

UDC

中华人民共和国国家标准

GB

P

GB/T 50476—2008

混凝土结构耐久性设计规范

Code for durability design of concrete structures

2008—11—12 发布

2009—05—01 实施

中华人民共和国住房和城乡建设部

联合发布

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

中华人民共和国国家标准

混凝土结构耐久性设计规范

Code for durability design of concrete structures

GB/T 50476—2008

主编部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2009年5月1日

中国建筑工业出版社

2008 北京

中华人民共和国住房和城乡建设部

公告

第 162 号

关于发布国家标准

《混凝土结构耐久性设计规范》的公告

现批准《混凝土结构耐久性设计规范》为国家标准，编号为 GB/T 50476 2008，自 2009 年 6 月 1 日起实施。

本规范由我部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2008 年 11 月 12 日

前言

本规范是根据建设部《关于印发(二 00 四年工程建设国家标准制定、修订计划)的通知》(建标[2004]67 号文)要求,由清华大学会同有关单位共同编制而成。

在编写过程中,编制组开展了专题调查研究,总结了我国近年来的工程实践经验并借鉴了现行的有关国际标准,先后完成了编写初稿、征求意见稿和送审稿,并以多种方式在全国范围内广泛征求意见,经反复修改,最后审查定稿。

本规范共分 8 章、4 个附录,主要内容为: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、混凝土材料的基本要求、有关的结构构造措施以及一般环境、冻融环境、氯化物环境和化学腐蚀环境作用下的耐久性设计方法。

混凝土结构的耐久性问题十分复杂,不仅环境作用本身多变,带有很大的不确定与不确定性,而且结构材料在环境作用下的劣化机理也有诸多问题有待进一步明确。我国幅员辽阔,各地环境条件与混凝土原材料均存在很大差异,在应用本规范时,应充分考虑当地的实际情况。

本规范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。为提高规范质量,请在使用本规范的过程中结合工程实践,认真总结经验、积累资料,并将意见和建议寄交清华大学土木系(邮编:100084; E-mail: jieyou@tsinghua.edu.cn)。

本规范主编单位、参编单位和主要起草人:

主编单位:清华大学

参编单位:中国建筑科学研究院

国家建筑工程质量监督检验中心

北京市市政工程设计研究总院

同济大学

西安建筑科技大学

大连理工大学

中交四航工程研究院

中交天津港湾工程研究院

路桥集团桥梁技术有限公司

中国建筑工程总公司

主要起草人:陈肇元 邸小坛 李克非 廉慧珍 徐有邻

包琦玮 王庆霖 黄土元 金伟良 干伟忠

赵 筠 朱万旭 鲍卫刚 潘德强 孙 伟

王 铠 陈蔚凡 巴恒静 路新瀛 谢永江

郝挺宇 邓德华 冷发光 缪昌文 钱稼茹

王清湘 张 鑫 邢 锋 尤天直 赵铁军

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，确保工程的合理使用寿命要求，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于常见环境作用下房屋建筑、城市桥梁、隧道等市政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，不适用于轻骨料混凝土及其他特种混凝土结构。

1.0.3 本规范规定的耐久性设计要求，应为结构达到设计使用年限并具有必要保证率的最低要求。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，除执行本规范的规定外，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的作用。

2.1.2 劣化 degradation

材料性能随时间的逐渐衰减。

2.1.3 劣化模型 degradation model

描述材料性能劣化过程的数学表达式。

2.1.4 结构耐久性 structure durability

在设计确定的环境作用和维修、使用条件下，结构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 结构使用年限 structure service life

结构各种性能均能满足使用要求的年限。

2.1.6 氯离子在混凝土中的扩散系数 chloride diffusion coefficient of concrete

描述混凝土孔隙水中氯离子从高浓度区向低浓度区扩散过程的参数。

2.1.7 混凝土抗冻耐久性指数 DF (durability factor)

