**CECS T/CECS XXX：202X**

**中国工程建设标准化协会标准**

**耐蚀钢筋混凝土应用技术规程**

Technical specification for application of corrosion-resistant reinforced concrete

 **（征求意见稿）**

**2022 北 京**

**中国工程建设标准化协会标准**

**耐蚀钢筋混凝土应用技术规程**

Technical specification for application of corrosion-resistant reinforced concrete

**T/CECS XXX:202X**

**主编单位：****东南大学**

**批准单位：中国工程建设标准化协会**

**施行日期：202X年X月X日**

**中国XX出版社**

**202X 北京**

**前 言**

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2021年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2021]20号）的要求，深入调查研究，认真总结工程实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为7章和4个附录，主要技术内容包括总则、术语和符号、基本规定、原材料、设计、施工及质量验收。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会防水防护与修复专业委员会归口管理，由东南大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议请寄送东南大学（地址：江苏省南京市江宁区东南大学材料科学与工程学院，邮编：211189）。

主编单位： 东南大学

参编单位： 青岛理工大学、江苏沙钢集团有限公司、中国铁路设计集团有限公司、中国铁道科学研究院集团有限公司、石家庄铁道大学、河海大学、中交公路规划设计院有限公司、海军研究院、贵州省军区动员局、青岛青建蓝谷新型材料有限公司、青岛市建筑工程管理服务中心

主要起草人：蒋金洋、金祖权、麻晗、苏伟、李化建、郭东、陈兆毅、许春荣、王鹏刚、刘志勇、孙国文、许文祥、陈焕德、隋圣陶、于琦、高翔、王凤娟、眭世玉、芦泽宇、黄法礼、王振、沈志强、杨志强、辛忠毅、郭乐、王立国

主要审查人：

**目 录**

1 总则 ························································································ 1

2 术语和符号 ··············································································· 2

 2.1 术语 ························································································ 2

 2.2 符号 ······················································································· 2

3 基本规定 ··············································································· 3

4 原材料 ·················································································· 5

 4.1 混凝土 ··············································································· 5

 4.2 耐蚀钢筋 ···················································································· 5

 4.3 耐蚀钢筋连接 ···················································································· 7

5 设计 ······················································································· 8

 5.1 一般规定 ·············································································· 8

 5.2 环境类别和环境作用等级 ························································· 9

 5.3 材料与保护层厚度 ········································································· 13

 5.4 构件设计 ············································································ 18

 5.5 构造与措施 ············································································ 18

6 施工 ····················································································· 21

 6.1 一般规定 ····································································· 21

 6.2 材料 ··········································································· 21

 6.3 混凝土制备与运输 ································································· 21

 6.4 耐蚀钢筋加工 ····································································· 22

 6.5 耐蚀钢筋连接与安装 ······························································· 23

7质量验收 ··············································································· 24

 7.1耐蚀钢筋分项工程 ····································································· 24

 7.2混凝土分项工程 ····································································· 27

附录A 耐蚀钢筋混凝土耐久性设计·············································· ········30

附录B 传输时变系数计算 ································································ 34

附录C 硫酸盐作用保护层剥落厚度计算 ············································· 36

附录D 硫酸盐—氯盐耦合作用保护层剥落厚度计算 ······························· 38

本规程用词说明 ········································································· 40

引用标准名录 ·············································································· 41

附：条文说明 ············································································· 43

**Contents**

1 General Provisions ··································································· 1

2 Terms and Symbols ···································································· 2

 2.1 Terms ······················································································ 2

 2.2 Symbols ··················································································· 2

3 General Requirements ······························································ 3

4 Materials ················································································ 5

 4.1 Concrete ························································································· 5

 4.2 Corrosion Resistance Bars ··································································· 5

 4.3 Corrosion Resistance Bars Connection ······················································· 7

5 Design ··················································································· 8

 5.1 General Requirements ·································································· 8

 5.2 Classes and Intensities of Environmental Actions ···································· 9

 5.3 Materials and Concrete Cover ······················································ 13

 5.4 Design of Construction Components ··········································· 18

 5.5 Detailing and Protection Measures ··············································· 18

6 Construction ···························································· 21

 6.1 General Reinforcement ··································································· 21

 6.2 Materials ········································································ 21

 6.3 Concrete Preparation and Transportation ·················································· 21

 6.4 Corrosion Resistance Bars Fabrication ·················································· 22

 6.5 Corrosion Resistance Bars Connection and Installation ······························· 23

7 Quality Acceptance ······························································· 24

 7.1 Reinforcement ··············································································· 24

 7.2 Concrete ·············································································· 27

Appendix A Durability Design of Corrosion Resistance Bars Concrete ················30

Appendix B Calculation of transmission time-varying coefficient ························ 34

Appendix C Calculation of failure cover thickness in sulfate environment ········ 36

Appendix D Calculation of failure cover thickness in Sulfate chloride coupling environment ·················································································· 38

Explanation of Wording in This Specification ······································· 40

List of Quoted Standards ······························································· 41

Addition: Explanation of provisions ··············································· 43

**1 总 则**

* + 1. 为贯彻执行国家节能减排的技术经济政策，在混凝土结构工程中推广应用耐蚀钢筋，做到技术先进、长效耐久、安全适用、经济合理，制定本规程。
		2. 本规程适用于采用耐蚀钢筋的重要混凝土结构与构件设计、施工和质量验收。
		3. 采用耐蚀钢筋的重要混凝土结构与构件的设计、施工及质量验收，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

**2** **术语和符号**

**2.1 术语**

* + 1. **耐蚀钢筋 corrosion resistance bars**

根据钢筋使用环境类别的不同，在钢中加入适量的耐腐蚀合金元素（如Cu、P、Cr、Ni、Mo、Re等，其中Cr元素含量应在5%~10%），具有相对腐蚀率低于20%，临界氯离子浓度为普通钢筋5倍以上等高耐腐蚀性特点，并按照热轧或控轧控冷状态交货的钢筋。

* + 1. **平均腐蚀速率average corrosion rate**

钢筋在腐蚀试验中单位面积、单位时间的平均失重量。

**2.2 符号**

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——耐蚀钢筋直径； |
| *E*S | ——耐蚀钢筋的弹性模量； |
|  | ——耐蚀钢筋的抗拉、抗压强度设计值； |
| HRB400cHRB500c | ——强度等级为400MPa、500 MPa的耐蚀钢筋； |
| HRB400cEHRB500cE | ——强度等级为400MPa、500 MPa的用于抗震结构的耐蚀钢筋； |
|  | ——钢筋试样长度； |
|  | ——试验时间； |
|  | ——相对腐蚀率； |
| *V*c | ——钢筋的平均腐蚀速率； |
| *V*cc | ——耐蚀钢筋的平均腐蚀速率； |
| *V*cs | ——HRB400钢筋的平均腐蚀速率； |
|  | ——钢筋试样原始质量； |
|  | ——钢筋试样试验后质量。  |

**3 基本规定**

* + 1. 采用耐蚀钢筋的混凝土结构工程应进行结构耐久性极限状态设计，并应符合工程的功能和结构性能要求。
		2. 混凝土配合比设计应满足混凝土配制强度及其他力学性能、拌合物性能、长期性能和耐久性能的设计要求。混凝土拌合物性能、力学性能、长期性能和耐久性能的试验方法应分别符合现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080、《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081和《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082的规定。
		3. 混凝土结构构件的最小截面尺寸应满足结构承载力极限状态、正常使用极限状态、耐久性极限状态的计算要求，并应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《混凝土结构通用规范》GB 55008的相关规定。
		4. 采用耐蚀钢筋混凝土结构的设计使用年限不应低于现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001的相关规定。
		5. 采用耐蚀钢筋混凝土结构暴露的侵蚀环境类别应按表3.0.5的规定划分。

**表3.0.5环境类别及劣化机理**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 环境类别 | 海洋氯化物环境（Ⅲ） | 除冰盐环境（Ⅳ） | 盐渍土环境（Ⅵ） |
| 劣化机理 | 氯盐引起钢筋锈蚀 | 氯盐引起钢筋锈蚀 | 氯盐-硫酸盐耦合引起混凝土保护层损伤剥落，钢筋锈蚀 |

注：1 暴露的环境是指混凝土结构表面所处的环境；

2 表括号中符号为环境类别的代号。

* + 1. 当施工中进行混凝土结构构件的钢筋代换时，应符合现行国家标准《混凝土结构通用规范》GB 55008的有关规定。
		2. 配筋混凝土结构的环境作用等级应按表3.0.7的规定确定。

**表3.0.7 环境作用等级**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  环境作用等级环境作用类别 | C中度 | D严重 | E非常严重 | F-1极端严重 | F-2极端严重 | F-3极端严重 |
| 海洋氯化物环境（Ⅲ） | Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F-1 | - | - |
| 除冰盐环境（Ⅳ） | Ⅳ-C | Ⅳ-D | Ⅳ-E | Ⅳ-F-1 | - | - |
| 盐渍土环境（Ⅵ） | Ⅵ-C | Ⅵ-D | Ⅵ-E | Ⅵ-F-1 | Ⅵ-F-2 | Ⅵ-F-3 |

* + 1. 进行混凝土结构加固、改造时，应考虑既有混凝土结构、构件等与新设混凝土结构、构件等的协同工作效应，并符合现行国家标准《混凝土结构通用规范》GB 55008的有关规定。
		2. 采用耐蚀钢筋的混凝土结构设计，除应符合本规程的要求外，尚应符合现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001、《混凝土结构通用规范》GB 55008、《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002和《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定。

# 4 原材料

**4.1 混凝土**

* + 1. 混凝土结构的混凝土强度等级、水胶比和原材料组成应根据结构所处的环境类别和结构设计使用年限确定。
		2. 采用400MPa级耐蚀钢筋时，混凝土强度等级不应低于C25；采用500MPa级耐蚀钢筋时，混凝土强度等级不应低于C30。
		3. 混凝土的强度标准值、强度设计值、弹性模量等应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定采用。

4.2 耐蚀钢筋

* + 1. 用于混凝土结构的耐蚀钢筋性能指标应符合现行国家标准《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33953、《海洋工程混凝土用高耐蚀性带肋钢筋》GB/T 34206的相关规定。耐蚀钢筋的化学成分（熔炼分析）应符合表4.2.1的规定。

**表4.2.1 耐蚀钢筋化学成分（质量分数）%**

|  |  |
| --- | --- |
| 牌号 | 化学成分（质量分数）% |
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Sn | Cu | V |
| 不大于 |
| HRB400cHRB400cE HRB500cHRB500cE | 0.08 | 0.8 | 2.5 | 0.02 | 0.02 | 5.0~10.0 | 0.80~1.80 | ≤0.30 | ≤0.50 | 0.03~0.15 |

注：根据需要，耐蚀钢筋中还可加入Re、Ti等元素。

* + 1. 耐蚀钢筋的强度标准值应具有不小于95%的保证率。耐蚀钢筋的屈服强度标准值*f*yk、极限强度标准值*f*stk应按表4.2.2采用。

**表4.2.2 耐蚀钢筋强度标准值（N/mm2）**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 牌号 | 符号 | 公称直径d（mm） | 屈服强度标准值*f*yk | 极限强度标准值*f*stk |
| HRB400cHRB400cE | c  | 6~50 | 400 | 540 |
| HRB500cHRB500cE | c | 6~50 | 500 | 630 |

