

ICS 91. 080. 40
P 25

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL 775—2018

水工混凝土结构耐久性评定规范

Specification for evaluating durability of
hydraulic concrete structures

2018-12-05 发布

2019-03-05 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《水工隧洞
安全监测技术规范》等5项
水利行业标准的公告

2018年第11号

中华人民共和国水利部批准《水工隧洞安全监测技术规范》
(SL 764—2018)等5项为水利行业标准，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	水工隧洞安全监测技术规范	SL 764—2018		2018.12.5	2019.3.5
2	大坝安全监测系统基础设计规程	SL 766—2018		2018.12.5	2019.3.5
3	三峡水库调查与评价技术规范	SL 767—2018		2018.12.5	2019.3.5
4	水闸安全监测技术规范	SL 768—2018		2018.12.5	2019.3.5
5	水工钢筋混凝土结构耐久性评定规范	SL 775—2018		2018.12.5	2019.3.5

水利部

2018年12月5日

<http://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

前 言

根据水利技术标准制修订计划安排，按照 SL 1—2014《水利技术标准编写规定》的要求，编制本标准。

本标准共 5 章、4 个附录，主要内容有：

- 总则；
- 术语和符号；
- 评定准则与程序；
- 评定方法；
- 耐久性检测要求。

本标准全文推荐。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：南京水利科学研究院

本标准参编单位：中国水利水电科学研究院

长江水利委员会长江科学院

中水东北勘测设计研究有限责任公司

新疆水利水电科学研究院

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：刘伟主 陆采荣 纪国晋 梅国兴

杨华全 王 珩 王德库 戈雪良

贺传卿 杨东利 王怀义 沙海飞

孙尊琳 杨 虎 谈叶飞 王化翠

本标准审查会议技术负责人：温续余

本标准体例格式审查人：陈 昊

本标准在执行过程中，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国际合作与科技司（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。

<https://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	2
3 评定准则与程序	7
3.1 评定准则	7
3.2 评定程序	7
3.3 环境作用类别与等级	8
4 评定方法	12
4.1 一般规定	12
4.2 碳化环境下的结构耐久性	13
4.3 氯盐环境下的结构耐久性	14
4.4 硫酸环境下的结构耐久性	16
4.5 硫酸盐环境下的结构耐久性	17
4.6 渗透压作用下的结构耐久性	18
4.7 磨蚀环境下的结构耐久性	18
4.8 碱-骨料反应	19
5 耐久性检测要求	22
5.1 一般规定	22
5.2 取样与检测	22
附录 A 混凝土结构耐久性评定(评级)表	24
附录 B 碳化环境下钢筋锈蚀过程分析	25
附录 C 氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀过程分析	34
附录 D 评分表	43
标准用词说明	45
条文说明	47

1 总 则

- 1.0.1 为规范水工混凝土结构的耐久性评定，制定本标准。
- 1.0.2 本标准适用于在碳化、氯盐、冻融、硫酸盐、渗透压、磨蚀、碱-骨料反应等环境作用下的水工混凝土结构耐久性评定。
- 1.0.3 环境作用的类别和等级发生改变的水工混凝土结构宜进行耐久性评定。
- 1.0.4 本标准主要引用下列标准：
- GB/T 50344 建筑结构检测技术标准
 - SL 352 水工混凝土试验规程
 - SL 654 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范
 - SL 713 水工混凝土结构缺陷检测技术规程
 - JTJ 270 水运工程混凝土试验规程
- 1.0.5 水工混凝土结构耐久性评定除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 环境作用 environmental action

混凝土结构服役过程中受到的碳化、氯盐、冻融、硫酸盐、渗透压、磨蚀、碱-骨料反应等对耐久性有影响的作用。

2.1.2 结构耐久性 structural durability

在设计确定的环境作用和规定的维修、使用条件下，结构及其构件在设计的使用寿命内保持其适用性和安全性的能力。

2.1.3 合理使用寿命 rational service life

在正常运行使用和规定的维修条件下，能按设计功能安全使用的最低要求年限。

2.1.4 剩余使用年限 remaining service life

结构使用若干年后，在设计使用条件和正常维护下，能够继续满足使用要求的年限。

2.1.5 期望使用年限 expected service life

结构使用若干年后，根据结构合理使用寿命或经主管部门批准的役用年限确定的期望后期继续使用的年限。

2.1.6 耐久性极限状态 limit state of durability

由耐久性损伤造成结构或构件性能劣化，影响适用性的临界状态。

2.2 符 号

A_w ——外加剂的碱含量；

A_c ——水泥的碱含量；

A_{tot} ——混凝土中总碱量；

A_d ——单位体积混凝土中外加剂的用量；

A_s ——芯样和立方体试件抗压强度换算系数；

- A_F —— 粉煤灰的碱含量；
 A_{Si} —— 硅粉的碱含量；
 $A_{S_{Mk}}$ —— 矿渣粉的碱含量；
 a —— 年；
 B —— 特定条件下自钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间；
 C —— 单位体积混凝土中水泥的用量；
 c —— 保护层厚度实测值；
 D —— 氯离子扩散系数；
 D_0 —— 与保护层厚度及碳化系数有关的参数；
 D_t —— 检测时刻的氯离子扩散系数；
 D_m —— 龄期 t 年的氯离子扩散系数；
 d —— 钢筋直径；
 erf^{-1} —— 误差函数的反函数；
 F —— 单位体积混凝土中粉煤灰的用量；
 F_c —— 保护层厚度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的影响系数；
 F_d —— 钢筋直径对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的影响系数；
 F_f —— 混凝土强度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的影响系数；
 F_m —— 局部环境对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的影响系数；
 F_{RH} —— 环境湿度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的影响系数；
 F_T —— 环境温度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的影响系数；
 f_c —— 长径比为 1:1 的芯样的抗压强度；
 f_{cu} —— 边长 150mm 立方体试件的抗压强度；
 f_{cu} —— 冻融后混凝土抗压强度；

- $f_{cu,k}$ ——混凝土抗压强度设计标准值；
 f_{cu} ——未冻前混凝土抗压强度；
 H_0 ——保护层厚度对保护层锈胀开裂时间的影响系数；
 H_d ——钢筋直径对保护层锈胀开裂时间的影响系数；
 H_f ——混凝土强度对保护层锈胀开裂时间的影响系数；
 H_l ——局部环境对保护层锈胀开裂时间的影响系数；
 H_{RH} ——环境湿度对保护层锈胀开裂时间的影响系数；
 H_T ——环境温度对保护层锈胀开裂时间的影响系数；
 I ——钢筋腐蚀电流密度；
 K ——氯离子侵蚀系数；
 K_0 ——保护层厚度影响系数；
 k ——碳化系数；
 K_d ——钢筋位置影响系数；
 K_k ——碳化速率影响系数；
 K_m ——局部环境影响系数；
 k_1 ——混凝土表面氯离子聚集系数；
 k_2 ——电阻率系数；
 M_0 ——混凝土保护层中氯离子浓度平均值；
 M_{cr} ——钢筋锈蚀临界氯离子浓度；
 M_{c0} ——混凝土在制备时已含有的氯离子浓度；
 M_s ——混凝土表面氯离子浓度；
 M_r ——钢筋表面氯离子浓度；
 M_{c1} ——混凝土制备时氯离子的初始含量；
 M_{c2} ——实测的表面氯离子浓度；
 $M(x, t_2)$ ——检测时 x 深度处的氯离子浓度；
 m ——局部环境系数；
 m_d ——氯盐环境局部环境系数；
 N_d ——结构在期望使用年限内将经受的冻融循环次数；
 N_m ——结构建成至检测时经历的冻融循环次数；
 N_r ——混凝土表层出现明显冻融损伤的剩余冻融循环

- 次数；
- N_c ——构件表层出现明显冻融损伤的循环次数；
- Q ——硫酸盐侵蚀强度比；
- q ——幂次数；
- RH ——年平均相对湿度；
- S ——单位体积混凝土中矿渣粉的用量；
- S_i ——单位体积混凝土中硅粉的用量；
- T ——环境年平均温度；
- T_c ——钢筋处温度；
- t_c ——钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间；
- t_d ——钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间；
- t_{cr} ——保护层锈胀开裂的时间；
- t_e ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间；
- t_e ——期望使用年限；
- t_i ——结构建成至钢筋开始锈蚀的时间；
- t_p ——磨蚀过水历时；
- t_{re} ——剩余使用年限；
- t_s ——特定条件下构件自钢筋开始锈蚀到保护层锈胀开裂的时间；
- t_0 ——结构建成至检测时的时间；
- t_1 ——混凝土表面氯离子达到稳定值的累计时间；
- W/B ——混凝土水胶比；
- x ——氯离子扩散深度；
- x_c ——实测碳化深度；
- x_s ——碳化残量；
- α ——氯离子扩散系数时间依赖系数；
- β ——磨蚀速率系数；
- γ_s ——结构耐久重要性系数；
- δ ——平均磨蚀深度；

- δ_c ——保护层锈胀开裂时的临界钢筋锈蚀深度；
- δ_e ——结构在期望使用年限内允许的平均磨蚀深度；
- δ_a ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤时的钢筋锈蚀深度；
- δ_f ——检测时构件表层混凝土强度损失率；
- δ_p ——预期平均磨蚀深度；
- λ_0 ——氯盐侵蚀环境保护层锈胀开裂前年平均钢筋锈蚀速率；
- λ_{cl} ——氯盐侵蚀环境保护层锈胀开裂后的年平均钢筋锈蚀速率；
- λ_s ——保护层锈胀开裂前的年平均钢筋锈蚀速率；
- λ_r ——保护层锈胀开裂后的年平均钢筋锈蚀速率；
- ρ ——混凝土电阻率；
- %FA——粉煤灰占胶凝材料的百分比；
- %SG——磨细矿渣占胶凝材料的百分比。

3 评定准则与程序

3.1 评定准则

3.1.1 混凝土结构耐久性评定应结合结构设计的合理使用年限、所处的环境类别及混凝土自身的耐久性能来进行，结构合理使用年限应按 SL 654 执行。

3.1.2 混凝土结构处于多种环境因素作用时，耐久性评定应根据各环境作用的类别及其作用等级分别进行耐久性评定。

3.1.3 根据混凝土结构满足期望使用年限内的耐久性要求程度，耐久性评定等级分为 A、B、C 三级，见表 3.1.3。

表 3.1.3 耐久性评定等级划分

评定等级	含义
A	期望使用年限内满足耐久性要求
B	期望使用年限内基本满足耐久性要求，不需采取或部分采取修复及其他防护措施
C	期望使用年限内不能满足耐久性要求，应及时采取修复或其他防护措施

3.2 评定程序

3.2.1 混凝土耐久性评定宜按以下程序进行：

- 1 对评定工作的目的、范围及评定内容进行调研分析；
- 2 对水工建筑物或结构的相关背景资料进行详细调查；
- 3 根据调查结果制定评定方案；
- 4 进行必要的检测、试验；
- 5 对调查及检测结果进行分析，提出评定意见，填写混凝土结构耐久性评定表，表格格式见附录 A；
- 6 综合分析，编制耐久性评定报告。

3.2.2 对水工建筑物和结构的相关背景资料的调查应包括下列内容：

- 1 混凝土结构用途、使用情况；
- 2 混凝土结构设计、施工、维修加固、改造扩建、维护监测、事故和处理等与耐久性相关的情况；
- 3 设计技术资料、相关验收资料等；
- 4 混凝土结构的环境及防护措施，包括大气年平均温度、最高最低温度、最冷月平均温度及年低于0℃的天数等；大气年平均相对湿度、月平均相对湿度、日平均相对湿度等；结构或构件的环境温度变化及干湿交替情况；海潮周期性变化情况；侵蚀性气体、液体、固体的影响范围及程度，必要时检测有害成分含量；冻融循环及混凝土饱水状态；冲刷磨蚀情况、平均及最大水流流速和水力梯度情况。

3.2.3 耐久性评定报告应包括下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 评定目的、范围和内容；
- 3 检测与试验；
- 4 分析与评定；
- 5 结论及建议；
- 6 相关附件。

3.3 环境作用类别与等级

3.3.1 混凝土结构所处的环境作用类别可分为碳化环境、氯盐环境、冻融环境、硫酸盐环境、渗透压环境、磨蚀环境、碱-骨料反应环境等，按表 3.3.1 确定。

表 3.3.1 环境作用类别

环境作用类别	名称	腐蚀机理
I	碳化	保护层混凝土碳化或中性化引起钢筋锈蚀
II	氯盐	氯离子侵入混凝土引起钢筋锈蚀

表 3.3.1 (续)

环境作用类别	名称	腐蚀机理
Ⅲ	冻融	冻融循环导致混凝土损伤
Ⅳ	硫酸盐	水、土中的硫酸盐侵蚀对混凝土的破坏
Ⅴ	渗透压	高水头作用下混凝土发生渗漏,引起破坏
Ⅵ	磨蚀	高速水流对混凝土表面产生的空蚀、磨蚀和冲刷破坏
Ⅶ	碱-骨料反应	活性骨料与碱反应导致混凝土破坏

3.3.2 环境作用按其其对水工混凝土结构耐久性破坏作用的严重程度,可分为轻微(A)、轻度(B)、中度(C)、重度(D)、严重(E)等五个等级。碳化环境、氯盐环境、冻融环境作用等级可按表 3.3.2-1 确定,水、土中的硫酸盐环境作用等级可按表 3.3.2-2 确定,渗透压环境、磨蚀环境作用等级可按表 3.3.2-3 确定,碱-骨料反应环境作用等级可按表 3.3.2-4 确定。

表 3.3.2-1 碳化环境、氯盐环境、冻融环境作用等级

环境作用类别	环境作用等级	环境条件	结构构件示例
I	I-A	干燥环境	室内、室外不淋雨的梁、板、柱、墩
	I-B	长期在河内或水下成土中	泵房泵房轨道,底板,消力池、护基、铺盖、蓄洪池等所有表面均处于水下或土中的构件
	I-C	室内潮湿环境及室内湿度变化环境	调压室内壁
	I-D	水位变化区,室外干湿交替区(表面经常淋雨或与水接触的大气区)	闸墩、泵墩、工作桥排架、工作桥、梁桥、桥翼墙的前墩等

表 3.3.2-1 (续)

环境作用类别	环境作用等级	干燥条件	结构条件示例
II	II-C	长期在海水的水下或土中	底板、灌注桩、沉井、地基墙等
	II-D	海上大气区(轻度盐雾作用区); 距平均水位 15m 高度以上的海上大气区; 高浪海岸线以外 100~1000m 内的陆上室外大气环境	筒仓、系墩、胸墙、工作桥排架、工作桥、工作桥、公路桥等
	II-E	海水水位变化区、浪溅区; 海上大气区(中度盐雾作用区); 距平均水位 15m 高度以内的海上大气区; 高浪海岸线 100m 以内的陆上室外大气环境; 使用除冰盐的环境	筒仓、系墩、工作桥排架、工作桥、公路桥等
III	III-C	热带地区的无盐环境; 混凝土高度饱水	面浇筑后期面板、进出口水位变动区构件
		严寒和寒冷地区的无盐环境; 混凝土中度饱水	受雨淋的外墙或其他竖向构件
	III-D	严寒和寒冷地区的无盐环境; 混凝土高度饱水	面浇筑后期面板、进出口水位变动区构件
		微冻地区的有盐环境; 混凝土高度饱水	受潮海水位变动区构件
	III-E	严寒和寒冷地区的有盐环境; 混凝土中度饱水	受雨淋的外墙或其他竖向构件
严寒和寒冷地区的有盐环境; 混凝土高度饱水		受潮海水位变动区构件	
<p>注 1: 干燥环境指年平均相对湿度低于 60%。</p> <p>注 2: 干湿交替指混凝土表面经常交替接触到大气和水的干燥条件。</p> <p>注 3: 第 3 类混凝土结构, 按构件的一面表面接触室内干燥空气、另一面表面接触水或潮湿气体时, 按和空气一侧的环境作用等级按干湿交替环境确定。</p> <p>注 4: 江河入海口附近水体的含盐量根据实测确定, 当含盐量明显低于海水时, 其环境作用等级可根据具体情况确定。</p>			

表 3.3.2-2 水、土中硫酸盐环境作用等级

环境作用类别	环境作用等级	水中硫酸根离子浓度 /(mg/L)	土中硫酸根离子浓度 (水溶性) /(mg/kg)
IV	IV-C	200~1000	300~1500
	IV-D	1000~4000	1500~6000
	IV-E	4000~10000	6000~15000

注 1: 当处于干湿交替 (长期浸没于地表或地下水中) 时, 按表中的作用等级降低一级, 但不低于 IV-C 级。
 注 2: 当混凝土结构构件处于弱透水土壤中时, 土中硫酸根离子环境作用等级按相应的等级降低一级, 但不低于 IV-C 级。
 注 3: 对氯离子浓度大于 500mg/L 的地下水、土, 不单独考虑硫酸盐的作用。

