

DB32

江 苏 省 地 方 标 准

DB32/T 3696-2019

高性能混凝土应用技术规程

Technical code of practice for application of high performance concrete

2019 - 12 - 16 发布

2020 -03-01 实施

江苏省市场监督管理局
江苏省住房和城乡建设厅

发 布

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和符号 2

4 基本规定 4

5 性能要求 5

6 生产 10

7 施工 13

8 验收 14

附 录 A （规范性附录） 混凝土耐久性设计方法 15

附 录 B （规范性附录） 耐腐蚀混凝土抗硫酸盐腐蚀性能试验方法 17

附 录 C （规范性附录） 混凝土孔隙负压测试方法 19

附 录 D （规范性附录） 混凝土非荷载裂缝开裂风险控制设计方法 20

附 录 E （规范性附录） 混凝土 28d 变形测试方法 27

附 录 F （规范性附录） 混凝土吸水率测试方法 28

附 录 G （规范性附录） 盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比 29

附 录 H （规范性附录） 钢筋临界氯离子浓度提高倍数测试方法 31

附 录 I （规范性附录） 水化热降低率测试方法 33

前 言

本标准按照GB/T1.1-2009给出的规则起草。

本标准由江苏省建筑科学研究院有限公司提出。

本标准由江苏省住房和城乡建设厅归口。

本标准起草单位：江苏省建筑科学研究院有限公司、东南大学、江苏苏博特新材料股份有限公司、扬州大学、南京市建筑设计研究院有限责任公司、江苏省建筑工程质量检测中心有限公司、河海大学、江苏省建筑设计研究院有限公司、扬州市建筑设计研究院有限公司、启迪设计集团股份有限公司、建华建材投资有限公司、江苏双龙集团有限公司、江苏中南建筑产业集团有限责任公司、江苏省建设工程质量监督总站、苏交科集团股份有限公司、昆山市建国混凝土制品有限公司、江苏淮安美赞建材科技有限公司、江苏同力建材集团、南通市建设混凝土有限公司、无锡江达节能科技股份有限公司。

本标准主要起草人：刘加平、石 亮、王育江、曹大富、高建明、刘建忠、朱春银、卢建峰、张亚挺、赵海涛、金如元、缪小春、张 敏、苟德胜、陈耀钢、金孝权、张建东、姜 骞、张 华、耿长圣、赵新珍、马 安、金敏霞。

高性能混凝土应用技术规程

1 范围

本规程规定了江苏省高性能混凝土的术语和符号、基本规定、性能要求、生产、施工和验收。
本规程适用于江苏省内设计使用年限为 50 年和 100 年的强度等级为 C30~C80 的结构混凝土。
本规程不适用于聚合物混凝土、沥青混凝土、轻骨料混凝土和有特殊要求的混凝土。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 175	通用硅酸盐水泥
GB 8076	混凝土外加剂
GB 18445	水泥基渗透结晶型防水材料
GB 23439	混凝土膨胀剂
GB 50010	混凝土结构设计规范
GB 50153	工程结构可靠性设计统一标准
GB 50164	混凝土质量控制标准
GB 50204	混凝土结构工程施工质量验收规范
GB 50208	地下防水工程质量验收规范
GB 50496	大体积混凝土施工标准
GB 50666	混凝土结构工程施工规范
GB/T 1596	用于水泥和混凝土中的粉煤灰
GB/T 12959	水泥水化热测定方法
GB/T 14902	预拌混凝土
GB/T 18046	用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
GB/T 21120	水泥混凝土和砂浆用合成纤维
GB/T 27690	砂浆和混凝土用硅灰
GB/T 31296	混凝土防腐阻锈剂
GB/T 50080	普通混凝土拌合物性能试验方法
GB/T 50082	普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
GB/T 50107	混凝土强度检验评定标准
GB/T 50476	混凝土结构耐久性设计规范
GB/T 50784	混凝土结构现场检测技术标准
GB/T 51003	矿物掺合料应用技术规范
HJ 812	水质可溶性阳离子（ Li^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）的测定 离子色谱法
JGJ 52	普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准
JGJ 63	混凝土用水标准
JGJ 55	普通混凝土配合比设计规程

JGJ/T 178	补偿收缩混凝土应用技术规程
JGJ/T 192	钢筋阻锈剂应用技术规程
JGJ/T 193	混凝土耐久性检验评定标准
JGJ/T 281	高强混凝土应用技术规程
JGJ/T 283	自密实混凝土应用技术规程
JGJ/T 318	石灰石粉在混凝土中应用技术规程
JGJ/T 328	预拌混凝土绿色生产及管理技术规程
JGJ/T 385	高性能混凝土评价标准
JG/T 335	混凝土结构防护用成膜型涂料
JG/T 477	混凝土塑性阶段水分蒸发抑制剂
JG/T 486	混凝土用复合掺合料
JC/T 984	聚合物水泥防水砂浆
JC/T 1011	混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂
JT/T 537	钢筋混凝土阻锈剂
JTJ 275	海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范
DL/T 5150	水工混凝土试验规程
DGJ32/TJ 206	城市轨道交通工程高性能混凝土质量控制技术规程

3 术语和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

高性能混凝土 high performance concrete

根据工程服役环境和使用要求进行设计,采用绿色生产方式生产,C30及以上强度等级且至少有一项耐久性指标满足结构长期安全服役要求的混凝土。

3.1.2

设计使用年限 design service life

在设计确定的环境作用和维修、使用条件下,作为结构耐久性设计依据并具有一定保证率的使用年限。

3.1.3

劣化模型 degradation model

描述材料与结构性能劣化过程的数学表达式。

3.1.4

开裂风险系数 crack risk coefficient

由混凝土收缩引起的拉应力和混凝土抗拉强度的比值。

3.1.5

混凝土抗侵蚀抑制剂 corrosion-resistance admixture for concrete

掺入混凝土中，能降低硬化混凝土水分传输速率和有害离子扩散速率的外加剂。

3.1.6

临界氯离子浓度 critical chloride concentration

钢筋表面开始去钝化时的氯离子含量。

3.1.7

混凝土外防护材料 external protection material for concrete

作用于硬化混凝土表面，抵抗酸、盐等有害介质对混凝土侵蚀的材料。

3.1.8

水分蒸发抑制剂 water evaporation retardants

一种喷洒于已成型尚处于塑性阶段的水泥净浆、水泥砂浆或混凝土表面，在其表面形成单分子膜，能有效抑制其表面水分蒸发的材料。

3.1.9

温控膨胀抗裂剂 temperature controlling and shrinkage-compensating crack-resistance agent

兼有降低混凝土温升、补偿混凝土收缩的外加剂。

3.1.10

粘度改性掺合料 viscosity modified admixture

掺入混凝土中，能改善新拌混凝土粘度的矿物外加剂。

3.1.11

空气渗透系数 air permeability coefficient

描述在压力差作用下空气通过混凝土表层从高压向低压方向流动过程的参数，用于表征空气通过混凝土的难易程度。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

c — 钢筋的混凝土保护层厚度；

δ — 结构厚度；

C — 电通量；

P — 混凝土抗渗等级；

F — 混凝土抗冻等级；

D_{RCM} — 用快速氯离子迁移系数法测得的氯离子迁移系数；

- NS — 混凝土抗硫酸盐侵蚀等级；
 $L_{\max}$ — 一次性最大浇筑长度；
 T_0 — 入模温度；
 ΔT — 内外温差；
 R_T — 温降速率。

4 基本规定

4.1 一般要求

- 4.1.1 混凝土应根据结构设计使用年限、所处的环境类别及作用等级进行设计。
- 4.1.2 对于环境侵蚀介质浓度超出标准规范规定或存在多种介质共同腐蚀作用的应进行耐久性专项设计，超出本规程规定范围的应进行专项论证。
- 4.1.3 对于有抗裂防渗特殊要求的混凝土结构应进行抗裂性专项设计。
- 4.1.4 混凝土应根据结构所处的环境类别、作用等级和结构设计使用年限，选用适当的水泥品种、矿物掺合料及水胶比，并采用适当的化学外加剂进行制备。
- 4.1.5 根据混凝土结构所处的环境条件，混凝土在满足强度等级不低于 C30 的基础上，还应满足下列一种或几种技术要求：
- 1) 加速碳化 28d 碳化深度不大于 15mm；
 - 2) 抗渗等级不小于 P12，且开裂风险系数不大于 0.70，结构混凝土防水等级达到一级；
 - 3) 抗裂等级达到二级，且开裂风险系数不大于 0.70；
 - 4) 28d 龄期氯离子迁移系数 D_{RCM} 不大于 $10.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ；
 - 5) 抗冻等级不小于 F250；
 - 6) 抗硫酸盐等级不小于 NS40。
- 4.1.6 混凝土生产应符合预拌混凝土绿色生产相关管理规定。
- 4.1.7 混凝土设计评价、生产评价和工程评价应符合 JGJ/T 385 的要求。

4.2 环境类别和作用等级

- 4.2.1 混凝土结构所处环境按其对钢筋和混凝土的腐蚀机理可分为 5 类，环境类别应按表 1 确定。

表 1 环境类别

环境类别	名称	腐蚀机理
I	一般环境	保护层混凝土碳化引起钢筋锈蚀
II	冻融环境	反复冻融导致混凝土损伤
III	海洋氯化物环境	氯盐引起钢筋锈蚀
IV	除冰盐等其他氯化物环境	氯盐引起钢筋锈蚀
V	化学腐蚀环境	硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀
		大气对混凝土腐蚀
注：一般环境是指无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用的环境。		

- 4.2.2 环境对配筋混凝土结构的作用程度应采用环境作用等级表述，并应符合表 2 的规定。

表 2 环境作用等级

环境类别	环境作用等级				
	A 轻微	B 轻度	C 中度	D 严重	E 非常严重
一般环境	I-A	I-B	I-C	-	-
冻融环境	-	-	II-C	II-D	-
海洋氯化物环境	-	-	III-C	III-D	III-E
除冰盐等其他氯化物环境	-	-	IV-C	IV-D	IV-E
化学腐蚀环境	-	-	V-C	V-D	V-E

