

前 言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2014年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标[2013]169号)的要求,标准编制组经广泛调查研究,认真总结工程实践经验,参考有关国际标准和国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,修订了本标准。

本标准的主要内容是:总则、术语和符号、混凝土结构耐久性设计的基本原则、环境作用类别与等级的划分、设计使用年限要求、材料与构造的基本要求、不同环境作用下的耐久性设计方法、后张法预应力体系的耐久性要求。

本标准修订的主要技术内容是:1. 补充了结构使用阶段的维护设计内容;2. 增加了热轧钢筋和耐腐蚀钢筋的耐久性要求;3. 增加了不同环境下结构耐久性构造与防裂要求;4. 补充了不同环境下使用防腐蚀附加措施的要求与规定;5. 增加了耐久性设计定量方法的原则与规定;6. 修改了混凝土原材料要求与规定;7. 更新了混凝土耐久性参数与指标的测试标准方法。

本标准由住房和城乡建设部负责管理,由清华大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议,请寄送清华大学(地址:北京市海淀区清华大学土木工程系建筑材料研究所,邮编:100084)。

本标准主编单位:清华大学

本标准参编单位:国家建筑工程质量监督检验中心
中国建筑科学研究院有限公司
北京市市政工程设计研究总院
中冶建筑研究总院有限公司
同济大学

西安建筑科技大学
中交四航研究院有限公司
中交武汉港湾工程设计研究院有限
公司
中交桥梁技术有限公司
中国建筑工程总公司

本标准主要起草人员：李克非 邸小坛 陈肇元 廉慧珍
王胜年 郝挺宇 阎培渝 包琦玮
肖绪文 鲍卫刚 干伟忠 黄士元
金伟良 郭保林 路新瀛 王晓锋
周永祥 钱稼茹 牛荻涛 谢永江
邢 锋 韩宁旭 张 鑫 赵 筠
赵铁军 朱万旭 邓德华 朱建国
张国志

本标准主要审查人员：缪昌文 徐有邻 罗 玲 朱祖熹
熊 威 陈改新 赵尚传 丁建彤
葛 勇 余其俊 冯 远

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	6
3.1	设计原则	6
3.2	环境类别和环境作用等级	7
3.3	设计使用年限	8
3.4	材料要求	8
3.5	构造规定	10
3.6	施工质量的附加要求	12
4	一般环境	14
4.1	一般规定	14
4.2	环境作用等级	14
4.3	材料与保护层厚度	15
4.4	构造与措施	17
5	冻融环境	19
5.1	一般规定	19
5.2	环境作用等级	19
5.3	材料与保护层厚度	21
5.4	构造与措施	22
6	氯化物环境	23
6.1	一般规定	23
6.2	环境作用等级	23
6.3	材料与保护层厚度	26

6.4	构造与措施	28
7	化学腐蚀环境	30
7.1	一般规定	30
7.2	环境作用等级	30
7.3	材料与保护层厚度	32
7.4	构造与措施	33
8	后张预应力体系的耐久性要求	34
8.1	一般规定	34
8.2	预应力筋的防护	34
8.3	锚固端的防护	35
8.4	构造与施工质量的附加要求	36
附录 A	混凝土结构耐久性设计的定量方法	38
附录 B	混凝土原材料的选用	40
附录 C	混凝土结构防腐蚀附加措施	44
附录 D	引气混凝土的含气量与气泡间隔系数	45
附录 E	混凝土耐久性参数与腐蚀性离子测定方法	46
	本标准用词说明	47
	引用标准名录	48

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	4
3	General Requirements	6
3.1	Design Principles	6
3.2	Classes and Intensities of Environmental Actions	7
3.3	Design Service Life	8
3.4	Requirements for Materials	8
3.5	Requirements for Detailing	10
3.6	Requirements for Construction Quality	12
4	Atmospheric Environment	14
4.1	General Requirements	14
4.2	Environmental Classification	14
4.3	Materials and Concrete Cover	15
4.4	Detailing and Protection Measures	17
5	Freeze-thaw Environment	19
5.1	General Requirements	19
5.2	Environmental Classification	19
5.3	Materials and Concrete Cover	21
5.4	Detailing and Protection Measures	22
6	Chloride Environment	23
6.1	General Requirements	23
6.2	Environmental Classification	23
6.3	Materials and Concrete Cover	26

6.4	Detailing and Protection Measures	28
7	Chemical Environment	30
7.1	General Requirements	30
7.2	Environmental Classification	30
7.3	Materials and Concrete Cover	32
7.4	Detailing and Protection Measures	33
8	Durability Requirements for Post-tensioned Prestressed Concrete Structures	34
8.1	General Requirements	34
8.2	Protection of Tendons and Wires	34
8.3	Protection of Anchorages	35
8.4	Detailing and Requirements for Construction Quality	36
Appendix A	Quantitative Design for Durability of Concrete Structures	38
Appendix B	Concrete Raw Materials	40
Appendix C	Additional Protective Measures for Concrete Structures	44
Appendix D	Air Entrainment and Spacing Factor of Air Voids	45
Appendix E	Test Methods for Durability Parameters and Aggressive Ions	46
	Explanation of Wording in This Standard	47
	List of Quoted Standards	48

1 总 则

1.0.1 为保证混凝土结构的耐久性达到规定的设计使用年限，确保工程结构的合理使用寿命，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于各种自然环境作用下房屋建筑、桥梁、隧道等基础设施与一般构筑物中普通混凝土结构及其构件的耐久性设计。

本标准未考虑低周反复荷载和持久荷载引起的结构性能劣化，不适用于轻骨料混凝土、纤维混凝土及其他特种混凝土结构以及工业生产的高温高湿环境、微生物腐蚀环境、电磁环境、高压环境、杂散电流等特殊腐蚀环境下混凝土结构的耐久性设计。

1.0.3 本标准的耐久性规定，是使结构达到设计使用年限并具有规定保证率的最低要求。设计中可根据工程的具体特点、当地的环境条件与实践经验以及具体的施工条件等适当提高。

1.0.4 混凝土结构的耐久性设计，除应符合本标准的规定外，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
温、湿度及其变化以及二氧化碳、氧、盐、酸等环境因素对结构或材料性能的影响。
- 2.1.2 劣化** degradation
材料或结构在所处环境中性能随时间的衰减。
- 2.1.3 劣化模型** degradation model
描述材料或结构性能劣化过程的数学表达式或试验装置。
- 2.1.4 结构耐久性** structure durability
在环境作用和正常维护、使用条件下，结构或构件在设计使用年限内保持其适用性和安全性的能力。
- 2.1.5 一般环境** atmospheric environment
无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用的混凝土结构或构件的暴露环境。
- 2.1.6 冻融环境** freeze-thaw environment
混凝土结构或构件经受反复冻融作用的暴露环境。
- 2.1.7 氯化物环境** chloride environment
混凝土结构或构件受到氯盐侵入作用并引起内部钢筋锈蚀的暴露环境，具体包括海洋氯化物环境和除冰盐等其他氯化物环境。
- 2.1.8 化学腐蚀环境** chemical environment
混凝土结构或构件受到自然环境中化学物质腐蚀作用的暴露环境，具体包括水、土中化学腐蚀环境和大气污染腐蚀环境。
- 2.1.9 设计使用年限** design working life
设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按预定目的使

用的年限。

2.1.10 氯离子扩散系数 chloride diffusion coefficient

表示氯离子在混凝土中从高浓度区向低浓度区扩散速率的参数。

2.1.11 抗冻耐久性指数 durability factor

采用标准试验方法、经规定次数快速冻融循环后混凝土的动弹性模量与初始动弹性模量的比值，通常用百分比表示。

2.1.12 引气 air entrainment

混凝土拌合时用表面活性剂在混凝土中形成均匀、稳定、球形封闭微气泡的工艺措施。

2.1.13 含气量 air content in concrete

混凝土中气泡体积与混凝土总体积的比值，用百分数表示。

2.1.14 气泡间隔系数 spacing factor of air voids

表示硬化混凝土或水泥浆体中相邻气泡边缘之间距离的参数。

2.1.15 维护 maintenance

为维持结构在使用年限内所需性能而采取的各种技术和管理活动。

2.1.16 修复 restore

通过修补、更换或加固，使受到损伤的结构恢复到满足正常使用所进行的活动。

2.1.17 大修 major repair

在一定期限内停止结构的正常使用，需大面积置换结构中的受损混凝土或更换结构主要构件的修复活动。

2.1.18 可修复性 restorability

受到损伤的结构或构件具有能够经济合理地修复的能力。

2.1.19 胶凝材料 cementitious material, or binder

混凝土原材料中具有胶结作用的水泥和粉煤灰、硅灰、粒化高炉矿渣粉等矿物掺和料的总称。

2.1.20 水胶比 water to binder ratio

单位体积混凝土拌合物中用水量与胶凝材料总量的质量比。

2.1.21 矿物掺和料混凝土 concrete with supplementary cementitious materials

胶凝材料中含有不小于 30% 的矿物掺和料（含水泥中的复合材）、需要采取较低的水胶比和特殊施工措施的混凝土。

2.1.22 钢筋的混凝土保护层 concrete cover to reinforcement

从混凝土表面到钢筋公称直径外边缘之间的最小距离；对后张法预应力筋，为套管或孔道外边缘到混凝土表面的距离。

2.1.23 防腐蚀附加措施 additional protective measures

在改善混凝土密实性、增加保护层厚度和利用防排水措施等常规手段的基础上，为进一步提高混凝土结构耐久性所采用的补充措施，包括混凝土表面涂层、环氧涂层钢筋、钢筋阻锈剂和阴极保护等。

