**CECS T/CECS XXX：202X**

**中国工程建设标准化协会标准**

**严酷环境混凝土结构耐久性设计标准**

Durability design standard for concrete structures in severe environments

**（征求意见稿）**

**2022 北 京**

**中国工程建设标准化协会标准**

**严酷环境混凝土结构耐久性设计标准**

Durability design standard for concrete structures in severe environments

**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：2022年X月X日**

**中国XX出版社**

**2022 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，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，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，制定本标准。

本标准的内容包括总则、术语和符号、基本规定、材料、设计、施工及验收。

本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准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： 江苏博特新材料股份有限公司、青岛理工大学、武汉理工大学、中交公路规划设计院有限公司、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、青岛青建新型材料集团有限公司、中国铁路设计集团有限公司、南京理工大学、兰州理工大学、中交一航局第二工程有限公司、中国铁建投资集团公司、青岛市建筑工程管理服务中心、江苏丰彩建材（集团）有限公司

主要起草人：蒋金洋、刘建忠、金祖权、孙国文、左晓宝、张云升、丁庆军、穆松、刘志勇、许文祥、王鹏刚、张海、李化建、许春荣、于琦、易忠来、卢立群、秦志斌、李永升、王凤娟、眭世玉、刘桂宾、高翔、张嘉文、蔡景顺、陈泽、王赟程、杨志强、曹彤宁、冯滔滔

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

3.1 一般规定 ·············································································3

3.2 环境类别和环境作用等级························································ 3

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

4.1 胶凝材料··········································································· ···· 5

4.2 骨料······················································································5

4.3 拌合、养护用水·········································································6

4.4 减水剂··············································································· ··· 6

4.5 提升材料··············································································· 6

4.6 混凝土·················································································· 7

5 多因素时变设计············································································9

5.1 一般规定 ··························· ···· ············································ 9

5.2 多因素时变设计方法········································ ······ ·················10

5.3 分项系数设计确定···································································11

6 盐冻环境设计············································································12

6.1 一般规定············································································12

6.2 环境作用等级·········································································12

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

7 高浓度氯盐侵蚀环境设计···························································· 16

7.1 一般规定 ············································· ··························· 16

7.2 环境作用等级········································ ······ ·························16

7.3 材料与保护层厚度···································································17

8 高浓度硫酸盐侵蚀环境设计··················· ······ ······ ······ ··················· 19

8.1 一般规定 ············································· ··························· 19

8.2 环境作用等级········································ ······ ·························19

8.3 材料与保护层厚度···································································20

9 硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境设计······················ ······························ 23

9.1 一般规定················································ ··························· 23

9.2 环境作用等级········································ ······ ·························23

9.3 材料与保护层厚度···································································24

附录A 传输时变系数计算···································································27

附录B 盐冻作用保护层剥落厚度计算 ················································29

附录C 硫酸盐作用保护层剥落厚度计算 ·············································31

附录D 严酷环境下混凝土耐久性时变设计方法·······································34

附录E 硫酸盐—氯盐耦合作用保护层剥落厚度计算··································37

本标准用词说明···············································································39

引用标准名录············································ ································ ·····40

附：条文说明············································ ································ ·····41

**Contents**

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

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

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

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

3 Basic Requirement··················· ······························ ·························3

3.1 General provisions··············· ······························ ·······················3

3.2 Environmental category and environmental action level· ·······················3

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

4.1 Cementitious materials··············· ······························ ··················5

4.2 Aggregates ······························································· ············· 5

4.3 Mixing and curing water··············· ······························ ·················6

4.4 Admixture ·························································· ··················· 6

4.5 Additional materials ·············································· ··················· 6

4.6 Concrete ················································································ 7

5 Multi factor time-varying design··············· ······························ ·············9

5.1 General provisions··············· ······························ ··················9

5.2 Method······························································· ············· 10

5.3 Determination of partial coefficient design························· ············· 11

6 Salt freezing environment······························································ 12

6.1 General provisions······························································· ·····12

6.2 Environmental action level ························································ 12

6.3 Material and thickness of cover thickness························ ················13

7 High concentration chlorine salt erosion environment··················· ·········· 16

7.1 General provisions································································· 16

7.2 Environmental action level ························································ 16

7.3 Material and thickness of cover thickness·········································17

8 High concentration sulfate erosion environment ·················· ··················19

8.1 General provisions ·················· ···································· ············19

8.2 Environmental action level ························································ 19

8.3 Material and thickness of cover thickness························· ···············20

9 Sulfate chloride coupling environment ·················· ····························· 23

9.1 General provisions ·············································· ··················· 23

9.2 Environmental action level ························································ 23

9.3 Material and thickness of cover thickness························ ················24

Appendix A Calculation of transmission time-varying coefficient ·· ··· ········27

Appendix B Calculation of failure cover thickness in salt freezing environment 29

Appendix C Calculation of failure cover thickness in sulfate environment ····· ··· 31

Appendix D Time-varying design of concrete durability in harsh environment 34

Appendix E Calculation of failure cover thickness in Sulfate chloride coupling environment 37

Explanation of Wording in this Specification ·········································· 39

List of Quoted Standards ···································································40

Addition: Explanation of provisions··························································41

**1 总 则**

**1.1** 为保证严酷环境下混凝土结构的耐久性达到规定的设计使用年限，确保工程结构的合理使用寿命，制定本标准。

**1.2** 本标准适应于最冷月平均气温至-20℃；水中氯离子浓度5000 mg/L~100000 mg/L；土中氯离子浓度7500 mg/kg~150000 mg/kg；水中硫酸根离子浓度10000 mg/L ~20000 mg/L，土中硫酸根离子浓度15000 mg/kg~30000 mg/kg的严酷环境作用下道路、桥梁、隧道等结构与构件的耐久性设计。本标准未考虑荷载引起的结构性能劣化。

**1.3** 本标准不适用于轻骨料混凝土、纤维混凝土及其他特种混凝土结构以及工业生产的高温高湿环境、微生物腐蚀环境、电磁环境、高压环境、杂散电流等特殊腐蚀环境下混凝土结构的耐久性设计。

**1.4** 本标准的耐久性规定，是使结构达到设计使用年限并具有规定保证率的最低要求。设计中可根据工程的具体特点、当地的环境条件与实践经验以及具体的施工条件等适当提高。

**1.5** 混凝土结构的耐久性设计，除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

**2 术语与符号**

**2.1 术语**

**2.1.1 环境作用 environmental action**

温、湿度及其变化以及氧、盐、酸等环境因素对结构或材料性能的影响。

**2.1.2 严酷环境 severe environment**

混凝土结构或构件暴露于单一或多种作用的特殊自然环境，如低温盐冻、高浓度氯盐以及硫酸盐—氯盐耦合环境。

**2.1.3 保护层剥落厚度 failure thickness of cover**

受环境侵蚀、钢筋锈蚀作用而发生损坏、剥离的混凝土结构保护层厚度。

**2.1.4 防腐蚀附加措施 additional protective measures**

在改善混凝土密实性、增加保护层厚度和利用防排水措施等常规手段的基础上，为进一步提高混凝土结构耐久性所采用的补充措施，包括混凝土表面涂层、环氧涂层钢筋、钢筋阻锈剂和阴极保护等。