* + 1. 耐蚀钢筋的抗拉强度设计值*f*y、抗压强度设计值*f*y'应按表4.2.3采用，并应满足下列规定：

**1** 当构件中配有不同种类的钢筋时，每种钢筋应采用各自的强度设计值；

**2** 对轴心受压构件，当采用500MPa级耐蚀钢筋时，钢筋的抗压强度设计值*f*y' 应取400N/mm2;

**3** 纵向钢筋的抗拉强度设计值*f*yv应按表中*f*y的数值采用；

**4** 当用作受剪、受扭、受冲切承载力计算时，其数值应取360N/mm2。

**表4.2.3 耐蚀钢筋强度设计值（N/mm2）**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 牌号 | 抗拉强度设计值*f*y | 抗压强度设计值*f*y' |
| HRB400c、HRB400cE | 360 | 360 |
| HRB500c、HRB500cE | 435 | 435 |

* + 1. 耐蚀钢筋的最大力总伸长率*δ*gt不应小于表4.2.4规定的数值。

**表4.2.4 耐蚀钢筋的最大力总伸长率限值**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 牌号 | HRB400c、HRB500c | HRB400cE、HRB500cE |
| *δ*gt（%） | 7.5 | 9.0 |

* + 1. 耐蚀钢筋的疲劳应力幅限值，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的要求。
		2. 耐蚀钢筋与现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋》GB/T1499.2中HRB400牌号比照，相对腐蚀率应低于20%，相对腐蚀率应按下式计算：

 （4.2.6-1）

 （4.2.6-2）

式中：——相对腐蚀率；

*V*cc——耐蚀钢筋的平均腐蚀速率（g/m2·h）；

*V*cs——HRB400钢筋的平均腐蚀速率（g/m2·h）；

 ——钢筋试样原始质量（g）；

 ——钢筋试样腐蚀试验后质量（g）；

*V*c——钢筋的平均腐蚀率（g/m2·h）；

 ——钢筋试样长度（mm）；

 ——钢筋试样直径（mm）；

——试验时间（h）。

**4.3 耐蚀钢筋连接**

* + 1. 当耐蚀钢筋采用焊接连接时，焊材应符合下列规定：

**1** 牌号为HRB400c、HRB400cE耐蚀钢筋的焊接材料推荐选用现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117中的E5015-GP；

**2** 牌号为HRB500c、HRB500cE耐蚀钢筋的焊接材料推荐选用现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117中的E5016-G；

**3** 焊接连接相关技术要求应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18。

* + 1. 当耐蚀钢筋采用机械连接时，耐蚀钢筋之间机械连接用连接件的原材料宜采用与耐蚀钢筋母材相同材质的棒材或无缝钢管，耐蚀钢筋与普通钢筋机械连接的原材料可采用与普通钢筋材料相同材质的棒材或无缝钢管，并应符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107 的相关规定。
		2. 当耐蚀钢筋采用套筒灌浆连接时，所采用的套筒、灌浆料及相关技术要求应符合现行行业标准《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》JGJ 355、《钢筋连接用灌浆套筒》JG/T 398及《钢筋连接用套筒灌浆料》JG/T 408的相关规定。
		3. 当耐蚀钢筋采用绑扎连接或螺栓时，用于连接的绑扎或螺栓材料应采用与耐蚀钢筋耐腐蚀等级相同或更好的材料。
		4. 耐腐蚀性能钢筋用锚固板的原材料宜采用与耐腐蚀性能钢筋母材同材质的棒材。

**5 设计**

**5.1 一般规定**

* + 1. 严酷氯盐侵蚀环境混凝土结构或构件耐久性按以下两种极限状态设计：

1) 钢筋开始锈蚀的极限状态。指的是钢筋表面氯离子浓度达到临界氯离子浓度的状态。重要、重大工程的混凝土结构主要构件，宜采用钢筋开始锈蚀的极限状态。对锈蚀敏感的预应力钢筋、冷加工钢筋或直径不大于6 mm的普通热轧钢筋作为受力主筋时，应以钢筋开始锈蚀作为极限状态。

2) 混凝土保护层锈胀开裂极限状态。指钢筋锈蚀产物引起混凝土保护层胀裂状态。同一混凝土结构的不同部位所处的环境作用不同时，应根据具体情况对不同部位所处的环境类别及作用等级进行确定，当结构构件受到两种环境类别共同作用时，应分别符合每种环境类别单独作用下的耐久性要求。

* + 1. 氯化物环境作用等级为E、F-1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做出定期检测的详细规划，并设置专供检测取样用的构件。
		2. 对于采用耐蚀钢筋的混凝土工程，采用经验方法设计时，应符合下列规定：

**1** 处于Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ类环境中C、D、E类作用等级的混凝土结构，当采用耐蚀钢筋时，可不采用防腐蚀附加措施；

**2** 对于其他情况，耐蚀钢筋应按表5.1.3选用。

**表5.1.3 各环境作用等级耐蚀钢筋选用表**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | Ⅲ-C、Ⅲ-D、Ⅲ-E | Ⅲ-F-1 | Ⅳ-C、Ⅳ-D、Ⅳ-E | Ⅳ-F-1 | Ⅵ-C、Ⅵ-D、Ⅵ-E | Ⅵ-F-1、Ⅵ-F-2、Ⅵ-F-3 |
| 耐蚀钢筋 | √ | ○ | √ | ○ | √ | ○ |

注：1 √表示选用时可不采用防腐蚀附加措施；

2 ○表示可选用，选用时应按第5.1.4条同时采用不少于1种防腐蚀附加措施。

* + 1. 防腐蚀附加措施包括混凝土表面涂层、硅烷浸渍，以及阻锈剂等。
		2. 阻锈剂的使用，应符合现行行业标准《钢筋阻锈剂应用技术规程》JGJ/T 192的有关规定。
		3. 耐蚀钢筋混凝土结构采用其他防腐蚀附加措施时，应经过专门的技术论证证明其抵抗环境腐蚀介质侵蚀的能力。

5.2 环境类别和环境作用等级

* + 1. 海洋氯化物环境对混凝土结构构件的环境作用等级，应按表5.2.1确定。

**表5.2.1 海洋氯化物环境的作用等级**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 环境条件 | 混凝土结构示例 |
| Ⅲ-C | 非炎热地区水下区和土中区水中氯离子浓度：100~2000 mg/L土中氯离子浓度：150~3000 mg/kg | 桥墩，承台，基础，抗浮锚杆（抗浮桩） |
| Ⅲ-D | 非炎热地区水下区和土中区水中氯离子浓度：2000~5000 mg/L土中氯离子浓度：3000~7500 mg/kg | 桥墩，承台，基础，抗浮锚杆（抗浮桩） |
| 非炎热地区大气区（轻度盐雾）：距平均水位15m高度以上的海上大气区；涨潮岸线以外100m~300m内的陆上室外环境 | 桥墩，桥梁上部结构构件；靠海的陆上建筑外墙及室外构件 |
| Ⅲ-E | 非炎热地区潮汐区和浪溅区水中氯离子浓度：5000~20000 mg/L | 处于水位变动区，或部分暴露于大气、部分在地下水中的混凝土桥墩，承台 |
| 炎热地区大气区（重度盐雾）：距平均水位上方15m高度以内的海上大气区；离涨潮岸线100m以内、低于海平面以上15m的陆上室外环境 | 桥墩，桥梁上部结构构件；靠海的陆上建筑外墙及室外构件 |
| Ⅲ-F-1 | 炎热地区潮汐区和浪溅区水中氯离子浓度：5000~20000 mg/L | 处于水位变动区，或部分暴露于大气、部分在地下水中的混凝土桥墩，承台 |

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

2 受到海水激流和海砂冲刷的构件，其保护层厚度应适当增加。

3 轻度盐雾区与重度盐雾区界限的划分，宜根据当地的具体环境和既有工程调查确定。

靠近海岸的陆上建筑物，盐雾对室外混凝土构件的作用尚应考虑风向、地貌等因素。

4 炎热地区指年平均温度高于20℃的地区。

* + 1. 除冰盐环境对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5.2.2确定。

**表5.2.2 除冰盐环境的作用等级**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 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，水中氯离子浓度：100~500 mg/L | 距离行车道10m以外接触盐雾的构件 |
| 四周浸没于含氯化物水中，水中氯离子浓度：100~500 mg/L | 地下水中构件 |
| 接触低浓度氯离子水体，且有干湿交替，水中氯离子浓度：100~500 mg/L，土中氯离子浓度：150~750mg/kg | 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，水中氯离子浓度：500~5000 mg/L | 桥梁护墙（栏），立交桥桥墩 |
| 接触较高浓度氯离子水体，且有干湿交替，水中氯离子浓度：500~5000 mg/L，土中氯离子浓度：750~7500mg/kg | 海水游泳池壁：处于水位变动区或部分暴露于大气、部分在地下水土中的构件 |
| Ⅳ-E | 直接接触除冰盐溶液，水中氯离子浓度：5000~10000 mg/L | 路面，桥面板，与含盐渗漏水接触的桥梁盖梁、墩柱顶面 |
| 受除冰盐水溶液重度溅射或重度盐雾作用，水中氯离子浓度：5000~10000 mg/L | 桥梁护栏、护墙，立交桥桥墩；车道两侧10m以内的构件 |
| 接触高浓度氯离子水体，有干湿交替，水中氯离子浓度：5000~10000 mg/L，土中氯离子浓度：7500~15000mg/kg | 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-F-1 | 直接接触除冰盐溶液，水中氯离子浓度：10000~20000 mg/L | 路面，桥面板，与含盐渗漏水接触的桥梁盖梁、墩柱顶面 |
| 受除冰盐水溶液重度溅射或重度盐雾作用，水中氯离子浓度：10000~20000 mg/L | 桥梁护栏、护墙，立交桥桥墩；车道两侧5m以内的构件 |
| 接触极高浓度氯离子水体，有干湿交替，水中氯离子浓度：10000~20000mg/L，土中氯离子浓度：15000~30000mg/kg | 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： 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。

