

中国土木工程学会标准

CCES 01 - 2004(2005年修订版)

混凝土结构 耐久性设计与施工指南

Guide to Durability Design and Construction
of Reinforced Structures

2005年10月

前言

鉴于工程安全性与耐久性对我国当前大规模土建工程建设的重要意义,中国工程院土木水利与建筑学部于 2000 年提出了一个名为“工程结构安全性与耐久性研究”的咨询项目,旨在联络国内专家,就我国土木和建筑工程结构安全性与耐久性的现状与亟待解决的问题进行探讨,并为政府部门提供技术政策方面的建议。考虑到混凝土结构的耐久性问题最为突出,而现行的设计与施工规范在许多方面又不能保证工程的耐久性需要,所以项目组决定联系各方专家,组织成立编审组,着手编写混凝土结构耐久性设计与施工的指导性技术文件,供工程设计、施工与管理人员使用。与此同时,国家建设部建筑业司和科技司也委托中国土木工程学会与清华大学土木系就建筑物耐久性与使用年限的课题进行研究。这份《混凝土结构耐久性设计与施工指南》,就是依托上述项目和课题,在国内众多专家的共同参与下编审完成的。环境作用下的混凝土结构劣化机理非常复杂,许多方面还认识不清,而且耐久性问题又具有相当大的不确定性与不确知性。在这种情况下,提出指南这样的指导性技术文件,可能更便于设计、施工人员能够结合工程的具体特点使用。《指南》的初稿、讨论稿和送审稿曾分别在 2001 年、2002 年两次学术会议上和在会后广泛征求过意见并经多次修改。由于时间和认识上的限制,不足之处,有待今后定期补充。

2003 年 6 月,中国土木工程学会报请国家建设部组织领导小组和专家组对指南送审稿进行审查和鉴定,并获得通过;经中国土木工程学会研究认定,本指南作为中国土木工程学会技术标准。

本指南将每年做局部修订补充,并发布于中国土木工程学会网站(www.cces.net.cn)。

对指南在使用过程中发现的问题,请将意见和建议寄:清华大学土木系结构工程实验室(邮编 100084,电子信箱 Jiegou@tsinghua.edu.cn)转有关编写人。

指南编审组

2003 年

指南编审组成员

(汉语拼音为序)

巴恒静 包琦玮 陈肇元* 陈蔚凡 邱小坛 冯乃谦 傅 智 干伟忠 郝挺宇
洪定海 洪乃丰 黄士元 蒋蕊秋 金伟良 李金玉 廉慧珍* 林宝玉 林志伸
刘西拉 罗 琳 吕志涛 马孝轩 潘德强 钱稼茹 覃维祖 王庆霖 吴学敏
徐有邻 岳庆瑞 袁 勇 赵国藩 周君亮

*编审组联系人

指南起草人:

第1、2、3、5章 陈肇元; 第4、6章 廉慧珍、陈肇元; 第7章 洪乃丰;
附录A1 覃维祖; 附录A2 冯乃谦、巴恒静; 附录B1 干伟忠; 附录B2 路新瀛。
为起草指南第4、5章提供条文初稿的尚有黄士元、冯乃谦、王庆霖、林宝玉、吕志涛、林志伸。
全文由陈肇元、廉慧珍根据汇总的资料、意见及建议增补、修改定稿。

国家建设部组织的审查专家组:

徐培福 风懋润 吴学敏 白生翔 林志伸 韩素芳 程懋昆 罗 玲 邱小坛
姚 燕 吴松勤

一、 《混凝土结构耐久性设计与施工指南》 CCES 01—2004 的 2005 年修订版，已于
2005 年 10 月由中国建筑工业出版社正式出版

2005 年修订版说明

根据《指南》第一版(CCES 01—2004)使用过程中征集到的意见、建议以及近期获得的新的信息，这一修订版对原有条文作了局部的修改、补充和必要的订正，并以单印本的形式正式发行，取代原先刊载于文集《混凝土结构耐久性设计与施工指南》（中国建筑工业出版社 2004 年 5 月第一版）中的条文。与第一版相比，修订版增添了一些新的条文和附录，篇幅增加近 40%。读者如欲继续使用指南第一版中的条文内容，请注意新的修订版中已作出的更改，后者可从以下网站查得：

中国土木工程学会 www.cces.net.cn

2005 年 9 月

二、 《指南》2005 年修订版的主要修改内容

持有《指南》第一版的读者如欲继续使用或参考第一版的条文，请注意修订版中已作出的局部修改，其中与第一版有较大区别的，可下载修订版中的如下条文。至于修订版中的增加内容，可参阅新出版的指南，主要有：对于不同环境类别和作用等级下的混凝土原材料品种与用量的范围作了限定；对混凝土养护和钢筋保护层厚度的合格验收要求作了补充；新增了附录 C（氯离子侵入混凝土过程的 Fick 模型）和附录 D（后张预应力混凝土体系的耐久性要求）。

目次

1、总则

1.0.1 本指南旨在为设计和施工人员提供环境作用下混凝土结构耐久性设计与施工的基本原则与要求。当结构所处环境能够明显导致结构材料性能劣化或结构需有很长的使用年限时，则在结构的设计与施工过程中必须专门考虑环境作用下的耐久性要求，并应在设计文件中单独列入耐久性设计的内容。

混凝土结构的耐久性在很大程度上取决于结构施工过程中的质量控制与质量保证以及结构使用过程中的正确维修与例行检测。本指南同时也为工程的业主、施工监理和工程交付使用后的运营管理部门提供耐久性要求的相关信息。

1.0.2 本指南仅考虑常见的环境作用对混凝土结构耐久性的影响，所考虑的环境作用因素包括：温度，湿度（水分）及其变化，空气中的氧、二氧化碳和空气污染物（盐雾、二氧化硫、汽车尾气等），所接触土体与水体中的氯盐、硫酸盐、碳酸等物质，以及北方地区为溶化降雪而喷洒的化学除冰盐等。本指南不涉及低周疲劳荷载、振动与磨损等力学作用对耐久性的影响，也不涉及生物作用、辐射作用与电磁作用，虽然微生物和杂散电流有时可引起混凝土腐蚀和钢筋的严重锈蚀。

1.0.3 本指南主要适用于房屋、桥梁、涵洞、隧道与一般构筑物的普通钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构，不适用于轻骨料混凝土与其它特种混凝土结构。对于特殊腐蚀环境以及生产、使用、排放或贮存各种有害化学腐蚀物质的结构物，应参照专门的标准进行设计，但本指南提供的原则和数据对这些结构物的设计可能有比照参考价值。

1.0.4 混凝土结构的耐久性设计与施工，除本指南已有规定的以外，在结构材料、结构构造、结构施工上尚应参照现行国家标准与行业标准的其他有关规定。

1.0.5 由于环境作用的复杂性、不确定性与不确知性以及缺乏足够的经验和数据，目前尚难在设计阶段对混凝土结构的耐久性及其使用年限作出准确的预测。本指南所提供的只是一种基于现有认识的近似判断和估计，用于不同环境条件下、不同设计使用年限要求的结构耐久性设计。本指南中的要求只是通常情况下为满足结构安全性、适用性和可修复性的最低要求，设计人员要结合工程及其所处环境的具体特点，如工程的重要性、环境作用的不确定性与不确知性、材料劣化导致结构失效的后果严重性、使用过程中进行维修的可行性等，必要时采取更为严格的要求。混凝土结构的耐久性与许多因素有关，如有基于工程经验类比或基于材料性能劣化模型计算结果的可靠依据，并通过专门的论证，可以修正和取代本指南的个别规定和要求。

2、术语

2.0.1 环境作用 (environmental action) 能引起结构材料性能劣化或腐蚀的环境因素 (agent) 如温度、湿度及各种有害物质等施加于结构上的作用。

2.0.2 腐蚀 (deterioration) 材料与周围的环境因素发生物理、化学或电化学反应而受到的渐进性损伤与破坏。对钢材则为锈蚀 (corrosion)。

2.0.3 劣化 (degradation) 材料性能随时间逐渐降低。

2.0.4 结构耐久性 (structure durability) 结构及其部件在可能引起材料性能劣化的各种作用下能够长期维持其应有性能的能力。在结构设计中, 结构耐久性又常被定义为预定作用和预期的维修与使用条件下, 结构及其部件能在预定的期限内维持其所需的最低性能要求的能力。

2.0.5 结构使用年限 (service life of structure) 结构建造完成后, 在预定的使用与维修条件下, 结构所有性能 (如安全性、适用性) 均能满足原定要求的实际年限。

2.0.6 设计使用年限 或设计寿命 (design life, or design working life) 设计人员用以作为结构耐久性设计依据并具有足够安全裕度或保证率的目标使用年限。设计使用年限应由业主或用户与设计人共同确定, 并满足有关法规的最低要求。

2.0.7 劣化模型 (degradation model) 描述材料性能劣化过程的数学表达式, 可用于结构使用年限的预测。

2.0.8 混凝土侵入性 (penetrability of concrete) 表达外部物质 (水、气及溶于水、气中的其他分子和离子等) 入侵到混凝土内部难易程度的混凝土性能。根据入侵物质的不同传输机理与特征, 常用渗透系数, 扩散系数, 吸收率等不同参数表示, 作为混凝土材料耐久性的综合度量指标。混凝土侵入性又常被称为渗透性 (permeability), 但渗透 (permeation) 通常单指水或溶液在压力差驱动下的传输, 并用渗透系数表示渗透性。

2.0.8 扩散 (diffusion) 流体中的分子或离子通过无序运动从高浓度区向低浓度区的传输, 其驱动力为浓度差。

2.0.9 混凝土的氯离子扩散系数 (chloride diffusion coefficient of concrete) 表示混凝土中氯离子扩散性的一个参数。氯离子在混凝土中的扩散是溶于混凝土孔隙水中的氯离子从高浓度区向低浓度区的传输。因为氯离子可以同时通过扩散、渗透和吸附等不同机理侵入到混凝土内部, 并在传输过程中有部分氯离子与水泥的水化产物相结合, 所以通过试验和计算得到的扩散系数有时在一定程度上也包含了其他传输机理与被结合等因素的影响。

2.0.10 混凝土耐久性指数 DF (durability factor) 反映混凝土抗冻性能的一个指标, 用混凝土标准试件和标准试验方法经规定次数快速冻融循环试验后的动弹性模量与初始弹性模量的比值表示。

2.0.11 含气量 (entrained air content) 混凝土中掺入引气剂后, 在混凝土内形成大量球形微细气泡与混凝土的体积比。这些气泡相邻边缘之间距离的平均值称为气泡间距系数 (air bubble spacing)。

2.0.12 维修 (maintenance) 为维持结构或其构件在使用年限内所需性能而采取的各种技术和管理活动, 包括维护和修理 (修复)。

2.0.13 修理 或修复 (repair, or restore) 通过修补、更换或加固,使损伤的结构或其构件恢复到可接受的状态。按修复的规模、费用及其对结构正常使用的影响,可分为大修和小修。当修复活动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构件中的受损混凝土或更换结构的主要构件时为大修。

2.0.14 可修复性 (restorability, or repairability) 结构或其构件在所考虑的作用下受到损伤后能够经济合理地进行修复的能力。

2.0.15 胶凝材料 (cementitious material, or binder) 用于配制混凝土的硅酸盐水泥与粉煤灰、磨细矿渣和硅灰等矿物掺和料的总称。矿物掺和料在混凝土配比中的用量,通常以其占胶凝材料总量的百分比(重量比)表示。

2.0.16 水胶比 (water to binder ratio) 混凝土配制时的用水量与胶凝材料(水泥加矿物掺和料)总量之比。在耐久混凝土的配合比中,常以胶凝材料用量的概念取代传统的水泥用量,并以水胶比取代传统的水灰比,作为判断混凝土密实性或耐久性的一个宏观指标。

2.0.17 高性能混凝土 (high performance concrete) 以耐久性为基本要求并用常规材料和常规工艺制造的水泥基混凝土。这种混凝土在配比上的特点是掺加合格的矿物掺和料和高效减水剂,取用较低的水胶比和较少的水泥用量,并在制作上通过严格的质量控制,使其达到良好的工作性、均匀性、密实性和体积稳定性。