注：对于一般环境、冻融环境、海洋氯化物环境、除冰盐等其他氯化物环境以及化学腐蚀环境的不同环境作用等级对应的环境条件、结构构件示例等按 GB/T 50476 进行规定。

4.2.3 结构构件受多种环境类别作用时，应分别满足每种环境类别单独作用下的耐久性要求。

4.2.4 在长期潮湿或接触水的环境条件下，混凝土结构的耐久性设计应考虑混凝土可能发生的碱-骨料反应和钙矾石延迟反应。

4.2.5 混凝土耐久性设计尚应考虑高速水流、风沙以及车轮行驶对混凝土表面的冲刷、磨损作用等实际使用条件对耐久性的影响。

4.3 设计使用年限

4.3.1 混凝土结构设计使用年限应按建筑物的合理使用年限确定，不应低于 GB 50153 的规定，对城市快速路和主干道上的桥梁以及其他道路上的大型桥梁、隧道和重要的市政设施不应低于 100 年，对城市次干道和一般道路上的中小型桥梁和一般市政设施不应低于 50 年。

4.3.2 一般环境下的民用建筑在设计使用年限内无需大修，其结构构件的设计使用年限应与结构整体设计使用年限相同。严重环境作用下的桥梁、隧道等混凝土结构，其部分构件可设计成易于更换的形式，或能够经济合理地进行大修。可更换构件的设计使用年限可低于结构整体的设计使用年限，并应在设计文件中明确规定。

5 性能要求

5.1 一般规定

5.1.1 混凝土最低强度等级与钢筋的混凝土保护层最小厚度设计应符合表 3 的规定。

表 3 混凝土最低强度等级与钢筋的混凝土保护层最小厚度 c 单位为毫米

环境作用等级	50 年		100 年	
	混凝土最低强度等级	c	混凝土最低强度等级	c
I-A	C30	20	C30	25
I-B	C30	25	C35	30
I-C	C35	35	C40	40
II-C	C45	30	C45	35

表 3 混凝土最低强度等级与钢筋的混凝土保护层最小厚度 c (续)

单位为毫米

环境作用等级	50 年		100 年	
	混凝土最低强度等级	c	混凝土最低强度等级	c
II-D	Ca35	35	Ca40	35
III-C、IV-C	C40	40	C45	45
III-D、IV-D	C40	50	C45	55
III-E、IV-E	C45	55	C50	60
V-C	C40	40	C45	50
V-D	C45	45	C50	55
V-E	C50	50	C55	65
注 1: 预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于 C40; 注 2: 表中所列指标适用于板、墙等平面构件的结构设计, 对于梁、柱等杆状构件, 保护层的最小厚度增大 5mm; 注 3: 预制构件、预应力钢筋混凝土构件、直接接触土体浇筑的构件、处于流水中或同时受水中泥沙冲刷的构件保护层厚度设计取值还应符合 GB/T 50476 的要求; 注 4: 对于地下工程混凝土结构, 迎水面钢筋保护层厚度不应小于 50mm; 注 5: Ca 为引气混凝土。				

5.1.2 荷载作用下钢筋混凝土构件的裂缝控制应符合 GB 50010 和 GB/T 50476 的要求。

5.1.3 对于超长、大体积、有结构自防水要求结构, 以及具有特殊控裂要求的结构, 应控制混凝土非荷载裂缝发生, 混凝土开裂风险系数应控制不大于 0.70。

5.1.4 混凝土拌合物性能应满足工程建设需求。

5.2 耐久性能要求

5.2.1 不同强度等级混凝土的密实性应按表 4 确定。

表 4 不同强度等级混凝土的密实性

控制项目	50 年		100 年	
	C30~C45	$\geq C50$	C30~C45	$\geq C50$
56d 电通量 (C)	<1500	<1200	<1200	<1000
注: 56d 电通量按 GB/T 50082 进行测试。				

5.2.2 一般环境下混凝土抗碳化性能和抗渗性能指标应按表 5 确定。

表 5 一般环境下的混凝土抗碳化性能和抗渗性能指标

控制项目	50 年	100 年	
	I-C	I-B	I-C
加速碳化 28d 碳化深度 (mm)	≤ 15	≤ 10	≤ 5
抗渗等级	$\geq P12$	$\geq P12$	$\geq P12$
注: 加速碳化 28d 碳化深度和抗渗等级按 GB/T 50082 进行测试。			

5.2.3 冻融环境下混凝土抗冻性能指标应按表 6 确定。

表 6 冻融环境下的混凝土抗冻性能指标

控制项目	50 年		100 年	
	II-C	II-D	II-C	II-D
抗冻等级	≥F250	≥F300	≥F300	≥F350
注：抗冻等级按 GB/T 50082 进行测试。				

5.2.4 氯化物环境下混凝土抗氯离子渗透性能指标,应通过结构混凝土服役环境参数与材料参数按附录 A 计算得出,在不具备上述试验参数时,可按表 7 确定。

表 7 氯化物环境下的混凝土抗氯离子渗透性能指标

控制项目	50 年		100 年	
	III-D	III-E	III-D	III-E
	IV-D	IV-E	IV-D	IV-E
28d 龄期氯离子迁移系数 D_{RCM} ($\times 10^{-12} m^2/s$)	<10	<6	<7	<4
注 1: 表中的 28d 龄期氯离子迁移系数与本规程表 3 中规定的混凝土保护层厚度相对应,如实际采用的保护层厚度大于表 3 的规定,可按附录 A 计算 28d 龄期氯离子迁移系数 D_{RCM} ,对本表中的数据作适当调整; 注 2: 表中的 D_{RCM} 值适用于较大或大掺量矿物掺合料混凝土,对于胶凝材料主要成分为硅酸盐水泥的混凝土,应采取更为严格的要求,对于掺入钢筋阻锈剂等能够提高钢筋锈蚀临界氯离子浓度的耐腐蚀混凝土,可根据临界氯离子浓度提升倍数,按附录 A 计算 28d 龄期氯离子迁移系数 D_{RCM} ,对本表中的数据作适当放宽; 注 3: 28d 龄期氯离子迁移系数 D_{RCM} 按 GB/T 50082 进行测试。				

5.2.5 化学腐蚀环境下混凝土抗硫酸盐腐蚀性能指标,应通过结构混凝土服役环境参数与材料参数按附录 A 计算得出,在不具备上述试验参数时,可按表 8 确定。

表 8 化学腐蚀环境下的混凝土抗硫酸盐腐蚀性能指标

控制项目	50 年			100 年		
	V-C	V-D	V-E	V-C	V-D	V-E
对于硫酸盐环境,抗硫酸盐腐蚀性能	≥NS40	≥NS60	≥NS140	≥NS50	≥NS120	≥NS280
注: 针对超出浓度范围的环境,混凝土耐久性设计指标按本规程附录 A 中的混凝土耐久性专项设计方法进行计算,抗硫酸盐腐蚀性能按本规程附录 B 的试验方法进行测试。						

5.2.6 服役于氯盐和硫酸盐共同作用环境的混凝土耐久性指标,应通过结构混凝土服役环境参数与材料参数按附录 A 计算得出,在不具备上述试验参数时,应同时满足表 7 和表 8 的要求。

5.3 耐久性能保障措施

5.3.1 处于环境作用等级为D和E的混凝土结构,在混凝土设计时可根据环境特点,使用混凝土抗侵蚀抑制剂、混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂、钢筋阻锈剂、混凝土外防护材料等耐久性提升功能材料。

5.3.2 耐久性提升功能材料选用应满足表9的要求。

表9 耐久性提升功能材料选用建议

环境类别与作用等级		混凝土抗侵蚀抑制剂	混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂	钢筋阻锈剂	混凝土外防护材料		
					表面涂层	表面憎水	防腐面层
一般环境	I-D	-	-	-	-	-	-
冻融环境	II-D	-	-	-	-	-	-
	II-E	△	-	-	-	△	-
海洋氯化物环境	III-D	△	-	○	△	△	-
	III-E	○	-	○	○	○	-
除冰盐等其它氯化物环境	IV-D	△	-	○	△	△	-
	IV-E	○	-	○	△	○	-
化学腐蚀环境	V-D	△	○	△	△	△	○
	V-E	○	○	○	○	○	○
注1: ○ 宜采用; △可采用; —一般不采用; 注2: 氯盐和硫酸盐共同作用环境下,中度腐蚀时,宜采用防腐面层、钢筋阻锈剂和混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂进行防护;严重和非常严重时,宜采用防腐面层、混凝土抗侵蚀抑制剂、钢筋阻锈剂和混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂进行防护。							

5.4 抗裂性能要求

5.4.1 混凝土凝结硬化前,应采取保湿养护措施,控制表层混凝土孔隙负压不大于15kPa,抑制由水分蒸发引起的塑性阶段裂缝产生。混凝土孔隙负压测试按附录C进行。

5.4.2 混凝土硬化阶段抗裂性能指标应按附录D计算得出,对于底板、墙体、楼板及顶板结构,在不具备试验参数时,设计指标可按表10选取。

表10 混凝土抗裂性能指标(底板、墙体及楼板)