* + 1. 盐渍土环境对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5.2.3确定。

 **表5.2.3 盐渍土环境的作用等级**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 环境条件 | 混凝土结构示例 |
| 水中离子浓度 | 土中离子浓度 |
| Ⅵ-C | 氯离子浓度：100~500 mg/L硫酸根离子浓度：100~2000 mg/L | 氯离子浓度：150~750 mg/kg硫酸根离子浓度：150~3000 mg/kg | 非炎热环境盐湖地区等部分暴露于水中、土中的混凝土桥墩、承台、基础等结构构件 |
| Ⅵ-D | 氯离子浓度：500~2000 mg/L硫酸根离子浓度：2000~5000 mg/L | 氯离子浓度：750~3000 mg/kg硫酸根离子浓度：3000~7500 mg/kg | 非炎热环境盐湖地区等部分暴露于水中、土中的混凝土桥墩、承台、基础等结构构件 |
| Ⅵ-E | 氯离子浓度：2000~5000 mg/L硫酸根离子浓度：5000~10000 mg/L | 氯离子浓度：3000~7500 mg/kg硫酸根离子浓度：7500~15000 mg/kg | 非炎热环境盐湖地区等部分暴露于水中、土中的混凝土桥墩、承台、基础等结构构件 |
| Ⅵ-F-1 | 氯离子浓度：5000~20000 mg/L硫酸根离子浓度：10000~12500 mg/L | 氯离子浓度：7500~30000 mg/kg硫酸根离子浓度：15000~18750 mg/kg | 非炎热环境盐湖地区等部分暴露于水中、土中的混凝土桥墩、承台、基础等结构构件 |
| Ⅵ-F-2 | 氯离子浓度：20000~50000 mg/L硫酸根离子浓度：12500~15000mg/L | 氯离子浓度：30000~75000 mg/kg硫酸根离子浓度：18750~22500 mg/kg | 非炎热环境盐湖地区等全部或部分暴露于水中、土中的混凝土桥墩、承台、基础等结构构件 |
| 氯离子浓度：5000~20000 mg/L硫酸根离子浓度：10000~12500 mg/L | 氯离子浓度：7500~30000 mg/kg硫酸根离子浓度：15000~18750 mg/kg | 炎热环境盐湖地区等全部或部分暴露于水中、土中的混凝土桥墩、承台、基础等结构构件 |
| Ⅵ-F-3 | 氯离子浓度：＞50000 mg/L硫酸根离子浓度：＞15000mg/L | 氯离子浓度：＞75000 mg/kg硫酸根离子浓度：＞22500 mg/kg | 非炎热环境盐湖地区等全部或部分暴露于水中、土中的混凝土桥墩、承台、基础等结构构件 |
| 氯离子浓度：＞20000 mg/L硫酸根离子浓度：＞12500 mg/L | 氯离子浓度：＞30000 mg/kg硫酸根离子浓度：＞18750 mg/kg | 炎热环境盐湖地区和盐渍土地区等全部暴露于水中的混凝土桥墩、承台、基础等结构构件 |

注：1 盐渍土地区的建筑工程应评价水、温度、湿度等环境条件对盐渍土地基的影响，并提出处理措施的建议。

2 表中所规定的土中离子浓度，是在土样中加水溶出的浓度(水溶值)；

3 炎热地区指年平均温度高于20℃的地区。

5.3 材料与保护层厚度

1. 对混凝土的耐久性质量和原材料选用要求除了应符合《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476附录B的规定外，原材料还应符合本标准第4章的相关规定。
2. 采用耐蚀钢筋的混凝土结构，其混凝土保护层最小厚度及其相应的混凝土强度等级、最大水胶比应符合表5.3.2-1、5.3.2-2及5.3.2-3 的规定，且钢筋的保护层厚度不应小于钢筋的公称直径。

**表5.3.2-1 海洋氯化物环境中混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度*c***（mm）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 设计使用年限环境作用等级 | 120年 | 100年 | 50年 |
| 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d最大氯离子扩散系数(10-12m2/s) | *c* | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d最大氯离子扩散系数(10-12m2/s) | *c* | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d最大氯离子扩散系数(10-12m2/s) | *c* |
| 箱梁、桥墩等条形构件 | Ⅲ-C | C40C45 | 0.420.40 | 8.07.5 | 4035 | C35C40 | 0.440.42 | 8.58.0 | 4035 | C35C40 | 0.440.42 | 10.09.5 | 3530 |
| Ⅲ-D | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.56.0 | 4540 | C40≥C45 | 0.420.40 | 7.06.0 | 4035 | C35≥C40 | 0.440.42 | 9.58.5 | 4035 |
| Ⅲ-E | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 4540 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 4035 | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.05.0 | 4035 |
| Ⅲ-F-1 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 5045 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 4540 | C45≥C50 | 0.400.36 | 5.04.5 | 4035 |
| 码头面板等面形构件 | Ⅲ-C | C40C45 | 0.420.40 | 8.07.5 | 3530 | C35C40 | 0.440.42 | 8.58.0 | 3530 | C35C40 | 0.440.42 | 10.09.5 | 3025 |
| Ⅲ-D | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.56.0 | 4035 | C40≥C45 | 0.420.40 | 7.06.0 | 3530 | C35≥C40 | 0.440.42 | 9.58.5 | 3530 |
| Ⅲ-E | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 4035 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 3530 | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.05.0 | 3530 |
| Ⅲ-F-1 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 4540 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 4035 | C45≥C50 | 0.400.36 | 5.04.5 | 3530 |

**表5.3.2-2 除冰盐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 | 120年 | 100年 | 50年 |
| 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d最大氯离子扩散系数(10-12m2/s) | *c* | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d最大氯离子扩散系数(10-12m2/s) | *c* | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d最大氯离子扩散系数(10-12m2/s) | *c* |
| 箱梁、桥墩等条形构件 | Ⅳ-C | C40C45 | 0.420.40 | 8.07.5 | 4540 | C35C40 | 0.440.42 | 8.58.0 | 4540 | C35C40 | 0.440.42 | 10.09.5 | 4035 |
| Ⅳ-D | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.56.0 | 5045 | C40≥C45 | 0.420.40 | 7.06.0 | 4540 | C35≥C40 | 0.440.42 | 9.58.5 | 4540 |
| Ⅳ-E | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5550 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5045 | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.05.0 | 5045 |
| Ⅳ-F-1 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 6055 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5550 | C45≥C50 | 0.400.36 | 5.04.5 | 5045 |
| 码头面板等面形构件 | Ⅳ-C | C40C45 | 0.420.40 | 8.07.5 | 4035 | C35C40 | 0.440.42 | 8.58.0 | 4035 | C35C40 | 0.440.42 | 10.09.5 | 3530 |
| Ⅳ-D | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.56.0 | 4540 | C40≥C45 | 0.420.40 | 7.06.0 | 4035 | C35≥C40 | 0.440.42 | 9.58.5 | 4035 |
| Ⅳ-E | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5045 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 4540 | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.05.0 | 4540 |
| Ⅳ-F-1 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 5550 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5045 | C45≥C50 | 0.400.36 | 5.04.5 | 4540 |

**表5.3.2-3 盐渍土环境中混凝土材料要求及钢筋的保护层最小厚度*c***（mm）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 设计使用年限环境作用等级 | 120年 | 100年 | 50年 |
| 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d氯离子扩散系数（10-12m2/s） | *c* | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d氯离子扩散系数（10-12m2/s） | *c* | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 28d氯离子扩散系数（10-12m2/s） | *c* |
| 箱梁、桥墩等条形构件 | Ⅵ-C | C40C45 | 0.420.40 | 8.07.5 | 4540 | C35C40 | 0.440.42 | 8.58.0 | 4540 | C35C40 | 0.440.42 | 10.09.5 | 4035 |
| Ⅵ-D | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.56.0 | 5045 | C40≥C45 | 0.420.40 | 7.06.0 | 4540 | C35≥C40 | 0.440.42 | 9.58.5 | 4540 |
| Ⅵ-E | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5550 | C40≥C45 | 0.420.40 | 4.03.5 | 5045 | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.05.0 | 5045 |
| Ⅵ-F-1 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 6055 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5550 | C45≥C50 | 0.400.36 | 5.04.5 | 5045 |
| Ⅵ-F-2 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 6560 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 6055 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.54.0 | 5550 |
| Ⅵ-F-3 | C55≥C60 | 0.330.30 | 4.03.5 | 6560 | C55≥C60 | 0.330.30 | 4.03.5 | 6055 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 5550 |
| 码头面板等面形构件 | Ⅵ-C | C40C45 | 0.420.40 | 8.07.5 | 4035 | C35C40 | 0.440.42 | 8.58.0 | 4035 | C35C40 | 0.440.42 | 10.09.5 | 3530 |
| Ⅵ-D | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.56.0 | 4540 | C40≥C45 | 0.420.40 | 7.06.0 | 4035 | C35≥C40 | 0.440.42 | 9.58.5 | 4035 |
| Ⅵ-E | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5045 | C40≥C45 | 0.420.40 | 4.03.5 | 4540 | C40≥C45 | 0.420.40 | 6.05.0 | 4540 |
| Ⅵ-F-1 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5550 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.03.5 | 5045 | C45≥C50 | 0.400.36 | 5.04.5 | 4540 |
| Ⅵ-F-2 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 6055 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 5550 | C45≥C50 | 0.400.36 | 4.54.0 | 5045 |
| Ⅵ-F-3 | C55≥C60 | 0.330.30 | 4.03.5 | 6055 | C55≥C60 | 0.330.30 | 4.03.5 | 5550 | C50≥C55 | 0.360.33 | 4.03.5 | 5045 |

 注：假定混凝土中耐蚀钢筋临界氯离子浓度为普通钢筋的5倍以上，具体保护层厚度计算方法见附录。

1. 当有充分依据并采取下列有效措施时，可减小混凝土保护层厚度5mm。

**1** 采用工厂化生产的预制构件，并能保证预制构件混凝土的质量；

**2** 在混凝土中掺加阻锈剂或采用阴极保护处理等措施；

**3** 当对地下室墙体采取可靠的建筑防水做法或防腐措施时，与土壤接触一侧耐蚀钢筋的保护层厚度可减少5mm，但不应小于25mm。

1. 当梁、柱、墙中纵向受力钢筋的保护层厚度大于50mm时，宜对保护层采取有效的构造措施。可在保护层内配置防裂、防剥落的焊接钢筋网片，网片钢筋的保护层厚度不应小于25mm，并应采取有效的绝缘、定位措施。
2. 有防火要求的结构构件，其混凝土保护层厚度尚应符合国家现行有关标准的规定。

5.4 构件设计

1. 混凝土结构和构件承载力计算和承载力验算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定。
2. 正截面承载力计算应采用符合工程需求的混凝土应力-应变本构关系，并应满足变形协调和静力平衡条件。正截面承载力简化计算时，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定。
3. 钢筋混凝土结构构件中纵向受力耐蚀钢筋的配筋率应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定。
4. 混凝土柱纵向钢筋和箍筋配置应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010规定。
5. 对有抗震设防要求的结构，其纵向受力钢筋的性能应满足设计要求；当设计无具体要求时，对一、二、三级抗震等级设计的框架和斜撑构件（含梯段）中的纵向受力钢筋，其强度和最大力下总伸长率的实测值，应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定。