2.1.24 保护年限 protection life

防腐蚀附加措施能够维持对混凝土或钢筋有效保护的年限。

2.1.25 多重防护措施 multiple protective measures

为确保混凝土结构和构件的使用年限而同时采取的多种防腐蚀附加措施。

2.1.26 耐久性再设计 durability redesign

根据结构检测在使用年限内为保持结构耐久性而采取的技术措施和方法。

2.1.27 混凝土结构 concrete structure

以混凝土为主制成的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构；无筋或不配置受力钢筋的结构为素混凝土结构，钢筋混凝土和预应力混凝土结构在本标准统称为配筋混凝土结构。

2.2 符 号

c ——钢筋的混凝土保护层厚度；

c_1 ——钢筋的混凝土保护层厚度的检测值；

C_{a30} ——强度等级为 C30 的引气混凝土；

D_{RCM} ——用外加电场加速离子迁移的标准试验方法测得的氯离子扩散系数；

DF ——混凝土抗冻耐久性指数；

E_0 ——经历冻融循环之前混凝土的初始动弹性模量；

E_1 ——经历冻融循环后混凝土的动弹性模量；

w/b ——混凝土的水胶比；

Δ ——混凝土保护层施工允许负偏差的绝对值。

住房和城乡建设部信息公开
浏览专用

3 基本规定

3.1 设计原则

3.1.1 混凝土结构的耐久性应根据结构的设计使用年限、结构所处的环境类别和环境作用等级进行设计。

当具有定量的劣化模型时，可按本标准附录 A 的规定针对耐久性参数和指标进行定量设计；暴露于氯化物环境下的重要混凝土结构，应按附录 A 规定针对耐久性参数和指标进行定量设计与校核。

3.1.2 混凝土结构的耐久性设计应包括下列内容：

- 1 确定结构的设计使用年限、环境类别及其作用等级；
- 2 采用有利于减轻环境作用的结构形式和布置；
- 3 规定结构材料的性能与指标；
- 4 确定钢筋的混凝土保护层厚度；
- 5 提出混凝土构件裂缝控制与防排水等构造要求；
- 6 针对严重环境作用采取合理的防腐蚀附加措施或多重防护措施；
- 7 采用保证耐久性的混凝土成型工艺、提出保护层厚度的施工质量验收要求；
- 8 提出结构使用阶段的检测、维护与修复要求，包括检测与维护必需的构造与设施；
- 9 根据使用阶段的检测必要时对结构或构件进行耐久性再设计。

3.1.3 混凝土结构的耐久性设计应建立结构在使用阶段的维护制度。维护制度应以施工结束或竣工验收状态为起点，根据使用周期中结构与构件的劣化规律与使用要求，综合考虑结构全寿命周期的性能与成本，确定合理的维护技术和维护频次。

3.2 环境类别和环境作用等级

3.2.1 混凝土结构暴露环境类别应按表 3.2.1 的规定确定。

表 3.2.1 环境类别

环境类别	名称	劣化机理
I	一般环境	正常大气作用引起钢筋锈蚀
II	冻融环境	反复冻融导致混凝土损伤
III	海洋氯化物环境	氯盐侵入引起钢筋锈蚀
IV	除冰盐等其他氯化物环境	氯盐侵入引起钢筋锈蚀
V	化学腐蚀环境	硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀

3.2.2 当结构构件受到多种环境类别共同作用时，应分别针对每种环境类别进行耐久性设计。

3.2.3 配筋混凝土结构的环境作用等级应按表 3.2.3 的规定确定。

表 3.2.3 环境作用等级

环境作用等级 环境类别	A 轻微	B 轻度	C 中度	D 严重	E 非常严重	F 极端严重
一般环境	I - A	I - B	I - C	—	—	—
冻融环境	—	—	II - C	II - D	II - E	—
海洋氯化物环境	—	—	III - C	III - D	III - E	III - F
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	—

3.2.4 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、钙矾石延迟生成反应和环境水对混凝土的溶蚀，在设计中采取相应的措施。对混

凝土含碱量的限制应根据本标准附录 B 确定。

3.2.5 混凝土结构的耐久性设计尚应根据结构的实际使用条件，考虑高速流水、风沙以及车轮行驶对混凝土表面的冲刷、磨损等作用对耐久性的影响。

3.3 设计使用年限

3.3.1 混凝土结构的设计使用年限不应低于《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 等相关国家现行标准的规定。

3.3.2 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。

环境作用等级为 D、E、F 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。

3.4 材料要求

I 混 凝 土

3.4.1 混凝土材料的强度等级、水胶比和原材料组成应根据结构所处的环境类别、环境作用等级和结构设计使用年限确定。

3.4.2 对重要工程或大型工程，应针对具体的环境类别和环境作用等级，分别提出抗冻耐久性指数、氯离子扩散系数等具体量化的耐久性指标。

3.4.3 结构构件的混凝土强度等级应同时满足耐久性和承载能力的要求。

3.4.4 配筋混凝土结构满足耐久性要求的混凝土最低强度等级应符合表 3.4.4 的规定。混凝土强度等级应根据 28d 或设计规定龄期的立方体抗压强度，并按现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB 50107 确定。

表 3.4.4 满足耐久性要求的混凝土最低强度等级

环境类别与作用等级	设计使用年限		
	100 年	50 年	30 年
I - A	C30	C25	C25
I - B	C35	C30	C25
I - C	C40	C35	C30
II - C	C _a 35, C45	C _a 30, C45	C _a 30, C40
II - D	C _a 40	C _a 35	C _a 35
II - E	C _a 45	C _a 40	C _a 40
III - C, IV - C, V - C, III - D, IV - D, V - D	C45	C40	C40
III - E, IV - E, V - E	C50	C45	C45
III - F	C50	C50	C50

3.4.5 素混凝土结构满足耐久性要求的混凝土最低强度等级，一般环境不应低于 C15；冻融环境和化学腐蚀环境规定应与本标准表 3.4.4 相同；氯化物环境可按本标准表 3.4.4 的 III - C 或 IV - C 环境作用等级确定。

3.4.6 预应力构件的混凝土最低强度等级不应低于 C40；大截面受压墩柱等普通钢筋混凝土构件，在加大钢筋保护层的前提下其混凝土强度可低于本标准表 3.4.4 的规定，但不应低于本标准第 3.4.5 条对素混凝土的规定。

II 钢 筋

3.4.7 直径为 6mm 的细直径热轧钢筋作为受力主筋，只限于在一般环境中使用。

3.4.8 预应力筋的公称直径不得小于 5mm。冷加工钢筋不应作为预应力筋使用。

3.4.9 同一构件中的受力普通钢筋，宜使用同牌号的钢筋。

3.4.10 使用不同牌号热轧钢筋的混凝土构件，其耐久性设计要

求相同。不锈钢钢筋和耐蚀钢筋等具有耐腐蚀性能的钢筋可用于环境作用等级为 D、E、F 的混凝土构件，其耐久性要求应经专门论证确定。

3.5 构造规定

3.5.1 不同环境作用下钢筋主筋、箍筋和分布筋，其混凝土保护层厚度应满足钢筋防锈、耐火以及与混凝土之间粘结力传递的要求，且混凝土保护层厚度设计值不得小于钢筋的公称直径。

3.5.2 预应力钢筋的混凝土保护层应符合下列规定：

1 具有连续密封套管的后张预应力筋，混凝土保护层厚度应取本标准规定值与孔道直径的 $1/2$ 两者的较大值；没有密封套管的后张预应力钢筋，其混凝土保护层厚度应在本标准规定值的基础上增加 10mm；

2 先张法构件中预应力钢筋在全预应力状态下的保护层厚度宜与普通钢筋相同，允许开裂构件的预应力筋的保护层厚度比普通钢筋增加 10mm；

3 直径大于 16mm 的预应力螺纹筋保护层厚度可与普通钢筋相同。

3.5.3 工厂预制的混凝土构件，其普通钢筋和预应力筋的混凝土保护层厚度可比现浇构件减少 5mm。

3.5.4 根据耐久性要求，在荷载作用下配筋混凝土构件的表面裂缝最大宽度计算值不应超过表 3.5.4 中的限值。对裂缝宽度无特殊外观要求的，当保护层设计厚度超过 30mm 时，可将厚度取为 30mm 计算裂缝的最大宽度。

表 3.5.4 表面裂缝计算宽度限值 (mm)

环境作用等级	钢筋混凝土构件	有粘结预应力混凝土构件
A	0.40	0.20
B	0.30	0.20 (0.15)
C	0.20	0.10

续表 3.5.4

环境作用等级	钢筋混凝土构件	有粘结预应力混凝土构件
D	0.20	按二级裂缝控制或按部分预应力 A 类构件控制
E, F	0.15	按一级裂缝控制或按全预应力类构件控制

注：1 括号中的宽度适用于采用钢丝或钢绞线的先张预应力构件；

2 裂缝控制等级为二级或一级时，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的计算裂缝宽度；部分预应力 A 类构件或全预应力构件按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的计算裂缝宽度。