混凝土经规定次数快速冻融循环试验后，用标准试验方法测定的动弹性模量与初始动弹性模量的比值。

2.1.8 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、稳定球形微气泡的工艺措施。

2.1.9 含气量 concrete air content

混凝土中气泡体积与混凝土总体积的比值。对于采用引气工艺的混凝土，气泡体积包括掺入引气剂后形成的气泡体积和混凝土拌合过程中挟带的空气体积。

2.1.10 气泡间隔系数 air bubble spacing

硬化混凝土或水泥浆体中相邻气泡边缘之间的平均距离。

2.1.11 维修 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。

2.1.12 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。

2.1.13 大修 major repair

需在一定期限内停止结构的正常使用，或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。

2.1.14 可修复性 restorability

受到损伤的结构或构件具有能够经济合理地被修复的能力。

2.1.15 胶凝材料 cementitious material, or binder

混凝土原材料中具有胶结作用的硅酸盐水泥和粉煤灰、硅灰、磨细矿渣等矿物掺合料与混合料的总称。

2.1.16 水胶比 water to binder ratio

混凝土拌合物中用水量与胶凝材料总量的重量比。

2.1.17 大掺量矿物掺合料混凝土 concrete with high volume supplementary cementitious

materials

胶凝材料中含有较大比例的粉煤灰、硅灰、磨细矿渣等矿物掺合料和混合料，需要采取较低的水胶比和特殊施工措施的混凝土。

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

从混凝土~NNN 筋(包括纵向钢筋、箍筋和分布钢筋)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。

2.1.19 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取的补充措施，包括混凝土表面涂层、防腐蚀面层、环氧涂层钢筋、钢筋阻锈剂和阴极保护等。

2.1.20 多重防护策略 multiple protective strategy

为确保混凝土结构和构件的使用年限而同时采取多种防腐蚀附加措施的方法。

2.1.21 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规范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；

α_f ——混凝土原材料中的粉煤灰重量占胶凝材料总重的比值；

α_s ——混凝土原材料中的磨细矿渣重量占胶凝材料总重的比值；

Δ ——混凝土保护层施工允许负偏差的绝对值。

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及作用等级进行设计。

对于氯化物环境下的重要混凝土结构，尚应按本规范附录 A 的规定采用定量方法进行辅助性校核。

3.1.2 混凝土结构的耐久性设计应包括下列内容：

- 1 结构的设计使用年限、环境类别及其作用等级；
- 2 有利于减轻环境作用的结构形式、布置和构造；
- 3 混凝土结构材料的耐久性质量要求；
- 4 钢筋的混凝土保护层厚度；
- 5 混凝土裂缝控制要求；
- 6 防水、排水等构造措施；
- 7 严重环境作用下合理采取防腐附加措施或多重防护策略；
- 8 耐久性所需的施工养护制度与保护层厚度的施工质量验收要求。
- 9 结构使用阶段的维护、修理与检测要求。

3.2 环境类别与作用等级

3.2.1 结构所处环境按其钢筋和混凝土材料的腐蚀机理可分为 5 类，并按表 3.2.1 确定。

表 3.2.1 环境类别

环境类别	名称	腐蚀机理
I	一般环境	保护层混凝土碳化引起钢筋锈蚀
II	冻融环境	反复冻融导致混凝土损伤
III	海洋氯化物环境	氯盐引起钢筋锈蚀
IV	除冰盐等其他氯化物环境	氯盐引起钢筋锈蚀

注：一般环境系指无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用。

3.2.2 环境对配筋混凝土结构的作用程度应采用环境作用等级表达，并应符合表 3.2.2 的规定。

表 3.2.2 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	—	—	V-C	V-D	V-E	—
化学腐蚀环境	—	—	V-C	V-D	V-E	—

3.2.3 当结构构件受到多种环境类别共同作用时，应分别满足每种环境类别单独作用下的

耐久性要求。

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、钙矾石延迟反应和软水对混凝土的溶蚀，在设计中采取相应的措施。对混凝土含碱量的限制应根据附录 B 确定。

3·2·5 混凝土结构的耐久性设计尚应考虑高速流水、风沙以及车轮行驶对混凝土表面的冲刷、磨损作用等实际使用条件对耐久性的影响。

3.3 设计使用年限

3·3·1 混凝土结构的设计使用年限应按建筑物的合理使用年限确定，不应低于现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 的规定；对于城市桥梁等市政工程结构应参照表 3.3.1 的规定确定。

表 3.3.1 混凝土结构的设计使用年限

设计使用年限	适用范围
不低于 100 年	城市快速路和主干道上的桥梁以及其他道路上的大型桥梁、隧道、重要的市政设施等
不低于 50 年	城市次干道和一般道路上的中小型桥梁，一般市政设施

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。

严重环境作用下的桥梁、隧道等混凝土结构，其部分构件可设计成易于更换的形式，或能够经济合理地进行大修。可更换构件的设计使用年限可低于结构整体的设计使用年限，并应在设计文件中明确规定。