表 3.3.2-3 渗透压环境、磨蚀环境作用等级

环境作用类别	环境作用等级	环境条件	取值
V	V-C	水力梯度 i	$i < 30$
	V-D		$30 \leq i < 50$
	V-E		$i \geq 50$
VI	VI-B	水流流速 v /(m/s)	$v < 15$
	VI-C		$15 \leq v < 25$
	VI-D		$25 \leq v < 35$
	VI-E		$v \geq 35$

注: 本标准中涉及的磨蚀环境不包括含有推移质的情况。

表 3.3.2-4 碱-骨料反应环境作用等级

环境作用类别	环境作用等级	环境条件	说 明
III	III-C	干燥环境	混凝土构件周围空气相对湿度小于 50%, 不与水、潮湿土壤、水汽直接接触
	III-D	潮湿环境	与水、潮湿土壤、水汽直接接触及以上情形的干湿交替环境
	III-E	含碱环境	潮湿环境且外部有含碱供应 (如海水、盐碱地、除冰融环境)

4 评定方法

4.1 一般规定

4.1.1 混凝土结构的耐久性评定等级可根据耐久性极限状态对应的耐久性要求的满足程度进行评定，并考虑结构和构件的耐久重要性系数。

4.1.2 根据混凝土结构耐久性对建筑物的影响程度，结构和构件的耐久重要性系数可按表 4.1.2 确定。

表 4.1.2 结构和构件的耐久重要性系数 γ_c

耐久性失效的影响	耐久重要性系数
很大影响，不修修复	>1.1
较大影响，修复修复	1.0~1.1
较小影响，次要结构	0.9~1.0

4.1.3 碳化环境和氯盐环境下的耐久性极限状态可按下列规定确定：

1 对期望使用年限内不允许钢筋锈蚀的构件，可将钢筋开始锈蚀作为耐久性极限状态；

2 对期望使用年限内不允许保护层出现锈胀裂缝的构件，可将保护层锈胀开裂作为耐久性极限状态；

3 对期望使用年限内允许出现锈胀裂缝或局部破损的构件，可将混凝土表面出现最大可接受外观损伤作为耐久性极限状态。

4.1.4 冻融环境的耐久性极限状态应按下列规定确定：

1 钢筋混凝土保护层剥落严重，钢筋外露；

2 混凝土出现明显冻融损伤，强度损失达到允许值。

4.1.5 硫酸盐环境的耐久性极限状态为混凝土的强度损失达到允许值。

4.1.6 渗透压环境下的耐久性极限状态为混凝土抗渗等级达到

设计等级。

4.1.7 磨蚀环境的耐久性极限状态为混凝土出现最大可接受磨蚀深度。

4.2 碳化环境下的结构耐久性

4.2.1 碳化环境下钢筋开始锈蚀的时间 t_r 应根据碳化速率、保护层厚度和局部环境的影响确定，计算方法见附录 B。

4.2.2 保护层锈胀开裂的时间 t_{cr} 应考虑保护层厚度、混凝土强度、钢筋直径、环境温度、环境湿度以及局部环境的影响，可按式 (4.2.2) 估算：

$$t_{cr} = t_r + t_i \quad (4.2.2)$$

式中 t_{cr} ——保护层锈胀开裂的时间，a；

t_i ——结构建成至钢筋开始锈蚀的时间，a，按附录 B 计算；

t_r ——钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间，a，按附录 B 计算。

4.2.3 混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间 t_d 应考虑保护层厚度、混凝土强度、钢筋直径、环境温度、环境湿度以及局部环境的影响，可按式 (4.2.3) 估算：

$$t_d = t_r + t_{d1} \quad (4.2.3)$$

式中 t_d ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，a；

t_i ——结构建成至钢筋开始锈蚀的时间，a，按附录 B 计算；

t_{d1} ——钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，a，按附录 B 计算。

4.2.4 耐久性评定时，各项计算参数应按下列规定取用：

- 1 保护层厚度取实测平均值；
- 2 混凝土强度取实测抗压强度推定值；
- 3 碳化深度取钢筋部位实测平均值；
- 4 环境温度、湿度取建成后历年的年平均环境温度和年平均

均相对湿度平均值，室内构件宜按室内实测数据确定，也可按室外数据适当调整；

5 对薄弱构件或薄弱部位（保护层厚度较小，混凝土强度较低，所处环境恶劣）宜按其最不利参数单独进行评定，并在评定报告中列出。

4.2.5 剩余使用年限 t_{re} 由耐久性失效时间减去结构已运行年限确定。对期望使用年限内不允许钢筋锈蚀的构件可按式 (4.2.5-1) 计算，对期望使用年限内不允许保护层出现锈胀裂缝的构件可按式 (4.2.5-2) 计算，对期望使用年限内允许出现锈胀裂缝或局部破损的构件可按式 (4.2.5-3) 计算：

$$t_{re} = t_d - t_1 \quad (4.2.5-1)$$

$$t_{re} = t_m - t_1 \quad (4.2.5-2)$$

$$t_{re} = t_4 - t_1 \quad (4.2.5-3)$$

式中 t_{re} ——剩余使用年限，a；
 t_1 ——结构建成至钢筋开始锈蚀的时间，a；
 t_2 ——结构建成至检测时的时间，a；
 t_m ——保护层锈胀开裂的时间，a；
 t_4 ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，a。

4.2.6 碳化环境下结构耐久性等级可通过计算 $t_{re}/(t_d \gamma_c)$ 的结果按表 4.2.6 评定。

表 4.2.6 碳化环境下结构耐久性评定

$t_{re}/(t_d \gamma_c)$	≥ 1.8	< 1.8 且 ≥ 1.0	< 1.0
耐久性等级	A	B	C
注 1: t_d 为期望使用年限。 注 2: γ_c 为结构耐久重要性系数。 注 3: 当计算评定为 A、B 级时，宜对不允许钢筋锈蚀的构件碳化率超过保护层厚度，或不允许保护层出现锈胀裂缝的构件出现保护层锈胀开裂，耐久性等级为 C 级。			

4.3 氯盐环境下的结构耐久性

4.3.1 氯盐环境下钢筋开始锈蚀时间 t_r 应根据保护层厚度、氯

离子扩散系数、混凝土表面氯离子浓度和局部环境的影响确定，计算方法见附录 C。

4.3.2 保护层锈胀开裂时间 t_{cr} 可按式 (4.3.2) 估算：

$$t_{cr} = t_1 - t_0 \quad (4.3.2)$$

式中 t_{cr} ——保护层锈胀开裂的时间，a；

t_1 ——结构建成至钢筋开始锈蚀的时间，a，按附录 C 计算；

t_0 ——钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间，a，按附录 C 计算。

4.3.3 混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间 t_d 可按式 (4.3.3) 估算：

$$t_d = t_1 - t_0 \quad (4.3.3)$$

式中 t_d ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，a；

t_1 ——结构建成至钢筋开始锈蚀的时间，a，按附录 C 计算；

t_0 ——钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，a，按附录 C 计算。

4.3.4 剩余使用年限 t_{re} 由耐久性失效时间减去结构已运行年限确定。对期望使用年限内不允许钢筋锈蚀的构件可按式 (4.3.4-1) 计算，对期望使用年限内不允许保护层出现锈胀裂缝的构件可按式 (4.3.4-2) 计算，对期望使用年限内允许出现锈胀裂缝或局部破损的构件可按式 (4.3.4-3) 计算：

$$t_{re} = t_1 - t_0 \quad (4.3.4-1)$$

$$t_{re} = t_1 - t_0 \quad (4.3.4-2)$$

$$t_{re} = t_d - t_0 \quad (4.3.4-3)$$

式中 t_{re} ——剩余使用年限，a；

t_1 ——结构建成至钢筋开始锈蚀的时间，a；

t_0 ——结构建成至检测时的时间，a；

t_{cr} ——保护层锈胀开裂的时间，a；

t_d ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，a。

4.3.5 氯盐环境混凝土结构耐久性等级应根据 $t_w/(t_e \gamma_e)$ 计算结果按表 4.3.5 评定。

表 4.3.5 氯盐环境下结构耐久性评定

$t_w/(t_e \gamma_e)$	≥ 1.8	$< 1.6 \leq 1.0$	< 1.0
耐久性等级	A	B	C

注 1: t_e 为期望使用年限。
 注 2: γ_e 为结构耐久重要性系数。
 注 3: 通过计算评定为 A 或 B, 但保护层出现蜂窝麻面或混凝土表面出现不可接受外观损伤时, 该构件的耐久性等级为 C 级。

4.4 冻融环境下的结构耐久性

4.4.1 冻融环境下的结构耐久性可根据强度损失率和外观评定。

4.4.2 构件表层出现明显冻融损伤的循环次数 N_c 可由式 (4.4.2) 估算:

$$N_c = N_m / \delta_f \quad (4.4.2)$$

式中 N_c ——构件表层出现明显冻融损伤的循环次数;

N_m ——结构建成至检测时经历的冻融循环次数, 根据工程当地气象资料统计分析确定;

δ_f ——检测时构件表层混凝土强度损失率。

4.4.3 构件冻融后混凝土抗压强度损失率 δ_f 可按式 (4.4.3) 计算:

$$\delta_f = 1 - f_c / f_{c0} \quad (4.4.3)$$

式中 δ_f ——检测时构件表层混凝土强度损失率;

f_c ——冻融后混凝土抗压强度, MPa;

f_{c0} ——未冻前混凝土抗压强度, MPa。

注: 混凝土抗压强度可根据回弹值按 SL 352 推算。

4.4.4 混凝土表层出现明显冻融损伤的剩余冻融循环次数 N_r 可按式 (4.4.4) 计算:

$$N_r = N_c - N_m \quad (4.4.4)$$

式中 N_f ——混凝土表层出现明显冻融损伤的剩余冻融循环次数；
 N_0 ——构件表层出现明显冻融损伤的循环次数；
 N_m ——结构建成至检测时经历的冻融循环次数。

4.4.5 混凝土冻融耐久性等级可根据 $N_f/(N_0 \gamma_c)$ 计算结果按表 4.4.5 评定。

表 4.4.5 冻融耐久性评定

$N_f/(N_0 \gamma_c)$	≥ 1.8	< 1.8 且 ≥ 1.0	< 1.0
耐久性等级	A	B	C

注 1: N_f 为结构在期望使用年限内将承受的冻融循环次数。
 注 2: 各地区的冻融循环次数可通过调查取得。

4.4.6 钢筋混凝土保护层受冻害剥落严重,造成钢筋出露的构件应评为 C 级;混凝土强度损失达到允许值或强度低于设计要求的构件应评为 C 级。

4.5 硫酸盐环境下的结构耐久性

4.5.1 硫酸盐环境下混凝土结构的耐久性评定可采用芯样强度比的方法。

4.5.2 芯样抗压强度测试应符合 SL 352 的要求,芯样抗压强度与立方体抗压强度的换算可按式 (4.5.2) 计算:

$$f_{cu} = A_c f_c \quad (4.5.2)$$

式中 f_{cu} ——边长 150mm 立方体试件的抗压强度, MPa;
 f_c ——长径比为 1:1 的芯样的抗压强度, MPa;
 A_c ——芯样和立方体试件抗压强度换算系数,按表 4.5.2 取用。

表 4.5.2 混凝土芯样和 150mm 立方体试件之间
抗压强度换算系数 A_c

芯样尺寸/(mm×mm)	$\phi 100 \times 100$	$\phi 150 \times 150$	$\phi 200 \times 200$
换算系数 A_c	1.00	1.04	1.18

4.5.3 换算立方体抗压强度 f_{cu} 与强度设计标准值 $f_{cu,k}$ 的比值 Q 可按式 (4.5.3) 计算:

$$Q = f_{cu} / f_{cu,k} \quad (4.5.3)$$

式中 Q ——硫酸盐侵蚀强度比;

f_{cu} ——边长 150mm 立方体试件的抗压强度, MPa;

$f_{cu,k}$ ——混凝土抗压强度设计标准值, MPa。

4.5.4 硫酸盐环境耐久性评定等级根据 $Q/\%$ 计算结果按表 4.5.4 进行评定。

表 4.5.4 硫酸盐环境耐久性评定

$Q/\%$	≥ 1.00	< 1.00 且 ≥ 0.80	< 0.80
抗硫酸盐耐久性评定等级	A	B	C

4.5.5 混凝土表面出现明显疏松、大面积剥落或钢筋外露, 应评为 C 级。

4.6 渗透压作用下的结构耐久性

4.6.1 采用 $\phi 150\text{mm}$ 的混凝土芯样制作标准的混凝土抗渗试件 6 个, 并符合 JTJ 270 中“取芯法测定混凝土抗渗性”规定。填充砂浆宜采用聚合物砂浆。

4.6.2 按设计的抗渗等级逐级加压, 在加至规定压力后 8h 内, 观察芯样试件透水情况, 透水芯样数量与评级结果应符合表 4.6.2 的规定。

表 4.6.2 抗渗耐久性评定

透水芯样数量 N	0	$0 < N \leq 2$	$N > 2$
抗渗耐久性评定等级	A	B	C

4.6.3 混凝土结构表面裂缝过宽过长, 出现大流量渗浆等不满足抗渗要求的状况, 应评为 C 级。

4.7 磨蚀环境下的结构耐久性

4.7.1 对于含沙水流和悬移质水流, 混凝土结构平均磨蚀深度

可按式 (4.7.1) 计算:

$$\delta = \beta q t_p^g \quad (4.7.1)$$

式中 δ —— 平均磨蚀深度, mm;

β —— 磨蚀速率系数, 与混凝土材料、含沙量、流速等有关, 可通过定期观测磨蚀深度和过水历时, 拟合得到;

t_p —— 磨蚀过水历时, h;

g —— 磨蚀速率幂次数, 一般为 1.0~1.5, 可通过定期观测磨蚀深度和过水历时, 拟合得到。

4.7.2 应根据定期观测 3 次以上的过水历时和对应的磨蚀深度, 拟合得到参数 β 、 g , 再代入预期的过水历时, 得出相应的预期平均磨蚀深度 δ 。

4.7.3 混凝土抗磨蚀耐久性等级可根据 $\delta_e/(\delta_e \gamma_c)$ 计算结果按表 4.7.3 评定。

表 4.7.3 抗磨蚀耐久性评定

$\delta_e/(\delta_e \gamma_c)$	≥ 1.8	<1.8 且 ≥ 1.0	<1.0
耐久性等级	A	B	C

注: δ_e 为结构在预期使用寿命内允许的平均磨蚀深度, 可根据统计回归分析、试验或水力学计算确定。

4.8 碱-骨料反应

4.8.1 碱-骨料反应可按下列两级评定:

1 条件评定, 分析混凝土是否具备碱-骨料反应条件, 包括骨料碱活性、碱含量及碱、水的持续供给。

2 危害评定, 分析在具备碱-骨料反应条件时, 混凝土是否已发生碱-骨料反应及有无残余危害性膨胀。

4.8.2 条件评定应进行骨料活性及混凝土总碱量计算, 可采用下列方法:

1 骨料碱活性可通过芯样岩相试验判断骨料种类及活性组

分；也可分离出骨料后按照 SL 352 砂石料部分相关方法测试。

2 混凝土配合比已知时，混凝土总碱量可按式 (4.8.2) 计算：

$$A_{\text{con}} = A_C C + 0.2A_F F + 0.5A_{S_{100}} S + 0.5A_{Si} Si + A_{Ad} Ad \quad (4.8.2)$$

式中 A_{con} ——混凝土中总碱量， kg/m^3 ；
 A_C 、 A_F 、 $A_{S_{100}}$ 、 A_{Si} 、 A_{Ad} ——水泥、粉煤灰、矿渣粉、硅粉、外加剂的碱含量，%；
 C 、 F 、 S 、 Si 、 Ad ——单位体积混凝土中水泥、粉煤灰、矿渣粉、硅粉、外加剂的用量， kg/m^3 。

4.8.3 条件评定符合下列情况的耐久性可评定为 A 级，不符合下列情况的应进行危害评定。

- 1 骨料无潜在碱活性。
- 2 骨料具有潜在碱-硅反应活性，但混凝土总碱量不超过表

4.8.3 中的限值。

表 4.8.3 混凝土总碱量限值 单位： kg/m^3

环境情况	一般结构	重要结构	特殊重要结构
干燥	不限	3.5	3.0
潮湿	3.5	3.5	2.5

注：对于三级配和四级配混凝土的总碱量可折算成相应二级配混凝土的总碱量后进行最大总碱量限值。

4.8.4 危害评定应采用下列步骤进行：

- 1 观察特征裂缝，当无钢筋约束时，混凝土因碱-骨料反应膨胀造成的开裂呈无规则网状，有钢筋约束时，常发展成沿筋的裂缝。
- 2 观察裂缝中凝胶物质，碱-骨料反应造成的裂缝中有凝胶类物质渗出，随时间不同呈不同颜色，碱-硅酸反应产物形貌、成分宜采用带能谱的电子显微镜进行分析。

