

ICS 93.080
P66
备案号: 51420-2016

DB32

江 苏 省 地 方 标 准

DB32/T 2974-2016

临海环境下混凝土桥梁耐久性设计标准

Design standard for durability of concrete bridge in coastal environment

2016 - 09 - 20 发布

2016 - 11 - 20 实施

江苏省质量技术监督局

发 布

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》编制。

本标准由江苏省交通运输厅提出并归口。

本标准起草单位：江苏省交通运输厅公路局、苏交科集团股份有限公司。

本标准主要起草人：张鸿飞、宋国森、胡萌、刘冠国、朱雷雷、闵剑勇、张国荣、赵炜、张建东、王辉、路璐。

临海环境下混凝土桥梁耐久性设计标准

1 范围

本标准规定了临海环境下混凝土桥梁耐久性设计过程要求及防腐附加措施。

本规范适用于临海环境作用下公路桥涵混凝土构筑物及其构件的耐久性设计,对于特殊环境下混凝土构筑物或特种混凝土结构及其构件的耐久性设计并不适用。

本标准适用于临海环境作用下公路桥涵混凝土构筑物环境等级划分、原材料优选、混凝土配合比优化设计、结构耐久性设计以及防腐蚀附加措施。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB 18845 水泥基渗透结晶型防水材料
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB 50496 大体积混凝土施工规范
- GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计规范
- JG 3042 环氧树脂涂层钢筋
- JGJ 63 混凝土拌和用水标准
- JGJ/T 192 钢筋阻锈剂应用技术规程
- JTGT B07-01 公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范
- JTJ 058 公路工程集料试验规程
- JTJ 275 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范
- TB 10005 铁路混凝土结构耐久性设计规范
- CCES 01 混凝土结构耐久性设计与施工指南
- CECS 220 混凝土结构耐久性评定标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

临海环境 coastal environment

近海岸线（一般离海岸线的平均距离为25km以内）的陆地环境。

3.2

结构耐久性 structural durability

在设计确定的环境作用和维修、使用条件下，结构及其构件在设计使用年限内保持其适用性和安全性的能力。

3.3

环境作用 environmental action

引起结构材料性能劣化或腐蚀的温度变化、湿度变化、水、二氧化碳、氧、盐、酸等环境因素对结构的作用。

3.4

环境作用等级 environmental action grade

根据环境作用对混凝土及结构破坏或腐蚀程度的不同而划分的若干级别。

3.5

体积稳定性 volume stability

混凝土保持其初始几何尺度的能力，主要受收缩、碳化和碱集料反应的影响。

3.6

可更换构件 replaceable component

根据构件在使用过程中不同的退化模式和在维护管理及更换方面的不同要求，将需要周期性更换的构件。

3.7

防腐蚀附加措施 additional protective measurement

在材料和构造等常规手段的基础上，为进一步提高混凝土结构耐久性所采取的补充措施。

3.8

设计使用年限 design service life

在正常设计、正常施工、正常使用和维护条件下，结构或构件不需进行大修即可达到预定目的的使用年限。

3.9

大体积混凝土 mass concrete

混凝土结构物实体最小几何尺寸不小于1m的大体量混凝土，或预计会因混凝土中胶凝材料水化引起的温度变化和收缩而导致有害裂缝的混凝土。

3.10

胶凝材料 binder

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

3.11

水胶比 water to binder ratio

混凝土拌合物中用水量与胶凝材料总量的质量比。

3.12

混凝土抗冻耐久性指数 durable factor

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

3.13

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措施和修复、改善活动。

3.14

劣化 degradation

材料性能随时间的衰减变化。

3.15

修复 repairation

通过修补、更换或加固，使受到损伤的结构恢复到满足正常使用所进行的活动。

3.16

大掺量矿物掺合料混凝土 high volume mineral admixture concrete

胶凝材料中含有50%及以上的粉煤灰、硅灰、磨细矿渣等矿物掺合料，需要采取较低的水胶比和特殊施工措施的混凝土。

3.17

钢筋的混凝土保护层厚度 concrete cover thickness to reinforcement

从混凝土中受力钢筋（包括主筋和箍筋）最外缘到混凝土表面的距离。

3.17

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

描述混凝土孔隙水中氯离子从高浓度区向低浓度区扩散过程的参数。

3.18

多重防护策略 multiple protective strategy

为确保混凝土结构和构件的使用年限而同时采取多种防腐附加措施的方法。

3.19

混凝土抗裂性 cracking resistance of concrete

混凝土抵抗开裂的能力。

4 总则

4.1 本规范规定的耐久性设计要求，应为结构达到设计使用年限并具有必要保证率的最低要求。设计中可根据工程的具体特点、当地的环境条件与实践经验，以及具体的施工条件等适当提高。

4.2 混凝土结构的耐久性设计，除执行本规范的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

5 一般规定

5.1 设计的主要内容

设计应包括如下内容：

- 1) 结构和可更换构件的设计使用年限、环境类别和作用等级；
- 2) 混凝土配合比设计、耐久性控制指标和原材料的选型标准；
- 3) 结构耐久性要求的构造措施、混凝土保护层和抗裂设计；
- 4) 满足耐久性要求的施工质量控制措施；
- 5) 合理采取防腐蚀附加措施或多重防护策略；

6) 耐久性所需的施工养护制度与保护层厚度的施工质量验收要求。

5.2 设计文件主要内容

临海环境下混凝土桥梁耐久性设计文件中应包括以下主要内容：

- 1) 设计文件中应明确结构的设计使用年限；
- 2) 设计文件应区分可更换构件和不可更换构件，并注明可更换构件的名称和更换或检修时间。
- 3) 设计文件需划分不同结构构件所处的环境类别及作用等级。设计文件中包括的混凝土和结构的耐久性指标也应根据构件所处的环境类别和作用等级而定。当运营期内环境发生变化时，应加强检测和评估；
- 4) 设计文件需包含混凝土原材料的选用标准和混凝土耐久性要求。混凝土耐久性要求由耐久性技术指标和配合比两部分组成；
- 5) 设计文件应包括与耐久性有关的结构构造措施、混凝土最小保护层厚度和裂缝控制措施；
- 6) 设计文件宜向工程业主和运营单位提出公路工程混凝土结构日常巡检、维护或修理的具体要求，对严重环境作用下的结构提出定期专项检测要求，混凝土构件的加固和更换应根据检测结果确定。在设计中设置必要的维修与检测通道和空间，预埋监测元件。对大型工程应设置全寿命耐久性监测系统；
- 7) 对受到环境作用等级为E级或F级的构件，或因条件所限不能满足规定保护层厚度或规定养护时间的构件，设计文件中宜提出合理的防腐蚀附加措施。

6 技术规定

6.1 设计使用年限

6.1.1 公路混凝土桥梁结构的设计使用年限，应根据工程的重要性按照表 1 选用。

表 1 公路混凝土桥梁结构设计使用年限

级别	设计使用年限	适用范围
一	不低于 100 年	二级以上（含二级）公路上的特大桥、大桥、中桥、重要小桥涵等重要结构
二	不低于 50 年	三级以下（含三级）公路上的中、小型桥梁、涵洞及其他基础设施工程
三	15~30 年	可更换结构构件
注1：重要小桥涵是指高速公路和一级公路上、国防公路上及城市附近交通繁忙公路上的桥涵； 注2：对有特殊要求的结构，其设计使用年限可由业主和设计人员在上述规定的基础上，经技术经济论证后可予以适当调整；		

6.1.2 公路桥梁混凝土结构，可按照表 2 划分为不可更换构件和可更换构件。可更换构件又划分为难于更换构件和易于更换构件。

表 2 公路桥梁工程混凝土结构构件一览表

型式	构件名称		不可更换构件	可更换构件	
				难于更换	易于更换
桥梁上部 结构构件	梁桥	主梁	√		
	拱桥	主拱圈	√		
		拱上立柱	√		
		吊杆/系杆		√	
	斜拉桥	索塔	√		
		主梁	√		
		斜拉索		√	
	悬索桥	塔	√		
		锚碇	√		
		加劲梁	√		
		主缆	√		
		吊索	√	√	
	桥面铺装				√
	排水系统				√
	护栏/栏杆				√
	伸缩缝				√
支座		√	√		
桥梁下部 结构构件	帽梁		√		
	立柱/立柱间系梁		√		
	承台		√		
	基础		√		
	桥台/挡土墙		√		
	排水系统				√
注1：表中所列构件为公路桥梁工程混凝土结构常见构件，未列入表中构件，其设计使用年限由设计人员视实际情况确定；					
注2：本表中所列某些重要的可更换构件可根据业主的需求和更换难易程度及经济性，更改为不可更换构件。					

6.1.3 不可更换构件的设计使用年限根据其重要性参照表 1 选用。可更换构件中，难于更换构件的设计使用年限宜采用 20~30 年；易于更换构件的设计使用年限宜采用 15~20 年。并应在设计文件中明确规定。

6.2 环境作用等级

6.2.1 临海环境下桥梁混凝土结构所处环境按其钢筋和混凝土材料的腐蚀机理可分为 5 类，并按表 3 确定。

表 3 环境类别

环境类别	名称	腐蚀机理
I	一般环境（碳化环境）	混凝土碳化引起钢筋锈蚀
II	冻融环境（无盐、酸、碱等作用）	反复冻融导致混凝土损伤
III	海洋氯化物环境	海洋环境下的氯盐引起钢筋锈蚀
IV	除冰盐等其他氯化物环境	除冰盐等氯盐引起钢筋锈蚀
V	盐结晶环境	硫酸盐在混凝土孔隙中结晶膨胀导致混凝土损伤

注：一般环境系指无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用。

6.2.2 不同环境对配筋混凝土结构的作用程度应采用环境作用等级表达，并应符合表 4 的规定。

表 4 环境作用等级

环境类别 \ 环境作用等级	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）	I-A	I-B	I-C	—	—	—
冻融环境（II）	—	—	II-C	II-D	II-E	—
海洋氯化物环境（III）	—	—	III-C	III-D	III-E	—
除冰盐等其他氯化物环境（IV）	—	—	IV-C	IV-D	IV-E	—
盐结晶环境（V）	—	—	—	—	V-E	V-F

注：环境作用等级参照GB/T 50476章节3.2。

6.2.3 当结构构件受到多种、复杂环境类别共同作用时，应分别满足每种环境类别单独作用下的耐久性要求。

6.3 一般环境

6.3.1 一般环境下混凝土结构耐久性设计，应控制正常大气作用下混凝土碳化引起的钢筋锈蚀。当有其他环境同时作用时，应按环境作用等级较高的相关要求进行了。

6.3.2 一般环境对桥梁混凝土结构的环境作用等级见表 5。

表 5 一般环境对混凝土结构的环境作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
I - A	干燥环境	常年干燥、低湿度环境中的构件； 所有表面均永久处于静水下的构件； 桥梁上部结构或桥墩水下部分。
	永久的静水浸没环境	
I - B	非干湿交替的环境	不接触或偶尔接触雨水的构件； 长期与水或湿润土接触的构件； 桥墩等下部结构。
	长期湿润环境	

表 5 (续)

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
I -C	干湿交替环境	表面频繁淋雨或频繁与水接触的构件； 处于水位变动区的构件。
注1：环境条件系指混凝土表面的局部环境； 注2：干燥、低湿度环境指年平均湿度低于60%，中、高湿度环境指年平均湿度大于60%； 注3：干湿交替指混凝土表面经常交替接触到大气和水的环境条件；		