3.4 材料要求

3.4.1 混凝土材料应根据结构所处的环境类别、作用等级和结构设计使用年限，按同时满足混凝土最低强度等级、最大水胶比和混凝土原材料组成的要求确定。

3.4.2 对重要工程或大型工程，应针对具体的环境类别和作用等级，分别提出抗冻耐久性指数、氯离子在混凝土中的扩散系数等具体量化耐久性指标。

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。

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	30 年
I-A	C30	C25	C25
I-B	C35	C30	C25
I-C	C40	C35	C30
II-C	C35, C45	C30, C45	C30, C40
II-D	G40	Ca35	Ca35
II-E	C45	Ca40	Ca40
III-C , IV-C.V-C , III-D, IV-D	C45	C40	C40

V-D, III-E, IV-E	C50	C45	C45
V-E, III-F	C55	C50	C50

注：1 预应力混凝土构件的混凝土最低强度等级不应低于 C40；

2 如能加大钢筋的保护层厚度，大截面受墩、柱的混凝土强度等级可以低于表中规定的数值，但不应低于第 3.4.5 条规定的素混凝土最低强度等级。

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应根据本规范表 5.3.2、表 7.3.2 的规定确定；氯化物环境可按本规范表 6.3.2 的 III-C 或 IV-C 环境作用等级确定。

3.4.6 直径为 6mm 的细直径热轧钢筋作为受力主筋，应只限在一般环境(I 类)中使用，且当环境作用等级为轻微(T-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。

3.4.7 冷加工钢筋不宜作为预应力筋使用，也不宜作为按塑性设计构件的受力主筋。

公称直径不大于 6mm 的冷加工钢筋应只在 I-A、I-B 等级的环境作用中作为受力钢筋使用，且构件的设计使用年限不得超过 50 年。

3.4.8 预应力筋的公称直径不得小于 5mm。

3.4.9 同一构件中的受力钢筋，宜使用同材质的钢筋。

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 具有连续密封套管的后张预应力钢筋，其混凝土保护层厚度可与普通钢筋相同且不应小于孔道直径的 1/2；否则应比普通钢筋增加 10mm。

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可与普通钢筋相同，否则应比普通钢筋增加 10mm。

直径大于 16mm 的热轧预应力钢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钢筋的混凝土保护层厚度可比现浇构件减少 5mm。

3.5.4 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
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

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 D62 计算裂缝宽度；

3 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。

3.5.5 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，并应采取以下构造措施：

1 受雨淋或可能积水的露天混凝土构件顶面，宜做成斜面，并应考虑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侧边下沿，应做滴水槽、鹰嘴或采取其他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，且不得将水直接排向下部混凝土构件的表面；

4 在混凝土结构构件与上覆的露天面层之间，应设置可靠的防水层。

3.5.6 当环境作用等级为 D、E、F 级时，应减少混凝土结构构件表面的暴露面积，并应避免表面的凹凸变化；构件的棱角宜做成圆角。

3.5.7 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，否则应采取有效的防护措施。

3.5.8 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，表面应采用可靠的防腐措施；后张法预应力体系应采取多重防护措施。

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作用等级，混凝土耐久性所需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
	大掺量矿物掺合料混凝土	浇筑后立即覆盖并加湿养护，至少养护 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	养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 50%且小少于 3d
	大掺量矿物掺合料混凝土	浇筑后立即覆盖并加湿养护，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	大掺量矿物掺合料混凝土	浇筑后立即覆盖并加湿养护，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。加湿养护结束后应继续用养护喷涂或覆盖保湿、防风一段时间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 有盐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 大掺量矿物掺合料混凝土在 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，其保护层厚度的施工质量验收要求按照现行国家标准《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，应按下列要求进行保护层厚度的施工质量验收：

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

2 对同一构件所有的测点，如有 95% 或以上的实测保护层厚度 c_1 满足以下要求，则认为合格：

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

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 当不能满足第 2 款的要求时，可增加同样数量的测点进行复检，按两次测点的全部数据进行统计，如仍不能满足第 2 款的要求，则判定为不合格，并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,应控制在正常大气作用下混凝土碳化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耐久性设计。
- 4.1.3 一般环境下混凝土结构的构造要求应符合本规范第 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规范第 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根据具体情况按表 4.2.1 确定。