结构部位	结构厚度 δ (m)	一次性最大浇筑长度 L_{max} (m)	控制项目				
			入模温度 T_0 (°C)	内外温差 ΔT 及温降速率 R_T	混凝土初凝后开始计时的1d绝热温升/7d绝热温升 (%)	变形	
						7d自生体积变形	28d变形
底板	$\geq 0.4, \leq 1$	40	$\geq 5, < 35$	$\Delta T \leq 15^\circ\text{C}$ $R_T \leq 5^\circ\text{C/d}$	/	/	/
		40~60			/	$\geq +100 \times 10^{-6}$	≥ 0
	$> 1, \leq 2$	40	$\geq 5, < 30$ $\geq 30, < 35$	$\Delta T \leq 15^\circ\text{C}$	/	/	/
					≤ 50	$\geq +100 \times 10^{-6}$	≥ 0
墙体	$\geq 0.3, < 0.5$	20	$\geq 30, < 35$	/	≤ 50	$\geq +200 \times 10^{-6}$	$\geq +50 \times 10^{-6}$
		30	$\geq 25, < 30$	/	/		
		40	$\geq 15, < 25$	/	/		
		60	$\geq 5, < 15$	/	/	$\geq +200 \times 10^{-6}$	$\geq +50 \times 10^{-6}$
		80		/	/		

表 10 混凝土抗裂性能指标（底板、墙体及楼板）（续）

结构 部位	结构厚度 δ (m)	一次性最大 浇筑长度 $L_{\max}$ (m)	控制项目					
			入模温度 T_0 (℃)	内外温差 ΔT 及温降速率 R_T	混凝土初凝后开始 计时的 1d 绝热温升 /7d 绝热温升 (%)	变形		
						7d 自生体积变 形	28d 变形	
墙体	$\geq 0.5, < 0.7$	20	$\geq 30, < 35$	$R_T \leq 5^{\circ}\text{C}/\text{d}$	≤ 50	$\geq +200 \times 10^{-6}$	$\geq +50 \times 10^{-6}$	
		40	$\geq 5, < 30$					
	$\geq 0.7, < 1$	15	$\geq 30, < 35$		≤ 50			
		20	$\geq 25, < 30$					
		30	$\geq 5, < 25$					
楼板/ 顶板	≤ 0.3	30~60	$\geq 5, < 35$	/	/	/	$\geq -100 \times 10^{-6}$	
		60~120	$\geq 5, < 30$	/	/	$\geq +200 \times 10^{-6}$	$\geq +50 \times 10^{-6}$	

注 1：本表适合于混凝土强度等级 C50 以下结构，对于 C50 及以上结构，混凝土抗裂性能指标按附录 D 的专项设计方法进行计算；

注 2：当基础置于岩石类地基上时，混凝土抗裂性能指标按附录 D 的专项设计方法进行计算；

注 3：本表中“一次性最大浇筑长度”表示施工过程中混凝土浇筑块不出现收缩裂缝时所允许的最大浇筑长度，即施工缝最大间距；

注 4：“/”表示可以不作技术要求；

注 5：收缩变形“+”表示膨胀，“-”表示收缩；

注 6：在“一次性最大浇筑长度”和“混凝土入模温度”指标无法满足表中要求时，在入模温度不高于 35°C 条件下，可采取中热或低热水泥、增加矿物掺合料掺量、掺加混凝土膨胀剂、掺加具有温控效果的功能材料等技术措施，具体方案应根据抗裂性设计及试验确定；

注 7：绝热温升参照 DL/T 5150 进行测试；

注 8：7d 自生体积变形和 28d 变形按本规程附录 E 的试验方法进行测试。

5.5 抗裂性能保障措施

5.5.1 对有裂缝控制需要的混凝土结构，在设计时可根据开裂风险控制要求，使用水分蒸发抑制剂、合成纤维、膨胀剂、温控膨胀抗裂剂等抗裂性提升功能材料。

5.5.2 抗裂性提升功能材料选用应满足表 11 的要求。

表 11 抗裂性提升功能材料选用建议

施工温度及结构形式			塑性裂缝抑制		硬化阶段裂缝抑制		
结构 部位	日平均气 温 ($^\circ\text{C}$)	厚度 δ (m)	水分蒸发抑制剂	合成纤维	氧化钙类膨胀剂	氧化镁膨胀剂	温控膨胀抗裂剂
楼板	≥ 25	≤ 1.0	○	△	○	△	△
	< 25		-	-	△	-	-

表 11 抗裂性提升功能材料选用建议（续）

施工温度及结构形式			塑性裂缝抑制		硬化阶段裂缝抑制		
结构部位	日平均气温（℃）	厚度 δ（m）	水分蒸发抑制剂	合成纤维	氧化钙类膨胀剂	氧化镁膨胀剂	温控膨胀抗裂剂
墙体	≥25	≤0.5	-	-	○	-	○
	<25		-	-	○	-	△
	/	>0.5, ≤0.7	-	-	○	-	○
		>0.7	-	-	-	○	○
大体积	≥25	/	○	△	-	○	△
	/		-	-	-	○	△
注 1：○ 宜采用；△可采用；—一般不采用；							
注 2：/ 不限；							
注 3：受强约束部位按墙体。							

6 生产

6.1 原材料

6.1.1 水泥宜采用强度等级不低于 42.5 级的通用硅酸盐水泥, 其性能应符合 GB 175 的规定。当采用其他品种时, 其性能应符合国家现行有关标准的规定。硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的比表面积不宜大于 $350\text{m}^2/\text{kg}$, 矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥 $80\mu\text{m}$ 方孔筛筛余不宜大于 10%或 $45\mu\text{m}$ 方孔筛筛余不宜大于 30%。

6.1.2 粉煤灰等级宜为 I 级和 II 级, 其性能应满足 GB/T 1596 的要求。

6.1.3 高炉矿渣粉等级宜为 S95 级和 S105 级, 其性能应满足 GB/T 18046 的要求。

6.1.4 硅灰 SiO_2 含量不应低于 90%, 掺量宜控制在 10%以内, 应配合高效减水剂等外加剂共同使用, 其性能应满足 GB/T 27690 的要求。

6.1.5 石灰石粉、天然火山灰质材料等矿物掺合料以及复合掺合料性能应满足 JGJ/T 318、GB/T 51003 和 JG/T 486 的要求。

6.1.6 细骨料应采用质地坚硬、清洁、级配良好的河砂或人工砂。河砂宜选用 II 区中砂, 含泥量不宜大于 2.0%。人工砂细度模数不宜超过 3.3, 且不宜采用细砂, 石粉含量不宜大于 10%且 MB 值不宜大于 1.2。细骨料性能应满足 JGJ 52 的要求。

6.1.7 粗骨料采用清洁、级配良好的碎石或卵石, 针片状颗粒含量不宜大于 10%, 吸水率不宜大于 2.0%, 松散堆积空隙率不宜大于 45%。对于 C60 以上等级的高强高性能混凝土, 粗骨料母岩抗压强度不应小于混凝土设计强度的 1.3 倍, 粗骨料最大粒径不宜大于 25mm。对于自密实高性能混凝土, 粗骨料最大粒径不宜大于 20mm。粗骨料性能应满足 JGJ 52 的要求。

6.1.8 高性能减水剂减水率不应小于 25%，28d 收缩率比不应大于 110%。聚羧酸系高性能减水剂不得与萘系、氨基磺酸盐和三聚氰胺系高效减水剂混合使用，与其他品种外加剂同时使用时，宜分别掺加，复配使用时应关注相容性。减水剂性能应满足 GB 8076 的要求。

6.1.9 高性能混凝土拌和、养护用水应符合 JGJ 63 的规定。

6.2 功能材料

6.2.1 混凝土抗侵蚀抑制剂

1) 混凝土抗侵蚀抑制剂的游离铵根离子含量不应大于 100mg/L，掺混凝土抗侵蚀抑制剂的混凝土吸水率降低不应小于 50%，氯离子渗透系数比不应大于 85%，盐水浸烘环境中钢筋腐蚀面积百分率减少不应小于 75%。

2) 游离铵根离子含量试验按 HJ 812 进行测试，混凝土吸水率测试方法按本规程附录 F 的规定执行，氯离子渗透系数比测试方法按 GB/T 31296 进行测试，盐水浸烘环境中钢筋腐蚀面积百分率减少按 JGJ/T 192 进行测试。

6.2.2 混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂

1) 混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂抗蚀系数不应小于 0.90，膨胀系数不应大于 1.2。

2) 混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂性能应满足 JC/T 1011 的要求。

6.2.3 钢筋阻锈剂

1) 钢筋阻锈剂宜选用复合氨基醇类有机阻锈剂，干湿循环钢筋锈蚀面积比不应大于 30%，临界氯离子浓度提高倍数不应小于 1 倍，其性能应满足 JGJ/T 192 和 JT/T 537 的要求。

2) 盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比按本规程附录 G 进行，临界氯离子浓度提高倍数按本规程附录 H 进行。

6.2.4 混凝土外防护材料

1) 表面涂层类混凝土外防护材料性能应满足 JG/T 335 和 GB 18445 的要求。

2) 表面憎水类混凝土外防护材料性能应满足 JTJ 275 的要求。

3) 防腐面层类混凝土外防护材料性能应满足 JC/T 984 和 JTJ 275 的要求。

6.2.5 水分蒸发抑制剂

1) 水分蒸发抑制剂降低水分蒸发的效率不应小于 25%，总开裂面积降低率不应小于 80%。

2) 水分蒸发抑制剂性能应满足 JG/T 477 的要求。

6.2.6 合成纤维

1) 合成纤维断裂强度不应小于 500MPa，初始模量不应小于 4.5GPa，断裂伸长率宜控制在 15%~30%。

2) 合成纤维性能应满足 GB/T 21120 的要求。

6.2.7 膨胀剂

1) 氧化钙类和硫铝酸钙-氧化钙类膨胀剂性能应满足 GB 23439 的要求。

2) 钙镁复合膨胀剂在 20℃ 水中 7d 限制膨胀率不应小于 0.050%；在 60℃ 水中 28d 与 3d 限制膨胀率之差不应小于 0.020%。限制膨胀率按 GB 23439 进行测试。

6.2.8 温控膨胀抗裂剂

1) 温控膨胀抗裂剂的限制膨胀率不应小于 0.050%; 初凝之后的 24h 水化热降低率 $\geq 30\%$ 、7d 水化热降低率 $\leq 15\%$ 。

