

ICS 93.160

P 59

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL/T 352—2020

替代 SL 352—2006

水工混凝土试验规程

Test code for hydraulic concrete

2020—11—30 发布

2021—2—28 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部
关于批准发布水利行业标准的公告
(水工混凝土试验规程)

2020 年第 23 号

中华人民共和国水利部批准《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水工混凝土试验规程	SL/T 352—2020	SL 352—2006	2020.11.30	2021.2.28

水利部

2020 年 11 月 30 日

前 言

根据水利技术标准制修订工作安排，按照 SL 1-2014《水利技术标准编写规定》，对 SL 352-2006《水工混凝土试验规程》进行修订。

本规程共 10 章和 2 个附录，主要技术内容包括：总则、术语、骨料、混凝土拌和物、混凝土、全级配混凝土、碾压混凝土、现场混凝土质量检测、水工砂浆、水质分析，以及水工混凝土和水工砂浆的配合比设计方法等。

本次修订的主要内容如下。

—— 增加术语一章；

—— 删除 4 个试验方法：骨料碱活性检验（化学法）、骨料碱活性检验（砂浆棒长度法）、抑制骨料碱活性效能试验、射钉法检测混凝土强度；

—— 增加 15 个试验方法：细骨料亚甲蓝值试验、细骨料氯离子含量试验、人工粗骨料石粉含量试验、粗骨料氯离子含量试验、骨料碱活性抑制措施有效性试验（砂浆棒快速法）、骨料碱活性抑制措施有效性试验（混凝土棱柱体试验法）、混凝土抗硫酸盐侵蚀快速试验、混凝土表观密度和吸水率试验、混凝土早期抗裂试验、混凝土泊松比试验、全级配混凝土压缩徐变试验、加浆振捣碾压混凝土室内拌和成型方法、砂浆凝结时间试验、砂浆吸水率试验、水质不溶物含量测定；

—— 对试验方法的主要修改内容包括。

- 1) 骨料颗粒级配、针片状颗粒含量试验：增加 ISO B 系列试验筛；
- 2) 骨料表观密度、吸水率、表面含水率等试验：取消以干燥状态为基准的结果处理内容；
- 3) 细骨料云母含量试验：增加筛除粒径大于 5mm 和小于 0.315mm 的颗粒的内容；
- 4) 骨料硫化物及硫酸盐含量试验：修改硫化物的检测方法；
- 5) 粗骨料含泥量（石粉含量）试验：增加人工粗骨料石粉含量检测方法；
- 6) 粗骨料泥块含量试验：改为泡水法；
- 7) 粗骨料超逊径颗粒含量试验：增加了筛孔尺寸与骨料粒级上下限粒径相同的试验筛，增加中径筛余率的检测方法；
- 8) 混凝土室内拌和方法：增加强制式搅拌机，增加现场取样方法；
- 9) 混凝土拌和物泌水率试验：将容器修改为内径及高均为 267mm 的 15L 容量筒；
- 10) 混凝土试件的成型与养护方法：将标准养护温度控制水平从 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 提高到 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，增加对试件尺寸偏差和形位偏差的规定，增加试件到达检测龄期后开始测试的时间偏差的规定；
- 11) 混凝土立方体抗压强度试验：将测值波动较大时取平均值改为取中间值；
- 12) 混凝土劈裂抗拉强度试验：增加固定垫条的劈裂夹具；
- 13) 混凝土轴向拉伸试验：修改为通过应变-应力数据拟合确定极限拉伸值；
- 14) 混凝土圆柱体（轴心）抗压强度与静力抗压弹性模量试验：增加通过应力-应变数据拟合确

定弹性模量的方法；

- 15) 混凝土徐变、干缩（湿胀）和自生体积变形试验：增加恒温（恒湿）室的设施要求；
- 16) 混凝土压缩徐变试验：修改为成型轴心抗压试件确定徐变试件破坏荷载；
- 17) 混凝土干缩（湿胀）试验：将初始测量时间由 48h 修改为 3d；
- 18) 混凝土自生体积变形试验：将初始测量时间由 24h 修改为以混凝土初凝时间为准。
- 19) 混凝土抗冲磨试验（水下钢球法）：增加一种棱面球体作为代用研磨料；
- 20) 混凝土抗冻性试验：调整冻融循环制度，循环历时由（2.5~4.0）h 修改为（2.0~4.0）h，降温历时由（1.5~2.5）h 修改为（1.0~2.5）h，升温历时由（1.0~1.5）h 修改为（1.0~2.0）h。降温和升温终了时，试件中心温度由“（-17±2）℃和（8±2）℃”修改为“（-18±2）℃和（5±2）℃”；
- 21) 混凝土（砂浆）动弹性模量试验：增加冲击共振法作为代用法；
- 22) 硬化混凝土气泡参数试验（直线导线法）：将混凝土中浆气比 P/A（体积比）限值由 4.33 修改为 4.342；
- 23) 碾压混凝土抗压强度试验：将其中有关碾压混凝土试件成型的内容单独作为一节“碾压混凝土的成型与养护方法”；
- 24) 现场碾压混凝土表观密度测定：重新编写，增加基准表观密度测定，将仪器现场标定用试件由边长 450mm 立方体修改为 600mm×600mm×400mm 棱柱体，将进行四个深度测量改为进行等深度四个方向测量；
- 25) 水工混凝土配合比设计方法：增加了水工泵送混凝土、抗冲磨混凝土、面板混凝土的配合比设计要求。

—— 细化完善了其他试验方法。

本规程所替代标准的历次版本发布情况为。

—— 水工混凝土试验方法（1962）

—— SD 105-82 《水工混凝土试验规程》

—— SL 48-94 《水工碾压混凝土试验规程》

—— SL 352-2006 《水工混凝土试验规程》

本规程批准部门：中华人民共和国水利部

本规程主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本规程解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本规程主编单位：中国水利水电科学研究院

本规程参编单位：南京水利科学研究院

长江水利委员会长江科学院

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

中国长江三峡集团有限公司

武汉大学

本规程出版、发行单位：中国水利水电出版社

本规程主要起草人：陈改新 蔡跃波 王少江 纪国晋 李家正 李光伟 李文伟
钱文勋 李来芳 陆采荣 阮 燕 石 妍 王秀军

本规程审查会议技术负责人：

本规程体例格式审查人：

本规程在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部（通信地址：北京市西城区白广路二条 2 号；邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn），以供今后修订时参考。

目 次

1	总则.....	1
2	术语.....	1
3	骨料.....	3
3.1	细骨料颗粒级配试验.....	3
3.2	细骨料饱和面干表观密度及吸水率试验.....	4
3.3	细骨料饱和面干表观密度试验（李氏瓶法）.....	6
3.4	人工细骨料饱和面干吸水率试验（湿痕法）.....	7
3.5	人工细骨料饱和面干吸水率试验（试模法）.....	8
3.6	细骨料表面含水率试验.....	9
3.7	细骨料表面含水率试验（容量瓶法）.....	9
3.8	细骨料堆积密度及空隙率试验.....	10
3.9	细骨料振实密度及空隙率试验.....	11
3.10	天然细骨料含泥量试验.....	12
3.11	天然细骨料泥块含量试验.....	13
3.12	人工细骨料石粉含量试验（水洗法）.....	14
3.13	人工细骨料亚甲蓝 MB 值试验.....	15
3.14	细骨料有机质含量试验.....	16
3.15	细骨料云母含量试验.....	17
3.16	天然细骨料轻物质含量试验.....	18
3.17	细骨料坚固性试验.....	19
3.18	细骨料氯离子含量试验.....	20
3.19	骨料硫化物及硫酸盐含量试验.....	21
3.20	粗骨料颗粒级配试验.....	25
3.21	粗骨料饱和面干表观密度及吸水率试验.....	25
3.22	粗骨料表面含水率试验.....	27
3.23	粗骨料堆积密度及空隙率试验.....	27
3.24	粗骨料振实密度及空隙率试验.....	29
3.25	粗骨料含泥量（石粉含量）试验.....	30
3.26	粗骨料泥块含量试验（泡水法）.....	31
3.27	粗骨料有机质含量试验.....	32
3.28	粗骨料氯离子含量试验.....	33
3.29	粗骨料针片状颗粒含量试验.....	34
3.30	粗骨料超逊径颗粒含量和中径筛余率试验.....	35

3.31	粗骨料软弱颗粒含量试验.....	36
3.32	粗骨料压碎值试验.....	38
3.33	岩石抗压强度及软化系数试验.....	39
3.34	粗骨料坚固性试验.....	40
3.35	粗骨料抗磨损试验.....	41
3.36	骨料碱活性检验（岩相法）.....	42
3.37	碳酸盐骨料的碱活性检验（岩石柱法）.....	45
3.38	骨料碱活性检验（砂浆棒快速法）.....	46
3.39	骨料碱活性检验（混凝土棱柱体法）.....	48
3.40	骨料碱活性抑制措施有效性试验（砂浆棒快速法）.....	50
3.41	骨料碱活性抑制措施有效性试验（混凝土棱柱体法）.....	51
4	混凝土拌和物.....	53
4.1	混凝土拌和物室内拌和和现场取样方法.....	53
4.2	混凝土拌和物坍落度试验.....	54
4.3	混凝土拌和物维勃稠度试验.....	55
4.4	混凝土拌和物扩散度试验.....	57
4.5	混凝土拌和物泌水率试验.....	57
4.6	混凝土拌和物压力泌水率试验.....	58
4.7	混凝土拌和物表观密度试验.....	59
4.8	混凝土拌和物拌和均匀性试验.....	60
4.9	混凝土拌和物凝结时间试验（贯入阻力法）.....	61
4.10	混凝土拌和物含气量试验.....	63
4.11	混凝土拌和物水胶比分析试验（水洗法）.....	64
4.12	混凝土拌和物水胶比分析试验（炒干法）.....	66
5	混凝土.....	68
5.1	混凝土试件的成型与养护.....	68
5.2	混凝土立方体抗压强度试验.....	70
5.3	混凝土劈裂抗拉强度试验.....	71
5.4	混凝土粘结强度试验.....	72
5.5	混凝土轴向拉伸试验.....	73
5.6	混凝土弯曲试验.....	76
5.7	混凝土抗剪强度试验.....	78
5.8	混凝土轴心抗压强度与静力抗压弹性模量试验.....	80
5.9	混凝土泊松比试验.....	82
5.10	混凝土对钢筋握裹力试验.....	84
5.11	混凝土压缩徐变试验.....	86

5.12	混凝土拉伸徐变试验.....	89
5.13	混凝土干缩（湿胀）试验.....	91
5.14	混凝土自生体积变形试验.....	93
5.15	混凝土导温系数试验.....	95
5.16	混凝土导热系数试验.....	97
5.17	混凝土比热试验（绝热法）.....	99
5.18	混凝土线膨胀系数试验.....	102
5.19	混凝土绝热温升试验.....	103
5.20	混凝土抗冲磨试验（圆环法）.....	104
5.21	混凝土抗冲磨试验（水下钢球法）.....	106
5.22	混凝土抗渗性试验（逐级加压法）.....	107
5.23	混凝土相对渗透性试验.....	109
5.24	混凝土抗冻性试验（快冻法）.....	110
5.25	混凝土（砂浆）动弹性模量试验.....	112
5.26	混凝土气泡参数试验（直线导线法）.....	114
5.27	混凝土中钢筋腐蚀的电化学试验（新拌砂浆阳极极化法）.....	116
5.28	混凝土中钢筋腐蚀的电化学试验（硬化砂浆阳极极化法）.....	118
5.29	混凝土碳化试验.....	120
5.30	混凝土抗氯离子渗透性试验（电量法）.....	121
5.31	混凝土氯离子扩散系数试验（RCM法）.....	124
5.32	混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量试验.....	126
5.33	混凝土中砂浆的氯离子总含量试验.....	128
5.34	混凝土钢筋腐蚀快速试验（淡水、海水）.....	129
5.35	混凝土抗盐冻剥蚀试验.....	131
5.36	混凝土抗硫酸盐侵蚀快速试验.....	133
5.37	混凝土表观密度和吸水率试验.....	134
5.38	混凝土早期开裂试验（平板法）.....	135
5.39	真空脱水混凝土试件的成型与养护方法.....	137
5.40	混凝土拌和物真空脱水率试验.....	139
6	全级配混凝土.....	140
6.1	全级配混凝土试件的成型与养护方法.....	140
6.2	全级配混凝土抗压强度试验.....	141
6.3	全级配混凝土劈裂抗拉强度试验.....	142
6.4	全级配混凝土弯曲试验.....	142
6.5	全级配混凝土轴向拉伸试验.....	143
6.6	全级配混凝土轴心抗压强度和静力抗压弹性模量试验.....	144

6.7	全级配混凝土渗透系数试验.....	145
6.8	全级配混凝土压缩徐变试验.....	147
7	碾压混凝土.....	149
7.1	碾压混凝土拌和物工作度（VC 值）试验.....	149
7.2	碾压混凝土拌和物表观密度试验.....	149
7.3	碾压混凝土拌和物含气量试验.....	151
7.4	碾压混凝土拌和物凝结时间试验（贯入阻力法）.....	152
7.5	碾压混凝土的成型与养护方法.....	153
7.6	碾压混凝土立方体抗压强度试验.....	155
7.7	碾压混凝土表观密度试验.....	155
7.8	碾压混凝土劈裂抗拉强度试验.....	156
7.9	碾压混凝土轴向拉伸试验.....	156
7.10	碾压混凝土弯曲试验.....	156
7.11	碾压混凝土抗剪强度试验.....	157
7.12	碾压混凝土圆柱体轴心抗压强度和静力抗压弹性模量试验.....	157
7.13	碾压混凝土压缩徐变试验.....	157
7.14	碾压混凝土抗渗性试验（逐级加压法）.....	158
7.15	碾压混凝土渗透系数试验.....	158
7.16	碾压混凝土抗冻性试验.....	159
7.17	碾压混凝土自生体积变形试验.....	159
7.18	碾压混凝土干缩（湿胀）试验.....	159
7.19	碾压混凝土导温系数试验.....	160
7.20	碾压混凝土导热系数试验.....	160
7.21	碾压混凝土比热试验（绝热法）.....	160
7.22	碾压混凝土绝热温升试验.....	161
7.23	碾压混凝土线膨胀系数试验.....	161
7.24	加浆振捣碾压混凝土室内拌和成型方法.....	161
7.25	碾压混凝土拌和物仓面贯入阻力检测.....	163
7.26	现场碾压混凝土表观密度检测.....	163
8	现场混凝土质量检测.....	166
8.1	回弹法检测混凝土抗压强度.....	166
8.2	超声波检测混凝土抗压强度和均匀性.....	170
8.3	超声波检测混凝土裂缝深度（平测法）.....	175
8.4	超声波检测混凝土裂缝深度（对、斜测法）.....	177
8.5	超声波检测混凝土内部缺陷.....	179
8.6	混凝土芯样强度试验.....	185

8.7	混凝土与岩基和碾压混凝土层间原位直剪试验（平推法）	186
8.8	混凝土中钢筋半电池电位检测.....	187
8.9	海砂、混凝土拌和物中氯离子含量的快速检测.....	189
9	水工砂浆.....	192
9.1	砂浆室内拌和方法.....	192
9.2	砂浆稠度试验.....	192
9.3	砂浆泌水率试验.....	193
9.4	砂浆表观密度试验及含气量计算.....	194
9.5	砂浆凝结时间试验.....	195
9.6	砂浆吸水率试验.....	195
9.7	砂浆抗压强度试验.....	196
9.8	砂浆劈裂抗拉强度试验.....	196
9.9	砂浆粘结强度试验.....	197
9.10	砂浆轴向拉伸试验.....	198
9.11	砂浆干缩（湿胀）试验.....	200
9.12	砂浆抗冻性试验.....	200
9.13	砂浆抗渗性试验.....	202
10	水质分析.....	203
10.1	水样的采集与保存.....	203
10.2	pH 值测定（电极法或酸度计法）	204
10.3	二氧化碳含量测定.....	204
10.4	碱度测定.....	206
10.5	硬度测定.....	208
10.6	钙离子、镁离子含量测定.....	210
10.7	氯离子含量测定（摩尔法）	212
10.8	氯离子含量测定（硝酸高汞法）	213
10.9	硫酸根离子含量测定（称量法）	215
10.10	硫酸根离子含量测定（EDTA 容量法）	216
10.11	溶解性固形物含量测定.....	218
10.12	化学耗氧量测定.....	218
10.13	不溶物含量测定.....	220
附录 A	水工混凝土配合比设计方法.....	222
A.1	基本原则.....	222
A.2	混凝土配制强度的确定.....	223
A.3	混凝土配合比的计算.....	223
A.4	混凝土配合比的试配、调整和确定.....	225

A. 5	水工常态混凝土配合比设计.....	226
A. 6	水工碾压混凝土配合比设计.....	230
A. 7	海水环境混凝土配合比设计.....	232
附录 B	水工砂浆配合比设计方法.....	234
B. 1	基本原则.....	234
B. 2	砂浆配制强度的确定.....	234
B. 3	砂浆配合比计算.....	235
B. 4	砂浆配合比的试配、调整和确定.....	236

1 总则

1.0.1 为规范水利水电工程混凝土的试验方法和检测方法，保证试验结果的准确性、可靠性、可比性和复验性，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于水工混凝土骨料、拌和物、混凝土、全级配混凝土、碾压混凝土、现场混凝土、水工砂浆和混凝土用水等的室内试验和现场质量检测。

1.0.3 本规程主要引用下列标准。

- GB/T 601 化学试剂 标准滴定溶液的制备
- GB/T 602 化学试剂 杂质测定用标准溶液的制备
- GB/T 603 化学试剂 试验方法中所用制剂及制品的制备
- GB/T 750 水泥压蒸安定性试验方法
- GB/T 2611 试验机 通用技术要求
- GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋
- GB/T 3159 液压式万能试验机
- GB/T 3408.1 大坝监测仪器 应变计 第1部分：差动电阻式应变计
- GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
- GB/T 14685 建设用碎石、卵石
- SL 126 砂石料试验筛检验方法
- SL 127 容量筒校验方法
- SL 128 混凝土试验用搅拌机校验方法
- SL 129 混凝土试验用振动台校验方法
- SL 130 混凝土试模校验方法
- SL 131 混凝土坍落度仪校验方法
- SL 132 混凝土拌和物含气量测定仪（气压式）校验方法
- SL 133 混凝土抗渗仪校验方法
- SL 134 混凝土快速冻融试验机校验方法
- SL 135 混凝土动弹性模量测定仪校验方法
- SL 136 混凝土热学参数测定仪校验方法
- SL 137 砂浆和混凝土测长仪校验方法
- SL 138 水工混凝土标准养护室检验方法
- SL 211 水工建筑物抗冰冻设计规范
- SL 264 水利水电工程岩石试验规程
- SL 275 核子水分-密度仪现场测试规程
- SL 654 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范
- JG/T 3033 试验用砂浆搅拌机

- 1.0.4 除特别规定外，试验室室内温度宜为 (20 ± 5) ℃。试验物料、仪器设备等的温度宜与试验室温度一致，并应避免阳光照射。
- 1.0.5 本规程涉及到的主要仪器设备，应定期进行检定或校准，并在有效期限内使用。
- 1.0.6 应按照需称量的物料质量、规定的分度值选择合适的天平或秤，分析天平的准确度等级不应低于Ⅰ级，天平的准确度等级不应低于Ⅱ级，秤的准确度等级不应低于Ⅲ级。
- 1.0.7 除特别规定外，本规程涉及到的标准溶液、试剂的配制及标定方法应按照 GB/T 601、GB/T 602、GB/T 603 的规定进行。
- 1.0.8 除特别规定外，本规程的测量值、计算结果的数值修约应符合 GB/T 8170 的规定。中间计算结果的修约间隔应比最终结果的修约位数至少多保留一位。进行结果评定时应采用修约值比较法。
- 1.0.9 试验记录表至少应包含：本规程编号、名称；试样编号、名称、规格、状态描述；试验设备名称、编号；试验日期、环境条件；人工记录或自动记录的试验数据及计算结果；试验人、记录人、校核人的签字等内容，以及与标准方法的偏离说明。
- 1.0.10 水工混凝土试验除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 全级配混凝土(试件) concrete specimen with all grade aggregate

在室内试验时,骨料粒径大于 40mm、不经过湿筛处理、保留全部粒级骨料成型的混凝土(试件)。通常指骨料最大粒径为 80mm 的三级配混凝土,及骨料最大粒径为 150(或 120)mm 的四级配混凝土,使用全部拌和物(不筛除大骨料)成型的大尺寸混凝土试件。

2.0.2 湿筛混凝土拌和物 wet-sieved concrete mixture

在搅拌均匀出机后,立即筛除大粒径骨料后的混凝土拌和物。湿筛时宜用金属丝编织网方孔筛,筛孔尺寸按照混凝土试件成型要求的或拌和物试验规定的最大骨料粒径选用。

2.0.3 骨料粒级 grade of coarse aggregate

按照粒径大小,划分的不同粒径范围的粗骨料颗粒。通常将水工混凝土所用粗骨料分为四个粒级,粒径 5mm~20mm 范围的粗骨料称为小石,粒径 20mm~40mm 范围的粗骨料称为中石,粒径 40mm~80mm 范围的粗骨料称为大石,粒径 80mm~150(或 120)mm 范围的粗骨料称为特大石。

2.0.4 级配骨料 grade-mixed coarse aggregate

由小石和较大粒级的骨料,按一定比例混合而成的粗骨料。在水利水电工程中,通常将小石称为一级配粗骨料,将按一定比例混合的小石、中石称为二级配粗骨料,将按一定比例混合的小石、中石、大石称为三级配粗骨料,将按一定比例混合的小石、中石、大石、特大石称为四级配粗骨料。

2.0.5 饱和面干骨料 saturated and surface-dry aggregate

饱和面干粗骨料,即将粗骨料浸没在水中 24h 后,捞出并用拧干的湿毛巾包裹,吸干骨料表面多余水分,至各颗粒表面为潮湿且亚光无亮色状态。饱和面干细骨料,即将细骨料浸没在水中 24h 后,移入金属托盘中,低温加热并不断翻拌,使骨料颗粒表面的水分均匀蒸发,在用饱和面干试模进行试验时,试模提起后骨料颗粒坍落后呈尖锥体状。

2.0.6 饱和面干表观密度 bulk density of saturated and surface-dry aggregate

以饱和面干状态骨料为基准计算的,饱和面干骨料吸水率。

2.0.7 饱和面干吸水率 water-absorption ratio of saturated and surface-dry aggregate

骨料从干燥状态到饱和面干状态所吸入的水量,占饱和面干状态骨料质量的百分比。

2.0.8 表面含水率(量) surface moisture content

以饱和面干状态骨料为基准计算的含水率,即扣除饱和面干吸水率后的骨料含水率。

2.0.9 含泥量 content of clay and particles finer than 0.08mm

骨料中小于 0.08mm 的粘土、淤泥及细屑的总含量。

2.0.10 石粉含量 content of stone powder finer than 0.16mm

人工骨料中小于 0.16mm 的颗粒含量。其中小于 0.08mm 的颗粒称为微粒。

2.0.11 极限拉伸值(应变) ultimate tensile strain of concrete

在轴向拉伸时,混凝土断裂前的最大伸长应变。

2.0.12 自生体积变形 autogenous volume deformation of concrete

在恒温绝湿和无人为外界荷载的条件下，因胶凝材料的水化反应等内部原因引起的混凝土体积变形。

2.0.13 绝热温升 *adiabatic temperature rise of concrete*

在与外界无热交换的绝热条件下，因胶凝材料的水化反应所引起的混凝土温度升高。

2.0.14 抗冲磨强度 *scouring-abrasion resistance strength*

在混凝土单位面积上冲磨掉单位质量所需的时间，量值单位为 $\text{h}/(\text{kg}/\text{m}^2)$ 。

2.0.15 加浆振捣碾压混凝土 *grout enriched roller compacted concrete (GE-RCC)*

在碾压混凝土拌和物中，掺入一定比例的灰浆或水泥浆，拌和均匀后可通过振捣密实的混凝土。亦称为变态混凝土。

3 骨料

3.1 细骨料颗粒级配试验

3.1.1 本试验用于测定细骨料颗粒级配，计算细度模数或细砂、特细砂的平均粒径。

3.1.2 仪器设备应包括以下几种。

1 天平：分度值不大于 0.1g。

2 试验筛：筛孔尺寸为 10mm、5mm、2.5mm、1.25mm、0.63mm、0.315mm、0.16mm 的方孔套筛，以及底盘和盖，亦可采用 ISO B 系列筛。试验筛应符合 SL 126 的规定。

3 烘箱：可控制温度在 (105 ± 5) °C。

4 辅助器具：摇筛机、金属托盘、毛刷等。

3.1.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 用于颗粒级配试验的细骨料，颗粒粒径不应大于 10mm。取有代表性的自然状态的细骨料，充分拌匀后，用四分法缩分至每份不少于 550g 的试样两份，在 (105 ± 5) °C 下烘至恒量，冷却至室温后，分别按下述步骤进行试验。试样烘干后如有结团，应在试验前捏碎。

注：在本规程中，恒量是指在物料烘干时，间隔时间大于 1h 的两次称量结果的差异不大于 0.1%。

2 称出烘干后的细骨料试样质量 (G_0 ，精确到 0.1g)，按筛孔大小顺序（即最上 5mm 筛为 1 号筛，最下 0.16mm 筛为 6 号筛）将各筛和底盘紧密叠加，然后将全部烘干试样倒入最上 1 号筛内，加盖后将整套筛安装在摇筛机上，摇 10min，取下套筛，按筛孔大小顺序在清洁的金属托盘上逐个用手筛，筛至每分钟通过量不超过试样总量的 0.1% 时为止。通过的颗粒并入下一号筛中，并和下一号筛中的试样一起过筛。顺序进行，直至各号筛全部筛完为止。

3 当试样在某一筛上的筛余量超过 200g 时，应将该筛上试样分成两份，再进行筛分，并以两次筛余量之和作为该号筛的筛余量。

4 筛完后，将各筛上颗粒倒出，并用毛刷轻轻刷净，称出各号筛的筛余量 (a_i ，精确到 0.1g)。

5 细骨料试样如为特细砂时，每份试样量可取 250g 烘干，筛分时在最小号筛以下增加一只 0.080mm 的方孔筛，并记录和计算 0.08mm 筛的筛余量和分计筛余百分率。

6 无摇筛机时，可直接用手筛。手筛时，将装有试样的整套筛放在试验台上，右手按着顶盖，左手扶住侧面，将套筛一侧抬起（倾斜度约 $30^\circ \sim 35^\circ$ ），使筛底与台面成点接触，并按顺时针方向做滚动筛析 3min，然后再逐个过筛至达到要求为止。

3.1.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 各筛的分计筛余百分率按照公式 (3.1.4-1) 计算。

$$P_i = \frac{a_i}{G_0} \times 100\% \quad (3.1.4-1)$$

式中 P_i —— i 号筛的分计筛余百分率， $i=1 \sim 6$ ；

a_i —— i 号筛的筛余量，g；

G_0 —— 试样总量, g。

2 各筛的累计筛余百分率按照公式 (3.1.4-2) 计算 (修约间隔 0.1%)。

$$A_i = P_1 + \dots + P_i \quad (3.1.4-2)$$

式中 A_i —— i 号筛的累计筛余百分率, $i=1\sim6$;

3 细度模数按照公式 (3.1.4-3) 计算。

$$FM = \frac{(A_2+A_3+A_4+A_5+A_6)-5A_1}{1-A_1} \quad (3.1.4-3)$$

式中 FM —— 细度模数;

$A_1\sim A_6$ —— 分别为各筛的累计筛余百分率。

4 细度模数以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1)。当各筛筛余量和底盘中粉料质量的总和与试样原质量相差超过试样量的 1%时, 或两次测试的细度模数相差超过 0.2 时, 应重做试验。

5 如有需要, 可以各号筛的筛孔尺寸为横坐标, 对应的累计筛余百分率为纵坐标绘制筛分曲线。

6 对细砂 (FM: 2.2~1.6) 或特细砂 (FM: 1.5~0.7), 根据筛分结果可按照公式 (3.1.4-4) 计算其平均粒径 (修约间隔 0.01mm)。

$$d_m = 0.5 \times \left(\frac{a_2+a_3+a_4+a_5+a_6}{0.0024a_2+0.02a_3+0.17a_4+1.3a_5+11a_6} \right)^{1/3} \quad (3.1.4-4)$$

式中 d_m —— 细骨料颗粒的平均粒径, mm;

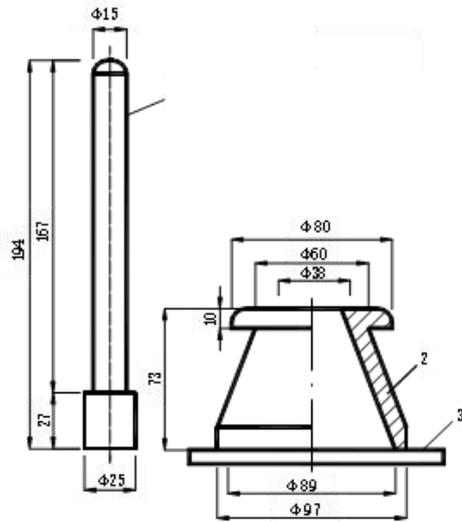
$a_2\sim a_6$ —— 分别为 2~6 号筛的筛余量, g。

3.2 细骨料饱和面干表观密度及吸水率试验

3.2.1 本试验用于测定细骨料的饱和面干表观密度及吸水率, 不适用于高石粉含量 (不小于 10%) 人工细骨料。

3.2.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 天平: 分度值不大于 0.1g。
- 2 容量瓶: 1000mL。
- 3 烘箱: 可控制温度在 (105±5) °C。
- 4 5mm 方孔试验筛。
- 5 饱和面干试模和捣棒: 钢制, 尺寸如图 3.2.2, 捣棒质量 340g。
- 6 温度计: 分度值不大于 0.2°C。
- 7 辅助器具: 手提吹风机、金属托盘、小钢铲、毛刷、喷水壶、毛巾等。



1—捣棒；2—试模；3—玻璃板

图 3.2.2 细骨料饱和面干试模和捣棒（单位：mm）

3.2.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性细骨料，过 5mm 筛后用四分法取样约 3000g。

2 将试样装入金属托盘中，注入清水，使水面高出试样 20mm 左右，用玻璃棒轻轻搅拌，排出气泡，静置 24h。

3 将上层清水倒出，在托盘中摊开试样，用手提吹风机吹入暖风，并用小钢铲不断翻拌试样，使试样表面的水分均匀蒸发。调整好手提吹风机的风速和吹风口与试样的距离，以免吹走粉料。可随时用手将适量试样抓团，观察含水状态，根据经验含水合适时立即停止加热。

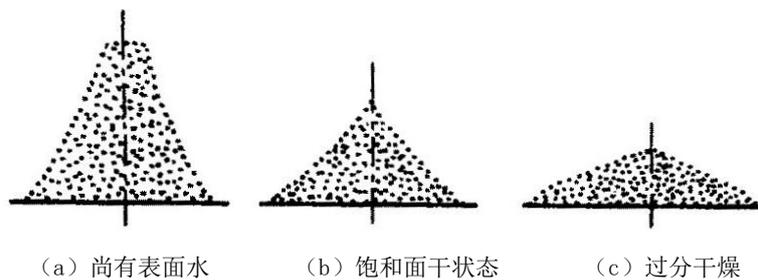


图 3.2.3 细骨料试样的坍落情况

4 迅速将试样分两层装入饱和面干试模中捣实。第一层装入试模高度的一半，然后一手按住试模不应错动，一手用捣棒自试样表面高约 10mm 处自由落下，从周围到中心均匀捣实 13 次，第二层装满试模，再捣实 13 次（如为特细砂，分两层各捣实 5 次；多棱角的山砂、风化砂，分两层各捣实 10 次）。刮平模口后，垂直将试模轻轻提起，与图 3.2.3 中试样坍落的形状比对判断其含水情况。

- 1) 如试样坍落呈图 3.2.3 (a) 的形状, 说明试样表面含水较多。将试样倒回托盘混匀, 继续吹干再进行坍落试验, 直至试样坍落呈图 3.2.3 (b) 的形状即为饱和面干状态, 用湿布覆盖调好的试样备用;
- 2) 如试样坍落呈图 3.2.3 (c) 的形状, 说明试样已过分干燥。将试样倒回托盘, 喷适量水, 将试样充分拌匀后用湿布覆盖静置 30min, 再按上述方法进行试验, 直至达到要求为止;
- 3) 如试样第一次坍落就呈图 3.2.3 (b) 的形状, 则试样已稍偏干。将试样倒回托盘, 洒少量水, 将试样充分拌匀用湿布覆盖静置片刻, 再按上述方法进行试验。

5 迅速称取饱和面干试样约 600g (G_0) 两份, 分别装入两个盛有半满水的容量瓶内, 用手旋转摇动容量瓶, 排除气泡后, 静置 30min, 测瓶内水温, 然后加水至容量瓶颈刻度线处, 塞紧瓶盖, 擦干瓶外水分, 称出总质量 (G_1)。在操作过程中, 前后两次加入容量瓶中的水的温差不应超过 2℃。

6 将瓶内的水和试样全部倒出, 洗净容量瓶, 再向瓶内注水至瓶颈刻度线处, 擦干瓶外水分, 称其质量 (G_2)。

7 称取饱和面干试样约 500g (G_0') 两份, 烘至恒量, 冷却至室温后称出干燥状态试样质量 (G')。

3.2.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 细骨料的饱和面干表观密度按照公式 (3.2.4-1) 计算。

$$\rho_s = \frac{G_0}{G_0 + G_2 - G_1} \times \rho_w \quad (3.2.4-1)$$

式中 ρ_s —— 细骨料饱和面干表观密度, kg/m^3 ;

ρ_w —— 水的密度, kg/m^3 ;

G_0 —— 饱和面干状态试样质量, g;

G_1 —— 饱和面干状态试样、水及容量瓶总质量, g。

G_2 —— 水及容量瓶总质量, g。

2 细骨料的饱和面干吸水率按照公式 (3.2.4-2) 计算。

$$a_s = \frac{G_0' - G'}{G_0'} \times 100\% \quad (3.2.4-2)$$

式中 a_s —— 细骨料饱和面干吸水率;

G_0' —— 饱和面干状态试样质量, g;

G' —— 干燥状态状态试样质量, g。

3 以两次测值的平均值作为试验结果 (表观密度修约间隔 $10\text{kg}/\text{m}^3$, 吸水率修约间隔 0.1%)。当两次表观密度测值相差大于 $20\text{kg}/\text{m}^3$, 或两次吸水率测值相差大于 0.2% 时, 应重做试验。

3.3 细骨料饱和面干表观密度试验 (李氏瓶法)

3.3.1 本试验用于测定细骨料的饱和面干表观密度。

3.3.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 天平: 分度值不大于 0.1g。
- 2 李氏瓶: 容量 250mL。

3 辅助器具：玻璃漏斗、温度计、滤纸等。

3.3.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按照 3.2 节的规定制备适量饱和面干试样，称取试样约 50g (G_0) 两份，按下述步骤分别进行测试。

2 试验应在温度为 (20 ± 2) °C 的环境中进行。向李氏瓶中注水至 0~1mL 刻度之间，用滤纸吸干瓶颈内壁附着水，并记录瓶中水面刻度读数 (V_1)。

3 将试样徐徐装入盛水的李氏瓶中，用毛刷轻轻将粘附在瓶颈内壁上的颗粒刷入瓶中，旋转摇动李氏瓶以排净气泡。塞紧瓶盖，静置 30min 后，记录瓶中水面刻度读数 (V_2)，测出瓶中水温。在两次试验中，加入李氏瓶中的水的温差不应超过 2°C。

3.3.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 细骨料的饱和面干表观密度按照公式 (3.3.4) 计算。

$$\rho_s = \frac{G_0}{V_2 - V_1} \times 1000 \quad (3.3.4)$$

式中 ρ_s —— 细骨料饱和面干表观密度，kg/m³；

G_0 —— 饱和面干状态试样质量，g；

V_1 —— 李氏瓶初始水面刻度读数，mL；

V_2 —— 加入饱和面干状态试样后水面刻度读数，mL。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 10kg/m³）。当两次测值相差大于 20kg/m³ 时，应重做试验。

3.4 人工细骨料饱和面干吸水率试验（湿痕法）

3.4.1 本试验用于测定人工细骨料的饱和面干吸水率。

3.4.2 仪器设备应包括以下几种。

1 天平：分度值不大于 0.1g。

2 烘箱：可控制温度在 (105 ± 5) °C。

3 5mm 方孔试验筛。

4 黑色橡胶板：表面干燥平整、能被水润湿但不吸水，平面尺寸不小于 400mm×400mm，厚度不小于 3mm。可用黑色氧化铁板、漆黑金属板等替代。

5 辅助器具：金属托盘、扁铲、毛刷、手提吹风机、喷水壶、毛巾等。

3.4.3 试验条件应为温度 (20 ± 2) °C，相对湿度 40%~70%。

3.4.4 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性细骨料，过 5mm 筛后用四分法取样约 1500g。

2 将试样装入金属托盘中，注入清水，使水面高出试样 20mm 左右，用玻璃棒轻轻搅拌，排出气泡，静置 24h。然后将上层水倒出，在托盘中摊开试样，用手提吹风机缓缓吹入暖风，并不断翻拌试样，使试样表面的水分均匀蒸发。用手提吹风机吹干试样时，宜用弱风档，同时不应直接吹到试样上，

以免吹走粉料。

3 称量约 100g 的试样倒在橡胶板上，用扁铲轻拍 10 下，厚度约 10mm 左右，经过 1s 后，移除试样，观测湿痕散失时间。当湿痕消失时间大于 2s 或橡胶板上有明显的水痕时，说明试样表面水分过多，应将试样倒回托盘继续吹干，再按上述方法进行试验，直至移除试样后湿痕在 (1~2) s 内消失，说明试样正处于饱和面干状态；当移除试样后，橡胶板上没有湿痕或试样从约 (100~150) mm 高处撒落时出现粉尘，说明试样已过分干燥，此时应喷水 (5~10) mL，将试样充分拌匀，加盖后静止 30min，再按上述方法进行试验，直至达到要求为止。

4 称取饱和面干试样约 500g (G_0 ，精确到 0.1g，下同) 两份，烘至恒量，冷却至室温后称出干燥细骨料质量 (G)。

3.4.5 试验结果处理应按以下规定执行。

1 细骨料的饱和面干吸水率按照公式 (3.4.5) 计算。

$$a_s = \frac{G_0 - G}{G_0} \times 100\% \quad (3.4.5)$$

式中 a_s —— 细骨料饱和面干吸水率；

G_0 —— 饱和面干状态试样质量，g；

G —— 干燥状态试样质量，g。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1%)。当两次测值相差大于 0.2% 时，应重做试验。

3.5 人工细骨料饱和面干吸水率试验 (试模法)

3.5.1 本试验用于测定高石粉含量 (不低于 10%) 人工细骨料的饱和面干吸水率。

3.5.2 仪器设备应包括以下几种。

1 高石粉含量人工细骨料饱和面干试模：上口直径 38mm，下口直径 89mm，高 113mm，如图 3.5.2。

2 其他同 3.2 节。

3.5.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 细骨料试样的制备、泡水饱和、吹干等步骤同 3.2 节。

2 对石粉含量 10%~15% 的试样，分两层装入试模，每层用捣棒插捣四次；对石粉含量大于 15% 的试样，采用一层装模插捣五次，其他操作同 3.2 节。

3 试样饱和和干面状态判断及处理方法同 3.2 节。

4 饱和面干状态试样的称取、烘干、称重等同 3.2 节。

3.5.4 高石粉含量人工细骨料饱和面干吸水率计算及处理方法同 3.2 节。

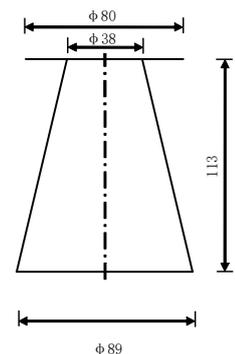


图 3.5.2 高石粉含量人工细骨料饱和面干试模 (单位: mm)

3.6 细骨料表面含水率试验

3.6.1 本试验用于测定自然状态细骨料的表面含水率。

3.6.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 烘箱：可控制温度在 (105 ± 5) °C。
- 2 天平：分度值不大于 0.1g。
- 3 辅助器具：金属托盘、钢铲、毛刷等。

3.6.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 预先按照 3.2 节、3.4 节或 3.5 节测定细骨料饱和面干吸水率 (a_s)。
- 2 称取自然状态细骨料试样约 500g (G_0 , 精确到 0.1g, 下同) 两份, 分别装入托盘中摊平, 在 (105 ± 5) °C 的烘箱中烘至恒量, 冷却至室温后称出试样质量 (G_1)。

3.6.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 细骨料的表面含水率按照公式 (3.6.4) 计算。

$$w_s = \left[\frac{G_0 - G_1}{G_1} \times (1 - a_s) - a_s \right] \times 100\% \quad (3.6.4)$$

式中 w_s —— 细骨料表面含水率。

G_0 —— 自然状态试样质量, g;

G_1 —— 干燥状态试样质量, g;

a_s —— 细骨料饱和面干吸水率, %。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1%)。当两次测值相差大于 0.2% 时, 应重做试验。

3.7 细骨料表面含水率试验 (容量瓶法)

3.7.1 本试验用于测定潮湿状态细骨料的表面含水率, 适用于含水率超过饱和面干吸水率的细骨料。

3.7.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 天平：分度值不大于 0.1g。
- 2 容量瓶：1000mL。
- 3 辅助器具：金属托盘、漏斗、温度计、干毛巾等。

3.7.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 预先按照 3.2 节或 3.3 节测定细骨料饱和面干表观密度 (ρ_s)。

2 称取潮湿状态细骨料试样约 400g (G_1 , 精确到 0.1g, 下同) 两份, 按下述步骤分别进行测试。

3 将试样通过漏斗装入盛有半瓶水的容量瓶内, 然后用手旋转容量瓶底部 (手和瓶之间应垫干毛巾, 防止传热), 排除气泡。加水至容量瓶颈刻度线处, 静置片刻, 测出瓶中水温。塞紧瓶盖, 擦干瓶外水分, 称出质量 (G_2)。

4 倒出瓶中的水和试样, 将瓶内外洗净, 再向瓶内注水至容量瓶颈刻度线处, 静置片刻, 测出

瓶中水温。塞紧瓶盖，擦干瓶外水分，称出质量（ G_3 ）。前后两次注入容量瓶中的水，温度相差不应超过 2℃。

3.7.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 细骨料的表面含水率按照公式（3.7.4）计算。

$$m_s = \frac{(\rho_s - \rho_w) \frac{G_1}{\rho_s} - (G_2 - G_3)}{G_2 - G_3} \times 100\% \quad (3.7.4)$$

式中 m_s —— 细骨料表面含水率；

ρ_s —— 细骨料饱和面干表观密度， kg/m^3 ；

ρ_w —— 试验温度下水的密度，可取 1000kg/m^3 ；

G_1 —— 潮湿状态试样质量，g；

G_2 —— 试样、水及容量瓶总质量，g；

G_3 —— 水及容量瓶总质量，g。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。当两次测值相差大于 0.2% 时，应重做试验。

3.8 细骨料堆积密度及空隙率试验

3.8.1 本试验用于测定干燥状态细骨料的表观密度、（松散）堆积密度及空隙率。

3.8.2 仪器设备应包括以下几种。

1 天平：分度值不大于 0.1g。

2 烘箱：可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

3 容量瓶：1000mL。

4 容量筒：容积为 1L 的金属圆筒，内径 108mm，内深 109mm，壁厚不小于 2mm，底厚约 5mm。

5 漏斗：如图 3.8.2 所示。

6 辅助器具：温度计、钢直尺或金属直杆、金属托盘等。

3.8.3 试验步骤应按以下规定执行。

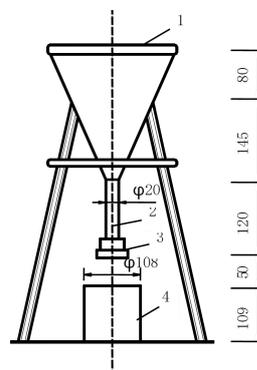
1 用托盘装自然状态细骨料试样约 10kg，在温度 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量，取出并冷却至室温。试样烘干后如有结团，应在试验前捏碎。

2 干燥状态细骨料表观密度的检测应按以下步骤进行。

1) 称取烘干试样约 600g (G_1 ，精确到 0.1g，下同) 两份，按下述步骤分别进行测试。

2) 将试样装入盛半满水的容量瓶中，用手旋转摇动容量瓶，使试样充分搅动，排除气泡。塞紧瓶盖，静置 24h，量出瓶内水温，然后用移液管加水至瓶颈刻度线处，塞紧瓶盖，擦干瓶外水分，称出其质量 (G_2)。

3) 将瓶内的水和试样全部倒出，洗净容量瓶，再向瓶内加水至瓶颈刻度线处，塞紧瓶盖，擦



1—漏斗；2— $\phi 20$ 管子；

3—活动闸门；4—容量筒

图 3.8.2 堆积密度漏斗示意图

干瓶外水分，称出其质量 (G_3)。加入容量瓶的水，温差不应超过 2℃。

3 称出空容量筒质量 (G_0 ，精确到 1g)，并按照 SL 127 校准实际容积 (V ，精确到 1mL)。

4 将烘干试样分成大致相等的两份。将试样一次装满漏斗，打开漏斗活动闸门，使试样从漏斗口（高于容量筒顶面 50mm）落入容量筒内，直至试样装满容量筒并超出筒口时为止。用钢直尺或金属直杆沿筒口中心线向两侧方向轻轻刮平，然后称其质量 (G_4 ，精确到 1g)。

3.8.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 干燥状态细骨料的表观密度按照公式 (3.8.4-1) 计算。

$$\rho_d = \frac{G_1}{G_1 + G_3 - G_2} \times \rho_w \quad (3.8.4-1)$$

式中 ρ_d —— 干燥状态细骨料表观密度，kg/m³；

ρ_w —— 水的密度，kg/m³；

G_1 —— 干燥状态试样质量，g；

G_2 —— 干燥状态试样、水及容量瓶总质量，g；

G_3 —— 水及容量瓶总质量，g。

2 干燥状态细骨料的堆积密度按照公式 (3.8.4-2) 计算。

$$\rho_b = \frac{G_4 - G_0}{V} \times 1000 \quad (3.8.4-2)$$

式中 ρ_b —— 干燥状态细骨料堆积密度，kg/m³；

G_0 —— 容量筒质量，kg；

G_4 —— 容量筒及试样总质量，kg；

V —— 容量筒的实际容积，L。

3 空隙率为堆积状态试样中空隙体积占总体积的百分率，干燥状态细骨料的空隙率按照公式 (3.8.4-3) 计算。

$$P_{vb} = (1 - \frac{\rho_b}{\rho_d}) \times 100\% \quad (3.8.4-3)$$

式中 P_{vb} —— 干燥状态细骨料空隙率。

4 以两次测值的平均值作为表观密度、堆积密度、空隙率试验结果（修约间隔分别为 10kg/m³、10kg/m³、1%）。当表观密度、堆积密度的两次测值相差大于 20kg/m³时，应重做试验。

3.9 细骨料振实密度及空隙率试验

3.9.1 本试验用于测定碾压混凝土用细骨料的振实密度及空隙率。

3.9.2 仪器设备应包括以下几种。

1 维勃稠度仪的要求同 4.3.2 的规定，其中塑料压板、滑杆及 5kg 配重砝码的总质量应为 (7.75 ± 0.05) kg。

2 套模：内径 240mm、高 100mm 的金属套模（可固定于容量筒上口），或用 5mm 厚的橡皮板加工成与容量筒外径一致、高 100mm 的套模。

3 秤：分度值不大于 0.01kg。

- 4 秒表：分辨力不大于 1s。
- 5 辅助器具：铁铲、钢直尺或金属直杆等。

3.9.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 预先按照 3.2 节或 3.3 节测定细骨料饱和面干表观密度 (ρ_s)。
- 2 称出空容量筒质量 (G_1 ，精确到 0.01kg，下同)，并按照 SL 127 校准实际容积 (V ，精确到 1mL)。
- 3 按照 3.2 节方法制备饱和面干细骨料约 10kg，用铁铲拌匀，分成大致相等两份备用。
- 4 将套模附在容量筒上，然后固定在维勃稠度仪的振动台上。用铁铲把饱和面干试样装入容量筒内，细骨料应高出筒口约 50mm。
- 5 将透明塑料压板、滑杆连同配重砝码一起置于细骨料表面。松开滑杆，使压板端正地压于细骨料表面上。
- 6 开动振动台，同时按动秒表计时，振动 40s 后取下容量筒，用钢直尺或金属直杆从筒口中心线向两侧方向刮平试样，称出总质量 (G_2)。

3.9.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 饱和面干细骨料在振实状态下的密度按照公式 (3.9.4-1) 计算。

$$\rho_t = \frac{G_2 - G_1}{V} \times 1000 \quad (3.9.4-1)$$

式中 ρ_t —— 饱和面干细骨料振实密度，kg/m³；

G_1 —— 容量筒质量，kg；

G_2 —— 容量筒及试样质量，kg；

V —— 容量筒容积，L。

- 2 饱和面干细骨料在振实状态下的空隙率按照公式 (3.9.4-2) 计算。

$$v_t = \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (3.9.4-2)$$

式中 P_{vt} —— 饱和面干细骨料振实空隙率；

ρ_s —— 细骨料饱和面干表观密度，kg/m³。

- 3 以两次测值的平均值作为振实密度、空隙率试验结果（修约间隔分别为 10kg/m³、1%）。当振实密度的两次测值相差大于 20kg/m³时，应重做试验。

3.10 天然细骨料含泥量试验

3.10.1 本试验用于测定天然细骨料中含泥量（粒径小于 0.08mm 的粘土、淤泥及细屑总含量）。

3.10.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 天平：分度值不大于 0.1g。
- 2 烘箱：可控制温度在 (105±5)℃。
- 3 试验筛：筛孔尺寸为 1.25mm、0.08mm 筛的方孔套筛。
- 4 辅助器具：洗砂筒（深度需大于 250mm）、搅棒、金属托盘、水槽等。

3.10.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 称取烘干的细骨料约 500g (G_0 , 精确到 0.1g, 下同) 两份, 按下述步骤分别进行测试。
- 2 将试样放入洗砂筒中, 注入清水淹没试样, 用搅棒充分搅拌后, 浸泡 2h。
- 3 用手在水中充分淘洗试样, 然后把浑水缓缓倒入 1.25mm 及 0.08mm 的套筛上 (筛孔由大到小套放), 滤去小于 0.08mm 的颗粒。
- 4 再在筒中加入清水, 重复步骤 3 的操作, 直至筒内的试样清空为止。
- 5 用水流充分冲洗剩留在套筛上的颗粒。移去 1.25mm 筛, 将 0.08mm 筛半浸在水槽中来回摇动, 以充分洗除小于 0.08mm 的颗粒。
- 6 将两只筛上剩留的颗粒倒入金属托盘中, 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量, 待冷却至室温后, 称出试样质量 (G_1)。

3.10.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 天然细骨料中含泥量按照公式 (3.10.4) 计算。

$$Q_f = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \times 100\% \quad (3.10.4)$$

式中 Q_f —— 天然细骨料含泥量;

G_0 —— 试验前的烘干试样质量, g;

G_1 —— 试验后的烘干试样质量, g。

- 2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1%)。当两次测值相差大于 0.5% 时, 应重做试验。

3.11 天然细骨料泥块含量试验

3.11.1 本试验用于测定天然细骨料中泥块含量。

3.11.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 天平: 分度值不大于 0.1g;
- 2 烘箱: 可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。
- 3 试验筛: 筛孔尺寸为 1.25mm、0.63mm 的方孔套筛。
- 4 辅助器具: 金属托盘、毛刷、料铲等。

3.11.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 称取烘干的细骨料试样约 500g (G_0 , 精确到 0.1g, 下同) 两份, 按下述步骤分别进行测试。
- 2 将试样用 1.25mm 筛筛分, 称取 1.25mm 以上的试样质量 (G_1), 不应少于 100g, 否则应增加筛分前的试样量。
- 3 将 1.25mm 以上的试样在金属托盘中摊成薄层, 用手捏碎所有泥块, 然后用 0.63mm 筛过筛, 称出剩余试样的质量 (G_2)。

3.11.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 天然细骨料中泥块含量按照公式 (3.11.4) 计算。

$$Q_c = \frac{G_1 - G_2}{G_0} \times 100\% \quad (3.11.4)$$

式中 Q_c —— 天然细骨料泥块含量；
 G_0 —— 试样质量，g；
 G_1 —— 1.25mm 以上试样质量，g；
 G_2 —— 筛除泥块后的试样质量，g。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。

3.12 人工细骨料石粉含量试验（水洗法）

3.12.1 本试验用于测定人工细骨料中的石粉（小于 0.16mm 的颗粒）含量及微粒（小于 0.08mm 的颗粒）含量。

3.12.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 天平：分度值不大于 0.1g。
- 2 烘箱：可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。
- 3 试验筛：筛孔尺寸 1.25mm、0.16mm、0.08mm 筛的方孔套筛，以及底盘和盖。
- 4 辅助器具：洗砂筒（深度大于 250mm）、搅棒、金属托盘（两个）、水槽等。

3.12.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 称取烘干的细骨料试样约 500g (G_0 ，精确到 0.1g，下同) 两份，按下述步骤分别进行试验。
- 2 将试样放入洗砂筒中，注入清水淹没试样，用搅棒充分搅拌后，浸泡 2h。
- 3 用手在水中充分淘洗试样，然后把浑水缓缓倒入 1.25mm、0.16mm 及 0.08mm 的套筛上（筛孔由大到小套放），滤去小于 0.08mm 的颗粒。
- 4 再在筒中加入清水，重复步骤 3 的操作，直至筒内的试样清空为止。
- 5 用水流充分冲洗剩留在套筛上的颗粒。移去 1.25mm 和 0.16mm 筛，将筛上颗粒倒入金属托盘 A 中。将 0.08mm 筛半浸在水槽中来回摇动，以充分洗除小于 0.08mm 的颗粒，然后将筛上颗粒倒入金属托盘 B 中。
- 6 将金属托盘 A、B 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量，待冷却至室温后，分别称出试样质量 (G_1 、 G_2)。

3.12.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 人工细骨料中石粉含量按照公式 (3.12.4-1) 计算。

$$Q_p = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \times 100\% \quad (3.12.4-1)$$

式中 Q_p —— 人工细骨料的石粉含量；
 G_0 —— 试验前的烘干试样质量，g；
 G_1 —— 金属托盘 A 中大于 0.16mm 的烘干试样质量，g。

- 2 人工细骨料中微粒含量按照公式 (3.12.4-2) 计算。

$$Q_{mp} = \frac{G_0 - (G_1 + G_2)}{G_0} \times 100\% \quad (3.12.4-2)$$

式中 Q_{mp} —— 人工细骨料的微粒含量；

G_2 —— 金属托盘 B 中大于 0.08mm 小于 0.16mm 的烘干试样质量，g。

3 石粉中微粒含量按照公式 (3.12.4-3) 计算。

$$Q_{ms} = \frac{G_0 - (G_1 + G_2)}{G_0 - G_1} \times 100\% \quad (3.12.4-3)$$

式中 Q_{ms} —— 石粉中的微粒含量。

4 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1%)。当两次测值相差大于 0.5% 时，应重做试验。

5 人工细骨料的石粉含量也可用 3.1 节试验结果中 0.16mm 筛以下颗粒含量百分率表示 (干筛法)，即为底盘上的石粉质量除以试样总质量。干筛法可作为替代法，但需要预先进行对比试验，确定两种方法测值的差异，对于干筛法试验结果进行修正。

3.13 人工细骨料亚甲蓝 MB 值试验

3.13.1 本试验用于检测人工细骨料的亚甲蓝 MB 值或亚甲蓝快速试验是否合格，判断人工细骨料中的石粉中是否含有较多泥粉。

3.13.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 天平：分度值不大于 0.01g。

2) 烘箱：控制温度为 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

3) 试验筛：2.5mm 方孔筛，含筛底和盖。

4) 移液管：5mL 和 2mL 各一支。

5) 搅拌装置：三片或四片叶轮搅拌器，转速可调，最高 $(600 \pm 60)\text{r}/\text{min}$ ，直径 $(75 \pm 10)\text{mm}$ 。

6) 计时器：分度值不大于 1s。

7) 温度计：分度值不大于 1°C 。

8) 辅助器具：1000mL 玻璃容量瓶、1000mL 烧杯、直径 8mm 玻璃棒、快速定量滤纸、搪瓷盘、金属托盘、搅棒、毛刷等。

2 亚甲蓝溶液 (10g/L)。将含量不低于 98.5% 的亚甲蓝 ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 粉末放入 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量，放入干燥器中冷却。称取烘干亚甲蓝粉末 10g (精确到 0.01g)，倒入盛有 $(35 \sim 40)^\circ\text{C}$ 约 600mL 蒸馏水的烧杯中，用玻璃棒持续搅拌 40min，直至亚甲蓝粉末完全溶解，然后冷却至 20°C 。将溶液倒入 1000mL 容量瓶中，用蒸馏水淋洗烧杯内部和搅拌器叶片等，使所有亚甲蓝溶液全部移入容量瓶。容量瓶和溶液的温度应保持在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 以便定容，加蒸馏水至容量瓶 1000mL 刻度处。振荡容量瓶以保证亚甲蓝粉末完全溶解。将容量瓶中溶液移入深色储藏瓶中，标明溶液名称、配制日期、失效日期 (亚甲蓝溶液保质期不应超过 28d)，并避光保存。

3.13.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取约 400g 有代表性风干细骨料，在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘至恒量，冷却至室温后，筛除大于

2.5mm 的颗粒。

2 称取细骨料试样约200g (G , 精确到0.1g), 加入盛有(500±5)mL蒸馏水的烧杯中, 用叶轮搅拌器以(600±60) r/min 转速搅拌5min, 形成悬浮液。然后以(400±40) r/min 转速持续搅拌, 直至后续试验全部结束。

3 在悬浮液中加入5mL亚甲蓝溶液, 搅拌至少1min后, 用玻璃棒蘸取一滴悬浮液, 滴于滤纸上。所取悬浮液滴的量应能在滤纸上形成直径(8~12)mm的沉淀物。滤纸应水平置于空烧杯或其他合适的支撑物上, 滤纸中部不应与任何物体接触, 使得悬浮液在滤纸上能够自由扩散。如沉淀物周围未出现色晕, 则在悬浮液中加入5mL亚甲蓝溶液, 继续搅拌1min, 再用玻璃棒蘸取一滴悬浮液, 滴于滤纸上。应保证后一次蘸染试验的色晕与前面滴点的色晕之间留空10mm以上, 如滤纸上空白位置不足, 应及时更换新滤纸。如沉淀物周围仍未出现色晕, 重复上述步骤, 直至沉淀物周围出现约1mm宽的稳定浅蓝色色晕。

4 此时不加入亚甲蓝溶液, 从最后一次加入亚甲蓝溶液开始计时, 每到1min 的时间点就进行一次蘸染试验。蘸染试验应间隔1min进行一次, 而不是滴悬浮液后一直观察5min看色晕是否消失。若未到5min的时间点蘸染试验就不再出现色晕, 在悬浮液中再加入5mL亚甲蓝溶液; 若正好在5min的时间点时, 蘸染试验不再出现色晕, 则在悬浮液中再加入2mL亚甲蓝溶液。在上述两种情况下, 加入亚甲蓝溶液后均应重新开始计时, 并继续每到1min的时间点就进行一次蘸染试验, 直至在5min时间点进行的蘸染试验仍能出现色晕时, 试验结束。记录所加入的亚甲蓝溶液的总体积(V , 精确到1mL)。

5 亚甲蓝快速试验方法。按上述方法形成悬浮液后, 一次性向烧杯中加入30mL亚甲蓝溶液, 持续搅拌8min, 然后用玻璃棒蘸取一滴悬浮液, 滴于滤纸上, 观察沉淀物周围是否出现明显色晕。

3.13.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 人工细骨料亚甲蓝MB值按照公式(3.13.4)计算。

$$MB = \frac{V}{G} \times 10 \quad (3.13.4)$$

式中 MB —— 亚甲蓝MB值, g/kg;

G —— (0~2.5) mm 粒级试样质量, g;

V —— 所加入的亚甲蓝溶液总量, mL。

10 —— 换算系数。

2 以两次测值的平均值作为试验结果(修约间隔0.1)。

3 结果评定应按以下规定执行。

1) 当MB值测定结果小于1.4时, 则判定试样中的微粒以石粉为主; 当MB 值不小于1.4 时, 则判定试样中的微粒以粘土为主。

2) 对亚甲蓝快速试验, 若沉淀物周围出现明显色晕, 则判定亚甲蓝快速试验为合格, 试样中的微粒以石粉为主; 否则判定亚甲蓝快速试验为不合格, 试样中的微粒以粘土为主。

3.14 细骨料有机质含量试验

3.14.1 本试验用于测定细骨料被有机质污染的程度。

3.14.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 天平：分度值不大于 0.1g 一台，分度值不大于 0.01g 一台。

2) 量筒：10mL、100mL 各一只；250mL 二只，带塞。

3) 辅助器具：烧杯、移液管、玻璃棒等。

2 试剂应包括以下几种。

1) 3%的氢氧化钠溶液。

2) 标准溶液的配制。取 2g 鞣酸粉溶解于 98mL 的 10%乙醇中，即得所需的鞣酸溶液。在 250mL 量筒中注入 97.5mL 浓度为 3%的氢氧化钠溶液，然后注入 2.5mL 鞣酸溶液，加塞后剧烈摇动，静置 24h，即得标准溶液。标准溶液颜色无永久性，每次试验时都应重新配制。比色时也可采用标准色板代替标准溶液。

3.14.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取有代表性的风干细骨料约 500g，将试样装入 250mL 量筒中至 130mL 处。然后注入 3%氢氧化钠溶液至 200mL 处，加塞后剧烈摇动后静置 24h。

2 用与盛装试样相同的玻璃量筒（颜色一致）盛装标准液，比较试样上部溶液和标准溶液的颜色，拍照作为试验原始记录。

3.14.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 如试样上部溶液的颜色浅于标准溶液，则判定试样有机质含量合格。

2 如两种溶液的颜色接近，则将试样（包括上部溶液）全部倒入烧杯中，放在（60~70）℃的水浴锅中加热（2~3）h，然后再与标准溶液比色。

3 如溶液的颜色深于标准溶液，则应做进一步检测：取适量细骨料分大致相等的两份，其中一份用 3%氢氧化钠溶液洗除有机质，然后再用清水洗净（要注意不应将细颗粒洗掉），直至用比色法试验时，试样上部溶液的颜色浅于标准色。然后分别用洁净细骨料和原状细骨料，与相同的水泥，按 GB/T 17671 制作水泥胶砂试件，测定 28d 抗压强度。当原状细骨料与洁净细骨料的抗压强度之比不小于 0.95 时，此细骨料仍可使用，否则应判定细骨料有机质含量不合格。

3.15 细骨料云母含量试验

3.15.1 本试验用于测定细骨料的片状游离云母的含量。细粒碎云母（如绢云母等）含量较高的母岩轧制的人工细骨料，宜对石粉中的云母含量及其对混凝土性能的影响进行专门研究。

3.15.2 仪器设备应包括以下几种。

1 放大镜：放大倍数（3~5）倍。

2 天平：分度值不大于 0.01g。

3 试验筛：筛孔尺寸 5mm、0.315mm 的方孔套筛，以及底盘和盖。

4 辅助器具：钢针、称量盒、金属托盘等。

3.15.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性细骨料，用四分法缩分至约 30g，倒入金属托盘，在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量，冷却至室温后，筛除粒径大于 5mm 和小于 0.315mm 的颗粒。

2 称取试样约 10g (G ，精确到 0.01g，下同)，倒入金属托盘中尽量摊薄，在放大镜下仔细观察，并用钢针将片状游离云母挑出放入称量盒，最后称出云母的质量 (G_1)。

3.15.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 细骨料中云母含量按照公式 (3.15.4) 计算。

$$Q_m = \frac{G_1}{G} \times 100\% \quad (3.15.4)$$

式中 Q_m —— 细骨料云母含量；

G —— 试样质量，g；

G_1 —— 云母质量，g。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。

3.16 天然细骨料轻物质含量试验

3.16.1 本试验用于测定天然细骨料中轻物质含量。

3.16.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 天平：分度值不大于 0.01g。

2) 烘箱：可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

3) 精密密度计：测定范围 $(1.95 \sim 2.00) \text{ kg/L}$ 。

4) 0.315mm 方孔试验筛。

5) 辅助器具：量杯（1000mL）、量筒（250mL）、烧杯（500mL）、蒸发皿、玻璃棒、玻璃漏斗等。

2 氯化锌高密度溶液（密度为 $1.95 \text{ kg/L} \sim 2.00 \text{ kg/L}$ ）：向 1000mL 量杯中加水至 600mL 刻度处，再加入 1500g 氯化锌，用玻璃棒搅拌使氯化锌全部溶解，待冷却至室温后取部分溶液倒入 250mL 量筒中，测其密度。如溶液密度小于要求值，则将它倒回 1000mL 量杯中，再加入一定量的氯化锌，溶解并冷却后再测其密度，直至溶液密度达到要求数值为止。

3.16.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 称取烘干细骨料试样约 200g (G ，精确到 0.01g，下同) 两份，按下述步骤分别进行测试。

2 将试样倒入盛有高密度溶液（约 500mL）的烧杯中，用玻璃棒充分搅拌，使试样中的轻物质与细骨料分离。静置 5min 后，将浮起的轻物质连同部分高密度溶液倒入 0.315mm 筛中，剩余的高密度溶液与细骨料颗粒表面相距 $(20 \sim 30) \text{ mm}$ 时应停止倒出，通过在筛下接玻璃漏斗和烧杯，再将接到的高密度溶液返回烧杯中。重复上述过程，直至无轻物质浮起为止。

3 用清水洗净留在筛网上的轻物质, 然后将其倒入已知质量 (G_1) 的蒸发皿中, 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量, 冷却至室温后称出轻物质与蒸发皿的总质量 (G_2)。

3.16.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 天然细骨料中轻物质含量按照公式 (3.16.4) 计算。

$$Q_1 = \frac{G_2 - G_1}{G} \times 100\% \quad (3.16.4)$$

式中 Q_1 —— 天然细骨料轻物质含量;

G —— 试样质量, g;

G_1 —— 蒸发皿质量, g;

G_2 —— 烘干的轻物质与蒸发皿总质量, g。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1%)。

3.17 细骨料坚固性试验

3.17.1 本试验用于测定细骨料对硫酸钠饱和溶液结晶膨胀破坏作用的抵抗能力, 间接评定细骨料的坚固性。

3.17.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 天平: 分度值不大于 0.01g。

2) 烘箱: 可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

3) 试验筛: 与 3.1 节相同的套筛。

4) 三角网篮: 由铜丝或镀锌铁丝制成, 直径和高均为 70mm, 网孔尺寸不应大于所盛试样最小粒径的一半。网篮下部三只支撑脚, 脚高应大于 30mm。

5) 密度计: 测定范围 $(1.15 \sim 1.20)$ kg/L。

6) 辅助器具: 搪瓷盆或瓷缸 (容量不小于 10L)、带盖塑料容器、洗砂筒、摇筛机、金属托盘、毛刷等。

2 饱和硫酸钠溶液: 在搪瓷盆或瓷缸中注入 1L 温度为 $(30 \sim 50)^\circ\text{C}$ 的水, 再加入无水硫酸钠 $(300 \sim 350)$ g 或十水硫酸钠 $(700 \sim 1000)$ g, 用玻璃棒搅拌, 使其溶解并饱和, 然后在 $(20 \sim 25)^\circ\text{C}$ 温度下静置 48h。其密度应保持在 $(1.151 \sim 1.174)$ kg/L 范围内。

3.17.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 称取细骨料试样约 3kg, 按 3.10 节的规定冲洗, 并烘至恒量。再按 3.1 节的规定, 筛分烘干试样并测定颗粒级配。

2 称取粒径为 $(0.315 \sim 0.63)$ mm、 $(0.63 \sim 1.25)$ mm、 $(1.25 \sim 2.5)$ mm、 $(2.5 \sim 5.0)$ mm 的试样各 100g (g_i , 精确到 0.01g, 下同), 分别装入四个三角网篮中, 然后浸入盛有饱和硫酸钠溶液的带盖塑料容器中。容器应放置在恒温室内, 保证溶液的温度在 $20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 范围内, 容器中溶液的体积不应小于试样总体积的五倍, 底部应无硫酸钠结晶。网篮浸入溶液时, 应上下升降多次, 以排除试

样中的气泡。网篮的间距不应小于 30mm，试样表面至少应在液面以下 30mm。试验过程中，盛放硫酸钠溶液的容器应密封，防止水分蒸发或掉入灰尘脏物。

3 浸泡 20h 后，从溶液中取出网篮，放在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘 4h。至此，完成了第一次试验循环。待试样冷却至室温后，即开始第二次循环。从第二次循环开始，试样浸泡和烘干时间均为 4h，共进行五次循环。

4 最后一次循环完毕后，用 $(25 \sim 30)^\circ\text{C}$ 的清水洗净试样中的硫酸钠。可取少量冲洗试样的水，滴入少量氯化钡 (BaCl_2) 溶液，如无白色沉淀，即说明试样中的硫酸钠已被洗净。

5 将试样在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量，冷却至室温后，用筛孔尺寸为各级试样粒径下限的筛子过筛，并称出各级试样的筛余量 (g_i')。

6 每次使用前应检查硫酸钠溶液的密度，进行 10 次循环后，应更换硫酸钠溶液。

3.17.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 各级试样质量损失率按照公式 (3.17.4-1) 计算。

$$P_i = \frac{g_i - g_i'}{g_i} \times 100\% \quad (3.17.4-1)$$

式中 P_i —— 各级试样质量损失率；

g_i —— 各级试样质量，g；

g_i' —— 各级试样在试验后的筛余量，g。

2 粒径 $(0.315 \sim 5.0)$ mm 细骨料的总质量损失率按照公式 (3.17.4-2) 计算 (修约间隔 0.1%)。

$$P = \frac{a_1 P_1 + a_2 P_2 + a_3 P_3 + a_4 P_4}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4} \times 100\% \quad (3.17.4-2)$$

式中 P —— 细骨料总质量损失率；

a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 —— 分别为 $(0.315 \sim 0.63)$ mm、 $(0.63 \sim 1.25)$ mm、 $(1.25 \sim 2.5)$ mm、 $(2.5 \sim 5.0)$ mm 各级试样在筛除小于 0.315mm 及大于 5.0mm 颗粒后的试样中所占的百分率；

P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 —— 分别为各级试样质量损失率。

3 细骨料的坚固性以粒径 $(0.315 \sim 5.0)$ mm 试样的总质量损失率评价。

3.18 细骨料氯离子含量试验

3.18.1 本试验用于测定细骨料中的氯离子含量。

3.18.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 天平：分度值不大于 0.1g 一台，分度值不大于 0.1mg 分析天平一台。

2) 烘箱：控制温度 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

3) 高精度电位滴定仪：可自动滴定至终点并计算出滴定结果。电位测量范围 $\pm 2000\text{mV}$ ，分辨率不大于 0.1mV；pH 测量范围 0~14，分辨率不大于 0.02。配备高精度计量管，误差不大于 0.01mL。滴定分析重复性不大于 0.2%。

4) 移液管: 50mL 和 1mL。

5) 辅助器具: 1L 带塞磨口瓶、500mL 容量瓶、300mL 三角瓶、玻璃棒、金属托盘、毛刷等。

2 试剂应包括以下几种。

1) 5% (W/V) 铬酸钾指示剂溶液。称取 5g 铬酸钾 (K_2CrO_4) 溶于约 75mL 水中, 滴加饱和硝酸银溶液, 直到出现棕红色沉淀为止, 避光放置 24h, 滤去沉淀, 半清液稀释至 100mL, 贮在棕色瓶中备用。

2) 0.01mol/L 硝酸银标准溶液。准确称取经 105℃ 烘干的 1.6987g 硝酸银溶于蒸馏水中, 定容至 1L, 摇匀, 保存于暗色瓶中。必要时用 0.01mol/L 氯化钠标准溶液标定。

3) 0.01mol/L 氯化钠标准溶液。

3.18.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取约 2kg 有代表性风干细骨料, 在 (105 ± 5) ℃ 的烘箱中烘至恒量, 冷却至室温后, 分成大致相等的两份备用。

2 称取细骨料试样约 500g (G , 精确到 0.1g), 装入盛有 500mL (V_0 , 精确到 1mL) 蒸馏水的磨口瓶中, 加上塞子, 摇动一次。放置 2h, 然后每隔 5min 摇动一次, 共摇动三次, 使氯盐充分溶解。

3 取上部约 100mL 澄清溶液用中速滤纸过滤, 然后用移液管吸取 50mL 滤液, 注入三角瓶中, 再加入 5% 铬酸钾指示剂 1mL。用 0.01mol/L 硝酸银标准溶液滴定至溶液呈砖红色为止, 记录消耗的硝酸银标准溶液的体积 (V_1 , 精确到 0.001mL)。

4 空白试验。用移液管准确吸取 50mL 蒸馏水到三角瓶内, 加入 5% 铬酸钾指示剂 1mL, 并用 0.01mol/L 的硝酸银标准溶液滴定至溶液呈砖红色为止, 记录消耗的硝酸银标准溶液的体积 (V_2 , 精确到 0.001mL)。

3.18.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 细骨料中氯离子含量按照公式 (3.18.4) 计算。

$$Q_{Cl} = \frac{C_{AgNO_3}(V_1 - V_2) \times 0.0355 \times 10}{G} \times 100\% \quad (3.18.4)$$

式中 Q_{Cl} —— 细骨料中氯离子含量;

C_{AgNO_3} —— 硝酸银标准溶液的浓度, mol/L;

V_1 —— 样品滴定时消耗的硝酸银标准溶液的体积, mL;

V_2 —— 空白试验时消耗的硝酸银标准溶液的体积, mL;

G —— 试样质量, g;

0.0355 —— 换算系数;

10 —— 全部试样溶液与所分取试样溶液的体积比。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.01%)。

3.19 骨料硫化物及硫酸盐含量试验

3.19.1 本试验用于测定细骨料或粗骨料中硫酸盐、硫化物的总含量。

3.19.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 天平：分度值不大于 0.1g 一台，分度值不大于 0.01g 一台。
- 2) 分析天平：分度值不大于 0.1mg。
- 3) 高温炉：可控温度不低于 1000℃。
- 4) 烘箱：控制温度 (105±5)℃。
- 5) 试验筛：筛孔尺寸 20mm、0.08mm 的方孔筛。
- 6) 辅助器具：振荡器或滚筒、烧瓶、加塞圆底烧瓶、过滤漏斗、冷凝管、移液管、烧杯、瓷坩埚、搅拌器、电炉、中速滤纸、慢速定量滤纸、玻璃棒、氮气或氩气瓶等。

2 试剂应包括以下几种。

- 1) 10%氯化钡溶液：称出 10 克氯化钡溶解于 100mL 蒸馏水中制备。
- 2) 盐酸溶液 (1:1)：由浓盐酸溶于同体积的蒸馏水中制备。
- 3) 硝酸银溶液：称出 1g 硝酸银，溶解于 100mL 蒸馏水中后，缓慢加入 (5~10) mL 的硝酸 (密度为 1.42kg/L)，存放于棕色试剂瓶内。
- 4) 硫酸锌的氨溶液：称出 50 克硫酸锌 ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) 溶解于 150mL 蒸馏水中，加入 350mL 浓氨水 (NH_4OH)，静置 24h 后用中速滤纸过滤；
- 5) 醋酸铅溶液：称出 0.2 克醋酸铅溶解于 100mL 蒸馏水中制备。
- 6) 标准碘酸钾溶液 (0.01667mol/L)：称出 110℃烘干的 (3.6±0.1) g (精确到 0.1mg,) 碘酸钾 (KIO_3)、0.4g 氢氧化钠 ($NaOH$) 和 25g 碘化钾 (KI)，放入 1L 容量瓶中，加入新煮沸过的冷水至标线 (微量氢氧化钠有助于溶液保持稳定，如溶液褪色应抛弃)。标准碘酸钾溶液系数 F 按照公式 (3.19.2-1) 计算。

$$F = \frac{m_1}{(214.01 \times 0.01667)} = \frac{m_1}{3.5668} \quad (3.19.2-1)$$

式中 m_1 ——碘酸钾的质量，g。

- 7) 硫代硫酸钠溶液 (0.1mol/L)。称出 24.82 克硫代硫酸钠 ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 溶解于 1L 蒸馏水中制备。硫代硫酸钠溶液系数 f 按照下述方法测定。
 - a) 用移液管将 20mL 碘酸钾溶液放入 500mL 锥形瓶，注入 150mL 稀释，加入 25mL 盐酸溶液 (1:1) 酸化，用 0.1mol/L 硫代硫酸钠溶液滴定至淡黄色。
 - b) 加入 2mL 淀粉溶液，继续滴定直至蓝色变成无色。
 - c) 硫代硫酸钠溶液系数 f 按照公式 (3.19.2-2) 计算。

$$f = \frac{20 \times 0.01667 \times 214.01 \times F}{3.5668 \times V_s} = 20 \times \frac{F}{V_s} \quad (3.19.2-1)$$

式中 F —— 标准碘酸钾溶液系数；

V_s —— 0.1mol/L 硫代硫酸钠溶液滴定用量，mL。

- 8) 淀粉溶液：称出 1g 水溶性淀粉、1g 碘化钾 (KI)，溶解于 100mL 蒸馏水中制备。
- 9) 浓盐酸。

- 10) II 价氯化锡 ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。
- 11) 铬, 粉状。
- 12) 去离子水。

3.19.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按照表 3.19.3 规定的质量, 取有代表性的细骨料 (或粗骨料), 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量, 冷却至室温。对细骨料, 称取试样约 500g (G_0 , 精确到 0.1g) 两份。对粗骨料, 如骨料粒径大于 20mm, 应破碎 (应避免过分研磨) 过 20mm 筛, 混拌均匀, 用四分法称取试样约 2kg (G_0 , 精确到 1g) 两份。按下述步骤分别进行测试。

表 3.19.3 骨料硫化物及硫酸盐含量试验取样质量表

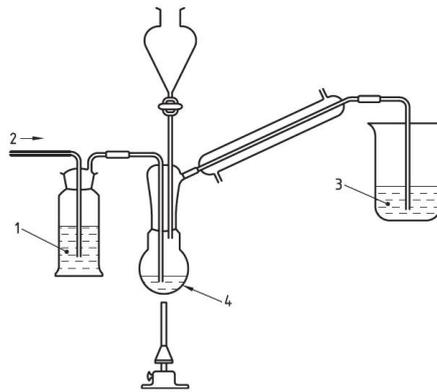
骨料最大粒径 (mm)	5	20	40	80	150 (120)
最少取样质量 (kg)	2	5	30	60	100

2 水溶性硫酸盐含量测定步骤如下。

- 1) 将骨料试样装入 5L 容器 (细骨料试样用 2L 容器), 注入约为试样 2 倍质量的蒸馏水 (V_w , 精确到 1mL), 密封后用振荡器或滚筒连续晃动 24h。
- 2) 静置 20min 后, 取上部约 100mL 澄清溶液用中速滤纸过滤, 然后用移液管取 50mL 滤液到 500mL 烧杯, 用水稀释到 300mL, 加入 10mL 盐酸。煮沸 5min。
- 3) 维持沸腾, 边快速搅拌边滴加 5mL 氯化钡溶液 (微沸), 再煮沸 15min, 以便沉淀形成。继续微沸 30min 后温热静置一夜。用慢速定量滤纸过滤, 用热水冲洗沉淀物至无氯离子 (用硝酸银溶液检测)。
- 4) 将沉淀及滤纸一并移入已灼烧恒量 (G_1 , 精确到 0.1mg) 的瓷坩埚中, 灰化后在 800°C 的高温炉内灼烧 30min。取出坩埚, 置于干燥器中冷至室温, 称出沉淀物及坩埚总质量 (G_2 , 精确到 0.1mg)。

3 酸溶性硫化物含量测定步骤如下。

- 1) 将骨料试样再逐步破碎缩减到 20g, 研磨过 0.125mm 筛, 取样 1g (G_3 , 精确到 0.1mg)。
- 2) 将试样装入 250mL 加塞圆底烧瓶, 加入 2.5g 氯化锡 (II 价) 和 0.1g 铬 (有助于骨料中 FeS_2 的溶解), 注入 50mL 去离子水。按照图 3.19.3 连接仪器。烧杯盛有 15mL 硫酸锌的氨溶液和 285mL 去离子水。打开气瓶, 调节气流流速为 10mL/min。
- 3) 关闭气流, 通过过滤漏斗注入 50mL 盐酸 (1:1)。然后再打开气流, 加热烧杯至沸腾, 煮沸 10min 后, 断开导出管 (滴定期间起搅拌作用)。至少反应 10min, 以便硫化物完全转化为硫化锌沉淀。
- 4) 烧杯冷却至室温, 用移液管加入 10mL 碘酸钾溶液 (0.0167mol/L) 和 25mL 浓盐酸, 用硫代硫酸钠溶液滴定至淡黄色。再加入 2mL 淀粉溶液, 继续滴定至蓝色消失。如硫化物含量小于 0.1%, 应将碘酸钾溶液稀释 10 倍后使用。



1—醋酸铅溶液；2—氮气或氩气；3—硫酸锌的氨溶液；4—反应烧瓶

图 3. 19. 3 硫化物测定装置示意图

3. 19. 4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 骨料中硫酸盐按照公式 (3. 19. 4-1) 计算。

$$Q_{s1} = \frac{(G_2 - G_1) \times 0.343}{G_0} \times \frac{V_w}{50} \times 100\% \quad (3. 19. 4-1)$$

式中 Q_{s1} —— 骨料硫酸盐含量 (以 SO_3 质量计)；

G_0 —— 试样质量, g；

G_1 —— 坩埚质量, g；

G_2 —— 沉淀物及坩埚总质量, g；

0. 343 —— 硫酸钡 ($BaSO_4$) 换算为 SO_3 的系数；

V_w —— 浸泡试样所加蒸馏水的体积, mL。

2 骨料中硫化物含量按照公式 (3. 19. 4-2) 计算。

$$\begin{aligned} Q_{s2} &= \left(\frac{0.01667 \times 3 \times 80}{1000} \right) \times \frac{(V_1 \times F) - (V_2 \times f)}{G_3} \times 100\% \\ &= 0.004 \times \frac{(V_1 \times F) - (V_2 \times f)}{G_3} \times 100\% \end{aligned} \quad (3. 19. 4-2)$$

式中 Q_{s2} —— 骨料硫化物含量 (以 SO_3 质量计)；

V_1 —— 碘酸钾溶液用量, mL；

F —— 碘酸钾溶液系数；

V_2 —— 硫代硫酸钠溶液滴定量, mL；

f —— 硫代硫酸钠溶液系数；

G_3 —— 试样质量, g。

3 骨料硫化物和硫酸盐总含量 (以 SO_3 质量计) $Q_s = Q_{s1} + Q_{s2}$ 。以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0. 01%)。若两次测值相差大于 0. 15% 时, 应重做试验。

3.20 粗骨料颗粒级配试验

3.20.1 本试验用于测定粗骨料混合料的颗粒级配。

3.20.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验筛：与各粒级上下限对应的筛孔尺寸分别为 150（或 120）mm、80mm、40mm、20mm、5mm 的方孔试验筛（在本节简称为粒级筛，按筛孔尺寸由大到小编号为 $i=0\sim 4$ 号筛。按照 GB/T 14685 生产的粗骨料，宜使用对应的粒级试验筛进行颗粒级配试验。试验筛应符合 SL 126 的规定。

2 秤：分度值不大于 0.01kg 一台，分度值不大于 0.1kg 一台。

3 辅助器具：平头铁锹、铁盘或其他容器等。

3.20.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取有代表性的风干状态的粗骨料混合料，按表 3.20.3 规定的质量称取两份试样（ G_0 ，小于 10kg 精确到 0.01kg，不小于 10kg 精确到 0.1kg，下同），按下述步骤分别进行测试。为方便操作，大于 50kg 骨料宜分多次称量。

表 3.20.3 粗骨料颗粒级配试验取样质量表

骨料最大粒径 (mm)	20	40	80	150 (120)
最少取样质量 (kg)	10	20	50	200

2 在干燥洁净的平面上，使用粒级筛，按筛孔尺寸由大到小的顺序分别过筛，直至通过量不超过试样总量的 0.1% 为止。但在每号筛上筛余试样的层厚不应大于试样的最大粒径值，否则应将该号筛上的筛余试样分成两份，再次进行筛分。

3 称出各粒级筛筛余量（ G_i ）和底板上的通过量（ G ）。

3.20.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 各筛的分计筛余百分率按照公式（3.20.4-1）计算。

$$P_i = \frac{G_i}{G_0} \times 100\% \quad (3.20.4-1)$$

式中 P_i —— i 号粒级筛的分计筛余百分率， $i=0\sim 4$ ；

G_i —— i 号粒级筛上的筛余量， g ；

G_0 —— 试样总量， g 。

2 各筛的累计筛余百分率按照公式（3.20.4-2）计算：

$$A_i = P_1 + \dots + P_i \quad (3.20.4-2)$$

式中 A_i —— i 号粒级筛的累计筛余百分率， $i=1\sim 5$ ；

3 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 1%）。

3.21 粗骨料饱和面干表观密度及吸水率试验

3.21.1 本试验用于测定单粒级粗骨料的饱和面干表观密度及吸水率。

3.21.2 仪器设备应包括以下几种。

1 静水力学天平：由天平与静水力学装置构成，能称量水中物料。其中。

- 1) 天平：分度值不大于 1g；
- 2) 网篮：网孔尺寸小于 5mm，直径和高均约 200mm；
- 3) 盛水筒：直径约 400mm，高约 600mm。

2 烘箱：可控制温度在 (105 ± 5) °C。

3 辅助器具：盛水容器、金属托盘、毛巾等。

3.21.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性的单粒级粗骨料，冲洗干净，面干后按照表 3.21.3 中规定的质量称取两份试样，按下述步骤分别进行测试。

表 3.21.3 粗骨料表观密度试验取样质量表

骨料最大粒径 (mm)	20	40	80	150 (120)
最少取样质量 (kg)	2	2	4	6

2 将试样装入盛水的容器中，水面至少高出试样 50mm，浸泡 24h。

3 将网篮全部浸入盛水筒中，称出网篮在水中的质量 (G_1 ，精确到 1g，下同)。再将浸泡后的试样装入网篮内，放入盛水筒中，用上下升降网篮的方法排除气泡 (试样不应露出水面)。称出试样和网篮在水中的总质量 (G_2)。两者之差即为试样在水中的质量。试验应在恒温室内进行，两次称量时，水的温度相差不应大于 2°C。

4 将试样从网篮中取出，用拧干后的湿毛巾吸干试样表面多余水至饱和面干状态 (即粗骨料表面潮湿且亚光无亮色)，并立即称出饱和面干试样的质量 (G_3)。

5 将试样放入金属托盘，置于温度为 (105 ± 5) °C 烘箱中烘至恒量，冷却至室温后称出烘干试样的质量 (G_4)。

3.21.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 粗骨料的饱和面干表观密度按照公式 (3.21.4-1) 计算。

$$\rho_s = \frac{G_3}{G_3 + G_1 - G_2} \times \rho_w \quad (3.21.4-1)$$

式中 ρ_s —— 粗骨料饱和面干表观密度， kg/m^3 ；

ρ_w —— 水的密度， kg/m^3 ；

G_1 —— 网篮在水中的质量，g；

G_2 —— 饱水试样和网篮在水中的总质量，g；

G_3 —— 饱和面干试样质量，g。

2 粗骨料的饱和面干吸水率按照公式 (3.21.4-2) 计算。

$$a_s = \frac{G_3 - G_4}{G_3} \times 100\% \quad (3.21.4-2)$$

式中 a_s —— 粗骨料饱和面干吸水率；

G_4 —— 烘干试样质量，g。

2 表观密度、吸水率以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔分别为 10kg/m^3 、0.01%)。当两次表观密度测值相差大于 20kg/m^3 ，或两次吸水率测值相差大于 0.5% 时，应重做试验。

3.22 粗骨料表面含水率试验

3.22.1 本试验用于测定潮湿状态单粒级粗骨料的表面含水率，适用于含水率超过饱和面干吸水率的粗骨料。

3.22.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 天平：分度值不大于 1g。
- 2 辅助器具：金属托盘、毛巾等。

3.22.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性的潮湿状态的粗骨料，按照表 3.21.3 中规定的质量称取试样两份（ G_1 ，精确到 1g，下同），按下述步骤分别进行测试。

2 将试样放入托盘中，用拧干的湿毛巾吸干试样表面多余水份至饱和面干状态，并立即称出饱和面干试样的质量（ G_2 ）。

3.22.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 粗骨料的表面含水率按照公式（3.22.4）计算。

$$P_{sw} = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \times 100\% \quad (3.22.4)$$

式中 P_{sw} —— 粗骨料表面含水率；

G_1 —— 潮湿试样质量，g；

G_2 —— 饱和面干试样质量，g。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。当两次测值相差大于 0.5% 时，应重做试验。

3.23 粗骨料堆积密度及空隙率试验

3.23.1 本试验用于测定单粒级或级配粗骨料的（松散）堆积密度、紧密堆积密度，及对应的空隙率。

3.23.2 仪器设备应包括以下几种。

1 振动台：频率（ 50 ± 3 ）Hz，空载时台面中心振幅（ 0.5 ± 0.1 ）mm，额定荷载不小于 200kg。附有固定容量筒的装置。

2 容量筒：容积 10L、20L、30L、80L，内径与内深接近的钢制容器，尺寸要求见表 3.23.2。应符合 SL 127 的规定。

- 3 秤：分度值不大于 0.01kg 一台，分度值不大于 0.1kg 一台。

- 4 辅助器具：平头铁铲、钢直尺或金属直杆等。

表 3.23.2 粗骨料最大粒径与容量筒容积对应表

骨料最大粒径 (mm)		20	40	80	150 (120)
容量筒	容积 (L)	10	20	30	80

	内径 (mm)	234±1.5	294±2	337±2	467±2.5
	内深 (mm)	234±1.5	294±2	337±2	467±2.5
	壁厚 (mm)	≥2	≥3	≥4	≥5
	底厚 (mm)	≥5	≥5	≥6	≥6

3.23.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 预先按照 3.21 节的方法取样试验, 并按照公式 (3.23.4-1) 计算干燥状态粗骨料的表观密度 (ρ_d)。

2 根据粗骨料最大粒径, 按照表 3.23.2 的规定选用相应容积的容量筒, 称出空容量筒质量 (G_1 , 小于 10kg 精确到 0.01kg, 不小于 10kg 精确到 0.1kg, 下同), 并按照 SL 127 校准实际容积 (V , 修约间隔 0.01L)。

3 根据容量筒容积及适当的富余量估算试样质量, 对级配骨料, 需根据级配比例估算各粒级骨料的质量。按照估算质量取有代表性的风干粗骨料, 堆放在干燥洁净的平面上, 用铁铲将试样翻拌均匀。

4 松散堆积密度的测定。用平头铁铲将试样从离容量筒口 50mm 高处自由落入筒中, 直至试样高出筒口。用钢直尺或金属直杆沿筒口边缘刮去高出筒口的颗粒, 用适当的颗粒填平凹处, 使表面稍凸起部分和凹陷部分的体积大致相等, 称出容量筒和试样的总质量 (G_2)。

5 紧密堆积密度的测定。将测完松散堆积密度的装满试样的容量筒放在振动台上, 振动 (2~3) min。不具备振实条件时亦可采用人工颠实的方法: 将容量筒置于坚实的平地上, 在筒底垫放一根直径为 25mm 的钢筋, 将试样分三层距容量筒上口 50mm 高处装入筒中, 每装完一层后, 将筒按住, 左右交替颠击地面各 25 次。

6 在试样密实后, 补充试样直至超出筒口, 按步骤 4 方法平整表面, 称出试样和容量筒总质量 (G_3)。

7 将试样倒出, 与剩余试样一起翻拌均匀, 按上述步骤再测一次松散堆积密度和紧密堆积密度。

3.23.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 干燥状态粗骨料的表观密度按照公式 (3.23.4-1) 计算。

$$\rho_d = \frac{G_4}{G_4 + G_1 - G_2} \times \rho_w \quad (3.23.4-1)$$

式中 ρ_d —— 干燥状态粗骨料表观密度, kg/m^3 ;

ρ_w —— 水的密度, kg/m^3 ;

G_1 —— 网篮在水中的质量, g;

G_2 —— 饱水试样和网篮在水中的总质量, g;

G_4 —— 干燥状态试样质量, g。

2 粗骨料的松散堆积密度和紧密堆积密度按照公式 (3.23.4-2)、公式 (3.23.4-3) 计算。

$$\rho_1 = \frac{G_2 - G_1}{V} \times 1000 \quad (3.23.4-2)$$

$$\rho_2 = \frac{G_3 - G_1}{V} \times 1000 \quad (3.23.4-3)$$

式中 ρ_1 、 ρ_2 —— 松散堆积密度和紧密堆积密度， kg/m^3 ；
 G_1 —— 容量筒质量， kg ；
 G_2 —— 容量筒及松散试样总质量， kg ；
 G_3 —— 容量筒及密实试样总质量， kg ；
 V —— 容量筒的容积， L 。

3 粗骨料的松散堆积空隙率和紧密堆积空隙率按照公式（3.23.4-4）、公式（3.23.4-5）计算。

$$V_1 = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_d}\right) \times 100\% \quad (3.23.4-4)$$

$$V_2 = \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_d}\right) \times 100\% \quad (3.23.4-5)$$

式中 V_1 、 V_2 —— 松散堆积空隙率和紧密堆积空隙率。

3 堆积密度、空隙率以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔分别为 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、 1% ）。当松散堆积密度和紧密堆积密度两次测值相差超过 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 时，应重做试验。

3.24 粗骨料振实密度及空隙率试验

3.24.1 本试验用于测定碾压混凝土用级配粗骨料的振实密度及空隙率。

3.24.2 仪器设备应包括以下几种。

1 振动台：频率 (50 ± 3) Hz，振幅 (0.5 ± 0.1) mm，额定荷载不小于 200kg。附有固定容量筒的装置。

2 秤：分度值不大于 0.01kg。

3 天平：分度值不大于 1g。

4 容量筒：容积 20L、30L，内径与内深接近的钢制容器，尺寸要求见表 3.23.2。应符合 SL 127 的规定。

5 压重块：质量 7.8kg、10kg 各一块，分别与 20L、30L 的容量筒对应使用，直径略小于对应容量筒的直径。

6 玻璃量筒：500mL 或 1000mL。

7 辅助器具：平头铁铲、薄塑料布（边长应大于容量筒直径）、钢直尺或金属直杆等。

3.24.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 预先按照 3.21 节的方法取样试验，并按照公式（3.23.4-1）计算干燥状态粗骨料的表观密度（ ρ_d ）。

2 根据粗骨料最大粒径，按照表 3.21.2 选用相应容积的容量筒，称出空容量筒质量（ G_1 ，小于 10kg 精确到 0.01kg，不小于 10kg 精确到 0.1kg，下同），并按照 SL 127 校准实际容积（ V_1 ，修约间隔 0.01L）。

3 根据容量筒容积及适当的富余量估算骨料质量，并根据级配比例估算各粒级骨料的质量。按照估算质量取有代表性的风干粗骨料，堆放在干燥洁净的平面上，用铁铲将试样翻拌混合均匀。

4 用平头铁铲将试件从离容量筒口 50mm 高处自由落入筒内，粗骨料装至与筒口齐平，用（5~

10) mm 的小粒径粗骨料填平。把装有粗骨料的容量筒固定于振动台上, 粗骨料表面加上相应的压重块 (质量按压强 0.98kPa 计算)。开动振动台, 振 60s, 取下压重块。

5 在试样上面铺上薄塑料布, 将标准砂从 50mm 高处均匀地倒在布上, 直至标准砂略高于筒口, 然后用钢直尺或金属直杆沿容量筒上边缘刮平。提起塑料布将标准砂取出, 称出标准砂质量 (G_2 , 精确到 0.1g), 并用玻璃量筒测量标准砂体积 (V_2 , 精确到 1mL)。如不用标准砂补足, 也可按照步骤 4 再次加料和压重振实, 直到骨料上表面与筒口的距离小于骨料最大粒径, 按步骤 4 加料填平。