表 4.2.1 一般环境对配筋混凝土结构的环境作用等级

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、低湿度环境中的室内构件;
	永久的静水浸没环境	所有表面均永久处于静水下的构件
I-B	非干湿交替的室内超市环境	中、高湿度环境中的室内构件;
	非干湿交替的露天环境	不接触或偶尔接触雨水的室外构件;
	长期湿润环境	长期与水或湿润土体接触的构件
I-C	干湿交替环境	与冷凝水、露水或与蒸汽频繁接触的室内构件; 地下室顶板构件; 表面频繁淋雨或频繁与水接触的室外构件; 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等级宜按干湿交替环境确定。

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。
- 4.3.2 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规范表 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规范表 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, 混凝土保护层厚度应增加 10mm。

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 环境作用等级		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、墙等面形结构	I-A	C30	0.55	20	C25	0.60	20	C25	0.60	20
	I-B	C35	0.50	30	C30	0.55	25	C25	0.60	25
		≥C40	0.45	25	≥C35	0.50	20	≥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
		≥C50	0.36	30	≥C45	0.40	25	≥C40	0.45	20
梁、柱等条形结构	I-A	C30	0.55	25	C25	0.60	25	≥C25	0.60	20
		≥C35	0.50	20	≥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	≥C50	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 年平均气温大于 20℃且年平均湿度大于 75%的环境.除 I-A 环境中的板、墙构件外，混凝土最低强度等级应比表中规定提高一级，或将保护层最小厚度增大 5mm；

3 直接接触土体浇筑的构件，其混凝土保护层厚度不应小于 70mm,有混凝土垫层时，可按上表确定；

4 处于流动水中或同时受水中泥沙冲刷的构件，其保护层厚度宜增加 10~20mm；

5 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少 5mm；

6 当胶凝材料中粉煤灰和矿渣等掺量小于 20%时，表中水胶比低于 0.45 的，可适当增加；

7 预应力钢筋的保护层厚度按照本规范第 3.5.2 条的规定执行。

4.3.3 在 I-A、I-B 环境中的室内混凝土结构构件，如考虑建筑饰面对于钢筋防锈的有利作用，则其混凝土保护层最小厚度可比本规范表 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，如考虑防水饰面的保护作用，则其混凝土保护层最小厚度可比本规范表 4.3.1 规定适当减小，但不应低于 I-B 环境的要求。

4.3.4 采用直径 6mm 的细直径热轧钢筋或冷加工钢筋作为构件的主要受力钢筋时，应在本规范表 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。

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反复冻融的混凝土结构构件,应考虑冻融环境的作用。最冷月平均气温高于 2.5℃的地区,混凝土结构可不考虑冻融环境作用。

5.1.3 冻融环境下混凝土结构的构造要求应符合本规范第 3.5 节的规定。对冻融环境中混凝土结构的薄壁构件,还宜增加构件厚度或采取有效的防冻措施。

5.1.4 冻融环境下混凝土结构的施工质量控制应按照本规范第 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。冬期施工混凝土接触负温时的强度应大于 10N/mm²。

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 冻融环境对混凝土结构的环境作用等级

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
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 冻融环境按当地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: -3~2.5℃、-3~-8℃和-8℃以下;

2 中度饱水指冰冻前偶受水或受潮,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上体,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、除冰盐或其他盐类。

5.2.2 位于冰冻线以上土中的混凝土结构构件,其环境作用等级可根据当地实际情况和经验适当降低。

5.2.3 可能偶然遭受冻害的饱水混凝土结构构件，其环境作用等级可按本规范表 5.2.1 的规定降低一级。

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，并宜增加表面防护措施。

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规范附录 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规范附录 C 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 5.0.2 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 环境作用等级			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 结构	II-C 无盐		C45	0.40	35	C45	0.40	30	C40	0.45	30
			≥C50	0.36	30	≥C50	0.36	25	≥C45	0.40	25
			Ca35	0.50	35	Ca35	0.55	30	Ca30	0.55	25
	II-D	无盐	Ca40	0.45	35	Ca35	0.50	35	Ca35	0.50	30
		有盐									
	II-E 有盐		Ca45	0.40		Ca40	0.45		Ca40	0.45	
梁、柱等条形 结构	II-C 无盐		C45	0.40	40	C45	0.40	35	C40	0.45	35
			≥C50	0.36	35	≥C50	0.36	30	≥C45	0.40	30
			Ca35	0.50	35	Ca35	0.55	35	Ca30	0.55	30
	II-D	无盐	Ca40	0.45	40	Ca35	0.50	40	Ca35	0.50	35
		有盐									
	II-E 有盐		Ca45	0.40		Ca40	0.45		Ca40	0.45	

注：1 如采取表面防水处理的附加措施，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规范第 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 混凝土抗冻耐久性指数 DF(%)