**2.1.5 多重防护措施 multiple protective measures**

为确保混凝土结构和构件的使用年限而同时采取的多种防腐蚀附加措施。

**2.1.6 耐久性再设计 durability redesign**

根据结构检测在使用年限内为保持结构耐久性而采取的技术措施和方法。

**2.2 符号**

*c*——钢筋的混凝土保护层厚度；

*D*RCM——用外加电场加速离子迁移的标准试验方法测得的氯离子扩散系数；

*D*F——混凝土抗冻耐久性指数；

*E*0——经历冻融循环之前混凝土的初始动弹性模量；

*E*1——经历冻融循环后混凝土的动弹性模量；

——环境最冷月均气温；

*ΔT*——环境日温差；

*V*g——引气混凝土含气量；

——引气混凝土平均气泡间距系数。

**3 基本规定**

**3.1 一般规定**

**3.1.1** 严酷环境下混凝土结构的耐久性设计应根据结构的设计使用年限、结构所处的环境类别和环境作用等级进行设计。暴露于高氯化物环境下的重要混凝土结构，应按附录A规定对耐久性参数和指标进行定量设计；暴露于盐冻或硫酸盐为主侵蚀环境下的混凝土保护层剥落厚度，分别按照附录B和附录C方法进行计算与校核。

**3.1.2** 混凝土结构的耐久性设计应建立结构在使用阶段的维护制度。维护制度应以施工结束或竣工验收状态为起点，根据使用周期中结构与构件的劣化规律与使用要求，综合考虑结构全寿命周期的性能与成本，确定合理的维护技术和维护频次。

**3.2 环境类别和环境作用等级**

**3.2.1** 混凝土结构或构件暴露于单一或多种作用的特殊自然环境，如低温盐冻、高浓度氯盐以及硫酸盐—氯盐耦合环境，且环境参数达到1.2条规定的范围内时，该环境应视为严酷环境。

**3.2.2** 混凝土结构暴露的严酷环境类别应按表3.2.2的规定确定。

表3.2.2 环境类别

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境类别 | 名称 | 劣化机理 |
| II-F | 盐冻环境 | 反复冻融导致混凝土保护层损伤剥落 |
| III-F | 高浓度氯盐侵蚀环境 | 氯盐侵入引起钢筋锈蚀 |
| V-F | 高浓度硫酸盐环境 | 硫酸盐侵入引起混凝土腐蚀剥落 |
| VI | 硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境 | 硫酸盐—氯盐耦合引起混凝土保护层损伤剥落，钢筋锈蚀 |

**3.2.3** 配筋混凝土结构在严酷环境中的作用等级应按表3.2.3的规定确定。

表3.2.3 严酷环境作用等级

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级  环境类别 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 盐冻环境 | II-F-1 | II-F-2 | II-F-3 | II-F-4 |
| 高浓度氯盐侵蚀环境 | III-F-1 | III-F-2 | III-F-3 | III-F-4 |
| 高浓度硫酸盐环境 | V-F-1 | V-F-2 | V-F-3 | V-F-4 |
| 硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境 | VI-1 | VI-2 | VI-3 | VI-4 |

**3.2.4** 在长期潮湿或接触水的环境条件下，混凝土结构的耐久性设计应考虑混凝土可能发生的碱-骨料反应、钙矾石延迟生成反应和环境水对混凝土的溶蚀，在设计中采取相应的措施。对混凝土含碱量的限制应根据《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）附录B确定。

**3.2.5** 混凝土结构的耐久性设计尚应根据结构的实际使用条件，考虑高速流水、风沙以及车轮行驶对混凝土表面的冲刷、磨损等作用对耐久性的影响。

**4 原材料**

**4.1 水泥和矿物掺合料**

**4.1.1** 水泥宜采用强度等级不低于42.5级的通用硅酸盐水泥，性能应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》（GB 175）的有关规定。

**4.1.2** 氯化物环境下不宜使用抗硫酸盐硅酸盐水泥。

**4.1.3** 在硫酸盐或硫酸盐—氯盐耦合的化学侵蚀环境中，除硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥外，尚可采用抗硫酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥，水泥熟料中铝酸三钙含量不宜超过5%。

