

中华人民共和国国家标准

GB

GB/Txxxx-200x

混凝土结构耐久性设计规范

Code for durability design of concrete structures

(征求意见稿)

200x 年-XX-XX 发布

200x 年-XX-XX 实施

中华人民共和国建设部
国家质量监督检验检疫总局

征求意见稿前言

本标准是根据建设部建标[2004]第 67 号文的要求，由主编单位清华大学会同参编单位，组织科研、教学、设计、施工等部门的专家成立编制组，现已完成这一标准的《征求意见稿》。

在编制过程中，编写组开展了专题研究和调查，总结了我国近年来的工程实践经验并借鉴了现行的国际标准，曾先后编写出规范的两轮初稿，并通过会议等形式在一定范围内听取了建议和意见，经反复讨论、修改后形成《征求意见稿》，现报送有关行政主管部门、各省、自治区、直辖市工程建设行政主管部门和有关单位征求意见。

本标准的主要内容为：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；设计使用年限要求；材料与构造的基本要求以及不同环境作用下的耐久性设计方法，包括一般环境、冻融环境、氯化物环境和化学腐蚀环境。

本标准由建设部管理，具体技术内容的解释由主编单位清华大学土木工程系负责。为提高《混凝土结构耐久性设计规范》的编制质量和水平，请认真审阅规范《征求意见稿》的条文和相关说明。为便于审阅，在征求意见稿中已将条文说明直接附在每一条文之后并用楷体字表示。

请将意见和建议寄至主编单位：北京清华大学土木系结构工程研究所转《混凝土结构耐久性设计规范》编制组（邮编：100084；E-mail: jiegou@tsinghua.edu.cn），也可直接提交给下列编制组成员。

主编单位：清华大学

参编单位：中国建筑科学研究院、国家工程结构检测中心、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、交通部四航局工程技术研究院、天津港湾工程研究所、路桥集团桥梁技术有限公司

编制组成员：（以姓氏拼音为序）

陈肇元 邸小坛 李克非 廉慧珍 徐有邻（以上为执笔人）

巴恒静 包琦玮 鲍卫刚 陈蔚凡 干伟忠 郝挺宇 黄士元 金伟良 冷发光
路新瀛 缪昌文 潘德强 钱稼茹 孙 伟 王庆霖 王清湘 谢永江 邢 锋
尤天真 张 鑫 赵 筠 赵铁军 朱万旭

《混凝土结构耐久性设计规范》编写组

2006 年 8 月

目 次

1	总则.....	1
2	术语和符号.....	3
2.1	术语.....	3
2.2	符号.....	5
3	基本规定.....	6
3.1	设计原则.....	6
3.2	环境类别与作用等级.....	8
3.3	设计使用年限.....	11
3.4	材料要求.....	12
3.5	构造规定.....	14
4	一般环境.....	20
4.1	一般规定.....	20
4.2	环境作用等级.....	20
4.3	材料与保护层厚度.....	21
4.4	构造与做法.....	23
5	冻融环境.....	24
5.1	一般规定.....	24
5.2	环境作用等级.....	24
5.3	材料与保护层厚度.....	26
5.4	构造与做法.....	28
6	海水和除冰盐等氯化物环境.....	30
6.1	一般规定.....	30
6.2	环境作用等级.....	32
6.3	材料与保护层厚度.....	35
6.4	构造与做法.....	39
6.5	氯化物侵入混凝土引起钢筋锈蚀的定量分析.....	40

7	化学腐蚀环境.....	41
7.1	环境作用等级.....	41
7.2	材料、保护层厚度与构造	45
8	后张预应力体系的耐久性要求.....	47
8.1	一般规定.....	47
8.2	预应力筋的防护.....	48
8.3	锚固端的防护.....	50
8.4	构造与做法.....	52
附录 A	混凝土结构设计的耐久性极限状态	53
附录 B	混凝土原材料选用的限定范围	55
B1	混凝土胶凝材料用量的限定范围	55
B2	混凝土中氯离子、三氧化硫、碱含量的限制	56
B3	混凝土胶凝材料组成的限定范围	57
B4	混凝土骨料的最大粒径限制与质量要求	60
附录 C	冻融环境中引气混凝土含气量与气泡间隔系数	61
附录 D	混凝土耐久性参数与腐蚀性离子测定方法	62

1 总 则

1.0.1 为保证混凝土结构具有经济合理的使用年限，贯彻可持续发展战略和建设节约型社会的方针，制订本规范。

通过耐久性设计保证混凝土结构经济合理的使用寿命，体现节约资源和可持续发展的方针政策，是本规范编制的目标。

1.0.2 本规范适用于常见环境作用下房屋建筑、城市桥隧与一般构筑物中普通混凝土结构的耐久性设计。处于特殊腐蚀环境中的混凝土结构耐久性设计，应按现行国家有关标准的专门规定执行。

本条确定规范的适用范围。本规范仅适用于普通混凝土做成的结构。轻骨料混凝土与其他特种混凝土在环境作用下的劣化机理与速度有可能不同于普通混凝土，例如轻骨料混凝土的碳化速度就要大于普通混凝土。对于非普通混凝土结构，应结合材料自身的特点参考本规范的规定进行耐久性设计。除环境作用以外，低周反复荷载和持久荷载的作用也能引起材料性能劣化的耐久性问题，后者与荷载作用下的结构强度设计有关，有别于环境作用下的耐久性设计，故不属于本规范考虑的范畴。

特殊腐蚀环境下混凝土结构的耐久性设计可按《工业建筑防腐蚀设计规范》等专用标准进行设计，但需注意不同设计使用年限的结构应采取不同的防腐蚀要求。本规范不涉及工业生产的高温高湿环境、微生物腐蚀环境、电磁环境、高压环境以及极端恶劣自然环境作用下的耐久性设计问题。

本规范适用的工程对象除房屋建筑和一般构筑物外，还包括城市市政基础设施工程，如桥梁、涵洞、隧道、地铁、管道等。

1.0.3 本规范的规定仅为混凝土结构耐久性设计的最低限度要求。根据结构的具体特点及重要程度，必要时应适当调整耐久性设计要求。

本条强调规范所提出的规定是一般情况下为保证混凝土结构耐久性的最低要求。设计人员应结合工程的具体特点，必要时应采取更为严格的要求。此外，由于环境作用下混凝土结构的耐久性问题十分复杂，目前尚缺乏工程经验和全面的认识，因此在进行耐久性设计时，如有可靠的调查分析与理论和试验依据，并通过专门的论证，可以局部调整本规范的规定。

1.0.4 混凝土结构的耐久性设计除本规范已作出的规定以外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

本条明确了本规范与其他相关标准规范的协调关系。我国现行标准规范中有关混凝土结构耐久性的规定，在一些方面不能完全满足结构使用年限的要求，所以建议按本规范提出的规定进行设计。凡本规范未提及的内容，尚应符合国家有关标准中的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 环境作用 (environmental action)

能引起混凝土结构材料性能劣化的环境因素（如湿度、温度以及二氧化碳、氧、盐、酸等物质）施加于结构上的作用。

2.1.2 劣化 (degradation)

材料性能随时间逐渐衰减。

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，结构构件在规定的期限内保持其适用性和安全性的能力。

2.1.5 结构的使用年限 (structure service life)

结构建成后，各种性能均能满足要求的实际年限。

2.1.6 设计使用年限 (design service life)

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

2.1.7 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向低浓度区扩散过程的参数。

2.1.8 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的动弹性模量与初始动弹性模量的比值，用标准试验方法测定。

2.1.9 引气 (air entrainment)

在混凝土拌合过程中，使用表面活性剂在混凝土中形成均匀、稳定的球形微细气泡的工艺措施。

2.1.10 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夹带的空气体积。

2.1.11 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。

2.1.12 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。

2.1.13 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状态所进行的活动。

2.1.14 大修 (major repair)

需在一定期限内停止结构的正常使用，或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。

2.1.15 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。

2.1.16 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、磨细矿渣等矿物掺和料（或混合材料）的总称。矿物掺和料在混凝土配比中的用量，以其占胶凝材料的重量百分比表示。

2.1.17 水胶比 (water to binder ratio)

混凝土的用水量与胶凝材料用量的重量比。

2.1.18 防腐蚀附加措施 (additional protective measures)

在改善混凝土密实性和增加保护层厚度等常规手段的基础上，为进一步提高混凝土

土结构耐久性所采取的其他补充措施，包括混凝土表面涂层和防腐蚀面层、环氧涂层钢筋、钢筋阻锈剂和阴极保护等。

2.1.19 钢筋的混凝土保护层 (concrete cover to reinforcement)

从混凝土表面到钢筋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。

2.2 符号

-C — 混凝土结构所处的环境类别（罗马字符）和环境作用等级（大写英文字符）；

C_a 30 — 强度等级为 C30 的引气混凝土；

D_{RCM} — 用外加电场快速迁移试验测得的氯离子扩散系数 (m^2/s)；

f — 混凝土原材料中的粉煤灰重量占胶凝材料总重的比值；

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；

w/B — 混凝土的水胶比。

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和结构所处的环境类别及其作用等级进行设计。

混凝土结构的耐久性设计可分为传统的经验方法和定量计算方法。传统方法是将环境作用按其严重程度定性地划分成几个作用等级，在工程经验类比的基础上，对于不同环境作用等级下的混凝土结构构件，由规范直接规定混凝土材料的耐久性质量要求（通常用混凝土的强度、水胶比、胶凝材料用量等指标表示）和钢筋保护层厚度等构造要求，以满足结构的耐久性需要。近年来，国际上的混凝土结构设计规范在耐久性设计方法上对传统方法作了重大改进，首先是按照材料的劣化机理确定不同的环境类别，在每一类别下再按温、湿度及其变化等不同环境条件区分其环境作用等级，从而对环境作用的描述能够较为详细准确；其次对不同设计使用年限的结构构件，提出了不同的耐久性要求。

在结构耐久性设计的定量计算方法中，环境作用需要定量表示，然后选用适当的材料劣化模型求出环境作用效应，列出耐久性极限状态下的环境作用效应与耐久性抗力的关系式，即可求得与耐久性极限状态相应的使用年限。比如在海洋环境下，环境作用的量值就是混凝土构件表面接触到的氯离子浓度；环境作用效应就是氯离子侵入混凝土内部并在构件截面不同深度位置上积累的氯离子浓度，后者随使用年限增长，是使用年限的函数；耐久性抗力与钢筋的混凝土保护层质量及厚度有关；当保护层深度处的氯离子浓度逐渐累积到能够引起钢筋锈蚀的临界浓度时，可认为耐久性开始失效，达到了构件的耐久性极限状态，即使用年限（寿命）的终结。

结构的设计使用年限应有规定的安全度，所以在耐久性极限状态的关系式中应引入相应的安全系数，当用概率可靠度方法设计时应满足所需的保证率。对于混凝土结构耐久性极限状态与设计使用年限安全度的具体规定，可见本规范的附录 A。

目前，环境作用下耐久性设计的定量计算方法尚未成熟到能在工程中普遍应用的程度。在各种劣化机理的计算模型中，可供实际应用的还只局限于定量估算钢筋开始发生锈蚀的年限。在国内外现行的混凝土结构设计规范中，所采用的耐久性设计方法仍然是传统方法或改进的传统方法。

本规范采用改进的传统方法。除了细化环境的类别和作用等级外，在混凝土的耐久性质质量要求中，既规定了不同环境类别与作用等级下的混凝土最低强度等级、最大水胶比和限定范围的混凝土原材料，又提出了混凝土抗冻耐久性指数、混凝土中的氯离子扩散系数等耐久性参数的量值指标；同时从耐久性要求出发，对结构构造方法、施工质量控制以及工程使用阶段的维修检测作

出了比较具体的规定。对于设计使用年限所需的安全度，已隐含在规范规定的上述要求中。

对于氯盐腐蚀环境下的重要混凝土结构工程，除按本规范规定设计外，建议同时用定量计算方法进行辅助性校核。

本规范中所指的环境作用，是直接和混凝土表面接触的局部环境作用。同一结构中的不同构件或同一构件中的不同部位，所处的局部环境有可能不同，在耐久性设计中应分别予以考虑。例如外墙板的室外一侧会受到雨淋而干湿交替，但室内一侧则处境良好，此时内外两侧钢筋所需的保护层厚度需分别对待。

3.1.2 混凝土结构的耐久性设计包括如下内容：

- 1) 概念设计 — 有利于减轻环境因素对结构作用的结构选型、布置和构造；
- 2) 混凝土材料和钢筋的选用 — 提出材料的耐久性质量要求；
- 3) 根据耐久性要求确定混凝土保护层厚度；
- 4) 防水、排水等构造措施；
- 5) 混凝土裂缝控制要求；
- 6) 严重环境作用下需要采取的多重防护措施与防腐蚀附加措施；
- 7) 基于结构耐久性要求的施工工艺与质量验收要求；
- 8) 使用阶段的维护与检测要求。

本条提出了混凝土结构耐久性设计的基本内容，强调耐久性设计不仅是确定材料性能指标与混凝土保护层厚度。适当的防排水构造措施能够非常有效地减轻环境作用，应作为耐久性设计中的重要内容。混凝土结构的耐久性在很大程度上还取决于混凝土的施工养护质量与钢筋保护层厚度的施工误差，在设计中必须提出相应的质量控制要求与明确的施工验收标准。

混凝土结构的耐久性或预期使用寿命是建立在预定的维修与使用条件下的。因此，在严重环境作用下还必须在设计中提出结构使用阶段维护检测的要求。为方便检测维修，在设计中需要预留必要的条件，如通道、工作空间和装置等。

3.2 环境类别与作用等级

3.2.1 结构所处环境按其对钢筋和混凝土材料的腐蚀机理分为 5 类, 如表 3.2.1 所示。

表 3.2.1 环境类别

环境类别	名称	腐蚀机理
I	一般环境	表层混凝土碳化引起钢筋锈蚀， 无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用
II	冻融环境	反复冻融导致混凝土损伤
III	海水氯化物环境	氯盐引起钢筋锈蚀
IV	除冰盐等其他氯化物环境	氯盐引起钢筋锈蚀
V	化学腐蚀环境	硫酸盐等化学物质对混凝土腐蚀

本条根据混凝土材料的劣化机理，对环境作用进行了分类，即一般环境、冻融环境、海水氯化物环境、除冰盐等其他氯化物环境和化学腐蚀环境。

一般环境（I 类）是指仅有正常的大气（二氧化碳、氧气等）和温、湿度（水分）作用，对混凝土结构的腐蚀主要是碳化引起的钢筋锈蚀。混凝土呈高度碱性，钢筋在碱性环境中发生钝化反应，表面生成一层致密的钝化膜，使钢筋具有良好的稳定性。当空气中的二氧化碳扩散到混凝土内部，会与混凝土内的碱性水化产物发生化学作用（碳化）。碳化虽可增加混凝土密实性，但当碳化缓慢地发展到钢筋表面时，会使钢筋表面失去稳定性（脱钝），于是在氧气与水分的作用下引起锈蚀。各种混凝土结构都会受到大气和温湿度作用，所以在耐久性设计中都应予以考虑。

冻融环境（II 类）主要引起混凝土的冻蚀。当混凝土表面接触环境中的水分时，在冻融循环的作用下可使表层混凝土内部孔隙水的饱和程度不断增加；孔隙水冰冻时体积膨胀以及孔隙水结晶引起的孔隙间液态水的流动，就会使饱水的混凝土发生内部或表层的冻蚀和损伤。如果水中含有盐分，不但会加重损伤程度，而且还会引起混凝土表层剥蚀。所以冰冻地区与雨、水接触的露天混凝土构件应按冻融环境考虑。反复冻融造成混凝土保护层损伤还会间接促使钢筋锈蚀。

海水、除冰盐等氯化物环境（III 和 IV 类）中的氯离子可从混凝土表面迁移到混凝土内部。当侵入到钢筋表面的氯离子浓度积累到一定浓度（临界浓度）后，也能破坏钢筋的稳定性并引发锈蚀。氯离子引起的钢筋锈蚀要比一般环境下单纯的碳化锈蚀严重得多，是耐久性设计的重点问题。

化学腐蚀环境（V 类）对混凝土的腐蚀主要是土、水中的硫酸盐、酸等化学物质和大气中的

硫化物、氮氧化物等与混凝土发生化学作用的结果，但也有盐结晶那样的物理作用所引起的破坏。

3.2.2 各类环境对钢筋混凝土和预应力混凝土的作用程度在本规范中用环境作用等级表示，如表 3.2.2 所示。

表 3.2.2 环境作用等级

作用程度 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	II-F
海水氯化物环境	-	-	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	IV-F
化学腐蚀环境	-	-	V-C	V-D	V-E	

本条将环境作用按其混凝土结构的腐蚀影响程度定性地划分成 6 个等级。一般环境的作用等级从轻微到中度（I-A、I-B、I-C），其他环境的作用程度则为中度到极端严重。但应注意，对于不同环境类别中相同的等级（如 I-C、II-C、III-C），由于腐蚀机理不同，在结构耐久性设计的要求或做法上也会有所差异。