6.4 冻融环境

6.4.1 冻融环境下混凝土结构耐久性设计，应控制混凝土遭受长期冻融循环作用引起的损伤。

6.4.2 冻融环境对混凝土结构的环境作用等级见表 6。

表 6 冻融环境（无盐、酸、碱等作用）对混凝土结构的环境作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
II -C	微冻地区，混凝土中度饱水	微冻地区受雨淋构件的竖向表面
II -D	微冻地区，混凝土高度饱水	微冻地区的水位变动区的构件，频繁受雨淋构件的水平表面
	严寒和寒冷地区，混凝土中度饱水	严寒和寒冷地区受雨淋构件的竖向表面
II -E	严寒和寒冷地区，混凝土高度饱水	严寒和寒冷地区的水位变动区构件，频繁受雨淋构件的水平表面
注1：严寒地区、寒冷地区和微冻地区是根据其最冷月的平均气温划分的。严寒地区、寒冷地区和微冻地区最冷月的平均气温 t 分别为： $t \leq -8^{\circ}\text{C}$ 、 $-8^{\circ}\text{C} < t < -3^{\circ}\text{C}$ 和 $-3^{\circ}\text{C} \leq t \leq 2.5^{\circ}\text{C}$ ； 注2：中度饱水指冰冻前偶受水或受潮，混凝土内饱水程度不高；高度饱水指冰冻前长期或频繁接触水或湿润，混凝土内高度水饱和； 注3：当设有防寒保暖层时，应根据设计的混凝土构件表面温度，取用对应的冻融环境； 注4：本表为无防排水系统的情形，如有完善的防排水系统时，作用等级可按表中规定降低一个等级取用。		

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

6.4.4 可能偶然遭受冻害的饱水混凝土结构构件，其环境作用等级可按表 6 的规定降低一级。

6.5 海洋氯化物环境

6.5.1 海洋氯化物环境下混凝土耐久性设计，应将钢筋处的氯离子浓度控制在临界值以下，以防锈蚀。

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

6.5.3 海洋氯化物环境的作用等级见表 7。

表 7 海洋氯化物环境对混凝土结构的作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
--------	------	--------

表 7 (续)

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
III-C	水下区和土中区： 周边永久浸没于海水或埋于土中 盐雾影响区： 距涨潮线以外300m~1.2km范围内的陆上环境	近海土中桥墩； 近海桥梁、涵洞的上、下部结构构件。
III-D	大气区（轻度盐雾）： 距平均水位15m高度以上的海上大气区； 涨潮岸线以外100~300m范围内的陆上环境	近海桥梁上部结构构件；靠海的桥梁、涵洞。
III-E	大气区（重度盐雾）： 距平均水位15m高度以内的海上大气区； 离涨潮岸线100m以内的陆上环境	桥梁上部结构构件、桥墩；靠海的桥梁、涵洞。
	潮汐区和浪溅区，非炎热地区	桥墩、承台、基础。
注1：近海或海洋环境中的水下区、潮汐区、浪溅区和大气区的划分，按照国家现行标准（JTJ 275）《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》的规定确定；近海或海洋环境的土中区指海底以下或近海的陆区地下，其地下水中的盐类成分与海水相近； 注2：轻度盐雾区与重度盐雾区界限的划分，宜根据当地的具体环境和既有工程调查确定；靠近海岸的陆上建筑物，盐雾对混凝土构件的作用尚应考虑风向、地貌等因素； 注3：内陆盐湖中氯化物的环境作用等级可比照上表确定。		

6.6 除冰盐等其他氯化物环境

6.6.1 除冰盐等其他氯化物环境下混凝土结构耐久性设计，应控制除冰盐和地下水、土及含氯盐消毒剂中的氯盐对配筋混凝土结构中钢筋的锈蚀。

6.6.2 除冰盐等其他氯化物环境对于配筋混凝土结构构件的环境作用等级宜根据调查确定；当无相应的调查资料时，可按表 8 确定。

6.6.3 除冰盐等其他氯化物环境的作用等级划分见表 8。

表 8 除冰盐等其他氯化物环境对混凝土结构的作用等级

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1m范围内接触盐雾的构件
	四周浸没于含氯化物水中	地下水中构件
	接触较低浓度氯离子水体，且有干湿交替	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	行车道两侧构件，如：桥梁护墙、桥墩、涵台、涵洞内壁；
	接触较高浓度氯离子水体，且有干湿交替	部分暴露于大气、部分在地下水土中的构件
IV-E	直接接触除冰盐溶液	桥面板、与含盐渗漏水接触的桥梁帽梁、墩柱顶面

表 8 (续)

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
IV-E	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、涵洞。
	接触高浓度氯离子水体，有干湿交替	部分暴露于大气、部分在地下水土中的构件
注1：水中氯离子浓度（mg/l）的高低划分为：较低100~500；较高500~5000；高>5000；土中氯离子浓度（mg/kg）的高低划分为：较低150~750；较高750~7500；高>7500； 注2：除冰盐环境的作用等级与冬季喷洒除冰盐的具体用量和频度有关；可根据具体情况作出调整。		

6.7 盐结晶环境

6.7.1 盐结晶环境下混凝土结构耐久性设计，应控制混凝土在近地面区域在干湿循环作用下，因水中或土中硫酸盐与水泥水化产物发生化学反应或因硫酸盐结晶后体积膨胀而导致混凝土发生的膨胀破坏。

6.7.2 盐结晶环境对公路桥梁工程混凝土结构的环境作用等级见表 9。

表 9 盐结晶环境对混凝土结构的环境作用等级

环境作用等级	环境条件	结构构件示例
V-E	日温差小、有干湿交替作用的盐土环境	与含盐土壤接触的墩柱等构件露出地面以上的“吸附区”；
V-F	日温差大、干湿交替作用频繁的高含盐量盐土环境	
注1：对于盐渍土地区的混凝土结构，埋入土中的混凝土按受化学腐蚀环境作用考虑；露出地表的毛细吸附区内的混凝土按受盐类结晶环境作用考虑； 注2：环境水中硫酸根离子（SO₄²⁻）浓度（mg/L）处于4000～10000时为高含盐量，土中SO₄²⁻浓度（mg/L）处于6000～15000时为高含盐量盐土环境； 注3：当混凝土结构处于极高含盐地区（环境水中SO₄²⁻含量大于10000mg/L或环境土中SO₄²⁻含量大于15000mg/kg），其耐久性技术措施应通过专门的试验和研究确定。		

6.8 施工质量的附加要求

6.8.1 混凝土的入模温度应视气温而调整，在炎热气候下，混凝土入模前模板和钢筋的温度以及附近区域温度不宜超过 40℃；对于构件最小断面尺寸在 300mm 以上的低水胶比混凝土结构，混凝土的入模温度一般应控制在 25℃以下。冬期施工时（日平均气温<5℃），混凝土的出机温度不宜低于 10℃，入模温度不宜低于 5℃。

6.8.2 混凝土终凝后应立即开始潮湿养护，养护水应符合混凝土拌和水的标准，不得用海水养护。整个养护期间，尤其是从终凝到拆模的养护初期，应确保混凝土处于有利于硬化及强度增长的温度和湿度环境中。混凝土带模养护期间，应采取带模包裹、浇水、喷淋洒水或通蒸汽等措施进行保湿、潮湿养护。柱等垂直构件宜采用有蓄水内膜或有良好保水性能的模板，在浇筑完毕后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。气温较高时可适当缩短湿养护时间；在寒冷气候下，

应在模板外采取保温措施并延迟拆模时间和湿养护时间。

6.8.3 对于水胶比低于 0.4 的混凝土和大掺量矿物掺合料混凝土，在施工浇筑基础底板、路面等大面积构件时应尽量减少暴露的工作面，在工作面上喷雾保湿，并立即用塑料薄膜紧密覆盖，防止表面水分蒸发。进行搓抹表面工序时可卷起塑料薄膜并再次覆盖，终凝后可撤除薄膜并立即以蓄水、覆盖湿麻袋或湿棉毡进行加湿养护。

6.8.4 根据结构所处的环境类别与作用等级，混凝土耐久性所需的施工养护应符合表 10 的规定。

表 10 施工养护制度要求

环境作用等级	混凝土类型	养护制度
I-A	水胶比低于 0.4 的混凝土	至少养护 1d
	大掺量矿物掺合料混凝土	浇筑后立即覆盖并加湿养护，至少养护 3d
I-B, I-C, II-C, III-C, IV-C, V-C II-D, V-D II-E, V-E	水胶比低于 0.4 的混凝土	养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 3d
	大掺量矿物掺合料混凝土	浇筑后立即覆盖并加湿养护，养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 7d
III-D, IV-D III-E, IV-E III-F	大掺量矿物掺合料混凝土	浇筑后立即覆盖并加湿养护，养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 7d。加湿养护结束后应继续用养护喷涂或覆盖保湿、防风一段时间至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 70%
注 1：表中要求适用于混凝土表面大气温度不低于 10℃的情况，否则应延长养护时间； 注 2：有盐的冻融环境中混凝土施工养护应按 III、IV 类环境的规定执行； 注 3：大掺量矿物掺合料混凝土在 I-A 环境中用于永久浸没于水中的构件。		

6.8.5 对大体积混凝土，应定时测定混凝土中心温度、表层温度以及环境的气温、相对湿度、风速等参数，并根据混凝土温度和环境的变化情况及时调整养护制度。养护期间，混凝土内部的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 25℃，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℃。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延缓降温速率。混凝土表面的养护水温度与混凝土表面温度的差值不大于 15℃。

6.8.6 对大体积混凝土，可采取分层分块的浇筑方式，降低浇筑速度和浇筑层的厚度。根据施工季节，采取不同的温控措施，施工过程中应注意保湿保温，采取蓄水法和覆盖法减小内外温差。

6.8.7 对于大掺量矿物掺合料混凝土，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。

6.9 保护层质量验收基本要求

6.9.1 钢筋保护层厚度的检验，可采用非破损或局部破损方法，也可采用非破损方法并用局部破损方法进行校验。

6.9.2 对处于一般环境 A 级（轻微）、B 级（轻度）下的混凝土结构构件，其保护层厚度的施工质量验收要求按照现行国家标准（GB 50204）《混凝土结构工程施工质量验收规范》的相关要求执行。

6.9.3 处于环境作用等级为 C 级或以上的混凝土结构构件，应按下列要求进行保护层厚度的施工质量验收：

- 1) 对选定的梁类构件，应对全部纵向受力钢筋的保护层厚度进行检验。对每根钢筋，应选取 3 个代表性部位测量；
- 2) 当全部钢筋保护层厚度检验的合格点率在 90%及以上，钢筋保护层厚度的检验结果为合格；
- 3) 当全部钢筋保护层厚度检验的合格点率在 85%~90%内，可增加同样数量的测点进行检测；按两次测点的全部数据进行统计，如仍不能满足第 2) 条款的要求，则判定为不合格；
- 4) 钢筋的保护层厚度施工允许偏差值见表 11。