2.0.18 大掺量矿物掺和料混凝土 (concrete with high volume mineral admixtures) 本指南所指的大掺量矿物掺和料混凝土,为单掺粉煤灰时的掺量不小于胶凝材料总量的 30%(重量比),单掺磨细粒化高炉矿渣时的掺量不小于胶凝材料总量的 50%;复合使用两种或两种以上的矿物掺和料时,为其中的粉煤灰掺量不小于胶凝材料总量的 30%,或各种矿物掺和料掺量之和不小于胶凝材料总量的 50%。需水量很大的矿物掺和料如硅灰、沸石岩粉等不适合于大掺量,宜与其他矿物掺和料复合使用。

2.0.19 防腐蚀附加措施 (additional protective measures) 有别于通过改善混凝土的密实性和增加保护层厚度等常规手段来提高混凝土结构耐久性的其他特殊措施,如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。

2.0.20 混凝土表面涂层 (surface protective membrane to concrete) 用无机或有机材料如树脂、橡胶或沥青类涂料分层涂刷于混凝土表面的防腐层,一般由底层、面层或有中间层的涂层组成。涂层的总厚度一般较薄。

2.0.21 环氧涂层钢筋 (epoxy coated rebar) 将填料、热固性环氧树脂与交联剂等外加剂制成的粉末,在严格控制的工厂流水线上,采用静电喷涂工艺喷涂于表面处理过的预热的钢筋上,形成一层坚韧、抗渗透、连续的绝缘涂层的钢筋。

2.0.22 钢筋阻锈剂 (corrosion inhibitor) 能抑制混凝土中钢筋电化学腐蚀的化学物质。掺入型阻锈剂为掺加到新拌混凝土中的化学外加剂,主要用于新建工程;渗透型阻锈剂涂于混凝土表面并渗透到混凝土中,主要用于已有工程的修复。

2.0.23 混凝土表面硅烷渗涂 (silane coated concrete) 用硅烷类液体渗涂混凝土表层,使其具有低吸水性、低氯离子扩散率的防腐蚀措施

2.0.24 混凝土防护面层 (protective layer) 涂抹、浇筑或覆盖在混凝土表面并与其牢固粘结的防护层,如水泥基聚合物砂浆抹面层、油毡防水面层及玻璃钢面层等,防腐面层的厚度远大于涂层。

3、基本规定

3.1 环境类别与环境作用等级

3.1.1 结构所处的环境按其对于钢筋和混凝土材料的不同腐蚀作用机理分为 5 类（表 3.1.1）。

表 3.1.1 环境分类

类别	名称	类别	名称
I	碳化引起钢筋锈蚀的一般环境	V	其他化学物质引起混凝土腐蚀的环境：
II	反复冻融引起混凝土冻蚀的环境	V ₁	土中和水中的化学腐蚀环境
III	海水氯化物引起钢筋锈蚀的近海或海洋环境	V ₂	大气污染环境
IV	除冰盐等其他氯化物引起钢筋锈蚀的环境	V ₃	盐结晶环境
注：氯化物环境（III和IV）对混凝土材料也有一定腐蚀作用，但主要是引起钢筋的严重锈蚀。反复冻融（II）和其他化学介质（V ₁ 、V ₂ 、V ₃ ）对混凝土的冻蚀和腐蚀，也会间接促进钢筋锈蚀，有的并能直接引起钢筋锈蚀，但主要是对混凝土的损伤和破坏。			

3.1.2 环境作用按其对于配筋（钢筋和预应力筋）混凝土结构侵蚀的严重程度分为 6 级（表 3.1.2）。

表 3.1.2 环境作用等级

作用等级	作用程度的定性描述	作用等级	作用程度的定性描述
A	可忽略	D	严重
B	轻度	E	非常严重
C	中度	F	极端严重

3.1.3 不同环境类别在不同的环境条件（如湿度、温度、侵蚀介质的浓度等）下对配筋混凝土结构的环境作用等级如表 3.1.3-1 和表 3.1.3-2 所示。

当土中和水中的化学腐蚀环境(V₁)有多种化学物质（表 3.1.3-2）一起作用于结构上时，应取其中最高的作用等级作为环境 V₁ 的作用等级；但如其中有两种或多种化学物质的作用均处于相同的最高作用等级时，则为考虑可能加重的化学腐蚀后果，应按再提高一个等级作为结构所处 V₁ 环境类别的作用等级。

表 3.1.3-1 环境分类及环境作用等级

环境类别	环境条件 ¹		作用等级	示例
I 一般环境 (无冻融、盐、酸等作用)	室内干燥环境		I-A	长期干燥、低湿度环境 ² 中的室内混凝土构件
	非干湿交替的室内潮湿环境和露天环境， 长期湿润环境		I-B	中、高湿度环境 ² 的室内混凝土构件；不受雨淋或与水接触的露天构件；长期与水或湿润土体接触的水中或土中构件
	干湿交替环境 ¹		I-C	与凝结露水接触的室内天窗构件和地下室顶板构件，表面频繁淋雨或与水接触的室外构件，处于水位变动区的构件，靠近地表、湿度受地下水位变动影响构件
II 冻融环境	微冻地区 ⁴ ，	无氯盐 ³	II-C	微冻地区水位变动区的构件，频繁受雨淋的构件

	混凝土高度饱水 ⁵	有氯盐 ³	II-D	水平表面
	严寒和寒冷地区 ⁴ , 混凝土中度饱水 ⁵	无氯盐 ³	II-C	严寒和寒冷地区受雨淋构件的竖向表面
		有氯盐 ³	II-D	
	严寒和寒冷地区 ⁴ , 混凝土高度饱水 ⁵	无氯盐 ³	II-D	水位变动区的构件, 频繁受雨淋的构件水平表面
有氯盐 ³		II-E		
III 近海或海洋环境 ⁶	水下区		III-D ⁷	长期没于水中的桥墩
	大气区	轻度盐雾区 离平均水位 15m 以上的海上大气区, 离涨潮岸线 100m 外至 300m 内的陆上室外环境	III-D	靠海的陆上室外构件 桥梁上部结构构件
		重度盐雾区 离平均水位上方 15m 以内的海上大气区, 离涨潮岸线 50m 内的陆上室外环境	III-E	靠海的陆上室外构件 桥梁上部结构构件
	潮汐区和浪溅区, 非炎热地区 ⁷		III-E	桥墩
	潮汐区和浪溅区, 南方炎热潮湿地区		III-F	桥墩
	土中区	非干湿交替	III-D ⁷	桩
干湿交替		III-E	地下结构中外侧接触地下水而内侧接触空气的混凝土衬砌结构	
IV 除冰盐等其他氯化物环(来自海水的除外)	较低氯离子浓度 ⁸ (反复冻融环境按 IV-D)		IV-C	与含有较低浓度氯盐的土体或水体接触的构件, 无干湿交替引起的浓度积累
	较高氯离子浓度		IV-D	受除冰盐直接喷射的构件竖向表面 与含有较高浓度氯盐的水体或土体接触的构件
	高氯离子浓度, 或干湿交替引起氯离子积累		IV-E	直接接触除冰盐的构件水平表面与含有高浓度氯盐的土体或水体接触的构件
V ₁ 土中及地表、地下水中的化学腐蚀环境(来自海水的除外)	(见表 3.1.3-2)			与含有腐蚀性化学介质如硫酸盐、镁盐、碳酸、氯化物等土体、地下水、地表水接触的结构构件
V ₂ 大气污染环境(来自海水的盐雾除外)	汽车或机车废气		V ₂ -C	受废气直射的结构构件, 处于有限封闭空间内受废气作用的车库或隧道构件
	酸雨 (酸雨 pH 值小于 4 时按 E 级)		V ₂ -D	遭酸雨频繁作用的构件
	盐碱地区含盐分的大气和雨水作用 (盐度很高的情况宜按 E 级, 较轻时可按 C 级)		V ₂ -D	盐碱地区的露天构件, 尤其是受淋雨的迎风构件
V ₃ 盐碱结晶环境	轻度盐结晶		V ₃ -E	与含盐土壤接触的电杆、墙、柱等露出于地面以上的“吸附区”
	重度盐结晶(大温差、频繁干湿交替)		V ₃ -F	

注: 1、表中的环境条件系指与混凝土表面接触的局部环境; 对钢筋则为混凝土保护层的表面环境, 但如构件的一侧表面接触空气而对侧表面接触水体或湿润土体, 则空气一侧的钢筋需按干湿交替环境考虑。

2、长期干燥的低湿度室内环境指室内相对湿度 RH 长期处于 60% 以下, 中、高湿度环境指相

对湿度的年平均值大于 60%。

3、氯盐指除冰盐或海水中氯盐。

4、冻融环境按当地最冷月平均气温划分为严寒地区、寒冷地区和微冻地区，其最冷月的平均气温 t 分别为 $t \leq -8^{\circ}\text{C}$ 、 $-8^{\circ}\text{C} < t < -3^{\circ}\text{C}$ 和 $-3^{\circ}\text{C} \leq t \leq 2.5^{\circ}\text{C}$ 。但在海洋环境，海水的冰冻应根据当地的实际调查确定。

5、高度饱水指冰冻前长期或频繁接触水或湿润土体，混凝土体内高度水饱和；中度饱和指冰冻前偶受雨水或潮湿，混凝土体内饱水程度不高。

6、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。

7、周边永久浸没于海水或地下水中的构件，其环境作用等级可按 III-C 考虑，但流动水流的情况除外。

8、地表或地下水中氯离子浓度 (mg/l) 的高、低区分为：低 100—500；较高 501—5000；高 >5000。如构件周边永久浸没水中不存在干湿交替或接触大气，可按环境作用等级 IV-C 考虑。

标 3.1.3 土中及地表、地下水中的化学腐蚀环境 (V₁) 及其作用等级

腐蚀作用等级	V ₁ -C	V ₁ -D	V ₁ -E
水中 SO ₄ ²⁻ mg/L	≥200, <1000	≥1000, <4000	≥4000, <10000
水中 SO ₄ ²⁻ mg/Kg	≥300, <1500	≥1500, <6000	≥6000, <15000
水中 Mg ²⁺ mg/L	≥300, <1000	≥1000, <3000	≥3000,
水的 PH 值	≥5.5, <6.5	≥4.5, <5.5	≥4.0, <4.5
水中 CO ₂ mg/L	≥15, <30	≥30, <60	≥60, <100

注：1、如构件处于弱透水土体（渗透系数小于 10^{-5}m/s 或 8.6m/d ）的地下水中，则土中和水中 Mg^{2+} 、 CO_2 及 pH 值的作用均可按表中所示的等级降低一级取用。

2、含氯盐的咸水中可不单独考虑镁离子的侵蚀作用。

3、土中 SO_4^{2-} 为土中水溶硫酸盐的硫酸根量。

4、硫酸盐作用等级或 CO_2 作用等级为 D 和 D 级以上的构件，如处于流动地下水中，应考虑在构件的混凝土表面设置防腐面层或涂层。

5、高压水头下可加重硫酸盐的化学腐蚀。

3.1.4 结构构件除受到碳化引起钢筋锈蚀的一般环境 (I) 作用外，还可能受到冻融环境 (II)、氯盐环境 (III 和 IV) 及其他化学物质等腐蚀环境 (V₁、V₂ 或 V₃) 的作用。当结构构件处于表 3.1.3-2 中两类或两类以上的环境类别时，应同时满足这些环境类别各自单独作用下的耐久性要求。

3.1.5 对于引气混凝土构件，在确定混凝土技术性能要求 (见表 4.0.2 和 4.0.3) 时可按表 3.1.3-1 和表 3.1.3-2 中的环境作用等级降低一个等级考虑。引气混凝土除用于冻融环境 (II) 外，还可用于并非遭受冻融侵蚀的氯盐环境 (III 和 IV) 及其他化学腐蚀环境 (V₁、V₂ 或 V₃) 中作用等级为 D 或 D 级以上的场合。