5.5 构造与措施

1. 配筋混凝土桥梁结构的构造要求应符合下列规定：

**1** 应优先采用混凝土预制构件；

**2** 海水水位变动区和浪溅区，不宜设置施工缝与连接缝；

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

1. 配筋混凝土隧道构件的构造要求应符合下列规定：

**1** 隧道结构的施工缝、伸缩缝等接缝部位，宜避开不利的环境作用，当可能遭受腐蚀性环境侵蚀时，应对接缝部位加强防排水、封堵措施，并宜采取附加防腐蚀措施；

**2** 暴露在隧道混凝土构件外的钢预埋件（吊环、紧固件、连接件等），其埋入混凝土中的锚固部分应与混凝土构件中的其他钢筋隔离；

**3** 有防水要求的钢筋混凝土构件，其每侧暴露面上表层分布钢筋的最小配筋率不宜低于0.4%，分布钢筋的间距不宜大于300mm。

1. 氯化物环境中耐蚀钢筋混凝土结构构件的纵向受力钢筋直径不应小于16mm。
2. 处于流动海水中或同时受水中泥沙冲刷的配筋混凝土构件，其钢筋的混凝土保护层厚度应在本标准表5.3.2-1规定的基础上增加10mm~20mm。
3. 在以盐胀为主的盐渍土地区，宜采取加大基底附加压力的措施约束盐胀变形，或适当增大基础埋深，减少盐胀引起的差异变形。
4. 在盐渍化冻土地区，混凝土结构地基设计应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007及行业标准《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118的有关规定。
5. 耐蚀钢筋的锚固应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定。当计算中充分利用耐蚀钢筋的抗拉强度时，受拉耐蚀钢筋的锚固应符合下列要求：

**1** 基本锚固长度应按下式计算：

 （5.5.7-1）

式中：*l*ab —— 受拉耐蚀钢筋的基本锚固长度（mm）；

*f*y —— 耐蚀钢筋的抗拉强度设计值（N/mm²）；

*f*t —— 混凝土轴心抗拉强度设计值（N/mm²），应按现行国家标准《混凝

土结构设计规范》GB 50010 的有关规定采用；当混凝土强度等

级高于C60时，按 C60取值；

*d* ——锚固钢筋的直径（mm）。

**2** 受拉耐蚀钢筋的锚固长度应根据锚固条件按下式计算，且不应小于200mm；

 （5.5.7-2）

式中：*l*a—— 受拉耐蚀钢筋的锚固长度（mm）；

 *ζ*a—— 锚固长度修正系数，应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》

GB 50010的规定取用，当多于一项时，可按连乘计算，但不宜小

于 0.6；

 *ζ*b—— 环境作用等级修正系数，按表5.5.7取用。

**表5.5.7 环境作用等级修正系数**

|  |  |
| --- | --- |
| 环境作用等级 | *ζ*b |
| Ⅲ-C、Ⅲ-D、Ⅳ-C、Ⅳ-D、Ⅵ-C、Ⅵ-D | 1.05 |
| Ⅲ-E、Ⅳ-E、Ⅵ-E | 1.10 |
| Ⅲ-F-1、Ⅳ-F-1、Ⅵ-F-1 | 1.15 |
| Ⅵ-F-2、Ⅵ-F-3 | 1.20 |

**3** 当锚固钢筋的保护层厚度不大于5*d*时，锚固长度范围内应配置横向构造钢筋，其直径不应小于*d*/4；对梁、柱、斜撑等构件间距不应大于5*d*，对板、墙等平面构件间距不应大于10*d*，且均不应大于100mm，此处*d*为锚固钢筋的直径。

**6 施工**

**6.1 一般规定**

* + 1. 配置耐蚀钢筋混凝土结构工程的施工应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666的规定。用于装配式混凝土结构时，尚应符合国家现行标准《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231和《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1的规定。
		2. 混凝土结构施工宜采用预拌混凝土。预拌混凝土应符合现行国家标准《预拌混凝土》GB 14902的有关规定。
		3. 耐蚀钢筋宜采用专业化生产的成型钢筋。成型钢筋的应用应符合现行行业标准《混凝土结构成型钢筋应用技术规程》JGJ 366的有关规定。
		4. 耐蚀钢筋安装时，受力钢筋的牌号、规格和数量应符合设计要求。当钢筋的牌号或规格需作变更时，应办理设计变更手续。
		5. 耐蚀钢筋连接方式应根据设计要求和施工条件选用。当设计无具体要求时，宜采用机械连接、钢筋套筒灌浆连接和绑扎搭接；当采用预制构件时，耐蚀钢筋也可采用焊接连接。

6.2 材料

* + 1. 混凝土原材料的主要技术指标应符合本规程第4.1的有关规定，并应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666附录F和其他有关标准的规定。
		2. 耐蚀钢筋的各项性能应符合本规程第4.2的有关规定，并符合现行国家标准《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33953 、《海洋工程混凝土用高耐蚀性带肋钢筋》GB/T 34206的有关规定。

6.3 混凝土制备与运输

1. 混凝土配合比设计应符合本规程第4.1节的有关规定，并应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55及现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666的有关规定。
2. 混凝土搅拌过程中，当粗、细集料的实际含水量发生变化时，应及时调整粗、细集料和拌和用水量。混凝土搅拌时应对原材料用量准确计量。采用分次投料搅拌方法时，应通过试验确定投料顺序、数量及分段搅拌时间等工艺参数。混凝土应搅拌均匀，宜采用强制式搅拌机搅拌。
3. 采用混凝土搅拌运输车运输混凝土时，应符合下列规定：

**1** 接料前，搅拌运输车应排净罐内积水；

**2** 在运输途中及等候卸料时，应保持搅拌运输车罐体正常转速，不得停转；

**3** 卸料前，搅拌运输车罐体宜快速旋转搅拌20s以上后再卸料。

1. 原材料进场时，应对材料外观、规格、等级、生产日期等进行检查，并应对其主要技术指标划分检验批进行抽样检验，每个检验批检验不得少于1次。

6.4 耐蚀钢筋加工

* + 1. 耐蚀钢筋加工前应将表面清理干净。表面有裂纹、毛刺及影响性能的机械损伤、外形尺寸偏差的钢筋不得使用。
		2. 耐蚀钢筋加工宜在常温状态下进行，加工过程中不应对钢筋进行加热处理。
		3. 耐蚀钢筋应采用不具有延伸功能的机械设备进行调直。钢筋调直后应平直，不应有局部弯折、表面明显擦伤。
		4. 耐蚀钢筋弯折的弯钩角度、弯弧直径和弯折后平直段长度应符合设计要求及现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666的有关规定，弯折的弯弧内直径应符合下列规定：

**1** 钢筋末端可不制作弯钩。当钢筋末端需制作90°或135°弯折时，钢筋的弯弧内直径不应小于钢筋直径的 5倍；

**2** 箍筋弯折半径尚不应小于纵向受力钢筋直径；箍筋弯折处纵向受力钢筋为搭接钢筋或并筋时，应按钢筋实际排布情况确定箍筋弯弧内直径。

* + 1. 当耐蚀钢筋采用机械锚固措施时，钢筋锚固端的加工应符合国家现行相关标准的规定。采用钢筋锚固板时，应符合现行行业标准《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256的有关规定。

## 6.5 耐蚀钢筋连接与安装

1. 耐蚀钢筋之间或耐蚀钢筋与普通钢筋可采用焊接、机械连接、钢筋套筒灌浆连接、绑扎连接或锚固板的方式连接。
2. 现场施工中耐蚀钢筋之间或耐蚀钢筋与普通钢筋不宜采用焊接方式连接，工厂或预制场中可采用焊接方式连接，焊接后需酸洗或打砂完全清除焊接产物。
3. 耐蚀钢筋的连接应符合本规程第4.3节的有关规定，并符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666、行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107的有关规定。
4. 采用锚固板锚固时，钢筋锚固端的加工和安装应符合现行行业标准《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256的有关规定。
5. 耐蚀钢筋接头设置应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666的有关规定。
6. 纵向受力耐蚀钢筋采用焊接接头、机械连接接头或绑扎搭接接头的接头设置以及接头面积百分率应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666的有关规定。
7. 抗震等级为四级和非抗震结构的梁、柱类构件以及抗震结构中的次梁，其纵向受力耐蚀钢筋搭接长度范围内的箍筋及其他横向构造钢筋，应符合现行国家标淮《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。
8. 耐蚀钢筋的安装应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666的有关规定。
9. 耐蚀钢筋安装应采用间隔件固定钢筋的位置。钢筋间隔件应符合现行行业标准《混凝土结构用钢筋间隔件应用技术规程》JGJ/T 219的规定。

**7 质量验收**

7.1 钢筋分项工程

**I 主控项目**

1. 耐蚀钢筋或成型耐蚀钢筋进场时，应对钢筋化学成分进行检验。

检查数量：按进场批次和抽样检验方案确定。

检验方法：检查质量证明文件和抽样检验报告。

1. 耐蚀钢筋或成型耐蚀钢筋进场时，应按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定抽取试件作屈服强度、抗拉强度、伸长率、弯曲性能和重量偏差检验，检验结果应符合相应标准的规定。

检查数量：按进场批次和抽样检验方案确定。

检验方法：检查质量证明文件和抽样检验报告。

1. 耐蚀钢筋或成型耐蚀钢筋的耐腐蚀性能，应符合《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33953的规定。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查型检报告。

1. 耐蚀钢筋弯折角度、弯弧内直径和弯折后平直段长度应符合设计要求及现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的有关规定。

检查数量：同一设备加工的同一类型耐蚀钢筋，每工作班抽查不应少于3件。

检验方法：尺量。

1. 耐蚀钢筋调直后应进行力学性能和重量偏差检验，其强度、断后伸长率、重量偏差应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检查数量：同一设备加工的同一牌号、同一规格的调直耐蚀钢筋，重量不大于30t为一批，每批见证抽取3个试件。

检验方法：检查抽样检验报告。

1. 当耐蚀钢筋采用锚固板锚固时，钢筋锚固端的加工和安装应符合现行行业标准《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256的有关规定。

检查数量：按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检验方法：检查抽样检验报告。

1. 当钢筋采用机械连接或半灌浆套筒连接时，钢筋机械连接端的加工和安装应符合现行行业标准《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107的有关规定。

检查数量：按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检验方法：检查抽样检验报告。

1. 当钢筋采用套筒灌浆连接时，钢筋机械连接端的加工和安装应符合现行行业标准《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》JGJ 355的有关规定。

检查数量：按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检验方法：检查抽样检验报告。

1. 耐蚀钢筋安装应牢固。受力耐蚀钢筋的安装位置、锚固方式应符合设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察、尺量。

**Ⅱ 一般项目**

1. 耐蚀钢筋应平直，表面不得有裂纹、油污、毛刺及影响性能的机械损伤。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

1. 成型耐蚀钢筋的外观质量和尺寸偏差应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检查数量：同一厂家、同一类型的成型耐蚀钢筋，不超过30t为一批，每批随机抽取3个成型耐蚀钢筋。

检验方法：观察，尺量。

1. 耐蚀钢筋机械连接套筒、钢筋锚固板以及预埋件等的外观质量应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检查数量：按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检验方法：检查产品质量证明文件；观察，尺量。

1. 耐蚀钢筋加工的形状、尺寸应符合设计要求，其偏差应符合表7.1.13的规定。

检查数量：同一设备加工的同一类型耐蚀钢筋，每工作班抽查不应少于3件。

检验方法：尺量。

**表7.1.13 耐蚀钢筋加工的允许偏差**

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 | 允许偏差（mm） |
| 受力钢筋沿长度方向的净尺寸 | ±10 |
| 弯起钢筋的弯折位置 | ±20 |
| 箍筋外廓尺寸 | ±5 |

1. 耐蚀钢筋接头的位置、接头的外观质量、接头面积百分率应符合设计要求和现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检查数量：按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检验方法：观察，尺量。