表 11 公路工程混凝土结构钢筋保护层厚度允许偏差

单位：mm

构件	允许偏差
柱、梁、拱肋	±5
基础、锚碇、墩台	±10
板	±3
注 1：在海水或腐蚀环境中，保护层厚度偏差不应出现负值；	
注 2：对于预制混凝土构件，允许偏差一般控制在 0~5mm。	

7 材料

7.1 一般规定

7.1.1 根据公路桥梁工程性质与特点、结构物所处环境及施工条件，选择合适的水泥品种，水泥强度等级应当与混凝土设计强度等级相适应；

7.1.2 对于严重环境作用（D 级或 D 级以上）下的混凝土结构，宜采用硅酸盐水泥与矿物掺合料，或采用特殊水泥配制混凝土；

7.1.3 选用质地坚硬、级配良好、粒径合格、有害杂质含量少的粗、细集料；

7.1.4 使用优质粉煤灰、矿渣、硅灰等矿物掺合料或复合矿物掺合料；

7.1.5 拌合用水要清洁，pH 不应低于 5，不得用海水拌制钢筋混凝土和预应力混凝土，物质含量限值应满足（JGJ 63）《混凝土拌和用水标准》的相关要求；

7.1.6 根据使用目的和混凝土性能要求、原材料性能、施工条件、配合比等因素，选择适宜外加剂并符

合（GB 50119）《混凝土外加剂应用技术规范》的相关要求。

7.2 原材料

7.2.1 水泥应符合如下规定：

- 1) 硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥的比表面积不宜超过 $380\text{m}^2/\text{kg}$ ；水泥中铝酸三钙（ C_3A ）含量不宜超过 8%（海水中 5%）；游离氧化钙不超过 1.5%。大体积混凝土宜采用硅酸二钙（ C_2S ）含量相对较高的水泥；
- 2) 水泥的含碱量（按 Na_2O 当量计）不应超过 0.6%，或混凝土内的总含碱量（包括所有原材料）应低于限值要求 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。矿物掺合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；当无检测条件时，可以粉煤灰总碱量的 1/6 计算粉煤灰中的可溶性碱，矿渣的约为 1/2。

7.2.2 粗、细集料应符合如下规定：

- 1) 粗、细集料松散堆积密度一般应大于 $1350\text{kg}/\text{m}^3$ ，即空隙率应小于 47%。粗集料的压碎指标不大于 10%（I 类）、20%（II 类）、30%（III 类），针片状颗粒含量不宜超过 5%（I 类）、15%（II 类）、25%（III 类），吸水率不大于 2%，在严重冻融环境作用下，粗集料的吸水率不宜大于 1%；
- 2) 对不同细度模数的细集料，控制 5mm、0.63mm 和 0.16mm 筛的累计筛余量分别为 0~10%、74%~85%（I 区砂）或 41%~70%（II 区砂）和 $\geq 90\%$ ）；
- 3) 对于处于冻融环境下的重要工程的粗、细集料，还宜使用硫酸钠溶液进行坚固性试验，质量损失应小于 5%（细集料）和 10%（粗集料）；
- 4) 用于冻融环境和干湿循环作用下的混凝土，粗、细集料的含泥量应分别低于 0.7% 和 1%。集料中的硫化物及硫酸盐含量（以三氧化硫 SO_3 计）分别不宜超过粗、细集料总质量的 1%；
- 5) 应对不同料源的粗、细集料进行碱活性检验，尽量避免采用有碱活性反应的集料，或采取必要的控制措施。对桥梁、隧道的主体结构而言，不应使用有碱活性反应的集料。具体试验方法参见（JTJ 058）《公路工程集料试验规程》；
- 6) 在海洋氯化物环境或除冰盐等其他氯化物环境作用（D 级或 D 级以上）下，不宜采用抗渗透性较差的岩质作为粗、细集料；配筋混凝土工程和预应力混凝土工程不应使用海砂；

7) 粗集料的最大公称粒径不得超过结构最小边尺寸的 1/4 和钢筋最小净距的 3/4; 在两层或多层密布钢筋结构中, 不得超过钢筋最小净距的 1/2。粗集料最大公称粒径与钢筋保护层厚度的关系, 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钢筋保护层厚度的 2/3。

7.2.3 水的具体要求参考 (JGJ 63) 《混凝土拌和用水标准》。

7.2.4 矿物掺合料应符合如下规定:

1) 粉煤灰

桥梁混凝土结构宜采用 F 类粉煤灰。对普通钢筋混凝土, 粉煤灰烧失量不宜大于 8%; 需水量比不宜大于 105%; I 级粉煤灰的 $45\mu\text{m}$ 方孔筛筛余 $\leq 12\%$, II 级灰的筛余量 $\leq 20\%$ 。三氧化硫含量 $\leq 3\%$ 。

2) 磨细矿渣

磨细高炉矿渣的比表面积宜处于 $350\sim 450\text{m}^2/\text{kg}$ 范围内, 烧失量不大于 3%, 此外氯离子含量不大于 0.02%。

3) 硅灰

硅灰中的二氧化硅含量不宜小于 85%, 比表面积大于 $18000\text{m}^2/\text{kg}$ 。一般情况下, 硅灰应与其他矿物掺合料复合使用, 掺量不超过胶凝材料总质量的 10%, 应与减水剂配合使用。

7.2.5 外加剂应符合如下规定:

1) 减水剂

减水剂减水率应不小于 20%, 收缩率比应不大于 110%。减水剂碱含量 (按折固含量计) 应不大于 10%, 氯离子含量 (按折固含量计) 应不大于 0.6%。

2) 引气剂

对于有抗冻要求的混凝土宜掺入引气剂或引气型减水剂, 引入的气泡应能稳定地存在于混凝土中, 在新拌混凝土中的 1h 含气量变化量应不大于 1.5%。

3) 膨胀剂

膨胀剂的品种和性能应符合 (GB23439) 《混凝土膨胀剂》的规定。对于用于海水或有侵蚀性水的工程, 不得使用含氧化钙类膨胀剂配制混凝土。

4) 各种外加剂应有厂商提供的产品说明书, 包括: 主要成分的化学名称、推荐掺量、氯离子含量、水溶性钠盐含量、含碱量、施工中必要的注意事项以及掺用外加剂的混凝土长期性能报告等;

5) 当混合使用不同外加剂时, 应事先通过试验, 测定它们之间的相容性。

7.2.6 钢筋、钢绞线应符合如下规定:

- 1) 普通钢筋应优先选用 HRB335 级和 HRB400 级钢筋。受力钢筋最小直径应不小于 12mm，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；
- 2) 当构件有防水要求需严格控制裂缝宽度时，构件每侧暴露面上的分布钢筋配筋率不宜低于 0.6%（HPB235 级钢筋）或 0.4%（HRB335 级和 HRB400 级钢筋）；此外，分布钢筋间距不宜大于 150mm；
- 3) 预应力混凝土结构中的钢丝或钢绞线，在采用体内索结构进行灌浆等防腐蚀措施时，灌浆应密实。采用体外索时，应进行钢绞线外部的防腐蚀措施控制；
- 4) 钢筋在运输、储存等环节应采取适当的防护措施避免生锈，严重锈蚀的钢筋禁止使用，轻微锈蚀的钢筋除锈后才能使用。

7.3 混凝土

7.3.1 不同环境类别下的结构构件，混凝土耐久性评价指标的选取宜按照表 12 采用。

表 12 不同环境类别下的混凝土耐久性评价指标

环境类别	混凝土耐久性评价指标
一般环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、抗渗等级、裂缝宽度限值、保护层厚度、抗碱-骨料反应能力
冻融环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、抗渗等级、抗冻耐久性指数、裂缝宽度限值、保护层厚度、抗碱-骨料反应能力
海洋氯化物环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、电通量、氯离子扩散系数、裂缝宽度限值、保护层厚度、抗碱-骨料反应能力
除冰盐等其他氯化物环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、电通量、氯离子扩散系数、裂缝宽度限值、保护层厚度、抗碱-骨料反应能力
盐结晶环境	最低强度等级、氯离子含量、碱含量、抗渗等级、抗冻耐久性指数、裂缝宽度限值、保护层厚度、抗碱-骨料反应能力

注：处于海洋氯化物环境和除冰盐等其他氯化物环境中的混凝土结构，氯离子扩散系数和电通量都为抗氯离子侵入性指标；其他环境下，抗渗等级可用电通量法和 RCM 氯离子扩散系数法，或者使用抗渗标号进行判定；

7.3.2 混凝土耐久性最低强度等级参见表13。

表 13 结构混凝土最低强度等级

环境类别	环境作用等级	设计使用年限			
		100 年		50 年	
		钢筋混凝土与预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土与预应力混凝土	素混凝土

表 13 (续)

环境类别	环境作用等级	设计使用年限			
		100 年		50 年	
		钢筋混凝土与 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土与预应 力混凝土	素混凝土
一般环境	I -A	C30	C30	C25	C25
	I -B	C35		C30	
	I -C	C40		C35	
冻融环境	II -C	C35	C35	C30	C30
	II -D	C35	*	C30	*
	II -E	C40		C35	
海洋氯化物环境	III-C	C35	C35	C30	C30
	III-D	C35		C30	
	III-E	C40		C35	
	III-F	C45		C40	
除冰盐等其他氯化物环境	IV-C	C35	C35	C30	C30
	IV-D	C35		C30	
	IV-E	C40		C35	
盐结晶环境	V -E	C40	*	C40	*
	V -F	C45		C40	

注 1：“*”表示不宜使用素混凝土。若必须使用素混凝土，应采用适当的防护措施；

注 2：对于预应力混凝土构件，最低混凝土强度等级为 C40；

注 3：承台、桩基础不受此规定限制。

7.3.3 不同设计使用年限、不同强度等级混凝土的最大水胶比和单位体积混凝土的最大、最小胶凝材料用量可参见表14。

表 14 混凝土材料的最大水胶比和单位体积混凝土的胶凝材料用量

设计使用年限 混凝土强度等级	100 年			50 年		
	最大水胶 比	最小用量 (kg/m ³)	最大用量 (kg/m ³)	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	400	0.55	280	
C35	0.50	300		0.50	300	

表 14 (续)

设计使用年限 混凝土强度等级	100 年			50 年		
	最大水胶比	最小用量 (kg/m ³)	最大用量 (kg/m ³)	最大水胶比	最小用量 (kg/m ³)	最大用量 (kg/m ³)
C40	0.45	320	450	0.45	320	450
C45	0.40	340		0.40	340	
C50	0.36	360	480	0.36	360	480
C55	0.36	380	500	0.36	380	500
C60	0.33			—	—	—

注 1: 大掺量矿物掺合料混凝土的水胶比应不大于 0.42;
 注 2: 表中数据适用于集料最大粒径为 20mm 的情况, 集料粒径较大时可适当降低胶凝材料用量, 集料粒径较小时可适当增加;
 注 3: 对强度等级达到 C60 的泵送混凝土, 胶凝材料最大用量可增大到 530kg/m³;
 注 4: 预应力混凝土的胶凝材料用量应大于 350kg/m³;
 注 5: 对自密实混凝土, 胶凝材料的最大用量可适当超过相应级别的规定值。