**4.1.4** 在低温以硫酸盐化学侵蚀为的主环境中，水泥混合材料中石灰石粉含量不得超过5%。

**4.1.5** 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的比表面积不宜大于350 m2/kg。

**4.1.6** 严酷环境宜双掺或多掺磨细矿渣粉、低钙粉煤灰、硅灰等矿物掺合料。

**4.1.7** 冻融环境下用于引气混凝土的低钙粉煤灰掺和料，其烧失量不应大于5％。

**4.1.8** 磨细矿渣粉等级宜为S95级，其性能应符合现行国家标准《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》（GB/T 18046）的有关规定。

**4.1.9** 粉煤灰等级宜为I级或II级，其性能应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）的有关规定。

**4.1.10** 硅灰应符合现行国家标准《砂浆和混凝土用硅灰》（GB/T 27690）的有关规定。

**4.2 骨料**

**4.2.1** 细骨料宜采用细度模数为2.3~3.0的II区中砂，并应符合现行国家标准《建设用砂》（GB/T 14684）的有关规定。

**4.2.2** 在低温硫酸盐或硫酸盐—氯盐耦合的化学侵蚀环境中，石灰岩类机制砂石粉含量不应大于3%。

**4.2.3** 粗骨料吸水率不宜大于2%，并应符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》（GB/T 14685）的有关规定。

**4.2.4** 在低温硫酸盐或硫酸盐—氯盐耦合的化学侵蚀环境中，石灰岩类骨料石粉含量不应大于1%。

**4.2.5** 细骨料、粗骨料性能测试方法应按现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52）的有关规定执行。

**4.3 拌合、养护用水**

**4.3.1** 混凝土拌合、养护用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》（JGJ 63）的有关规定。

**4.3.2** 拌合、养护用水中氯离子和硫酸根离子含量不应大于1000 mg/L。

**4.4减水剂**

**4.4.1** 减水剂性能应符合现行国家标准《混凝土外加剂》（GB 8076）的有关规定。

**4.4.2** 减水剂宜选用聚羧酸类高性能减水剂，盐冻环境中的混凝土宜适量掺入符合现行国家标准《混凝土外加剂》（GB 8076）要求的引气剂或引气型减水剂。

**4.5 提升材料**

**4.5.1** 混凝土提升材料可分为表层防护材料、混凝土基体抗侵蚀材料、钢筋阻锈材料和特种钢筋材料等。

**4.5.2** 表面涂层类防护材料性能应符合国家现行标准《水泥基渗透结晶型防水材料》（GB 18445）和《混凝土结构防护用成膜型涂料》（JG/T 355）的有关规定。

**4.5.3** 表面憎水类防护材料性能应符合现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTJ 275）、《混凝土结构防护用渗透型涂料》（JG/T 337）的有关规定。

**4.5.4** 防腐面层类防护材料性能应符合现行行业标准《聚合物水泥防水砂浆》（JC/T 984）和《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTJ 275）的有关结构。

**4.5.5** 针对氯盐和硫酸盐侵蚀作用，混凝土基体抗侵蚀材料可分为混凝土抗侵蚀抑制剂和抗硫酸盐类侵蚀防腐剂。

**4.5.6** 混凝土抗侵蚀抑制剂和抗硫酸盐类侵蚀防腐剂性能应符合现行标准《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECS 607）的相关要求，抗硫酸盐类侵蚀防腐剂性能还应符合现行行业标准《混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂》（JC/T 1011）的有关规定。

**4.5.7** 钢筋阻锈剂应符合现行行业标准《钢筋阻锈剂应用技术规程》（JGJ/T 192）和《钢筋混凝土阻锈剂》（JT/T 537）的有关规定。

**4.5.8** 钢筋阻锈剂宜选用复合氨基醇类有机阻锈剂，临界氯离子浓度提高倍数不应小于1倍，盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率不应大于30%。钢筋阻锈剂的临界氯离子浓度提高倍数测试方法应按现行标准《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECS 607）的相关要求执行。

**4.5.9** 严酷环境中特种钢筋宜选用耐蚀钢筋，其临界氯离子浓度较普通碳钢钢筋提高不应小于5倍，耐蚀钢筋性能应符合现行国家标准《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》（GB/T 33953）的相关规定。

**4.6 混凝土**

**4.6.1**  严酷环境下混凝土配合比设计应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ 55）的有关规定。

**4.6.2**  严酷环境下混凝土配合比应经试验确定，在缺乏试验依据的情况下应符合下列规定：

1) 混凝土水胶比不宜大于0.40；

2) 混凝土宜加入20%~50％的矿物掺合料；

3) 在低温硫酸盐或硫酸盐—氯盐耦合化学侵蚀环境中，宜选用抗硫酸盐水泥。

4) 在高浓度氯盐侵蚀环境中，外加剂宜选用减水剂、钢筋阻锈剂、混凝土抗侵蚀抑制剂或者耐蚀钢筋；

5) 在硫酸盐或硫酸盐—氯盐耦合的化学侵蚀环境中，外加剂宜选用减水剂、抗硫酸盐类侵蚀防腐剂、混凝土抗侵蚀抑制剂；

6) 混凝土含气量、平均气泡间距系数、氯离子、三氧化硫和碱含量应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的有关规定。

**4.6.3**  严酷盐冻环境下，混凝土的强度等级不宜低于C45。

**4.6.4** 严酷硫酸盐或硫酸盐—氯盐耦合的化学侵蚀环境中，混凝土的强度等级不宜低于C50。

**4.6.5** 严酷环境下预制构件、预应力钢筋、直接接触土体浇筑的构件、处于流水中或同时受水中泥沙冲刷的构件保护层厚度设计取值应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的有关规定。

**4.6.6** 严酷环境下混凝土表层防护材料选用应符合现行国家标准《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942）的有关规定。

**5 多因素时变设计**

**5.1 一般规定**

**5.1.1** 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。

**5.1.2** 严酷盐冻环境下混凝土结构或构件耐久性按以下两种极限状态设计：

1) 混凝土表面剥落极限状态。指的是混凝土表面剥落极限状态是指冻融循环作用引起混凝土构件表层水泥砂浆脱落、粗骨料外露，构件表面出现明显损伤的状态。

2) 钢筋开始锈蚀极限状态。

**5.1.3** 冻融环境钢筋锈蚀耐久性应根据引起钢筋锈蚀的原因，分一般冻融环境、寒冷地区海洋环境、除冰盐环境进行设计，本标准特指后两种环境的耐久性设计。

**5.1.4** 硫酸盐侵蚀环境下混凝土结构或构件耐久性按以下三种极限状态设计：

1) 混凝土开始失效极限状态。指硫酸盐侵蚀引起混凝土结构或构件表面开始损伤开裂，保护层混凝土开始出现失效剥落、尚不明显影响结构或构件承载力的状态。重要、重大工程的混凝土结构主要构件，或保护层厚度按抗氯盐侵蚀最小值设计的结构或构件，宜采用混凝土开始失效极限状态。

2）混凝土保护层损伤极限状态。指硫酸盐侵蚀引起混凝土保护层剥落厚度值达到20 mm时，或者钢筋表面混凝土的硫酸盐含量达到4%（以SO3计，相对于胶凝材料的质量百分数）时的状态。

3）钢筋开始锈蚀极限状态。

**5.1.5** 混凝土结构耐久性设计时，应对结构的耐久性极限状态进行计算。

**5.1.6** 本标准采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，量化严酷环境下混凝土性能时变关键指标特征值，以可靠指标度量结构构件的可靠度，采用分项系数的设计表达式进行设计。

**5.1.7** 严酷环境下耐久性极限状态相对应的结构设计使用限应具有保证率，根据适用性极限状态失效后果的严重程度，保证率宜为90%~95%，失效概率宜为5%~10%，对应的可靠度指标值为1.28~1.65。

**5.2 多因素时变设计方法**

**5.2.1** 对不同严酷环境以及结构服役的耐久性设计状况，应采用相应的可靠度水平、基本变量和作用组合对耐久性进行可靠性设计。

**5.2.2** 对于严酷环境下混凝土结构使用时的正常情况，宜进行耐久性极限状态设计。对每一种作用组合，混凝土结构耐久性设计均应采用其最不利的效应设计值进行。

**5.2.3** 结构耐久性极限状态可采用下列状态方程描述：

(5.2.3)