6 称出容量筒和试样总质量 (G_3 , 精确到 0.1kg)。然后将试样倒出, 与剩余试样一起翻拌均匀, 按上述步骤再测一次。

3.24.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 粗骨料的振实密度按照公式 (3.24.4-1) 计算。

$$\rho_g = \frac{G_3 - G_1}{V_1 - V_2} \times 1000 \quad (3.24.4-1)$$

式中 ρ_g ——粗骨料振实密度, kg/m^3 ;

G_1 ——容量筒质量, kg ;

G_2 ——所填标准砂质量, kg ;

G_3 ——容量筒和试样总质量, kg ;

V_1 ——容量筒容积, L ;

V_2 ——所填标准砂体积, L 。

2 粗骨料的振实空隙率按照公式 (3.24.4-2) 计算。

$$P_{vg} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (3.24.4-2)$$

式中 P_{vg} ——粗骨料振实空隙率;

ρ_0 ——干燥状态粗骨料表观密度, kg/m^3 。

3 振实密度、空隙率以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔分别为 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、1%)。当振实密度两次测值相差超过 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 时, 应重做试验。

3.25 粗骨料含泥量 (石粉含量) 试验

3.25.1 本试验用于测定单粒级天然粗骨料中含泥量 (小于 0.08mm 的粘土、淤泥及细屑的总含量), 或测定单粒级人工粗骨料中的石粉含量。

3.25.2 仪器设备应包括以下几种。

1 秤: 分度值不大于 0.01kg 一台, 分度值不大于 0.1kg 一台。

2 烘箱: 可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

3 试验筛: 筛孔尺寸为 0.08mm、0.16mm、1.25mm 的方孔套筛。

4 辅助器具: 铁铲、容器、金属托盘、毛刷等。

3.25.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性单粒级粗骨料, 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘至恒量, 冷却至室温后, 按照表 3.25.3

规定的质量称取试样两份 (G_0 , 小于 10kg 精确到 0.01kg, 不小于 10kg 精确到 0.1kg), 按下述步骤分别进行测试。

表 3.25.3 粗骨料含泥量 (石粉含量) 试验取样质量表

骨料粒级 (mm)	5~20	20~40	40~80	80~150 (120)
最少取样质量 (kg)	10	10	20	30

2 将试样装入容器并注入清水, 用铁铲在水中翻拌淘洗, 使小于 0.08mm 的颗粒与较粗颗粒分离, 然后将浑水慢慢倒入 1.25mm 及 0.08mm 的套筛上 (1.25mm 筛放置上面), 滤去小于 0.08mm 的颗粒。1.25mm 筛上的颗粒及时倒回容器中。加水反复淘洗, 直至盆中的水清为止。在试验过程中, 注意勿将水溅出, 避免大于 0.08mm 的颗粒丢失。石粉含量检测用 0.16mm 的筛替换 0.08mm 的筛。

3 用水冲洗干净 0.08mm 筛上的颗粒, 然后将其和容器中的试样一并装入金属托盘中, 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量, 待冷却至室温后, 称出试样质量 (G_1)。

3.25.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 粗骨料中含泥量 (石粉含量) 按照公式 (3.25.4) 计算。

$$Q_p = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \times 100\% \quad (3.25.4)$$

式中 Q_p —— 粗骨料含泥量 (石粉含量);

G_0 —— 试验前烘干的试样质量, kg;

G_1 —— 试验后烘干的试样质量, kg。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1%)。当两次测值相差大于 0.2% 时, 应重做试验。

3.26 粗骨料泥块含量试验 (泡水法)

3.26.1 本试验用于测定单粒级粗骨料中泥块含量, 评定粗骨料品质。

3.26.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 秤: 分度值不大于 0.01kg 一台, 分度值不大于 0.1kg 一台。
- 2 烘箱: 可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。
- 3 试验筛: 筛孔尺寸为 5mm、2.5mm 的方孔筛。
- 4 辅助器具: 铁铲、容器、金属托盘、毛刷等。

3.26.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性单粒级粗骨料, 在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘至恒量, 冷却至室温后, 筛除小于 5mm 的颗粒, 再按照表 3.26.3 规定的质量称出试样两份 (G_0 , 小于 10kg 精确到 0.01kg, 不小于 10kg 精确到 0.1kg, 下同), 按下述步骤分别进行测试。

2 将试样装入容器并注入清水, 水面至少高出试样 50mm, 用铁铲在水中翻拌淘洗, 然后浸泡 24h。

3 用手在水中将泥块碾碎, 再将骨料分批放在 2.5mm 筛上用水冲洗干净。在试验过程中应避免骨料颗粒丢失。

4 将冲洗干净的试样装入金属托盘中，在（105±5）℃的烘箱中烘至恒量，待冷却至室温后，称出试样质量（ G_1 ）。

表 3.26.3 粗骨料泥块含量试验取样质量表

骨料粒级（mm）	5~20	20~40	40~80	80~150（120）
最少取样质量（kg）	5	10	20	40

3.26.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 粗骨料中泥块含量按照公式（3.26.4）计算。

$$Q_c = \frac{G_0 - G_1}{G_1} \times 100\% \quad (3.26.4)$$

式中 Q_c ——粗骨料泥块含量；

G_0 ——试验前试样质量，kg；

G_1 ——剔除泥块后的试样质量，kg。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。

3.27 粗骨料有机质含量试验

3.27.1 本试验用于测试天然粗骨料（粒径小于 20mm）被有机质污染程度。

3.27.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 天平：分度值不大于 1g 一台，分度值不大于 0.01g 一台；

2) 玻璃量筒：100mL、250mL、1000mL；

3) 1000mL 烧杯；

4) 20mm 方孔试验筛；

5) 辅助器具：玻璃棒等。

2 试剂与 3.14 节相同。

3.27.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取有代表性的（5~20）mm 粒级的风干粗骨料约 1000g。

2 将试样装入 1000mL 量筒中至 600mL 处，然后注入 3% 的氢氧化钠溶液至 800mL 处，经剧烈摇动后静置 24h。

3 用与盛装试样相同的玻璃量筒（颜色一致）盛装标准溶液，比较试样上部溶液和标准溶液的颜色，拍照作为试验原始记录。

3.27.4 试验结果评定应按以下规定执行。

1 如试样上部溶液的颜色浅于标准溶液，则表示试样有机质含量合格。

2 如两种溶液的颜色接近，则将试样（包括上部溶液）全部倒入烧杯中，放在（60~70）℃的水浴锅中加热（2~3）h，然后再与标准溶液比色。

3 如溶液的颜色深于标准色，则应按下法作进一步检测：取适量粗骨料分大致相等的两份，其

中一份用 3%氢氧化钠溶液洗除有机杂质，再用清水淘洗干净，直至用比色法试验时，试样上部溶液的颜色浅于标准色。然后分别用洁净粗骨料和原状粗骨料，与相同的水泥和细骨料，按照相同的配合比(按附录 A 进行配合比设计，其中水泥用量 330kg/m³，砂率 36%，用水量应控制混凝土坍落度为 70mm~90mm，以洁净粗骨料混凝土的用水量为准，不掺外加剂)，拌制混凝土测定 28d 抗压强度。当原状粗骨料与洁净粗骨料的混凝土强度之比不小于 0.95 时，此粗骨料仍可使用，否则应判定粗骨料有机质含量不合格。

3.28 粗骨料氯离子含量试验

3.28.1 本试验用于测定粗骨料中的氯离子含量。

3.28.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 天平：分度值不大于 1g。
- 2) 秤：分度值不大于 0.01kg 一台，分度值不大于 0.1kg 一台。
- 3) 辅助器具：塑料桶（带盖，不同容积若干个）、钢制搅拌器或滚筒等。
- 4) 其他同 3.18 节。

2 试剂同 3.18 节。

3.28.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按照表 3.28.3 规定的质量，取有代表性风干粗骨料，在 (105±5)℃ 的烘箱中烘至恒量，冷却至室温。将粒径大于 20mm 的骨料全部破碎（避免过分研磨）后过 20mm 筛，搅拌均匀后，再用四分法称取约 2kg 试样（G，精确到 1g）两份，按下述步骤分别进行测试。

表 3.28.3 粗骨料氯离子含量试验取样质量表

粗骨料最大粒径 (mm)	20	40	80	150 (120)
最少取样质量 (kg)	1	5	40	200 (120)

2 将试样装入 5L 容器，注入约 1 倍质量的蒸馏水（V_w，精确到 1mL），密封后用振动器或滚筒连续洗涤 60min。

3 静置 20min 后，取上部约 100mL 澄清溶液用中速滤纸过滤，然后用移液管吸取 50mL 滤液，后续步骤按照 3.18 节的规定进行。

3.28.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 粗骨料中氯离子含量按照公式 (3.28.4) 计算。

$$Q_{Cl} = \frac{C_{AgNO_3}(V_1 - V_2) \times 0.0355 \times 10}{G} \times \frac{V_w}{50} \times 100\% \quad (3.28.4)$$

式中 Q_{Cl} —— 粗骨料氯离子含量；

C_{AgNO_3} —— 硝酸银标准溶液的浓度，mol/L；

V_i —— 样品滴定时消耗的硝酸银标准溶液的体积，mL；

V_2 —— 空白试验时消耗的硝酸银标准溶液的体积, mL;

G —— 试样质量, g;

0.0355 —— 换算系数;

V_w —— 浸泡试样所加蒸馏水的体积, mL。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.01%)。

3.29 粗骨料针片状颗粒含量试验

3.29.1 本试验用于测定粗骨料中针状及片状颗粒的总含量。

3.29.2 仪器设备应包括以下几种。

1 天平: 分度值不大于 1g。

2 秤: 分度值不大于 0.01kg 一台, 不大于 0.1kg 一台。

3 试验筛: 筛孔尺寸为 150 (120) mm、80mm、63mm、40mm、31.5mm、25mm、20mm、16mm、5mm 的方孔筛。

4 针状规准仪和片状规准仪, 见图 3.29.2。针状规准仪基板应平直无弯曲锈蚀, 规准柱固定牢固无松动, 无明显倾斜和磨损。片状规准仪规准板应平直无弯曲锈蚀, 规准孔均匀分布在规准板上, 孔壁平直光滑, 两端为圆弧形, 其圆弧直径分别为各孔宽度。对于按照 GB/T 14685 生产的粗骨料, 宜使用其规定的针状规准仪和片状规准仪, 以及卡尺卡口宽度规定值进行试验。

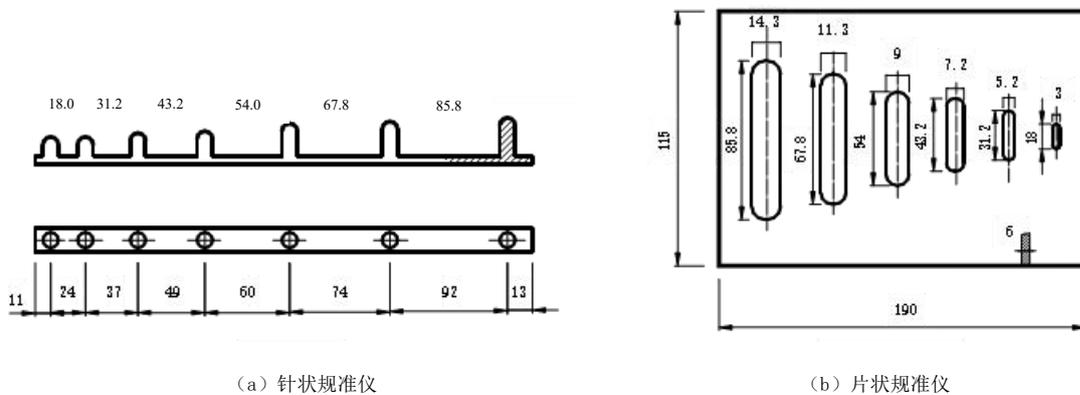


图 3.29.2 针片状规准仪 (单位: mm)

5 卡尺: 分度值不大于 0.1mm。

6 辅助器具: 瓷盘、料斗等。

3.29.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取有代表性的适量风干单粒级粗骨料, 按照表 3.29.3-1 规定的质量称取试样 (G_{0i} , 小于 1kg 精确到 0.1g, 1kg~10kg 精确到 0.01kg, 不小于 10kg 精确到 0.1kg, 下同), 再按照表 3.29.3-2 和 3.29.3-3 给出的细分粒级尺寸再次筛分, 然后按下述步骤分别进行测试。

2 粒径不大于 40mm 的粗骨料, 按照表 3.29.3-2 所规定的细分粒级, 用规准仪逐粒对试样进行

鉴定。颗粒最大尺寸大于针状规准仪上相应间距的，为针状颗粒；颗粒最小尺寸小于片状规准仪上相应孔宽的，为片状颗粒。

表 3.29.3-1 粗骨料针片状颗粒含量试验取样质量表

粒级代号 i	a	b	c	d
骨料粒级 (mm)	5~20	20~40	40~80	80~150 或 120
最少取样质量 (kg)	2	10	20	40
注：每粒级至少 100 个骨料颗粒。				

表 3.29.3-2 粗骨料（粒径不大于 40mm）的细分粒级及相应的规准仪间距或孔宽

粒级代号 i	a1	a2	a3	b1	b2	b3
细分粒级 (mm)	5~10	10~16	16~20	20~25	25~31.5	31.5~40
针状规准仪上 规准柱的间距 (mm)	18.0	31.2	43.2	54.0	67.8	85.8
片状规准仪上 规准孔的孔宽 (mm)	3.0	5.2	7.2	9.0	11.3	14.3

3 粒径大于 40mm 的粗骨料，可用卡尺鉴定针、片状颗粒，卡尺卡口的设定宽度应符合表 3.29.3-3 的规定。

表 3.29.3-3 粗骨料（粒径大于 40mm）的细分粒级及相应的卡尺卡口的设定宽度

粒级代号 i	c1	c2	d
细分粒级 (mm)	40~63	63~80	80~150 或 120
鉴定针状颗粒的卡口宽度 (mm)	123.6	171.6	276.0 或 240.0
鉴定片状颗粒的卡口宽度 (mm)	20.6	28.6	46.0 或 40.0

4 按照表 3.29.3-1 给出的粗骨料粒级，汇总各细分粒级挑出的针状颗粒和片状颗粒，称出其总质量 (G_1)。

3.29.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 各粒级试样中针片状颗粒含量按照公式 (3.29.4-1) 计算。

$$Q_{ni} = \frac{G_i}{G_{0i}} \times 100\% \quad (3.29.4-1)$$

式中 Q_{ni} —— i 粒级试样中针片状颗粒含量；

G_1 —— i 粒级试样中针状颗粒和片状颗粒总质量，g；

G_{0i} —— i 粒级试样质量，g。

2 级配粗骨料中针片状颗粒总含量可按照公式 (3.29.4-2) 计算（修约间隔 1%）。

$$Q_n = \sum R_i Q_{ni} \quad (3.29.4-2)$$

式中 Q_n —— 粗骨料中针片状颗粒总含量；

R_i —— i 粒级试样在粗骨料中的配合比例。

3.30 粗骨料超逊径颗粒含量和中径筛余率试验

3.30.1 本试验用于测定单粒级粗骨料的超径颗粒含量、逊径颗粒含量和中径筛余率。

3.30.2 仪器设备应包括以下几种。

1 秤：分度值不大于 0.01kg 一台，分度值不大于 0.1kg 一台。

2 试验筛：均为方孔筛，筛孔尺寸要求见表 3.30.2。超逊径试验可以采用超逊径筛、原孔筛，以及筛孔尺寸与骨料粒级上下限粒径相同的试验筛（称为粒级试验筛），其中原孔筛可用粒级试验筛替代。按照 GB/T 14685 生产的粗骨料，宜使用对应的粒级试验筛进行超逊径试验。

注：原孔筛，是指与骨料生产系统所用筛网具有相同筛孔尺寸的试验筛。

表 3.30.2 粗骨料超逊径试验和中径筛余试验用筛尺寸表

骨料粒级 (mm)	5~20		20~40		40~80		80~150 (120)	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限	下限	上限
超逊径筛筛孔尺寸 (mm)	4	23	17	47	33	93	67	175(140)
粒级试验筛筛孔尺寸 (mm)	5	20	20	40	40	80	80	150(120)
中径筛筛孔尺寸 (mm)	10		30		60		115 (100)	

3.30.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取有代表性的适量风干单粒级粗骨料，翻拌均匀后，按照表 3.30.3 规定的质量称取试样 (G_{0i} ，精确到 0.1kg，下同)，按下述步骤分别进行测试。

2 用表 3.30.2 规定的试验筛筛分试样，并分别称出超径颗粒和逊径颗粒的质量 (G_{1i} 、 G_{2i})。

表 3.30.3 粗骨料超逊径颗粒含量试验取样质量表

粗骨料粒级 (mm)	5~20	20~40	40~80	80~150 (120)
最少取样质量 (kg)	20	30	40	50

3 将筛分后的各粒级试样，再用对应的中径筛筛分，并称出中径筛上的筛余颗粒质量 (G_{3i})。

3.30.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 粗骨料中超径或逊径颗粒含量按照公式 (3.30.4-1) 计算 (修约间隔 1%)。

$$Q_e = \frac{G_i}{G_0} \times 100\% \quad (3.30.4-1)$$

式中 Q_e —— 粗骨料超径或逊径颗粒含量；

G_0 —— 试样质量，kg；

G_i —— 试样中超径颗粒质量 (G_1) 或逊径颗粒质量 (G_2)，kg。

2 粗骨料的中径筛余率按照公式 (3.30.4-2) 计算 (修约间隔 1%)。

$$Q_m = \frac{G_3 + G_1}{G_0} \times 100\% \quad (3.30.4-2)$$

式中 Q_m —— 粗骨料的中径筛余率；

G_3 —— 中径筛筛余的试样颗粒质量，kg。

3 粗骨料的超径或逊径颗粒含量试验结果应注明所使用的试验筛种类。可用粒级试验筛替代原孔筛进行骨料品质评定。

3.31 粗骨料软弱颗粒含量试验

3.31.1 本试验用于测定天然或人工粗骨料（粒径不大于 40mm）中软弱颗粒的含量。

3.31.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 天平：分度值不大于 1g。
- 2 试验筛：筛孔尺寸为 5mm、10mm、20mm、40mm 的方孔套筛。
- 3 加压器具：压力机，或其他有压力示值的加压器具。
- 4 辅助器具：盛水容器、金属托盘、毛刷等。

3.31.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取有代表性适量风干粗骨料（粒径不大于 40mm），用 10mm 筛将（5~20）mm 粒级骨料细分，然后每细分粒级取样 100 粒（应避免针片状颗粒）作为试样，将试样浸水 8h 以上。

2 取出后用拧干的湿毛巾擦去颗粒表面水膜，分别按细分粒级称出 100 粒试样总质量（ G_{0i} ，精确到 1g，下同）。试验过程中加压前后都应注意用湿毛巾裹紧骨料以免失水。

表 3.31.3 粗骨料粒级与对应的加压荷载表

粒级代号 i	a1	a2	b
细分粒级 (mm)	5~10	10~20	20~40
加压荷载 (kN)	0.15	0.25	0.34

3 按照表 3.31.3 规定的各细分粒级的加压荷载，在加压器具上逐颗进行加压。使用压力机或其他有压力示值的器具加压时应轻柔，以避免压头对试样颗粒的冲击破坏。被压碎的颗粒即为软弱颗粒，将其抛弃。被压碎的颗粒指有明显破损的颗粒，不包括轻微掉角的颗粒。分别按细分粒级称出剩下的未破碎颗粒的总质量（ G_i ）。

3.31.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 试样中软弱颗粒含量按照公式（3.31.4-1）计算。

$$Q_{si} = \frac{G_{0i} - G_i}{G_{0i}} \times 100\% \quad (3.31.4-1)$$

式中 Q_{si} —— i 细分粒级试样软弱颗粒含量；

G_{0i} —— i 细分粒级试样中 100 颗粒总质量，g；

G_i —— i 细分粒级试样中未破碎坚硬颗粒总质量，g。

2 （5~20）mm 骨料中软弱颗粒含量按照公式（3.31.4-2）计算。

$$Q_{f1} = Q_{sa1} \times R_{a1} + Q_{sa2} \times R_{a2} \quad (3.31.4-2)$$

式中 Q_{f1} —— （5~20）mm 粗骨料软弱颗粒含量；

Q_{sa1} 、 Q_{sa2} —— 分别为（5~10）mm、（10~20）mm 细分粒级试样的软弱颗粒含量；

R_{a1} 、 R_{a2} —— 分别为（5~10）mm、（10~20）mm 细分粒级试样在（5~20）mm 试样中的配合比例。

3 （5~40）mm 骨料中软弱颗粒总含量按照公式（3.31.4-3）计算（修约间隔 1%）。

$$Q_{f2} = Q_{f1} \times R_a + Q_{sb} \times R_b \quad (3.31.4-3)$$

式中 Q_{f2} —— （5~40）mm 粗骨料软弱颗粒总含量；

Q_{sb} —— （20~40）mm 粗骨料软弱颗粒含量；

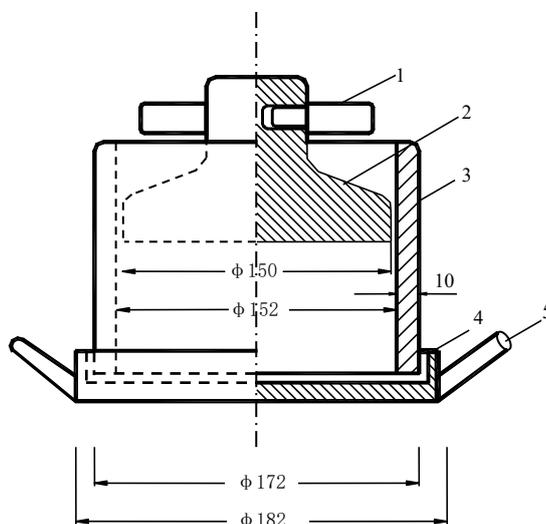
R_a 、 R_b —— 分别为（5~20）mm、（20~40）mm 粒级试样在（5~40）mm 试样中的配合比例。

3.32 粗骨料压碎值试验

3.32.1 本试验用于测定粗骨料抵抗压碎的能力。

3.32.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 压力机：压力不小于 300kN。
- 2 压碎值测定仪：结构示意图见图 3.32.2。
- 3 天平：分度值不大于 1g。
- 4 试验筛：筛孔尺寸分别为 20mm、10mm、2.5mm 的方孔筛。
- 5 辅助器具：金属托盘、毛刷等。



1—压头把手；2—加压头；3—圆模；4—底盘；5—底盘把手

图 3.32.2 压碎值测定仪（单位：mm）

3.32.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性的（5~20）mm 粒级风干粗骨料，用 10mm 和 20mm 的筛，选取粒径大于 10mm 而小于 20mm 的粗骨料，并剔除其中的针片状颗粒。称取试样两份，每份约 3kg（ G_0 ，精确到 1g，下同），按下述步骤分别进行测试。当粗骨料由不同种类岩石组成时，应分别选样进行试验。对粒径大于 20mm 的天然粗骨料，应分粒级破碎后再进行试验。

2 将压碎值测定仪的圆模置于底盘上，分两层装入试样。每装完一层，一只手按住圆模，另一只手将一边底盘把手提起 20mm，然后松手使其自由落下，两边交替，反复进行至每边提落 25 次。振完后，平整模内试样表面。

3 将装有试样的圆模和底盘放入压力机，盖上加压头，调整加压头平正后，开动试验机在（3~5）min 内均匀地加荷到 200kN，然后卸荷。取下压碎值测定仪，移去加压头，倒出试样，用 2.5mm 的筛筛除被压碎的细粒，并称出剩留在筛上的试样质量（ G_1 ）。

3.32.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 粗骨料压碎值按照公式 (3.32.4) 计算。

$$Q_c = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \times 100\% \quad (3.32.4)$$

式中 Q_c —— 粗骨料压碎值；

G_0 —— 试样质量，g；

G_1 —— 压碎后筛余试样质量，g。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。

3.33 岩石抗压强度及软化系数试验

3.33.1 本试验用于测定水饱和状态下岩石的抗压强度及软化系数。

3.33.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 压力机：压力不小于 1000kN。
- 2 卡尺：分度值不大于 0.1mm。
- 3 辅助器具：钻石机或切石机、磨石机、角尺等。

3.33.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 用钻石机和切石机从岩石中制取两组直径与高均为 50mm 的圆柱体试件，每组六个。对有显著层理的岩石，应用切石机制作边长 50mm 的立方体试件，组数增至四组。试件与压力机接触面应用磨石机磨平，并保证对应两承压面互相平行，并垂直于侧面（圆柱体试件）或相邻的面（立方体试件）。

2 用卡尺测量试件的尺寸（精确到 0.1mm）。对于圆柱体试件，取顶面和底面上相互垂直的两个直径平均值分别作为顶面、底面直径，取顶面积和底面积的平均值作为计算用的截面积。对于立方体试件，取顶面或底面上相互平行两个边的平均长度作为长和宽，取顶面积和底面积的平均值作为计算用的截面积（ A ，修约间隔为 1mm^2 ）。

3 将一组试件（具有显著层理岩石的试件需两组）置于水池中浸泡 48h，水面应高出试件顶面 50mm 以上。其余试件为气干状态。

4 将浸水饱和的试件取出，擦干表面水分，立即放在压力机上测定破坏荷载（ P ，精确 0.01kN），加压速度为（0.5~1.0）MPa/s。对有显著层理岩石的立方体试件，加压方向一组与层理方向垂直，一组与层理方向平行。在同一条件下，测定气干试件的破坏荷载。

3.33.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 岩石抗压强度按照公式 (3.33.4-1) 计算。

$$f = \frac{P}{A} \times 1000 \quad (3.33.4-1)$$

式中 f —— 岩石抗压强度，MPa；

P —— 破坏荷载，kN；

A —— 试件的截面积， mm^2 。

2 对圆柱体试件，从每组六个试件的抗压强度测值中去掉最大值和最小值，取其余四个测值的

平均值作为试验结果(修约间隔 0.1MPa)。对具有显著层理岩石的立方体试件,以垂直于层理及平行于层理的抗压强度的平均值作为试验结果。

4 岩石软化系数按照公式(3.33.4-2)计算(修约间隔 0.01)。

$$K_s = \frac{f}{f_0} \quad (3.33.4-2)$$

式中 K_s —— 岩石软化系数;

f —— 水饱和状态下的岩石抗压强度, MPa;

f_0 —— 气干状态下的岩石抗压强度, MPa。

3.34 粗骨料坚固性试验

3.34.1 本试验用于测定粗骨料对硫酸钠饱和溶液结晶膨胀破坏作用的抵抗能力。

3.34.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备包括以下几种。

- 1) 天平: 分度值不大于 1g。
- 2) 烘箱: 可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。
- 3) 试验筛: 筛孔尺寸为 80mm、40mm、20mm、10mm、5mm 的方孔筛;
- 4) 三角网篮: 采用筛孔尺寸不大于 2.5mm 的铜丝网制成, 分外径 100mm、高 150mm 和外径、高均为 150mm 两种。粒径在 80mm 以上的粗骨料, 用外径及高均为 150mm 的网篮。
- 5) 辅助器具: 盆或桶(容积 50L)、金属托盘等。

2 硫酸钠饱和溶液: 按 3.17 节配制。

3.34.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性粗骨料, 用水洗净后在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒量, 取出冷却至室温, 用 10mm 筛将 (5~20) mm 粒级骨料细分, 再按照表 3.34.3 的规定质量称取各粒级试样 (G_{0i} , 精确到 1g, 下同)。

3 将称取的各粒级试样分别装入三角网篮, 按 3.17 节方法进行试验。最后用筛孔尺寸为各粒级下限的试验筛过筛, 称出各粒级试样的筛余量 (G_i)。

表 3.34.3 粗骨料坚固性试验各级试样取样质量表

粒级代号 i		a1	a2	b	c	d
细分粒级 (mm)		5~10	10~20	20~40	40~80	80~150 (120)
各级试样 最少取样质量 (g)	最大粒径 ≤ 80mm	500	1000	1500	2000	/
	最大粒径 150 (或 120)mm	500	1250	1250	2000	2500

3.34.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 各粒级试样质量损失率按照公式(3.34.4-1)计算。

$$Q_{si} = \frac{G_{0i} - G_i}{G_{0i}} \times 100\% \quad (3.34.4-1)$$

式中 Q_{si} —— i 粒级试样质量损失率;

G_{0i} —— i 粒级试样质量, g;

G_i —— i 粒级试样在试验后的筛余量, g。

2 粗骨料的总质量损失率可按照公式 (3.34.4-2) 计算 (修约间隔 0.1%)。

$$Q_s = \sum R_i Q_{si} \quad (3.34.4-2)$$

式中 Q_s —— 粗骨料的总质量损失率;

R_i —— 为 i 粒级试样在粗骨料中的配合比例。

3.35 粗骨料抗磨损试验

3.35.1 本试验用于检测粗骨料抵抗磨损、冲击及碾轧粉碎的综合性能。

3.35.2 仪器设备应包括以下几种。

1 磨耗机: 利用钢筒旋转时搁板将试样及钢球卷起, 并立即掉到钢筒另一边, 而形成磨损、冲击及碾轧粉碎作用。其主要部件为两端封闭的空心圆钢筒, 内径为 (710±5) mm, 内腔长为 (508±5) mm。两个短轴连接在钢筒的两端, 应保证钢筒能绕水平轴线旋转, 其斜度偏差应小于 1:100。筒上应开有装料口, 并配防尘盖和固定装置, 盖板与筒内壁平齐。筒内壁装配有可卸式搅料板。应能保证钢筒旋转时转速均匀稳定, 无空行程及滑动, 钢筒转速为 (30~33) r/min。

2 磨料: 采用直径为 (46~48) mm 钢球, 每个钢球质量在 (390~445) g 之间。也可用直径为 46.0mm、46.8mm 和 47.6mm 的钢球, 每个钢球质量分别约 400g、420g 和 440g, 以便于组合成符合要求的总质量。

3 试验筛: 筛孔尺寸为 80mm、60mm、50mm、40mm、30mm、20mm、10mm、5mm、1.7mm 的方孔套筛。

4 天平: 分度值不大于 1g。

5 烘箱: 可控制温度在 (105±5) °C。

6 辅助器具: 金属托盘、毛刷等。

3.35.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取适量有代表性单粒级粗骨料, 冲洗干净, 在 (105±5) °C 烘箱中烘至恒量, 冷却至室温后, 按照表 3.35.3 规定的细分粒级筛分, 按规定的质量取样 (G_{ij} , 精确到 1g, 下同), 并重新混合成粒级试样 ($G_{1i} = \sum G_{ij}$)。

表 3.35.3 抗磨损试验要求汇总表

试样粒级				试样质量		钢球数量 (个)	钢球总质量 (g)	钢筒转数 (转)
粒级 代号 i	粒级尺寸 (mm)	细分粒级尺寸 (mm)	细分粒级 代号 j	取样质量 (g)	总质量 (g)			
a	40~80	60~80	3	2500±50	10000±100	12	5000±25	1000
		50~60	2	2500±50				
		40~50	1	5000±50				

c	20~40	30~40	2	5000±25	10000±50			
		20~30	1	5000±25				
B	5~20	10~20	2	2500±10	5000±10	11	4580±25	500
		5~10	1	2500±10				

2 每次选取一个粒级试样进行磨耗试验。将该粒级全部试样及所需钢球装入钢筒内，紧好盖板，设定好规定转数，开动磨耗机进行试验。

3 停机后，取出试样和钢球，将试样过 1.7mm 筛。再将筛余试样冲洗干净，在 (105±5)℃ 烘箱中烘至恒量，冷却至室温后称出磨耗后试样质量 (G_{2i})。

3.35.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 各粒级粗骨料的磨耗率按照公式 (3.35.4) 计算。

$$Q_{ai} = \frac{G_{1i} - G_{2i}}{G_{1i}} \times 100\% \quad (3.35.4)$$

式中 Q_{ai} ——i 粒级粗骨料磨耗率；

G_{1i} ——i 粒级试样试验前质量，g；

G_{2i} ——i 粒级试样磨耗后质量，g。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1%)。当两次测值相差大于平均值的 5% 时，应重做试验。

3 粗骨料抗磨耗质量评定标准：a、c 粒级的试样经 1000 转旋转后，或 B 粒级的试样经 500 转旋转后，磨耗率不应超过 40%。否则，应判定粗骨料磨耗坚固性不合格。

3.36 骨料碱活性检验 (岩相法)

3.36.1 本试验用于鉴定骨料的岩石种类和矿物成分，以及检验碱活性骨料的种类和含量。

3.36.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验筛：筛孔尺寸分别为 150 (120) mm、80mm、40mm、20mm、5mm、2.5mm、1.25mm、0.63mm、0.315mm、0.16mm 的方孔套筛，以及筛盖和底盘；

2 秤：分度值不大于 0.01kg 一台，不大于 0.1kg 一台。

3 天平：分度值不大于 1g。

4 实体显微镜、偏光显微镜。

5 辅助器具：切片机、磨片机、镶嵌机、金刚砂 (150[#]、400[#]、600[#]、800[#])、树胶 (如冷杉胶等)、载玻片、盖玻片、地质锤、砧板及酒精灯等。

3.36.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取样应按以下步骤进行。

1) 取适量有代表性粗骨料，用水洗净风干后，按 3.20 节方法进行筛分，然后按照表 3.36.3-1 规定的质量称取试样。为方便操作，大于 50kg 骨料宜分多次称量。

2) 取约 2kg 有代表性细骨料，按 3.10 节方法淘洗掉粒径小于 0.08mm 的颗粒，在 (105±5)℃

烘箱中烘干，冷却至室温后按 3.1 节方法筛分，然后按照表 3.36.3-2 规定的质量称取试样。

表 3.36.3-1 骨料碱活性检验（岩相法）粗骨料取样质量表

粗骨料粒级 (mm)	取样质量 (kg)	备注
大于 150	视需要定	1. 当工程需要使用时大于 150mm 的颗粒，应按照 (80~150) mm 粒级取样进行试验 2. 每粒级试样应至少包含 300 颗骨料。
80~150 (120)	240	
40~80	150	
20~40	50	
5~20	10	

表 3.36.3-2 骨料碱活性检验（岩相法）细骨料取样质量表

试样粒径 (mm)	取样质量 (g)	备注
2.5~5.0	100	每粒级试样应至少包含 300 颗骨料。
1.25~2.5	50	
0.63~1.25	25	
0.315~0.63	10	
0.16~0.315	10	
小于 0.16	5	

2 粗骨料的鉴定应按以下步骤进行。

- 1) 将试样逐粒进行肉眼鉴定。必要时可将颗粒放在砧板上用地质锤击碎（注意应使岩石碎片损失最小），观察颗粒新鲜断口。
- 2) 鉴定后按下列准则分类。
 - a) 岩石名称及物理性质，包括大体上的矿物成分、风化程度、有无裂隙，以及坚硬性、有无包裹体和断口形状等；
 - b) 化学性质，分为在混凝土中可能或不能产生碱—骨料反应两种。粗骨料鉴定时可参考表 3.36.3-3；
 - c) 对初步确定为碱活性骨料的岩石颗粒，应制成薄片，在显微镜下鉴定矿物组成、结构等，并测定其隐晶质、玻璃质成份的含量。

表 3.36.3-3 常见碱活性岩石

岩石类别	岩石名称	碱活性矿物
火成岩	流纹岩 安山岩 松脂岩 珍珠岩 黑曜岩	酸性—中性火山玻璃、隐晶—微晶石英、鳞石英、方石英
	花岗岩 花岗闪长岩	应变石英、微晶石英
沉积岩	火山熔岩 火山角砾岩 凝灰岩	火山玻璃
	石英砂岩 硬砂岩	微晶石英、应变石英 微晶石英、应变石英、喷出岩及火山碎屑岩屑

	硅藻土 碧玉 燧石	蛋白石 玉髓、微晶石英 蛋白石、玉髓、微晶石英
	碳酸盐岩	细粒泥质灰质白云岩或白云质灰岩、硅质灰岩或硅质白云岩
变质岩	板岩 千枚岩	玉髓、微晶石英
	片岩 片麻岩	微晶石英、应变石英
	石英岩	应变石英

3 细骨料鉴定时，将试样放在体视显微镜下挑选，鉴别出碱活性骨料的种类及含量。小粒径砂在体视显微镜下挑选有困难时，需在镶嵌机上压型（用树胶或环氧树脂胶结）制成薄片，在偏光显微镜下鉴定。

3.36.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 如对粗骨料进行全分析，需按照表 3.36.4-1 列出各种岩石的成分及其含量；如只分析碱活性骨料，则按照表 3.36.4-2 列出每种碱活性骨料的名称及其含量。细骨料只分析碱活性骨料的名称和总含量，鉴定结果应按照表 3.36.4-3 格式列出。

表 3.36.4-1 粗骨料全分析岩相鉴定表

岩石名称	占不同粒级粗骨料的质量百分数 (%)				岩相描述 (颜色、硬度、风化程度等)	物理性质 (以优、良劣评定)	化学性质 (注明有害或无害)
	5~20 (mm)	20~40 (mm)	40~80 (mm)	80~150 (或 120) (mm)			

表 3.36.4-2 粗骨料中碱活性骨料鉴定结果表

碱活性骨料名称	占不同粒级粗骨料质量百分数 (%)			
	5~20 (mm)	20~40 (mm)	40~80 (mm)	80~150 (或 120) (mm)

表 3.36.4-3 细骨料中碱活性骨料鉴定结果表

颗粒级配		碱活性骨料 名称	碱活性骨料含量 (%)		
粒径 (mm)	分计筛余 量 (%)		占本级样品	占总样品	合计
2.5~5.0					
1.25~2.5					
0.63~1.25					
0.315~0.63					
0.16~0.315					
小于 0.16					

2 根据鉴定结果，如骨料含有碱活性成分时，应采用其他方法作进一步检验。

3.37 碳酸盐骨料的碱活性检验（岩石柱法）

3.37.1 本试验采用岩石柱法测量碳酸盐骨料试件在碱溶液中的长度变化，评定碳酸盐岩石的潜在碱活性。

3.37.2 仪器设备及试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 钻机：配Φ9mm圆筒钻头。
- 2) 试件养护瓶：要求制瓶材料不与碱溶液起反应，能用盖子密闭，以免溶液变质和浓度改变。可用厚度不小于0.5mm的聚氯乙烯瓶。
- 3) 测长仪：有效测距（25~50）mm，分度值不大于0.01mm，应配有长度在有效测距范围内的量杆。比长仪应符合SL 137的规定。亦可采用外径千分尺等测长仪器。
- 4) 辅助器具：锯石机、磨片机、烧杯、玻璃棒等。

2 试剂：氢氧化钠溶液，将（40±1）g的氢氧化钠（化学纯）溶于1L蒸馏水中制备。

3.37.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 取样：为了取得有代表性的试件，应在同块岩石具有不同岩性的方向上取样。如岩石层理不清，则应在三个相互垂直的方向上各取一个试件。岩样的大小应能满足试件加工要求。

2 试件加工：用钻机、锯石机、磨片机加工试件，试件为圆柱体，直径（9±1）mm，长（35±5）mm。加工时应避免试件表面由于磨光或其他某些作用而变质，影响碱溶液进入岩样的速率。

3 试件基准长度测量：试件养护和测长应在（20±2）℃的恒温室内进行。试件编号后，放入盛有蒸馏水的瓶中，每隔24h取出擦干表面水分，用测长仪测量试件长度，直至前后两次测得的长度变化率之差不超过0.02%时为止（需2d~5d）。取最后一次测得的试件长度作为基准长度（ L_0 ，精确到0.01mm，下同）。

4 试件的养护和长度测量：将测完基长的试件浸入盛有1mol/L氢氧化钠溶液的瓶中（液面应超过试件顶面10mm以上，每个试件的平均液量至少50mL；同一个瓶中不应浸泡不同品种的试件；溶液每六个月更换一次），盖严瓶盖后，置于（20±2）℃的恒温室中保存。达到测量龄期时，从瓶中取出试件，在蒸馏水中洗净，然后将表面水擦干，进行测长（ L_t ）。测量龄期从试件泡入碱液时算起，在浸泡1d、3d、7d、14d、21d、28d后取出试件测长，以后每28d测一次，如果一年以后需继续试验，则每12周测一次。每个试件测长时的方向，应自始至终保持一致。每次测量前，均应先测量杆长度，以便校正测值。测量试件时，应重复测量一次，两次测值偏差不应超过±0.02%。

5 每次测量时，应仔细观察试件的外观特征。如有开裂、弯曲、断裂等，应作记录，并停止该试件的检测。

3.37.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 试件长度变化率按照公式（3.37.4）计算。

$$\epsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (3.37.4)$$

式中 ε_t —— 碱液浸泡 t 天后的试件长度变化率（正值表示膨胀，负值表示收缩）；

L_t —— 碱液浸泡 t 天后的试件长度，mm；

L_0 —— 试件的基准长度，mm。

- 2 取三个试件长度变化率的最大值作为试验结果（修约间隔 0.01%）。
- 3 结果评定应按以下规定执行。
 - 1) 浸泡 84d 时试件膨胀率在 0.10% 以上，或试件有开裂、弯曲、断裂等现象，该岩样应评为具有潜在碱活性危害，不宜作为混凝土骨料；
 - 2) 必要时应按 3.39 节方法检验，以混凝土试验结果作最终评定。

3.38 骨料碱活性检验（砂浆棒快速法）

3.38.1 本试验用于测量砂浆试件在 80℃ 碱溶液中的长度变化，评定骨料是否具有潜在碱-硅反应活性。适合于反应缓慢或只在后期才产生膨胀的骨料。

3.38.2 仪器设备、试剂及防护用品应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 试验筛应符合 3.1 节的规定。
- 2) 天平：分度值不大于 0.1g。
- 3) 试验用砂浆搅拌机：应符合 JG/T 3033 的规定。
- 4) 砂浆棒试模及测头（埋钉）：金属试模，尺寸为 25.4mm×25.4mm×285mm。试模两端正中有一小孔，以便固定测头。测头应由不锈钢制成。
- 5) 养护筒：由耐碱腐蚀和耐高温（80℃）的聚丙烯、聚乙烯或不锈钢制成，可装入三个砂浆棒试件。不应漏水，有密封盖，使外面的水汽不能进入，内部碱溶液的浓度不发生变化。筒内有试件架，可使试件垂直立在筒中。
- 6) 碱骨料试验箱或恒温水浴箱：温度能控制在（80±2）℃；
- 7) 测长仪：有效测距（275~300）mm，分度值不大于 0.01mm。应配备长度在有效测距范围内的量杆。比长仪应符合 SL 137 的规定。亦可采用外径千分尺等测长仪器。
- 8) 辅助器具：钹刀、铁勺、量筒、硬木捣棒（截面为 14mm×13mm，长为 150mm）等。

2 试剂：1mol/L NaOH 溶液，将（40±1）g 的氢氧化钠（化学纯）溶于 1L 蒸馏水中制备，浓度应在（0.99~1.01）mol/L 之间。

3 防护用品：防酸碱的围裙、袖套、手套、胶鞋及面罩等。

3.38.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 砂浆原材料及配合比应按以下规定执行。

- 1) 水泥应采用硅酸盐水泥或基准水泥。用《水泥压蒸安定性试验方法》（GB/T 750）检测，水泥压蒸膨胀率应小于 0.20%。水泥碱含量应为 0.9%±0.1%（以 Na₂O 计，即 Na₂O+0.658K₂O），当水泥碱含量较低时，可外加 NaOH 调整。

- 2) 细骨料试样制备。取适量有代表性细骨料，按 3.1 节方法进行筛分，再按照表 3.38.3 规定的质量配制试样。所制试样应洗净、烘干，贮存于密封的容器中备用。
- 3) 粗骨料如为单矿物岩石，可按前述方法取样破碎后配制细骨料试样；如含有多种矿物岩石，可根据岩相鉴定结果，挑出活性和非活性两组岩石，分别配制细骨料试样。也可按粒级分选和制样，最后再按粗骨料的实际配合比例混合，从而配制细骨料试样。

表 3.38.3 砂浆棒快速法试验试样配料表

细分粒级 (mm)	5~2.5	2.5~1.25	1.25~0.63	0.63~0.315	0.315~0.16	合计
骨料质量百分率 (%)	10	25	25	25	15	100
一组试件所需试样质量 (g)	90	225	225	225	135	900

- 4) 砂浆配合比。砂浆中水泥与细骨料的质量比为 1:2.25，水灰比为 0.47。使用砂浆棒试模制作一组三个试件，共需水泥 400g、细骨料试样 900g、水 188g。

2 试件制作应按以下步骤进行。

- 1) 成型前 24h，将所用材料（水泥、细骨料试样、拌和水）放入温度为 (20 ± 2) °C 恒温室中。
- 2) 制备砂浆时，先将水泥与细骨料试样倒入搅拌锅内，开动搅拌机。拌和 5s 后徐徐加水，30s 加完，自开动机器起搅拌 3min 停机。将粘在叶片上的砂浆刮下，取下搅拌锅。
- 3) 将砂浆分两层装入试模内，每层用捣棒捣 20 次（并注意测头周围应填实），捣完用钹刀刮除多余砂浆，抹平表面。试件成型 4h 后再次抹面并编号。

3 试件的养护及长度测量应按以下步骤进行。

- 1) 试件成型完毕后，连模一起放入温度为 (20 ± 2) °C、相对湿度 95% 以上的养护箱或标准养护室中。养护 (24 ± 2) h 后脱模，立即在 (20 ± 2) °C 的恒温室中用测长仪测量试件的初始长度（作为基准长度的参照值）。每次测量前，均应先测量量杆长度，以便校正测值。
- 2) 测量完毕，将试件完全浸泡在装有自来水的密封的养护筒中，放入温度保持在 (80 ± 2) °C 的恒温水浴箱中 24h。一个筒中应装入同一组试件。
- 3) 将养护筒从恒温水浴箱中取出，打开筒盖，将试件从筒中取出，用毛巾将试件表面和两端测头擦干，尽快测量试件的基准长度 (L_0)。试件从溶液中取出到测量完毕应在 (15 ± 5) s 内完成。
- 4) 一组试件测量完后，立即装入盛有 1mol/L NaOH 溶液的养护筒中，试件应完全浸泡在溶液中，密封好养护筒盖子，再将放回温度为 (80 ± 2) °C 的恒温水浴箱中。
- 5) 其后，在碱液中浸泡 3d、7d、14d 时取出试件测长 (L_t)。测长龄期从试件泡入碱液时算起，应准确至 1h。
- 6) 每次测量时，应仔细观察试件的外观特征，如有开裂、弯曲等，应作记录，并停止该组试件的检测。

3.38.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 试件长度变化率按照公式 (3.38.4) 计算。

$$\varepsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0 - 2\Delta} \times 100\% \quad (3.38.4)$$

式中 ε_t —— 碱液浸泡 t 天后的试件长度变化率（正值表示膨胀，负值表示收缩）；

L_t —— 碱液浸泡 t 天后的试件长度，mm；

L_0 —— 试件的基准长度，mm；

Δ —— 测头的长度，mm。

- 2 以三个试件测值的平均值作为某一龄期的长度变化率（修约间隔 0.01%）。
- 3 结果评定应按以下规定执行。
 - 1) 砂浆棒试件 14d 的膨胀率小于 0.10%，则骨料为非活性骨料；
 - 2) 砂浆棒试件 14d 的膨胀率大于 0.20%，或膨胀率不大于 0.20% 但有开裂、弯曲等现象，则骨料为具有潜在危害性碱—硅反应的活性骨料；
 - 3) 砂浆棒试件 14d 的膨胀率在 0.10% 至 0.20% 之间的，对这种骨料应结合现场记录、岩相分析、开展其他的辅助试验、试件检测的时间延至 28d 的膨胀率等综合评定。
 - 4) 必要时应按 3.39 节方法检验，以混凝土试验结果作最终评定。

3.39 骨料碱活性检验（混凝土棱柱体法）

3.39.1 本试验用于测量混凝土试件在 38℃ 及潮湿条件下的长度变化，评定水泥中的碱与骨料反应所引起的膨胀是否具有潜在危害性。本试验适用于骨料碱—硅反应和碱—碳酸盐反应活性的检验。

3.39.2 仪器设备、试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 试验筛：筛孔尺寸为 20mm、15mm、10mm、5mm 的方孔套筛。
- 2) 秤：分度值不大于 0.01kg。
- 3) 天平：分度值不大于 0.1g。
- 4) 振动台：频率（50±3）Hz，空载时台面中心振幅（0.5±0.1）mm。
- 5) 棱柱体法试模和测头（埋钉）：钢制，模腔尺寸为 75mm×75mm×275mm。试模两端正中有一小孔，以便固定测头埋入混凝土。测头用不锈钢制成，直径（5~7）mm，长 25mm。
- 6) 测长仪：有效测距（275~300）mm，分度值不大于 0.01mm。应配有长度在有效测距范围内的量杆。比长仪应符合 SL 137 的规定。亦可采用外径千分尺等测长仪器。
- 7) 养护筒：由耐磨材料（如塑料、不锈钢）制成，不应漏水，能密封。在筒底可存储约 20mm 深的水，筒内应有试件架使试件垂直立在筒中，底部不与水接触。
- 8) 碱骨料试验箱或高温养护室：温度应控制在（38±2）℃；
- 9) 辅助器具：钢板、铁锹、捣棒、抹刀、烧杯、玻璃棒等。

2 试剂：10%NaOH 溶液。

3.39.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 混凝土原材料及配合比应按以下规定执行。

- 1) 水泥应使用基准水泥或硅酸盐水泥，水泥碱含量宜为 $0.9\% \pm 0.1\%$ (以 Na_2O 计，即 $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$)。通过外加 10%NaOH 溶液，使试验用水泥含碱量达到 1.25%。
 - 2) 骨料应按以下原则选取和制备。
 - a) 如果试验用来评价细骨料的活性，则应选用已通过试验证实为非活性的粗骨料；
 - b) 如果试验用来评价粗骨料的活性，则应选用已通过试验证实为非活性的细骨料。细骨料的细度模数为 2.7 ± 0.2 ；
 - c) 如果工程用的骨料为同一品种的材料，则应用该细骨料、粗骨料来评价活性；
 - d) 试验用粗骨料应筛分或破碎为三个粒级： $(5 \sim 10)$ mm、 $(10 \sim 15)$ mm 和 $(15 \sim 20)$ mm，各取 1/3 等量混合而成。
 - 3) 混凝土配合比应按以下原则设计。
 - a) 单位体积混凝土中水泥用量为 (420 ± 10) kg/m^3 ；
 - b) 水灰比为 $0.42 \sim 0.45$ ；
 - c) 粗骨料与细骨料的质量比为 6: 4；
 - d) 除了加 NaOH 调整水泥碱含量外，不应使用其他外加剂。
- 2 试件制作应按以下步骤进行。
- 1) 成型前 24h，应将试验所用材料（水泥、细骨料、粗骨料及拌和水等）放入 (20 ± 5) °C 的拌和间。
 - 2) 一次拌和的混凝土量较少，可在钢板上进行人工拌和。拌和前将钢板及铁锹清洗干净，并保持表面湿润。
 - 3) 将称好的细骨料与水泥倒在钢板上，用铁锹翻拌均匀，再放入称好的粗骨料一起拌和，至少翻拌三次。然后堆成锥形，将中间扒一凹坑，加入拌和用水（外加碱应事先加入水中并搅拌均匀），小心拌和以免水流失，至少翻拌六次。拌和时间从加水完毕时算起，10min 内完成。
 - 4) 将混凝土一次装入试模，用捣棒和抹刀捣实，然后在振动台上振动，使表面泛浆为止。
 - 5) 试件成型后连试模一起送入标准养护室中，在混凝土初凝前 $(1 \sim 2)$ h，对试件进行抹面并编号。
- 3 试件的养护及长度测量应按以下步骤进行。
- 1) 试件养护 (24 ± 4) h 后脱模，并尽快测试件基准长度。脱模时应特别小心不要损坏测头，待测试件应用湿布盖好，以防干燥。
 - 2) 试件基准长度的测量应在 (20 ± 2) °C 的恒温室中进行。每个试件至少重复测试两次，取两次测值的平均值作为该试件的基准长度值 (L_0)。
 - 3) 测量后将试件放入养护筒中，筒底部应有约 20mm 深的水，但试件底部不与水接触。盖严筒盖后，放入 (38 ± 2) °C 的养护室（箱）里养护。
 - 4) 试件的龄期以测定基准长度后算起，测长龄期为 1 周、2 周、4 周、8 周、13 周、18 周、26 周、39 周和 52 周，此后可三个月测一次。每次测量的前一天，应将养护筒从 (38 ± 2) °C

的养护室中取出，放入（20±2）℃的恒温室中，恒温（24±4）h后测长（ L_t ）。测长完毕后，将试件上下调头放回养护筒中，盖好筒盖，放入（38±2）℃养护室中继续养护。

- 5) 每次测量时，应仔细观察试件的外观特征，有无开裂、弯曲、渗出物等，并作记录。如有开裂、弯曲等现象，应停止该组试件的检测。

3.39.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 试件的长度变化率按照公式（3.39.4）计算。

$$\varepsilon_t = \frac{L_t - L_0}{L_0 - 2\Delta} \times 100\% \quad (3.39.4)$$

式中 ε_t —— t 天龄期的试件长度变化率（正值表示膨胀，负值表示收缩）；

L_t —— t 天龄期的试件长度，mm；

L_0 —— 试件的基准长度，mm；

Δ —— 测头的长度，mm。

2 以三个试件测值的平均值作为某一龄期的长度变化率（修约间隔0.01%）。当平均膨胀率小于0.02%时，同一组试件中膨胀率最高值与最低值之差不应超过0.008%；当平均膨胀率不小于0.02%时，同一组试件中膨胀率最高值与最低值之差不应超过平均值的40%。超过上述规定时需查明原因，取相近的两个测值的平均值作为该龄期膨胀率的测定值。

- 3 结果评定应按以下规定执行。

- 1) 当试件一年的膨胀率不小于0.04%时，或有开裂、弯曲等现象，则判定为具有潜在危害性反应的活性骨料；
- 2) 当试件一年的膨胀率小于0.04%，则判定为非活性骨料。

3.40 骨料碱活性抑制措施有效性试验（砂浆棒快速法）

3.40.1 本试验用于测量采取抑制措施的砂浆棒试件在80℃碱溶液中的长度变化，评定抑制措施对具有潜在碱—硅酸反应的活性骨料的有效性。

3.40.2 仪器设备、试剂及防护用品同3.38节。

3.40.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 砂浆原材料及配合比应按以下规定执行。

- 1) 水泥可使用硅酸盐水泥或基准水泥，也可使用工程实际使用的水泥。若使用硅酸盐水泥或基准水泥，压蒸膨胀率的要求、水泥碱含量的要求和调整方法同3.38节。若使用工程水泥，碱含量低于要求数值则按同样方法调整，碱含量高于要求数值可直接使用。掺用掺合料时，应调整水泥中的碱含量到0.9%，而不是将胶凝材料的总碱量调整到0.9%。
- 2) 如掺加掺合料（如粉煤灰、火山灰、粒化高炉矿渣粉、硅粉等）作为抑制措施，其掺量按照工程实际要求确定，掺合料等质量替代水泥。在掺合料和水泥称量好后，需提前人工混合均匀。
- 3) 如掺加外加剂作为抑制措施，其掺量按照工程实际要求确定。若为粉状外加剂，应在外加

剂和水泥称量好后，提前人工翻拌均匀；若为液体外加剂，应在外加剂和水称量好后，将外加剂加入水中混合均匀。

- 4) 细骨料试样制备同 3.38 节的规定。
- 5) 砂浆配合比同 3.38 节的规定。若掺加掺合料，在 3.38 节基准砂浆配合比中，用水泥与掺合料混合料取代水泥。若掺加外加剂，在 3.38 节规定的基准砂浆配合比中加入外加剂，外加剂用量=水泥用量×掺量，应从水量中扣除液体外加剂所含水分。

2 试件制作方法同 3.38 节的规定。同时成型两组试件，一组为基准试件，不掺加掺合料或外加剂；另一组为对比试件，掺加掺合料或外加剂。

3 试件的养护及长度测量方法同 3.38 节的规定。测量龄期延长到 28d。

3.40.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 基准试件和对比试件的膨胀率计算与取值方法同 3.38 节。
- 2 膨胀率降低率按照公式 (3.40.4) 计算 (修约间隔 0.01%)。

$$R_e = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0} \times 100\% \quad (3.40.4)$$

式中 R_e —— 膨胀率降低率；

ε_0 —— 基准试件在 28d 龄期的膨胀率；

ε —— 对比试件在 28d 龄期的膨胀率。

3 结果评定应按以下规定执行。

- 1) 若对比试件在 28d 龄期的膨胀率小于 0.10%，则在试验用掺量下，该掺合料或外加剂对骨料的潜在碱—硅反应活性的抑制效果评定为有效，否则评定为无效；
- 2) 必要时应按 3.41 节方法检验，以混凝土试验结果作最终评定。

3.41 骨料碱活性抑制措施有效性试验 (混凝土棱柱体法)

3.41.1 本试验用于测量采取抑制措施的混凝土试件在 38℃ 温度及潮湿条件下的长度变化，评定抑制措施对具有潜在碱—硅反应活性或碱—碳酸盐反应活性的骨料的有效性。

3.41.2 仪器设备、试剂同 3.39 节。

3.41.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 混凝土原材料及配合比应按以下规定执行。

- 1) 水泥可使用硅酸盐水泥或基准水泥，也可使用工程实际使用的水泥。若使用硅酸盐水泥或基准水泥，水泥碱含量的要求和调整方法同 3.39 节的规定。若使用工程水泥，碱含量低于要求数值则按同样方法调整，碱含量高于要求数值可直接使用。
- 2) 如掺加掺合料 (如粉煤灰、火山灰、粒化高炉矿渣粉、硅粉等) 作为抑制措施，其掺量按照工程实际要求确定，掺合料等质量替代水泥。在掺合料和水泥称量好后，需提前人工混合均匀。
- 3) 如掺加外加剂作为抑制措施，其掺量按照工程实际要求确定。若为粉状外加剂，应在外加

剂和水称量好后，提前人工翻拌均匀；若为液体外加剂，应在外加剂和水称量好后，将外加剂加入水中混合均匀。

- 4) 骨料的选取和制备同 3.39 节的规定。如针对某一工程的骨料评价抑制措施的有效性，应同时使用该工程的细骨料、粗骨料。各粒级粗骨料为单一品种时，可取（5~20）mm 粒级粗骨料按 3.39 节的规定制作粗骨料；各粒级粗骨料为不同品种时，可将大于 20mm 粒径的骨料破碎筛分后，再按工程混凝土配合比中粗骨料的级配比例混合，按 3.39 节的规定制作粗骨料。
- 5) 混凝土配合比同 3.39 节的规定。若掺加掺合料，在 3.39 节基准混凝土配合比中，用水泥与掺合料混合料取代水泥。若掺加外加剂，在 3.39 节基准混凝土配合比中加入外加剂，外加剂用量=水泥用量×掺量，应从水量中扣除液体外加剂所含水分。

2 试件制作同 3.39 节的规定。同时成型两组试件，一组为基准试件，不掺加掺合料或外加剂；另一组为对比试件，掺加掺合料或外加剂。

3 试件的养护及长度测量同 3.39 节的规定。测量龄期延长到 2 年。

3.41.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 基准试件和对比试件的膨胀率计算与取值方法同 3.39 节的规定。
- 2 膨胀率降低率按照公式（3.41.4）计算（修约间隔 0.01%）。

$$R_e = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0} \times 100\% \quad (3.41.4)$$

式中 R_e —— 膨胀率降低率；

ε_0 —— 基准试件在 2 年龄期的膨胀率；

ε —— 对比试件在 2 年龄期的膨胀率。

3 评定标准：若对比试件在 2 年龄期的膨胀率小于 0.04%，则在试验用掺量下，该掺合料或外加剂对骨料的潜在碱—硅酸反应活性或碱—碳酸盐反应活性的抑制效果评定为有效，否则评定为无效。

4 混凝土拌和物

4.1 混凝土拌和物室内拌和和现场取样方法

4.1.1 本方法用于制备室内试验用混凝土拌和物。

4.1.2 仪器设备应包括以下几种。

1 混凝土搅拌机：强制式或自落式。强制式搅拌机的公称容量（60~100）L，转速（45~48）r/min；自落式搅拌机公称容量（50~100）L，转速（18~22）r/min。其他要求应符合 SL 128 的规定。

2 天平：分度值不大于 0.1g。

3 秤：分度值不大于 0.01kg。

4 辅助器具：拌和钢板（平面尺寸不小于 1.5m×2.0m，厚度不小于 5mm）、盛料容器和平头铁铲等。

4.1.3 混凝土室内拌和应满足以下基本要求。

1 水工混凝土配合比设计应按照附录 A 的规定执行。

2 在拌和混凝土时，拌和间温度保持在（20±5）℃，相对湿度不低于 50%。对所拌制的混凝土拌和物应及时覆盖保湿。

3 用于拌制混凝土的各种材料，应至少提前 24h 放入已调好温度的拌和间，使得材料温度与拌和间温度相同。拌和水也应提前储存，不应现接现用自来水。

4 细骨料、粗骨料用量均以饱和面干状态下的质量为准。细骨料应预先加水使得含水率超过其饱和面干吸水率，浸润 24h。有条件或有必要时，粗骨料也宜预先浸润。

5 优先使用机械拌和，一次拌和量不宜少于搅拌机出料容量的 20%，不宜大于搅拌机出料容量的 80%。拌和较少量的非引气混凝土可用人工拌和。

6 材料用量以质量计。水泥、掺合料、水和外加剂称量误差为±0.3%，骨料称量误差为±0.5%。

7 称量好的外加剂先溶于称量好的拌和水中，搅拌均匀。引气剂应提前按一定倍数用水稀释，减小称量误差。

4.1.4 混凝土室内拌和应按以下操作步骤进行。

1 用混凝土搅拌机进行拌和前，应先将机内、拌和钢板及铁铲清洗干净，并保持表面润湿。拌制少量同配合比混凝土拌和物或水胶比相同的砂浆，使搅拌机内壁挂浆后将拌和物卸出，再摊开将铁板挂浆后抛弃。

2 将称好的粗骨料、细骨料、胶凝材料（水泥和掺合料预先拌匀）依次倒入搅拌机，加盖后开机先干拌（10~20）s，再加水（含溶入的外加剂）后继续搅拌（2~3）min。对自落式搅拌机，在搅拌 1min 后，可将盖取下，观察是否有物料粘附在搅拌机内壁或叶片上，如有应停机刮下，然后继续开机搅拌，到预定剩余时间后停机。

3 将拌好的混凝土拌和物卸在钢板上，并刮干净粘附在搅拌机内壁或残留的拌和物。

4 将出机拌和物人工翻拌 2~3 次，使之均匀。人工翻拌时，应通过将拌和物重复堆积成圆锥体的方式来混合均匀。当堆积锥体时，每一铲拌和物都应从锥体顶点落下，使得拌和物能从锥体的各个方向散落，形成最佳混合物。所有拌和物堆积成锥体后，翻转铁铲重复地、垂直地从锥体顶点插入，将锥体摊开成一个扁平物。将拌和物堆积锥体再摊平为一次人工翻拌过程。

注：本规程中的“人工翻拌”均应按上述方法进行。

5 在拌和物初凝前，应将拌和物所用器具清理冲洗干净。

4.1.5 混凝土拌和物现场取样应按以下规定执行。

1 取样总量不应少于试验所需量的 1.5 倍，并且每次取样的混凝土拌和物用 40mm 方孔筛湿筛后不宜小于 20L。

2 同一组混凝土拌和物应从同一盘混凝土或同一车混凝土中取样。取样应具有代表性，宜采用多次取样的方法，在同一盘混凝土或同一车混凝土中的约 1/4 处、1/2 处和 3/4 处分别取样。从第一次取样到最后一次取样不宜超过 15min，取样后注意及时覆盖保湿，并尽快送到试验室。

3 在试验前将试样人工翻拌均匀，应合理安排每次的试验项目，以保证从取样完毕到开始进行拌和物性能检测的时间间隔不超过 10min。

4.2 混凝土拌和物坍落度试验

4.2.1 本试验用于测定混凝土拌和物的坍落度，适用于骨料粒径不超过 40mm、坍落度（10~230）mm 的混凝土。

4.2.2 仪器设备应包括以下几种。

1 坍落度仪包括以下部分，应符合 SL 131 的规定。

- 1) 坍落度筒：用（2~3）mm 厚的铁皮制成，形状尺寸见图 4.2.2；
- 2) 捣棒：直径（16±0.5）mm，长约 650mm，一端为弹头形的金属圆棒；
- 3) 底板：钢制，平面尺寸不小于 0.8m×0.8m，厚度不小于 5mm，水平放置，底部充实。

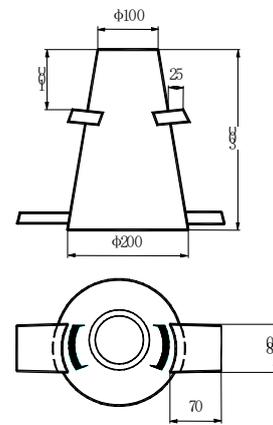


图 4.2.2 坍落度筒（单位：mm）

2 40mm 方孔试验筛。

3 钢直尺：标称长度 300mm，分度值不大于 1mm。

4 辅助器具：装料漏斗、抹刀、小铁铲、温度计等。

4.2.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 按 4.1 节的方法拌制混凝土，应采用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。
- 2 用湿布将坍落度筒内壁、底板表面润湿，将坍落度筒放在底板中间，用双脚脚掌踏紧踏板。
- 3 将混凝土拌和物用小铁铲通过装料漏斗分三层装入筒内，每层体积大致相等。底层厚约 70mm，中层厚约 90mm。每装一层，用捣棒在筒内从边缘到中心按螺旋形均匀插捣 25 次。底层插捣深度应穿

透该层，中层、上层插捣深度应分别插进其下层约（10~20）mm。当混凝土坍落度大于 210mm 时，拌和物宜一次性装入坍落度筒内，按前述方法插捣 25 次，捣棒每次均应插入到拌和物底部。

4 上层插捣完毕，取下装料漏斗，用抹刀将混凝土拌和物沿筒口抹平，并清除筒外周围的混凝土。

5 将坍落度筒匀速竖直提起，让混凝土拌和物试样自行坍落。当试样不再继续坍落时，将坍落度筒轻放于试样旁边，用钢直尺量出试样顶部中心点与坍落度筒顶部之差，即为坍落度值。

6 试样应四周均匀坍落，若试样发生一边坍陷或剪坏，则该次试验作废，应取另一部分试样重做试验。

7 整个坍落度试验过程应连续，并在（2~3）min 内完成。每次试验后及时冲洗清理干净坍落度筒内壁。

4.2.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土拌和物的坍落度以 mm 计，取整数。

2 在测定坍落度的同时，可目测评定混凝土拌和物的下列性质。

1) 棍度。根据做坍落度时插捣混凝土的难易程度分为上、中、下三级。上级，表示容易插捣；中级，表示插捣时稍有阻滞感觉；下级，表示很难插捣。

2) 粘聚性。用捣棒在做完坍落度的试样一侧中部轻打，如试样保持原状而渐渐下沉，表示粘聚性较好；若试样突然坍倒、部分崩裂或发生粗骨料离析现象，表示粘聚性不好。

3) 含砂情况。根据抹刀抹平程度分多、中、少三级。多砂，用抹刀抹混凝土拌和物表面时，抹 1~2 次就可使混凝土表面平整无蜂窝；中砂，抹 4~5 次就可使混凝土表面平整无蜂窝；少砂，抹面困难，抹 8~9 次后混凝土表面仍不能消除蜂窝。

4) 析水情况。根据水分从混凝土拌和物中析出的情况分多量、少量、无三级。多量，表示在插捣时及提起坍落度筒后就有较多水分从底部析出；少量，表示有少量水分析出；无，表示没有明显的析水现象。

4.3 混凝土拌和物维勃稠度试验

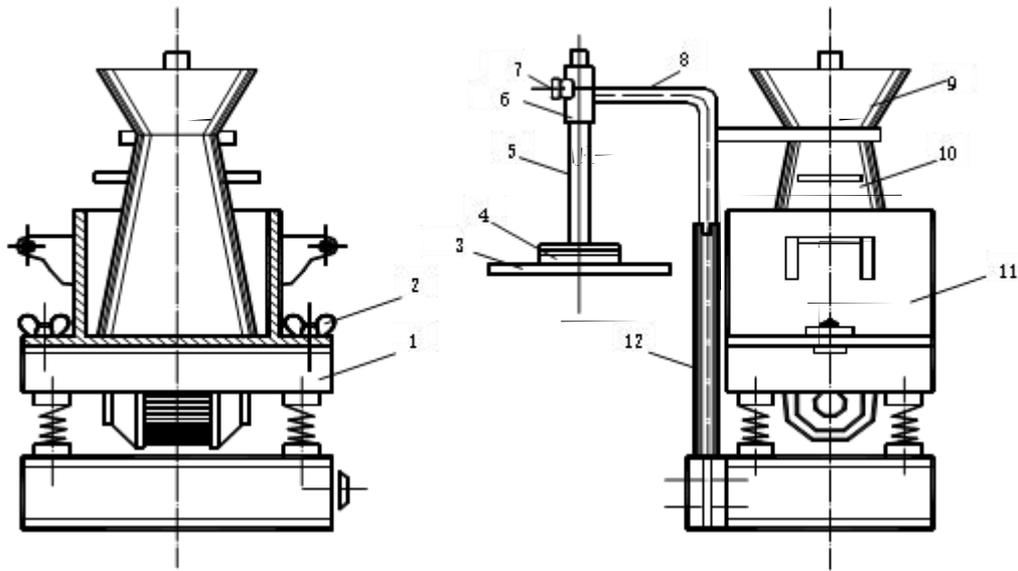
4.3.1 本试验用于测定混凝土拌和物的维勃稠度，适用于骨料粒径不超过 40mm 的混凝土，测定范围以（2~30）s 为宜。

4.3.2 仪器设备应包括以下几种。

1 维勃稠度仪，由以下各部分组成（见图 4.3.2）。

1) 振动台：台面长 380mm、宽 260mm，频率（50±3）Hz，空载时台面中心振幅（0.5±0.1）mm。附有固定容量筒的装置；

2) 容量筒：内径（240±3）mm、高（200±2）mm、壁厚 3mm、底厚 7.5mm 的金属圆筒，筒两侧有手柄，底部可固定于振动台上；



(a) 正面

(b) 侧面

1—振动台；2—元宝螺丝；3—圆盘；4—荷重块；5—滑杆；6—套筒；

7—螺栓；8—旋转架；9—漏斗；10—坍落度筒；11—容量筒；12—支柱

图 4.3.2 混凝土拌和物维勃稠度测定仪

3) 坍落度筒：无脚踏板，其他规格应符合 4.2 节的规定；

4) 塑料压板：要求透明平整（可用无色有机玻璃制成），直径 (230 ± 2) mm，厚 $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ 。压板、滑杆及配重组成的滑动部分总质量为 (2750 ± 50) g。滑杆上有刻度，可测读混凝土的坍落度；

5) 旋转架：一侧安装圆盘、滑杆及配重组成的滑动部分，另一侧安装漏斗。

2 辅助器具：捣棒、秒表、抹刀、小铁铲等。

4.3.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 4.1 节的方法拌制混凝土，用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 用湿布将容量筒、坍落度筒及漏斗内壁润湿。

3 将容量筒用螺母固定于振动台台面上。把坍落度筒放入容量筒内并对中，然后把漏斗旋转后坐落在坍落度筒的顶上，压实坍落度筒并拧紧螺丝，以保证坍落度筒不能离开容量筒底部。

4 按 4.2.3 条 3 款的规定将混凝土拌和物装入坍落度筒并捣实。上层插捣完毕后将螺丝松开，漏斗旋转 90° ，用抹刀刮平坍落度筒顶面。

5 将坍落度筒徐徐竖直提起，让混凝土拌和物自行坍落。把透明圆盘旋转到停止坍落的混凝土锥体上部，小心下降圆盘直至与混凝土顶面接触，此时可从滑杆上刻度读出坍落度数值（精确到 1mm）。

6 启动振动台，同时用秒表计时。当透明圆盘的整个底面都与水泥浆接触时（允许存在少量闭合气泡），立即卡停秒表，关停振动台。记录秒表上的时间（精确到 0.5s）。

7 试验结束后，需将仪器清洗干净，并在滑杆等处涂抹薄层黄油。

4.3.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 由秒表读出的时间即为混凝土拌和物的维勃稠度值。
- 2 若测得的维勃稠度值小于 5s 或大于 30s, 则表示该混凝土拌和物的稠度已超出本仪器的适用范围。

4.4 混凝土拌和物扩散度试验

- 4.4.1 本试验用于测定混凝土拌和物的扩散度 (亦称扩展度), 适用于骨料粒径不超过 40mm、坍落度大于 150mm 的混凝土。
- 4.4.2 仪器设备应包括以下几种。
 - 1 钢直尺: 标称长度 1m, 分度值不大于 1mm;
 - 2 其他仪器设备与 4.2 节相同。
- 4.4.3 试验步骤应按以下规定执行。
 - 1 按 4.1 节的方法拌制混凝土, 用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。
 - 2 按 4.2.3 的步骤 2、3、4 进行试验操作。当混凝土坍落度大于 210mm 以上时, 拌和物宜一次性装入坍落度筒内, 捣棒每次均应插入到拌和物底部。
 - 3 将坍落度筒徐徐竖直提起, 让混凝土拌和物自行扩散。当拌和物不再扩散或扩散时间达到 60s 时, 用钢直尺在 2~4 个不同方向量 (应包括最大直径以及其垂直方向) 取拌和物扩散后的直径 (精确到 1mm)。
 - 4 整个扩散度试验应连续进行, 并应在 (4~5) min 内完成。
- 4.4.4 混凝土拌和物的扩散度以扩散后的 2~4 个直径测值的平均值作为结果 (以 mm 计, 取整数)。

4.5 混凝土拌和物泌水率试验

- 4.5.1 本试验用于测定混凝土拌和物的泌水率。
- 4.5.2 仪器设备应包括以下几种。
 - 1 秤: 分度值不大于 0.01kg。
 - 2 振动台: 频率 (50±3) Hz, 空载时台面中心振幅 0.5mm±0.1mm。
 - 3 带盖容器: 内径及高均为 267mm 的 15L 容量筒或其他尺寸接近的容器, 能够加盖密封, 如无盖可用玻璃板代替。
 - 4 带塞量筒: 100mL。
 - 5 辅助器具: 吸液管、钟表、铁铲、捣棒、抹刀等。
- 4.5.3 试验步骤应按以下规定执行。
 - 1 按 4.1 节的方法拌制混凝土。
 - 2 用湿布将容器内壁润湿, 称容器质量 (G_c , 精确到 0.01kg, 下同)。
 - 3 将混凝土拌和物装入容器, 每组两个试样。如用振动台振实, 可一次装料, 振至表面泛浆;

如人工插捣，则分二层装料，每层均匀插捣 35 次，插捣底层时捣棒插至筒底，插捣上层时捣棒插入底层（10~20）mm。密实后试样顶面比筒口低 40mm 左右，厚度应在（230~250）mm。

4 将容器口及外表面擦净，称出容器及试样的总质量（ G_{cc} ）。

5 将容器和试样静置于无振动的地方，加盖后开始计时。试验环境温度应为（20±5）℃。

6 前 60min 每隔 20min 用吸液管吸出泌水一次，以后每隔 30min 吸水一次，直至连续三次无泌水为止。每次吸取泌水前，将筒底一侧垫高使容器倾斜使水汇集，吸水后仍将容器轻轻放平盖好。每个试样对应一个量筒。吸出的泌水注入量筒后应及时塞紧，不应蒸发损失。每次吸水后记录泌水时间和累计泌水量（精确到 1mL），直至无泌水后读取量筒中收集的泌水总体积（精确到 1mL，按质量记录 W_b ）。如量筒底部有泥浆沉淀，应扣除其体积。

4.5.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土拌和物泌水率按照公式（4.5.4）计算。

$$Q_b = \frac{W_b/G_1}{W/G} \times 100\% \quad (4.5.4)$$

式中 Q_b —— 混凝土拌和物泌水率；

W_b —— 泌水总质量，g；

G_1 —— 试样质量（ $G_{cc}-G_c$ ），g；

W —— 单位体积混凝土中用水量，kg/m³；

G —— 单位体积混凝土质量，kg/m³。

2 以两个测值的平均值作为试验结果（修约间隔 1%）。如有必要，以泌水时间为横坐标，累计泌水量为纵坐标，绘出泌水过程线。

3 捣实方法应在结果中注明。

4.6 混凝土拌和物压力泌水率试验

4.6.1 本试验用于测定泵送混凝土的压力泌水率。

4.6.2 仪器设备应包括以下几种。

1 压力泌水仪：由压力表、压力缸、筛网等部件构成，如图 4.6.2 所示。工作活塞压强为 3.5MPa，工作活塞公称直径为 125mm，压力缸容积为 1.66L，筛网筛孔尺寸为 0.335mm。

2 秤：分度值不大于 0.01kg。

3 量筒：1000mL。

4 辅助器具：捣棒、秒表等。

4.6.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 4.1 节的方法拌制混凝土。拌和物体积应大于压力泌水仪的缸体容积的三倍并略有富裕，以满足试验用料。

2 称出缸体质量（ G_0 ，精确到 0.01kg，下同）。将混凝土拌和物一次装入缸体内，用捣棒由外围

向中心均匀插捣 25 次，再称出缸体和混凝土的总质量 (G_1)。

3 将压力泌水仪按规定组装完毕，尽快给混凝土加压至 3.5MPa，立即打开泌水管阀门，同时开始计时，并保证恒压，泌出的水接入 1000mL 量筒内。

4 加压 10s 后读取一次总泌水量 (V_{10} ，精确到 1mL)，加压至 140s 后再读取一次总泌水量 (V_{140} ，精确到 1mL)。

4.6.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土拌和物压力泌水率按照公式 (4.6.4) 计算。

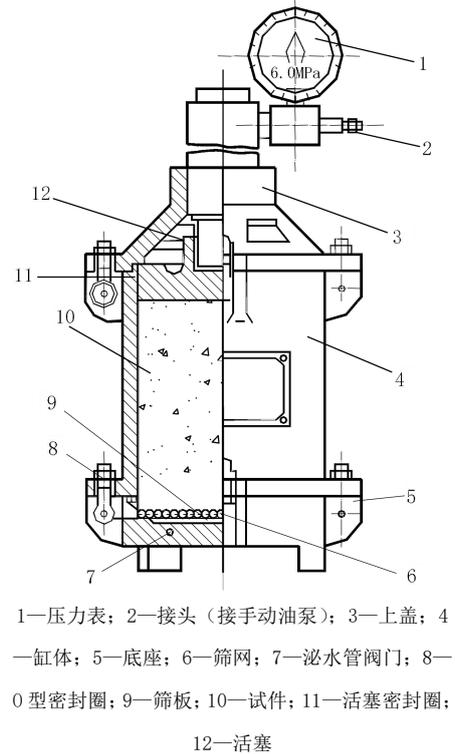
$$S_p = \frac{V_{10}}{V_{140}} \times 100\% \quad (4.6.4)$$

式中 S_p —— 混凝土拌和物压力泌水率；

V_{10} —— 加压 10s 时的泌水量，mL；

V_{140} —— 加压 140s 时的泌水量，mL。

2 以三次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 1%)。应在结果中注明混凝土试样质量 G ($G_1 - G_0$)。



1—压力表；2—接头 (接手动油泵)；3—上盖；4—缸体；5—底座；6—筛网；7—泌水管阀门；8—O 型密封圈；9—筛板；10—试件；11—活塞密封圈；

12—活塞

图 4.6.2 混凝土压力泌水仪

4.7 混凝土拌和物表观密度试验

4.7.1 本试验用于测定混凝土拌和物单位体积的质量。

4.7.2 仪器设备应包括以下几种。

1 容量筒：容积 10L、20L、30L、80L，内径与内深接近的钢制容器，应符合 SL 127 的规定。

2 振动台：频率 (50 ± 3) Hz，空载时台面中心振幅 (0.5 ± 0.1) mm。

3 秤：分度值不大于 0.01kg。

4 辅助器具：捣棒、玻璃板、钢直尺或金属直杆、抹刀等。

4.7.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 根据骨料最大粒径按照表 3.23.2 选用相应规格的容量筒，称出空容量筒质量 (G_1 ，精确到 0.01kg，下同)，并按照 SL 127 校准实际容积 (V)。

2 按 4.1 节的方法拌制混凝土。

3 将混凝土拌和物装入容量筒内，在振动台上振至表面泛浆。若用人工插捣，则将混凝土拌和物分层装入筒内，每层厚度不超过 150mm，用捣棒从边缘至中心螺旋形插捣，每层插捣次数应满足表 4.7.3 的规定。底层插捣至底面，以上各层插入其下层 (10~20) mm。

4 用钢直尺或金属直杆，竖起来沿筒口刮除多余的拌和物，并来回抹平表面，将容量筒外部擦净，称出容量筒和混凝土总质量 (G_2)。

表 4.7.3 每层插捣次数表

容量筒容积 (L)	10	20	30	80
每层插捣次数 (次)	25	40	50	72

4.7.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 混凝土拌和物表观密度按照公式 (4.7.4-1) 计算 (修约间隔 10kg/m³)。

$$\rho_m = \frac{G_2 - G_1}{V} \times 100\% \quad (4.7.4-1)$$

式中 ρ_m —— 混凝土拌和物的表观密度, kg/m³;

G_1 —— 容量筒质量, kg;

G_2 —— 混凝土拌和物及容量筒总质量, kg;

V —— 容量筒的容积, L。

- 2 当已知所用原材料表观密度时, 可按照公式 (4.7.4-2) 计算混凝土拌和物理论含气量 (修约间隔 0.1%)。

$$Q_a = \frac{\rho_0 - \rho_m}{\rho_0} \times 100\% \quad (4.7.4-2)$$

$$\rho_0 = \frac{C+A+S+G+W}{C/\rho_C+A/\rho_A+S/\rho_S+G/\rho_G+W/\rho_W} \quad (4.7.4-3)$$

式中 Q_a —— 混凝土拌和物的理论含气量;

ρ_0 —— 不含气时混凝土拌和物的理论密度按照公式 4.7.4-3 计算, kg/m³;

C 、 A 、 S 、 G 、 W —— 分别为单位体积混凝土中水泥、掺合料、细骨料、粗骨料及水的用量, kg/m³;

ρ_C 、 ρ_A 、 ρ_W —— 分别为水泥、掺合料、水的密度, kg/m³;

ρ_S 、 ρ_G —— 分别为细骨料、粗骨料的饱和面干表观密度, kg/m³。

4.8 混凝土拌和物拌和均匀性试验

4.8.1 本试验用于测试混凝土拌和物的拌和均匀性。

4.8.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 抗压强度试验所用设备同 5.2 节。
- 2 砂浆密度试验所用设备同 9.4 节。
- 3 5mm 方孔试验筛。

4.8.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 根据试验目的确定拌和时间。

- 1) 检测搅拌机在一定拌和时间下混凝土拌和物的均匀性时, 拌和时间为操作制度所规定的时间;
- 2) 为选择搅拌机合适的拌和时间, 可根据搅拌机容量大小选择三个或四个可能采用的拌和时间, 分别拌制原材料、配合比相同的混凝土。

2 达到规定拌和时间后, 分别取最先出机和最后出机的混凝土试样各一份, 取样质量应能满足试验要求。

3 将所取试样分别人工翻拌均匀，取一部分按 5.2 节的规定测定边长 150mm 立方体试件的 28d 龄期的抗压强度。将另一部分试样用湿筛法过 5mm 方孔筛，取砂浆人工翻拌均匀，按 9.4 节的规定测定砂浆表观密度。

4.8.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土拌和物的拌和均匀性，可用先后出机混凝土试样的 28d 抗压强度的差值 $\Delta R = |f_1 - f_2|$ 和砂浆表观密度的差值 $\Delta = |\rho_1 - \rho_2|$ 评定，差值越小，拌和均匀性越好。

2 混凝土抗压强度偏差率和砂浆表观密度偏差率分别按照公式（4.8.4-1）和公式（4.8.4-2）计算（修约间隔 0.1%）。

$$R_f = \frac{|f_1 - f_2|}{\text{MAX}(f_1, f_2)} \times 100\% \quad (4.8.4-1)$$

$$R_\rho = \frac{|\rho_1 - \rho_2|}{\text{MAX}(\rho_1, \rho_2)} \times 100\% \quad (4.8.4-2)$$

式中 R_f —— 混凝土抗压强度偏差率；

R_ρ —— 砂浆表观密度偏差率；

f_1 —— 最先出机混凝土的抗压强度，MPa；

ρ_1 —— 最先出机混凝土湿筛砂浆的表观密度， kg/m^3 ；

f_2 —— 最后出机混凝土的抗压强度，MPa；

ρ_2 —— 最后出机混凝土湿筛砂浆的表观密度， kg/m^3 ；

3 最优拌和时间的选择：以拌和时间为横坐标，以不同批次混凝土测得的强度偏差率或表观密度偏差率为纵坐标，绘制时间与偏差率曲线，在曲线上找出偏差率最小时的拌和时间，即为最优的拌和时间。

4.9 混凝土拌和物凝结时间试验（贯入阻力法）

4.9.1 本试验用于测定混凝土拌和物的初凝时间与终凝时间。

4.9.2 仪器设备应包括以下几种。

1 贯入阻力仪：测力计量程不小于 1kN，分度值不大于 1N。测针的截面积有 100mm^2 、 50mm^2 、 20mm^2 三种，测针长 100mm，在距贯入端 25mm 处有明显的标记。

2 砂浆筒：上口内径 160mm，下口内径 150mm，净高 150mm。也可用尺寸接近的、不漏浆的其他容器。

3 5mm 方孔试验筛，宜用金属丝编织网筛。

4 振动台：频率 (50 ± 3) Hz，空载时台面中心振幅 $0.5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 。

5 辅助器具：捣棒、吸液管、钟表等。

4.9.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 4.1 节的方法拌制混凝土，用湿筛法筛除大于 5mm 的骨料。

2 取砂浆人工翻拌均匀。将砂浆分别装入三只砂浆筒中，砂浆表面应低于筒口约 10mm，经振动

台振动或人工插捣 35 次使其密实。编号后置于温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的环境中，加覆盖物防止水分散失。

3 以混凝土拌和加水完毕为计时起点，2h 后开始贯入阻力测试。此后每隔 1h 测一次，临近初凝或终凝时，适当缩短测试间隔时间。也可经观察，砂浆表面略硬时，开始贯入阻力测试，以免过早、过多测试，导致后期无合适测点。尤其是加入缓凝剂的混凝土拌和物，更应延后开始测试时间。在测试早期，或贯入阻力值距初凝阻力 3.5MPa 或终凝阻力 28MPa 较远时，可适当延长测试间隔时间。

4 测点位置应按照先周边后中心的顺序布置，每次测点应避开前一次测孔，其间距不小于 15mm。测点与砂浆筒壁距离不应小于 20mm。

5 到测试时间时，取出砂浆筒，检查砂浆表面泌水情况。如有泌水，将砂浆筒底一侧垫高使筒倾斜，用吸液管吸去表面泌水。

6 测试时，将砂浆筒置于仪器座板上，去皮清零（或记录压力表初始示值）。压下手柄使测针端部与砂浆表面接触，然后均匀用力使测针贯入砂浆，经 10s 左右使测针 25mm 深度标记到达砂浆表面，读取贯入阻力仪示值（或记录压力表最大示值），得到贯入阻力 P （精确到 1N）。每只砂浆筒每次测一个或两个点，取平均值作为本次贯入阻力测值，并按照公式（4.9.4）计算贯入阻力值 R （MPa）。

7 每次测试完毕，应将测针上粘附的砂浆擦净。取下砂浆筒，加盖后放回恒温室中。

8 测试过程中，按照表 4.9.3 规定的贯入阻力值范围，以测针截面积从大到小的次序更换测针。

表 4.9.3 贯入阻力值与测针对应关系表

对应贯入阻力值 (MPa)	0~4	4~12	12~30
贯入阻力仪示值 (N)	0~400	200~600	240~600
测针截面积 (mm^2)	100	50	20

9 初凝时段：当使用截面积 100 mm^2 的测针，贯入阻力值大于 3.5MPa 时（贯入阻力仪示值大于 350N），应立即更换截面积 50 mm^2 的测针，并在较远位置再测一次进行校核。

10 终凝时段：当使用截面积 50 mm^2 的测针，贯入阻力值大于 10MPa 时（贯入阻力仪示值大于 500N），应立即更换截面积 20 mm^2 的测针，继续进行测试直至贯入阻力值大于 28MPa（贯入阻力仪示值大于 560N），在较远位置再测一次进行校核然后停止试验。

4.9.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 贯入阻力值按照公式（4.9.4）计算（修约间隔 0.1MPa）。

$$R = \frac{P}{A} \quad (4.9.4)$$

式中 R —— 贯入阻力值，MPa；

P —— 贯入深度达 25mm 时所需的净压力，N；

A —— 相应测针的截面积， mm^2 。

2 以贯入阻力值为纵坐标，测试时间为横坐标，绘制每个试件的贯入阻力与对应时间的关系曲线。然后以贯入阻力值为 3.5MPa 及 28MPa 划两条平行横坐标的直线，直线与曲线交点对应的横坐标值即为初凝时间与终凝时间。

3 以三个试件凝结时间的平均值作为试验结果。

4.10 混凝土拌和物含气量试验

4.10.1 本试验用于测定混凝土拌和物中的含气量，适用于骨料粒径不大于 40mm 的混凝土拌和物。

4.10.2 仪器设备应包括以下几种。

1 含气量测定仪：直读或非直读式气压含气量测定仪（见图 4.10.2），应符合 SL 132 的规定。

2 秤：分度值不大于 0.01kg。

3 振动台：频率（50±3）Hz，空载时台面中心振幅 0.5mm±0.1mm，应符合 SL 129 的规定。

4 辅助器具：捣棒、打气筒、木槌、水杯、抹刀等。

4.10.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 使用前应按照 SL 132 的规定率定含气量测定仪。

2 按 4.1 节的方法拌制混凝土，用湿筛法筛除大于 40mm 的骨料。

3 用湿布润湿钵体内部，装入混凝土拌和物，用振动台振实，振动时间宜为（15~30）s 至混凝土表面翻浆（如采用人工捣实，可将拌和物分二层装入，每层插捣 25 次）。用抹刀刮去多余的混凝土拌和物，仔细沿筒口抹平使表面光滑无气泡。擦净钵体筒口，盖上并紧固盖体。

4 关紧气室操作阀，打开进水阀和排水阀，用注水器从进水阀注水。排水阀出水后，略微倾斜抬高排水阀，轻轻摇动含气量仪从排水阀排气，然后放平继续注水直至排水阀出水无气泡为止，先关闭排水阀再关闭进水阀。打气加压，使压力稍过初始压力，控制放气阀调整至初始压力。按下气室操作阀，使气室与容器连通，压力平衡后读取指示表的示值。

4.10.4 试验结果处理应按以下规定执行。

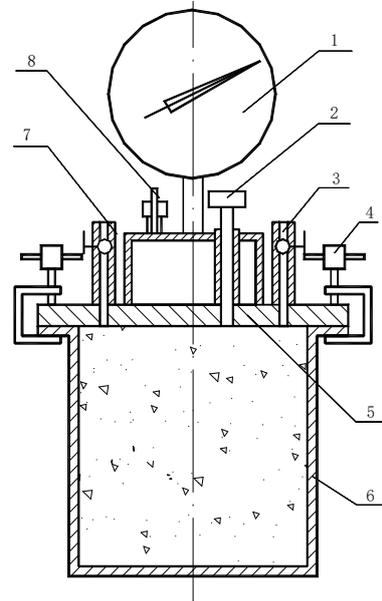
1 直读式含气量仪示值即为混凝土拌和物的含气量（ A_0 ，精确到 0.1%）；非直读式含气量仪为压力示值，按含气量仪率定曲线计算混凝土拌和物的含气量（ A_0 ，修约间隔为 0.1%）。

2 当骨料粒径超过 40mm 时，需要筛除大骨料，此时测出的含气量不是原级配混凝土的含气量，需要根据配合比进行校正。骨料校正系数（ C ）按以下步骤测定。

1) 按照公式（4.10.4-1）和公式（4.10.4-2）计算装入钵体中的细骨料和粗骨料质量。由两式计算出的细骨料和粗骨料用量是以饱和面干状态为基准的，还需根据细骨料、粗骨料的含水情况按（4.10.4-3）进行修正，并按修正后的用量称取细骨料和粗骨料。

$$G_{s1} = \frac{G_s V_0}{1000(1 - G_3 / \rho_{g3})} \quad (4.10.4-1)$$

$$G_{g1} = \frac{(G_1 + G_2) V_0}{1000(1 - G_3 / \rho_{g3})} \quad (4.10.4-2)$$



1—含气量表（压力表）；2—气室操作阀；3—进水阀；
4—固定夹板；5—上盖；6—钵体；7—排气阀；8—进气阀

图 4.10.2 气压式含气量测定仪

式中 G_{s1} 、 G_{g1} —— 分别为装入量钵中的细骨料和粗骨料质量（饱和面干状态），kg；

G_s —— 单位体积混凝土中细骨料用量， kg/m^3 ；

G_1 、 G_2 、 G_3 —— 分别为单位体积混凝土中（5~20）mm、（20~40）mm 及大于 40mm 的粗骨料用量， kg/m^3 ；

ρ_{g3} —— 大于 40mm 的粗骨料的饱和面干表观密度， kg/m^3 ；

V_0 —— 钵体容积，L。

$$G_0 = G(1 + P_{sw}) \quad (4.10.4-3)$$

式中 G_0 —— 潮湿状态的细骨料或粗骨料质量，kg；

G —— 按照公式（4.10.4-1）和公式（4.10.4-2）计算的 G_{s1} 或 G_{g1} ，kg；

P_{sw} —— 细骨料或粗骨料的表面含水率。

- 2) 先在钵体中盛 1/3 高度的水，将称取的细骨料和粗骨料混合均匀后加入钵体，边加边搅拌以排气。水面每升高 25mm，用捣棒轻捣 10 次。骨料全部加入后，再加水至满，然后刮除水面泡沫，擦净钵体筒口，盖上并紧固盖体。此时测定的含气量，即为骨料校正系数（ C ，精确到 0.1%）。

- 3 混凝土拌和物含气量按照公式（4.10.4-4）校正。

$$A = A_0 - C \quad (4.10.4-4)$$

式中 A —— 校正后的混凝土拌和物含气量，%；

A_0 —— 测得的拌和物含气量，%；

C —— 骨料校正系数，%。

- 4 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。当两次测值相差大于 0.5% 时，应重做试验。

4.11 混凝土拌和物水胶比分析试验（水洗法）

4.11.1 本试验用于测定混凝土拌和物的水胶比。

4.11.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 静水力学天平：分度值不大于 0.1g。
- 2 0.16mm、5mm 方孔试验筛。
- 3 辅助器具：称量桶（直径和高均为 160mm）、玻璃板盖、水槽、拌和铲等。

4.11.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 称出各称量桶和玻璃板在空气中及水中质量，并编号。
- 2 按下述步骤预先测定原材料的参数。

- 1) 胶凝材料的密度（ ρ_{cm} ）。预先分别称出称量桶和玻璃板盖在水中的质量。按混凝土拌和物中水泥与掺合料的比例，称取胶凝材料试样 1000g，混合均匀后放入称量桶内，加水至桶内 2/3 处，充分搅拌，使气泡完全排出，加水至满。除去水面泡沫，加盖玻璃板，玻璃板