2) 限制膨胀率按 GB 23439 进行测试, 水化热降低率按附录 I 进行测试。

6.2.9 粘度改性掺合料

1) 粘度改性掺合料不应降低混凝土抗压强度, 混凝土倒置坍落度筒排空时间减少不应小于 20%, T500 扩展时间减少不应小于 30%, 其性能应满足 GB/T 51003 和 JG/T 486 的要求。

2) 混凝土倒置坍落度筒排空时间按 JGJ/T 281 进行测试, T500 扩展时间按 JGJ/T 283 进行测试。

6.3 配合比参数

6.3.1 混凝土配合比设计应符合 JGJ 55 的规定。

6.3.2 混凝土配合比应满足混凝土配制强度及其他力学性能、拌合物性能、长期性能、抗裂性能和耐久性能的设计要求。

6.3.3 混凝土的最大水胶比、胶凝材料用量宜符合表 12 的规定。

表 12 混凝土最大水胶比、胶凝材料用量范围限值

混凝土强度等级	最大水胶比	胶凝材料用量范围(kg/m ³)
C30	0.45	320~380
C35	0.45	350~400
C40	0.43	380~440
C45	0.40	400~450
C50	0.36	420~480
C55	0.34	430~500
C60	0.32	440~520
C70	0.28	520~560
C80	0.26	550~580

注: 表中数据适用于标准养护条件, 对于蒸汽养护和蒸压养护条件, 混凝土最大水胶比和胶凝材料用量范围应通过试验确定。

6.3.4 应根据环境类别与水胶比确定混凝土中矿物掺合料的种类和掺量, 粉煤灰和高炉矿渣粉的掺量宜符合表 13 的规定。

表 13 不同环境下混凝土中矿物掺合料掺量范围

单位为百分比

环境类别	矿物掺合料种类	水胶比 ≤ 0.40	水胶比 > 0.40
碳化环境	粉煤灰	≤ 40	≤ 30
	高炉矿渣粉	≤ 50	≤ 40
冻融环境	粉煤灰	≤ 30	≤ 20
	高炉矿渣粉	≤ 40	≤ 30

表 13 不同环境下混凝土中矿物掺合料掺量范围 (续)

单位为百分比

环境类别		矿物掺合料种类	水胶比 ≤ 0.40	水胶比 >0.40
氯化物环境		粉煤灰	30~50	20~40
		高炉矿渣粉	40~60	30~50
化学腐蚀环境	单一介质腐蚀	粉煤灰	30~50	20~40
		高炉矿渣粉	40~60	30~50
	氯盐和硫酸盐共同作用	粉煤灰	40~60	10~30
		高炉矿渣粉	50~70	20~40
	酸雨和碳化共同作用	粉煤灰	40~60	≤ 30
		高炉矿渣粉	50~70	≤ 40
注 1: 当采用两种或多种矿物掺合料复合掺用时, 混凝土中掺合料总量不宜超过胶凝材料总量的 50%, 不同矿物掺合料的掺量可参考本表并经过试验确定; 注 2: 本表规定的矿物掺合料的掺量范围仅限于使用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥的混凝土, 对使用硅酸盐水泥的混凝土可取高限, 对普通硅酸盐水泥的混凝土可取低限; 注 3: 对于预应力混凝土结构, 宜采用 I 级粉煤灰, 其掺量不宜超过 30%; 注 4: 严重氯盐环境与化学侵蚀环境下, 粉煤灰的掺量不应小于 30%, 或高炉矿渣粉的掺量不小于 50%。				

6.3.5 硅灰、石灰石粉、天然火山灰质材料、复合掺合料等其他矿物掺合料种类和掺量应根据工程建设需求通过试验确定。

6.3.6 混凝土含气量、平均气泡间距系数、氯离子、三氧化硫和碱含量应满足 GB/T 50476 的要求。

6.4 制备

6.4.1 混凝土制备应按 GB/T 14902、GB 50164 和 JGJ/T 328 的规定。

6.4.2 混凝土原材料应先验证合格后再使用。

6.4.3 混凝土生产前应进行试配, 试配使用的原材料应与配合比设计用原材料一致。

6.4.4 在混凝土配合比使用过程中, 应根据混凝土质量的动态信息及时进行调整。原材料发生重大变化时, 应重新进行配合比设计和试配。

6.4.5 掺矿物掺合料、混凝土抗侵蚀抑制剂、混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂、钢筋阻锈剂、膨胀剂、温控膨胀抗裂剂、合成纤维、粘度改性掺合料的混凝土宜采用强制式搅拌机搅拌, 并适当延长搅拌时间。

6.4.6 环型截面混凝土预制构件可采用离心工艺成型, 离心转速和持续时间应通过试验确定, 离心后应去除余浆。

7 施工

7.1 混凝土结构工程施工应符合 GB 50666 的规定。

7.2 大体积混凝土结构工程施工应满足 GB 50496 的规定。

7.3 在混凝土浇筑完毕初凝前, 宜喷雾或喷水分蒸发抑制剂养护, 不应进行洒水、蓄水、覆盖等养护。混凝土表面宜在初凝后终凝前进行二次抹压。

7.4 掺加膨胀剂、温控膨胀抗裂剂的混凝土施工应符合 JGJ/T 178 的规定。掺加温控膨胀抗裂剂混凝土结构拆模时间宜不少于 5d，在冬期施工时，拆模时间应延至 7d 以上。

7.5 跳仓法施工时，跳仓的最大分块尺寸应根据本规程抗裂性计算后确定，跳仓间隔施工的时间不宜小于 7d。

7.6 混凝土养护水的温度与混凝土表面温度之差不宜超过 11℃，混凝土内外温差及温降速率应满足抗裂性设计指标。

7.7 采用蒸汽养护时，升温速率与降温速率不宜大于 15℃/h；采用浸水养护时，水温正负温差不宜超过 5℃，水面宜高出构件表面 30cm，养护时间不宜少于 14d。

8 验收

8.1 检验

8.1.1 检验分为出厂检验和交货检验。出厂检验的取样、试验由生产厂家承担，在搅拌地点进行取样。交货检验的取样、试验由使用方承担，在浇筑地点进行取样。

8.1.2 检验项目应包括设计要求和合同约定的各项性能。

8.1.3 原材料性能应符合相关国家标准和本规程第 5 章的规定，取样和检验方法应符合相关国家标准的规定。

8.1.4 混凝土拌合物性能的取样和检验方法应符合 GB/T 14902 和 GB 50204 的规定。

8.1.5 混凝土力学性能的检验频次与检验方法应符合 GB/T 50107 的规定。

8.1.6 混凝土耐久性能指标同一工程、同一配合比，应至少对搅拌地点和浇筑地点分别抽样检测 1 次。取样和检验方法应符合 JGJ/T 193、GB/T 50082 和本规程附录 B 的规定。

8.1.7 有抗裂防渗要求时，混凝土抗裂性能同一工程、同一配合比，应至少对搅拌地点和浇筑地点分别抽样检测 1 次。取样方法应符合 JGJ/T 193 规定，检测方法应符合 GB/T 50082 以及本规程附录 C、附录 E、附录 I 的规定。

8.1.8 8.1.8 混凝土结构实体检验包括混凝土强度、保护层厚度、耐久性能、结构位置与尺寸偏差以及合同约定的项目，应符合下列规定：

1) 混凝土强度、保护层厚度、结构位置与尺寸偏差应符合 GB 50204 的规定。

2) 对结构实体混凝土的氯离子迁移系数检验，可采用混凝土空气渗透测试方法。混凝土空气渗透测试方法按 DGJ 32 或 TJ 206 的规定进行。当对检验结果产生争议时，可采取钻取混凝土芯样方法，按 GB/T 50784 的规定执行。

3) 对于不合格的耐久性能检验项目，应进行专项评审并提出处理意见。

8.2 验收

8.2.1 混凝土工程质量的验收应符合 GB 50204 的规定，验收时应将材料和结构实体耐久性能检验纳入验收要求。

8.2.2 有抗裂防渗要求的地下混凝土结构验收还应符合 GB 50208 中一级防水的规定。

附 录 A
(规范性附录)
混凝土耐久性设计方法

A.1 本附录给出的混凝土耐久性专项设计方法与原则是本规程高性能混凝土设计的补充与延伸，其目的是指导服役于超高浓度腐蚀环境、耦合侵蚀环境或超出现有标准规范规定范围的混凝土耐久性定量设计，使结构和构件在使用年限内达到所期望的性能要求。

A.2 混凝土耐久性定量设计需明确结构和构件在指定服役环境下的性能劣化规律、耐久性极限状态以及设计使用年限。

A.3 混凝土耐久性定量设计需要使用劣化模型，针对确定的极限状态和设计使用年限，确定与结构和构件性能劣化抗力直接相关的材料与结构参数，并且应充分考虑环境作用和性能劣化影响因素的不确定性，使设计参数具有一定保证率。

A.4 结构构件性能劣化的耐久性极限状态应按正常使用下的适用性极限状态考虑，且不应损害到结构的承载能力和可修复性要求。混凝土结构和构件的耐久性极限状态可分为以下三种：

- 1) 钢筋开始锈蚀的极限状态；
- 2) 钢筋适量锈蚀的极限状态；
- 3) 混凝土表面轻微损伤的极限状态。

A.5 钢筋开始锈蚀的极限状态应为混凝土碳化发展到钢筋表面，或氯离子侵入混凝土内部并在钢筋表面积累的浓度达到临界浓度。重要、重大工程的混凝土结构主要构件以及使用期难以维护的混凝土构件，宜采用钢筋开始锈蚀的极限状态。对锈蚀敏感的预应力钢筋、冷加工钢筋或直径不大于 6mm 的普通热轧钢筋作为受力主筋时，应以钢筋开始锈蚀作为极限状态。

A.6 钢筋适量锈蚀的极限状态应为钢筋锈蚀发展导致混凝土构件表面开始出现顺筋裂缝，或钢筋截面的径向锈蚀深度达到 0.1mm。混凝土结构中的可维护构件，可采用钢筋适量锈蚀的极限状态。