与各个环境作用等级相对应的具体环境条件，可分别参见本规范第 5 章到第 7 章中的规定。

3.2.3 当结构构件受到多种环境类别共同作用时，应同时满足每个环境类别单独作用下的耐久性要求。

一般环境（I 类）的作用是所有结构构件都会遇到和需要考虑的。当同时受到两类或两类以上的环境作用时，通常由作用程度较高的环境类别决定或控制混凝土构件的耐久性要求，但对冻融环境（II 类）或化学腐蚀环境（V 类）有例外，例如在冻融环境下可能必须采用引气混凝土，在混凝土原材料选择、结构构造、混凝土施工养护等方面也有特殊要求。所以当结构构件同时受到多种类别的环境作用时，原则上均应考虑，需满足各自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发生碱-骨料反应、钙矾石延迟反应和软水对混凝土溶蚀的可能性，并在设计中采取相应的措施。

混凝土中的碱（ Na_2O 和 K_2O ）与砂、石骨料中某些含有活性硅的成份会发生化学反应，称为碱硅反应（Aggregate-Silica Reaction，简称 ASR）；某些碳酸盐类岩石骨料也能与碱起反应，称为碱碳酸盐反应（Aggregate-Carbonate Reaction，简称 ACR）。这些碱骨料反应在骨料界面生

成的膨胀性产物会引起混凝土开裂，在国内外都发生过不少工程损坏的事例。环境作用下的化学腐蚀反应大多从表面开始，但碱-骨料反应却是在内部发生的，这是一个长期的渐进过程，一般需要若干年后才能显现，而一旦在表面出现开裂，往往已严重到无法修复的程度。

发生碱-骨料反应的充分条件是：混凝土有较高的碱含量；骨料有较高的活性；还要有水的参与。如果没有水的供给，即使混凝土内有碱和活性骨料也不会发生碱骨料反应。当混凝土在使用环境下可能长期遭受潮湿或接触水时，必须结合使用低碱水泥和大掺量矿物掺和料，并通过严格的测试，才可有条件地应用低活性的骨料。在混凝土中加入足够掺量的粉煤灰、矿渣或沸石岩等掺和料，能够抑制碱骨料反应；采用密实的低水胶比混凝土也能有效地阻止水分进入混凝土内部，有利于阻止反应的发生。

与碱骨料反应相似，从内部发生的化学腐蚀反应还有混凝土钙矾石延迟生成（Delayed Ettringite Formation, 简写作 DEF）。混凝土中的钙矾石是硫酸盐、铝酸钙与水反应后的产物，正常情况下应该在混凝土拌和后水泥的水化初期形成。如在硬化后的混凝土中剩有较多的早期未起反应的硫酸盐离子和铝酸三钙，则在混凝土以后的使用过程中如有水的供应条件就会再起反应，延迟生成钙矾石，后者在生成过程中体积膨胀，会导致混凝土开裂。这一反应也称内部硫酸盐腐蚀。

混凝土早期蒸养过度或内部温度较高能阻止钙矾石生成或使其脱水，甚至分解。防止延迟生成钙矾石破坏作用的主要途径是降低养护温度，限制水泥熟料中的硫酸盐和 C_3A 含量，混凝土在使用阶段应避免与水分接触；在配制混凝土时加入引气剂，也能起到缓解的作用。

流动的软水能使水泥浆体中的氢氧化钙溶出，使混凝土密实性下降并影响其他含钙水化物的稳定。酸性地下水也有类似的作用。一切有利于增加混凝土密实性的措施均有助于减轻氢氧化钙的析出作用。

3.2.5 混凝土结构的耐久性设计尚应根据实际使用条件考虑高速流动水、风沙以及车轮行驶对混凝土表面的冲刷、磨损作用。

冲刷、磨损会削弱混凝土构件截面，尤其是降低混凝土保护层的厚度对结构耐久性造成不利影响，在耐久性设计中应予以考虑。

3.3 设计使用年限

3.3.1 混凝土结构的设计使用年限宜按表 3.3.1 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
不小于 100 年	标志性、纪念性建筑，大型公共建筑，大跨或高层建筑，大型城市桥梁，重要的大型构筑物、重要市政设施等
不小于 50 年	一般的住宅和公寓，中小型公共建筑，中小型桥梁、一般市政设施、一般构筑物、大型工业建筑等
不小于 30 年	易拆卸的轻型建筑物，某些工业建筑、矿山建筑与构筑物等

本条对混凝土结构的最低设计使用年限作出了规定。

结构的设计使用年限是在设计预定的使用与维修条件下具有规定保证率或安全裕度的结构整体使用年限，应由设计人员与业主共同确定，并不低于有关法规和表 3.3.1 的规定。

一般的民用建筑物在混凝土结构的设计使用年限内应按无需大修进行设计(仅需常规维护)，所有结构构件的设计使用年限应与结构整体的设计使用年限相同。

标志性、纪念性建筑物的设计使用年限一般不宜低于 150 年；表 3.3.1 中的高层建筑是指总体建筑高度大于 50m 的建筑物；对于大型工程建设项目，其混凝土结构的设计使用年限可适当增加；某些工业建筑和矿山建筑的使用年限与工艺更新和资源开采的期限有关，可以低于 50 年。

3.3.2 在严重环境作用下的混凝土结构，允许将个别构件或部件设计成容易更换的型式，或能够在预期的年限进行大修。这些构件的设计使用年限可低于结构整体的设计使用年限。

在严重（包括严重、非常严重和极端严重）环境作用下，混凝土结构的个别构件因技术条件和经济性难以达到结构整体的设计使用年限时（如斜拉桥的拉索），在与业主协商同意后，可设计成易更换的构件或能在预期的年限进行大修，并应在设计文件中注明更换或大修的预期年限。需要大修或更换的结构构件，应具有能够经济合理地进行修复或更换的施工操作条件。

3.4 材料要求

3.4.1 配有钢筋的混凝土耐久性质量，应根据不同环境类别和作用等级，同时满足混凝土最低强度等级、最大水胶比和在限定范围内选用混凝土原材料的要求。

经验表明，综合控制混凝土的最低强度等级、最大水胶比和在限定范围内选择混凝土原材料的品种、用量和质量，就能满足不同类别环境作用下的耐久性质量要求。这里所说的限定范围，主要指硅酸盐水泥和矿物掺和料等胶凝材料的用量范围（如上下限值）、化学外加剂的选用（如高效减水剂和引气剂）、水泥中的铝酸三钙含量限制、原材料中的有害成分总量限制（如氯离子、硫酸根离子、可溶碱等）、粗骨料的最大粒径与吸水率限制等，具体可见本规范的附录 B1、B2 和 B3。

设计需要满足的混凝土最低强度等级和最大水胶比可见本规范有关章节的规定。对于混凝土原材料的选用，一般可在设计文件中注明由施工单位根据设计文件提出的环境作用类别与等级、工程的设计使用年限和设计规定的混凝土材料质量和组成要求，按本规范执行。大型工程和重要工程的混凝土原材料选用，应在设计阶段由结构工程师会同材料工程师共同确定混凝土及其原材料的具体技术要求。

3.4.2 对于重要工程和大型工程，应在设计中针对具体的环境类别和作用等级，提出混凝土材料耐久性参数的量值指标。

常用的混凝土耐久性参数包括一般环境作用下的混凝土抗渗等级、冻融环境下的抗冻耐久性指数或抗冻等级、氯盐环境下的氯离子在混凝土中的扩散系数等。这些参数均用实验室标准快速试验方法测定，在一定条件下可用来比较不同混凝土之间耐久性能的相对高低，但较难与使用年限直接相联系，所以主要用于施工阶段的混凝土质量控制和质量检验。

抗渗等级仅对低强度混凝土的性能检验有一定用处，对于密实的高性能混凝土宜用氯离子在混凝土中的扩散系数作为耐久性能的评定指标。

3.4.3 结构构件的混凝土强度等级应同时满足构件承载能力和耐久性的要求。对于配有钢筋的混凝土构件，满足耐久性要求的混凝土最低强度等级与最大水胶比如表 3.4.3 所示。

表 3.4.3 基于耐久性要求的混凝土最低强度等级与最大水胶比

环境作用类别与等级	设计使用年限		
	100 年	50 年	30 年
I-A	C30, 0.55	C25 ¹ , 0.60	C25 ¹ , 0.60
I-B	C35, 0.50	C30, 0.55	C25, 0.60
I-C, III-C, IV-C	C40, 0.45	C35, 0.50	C30, 0.55
II-C, V-C, III-D, IV-D	C45, 0.40	C40, 0.45	C40, 0.45
II-D	C _o 40, 0.45	C _o 35, 0.50	C _o 35, 0.50
II-E	C _o 45, 0.40	C _o 40, 0.45	C _o 40, 0.45
V-D, III-E, IV-E	C50, 0.36	C45, 0.40	C45, 0.40
V-E, III-F, IV-F	C55, 0.36	C50, 0.36	C50, 0.36

注：1、对于预应力混凝土构件，最低强度等级不得低于 C30。

2、冻融环境作用等级为 -D 和 -E 的混凝土应采用引气工艺。

3、如能加大钢筋保护层的厚度，大截面受压墩、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 3.4.4 条规定的素混凝土构件的最低强度等级。

结构构件需要采用的混凝土强度等级，在许多情况下是由环境作用决定的，而并非由荷载作用控制。因此在进行混凝土结构的承载能力设计以前，应该首先了解耐久性要求的混凝土最低强度等级。对于截面较大的墩柱等受压构件，为了满足表层（或钢筋保护层）混凝土的耐久性要求而全截面采用较高强度的混凝土，有时就不如采用加大钢筋保护层厚度或者在混凝土表面采取附加防腐措施的办法更为经济。

混凝土强度与混凝土耐久性是两个不同的概念，但强度在一定程度上确实能较好地体现混凝土的耐久性。强度高的混凝土比较密实，有利于阻挡或延缓外界水分、气体和有害化学物质的侵入；混凝土强度还与混凝土的抗冻能力和抵抗盐结晶等能力直接有关。所以在混凝土结构耐久性设计的传统经验方法中，一直用混凝土最低强度等级，混凝土最大水胶比和混凝土胶凝材料最小用量，合在一起作为混凝土耐久性质量的保证。

3.4.4 素混凝土结构的混凝土最低强度等级可以根据环境类别参照表 3.4.3 选取：对于一般环境，可按 I-A 作用等级取用；对于冻融环境，可直接按环境作用等级选取，即与配有钢筋的混凝土相同；对于氯盐环境，可按 -C 或 -C 作用等级选取；对于化学腐蚀环境，可降低一个环境作用等级选取混凝土强度。

素混凝土结构不存在钢筋锈蚀问题，所以在一般环境和氯盐环境中可按较低的环境作用等级取用混凝土所需的最低强度。由于一般环境下的温湿度变化也会引起混凝土风化、损伤，所以素混凝土的强度等级也需有最低的保证。同样，氯离子对混凝土材料也有腐蚀作用，氯盐环境下素

混凝土的最低强度等级不宜低于 C35（50 年）和 C40（100 年）。

3.4.5 冷加工钢筋作为混凝土构件的受力主筋，只能用于一般环境（I 类）中的轻微和轻度作用等级（I-A 和 I-B），且构件的设计使用年限不得超过 50 年。

3.4.6 直径小于 6mm 的钢筋作为受力钢筋，只能在一般环境（I 类）中使用。当环境作用等级为轻微和轻度（I-A 和 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。

3.5 构造规定

3.5.1 环境作用下钢筋（包括主筋、箍筋和分布筋）的混凝土保护层厚度应满足钢筋防锈的耐久性需要并考虑施工偏差的影响。

本条提出环境作用下混凝土保护层厚度的确定原则。对于不同环境作用下耐久性所需的混凝土保护层厚度，可见本规范第 4 章到第 7 章中的具体规定。如果本规范规定的保护层厚度不能满足钢筋与混凝土之间粘结力传递与防火的要求，则保护层厚度应按后者取值。

从耐久性角度分析，混凝土构件中最外侧的钢筋会首先发生锈蚀，可能是箍筋和分布筋，也可能是主筋。所以本规范规定构件中的各类钢筋都应满足同样的保护层厚度的最低要求。在现行的欧洲规范和美国混凝土学会的 ACI 规范以及过去的英国 BS 规范和欧洲 CEB - FIP 模式规范中都有这样的规定。箍筋的锈蚀可引起构件混凝土沿箍筋的环向开裂，而墙、板中分布筋的锈蚀除引起开裂外，还会导致保护层的成片剥落，都是结构的正常使用所不允许的。

由于保护层厚度尺寸较小，而钢筋出现锈蚀的年限大体与保护层厚度的平方成反比，因此保护层厚度的施工偏差会对耐久性造成很大的影响。以板中 20mm 厚度的保护层为例，如果施工偏差允许 5mm，就可使钢筋出现锈蚀的年限缩短 45%，所以在设计要求的保护层厚度中，必须计入施工允许负偏差的影响。在 2004 年正式颁布作为欧共体国家统一使用的欧洲规范、1990 年颁布的 CEB-FIP 模式规范、英国 BS 规范等国际通行标准中，都将设计要求的保护层厚度取为保护层最小厚度 c_{min} 与施工允许负偏差（取绝对值）之和，称为“名义厚度 c_{nom} ”，并明确规定用于结构计算和标注于施工图上的保护层厚度应为名义厚度而非最小厚度。欧洲规范建议的施工允许偏差对现浇混凝土为 5mm 到 15mm，一般取 10mm。英国规范中过去规定施工允许偏差 5mm，但通过大量工程调查，证明多数工程现场达不到这个要求，需取更大的数值。在北美的规范中，设计要求的保护层厚度在名称上标为最小厚度，但规范在最小厚度的取值中已经包含了施工允许偏差，实际上就是欧洲的名义厚度。加拿大规范在最小厚度中考虑的施工偏差是 $\pm 12\text{mm}$ ，美国 ACI 规范也大体相近。

在我国的混凝土结构设计标准中，设计规定的保护层厚度是最小厚度，但没有明确其中是否

考虑了施工允许偏差。我国现行的《混凝土结构设计规范》GB 50010 - 2002 对环境作用的分类与对受力钢筋保护层最小厚度的规定，与 1990 CEB-FIP 模式规范中规定的分类与保护层最小厚度基本一致；但前者对主筋，而后者是对最外侧钢筋（可能是箍筋或分布筋），且需另加 10mm 的施工偏差。两者对于梁柱构件主筋的保护层厚度要求，实际上要相差 20mm 左右甚至更多。

我国交通部新颁布的用于耐久性设计的标准《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTG/T B07 - 01 - 2006，已规定了设计采用的保护层厚度应为名义厚度，为保护层最小厚度与施工允差之和，并分别对最小厚度与允差作了具体规定。铁道部新颁布的标准《铁路混凝土结构耐久性设计暂行规定》铁建设[2005]157 号中，也明确规定设计采用的保护层厚度为规范规定的最小厚度另加施工允许偏差。此前在中国土木工程学会颁布的标准《混凝土结构设计施工指南》CCES01 - 2004 中，规定设计采用的保护层厚度为名义厚度。

本规范规定保护层设计厚度的最低值仍称为最小厚度，但在最小厚度的取值中已考虑了施工允差的影响，并认为一般情况下施工导致保护层设计厚度的正负偏差 \pm 相等，对现浇的一般混凝土梁、柱取允许偏差为 10mm，板、墙取为 5mm。

为保证钢筋与混凝土之间粘结力传递，按照《混凝土结构设计规范》GB 50010 - 2002 的规定，钢筋的保护层厚度要求一般不小于钢筋的直径。按防火要求的混凝土保护层厚度，可参照有关的防火设计标准，但我国有关设计规范中规定的梁板保护层厚度，往往达不到所需耐火极限的要求。尤其是预应力预制楼板相差更多，预应力高强钢材在高温下的强度损失要比普通热轧钢筋大得多。

[送审注]：在本规范此前的讨论稿中，规定设计采用的保护层厚度是名义厚度，认为使用名义厚度的概念比较清楚，也有利于施工阶段的质量控制和促进施工水平。此后在规范编制组的讨论中，多数成员考虑到国内工程设计界的传统，认为不宜引入名义厚度的新概念，可在最小厚度内将施工偏差考虑进去，所以在这一征求意见稿中，对于设计采用的保护层厚度又改回到最小厚度的提法。但也有专家认为不应考虑施工偏差。根据本规范的主编单位和编制组成员单位（西安建筑大学与浙江大学）所作的定量计算和概率可靠度分析表明，设计取用的保护层厚度确实需要包含施工偏差的影响，否则不能保证所需的设计使用寿命。

这一问题提请有关单位和专家在审阅这一征求意见稿时特别注意,并给予具体意见和建议。

[背景材料]：1982~1983 年间，国内的“构件混凝土结构构件可靠度的研究”课题组曾对各类混凝土构件的保护层厚度有过实测统计，调查了我国 13 个城市的 14 个施工现场和 19 个预制构件厂，统计得到这些数据可近似用正态分布描述，现浇混凝土梁板柱的主筋保护层厚度变异系数为 0.3，保护层实测厚度与设计规定的最小厚度的比值平均为 0.89。由此估计，实测保护层厚度数据中竟有 66% 达不到设计要求。如果设计规范规定的保护层厚度中不考虑施工允许偏差