下面不应留有气泡，玻璃板盖应封闭严密，以防止浸水时胶凝材料漂出桶外。立即将整体放入水槽中，称出胶凝材料在水中质量（ g_w ，精确到 0.1g，下同）。按照公式（4.11.3-1）计算胶凝材料的密度（ ρ_{cm} ，修约间隔 0.01g/cm³）。

$$G_{cm} = \frac{1000}{1000 - g_w} \quad (4.11.3-1)$$

式中 ρ_{cm} —— 胶凝材料的密度，g/cm³；

g_w —— 胶凝材料的水中质量，g。

2) 按 3.2 节的有关规定测定细骨料的饱和面干表观密度（ ρ_s ）。

3) 测定细骨料中小于 0.16mm 颗粒的粉砂修正值（ f ）。取烘干细骨料试样约 2000g 两份（ g_0 ），分别分数次放在 0.16mm 的筛上进行筛洗，筛洗至流出的水清澈且无粉砂粒为止。将筛上的试样重新烘干，称其质量。按照公式（4.11.3-2）计算粉砂修正值（修约间隔 0.001），以两次测值的平均值作为试验结果。

$$f = \frac{g_0 - g_s}{g_s} \quad (4.11.3-2)$$

式中 f —— 粉砂修正值；

g_0 —— 试样质量，g；

g_s —— 经筛洗后筛余试样的烘干质量，g。

3 用 5mm 筛从需要分析的混凝土拌和物中尽快筛取砂浆试样（2~3）kg，分两份装入两只已知质量的称量桶中，称出砂浆试样的质量（ G_m ）。

4 向装有试样的称量桶加水至桶高的约 2/3 处，充分搅拌，使试样中的气泡全部排出。加水至满，静置 10min，除去水面泡沫，然后加玻璃板盖（但不盖严），把称量桶浸没于水中，注意盖底不应留有空气泡，称出砂浆试样在水中质量（ G_{mw} ）。

5 将称过水中质量的砂浆稍加搅拌，使胶凝材料与细骨料分离，然后分数次放在 0.16mm 筛上用水筛洗，直至流出的水清澈，再将筛余的细骨料收集在称量桶内，称出粒径大于 0.16mm 细骨料的水中质量（ G_{sw} ）。

4.11.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 试样中细骨料、胶凝材料和水的质量分别按照公式（4.11.4-1）、公式（4.11.4-2）和公式（4.11.4-3）计算。

$$G_s = G_{sw}(1 + f) \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} \quad (4.11.4-1)$$

$$G_{cm} = [G_{mw} - G_{sw}(1 + f)] \frac{\rho_{cm}}{\rho_{cm} - 1} \quad (4.11.4-2)$$

$$G_w = G_m - (G_s + G_{cm}) \quad (4.11.4-3)$$

式中 G_s 、 G_{cm} 、 G_w —— 分别为砂浆试样中细骨料、胶凝材料及拌和水的质量，g；

G_{sw} —— 粒径大于 0.16mm 细骨料的水中质量，g；

G_m 、 G_{mw} —— 分别为砂浆试样在空气中和水中的质量，g；

ρ_s 、 ρ_{cm} —— 分别为细骨料及胶凝材料的表观密度，g/cm³；

f —— 粉砂修正值。

2 实测水胶比为 G_w/G_{cm} ，以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.01）。

3 胶凝材料水洗分析时，大于 0.16mm 的颗粒很少，故可不计，必要时也可实测后修正。细骨料含泥量或石粉含量较大时，也可实测后修正。

4 试验前应预先在室内按给定配合比拌制试样，进行还原分析，结果与实际基本相符方可使用。

4.12 混凝土拌和物水胶比分析试验（炒干法）

4.12.1 本试验用于测定混凝土拌和物的水胶比。

4.12.2 仪器设备应包括以下几种。

1 天平：分度值不大于 0.1g。

2 0.16mm、5mm 方孔试验筛。

3 辅助器具：电炉（2000W，可调电压）、托盘、铁桶（2L）、拌和铲等。

4.12.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 粉砂修正值（ f ）测定按 4.11 节的有关规定进行。

2 细骨料的饱和面干吸水率（ a_1 ，以干细骨料为基准）测定按 3.2 节的有关规定进行。

3 从需要分析的混凝土拌和物中用 5mm 筛尽快筛取砂浆试样约 2kg，分成两份，分别放于已知质量（ G_0 ，精确到 0.1g，下同）的托盘上，称出托盘及砂浆试样的总质量（ G_1 ），计算砂浆试样质量（ G_m ）。

4 把装有砂浆试样的托盘放在电炉上边搅拌边炒干，冷却至室温后称出托盘及炒干砂浆试样的总质量（ G_2 ）。

5 将炒干砂浆试样放于小铁桶内，加水搅拌，使胶凝材料与细骨料分离，然后分数次放在 0.16mm 筛上用水筛洗，直至流出的水清澈，再将筛余的细骨料放在托盘上炒干，冷却至室温后称出细骨料质量（ G_3 ）。

4.12.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 试样中细骨料、胶凝材料和水的质量分别按照公式（4.12.4-1）、公式（4.12.4-2）、和公式（4.12.4-3）计算。

$$G_s = G_3(1 + f)(1 + a_1) \quad (4.12.4-1)$$

$$G_w = (G_1 - G_2) - G_3(1 + f)a_1 \quad (4.12.4-2)$$

$$G_{cm} = G_m - G_s - G_w \quad (4.12.4-3)$$

式中 G_s 、 G_{cm} 、 G_w —— 分别为砂浆试样中细骨料、胶凝材料及水的质量，g；

G_1 —— 未炒前砂浆试样及炒盘总质量，g；

G_2 —— 炒干后砂浆试样及炒盘总质量，g；

G_m —— 砂浆试样质量，g；

G_3 —— 经冲洗烘干后的细骨料质量，g；

a_1 —— 以干细骨料为基准的饱和面干吸水率，%；

f —— 粉砂修正值。

- 2 实测水胶比为 G_w/G_{cm} ，以两次测值的平均值作为试验结果。
- 3 试验前应预先在室内按给定配合比拌制试样，进行还原分析，结果与实际基本相符方可使用。

5 混凝土

5.1 混凝土试件的成型与养护

5.1.1 本方法用于制备混凝土试件，适用于骨料粒径不大于 40mm 的常态混凝土拌和物。

5.1.2 仪器设备与设施应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 试模：由钢或铸铁制作，也可选用不吸水且不易发生变形的其他材质试模。试模应拼装牢固，具有水密性，振捣时不应变形、漏浆。试模应满足边长偏差不应大于边长的 1/150，角度偏差不应超过 0.5°，平整度偏差不应超过边长的 0.05%。其他要求应符合 SL 130 的规定。

2) 振动台：频率 (50±3) Hz，空载时台面中心振幅 (0.5±0.1) mm，额定荷载不小于 200kg。其他要求应符合 SL 129 的规定。

3) 捣棒：直径 (16±0.5) mm，长约 650mm，一端为弹头形的金属圆棒。

4) 方孔筛：筛孔尺寸 40mm 或 30mm，宜采用金属丝编织网筛。

6 辅助器具：铁铲、抹刀、橡胶锤、毛笔等。

2 标准养护室：应控制室内温度 (20±2) °C，相对湿度 95%以上。应为雾室，保证试件表面呈潮湿状态，但不应被水直接淋刷。在断电情况下，5h 内养护室内温度变化不应超过 2°C。宜配备恒温恒湿环境控制设备。其他要求应满足 SL 138 的规定。在没有标准养护室时，试件可在 (20±2) °C 的饱和石灰水 (或 Ca(OH)₂ 饱和溶液) 中养护，但应在报告中注明。

5.1.3 试件制作应按以下规定执行。

1 制作试件前，按照表 5.1.3 规定的试件尺寸选用试模，并检查试模装配情况。试模内壁应均匀涂刷一薄层脱模材料，脱模材料不应与胶凝材料反应，并应符合试验方法的要求。

表 5.1.3 水工混凝土试件尺寸与试模

试件类别	抗压试件、劈裂抗拉试件、抗剪试件	抗弯试件	轴向抗拉试件	静压弹模试件 轴心抗压试件	徐变试件
试模模腔形式	立方体	棱柱体	棱柱体	圆柱体	圆柱体
试模模腔尺寸 (mm)	边长 150	150×150×550 (或 600)	中部截面 100mm×100mm，纯拉段长度不小于 200mm	Φ150×300	Φ150×450 (压) Φ150×500 (拉)

注：本表只列出了力学性能用、有承压 (拉) 面的试件，其他如干缩、抗冻、抗渗、抗冲磨、碳化等的试件与试模可按有关试验方法的要求选用。

2 按 4.1 节的方法制备混凝土拌和物。若骨料粒径超过模腔最小尺寸的 1/3 时，应在成型前用湿筛法筛除大骨料。

3 混凝土拌和物的密实方法根据混凝土拌和物的坍落度而定，采用捣棒人工捣实的拌和物坍落度宜大于 90mm。

1) 采用振动台或振动棒振实时，可将混凝土拌和物一次装入试模，装料时用抹刀或捣棒沿试

模内壁略加插捣，并使混凝土拌和物略高出试模口。振动台振动时间不宜超过 30s。振动持续到混凝土表面出浆且无明显大气泡溢出时立刻停止，不应过振，避免造成拌和物分层和含气量损失。试模不应在振动台上跳动，可采用磁力吸附或其他方式压紧试模。如用振动棒，应竖直插入并避免接触试模。一次装料厚度不宜超过 200mm，对于弹模、徐变等试件，可分 2~3 次装料；装满后堆料不应高出试模口过多，应边振动边补料，以免浆体溢出损失。

- 2) 采用捣棒人工捣实时，混凝土拌和物应分层装入模内，每层的装料厚度大致相等，并不大于 100mm。插捣应按螺旋方向从边缘向中心均匀进行，插捣时捣棒应保持垂直。插捣底层时，捣棒应达到试模底面，插捣上层时，捣棒应穿至下层（20~30）mm。每层的插捣次数每 100cm² 不宜少于 12 次，以插捣密实为准。最后还应用抹刀沿试模内壁插入数次，或用橡皮锤均匀敲击试模侧壁，直至无明显大气泡溢出且捣痕消失。
- 3) 拌和物密实后，用抹刀刮除多余拌和物，如有不足取少量砂浆补平并拍打密实，试件表面宜比试模边缘略高。在混凝土初凝前（1~2）h，再次用抹刀进行抹面并抹光（如有泌水沉降现象应记录，并用少量水泥浆补平）。在混凝土除凝后或拆模前，在试件表面写上编号，编号应能持久可辨。

5.1.4 试件成型后，在（20±5）℃的室内带模静置（24~48）h 后拆模（以拆模时试件不掉角为准）。试件在静置过程中应摆放水平，用湿布或塑料薄膜覆盖，并避免受到振动和冲击。试件应立即放入（20±2）℃标准养护室中养护，试件应彼此间隔（10~20）mm 放在架上。

5.1.5 拆模后，应将试模内外清理干净。钢或铸铁制做的试模，宜在内壁均匀地刷一薄层脱模材料，防止生锈。

5.1.6 混凝土终凝 8h 后或试件具有足够的强度后方可搬运。在搬运过程中，应采用合适的衬垫材料保护试件免受损伤，并采用塑料薄膜包裹或用湿麻袋覆盖试件。

5.1.7 试件从养护室取出后，需目测检查试件，如有较大缺损、鼓包、开裂、坑凹、扭曲等缺陷应废弃。在测试前，按试验方法要求测量试件尺寸，应满足表 5.1.7 的规定，试验方法另有规定的除外。试件形位偏差的检测方法按 SL 130 的规定执行，不满足表 5.1.7 的规定时，应进行加工处理。

表 5.1.7 水工混凝土试件的尺寸偏差和形位偏差要求

试件形式	尺寸偏差（mm）	承压面平面度偏差（mm）	垂直度偏差（°）	平直度偏差（mm）
立方体	长、宽—±0.6%公称尺寸 高一±1.0%公称尺寸	0.05%边长	侧与底：0.5	/
圆柱体	直径—±0.6%公称尺寸 高一±1.0%公称尺寸	0.05%直径	侧与底：0.5	/
棱柱体	宽、棱长—±0.6%公称尺寸 高一±1.0%公称尺寸	0.05%棱长	侧与底：0.5	±0.2

5.1.8 试件的龄期从搅拌加水起算。到达规定试验龄期时，从养护室取出试件后应尽快测试，开始测试时间的允许偏差应符合表 5.1.8 的规定。

表 5.1.8 水工混凝土试件开始测试时间的允许偏差

试验龄期	3d	7d	28d	56d	90d	180d	360d
开始测试时间 允许偏差	±2h	±4h	±8h	±24h	±24h	±48h	±72h

5.2 混凝土立方体抗压强度试验

5.2.1 本试验用于测定混凝土立方体试件的抗压强度。

5.2.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机：压力机或万能试验机，试件的预计破坏荷载宜在试验机全量程的 20%~80%。应符合 GB/T 3159《液压力式万能试验机》及 GB/T 2611《试验机 通用技术要求》的规定，且级别不应低于 1 级。

2 钢质垫板：垫板应大于试件的承压面积，厚度不小于 25mm。垫板表面应平整光滑，平面度偏差不大于边长的 0.02%，表面粗糙度 Ra 不大于 0.80 μm，表面硬度不小于 55HRC，硬化层厚度不小于 5mm。

3 钢质球座：球面及球窝粗糙度 Ra 不大于 0.32 μm，转动灵活。其他要求同钢质垫板。当压力机的上压板不带球座，或压板尺寸相对于试件尺寸过大时，应在试件与上压板间加一个合适尺寸的球座。对小试件不应使用大球座。

4 卡尺：分度值不大于 0.1mm。

5 钢直尺：分度值不大于 1mm。

6 辅助器具：万能角度尺、刀口形直尺、塞尺等。

5.2.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制作和养护试件，每组三个试件。抗压强度采用边长 150mm 的立方体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，用湿布覆盖试件，保持试件潮湿状态。

3 试验前将试件擦拭干净，检查外观，在上下承压面中部相垂直位置测量宽度（精确到 1mm）。试件的外观及偏差等应满足 5.1.7 条的规定。

4 将试验机上、下压板擦拭干净。将试件放在试验机下压板中部，以成型时侧面为承压面。如有必要，在试验机上、下压板与试件之间加入钢垫板，在上压板与试件之间正中位置夹放钢质球座。

5 设定试验机加载速度为 (18~30) MPa/min。开动试验机，当上压板与垫板将接触时，调整球座使试件受压均匀。使试验机连续而均匀地加荷直至试件破坏，记录破坏荷载 (P，精确到 0.01kN)。如手动控制加载速度，当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门直至试件破坏。

6 停机后取下试件，观察破坏后试件的形貌，如有明显的非均匀受压破坏的现象，应做记录。

5.2.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土立方体抗压强度按照公式 (5.2.4) 计算。

$$f_{cc} = \frac{P}{A} \times 1000 \quad (5.2.4)$$

式中 f_{cc} —— 抗压强度, MPa;
 P —— 破坏荷载, kN;
 A —— 试件承压面积, mm^2 。

2 以三个试件测值的平均值作为该组试件的抗压强度试验结果 (修约间隔 0.1MPa)。当有一个测值与中间值之差超过中间值的 15%时, 取中间值作为试验结果。当两个测值与中间值之差均超过中间值的 15%时, 该组试验结果无效。

5.3 混凝土劈裂抗拉强度试验

5.3.1 本试验用于测定混凝土立方体试件的劈裂抗拉强度。

5.3.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机、卡尺、钢直尺等应符合 5.2.2 条的规定。

2 劈裂夹具: 钢质, 示意图见图 5.3.2, 其中采用截面 5mm×5mm、长约 200mm 的平直钢制方垫条, 垫条应可抽出更换。也可直接使用钢制方垫条, 但应保证两根垫条放置时居中且平行。



图 5.3.2 劈裂抗拉强度试验夹具示意图

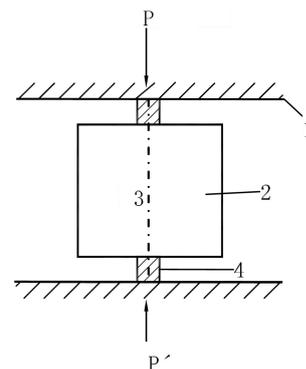
(待改为结构示意图)

5.3.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制作和养护试件, 每组三个试件。劈裂抗拉试验采用边长 150mm 的立方体试件, 在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 到达规定试验龄期时, 从养护室取出试件, 用湿布覆盖, 保持试件潮湿状态。

3 试验前将试件擦拭干净, 检查外观, 测量劈裂面尺寸



1—压板; 2—试件; 3—试件成型时顶面; 4—垫条

图 5.3.3 劈裂抗拉试验受力示意图

(精确到 1mm)。试件的外观及偏差等应满足 5.1.7 条的规定。

4 将图 5.3.2 所示劈裂夹具放在试验机下压板的中心位置,再居中放入试件,劈裂面应过顶面和底面。采用垫条时,过试件成型时的两个侧面中心划出相平行的定位线,在试验机上、下压板与试件之间加入垫条,垫条应与定位线重合。

5 设定试验机加载速度为(1.8~3.6)MPa/min。开动试验机,当上压板与试件接近时,调整球座使试件受压均匀。使试验机连续而均匀地加荷直至试件破坏,记录破坏荷载(P ,精确到 0.01kN)。如手动控制加载速度,当试件接近破坏而开始迅速变形时,应停止调整试验机油门直至试件破坏。

5.3.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土劈裂抗拉强度按照公式(5.3.4)计算。

$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi A} \times 1000 \quad (5.3.4)$$

式中 f_{ts} —— 劈裂抗拉强度,MPa;

P —— 破坏荷载,kN;

A —— 试件劈裂面面积, mm^2 。

2 以三个试件测值的平均值作为该组试件劈裂抗拉强度的试验结果(修约间隔 0.01MPa)。当有一个测值与中间值之差超过中间值的 15%时,取中间值作为试验结果。当两个测值与中间值之差均超过中间值的 15%时,该组试验结果无效。

5.4 混凝土粘结强度试验

5.4.1 本试验用于测定新老混凝土之间、混凝土与其他材料之间的粘结强度。

5.4.2 仪器设备与 5.3.2 相同。

5.4.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 用与被粘结结构物混凝土相近的原材料和配合比,按 5.1 节的规定制作一组三个边长为 150mm 的混凝土立方体试件。标准养护 14d 后取出,按照 5.3 节方法将试件劈成六块待用。

2 将试件劈开面清洗干净并保持湿润状态,垂直放入 150mm 立方体试模一侧,光面紧贴试模内壁,劈开面与试模之间形成尺寸约为 150mm×75mm×150mm 的剩余空间。

3 在六个试模的剩余空间中,根据需要浇入新混凝土拌和物或其他材料并使其密实。如新浇入混凝土,可分二层人工捣实,每层插捣 13 次,再按 5.1 节的规定脱模、养护。

4 到规定试验龄期取出试件,按 5.3 节的规定,将粘结面作为劈裂面,进行混凝土粘结强度的测试。

5.4.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土粘结强度按照公式(5.3.4)计算,其中 A 为试件粘结面面积。

2 在六块试件测值中,剔除最大最小两个,以其余四个测值的平均值,作为该组试件混凝土粘结强度的试验结果(修约间隔 0.01MPa)。

5.5 混凝土轴向拉伸试验

5.5.1 本试验用于测定混凝土的轴向抗拉强度、极限拉伸值以及抗拉弹性模量。

5.5.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机：拉力试验机或万能试验机，试件的破坏荷载宜在试验机全量程的 20%~80%，且其有效拉伸间距不小于（800~1000）mm。试验机还应符合 GB/T 3159《液压式万能试验机》及 GB/T 2611《试验机 通用技术要求》的规定，级别不低于 1 级。



图 5.5.2 附着式变形测量夹具示意图(上下两个支架为方框形)
(待改为结构示意图)

2 变形测量装置：可采用千分表、LVDT 位移计或电阻应变片等变形测量仪器。采用千分表或位移计时应备有附着式变形测量夹具（见图 5.5.2，上下支架两个为方框形），试件的变形通过夹具传递到千分表或位移计。采用电阻应变片或位移计时，应备有与其相匹配的记录仪。变形测量夹具的测距（或电阻应变片敏感栅长度）应大于骨料最大粒径的 3 倍，应变测量误差不应高于 20×10^{-6} 。

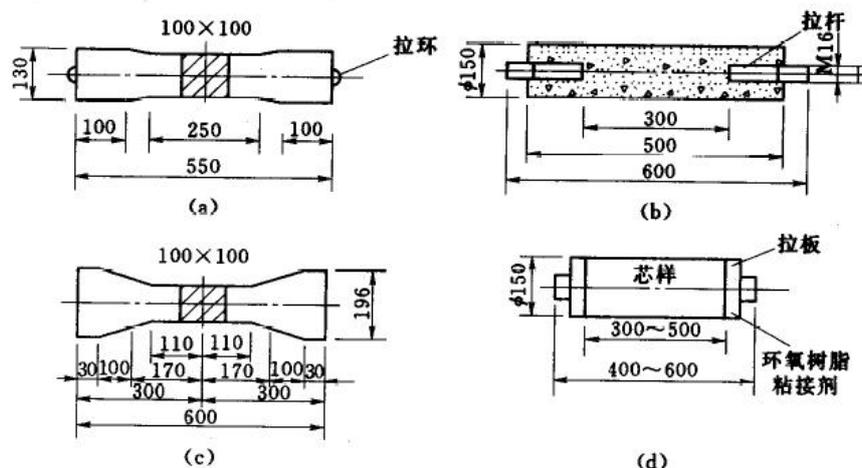
3 卡尺：分度值不大于 0.1mm。

4 钢直尺：分度值不大于 1mm。

5 辅助器具：拉环（或拉杆、拉板）、502 胶、环氧树脂粘结剂、角度尺、刀口形直尺、塞尺等。

5.5.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制作和养护试件，每组四个试件。拉伸试验试件形式见图 5.5.3 中 (a)、(b)、(c)。宜选用中部截面尺寸为 100mm×100mm，纯拉段长度不小于 200mm 的变截面棱柱体试件(图 5.5.3 中形式 a)，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料。在试验报告中应说明试件尺寸。拉伸试验试件长度减去 1.5 倍的两端预埋件埋入长度，或变断面段及以外段的长度，即认为是纯拉段长度。



(a)、(b)、(c) 室内成型试件；(d) 钻芯试件

图 5.5.3 混凝土轴向拉伸试件形式和尺寸 (单位: mm)

2 成型前埋件的安装。当采用图 5.5.3 (a) 形式试件时, 将拉环紧紧夹持在试模两端上、下拉环夹板的凹槽中, 注意检查拉环位置是否水平, 必要时用若干层纸垫在前夹板或后夹板上调整拉环的位置。当采用图 5.5.3 (b) 形式试件时, 上、下拉杆的埋设靠端板定位, 端板与试模内尺寸采用动配合精度, 应保证埋杆与试件同轴心。

3 到达规定试验龄期时, 从养护室取出试件, 用湿布覆盖试件, 保持试件潮湿状态。

4 试验前将试件擦拭干净, 测量试件中部纯拉段断面宽度 (精确到 0.1mm), 据此计算试件的断面面积 (A)。试件的外观及偏差等应满足 5.1.7 条的规定。

5 将试件安装在试验机上。试验机应具有球面拉力接头, 试件的拉环 (或拉杆、拉板) 与拉力接头连接。球面拉力接头用以调整试件以免产生偏心受拉。

6 变形测量装置应按以下规定安装。

- 1) 当采用千分表或位移计时, 将千分表或位移计固定在变形测量架上, 然后将变形测量架通过紧固螺钉固定在试件中部, 测量标距 (100mm 或 150mm) 由标距定位杆定位。使用变形测量架, 应在试件安装在试验机上以前, 用钢直尺在试件中部画出安装定位线。
- 2) 当采用电阻应变片时, 在测量完断面尺寸后, 用电风吹干试件的两侧中间部位, 然后用 502 胶粘贴电阻应变片, 使电阻应变片与试件紧密结合不应有气泡。电阻应变片应在中部两侧中间位置, 并且长度方向与试件轴线平行。在试件安装到试验机上后, 连接电阻应变片与记录仪。

7 设定试验机拉伸加载速度为 0.4MPa/min。应首先进行预拉, 记录仪表初始读数 (或清零), 开动试验机加荷到破坏荷载的 15%~20%后停机, 测读两侧变形值, 按照公式 (5.5.3) 计算偏心率 (修约间隔 1%)。试件受拉偏心率不应大于 15%。如有必要, 卸载后调整试件位置再次预拉。如试件受拉偏心率不能调整合格, 应做记录。

$$e = \frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \times 100\% \quad (5.5.3)$$

式中 e —— 偏心率;

ε_1 、 ε_2 —— 分别为试件两侧的变形值。

8 预拉完毕后卸载,记录仪表初始读数(或清零),正式开始测试,使试验机连续匀速张拉直至试件拉断,记录破坏荷载(P ,精确到0.01kN)。如手动控制加载速度,当试件接近破坏而开始迅速变形时,应停止调整试验机油门直至试件破坏。试验过程中,由记录仪自动记录或人工测读每加荷500N或1000N(或更小间隔)时相应的变形值。

9 停机后取下试件,观察试件断裂面的位置和形貌。如断裂面在试件中部纯拉段之外,与变截面转折点或埋件端点的距离在20mm以内,或断裂面明显不垂直于试件轴线,应做记录。

5.5.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 轴向抗拉强度按照公式(5.5.4-1)计算。

$$f_t = \frac{P}{A} \times 1000 \quad (5.5.4-1)$$

式中 f_t —— 轴向抗拉强度,MPa;

P —— 破坏荷载,kN;

A —— 试件断面面积, mm^2 。

2 极限拉伸值的确定。按照公式(5.5.4-1)计算不同荷载时的应力(σ),然后以应变为横坐标,应力为纵坐标,做出试件拉伸试验全过程(应去除末端明显偏离的数据点)的应力—应变曲线图(或应变—应力曲线图),见图5.5.4。取得曲线的二阶多项式拟合方程,将代入破坏应力求得的应变值作为该试件的极限拉伸值。如应力—应变曲线不通过坐标原点,应更改拟合方程,修正极限拉伸值。

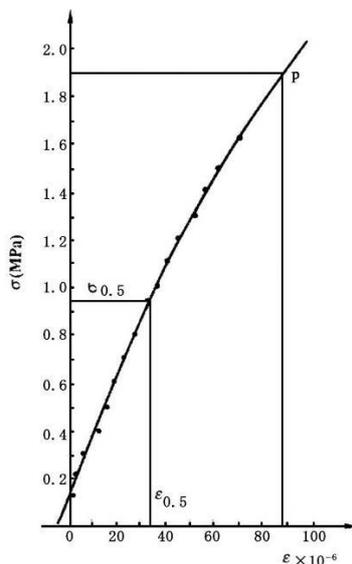


图 5.5.4 应力—应变曲线图

3 轴向抗拉弹性模量取应力从0~50%破坏应力的割线弹性模量,按照公式(5.5.4-2)计算。

$$E_t = \frac{\sigma_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \div 1000 \quad (5.5.4-2)$$

式中 E_t —— 轴向抗拉弹性模量, GPa;

$\sigma_{0.5}$ —— 50%的破坏应力, MPa;

$\varepsilon_{0.5}$ —— 50%破坏应力对应的应变。

4 轴向抗拉强度、极限拉伸值、抗拉弹性模量均以四个试件测值的平均值作为试验结果(修约间隔分别为 0.01MPa、 1×10^{-6} 、0.1GPa)。当试件的断裂位置与变截面转折点或埋件端点的距离在 20mm 以内时,该测值应剔除,取余下测值的平均值作为试验结果。如可用的测值少于两个,该组试验结果无效。

5.6 混凝土弯曲试验

5.6.1 本试验用简支梁三分点加荷法测定混凝土的抗弯强度、弯曲极限拉伸值和抗弯弹性模量。

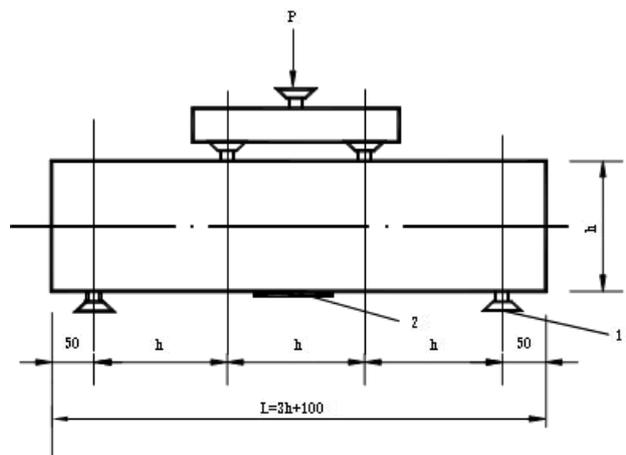
5.6.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机应符合 5.2.2 条的规定。

2 三分点加荷装置:各部件均为钢质,加荷装置和试件受力情况见图 5.6.2-1、图 5.6.2-2。上部两个压辊和下部两个支辊应相互平行放置,与试件接触端具有直径 30mm 的弧形,且长于试件宽度。上部两个压辊应能使两个相等的荷载同时作用于试件的两个三分点处。其中一个支辊应固定不动,其余支辊和压辊可沿其长度方向小角度倾斜与试件紧密接触。



图 5.6.2-1 三分点加荷装置示意图



1—支座; 2—电阻片

图 5.6.2-2 弯曲试验示意图

3 变形测量装置:可采用位移计或电阻应变片等变形测量仪器,应满足 5.5.2 条的规定。

4 卡尺:分度值不大于 0.1mm。

5 钢直尺:分度值不大于 1mm。

6 辅助器具:角度尺、刀口形直尺、塞尺、502 胶水等。

5.6.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制作和养护试件，只测抗弯强度时每组三个试件，否则应增加一个试件以确定预弯荷载。弯曲试验采用 150mm×150mm×550mm（或 600mm）的棱柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。如选用 100mm×100mm×400mm（或 515mm）的棱柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料。

2 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，用湿布覆盖试件，保持试件潮湿状态。

3 试验前将试件擦拭干净，检查外观，测量试件中部断面尺寸（精确到 1mm）。如实测尺寸与公称尺寸之差不超过 1mm，可按公称尺寸进行计算截面积。试件的外观及偏差等应满足 5.1.7 条的规定。在试件各面长度方向的中部 1/3 区域内，不应有表面直径超过 5mm、深度超过 2mm 的孔洞，否则应在试验报告中注明。

4 按图 5.6.2-2 所示位置在试件两个侧面划出相平行的加荷定位线。如需测试弯曲拉伸应变时，将试件底面中间受拉段用电风吹干，然后用 502 胶水粘贴电阻应变片，电阻应变片应在中部中间位置并且长度方向与试件轴线平行。亦可使用引伸仪或位移计，需有与其配套的支架。

5 将三分点加荷装置安装到试验机上，并调整好下支辊间距，间距的尺寸偏差不应大于 1mm。三分点加荷装置的中心应在试验机加荷轴线上。

6 将试件安放在三分点加荷装置中，并加装上压辊和压梁。承压面应选择试件成型时的侧面，上压辊、下支辊应与定位线重合。

7 开动试验机，手动控制慢速进行预弯，轻微压实即可。当开始压实时，注意观察并调整加荷装置，使其与试件接触均衡。然后卸载。

8 设定试验机加载速度为 0.7MPa/min，启动试验机连续匀速加荷直至试件折断，记录破坏荷载 P （精确到 0.01kN）。如手动控制加载速度，当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门直至试件破坏。

9 如需测定弯曲极限拉伸值和抗弯弹性模量，可先用一个试件按照前述步骤测试抗弯破坏荷载，然后在测试其余三个试件时，安装应变测量装置，并加荷到抗弯破坏荷载的 15%~20%进行两次预弯。预弯完成后，记录应变测量仪表初始读数（或清零），进行正式测试。加荷过程中，由记录仪自动记录或人工测读每加荷 500N 或 1000N（或更小间隔）时相应的变形值。

10 停机后取下试件，观察试件断裂面的位置和形貌，如断裂面位于中部 1/3 受拉区之外，或断裂面明显不垂直于试件轴线，应做记录。

5.6.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土抗弯强度按照公式（5.6.4-1）计算。

$$f_f = \frac{Pl}{bh^2} \times 1000 \quad (5.6.4-1)$$

式中 f_f —— 抗弯强度，MPa；

P —— 破坏荷载，kN；

l —— 支座间距（即跨度），为 3h，mm；

b —— 试件截面宽度，mm；

h —— 试件截面高度，mm。

2 抗弯极限拉伸值的确定方法同 5.5.4。

3 抗弯弹性模量取应力从 0~50%破坏应力的割线弹性模量，按照公式 (5.6.4-3) 计算。

$$E_f = \frac{\sigma_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \div 1000 \quad (5.6.4-3)$$

式中 E_f —— 抗弯拉弹性模量，GPa；

$\sigma_{0.5}$ —— 50%破坏应力，MPa；

$\varepsilon_{0.5}$ —— 50%破坏应力对应的应变。

4 抗弯强度、抗弯极限拉伸值、抗弯弹性模量均以三个试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔分别为 0.01MPa、 1×10^{-6} 、0.1GPa）。但是断裂面位于中部 1/3 受拉区之外的试件，其测值应剔除，取余下两个试件的测值的平均值作为试验结果。当可用的测值少于两个时，该组试验结果无效。

5.7 混凝土抗剪强度试验

5.7.1 本试验用于测定混凝土的抗剪强度，或混凝土与其他材料结合面的抗剪强度。

5.7.2 仪器设备应包括以下几种。

1 剪切试验仪：可以同时依法向和剪切向加荷的设备，示意图见图 5.7.2。剪切试验过程中，法向应力应能保持恒定。

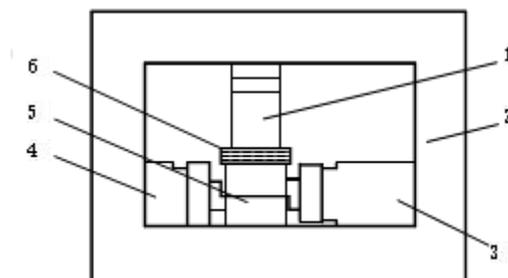
2 变形测量仪器：千分表或位移计，及磁性支架，测杆和表架应具有足够的刚度。

3 卡尺：分度值不大于 0.1mm。

4 钢直尺：分度值不大于 1mm。

5.7.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定和下述方法制作和养护试件，每组 15 个试件。抗剪强度试验采用边长 150mm 的立方体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。对不同试验目的的试件，按照以下规定成型。



1—法向加荷；2—刚性架；3—剪切向加荷；4—传力垫块；5—剪力盒；6—滚轴排

图 5.7.2 混凝土剪切试验仪示意图

1) 用于混凝土本体抗剪试验的试件，可直接成型。

- 2) 用于混凝土层间结合试验的抗剪试件, 先取适量拌和物装入试模, 密实后应为试模深度的 1/2, 放入养护室养护至要求的间隔时间。然后取出试模, 按施工要求进行表面处理, 再重新搅拌混凝土成型上半部分。
 - 3) 用于混凝土和岩石胶结的试件, 必须先测定岩石面的起伏差, 绘制岩石沿剪切方向的高度变化曲线, 然后在岩石上铺筑混凝土, 制作剪切试件。
- 2 到达规定试验龄期时, 从养护室取出试件, 用湿布覆盖试件, 保持试件潮湿状态。
 - 3 试验时将试件擦拭干净, 成型面朝下、剪切面水平置于剪力盒中, 然后放上传力板和滚轴排, 应保证法向力和剪切力的合力通过剪切面的中点。
 - 4 安装测量法向和剪切向变形的仪表, 磁性支架的基座应设置在剪切变形影响范围之外。
 - 5 法向荷载按设计的法向最大荷载, 均分为五级施加, 每级荷载取三个试件进行剪切试验。
 - 6 开动试验机, 先施加法向荷载到预定等级, 测读法向变形, 当前后两次法向变形读数差不超过 1% 时, 开始施加剪切荷载。在试件剪切过程中, 应使法向应力保持恒定。开始时施加剪切荷载的速率为 0.4MPa/min, 选择合适的荷载间隔测读并记录荷载和剪切变形值。当所加剪切荷载引起的水平变形为前一荷载变形的 1.5 倍以上时, 剪切荷载的速率减半, 并减小测读间隔, 直至剪断, 记录剪切破坏荷载 (P , 精确到 0.01kN)。
 - 7 试件剪断后, 移开剪切位移表, 在相同法向应力下按上述方法进行摩擦试验, 测读在大致相等的剪应力作用下不断发生大位移的残余剪切荷载。必要时可改变法向应力进行单点摩擦试验。
 - 8 停机后取下试件, 观察试件剪切面的形貌, 对骨料及界面破坏情况进行描述, 测定剪切面起伏差, 绘制剪切方向的断面高度变化曲线, 测量并计算有效剪切面积 (A)。

5.7.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 按照公式 (5.7.4-1)、公式 (5.7.4-2) 计算各级法向荷载下的法向应力和剪应力, 取三个试件测值的平均值为本级法向荷载下的剪应力。

$$\sigma_i = \frac{P}{A} \times 1000 \quad (5.7.4-1)$$

$$\tau_i = \frac{Q}{A} \times 1000 \quad (5.7.4-2)$$

式中 σ_i —— 法向应力, MPa;
 τ_i —— 剪应力, MPa;
 P —— 总法向荷载, kN;
 Q —— 剪切荷载, 应扣除滚轴排摩擦阻力, kN;
 A —— 有效剪切面积, mm²。

- 2 根据各级法向荷载下的法向应力和剪应力, 在坐标图上作 σ — τ 曲线, 并用最小二乘法或作图法求得公式 (5.7.4-3) 中的 f' 和 c' 。

$$\tau = \sigma f' + c' \quad (5.7.4-3)$$

式中 τ —— 极限抗剪强度, MPa;
 σ —— 法向应力, MPa;

f' —— 摩擦系数；
 c' —— 粘聚力，MPa。

5.8 混凝土轴心抗压强度与静力抗压弹性模量试验

5.8.1 本试验用于测定混凝土圆柱体的轴心抗压强度和静力抗压弹性模量。

5.8.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机与 5.2 节相同。

2 变形测量装置应符合 5.5.2 条的规定。对圆柱体试件，附着式变形测量夹具见图 5.8.2，上下两个支架为圆环形。



图 5.8.2 附着式变形测量夹具(上下两个支架为圆环形)

(待改为结构示意图)

3 卡尺：分度值不大于 0.1mm。

4 钢直尺：分度值不大于 1mm。

5 辅助器具：角度尺、刀口形直尺、塞尺、玻璃板、磨石机、502 胶水等。

5.8.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制作和养护试件。待混凝土初凝前，在试件顶面填以少量的干硬水泥净浆，用玻璃板抹平表面。测定轴心抗压强度和抗压弹性模量时每组各三个试件。轴心抗压试验采用 $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的圆柱体试件。

2 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，用湿布覆盖试件，保持试件潮湿。

3 试验前将试件擦拭干净，检查外观，测量尺寸（精确到 1mm），并据此计算试件的承压面积（ A ）。如实测尺寸与公称尺寸之差不超过 1mm，可按公称尺寸进行计算。试件的外观及上下承压面的平行度、平面度及与轴线的垂直度等偏差均应满足 5.1.7 条的规定。必要时，可用磨石机加工圆柱体试件的底面和成型时的顶面。

4 将试验机上、下压板擦拭干净。将试件放在试验机下压板中心位置。如有必要，在试验机压板与试件之间加入钢垫板，或在上压板与上钢垫板之间正中位置夹放钢质球座。

5 测定轴心抗压强度。设定试验机加荷速度为 (25 ± 5) MPa/min，开动试验机，当上压板与试件接近时，调整球座使试件受压均匀。使试验机连续匀速加荷直至试件破坏，记录破坏荷载 (P) ，精确到 0.01kN)。如手动控制加载速度，当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门直至试件破坏。

6 测定抗压弹性模量应按以下步骤进行。

- 1) 按 5.5.3 条 6 款的规定安装变形测量装置，测量标距为 150mm。测量标距不应大于试件高度的 1/2，也不应小于 100mm 及骨料最大粒径的 3 倍。
- 2) 设定试验机加荷速度为 (15 ± 3) MPa/min。首先应按照 5.5.3 条 7 款的方法进行进行预压，和调整试件受压偏心率。
- 3) 预压完毕后卸载，记录仪表初始读数（或清零），正式开始测试，使试验机连续匀速加压，由记录仪自动记录或人工测读每加荷 500N 或 1000N（或更小间隔）时相应的变形值（至少六个）。当荷载达到破坏荷载的 50%时，在不改变加荷速度的同时快速卸下变形测量装置。继续加压直至试件破坏，记录破坏荷载 (P') ，精确到 0.01kN)。如手动控制加载速度，当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门直至试件破坏。

5.8.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 轴心抗压强度按照公式 (5.8.4-1) 计算。

$$f_c = \frac{P}{A} \times 1000 \quad (5.8.4-1)$$

式中 f_c —— 轴心抗压强度，MPa；

P —— 破坏荷载，kN；

A —— 试件承压面积， mm^2 。

2 静力抗压弹性模量取应力从 0.5MPa~40%破坏应力的割线弹性模量，按照公式 (5.8.4-2) 计算。

$$E_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \div 1000 \quad (5.8.4-2)$$

式中 E_c —— 静力抗压弹性模量，GPa；

$\Delta\sigma$ —— 从 0.5MPa 到 40%破坏应力的应力增加值，MPa；

$\Delta\varepsilon$ —— 从 0.5MPa 对应应变到 40%破坏应力对应应变的应变增加值。

其中，应力 σ 、应变 ε 分别按照公式 (5.8.4-3)、公式 (5.8.4-4) 计算。

$$\sigma = \frac{P}{A} \times 1000 \quad (5.8.4-3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5.8.4-4)$$

式中 P —— 荷载，kN；

A —— 试件承压面积， mm^2 。

ΔL —— 变形值, mm;

L_0 —— 测量变形的标距, mm。

3 轴心抗压强度、静力抗压弹性模量均以三个试件测值的平均值作为试验结果 (修约间隔分别为 0.1MPa、0.1GPa)。当有一个测值与中间值之差超过中间值的 15%时, 取中间值作为试验结果。当两个测值与中间值之差均超过中间值的 15%时, 该组试验结果无效。

5.9 混凝土泊松比试验

5.9.1 本试验用于测定混凝土的泊松比。

5.9.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机等与 5.8 节相同。

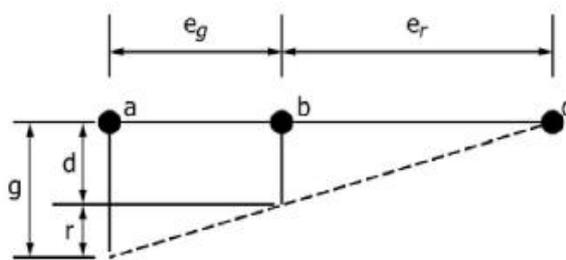
2 变形测量仪器: 可采用千分表、位移计或电阻应变片等, 要求与 5.8 节相同。

3 夹具: 可使用轴向引伸计 (如 5.8.2 节规定的圆形卡箍安装变形测量仪器), 测量纵向变形; 配合使用圆周引伸计或径向引伸计, 测量横向变形。亦可使用图 5.9.2-1 所示的泊松比变形测量架。测量架由两套卡箍组合而成, 其中上下两个卡箍用于测量试件纵向变形, 用三个紧固螺钉与试件固定, 在开口侧安装测量仪表, 另一侧为支撑杆 (亦是标距定位杆之一, 与上卡箍为绞合连接); 另一套中间卡箍用于测量试件横向变形, 由在直径方向相对应的两个紧固螺钉与试件固定, 在开口侧安装测量仪表, 另一侧为绞合点。试件的实际变形与测量仪表读数之间的关系如图 5.9.2-2 所示, 用公式(5.9.2) 计算试件的实际横向变形和实际纵向变形。如果绞合点 c 和测量仪表 a 到卡箍固定点 b 的垂直距离相等, 试件的实际变形等于测量仪表读数的一半。



图 5.9.2-1 泊松比变形测量架

(待改为结构示意图)



a—测量仪表位置；b—卡箍固定点；c—绞合点；d—试件变形；g—测量仪表读数

图 5.9.2-2 变形计算示意图

$$d = \frac{e_r}{e_r + e_g} \times g \quad (5.9.2)$$

式中 d —— 试件变形， μm ；

g —— 测量仪表读数， μm ；

e_r —— 从枢轴杆到中间卡箍两个支撑点平面的垂直距离， mm ；

e_g —— 从测量仪表到中间卡箍两个支撑点平面的垂直距离， mm 。

5.9.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 前序试验步骤同 5.8.3 条的步骤 1~3。

2 变形测量装置应按以下规定安装。

1) 当采用千分表或位移计时，首先组装泊松比变形测量架，再将试件放入架中，通过上下两个卡箍的紧固螺钉将测量架固定在试件中部，测量标距（100mm 或 150mm）由标距定位杆定位。然后固定中间卡箍的紧固螺钉，最后将测量仪表固定在测量架。通过调整测杆压入长度，调节仪表读数在其测量范围中部区域。在试件安装到试验机上后，连接位移计与记录仪。

2) 当采用电阻应变片时，在测量完断面尺寸后，用电风吹干试件的两侧中间部位，然后用 502 胶粘贴电阻应变片，电阻应变片应在中部两侧中间位置，并且一支长度方向与试件轴线平行，一支垂直。在试件安装到试验机上后，连接电阻应变片与记录仪。

3 后续试验步骤同 5.8.3 条的步骤 6 中 2)、3)。

5.9.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土泊松比按照公式 (5.9.4) 计算。

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5.9.4)$$

式中 μ —— 混凝土泊松比；

ε_1 —— 起点纵向应变，取 50×10^{-6} 。

ε_2 —— 40%破坏荷载时的纵向应变。

ε_{t1} —— 起点纵向应变 50×10^{-6} 对应的试件中部横向应变；

ε_{t2} —— 40%破坏荷载时的试件中部横向应变；

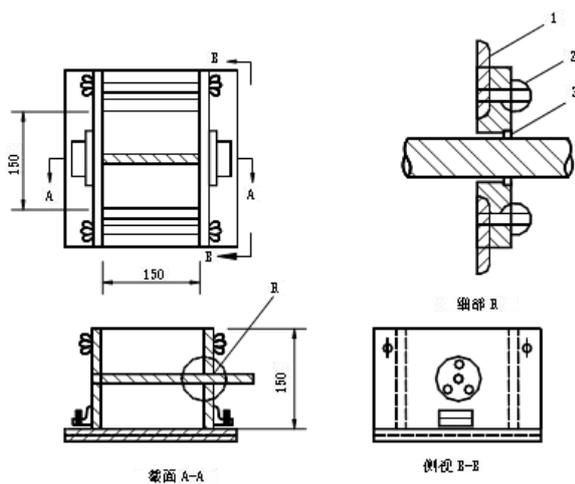
2 以三个试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.01）。当有一个测值与中间值之差超过中间值的 15%时，取中间值作为试验结果。当两个测值与中间值之差均超过中间值的 15%时，该组试验结果无效。

5.10 混凝土对钢筋握裹力试验

5.10.1 本试验用于测定混凝土对钢筋的握裹力。

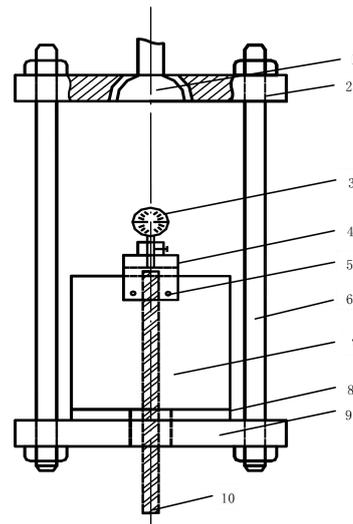
5.10.2 仪器设备应包括以下几种。

1 握裹力试模：钢质，如图 5.10.2-1 所示，模腔尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ ，相对两侧壁中心留有孔洞，用于嵌入和穿过钢筋，保证钢筋水平且钢筋轴线距离模底 75mm。钢筋穿过的孔洞里应有橡皮圈密封。



1—模板；2—固定圈；3—用橡皮圈堵塞

图 5.10.2-1 握裹力试模（单位：mm）



1—带球座拉杆；2—上端钢板；3—千分表；
4—仪器固定架；5—止动螺丝；6—钢杆；7—试件；
8—垫板；9—下端钢板；10—埋入的钢筋

图 5.10.2-2 握裹力试验装置示意图

2 握裹力夹具：如图 5.10.2-2 所示，试件夹具是由两块长方形钢板（厚度 30mm，面积为 $250\text{mm} \times 150\text{mm}$ ，材质为 45 号优质碳素结构钢）与四根的钢筋（直径 18mm）形成的框架。上端钢板中心附有直径为 25mm 的拉杆，拉杆下端套入钢板并成球面相接，上端供万能机上夹头夹持。另附 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 10\text{mm}$ 钢垫板一块，垫于试件与夹具下端钢板之间，钢垫板和下端钢板中心开有直径 40mm 的圆孔。

3 位移测量装置包括以下内容。

1) 测量仪器，可用千分表或 LVDT 位移计，分度值不大于 0.001mm；

2) 仪器固定架，横跨试件表面，并通过止动螺丝固定在试件上。固定架横杆中部有孔，可穿

过并夹持位移测量仪器，使之直立。

4 万能试验机、卡尺等应符合 5.2 节的规定。

5.10.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 试验采用 HRB400 热轧带肋钢筋，性能应符合 GB/T 1499.2 的规定，其公称直径为 20mm。为了具有足够的长度供万能机夹持和装置量表，长度不宜小于 500mm。试验中采用的钢筋尺寸和形状均应相同。成型前钢筋应用钢丝刷刷净，并用丙酮擦拭，不应有锈屑和油污存在。钢筋的测试端面应切割打磨光滑平整并与轴线垂直。确有必要时，也可采用工程中实际使用的其他钢筋（公称直径 20mm），应在试验结果中注明。

2 按 5.10.2-1 所示将钢筋装入握裹力试模，钢筋的测试端嵌入模壁予以固定，另一端由模壁伸出，作为加力之用。钢筋与试模孔洞间隙应用橡皮圈密封，不应漏浆。

3 采用工程所用混凝土配合比，按 5.1 节的规定制作和养护试件，每组六个试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料。同时成型一组同龄期立方体抗压强度试件。

4 试件成型后，特别在拆模时，不应碰动钢筋。拆模时间以 48h 为宜，拆模时应先取下橡皮固定圈，再将套在钢筋上的模板小心取下。

5 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，用湿布覆盖试件，保持试件潮湿状态。抗压强度试件按照 5.2 的规定测定。

6 试验前将握裹力试件擦拭干净，检查外观，用卡尺测量钢筋埋入混凝土中的长度（精确到 0.1mm），据此计算埋入混凝土中的钢筋表面积（ A ）。钢筋不应松动，与试件侧面应垂直，偏差不应大于 0.5° 。

7 将试件套上中心有孔的垫板，然后装入已安装在万能试验机上的握裹力夹具中，使万能试验机的下夹头将钢筋夹牢。

8 在试件上安装仪器固定架和位移测量仪器，使测量仪器测杆垂直向下，探头与钢筋测量端面中心紧密接触。

9 设定试验机的加荷速度为 24kN/min。记下位移测量仪器的初始读数（或调零）后，开动试验机拉拔钢筋。试验过程中，如人工测读，记录每加荷（1~5）kN 相应的位移测量仪器读数。

10 到达下列任何一种情况时应停止加荷。

- 1) 钢筋测量端面的滑动位移超过 0.1mm；
- 2) 混凝土发生破裂；
- 3) 钢筋达到屈服点。

5.10.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 当采用带肋钢筋时，以六个试件在各级荷载下滑动位移的算术平均值为横坐标，以荷载为纵坐标，做出荷载—滑动位移关系曲线，取得线性拟合方程。取滑动位移 0.01mm、0.05mm、0.10mm，计算相应的荷载。混凝土对钢筋握裹力（强度）按照公式（5.10.4）计算（修约间隔 0.01MPa）。

$$\tau = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3A} \times 1000 \quad (5.10.4-1)$$

$$A = \pi DL \quad (5.10.4-2)$$

式中 τ —— 混凝土对钢筋握裹力（强度），MPa；
 P_1 —— 滑动位移为 0.01mm 时的荷载，kN；
 P_2 —— 滑动位移为 0.05mm 时的荷载，kN；
 P_3 —— 滑动位移为 0.10mm 时的荷载，kN；
 A —— 埋入混凝土中的钢筋表面积， mm^2 ；
 D —— 钢筋的公称直径，mm；
 L —— 钢筋埋入混凝土中的长度，mm。

3 试验记录应注明钢筋的类型、直径及混凝土配合比、同龄期混凝土抗压强度等内容。

5.11 混凝土压缩徐变试验

5.11.1 本试验用于测定混凝土的压缩徐变变形。适用于恒温和绝湿条件下，单向受压的混凝土徐变试验。

5.11.2 仪器设备与设施应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 徐变仪：弹簧式或液压式压缩徐变仪，如图 5.11.2 所示，包括上下压板、弹簧（或液压）持荷装置以及承力丝杆。最大轴向压缩荷载低于 200kN，可采用弹簧式压缩徐变仪；最大轴向压缩荷载大于 200kN 时应选用液压式压缩徐变仪。弹簧及丝杠尺寸应按徐变试验仪所要求的吨位而定。在试验荷载下，丝杠的拉应力不应大于材料屈服点的 30%，弹簧的工作压力不应超过允许极限荷载的 80%。但工作时弹簧应有足够的调整能力，压缩变形不应小于 20mm。上下压板、垫板及球座应满足 5.2 节的规定。

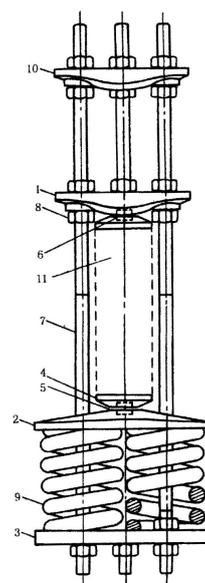
2) 加荷设备：包括油压千斤顶、测力计等。测力计的测量精度应达到所加荷载的 2%，试验加压荷载应在测力计量程的 20% 与 80% 之间。

3) 应变测量仪器：差动电阻式应变计，标距不应小于骨料最大粒径的三倍，测量误差不应大于 4×10^{-6} ，并应满足 GB/T 3408.1 的规定。宜配套应变计自动采集记录设备。

4) 水工比例电桥。

5) 辅助器具：橡皮套或金属套筒等材料密封。

2 恒温室：温度应控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，保温要求应符合 SL 138 的规定。宜配备恒温环境控制设备。地面应有必要的减震措施。



1—上板；2—中板；3—下板；4—垫板；5—球座；6—钢球；
7—螺杆；8—螺帽；9—弹簧；10—加压板；11—试件

图 5.11.2 弹簧式压缩徐变仪示意图

5.11.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 使用前将应变计电缆接入水工比例电桥，检查应变计是否正常。

2 压缩徐变试验采用 $\Phi 150\text{mm}\times 450\text{mm}$ 的圆柱体试件。试模侧壁宜有固定应变计和穿出线缆的孔洞。应变计应垂直固定在试模中心，其轴线应与试模轴线重合，如图 5.11.3 所示。

3 徐变试验加荷龄期，宜为 3d、7d、28d、90d、180d、360d，也可根据试验需要确定加荷龄期。每个龄期应制备三个徐变试件，及三个 $\Phi 150\text{mm}\times 300\text{mm}$ 的轴心抗压试件。同时，一次成型的、同配合比的几组试件，应制备两个测自生体积变形和温度变形的补偿试件，形状和尺寸与徐变试件相同。

4 按 5.1 节的规定制作徐变试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料，并计算试件灰浆率。同时采用湿筛混凝土按 5.8 节的规定制作轴心抗压试件。成型徐变试件时将混凝土拌和物一次装模用振动台振动密实。不宜采用人工插捣密实方式，容易将固定应变计的细线插断，或导致应变计倾斜。待混凝土初凝前，在试件顶面填以少量的干硬水泥净浆，用玻璃板抹平表面。成型后用水工比例电桥检查应变计是否正常。

5 徐变试件成型后，经（24~48）h 拆模，立即用橡皮套或金属套筒等材料密封，可用充气法检查密封效果。徐变试件和补偿试件移入（20±2）℃的恒温室，抗压强度试件移入标准养护室养护。

6 到达加荷龄期时，按 5.8 节的规定测定圆柱体试件的轴心抗压强度，并计算出压缩徐变试件的破坏荷载。

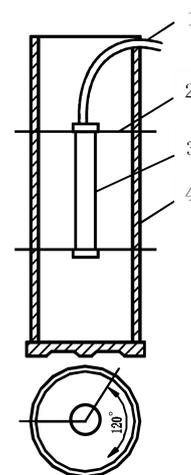
7 徐变试验应在（20±2）℃的恒温环境中进行。将徐变试件安装在徐变仪上，如图 5.11.2 所示，调试对中。

8 将应变计电缆接入水工比例电桥，按 5.8 节方法（不需预压），在徐变仪上测定徐变试件的抗压弹性模量，最大荷载不超过徐变试件破坏荷载的 30%。该弹性模量仅供徐变计算用。当弹性模量试验加荷到达最大荷载时，即可作为徐变试验的加荷荷载。此时需迅速拧紧徐变仪上的荷载固定螺母，然后松开千斤顶，立即测读应变计的电阻比与电阻，作为试件徐变变形的基准值。同时，按 5.14 节的规定测读补偿试件应变计的电阻比与电阻，并作为该组试件徐变变形的补偿起点。

9 再将应变计电缆接入自动采集记录设备，开始徐变检测。如人工测读，宜在加荷后 2h、6h、24h 接入水工比例电桥各测读一次，以后每天测读一次至两周，再每周测读一次或两次至半年，再每月测读一次或两次直至试验结束。在每次测读徐变试件的同时应测读补偿试件。

10 徐变试验期间，由于加荷产生压缩变形会造成应力松弛，所以当荷载变化大于 2%时，必须进行调荷。宜在加荷后第 1d、7d、30d、90d、180d 时定期调荷，调荷前后应测读应变计的电阻比与电阻并记录。

11 持荷时长根据试验需要确定，也可在徐变变形基本稳定后停止试验。



1—电缆；2—24°铅丝；3—应变计；4—铁模

图 5.11.3 应变计安装示意图

5.11.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 抗压弹性模量按照公式 (5.11.4-1) 计算 (修约间隔 0.1GPa)。

$$E_c = \frac{P_c}{Af\Delta Z} \quad (5.11.4-1)$$

式中 E_c —— 抗压弹性模量, GPa;

P_c —— 受压荷载 (不超过试件破坏荷载的 30%), kN;

A —— 试件受荷面积, mm^2 ;

f —— 应变计应变灵敏度 (厂家提供), $10^{-6}/(0.01\%)$;

ΔZ —— 应变计电阻比由荷载为零到最大受压荷载时的变化量, 0.01%。

2 混凝土压缩徐变度可按以下规定计算。

1) 用差动电阻式应变计观测变形时, 压缩徐变应变按照公式 (5.11.4-2) ~ 公式 (5.11.4-6) 计算。

$$\varepsilon_c = f\Delta Z + b\Delta T - \varepsilon_0 \quad (5.11.4-2)$$

$$\varepsilon_0 = f'\Delta Z' + b'\Delta T \quad (5.11.4-3)$$

$$\Delta Z = Z_i - Z_0 \quad (5.11.4-4)$$

$$\Delta T = T_i - T_0 \quad (5.11.4-5)$$

$$T_i = a'(R_i - R_0) \quad (5.11.4-6)$$

式中 ε_c —— 混凝土试件的压缩徐变应变, 10^{-6} ;

ε_0 —— 补偿试件的应变值, 10^{-6} ;

b —— 应变计温度补偿系数 (厂家提供), $10^{-6}/^\circ\text{C}$;

ΔZ —— 电阻比变化量, 0.01%, 即某一时刻的电阻比 Z_i 与基准电阻比 Z_0 之差;

ΔT —— 温度变化量, $^\circ\text{C}$, 即某一时刻的温度 T_i 与基准温度 T_0 之差;

f' —— 补偿试件应变计应变灵敏度 (厂家提供), $10^{-6}/(0.01\%)$;

$\Delta Z'$ —— 补偿试件应变计电阻比变化量, 0.01%;

b' —— 补偿试件应变计温度补偿系数 (厂家提供), $10^{-6}/^\circ\text{C}$;

a' —— 应变计温度灵敏度系数 (厂家提供), $^\circ\text{C}/\Omega$;

R_i —— 温度 T_i 对应的实测电阻值, Ω ;

R_0 —— 0°C 的电阻值 (厂家提供), Ω 。

2) 单位应力下的压缩徐变应变, 即压缩徐变度按照公式 (5.11.4-7)、公式 (5.11.4-8) 计算。

$$C_c = \varepsilon_c \times \frac{1}{\sigma_c} \times a \quad (5.11.4-7)$$

$$a = V_0/V \quad (5.11.4-8)$$

式中 C_c —— 原配合比混凝土的压缩徐变度, $10^{-6}/\text{MPa}$;

σ_c —— 混凝土试件所受压应力, MPa;

a —— 湿筛混凝土的灰浆率;

V_0 —— 原配合比混凝土中水泥、掺合料和水的体积, L/m^3 ;

V —— 湿筛混凝土中水泥、掺合料和水的体积, L/m^3 。

3) 单位应力下的总压缩应变按照公式 (5.11.4-9) 计算。

$$\varepsilon'_c = (1/E_c) + C_c \quad (5.11.4-9)$$

式中 ε'_c —— 单位应力下的总压缩应变, $10^{-6}/MPa$;

$1/E_c$ —— 单位应力下的压缩弹性应变, $10^{-6}/MPa$ 。

3 不可恢复的压缩徐变变形按照公式 (5.11.4-10) 计算。

$$C'_n = C_c - C'_y \quad (5.11.4-10)$$

式中 C'_n —— 不可恢复的压缩徐变变形, $10^{-6}/MPa$;

C_c —— 压缩徐变度, $10^{-6}/MPa$;

C'_y —— 弹性后效, $10^{-6}/MPa$ 。

4 以三个试件测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1×10^{-6})。

5 如需要, 以持荷时长 (试件龄期 t 与加荷龄期 τ_m 之差) 为横坐标, 不同加荷龄期的压缩徐变度为纵坐标, 绘制徐变度曲线。可采用最小二乘法进行曲线拟合, 并给出混凝土的压缩徐变度—持荷时长最优拟合表达式、适用条件。

5.12 混凝土拉伸徐变试验

5.12.1 本试验用于测定混凝土的拉伸徐变变形。适用于恒温和绝湿条件下, 单向拉伸的混凝土徐变试验。

5.12.2 仪器设备与设施应包括以下几种。

1 徐变仪: (30~50) kN 的弹簧式拉伸徐变仪, 其基本形式如图 5.12.2 所示, 它包括上下压板, 弹簧持荷装置以及二根承力丝杆。弹簧及丝杆尺寸应按徐变试验仪所要求的吨位而定。在试验荷载下, 丝杆的应力不应大于材料屈服强度的 30%, 弹簧的工作拉力不应超过允许极限荷载的 80%。工作时弹簧应有足够的调整能力, 拉伸变形不应小于 20mm。

2 其他仪器设备、设施与 5.11 节相同。

5.12.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 使用前将应变计电缆接入水工比例电桥, 检查应变计是否正常。

2 拉伸徐变试验采用 $\Phi 150\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的圆柱体试件, 试模两端可埋设拉杆, 见图 5.5.3 中 b)。将应变计垂直固定在试模中心, 应使其轴线与试件纵轴重合, 并安装好两端拉力预埋件 (M16)。

3 徐变试验加荷龄期, 宜为 7d、28d、90d、180d、360d, 也可根据需要确定加荷龄期。每个龄期应制作三个拉伸徐变试件, 及四个轴向拉伸试件 (图 5.5.3 中形式 a 或 b)。同时, 一次成型的几组同配合比试件应制备不少于两个测自生体积变形和温度变形的补偿试件, 形状和尺寸与徐变试件相同。

4 按 5.1 节的规定制作徐变试件, 在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料, 并计算灰浆率。同时采用湿筛混凝土按 5.5 节的规定制作轴向拉伸试件。成型徐变试件时将拌和物一次装模, 用振动台振动密实。成型前后应检查应变计和两端拉力预埋件是否正常。

5 试件成型后, 经 (24~48) h 拆模, 并立即用橡皮套、金属套筒等材料密封, 试件的密封检查与 5.11.3 中 5 相同。徐变试件和补偿试件移入 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温室, 抗拉强度试件移入标准养护室养护。

6 到达加荷龄期时, 按 5.5 节的规定测定抗拉强度试件的轴向抗拉强度, 作为徐变试验的加荷基准。

7 徐变试验应在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温室中进行。将徐变试件安装在徐变仪上, 如图 5.12.2 所示, 调试对中。

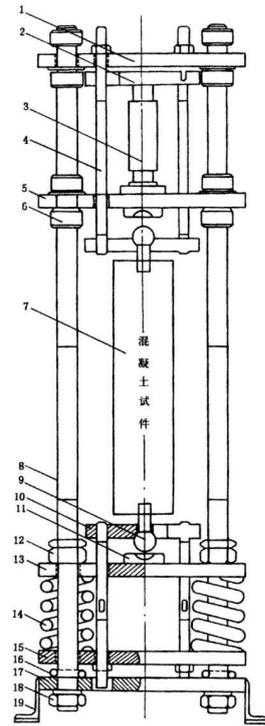
8 按 5.5 节的规定 (不需预拉), 在徐变仪上测定徐变试件的抗拉弹性模量, 最大荷载不超过试件拉伸破坏荷载的 30%。在弹性模量试验加荷到达最大荷载时, 即可作为徐变试验的加荷荷载。此时需迅速拧紧徐变仪上的荷载固定螺母, 然后松开千斤顶, 立即测读应变计的电阻比与电阻, 作为试件徐变变形的基准值。同时, 应按 5.14 节的规定测读补偿试件应变计的电阻比与电阻, 并作为该组试件徐变变形的补偿起点。

9 观测过程和调荷时间同 5.11 节的规定。

5.12.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 抗拉弹性模量按照公式 (5.12.4-1) 计算 (修约间隔 0.1GPa)。

$$E_t = \frac{P_t}{Af\Delta Z} \quad (5.12.4-1)$$



1—传力板; 2—加荷垫板; 3—液压千斤顶; 4—短拉杆;
5—传力板; 6—螺母; 7—混凝土试件; 8—支架杆; 9—球杆;
10—拉力板; 11—球座; 12—螺母; 13—传力板; 14—弹簧;
15—传力板; 16—扁螺母; 17—传力板; 18—螺母; 19—底座

图 5.12.2 弹簧式拉伸徐变仪示意图

式中 E_t —— 抗拉弹性模量, GPa;

P_t —— 最大受拉荷载, kN;

A —— 试件受荷面积, mm^2 ;

f —— 应变计应变灵敏度 (厂家提供), $10^{-6}/(0.01\%)$;

ΔZ —— 应变计电阻比由荷载为零到最大受拉荷载时的变化量, 0.01%。

2 拉伸徐变度可按以下规定计算。

1) 用差动电阻式应变计观测变形时, 拉伸徐变应变按照公式 (5.11.4-2) 计算 (修约间隔 0.1×10^{-6})。

2) 单位应力下的拉伸徐变变形, 即拉伸徐变度按照公式 (5.12.4-2) 计算。

$$C_t = \varepsilon_t \times \frac{1}{\sigma_t} \times a \quad (5.12.4-2)$$

式中 C_t —— 原配合比混凝土的拉伸徐变度, $10^{-6}/\text{MPa}$;

σ_t —— 混凝土试件所受拉应力, MPa;

a —— 湿筛混凝土的灰浆率, 按 5.11 节的规定计算。

3) 单位应力下的总拉伸应变按照公式 (5.12.4-3) 计算 (修约间隔 $0.1 \times 10^{-6}/\text{MPa}$)。

$$\varepsilon'_t = (1/E_t) + C_t \quad (5.12.4-3)$$

式中 ε'_t —— 单位应力下的总拉伸应变, $10^{-6}/\text{MPa}$;

$1/E_t$ —— 单位应力下的拉伸弹性变形, $10^{-6}/\text{MPa}$ 。

3 不可恢复的拉伸徐变变形按照公式 (5.12.4-4) 计算。

$$C_n'' = C_t - C_y'' \quad (5.12.4-4)$$

式中 C_n'' —— 不可恢复的拉伸徐变变形, $10^{-6}/\text{MPa}$;

C_t —— 压缩徐变度, $10^{-6}/\text{MPa}$;

C_y'' —— 弹性后效, $10^{-6}/\text{MPa}$ 。

4 以三个试件测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.1×10^{-6})。

5.13 混凝土干缩 (湿胀) 试验

5.13.1 本试验用于测定, 在无人为外加荷载和恒温恒湿条件下, 由于干燥失水或浸泡吸水引起的混凝土轴向长度变形的测试。

5.13.2 仪器设备与设施应包括以下几种。

1 仪器设备包括以下几种。

1) 变形测量装置可由以下部件组成。

① 变形测量仪器可用 LVDT 位移计、千分表、比长仪、弓形螺旋测微计等, 分度值或分辨

力不应大于 0.001mm。比长仪应符合 SL 137 的规定。位移计、应变计应配套自动采集记录设备。亦可用非接触式变形测量仪器。

- ② 位移计、千分表可采用固定式测量支架或其他固定方法，在试验期间不应触动试件和仪表。可使用如图 5.13.2 所示的柱座式测量支架。也可使用附着式变形测量夹具，如 5.5 节极限拉伸试验用方框形测量支架，但测距应尽量长，可更换较长的标距定位杆，使得上下支架靠近试件端部。
- ③ 按照选择的变形测量仪器及其固定方式，配套在试件上使用的测头、端板等。固定在试件端面的金属测头应采用不易锈蚀的材质，测头型式应根据变形测量仪器测杆端部的形状，按照球状对平面的方式选择。

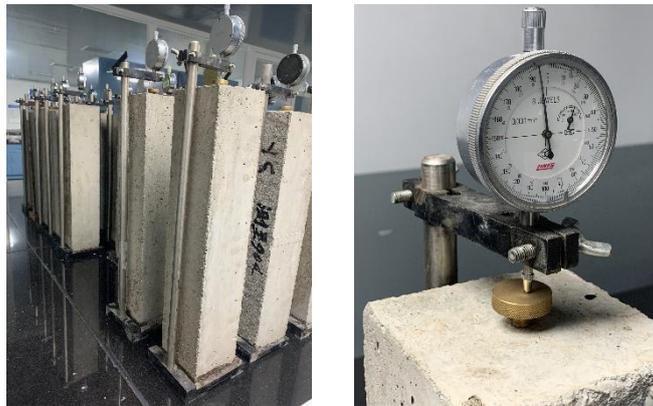


图 5.13.2 柱座式变形测量支架
(待补充结构图)

- 2) 卡尺：有效测距 600mm 及小测距卡尺各一只，分度值不大于 0.1mm。
- 3) 恒温水槽：内装 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液。
- 4) 辅助器具：黄油、橡胶锤、油性纸、5mm 厚玻璃板等。

2 恒温恒湿室（干缩室）：应保持室内温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $60\% \pm 5\%$ 。保温要求应符合 SL 138 的规定。宜配备恒温恒湿环境控制设备。试验台或地面应有必要的减震措施。

5.13.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 试验前应准备好试模。如需要在试件端部埋入防锈金属测头（可用铜质、不锈钢等）或端板，应先用卡尺测量测头长度或端板厚度，再将测头卡入端板，在端板四周刮上少量黄油，再放入干缩试模内部两端，可用橡胶锤轻敲端板使其卡紧。金属测头应埋设牢靠，并保证测头的轴线与棱柱体试件的轴线重合。如使用固定式干缩测量支架，可只装入一个测头。使用其他变形测量仪器，按要求准备试模。为了不影响拆模后试件的水分散失，干缩试模内侧壁不宜刷机油等油性脱模剂，可用水性脱模剂或塑料薄膜、油性纸等防粘材料。

2 按 5.1 节的规定制作试件，每组三个试件。干缩试验采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 515$ （或 600）mm 的棱柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料。

3 试件成型后，送入养护室养护，从拌和加水算起 $3d \pm 2h$ 时（或按其他规定的时间和条件，如

混凝土终凝后 24h, 或同批成型的混凝土达到某个强度范围) 拆模并编号。

4 试件拆模后立即送至干缩室, 用 600mm 卡尺测量含有测头或端板的试件长度, 取两次相同的读数作为测值, 减去测头或端板的长度即为试件有效长度 (L , 修约间隔 0.001mm)。

5 测量基准值, 可以是绝对长度或相对长度。如采用固定式测量支架, 将试件与支架组装在一起, 并安装好变形测量仪器, 测量基准值 (L_0 , 精确到 0.001mm)。如不采用固定式支架, 每次测量前应仔细擦净测头, 测量时试件的方向应固定 (在试件上做标记)。应至少重复测量一次, 取连续两次相同时的读数作为测值, 并记录测量时刻 (精确到分钟)。如使用比长仪, 从测基准长度时起, 每次测量前均需测定标准棒长度, 用以校正测值。对于非接触式变形测量仪器, 按照说明书操作测试。

6 对于不使用固定式支架的试件, 测定基准值后, 干缩试件宜底面架空置于不吸水的硬质垫板上, 连同垫板水平放在干缩室试件架上, 试件间距不应小于 30mm。搬动过程中注意避免测头碰伤。为防止测头生锈, 每次测量后可在测头端部涂一薄层黄油, 每次测量时再仔细擦净。

7 试件的干缩龄期从测定基准值的时间算起。自动测读的仪器, 从安装完成后即可按设定的间隔自动采集记录变形数据。人工测读的仪器, 至少应在测量基准值后 3d、7d、14d、28d、60d、90d、180d 或指定的龄期时再次测量 (L_t , 精确到 0.001mm), 每次测量应同时记录测量时刻 (精确到分钟)。

8 如需要进行湿胀试验, 在最后一次干缩测量完成后 (可更换测量器具), 将试件泡入装有饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液的恒温水槽内。湿胀试验的龄期从泡水时算起, 人工测读龄期为 1d、3d、7d、14d、28d。

5.13.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 某一龄期 t 的试件干缩 (湿胀) 率按照公式 (5.13.4) 计算。

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_t}{L} = \frac{L_t - L_0}{L} \times 100\% \quad (5.13.4)$$

式中 ε_t —— t 天龄期时的试件干缩 (湿胀) 率;

ΔL_t —— t 天龄期时的变形值, mm;

L —— 试件有效长度 (纯混凝土段的长度) 或测距, mm;

L_t —— t 天龄期时测值, mm;

L_0 —— 基准测值, mm。

2 取一组三个试件的平均值作为某一龄期试件干缩 (湿胀) 率的试验结果 (修约间隔 1×10^{-6})。负值为收缩, 正值为膨胀。根据需要可绘制试件的干缩 (湿胀) 率随时间的变化曲线。

3 试件拆模时间或测基准值前的养护方式有改变时, 应在试验报告中说明。

4 应随混凝土干缩试验结果, 附所确定的基准时间点 (从拌和加水算起)。

5.14 混凝土自生体积变形试验

5.14.1 本试验用于测定初凝后混凝土的自生体积变形。

5.14.2 仪器设备与设施应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 变形测量仪器及应变测读记录设备同 5.11.2。

2) 试件筒：使用带盖镀锌白铁皮筒或其他便于混凝土散热的材质制作的试件筒，筒体直径200mm、高（500~600）mm，不漏水不透气，附有密封盖板，盖板中心应留有应变计电缆传出孔。在内壁应衬有防止混凝土与筒体粘接的隔离层，可采用一层厚约（1~2）mm薄橡胶皮，或涂一层厚约（0.3~0.5）mm的沥青等不影响混凝土变形的措施。

3) 辅助器具：隔离层材料（1mm~2mm厚的橡皮等）、密封材料（高压胶带或玻璃胶）等。

2 恒温室同 5.11 节的规定。

5.14.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 使用前应将应变计电缆接入水工比例电桥，检查应变计是否正常。

2 按 4.1 节的规定拌制混凝土并按下述方法成型试件，每组至少两个试件。自生体积变形试验采用直径 200mm、高（500~600）mm 的圆柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料，并记算试件灰浆率。

3 将混凝土拌和物分三层装入试件筒内，装入并密实第一层后，将应变计垂直固定在试件筒中心再装入并密实第二层，应及时调整使应变计位于试件中部并且测量基线与试件纵轴重合。宜采用振动台振动密实。

4 试件成型后应避免水分散失，尽快加上盖板，并密封盖板与试件筒之间缝隙及应变计电缆出口处。然后用水工比例电桥检查应变计是否正常。

5 自变试验应在（20±2）℃的恒温环境中进行。将密封后的试件放入恒温室，试验期间应避免振动和撞击。

6 将应变计电缆接入自动采集记录设备，开始检测。应检测同批混凝土拌和物的凝结时间，以初凝时间所对应时间点（或其他规定的时间）的电阻及电阻比测值为基准值（ R_t 、 Z_t ）。如人工测读，应在测量基准值后 2h、6h、12h、24h 龄期接入水工比例电桥各测量一次，以后每天测量一次至两周，然后每周测量一次至半年，之后每月测量一次至一年，每次测量应同时记录测量时刻（精确到分钟）。

5.14.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 试件的自生体积变形龄期以测定基准值的时刻算起。对自动采集记录的数据进行处理时，应以每次测量的时刻（ t ）减去基准值的测量时刻（ τ ），作为自生体积变形龄期（ $t - \tau$ ）。

2 混凝土自生体积变形按照公式（5.14.4-1）~公式（5.14.4-3）计算。

$$G_{t-\tau} = f(Z_t - Z_1) + (b - \alpha)(T_t - T_1) \quad (5.14.4-1)$$

$$T_t = a'(R_t - R_0) \quad (5.14.4-2)$$

$$T_1 = a'(R_1 - R_0) \quad (5.14.4-3)$$

式中 $G_{t-\tau}$ —— 不同龄期的混凝土自生体积变形， 10^{-6} ；

Z_t —— t 时刻测量的应变计电阻比，0.01%；

R_t —— t 时刻测量的应变计电阻， Ω ；

Z_1 —— 电阻比基准值，0.01%；

R_0 —— 电阻基准值， Ω ；

T_1 —— 计算的温度基准值， $^{\circ}\text{C}$ ；

- T_t —— t 时刻混凝土内部温度计算值, $^{\circ}\text{C}$;
- α —— 混凝土线膨胀系数, 按 5.18 节方法测定, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- f —— 应变计应变灵敏度 (厂家提供), $10^{-6}/(0.01\%)$;
- b —— 应变计温度补偿系数 (厂家提供), $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$;
- a' —— 应变计温度灵敏度系数 (厂家提供), $^{\circ}\text{C}/\Omega$;
- R_0 —— 0°C 时的电阻 (厂家提供), Ω 。

- 2 取各试件测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 1×10^{-6})。
- 3 随混凝土自生体积变形试验结果, 应附基准时间点 (从拌和加水算起) 的说明。

5.15 混凝土导温系数试验

5.15.1 本试验用于测定混凝土导温系数。

5.15.2 仪器设备应包括以下几种。

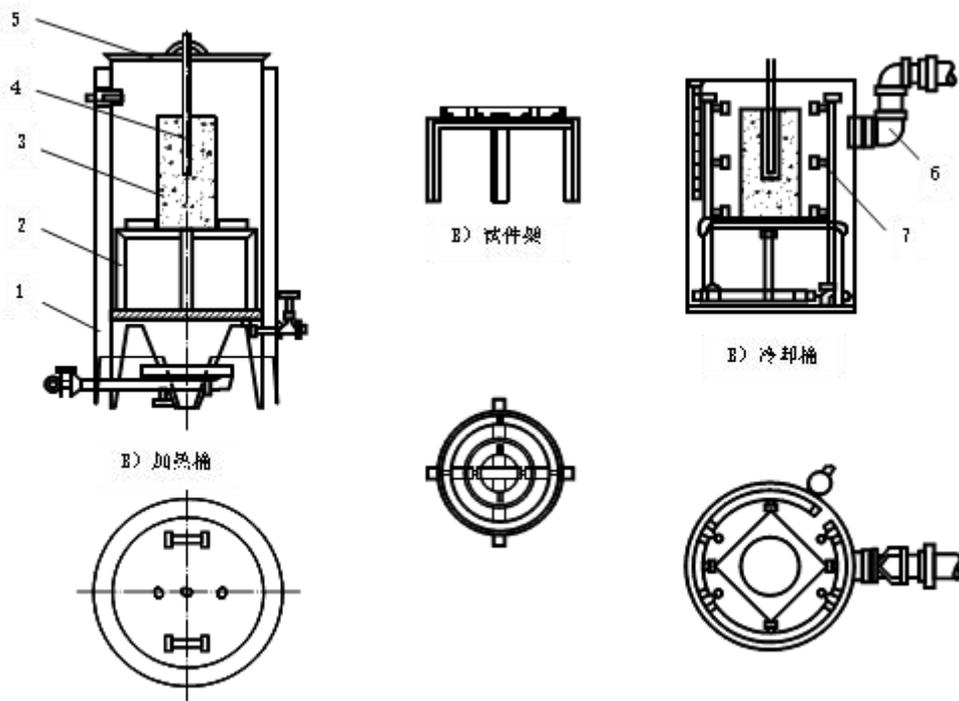
1 混凝土导温系数测定仪: 应符合 SL 136 的规定, 测温分辨率不大于 0.1°C 。也可使用如图 5.15.2 所示导温仪, 主要由以下部件组成。

- 1) 加热桶: 用两层铁皮制成的圆桶, 外径 500mm, 内径 400mm, 两层铁皮的间距约 50mm, 内填隔热材料。桶底装有总功率为 (3000~4000) W 并有分档的加热器, 加热器与装在桶外的温控装置相连。附有桶盖, 盖上有三个孔, 分别用于安装测量试件中心温度、桶内水温的传感器, 以及搅拌器;
- 2) 冷却桶: 用一层铁皮制成的圆桶, 直径 (500~600) mm, 高约 800mm, 附有冷却水管及喷嘴;
- 3) 试件架: 能够放入加热桶和冷却桶内部, 用以架空试件。

2 热学性能试模: 模腔为 $\Phi 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ 圆柱体。附有支架和铁杆, 铁杆直径为 10mm, 长度为 200mm, 用于在试件中心预留测温计的插孔。

3 测温计: 测量范围 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$, 分度值不大于 0.1°C 。如用水银温度计, 水银球到刻度起点的距离须大于 250mm。

4 辅助器具: 时钟、石棉线、胶布、变压器油等。



1—保温外桶；2—试件架；3—试件；4—测温计；5—桶盖；6—排水管；7—冷却水管及喷嘴

图 5.15.2 混凝土导温仪示意图

5.15.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 4.1 节拌制混凝土并按下述方法成型和养护试件，每组两个试件。导温系数测定采用 $\phi 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ 圆柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 将拌好的混凝土分三层装入试模内，每层用捣棒插捣 40 次，或用振动台分三层振实。第一层混凝土密实后，安上支架，将铁杆表面涂刷脱模材料后插入试模中，并固定在中心部位，再装入和密实第二层和第三层混凝土。

3 成型后 (1~2) h 抹面，约 4h 后将埋入的铁杆轻轻转动（不应上下移动），铁杆应避免与混凝土粘结。(1~2) d 后拨出铁杆拆模并编号，将试件放入标准养护室至少 7d，即可用于试验。

4 试验前一天，取出试件，在顶面靠近中心孔周围凿毛，用湿布抹净，向孔内注放变压器油，放入测温计，使测头浸没在油中，用石棉线将孔口塞紧，用胶布固定好，并用水泥净浆严密封口。

5 使用导温系数测定仪时，按仪器说明书步骤进行试验。使用导温仪试验时，将试件放入加热桶中，安放在试架上，加水没过试件顶面 50mm 以上。盖上桶盖，插入水温测温计，启动加热器和搅拌器，将水加热至 (60~70) °C，待试件中心温度与水温完全相等时停止加热和搅拌。如要测得不同温度的导温系数，可分别加热至所需的温度。

6 在冷却水桶内注满水，并使其不断流动，水温应均匀一致。

7 将经加热并温度均匀一致的试件，迅速连同试件架一起放入冷却桶内，水面应高出试件顶面 50mm 以上，立即测读试件中心温度和冷却水温，并开始记时。以后每隔 5min 测读一次，直到试件中心温度与冷却水水温相差 (3~6) °C 为止。

5.15.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 查表法。根据记录计算试件中心温度与冷却水温度的初始温差 θ_0 及两者在任意时刻的温差 θ ，求得各个时间的 θ/θ_0 比值（修约间隔 0.00001），查附表得相应的 $\alpha t/D^2$ 值。其中 t 为冷却时间（单位为 h）， D 为试件的直径（单位为 m），从而算出相应时刻的导温系数 α_t 。取试件开始冷却后 30min 至 1h 各测值的平均值作为该试件的导温系数 α 。

注：附表中 $\alpha t/D^2$ 值的查法，表中主体数据为 θ/θ_0 值（除第一行、第一列外），在通过 θ/θ_0 值查找计算 $\alpha t/D^2$ 值时，应查找最接近 θ/θ_0 的数值（不需插值计算），其所在位置对应的第一行、第一列的两个数值相加即为 $\alpha t/D^2$ 值。

2 半对数算法。

1) 以冷却时间 t （单位为 h）为横坐标， $\ln \theta$ 为纵坐标，做出 $\ln \theta = f(t)$ 的曲线。

2) 取得 $\ln \theta = f(t)$ 曲线的直线段（可取冷却时间 30min 到 1h 之间的数据）的拟合线性方程，斜率的绝对值为冷却率 m （1/h）。

3) 计算试件形状系数 K （ m^2 ）。

$$K = \frac{1}{(2.4048/R)^2 + (\pi/L)^2} \quad (5.15.4-1)$$

式中 R —— 试件的半径，m；

L —— 试件的高度，m。

4) 计算导温系数 a 。

$$a = K \cdot m \quad (5.15.4-2)$$

3 取两个试件导温系数测值的平均值作为试验结果（修约间隔 $0.01 \times 10^{-3} m^2/h$ ）。两种方法所得的结果差距较大时，以半对数算法的结果为准。

5.16 混凝土导热系数试验

5.16.1 本试验用于测定混凝土的导热系数。

5.16.2 仪器设备应包括以下几种。

1 导热系数测定仪：应符合 SL 136 的规定，测温分辨率不大于 $0.1^\circ C$ 。也可使用如图 5.16.2-1、图 5.16.2-2 所示导热仪，主要由以下部件组成。

1) 冷却桶：直径 600mm，高 960mm 的铁桶。内有搅拌冷却水用的大叶片八个，用马达驱动，循环冷却水可用自来水；

2) 加热器：外径 29mm，内径 10mm，长 370mm，用黄铜片制成，夹层中绕有电阻丝，功率 260W；

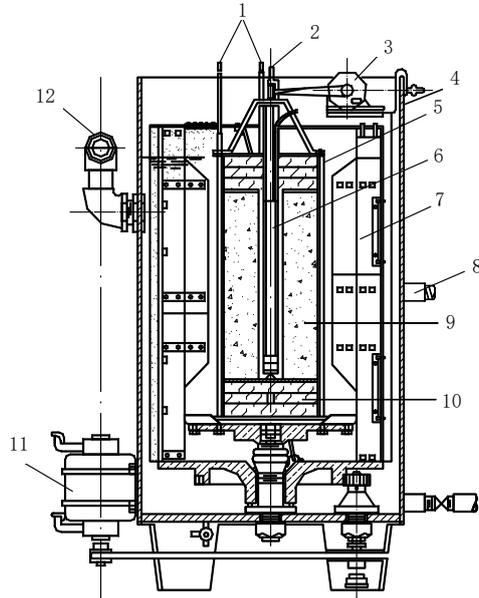
3) 搅拌器：搅拌试件内腔的水，使其温度均匀，以马达驱动；

4) 电流计：5A，不低于 0.5 级；

5) 电压表：0~220V，不低于 0.5 级。

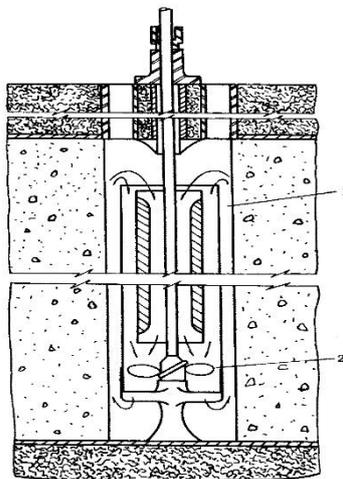
2 测温计：测量范围 0~100 $^\circ C$ ，分度值不大于 $0.1^\circ C$ 。如用玻璃水银温度计，水银球至读数起点的距离应大于 250mm。

3 热学性能试模：模腔为 $\phi 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ 圆柱体。附有铁杆和支架，铁杆直径为 40mm，长度不小于 400mm。



1—温度计；2—搅拌器轴；3—搅拌器马达；4—冷却桶；5—试件架；6—加热器；
7—搅拌叶片；8—进水管；9—试件；10—软木；11—马达；12—出水管

图 5.16.2-1 导热仪示意图



1—加热器；2—搅拌器叶片

图 5.16.2-2 加热器安装示意图

5.16.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 试件的成型、养护按 5.15 节的规定。每组两个试件。
- 2 使用导热系数测定仪时，按仪器说明书步骤进行试验。使用导热仪试验时，按照图 5.16.2-1、图 5.16.2-2 将试件安放在试件架上（软木应先用石蜡液浸渍）。向试件内腔灌水，水面比试件顶面低

(10~20) mm。

3 接通冷却水源，向桶中放水，使水面与试件顶面齐平。然后开动大叶片搅拌器，此时，靠试件处水位降低，应继续放水，使中部水位与试件顶面齐平。调节控制好进出水量，使整个试验过程的水位不变。

4 接通加热器开关，开动试件内腔小搅拌器使内腔温度均匀一致。控制加热器的电压和电流，电压宜在(50~100)V左右，电流在(1.5~2.0)A之间，并使其稳定下来。观测试件中心温度上升情况，以及仪器运转是否正常。

5 接通加热器后1h左右，每隔10min测读一次冷却水温、混凝土中心温度以及电压、电流，直至电压、电流及混凝土中心温度稳定为止。需测读10次左右。

5.16.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 导热系数按照公式(5.16.4)计算。可选用自记录温度起30min以后的各次读数来计算，避免早期读数规律性较差。导热系数的单位也可以用W/(m·K)，两个单位的换算各项为： $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})=3.6\text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ 。

$$\lambda = \frac{Q \ln(a/b)}{2\pi L(\theta_2 - \theta_1)} = \frac{3.600W \ln(a/b)}{2\pi L(\theta_2 - \theta_1)} = \frac{2.305W}{\theta_2 - \theta_1} \quad (5.16.4)$$

式中 λ —— 混凝土导热系数，kJ/(m·h·°C)；

Q —— 试件由中心向四周在单位时间内的传热量，为3.600kJ/(W·h)；

a —— 试件外径，m；

b —— 试件内孔径，m；

L —— 试件高度，m；

θ_1 —— 冷却水温，°C；

θ_2 —— 试件中心水温，°C；

W —— 电热功率，为电流与电压乘积，W。

2 取各次导热系数测值的平均值为该试件的导热系数，以两个试件导热系数的平均值作为试验结果(修约间隔0.01kJ/(m·h·°C))。

5.17 混凝土比热试验(绝热法)

5.17.1 本试验用于测定混凝土的比热。

5.17.2 仪器设备应包括以下几种。

1 比热测量设备：应符合SL 136的规定。可以采用自动比热仪，或如图5.17.2所示的绝热量热器，主要由以下部件组成。

1) 保温桶：用两层钢板制成，附有桶盖。外径800mm，内径740mm，高1170mm，两层钢板之间填以隔热材料；

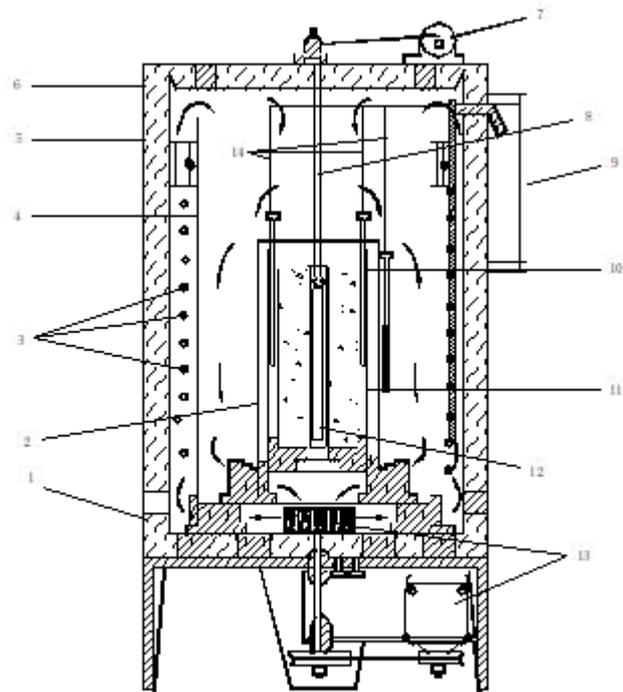
2) 圆筒形空气挡板：用厚1mm的铜板制成。直径530mm，高880mm。其外缘母线方向，均匀

装有 12 条胶木板，每条胶木板上安有 12 个小型绝缘瓷柱，瓷柱上装有 12 根各 100W 的电热丝，为保温桶内空气加热用；

- 3) 隔离桶：用 1mm 厚的紫铜板制成。直径 330mm，高 510mm，附有盖。
- 4) 试件桶：用 1mm 厚的紫铜板制成。直径 240mm，高 480mm，附有盖。
- 5) 加热器：试件中心加热用，用黄铜片制成。外管直径 30mm，内管直径 10mm，长 370mm，内外管间布有电热丝，功率为 230W 左右；
- 6) 搅拌器：杆式，由一小马达带动，以使试件周围水温均匀；
- 7) 鼓风机：由多翼风扇与马达组成，以使桶内空气温度均匀；
- 8) 温度计：测量范围 (0~100) °C，分度值 0.1°C。如用水银温度计，水银球到刻度起点的距离应大于 400mm；
- 9) 其他：瓦时表 (220V, 5A, 精度 0.01)，控制箱及软木块等。

2 热学性能试模：模腔为 $\phi 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ 圆柱体。附有铁杆和支架，铁杆直径 40mm，长度不小于 400mm。

- 3 秤：分度值不大于 0.01kg。
- 4 辅助器具：时钟等。



1—软木垫块；2—隔离桶；3—电热丝；4—圆筒型空气挡板；5—保温桶；6—隔热材料；7—搅拌器马达；
8—搅拌器；9—控制箱；10—2.5mm 空气层；11—试件桶；12—加热器；13—鼓风机及马达；14—温度计

图 5.17.2 绝热量热器示意图

5.17.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 试件的成型、养护按 5.15 节的规定。每组两个试件。
- 2 试验前，从养护室取出试件，擦干表面水分后称重（精确到 0.1kg）。
- 3 将试件及其他设备按照图 5.17.2 安装好，并往试件桶内装水，使水面高出试件顶面（20~30）mm。记录装入的水量（精确到 0.01kg）。
- 4 启动自动比热仪进行测试。采用绝热量热器时按以下步骤进行。
 - 1) 当试件桶内的温度与保温桶内温度稳定一致时，表示绝热量热器内试件温度、水温和气温已达平衡。此时测出试件的初始温度（ θ_1 ），和电表的初始读数。
 - 2) 接通加热器及搅拌器的电源并开始记时。同时接通鼓风机及空气加热丝电源，使保温桶内空气与试件桶内的水温相等。待水温上升（10~15）℃时，关闭加热器，只让搅拌器运转，经（1.5~2.0）h，使试件温度均匀，读取试件桶内温度计的读数（ θ_2 ），并记录时间及电表读数。至此，一次加热操作完毕。
 - 3) 按上述加热操作步骤对试件再加热两次。

5.17.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 读取并记录自动比热仪的测试结果。
- 2 采用绝热量热器时按以下步骤计算比热 c 。
 - 1) 加热器供热量：每次加热所消耗的电量（W·h）乘以 3.600[kJ/（W·h）]即为每次加热器的供热量 q_1 （kJ）。
 - 2) 搅拌器供热量：搅拌器搅拌常数乘以搅拌时间（h），即为每次搅拌器供热量 q_2 （kJ）。