A.7 混凝土表面轻微损伤的极限状态应为不影响结构外观、不明显损害构件的承载力和表层混凝土对钢筋的保护。

A.8 与耐久性极限状态相对应的结构设计使用年限应具有规定的保证率，并应满足正常使用下适用性极限状态的可靠度要求。根据适用性极限状态失效后果的严重程度，保证率宜为 90%~95%，相应的失效概率宜为 5%~10%。

A.9 混凝土耐久性定量设计的劣化模型，其有效性应经过验证并应具有可靠的工程应用。环境作用和作用效应参数应依据工程环境条件取值，性能劣化的材料抗力参数应能通过可靠的试验方法确定，劣化模型应考虑混凝土配合比和施工方法对劣化规律的影响。

A.10 海洋氯化物环境，氯离子侵入混凝土内部的过程，可采用 Fick 第二定律的经验扩散模型。模型所选用的混凝土表面氯离子浓度、氯离子扩散系数、钢筋锈蚀的临界氯离子浓度等参数的取值应有可靠的依据。其中，表面氯离子浓度和扩散系数应为其表观值，氯离子扩散系数、钢筋锈蚀的临界浓度等参数还应考虑混凝土的组成特性、混凝土构件使用环境的温、湿度等因素的影响。根据设计使用年限与保护层厚度，选择极限状态所对应的临界氯离子浓度和表面氯离子浓度，计算得出混凝土的氯离

子扩散系数, 根据氯离子迁移系数 D_{RCM} 与氯离子扩散系数的关系, 得到混凝土耐久性设计指标。

A.11 硫酸盐腐蚀环境, 可采用美国 ACI 硫酸盐腐蚀破坏模型, 计算硫酸盐等腐蚀性介质侵入引起保护层厚度剥落, 得到混凝土耐久性设计指标。

美国 ACI 硫酸盐腐蚀破坏模型:

$$R = \frac{X_{spall}}{t_{spall}} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$X_{spall} = \frac{2\alpha\gamma(1-\nu)}{E(\beta C_E)^2} \dots\dots\dots (A.2)$$

$$t_{spall} = \frac{X_{spall}^2 \cdot C_E}{2D_i c_0} \dots\dots\dots (A.3)$$

$$R = \frac{E\beta^2 c_0 C_E D_i}{\alpha\gamma(1-\nu)} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

- R — 硫酸盐环境中混凝土的腐蚀速率, 单位为米每秒 (m/s);
- X_{spall} — 硫酸盐环境中混凝土的腐蚀破坏区域的厚度, 单位为米 (m);
- t_{spall} — 硫酸盐环境中混凝土腐蚀破坏的时间, 单位为米 (m);
- α — 断裂表面的粗糙度;
- γ — 混凝土的断裂表面能, 单位为焦耳每平方米 (J/m²);
- ν — 泊松比;
- E — 杨氏弹性模量, 单位为吉帕 (GPa);
- B — 单位体积的砂浆中 1mol 硫酸盐产生的线性应变, 单位为立方米每摩尔 (m³/mol);
- C_E — 参与反应生成钙矾石的硫酸盐浓度, 单位为摩尔每立方米 (mol/m³);
- c_0 — 外部环境中硫酸根离子浓度, 单位为摩尔每立方米 (mol/m³);
- D_i — 混凝土的本征硫酸根离子扩散系数, 单位为平方米每秒 (m²/s)。

A.12 氯盐和硫酸盐共同作用环境, 可在 Fick 第二定律的经验扩散模型基础上, 引入美国 ACI 硫酸盐腐蚀破坏模型, 修正硫酸盐等腐蚀性介质侵入引起保护层厚度剥落, 通过迭代算法, 计算混凝土耐久性设计指标。

A.13 结构和构件性能劣化的材料抗力参数, 在施工中应通过简单、可靠的方法加以控制, 确保达到设计的使用年限。

A.14 对于环境作用与抗力参数的不确定性以及劣化规律的模型误差, 应通过结构使用期间的长期监测和再设计来逐步校准和消除。

附录 B (规范性附录)

耐腐蚀混凝土抗硫酸盐腐蚀性能试验方法

B.1 试件制作应符合下列规定：

- 1) 应采用尺寸为 100mm×100mm×100mm 的立方体试件，每组应为 3 块；
- 2) 混凝土的取样、试件的制作和养护应符合 GB/T 50082 的有关规定；
- 3) 除制作抗硫酸盐腐蚀试验用试件外，尚应按照同样方法，同时制作抗压强度对比用试件。试件组数应符合表 B.1 的规定。

表 B.1 抗硫酸盐侵蚀试验所需的试件组数

设计抗硫酸盐等级	NS40	NS50	NS60	NS120	NS140	NS280 及以上
检查强度所需 干湿循环次数	20 及 40	25 及 50	30 及 60	60 及 120	70 及 140	280 及设计次数
鉴定 28d 强度 所需试件组数	1	1	1	1	1	1
干湿循环试件组数	2	2	2	2	2	2
对比试件组数	2	2	2	2	2	2
总计试件组数	5	5	5	5	5	5

B.2 试验设备和试剂的性能应符合下列规定：

- 1) 干湿循环试验装置宜采用能使试件静止不动，浸泡、烘干及冷却等过程应能自动进行的装置。设备应具有数据实时显示、断电记忆及试验数据自动存储的功能。
- 2) 干湿循环试验设备的温度调控范围和容量应符合下列规定。
 - a) 烘箱的温度可在 50℃~90℃ 调控。
 - b) 容器应至少能够装 27L 溶液，并应带盖，且应由耐盐腐蚀材料制成。
- 3) 试剂应采用化学纯无水硫酸钠。

B.3 干湿循环试验应按下列步骤进行：

- 1) 试件应在养护至 28d 时，将试件从标准养护室取出。试件表面水分擦干，应将试件放入烘箱中，并应把温度调至 (80±5)℃ 烘干 48h。烘干结束后应将试件在干燥环境中冷却至室温。对于大掺量矿物掺合料混凝土，也可采用 56d 龄期或者设计规定的龄期进行试验，并应在试验报告中说明。
- 2) 试件烘干并冷却后，应将试件放入试件盒（架）中，相邻试件之间的距离不应小于 20mm，试件与试件盒侧壁的间距不应小于 20mm。
- 3) 试件放入试件盒以后，应将配制好的 10% Na₂SO₄ 溶液放入试件盒，溶液应至少超过最上层试件表面的 20mm，并浸泡 (11±0.5) h。注入溶液的时间不应超过 30min。试验过程中可每隔 20 个循环测试一次溶液 pH 值，溶液的 pH 值应保持为 6~8。溶液的温度应为 20℃~25℃。
- 4) 浸泡过程结束后，应在 30min 内将溶液排空。溶液排空后应将试件风干 30min，从溶液开始排出到试件风干的时间应为 1h。
- 5) 风干过程结束后应立即升温，应将试件盒内的温度调至 60℃，开始烘干。升温过程应在 30min

内完成。温度升到 60℃后，温度应维持在 (60±5)℃。从升温开始到开始冷却的时间应为 10h。

6) 烘干结束后，应对试件进行冷却，从开始冷却到将试件盒内的试件表面温度冷却到 20℃～25℃的时间应为 2h。

7) 每个干湿循环的总时间应为 (24±2) h。然后应再次放入溶液，按照本条第 3～6 款的步骤进行下一个干湿循环。

8) 在达到本规程表 B.1 规定的干湿循环次数后，应进行抗压强度试验。同时应观察经过干湿循环后混凝土表面的破损情况并应进行外观描述。当试件有严重剥落、掉角等缺陷，应先用高强石膏补平后再进行抗压强度试验。对经受干湿循环的试件进行抗压强度试验时，应同时取一组标准养护的对比试件进行抗压强度试验。

9) 当干湿循环试验出现下列三种情况之一时，可停止试验。

- a) 抗压强度耐蚀系数低于 75%；
- b) 干湿循环次数达到 280 次；
- c) 达到设计耐腐蚀等级相应的干湿循环次数。

B.4 试验结果计算及处理应符合下列规定：

1) 混凝土抗压强度耐蚀系数应按下列式进行计算：

$$K_f = \frac{f_{cn}}{f_{c0}} \times 100 \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

K_f — 压强度耐蚀系数，单位为百分比 (%)；

f_{cn} — N 次干湿循环后受硫酸盐腐蚀的一组混凝土试件的抗压强度测定值，单位为兆帕 (MPa)，精确至 0.1MPa；

f_{c0} — 与受硫酸盐腐蚀试件同龄期的标准养护的一组对比混凝土试件的抗压强度测定值，单位为兆帕 (MPa)，精确至 0.1MPa。

2) f_{c0} 和 f_{cn} 应以三个试件抗压强度试验结果的算术平均值作为测定值。当最大值或最小值，与中间值之差超过中间值的 15%时，应剔除此值，并应取其余两值的算术平均值作为测定值；当最大值和最小值，均超过中间值的 15%时，应取中间值作为测定值。

3) 混凝土耐腐蚀等级应以混凝土抗压强度耐蚀系数下降到75%时的最大干湿循环次数来确定，并应以符号NS表示。

附录 C

（规范性附录）

混凝土孔隙负压测试方法

C.1 孔隙负压测试系统示意图 C.1 所示，包括：数据采集和输送装置、压力传感器、针头、管塞、塑料管、多孔陶瓷头。

- 1) 多孔陶瓷头平均孔径： $1.5\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$ 。
- 2) 压力传感器：量程不低于 80kPa ，精度不低于 1kPa 。
- 3) 密封性能：塑料与软陶瓷头之间、压力传感器与塑料管之间应紧密粘结，不应漏气。
- 4) 数据采集和传输：通过数字化的采集设备、有线或无线传输方式进行数据采集和传输，也可采取机械式负压式传感器，通过现场人工读数的方法读取数据。