的影响，而在施工验收规范中又允许保护层可有+10，-7mm 的偏差，并规定验收时的合格率为 90%，这时即使实测的保护层厚度能够平均达到设计所要求的厚度且满足验收标准，也会有将近一半的测点满足不了设计要求。

举例说明，如果一根梁的保护层设计厚度为 25mm，处于碳化锈蚀的一般环境中，按 7mm 的施工负允差进行验收，实测厚度达到 18 mm 就进入验收合格范围，18mm 保护层厚度的耐久性如果用钢筋发生锈蚀的年限表示，只有规范要求 25mm 保护层厚度时的 52%。假设**实际厚度在 90%测点上达到 18mm，实测保护层厚度的均值为 25mm**（根据验收规范为合格），这时可以反推的保护层厚度的变异系数约为 $(7\text{mm}/1.28)/25\text{mm}=0.22$ （90%保证率对应可靠度指标为 1.28）；如果保护层设计厚度 25mm 能够保证设计使用年限 50 年，按照上述验收合格的情况下（实测平均值达到 25mm，90%达到 18mm），仅需 20 年左右耐久性失效概率会达到 10%，到 30 年失效概率将达到 20%，到工程建成后的 43 年，失效概率将增至 40%，到达设计使用寿命 50 年时，失效概率将为 50%，这对耐久性设计来讲无论如何是不能接受的。按可靠度设计方法的要求，到达设计使用寿命 50 年时，按正常使用的耐久性失效概率应不超过 5%~10%，相应的可靠指标为 1.5。而欧洲一些工程设计以及 fib 新编制的标准草案《混凝土结构的使用寿命设计》中，要求可靠指标为 1.8，对应的失效概率小于 5%。

3.5.2 预应力筋的混凝土保护层厚度，对于具有连续密封防护套管的后张预应力（有粘结或无粘结）钢筋可取与普通钢筋相同且不小于孔道管直径的 1/2；对于没有套管或套管无密封防护功能的预应力筋，其保护层厚度应比普通钢筋增加 10mm。

预应力筋的耐久性保证率应高于普通钢筋。在严重的环境条件下，除混凝土保护层外还应应对预应力筋采取双重或多道防护措施，如将后张预应力筋置于密封的波形套管中并灌浆。本规范规定，对于单纯依靠混凝土保护层防护的预应力筋，其保护层厚度应比普通钢筋的大 10mm。我国混凝土结构设计规范对室内干燥环境中预应力筋的保护层厚度要求与普通钢筋相同，而欧洲规范则要求预应力筋的保护层最小厚度在各种环境作用下都比普通钢筋的大 10mm。对于热轧预应力粗钢筋，其保护层厚度可取与非预应力的普通热轧钢筋相同。

3.5.3 对于工厂生产的混凝土预制构件，钢筋的混凝土保护层厚度可比现浇混凝土构件的规定保护层厚度减少 5mm。

工厂生产的混凝土预制构件，在保护层厚度的质量控制上较有保证，保护层施工偏差比现浇构件小，因此设计要求的保护层厚度可以适当降低。

3.5.4 设计文件宜对施工提出混凝土保护层厚度施工质量验收的合格要求。

由于本规范在设计采用的保护层最小厚度中已考虑了施工偏差的影响，对施工允许偏差的取值也与现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 - 2002 的规定基本一致。但在任何情况下，如发现个别保护层厚度不足设计规定的 2/3 均应作为事故，需扩大检查范围并对后果进行专门分析，并采取必要的补救措施。

对于桥梁等结构，可按《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTG/T B07 - 01 - 2006 中的规定进行验收。与扣除施工允许偏差后的保护层设计厚度相比，所有保护层厚度的实测值应有 95 % 以上的合格率。

保护层厚度的施工允许偏差宜取正负相等的偏差值。国内有的大型工程为了保证结构耐久性，专门规定保护层厚度的施工允差为 + 10 和 - 0mm；对于截面高度不是很大的受弯构件构件，这种做法会影响到构件的承载力，不宜采用。

混凝土保护层厚度的施工允许偏差越小，对施工的质量要求就越高。对于重要工程或环境作用较为严重的情况，尤其应该关注现场的施工质量控制水平，必要时应调整保护层的设计厚度；此外，在合同文件中还应规定混凝土保护层厚度质量验收的检测方法和验收不合格时的补救与赔偿方案。

3.5.5 钢筋混凝土构件在荷载作用下的表面裂缝最大宽度的计算值应不超过表 3.5.5 中的限值。如对裂缝宽度并无外观上的特殊要求，当保护层实际厚度超过 30mm 时，可将厚度取为 30mm 计算确定表面裂缝的最大宽度。

表 3.5.5 表面裂缝计算宽度的允许值 (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) ¹
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 ²
E	0.15	按一级裂缝控制或按全预应力类构件控制 ²
F	0.10	按一级裂缝控制或按全预应力类构件控制 ²

注：1、括号中的数据用于采用钢丝或钢绞线的预应力构件，有密封套管的后张预应力构件除外。

2、裂缝控制等级为二级或一级时，按《混凝土结构设计规范》GB 50010 - 2002 的公式计算；部分预应力 A 类构件或全预应力构件按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 - 2004 的公式计算。

3、有自防水要求的混凝土构件强度等级不应低于 C35，其横向弯曲的表面裂缝计算宽度不应

超过 0.20mm。

裂缝最大宽度可根据《混凝土结构设计规范》GB50010 - 2002 或《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 - 2004 的相关公式计算，后者给出的裂缝宽度计算值与保护层厚度的大小无关。

本条规定的裂缝为荷载造成的横向裂缝，不包括收缩和温度等非荷载作用引起的裂缝。表 3.5.5 中的裂缝宽度允许值，更不能作为荷载裂缝计算值与非荷载裂缝计算值两者叠加后的控制标准。非荷载裂缝应该通过适当的施工工艺和构造措施进行控制。国外有的地铁标准中提出荷载裂缝宽度与非荷载裂缝宽度可以分开计算，如能单独满足表 3.5.5 中那样的裂宽允许值即可；也有设计标准提出荷载与收缩共同作用下的裂缝宽度计算方法。按照规范计算公式得到的裂缝宽度，实际上的发生概率是很低的；对裂缝控制要求的严格程度，也与规范编制者对开裂后果的估计有关。如果开裂对工程的功能影响不大，就没有必要提出过高的要求。

3.5.6 混凝土结构的形状和构造应有效地避免水、汽和有害物质在其表面的积聚，并能够及时排除。

可能受雨淋或积水的构件顶面应做成斜面以利于排水，并应考虑结构发生挠度或施加预应力引起反拱对排水的影响；受雨淋的室外悬挑构件侧边，应设滴水槽或类似装置，防止雨水从侧边淌向构件底面。

楼面、桥面的排水应通过专门设置的管、沟排出，不应直接排在下部构件的混凝土表面上。桥梁墩台的顶面应做成向边缘倾斜不小于 5% 的斜坡，或内置中心排水管时向中心倾斜。

水分是影响混凝土结构耐久性的重要作用因素，避免构件遭受各种水的直接作用是提高混凝土结构耐久性能的重要措施之一。本条给出了混凝土结构避免直接接触水、汽和排水的构造原则。

3.5.7 混凝土构件宜设防护面层并减少棱角。

在混凝土构件与上覆的露天面层（如桥面板与路面层，屋面板与屋面层）之间应设置可靠的防水层。

除轻微和轻度的环境作用外，失效年限低于构件使用年限的防水层等普通构造措施以及普通的建筑饰面（抹灰、面砖等），在确定钢筋所需的混凝土保护层厚度时不宜考虑其有利作用。

在混凝土表面设置防护面层可以有效减轻碳化、冻融和腐蚀性物质的作用效应。棱角部位受到两个侧面的环境作用并容易造成碰撞损伤，在可能条件下应尽量加以避免，尤其在严重环境作

用下，棱角应修改成圆角。

3.5.8 结构设计宜减少施工缝、伸缩缝等连接缝数量，并应避让可能遭受最不利局部环境作用的部位。对必须设置的各种连接缝应采取有效的防护措施。

混凝土施工缝、伸缩缝等连接缝是结构中相对薄弱的部位，容易成为腐蚀性物质侵入混凝土内部的通道，故应在设计与施工中尽量避让不利的环境作用并采取有效的防护措施。

3.5.9 地下工程与岩土工程施工中用于稳定周围岩土的混凝土支护，如在设计中作为永久性结构的一个部分共同承受结构设计使用年限内的荷载作用，则应满足相应的耐久性质量要求，否则应按临时性结构考虑。

3.5.10 浇筑在混凝土中并部分暴露在外的吊环、紧固件、连接件等金属部件应与混凝土中的钢筋隔离。

外露金属部件不得与内部的钢筋有电连接是钢筋防锈的基本要求。对于外露金属部件，也应采取适当措施，避免这类部件锈蚀造成的混凝土胀裂对构件承载力的影响。

另外，结构的同一构件应尽可能使用相同材质的钢筋，混凝土中不同金属埋件（包括镀锌钢材与普通钢材）之间均不得有导电的连接。

3.5.11 后张预应力混凝土应按本规范第 8 章的要求采取多重防护措施。

预应力构件对锈蚀比较敏感，锈蚀后会发生脆断，且在破坏前难以察觉，破坏后果往往特别严重，所以在设计中需根据环境的作用程度，采用相应的多重防护构造措施。

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，在于控制正常大气作用下混凝土碳化引起的内部钢筋锈蚀。

正常大气作用下表层混凝土碳化引发的内部钢筋锈蚀，是混凝土结构中最常见的劣化现象，也是耐久性设计中的首要问题。

4.1.2 当混凝土构件同时承受其他环境作用时，如后者的作用等级高于一般环境的作用等级，则可直接按后者的作用等级进行耐久性设计。

4.2 环境作用等级

4.2.1 对于配有钢筋的混凝土结构，一般环境的作用等级可按表 4.2.1 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 ¹	结构构件示例
I-A	室内干燥环境	常年干燥的低湿度 ² 室内构件；
	永久浸没于静水中的环境	所有表面均永久处于静水下的构件
I-B	非干湿交替的室内潮湿环境	中、高湿度 ² 环境中的室内混凝土构件；
	非干湿交替的露天环境	不受雨淋或与水接触的室外构件；
	长期湿润环境	长期与水或湿润土体接触的水中或土中构件
I-C	干湿交替环境	与凝结露水接触的室内天窗构件； 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； 处于水位变动区的大气中构件

注：1、环境条件指与混凝土表面接触的局部环境。

2、常年干燥的低湿度室内环境指室内相对湿度长期处于 60% 以下，中、高湿度环境指年平均相对湿度大于 60%。

确定大气环境对混凝土结构与构件的作用程度，需要考虑的环境因素主要是湿度（水）、温度和 CO_2 与 O_2 的供给程度。如果相对湿度较高，混凝土始终处于湿润的饱水状态，则空气中的 CO_2 难以扩散到混凝土体内，碳化就不能或只能非常缓慢地进行。如果相对湿度很低，混凝土非常干燥，则溶解在孔隙水中的氢氧化钙的量很少，碳化反应很难进行。同时，钢筋锈蚀是电化学过程，

要求混凝土有一定的电导率，当混凝土内部的湿度低于 70% 时，由于混凝土导电率太低钢筋锈蚀也很难进行。锈蚀电化学过程需有水和氧气参与，当混凝土处于水下或湿度接近饱和时，氧气难以扩散到钢筋表面，锈蚀会因为缺氧而难以发生。所以最易造成钢筋碳化锈蚀的环境是干湿交替，炎热的潮湿环境会加速钢筋锈蚀，更容易造成破坏。

一般环境下的室内干燥环境对混凝土结构的耐久性最为有利。虽然混凝土在相对湿度为 50 ~ 60% 的干燥环境下很容易碳化，但实际上钢筋锈蚀的速度非常缓慢甚至难以进行。同样，水下构件由于缺乏氧气，钢筋基本不会锈蚀。因此这两类情况的环境作用等级被归为 -A 级。在室内外潮湿环境条件下，碳化深度超过保护层厚度后钢筋容易发生明显锈蚀，环境作用等级归为 -B 级。干湿交替的环境最为不利，环境作用等级归为 -C 级。如果室内构件有较长一段时间处于较高湿度中，虽然年均的相对湿度低于 60%，也会引起钢筋锈蚀，故宜按 -B 级考虑。

表 4.2.1 注 1 中所指的局部环境，对于钢筋来说，是指其混凝土保护层表面的环境。

4.2.2 墙、板构件的一侧表面接触室内干燥空气、对侧表面接触水体或湿润土体时，接触空气一侧钢筋的环境作用等级宜按干湿交替环境考虑。

与湿润土体或水接触的一侧混凝土饱水，钢筋不易锈蚀，可按环境作用等级 I-B 考虑选用钢筋的混凝土保护层厚度；而接触干燥空气的对侧，混凝土容易碳化，又有水分从另一侧迁移供给，一般应按 I-C 级环境考虑。但混凝土密实性优良、构件厚度较大或表面已作可靠防护层时，可不按 I-C 级考虑。

4.2.3 室内频繁接触水蒸汽的构件，其环境作用等级应按 I-C 级考虑。

4.3 材料与保护层厚度

4.3.1 一般环境中配有钢筋的混凝土构件，其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 中规定的混凝土最低强度等级、最大水胶比和保护层厚度与欧美的一些规范相近，这些数据比照了已建工程实际劣化现状的调查结果，并用材料劣化模型作了近似的计算校核，总体上略高于我国混凝土结构设计规范的规定，但在干湿交替的环境条件下则差别较大。美国 ACI 设计规范要求室外淋雨环境的梁柱外侧钢筋（箍筋）保护层厚度至少 50mm，英国 BS8110 设计规范（60 年设计年限）为至少 40mm（C40）或 30mm（C45）。

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		
		强度 等级	最大 水胶比	c	强度 等级	最大 水胶比	c	强度 等级	最大 水胶比	c
板、墙等 面形构件	I-A	C30	0.55	25	C25	0.60	25	C25	0.60	20
		\geq C35	0.50	20	\geq C30	0.55	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	45	C35	0.50	35	C35	0.50	30
		C45 \geq C50	0.40 0.36	40 35	C40 \geq C50	0.45 0.36	30 25	\geq C40	0.45	25
梁、柱等 条形构件	I-A	C30	0.55	30	C25	0.60	30	C25	0.60	30
		\geq C35	0.50	25	\geq C30	0.55	25			
	I-B	C35	0.50	40	C30	0.55	35	C25	0.60	30
		\geq C40	0.45	35	\geq C35	0.50	30	\geq C30	0.55	25
	I-C	C40	0.45	50	C35	0.50	40	C35	0.50	35
		C45 \geq C50	0.40 0.36	45 40	C40 \geq C50	0.45 0.36	35 30	C40 \geq C45	0.45 0.40	30 25

注：1、对于年平均气温大于 20℃ 且年平均相对湿度大于 75% 的 I-B、I-C 环境中的构件，表中的混凝土最低强度等级宜分别提高 5MPa。

2、直接接触土体浇筑的混凝土保护层厚度应不小于 70mm。

3、处于流动水中或同时受水中泥砂冲刷侵蚀的构件保护层厚度宜适当增加 10 ~ 20mm。

4、预制构件的保护层厚度可减少 5mm。

5、一般环境下当胶凝材料中的粉煤灰和矿渣等用量甚少时，表中的最大水胶比凡低于 0.45 的可适当增加。

板、墙、壳等面形构件中的钢筋，主要受来自一侧混凝土表面的环境因素侵蚀，而矩形截面的梁、柱等条形构件中的角部钢筋，则同时受到来自两个相邻侧面的环境因素侵蚀，所以后者的保护层最小厚度要大于前者。对保护层最小厚度要求与所用的混凝土水胶比有关，在应用表 4.3.1 中不同使用年限和不同环境作用等级下的保护层厚度时，应注意到对混凝土水胶比和强度等级的不同要求。

4.3.2 大截面混凝土墩柱在加大钢筋的保护层厚度的前提下，其混凝土强度等级可低于表 4.3.1 中的要求，但两者差值应不大于 10MPa，且不应低于 3.4.4 条规定的对

素混凝土最低强度等级的要求。

当采用的混凝土强度等级比表 4.3.1 的规定低 5MPa 时，保护层厚度应增加 5 mm；当采用的混凝土强度等级比表 4.3.1 的规定低 10MPa 时，保护层厚度应增加 10mm。

一般环境下对混凝土提出最低强度等级的要求，是为了保护钢筋的需要，所针对的只是构件表层的保护层混凝土。受压构件加大保护层厚度不会引起钢筋与混凝土应力的显著增加，不像受弯构件那样为了减少自重引起弯矩需尽量设法降低保护层厚度。大截面墩柱的体积大，如果只是为了提高保护层混凝土的耐久性而全截面采用较高强度的混凝土，就不如采用加大保护层厚度的办法更为经济合理。