注：搅拌器常数与搅拌器形状尺寸及转速有关。按美国垦务局混凝土比热仪图纸制造的搅拌器常数为 6.752kJ/h，自制的应另行测定。

- 3) 试件桶吸热量：试件桶的吸热常数 4.254kJ/℃，乘以每次加热的温升值（ $\theta_2 - \theta_1$ ）即为试件桶所吸收的热量 q_3 （kJ）。
- 4) 水吸收的热量：水的比热乘以用水量再乘以每次加热的温升值（ $\theta_2 - \theta_1$ ），即为水所吸收的热量 q_4 （kJ）。
- 5) 试件吸收的热量：按照公式（5.17.4-1）计算。

$$Q = q_1 + q_2 - q_3 - q_4 \quad (5.17.4-1)$$

- 6) 按照公式（5.17.4-2），连续加热三次就可得到三个三元一次方程，联立求解即可求出 C_0 、 C_1 、 C_2 之值。

$$Q = M[C_0(\theta_2 - \theta_1) + \frac{C_1}{2}(\theta_2^2 - \theta_1^2) + \frac{C_2}{3}(\theta_2^3 - \theta_1^3)] \quad (5.17.4-2)$$

式中 Q —— 试件吸收的热量，kJ；

M —— 试件的质量，kg；

C_0 、 C_1 、 C_2 —— 待求的系数；

θ_1 、 θ_2 —— 每次加热的初始温度和终止温度，℃。

- 7) 按 $c = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2$ ，即得比热 c 随温度 θ 变化表达式。此式在试验温度范围内有效。

- 3 以两个试件比热的平均值作为试验结果（修约间隔 0.01（kJ/（kg·℃）））。随比热结果应给

出适用的温度区间。

5.18 混凝土线膨胀系数试验

5.18.1 本试验用于测定混凝土线膨胀系数。

5.18.2 仪器设备应包括以下几种。

1 恒温设备：自动恒温设备或带有搅拌器的自动控制恒温水箱，温度控制误差不大于 0.5°C 。应符合 SL 136 的规定。

2 测温仪器：分度值不大于 0.1°C 。

3 试件筒和应变测量仪器同 5.14 节。

5.18.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 试件的制作、养护按 5.14 节的规定。每组两个试件。也可直接使用测完混凝土自生体积变形的试件。

2 在达到规定试验龄期（不少于 7d）时，将密封试件筒放入恒温设备内。如使用恒温水箱则箱中水面应没过试件筒顶面 50mm 以上，应提前将水恒温。初始温度可在 $(10\sim 20)^{\circ}\text{C}$ 范围内，大坝混凝土 15°C 左右。

3 开启恒温设备，用配套仪器测量应变计的电阻和电阻比，并测读恒温设备内温度。当试件中心温度恒温时记下应变计的电阻 R_t 、电阻比 Z_t ，即为试验初始恒温点的测值。恒温的标准是相隔 1h 温度波动不超过 0.1°C 。

4 调整恒温设备，使内部温度上升到 60°C ，达到恒温后，记下各恒温点时应变计的电阻 R_t 、电阻比 Z_t 。

5.18.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 试件中心温度及应变值分别按照公式 (5.18.4-1) ~ 公式 (5.18.4-4) 计算。

$$T_t = a'(R_t - R_0) \quad (5.18.4-1)$$

$$\varepsilon_t = f\Delta Z + b\Delta T \quad (5.18.4-2)$$

$$\Delta T = a'(R_t - R_1) \quad (5.18.4-3)$$

$$\Delta Z = Z_t - Z_1 \quad (5.18.4-4)$$

式中 T_t —— 恒温时试件中心温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

ε_t —— 恒温时试件的应变值， 10^{-6} ；

R_t —— 恒温时应变计的电阻， Ω ；

R_1 —— 初始恒温点时应变计的电阻， Ω ；

ΔT —— 恒温时试件中心温度变化量， $^{\circ}\text{C}$ ；

ΔZ —— 恒温时应变计电阻比变化量；

Z_t —— 恒温时应变计的电阻比；

Z_1 —— 初始恒温点时应变计的电阻比；

- R_0 —— 0℃时应变计的电阻（厂家提供）， Ω ；
- a' —— 应变计温度灵敏度系数（厂家提供）， $^{\circ}\text{C}/\Omega$ ；
- b —— 应变计温度补偿系数（厂家提供）， $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ；
- f —— 应变计灵敏度（厂家提供）， $10^{-6}/0.01\%$ ；

2 混凝土线膨胀系数按照公式（5.18.4-5）计算。

$$\alpha_t = \frac{\varepsilon_t}{\Delta T} \quad (5.18.4-5)$$

式中 α_t —— 混凝土线膨胀系数， $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ；

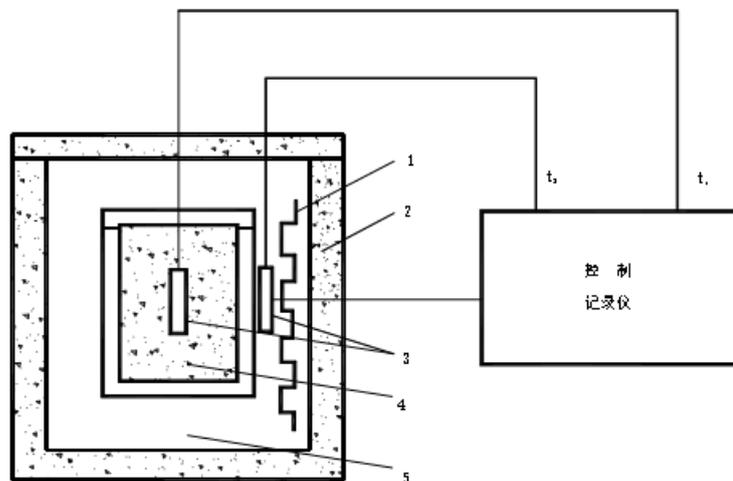
3 取两个试件线膨胀系数的平均值作为试验结果（修约间隔 $0.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）。

5.19 混凝土绝热温升试验

5.19.1 本试验用于测定在绝热条件下混凝土凝结硬化过程中的温度变化。

5.19.2 仪器设备应包括以下几种。

1 绝热温升测定仪：由绝热室和控制记录仪两部分组成，工作原理见图 5.19.2。绝热室应达到绝热试验条件，即胶凝材料水化所产生的热量与外界不发生热交换，应能满足绝热室温度与跟踪试样的中心温度相差不大于 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的要求。试验温度范围（5~80） $^{\circ}\text{C}$ ，测温元件采用温度传感器，温度示值的分度值不大于 0.1°C 。其他要求应符合 SL 136 的规定。



1—加热器；2—保温隔热层；3—测温元件；4—混凝土试件；5—控温层

图 5.19.2 绝热温升测定仪工作原理图

2 容器：容积为 50L 左右，钢质圆柱体，顶部直径略大。顶盖具有橡胶密封圈，中部有测温计插孔。容器尺寸应大于骨料最大粒径的三倍。

3 辅助器具：秤、天平、测温管（导热良好的金属管，如紫铜测温管）、导热油（如变压器油）等。测温管的内径稍大于测温探头直径，长度为试件高的二分之一，插入端封闭。

5.19.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 应定期按 SL 136 校验绝热温升测定仪的绝热性和温度跟踪误差。

2 至少提前 24h 将混凝土拌和用料放入 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的室内，使其温度与室温一致。如对混凝土浇筑温度有专门要求时，则按要求控制拌和物的初始温度。

3 按 4.1 节的规定拌制混凝土，记录拌和加水时间、测量拌和物温度。分两层将拌和物装入容器，按 5.1 节的规定人工捣实或一次装料用振动台振实，称量容器与混凝土的总质量。在容器中心插入测温管，并在测温管中注满变压器油。然后盖上容器顶盖，测温管头需从顶盖预留孔中露出，密封全部缝隙。

4 立即将容器装入绝热温升测定仪绝热室内，按仪器使用说明书规定，将试件中心温度传感器插入测温管中，并安装其他温度传感器。

5 关闭保温门开始试验，每 0.5h 记录一次试样中心温度，历时 24h 后每 1h 记录一次，7d 后可 (3~6) h 记录一次。历时 28d (或根据需要确定天数) 试验结束。

6 从混凝土拌和加水到开始测读温度，应在 30min 内完成。

5.19.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土绝热温升值按照公式 (5.19.4) 进行修正 (修约间隔 0.1°C)。

$$T_t = \frac{C_k + C_m}{C_k} (T'_t - T_0) \quad (5.19.4)$$

式中 T_t —— 修正后的 t 天龄期混凝土绝热温升值， $^\circ\text{C}$ ；

T'_t —— 仪器记录的 t 天龄期温度值， $^\circ\text{C}$ ；

T_0 —— 混凝土拌和物的初始温度， $^\circ\text{C}$ ；

C_k —— 混凝土试件的热容量，为混凝土质量与混凝土平均比热 (按 5.17 节方法测定) 的乘积， $\text{kJ}/^\circ\text{C}$ ；

C_m —— 绝热室的总热容量，由厂家提供， $\text{kJ}/^\circ\text{C}$ 。如自制仪器可按 $C_m = \sum G_i C_i$ 进行计算， G_i 为各附件 (容器、测温管、测温元件和导热油) 的质量， C_i 为各附件材料的比热。

2 以时间 t 为横坐标，温升 T_t 为纵坐标绘制混凝土绝热温升过程线，根据曲线即可查得各不同龄期的混凝土绝热温升值。

3 如有需要，可采用最小二乘法进行曲线拟合，并给出混凝土的绝热温升—历时最优拟合表达式和适用条件。

5.20 混凝土抗冲磨试验 (圆环法)

5.20.1 本试验用于测定混凝土或其他材料在含砂水流 (悬移质) 冲刷下的抗冲磨强度。

5.20.2 仪器设备应包括以下几种。

1 混凝土冲刷仪：能使水流名义流速达到 $(10 \sim 40) \text{m/s}$ 的水流驱动装置和调速定时装置。冲磨质采用级配刚玉 (12 目、24 目和 40 目各 1/3)，水流含砂率为 20% (砂与含砂水的质量比)。

2 天平：分度值不大于 1g。

3 秤：分度值不大于 0.01kg。

4 量筒：1000mL 和 500mL 各一个。

5.20.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制备和养护试件，每组三个试件。抗冲磨试验采用内径 300mm、顶部外径 500mm、底部外径 490mm、高度 100mm 的圆环试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 试验龄期按设计要求确定。到达规定试验龄期前两天，将试件放入水中使其吸水饱和。水中养护试件可直接用于试验。

3 试验前从水中取出试件，用湿布将试件表面擦干，以饱和面干状态称取试件质量 (M_0 ，精确到 0.01kg)。

4 打开主机试验箱上盖，检查两个排砂孔密封是否漏水。擦净试验箱，放入聚四氟乙烯防磨圈，再将试件装入试验箱内。

5 称量 625g 刚玉，均匀地洒入冲刷轮齿间隙中，再加水 2500mL。盖上试验箱上盖，紧固卡子。紧固时应两个对称卡子同时加力，以免密封不严。

6 开动主机，调节流速，10s 内达到设定的试验流速。由定时器设定每次试验冲磨时间 1200s，冲磨时间达到后，自动停机。

7 停机后打开上盖，取出试件冲洗干净，用湿布将试件表面擦干，以饱和面干状态称取试件质量 (M_f ，精确到 0.01kg)。取出聚四氟乙烯防磨圈，将排砂孔打开，排出废砂水。清洗干净试验箱，关闭排砂孔。

8 重复 4 至 7 项试验操作，总计冲磨时间达到 1h 后停止试验。

5.20.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土抗含砂水流冲磨性能以抗冲磨强度表示，按照公式 (5.20.4-1) ~ 公式 (5.20.4-3) 计算。

$$f_a = \frac{tA}{\Delta M} = \frac{0.0942}{\Delta M} \quad (5.20.4-1)$$

$$A = \pi DH \quad (5.20.4-2)$$

$$\Delta M = M_0 - M_f \quad (5.20.4-3)$$

式中 f_a —— 抗冲磨强度，h/(kg/m²)；

t —— 累积冲磨时间，h；

ΔM —— 试件累计冲磨量，kg；

M_0 —— 试件初始质量，kg；

M_f —— 冲磨时间达到 1h 时试件质量，kg；

A —— 试件受冲磨面积，m²；

D —— 圆环试件内径，可按 0.3m 计算，m；

H —— 圆环试件高，可按 0.1m 计算，m。

2 以三个试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.01h/(kg/m²)）。

3 当采用其他冲磨质时，应在试验结果中注明。

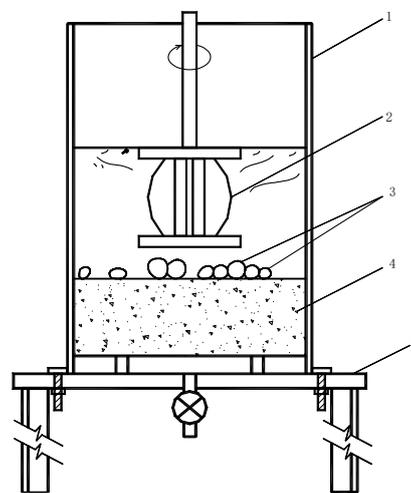
5.21 混凝土抗冲磨试验（水下钢球法）

5.21.1 本试验用于测定混凝土表面受水下流动介质（推移质）磨损的抗冲磨强度。

5.21.2 仪器设备应包括以下几种。

1 钢球冲磨仪：结构示意图见图 5.21.2，主要部件包括。

- 1) 水流驱动装置，能使搅拌桨以 1200r/min 速度旋转的电机和调速定时装置，以及搅拌桨；
- 2) 钢筒，内径为 (305 ± 6) mm，高 (450 ± 25) mm，下边四周有螺孔固定在底座上；
- 3) 研磨料：按照表 5.21.2 规定配制的研磨钢球。其中棱面球体为在钢球相互垂直的六个方向，分别切割掉直径的 5%，形成相互垂直的六个带棱平面。



1—钢容器；2—搅拌桨；3—不同直径研磨钢球；
4—混凝土试件；5—底座

图 5.21.2 钢球冲磨仪示意图

表 5.21.2 研磨钢球数量与直径

钢球直径 (mm)		30.0±0.1	25.4±0.1	19.1±0.1	12.7±0.1
基准法	钢球数量 (个)	/	10	35	25
	钢球形态	/	光滑球体	光滑球体	光滑球体
代用法	钢球数量 (个)	8	17	35	25
	钢球形态	棱面球体	棱面球体	棱面球体	光滑球体

2 秤：分度值不大于 0.01kg。

5.21.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制备和养护试件，每组三个试件。抗冲磨试验采用直径 (300 ± 2) mm、高 (100 ± 1) mm 的扁圆柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 试验龄期按设计要求确定。到达规定试验龄期前两天，将试件放入水中使其吸水饱和。水中养护的试件可直接用于试验。

3 试验时，取出试件，用湿布将试件表面擦干，以饱和面干状态称取试件质量 (M_0 ，精确到 0.01kg)。

4 在钢筒与底座间放上橡皮垫圈，在底板上垫上两根 $\Phi 6$ mm 的钢筋，再把混凝土试件放在钢筋上并对中，以混凝土成型表面作为冲磨面，且使试件表面垂直于转轴，套上钢筒，旋紧固定钢筒与底座的螺栓，使其密封。

5 将搅拌桨安装在转轴上，搅拌桨底部距试件表面约 38mm，调整钢筒和底座的位置使转轴对中。

6 在钢筒内放入研磨钢球于试件表面，并加水至水面高出试件表面 165mm。棱面球体棱角磨损

后应及时更换。

7 开机, 调整转轴转速在 1200r/min 开始进行冲磨试验。

8 每隔 24h, 在钢筒内加水 (1~2) 次至原水位高度。

9 累计冲磨 72h 后, 取出试件冲洗干净, 用湿布将试件表面擦干, 以饱和面干状态称取试件质量 (M_f , 精确到 0.01kg)。

5.21.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土的抗冲磨强度按照公式 (5.21.4-1) ~ 公式 (5.21.4-3) 计算。

$$f_a = \frac{tA}{\Delta M} = \frac{5.087}{\Delta M} \quad (5.21.4-1)$$

$$A = \pi D^2 / 4 \quad (5.21.4-2)$$

$$\Delta M = M_0 - M_f \quad (5.21.4-3)$$

式中 f_a —— 混凝土抗冲磨强度, h/(kg/m²);

t —— 累计冲磨时间, h;

ΔM —— 试件累计冲磨量, kg;

M_0 —— 试件初始质量, kg;

M_f —— 冲磨时间达到 72h 时试件质量, kg;

A —— 试件受冲磨面积, m²;

D —— 试件直径, 可按 0.3m 计算, m。

2 混凝土的磨损率按照公式 (5.21.4-4) 计算。

$$L_a = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100\% \quad (5.21.4-4)$$

式中 L_{av} —— 混凝土磨损率;

M_0 —— 试验前试件质量, kg;

M_t —— 经 t 时间冲磨后试件质量, kg。

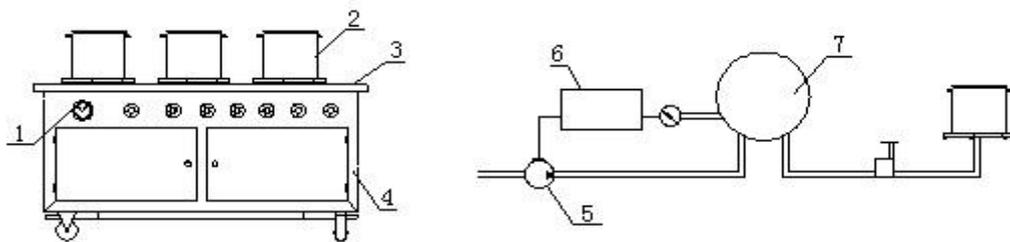
3 抗冲磨强度、磨损率以三个试件测值的平均值作为试验结果(修约间隔分别为 0.01 h/(kg/m²)、0.1%)。使用棱面球体时, 应随试验结果注明研磨料种类。

5.22 混凝土抗渗性试验 (逐级加压法)

5.22.1 本试验用于测定混凝土的抗渗等级。

5.22.2 仪器设备应包括以下几种。

1 混凝土抗渗仪: 可一次测试六个试件的抗渗性能, 结构示意图见图 5.22.2, 主要由套模、台面、支架、加压系统、储水罐、压力控制系统和压力显示装置等组成, 应符合 SL 133 的规定。也可采用全自动抗渗仪。



1—压力显示装置；2—套模；3—台面；4—支架；5—加压系统；6—压力控制系统；7—储水罐。

图 5.22.2 混凝土抗渗仪结构示意图

2 辅助器具：石蜡加松香、水泥加黄油等密封材料，以及加压装置、烘箱、电炉、瓷盘、钢丝刷、三角刀、时钟等。

5.22.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制备和养护试件，每组六个试件。抗渗试验采用上口直径 175mm、下口直径 185mm、高 150mm 的截头圆锥体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 试件拆模后，用钢丝刷刷去两端面的水泥浆膜，然后送入养护室养护。

3 试验龄期按设计要求确定。到达规定试验龄期时，取出试件，擦拭干净，待表面晾干后，将试件密封及装入模套。用石蜡加松香密封时，在试件侧面滚涂一层熔化的石蜡松香混合物，然后用加压装置将试件压入经过烘箱或电炉预热过的模套中（模套预热温度，以石蜡接触模套即缓慢熔化但不流淌为宜），使试件与模套底部平齐，模套变冷后才可卸压。用水泥加黄油密封时，其用量比为（2.5~3）:1，用三角刀均匀刮涂（1~2）mm 厚密封材料在试件侧面上，然后用加压装置将试件压入模套，使试件与模套底部齐平。

4 启动抗渗仪，开通六个试位的阀门，使水从孔中渗出充满试位坑。关闭抗渗仪，将装好试件的模套安装紧固在试位上。

5 试验时，水压从 0.1MPa 开始，以后每隔 8h 增加 0.1MPa，并随时观察试件端面渗水情况。

1) 若试件周边渗水，表明密封不好，应及时关闭对应试位的阀门，取下重新密封，尽快装回继续试验；

2) 若试件表面渗水，应及时关闭对应试位阀门，结束该试件的试验。

6 出现以下两种情况之一时，停止抗渗试验。

1) 尚未加至规定水压力（由设计抗渗等级按照公式（5.22.4）反算的水压力），表面渗水的试件超过两个，记录此时的水压力并停机；

2) 加至规定水压力，表面渗水的试件不超过两个，可停机；

3) 若需要测试混凝土最大抗渗等级，可继续加压，直至表面渗水的试件超过两个，记录此时的水压力并停机。

7 泄压并拆除试件。

5.22.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土的抗渗等级数值按照公式 (5.22.4) 计算。

$$P = 10(H - 0.1) \quad (5.22.4)$$

式中 P —— 混凝土抗渗等级数值;

H —— 六个试件中表面渗水的试件超过两个时的最小水压力, MPa。

2 试验结果评定应符合以下要求。

- 1) 若在某个水压力 (小于规定水压力), 表面渗水的试件初次超过两个, 则按照公式 (5.22.4) 计算抗渗等级数值, 加前缀 W 表示混凝土抗渗等级。
- 2) 若至规定水压力, 表面渗水的试件不超过两个, 则混凝土的抗渗等级大于设计抗渗等级。

5.23 混凝土相对渗透性试验

5.23.1 本试验用于测定混凝土在恒定水压下的渗水高度, 计算相对渗透性系数。本方法适用于抗渗性能较高的混凝土。

5.23.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 卡尺或钢直尺: 分度值不大于 1mm。
- 2 计时器: 分辨力不大于 1min。
- 3 辅助器具: 压力机、 $\Phi 6\text{mm}$ 钢垫条、记号笔等。
- 4 抗渗仪及其他器具同 5.22 节。

5.23.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 试件的成型、养护、密封、安装等按 5.22 节的规定执行。

2 将抗渗仪水压力一次加到 0.8MPa, 同时开始记录时间 (准确至分钟)。在此压力下恒定 24h, 然后降压停机。当混凝土比较密实时, 可将水压力改为 1.0MPa 或 1.2MPa, 并在试验报告中注明。

3 从模套中取出试件放在压力机上, 在试件两端面沿直径方向各平行放置一根 $\Phi 6\text{mm}$ 钢垫条, 开机将试件劈开。过 (2~3) min 即可在试件劈开面看出水痕, 用笔划出水痕界线位置。沿劈开面的底边 10 等分, 在各等分点处量出渗水高度 (D_i , 精确到 1mm)。如果测点处的界线上刚好嵌有较小的粗骨料颗粒, 可取该颗粒两侧渗水高度的平均值作为该点的测值; 如颗粒较大, 则该测点不读取数据。

4 在恒压过程中, 如有试件端面出现渗水, 即停止该组试件的试验, 并记下出水时间。渗水试件的渗水高度即为试件的高度 (150mm), 其他试件的渗水高度按步骤 3 测量。

5.23.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 以各等分点渗水高度 D_i 的平均值作为该试件的渗水高度 D_m 。
- 2 试件的混凝土相对渗透性系数按照公式 (5.23.4) 计算。

$$K_r = \frac{aD_m^2}{2tH} = 7.66 \times 10^{-8} \times D_m^2 \quad (5.23.4)$$

式中 K_r —— 相对渗透性系数, cm/h;

D_m —— 试件的平均渗水高度, cm;

H —— 水压力, 以水柱高度表示, cm。1MPa 水压力以水柱高度表示为 10200cm;

- t —— 恒压时间, h;
- a —— 混凝土的吸水率, 按 5.37 测定。如无测定值, 可取 0.03。
- 3 以六个试件测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 $0.1 \times 10^{-8} \text{cm/h}$)。

5.24 混凝土抗冻性试验 (快冻法)

5.24.1 本试验通过快速冻融循环过程测定浸泡在水中的混凝土的抗冻等级。本方法也适用于海水或其他含盐水的冻融试验。

5.24.2 快冻法冻融循环过程应按以下规定进行。

- 1 循环历时 (2.0~4.0) h;
- 2 降温历时 (1.0~2.5) h;
- 3 升温历时 (1.0~2.0) h, 并不少于整个冻融循环历时的 1/4;
- 4 降温和升温终了时, 试件中心温度应分别控制在 $(-18^{\circ}\text{C} \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 和 $(5 \pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- 5 试件中心和表面的温差应小于 28°C 。

5.24.3 仪器设备应包括以下几种。

1 混凝土快速冻融试验机: 主要由冻融箱、加热冷却循环系统、自动控制及记录系统等组成, 能够满足 5.24.2 的冻融循环过程。使用铂电阻温度传感器或其他测温仪器, 分度值不应大于 0.1°C , 至少在测温试件中心、冻融箱中部及相对两角各放置一个温度传感器。冻融液应在 $(-25 \sim 20)^{\circ}\text{C}$ 范围内稳定, 满载运行时冻融箱内的冻融液温度极差不应大于 2°C 。其他要求应符合 SL 134 的规定。

2 测温试件: 尺寸与抗冻试件相同, 宜用高抗冻混凝土制作, 以保证能够长时间使用。测温试件应放在冻融箱中部位置, 测温传感器探头宜预埋于测温试件中心; 如是后期插入测温试件的预留孔中, 应在间隙注入水或防冻液并密封。测温试件盒灌入的冻融介质 (淡水、海水或盐水) 应与试验试件盒保持一致。

3 试件盒: 由 (4~5) mm 厚的橡胶制成, 内侧面有 3mm 左右的竖向突起, 一端开口一端封闭, 尺寸约为 $120\text{mm} \times 120\text{mm} \times 500\text{mm}$ 。

4 动弹性模量测定仪: 宜采用 5.25.2 规定的强迫共振法动弹性模测量定义。

5 秤: 分度值不大于 5g。

5.24.4 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制备和养护试件, 每组三个试件。抗冻试验采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的棱柱体试件, 在成型前用湿筛法去除粒径大于 30mm 的骨料。为了不影响抗冻试验时水分浸入混凝土内部, 抗冻试模内侧壁不宜刷机油等油性脱模剂, 可用水性脱模剂或塑料薄膜。

2 试验龄期按设计要求确定。到达规定试验龄期前 4d, 将试件浸泡在 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的水中使其吸水饱和。对于水中养护的试件, 到达规定试验龄期时即可直接用于试验。强度大于 40MPa 的抗冻试件拆模后应水养至测试龄期。如环境介质为海水或其他含盐水, 试件在养护到期后, 应风干 2d 后再浸泡海水或相应的盐水 2d。

3 试验前,取出试件,用湿布将试件表面擦干,以饱和面干状态称取试件质量(G_0 ,精确到1g)。按5.25节的规定测定试件初始自振频率(f_0 ,精确到1Hz)。

4 将试件装入试件盒中,按冻融介质要求,注入淡(海、盐)水,水面应浸没试件顶面不超过20mm。然后将试件盒放入冻融试验机,开机进行试验。试验时应保证冻融箱装满试件,如无正式试件,可用废试件填充。

5 每做25次冻融循环取出试件检测一次,也可根据需要确定检测的间隔次数。测试时,逐个将试件盒取出,按步骤3称重和测定自振频率,并做必要的外观描述或照相。每次测试完毕后,应将试件调头装入试件盒,重新注入淡(海、盐)水,然后放回冻融试验机继续试验。

6 出现以下三种情况之一时,即可停止相应试件的冻融试验。

- 1) 至抗冻等级对应的冻融循环次数;
- 2) 相对动弹性模量 $\leq 60\%$;
- 3) 质量损失率 $\geq 5\%$ 。

7 当有试件终止试验取出后,应另用试件填补空位,如无正式试件,可用废试件填充。若因故需人为中断试验,应将试件在受冻状态下保存。

5.24.5 试验结果处理应按以下规定执行。

1 单个试件的相对动弹性模量按照公式(5.24.5-1)计算。

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\% \quad (5.24.5-1)$$

式中 P_n —— n 次冻融循环后试件相对动弹性模量;

f_0 —— 冻融循环前的试件自振频率, Hz;

f_n —— n 次冻融循环后的试件自振频率, Hz。

2 单个试件的质量损失率按照公式(5.24.5-2)计算。

$$W_n = \frac{G_0 - G_n}{G_0} \times 100\% \quad (5.24.5-2)$$

式中 W_n —— n 次冻融循环后试件质量损失率;

G_0 —— 冻融循环前的试件质量, g;

G_n —— n 次冻融循环后的试件质量, g。

3 以三个试件相对动弹性模量、质量损失率的平均值作为该组试件的试验结果(修约间隔分别为1%、0.1%)。若试件的质量损失率出现负值,宜作为异常数据不纳入计算,取其余数值的平均值作为试验结果。如果3个试件的质量损失率均为负值,不应采用质量损失率进行试验结果评定。

4 试验结果评定应符合以下要求。

- 1) 当一组试件的相对动弹性模量小于60%或质量损失率大于5%时,取前一次检测时的冻融循环次数,加前缀F表示混凝土抗冻等级。
- 2) 若至抗冻等级对应的冻融循环次数,相对动弹性模量和质量损失率均未到达上述指标,则混凝土抗冻等级大于设计抗冻等级。

5.25 混凝土（砂浆）动弹性模量试验

5.25.1 本试验用于以强迫共振法（基准方法）和冲击共振法测定混凝土（或砂浆）棱柱体试件的自振频率，计算动弹性模量，间接表征试件的强度变化。适用于长度与横截面的最大边长之比为3~5之间的试件。

5.25.2 仪器设备应包括以下几种。

1 强迫共振法动弹性模量测定仪：组成及工作原理见图5.25.2-1。工作频率范围应包括（500~10000）Hz。若只做横向自振频率测试时，动弹仪工作频率范围可包括（500~4500）Hz。频率示值误差应小于1%，频率输出稳定性为4小时变化率不应大于0.2%，自振频率的同点复测误差不应大于5 Hz。其他要求应符合SL 135的规定。

2 冲击共振法动弹性模量测定仪：组成及工作原理见图5.25.2-2。主机可为数字波形分析仪或频率计数器。冲击器为一个直径19毫米的实心钢球制作的锤子，能激发约10kHz的共振频率。冲击器应由金属或硬质塑料制成，冲击时间应足够短以激发最大共振频率，两者成倒数关系，钢球越大共振频率越低。拾振器为压电加速度计，工作频率范围为（100~12000）Hz，测量误差为±1%。

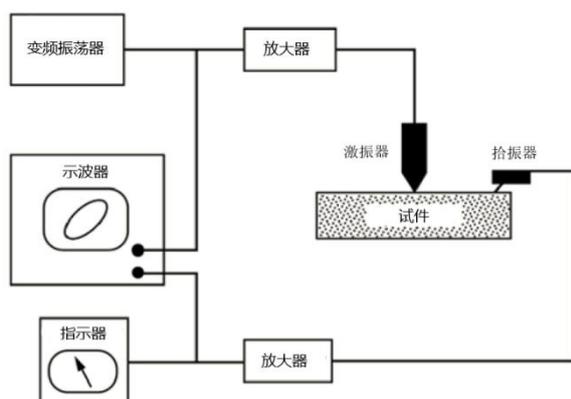


图 5.25.2-1 强迫共振法动弹性模量测量原理图

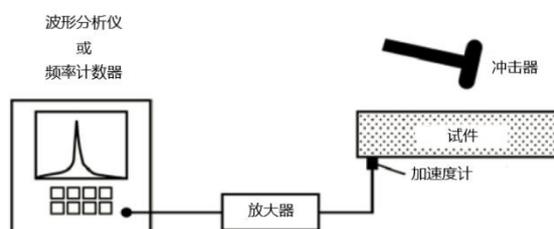


图 5.25.2-2 冲击共振法动弹性模量测量原理图

3 秤：分度值不大于0.01kg。

4 钢直尺：分度值不大于1mm。

5 辅助器具：厚度20mm以上海棉垫或橡胶垫、黄油或凡士林耦合介质等。

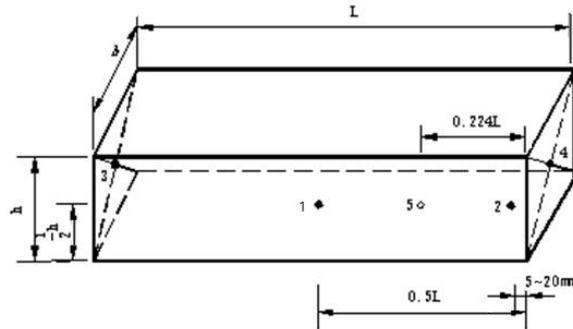
5.25.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 动弹性模量测定仪应在测试前预热15min以上。

2 用于抗冻试验时，按照5.24节的规定制备试件。用于其他试验时，试件长度与横截面的最大边长之比应满足5.25.1条的规定。

3 到达测试龄期后取出试件。测试前试件应为饱和面干状态，用拧干湿布将试件表面擦干净，称取质量（ G ，准确至0.01kg），测量试件尺寸（准确至1mm）。当用于确定混凝土的抗冻等级或比较砂浆的抗冻性时，可不测试件的尺寸。

4 将试件平放在海绵垫上。测定横向或纵向自振频率时，激振器（冲击点）和拾振器的位置如图 5.25.3 所示。图中激振器位置 1、3 分别为试件侧面中心和端部中心；拾振器位置 2 应靠近试件端头，不宜超过 20mm，位置 4 为试件端部中心；节点位置 5 距试件端部 $0.224L$ 。其中 1、2 位置用于横向频率测定，3、4 位置用于纵向频率测定。应在试件的侧面和端面上进行测试，每组试件的测点位置应一致；而且同一块试件，每次的测点位置应相同。对混凝土试件测定横向自振频率，对砂浆试件测定纵向自振频率。



1、3—激振器位置；2、4—拾振器位置；5—节点位置

图 5.25.3 测试位置示意图

5 强迫共振法测定试件的自振频率应按以下步骤进行。

- 1) 在测头与试件接触面涂一薄层黄油或凡士林作为耦合介质，将激振器和拾振器的测头垂直压在试件表面上，压力的大小以不出现噪音为宜。
- 2) 根据试件自振频率的大小，选择相应的频率测量范围。调整激振器和拾振器增益，以粗调迅速找到试件的共振点后，再行细调。当测得的幅值增至最大时即为共振，此时的频率就是试件的自振频率。应重复测试两次记录平均自振频率，两次测试结果的波动不应大于 0.5%。
- 3) 在测试过程中，可采用以下方法找出真实的共振峰。
 - a) 测横向自振频率时，先调整发射频率使测得的幅值最大，再把拾振器图 5.25.3 中位置 2 移至节点位置 5，此时若测得的幅值为零，则该频率值为真实的共振频率；
 - b) 测纵向自振频率时，将输出功率固定，反复调整仪器输出频率，比较测得的幅值的大小，幅值最大者为真实的共振峰。

6 冲击共振法测定试件的自振频率应按以下步骤进行。

- 1) 在拾振器测头与试件接触面涂一薄层黄油或凡士林作为耦合介质，将测头垂直压在试件表面上。
- 2) 根据试件自振频率的大小，调整数字波形分析仪，采样率至少为预计测量最大频率的 2.5 倍，采样点数至少 2048 个。使用冲击器在指定冲击点垂直击打试件表面，记录主机显示的频率。当使用波形分析仪时，自振频率是测得的幅值最高峰值对应的频率。重复测试两

次记录平均自振频率，两次测值的波动不应大于平均值的 10%。

- 3) 可以通过在图 5.25.3 中节点位置 5 击打试件验证自振频率，此时测得的幅值应非常小或无峰值。

5.25.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 横向动弹性模量按照公式 (5.25.4-1) 计算：

$$E_{dt} = 9.464 \times 10^{-7} \times \frac{GL^3T}{bh^3} \times f^2 \quad (5.25.4-1)$$

式中 E_{dt} —— 横向动弹性模量，GPa；

G —— 试件质量，kg；

f —— 试件的自振频率，Hz；

L 、 b 、 h —— 分别为试件的长、宽、高，mm；

T —— 取决于试件边长比和泊松比的修正系数。对于长高比为 4，泊松比大约为 1/6 的混凝土试件，取 1.38。

- 2 纵向动弹性模量按照公式 (5.25.5-2) 计算。

$$E_{dl} = 40 \times 10^{-7} \times \frac{GL}{bh} \times f^2 \quad (5.25.5-2)$$

式中 E_{dl} —— 纵向动弹性模量，GPa。

- 3 以三个试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔 1GPa）。

5.26 混凝土气泡参数试验（直线导线法）

5.26.1 本试验用于测定硬化混凝土中气泡的数量、大小和间距，计算混凝土的含气量、气泡比表面积和间距系数等气泡参数。

5.26.2 仪器设备应包括以下几种。

1 混凝土气泡参数分析仪或测量显微镜。仪器放大倍数宜为（80~128）倍，测量分度值不应大于 10 μ m。应配备能纵向、横向移动的载物台，移动范围分别不小于 50mm 和 100mm。气泡参数分析仪应能自动扫描及分析计算结果。测量显微镜应具有目镜测微尺。

2 辅助器具：聚光型照明灯、切片机、磨片机、抛光机、金刚砂（400 号、800 号、1200 号）等。

5.26.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 从试样上锯下试件时，应使得截取的观测面与浇筑面相垂直。观测总面积和导线总长度应符合表 5.26.3 的规定，因此需要截取和制作足够多的试件和观测面。如混凝土内骨料或大孔隙分布不均匀，应适当增大观测面积。当在一个混凝土试样中截取几个观测面时，两观测面的间距应大于骨料最大粒径的 1/2。

表 5.26.3 最小观测总面积及最小导线总长度

骨料最大粒径	最小观测总面积	最小导线总长度
--------	---------	---------

(mm)	(mm ²)	(mm)
80	50000	3000
40	17000	2600
30	11000	2500
20	7000	2300
10	6000	1900

2 将试件观测面洗刷干净，分别采用 400 号和 800 号（如有必要可使用 1200 号）金刚砂仔细研磨。每次磨完洗刷干净，再进行下次研磨。然后在抛光机转盘的呢料上涂刷氧化铬，抛光观测面，洗刷干净后在 (105±5)℃ 的烘箱中烘干，最后置于显微镜下检查。当照射灯强光以低入射角照射在观测面上，观测到表面除了气泡截面和骨料孔隙外基本是平的，而且气泡边缘清晰，并能测出尺寸为 10μm 的气泡截面，即可认为该观测面已加工合格。

3 在观测面两端，贴附导线间距标志并画导线，使选定的导线均匀地分布在观测面范围内。

4 混凝土气泡参数分析仪按照说明书操作进行测量。使用测量显微镜观测时，首先调整观测面的位置，使十字丝的横丝与导线重合，将试件固定好，然后用目镜测微尺进行定量测量。从第一条导线起点开始观察，分别测量并记录视域中气泡个数及测微尺所截取的每个气泡的弦长刻度值。如需要，也可增测气泡截面直径。第一条导线观测完后，按顺序进行第二、三、四……条导线。

5.26.4 混凝土气泡参数分析仪应能自动计算输出以下气泡参数。使用测量显微镜时，试验结果处理应按以下规定执行（以下计算结果至少取三位有效数字）。

1 气泡平均弦长按照公式 (5.26.4-1) 计算。

$$\bar{l} = \frac{\sum l}{n} \quad (5.26.4-1)$$

2 气泡比表面积按照公式 (5.26.4-2) 计算。

$$\alpha = \frac{4}{\bar{l}} \quad (5.26.4-2)$$

3 气泡平均半径按照公式 (5.26.4-3) 计算。

$$\bar{r} = \frac{3}{4} \bar{l} \quad (5.26.4-3)$$

4 混凝土试件的空气含量（体积比）按照公式 (5.26.4-4) 计算。

$$A = \frac{\sum l}{L} \times 100\% \quad (5.26.4-4)$$

5 1000mm³ 混凝土的气泡个数按照公式 (5.26.4-5) 计算。

$$n_v = \frac{3A}{4\pi\bar{r}^3} \quad (5.26.4-5)$$

6 每 10mm 导线切割的气泡个数按照公式 (5.26.4-6) 计算。

$$n_l = 10 \times \frac{n}{L} \quad (5.26.4-6)$$

7 气泡间距系数按照公式 (5.26.4-7)、公式 (5.26.4-8) 计算。

1) 当混凝土中浆气比 P/A (体积比) 大于 4.342 时:

$$\bar{L} = \frac{3A}{4n_l} \left[1.4 \left(\frac{P}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (5.26.4-7)$$

2) 当混凝土中浆气比 P/A (体积比) 不大于 4.342 时。

$$\bar{L} = \frac{P}{4n_l} \quad (5.26.4-8)$$

式 (5.26.4-1) ~ 式 (5.26.4-8) 中。

\bar{l} —— 气泡平均弦长, mm;

$\sum l$ —— 全部导线所切割的气泡弦长总和, mm;

n —— 全部导线所切割的气泡总个数;

α —— 气泡比表面积, mm^2/mm^3 ;

\bar{r} —— 气泡平均半径, mm;

n_v —— 1000mm^3 混凝土中的气泡个数;

A —— 混凝土的空气含量 (体积比);

L —— 导线总长, mm;

P —— 混凝土中胶结材料浆体体积含量 (不包括空气含量);

n_l —— 每 10mm 导线切割的气泡个数;

\bar{L} —— 气泡间距系数, mm。

8 每个气泡参数均应取所有试件测值的平均值作为试验结果 (保留三位有效数字)。

5.27 混凝土中钢筋腐蚀的电化学试验 (新拌砂浆阳极极化法)

5.27.1 本试验用于检验原材料对混凝土中钢筋锈蚀概率的影响, 适用于初凝时间大于 45min 的混凝土。

5.27.2 仪器设备应包括以下几种。

1 钢筋锈蚀仪: 恒电流阳极极化试验仪, 或有恒电流装置的恒电位仪。电流最大量程 $1000\mu\text{A}$, 分度值 $10\mu\text{A}$; 电压最大量程 (1200~1500) mV, 分度值 10mV。

2 铜—硫酸铜电极。

3 钢筋电极: 热轧光圆钢筋, 公称直径 6mm, 长 100mm。

4 试模: 用木板或塑料等绝缘材料加工而成, 模腔尺寸为 $40\text{mm} \times 100\text{mm} \times 150\text{mm}$ 。

5 5mm 方孔筛。

6 电热鼓风烘箱。

7 辅助器具: 砂布 (2.5 号、0 号)、导线、电焊、乳胶手套等。

5.27.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 制作钢筋电极应按以下步骤进行。

1) 钢筋酸洗除锈。酸洗液为工业盐酸:水=1:1 的盐酸溶液, 另加纯盐酸质量 2%~3% 的六次

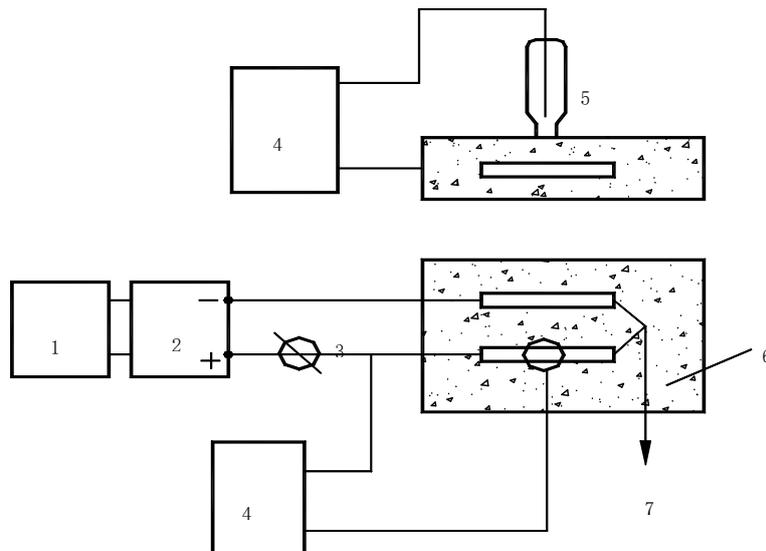
甲基四胺缓蚀剂，中和液为 3%碳酸钠溶液。酸洗时将钢筋泡入酸洗液中，待表面氧化皮溶解后取出，然后依次经过水、中和液浸洗，最后都放入另一盘中和液中暂存。

- 2) 在试验当天取出钢筋，用水冲洗，再用干毛巾擦干，放入已预先升至 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱内烘干 5min。冷却后立即用 2.5 号、0 号砂布磨擦钢筋表面至光亮。
- 3) 在钢筋的一端焊上导线，及时擦去焊油。将钢筋两头浸涂石蜡，焊线端涂 25mm，另一端涂 5mm，使中间暴露段长 70mm。用丙酮擦去中间段钢筋表面油脂，放在干燥器内备用。此后操作过程中不可用裸手接触电极，必须带乳胶手套。

2 按工程项目要求的配合比配制混凝土后湿筛出砂浆，或按需要配制砂浆。在无特定要求时，可采用水胶比 0.5，灰砂比 1:2.2，水泥可用硅酸盐或普通硅酸盐水泥。检测外加剂时，外加剂按比例随拌和水加入。检测掺合料时，掺合料按比例替代水泥。拌和水可用自来水或蒸馏水。

3 将砂浆浇入试模中，先浇一半，将两个钢筋电极平行放在砂浆层中部，间距约为 40mm，拉出导线，然后灌满砂浆。在试模两边轻轻插捣几下，使钢筋表面全部与砂浆接触。

4 按照图 5.27.2 接好试验线路，将两根钢筋电极和铜—硫酸铜电极连接到钢筋锈蚀仪。以一根钢筋连接正极作为试验电极，另一根连接负极作为辅助电极，并用铜—硫酸铜电极测量试验电极的自然电位 V_0 。测量时，铜—硫酸铜电极的下端应对准试验电极的中点位置，与新鲜砂浆表面接触，并垂直于砂浆表面。



1—直流稳压电源；2—直流稳流器；3—直流微安表；

4—直流毫伏表；5—铜—硫酸铜电极；6—新拌砂浆试件；7—钢筋

图 5.27.2 新拌砂浆阳极极化法试验装置示意图

5 开机通电，同时开始记时，分别在 2min、6min、10min、15min 时测读并记录试验电极的极化电位 V_2 、 V_6 、 V_{10} 、 V_{15} 。试验中通过钢筋表面的电流密度应保持恒定为 $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，按试验电极中间暴露段钢筋面积计算电流（例如 $I=50 \times \pi \times 0.6 \times 7=660\mu\text{A}$ ）。

6 更换试验电极。将已测读完毕的试验电极从砂浆中取出，再埋入另一根处理好的钢筋作试验

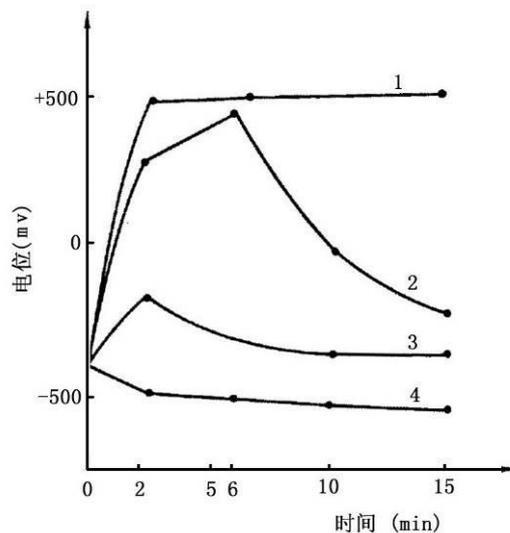
电极，辅助电极可不更换。照以上步骤，进行重复测量。

5.27.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 以两个试验电极测量结果的平均值作为钢筋阳极极化电位的测定值。以阳极极化电位为纵坐标，时间为横坐标，绘制电位—时间曲线（如图 5.27.4）。

2 根据电位—时间曲线判断钢筋的锈蚀概率应按以下规定执行。

1) 电极通电后，阳极电位迅速向正方向移动，在 2min 时电极电位 V_2 已达 +500mV 左右，并且在 15min 时电位的下降值不超过 50mV ($V_2 - V_{15}$)，则认为此电极处于钝化状态（图 5.27.4 中的 1 号曲线），并可判定试验砂浆中的水泥、外加剂或掺合料不会引起钢筋锈蚀；



1—钝化曲线；2—钝化和活化之间的曲线；3、4—活化曲线

图 5.27.4 阳极极化电位~时间曲线

2) 电极通电后，阳极电位向负方向移动，或虽向正方向移动但又很快大幅度下降（如图 5.27.4 中的 2、3、4 号曲线）。这两种情况均表明钢筋钝化膜已遭损坏，但不能作出明确判断所用水泥、外加剂或掺合料对钢筋锈蚀的影响，还必须按 5.28 节的方法作进一步的检验。

3 如两个试验电极测量结果出现矛盾，即一个处于钝化状态，另一个处于非钝化状态，则此组试验作废，应重新试验。

4 测定钢筋电极在无外加剂的普通硅酸盐水泥砂浆中电位—时间曲线，可用于检查钢筋电极制作质量，如为钝化曲线，表明钢筋电极合格，可用于试验。

5.28 混凝土中钢筋腐蚀的电化学试验（硬化砂浆阳极极化法）

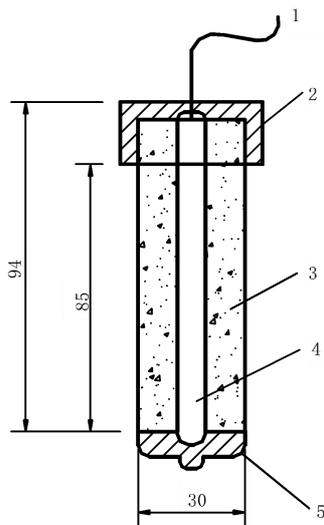
5.28.1 本试验用于检验原材料对混凝土中钢筋锈蚀概率的影响，适用于终凝时间不超过 48h 的混凝土。

5.28.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 钢筋锈蚀仪、铜—硫酸铜电极同 5.27 节。
- 2 试模：模腔为 30mm×30mm×94mm 棱柱体，两端模板中心有固定钢筋的凹孔。
- 3 钢筋：热轧光圆钢筋，公称直径 6mm，长 100mm。
- 4 辅助电极：长 150mm、宽 25mm 的不锈钢尺。
- 5 玻璃缸：内部尺寸不小于 120mm×160mm×190mm。
- 6 电热鼓风烘箱。
- 7 辅助器具：细钢丝刷或砂布、导线、电焊等。

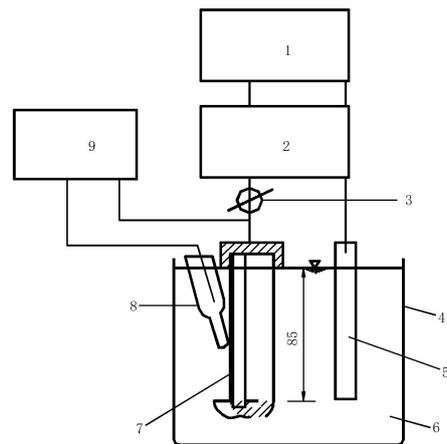
5.28.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 按下述步骤成型与养护钢筋砂浆电极（以下简称砂浆电极）。
 - 1) 按 5.27 节的规定执行钢筋酸洗、去脂、刷光。将处理好的钢筋尽快装入试模，由两端模板上的凹孔保证其处于正中位置。
 - 2) 按工程项目要求的配合比配制混凝土后湿筛出砂浆，或按需要配制砂浆。将拌制好的砂浆浇入模中，用跳桌或振动台成型。每组三个砂浆电极。
 - 3) 成型后带模送入养护室，盖上湿布养护。24h 后取出脱模，延长脱模时间应在报告中注明。用水泥净浆将外露的钢筋两头覆盖，再送入养护室养护 48h。



1—导线；2—石蜡；3—砂浆；
4—钢筋；5—石蜡

图 5.28.2-1 钢筋砂浆电极（单位：mm）



1—晶体管直流稳压电源；2—直流稳流器；3—直流微安表；
4—玻璃缸；5—不锈钢尺；6—饱和氢氧化钙溶液；
7—钢筋砂浆电极；8—铜—硫酸铜电极；9—直流毫伏表

图 5.28.2-2 试验装置示意图

- 4) 电极养护后取出，在温度为 $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘 24h 加速钢筋锈蚀，误差不应超过半小时。在烘箱内冷却后取出电极，敲去两端的水泥石，露出钢筋端头。在钢筋的一端焊上导线，再用蜡涂封电极两端，使中间暴露段长度为 85mm（如图 5.28.2 所示）。
- 5) 将一组三个砂浆电极放入 1000mL 烧杯中，用饱和氢氧化钙溶液浸泡（2~4）h 备用。

2 按照图 5.28.3 接好试验线路,将砂浆电极、辅助电极和铜—硫酸铜电极连接到钢筋锈蚀仪,砂浆电极接电源正极,不锈钢辅助电极接电源负极,并把电极浸入盛有饱和氢氧化钙溶液的玻璃缸内,使砂浆电极浸入溶液的深度为 85mm。用铜—硫酸铜电极测量砂浆电极的自然电位 V_0 ,测量时,铜—硫酸铜电极的下端应对准砂浆电极暴露段的中点位置,与砂浆表面接触。

3 然后开机通电,同时开始计算时间,分别在 2min、6min、10min、15min 时记录砂浆电极的极化电位 V_2 、 V_6 、 V_{10} 、 V_{15} 。试验中通过钢筋表面的电流密度应保持恒定为 $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$,按砂浆电极中间暴露段钢筋面积计算电流 ($I=50\times\pi\times0.6\times8.5=800\mu\text{A}$)。

4 更换砂浆电极,按同样步骤测试另两个砂浆电极的阳极极化电位。

5.28.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 以三个砂浆电极极化电位的平均值作为钢筋阳极极化电位的测定值。以阳极极化电位为纵坐标,时间为横坐标,参考图 5.27.4 绘制电位—时间曲线。

2 根据电位—时间曲线判断钢筋的锈蚀概率应按以下规定执行。

- 1) 电极通电后,在 2min 时电极电位达 +650mV 左右,并且在 15min 时电位下降值 (V_2-V_{15}) 不超过 50mV,则认为此电极处于钝化状态,并可以判定试验砂浆中的水泥、外加剂或掺合料不会引起钢筋锈蚀。
- 2) 电极通电后,在 2min 时电极电位 V_2 达 +650mV 左右,但经 15min 电位下降值超过 50mV,则认为此电极处于钝化状态和活化状态之间,其钢筋的钝化膜已损坏。钝化膜损坏的程度可用 $V_2\sim V_{15}$ 段曲线斜率来表示,即电位向负方向移动的斜率愈大,损坏愈严重。
- 3) 电极通电后,在 2min 时电极电位 V_2 小于 +650mV,并且很快又大幅度下降,表明钢筋钝化膜已严重损坏。该电极处于活化状态。活化程度可用 V_2 来衡量, V_2 越低,活化程度越强。
- 4) 无论处于活化状态或介于活化与钝化之间的电极,均可认为砂浆中的水泥、外加剂或掺合料会引起钢筋锈蚀。钢筋锈蚀概率大小,可从钢筋钝化膜的破坏程度来定性地进行相对比较。

5.29 混凝土碳化试验

5.29.1 本试验用于测定在一定的二氧化碳浓度和相对湿度环境中混凝土的碳化深度。

5.29.2 混凝土碳化试验环境条件应按以下规定进行。

- 1 温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$;
- 2 相对湿度为 $70\%\pm 5\%$;
- 3 二氧化碳浓度为 $20\%\pm 3\%$ 。

5.29.3 仪器设备应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 碳化试验装置:宜采用混凝土碳化试验箱,能够设定、检测和自动控制箱内碳化环境满足 5.29.2 的规定。也可采用带密封盖或门的密闭容器,容积至少应为试件体积的两倍,箱内需有试件搁架,二氧化碳气体入口,湿度调节装置,以及空气对流装置,另外还需配备

温度、相对湿度和二氧化碳浓度测量仪器等。

- 2) 二氧化碳供气装置：包括气瓶、减压阀、压力表或流量计等。
- 3) 钢直尺或卡尺：分度值不大于 1mm。
- 4) 辅助器具：小喷壶、毛刷、压力机或切割机等。

2 1%酚酞溶液：用 1g 酚酞溶于 80mL 乙醇（95%），再加 20mL 蒸馏水（或去离子水）制成。

5.29.4 试验步骤应按以下规定执行。

1 碳化试件的制作应按以下规定执行。

- 1) 按 5.1 节的规定制作和养护试件，试件的最小边长应大于骨料最大粒径的 3 倍，长宽比不应小于 3。如选用 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料，每组 3 条。试件的最小边长应大于骨料最大粒径的 3 倍。也可用立方体试件，每组 3 块，组数按照碳化过程中的测试次数配备。
- 2) 到达试验龄期前 2d 时，将试件从标准养护室取出，在 60℃±2℃温度下烘 48h。
- 3) 试件冷却后，除留下一个或相对的两个侧面外，其余表面用熔化的石蜡予以密封。如测试混凝土表面的涂覆材料对碳化的防护效果，则应密封其他所有裸露面。

2 将经过处理的试件放入碳化箱内的搁架上，经受碳化的表面宜侧放，相邻试件间距应大于 50mm。

3 关闭碳化箱并开机，然后打开二氧化碳气瓶减压阀，调节合适的流量。至 3d、7d、14d 及 28d 或其他规定的碳化时间时，取出试件进行测试。对棱柱体试件，在压力试验机上用劈裂法从一端劈开，每次切除的厚度约为试件宽度的一半，也可用切割机干切。用熔化的石蜡将剩余的棱柱体试件的断面密封，放回箱内继续碳化。对立方体试件，每次取出三块，沿裸露面中部、垂直于顶面劈开或切开。立方体试件不重复使用。

4 用毛刷清理干净试件切片的新断面，随即均匀喷上 1%酚酞溶液，断面上已碳化区域不变色，未碳化区域应呈现粉色。经 30s 后，用笔划出粉色界线位置，在断面上按 10mm 间距，用钢直尺或卡尺测量不变色区的宽度作为碳化深度（ d_i ，精确至 1mm）。如果测点处的界线上刚好嵌有较小的粗骨料颗粒，可取该颗粒两侧碳化深度的平均值作为该点的测值；如颗粒较大，则该测点不读取数据。

5.29.5 试验结果处理应按以下规定执行。

1 单个试件的平均碳化深度按照公式（5.29.5）计算。

$$d_t = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (5.29.5)$$

式中 d_t —— 碳化 t 天后试件的平均碳化深度，mm；

d_i —— 各测点的碳化深度，mm；

n —— 有效测点总数。

2 以三个试件碳化深度平均值作为试验结果（修约间隔 1mm）。

3 如有需要，可以绘制碳化时间与碳化深度的关系曲线，研究混凝土的碳化发展规律。

5.30 混凝土抗氯离子渗透性试验（电量法）

5.30.1 本试验用于测定通过试件的总电量，以电通量指标评定混凝土的抗氯离子渗透性。不适用于掺亚硝酸钙等的混凝土。

5.30.2 仪器设备和试剂应包括以下几种。

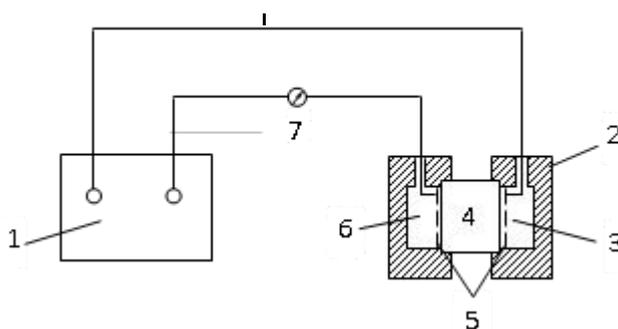
1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 混凝土电通量测定仪：具备自动恒压电源输出、电流测量、温度测量、计时，以及试验结束时自动计算电通量等功能。直流电压为 $(60 \pm 0.1) \text{ V}$ ；电流量程 20A，测量误差不大于 5mA；测温误差不大于 0.1°C 。亦可自行组装如图 5.30.2-1 所示试验装置。
- 2) 试验槽：有机玻璃制，具有试件夹紧螺杆、电解质灌储槽、耐腐技术电极和接线柱，其示意图如图 5.30.2-2。紫铜垫圈外径 $(109 \pm 1) \text{ mm}$ ，厚度 $(0.50 \pm 0.01) \text{ mm}$ ，内径 $(76 \pm 0.1) \text{ mm}$ 。铜网筛孔尺寸 0.95mm (20 目)。橡胶垫外径 $(110 \pm 1) \text{ mm}$ ，内径 $(90 \pm 1) \text{ mm}$ ，厚度 $(6 \pm 1) \text{ mm}$ 。试验槽正极接口为红色，负极接口为黑色。
- 3) 真空饱水设备：真空室至少能容纳 3 个试件，真空度可达 133Pa，能够自动抽真空、计时、吸水和排水。亦可采用真空干燥器、空泵等自行组装试验装置。
- 4) 卡尺：分度值不大于 0.1mm。
- 5) 辅助器具：硅橡胶或树脂密封材料、水冷式金刚石锯或碳化硅锯、水砂纸 (200 号~600 号)、细锉刀、黄铜刷、橡胶手套等。

2 试剂应包括以下几种。

- 1 阴极溶液：3.0%氯化钠溶液，称取 30g 氯化钠溶解于 970g 蒸馏水（或去离子水）中。
- 2 阳极溶液：0.3mol/L 氢氧化钠溶液，称取 12g 氢氧化钠溶解于 988 克蒸馏水（或去离子水）中。

注：氢氧化钾、氢氧化钠均具有极强的腐蚀性，操作时注意防护，台面、地面如有遗撒应及时清理。



1—直流稳压电源；2—试验槽；3—3%NaCl 溶液；4—混凝土试件；
5—耐腐金属电极；6—0.3mol/L NaOH 溶液；7—数字式电流表

图 5.30.2-1 电量法试验装置示意图

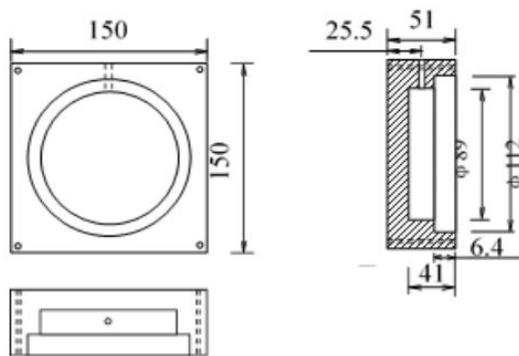


图 5.30.2-2 电量法试验槽结构图 (单位: mm)

5.30.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按照 5.1 节的规定成型和养护试件, 每组 3 个试件。抗氯离子渗透性试验采用直径 ϕ (100 \pm 1) mm、高 (50 \pm 2) mm 的圆柱体试件, 骨料粒径不宜大于 25mm。可先成型 ϕ 100mm \times 200mm 的圆柱体试件或边长 150mm 的立方体试件。

2 试件的标准养护龄期为 28d, 或根据要求选用其它龄期。在试验前, 将制作的试件切割或钻芯加工成所需尺寸试件。如需修补, 将试件暴露于空气中至表面干燥, 以硅橡胶或树脂密封材料施涂于试件侧面, 必要时填补涂层中的孔洞以保证试件侧面完全密封, 并待干透后用水砂纸 (200 号~600 号)、细锉刀将侧面打磨光滑。然后用卡尺测量试件的直径和高度 (精确到 0.1mm)。

3 加工好的试件需在测试前进行真空饱水。将试件放入真空饱水设备中, 加盖密封, 启动后按如下流程进行真空饱水: 抽真空度到 133Pa, 保持真空 3h 后, 维持这一真空度自动吸入足够的蒸馏水, 直至淹没试件, 试件浸泡 1h 后恢复常压, 再继续浸泡 (18 \pm 2) h。

4 取出处于饱水状态的试件, 将表面的碎屑刷洗干净, 用湿布擦干。此后操作时必须戴乳胶手套, 不应再裸手接触试件防止污染, 同时保护手免遭碱溶液腐蚀。

5 试验应在 (20~25) $^{\circ}$ C 恒温室内进行。将试件安装于试验槽内, 接触面用橡胶密封环或其他密封胶密封, 并用螺杆将两试验槽和试件夹紧。在两个试验槽中灌入蒸馏水 (或去离子水) 检查密封情况, 以确保不会渗漏, 同时有清洗作用, 然后倒出。

6 将浓度为 3.0% 的 NaCl 溶液注入连接电源负极的试验槽中, 将 0.3mol/L 的 NaOH 溶液注入连接电源正极的试验槽中。然后将试验装置置于 (20~23) $^{\circ}$ C 的流动冷水槽中, 其水面宜低于试验槽顶面 5mm。

7 用电源线连接试验槽正负极与混凝土电通量测定仪的正负极, 然后打开测定仪电源, 在试件两端施加 60V 直流恒电压, 设定电流记录时间间隔为 (5~10) min, 开始试验并在 6h 后自动结束, 自动计算出通过试件的总电量 (C)。对自组试验装置, 调节直流电源电压到 60V, 记录电流初始读数 I_0 , 开始时每隔 5min 记录一次电流值, 当电流值变化不大时, 每隔 10min 记录一次电流值, 当电流变化很小时, 每隔 30min 记录一次电流值, 直至通电 6h。通电期间应保持试验槽中充满溶液, 并监测记录溶液温度。

8 试验结束后,应及时倾倒试验槽中碱溶液到专用废液桶中,先用流水冲洗试验槽和电极、再用蒸馏水冲洗干净,晾干后备用。

5.30.5 试验结果处理应按以下规定执行。

1 读取混凝土电通量测定仪自动计算的通过试件的总电量 C 。对自组试验装置,绘制电流与时间的关系图,将各点数据以光滑曲线连接起来,对曲线作面积积分,或按梯形法进行面积计算,即可得试验 6h 通过的总电量 C 。

2 按截面面积比的正比关系,将所得电量换算成直径为 95mm 试件的标准电通量。

3 取三个试件测值的平均值作为试验结果(修约间隔 10 库仑)。

5.31 混凝土氯离子扩散系数试验(RCM法)

5.31.1 本试验用于测定混凝土中氯离子非稳态快速迁移的扩散系数。

5.31.2 仪器设备和试剂应包括以下几种。

1 仪器设备和试剂应包括以下几种。

1) 氯离子扩散系数测定仪:由主机、数据采集线、试验槽、支架、阴阳极板、环箍及有机硅橡胶套组成,示意图见图 5.31.2-1。

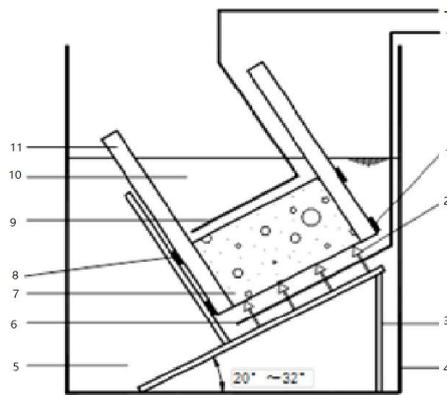
a) 主机由直流电压输出系统、电流测量、温度测量及控制系统等组成,应能稳定提供 30V(最大允许误差 $\pm 0.1V$)的可调直流电,电流量程应为 0~10A(最大允许误差 $\pm 0.1mA$),温度计或热电偶的测量误差为 $\pm 0.2^{\circ}C$ 。应能自动记录初始电流、控制试验持续时间、记录试验槽溶液温度。电压输出端口正极为红色,负极为黑色,且有正负极符号标识。

b) 试验槽:如图 5.31.2 所示,尺寸为 370mm \times 270mm \times 280mm 的硬质塑料槽,可同时放入一组三个试件。装入试件的橡胶套为有机硅材质,内径为 100mm,外径($\phi 114\sim\phi 120$)mm,高(150~170)mm。夹具应采用不锈钢环箍,其直径范围为(105~115)mm,宽度为 20mm。阳极板采用厚度为(0.5 \pm 0.1)mm、直径为(98 \pm 1)mm 的不锈钢网或带孔的不锈钢板。阴极板采用厚度为(0.5 \pm 0.1)mm、直径不小于 100mm 的不锈钢网或带孔的不锈钢板。阴极板支架倾斜 20 $^{\circ}$ ~32 $^{\circ}$,由硬塑料板制成。

2) 真空饱水设备:同 5.30 节的规定。

3) 卡尺:分度值不大于 0.1mm。

4) 辅助器具:水冷式金刚石锯或碳化硅锯、超声浴箱、电吹风(2000W)、扭矩扳手(20N \cdot m~100N \cdot m)、水砂纸(200号~600号)、细锉刀、黄铜刷、试件劈裂装置、喷壶、橡胶手套等。



1—环箍；2—支撑顶头；3—支架；4—试验槽；5—KOH+NaCl 溶液；6—阴极板；7—试件；
8—环箍；9—阳极板；10—KOH 溶液；11—橡胶筒

图 5.31.2 RCM 测定仪示意图

2 试剂应包括以下几种。

- 1) 阴极溶液：5% NaCl 和 0.2 mol/L KOH 混合溶液。
- 2) 阳极溶液：0.2 mol/L KOH 溶液。
- 3) 显色指示剂：0.1mol/L AgNO₃ 溶液。

5.31.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 试件的制作和试验准备工作按照 5.30 节的规定进行。
- 2 测试过程应按以下步骤进行。

- 1) 将试件装入橡胶筒内，置于筒的底部，见图 5.31.2。如测试表层混凝土性能，需将试件表层朝下。在橡胶筒体外侧对应试件的底部和顶部位置处安装两个平行环箍，并拧紧环箍上的螺丝至扭矩达 (30~35) N·m，使试件的侧面处于密封状态。若试件的圆柱曲面具有可能造成液体渗漏的缺陷，则应以密封剂保持其密封性。
- 2) 用蒸馏水将试验槽冲洗干净。把装好试件的橡胶筒安装到试件槽中，安装好阳极板，然后在橡胶筒中注入约 300mL 的 0.2mol/L 的 KOH 溶液，使阳极板和试件表面均浸没于溶液中；在试验槽中注入含 5%NaCl 和 0.2mol/L KOH 的混合溶液，直至其液面与橡胶筒中的 KOH 溶液的液面齐平。
- 3) 连接 RCM 测定仪和试件。将电源的阳极用红色导线连至橡胶筒中的阳极板，电源的阴极用黑色的导线连至试验槽中的阴极板，并在每个橡胶筒中插入一个温度传感器。
- 4) 打开 RCM 测定仪电源开始试验。测定仪应能稳定输出 (30±1) V 并联电压，并立即显示每个试件的阳极电解液初始温度、初始电流及试验持续时间等信息。
- 5) 试验时间按测得的初始电流确定，见表 5.31.3。一组三个试件的试验时间可能不同，应待全部结束时再取出。
- 6) 试验结束后，测定仪应显示阳极溶液的最终温度和最终电流。关闭测定仪电源，断开连线，

取出装有试件的橡胶筒，倒出 KOH 溶液，松开环箍螺丝，然后从上向下移出试件。及时排出试验槽内的溶液，结垢或沉淀物用毛刷清除。用水冲洗干净试验槽和橡胶筒，最后用电吹风的冷风档吹干。

5.31.3 不同初始电流对应的试验持续时间

初始电流 I_0 (mA)	试验持续时间 (h)	初始电流 I_0 (mA)	试验持续时间 (h)
$I_0 < 5$	168	$30 \leq I_0 < 60$	24
$5 \leq I_0 < 10$	96	$60 \leq I_0 < 120$	8
$10 \leq I_0 < 30$	48	$I_0 \geq 120$	4

3 氯离子扩散深度测定。将试验完的试件取出后，用水冲洗干净，擦干后在压力机上沿轴向开。用毛刷清除断面杂物并立即喷涂指示剂，利用 AgNO_3 溶液的比色反应就可以测出氯离子浸入试件的扩散深度。当氯离子浓度达到 0.07mol/L ，在试件断面喷涂 AgNO_3 溶液约 15min 后，就可观察到明显的颜色变化。在一块劈开试件的断面上用笔划出分界线位置，按 20mm 间距用钢直尺或卡尺测量显色分界线离底面的距离，计算平均值即为该试件的氯离子平均扩散深度 x_d （修约间隔 1mm ）。可不考虑试件边缘效应和骨料对氯离子渗透的阻挡，但如颗粒较大存在明显的影响，该测点不读取数据。

5.31.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土的氯离子扩散系数按照公式（5.31.4-1）和公式（5.31.4-2）计算。

$$D_{RCM} = 2.872 \times 10^{-6} \times \frac{Th(x_d - \alpha\sqrt{x_d})}{t} \quad (5.31.4-1)$$

$$\alpha = 3.338 \times 10^{-3} \times \sqrt{Th} \quad (5.31.4-2)$$

式中 D_{RCM} —— 混凝土氯离子迁移系数， m^2/s ；

T —— 阳极电解液初始和最终温度的平均值， K ；

h —— 试件高度， m ；

x_d —— 试件的氯离子平均扩散深度， m ；

t —— 通电持续时间， s ；

α —— 辅助变量。

2 以三个试件的氯离子扩散系数的平均值作为该组试件的试验结果（修约间隔 $0.1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ）。如任一测值与中间值之差超过中间值的 15% 时，应剔除此值，取其余两值的平均值作为测定值；如两个测值均超过中间值的 15%，则该组试验无效。

5.32 混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量试验

5.32.1 本试验用于测定硬化混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量。

5.32.2 仪器设备应包括以下几种。

1 分析天平：分度值不大于 0.1mg 。

2 棕色滴定管： 25mL 或 50mL 。

- 3 三角烧瓶：250mL。
- 4 容量瓶：100mL、1000mL。
- 5 移液管：20mL。
- 6 0.63mm 方孔试验筛。
- 7 辅助器具：玻璃干燥器、研钵、表面皿、中速滤纸、漏斗、烘箱等

5.32.3 试剂应包括以下几种。

1 5%铬酸钾指示剂：称取 5g 铬酸钾溶于少量蒸馏水中，加入少量硝酸银溶液使出现微红，手摇匀后放置过夜，过滤并移入 100mL 容量瓶中，稀释至刻度。

2 0.5%酚酞溶液：称取 0.5g 酚酞，溶于 75mL 乙醇（95%）中，再加 25mL 蒸馏水（或去离子水）制成。

3 稀硫酸溶液：以 1 份体积硫酸（密度 1.84kg/L）倒入 20 份蒸馏水。

4 0.02mol/L 氯化钠标准溶液：把分析纯氯化钠置于瓷坩锅中加热（以玻璃棒搅拌），一直到不再有盐的爆裂声为止。冷却后称取 1.2g 左右（精确至 0.1mg），用蒸馏水溶解后移入 1000mL 容量瓶，并稀释至刻度。

5 0.02mol/L 硝酸银溶液：称取硝酸银 3.4g 左右溶于蒸馏水中并至 1000mL，置于棕色瓶中保存。用移液管吸取氯化钠标准溶液 20mL 于三角烧瓶中，加入 10 滴铬酸钾指示剂，用已配制的硝酸银溶液滴定至溶液刚呈砖红色。视所测的氯离子含量，也可以配成浓度略高的硝酸银溶液。

5.32.4 试验步骤应按以下规定执行。

1 样品处理。取硬化混凝土中的砂浆约 30g，研磨至全部通过 0.63mm 筛，在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 2h，取出后放入干燥器冷却至室温。用分析天平称取 20g 左右（ G ，精确到 0.1mg），倒入三角烧瓶中，并加入 200mL 蒸馏水（ V_1 ），剧烈振荡（1~2）min，浸泡 24h。

2 将上述试样过滤。用移液管分别吸取滤液 20mL（ V_2 ），置于两个三角烧瓶中，各加 2 滴酚酞，使溶液呈微红色，再用稀硫酸中和至无色后，加铬酸钾指示剂 10 滴，立即用硝酸银溶液滴至砖红色。记录所消耗的硝酸银（ V_3 ）。

5.32.5 试验结果处理应按以下规定执行。

1 砂浆样品中水溶性氯离子含量应按照公式（5.32.5）计算。

$$P_{\text{cl}} = \frac{C_{\text{AgNO}_3} V_3 \times 0.03545}{G \times \frac{V_2}{V_1}} \times 100\% \quad (5.32.5)$$

式中 P_{cl} —— 砂浆样品中水溶性氯离子含量；

C_{AgNO_3} —— 硝酸银溶液浓度，mol/L；

G —— 砂浆样品质量，g；

V_1 —— 浸样品的水体积，mL；

V_2 —— 每次滴定时提取的滤液体积，mL。

V_3 —— 每次滴定时消耗的硝酸银溶液体积，mL。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.01%）。

5.33 混凝土中砂浆的氯离子总含量试验

5.33.1 本试验用于测定混凝土中砂浆的氯离子总含量，其中包括已和水泥结合的氯离子含量。

5.33.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 分析天平：分度值不大于 0.1mg。
- 2 酸式滴定管：10mL。
- 3 容量瓶：100mL、1000mL。
- 4 试剂瓶：1000mL。
- 5 移液管：20mL。
- 6 0.63mm 方孔试验筛。
- 7 辅助器具：玻璃干燥器、研钵、表面皿等。

5.33.3 试剂应包括以下几种。

- 1 0.02mol/L 氯化钠标准溶液：按 5.32.3 条的规定执行。
- 2 0.02mol/L 硝酸银溶液配制：按 5.32.3 条的规定执行。
- 3 6mol/L 硝酸溶液：取化学纯浓硝酸（HNO₃ 含量 65%~68%）一定量放入 100mL 容量瓶中，用蒸馏水稀释至刻度。
- 4 稀硝酸溶液：按体积比为浓硝酸：蒸馏水=15：85 配制。
- 5 10%铁矾溶液：用 10g 化学纯铁矾（(Fe²⁺)(Fe³⁺)₂(SO₄)₄·14H₂O）溶于 90g 蒸馏水配成。
- 6 0.02mol/L 硫氰酸钾标准溶液：用天平称取化学纯硫氰酸钾晶体约 1.95g 左右，溶于 1000mL 蒸馏水，充分摇匀，装在瓶内配成硫氰钾溶液并用硝酸银标准溶液进行标定。将硝酸银标准溶液装入滴定管，从滴定管放出硝酸银标准溶液约 25mL，加入 6mol/L 硝酸 5mL 和 10%铁矾溶液 4mL，然后用硫氰酸钾标准溶液滴定，滴定时，激烈摇动溶液，当滴至红色维持（5~10）s 不褪时即为终点。

5.33.4 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 取硬化混凝土中的砂浆约 40g，研磨至全部通过 0.63mm 筛，在（105±5）℃烘箱中烘 2h。取出放入干燥器内冷却至室温，用分析天平称取约 20g（G，精确到 0.1mg），倒入三角烧瓶。
- 2 用容量瓶盛 100mL 稀硝酸倒入盛有砂浆试样的三角烧瓶内，盖上瓶塞，浸泡一昼夜左右（以水泥全部溶解为度），其间摇动三角烧瓶。然后用滤纸过滤，除去沉淀。
- 3 用移液管准确量取滤液 20mL（V）两份，置于三角锥形瓶，每份由滴定管加入硝酸银溶液约 20mL（V₁，可估算氯离子含量的多少而酌量增减），分别用硫氰酸钾溶液滴定（V₂）。滴定时激烈摇动溶液，当滴至红色能维持（5~10）s 不褪时即为终点。

注：必要时加入（3~5）滴 10%铁矾溶液以增加水泥含有的 Fe³⁺。

5.33.5 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 砂浆样品中氯离子总含量按照公式（5.33.5）计算。

$$P_{cl} = \frac{0.03545(C_{AgNO_3}V_1 - C_{KSCN}V_2)}{G \frac{V}{V_3}} \times 100\% \quad (5.33.5)$$

式中 P_{cl} —— 砂浆样品中氯离子总含量；

- C_{AgNO_3} ——硝酸银标准溶液的浓度, mol/L;
 V_1 ——加入滤液试样中的硝酸银标准溶液体积, mL;
 C_{KSCN} ——硫氰酸钾标准溶液的浓度, mol/L;
 V_2 ——滴定时消耗的硫氰酸钾标准溶液体积, mL;
 V ——每次滴定时提取的滤液体积, mL;
 V_3 ——浸样品的水体积, mL, 总用水量为 85mL 和浓硝酸含水量之和;
 G ——砂浆样品质量, g;

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔 0.01%)。

5.34 混凝土钢筋腐蚀快速试验 (淡水、海水)

5.34.1 本试验用于快速测定原材料对混凝土中钢筋腐蚀的影响。

5.34.2 仪器设备和化学试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 电热鼓风烘箱。
- 2) 塑料箱: 尺寸可采用 500mm×600mm×900mm (高×宽×长), 带盖。
- 3) 分析天平: 分度值不大于 0.1mg。
- 4) 天平: 分度值不大于 0.1g。
- 5) 胶砂强度试模。
- 6) 钢筋: 热轧光圆钢筋, 公称直径 6mm。
- 7) 碳化箱等应符合 5.29 节的规定。
- 8) 钢直尺: 分度值不大于 1mm。
- 9) 辅助器具: 温湿度计、抹刀、砂布、乳胶手套等。

2 试剂包括: 工业盐酸、丙酮、碳酸钠、食盐、1%酚酞溶液、10%硫酸溶液、33%氢氧化钾溶液等。

5.34.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 钢筋的准备。把直径 6mm、光滑平直、未有锈斑的钢筋, 按每根 100mm 长剪断作为钢筋试样。两端在砂轮上磨成半球形后, 按 5.27 节的规定执行酸洗、擦光、去脂, 在天平上称得钢筋初始质量 (精确到 0.1g), 移入干燥器中备用。酸洗以后的操作过程中应戴乳胶手套。

2 试件成型应按以下步骤进行。

- 1) 将钢筋试样两头用端头板和木楔固定, 装入 100mm×100mm×400mm 胶砂试模中部 (图 5.34.3), 以保证从试件底面到钢筋表面的距离 (钢筋保护层) 为 30mm 或 40mm 及其他规定厚度。整个过程中应避免污染钢筋, 否则再次用丙酮洗去油脂。
- 2) 碳化试验和浸烘循环试验各制作四个试件, 对比组可制作 (8~10) 个试件。采用给定的混凝土配合比, 按 4.1 节的规定拌制混凝土, 粗骨料的最大粒径与混凝土保护层厚度之比不应大于 3/4, 否则用湿筛法筛除大骨料。试件分两次浇制, 先浇制 100mm 长的中间段,

按住端头板和木楔在振动台上振动至出浆；接着卸去木楔和端头板，在两头浇入水胶比小于中间混凝土的砂浆，用抹刀仔细插捣，使其密实。

- 3) 试件成型后，放入标准养护箱 24h 后拆模，再标准养护到规定时间。比较水泥品种不同的混凝土时，试件应养护至 28d 龄期；比较水泥品种相同的混凝土时，试件可养护至 14d 龄期。然后按下述方法分别进行碳化试验或浸烘循环试验。模拟海洋环境水工混凝土的试件，不进行碳化。

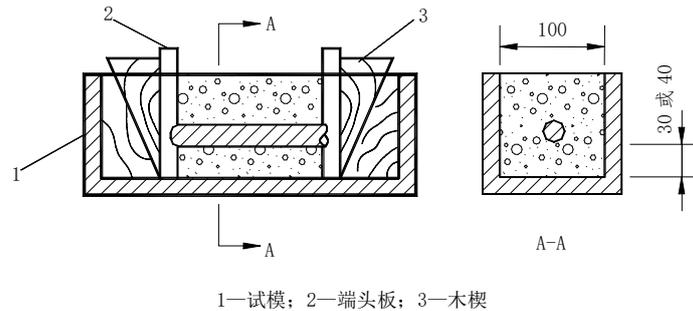


图 5.34.3 试件成型示意图

3 试件碳化应按以下步骤进行。

- 1) 试件养护到期后，放入烘箱，在 $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的温度中烘 24h。然后，不需密封表面，放入碳化箱按 5.29 节的规定执行碳化，其中箱内二氧化碳浓度为 $(50 \pm 3)\%$ 。
- 2) 碳化（2~3）个月后，从对比组中取出一块试件，沿钢筋劈开，用 1% 酚酞溶液测定劈开面上钢筋混凝土保护层的碳化深度。如碳化深度未至钢筋表面时，仍继续进行碳化；否则取出全部试件。
- 3) 沿钢筋劈开试件，用钢直尺测量钢筋两端的混凝土保护层厚度（精确至 1mm）。同时测量等距离四个点的碳化深度（精确至 1mm）。

4 试件浸烘循环应按以下步骤进行。

- 1) 试件养护到期后，放入烘箱，在 $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的温度下烘 4d。
- 2) 冷却后放入塑料箱，在自来水中浸泡 24h 后取出，再放入烘箱，在 $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的温度下烘 13d。从开始泡水至烘毕，共历时 14d，为一次循环。
- 3) 经过（6~7）次循环后，沿钢筋劈开一块对比组试件，观察钢筋锈况。如未生锈，继续进行浸烘循环；如已生锈且锈积率大于 15%，则取出全部试件。
- 4) 从砂浆中取出钢筋，用玻璃纸描绘钢筋表面的锈蚀面积，然后复印在方格纸上，计算锈蚀面积。酸洗取出的钢筋，洗去腐蚀产物。酸洗时，洗液中放入两根尺寸相同的同类无锈钢筋作空白校正。然后烘干称重（精确到 0.1g）。
- 5) 模拟海洋环境水工混凝土的试件，浸烘循环中应用 3.5% 食盐水浸泡，塑料箱加盖，食盐水的浓度应经常检查，使之基本恒定。经过（4~5）次循环后，即可检查对比组试件。

5.34.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 取钢筋两端混凝土保护层厚度平均值，作为该试件的混凝土保护层厚度，若小于原设计保护层厚度的 80%，该试件作废。

2 取混凝土保护层上四个等距离点的碳化深度平均值，作为该试件的碳化深度值。

3 钢筋锈积率按照公式（5.34.4-1）计算。

$$R = \frac{A_n}{A_o} \times 100\% \quad (5.34.4-1)$$

式中 R —— 钢筋锈积率；

A_n —— n 次循环后钢筋锈蚀面积， mm^2 ；

A_o —— 钢筋表面积， mm^2 。

4 钢筋质量损失率按照公式（5.34.4-2）计算。

$$L = \frac{M_0 - M - \frac{(M_{01} - M_1) + (M_{02} - M_2)}{2}}{M_0} \times 100\% \quad (5.34.4-2)$$

式中 L —— 钢筋质量损失率；

M_{01} 、 M_{02} —— 分别为空白校正用的两根钢筋的初始质量，g；

M_1 、 M_2 —— 分别为空白校正用的两根钢筋酸洗后的质量，g；

M_0 —— 钢筋初始质量，g；

M —— 试验后钢筋质量，g。

5 混凝土保护层厚度、碳化深度、钢筋锈积率、质量损失率均应取同组试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔分别为 1mm、1mm、0.1%、0.1%）。

5.35 混凝土抗盐冻剥蚀试验

5.35.1 本试验用于评价混凝土在盐环境条件下抵抗表面剥蚀的能力。

5.35.2 混凝土盐冻试验冻融循环过程应按以下规定进行。

1 一个冻融循环历时 24h；

2 降温冻结过程：按照 $(-10 \pm 1)^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速度使温度降低到 $(-17 \pm 3)^\circ\text{C}$ ，从降温开始历时（16～18）h；

3 升温融化过程：按照 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速度使温度升高到 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，从升温开始历时（6～8）h。

5.35.2 仪器设备和试剂应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

1) 试模：PVC 材料制做，模腔为 $\phi 110\text{mm} \times 300\text{mm}$ 圆柱体，带可拆卸底盖。

2) 套管：PVC 材料制做，内径 $\phi 110\text{mm}$ ，长 60mm；或内径 100mm，长 80mm。

3) 天平：分度值不大于 0.1g。

4) 混凝土振动台、标准养护室同 5.1 节的规定。

5) 盐冻试验箱：能迅速降温至 -25°C 及升温至 25°C ，可以自动控制按照 5.35.2 的盐冻制度进行试验。其他应符合 SL 134 的规定。

6) 辅助器具: PVC胶、烘箱、岩石切片机等。

2 4% CaCl_2 溶液。

5.35.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 盐冻试件制备应按以下规定进行。

1) 按 4.1 节的规定拌制混凝土, 分两层装入 PVC 试模并放在振动台上振实。24h 后取下试模底盖, 放入标准养护室。

2) 养护至 21d 龄期后, 在岩石切片机上将带模试件切成厚 50mm 的圆柱片。清洗擦干后, 用 PVC 胶将管套接于混凝土圆柱片上, 以锯切面作为盐冻剥蚀试验面。每个 PVC 试模制作四个试件作为一组。制作的盐冻试件如图 5.35.3 所示。

3) 加水检查盐冻试件是否渗漏后, 放回标准养护室至 28d 龄期。

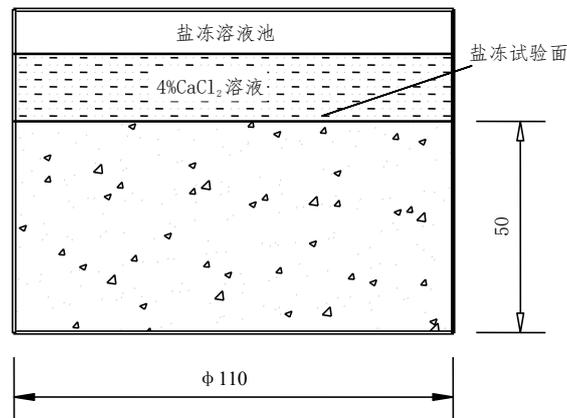


图 5.35.3 盐冻试件示意

2 养护到 28d 龄期时, 取出称重 (G_0 , 精确至 0.01g)。

3 在盐冻试件上部盐溶液池中加入深约 6mm 的 4% CaCl_2 溶液, 放入盐冻试验箱按 5.35.2 条规定的盐冻循环制度进行试验。

4 每五次循环后更换新的盐冻溶液, 并记录表面剥蚀情况。

5 共进行 50 个循环后结束, 取出盐冻试件, 倒掉盐溶液, 清洗干净混凝土及模具表面后称重 (G_1 , 精确至 0.01g)。

5.35.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 用定性法对结果进行评定: 根据 50 次盐冻循环后试件的表面剥蚀情况, 把剥蚀程度分为 6 级: ①无剥蚀、②非常轻微剥蚀、③轻微到中度剥蚀、④中度剥蚀 (部分粗骨料裸露)、⑤中度到重度剥蚀、⑥重度剥蚀 (整个表面粗骨料裸露)。

2 用定量法对结果进行评定: 按照公式 (5.35.4) 计算试件单位面积的盐冻剥蚀量 (修约间隔 $0.1\text{kg}/\text{m}^2$)。以经过 50 次盐冻循环后, 单位面积的盐冻剥蚀量是否超过 $0.8\text{kg}/\text{m}^2$ 来评价混凝土的抗盐冻能力。

$$Q_s = \frac{G_0 - G_1}{1000A} \quad (5.35.4)$$

式中 Q_s —— 单位面积的盐冻剥蚀量, kg/m^2 ;

G_0 —— 盐冻前试件的质量, g;

G_I —— 50 次盐冻循环后试件的质量, g;

A —— 混凝土试件盐冻面积, m^2 。

5.36 混凝土抗硫酸盐侵蚀快速试验

5.36.1 本试验用于快速测定混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能。

5.36.2 混凝土抗硫酸盐侵蚀的浸烘循环过程应按以下规定进行。

- 1 浸泡过程: 在 $(25\sim 30)^\circ\text{C}$ 的 $5\%\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液中浸泡, 从开始注入溶液共计 15h。
- 2 排空与风干过程: 在 30min 内将溶液排空, 然后风干试件, 从开始排空溶液共计 1h。
- 3 烘干过程: 在 30min 内升温到 80°C , 并维持在 $(80\pm 5)^\circ\text{C}$, 从开始升温共计 6h。
- 4 冷却过程: 将试件温度降低到 $(25\sim 30)^\circ\text{C}$, 从开始冷却共计 2h。
- 5 每个浸烘循环过程的总时间应为 (24 ± 2) h。

5.36.3 仪器设备和试剂应包括以下几种。

1 硫酸盐侵蚀试验箱: 试验箱应由耐盐腐蚀材料制成, 箱盖能够密封, 并有架空摆放试件的支架。试验过程中能够自动注入与排出硫酸钠溶液, 按照 5.36.2 规定的浸烘循环过程自动控制, 并具有数据实时显示、存储及断电记忆的功能。亦可使用烘箱和塑料容器人工进行试验。

2 试验机、试模同 5.2 节的规定。

3 $5\%\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液: 采用化学纯无水硫酸钠配制。

5.36.4 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制作和养护试件。如选用边长 100mm 的立方体试件, 成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料。每组三个试件, 试件组数应满足每 30 次浸烘循环需要测试一组侵蚀试件和一组同龄期标准养护试件的抗压强度的要求 (即至少为 2 倍的设计浸烘循环次数/30 组试件)。

2 试验龄期宜为 28d, 也可为其他规定龄期, 应在试验报告中说明。到达规定试验龄期时, 一半数量的试件继续进行标准养护, 取出一半数量的试件进行侵蚀试验。将试件擦干后在 $(80\pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘 48h, 在干燥环境中冷却到室温后放入试验箱的支架上。试件应架空摆放, 相邻试件之间应保持 20mm 间距, 试件与侧壁的间距不应小于 20mm。盖上箱盖, 开机按照给定的浸烘循环过程自动进行试验。浸泡时溶液应至少超过最上层试件表面 20mm。

3 试验过程中宜定期检查和调整溶液的 pH 值, 可每 15 个循环测试一次溶液 pH 值, 应始终维持溶液的 pH 值在 6~8 之间。也可不检测其 pH 值, 每月更换一次试验用溶液。

4 在每完成 30 次浸烘循环, 观察并记录侵蚀试件表面的破损情况, 并取出一组侵蚀试件测试抗压强度 (f_{cn}), 同时取出一组标准养护对比试件测试抗压强度 (f_c)。当侵蚀试件有严重剥落、掉角等缺陷时, 应先用高强修补材料补平受压面, 再进行抗压强度试验。

5 出现以下两种情况之一时, 即可停止浸烘循环过程。

- 1) 侵蚀试件的抗压强度与同龄期标准养护对比试件的抗压强度之比小于 75%;

2) 达到设计抗硫酸盐等级对应的浸烘循环次数。

6 当有试件终止试验取出后, 应另用试件填补空位, 如无正式试件, 可用废试件填充。

5.36.5 试验结果计算及处理应符合下列规定。

1 抗压强度的结果处理按照 5.2 节的规定执行。

2 混凝土耐蚀系数按照公式 (5.36.5) 计算 (修约间隔 1%)。

$$K_f = \frac{f_{cn}}{f_c} \times 100\% \quad (5.36.5)$$

式中 K_f —— 混凝土耐蚀系数;

f_{cn} —— 为 n 次浸烘循环后侵蚀试件的抗压强度, MPa;

f_c —— 同龄期标准养护对比试件的抗压强度, MPa。

3 试验结果评定应符合以下要求。

1) 当一组试件的耐蚀系数下降到 75% 以下时, 应取前一次检测时的浸烘循环次数, 并加前缀符号 KS 表示混凝土抗硫酸盐等级。

2) 若至预定的浸烘循环次数, 耐蚀系数未下降到 75% 以下, 可认为混凝土抗硫酸盐等级大于设计抗硫酸盐等级。

5.37 混凝土表观密度和吸水率试验

5.37.1 本试验用于测定硬化混凝土在不同含水状态下的表观密度和吸水率。

5.37.2 仪器设备应包括以下几种。

1 卡尺或钢直尺: 分度值不大于 0.5mm。

2 静水力学天平: 由天平与静水力学装置构成, 能称量水中物料。其中。

1) 天平: 分度值不大于 1g;

2) 盛水筒: 应能浸没试件, 水温保持在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$;

3) 托盘: 最小尺寸不小于 150mm, 能够挂于天平下。

3 鼓风干燥箱: 可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

5.37.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按照 5.1 节点规定制作和养护试件, 每组三个试件。可采用边长为 150mm 的立方体试件或直径 150mm、高度不小于 150mm 的圆柱体试件。试验龄期不应小于 28d。亦可采用其他方式制作的试件, 或形状不规则的混凝土样品。

2 试件质量的测定应按以下规定进行。

1) 试件的初始质量: 将初始状态的试件表面清洁干净, 用天平称取试件质量 (m_0 , 精确到 1g, 下同)。

2) 饱和面干试件的质量。将试件浸泡在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中至少 48h, 取出后用拧干的湿毛巾吸干试件表面多余水至饱和面干状态, 并立即称取试件质量。继续浸泡 24h 后, 按前述方法再次称重。直至连续两次称取的质量变化小于 0.2% 时, 停止浸泡。记录最后一次试

件质量 (m_s)。

3) 干燥试件的质量: 将试件置于温度为 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 48h, 冷却至室温后称取试件质量。继续烘 24h 后, 按前述方法再次称重。直至连续两次称取的质量变化小于 0.2% 时, 停止烘干。记录最后一次试件质量 (m_d)。