1. 耐蚀钢筋安装偏差及检验方法应符合表7.1.15的规定，受力钢筋保护层厚度的合格点率应达到90%及以上，且不得有超过表中数值1.5倍的尺寸偏差。

检查数量：按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

**表7.1.15 耐蚀钢筋安装允许偏差及检验方法**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 允许偏差（mm） | 检验方法 |
| 绑扎钢筋网 | 长、宽 | ±10 | 尺量 |
| 网眼尺寸 | ±20 | 尺量连续三档，取最大偏差值 |
| 绑扎钢筋骨架 | 长 | ±10 | 尺量 |
| 宽、高 | ±5 | 尺量 |
| 纵向受力钢筋 | 锚固长度 | －20 | 尺量 |
| 间距 | ±10 | 尺量两端、中间各一点，取最大偏差值 |
| 排距 | ±5 |
| 纵向受力钢筋、箍筋的混凝土保护层厚度 | 板、墙、壳 | ±3 | 尺量 |
| 次梁 | ±5 | 尺量 |
| 基础 | ±10 | 尺量 |
| 绑扎箍筋、横向钢筋间距 | ±5 | 尺量连续三档，取最大偏差值 |
| 钢筋弯起点位置 | 20 | 尺量 |
| 预埋件 | 中心线位置 | 5 | 尺量 |
| 水平高差 | ±3，0 | 塞尺量测 |

注：检查中心线位置时，应沿纵、横两个方向量测，并取其中偏差的较大值。

7.2 混凝土分项工程

**I 主控项目**

1. 混凝土原材料中的水泥、外加剂进场时，应对其品种、性能、出厂日期等进行检查，并应对其相关性能指标进行检验，检验结果应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204等的相关规定。

检查数量：按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检验方法：检查质量证明文件和抽样检验报告。

1. 预拌混凝土进场时，其质量应符合现行国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902的规定。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查质量证明文件。

1. 混凝土拌和物不应离析。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

1. 混凝土中氯离子含量和碱总含量应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定和设计要求。

检查数量：同一配合比的混凝土检查不应少于一次。

检验方法：检查原材料试验报告和氯离子、碱的总含量计算书。

1. 首次使用的混凝土配合比应进行开盘鉴定，其原材料、强度、凝结时间、稠度等应满足设计配合比的要求。

检查数量：同一配合比的混凝土检查不应少于一次。

检验方法：检查开盘鉴定资料和强度试验报告。

1. 混凝土的强度等级必须符合设计要求。用于检验混凝土强度的试件应在浇筑地点随机抽取。

检查数量：对同一配合比混凝土，取样与试件留置应符合下列规定：

**1** 每拌制100盘且不超过100m3时，取样不得少于一次；

**2** 每工作班拌制不足100盘时，取样不得少于一次；

**3** 连续浇筑超过1000 m3时，每200 m3取样不得少于一次；

**4** 每一楼层取样不得少于一次；

**5** 每次取样应至少留置一组试件。

检验方法：检查施工记录及混凝土强度试验报告。

**Ⅱ 一般项目**

1. 混凝土用矿物掺合料进场时，应对其品种、技术指标、出厂日期等进行检查，并应对其相关技术指标进行检验，检验结果应符合国家现行有关标准的规定。混凝土原材料中的粗细集料质量、拌制及养护用水应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204等的相关规定。

检查数量：按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的规定。

检验方法：检查质量证明文件和抽样检验报告。

1. 混凝土拌和物稠度应满足施工方案的要求。

检查数量：对同一配合比混凝土，取样应符合下列规定：

**1** 每拌制100盘且不超过100m3时，取样不得少于一次；

**2** 每工作班拌制不足100盘时，取样不得少于一次；

**3** 连续浇筑超过1000 m3时，每200 m3取样不得少于一次；

**4** 每一楼层取样不得少于一次；

检验方法：检查稠度抽样检验记录。

1. 混凝土耐久性应在施工现场随机抽取试件进行检验，其检验结果应符合国家现行有关标准的规定和设计要求。

检查数量：同一配合比的混凝土，取样不应少于一次，留置试件数量应符合国家现行标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082和《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193的规定。

检验方法：检查试件耐久性试验报告。

1. 后浇带的留设位置应符合设计要求。后浇带和施工缝的留设及处理方法应符合施工方案要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察。

1. 混凝土浇筑完毕后应及时进行养护，养护时间以及养护方法应符合施工方案要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：观察，检查混凝土养护记录。

**附录A 耐蚀钢筋混凝土耐久性设计**

* + 1. 结构构件耐久性极限状态设计表达式中所包含的各种分项系数，宜根据有关基本变量的概率分布类型和统计参数及规定的可靠指标，通过计算分析，并结合工程经验，经优化确定；当缺乏统计数据时，可根据传统的或经验的设计方法，由有关标准规定各种分项系数。
		2. 结构构件耐久性极限状态的分项系数计算分析求解如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|   |  | (A.0.2-1) |
|  |  | (A.0.2-2) |
|  |  | (A.0.2-3) |
|  |  | (A.0.2-4) |

式中：——函数在设计运算点*p*\*处的偏导数，设计运算点坐标为；

——基本变量在分位概率处的分位值；

——基本变量在分位概率处的分位值的导数；

——变量的设计值；

——变量的特征值，本文中采用标准值替代；

——标准正态分布函数；

——目标可靠度；

——基本变量的分项可靠指标

——基本变量的分布函数的反函数；

——各随机变量的敏感系数，通过迭代计算得到。

**A.0.3** 作用力及抗力的分项系数分别通过如下方程表达：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (A.0.3-1) |
|  |  | (A.0.3-2) |

**A.0.4** 混凝土结构或构件的耐久性极限状态方程计算如下所示：

1）以钢筋开始锈蚀作耐久性极限状态判据的，极限状态方程可用下列方程描述：

 (A.0.4-1)

式中：——混凝土中初始氯离子浓度；

——表面氯离子浓度；

——表观氯离子扩散系数；

——混凝土保护层厚度；

——保护层厚度波动值；

——保护层剥落厚度；

——结构或构件的几何参数变异系数。

2) 以硫酸盐侵蚀为主的混凝土保护层损伤剥落极限状态判据，极限状态方程可用下列方程描述：

 (A.0.4-2)

式中：——混凝土中初始硫酸根离子浓度；

——外部环境侵蚀下混凝土表面硫酸根离子浓度；

——硫酸根离子扩散系数；

——混凝土保护层厚度；

——保护层厚度波动值；

——硫酸盐侵蚀剥落厚度；

——C3A含量变化值；

——结构或构件的几何参数变异系数。

**A.0.5** 以钢筋开始锈蚀作耐久性极限状态判据的冻融、氯盐、硫酸盐侵蚀耦合环境下，混凝土结构耐久性设计极限状态，可通过如下近似概率方法方程描述：

 (A.0.5-1)

式中：、、、、分别是初始氯离子扩散系数、温度对氯离子扩散系数影响系数、氯离子结合效应对氯离子扩散系数影响系数、硫酸盐侵蚀对氯离子扩散系数影响系数、冻融循环损伤对扩散系数影响系数。是参考龄期氯离子扩散系数，是时间依赖系数，是氯离子扩散系数稳定时间，一般可取30年。为临界氯离子含量分项系数。为表面氯离子含量分项系数。为氯离子扩散系数分项系数。

混凝土耐久性设计方程(A.0.5-1)在设计运算点p\*处的偏导数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (A.0.5-2) |
|  |  | (A.0.5-3) |
|  |  | (A.0.5-4) |
|  |  | (A.0.5-5) |

将式(A.0.5-2)-( A.0.5-5)计算结果代入式(A.0.2-4)，计算出各随机变量的方向余弦，再通过式(A.0.2-1)和(A.0.2-2)求出当前可靠指标新的分位值，将求得的新的分位值代入式(A.0.2-1)和(A.0.2-2)、(A.0.2-4)及式(A.0.5-2)-(A.0.5-4)中进行迭代，当满足时停止迭代，此时得出的代入式(A.0.2-3)得出的值即为变量的“理论设计值”，再通过式(A.0.3-1)和(A.0.3-2)计算相应的分项系数。

**A.0.6** 耐蚀钢筋混凝土寿命结构构件的设计步骤如下：

1) 根据结构构件的服役环境，初定确定混凝土配合比，量化基本变量（、、、、、、、以及等）概率分布类型和统计参数。当缺乏统计数据时，可根据传统的或经验的设计方法确定基本变量的统计类型和统计参数；

2) 根据预期结构可靠度，得到对应的可靠度指标，求解变量分项系数（、、等）；

3) 计算达到设计使用年限时混凝土保护层剥落层厚度，参考现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T 50476），提出混凝土保护层厚度设计初始值。依据现行国家标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010）裂缝控制验算相关规定，混凝土最大保护层厚度不宜超过70 mm，混凝土易开裂且不易满足裂缝控制要求。

4) 将混凝土基本变量参数及分项系数带入公式(A.0.4-1)，计算相应值，若，则混凝土配合比及保护层厚度满足寿命设计要求；若，则按照步骤5重新设计；

5) 在不超过最大保护层厚度的条件下，在步骤3计算值基础上增加5 mm为新的设计保护层厚度，并按照步骤3-4计算，采用时的值为保护层厚度；当混凝土保护层厚度达到设计允许最大值仍不满足耐久性设计要求时，则需要对混凝土采用附加防护措施，并按照步骤1-4重新设计。

**附录B 传输时变系数计算**

**B.0.1** 服役环境下结构混凝土的微纳结构、环境侵蚀介质浓度等实时演变，会显著影响侵蚀介质传输速率，耐久性设计需考虑传输系数的时变效应。

**B.0.2** 氯盐侵蚀环境下考虑氯离子传输时变效应的传输本构方程如式(B.0.2)所示：

 (B.0.2-1)

 (B.0.2-2)

式中，——氯离子浓度；

——基准氯离子扩散系数；

——氯离子扩散系数的温度影响系数；

——氯离子扩散系数的结合系数；

——氯离子扩散系数的硫酸盐侵蚀影响系数；

——氯离子扩散系数的冻融循环影响系数；

——氯离子扩散系数的微结构演变时间影响系数。

**B.0.3** 使用换元法更换变量所得新的氯离子传输本构方程如式(B.0.3)所示：

 (B.0.3-1)

 (B.0.3-2)

**B.0.4** 式(B.0.3)的解析解形式如式(B.0.4)所示：

 (B.0.4-1)

 (B.0.4-2)

**B.0.5** 综上可得时变扩散系数下氯离子传输控制方程的解析解形式如式(B.0.5)所示：

 (B.0.5)

**B.0.6** 当式(B.0.4-2)不可积时，应采用有限元或有限差分方法求解式(B.0.2-1)以获得氯离子传输的时空分布。

**B.0.7** 硫酸根离子在混凝土中的扩散系数值可通过硫酸根离子溶液中的扩散系数()和混凝土的孔隙率(*φ*)计算：

 (B.0.7-1)

式中：*D*c——表示混凝土中硫酸盐传输时变扩散系数(m2/s)；

——硫酸根离子在孔溶液中的扩散系数(m2/s)，25°C时：

 (B.0.7-2)