3 测试混凝土潜在膨胀性，参照测长法检测膨胀性，应在不同部位钻取直径不小于70mm、长度不小于3倍直径的芯样3个以上；两端磨平后粘上测头制成测长试件，先在自然状况下养护7d，量取此时长度为初始长度，然后将试件放入(38±2)℃、90%以上湿度环境中养护12个月，每周读数一次，计算试件的膨胀率。

4.8.5 危害评定应按下列标准给出：

1 混凝土外观无异常，内部也未发现反应产物，芯样1年的膨胀率不大于 600×10^{-4} ，耐久性等级评定为B级。

2 混凝土外观有特征裂缝，且内部有凝胶类物质渗出，或芯样1年膨胀率大于 400×10^{-4} ，耐久性等级评定为C级。

3 混凝土外观无特征裂缝，但芯样1年膨胀率大于 600×10^{-4} ，耐久性等级评定为C级。

4 骨料具有潜在碱-碳酸盐反应活性且处于潮湿或含碱环境，耐久性等级评为C级。

4.8.6 碱-骨料反应耐久性等级应按表4.8.6评定。

表4.8.6 碱-骨料反应耐久性评定

条 件	耐久性等级
骨料无潜在活性	A
骨料具有潜在碱-硅反应活性，但混凝土总碱量不超过表4.8.3中的限值	
混凝土外观无异常，内部也未发现反应产物，芯样1年的膨胀率不大于 600×10^{-4}	B
混凝土外观有特征裂缝，且内部有凝胶类物质渗出，或芯样1年膨胀率大于 400×10^{-4}	C
混凝土外观无特征裂缝，但芯样1年膨胀率大于 600×10^{-4}	
骨料具有潜在碱-碳酸盐反应活性且处于潮湿或含碱环境	

5 耐久性检测要求

5.1 一般规定

5.1.1 混凝土耐久性检验的项目和取样应根据耐久性评定要求确定，评定单元可按分缝区段、不同结构类型划分，芯样取样应客观反映构件整体特征，同一评定单元检测结果宜取多个检测结果的平均值。

5.1.2 结构耐久性指标检测应根据结构环境、当前技术状况及耐久性评定要求确定，包括构件的外观、几何参数、裂缝及缺陷、保护层厚度、钢筋直径、混凝土抗压强度、碳化深度、混凝土氯离子含量及分布、氯离子扩散系数、钢筋锈蚀、混凝土渗透性、冻融损伤、化学腐蚀、冲磨损伤、碱-骨料反应等。

5.2 取样与检测

5.2.1 构件的外观、几何参数、裂缝及缺陷的检测应按 SL 713 执行。

5.2.2 保护层厚度和钢筋直径检测应按 SL 713 执行，并应符合下列规定：

1 保护层厚度可采用非破损或微破损检测方法，当采用前者时，宜用微破损方法校准。

2 同类构件含有测区的构件数不宜少于 3 个，同类构件数少于 6 个时，应逐个测试，均匀性差时，应增加检测构件数量。

3 每个检测构件的测区数不应少于 3 个，测区应均匀布置，每个测区测点不应少于 3 个，构件角部的钢筋应测量两侧的保护层厚度。

5.2.3 混凝土抗压强度检测应按 SL 713 执行。

5.2.4 混凝土碳化深度检测应符合下列规定：

1 测区宜布置在量测保护层厚度的测区内。

2 同类构件含有测区的构件数不宜少于 6 个，同类构件数少于 6 个时，应逐个测试。

3 每个检测构件应不少于 3 个测区，测区应布置在构件的不同侧面。

4 每一测区应布置 3 个测孔，呈“品”字形排列，孔距应大于 2 倍孔径。

5 测区宜布置在钢筋附近，对构件角部钢筋宜测试钢筋处两侧的碳化深度。

5.2.5 混凝土的氯离子含量和氯离子扩散系数宜按 SL 352 执行，并应符合下列规定：

1 同环境同类构件抽样构件数不宜少于 6 个，同类构件数少于 6 个时，应逐个取样。

2 测定氯离子含量在混凝土内的分布时，应从表面每 5~10cm 深度取样，且不少于 5 层。

5.2.6 钢筋锈蚀状态宜按 SL 713 执行，钢筋腐蚀电流密度宜按 GB/T 50344 执行。

5.2.7 混凝土受冻融部位强度检测宜按 SL 713 执行，且混凝土芯样数量不应少于 3 个。

5.2.8 混凝土在硫酸盐侵蚀条件下的芯样轴心抗压强度检测宜按 SL 713 执行，且取芯数量不应少于 3 个。

5.2.9 混凝土渗透性取样检测宜按 JTJ 270 执行。

5.2.10 测定磨蚀深度时，各部位表面测点数不宜少于 6 个，各点宜均匀分布。

附录 A 混凝土结构耐久性评定（评级）表

混凝土结构耐久性评定（评级）表

工程名称								完工日期	年 月 日
混凝土结构名称									
部位及取样 情况说明									
环境作用类别									
环境作用等级									
耐久性评定等级									
主要评定意见									
评定日期	年 月 日				年 月 日				

附录 B 碳化环境下钢筋 锈蚀过程分析

B.0.1 碳化环境下钢筋开始锈蚀时间 t_i 应根据碳化速率、保护层厚度和局部环境的影响确定，可按式 (B.0.1-1) 或式 (B.0.1-2) 计算，其中式 (B.0.1-1) 为查表法，式 (B.0.1-2) 为计算法：

$$t_i = 15.2K_k K_c K_m \quad (\text{B.0.1-1})$$

$$t_i = \left(\frac{c - x_c}{k} \right)^2 \quad (\text{B.0.1-2})$$

式中 t_i ——结构建成至钢筋开始锈蚀的时间，a；
 K_k ——碳化速率影响系数，按表 B.0.1-1 取用；
 K_c ——保护层厚度影响系数，按表 B.0.1-2 取用；
 K_m ——局部环境影响系数，按表 B.0.1-3 取用；
 c ——保护层厚度实测值，mm；
 x_c ——碳化残量，mm，按式 (B.0.4) 计算；
 k ——碳化系数，按式 (B.0.2) 计算。

表 B.0.1-1 碳化速率影响系数 K_k

碳化系数 $k/(mm/\sqrt{a})$	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0
K_k	2.27	1.54	1.20	0.94	0.80	0.71	0.64

注：碳化系数 k 按式 (B.0.2) 计算。

表 B.0.1-2 保护层厚度影响系数 K_c

保护层厚度 c /mm	10	15	20	25	30	40	50	60
K_c	0.75	1.00	1.28	1.62	1.86	2.57	3.26	3.91

注：保护层厚度 c 按实测值计算。

表 B.0.1-3 局部环境系数 K_m

局部环境系数 m	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
K_m	1.51	1.24	1.05	0.94	0.85	0.78	0.73

注：局部环境系数 m 按表 B.0.3 取用。

B.0.2 碳化系数 k 应按式 (B.0.2) 计算：

$$k = \frac{x_c}{\sqrt{t_c}} \quad (\text{B.0.2})$$

式中 x_c —— 实测碳化深度，mm；

t_c —— 结构建成至检测时的时间，a。

注1：碳化深度测区与评定钢筋锈蚀部位一致，测区不在构件角部时，角部的碳化深度可取非角部的1.4倍；

注2：计算未考虑遮盖层的作用。

B.0.3 不同环境等级和条件的局部环境系数 m 可按表 B.0.3 取值。

表 B.0.3 环境等级及局部环境系数 m

环境作用等级	条 件	局部环境系数 m
I-A	干燥环境	1.0
I-B	长期处于内河水下或土中、 室内潮湿环境（相对湿度≥75%）	1.5~2.5
	室内高温、高湿度变化环境	2.5~4.0
	室内干湿交替环境（表面有水或结露）	3.0~4.0
I-C	干燥地区室外环境（湿度≤75%，室外降雨）	3.5~4.0
	水位变化区、湿热地区室外环境 （室外降雨），室外大气污染环境	4.0~4.5

注：当在气态介质的弱腐蚀和中等腐蚀时，局部环境系数考虑具体情况，取用大值。

B.0.4 碳化残量 x_c 可按式 (B.0.4) 计算：

$$x_c = (1.2 - 0.35 k^{0.9}) D_c - \frac{6.0}{m - 1.5} (1.5 - 0.84k) \quad (\text{B.0.4})$$

式中 x_c ——碳化残量, mm;

k ——碳化系数, 按式 (B.0.2) 计算;

D_c ——与保护层厚度及碳化系数有关的参数。当 $c \leq 28$ mm 时: 若 $k \geq 0.8$, $D_c = c$, 若 $k < 0.8$, $D_c = c - 0.16/k$; 当 $c > 28$ mm 时: 若 $k \geq 1.0$ ($k > 3.3$ 取 $k = 3.3$), $D_c = c - 0.056(c - 28)^{0.16}$, 若 $k < 1.0$, $D_c = c - 0.389(c - 28)(0.16/k)^{0.16}$;

m ——局部环境系数, 按表 B.0.3 取用。

B.0.5 钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间 t_r 应考虑保护层厚度、混凝土强度、钢筋直径、环境温度、环境湿度以及局部环境的影响, 可采用查表法按式 (B.0.5-1) 估算或采用直接算法按式 (B.0.5-2) 估算:

$$t_r = t_0 \cdot H_c \cdot H_f \cdot H_d \cdot H_T \cdot H_{RH} \cdot H_m \quad (\text{B.0.5-1})$$

$$t_r = \frac{\delta_{cr}}{\lambda_0} \quad (\text{B.0.5-2})$$

式中 t_0 ——钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间, a;

t_0 ——特定条件下 (各项影响系数为 1.0 时) 构件自钢筋开始锈蚀到保护层锈胀开裂的时间, a, 对室外杆件取 $t_0 = 1.9$, 室外墙、板取 $t_0 = 3.9$; 对室内杆件取 $t_0 = 3.8$, 室内墙、板取 $t_0 = 11.0$;

H_c ——保护层厚度对保护层锈胀开裂时间的影响系数, 按表 B.0.5-1 取用;

H_f ——混凝土强度对保护层锈胀开裂时间的影响系数, 按表 B.0.5-2 取用;

H_d ——钢筋直径对保护层锈胀开裂时间的影响系数, 按表 B.0.5-3 取用;

H_T ——环境温度对保护层锈胀开裂时间的影响系数, 按表 B.0.5-4 取用;

H_{RH} ——环境湿度对保护层锈胀开裂时间的影响系数, 按表

B.0.5-5 取用；

H_{e} ——局部环境对保护层锈胀开裂时间的影响系数，按表

B.0.5-6 取用；

δ_{cr} ——保护层锈胀开裂时的临界钢筋锈蚀深度，mm，按

B.0.6 条估算；

λ_{c} ——保护层锈胀开裂前的年平均钢筋锈蚀速率，mm/a，

按 B.0.7 条估算。

表 B.0.5-1 保护层厚度对保护层锈胀开裂时间的影响系数 H_{e}

保护层厚度/mm		10	15	20	25	30	40	50	50	
H_{e}	室外	杆件	0.65	1.00	1.34	1.70	2.06	2.93	3.82	4.55
	墙、板	0.62	1.00	1.48	2.07	2.75	4.62	6.80	9.49	
室内	杆件	0.65	1.00	1.36	1.73	2.13	3.02	3.95	5.03	
	墙、板	0.51	1.00	1.51	2.14	2.92	4.97	7.40	10.41	

表 B.0.5-2 混凝土强度对保护层锈胀开裂时间的影响系数 H_{f}

混凝土强度 /MPa		10	15	20	25	30	40	50	50	
H_{f}	室外	杆件	0.27	0.47	0.86	1.39	2.04	2.94	3.59	6.59
	墙、板	0.17	0.41	0.76	1.26	1.92	2.76	3.79	6.25	
室内	杆件	0.21	0.48	0.89	1.44	2.15	3.04	4.13	6.59	
	墙、板	0.17	0.41	0.77	1.27	1.94	2.79	3.83	6.23	

表 B.0.5-3 钢筋直径对保护层锈胀开裂时间的影响系数 H_{d}

钢筋直径/mm		4	8	12	16	20	25	28	32	36	
H_{d}	室外	杆件	2.42	1.66	1.40	1.27	1.19	1.15	1.10	1.00	0.95
	墙、板	0.05	2.11	1.59	1.25	1.12	1.02	0.99	0.96	0.93	
室内	杆件	2.23	1.52	1.29	1.17	1.10	1.04	1.02	1.00	0.98	
	墙、板	0.10	1.57	1.34	1.11	1.03	0.92	0.88	0.85	0.83	

表 B.0.5-4 环境温度对保护层锈胀开裂时间的影响系数 H_T

环境温度 / °C		4	8	12	16	20	24	28	
H_T	室外	杆件	1.50	1.42	1.34	1.27	1.20	1.16	1.09
		墙、板	1.39	1.31	1.24	1.17	1.11	1.06	1.01
	室内	杆件	1.38	1.31	1.24	1.17	1.11	1.06	1.01
		墙、板	1.25	1.19	1.11	1.05	1.00	0.95	0.91

表 B.0.5-5 环境温度对保护层锈胀开裂时间的影响系数 H_{RH}

环境湿度 / %		55	60	65	70	75	80	85	
H_{RH}	室外	杆件	2.46	1.88	1.51	1.30	1.16	1.04	1.04
		墙、板	2.25	1.70	1.40	1.21	1.07	0.97	0.97
	室内	杆件	2.04	1.91	1.49	1.21	1.02	0.92	0.92
		墙、板	2.24	1.73	1.32	1.09	0.94	0.82	0.83

表 B.0.5-6 局部环境对保护层锈胀开裂时间的影响系数 H_m

局部环境系数 m		1.0	1.5	1.9	2.5	3.2	3.5	4.5	
H_m	室外	杆件	3.74	2.49	1.87	1.50	1.28	1.07	0.85
		墙、板	3.50	2.33	1.75	1.40	1.17	1.00	0.78
	室内	杆件	3.40	2.27	1.73	1.36	1.13	0.87	0.76
		墙、板	3.09	2.05	1.55	1.24	1.03	0.88	0.59

B.0.6 临界钢筋锈蚀深度 δ_c 可根据结构类型和钢筋部位分别按式 (B.0.6-1) 和式 (B.0.6-2) 估算:

杆件 (角部钢筋)

$$\delta_c = 0.012c/d + 0.00084f_{m,sk} + 0.018 \quad (\text{B.0.6-1})$$

墙、板 (非角部钢筋)

$$\delta_c = 0.015(c/d)^{1.15} + 0.0014f_{m,sk} + 0.016 \quad (\text{B.0.6-2})$$

式中 δ_c ——保护层锈胀开裂时的临界钢筋锈蚀深度, mm;

c ——钢筋保护层厚度实测值, mm;

d ——钢筋直径, mm;

f_{cd} ——混凝土抗压强度设计标准值，MPa。

B.0.7 保护层锈胀开裂前年平均钢筋锈蚀速率 λ_r 可根据室内或室外分别按式(B.0.7-1)和式(B.0.7-2)估算：

室外

$$\lambda_r = 7.53K_{jm}(0.75 - 0.0125T)(RH - 0.45)^{2.0}c^{-0.15}f_{cd}^{-1.4} \quad (\text{B.0.7-1})$$

室内

$$\lambda_r = 5.92K_{jm}(0.75 + 0.0125T)(RH - 0.5)^{2.0}c^{-0.15}f_{cd}^{-1.4} \quad (\text{B.0.7-2})$$

式中 λ_r ——保护层锈胀开裂前的年平均钢筋锈蚀速率，mm/a；

K_{jm} ——钢筋位置影响系数，钢筋位于角部时 $K_{jm}=1.6$ ；钢筋位于非角部时 $K_{jm}=1.0$ ；

m ——局部环境系数，按表B.0.3取用；

T ——年平均温度，℃；

RH ——年平均相对湿度， $RH > 0.8$ 时，取 $RH = 0.80$ ；

c ——钢筋保护层厚度，mm；

f_{cd} ——混凝土抗压强度设计标准值，MPa。

B.0.8 钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间 t_c 应考虑保护层厚度、混凝土强度、钢筋直径、环境温度、环境湿度以及局部环境的影响，可按式(B.0.8-1)或式(B.0.8-2)估算，其中式(B.0.8-1)为查表法，式(B.0.8-2)为直接计算法：

$$t_c = BF_c F_r F_d F_e F_{RH} F_m \quad (\text{B.0.8-1})$$

$$t_c = t_0 + \frac{\delta_a - \delta_r}{\lambda} \quad (\text{B.0.8-2})$$

式中 t_c ——钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，a；

B ——特定条件下（各项影响系数为1.0时），自钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，对室外杆件取 $B=7.0a$ ，室外墙、板取 $B=$