3 试件体积的测定应按以下规定进行。

1) 在试件表面刮一薄层石蜡, 封闭表面的孔洞。对于形状不规则的样品, 或者透水混凝土等表面有大量孔洞的混凝土, 可用聚乙烯塑料薄膜紧密包裹表面。称取表面封闭试件的质量 (m_a)。

2) 将托盘全部浸入盛水筒中, 称出托盘在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中的质量。再将表面处理完的试件放在托盘上, 一起完全浸入盛水筒中, 应注意清除试件表面吸附的气泡, 托盘浸入水中的深度应相同, 称出试件和托盘在水中的总质量。两者之差即为表面封闭试件在水中的质量 (m_w)。

3) 若试件的外形规则, 且尺寸偏差符合表 5.1.7 的规定, 可通过测量计算试件的体积。

5.37.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 浸水法测试的每个试件的体积按照公式 (5.37.4-1) 计算 (修约间隔 0.001m^3)。

$$V = \frac{m_a - m_w}{\rho_w} \quad (5.37.4-1)$$

式中 V —— 浸水法试件的体积, m^3 ;

m_a —— 表面封闭试件在空气中的质量, kg ;

m_w —— 表面封闭试件在水中的质量, kg ;

ρ_w —— 水在 20°C 的密度, 取 $998\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2 混凝土在不同含水状态下的表观密度按照公式 (5.37.4-2) 计算。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.37.4-2)$$

式中 ρ —— 混凝土的表观密度, kg/m^3 ;

m —— 不同含水状态下的试件质量, kg ;

V —— 试件的体积, m^3 。

3 混凝土的吸水率按照公式 (5.37.4-3) 计算。

$$A_w = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (5.37.4-3)$$

式中 A_w —— 混凝土的吸水率。

4 混凝土表观密度和吸水率以三个试件测值的平均值作为试验结果 (修约间隔分别为 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、 0.01%)。

5.38 混凝土早期开裂试验 (平板法)

5.38.1 本方法用于测试混凝土在约束条件下的早期开抗裂性能。

5.38.2 仪器设备与设施应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 混凝土早期开裂试验装置(图 5.38.2): 应为钢制, 内部试件尺寸为 $600\text{mm}\times 600\text{mm}\times 63\text{mm}$ 。模具的四个边框可采用 6.3#槽钢制作, 在边框距底边缘 20mm、40mm 两个平行线上、间隔 60mm 均匀打孔, 两条线上的孔位应错开布置; 每条线上向外间隔装入直径 8mm、长 60mm 和 110mm 的 8.8 级外六角螺栓, 内外用两颗螺母固定在边框上。边框与底板通过用 M12 螺栓固定在一起, 螺栓的间距不大于 $200\text{mm}\times 150\text{mm}$ 。底板应采用不小于 5mm 厚的钢板, 并在底面沿两个对角线方向加固以免中部下凹。底板上铺设双层聚乙烯塑料薄膜(厚度不小于 0.1mm)或聚四氟乙烯片作为隔离层, 薄膜厚度不小于 0.1mm。

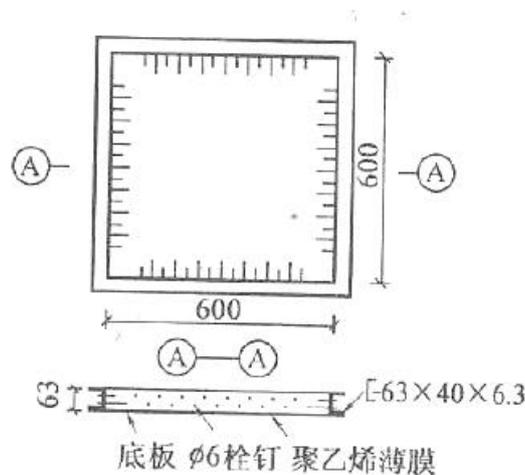


图 5.38.2 混凝土早期开裂试验装置示意图

- 2) 刻度放大镜(或裂缝宽度观测仪): 放大倍数不应小于 40 倍, 分辨率不大于 0.01mm。
- 3) 钢直尺: 分度值不大于 1mm。
- 4) 工业风扇: 功率不小于 180W, 应能够保证风速满足试验要求。
- 5) 温湿度计。
- 6) 风速计。
- 7) 表面式振动器。

2 恒温恒湿室同 5.13 节的规定。

5.38.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 检查开裂试验装置的螺栓紧固情况, 边框内壁和螺栓不宜刷油。在底板上铺设两层聚乙烯薄膜或者聚四氟乙烯片, 应布满底板内表面。
- 2 按照 4.1 节的规定拌制混凝土, 在成型前用湿筛法筛除粒径大于 20mm 的骨料。每组两个试件。
- 3 将混凝土一次装入早期抗裂试验装置内, 摊平后应比模具边框略高。使用平板表面式振捣器振捣, 应防止过振, 泛浆厚度不应超过 5mm。振捣后, 用抹子整平表面, 但不应使骨料外露。最后

用略长于 600mm 的金属直杆刮平混凝土表面。

4 随后将成型好的带模试件，放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(60 \pm 5)\%$ 的恒温恒湿室中，注意放置水平。

5 每个带模试件前各放一台风扇，调节风扇位置和风速，应使风向平行于试件表面，并使试件表面中心正上方 100mm 处风速为 $(5 \pm 0.5) \text{ m/s}$ 。

6 在混凝土终凝后 $(24 \pm 1) \text{ h}$ 开始测读裂缝数量、长度、宽度，以肉眼可见裂缝为准。目测统计裂缝总数目 N ；用钢直尺测量裂缝两端点之间的直线距离为裂缝长度 L_i （精确到 1mm），当裂缝出现明显弯折时，可将各段裂缝的长度相加，作为一条裂缝长度；采用刻度放大镜（或裂缝宽度观测仪）观测裂缝，并测量每条裂缝的最大宽度 W_i （精确到 0.01mm）。

~~7 采取抗裂性能提升措施的抗裂混凝土，应与基准混凝土的配合比相同，并同时进行了开裂试验。~~

5.38.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 每条裂缝的平均开裂面积按照公式 (5.38.4-1) 计算。

$$a = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (W_i \times L_i) \quad (5.38.4-1)$$

2 单位面积上的裂缝数目按照公式 (5.38.4-2) 计算：

$$b = \frac{N}{A} \quad (5.38.4-2)$$

3 单位面积上的总开裂面积按照公式 (5.38.4-3) 计算。

$$c = a \times b \quad (5.38.4-3)$$

4 采取抗裂性能提升措施后，抗裂混凝土的裂缝降低率按照公式 (5.38.4-4) 计算（修约间隔 1%）。

$$\eta_{cr} = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \times 100\% \quad (5.38.4-4)$$

式中 W_i —— 第 i 条裂缝的最大宽度，mm；

L_i —— 第 i 条裂缝的长度，mm；

N —— 总裂缝数目，条；

A —— 平板的面积， m^2 ；

a —— 每条裂缝的平均开裂面积， $\text{mm}^2/\text{条}$ ；

b —— 单位面积的裂缝数目， $\text{条}/\text{m}^2$ ；

c —— 单位面积上的总开裂面积， mm^2/m^2 ；

c_0 —— 基准混凝土单位面积的总开裂面积， mm^2/m^2 ；

c_1 —— 抗裂混凝土单位面积的总开裂面积， mm^2/m^2 ；

η_{cr} —— 裂缝降低率。

4 每组试件的裂缝平均开裂面积、单位面积上的裂缝数目、单位面积上的总开裂面积应以两个试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔分别为 $1\text{mm}^2/\text{条}$ 、 $0.1 \text{ 条}/\text{m}^2$ 、 $1\text{mm}^2/\text{m}^2$ ）。

5.39 真空脱水混凝土试件的成型与养护方法

5.39.1 本试验用于制作真空脱水混凝土试件，适用于水胶比不小于 0.35 的混凝土拌和物。

5.39.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试模：同 5.1 节的规定，并配以吸盘固定架（如图 5.39.2-1）和真空吸盘（如图 5.39.2-2）。

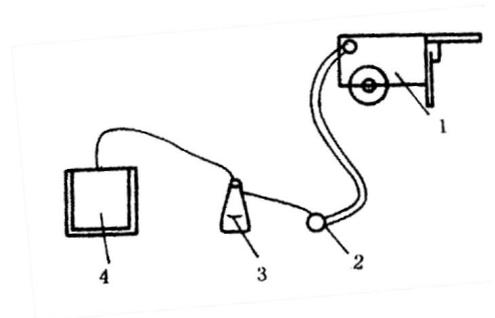
2 真空吸盘：真空吸盘采用硬吸垫，大小应与试模尺寸相配，吸盘四周设橡胶密封圈。真空吸盘由尼龙布、二层塑料网络、薄镀锌铁板分别作为过滤层、骨架层和密封层，并在密封层上装吸水咀。

3 振动台、捣棒、养护室等符合 5.1 节的规定。

4 真空集水瓶：试模尺寸为 150mm×150mm×150mm 时，宜采用 500mL 容量的真空瓶。

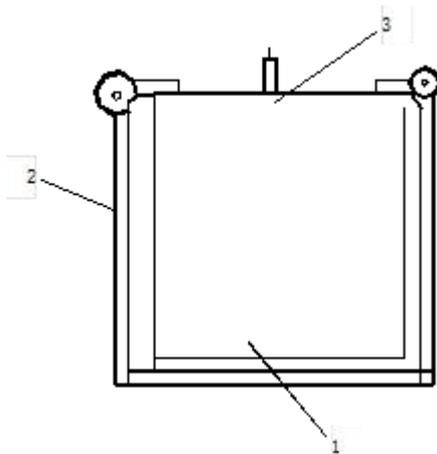
5 真空橡胶管：宜采用适宜直径的耐压橡胶管。亦可采用工业氧气管或乙炔管等代替。

6 真空脱水机组：可采用抽气速率为 28L/s 左右的设备。



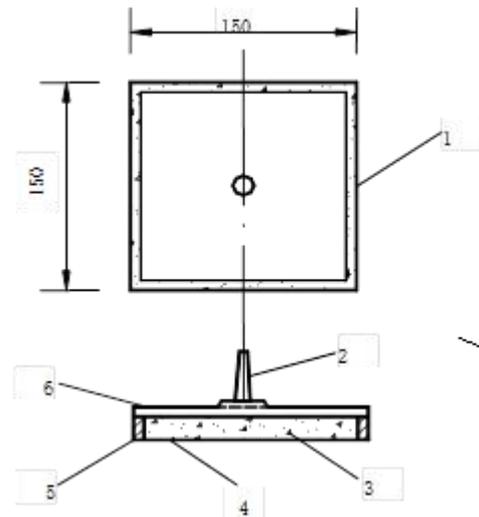
1—真空脱水机组；2—连接器；3—集水瓶；4—试件

图 5.39.3 混凝土真空脱水系统连接图



1—试模；2—吸盘固定架；3—吸盘

图 5.39.2-1 真空吸盘固定架



1—橡胶密封圈；2—吸水咀；3—骨架层；

4—过滤层；5—密封圈；6—密封层

图 5.39.2-2 真空吸盘（单位：mm）

5.39.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 混凝土的成型按 5.1 节的规定执行。

2 试件成型后，立即在表面复盖真空吸盘，然后用少量水泥浆封闭吸盘四周。如图 5.39.3 用耐压橡胶管连接吸盘吸水咀和真空集水瓶及真空脱水机组，开机脱水处理。真空度控制为 0.079MPa。脱水结束时，先掀开吸盘的一角，将管路中水分全部抽至集水瓶中，然后切断集水瓶与脱水泵之间的连接管路，再关机，以防止脱水泵中冷却水回冲到集水瓶中。

1) 试件断面尺寸为 100mm×100mm 时，脱水时间控制在 (10~15) min；断面尺寸为 150mm×150mm

时，脱水时间以（15~20）min 为宜。

2) 对于抗渗试件，在成型的上表面（ $\phi 185\text{mm}$ ）进行真空脱水，脱水时间约为（20~25）min。测定抗渗性时保持水压作用于真空处理面。

3) 对于抗碳化试件，在成型的上表面进行真空脱水。在进行碳化试验之前，用熔化石蜡将试件未经真空处理的其他五个表面封闭。

3 试件脱水处理后，用湿布覆盖，并在（ 20 ± 5 ） $^{\circ}\text{C}$ 的室内静置 24h，拆模编号。在特殊情况下，可立即拆模进行试验。

4 试件养护应符合 5.1 节的规定。

5.40 混凝土拌和物真空脱水率试验

5.40.1 本试验用于测定混凝土拌和物真空脱水率，适用于水胶比不小于 0.35 的混凝土拌和物。

5.40.2 仪器设备应包括以下几种。

1 量筒：25mL 或 50mL。

2 其他仪器设备同 5.39 节的规定。试模模腔尺寸为 150mm \times 150mm \times 150mm。

5.40.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定成型试件。每组 3 各试件。

2 试件成型后即按 5.39 节的规定执行真空脱水处理。

3 将脱出的水收集到真空瓶中，然后倒入量筒中计量（ ΔW ，准确至 1.0mL）。

5.40.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 真空脱水率按照公式（5.40.4）计算。

$$Q = \frac{\Delta W}{3.375W} \times 100\% \quad (5.40.4)$$

式中 Q —— 真空脱水率；

W —— 每方混凝土的用水量，kg；

ΔW —— 试件脱出水量，mL。

2 取三个试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。

6 全级配混凝土

6.1 全级配混凝土试件的成型与养护方法

6.1.1 本方法适用于三、四级配常态混凝土的全级配混凝土试件的制作。

6.1.2 仪器设备与设施应包括以下几种。

1 仪器设备应包括以下几种。

- 1) 试模：由钢或铸铁制作，也可选用不吸水、具有足够刚度且基本不发生变形的其他材质试模。试模应拼接牢固，振捣时不应变形、漏浆。试模模腔的尺寸偏差不应大于对应边长的1/150，角度偏差不应超过1°，平整度偏差不应超过边长的0.05%；
- 2) 混凝土搅拌机：宜采用公称容量不小于200L的自落式或强制式混凝土搅拌机；
- 3) 振捣棒：频率应大于170Hz，直径 $\Phi 50\text{mm}$ ，长度不宜小于500mm；
- 4) 平板振捣器：底板最小边长不宜小于200mm，频率不小于47Hz。

2 养护设施：应将内部空间的环境温度控制在 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ ，相对湿度不低于90%。

6.1.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 成型前，按照表6.1.3选用合适的试模，模腔最小尺寸不应小于骨料最大粒径的三倍。检查试模装配情况，必要时紧固或重新装配试模，并在试模内壁均匀地涂刷一薄层脱模材料。

表 6.1.3 水工全级配混凝土试件尺寸与试模

单位：mm

骨料最大粒径	抗压试件		劈拉试件	抗弯试件	轴向抗拉试件	静压弹模试件	压缩徐变
	立方体	圆柱体	立方体	棱柱体	圆柱体	圆柱体	圆柱体
80	300×300×300	$\Phi 300\times 600$	300×300×300	300×300×1200	$\Phi 300\times 900$	$\Phi 300\times 600$	$\Phi 300\times 600$
150 (120)	450×450×450	$\Phi 450\times 900$	450×450×450	450×450×1700	$\Phi 450\times 1350$	$\Phi 450\times 900$	$\Phi 450\times 900$

注：本表只列出了有承压（拉）面的试件所用的试模，其他试模按有关试验方法要求选用。

2 按照4.1节的规定用搅拌机拌制混凝土。每拌混凝土体积不宜少于搅拌机公称容量的20%。

3 将混凝土拌和物浇筑在试模内，浇筑层厚度不宜超过300mm。用振捣棒从边缘向中心均匀地进行插捣，振捣时间以浇筑层表面泛浆为止。插捣底层时，捣棒应达到试模底面，插捣上层时，捣棒应穿至下层（50~100）mm，应保证层间良好结合。当混凝土拌和物浇筑至试件顶面时，可采用平板振捣器振平。

4 试件成型后，在混凝土初凝前（1~2）h需进行抹面，要求与模口齐平。

5 成型后将带试模的试件用湿布或塑料布覆盖，在 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ 的环境中静置（2~7）d（静置天数决定于混凝土强度），然后拆模并编号。

6 拆模后的试件，应放入温度 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度不低于90%的养护设施中，直至规定的试验龄期。在搬运过程中，应采用合适的衬垫材料保护试件免受损伤。养护期间，全级配混凝土试件不应直接接触地面，应架空或放置在合适的吸水衬垫材料上。严禁叠放全级配混凝土试件。

7 其他要求同 5.1 节的规定。

6.2 全级配混凝土抗压强度试验

6.2.1 本试验用于测定全级配混凝土的立方体抗压强度和圆柱体抗压强度。

6.2.2 仪器设备应包括以下几种。

1 压力试验机：试件的预计破坏荷载应在试验机全量程的 20%~80%。试验机的示值误差不应大于±1%。

2 钢质垫板：平面尺寸为 350mm×350mm 或 500mm×500mm，应有足够的刚度，承压面平面度偏差不应大于边长的 0.03%。

3 钢质球座：球面及球窝粗糙度 Ra 不大于 0.32 μm，转动灵活。

4 卡尺或钢直尺：分度值不大于 1mm。

5 辅助器具：角度尺、刀口形直尺、塞尺等

6.2.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 6.1 节的规定制作和养护混凝土试件，每组三个试件。全级配混凝土抗压强度试验采用边长 300mm（三级配混凝土）和边长 450mm（四级配混凝土）的立方体试件，或 φ300mm×600mm（三级配混凝土）和 φ450mm×900mm（四级配混凝土）的圆柱体试件。

2 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，用湿布覆盖，保持试件潮湿状态。测试时试件龄期的允许偏差可参考表 5.1.8 条的规定。

3 试验前将试件擦拭干净，检查外观，测量尺寸（精确到 1mm）。当试件有严重缺陷时应废弃。

4 将试件安放在试验机上下压板中间，立方体试件以成型时侧面为承压面。上下压板与试件之间放置钢质垫板，在上压板与上钢垫板之间正中位置安放钢质球座。

5 开动试验机，当上压板与垫板将接触时，调整球座使试件受压均匀。使试验机以 6MPa/min 的速度连续而均匀地加荷，直至试件破坏，并记录破坏荷载 P （精确到 0.01kN）。如手动控制加载速度，当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门直至试件破坏。

6 观察破坏后试件的形貌，如存在明显的非均匀受压破坏的现象，应做记录。

6.2.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 混凝土抗压强度按照公式（6.2.4）计算。

$$f_{cc} = \frac{P}{A} \times 1000 \quad (6.2.4)$$

式中 f_{cc} —— 抗压强度，MPa；

P —— 破坏荷载，kN；

A —— 试件承压面积，mm²。

2 以三个试件测值的平均值作为该组试件的抗压强度试验结果（修约间隔 0.1MPa）。

6.3 全级配混凝土劈裂抗拉强度试验

6.3.1 本试验用于测定全级配混凝土立方体试件的劈裂抗拉强度。

6.3.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 试验机、卡尺、钢直尺等应符合 6.2.2 条的规定。
- 2 垫条：截面 15mm×15mm、长度不小于试件边长的平直钢制方垫条。

6.3.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 6.1 节的规定制作和养护混凝土试件，每组三个试件。全级配混凝土劈裂抗拉强度试验采用边长 300mm（三级配混凝土）和边长 450mm（四级配混凝土）的立方体试件。

2 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，用湿布覆盖，保持试件潮湿状态。

3 试验前将试件擦干净，检查外观，测量劈裂面尺寸（精确到 1mm）。当试件有严重缺陷时应废弃。过试件成型的两个侧面中心划出相平行的定位线，劈裂面应过顶面和底面。

4 如图 5.3.3 所示，将试件及垫条安放在压力机上下压板中间，垫条应与定位线重合。可在底面两侧加垫块防止试件倾斜。为保证上、下垫条平行对准及提高工作效率，可采用垫条定位装置。

5 开动试验机，当垫条压紧时，在保证试件不会倾斜的情况下撤去两侧的垫块。以 0.4MPa/min 的速度连续而均匀地加荷，直至试件破坏，记录破坏荷载 P （精确到 0.01kN）。如手动控制加载速度，当试件接近破坏而开始迅速变形时，应停止调整试验机油门直至试件破坏。

6.3.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 混凝土劈裂抗拉强度按照公式（6.3.4）计算。

$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi A} \times 1000 \quad (6.3.4)$$

式中 f_{ts} —— 劈裂抗拉强度，MPa；

P —— 破坏荷载，kN；

A —— 试件劈裂面面积，mm²。

- 2 以三个试件测值的平均值作为该组试件的劈裂抗拉强度试验结果（修约间隔 0.01MPa）。

6.4 全级配混凝土弯曲试验

6.4.1 本试验用简支梁三分点加荷法测定全级配混凝土棱柱体试件的抗弯强度。

6.4.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 试验机应符合 6.2.2 条的规定。

2 三分点加荷装置：各部件均为钢质，加荷装置和试件受力情况如图 6.4.2。上部两个压辊和下部两个支辊应相互平行放置，与试件接触端具有直径 45mm 的弧形，均应长于试件宽度。上部两个压辊应能使两个相等的荷载同时作用于试件的两个三分点处。其中一个支辊应固定不动，其余支辊和压辊可以沿长度方向小角度倾斜与试件紧密接触。

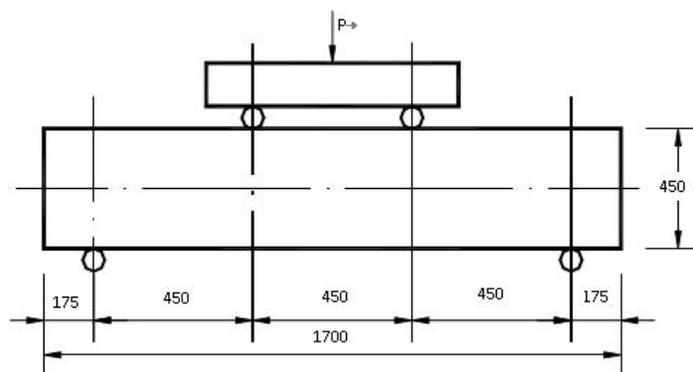


图 6.4.2 全级配混凝土（四级配）弯曲试验示意图（单位：mm）

3 钢直尺：分度值不大于 1mm。

6.4.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 6.1 节的规定制作和养护混凝土试件，每组三个试件。全级配混凝土弯曲试验采用 300mm×300mm×1200mm（三级配混凝土）和 450mm×450mm×1700mm（四级配混凝土）的棱柱体试件。

2 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，用湿布覆盖，保持试件潮湿状态。

3 试验前将试件擦干净，检查外观，测量试件中部截面尺寸（精确到 1mm）。当试件有严重缺陷时应废弃。在试件成型的两个侧面按图 6.4.2 所示位置划出相平行的定位线。

4 将三分点加荷装置安装到试验机上，按照试件尺寸调整好的下支辊间距，三分点加荷装置的中心应在试验机加荷轴线上。

5 将试件安放在三分点加荷装置中，并加装上压辊和压梁。承压面应选择试件成型时的侧面，上压辊、下支辊应与定位线重合。

6 开动试验机，手动控制慢速进行预压，轻微压实即可。当开始压实时，注意观察并调整加荷装置，使其与试件接触均衡，然后卸载。

7 设定试验机加载速度为 0.4MPa/min，启动试验机连续而均匀地加荷，直至试件折断，记录破坏荷载 P （精确到 0.01kN）。

6.4.4 抗弯强度的计算按 5.6.4 条的规定处理。

6.5 全级配混凝土轴向拉伸试验

6.5.1 本试验用于测定全级配混凝土轴向抗拉强度、极限拉伸值和抗拉弹性模量。

6.5.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机：材料拉伸试验机或专用试验装置，其有效行程应满足所选试件尺寸，应具有足够刚度。其他应符合 6.2.2 条的规定。

2 变形测量装置：可采用位移计或千分表等变形测量仪器，分度值不应大于 0.001mm。可配合采用与图 5.5.2 类似的变形测量架。变形测量装置的测距应大于骨料最大粒径的 3 倍。

3 卡尺或钢直尺：分度值不应大于 1mm。

4 辅助器具：球面拉接头等。

6.5.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 6.1 节的规定制作和养护试件，每组四个试件。轴向拉伸试验采用 $\phi 300\text{mm}\times 900\text{mm}$ （三级配混凝土）和 $\phi 450\text{mm}\times 1350\text{mm}$ （四级配混凝土）的圆柱体试件。亦可使用中部截面尺寸 $300\text{mm}\times 300\text{mm}$ ，纯拉段长度不小于 600mm （三级配混凝土），和中部截面尺寸 $450\text{mm}\times 450\text{mm}$ ，纯拉段长度不小于 900mm （四级配混凝土）的棱柱体试件。试件长度减去两个 1.5 倍的两端预埋件的长度或变断面段的长度，即认为是纯拉段长度。成型时可在试件两端采取适当增强措施减少端部断裂机率，如补加适量的水泥、减少大骨料含量、适量加筋等。

2 到达规定试验龄期时，从养护室中取出试件，用湿布覆盖，保持试件潮湿状态。

3 试验前将试件擦拭干净，检查外观，测量试件尺寸（精确到 1mm ）。当试件有严重缺陷时应废弃。

4 通过球面拉接头将试件安装在试验机或试验装置上。

5 后续试验步骤按照 5.5.3 条的规定执行。

6.5.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 极限拉伸值、轴向抗拉强度和抗拉弹性模量的计算按照 5.5.4 条的规定处理。

2 极限拉伸值、轴向抗拉强度和抗拉弹性模量以四个试件测值的平均值作为试验结果。当试件的断裂位置与预埋件内端头的距离在 50mm 以内时，该测值应剔除，取余下测值的平均值作为试验结果。如可用的测值少于两个，该组试验结果无效。

3 使用棱柱体试件时，应在试验报告中注明试件类型，不做换算。

6.6 全级配混凝土轴心抗压强度和静力抗压弹性模量试验

6.6.1 本试验用于测定全级配混凝土的轴心抗压强度和静力抗压弹性模量。

6.6.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机或试验装置同 5.2.2 条的规定。

2 变形测量装置：可采用位移计或千分表等变形测量仪器，量程在 $(1\sim 2)\text{mm}$ ，分度值不应大于 0.001mm 。可配合采用与 5.8.2 条类似的变形测量架。变形测量装置的测距应大于骨料最大粒径的 3 倍，对三级配混凝土试件测距宜为 300mm ，对四级配混凝土试件测距宜为 450mm 。

3 卡尺或钢直尺：分度值应不大于 1mm 。

4 辅助器具：角度尺、刀口形直尺、塞尺等。

6.6.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 6.1 节的规定制作和养护试件。每组六个试件，其中三个测定轴心抗压强度，三个测定抗压弹性模量。只测定静力弹性模量时，可成型四个试件，先取一个测定轴心抗压强度，其余三个测定抗压弹性模量。轴心抗压试验采用 $\phi 300\text{mm}\times 600\text{mm}$ （三级配混凝土）和 $\phi 450\text{mm}\times 900\text{mm}$ （四级配混凝土）的圆柱体试件。

2 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，用湿布覆盖，保持试件潮湿状态。

3 试验前将试件擦拭干净，检查外观，测量尺寸（精确到 1mm）。当试件有严重缺陷时应报废。

4 先取三个试件，按 6.2 节测定其轴心抗压强度 f_c 。

5 取其余三个试件测定抗压弹性模量。首先将变形测量架固定在试件中间部位，安装位移计或千分表，检查接触是否合适。

6 设定加荷速度 6MPa/min，开动试验机进行预压，最大预压应力为试件破坏强度的 40%。反复预压（两次或三次），直至相邻两次变形值之差不超过 0.009mm 为止。否则应继续预压，直至差值达到要求，但增加预压的次数应在报告中注明。

7 预压后，进行正式试验，加荷速度与预压荷载速度相同。记录各荷载时的变形值。当荷载达到破坏应力 50%（ $0.5f_c$ ）时，在不改变加荷速度的同时快速卸下变形测量装置，继续压至试件破坏，记录破坏荷载 P' （精确到 0.01kN）。

6.6.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 轴心抗压强度、静力抗压弹性模量按照 5.8.4 条的规定计算。

2 轴心抗压强度、静力抗压弹性模量均以三个试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔分别为 0.1MPa、0.1GPa）

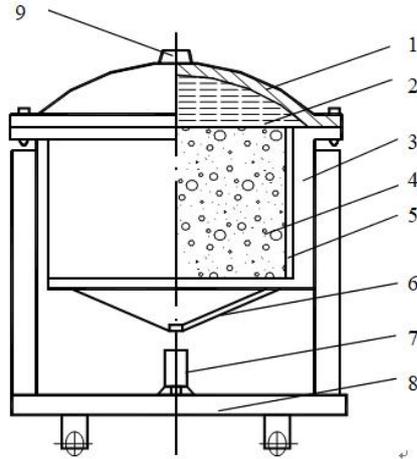
6.7 全级配混凝土渗透系数试验

6.7.1 本试验用于测定全级配混凝土的渗透系数。

6.7.2 仪器设备应包括以下几种。

1 混凝土渗透系数测定仪：由水压稳定系统和密封试件箱两部分组成。水压稳定系统可采用氮气—水稳压方法和水—蓄能器稳压方法。水压稳定系统应能长时间保持压力稳定，压力波动不应大于 $\pm 5\%$ 。水压稳定系统供给密封试件箱的水压力为（8~10）MPa。并具有分支接口，将压力水分流到各个试件箱。试件箱示意图见图 6.7.2，试件箱下设有收集和测量通过试件渗出水量的容器，试件箱尺寸应与试件尺寸相匹配。

2 辅助器具：止水密封材料（沥青，填缝油膏等）、500kg 电动或手动葫芦、电炉、温度计、搅铲等。



1—顶盖；2—水；3—试件箱；4—混凝土试件；5—止水密封材料；
6—有机玻璃集水盖；7—量杯；8—钢制支撑框架；9—进水阀

图 6.7.2 混凝土渗透系数试验示意图

6.7.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 6.1 节的规定制作和养护试件，每组三个试件。渗透系数试验采用 $\Phi 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ （三级配混凝土）和 $\Phi 450\text{mm} \times 450\text{mm}$ （四级配混凝土）的圆柱体试件。

2 在规定试验龄期的前 4d，将试件浸泡于水中，2d 后取出，风干试件表面，清除松散物质。当试件有严重缺陷时应废弃。

3 将试件放在垫好透水板的试件箱内，在试件与模壁间填入止水密封材料。低温试验时，钢模应预先加热。间隙下部 2/3 填入温度高于 80°C 的热沥青，上部 1/3 填入柔性高的填缝材料。沥青中宜掺入 5%~10% 的柴油以调软沥青硬度。

4 待密封材料冷却后，将试件及容器吊入钢制支撑框架中，在容器顶面放好密封圈，紧固顶盖螺栓。装上下部集水盖，连接集水量杯。

5 将压力水源的连接管与试件箱接通，打开进水阀使水灌满试件箱上部，待排出空气后再关闭排气阀。打开压力水源开关，调节压力，使水压稳定，压力变动误差在 $\pm 0.1\text{MPa}$ 的范围内。

6 当混凝土抗压强度不大于 30MPa 时，试验水压可从 0.2MPa 开始，每隔 8h 增加 0.1MPa 压力，直至三个试件底部全部渗水为止。稳定在最后一级压力上，开始进行渗透系数试验。每 8h 测读一次量杯的水量，并计算本时段的渗流量，直至前后时段的渗流量基本相近时为止。

7 混凝土抗压强度大于 30MPa 时，试验水压可从 $(0.5 \sim 1.0)\text{MPa}$ 开始，每隔 8h 加 0.4MPa 压力，直至三个试件底部全部渗水为止，再按上述方法进行渗透系数试验。

8 试验结束后，取下试件箱，加热软化止水密封材料，将试件取出。

6.7.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 绘制每个试件的累积渗流量—历时过程线，在过程线的直线段上，横坐标截取大于 100h 时段，其斜率即为通过试件的恒定渗流量。以三个试件渗流量的平均值为该组试件渗流量试验结果。

2 混凝土渗透系数应按照公式 (6.7.4) 计算。

$$K = \frac{QL}{AH} \quad (6.7.4)$$

式中 K —— 混凝土渗透系数, m/s;

Q —— 通过混凝土的渗流量, m^3/s ;

H —— 试件承受的水头 (按 1MPa 水压等于 100m 水头换算), m;

A —— 试件横截面积, m^2 ;

L —— 试件高度, m。

6.8 全级配混凝土压缩徐变试验

6.8.1 本试验用于测定全级配混凝土的压缩徐变。

6.8.2 仪器设备与设施应包括以下几种。

1 全级配混凝土徐变仪: 自动稳压液压式徐变仪, 最大轴向压缩荷载应大于试验加压荷载的 1.3 倍, 压力波动应不超过所加荷载的 $\pm 2\%$ 。

2 应变计及应变测量设备、恒温室同 5.11 节的规定。

6.8.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 徐变试验的加荷龄期宜为 7d、28d、90d、180d、360d, 也可根据试验需要确定加荷龄期。每个龄期应制备两个 $\Phi 300\text{mm} \times 600\text{mm}$ (三级配混凝土) 或 $\Phi 450\text{mm} \times 900\text{mm}$ (四级配混凝土) 的圆柱体试件, 及 6.6 节规定的三个轴心抗压强度试件。还应同时制备两个测自生体积变形和温度变形的补偿试件, 尺寸与徐变试件相同。

2 成型前后应用水工比例电桥检查应变计是否正常。将应变计垂直固定在试模中心, 试模的侧壁应有固定应变计和穿出线缆的孔洞。

3 按 6.1 节的规定制作试件, 试件类型及数量按照步骤 1 计算。待混凝土初凝前, 在试件顶面填以少量的干硬水泥净浆, 用玻璃板抹平表面, 两端面应符合 6.1.2 条的规定。

4 预计混凝土抗压强度达到 5MPa 以上时拆模。拆模后立即将徐变试件和补偿试件用橡皮套或金属套筒等材料密封, 可用充气法检查密封效果, 然后移入 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的徐变室养护。抗压强度试件按 6.1 节的规定养护。

5 到达加荷龄期时, 按 6.6 节的规定测定轴心抗压强度, 作为徐变试验的加荷基准。

6 将徐变试件安装在徐变仪上, 调试对中。在控制台上设定徐变加压荷载, 徐变加压荷载为试件轴心抗压强度的 30%。开机加荷, 待达到设定荷载并稳定后, 测读应变计的电阻比与电阻, 作为试件徐变变形的基准值。同时, 按 5.14 节的规定测读补偿试件应变计的电阻比与电阻, 并作为该组试件徐变变形的补偿起点。

7 徐变观测时间和调荷按照 5.11.3 条的规定执行。

8 持荷时长根据试验需要确定, 可为 90d、180d、360d 等, 也可在徐变变形基本稳定后停止试验。

6.8.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 抗压弹性模量、压缩徐变度、不可恢复的压缩徐变变形等按照 5.11.4 条的规定计算。
- 2 以两个试件测值的平均值作为试验结果。

7 碾压混凝土

7.1 碾压混凝土拌和物工作度（VC 值）试验

7.1.1 本试验用于测定碾压混凝土拌和物的工作度（VC 值），适用于 VC 值为（2~25）s 的碾压混凝土拌和物。

7.1.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 维勃稠度仪同 4.3.2 条的规定。滑动圆盘上再加两块（ 7.5 ± 0.05 ）kg 的配重砝码。
- 2 捣棒：直径 16mm，长 650mm，一端为弹头形金属棒。
- 3 40mm 方孔试验筛。
- 4 秒表；分辨力不大于 0.1s。

7.1.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 试验前将容量筒、压板等擦净润湿。

2 按照 4.1 节或 6.1 节的规定拌制碾压混凝土，用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。工作度试验在拌和物出机后 20min 内做完，试验前应采用塑料薄膜或湿麻袋遮盖。

3 工作度试验应进行两次，将湿筛后的拌和物翻拌均匀，摊平，用四分法分成四份，每次试验取其对角方向的两份。将试样混匀后分两层装入维勃稠度仪容量筒中，下层应超过半筒，上层装至与筒口齐平。每装一层用捣棒从容量筒周边开始向中心螺旋形均匀插捣 25 次。插捣深度以底层穿透该层，上层插入下层表面以下（10~20）mm 为准。上层插捣完毕后将表面整平。

4 将装料的容量筒固定于振动台上，把透明塑料压板、砝码滑杆及配重砝码加到拌和物表面（总质量 17.75kg）。松动滑杆紧固螺栓，启动振动台同时开始计时，直到圆压板下面全部出现水泥浆停止计时并停机，读取振动时间（读数精确到 0.1s）。

7.1.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 以两次测值的平均值（精确到 0.1s）作为碾压混凝土拌和物的工作度（VC 值）。
- 2 当混凝土拌和物的 VC 值处于（2~5）s、（5~25）s 范围内，两次测试结果分别不应超过 1s、3s，否则应重做试验。

7.2 碾压混凝土拌和物表观密度试验

7.2.1 本试验用于测定碾压混凝土拌和物单位体积的质量。

7.2.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 容量筒同 3.23.2 的规定。
- 2 振动台：振动频率（ 50 ± 3 ）Hz，空载时台面中心振幅（ 0.5 ± 0.1 ）mm，额定荷载不小于 200kg。附有固定容量筒的装置。
- 3 80mm、40mm 方孔试验筛。

4 秤：分度值不大于 0.05kg。

5 辅助器具：弹头捣棒、玻璃板（尺寸稍大于容量筒筒口，厚 5mm）、钢直尺或金属直杆、容量筒套模（内径与容量筒内径同，高 150mm，能固定于容量筒上）、压板（直径比容量筒内径小 5mm，厚 5mm~10mm，压板中心附有长 400mm、直径 10mm~20mm 的垂直圆杆）、压重块（连同压板一起的总质量按压强 4.9kPa 计算）等。

7.2.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 根据拌和物中骨料最大粒径按照表 3.23.2 选定相应规格的容量筒，称出空容量筒质量（ G_1 ，精确到 0.1kg，下同），并按照 SL 127 校准实际容积（ V ）。

2 按照 4.1 节或 6.1 节的规定拌制碾压混凝土。

3 把容量筒固定于振动台上，加上套模。分层将拌和物装入容量筒，每层装料厚度不大于 200mm，上层应装至高出容量筒顶面约 50mm。每层按 12 次/100cm²进行插捣，然后放上相应质量的压重块（压强应为 4.9kPa）进行振动。下层振动时间等于该拌和物 2 倍 VC 值，顶层振动时间为该拌和物（2~3）倍 VC 值，以拌和物振动液化表面泛浆为准。

4 取下套模及压重物，沿筒口刮除多余的拌和物，用抹刀及玻璃板抹平表面。将容量筒外部擦净，称取总质量（ G_2 ）。

7.2.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 碾压混凝土拌和物的表观密度应按照公式（7.2.4-1）计算。

$$\gamma_b = \frac{G_2 - G_1}{V} \times 1000 \quad (7.2.4-1)$$

式中 γ_b —— 碾压混凝土拌和物的表观密度，kg/m³；

G_1 —— 容量筒质量，kg；

G_2 —— 试样与容量筒质量，kg；

V —— 容量筒的容积，L。

2 以两次测值的平均值作为拌和物表观密度试验结果（修约间隔 1kg/m³）。当两次测值相差超过 20kg/m³时，应重做试验。

3 当已知所用材料表观密度时，拌和物的近似含气量可以按照公式（7.2.4-2）、公式（7.2.4-3）计算（修约间隔 0.1%）。

$$V_a = \frac{\gamma_0 - \gamma_b}{\gamma_0} \times 100\% \quad (7.2.4-2)$$

$$\gamma_0 = \frac{G_c + G_f + G_s + G_g + G_w}{\frac{G_c}{\rho_c} + \frac{G_f}{\rho_f} + \frac{G_s}{\rho_s} + \frac{G_g}{\rho_g} + \frac{G_w}{\rho_w}} \quad (7.2.4-3)$$

式中 V_a —— 碾压混凝土拌和物的含气量；

γ_0 —— 拌和物不含气时的表观密度，kg/m³；

γ_b —— 拌和物的实测表观密度，kg/m³；

G_c 、 G_f 、 G_s 、 G_g 、 G_w —— 分别为单位体积混凝土中水泥、粉煤灰、细骨料、粗骨料及水的用量，kg/m³；

ρ_c 、 ρ_f 、 ρ_s 、 ρ_g 、 ρ_w —— 分别为水泥、粉煤灰、细骨料、粗骨料及水的密度或表观密度， kg/m^3 。

7.3 碾压混凝土拌和物含气量试验

7.3.1 本试验用于测定碾压混凝土拌和物的含气量，适用于含气量不大于 7% 时。

7.3.2 仪器设备应包括以下几种。

1 混凝土含气量测定仪同 4.10.2 条的规定。

2 秤：分度值不大于 50g。

3 维勃稠度仪振动台。

4 辅助器具：套模（内径与含气量测定仪量钵内径相同，高度 60mm）、压重块及导杆（总质量 15kg）、含气量测定仪固定到振动台上的卡具、玻璃板（250mm×250mm×5mm）、捣棒、秒表、抹刀、打气筒、漏斗等。

7.3.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 试验前应对含气量测定仪进行率定，率定方法按该仪器使用说明书规定方法进行。

2 按照 4.1 节或 6.1 节的规定拌制碾压混凝土。

3 碾压混凝土拌和物含气量的测定按照以下步骤进行。

1) 取拌和物约 15L，用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料，拌和均匀，称取质量为 G_b 的试样。

$$G_b = \frac{\gamma_b V_0}{1000} \quad (7.3.3-1)$$

式中 G_b —— 碾压混凝土拌和物试样质量，kg；

γ_b —— 拌和物（经过湿筛的）表观密度， kg/m^3 ；

V_0 —— 含气量测定仪量钵容积，L。

2) 把套模置于量钵上，将称取的试样（ G_b ）分两层装入量钵内。每层高约 100mm，用捣棒从量钵周边开始向中心螺旋形均匀插捣 25 下，插捣上层时捣棒应插入下层（10~20）mm。

3) 将量钵置于固定卡具上，然后用螺杆和压板将量钵连同套模一并固定在振动台上，再将压重块和导杆轻轻置于套模内碾压混凝土表面上。

4) 开动振动台同时计时，振动时间按该拌和物的（2~3）倍 VC 值控制，以表面泛浆为准。

5) 将量钵从振动台上取下，用抹刀将顶面大致抹平，擦净量钵上边缘，将钵盖盖上，旋紧紧固螺栓。

6) 按使用的含气量测定仪规定方法测定碾压混凝土含气量。

4 测定骨料校正常数 K 。 K 随骨料种类不同而变化，除轻骨料外，满足水工混凝土用的骨料可不考虑骨料校正常数，不进行此项测定。

1) 按照公式（7.3.3-2）和公式（7.3.3-3）计算出装入量钵中的细骨料和粗骨料质量。由两式计算出的细骨料和粗骨料用量以饱和面干状态为准，实际用量还需根据细骨料和粗骨料的含水情况进行修正。按修正后的实际用量称取细骨料和粗骨料。

$$G_{s1} = \frac{G_s V_0}{1000(1 - \frac{G_3}{\rho_{g3}})} \quad (7.3.3-2)$$

$$G_{g1} = \frac{(G_1 + G_2) V_0}{1000(1 - \frac{G_3}{\rho_{g3}})} \quad (7.3.3-3)$$

式中 G_{s1} 、 G_{g1} ——分别表示装入量钵中的细骨料和粗骨料质量，kg；

G_s ——单位体积碾压混凝土中细骨料用量，kg/m³；

V_0 ——量钵容积，L；

G_1 、 G_2 、 G_3 ——分别为碾压混凝土中（5~20）mm、（20~40）mm 及大于 40mm 的粗骨料用量，kg/m³；

ρ_{g3} ——大于 40mm 粗骨料的表观密度，kg/m³。

2) 量钵中先盛 1/3 高度的水，将称取的细骨料和粗骨料混合物逐步加入量钵中，不断搅拌以排气。每当骨料层厚增加 45mm 时，用捣棒捣 10 次。细骨料和粗骨料全部加入水至满。盖上钵盖，扭紧紧固螺栓。

3) 同样按测定拌和物含气量的方法测定含气量，测得的含气量即为骨料校正常数 K 。

7.3.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 按照公式（7.3.4）计算拌和物含气量。

$$V_b = V_{bl} - K \quad (7.3.4)$$

式中 V_b ——拌和物的含气量，%；

V_{bl} ——由含气量测定仪测得的含气量，%；

K ——骨料校正常数，%。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.1%）。若两次含气量测值相差大于 0.5%，应重做试验。

7.4 碾压混凝土拌和物凝结时间试验（贯入阻力法）

7.4.1 本试验用于测定碾压混凝土拌和物的初凝和终凝时间。

7.4.2 仪器设备应包括以下几种。

1 贯入阻力仪同 4.9 节的规定。

2 试模：边长 150mm 的立方体试模（要求不漏浆，试模内可加薄塑料袋），且附有套模。

3 5mm 方孔筛，宜用金属丝编织网筛。

4 辅助器具：振动台、秒表、抹刀、压重块等。

7.4.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按照 4.1 节或 6.1 节的规定拌制碾压混凝土，用湿筛法筛除粒径大于 5mm 的骨料，获取砂浆试样约 15L。

2 通过套模将砂浆平均分装于三个边长 150mm 的立方体试模中（分两层装模，每层插捣 25 次）。将试模固定于振动台上，砂浆表面加压重块（按压强 2450Pa 计算）。开启振动台使试样振动密实（施振时间等于该碾压混凝土拌和物的 2 倍 VC 值），随后去掉压重块和套模，刮去试模表面多余砂浆，抹

平表面。试模置于 (20 ± 2) ℃的环境中，用橡胶板或玻璃板遮盖。

3 掺普通外加剂的在成型后 $(3\sim 4)$ h，掺缓凝剂的在成型后 $(4\sim 6)$ h开始测定。只用 20mm^2 截面积的测针，开始时每小时测试一次，按7.4.4节的规定计算贯入阻力值，并绘图确定碾压混凝土拌和物的初凝时间。测试时间间隔可视初凝时间长短进行调整，但初凝前及初凝后宜分别有五次以上的测试数值。

4 测点位置应按照先周边后中心布置，每次测点应避开前一次测孔，其间距不小于15mm。测点与砂浆筒壁距离不应小于20mm。

5 到测试时间时，取出砂浆试模置于仪器座板上，去皮清零（或记录压力表初始示值）。压下手柄使测针端部与砂浆表面接触，然后均匀用力使测针贯入砂浆，经10s左右使测针25mm深度标记到达砂浆表面，读取贯入阻力仪示值（或记录压力表最大示值，计算贯入压力） (P) ，精确到1N。每只砂浆筒每次测一个或两个点，取平均值作为本次贯入压力测值。

6 每次测试完毕，应将测针上粘附的砂浆擦净。取下砂浆试模，加盖后放回恒温室中。

7 重复步骤5~6，直至贯入阻力仪示值大于560N（即贯入阻力大于28MPa），停止试验。

7.4.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 贯入阻力值按照公式(7.4.4)计算。

$$R = \frac{P}{A} \quad (7.4.4)$$

式中 R —— 贯入阻力值，MPa；

P —— 贯入深度达25mm时所需的净压力，N；

A —— 测针的截面积， 20mm^2 。

2 以砂浆拌和加水至测定贯入阻力时所经历的时间为横坐标，以贯入阻力为纵坐标，将测试结果绘于图上。根据测点的具体分布情况，在转折点处将测点划分为两组（测点划分合适与否，可用两直线的相关系数是否均为最大进行判断）。用“最小二乘法”或“平均法”将两组测点分别用直线或直线方程表示，两直线的交点对应的时间即为碾压混凝土拌和物的初凝时间。

3 在贯入阻力~历时第二段直线上，贯入阻力28MPa对应的时间，即为该碾压混凝土拌和物的终凝时间。

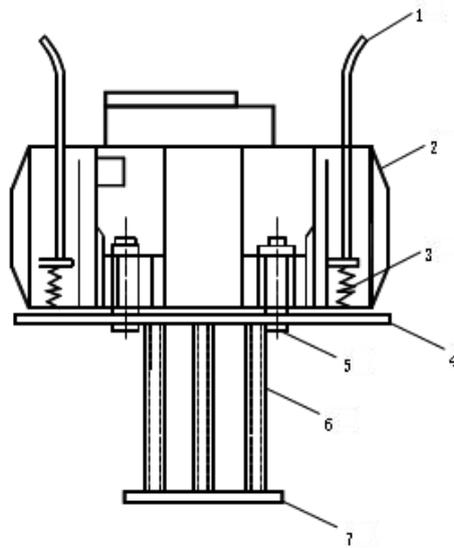
4 以三个试件凝结时间的平均值作为试验结果。

7.5 碾压混凝土的成型与养护方法

7.5.1 本试验用于测定碾压混凝土试件的制作。

7.5.2 仪器设备应包括以下几种。

1 振实机具：振动频率 (50 ± 3) Hz、振幅 (0.5 ± 0.1) mm的振动台（附有固定试模的装置）或振动成型器。振动成型器示意图见图7.5.2，质量 (35 ± 5) kg，频率 (50 ± 3) Hz，振幅 (3 ± 0.2) mm。附有可拆卸的试模压板，压板应具有一定的刚度，其边长或直径比试模尺寸约小5mm。



1—扶手；2—振捣器；3—弹簧；4—底板；5—螺栓；6—套管；7—成型压板

图 7.5.2 振动成型器

3 成型套模：套模的内轮廓尺寸与试模相同，高度 50mm，不易变形并能固定于试模上。

4 成型压重块及承压板：形状与试件表面形状一致，尺寸略小于试件表面尺寸。根据不同试模尺寸，将压重块和承压板的质量调整至碾压混凝土试件表面压强为 4.9kPa。

5 试模：由钢或铸铁制作，应足够坚固耐用，压重振实成型时不应变形、漏浆。模腔最小尺寸不应小于骨料最大粒径的三倍。试模应满足边长偏差不应大于边长的 1/150，角度偏差不应超过 1°，平整度偏差不应超过边长的 0.05%。

6 混凝土搅拌机、振动台按照 5.1 节或 6.1 节的规定选用。

7.5.3 碾压混凝土拌和物成型应按以下规定执行。

1 按照表 7.5.3 选用试模，检查试模装配情况及内壁脱模材料情况。必要时，重新装配或紧固试模，在试模内壁重新均匀地涂刷一薄层脱模材料。

表 7.5.3 水工碾压混凝土试件尺寸与试模

单位：mm

骨料最大粒径	抗压试件 劈拉试件	抗弯试件	抗剪试件	轴向抗拉试件	轴心抗压强度试件 抗压弹性模量试件	压缩徐变
	立方体	棱柱体	立方体	棱柱体或圆柱体	圆柱体	圆柱体
40	150×150×150	150×150×550(600)	150×150×150	中部截面 100×100, 纯拉段长度不小于 200	Φ150×300	Φ150×450
80	300×300×300	300×300×1200	/	Φ300×900	Φ300×600	Φ300×600

注：本表只列出了有承压（拉）面的试件所用的试模，其他试模按有关试验方法要求选用。

2 按照 4.1 节或 6.1 节的规定拌制碾压混凝土。按照各试验方法要求，用湿筛法筛除大粒径骨料，然后翻拌均匀。

3 将碾压混凝土拌和物分二层装入试模，并用捣棒插捣。每装一层用捣棒从试模周边开始向中心螺旋形均匀插捣，对边长或直径为 150mm、300mm 的试模，插捣次数分别为 25 次和 40 次。插捣深

度以底层穿透该层，上层插入下层表面以下（10~20）mm 为准。上层插捣完毕后将表面整平。

4 然后加压振动密实成型。用振动台成型时，将试模应固定于振动台上，加上套模，放上承压板及压重块（按压强为 4.9kPa 计算出压重块的总质量），由人工扶正压重块或用导向杆导向。用振动成型器成型时，将装有压板（形状与试件表面形状相同）的振动器垂直置于试模内的拌和物表面，用手扶正，不要人为加压或提起，以拌和物表面泛浆为准控制振动时间。

5 试件高度为 150mm 时，一次加压振动成型，振动时间为（2~3）倍 VC 值；试件高度为 300mm 时，分二次加压振动成型，底层振动时间为 2 倍 VC 值，上层振动时间为（2~3）倍 VC 值。均以碾压混凝土表面泛浆为准。

6 试件成型后马上进行抹面，要求沿模口抹平。

7.5.4 成型后的带模试件宜用塑料布或湿布覆盖，48h 后拆模、编号。试件的养护按照 5.1 节或 6.1 节的规定执行。

7.6 碾压混凝土立方体抗压强度试验

7.6.1 本试验用于测定碾压混凝土立方体试件的抗压强度。

7.6.2 试验机及其他器具同 5.2 节。

7.6.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

1 按 7.5 节的规定制备和养护试件，每组三个试件。抗压强度试验采用边长 150mm 的立方体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。骨料最大粒径 80mm 的碾压混凝土，也可采用边长 300mm 的立方体试件。

2 其余试验步骤和结果处理按 5.2 节的规定执行。

7.7 碾压混凝土表观密度试验

7.7.1 本试验用于测定碾压混凝土单位体积的质量。

7.7.2 仪器设备应符合 7.5 节的规定，称量设备等应符合 7.2 节的规定。

7.7.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 7.5 节的规定制备和养护试件。

2 到测试龄期后，取出试件，用卡尺或钢直尺测量尺寸（准确至 1mm），用秤称质量 G （准确至 0.05kg）。

7.7.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 碾压混凝土的表观密度按照公式（7.7.4）计算。

$$\gamma = \frac{G}{V_0} \times 1000 \quad (7.7.4)$$

式中 γ —— 碾压混凝土表观密度， kg/m^3 ；

G —— 碾压混凝土质量， kg ；

V_0 —— 试件体积, L。

- 2 以三个试件的平均值作为试验结果 (修约间隔 $1\text{kg}/\text{m}^3$)。

7.8 碾压混凝土劈裂抗拉强度试验

7.8.1 本试验用于测定碾压混凝土立方体试件的劈裂抗拉强度。

7.8.2 仪器设备应符合 5.3 节的规定。

7.8.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

- 1 按 7.5 节的规定制备和养护试件, 每组三个试件。劈裂抗拉强度试验采用边长 150mm 的立方体试件, 在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。骨料最大粒径 80mm 的碾压混凝土, 也可采用边长 300mm 的立方体试件。

- 2 其余试验步骤和结果处理按 5.3 节的规定执行。

7.9 碾压混凝土轴向拉伸试验

7.9.1 本试验用于测定碾压混凝土的轴向抗拉强度、极限拉伸值及抗拉弹性模量。

7.9.2 仪器设备应符合 5.5 节的规定。

7.9.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

- 1 按 7.5 节的规定制备和养护试件, 每组四个试件。拉伸试验采用中部截面尺寸为 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$, 纯拉段长度不小于 200mm 的变截面棱柱体试件, 在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料。骨料最大粒径 80mm 的碾压混凝土, 也可采用 $\Phi 300\text{mm}\times 900\text{mm}$ 的圆柱体试件, 或中部截面尺寸 $300\text{mm}\times 300\text{mm}$, 纯拉段长度不小于 600mm 的棱柱体试件。

- 2 其余试验步骤和结果处理按 5.5 节的规定执行。

7.10 碾压混凝土弯曲试验

7.10.1 本试验用于用简支梁三分点加荷法测定碾压混凝土的抗弯强度、弯曲极限拉伸值及抗弯弹性模量。

7.10.2 仪器设备应符合 5.6 节的规定。

7.10.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

- 1 按 7.5 节的规定制备和养护试件, 每组三个试件。弯曲试验采用 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 550\text{mm}$ (或 600mm) 的棱柱体试件, 在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。骨料最大粒径 80mm 的碾压混凝土, 也可采用 $300\text{mm}\times 300\text{mm}\times 1200\text{mm}$ 的棱柱体试件。

- 2 其余试验步骤和结果处理按 5.6 节的规定执行。

7.11 碾压混凝土抗剪强度试验

7.11.1 本试验用于测定碾压混凝土及层面的抗剪强度。

7.11.2 仪器设备应符合 5.7 节的规定。

7.11.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

1 按 7.5 节的规定制备和养护试件，每组不少于 15 个试件。抗剪试验采用边长 150mm 的立方体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 用于碾压混凝土本体抗剪强度试验的试件，一次制作完成。

3 用于碾压混凝土层间结合试验的试件，分两次装料和加压振实成型。首先按碾压混凝土拌和物表观密度计算并称取试件 1/2 高度所需要的拌和物，装入试模后一次加压振实，振实时间为 2 倍 VC 值。然后放入要求的环境至要求的间隔时间后，取出试模，按施工要求进行表层处理，再重新拌制混凝土成型上半部，振实时间为 (2~3) 倍 VC 值。均以碾压混凝土表面泛浆为准。

4 其余试验步骤和结果处理按 5.7 节的规定执行。

7.12 碾压混凝土圆柱体轴心抗压强度和静力抗压弹性模量试验

7.12.1 本试验用于测定碾压混凝土圆柱体轴心抗压强度和静力抗压弹性模量。

7.12.2 仪器设备应符合 5.8 节的规定。

7.12.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

1 按 7.5 节的规定制备和养护试件，每组六个试件，其中三个试件测定轴心抗压强度，三个试件测定抗压弹性模量。轴心抗压试验采用 $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的圆柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。骨料最大粒径 80mm 的碾压混凝土，也可采用 $\Phi 300\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的圆柱体试件。

2 成型时分两次装料和加压振实，底层振实时间为拌和物的 2 倍 VC 值，顶层振实时间为 (2~3) 倍 VC 值。均以碾压混凝土表面泛浆为准。

3 其余试验步骤和结果处理按 5.8 节的规定执行。

7.13 碾压混凝土压缩徐变试验

7.13.1 本试验用于测定碾压混凝土的徐变变形，适用于恒温 ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) 绝湿条件下，单向受压的徐变试验。

7.13.2 仪器设备与设施应符合 5.11 节的规定。

7.13.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

1 按 7.5 节的规定制备和养护试件，每组两个试件。徐变试验采用 $\Phi 150\text{mm} \times 450\text{mm}$ 的圆柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料，并计算试件灰浆率。骨料最大粒径 80mm 的碾压混凝土，也可采用 $\Phi 300\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的圆柱体试件。

2 成型时分三层装料和加压振实。当采用应变计测量时，应在埋设应变计的位置，在第二层填料前插入一个比应变计外径略大的棒体。待第二层压振后，轻轻拔出，然后将应变计埋入，再装填第三层试料，进行加压振实。底层和中层振动时间为拌和物的 2 倍 VC 值，顶层振动时间为 (2~3) 倍 VC 值。均以碾压混凝土表面泛浆为准。

3 碾压混凝土初凝前，在试件顶面填以少量的干硬水泥净浆，用玻璃板抹平表面。

4 成型前后应检查和测读应变计是否正常。

5 其余试验步骤和结果处理按 5.11 节的规定执行。

7.14 碾压混凝土抗渗性试验(逐级加压法)

7.14.1 本试验用于测定碾压混凝土的抗渗等级。

7.14.2 仪器设备应符合 5.22 节的规定。

7.14.3 试验步骤及试验结果处理应按以下规定执行。

1 按照 7.5 节的规定制备和养护试件，每组六个试件。抗渗试验采用上口直径 175mm、下口直径 185mm、高 150mm 的截头圆锥体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。

2 其余试验步骤及结果处理按 5.22 节的规定执行。

7.15 碾压混凝土渗透系数试验

7.15.1 本试验用于测定碾压混凝土本体和层间的渗透系数。

7.15.2 仪器设备应包括以下几种。

1 混凝土渗透系数测定仪：与 6.7 节所用渗透仪器设备相同，但接入水压稳压系统的试件箱容器尺寸应与试验试件尺寸相匹配。

2 密封材料：沥青、厚度 3mm~5mm 塑料（橡胶）板。

3 辅助器具：电炉、温度计、搅拌铲、抹刀等。

7.15.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按照 7.5 节的规定制备和养护试件，每组三个试件。有层面的试件分两次成型，按 7.11 节的规定执行。渗透系数试验选用 $\Phi 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的圆柱体试件或 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的立方体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料。骨料最大粒径 80mm 的碾压混凝土，也可选用 $\Phi 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的圆柱体试件或边长 300mm 的立方体试件。

2 到达规定试验龄期时，由养护室取出试件，擦干表面。将试件装入容器中，要做好密封，试件底部用塑料（或橡胶）板与容器底部法兰密封。容器的内壁与试件周边有 15mm 的净间距，用以填充密封材料。将沥青加热到 (175~200) °C 至水分蒸发完为止，浇注到容器与试件四周的空隙内，宜分 (2~3) 次灌注以保证充填全部间隙。

3 置定试验水压力，初次施加水压力 0.5MPa，检查试件的密封性，观察 24h，确认密封良好无

渗漏后，开始试验。在 7d 内分（3~5）次将水压力逐次增加到试验水压力 8MPa，然后由仪器的稳压系统长期保持水压力恒定。

4 应经常检查压力表上的试验水压力，细心观察试件底部，记录开始流出水量的准确时间和流出的水量。以后每天检测两次，在直角坐标纸上绘制累积流出水量—历时过程线。当过程线变成一条直线且直线段历时大于 100h，即认为达到流量恒定，停止试验。

5 试验结束后，试件容器从试验单元取下，并加热软化沥青密封材料，将试件取出。

7.15.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 每个试件测得一条累积流出水量过程线，在过程线的直线段上，横坐标截取 100h 时段，其斜率即为通过试件的恒定流量。三个试件的平均流量为试验所要确定的恒定流量。

2 按照公式（6.7.4）计算碾压混凝土渗透系数

3 有层面的试件，应在报告中注明含层面碾压混凝土。

7.16 碾压混凝土抗冻性试验

7.16.1 本试验用于测定碾压混凝土的抗冻等级。

7.16.2 仪器设备应符合 5.24 节的规定。

7.16.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

1 按照 7.5 节的规定制备和养护试件，每组三个试件。抗冻试验采用 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料。

2 其余试验步骤和结果处理按 5.24 节的规定执行。

7.17 碾压混凝土自生体积变形试验

7.17.1 本试验用于测定碾压混凝土自生体积变形。

7.17.2 仪器设备与设施应符合 5.14 节的规定。

7.17.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

1 试件桶应满足压振成型的要求。试验前应进行严格检查，要求试件桶密封后不渗水不透气。试验前在桶内壁衬一层厚约（1~2）mm 的橡皮，并涂抹一层厚约（0.3~0.5）mm 沥青隔离层。

2 按 7.13 节的规定制备试件，每组两个试件。自生体积变形试验采用 $\Phi 200\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的圆柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 的骨料，并记算试件灰浆率。

3 成型前后应检查和测读应变计是否正常。

4 其余试验步骤和结果处理按 5.14 节的规定执行。

7.18 碾压混凝土干缩（湿胀）试验

7.18.1 本试验用于测定碾压混凝土的干缩和湿胀性能。

7.18.2 仪器设备与设施应符合 5.13 节的规定。

7.18.3 试验步骤及试验结果处理应按以下规定执行。

1 按照 7.5 节的规定制备和养护试件，每组三个试件。干缩（湿胀）试验采用 100mm×100mm×515mm 的棱柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 30mm 的骨料。

2 测量基准值的时间按照试验要求确定。碾压混凝土的凝结时间较长时，测量基准值的时间应适当延长，如终凝后 24h 或 48h。

3 其他试验步骤和试验结果处理按 5.13 节的规定执行。

7.19 碾压混凝土导温系数试验

7.19.1 本试验用于测定碾压混凝土导温系数。

7.19.2 仪器设备应符合 5.15 节的规定。

7.19.3 试验步骤及试验结果处理应按以下规定执行。

1 按照 7.5 节的规定制备和养护试件，每组两个试件。导温系数试验采用 $\Phi 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ 圆柱体试件，在成型前用湿筛法筛除粒径大于 40mm 骨料。

2 成型时将拌和物分三层装入试模内，每层先插捣 25 次再加压重（压强为 4.9kPa）振实。第一层振实后，将铁杆插入试模中，并固定在中心部位，再装第二层和第三层试料，然后分别振实。底层、中层振动时间为拌和物的 2 倍 VC 值，上层为（2~3）倍 VC 值。均以碾压混凝土表面泛浆为准。

3 其余试验步骤和结果处理按 5.15 节的规定执行。

7.20 碾压混凝土导热系数试验

7.20.1 本试验用于测定碾压混凝土导热系数。

7.20.2 仪器设备应符合 5.16 节的规定。

7.20.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。

1 按照 7.19 节的规定制备试件，每组两个试件。

2 其余试验步骤和结果处理按 5.16 节的规定执行。

7.21 碾压混凝土比热试验（绝热法）

7.21.1 本试验用于测定碾压混凝土比热。

7.21.2 仪器设备应符合 5.17 节的规定。

7.21.3 试验步骤及试验结果处理应按以下规定执行。

1 按照 7.19 节的规定制备试件，每组两个试件。

- 2 其余试验步骤和结果处理按 5.17 节的规定执行。

7.22 碾压混凝土绝热温升试验

- 7.22.1 本试验用于测定,在绝热条件下,水泥水化所产生的热量使碾压混凝土升高的温度和温升—历时关系。
- 7.22.2 仪器设备应符合 5.19 的规定。
- 7.22.3 试验步骤及试验结果处理应按以下规定执行。
 - 1 试验前按 5.19 节的规定检查仪器工作是否正常。
 - 2 试验前 24h 应将碾压混凝土拌和用料,放在 (20 ± 5) °C 的室内,使其温度与室温一致。如对拌和物浇筑温度有专门要求时,则按要求控制拌和物的初始温度。
 - 3 按照 7.5 的规定制备试件。测量出机拌和物温度,然后分两层装入容器中,每层用振动成型器振实,以碾压混凝土表面泛浆为准。在容器中心用橡胶锤打入测温管。
 - 4 其余试验步骤和结果处理按 5.19 节的规定执行。

7.23 碾压混凝土线膨胀系数试验

- 7.23.1 本试验用于测定碾压混凝土线膨胀系数。
- 7.23.2 仪器设备应符合 5.18 的规定。
- 7.23.3 试验步骤和结果处理应按以下规定执行。
 - 1 按 7.13 节的规定制备试件,每组为两个试件。测完碾压混凝土自生体积变形的试件,也可用于本试验。
 - 2 其余试验步骤和结果处理按 5.18 节的规定执行。

7.24 加浆振捣碾压混凝土室内拌和成型方法

- 7.24.1 本方法用于拌制和成型加浆振捣碾压混凝土。
- 7.24.2 仪器设备应包括以下几种。
 - 1 秤、天平、混凝土搅拌机、振动台、插入式振捣器、试模等应符合 5.1 节的规定。
 - 2 辅助器具:容量筒、盛料容器、铁铲、抹刀等。
- 7.24.3 浆液配合比计算按以下规定进行。
 - 1 浆液所使用的原材料应与拟加浆的碾压混凝土所使用的原材料相同。
 - 2 浆液的水胶比不宜大于拟加浆的碾压混凝土,可适当减小 0.05~0.10。
 - 3 浆液的掺合料掺量不宜大于拟加浆的碾压混凝土,可适当减小 5%~10%。
 - 4 浆液不掺引气剂,减水剂掺量可以微调,以满足浆液的工作性要求。

5 浆液的用水量按照公式(7.24.3-1)计算。

$$m_w = \frac{R\rho_w\rho_c\rho_p}{R\rho_c\rho_p + (1-C_f)\rho_w\rho_p + C_f\rho_w\rho_c} \quad (7.24.3-1)$$

式中 m_w —— 浆液用水量, kg/m^3 ;

ρ_w —— 水的密度, kg/m^3 ;

ρ_c —— 水泥的密度, kg/m^3 ;

ρ_p —— 掺合料的密度, kg/m^3 ;

R —— 水胶比;

C_f —— 掺合料掺量。

6 浆液的胶凝材料用量、水泥用量和掺合料用量分别按照公式(7.24.3-2)、(7.24.3-3)、(7.24.3-4)计算。

$$m_c + m_p = \frac{m_w}{R} \quad (7.24.3-2)$$

$$m_c = (1 - C_f)(m_c + m_p) \quad (7.24.3-3)$$

$$m_p = C_f(m_c + m_p) \quad (7.24.3-4)$$

式中 m_c —— 浆液水泥用量, kg/m^3 ;

m_p —— 浆液掺合料用量, kg/m^3 。

7.24.4 浆液的配制按以下规定进行。

- 1 将拌制浆液的各种材料提前放入拌和间,使其温度与拌和间温度相同。
- 2 按照碾压混凝土拌和物的体积和加浆体积率,计算浆液体积与各材料的用量。
- 3 称取配制浆液所需各种材料,各材料允许称量偏差为 $\pm 0.3\%$ 。
- 4 将水泥、掺合料、水和减水剂依次加入洗净的搅拌机内,搅拌(2~3)min。也可采用适当大小的容器,人工拌制浆液至浆液充分混合均匀。

7.24.5 加浆振捣碾压混凝土的成型按以下规定进行。

- 1 按4.1节的规定拌制拟加浆的碾压混凝土拌和物。

2 采用振动台振实成型时,将碾压混凝土拌和物在钢板上摊铺成(100~150)mm的厚度,再将拌好的浆液均匀铺洒在碾压混凝土上,人工翻拌两次,装入试模,按5.1节的规定成型试件。

3 采用插入式振捣器振实成型时,根据拟成型的试模的容积,按照公式(7.24.5-1)计算单个试模中碾压混凝土拌和物的质量 m_h ,按照公式(7.24.5-2)计算单个试模中所需浆液的体积,将量取的浆液一次性铺筑于试模底部,再将称好的碾压混凝土拌和物一次性装入试模和套模内,然后开动插入式振捣器,按6.1.3条的规定捣实混凝土,直至拌和物表面均匀泛浆。

$$m_h = \frac{\rho_h V_0 (1 - P_v)}{1000} \quad (7.24.5-1)$$

式中 m_h —— 单个试模中碾压混凝土拌和物的质量, kg ;

ρ_h —— 碾压混凝土拌和物的表观密度, kg/m^3 ;

V_0 —— 拟成型的试模的容积, L ;

P_v —— 加浆体积率。

$$V_s = V_0 P_v \quad (7.24.5-2)$$

式中 V_s —— 单个试模中所需浆液的体积, L。

7.24.6 其余试验步骤按照 5.1 节的规定执行。

7.25 碾压混凝土拌和物仓面贯入阻力检测

7.25.1 本试验用于测定仓面碾压混凝土拌和物的贯入阻力, 控制施工时的直接铺筑允许间隔时间。

7.25.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 手持式贯入阻力仪。测力计量程 500N, 分度值 10N。
- 2 捣棒: 直径 16mm, 长 650mm, 一端为弹头形金属棒。

7.25.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 从运到施工现场的碾压混凝土拌和物中筛取砂浆试样 40L。
- 2 在平仓后的碾压混凝土层某一预定位置挖取面积 400mm×400mm, 深 200mm 的坑。将砂浆分两层装入试样坑内, 每层插捣 40 次。刮平试样, 表面略高出碾压混凝土表面。
- 3 将砂浆表面覆盖一层尼龙编织布, 然后砂浆试样与碾压混凝土拌和物一起承受振动碾碾压, 碾压制度按碾压混凝土碾压规定进行。碾压完毕后, 除去覆盖编织布, 与碾压混凝土暴露在相同外界环境中。
- 4 按不同时间间隔 (以碾压混凝土拌和物加水搅拌时开始计时) 分次用贯入阻力仪测定现场砂浆试样的贯入阻力值。
- 5 测试时, 两手持阻力仪, 保持测针竖直。将测针端部与砂浆试样表面接触, 通过手柄徐徐加压, 使测针在 10s 内贯入砂浆 25mm, 此时仪表上显示的荷载为最大贯入静压力。然后将测针拔出, 阻力仪水平放置在平稳处。
- 6 每次在砂浆试样上测定贯入阻力时, 按照先周边后中心的顺序进行, 测点间距离不应小于 25mm。

7.25.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 按照公式 (7.4.4) 计算贯入阻力值。
- 2 当贯入阻力达到允许间隔时间所对应的贯入阻力限制值时, 此时所经过的时间即为该外界条件下直接浇筑允许间隔时间。

7.26 碾压混凝土表观密度现场检测

7.26.1 本试验用于在施工现场测定碾压混凝土的表观密度, 以评定碾压密实度, 适用于层厚不大于 500mm 刚碾压完毕的碾压混凝土层。

7.26.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 表层型核子水分—密度仪, 符合 SL 275 的有关规定。

- 2 标准块：密度不宜小于 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，含水量不宜大于 $0.24\text{g}/\text{cm}^3$ 。
- 3 试模：尺寸 $600\text{mm}\times 600\text{mm}\times 400\text{mm}$ 。
- 4 辅助器具：铁锤、钢钎。
- 5 其他称量及量测器具同 7.2 “碾压混凝土表观密度测定”。

7.26.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 采用实际使用的碾压混凝土施工配合比，拌和 3 盘，按照 7.2 节的规定测定碾压混凝土拌合物表观密度，取 3 次测试结果的平均值作为基准表观密度。

2 开始正式测试前，按核子密度仪说明书要求，进行标准计数检验，并做好记录。其值必须在仪器规定的范围内，否则应重新计数，直至满足要求。

3 仪器现场标定按以下步骤进行。

- 1) 采用实际使用的碾压混凝土施工配合比，按 7.5 节的规定成型 $600\text{mm}\times 600\text{mm}\times 400\text{mm}$ 试件 3 块。试块长宽应端正，表面为测量面，应平整。
- 2) 用导板、铁锤和钢钎，在试件中心位置造一个比现场测量深度深 25mm 左右的测孔，该测孔应垂直于测量面。
- 3) 在钢钎没有拔出情况下，以导板四角为定位标志，划好仪器安放位置的定位标记线。
- 4) 用拔钎器垂直向上缓慢拔出钢钎，保持孔壁光滑。
- 5) 仪器开机，经预热和自检后进入工作状态。
- 6) 按照试块上的定位标记线，将仪器准确地放在测点位置。
- 7) 检查和确认仪器的测量参数与测量模式的设置后，将仪器源杆缓慢向下插入测孔至预定测量深度。在源杆下插过程中应避免扰动孔壁，测孔不应坍塌。
- 8) 以源杆为轴左右转动仪器，使仪器平稳坐落在测量面上，其底面应与测量面接触良好。
- 9) 启动仪器进行测试，在测试过程中测量人员应退到距离仪器 2m 以外的安全范围。
- 10) 对每个试块，以源杆为转轴，按照预先确定的 0° 、 90° 、 180° 和 270° 四个方向分别测试，每个方向连续独立测取 3 个密度值。取 12 个测值的平均值，作为该试块的表观密度测量结果。
- 11) 测量结束后应立即将仪器源杆退回安全位置。
- 12) 计算每个试块的表观密度测量结果与碾压混凝土基准表观密度值的差值，取这 3 个差值的平均值作为仪器在该测量深度时表观密度测量结果的校正偏差值。
- 13) 现场测试前将偏差值输入仪器。

4 现场碾压混凝土表观密度测定按以下步骤进行。

- 1) 选择和确定测量位置，避开混凝土中的钢筋和金属埋件。
- 2) 可用导板等工具将测量表面抹平。
- 3) 现场碾压混凝土表观密度测定方法与仪器现场标定方法相同。应在碾压后 20min 内进行造孔和测试。仪器测量深度应稍大于或等于碾压层厚度。放射源放入孔内测读时间不应小于 1min。

4) 以仪器源杆为转轴在 0°、180°两个方向各测试 1 次。

7.26.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 取两次测值的平均值作为现场碾压混凝土的表观密度测量结果。若两次密度读数的差值超过 30kg/m³，则应补充测试 90°和 270°两个方向，取四次密度读数的平均值作为测量结果。

2 现场碾压混凝土表观密度与碾压混凝土基准表观密度的比值，即相对密实度或压实度按照公式 (7.26.4) 计算 (修约间隔 1%)。

$$K = \frac{\gamma_a}{\gamma} \times 100\% \quad (7.26.4)$$

式中 K —— 现场碾压混凝土相对密实度或压实度；

γ_a —— 现场碾压混凝土表观密度，kg/m³；

γ —— 碾压混凝土基准表观密度，kg/m³。

8 现场混凝土质量检测

8.1 回弹法检测混凝土抗压强度

8.1.1 本试验用于检测混凝土抗压强度，作为检查混凝土质量的一种手段。适用于抗压强度为（10～60）MPa 的混凝土。

8.1.2 仪器设备和试剂应包括以下几种。

1 仪器设备和试剂应包括以下几种。

- 1) 回弹仪：示值系统为直读式的混凝土回弹仪。按回弹仪的标称动能可分为：中型回弹仪，标称动能为 2.2J，和重型回弹仪，标称动能为 29.4J；
- 2) 压力机：2000kN 压力试验机；
- 3) 标定回弹仪的钢砧。硬度值应符合表 8.1.2 的规定；

表 8.1.2 钢砧芯硬度值

仪器名称	洛氏硬度（HRC）
中型回弹仪	58～62
重型回弹仪	62～64

4) 钢尺：分度值 0.5mm。

2 1.0%酚酞溶液。

8.1.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 在被测混凝土结构或构件上均匀布置测区，测区数不小于 10 个。测区面积：中型回弹仪为 400cm²；重型回弹仪为 2500cm²。

2 根据混凝土结构、构件厚度或骨料最大粒径，选用回弹仪。

- 1) 混凝土结构或构件厚度 < 600mm，宜选中型回弹仪。
- 2) 混凝土结构或构件厚度 ≥ 600mm，或骨料粒径 ≥ 40mm，宜选重型回弹仪。

3 检验回弹仪的标准状态应按以下步骤进行。

1) 弹击锤与弹击杆碰撞的瞬间，弹击拉簧应处于自由状态，此时弹击锤起跳点应相应于指针指示刻度尺上的“0”位处。

2) 率定“N”值。将回弹仪在钢砧上进行率定，其率定值应符合下列要求。

——中型回弹仪：率定值“N”为 80±2；

——重型回弹仪：率定值“N”为 63±2。

4 当回弹仪不符合标准状态时，不应用于工程测量。

5 测试应按以下步骤进行。

1) 每个测区应弹击 16 点。两测点间距不宜小于 50mm。当一个测区有两个测面时，每一个测面弹击 8 点，测点布置如图 8.1.3（a）；不具备二个测面的测区，可在一个测面上弹击

- 16点，可按照图 8.1.3 (b) 所示布置测点。
- 2) 回弹值测试面要清洁、平整，测点应避开气孔或外露粗骨料。一个测点只允许弹击一次。
 - 3) 弹击时，回弹仪的轴线应垂直于结构或构件的混凝土表面，缓慢均匀施压，不宜用力过猛或突然冲击。
 - 4) 读数时可将回弹仪顶住表面，或按下按钮，锁住机芯。
 - 5) 当出现回弹值“ N ”过高或过低，应查明原因。可在该测点附近（约 30mm）补测，舍弃原测点。
- 6 碳化深度测量应按以下步骤进行。
- 1) 当测试完毕后，可用电动冲击钻在回弹值的测区内，钻一个直径 20mm，深 70mm 的孔洞，测量混凝土碳化深度。
 - 2) 测量混凝土碳化深度时，应将孔洞内的混凝土粉末清理干净，用 1.0% 酚酞溶液（含 20% 的蒸馏水或去离子水）滴在孔洞内壁的边缘处，再用钢尺测量混凝土碳化深度值 L （不变色区的深度），读数精度为 0.5mm。
 - 3) 测量的碳化深度小于 0.4mm 时，则按无碳化处理。

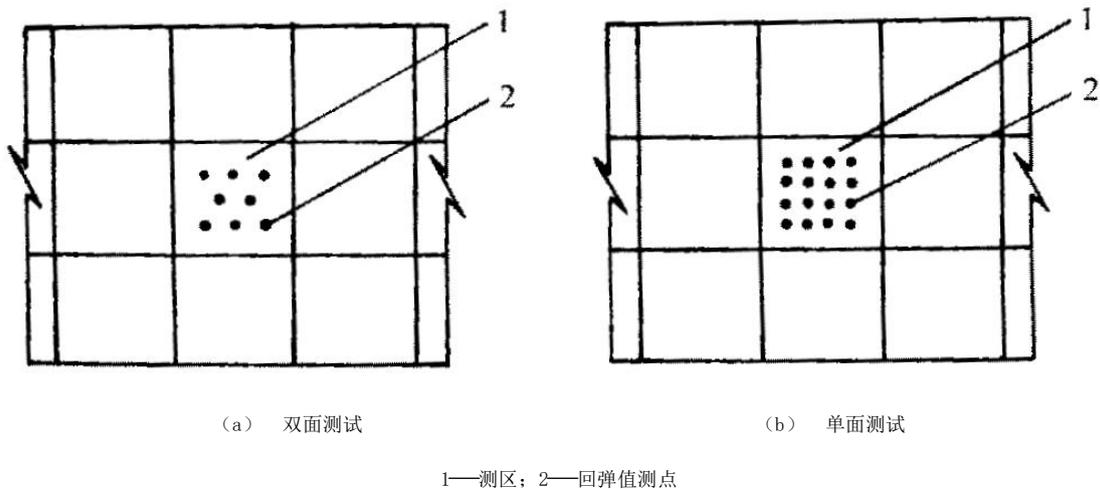


图 8.1.3 回弹值测点布置示意图

8.1.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 从测区的 16 个回弹值中，舍弃三个最大值和三个最小值，将余下的 10 个回弹值按照公式 (8.1.4-1) 计算测区平均回弹值 m_N （修约间隔 0.1）。

$$m_N = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} N_i \quad (8.1.4-1)$$

式中 m_N —— 测区平均回弹值；

N_i —— 第 i 个测点回弹值， $i=1, 2, 3, \dots, 10$ 。

2 当回弹仪在非水平方向测试时,如图 8.1.4-1 所示。先将测得的数据按照公式 (8.1.4-1), 求出测区平均回弹值 $m_{N\alpha}$, 再按照公式 (8.1.4-2) 换算成水平方向测试的测区平均回弹值 m_N (修约间隔 0.1)。

$$m_N = m_{N\alpha} + \Delta N_\alpha \quad (8.1.4-2)$$

式中 $m_{N\alpha}$ —— 回弹仪与水平方向成 α 角测试时测区的平均回弹值;
 ΔN_α —— 按照表 8.1.4-1 查出的不同测试角度 α 的回弹修正值。

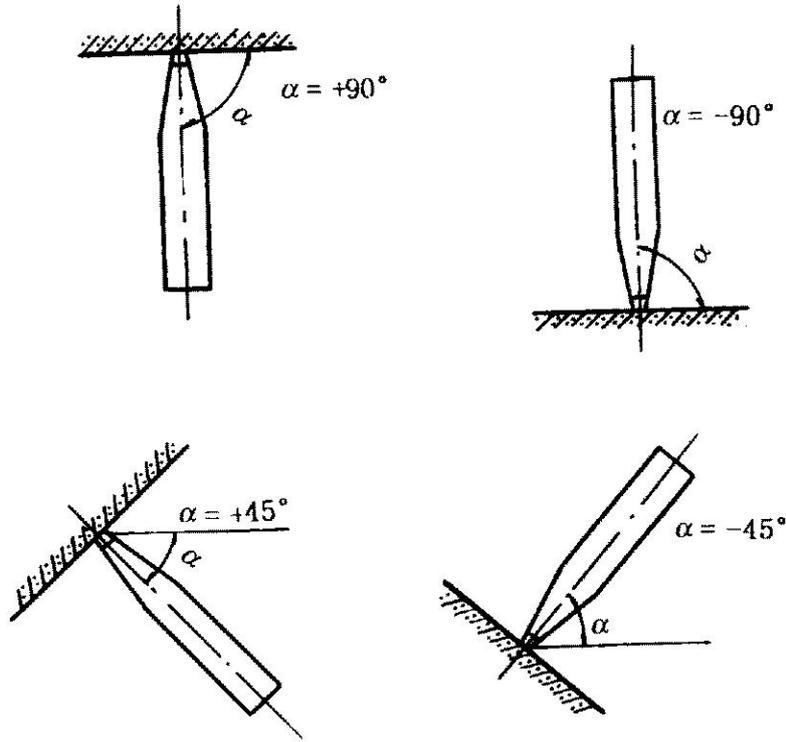


图 8.1.4-1 回弹仪非水平方向测试示意图

3 推定混凝土强度的回弹值应是水平方向测试的回弹值 m_N 。
 4 在推定混凝土强度时,宜优先采用专用混凝土强度公式。专用混凝土强度公式的建立,可按 8.3.3 条 2 款的规定执行。

1) 对于重型回弹仪,可采用 300mm×300mm×300mm 的试件,建立强度—回弹值的关系。在浇制 300mm 立方体全级配混凝土大试件的同时,制作相应湿筛分的 150mm×150mm×150mm 的小试件。在大试件上测取回弹值,在小试件上测定相应的抗压强度。

表 8.1.4-1 回弹修正值 ΔN_α

$m_{N\alpha}$	测试角度 α							
	+90°	+60°	+45°	+30°	-30°	-45°	-60°	-90°
20	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	+2.5	+3.0	+3.5	+4.0
30	-5.0	-4.0	-3.5	-2.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5

40	-4.0	-3.5	-3.0	-2.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0
50	-3.5	-3.0	-2.5	-1.5	+1.0	+1.5	+2.0	+2.5

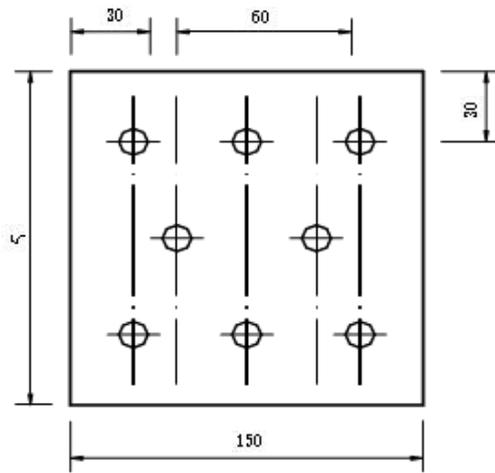


图 8.1.4-2 测点布置图 (单位: mm)

- 2) 对于中型回弹仪, 采用 150mm×150mm×150mm 的试件, 建立强度—回弹值的关系。在试件上选取两个相对的测试面。每个测试面取八个测点 (对于 300mm 立方体的大试件, 测点可取自同一测试面)。测点距试件边缘不小于 30mm。测点布置如图 8.1.4-2 所示。测试时, 将试件用 2.0MPa 压力固定在压力机中。用回弹仪分别水平对准各测点, 测定回弹值。然后按 5.2 节的规定测试抗压强度。
- 3) 根据实测的抗压强度、回弹值, 以最小二乘法计算出曲线的方程式。回归方程式宜采用公式 (8.1.4-3) 和公式 (8.1.4-4)。

$$f_{ccNo} = Am_N^B \quad (8.1.4-3)$$

$$f_{ccNo} = Ae^{Bm_N} \quad (8.1.4-4)$$

式中 f_{ccNo} —— 混凝土抗压强度, MPa;

m_N —— 测区平均回弹值;

A 、 B —— 试验常数。

5 当无专用混凝土强度公式时, 可根据回弹仪型号, 公式 (8.1.4-5)、公式 (8.1.4-6) 推定混凝土强度。

- 1) 中型回弹仪

$$f_{ccNo} = 0.02497m_N^{2.0108} \quad (8.1.4-5)$$

- 2) 重型回弹仪

$$f_{ccNo} = 7.7e^{0.04m_N} \quad (8.1.4-6)$$

- 6 当混凝土结构或构件碳化至一定深度时, 须将推定的混凝土强度按照公式 (8.1.4-7) 修正。

$$f_{ccN} = f_{ccNo} \times C \quad (8.1.4-7)$$

式中 f_{ccN} —— 碳化深度修正后的混凝土强度值，MPa；
 f_{ccNo} —— 按照公式推定的混凝土强度值，MPa；
 C —— 查表 8.1.4-2 的碳化深度修正值。

表 8.1.4-2 碳化深度修正值

测区强度 (MPa)	碳化深度 (mm)					
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	≥6.0
10.0~19.5	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
20.0~29.5	0.94	0.88	0.82	0.75	0.73	0.65
30.0~39.5	0.93	0.86	0.80	0.73	0.68	0.60
40.0~50.0	0.92	0.84	0.78	0.71	0.65	0.58
50.0~60.0	0.92	0.82	0.76	0.71	0.65	0.58

7 根据各测点区的混凝土强度 f_{ccN} ，计算构件的平均强度 m_{fccN} 、标准差 σ 和变异系数 C_V ，评估构件的混凝土强度和均匀性。

8 保证率不低于 95% 的构件混凝土强度推定值，当构件测区数不少于 10 个时，按照公式 (8.1.4-8) 计算；当测区数少于 10 个时，按照公式 (8.1.4-9) 计算。

$$f_{cu,e} = m_{fccN} - 1.645\sigma \quad (8.1.4-8)$$

$$f_{cu,e} = f_{ccN, \min} \quad (8.1.4-9)$$

式中： $f_{cu,e}$ —— 构件的混凝土强度推定值；
 m_{fccN} —— 构件各测区的平均混凝土强度值；
 $f_{ccN, \min}$ —— 构件各测区的最小混凝土强度值。

8.2 超声波检测混凝土抗压强度和均匀性

8.2.1 本试验用于现场实测超声波在混凝土中的传播速度（简称波速）推求结构混凝土强度。根据各测点强度的离散性，评定建筑物混凝土的均匀性。本方法不宜用于抗压强度在 45MPa 以上或在超声传播方向上钢筋布置太密的混凝土。

8.2.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 非金属超声检测仪：仪器最小分度 0.1 μ s。当传播路径在 100mm 以上时，传播时间（简称声时）的测量误差不应超过 1%；
- 2 换能器：对于路径短的测量（如试件），宜用频率较高的换能器（50kHz~100kHz）；对路径较长的测量，宜用 50kHz 以下的换能器；
- 3 耦合介质：可用黄油、浓机油、浆糊等。

8.2.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 超声波检测仪零读数的校正应按以下步骤进行。

- 1) 仪器零读数指的是当发、收换能器之间仅有耦合介质的薄膜时，仪器的时间读数，以 t_0 表示。对于具有零校正回路的仪器，应按照仪器使用说明书，用仪器所附的标准棒在测量前校正好零读数，然后测量（此时仪器的读数已扣除零读数）。对于无零校正回路的仪器应事先求得零读数值 t_0 ，从每次仪器读数中扣除 t_0 。
- 2) 零读数按下述方法求得：以均质材料（如有机玻璃）棱柱体（或截成长度不等的两段），棱柱体的最小边长应大于换能器的直径。准确地测量纵方向尺寸 d_1 和横方向尺寸 d_2 ，并用超声仪测读声波通过纵向和横向的时间 t_1 和 t_2 ， t_0 按照公式（8.2.3-1）计算。

$$t_0 = \frac{d_1 \cdot t_2 - d_2 \cdot t_1}{d_1 - d_2} \quad (\mu\text{s}) \quad (8.2.3-1)$$

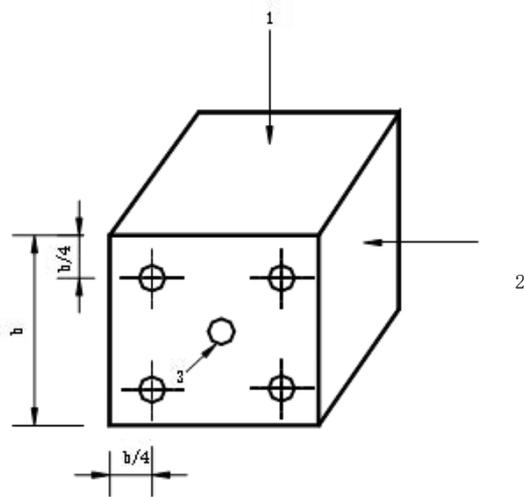
- 3) 求 t_0 时，测量棱柱体的尺寸和测读声波通过的时间应在同一室温下进行，所用的耦合介质应与在建筑物上测量时所用者相同。
 - 4) 若仪器附有经过标定传播时间 t_1 的标准棒，测读通过标准棒的时间 t_2 ，则 $t_0 = t_2 - t_1$ 。当仪器性能允许时，也可将发、收换能器幅射面隔着耦合介质薄膜相对地直接接触，读取这时的时间读数即得 t_0 。更换换能器时应另求 t_0 值。
- #### 2 建立强度—波速关系应按以下步骤进行。

1) 试件制作应按以下规定执行。

- a) 试件数量，三个为一组，不少于 10 组；
- b) 试件尺寸可为 150mm×150mm×150mm。当骨料粒径超过 40mm 时，试件尺寸不小于 200mm×200mm×200mm；
- c) 试件的原材料、配合比、振捣方法、养护条件应与被测建筑物混凝土一致；
- d) 为了使同一批试件的强度、波速在较大范围内变化，可采用以下两种方法。
 - 如旨在检测建筑物混凝土强度时，可采用固定胶凝材料、细骨料和粗骨料比例，使水胶比在一定范围内上下波动，在同一龄期测试；
 - 如旨在了解混凝土硬化过程中强度的变化时，可采用固定混凝土的配合比和水胶比，在不同龄期进行测试。

2) 试件的测试应按以下规定执行。

- a) 超声波测试，每个试件的测试位置如图 8.2.3 所示。在测点处涂上耦合剂，将换能器压紧在测点上，调整增益，使所有被测试件接收信号第一个半波的幅度降至相同的某一幅度，读取时间读数。每个试件以五点测值的算术平均值作为试件混凝土中超声传播时间 t 的测量结果。



1—浇注方向；2—抗压测试方向；3—超声测试方向

图 8.2.3 试件的测试位置

- b) 尺寸测量，以不大于 1mm 的误差，沿超声传播方向测量试件各边长，取平均值作为传播距离 L 。
- c) 按照公式 (8.2.3-2) 计算波速。

$$v = \frac{L}{t} \times 1000 \quad (8.2.3-2)$$

式中 v —— 超声波速度，km/s；

L —— 超声波在试件上的平均传播距离，m；

t —— 超声波在试件上的传播时间， μs 。

- d) 抗压强度测试应按照 5.2 节的规定执行。

3) 结果整理应按以下规定执行。

- a) 波速或强度均取一组三个试件测值的平均值作为试验结果。
- b) 以强度为纵坐标，波速为横坐标，绘制强度—波速关系曲线。根据实测数据，以最小二乘法计算出曲线的回归方程式，推荐二次函数公式 (8.2.3-3)、指数函数公式 (8.2.3-4) 和幂函数公式 (8.2.3-5) 三种，可选用相关系数比较大的函数形式。

$$f_{cc} = a + bv + cv^2 \quad (8.2.3-3)$$

$$f_{cc} = ae^{bv} \quad (8.2.3-4)$$

$$f_{cc} = av^b \quad (8.2.3-5)$$

式中 f_{cc} —— 混凝土强度，MPa；

v —— 超声波速，km/s；

a 、 b 、 c —— 方程式的系数，用最小二乘法统计算得。

3 现场测试应按以下步骤进行。

- 1) 在建筑物相对的两面均匀地划出网格，网格的交点即为测点。相对两测点的距离即为超声波的传播路径长度 L 。此长度的测量误差不应超过 1%。网格的大小，即测点疏密，视建筑物尺寸、质量优劣和要求的测量精度而定。网格边长宜为 (200~1000) mm。
- 2) 在测点处涂上耦合剂，将换能器压紧在相对的测点上。调整仪器增益，使接收信号第一个半波的幅度至某一幅度（与测试试件时同样大小），读取传播时间 t ，按 (8.2.3-2) 式计算该点的波速。被测体与换能器接触处应平整光滑，若混凝土表面粗糙不平而又无法避开时，应将表面铲磨平整，或用适当材料（熟石膏或水泥浆等）填平、抹光。在测量过程中应注意波形的变化和波速的大小，如发现异常波形和过低的波速时，应反复测量并检查测点的平整程度和耦合是否良好。
- 3) 按比例绘制被测物体的图形及网格分布，将测得的波速标于图中的各测点处。在数值偏低的部位，可根据情况加密测点，再行测试。

8.2.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 将现场测得波速加以必要的修正后，按强度—波速关系式（或曲线）换算出各测点处的混凝土强度。并按数理统计方法计算平均强度 $m_{f_{cc}}$ 、标准差 σ 和变异系数 C_v 三个统计特征值，用以比较各部位混凝土的均匀性。