3.1.6 对于素混凝土结构，可仅考虑冻融环境、氯盐环境 (III 和 IV) 和化学腐蚀环境 (V₁、V₂ 或 V₃) 的作用。这些环境类别在不同环境条件下对素混凝土结构的作用等级，对于冻融环境 (II) 可取与配筋混凝土结构相同 (见表 3.1.3-1 和表 3.1.3-2)，对于化学腐蚀环境 (V₁、V₂ 或 V₃) 可比配筋混凝土结构降低一个等级取用，但不低于 C 级，对于氯盐环境 (III 和 IV) 可按 C 级。

3.1.7 房屋建筑的室内厨房、卫生间和地下室等频受潮湿和易结露的构件部位以及室外频受雨淋的阳台、外廊、女儿墙、雨罩、栏杆、地面等混凝土构件应按干湿交替的环境条件设计。冰冻地区的建筑物室外混

混凝土构件在受冻前可能接触雨水或其他水体的部位应按冻融环境设计。使用过程中可能接触到海水、盐雾、氯化物除冰盐、氯化物消毒剂等氯盐作用的建筑物构件,如滨海建筑物的外墙构件、滨海停车库的地板(或楼板)、喷洒或将来可能喷洒除冰盐地区的停车库地板(或楼板)、游泳馆中接触氯盐消毒剂的构件、海洋馆中接触海水的结构构件等,应按近海环境和除冰盐等其他氯化物环境设计。

桥梁构件的设计应考虑由于路面层、防水层和桥面伸缩缝等各种连接部位的渗漏所造成的局部环境作用,对于桥面板的顶面以及可能遭受来自伸缩缝处渗漏水作用的下部梁、柱(墩)表面,应按干湿交替的环境条件设计;桥梁中频受雨淋或与变动水位接触的构件也应按干湿交替的环境条件设计。上述的受湿部位在冻融地区尚需按冻融环境设计。桥面板的底面如有可靠的构造措施能够防止雨水或伸缩缝处渗漏水从构件的侧边滴入底面,则底部钢筋可按非干湿交替的露天环境条件设计。

冬季使用除冰盐地区(包括随着交通发展,将来不可避免会使用除冰盐来融化路面积雪的地区)的混凝土桥梁、道路和道路两旁的露天构件,必须考虑含除冰盐的融化雪水(雨水)和由车辆高速行驶引起盐雾的侵蚀作用,包括含盐的渗漏水自桥面流向下部梁、柱表面以及含盐雨水渗入土中对桥梁下部结构和基础的侵蚀作用。

沿海地区和盐碱地区的混凝土结构,必须考虑当地大气、地下水和土中可能存在腐蚀性化学物质的作用。这些地区的构件设计不应直接套用一般的标准图。

污水管道、厩舍、化粪池等受硫化氢气体或腐蚀性液体侵蚀的构件部位按其严重程度可比照环境作用等级 V_{r-E} 或 V_{r-D} 考虑,这些构件或部位如长期浸没于液体中可按 V_{r-C} 考虑。

3.1.8 除 3.1.3 条所列的环境类别可能引起钢筋锈蚀和混凝土腐蚀外,在长期潮湿和有水长期作用的环境下,混凝土结构的耐久性设计还必须高度重视混凝土发生碱-骨料反应,钙矾石延迟反应和软水对混凝土溶析破坏的可能性,并在设计施工中采取相应的对策。

3.2 结构的设计使用年限

3.2.1 结构的设计使用年限应是具有一定裕度或保证率的目标使用年限,并与结构使用的适用性极限状态相对应。设计使用年限必须由工程的业主与设计人员共同商定,并不低于政府主管部门规定的最低要求。

3.2.2 结构的设计使用年限可按表 3.2.2 的级别选取。特殊重要的纪念性或标志性结构物,其设计使用年限应大于 100 年;大城市中的高层建筑或大型建筑物,其结构的设计使用年限宜不小于 70 年;工矿建筑与构筑物的结构设计使用年限宜与生产的设计服务年限相应,某些工业厂房结构的设计使用年限因现代生产工艺的快速变更或根据实际需要可定为 30 年。

当结构的使用年限预期会因服务功能的快速变化(如桥梁通行能力的快速增长)而提前终结,或当环境特别严酷,采取较长的使用年限受到技术、经济上的制约时,则在主管部门和业主的同意下,可按较低的设计使用年限进行设计,但一般不宜低于 30 年。

本《指南》仅提出 100 年、50 年和 30 年三种设计使用年限下的具体设计要求,对于介于其中的不同设计使用年限下的要求,可以大体按照内插的方法处理。

表 3.2.2 结构的设计使用年限分级

级别	设计使用年限	名称	示例
一	不小于 100 年	重要建筑物	标志性、纪念性建筑物,大型公共建筑物如大型的博物馆、会议大厦和文体卫生建筑,政府的重要办公楼,大型电视塔等
		重要土木工程	大型桥梁,隧道,高速和一级公路上的桥涵,城市干线上的大型桥梁、大型立交桥,城市地铁轻轨系统等
二	不小于 50 年	一般建筑物和构筑物	一般民用建筑如公寓、住宅以及中小型商业和文体卫生建筑,大型工业建筑

		次要的土木设施工程	二级和二级以下公路以及城市一般道路上的桥涵
三	不小于 30 年	不需较长寿命的结构物 可替换的易损构件	某些工业厂房

3.2.3 结构的设计使用年限，通常应是结构使用过程中仅需常规维护(包括构件表面涂刷等)而不需进行大修的期限。

仅当现有的技术条件不能保证结构的所有构件(或部件)均能达到与结构设计使用年限相同的耐久性时，或从经济等角度考虑认为有必要时，则在业主认可的前提下，可在结构设计中规定结构的个别构件(或部件)需在结构的设计使用年限内进行规定次数(1~2次或更多)的大修或更换。

处于良好环境条件下的一般民用建筑物，在结构的设计使用年限内应按仅需常规维护进行设计。处于严重环境作用下的结构物，在结构的设计使用年限内，可对个别结构构件或部件(如桥梁拉索及支座件等)进行定期大修或更换。

需在设计使用年限内进行大修或更换的结构构件，应具有能够进行修补或更换的施工操作条件。需要修补或更换的构件，其使用年限可低于结构的整体设计使用年限。对于土中或水下缺乏修理条件的结构构件，其设计使用年限应与结构的整体设计使用年限相同。

3.3 设计基本要求

3.3.1 混凝土结构及其构件的耐久性，应根据不同的设计使用年限和不同的环境类别及其作用等级进行设计。同一结构中的不同构件或同一构件中的不同部位由于所处的局部环境条件有异，应予以分别对待。

结构的耐久性设计必须考虑施工质量控制与质量保证对结构耐久性的影响，必须考虑结构使用过程中的维修与检测要求。

3.3.2 混凝土结构耐久性设计的设计文件应列入以下内容：

1. 结构所处的环境类别及其环境作用等级。对于环境作用等级为D或D级以上的结构设计，除勘测资料外，应有结构周边既有结构工程耐久性现状的调查资料和必要的检测数据。
2. 结构的设计使用年限。应标明结构设计使用年限内需要大修或更换的结构构件或部件及其预期的修补期限或更换期限，列出结构各构件和部件的使用年限及维修周期的明细表。对结构耐久性有重要影响的构造措施(如桥面防水层、伸缩缝等)，其预期的使用年限也应在设计文件中一并列出。
3. 对施工单位(包括混凝土供应方)提出耐久混凝土的技术要求和施工质量的合格验收标准。
4. 对工程业主或工程的运营管理单位提出使用过程中需要进行正常维护、修理或更换的具体内容与要求。
5. 对于桥梁结构等基础设施工程，需对设计使用年限内的全寿命投资费用作出适当的论证与评估。

3.3.3 混凝土结构的耐久性设计至少应包括：

1. 耐久混凝土的技术要求(参见第4章)。

根据结构所处的不同环境类别、环境作用等级与结构的设计使用年限，确定混凝土材料耐久性的主要技术要求，包括：混凝土原材料的选用要求(水泥、矿物掺和料、骨料以及化学外加剂的品种与质量等)，混凝土的最低强度等级，最大水胶比和胶凝材料的最小用量，以及结构所处环境下所需的混凝土氯离子扩散系数、抗冻耐久性指数(或抗冻等级)等混凝土耐久性参数的具体指标以及引气等要求。

对于一般环境和无盐的冻融环境下的混凝土技术要求，在设计阶段可仅规定混凝土的最低强度等级与最大水胶比以及混凝土是否引气等要求，并标明在设计施工图和相应说明中。至于混凝土原材料的选用和混凝土具体配比等其他技术要求，可指定施工或混凝土供货单位依据设计方提出的环境作用等级与结构的设计使用年限，按照本《指南》规定的相关条文确定。设计采用的混凝土强度等级应满足构件耐久性的最低要求与构件强度的需要；当环境作用等级为C或C级以上时，构件所需的混凝土强度等级常取决于耐久性的要求(尤其是受弯构件)，应首先进行耐久性设计而后作荷载作用下的构件承载力与变形验算。

对于重要基础设施工程和氯盐及其他化学腐蚀环境下的工程，应在设计阶段与混凝土材料工程师合作

提出耐久混凝土的详细技术要求。

2. 与耐久性有关的结构构造措施（参见第5章）。

根据结构的环境作用等级与设计使用年限，确定钢筋的混凝土保护层厚度，提出防水排水构造与裂缝控制等措施。

3. 与耐久性有关的施工质量要求（参见第6章）。

重点为混凝土养护（温度、湿度控制与湿养护期限与方法）与保护层厚度的质量控制要求，并标明在结构施工图和相应说明中。

4. 结构使用阶段的维修与检测。

对于严重环境作用（D或D级以上）下的结构，应确定使用期内的定期维修（包括部件更换）与检测要求，并在设计中为从事这些维修与检测的活动设置必要的通道和施工、操作空间，预置埋设件和测试元件。

5. 防腐蚀附加措施。

以下场合应考虑采取防腐蚀附加措施：重大工程中环境作用等级为E或F的构件部位；因条件所限不能满足规定保护层厚度或规定养护时间的结构部位；受氯盐和硫酸盐极端严重作用的结构部位。

常用的防腐蚀附加措施有：在混凝土表面涂刷或覆盖防护材料，在混凝土组成中加入阻锈剂或水溶性聚合物乳液，局部选用环氧涂层钢筋，在混凝土浇筑成型中采用带透水衬里的模板，直至采用阴极保护等措施。防腐新材料和新工艺的使用，需通过专门的论证。

6. 对于可能遭受氯盐引起钢筋锈蚀的重要混凝土工程，宜根据具体环境条件和材料劣化模型，进行结构使用年限的验算。

不同设计使用年限的结构物，在不同环境作用等级下需要进行耐久性设计的具体内容大体如表 3.3.3 所示。

表3.3.3 不同设计使用年限级别的结构物在不同环境作用等级下的耐久性设计内容

耐久性设计内容 使用年限级别 环境作用等级	混凝土材料			结构构造和裂缝控制			施工要求			使用阶段定期检测			防腐蚀附加措施		
	一	二	三	一	二	三	一	二	三	一	二	三	一	二	三
A	●			●			●								
B	●	●		●	●		●	●		▲					
C	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	▲				
D	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	▲	▲		
E	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	▲	▲	▲
F	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	▲	▲

注：1、混凝土材料、结构构造和施工要求需同时满足本指南提出的最低要求；

2、表中符号意义：●需要 ▲ 可能需要

3.3.4 提高混凝土结构耐久性的一般设计原则如下：

1. 采用的结构类型、结构布置和结构构造应尽可能有利于阻挡或减轻环境对结构的侵蚀作用，便于施工并有利于保证施工质量，便于工程今后使用过程中的检查和维修。

2. 提高混凝土材料本身的耐久性。采用低水胶比混凝土，尽可能减少用水量并正确使用矿物掺和料，明确耐久混凝土的施工要求，保证混凝土有良好的匀质性、工作性和抗裂性。

3. 增加钢筋的混凝土保护层厚度。

4. 注重防、排水和连接缝等构造措施，尽可能避免水和氯盐等有害物质接触或渗漏到混凝土表面，尽可能防止混凝土在使用过程中遭受干湿交替。

5. 对于环境作用等级为E或E级以上的重要工程，以及易遭锈断、失效后果严重的预应力钢绞线和高强

拉索等构件，在其耐久性设计中应采取多重防护对策，即综合采用多种防护措施，可以多种防护措施平行地起作用（如在提高耐久混凝土性质量和保护层厚度的基础上，同时采用阻锈剂或环氧涂层钢筋），或在一种措施在使用过程中失效后启动另一种措施（如结构中的钢筋发生锈蚀后启动阴极保护）。