3.5.5 有自防水要求的混凝土构件，其横向弯曲的表面裂缝计算宽度不应超过 0.20mm。

3.5.6 混凝土结构构件的形状和构造应有效地避免水、汽和有害物质在混凝土表面的积聚，并应采取下列构造措施：

1 受雨淋或可能积水的混凝土构件顶面应做成斜面，斜面应消除结构挠度和预应力反拱对排水的影响；

2 受雨淋的室外悬挑构件外侧边下沿，应做滴水槽、鹰嘴等防止雨水淌向构件底面的构造措施；

3 屋面、桥面应专门设置排水系统等防止将水直接排向下部构件混凝土表面的措施；

4 在混凝土结构构件与上覆的露天面层之间，应设置防水层；

5 环境作用等级为 D、E、F 的混凝土构件，应采取下列减小环境作用的措施：

1) 减少混凝土结构构件表面的暴露面积；

2) 避免表面的凹凸变化；

3) 宜将构件的棱角做成圆角。

3.5.7 可能遭受碰撞的混凝土结构，应设置防止出现碰撞的预警设施和避免碰撞损伤的防护措施。

3.5.8 施工缝、伸缩缝等连接缝的设置宜避开局部环境作用不利的部位，当不能避开不利部位时应采取防护措施。

3.5.9 暴露在混凝土结构构件外的吊环、紧固件、连接件等金属部件，表面应采用防腐措施，具体措施可按现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275 的规定执行；当环境类别为Ⅲ、Ⅳ时，其防腐范围应为从伸入混凝土内 100mm 处起至露出混凝土外的所有表面。

3.5.10 后张法预应力体系应按本标准第 8 章的规定采取多重防护措施。

3.5.11 混凝土结构可采用防腐蚀附加措施来确保构件的设计使用年限，不同环境类别下可采用的防腐蚀附加措施应符合本标准附录 C 的规定。

3.6 施工质量的附加要求

3.6.1 根据结构所处的环境类别与环境作用等级，混凝土的施工养护应符合表 3.6.1 的规定。

表 3.6.1 施工养护制度要求

环境作用等级	混凝土类型	养护制度
I - A	一般混凝土	至少养护 1d
	矿物掺和料混凝土	浇筑后立即覆盖、加湿养护，不少于 3d
I - B, I - C, II - C, III - C IV - C, V - C, II - D, V - D II - E, V - E	一般混凝土	养护至现场混凝土强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 3d
	矿物掺和料混凝土	浇筑后立即覆盖、加湿养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 7d
III - D, IV - D III E, IV E III - F	矿物掺和料混凝土	浇筑后立即覆盖、加湿养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 7d；继续保湿养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 70%

注：1 表中要求适用于混凝土表面大气温度不低于 10℃ 的情况，否则应延长养护时间；

2 有益的冻融环境中混凝土施工养护应按Ⅲ、Ⅳ类环境的规定执行；

3 矿物掺和料混凝土在 I - A 环境中用于永久浸没于水中的构件。

3.6.2 处于 I-A, I-B 环境下的混凝土结构构件, 其保护层厚度施工质量验收要求应按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定执行。

3.6.3 环境作用等级为 C、D、E、F 的混凝土结构构件, 保护层厚度的施工质量验收应符合下列规定:

1 对选定的每一配筋构件, 选择有代表性的最外侧钢筋 8 根~16 根进行混凝土保护层厚度的无破损检测; 对每根钢筋, 应选取 3 个代表性部位测量。

2 当同一构件所有测点有 95% 或以上的实测保护层厚度 c_1 满足下式要求时, 则应认为合格:

$$c_1 \geq c - \Delta \quad (3.6.3)$$

式中: c ——保护层设计厚度;

Δ ——保护层施工允许负偏差的绝对值, 对梁、柱等条形构件取 10mm, 板、墙等面形构件取 5mm。

3 不能满足第 2 款的要求时, 可增加同样数量的测点进行检测, 按两次测点的全部数据进行统计; 仍不能满足第 2 款要求的, 则判定为不合格, 并应要求采取相应的补救措施。

4 一般环境

4.1 一般规定

4.1.1 一般环境下混凝土结构的耐久性设计，应控制正常大气作用引起的内部钢筋锈蚀。

4.1.2 当混凝土结构构件同时承受其他环境作用时，应按环境作用等级较高的有关要求进行了耐久性设计。

4.1.3 一般环境下混凝土结构的构造要求除应符合本章规定外，尚应符合本标准第 3.5 节的规定。

4.1.4 一般环境下混凝土结构施工质量控制应按照本标准第 3.6 节的规定执行。

4.2 环境作用等级

4.2.1 一般环境对配筋混凝土结构的环境作用等级应按表 4.2.1 的规定确定。

表 4.2.1 一般环境的作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
I - A	室内干燥环境	常年干燥、低湿度环境中的结构内部构件
	长期浸没水中环境	所有表面均处于水下的构件
I - B	非干湿交替的结构内部潮湿环境	中、高湿度环境中的结构内部构件
	非干湿交替的露天环境	不接触或偶尔接触雨水的外部构件
	长期湿润环境	长期与水或湿润土体接触的构件

续表 4.2.1

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
I - C	干湿交替环境	与冷凝水、露水或与蒸汽频繁接触的结构内部构件； 地下水位较高的地下室构件； 表面频繁淋雨或频繁与水接触的构件； 处于水位变动区的构件

注：1 环境条件系指混凝土表面的局部环境；

2 干燥、低湿度环境指年平均湿度低于 60%，中、高湿度环境指年平均湿度大于 60%；

3 干湿交替指混凝土表面经常交替接触到大气和水的环境条件。

4.2.2 配筋混凝土墙、板构件的一侧表面接触室内干燥空气、另一侧表面接触水或湿润土体时，接触空气一侧的环境作用宜确定为 I - C 等级。

4.3 材料与保护层厚度

4.3.1 一般环境中的配筋混凝土结构构件，其普通钢筋的保护层最小厚度与相应的混凝土强度等级、最大水胶比应符合表 4.3.1 的要求。

表 4.3.1 一般环境中混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度 c (mm)

设计使用年限		100 年			50 年			30 年		
		混凝土强度等级	最大水胶比	c	混凝土强度等级	最大水胶比	c	混凝土强度等级	最大水胶比	c
环境作用等级	I - A	\geq C30	0.55	20	\geq C25	0.60	20	\geq C25	0.60	20
	I - B	C35	0.50	30	C30	0.55	25	C25	0.60	25
		\geq C40	0.45	25	\geq C35	0.50	20	\geq C30	0.55	20
	I - C	C40	0.45	40	C35	0.50	35	C30	0.55	30
		C45	0.40	35	C40	0.45	30	C35	0.50	25
		\geq C50	0.36	30	\geq C45	0.40	25	\geq C40	0.45	20

续表 4.3.1

设计使用年限		100年			50年			30年		
		混凝土 强度 等级	最大 水胶比	c	混凝土 强度 等级	最大 水胶比	c	混凝土 强度 等级	最大 水胶比	c
梁、柱等 条形构件	I - A	C30	0.55	30	C25	0.60	25	≥C25	0.60	20
		≥C35	0.50	25	≥C30	0.55	20			
	I - B	C35	0.50	35	C30	0.55	30	C25	0.60	30
		≥C40	0.45	30	≥C35	0.50	25	≥C30	0.55	25
	I - C	C40	0.45	45	C35	0.50	40	C30	0.55	35
		C45	0.40	40	C40	0.45	35	C35	0.50	30
	≥C50	0.36	35	≥C45	0.40	30	≥C40	0.45	25	

注：1 I - A 环境中使用年限低于 100 年的板、墙，当混凝土骨料最大公称粒径不大于 15mm 时，保护层最小厚度可降为 15mm，但最大水胶比不应大于 0.55；

2 处于年平均气温大于 20℃且年平均湿度高于 75% 环境中的构件，除 I - A 环境中的板、墙外，混凝土最低强度等级应比表中规定提高一级，或将钢筋的保护层最小厚度增加 5mm；

3 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少 5mm；

4 预应力钢筋的保护层厚度按照本标准 3.5.2 条的规定执行。

4.3.2 当胶凝材料中粉煤灰和矿渣等矿物掺和料掺量小于 20% 时，混凝土水胶比按本标准表 4.3.1 规定低于 0.45 的，可适当增加。

4.3.3 长期浸没水中的地下结构构件，设计使用年限为 100 年时，混凝土强度等级不宜低于 C35。

4.3.4 大截面混凝土墩柱在加大钢筋的混凝土保护层厚度的前提下，其混凝土强度等级可低于本标准表 4.3.1 中的要求，但降低幅度不应超过两个强度等级，且设计使用年限为 100 年和 50 年的构件，其强度等级不应低于 C25 和 C20。

当采用的混凝土强度等级比本标准表 4.3.1 的规定低一个等级时，混凝土保护层厚度应增加 5mm；当低两个等级时，混凝土

土保护层厚度应增加 10mm。

4.3.5 直径为 6mm 的细直径热轧钢筋作为受力主筋，当环境作用等级为轻微（I-A）和轻度（I-B）时，构件的设计使用年限不得超过 50 年；当环境作用等级为中度（I-C）时，设计使用年限不得超过 30 年。

4.3.6 公称直径不大于 6mm 的冷加工钢筋只能在一般环境中的 I-A、I-B 等级下作为受力钢筋使用，且构件的设计使用年限不得超过 50 年。

4.3.7 采用冷加工钢筋或直径 6mm 的细直径热轧钢筋作为构件的主要受力钢筋时，应在本标准表 4.3.1 规定的基础上将混凝土强度提高一个等级，或将钢筋的混凝土保护层厚度增加 5mm。

4.4 构造与措施

4.4.1 在 I-A、I-B 环境中的室内混凝土结构构件，考虑建筑饰面对于钢筋防锈的有利作用时，其混凝土保护层最小厚度则可比本标准表 4.3.1 规定适当减小，但减小幅度不应超过 10mm；在任何情况下板、墙等面形构件的最外侧钢筋保护层厚度不应小于 10mm；梁、柱等条形构件最外侧钢筋的保护层厚度不应小于 15mm。