式中：——混凝土结构的功能函数；

——基本变量。

**5.2.4** 混凝土结构或构件耐久性极限状态设计应符合下列规定：

(5.2.4)

**5.2.5** 当采用环境作用效应和抗力作为综合基本变量时，混凝土结构耐久性极限状态设计应符合下列规定：

(5.2.5)

式中：——混凝土结构对环境因素的抗力；

——混凝土结构的环境作用效应。

在氯盐为主的严酷侵蚀环境抗力是临界氯离子浓度，在强盐渍土或冻融环境抗力是混凝土的保护层厚度。

**5.2.6** 严酷环境下耐久性时变定量设计应明确混凝土结构和构件性能在严酷环境下的时变规律、性能指标分布特征耐久性的极限状态以及设计使用年限，在性能时变量化的基础上确定与结构和构件性能时变劣化抗力直接相关的材料与结构参数，使设计参数具有一定保证率。

**5.2.7** 混凝土结构宜根据规定的可靠指标，采用由作用的代表值、材料性能的标准值、几何参数的标准值和各相应的分项系数构成的极限状态设计表达式进行设计。

**5.2.8** 对严寒地区海洋环境和除冰盐环境，混凝土结构或者构件的耐久性设计宜考虑混凝土冻融损伤以及剥落厚度对氯离子扩散系数、表面氯离子浓度的影响。

**5.2.9** 对硫酸盐、硫酸盐—氯盐侵蚀为主的盐渍土地区，混凝土结构或者构件的耐久性设计宜考虑混凝土损伤、剥落厚度、剥落速率，还应考虑钢筋锈蚀极限状态。

**5.3 分项系数设计确定**

**5.3.1** 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。

**5.3.2** 基本变量的设计值可按下列规定确定：

1) 环境作用的设计值可按下式确定：

(5.3.2-1)

式中：——环境作用的代表值；

——环境作用的分项系数。

2) 材料性能的设计值可按下式确定：

(5.3.2-2)

式中：——材料性能的标准值；

——材料性能的分项系数，其值按有关的结构设计标准的规定采用。

3) 几何参数的设计值可采用几何参数的标准值。

当几何参数的变异性对结构性能有明显影响时，几何参数的设计值可按下式确定：

(5.3.2-3)

式中：——几何参数的附加量。

4) 结构抗力的设计值可按下式确定：

(5.3.2-4)

**6 盐冻环境设计**

**6.1 一般规定**

**6.1.1** 严酷盐冻环境下混凝土结构的耐久性设计，应控制混凝土遭受长期冻融循环作用引起的损伤。

**6.1.2** 冻融环境下混凝土结构的施工质量控制应按《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）规定执行，且混凝土在施工养护结束至初次受冻的时间不得少于一个月并避免与水、盐接触。冬期施工中混凝土接触负温时的强度应大于10 MPa。

**6.1.3** 本条文所述盐冻环境指含氯盐等的盐类条件下发生的冻融循环作用，当盐冻环境含硫酸盐浓度超过5000 mg/L时，需进行专项研究。

**6.2 环境类别和环境作用等级**

**6.2.1** 严酷冻融环境对混凝土结构的环境作用等级应按表6.2.1的规定确定。

表6.2.1 冻融环境作用等级

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 环境条件 | 混凝土结构示例 |
| II-F-1 | 直接接触除冰盐溶液 | 路面，桥面板，与含盐渗漏水接触的桥梁盖梁、墩柱顶面 |
| 受除冰盐水溶液重度溅射或重度盐雾作用 | 桥梁护栏、护墙，立交桥桥墩；  车道两侧10 m以内的混凝土 |
| -3℃＞＞-8℃的含盐环境  混凝土中度饱水 | 含盐寒冷地区受雨淋混凝土的竖向表面 |
| II-F-2 | -8℃＞＞-12℃，*ΔT*＞12℃的含盐环境  混凝土中度饱水 | 含盐严寒地区受雨淋混凝土的竖向表面 |
| II-F-3 | -8℃＞＞-12℃，*ΔT*＞12℃的含盐环境  混凝土高度饱水 | 含盐严寒地区的水位变动区混凝土和频繁受雨淋混凝土的水平表面 |
| II-F-4 | -12℃＞＞-20℃，*ΔT*＞15℃的含盐环境，混凝土高度饱水 | 含盐超低温严寒地区的水位变动区混凝土和受雨淋混凝土的水平表面 |

注：1) 中度饱水指冰冻前处于潮湿状态或偶与雨、水等接触，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土体，混凝土内高度水饱和；

2) 盐类包括海水中的氯盐、除冰盐和有机类融雪剂或其他盐类；

3) 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；

4) 严寒环境参考现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的相关定义；

5) 对于＜-20℃且日最高温＞0℃的环境需进行专项研究。

**6.2.3** 处于盐冻环境的混凝土结构或构件，其环境作用等级应根据当地调查确定，无调查资料时，可按II-F-2等级考虑。

**6.2.4** 位于冰冻线以上土中的混凝土结构构件，其环境作用等级应根据当地实际和经验确定；无调查资料或经验数据时，环境作用等级可按本标准表6.2.1的规定降低一个等级。

**6.2.5** 直接接触含盐积雪、冰的混凝土墙、柱底部，宜适当提高环境作用等级，可比表6.2.1的规定提高一个等级。

**6.3 材料与保护层厚度**

**6.3.1** 在严酷盐冻环境下，对混凝土的耐久性质量和原材料选用要求应符合《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。

**6.3.2** 在严酷盐冻环境下，混凝土的强度等级不宜低于C45。

**6.3.3** 在严酷盐冻环境中混凝土结构的钢筋保护层会发生剥落，其剥落厚度设计值宜参考表6.3.3所示。

表6.3.3 盐冻环境下混凝土结构的钢筋保护层剥落厚度（mm）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 50年 | | | 100年 | | | 提升措施 |
| 强度等级 | 水胶比 | 剥落厚度 | 强度等级 | 水胶比 | 剥落厚度 |
| II-F-1 | C45 | 0.40~0.38 | 5~10 | C50 | 0.34~0.32 | 10~15 | — |
| C45 | 0.40~0.38 | 0~5 | C50 | 0.34~0.32 | 5~10 | 基体抗侵蚀材料 |
| C45 | 0.40~0.38 | 0~5 | C50 | 0.34~0.32 | 0~5 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料 |
| II-F-2 | C50 | 0.34~0.32 | 5~10 | C50 | 0.34~0.32 | 15~20 | — |
| C50 | 0.34~0.32 | 0~5 | C50 | 0.34~0.32 | 10~15 | 基体抗侵蚀材料 |
| C50 | 0.34~0.32 | 0~5 | C50 | 0.34~0.32 | 5~10 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料 |
| II-F-3 | C60 | 0.30~0.28 | 5~10 | C60 | 0.30~0.28 | 15~20 | — |
| C60 | 0.30~0.28 | 0~5 | C60 | 0.30~0.28 | 10~15 | 基体抗侵蚀材料 |
| C60 | 0.30~0.28 | 0~5 | C60 | 0.30~0.28 | 5~10 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料 |
| II-F-4 | C70 | 0.23~0.26 | 10~15 | C70 | 0.23~0.26 | 15~20 | — |
| C70 | 0.23~0.26 | 0~5 | C70 | 0.23~0.26 | 5~10 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料 |