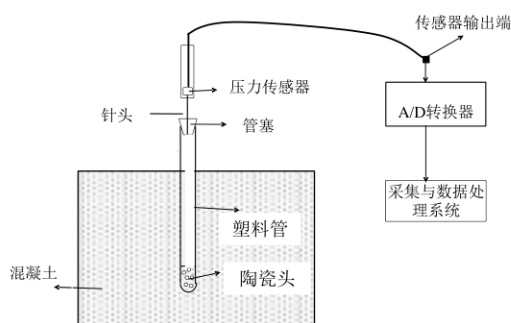


图 C.1 孔隙负压测试系统示意图

C.2 混凝土孔隙负压的测试方法包括下述步骤：

- 1) 使用前，陶瓷头应在无气水（可以采用普通的自来水加热至沸腾之后，再继续加热超过 20 分钟冷却）中预先浸泡超过 24 小时。
- 2) 采用 $70\text{kPa}\sim 90\text{kPa}$ 的负压力抽水，使探头（多孔陶瓷头和塑料管）内饱水；
- 3) 在混凝土浇筑抹平后，将陶瓷探头埋设在距表层 1.0cm 深度处。对于同一个浇筑混凝土仓面，应布置 2 个以上探头。
- 4) 孔隙负压采集时间间隔不宜超过 10min 。
- 5) 混凝土初凝时可停止测试。

附录 D (规范性附录)

混凝土非荷载裂缝开裂风险控制设计方法

D.1 混凝土非荷载裂缝设计应控制开裂风险系数不大于 0.70。计算所用参数宜通过试验确定，无试验数据时，常规工程可按推荐参数取值。

D.2 抗裂性设计应包括混凝土收缩控制、温度控制、施工措施控制。收缩变形宜以自生体积变形、干燥收缩等参数明确；温度控制指标宜以入模温度、内外温差、混凝土温升等参数明确；施工措施宜通过计算确定一次性浇筑长度。

D.3 计算出的开裂系数超过 0.70 时，宜调整混凝土绝热温升值、降低入模温度、保温养护、减少一次性浇筑程度等措施，将开裂风险系数控制在 0.70 以下。

D.4 混凝土水化历程及绝热温升宜根据混凝土实际配合比通过试验确定，无试验数据时，混凝土绝热温升可按下列公式计算。

$$T_a(t_a) = T_{a,\max}(1 - e^{-m_a t_a}) = \alpha_{\max} \frac{WQ}{C\rho}(1 - e^{-m_a t_a}) \dots\dots\dots (D.1)$$

水化程度定义如下：

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

- $T_a(t_a)$ — 混凝土龄期 t_a 时的绝热温升，单位为摄氏度 (°C)；
- $T_{a,\max}$ — 最大绝热温升值，单位为摄氏度 (°C)；
- W — 每 m^3 混凝土胶凝材料用量，单位为千克为立方米 (kg/m^3)；
- Q — 胶凝材料放热总量，单位为千焦耳每千克 (kJ/kg)；
- $Q(t)$ — t 时刻胶凝材料放热量，单位为千焦耳每千克 (kJ/kg)；
- C — 混凝土的比热，一般为 0.92~1.0，单位为千焦耳每千克每摄氏度 ($kJ/(kg \cdot ^\circ C)$)；
- ρ — 混凝土的重力密度，一般为 2400~2500，单位为千克为立方米 (kg/m^3)；
- m — 与水泥品种、浇筑温度等有关经验系数，C30~C40 混凝土可取 0.8~1.0，C50~C80 混凝土可取 1.0~1.5，单位为每天 (d^{-1})；
- t_a — 绝热温升测试龄期，单位为天 (d)；
- t — 时间，单位为天 (d)；
- $\alpha_{\max}$ — 胶凝材料的最大水化程度；
- $\alpha(t)$ — t 时刻胶凝材料的水化程度。

1) 当已知混凝土组成时，胶凝材料放热总量可按式计算：

$$Q = Q_C \cdot P_C + k_1 \cdot 461 \cdot P_{SL} + k_2 \cdot 210 \cdot P_{FA} \dots\dots\dots (D.3)$$

式中：

Q_C — 水泥放热总量, 单位为千焦耳每千克 (kJ/kg), 可按表 D.1 选取;

P_C 、 P_{SL} 和 P_{FA} — 水泥、矿粉、粉煤灰的掺量;

k_1 、 k_2 — 水化放热相关系数, 可按表 D.2 选取。

表 D.1 水泥水化放热总量

单位为千焦耳每千克

水泥品种	水泥强度等级	
	42.5	52.5
硅酸盐水泥	430	465
普通硅酸盐水泥	365	420

表 D.2 不同掺量掺合料调整系数

掺量	0	10%	20%	30%	40%	50%
矿渣粉 (k_1)	0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5
粉煤灰 (k_2)	0	0.5	0.45	0.42	0.4	0.35

2) 当未知混凝土组成时, 可按表 D.3 选取 $T_{a, \max}$:

表 D.3 不同强度等级混凝土的最大绝热温升

混凝土强度等级	C30-C40	C40-C50	C50-C60
$T_{a, \max}$ (°C)	45	50	55

3) $\alpha_{\max}$ 可按式计算

$$\alpha_{\max} = \frac{1.031 \cdot w/b}{0.194 + w/b} + 0.50 \cdot P_{FA} + 0.30 \cdot P_{SL} \leq 1 \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

$\alpha_{\max}$ — 水化程度最大值, 当计算结果大于 1 时取 1;

w/b — 为混凝土水胶比。

D.5 温度对水化放热速率影响较大, 结构温度场计算过程中应考虑温度对水化放热的影响。对于各向同性的具有内部热源的固体的瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$ 需满足下列热传导方程和边界条件。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_a [t_{a,eq}] \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \frac{T_a(t_{a,eq}) + T_{a0} - T(t)}{[T_{a0} + T_a(t_{a,eq}) + 273] \cdot [T(t) + 273]} \right] \dots\dots\dots (D.5)$$

$$q_a [T_a(t_{a,eq})] = C \cdot \frac{dQ}{dt} \bigg|_{t=t_{a,eq}} \dots\dots\dots (D.6)$$

$$t_{a,eq} = -\frac{1}{r} \cdot \ln \left[1 - \frac{a(t)}{a_{\max}} \right] \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

λ — 混凝土导热系数, 通过试验确定, 无试验数据时, 简化计算时可取 2.5, 单位为瓦特每米每摄氏度 ($W/(m \cdot ^\circ C)$);

q_a — 水化放热速率;

- $t_{a,eq}$ — 实际工程中时间 t 相对于绝热温升测试（式（D.1））过程中的等效龄期；
 T_{a0} — 绝热温升测试时的入模温度，一般为 20，单位为摄氏度℃；
 E_a — 混凝土中胶凝材料水化反应活化能（ $J \cdot mol^{-1}$ ），无测试数据时可取 30000~40000，单位为焦耳每摩尔（ J/mol ），有配合比参数时，可按式（D.8）进行选取；
 R — 普适气体常数，8.315，单位为瓦特每米每摄氏度（ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ）。

$$E_a = [(k_{Ea, Fa} + k_{Ea, SL}) - 1] \cdot E_c \dots\dots\dots (D.8)$$

式中：

E_c — 水泥水化活化能，单位为焦耳每摩尔（ J/mol ），可按表 D.4 选取；

$k_{Ea, Fa}$ 和 $k_{Ea, SL}$ — 粉煤灰和矿粉对活化能的影响系数，可按表 D.5 选取。

表 D.4 水泥水化反应活化能 E_c

单位为焦耳每摩尔

水泥品种	水泥强度等级	
	42.5	52.5
硅酸盐水泥	42000	43000
普通硅酸盐水泥	38000	40000

表 D.5 粉煤灰及矿粉掺量对活化能影响系数

掺量	0	10%	20%	30%	40%	50%
矿渣粉	1	1.04	1.08	1.12	1.16	1.2
粉煤灰	1	0.92	0.84	0.76	0.69	0.61

D.6 在混凝土浇筑块温度计算过程中，初始温度即为浇筑温度。边界条件可通过以下四种方式给出：

- 1) 第一类边界条件 C1：混凝土表面温度是时间的已知函数，即

$$T(t) = f(t) \dots\dots\dots (D.9)$$

- 2) 第二类边界条件 C2：混凝土表面的热流量是时间的已知函数，即

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = f(t) \dots\dots\dots (D.10)$$

式中：

n — 表面法线方向；

若表面是绝热的，则有：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = 0 \dots\dots\dots (D.11)$$

- 3) 第三类边界条件 C3：当混凝土与空气接触时，表面热流量与混凝土表面温度 T 和气温 T_a 之差成正比，即：

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \beta(T - T_a) \dots\dots\dots (D.12)$$

式中:

β — 放热系数, 单位为千焦耳每平方米每小时每摄氏度 ($\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$)。

当放热系数 β 趋于无限时, $T=T_a$, 即转化为第一类边界条件。当放热系数 $\beta=0$ 时, $\partial T/\partial n=0$, 转化为绝热条件。

4) 第四类边界条件 C4: 当两种不同的固体接触时, 如接触良好, 则在接触面上温度和热流量都是连续的, 即

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_2 \\ \lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right) &= \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(D. 13)}$$

混凝土表面覆盖模板或采取保温措施时, 表面放热系数可按 GB 50496 进行选取。

D.7 水化程度为 $\alpha(t)$ 的混凝土力学性能 $f_M(\alpha(t))$ (强度或弹性模量) 以下式表示:

$$f_M(\alpha(t)) = f_{M\infty} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^a \dots\dots\dots \text{(D. 14)}$$

其中, $f_{M\infty}$ 为强度或弹性模量平均值, 无试验数据时可按下式进行计算:

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \dots\dots\dots \text{(D. 15)}$$

$$\begin{cases} f_{ctm} = 0.3(f_{ck})^{2/3} & f_{ck} \leq 50\text{MPa} \\ f_{ctm} = 2.12 \ln(1 + 0.1(f_{ck} + \Delta f)) & f_{ck} > 50\text{MPa} \end{cases} \dots\dots\dots \text{(D. 16)}$$

$$E_{cm} = 4734 f_{cm}^{0.5} \dots\dots\dots \text{(D. 17)}$$

式中:

f_{cm} — 抗压强度平均值, 单位为兆帕 (MPa);

f_{ck} — 抗压强度设计值, 单位为兆帕 (MPa);

f_{ctm} — 抗拉强度平均值, 单位为兆帕 (MPa);

E_{cm} — 弹性模量平均值, 单位为兆帕 (MPa);

a — 指数常数, 无试验测试值时, 弹性模量可取 0.5, 抗拉强度可取 1.0;

α_0 — 初始水化程度, 无试验测试数据时, C30~C40 可取 0.15~0.20, C50~C60 可取 0.10~0.15, C60 以上可取 0.05~0.10。

D.8 混凝土温度变形以下式表示:

$$\varepsilon_T = \beta_T \cdot \Delta T \dots\dots\dots \text{(D. 18)}$$

式中:

ε_T — 温度变形;

β_T — 线膨胀系数, 简化计算时可取 1.0×10^{-5} , 单位为每摄氏度 ($^\circ\text{C}^{-1}$);

ΔT — 温差, 单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$)。

D.9 相对湿度变化引起的变形包括密封条件下自收缩、水分蒸发引起的干燥收缩变形。对于早期带模及需要养护的混凝土结构计算过程中宜在早期采取自收缩变形进行计算。混凝土的自收缩可按下面经

验公式计算:

$$\varepsilon_{as} = f(t) \varepsilon_{as\infty} = f[\alpha(t)] \varepsilon_{as28} \dots\dots\dots (D. 19)$$

式中:

ε_{as} — 自收缩变形;

ε_{as28} — 28d 自收缩变形, 无试验资料时, 可取 $\varepsilon_{as28} = (10 f_{ck} - 200) 10^{-6}$;

$f(t)$ — 时间相关函数, 无试验资料时, 可取 $f(\alpha(t)) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5})$;

$f(\alpha(t))$ — 水化程度相关函数。

结构混凝土表面覆盖模板或早期需要进行养护, 暴露于环境中时性能相对稳定, 计算干燥收缩时, 可不考虑温度影响, 计算方法如下:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_d) = -\varepsilon_{sh\infty} k_h S(t) \dots\dots\dots (D. 20)$$

$$k_h = \begin{cases} 1 - h^3 & h \leq 0.98 \\ -0.2 & h = 1 \\ \text{线性内插} & 0.98 \leq h \leq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (D. 21)$$

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}}, \tau_{sh} = k_t (k_s D)^2 \dots\dots\dots (D. 22)$$

$$D = \frac{2v}{s}, k_t = 8.5 t_d^{-0.08} f_{cm}^{-0.025} \dots\dots\dots (D. 23)$$

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty} \frac{E(607)}{E(t_0 + \tau_{sh})} \dots\dots\dots (D. 24)$$

$$E(t) = E(28) \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (D. 25)$$

$$\varepsilon_{s\infty} = -a_1 a_2 \left[1.9 \times 10^{-2} w^{2.1} f_c'^{-0.28} + 270 \right] \dots\dots\dots (D. 26)$$

$$a_1 = \begin{cases} 1 & \text{一类水泥} \\ 0.85 & \text{二类水泥} \\ 1.1 & \text{三类水泥} \end{cases} a_2 = \begin{cases} 0.75 & \text{蒸汽养护} \\ 1.2 & \text{密封或防干燥的自然养护} \\ 1.0 & \text{水中或者相对湿度100\%} \end{cases} \dots\dots\dots (D. 27)$$

式中:

k_h — 湿度影响系数;

h — 相对湿度;

$S(t)$ — 时间函数;

τ_{sh} — 尺寸影响系数;

D — 有效厚度, 单位为厘米 (cm), 对应板即为实际厚度;

k_s — 截面形状因子, 板取为 1.0, 圆柱取为 1.15, 正方形棱柱体取为 1.25, 球体取为 1.3, 立方体取为 1.55;

$\varepsilon_{sh\infty}$ — 混凝土干燥收缩终值;

t_d — 开始干燥时间;

$E(28)$ — 混凝土 28d 的弹性模量, 单位为兆帕(MPa), 以 28d 强度作为设计依据时, 可取 $E(28) = E_{ctm}$;

w — 用水量, 单位为千克每立方米 (kg/m^3)。

D.10 混凝土的早期徐变性能宜通过试验确定, 无试验资料时, 徐变函数 $J(t, t_0)$ 可采取下式进行计算:

$$J(t, t_0) = q_1 + C_0(t, t_0) + C_d(t, t_0) \cdots \cdots \cdots \text{(D. 28)}$$

其中, 瞬时弹性变形系数 q_1 以下式表示:

$$q_1 = 1 / E_0 \cdots \cdots \cdots \text{(D. 29)}$$

基本徐变柔度函数 $C_0(t, t_0)$ 以下式表示:

$$C_0(t, t_0) = q_2 Q(t, t_0) + q_3 \ln[1 + (t - t_0)^n] + q_4 \ln(t / t_0) \cdots \cdots \cdots \text{(D. 30)}$$

$$q_2 = 185.4 \times 10^{-6} c^{0.5} f_{cm28}^{-0.9} \cdots \cdots \cdots \text{(D. 31)}$$

$$q_3 = 0.29(w / c)^4 q_2 \cdots \cdots \cdots \text{(D. 32)}$$

$$q_4 = 20.3(a / c)^{-0.7} \cdots \cdots \cdots \text{(D. 33)}$$

$$Q(t, t_0) = Q_f(t_0) \left[1 + \left(\frac{Q_f(t_0)}{Z(t, t_0)} \right)^{r(t_0)} \right]^{1 - 1/r(t_0)} \cdots \cdots \cdots \text{(D. 34)}$$

$$Q_f(t_0) = \left[0.086(t_0)^{2/9} + 1.21(t_0)^{4/9} \right]^{-1} \cdots \cdots \cdots \text{(D. 35)}$$

$$Z(t, t_0) = (t_0)^{-m} \ln[1 + (t - t_0)^n] \cdots \cdots \cdots \text{(D. 36)}$$

$$r(t_0) = 1.7(t_0)^{0.12} + 8 \cdots \cdots \cdots \text{(D. 37)}$$

干燥徐变柔度 $C_d(t, t_0)$ 以下式表示:

$$C_d(t, t_0, t_d) = q_5 \left[\exp\{-8H(t)\} - \exp\{-8H(t_0)\} \right]^{1/2} \cdots \cdots \cdots \text{(D. 38)}$$

$$q_5 = 0.757 f_{cm28}^{-1} \left| \varepsilon_{sh\infty} \times 10^6 \right|^{-0.6} \cdots \cdots \cdots \text{(D. 39)}$$

$$H(t) = 1 - (1 - h)S(t - t_d) \cdots \cdots \cdots \text{(D. 40)}$$

$$H(t_0) = 1 - (1 - h)S(t_0 - t_d) \cdots \cdots \cdots \text{(D. 41)}$$

式中:

t_0 — 开始持荷时间, 单位为天 (d);

E_0 — 混凝土加载时的弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

q_2 、 q_3 、 q_4 和 q_5 — 实验数据拟合的经验系数。

D. 11 混凝土的自身收缩、温度收缩在约束作用下混凝土产生收缩应力。约束包括内约束和外约束两类, 内约束由混凝土自身内外收缩不均引起, 内外温差、湿度梯度均导致收缩梯度的产生; 外约束主要由结构形式、施工浇筑先后顺序所引起。收缩应力计算宜采取有限元法进行, 将温度场和收缩变形计算成果和边界条件, 根据程序要求输入相应数据后, 由计算机进行计算。为判定综合效应, 可将各项最不利因素相互叠加, 进行有限元仿真计算。

用有限元增量求解混凝土应力的整体平衡方程如下:

$$[k]\{\Delta\delta\} = \{\Delta F\}\{\Delta F_C\}\{\Delta F_T\}\{\Delta F_G\} \cdots \cdots \cdots \quad (\text{D. 42})$$

式中:

$[k]$ — 刚度矩阵;

$\{\Delta\delta\}$ — 节点位移增量阵列;

$\{\Delta F\}$ — 节点荷载增量阵列;

$\{\Delta F_C\}$ — 混凝土徐变引起的节点荷载增量;

$\{\Delta F_T\}$ — 混凝土温度变形引起的节点荷载增量;

$\{\Delta F_G\}$ — 混凝土自生收缩变形引起的节点荷载增量;

相应的应力增量为:

$$\{\Delta\sigma_n\} = [\overline{D}]\left(\{\Delta\varepsilon_n\} - \{\eta_n\} - \{\Delta\varepsilon_n^T\} - \{\Delta\varepsilon_n^G\}\right) \cdots \cdots \cdots \quad (\text{D. 43})$$

式中:

$[\overline{D}]$ — 等效弹性矩阵;

$\Delta\varepsilon_n$ — 应变增量;

η_n — 徐变应变增量;

$\Delta\varepsilon_n^T$ — 温度应变增量;

$\Delta\varepsilon_n^G$ — 自生收缩应变增量。

D. 12 混凝土开裂风险系数 η 按下式计算:

$$\eta = \frac{\sigma(t)}{f_t(t)} \cdots \cdots \cdots \quad (\text{D. 44})$$

式中:

$\sigma(t)$ — t 时刻混凝土内部最大拉应力, 单位为兆帕 (MPa);