4.3.3 环境作用等级为 I-A 和 I-B 的民用房屋结构构件可考虑构件饰面对混凝土构件耐久性的有利影响，适当降低表 4.3.1 中规定的保护层厚度，但降低的幅度不应超过 10mm。任何情况下，板、墙等平面形构件的保护层厚度不应小于 15mm；梁、柱等条形构件的保护层厚度不应小于 25mm。

4.3.4 在符合 3.5.11 和 3.5.12 条规定的前提下，采用冷加工钢筋或直径小于 6mm 的钢筋作为构件的主要受力钢筋时，构件的混凝土强度等级或保护层厚度应在表 4.3.1 规定的基础上提高一个等级。

冷加工钢筋和细直径钢筋对锈蚀比较敏感，作为受力主筋使用时需要相应提高耐久性要求。

4.4 构造与做法

4.4.1 一般环境下混凝土结构耐久性设计的构造要求见 3.5 节的规定。

4.4.2 对于环境作用等级为 I-C 的混凝土构件，施工中湿养护时间不得少于 3 天，且养护结束时现场混凝土强度不应小于 28 天强度的 50%。

本条规定了一般环境条件下混凝土养护的最低要求，利用养护时间和养护结束时混凝土强度来控制现场养护过程。本条规定的养护时间适用于除大掺量矿物掺合料混凝土以外的混凝土材料。

实际应用中，混凝土的施工养护方法和养护时间需要考虑混凝土强度等级、施工环境的温、湿度和风速、构件尺寸、混凝土原材料组成、入模温度等诸多因素。应根据具体施工条件选择合理的养护工艺，可参考现行的技术标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES01-2004 的相关规定。

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，在于避免混凝土遭受长期冻融循环作用引起的损伤。

饱水的混凝土在反复冻融作用下会造成内部损伤，发生开裂甚至剥落，导致骨料裸露。与冻融破坏有关的环境因素主要有水、最低温度、降温速率和反复冻融次数。混凝土的冻融损伤只发生在混凝土内部含水量比较充足的情况，这与混凝土孔隙水结冰时的结晶压积聚有关。

冻融环境下的混凝土结构耐久性设计，原则上要求混凝土不受损伤，不影响构件的承载力与对钢筋的保护。

5.1.2 与雨、雪、水直接接触并因气候变化有可能遭受冻融的混凝土构件，应考虑冻融环境作用。

冰冻地区与雨、水接触的露天混凝土构件应按冻融环境进行耐久性设计。环境温度达不到冰冻条件（如位于土中冰冻线以下和长期在不结冻水下）的混凝土构件可不考虑抗冻要求。冰冻前不饱水的混凝土且在反复冻融过程中不接触外界水分的混凝土构件，也可不考虑抗冻要求。

本规范不考虑人工造成的冻融环境作用，此类问题由专门的标准规范解决。

5.2 环境作用等级

5.2.1 冻融环境对混凝土结构的作用等级可按表 5.2.1 确定。

本规范对冻融环境作用等级的划分，主要考虑混凝土饱水程度与气温变化两个因素。饱水程度与混凝土表面接触水的频度及表面积水的难易程度（如水平或竖向表面）有关。气温变化则主要与环境最低温度及年冻融次数有关。

我国现行规范中对混凝土抗冻等级的要求多按当地最冷月份的平均气温进行区分，这在使用上有其方便之处，但当地气温与构件所处地段的局部温度往往差别很大。比如严寒地区朝南构件的冻融次数多于朝北的构件，而微冻地区可能反之。由于缺乏各地区年冻融次数的统计资料，现仍暂时按当地最冷月的平均气温表示气温变化对混凝土冻融的影响程度。

对于饱水程度，分为高度饱水和中度饱水两种情况，前者指受冻前长期或频繁接触水体或湿润土体，混凝土体内高度饱水；后者指受冻前偶受雨淋或潮湿，混凝土体内的饱水程度不高。混凝土受冻融破坏的临界饱水度约为 85%~90%。混凝土的含水量低于临界饱水度时不会冻坏，一旦达到或超过临界饱水度，就会很快冻坏。

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 ¹ ： 混凝土高度饱水 ² ，无盐 ³	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： 混凝土中度饱水，无盐	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： 混凝土高度饱水，无盐	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
	微冻地区的盐冻环境： 混凝土高度饱水，有盐	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
	严寒和寒冷地区的盐冻环境： 混凝土中度饱水，有盐	有氯盐严寒和寒冷地区受雨淋构件的竖向表面
II-E	严寒和寒冷地区的盐冻环境： 混凝土高度饱水，有盐	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： $-3^{\circ}\text{C} \sim 2.5^{\circ}\text{C}$ 、 $-8^{\circ}\text{C} \sim -3^{\circ}\text{C}$ 和 -8°C 以下。最冷月平均气温在 2.5°C 以上地区的结构可不考虑冻融作用。

2、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；中度饱和指冰冻前偶受雨水或潮湿，混凝土内饱水程度不高。

3、有盐或无盐指冻结的水中是否含盐，如海水中的氯盐，除冰盐或其他盐类。海水或含盐雪水出现冰冻（盐冻）的可能性应根据当地实际情况调查确定。

有氯化物的冻融环境主要指冬季喷洒除冰盐的环境。含盐分的水溶液不仅会造成混凝土的内部损伤，而且能使混凝土表面起皮剥蚀，盐中的氯离子还会引起混凝土内部钢筋的锈蚀（除冰盐引起的钢筋锈蚀按 IV 类环境考虑）。除冰盐的剥蚀作用程度与混凝土湿度有关；不同构件及部位由于方向、位置不同，受除冰盐直接、间接污染或溅射的程度也会有很大的差别。

寒冷地区海洋和近海环境中的混凝土表层，当接触水分时也会发生盐冻，但海水的含盐浓度要比除冰盐融雪后的盐水低得多。海水的冰点较低，所以在有些寒冷地区并未出现冻结现象。在这种情况下，可以不考虑冻融环境作用，但可以提出引气要求，也有利于防止盐结晶破坏。

5.2.2 位于冰冻线以上的土中混凝土构件，其环境作用等级可根据具体情况适当降低。

埋置于土中冰冻线以上的混凝土构件，发生冻融交替的次数明显低于暴露在大气环境中的构

件，但仍要考虑冻蚀融损伤的可能，可根据具体情况适当降低环境作用等级。

5.2.3 非正常使用条件下可能偶然遭受冻害的饱水混凝土构件，其环境作用等级可按表 5.2.1 的规定降低一级考虑。

某些结构，如电厂的冷却塔构件，在正常使用条件下冬季出现冰冻的可能性很小，但在极端气候条件下或偶发事故时有可能遭受冰冻，故宜具有一定的抗冻能力，但可适当降低要求。

5.2.4 接触积雪的混凝土墙柱底部，宜适当提高环境作用等级，并考虑增加表面防护措施。

竖向构件底部侧面的积雪可引发混凝土较严重的冻融损伤。尤其在冬季喷洒除冰盐的环境中，道路上含盐的积雪常被扫到两侧并堆置在墙柱和栏杆底部，往往造成底部混凝土的严重腐蚀。对于接触积雪的局部区域，也可采取局部的防护处理。

5.3 材料与保护层厚度

5.3.1 冻融环境下的混凝土宜采用引气工艺，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。冻融环境下混凝土原材料的限定范围见本规范的附录 B。环境作用等级为 II-C 的混凝土可不引气，但环境作用等级为 II-D 和 II-E 的混凝土构件应采用引气混凝土。

使用引气剂能在混凝土中产生大量均布的微小封闭气孔，可阻断混凝土中连通的毛细孔隙通路，提高混凝土的抗渗能力，并可吸收、缓冲因冰冻造成混凝土内部的膨胀压力。

引气混凝土的抗冻要求常用新拌混凝土的含气量表示，是气泡体积占混凝土体积的份额。气泡只存在于水泥浆体中，混凝土的浆体体积一般随骨料最大粒径增大而减少，所以混凝土所需的含气量与骨料的粒径有关，具体可参照附录 C 的要求。冻融越严重，要求混凝土的含气量越大，但过大的含气量会明显降低混凝土强度，故含气量应控制在一定范围内，且有相应的误差限制。

矿物掺和料对混凝土抗冻性也有影响，宜通过试验确定。通常情况下，掺加硅粉有利于抗冻；在低水胶比前提下，适量掺加粉煤灰和矿渣对抗冻能力影响不大，但应严格控制粉煤灰的品质，特别要尽量降低粉煤灰的烧失量。

5.3.2 冻融环境中配有钢筋的混凝土构件，其混凝土最低强度等级、最大水胶比和保护层厚度应符合表 5.3.2 的规定，其中盐冻情况下的保护层厚度应根据氯化物环境条件按第 6 章的规定执行。

表 5.3.2 冻融环境中混凝土材料的最低强度与保护层厚度 c (mm)

设计使用年限 环境 作用等级			100 年			50 年			30 年		
			最低强度 等级	最大水 胶比	c	最低强度 等级	最大水 胶比	c	最低强 度等级	最大水 胶比	c
板、墙 面形 构件	II-C 无盐		C45	0.40	40	C40	0.45	35	C40	0.45	35
			\geq C50	0.36	35	\geq C45	0.40	30	\geq C45	0.40	30
			C _a 35	0.50	35	C _a 30	0.55	30	C _a 30	0.55	30
	II-D	无盐	C _a 40	0.45	40	C _a 35	0.50	35	C _a 35	0.50	35
		有盐 ¹									
	II-E 有盐 ¹		C _a 45	0.40		C _a 40	0.45		C _a 40	0.45	
柱 条形 构件	II-C 无盐		C45	0.40	45	C40	0.45	40	C40	0.45	40
			\geq C50	0.36	40	\geq C45	0.40	35	\geq C45	0.40	35
			C _a 35	0.50	40	C _a 30	0.55	35	C _a 30	0.55	35
	II-D	无盐	C _a 40	0.45	45	C _a 35	0.50	40	C _a 35	0.50	40
		有盐 ¹									
	II-E 有盐 ¹		C _a 45	0.40		C _a 40	0.45		C _a 40	0.45	

注：1、盐冻条件下钢筋的最小保护层厚度应根据氯化物环境条件(表 6.2.1 或表 6.2.2)按表 6.3.2 的规定确定。如果混凝土采用引气工艺，其强度等级可比表 6.3.2 中的非引气混凝土强度等级降低 5MPa，相应的最大水胶比可提高 0.05。引气混凝土的强度等级尚应满足表 5.3.2 中的规定。

- 2、为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，可采取表面防水处理的附加措施。
- 3、预制构件的保护层厚度可以减少 5mm。

表 5.3.2 中仅列出一般冻融（无盐）情况下钢筋的混凝土保护层最小厚度。盐冻情况下的保护层厚度由氯化物环境控制，而相应的保护层混凝土质量则要同时满足冻融环境和氯化物环境的要求并取其中的较高者。受盐冻的混凝土必须采用引气混凝土，以严寒地区 50 年设计使用年限的跨海桥梁墩柱为例，冬季海水冰冻，据表 5.2.1，冻融环境的作用等级为 II-E，所需混凝土最低强度等级为 C_a40，最大水胶比 0.45。桥梁墩柱的浪溅区混凝土干湿交替，据表 6.2.1，海水氯化物环境的作用等级下为 III-E，所需保护层厚度为 60mm(C45)或 55mm (C50)，由于相应的混凝土必须引气，强度等级可降低 5MPa，成为 60mm(C_a40)或 55mm (C_a45)，均不低于环境作用等级 II-E 所需的 C_a40，故设计时可选保护层厚度 60mm(混凝土强度等级 C_a40，最大水胶比 0.45)，或保护层厚度 55mm(混凝土强度等级 C_a45，最大水胶比 0.40)。

5.3.3 对于重要工程和大型工程，混凝土的抗冻耐久性指数 DF 应不低于表 5.3.3 所示的数值。

表 5.3.3 混凝土抗冻性的耐久性指数¹ 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 腐蚀下冻融	高度 饱水	中度 饱水	盐或化学腐 蚀下冻融	高度 饱水	中度 饱水	盐或化学腐 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、抗冻性指数 DF 为 300 次快速冻融循环后的动弹性模量与其初始值的比值。如在 300 次循环以前，试件的动弹模已降到小于初始值的 60%或重量损失已超过 5%，则以此时的循环次数 N 计算 DF 值，并取 $DF = 0.6 \times N / 300$ 。

2、对于厚度小于 150mm 的薄壁构件混凝土，表中的 DF 值应增加 5%。

对于冻融环境下重要工程和大型工程的混凝土，其耐久性质量除需满足 5.3.2 条的规定外，尚需同时满足本条提出的抗冻耐久性指数要求。

表 5.3.3 中的抗冻耐久性指数由快速冻融循环试验结果进行评定。美国 ASTM 标准定义试件经历 300 次冻融循环后的动弹模的相对损失（计算方法见注 1）为抗冻耐久性指数 DF。在北美，认为有抗冻要求的混凝土 DF 值不能小于 60%。对于年冻融次数不频繁的环境条件或混凝土现场饱水程度不很高时，这一要求可能偏高。

混凝土的抗冻性评价可用多种指标表示，如试件经历冻融循环后的动弹性模量损失、质量损失、伸长量或体积膨胀等。多数标准都采用动弹模损失或同时考虑质量损失来确定抗冻级别，但上述指标通常只用来比较混凝土材料的相对抗冻性能，不能直接用来进行结构使用年限的预测。

5.4 构造和做法

5.4.1 冻融环境下混凝土结构耐久性设计的构造要求可见 3.5 节的规定。

5.4.2 可能遭受冻蚀的混凝土薄壁构件，在设计时宜适当增加构件厚度，或采取表面防冻的防护措施。

截面尺寸较小的钢筋混凝土构件和预应力混凝土构件，发生冻蚀的后果严重，应赋予更大的安全保证率。在耐久性设计时应适当增加厚度作为补偿，或采取表面附加防护措施。

5.4.3 受冻融作用的混凝土构件，在混凝土施工养护结束至初次受冻的时间不得少于一个月。

适当延迟现场混凝土初次与水接触的时间实际上是延长混凝土的干燥时间，并且给混凝土内部结构发育提供时间。在可能情况下，应尽量延迟混凝土初次触水时间，最好在一月以上。

5.4.4 设计应提出引气混凝土抗冻质量合格验收的条件，并应符合附录 C 中的规定。

一般工程应从到达现场的混凝土出料口取样测定拌合物的含气量，取样频率与混凝土坍落度的测定频率相同。此外，还应从经过泵送、振捣的新浇混凝土中取样测定含气量。

对于重要工程，应同时在现场取新拌混凝土制作混凝土试件，测定硬化后混凝土的抗冻耐久性指数 DF 和气泡间隔系数。从现场的硬化混凝土可取芯测定气泡间隔系数，但不能用于 DF 值的测定。引气混凝土的含气量和气泡间隔系数等指标，应符合附录 C 中的规定。

6 海水和除冰盐等氯化物环境

6.1 一般规定

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

环境中的氯化物以水溶氯离子的形式通过扩散、渗透和吸附等途径从混凝土构件表面向混凝土内部迁移, 可引起混凝土内钢筋的严重锈蚀, 从而对混凝土结构的耐久性构成重大的威胁。氯离子引起的钢筋锈蚀不容易控制, 因为氯离子在参与钢筋锈蚀的电化学过程中起到催化和促进的作用, 本身并不消耗, 因此后果更为严重。氯盐对于混凝土材料也有一定的腐蚀作用, 但相对较轻。

6.1.2 海洋和近海地区接触海水氯化物 (包括大气、地下水与土体中含有的来自海水的氯化物) 的混凝土构件, 应按本章 6.2.1 条规定的环境作用等级进行耐久性设计。其他地区或情况下与海水氯化物接触的混凝土构件, 也可参照本章的规定进行设计。

除海洋和滨海地区的自然环境中来自海水的氯化物作用外, 其他情况下接触海水的混凝土构件也应考虑海水氯化物的腐蚀, 如海洋馆中接触海水的混凝土池壁、管道等。

6.1.3 降雪地区接触除冰盐或盐雾的桥梁、道路以及道路周围构筑物与停车库楼板等构件, 接触含有氯盐的地下水、土的内陆地区混凝土构件以及频繁接触含氯盐消毒剂的混凝土构件 (如游泳池壁等), 均应按本章 6.3.4 条规定的环境作用等级进行耐久性设计。

降雪地区喷洒的除冰盐可以通过多种途径作用于混凝土构件, 含盐的融雪水直接作用于路面, 并通过伸缩缝等连接处渗漏到桥面板下方的构件表面, 或者通过路面层和防水层的缝隙渗漏到混凝土桥面板的顶面。排出的盐水如渗入地下土体, 还会侵蚀腐蚀混凝土基础。此外, 高速行驶的车辆会将路面上含盐的水溅射或转变成盐雾, 作用到车道两侧甚至较远的混凝土构件表面; 汽车底盘和轮胎上冰冻的含盐雪水进入停车库后融化, 还会作用于车库混凝土楼板或地板引起钢筋腐蚀。