6. 在确定钢筋的混凝土保护层厚度和耐久混凝土的技术要求时，不考虑普通建筑饰面（抹灰、面漆、面砖等）和防水层等构造对混凝土结构的有限防护作用。对于结构施工建造中主要起临时承载作用且不具足够耐久性的部件（如隧道的喷混凝土初衬支护，其混凝土的性能和锚杆、钢筋网、钢棚架的保护层均难以满足严重环境作用下的耐久性要求），在结构的承载力设计中不应考虑其贡献。

3.3.5 同一结构中宜使用相同材质的钢筋以降低钢材的电化学锈蚀速度。对非预应力钢筋，宜在设计中统一选用新三级钢筋HRB400。混凝土中不同金属埋件之间（包括镀锌钢材与普通钢材之间）均不得有导电的连接。

3.3.6 在C级及C级以上的环境等级下采用预应力混凝土时，需对预应力体系（预应力筋、锚具和孔道管等）的使用年限作出专门评估，要求生产厂家提供相关的资料和说明。同时，应对灌浆材料、施工工艺及质量检验标准提出具体要求。

预应力混凝土体系的施工必须由具有专门资质的专业机构完。

3.3.7 混凝土结构的耐久性设计，需考虑到混凝土构件开始暴露于环境作用时的不同龄期对耐久性的影响。应尽量设法延迟新浇混凝土开始与海水、氯盐等接触或开始遭受冰冻的时间。在海洋环境下宜尽量采用预制构件；在冰冻地区宜尽早开工，至少应在冰冻季节到来前一月完成施工。

3.3.8 当结构所处的环境作用等级为E或E级以上时，应在设计中提出必须电行节向需用年限内的定期检测要求。第一次检测需在结构竣工使用后的3-5年内进行，并根据测试结果对结构的耐久性做出评估。除目测外，检测的重点在于确定表层混凝土的劣化现状，如混凝土的碳化深度，混凝土表层内不同深度处的氯离子浓度分布，钢筋的锈蚀或锈蚀倾向等。以后的定期检测间隔视劣化速度而定。

对于重要工程，应在设计阶段作出结构使用期内检测的详细规划，在工程现场设置专供检测取样用的构件，后者在尺寸、材料、配筋、成型、养护以及暴露环境条件上，应能代表实际的结构构件，必要时还可在结构构件有代表性的部位上埋置传感元件以监测钢筋锈蚀的发展。

3.3.9 结构使用年限的验算以及使用阶段的检测规划可委托专业的研究、咨询机构完成并通过论证。

4、混凝土材料

4.0.1 配制耐久混凝土的一般原则如下：

1. 选用质量稳定、低水化热和含碱量偏低的水泥，尽可能避免使用早强水泥和 C_3A 含量偏高的水泥；
2. 选用坚固耐久、级配合格、粒形良好的洁净骨料；
3. 使用优质粉煤灰、矿渣等矿物掺和料或复合矿物掺和料；一般情况下，矿物掺和料应作为耐久混凝土的必需组分；
4. 使用优质引气剂，将适量引气作为配制耐久混凝土的常规手段；
5. 尽量降低拌和水用量，采用高效减水剂；
6. 高度重视骨料级配与粗骨料粒形要求；
7. 限制每立方米混凝土中胶凝材料的最低和最高用量，尽可能减少胶凝材料中的硅酸盐水泥用量。

4.0.2 不同环境作用等级和不同使用年限的钢筋混凝土结构与预应力混凝土结构，其混凝土的最低强度等级、最大水胶比和每立方米混凝土胶凝材料最低用量宜满足表 4.0.2 的规定，且所用的胶凝材料（水泥与矿物掺和料）种类与用量范围需根据不同的环境类别符合 4.0.3 条的要求。

表 4.0.2 混凝土最低强度等级、最大水胶比和胶凝材料最小用量(kg/m^3)

设计使用年限 环境作用等级	100 年	50 年	30 年
A	C30, 0.55, 280	C25, 0.60, 260	C25, 0.65, 240
B	C35, 0.50, 300	C30, 0.55, 280	C30, 0.60, 260
C	C40, 0.45, 320	C35, 0.50, 300	C35, 0.50, 300
D	C45, 0.40, 340	C40, 0.45, 320	C40, 0.45, 320
E	C50, 0.36, 360	C45, 0.40, 340	C45, 0.40, 340
F	C55, 0.33, 380	C50, 0.36, 360	C50, 0.36, 360

注：1、对于氯盐环境（III D 和 IV D），这一混凝土最大水胶比 0.45 宜降为 0.40。

2、引气混凝土的最低强度等级与最大水胶比可按降低一个环境作用等级采用。

3、不同的环境类别下的混凝土性能与胶凝材料尚需符合 4.0.5 至 4.0.15 条的要求。

4、表中胶凝材料最小用量与骨料最大粒径约为 20mm 的混凝土相对应，当最大粒径较小或较大时需适当增减胶凝材料用量

5、对于冻融和化学腐蚀环境下的薄壁构件，其水胶比宜适当低于表中对应的数值。

4.0.3 不同环境类别和环境条件（或作用等级）下的混凝土，其胶凝材料的适用品种与用量如表 4.0.3 所示。

4.0.2 条中所指的水胶比与最小胶凝材料用量，需按表 4.0.3 限定范围内的胶凝材料计算。

表 4.0.3 不同环境作用下混凝土胶凝材料品种与矿物掺和料用量的限定范围

环境分类	环境作用等级 (环境条件)	水泥适用品种	矿物掺和料的限定范围 (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, $f_{0.3+s}/0.5 \leq 1$ W/B=0.55 时, $f_{0.2+s}/0.3 \leq 1$	对于保护层最小厚度 $\leq 20\text{mm}$ 或 W/B > 0.5 的构件混凝土, 不宜采用 SP, FP, CP 水泥
	I-B(长期湿润或水中)	PO, PI, PII, SP, FP, CP	$f_{0.5+s}/0.7 \leq 1$	
	I-B(非干潮交替的室内潮湿环境和露天环境)	PO, PI, PII, SP, FP, CP	W/B=0.4 时, $f_{0.3+s}/0.5 \leq 1$ W/B=0.5 时, $f_{0.2+s}/0.3 \leq 1$ W/B=0.55 时, $f_{0.15+s}/0.25 \leq 1$	保护层最小厚度 $\leq 25\text{mm}$ 或 W/B > 0.5 的构件混凝土, 不建议采用 SP, FP, CP 水泥
	I-C (干潮交替)	PO, PI, PII		
II	II-C, II-D (一般动融, 无盐)	PO, PI, PII	$f_{0.3+s}/0.4 \leq 1$	一般动融下如不引气, 矿物掺和料量不超过 20%
	II-D, II-E (盐冻)	PO, PI, PII		
III	III-D, III-E, III-F	PO, PI, PII	用量不小于: $f_{0.25+s}/0.4=1$	当 $0.5 \geq W/B > 0.4$ 时, 需同时满足 I 类环境下要求; 如同时处于动融环境, 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	PO, PI, PII	用量不大于: $f_{0.5+s}/0.8=1$	
V ₁	V ₁ -C, V ₁ -D, V ₁ -E	PO, PI, PII SR, HSR		当 $0.5 \geq W/B > 0.4$ 时, 矿物掺和料用量的上限尚应满足 I 类环境要求; 如同时处于动融环境, 掺和料用量的上限尚应满足 II 类环境要求
V ₂	V ₂ -C, V ₂ -D, V ₂ -E	PO, PI, PII	作用等级 D、E 时, 掺和料的用量同限制 III 类环境	
V ₃	V ₃ -E, V ₃ -F	PO, PI, PII SR, HSR	见 4.0.15 条	

注: 1、表中水泥符号: PI—硅酸盐水泥, PII—掺混合材料料 $\geq 5\%$ 的硅酸盐水泥, PO—掺混合材料料 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外加的活性矿物掺和料与水泥生产时加入的粉煤灰、矿渣、火山灰等活性混合材料料的总量。符号: C—水泥, S—矿渣, F—粉煤灰或火山灰, SF—硅灰, 均用重量表示, 表中公式内的 s 和 f 分别表示矿渣 S 和粉煤灰 (或火山灰) F 占胶凝材料总量的比值。

计算水胶比 W/B 的胶凝材料总量为: $B = C + S + F + SF$, 其中 C 对 PI 和 PII 水泥按全量取用, 对 PO 水泥按全量扣除混合材料后取用, 其中的活性混合材料则列入矿渣、粉煤灰和火山灰中 (如生产厂家不能提供数据, 则取 C 为 85% 水泥重, 活性混合材料按 10% 水泥重的 F 计算)。对其他混合水泥, 计算方法同 PO 水泥 (如生产厂家不能提供数据, 则不宜采用)。

3、表中未列入的其他符合国家标准或行业标准的水泥 (如硫铝酸盐水泥和铁铝酸盐水泥, 适用于非高温地区) 也可考虑使用。其他的活性矿物掺和料 (如烧高岭土粉、磷渣粉、沸石岩粉等) 如经类比试验, 能证明满足所要求的混凝土强度与耐久性, 并经工程试点和鉴定的也可作为限定范围内的胶凝材料用来确

定表 4.0.2 中的水胶比和最小胶凝材料用量。

4、氯盐环境下如不能满足矿物掺和料的最低用量要求，就有需要降低表 4.0.2 中最大水胶比或增加表 5.0.8 中的保护层最小厚度。

5、化学腐蚀环境下对矿物掺和料的最低用量要求，尚与水泥的 C_3A 等含量有关，见 4.0.13 条。

4.0.4 单方混凝土中的水泥与矿物掺和料总量(包括非活性矿物掺和料)对 C30 混凝土不宜大于 400 kg/m^3 ，C40-C50 混凝土不宜大于 450 kg/m^3 ，C60 及以上等级混凝土不宜大于 500 kg/m^3 。

对于大掺量矿物掺和料混凝土(2.1.19 条)，其水胶比不宜大于 0.42，并应随掺量的增加而降低。大掺量矿物掺和料混凝土的施工养护必须符合 6.2.10 和 6.2.11 条的专门要求。

用于环境作用等级为 E 或 F 的混凝土，其拌和水用量不宜高于 150 kg/m^3 。

4.0.5 对耐久性有较高要求的混凝土结构，需在正式施工前的混凝土试配工作中，进行混凝土和胶凝材料抗裂性能的对比试验，并从中优选抗裂性能良好的混凝土原材料和配比。抗裂性能的对比试验可采用约束状态下的环形试件或板式试件(附录 A)。

4.0.6 碳化引起钢筋锈蚀的一般环境下(I类环境，无冻融、氯化物和其他化学腐蚀)，除长期处于水中环境或湿润土中环境的构件可以采用大掺量粉煤灰(掺量可不大于 50%，而水胶比应随掺量增加而减小)混凝土外，对暴露于空气中的一般构件混凝土，粉煤灰和矿渣掺量的限制见表 4.0.3，且单方混凝土胶凝材料中的硅酸盐熟料用量不宜小于 240 kg 。

4.0.7 冻融环境(H类环境)下的混凝土宜采用引气，引气混凝土的最低强度等级和最大水胶比，可按表 3.1.3-1 确定的环境作用等级降低一个等级从表 4.0.2 中取用。对于冻融环境下作用等级为 C 的混凝土可不引气，但此时的混凝土最低强度等级应不低于 C40。冻融环境下作用等级为 D 或在除冰盐环境下，应采用引气混凝土。冻融环境下粉煤灰和矿渣掺量的限制见表 4.0.3，粉煤灰用于引气混凝土时的含碳量宜不大于 2%。

4.0.8 冻融环境下的引气混凝土，其含气量与气泡间距系数应符合表 4.0.8 的要求。

表 4.0.8 混凝土含气量(平均值，%)