7.3.4 不同环境类别中的混凝土中矿物掺合料用量可参见表15。

表 15 不同环境类别作用下混凝土中矿物掺合料用量参考范围

单位: %

混凝土类型	环境类别	水胶比	粉煤灰	矿渣	复掺
钢筋混凝土	一般环境	≤0.42	≤30	≤50	≤40
		>0.42	≤20	≤30	≤25
	冻融环境	≤0.42	≤30	≤40	≤35
		>0.42	≤20	≤30	≤25
	海洋氯化物环境/除冰盐等其他氯化物环境	≤0.42	30~50	40~60	30~50
		>0.42	20~40	30~50	≤30
	盐结晶环境	≤0.42	≤40	≤50	—
		>0.42	≤30	≤40	—
预应力混凝土			≤30	≤50	30~50

注 1：表中矿物掺合料用量范围仅限使用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥；

注 2：硅酸盐水泥由硅酸盐水泥熟料，5%以下的石灰石或粒化高炉矿渣，适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料；普通硅酸盐水泥由硅酸盐水泥熟料、5%~20%的混合材料、适量石膏混合磨细制成的水硬性胶凝材料；

注 3：使用普通硅酸盐水泥时，应了解水泥中原有矿物掺合料的品种、掺量，并与配制混凝土时加入的矿物掺合料用量一起，计算混凝土中各类矿物掺合料总量，其与胶凝材料总量的质量百分比应低于表中要求；

注 4：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 70~75%；但对冻融部位的混凝土，矿渣的最大掺量不宜超过 50%；

注 5：其他特殊情况，矿物掺合料掺量需按专项试验加以论证。

7.3.5 混凝土的抗冻融循环性能用抗冻耐久性指数表征，见表16的规定。

表 16 混凝土抗冻耐久性指数

单位：%

使用年限级别	100 年			50 年		
环境条件	高度饱水	中度饱水	盐冻	高度饱水	中度饱水	盐冻
严寒地区	80	70	85	70	60	80
寒冷地区	70	60	80	60	50	70
微冻地区	60	60	70	50	45	60

注 1: 抗冻耐久性指数为混凝土试件经 300 次快速冻融循环后混凝土的动弹性模量 E1 与其初始值 E0 的比值, $DF=E1/E0$; 如在达到 300 次循环之前 E1 已降至初始值的 60%或试件重量损失已达到 5%, 以此时的循环次数 N 计算 DF 值, 并取 $DF = (N/300) \times 0.6$;

注 2: 对于厚度小于 150mm 的薄壁混凝土构件, 其 DF 值宜增加 5%。

7.3.6 对处于海洋氯化物环境下的重要配筋混凝土工程，应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，见表17。

表 17 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	D	E	F	D	E	F
抗侵入性指标						
氯离子扩散系数 D_{RCM} (28d 龄期) ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	<8	<5	<4	<10	<7	<5
电通量值 (56d 龄期) (C)	<1200	<800	<800	<1500	<1000	<800

7.3.7 钢筋混凝土和预应力混凝土内水溶氯离子的总含量应符合表18的规定。

表 18 氯离子含量限值

单位：%

环境条件	预应力混凝土	钢筋混凝土
海水、除冰盐和其他氯盐环境	0.06	0.10
潮湿和干湿交替环境		0.20
不受潮环境		0.30

注：以胶凝材料质量百分数计。

7.4 水泥基灌浆材料

7.4.1 对预应力混凝土孔道灌浆材料应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥配制的水泥浆；采用高效减水剂，减水率应不小于 20%；水胶比宜控制在 0.26~0.28 之间。灌浆材料的初凝时间不小于 3h，终凝时

间不超过 24h。

7.4.2 水泥基灌浆料强度应符合设计规定，当设计无具体规定时，水泥基灌浆料强度指标见表 19。

表 19 水泥基灌浆料抗压强度指标

单位：MPa

普通灌浆材料	7d	≥20
	28d	≥30
真空辅助压浆材料	7d	≥25
	28d	≥40
注：28天强度要求不宜小于预应力构件本体混凝土强度		

7.4.3 水泥基灌浆料的膨胀率见表 20。

表 20 水泥基灌浆料的膨胀性指标

单位：%

竖向膨胀率	3h	0.1~3.5
	24h 与 3h 的膨胀值之差	0.02~0.5
自由膨胀率	普通压浆	<6
	真空辅助压浆	<3
注：检验方法见《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448附录A。		

7.4.4 水泥浆的泌水率最大不得超过 3%，拌和后 3h 泌水率宜控制在 2%，泌水应在 24h 内重新全部被浆吸回。泌水率试验方法按（GB/T 50080）《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》。

7.4.5 水泥基灌浆料中氯离子总量不应超过胶凝材料质量的 0.06%。

7.4.6 水泥基灌浆料的抗渗透性能可参照表 17 混凝土抗氯离子侵入性能的评估方法，可采用电通量和氯离子扩散系数作为评价指标。

8 结构

8.1 一般规定

8.1.1 临海环境下公路工程混凝土桥梁和涵洞结构应根据其设计使用年限、环境类别及作用等级进行耐久性设计。

8.1.2 桥梁结构的选型应注重结构的整体性和连续性，不宜采用带铰或带挂孔的悬臂梁及 T 形刚构桥梁。

8.1.3 桥梁结构传力体系宜简明合理，在几何形体变化处宜连续平顺，减少棱角和突变，尽量避免应力集中。

8.1.4 结合桥位特点和经济技术条件,宜通过工业化制造和架设技术,提高混凝土桥涵的品质和耐久性。

8.1.5 应结合桥位环境及桥涵构造,形成完整、通畅、便于维修的防排水系统。

8.2 钢筋的混凝土保护层

8.2.1 混凝土桥涵结构中,钢筋的混凝土保护层厚度(受力钢筋最外缘至混凝土表面的距离)不应低于表 21 中规定的最小保护层厚度。

表 21 桥涵结构钢筋的混凝土最小保护层厚度

单位: mm

构件类型 环境类别		上部结构		下部结构						
		梁、板、拱圈、涵洞（上部）		墩身、挡土结构、涵洞（下部）		承台、基础（桥、涵）				
		混凝土强度等级	<i>c</i>	混凝土强度等级	<i>c</i>	混凝土强度等级	<i>c</i>			
一般环境	I -A	C30	20	C30	20	C30	40			
		≥C35		≥C35		≥C35		35		
	I -B	C35	25 20	C35	25 20	C30	45 40			
		≥C40		≥C40		≥C35				
	I -C	C40	35 30 25	C40	35 30 25	C30	50 45			
		C45		C45		≥C35				
≥C50	≥C50									
冻融破坏环境	II -C	C40		30		C35		30	C30	60
	II -D	C45	30		C35	35 30	C30		65 60	
		≥C40			≥C35					
	II -E	C50	40	C40	45 40	C35	70 65			
	≥C45	≥C40								
海洋氯化物环境	III -C	C45	35	C35	35	C30	65			
	III -D	C45		40 35		C35		40 35	C30	70 65
		≥C50				≥C40			≥C35	
	III -E	C50		40 35		C40		40 35	C35	70 65
		≥C55				≥C45			≥C40	
III -F	—	—	C45	45	C40	75				
除冰盐等其他氯化物环境	IV -C	C45	30	C35	30	C30	60			
	IV -D	C45		35 30		C35		35 30	C30	65 60
		≥C50				≥C40			≥C35	
	IV -E	C50		45 40		C40		45 40	C35	70 65
≥C55	≥C45	≥C40								
盐结晶环境	V -E	—	—	C40	45	—	—			
	V -F	—	—	C45	45	—	—			

表 21 (续)

单位: mm

注1: 表中保护层厚度值对应于100年的设计使用年限。若设计使用年限为50年, 可相应减小5mm, 但不得小于20mm;
 注2: 若表中保护层厚度小于被保护钢筋的直径, 则取钢筋直径值;
 注3: 对于工厂预制的混凝土构件, 其最小保护层厚度可将表中相应数值减小5mm, 但不得小于20mm;
 注4: 表中承台和基础的最小保护层厚度, 针对的是基坑底无垫层或侧面无模板的情况; 对于有垫层或有模板的情况, 最小保护层厚度可将表中相应数值减少20mm, 但不得小于40mm。

8.2.2 在混凝土保护层内设置分布钢筋时, 宜采用非金属分布筋, 否则应与受力钢筋保持一定距离, 并采取适宜的防腐措施。

8.2.3 对于人行道、栏杆等易于更换的非主要受力构件, 其最小保护层厚度值可按以下要求取值: 一般环境、磨蚀环境下, 取 20mm; 冻融和除冰盐环境等其他氯化物环境下, 取 25mm; 海洋氯化物和盐结晶环境下, 取 30mm。

8.2.4 当采用环氧涂层钢筋时, 保护层厚度可酌减, 但不宜低于表中同一环境类别下的最低环境作用等级所对应的保护层厚度。当采取其他防腐蚀附加措施并对耐久性进行专门论证后, 其混凝土保护层厚度可适当低于表 21 的规定。

8.3 裂缝控制

8.3.1 不同环境下混凝土桥涵结构的裂缝宽度限值如表 22。

表 22 桥涵结构混凝土表面裂缝宽度限值

单位: mm

环境类别	环境作用等级	裂缝宽度限值	
		钢筋混凝土构件	部分预应力 B 类构件
一般环境	I -A	0.25	0.2
	I -B	0.2	0.15
	I -C	0.2	0.1
冻融破坏环境	II -C	0.2	0.1
	II -D	0.15	—
	II -E	0.15	—
海洋氯化物环境	III -C	0.2	0.1
	III -D	0.2	—
	III -E	0.15	—
	III -F	0.15	—
除冰盐等其他氯化物环境	IV -C	0.2	0.1

表 22 (续)

单位: mm

环境类别	环境作用等级	裂缝宽度限值	
		钢筋混凝土构件	部分预应力 B 类构件
除冰盐等其他氯化物环境	IV-D	0.2	—
	IV-E	0.15	—
盐结晶环境	V-E	0.15	—
	V-F	0.15	—

注: 表中“—”表示不允许出现裂缝, 或不允许采用部分预应力B类构件。

8.3.2 应区分混凝土桥梁的结构性裂缝和非结构性裂缝成因, 有针对性地采用预防控制措施。

8.3.3 为预防结构性裂缝, 可采取如下抗裂控制措施:

- 1) 对于预应力混凝土桥梁, 除必须满足相关规范的正截面和斜截面抗裂验算要求外, 还应关注梁结构在成桥后的合理内力和应力状态, 从而抵御收缩徐变等不利时效影响, 提高桥梁结构的整体抗裂性能;
- 2) 对于混凝土桥梁应力扰动区(截面应变分布不符合平截面假定的区域), 可应用实体有限元分析方法或者拉压杆模型方法, 进行抗裂配筋设计;
- 3) 应限制运营期的超载车辆通行, 减缓疲劳作用及微裂缝的发生和发展。

8.3.4 为预防非结构性裂缝, 可采取如下抗裂控制措施:

- 1) 应配置分布式构造钢筋, 其配筋率和布置方式宜满足相关规范要求;
- 2) 在施工期间, 除了满足本标准中有关材料和养护的规定外, 还应通过控制施工支架的不均匀沉降或差动位移, 控制非结构性裂缝的产生;
- 3) 在桥梁的运营养护期, 应及时修补混凝土缺损及有害裂缝。