注：1) 表中最大水胶比是基于严酷冻融环境下胶凝材料的矿物掺合料掺量通常≥20％给出的。

2) 剥落层厚度值依据工程上普遍采用的P⋅O 42.5水泥素混凝土开展室内外对比实验和理论模拟获取。

**6.3.4** 冻融环境中的配筋混凝土结构构件，其普通钢筋的混凝土保护层最小厚度与相应的混凝土强度等级、最大水胶比应符合表6.3.4的规定。其中，有盐冻融环境中钢筋的混凝土保护层最小厚度，应按氯盐环境的有关规定执行。

表6.3.4 冻融环境中混凝土配合比与防腐蚀措施

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设计使用年限 | 环境作用等级 | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 最小胶凝材料用量  (kg/m3) | 最小保护层厚度  (mm) | 采用防腐蚀措施 |
| 50年 | II-F-1 | C45 | 0.38 | 380 | 60 | — |
| C45 | 0.40 | 400 | 45 | 基体抗侵蚀材料 |
| II-F-2 | C50 | 0.32 | 450 | 60 | — |
| C50 | 0.34 | 420 | 45 | 基体抗侵蚀材料 |
| II-F-3 | C60 | 0.26 | 520 | 60 | 基体抗侵蚀材料 |
| C60 | 0.28 | 480 | 50 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料 |
| II-F-4 | C60 | 0.23 | 550 | 50 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料  钢筋阻锈材料 |
| 100年 | II-F-1 | C50 | 0.32 | 450 | 65 | — |
| C50 | 0.34 | 420 | 50 | 基体抗侵蚀材料 |
| II-F-2 | C50 | 0.32 | 450 | 65 | 基体抗侵蚀材料 |
| C50 | 0.34 | 420 | 50 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料 |
| II-F-3 | C60 | 0.26 | 520 | 65 | 基体抗侵蚀材料 |
| C60 | 0.28 | 520 | 50 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料 |
| II-F-4 | C70 | 0.23 | 550 | 50 | 表面防护材料  基体抗侵蚀材料  钢筋阻锈材料 |

注：1) 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少5 mm；

2) 梁、柱等条形结构保护层厚度需增加5 mm；

3) 直接接触除冰盐、含盐积雪接触的结构部位、存在冻融的海洋干湿交替区结构部位保护层厚度宜增加5~10 mm，且宜使用表面防护材料；

4) 保护层厚度不宜超过70mm。

**6.3.5** 重要工程和大型工程，混凝土的抗冻耐久性指数不应低于表6.3.5的规定。

表6.3.5 混凝土的抗冻耐久性指数DF(％)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 设计使用年限 | 100年 | | 50年 | |
| 环境条件 | 高饱和 | 中饱和 | 高饱和 | 中饱和 |
| 盐冻环境 | 85 | 80 | 80 | 75 |

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*E*1与其初始值*E*0的比值，DF=100×*E*1/*E*0；在达到300次循环之前*E*1已降至初始值的60％或试件重量损失已达到5％的试件，以此时的循环次数N计算其DF值，DF=0.6×N/300×100；

2) 对于厚度小于150 mm的薄壁混凝土结构，其DF值宜增加5％。

**6.3.6** 环境作用等级为II-F-2、II-F-3和II-F-4的混凝土结构构件应采用引气混凝土，引起混凝土含气量不应低于3.0%，不宜高于6.0%，平均气泡间隔系数不应大于200 μm。

**6.3.7** 含气量从浇筑或入模前的新拌混凝土中取样用含气量测定仪(气压法)测定，允许绝对误差为±1.0％，测定方法应符合现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》（GB/T 50080）的相关规定。

**6.3.8** 气泡间隔系数为从硬化混凝土中取样(芯)测得的数值，用直线导线法测定，根据抛光混凝土截面上气泡面积推算三维气泡平均间隔，推算方法可按现行行业标准《水工混凝土试验规程》（DL/T 5150）的相关规定执行。

**6.3.9** 盐冻环境下混凝土28天氯离子扩散系数D*RCM*应低于3.0×10-12m2/s。

**7 高浓度氯盐侵蚀环境设计**

**7.1 一般规定**

**7.1.1** 高浓度氯盐侵蚀环境中配筋混凝土结构的耐久性设计，应控制氯离子引起的钢筋锈蚀。

**7.1.2** 高浓度氯盐侵蚀环境的配筋混凝土结构，应在耐久性设计中提出结构使用过程中定期检测的要求。重要工程尚应在设计阶段作出定期检测的详细规划，并设置专供检测取样用的构件。

**7.1.3** 高浓度氯盐侵蚀环境下混凝土结构的施工质量控制应按《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）第3.6节规定执行。

**7.2环境作用等级**

**7.2.1** 高浓度氯盐侵蚀环境对配筋混凝土结构或构件的环境作用等级，应按表7.2.1确定。

表7.2.1 高浓度氯盐侵蚀环境作用等级

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 环境条件 | 混凝土结构示例 |
| III-F-1 | 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 |
| 非炎热地区土中氯离子浓度：7500~30000 mg/kg | 部分在地下土中的混凝土桥墩，承台，基础 |
| III-F-2 | 非炎热地区水中氯离子浓度：20000~50000 mg/L | 盐湖地区等部分暴露于水中的混凝土桥墩、承台、基础等结构或构件 |
| 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 |
| 非炎热地区土中氯离子浓度：30000~75000mg/kg | 盐渍土地区等部分暴露于土中的混凝土桥墩、承台、基础等结或构构件 |
| III-F-3 | 非炎热地区水中氯离子浓度：＞50000 mg/L | 盐湖地区等全部或部分暴露于水中的混凝土桥墩、承台、基础等结构或构件 |
| 炎热地区水中氯离子浓度：20000~50000 mg/L |
| 非炎热地区土中氯离子浓度：＞75000 mg/L | 盐渍土地区等全部或部分暴露于土中的混凝土桥墩、承台、基础等结构或构件 |
| III-F-4 | 炎热地区水中氯离子浓度：  ＞50000 mg/L | 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、基础等结构或构件 |
| 炎热地区土中氯离子浓度：  ＞75000 mg/L |