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	7.0	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

注：1、高度饱水指冰冻前长期或频繁接触水或湿润土体，混凝土体内高度水饱和；中度饱和指冰冻前偶受雨水或潮湿，混凝土体内饱水程度不高。

2、气泡间距系数(平均值)在高度饱水、中度饱水和盐冻条件下宜不大于 250、300 和 200 m。气泡间距系数为从现场或模拟现场的硬化混凝土中取样或取芯测得的数值。测定方法可参照有关标准。

3、表中含气量为从现场新拌混凝土中取样测得的数值，允许绝对误差士为 1.5%，但不小于 4%。

4、在实验室条件下进行新拌混凝土试样的含气量测试时，无论混凝土的坍落度大小，测试前均应在标准振动台上振动，时间不少于 15-30sec(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和适用性。

4.0.9 混凝土的抗冻性(抗冻耐久性指数)应不低于表 4.0.9 所示的数值。对于厚度小于 150mm 的薄壁构件，表中的 D_f 值需再增加 5%

表 4.0.9 混凝土抗冻性的耐久性指数¹ DF (%)

使用年限级别	一			二			三		
	高度 ² 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 ³	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、耐久性指数 DF 为 300 次快速冻融循环后的动弹模量与初始值的比值。如在 300 次循环以前，试件的动弹模已降到初始值的 60%以下或重量损失已超过 5%则以此时的循环次数 N 计算 DF 值，并取 $DF = (N/300) \times 0.6$ 。快速冻融循环试验的方法可参照水工混凝土试验标准，试件自现场或模拟现场混凝土构件中取样，如在实验室制作，试件养护温度及试验龄期需按实际工程情况选定。对海水或化学腐蚀下冻融环境，试验时用于浸泡试件的水需用海水或含化学物质，其浓度取与实际工程环境中相同。

- 2、高度饱水指冰冻前长期或频繁接触水或湿润土体，混凝土体内高度水饱和；中度饱和指冰冻前偶受雨水或潮湿，混凝土体内饱水程度不高；盐冻指接触海水、除冰盐或其他化学腐蚀物质下的冻融情况。
- 3、严寒、寒冷和微冻地区按其最冷月的平均气温 t 分别为 $t \leq -8^\circ\text{C}$ ， $-8^\circ\text{C} < t < -3^\circ\text{C}$ 和 $-3^\circ\text{C} \leq t \leq 2.5^\circ\text{C}$ 划分。

4.0.10 氯盐环境(III和IV类环境)下的配筋混凝土应采用大掺量或较大掺量矿物掺和料的低水胶比混凝土，单掺粉煤灰的掺量不宜小于30%，单掺磨细矿渣的掺量不宜小于50%，且宜复合使用粉煤灰加硅灰、粉煤灰加矿渣或两种以上的矿物掺和料；对于环境作用等级为E或E级以上以及当大掺量矿物掺和料的用量很高时，可加入少量的硅灰（掺量5%左右）。

海水环境下的混凝土不宜采用抗硫酸盐硅酸盐水泥。

4.0.11 氯盐环境下应严格限制原材料（水泥、矿物掺和料、骨料、外加剂和拌和水等）引入混凝土中的氯离子量，各种原材料中的氯离子量应尽可能低。新拌混凝土硬化后，实测混凝土中的水溶氯离子含量对于钢筋混凝土不应超过胶凝材料重的 0.1%，对于预应力混凝土不应超过胶凝材料重的0.06%。

4.0.12 氯盐环境下重要的配筋混凝土工程，宜在设计中提出混凝土抗氯离子侵入性的指标，作为混凝土耐久性质量的一种控制标准。这一指标可用附录B-1介绍的非稳态氯离子快速电迁移试验方法测得的氯离子扩散系数 D_{RCM} 值表示，或用ASTM-1202 快速试验方法测得的电量表示，并宜符合表4.0.12 所示的要求。混凝土抗氯离子侵入性的指标也可用附录B-2介绍的快速试验方法测得的扩散系数 D_{NEL} 表示，或采用实验室内快速自然扩散法测得的氯离子扩散系数 D_p （见2.2.6条）表示。

表 4.0.12 混凝土抗氯离子侵入性指标

使用年限级别	100 年			50 年		
	作用等级			作用等级		
抗侵入性 指标	D	E	F	D	E	F
电量指标（56 天龄期） 库仑	<1200	<800	<800	<1500	<1000	<800
氯离子扩散系数 D_{RCM} (28 天龄期) $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$	<8	<5	<4	<10	<7	<5

注：1.表中的混凝土抗氯离子侵入性指标大体与表 5.0.8 的钢筋保护层厚度相应，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.表中中 D_{RCM} 值，仅适用于较大或大掺量矿物掺和料混凝土；对于胶凝材料中主要成分为硅酸盐水泥熟料的混凝土，可能需要更低的数值。

4.0.13 硫酸盐等化学腐蚀环境（V₁类环境）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。当环境作用等级为C和D时，水泥中的C₃A含量应分别低于8%和5%，否则应外加矿物掺和料（但此时的水泥C₃A含量仍分别不宜大于10%和8%）；当环境作用等级为E时，水泥中的C₃A含量应低于5%，并应同时外掺矿物掺和料。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级以上时，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。

4.0.14 在硫酸盐浓度大于1500mg/L的流动地下水中，或流动地下水中CO₂浓度大于50mg/L时，混凝土表面应考虑设置防腐层，或较大幅度降低水胶比。

4.0.15 引气混凝土用于不受冻融侵蚀的氯盐环境和其他化学腐蚀环境时，其含气量及耐久性指数D_F值应满足表4.0.8和4.0.9中相当于中度饱水冻融环境条件下的要求。

5、构造措施和裂缝宽度限制

5.0.1 保证混凝土结构耐久性的必要构造措施包括：

1. 隔绝或减轻环境因素对混凝土的作用；
2. 控制混凝土裂缝；
3. 为钢筋提供足够厚度的混凝土保护层。

5.0.2 结构的形状、布置和构造应有利于避免水、水汽和有害物质在混凝土表面的积聚，便于施工时混凝土的捣固和养护，并减轻荷载作用（或强制变形）下产生的应力集中与约束应力。

处于严重环境作用（D或D级以上）下的结构构件，其外形应力求简单，尽量减少暴露的表面积和棱角，后者在可能条件下宜做成圆角。

5.0.3 结构的施工缝与各种连接缝的位置与结构构造应仔细设计，以利于混凝土的裂缝控制和防止水、盐等有害物质的渗入。施工缝与各种连接缝的位置应尽量避免可能遭受最不利局部环境作用下的部位（如桥墩中的浪溅区和水位变动区，墙柱靠近地表的干湿交替区等）。

应尽可能减少伸缩缝的数量并改善其密闭性，并从构造上采取措施避免从竖向伸缩缝中渗漏的水滴向构件底面或落在下部结构构件表面上积聚。近海或除冰盐等氯盐环境下的伸缩缝部位及其附近混凝土宜采取防腐蚀附加措施。

5.0.4 混凝土结构及其构件的表面形状应有利于排水，对于可能受雨淋或积水的构件顶面应做成斜面。遭受氯盐（来自海水、除冰盐、大气盐雾、消毒剂等）侵蚀的混凝土桥面和车库楼面，应加大地面排水坡度（2%），并应考虑到结构发生挠度或施加预应力引起反拱对地面排水的影响。

桥梁墩台的顶面应做成向边缘倾斜不小于5%的斜坡，或向中心处倾斜（当受雨面积甚大、设置内埋的排水管时）。

桥面、车库楼面的排水应通过专门设置的管道排出，不得将水直接排在构件的混凝土表面上。排水管的出口应离开混凝土墩柱或其他构件表面一定距离。

5.0.5 受雨淋的室外构件侧边，宜设滴水槽或类似装置，防止雨水从侧面流向构件底面。处于冻融、酸雨、盐雾或除冰盐环境下的桥梁结构，在其可能遭受雨淋的外侧构件上必须设置滴水槽等装置，所有排水管道（非钢质的塑料管）的出口必须远离混凝土结构构件表面。

5.0.6 在混凝土构件与上覆的露天面层（如混凝土桥面板与路面层，混凝土屋面板与屋面层）之间应设置可靠的防水层。除冰盐环境下的防水层应选择高性能的防水材料。

可能遭受高浓度除冰盐和氯盐严重侵蚀的配筋混凝土表面和部位，可采取浸涂或覆盖防腐材料，在混凝土中加入阻锈剂，或局部采用环氧涂层钢筋等防腐蚀附加措施；对于重要的结构物，还可考虑在钢筋发展锈蚀以后启动阴极保护措施，并在设计和施工中预先设置为将来实施阴极保护的必要条件。

5.0.7 对于可能在高度饱水下遭受冻蚀，或受流动地下水中较高浓度硫酸盐或碳酸严重侵蚀的混凝土薄壁构件，应考虑暴露面上混凝土的可能剥蚀对构件承载力的损害，在设计时需适当增加构件厚度或混凝土保护层厚度作为补偿厚度，或同时采取防腐蚀附加措施。

5.0.8 用于构件强度计算和标注于施工图上的钢筋（包括主筋、箍筋和分布筋）保护层名义厚度 c （钢筋外缘至混凝土表面的距离），不应小于表5.0.8中的保护层最小厚度 c_{min} 与保护层厚度施工负允差之和，即：

$$c \geq c_{min} +$$

式中的施工允差，对现浇混凝土构件一般可取10mm（构件较薄时可稍低），对工厂生产的预制构件可取0~5mm，视钢筋施工的定位工艺和质量保证的可靠程度而定，必要时应取更大的数值。

5.0.9 处于C级和C级以上环境作用下的结构构件，其最外层主筋、箍筋或分布筋的保护层厚度必须计入施工负允差并满足上式的要求；仅当混凝土的强度等级或水胶比明显优于4.0.2条中的最低要求（见表5.0.8的注1），或者在满足4.0.2和4.0.3条最低要求的基础上同时采取防腐蚀附加措施时，混凝土保护层最小厚度 c_{min} 才可低于表5.0.8中的规定。

环境作用等级为A和B的房屋建筑物结构构件，可适当考虑混凝土饰面或环境作用较轻等因素对混凝土构件耐久性的有利影响，在设计中取用较小的值，并在设计文件中降低对保护层厚度施工合格验收的标准（见6.3.2条）。

钢筋的混凝土保护层最小厚度 c_{min} ，尚应满足有关规范作出的为保证钢筋耐火以及本《指南》中规定的不同环境作用等级下与混凝土骨料最大粒径相匹配的最低要求。

表5.0.8 混凝土保护层最小厚度 c_{min} (mm)

环境作用等级		A	B	C	D	E	F
板、墙等面形构件	设计使用年限 30 年	15	15	25	35	40	45
	设计使用年限 50 年	15	20	30	40	45	50
	设计使用年限 100 年	20	30	40	45	50	55
梁、柱等条形构件	设计使用年限 30 年	20	25	30	40	45	50
	设计使用年限 50 年	25	30	35	45	50	55
	设计使用年限 100 年	30	35	45	50	55	60

注：1、表中根据耐久性需要的混凝土保护层最小厚度，其混凝土的强度等级、水胶比与胶凝材料的选用范围需符合4.0.2和4.0.3条的要求。如实际采用的混凝土水胶比低于表4.0.2中的最大水胶比一个级差，且水胶比不大于0.45，或实际采用的混凝土强度等级高于表4.0.2中10MPa以上，则保护层的最小厚度可比上表中的数值适当减小，但两者的差值一般不宜超过5mm。

2、表中的保护层最小厚度值如小于所保护钢筋的直径，则取 c_{min} 与钢筋直径相同。

3、对于一般冻融（无盐）环境下的引气混凝土，混凝土保护层的最小厚度可按表3.1.3l中的环境作用等级降低一级后按上表选用。

4、直接接触土体浇筑的混凝土保护层厚度应不小于70mm。

5、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应适量增加10~20mm。对于风砂等特殊磨蚀环境下的构件保护层厚度应通过专门研究确定。