除冰盐对混凝土的作用机理很复杂。一方面, 除冰盐直接接触混凝土表层, 在冰雪融化时会吸收热量, 使混凝土表层温度骤然下降, 由此产生的温度应力可导致混凝土表面的开裂剥落; 另一方面, 反复使用除冰盐使渗入混凝土中的盐在水蒸发后浓度不断增加, 达过饱和而析出结晶, 产生结晶膨胀压力而破坏; 对钢筋混凝土 (如桥面板) 而言, 更重要的是氯离子进入混凝土, 会引起钢筋腐蚀。

地下水土 (滨海地区除外) 中的氯离子浓度一般较低, 当浓度较高且在干湿交替的条件下,

则需考虑对混凝土构件的腐蚀。对于我国西部盐湖和盐渍土地区那样在地下水土中氯盐含量极高的特殊情况，则需专门研究处理，不属于本规范的内容。

对于游泳池及其周围的混凝土构件，如公共浴室、卫生间地面等，还需要考虑氯盐消毒剂对混凝土构件腐蚀的作用。

6.1.4 目前尚未使用除冰盐的降雪地区，应考虑今后交通运输发展的需要，在新建桥梁和停车库时，按除冰盐氯化物环境进行耐久性设计。

除冰盐可对混凝土结构造成极其严重的腐蚀，按照一般环境设计的桥梁在除冰盐环境下只需几年或十几年就需要大修甚至被迫拆除。发达国家使用含氯除冰盐融化道路积雪已有 40 年的历史，迄今尚无更为经济的替代方法。考虑今后交通发展对融化道路积雪的需要，应在混凝土桥梁的耐久性设计时考虑除冰盐氯化物的影响。

6.1.5 氯化物环境下同时受冰冻的混凝土构件，其耐久性设计应同时满足氯化物环境和冻融环境（第 5 章）的要求。

6.1.6 氯化物环境下的重要混凝土结构和构件，当环境作用等级为 E 或 E 级以上时应采用一种或多种防腐蚀附加措施。

防腐蚀附加措施用于氯化物环境时，宜作为并行的多重防护手段之一，主要是为了增加结构耐久性的可靠程度，提高结构使用年限的保证率。当环境作用等级非常严重或极端严重时，按照常规手段通过增加混凝土强度、降低混凝土水胶比和增加混凝土保护层厚度的办法，仍然有可能保证不了 50 年或 100 年设计使用年限的要求。在采取防腐蚀附加措施的同时，不应降低混凝土材料的耐久性质量和保护层的厚度要求。

常用的防腐蚀附加措施有：混凝土表面涂刷防腐面层或涂层、采用环氧涂层钢筋、应用钢筋阻锈剂等。环氧涂层钢筋和钢筋阻锈剂只有在耐久性优良的混凝土材料中才能起到控制构件锈蚀的作用，从而延长构件使用年限。

6.1.7 对于海水和除冰盐氯化物环境下作用等级为 E 或 E 级以上的混凝土结构，应在耐久性设计中提出结构使用过程中定期检测的要求。重要工程应在设计阶段作出定期检测的详细规划，并在工程现场设置专供检测取样用的构件。

定期检测可以尽快发现问题及时采取补救措施。

6.2 环境作用等级

6.2.1 对于配有钢筋的混凝土构件，在海水氯化物环境中的环境作用等级可按表 6.2.1 确定。

表 6.2.1 海水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 ¹ 周边永久浸没于海水或埋于土中 ²	桥墩，基础
III-D	大气区 ¹ （轻度盐雾 ³ ）： 平均水位 15m 以上的海上大气区； 涨潮岸线以外 100~300m 内的陆上室外环境	桥梁上部结构构件； 靠海的陆上室外构件
III-E	大气区（重度盐雾 ³ ）： 平均水位上方 15m 以内的海上大气区； 离涨潮岸线 100m 内的陆上室外环境	桥梁上部结构构件； 靠海的陆上室外构件
	潮汐区和浪溅区 ¹ ，非炎热地区 ⁴	桥墩，码头
III-F	潮汐区和浪溅区 ¹ ，炎热潮湿地区 ⁴	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，可参考《海港工程混凝土结构防腐蚀规范》JTJ275 - 2000 的规定。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、海水激流中的构件宜按提高一个作用等级设计。

3、对轻度盐雾区与重度盐雾区界限的划分，宜根据当地既有工程调查的情况确定，表中的数值只供参考。对于靠近海岸的陆上建筑物，盐雾对室外混凝土构件的腐蚀作用尚与风向和地貌等多种因素有关。对于密集的建筑群，除直接面海的建筑物外，处于后面的建筑物一般较少受到明显的腐蚀。

4、炎热地区指年平均温度大于 20℃ 的地区。

对于海水中的配筋混凝土结构，氯盐引起钢筋锈蚀的环境可进一步分为水下区、潮汐区、浪溅区、大气区和土中区。长年浸没于海水中的混凝土，由于引起钢筋脱钝所需的氯离子临界浓度在饱水条件下较高，又因水中缺氧使锈蚀发展速度变得极其缓慢甚至停止，所以相对来说钢筋锈蚀危险性不会太大。潮汐区特别是浪溅区的情况则正好相反，二者均处于干湿交替状态，混凝土表面的氯离子可通过吸收（当混凝土表面干燥时）、扩散、渗透等多种途径侵入混凝土内部，而且干湿交替的环境条件使得钢筋脱钝所需的氯离子临界浓度降到很低的水平，同时供氧供水充足，具备锈蚀发展的充分条件。浪溅区的供氧条件最为充分，锈蚀最严重；由频繁干湿交替造成的盐

结晶腐蚀在这一区域也最为严重。

我国《海港混凝土结构防腐蚀技术规范》在大量调查研究的基础上，分别对浪溅区和潮汐区提出不同的要求。但本规范考虑到设计施工方便以及潮汐区内进行修复的难度，将潮汐区与浪溅区统一按同一作用等级考虑。南方炎热地区温度高，氯离子扩散系数增大，锈蚀发展速度也会加剧，所以在南方炎热地区的浪溅区混凝土构件中，钢筋遭受腐蚀的程度最甚。

海洋和近海地区的大气中都含有氯离子。海洋大气区处于浪溅区的上方，海浪拍击可产生大小为 $0.1 \sim 20 \mu\text{m}$ 的细小雾滴，较大的雾滴积聚于海面附近，而较小的雾滴可随风飘移到近海的陆上地区。海上桥梁的上部构件离浪溅区很近时，受到浓重的盐雾作用，在构件混凝土表层内积累的氯离子浓度可以很高，而且同时又处于干湿交替的环境中，因此处于更不利的状态。在浪溅区与其上方的大气区之间，构件表层混凝土的氯离子浓度没有明确的界限，设计时应该根据具体情况偏安全地选用。

虽然大气盐雾区的混凝土表面氯离子浓度可以积累到与浪溅区的相近（甚至大于浪溅区），但浪溅区的混凝土表面氯离子浓度可认为从一开始就达到其最大值，而大气盐雾区则需许多年才能逐渐积累到最大值；此外，浪溅区的干湿交替程度也明显高于大气区，所以浪溅区的环境还是最为严酷的。在平均水位上方的范围 15m 内，应该是越靠下的部位，所受的环境作用越接近浪溅区。

靠近海岸的陆上大气也含盐分，其浓度与具体的地形、地物、风向、风速等多种因素有关。根据我国浙东、山东等沿海地区的调查，构件的腐蚀程度与离岸距离以及朝向有很大关系，靠近海岸且暴露于室外的构件应考虑盐雾的作用。烟台地区的调查发现，离海岸 100m 内的室外混凝土构件均受到严重锈蚀。

表 6.2.1 中对靠海构件环境作用等级的划分，尚有待积累更多调查数据后作进一步修正。设计人员宜在调查工程所在地区具体环境条件的基础上，采取适当的防腐蚀要求。

6.2.2 一侧接触海水或土体、另一侧接触空气的海中或海底隧道混凝土构件，宜按 III-E 级的环境作用设计。

隧道混凝土构件接触土体的外侧如无空气进入的可能，可按 III-D 级的环境作用确定构件的混凝土保护层厚度，如设置防漏的排水通道、有可能引入空气时，应按 III-E 级考虑。隧道构件接触空气的内侧可能接触渗漏的海水，底板和侧墙底部应按 III-E 级考虑，其他部位可根据具体情况确定，但不低于 III-D。

6.2.3 江河入海口附近水域的含盐量应根据实测确定，如其浓度低于一般海水时，用于结构耐久性设计的环境作用等级可适当低于表 6.2.1 的规定。

近海和海洋环境的海水氯化物对混凝土结构的腐蚀作用与当地海水中的含盐量有关。表 6.2.1 的环境作用等级是根据一般海水的氯离子浓度（约 $18 \sim 20 \text{ kg/m}^3$ ）确定的。不同地区海水的含盐量可能有很大差别，沿海地区海水的含盐量受到江河淡水排放的影响并随季节而变化，海水的含盐量有可能较低，需取年均值作为设计的依据。

6.2.4 对于配有钢筋的混凝土结构，在除冰盐、消毒剂等氯化物作用下的环境作用等级宜根据调查确定；如无相应的调查资料，可按表 6.2.4 确定。冬季频繁受除冰盐作用的构件，可按环境作用级别 -F 进行耐久性设计。

表 6.2.4 除冰盐等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 ¹ 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
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 ¹ 氯离子水体，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	直接接触除冰盐水溶液	路面，桥面板顶面，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 ¹ 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：150 - 750；750 - 7500；>7500。

2、除冰盐环境的作用等级与不同地区冬季喷洒除冰盐的用量和频度有关，设计时可根据具体情况作出调整。

对于同一构件，应注意不同侧面的环境作用等级的差异。混凝土桥面板的顶面会受到除冰盐溶液的直接作用，所以顶面钢筋一般应按 -E 的作用等级设计，保护层至少需 60mm；而桥面板的底部钢筋通常可按一般环境中的室外环境条件设计，板的底部不受雨淋，无干湿交替，作用等级为 -B，所需的保护层可能只有 25mm。桥面板顶面的氯离子不可能扩散到底部钢筋，因为所需的时间非常长。但是桥面板的底部有可能受到从板的侧边流淌到底面的雨水或伸缩缝处渗漏水

的作用，从而出现干湿交替、反复冻融冻和盐蚀。所以必须采取相应的排水构造措施，如在板的侧边设置滴水沿、排水沟等。桥面板上部的铺装层一般容易开裂渗漏，防水层的寿命也较短，通常在确定钢筋的保护层厚度时不考虑其有利影响。设计时可根据铺装层防水性能的实际情况，对桥面板顶部钢筋保护层厚度作适当调整。

水中氯离子浓度的高低对大气中构件锈蚀的影响，目前尚无确切试验数据。表 6.2.4 中划分的浓度范围仅供参考。

6.2.5 在确定氯化物环境对混凝土构件的作用等级时，一般不应考虑混凝土表面的普通防水层对氯化物的阻隔作用。

与混凝土构件的设计使用年限相比，一般防水层的有效年限要短得多，在氯盐环境下只能作为辅助措施，不应考虑其有利作用。

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附录 B 的规定。

低水胶比的大掺量矿物掺和料混凝土，其抗氯离子侵入的能力要比相同水胶比的硅酸盐水泥混凝土高得多，所以在氯化物环境中不宜单独采用硅酸盐水泥作为胶凝材料。为了增强混凝土早期的强度和耐久性发展，通常应在矿物掺和料中加入少量硅灰，可复合使用两种或两种以上的矿物掺和料，如粉煤灰加硅灰、粉煤灰加矿渣加硅灰。矿物掺和料占胶凝材料总量的比例宜大于 40%。但使用大掺量矿物掺和料混凝土，必须有良好的施工养护和保护为前提。如工程的使用环境同时存在冻融环境作用，则要适当降低矿物掺和料的用量。

6.3.2 海水和除冰盐等氯化物环境中，混凝土构件的钢筋最小保护层厚度及其相应的混凝土强度等级与最大水胶比应符合表 6.3.2 的规定。

表 6.3.2 规定的混凝土最低强度等级大体与国外规范中的相近，考虑到我国的混凝土组成材料的特点，最大水胶比的取值则相对较低。国内混凝土的骨料级配和粒形普遍较差，导致混凝土组分中浆体用量普遍过大；因此配制同样密实的混凝土，相比国外往往需要采用更低的水胶比。

表 6.3.2 规定的保护层厚度根据我国海洋地区混凝土工程的劣化现状调研以及比照国外规范的数据而定，并利用材料劣化模型作了近似核对。

表 6.3.2 氯化物环境中钢筋保护层最小厚度 c (mm)

设计使用年限 环境 作用等级		100 年			50 年			30 年		
		最低 强度等级	最大 水胶比	c	最低 强度等级	最大 水胶比	c	最低 强度等级	最大 水胶比	c
板墙 等面 形构 件	III-C,IV-C	C40	0.45	50	C35	0.50	40	C35	0.50	35
	III-D,IV-D	C45 \geq C50	0.40 0.36 ⁴	55 50	C40	0.45	50	C40	0.45	45
	III-E,IV-E	C50 \geq C55	0.36 ⁴ 0.36 ⁴	60 55	C45 \geq C50	0.40 0.36 ⁴	55 50	C45	0.40	50
	III-F	C55	0.36 ⁴	65	C50 \geq C55	0.36 0.36 ⁴	60 55	C50	0.36	55
梁柱 等条 形构 件	III-C,IV-C	C40	0.45	55	C35	0.50	45	C35	0.50	40
	III-D,IV-D	C45 \geq C50	0.40 0.36 ⁴	60 55	C40	0.45	55	C40	0.45	50
	III-E,IV-E	C50 \geq C55	0.36 ⁴ 0.36 ⁴	65 60	C45 \geq C50	0.40 0.36 ⁴	60 55	C45	0.40	55
	III-F	C55	0.36 ⁴	70	C50 \geq C55	0.36 ⁴ 0.36 ⁴	65 60	C50	0.36	60

注：1、可能出现海水冰冻的环境与除冰盐环境，表中混凝土的强度等级和水胶比以及是否引气应满足冻融环境下的要求（见表 5.3.2）。当采用引气混凝土时，表中的混凝土强度等级和水胶比可分别降低 5MPa 和增加 0.05。

2、处于流动海水中或同时受水中泥砂冲刷腐蚀的构件保护层厚度应适量增加 10~20 mm。

3、预制构件的施工允差较小，可将表中的保护层厚度减少 5mm。

4、表中要求的混凝土最大水胶比，如能满足表 6.3.6 中规定的扩散系数值，C50 和 C55 混凝土的最大水胶比可分别提高到 0.40 和 0.38。

对于氯化物腐蚀下的干湿交替环境，如海洋浪溅区和可能接触渗漏除冰盐水的桥面板顶部混凝土，美国的 AASHTO 公路桥梁规范规定桥面板顶部钢筋的保护层最小厚度为 60mm（考虑到施工误差，实际在美国和加拿大采用的保护层厚度设计值多为 65 甚至 70mm，并推荐使用环氧涂层钢筋），构件主筋的保护层最小厚度在海水中为 100mm，当混凝土水胶比小于 0.4 时可乘系数 0.8 折减。英国新的混凝土规范（BS 8500-1:2002）对于浪溅区中设计寿命为 50 年的混凝土构件，要求最外侧钢筋的混凝土保护层厚度至少为 50、45、40mm（与混凝土强度和不同胶凝材料品种有关）再加施工允差（一般 10mm）。加拿大新的混凝土规范（CSA A23.1-04/A23.2/04）对于氯化物

作用下的梁、板构件，规定保护层厚度至少均为 60mm；如有较高的耐久性要求，相应的混凝土最大水胶比和最低强度等级为 0.37 和 56 天 C60（已换算为立方强度），对一般的耐久性要求则为 0.40 和 28 天 C45。我国海港混凝土结构防腐蚀规范也对港工结构的保护层厚度作了规定，但应注意，这一标准所考虑的设计使用年限为 50 年。

从总体看，表 6.3.2 的规定仍可能偏低。规范所提出的只是最低要求，设计人员应该充分考虑工程设计对象的具体情况，尽可能地取用更高的要求。国际上近年建成的一些大型桥梁保护层厚度都比较大，如加拿大的 Northumberland 海峡大桥（设计寿命 100 年），墩柱的保护层厚度用 75~100mm，上部结构 50mm（混凝土水胶比 0.34）；丹麦 Great Belt Link 跨海桥墩用环氧涂层钢筋，保护层 75mm，上部结构 50mm（混凝土水胶比 0.35）。

6.3.3 海水氯化物环境下作用等级为 -E 和 -F 的构件混凝土，应尽可能采用大掺量矿物掺和料混凝土，否则应提高混凝土最低强度等级或同时增加表中的最小保护层厚度。