在 I-C 环境中频繁遭遇雨淋的室外混凝土结构构件，考虑防水饰面的保护作用时，其混凝土保护层最小厚度则可比本标准表 4.3.1 规定适当减小，但不应低于 I-B 环境的要求。

4.4.2 直接接触土体浇筑的构件，其钢筋的混凝土保护层厚度不应小于 70mm；当采用混凝土垫层时，其保护层厚度可按本标准表 4.3.1 确定。

4.4.3 一般环境中混凝土构件采用的防腐蚀附加措施，可按本标准附录 C 的规定选取；当采取的防腐蚀附加措施符合本标准附录 C 规定的保护年限时，构件的混凝土强度可降低一个等级，但不应低于本标准表 4.3.1 对 I-A 环境的要求。

4.4.4 受到高速气流、水流影响或受到风沙、泥沙冲刷、人员

活动、车辆行驶等磨损影响的构件，其钢筋的保护层厚度宜在本标准表 4.3.1 规定的基础上增加 10mm~20mm；设计使用年限达到 100 年的地下结构和构件，其迎水面的钢筋保护层厚度不应小于 50mm。

4.4.5 一般环境中混凝土结构应采取裂缝控制措施，房屋建筑应按现行行业标准《建筑工程裂缝防治技术规程》JGJ/T 317 的规定执行。

5 冻融环境

5.1 一般规定

- 5.1.1** 冻融环境下混凝土结构的耐久性设计，应控制混凝土遭受长期冻融循环作用引起的损伤。
- 5.1.2** 长期与水体直接接触并会发生冻融循环的混凝土结构构件，应考虑冻融作用。
- 5.1.3** 冻融环境下混凝土结构的构造要求除应符合本章规定外，尚应符合本标准第 3.5 节的规定。
- 5.1.4** 冻融环境下混凝土结构的施工质量控制应按本标准第 3.6 节的规定执行；且混凝土构件在施工养护结束至初次受冻的时间不得少于一个月并避免与水接触。冬期施工中混凝土接触负温时的强度应大于 10N/mm^2 。

5.2 环境作用等级

- 5.2.1** 冻融环境对混凝土结构的环境作用等级应按表 5.2.1 确定。

表 5.2.1 冻融环境的作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
II - C	微冻地区的无盐环境 混凝土高度饱水	微冻地区的水位变动区构件和频繁受雨淋的构件水平表面
	严寒和寒冷地区的无盐环境 混凝土中度饱水	严寒和寒冷地区受雨淋构件的竖向表面

续表 5.2.1

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
II - D	严寒和寒冷地区的无盐环境 混凝土高度饱水	严寒和寒冷地区的水位变动区构件和频繁受雨淋的构件水平表面
	微冻地区的有盐环境 混凝土高度饱水	有氯盐微冻地区的水位变动区构件和频繁受雨淋的构件水平表面
	严寒和寒冷地区的有盐环境 混凝土中度饱水	有氯盐严寒和寒冷地区受雨淋构件的竖向表面
II - E	严寒和寒冷地区的有盐环境 混凝土高度饱水	有氯盐严寒和寒冷地区的水位变动区构件和频繁受雨淋的构件水平表面

注：1 冻融环境按最冷月平均气温划分为微冻地区、寒冷地区和严寒地区，其平均气温分别为： $-3^{\circ}\text{C}\sim-2.5^{\circ}\text{C}$ 、 $-8^{\circ}\text{C}\sim-3^{\circ}\text{C}$ 和 -8°C 以下；

2 中度饱水指冰冻前处于潮湿状态或偶与雨、水等接触，混凝土内饱水程度不高；高度饱水指冰冻前长期或频繁接触水或湿润土体，混凝土内高度水饱和；

3 无盐或有盐指冻结的水中是否含有盐类，包括海水中的氯盐、除冰盐和有机类融雪剂或其他盐类。

5.2.2 处于冻融环境、海水变动区的混凝土构件，其环境作用等级应根据当地调查确定。无调查资料时，微冻地区可按 II - C 等级考虑，寒冷和严寒地区可按 II - D 等级考虑；考虑浮冰撞击对构件的影响，可将环境作用等级提高一个等级。

5.2.3 位于冰冻线以上土中的混凝土结构构件，其环境作用等级应根据当地实际和经验确定；无调查资料或经验数据时，环境作用等级可按本标准表 5.2.1 的规定降低一个等级。

5.2.4 直接接触积雪的混凝土墙、柱底部，宜适当提高环境作用等级，可比表 5.2.1 的规定提高一个等级。

5.2.5 最冷月平均气温高于 2.5°C 的地区，混凝土结构可不考虑冻融环境作用。在极端天气条件下，可能偶然遭受冻融作用的混凝土构件，其环境作用等级可按本标准表 5.2.1 的 II - C 等级确定。

5.3 材料与保护层厚度

5.3.1 在冻融环境下，混凝土原材料的选用应符合本标准附录 B 的规定。环境作用等级为 II - D 和 II - E 的混凝土结构构件应采用引气混凝土，引气混凝土的含气量与气泡间隔系数应符合本标准附录 D 的规定。

5.3.2 冻融环境中的配筋混凝土结构构件，其普通钢筋的混凝土保护层最小厚度与相应的混凝土强度等级、最大水胶比应符合表 5.3.2 的规定。其中，有盐冻融环境中钢筋的混凝土保护层最小厚度，应按氯化物环境的有关规定执行。

表 5.3.2 冻融环境中混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度 c (mm)

设计使用年限		100 年			50 年			30 年			
		混凝土强度等级	最大水胶比	c	混凝土强度等级	最大水胶比	c	混凝土强度等级	最大水胶比	c	
板、墙等面形构件	II - C 无盐	C45	0.40	35	C45	0.40	30	C40	0.45	30	
		\geq C50	0.36	30	\geq C50	0.36	25	\geq C45	0.40	25	
		C _a 35	0.50	35	C _a 30	0.55	30	C _a 30	0.55	25	
	II - D	无盐	C _a 40	0.45	35	C _a 35	0.50	35	C _a 35	0.50	30
		有盐									
II - E 有盐	C _a 45	0.40		C _a 40	0.45		C _a 40	0.45			
梁、柱等条形构件	II - C 无盐	C45	0.40	40	C45	0.40	35	C40	0.45	35	
		\geq C50	0.36	35	\geq C50	0.36	30	\geq C45	0.40	30	
		C _a 35	0.50	35	C _a 30	0.55	35	C _a 30	0.55	30	
	II - D	无盐	C _a 40	0.45	40	C _a 35	0.50	40	C _a 35	0.50	35
		有盐									
II - E 有盐	C _a 45	0.40		C _a 40	0.45		C _a 40	0.45			

注：1 采取表面防水处理的附加措施时，可降低大体积混凝土对最低强度等级和最大水胶比的抗冻要求；

2 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少 5mm；

3 预应力钢筋的保护层厚度按照本标准 3.5.2 条的规定执行。

5.3.3 重要工程和大型工程，混凝土的抗冻耐久性指数不应低于表 5.3.3 的规定。

表 5.3.3 混凝土的抗冻耐久性指数 DF (%)

设计使用年限	100 年			50 年			30 年		
	高度 饱水	中度 饱水	含盐环境 下冻融	高度 饱水	中度 饱水	含盐环境 下冻融	高度 饱水	中度 饱水	含盐环境 下冻融
严寒地区	80	70	85	70	60	80	65	50	75
寒冷地区	70	60	80	60	50	70	60	45	65
微冻地区	60	60	70	50	45	60	50	40	55

注：1 抗冻耐久性指数为混凝土试件经 300 次快速冻融循环后混凝土的动弹性模量 E_1 与其初始值 E_0 的比值， $DF=100 \times E_1 / E_0$ ；在达到 300 次循环之前 E_1 已降至初始值的 60% 或试件重量损失已达到 5% 的试件，以此时的循环次数 N 计算其 DF 值， $DF=0.6 \times N / 300 \times 100$ ；

2 对于厚度小于 150mm 的薄壁混凝土构件，其 DF 值宜增加 5%。

5.4 构造与措施

5.4.1 冻融环境中混凝土结构的薄壁构件，宜增加构件厚度或采取有效的防腐蚀附加措施。

5.4.2 直接接触积雪的混凝土墙、柱底部，宜设置表面防护措施。

5.4.3 冻融环境中混凝土构件采用的防腐蚀附加措施，可按本标准附录 C 的规定选取；当采取的防腐蚀附加措施符合本标准附录 C 规定的保护年限时，构件的混凝土强度可降低一级，但不应低于表 5.3.2 对 II-C 等级的规定。

6 氯化物环境

6.1 一般规定

6.1.1 氯化物环境中配筋混凝土结构的耐久性设计，应控制氯离子引起的钢筋锈蚀。

6.1.2 海洋和近海地区接触海水氯化物的配筋混凝土结构构件，应按海洋氯化物环境进行耐久性设计。

6.1.3 具有下列环境条件的配筋混凝土结构构件，应按除冰盐等其他氯化物环境进行耐久性设计：

1 降雪地区接触除冰盐或盐雾的桥梁、隧道、停车库、道路周围构筑物等的构件；

2 内陆地区接触含有氯盐的地下水、土的构件；

3 频繁接触含氯盐消毒剂的构件。

6.1.4 氯化物环境作用等级为 E、F 的配筋混凝土结构，应在耐久性设计中提出结构使用过程中定期检测的要求。重要工程尚应在设计阶段作出定期检测的详细规划，并设置专供检测取样用的构件。