8.4 构造措施

8.4.1 桥梁支座设计应考虑其可检修、可更换性。

8.4.2 高墩和位于水中的桥墩在不同高程处所受的环境作用变化较大时, 可以分部位进行耐久性设计。

8.4.3 桥梁的形状、布置和部位应简捷, 尽量减少暴露的表面积和棱角, 从整体上减轻环境因素的作用, 施工时混凝土便于振捣和养护, 并减轻荷载作用下产生的应力集中与约束应力。

8.4.4 桥面系应设置完善的排水系统。

8.5 后张预应力混凝土桥梁

8.5.1 应根据结构所处环境类别和作用等级, 对后张预应力体系采取相应的多重防护措施。在严重环境

下，当难以保证预应力体系的耐久性达到桥梁整体的设计使用年限时，宜采用可更换的预应力体系。

8.5.2 预应力筋（钢绞线、钢丝）的防护工艺包括：预应力筋表面防腐处理、预应力套管内部填充、预应力护套、混凝土保护层和混凝土表面涂层。预应力筋的耐久性防护措施应按表 23 的规定选用。

表 23 预应力筋的耐久性防护工艺

防护工艺编号	备注
PS1	预应力筋防腐表层：防腐润滑脂涂层、环氧涂层或表面镀锌
PS2	预应力钢束套管内部填充：水泥基浆体、油脂或石蜡等
PS3	非金属套管：高密度聚乙烯、聚丙烯套管等
PS4	混凝土保护层：满足本标准表 24 的规定
PS5	混凝土表面涂层：耐腐蚀表面涂层和防腐蚀面层
注：针对耐久性严酷环境，推荐采用PS3非金属套管，其他环境可采用金属波纹管。	

8.5.3 根据环境类别与作用等级，体内预应力体系和体外预应力体系的多重防护措施参照表 24 和表 25 的规定选用。

表 24 体内预应力筋的多重防护措施

环境类别与作用等级		体内预应力体系	PS1/预应力筋 表面处理	PS2/套管内 填充	PS3/非金属 套管	PS4/混凝土 保护层	PS5/混凝土表 面涂层
一般环境	I -A, I -B		—	●	—	●	—
	I -C		—	●	—	●	—
冻融环境	II -C, II -D		—	●	▲	●	—
	II -D, II -E		—	●	●	●	▲
海洋氯化物环境	III -C, III -D		—	●	●	●	▲
	III -E, III -F		▲	●	●	●	●
除冰盐等其他氯化物环境	IV -C, IV -D		—	●	●	●	▲
	IV -E		▲	●	●	●	●
盐结晶环境	V -E, V -F		▲	●	●	●	●
注：表中符号意义：● 建议采用；▲ 可以采用；— 一般不采用。							

表 25 体外预应力筋的多重防护措施

环境类别与作用等级		体外预应力体系	PS1/ 预应力筋表面处理	PS2/ 套管内填充	PS3/ 非金属套管
一般环境	I -A, I -B		▲	—	▲
	I -C		▲	—	▲
冻融环境	II -C, II -D		●	▲	▲

表 25 (续)

环境类别与作用等级		体外预应力体系	PS1/ 预应力筋表面处理	PS2/ 套管内填充	PS3/ 非金属套管
冻融环境		II -D, II -E	●	▲	●
海洋氯化物环境		III -C, III -D	●	▲	●
		III -E, III -F	●	●	●
除冰盐等其他氯化物环境		IV -C, IV -D	●	▲	●
		IV -E	●	●	●
盐结晶环境		V -E, V -F	●	●	●
注1：表中符号意义：● 建议采用；▲ 可以采用；— 一般不采用； 注2：当体外预应力筋为热挤PE护套高强度钢丝成品拉索，或者当体外预应力筋由单根无粘结钢绞线（用防腐润滑脂和护套涂包）组成时，均不存在套管内填充问题； 注3：对可更换体外预应力拉索，应结合后期更换的方便程度，慎重采用套管内填充。					

8.5.4 当环境作用等级为 D、E、F 时，后张预应力筋的管道宜采用高密度聚乙烯套管或聚丙烯塑料套管；分节段施工桥梁的节段间体内预应力套管不宜使用金属套管。

8.5.5 用水泥基浆体填充后张预应力管道时，水泥基灌浆材料需符合本标准表 20 的要求。

8.5.6 预应力锚固端的防护工艺包括：锚具表面处理、锚头封罩内部填充、锚头封罩、锚固端封裹和锚固端表面涂层。预应力锚固端的多重防护措施应按表 26 的规定选用。

表 26 预应力锚固端耐久性防护工艺

防护工艺编号	备注
PA1	锚具表面处理：锚具表面镀锌或者镀氧化膜工艺
PA2	锚头封罩内部填充：水泥基浆体、专用灌浆料、油脂或者石蜡
PA3	锚头封罩：不锈钢或其他耐腐蚀材料
PA4	锚固端封裹：细石混凝土材料
PA5	锚固端表面涂层：耐腐蚀表面涂层和防腐蚀面层

8.5.7 根据环境类别与作用等级，预应力埋入式锚头和暴露式锚头的锚固端多重防护措施，应分别参照表 27 和表 28 的规定选用。

表 27 埋入式锚头的锚固端多重防护措施

环境类别与作用等级		锚固端类型	PA1/锚具表 面处理	PA2/锚头封罩 内部填充	PA3/锚头 封罩	PA4/锚固端 封裹	PA5/锚固端表 面涂层
一般环境		I -A, I -B	—	—	—	●	—
		I -C	—	—	—	●	—
冻融环境		II -C, II -D	—	—	—	●	—

表 27 (续)

环境类别与作用等级	锚固端类型	PA1/锚具表面处理	PA2/锚头封罩内部填充	PA3/锚头封罩	PA4/锚固端封裹	PA5/锚固端表面涂层
冻融环境	II-D, II-E	▲	▲	▲	●	—
海洋氯化物环境	III-C, III-D	▲	▲	▲	●	▲
	III-E, -F	▲	●	●	●	●
除冰盐等其他氯化物环境	IV-C, IV-D	▲	▲	▲	●	▲
	IV-E	▲	●	●	●	▲
盐结晶环境	V-E, V-F	▲	●	●	●	▲
注：表中符号意义：● 建议采用；▲ 可以采用；— 一般不采用。						

表 28 暴露式锚头的锚固端多重防护措施

环境类别与作用等级	锚固端类型	PA1/锚具表面处理	PA2/锚头封罩内部填充	PA3/锚头封罩
一般环境	I-A, I-B	—	▲	▲
	I-C	—	●	●
冻融环境	II-C, II-D	—	●	●
	II-D, II-E	▲	●	●
海洋氯化物环境	III-C, III-D	▲	●	●
	III-E, III-F	●	●	●
除冰盐等其他氯化物环境	IV-C, IV-D	▲	●	●
	IV-E	●	●	●
盐结晶环境	V-E, V-F	●	●	●
注1：表中符号意义：● 建议采用；▲ 可以采用；— 一般不采用；				
注2：暴露式锚头(指突出于结构轮廓之外且不用混凝土封裹的锚头)一般用作可更换的体外预应力锚头，有时也用作箱室内齿板上的体内预应力锚头。				

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

8.5.9 位于桥梁梁端的后张预应力锚固端，宜设置排水槽和滴水檐；现浇节段间的锚固端，应在梁体顶板表面涂刷防水层；预制节段间的锚固端，除应在梁体上表面涂刷防水涂层外，尚应在预制节段间涂刷或填充环氧树脂。

9 防腐蚀附加措施

9.1 一般规定

9.1.1 对于环境作用等级为 E 级及以上的构件，或因条件所限不能满足规定保护层厚度或规定养护时间的构件，或受氯盐和硫酸盐极端严重作用的构件，原则上应采取防腐蚀附加措施。不同环境类别和环境作用等级下建议采取的防腐蚀附加措施见表 29。

表 29 各类防腐蚀附加措施采用建议

防腐蚀附加措施 环境类别与作用等级		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
一般环境	I-A, I-B	—	—	—	—	—	—	—	—
	I-C	—	—	▲	—	—	▲	—	—
冻融环境	II-C, II-D	▲	▲	▲	—	—	▲	▲	—
	II-D, II-E	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲
海洋氯化物环境	III-C, III-D	▲	▲	▲	—	▲	▲	▲	▲
	III-E, III-F	●	●	●	●	●	▲	▲	●
除冰盐等其他氯化物环境	IV-C, IV-D	▲	▲	▲	—	—	▲	▲	—
	IV-E	●	●	●	▲	▲	▲	▲	▲
盐结晶环境	V-E, V-F	—	●	●	▲	▲	▲	▲	—

注 1: M1: 涂层钢筋和耐蚀钢筋; M2: 钢筋阻锈剂; M3: 混凝土表面涂层; M4: 混凝土表面憎水处理; M5: 水泥基渗透结晶型防水剂; M6: 混凝土防腐面层; M7: 透水模板衬里; M8: 电化学保护;

注 2: 表中符号意义: ● 建议采用; ▲ 可以采用; — 一般不采用。

9.1.2 采取防腐蚀附加措施的结构,应根据结构物所处环境类别和材料合理选用有针对性的防腐蚀附加措施,并应提出混凝土构件和钢筋、预应力钢筋的防腐蚀附加措施设计方案和要求。

9.2 涂层钢筋和耐蚀钢筋

9.2.1 环氧涂层钢筋应满足以下要求:

- 1) 当环境作用为 E 级及以上,可选用环氧涂层钢筋。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)。
- 2) 环氧涂层钢筋与混凝土之间的粘结强度可为无涂层钢筋粘结强度的 80%。涂层钢筋的锚固长度应为无涂层钢筋锚固长度的 1.25 倍。绑扎搭接长度对受拉钢筋应为无涂层钢筋锚固长度的 1.5 倍;对受压钢筋应为 1.0 倍,且不应小于 250mm。
- 3) 采用环氧涂层钢筋的混凝土构件的承载力、裂缝宽度和刚度计算方法与无环氧涂层构件相同,但裂缝宽度计算值应为无环氧涂层钢筋的 1.2 倍,刚度计算值应为无环氧涂层钢筋的 0.9 倍。
- 4) 环氧涂层钢筋制作所采用的材料、加工工艺、质量检验及验收标准,应符合(JG 3042)《环氧树脂涂层钢筋》的规定。