氯离子在混凝土中的扩散系数会随着龄期或暴露时间的增长而逐渐降低。与大掺量的矿物掺和料混凝土相比，这种衰减的程度在单纯用硅酸盐水泥配制的混凝土中要慢得多。如果两者在早期（28 天龄期）有相同的扩散系数值，不加矿物掺和料的混凝土中钢筋会更早锈蚀，所以需要提高混凝土强度等级 10~15Mpa，或同时增加保护层厚度 5~10mm，具体宜根据计算确定。

6.3.4 环境作用等级为 -E 或 -E 及其以上等级的大截面柱、墩等受压构件，宜采用较大的保护层厚度，但相应的混凝土强度等级不宜降低。受氯化物作用的混凝土墩柱顶面，宜加大钢筋的保护层厚度。

与受弯构件不同，增加墩柱的保护层厚度基本不会增大构件材料的工作应力，但能显著提高构件对内部钢筋的保护能力。氯化物环境下存在许多不确定性，为了提高使用年限的保证率，采用增大保护层厚度的办法要比附加防腐蚀措施更为经济。

墩柱顶部的表层混凝土由于施工中混凝土泌水等影响，密实性相对较差。这一部位又往往受到含盐渗漏水影响并处于干湿交替状态，所以宜增加保护层厚度。

6.3.5 仅在特殊情况下，通过采取可靠的防腐蚀附加措施并经过专门论证，才能适当减少表 6.3.2 中对于环境作用等级为 III-E 或 IV-E 及其以上构件的最小保护层厚度。

6.3.6 对于氯化物环境中的重要混凝土工程，作为混凝土耐久性质量的控制标准，宜在设计中提出混凝土的氯离子侵入性指标，并满足表 6.3.6 的要求。

表 6.3.6 混凝土的氯离子侵入性指标

设计使用年限	100 年		50 年	
作用等级	D	E	D	E
侵入性指标				
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表 6.3.2 中的钢筋保护层厚度相对应，具体应用时可根据钢筋保护层厚度和混凝土水胶比的具体特点对表中数据作适当调整。

2、表中的 D_{RCM} 值，仅适用于较大或大掺量矿物掺和料混凝土，对于胶凝材料主要成分为硅酸盐水泥的混凝土则需取更低的数值。

本条规定氯化物环境中混凝土需要满足的氯离子侵入性指标。

氯盐环境下的混凝土侵入性可用氯离子在混凝土中的扩散系数表示。氯离子在混凝土中的扩散属于非稳态过程，其扩散系数通常与 Fick 第二定律相联系。根据不同测试方法得到的扩散系数在数值上不尽相同并各有其特定的用途。 D_{RCM} 是在实验室内采用快速电迁移的标准试验方法（RCM 法）测定的扩散系数。试验时将试件的两端分别置于两种溶液之间并施加电位差，上游溶液中含氯盐，在外加电场的驱动下氯离子快速向混凝土内迁移，经过若干小时后劈开试件测出氯离子侵入试件中的深度，利用理论公式可以计算得出扩散系数，称为非稳态快速氯离子迁移扩散系数。这一方法最早由唐路平提出，现已得到较为广泛的应用，不仅可以用于施工阶段的混凝土质量控制，而且还可结合以往根据工程实测得到的扩散系数随暴露年限的衰减规律，用于定量计算混凝土构件中的钢筋开始发生锈蚀的年限。

本规范推荐采用 RCM 法。混凝土的氯离子侵入性也可以用其他指标表示。以往国内外最常用的是以美国 ASTM C1202 快速电量测定方法为基础的标准试验方法，但这一方法的缺陷较多，用于水胶比低于 0.4 的矿物掺和料混凝土时误差较大。我国自行研发的 NEL 氯离子扩散系数快速检测方法也可以使用，具体试验方法可参见中国土木工程学会标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES01-2004。

表 6.3.6 中的数据主要参考近年来国内外重大工程采用 D_{RCM} 作为质量控制指标的实践并利用 Fick 模型进行了近似校核。

6.3.7 氯化物环境中构件受力钢筋的直径应不小于 16mm。

6.4 构造与做法

6.4.1 遭受氯盐腐蚀的混凝土桥面、墩柱顶面和车库楼面等部位，排水坡度应不小于2%。

承受上部淋水的结构，边缘必须设置排水槽、滴水沿、鹰嘴等排水装置。

所有排水管道均应采用非钢质的塑料管，排水的出口应远离混凝土构件表面，并与墩柱基础保持一定距离。

6.4.2 海水水位变动区和浪溅区等部位不得设置结构的施工缝与各种连接缝。伸缩缝及附近部位的混凝土宜局部采取必要的防腐蚀附加措施，处于伸缩缝下方的构件应通过可靠的构造措施防止上部渗漏水的腐蚀。

6.4.3 氯化物环境中的桥梁路面层与混凝土桥面板之间必须设置可靠的防水层。

6.4.4 氯化物环境下的混凝土结构在设计文件中应提出对混凝土施工养护的要求与合格验收的标准。

大掺量矿物掺和料混凝土加湿养护的时间不得少于7d，加湿养护结束时的强度不得低于设计强度标准值的70%。在加湿养护结束后仍应采取适当的措施继续保湿一段时间。

本条文的养护要求适用于：单掺粉煤灰与胶凝材料总重的比值 f_r 超过30%，单掺矿渣与胶凝材料总重的比值 f_s 超过50%，或双掺时的相对用量 $f_r/0.3$ 与 $f_s/0.5$ 之和超过1的情况。大掺量矿物掺和料混凝土从浇注就位开始就应加湿养护，在表面抹平并覆盖湿毛毡类织物或蓄水以前，对于直接暴露于大气中表面应予连续喷雾加湿并降温。在覆盖湿毛毡类织物后除应加水保持湿润外，尚应罩上不透气的塑料薄膜。涂刷养护剂只是保湿，不属于加湿养护措施，可用于加湿养护结束之后。

6.4.5 混凝土浇筑以后应尽量推迟与氯化物开始接触的时间。在可能的条件下宜采用混凝土预制构件。

早龄混凝土的密实性较差，推迟混凝土与氯化物环境接触时的龄期有利于混凝土结构的耐久性。设计文件中应规定新浇混凝土不得与海水接触的具体龄期，或者必须采取的防护措施，如设置临时性的涂层，养护膜等。采用预制混凝土构件在这方面有很大优势。

6.5 氯离子侵入混凝土引起钢筋锈蚀的定量分析

6.5.1 采用数学模型定量分析氯离子侵入混凝土内部并使钢筋达到临界锈蚀的年限，应遵循以下原则：

- 1、数学模型的有效性应经过验证，有较为可靠的工程应用背景；
- 2、模型参数（混凝土表面氯离子浓度、钢筋锈蚀的临界浓度、氯离子扩散系数等）的选取应有可靠的依据，氯离子扩散系数的取值应考虑混凝土材料的组成特性、暴露年限和环境温、湿度等重要因素的影响；
- 3、与设计使用年限对应的耐久性极限状态，应具有不小于 90% ~ 95% 的保证率（可靠指标不低于 1.5）。

应用数学模型定量分析氯离子侵入混凝土内部并使钢筋达到临界锈蚀的年限，应选择比较成熟的数学模型，模型中的参数取值有可靠的试验依据，可委托专业机构进行分析。

6.5.2 氯离子自混凝土构件表面侵入混凝土内部的迁移过程可采用 Fick 第二定律的经验扩散模型计算。计算中取用的氯离子在混凝土中的扩散系数与构件的表面氯离子浓度，应以表观扩散系数和表观的表面氯离子浓度为依据。

从长期暴露于现场氯离子环境的混凝土构件中取样，实测得到构件截面不同深度上的氯离子浓度分布数据，并按 Fick 第二扩散定律的误差函数解析公式（其中假定在这一暴露时间内的扩散系数和表面氯离子浓度均为定值）进行曲线拟合回归求得的扩散系数和表面氯离子浓度，称为表观扩散系数和表观的表面氯离子浓度。表观扩散系数的数值随暴露期限的增长而降低，其衰减规律与混凝土胶凝材料的不同品种有关。设计取用的表面氯离子浓度和扩散系数，应以类似工程中实测得到的表观值为依据，具体可参见中国土木工程学会标准 CCES01 - 2004(2005 年修订版)。

7 化学腐蚀环境

7.1 环境作用等级

7.1.1 与环境中的腐蚀性化学物质接触的混凝土构件，应视环境作用的程度按不同的环境作用等级进行设计。

本规范考虑的常见腐蚀性化学物质包括土中和地表、地下水中的硫酸盐和酸类等物质以及大气中的盐分、硫化物、氮氧化合物等污染物质。这些物质对混凝土的腐蚀主要是化学腐蚀，但盐类侵入混凝土也有可能产生盐结晶的物理腐蚀。本章的化学腐蚀环境不包括氯化物，后者已在第6章中单独作了规定。

7.1.2 水、土中的硫酸盐和酸类物质对混凝土构件的环境作用等级可按表 7.1.2 确定。当表中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。如其中有两种或多种化学物质的作用等级相同时，应将设计的环境作用等级再提高一个等级，以考虑可能加重的化学腐蚀后果。

表 7.1.2 水、土中的化学腐蚀环境的作用等级

作用因素 作用等级	水中硫酸根 SO_4^{2-} (mg/L)	土中硫酸根(水溶值) SO_4^{2-} (mg/kg)	水中镁离子 (mg/L)	水中酸碱度 (pH 值)	水中腐蚀性二氧化碳 (mg/L)
V-C	200-1000	300-1500	300-1000	5.5-6.5	15-30
V-D	1000-4000	1500-6000	1000-3000	4.5-5.5	30-60
V-E	4000-10000	6000-15000	≥ 3000	4.0-4.5	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。如无干湿交替（长期浸没于地表或地下水中），则可按表中的等级降低一个等级进行设计，但不能低于 V-C。对于干旱高寒地区的环境条件可见 7.1.3 条。

2、当混凝土构件处于弱透水土体中时，土中硫酸根离子、水中镁离子、水中二氧化碳及水的 pH 值的作用等级可按表 7.1.2 中相应的等级降低一级取用，但不能低于 V-C。

3、含有较高浓度氯盐的咸水中可不单独考虑硫酸盐的腐蚀作用。

4、高水压下可加重硫酸盐的化学腐蚀，应提高相应的环境作用等级。

5、表中硫酸根等各种腐蚀性物质含量的测定方法见附录 D。

本条根据水、土环境中化学物质的不同浓度范围将环境作用划分为 V-C、V-D 和 V-E 共 3 个等级。浓度低于 V-C 等级的不需在设计中考虑，浓度高于 V-E 等级的作为特殊情况另行对待。化学环境作用对混凝土的腐蚀，至今尚缺乏足够的数据积累和研究成果。重要工程应在设计前作充

分调查，以工程类比作为设计的主要依据。

水、土中的硫酸盐对混凝土的腐蚀作用，除硫酸根离子的浓度值外，还与硫酸盐的阳离子种类及其浓度、混凝土表面的干湿交替程度、环境温度以及与土的渗透性和地下水的流动性等因素有很大关系。腐蚀混凝土的硫酸盐主要来自周围的水、土，也可能来自原本受过硫酸盐腐蚀的混凝土骨料以及混凝土外加剂，如喷射混凝土中常使用的大剂量钠盐速凝剂等。

在常见的硫酸盐中，对混凝土腐蚀的严重程度依次为硫酸镁、硫酸钠和硫酸钙。腐蚀性很强的硫酸盐还有硫酸铵，此时需单独考虑铵离子的作用，自然界中的硫酸铵不多见，但在长期施加化肥的土地中则需要注意。

表 7.1.2 规定的土中硫酸根离子 SO_4^{2-} 浓度，是在土样中加水溶出的浓度（水溶值）。有的硫酸盐（如硫酸钙）在水中的溶解度很低，在土样中加酸则可溶出土中含有的全部 SO_4^{2-} （酸溶值）。但是，只有溶于水中的硫酸盐才会腐蚀混凝土。不同国家的混凝土结构设计规范，对硫酸盐腐蚀的作用等级划分有较大差别，采用的浓度测定方法也有较大出入，有的用酸溶法测定（如欧洲规范），有的则用水溶法（如美国、加拿大和英国）。当用水溶法时，由于水土比例和浸泡搅拌时间的差别，溶出的量也不同。所以最好能同时测定 SO_4^{2-} 的水溶值和酸溶值，以便于判断难溶盐的数量。

硫酸盐对混凝土的化学腐蚀是两种化学反应的结果：一是与混凝土中的水化铝酸钙起反应形成硫铝酸钙即钙矾石；二是与混凝土中氢氧化钙结合形成硫酸钙（石膏），两种反应均会造成体积膨胀，使混凝土开裂。当含有镁离子时，同时还能和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应，生成疏松而无胶凝性的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，这会降低混凝土的密实性和强度并加剧腐蚀。硫酸盐对混凝土的化学腐蚀过程很慢，通常要持续很多年，开始时混凝土表面泛白，随后开裂、剥落破坏。当土中构件暴露于流动的地下水中时，硫酸盐得以不断补充，腐蚀的产物也被带走，材料的损坏程度就会非常严重。相反，在渗透性很低的粘土中，当表面浅层混凝土遭硫酸盐腐蚀后，由于硫酸盐得不到补充，腐蚀反应就很难进一步进行。

在干湿交替的情况下，水中的 SO_4^{2-} 浓度如大于 200 mg/L（或土中 SO_4^{2-} 大于 1000mg/kg）就有可能损害混凝土；水中 SO_4^{2-} 如大于 2000mg/L（或土中的水溶 SO_4^{2-} 大于 4000 mg/kg）则可能有较大的损害。水的蒸发可使水中的硫酸盐逐渐积累，所以混凝土冷却塔就有可能遭受硫酸盐的腐蚀。地下水、土中的硫酸盐可以渗入混凝土内部，并在一定条件下使得混凝土毛细孔隙水溶液中的硫酸盐浓度不断积累，当超过饱和浓度时就会析出盐结晶而产生很大的压力，导致混凝土开裂破坏，但这是纯粹的物理作用。硫酸盐对混凝土的腐蚀，多数是盐结晶造成的。

硅酸盐水泥混凝土的抗酸腐蚀能力较差，如果水的 pH 值小于 6，对抗渗性较差的混凝土就会造成损害。这里的酸指的是除硫酸和碳酸以外的一般酸和酸性盐，如盐酸、硝酸等强酸和其他弱的无机、有机酸及其盐类。其来源于受工业或养殖业废水污染的水体。

酸对混凝土的腐蚀作用主要是与硅酸盐水泥水化产物中的氢氧化钙起反应，如果混凝土骨料

是石灰石或白云石，酸也会与这些骨料起化学反应，反应的产物是水溶性的钙化物，其可以被水溶液浸出（草酸和磷酸形成的钙盐除外）。对于硫酸来说，还会进一步形成硫酸盐造成硫酸盐腐蚀。如果酸、盐溶液能到达钢筋表面，还会引起钢筋锈蚀，从而造成混凝土顺筋开裂和剥落。低水胶比的密实混凝土能够抵抗弱酸的腐蚀，但是硅酸盐水泥混凝土不能承受高浓度酸的长期作用。因此在流动的地下水中，必须在混凝土表面采取涂层复盖等保护措施。

当结构所处环境中含有多种化学腐蚀物质时，一般会加重腐蚀的程度。如 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 同时存在时能引起双重腐蚀。但两种以上的化学物质有时也可能产生相互抑制的作用。例如，海水环境中的氯盐就可能会减弱硫酸盐的危害。有资料报道，如无 Cl^- 存在，浓度约为 250mg/L 的 SO_4^{2-} 就能引起纯硅酸盐水泥混凝土的腐蚀，如 Cl^- 浓度超过 5000 mg/L，则造成损害的 SO_4^{2-} 浓度要提高到约 1000mg/L 以上。海水中的硫酸盐含量很高，但有大量氯化物存在，所以不再单独考虑硫酸盐的作用。

土中的化学腐蚀物质对混凝土的腐蚀作用需要通过溶于土中的孔隙水来实现。密实的弱透水土体提供的孔隙水量少，而且流动困难，靠近混凝土表面的化学腐蚀物质与混凝土发生化学作用后被消耗，得不到充分的补充，所以腐蚀作用有限。对弱透水土体的定量界定比较困难，一般认为其渗透系数小于 $10^{-5}m/s$ 或 0.86 m/d。

7.1.3 部分接触含硫酸盐的水、土而部分又暴露于大气中的混凝土构件，一般可按表 7.1.2 规定的环境作用等级进行设计。当混凝土构件处于日温差剧烈变化的干旱高寒地区，应按表 7.1.3 的环境硫酸盐浓度确定环境作用等级。

表 7.1.3 干旱高寒地区硫酸盐腐蚀环境的作用等级

作用因素 环境 作用等级	水中硫酸根 SO_4^{2-} (mg/L)	土中硫酸根(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