6.1.5 氯盐环境下混凝土结构的构造要求除应符合本章规定外，尚应符合本标准第 3.5 节的规定。

6.1.6 氯化物环境中混凝土结构施工质量控制应按照本标准第 3.6 节的规定执行。

6.2 环境作用等级

I 海洋氯化物环境

6.2.1 海洋氯化物环境对配筋混凝土结构构件的环境作用等级，应按表 6.2.1 确定。

表 6.2.1 海洋氯化物环境的作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
Ⅲ-C	水下区和土中区； 周边永久浸没于海水或埋于土中	桥墩，承台，基础
Ⅲ-D	大气区（轻度盐雾）： 距平均水位 15m 高度以上的海上大气区； 涨潮岸线以外 100m~300m 内的陆上室外环境	桥墩，桥梁上部结构构件； 靠海的陆上建筑外墙及室外构件
Ⅲ-E	大气区（重度盐雾）： 距平均水位上方 15m 高度以内的海上大气区； 离涨潮岸线 100m 以内、低于海平面以上 15m 的陆上室外环境	桥梁上部结构构件； 靠海的陆上建筑外墙及室外构件
	潮汐区和浪溅区，非炎热地区	桥墩，承台，码头
Ⅲ-F	潮汐区和浪溅区，炎热地区	桥墩，承台，码头

注：1 近海或海洋环境中的水下区、潮汐区、浪溅区和大气区的划分，按现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275 的规定确定。近海或海洋环境的土中区指海底以下或近海的陆区地下，其地下水中的盐类成分与海水相近。

2 轻度盐雾区与重度盐雾区界限的划分，宜根据当地的具体环境和既有工程调查确定。靠近海岸的陆上建筑物，盐雾对室外混凝土构件的作用尚应考虑风向、地貌等因素。密集建筑群，除直面海和迎风的建筑物外，其他建筑物可适当降低作用等级。

3 炎热地区指年平均温度高于 20℃ 的地区。

6.2.2 受到海水激流和海砂冲刷的混凝土构件，其环境作用等级宜按本标准表 6.2.1 的规定提高一级。

6.2.3 一侧接触海水或含有海水土体、另一侧接触空气的海中或海底隧道配筋混凝土结构构件，其环境作用等级不宜低于 Ⅲ-E。

6.2.4 江河入海口水域和内陆盐湖的含盐量应根据实测确定。

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低于本标准表 6.2.1 的规定。

II 除冰盐等其他氯化物环境

6.2.5 除冰盐等其他氯化物环境对于配筋混凝土结构构件的环境作用等级宜根据调查确定；当无相应的调查资料时，可按表 6.2.5 确定。

表 6.2.5 除冰盐等其他氯化物环境的作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
IV - C	受除冰盐盐雾轻度作用	距离行车道 10m 以外接触盐雾的构件
	四周浸没于含氯化物水中	地下水中构件
	接触较低浓度氯离子水体，且有干湿交替	处于水位变动区，或部分暴露于大气、部分在地下水土中的构件
IV - D	受除冰盐水溶液轻度溅射作用	桥梁护墙（栏），立交桥桥墩
	接触较高浓度氯离子水体，且有干湿交替	海水游泳池壁；处于水位变动区，或部分暴露于大气、部分在地下水土中的构件
IV - E	直接接触除冰盐溶液	路面，桥面板，与含盐渗漏水接触的桥梁盖梁、墩柱顶面
	受除冰盐水溶液重度溅射或重度盐雾作用	桥梁护栏、护墙，立交桥桥墩；车道两侧 10m 以内的构件
	接触高浓度氯离子水体，有干湿交替	处于水位变动区，或部分暴露于大气、部分在地下水土中的构件

- 注：1 水中氯离子浓度的划分为：较低，100mg/L~500mg/L；较高，500mg/L~5000mg/L；高，大于 5000mg/L；
- 2 土中氯离子浓度的划分为：较低，150mg/kg ~ 750mg/kg；较高，750mg/kg~7500mg/kg；高，大于 7500mg/kg；
- 3 除冰盐环境的作用等级与冬季喷洒除冰盐的具体用量和频度有关，可根据具体情况作出调整。

6.2.6 接触内陆盐湖的配筋混凝土结构构件，其大气区的环境作用等级可按本标准表 6.2.1 和第 6.2.4 条的规定确定，其接触含氯盐水体的环境作用等级可根据实际含盐量按本标准表 6.2.5 的规定确定。

6.2.7 设置直排式泄水孔的混凝土桥梁翼缘板，当其泄水孔附近受到除冰盐作用时环境作用等级宜确定为 IV-D。

6.3 材料与保护层厚度

6.3.1 氯化物环境中应采用掺有矿物掺和料的混凝土。对混凝土的耐久性质量和原材料选用要求应符合本标准附录 B 的规定。

6.3.2 氯化物环境中的配筋混凝土结构构件，其普通钢筋的保护层最小厚度及其相应的混凝土强度等级、最大水胶比应符合表 6.3.2 的规定。

表 6.3.2 氯化物环境中混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度 c (mm)

设计使用年限		100 年			50 年			30 年		
		混凝土强度等级	最大水胶比	c	混凝土强度等级	最大水胶比	c	混凝土强度等级	最大水胶比	c
板、墙等面形构件	Ⅲ-C, Ⅳ-C	C45	0.40	45	C40	0.42	40	C40	0.42	35
	Ⅲ-D, Ⅳ-D	C45	0.40	55	C40	0.42	50	C40	0.42	45
		\geq C50	0.36	50	\geq C45	0.40	45	\geq C45	0.40	40
	Ⅲ-E, Ⅳ-E	C50	0.36	60	C45	0.40	55	C45	0.40	45
\geq C55		0.33	55	\geq C50	0.36	50	\geq C50	0.36	40	
Ⅲ-F	C50	0.36	65	C50	0.36	60	C50	0.36	55	
	\geq C55	0.33	60	\geq C55	0.36	55				
梁、柱等条形构件	Ⅲ-C, Ⅳ-C	C45	0.40	50	C40	0.42	45	C40	0.42	40
	Ⅲ-D, Ⅳ-D	C45	0.40	60	C40	0.42	55	C40	0.42	50
		\geq C50	0.36	55	\geq C45	0.40	50	\geq C45	0.40	40

续表 6.3.2

设计使用年限		100 年			50 年			30 年		
		混凝土 强度 等级	最大 水胶比	c	混凝土 强度 等级	最大 水胶比	c	混凝土 强度 等级	最大 水胶比	c
梁、 柱等 条形 构件	Ⅲ-E, Ⅳ-E	C50	0.36	65	C45	0.40	60	C45	0.40	50
		≥C55	0.33	60	≥C50	0.36	55	≥C50	0.36	45
	Ⅲ-F	C50	0.36	70	C50	0.36	65	C50	0.36	55
		≥C55	0.33	65	≥C55	0.36	60			

注：1 当满足本标准表 6.3.6 中规定的扩散系数时，C50 和 C55 混凝土所对应的最大水胶比可分别提高到 0.40 和 0.38；

2 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少 5mm；

3 预应力钢筋的保护层厚度按照本标准 3.5.2 条的规定执行。

6.3.3 海洋氯化物环境作用等级为Ⅲ-E 和Ⅲ-F 的配筋混凝土，宜采用矿物掺和料混凝土，否则应提高表 6.3.2 中的混凝土强度等级或增加钢筋的保护层最小厚度。

6.3.4 海水冰冻环境与除冰盐环境宜采用引气混凝土。当采用引气混凝土时，本标准表 6.3.2 中混凝土强度等级可降低一个等级，但引气混凝土的强度等级和最大水胶比仍应符合本标准表 5.3.2 的规定。

6.3.5 对大截面柱、墩等配筋混凝土受压构件中的钢筋，宜采用较大的混凝土保护层厚度，且相应的混凝土强度等级不宜降低。

6.3.6 对于氯化物环境中的重要配筋混凝土结构工程，设计时应提出混凝土的抗氯离子侵入性指标，并应满足表 6.3.6 的要求。

表 6.3.6 混凝土的抗氯离子侵入性指标

设计使用年限	100 年		50 年	
环境作用等级	D	E	D	E
侵入性指标				
28d 龄期氯离子扩散系数 $D_{RCM} (10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$	≤ 7	≤ 4	≤ 10	≤ 6

注：1 表中的混凝土抗氯离子侵入性指标与本标准表 6.3.2 中规定的混凝土保护层厚度相对应，实际采用的保护层厚度高于表 6.3.2 的规定时，可对表中数据作适当调整；

2 表中的 D_{RCM} 值适用于矿物掺和料混凝土，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。

6.4 构造与措施

6.4.1 氯化物环境中配筋混凝土桥梁结构的构造要求应符合下列规定：

1 遭受氯盐腐蚀的混凝土桥面、墩柱顶面和车库楼面等部位应设置排水坡；

2 遭受雨淋的桥面结构，应防止雨水流到底面或下部结构构件表面；

3 桥面排水管道应采用非钢质或球墨铸铁等耐腐蚀材料，排水口应远离混凝土构件表面，并应与墩柱基础保持一定距离；

4 桥面铺装与混凝土桥面板之间应设置防水层；

5 应优先采用混凝土预制构件；

6 海水水位变动区和浪溅区，不宜设置施工缝与连接缝；

7 伸缩缝及附近部位的混凝土宜局部采取防腐蚀附加措施，处于伸缩缝下方的构件应采取防止渗漏水侵蚀的构造措施。

6.4.2 氯化物环境中钢筋混凝土结构构件的纵向受力钢筋直径不应小于 16mm。

6.4.3 处于流动海水中或同时受水中泥沙冲刷的配筋混凝土构件，其钢筋的混凝土保护层厚度应在本标准表 6.3.2 规定的基础

上增加 10mm~20mm。

6.4.4 混凝土表面的防水层除经专门论证，不应考虑其对氯化物的阻隔作用。

6.4.5 受氯化物直接作用的混凝土墩柱顶面，宜加大钢筋的混凝土保护层厚度或采用防腐蚀附加措施。

6.4.6 重要配筋混凝土结构的构件，当氯化物环境作用等级为 E、F 级时应采用防腐蚀附加措施。

6.4.7 氯盐环境中混凝土构件采用的防腐蚀附加措施，可按本标准附录 C 的规定选取；当防腐蚀附加措施的保护年限符合本标准附录 C 的规定时，构件的混凝土强度等级可降低，但应符合下列规定：