设计使用 年限	100 年			50 年			30 年		
环境条件	高 度 饱水	中 度 饱水	盐或化学 侵蚀下冻 融	高 度 饱水	中 度 饱水	盐或化学 侵蚀下冻 融	高 度 饱水	中 度 饱水	盐或化学 侵蚀下冻 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 E1 与其初始值 E0 的比值， $DF=E1/E0$ ；如在达到 300 次循环之前 E1 已降至初始值的 60%或试件重量损失已达到 5%，以此时的循环次数 N 计算 DF 值， $DF=0.6 \times N/300$ ；

2 对于厚度小于 150mm 的薄壁混凝土构件，其 DF 值宜增加 5%。

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 降雪地区接触除冰盐(雾)的桥梁、隧道、停车库、道路周围构筑物等配筋混凝土结构的构件,内陆地区接触含有氯盐的地下水、土以及频繁接触含氯盐消毒剂的配筋混凝土结构的构件,应按除冰盐等其他氯化物环境进行耐久性设计。
- 降雪地区新建的城市桥梁和停车库楼板,应按除冰盐氯化物环境作用进行耐久性设计。
- 6.1.4 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。
- 6.1.5 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。
- 6.1.6 氯化物环境中,用于稳定周围岩土混凝土初期支护,如作为永久性混凝土结构的一部分,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。
- 6.1.7 氯化物环境中配筋混凝土桥梁结构的构造要求除应符合本规范第 3.5 节的规定外,尚应符合下列规定:
- 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管道,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可靠的防水层;
 - 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。
- 6.1.8 氯化物环境中混凝土结构施工质量控制应按照本规范第 3.6 节的规定执行。

6.2 环境作用等级

- 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, 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 100~300m 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, 码头
III-F	潮汐区和浪溅区, 炎热地区	桥墩, 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,按国家现行标准《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 海水激流中构件的作用等级宜提高一级;

3 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,除直接面海和迎风的建筑物外,其他建筑物可适当降低作用等级;

4 炎热地区指年平均温度高于 20℃的地区;

5 内陆盐湖中氯化物的环境作用等级可比照上表规定确定。

6.2.2 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钢筋混凝土结构构件,其环境作用等级不宜低于 III-E。

6.2.3 江河人海口附近水域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表 6.2.1 的规定。

6.2.4 除冰盐等其他氯化物环境对于配钢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 6.2.4 确定。

表 6.2.4 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	离开行车道 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,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帽梁、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(mg/l,)的高低划分为: 较低 100~500; 较高 500~5000; 高>5000; 土中氯离子浓度(mg/kg)的高低划分为: 较低 150~750; 较高 750~7500; 高>7500;

2 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。

6.2.5 在确定氯化物环境对配筋混凝土结构构件的作用等级时, 不应考虑混凝土表面普通防水层对氯化物的阻隔作用。

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合料的混凝土。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 环境作用等级		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、墙等面形结构	III-C	C45	0.40	45	C40	0.42	40	C40	0.42	35
	IV-C									
	III-D	C45	0.40	55	C40	0.42	50	C40	0.42	45
	IV-D	≥C50	0.36	50	≥C45	0.40	45	≥C45	0.40	40
	III-E	C50	0.36	60	C50	0.40	55	C45	0.40	45
	IV-E	≥C55	0.36	55	≥C55	0.36	50	≥C50	0.36	40
	III-F	≥C55	0.36	65	C50	0.36	60	C50	0.36	55
					≥C55	0.36	55			
梁、柱等条形结构	III-C	C45	0.40	50	C40	0.42	45	C45	0.42	40
	IV-C									
	III-D	C45	0.40	60	C40	0.42	55	C40	0.42	50
	IV-D	≥C50	0.36	55	≥C45	0.40	50	≥C45	0.40	40
	III-E	C50	0.36	65	C45	0.40	60	C45	0.40	40
	IV-E	≥C55		60	≥C50	0.36	55	≥C50	0.36	45
	III-F	C55	0.36	70	C50	0.36	65	C50	0.36	55
					≥C55	0.36	60			

注: 1 可能出现海水冰冻环境与除冰盐环境时, 宜采用引气混凝土; 当采用引气混凝土时, 表中混凝土强度等级可降低一个等级, 相应的最大水胶比可提高 0.05, 但引气混凝土的强