——硫酸根离子浓度，mol/m3；

混凝土的孔隙率；

硫酸根离子传输时变系数是硫酸根离子浓度*c*的函数，将硫酸根离子传输时变系数代入硫酸根离子传输反应方程(B.0.7-3)，并引入混凝土结构或构件的边界条件和初始条件(B.0.7-4)，通过有限元方法或有限差分法进行数值求解，可获得混凝土结构或构件在不同时间和位置处的硫酸盐浓度时空分布。式中*c*d表示化学反应所消耗的硫酸盐浓度，在附录C中有详细的求解说明。

 (B.0.7-3)

式中：*c*d——化学反应所消耗的硫酸盐浓度，详见C.0.2-4；

——混凝土结构或构件中硫酸盐传输区域；

由于硫酸盐侵蚀引起混凝土结构或构件表层失效剥落，导致其表面边界向其内部移动，结构或构件内部区域逐渐缩小，因此，混凝土结构或构件内部区域及其表面的初始条件与边界条件为：

 (B.0.7-4)

式中：——混凝土结构或构件中硫酸盐传输的初始区域；

——混凝土结构或构件因硫酸盐侵蚀引起的失效剥落区域；

——硫酸盐环境下混凝土结构或构件的侵蚀时间，s；

——混凝土结构或构件边界位置，随硫酸盐侵蚀引起的剥落过程而移动，m。

——环境中硫酸盐浓度，mol/m3。

**附录C 硫酸盐作用保护层剥落厚度计算**

**C.0.1** 材料的强度、弹性模量、体积模量、剪切模量、泊松比、基体极限抗拉强度等物理力学性能，应根据国家现行有关试验方法标准经试验确定。

**C.0.2** 硫酸盐侵蚀混凝土的保护层剥落厚度计算方法如下所示：

长期暴露于硫酸盐环境中的混凝土结构或构件，环境中硫酸盐经扩散传输而进入混凝土中，如式(B.0.7-3)，与混凝土中水泥水化生成的铝相水化产物发生化学反应，生成钙矾石和石膏等膨胀性侵蚀产物，其反应过程可近似表达为式(C.0.2-1)和(C.0.2-2)，由于离子浓度的差异，硫酸盐从环境扩散到试样中。扩散的硫酸盐离子部分反应形成钙矾石/石膏，其余部分成为混凝土中的游离硫酸盐离子。因此，宏观的硫酸盐扩散是一个非稳态过程，它可以被建模为：

 (C.0.2-1)

 (C.0.2-2)

式(C.0.2-1)和(C.0.2-1)是二阶化学反应过程，利用化学反应动力学方法，可获得混凝土中因化学反应所消耗的硫酸盐浓度和生成的石膏和钙矾石：

 (C.0.2-3)

式中，和——混凝土中生成的石膏和钙矾石的浓度；

——混凝土中铝相水化产物浓度；

——混凝土中钙离子浓度；

——分别为石膏和钙矾石生成反应速率常数；

——分别为石膏和钙矾石生成反应所消耗的硫酸盐浓度，即：

 (C.0.2-4)

硫酸盐环境下，石膏和钙矾石生成所引起混凝土自由体积膨胀应变，可以表示为：

(C.0.2-5)

式中，——氢氧化钙、铝相、石膏和钙矾石的摩尔体积；

——混凝土开始产生膨胀应变时石膏和钙矾石填充的体积分数；

——混凝土的初始孔隙率。

硫酸盐环境下，石膏和钙矾石等侵蚀产物，导致混凝土体积膨胀，并产生膨胀应力、塑性应变和损伤劣化等力学响应。利用细观力学和弹塑性损伤力学，因体积膨胀引起的混凝土力学响应可通过式(C.0.2-6)求解：

 (C.0.2-6)

式中，——石膏和钙矾石生成引起的混凝土特征应变：

 (C.0.2-7)

——混凝土的初始弹性刚度；

——混凝土应力、应变；

——混凝土塑性应变，可按照塑性力学模型计算；

——混凝土损伤程度，可按照损伤力学模型计算；

硫酸盐侵蚀过程中，石膏和钙矾石等侵蚀产物的生长，导致混凝土内应力逐渐增加，并引起混凝土损伤程度逐渐增大，当混凝土的损伤程度提高至一定程度，混凝土开始失效破坏，造成混凝土结构或构件保护层逐层开裂和剥落，使硫酸盐的传输边界(B.0.7-4)向结构或构件内部移动。根据硫酸盐侵蚀引起的混凝土损伤程度，可确定混凝土结构或构件的边界移动准则：

 (C.0.2-8)

式中：——混凝土失效剥落时的临界损伤程度，取值不小于0.85；

当混凝土的损伤程度大于临界损伤程度，则混凝土失效剥落，记录此时的深度为，则混凝土剥落厚度可以表示为：

(C.0.2-9)

式中，——混凝土保护层厚度。

**附录D 硫酸盐—氯盐耦合作用保护层剥落厚度计算**

**D.0.1** 材料的强度、弹性模量、体积模量、剪切模量、泊松比、基体极限抗拉强度等物理力学性能，应根据国家现行有关试验方法标准经试验确定。

**D.0.2** 硫酸盐—氯盐耦合作用混凝土的保护层剥落厚度计算方法

在海洋、盐湖及盐渍土等氯盐-硫酸盐耦合作用环境下，渗入到混凝土中的氯离子和硫酸根离子，因水泥水化产物及微结构的物理化学作用而导致它们在混凝土内扩散传输过程中发生了复杂的相互作用。先渗入的氯离子与混凝土中AFm 发生化学结合而生成 Friedel 盐，而后传输进入的硫酸根离子与Friedel 盐发生反应，导致 Friedel 盐分解，即：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (D.0.2-1) |

因此，混凝土中硫酸盐和氯盐耦合传输过程中，渗入混凝土中的硫酸根子不仅按照式(C.0.2-1)和(C.0.2-2)发生化学反应，还按照式(D.0.2-1)与Friedel 盐反应，因此，硫酸盐-氯盐耦合环境下硫酸根离子的传输方程，可通过式(B.0.7-3)，进一步表示为

|  |  |
| --- | --- |
|  | (D.0.2-2) |

式中：—— Friedel盐分解过程中所结合的硫酸根离子浓度，mol/m3

|  |  |
| --- | --- |
|  | (D.0.2-3) |

—— Friedel盐生成或分解过程中所结合的氯离子含量，mol/m3

|  |  |
| --- | --- |
|   | (D.0.2-4) |

——吸附系数，反映混凝土中AFm吸附氯离子的能力，

——混凝土中氯离子浓度，可近似按式(B.0.2-1)~ (B.0.5)计算，mol/m3

——混凝土中AFm的初始含量，mol/m3；

——混凝土中硫酸盐侵蚀所消耗的AFm含量，mol/m3，可近似按下式计算：

|  |  |
| --- | --- |
|   | (D.0.2-5) |

——为混凝土中铝相水化产物CA()的初始含量，mol/m3;

——硫酸盐侵蚀过程中混凝土中铝相水化产物CA的含量，mol/m3，可按式(C.0.2-3)的第二式计算；

——混凝土内Friedel盐形成所消耗的AFm含量，为初始混凝土中AFm的初始含量减去硫酸盐侵蚀所消耗的AFm含量的值，mol/m3；

根据硫酸盐-氯盐耦合侵蚀的初始条件和边界条件，利用有限差分或有限元等数值求解方法，可求解(D.0.2-2)，获得混凝土中硫酸盐浓度的时空分布*c*，再按硫酸盐侵蚀混凝土的化学-力学模型，即式(C.0.2-3)~(C.0.2-9)，可计算硫酸盐—氯盐耦合作用混凝土的保护层剥落厚度。

**D.0.3** 在D.0.2的剥落厚度计算中，主要考虑了氯盐环境对混凝土中硫酸根离子传输过程的影响，尚未考虑氯盐的存在对混凝土中钙矾石等侵蚀产物溶解及生长过程的影响，需要进一步开展研究，但仅考虑氯盐对硫酸盐传输过程的影响，进行混凝土剥落厚度计算，所获得的值偏高，这对于工程中按照D.0.2方法计算硫酸盐-氯盐耦合作用下混凝土的剥落厚度，设计混凝土结构的保护层厚度，是偏于安全的。

**本规程用词说明**

**1**  为了便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的：

 正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2）表示严格，在正常情况下均应这样做的：

 正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，可采用“可”。

**2** 规程中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

**引用标准名录**

《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080

《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081

《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082

《混凝土结构设计规范》GB 50010

《混凝土结构通用规范》GB 55008

《工程结构通用规范》GB 55001

《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002

《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33953

《海洋工程混凝土用高耐蚀性带肋钢筋》GB/T 34206

《钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋》GB/T1499.2

《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117

《钢筋焊接及验收规程》JGJ 18

《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107

《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》JGJ 355

《钢筋连接用灌浆套筒》JG/T 398

《钢筋连接用套筒灌浆料》JG/T 408

《钢筋阻锈剂应用技术规程》JGJ/T 192

《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275

《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476

《建筑地基基础设计规范》GB 50007

《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118

《混凝土结构工程施工规范》GB 50666

《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T 51231

《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1

《预拌混凝土》GB 14902

《混凝土结构成型钢筋应用技术规程》JGJ 366

《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55

《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256

《混凝土结构用钢筋间隔件应用技术规程》JGJ/T 219

《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204

《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193

中国工程建设协会标准

耐蚀钢筋混凝土应用技术规程

CECS XXX:201X

条文说明

**目 次**

1 总则 ·······················································································45

2 术语和符号 ··············································································46

3 基本规定 ·················································································47

4 原材料 ····················································································48

5 设计 ·····················································································49

6 施工 ···················································································54

7 质量验收 ···········································································56

附录A 耐蚀钢筋混凝土耐久性设计 ···················································· 57

附录B 传输时变系数计算 ····························· ························· ········58

附录C 硫酸盐作用保护层剥落厚度计算 ············································· 59

附录D 硫酸盐—氯盐耦合作用保护层剥落厚度计算·································60

**1 总 则**

**1.0.1** 本条提出了制定本标准的目的。

**1.0.3** 采用耐蚀钢筋的混凝土结构的设计、施工与验收除执行本标准外，尚应符合现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001、《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002、《混凝土结构通用规范》GB 55008、《混凝土结构设计规范》GB 50010、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300等与混凝土结构相关的国家标准和行业标准的要求。

**2** **术语和符号**

**2.1.1**本规程定义的耐腐蚀性能钢筋仅限于《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33593和《海洋工程混凝土用高耐蚀性合金带肋钢筋》GB/T 34206规定的耐蚀钢筋和不锈钢钢筋。

**3 一般规定**

**3.0.1**采用耐蚀钢筋的混凝土结构工程应进行细致的耐久性设计，避免因所暴露的复杂环境影响导致材料劣化而引起性能衰减，出现混凝土酥裂、粉化、钢筋锈蚀、腐蚀等耐久性极限状态，甚至构件承载力出现问题而发生破坏。本标准针对采用耐蚀钢筋的混凝土结构工程制定相应耐久性设计要求，是应满足的基本要求。