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；

2) 炎热地区指年平均温度高于20 ℃的地区；

3) 水中氯离子浓度＞100000 mg/L或土中氯离子浓度＞150000 mg/L或年平均温度高于30 ℃的环境需进行专项论证。

**7.2.2** 受到海水激流和海砂冲刷的混凝土构件，其环境作用等级宜按本标准表7.2.1的规定提高一级。

**7.2.3** 江河入海口水域和内陆盐湖的含盐量应根据实测确定。当含盐量明显低于海水时，其环境作用等级可根据具体情况低于本标准表7.2.1的规定。

**7.3 材料与保护层厚度**

**7.3.1** 高浓度氯盐侵蚀环境中应采用掺有矿物掺和料的混凝土。对混凝土的耐久性质量和原材料选用要求应符合《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。

**7.3.2** 在高浓度氯盐侵蚀环境下，混凝土的强度等级不宜低于C45。

**7.3.3** 高浓度氯盐侵蚀环境中的配筋混凝土结构或构件，其普通钢筋的保护层最小厚度及其相应的混凝土强度等级、最大水胶比应符合表7.3.3的规定。

表7.3.3 高浓度氯盐侵蚀环境中混凝土配合比与防腐蚀措施

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设计使用年限 | 环境作用等级 | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 氯离子扩散系数  (×10-12m2/s) | 最小胶凝材料用量  (kg/m3) | 最小保护层厚度  (mm) | 采用防腐蚀措施 |
| 50年 | III-F-1 | C50 | 0.34 | 4.5 | 420 | 65 | — |
| C50 | 0.36 | 6.0 | 420 | 50 | 传输抑制材料 |
| III-F-2 | C55 | 0.32 | 3.0 | 450 | 65 | — |
| C55 | 0.34 | 3.5 | 450 | 50 | 传输抑制材料 |
| III-F-3 | C60 | 0.26 | 2.0 | 520 | 70 | 传输抑制材料  钢筋阻锈材料 |
| C60 | 0.28 | 2.5 | 480 | 50 | 表面防护材料  传输抑制材料  钢筋阻锈材料 |
| III-F-4 | C70 | 0.23 | 2.0 | 520 | 50 | 表面防护材料  传输抑制材料  钢筋阻锈材料 |
| 100年 | III-F-1 | C50 | 0.34 | 3.0 | 420 | 65 | — |
| C50 | 0.36 | 4.0 | 420 | 50 | 传输抑制材料 |
| III-F-2 | C55 | 0.32 | 1.5 | 450 | 70 | 钢筋阻锈材料 |
| C55 | 0.34 | 2.0 | 450 | 50 | 传输抑制材料  钢筋阻锈材料 |
| III-F-3 | C60 | 0.26 | 1.0 | 520 | 70 | 传输抑制材料  钢筋阻锈材料 |
| C60 | 0.28 | 1.5 | 480 | 50 | 表面防护材料  传输抑制材料  钢筋阻锈材料  耐蚀钢筋 |
| III-F-4 | C70 | 0.23 | 1.0 | 550 | 50 | 表面防护材料  传输抑制材料  钢筋阻锈材料  耐蚀钢筋 |

注：1) 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少5 mm；

2) 高浓度氯盐侵蚀环境应采用矿物掺和料混凝土；

3) 梁、柱等条形结构保护层厚度需增加5 mm；

4) 表中的D*RCM*值适用于矿物掺和料混凝土，对于胶凝材料主要成分为硅酸盐水泥的混凝土，应采取更为严格的要求；

5) 钢筋混凝土保护层厚度不宜小于50 mm，不宜大于70 mm；

6) 对大截面柱、墩等配筋混凝土受压构件中的钢筋，宜采用较大的混凝土保护层厚度，且相应的混凝土强度等级不宜降低。

7) 表中最大水胶比是基于严酷氯盐环境下胶凝材料的矿物掺合料通常≥20％给出的。

**7.3.4** 用于高浓度氯盐侵蚀环境的C60及以上高强混凝土可掺入不大于10％的石灰石粉或不大于5％的硅灰，以减小拌合物黏性，并提高拌合物的抗离析性，用作矿物掺和料的粉煤灰，其氧化钙含量不应大于10％。

**8** **高浓度硫酸盐侵蚀环境设计**

**8.1 一般规定**

**8.1.1** 高浓度硫酸盐侵蚀环境下混凝土结构的耐久性设计，应控制混凝土遭受高浓度硫酸盐长期侵蚀引起的损伤。

**8.1.2** 高浓度硫酸盐侵蚀环境下的混凝土保护层厚度不宜小于50 mm，当保护层厚度不满足服役寿命需求时，还应使用表层防护材料，基体抗侵蚀材料，钢筋阻锈材料，耐蚀钢筋等措施进行防护。

**8.1.3** 本标准中混凝土混凝土含气量，平均气泡间距系数，三氧化硫和碱含量应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的有关规定。若出现某一规范规定的指标高于其他规范，则采用高的指标要求，以确保混凝土结构耐久性设计与混凝土材料制备的可靠度。

**8.2环境作用等级**

**8.2.1** 高浓度硫酸盐侵蚀环境对混凝土结构构件的环境作用等级，应按表8.2.1确定。

表8.2.1 高浓度硫酸盐侵蚀环境的作用等级

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 水中硫酸根离子浓度（mg/L） | 土中硫酸根离子浓度（mg/L） |
| V-F-1 | 10000~12500 | 15000~18750 |
| V-F-2 | 12500~15000 | 18750~22500 |
| V-F-3 | 15000~17500 | 22500~26250 |
| V-F-4 | 17500~20000 | 26250~30000 |

注：1) 表中与环境作用等级相应的硫酸根浓度，所对应的环境条件为非干旱高寒地区的干湿交替环境。当无干湿交替(长期浸没于地表或地下水中)时，可按表中的等级降低一级，但不得低于V-F-1级；