1 当环境作用等级为 C、D 时，采用一种或以上的防腐蚀附加措施，混凝土强度可降低一个等级，但不应低于 C40。

2 当环境作用等级为 E、F 时，采用一种防腐蚀附加措施，混凝土强度等级不得降低；采用两种附加措施后，混凝土强度可降低一个等级，但不应低于 C45。

6.4.8 氯化物环境中，用于稳定周围岩土的混凝土初期支护，作为永久结构考虑则应满足相应的耐久性要求；否则不应考虑其中的钢筋和型钢在永久承载中的作用。

7 化学腐蚀环境

7.1 一般规定

7.1.1 化学腐蚀环境下混凝土结构的耐久性设计，应控制混凝土遭受化学腐蚀性物质长期侵蚀引起的损伤。

7.1.2 化学腐蚀环境下混凝土结构的构造要求除应符合本章规定外，尚应符合本标准第 3.5 节的规定。

7.1.3 化学腐蚀环境下混凝土结构的施工质量控制应按照本标准第 3.6 节的规定执行。

7.2 环境作用等级

I 水、土中化学腐蚀环境

7.2.1 水、土中的硫酸盐和酸类物质对混凝土结构构件的环境作用等级可按表 7.2.1 确定。

表 7.2.1 水、土中硫酸盐和酸类物质环境作用等级

作用因素 作用等级	水中硫酸根 离子浓度 SO_4^{2-} (mg/L)	土中硫酸根 离子浓度 (水溶值) SO_4^{2-} (mg/kg)	水中镁离 子浓度 (mg/L)	水中酸碱度 (pH 值)	水中侵蚀性 二氧化碳浓度 (mg/L)
V - C	200~1000	300~1500	300~1000	6.5~5.5	15~30
V - D	1000~4000	1500~6000	1000~3000	5.5~4.5	30~60
V - E	4000~10000	6000~15000	≥ 3000	< 4.5	60~100

注：1 表中与环境作用等级相应的硫酸根浓度，所对应的环境条件为非干旱高寒地区的干湿交替环境。当无干湿交替（长期浸没于地表或地下水中）时，可按表中的等级降低一级，但不得低于 V - C 级。对于干旱、高寒地区的环境条件可按本标准第 7.2.3 条确定。

2 当混凝土结构构件处于弱透水土体中时，土中硫酸根离子、水中镁离子、水中侵蚀性二氧化碳及水的 pH 值的作用等级可按相应的等级降低一级，但不得低于 V - C 级。

3 高水压流动水条件下，应提高相应的环境作用等级。

4 表中硫酸根等含量的测定方法应符合本标准附录 E 的规定。

7.2.2 当有多种化学物质共同作用时，环境作用等级应按下列原则确定：

1 对含有较高浓度氯盐的地下水、土且不存在干湿交替作用时，可不单独考虑硫酸盐的作用；

2 当化学物质的腐蚀作用无叠加效应时，应取其中最高的环境作用等级；

3 当其中有两种及以上化学物质的作用等级相同且可能加重化学腐蚀时，其环境作用等级应再提高一级。

7.2.3 部分接触含硫酸盐的水、土而部分暴露于大气中的混凝土结构构件，可按本标准表 7.2.1 确定环境作用等级。当混凝土结构构件处于干旱、高寒地区，其环境作用等级应按表 7.2.3 确定。

表 7.2.3 干旱、高寒地区硫酸盐环境作用等级

作用因素 环境作用等级	水中硫酸根离子浓度 SO_4^{2-} (mg/L)	土中硫酸根(水溶值)离子浓度 SO_4^{2-} (mg/kg)
V-C	200~500	300~750
V-D	500~2000	750~3000
V-E	2000~5000	3000~7500

注：我国干旱区指干燥度系数大于 2.0 的地区，高寒地区指海拔 3000m 以上的地区。

II 大气污染腐蚀环境

7.2.4 大气污染环境对混凝土结构构件的作用等级可按表 7.2.4 确定。

表 7.2.4 大气污染环境作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
V-C	汽车或机车废气	受废气直射的结构构件，处于封闭空间内受废气作用的车库或隧道构件
V-D	酸雨(雾、露) $4.5 \leq \text{pH}$ 值 ≤ 5.6	遭酸雨频繁作用的构件
V-E	酸雨 pH 值小于 4.5	遭酸雨频繁作用的构件

7.2.5 处于含盐大气中的混凝土结构构件环境作用等级可按 V-C 级确定，对气候常年湿润的环境，可不考虑其环境作用。

7.2.6 污水管道、厩舍、化粪池等接触硫化氢气体或其他腐蚀性液体的混凝土结构构件，可将环境作用确定为 V-E 级，当作用程度较轻时也可按 V-D 级确定。

7.3 材料与保护层厚度

7.3.1 化学腐蚀环境下的混凝土不宜单独使用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥作为胶凝材料，其原材料组成应根据环境类别和作用等级按本标准附录 B 确定。

7.3.2 水、土中的化学腐蚀环境、大气污染环境和含盐大气环境中的配筋混凝土结构构件，其普通钢筋的混凝土保护层最小厚度及相应的混凝土强度等级、最大水胶比应按表 7.3.2 确定。

表 7.3.2 化学腐蚀环境下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度 c (mm)

设计使用年限		100 年			50 年			30 年		
		混凝土强度等级	最大水胶比	c	混凝土强度等级	最大水胶比	c	混凝土强度等级	最大水胶比	c
环境作用等级	V-C	C45	0.40	40	C40	0.45	35	C40	0.45	30
	V-D	C45	0.40	45	C40	0.45	40	C40	0.45	35
		\geq C50	0.36	40	\geq C45	0.40	35	\geq C45	0.40	30
V-E	C50	0.36	45	C45	0.40	40	C45	0.40	35	
	\geq C55	0.33	40	\geq C50	0.36	35				
板、墙等 面形构件	V-C	C45	0.40	45	C40	0.45	40	C40	0.45	35
		\geq C50	0.36	40	\geq C45	0.40	35	\geq C45	0.40	30
	V-D	C45	0.40	50	C40	0.45	45	C40	0.45	40
		\geq C50	0.36	45	\geq C45	0.40	40	\geq C45	0.40	35
	V-E	C50	0.36	50	C45	0.40	45	C45	0.40	40
		\geq C55	0.33	45	\geq C50	0.36	40			
梁、柱等 条形构件	V-C	C45	0.40	45	C40	0.45	40	C40	0.45	35
		\geq C50	0.36	40	\geq C45	0.40	35	\geq C45	0.40	30
	V-D	C45	0.40	50	C40	0.45	45	C40	0.45	40
\geq C50		0.36	45	\geq C45	0.40	40	\geq C45	0.40	35	
V-E	C50	0.36	50	C45	0.40	45	C45	0.40	40	
	\geq C55	0.33	45	\geq C50	0.36	40				

注：1 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少 5mm；

2 预应力钢筋的保护层厚度按本标准 3.5.2 条的规定执行。

7.3.3 水、土中的化学腐蚀环境、大气污染环境和含盐大气环境中的素混凝土结构构件，其混凝土的最低强度等级和最大水胶比应与配筋混凝土结构构件相同。

7.3.4 在干旱、高寒硫酸盐环境和含盐大气环境中的混凝土结构，宜采用引气混凝土，引气要求可按冻融环境中度饱水条件下的规定确定，引气后混凝土强度等级可按本标准表 7.3.2 的规定降低一级或两级。

7.4 构造与措施

7.4.1 严重化学腐蚀环境下的混凝土结构构件，应结合对当地环境和既有建筑物的调查，在混凝土表面加设防腐蚀附加措施或加大混凝土构件的截面尺寸。对于配筋混凝土结构薄壁构件宜增加其厚度。

7.4.2 当混凝土结构构件处于硫酸根离子浓度大于 1500mg/L 的流动水或 pH 值小于 3.5 的水中时，应在混凝土表面采取专门的防腐蚀附加措施。

7.4.3 化学腐蚀环境中混凝土构件采用的防腐蚀附加措施，可按本标准附录 C 的规定选取；当采取的防腐蚀附加措施符合本标准附录 C 规定的保护年限时，构件的混凝土强度可降低一个等级，但不应低于本标准表 7.3.2 对 V-C 环境的规定。

8 后张预应力体系的耐久性要求

8.1 一般规定

8.1.1 后张预应力混凝土结构除应满足钢筋混凝土结构的耐久性要求外，尚应根据结构所处环境类别和作用等级对预应力体系采取相应的多重防护措施。

8.1.2 在严重环境作用下，当难以确保预应力体系的耐久性达到结构整体的设计使用年限时，应采用可更换的预应力体系。

8.2 预应力筋的防护

8.2.1 预应力筋（钢绞线、钢丝）的耐久性性能可通过材料表面处理、预应力套管、预应力套管填充、混凝土保护层和结构构造措施等环节提供保证。预应力筋的耐久性防护措施应按表 8.2.1 的规定选用。