5.0.10 预应力钢筋的混凝土保护层厚度，一般不应小于预应力钢筋保护层最小厚度 c_{min} 与保护层厚度施工负公差之和。对于具有防腐连续密封护套（或防腐连续密封孔道管）的后张预应力钢筋，保护层厚度为护套或孔道管外缘至混凝土表面的距离，此时的保护层最小厚度 c_{min} 可取与普通钢筋的相同（表5.0.8），但 c_{min} 不应小于孔道管直径的1/2或护套直径。对于没有防腐连续密封护套（或孔道管）的预应力钢筋，或虽有护套（或孔道管）但不具防腐和密封功能时，其保护层最小厚度 c_{min} 应比表5.0.8中普通钢筋的保护层最小厚度增加10mm。预应力钢筋保护层厚度的施工负公差，可取与普通钢筋的相同。

5.0.11 钢筋混凝土构件在荷载作用下的表面横向裂缝宽度计算值应不超过表5.0.11中的限值。当按《混凝土结构设计规范》GB50010-2002的公式计算裂缝宽度时，如对裂缝的表面宽度并无外观上的特殊要求，则当保护层实际厚度超过30mm时，可将厚度取为30mm代入计算式，用来确定表面横向裂缝宽度的计算值。

表5.0.11 表面裂缝计算宽度的允许值

环境作用等级	钢筋混凝土 (mm)	有粘结预应力混凝土 (mm)
A	0.4	0.2
B	0.3	0.2 (0.15) ¹
C	0.20	0.1
D	0.20	按二级裂缝控制或按部分预应力A类构件控制
E	0.15	按一级裂缝控制或按全预应力类构件控制
F	0.10	按一级裂缝控制或按全预应力类构件控制

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

2、二级或一级裂缝控制与GB50010-2002混凝土结构设计规范的设计方法相应，部分预应力A类构件或全预应力构件与JTG D62-2004公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范的设计方法相应。

3、II类（冻融）环境下采用引气混凝土时的环境作用等级可按表3.1.3-1所示的降低一个等级来确定

表面裂缝计算宽度的允许值。

4、有自防水要求的混凝土构件强度等级不应低 C35，其横向弯曲的表面裂缝计算宽度不超过 0.15 mm。

5.0.12 环境作用等级为C或C级以上的配筋混凝土板、墙类构件应双面、双向通长配筋，不应取消板的受压区构造配筋。梁的两个侧面应设有间距不大于200mm的腰筋。

5.0.13 一侧接触水、土并要求结构自防水的混凝土墙、板构件，或需严格控制裂缝宽度的板式构件，其每侧暴露面上的分布钢筋配筋率(单位长度内一侧分布钢筋面积 mm^2/mm 与 $0.5h$ 之比，其中 h 为构件厚度(mm)，当 h 大于500mm 时按500mm 计算)不宜低于0.6%(用 I 级钢筋时)、0.5%(II 级钢筋)和0.4%(III 级钢筋)，分布钢筋间距不宜大于150mm。

5.0.14 对于可能处于严重锈蚀环境下的构件，浇筑在混凝土中并部分暴露在外的吊环、紧固件、连接件等铁件应与混凝土中的钢筋隔离，并应采取相应的措施，以消除这类铁件的可能锈蚀对构件承载力的影响。

5.0.15 当构件处于可能遭受严重锈蚀的环境时，受力钢筋的最小直径应不小于16mm。处于B或B级以上环境作用等级中的预应力混凝土结构，不应采用细钢丝或冷加工钢筋作为预应力筋（有密封护套或孔道管的除外）。

5.0.16 当环境作用等级为C或C级以上（对无粘结预应力钢筋为B或B级以上）时，应采用有防腐连续密封护套（或孔道管）的后张预应力体系。置有预应力筋的孔道管或护套应灌注水泥浆体、砂浆、油脂或其他防护材料。对于有粘结后张预应力体系，其孔道管不宜采用无密封功能的金属螺旋管，应采用有良好密封和防腐性能的高密度聚乙烯或聚丙烯波形管，管壁的厚度应不小于2mm，并宜采用真空压浆灌浆工艺。孔道管与端部防腐连接套管之间的连接也应保持密封。对于严重环境作用（D 级或 D级以上）下的有粘结后张预应力体系，宜采用多道防护措施，如同时采用环氧涂层预应力筋（绞线），或在灌浆材料中加入阻锈剂等。

5.0.17 后张有粘结预应力体系的端部锚固，应采用无收缩高性能细石混凝土封端，其强度等级在各种环境条件下均应高于构件本体混凝土的强度等级，水胶比也不低于本体混凝土并不大于0.4，并需对新老混凝土的连接界面进行防水处理。在氯盐等严重环境作用下，封端混凝土中宜外加阻锈剂或采用水泥基聚合物混凝土，并对预应力锚头外覆塑料密封罩。封端混凝土的保护层厚度一般不小于50mm，在盐类腐蚀环境下不小于80mm。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。

5.0.18 处于C或C级以上环境作用等级的预应力混凝土结构宜尽可能采用整体结构，当采用节段拼装式结构或用预应力筋连接相邻的构件成为整体时，应在拼缝处设置多道防护措施保证预应力筋的密封防锈。后张预应力混凝土结构还应避免施加过大的预应力度，防止在锚头附近出现裂缝，或因预拉区开裂而降低结构耐久性。

5.0.19 预应力混凝土结构体系应在结构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，即结构内的个别预应力筋如因锈蚀脆断而造成的局部破坏不致引起大范围的破坏倒塌。

5.0.20 如限于技术条件不能确保后张有粘结预应力体系在严重环境作用下的很长设计使用年限时（如100年或更长），可考虑采用使用期限内能定期检查并能定期更换预应力筋的后张无粘结预应力体系或体外预应力体系。有关预应力体系耐久性要求的更多说明，可参见本《指南》的附录 D。

6、施工要求

6.1 混凝土原材料选择

6.1.1 配制耐久混凝土的硅酸盐类水泥一般应为品质稳定的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥，其强度等级宜为 42.5。硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥宜与矿物掺和料一起使用。对于严重环境作用（D 级或 D 级以上）下的混凝土，宜采用硅酸盐水泥与大掺量矿物掺和料一起配制或采用专用水泥。如使用含有矿物混合材料的水泥（如普通硅酸盐水泥和矿渣水泥），则应了解水泥中的矿物混合材料品种、质量和掺量，与配制混凝土时加入的矿物掺和料一起计算混凝土中所有混合、掺和料占胶凝材料总量的份额百分比。

6.1.2 不同环境类别及其作用等级下的胶凝材料适用品种与用量范围需符合 4.0.3 和 4.0.2 条的限定。

6.1.3 为改善混凝土的体积稳定性和抗裂性，硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥的细度（比表面积）不宜超过 $350\text{m}^2/\text{kg}$ ， C_3A 含量不宜超过 8%（海水中 10%），游离氧化钙不超过 1.5%。大体积混凝土宜采用 C_2S 含量相对较高的水泥。硫铝酸盐和铁铝酸盐水泥的抗化学腐蚀能力要高于硅酸盐水泥，除气温较高的地区外，也可针对具体环境特点选用。

为改善混凝土的抗裂性，水泥的含碱量（按 Na_2O 当量计）不宜超过 0.6%，否则应满足混凝土内的总含碱量（包括所有原材料）不超过 $3.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的要求。矿物掺和料中的碱含量应以其中的可溶性碱计算，按试样中碱的溶出量试验确定（当元检测条件时，可暂考虑粉煤灰中的可溶性碱约为总碱量的 1/6，矿渣的约为 1/2）。

6.1.4 配制耐久混凝土所用的矿物掺和料可为粉煤灰、磨细高炉水浮矿渣、硅灰、沸石岩粉、石灰石粉、天然火山灰等材料。掺和料必须品质稳定、来料均匀、来源固定。掺和料的掺量应根据设计对混凝土各龄期强度、混凝土的工作性和耐久性以及施工条件和工程特点（如环境气温、混凝土拌和物温度、构件尺寸等）而定。矿物掺和料中应不含放射性物质、可溶性（包括可升华而释放的）有毒物质或对混凝土性质有害的物质，并应有相应的检验证明和生产厂家出具的产品检验合格证书。监理工程师对产品质量有怀疑时，应对其质量进行复查。

1. 粉煤灰

混凝土的粉煤灰掺和料应来自燃煤工艺先进的电厂。粉煤灰的烧失量应尽可能低（不宜大于 5%，对预应力混凝土和引气混凝土小于 3%）；三氧化硫含量 $\leq 3\%$ ；需水量比宜不大于 105%。混凝土中的粉煤灰掺量应不少于胶凝材料总量的 20%，当掺量达 30% 以上时，水胶比不宜大于 0.42，并应随粉煤灰掺量的增加而减小，优质粉煤灰的最大掺量可到胶凝材料总量的 50% 甚至更多。

粉煤灰作为掺和料用于引气混凝土时，应严格限制其烧失量，不宜超过 2%。

2. 磨细矿渣

磨细高炉矿渣的比表面积不宜小于 $350\text{m}^2/\text{kg}$ ，但过高细度的磨细矿渣有时也不利于控制混凝土水化热和防裂。对于硫酸盐腐蚀环境，特别是高温下的硫酸盐腐蚀环境和海水环境，宜将大掺量矿渣作为胶凝材料的必需组分，矿渣的最大掺量在低水胶比的混凝土中可达胶凝料总量的 90%；但对冻融部位的混凝土，矿渣的最大掺量不宜超过 50%。作为掺和料的矿渣需水量比不宜大于 105%，烧失量不大于 1%。

3. 硅灰

硅灰中的二氧化硅含量不应小于 85%，比表面积（ BET-N_2 吸附法）不小于 $15000\text{m}^2/\text{kg}$ 。硅灰掺量一般不超过胶凝材料总量的 8%。硅灰宜用于配制特殊高强或高耐磨的混凝土，单掺硅灰会增加低水胶比高强混凝土的自收缩，并不利于降低混凝土温升，在大体积混凝土中应慎用。硅灰一般应与其它矿物掺和料复合使用，如将大掺量粉煤灰与占胶凝材料总重 5% 左右的硅灰复合，能明显增强这种混凝土抗氯离子侵入的能力和早期性能。

4. 沸石岩粉

磨细天然沸石岩粉应选用斜发沸石岩或丝光沸石岩,其他沸石尤其是方沸石不宜用作混凝土的掺和料。沸石岩的铵离子净交换容量不小于 107 mol / 100g(斜发沸石岩)或 115 mol / 100g(丝光沸石岩),沸石岩品位(即沸石含量,用铵离子净交换容量检测)应当稳定,比表面积大于 280m²/kg。

5. 复合磨细矿粉及其他

使用二种或二种以上的掺和料复合而成的磨细矿物掺和料,其效果通常能明显优于单一矿物掺和料。复合掺和料应有合格的产品标准或经过有关部门鉴定的性能检测证明并附有组成成分和使用说明,不得添加对混凝土有害的成分。为避免增加混凝土的自收缩和温升,复合磨细矿粉也不宜过细。

6.1.5 配制耐久混凝土的骨料应满足以下要求:

1. 质地均匀坚固,粒形和级配良好、吸水率低、空隙率小(粗骨料的松散堆积密度一般应大于 1500kg/m³,对较致密石子如石灰岩大于 1600kg/m³,即空隙率约不超过 40%;对不同细度模数的砂子,控制 4.75mm、0.6mm和 0.15mm 筛的累计筛余量分别为 0~5%、40%~70%和 ≥95%)。粗骨料的压碎指标不大于 7%,吸水率不大于 2%,针、片状颗粒不宜超过 5%。

2. 用于冻融环境和各种干湿交替环境的混凝土粗、细骨料,其含泥量应分别低于 0.7%和 1%。在严重冻融环境作用下,混凝土粗骨料的吸水率不宜大于 1%,对于重要工程的混凝土骨料,还宜进行坚固性试验,测得的失重率应小于 5%(细骨料)和 8%(粗骨料)。在氯盐环境作用(D级或D级以上)下,不宜采用抗渗透性较差的岩质如某些花岗岩、砂岩等作为粗、细骨料。