$f_t(t)$ — t 时刻混凝土抗拉强度, 单位为兆帕 (MPa)。

附 录 E
(规范性附录)
混凝土 28d 变形测试方法

E.1 混凝土 28d 变形为以混凝土初凝为基准值恒温密封养护 7d 后转入恒温恒湿（箱）室养护至 28d 总的变形值。

E.2 初凝至恒温密封养护 7d 条件下的变形（7d 自生体积变形）测试参照 GB/T 50082 中的非接触法收缩试验进行。并至少按照下列规定的时间间隔测试其变形读数：1d、3d、5d、7d。

E.3 试件由密封养护转入恒温恒湿（箱）室养护至 28d 变形（21d 干燥变形）按照以下方法进行：

- 1) 试件成型、试验设备、测试环境参照 GB/T 50082 中的接触法收缩试验进行。
- 2) 试件成型完毕后，应立即采取塑料薄膜作密封处理，并移至温度为（20±2）℃养护室养护，其后带模养护至 7d。
- 3) 拆模后，立即将试件移入恒温恒湿（箱）室测试其初始长度，并至少按照下列规定时间间隔测量其变形读数：1d、3d、7d、14d、21d。

E.4 混凝土变形（收缩率或膨胀率）计算参照 GB/T 50082 中的接触法收缩试验进行。混凝土膨胀时变形为正值，收缩时为负值。

E.5 混凝土 28d 变形按照下式计算：

$$\epsilon_{28} = \epsilon_{As,7} + \epsilon_{Ds,21} \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

ϵ_{28} — 混凝土 28d 变形（ 10^{-6} ）；

$\epsilon_{As,7}$ — 混凝土 7d 自生体积变形（ 10^{-6} ）；

$\epsilon_{Ds,21}$ — 混凝土 21d 干燥变形（ 10^{-6} ）。

附 录 F
(规范性附录)
混凝土吸水率测试方法

F.1 混凝土吸水率试件应采用符合上口内径为175mm、下口内径为185mm、高度为150mm的圆台体试模或150mm×150mm×150mm的立方体试模成型，每组3块。试件成型(24±2)h后拆模，标准养护(72±2)h后取出，钻取直径为(75±3)mm的混凝土芯样，切除上下表面后制备高度为(75±3)mm的圆柱体芯样。

F.2 试件应置于温度为(105±5)℃的烘箱干燥(72±2)h，且每个试件与其他试件或加热面的距离不应小于25mm。试件取出后放置于温度为(25±3)℃的干燥器中冷却(24±0.5)h，称重并记录W₁，立即以圆柱底面与水面垂直的方式将试件置于温度为(25±3)℃的水中浸泡，试件间隔距离不应小于10mm，试件最高点与水面的距离为(25±5)mm、(30±0.5)min时，将试件取出并用抹布擦去表面的水，称重并记录W₂。

F.3 称量天平的感量应为0.05g，最大称量范围不应超过5000g的。

F.4 混凝土试件的吸水率应按下式计算：

$$f = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \dots\dots\dots (F.1)$$

式中：

f — 混凝土试件的吸水率，单位为百分比(%)，精度为0.1%；

W_1 — 混凝土试件浸泡前质量，单位为克(g)，精度为0.1g；

W_2 — 混凝土试件浸泡后质量，单位为克(g)，精度为0.1g。

附录 G (规范性附录)

盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比

G.1 试样制备应符合下列规定：

1) 将 HPB300 钢筋加工制成直径为 20mm、厚度为 10mm 的圆柱片，直接采用 HG/T 3523 规定的 I 型 Q235 碳素钢片，并依次采用 400#，600#，1000# 和 2000# 砂纸打磨圆柱或碳素钢片底面，试样的数量不应少于 12 个；

2) 应采用丙酮（或乙醇）擦除试样表面的油脂，并吹干后放入饱和氢氧化钙溶液浸泡 48h 取出，再吹干待用。

G.2 试验可采用人工操作或全自动干湿循环试验机进行。

G.3 人工操作的试验仪器规格宜为直径 180mm，高度 200mm 的带盖密闭容器。采用 500mL 玻璃烧杯装满饱和氯化钠盐溶液，敞口放置于密闭容器内。

G.4 溶液配制应符合下列规定：

1) 基准盐溶液配制，向 500mL 玻璃烧杯中加入 3g 分析纯氢氧化钙和 17.5g 分析纯氯化钠，用蒸馏水稀释至 500g；

2) 阻锈剂盐溶液配制，向 500mL 玻璃烧杯中加入 3g 分析纯氢氧化钙、17.5g 分析纯氯化钠和生产厂家推荐掺量的钢筋阻锈剂，用蒸馏水稀释至 500g。

G.5 试验温度应为 $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ ，空气湿度应为 $(75 \pm 5) \%$ 。

G.6 测试及计算过程应符合下列规定：

1) 人工操作试验应符合下列规定：

a) 人工操作浸泡，将本规程第 G.1 条制备的试样分为两组，每组 6 个，分别放入本规程第 G.4 条配制的基准盐溶液和阻锈剂盐溶液中浸泡 2min。

b) 人工操作干燥，将试样从溶液中取出，用纸巾从边缘轻轻吸走表面残留水滴，在本规程第 G.3 条规定的带盖密闭容器中放置 1h。

c) 人工操作，浸泡 2min，干燥 1h 为一个循环，8 个循环后再浸泡 16h，一天共 8 个循环。至第 50 个干湿循环结束后停止试验，取出试样并用成像设备对试样的两面进行拍照。

2) 采用全自动干湿循环试验机时，直接将本规程第 G.1 条制备的碳素钢片放置于试验机中，干湿循环周期比与人工试验制度相同，无需吸走表面残留水滴的操作，同样至 50 个循环时停止试验，拿出腐蚀挂片并用成像设备对试样的两面进行拍照。

3) 使用图像处理软件按试样表面锈蚀区与未锈蚀区灰度差别，对试样表面进行二值化处理，计算得到锈蚀区面积占试样整个工作面积比率，即钢筋锈蚀面积百分率。

G.7 盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比应按下列公式计算：

$$R = A/A_0 \times 100\% \dots\dots\dots (G.1)$$

式中：

R —盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比，单位为百分比（%）；

A —阻锈剂盐溶液中钢筋锈蚀面积百分率，单位为百分比（%）；

A₀ —基准盐溶液中钢筋锈蚀面积百分率，单位为百分比（%）。

G.8 当钢筋锈蚀面积百分率最大值或最小值，与中间值之差超过中间值的 15%时，应剔除此值，并应取剩余五个值的算术平均值作为测定值；当最大值和最小值，均超过中间值的 15%时，应取剩余四个值的算术平均值作为测定值。

附录 H

(规范性附录)

钢筋临界氯离子浓度提高倍数测试方法

H.1 测试用的金属电极宜采用 HPB300 钢筋制备,尺寸宜为 $\Phi 10\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。测试前应依次采用 400#, 600#, 1000#, 2000# 砂子打磨,再采用细度为 $50\ \mu\text{m}$ 的 Al2O3 粉抛光。

H.2 金属电极表面应使用纯丙酮(或乙醇)擦洗,吹干后放入饱和氢氧化钙溶液中钝化 7d,取出吹干后放入干燥箱中备用。钢筋线性极化曲线应采用三电极平板腐蚀池测试,工作电极应为金属电极,对电极应为铂网电极,参比电极应为饱和甘汞电极。

H.3 初始溶液的模拟孔隙液中氢氧化钙的质量分数应为 0.6%、氯化钠的质量分数应为 0.234%,并掺入生产厂家推荐掺量的钢筋阻锈剂。

H.4 金属电极浸泡 24h 后,应采用用电化学工作站测试第一次钢筋线性极化曲线;添加质量分数为 0.117% 的 NaCl 于溶液中,24h 后测试第二次钢筋线性极化曲线;再添加 0.117% 质量分数的 NaCl 于溶液中,24h 后测试第三次钢筋线性极化曲线,以此类推。

H.5 钢筋线性极化曲线应通过线性拟合,得到线性极化电阻,再通过 Stern-Geary 公式计算出第 1 到 N 次测试的钢筋腐蚀电流密度:

$$i = \frac{B}{R_p} \dots\dots\dots (\text{H.1})$$

式中:

i — 腐蚀电流密度,单位为微安培每平方厘米 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$);

R_p — 线性极化电阻,单位为千欧姆 ($\text{k}\Omega$);

B — 取 52,单位为毫伏 (mV)。

H.6 应采用 6 个金属电极进行平行测试,去掉最小和最大值后计算平均腐蚀电流密度。

H.7 第 N 次平均腐蚀电流密度仍小于 $0.2\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 时, N 即为钢筋腐蚀临界氯离子浓度提高倍数。

附 录 I
(规范性附录)
水化热降低率测试方法

I.1 基准砂浆：按照本附录规定的试验条件配制的不掺功能材料的砂浆。

I.2 受检砂浆：按照本附录规定的试验条件配制的掺有功能材料的砂浆。

I.3 受检砂浆和基准砂浆样品应符合以下规定：

1) 砂浆配比如表 I.3 所示。

表 I.3 砂浆配比

砂浆种类	水泥 (g)	功能材料 (g)	砂	水 (g)
基准砂浆	450	—	1350	180
对比砂浆	450(1- p)	450 p	1350	180

2) 水泥：采用现行 GB 8076 规定的基准水泥，或选用实际工程所指定的水泥。

3) 砂：满足 GB/T 12959 中直接法的规定要求。

4) 功能材料掺量 (p)：生产厂家指定。

I.4 水化热测试仪器设备、试验条件参照 GB/T 12959 中直接法测试进行。

I.5 砂浆凝结时间采用 GB/T 50080 中的贯入阻力法测定。

I.6 测试初凝后开始计时的 1d、距加水 7d 水化放热量，并按下式计算水化热降低率：

$$R_Q = \left(1 - \frac{Q_t}{Q_c}\right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (I.1)$$

式中：

R_Q — 水化热降低率，单位为百分比 (%)；

Q_t — 受检砂浆水化放热量，单位为焦耳每克 (J/g)；

Q_c — 基准砂浆水化放热量，单位为焦耳每克 (J/g)。