2) 当混凝土结构或构件处于弱透水土体中时，土中硫酸根离子作用等级可按相应的等级降低一级，但不低于V-F-1级；

3) 高水压或流动水条件下，应提高相应的环境作用等级。

**8.2.2** 部分接触含硫酸盐的水、土而部分暴露于大气中的混凝土结构构件，可按本标准表8.2.1确定环境作用等级。当混凝土结构构件处于干旱、高寒地区，其环境作用等级应按表8.2.2确定：

表8.2.2 干旱、高寒地区盐渍土环境的作用等级

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 水中硫酸根离子浓度（mg/L） | 土中硫酸根离子浓度（mg/L） |
| V-F-1 | 10000~12500 | 15000~18750 |
| V-F-2 | 12500~15000 | 18750~22500 |
| V-F-3 | 15000~17500 | 22500~26250 |
| V-F-4 | 17500~20000 | 26250~30000 |

注：我国干旱区指干燥度系数大于2.0的地区，高寒地区指海拔3000 m以上的地区。

**8.3 材料与保护层厚度**

**8.3.1** 高浓度硫酸盐环境中应采用掺有矿物掺和料的混凝土。对混凝土的耐久性质量和原材料选用要求应符合《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。

**8.3.2** 在高浓度硫酸盐环境下，混凝土的强度等级不宜低于C50。

**8.3.3** 在硫酸盐环境中的混凝土结构的钢筋保护层会发生剥落，其剥落厚度设计值宜参考表8.3.3所示。

表8.3.3 硫酸盐环境下混凝土结构的钢筋保护层剥落厚度（mm）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 50年 | | | 100年 | | | 提升措施 |
| 强度等级 | 水胶比 | 剥落厚度 | 强度等级 | 水胶比 | 剥落  厚度 |
| V-F-1 | C50 | 0.34~0.32 | 50~60 | C50 | 0.34~0.32 | 110~120 | — |
| C50 | 0.34~0.32 | 40~50 | C50 | 0.34~0.32 | 95~105 | 抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| C50 | 0.34~0.32 | 30~40 | C50 | 0.34~0.32 | 80~90 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| V-F-2 | C50 | 0.34~0.32 | 40~50 | C50 | 0.34~0.32 | 100~110 | — |
| C50 | 0.34~0.32 | 35~45 | C50 | 0.34~0.32 | 85~95 | 抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| C50 | 0.34~0.32 | 30~40 | C50 | 0.34~0.32 | 70~80 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| V-F-3 | C60 | 0.30~0.28 | 30~40 | C60 | 0.30~0.28 | 60~70 | — |
| C60 | 0.30~0.28 | 25~35 | C60 | 0.30~0.28 | 50~60 | 抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| C60 | 0.30~0.28 | 20~30 | C60 | 0.30~0.28 | 40~50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| V-F-4 | C70 | 0.23~0.25 | 10~15 | C70 | 0.21~0.23 | 15~20 | — |
| C70 | 0.23~0.26 | 8~13 | C70 | 0.23~0.26 | 12~18 | 抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| C70 | 0.23~0.26 | 5~10 | C70 | 0.23~0.26 | 10~15 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |

注：剥落层厚度依据工程上普遍采用的P⋅O 42.5水泥素混凝土开展室内外对比实验和理论模拟获取。

**8.3.4** 硫酸盐侵蚀环境下混凝土结构，其混凝土保护层最小厚度及其相应的混凝土强度等级、最大水胶比应满足符合表8.3.4的规定。

表8.3.4 服役寿命期内混凝土材料以及附加防护措施要求

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设计使用年限 | 环境作用等级 | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 最小胶材用量  (kg/m3) | 最小保护层厚度  （mm） | 采用防腐蚀措施 |
| 50年 | V-F-1 | C50 | 0.34 | 420 | 100 | — |
| C50 | 0.34 | 420 | 50 | 表面防护材料 |
| V-F-2 | C50 | 0.32 | 420 | 90 | — |
| C50 | 0.32 | 420 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| V-F-3 | C60 | 0.28 | 460 | 80 | — |
| C60 | 0.28 | 460 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料  钢筋阻锈材料 |
| V-F-4 | C70 | 0.23 | 500 | 70 | — |
| C70 | 0.23 | 500 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料  钢筋阻锈材料  耐蚀钢筋 |
| 100年 | V-F-1 | C50 | 0.32 | 420 | 110 | — |
| C50 | 0.32 | 420 | 50 | 表面防护材料 |
| V-F-2 | C50 | 0.30 | 450 | 100 | — |
| C50 | 0.30 | 450 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| V-F-3 | C60 | 0.26 | 480 | 90 | — |
| C60 | 0.26 | 480 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料  钢筋阻锈材料 |
| V-F-4 | C70 | 0.21 | 520 | 80 | — |
| C70 | 0.21 | 520 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料  钢筋阻锈材料  耐蚀钢筋 |

注：1) 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少5 mm；

2) 梁、柱等条形结构保护层厚度需增加5 mm；

3) 表中最大水胶比是基于高浓度硫酸盐侵蚀环境下胶凝材料的矿物掺合料掺量通常≥20％给出的。

**8.3.5** 水、土中的硫酸盐侵蚀环境下中的素混凝土结构构件，其混凝土的最低强度等级和最大水胶比应与配筋混凝土结构构件相同。

**8.3.6** 在干旱、高寒硫酸盐环境和含盐大气环境中的混凝土结构，宜采用引气混凝土，引气要求可按盐冻环境中度饱水条件的规定确定，引气后混凝土强度等级可按本标准表8.3.2的规定降低一级或两级。

**8.3.7** 预制构件，预应力钢筋，直接接触土体浇筑的构件，处于流水中或同时受水中泥沙冲刷的构件保护层厚度设计取值应符合下现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的有关规定。

**8.3.8** 耐腐蚀混凝土表层防护材料选用应符合现行国家标准《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942）的有关规定。

**8.3.9**干湿交替的情况下会有较大的损害。水的蒸发可使水中的硫酸盐逐渐积累，地下水、土中的硫酸盐可以渗入混凝土内部，并在一定条件下使得混凝土毛细孔隙水溶液中的硫酸盐浓度不断积累，当超过饱和浓度时就会系数盐结晶而产生很大的压力导致混凝土开裂破坏，这是纯粹的物理作用。因此设计的保护层厚度可比表中规定增加10 mm或者采用相应的防腐措施。