0.8.09; 对室内杆件取 $B = 3.84$, 室内墙、板取 $B = 14.48$;

F_1 ——保护层厚度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的的影响系数, 按表 B.0.8-1 取用;

F_2 ——混凝土强度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的的影响系数, 按表 B.0.8-2 取用;

F_3 ——钢筋直径对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的的影响系数, 按表 B.0.8-3 取用;

F_4 ——环境温度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的的影响系数, 按表 B.0.8-4 取用;

F_{RH} ——环境湿度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的的影响系数, 按表 B.0.8-5 取用;

F_m ——局部环境对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的的影响系数, 按表 B.0.8-6 取用;

t_1 ——钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间, a, 按 B.0.9 条估算;

δ_2 ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤时的钢筋锈蚀深度, mm, 按 B.0.9 条估算;

δ_{cr} ——保护层锈胀开裂时的临界钢筋锈蚀深度, mm, 按 B.0.9 条估算;

λ_1 ——保护层锈胀开裂后的年平均钢筋锈蚀速率, mm/a, 按 B.0.10 条估算。

表 B.0.8-1 保护层厚度对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的的影响系数 F_1

保护层厚度/mm		10	15	20	25	30	40	50	60	
F_1	室外	杆件	0.87	1.00	1.17	1.30	1.54	1.91	2.43	3.03
		墙、板	0.77	1.00	1.24	1.45	1.76	2.34	2.98	3.69
	室内	杆件	0.78	1.00	1.23	1.44	1.59	2.13	2.81	3.45
		墙、板	0.71	1.00	1.26	1.53	1.80	2.45	3.17	3.94

表 B.0.8-2 混凝土强度对混凝土表面出现可接受
最大外观损伤时间的影响系数 F_t

混凝土强度/MPa		10	15	20	25	30	35	40	50	60	
F_t	室外	杆件	0.29	0.69	0.52	1.25	1.64	2.16	2.73	4.14	5.74
		墙、板	0.31	0.59	0.55	1.23	1.81	2.48	3.24	4.96	7.15
	室内	杆件	0.34	0.52	0.33	1.33	1.85	2.49	3.24	4.94	7.03
		墙、板	0.31	0.56	0.55	1.35	1.94	2.65	3.52	5.55	8.12

表 B.0.8-3 钢筋直径对混凝土表面出现可接受
最大外观损伤时间的影响系数 F_d

钢筋直径/mm		4	8	12	16	20	25	28	32	36	
F_d	室外	杆件	0.86	1.11	1.33	1.23	1.26	1.23	1.22	1.21	1.20
		墙、板	0.91	1.34	1.47	1.56	1.30	1.25	1.24	1.23	1.22
	室内	杆件	0.91	1.14	1.32	1.27	1.24	1.21	1.20	1.19	1.18
		墙、板	0.92	1.40	1.41	1.20	1.23	1.19	1.17	1.16	1.15

表 B.0.8-4 环境温度对混凝土表面出现可接受
最大外观损伤时间的影响系数 F_T

环境温度/°C		4	8	12	16	20	24	28	
F_T	室外	杆件	1.30	1.33	1.27	1.22	1.18	1.13	1.10
		墙、板	1.43	1.41	1.35	1.27	1.22	1.16	1.12
	室内	杆件	1.42	1.35	1.28	1.22	1.16	1.12	1.07
		墙、板	1.43	1.35	1.28	1.22	1.16	1.11	1.03

表 B.0.8-5 环境湿度对混凝土表面出现可接受
最大外观损伤时间的影响系数 F_{xs}

环境湿度/%		55	60	65	70	75	80	85	
F_{xs}	室外	杆件	2.07	1.64	1.40	1.24	1.13	1.06	1.06
		墙、板	2.30	1.79	1.50	1.31	1.18	1.08	1.08
	室内	杆件	2.65	1.91	1.46	1.25	1.11	1.00	1.00
		墙、板	3.08	1.96	1.51	1.25	1.10	0.98	0.98

表 B.0.8-6 局部环境对混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的影响系数 F_m

局部环境系数 m		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
F_m	室外	杆件	3.15	2.14	1.67	1.58	1.20	1.06	0.95	0.88
		墙、板	2.53	2.39	1.82	1.49	1.26	1.10	0.98	0.89
	室内	杆件	3.27	2.23	1.71	1.40	1.16	1.05	0.93	0.85
		墙、板	3.43	2.30	1.75	1.41	1.18	1.03	0.91	0.82

注：局部环境系数 m 按表 B.0.8 取用。

B.0.9 混凝土表面出现可接受最大外观损伤时的钢筋锈蚀深度 δ_a 可根据结构和钢筋特征按式 (B.0.9-1)、式 (B.0.9-2)、式 (B.0.9-3) 分别估算：

当配有圆形钢筋的杆件时：

$$\delta_a = 0.255 + 0.012c/d + 0.00081f_{cu,k} \quad (\text{B.0.9-1})$$

当配有带肋钢筋的杆件时：

$$\delta_a = 0.273 + 0.008c/d + 0.00055f_{cu,k} \quad (\text{B.0.9-2})$$

当墙、板类构件时：

$$\delta_a = 0.3 \quad (\text{B.0.9-3})$$

式中 δ_a ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤时的钢筋锈蚀深度，mm；

c ——钢筋保护层厚度，mm；

d ——钢筋直径，mm；

$f_{cu,k}$ ——混凝土抗压强度评定值，MPa。

B.0.10 保护层锈胀开裂后年平均钢筋锈蚀速率 λ_1 可按式 (B.0.10) 估算：

$$\lambda_1 = (4.5 - 340\lambda_0)\lambda_0 \quad (\text{B.0.10})$$

式中 λ_1 ——保护层锈胀开裂后的年平均钢筋锈蚀速率，mm/a；

λ_0 ——保护层锈胀开裂前的年平均钢筋锈蚀速率，mm/a，

按 B.0.7 条估算。

注：当 $\lambda_1 < 1.8\lambda_0$ 时，取 $\lambda_1 = 1.8\lambda_0$ 。

附录 C 氯离子侵蚀引起的钢筋 锈蚀过程分析

C.0.1 符合下列条件时可不考虑氯离子的扩散系数的时间依赖性:

- 1 氯离子扩散系数趋于稳定或偏保守估算时。
- 2 水胶比 ≥ 0.55 。

C.0.2 氯盐环境下钢筋开始锈蚀时间 t_r 应根据保护层厚度、氯离子扩散系数、混凝土表面氯离子浓度和局部环境的影响确定。符合 C.0.1 条件的对于 II-E 环境可按式 (C.0.2-1) 计算, 对于 II-D 环境可按式 (C.0.2-2) 计算; 不符合 C.0.1 条件的可按式 (C.0.2-3) 计算。

$$t_r = \left(\frac{c}{K}\right)^2 \times 10^{-6} \quad (\text{C.0.2-1})$$

$$t_r = \left(\frac{c}{K}\right)^2 \times 10^{-6} - 0.2t_s \quad (\text{C.0.2-2})$$

$$t_r = \left\{ \frac{c^2 \times 10^{-6}}{4D_c \left[\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{M_{cr}}{M_s} \right) \right]^2} \right\}^{1/2} \quad (\text{C.0.2-3})$$

- 式中 t_r ——钢筋开始锈蚀时间, a;
- c ——混凝土保护层厚度, mm;
- K ——氯离子侵蚀系数;
- t_s ——混凝土表面氯离子达到稳定值的累计时间, a, 按表 C.0.5 取用;
- D_c ——检测时刻的氯离子扩散系数, m^2/a ;
- erf^{-1} ——误差函数的反函数, 可以通过计算获得, 也可以通过附录 D 查表或内插取值;
- M_{cr} ——钢筋锈蚀临界氯离子浓度, kg/m^3 ;

M_s ——混凝土表面氯离子浓度, kg/m^3 ;

α ——氯离子扩散系数时间依赖系数, 一般用实测推算值。

C.0.3 氯离子侵蚀系数 K 可根据氯离子扩散系数、钢筋锈蚀临界氯离子浓度和混凝土表面氯离子浓度按式 (C.0.3) 计算或按表 C.0.3 选用或内插取值。

$$K = 2\sqrt{D} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{M_s}{M_c} \right) \quad (\text{C.0.3})$$

式中 K ——氯离子侵蚀系数;

D ——氯离子扩散系数, m^2/a , 按芯样实测值或 C.0.4 条确定;

erf^{-1} ——误差函数的反函数, 可以通过计算获得, 也可以通过附录 D 查表或内插取值;

M_c ——钢筋锈蚀临界氯离子浓度, kg/m^3 ;

M_s ——混凝土表面氯离子浓度, kg/m^3 。

表 C.0.3 氯离子侵蚀系数 K

M_s/M_c	$D/10^{-10}(\text{m}^2/\text{a})$								
	0.80	1.00	1.40	1.80	2.20	2.60	3.00	3.40	3.80
	$K/10^{-2}$								
0.10	1.80	2.33	2.75	3.12	3.45	3.75	4.03	4.27	4.53
0.15	1.57	2.04	2.41	2.73	3.02	3.28	3.52	3.75	3.97
0.20	1.40	1.81	2.14	2.43	2.69	2.92	3.14	3.34	3.54
0.25	1.26	1.63	1.92	2.18	2.4	2.59	2.82	3.00	3.17
0.30	1.14	1.47	1.73	1.97	2.17	2.36	2.54	2.70	2.86
0.35	1.02	1.32	1.55	1.77	1.96	2.13	2.29	2.44	2.58
0.40	0.92	1.18	1.41	1.60	1.77	1.92	2.06	2.19	2.32
0.45	0.83	1.07	1.28	1.43	1.58	1.72	1.85	1.97	2.08
0.50	0.74	0.95	1.13	1.28	1.41	1.54	1.65	1.76	1.85
0.55	0.68	0.85	1.00	1.13	1.25	1.35	1.45	1.55	1.63
0.60	0.63	0.74	0.85	1.00	1.10	1.20	1.28	1.37	1.45

表 C.0.3 (续)

M_w/M_s	$D/(10^{-11}m^2/a)$								
	0.60	1.00	1.40	1.80	2.20	2.50	3.00	3.40	3.80
	$K/10^{-2}$								
0.65	0.59	0.64	0.76	0.90	0.95	1.04	1.11	1.15	1.25
0.70	0.42	0.55	0.65	0.75	0.81	0.88	0.94	1.01	1.06
0.75	0.35	0.45	0.53	0.61	0.57	0.75	0.78	0.83	0.88
0.80	0.28	0.36	0.42	0.48	0.53	0.58	0.62	0.66	0.70
0.85	0.21	0.27	0.36	0.36	0.40	0.45	0.48	0.49	0.52
0.90	0.14	0.18	0.24	0.24	0.26	0.27	0.31	0.32	0.35

注1: 混凝土在制备时含有氯离子(浓度为 M_{cl})时,在式(C.0.3)及本表中,以 (M_w-M_{cl}) 、 (M_s-M_{cl}) 取代 M_w 、 M_s 。
注2: 若 M_w/M_s 值为1.50时,可取 D 为0.14;若 M_w/M_s 值远大于1,则基本不存在钢筋锈蚀风险。

C.0.4 未取得实测氯离子扩散系数时,氯离子扩散系数 D 应按下列规定取用:

1 应优先根据混凝土中氯离子分布检测结果由式(C.0.4-1)推算:

$$D_0 = \frac{x^2 \times 10^4}{4t_0 \left\{ \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{M(x, t_0)}{M_s} \right] \right\}^2} \quad (\text{C.0.4-1})$$

式中 D_0 ——氯离子扩散系数, m^2/a ;

x ——氯离子扩散深度, mm;

t_0 ——结构建成至检测时的时间, a;

$M(x, t_0)$ ——检测时 x 深度处的氯离子浓度, kg/m^3 ;

M_s ——实测混凝土表面氯离子浓度, kg/m^3 , 潮汐区和浪溅区按表 C.0.7 取用, 大气区按 C.0.8 条规定估算。

注: 当符合 C.0.2 条规定时, 取 $D=D_0$ 。

2 需要考虑氯离子扩散系数时间依赖性时, 可按式(C.0.4-2)估算:

$$D = D_0 (t_0/t)^\alpha \quad (\text{C.0.4-2})$$

式(C.0.4-2)中 α 值宜用每隔2~3年实测数据推算的 D 值确定,不能实测时,可按式(C.0.4-3)确定:

$$\alpha = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (\text{C.0.4-3})$$

式中 %FA——粉煤灰占胶凝材料的百分比;

%SG——磨细矿渣占胶凝材料的百分比。

3 无实测数据时,普通硅酸盐水泥混凝土龄期5年的氯离子扩散系数可按式(C.0.4-4)估算:

$$D_{5a} = (7.08W/B - 1.846)(0.0447T - 0.052) \quad (\text{C.0.4-4})$$

式中 D_{5a} ——龄期5年的氯离子扩散系数, $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$;

W/B ——混凝土水胶比;

T ——环境年平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

C.0.5 渗入型氯盐侵蚀环境下混凝土表面氯离子达到稳定值的累计时间 t_1 应按表C.0.5确定。

表 C.0.5 氯离子侵蚀环境混凝土表面氯离子达到稳定值的累计时间

环境作用等级	环境类别及环境状况		混凝土表面氯离子达到稳定值的累计时间 t_1/a	局部环境系数 m_e	
				室外	室内
II-D	近海大气 轻度盐雾 环境	离海岸1.0km以内	20~35	4.0~	2.0~
		离海岸0.5km以内	15~25		
		离海岸0.25km以内	10~15		
		海上轻度盐雾作用区; 离海岸0.1km以内	10		
II-E	水位变化区、浪溅区	铸石	4.5~5.5		
	除冰盐环境;近海大气重度盐雾环境;离海岸50m以内的陆上室外大气环境	检测结果确定	4.5~5.5		

注1: 渗入型氯盐侵蚀环境是指外部环境氯离子向混凝土内部渗入的环境。
注2: 近海大气环境的参数适用于空旷无遮挡的构件。

C.0.6 钢筋锈蚀临界氯离子浓度 M_{cr} 可按表 C.0.6 取用。

表 C.0.6 钢筋锈蚀临界氯离子浓度 M_{cr}

f_{cu}/MPa	40	30	≤ 25
$M_{cr}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.4(0.4%)	1.3(0.37%)	1.2(0.34%)

注1: M_{cr} 为总氯值,括号内百分数为氯离子占混凝土材料的重量比。
 注2: 视环境条件、混凝土材料性能差异, M_{cr} 取值可在 0.3%~0.5%内适当调整。
 注3: 混凝土强度等级高于 C40 时,混凝土强度每增加 10MPa,临界氯离子浓度增加 0.1kg/m³。

C.0.7 潮汐区、浪溅区混凝土表面氯离子浓度 M_s 应采用调查值或实测数据推算值,实测值宜取距表面 10mm 左右深度的最大浓度值。当缺乏有效的实测数据时,可参照表 C.0.7 取用。

表 C.0.7 潮汐区、浪溅区混凝土表面氯离子浓度 M_s

f_{cu}/MPa	40	30	25	20
$M_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	8.1	10.5	12.9	15.0

注: 离于海面 15m 以内的非雾区可按本表取用,达到稳定值的累积时间 t_s 可取 10 年。

C.0.8 近海大气区混凝土表面氯离子浓度 M_s 应先通过实测并按下列规定确定:

1 混凝土表面氯离子浓度可按下列公式确定:

$$M_s = k_s \sqrt{t_s} \quad (\text{C.0.8-1})$$

$$k_s = M_s / \sqrt{t_s} \quad (\text{C.0.8-2})$$

式中 M_s ——混凝土表面氯离子浓度, kg/m³;

k_s ——混凝土表面氯离子聚集系数;

t_s ——混凝土表面氯离子浓度达到稳定值的时间, a, 按表 C.0.8 取用;

M_s ——实测的表面氯离子浓度, kg/m³, 一般取距表面 10mm 左右深度的最大浓度值;

t_0 ——结构建成至检测时的时间，当 $t_0 > t_1$ 时，取 $t_0 = t_1$ 。

2 缺乏有效的实测数据时，距海岸 0.1km 处混凝土表面氯离子浓度可按表 C.0.8-1 取用，其他位置氯离子表面浓度可按表 C.0.8-1 中数据与表 C.0.8-2 中修正系数的乘积计算。

表 C.0.8-1 距海岸 0.1km 处混凝土表面氯离子浓度 M_s

f_{mk}/MPa	40	30	25	20
$M_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	3.2	4.0	4.6	5.2

表 C.0.8-2 表面氯离子浓度修正系数

离海岸距离/km	海岸线附近	0.1	0.25	0.5	1.0
修正系数	1.93	1.0	0.56	0.41	0.33

C.0.9 钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂时间 t_r 可用查表法或公式计算获得。浪溅区可按表 C.0.9 取用，近海大气区可用表 C.0.9 中数据与 $\sqrt{f_{0M_s}}$ 乘积计算；或可按式 (C.0.9) 估算：