表 8.2.1 预应力筋的耐久性防护措施

编号	防护工艺	防护措施
PS1	预应力筋表面处理	油脂涂层或环氧涂层
PS2	预应力套管内部填充	水泥基浆体、油脂或石蜡
PS2a	预应力套管内部特殊填充	管道填充浆体中加入阻锈成分
PS3	预应力套管	高密度聚乙烯、聚丙烯套管或金属套管
PS3a	预应力套管特殊处理	套管表面涂刷防渗涂层
PS4	混凝土保护层	满足本标准第 3.5.2 条规定
PS5	混凝土表面涂层	耐腐蚀表面涂层和防腐蚀面层

注：1 预应力筋钢材质量需要符合国家现行标准《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223、《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 与《预应力钢丝及钢绞线用热轧盘条》YB/T 146 的技术规定；

2 金属套管仅可用于体内预应力体系，其使用应符合本标准第 8.4.1 条的规定。

8.2.2 不同环境作用等级下，预应力筋的多重防护措施可根据具体情况按表 8.2.2 的规定选用。

表 8.2.2 预应力筋的多重防护措施

环境类别与作用等级		预应力体系	体内预应力体系	体外预应力体系
Ⅰ 大气环境	I - A, I - B		PS2, PS4	PS2, PS3
	I - C		PS2, PS3, PS4	PS2a, PS3
Ⅱ 冻融环境	Ⅱ - C, Ⅱ - D (无盐)		PS2, PS3, PS4	PS2a, PS3
	Ⅱ - D (有盐), Ⅱ - E		PS2a, PS3, PS4	PS2a, PS3a
Ⅲ 海洋环境	Ⅲ - C, Ⅲ - D		PS2a, PS3, PS4	PS2a, PS3a
	Ⅲ - E		PS2a, PS3, PS4, PS5	PS1, PS2a, PS3
	Ⅲ - F		PS1, PS2a, PS3, PS4, PS5	PS1, PS2a, PS3a
Ⅳ 除冰盐	Ⅳ - C, Ⅳ - D		PS2a, PS3, PS4	PS2a, PS3a
	Ⅳ - E		PS2a, PS3, PS4, PS5	PS1, PS2a, PS3
Ⅴ 化学腐蚀	Ⅴ - C, Ⅴ - D		PS2a, PS3, PS4	PS2a, PS3a
	Ⅴ - E		PS2a, PS3, PS4, PS5	PS1, PS2a, PS3

8.3 锚固端的防护

8.3.1 预应力锚固端的耐久性应通过锚头组件材料、锚头封罩、封罩填充、锚固区封填和混凝土表面处理等环节提供保证。锚固端的防护工艺和措施应按表 8.3.1 的规定选用。

表 8.3.1 预应力锚固端耐久性防护工艺与措施

编号	防护工艺	防护措施
PA1	锚具表面处理	锚具表面镀锌或者镀氧化膜工艺
PA2	锚头封罩内部填充	水泥基浆体、油脂或者石蜡
PA2a	锚头封罩内部特殊填充	填充材料中加入阻锈成分
PA3	锚头封罩	高耐磨性材料
PA3a	锚头封罩特殊处理	锚头封罩表面涂刷防涂涂层

续表 8.3.1

编号	防护工艺	防护措施
PA4	锚固端封端层	细石混凝土材料
PA5	锚固端表面涂层	耐腐蚀表面涂层和防腐蚀面层

注：1 锚具组件材料需要符合国家现行标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370、《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的技术规定；

2 锚固端封端层的细石混凝土材料应符合本标准第 8.4.4 条的规定。

8.3.2 不同环境作用等级下，预应力锚固端的多重防护措施可根据具体情况按表 8.3.2 的规定选用。

表 8.3.2 预应力锚固端的多重防护措施

环境类别与作用等级		锚固端类型	
		埋入式锚头	暴露式锚头
I 大气环境	I - A, I - B	PA4	PA2, PA3
	I - C	PA2, PA3, PA4	PA2a, PA3
II 冻融环境	II - C, II - D (无盐)	PA2, PA3, PA4	PA2a, PA3
	II - D (有盐), II - E	PA2a, PA3, PA4	PA2a, PA3a
III 海洋环境	III - C, III - D	PA2a, PA3, PA4	PA2a, PA3a
	III - E	PA2a, PA3, PA4, PA5	不宜使用
	III - F	PA1, PA2a, PA3, PA4, PA5	不宜使用
IV 除冰盐	IV - C, IV - D	PA2a, PA3, PA4	PA2a, PA3a
	IV - E	PA2a, PA3, PA4, PA5	不宜使用
V 化学腐蚀	V - C, V - D	PA2a, PA3, PA4	PA2a, PA3a
	V - E	PA2a, PA3, PA4, PA5	不宜使用

8.4 构造与施工质量的附加要求

8.4.1 当环境作用等级为 D, E, F 时，后张预应力体系中的管道应采用高密度聚乙烯套管或聚丙烯塑料套管；分节段施工的预应力桥梁结构，节段间的体内预应力套管不应使用金属套管。

8.4.2 高密度聚乙烯和聚丙烯预应力套管应能承受不小于 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 的内压力。采用体内预应力体系时，套管的厚度不应小于 2mm ；采用体外预应力体系时，套管的厚度不应小于 4mm 。

8.4.3 用水泥基浆体填充后张预应力管道时，应控制浆体的流动性、泌水率、体积稳定性和强度等指标。

在冬期施工环境中灌浆，灌入的浆料必须在 $10^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ 环境温度中至少保存 24h 。

8.4.4 后张预应力体系的锚固端应采用无收缩高性能细石混凝土封锚，其水胶比不得大于本体混凝土的水胶比，且不应大于 0.4 ；保护层厚度不应小于 50mm ，且在氯化物环境中不应小于 80mm 。

8.4.5 位于桥梁梁端的后张预应力锚固端，应设置专门的排水沟和滴水沿；现浇节段间的锚固端，应在相邻两节梁体施工完成、混凝土硬化干燥后，在梁体顶板表面施工缝两侧各 250mm 范围内涂刷防水层；预制节段间的锚固端除应在梁体上表面涂刷防水涂层外，尚应在预制节段间涂刷或填充环氧树脂。

附录 A 混凝土结构耐久性设计的定量方法

A.0.1 混凝土结构的耐久性定量设计应针对具体环境作用下的性能劣化过程，确保结构和构件在使用年限内达到预期的性能要求。使用年限大于 50 年的重要工程，其混凝土结构的耐久性设计宜采用定量方法。

A.0.2 混凝土结构耐久性定量设计应明确结构和构件的性能劣化规律、耐久性极限状态以及设计使用年限。用于定量设计的劣化模型应能够得到环境作用和结构与构件性能劣化抗力之间的关系。

定量设计使用劣化模型，应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.0.3 结构构件性能劣化的耐久性极限状态应按正常使用极限状态考虑，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下列三种：

- 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.0.4 钢筋开始锈蚀的极限状态应为大气作用下钢筋表面脱钝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。

设计使用年限 50 年以上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.0.5 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.0.6 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.0.7 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，并应满足正常使用极限状态的可靠度要求。根据正常使用极限状态失效后果的严重程度，可靠度宜为90%~95%，相应的失效概率宜为5%~10%。

A.0.8 混凝土结构耐久性定量设计的性能劣化模型，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材料配合比和施工方法对劣化规律的影响。

耐久性定量设计结果对设计使用年限的保证率应符合本标准第A.0.7条的规定。

A.0.9 氯离子侵入混凝土内部的过程，可采用经验扩散模型。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尚应考虑混凝土材料的组成特性、混凝土构件使用环境的温、湿度等因素的影响。

A.0.10 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；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 混凝土原材料的选用

B.1 混凝土胶凝材料

B.1.1 单位体积混凝土的胶凝材料用量宜符合表 B.1.1 的规定。

表 B.1.1 单位体积混凝土的胶凝材料用量

强度等级	最大水胶比	最小用量 (kg/m ³)	最大用量 (kg/m ³)
C25	0.60	260	—
C30	0.55	280	—
C35	0.50	300	—
C40	0.45	320	—
C45	0.40	—	450
C50	0.36	—	500
≥C55	0.33	—	550

注：1 表中数据适用于最大骨料粒径为 20mm 的情况，骨料粒径较大时宜适当降低胶凝材料用量，骨料粒径较小时可适当增加胶凝材料用量；

2 引气混凝土的胶凝材料用量与非引气混凝土要求相同；

3 当胶凝材料的矿物掺和料掺量大于 20% 时，最大水胶比不应大于 0.45。

B.1.2 配筋混凝土的胶凝材料中，矿物掺和料用量占胶凝材料总量的比值应根据环境类别与作用等级、混凝土水胶比、钢筋的混凝土保护层厚度以及混凝土施工养护期限等因素综合确定，并应符合下列规定：

1 长期处于室内干燥 I - A 环境中的混凝土结构构件，当其钢筋（包括最外侧的箍筋、分布钢筋）的混凝土保护层厚度不超过 20mm 且水胶比大于 0.5 时，无防止碳化措施不应使用矿物

掺和料或粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥；长期湿润 I - A 环境中的混凝土结构构件，可采用矿物掺和料，且厚度较大的构件宜采用矿物掺和料混凝土。

2 I - B、I - C 环境和 II - C、II - D、II - E 环境中的混凝土结构构件，可使用少量矿物掺和料，并可随水胶比的降低适当增加矿物掺和料用量。当混凝土的水胶比 $w/b \geq 0.45$ 时，不宜使用矿物掺和料混凝土。

3 氯化物环境和化学腐蚀环境中的混凝土结构构件，应采用矿物掺和料混凝土，III - D、IV - D、III - E、IV - E、III - F 环境中的混凝土结构构件，应采用水胶比 $w/b \leq 0.4$ 的矿物掺和料混凝土，且宜在矿物掺和料中再加入胶凝材料总重 3%~5% 的硅灰。