部分暴露于大气中而其他部分又接触含盐水、土的混凝土构件应考虑盐结晶作用。

高寒地区指海拔 3000m 以上，干旱和半干旱地区指植被地带的最大蒸发量和降水量的比值分别大于 4 和处于 1.5~4.0 之间。在日温差剧烈变化或干旱和半干旱地区，混凝土孔隙中的盐溶液容易浓缩并产生结晶或在外界低温过程的作用下析出结晶。对于一端置于水、土而另一端露于

空气中的混凝土构件，水、土中的盐会通过混凝土毛细孔隙的吸附作用上升，并在干燥的空气中蒸发，最终因浓度的不断提高产生盐结晶。我国滨海和盐渍土地区电杆、墩柱、墙体等混凝土构件在地面以上 1m 左右高度范围内常出现这类破坏。对于一侧接触水或土而另一侧暴露于空气中的混凝土构件，情况也与此相似。

我国西部的盐湖地区，水、土中盐类的浓度可以超出表 7.1.2 中最大值的几倍甚至 10 倍以上，这些情况则需专门研究对待。

7.1.4 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构件，一般可按环境作用等级 -E 考虑，作用程度较轻的可按 -D 考虑。

7.1.5 大气污染对混凝土结构的作用等级可按表 7.1.5 确定。

表 7.1.5 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） $\text{pH} \geq 4$	遭酸雨频繁作用的构件
V-E	酸雨 $\text{pH} < 4$	遭酸雨频繁作用的构件

大气污染环境的主要的作用因素有大气中 SO_2 产生的酸雨，汽车和机车排放的 NO_2 废气，以及盐碱地区空气中的盐分。这种环境对混凝土结构的作用程度可有很大差别，宜根据当地的调查情况确定其等级。含盐大气中混凝土构件的环境作用等级见 7.1.6 条的规定。

7.1.6 处于一般含盐大气中的混凝土构件可按环境作用等级 V-C 进行设计。如当地气候常年湿润，可以不考虑盐结晶的作用。

处于含盐大气中的混凝土构件，应考虑盐结晶的破坏作用。大气中的盐分会附着在混凝土构件的表面，环境降水可溶解混凝土表面的盐分形成盐溶液侵入混凝土内部。混凝土孔隙中的盐溶液浓度在干湿循环的条件下会不断增高，达到临界浓度后产生巨大的结晶压力使混凝土开裂破坏。在常年湿润（植被地带的最大蒸发量和降水量的比值小于 1）地区，孔隙水难以蒸发，不会发生盐结晶。

7.1.7 受工业生产侵蚀性气体影响的混凝土结构，可视侵蚀性气体对混凝土的腐蚀机理及其作用的严重程度，参考本规范规定的环境类别与作用等级进行设计。

7.2 材料、保护层厚度与构造

7.2.1 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，应根据环境作用种类和等级按照本规范附录 B 的限定范围选择混凝土的原材料。

硅酸盐水泥混凝土抗硫酸盐以及酸类物质的化学腐蚀的能力较差。硅酸盐水泥水化产物中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不论在强度上或化学稳定性上都很弱，几乎所有的化学腐蚀都与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 有关，在压力水、流动水尤其是软水的作用下 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 还会溶析，是混凝土抗腐蚀的薄弱环节。

在混凝土中加入适量的矿物掺和料对于提高混凝土抵抗化学腐蚀的能力有良好的作用。研究表明，在合适的水胶比下，矿物掺和料及其形成的致密水化产物可以改善混凝土的微观结构，提高混凝土抵抗水、酸和盐类物质腐蚀的能力，而且还能降低氯离子在混凝土中的扩散系数，提高抵抗碱-骨料反应的能力。所以在化学腐蚀环境下，不宜单独使用硅酸盐水泥作为胶凝材料。通常用标准试验方法对 28 天龄期混凝土试件测得的混凝土抗化学腐蚀的耐久性能参数，不能反映这种混凝土的性能在后期的增长。

化学腐蚀环境中的混凝土结构耐久性设计必须有针对性，对于不同种类的化学腐蚀性物质，采用的水泥品种和掺和料的成分及合适掺量并不完全相同。在混凝土中加入少量硅灰一般都能起到比较显著的作用；粉煤灰和其他火山灰质材料因其本身的 Al_2O_3 含量有波动，效果差别较大，并非都是掺量越大越好。

因此当单独掺加粉煤灰等火山灰质掺和料时，应当通过实验确定其最佳掺量。在西方，抗硫酸盐水泥或高抗硫酸盐水泥都是硅酸盐类的水泥，只不过水泥中 C_3A 和 C_3S 的含量不同程度地减少。当环境中的硫酸盐含量异常高时，最好是采用不含硅酸盐的水泥，如石膏矿渣水泥或矾土水泥。但是非硅酸盐类水泥的使用条件和配合比以及养护等都有特殊要求，需通过试验确定使用。此外，要注意在硫酸盐腐蚀环境下的粉煤灰掺和料应使用低钙粉煤灰。

7.2.2 水、土中的化学腐蚀环境、大气污染环境和盐结晶环境作用中配有钢筋的混凝土构件，其钢筋的混凝土保护层最小厚度及相应的混凝土强度等级与最大水胶比应按表 7.2.2 确定。

7.2.3 水、土化学腐蚀环境、大气污染环境和盐结晶环境中的素混凝土构件，其混凝土的最低强度等级和最大水胶比与配有钢筋的混凝土相同。

表 7.2.2 化学腐蚀环境下混凝土材料与钢筋保护层厚度 c (mm)

设计使用年限 环境 作用等级		100 年			50 年		
		最低强度等级	最大水胶比	c	最低强度等级	最大水胶比	c
板、墙等 面形构件	V-C	C45	0.40	40	C40	0.45	35
	V-D	C50	0.36	45	C45	0.40	40
		$\geq C55$	0.36	40	$\geq C50$	0.36	35
	V-E	C55	0.36	45	C50	0.36	40
梁、柱等 条形构件	V-C	C45	0.40	45	C40	0.45	40
		$\geq C50$	0.36	40	$\geq C45$	0.40	35
	V-D	C50	0.36	50	C45	0.40	45
		$\geq C55$	0.36	45	$\geq C50$	0.36	40
	V-E	C55 $\geq C60$	0.36 0.33	50 45	C50 $\geq C55$	0.36 0.36	45 40

7.2.4 在盐结晶环境中，可采用引气工艺来提高混凝土耐久性，具体可参照冻融环境中度饱水条件下的引气要求。

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中的预应力体系应根据不同的环境作用等级采取不同组合的多重防护措施。预应力体系除需满足混凝土材料的耐久性能以外，尚需保证预应力体系具有足够的耐久性能。

预应力混凝土结构由混凝土和预应力体系两部分组成。有关混凝土材料的耐久性要求，已在本规范第4章到第7章中作出规定。

预应力混凝土结构中的预应力施加方式有先张法和后张法两类。先张预应力筋的张拉和混凝土的浇筑、养护以及钢筋与混凝土的粘结锚固多在预制工厂条件下完成。相对来说，质量较易保证。后张法预应力构件的制作则多在施工现场完成，涉及的工序多而复杂，质量控制的难度大。预应力混凝土结构的工程实践表明，后张预应力体系的耐久性往往成为工程中最为薄弱的环节，并对结构安全构成严重威胁。

本章专门针对后张法预应力体系的钢筋与锚固端提出防护措施与工艺、构造要求。

8.1.2 当限于技术条件无法确保后张有粘结预应力体系在严重环境作用下的设计使用年限时，可考虑采用可更换的预应力体系。

对于严重环境作用下的结构，按现有工艺技术生产和施工的预应力体系不论在耐久性质量的保证或在长期使用过程中的安全检测上均有可能满足不了结构设计使用年限的要求。从安全角度考虑，可采用可更换的无粘结预应力体系或体外预应力体系，同时也便于检测维修。

8.1.3 混凝土结构中的预应力体系应在选型和构造上采取措施，保证结构在整体牢固性上有足够的安全裕度。

结构的整体牢固性是结构出现的局部破坏不致引发大范围破坏倒塌后果的能力。预应力体系中的预应力钢绞线往往承受很大的内力，处于高应力工作状态的高强钢丝，一旦发生锈蚀脆断，将直接影响结构的整体安全。为了增强结构的整体牢固性，在结构方案和预应力体系选型与耐久性设计上应采取措施，如将集中承受荷载的单根或少数预应力筋分散由更多的预应力筋承受，增加结构的冗余度，对预应力筋采取多重防护手段等。

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性能、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加以保证。预应力筋的耐久性防护措施见表 8.2.1。

8.2.1 预应力钢绞线和钢丝的耐久性防护工艺与措施

编号	防护工艺	防护措施
PS0	预应力钢材质量	符合 GB/T 5223-2002, GB/T5224-2004, YB/T 146-1998 要求
PS1	钢丝表面处理	油脂涂层或者环氧涂层
PS2	预应力套管填充	水泥基浆体；油脂或者石蜡
PS2a	预应力套管特殊填充	管道填充浆体中加入阻锈剂
PS3	预应力套管	高密度聚乙烯或聚丙烯套管、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	满足耐久性构造要求，见 4.2.3 条规定
PS4a	混凝土保护层防锈处理	混凝土保护层掺入阻锈成份
PS5	混凝土表面涂层	耐腐蚀表面涂层和防腐蚀面层

表 8.2.1 列出了目前可能采取的预应力筋防护措施，适用于体内和体外后张预应力体系。为方便起见，表中使用的序列编号代表相应的防护工艺与措施。这里的预应力筋主要指对锈蚀敏感的钢绞线和钢丝，不包括热轧高强粗钢筋。

涉及体内预应力体系的防护措施有 PS0, PS1, PS2, PS2a, PS3, PS4, PS4a 和 PS5；涉及体外预应力体系的防护措施有 PS0, PS1, PS2, PS2a, PS3, PS3a。这些防护措施的使用应根据混凝土结构的环境作用类别和等级确定，具体见 8.2.2 条。

防护措施 PS2a 所指的阻锈剂应符合相关技术规范的规定，国标《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119-2003 中规定不得使用亚硝酸盐类阻锈剂，以避免预应力钢绞线和钢丝的应力腐蚀。

8.2.2 在不同的环境作用等级下，预应力筋的防护措施应按表 8.2.2 的规定选择。

表 8.2.2 预应力筋的总体防护措施

环境分类与等级		体内预应力体系	体外预应力体系
I 大气环境	I-A, I-B	PS0, PS2, PS3, PS4	PS0,PS2,PS3
	I-C	PS0, PS2 α , PS3, PS4 α	PS0,PS2 α ,PS3
II 冻融环境	II-C, II-D	PS0, PS2, PS3, PS4 α	PS0,PS2 α ,PS3
	II-E	PS0, PS2 α , PS3, PS4 α , PS5	PS0,PS1,PS2 α ,PS3
III 海洋环境	III-D	PS0,PS2 α ,PS3,PS4 α	PS0,PS2 α ,PS3
	III-E	PS0,PS1,PS2 α ,PS3,PS4 α	PS0,PS1,PS2 α ,PS3
	III-F	PS0,PS1, PS2 α ,PS3,PS4 α , PS5	PS0,PS1,PS2 α ,PS3 α
IV 除冰盐	IV-D	PS0,PS2 α ,PS3,PS4 α	PS0,PS2 α ,PS3
	IV-E	PS0,PS1,PS2 α ,PS3,PS4 α	PS0,PS1,PS2 α ,PS3
	IV-F	PS0,PS1,PS2 α ,PS3,PS4 α ,PS5	PS0,PS1,PS2 α ,PS3 α
V 化学腐蚀	V-C, V-D	PS0,PS2 α ,PS3,PS4 α	PS0,PS2 α ,PS3
	V-E	PS0,PS2 α ,PS3,PS4 α ,PS5	PS0,PS1,PS2 α ,PS3
	V-F	PS0,PS1,PS2 α ,PS3,PS4 α ,PS5	PS0,PS1,PS2 α ,PS3 α

本条给出预应力筋在不同环境作用等级条件下耐久性综合防护的最低要求，设计人员可以根据具体的结构环境、结构重要性和设计使用年限适当提高防护要求。

对于体内预应力筋，基本的防护要求为 PS0, PS2, PS3 和 PS4；对于体外预应力，基本的防护要求为 PS0, PS2 和 PS3。

8.3 锚固端的防护

8.3.1 预应力锚固端的耐久性可通过锚头组件材料、锚头封罩、封罩填充、锚固区封填和混凝土表面处理等环节加以保证。锚固端的防护工艺和措施见表 8.3.1。

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
PA0	锚具组件材料	符合 GB/T 14370-2000, JGJ 85-2002 的要求
PA1	锚具表面处理	锚具表面镀锌或者镀氧化膜工艺 ¹
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，满足耐久性要求
PA4a	锚固端封端层防锈处理	细石混凝土材料掺入阻锈成份
PA5	锚固端表面涂层	耐腐蚀表面涂层和防腐蚀面层

注 1：镀氧化膜的工艺效果优于镀锌，且对环境的污染较小。

表 8.3.1 列出了目前可能采取的预应力锚固端防护措施，包括了埋入式锚头和暴露式锚头。为方便起见，表中使用的序列编号代表相应的防护工艺与措施。

涉及埋入式锚头的防护措施有 PA0, PA1, PA2, PA2a, PA3, PA4, PA4a, PA5；涉及暴露式锚头的防护措施有 PA0, PA1, PA2, PA2a, PA3, PA3a。这些防护措施的使用应根据混凝土结构的环境作用类别和等级确定，参见 8.3.2 条。

防护措施 PA2a 所指的阻锈剂应符合国标《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119-2003 的规定，不得使用亚硝酸盐类阻锈剂，避免预应力钢筋的应力腐蚀。

8.3.2 对于不同的腐蚀环境，预应力锚固端的防护措施可参照表 8.3.2 的规定选择。

表 8.3.2 预应力锚固端的总体防护措施

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		PA0,PA4	PA0, PA2, PA3
	I-C		PA0, PA2, PA3, PA4a	PA0, PA2a, PA3
II 冻融环境	II-C, II-D		PA0, PA2, PA3, PA4	PA0, PA2a, PA3
	II-E		PA0, PA2, PA3, PA4, PA5	PA0, PA2a, PA3a
III 海洋环境	III-D		PA0,PA2a,PA3,PA4a	PA0, PA2a, PA3a
	III-E		PA0,PA2a,PA3,PA4a,PA5	不宜使用
	III-F		PA0,PA1,PA2a,PA3,PA4a, PA5	不宜使用
IV 除冰盐	IV-D		PA0,PA2a,PA3,PA4a	PA0, PA2a, PA3a
	IV-E		PA0,PA2a,PA3,PA4a, PA5	不宜使用
	IV-F		PA0,PA1,PA2a,PA3,PA4a,PA5	不宜使用
V 化学腐蚀	V-C, V-D		PA0,PA2a,PA3,PA4a	PA0, PA2a, PA3a
	V-E		PA0,PA2a,PA3,PA4a,PA5	不宜使用
	V-F		PA0,PA1,PA2a,PA3,PA4a,PA5	不宜使用

本条给出预应力锚头在不同环境作用等级条件下耐久性综合防护的最低要求，设计人员可以根据具体的结构环境、结构重要性和设计使用年限适当提高防护要求。

对于埋入式锚固端，基本的防护要求为 PA0 和 PA4；对于暴露式锚固端，基本的防护要求为 PS0, PS2 和 PS3。

8.4 构造与做法

8.4.1 在严重环境作用下，后张预应力体系中的管道应采用本身有优良防腐性能与密封能力的高密度聚乙烯或聚丙烯塑料套管。除室内轻微环境作用外，不宜采用无密封功能的金属软管。对于节段施工的预应力结构，节段间的体内预应力套管也不应使用金属管。

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 1MPa 的内压。套管外径的制造误差不大于直径的 0.9%并不大于 1mm；对于体内预应力体系，管道的最小厚度为 2mm，且施工磨损后的厚度不小于 1.5mm；体外预应力体系的管道厚度不小于 4mm。

本条规定的预应力套管能承受的工作内压，参照了欧共体技术核准协会对后张法预应力体系组件的要求。对高密度聚乙烯和聚丙烯套管的其他技术要求可参见行业标准《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/T529-2004 的有关规定。

8.4.3 用水泥基浆体填充后张预应力管道时，硬化后水泥浆的截面填充率应大于 95%，即管道截面中可能残留的孔隙面积不应超过管道截面积的 5%。

水泥基浆体的压浆工艺对管道内预应力筋的耐久性有重要影响，具体压浆工艺和性能要求可参见中国土木工程学会标准《混凝土结构设计施工耐久性指南》CCES 01-2004（2005 年修订版）附录 D 的相关条文。

8.4.4 后张有粘结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。封锚细石混凝土的水胶比不得高于本体混凝土的水胶比，且不大于 0.4。封锚混凝土的保护层厚度应不小于 50mm，在氯化物环境中应不小于 80mm。

在氯化物等严重环境作用下，封锚混凝土中宜外加阻锈剂或采用水泥基聚合物混凝土，并外覆塑料密封罩。对于桥梁等室外预应力构件，应采取构造措施，防止雨水或渗漏水直接作用或流过锚固封堵端的外表面。