表 C.0.9 浪溅区构件钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间 t_r

气候条件	混凝土强度等级	构件类型	保护层厚度/mm					
			20	30	40	50	60	
t _r /a	南方	C25	杆件	1.6	2.1	2.5	3.1	3.5
			墙、板	2.0	2.7	3.6	4.5	5.5
		C30	杆件	1.8	2.2	2.8	3.4	3.9
			墙、板	2.3	3.1	4.0	5.0	6.1
	北方	C35	杆件	2.0	2.5	3.1	3.8	4.4
			墙、板	2.6	3.4	4.3	5.4	6.5
		C40	杆件	2.3	2.9	3.6	4.3	4.9
			墙、板	2.9	3.8	4.8	6.0	7.1

表 C.0.9 (续)

气候条件	混凝土 强度等级	构件类型	保护层厚度/mm					
			20	30	40	50	60	
t_e/a	北方	C25	杆件	2.8	3.6	4.4	5.2	6.0
			墙、板	3.4	4.7	6.1	7.7	9.5
		C30	杆件	3.1	4.0	4.9	5.8	6.8
			墙、板	3.9	5.3	6.8	8.5	10.4
		C35	杆件	3.4	4.4	5.3	6.2	7.0
			墙、板	4.4	5.8	7.4	9.2	11.1
		C40	杆件	3.9	4.9	5.8	6.7	7.6
			墙、板	5.0	6.6	8.3	10.1	12.1

注：南方地区系指月平均最低气温大于0℃的地区。

$$t_e = \frac{\delta_r}{\lambda_e} \quad (\text{C.0.9})$$

式中 t_e ——钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间, a;
 δ_r ——保护层开裂时的钢筋临界锈蚀深度, mm, 按 B.0.6 条确定;
 λ_e ——氯盐侵蚀环境保护层开裂前钢筋年平均锈蚀速率, mm/a, 按 C.0.10 条估算。

C.0.10 保护层开裂前钢筋年平均锈蚀速率 λ_e , 可按式 (C.0.10) 计算:

$$\lambda_e = 11.6 \times I \times 10^{-5} \quad (\text{C.0.10})$$

式中 λ_e ——氯盐侵蚀环境保护层开裂前钢筋年平均锈蚀速率, mm/a;

I ——钢筋腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 按 C.0.11 条估算。

C.0.11 普通硅酸盐混凝土钢筋腐蚀电流密度 I 可按下列公式估算:

- 1 掺入型氯离子侵蚀环境 ($M_d > M_{d0}$):

$$\ln I = 8.617 + 0.618 \ln \left[M_d \left(\frac{11.1}{M_d^{0.5} t^{0.93}} + 0.368 \right) \right] - \frac{3034}{T_c - 273} - 5 \times 10^{-4} \rho + \ln m_a \quad (\text{C. 0.11-1})$$

2 渗入型氯离子侵蚀环境:

$$\ln I = 8.617 + 0.618 M_d - \frac{3034}{T_c + 273} - 5 \times 10^{-4} \rho + \ln m_a \quad (\text{C. 0.11-2})$$

$$M_d = M_{se} - (M_s - M_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c \times 10^{-3}}{2 \sqrt{Dc_{cr}}} \right) \right] \quad (\text{C. 0.11-3})$$

$$\rho = k_p (1.8 - M_0) + 10(RH - 1)^2 + 4 \quad (\text{C. 0.11-4})$$

- 式中 M_{se} ——钢筋表面氯离子浓度, kg/m^3 ;
 m_a ——氯盐环境局部环境系数, 按表 C. 0.5 取用;
 T_c ——钢筋处温度, $^{\circ}\text{C}$, 可用大气环境温度;
 ρ ——混凝土电阻率, $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$, 可按实测值取用, 也可按式 (C. 0.11-4) 计算;
 k_p ——电阻率系数。当水胶比 $W/B=0.3 \sim 0.4$ 或 C40~C50 时, $k_p=11.1$; 当水胶比 $W/B=0.5 \sim 0.6$ 或 C20~C30 时, $k_p=5.5$;
 M_0 ——混凝土保护层中氯离子浓度平均值, kg/m^3 , $M_0 > 3.6$ 时, 取 $M_0=3.6$;
 RH ——环境相对湿度;
 M_s ——混凝土制备时氯离子的初始含量, kg/m^3 。

C. 0.12 钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间 t_c 可按式 (C. 0.12) 估算:

$$t_c = t_r + \frac{\delta_a - \delta_{cr}}{\lambda_{cl}} \quad (\text{C. 0.12})$$

式中 t_c ——钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间, a ;

t_c ——钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间, a, 按 C.0.9 条估算;

δ_d ——混凝土表面出现可接受最大外观损伤时的钢筋锈蚀深度, mm, 按 B.0.9 条估算;

δ_{cr} ——保护层锈胀开裂时的临界钢筋锈蚀深度, mm, 按 B.0.6 条估算;

λ_{cl} ——保护层锈胀开裂后的年平均钢筋锈蚀速率, mm/a, 按 C.0.13 条估算。

C.0.13 保护层开裂后年平均钢筋锈蚀速率 λ_{cl} , 可按式 (C.0.13) 估算:

$$\lambda_{cl} = (4.5 - 25\lambda_d)\lambda_c \quad (\text{C.0.13})$$

式中 λ_{cl} ——保护层锈胀开裂后的年平均钢筋锈蚀速率, mm/a;

λ_c ——保护层锈胀开裂前的年平均钢筋锈蚀速率, mm/a, 按 C.0.10 条估算。

注: 当 $\lambda_{cl} < 1.5\lambda_c$ 时, 取 $\lambda_{cl} = 1.5\lambda_c$ 。

附录 D erf^{-1} 表

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.01	0.000	0.000	0.010	0.011	0.012	0.013	0.015	0.016	0.019	0.016
0.02	0.012	0.013	0.019	0.020	0.021	0.021	0.023	0.025	0.025	0.025
0.03	0.017	0.017	0.023	0.023	0.024	0.025	0.027	0.028	0.029	0.030
0.04	0.023	0.023	0.027	0.028	0.029	0.029	0.031	0.032	0.033	0.034
0.05	0.029	0.029	0.033	0.034	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039
0.06	0.035	0.035	0.038	0.039	0.040	0.040	0.041	0.042	0.043	0.044
0.07	0.041	0.041	0.044	0.045	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050
0.08	0.047	0.047	0.049	0.050	0.051	0.051	0.052	0.053	0.054	0.055
0.09	0.053	0.053	0.055	0.056	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.061
0.10	0.059	0.059	0.061	0.062	0.062	0.063	0.064	0.065	0.066	0.067
0.11	0.065	0.065	0.066	0.067	0.068	0.068	0.069	0.070	0.071	0.072
0.12	0.071	0.071	0.072	0.073	0.074	0.074	0.075	0.076	0.077	0.078
0.13	0.076	0.076	0.077	0.078	0.079	0.079	0.080	0.081	0.082	0.083
0.14	0.082	0.082	0.083	0.084	0.085	0.085	0.086	0.087	0.088	0.089
0.15	0.089	0.089	0.090	0.091	0.092	0.092	0.093	0.094	0.095	0.096
0.16	0.096	0.096	0.097	0.098	0.099	0.099	0.100	0.101	0.102	0.103
0.17	0.103	0.103	0.104	0.105	0.106	0.106	0.107	0.108	0.109	0.110
0.18	0.110	0.110	0.111	0.112	0.113	0.113	0.114	0.115	0.116	0.117
0.19	0.117	0.117	0.118	0.119	0.120	0.120	0.121	0.122	0.123	0.124
0.20	0.124	0.124	0.125	0.126	0.127	0.127	0.128	0.129	0.130	0.131
0.21	0.131	0.131	0.132	0.133	0.134	0.134	0.135	0.136	0.137	0.138
0.22	0.138	0.138	0.139	0.140	0.141	0.141	0.142	0.143	0.144	0.145
0.23	0.145	0.145	0.146	0.147	0.148	0.148	0.149	0.150	0.151	0.152
0.24	0.152	0.152	0.153	0.154	0.155	0.155	0.156	0.157	0.158	0.159
0.25	0.159	0.159	0.160	0.161	0.162	0.162	0.163	0.164	0.165	0.166
0.26	0.166	0.166	0.167	0.168	0.169	0.169	0.170	0.171	0.172	0.173
0.27	0.173	0.173	0.174	0.175	0.176	0.176	0.177	0.178	0.179	0.180
0.28	0.180	0.180	0.181	0.182	0.183	0.183	0.184	0.185	0.186	0.187
0.29	0.187	0.187	0.188	0.189	0.190	0.190	0.191	0.192	0.193	0.194
0.30	0.194	0.194	0.195	0.196	0.197	0.197	0.198	0.199	0.200	0.201
0.31	0.201	0.201	0.202	0.203	0.204	0.204	0.205	0.206	0.207	0.208
0.32	0.208	0.208	0.209	0.210	0.211	0.211	0.212	0.213	0.214	0.215
0.33	0.215	0.215	0.216	0.217	0.218	0.218	0.219	0.220	0.221	0.222
0.34	0.222	0.222	0.223	0.224	0.225	0.225	0.226	0.227	0.228	0.229
0.35	0.229	0.229	0.230	0.231	0.232	0.232	0.233	0.234	0.235	0.236
0.36	0.236	0.236	0.237	0.238	0.239	0.239	0.240	0.241	0.242	0.243
0.37	0.243	0.243	0.244	0.245	0.246	0.246	0.247	0.248	0.249	0.250
0.38	0.250	0.250	0.251	0.252	0.253	0.253	0.254	0.255	0.256	0.257
0.39	0.257	0.257	0.258	0.259	0.260	0.260	0.261	0.262	0.263	0.264
0.40	0.264	0.264	0.265	0.266	0.267	0.267	0.268	0.269	0.270	0.271
0.41	0.271	0.271	0.272	0.273	0.274	0.274	0.275	0.276	0.277	0.278
0.42	0.278	0.278	0.279	0.280	0.281	0.281	0.282	0.283	0.284	0.285
0.43	0.285	0.285	0.286	0.287	0.288	0.288	0.289	0.290	0.291	0.292
0.44	0.292	0.292	0.293	0.294	0.295	0.295	0.296	0.297	0.298	0.299
0.45	0.299	0.299	0.300	0.301	0.302	0.302	0.303	0.304	0.305	0.306
0.46	0.306	0.306	0.307	0.308	0.309	0.309	0.310	0.311	0.312	0.313
0.47	0.313	0.313	0.314	0.315	0.316	0.316	0.317	0.318	0.319	0.320
0.48	0.320	0.320	0.321	0.322	0.323	0.323	0.324	0.325	0.326	0.327
0.49	0.327	0.327	0.328	0.329	0.330	0.330	0.331	0.332	0.333	0.334
0.50	0.334	0.334	0.335	0.336	0.337	0.337	0.338	0.339	0.340	0.341
0.51	0.341	0.341	0.342	0.343	0.344	0.344	0.345	0.346	0.347	0.348
0.52	0.348	0.348	0.349	0.350	0.351	0.351	0.352	0.353	0.354	0.355
0.53	0.355	0.355	0.356	0.357	0.358	0.358	0.359	0.360	0.361	0.362
0.54	0.362	0.362	0.363	0.364	0.365	0.365	0.366	0.367	0.368	0.369
0.55	0.369	0.369	0.370	0.371	0.372	0.372	0.373	0.374	0.375	0.376
0.56	0.376	0.376	0.377	0.378	0.379	0.379	0.380	0.381	0.382	0.383
0.57	0.383	0.383	0.384	0.385	0.386	0.386	0.387	0.388	0.389	0.390
0.58	0.390	0.390	0.391	0.392	0.393	0.393	0.394	0.395	0.396	0.397
0.59	0.397	0.397	0.398	0.399	0.400	0.400	0.401	0.402	0.403	0.404
0.60	0.404	0.404	0.405	0.406	0.407	0.407	0.408	0.409	0.410	0.411
0.61	0.411	0.411	0.412	0.413	0.414	0.414	0.415	0.416	0.417	0.418
0.62	0.418	0.418	0.419	0.420	0.421	0.421	0.422	0.423	0.424	0.425
0.63	0.425	0.425	0.426	0.427	0.428	0.428	0.429	0.430	0.431	0.432
0.64	0.432	0.432	0.433	0.434	0.435	0.435	0.436	0.437	0.438	0.439
0.65	0.439	0.439	0.440	0.441	0.442	0.442	0.443	0.444	0.445	0.446
0.66	0.446	0.446	0.447	0.448	0.449	0.449	0.450	0.451	0.452	0.453
0.67	0.453	0.453	0.454	0.455	0.456	0.456	0.457	0.458	0.459	0.460
0.68	0.460	0.460	0.461	0.462	0.463	0.463	0.464	0.465	0.466	0.467
0.69	0.467	0.467	0.468	0.469	0.470	0.470	0.471	0.472	0.473	0.474
0.70	0.474	0.474	0.475	0.476	0.477	0.477	0.478	0.479	0.480	0.481
0.71	0.481	0.481	0.482	0.483	0.484	0.484	0.485	0.486	0.487	0.488
0.72	0.488	0.488	0.489	0.490	0.491	0.491	0.492	0.493	0.494	0.495
0.73	0.495	0.495	0.496	0.497	0.498	0.498	0.499	0.500	0.501	0.502
0.74	0.502	0.502	0.503	0.504	0.505	0.505	0.506	0.507	0.508	0.509
0.75	0.509	0.509	0.510	0.511	0.512	0.512	0.513	0.514	0.515	0.516
0.76	0.516	0.516	0.517	0.518	0.519	0.519	0.520	0.521	0.522	0.523
0.77	0.523	0.523	0.524	0.525	0.526	0.526	0.527	0.528	0.529	0.530
0.78	0.530	0.530	0.531	0.532	0.533	0.533	0.534	0.535	0.536	0.537
0.79	0.537	0.537	0.538	0.539	0.540	0.540	0.541	0.542	0.543	0.544
0.80	0.544	0.544	0.545	0.546	0.547	0.547	0.548	0.549	0.550	0.551
0.81	0.551	0.551	0.552	0.553	0.554	0.554	0.555	0.556	0.557	0.558
0.82	0.558	0.558	0.559	0.560	0.561	0.561	0.562	0.563	0.564	0.565
0.83	0.565	0.565	0.566	0.567	0.568	0.568	0.569	0.570	0.571	0.572
0.84	0.572	0.572	0.573	0.574	0.575	0.575	0.576	0.577	0.578	0.579
0.85	0.579	0.579	0.580	0.581	0.582	0.582	0.583	0.584	0.585	0.586
0.86	0.586	0.586	0.587	0.588	0.589	0.589	0.590	0.591	0.592	0.593
0.87	0.593	0.593	0.594	0.595	0.596	0.596	0.597	0.598	0.599	0.600
0.88	0.600	0.600	0.601	0.602	0.603	0.603	0.604	0.605	0.606	0.607
0.89	0.607	0.607	0.608	0.609	0.610	0.610	0.611	0.612	0.613	0.614
0.90	0.614	0.614	0.615	0.616	0.617	0.617	0.618	0.619	0.620	0.621
0.91	0.621	0.621	0.622	0.623	0.624	0.624	0.625	0.626	0.627	0.628
0.92	0.628	0.628	0.629	0.630	0.631	0.631	0.632	0.633	0.634	0.635
0.93	0.635	0.635	0.636	0.637	0.638	0.638	0.639	0.640	0.641	0.642
0.94	0.642	0.642	0.643	0.644	0.645	0.645	0.646	0.647	0.648	0.649
0.95	0.649	0.649	0.650	0.651	0.652	0.652	0.653	0.654	0.655	0.656
0.96	0.656	0.656	0.657	0.658	0.659	0.659	0.660	0.661	0.662	0.663
0.97	0.663	0.663	0.664	0.665	0.666	0.666	0.667	0.668	0.669	0.670
0.98	0.670	0.670	0.671	0.672	0.673	0.673	0.674	0.675	0.676	0.677
0.99	0.677	0.677	0.678	0.679	0.680	0.680	0.681	0.682	0.683	0.684
1.00	0.684	0.684	0.685	0.686	0.687	0.687	0.688	0.689	0.690	0.691

附录 D (续)