**3.0.2** 结构所处环境是影响其耐久性的外因。对影响混凝土结构耐久性的环境类别进行较详细的分类，以便于根据实际条件选择适当的环境类别。

**3.0.3** 本条明确了钢筋混凝土结构应进行评定、验算或重新设计的情况。应根据不同的目的，选择不同的设计方案。参考规范：《混凝土结构设计规范》（2015年版） GB 50010-2010，第3.7.1条。

**3.0.4** 本条规定了既有结构评定所应符合的规定。既有结构设计前，应对其安全性、适用性、耐久性及抗灾害能力进行评定，从而确定设计方案。参考规范：《混凝土结构设计规范》（2015年版） GB 50010-2010，3.7.2条。

**3.0.5**现行国家标准《工程结构通用规范》GB 55001对交通工程、永久性港口建筑物的设计、房屋建筑工作年限作出规定，依据本标准设计的采用耐蚀钢筋的混凝土结构应满足其相关规定。

**3.0.6** 根据钢筋混凝土结构材料的腐蚀机理，将环境类别划分为3种，分别用罗马字母Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ表示：

海洋氯化物环境（III）、除冰盐环境（IV），指临近海洋、受除冰盐影响环境。氯化物环境腐蚀机理是氯离子进入混凝土内部，在钢筋表面积累到一定浓度（临界浓度）后引发钢筋锈蚀，其程度比单纯由大气作用引起的锈蚀严重得多。

盐渍土环境（Ⅵ），指临近盐渍土影响环境。盐渍土环境腐蚀机理是易溶盐对混凝土的腐蚀、混凝土保护层损伤引起钢筋锈蚀，其程度比单纯由大气作用引起的锈蚀严重得多。

**4 原材料**

**4.2 钢筋**

根据《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33953、《海洋工程混凝土用搞耐蚀性带肋钢筋》GB/T 34206的相关规定对耐蚀钢筋的合金元素比例做了相关规定。根据《混凝土结构设计规范》GB 50010规定，要求钢筋强度标准值的保证率不应小于95%。本条根据《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33953、《海洋工程混凝土用高耐蚀性带肋钢筋》GB/T 34206，分别给出了400MPa级、500MPa级耐蚀钢筋的种类、符号、屈服强度标准值、极限强度标准值、抗拉强度设计值、抗压强度设计值，最大力总延伸率限值、弹性模量以及不同强度级别钢筋对应的公称直径范围等设计参数。耐腐蚀性能钢筋混凝土结构的疲劳验算，要求与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的规定一致。根据《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33953，规定了耐蚀钢筋与HRB400牌号的相对腐蚀率。

**4.3 耐蚀钢筋连接**

目前用于耐蚀钢筋与普通钢筋连接的绑扎材料或螺栓材料，尚无可执行的国家或行业标准供参考，建议使用与普通钢筋相同的材料。目前用于耐蚀钢筋之间连接的绑扎材料或螺栓材料，尚无可执行的国家或行业标准供参考，因此建议使用与所用钢筋耐腐蚀性能相同的材料。建议现场施工耐蚀钢筋与普通钢筋不宜采用焊接方式，工厂预制可以采用焊接方式但焊接产物需处理。规定了耐蚀钢筋的焊材应符合焊接材料推荐选用现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117中E5015-GP和E5016-G。

规定了耐蚀钢筋采用套筒灌浆连接时，所采用的套筒、灌浆料及相关技术要求应符合现行行业标准《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》JGJ 355、《钢筋连接用灌浆套筒》JG/T 398及《钢筋连接用套筒灌浆料》JG/T 408的相关规定。

**5 设计**

**5.1 一般规定**

**5.1.1** 高浓度氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀速率较快，尤其是炎热海洋环境，这种速率是普通氯盐环境的2~3倍。在保护层开裂前，氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀相对均匀，锈蚀速率相对较慢，保护层开裂后，随着氯离子侵蚀路径的增多，传输速度加快，引发钢筋锈蚀速率以及体积膨胀增加，混凝土结构或者构件的服役寿命显著缩短。为安全设计，对于重要的或者重大混凝土结构，目标使用年限内不允许钢筋锈蚀的构件，如预应力构件中预应力筋，宜采用钢筋开始锈蚀极限状态进行设计；而对于目标使用年限内不允许出现混凝土保护层锈胀裂缝的构件则应采用混凝土保护层锈胀开裂极限状态进行设计。

**5.1.2** 本标准所指腐蚀环境作用，是直接与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，所处的局部环境可能有所不同，在耐久性设计中应分别考虑。

**5.1.3** 耐蚀钢筋本身具有较好的耐氯离子腐蚀能力，在氯离子腐蚀环境下，使用耐蚀钢筋是一种延长混凝土结构使用寿命的有效措施，根据环境类别和环境作用等级选用不同种类的耐蚀钢筋，必要时辅以其他防腐蚀附加措施可以加强对结构的防护作用。

**5.1.4** 耐蚀钢筋本身具有较好的耐氯离子腐蚀能力，在氯离子腐蚀环境下，使用耐蚀钢筋是一种延长混凝土结构使用寿命的有效措施，根据环境类别和环境作用等级选用不同种类的耐蚀钢筋，必要时辅以其他防腐蚀附加措施可以加强对结构的防护作用。

**5.1.5** 环境作用下混凝土结构的防腐蚀附加措施可以分为针对混凝土的措施和针对钢筋的措施。本条所列的防腐蚀措施为在工程实践中使用较为广泛的技术措施。混凝土的防腐蚀附加措施主要包括表面涂层和硅烷浸渍，两类措施都起到隔离混凝土表面与周围环境的作用，因此能够阻止和延缓环境中侵蚀性介质进入混凝土内部。

海洋环境、除冰盐及盐渍土环境，腐蚀特征主要是环境中氯离子从混凝土表面迁移到混凝土内部，当到达钢筋表面的氯离子积累到一定浓度（临界浓度）后，引发钢筋锈蚀破坏。研究和工程均证明，表面涂层和硅烷浸渍是最经济有效的防腐蚀措施之一，如我国华南湛江港海洋环境暴露实验站于 20 世纪 80 年代开展的环氧树脂、丙烯酸、氯化橡胶、聚氨醋等混凝土表面涂层长期暴露试验，5 年~20 年暴露试验结果表明涂层阻止氯离子渗透效果明显；我国深圳盐田港集装箱码头二期工程是国内最早使用硅烷浸渍防腐蚀的工程，2012 年工程调查和实体构件氯离子渗透检测情况表明，氯离子很难渗透进混凝土表层 3cm 以上的深度。

钢筋的防腐蚀附加措施针对钢筋的防锈过程，其中阻锈剂为化学试剂（如磷氟酸纳），能够有效提高钢筋锈蚀的临界氯离子浓度，延缓氯盐环境中钢筋锈蚀进程；阴极保护直接对钢筋进行电化学保护，使钢筋处于被保护状态。

设计人员可选择针对混凝土和钢筋的附加保护层措施中的一种或者几种达到延长构件使用年限的目的。进行选择时，一方面需要综合考虑结构设计工作年限、混凝土本身耐久性和防腐蚀措施的设计保护年限；另一方面，如采取两种或多重措施联合防腐时，各措施之间必须技术相容。

**5.1.7** 混凝土结构的防腐蚀附加措施发展迅速，新材料和新工艺的发明都能促进保护措施的发展。因此本标准并不禁止使用未列入的防腐蚀附加措施。新措施和新材料的应用应经过专门论证，证明其防腐蚀能力以及相应的保护年限。

**5.2 环境类别和环境作用等级**

**5.2.1** 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，由于水中缺氧使锈蚀发展变得极其缓慢甚至停止，所以钢筋锈蚀危险性不大。潮汐区特别是浪溅区的情况则不同，混凝土处于干湿交替状态，混凝土表面的氯离子可通过吸附、扩散、渗透等多种途径进入混凝土内部，而且氧气和水交替供给，使内部的钢筋具备锈蚀发展的所有条件。浪溅区的供氧条件最为充分，锈蚀最严重。

我国《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275 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。根据海港工程的大量调查表明，平均潮位以下的潮汐区，混凝土在落潮时露出水面时间短，且接触的大气的湿度很高，所含水分较难蒸发，所以混凝土内部饱水程度高、钢筋锈蚀没有浪溅区显著。但本标准考虑到潮汐区内进行修复的难度，将潮汐区与浪溅区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，钢筋锈蚀也会加剧，所以炎热气候应作为一种加剧钢筋锈蚀的因素考虑。

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，海浪拍击产生大小为 0.1μm~20μm 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，因此处于很不利的状态。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，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。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。根据我国浙江、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中的钢筋均发生严重锈蚀。

**5.2.2** 对于同一构件，应注意不同侧面的局部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，而桥面板的底部不受雨淋，无干湿交替，桥面板顶面的氯离子不可能迁移到底部钢筋，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、反复冻融和盐蚀。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。水或土体中氯离子浓度的高低对与之接触并部分暴露于大气中构件锈蚀的影响，目前尚无确切试验数据，表 5.2.2中划分的浓度范围可供参考。

**5.2.3** 盐渍土类型繁多，有氯盐为主、硫酸盐为主和氯盐-硫酸盐共存状态。氯盐为主的盐渍土中钢筋混凝土破坏机理和海洋环境及除冰盐环境相同，但以硫酸盐为主或氯盐-硫酸盐共存状态的破坏模式主要为硫酸根离子与混凝土中的水化铝酸钙起反应形成钙矾石、与氢氧化钙结合形成硫酸钙(石膏)，使混凝土开裂，侵蚀性离子加速进入混凝土内部，造成钢筋锈蚀。

**5.3 材料与保护层厚度**

**5.3.2** 混凝土对钢筋的保护，除需要一定密实度的混凝土外，还需要有一定厚度的保护层。根据调查，保护层厚度若减少 1/4，则混凝土中性化层到达钢筋表面的时间可缩短一倍。本条混凝土保护层的厚度针对所有钢筋，即纵筋、钢箍、分布筋均要满足该表的要求。因为从防腐蚀机理出发，钢箍锈蚀不仅会导致构件抗剪能力的下降，而且钢箍的锈蚀会诱导纵向受力钢筋的锈蚀，从而导致构件丧失承载能力。国际上的观点都很明确，必须包括全部钢筋。本规范表 5.3.2-1、5.3.2-2、5.3.2-3 面形构件中只提到板、墙，没有壳体。因壳体较薄，混凝土保护层厚度一般不能满足要求，且在腐蚀条件下应用很少。混凝土保护层厚度的增加对防腐蚀设计十分重要，目前国际上都有加厚保护层的趋势。但厚度也不能增加过多，因为保护层太厚时，受弯构件横向裂缝会加大，涂料防护层也易脱落。由于耐蚀钢筋具有较好的耐氯离子腐蚀能力，在此条件下可以适当减少混凝土保护层厚度以及混凝土强度等级。