2 钢筋对波速影响的修正应按以下步骤进行。

- 1) 钢筋垂直于传播路径（见图 8.2.4-1）且钢筋排列较密的情况下，将测得的传播速度乘以修正系数（见表 8.2.4-1），得混凝土中波速。

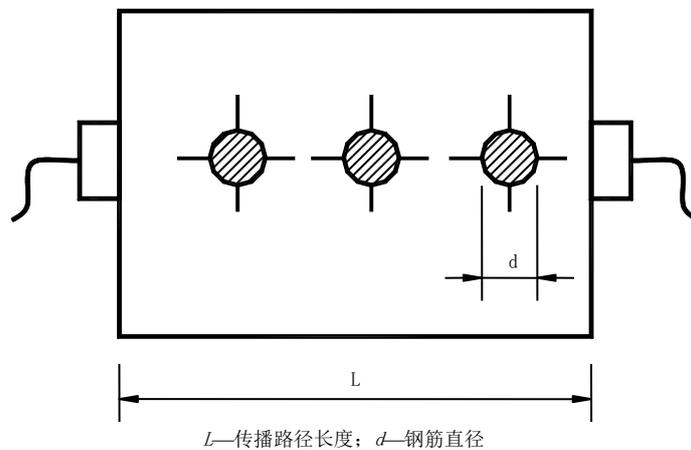


图 8.2.4-1 钢筋垂直于传播路径的测量

表 8.2.4-1 钢筋垂直于传播路径时的波速修正系数

L_0/L	$v_c=3.00$ km/s	$v_c=4.00$ km/s	$v_c=5.00$ km/s
1/12	0.96	0.97	0.99
1/10	0.95	0.97	0.99
1/8	0.94	0.96	0.99
1/6	0.92	0.95	0.98

注 1: v_c 为混凝土中波速, 取附近无钢筋处实测得的波速平均值。

注 2: L_s/L 为传播路径中通过钢筋断面的长度 L_s 与总路径 L 之比。若探头正对钢筋, $L_s = \Sigma d$, d 为钢筋直径。

- 2) 钢筋平行于传播路径 (见图 8.2.4-2) 情况下, 由测得的传播时间 t , 按照公式 (8.2.4-1) 粗略计算混凝土中波速。测量时, 换能器避开钢筋影响的最短距离 D_{\min} 按照公式 (8.2.4-2) 计算, 可取 $D_{\min} = (1/8 \sim 1/6)L$ 。

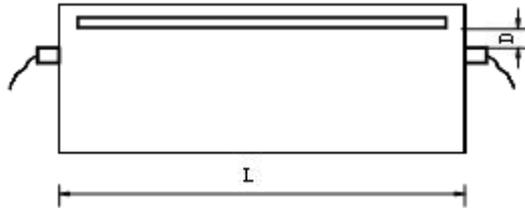


图 8.2.4-2 钢筋平行于传播路径的测量

$$v_c = \frac{2Dv_s}{\sqrt{4D^2 + (v_s \cdot t - L)^2}} \quad (8.2.4-1)$$

$$D_{\min} \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_s - v_c}{v_s + v_c}} \quad (8.2.4-2)$$

式中 v_c —— 混凝土中波速, m/s;

v_s —— 钢筋中波速, m/s, 随钢筋直径变化, 通过试验求得或参考图 (8.2.4-3) 查得;

t —— 传播时间, s;

D —— 换能器边缘至钢筋的距离, m;

L —— 传播路径长度, m, 即两换能器底面之间的直线距离, m;

D_{\min} —— 换能器边缘至钢筋的最短距离, m。

- 3 含水率和养护方法对波速影响的修正应按以下步骤进行。

- 1) 率定试件与被测建筑物混凝土养护条件不一致时, 应对波速进行修正。修正值通过试验确定, 也可参考表 8.2.4-2。
- 2) 率定试件与建筑物混凝土含水率不一致时, 应对波速进行修正。当混凝土含水率增大 1% 时, 可近似认为波速也相应增大 1%。可从建筑物上取样, 实测混凝土的含水率。
- 4 测距修正系数宜通过对比试验确定。如难以确定, 可参考表 (8.2.4-3)。将测得的波速乘以修正系数。

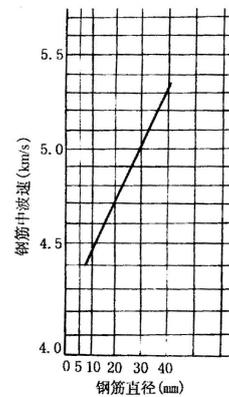


图 8.2.4-3 不同钢筋直径与波速的关系

表 8.2.4-2 不同养护条件下波速修正值

(单位: km/s)

混凝土强度 (MPa)	养护条件	
	水中养护	潮湿养护
35~45	0.20	0
25~35	0.25	0.05
15~25	0.30	0.10
10~15	0.33	0.15

注：本表系以自然养护为标准，如采用水中或潮湿养护时，应将测得的波速减去表中相应值。
——自然养护：24h后脱模，洒水覆盖7d，然后在湿度为70%左右的空气中养护；
——潮湿养护：24h后脱模，然后在湿度为95%以上的空气中养护；
——水中养护：24h后脱模，然后在水中养护。

表 8.2.4-3 测距修正系数

测距 (mm)	150	500	1000	2000	3000	4000	5000
修正系数	1.000	1.003	1.015	1.023	1.027	1.030	1.031

注：表中未列数值可用内插法求得。

8.3 超声波检测混凝土裂缝深度（平测法）

8.3.1 本试验用于测量混凝土建筑物中深度不大于 500mm 的裂缝。裂缝内有水或穿过裂缝的钢筋太密时本方法不适用。

8.3.2 仪器设备应符合 8.2 节的规定。

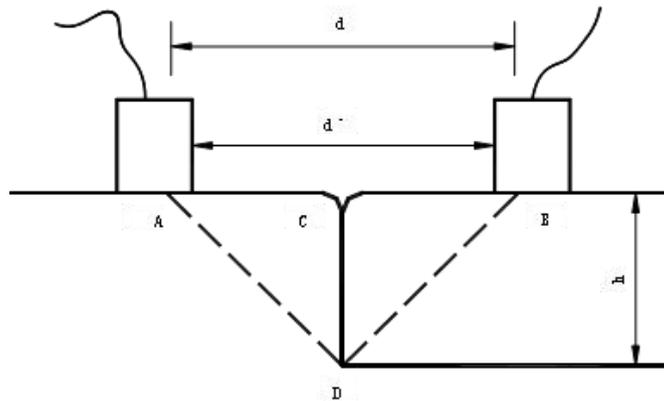
8.3.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 无缝处平测声时和传播距离的计算应按以下步骤进行。

- 1) 将发、收换能器平置于裂缝附近有代表性的、质量均匀的混凝土表面上，两换能器内边缘相距为 d' 。在不同的 d' 值（如 50mm、100mm、150mm、200mm、250mm、300mm 等，必要时再适当增加）的情况下，分别测读出相应的传播时间 t_0 。
- 2) 以距离 d' 为纵坐标，时间 t_0 为横坐标，将数据点绘在坐标纸上。若被测处的混凝土质量均匀、无缺陷，则各点应大致在一条不通过原点的直线上。
- 3) 根据图形计算出这直线的斜率（用直线回归算法），即为超声波在该处混凝土中的传播速度 v 。按 $d = t_0 \cdot v$ ，计算出发、收换能器在不同 t_0 值下相应的超声波传播距离 d （ d 略大于 d' ）。

2 绕缝传播时间的测量应按以下步骤进行。

- 1) 垂直裂缝。将发、收换能器平置于混凝土表面上裂缝的各一侧，并以裂缝为轴相对称，两换能器中心的连线应垂直于裂缝的走向，如图 8.3.3-1。沿着同一直线，改变换能器边缘距离 d' 。在不同的 d' 值（如 50mm、100mm、150mm、200mm、250mm、300mm 等），分别读出相应的绕裂缝传播时间 t_1 。



d' —两换能器之间的净距； d —超声传播的实际距离

图 8.3.3-1 裂缝深度测试

2) 倾斜裂缝。

- a) 如图 8.3.3-2 所示，先将发、收换能器分别布置在 A、B 位置（对称于裂缝顶），测读出传播时间 t_1 。然后 A 换能器固定，将 B 换能器移至 C，测读出另一传播时间 t_2 。以上为一组测量数据。改变 AB、AC 距离，即可测得不同的几组数据。
- b) 裂缝倾斜方向判断法：如图 8.3.3-3 所示，将一只换能器 B 靠近裂缝，另一只位于 A 处，测传播时间。接着将 B 换能器向外稍许移动，若传播时间减小，则裂缝向换能器移动方向倾斜；若传播时间增加，则进行固定 B 移动 A 的反方向检测。

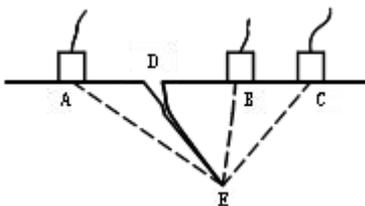


图 8.3.3-2 倾斜裂缝的测试

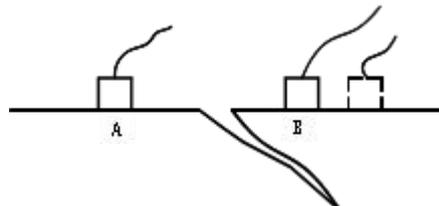


图 8.3.3-3 裂缝倾斜方向判断法

8.3.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 垂直裂缝深度按 (8.3.4) 式计算。

$$h = \frac{d}{2} \sqrt{(t_1/t_0)^2 - 1} \quad (8.3.4)$$

式中 h —— 垂直裂缝深度，mm；

t_1 —— 绕缝的传播时间， μs ；

t_0 —— 相应的无缝平测传播时间， μs ；

d —— 相应的换能器之间声波的传播距离，mm。

- 1) 根据换能器在不同距离下测得的 t_1 、 t_0 和 d 值，可算出一系列的 h 值。把凡是 $d < h$ 和 $d > 2h$ 的数据舍弃，取其余（不少于两个） h 值的算术平均值作为裂缝深度的测试结果。
- 2) 在进行跨缝测量时注意观察接收波首波的相位。当换能器间距从较小距离增大到裂缝深度

的 1.5 倍左右时,接收波首波会反相。当观察到这一现象时,可以用反相前、后两次测量结果计算裂缝深度,并以其平均值作为最后结果。

2 倾斜裂缝深度用作图法求得。如图 8.3.4 所示,在坐标纸上按比例标出换能器及裂缝顶的位置(按超声传播距离 d 计)。以第一次测量时两换能器位置 A、B 为焦点,以 $t_1 \cdot v$ 为两动径之和作一椭圆。再以第二次测量时两换能器的位置 A、C 为焦点,以 $t_2 \cdot v$ 为两动径之和作另一椭圆。两椭圆的交点 E 即为裂缝末端,DE 为裂缝深度 h 。

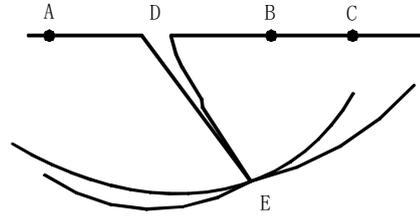


图 8.4.4 椭圆交会法

8.3.5 试验过程还应满足下列要求:

1 测试时,换能器应与混凝土耦合良好。

2 当有钢筋穿过裂缝时,发、收换能器的布置应使换能器连线离开钢筋轴线,离开的最短距离宜为裂缝深度的 1.5 倍。

3 在测量绕缝传播时间时,应读取第一个接收信号。如换能器与混凝土耦合不良等造成第一个信号微弱,误读后面的叠加信号,将造成测量错误。随着探头相互距离逐级增加,第一个接收信号的幅度应逐渐减小。如果情况反常,应检查测量有无错误。

8.4 超声波检测混凝土裂缝深度(对、斜测法)

8.4.1 本试验用于按对、斜测法测量混凝土裂缝深度。适用于有条件两面对测或可钻孔对测的混凝土建筑物。裂缝中有水时本方法不适用。

8.4.2 仪器设备应包括以下几种。

1 非金属超声波检测仪应符合 8.2 节的规定;

2 换能器:平面换能器及可置于钻孔中测量的径向换能器,如增压式换能器、环状换能器或水听器;

3 钻孔设备:风钻、钻机等。

8.4.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 对于有条件两面对测的结构,如梁、墩、墙体,可采用两面斜测法。试验步骤如下。

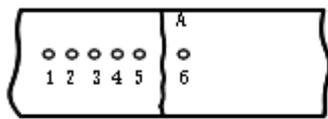
1) 在结构(如梁)一侧或两侧发现裂缝 A 和 B,可如图 8.4.3-1 所示布置换能器进行斜测。

其中 1~1'、2~2'、3~3'、4~4'、5~5'测线斜穿过裂缝所在平面 AB。作为比较,再布置不穿过裂缝所在平面的测线 6~6'。测试面必须平整,换能器与结构表面声耦合必须良好。

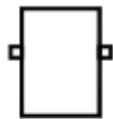
2) 测量各条测线接收信号振幅和声传播时间,以振幅参数作为判断的主要依据。

3) 在穿裂缝所在平面的各条测线中,若某(些)条测线振幅测值明显小于 6~6'测线,则表明裂缝已深入到这些测线位置,从而确定裂缝的深度。

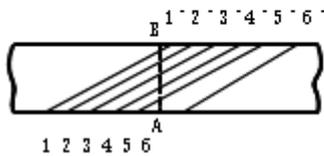
2 对于没有条件两面对测但可钻孔对测的结构,如坝体、底板、廊道等,可采用钻孔对测法。试验步骤如下。



a) 测视图



b) 侧视图



c) 俯视图

图 8.4.3-1 双面斜测法

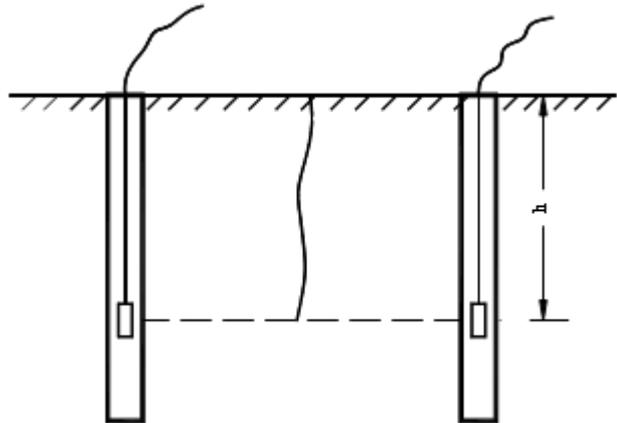


图 8.4.3-2 深层裂缝测量法

- 1) 在裂缝两侧对称地打两个垂直于混凝土表面的钻孔，两孔口的连线应与裂缝走向垂直。孔径大小以能自由地放入径向换能器为度。两孔的间距、深度，按以下原则选择。
 - a) 超声波穿过两孔之间的无缝混凝土后，接收信号第一个半波的振幅应大于 20mm；
 - b) 当裂缝倾斜时，估计裂缝底部不致超出两孔之间。两孔间距宜为 (1~3)m，如图 8.4.3-2 所示。
 - c) 钻孔深度应至少大于裂缝深度 0.5m。
- 2) 钻孔应冲洗干净，注满清水，将发、收换能器分别置于两钻孔中同样高程上。测量并记录超声传播时间、接收信号振幅等参数。
- 3) 关于接收信号的振幅，可采用两种方法测读。
 - a) 直接测量示波器荧光屏上接收信号第一个半波（或第二个半波）的振幅毫米数；
 - b) 利用串接在接收回路中的衰减器，将接收信号衰减至某一预定高度（此高度应小于测量过程中最小的振幅），然后读取衰减器上的数值。
- 4) 使换能器在孔中上下移动进行测量，直至发现当换能器达到某一深度 h 时，振幅出现最大值，再向下则基本上稳定在这个数值左右。此时，换能器在孔中的深度 h_1 即为裂缝的深度（以换能器中部计）。在整个测量过程中，仪器增益固定不变。
- 5) 为便于判断，可绘制孔深—振幅曲线（如图 8.4.3-3 所示）。根据振幅沿孔深变化情况来判断裂缝深度。可在无裂缝混凝土处加钻孔距相等，孔深为 (500~600) mm 的第三个孔，以校核等孔距无缝混凝土的超声波信号。
- 6) 当裂缝倾斜时，可用图 8.4.3-4 所示方法进行测量：使换能器在两孔中不同深度以等速移动方式斜测，寻找测量参数突变时两换能器中部的连线，多条（图上只画两条）连线的交点 N 即为裂缝的末端。判别的根据主要是振幅。

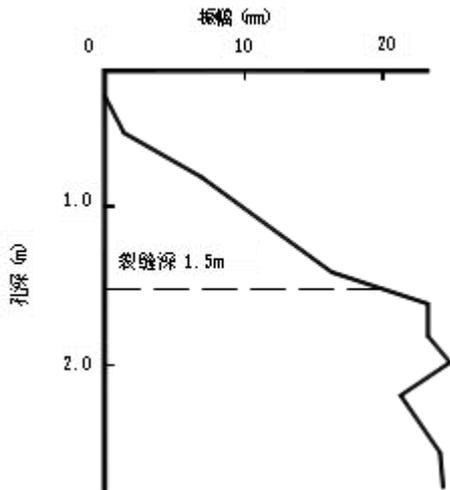


图 8.4.3-3 孔深—振幅曲线

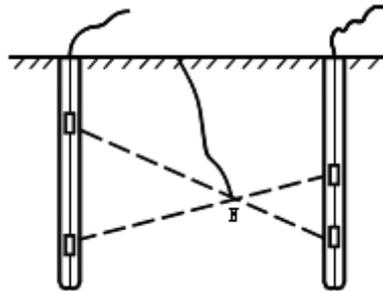


图 8.4.3-4 倾斜裂缝测量法

8.5 超声波检测混凝土内部缺陷

8.5.1 本试验用于利用超声波探测构筑物混凝土内部缺陷，如蜂窝、空洞、架空、夹泥层、低强区等。本方法适用于能进行穿透测量以及经钻孔或预埋管可进行穿透测量的构筑物和构件。

8.5.2 仪器设备应包括以下几种。

1 非金属超声检测仪应符合 8.2 节的规定；

2 各种声波频率的平面换能器：当测距小于 1m 时，宜采用（50~100）kHz 换能器；当测距大于 2m 时，宜采用 50kHz 以下的换能器。在穿透能力允许情况下，宜用高频率的换能器；孔中测量应采用径向换能器；

3 长度测量工具，如钢卷尺等。

8.5.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 超声仪仪器零读数校正按以下规定执行。

1) 当采用平面换能器测量时，仪器零读数 t_0 的定义及校正见 8.2 节的规定。

2) 对于在钻孔中或预埋声测管中以径向换能器进行检测的场合，仪器零读数 t_0 定义为——孔间混凝土介质厚度为零时仪器的声时读数。可采用以下方法标定——将发、收径向换能器表面相互紧贴，置于水中，读取此时的接收波首波声时 t_1 (μs)。则仪器（包括换能器）的零读数 t_0 (μs) 可按照公式（8.5.3-1）、公式（8.5.3-2）计算。带有零读数调节的仪器，在标定换能器零读数中及以后使用中，调零旋钮应固定在同一位置，不应变更。

a) 在钻孔中测量时。

$$t_0 = t_1 + (d_1 - d_2) \times 10^6 / v_w \quad (\mu\text{s}) \quad (8.5.3-1)$$

式中 d_1 —— 钻孔直径，m；

d_2 —— 径向换能器外直径，m；

v_w —— 水的声速，取 1480m/s。

b) 在预埋管中测量时。

$$t_0 = t_1 + (d_1 - d_2) \times 10^6 / v_w + 2a \times 10^6 / v_s \quad (\mu\text{s}) \quad (8.5.3-2)$$

式中 d_1 —— 预埋管内直径, m;

d_2 —— 径向换能器外直径, m;

a —— 预埋管管壁厚度, m;

v_s —— 预埋管材料声速, 若用钢管, 取 $v_s=5900\text{m/s}$ 。

2 测点布置按以下规定执行。

- 1) 对于一般结构, 如梁、柱、墩、墙等, 在其相对的两面对称地画出方格网。方格网交点即为测点。方格网的间距视结构物尺寸和要求的测量精度而定, 宜为 (0.2~1.0) m。
- 2) 对于钻孔或埋管法测量, 则从孔口开始向下逐点对测。测点间距通常为 (0.2~0.5) m。在测得缺陷附近, 测点还应加密。
- 3) 一个构件或一个统计总体, 测点数不应少于 30。

3 测点处理按以下规定执行。

- 1) 测点处表面应打磨平整, 然后涂上耦合剂 (黄油或浆糊)。表面凹凸严重难以整平的测点可涂抹石膏或砂浆, 硬化后待用。
- 2) 钻孔或预埋管中充满淡水作耦合介质, 应注意不能使水浑浊。

4 测距测量按以下规定执行。

- 1) 相对二测点的间距称为测距, 应以不大于 ±1% 的误差准确测量。
- 2) 钻孔或预埋管测量中的测距指的是二孔间混凝土的净距离。要求每对测孔相互平行, 在孔口处准确丈量测距。如果不能保证钻孔或预埋管相互平行而导致孔间距离误差大于 ±1% 时, 应对各测点测距进行适当修正。

5 声学参数测量, 调整仪器状态 (发射电压、增益、衰减等), 使适合于该测量场合, 逐点测量各测点全部或部分声学参数。

- 1) 声传播时间 (声时 t) 及声传播速度 (声速 v): 以不低于 1% 的精度测读各测点首波声时读数 t'_i , 则声时 t_i 按照公式 (8.5.3-3) 计算, 根据各测点声时按照公式 (8.5.3-4) 计算各测点声速。

$$t_i = t'_i - t_0 \quad (8.5.3-3)$$

式中 t_i —— 测点声时, μs ;

t'_i —— 测点首波声时, μs ;

t_0 —— 该场合下的仪器零读数。

$$v_i = \frac{l_i}{t_i} \times 1000 \quad (8.5.3-4)$$

式中 v_i —— 测点声速, km/s;

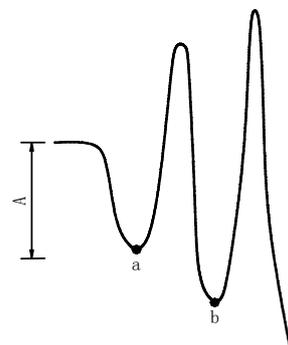


图 8.5.3-1 接收波形

I_i —— 测点测距, m。

- 2) 接收信号首波振幅(振幅 A):接收波第一个波前半周波波谷(或波峰)的幅度 A_i (图 8.5.3-1),测试方法与 8.4.3 中测试方法相同。在进行各测点振幅测量过程中,仪器的发射电压、放大器增益均不应变化,各测点的声耦合应良好,并尽量保持一致。
- 3) 接收信号频率(频率 f_i):接收波第一个周波的主频率,可采用下述两种方法之一进行测量。
 - a) 频谱法:凡具有快速频谱分析功能的超声仪,可将采集的一串接收波中的前一个周波,即图 8.5.3-1 中的 $a\sim b$ 段波,以不低于 2kHz 的分辩力进行频谱(振幅谱)分析,把分析结果中的主频率(幅度最大者)作为频率测值 f_i 。
 - b) 周期法:移动仪器时间游标(标刻),先对准波谷 a ,读取相应声时 t_a ,再移动游标对准波谷 b ,读取相应声时 t_b ,则频率 f_i 按照公式(8.5.3-5)计算。

$$f_i = \frac{1}{t_b - t_a} \text{ (kHz)} \quad (8.5.3-5)$$

式中 f_i ——接收波第一个周波的主频率, KHz;
 t_a ——波谷 a (图 8.5.3-1) 相应声时, S;
 t_b ——波谷 b (图 8.5.3-1) 相应声时, S。

- 4) 接收波波形(波形):观察各测点波形,注意前一个周波是否有畸变。必要时可采集打印或拍摄照片或描绘该波形。

6 两个方向对测和斜交叉测,当在一个方向进行两面对测后,发现某些测点声学参数明显偏低,这时首先应复测,确定无疑后,再在可疑点附近加密测点测量。当证实这些部位有可能内部有缺陷时,如果构筑物条件允许,可采用两个方向对测或斜测的方法以确定缺陷的纵深位置。

- 1) 两个方向对测:对于柱、墩一类构件,如图 8.5.3-2 所示。当在 I~I'方向对测,发现 3~3'测线测值异常,则可再在 II~II'方向逐点对测,如果在 II~II'方向, $b\sim b'$ 测线测值异常,则缺陷出现在 3~3'测线与 $b\sim b'$ 测线交点处可能性最大。
- 2) 斜交叉测量:对于墙体一类结构,或在钻孔、预埋管中测量时(如图 8.5.3-3),当对测发现 $a\sim b$ 测线异常,可将发、收换能器彼此错开一定高度(0.2m~2.0m)在 $a\sim b$ 测线所在的垂直面内进行斜交叉测量。各斜测线彼此等长度、等斜度。比较各斜线测值,可以确定缺陷的纵深位置及范围。

注:检测灌注桩时,可用斜测法判断是否是“夹泥层”或“缩颈”。如图(8.5.3-4)所示,当 $a\sim b$ 测线测值明显低下,斜测线中除 1~1'、2~2'、9~9'、10~10'正常外,其余斜测线均异常, $a\sim b$ 处多为夹泥层。如图(8.5.3-5)所示,当 $a\sim b$ 测线测值明显低下, 3~3'、4~4'、7~7'、8~8'测值也异常,但其余测线正常, a 、 b 处多为缩颈。必要时可作双向斜测,相互印证。

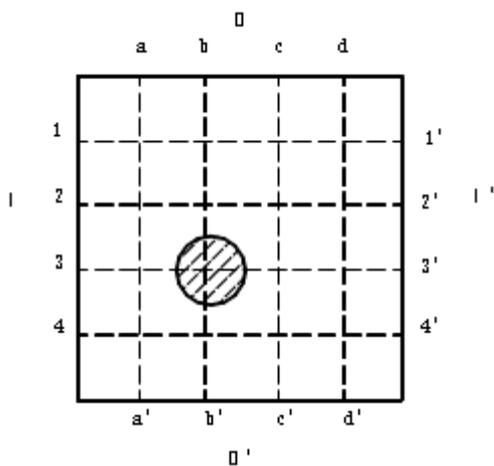


图 8.5.3-2 两个方向对测示意图

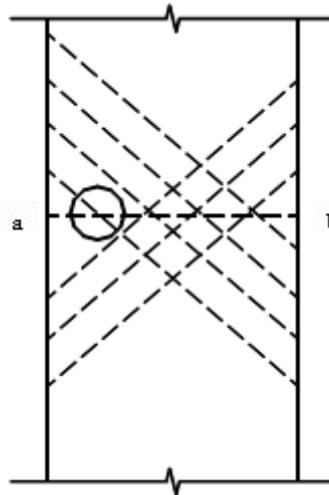


图 8.5.3-3 斜交叉测量

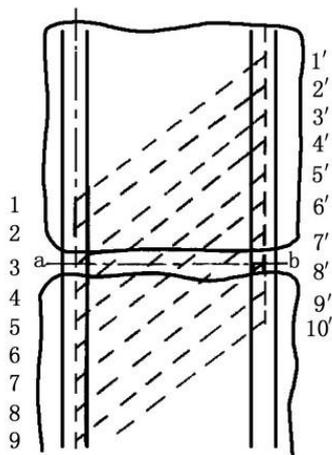


图 8.5.3-4 灌注桩中的夹泥层

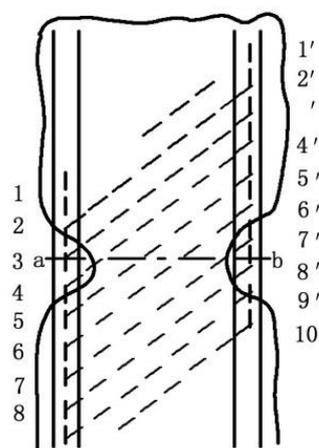


图 8.5.3-5 灌注桩中的缩颈

8.5.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 应当从混凝土各测点处测值正常的波动与离散中分辨出非正常的测值，可以采用概率法进行判断，其步骤如下。

- 1) 统计总体：以单个构件或同条件、同龄期、一次浇筑的结构一部分作为一判断总体。统计总体的测点数不应少于 30。
- 2) 测值的取舍及统计计算。
 - a) 将判断总体各测点测值（波速、振幅或频率）按大小次序排列，即： $X_1 > X_2 > X_3 > \dots > X_{n-2} > X_{n-1} > X_n > X_{n+1} > X_{n+2} \dots$ 。
 - b) 将排在后面且明显小的某些测值（例如 X_{n+1} 、 $X_{n+2} \dots$ ）视为可疑值予以舍弃，把 X_n 及其以上各值参加统计，平均值 m_x 及标准差 S_x 按照公式 (8.5.4-1) 和公式 (8.5.4-2) 计算。

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (8.5.4-1)$$

$$S_X = \sqrt{(\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \cdot m_X^2)/(n-1)} \quad (8.5.4-2)$$

式中 X_i —— 某点测值；

n —— 参加统计的测点数。

3) 单点临界值 X_{L1} 按照公式 (8.5.4-3) 计算。

$$X_{L1} = m_X - K_1 S_X \quad (8.5.4-3)$$

式中 K_1 —— 单点异常值判定系数，其值根据所有测点总数 n 查表 8.5.4-1。

4) 单个异常值的判断：把 X_{L1} 与测值序列中各值相比较，情况如下。

a) 若 $X_{r-1} \leq X_{L1}$, $X_r > X_{L1}$ ，则判 X_{r-1} 及其以下各测值为异常值，计算结束。

b) 若 $X_n \leq X_{L1}$, $X_{r-1} > X_{L1}$ ，则把 X_n 也舍弃，以其余各测值参加统计，按照公式 (8.5.4-1)、(8.5.4-2)、(8.5.4-3) 重新计算 m'_r 、 S'_r 及 X'_{L1} ，并重新判断：若 $X_n \leq X'_{L1}$, $X_{r-1} > X'_{L1}$ ，则判 X_n 及其以下各测值为异常值，计算结束；若 $X_{r-1} \leq X'_{L1}$ ，则再舍弃 X_{r-1} ，重新计算与判断，直至舍弃某值而其上一值大于 X'_{L1} 为止，并判该值及其以下各值为异常值。

c) 有条件时，也可采用以下方法舍弃数据：先从最小测值逐个舍弃，每舍弃一个值，即对剩下的数据作正态检测，直至所余数据符合正态分布，再按 2)、3)、4) 所述方法进行计算和判断。

5) 相邻异常值的判断：当按上述方法进行单个测值异常值判断结束后，宜再进行相邻二点测值的判断。相邻点临界值 X_{L2} 按照公式 (8.5.4-4) 计算。若结构或构件中任何相邻的二个测点值均同时小于或等于 X_{L2} ，则可判该相邻二测点测值均为异常值。

$$X_{L2} = m_X - K_2 S_X \quad (8.5.4-4)$$

式中 m_X 、 S_X —— 单点判断中最后一次统计计算的平均值与标准差；

K_2 —— 相邻点异常值判定系数，其值根据所有测点总数 n ，查表 8.5.4-1 (分一般结构与孔中测量两种情况)。

注 3：用以统计判断的测值可以是声速，也可以是振幅或频率，都可按以上方法获得判断结果。考虑到振幅及频率测值测试误差较大，在最后确定某测点是否属异常值时，宜以声速的判断结果为主，以振幅或频率的判断结果为辅，并参考波形的观察结果综合确定。

注 4：当所测结构缺陷范围较大，难以保证有足够数量的正常测点来统计平均值和标准差时，可另在同类型的其他正常结构上测量 30 个以上测点，进行平均值与标准差的统计，再来对该结构进行计算判断。

表 8.5.4-1 异常值判定系数表

K	n									
	10	12	14	16	18	20	22	24	26	
K_1	1.18	1.38	1.47	1.53	1.59	1.64	1.69	1.73	1.77	
K_2	一般结构	1.00	1.06	1.11	1.15	1.19	1.22	1.25	1.27	1.29

	孔中测量	0.76	0.83	0.88	0.93	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09
28	30	32	34	36	38	40	42	44	44	46
1.80	1.83	1.86	1.89	1.92	1.94	1.96	1.98	2.00	2.00	2.02
1.31	1.33	1.35	1.37	1.38	1.40	1.41	1.42	1.44	1.44	1.45
1.11	1.13	1.15	1.17	1.19	1.20	1.22	1.23	1.24	1.24	1.26
48	50	55	60	65	70	75	80	85	85	90
2.04	2.05	2.09	2.13	2.16	2.19	2.22	2.24	2.27	2.27	2.29
1.46	1.47	1.50	1.52	1.54	1.56	1.57	1.59	1.61	1.61	1.62
1.27	1.28	1.31	1.33	1.36	1.38	1.39	1.41	1.43	1.43	1.44
95	100	105	110	115	120	130	140	150	150	160
2.31	2.33	2.34	2.36	2.38	2.40	2.42	2.45	2.48	2.48	2.50
1.63	1.64	1.66	1.67	1.68	1.69	1.71	1.72	1.74	1.74	1.76
1.46	1.47	1.48	1.49	1.51	1.52	1.54	1.56	1.57	1.57	1.59
170	180	190	200	220	240	260	280	300	300	350
2.52	2.54	2.56	2.58	2.61	2.64	2.66	2.69	2.71	2.71	2.76
1.77	1.78	1.79	1.81	1.83	1.85	1.87	1.88	1.90	1.90	1.93
1.61	1.62	1.63	1.64	1.67	1.69	1.71	1.73	1.74	1.74	1.78
注：n 为测点总数。										

2 异常点位置图。按比例绘制构件侧面轮廓图，将实测的各测点参数值点绘在图上。以阴影线勾画出异常点的位置及范围。若是孔中测量，则绘制出沿孔深变化的测值变化图，并标出 X_{L1} 、 X_{L2} 二条临界值线。

3 缺陷的判定。经上述方法确定的异常值，表明该测点内部混凝土情况异常。最后应结合结构施工过程的实际情况、施工记录、异常点所处部位判定缺陷的类型、范围及严重程度。

4 缺陷尺寸的估计。当缺陷形状近于圆球或圆柱体，且缺陷类型为空洞或虽不是空洞，但缺陷介质的声速仅为该结构混凝土声速的 0.7 倍以下时，可按以下方法估算缺陷的半径 r 。设半径为 r 的圆形缺陷的中心位于测距为 l 的结构物一侧，距该侧面距离为 l_1 如图 8.5.4 所示。声波在缺陷附近正常混凝土处的声时为 t_n ，在缺陷中心处的声时（声波绕缺陷传播）为 t_f 。按照公式 (8.5.4-5)、(8.5.4-6) 计算 X 、 Y ，根据 X 、 Y 值查表 8.5.4-2 可得 Z 值。再按照公式 (8.5.4-7) 计算缺陷半径 r 。

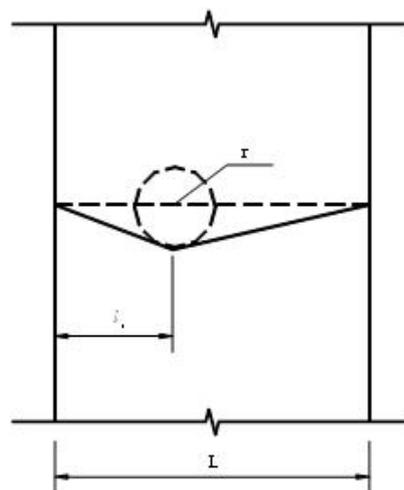


图 8.5.4 缺陷尺寸及位置

$$\frac{(t_f - t_n)}{t_n} \times 100 = X \quad (8.5.4-5)$$

$$\frac{l_1}{l} = Y \quad (8.5.4-6)$$

$$r = l \cdot Z \quad (8.5.4-7)$$

表 8.5.4-2 缺陷尺寸估算表

Y	Z												
	0.05	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
X (%)													
0.10	1.42	3.77	6.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.15	1.00	2.56	4.06	5.97	8.39	-	-	-	-	-	-	-	-
0.20	0.78	2.02	3.18	4.62	6.36	8.44	10.9	13.9	-	-	-	-	-
0.25	0.67	1.72	2.69	3.90	5.34	7.03	8.98	11.2	13.8	16.8	-	-	-
0.30	0.60	1.53	2.40	3.46	4.73	6.21	7.91	9.38	12.0	14.4	17.1	20.1	23.6
0.35	0.55	1.41	2.21	3.19	4.35	5.70	7.25	9.00	10.9	13.1	15.5	18.1	21.0
0.40	0.52	1.34	2.09	3.02	4.12	5.39	6.84	8.48	10.3	12.3	14.5	16.9	19.6
0.45	0.50	1.30	2.03	2.92	3.99	5.22	6.62	8.20	9.95	11.9	14.0	16.3	18.8
0.50	0.50	1.28	2.00	2.89	3.94	5.16	6.55	8.11	9.84	11.8	13.3	16.1	18.6

8.6 混凝土芯样强度试验

8.6.1 本试验用于测定混凝土圆柱体芯样试件的抗压强度与劈裂抗拉强度。

8.6.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 试验机应符合 5.2 节的规定；
- 2 垫条应符合 5.3 节的规定。
- 3 锯石机；
- 4 磨石机；
- 5 卡尺、钢尺等。

8.6.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 将混凝土芯样截取为长径比（长度与直径的比值）为 1.0 的试件，测定抗压强度与劈裂抗拉强度，每组三个试件。如需测定轴心抗压强度，应截取长径比为 2 的试件。从混凝土建筑物中钻取芯样时，芯样的直径不应小于骨料最大粒径的三倍。如难以满足要求，芯样的直径至少应大于骨料最大粒径的两倍。芯样不应含有钢筋。

2 将试样两端在磨石机上磨平，亦可用水泥净浆、水泥砂浆、聚合物水泥砂浆、环氧胶泥、硫磺胶泥或找平，浆体找平层厚度不应大于 1.5mm，砂浆找平层厚度不应大于 5mm，找平层厚度计入试件高度。端面平整度偏差不应大于直径的 0.1%，两端面与中轴线的垂直度偏差不应大于 1°。试件四周不应有缩颈、鼓肚或其他缺陷（如裂缝等）。

3 供劈裂抗拉试验用的试件，还应将其侧面的两个相对母线处磨平，磨平面的宽度约 15mm，作安放劈裂垫条用。

4 在试件侧面不同位置量测长度两次（准确至 1mm，下同），取二个测值的平均值作为试件的长度。在试件中部量测直径两次（两次测量方向相垂直），取二个测值的平均值作为试件的直径。

- 5 在试验前，将试件泡水 2 天。

6 然后分别按 5.2 节及 5.3 节的规定，测定芯样试件的抗压强度和劈裂抗拉强度（垫条长度应大于母线长）。抗压试验以试件的两个端面作为承压面，劈裂抗拉强度试验在试件侧面两个相对母线（预先磨平）处放置劈裂垫条。改成端面劈拉。

8.6.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 抗压强度按照公式(8.6.4-1)计算,以三个试件测值的平均值作为试验结果(修约间隔 0.1MPa)。

$$f_c = \frac{4P}{\pi D^2} = 1.273 \frac{P}{D^2} \quad (8.6.4-1)$$

式中 f_c —— 抗压强度, MPa;

P —— 破坏荷载, N;

D —— 试件直径, mm。

2 劈裂抗拉强度按照公式(8.6.4-2)计算,以三个试件测值的平均值作为试验结果(修约间隔 0.01MPa)。

$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi DL} = 0.637 \frac{P}{DL} \quad (8.6.4-2)$$

式中 f_{ts} —— 劈裂抗拉强度, MPa;

L —— 试件长度, mm。

3 将长径比为 1.0 的芯样试件抗压强度换算成 150mm×150mm×150mm 立方体的抗压强度, 应按照公式(8.6.4-3)计算(修约间隔 0.01MPa)。

$$f_{cc} = A \times f_c \quad (8.6.4-3)$$

式中 f_{cc} —— 150mm×150mm×150mm 立方体试件的抗压强度, MPa;

f_c —— 长径比为 1.0 的芯样试件抗压强度, MPa;

A —— 换算系数, 见表 8.6.4。其他尺寸芯样的换算系数应通过对比试验确定。

表 8.6.4 芯样和 150mm×150mm×150mm 立方体试件之间抗压强度换算系数

芯样尺寸 (mm)	Φ100×100	Φ150×150	Φ200×200
换算系数 A	1.00	1.04	1.18

8.7 混凝土与岩基和碾压混凝土层间原位直剪试验（平推法）

8.7.1 本试验用于检测坝体部位抵抗剪切的性能, 验证坝体抗滑稳定参数。适用于坝体混凝土与岩体接触面, 碾压混凝土自身和层间结合的原位抗剪断强度试验。

8.7.2 试验采用的加荷、传力、量测系统仪器设备及其滚轴排摩擦系数率定等, 按 SL 264 规定进行。

8.7.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 试验布置按以下规定执行。

1) 在构筑物上选定具代表性部位和试验层面, 宜在施工试验段或坝体上选定, 选定试验区的

面积不应少于 $2\text{m}\times 8\text{m}$ ，试体需布置在同一层面上，数量（4~5）块。

- 2) 每块试体的剪切面积不应小于 $500\text{mm}\times 500\text{mm}$ ，试体间净距不应少于试体最小边长的 1.5 倍。
- 3) 剪切面以上试体的高度略大于试体边长的 $2/3$ 为宜。
- 4) 进行试验布置时，施加于试体面上的水平推力方向，应与结构受力方向一致。

2 试体开挖制备与养护按以下规定执行。

- 1) 试体开挖时龄期不应少于 21d。采用人工挖凿试验区内试体外围混凝土，严防试体扰动。
- 2) 试体开挖深度应至试验层面，但受水平推力的试验层面应开挖至层面以下，并留有安装千斤顶的足够空间。千斤顶应严格定位，中心线应平行预定剪切面，且与剪切面的距离不应大于剪切方向试件边长的 5%。试体开挖后的尺寸偏差宜不大于 $\pm 20\text{mm}$ ，并用与试块强度相近的水泥砂浆抹平。在做层缝抗剪时，在剪切面周边留约 10mm 宽的剪切缝。
- 3) 完成试体与试验区开挖后，应向试坑充水或回填湿砂，作好试体养护与保护，直至规定龄期前，开始仪器设备安装时，再行清除。同时应有继续保持试体及其剪切面处于水饱和状态的措施。

3 试体承载面的表面处理、加荷、传力、量测系统的设备、仪器安装、布置、调试、检查与具体试验方法，按 SL 264 规定进行。

8.7.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 试验结果主要是层面抗剪断强度参数，即 f' 、 c' ，按 4.7 节的规定处理。

2 试验结果整理时，应搜集并给出剪切面混凝土的配合比、拌和物质量、振实质量的检测结果；施工层厚、铺振方式、设备型号、振实工艺、层面处理、间歇时间、入仓温度、施工日期、气候以及试验区布置图、剪切面描述图、试验装置及典型剪切面破坏状况照片等。

8.8 混凝土中钢筋半电池电位检测

8.8.1 本试验用于本方法适用于现场无破坏检测海洋环境水工钢筋混凝土构筑物中钢筋半电池电位，以确定钢筋腐蚀性状。本法不适用于混凝土已饱水或接近饱水的构件。

8.8.2 仪器设备应包括以下几种。

1 自制铜—硫酸铜参比电极。用一内径不小于 20mm，长度不小于 100mm 的玻璃管或刚性塑料管，下端塞一软木塞，上端用橡皮塞或火漆封闭。管内灌满饱和硫酸铜溶液（有一定量硫酸铜晶体积聚在溶液底部时，即认为此溶液已饱和）。通过橡皮塞在溶液中插入一根直径不小于 5mm 的紫铜棒。紫铜棒预先经过擦锈、去脂。在电极下端软木塞外面用海绵包裹。测量前电极下端浸在硫酸铜溶液中备用；

- 2 直流电压表，量程 2000mV，最小分刻度 10mV，输入阻抗不应低于 $10\text{M}\Omega$ ；

- 3 电瓶夹头一只；导线，总长不大于 100m。

8.8.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 在构件表面以网格形式布置测点。测点纵、横向间距宜为（300~500）mm。当相邻两测点测值代数值之差超过 150mV 时，应适当缩小测点间距。

2 在构筑物表面，与里面钢筋网电连接的露头钢筋上，用电瓶夹头引出导线。钢筋与夹头电连接处，预先用砂布除锈、擦光。引出的导线接电压表的正极。若无可供电连接的露头钢筋时，在构筑物表面某一处凿去混凝土保护层，使钢筋暴露，并引线。

3 从铜-硫酸铜参比电极的紫铜棒上引出导线，接电压表的负极。

4 将铜-硫酸铜参比电极下端依次放置在各测点处，同时电极纵轴线保持与构件表面垂直，读出并记录各测点的钢筋半电池电位，精确至 10mV（如图 8.8.3）。测量时，半电池电位读数不应随时间变化或摆动，5min 内电位读数变化应在 ±20mV 以内，否则应用浸透硫酸铜溶液的海绵预先在各测点预湿。在混凝土较干的情况下，可用喷淋等方法预湿整个混凝土表面。使读数稳定。若用以上预湿方法，未能使电位稳定在 ±20mV 以内，则不能使用本法。在水平向或垂直向上测量时，要确保参比电极中硫酸铜溶液始终与软木塞、紫铜棒接触。

8.8.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 绘制构件表面钢筋半电池等电位图，表征构件中可能发生钢筋腐蚀活动的区域。在一比例适当的构件表面图上，点绘出各测点的位置和测值。通过电位等值点和内插等值点，画等电位线。等电位线的最大间隔应为 100mV。

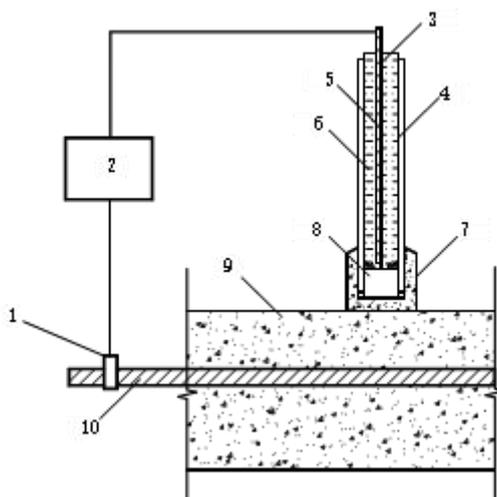
2 绘制累积频率图，给出构件中钢筋腐蚀活动区域的占比。将所有的半电池电位，按其负值从小到大排列（电位相同的测点之间，可任意排列次序），并连续编号。按（8.8.4）式计算各测值的累积频率，累积频率图的纵坐标为半电池电位（mV），横坐标为累积频率（%）。根据各测点的半电池电位和累积频率，在图上绘出累积频率曲线。

$$f_x = \frac{r}{\sum n+1} \times 100 \quad (8.8.4)$$

式中 f_x —— 所测值的累积频率，%；

r —— 各个半电池电位的排序；

$\sum n$ —— 总测值个数。



1—电瓶夹；2—电压表；3—橡皮塞；4—紫铜棒；5—刚性塑料管；
6—饱和硫酸铜溶液；7—海绵；8—软木塞；9—混凝土；10—钢筋

图 8.8.3 测定钢筋半电池电位

3 结果评定应按照以下规定执行。

- 1) 半电池电位正向大于-200mV, 则此区域发生钢筋腐蚀概率小于 10%;
- 2) 半电池电位负向大于-350mV, 则此区域发生钢筋腐蚀概率大于 90%;
- 3) 半电池电位在 (-200~-350) mV 范围内, 则此区域发生钢筋腐蚀性状不确定。

8.9 海砂、混凝土拌和物中氯离子含量的快速检测

8.9.1 本试验用于现场快速检测海砂或混凝土拌和物中的氯离子含量, 或检测其氯离子含量是否超出规范所规定的允许值。

8.9.2 仪器设备应包括以下几种。

1 氯离子选择电极: 测量范围: ($5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2}$) mol/L, pH 范围: 2~12, 响应时间: ≤ 2 min, 温度范围: (5~35) °C;

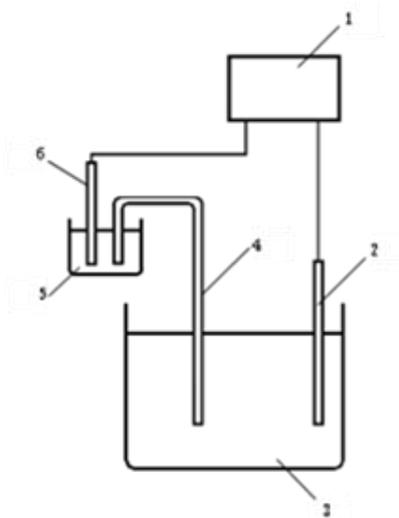
2 参比电极: 饱和甘汞电极, 盐桥充 0.1mol/L KNO_3 溶液或 0.1mol/L NaNO_3 溶液;

3 电位测量仪: 分辨值为 mv 的酸度计、恒电位仪、伏特计或电位差计, 输入阻抗不小于 $7\text{M}\Omega$ 。

8.9.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 建立电位-氯离子浓度关系曲线应按以下步骤进行。

- 1) 把氯离子选择电极放入由蒸馏水 (或去离子水) 配制的 0.001mol/L NaCl 溶液中活化 2h;
- 2) 用蒸馏水 (或去离子水) 配制 5.5×10^{-3} mol/L 和 5.5×10^{-4} mol/L 两种 NaCl 标准溶液, 各 250mL;
- 3) 将氯离子选择电极和甘汞电极 (通过盐桥), 插入 (20 ± 2) °C 的两种 NaCl 标准溶液中, 经 2min 后用电位测量仪测两极之间电位值 (见图 8.9.3)。将两值标点在 $E-IgC$ 半对数坐标上, 其连接线即为电位-氯离子浓度关系曲线。



1—电位测量仪; 2—氯离子选择电极; 3—被测液; 4—盐桥; 5—KCl 溶液; 6—甘汞电极

图 8.9.3 测量示意图

2 检测海砂或混凝土的氯离子含量是否超过规范规定的允许值时，应制备氯离子浓度允许限值的标准溶液 250mL。标准溶液的 NaCl 浓度按照公式 (8.9.3) 计算，按前述同样步骤测得 20℃ 标准溶液的电极电位值。

$$C_{NaCl} = \frac{K}{3.55\beta} \quad (8.9.3)$$

式中 C_{NaCl} —— NaCl 标准溶液的浓度，mol/L；

K —— 规范规定的氯离子浓度允许限值，%，按水泥用量计；

β —— 混凝土的水胶比。

3 海砂中氯离子含量测定

- 1) 把氯离子选择电极放入 0.001mol/L NaCl 溶液中活化 1h；
- 2) 按 2.6 节的规定测定海砂表面含水率 ω_{WC} ；
- 3) 称取 200g 海砂样品置于 1000mL 磨口瓶中，加入 250mL 蒸馏水（或去离子水），加盖后摇晃 1min，静置半小时，并按此顺序再重复一次。将上部清液移至锥形瓶中。并用温度计测量清液的温度；
- 4) 将氯离子选择电极和甘汞电极（通过盐桥）插入水中，用电位测量仪测得电位值。按温度每增加 1℃，电位向负移动 1mV 的比率对电位值进行温度校正，并从 E—lg C_{NaCl} 曲线上推求得水中氯离子浓度。

4 混凝土拌和物中氯离子含量测定

- 1) 把氯离子选择电极放入以蒸馏水（或去离子水）配制的 0.001mol/L NaCl 溶液中活化 1h；
- 2) 从混凝土拌和物中取出 600g 左右砂浆，放入烧杯中，量测温度，插入氯离子选择电极和甘汞电极（通过盐桥），测定其电位，并进行温度校正；
- 3) 从 E—lg C 曲线推算得相应拌和水的氯离子浓度。

8.9.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 以水泥质量计的海砂氯离子含量按照公式 (8.9.4-1) 计算。

$$P_s = C_{Cl} \times \frac{(1.25 + \omega_{WC})(1 + \omega_{WC})}{1000N} \times 35.5 \times 100 \quad (8.9.4-1)$$

式中 P_s —— 以水泥质量计的海砂中氯离子含量，%；

C_{Cl} —— 水中氯离子浓度，mol/L；

ω_{WC} —— 海砂表面含水率，%；

N —— 按给定混凝土配合比计算的灰砂比。

- 2 混凝土氯离子含量按量按照公式 (8.9.4-2) 计算。

$$P_c = C_{Cl} \times \frac{\beta}{1000} \times 35.5 \times 100 \quad (8.9.4-2)$$

式中 P_C —— 混凝土拌和物中氯离子含量，%，以水泥质量计；

C_{Cl^-} —— 相应拌和水中氯离子浓度，mol/L；

β —— 混凝土的水胶比。

3 检测海砂或混凝土的氯离子含量是否超过规范规定允许限量时，将测得电位值经温度校正后与相应氯离子允许限量标准溶液中电位值相比较，若前者较后者小，表明其氯离子含量已超过规范允许值。

4 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 0.01%）。

9 水工砂浆

9.1 砂浆室内拌和方法

- 9.1.1 本方法用于为试验提供砂浆拌和物。
- 9.1.2 仪器设备应包括以下几种。
- 1 砂浆搅拌机应符合 JG/T 3033 的规定。
 - 2 其余设备应符合 4.1 节的规定。
- 9.1.3 砂浆配合比设计按照附录 B 的规定执行。
- 9.1.4 砂浆室内拌和的基本要求应按照 4.1.3 条的规定执行。
- 9.1.5 砂浆室内拌和的操作步骤应按照的 4.1.4 条的规定执行。

9.2 砂浆稠度试验

- 9.2.1 本试验用于测定砂浆的流动性，或施工时控制砂浆用水量，适用于稠度小于 120mm 的砂浆。
- 9.2.2 仪器设备应包括以下几种。

1 砂浆稠度仪：由试锥、容器和支座三部分组成，如图 9.2.2 所示。试锥高度为 145mm，锥底直径为 75mm，试锥连同滑杆的质量为 300g。盛砂浆容器由钢板制成，筒高为 180mm，锥筒上口内径为 150mm。支座分底座、支架及稠度显示盘三个部分，由铸铁、钢及其他金属制成。应及时用少量润滑油轻擦滑杆，再将滑杆上多余的油用吸油纸擦净，使滑杆能自由滑动。

2 捣棒：直径 12mm，长 250mm，一端为弹头形的金属棒。

3 辅助器具：秒表等。

9.2.3 试验步骤应按以下规定执行。

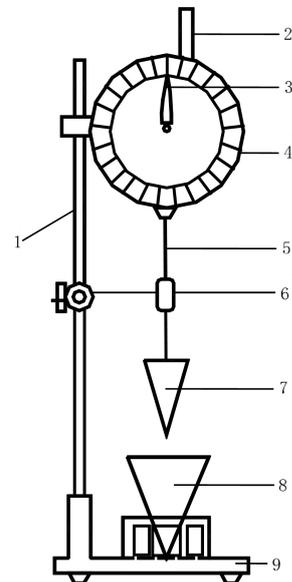
1 按 9.1 节的规定制备砂浆。

2 将圆锥容器和试锥表面用湿布擦干净。检查滑杆滑动是否顺畅。

3 将砂浆拌和物一次装入容器，使砂浆表面低于容器口约 10mm 左右，用捣棒自容器中心向边缘插捣 25 次，

然后轻轻地将容器摇动或敲击（5~6）次，使砂浆表面平整，随后将容器置于稠度测定仪的底座上。

4 拧开试锥滑杆的制动螺丝，向下移动滑杆，当试锥尖端与砂浆表面刚接触时，拧紧制动螺丝，使齿条测杆下端刚接触滑杆上端，并将指针对准零点。



1—支架；2—齿条测杆；3—指针；
4—稠度显示盘；5—滑杆；6—固定螺钉；
7—试锥；8—圆锥容器；9—底座

图 9.2.2 砂浆稠度仪示意图

5 拧开制动螺丝，同时计时，经 10s 立即拧紧制动螺丝，将齿条测杆下端接触滑杆上端，从刻度盘上读出试锥下沉深度（准至 1mm）即为砂浆的稠度值。

6 圆锥形容器内的砂浆只允许测定一次稠度，重复测定时，应重新取样。

9.2.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔为 1mm）。

2 两次测值之差如大于 20mm，则应另取砂浆搅拌后重新测定。

9.3 砂浆泌水率试验

9.3.1 本试验用于测定水泥砂浆的泌水率。

9.3.2 仪器设备应包括以下几种。

1 容量筒：容积 2L（直径与高大至相等），带盖，也可用玻璃板。

2 振动台应符合 4.1 节的规定。

3 跳桌：跳桌圆盘直径（300±1）mm；跳动部分总质量（3.45±0.02）kg；圆盘跳动落距（10±0.1）mm。

4 量筒：100mL 带塞量筒。

5 直径 12mm，长 250mm，一端为弹头形的金属捣棒、吸液管等。

9.3.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 9.1 节的规定制备砂浆。

2 将容量筒内壁润湿并称其质量。

3 将拌制好的砂浆试样分别装入两个容量筒内，当砂浆的稠度小于 60mm 时，一次装料，采用振捣法，即将装有砂浆的容量筒放在振动台上振 15s 或在跳桌上跳 120 次；当砂浆稠度在 60mm 以上时采用插捣法。此时，砂浆分两层装入容量筒，每层用捣棒均匀插捣 25 次。捣实后的砂浆表面离筒口约 10mm，分别称取容量筒和砂浆总质量。

4 将容量筒盖好盖，静置于无振动处。

5 自静置时起，30min 内，每隔 15min 测一次泌水量，以后每 30min 测一次泌水量，直到连续三次吸不出水为止。

6 吸取泌水时将容量筒一侧垫高，使泌水集中，用吸管吸出泌水注入带盖量筒内，记录每次泌水的累计量。每次吸完水后，再把容量筒轻轻放平，不应扰动砂浆。

9.3.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 泌水率按照公式（9.3.4）计算。

$$B_m = \frac{W_b}{(W/G)G_1} \times 100\% \quad (9.3.4)$$

式中 B_m —— 泌水率；

W_b —— 泌水总质量，g；

W —— 一次拌和的总用水量，g；

G —— 一次拌和的砂浆总质量, g;

G_1 —— 试样质量, g。

- 2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔为 1%)。
- 3 需要时可绘制时间与砂浆泌水累计量的关系曲线。

9.4 砂浆表观密度试验及含气量计算

9.4.1 本试验用于测定砂浆拌和物单位体积质量及计算其含气量。

9.4.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 砂浆容量筒: 容积 1L, 直径 108mm, 高 109mm。
- 2 天平: 分度值不大于 0.1g。
- 3 砂浆稠度仪应符合 9.2 节的规定。
- 4 振动台、跳桌应符合 9.3 节的规定。
- 5 捣棒: 直径 12mm、长 250mm、一端为弹头形金属棒。

9.4.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 按 9.1 节的规定制备砂浆。
- 2 按 9.2 节的规定测定稠度。

3 称空容量筒质量, 将拌和好的砂浆装入容量筒内并稍有富余。当砂浆稠度小于 60mm 时, 采用振捣法, 即将装有砂浆的容量筒放在振动台上振 15s, 或在跳桌上跳 120 次; 当砂浆稠度大于 60mm 时, 用捣棒人工插捣 25 次。

- 4 捣实后刮去多余砂浆, 抹净筒壁, 称出筒及砂浆总质量。
- 5 每种砂浆测定两次。

9.4.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 砂浆表观密度按照公式 (9.4.4-1) 计算。

$$\rho = \frac{G_2 - G_1}{V} \times 1000 \quad (9.4.4-1)$$

式中 ρ —— 砂浆表观密度, kg/m^3 ;

G_1 —— 容量筒质量, kg;

G_2 —— 容量筒及砂浆总质量, kg;

V —— 容量筒的容积, L。

- 2 砂浆的含气量按照公式 (9.4.4-2) 计算。

$$A = \frac{\rho_t - \rho}{\rho_t} \times 100\% \quad (9.4.4-2)$$

$$\rho_t = \frac{C+S+W}{C/\rho_c + S/\rho_s + W/\rho_w} \quad (9.4.4-3)$$

式中 A —— 砂浆含气量, %;

ρ_t —— 不计含气时砂浆的理论表观密度, kg/m^3 。

C 、 S 、 W —— 分别为配制试验砂浆时水泥、砂、水的质量, kg ;

ρ_c 、 ρ_s 、 ρ_w —— 分别为水泥密度、砂的饱和面干表观密度和水的密度, kg/m^3 。

3 砂浆表观密度、含气量均以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔分别为 $10\text{kg}/\text{m}^3$ 、 0.1%)。

9.5 砂浆凝结时间试验

9.5.1 本试验用于以贯入阻力法测定水泥砂浆的初凝时间和终凝时间。

9.5.2 仪器设备包括贯入阻力仪、砂浆桶、振动台、捣棒等应符合 4.9 节的规定。

9.5.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 5.1 节的规定制备砂浆拌和物, 加水完毕开始计时。砂浆量应满足同时装满 3 只砂浆桶。

2 将砂浆分别装入三只砂浆筒中, 砂浆表面应低于筒口约 10mm , 经振动台振动或人工插捣 35 次使其密实。编号后置于温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的环境中, 加覆盖物防止水分散失。

3 待砂浆表面即将失去水光时开始测试。按 4.9 节的规定, 在贯入阻力仪上用 20mm^2 截面积的测针测试贯入阻力, 以不在同一试模中的三个测点贯入阻力的平均值作为该时刻的贯入阻力 (P , 精确到 1N), 直至砂浆试样的贯入阻力 P 大于 560N (即贯入阻力值大于 28MPa) 为止。

9.5.4 试验结果处理按照 4.9 节的规定执行。

9.6 砂浆吸水率试验

9.6.1 本试验用于测定硬化水泥砂浆的吸水率。

9.6.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试模与 9.7 节相同。

2 天平: 分度值不大于 0.1g ;

3 鼓风干燥箱: 可控制温度在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

9.6.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 9.1 节的规定制备砂浆拌和物, 按 9.7 节的规定制备和养护砂浆试件。

2 养护至规定试验龄期, 取出试件浸泡在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中至少 48h , 然后用拧干的湿毛巾吸干试件表面多余水至饱和面干状态, 并立即称取试件质量。继续浸泡 24h 后, 按前述方法再次称重。直至连续两次称取的质量变化小于 0.1% 时, 停止浸泡。记录最后一次试件质量 (m_s , 精确到 0.1g , 下同)。

3 将饱和面干状态试件置于温度为 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 48h , 冷却至室温后称取试件质量。继续烘 24h 后, 按前述方法再次称重。直至连续两次称取的质量变化小于 0.2% 时, 停止烘干。记录最后一次试件质量 (m_d)。

9.6.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 砂浆试件的吸水率按照公式 (9.6.4) 计算。

$$A_w = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (9.6.4)$$

式中 A_w —— 砂浆的饱和面干吸水率；

m_s —— 饱和面干砂浆试件的质量，kg；

m_d —— 干燥砂浆试件的质量，kg；

2 以三个试件测值的平均值作为试验结果（修约间隔为 0.1%）。

9.7 砂浆抗压强度试验

9.7.1 本试验用于测定砂浆抗压强度。

9.7.2 仪器设备应包括以下几种。

1 压力机应符合 5.2 节的规定。

2 试模：边长 70.7mm 的立方体金属试模。试模应具有足够的刚度并拆装方便。试模的内表面应机械加工，其平整度偏差不应超过边长的 0.05%。组装后各相邻面的垂直度偏差不应超过 $\pm 0.5^\circ$ 。

3 捣棒直径 12mm、长 250mm，一端为弹头形的金属捣棒。

9.7.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 9.1 节的规定制备砂浆。检测施工砂浆强度，应从现场取样。

2 在试模内涂一薄层矿物油，装入砂浆并高出模口，用捣棒插捣 25 次。如采用振动台成型时，可振动 15s；如采用跳桌成型时，跳动 120 次。试验以三个试件为一组。

3 砂浆成型后经 (1~2) h 用镏刀刮去多余砂浆，并抹平试件表面，编号，在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 温度环境下停置一昼夜 (24 ± 2) h，必要时，可适当延长时间，但不应超过两昼夜。试件拆模后，应在标准养护室养护。

4 养护至规定试验龄期，取出试件并擦净表面，立即进行抗压试验。待压试件需用湿布覆盖，试件表面不应干燥。

5 测量尺寸，并检查其外观。试件尺寸测量准至 1mm，并据此计算试件的承压面积。如实测尺寸与公称尺寸之差不超过 1mm，可按公称尺寸进行计算。

6 将试件放在试验机下压板正中间，上下压板与试件之间宜垫以钢垫板。加压方向应与试件捣实方向垂直。开动试验机，当上压板与上垫板行将接触时，如有明显偏斜，应调整球座，使试件均匀受压。

7 以 $(0.3 \sim 0.5)$ MPa/s 速度连续而均匀地加荷。当试件接近破坏而开始迅速变形时，停止调整试验机油门，直至试件破坏，记录破坏荷载。

9.7.4 试验结果处理按 5.2 节的规定执行。

9.8 砂浆劈裂抗拉强度试验

9.8.1 本试验用于测定砂浆劈裂抗拉强度。

9.8.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 压力机、试模、捣棒应符合 9.7 节的规定。
- 2 钢垫条：直径 4mm，长 75mm。

9.8.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 试件的成型、养护应符合 9.7 节的规定。以三个试件为一组。
- 2 到达规定试验龄期时，从养护室取出试件，擦净表面，测量尺寸。试验时，试件与垫条的位置参照 5.3 节的规定。开动试验机，以 0.08MPa/s 的速度连续而均匀地加荷（不应冲击）。当试件接近破坏时应停止调整试验机油门直至试件破坏，记录破坏荷载。

9.8.4 试验结果处理按 5.3 节的规定执行。

9.9 砂浆粘结强度试验

9.9.1 本试验用于测定水泥砂浆与砂浆（或其他材料）间的粘结强度。

9.9.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 试模：抗拉试模见图 9.9.2-1，由两半拼装，可以拆卸。腰中内表面宽度为 (25 ± 0.1) mm，试模等厚，厚度为 (25 ± 0.2) mm。
- 2 拉力试验机：小吨位拉力试验机或万能试验机（10kN），其有效行程应满足试件尺寸要求。
- 3 拉伸夹具：见图 9.9.2-2。
- 4 刮刀：断面为边长 26mm 的正三角形，包括两个手柄总长约 320mm。

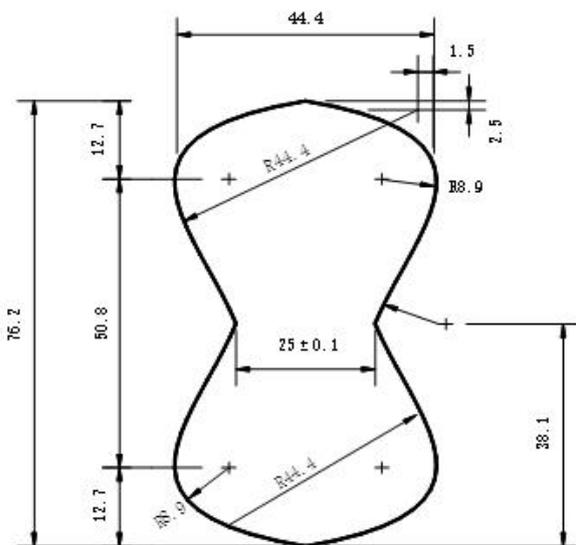


图 9.9.2-1 “8”字形试模（单位：mm）

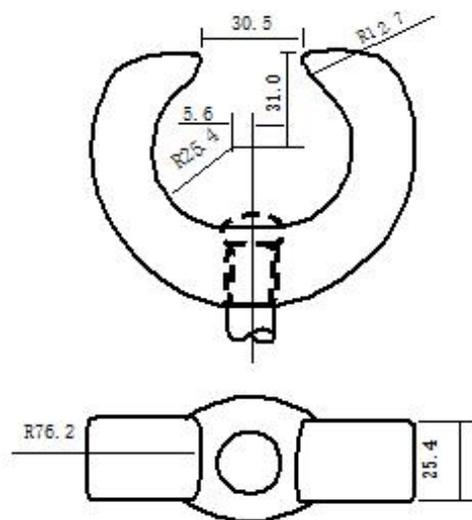


图 9.9.2-2 拉伸夹具（单位：mm）

9.9.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 成型前将试模擦净，模的内壁涂上脱模剂，模底面与底板接触部位涂上黄油。

2 按 9.1 节的规定制备砂浆。

3 用抗压强度不低于 30MPa 的砂浆，成型三个 8 字型试件，胶砂入模后在水泥胶砂振动台上振 15s，1h 后用刮刀将多余胶砂刮去，移入标准养护室内养护 24h 后拆模，并继续在标准养护室中养护 13d。

4 制备粘结试件前，取出水泥砂浆试件，在试件长轴线上取中点划一条直线，用锯条沿线锯出 1mm 深的沟槽，然后用一平刀垂直于沟槽，用榔头向下击打刀背将试件切开。将六个半 8 字型试件的粘结面，用丙酮去脂，用粗砂布（2 $\frac{1}{2}$ 号）擦毛，再用毛刷刷去面上的微粒和粉末。

5 将六个半 8 字型试件置于周壁涂有脱模剂的 8 字型抗拉试模内，然后将新拌砂浆（或其他材料）浇入另一半试模内，在水泥胶砂振动台上振 15s。1h 后用刮刀将多余的砂浆刮去，移入标准养护室养护 24h 后拆模，并继续放入标准养护室养护至规定时间。

6 试验前，应检查仪器夹具是否清洁。将试件放入夹具内时，位置必须端正，并注意夹具对试件不应受力，试件与夹具间不应有砂粒存在。试件安装好后进行加荷，加荷速度控制在 100N/s 左右为宜，直至试件被拉断。

9.9.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 砂浆试件的粘结强度按照公式（9.9.4）计算。

$$f_b = \frac{P}{A} \quad (9.9.4)$$

式中 f_b —— 粘结强度，MPa；

P —— 断裂荷载，N；

A —— 受拉面积，mm²。

2 每组六个试件中剔除最大最小的两个值，以其余四个值的平均值作为粘结强度的试验结果（修约间隔为 0.01MPa）。

9.10 砂浆轴向拉伸试验

9.10.1 本试验用于测定水泥砂浆极限拉伸值、轴向抗拉强度和抗拉弹性模量。

9.10.2 仪器设备应包括以下几种。

1 试验机：拉力试验机或万能试验机，最大荷载 10kN，其有效行程应满足试件尺寸要求。

2 试模：成型试件呈哑铃形，直线段长度为 100mm，宽度为（25±0.10）mm，试件等厚，厚度为（25±0.25mm）。哑铃形试模由两件拼装，内模尺寸见图 9.10.2。

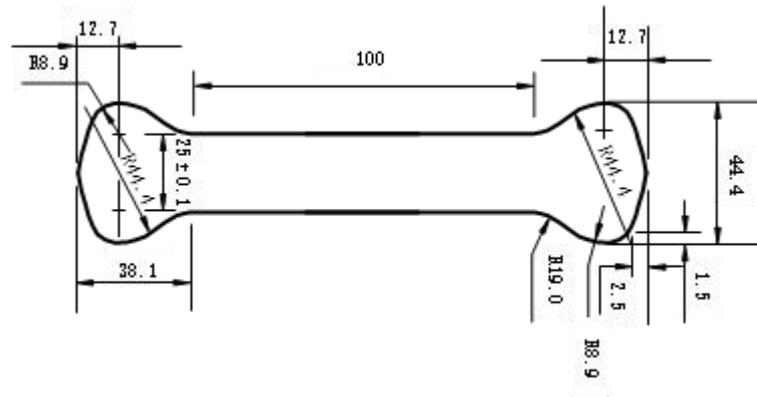


图 9.10.2 哑铃形试模内模尺寸 (单位: mm)

- 3 拉伸夹具: 见图 9.9.2-2。
- 4 应变量测仪器: 电阻应变仪二台。
- 5 电阻应变片 (长度不小于 25mm), 502 粘结胶等。

9.10.3 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 按 9.1 节的规定拌制砂浆, 并成型砂浆轴向拉伸试件, 试件以六个为一组。
- 2 到达规定试验龄期, 将试件从养护室取出。室内气干表面后, 在试件左右两侧面中部粘贴电阻应变片。从试件取出至试验完毕, 不宜超过 4h。
- 3 试件贴好电阻应变片后, 拉伸夹具安装在试验机上, 并将试件装入夹具内。
- 4 开动试验机, 进行两次预拉。预拉的荷载约相当于破坏荷载的 25%~30%。预拉时, 应测读应变值, 需要时, 调整荷载传递装置使偏心率不大于 20%。偏心率 e 按照公式 (9.10.3) 计算。

$$e = \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \right| \times 100\% \quad (9.10.3)$$

式中 e —— 偏心率;

ε_1 、 ε_2 —— 为试件两侧的应变值。

- 5 预拉完毕后, 重新调整测量仪器进行正式测试。拉伸时的加荷速度控制在 0.24kN/min。每加荷 0.1kN 或 0.2kN, 测读并记录变形值, 直至试件破坏 (当荷载加到破坏荷载的 90%左右时, 为防止突然断裂, 应加密测读变形值), 记录破坏荷载和断裂位置。

9.10.4 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 极限拉伸值的确定方法同 5.5.4 条的规定。
- 2 轴向抗拉强度按照公式 (9.10.4-1) 计算。

$$f_t = \frac{P}{A} \quad (9.10.4-1)$$

式中 f_t —— 轴向抗拉强度, MPa;

P —— 破坏荷载, N;

A —— 试件断面面积, mm^2 。

- 3 抗拉弹性模量按照公式 (9.10.4-2) 计算。

$$E_t = \frac{\sigma_{0.4}}{\varepsilon_{0.4}} \quad (9.10.4-2)$$

式中 E_t —— 抗拉弹性模量, GPa;

$\sigma_{0.4}$ —— 40%的破坏应力, MPa;

$\varepsilon_{0.4}$ —— $\sigma_{0.4}$ 所对应的应变值。

4 极限拉伸值、轴向抗拉强度、抗拉弹性模量均以中间四个试件测值的平均值作为试验结果(修约间隔分别为 1×10^{-6} 、0.01MPa、0.1GPa)。当试件的断裂位置与变截面转折点的距离在 20mm 以内或单个测值超过平均测值 $\pm 15\%$ 时, 该测值应剔除, 取余下测值的平均值作为试验结果。如可用测值少于两个时, 应重做试验。

9.11 砂浆干缩(湿胀)试验

9.11.1 本试验用于测定水泥砂浆在无外荷载条件下, 在温、湿度基本稳定的空气中或恒温水中产生的轴向长度变形。

9.11.2 仪器设备应包括以下几种。

1 测长仪: 测距(165~175)mm, 测量精度不应小于 0.01mm。比长仪应符合 SL 137 的规定。亦可采用外径千分尺等测长仪器。

2 试模: 规格 40mm×40mm×160mm 的棱柱体, 试模两端模板中心有装测头的小孔。

3 测头: 测头应用不锈钢制成, 量测点为球形。

4 捣棒: 方头圆杆金属捣棒, 方头尺寸为 35mm×35mm×35mm, 圆杆直径 28mm, 长 135mm。

9.11.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 9.1 节的规定制备砂浆。

2 擦净试模, 在其内壁涂一薄层矿物油。将拌好的砂浆分两层装入试模, 两层厚度大致相等, 每层捣两遍, 每遍捣五次。在浇捣完第一层后, 埋设试件两端的测头, 再浇第二层砂浆并捣实。采用振动捣实时, 可一次装模, 振 15s 或跳桌跳 120 次。试验以三个试件为一组。

3 按 5.13 节的规定执行试件的养护和观测。

9.11.4 试验结果处理按 5.13 节的规定执行。

9.12 砂浆抗冻性试验

9.12.1 本试验用于检测水泥砂浆抗冻性能。

9.12.2 仪器设备应包括以下几种。

1 胶砂试模: 40mm×40mm×160mm。

2 砂浆试件盒: 尺寸大小如图 9.12.2 所示。

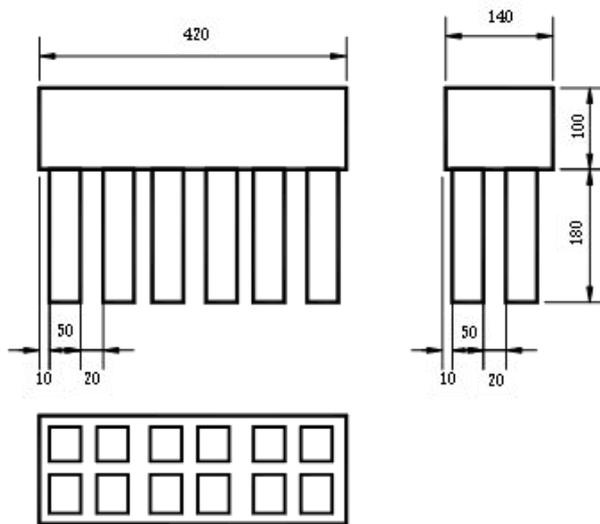


图 9.12.2 砂浆试件盒 (单位: mm)

3 天平: 分度值不大于 0.1g。

4 橡皮板: 厚 3mm。

5 大试件试模以及其他设备应符合 5.24 节的规定, 动弹仪的频率范围应为 (100~20000) Hz。

9.12.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 小试件试验应按以下步骤执行。

- 1) 按 9.7 节的规定执行砂浆拌和及成型、养护 40mm×40mm×160mm 的砂浆试件。试验以三个试件为一组。
- 2) 到达规定试验龄期的前 3d, 将试件放入 (20±2) °C 的水中浸泡, 水深应没过试件顶面 20mm 以上。
- 3) 将浸水完毕的试件擦去表面水分, 称量, 按 5.25 节的规定测定纵向自振频率, 并做必要的外观描述, 作为评定抗冻性的起始值。
- 4) 随即将试件装入四周及底垫有橡皮板的试件盒中, 加入清水, 使其没过试件顶面 (3~5) mm。
- 5) 将装有试件的盒子固定在试验箱内, 按 5.24 节的规定执行冻融循环试验。

2 大试件试验应按以下步骤执行。

- 1) 按 9.1 节的规定拌制砂浆。
- 2) 按 5.1 节的规定成型和养护 100mm×100mm×400mm 棱柱体试件。试验以三个试件为一组。
- 3) 到达规定试验龄期的前 4d, 将试件放在 (20±2) °C 的水中浸泡。对于水中养护的试件, 可直接用于试验。
- 4) 按 5.24 节的规定执行冻融循环试验。

9.12.4 试验结果处理按 5.24 节的规定执行。

9.13 砂浆抗渗性试验

9.13.1 本试验用于测定砂浆的抗渗性能。

9.13.2 仪器设备应包括以下几种。

- 1 砂浆渗透试验仪。
- 2 截头圆锥金属试模：上口直径 70mm，下口直径 80mm，高 30mm。
- 3 捣棒：直径 12mm，长 250mm，一端为弹头形金属棒。
- 4 抹刀等。

9.13.3 试验步骤应按以下规定执行。

1 按 9.1 节的规定制备砂浆。

2 试件的成型、养护按 9.7 节的规定执行。每组试件为三个。

3 养护至规定试验龄期，取出并待表面干燥后，在试体侧面和试模内表面涂一层密封材料（如有机硅橡胶），把试件压入试模使两底面齐平。静置 24h 后装入渗透仪中，进行透水试验。

4 水压从 0.2MPa 开始，保持 2h，增至 0.3MPa，以后每隔 1h 增加水压 0.1MPa，直至所有试件顶面均渗水为止。记录每个试件各压力段的水压力和相应的恒压时间 t (h)。如果水压增至 1.5MPa，保持 1h 后试件仍未透水，按 5.23 节的规定劈开试件并测量渗水高度。

9.13.4 试验结果处理应按以下规定执行。

1 砂浆试件不透水性系数按照公式 (9.13.4) 计算，以三个试件测值的平均值作为该组试件不透水性系数的试验结果（修约间隔为 0.1MPa·h）。

$$I = \sum P_i t_i \quad (9.13.4)$$

式中 I —— 砂浆试件不透水性系数，MPa·h；

P_i —— 试件在每一压力阶段所受水压，MPa；

t_i —— 相应压力阶段的恒压时间，h。

2 水压达 1.5MPa 持续 1h 仍未透水的试件，可按 5.23 节的规定测量渗水高度，并计算相对渗透性系数。

10 水质分析

10.1 水样的采集与保存

10.1.1 本试验用于为水质分析提供水样。适用于混凝土拌和及养护用水的水质分析和水工建筑物环境水侵蚀性检测。

10.1.2 取样应按以下规定进行。

1 采集的水样必须有代表性，并要求密封良好，编号清晰，送样及时，在运往试验室的途中不受污染，不变质。

2 从河、湖中采集水样时，每次不应少于六个取样点（至少在离开岸线不相等的三个地点，每个地点至少在两个不同深度取样）。从贯穿几个载水层的钻井中采集水样时，每次采水样的数目应与该孔贯穿的载水层的数目相对应。从浅井土坑中取样时，每次取一个水样。

3 在水的成分经常变化的水源中，水样应该在不同时间从同一地点取几次，使水样能代表水源的状态。

4 水样应避免被外界污染，采集的水样尽可能不与或少与空气接触，以避免水中溶解性气体受到影响。

5 进行常规分析试验应取水样 3L。用以直接测定侵蚀性 CO_2 的水样为 (0.25~0.5) L。

6 盛水样的容器应采用带塞细口玻璃瓶或聚乙烯塑料瓶。当水样含较多有机物时，以玻璃瓶为宜；当水样含较多碱金属或碱土金属时，应用塑料瓶。新启用的玻璃瓶和塑料瓶，必须先用硝酸 (1:1) 浸泡一天再洗涤。对玻璃瓶，先用盐酸 (1:1) 洗涤，再用自来水冲洗，最后用蒸馏水冲洗；对塑料瓶，先用盐酸 (1:1) 或硝酸 (1:1) 洗涤，也可用 10% 氢氧化钠或碳酸钠溶液洗涤，再用自来水冲洗，最后用蒸馏水冲洗。

7 采集水样时，先将采样瓶洗涤干净，再用被采集水冲洗三次，然后采集水样。水与瓶塞间应留有 (5~10) mL 空隙，盖好瓶塞，用石蜡或火漆封口。

8 采集河、湖水样时，可将取样瓶直接浸入水面下 (300~500) mm 处，将瓶塞打开装满水样。从水源一定深度取样时，应使用专门取样器。从浅井或钻井中取水样时，应把积滞水抽出，使浅井或钻井的水为新鲜水所代替。

9 水样采集后，立即测定水中 CO_2 和 pH 值。

10 测定侵蚀性 CO_2 用的水样，必须使水样从与空气不接触的取水器中，通过虹吸管装入玻璃瓶中（需多次更换，取其最后一部分新鲜水），每 500mL 水样加 3g 碳酸钙粉末。塞紧瓶塞，用石蜡或火漆封好，放置，每天摇动数次。

11 水样采集后应及时检测，存放和运送时间应缩短。如不能及时进行检测，应仔细密封好，妥善保管和运送，水样瓶应放在不受日光直接照射的阴凉处。冬天应防冻。若发现水样受污染，腐败变质，应重新取样。

12 每一份水样应填一份说明书，见表 10.1.2。

表 10.1.2 水样说明书

编 号		瓶 数		采样日期	
水源种类	(江、河、湖、海、钻井等)			采样地点	
采样深度		水 温		气 温	
周围污染情况描述	(工厂、厕所、污水坑、下水道、垃圾等)				
取样方法					
水样中加有何种试剂					
水样分析目的	(检测混凝土拌和水、养护水、环境水)				
采样单位		取样者		备 注	

10.2 pH 值测定 (电极法或酸度计法)

10.2.1 本试验用于用电极法测定水中氢离子浓度，以 pH 值表示。

10.2.2 本试验基本原理：以饱和甘汞电极为参比电极，玻璃电极为指示电极组成原电池。玻璃电极在溶液中的电位，决定于溶液中氢离子的浓度 ($E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln a_H^+$)。在 25℃ 时溶液中每变化一个 pH 单位，产生 59.1mV 的电位差，在仪器上可直接读出 pH 值。

10.2.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 酸度计：pHS-2 型或相同性能的酸度计；
- 2 饱和甘汞电极、pH 玻璃电极或复合电极。

10.2.4 试验步骤应按以下规定执行。

- 1 用已知 pH 值的标准缓冲溶液“校正”酸度计，然后进行测量。

注：酸度计的使用方法、注意事项以及缓冲溶液的配制可参阅仪器说明书。

- 2 每个水样作平行测定。水样混浊时，需过滤后再进行测定。

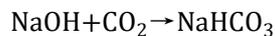
10.2.5 以两次测值的平均值作为试验结果。若两次测值相差大于 0.1，应重做试验。

10.3 二氧化碳含量测定

10.3.1 本试验用酸碱滴定法测定水中游离二氧化碳和侵蚀性二氧化碳的含量。

10.3.2 本试验基本原理如下。

1 游离二氧化碳是指溶于水中的二氧化碳，游离二氧化碳在水中极不稳定，采样后应及时进行测定。游离二氧化碳含量可采用酚酞指示剂滴定法测定。以酚酞为指示剂，用氢氧化钠标准溶液滴定游离二氧化碳的含量。游离二氧化碳与氢氧化钠反应生成碳酸氢钠，其反应如下。



- 2 侵蚀性二氧化碳是指超过平衡量并能与碳酸钙起反应的游离二氧化碳。侵蚀性二氧化碳含量

可采用酸滴定法测定。侵蚀性二氧化碳与碳酸钙作用，析出等量的重碳酸根离子，待侵蚀性二氧化碳与外加的碳酸钙完全作用后，以甲基橙为指示剂，用盐酸标准溶液测定重碳酸盐含量，扣除水样中原重碳酸盐含量，即得侵蚀性二氧化碳的含量。其反应如下。



10.3.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 分析天平：分度值不大于 0.1mg；
- 2 250mL 锥形瓶；
- 3 25mL 滴定管，误差不大于 0.01mL；
- 4 100mL 容量瓶；
- 5 辅助器具：虹吸管。

10.3.4 试剂应符合以下要求。

- 1 0.05mol/L 氢氧化钠标准溶液：称取分析纯氢氧化钠 2g，溶于新煮沸冷却的 1L 蒸馏水中。
 - 1) 标定：称取已在 (105~110) °C 烘 2h 的邻苯二甲酸氢钾（分析纯）0.2g（准确至 0.1mg）置于 250mL 锥形瓶内，加入 50mL 新煮沸冷却的蒸馏水，再加 2~3 滴酚酞指示剂，立即用氢氧化钠标准溶液滴定至微红色在 30s 内不退色为终点，记录所耗体积。同时做空白试验。氢氧化钠标准溶液的浓度按照公式 (10.3.4-1) 计算。

$$C = \frac{m}{(V-V_0) \times 204.23} \times 1000 \quad (10.3.4-1)$$

式中 C —— 氢氧化钠标准溶液的浓度，mol/L；

m —— 邻苯二甲酸氢钾的质量，g；

V —— 消耗氢氧化钠标准溶液的体积，mL；

V_0 —— 空白试验消耗氢氧化钠标准溶液的体积，mL；

204.23 —— 邻苯二甲酸氢钾的摩尔质量，g/mol。

- 2) 标定三次，差值不应超过 0.001mol/L，取其平均值。

- 2 0.05mol/L 盐酸标准溶液：取 4.2mL 分析纯盐酸，加蒸馏水稀释至 1L。

- 1) 标定：称取已在 250°C 烘 4h 的无水碳酸钠（分析纯）0.1g（准确至 0.1mg）置于 250mL 锥形瓶内，加蒸馏水 100mL，微热使其溶解。加 2~3 滴甲基橙指示剂，用配制好的盐酸标准溶液滴定至橙色，记录所耗体积。盐酸标准溶液的浓度按照公式 (10.3.4-2) 计算。

$$C = \frac{m}{53.00V} \times 1000 \quad (10.3.4-2)$$

式中 C —— 盐酸标准溶液的浓度，mol/L；

m —— 无水碳酸钠的质量，g；

V —— 滴定时消耗盐酸标准溶液的体积，mL；

53.00 —— $1/2 \text{Na}_2\text{CO}_3$ 的摩尔质量，g/mol。

- 2) 标定三次，差值不应超过 0.001mol/L，取其平均值。

- 3 0.5%酚酞指示剂：称取酚酞 0.5g 溶于 100mL95%乙醇中；

- 4 0.1%甲基橙指示剂：称取 0.1g 甲基橙溶于 100mL 蒸馏水中；
- 5 饱和酒石酸钾钠溶液；
- 6 碳酸钙（分析纯粉末）。

10.3.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 从水源取样后应立即进行游离 CO₂ 的测定。取水样时应沿壁流下，不要使水溅起气体逸出。

2 游离二氧化碳测定：用虹吸管吸取水样 100mL（将开始吸取的约 100mL 水样溢去），注入带塞的锥形瓶中，加（2~3）滴酚酞指示剂，若显红色，则说明水样不含二氧化碳；若不显红色，立即用氢氧化钠标准溶液滴定至微红色，在 30s 内不褪色为终点，记录所耗体积。水样在滴定时发生浑浊，表明水的硬度较高或含铁盐，需在滴定前加 1mL 饱和酒石酸钾钠溶液。

3 侵蚀性二氧化碳测定：同时用虹吸管吸取两瓶水样（各 500mL），从其中一瓶中立即取 100mL 水样注入锥形瓶中，加（2~3）滴甲基橙指示剂，用 0.05mol/L 盐酸标准溶液滴定至橙色为止，记录所耗体积。另一瓶按 10.1.2 中 10 方法处理，加入 3g 碳酸钙粉末并放置 5d 或用电动振荡器振荡 6h 后，取澄清的水样 100mL（不能夹带沉淀粉末），用同样方法滴定，记录所耗体积。

4 每个水样作平行测定。

10.3.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 水样中游离二氧化碳和侵蚀性二氧化碳含量分别按照公式（10.3.6-1）和公式（10.3.6-2）计算。

$$C_f = \frac{C_0 V_0 \times 44.00}{V} \times 1000 \quad (10.3.6-1)$$

$$C_c = \frac{C_1 (V_2 - V_1) \times 22.00}{V} \times 1000 \quad (10.3.6-2)$$

式中 C_f —— 水样中游离二氧化碳含量，mg/L；

C_c —— 水样中侵蚀性二氧化碳含量，mg/L；

C_0 —— 氢氧化钠标准溶液的浓度，mol/L；

C_1 —— 盐酸标准溶液的浓度，mol/L；

V_0 —— 测定游离二氧化碳消耗的氢氧化钠标准溶液的体积，mL；

V_1 —— 未加碳酸钙的水样消耗盐酸标准溶液的体积，mL；

V_2 —— 加碳酸钙粉末的水样消耗盐酸标准溶液的体积，mL；

V —— 水样的体积，mL；

44.00 —— CO₂ 的摩尔质量，g/mol；

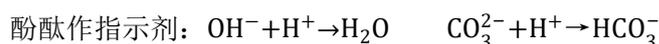
22.00 —— 1/2 CO₂ 的摩尔质量，g/mol。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔为 1mg/L）。若两测值相对误差大于 8.7%时，应重做试验。如果 V_2 不大于 V_1 说明水样无侵蚀性二氧化碳。

10.4 碱度测定

10.4.1 本试验用酸碱滴定法测定水的碱度，适用于天然水和未污染的地表水。对于污水，应根据水中物质组分，分析后才能对试验结果作出正确解释。

10.4.2 本试验基本原理：水样的碱度是用标准盐酸溶液滴定水样至规定的 pH 值，其终点由加入的酸碱指示剂在该 pH 值时颜色的变化来判断。当滴定至酚酞指示剂由红色变为无色时，溶液的 pH 值为 8.3，指示水中氢氧根离子已被中和，碳酸盐均变为重碳酸盐；当滴定至甲基橙指示剂由淡黄色变为橙红色时，溶液的 pH 值为 4.3~4.5，指示水中的重碳酸盐(包括原有的重碳酸盐)已被中和。根据上述两个终点到达时所消耗的盐酸标准溶液的量，计算出水中碳酸盐、重碳酸盐含量及总碱度。滴定时反应如下。



10.4.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 100mL 容量瓶；
- 2 250mL 锥形瓶；
- 3 25mL 滴定管，误差不大于 0.01mL。

10.4.4 试剂应符合以下要求。

- 1 0.05mol/L 盐酸标准溶液，按 10.3.4 条的规定配制和标定；
- 2 0.5%酚酞指示剂，按 10.3.4 条的规定配制；
- 3 0.1%甲基橙指示剂，按 10.3.4 条的规定配制。

10.4.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 酚酞碱度的测定：取水样 100mL，注入 250mL 锥形瓶内，加入 (2~3) 滴酚酞指示剂，如不显红色，则酚酞碱度为零；如显红色，则用盐酸标准溶液滴定至溶液微红色恰好消失为终点，记录所耗体积。

2 甲基橙碱度的测定：在已滴定酚酞碱度的水样中继续加入甲基橙指示剂 (2~3) 滴，继续以盐酸标准溶液滴定至显橙红色，记录所耗体积。

3 每个水样作平行测定。

10.4.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 各种碱度分别按照公式 (10.4.6-1)、公式 (10.4.6-2)、公式 (10.4.6-3) 计算。

$$A_1 = \frac{CV_1 \times 60.02}{2V} \times 1000 \quad (10.4.6-1)$$

$$A_2 = \frac{CV_2 \times 61.02}{V} \times 1000 \quad (10.4.6-2)$$

$$A_3 = \frac{C(V_1 + V_2) \times 100.09}{2V} \times 1000 \quad (10.4.6-3)$$

式中 A_1 —— 酚酞碱度 (以 CO_3^{2-} 计), mg/L;

A_2 —— 甲基橙碱度 (以 HCO_3^- 计), mg/L;

A_3 —— 总碱度 (以 CaCO_3 计), mg/L;

C —— 盐酸标准溶液的浓度, mol/L;
 V_1 —— 测定酚酞碱度所耗盐酸标准溶液的体积, mL;
 V_2 —— 测定甲基橙碱度所耗盐酸标准溶液的体积, mL;
 V —— 水样的体积, mL;

60.02 —— CO_3^{2-} 的摩尔质量, g/mol;

61.02 —— HCO_3^- 的摩尔质量, g/mol;

100.09 —— CaCO_3 的摩尔质量, g/mol。

2 各种碱度以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔为 1mg/L)。若两测值相对误差大于 4.3%时, 应重做试验。

3 根据滴定结果, 可分别按照公式 (10.4.6-4), 公式 (10.4.6-5), 公式 (10.4.6-6) 和表 10.4.6 计算水样中 OH^- 、 CO_3^{2-} 及 HCO_3^- 的含量 (修约间隔为 1mg/L)。

$$C_1 = \frac{CV_0 \times 17.00}{V} \times 1000 \quad (10.4.6-4)$$

$$C_2 = \frac{CV_0 \times 60.02}{2V} \times 1000 \quad (10.4.6-5)$$

$$C_3 = \frac{CV_0 \times 61.02}{V} \times 1000 \quad (10.4.6-6)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 —— 水样中 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 的含量, mg/L;

C —— 盐酸标准溶液的浓度, mol/L;

V_0 —— 按照表 10.4.6 根据 V_1 、 V_2 测值来确定;

V —— 水样的体积, mL;

17.00 —— OH^- 的摩尔质量, g/mol。

60.02 —— CO_3^{2-} 的摩尔质量, g/mol。

61.02 —— HCO_3^- 的摩尔质量, g/mol。

表 10.4.6 由滴定结果确定 V_0 值

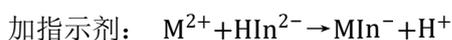
滴定结果	OH^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-
$V_1=0 \quad V_2>0$	0	0	V_2
$V_1<V_2$	0	$2 V_1$	$V_2 - V_1$
$V_1=V_2$	0	$2 V_1$	0
$V_1>V_2$	$V_1 - V_2$	$2 V_2$	0
$V_1>0 \quad V_2=0$	V_1	0	0

10.5 硬度测定

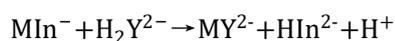
10.5.1 本试验用 EDTA 容量法测定水的总硬度, 适用于测定 CaCO_3 含量在 2 mg/L 以上的水的硬度。清洁的地表水和地下水可直接测定; 水样浑浊、具色, 含有铁、铝等干扰时可进行稀释; 若水样中含