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.32	0.292	0.292	0.294	0.294	0.296	0.296	0.297	0.297	0.299	0.299
0.33	0.301	0.301	0.303	0.303	0.305	0.305	0.307	0.307	0.309	0.309
0.34	0.311	0.311	0.313	0.313	0.315	0.315	0.317	0.317	0.319	0.319
0.35	0.321	0.321	0.323	0.323	0.325	0.325	0.327	0.327	0.329	0.329
0.36	0.331	0.331	0.333	0.333	0.335	0.335	0.337	0.337	0.339	0.339
0.37	0.341	0.341	0.343	0.343	0.345	0.345	0.347	0.347	0.349	0.349
0.38	0.351	0.351	0.353	0.353	0.355	0.355	0.357	0.357	0.359	0.359
0.39	0.361	0.361	0.363	0.363	0.365	0.365	0.367	0.367	0.369	0.369
0.40	0.371	0.371	0.373	0.373	0.375	0.375	0.377	0.377	0.379	0.379
0.41	0.381	0.381	0.383	0.383	0.385	0.385	0.387	0.387	0.389	0.389
0.42	0.391	0.391	0.393	0.393	0.395	0.395	0.397	0.397	0.400	0.400
0.43	0.402	0.402	0.404	0.404	0.406	0.406	0.408	0.408	0.410	0.410
0.44	0.412	0.412	0.414	0.414	0.416	0.416	0.418	0.418	0.421	0.421
0.45	0.423	0.423	0.425	0.425	0.427	0.427	0.429	0.429	0.431	0.431
0.46	0.433	0.433	0.435	0.435	0.438	0.438	0.440	0.440	0.442	0.442
0.47	0.444	0.444	0.446	0.446	0.448	0.448	0.451	0.451	0.453	0.453
0.48	0.455	0.455	0.457	0.457	0.459	0.459	0.461	0.461	0.464	0.464
0.49	0.466	0.466	0.468	0.468	0.470	0.470	0.472	0.472	0.475	0.475
0.50	0.477	0.477	0.479	0.479	0.481	0.481	0.484	0.484	0.486	0.486
0.51	0.488	0.488	0.490	0.490	0.493	0.493	0.495	0.495	0.497	0.497
0.52	0.499	0.499	0.502	0.502	0.504	0.504	0.506	0.506	0.509	0.509
0.53	0.511	0.511	0.513	0.513	0.515	0.515	0.518	0.518	0.520	0.520
0.54	0.522	0.522	0.525	0.525	0.527	0.527	0.529	0.529	0.532	0.532
0.55	0.534	0.534	0.537	0.537	0.539	0.539	0.541	0.541	0.544	0.544
0.56	0.546	0.546	0.548	0.548	0.551	0.551	0.553	0.553	0.556	0.556
0.57	0.558	0.558	0.560	0.560	0.563	0.563	0.565	0.565	0.568	0.568
0.58	0.570	0.570	0.573	0.573	0.575	0.575	0.578	0.578	0.580	0.580
0.59	0.583	0.583	0.585	0.585	0.588	0.588	0.590	0.590	0.593	0.593
0.60	0.595	0.595	0.598	0.598	0.600	0.600	0.603	0.603	0.605	0.605
0.61	0.608	0.608	0.610	0.610	0.613	0.613	0.616	0.616	0.618	0.618
0.62	0.621	0.621	0.623	0.623	0.626	0.626	0.629	0.629	0.631	0.631
0.63	0.634	0.634	0.637	0.637	0.639	0.639	0.642	0.642	0.645	0.645
0.64	0.647	0.647	0.650	0.650	0.653	0.653	0.655	0.655	0.658	0.658
0.65	0.661	0.661	0.664	0.664	0.666	0.666	0.669	0.669	0.672	0.672
0.66	0.675	0.675	0.678	0.678	0.680	0.680	0.683	0.683	0.686	0.686
0.67	0.689	0.689	0.692	0.692	0.695	0.695	0.697	0.697	0.700	0.700
0.68	0.703	0.703	0.705	0.705	0.709	0.709	0.712	0.712	0.715	0.715

附录 D (续)

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.69	0.718	0.718	0.721	0.721	0.724	0.724	0.727	0.727	0.730	0.730
0.70	0.733	0.733	0.736	0.736	0.739	0.739	0.742	0.742	0.745	0.745
0.71	0.748	0.748	0.751	0.751	0.754	0.754	0.758	0.758	0.761	0.761
0.72	0.764	0.764	0.767	0.767	0.770	0.770	0.774	0.774	0.777	0.777
0.73	0.780	0.780	0.783	0.783	0.787	0.787	0.790	0.790	0.793	0.793
0.74	0.796	0.796	0.800	0.800	0.803	0.803	0.807	0.807	0.810	0.810
0.75	0.813	0.813	0.817	0.817	0.820	0.820	0.824	0.824	0.827	0.827
0.76	0.831	0.831	0.834	0.834	0.838	0.838	0.842	0.842	0.845	0.845
0.77	0.849	0.849	0.852	0.852	0.856	0.856	0.860	0.860	0.863	0.863
0.78	0.867	0.867	0.871	0.871	0.875	0.875	0.879	0.879	0.882	0.882
0.79	0.886	0.886	0.890	0.890	0.894	0.894	0.898	0.898	0.902	0.902
0.80	0.908	0.908	0.910	0.910	0.914	0.914	0.918	0.918	0.923	0.923
0.81	0.927	0.927	0.931	0.931	0.935	0.935	0.939	0.939	0.944	0.944
0.82	0.948	0.948	0.952	0.952	0.957	0.957	0.961	0.961	0.966	0.966
0.83	0.970	0.970	0.975	0.975	0.979	0.979	0.984	0.984	0.989	0.989
0.84	0.994	0.994	0.998	0.998	1.003	1.003	1.008	1.008	1.013	1.013
0.85	1.018	1.018	1.023	1.023	1.028	1.028	1.033	1.033	1.038	1.038
0.86	1.044	1.044	1.049	1.049	1.054	1.054	1.060	1.060	1.065	1.065
0.87	1.071	1.071	1.076	1.076	1.082	1.082	1.088	1.088	1.094	1.094
0.88	1.099	1.099	1.105	1.105	1.111	1.111	1.118	1.118	1.124	1.124
0.89	1.130	1.130	1.137	1.137	1.143	1.143	1.150	1.150	1.156	1.156
0.90	1.162	1.162	1.170	1.170	1.177	1.177	1.184	1.184	1.191	1.191
0.91	1.195	1.195	1.203	1.203	1.211	1.211	1.222	1.222	1.230	1.230
0.92	1.235	1.235	1.243	1.243	1.251	1.251	1.267	1.267	1.272	1.272
0.93	1.285	1.285	1.291	1.291	1.303	1.303	1.310	1.310	1.323	1.323
0.94	1.330	1.330	1.343	1.343	1.357	1.357	1.362	1.362	1.376	1.376
0.95	1.390	1.390	1.404	1.404	1.417	1.417	1.425	1.425	1.439	1.439
0.96	1.454	1.454	1.465	1.465	1.483	1.483	1.498	1.513	1.513	1.528
0.97	1.528	1.543	1.559	1.559	1.574	1.574	1.596	1.605	1.622	1.622
0.98	1.638	1.655	1.671	1.671	1.688	1.688	1.722	1.739	1.756	1.756
0.99	1.814	1.832	1.851	1.851	1.922	1.950	2.000	2.084	2.165	2.254

标准用词说明

标准用词	在特殊情况下的 等效表述	严格程度
应	有必要、要求、要、 只有……才允许	严格，在正常情况下 均应这样做
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推荐，在条件许可时 首先应这样做
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	有选择，在一定条件下 可以这样做

中华人民共和国水利行业标准

水工混凝土结构耐久性评定规范

SL 775—2018

条文说明

<https://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

目 次

1 总则.....	49
2 术语和符号.....	51
3 评定准则与程序.....	52
4 评定方法.....	55
5 耐久性检测要求.....	64
附录 B 碳化环境下钢筋锈蚀过程分析	65
附录 C 氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀过程分析	68

1 总 则

1.0.1 我国现有的耐久性技术标准大多是从设计的角度对于未建工程考虑耐久性问题，而对于已建工程耐久性的评价方面可参考的不多。因为，耐久性问题的影响因素众多，因为混凝土结构的劣化机理非常复杂，损伤往往是多因素作用，环境和材料特性又有很大的不确定性，除本标准考虑的 7 类环境因素外，化学腐蚀环境尚无时变劣化模型可供参考。所以以往的耐久性评价往往是根据专家经验做出粗略估计。近年来，国内外在混凝土耐久性研究方面取得了很大进展，对于钢筋锈蚀、氯离子侵蚀等已有相对成熟的理论预测公式，但对混凝土结构的剩余寿命的准确预测仍存在困难。至今对于混凝土耐久性的认识仍然是初步的，今后还需要进一步完善和补充。

1.0.2 在水工建筑物的安全鉴定中，需要对结构的各项功能进行全面鉴定，包括结构的安全性、适用性和耐久性。大量混凝土工程由于环境侵蚀、材料老化及使用维护不当等原因产生累积损伤，会使得结构的耐久性能下降。如何评价其耐久性已经成为工程技术界关心的问题。水工混凝土结构耐久性破坏的突出因素有碳化环境、氯盐环境、冻融环境、渗透压环境、硫酸盐环境、磨蚀环境、碱-骨料反应。其中渗透压和磨蚀环境是水工混凝土特有的耐久性破坏因素。

水工混凝土结构的耐久性损伤主要为钢筋锈蚀及水工混凝土腐蚀和损伤。钢筋锈蚀是混凝土结构最普遍的、危害最大的耐久性损伤，据美国标准局 1975 年的调查，美国全年由于混凝土中钢筋锈蚀造成的损失为 280 亿美元，英国、挪威、荷兰的钢筋混凝土结构在 20 世纪 80 年代均花费了巨资进行维修。荷兰曾对沿海的水工建筑物进行调查，包括泄水闸、突堤码头、顺岸码头、浮码头等，在建造完成后的 3~63 年间，可见损伤多见于混凝土

保护层、钢筋腐蚀、混凝土表面风化剥落、碳化等。我国 20 世纪 60 年代对华南、华东地区 27 座海港的钢筋混凝土进行调查，发现钢筋锈蚀导致结构破坏的占 74%，1981 年对华南 18 座使用了 7~25 年的海港码头调查，发现钢筋锈蚀导致结构破坏的占 89%。在严寒和寒冷地区，冻融破坏也是常见的耐久性损伤。对于高水头作用的挡水建筑，混凝土的抗渗性能和抗磨蚀性能也是不容忽视的耐久性指标。在存在硫酸盐腐蚀及碱-骨料反应环境下两类耐久性问题还需要提高重视程度。目前对于化学腐蚀、高水头渗透和磨蚀下的耐久性评价方法还缺乏深入的研究，其他特殊问题还应结合相关标准进行评估。

1.0.3 本标准主要针对环境作用的类别和等级发生改变的水工混凝土结构。对于未建和在建工程，可通过各类设计文件和标准来控制耐久性。

1.0.5 我国目前还缺乏水工结构定期检测评价法规，但处于严酷环境的工程结构使用 10 年就有可能出现耐久性损伤，如果重要结构部位设置了明确的耐久性检测周期则有利于建筑物耐久性的评价和预测。

2 术语和符号

2.1 术 语

本标准采用的术语及含义按照下列原则确定：

(1) 凡是现行工程建设国家和行业标准规定的，按相应标准引用，如 GB/T 50476《混凝土结构耐久性设计规范》、SL 191《水工混凝土结构设计规范》、SL 354--2014《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》等。

(2) 凡是现行工程建设国家标准尚未规定的，参照 GB/T 50083《工程结构设计基本术语标准》给出定义与说明。

3 评定准则与程序

3.1 评定准则

3.1.1 结构和构件的设计使用年限、重要性、环境条件、耐久性损伤及可修复性是耐久性评定的重要依据。其中，设计使用年限是水工结构耐久性的重要参数。设计使用年限与合理使用年限的定义和内涵不尽相同，合理使用年限为一个临界值，与工程质量保修制度相关，基础设施工程最低保修期限为设计文件规定的合理使用年限 [见 2000 年《建设工程质量管理条例》(国务院令 第 279 号)]。按照此定义，设计使用年限应不小于合理使用年限。一般来说，为保证水工混凝土结构耐久性，设计与施工应遵守相关规定，如除应确保混凝土结构的承载能力外，还应对抗裂性、钢筋保护层厚度等防护措施进行设计。

采用有利于防止环境危害的结构布置、构件体形，并方便施工；选择质量稳定并有利于改善混凝土抗裂性能和耐久性原材料和配合比及合理的施工工艺；在采用新材料、新工艺、新技术和新设备解决混凝土耐久性问题时，应进行试验研究和论证。虽然设计上考虑了耐久性，但评定时仍需要结合实际施工情况、环境因素的变化，结构的维护等因素。耐久性评定是对结构现有耐久性能能否满足使用需求的判断，因此评定的基础是实际情况的调研分析和实际需求及预期，对比两者的关系从而做出评定。尽管实际情况复杂多变，很难用几个简单的参数来评价，也很难用局部代替整体，但耐久性评定工作力求平衡主观与客观，局部和整体的关系。

3.1.2 混凝土结构的耐久性损伤原因可能是多方面耦合的结果，存在耦合情况时，难以找到成熟的评定方法使用，需要进行专门的研究。因此，本标准以一种或多种主要环境类别来分别进行评定，也符合大多数工程实际。对于重要工程部位，可以针对耐久

性检测需要，设置一些暴露试验构件，以便后期数据获取和耐久性评定的进行，构件的材料、配筋、成型、养护以及暴露环境条件应与实际结构一致。

3.1.3 耐久性评定的目标是对混凝土结构的耐久性状态进行评价，即使在环境条件确定，混凝土的损伤状态确定，具有完善的预测模型的情况下，想要精确预测耐久性寿命也是有难度的，实际上耐久性寿命仅仅是混凝土结构使用寿命的参考因素之一。因此，与其进行精确的耐久性寿命预测，不如进行耐久性等级评价反而更加具有实际意义。根据耐久性等级评价以及相关设计和使用要求可以对下一阶段的处理措施及对策提供参考。本部分参照 CECS 220：2007《混凝土结构耐久性评定标准》中对混凝土结构耐久性的等级划分。

3.2 评定程序

3.2.1 参照 CECS 220：2007 中的结构耐久性评定程序，同时参考了 GB 50202—2015《民用建筑可靠性鉴定标准》。由于具体的工程结构多样，使用的目的和要求不尽相同，环境条件多变，因此，评定目标、范围、内容等需要根据具体情况而定，推荐委托专业评定机构（如具有丰富工程经验的工程咨询单位）开展评定工作，同时考虑工程管理方或业主方的需求，使得评定结果具有实际意义。

3.2.2 条文中规定的调查内容较为系统全面，具体执行过程中，可适当选取所需的内容，旨在获取足够的信息，确定调查与检测方案。

3.3 环境作用类别与等级

3.3.1 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》中表 3.2.1 将环境作用类别分为五类，分别为一般环境（碳化引起的钢筋锈蚀）、冻融环境、海洋氯化物环境、除冰盐等其他氯化物环境、化学腐蚀环境；CCES 01：2004《混凝土结构耐久性设计

与施工指南》中表 3.1.1 将环境作用类别分为五类，分别为碳化引起钢筋锈蚀的一般环境、反复冻融引起混凝土腐蚀的环境、海水氯化物引起钢筋锈蚀的近海或海洋环境、除冰盐等其他氯化物引起钢筋锈蚀的环境、其他化学物质引起混凝土腐蚀的环境；TB 10005—2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》中表 4.2.1 将环境作用类别分为六类，分别为碳化环境、氯盐环境、化学侵蚀环境、盐类结晶破坏环境、冻融破坏环境、磨蚀环境。综合以上分类方法，并结合水工混凝土特性，将环境作用类别分为七类，其中增加了渗透压渗透环境和碱-骨料反应环境。SL 191—2008《水工混凝土结构设计规范》中将环境作用类别分为五类，其分类方法并非按照环境因素，本标准的环境作用类别以 CCES 01—2004 为基础，增加渗透、磨蚀、碱-骨料反应，其中 I~IV 分别对应于 SL 191 中的一、二、三、三、四、五；二、三、四、五；三、四、五。

3.3.2 CCES 01—2004 中，将环境作用等级分为 A~F 六级；GB/T 50476—2008 中，将环境作用等级分为 A~F 六级；TB 10005—2010 中按照环境类别分级，分为三~四级不等。综合考虑，本标准将环境作用等级分为五级。表 3.3.2-1 中环境类别为 II 的部分内容引自 GB/T 50476—2008 表 5.2.1 和 CCES 01—2004 表 3.1.3-1 中环境类别为 II 的部分。

氯盐环境作用等级划分参考了 GB/T 50476—2008、SL 191—2008 及 DL/T 5057—2009《水工混凝土结构设计规范》；碱-骨料反应环境作用等级划分参照 DL/T 5241—2010《水工混凝土耐久性技术规范》。

4 评定方法

4.1 一般规定

4.1.1 耐久性评定是通过不同环境条件下的耐久性指标的检测、试验和计算来实现。耐久性要求的满足程度是结构评定或鉴定常用的指标，在我国的可靠性鉴定标准中均有类似应用。

4.1.2 表 4.1.2 中给出了结构耐久重要性系数取值推荐范围。进行耐久性等级划分时，本标准参考 CECS 220:2007 的耐久重要性系数，该系数可以依据失效风险大小对安全储备做适当调整，根据实际需要推荐范围内取值。