度等级和最大水胶比仍应满足本规范表 5.3.2 的规定；

2 处于流动海水中或同时受水中泥沙冲刷腐蚀的混凝土构件，其钢筋的混凝土保护层厚度应增加 10~20mm；

3 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少 5mm；

4 当满足本规范表 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；

5 预应力钢筋的保护层厚度按照本规范第 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，宜采用大掺量矿物掺合料混凝土，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 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。对于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。

6.3.5 在特殊情况下，对处于氯化物环境作用等级为 E、F 中的配筋混凝土构件，当采取可靠的防腐蚀附加措施并经过专门论证后，其混凝土保护层最小厚度可适当低于本规范表 6.3.2 中的规定。

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	
作用等级	D	E	D	E
侵入性指标				
8d 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规范表 6.3.2 中规定的混凝土保护层厚度相对应，如实际采用的保护层厚度高于表 6.3.2 的规定，可对本表中数据作适当调整；

2 表中的 D_{RCM} 值适用于较大或大掺量矿物掺合料混凝土—对于胶凝材料主要成分为硅酸盐水泥的混凝土，应采取更为严格的要求。

6.3.7 氯化物环境中配筋混凝土构件的纵向受力钢筋直径应不小于 16mm。

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应符合本规范第 3.5 节的规定。

7.1.3 严重化学腐蚀环境下的混凝土结构构件,应结合当地环境和对既有建筑物的调查,必要时可在混凝土表面施加环氧树脂涂层、设置水溶性树脂砂浆抹面层或铺设其他防腐面层,也可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。

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 的酸性水中时,应在混凝土表面采取专门的防腐蚀附加措施。

7.1.4 化学腐蚀环境下混凝土结构的施工质量控制应按照本规范第 3.6 节的规定执行。

7.2 环境作用等级

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。当有多种化学物质共同作用时,应取其中最高的作用等级作为设计的环境作用等级。如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。

7.2.2 部分接触含硫酸盐的水、土且部分暴露于大气中的混凝土结构构件,可按本规范表 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 7.2.2 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 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 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	1500~1600	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,可按表中的作用等级降低一级,但不得低于 V-C 级;对于干旱、高寒地区的环境条件可按本规范第 7.2.2 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,但不低于 V-C 级;

3 对含有较高浓度氯盐的地下水、土,可不单独考虑硫酸盐的作用;

4 高水压条件下应提高相应的环境作用等级;

5 表中硫酸根等含量的测定方法应符合本规范附录 D 的规定。

表 7.2.2 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)	土中硫酸根离子浓度 (水溶值) 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。

7.2.3 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。

7.2.4 大气污染环境对混凝土结构的作用等级可按表 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)pH 值 ≥ 4.5	遭酸雨频繁作用的构件
V-E	酸雨 pH 值 < 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。

7.3 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照本规范附录 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 环境作用等级		100 年			50 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
板、墙等面形结构	V-C	C45	0.40	40	C40	0.45	35
	V-D	C50 $\geq \text{C55}$	0.36 0.36	45 40	C45 $\geq \text{C50}$	0.40 0.36	40 35
	V-E	C55	0.36	45	C50	0.36	40
梁、柱等条形结构	V-C	C45 $\geq \text{C50}$	0.40 0.36	45 40	C40 $\geq \text{C45}$	0.45 0.40	40 35
	V-D	C50	0.36	50	C45	0.40	45

		$\geq C55$	0.36	45	$\geq C50$	0.36	40
	V-E	C55	0.36	50	C50	0.36	45
		$\geq C60$	0.33	45	$\geq C55$	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照本规范第 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规范表 7.3.2 的规定降低一级或两级。

8 后张预应力混凝土结构

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本规范表 8.2.1 的规定选用。

表 8.2.1 预应力筋的耐久性防护工艺和措施

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剂
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	满足本规范第 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现行国家标准《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 与现行行业标准《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，并应符合本规范第 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

预应力体系		体内预应力体系	体外预应力体系
环境类别与作用等级			
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, PS3a
	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本规范表 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剂
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渗涂层
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满足本规范第 8.4.4 条要求。

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

锚固端类型 环境类别与作用等级		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

8.4.2 高密度聚乙烯和聚丙烯预应力套管应能承受不小于 1N/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，应控制浆体的流动度、泌水率、体积稳定性和强度等指标。

在冰冻环境中灌浆，灌入的浆料必须在 10~15℃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梁体顶板表面涂刷防水层；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 混凝土结构设计的耐久性极限状态