有重金属或多量的铁、铝及锰等干扰时，应加掩蔽剂。

10.5.2 本试验的基本原理：在 pH 值为 10 的条件下，水中的钙、镁离子能与 EDTA(乙二胺四乙酸二钠盐)生成稳定的可溶性无色络合物，滴定时用铬黑 T 作指示剂指示终点。钙、镁离子能与铬黑 T 指示剂生成酒红色络合物，但其稳定性比钙、镁离子与 EDTA 生成的无色络合物差。当 EDTA 滴定时，先将游离的钙、镁离子络合完后，再夺取指示剂络合物中的钙、镁离子，使指示剂释放出来，溶液由酒红色变为蓝色。其反应如下。



蓝色 酒红色



酒红色 蓝色

10.5.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 100mL 容量瓶；
- 2 250mL 锥形瓶；
- 3 25mL 滴定管，误差不大于 0.01mL；
- 4 分析天平：分度值不大于 0.1mg；
- 5 辅助器具：移液管、研钵等。

10.5.4 试剂应符合以下要求。

1 缓冲溶液 (pH=10)：称取 20g 氯化铵溶于少量蒸馏水中，加入 150mL 28%氨水 (密度为 0.898kg/L)，然后用蒸馏水稀释至 1 L；

2 铬黑 T 指示剂：称取 0.5g 铬黑 T 溶于 10mL 缓冲溶液中，用 95%乙醇稀释至 100mL，贮于棕色瓶中；

3 (1:1) 三乙醇胺；

4 (1:1) 盐酸溶液；

5 锌标准溶液：称取 0.8g (准确至 0.1mg) 分析纯金属锌，放入锥形瓶中，加 (1:1) 盐酸溶液，微热使其完全溶解，用蒸馏水稀释至 500mL。锌标准溶液的浓度按照公式 (10.5.4-1) 计算：

$$C = \frac{m}{65.38V} \quad (10.5.4-1)$$

式中 C —— 锌标准溶液的浓度，mol/L；

m —— 锌的质量，g；

65.38 —— 锌离子的摩尔质量，g/mol；

V —— 溶液的体积，L。

6 10%氨水；

7 0.025mol/L EDTA 标准溶液：称取 EDTA 10g，溶于蒸馏水中，用蒸馏水稀释至 1 L。

1) 标定：用移液管吸取 25mL 锌标准溶液置于锥形瓶中，加蒸馏水稀释至 100mL，加入几滴 10% 氨水，中和此溶液至有微氨味后，再加入 5mL 缓冲溶液和 (2~3) 滴铬黑 T 指示剂，用

EDTA 标准溶液滴定至溶液由酒红色变为蓝色，记录所耗体积。EDTA 标准溶液浓度按照公式 (10.5.4-2) 计算：

$$C = \frac{C_1 V_1}{V} \quad (10.5.4-2)$$

式中 C —— EDTA 标准溶液的浓度，mol/L；

C_1 —— 锌标准溶液的浓度，mol/L；

V_1 —— 锌标准溶液的体积，mL；

V —— 消耗 EDTA 标准溶液的体积，mL。

2) 标定三次，差值不应超过 0.001mol/L，取其平均值。

10.5.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 取 100mL 水样置于 250mL 锥形瓶中，加入 5mL 缓冲溶液及铬黑 T 指示剂 (3~4) 滴，然后用 EDTA 标准溶液滴定至溶液由酒红色变为蓝色，即达终点，记录所耗体积。滴定时，EDTA 标准溶液应慢慢加入并均匀摇动。如在滴定前加热溶液至 (30~40) °C，可使终点转变更清楚。

2 水样碳酸盐硬度较大时，应少取水样，稀释后再测定。或在加入缓冲溶液前，先加入所需 EDTA 标准溶液量的 80%~90% (应记入消耗体积内)，否则在加入缓冲溶液后，可能析出碳酸盐沉淀使滴定终点延长。以 EDTA 标准溶液消耗数在 (10~20) mL 时较为适宜。

3 在水样中有 Fe、Mn、Al 干扰离子存在时，可加 (1~3) mL (1:1) 三乙醇胺溶液消除干扰。

4 在水样中镁含量很少、钙含量较大时，加指示剂后显色不清楚，应加入少量标准氯化镁溶液再进行滴定，计算时应扣除。

5 硬度小于 50mg/L 时，应作空白试验，以对照终点，或预先浓缩水样后再进行滴定。

6 每个水样作平行测定。

10.5.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 水的硬度 (以水样中 CaCO_3 含量计) 按照公式 (10.6.5) 计算。

$$H = \frac{C_1 V_1 \times 100.09}{V} \times 1000 \quad (10.5.6)$$

式中 H —— 硬度，mg/L；

C_1 —— EDTA 标准溶液的浓度，mol/L；

V_1 —— 消耗 EDTA 标准溶液的体积，mL；

V —— 水样的体积，mL，

100.09 —— 碳酸钙的摩尔质量，g/mol。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔为 1mg/L)。若两测值相对误差大于 1.4% 时，应重做试验。

10.6 钙离子、镁离子含量测定

10.6.1 本试验用 EDTA 容量法测定水中钙离子含量，计算镁离子含量。

10.6.2 本试验的基本原理：在 pH 值大于 12 的碱性溶液中，紫脲酸铵指示剂能与钙离子生成红色的络合物，但不如 EDTA 与钙生成的络合物稳定。因此用 EDTA 标准溶液滴定时，EDTA 先将游离的钙离子络合完后，再夺取钙与指示剂络合物中的钙，指示剂释放出来，溶液由红色变为蓝紫色。

10.6.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 主要仪器设备应符合 10.5 节的规定。
- 2 刚果红试纸。

10.6.4 试剂应符合以下要求。

- 1 0.025mol/L EDTA 标准溶液，按 10.5.4 条的规定配制和标定；
- 2 20%氢氧化钠溶液：称取 20g 氢氧化钠，溶于蒸馏水中，并稀释至 100mL，贮于塑料瓶中；
- 3 紫脲酸铵指示剂：称取 0.3g 紫脲酸铵指示剂和 100g 氯化钠固体，研磨均匀，贮于磨口棕色瓶内盖紧；
- 4 (1:1) 盐酸溶液。

10.6.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 用移液管吸取水样 100mL 置于 250mL 锥形瓶中，然后放入刚果红试纸一小片，加 (1:1) 盐酸溶液调节至试纸颜色变成蓝紫色为止。将溶液煮沸 (2~3) min，冷却至 (40~50) °C，加入 20%氢氧化钠溶液使 pH 值达 12 以上，再加紫脲酸铵指示剂约 20mg，摇匀使指示剂溶解。用 EDTA 标准溶液滴定至溶液由红色刚变为蓝紫色时即为终点，记录 EDTA 标准溶液用量。

- 2 消除干扰的方法按 10.5 节的规定执行。
- 3 若加入氢氧化钠溶液后沉淀较多，则应少取水样稀释后测定。
- 4 紫脲酸铵指示剂也可用钙指示剂代替，此时终点颜色由酒红色变为蓝色。
- 5 每个水样作平行测定。

10.6.6 试验结果处理应按以下规定执行。

- 1 水样中钙离子含量按照公式 (10.6.6-1) 计算。

$$C_{Ca} = \frac{CV_1 \times 40.08}{V} \times 1000 \quad (10.6.6-1)$$

式中 C_{Ca} —— 水样中钙离子的含量，mg/L；

C —— EDTA 标准溶液的浓度，mol/L；

V_1 —— 滴定时消耗 EDTA 标准溶液的体积，mL；

V —— 水样的体积，mL；

40.08 —— 钙离子的摩尔质量，g/mol。

2 水样中钙离子含量以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔为 1mg/L）。若两测值相对误差大于 3.4%时，应重做试验。

3 根据 10.5 及 10.6 的试验结果，水样中镁离子的含量按照公式 (10.6.6-2) 计算（修约间隔为 1mg/L）。

$$C_{Mg} = \frac{C(V_1 - V_2) \times 24.30}{V} \times 1000 \quad (10.6.6-2)$$

式中 C_{Mg} —— 水样中镁离子的含量, mg/L;

V_1 、 V_2 —— 分别为测定水样总硬度和钙离子消耗的 EDTA 标准溶液的体积, mL;

C —— EDTA 标准溶液的浓度, mol/L;

24.30 —— 镁离子的摩尔质量, g/mol;

V —— 水样的体积, mL。

10.7 氯离子含量测定 (摩尔法)

10.7.1 本试验用于测定水中的氯离子含量, 适用于氯离子含量为 (10~500) mg/L 的水样。高于此范围的水样, 可经稀释后测定。此法必须在溶液酸度范围为 pH 值 6.5~10.5 进行测定, 若溶液碱性太强可用稀硝酸中和, 酸性太强可用碳酸氢钠中和。

10.7.2 本试验基本原理: 在含有氯离子的溶液中, 以铬酸钾作指示剂, 用硝酸银标准溶液滴定。由于氯化银的溶解度比铬酸银小, 根据分步沉淀的原理, 溶液中首先析出氯化银沉淀, 滴定反应到达终点时, 过量的硝酸银溶液与铬酸钾指示剂生成砖红色的铬酸银沉淀, 即指示出反应的终点。由滴定消耗的硝酸银标准溶液量可计算出氯离子的含量。滴定反应和指示剂的反应如下。



10.7.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 1000mL 容量瓶;
- 2 25mL 棕色滴定管, 误差不大于 0.01mL;
- 3 250mL 烧杯;
- 4 250mL 锥形瓶。

10.7.4 试剂应符合以下要求。

1 5% 铬酸钾指示剂: 称取铬酸钾 (K_2CrO_4) 5g 溶于少量蒸馏水中, 加饱和的硝酸银溶液至有红色沉淀为止, 过滤后稀释至 100mL 备用;

2 0.03mol/L 氯化钠标准溶液: 称取经 500°C 灼烧 1h 的分析纯氯化钠 1.7535g, 溶于少量蒸馏水后移入容量瓶, 再用蒸馏水稀释至 1 L, 摇匀;

3 0.03mol/L 硝酸银标准溶液: 称取经 105°C 烘 2h 的硝酸银 5.1g 溶于蒸馏水, 后移入容量瓶, 加蒸馏水稀释至 1 L, 摇匀, 保存于棕色瓶中。

1) 标定: 准确吸取 25mL 氯化钠标准溶液置于 250mL 锥形瓶内, 加入 25mL 蒸馏水, 再加 5 滴铬酸钾指示剂, 用硝酸银标准溶液滴定至溶液中生成砖红色铬酸银沉淀为止, 记录所耗体积。同时做空白试验。硝酸银标准溶液的浓度按照公式 (10.7.4) 计算。

$$C_2 = \frac{C_1 V_1}{V_2 - V_0} \quad (10.7.4)$$

式中 C_1 —— 氯化钠标准溶液的浓度, mol/L;

C_2 —— 硝酸银标准溶液的浓度, mol/L;

- V_1 —— 氯化钠标准溶液的体积, mL;
- V_2 —— 消耗硝酸银标准溶液的体积, mL;
- V_0 —— 空白试验消耗硝酸银标准溶液的体积, mL。

2) 标定三次, 差值不应超过 0.001mol/L, 取其平均值。

10.7.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 取水样 100mL 置于锥形瓶中, 加 5 滴铬酸钾指示剂, 用硝酸银标准溶液滴定至溶液中生成砖红色铬酸银沉淀为止, 记录所耗体积。氯离子含量过高时, 因产生的白色氯化银沉淀过多而影响终点观察, 此时宜减少水样量。当水样中硫酸盐含量大于 32mg/L、硫离子 (S^{2-}) 含量大于 5mg/L 时, 对测定有干扰。

2 吸取蒸馏水 100mL, 按上述步骤进行空白试验, 记录所耗体积。

3 每个水样作平行测定。

10.7.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 水样中氯离子含量按照公式 (10.7.6) 计算。

$$C_{cl} = \frac{C_1(V_2 - V_1) \times 35.45}{V} \times 1000 \quad (10.7.6)$$

式中 C_{cl} —— 水样中氯离子含量, mg/L;

C_1 —— 硝酸银标准溶液的浓度, mol/L;

V_1 —— 空白试验消耗硝酸银标准溶液的体积, mL;

V_2 —— 水样消耗硝酸银标准溶液的体积, mL;

V —— 水样的体积, mL;

35.45 —— 氯离子的摩尔质量, g/mol。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔为 1mg/L)。若两测值相对误差大于 2.2% 时, 应重做试验。

10.8 氯离子含量测定 (硝酸高汞法)

10.8.1 本试验用于测定水中的氯离子含量, 适用于氯离子含量小于 50 mg/L 的水样。本试验必须控制溶液的 pH 值在 3.0~3.5 范围内。

10.8.2 本试验基本原理: 以二苯卡巴腓 (苯胼羰偶氮苯) 为主的混合指示剂, 在微酸性溶液中两价汞首先与氯离子结合生成离解度很小的氯化汞 ($HgCl_2$); 当到达终点时, 两价汞又与指示剂形成蓝紫色络合物, 指示出明显的终点。在滴定过程中, 必须控制溶液 pH 值在 3.0~3.5 范围内。可用二苯卡巴腓与溴酚兰配成的混合指示剂, 一方面指示溶液的 pH 值, 同时又指示滴定终点。

10.8.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 1000mL 容量瓶;
- 2 10mL 微量滴定管, 误差不大于 0.01mL;
- 3 250mL 锥形瓶;

4 1000mL 试剂瓶。

10.8.4 试剂应符合以下要求。

1 混合指示剂：0.5g 二苯卡巴脲与 0.05g 溴酚兰混合，溶于 100mL 95%的乙醇中；

2 0.03mol/L 氯化钠标准溶液，按 10.7.4 条的规定配制；

3 0.05mol/L 硝酸溶液：量取 3.2mL 硝酸（密度为 1.42kg/L），加蒸馏水稀释至 1000mL，摇匀，存于棕色试剂瓶备用。

4 硝酸高汞标准溶液 $\left\{ C \frac{1}{2} [Hg(NO_3)_2 \cdot \frac{1}{2} H_2O] = 0.02 mol/L \right\}$ ：称取 3.35g 硝酸高汞 $[Hg(NO_3)_2 \cdot \frac{1}{2} H_2O]$

溶于 100mL 加有（1.0~1.5）mL 硝酸（密度为 1.42kg/L）的蒸馏水中，移入容量瓶后加蒸馏水稀释至 1L，摇匀。

1) 标定：准确吸取 25mL 氯化钠标准溶液置于 250mL 锥形瓶内，加入 25mL 蒸馏水和 10 滴混合指示剂，用 0.05mol/L 硝酸调至溶液呈黄色，再多加 1mL 0.05mol/L 硝酸使 pH 值为 3.0~3.5，用硝酸高汞标准溶液滴至溶液呈葡萄紫色为止，记录所耗体积。同时做空白试验。硝酸高汞标准溶液的浓度按照公式（10.8.4）计算。

$$C = \frac{C_1 V_1}{V_2 - V_0} \quad (10.8.4)$$

式中 C —— $\frac{1}{2} [Hg(NO_3)_2 \cdot \frac{1}{2} H_2O]$ 硝酸高汞标准溶液的浓度，mol/L；

C_1 —— 氯化钠标准溶液的浓度，mol/L；

V_1 —— 氯化钠标准溶液的体积，mL；

V_2 —— 消耗硝酸高汞标准溶液的体积，mL；

V_0 —— 空白试验消耗硝酸高汞标准溶液的体积，mL。

2) 标定三次，差值不应超过 0.001mol/L，取其平均值。

10.8.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 取水样 100mL 置于 250mL 锥形瓶中，加混合指示剂 10 滴（不宜过量），并用 0.05mol/L 硝酸调至溶液呈黄色，再多加 1mL 0.05mol/L 硝酸使 pH 值为 3.0~3.5，用硝酸高汞标准溶液滴定至溶液呈葡萄紫色为止，记录所耗体积。如果待测液有颜色，则干扰终点观察。可用稀硝酸酸化后的活性炭吸附脱色，过滤后滴定；也可将水样蒸干，用过氧化氢去除有机质，再溶解后进行滴定。

2 吸取 100mL 蒸馏水，按上述步骤进行空白试验，记录所耗体积。

3 每个水样作平行测定。

10.8.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 水样中氯离子含量按照公式（10.8.6）计算。

$$C = \frac{C_1(V_2 - V_1) \times 35.45}{V} \times 1000 \quad (10.8.6)$$

式中 C —— 水样中氯离子含量，mg/L；

V_2 —— 水样消耗硝酸高汞标准溶液的体积，mL；

V_1 —— 空白试验消耗硝酸高汞标准溶液的体积，mL；

V —— 水样的体积, mL;

C_1 —— $\frac{1}{2}[\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}]$ 硝酸高汞标准溶液的浓度, mol/L;

35.45 —— 氯离子的摩尔质量, g/mol。

2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔为 1mg/L)。若两测值相对误差大于 2.2% 时, 应重做试验。

10.9 硫酸根离子含量测定 (称量法)

10.9.1 本试验用于测定水中的硫酸根离子含量, 适用于硫酸根离子含量较高的水质测定。

10.9.2 本试验基本原理: 水中硫酸根离子在微酸性溶液中与氯化钡反应生成硫酸钡沉淀, 沉淀在 800℃ 灼烧后称量, 换算测得硫酸根离子含量。

10.9.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 高温炉: 最高温度不低于 1000℃;
- 2 分析天平: 分度值不大于 0.1mg;
- 3 瓷坩埚: (20~25) mL;
- 4 辅助器具: 1000mL 容量瓶、棕色试剂瓶、烧杯、慢速定量滤纸等。

10.9.4 试剂应符合以下要求。

1 1%硝酸银溶液: 准确称取 1.0000g 硝酸银 (AgNO_3), 溶于少量蒸馏水, 移入 1000mL 容量瓶后用蒸馏水稀释至刻度, 摇匀储存于棕色试剂瓶中;

2 10%氯化钡溶液: 准确称取 10.0000g 氯化钡 (或 11.7238g $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 溶于少量蒸馏水, 移入 1000mL 容量瓶后用蒸馏水稀释至刻度, 摇匀;

3 (1:1) 盐酸溶液;

4 1%甲基红指示剂溶液: 称取 1g 甲基红, 溶于 99g 95%乙醇中。

10.9.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 取水样 200mL 置于 400mL 烧杯中, 宜可根据硫酸根离子的含量酌情取水样。在水样中加 (2~3) 滴甲基红指示剂, 用 (1:1) 盐酸溶液酸化至刚出现红色, 再多加 0.5mL 盐酸溶液。在不断搅动下加热, 趁热滴加 10%氯化钡溶液至上层溶液中不再产生沉淀时, 再多加 (2~4) mL 氯化钡溶液。加热至 60℃~70℃, 保温静置 4h。

2 用慢速定量滤纸过滤, 烧杯中的沉淀用热蒸馏水洗两次~三次后移入滤纸, 再用热蒸馏水缓缓洗涤滤纸至无氯离子 (用 1% AgNO_3 溶液检测), 但不宜过多洗涤。

3 将沉淀和滤纸移入预先已在 800℃ 灼烧至恒量的瓷坩埚中, 先在电炉上小心烤干并灰化至呈灰白色后, 再移入高温炉中, 升温至 800℃, 恒温灼烧半小时取出, 稍冷后移入干燥器中, 冷却至室温称量。再在相同条件下灼烧半小时, 冷却称量。如此反复操作直至恒量 (两次称量之差小于 ±0.0002g)。灼烧前灰化必须彻底, 并注意空气流通。灼烧温度不应过高, 否则引起硫酸钡分解。

4 用蒸馏水按以上步骤作空白试验。

5 每个水样作平行测定。

10.9.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 水样中硫酸根离子含量按照公式(10.9.6)计算:

$$C = \frac{(G-G_0) \times 0.4116 \times 1000}{V} \times 1000 \quad (10.9.6)$$

式中 C ——水样中硫酸根离子含量, mg/L;

G ——硫酸钡沉淀质量, g;

G_0 ——空白试验硫酸钡沉淀质量, g;

V ——水样的体积, mL;

0.4116——硫酸钡换算成硫酸根离子的系数。

2 以两次测值的平均值作为试验结果(修约间隔为1mg/L)。若两测值相对误差大于2.5%时,应重做试验。

10.10 硫酸根离子含量测定(EDTA容量法)

10.10.1 本试验用于测定水中的硫酸根离子含量,适用于硫酸根离子含量在(10~200)mg/L范围的天然水。

10.10.2 本试验的基本原理:在水样中加入已知量的标准氯化钡溶液,使与硫酸根离子生成硫酸钡沉淀,过量的钡离子可与EDTA络合而加以测定。钡离子损失的摩尔数相当于硫酸根离子的摩尔数,从而得到定量的结果。用铬黑T作指示剂,反应终点时溶液的颜色由玫瑰红变为纯蓝色。镁离子的存在可使终点的变化清晰,故常用的是氯化钡和氯化镁的混合溶液。在此测定条件下,水样中的钙、镁等离子都能参加反应消耗EDTA(即硬度),应加以扣除。

10.10.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 1000mL容量瓶;
- 2 250mL锥形瓶;
- 3 25mL滴定管,误差不大于0.01mL;
- 4 分析天平:分度值不大于0.1mg;
- 5 辅助器具:移液管、研钵、试剂瓶、刚果红试纸、水浴加热装置等。

10.10.4 试剂应符合以下要求。

- 1 缓冲溶液,按10.5.4条的规定配制;
- 2 铬黑T指示剂:称取0.5g铬黑T,烘干,加100g在(105±5)℃烘至恒量的固体氯化钠,研磨均匀,贮于棕色试剂瓶中;
- 3 钡、镁混合溶液:称取3.0500g氯化钡($BaCl_2 \cdot 2H_2O$)和2.5400g氯化镁($MgCl_2 \cdot 6H_2O$),溶于少量蒸馏水,移入1000mL容量瓶后用蒸馏水稀释至刻度,摇匀;
- 4 (1:1)盐酸溶液;
- 5 10%氯化钡溶液,按10.9.4条的规定配制;

6 0.05mol/L EDTA 标准溶液：称取 EDTA 20g，溶于蒸馏水中，用蒸馏水稀释至 1 L，再按 10.5.4 条的规定标定。

10.10.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 水样体积和钡、镁混合溶液用量的确定：取 5mL 水样置于 10mL 试管中，加 2 滴（1:1）盐酸溶液和 5 滴 10%氯化钡溶液，摇匀，观察沉淀生成情况，按照表 10.10.5 确定取水样量及钡、镁混合溶液用量。

表 10.10.5 硫酸根离子含量与钡、镁混合溶液用量关系

浑浊情况	硫酸根离子含量 (mg/L)	取样体积 (mL)	钡镁混合溶液用量 (mL)
数分钟后略浑	< 25	100	4
稍浑浊	25~50	50	4
浑浊	50~100	25	4
生成沉淀	100~200	25	8
生成大量沉淀	> 200	取少量稀释	10

2 根据表 10.10.5 大致确定硫酸根离子含量后，用移液管取与表 10.10.5 相应的水样置于 250mL 锥形瓶中，加水稀释至约 100mL，滴加（1:1）盐酸溶液使刚果红试纸由红色变为蓝色，加热煮沸（1~2）min 除去二氧化碳。

3 趁热加入表 10.10.5 所规定数量的钡、镁混合溶液，不断搅动并加热至沸。沉淀陈化 6h 或放置过夜后滴定。必要时为缩短陈化时间，可将加沉淀剂后的水样置沸水浴上保温陈化 2h，冷却后加入 5mL 缓冲溶液和铬黑 T 指示剂一小匙（约 20mg），用 EDTA 标准溶液滴定至溶液由红色变为纯蓝色，记录所耗体积。操作时，为避免 BaSO₄ 沉淀吸附部分的 Ba²⁺ 而影响结果，滴定时应用力摇动。当有大量沉淀影响终点观察时，可过滤后再滴定。干扰及消除方法参照 10.5.4 条的规定处理。

4 取与步骤 2 中同体积水样，按 10.5 节的规定测定其总硬度，记录所耗体积。

5 取与水样相同体积的蒸馏水，按步骤 2、3 作空白试验，记录所耗体积。

6 每个水样作平行测定。

10.10.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 水样中硫酸根离子含量按照公式（10.10.5）计算。

$$C = \frac{C_1[(V_2+V_3)-V_1] \times 96.06}{V} \times 1000 \quad (10.10.6)$$

式中 C —— 水样中硫酸根离子含量，mg/L；

C_1 —— EDTA 标准溶液的浓度，mol/L；

V_1 —— 水样消耗 EDTA 标准溶液的体积，mL；

V_2 —— 同体积水样中钙、镁消耗 EDTA 标准溶液的体积，mL；

V_3 —— 空白试验所消耗 EDTA 标准溶液的体积，mL；

V —— 水样的体积，mL；

96.06 —— 硫酸根离子的摩尔质量，g/mol。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔为 1mg/L）。若两测值相对误差大于 1.5%时，应

重做试验。

10.11 溶解性固形物含量测定

10.11.1 本试验用于测定水中的溶解性固形物含量。

10.11.2 本试验基本原理：溶解性固形物是指溶解在水中的固体，如可溶性的氯化物、硫酸盐、硝酸盐、重碳酸盐、碳酸盐等。水样加热蒸干，再烘至恒量，测得溶解性固形物。

10.11.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 分析天平：分度值不大于 0.1mg；
- 2 辅助器具：快速定量滤纸、烘箱、水浴加热装置、瓷蒸发皿、100mL 容量瓶等。

10.11.4 (1:1) 过氧化氢溶液。

10.11.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 将水样充分摇匀，用快速定量滤纸过滤，以除去悬浮固体。若滤液浑浊，须重新过滤，直到滤液澄清为止。

2 用容量瓶量取 100mL 水样，分数次倒入经 105℃ 烘至恒量的瓷蒸发皿中，在蒸发皿上搁一玻璃三角架，盖上表面皿，置于水浴锅上蒸发至干。

3 如蒸干残渣有色，则应使蒸发皿稍冷后，滴加 (1:1) 过氧化氢溶液数滴，慢慢旋转蒸发皿至气泡消失，再置于水浴或蒸汽浴上蒸干，反复数次，直至残渣变白或颜色稳定为止。用过氧化氢去除有机物时应少量多次进行，每次残渣润湿即可，以防有机物与过氧化氢作用分解时泡沫过多，发生盐类损失。

4 将蒸干的固形物移入烘箱中，在 (105~110)℃ 的温度下烘 1h，取出在干燥器中冷却至室温后称量。再烘 (20~30) min，冷却后再称量，直至恒量 (前后两次称量相差小于 ±0.0004g)。

5 每个水样作平行测定。

10.11.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 溶解性固形物含量按照公式 (10.11.6) 计算。

$$C = \frac{(G-G_0) \times 1000}{V} \times 1000 \quad (10.11.6)$$

式中 C —— 溶解性固形物含量，mg/L；

G —— 蒸发皿和溶解性固形物的总质量，g；

G_0 —— 蒸发皿的质量，g；

V —— 水样的体积，mL。

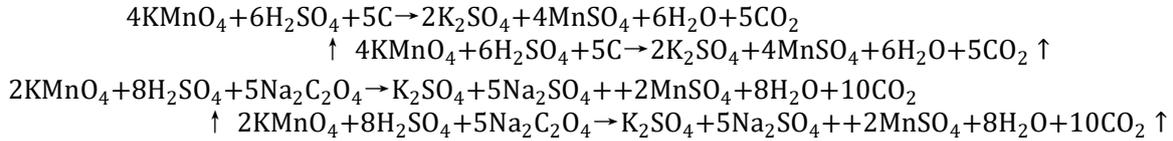
2 以两次测值的平均值作为试验结果 (修约间隔为 1mg/L)。

10.12 化学耗氧量测定

10.12.1 本试验用于测定天然水中有机物质和还原性物质的含量，不适用于理论需氧量或有机物总

含量的测试。本试验适用于氯离子浓度小于 300mg/L 的水样。当水样的耗氧量超过 5mg/L 时，应稀释水样。本试验最佳耗氧量测定范围的下限为 0.5mg/L。

10.12.2 本试验的基本原理：在酸性溶液中用高锰酸钾氧化有机物和还原性物质，过量高锰酸钾以草酸钠还原，再用高锰酸钾回滴。反应式如下。



10.12.3 仪器设备应包括以下几种。

- 1 分析天平：分度值不大于 0.1mg；
- 2 25mL 无色和棕色滴定管，误差不大于 0.01mL；
- 3 移液管：100mL、25mL、5mL（带有分度）；
- 4 辅助器具：水浴加热装置、250mL 锥形瓶、1000mL 容量瓶、棕色试剂瓶等。

10.12.4 试剂应符合以下要求。

1 2mol/L 硫酸溶液：在不断搅拌下将 110mL 硫酸（密度为 1.84kg/L）缓慢加入约 500mL 蒸馏水中，然后缓慢加入 0.002mol/L 高锰酸钾溶液直至微红色不消失，冷却后用蒸馏水稀释至 1 L；

2 草酸钠标准贮备溶液 $\left\{C\left(\frac{1}{2}\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4\right) = 0.1\text{mol/L}\right\}$ ：准确称取 6.7000g 于 120℃干燥 2h 的草酸钠（分析纯）固体，用少量蒸馏水溶解后移入 1000mL 容量瓶中，用蒸馏水稀释至刻度，摇匀，此溶液应贮存于阴暗处，可稳定六个月；

3 草酸钠标准溶液 $\left\{C\left(\frac{1}{2}\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4\right) = 0.01\text{mol/L}\right\}$ ：用移液管吸取 100mL 草酸钠标准贮备溶液至 1000mL 容量瓶中，用蒸馏水稀释至刻度，摇匀；

4 高锰酸钾贮备溶液 $\left\{C\left(\frac{1}{5}\text{KMnO}_4\right) = 0.1\text{mol/L}\right\}$ ：将约 3.2g 高锰酸钾溶于 1000mL 蒸馏水中，于（90~95）℃加热 2h，冷却，至少存放两天后，倾出上层清液贮存于棕色试剂瓶中；

5 高锰酸钾标准溶液 $\left\{C\left(\frac{1}{5}\text{KMnO}_4\right) = 0.01\text{mol/L}\right\}$ ：用移液管吸取 100mL 高锰酸钾贮备溶液至 1000mL 容量瓶中，用蒸馏水稀释至刻度，摇匀。

10.12.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 用移液管吸取 25mL 水样置于 250mL 锥形瓶中（如水样浑浊需过滤时，必须采用玻璃过滤器，不应使用滤纸），用量筒加入约 75mL 蒸馏水，加 5mL 硫酸溶液，轻轻摇匀，用滴定管准确加入 5.00mL 高锰酸钾标准溶液后，快速放在沸水浴上加热并开始计时。加热过程中，溶液应保持红色，若产生 MnO_2 沉淀或褪为无色，应适当稀释水样。加热 30min 后立即取出，用滴定管快速准确加入 5.00mL 草酸钠标准溶液，此时溶液应变为无色，趁热用高锰酸钾标准溶液返滴溶液至微红色约 30s 不褪色为止，记录所耗体积 V_1 。

2 以 25mL 蒸馏水代替水样，按步骤 1 平行进行三份空白试验，记录所耗体积。取三份平均值 V_0 。蒸馏水不应含有有机物和还原性物质。试样的加酸量、加热时间及温度应保持一致。

3 在空白试验留下的溶液中，进行高锰酸钾溶液浓度标定。

1) 用滴定管再加入 5.00mL 草酸钠标准溶液，将溶液加热至约 80℃，然后用高锰酸钾标准溶液滴定至微红色 30s 不褪色为止，记录所耗体积。

2) 高锰酸钾标准溶液浓度按照公式 (10.12.5) 计算。

$$C_1 = \frac{C_2 V_2}{V_1} \quad (10.12.5)$$

式中 C_1 —— 高锰酸钾标准溶液的浓度，mol/L；

C_2 —— 草酸钠标准溶液的浓度，mol/L；

V_2 —— 加入草酸钠标准溶液的体积，mL；

V_1 —— 消耗高锰酸钾标准溶液的体积，mL；

3) 标定三次，差值不应超过 0.001mol/L，取其平均值。

4 每个水样作平行测定。

10.12.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 化学耗氧量按照公式 (10.12.6) 计算。

$$C = \frac{C_1(V_1 - V_0) \times 8.00}{V} \times 1000 \quad (10.12.6)$$

式中 C —— 化学耗氧量，mg/L；

C_1 —— 高锰酸钾标准溶液的浓度，mol/L；

V_1 —— 水样所消耗高锰酸钾标准溶液的体积（不包括加热前加入的 5.00mL），mL；

V_0 —— 空白溶液所消耗的高锰酸钾标准溶液的体积，mL；

V —— 水样的体积，mL；

8.00 —— 氧 ($\frac{1}{4}O_2$) 的摩尔质量，g/mol。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔为 1mg/L）。

10.13 不溶物含量测定

10.13.1 本试验用于测定水中的不溶物含量。

10.13.2 本试验的基本原理：水样中的不溶物是指不能通过孔径 0.45 μm 的滤膜，并于 (105~110)℃ 烘干至恒重的固体物质。

10.13.3 仪器设备应包括以下几种。

1 分析天平：分度值不大于 0.1mg；

2 全玻璃微孔滤膜过滤器；

3 CN-CA 滤膜：孔径 0.45 μm，直径 60mm；

4 辅助器具：烘箱、吸滤瓶、真空泵、无齿扁咀镊子等。

10.13.4 蒸馏水，或同等纯度的水。

10.13.5 试验步骤应按以下规定执行。

1 滤膜准备按以下步骤执行。

- 1) 用扁咀无齿镊子夹取微孔滤膜放于事先恒重的称量瓶里，移入烘箱中于（105~110）℃烘干半小时，取出置干燥器内冷却至室温，称其重量。反复烘干、冷却、称量，直至两次称量的重量差不大于 0.2 mg 为止。
- 2) 将恒重的微孔滤膜正确的放在滤膜过滤器的滤膜托盘上，加盖配套的漏斗，并用夹子固定好。以蒸馏水湿润滤膜，并不断吸滤。

2 测定按以下步骤执行。

- 1) 量取充分混合均匀的试样 100 mL，抽吸过滤，使水分全部通过滤膜。再以每次 10 mL 蒸馏水连续洗涤三次，继续吸滤以除去痕量水分。
- 2) 停止吸滤后，仔细取出滤膜放在原恒重的称量瓶里，移入烘箱中于（105~110）℃下烘干一小时，移入干燥器内冷却到室温，称其重量。反复烘干、冷却、称量，直至两次称量的重量差不大于 0.4mg 为止。滤膜上截留过多过滤物可能夹带过多的水分，除延长干燥时间外，还可能造成过滤困难，遇此情况可酌情少取试样；滤膜上截留过少，则会增大称量误差测定精度，必要时可增大试样体积。宜以（5~100）mg 过滤物为准，量取水样体积。

3 每个水样作平行测定。

10.13.6 试验结果处理应按以下规定执行。

1 水样中不溶物含量公式（10.13.6）计算。

$$C = \frac{(G_2 - G_1) \times 1000}{V} \times 1000 \quad (10.13.6)$$

式中 C —— 水中不溶物含量，mg/L；

G_1 —— 滤膜+称量瓶重量，g；

G_2 —— 过滤物+滤膜+称量瓶重量，g；

V —— 水样的体积，mL。

2 以两次测值的平均值作为试验结果（修约间隔 1mg/L）。

附录 A 水工混凝土配合比设计方法

A.1 基本原则

- A.1.1 水工混凝土配合比设计，应满足设计与施工要求，确保混凝土工程质量且经济合理。
- A.1.2 混凝土配合比设计应按以下规定执行。
- 1 应根据工程要求，结构型式，施工条件和原材料状况，以及强度、耐久性等要求，确定各组成材料的用量；
 - 2 在满足工作性要求的前提下，宜选用较小的用水量；
 - 3 在满足强度、耐久性及其他要求的前提下，选用合适的水胶比；
 - 4 宜选取最优砂率，即用水量、水泥用量一定时，在保证混凝土拌和物具有良好的粘聚性并达到要求的工作性的情况下，使拌合物具有最大坍落度或最小 VC 值的砂率；
 - 5 宜选用最大粒径较大的骨料及合适的级配比例。
- A.1.3 混凝土配合比设计的主要步骤。
- 1 根据设计要求强度和耐久性选定水胶比；
 - 2 根据施工要求工作度和骨料最大粒径等选定用水量和砂率；
 - 3 采用绝对体积法计算各组成材料用量；
 - 4 通过试验室试配和必要的现场调整，确定每立方米混凝土材料用量和配合比。
- A.1.4 进行混凝土配合比设计时，应收集有关原材料的资料，并按有关标准对水泥、掺合料、外加剂、细骨料和粗骨料等性能进行检测，并符合标准规定。
- 1 水泥的品种、品质、强度等级、密度等；
 - 2 粗骨料岩性、种类、级配、饱和面干表观密度、饱和面干吸水率等；
 - 3 细骨料岩性、种类、细度模数、饱和面干表观密度、饱和面干吸水率等；
 - 4 外加剂种类、品质等；
 - 5 掺合料的品种、品质、密度等；
 - 6 拌和用水品质。
- A.1.5 进行混凝土配合比设计时，应收集相关工程设计资料，明确设计要求。
- 1 混凝土设计抗压强度及保证率；
 - 2 混凝土的抗渗等级、抗冻等级和其他性能指标；
 - 3 混凝土的拌制、运输、施工方式及工作性要求；
 - 4 混凝土骨料的粒径。
- A.1.6 进行混凝土配合比设计时，除应遵守本规程的规定外，还应符合国家现行有关标准的规定。

A.2 混凝土配制强度的确定

A.2.1 混凝土设计抗压强度系指按照标准方法制作和养护的边长为 150mm 的立方体试件，在设计龄期用标准试验方法测得的具有设计保证率的抗压强度，以 MPa 计。

A.2.2 混凝土配制强度按照公式(A.2.2)计算。

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} + t\sigma \quad (\text{A.2.2})$$

式中 $f_{cu,0}$ —— 混凝土配制强度，MPa；

$f_{cu,k}$ —— 混凝土设计龄期的设计抗压强度，MPa；

t —— 保证率系数，由给定的保证率 P 选定，见表 A.2.2；

σ —— 混凝土抗压强度标准差，MPa。

表 A.2.2 保证率和保证率系数的关系

保证率 P (%)	70.0	75.0	80.0	84.1	85.0	90.0	95.0	97.7	99.9
保证率系数 t	0.525	0.675	0.840	1.0	1.040	1.280	1.645	2.0	3.0

A.2.3 混凝土抗压强度标准差 σ ，宜按同品种混凝土抗压强度统计资料确定。

1 统计时，混凝土抗压强度试件总数不应少于 30 组；

2 根据近期相同抗压强度、生产工艺和配合比基本相同的混凝土抗压强度资料，混凝土抗压强度标准差 σ 按照公式 (A.2.3) 计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^2 - n a_{f_{cu}}^2}{n-1}} \quad (\text{A.2.3})$$

式中 $f_{cu,i}$ —— 第 i 组试件抗压强度，MPa；

$a_{f_{cu}}$ —— n 组试件的抗压强度平均值，MPa；

n —— 试件组数。

3 当混凝土设计抗压强度小于或等于 25MPa，其抗压强度标准差 σ 计算值小于 2.5MPa 时，计算配制抗压强度用的标准差不应小于 2.5MPa；当混凝土设计抗压强度等于或大于 30MPa，其抗压强度标准差计算值小于 3.0MPa 时，计算配制抗压强度用的标准差应取不小于 3.0MPa。

A.2.4 当无近期同品种混凝土抗压强度统计资料时， σ 值可按照表 A.2.4 取用。施工中应根据现场施工时强度的统计结果调整 σ 值。

表 A.2.4 标准差 σ 选用值

单位：MPa

设计抗压强度	≤15	20~25	30~35	40~45	50
混凝土抗压强度标准差	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5

A.3 混凝土配合比的计算

A. 3. 1 水工混凝土配合比计算应以饱和面干状态骨料为基准。

A. 3. 2 选取水胶比（或水灰比）。初选水胶比应根据混凝土设计指标（配制强度、抗冻等级、抗渗等级等），工程使用的水泥、掺合料、骨料、外加剂等原材料，以及混凝土拌和物的工作性要求（坍落度、含气量等）等综合考虑，可参考表 A. 5. 1-2 选取。

A. 3. 3 选取混凝土用水量。初选用水量应根据骨料最大粒径、坍落度、外加剂、掺合料等综合考虑，可参考表 A. 5. 1-3 选取。

A. 3. 4 选取砂率（体积砂率）。初选砂率应根据骨料品种、品质、最大粒径、水胶比和细骨料的细度模数、超径含量等综合考虑，可参考表 A. 5. 1-5 选取。

A. 3. 5 混凝土的胶凝材料用量（ $m_c + m_p$ ）、水泥用量 m_c 和掺合料用量 m_p 分别按照公式(A. 3. 5-1)、公式(A. 3. 5-2)、公式(A. 3. 5-3)计算，当无掺合料时， m_p 、 p 、 P_m 均取 0。

$$m_c + m_p = \frac{m_w}{w/(c+p)} \quad (\text{A. 3. 5-1})$$

$$m_c = (1 - P_m)(m_c + m_p) \quad (\text{A. 3. 5-2})$$

$$m_p = P_m(m_c + m_p) \quad (\text{A. 3. 5-3})$$

式中 m_c —— 单位体积混凝土中水泥用量， kg/m^3 ；

m_p —— 单位体积混凝土中掺合料用量， kg/m^3 ；

m_w —— 单位体积混凝土中用水量， kg/m^3 ；

P_m —— 掺合料掺量，%；

$w/(c+p)$ —— 水胶比，其中 w 代表 m_p ， c 代表 m_c ， p 代表 m_p 。

A. 3. 6 细骨料用量、粗骨料用量由胶凝材料用量和初选的用水量、砂率，根据“绝对体积法”计算。

1 绝对体积法基本原理是混凝土拌和物的体积等于各组成材料的绝对体积与空气体积之和。单位体积混凝土中骨料的绝对体积 V_{sg} 、细骨料用量 m_s 、粗骨料用量 m_g 按照公式(A. 3. 6-1)~(A. 3. 6-3)计算。

$$V_{sg} = 1 - \left(\frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_p}{\rho_p} + a \right) \quad (\text{A. 3. 6-1})$$

$$m_s = V_{sg} S_v \rho_s \quad (\text{A. 3. 6-2})$$

$$m_g = V_{sg} (1 - S_v) \rho_g \quad (\text{A. 3. 6-3})$$

式中 V_{sg} —— 骨料的绝对体积， m^3 ；

m_w —— 单位体积混凝土中用水量， kg/m^3 ；

m_c —— 单位体积混凝土中水泥用量， kg/m^3 ；

m_p —— 单位体积混凝土中掺合料用量， kg/m^3 ；

m_s —— 单位体积混凝土中细骨料用量， kg/m^3 ；

m_g —— 单位体积混凝土中粗骨料用量， kg/m^3 ；

a —— 混凝土含气量；

S_v —— 体积砂率；

ρ_w —— 水的密度， kg/m^3 ；

- ρ_c —— 水泥密度, kg/m^3 ;
- ρ_p —— 掺合料密度, kg/m^3 ;
- ρ_s —— 细骨料饱和面干表观密度, kg/m^3 ;
- ρ_g —— 粗骨料饱和面干表观密度, kg/m^3 。

2 各粒级粗骨料用量按选定的级配比例计算。级配比例应根据骨料品种、品质、最大粒径、超逊径含量和施工要求等综合考虑,可参考表 A. 5. 1-4 选取。

A. 3. 7 制表列出混凝土各组成材料的计算用量和配合比,配合比至少应包括水胶比、掺合料用量百分比、体积砂率百分比、粗骨料级配比例、外加剂掺量百分比(以胶凝材料总量为基准)等比例关系。

A. 4 混凝土配合比的试配、调整和确定

A. 4. 1 配合比试配应按以下规定执行。

- 1 在混凝土配合比试配时,应采用工程中实际使用的原材料。
- 2 在混凝土试配时,每盘混凝土的最小拌和量应符合表 A. 4. 1 的规定,当采用机械拌和时,其拌和量不宜小于搅拌机额定拌和量的 1/4。

表 A. 4. 1 混凝土试配的最小拌和量

骨料最大粒径 (mm)	拌和物体积 (L)
20	15
40	25
≥ 80	40

3 按计算的配合比进行试拌,根据坍落度、含气量、泌水、离析等情况判断混凝土拌和物的工作性,对初步确定的用水量、砂率、外加剂掺量等进行适当调整。用选定的水胶比和用水量,变动(4~5)个砂率每次增减砂率 1%~2%进行试拌,坍落度最大或 VC 值最小时的砂率即为最优砂率。用最优砂率试拌,调整用水量至混凝土拌和物满足工作性要求。然后提出混凝土试验用配合比。

4 混凝土强度试验至少应采用三个不同水胶比的配合比,以一个配合比为基础,其他配合比的用水量不变,水胶比依次增减,变化幅度为 0.05,砂率可相应增减 1%。当不同水胶比的混凝土拌和物坍落度与要求值的差超过允许偏差时,可通过增、减用水量进行调整。试配过程中,减水剂掺量应维持不变,可调整引气剂掺量使得混凝土拌和物含气量接近。

5 根据试配的配合比成型混凝土立方体抗压强度试件,标准养护到规定试验龄期进行抗压强度试验。根据试验得出(3~5)个水胶比与其对应的混凝土抗压强度的关系,建立设计龄期的强度与胶水比的回归方程式(A. 4. 1),确定回归系数 A、B。再由配制强度 $f_{cu,0}$,求出相应的水胶比,同时根据混凝土抗冻等级、抗渗等级和其他性能要求和允许的最大水胶比限值调整后选定合适的水胶比。

$$f_{cu} = Af_{ce}\left(\frac{c+p}{w} - B\right) \quad (\text{A. 4. 1})$$

式中 f_{cu} —— 混凝土强度, MPa;

f_{ce} —— 水泥 28d 龄期抗压强度实测值, MPa;

$\frac{c+p}{w}$ —— 胶水比, 其中 c 代表 m_c 为单位体积混凝土中水泥用量 (kg/m^3), p 代表 m_p 为单位体积混凝土中掺合料用量 (kg/m^3), w 代表 m_w 为单位体积混凝土中用水量 (kg/m^3)。当无掺合料时, p 取 0。

A 、 B —— 回归系数。当水泥强度波动较大时, 应代入 f_{ce} 调整回归系数。

A. 4. 2 配合比调整应按以下规定执行。

- 1 按 A. 4. 1 试配结果, 计算混凝土各组成材料用量和比例。
- 2 按下列步骤进行调整。
 - 1) 按照公式 (A. 4. 2) 计算混凝土配合比校正系数。

$$\delta = \frac{M_{c,t}/V_{c,t}}{m_w + m_c + m_p + m_s + m_g} \quad (\text{A. 4. 2})$$

式中 δ —— 配合比校正系数;

$M_{c,t}$ —— 实测拌和物的质量, kg;

$V_{c,t}$ —— 实测拌和物的体积, m^3 ;

m_w —— 单位体积混凝土中用水量, kg/m^3 ;

m_c —— 单位体积混凝土中水泥用量, kg/m^3 ;

m_p —— 单位体积混凝土中掺合料用量, kg/m^3 ;

m_s —— 单位体积混凝土中细骨料用量, kg/m^3 ;

m_g —— 单位体积混凝土中粗骨料用量, kg/m^3 。

3 当配合比校正系数 δ 大于 1% 时, 应对配合比中每项材料用量进行调整, $m_{\text{新}} = \delta m_{\text{原}}$, 即为调整后的材料用量和配合比。

A. 4. 3 配合比确定应按以下规定执行。

- 1 当混凝土设计指标还有抗渗、抗冻和其他要求时, 配合比应先满足抗压强度要求, 再进行其他相关性能试验。如不满足要求, 对配合比进行适当调整, 直到满足全部设计指标。
- 2 当使用过程中遇到下列情况之一时, 应调整或重新进行配合比设计。
 - 1) 对混凝土性能指标要求有变化时;
 - 2) 混凝土原材料品种、质量有变化时。

A. 5 水工常态混凝土配合比设计

A. 5. 1 水工常态混凝土设计应按以下规定执行。

- 1 宜选用硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。大坝常态混凝土应优先选用中热硅酸盐水泥或低热硅酸盐水泥。
- 2 混凝土的水胶比应根据设计对混凝土性能的要求, 通过试验确定, 并不超过表 A. 5. 1-1 的规

定。

表 A. 5. 1-1 混凝土的水胶比最大允许值

部 位	严寒地区	寒冷地区	温和地区
上、下游水位以上（坝体外部）	0.50	0.55	0.60
上、下游水位变化区（坝体外部）	0.45	0.50	0.55
上、下游最低水位以下（坝体外部）	0.50	0.55	0.60
基 础	0.50	0.55	0.60
内 部	0.60	0.65	0.65
受水流冲刷部位	0.45	0.50	0.50

注：在有环境水侵蚀情况下，水位变化区外部及水下混凝土最大允许水胶比应减小 0.05。

3 当无试验资料时，不掺掺和料的常态混凝土的水胶比可按表 A. 5. 1-2 选取。掺加掺和料时，混凝土的最大水胶比应根据掺和料的品种适当调整，并通过试验确定。

表 A. 5. 1-2 不同强度等级的常态混凝土初选水胶比表

28d 设计龄期的混凝土设计抗压强度 (MPa)	水胶比
$f_{cu,k} \leq 20$	0.45~0.60
$20 < f_{cu,k} \leq 30$	0.40~0.55
$30 < f_{cu,k} < 50$	0.35~0.45
$f_{cu,k} \geq 50$	0.35

注 1：本表以使用 42.5 强度等级的通用硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥，不掺掺和料的混凝土为基础编制。
注 2：当使用 32.5 强度等级的水泥，以及低热硅酸盐水泥时，水胶比宜适当减小；当使用 52.5 强度等级的水泥时，水胶比宜适当增大。
注 3：当混凝土设计龄期大于 28d 时，水胶比宜适当增大。

表 A. 5. 1-3 常态混凝土初选用水量表

单位：kg/m³

混凝土坍落度 (mm)	天然粗骨料最大粒径 (mm)				人工粗骨料最大粒径 (mm)			
	20	40	80	150	20	40	80	150
10~30	160	140	120	105	175	155	135	120
30~50	165	145	125	110	180	160	140	125
50~70	170	150	130	115	185	165	145	130
70~90	175	155	135	120	190	170	150	135

注 1：本表适用于细度模数为 2.6~2.8 的天然中砂。当使用细砂或粗砂时，用水量需增加或减少 (3~5) kg/m³；
注 2：采用人工细骨料，用水量增加 (5~10) kg/m³；
注 3：掺入火山灰质掺合料时，用水量需增加 (10~20) kg/m³；采用 I 级粉煤灰时，用水量可减少 (5~10) kg/m³；
注 4：采用外加剂时，用水量应根据外加剂的减水率作适当调整，外加剂的减水率应通过试验确定；
注 5：本表适用于骨料含水状态为饱和面干状态。

4 混凝土用水量应按照以下规定选取，并通过试拌确定。

- 1) 水胶比在 0.40~0.65 范围，当无试验资料时，混凝土用水量可按照表 A. 5. 1-3 初选，并通过试验确定；
- 2) 水胶比小于 0.40 的混凝土以及采用特殊成型工艺的混凝土用水量应通过试验确定。

5 粗骨料按粒径依次分为（5~20）mm、（20~40）mm、（40~80）mm、（80~150 或 120）mm 四个粒级。水工大体积混凝土宜尽量使用粒径较大的骨料，粗骨料最佳级配比例（或组合比）应通过试验确定，以紧密堆积密度较大的级配为宜。当无试验资料时，可按照表 A. 5. 1-4 初选，并通过试验确定。将不同粒径的粗骨料按不同的比例组合，选择使粗骨料振实密度最大的级配组合，并根据施工要求进行调整。

表 A. 5. 1-4 常态混凝土粗骨料级配比例初选表

级配	粗骨料最大粒径 (mm)	天然骨料 (小：中：大：特大)	人工骨料 (小：中：大：特大)
二	40	40:60:—:—	40:60:—:—
三	80	30:30:40:—	30:30:40:—
四	150	20:20:30:30	25:25:20:30

注：表中比例为质量比。

6 混凝土配合比宜选取最优砂率，最优砂率应通过试验选取。当无试验资料时，砂率可按以下原则确定。

1) 混凝土坍落度小于 10mm 时，砂率应通过试验确定。混凝土坍落度为（10~60）mm 时，砂率可按照表 A. 5. 1-5 初选。并通过试验确定。

2) 混凝土坍落度大于 60mm 时，砂率可通过试验确定，也可在表 A. 5. 1-5 的基础上按坍落度每增大 20mm，砂率增大 1% 的幅度予以调整。

表 A. 5. 1-5 常态混凝土砂率初选表

单位：%

骨料最大粒径 (mm)	水胶比			
	0.40	0.50	0.60	0.70
20	36~38	38~40	40~42	42~44
40	30~32	32~34	34~36	36~38
80	24~26	26~28	28~30	30~32
150	20~22	22~24	24~26	26~28

注 1：本表适用于天然粗骨料、细度模数为 2.6~2.8 的天然中砂拌制的混凝土；
注 2：细骨料的细度模数每增减 0.1，砂率相应增减 0.5%~1.0%；
注 3：使用人工粗骨料时，砂率需增加 3%~5%；
注 4：使用人工细骨料时，砂率需增加 2%~3%；
注 5：掺用引气剂时，砂率可减小 2%~3%；掺用粉煤灰时，砂率可减小 1%~2%。

7 外加剂掺量按胶凝材料质量的百分比计，应通过试验确定，并应符合国家和行业现行有关标准的规定。

8 掺合料的掺量按胶凝材料质量的百分比计，应通过试验确定，并应符合国家和行业现行有关标准的规定。

9 大体积内部混凝土的胶凝材料用量不宜低于 140kg/m³。

10 有抗冻要求的混凝土，应掺用引气剂。对大中型水电水利工程，混凝土的最小含气量应通过试验确定；当没有试验资料时，混凝土的最小含气量应符合 SL 211 的规定。混凝土的含气量不宜超

过 7%。

A. 5.2 水工泵送混凝土设计应按以下规定执行。

- 1 宜选用硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，不宜使用矿渣硅酸盐水泥或火山灰质硅酸盐水泥。
- 2 宜掺用粉煤灰等活性掺合料。
- 3 宜选用质地坚硬、级配良好、细度模数 2.6~3.2 的中粗砂。
- 4 应选用连续级配粗骨料，骨料最大粒径不宜超过 40mm。骨料最大粒径与输送管径之比宜符合表 A. 5.2 的规定。

表 A. 5.2 泵送混凝土粗骨料最大粒径与输送管径之比

粗骨料品种	泵送高度 (m)	骨料最大粒径与输送管径之比
人工粗骨料	<50	≤1/3.0
	50~100	≤1/4.0
	>100	≤1/5.0
天然粗骨料	<50	≤1/2.5
	50~100	≤1/3.0
	>100	≤1/4.0

- 5 应掺用坍落度经时损失小的泵送剂或缓凝高效减水剂、引气剂等。
- 6 水胶比不宜大于 0.60。
- 7 胶凝材料用量不宜低于 300kg/m³。
- 8 砂率宜为 35%~45%。
- 9 当掺用掺合料较多时，除应满足强度要求外，还应进行钢筋锈蚀及混凝土碳化试验。

A. 5.3 抗冲磨混凝土设计应按以下规定执行。

- 1 宜选用强度等级不低于 42.5 的中热硅酸盐水泥、硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。
- 2 应掺用粉煤灰、硅粉、磨细矿渣等活性掺合料，掺合料用量应通过优化试验确定，最大掺量不应超过表 A. 5.3 的规定。C50 以上混凝土宜选用 I 级粉煤灰，也可以选用需水量比不大于 100%、细度不大于 15%、烧失量不大于 3%的 II 级粉煤灰。

表 A. 5.3 抗冲磨混凝土活性掺合料最大掺量

活性掺合料品种	占胶凝材料总质量 (%)
粉煤灰	25
磨细矿渣	50
硅粉	10
粉煤灰+磨细矿渣+硅粉	50
粉煤灰+硅粉	35

- 3 应优先选用质地坚硬、含石英颗粒多、清洁、级配良好、细度模数偏大的细骨料。
- 4 应优先选用质地坚硬耐磨的粗骨料。天然粗骨料粒径不宜大于 40mm，人工粗骨料粒径不宜大

于 80mm，掺用钢纤维时混凝土骨料粒径不宜大于 40mm。

5 可采用铁矿骨料、铸石骨料等特殊骨料。

6 应掺用优质高效减水剂，如优先选用低收缩的聚羧酸高性能减水剂。有抗冻要求的应通过试验论证加入引气剂的必要性。

7 掺用钢纤维时，所用钢纤维应符合 A. 5. 3. 8 的有关规定。

8 应通过配合比优化试验，选择抗磨蚀性、和易性、体积稳定性和经济性较优的抗磨蚀混凝土配合比。

A. 5. 4 面板混凝土设计应按以下规定执行。

1 面板混凝土宜采用 42.5 级中热硅酸盐水泥，也可采用 42.5 级硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。当采用其他水泥品种和强度等级时，应通过试验确定。

2 宜掺用具有一定活性、较小干缩性的粉煤灰或其他优质掺合料，采用掺合料的种类及掺量应根据料源并通过试验确定。粉煤灰质量等级不宜低于 II 级，掺量为 15%~30%。严寒地区取较低值，温和地区取较高值。细骨料较粗时可采用粉煤灰超量取代水泥措施，改善混凝土性能。

3 应掺用引气剂和高效减水剂，混凝土的含气量宜控制在 4%~6%。根据需要，也可掺用调节混凝土凝结时间的外加剂。外加剂的种类及掺量应通过试验确定，各种外加剂间应具有相容性。

4 应采用二级配粗骨料，粗骨料粒径不应大于 40mm。宜适当减少中石用量，以减少溜槽入仓时混凝土离析。用于面板的细骨料吸水率不应大于 3%，含泥量不应大于 2%，细度模数宜在 2.4~2.8 范围内。粗骨料的吸水率不应大于 2%，含泥量不应大于 1%。

5 面板混凝土的水胶比，温和地区应小于 0.50，严寒和寒冷地区应小于 0.45。

6 溜槽输送混凝土时，坍落度应满足施工要求，溜槽入口处的混凝土坍落度宜控制在（30~70）mm，含气量应控制在 4%~6%。

7 面板混凝土应优选外加剂和掺合料，降低水泥用量和用水量，减少水化热温升和收缩变形，保证面板混凝土具有较高的抗拉强度和极限拉伸值。有条件时，宜优先选用热膨胀系数较低的骨料。必要时，可掺用纤维材料。

A. 6 水工碾压混凝土配合比设计

A. 6. 1 碾压混凝土所用原材料应符合以下规定。

1 宜选用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥和低热硅酸盐水泥，水泥的强度等级不宜低于 42.5 级。

2 应优先选用优质粉煤灰作为掺合料。粉煤灰掺量超过 65%时，应通过试验论证；

3 粗骨料粒径不宜超过 80mm。

4 当采用人工骨料时，细骨料中的石粉（小于 0.16mm 颗粒）含量宜控制在 15%~25%。最优石粉含量应通过试验确定。

5 应掺外加剂，以满足可碾性、缓凝性、引气性及其他性能要求。

A. 6. 2 碾压混凝土配合比设计应满足设计强度和耐久性要求，并做到经济合理。配制强度按照公式（A. 2. 2）计算，设计龄期选用 90d 或 180d，设计抗压强度保证率应不低于 80%， t 为 0. 842。

A. 6. 3 碾压混凝土的水胶比应根据设计对碾压混凝土性能的要求，通过试验确定，并不超过表 A. 5. 1-1 的规定。当无试验资料时，碾压混凝土的水胶比可按表 A. 6. 3 初选，并通过试验确定。

表 A. 6. 3 不同强度等级的碾压混凝土水胶比初选表

90d 设计龄期的混凝土设计抗压强度 (MPa)	水胶比
$f_{cu,k} \leq 15$	0. 50~0. 55
$15 < f_{cu,k} \leq 20$	0. 45~0. 50
$f_{cu,k} \geq 25$	< 0. 45

注 1：本表以使用 42. 5 强度等级的通用硅酸盐水泥或中热硅酸盐水泥，掺和料用量 40%~60% 的碾压混凝土为基础编制。
注 2：当使用 32. 5 强度等级的水泥时，水胶比宜适当减小。

A. 6. 4 碾压混凝土用水量应经过试验确定。满足工作度（VC 值）要求的用水量，主要与最大骨料粒径、岩性、粒型，以及细骨料用量和品质有关。当无试验资料时，碾压混凝土用水量可按照表 A. 6. 4 初选，并通过试验确定。

表 A. 6. 4 碾压混凝土用水量初选表

单位：kg/m³

碾压混凝土 VC 值 (s)	天然粗骨料最大粒径 (mm)		人工粗骨料最大粒径 (mm)	
	40	80	40	80
1~5	120	105	135	115
5~10	115	100	130	110
10~20	110	95	120	105

注 1：本表适用于细度模数为 2. 6~2. 8 的天然中砂，当使用细砂或粗砂时，用水量需增加或减少（5~10）kg/m³；
注 2：采用人工细骨料，用水量增加（5~10）kg/m³；
注 3：掺入火山灰质掺合料时，用水量需增加（10~20）kg/m³；采用 I 级粉煤灰时，用水量可减少（5~10）kg/m³；
注 4：采用外加剂时，用水量应根据外加剂的减水率作适当调整，外加剂的减水率应通过试验确定。

A. 6. 5 碾压混凝土最优砂率应按以下规定确定。

1 碾压混凝土的砂率可按照表 A. 6. 5 初选，并通过试验确定。

表 A. 6. 5 碾压混凝土砂率初选表

单位：%

骨料最大粒径 (mm)	水胶比			
	0. 40	0. 50	0. 60	0. 70
40	32~34	34~36	36~38	38~40
80	27~29	29~32	32~34	34~36

注 1：本表适用于天然粗骨料、细度模数为 2. 6~2. 8 的天然中砂拌制的 VC 值为（5~12）s 的碾压混凝土；
注 2：细骨料的细度模数每增减 0. 1，砂率相应增减 0. 5%~1. 0%；
注 3：使用人工粗骨料时，砂率需增加 3%~5%；
注 4：使用人工细骨料时，砂率需增加 2%~3%；
注 5：掺用引气剂时，砂率可减小 2%~3%；掺用粉煤灰时，砂率可减小 1%~2%。

2 在满足碾压混凝土施工工艺要求的前提下，通过试验确定最优砂率。最优砂率的评定标准为。

1) 骨料分离少；

2) 在固定水胶比及用水量条件下, 拌和物 VC 值小, 混凝土密度大、强度高。

A. 6. 6 粗骨料合理级配主要由骨料堆积密度、颗粒表面积和粒形等因素确定。将不同粒径的粗骨料按不同的比例组合, 选择使粗骨料振实密度最大的级配组合, 并根据施工要求进行调整。当无试验资料时, 可按照表 A. 6. 6 初选, 并通过试验确定。

表 A. 6. 6 碾压混凝土粗骨料级配比例初选表

级配	粗骨料最大粒径 (mm)	天然粗骨料 (小: 中: 大)	人工粗骨料 (小: 中: 大)
二	40	50:50:—	50:50:—
三	80	30:40:30	30:40:30

注: 表中比例为质量比。

A. 6. 7 碾压混凝土配合比的计算方法和步骤除应遵守 A. 3 节和 A. 4 节的规定外, 尚应符合以下规定。

- 1 碾压混凝土拌和物的设计工作度 (VC 值), 出机时宜选用 (2~8) s, 摊铺后碾压时宜选用 (5~12) s。特殊施工条件宜专门论证。
- 2 大体积永久建筑物碾压混凝土的胶凝材料用量不宜低于 $130\text{kg}/\text{m}^3$ 。
- 3 由用水量、水泥用量、掺合料用量、石粉中小于 0.08mm 颗粒以及引入的气体所组成的浆体应充分包裹细骨料颗粒表面, 并填满细骨料在紧密堆积状态下的所有空隙, 且有一定的富裕, 即灰浆填充系数 α 宜在 1.1~1.3; 配合比选定砂率后, 灰浆与细骨料组成的砂浆应能充分包裹粗骨料, 并能填满粗骨料在紧密堆积状态下的所有空隙, 且有一定富裕, 即砂浆填充系数 β 宜在 1.2~1.5。灰浆与砂浆的体积之比, 即浆砂比宜在 0.40~0.50 之间。

A. 7 海水环境混凝土配合比设计

A. 7. 1 海水环境混凝土所用原材料应符合以下规定。

- 1 配制混凝土所用的水泥宜采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥和矿渣硅酸盐水泥。受冻地区的混凝土宜采用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥; 不受冻地区的浪溅区混凝土宜采用矿渣硅酸盐水泥。普通硅酸盐水泥和硅酸盐水泥熟料中的铝酸三钙含量宜在 6%~12% 范围内。
- 2 粉煤灰质量应满足 II 级以上粉煤灰的要求。粉煤灰取代水泥质量的最大限量应符合下列规定。
 - 1) 用硅酸盐水泥拌制的混凝土不宜大于 25%;
 - 2) 用普通硅酸盐水泥拌制的混凝土不宜大于 20%;
 - 3) 用矿渣硅酸盐水泥拌制的混凝土不宜大于 10%;
 - 4) 经试验论证, 最大掺量可不受以上限制。
- 3 磨细粒化高炉矿渣的比表面积不宜小于 $400\text{m}^2/\text{kg}$, 用于有温度控制要求的混凝土时不宜大于 $450\text{m}^2/\text{kg}$ 。其掺量宜通过试验确定, 用硅酸盐水泥拌制的混凝土, 其掺量不宜小于胶凝材料质量的 50%; 用普通硅酸盐水泥拌制的混凝土, 其掺量不宜小于胶凝材料质量的 40%。
- 4 同时掺入磨细粒化高炉矿渣和粉煤灰时, 其总量不宜大于胶凝材料总量的 70%。
- 5 必要时, 掺磨细粒化高炉矿渣或粉煤灰的混凝土, 可同时掺 3%~5% 的硅灰, 其掺量应通过试

验确定。

- 6 细骨料不宜采用海砂。当受条件限制不应不采用海砂时，应经过充分论证。
- 7 不应采用可能发生碱—骨料反应的活性骨料，即使抑制措施有效也不应采用。
- 8 外加剂对混凝土的性能应无不利影响，所带入的氯离子总量不宜大于水泥质量的 0.02%。
- 9 拌和用水的氯离子含量不大于 200mg/L。

A. 7. 2 海水环境混凝土配合比设计应满足设计强度和耐久性要求，并做到经济合理。混凝土配制强度应同时满足设计强度和耐久性要求所决定的强度。

1 设计强度确定的配制强度按照公式 (A. 2. 2) 计算，混凝土龄期为 28d，强度保证率为 95%， t 为 1.645。对掺加粉煤灰或粒化高炉矿渣的混凝土可按 90d 龄期。

2 耐久性确定的配制强度是指达到耐久性要求的混凝土水胶比所决定的强度。

A. 7. 3 海水环境配筋混凝土不同暴露部位混凝土拌和物最大水胶比和最低小水泥用量、混凝土中最大氯离子含量、抗氯离子侵入性指标应符合 SL 654 的规定。

A. 7. 4 海水环境混凝土配合比设计的其他步骤按 A. 3~A. 5 节的规定执行。

附录 B 水工砂浆配合比设计方法

B.1 基本原则

- B.1.1 砂浆的技术指标要求应与其接触的混凝土的设计指标相适应。
- B.1.2 砂浆所使用的原材料应与其接触的混凝土所使用的原材料相同。
- B.1.3 砂浆应与其接触的混凝土所使用的掺合料品种、掺量相同，减水剂的掺量为混凝土掺量的 70% 左右；当掺引气剂时，其掺量应通过试验确定，以含气量达到 7%~9% 时的掺量为宜。
- B.1.4 采用体积法计算砂浆配合比中各项材料用量。

B.2 砂浆配制强度的确定

B.2.1 砂浆设计抗压强度系指按照标准方法制作和养护的边长为 70.7mm 的立方体试件，在设计龄期用标准试验方法测得的具有设计保证率的抗压强度，以 MPa 计。

B.2.2 砂浆配制抗压强度按照公式 (B.2.2) 计算。

$$f_{m,0} = f_{m,k} + t\sigma \quad (\text{B.2.2})$$

式中 $f_{m,0}$ —— 砂浆配制抗压强度，MPa；

$f_{m,k}$ —— 砂浆设计龄期的设计抗压强度，MPa；

t —— 保证率系数，由给定的保证率 P 选定，其值按照表 A.2.2 选用；

σ —— 砂浆立方体抗压强度标准差，MPa。

B.2.3 砂浆抗压强度标准差，宜按同品种砂浆抗压强度统计资料确定。

1 统计时，砂浆抗压强度试件总数不应少于 25 组；

2 根据近期相同抗压强度、生产工艺和配合比基本相同的砂浆抗压强度资料，砂浆抗压强度标准差 σ 按照公式 (B.2.3) 计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{m,i}^2 - na_{f_m}^2}{n-1}} \quad (\text{B.2.3})$$

式中 σ —— 砂浆抗压强度标准差；

$f_{m,i}$ —— 第 i 组试件抗压强度，MPa；

a_{f_m} —— n 组试件的抗压强度平均值，MPa；

n —— 试件组数。

3 当无近期同品种砂浆抗压强度统计资料时， σ 值可按照表 B.2.3 取用。施工中应根据现场施工时抗压强度的统计结果调整 σ 值。

表 B.2.3 标准差 σ 选用值

单位：MPa

设计龄期砂浆抗压强度标准值	≤10	15	≥20
砂浆抗压强度标准差	3.5	4.0	4.5

B.3 砂浆配合比计算

B.3.1 可选择与其接触混凝土的水胶比作为砂浆的初选水胶比。

B.3.2 砂浆配合比设计时用水量可按照表 B.3.2 确定。

表 B.3.2 砂浆用水量参考表

水泥品种	细骨料细度	用水量 (kg/m ³)
普通硅酸盐水泥	粗砂	270
	中砂	280
	细砂	310

注：适用于稠度（40~60）mm，稠度每增减 10mm，用水量相应增减（8~10）kg/m³。

B.3.3 砂浆的胶凝材料用量（ $m_c + m_p$ ）、水泥用量 m_c 和掺合料用量 m_p 按照公式 (B.3.3-1)、公式 (B.3.3-2)、公式 (B.3.3-3) 计算。

$$m_c + m_p = \frac{m_w}{w/(c+p)} \quad (\text{B.3.3-1})$$

$$m_c = (1 - P_m)(m_c + m_p) \quad (\text{B.3.3-2})$$

$$m_p = P_m(m_c + m_p) \quad (\text{B.3.3-3})$$

式中 m_c —— 单位体积砂浆中水泥用量，kg/m³；

m_p —— 单位体积砂浆中掺合料用量，kg/m³；

m_w —— 单位体积砂浆中用水量，kg/m³；

$w/(c+p)$ —— 水胶比；

P_m —— 掺合料掺量。

B.3.4 细骨料用量由已确定的用水量和胶凝材料用量，根据体积法按照公式 (B.3.4-1)、公式 (B.3.4-2) 计算。

$$V_s = 1 - \left(\frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_p}{\rho_p} + a \right) \quad (\text{B.3.4-1})$$

$$m_s = V_s \rho_s \quad (\text{B.3.4-2})$$

式中 V_s —— 细骨料的绝对体积，m³；

m_w —— 单位体积砂浆中用水量，kg/m³；

m_c —— 单位体积砂浆中水泥用量，kg/m³；

m_p —— 单位体积砂浆中掺合料用量，kg/m³；

a —— 含气量；

ρ_w —— 水的密度，kg/m³；

ρ_c —— 水泥密度，kg/m³；

ρ_p ——掺合料密度, kg/m^3 ;

ρ_s ——细骨料饱和面干表观密度, kg/m^3 ;

m_s ——单位体积砂浆中细骨料用量, kg/m^3 。

B. 3. 5 列出砂浆配合比中各组成材料的计算用量和比例。

B. 4 砂浆配合比的试配、调整和确定

B. 4. 1 按计算出的配合比的各项材料用量进行试拌, 固定水胶比, 调整用水量直至达到设计要求的稠度。由调整后的用水量得出砂浆抗压强度试验配合比。

B. 4. 2 砂浆抗压强度试验至少应采用三个不同的配合比, 其中一个应为公式(B. 4. 1)确定的配合比, 其他配合比的用水量不变, 水胶比依次增减, 变化幅度为 0. 05。当不同水胶比的砂浆稠度不能满足设计要求时, 可通过增、减用水量进行调整。

B. 4. 3 测定满足设计要求的稠度时砂浆的容重、含气量及抗压强度, 根据 28d 龄期抗压强度试验结果, 绘出抗压强度与水胶比关系曲线, 用作图法或计算法求出与砂浆配制强度 $f_{m,0}$ 相对应的水胶比。

B. 4. 4 计算出砂浆配合比中各组成材料用量及比例, 并经试拌确定最终配合比。

附表 $\frac{\theta}{\theta_0}$ 值和 $\frac{\alpha t}{D^2}$ 值的关系表（高度为直径二倍的圆柱体）

$\frac{\alpha t}{D^2}$	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.010	0.99628	0.99603	0.99578	0.99553	0.99529	0.99504	0.99479	0.99455	0.99430	0.99405
0.011	0.99381	0.99342	0.99303	0.99264	0.99225	0.99186	0.99147	0.99108	0.99069	0.99030
0.012	0.98991	0.98939	0.98887	0.98834	0.98782	0.98730	0.98677	0.98625	0.98573	0.98520
0.013	0.98468	0.98403	0.98338	0.98273	0.98209	0.98144	0.98079	0.98014	0.97949	0.97884
0.014	0.97819	0.97743	0.97666	0.97590	0.97513	0.97437	0.97360	0.97284	0.97207	0.97131
0.015	0.97054	0.96968	0.96882	0.96796	0.96710	0.96624	0.96538	0.96451	0.96365	0.96279
0.016	0.96193	0.96096	0.95999	0.95902	0.95805	0.95708	0.95611	0.95514	0.95417	0.95320
0.017	0.95223	0.95116	0.95009	0.94902	0.94796	0.94689	0.94582	0.94475	0.94368	0.94262
0.018	0.94155	0.94039	0.93924	0.93809	0.93693	0.93578	0.93462	0.93347	0.93231	0.93116
0.019	0.93001	0.92878	0.92755	0.92632	0.92509	0.92386	0.92263	0.92140	0.92017	0.91894
0.020	0.91771	0.91642	0.91512	0.91382	0.91253	0.91123	0.90993	0.90864	0.90734	0.90604
0.021	0.90475	0.90350	0.90225	0.90100	0.89975	0.89850	0.89724	0.89599	0.89474	0.89349
0.022	0.89124	0.88985	0.88845	0.88706	0.88566	0.88427	0.88287	0.88148	0.88008	0.87869
0.023	0.87729	0.87586	0.87443	0.87300	0.87156	0.87013	0.86870	0.86727	0.86583	0.86440
0.024	0.86297	0.86151	0.86004	0.85858	0.85712	0.85566	0.85419	0.85273	0.85127	0.84981
0.025	0.84834	0.84685	0.84536	0.84387	0.84238	0.84089	0.83940	0.83791	0.83642	0.83493
0.026	0.83344	0.83194	0.83043	0.82893	0.82742	0.82592	0.82442	0.82291	0.82141	0.81990
0.027	0.81840	0.81689	0.81537	0.81386	0.81234	0.81083	0.80932	0.80780	0.80630	0.80478
0.028	0.80326	0.80174	0.80022	0.79870	0.79718	0.79567	0.79415	0.79263	0.79111	0.78959
0.029	0.78807	0.78655	0.78503	0.78351	0.78199	0.78047	0.77895	0.77742	0.77590	0.77438
0.030	0.77286	0.77134	0.76982	0.76830	0.76678	0.76526	0.76373	0.76221	0.76069	0.75917
0.031	0.75765	0.75631	0.75462	0.75311	0.75159	0.75008	0.74857	0.74705	0.74554	0.74402
0.032	0.74251	0.74101	0.73950	0.73800	0.73649	0.73499	0.73349	0.73198	0.73048	0.72897
0.033	0.72747	0.72598	0.72448	0.72299	0.72150	0.72001	0.71852	0.71702	0.71553	0.71404
0.034	0.71255	0.71107	0.70959	0.70811	0.70663	0.70515	0.70367	0.70220	0.70072	0.69924
0.035	0.69776	0.69630	0.69483	0.69337	0.69190	0.69044	0.68897	0.68751	0.68604	0.68458
0.036	0.68311	0.68166	0.68022	0.67877	0.67732	0.67588	0.67443	0.67298	0.67154	0.67009
0.037	0.66864	0.66721	0.66579	0.66436	0.66293	0.66150	0.66008	0.65865	0.65722	0.65579
0.038	0.65436	0.65296	0.65155	0.65014	0.64873	0.64732	0.64591	0.64451	0.64310	0.64169
0.039	0.64028	0.63889	0.63751	0.63612	0.63473	0.63334	0.63196	0.63057	0.62918	0.62779
0.040	0.62641	0.62504	0.62366	0.62229	0.62091	0.61954	0.61818	0.61682	0.61546	0.61409
0.041	0.61273	0.61138	0.61003	0.60868	0.60733	0.60598	0.60464	0.60330	0.60196	0.60062
0.042	0.59928	0.59795	0.59663	0.59530	0.59397	0.59264	0.59133	0.59007	0.58869	0.58738
0.043	0.58606	0.58475	0.58345	0.58214	0.58084	0.57953	0.57824	0.57694	0.57565	0.57436
0.044	0.57306	0.57178	0.57050	0.56922	0.56793	0.56665	0.56538	0.56411	0.56284	0.56157
0.045	0.56029	0.55903	0.55777	0.55651	0.55525	0.55399	0.55275	0.55150	0.55025	0.54900
0.046	0.54775	0.54652	0.54528	0.54404	0.54281	0.54157	0.54035	0.53912	0.53790	0.53667

注：5.15 节用表。

附表 (续)

$\frac{at}{D^2 D^2}$	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.047	0.53545	0.53423	0.53302	0.53181	0.53059	0.52938	0.52818	0.52698	0.52577	0.52457
0.048	0.52337	0.52218	0.52099	0.51980	0.51861	0.51742	0.51624	0.51507	0.51389	0.51271
0.049	0.51153	0.51036	0.50920	0.50803	0.50696	0.50569	0.50454	0.50338	0.50223	0.50107
0.050	0.49992	0.49877	0.49763	0.49649	0.49534	0.49420	0.49306	0.49193	0.49080	0.48966
0.051	0.48853	0.48741	0.48629	0.48517	0.48405	0.48292	0.48181	0.48070	0.47959	0.47848
0.052	0.47737	0.47628	0.47518	0.47408	0.47298	0.47188	0.47079	0.46970	0.46862	0.46753
0.053	0.46644	0.46537	0.46429	0.46321	0.46214	0.46106	0.46000	0.45893	0.45787	0.45680
0.054	0.45573	0.45468	0.45363	0.45257	0.45152	0.45046	0.44942	0.44838	0.44733	0.44629
0.055	0.44525	0.44421	0.44318	0.44215	0.44111	0.44008	0.43906	0.43804	0.43702	0.43600
0.056	0.43497	0.43396	0.43295	0.43194	0.43093	0.42992	0.42892	0.42792	0.42692	0.42592
0.057	0.42492	0.42393	0.42294	0.42195	0.42096	0.41997	0.41899	0.41801	0.41703	0.41605
0.058	0.41507	0.41411	0.41314	0.41217	0.41120	0.41023	0.40927	0.40831	0.40736	0.40640
0.059	0.40544	0.40449	0.40351	0.40259	0.40165	0.40070	0.39976	0.39882	0.39788	0.39695
0.060	0.39601	0.39508	0.39415	0.39322	0.39230	0.39137	0.39045	0.38953	0.38862	0.38770
0.061	0.38678	0.38587	0.38496	0.38406	0.38315	0.38224	0.38134	0.38045	0.37955	0.37865
0.062	0.37775	0.37686	0.37598	0.37509	0.37420	0.37331	0.37243	0.37155	0.37067	0.36976
0.063	0.36892	0.36805	0.36718	0.36631	0.36544	0.36457	0.36371	0.36285	0.36200	0.36114
0.064	0.36028	0.35943	0.35858	0.35773	0.35688	0.35603	0.35518	0.35434	0.35350	0.35266
0.065	0.35182	0.35099	0.35016	0.34933	0.34850	0.34767	0.34684	0.34602	0.34520	0.34438
0.066	0.34356	0.34274	0.34193	0.34112	0.34030	0.33949	0.33869	0.33788	0.33708	0.33627
0.067	0.33547	0.33468	0.33388	0.33308	0.33229	0.33150	0.33071	0.32992	0.32914	0.32835
0.068	0.32756	0.32679	0.32601	0.32523	0.32445	0.32368	0.32291	0.32214	0.32137	0.32060
0.069	0.31983	0.31907	0.31831	0.31755	0.31679	0.31603	0.31528	0.31453	0.31377	0.31302
0.070	0.31227	0.31153	0.31079	0.31004	0.30930	0.30856	0.30782	0.30709	0.30635	0.30561
0.071	0.30488	0.30415	0.30343	0.30270	0.30197	0.30125	0.30053	0.29981	0.29909	0.29837
0.072	0.29766	0.29695	0.29624	0.29553	0.29482	0.29410	0.29340	0.29270	0.29200	0.29130
0.073	0.29059	0.28990	0.28920	0.28851	0.28782	0.28712	0.28643	0.28575	0.28506	0.28437
0.074	0.28369	0.28301	0.28233	0.28165	0.28097	0.28029	0.27962	0.27895	0.27828	0.27761
0.075	0.27694	0.27627	0.27561	0.27495	0.27429	0.27362	0.27292	0.27231	0.27165	0.27100
0.076	0.27034	0.26969	0.26905	0.26840	0.26775	0.26710	0.26646	0.26582	0.26518	0.26454
0.077	0.26390	0.26326	0.26263	0.26199	0.26136	0.26073	0.26010	0.25948	0.25885	0.25822
0.078	0.25759	0.25698	0.25636	0.25574	0.25512	0.25450	0.25000	0.25328	0.25266	0.25205
0.079	0.25144	0.25083	0.25023	0.24962	0.24902	0.24841	0.24781	0.24722	0.24662	0.24602
0.080	0.24542	0.24483	0.24424	0.24365	0.24306	0.24247	0.24188	0.24130	0.24071	0.24013
0.081	0.23954	0.23897	0.23839	0.23781	0.23723	0.23665	0.23668	0.23551	0.23494	0.23437
0.082	0.23380	0.23324	0.23267	0.23211	0.23154	0.23098	0.23042	0.22986	0.22930	0.22875
0.083	0.22819	0.22764	0.22708	0.22653	0.22598	0.22543	0.22488	0.22434	0.22379	0.22325
0.084	0.22270	0.22217	0.22163	0.22109	0.22005	0.22001	0.21948	0.21895	0.21841	0.21788
0.085	0.21735	0.21682	0.21630	0.21577	0.21524	0.21472	0.21420	0.21368	0.21316	0.21264
0.086	0.21211	0.21160	0.21109	0.21057	0.21006	0.20954	0.20904	0.20853	0.20802	0.20751

附表 (续)

$\frac{at}{D^2} \frac{at}{D^2}$	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.087	0.20700	0.20650	0.20600	0.20550	0.20500	0.20449	0.20400	0.20350	0.20300	0.20251
0.088	0.20201	0.20152	0.20103	0.20054	0.20005	0.19956	0.19907	0.19859	0.19810	0.19762
0.089	0.19713	0.19665	0.19618	0.19570	0.19522	0.19474	0.19426	0.19379	0.19331	0.19284
0.090	0.19237	0.19190	0.19143	0.19096	0.19050	0.19003	0.18957	0.18910	0.18864	0.18818
0.091	0.18771	0.18726	0.18690	0.18635	0.18589	0.18543	0.18498	0.18453	0.18408	0.18362
0.092	0.18317	0.18273	0.18228	0.18183	0.18139	0.18094	0.18050	0.18006	0.17962	0.17918
0.093	0.17873	0.17830	0.17786	0.17743	0.17699	0.17655	0.17612	0.17569	0.17526	0.17483
0.094	0.17440	0.17397	0.17355	0.17312	0.17270	0.17227	0.17185	0.17143	0.17101	0.17059
0.095	0.17017	0.16975	0.16934	0.16892	0.16850	0.16809	0.16768	0.16727	0.16686	0.16645
0.096	0.16604	0.16563	0.16522	0.16482	0.16441	0.16401	0.16361	0.16320	0.16280	0.16240
0.097	0.16200	0.16160	0.16121	0.16081	0.16042	0.16002	0.15963	0.15923	0.15884	0.15845
0.098	0.15806	0.15767	0.15729	0.15690	0.15651	0.15612	0.15574	0.15536	0.15498	0.15459
0.099	0.15421	0.15383	0.15346	0.15308	0.15270	0.15232	0.15195	0.15158	0.15120	0.15083
0.100	0.15045	0.15009	0.14972	0.14935	0.14898	0.14861	0.14825	0.14788	0.14752	0.14715
0.101	0.14679	0.14643	0.14607	0.14571	0.14535	0.14499	0.14463	0.14428	0.14392	0.14356
0.102	0.14321	0.14286	0.14250	0.14215	0.14180	0.14145	0.14110	0.14075	0.14041	0.14006
0.103	0.13971	0.13937	0.13903	0.13868	0.13834	0.13799	0.13766	0.13732	0.13698	0.13664
0.104	0.13630	0.13596	0.13563	0.13529	0.13496	0.13462	0.13429	0.13396	0.13363	0.13330
0.105	0.13296	0.13264	0.13231	0.13198	0.13166	0.13133	0.13101	0.13068	0.13036	0.13004
0.106	0.12971	0.12939	0.12907	0.12876	0.12844	0.12811	0.12780	0.12748	0.12717	0.12685
0.107	0.12654	0.12623	0.12591	0.12560	0.12529	0.12498	0.12467	0.12436	0.12405	0.12375
0.108	0.12344	0.12313	0.12283	0.12253	0.12222	0.12192	0.12161	0.12131	0.12101	0.12071
0.109	0.12041	0.12012	0.11982	0.11952	0.11922	0.11893	0.11863	0.11834	0.11804	0.11775
0.110	0.11746	0.11717	0.11688	0.11659	0.11630	0.11601	0.11572	0.11544	0.11515	0.11487
0.111	0.11458	0.11430	0.11401	0.11373	0.11345	0.11316	0.11288	0.11261	0.11233	0.11205
0.112	0.11177	0.11149	0.11121	0.11094	0.11066	0.11038	0.11011	0.10984	0.10957	0.10929
0.113	0.10902	0.10875	0.10848	0.10821	0.10794	0.10767	0.10741	0.10714	0.10687	0.10661
0.114	0.10634	0.10608	0.10581	0.10555	0.10529	0.10502	0.10476	0.10450	0.10424	0.10398
0.115	0.10372	0.10347	0.10321	0.10295	0.10270	0.10244	0.10219	0.10193	0.10168	0.10143
0.116	0.10117	0.10092	0.10067	0.10042	0.10017	0.09992	0.09967	0.09942	0.09918	0.09893
0.117	0.09868	0.09844	0.09819	0.09795	0.09771	0.09746	0.09722	0.09698	0.09673	0.09649
0.118	0.09625	0.09601	0.09577	0.09553	0.09529	0.09505	0.09482	0.09458	0.09435	0.09411
0.119	0.09388	0.09364	0.09341	0.09318	0.09295	0.09271	0.09248	0.09225	0.09202	0.09179
0.120	0.09156	0.09133	0.09111	0.09088	0.09066	0.09043	0.09021	0.08998	0.08975	0.08953
0.121	0.08930	0.08908	0.08886	0.08864	0.08842	0.08820	0.08798	0.08776	0.08754	0.08732
0.122	0.08710	0.08688	0.08667	0.08645	0.08624	0.08602	0.08581	0.08559	0.08538	0.08516
0.123	0.08495	0.08474	0.08453	0.08432	0.08411	0.08390	0.08369	0.08348	0.08327	0.08306
0.124	0.08285	0.08264	0.08244	0.08223	0.08203	0.08183	0.08162	0.08142	0.08121	0.08101
0.125	0.08080	0.08060	0.08040	0.08020	0.08000	0.07980	0.07960	0.07940	0.07920	0.07900
0.126	0.07880	0.07861	0.07841	0.07822	0.07802	0.07783	0.07760	0.07744	0.07724	0.07705

附表 (续)

$\frac{at}{D^2} \frac{at}{D^2}$	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.127	0.07685	0.07666	0.07647	0.07628	0.07609	0.07590	0.07571	0.07552	0.07533	0.07514
0.128	0.07495	0.07476	0.07458	0.07439	0.07421	0.07402	0.07384	0.07365	0.07347	0.07328
0.129	0.07309	0.07291	0.07273	0.07255	0.07237	0.07219	0.07201	0.07183	0.07165	0.07146
0.130	0.07128	0.07111	0.07093	0.07075	0.07058	0.07040	0.07022	0.07005	0.06987	0.06970
0.131	0.06952	0.06935	0.06917	0.06900	0.06883	0.06866	0.06848	0.06831	0.06814	0.06797
0.132	0.06780	0.06763	0.06746	0.06729	0.06712	0.06696	0.06679	0.06662	0.06645	0.06628
0.133	0.06611	0.06595	0.06579	0.06562	0.06546	0.06529	0.06513	0.06497	0.06480	0.06464
0.134	0.06447	0.06431	0.06415	0.06399	0.06383	0.06367	0.06351	0.06335	0.06319	0.06303
0.135	0.06287	0.06272	0.06256	0.06241	0.06225	0.06209	0.06194	0.06178	0.06162	0.06147
0.136	0.06131	0.06116	0.06101	0.06086	0.06070	0.06055	0.06040	0.06025	0.06009	0.05994
0.137	0.05979	0.05964	0.05949	0.05934	0.05920	0.05905	0.05890	0.05875	0.05860	0.05845
0.138	0.05830	0.05816	0.05801	0.05787	0.05772	0.05758	0.05743	0.05720	0.05714	0.05700
0.139	0.05685	0.05671	0.05657	0.05643	0.05629	0.05615	0.05601	0.05586	0.05572	0.05558
0.140	0.05544	0.05530	0.05516	0.05503	0.05489	0.05475	0.05461	0.05448	0.05434	0.05420
0.141	0.05406	0.05393	0.05379	0.05366	0.05352	0.05339	0.05326	0.05312	0.05299	0.05285
0.142	0.05272	0.05259	0.05246	0.05232	0.05219	0.05206	0.05193	0.05180	0.05167	0.05154
0.143	0.05141	0.05128	0.05115	0.05102	0.05089	0.05077	0.05064	0.05051	0.05038	0.05025
0.144	0.05013	0.05000	0.04988	0.04975	0.04963	0.04950	0.04938	0.04925	0.04913	0.04900
0.145	0.04888	0.04876	0.04863	0.04851	0.04839	0.04827	0.04815	0.04802	0.04790	0.04778
0.146	0.04766	0.04754	0.04742	0.04730	0.04718	0.04707	0.04695	0.04683	0.04671	0.04659
0.147	0.04647	0.04636	0.04624	0.04612	0.04601	0.04589	0.04578	0.04566	0.04555	0.04543
0.148	0.04531	0.04520	0.04509	0.04497	0.04486	0.04475	0.04464	0.04452	0.04441	0.04430
0.149	0.04418	0.04407	0.04396	0.04385	0.04374	0.04363	0.04352	0.04341	0.04330	0.04319
0.150	0.04308	0.04298	0.04287	0.04277	0.04266	0.04256	0.04246	0.04235	0.04225	0.04214
0.151	0.04204	0.04193	0.04183	0.04172	0.04161	0.04150	0.04140	0.04129	0.04118	0.04108
0.152	0.04097	0.04087	0.04076	0.04066	0.04055	0.04045	0.04035	0.04024	0.04014	0.04003
0.153	0.03993	0.03983	0.03974	0.03964	0.03954	0.03944	0.03935	0.03925	0.03915	0.03906
0.154	0.03896	0.03886	0.03876	0.03866	0.03856	0.03846	0.03837	0.03827	0.03817	0.03807
0.155	0.03797	0.03787	0.03778	0.03768	0.03758	0.03748	0.03739	0.03729	0.03719	0.03710
0.156	0.03700	0.03691	0.03682	0.03673	0.03664	0.03656	0.03647	0.03638	0.03629	0.03620
0.157	0.03611	0.03602	0.03593	0.03583	0.03574	0.03565	0.03556	0.03547	0.03537	0.03528
0.158	0.03519	0.03510	0.03501	0.03493	0.03485	0.03476	0.03467	0.03459	0.03452	0.03442
0.159	0.03433	0.03424	0.03416	0.03407	0.03398	0.03389	0.03381	0.03372	0.03363	0.03355
0.160	0.03346	0.03337	0.03329	0.03320	0.03312	0.03303	0.03295	0.03286	0.03278	0.03269
0.161	0.03261	0.03253	0.03245	0.03237	0.03229	0.03221	0.03213	0.03205	0.03197	0.03189
0.162	0.03181	0.03173	0.03165	0.03157	0.03149	0.03140	0.03132	0.03124	0.03116	0.03108
0.163	0.03100	0.03092	0.03085	0.03077	0.03070	0.03062	0.03055	0.03047	0.03040	0.03032
0.164	0.03025	0.03017	0.03010	0.03002	0.02994	0.02986	0.02979	0.02971	0.02963	0.02956
0.165	0.02948	0.02940	0.02933	0.02925	0.02918	0.02910	0.02902	0.02895	0.02887	0.02880
0.166	0.02872	0.02865	0.02858	0.02851	0.02844	0.02837	0.02831	0.02824	0.02817	0.02810

附表 (续)

$\frac{at}{D^2}$	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.167	0.02803	0.02796	0.02789	0.02782	0.02775	0.02767	0.02760	0.02753	0.02746	0.02739
0.168	0.02732	0.02725	0.02719	0.02712	0.02705	0.02698	0.02692	0.02685	0.02678	0.02672
0.169	0.02665	0.02658	0.02651	0.02644	0.02637	0.02630	0.02624	0.02617	0.02610	0.02603
0.170	0.02596	0.02589	0.02583	0.02576	0.02570	0.02563	0.02557	0.02550	0.02544	0.02537
0.171	0.02531	0.02525	0.02519	0.02512	0.02506	0.02500	0.02494	0.02488	0.02481	0.02475
0.172	0.02469	0.02463	0.02456	0.02450	0.02444	0.02437	0.02431	0.02425	0.02419	0.02412
0.173	0.02406	0.02400	0.02394	0.02388	0.02382	0.02376	0.02371	0.02365	0.02359	0.02353
0.174	0.02347	0.02341	0.02335	0.02329	0.02323	0.02317	0.02312	0.02306	0.02300	0.02294
0.175	0.02288	0.02282	0.02276	0.02270	0.02264	0.02258	0.02253	0.02247	0.02241	0.02235
0.176	0.02229	0.02224	0.02218	0.02213	0.02207	0.02202	0.02197	0.02191	0.02186	0.02180
0.177	0.02175	0.02169	0.02163	0.02158	0.02152	0.02147	0.02141	0.02136	0.02130	0.02125
0.178	0.02119	0.02114	0.02109	0.02104	0.02099	0.02093	0.02088	0.02083	0.02078	0.02073
0.179	0.02068	0.02063	0.02057	0.02052	0.02047	0.02041	0.02036	0.02031	0.02026	0.02020
0.180	0.02015	0.02010	0.02005	0.01999	0.01994	0.01989	0.01984	0.01979	0.01973	0.01968
0.181	0.01963	0.01958	0.01953	0.01949	0.01944	0.01939	0.01934	0.01929	0.01925	0.01920
0.182	0.01915	0.01910	0.01905	0.01900	0.01895	0.01890	0.01886	0.01881	0.01876	0.01871
0.183	0.01866	0.01861	0.01857	0.01852	0.01848	0.01843	0.01839	0.01834	0.01836	0.01852
0.184	0.01821	0.01816	0.01812	0.01807	0.01802	0.01797	0.01793	0.01788	0.01783	0.01779
0.185	0.01774	0.01769	0.01765	0.01760	0.01756	0.01751	0.01747	0.01742	0.01738	0.01733
0.186	0.01729	0.01725	0.01721	0.01716	0.01712	0.01708	0.01704	0.01700	0.01695	0.01691
0.187	0.01687	0.01683	0.01678	0.01674	0.01669	0.01665	0.01661	0.01656	0.01652	0.01647
0.188	0.01643	0.01639	0.01635	0.01631	0.01627	0.01623	0.01619	0.01615	0.01611	0.01607
0.189	0.01603	0.01599	0.01595	0.01591	0.01587	0.01582	0.01578	0.01574	0.01570	0.01566
0.190	0.01562	0.01558	0.01554	0.01550	0.01546	0.01542	0.01538	0.01534	0.01530	0.01526
0.191	0.01522	0.01518	0.01515	0.01511	0.01507	0.01503	0.01500	0.01496	0.01492	0.01489
0.192	0.01485	0.01481	0.01477	0.01474	0.01470	0.01466	0.01462	0.01458	0.01455	0.01451
0.193	0.01447	0.01443	0.01440	0.01436	0.01433	0.01429	0.01426	0.01422	0.01419	0.01415
0.194	0.01412	0.01408	0.01405	0.01401	0.01397	0.01393	0.01390	0.01386	0.01382	0.01378
0.195	0.01375	0.01372	0.01368	0.01365	0.01361	0.01358	0.01355	0.01351	0.01348	0.01344
0.196	0.01341	0.01338	0.01334	0.01331	0.01327	0.01324	0.01321	0.01317	0.01314	0.01310
0.197	0.01307	0.01304	0.01300	0.01297	0.01294	0.01290	0.01287	0.01284	0.01281	0.01277
0.198	0.01274	0.01271	0.01268	0.01265	0.01262	0.01258	0.01255	0.01252	0.01249	0.01246
0.199	0.01243	0.01239	0.01234	0.01230	0.01225	0.01221	0.01217	0.01212	0.01208	0.01203
0.200	0.01199	0.01197	0.01195	0.01194	0.01192	0.01190	0.01188	0.01186	0.01185	0.01183