- 5) 剪切与冷弯环氧涂层钢筋时, 所有接触环氧涂层钢筋的支座和芯轴等接触区均应配尼龙套筒或其他合适的塑料套筒。
 - 6) 环氧涂层钢筋的包装、标志、搬运和存放, 除应符合(JG 3042)《环氧树脂涂层钢筋》的有关规定外, 应符合下列规定:
 - a) 环氧涂层钢筋施工中应减少吊装次数, 宜采用集装箱运输环氧涂层钢筋;
 - b) 环氧涂层钢筋的吊装应采用不损伤环氧涂层的绑带、麻绳索及多吊点的刚性吊架, 或坚固的多点承托, 接触环氧涂层钢筋的区域应设置垫片, 不得在地上或其他钢筋上拖曳、掉落或承受冲击荷载;
 - c) 堆放时, 环氧涂层钢筋与地面之间应架空并设置保护性支承, 各捆环氧涂层钢筋之间, 应以垫木隔开, 支承的间距和垫木的间距应小到足以防止成捆钢筋的下垂, 成捆堆放层数不得超过 5 层, 无涂层钢筋与环氧涂层钢筋应分别堆放;
 - d) 环氧涂层钢筋现场存放期不宜超过 6 个月。当环氧涂层钢筋在室外存放的时间需要 2 个月以上时, 应采取保护措施, 避免阳光、盐雾和大气暴露的影响。
 - 7) 在整个施工过程中应随时检验涂层缺陷, 严格限制环氧涂层钢筋出现过多的缺陷, 每米涂层钢筋上小于 25mm^2 涂层缺陷的总面积不得超过钢筋表面积的 0.1%。
 - 8) 架立环氧涂层钢筋时, 不得采用原涂层钢筋, 绑扎环氧涂层钢筋应采用尼龙、环氧、塑料或其他材料包裹的铁丝, 架立环氧涂层钢筋的钢筋垫座、垫块应以尼龙、环氧、塑料或其他柔软材料包裹。同一构件中, 环氧涂层钢筋与无涂层钢筋不得有电连接。
 - 9) 环氧涂层钢筋架立后, 不宜在其上行走, 应防止工具或重物跌落其上, 并应规定可移动设备的位置, 以免损伤环氧涂层钢筋。浇筑混凝土前, 应检查环氧涂层钢筋的涂层, 尤其是剪切端头处, 如有损伤应及时修补, 待修补材料固化后, 方可浇筑混凝土。
 - 10) 浇筑混凝土时, 宜采用附着式振动器振捣密实。当采用插入式振动器时, 应用塑料或橡胶包覆振动器, 防止振捣混凝土过程中损伤环氧涂层。现场多次浇筑成整体或预制构件的外露环氧涂层钢筋应采取措施, 避免阳光曝晒。
- 9.2.2 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。镀锌钢筋的质量应符合相关规定。
- 9.2.3 采用耐腐蚀钢种为材质的钢筋, 可在腐蚀环境中选用, 其耐蚀性能应事先得到确认。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。

9.3 钢筋阻锈剂

9.3.1 当环境类别为海洋氯化物环境、除冰盐等其他氯化物环境，或环境作用为 E 级及以上时，可在优质耐久混凝土中掺入钢筋阻锈剂，下列情况宜使用环境友好型有机阻锈剂：

- 1) 因条件限制，混凝土构件的保持层偏薄；
- 2) 预应力混凝土氯离子含量超过水泥质量的 0.06%，或者钢筋混凝土氯离子含量超过水泥质量的 0.10%；
- 3) 设计寿命内，渗透到达钢筋表面氯离子浓度高于钢筋腐蚀氯离子阈值；
- 4) 对于恶劣的临海环境中的重要工程，其浪溅区和水位变化区，要求进一步提高优质混凝土或高性能混凝土的护筋性。

9.3.2 对于新建钢筋混凝土结构，可采用内掺钢筋阻锈剂提升钢筋耐蚀性能；对于已建结构，可在表面涂覆迁移型钢筋阻锈剂，减缓钢筋锈蚀。

9.3.3 钢筋阻锈剂的掺量和使用方法按相应产品生产厂家推荐的使用，并进行试配和适应性试验。

9.3.4 钢筋阻锈剂可与高性能混凝土、环氧涂层钢筋、阴极保护及混凝土外涂层、硅烷浸渍等联合使用；涂覆迁移型阻锈剂时应保证混凝土表面没有油污、涂层等，如需使用混凝土外涂层、硅烷浸渍等，应提前使用迁移型钢筋阻锈剂。

9.3.5 钢筋阻锈剂应有效抑制钢筋脱钝，内掺钢筋阻锈剂不应影响混凝土的主要物理、力学性能产生不利影响，并应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应符合有关标准的规定。

9.3.6 采用阻锈剂水剂时，混凝土拌和物的搅拌时间可延长 1 分钟；采用阻锈剂粉剂时，应延长 3 分钟；表面涂覆迁移型阻锈剂后应在混凝土表面覆盖一层薄膜，减少迁移型阻锈剂向外扩散。

9.3.7 钢筋阻锈剂指标应满足现行（JGJ/T 192）《钢筋阻锈剂应用技术规程》的性能要求。

9.4 混凝土表面涂层

9.4.1 混凝土表面涂层性能应满足下列要求：

- 1) 防腐蚀涂料应具有良好的耐碱性、附着性和耐蚀性，底层涂料尚应具有良好的渗透能力；表层涂料尚应具有耐老化性。
- 2) 表湿区防腐蚀涂料应具有湿固化、耐磨损、耐冲击和耐老化等性能。
- 3) 涂层的性能应满足表 30 的要求，涂层与混凝土表面的粘结力不得小于 1.5MPa。

表 30 涂层性能要求

项目	试验条件	标准	涂层名称
涂层外观	耐老化试验 1000h 后	不粉化、不起泡、不龟裂、不剥落	底层+中间层+面层的复合涂层
	耐碱试验 30d 后	不起泡、不龟裂、不剥落	

表 30 (续)

项目	试验条件	标准	涂层名称
涂层外观	标准养护后	均匀、无流挂、无斑点、不起泡、不龟裂、不剥落等	底层+中间层+面层的复合涂层
抗氯离子渗透性	活动涂层片抗氯离子渗透试验 30d 后	氯离子穿过涂层片的渗透量在 $5.0 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2 \text{ d}$ 以下	底层+中间层+面层的复合涂层

9.4.2 涂层系统应符合下列规定：

- 1) 涂层系统应由底层、中间层和面层或底层和面层的配套涂料涂膜组成。选用的配套涂料之间应具有相容性；
- 2) 根据环境状况设计配套的涂料选用及涂层平均厚度等要求可按现行的相关国家标准执行。

9.5 混凝土表面憎水处理

9.5.1 混凝土表面憎水处理适用于临海工程浪溅区混凝土结构表面的防腐蚀保护。硅烷浸渍材料宜采用硅类或氟类憎水材料，其他硅烷浸渍材料经论证也可采用。

9.5.2 混凝土表面硅烷浸渍材料应能渗透到混凝土内部，硅烷类涂料对混凝土的有效防护时间不应低于 10 年。

9.5.3 浸渍硅烷的质量验收以每 500m^2 浸渍面积为一个浸渍质量验收批。浸渍硅烷工作完成后，各取两个芯样进行吸水率、硅烷浸渍深度、氯化物吸收量的降低效果的测试。当任一验收单元浸渍质量的三项测试结果中任意一项不满足下列要求时，该验收批应重新浸渍硅烷后测试。

- 1) 吸水率平均值不应大于 $0.01\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ ；
- 2) 对强度等级不大于 C45 的混凝土，浸渍深度应达到 3~4mm；对强度等级大于 C45 的混凝土，浸渍深度应达到 2~3mm；
- 3) 氯化物吸收量的降低效果平均值不小于 90%。

9.5.4 硅烷的浸渍深度宜采用染料指示法评定。浸渍硅烷前的喷涂试验可采用热分解气相色谱法，当硅烷喷涂施工中对染料指示法的检测结果有疑问时，也可采用热分解色谱法进行最终结果评定。

9.6 水泥基渗透结晶型防水剂

9.6.1 水泥基渗透结晶型防水剂宜掺入水泥中使用，与水泥中的钙、镁等离子生成不溶性盐，用于渗水裂缝宽度不大于 1mm 的混凝土表层防水处理。

9.6.2 水泥终凝后 3~4h 应对施工面进行湿养护，24h 后进行直接水养护；养护期间应避免雨淋、霜冻、日晒，及 4℃ 以下的低温。

9.6.3 水泥基渗透结晶型防水剂应满足现行 (GB 18445)《水泥基渗透结晶型防水材料》的性能要求。

9.7 混凝土防腐面层

9.7.1 当环境作用为 E 级及以上时,可选用聚酯类玻璃钢等聚合物复合材料作为防腐面层;当环境作用为 C、D 级时,可采用聚合物水泥砂浆等材料作为防腐面层。

9.7.2 聚合物水泥砂浆面层的施工,应符合现有水泥砂浆抹面的有关规定。聚合物复合材料面层的施工应在混凝土构件表面达到足够干燥时进行。

9.7.3 在防腐蚀涂料施工过程中,应随时检查涂层层数及涂刷质量。涂层施工完成后应进行外观检查,涂层应光滑平整,颜色一致,无气泡、剥落、漏刷、反锈、透底和起皱等缺陷,用 5~10 倍的放大镜检查,应无微孔。当设计要求测定厚度时,可用磁性测厚仪测定,其厚度偏差不得小于设计规定厚度的 5%。

9.8 透水模板衬里

9.8.1 现浇混凝土结构宜采用透水模板衬里,施工环境恶劣的混凝土应优先采用。

9.8.2 放置透水模板衬里时,应沿混凝土模板的纵向与横向同时拉紧;振捣过程中应确保模板布的完整,施工结束后,应及时养护并适当延长养护时间。

9.9 电化学保护

9.9.1 工程中可能遭受严重氯盐锈蚀的部位可选择阴极保护方法。氯盐污染并引起钢筋锈蚀破坏的既有结构,宜通过必要的经济技术论证后,在钢筋锈蚀破坏初期及时实施阴极保护,或实施电化学脱盐。

9.9.2 以环氧涂层钢筋拼接的构件,不得采用阴极保护;否则应先设置阴极保护装置,后做钢筋涂层,并确保整个钢筋架构具有良好的电连续性,且阴阳极之间不得有短路。含有碱活性集料和无金属护套预应力筋应慎用阴极保护与电化学脱盐。

9.9.3 电化学保护的设计、施工、运行、检测、管理应由专业人员依据相关规定执行和确认。

条文说明

3 术语和定义

3.1.7 设计使用年限应由业主或用户与设计人员共同确定，并满足有关法规的最低要求。设计使用年限不同于设计基准期。

设计基准期是指为确定可变作用及与时间有关的材料性能等取值而选用的时间参数。一般设计规范所采用的设计基准期为 50 年，即设计时所考虑荷载、作用的统计参数均是按此基准期确定的。

设计使用年限指设计规定的结构或构件不需进行大修即可按其预定目的使用的年限，即在正常设计、正常施工、正常使用和一般维护下所应达到的使用年限。当达到设计使用年限后，经过鉴定和维修，可继续使用。因而设计使用年限不同于使用寿命。同一公路工程中，不同构件的设计使用年限可以不同，例如，主体结构和护栏、路面铺装等，均可有不同的设计使用年限。

4 总则

4.0.1 临海环境下混凝土桥梁结构的耐久性设计应遵循以下原则：

- 1) 根据工程结构（及主要构件）的重要性确定结构（及构件）的设计使用年限；
- 2) 确定工程结构（及主要构件）所处的环境类别及其作用等级；
- 3) 选用适宜的原材料、合理的配合比、适当的耐久性指标，以确保混凝土的耐久性；
- 4) 采用合理的结构及构造，便于施工、检修和维护管理；并采取适当的施工养护措施，满足耐久性所需的施工养护的基本要求；
- 5) 对于严重腐蚀环境条件下的混凝土结构，除了对混凝土本身提出相关的耐久性要求外，还应实施可靠的防腐蚀附加措施。

5 一般规定

5.1 混凝土结构耐久性设计是一个系统工程，除条文中的要求外，主要内容还包括：混凝土最小保护层厚度、裂缝控制要求；混凝土施工过程质量控制侧重混凝土的浇筑和养护等对耐久性影响较大的控制措施，涉及到施工工艺、温度变化、材料收缩、质量管理等。