A.0.1 结构构件耐久性极限状态应按正常使用下的适用性极限状态考虑，且不应损害到结构的承载能力和可修复性要求。

A.0.2 混凝土结构构件的耐久性极限状态可分为以下三种：

- 1 钢筋开始发生锈蚀的极限状态；
- 2 钢筋发生适量锈蚀的极限状态；
- 3 混凝土表面发生轻微损伤的极限状态。

A.0.3 钢筋开始发生锈蚀的极限状态应为混凝土碳化发展到钢筋表面，或氯离子侵入混凝土内部并在钢筋表面积聚的浓度达到临界浓度。

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，应以钢筋开始发生锈蚀状态作为极限状态。

A.0.4 钢筋发生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。

普通热轧钢筋(直径小于或等于 6mm 的细钢筋除外)可按发生适量锈蚀状态作为极限状态。

A.0.5 混凝土表面发生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.0.6 与耐久性极限状态相对应的结构设计使用年限应具有规定的保证率，并应满足正常使用下适用性极限状态的可靠度要求。根据适用性极限状态失效后果的严重程度，保证率宜为 90%~95%，相应的失效概率宜为 5%~10%。

A.0.7 混凝土结构耐久性定量设计的材料劣化数学模型，其有效性应经过验证并应具有可靠的工程应用经验。定量计算得出的保护层厚度和使用年限，必须满足本规范第 A.0.6 条的保证率规定。

A.0.8 采用定量方法计算氯离子侵入混凝土内部的过程，可采用 Fick 第二定律的经验扩散模型。模型所选用的混凝土表面氯离子浓度、氯离子扩散系数、钢筋锈蚀的临界氯离子浓度等参数的取值应有可靠的依据。其中，表面氯离子浓度和扩散系数应为其表观值，氯离子扩散系数、钢筋锈蚀的临界浓度等参数还应考虑混凝土材料的组成特性、混凝土构件使用环境的温、湿度等因素的影响。

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控制在表 B.1.1 规定的范围内。

表 B.1.1 单位体积混凝土的胶凝材料用量

最低强度等级	最大水胶比	最小用量(kg/m ³)	最大用量(kg/m ³)
	0.60	260	400
C30	0.55	280	
C35	0.50	300	
C40	0.45	320	450
C45	0.40	340	
C50	0.36	360	480
≥C55	0.36	380	500

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；

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 对于强度等级达到 C60 的泵送混凝土，胶凝材料最大用量可增大至 530kg/m³。

B.1.2 配筋混凝土的胶凝材料中，矿物掺合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≤20mm，水胶比>0.55 时，不应使用矿物掺合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，可采用矿物掺合料，且厚度较大的构件宜采用大掺量矿物掺合料混凝土。

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，可使用少量矿物掺合料，并可随水胶比的降低适当增加矿物掺合料用量。当混凝土的水胶比 W/B≥0.4 时，不应使用大掺量矿物掺合料混凝土。

3 氯化物环境和化学腐蚀环境中的混凝土结构构件，应采用较大掺量矿物掺合料混凝土，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≤0.4 的大掺量矿物掺合料混凝土。且宜在矿物掺合料中再加入胶凝材料总重的 3%~5% 的硅灰。

B.1.3 用作矿物掺合料的粉煤灰应选用游离氧化钙含量不大于 10% 的低钙灰。

B.1.4 冻融环境下用于引气混凝土的粉煤灰掺合料，其含碳量不宜大于 1.5%。

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 硫酸盐化学腐蚀环境中，当环境作用为 V-C 和 V-D 级时，水泥中的铝酸三钙含量应分别低于 8% 和 5%；当使用大掺量矿物掺合料时，水泥中的铝酸三钙含量可分别不大于 10% 和 8%；当环境作用为 V-E 级时，水泥中的铝酸三钙含量应低于 5%，并应同时掺加矿物掺合料。

硫酸盐环境中使用抗硫酸盐水泥或高抗硫酸盐水泥时，宜掺加矿物掺合料。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合料用量，且不应使用高钙粉煤灰。

硫酸盐环境中的水泥和矿物掺合料中，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，宜采用大掺量矿物掺合料；单掺磨细矿渣的用量占胶凝材料总重 $\alpha_s \geq 50\%$ ，单掺粉煤灰 $\alpha_s \geq 40\%$ ，单掺火山灰质材料不小于 30%，并应

降低水泥和矿物掺合料中的含碱量和粉煤灰中的游离氧化钙含量。

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的最大含量(用单位体积混凝土中氯离子与胶凝材料的重量比表示)不应超过表 B.2.1 的规定。

表 B.2.1 混凝土中氯离子的最大含量(水溶值)