**5.4 构件设计**

**5.4.5** 参考规范：《混凝土结构设计规范》 GB 50010-2010（2015版）。

**5.5 构造与措施**

**5.5.1** 参考规范：《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476-2019。

**5.5.2** 参考规范：《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310-2019。

**5.5.3** 参考规范：《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476-2019。

**5.5.7** 根据钢筋的试验参数和性能指标，并参考现行国家规范《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定，基本锚固长度*l*ab取决于钢筋强度*f*y，及混凝土抗拉强度*f*t，并与锚固钢筋的直径及外形有关，本规范给出了以简单计算确定受拉钢筋锚固长度的方法。其中公式（5.5.7-1）为计算基本锚固长度*l*ab的通式，其中分母项反映了混凝土对粘结锚固强度的影响，用混凝土的抗拉强度表达，本规范使用的耐蚀钢筋均为带肋钢筋，因此外形系数取为0.14。公式（5.5.7-2）规定，工程中实际的锚固长度为钢筋基本固长度*l*ab乘以锚固长度修正系数后的数值。修正系数*ζ*a根据锚固条件按现行国家规范《混凝土结构设计规范》GB50010规定取值。带肋耐蚀钢筋可能由于表面肋纹的腐蚀引起锚固的不足，因此计算锚固长度时应进一步考虑修正系数*ζ*b。修正系数根据腐蚀后钢筋混凝土的拉拔试验得到。

**6 施工**

**6.1 一般规定**

**6.1.4** 受力钢筋的牌号、规格和数量对结构构件的受力性能有重要影响，必须符合设计要求。耐腐蚀性能钢筋的牌号、规格可根据钢筋外观轧制标志识别。当钢筋的牌号或规格需作变更时，应经设计单位确认，并按规定办理相关审查、核定程序。

**6.1.5** 焊接连接、机械连接、绑扎搭接是国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010给出的三种钢筋连接方式。钢筋套筒灌浆连接是行业标准《装配式混凝土结构技术规程》JGJ 1给出的一种钢筋连接方式，在装配式混凝土结构竖向构件的连接中有较为广泛的应用。耐蚀钢筋现场焊接连接技术相对欠成熟，工厂预制过程中方便处理焊接产物故工厂预制时方可采用。

**6.3 混凝土制备与运输**

**6.3.2** 本条规定参考国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666。

**6.3.3** 本条规定参考国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666。

**6.4 耐蚀钢筋加工**

**6.4.1** 耐蚀钢筋加工前，应清理其表面的油渍、漆污，可采用风砂枪等机械方法处理。如果钢筋表面有裂纹、毛刺及影响性能的机械损伤、外形尺寸偏差，不应在工程中使用。

**6.4.2** 加工过程中不应对耐蚀钢筋进行加热处理有可能影响钢筋的力学性能，因此应予以避免。

**6.4.3** 机械调直有利于保证钢筋质量，控制钢筋强度。无延伸功能指调直机械设备的牵引力小于钢筋的屈服力。钢筋调直时，应注意保护钢筋横肋的损伤，以避免钢筋锚固性能降低。

**6.4.4** 纵向耐蚀钢筋和箍筋根据设计要求，其端部会有弯折的要求。弯折的弯钩角度、弯弧直径和弯折后平直段长度在现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666有详细的规定。应根据具体情况，按照规范GB 50666的要求对钢筋的端部进行加工成型。

**6.5 耐蚀钢筋连接与安装**

6.5.1 耐蚀钢筋的耐腐蚀性能低于不锈钢钢筋，挪威的《混凝土结构不锈钢钢筋使用指南》对于不锈钢钢筋的焊接有具体的说明：只要完全清除焊接产物，钢筋的耐蚀性不会降低，但是焊接产生的氧化产物需要采用酸洗或打砂才能清除干净，这在施工现场是不容易做到的，因此现场不建议对不锈钢钢筋进行焊接，而在工厂或在预制场，只要严格遵循不锈钢钢筋的焊接流程，不锈钢钢筋是可以焊接的。因此，针对耐蚀钢筋与普通钢筋的焊接，只要采取相应的措施，完全可以使用。

英国高速公路局编写的《道路桥梁设计手册》(BA 84/02)指出在新建结构中碳钢钢筋可与耐蚀钢筋直接连接而无需进行电绝缘处理。挪威建筑研究院编写的《混凝土结构不锈钢钢筋使用指南》更指出不锈钢钢筋除可在新建结构中与普通钢筋直接接触，更可在维修项目中替代已经损坏的钢筋。该指南指出与采用普通钢筋替代相比，在维修项目中采用不锈钢钢筋可降低周围未替代钢筋腐蚀的风险。因为已活化的碳钢钢筋，与钝化碳钢钢筋接触所产生的电偶腐蚀电流比与不锈钢钢筋接触所产生的电偶腐蚀电流还要大。因此，相对于不锈钢钢筋，耐蚀钢筋与普通钢筋的搭接腐蚀电流更低，耐蚀钢筋可与普通钢筋直接连接，无需做相应特殊处理。

**7 质量验收**

**7.1 钢筋分项工程**

**7.1.1** 钢筋的化学成分不同，直接影响钢筋的耐腐蚀效果，因此需对钢筋化学成分进行检验。

**7.1.9** 参考国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204。

**7.1.10** 参考国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204。

**7.1.13** 参考国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204。

**7.2 混凝土分项工程**

**7.2.1~7.2.6** 参考国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204与国家标准《预拌混凝土》GB/T 14902。

**附录A 耐蚀钢筋混凝土耐久性设计**

**A.0.6**本条规定了严酷环境中服役的混凝土结构或构件耐久性时变设计计算流程，其中：

1) 首先需针对混凝土结构或构件所处服役环境，初步确定混凝土基本配合比，由实验室测试或相应理论/模型方法量化、、、、、、、以及等基本变量概率分布类型和统计参数，当缺乏统计数据时，可根据传统的或经验的设计方法确定基本变量的统计类型和统计参数；

2) 可靠度指标可由结构可靠度所得，基于可靠度指标可由式(A.0.3-1)、(A.0.3-2)求解得到变量的分项系数（、、等）；

3) 参考现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T 50476）可计算达到设计使用年限时混凝土保护层剥落层厚度，从而提出混凝土保护层厚度设计初始值。依据现行国家标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010）裂缝控制验算相关规定，如果混凝土最大保护层厚度不宜超过70 mm，混凝土易开裂且不易满足裂缝控制要求；

4) 重新设计指该次耐久性设计结果未满足规定年限与保证率要求，需要对参数进行修正开展耐久性再设计；

5) 为满足裂纹控制要求，本标准在计算过程中，规定保护层厚度不超过70 mm，在多次计算结果存在70 mm仍无法达到规定年限与保证率要求，则需要额外添加提升措施以提高混凝土在严酷环境下的耐久性能。

**附录B 传输时变系数计算**

**B.0.2** 本条考虑了温度、结合能力、硫酸盐作用、冻融作用以及微结构水化等效应对氯离子传输的影响，采用修正系数法对基准扩散系数进行修正，得到时变氯离子扩散系数。

**B.0.6** 在数学上，式(B.0.4-2)存在不可积的几类特殊表达式，此时无法使用式(B.0.5)所示解析解来描述氯离子传输的时空分布。有限元或有限差分方法可对任意形式的偏微分方程进行求解，因此在此处可考虑使用有限元或有限差分法对式(B.0.2-1)求解以获得氯离子传输的时空分布。

**B.0.7** 将硫酸根离子传输时变系数，边界条件和初始条件代入硫酸根离子传输反应方程，通过有限元方法或有限差分法进行数值求解，可获得混凝土结构或构件在不同时间和位置处的硫酸盐浓度时空分布。硫酸根离子在混凝土中的扩散系数值是硫酸根离子浓度c的函数，将可通过硫酸根离子溶液中的扩散系数()和混凝土的孔隙率(φ)计算。

**附录C 硫酸盐作用保护层剥落厚度计算**

**C.0.1** 根据国家现行有关试验方法标准经试验确定与计算混凝土材料的物理参数，以便后续混凝土保护层剥落层的计算。

**C.0.2** 长期暴露于硫酸盐环境中的混凝土结构或构件。结合结晶压和体积增加理论，可描述硫酸盐侵蚀下混凝土损伤破坏过程的两个阶段，即“膨胀潜伏期”和“显著膨胀期”。在膨胀潜伏期，孔溶液超饱和度驱动的结晶压力是引起混凝土微观膨胀的主要原因，在结晶压力作用下，孔隙周围水泥浆体中微裂缝开始萌生，但并不相互连通。然而，随着结晶压力的增大，微裂缝扩展延伸，进而相互贯通。随后，混凝土产生明显的体积膨胀，即硫酸盐侵蚀进入第二阶段-“显著膨胀期”。在显著膨胀阶段，钙矾石/石膏的结晶和生长使得微裂缝扩展成宏观裂缝，并导致混凝土体积膨胀及逐层剥落，这种破坏行为可用体积增加理论来描述。考虑硫酸盐侵蚀引起的混凝土开裂剥落，将混凝土内硫酸根离子的扩散行为视为移动边界问题。引入化学损伤程度，以反映硫酸盐侵蚀对硫酸根离子扩散性能的影响；利用Fick定律，建立混凝土内硫酸盐离子的扩散-反应模型；根据化学反应动力学理论，确立侵蚀产物生成量的计算方法。根据临界损伤程度来计算混凝土失效剥落厚度。

**附录D 硫酸盐—氯盐耦合作用保护层剥落厚度计算**

**D.0.1** 根据国家现行有关试验方法标准经试验确定与计算混凝土材料的物理参数，以便后续混凝土保护层剥落层的计算。

**D.0.2** 由于硫酸根离子的直径及电荷量相对较大，所受的静电斥力使其难以进入C-S-H凝胶内部替代其所吸附的氯离子。因此，可认为硫酸根离子的渗入仅影响到AFm对氯离子的化学吸附，但不会导致C-S-H凝胶吸附结合的氯离子分解和释放，故可忽略其对氯离子的物理吸附作用。由此可见，经过扩散传输而渗入混凝土中的氯离子和硫酸根离子，除了部分游离在孔溶液中成为自由的氯离子和硫酸根离子外，另一部分氯离子被C-S-H凝胶物理吸附或因化学结合生成 Friedel盐而成为结合氯离子，而另一部分硫酸根离子因与氢氧化钙发生化学反应而消耗。同时，AFm吸附氯离子生成Friedel盐并释放硫酸根离子，或者是吸收硫酸根离子后Friedel盐分解而释放氯离子，从而改变了混凝土中自由氯离子和自由硫酸根离子浓度，因此，混凝土中氯离子和硫酸根离子存在复杂交互作用。

此外，氯离子-硫酸根离子耦合传输过程中，因硫酸盐侵蚀引起的混凝土微结构劣化也是影响离子耦合传输过程的重要因素。硫酸盐侵蚀生成石膏、钙钒石等侵蚀产物，可有效填充混凝土孔隙，并进一步导致混凝土体积膨胀开裂，直接影响到离子在混凝土中的传输性能，侵蚀前期的孔隙填充可减缓氯离子和硫酸根离子在混凝土中的传输速率，但侵蚀后期的膨胀开裂将加速混凝土中离子的传输进程。因此，需要考虑硫酸盐侵蚀引起的孔隙填充和膨胀开裂导致的混凝土微结构劣化对氯离子-硫酸根离子耦合传输进程的影响。