5.2 配合比的主要参数为：最大水胶比、胶凝材料和矿物掺合料用量；主要耐久性技术指标的选取应按构件所处不同环境类别进行，如：碳化深度、抗渗等级、含气量、抗冻耐久性指数等。

根据结构所处环境作用等级和设计使用年限等因素，确定混凝土最小保护层厚度和裂缝宽度限值。

此外,提出例如防排水、伸缩缝、裂缝控制措施等有利于提高耐久性的构造措施。

耐久性设计文件中也应包括混凝土生产、运输、浇筑、养护过程要求(温度、湿度控制、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。

6 技术规定

6.2.1 混凝土结构耐久性设计与结构所处环境类别有直接关系,事实上混凝土结构耐久性设计就是为了解决环境对结构的作用效应与结构对环境作用的抵抗能力这一矛盾。国内外规范中的环境分类方法大多根据结构工作环境情况、破坏机理、形态以及各行业传统经验制定。本标准将临海环境下混凝土桥梁工程常见的环境类别归纳为五大类,用大写的罗马字母表示各环境类别。设计人员应首先根据项目的环境报告对结构和构件所处的环境类别和环境作用等级进行选择确定。

6.7.1 盐类结晶对混凝土的膨胀破坏机理分为物理和化学破坏两种。一方面,硫酸盐与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化铝酸钙发生化学反应生成石膏和钙矾石,体积膨胀而使混凝土开裂剥落;另一方面,在干湿交替作用下,侵入混凝土孔隙中的硫酸盐溶液随着浓度增加达到过饱和而结晶,对孔壁产生极大的结晶压力而使混凝土破坏。因此,处于干燥、多风、日夜温差大环境下的混凝土结构,其距离地表或水面约 1m 区内的毛细吸附区或一面接触高浓度硫酸盐的环境水或环境土,另一面临空的薄壁混凝土结构,多遭受盐结晶破坏。盐结晶破坏程度与环境水和土中硫酸盐浓度、环境温度、相对湿度、风速及混凝土表面干湿交替程度有关,设计时应考虑这些因素。

6.8.1 降低入模温度对控制混凝土的裂缝非常重要。同样的混凝土,入模温度高的其温升值要比入模温度低的大许多。此外在高温情况下,氯离子扩散系数增大,钢筋锈蚀加剧,因此对于有防氯盐侵蚀需要的结构,应控制混凝土入模温度。在气温很高时,更应采取措施设法降低混凝土的入模温度。同时,也应防止表面混凝土比内部硬化得快而产生的表面拉应力导致的开裂。

6.8.2 混凝土耐久性的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。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。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。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。

6.9.3 从耐久性的角度看,最外层的箍筋或分布筋应该最早受到侵蚀,箍筋的锈蚀可引起沿箍筋的环线开裂,在箍筋的密布区域,还会发生保护层的成片剥落,所以在确定钢筋保护层的最小厚度时,应该充分考虑到最外侧的分布筋和箍筋的需要。设计人员在结构的施工图中应明确混凝土保护层厚度所指的钢筋对象(主筋、箍筋或分布筋)及保护层厚度的施工允差。由于影响钢筋锈蚀的因素非常复杂和综合,设计人员可以根据工程的实际情况(特别是通过专门的施工质量控制和质量保证措施)对表中的最小厚度值做出少量调整。鉴于主筋、箍筋和分布筋发生锈蚀的后果严重性有所不同,对于主筋的保护层最小

厚度应有足够的保证。

7 材料

7.2.1 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合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。

为改善混凝土的体积稳定性和抗裂性，应对混凝土细度、水化热和矿物组成含量进行控制。根据编写组长期试验结果和工程经验验证，水泥的细度可以提高到 $380\text{m}^2/\text{kg}$ ，与 $350\text{m}^2/\text{kg}$ 的情况下的开裂风险相差不大。水泥中的铝酸三钙（ C_3A ）水化迅速，虽然早期强度较高，但是其水化热大、收缩变形大，易导致混凝土水化热过大，提高开裂的风险，因此需控制水泥中铝酸三钙的含量。水泥中的硅酸三钙（ C_3S ）含量一般超过 50%，强度高但水化热较大；而硅酸二钙（ C_2S ）的后期强度较好，但其水化热较小，因此对于大体积的混凝土构件，宜适当提高水泥中的 C_2S 的含量。

7.2.2 集料是混凝土的重要组成，约占混凝土体积总量的 70%~80%，由于集料在混凝土中主要起骨架作用，因此又称骨料。集料分粗集料和细集料两种，其中细集料粒径 0.16~5mm，多为河砂、山砂及人工砂；粗集料粒径大于 5mm，有碎石和卵石两种。粗集料分为三类，I 类宜用于强度等级大于 C60 的混凝土，II 类宜用于强度等级为 C30~C60 及有抗冻、抗渗或其他要求的混凝土，III 类宜用于强度等级小于 C30 的混凝土。

我国将砂按颗粒级配分为 I 区、II 区和 III 区，按细度模数可分为粗、中、细砂三种规格，其细度模数分别为：粗砂：3.7~3.1，中砂：3.0~2.3，细砂：2.2~1.6。将石子分为连续级配和单粒级配。按技术要求可将砂、石分为适用于混凝土强度等级 $\geq \text{C60}$ 、用于混凝土强度等级 C30~C55 或有抗冻、抗渗等要求，用于混凝土强度等级 $\leq \text{C25}$ 三类集料。

7.2.4 拌制混凝土和砂浆用粉煤灰按照类别分为：F 类（由无烟煤或烟煤煅烧收集的粉煤灰）和 C 类（由褐煤或次烟煤煅烧收集的粉煤灰，其氧化钙含量一般大于 10%），粉煤灰可分为三个等级：I 级、II 级、III 级。I 级粉煤灰适用于钢筋混凝土和预应力混凝土，II 级粉煤灰适用于钢筋混凝土和无筋混凝土，III 级则主要用于强度低于 C30 的无筋混凝土。为避免粉煤灰中的氧化钙 CaO 与硫酸盐和铝酸三钙反应生成钙矾石，体积膨胀而导致混凝土破坏，应采用低钙粉煤灰（ $\text{CaO} \leq 10\%$ ），因此，公路工程混凝土结构建议采用 F 类 I 级或 II 级粉煤灰。

筛余量、需水量和烧失量是评价粉煤灰质量的三个主要指标：筛余量反映粉煤灰细度，在一定程度上影响其反应活性；为提高混凝土耐久性并保证其拌合性，通常使用高效减水剂，因此需水量成为衡量粉煤灰的指标之一。粉煤灰中未燃烧颗粒对外加剂具有很大的吸附作用，尤其对引气剂，因此应严格控制粉煤灰的烧失量。

一定的细度能够保证磨细矿渣的反应活性，但是过细的矿渣也不利于控制混凝土水化温升和防裂。

硅灰常用于配制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，且会加剧混凝土温升，通常在工程中与其他矿掺复合使用。

7.2.5 外加剂品种繁多，产品质量参差不齐，根据使用目的和要求主要分为减水剂、引气剂、缓凝剂、早强剂、防冻剂、膨胀剂、泵送剂、防水剂和速凝剂等。工程中应根据设计和施工要求选择适宜外加剂，通过实验及技术经济比较确定用量。

7.3.1 混凝土的强度是混凝土结构的基本力学指标，直接关系结构的耐久性。

7.3.3 混凝土中的游离水给混凝土的耐久性带来不利影响，控制混凝土拌合物最大用水量可以有效地改善其抗渗性、密实性等耐久性能。因此，混凝土单方用水量是影响混凝土的耐久性关键因素。

为保证混凝土拌合物的和易性和工作性，需控制胶凝材料的最小用量。此外，当胶凝材料用量过大时，由于水泥的水化热，会增加混凝土的开裂可能；还会造成混凝土的泛浆分层，降低混凝土耐久性。因此，胶凝材料的用量应满足混凝土的胶凝性能和工作性能，不宜过大或过小。

7.3.5 对于盐结晶环境，对混凝土引气是有效的措施，可仿照冻融环境的要求，将混凝土的引气也作为材料组成要求来解决盐结晶耐久性的问题，这样也可以为单纯避免局部的盐结晶而大范围提高下部结构的强度等级。

为了将混凝土抗冻性指标与实际工程在其环境条件下的使用年限预测相联系，国内外较常使用的是以美国 ASTM C666-86A 标准实验方法为基础的快速冻融循环试验。

7.4.1 水泥基灌浆材料是一种由水泥、集料（或不含集料）、外加剂和矿物掺合料等原材料，经工厂化配制生产而成的具有合理级分的干混料。加水拌和均匀后具有可灌注的流动性、微膨胀、不离析、不泌水、硬化快、早期强度高、性能特点。

7.4.3 水泥基灌浆料的膨胀性反映了材料的形变性能。水泥浆普遍具有高收缩性，容易出现收缩裂缝，对预应力钢筋的耐久性不利。因此，水泥基灌浆料需要具有一定的膨胀量，膨胀量过大也会出现拉应力。

7.4.4 水泥基灌浆料流动性较好，容易产生泌水现象，尤其是需要经泵压灌浆的部位更易发生灌浆料泌水。灌浆料泌水后会出现诸多不利影响，如浆料材质不均表层易形成缺陷，降低防腐性能。

8 结构

8.1.1 临海环境下桥梁工程结构混凝土耐久性设计应遵循全寿命周期设计理念，充分考虑设计使用年限内的检测、维修、更换和加固，保证结构适用性、可修复性与安全性的需要。

8.1.2 实践证明，带铰或带挂孔的悬臂梁及 T 形刚构桥，在铰缝两侧的转角变形会引起行车不平顺。支承铰处应力集中明显，受力复杂，容易造成混凝土开裂等病害。支承在隐形盖梁上的台阶形梁端构造，也有同样的铰缝问题。水和腐蚀性介质在铰缝处的渗漏将给桥梁耐久性造成不利影响。

此外，着眼于提高耐久性的整体式桥梁（无伸缩缝桥梁），在美国和日本等国已有一定的应用实践，待技术成熟后，也可在我国推广应用。

8.1.3 简明的传力路径和简洁平顺的几何形体，有助于提高结构效率，避免应力集中，发挥材料强度，减少桥梁病害。

8.1.4 桥梁工程中工业化制造和架设技术主要包括以下方面：

- 1) 对于混凝土桥梁上部结构及桥墩，可采用整孔、大件或大节段预制及吊装技术；
- 2) 对于多联多跨的预应力混凝土桥梁，可采用节段预制拼装技术；
- 3) 对于多联多跨或大跨径的预应力混凝土桥梁，可采用体内-体外混合配束的预应力体系，并保证体外束的易检修与可更换。

对混凝土桥梁进行整孔、大件或大节段的工厂化预制以及吊装架设，是现代混凝土桥梁工业化的发展方向。工厂化预制有利于从各个工艺环节保障混凝土品质，减少收缩徐变。此外，体外预应力构造具有可检测、可维护、可复张和可更换的特点，有利于提高桥梁在整个设计使用年限内的耐久性。