3. 当结构所处环境的季节温差或日夜温差变化剧烈时,宜选用线胀系数较小的粗骨料,以提高混凝土的抗裂性。

4. 在严重环境作用下,粗骨料的公称粒径与钢筋保护层厚度的比值,在氯盐和其他化学腐蚀环境下不应大于 1/2,在冻融环境下不应大于 2/3。

5. 重要的配筋混凝土工程应严禁使用海砂。一般工程由于条件限制不得不使用海砂时,必须采取严格的质量检验制度,经过冲洗后的海砂宜控制氯离子含量低于砂干重的 0.06%,并应满足混凝土的水胶比低于 0.45和混凝土中的氯离子总量低于 6.1.7 条的要求,否则应外加化学阻锈剂。使用氯离子量超过 0.06%但低于 0.12%的海砂,除满足上述条件外,钢筋的混凝土保护层厚度不宜小于 30mm。预应力混凝土一般不得使用海砂。

6. 使用骨料前应了解当地供应的骨料有无潜在活性,对于潮湿环境或可能经常与水接触的混凝土,使用潜在活性骨料应通过专门的验证。

6.1.6 配制耐久混凝土所用的化学外加剂应符合如下要求:

1. 各种外加剂应有厂商提供的推荐掺量与相应减水率、主要成分(包括复配组分)的化学名称、氯离子含量、水溶性钠盐含量、含碱量以及施工中必要的注意事项如超量或欠量使用时的有害影响、掺方法和成功的使用证明等。

2. 当混合使用高效减水剂、引气剂、缓凝剂、膨胀剂、阻锈剂及其他防腐剂时,应事先专门测定它们之间的相容性。

3. 各种外加剂中的氯离子含量不得大于混凝土中胶凝材料总重的 0.02%,高效减水剂中的硫酸钠含量不宜大于减水剂干重的 15%。

4. 氯化钙不能作为混凝土的外加剂使用,如用作冬季施工的抗冻剂等。

5. 各种阻锈剂的长期有效性需经检验,一般不能使用亚硝酸钠类阻锈剂。

6. 在喷射混凝土中以较大剂量使用含钠盐的速凝剂时,应评估当地环境条件和使用的骨料可能引发碱骨料反应或硫酸盐腐蚀的危险性。

6.1.7 混凝土中的水溶氯离子量在试配中应经过检测(检测时的混凝土龄期 28天)并满足以下要求:

1. 对于钢筋混凝土构件,在氯盐环境下应尽可能低;在元氯盐的潮湿环境下应不超过胶凝材料重的 0.15%(对桥梁等基础设施工程宜不超过 0.08%),在元氯盐的干燥环境下应不超过胶凝材料重的 0.3%(对桥梁等基础设施工程宜不超过 0.15%)。

2. 对于预应力混凝土,不超过胶凝材料重的 0.06%。

如已检测混凝土各种原材料（水泥、矿物掺和料、砂石骨料、外加剂与拌和用水）中的氯离子含量，且其总和不超过上述数值的1.2倍时，则可不再检测混凝土中的氯离子量。

当用酸溶法测定氯离子浓度时，其允许的限值可比上述水溶限值高1/3。

6.2 混凝土的施工

6.2.1 耐久混凝土工程在正式施工前，应针对工程特点和施工环境与施工条件，会同设计、施工、监理及混凝土供应等各方，共同制定施工全过程和各个施工环节的质量控制与质量保证措施以及相应的施工技术条例，商定质量检验方法与奖惩办法。施工和监理单位应各自委派专人负责记录混凝土运送到工地的时间和出机坍落度、浇筑时间和浇筑时的坍落度、浇筑时气温与混凝土浇筑温度、施工缝的划分、混凝土浇筑高度的控制以及混凝土的养护方式和养护过程，包括养护开始时间、混凝土养护中的表面温度与降温速率、拆模时间与拆模时气温等。如果出现裂缝，要记录裂缝出现的时间、部位、尺寸和处理等情况。

耐久混凝土施工中，需要重点保证质量并采取专门措施的内容有：结构表层混凝土的密实性、均匀性与良好的养护，混凝土保护层厚度的准确性，混凝土裂缝控制。此外，对于引气混凝土、后张预应力和连接缝的施工，也应制定专门的操作规程和质量检验标准。

6.2.2 耐久混凝土的原材料及配比，应在正式施工前的混凝土试配工作中，通过混凝土工作性、强度和耐久性指标的测定，并通过抗裂性能的对比试验后确定（附录 A）。重要的工程应在现场进行模拟构件的试浇注，发现问题及时调整，对其中截面最小尺寸大于 30cm 的构件，还宜测定混凝土的绝热或半绝热温升和自由收缩值。

如无条件进行混凝土的开裂性能试验，为限制混凝土的早期开裂，可控制混凝土的早期强度，要求 12 小时抗压强度不大于 8 N/mm^2 或 24 小时不大于 12 N/mm^2 ，当抗裂要求较高时，宜分别不高于 6 N/mm^2 或 10 N/mm^2 。

6.2.3 混凝土结构的施工顺序应经仔细规划，如墙、板分段分块的施工缝位置与浇筑顺序和后浇带的设置等，以尽量减少新浇混凝土硬化收缩过程中的约束拉应力与开裂。

6.2.4 为保证钢筋保护层厚度尺寸及钢筋定位的准确性，宜采用工程塑料制作的保护层定位夹或定型生产的纤维砂浆块。当使用一般的细石混凝土垫块定位保护层的厚度时，垫块的尺寸和形状（宜为工字形或锥形）必须满足保护层厚度和定位的允差要求；垫块的强度应高于构件本体混凝土，水胶比不大于 0.4。浇筑混凝土前，应仔细检查定位夹或保护层垫块的位置、数量及其紧固程度，并应指定专人作重复性检查以提高保护层厚度尺寸的施工质量保证率。构件侧面和底面的垫块应至少 4 个/m^2 ，绑扎垫块和钢筋的铁丝头不得伸入保护层内。

6.2.5 为保证混凝土的均匀性，混凝土的搅拌宜采用卧轴式、行星式或逆流式搅拌机并严格控制拌和时间。如无特殊需要，泵送混凝土的坍落度不宜过大以避免离析和泌水。插入式振捣棒需变换其在混凝土拌和物中的水平位置时，应竖向缓慢拔出，不得放在拌和物内平拖。泵送下料口应及时移动，不得用插入式振捣棒平拖驱赶下料口处堆积的拌和物将其推向远处。

6.2.6 结构表层混凝土的耐久性质量在很大程度上取决于施工养护过程中的湿度和温度控制。暴露于大气中的新浇混凝土表面应及时浇水或覆盖湿麻袋、湿棉毡等进行养护。如条件许可，应尽可能采用蓄水或洒水养护，但在混凝土发热阶段最好采用喷雾养护，避免混凝土表面温度产生骤然变化。当采用塑料薄膜或喷涂养护膜时，应确保薄膜搭接处的密封。此外，还应保证模板连接缝处不至于失水干燥。水养护或湿养护的时间应当在约定的施工条例中规定，在整个养护期内不得间断。养护剂应符合《水泥混凝土养护剂》（JC 901-2002）的要求。

对于水胶比低于 0.45 的混凝土和大掺量粉煤灰混凝土，在施工浇筑基础底板、楼板、路面等大面积构

件时应尽量减少暴露的工作面，浇筑后应立即用塑料薄膜紧密覆盖（与混凝土表面之间不应留有空隙）防止表面水分蒸发，待进行搓抹表面工序时可卷起塑料薄膜并再次覆盖，终凝后可撤除薄膜进行水养护。柱或墙板等垂直构件宜采用有蓄水内膜或有良好保水性能的模板，在浇筑完毕时也要将顶部严密覆盖；当使用钢模时，应及早松开模板并覆盖后连续注水养护，但必须使养护水的温度须与混凝土表面温度相适应以防止开裂。在寒冷气候下，应在模板外采取保温措施并延迟拆模时间。

6.2.7 混凝土的入模温度应视气温而调整，在炎热气候下不宜高于气温且不超过 30℃，负温下不宜低于 12℃。对于构件最小断面尺寸在 300mm 以上并有防水或防氯盐侵蚀的混凝土结构，混凝土的入模温度一般应控制在 25℃ 以下。重要工程可事先通过裂缝控制的专用分析程序，合理确定混凝土施工的浇筑、养护方法与工序，估计施工过程中混凝土温度与拉应力的变化，提出混凝土温度的控制值，并在施工养护过程中实际测定关键截面的中点温度和离表面约 5cm 深处的表层温度（对基础地板还包括底部），实行严格的温度控制。一般工程如无条件进行专门的计算分析，通常可取混凝土的温度控制值为：混凝土入模后的内部最高温度一般不高于 70℃，构件任一截面在任一时间内的内部最高温度与表层温度之差一般不大于 20℃，新浇混凝土与邻接的已硬化混凝土或岩土介质之间的温差不大于 20℃，淋注于混凝土表面的养护水温度低于混凝土表面温度的差值不大于 15℃，混凝土的降温速率最大不宜超过 3℃/d。此外，当周围大气温度低于养护中混凝土表面温度超过 20℃ 时，混凝土表面必须保温覆盖以降低降温速率。

6.2.8 现浇混凝土应有充分的潮湿养护时间。在整个潮湿养护过程中，应根据混凝土温度与气温的差别及变化，及时采取措施，控制混凝土的升温和降温速率。配筋混凝土不得用海水养护，养护水应符合混凝土拌和水的标准。

当新浇的结构构件有可能接触流动水时应采取防水措施，保证混凝土在浇筑后 7d 之内不受水的直接冲刷。对海洋浪溅区以下的新浇混凝土，应保证混凝土在养护期内并在其强度达到设计值以前不受海水与浪花的侵袭。应尽可能推迟新浇混凝土与海水等氯盐环境接触时的龄期，一般不宜小于 6 周。

混凝土的拆模时间除需考虑拆模时的混凝土强度外，还应考虑到拆模时的混凝土温度（由水泥水化热引起）不能过高，以免接触空气时降温过快而开裂，更不能在此时浇注凉水养护。

6.2.9 在炎热气候下浇筑混凝土时，应避免模板和新浇混凝土受阳光直射，入模前的模板与钢筋温度以及附近的局部气温不应超过 40℃。应尽可能安排傍晚浇筑而避开炎热的白天，也不宜在早上浇筑以免气温升到最高时加速混凝土的内部温升。在相对湿度较小、风速较大的环境下，宜采取喷雾、挡风等措施或在此时避免浇筑面板等有较大暴露面积的构件。重要工程浇筑混凝土时应定时测定混凝土温度以及气温、相对湿度、风速等环境参数，并根据环境参数变化及时调整养护方式。

6.2.10 对于大掺量矿物掺和料混凝土和其他水胶比低于 0.4 的混凝土，在施工浇筑基础底板、楼板、路面等大面积构件时应尽量减少暴露的工作面积，在工作面上喷雾保湿，初步刮平后应立即用塑料薄膜紧密覆盖（与混凝土表面之间不应留有空隙），防止表面水分蒸发，待进行最终搓抹表面工序时可卷起塑料薄膜并再次覆盖，终凝后撤除薄膜并立即进行加湿养护，如蓄水、覆盖湿麻袋或湿棉毡（应在养护过程中始终保湿并防止蒸发），上述各种覆盖材料的搭结长度应不小于 15cm 并相互紧贴。柱或墙板等垂直构件宜采用有蓄水内膜或有良好保水性能的模板，在浇筑完毕时也要将顶部严密覆盖；当使用钢模时，应及早松开模板并覆盖后连续注水养护，但养护水的温度必须与混凝土表面温度相适应以防止开裂。在寒冷气候下，应在模板外采取保温措施并延迟拆模时间。

6.2.11 对于氯盐和其他化学腐蚀环境（Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类）下的混凝土，潮湿养护的期限应不少于 7 天，且养护结束时混凝土达到的最低强度（根据工地现场养护的小试件测得，其养护条件与现场混凝土相同）与 28 天强度的比值应不低于 70%；对于大掺量矿物掺和料混凝土，在潮湿养护期正式结束后，如大气环境干燥或多风，仍宜继续保湿养护一段时间，如喷涂养护剂、包裹塑料膜或外罩覆盖层等措施，避免风吹、暴晒，防止混凝土表面的水分蒸发。对于一般环境（Ⅰ类）下和无盐的冻融环境（Ⅱ类），混凝土（掺量矿物掺和料