8.4.5 位于梁端的后张法预应力体系锚固端应设置专门的排水沟和滴水沿；位于箱梁内部的预应力锚固端，应在顶板上表面进行防水涂层处理，并在锚固端设置滴水沿和排水沟。现浇节段间的锚固端须在梁体上表面涂刷防水层；预制节段间的锚固端须在梁体上表面涂刷双层防水涂层，且须在节段间涂刷环氧树脂。

附录 A 混凝土结构设计的耐久性极限状态

A.0.1 设计使用年限终结时的耐久性极限状态，应不损害到结构的承载能力，为正常使用极限状态。

A.0.2 混凝土构件的耐久性极限状态可分为以下三种：

- (1) 钢筋临界锈蚀的极限状态；
- (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。

这三种劣化程度都不会损害到结构的承载能力，满足 A.0.1 条的基本要求。

A.0.3 钢筋临界锈蚀的极限状态为：混凝土的碳化发展到钢筋表面附近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，即钢筋开始锈蚀。

对锈蚀敏感的预应力钢筋，冷加工钢筋或直径小于 6mm 受力主筋，应以钢筋的临界锈蚀状态作为极限状态。

预应力筋和冷加工钢筋的延性差，破坏呈脆性，而且一旦开始锈蚀，发展速度较快。所以宜偏于安全考虑，以钢筋一开始发生锈蚀即作为耐久性极限状态。

A.0.4 钢筋发生适量锈蚀的极限状态为：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。

普通热轧钢筋可按发生适量锈蚀状态作为极限状态。

适量锈蚀到开始出现顺筋开裂尚不会损害钢筋的承载能力，钢筋锈蚀深度达到 0.1mm 也不至于明显影响钢筋混凝土构件的承载力，但构件表面出现锈胀引起的顺筋开裂时可认为构件已达到正常使用的极限状态。

A.0.5 混凝土表面发生轻微损伤的极限状态为：不影响结构所需外观，不明显损害构件的承载力和表层混凝土对钢筋的保护。

冻融环境和化学腐蚀环境中的混凝土构件可按表面轻微损伤极限状态考虑。

A.0.6 耐久性极限状态尚应满足结构和构件的可修复性要求。

A.0.7 与耐久性极限状态相对应的结构设计使用年限必须具有规定的保证率，满足正常使用极限状态下的可靠度要求，可靠指标应不低于 1.5，相应的失效概率约 5% ~ 10%，或保证率 90% ~ 95%。

环境作用引起的材料腐蚀在作用移去后不可恢复。对于不可逆的正常使用极限状态，可靠指标应大于 1.5。欧洲一些工程用可靠度方法进行环境作用下的混凝土结构耐久性设计时，与正常使用极限状态相应的可靠指标一般取 1.8。在 2004 年欧洲 fib 模式规范《混凝土结构使用寿命设计》的非正式草案中，规定与适用性相应的耐久性极限状态的可靠指标也为 1.8。

附录 B 结构混凝土原材料选用的限定范围

B.1 混凝土胶凝材料用量的限定范围

B.1.1 单位体积混凝土的胶凝材料用量宜控制在表 B.0.1 规定的范围内。

表 B.0.1 单位体积混凝土的胶凝材料用量¹

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)
C25	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范围量与非引气混凝土要求相同。

基于耐久性的需要，单位体积混凝土的胶凝材料不能太低。但过大的用量会加大混凝土的收缩，使混凝土更加容易开裂，因此应控制胶凝材料的最大用量。在强度与原材料相同的情况下，胶凝材料用量较小的混凝土，其耐久性能通常要优于胶凝材料用量较大的混凝土。

B.1.2 对于强度等级达到 C60 的泵送混凝土，单位体积混凝土的胶凝材料最大用量可增大至 530kg/m³。

泵送混凝土由于工作度的需要，允许适当加大胶凝材料用量。

B.2 混凝土中氯离子、三氧化硫、碱含量的限制

B.2.1 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）应不超过表 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、IV-F	0.1%	
V-C、V-D、V-E、	0.15%	

注：对重要桥梁等基础设施，各种环境下钢筋混凝土的氯离子含量均不超过 0.08%。

混凝土中的氯离子含量，可对所有原材料的氯离子含量进行实测，然后加在一起确定；也可以从新拌混凝土和硬化混凝土中取样化验求得。氯离子能与混凝土胶凝材料中的某些成分结合，所以从混凝土中取样测得的水溶氯离子量要低于测自原材料中的数值。为偏于安全，对重要工程也可用酸溶值控制。混凝土氯离子量的测试方法见附录 D。

重要结构的混凝土不得使用海砂配制。一般工程由于取材条件限制不得使用海砂时，混凝土水胶比应低于 0.45，强度等级不宜低于 C40，并适当加大保护层厚度或掺入外加化学阻锈剂。

B.2.2 混凝土配制中不应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（ SO_3 ）的最大含量应不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 NaO_2 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 3.5 kg/m^3 ，对于设计使用年限为 100 年的结构物，宜限制混凝土的含碱量不超过 3 kg/m^3 。

（2）对于骨料无活性但处于潮湿环境（相对湿度 75%）条件下的混凝土构件，含碱量不超过 3 kg/m^3 。

（3）对于骨料有活性且处于潮湿环境（相对湿度 75%）条件下的混凝土构件，

应严格控制混凝土含碱量并掺加矿物掺和料。

矿物掺和料带入混凝土中的碱可按水溶性碱的含量计入，当无检测条件时，对粉煤灰，可取其总碱量的 $1/6$ ，磨细矿渣取 $1/2$ 。

对于使用潜在活性骨料并常年处于潮湿环境条件的混凝土构件，可参考加拿大标准 CSA C23.2-27A 针对不同使用年限构件提出的具体要求，包括硅酸盐水泥的最大含碱量、矿物掺和料的最低用量、以及粉煤灰掺和料中的 CaO 最大含量。

B.3 混凝土胶凝材料组成的限定范围

B.3.1 混凝土胶凝材料中的矿物掺和料用量占胶凝材料总量的比值应满足表 B.3.1 的规定。

混凝土的胶凝材料除水泥中的硅酸盐水泥外，还包括水泥中具有胶凝作用的混合材料（如粉煤灰、火山灰、矿渣、沸石等）以及配制混凝土时掺入的具有胶凝作用的矿物掺和料（粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等）。本节中所指的矿物掺和料用量，包括水泥生产时加入的混合材料和配制混凝土时外加的矿物掺和料。

表 B.3.1 用算式表示粉煤灰和磨细矿渣的限定用量范围。例如在干湿交替的一般环境中，如混凝土的水胶比为 0.50，有 $\frac{\alpha_f}{0.2} + \frac{\alpha_s}{0.3} \leq 1$ ，表示单掺粉煤灰的用量不能超过胶凝材料总重的 20%（此时的 $\alpha_s = 0$ ，得 $\alpha_f \leq 0.2$ ），单掺磨细矿渣的用量不能超过胶凝材料总重的 30%。双掺粉煤灰和磨细矿渣，如粉煤灰掺量为 10%，则从上式可得矿渣掺量需小于 15%。

B.3.2 表 B.3.1 中未列入的其他符合国家标准或行业标准的水泥，如适用于非高温地区的硫铝酸盐水泥和铁铝酸盐水泥也可考虑使用。其他的矿物掺和料如烧高岭土粉、磷渣粉、沸石岩粉等按复合水泥用矿物掺和料的国家标准经试配后也可选用。

表 B.3.1 矿物掺和料用量的限定范围

环境分类 与作用等级		硅酸盐类水泥 适用品种 ¹	矿物掺和料的限定范围 ² (占胶凝材料总量的比值)	备注
I	I-A (室内干燥)	PO, PI, PII, SP, FP, CP	W/B=0.45 时, $\frac{\alpha_f}{0.3} + \frac{\alpha_s}{0.5} \leq 1$ W/B=0.55 时, $\frac{\alpha_f}{0.2} + \frac{\alpha_s}{0.3} \leq 1$	保护层最小厚度 $c \leq 15\text{mm}$ 或 $W/B > 0.55$ 的构件混凝土不宜采用 SP, FP, CP 水泥
	I-A (水中) I-B (长期湿润)	PO, PI, PII, SP, FP, CP	$\frac{\alpha_f}{0.5} + \frac{\alpha_s}{0.7} \leq 1$	
	I-B (室内非干湿交替) (露天非干湿交替)	PO, PI, PII, SP, FP, CP	W/B=0.4 时, $\frac{\alpha_f}{0.3} + \frac{\alpha_s}{0.5} \leq 1$ W/B=0.5 时, $\frac{\alpha_f}{0.2} + \frac{\alpha_s}{0.3} \leq 1$	保护层最小厚度 $c \leq 20\text{mm}$ 或 $W/B > 0.5$ 的构件混凝土不宜采用 SP, FP, CP 水泥
	I-C (干湿交替)	PO, PI, PII	W/B=0.55 时, $\frac{\alpha_f}{0.15} + \frac{\alpha_s}{0.25} \leq 1$	
II	II-C, II-D, II-E	PO, PI, PII	W/B=0.4 时, $\frac{\alpha_f}{0.3} + \frac{\alpha_s}{0.4} \leq 1$ W/B=0.5 时, $\frac{\alpha_f}{0.2} + \frac{\alpha_s}{0.3} \leq 1$	
III	III-C, III-D, III-E, III-F	PO, PI, PII	下限: $\frac{\alpha_f}{0.25} + \frac{\alpha_s}{0.4} = 1$ 上限: $\frac{\alpha_f}{0.5} + \frac{\alpha_s}{0.8} = 1$	当 $W/B=0.4 \sim 0.5$ 时, 需同时满足 I 类环境下的要求; 如同时处于冻融环境, 掺和料用量的上限尚应满足 II 类环境要求
IV	IV-C, IV-D, IV-E, IV-F			
V	V-C, V-D, V-E	PI, PII, PO, SR, HSR	下限: $\frac{\alpha_f}{0.25} + \frac{\alpha_s}{0.4} = 1$ 上限: $\frac{\alpha_f}{0.5} + \frac{\alpha_s}{0.8} = 1$	当 $W/B=0.4 \sim 0.5$ 时, 矿物掺和料用量的上限需同时满足 I 类环境下的要求; 如同时处于冻融环境, 掺和料用量的上限尚应满足 II 类环境要求

注：1、表中水泥符号：PI—硅酸盐水泥，PII—掺混合材料 5%的硅酸盐水泥，PO—掺混合材料 6~15%的普通硅酸盐水泥，SP—矿渣硅酸盐水泥，FP—粉煤灰硅酸盐水泥，PP—火山灰质硅酸盐水泥，CP—复合硅酸盐水泥，SR—抗硫酸盐硅酸盐水泥，HSR—高抗硫酸盐水泥。

2、矿物掺和料指配制混凝土时加入的具有胶凝作用的矿物掺和料（粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等）与水泥生产时加入的具有胶凝作用的混合材料。

表中公式内的 α_f 和 α_s 分别表示粉煤灰和矿渣占胶凝材料总量的比值。当使用 PI、PII 以外的掺有混合材料的硅酸盐类水泥时，矿物掺和料中应计入水泥生产中已掺入的混合料。在没有确切水泥组分的数据时，PO 可按 85%硅酸盐水泥、10%的活性混合材料估算，其他类型混合水泥在没有确切组分数据的情况下不宜使用。

B.3.3 用作矿物掺和料的粉煤灰应选用 CaO 含量 10%的低钙灰。

B.3.4 冻融环境下用于引气混凝土的粉煤灰掺和料，其含碳量不宜大于 1.5%。

B.3.5 氯盐环境下的矿物掺和料中，宜加入少量（占胶凝材料总重的 3%~5%）的硅灰。氯盐环境下不宜使用抗硫酸盐硅酸盐水泥。

B.3.6 硫酸盐化学腐蚀环境下，当环境作用等级为 -C 和 -D 时，水泥中的 C_3A 含量应分别低于 8%和 5%（如使用较大掺量的矿物掺和料，水泥中的 C_3A 含量可分别不大于 10%和 8%）；当环境作用等级为 -E 时，水泥中的 C_3A 含量应低于 5%，并应同时掺用矿物掺和料。硫酸盐环境下使用硅酸盐类的抗硫酸盐水泥或高抗硫酸盐水泥时，也宜掺有矿物掺和料。当环境作用等级在 -E 以上时，需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，且不能使用高钙粉煤灰。

硫酸盐化学腐蚀环境下的水泥和矿物掺和料中，不得加入石灰石粉。

B.3.7 对可能产生碱-骨料反应的混凝土，宜采用大掺量矿物掺和料，单掺磨细矿渣的用量（占胶凝材料总重）不小于 50%，单掺粉煤灰不小于 40%，单掺火山灰质材料不小于 30%，并应尽量降低水泥和矿物掺和料中的含碱量和粉煤灰中的 CaO 含量。

B.4 混凝土骨料的粒径限制与质量要求

B.4.1 混凝土骨料的粒径应满足表 B.4.1 的规定。

表 B.4.1 混凝土骨料的公称粒径 (mm)

混凝土保护层最小厚度 ¹ (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	40
	III、VI	10	15	15	20	20	25	25	30

注：1、表中的保护层厚度指构件最外侧钢筋的保护层厚度，并与表 4.3.1（一般环境）、表 5.3.2（冻融环境）、表 6.3.2（氯化物环境）和表 7.2.2（化学腐蚀环境）中的最小保护层厚度相应。

B.4.2 为保证混凝土密实性和体积稳定性，应充分重视控制骨料的级配和粒形，并采用单粒级石子两级配或三级配投料。

B.4.3 沿海地区的混凝土结构施工应注意当地使用海砂或混凝土用砂在开采、运输、堆放和生产过程中遭受海水污染和混用海砂的可能性，并采取相应措施。

附录 C 冻融环境中引气混凝土含气量与气泡间隔系数

C.0.1 冻融环境中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 混凝土含气量(%)和平均气泡间隔系数

环境条件 骨料 最大粒径(mm)	混凝土高度饱水	混凝土中度饱水	盐或化学腐蚀下冻融
10	7.0 ¹	5.5	7.0
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) ¹	250	300	200

注：1、含气量为从现场新拌混凝土中取样用含气量测定仪（气压法）测得的平均值，允许绝对误差为 $\pm 1.5\%$ ，测定方法见《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T50080。

2、气泡间隔系数为从现场或模拟现场的硬化混凝土中取样（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，方法见《水工混凝土试验规程》DL/T5150。

C.0.2 在实验室测定新拌混凝土的含气量时，不论其坍落度大小，测试前均应在标准振动台上振动，时间不少于 15 ~ 30s（坍落度大的取低值）。对于现场泵送和高频振捣的混凝土，应检测泵送和振捣过程造成的含气量损失，以判断所用引气剂品种的适用性。

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} 的测定方法见表 D.0.1。

表 D.0.1 混凝土材料耐久性参数及其测定方法

耐久性性能参数	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	GBJ82《普通混凝土长期性能和耐久 性能试验方法》 DL/T5150《水工混凝土试验规程》
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	CCES01《混凝土结构耐久性设计与施 工指南》 GBJ82《普通混凝土长期性能和耐久 性能试验方法》

D.0.2 混凝土及其原材料中氯离子含量的测定方法见表 D.0.2。

表 D.0.2 氯离子测定方法

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 3 分钟，取上部 50ml 溶液	氯离子百分 含量	GB11896《水质 氯化物的测定 硝酸 银滴定法》
	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	JTJ270《水运工程混凝土试验规程》
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 2 小时，取 50ml 溶液	氯离子百分 含量	GB11896《水质 氯化物的测定 硝酸 银滴定法》

	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 24hr，取 20ml 溶液	氯离子百分含量	GB50164《混凝土质量控制标准》 JTJ270《水运工程混凝土试验规程》
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	JGJ52《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》
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 稀释至 100ml	氯离子百分含量	GB/T8077《混凝土外加剂均质性试验方法》

D.0.3 混凝土及水、土中硫酸根离子含量的测定方法见表 D.0.3。

表 D.0.3 硫酸根离子测定方法

测试对象	实验方法	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	GB/T11899《水质硫酸盐的测定》
水	重量法测量硫酸根含量	硫酸根离子浓度，mg/L	
土 ¹	重量法测量硫酸根含量	硫酸根含量，mg/kg	GB7871《森林土壤水溶性盐分分析》

注 1：土中硫酸盐的测定也可参考加拿大标准 A23.2.3B《土中水溶硫酸根离子和总硫酸根离子测定》，试验时先用酸溶法测定总硫酸根离子浓度，设为 $p\%$ ，则测定水溶硫酸根离子浓度时的水土比例定为 $9p$ mL/g，加水后搅拌时间 6 小时，相对于我国标准 GB7871 中的水土比例固定为 5 以及搅拌时间 3 分钟，测得的水溶值可能有较大差异。英国标准中测定土中硫酸根离子的水土比例为 2，搅拌 16 小时。