标准用词说明

标准用词	严格程度
必须	很严格，非这样做不可
严禁	
应	严格，在正常情况下均应这样做
不应、不应	
宜	允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做
不宜	
可	有选择，在一定条件下可以这样做

标准历次版本编写者信息

《水工混凝土试验方法》(试行本) 1962

本标准主编单位：水利水电科学研究院

本标准参编单位：安徽水利科学研究所

长江水利科学研究所

三门峡工程局

瓯江工程局

南京水利科学研究所

浙江水利科学研究所

山东水利科学研究所

本标准主要起草人：吕宏基、赵庚、甄永严（水科院）

朱璞、童慧生（安徽水科所）

庞润民（长江水科院）

谢胡水（三门峡工程局）

顾言（瓯江工程局）

陈光福（南京水科所）

王立昌（浙江水科所）

《水工混凝土试验规程》SD 105—82

本标准主编单位：水利水电科学研究院

长江水利水电科学研究所

南京水利科学研究所

本标准参编单位：东北勘测设计院

天津勘测设计院

水电八局

水电一局

成都勘测设计院

安徽省水利科学研究所

交通部科学研究院

本标准主要起草人：关英俊、李金玉、沙慧文（水科院）

朱兴华（长江水科院）

郭飞骐（南京水科所）
黄立中（东北勘测设计院）
王足献（天津勘测设计院）
高家训（水电八局）
王泽民、肖长玉（水电一局）
黎尚周（成都勘测设计院）
方定正（安徽水科所）
蔡正咏（交通部科学研究院）

《水工碾压混凝土试验规程》SL 48—94

本标准主编单位：中国水利水电工程总公司
本标准参编单位：中国水利水电科学研究院
武汉水利电力大学
成都勘测设计院科学研究所
长江科学院
广西壮族自治区水电科学研究所
本标准主要起草人：姜福田 方坤河 黄绪通 周守贤 蔡继勋 冯运銮

《水工混凝土试验规程》SL 352—2006

本标准主编单位：中国水利水电科学研究院
南京水利科学研究院
本标准参编单位：长江水利委员会长江科学院
武汉大学
成都水电勘测设计研究院
中国长江三峡工程开发总公司
本标准主要起草人：陈改新 蔡跃波 李金玉 姜福田 陆采荣 杨华全 方坤河
黄绪通 李文伟 王昌义 曹建国 吴玲

中华人民共和国水利行业标准

水工混凝土试验规程

SL/T 352—2020XXX

条 文 说 明

目 次

1 总则	247
2 术语	247
3 骨料	247
4 混凝土拌和物	252
5 混凝土	253
6 全级配混凝土	264
7 碾压混凝土	264
8 现场混凝土质量检测	274
9 水工砂浆	287
10 水质分析	288
附录 A 水工混凝土配合比设计方法	289
附录 B 水工砂浆配合比设计方法	289

1 总 则

始于 1962 年，水利水电科学研究院主编的《水工混凝土试验规程》由原水电部颁布。至 1977 年，原水电部组织水利水电科学研究院、长江水利水电科学研究院、南京水利科学研究所等 9 个单位对 1962 年版《水工混凝土试验规程》进行修订，历时 5 年，经专题试验论证和修编工作，1982 年原水电部正式颁布《水工混凝土试验规程》(SD 105-82)。其后在 2004 年，由中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究所等 6 个单位再次进行修订，将《水工碾压混凝土试验规程》(SL 48-94) 一并修订纳入，颁布《水工混凝土试验规程》(SL 352-2006)，~~至今已实施 10 多年~~。

本次对《水工混凝土试验规程》(SL 352-2006) 修订，依据《水利部关于水利技术标准制定和修订(2016-2018 年) 项目任务书的批复》(水规计〔2016〕118 号) 及有关工作计划进行。

在总则中增加了对试验室室内温湿度、仪器设备的检验校准、称量仪器的量程选择和精度、测量值和计算结果的数值修约、标准溶液配制及标定、试验记录表的内容等统一要求。

各方法中只给出了最终计算结果的数值修约间隔的规定，此前各步骤的数值应比指定的修约位数至少多一位。如需与标准规定的极限数值(指标值) 做比较，应采用修约值比较法。使用 EXCEL 等软件进行试验数据处理时，应注意中间计算结果的修约问题。

2 术 语

本章为新增内容，满足 SL1《水利技术标准编写规定》对标准体例格式的要求；而且本规程方法众多，统一各方法中的术语，以免冲突和误解。

3 骨 料

将砂石骨料改为骨料，砂料改为细骨料，石料改为粗骨料。

如骨料的颗粒尺寸控制较差，会对试验造成较大的影响。一般来说，各试验方法所用细骨料试样，颗粒粒径不宜大于 10mm；所用粗骨料试样，如超逊径不合格，在进行其他试验前宜筛除。对试样的预处理，宜在结果报告中说明。

3.1 细骨料颗粒级配试验

依据水工混凝土用砂粗骨料生产用筛的实际情况，将试验筛筛孔形统一为“方孔”。

本规程使用的方孔筛的筛孔尺寸 150mm、120mm、80mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2.5mm、1.25mm、0.63mm、0.315mm、0.16mm 等为 ISO 6274 规定的 C 系列筛，GB/T 14684、GB/T 14685 使用的是 B 系列筛：115mm、75mm、37.5mm、19.0mm、9.5mm、4.75mm、2.36mm、1.18mm、0.60mm、0.30mm、0.15mm 等。水利工程外购骨料普遍采用 ISO B 系列筛加工。对比试验表明，两者的筛分结果差别不大，可以对应替换使用。

在本规程其他方法中，如测试结果中不含有筛孔尺寸，难以区分采用的是哪个系列的试验筛，在使用 ISO B 系列筛时，宜在结果中注明。

3.4 人工细骨料饱和面干吸水率试验（湿痕法）

根据美国 ASTM C128-01《Standard Test Method for Density, Relative Density, and Absorption of Fine Aggregate》（细骨料的密度、相对密度、吸水率的标准试验方法）有关规定，在 2006 版标准修订时经试验论证后引入。

3.5 人工细骨料饱和面干吸水率试验（试模法）

在 3.2 节方法基础上，通过加高饱和面干试模，改变每层的捣实次数，通过多种饱和面干试模及捣实方法的验证试验，在 2006 版标准修订时引入。

3.12 人工细骨料石粉含量试验

人工细骨料中小于 0.16mm 的颗粒称为“石粉”，石粉中小于 0.08mm 的颗粒称为微粒。因施工规范中无人工砂含泥量的规定，不再分“微粒”中的含泥。

细骨料石粉含量的水洗法试验结果准确，但相对麻烦，水洗法与干筛法有一定相关关系，相差不超过 2%（干法生产差异大点，湿法生产小点）。现场试验室如要快速反映细骨料石粉含量，可先通过试验确定两种方法的差异，对于筛法试验结果进行修正即可。

3.13 人工细骨料亚甲蓝 MB 值试验

本次修订新增内容，测定砂料中是否存在膨胀性粘土矿物并确定其含量的整体指标。参考 GB/T 14684《建设用砂》、BS EN 933-9《Tests for geometrical properties of aggregates. Assessment of fines. Methylene blue test》（骨料的几何性能测试方法 细骨料的评定 亚甲蓝试验）等标准编写。

对于采用人工细骨料与天然细骨料按一定比例配制而成的混合骨料，可按本方法检测和控制骨料中的含泥量。

3.15 细骨料云母含量试验

影响混凝土性能的主要是大颗粒的片状云母，因此提出“游离云母”的概念。本方法只能人工检出粒径大于 0.315mm 的游离状云母片，很难挑出粒径小于 0.315mm 的粉状云母碎片。实践表明，对一些细粒碎云母（如绢云母等）含量较高的母岩轧制的细骨料，使用本方法得出的云母含量测试结果偏差较大。某些水利水电工程采用云母含量较高的母岩作为混凝土骨料料源，细骨料加工过程中是否会形成较大粒径的游离云母，与母岩中云母的结构和颗粒粒径直接相关。这种细骨料的石粉中云母含量较高（X 射线衍射测定），对混凝土性能有较大不利影响，建议开展专门试验研究。

仪器设备中增加“筛孔尺寸为 5mm、0.315mm 的筛各一只”~~、鼓风干燥箱，~~方法中增加筛分“筛除粒径大于 5mm 和小于 0.315mm 的颗粒”。

3.18 细骨料氯离子含量试验

本次修订新增内容，以便从原材料源头控制混凝土中的氯离子含量。参考 JTS/T 236《水运工程混凝土试验检测技术规范》和 BS EN 1744-1《Tests for chemical properties of aggregates. Chemical analysis》（骨料的化学特性试验 化学分析）、AASHTO T 260《Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials》（混凝土和原材料中氯离子取样和测试的试验方法标准）等标准编写。

建议使用高精度电位滴定仪指示滴定终点，人为判定~~滴定终点~~的误差较大。

3.19 骨料硫酸盐、硫化物含量试验

根据硫化物与盐酸反应产物分析，由于硫化氢会以气体状态挥发掉，本次修订按照 BS EN 1744-1《Tests for chemical properties of aggregates. Chemical analysis》（骨料的化学性能试验 化学分析），经试验验证后引入其中“Determination of acid soluble sulfides（酸溶性硫化物的测定）”试验方法。

3.20 粗骨料颗粒级配试验

明确可以使用《砂石料试验筛检验方法》SL 126 规定的 B 系列筛进行试验，原因同 3.2 节。颗粒级配试验针对混合料进行，如天然砂石料勘探等。

3.25 粗骨料含泥量（石粉含量）试验

参照人工细骨料石粉含量试验制定人工粗骨料石粉含量检测方法，用以判定粗骨料的洁净度和易磨性。

3.28 粗骨料氯离子含量试验

本次修订新增内容，以便从原材料源头控制混凝土中的氯离子含量。参考 TB/T 3275《铁路混凝土》和 BS EN 1744-1、AASHTO T 260 等标准编写。

3.29 粗骨料针片状颗粒含量试验

针状颗粒和片状颗粒的定义为：假设每一颗粒的最大尺寸为长度，第二尺寸为宽度，最小尺寸为厚度，则针状颗粒为长度大于宽度 3 倍的颗粒，片状颗粒为厚度小于宽度 1/3 的颗粒。

BS EN 933-4:2008《Tests for geometrical properties of aggregates Part 4: Determination of particle shape—Shape index》（骨料几何特性试验 第 4 部分：颗粒形状的测定——形状指数）中规定，针状颗粒为长厚比 L/E 大于 3；BS EN 933-3:2012《Tests for geometrical properties of aggregates Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index》（骨料几何特性试验 第 3 部分：颗粒形状的测定——片状指数）中规定，片状颗粒为最小尺寸小于上限筛孔尺寸的 1/2。与本规程规定略有差异。

3.30 粗骨料超逊径颗粒含量和中径筛余率试验

增加中径筛余试验，配合《[水工混凝土施工规范](#)》(SL 677) 对中径筛余率的规定。

增加了筛孔尺寸与骨料粒级上下限相同的试验筛（可称为粒级试验筛），即有三种试验筛——超逊径筛、原孔筛、粒级试验筛进行超逊径试验。实际工作中多采用试验筛（标准筛）进行超逊径试验，水工规范也有相应技术要求，为方便使用并符合实际情况，可用粒级试验筛替代原孔筛；而且在依据水工混凝土施工规范评定粗骨料超逊径是否合格时，可以以原孔筛（或粒级试验筛）的超逊径检测值为依据。

外购粗骨料宜使用粒级试验筛进行超逊径试验。

3.31 粗骨料软弱颗粒含量试验

软弱颗粒含量试验最初是针对天然粗骨料（卵石）提出的，随着在水利工程中大量使用人工骨料，采用该方法进行人工骨料软弱颗粒含量试验时存在的问题越来越突出。针对使用人工骨料试验时出现的问题，在本次修订时明确本试验方法适用于最大粒径为 40mm 的骨料；每级取 100 粒骨料时，应选取粒形较好的颗粒，排除针状、片状颗粒骨料的干扰；使用压力机或其它有压力示值的器具加压时应轻柔，以避免压头对骨料颗粒的冲击破坏；“被压碎的颗粒”指有明显破损的颗粒，不包括轻微掉角的颗粒；给出了分级计算各粒级粗骨料的软弱颗粒含量的公式。

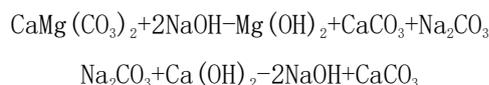
3.35 粗骨料抗磨损试验

本方法依据 ASTM C131 《Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine》（用洛杉矶磨耗试验机测定小尺寸粗集骨料的抗磨性与抗冲击性的标准试验方法）和 ASTM C535 《Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine》（用洛杉矶磨耗试验机测定大尺寸粗集骨料的抗磨性与抗冲击性的标准试验方法）编写，在 2006 版标准时引入，基本上与洛杉矶法等效。鉴于水工混凝土的骨料粒径较大，结合我国水利行业的试验筛筛孔尺寸规定和骨料级配规定，对试验筛及筛孔尺寸的内容进行了修改。

3.37 碳酸盐骨料的碱活性检测（岩石柱法）

碳酸盐骨料的碱活性检测基本原理如下。

碱—碳酸盐反应主要是脱（去）白云石反应，即某些特定的微晶白云石和氢氧化钠（NaOH）、氢氧化钾（KOH）等碱类反应生成氢氧化镁[Mg(OH)₂即水镁石]和碳酸盐等。这些生成物和水泥水化产物氢氧化钙[Ca(OH)₂]又起反应，重新生成碱，使脱白云石反应继续下去，直至白云石被完全作用完，或碱的浓度被继续发生的反应降至足够低为止。其反应式可归纳为。



反应产生的 Mg(OH)₂ 为凝胶体，可吸水膨胀，从而产生膨胀应力。本试验是用固定浓度的碱，浸泡碳酸盐岩样，定期测量脱白云石岩样的膨胀过程。

3.38 骨料碱活性检测（砂浆棒快速法）

砂浆棒快速法 1986 年由南非建筑研究所 Oberholster 和 Davis 提出，以后加拿大、日本、印度等国都普遍采用这种方法，美国于 1994 年将其列为正式标准 ASTM C1260-94。这个方法对于判定缓慢型碱活性反应或只在后期才产生膨胀的碱活性骨料特别有效。

本方法参考 ASTM C1260 《Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)》（骨料潜在碱活性标准试验方法—砂浆棒法）编写。

3.39 骨料碱活性检验（混凝土棱柱体试验法）

本方法是根据 CSA A23.2-14A-M90 《Test Method for Potential Expansivity of Cement-Aggregate Combination (Concrete Prism Expansion Method)》（水泥—骨料组合的潜在膨胀性试验方法—混凝土棱柱体膨胀法）编写而成。

3.40 骨料碱活性抑制措施有效性试验（砂浆棒快速法）

本次修订新增内容。根据以往大量试验结果，并参照 ASTM C1567《Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)》（测定胶凝材料与骨料组合的潜在碱硅反应性的标准试验方法-快速砂浆棒法）、CSA A23.2-28A《Standard Practice for Laboratory Testing to Demonstrate the Effectiveness of Supplementary Cementing Materials and Lithium-Based Admixtures to Prevent Alkali-Silica Reaction in Concrete》（辅助胶凝材料和锂盐外加剂对抑制碱硅反应的有效性的室内试验标准方法）等标准编写。

3.41 骨料碱活性抑制措施有效性试验（混凝土棱柱体试验法）

本次修订新增内容。~~参照标准同上。~~

4 混凝土拌和物

4.1 混凝土拌和物室内拌和和现场取样方法

本节明确室内拌和可以使用强制式或自落式，适应试验室大量使用强制式搅拌机的情况，~~优先使用强制式搅拌机~~。细化了混凝土室内拌和的基本要求，增加了混凝土拌和物现场取样的规定。

4.4 混凝土拌和物扩散度试验

考虑到高流动性混凝土、高性能混凝土及高效减水剂的日益广泛应用，仅用坍落度已难以反映此类混凝土的流动性。参考高流动性混凝土及高性能混凝土流动性扩散度试验方法，在2006版标准修订时引入。

4.11 混凝土拌和物水胶比分析试验（水洗法）

考虑到目前水泥中一般都掺有混合材，且混凝土掺合料都较细（只有极少颗粒大于0.16mm）。经实验证实，掺有掺合料的混凝土拌和物的水胶比仍可用水洗法进行试验测定，故将本节与4.12节条文中的水灰比分析扩展到水胶比分析。

胶凝材料的密度测定应按照《水泥密度测定方法》GB/T 208-2014的规定，使用无水煤油进行测定。因为胶凝材料中的水泥接触水后即发生水化作用，测得的密度可能与常规的水泥密度测定方法测

得的密度略有差别，为了符合本方法的实际操作过程和计算，故仍采用加水法测出的密度。

5 普通混凝土

5.1 混凝土试件的成型与养护

细化对混凝土试模的要求，给出了水工混凝土常用试模的模腔形式、尺寸与骨料最大粒径对照表，混凝土力学试验对试件的尺寸偏差、垂直度偏差以及承压面平面度偏差要求较高，应对组装后的试模进行认真检查并调整，避免生产出不合格的混凝土试件。

原标准养护室温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 要求较宽松，随着控制设备技术水平的提高和保温室造价的降低，宜将养护室温度控制水平提高到 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

明确了目测检查试件的要求，以及对各种试件尺寸偏差和形位偏差的要求。

考虑到到达规定试验龄期时，应对试件尽快测试，因此给出了开始测试时间的允许偏差。

5.2 混凝土抗压强度试验

如采用非标准尺寸试件，试验结果应乘以强度修正系数作为混凝土抗压强度。强度修正系数应根据不同工程的实际情况，通过对比试验确定。

对不同强度等级混凝土，抗压强度试验、劈拉强度试验的加荷时间宜控制在 1min 左右，可以据此调整合适的加荷速度。

5.3 混凝土劈裂抗拉强度试验

钢制方垫条人工对齐难度较大，因此增加了劈裂夹具的内容，将垫条的位置固定在卡槽里面，保证上下两个垫条平行居中。垫条磨损严重或损坏时，可抽出更换。

验证试验表明，使用半径 75mm 垫块测得的劈拉强度比使用边长 5mm 方垫条测得的劈拉强度要高出 17%~37%，平均约 23.20%，差别较为明显。另外有关资料表明，垫条尺寸越大，测得的劈裂抗拉强度越大。一般认为，垫条尺寸和形状不应影响对试件施加均匀的线性荷载，垫条尺寸过大时，试件可能不是劈裂破坏而是在垫条下面产生“压力柱”或剪切应力导致压柱破坏或剪切破坏。验证试验结果基本上能够证明，半径 75mm 弧形垫块导致的是压柱破坏，因此测得的劈裂抗拉强度偏高。因此，本方法不对垫条形式做出修改，试验人员应注意所得劈裂试验结果与 DL/T 5150、GB/T 50081 有较大的差异。

5.5 混凝土轴向拉伸试验

细化了变形测量装置的要求，变形测量可采用千分表、LVDT 位移计或电阻应变片等变形测量仪器，以及合适的附着式变形测量夹具。

千分表或位移计配合测量架使用时的测量误差，应是测长仪器的精度与测量标距的比值，不同于测长仪器本身的精度。比如采用量程 1mm 千分表（任意 0.05mm 最大允许误差 0.002mm），测量架标距 100mm 时，则实际测量误差为 0.002mm 除以 100mm 等于 20×10^{-6} 。电阻应变片的示值误差是 1×10^{-6} ，一般使用敏感栅长度 100mm、电阻值 350 Ω 的电阻应变片。光栅式位移计示值误差 0.0005mm，其实际测量误差 5×10^{-6} 。考虑到千分表用的较多，因此将测量误差规定为不大于 20×10^{-6} 。

混凝土的极限拉伸应变在 $70 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ ，测距为 100mm 时，要求的仪器量程不小于 0.02mm。

试件装卡在试验机上、下卡头中，装卡方式往往与试件形状相联系，可分为外夹式、内埋式和粘贴式三种。外夹式简单易行，不需要埋设拉杆和拉板，但试件体积大，断裂在端部的概率高，内埋式试件体积适中，拉杆埋设必须具有定位装置，保证与试件对中。粘贴式效率低，粘贴表面需要预先处理，但是试件体积小，尤其是对钻取的芯样，除此更无简便的方法。

试件不论采用哪种装卡方式，施加荷载时，在试件几何形状转折处、埋件头或粘贴面上都会产生不同程度应力集中。试验表明，内埋式拉杆头部或粘贴式粘接面 25mm~30mm 为应力集中范围，此范围以外的等直段应力分布基本均匀。在试验方法中规定测量标距为 100mm~150mm，这和试模尺寸与骨料最大粒径的关系是一致的。

拉伸试验时，混凝土试件受力应均匀，其断裂处应在变形测量标距内，方能保证测定值准确可靠。辨别一个试验方法适用性较好的标准是，试件在标距内断裂的概率不应低于 75%，否则将会增加试验重复次数和费用。

本次修订修改了极限拉伸值的确定方法。原标准规定“采用位移计或电阻应变片时，在荷载—应变曲线上破坏荷载所对应的应变即为该试件的极限拉伸值”。随着变形测量仪器的自动化程度和采样频率的提高，能够测量出混凝土拉断瞬间的应变值，但该极限应变值不具有实用性，异常偏大。因此，修改为**要求**做出试件拉伸试验全过程（最好去除末端明显偏离的数据点）的应变—应力曲线，取得二次多项式拟合方程，将代入破坏应力求得的应变值作为该试件的极限拉伸值，这样得出的极限拉伸值更具有实用性。

大量试验表明，混凝土拉伸试验在 50%破坏应力范围内的应力—应变曲线基本是线性的。为避免通过割线计算弹性模量时端点数据异常波动的影响，建议取 0~50%破坏应力段的应力—应变数据，求得线性拟合方程，将斜率作为该试件的抗拉弹性模量。

5.8 混凝土圆柱体轴心抗压强度与静力抗压弹性模量试验

同 5.5 节，细化了变形测量装置的要求，变形测量可采用千分表、LVDT 位移计或电阻应变片等变形测量仪器，以及合适的附着式变形测量夹具。

由于圆柱体试件的顶面是承压面，也是成型面，顶面的平面度、与轴线的垂直度，及与底面的平行度对试验结果影响较大。因此提出，必要时可用磨石机加工圆柱体试件的底面和顶面，以保证试

验结果的可靠性。

同 5.5 节条文说明中关于弹性模量计算方法的说明，鉴于混凝土轴心抗压试验在 0~40%破坏应力范围内的应力—应变曲线基本是线性的，为避免通过割线计算弹性模量时端点数据波动的影响，建议取 0.5MPa~40%破坏应力区段的应力—应变数据，求得线性拟合方程，将斜率作为该试件的抗压弹性模量。

5.9 混凝土泊松比试验

本次修订新增的试验方法。

参考 ASTM C469 《Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression》（混凝土静态抗压弹性模量和泊松比标准试验方法）等标准编写。

5.10 混凝土与钢筋握裹力试验

此试验中，仪表头顶着的钢筋端面对测试结果影响较大，端面应切割打磨光滑平整并与轴线垂直。

5.11 混凝土压缩徐变试验

对杠杆式徐变仪丝杆及弹簧所提出的要求是为了使仪器在整个试验过程中有较好的持荷及调整能力，为了减少徐变仪在试验过程中发生应力松弛，要求丝杆的工作应力尽可能低，弹簧的工作压力也规定控制在 2/3 最大工作压力范围内，但也不应选用吨位过大的弹簧。如果加荷时弹簧的压缩变形太小则在试验过程中试件所产生的变形将会造成很大的应力损失。弹簧过硬其调整能力就较差。

变形测量宜采用内埋的应变计。移动式的接触式引伸仪，对仪器本身、测试人员的技术水平及测点的安装等方面要求都较高。对变形测量装置提出的精度要求为 4×10^{-6} ，这是根据我国目前生产的内埋式应变计的精度要求而定的。应尽量采用满足标距要求的、直径较小的内埋式应变计。

将从立方体抗压试件强度换算压缩徐变试件的极限抗压强度，修改为直接成型圆柱体试件测定轴心抗压强度，作为徐变试验的加荷基准，避免从立方体抗压强度换算到圆柱体抗压强度过程中，需要考虑尺寸、湿筛、骨料种类等影响，按照经验确定换算系数的不准确性。

需要注意，式 (5.11.4-6) 中的 R_0 为 0℃ 的电阻值，该数据应附在厂家随应变计提供的合格证上，而不是初始测量时测得的电阻值。

5.13 混凝土干缩（湿胀）试验

将初始测量时间（基准时间点）由 48h 修改为 3d。亦可按其他规定的时间和条件，根据混凝土

配合比的实际情况确定初始测量时间（基准时间点），如混凝土终凝后 24h，或同批成型的混凝土达到某个强度范围等。掺加含有促凝早强成分、缓凝成分等外加剂时，宜同时测量凝结时间，以混凝土终凝后 24h 作为初始测量时间。

另外需要注意，为统一各方法对膨胀和收缩的表示，本规程中对试件的长度变化率，一律以负值为收缩，正值为膨胀。

非接触法测试混凝土变形性能的仪器和技术已比较成熟。常用的非接触法测试仪器有电涡流法与激光位移测试法，很多单位均对此类方法进行了系统的研究与试验，有相应的文章和专利成果。非接触法测试结果与传统的测试方法测试结果基本稳合；非接触法受外界干扰因素较少，可以实现全自动、全过程变形数据采集。如有条件，可选用非接触法测量干缩变形。

5.14 混凝土自生体积变形试验

用于变形试验的混凝土原材料，应至少提前 24h 放入成型室内恒温。建议将骨料加适量水，达到饱和面干状态，使用前覆盖保水，避免对混凝土早期变形测试数据的影响。

同 5.13 混凝土干缩试验一样，如何确定初始测量时间，也影响自生体积变形试验结果的实用性。大量的文献表明，混凝土初凝后整体形态基本固定，此时属于混凝土整个强度发展过程的早期，仍有大量的胶凝材料没有水化，初凝后混凝土存在较大的变形量，对早期开裂有较大影响。原方法以 24h 固定时间点作为初始测量时间有时不合适，如超长缓凝时间的混凝土在 24h 仍未凝结硬化。因此，本规程建议应检测同批混凝土拌和物的凝结时间，以初凝时间作为初始测量时间（基准时间点），测量的电阻及电阻比测值为基准值。

根据 E. E. 卡尔美科娃、R. B. 米哈依洛夫、A. E. 纳维尔、R. L. 勃莱恩、L. A. 托姆期以及 G. L. 克劳赛克等学者对水泥浆凝结过程的研究结果，水泥浆的凝结过程伴随着内部结构特性的转变。水泥加水搅拌形成水泥浆，具有溶胶的性质。随着水化反应的进行，水泥浆中的水泥颗粒及其水化产物形成胶粒。胶粒在表面能作用下相互吸附凝聚成较大颗粒，构成连续的网状絮凝结构—凝胶，这种结构的破坏具有触变复原性质。随着水泥的继续水化，水泥浆的结构在凝聚结构的基础上逐渐向凝聚—结晶结构、最终向结晶结构网转变，结晶结构网破坏后不再具有触变复原的性质。人们将这个结构转变的时刻定义为初凝时间。初凝以前水泥浆的结构是凝聚结构，初凝标志着水泥浆由凝聚结构向结晶结构转变，此时混凝土整体形态基本固定，其后混凝土内部胶凝材料的水化反应造成的体积变化等都会引起混凝土体积变形。

需要注意，式（5.14.4-3）中的 R_0 为 0℃ 的电阻值，厂家随应变计提供的合格证上应有该数据，而不是初始测量时测得的电阻值。

5.15 混凝土导温系数测定

导温系数测试结果的处理方法有两种，计算实例如下。

1 查表法（测试数据见表 1）

根据各个时间的 θ/θ_0 比值，查附表得相应的 at/D^2 值，由此值即可算出相对应时刻的导温系数 a ，取其平均值即为该试件的导温系数，计算实例见表 1。

表 1 混凝土导温系数试验记录计算表示例

时间	冷却时间 t	试件中心	冷却水	t 时刻	θ/θ_0	at/D^2	t 时刻的 导温系数 a_t (m^2/h)	导温系数 a (m^2/h)
h:min:s	(min)	温度 ($^{\circ}C$)	温度 ($^{\circ}C$)	的温差 θ ($^{\circ}C$)				
14:41:0	0	72.2	22.5	49.7				
46:0	5	72.0	22.7	49.3				
51:0	10	70.9	22.6	48.3				
56:0	15	67.4	22.6	44.8				
15:01:0	20	62.8	22.4	40.4				
06:0	25	57.7	22.2	35.5				
11:0	30	53.1	22.1	31.0	0.62374	0.0402	0.003216	
16:0	35	48.8	22.0	26.8	0.53924	0.0467	0.003202	
21:0	40	44.8	22.0	22.8	0.45875	0.0537	0.003222	
26:0	45	41.4	21.9	19.5	0.39235	0.0604	0.003221	0.003221
31:0	50	38.5	21.9	16.6	0.33400	0.0672	0.003225	
36:0	55	35.9	21.8	14.1	0.28370	0.0740	0.003229	
41:0	60	33.8	21.8	12.0	0.24145	0.0807	0.003228	
46:0	65	31.9	21.7	10.2				
51:0	70	30.4	21.7	8.7				
56:0	75	29.0	21.7	7.3				
16:01:0	80	27.7	21.7	6.0				

2 半对数法（采用表 1 的测试数据）

1) 以冷却时间 t （单位为 h）为横坐标， $\ln \theta$ 为纵坐标，做出 $\ln \theta = f(t)$ 曲线，见图 1。

2) 在曲线上选择冷却时间 t 为 30min 及 60min 之间的数据拟合线性方程，斜率的绝对值为 1.9067；如按两点割线斜率计算，冷却率为 1.8982，差别较小。

$$m = \frac{\ln \theta_a - \ln \theta_b}{t_a - t_b} = \frac{\ln 31.0 - \ln 12.0}{(60 - 30)/60} = 1.8982 \quad (1/h)$$

3) 计算形状系数 K 。

当试件半径 $R=0.1m$ ，高度 $=0.4m$ 时，

$$K = \frac{1}{(2.4048/R)^2 + (\pi/L)^2} = 0.00156 \quad (m^2)$$

4) 计算导温系数 a 。

$$a = 0.00156 \times 1.9067 = 0.002974 \quad (m^2/h)$$

查表法得出的导温系数偏大，比半对数法计算的结果大 8.1%。建议以查表法的结果为准。

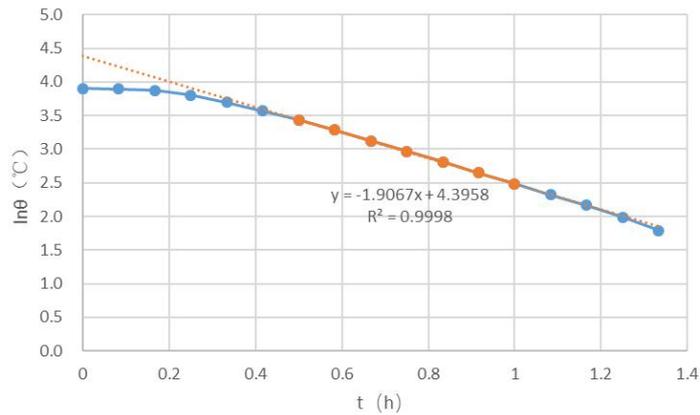


图 1 $\ln\theta$ 与 t 的关系曲线

5.16 混凝土导热系数测定

根据导热系数、导温系数、比热、容重之间的关系，也可在测得混凝土导温系数、比热、容重后，用下式计算导热系数。

$$\lambda = \alpha\rho C$$

式中 λ —— 混凝土导热系数， $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ ；

α —— 导温系数，按 5.15 节方法测定， m^2/h ；

ρ —— 混凝土表观密度，按 5.37 节方法测定， kg/m^3 ；

C —— 混凝土比热，按 5.17 节方法测量， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

5.17 混凝土比热测定（绝热法）

比热计算实例（数据见表 2。表中温度较高，一般升温到 40°C 左右即可）

第一次试验各数据计算。

1) 加热器供热: $q_1 = 267.35 \times 3.617 = 967.0$ (kJ)

2) 搅拌器供热: $q_2 = 6.752 \times 1.5 = 10.1$ (kJ)

3) 试件桶吸热: $q_3 = 4.254 \times 16 = 68.1$ (kJ)

4) 水吸热: $q_4 = 5.9 \times 16 \times 4.187 = 395.3$ (kJ)

5) 试件吸热: $Q = q_1 + q_2 - q_3 - q_4 = 513.7$ (kJ)

第二次、第三次试验同样计算，得如下方程组。

$$\begin{aligned} 68.42C_0 + 2052.63C_1 + 63038.5C_2 &= 16.10 \\ 68.85C_0 + 3170.50C_1 + 14748.96C_2 &= 16.29 \\ 56.45C_0 + 3426.36C_1 + 208799.38C_2 &= 13.50 \end{aligned}$$

联立求解得。

$$\begin{aligned} C_0 &= 1.01389 \\ C_1 &= -0.0006614 \\ C_2 &= 0.00001324 \end{aligned}$$

$$c = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2$$

将式中 θ 用所需温度代入，即可求得某一温度的比热 c 。两个试件的比热 c 都算出后取平均值即为本次试验所测得的比热 c 。

表 2 混凝土比热测定记录表

试验次数	时间 (h:min~h:min)	温度 (°C)		瓦时表读数 (W.h)		试件 温升 (°C)	加热器 耗电 (W.h)	备注
		初温	终温	初读数	终读数			
1	9:00~10:30	22.0	38.0	0	267.35	16.0	267.35	试件质量: 31.9kg
2	10:30~12:00	38.0	54.1	267.35	537.15	16.1	269.80	
3	12:00~13:00	54.1	67.3	537.15	760.00	13.2	222.85	
4								水质量: 5.9kg
5								

5.19 混凝土绝热温升试验

根据绝热介质不同，混凝土绝热温升测定仪分为水和空气循环绝热式两种。本方法对绝热温升测定仪不作硬性规定，但必须满足以下技术条件：试件尺寸大于最大骨料粒径的三倍；试验温度 5°C~80°C；试验跟踪温度精度 ±0.1°C。

为方便引用绝热温升试验数据，建议采用最小二乘法进行过程曲线拟合，给出混凝土的绝热温升一历时最优拟合表达式、适用条件和 95%置信度值，以便计算分析使用。推荐采用双曲线函数 $T_t = \frac{t}{t+a} T_f$ (T_f 为拟合最终绝热温升) 用于 2d 或 3d 以后绝热温升过程线的拟合。

5.20 混凝土抗冲磨试验（圆环法）

在 2006 版标准修订时，引入了中国水科院研制的最高流速达 40m/s，并能进行二级配混凝土 ($d_{max}=40mm$) 冲磨试验的抗冲磨仪。

冲磨质材料采用刚玉，也可采用专用标准石英砂或其他材料，但必须在试验报告中注明。刚玉的表观密度为 3.9g/cm³，各级粒径级配见表 3，即 12 目、24 目和 40 目各 1/3。专用标准石英砂采用符合 GB/T 17671-1999 规定的 0.5mm~1.0mm 的中级砂。

表 3 刚玉粒度分级级配

规格	粒度 (mm)	分级筛余量 (%)	累积筛余量 (%)
12 目	2.0~1.3	33.3	33.3
24 目	0.8~0.53	34.0	67.3
40 目	0.4~0.36	32.7	100

5.21 混凝土抗冲磨试验（水下钢球法）

依据美国标准 ASTM C1138 《Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete

(Underwater Method)》(混凝土抗冲磨标准试验方法—水下法) 修编而成。

本次修订 **推荐采用增加** 一种棱面球体作为研磨料, 为在钢球相互垂直的六个方向, 分别切割掉直径的 5%, 形成相互垂直的六个带棱平面。在混凝土强度小于 40MPa 时, 采用原标准中的光滑球体。研磨料为光滑球体时, 对高强度混凝土测试结果不明显。对比试验表明: 与原方法相比, 改进后的方法对于高强混凝土磨损率提高一倍, 抗冲磨强度减少一半, 磨损后试件表面严重磨损, 平均磨损深度从 2~4mm 增加到 10~35mm, 能够反映混凝土本体而非表层的抗冲磨性能。磨损效果显著提高, 更能反映 C40 以上高性能抗冲磨混凝土的抗磨损情况和真实的抗冲磨强度, 区分度较为明显。(参考“水工混凝土抗冲磨试验方法(水下钢球法)改进研究”, 吐尔洪·吐尔地等)

5.24 混凝土抗冻性试验(快冻法)

本次修订修改了冻融循环制度的内容, 与 GB/T 50082 和 ASTM C266 标准一致。循环历时由 2.5~4.0h 修改为 2.0~4.0h, 降温历时由 1.5~2.5h 修改为 1.0~2.5h, 升温历时由 1.0~1.5h 修改为 1.0~2.0h。4 降温和升温终了时, 试件中心温度由“应分别控制在 $-17^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $8^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ”修改为“应分别控制在 $-18^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $5^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ”。

在实际操作时, 测温试件的情况比较复杂。首先制作测温试件所用的混凝土无统一的规定, 而不同混凝土的导热系数差别较大, 影响对冻融循环制度的控制。本**规程方法**注明可用高强度(40~50MPa)、高含气量(6%~7%)的混凝土制作, 以保证抗冻性良好, 能够使用较长一段时间。试验室应能保证在一段时期内, 制作测温试件的混凝土原材料、配合比、含气量等保持稳定。

安装测温传感器探头的最佳方式是预埋设于测温试件中心, 但实际上很多实验室是插入测温试件的预留孔中, 再灌满**防冻液或水**并密封。**应注意测温试件盒中灌入的水不宜太多, 接近试件顶面即可。预留孔不宜埋设金属管, 以免与试件盒中灌入的水接触后导致测温头过快降温或升温。测温试件盒**严禁灌入防冻液。**测温试件**, 应放置**盒**在冻融箱中部。

常用的机油等油性脱模剂, 影响抗冻试验时水分浸入混凝土内部, 因此注明了抗冻试模内侧壁不宜刷机油等油性脱模剂, 可用水性脱模剂或塑料薄膜替代。

高强混凝土, 尤其是掺加超细矿物材料的混凝土, 难以短期泡水饱和, 因此对强度大于 40MPa 的抗冻试件, 拆模后应水养至测试龄期。

如试件质量损失率出现负值, 表明混凝土中裂隙增多, 应作为异常数据不纳入计算, 取其余数值的平均值作为试验结果。在混凝土抗冻差、使用劣质骨料等导致混凝土冻裂, 或试件未完全饱水时, 可能会出现 3 个试件的质量损失率均为负值, 此时不应采用质量损失率进行试验结果评定。

5.25 混凝土(砂浆)动弹性模量试验

本次修订增加了一种冲击共振法测定混凝土动弹性模量的方法, 参考 ASTM C215 《Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens》(混凝土试件横向、纵向和扭转向基本共振频率标准测试方法) 编写。原标

准试验方法与 ASTM C215 中的强迫共振法基本一致。建议抗冻试验动弹性模量的检测，以常用的强迫共振法为基准法，冲击共振方法为代用法。

强迫共振法测量混凝土动弹性模量的工作原理：当仪器工作时，由音频振荡器产生音频交变电压，经功率放大器放大，输入激振器。由激振器把电振荡转换为机械振动，并施加于试件上。输入试件的机械振动波经过拾振器，把机械振动波转换为电振荡，经音频电压放大器放大后，通过微安表和示波器显示出来。当外加机械振动频率与试件的固有振动频率相同时，即产生共振。此时微安表和示波器所显示的幅度值最大，这就是试件的自振频率。由自振频率可算出试件的动弹性模量值。

冲击共振方法是一种利用激振锤冲击长条形混凝土试件或芯样（棱柱体和圆柱体，长细比不小于 2）测试纵向共振频率，计算动弹性模量的方法。冲击共振法测试纵向共振频率时，将试件平放，支撑条件应保证试件能够沿纵向自由振动。应加速度传感器安置在试件纵向一个端面的中心。加速度传感器可以采用软蜡或胶和油脂等其它合适材料固定在试件纵向端面中心。如果试件处于湿润状态，可以采用喷气方法吹干待安置加速度传感器的端面区域。加速度传感器还可以用橡皮筋安置在端面上，但此时必须在加速度传感器和端面之间使用耦合剂以保证相互之间良好接触。使用波形分析处理仪时，纵向共振频率是加速度传感器数字信号经快速傅里叶变换生成的幅度谱或功率谱上最大峰值相对应的频率。用激振锤垂直敲击试件纵向中心处的节点，幅度谱或功率谱上该频率位置处的幅值很小或不存，可以此来验证该频率值为试件真实纵向共振频率。如采用频率计数器，应延时约 30 个纵向振动波形循环再开始记录振动信号，并应保证试件表面垂直激振。

5.26 硬化混凝土气泡参数试验（直线导线法）

参考 ASTM C457 《Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete》（显微法测定硬化混凝土中孔隙参数的标准试验方法），将混凝土中浆气比 P/A（体积比）限值由 4.33 修改为 4.342。

5.27 混凝土中钢筋腐蚀的电化学试验（新拌砂浆阳极极化法）

本方法的基本原理是：由于外加电压的作用，在接直流电源正极的钢筋表面，可以模拟钢筋腐蚀的阳极过程。通过测量通电后钢筋（阳极）的电位变化，可定性地判别钢筋在新拌砂浆中钝化膜的好坏，以此初步判断外加剂、掺合料和水泥对钢筋腐蚀的影响。

5.28 混凝土中钢筋腐蚀的电化学试验（硬化砂浆阳极极化法）

本方法的基本原理是：在砂浆硬化早期，水泥已与部分外加剂反应，这时采用提高温度（100℃ 温度下烘 24h）的方法加速钢筋腐蚀，并用阳极极化法测定钢筋表面钝化膜的状况，由此判断水泥、外加剂或掺合料对钢筋腐蚀的影响。

5.30 混凝土抗氯离子渗透性试验（电量法）

本方法参考 ASTM C1202-19 《Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration》（混凝土抗氯离子渗透能力的电指示标准试验方法）进行了修订。该方法与长期氯化物渗透试验测定的氯离子扩散系数有良好的相关性，具有方法简便，快速等优点。

5.31 混凝土氯离子扩散系数试验（RCM 法）

氯离子扩散系数快速测定的 RCM 法，其依据是瑞典 L. P. Tang（唐路平）在 1998 年提出的氯离子电迁移快速试验方法（CTH 法）及其原理，测定混凝土中氯离子非稳态快速迁移的扩散系数，它简单、快速、可直接可靠地测算混凝土的氯离子扩散系数。经改进衍生出常用的氯离子扩散系数测试方法（RCM 法）和北欧标准 Nordtest NT Build 492 标准。

本方法引自中国土木工程学会标准 CCES 01-2004《混凝土结构耐久性设计与施工指南》（2005 年修订版），是依据 RCM 法编写的。GB/T 50082 是依据 NT492 编写的。当通电电压相等、通电时间相同时 RCM 法和 NT492 法是等价的，两种计算方法可以互换，所测得的混凝土氯离子扩散系数相等。两者的差别在于。

- 1、电极溶液不同。RCM 法阴极溶液为 5% NaCl 和 0.2 mol/L KOH 混合溶液，阳极溶液为 0.2 mol/L KOH 溶液；NT492 法阴极溶液为 10% NaCl 溶液，阳极溶液为 0.3 mol/L NaOH 溶液；
- 2、通电电压和测试时间不同。RCM 法固定为 30V，不同初始电流对应的试验持续时间从 168h~4h；NT492 法初始通电电压为 30V，其后根据初始电流调整为 60V~10V 多种电压，再按新的初始电流决定试验持续时间，从 96h~6h。其中在新初始电流从 20mA~120mA（初始电压 30V 的初始电流为 10mA~360mA）的范围内，NT492 法对应的试验持续时间均为 24h，而 RCM 法是 48h~4h，持续时间差异较大，造成两种方法测试结果不同。

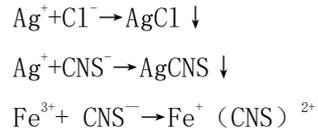
掺矿渣粉或粉煤灰等掺合料时，由于它们的火山灰反应速率远低于硅粉，因此，该类混凝土进行 RCM 法试验时，其标准养护的龄期建议不少于 2 个月。

5.33 混凝土中砂浆的氯离子总含量试验

试验基本原理：用硝酸将含有氯化物的水泥全部溶解，然后在硝酸溶液中，用倭尔哈德法来测定氯化物含量。

倭尔哈德法是在硝酸溶液中加入过量的 AgNO_3 标准溶液，使氯离子完全沉淀。在上述溶液中用铁矾做指示剂，将过量的硝酸银用 KCNS 标准溶液滴定。滴定时 CNS^- 首先与 Ag^+ 生成白色的 AgCNS 沉淀， CNS^- 略有多余时，即与 Fe^{3+} 形成 $\text{Fe}(\text{CNS})_2^{2+}$ 络离子使溶液显红色，当滴至红色能维持 5~10s 不褪，即为终点。

反应式为。



5.34 水工混凝土钢筋腐蚀快速试验（淡水、海水）

调查表明，水工混凝土建筑物水上和水位变动区钢筋腐蚀主因是混凝土碳化。混凝土碳化深度超过钢筋保护层厚度，钢筋就会生锈。而海洋环境的水工混凝土建筑物浪溅区和水位变化区钢筋腐蚀主因是氯离子。本方法就是根据这两种腐蚀机制而编写的。

5.35 混凝土抗盐冻剥蚀试验

本试验方法参考 RILEM TC 117-FDC Recommendation -CDF test 《Test method for the freeze-thaw and deicing resistance of concrete -Tests with sodium chloride》（混凝土冻融和抗冻性能试验方法——氯化钠盐冻法）和 ASTM C672《Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surface Exposed to Deicing Chemicals》（与防冻盐接触的混凝土表面的抗剥落性能的标准试验方法）等标准编写。

5.36 混凝土抗硫酸盐侵蚀快速试验

本次修订新增的试验方法。

本方法参考 GB/T 50082《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》等标准编写，适用土壤含有大量硫酸盐的地质条件下的水工混凝土抵抗硫酸盐侵蚀能力的检测，叠加干湿循环条件用于加速硫酸盐侵蚀，缩短试验时间。

5.37 混凝土表观密度和吸水率试验

本次修订新增的试验方法。

本方法参考以下标准编写，结合水工混凝土实际情况做了部分修改，试件修改为 150mm 边长立方体试件或直径 150mm 高 150mm 的圆柱体试件。

混凝土表观密度试验方法参考 ASTM C642 《Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete》（硬化混凝土密度、吸水性和空隙率标准试验方法）和 BS EN 12390-7 《Testing hardened concrete. Density of hardened concrete》（硬化混凝土试验—硬化混凝土表观密度）等标准编写。

混凝土吸水率试验方法参考 JTS/T 236《水运工程混凝土试验检测技术规范》、ASTM C1585 《Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement

Concretes》(水泥混凝土吸水率测试标准试验方法)和 BS 1881-122 《Testing concrete. Method for determination of water absorption》(混凝土试验—吸水率测定方法)等标准编写。

在 5.23 节时中, 可用本方法测试的混凝土吸水率带入公式 (5.23.4) 计算相对渗透性系数。

5.38 混凝土早期抗裂试验

本次修订新增的试验方法。

本方法参考 CECS 13《纤维混凝土试验方法》等标准编写, 可用于评价水工面板混凝土各项抗裂措施的效果。

6 全级配混凝土

6.1 全级配混凝土试件的成型与养护方法

全级配混凝土的试验结果, 主要供混凝土坝的设计复核, 不作为现场混凝土质量控制的依据。

全级配混凝土的试验方法, 主要是根据“八五”国家重点科技攻关项目《大坝全级配混凝土试验方法研究》208-01-03-081 成果而编写的, 同时也参考美国垦务局《MATERIALS LABORATORY PROCEDURES MANUAL》(材料室内试验手册)的有关内容。

6.8 全级配混凝土压缩徐变试验

本次修订新增试验方法, 主要是根据中国水科院“八五”国家重点科技攻关项目《大坝全级配混凝土试验方法研究》、《全级配混凝土试验方法研究》等多项科研项目, 以及多年来在三峡、小湾、溪洛渡、白鹤滩等工程项目的试用等成果编写。

7 碾压混凝土

7.1 碾压混凝土拌和物工作度 (VC 值) 试验

1 碾压混凝土的振动液化与工作度关系

- 1) 碾压混凝土的振动液化与工作度: 碾压混凝土的振实过程及原理与普通混凝土相似。拌和物在振动的作用下其颗粒围绕某一不稳定平衡位置作颤振运动, 并借助自身的质量向下产生位移, 浆体在振动作用下发生了液化。逐步挤压了拌和物各组份之间的空气所占的空间,

空气逐渐排出，因此拌和物得到逐步增实。碾压混凝土特别干硬，内摩阻力大到自身质量所不能克服的程度，必须供给辅助力量，才能使其完成液化过程。通常的办法是施加压重，压重物的振动对拌和物做功，使其颗粒下移直至液化。从振动开始到表面液化完成的时间（s），因拌和物的干湿而异，它可以作为工作度的衡量标准，通常称 VC 值。

- 2) 振动下拌和物临界液化时间和振动参数关系：碾压混凝土拌和物受振动产生液化需要能量，除了压力以外，这能量主要决定于振动参数—频率和振幅。对同一拌和物采用不同频率、不同振幅（或加速度），测得临界液化（出浆）时间必然不同。不同频率、振幅及振动加速度对液化临界时间影响的试验结果见图 2 和图 3。

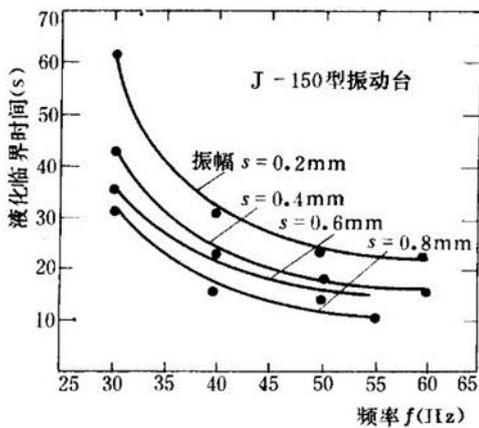


图 2 不同振幅下频率与振动液化时间的关系

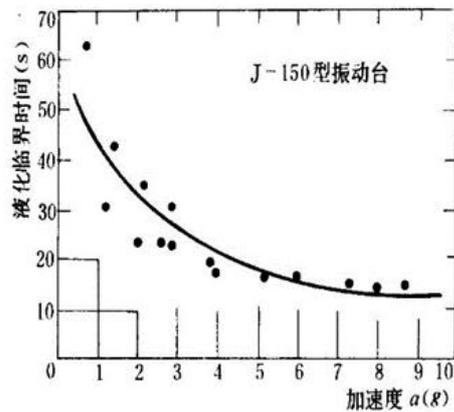


图 3 加速度与振动液化时间的关系

图 2 的试验结果说明，碾压混凝土振动液化临界时间随振幅增大而降低。图 3 的试验结果说明，碾压混凝土的振动液化临界时间随振动加速度的增加而降低，加速度在 5g~10g 范围内变化平稳。加速度小于 5g 时，振动液化临界时间随加速度减小而急剧增加。同时也说明，要用临界液化时间作为衡量工作度的标准，必须在固定的振动台和相同的振动参数下进行。

- 3) 附加压重质量和振动液化临界时间关系：普通混凝土的工作度以坍落度表示，干贫混凝土和零坍落度混凝土可以用 VB 值表示。但碾压混凝土特别干硬，用标准的 VB 试验法，出浆时间较长且难于判断准确，试验表明，只要增加压重质量，出浆时间就会明显缩短，而且随压重质量的增加逐渐趋于稳定。不同表面压重质量与振动液化临界时间关系如图 4 所示。它说明碾压混凝土振动增实过程中表面压重质量对拌和物液化作用有明显影响。随着表面压重质量的增加，液化临界时间减小，当压重增至 17.75kg 液化临界时间在 15s~20s 之间。因此，制定的试验规程碾压混凝土拌和物工作度测定选用 17.75kg 压重质量。

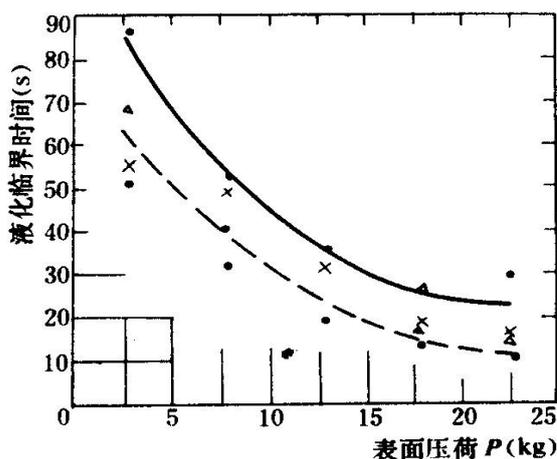


图 4 表面压重质量与振动液化临界时间

测定选用 17.75kg 压重质量。

2 振动台选定

选定振动台的原则是：①振动参数的波动对测值的影响不显著；②优先选用国内定型产品。根据这两条原则，测定碾压混凝土拌和物工作度选用维勃稠度仪。该设备振动频率为 50Hz±3Hz，空载振幅

0.5mm±0.1mm, 名义加速度 5g。“混凝土拌和物维勃稠度测定法”是国际标准化组织所接受的方法(ISO 4110-1979)。

7.2 碾压混凝土拌和物表观密度测定

碾压混凝土表观密度测定采用容量筒法。

- 1) 容量筒容积: 碾压混凝土拌和物单位体积质量的测定为配合比设计计算材料用量提供了依据, 也是对设计表观密度的检验。考虑到碾压混凝土比常规混凝土干硬, 因此把容量筒的容积适当加大以保证实测表观密度的精度, 相应于粗骨料最大粒径 40mm、80mm 的拌和物, 容量筒容积分别定为 10L、30L。目前国内及国外碾压混凝土所用粗骨料最大粒径为 40mm 及 80mm 左右, 大于 80mm 粒径的粗骨料很少应用。
- 2) 试验时压重块质量的确定: 试验表明, 试验时拌和物表面承受的动压力的大小对表观密度和强度有一定的影响。当每平方厘米面积上平均作用 50g 力时, 所得强度值较高。为使表观密度试验时拌和物的密实度能接近于强度试验成型时碾压混凝土的密实度, 故规定进行表观密度试验时, 压重块总质量按压强为 4900Pa 计算求得。
- 3) 成型振动时间的确定: 从拌和物液化原理及液化过程考虑, 拌和物受振表面出浆, 说明拌和物已经达到临界液化, 也就是说, 这时拌和物已基本上密实了。试验表明, 用本规程所规定的振动台振动同一拌和物, 不论用什么样的容量筒, 只要装料高度一致、单位表面积上压重质量一致, 出浆时间差别并不大。因此, 用 VC 值控制振动时间是可行的, 但为了保证拌和物充分振捣密实, 适当延长振捣时间是必要的。故规程中规定“下层振动时间等于 VC 值, 顶层振动时间为 2VC 值~3VC 值”。

7.3 碾压混凝土拌和物含气量试验

含气量试样成型采用维勃振动台, 需要一套卡具, 使含气量量钵固定在振动台上。碾压混凝土试样装入量钵后置于振动台上振动液化, 使其达到密实。根据抗压强度试验, 当表面压强达到 4900Pa 时, 强度最高, 也即密实度最大, 以此换算得混凝土表面压重需 15kg, 振动时间与抗压强度规定相同。

7.4 碾压混凝土拌和物凝结时间试验 (贯入阻力法)

对碾压混凝土的室内试验和现场实测结果说明, 可取用贯入阻力~历时关系曲线上转折点对应的时间作为初凝时间, 测试结果见图 5~图 8。

实践表明, 初凝时间不宜用作判别碾压混凝土仓面直接铺筑允许时间, 铺筑允许时间一般短于初凝时间。碾压混凝土仓面直接铺筑允许时间应由现场试验确定。

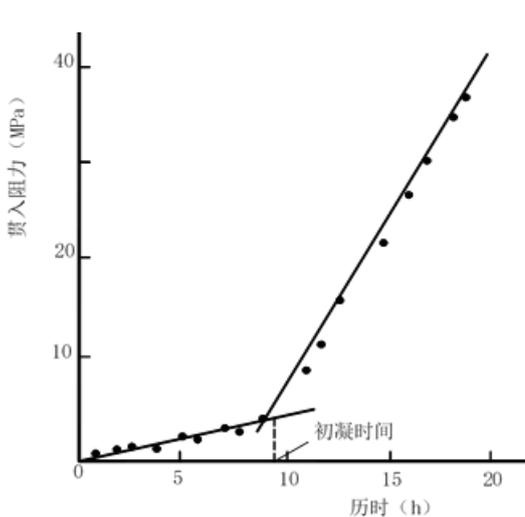


图 5 碾压混凝土拌合物初凝时间测定实例
(天生桥工程室内试验)

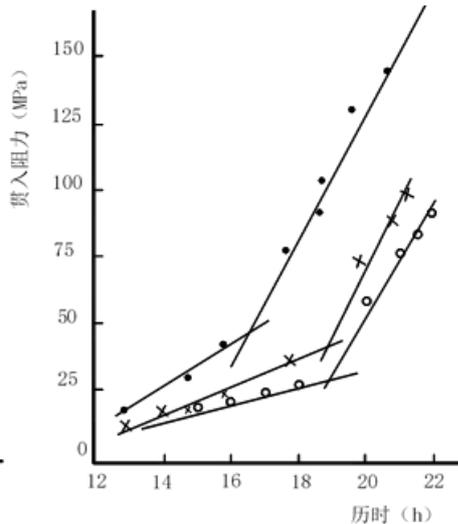


图 6 碾压混凝土拌合物贯入阻力与历时的关系
(铜街子工程实例)

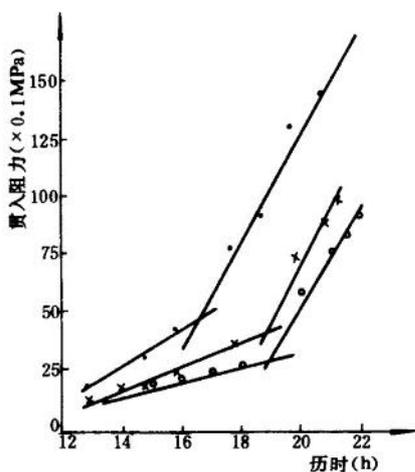


图 7 碾压混凝土贯入阻力与时间的关系
(铜街子工程室内试验资料)

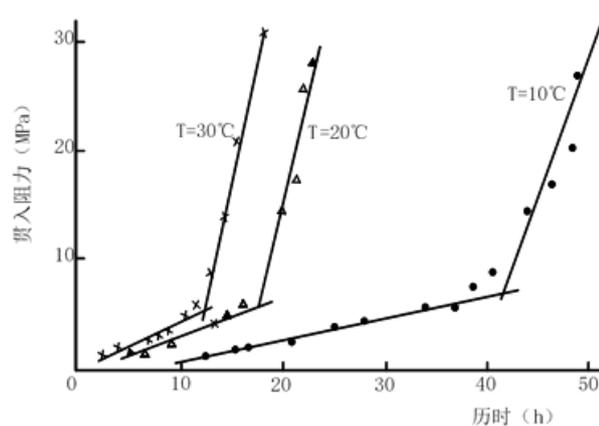


图 8 温度对碾压混凝土拌合物初凝时间的影响
(铜街子工程实例)

7.5 碾压混凝土成型方法

本节是将成型的内容从原 7.5 碾压混凝土立方体抗压强度试验中抽取出来的。

1 成型振动机械的选择。

碾压混凝土的现场施工是依靠振动碾压实现的，因此室内试验采用振动与施压相结合模拟现场施工情况。国产 1m^2 振动台实测振动频率为 47.67Hz ，标准压重下测定的振动加速度为 5.07g 。振动成型器重 35kg ，振幅 3mm ，振动频率 47Hz 。两种振动机械的频率、振幅都在较佳的工作范围内。选用国产振动台外加压重及振动成型器所进行的试验结果列于表 4 中。

从表 1 中可以看出：对相同的配合比，只要选定的压重和振时合理，无论是振动台还是振动成型器，均可达到相近的密实度，强度也相近。但同时也可看到，强度相近时，振动成型器成型的混凝土

静态弹性模量大于振动台成型的弹性模量。这是由于振动台所提供的能量或振动波是自下而上传递并逐步衰减的,即使分层振动也不能减小振动能量沿高度方向的衰减,所以分层振时对强度并无改善(见A1及G1)。而振动器则相反,它的振动能量是自上向下传递并递减的。利用分层的办法可以使混凝土上下层获得能量大致均匀,从而使密实度增大,强度提高,因此,若成型高度较大的试件(如导热及徐变试件)振动台不但很难达到振实要求,而且试件上下的密实度不均匀造成较大的试验误差,除此之外,振动成型器比振动台更接近施工碾压的实际情况。

根据试验结果及国内振动机械设备的情况,我们认为,碾压混凝土试件既可采用振动台成型也可采用振动器成型,但对成型高大试件以振动成型器为佳。

2 单位面积压重质量的选择。

碾压混凝土在施工和成型中承受振动和压力,单位面积上压重质量的选择是十分重要的。我们选用振动台进行不同压重质量对碾压混凝土强度影响的试验,试验中使用三级配碾压混凝土拌和物,湿筛去除大于40mm的粗骨料,分别选用单位面积上的压强为2450、4900、7350、9800Pa进行试验,试验结果列于表5。

表 4 振动台与振动成型器对比试验结果

配合比 编号	配比用料 (kg/m ³)				振动机械	施振时间 (s)	分层 与否	28d 抗压强度 (MPa)	91d	
	水灰比	水泥	粉煤灰	外加剂 (%)					抗压强度 (MPa)	弹模 (10 ⁴ MPa)
A1	0.8	90	30	木 0.2	振动台	60	不分	6.3	-	-
G1	0.8	90	30	木 0.2	振动台	40	二层	6.3	-	-
E1	0.8	90	30	木 0.2	振动器	40	不分	5.8	-	-
H1	0.8	90	30	木 0.2	振动器	40	二层	6.4	-	-
E2	0.8	90	30	木 0.2	振动器	-	不分	7.2	-	-
H2	0.8	90	30	木 0.2	振动器	40	二层	8.4	-	-
R25	0.8	90	30	糖 0.25	振动器	25	压不分 弹二层	7.0	10.6	2.55
R27	0.8	90	30	硅 3.0	振动器	25	压不分 弹二层	7.6	11.0	2.81
R34	0.75	98	42	木 0.2	振动台	-	不分	7.1	10.5	2.23
R35	0.70	97	41	木 0.2	振动台	-	不分	-	11.8	2.07

表 5 压强对碾压混凝土强度的影响

压强 (Pa)	不同成型施振时间情况下混凝土 28d 强度 (MPa)					
	20 s	30 s	40 s	60 s	75 s	80 s
2450	-	-	5.2	5.1	-	6.7
4900	5.0	5.3	5.3	6.3	5.4	-
7350	4.6	5.3	4.8	5.0	-	-
9800	-	5.4	5.3	-	-	-

注: 拌和物 VC 值等于 20s。

试验结果表明,选用的压强越小,要达到较高的碾压混凝土强度所需的施振时间就越长。从施工角度考虑,单位压重过小技术上难以达到要求。因此室内试件成型的单位面积上的压重质量须与施工情况接近。综合考虑以上因素,规定成型压重压强按 4900Pa 计算。

3 施振时间的选择。

在选定振动机具及单位面积上的压强以后,施振时间就是振实程度的决定因素。它直接反映碾压混凝土拌和物接受振动能量的多少,而拌和物只有接受足够的能量才能密实。若达不到相应的能量,拌和物就不能充分液化,内部气泡排出不充分,试件就不密实;然而过量的振动造成浆液流失,碾压混凝土不均匀。这两种情况都会使碾压混凝土强度降低。

为了确定合适的振捣时间,我们用振动成型器对不同配合比的拌和物进行振实成型试验,考察其 28d 抗压强度,试验结果列于表 6 中,由表中的数据可知,碾压混凝土拌和物越干硬、工作度越大,达到最佳密实度所需要的施振时间也越长。

表 6 成型施振时间对碾压混凝土强度的影响

编号	配比用料 (kg/m ³)				砂料细度 模数	工作度 VC (s)	分层	不同施振时间的 28d 抗压强度 (MPa)				
	水	水泥	粉煤灰	外加剂 (%)				15s	20s	30s	40s	50s
P	96	90	59	木 0.2	1.03	15	不分	6.75	7.88	8.03	8.13	-
Q	96	90	30	木 0.2	1.03	30	不分	-	6.03	6.88	6.55	7.02
E1	96	90	30	木 0.2	2.08	20	不分	-	5.70	5.20	5.80	-
H1	96	90	30	木 0.2	2.08	20	二层	-	-	6.20	6.40	6.00

4 取消用维勃试验振动台成型试件方法。

虽然国外规范规定可以用维勃试验振动台成型碾压混凝土抗压强度试件,但根据我国使用情况,均采用振动成型器成型试件,其优点是成型抗压强度试件的速度比维勃振动台快许多;振动成型器不但可以成型抗压强度试件,也可成型其他试验试件,特别是分层成型的试件。

7.7 碾压混凝土表观密度测定

1 碾压混凝土的施工质量必须采用密实度控制。通常用相对密实度表示,即实测混凝土表观密度与理论表观密度(按绝对体积法计算的单位材料总重量)的比值百分率。

2 美国混凝土学会要求碾压混凝土的密实度达 98%以上,柳溪坝达 98%~99%。苏联的研究证明,碾压混凝土密实度下降 1%,强度下降 8%~10%。

3 为使实测的混凝土表观密度尽量接近理论表观密度,取样时,混凝土拌和物应具有足够代表性,且应包括全部粗骨料。

4 严格控制碾压混凝土的振实时间。振实时间对表观密度的影响见表 7。从中可见随振实时间的延长,碾压混凝土密实度有所提高。为了与强度试验成型振实时间相一致,表观密度试验试件成型

的振实时间也规定为 2VC 值~3VC 值。同时考虑到碾压混凝土成型后有部分游离水会分泌蒸发，碾压混凝土的表观密度应以养护 3d 后测得的表观密度作为现场施工时密实度的控制标准表观密度。

表 7 振实时间对表观密度的影响

振实时间 (以 VC 值控制)	理论表观密度 (kg/m ³)	实测表观密度 (kg/m ³)	相对密度 (%)
1VC (10 s)	2573	2521	98.0
2VC (20 s)	2573	2533	98.4
3VC (30 s)	2573	2542	98.8
3VC (30 s) 养护 2d 拆模	2573	2540	98.7

5 铜街子工程采用核子密度仪现场测定的碾压混凝土表观密度见表 8。从表可见只要碾压混凝土密实，其相对密实度均可达 98%以上。

表 8 碾压混凝土表观密度的现场测定值

工程部位	混凝土标号	测定次数	最大值 (kg/m ³)	最小值 (kg/m ³)	平均值 (kg/m ³)	理论表观密度 (kg/m ³)	相对密度 (%)
16 [#] 、17 [#] 护坦	R ₉₀ 150	244	2633	2408	2550	2577	98.95
16 [#] 、17 [#] 护坦	R ₉₀ 100	416	2654	2423	2543	2573	98.83
1 [#] ~3 [#] 坝段	R ₉₀ 100	99	2633	2450	2550	2536	98.56

7.11 碾压混凝土抗剪强度试验

本法参照《水利水电工程岩石试验规程》SL264 制定。

1 边界条件。两向应力条件下的剪切试验，应该是在两侧无摩擦阻力的条件下进行的。试件在剪力盒中，在法向应力和水平推力的作用下，加力板与上、下底板接触会产生摩擦阻力，从而产生水平方向的约束。由于滚轴的摩擦系数很小，试件上端（或下端）加上滚轴排后可以认为未对试件产生水平轴向约束。

表 9 是不同上、下边界条件下碾压混凝土抗剪试验结果。从表中可以看出，不同边界条件对碾压混凝土的抗剪强度试验结果有较大影响。当只在试件上端加滚轴排而下端不加时，可以看成试件上端不受水平约束，下端轴向有水平约束。试件无水平方向推力，这正与重力坝设计单位长度坝体的两向受力情况相似。同时，试验结果表明其抗剪强度也居于另外两边界条件的抗剪强度之间，说明上端加滚轴排，下端不加滚轴排的模拟方法是正确的。

表 9 不同上、下边界条件下碾压混凝土抗剪强度

90d 抗压强度 (MPa)	90d 劈拉强度 (MPa)	上、下边界条件	90d 抗剪强度	
			C' (MPa)	Φ'
20.9	1.9	上端加滚轴排	3.30	49.90°

		上、下端均不加滚轴排	3.51	54.30°
		上、下端均加滚轴排	3.00	54.60°

2 最大垂直荷载的确定。抗剪试验中加于试件上的最大垂直荷载重应满足大坝设计要求。垂直荷载可按 4~5 级施加，坝高 100m 级重力坝最大法向应力不低于 3MPa，200m 级重力坝不低于 6MPa。试验时应尽量综合利用一块试件得到更多的资料。

3 试件注水饱和，使试验结果接近于坝体蓄水所处状况。

7.15 碾压混凝土渗透系数试验

碾压混凝土本体存在着渗水的原因是：①用水量超过水泥水化所需水量，而在内部形成毛细孔通道；②骨料和水泥石界面上的微裂隙；③碾压不密实而造成的孔洞。

液体在流过材料的迁移过程中渗透。渗透流量可用达西定律表示，即

$$Q = KA \frac{H}{L} \quad (1)$$

式中 Q —— 通过孔隙材料的流量， cm^3/s ；

K —— 渗透系数， cm/s ；

A —— 渗透面积， cm^2 ；

L —— 渗透厚度， cm ；

H —— 水头， cm 。

由 (1) 式得

$$K = \frac{QL}{AH} \quad (2)$$

渗透系数 K 反映材料渗透率的大小， K 值愈大，表示渗透率愈大，反之，则渗透率愈小。

渗透性测试方法必须与渗透性评定标准相适应。我国和前苏联采用抗渗等级作为评定标准，欧美和日本则采用渗透系数。抗渗等级评定是根据作用水头对建筑物最小厚度的比值大小，分别提出不同的抗渗等级。

渗透系数评定碾压混凝土的渗透性比抗渗等级物理概念清楚；与现场坝体压水试验测定参数一致，便于室内和现场试验分析比较；同时，吸收国外经验和对外技术交流方便。所以增加了碾压混凝土渗透系数测定方法。

测定碾压混凝土渗透系数的试件有圆柱体和立方体。圆柱体和立方体试件只沿液体流动方向受压，更接近大坝运用条件。

7.22 碾压混凝土绝热温升试验

在碾压混凝土坝温度场计算中，绝热温升—历时函数关系是特别重要的热性能参数。随着电子计算机和有限元法的发展，复杂结构的温度场和温度应力可以在较短时间内准确计算。但是必须准确选

择碾压混凝土热性能参数,使其与实际情况相符合。否则即使方法准确,所得到的结果与实际情况仍有较大的差异。

进行碾压混凝土绝热温升试验的目的,是测定在绝热试验条件下,由于水化所产生热量而使碾压混凝土温度升高。所谓绝热试验条件是指水泥水化所生热量与外界不发生交换,既不放热也不吸热。

根据绝热介质不同,碾压混凝土绝热温升测定仪分为水循环绝热式和空气循环绝热式两种。本试验方法对绝热温升测定不做硬性规定,但必须满足以下技术条件:试件尺寸大于最大骨料粒径的3倍;试验温度 $10^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$;试验跟踪精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

碾压混凝土绝热温升增长的物理表现是:碾压混凝土出搅拌机的温度称为初始温度,此时碾压混凝土绝热温升值为零。以后随着水泥水化产生热量,绝热温升逐渐增高,最后达到一个稳定值。绝热温升 T 是历时 t 的函数,即 $T=F(t)$,应满足以下数学条件:①当 $t=0$ 时, $T=F(0)=0$;②当 $t=\infty$ 时, $T=F(\infty)=T_0$ (定值);③ $T=F(t)$ 在 $(0, \infty)$ 区间单调增加;④ $dT/dt=g(t)$ 在 $(0, \infty)$ 区间单调降低。

碾压混凝土掺加大量粉煤灰,水化温升持续时间很长,根据有限的试验历时(一般28d)确定最终绝热温升(T_0)是困难的,且有较大的随意性。本试验方法提出利用双曲线型函数特性,根据实测绝热温升值推断最终绝热温升 T_0 。

$$T = \frac{T_0 t}{n+t} \quad (3)$$

式中 n 是由试验确定的系数。

当 $t=0$ 时, $T=0$;当 $t=\infty$ 时, $T=T_0$;当 $T=T_0/2$ 时, $t=n$,即 n 表示绝热温升为最终绝热温升一半的历时。

美国垦务局在三十年代曾提出混凝土绝热温升一历时表达式为

$$T=T_0(1-e^{-mt}) \quad (4)$$

式中 m 是由试验确定的系数。

(4)式是大体积混凝土温度场计算惯用的表达式。根据我国目前采用水泥和掺合料的品质,提出另一种绝热温升一历时表达式,即

$$T = T_0(1 - e^{-at^b}) \quad (5)$$

式中 a 、 b 是由试验确定的系数。

7.24 加浆振捣碾压混凝土室内拌和成型方法

本次修订新增试验方法。

加浆振捣碾压混凝土又称变态混凝土、加浆振捣混凝土。加浆振捣碾压混凝土是指在已摊铺的碾压混凝土拌和料中,掺入一定比例的灰浆后再振捣密实的混凝土。在碾压混凝土坝的施工中,加浆振捣碾压混凝土广泛地运用于振动碾无法直接碾压的基岩面与碾压混凝土接合部、模板边缘、廊道周围、坝内配筋处等部位。

本方法参考以下标准和资料编写:DL/T 5433《水工碾压混凝土试验规程》,中国水科院自然科学

基金项目《碾压混凝土的变态机理及变态浆材的改性优化研究》、国家电力公司科技项目子题《龙滩水电站高性能变态混凝土掺浆材料及配合比研究报告》，以及《碾压混凝土筑坝中变态混凝土施工工法》（田育功著）等。

7.25 碾压混凝土拌和物仓面贯入阻力检测

手持式贯入阻力仪用于测定碾压混凝土拌和物现场预布砂浆试样的贯入阻力，实时检控层面间隔时间。当实测贯入阻力等于层面直接浇筑允许间隔时间所对应的贯入阻力限制值，此时现场层面已达到允许间隔时间临界状况，应及时覆盖上层碾压混凝土。

提出这种检控方法的理念是碾压混凝土层面特性主要决定于碾压混凝土振动液化浮出层面的砂浆性质，而这种砂浆性质用其贯入阻力表征。

龙滩坝上游围堰现场仓面，用手持式贯入阻力仪测定仓面碾压混凝土贯入阻力的结果见**错误!未找到引用源。**—图 9

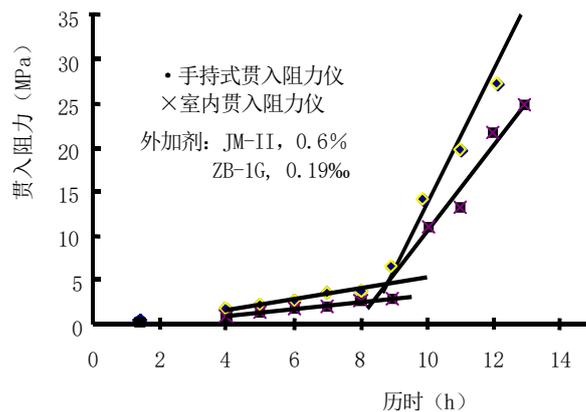


图 9 手持式贯入阻力仪用于仓面测控贯入阻力
(龙滩坝围堰现场实测)

7.26 现场碾压混凝土表观密度检测

本试验采用表层型核子水分—密度仪，用透射法测量刚碾压完毕的碾压混凝土层的表观密度测定。其基本原理是：从放射源放射出的 γ -射线穿透被测试的介质后，被探测器接受到穿透介质的 γ -射线强度与介质密度的关系为。

$$N = N_0^{-\mu_m \rho d}$$

式中：N —— 被探测器接受到穿透介质的 γ -射线强度（即 γ -射线的计数率， s^{-1} ）；

N_0 —— 放射源 γ -射线的初始强度（即 γ -射线的计数率， s^{-1} ）；

μ_m —— 介质的 γ -射线质量吸收系数 (cm^2/g)，每一种介质的 μ_m 皆为常数；

ρ —— 介质密度 (g/cm^2);

d —— 放射源到探测器的距离 (即源距, cm)。

当放射源、源强、源距确定之后, 被探测器测到穿透介质的 γ -射线计数率 N 仅与被测介质的密度 ρ 有关, 两者的相关性见 [错误!未找到引用源。图 10](#)。据此, 通过测量 γ -射线计数率 N , 可测定被测介质的密度 ρ 。

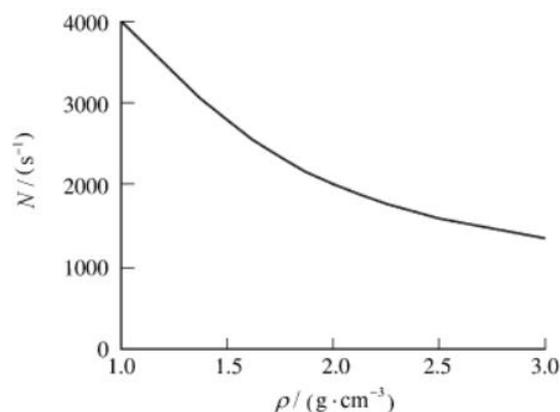


图 10 γ -射线计数率与被测介质密度的关系 (透射法)

现场碾压混凝土表观密度测定时应注意。

1 为防止碾压完后混凝土表面泌水, 影响测定密度值, 须在 20min 内测定。

2 为了消除在不同条件、不同地区下放射性本底的差异, 以及放射源衰减等影响因素造成的测量误差, 试验前应用标准计数计进行校正, 满足仪器技术指标后才能使用。标准计数检验方法见 SL 275 《核子水分-密度仪现场测试规程》。

3 为消除所用原材料 (特别是花岗岩地区) 成分对密度测量的影响。应采用工程材料及配合比配制碾压混凝土标准试块进行标定。

4 碾压层混凝土表观密度检测深度应尽量与层厚相近。

5 碾压混凝土表观密度为单位体积的质量 (包括拌和水)。

6 标准试块如采用木制试模制做, 木模内面应涂防水材料, 以防混凝土试件失水。

本次修订重新编写了本节试验方法, 增加基准表观密度测定, 并根据现场实际操作情况, 将仪器现场标定用试件由边长 450mm 立方体修改为 600mm×600mm×400mm 棱柱体, 将进行四个深度测量改为进行等深度四个方向测量。

8 现场混凝土质量检测

本次修订删除了原 8.3 节 “射钉法检测混凝土强度”, 该方法由原水电部第三工程局的周孝正和原交通部公路研究所的蔡正咏等合作在 1991 年研制成功, 本标准 95 版修订时引入。“射钉法检测混

凝土强度”方法的原理是用射钉贯入混凝土中，根据贯入深度来推定强度，可以避免如回弹仪受混凝土表面状态的影响，在三峡工程对外交通工程、河南省的一些水利工程中应用效果较好。现在逐步被淘汰主要是由于安全管制的原因，射钉弹的购买和携带都存在问题，外出检测时射钉弹在乘坐飞机和火车时均属于危险品，无法随身携带和办理托运，故导致这种检测方法逐步失去使用价值。

8.3 超声波检测混凝土裂缝深度（平测法）

本方法的基本原理是利用超声波绕过裂缝末端的传播时间（简称声时）来计算裂缝深度。

如图 8.4.3-1 所示，若换能器对称地置于裂缝两侧，测得传播时间为 t_1 ，（超声波绕过裂缝末端所需的时间）。设混凝土波速为 v ，可得： $\frac{t_1 \cdot v}{2} = AD$ 。则裂缝深度为。

$$h = \sqrt{(v \cdot t_1/2)^2 - (d/2)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{t_1^2 v^2 - d^2} \quad (8.1)$$

若换能器平置于无缝的混凝土表面上，相距同样为 d ，测得传播时间为 t_0 ，则 $t_0 \cdot v = d$ ，代入（6）式，则可得垂直裂缝深度（ h ）。

$$h = \frac{d}{2} \sqrt{(t_1/t_0)^2 - 1} \quad (8.2)$$

8.5 超声波检测混凝土内部缺陷

钻孔间测距修正：一般钻孔可认为是一条直线，如果两钻孔直线不平行，则需修正。简单的处理是：可按梯形考虑，以两直杆分别插在两孔中，测量露出孔口单位长度下两杆距离的变化，进而推算孔中不同高程的距离变化，如果两钻孔较深且明显不在同一平面上，则须测量两钻孔的倾角与方位角，按空间上两个不平行直线间的距离计算。

根据概率论，每个正常的含有粗大误差（这里指过失误差）的测量值出现的频率应为 $1/n$ ；含有粗大误差的测量值出现的频率应小于 $1/n$ ，这里 n 代表参加统计的测点总数。

条文中计算单点临界值 XL_1 的公式为。

$$XL_1 = m_x - K_1 S_x$$

其中 K_1 为单点异常值判定系数，实际上就是相应于概率为 $1/n$ 时的正态分布函数中的分位数（常以符号 t 表示），可从正态分布表中查到。

相邻异常值的判断实际上是指相邻两测点均低于某一临界值时，表明该两点均应是缺陷，而求临界值的大小。凡任意两相邻点均低于 X_i 的概率应是 $4P^2$ （ P 为某点出现小于某值 X_i 的概率）。质量正常波动出现这种情况的概率也应为 $1/n$ ，否则也是不允许的过失误差（粗大误差）。根据 $4P^2 = \frac{1}{n}$ ，即可解

$P = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{n}}$ 。概率 P 所对应的分位数就是文中所列的相邻异常值判定系数 K_2 。

估计形状近似圆球或圆柱体的缺陷尺寸时，可根据缺陷中心部位声时 t_1 与正常部位声时 t_n 差值

的百分数 $\frac{t_f-t_n}{t_n} \times 100\%$ 与缺陷在断面的位置 $\frac{l_1}{l}$ 查表求得。

8.6 混凝土芯样强度试验

芯样的加工水平直接影响其强度测试结果。本次修订将端面平整度偏差不应大于直径的 1/10 修改为不大于直径的 0.1%，增加了两端面与中轴线的垂直度偏差不应大于 1°。平整度（平面度）偏差和垂直度偏差参考 SL 130《混凝土试模校验方法》的规定进行测量和计算。

由于芯样强度检测常用于混凝土实体质量控制中，而实体质量检测通常要求结果提交的及时性，若在标准养护室养护一周时间过长，可将试件泡水 2 天饱水，以加快速度。

如需将不同长径比的芯样试件的抗压强度换算成长径比为 1.0 的试件强度，换算系数可由图 11 中的长径比—换算系数曲线上查找，如长径比为 2.0 的芯样试件抗压强度，除以 0.83 可换算成长径比为 1.0 的芯样试件抗压强度。劈裂抗拉强度可不换算。

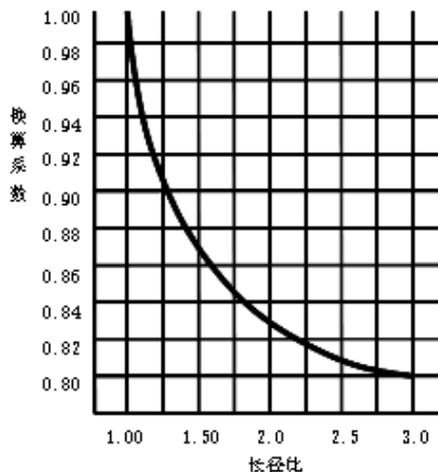


图 11 不同长径比试件抗压强度换算系数

混凝土芯样与 150mm 立方体强度之间的换算系数，是根据二滩水电站关于试验尺寸对混凝土强度影响的研究成果（见表 10），和本规程规定长径比为 2 的芯样强度/长径比为 1 的芯样强度=0.832， $f_{150}/f_{100} = 0.95$ ， $f_{150}/f_{200} = 1.05$ 而编制的。

表 10 圆柱体与立方体强度比

圆柱体尺寸 (mm)	Φ100×200	Φ150×300	Φ200×400
立方体尺寸 (mm)	100×100×100	150×150×150	200×200×200
两者强度比	0.79	0.80	0.74
注：两者强度比，为圆柱体强度与对应立方体强度的比值。			

8.7 混凝土与岩基和碾压混凝土层间原位直剪试验（平推法）

本项试验方法，依照 SL 264《水利水电工程岩石试验规程》，结合碾压混凝土层间结合原位直剪试验特点制订。

本项试验方法已在铜街子、岩滩等水电工程上应用，经 100 余块剪面积为 50cm×50cm、70cm×70cm 试体的现场检测，证明试验方法简便合适。试验结果能够较好地反应碾压混凝土坝体层面抗剪特性与应力、应变性能。成果经设计采用与工程运行的考验，具有可靠性。给出部分试验结果，见表 11。

表 11 碾压混凝土层间现场抗剪（断）成果表

工程名称	编号	每立方米混凝土材料用量 (kg)					设计混凝土标号	现场取样 90d 龄期 抗压强度 (MPa)	抗剪试验 碾压龄期 (d)	剪切面积 (cm ²)	最大法向 应力 (MPa)	抗剪（断）强度						施工及试验单位
		水	水泥	粉煤灰	砂	石						峰值		残余值		摩擦值		
												f'	c' (MPa)	f	c (MPa)	f	c (MPa)	
铜街子	砂浆层	90	65	65	635	1634	#100 (90d)	14.64	118	3928.2	0.993	1.23	1.25	1.13	0.525	1.13	0.535	水电部第七工程局 成都勘测设计院科研所
	碾压层											1.70	1.28	1.26	0.47	1.25	0.47	
												1.80	1.60	1.28	0.53	1.88	0.53	
岩滩	坝 1	85	55	104	754	1527	#150 (90d)		65~85	50×50	0.98	1.15	0.981	0.94	0.343	0.94	0.319	广西水电工程局
	坝 2	85	55	104	754	1527	#150 (90d)					1.20	1.618	1.03	0.466	1.08	0.368	广西水电科研所
	坝 3	85	55	104	754	1527	#150 (90d)					1.27	1.47	0.94	0.466	0.94	0.392	
	上堰 1	90	45	115	757	1555	#100 (90d)	17.2(28d)	90~100	50×50	0.98	1.36	1.40	0.96	0.84	0.90	0.66	广西水电工程局
	上堰 2	90	45	115	757	1555	#100 (90d)	17.2(28d)	90~100	50×50	0.98	1.05	0.61	0.79	0.25	0.75	0.17	广西水电科研所
	下堰 1	86	45	105	739	1546	#100 (90d)	20.6(28d)	90~100	50×50	0.98	1.26	1.24	1.15	0.29	1.21	0.26	葛洲坝工程局
	下堰 2	88	45	105	739	1546	#100 (90d)	20.6(28d)	90~100	50×50	0.98	1.25	1.20	1.30	0.14	1.21	0.17	广西水电科研所
龙滩 (碾压试 验体)	I 层厚 50cm 缝铺砂浆 (1:2) 处理	98	75	105	735	1475	#250 (90d)	28.3~31.5 (90d)	90~100	50×50	2.96	1.20~1.30	2.50~2.60					广西水电工程局 中南院科研所
	II 层厚 30cm, 连续碾压, 层间间歇 4~6h	98	75	105	735	1475	#250 (90d)	28.3~31.5 (90d)	90~100	50×50	2.96	1.05~1.10	1.00~1.50					广西水电科研所

8.8 混凝土中钢筋半电池电位检测

本方法的基本原理：混凝土中钢筋半电池电位，是测点处钢筋表面微阳极和微阴极的混合电位。当构件中钢筋表面阴极极化性能变化不大时，钢筋半电池电位主要决定于阳极性状：阳极钝化，电位偏正；阳极活化，电位偏负。

依据美国 ASTM C876《Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete》（混凝土中无保护层配筋的腐蚀电位的标准试验方法）和南京水利科学研究院研究报告《钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀的无破坏电测法》编写的。

已饱水或接近饱水的混凝土，其中钢筋由于缺氧，阴极极化性能很强。这时测得的钢筋半电池电位为负，而钢筋往往还未生锈。因此这时就不能采用本法。

用预湿混凝土的方法，未能使钢筋半电池电位在 5min 内变化在 $\pm 2\text{mV}$ 以内，原因是整个测量电路的电阻太大，或是由于外来杂散电流的影响。无论哪种情况，均不宜再用本法。

8.9 海砂、混凝土拌和物氯离子含量的快速检测

试验基本原理：用氯离子选择电极和甘汞电极置于液相中，测得的电极电位 E ，与液相中氯离子浓度 C 的对数，呈线性关系，即 $E=K-0.0591\lg C$ 。因此，可根据测得的电极电位值，来推算出氯离子浓度。

9 水工砂浆

本章名称由“水泥砂浆”修改为“水工砂浆”，以便于和建筑砂浆中的水泥砂浆区别，以防混淆。也与附录 B 的名称保持一致。同时，将各节名称中的“水泥砂浆”修改为“砂浆”。

9.5 砂浆拌和物凝结时间试验

本次修订新增试验方法。砂浆凝结时间与混凝土凝结时间检测方法基本相同，但在试验时只使用 20mm^2 截面积的测针测试贯入阻力。

9.6 砂浆饱和面干吸水率试验

本次修订新增试验方法。水工砂浆吸水率与其耐久性紧密相关。

9.9 砂浆粘结强度试验

有关技术文献介绍的粘结强度检测一般采用张拉或剪切两种方法。考虑到试验设备简单、操作方便、试验精度高的原则，本方法采用 8 字型水泥砂浆粘结试件抗拉强度的试验方法。

本方法的 8 字试模内模尺寸和拉伸夹具引用《环氧树脂砂浆技术规程》(DL/T 5193-2004) 的试模和夹具。

9.10 砂浆轴向拉伸试验

砂浆极限拉伸试验的基本要求是：沿试件横截面拉应力应均匀分布，无较大偏心；沿试件长度应有一均匀应力段。在此均匀应力段上测得的极限拉伸值和轴心抗拉强度，才是较真实的。试件形状和尺寸，是经过试验确定的。加载时，试件中部等断面段应力分布均匀，拉断时，断在渐变段的概率高。

研究表明：偏心率在 20% 以内，对试验结果影响不大，因此条文规定试件偏心率不应大于 20%。

砂浆试件相对于混凝土试件断面较小，材料较均质，抗拉强度和内部产生微细裂缝的荷载较大。因此，规定砂浆试件的加荷速度为 0.24kN/min，预拉荷载为 25%~30% 破坏荷载。

10 水质分析

本次修订，在各方法中均增加了试验基本原理一节。

10.4 碱度测定

本方法试验结果的精度要求，是依据 DZ/T 0064《地下水水质检验方法》，并考虑到水工混凝土水质分析试验条件，将精度要求适当放宽后编制的。

10.5 硬度测定

本方法试验结果的精度要求，是依据 GB/T 8538《饮用天然矿泉水检验方法》，并考虑到水工混凝土水质试验条件，将精度要求适当放宽后编制的。

10.13 不溶物含量测定

本方法为新增内容。不溶物含量是水质控制的一个重要参数。

附录 A 水工混凝土配合比设计方法

本附录配合比设计方法中包括了常态（普通）混凝土、碾压混凝土和海水环境混凝土等的配合比设计方法。

混凝土配制强度计算公式（A.2.2）中的保证率系数 t 没有赋值，是因为水利水电工程结构复杂，不同工程部位有不同保证率 P 要求。大体积混凝土要求 P 为 80%；体积较大的钢筋混凝土结构要求 P 为 85%~90%；薄壁和厂房结构要求 P 为 95%。故给出表 A.2.2 强度保证率的 P 和保证率系数 t 关系，以供查用。

水工大体积混凝土施工期长，混凝土承受荷载时间晚，为了利用混凝土后期强度，尤其是掺加掺合料的混凝土，设计龄期常采用 90d 或 180d，由公式（A.2.2）计算的配制强度是指设计龄期的抗压强度。

港工钢筋混凝土结构设计混凝土抗压强度为 25MPa~30MPa，比按耐久性要求的水灰比最大允许值所配制的混凝土强度低。目前施工质量验收，不能通过现场检测工程结构中已浇筑的混凝土拌和物的实际水灰比进行验收，只能通过混凝土试件的强度检测验收。因此，有必要规定按耐久性要求的水灰比最大允许值所对应的混凝土强度，以便对混凝土质量进行双控。所以在混凝土配合比设计确定配制强度时，提出由设计强度计算配制强度和满足耐久性要求的水灰比所决定的强度，两个强度指标。国外标准，按耐久性要求也规定了最低强度值，如美国 ACI357 规定龄期 28d 最低圆柱体抗压强度为 35MPa。

本次修订，在 A.5 常态混凝土配合比设计部分，新增了 A.5.2 泵送混凝土设计、A.5.3 抗冲磨混凝土设计、A.5.4 面板混凝土配合比设计等混凝土配合比设计原则性规定。分别参考 DL/T 5330《水工混凝土配合比设计规程》、DL/T 5207《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》、SL 49《混凝土面板堆石坝施工规范》、SL 228《混凝土面板堆石坝设计规范》等标准编写。

混凝土中氯离子含量最高限值、南方海港规程浪溅区混凝土的抗氯离子渗透性指标、不同暴露部位混凝土拌和物水胶比最大允许值和最低小水泥用量等内容见 SL 654《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》的规定，删除了 A.7.3~A.7.6 及有关条文。

附录 B 水工砂浆配合比设计方法

在日常使用中经验不足的技术人员容易混淆水工砂浆与建筑砂浆。两种砂浆的区别是：

1、所用的施工部位和建筑物所处环境不同。水工砂浆用于经常或周期性地受环境水作用的水工建筑物，在工民建工程中有时也应该使用水工砂浆，如经常浸泡在水中的建筑基础砌石所用的砂浆；建筑砂浆，包括砌筑砂浆、抹灰砂浆、勾缝砂浆及特种砂浆等，主要用于基础、墙壁、柱、地面等工民建工程，水利工程的附属建筑物，也会用到建筑砂浆。

2、配合比设计与试验方法不同。水工砂浆的设计方法与试验内容基本上与水工混凝土相同，配合比设计按照本规程附录 B 进行，使用普通硅酸盐水泥，不使用复合硅酸盐水泥、砌筑水泥；各项性

能试验按照本规程第 9 章“水泥砂浆”，不测试保水性、分层度等性能。建筑砂浆的配合比设计按照 JGJ 98《砌筑砂浆配合比设计规程》、JGJ/T 220《抹灰砂浆技术规程》等标准进行，性能试验按照 JGJ/T 70《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行。