8.1.5 水是诱发多种环境侵蚀的主要介质，通过完善的防排水系统，避免雨水积存在构件表面，是保障结构耐久性的一项重要措施。

8.2.4 防腐蚀附加措施有多种，如：高性能混凝土（自密实混凝土或纤维混凝土等）。

8.3.1 混凝土最大裂缝计算宽度限值按照环境类别和构件种类选定，其量值的确定主要参考了（GB 50010）《混凝土结构设计规范》、（GB/T 50476-2008）《混凝土结构耐久性设计规程》、（JTG D62-2004）《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》和（TB10005-2010）《铁路混凝土结构耐久性设计规范》等。部分预应力 B 类构件的定义可参照现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》。

8.3.2 混凝土桥梁的结构性裂缝和非结构性裂缝成因不同，应区分对待。这里所指的结构性裂缝为荷载作用造成的裂缝，非结构性裂缝指温度、收缩等非荷载因素引起的裂缝。

8.3.3 预应力混凝土桥梁抗裂设计的基本验算内容是截面的拉应力和主拉应力验算，但这种验算只是保障结构抗裂性的必要条件之一，还不是充分条件。对于预应力混凝土桥梁，还应当关注成桥状态下的结构内力分布和关键截面应力状态。调查表明，很多大跨径预应力混凝土梁桥在运营期发生梁体开裂和跨中持续下挠现象，研究表明，可以通过合理的预应力设计使之达到合理成桥状态，从而减轻多种时效因素带来的不利影响。

混凝土桥梁中的应力扰动区，又称 D 区（Disturbed region），是指混凝土结构中截面应变分布不符合平截面假定的区域。混凝土桥梁中的 D 区主要包括：各类预应力锚固区（如齿板锚固区、凹槽锚固区、端部锚固区等）、跨高比较小的深梁类构件（如承台、墩台盖梁、横隔梁等）以及临近支座的小剪跨比（剪跨比小于 2）区域。应力扰动区的受拉部位配筋设计，可应用实体有限元分析方法或者拉压杆模型方法进行。

在应用实体有限元分析方法时，配筋计算可参照如下原则：（1）结构按承载力计算所需钢筋用量，可由弹性实体有限元分析得到的截面拉应力图形面积确定；（2）对于混凝土开裂后受力状态有显著变化的部位，所需钢筋用量按弹性拉应力图形面积确定后，还宜通过非线性有限元分析评估结构的抗裂性和承载力。

拉压杆模型是从连续体内抽象出的离散桁架模型,由压杆、拉杆和节点组成,用以反映连续体内部力流的传递。在应用拉压杆模型进行配筋设计时,在正常使用状态下,应限制拉杆钢筋应力不大于 $0.6f_y$ 或 200MPa,以有效控制桥梁结构局部区的裂缝宽度。

超载运营是指桥涵上实际通行汽车荷载产生的作用效应超过了规范汽车荷载所产生的效应(总体或局部),会导致桥涵应力幅加大,加剧混凝土桥涵的疲劳损伤,造成桥涵内部不可恢复的损伤,导致裂缝过早出现,危及桥梁的耐久性和安全性。对于危旧桥涵,超载甚至会导致混凝土桥涵承载力破坏,直接发生垮塌事故。

8.4.1 桥梁支座设计应考虑其可检修、可更换性。例如,设置到达支座位置的扶梯和检修车,在墩顶或盖梁上预留有放置千斤顶等提升设备的空间和为工作人员留有检查和维修的操作平台等。

8.4.2 高墩和位于水中的桥墩在不同高程处所受的环境作用变化较大时,可以分阶段进行耐久性设计。例如对于位于水中的桥墩,可分为水下区、水位变动区(浪溅区)和大气区分别进行耐久性设计。

8.4.4 桥涵防水设计要注意整体性,即不但要充分重视桥面部分(主梁),也不可忽略伸缩缝、接缝等部位的防水要求。桥涵本身的排水系统必须和路基排水等周围其他的排水系统协调一致,才能保证水流被及时收集和排出桥涵范围。此外,桥涵防、排水系统构件的使用寿命通常较短,应该满足可检、可修、可换的要求。

8.5.1 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。后张法还分为有粘结预应力体系、无粘结预应力体系、体外预应力体系等。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。

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;或者在设计阶段预留预应力孔道以备再次设置预应力筋。

为保持与(GB/T 50476-2008)《混凝土结构耐久性设计规范》相关内容的一致性,本节对预应力体系采取的多重防护措施,主要参考了该规范第8章,并有适度简化。

8.5.2 本条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 PS1、PS2、PS3、PS4 和 PS5;涉及体外预应力体系的防护措施有 PS1、PS2 和 PS3。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。

8.5.3 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、结果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

PS2 和 PS4；对于体外预应力，基本的防护要求为 PS2 和 PS3。

8.5.6 本条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 PA1、PA2、PA3、PA4 和 PA5；涉及暴露式锚头的防护措施有 PA1、PA2 和 PA3。这些防护措施的使用应根据混凝土结构的环境类别和作用等级确定。

8.5.7 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、结果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 PA4；对于暴露式锚固端，基本的防护要求为 PA2 和 PA3。

9 防腐蚀附加措施

9.1.1 国内外大量临海工程实践证明表明，在严重的腐蚀环境中，混凝土本身不足以保护钢筋免遭侵蚀，提高结构自身和钢筋的抗腐蚀能力，是提高结构耐久性的重要措施之一。

9.2.1 目前国内无缺陷环氧涂层钢筋产品的使用年限约为 12 年，因其一旦失效则无法更换，故在使用时要保证混凝土自身的耐久性能。保证环氧膜层的完整性是环氧涂层钢筋得以防锈的关键，因此，应注意环氧涂层钢筋的施工质量及生产工艺。

9.2.2 在高浓度氯化物环境中，镀锌钢筋防护效果不良，热浸锌方法更适用于混凝土中辅助金属件的防护。

一般情况下，镀层过厚（ $>250\mu\text{m}$ ）的产品应加工后再镀锌，对所有边缘和接点均要提供覆盖保护，同时避免对镀层造成不必要的破坏，使未保护边缘的暴露最小。

9.2.3 不锈钢钢筋近年来得到了发展和应用。为了保证结构的设计使用年限，采用不锈钢钢筋比较可靠，虽然其价格较贵，但在某些情况下，从结构全寿命周期成本来看还是经济合理的。

9.3.3 相关行业标准都规定了钢筋阻锈剂的防腐蚀有效性以及对混凝土的无害性，但阻锈剂自身的长期有效性同样重要，新型阻锈剂的长期有效性需得到验证。钢筋阻锈剂可按《水运工程混凝土试验规程》进行阻锈剂质量验证试验。

9.3.5 掺加高效可靠的阻锈剂作为补充防腐蚀措施，以适当提高混凝土的护筋性；而保证阻锈剂长期维持可靠的防腐蚀效果，仍有赖于混凝土保护层本身的抗氯离子扩散性能，因此，应按照相关规定严格控制混凝土的质量。

9.3.6 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钢筋阻锈剂后再加入其他外加剂，搅拌时间可延长 1~3 分钟。

9.4.1 近海或海水环境中的水位变动区的 E、F 级，一般冻融环境中的中度饱水混凝土，盐结晶环境中的 F 级环境的混凝土均可采用表面涂层。被涂装的混凝土结构，只有通过验收合格，才能发挥涂层的防腐效果。

9.4.2 涂层体系一般性能要求：（1）具有抗 CO_2 渗透性能和防碳化能力；（2）具有对水、氧气等腐蚀因子很好的屏蔽性能；（3）具有很好的力学性能，能够适应混凝土的形变；（4）具有相应的耐候性能。

底层涂料应具有低粘度和高渗透能力，可渗透到混凝土内起封闭空隙和提高后续涂层附着力的作用；中间层应具有较好的防腐蚀能力，能抵抗外界有害介质的侵入；面层应具有抗老化性，对中间层和底层起保护作用。混凝土表面涂层的耐久性和防护效果，与混凝土涂装前的表面处理关系很大。良好的表面处理，能使混凝土经久耐用，防护效果也显著。

9.5.1 硅烷浸渍处理技术通过憎水以及与混凝土基体化学键合等多重功效来对混凝土结构进行防护，降低混凝土的吸水性、提高混凝土的抗氯离子渗透性具有显著的作用，是提高混凝土结构耐久性的重要技术途径。混凝土表面硅烷浸渍材料也可采用符合（JTJ 275）《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》要求的其他硅烷浸渍材料。

9.5.2 与阴极保护、环氧涂层钢筋相比，浸渍硅烷较经济，施工简便，憎水效果可保持 15 年以上。

9.5.3 浸渍硅烷的质量验收可参照欧洲标准草案（prEN 13580）。工程上为了加强对浸渍硅烷的质量控制，除按上述 prEN 规定水灰比 0.70 的混凝土试件监测浸渍深度外，尚应保留原（JTJ 275）《海港混凝土结构防腐蚀技术规范》的检测评定规定。

9.6.1 水泥基渗透结晶防水剂可形成不溶于水的蔓枝状非溶性晶体，堵塞毛细孔道，使混凝土致密，整体防水。对结构使用过程中新产生的宽度为 0.44~1mm 的细裂缝，会遇水产生新的晶体，对裂缝具有自愈合封闭的功能。

9.7.1 混凝土防腐面层是一种较直观的防腐蚀防护构造，易于检查和修复。通常，在新建工程中实施的造价比既有工程的修复低 60%~80%，因此，新建工程的设计过程中应充分考虑这一技术。采用聚酯类玻璃钢等聚合物复合材料，施工质量控制简便但造价较高；采用聚合物水泥砂浆材料，施工的质量控制要求较高但造价较低。

9.7.2 聚合物水泥砂浆面层的施工及验收可参照标准（HGJ 229）《工业设备、管道防腐蚀工程施工及验收规范》执行。

9.8.1 采用带透水衬里的模板，可明显改善混凝土保护层的施工质量，提高表层混凝土的密实度。衬里产品较多，效果各异，使用前应注意进行实验对比。

9.9.1 钢筋混凝土的电化学保护包括外加电流阴极保护、牺牲阳极阴极保护、电化学脱盐和电化学再碱化等技术。

采用 MMO 涂层的钛带阳极的外加电流阴极保护技术适用于长寿命关键结构的保护；与此类似的还有离散阳极型外加电流保护技术；夹套式牺牲阳极技术适合于处于潮差区的承台和桥墩的保护；埋入式牺牲阳极保护技术适合于钢筋混凝土结构和路面的局部修复；牺牲阳极和涂层联合保护技术适用于钢管桩的保护；电化学脱盐和电化学再碱化技术适用于受氯盐污染和严重碳化的在役混凝土结构的修复。

当混凝土中的钢筋电极电位负于 -200mV(CSE) 时（应扣除测量系统的 IR 降的影响，宜采用瞬时断电电位），说明钢筋处于腐蚀状态，应采用阴极保护措施。阴极保护效果的判据是：采用阴极保护措施

后，混凝土中任一具有代表性位置的钢筋电极电位都应满足如下要求之一：

- 1) 瞬时断电电位负于-850mV(CSE);
- 2) 在停止阴极保护 24 小时后，电极电位的衰减不应小于 100mV。

电化学脱盐也被称为电化学除氯或电化学除盐。采用 1--3A/m² 电流，系统最大电压不超过 50V 处理为宜。脱盐终点的判定是满足下列条件之一：

- 1) 当混凝土中 Cl-含量小于水泥用量的 0.2%~0.4%时为脱盐终点；
- 2) 最小处理电量 600~1500A hr/m²。