4.1.3 钢筋在混凝土的高碱性 ($\text{pH}>12.5$) 环境下，表面能够形成一层致密的钝化膜，抑制钢筋的腐蚀，但由于碱性降低或者有氯离子富集时，会导致钝化膜的破裂和腐蚀速率增加。钢筋锈蚀主要是电化学腐蚀过程，包含阳极电化学反应和阴极电化学反应。在保护层开裂之前，钢筋锈蚀速度较慢，保护层开裂之后，钢筋锈蚀速度加快。对于外观要求不高的构件，一般可用混凝土表面可接受最大外观损伤的时间确定其剩余使用年限，SL 191—2008 表 3.2.7 对于最大裂缝宽度限值做了具体规定。对于一般构件应采用保护层锈胀开裂作为耐久性失效的标准。

4.1.4 ~ 4.1.7 对不同环境条件下的混凝土耐久性极限状态或耐久性要求做了描述。由于目前耐久性研究的深度和广度限制，许多耐久性试验与工程实际之间存在一定的偏差，而且衡量耐久性的指标也难以量化，本标准参考了国内外相关研究结果，并考虑到实际应用，初步拟定了几类易于量化的耐久性极限状态和耐久性要求，希望在实践中进一步完善。

4.2 碳化环境下的结构耐久性

4.2.2 保护层锈胀开裂时间是由钢筋开始锈蚀时间加上钢筋开

压理论、结晶压理论 4 种,但仍没有一种理论可以全面解释冻融破坏的所有问题。混凝土在冻融过程中水化产物由冻融前的紧密堆积逐步变成疏松状态,微裂缝逐渐增多和加宽,导致混凝土强度下降。冻融环境下除按混凝土冻融损伤评定外,还应考虑冻融损伤对钢筋锈蚀的加速效应。

原水电部的调查结果显示,我国水工混凝土结构呈现“南锈北冻”的特点。云峰水电站(1967 年建成)位于吉林省鸭绿江中游,年平均气温 -13.3°C ,年平均正负温交替 74 次左右,大坝运行不到 10 年,溢流坝表面混凝土冻融破坏面积高达 9000m^2 ,占整个溢流坝面的 50%左右,混凝土平均冻融剥蚀深度达 10cm 以上,个别部位剥蚀深度达 40~50cm。挪威混凝土协会在 1960 年代对挪威沿岸的 200 多座港口进行了调查,在某些服役了 35~40 年的混凝土结构中,在潮汐区出现混凝土柱横截面面积减少 20%以上的现象,其原因经分析多由冻融破坏造成,除跟普通冻融破坏一样对混凝土结构表面造成剥落、开裂,出现露石、漏筋等现象外,盐冻破坏还会出现盐结晶现象,混凝土的盐冻破坏并不随着盐浓度的增加而增加,而是当盐浓度为中低浓度时破坏最为严重。在相同冻融条件下,盐冻的破坏速度远高于普通冻融破坏。

年冻融循环次数除了取决于工程所在地域的气候环境外,还与结构表面局部小气候环境密切相关。如丰满大坝上游面为向阳面,1985 年 10 月—1986 年 4 月实测上游坝面正负温变化次数为 182 次,下游面为背阴面,实测正负温变化次数为 21 次,坝顶 44 次。位于吉林省鸭绿江中游的云峰水电站大坝,坝区气候寒冷,年正负温变化次数达 80~90 次,大坝溢流面朝向东南,受日照时间长,太阳照射使溢流面表面温度升高 6°C 左右,致使溢流面年正负温变化次数达 135 次,发生了比较严重的冻融破坏。原交通部第一航务工程局和南京水利科学研究院 1961—1964 年对天津新港和大连湾海工混凝土冻融循环次数进行调查研究,以 -3°C 作为饱海水混凝土冻点温度时,天津新港每年冬

季遭受冻融循环次数为 80~100 次，大连湾为 110 次左右。研究发现，在向阳面由于日照时间长，温度较高，实际冻融循环次数较背阳面少。混凝土遭受的冻融次数由表层到内部逐渐降低，特别是表层 25mm 以内，因此，混凝土冻融破坏多为表层破坏。

我国典型地区近 50 年气温及年冻融循环统计结果见表 1。

表 1 我国典型地区近 50 年气温及年冻融循环统计表

地区	极端最低气温 / $^{\circ}\text{C}$	平均年温差 / $^{\circ}\text{C}$	年平均负温天数/d	年平均冻融循环次数/次
北京	-25.4	43.2	120	85
长春	-38.5	66.3	172	120
西宁	28.6	52.1	198	108
宜昌	-6.8	21.8	18	13

4.4.3 清华大学建立的冻融损伤破坏模型和混凝土内温度场、降温速率分布，提出了依据现有信息预测冻融损伤后混凝土抗压强度计算公式，模型已得到普通硅酸盐混凝土快速冻融试验的验证。公式(4.4.3-1)表明混凝土强度损失率随混凝土饱水冻融循环次数线性增加。因此混凝土表层($x=0$)出现明显冻融损伤经受的饱水冻融循环次数 N ，可取混凝土强度损失率为 1.0 推算。根据试验研究，混凝土相对动弹模量降低到 60% 时，其抗压强度降低 40%~50%，劈裂抗拉强度下降 50%~70%，这对于承载的薄壁钢筋混凝土结构偏不安全，薄壁钢筋混凝土结构指最小尺寸小于或等于最大冻深的结构。

4.4.5 表 4.4.3 中的冻融循环次数可根据条文说明 4.4.1 中表 1 取用。

4.4.6 当结构经历数十年尚未发生冻融损伤时，依据工程经验该结构不会发生冻融破坏。

4.5 硫酸盐环境下的结构耐久性

4.5.1 硫酸盐对于混凝土的侵蚀作用主要体现在两个方面：

①石膏型侵蚀，硫酸钠与氢氧化钙反应生成石膏，固相体积增加124%；②硫铝酸钙型侵蚀，硫酸钠与水化铝酸钙反应生成水化硫铝酸钙，固相体积增加227%。硫酸盐侵蚀的速度随硫酸盐溶液浓度的提高而加快，但浓度超过1%时，侵蚀速度增加速率减缓。除硫酸盐浓度外，混凝土被侵蚀速度还取决于硫酸盐补充的速度以及硫酸盐渗透的速度，因此，干湿交替将加速硫酸盐对混凝土的破坏作用。混凝土结构经受硫酸盐侵蚀破坏后，强度会下降，表面出现裂缝、剥落等现象。

4.5.4、4.5.5 在进行室内硫酸盐浸烘试验中，在试验早期，由于硫酸盐结晶填充了混凝土的毛细孔，混凝土强度还会上升。因此，对于实际结构，在硫酸盐渗入早期，混凝土的强度及其他性能并不一定下降，所以，如果以膨胀量或硫酸盐含量作为评价指标，容易出现偏严格的误判。因此，本标准采用芯样强度与混凝土设计标准强度对比，采用强度比来说明混凝土性能是否出现劣化，也易于操作。在GB 50287—2005《水利水电工程地质勘察规范》中，当混凝土强度降低20%以上时，认为有明显破坏，当混凝土强度降低5%~20%时，认为发生了中等腐蚀。另有研究表明，同样条件下，钻芯取样的混凝土强度比浇筑的低10%左右。考虑混凝土强度的后期增长特性，综合可认为，在进行强度比较时，芯样强度经重要性系数修正后，不低于设计标准值即可被认为是安全的，可评为A级；当芯样强度与设计标准值接近但略低时，说明混凝土可能受到了一定程度的侵蚀，需要引起注意，可评为B级；当混凝土芯样强度低于设计值80%时，混凝土可认为收到严重侵蚀，此时，混凝土表面可以看到明显剥落或疏松状况，可评为C级。

4.6 渗透压作用下的结构耐久性

4.6.1、4.6.2 混凝土结构出现渗透问题很大程度上并非混凝土材料的问题，而是出现了裂缝。因此，如果采用混凝土留样进行测试，无法体现现场结构的问题，因此本标准采取取芯的方法。

取芯试验参考 JTJ 270—1998《水工混凝土结构设计规范》。评定方法参考 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》的混凝土渗透等级试验方法。

4.6.3 根据具体的使用要求来判断抗渗性，比如地下工程可以参照 GB 50208—2011《地下防水工程质量验收规范》，坝体、堤防等可采用目测法，必要时可参照 SL 31—2003《水利水电工程钻孔压水试验规程》进行压水试验。

4.7 腐蚀环境下的结构耐久性

4.7.1 参考 DL/T 5207—2005《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》5.2.1 条文说明，对于推移质磨蚀和空化气蚀情况，式(4.7.1)中的参数也应根据实测数据拟合得到。已建工程运行实践表明，即使设计精确，施工工艺严格，混凝土材料抗磨蚀性能也较高，但长期运行后，由于某些不确定因素，泄水建筑物表面总有不同程度的磨蚀或空蚀，为了避免破坏范围的扩大，需要不断检查与维修，观测其磨蚀深度。

根据资料，国内外 C30~C50 混凝土年磨蚀量为 0.5~2.0cm，葛洲坝二江泄水闸，在施工堆渣磨蚀下，C40 混凝土年磨蚀量为 1~2cm；渔子溪电站经 12 年运行，C30 混凝土年均磨蚀量约为 1cm。比较严重的磨蚀事例也屡见不鲜，如美国 Hoover 大坝的泄洪洞，因空蚀破坏和泥沙水流磨蚀导致混凝土衬砌严重磨蚀，深度 5~10cm；美国 Kinzua 坝的消力池因水流冲磨破坏，深度达到 1.1m。

关于磨蚀环境下混凝土平均磨蚀深度的影响因素，一般认为与推移质或推移质数量、大小、形状、表面水流流速有关，以上参数在实际工程中难以统计，故本公式采用 β 值表示。由于推移质磨蚀预测性较差，所以，本规范暂只针对推移质磨蚀进行评价。

磨蚀深度的观测方法应预先设立基准点，在需要观测的混凝土表面进行网点式测量，以计算一定时间内的磨蚀深度，也可使

用全站仪实现。

4.7.2 在定期观测3次以上后，将每次观测的平均磨蚀深度和过水历时数据通过公式(4.7.1)拟合得出参数 β 、 q ，拟合过程可采用Excel或Origin等软件实现，然后通过代入预测目标年限的冲刷时间，得到预期的平均磨蚀深度。

4.8 碱-骨料反应

4.8.1 参照DL/T 5241—2010《水工混凝土耐久性技术规范》中表9.1.2-1。大坝混凝土体积庞大，内部水分几乎不散失，因此大坝混凝土所处的环境应划分为潮湿环境。含碱环境如直接与高含盐碱地、海水、含碱工业废水等接触的环境。

碱-骨料反应的三个条件是碱活性骨料、水、碱。在干燥条件下，一般难以发生碱-骨料反应和破坏，但在也有文献资料表明，在干旱条件下，混凝土内部由于存在水分，仍有发生碱-骨料反应的风险，因此，对于干燥条件下的某些重要结构，仍有进行评定的必要。

4.8.2 对于判断混凝土砂石原材料的碱活性，岩相试验一般作为初选半定量方法，在岩相法判断出骨料含有一定量的碱活性组分后，应分离骨料进行进一步的定量测试方法，如砂浆棒快速法，混凝土棱柱体法等。关于混凝土中总碱量的计算参考DL/T 5241—2010，对于掺合料中有效碱百分比，一般取粉煤灰20%，磨细矿渣50%，硅灰50%，也有文献研究认为有效碱含量与总碱量有关，在高碱条件下，掺合料的有效碱百分比会升高。本规范从工程实际出发，认为所取百分比较为合适。

根据国内外的研究，混凝土芯样中实测碱含量与配合比计算碱含量有较大差别，实测方法若采用酸溶法，则测试结果远高于配合比计算结果，且细骨料中K、Na离子影响较大；采用水溶法，细骨料中K、Na离子影响较小，故本规范采用水溶法。但水溶法实测碱含量较配合比计算碱含量的相关性仍待研究。另外，水溶法实测结果受溶出时间和溶出温度的影响较大，一般水

溶法测得碱含量约为配合比计算碱含量的 39%~52%。

4.8.3 参考国内外相关标准制定。实际上,国内外对于混凝土安全碱含量问题仍有争议,可能与各个国家的骨料碱活性特征有关。例如,英国交通部和水泥学会认为混凝土总碱量在 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下是安全的;新西兰水泥和混凝土协会规定混凝土的总碱量低于 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 是安全的;南非(SABS C100 PartII)则规定混凝土总碱量必须低于 $2.1\text{kg}/\text{m}^3$ 才是无害的。国际材料与结构研究试验室联合会(RILEM)2003年提出的《减少混凝土中碱-骨料反应的国际标准》草案中,对于不同活性的骨料提出了不同总碱量限制指标。对于低活性骨料,没有对混凝土总碱量限度提出要求;对于中等活性骨料,混凝土总碱量的限度为 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 或 $3.5\text{kg}/\text{m}^3$;对于高活性骨料,混凝土总碱量的限度为 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 。

我国相关标准 CECS 53:93《混凝土碱含量限值标准》、CECS 104:98《高强混凝土结构技术规程》、TB/T 3054—2002《铁路混凝土工程预防碱-骨料反应技术条件》、TB 10005—2010、DL/T 5241—2010等均对混凝土碱含量限值做了规定。

碱-碳酸盐反应难以通过掺合料抑制。高明述等研究了低碱水泥、粉煤灰和磨细矿渣粉对碱-碳酸盐反应膨胀量的影响,表明使用低碱水泥时,粉煤灰对水泥取代量为 70%,磨细矿渣粉对水泥的取代量为 30%时,才能有效降低碱-碳酸盐反应膨胀,这在实际工程中几乎不可能。Greiffen 和 Cadu 的研究表明,要阻止混凝土的碱-碳酸盐反应膨胀,混凝土中的有效碱含量必须低于 $0.8\text{kg}/\text{m}^3$,相当于总碱量 $1.3\text{kg}/\text{m}^3$,实际工程也难以实现。另外,对于抑制碱-硅酸反应有效的钨盐也难以抑制碱-碳酸盐反应。

4.8.5 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》中的混凝土棱柱体法判断骨料有无碱活性的依据为 1 年膨胀率小于 400 微应变,考虑到 B 级评定的标准是允许有一定的反应,但膨胀不造成破坏,故适当放宽膨胀率至 600 微应变。如由于内部碱-骨料反应

产生裂缝破坏，则为评定为 C 级。

4.8.6 将条件评定和危害评定汇总在一个表中，便于评定工作直观判断。

<https://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

5 耐久性检测要求

5.1 一般规定

5.1.1 耐久性评定的主要目的是评价现有混凝土结构的耐久性能否满足下一个目标年限的需求，该需求来源主要为使用方和设计方。同一类构件或同一分缝区段可设为一个评定单元，结构耐久性检测单元的代表性，以及取芯检测时芯样的代表性，都会影响评定结果的可靠性。

5.1.2 可根据需要选择耐久性检测的内容。结构所处环境包括：①大气年平均温度、最高温度、最低温度、最冷月平均温度及年低于 0°C 的天数等；②大气年平均相对湿度、日平均相对湿度等；③构件所处工作环境的年平均温度、年平均湿度，湿度、湿度变化及干湿交替情况；④冻融循环情况；⑤二氧化碳、酸、氯离子、硫酸盐的影响范围及程度；⑥渗漏情况；⑦冲刷、磨损情况。对于一般建筑物，其使用环境可划分为气象环境和工作环境两类，气象环境一般可按气象资料取用。结构的技术状况和耐久性要求可参考相应的设计资料和历史资料，包括竣工验收资料，历年来使用、管理、维护、加固情况，其他影响结构耐久性的情况。

5.2 取样与检测

5.2.1~5.2.10 构件的外观、几何参数、裂缝及缺陷、保护层厚度、钢筋直径、混凝土抗压强度、碳化深度、混凝土氯离子含量及分布、氯离子扩散系数、钢筋锈蚀、混凝土渗透性、冻融损伤、化学腐蚀、磨蚀深度等是耐久性的重要参数，检测结果的真实性直接关系到评定结果的可靠性，试样获取应能客观反应混凝土结构的环境特征和耐久性需求。

附录 B 碳化环境下钢筋 锈蚀过程分析

B.0.1 碳化环境下钢筋开始锈蚀时间的计算给出了两种算法，分别是查表法和直接计算法。查表法是根据直接计算法计算给出的简化计算方法，在常用范围内与公式计算相比误差很小。

B.0.2 碳化系数反应碳化速率，与 CO_2 浓度、混凝土密实度、环境温湿度等因素有关，碳化系数可以通过公式预测，公式包含混凝土强度、掺合料用量、应力影响、环境温湿度等因素，但本标准仍建议采用实测值。由实测碳化深度确定碳化系数可避开上述诸多因素的影响，得到较为可靠的结果。在构件角部，由于 CO_2 双向渗透作用，其碳化速率大约是非角部的 1.4 倍。