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%	

注：对重要桥梁等基础设施，各种环境下氯离子含量均不应超过 0.08%。

B.2.2 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(水溶碱，等效 Na₂O 当量)应满足以下要求：

1 对骨料无活性且处于干燥环境条件下的混凝土构件，含碱量不应超过 3.5kg/m³，当设计使用年限为 100 年时，混凝土的含碱量不应超过 3kg/m³。

2 对骨料无活性但处于潮湿环境(相对湿度≥75%)条件下的混凝土结构构件，含碱量不超过 3kg/m³。

3 对骨料有活性且处于潮湿环境(相对湿度≥75%)条件下的混凝土结构构件，应严格控制混凝土含碱量并掺加矿物掺合料。

B.3 混凝土骨料

B.3.1 配筋混凝土中的骨料最大粒径应满足表 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, I-B	20	25	30	35	40	40	40	40
	I-C, II, V	15	20	20	25	25	30	35	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，并应采用单粒级石子两级配或三级配投料。

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海砂的措施。

附录 C 引气混凝土的含气量与气泡间隔系数

C.0.1 引气混凝土含气量与气泡间隔系数应符合表 C.0.1 的规定。

表 C.0.1 引气混凝土含气量(%)和平均气泡间隔系数

含气量 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	盐或化学腐蚀下 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 含气量从运至施工现场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；

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，推算方法可按国家现行标准《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 0.5%，C60 混凝土可降低 1%，但不应低于 3.5%。

附录 D 混凝土耐久性参数与腐蚀性离子测定方法

D.0.1 混凝土抗冻耐久性指数 DF 和氯离子扩散系数 D_{RCM} 的测定方法应符合表 D.0.1 的规定。

表 D.0.1 混凝土材料耐久性参数及其测定方法

耐久性能参数	试验方法	测试内容	参照规范/标准
耐久性指数 DF	快速冻融试验	混凝土试件动弹模损失	《水工混凝土试验规程》DL/T 5150
氯离子扩散系数 D_{RCM}	氯离子外加电场快速迁移 RCM 试验	非稳态氯离子扩散系数	《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTG/T B07-1-2006

D.0.2 混凝土及其原材料中氯离子含量的测定方法应符合表 D.0.2 的规定。

表 D.0.2 氯离子含量测定方法

测试对象	试验方法	测试内容	参照规范/标准
新拌混凝土	硝酸银滴定水溶氯离子, 1L 新拌混凝土溶于 1L 水中, 搅拌 3min, 取上部 50mL 溶液	氯离子百分含量	《水质 氯化物的测定 硝酸银滴定法》GB 11896
	氯离子选择电极快速测定, 取 600g 砂浆, 用氯离子选择电极和甘汞电极进行测量	砂浆中氯离子的选择电位电势	《水运工程混凝土试验规程》JTJ 270
硬化混凝土	硝酸银滴定水溶氯离子, 5g 粉末溶于 100mL 蒸馏水, 磁力搅拌 2h, 取 50mL 溶液	氯离子百分含量	《水质 氯化物的测定 硝酸银滴定法》GB 11896
	硝酸银滴定水溶氯离子, 20g 混凝土硬化砂浆粉末溶于 200mL 蒸馏水, 搅拌 2min, 浸泡 24h, 取 20mL 溶液	氯离子百分含量	《混凝土质量控制标准》GB 50164 《水运工程混凝土试验规程》JTJ 270
砂	硝酸银滴定水溶氯离子, 水砂比 2:1, 10mL 澄清溶液稀释至 100mL	氯离子百分含量	《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ52
外加剂	电位滴定法测水溶氯离子, 固体外加剂 5g 溶于 200mL 水中; 液体外加剂 10mL 稀释	氯离子百分含量	《混凝土外加剂匀质性试验方法》GB/T 8077

	至 100mL		
--	---------	--	--

D.0.3 混凝土及水、土中硫酸根离子含量的测定方法应符合表 D.0.3 的规定。

表 D.0.3 硫酸根离子含量测定方法

测试对象	试验方法	测试内容	参照规范/标准
硬化混凝土	重量法测量硫酸根含量，5g 粉末溶于 100mL 蒸馏水	硫酸根百分含量	《水质硫酸盐的测定重量法》GB/T 11899
水	重量法测量硫酸根含量	硫酸根离子浓度，mg/L	
土	重量法测量硫酸根含量	硫酸根含量，mg/kg	《森林土壤水溶性盐分分析》GB 7871

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对于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，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

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”。