4 常温下硬化、C60 以上的高强混凝土，可掺入不大于 10% 的石灰石粉或不大于 5% 的硅灰，以减小拌合物黏性，并提高拌合物的抗离析性。

B. 1. 3 用作矿物掺和料的粉煤灰，其氧化钙含量不应大于 10%。

B. 1. 4 冻融环境下用于引气混凝土的粉煤灰掺和料，其烧失量不应大于 5%。

B. 1. 5 氯化物环境下不宜使用抗硫酸盐硅酸盐水泥。

B. 1. 6 在硫酸盐化学腐蚀环境中，当环境作用为 V - C 和 V - D 级时，水泥熟料中的铝酸三钙含量应分别低于 8% 和 5%；当使用矿物掺和料混凝土时，水泥熟料中的铝酸三钙含量应分别不大于 10% 和 8%；当环境作用为 V - E 级时，水泥熟料中的铝酸三钙含量应低于 5%，并应同时掺用矿物掺和料。

在硫酸盐环境中使用抗硫酸盐水泥或高抗硫酸盐水泥时，宜掺用矿物掺和料。当环境作用等级超过 V - E 级时，应根据当地的大气环境和地下水变动条件，进行专门实验研究和论证后确定水泥的种类和掺和料用量，且不应使用高钙粉煤灰。

温度低于 15℃ 的硫酸盐环境中，水泥和矿物掺和料不得加

入石灰石粉。

B. 1. 7 对可能发生碱-骨料反应的混凝土，宜采用矿物掺和料；单掺的矿物掺和料（含水泥中已掺混合材）掺量占胶凝材料总量的比例，磨细矿渣不应小于 50%，粉煤灰不应小于 40%，火山灰质材料不应小于 30%，并应降低水泥和矿物掺和料中的含碱量和粉煤灰中的氧化钙含量。胶凝材料的其他技术要求可按现行国家标准《预防混凝土碱骨料反应技术规范》GB/T 50733 的规定执行。

B. 2 混凝土中氯离子、三氧化硫和碱含量

B. 2. 1 配筋混凝土中氯离子含量用单位体积混凝土中氯离子与胶凝材料的重量比表示，其含量不应超过表 B. 2. 1 的规定。设计使用年限 50 年以上的钢筋混凝土构件，其混凝土氯离子含量在各种环境下均不应超过 0.08%。

表 B. 2. 1 混凝土中氯离子的最大含量

环境作用等级	构件类型	
	钢筋混凝土	预应力混凝土
I - A	0.3%	0.06%
I - B	0.2%	
I - C	0.15%	
Ⅲ - C、Ⅲ - D、Ⅲ - E、Ⅲ - F	0.1%	
Ⅳ - C、Ⅳ - D、Ⅳ - E	0.1%	
V - C、V - D、V - E	0.15%	

B. 2. 2 混凝土中不得使用含有氯化物的防冻剂和其他外加剂。

B. 2. 3 单位体积混凝土中三氧化硫的最大含量不应超过胶凝材料总量的 4%。

B. 2. 4 单位体积混凝土中的含碱量应符合下列规定：

1 对骨料无活性且处于相对湿度低于 75% 环境条件下的混凝土构件，含碱量不应超过 $3.5\text{kg}/\text{m}^3$ ，当设计使用年限为 100

年时，混凝土的含碱量不应超过 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2 对骨料无活性但处于相对湿度不低于 75% 环境条件下的混凝土结构构件，含碱量不超过 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

3 对骨料有活性且处于相对湿度不低于 75% 环境条件下的混凝土结构构件，应严格控制混凝土含碱量不超过 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 并参加矿物掺和料。

B.3 混凝土骨料

B.3.1 配筋混凝土中的骨料最大公称粒径应满足表 B.3.1 的规定。

表 B.3.1 配筋混凝土中骨料最大公称粒径 (mm)

混凝土保护层最小厚度 (mm)		20	25	30	35	40	45	50	≥ 60
环境 作用	I - A	20	25	30	35	40	40	40	40
	I - B	10	20	20	20	25	25	35	40
	I - C, II, V	10	15	20	20	25	25	30	35
	III, IV	10	15	15	20	20	25	25	25

B.3.2 混凝土骨料应满足骨料级配和粒形的要求，石子宜采用单粒级两级配或三级配，分级投料；级配后的骨料松堆空隙率不应大于 43%。

B.3.3 混凝土用砂在开采、运输、堆放和使用过程中，应采取防止遭受海水污染或混用不合格海砂的措施。

砂的密度应在饱和面干状态下检测，理论配合比中砂的用量以饱和面干质量计。

附录 C 混凝土结构防腐蚀附加措施

C.0.1 混凝土结构的防腐蚀附加措施应根据环境作用和条件、施工条件、便于维护以及全寿命成本等因素综合考虑。

C.0.2 混凝土结构附加防腐蚀措施的选择可按表 C.0.2 的规定选用。

表 C.0.2 混凝土结构防腐蚀附加措施

环境类别	名称	防腐蚀附加措施	
		混凝土	钢筋
I	一般环境	表面涂层, 硅烷浸渍	—
II	冻融环境	表面涂层, 硅烷浸渍	—
III	海洋氯化物环境	表面涂层, 硅烷浸渍	环氧涂层钢筋, 阻锈剂, 阴极保护
IV	除冰盐与其他氯化物环境	表面涂层, 硅烷浸渍	环氧涂层钢筋, 阻锈剂, 阴极保护
V	化学腐蚀环境	表面涂层, 硅烷浸渍	—

C.0.3 防腐蚀附加措施的最低保护年限应符合表 C.0.3 的要求, 各种措施的材料品质与具体技术要求应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的规定。

表 C.0.3 混凝土结构防腐蚀附加措施的保护年限

防腐蚀附加措施	最低保护年限 (年)
表面涂层	10
硅烷浸渍	15
环氧涂层钢筋	20
阴极保护 (外加电流)	30

C.0.4 混凝土结构采用其他附加防腐蚀措施时, 应经过专门的技术论证, 证明其抵抗环境腐蚀介质侵蚀的能力。

附录 D 引气混凝土的含气量与气泡间隔系数

D.0.1 引气混凝土含气量与平均气泡间隔系数应符合表 D.0.1 的规定。

表 D.0.1 引气混凝土含气量 (%) 和平均气泡间隔系数

骨料最大粒径(mm)	环境条件		
	混凝土高度饱水	混凝土中度饱水	含盐环境下冻融
10	6.5	5.5	6.5
15	6.5	5.0	6.5
25	6.0	4.5	6.0
40	5.5	4.0	5.5
平均气泡间隔系数(μm)	250	300	200

注：1 含气量从浇筑或入模前的新拌混凝土中取样用含气量测定仪（气压法）测定，允许绝对误差为 $\pm 1.0\%$ ，测定方法应符合现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080 的规定；

2 气泡间隔系数为从硬化混凝土中取样（芯）测得的数值，用直线导线法测定，根据抛光混凝土截面上气泡面积推算三维气泡平均间隔，推算方法可按现行行业标准《水工混凝土试验规程》DL/T 5150 的规定执行；

3 表中含气量：C50 混凝土可降低 1.0% ，C60 混凝土可降低 1.5% ，但不应低于 3.0% ；

4 表中平均气泡间隔系数：C50 混凝土可增加 $25\mu\text{m}$ ，C60 混凝土可增加 $50\mu\text{m}$ 。

附录 E 混凝土耐久性参数与 腐蚀性离子测定方法

E.0.1 混凝土抗冻耐久性指数 DF 通过快速冻融试验测定，测试方法应采用国家现行标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的快冻法或《水工混凝土试验规程》DL/T 5150 的混凝土抗冻性试验方法。

E.0.2 混凝土氯离子扩散系数 D_{RCM} 通过外加电场快速迁移试验测定，测试方法应采用现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的 RCM 法。

E.0.3 混凝土原材料的氯离子含量测定，水泥和矿物掺和料应按现行国家标准《水泥化学分析方法》GB/T 176 执行，混凝土外加剂应按现行国家标准《混凝土外加剂匀质性试验方法》GB/T 8077 执行，砂应按现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52 执行。混凝土拌合物和硬化混凝土氯离子含量测定方法可按现行行业标准《混凝土中氯离子含量检测技术规程》JGJ/T 322 执行。

E.0.4 水中硫酸根离子含量应按现行国家标准《水质 硫酸盐的测定 重量法》GB/T 11899 测定，土中硫酸根离子含量应按现行行业标准《森林土壤水溶性盐分分析》LY/T 1251 测定。

本标准用词说明

1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3) 表示允许稍有选择，在条件允许时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 2 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080
- 3 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082
- 4 《混凝土强度检验评定标准》GB 50107
- 5 《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153
- 6 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
- 7 《预防混凝土碱骨料反应技术规范》GB/T 50733
- 8 《水泥化学分析方法》GB/T 176
- 9 《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223
- 10 《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224
- 11 《混凝土外加剂匀质性试验方法》GB/T 8077
- 12 《水质 硫酸盐的测定 重量法》GB/T 11899
- 13 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370
- 14 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52
- 15 《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85
- 16 《建筑工程裂缝防治技术规程》JGJ/T 317
- 17 《混凝土中氯离子含量检测技术规程》JGJ/T 322
- 18 《水工混凝土试验规程》DL/T 5150
- 19 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362
- 20 《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275
- 21 《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153
- 22 《森林土壤水溶性盐分分析》LY/T 1251
- 23 《预应力钢丝及钢绞线用热轧盘条》YB/T 146