B.0.3 构件所处的局部环境对钢筋脱钝和锈蚀速率有极大影响，局部环境系数综合考虑了环境温度、湿度变异、干湿交替频率及侵蚀性介质对钢筋脱钝和锈蚀速率的影响，局部环境系数参考 GB 50045-2008《工业建筑防腐设计规范》并由工程验证结果给出。

B.0.4 过去一般都将碳化深度到达钢筋表面作为钢筋开始锈蚀的条件，试验和工程检测表明，碳化深度尚未到达钢筋表面时，钢筋可能已经锈蚀。

定义钢筋开始锈蚀时，用酚酞测量的碳化前沿（完全碳化前沿）与钢筋表面的距离为碳化残量 x_c ，碳化残量是确定钢筋开始锈蚀的重要参数。日本学者通过试验得出了碳化残量为 2~10mm，我国工程检测数据一般在 -20~25mm，正值多见于室外环境，负值多见于室内环境。碳化残量主要与保护层厚度、钢筋脱钝速率及碳化速率有关。

钢筋脱钝速率是影响碳化残量的重要因素，钢筋脱钝是一个时间过程，受内部和外部环境条件的制约。从工程数据分析，构

件局部环境对于脱钝速率影响最大，在干湿交替环境下，钢筋脱钝快，碳化残量大。由于脱钝和碳化同时进行，在脱钝条件相同或相近时，碳化越快，保护层厚度越小，碳化残量越小。

以保护层厚度 c 、碳化系数 k 和局部环境系数 m 为参数建立的经验公式与实测碳化残量 x_c 比较，计算与实测差值在 $-6.1 \sim 3.3\text{mm}$ 范围内变化，相应开始锈蚀时间计算值与检测值的比值在 $0.57 \sim 1.41$ 范围内变化。

B.0.5 钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间计算给出了两种算法，分别是查表法和直接计算法。查表法是根据直接计算法计算给出的简化计算方法，在常用范围内与公式计算相比误差很小。

B.0.6 试验表明，保护层厚度与钢筋直径比值 (c/d) 和混凝土强度是影响 δ_{cr} 的主要参数。由于在保护层开裂初期，随裂缝宽度增加，相应的锈蚀量快速增长，不同试验量测锈蚀量的时机不同，试验数据离散性很大，如对 C20 混凝土， c/d 在 1.6 左右时，试验值 δ_{cr} 在 $0.0177 \sim 0.0888\text{mm}$ 变化。本标准从工程角度出发，给出了保护层锈胀开裂的定义，将锈胀裂缝宽度为 0.1mm 时的锈蚀深度作为锈胀开裂的临界锈蚀深度。

B.0.7 关于碳化环境（大气环境）混凝土保护层开裂前的钢筋平均锈蚀速率，国内外的理论研究成果很多，但因采用的假定不够完善，或采用的参数难以确定，理论公式还难以直接应用。本标准采用的计算公式是以理论分析与试验研究为基础，通过工程数据验证确定的，公式中的保护层厚度 c 、混凝土强度 $f_{cu,t}$ 、环境温湿度对锈蚀速率的影响都是根据国内外试验数据确定的。

混凝土强度主要反映混凝土的平均渗透性能对锈蚀速率的影响，混凝土强度的影响由中国建筑科学研究院 70 个锈蚀试件的失重率统计得到（相关系数 0.827）。

混凝土保护层厚度对锈蚀速率的影响由中国建筑科学研究院和山东省建筑科学研究院的数据回归得到。

环境相对湿度对锈蚀速率的影响参考了苏联、日本及我国的试验或理论分析成果，试验表明，环境相对湿度在 45% 时，钢

筋仍有可能锈蚀；环境湿度在 30% 时，钢筋锈蚀速率最大；湿度大于 80% 时，由于孔隙水饱和度增大，氧气扩散困难，锈蚀速率反而下降（但也有湿度在 90%，锈蚀速率仍很快的试验结果）。因此，对室外环境钢筋不生锈的临界湿度取为 45%；对室外环境，由于湿度变异较小，临界湿度取为 50%；偏安全考虑，环境湿度大于 80% 时仍按 80% 计算。

Pruckner 和 Moringa 通过理论分析和试验研究，分析了环境湿度对钢筋锈蚀速率的影响，两者给出的结果相差不大。鉴于温度和湿度耦合程度较小，本标准给出了温度对钢筋锈蚀的影响系数。

干湿交替环境为氧和水的渗透提供了有利条件，因而会较恒湿条件下的锈蚀速率快得多。大气有微量腐蚀介质时，也会加快钢筋锈蚀。公式中通过局部环境系数 m 考虑这些因素的影响， m 取值是通过大量工程资料验证确定的。

角部钢筋因双向渗透，锈蚀速率加快，钢筋位置系数通过理论分析和对比试验得到。对于非角部配筋的墙板类构件，当前尚缺乏成熟的裂缝宽度与锈蚀量关系的定量分析。

B.0.8 钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤时间的计算给出了两种算法，分别是查表法和直接计算法，其中查表法是依据直接计算法给出的简化计算方法。

原冶金行业标准 YBJ 219—83《钢铁工业建筑物可靠性鉴定规程》附录二在分析和总结大量工程检测资料的基础上给出了锈蚀构件剩余使用寿命的预测方法，本标准给出的混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间，尽管与该标准预测模型不同，但也是以大量工程经验为背景的，因此，大多数情况下，本标准按混凝土表面出现可接受最大外观损伤预测的使用年限与 YBJ 219 预测值非常接近，仅在碳化深度接近钢筋表面或结构使用时间很短时存在较大误差，此时本标准的预测结果更为合理。

B.0.10 保护层开裂后钢筋锈蚀机理异常复杂，钢筋锈蚀量预测模型国内外研究很少，本标准依据工程检测数据给出了保护层开裂后的钢筋锈蚀速率估算公式。

附录 C 氯离子侵蚀引起的钢筋 锈蚀过程分析

C.0.1 在氯离子扩散模型中，氯离子扩散系数与时间相关，因为氯离子在传输过程中会与水化产物结合或吸附，仅有部分自由氯离子继续向内扩散，使得氯离子扩散系数逐渐减小；另外随着水泥水化不断进行，混凝土的密实度提高，也使得氯离子扩散系数减小。本条列出了可不考虑氯离子扩散系数时间依赖性的条件。

C.0.2 给出了开始锈蚀时间估算方法，其中不考虑氯离子扩散系数时间依赖性时分别按环境作用等级不同分别采用式 (C.0.2-1) 和式 (C.0.2-2) 估算，考虑氯离子扩散系数时间依赖性时按式 (C.0.2-3) 估算。如果所取 D 值的时间与计算出的钢筋锈蚀时间相差很大时，建议按相应公式计算。Fick 模型中的扩散系数、表面氯离子浓度等参数只有在工程建成并实际应用过一段时间后通过现场实测才比较可信，这也是重要工程应该在耐久性设计中规定工程建成后必须进行定期检测的一个原因。

C.0.4 给出了氯离子扩散系数的取值方法。氯离子扩散系数与混凝土组分、水胶比、养护、饱水程度、温度等因素密切相关。由于影响氯离子扩散系数的因素太多，渗透过程十分复杂，氯离子扩散系数随时间减小的规律尚未十分清楚，实际上难以准确确定氯离子扩散系数，因此通过实测混凝土内部的氯离子浓度分布，用扩散方程反推氯离子扩散系数是最有效的途径。

时变氯离子扩散系数采用国际通用的表达式，为准确获得时间依赖性系数 α ，仍建议通过实测数据确定。无条件实测时，参照美国 Life-365 程序并用我国实测数据验证，对普通硅酸盐混凝土可取 $\alpha=0.2$ ，对有掺合料的混凝土参考国外有关资料， α 值多在 0.4~0.6 范围内变化，本标准也给出了美国 Life-365 程序

中 α 的表达式。

氯离子扩散系数取值，参照 Life-365 的程序说明，时间超过 30 年后即可不考虑氯离子扩散系数的时间依赖性，对有、无掺合料混凝土 28d 的氯离子扩散系数可取相同数值。

国内外的试验、实测资料表明，水胶比和环境温度对氯离子扩散系数有显著影响，本标准用国内外实际工程与自然暴露试验资料回归 ($W/B=0.39\sim 0.66$ ，暴露时间 1~16 年，取 $\alpha=0.2$)，给出了 5 年龄期氯离子扩散系数经验公式：

C.0.5 氯离子半径小，穿透能力强，通过外界渗入或渗入混凝土中，到达钢筋表面后迅速破坏钝化膜形成腐蚀电池。在钢筋锈蚀过程中，氯离子不会因腐蚀反应而减少，它起的是催化和去极化作用、导电作用，使电化学反应加快，因此氯离子侵蚀环境下的钢筋锈蚀速率比碳化引起的钢筋锈蚀快。表中的环境等级较表 3.3.2-1 更加细化，将沿海大气区按离岸距离分为 4 级，氯离子到达稳定值所需时间的数据为美国 Life-365 设计程序给出的。

C.0.6 钢筋锈蚀临界氯离子浓度在本标准中指氯离子总含量，包括结合氯离子和自由氯离子，虽然引起钢筋锈蚀的是自由氯离子，但是由于在一定条件下，如碱度下降等，结合氯离子可转化为自由氯离子，所以取总氯离子浓度作为临界值，且总氯离子浓度较容易测定准确。受混凝土材料因素及环境条件等影响，一般来说，水胶比小，混凝土碱度高，钝化膜厚，临界浓度大；试验表明，水泥的 C_3A 含量高，临界浓度也大；干湿交替环境钝化膜易破坏，临界浓度相对较低。

Alonso 和 Sanchez 对现有文献中大量临界氯离子浓度值进行统计整理后得到，以总氯离子占胶凝材料的百分比表示的 (520 个数据) 临界氯离子浓度范围为 0.3%~4%；以自由氯离子占胶凝材料的百分比表示的 (350 个数据) 临界氯离子浓度范围为 0.1%~2.5%。ACI 222 委员会报告中提出的临界值为 0.25%~0.30% (水泥质量比)；根据我国工程检测数据，C30

以下混凝土取临界浓度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ (0.343%)，C40 混凝土取临界浓度 $1.4\text{kg}/\text{m}^3$ (0.4%) 较为合理，也与国际公认的 0.4% (胶材质量占比) 基本一致。由于临界浓度并非一个确定值，因此在评估时，可按材料性能和具体环境条件适当调整，但尽量取偏安全的小数值。

本标准规定混凝土的氯离子浓度为总氯值，若实测值为水溶性氯离子浓度，可乘以转换系数来估算总氯离子浓度，对于粉煤灰混凝土，转换系数为 1.2~1.7，对于磨细铁矿渣混凝土，由于磨细铁矿渣对于氯离子吸附较多，转换系数 2.0~2.5。

C.0.7 氯离子向混凝土内部渗透与受雨水冲刷等因素产生的表面流失平衡时，混凝土表面氯离子浓度达到稳定的最大值。潮汐区、浪溅区混凝土表面氯离子浓度直接与海水接触或受浪花拍打，可以认为瞬时达到最大值。根据工程实践，在水位变动或浪溅区，一般混凝土表面氯离子浓度在 10mm 深度左右存在极大值，因此，混凝土表面氯离子浓度取该值计算。

由于构件所处环境条件不同以及混凝土变异性很大，在进行评定时应优先通过现场取样分析混凝土表面氯离子浓度。表面氯离子浓度与构件所处环境、位置及混凝土的孔结构密切相关。处于海水中的混凝土，表面氯离子浓度一般与海水中的氯盐浓度接近。例如，英国海岸浪溅区混凝土表面氯离子浓度为 0.3%~0.7% (混凝土质量比)。我国港口使用 9~16 年浪溅区的混凝土表面氯离子浓度为混凝土质量的 0.07%~0.56% ($1.7\sim 13\text{kg}/\text{m}^3$)。表 C.0.7 中数据为偏安全确定的。

C.0.8 近海大气区混凝土表面氯离子浓度受各种不确定因素影响，其累积速率可在 $0.004\%/a \sim 0.1\%/a$ (混凝土质量比) 范围内变化。应优先采用实测值确定氯离子聚集系数 (检测时间小于表 C.0.5 的聚集时间 t_0)，或确定混凝土表面氯离子浓度最终稳定值 (检测时间大于表 C.0.5 的聚集时间 t_1)。

C.0.9 给出了浪溅区和近海大气区构件保护层锈胶开裂时间的估算方法，其中浪溅区根据气候条件、混凝土强度等级、构件类

率和保护层厚度查表获得，近海大气区采用查表结果调整的方法获得。根据南京水利科学研究院“九五”攻关进行的港口水工建筑物耐久性研究中对国内外海工建筑物的调查结果，结构腐蚀与水泥用量无定量关系，混凝土保护层厚度为主要因素，因此，浪溅区构件钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间仅与保护层厚度有关。

C.0.10、C.0.11 氯离子侵蚀环境影响钢筋锈蚀速率的主要因素有氯离子浓度、环境温度、混凝土电阻率、局部环境条件。混凝土电阻率与水胶比、混凝土中初始氯离子含量、环境湿度有关。干湿交替环境下钢筋锈蚀速率最快。T. Liu 和 R. W. Weyers 通过 5 年室外暴露试验，根据 2927 次测试结果提出了钢筋锈蚀速率公式，本标准在其基础上进一步考虑了氯离子浓度与时间的相关关系及局部环境条件的影响，补充了电阻率的取值方法，使得公式更加合理。

C.0.12 给出了钢筋开始锈蚀至混凝土表面出现可接受最大外观损伤的时间估算方法。

C.0.13 保护层锈胀开裂后，水和氧气可以直接从裂缝进入，钢筋锈蚀速率加快，锈蚀机理更加复杂，建立钢筋锈蚀速率模型十分困难，公式 (C.0.13) 是借鉴碳化腐蚀的相成公式并考虑氯盐侵蚀的特点依据工程调查、验证结果给出的近似模型。

水利水电技术标准咨询服务中心 简介

中国水利水电出版社标准化出版分社

中国水利水电出版社，一个创新、进取、严谨、团结的文化团队，一家把握时代脉搏、紧跟科技步伐、关注社会热点、不断满足读者需求的出版机构。作为水利部直属的中央部委专业科技出版社，成立于1956年，1993年荣膺首批“全国优秀出版社”的光荣称号。经过多年努力，现已发展成为一家以水利电力专业为基础，兼营其他学科和门类，以纸质书刊为主、兼营电子音像和网络出版的综合型出版单位，迄今已经出版近四万种、数亿余册（套、盘）各类出版物。

水利水电技术标准咨询服务中心（中国水利水电出版社标准化出版分社）是水利部指定的行业标准出版、发行单位，主要负责水利水电技术标准及相关出版物的出版、宣贯、推广工作，同时还负责水利水电类科技专著、工具书、文集及相关职业培训教材编辑出版工作。

感谢读者多年来对水利水电技术标准咨询服务中心的关注和垂爱，中心全体人员真诚欢迎广大水利水电科技工作者对标准、水利水电图书出版及推广工作多提意见和建议，我们将秉承“服务水利，传播科技，弘扬文化”的宗旨，为您提供全方位的图书出版咨询服务，进一步做好标准和水利水电图书出版、发行及推广工作。

主任：王德鸿 010-68545951 wdh@waterpub.com.cn
副主任：陈 昊 010-68545981 herc@waterpub.com.cn
主任助理：王 启 010-68545982 wqi@waterpub.com.cn
责任编辑：王丹平 010-68545974 wdy@waterpub.com.cn
 王思浩 010-68545995 zsj@waterpub.com.cn
 覃 薇 010-68545889 qwei@waterpub.com.cn
 刘媛媛 010-68545948 lyuan@waterpub.com.cn
 赵 智 010-68545622 zz@waterpub.com.cn
 李今今 010-68545613 lj@waterpub.com.cn
传 真：010-68317913

水利部 水利部 水利部 水利部 水利部

水利部 水利部 水利部 水利部 水利部

<https://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

<https://www.slzjxx.com>
水利工程造价信息网



http://www.slzjxx.com
水利造价信息网



155170.394

SL 775—2018

中华人民共和国水利行业标准
水工混凝土结构耐久性评定规范
SL 775—2018

中国水利水电出版社出版发行
(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)

网址: www.waterpub.com.cn

E-mail: sales@waterpub.com.cn

电话: (010) 68567658 (营销中心)

北京地区经销商: 营销中心 (零售)

电话: (010) 88283904、53202645、68545874

全国各地新华书店和相关出版物零售网点经销

北京合众伟业印刷有限公司印刷

170mm×208mm 32开本 2.5印张 67千字
2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷

书号 155170·394

定价 34.00元



水利部信息中心
营销服务中心
销售热线: 010-68567658
售后服务: 010-68545874

凡购买本社书籍, 如有缺页、倒页、脱页的,

本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究