混凝土除外) 湿养护的期限至少应不小于3天, 且养护结束时混凝土达到的最低强度与28天强度的比值应不低于40%。

6.2.12 在混凝土浇筑后的抹面压平工序中, 严禁向混凝土表面洒水, 并应防止过度操作影响表层混凝土的质量。冰冻地区受除冰盐作用的混凝土和暴露于干旱地区的混凝土, 尤其要注意施工抹面工序的质量保证。

6.2.13 用于施工后浇带或填充预留孔洞的混凝土宜加入适量微膨胀剂, 使用前应检验其与水泥和其他外加剂之间的相容性。在估计混凝土浇筑后的温升时, 需考虑膨胀剂所引起的温度增加; 如混凝土在养护过程中的内部温度较高(超过65℃), 尚应检验高温对膨胀剂效果的可能危害。在使用膨胀剂前, 应估算结构的配筋量或构造确能提供足够的约束应力使得膨胀剂能够发生正常的作用。采用后浇带时, 后浇带的浇筑时间不宜早于本体混凝土浇筑后的60天。

6.2.14 对于施工缝等各种连接缝处的混凝土施工, 应预先制定适当的操作工艺, 使混凝土的振捣过程既能保证混凝土充分密实, 又不影响止水带等连接件的准确定位, 当采用引气混凝土时防止混凝土中的气泡受到过多损失。

6.2.15 混凝土冬季施工应采用蓄热保温措施进行浇筑和养护并使用低水胶比的混凝土, 原则上不宜采用防冻剂。如气温低于-15℃而不得不使用时, 则必须对防冻剂的性能进行严格的检验, 防冻剂中有害物质的含量必须低于规定的限值。

6.2.16 预应力混凝土孔道灌浆施工应在专业工程师指导下, 由经过专业培训的技工操作。灌浆工艺应经试验剖析检验合格后再在工程上实施。孔道灌浆应采用专用灌浆材料, 具有良好的流动性和稠度, 不泌水, 适于真空压浆, 并在硬结后具有良好的体积稳定性(不收缩或低收缩), 抗渗性, 和足够的粘结强度。

预应力混凝土孔道灌浆材料的流动度应在施工前和施工中经过测定。浆体的水胶比应低于本体混凝土的水胶比, 一般宜不大于0.40并宜掺加矿物掺和料, 终凝时间不大于24h。在施工环境温度下, 灌浆材料在6h内应保持可灌性, 要求在3小时到24小时内的泌水率小于0.3%。浆体中可加入微膨胀剂保证灌浆的密实性。灌浆材料宜用水泥净浆, 孔道空隙较大时可用细砂水泥砂浆以减少收缩, 一般应掺入适量减水剂、缓凝剂或引气剂等外加剂, 也可掺入粉煤灰提高浆体的工作性和密实性; 加入钢筋阻锈剂可提高浆体的防护性能, 但不得加入铝粉或含有氯化物、硝酸盐等有害成分的外加剂。灌浆材料的性能测试应包括流动度、泌水率、体积稳定性、强度和沉积率, 有时还要测定温度敏感性、触变性等等。

如不能保证灌浆在预应力筋穿入孔道后的48h以内和张拉后的24h以内完成, 则应采取可靠措施, 确保孔道中的预应力筋体系在完成灌浆工序前不出现锈迹。

6.3 混凝土耐久性质量检验

6.3.1 现场混凝土耐久性质量检验的主要内容如下:

1. 通过无损检测, 测定现场钢筋的混凝土保护层实际厚度。
2. 通过标准预埋件的拔出试验或回弹仪试验, 测定表层混凝土的强度并间接估计保护层混凝土的密实性质量。对处于严重环境作用下的重要工程或构件, 宜通过现场混凝土表层抗渗性测试仪, 测定表层混凝土的抗渗性。
3. 对于引气混凝土, 测定新拌混凝土的含气量以及硬化后混凝土的含气量、气泡间距系数与抗冻耐久性指数DF值。
4. 对于氯盐环境下的重要工程混凝土, 测定混凝土的氯离子扩散系数。

6.3.2 混凝土保护层厚度的检验方法与合格标准如下:

用于保护层厚度测定的仪器精度应不低于1mm, 检验的结构部位和构件数量应视工程的具体情况而定。对成批的同类构件, 一般可各抽取构件数量的10%且不少于10个构件进行检验。对选定的每一构件, 可对各12根最外侧钢筋(一般为箍筋或分布筋)的保护层厚度进行检测。对每根钢筋, 应在有代表性的部位测量3点, 并对每一构件的测试数据进行评定。

对同一构件测得的钢筋保护层厚度, 如有95%或以上的测量数据大于或等于保护层最小厚度 C_{min} (表5.0.8), 则认为合格; 否则可增加同样数量的测点, 按两次检测的全部数据进行统计, 如仍不能有95%及以下的测点厚度大于或等于 C_{min} , 则认为不合格。

6.3.3 利用回弹仪、标准预埋件的拔出试验或手提式混凝土表层抗渗性测试仪（抗液体或气体渗透）等方法来检验保护层混凝土的密实时，应事先通过实验室内的标定试验，在与现场相同（原材料和配比）的混凝土试件上取得仪器读数与混凝土某种抗渗性指标之间的标定曲线。现场测试时的测点部位与测点数量，按照工程和量测方法的具体特点确定，测试宜在28天龄期左右进行。

6.3.4 对于引气混凝土，应从到达现场的混凝土出料口取样，取样的频率通常与混凝土稠落度的测定频率相同。此外，也应从经过泵送、浇筑与振捣后的新浇混凝土中抽样测试含气量。重要工程应同时在现场取样制作混凝土试件，测定硬化后混凝土的抗冻耐久性指数DF、含气量与气泡间距系数。对于一般工程，可在工程现场仅用含气量测定仪检测拌和料或新拌混凝土的含气量，但事先应在实验室条件下，对所用混凝土（包括引气剂在内的混凝土原材料与级配均相同）进行抗冻耐久性指数DF或气泡间距系数的测定试验，并符合表4.0.9和表4.0.8注2中的规定。

6.3.5 氯盐环境下的重要工程，应在现场制作混凝土试件中，取芯测定混凝土抗氯离子侵入性的扩散系数或电量指标，并与表4.0.12中的参考数据作比较。

7、防腐蚀附加措施

7.1 涂层钢筋和耐蚀钢筋

7.1.1 环氧涂层钢筋

对于环境作用等级为E或E级以上的混凝土构件，可在优质混凝土的基础上选用环氧涂层钢筋。环氧涂层钢筋可与钢筋阻锈剂联合使用，但不能与阴极保护联合使用（除非在钢筋绑扎后再做环氧涂层）。

环氧涂层钢筋的原材料、加工工艺、质量检验及验收标准，应符合现行行业标准《环氧树脂涂层钢筋》JG3042-1997的有关规定。环氧涂层钢筋在运输、吊装、搬运和加工过程中应避免损伤涂层，钢筋的断头和焊接热伤处应在2h内用钢筋生产厂家提供的涂层材料及时修补。在整个施工过程中，应随时检查涂层损伤缺陷并及时修补。如发现单个面积大于 25mm^2 的涂层损伤缺陷，或每米长的涂层钢筋上出现多个损伤缺陷的面积总和超过钢筋表面积的0.1%，不容许再修补使用。

与无涂层的普通钢筋相比，环氧涂层钢筋与混凝土之间的粘结强度下降20%，因而采用环氧涂层钢筋时的钢筋绑扎搭接长度，以及混凝土构件的刚度与裂缝计算值，均与采用普通钢筋时有所不同。

架立和绑扎环氧涂层钢筋，不得使用无涂层的普通钢筋和金属丝。环氧涂层钢筋与无涂层的普通钢筋之间不得有电连接。在浇筑混凝土时宜采用附着式振动器振捣，如使用插入式振动器，需用塑料或橡胶将振动器包覆。

7.1.2 镀锌钢筋（热浸锌）

在碳化引起钢筋锈蚀的一般环境下，可选用镀锌钢筋延长结构物的使用年限。对于钢丝网和某些预埋件，也可选用热浸锌方法加强防护。镀锌钢筋的质量应符合相关规定，并不宜用在氯盐环境中。

7.1.3 耐蚀钢筋和不锈钢钢筋

在腐蚀环境中可采用耐腐蚀钢种为材质的钢筋。在特别严重的腐蚀环境下，要求确保百年以上使用年限的特殊重要工程，可选用不锈钢钢筋。不锈钢钢筋不得与普通钢筋电连接。

7.2 钢筋阻锈剂

7.2.1 对于环境作用等级为E或E级以上的混凝土构件，可在优质混凝土的基础上，在混凝土中掺入钢筋阻锈剂。混凝土的密实性越高，钢筋阻锈剂的防护效能就越好。对于难以采用涂层防护的预应力钢筋和钢绞线的保护，在混凝土或灌浆中掺加钢筋阻锈剂是有效的防护方法之一。作为多重防护措施，钢筋阻锈剂还可与环氧涂层钢筋、阴极保护及混凝土外涂层联合、搭配使用。

7.2.2 钢筋阻锈剂的品质应得到确认，要求：1) 对混凝土的主要物理、力学性能无不利影响，2) 能有效抑制钢筋脱钝，防止钢筋锈蚀，3) 在混凝土中保持长期稳定。钢筋阻锈剂的使用范围与使用方法可参照国家有关行业标准。

7.2.3 钢筋阻锈剂的用量 (kg/m^3 混凝土) 应根据不同的环境条件（如结构使用年限内侵入混凝土中钢筋表面的氯盐量或混凝土采用海砂时由原材料带人的氯离子量）和阻锈剂品种确定。使用钢筋阻锈剂应事先经过试配和适应性试验；掺入型粉剂类钢筋阻锈剂与其他外加剂联合使用时，在搅拌时需首先加入阻锈剂后再加入其他外加剂，搅拌时间可延长1~3min，使钢筋阻锈剂能在混凝土中均匀分布。

7.3 混凝土表面涂层和防腐蚀面层

7.3.1 混凝土表面涂层包括薄涂层，复合型涂层或厚涂层，渗透型涂层等。混凝土表面涂层的试验方法与施工和管理，可参照《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(JTJ275-2000)的有关规定。

7.3.2 在腐蚀环境中，可选用薄层涂料作为保护混凝土中钢筋的措施。涂层系统应与混凝土表面的强碱性相适应，与混凝土的粘结力不小于 $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ ，涂层系统自身的耐久性和对混凝土的有效防护时间一般不应低于10年。但短寿命的涂层也可用于早龄期混凝土的防护，在混凝土的水化尚未充分完成的数月或一年龄期内，减轻氯盐等腐蚀物质侵入混凝土内部。

7.3.3 以沥青、环氧沥青、环氧加煤焦油为基的复合型涂层或厚涂层，可用于地下、水下部分混凝土结构

的防护。以环氧树脂、聚氨酯为基的复合型涂层或厚涂层，可用于上部结构。复合型涂层或厚涂层与混凝土的粘结力不小于 1.5N/m 时，自身的耐久性和对混凝土的有效防护时间不应低于20年。

7.3.4 能够渗透到混凝土内的硅烧类涂料，可作为保护混凝土中钢筋的附加措施。硅烧类涂料对混凝土的有效防护时间不应低于10年。

7.3.5 水泥基聚合物砂浆层

在结构和施工条件允许的情况下，可选用水泥基聚合物砂浆层作为保护混凝土和混凝土内部钢筋的措施。水泥基聚合物砂浆层的使用寿命可与混凝土相当，对混凝土的防护能力取决于水泥基聚合物砂浆的密实性和覆层厚度。水泥基聚合物砂浆层的厚度不应小于 5mm 。

7.3.6 隔离层

受环境严重腐蚀作用的混凝土结构或部位，可选用玻璃钢或耐腐蚀板、砖砌筑作为保护混凝土和钢筋的措施。隔离层的有效防护时间不应低于20年。