**9** **硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境设计**

**9.1 一般规定**

**9.1.1** 硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境下混凝土结构的耐久性设计，应控制混凝土遭受硫酸盐—氯盐离子耦合环境长期侵蚀引起的损伤。

**9.2环境作用等级**

**9.2.1** 耦合侵蚀环境下对混凝土结构构件的环境作用等级，应按表9.2.1确定。

表9.2.1 硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境的作用等级

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 水中硫酸根离子  浓度（mg/L） | 土中硫酸根离子  浓度（mg/L） | 水中氯离子  浓度（mg/L） | 土中氯离子  浓度（mg/L） |
| VI-1 | 10000~12500 | 15000~18750 | 5000~20000 | 7500~30000 |
| VI-2 | 12500~15000 | 18750~22500 | 20000~50000 | 30000~75000 |
| VI-3 | 15000~17500 | 22500~26250 | ＞50000 | ＞75000 |
| VI-4 | 17500~20000 | 26250~30000 | ＞50000 | ＞75000 |

注：1) 受到海水激流和海砂冲刷的构件，其环境作用等级宜提高一级；

2) 密集建筑群，除直接面海和迎风的建筑物外，其他建筑物可适当降低作用等级；

3) 内陆盐湖中氯化物的环境作用等级可比照上表规定确定。

4) 表中与环境作用等级相应的硫酸根浓度，所对应的环境条件为非干旱高寒地区的干湿交替环境。当无干湿交替(长期浸没于地表或地下水中)时，可按表中的等级降低一级，但不得低于VI-F-1级。对于干早、高寒地区的环境条件可按本标准第9.2.2条确定。

5) 当混凝土结构件处于弱透水土体中时，水和土中硫酸根离子、水和土中氯离子的作用等级可按相应的等级降低一级，但不低于VI-F-1级。

6) 高水压流动水条件下，应提高相应的环境作用等级。

7) 表中硫酸根离子和氯离子等含量的测定方法应符合国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）附录E的规定。

**9.2.2** 部分接触含硫酸盐的水、土而部分暴露于大气中的混凝土结构构件，可按本标准表9.2.1确定环境作用等级。当混凝土结构构件处于干旱、高寒地区，其环境作用等级应按表9.2.2确定：

表9.2.2 干旱、高寒地区盐渍土环境的作用等级

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 水中硫酸根离子  浓度（mg/L） | 土中硫酸根离子  浓度（mg/L） | 水中氯离子  浓度（mg/L） | 土中氯离子  浓度（mg/L） |
| VI-1 | 10000~12500 | 15000~18750 | 5000~20000 | 7500~30000 |
| VI-2 | 12500~15000 | 18750~22500 | 20000~50000 | 30000~75000 |
| VI-3 | 15000~17500 | 22500~26250 | ＞50000 | ＞75000 |
| VI-4 | 17500~20000 | 26250~30000 | ＞50000 | ＞75000 |

注：我国干旱区指干燥度系数大于2.0的地区，高寒地区指海拔3000 m以上的地区。

**9.3 材料与保护层厚度**

**9.3.1** 在高浓度硫酸盐—氯盐耦合环境下，对混凝土的耐久性质量和原材料选用要求应符合《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。

**9.3.2** 在高浓度硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境下，混凝土的强度等级不宜低于C50。

**9.3.3** 在高浓度硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境下的混凝土结构的钢筋保护层会发生剥落，其剥落厚度设计值宜参考表9.3.3所示。

表9.3.3 高浓度硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境下混凝土结构的钢筋保护层剥落厚度（mm）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 50年 | | | 100年 | | | 采用的防腐蚀措施 |
| 强度等级 | 水胶比 | 剥落  厚度 | 强度等级 | 水胶比 | 剥落  厚度 |
| VI-1 | C50 | 0.34~0.32 | 50~60 | C50 | 0.34~0.32 | 100~110 | — |
| C50 | 0.34~0.32 | 45~55 | C50 | 0.34~0.32 | 85~95 | 抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| C50 | 0.34~0.32 | 40~50 | C50 | 0.34~0.32 | 70~80 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| VI-2 | C50 | 0.34~0.32 | 45~50 | C50 | 0.34~0.32 | 90~100 | — |
| C50 | 0.34~0.32 | 40~45 | C50 | 0.34~0.32 | 75~85 | 抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| C50 | 0.34~0.32 | 35~40 | C50 | 0.34~0.32 | 60~70 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| VI-3 | C60 | 0.30~0.28 | 35~45 | C60 | 0.30~0.28 | 80~90 | — |
| C60 | 0.30~0.28 | 30~40 | C60 | 0.30~0.28 | 65~75 | 抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| C60 | 0.30~0.28 | 25~35 | C60 | 0.30~0.28 | 50~60 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| VI-4 | C80 | 0.23~0.25 | 10~15 | C80 | 0.21~0.23 | 15~20 | — |
| C80 | 0.23~0.26 | 5~10 | C80 | 0.23~0.26 | 10~15 | 抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| C80 | 0.23~0.26 | 3~8 | C80 | 0.23~0.26 | 5~10 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |

注：剥落层厚度依据工程上普遍采用的P⋅O 42.5水泥素混凝土开展室内外对比实验和理论模拟获取。

**9.3.4** 高浓度硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境下混凝土结构，其混凝土保护层最小厚度及其相应的混凝土强度等级、最大水胶比应满足符合表9.3.4的规定。

表9.3.4 服役寿命内混凝土材料以及附加防护措施要求

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设计使用年限 | 环境作用等级 | 混凝土强度等级 | 最大水胶比 | 最小胶材用量  (kg/m3) | 最小保护层厚度  （mm） | 采用的防腐蚀措施 |
| 50年 | VI-1 | C50 | 0.34 | 420 | 90 | — |
| C50 | 0.34 | 420 | 50 | 表面防护材料 |
| VI-2 | C50 | 0.32 | 420 | 80 | — |
| C50 | 0.32 | 420 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| VI-3 | C60 | 0.28 | 460 | 70 | — |
| C60 | 0.28 | 460 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料  钢筋阻锈材料 |
| VI-4 | C70 | 0.23 | 500 | 60 | — |
| C70 | 0.23 | 500 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料  钢筋阻锈材料  耐蚀钢筋 |
| 100年 | VI-1 | C50 | 0.32 | 420 | 100 | — |
| C50 | 0.32 | 420 | 50 | 表面防护材料 |
| VI-2 | C50 | 0.30 | 450 | 90 | — |
| C50 | 0.30 | 450 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料 |
| VI-3 | C60 | 0.26 | 480 | 80 | — |
| C60 | 0.26 | 480 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料  钢筋阻锈材料 |
| VI-4 | C70 | 0.21 | 520 | 60 | — |
| C70 | 0.21 | 520 | 50 | 表面防护材料  抗硫酸盐类侵蚀防腐材料  钢筋阻锈材料  耐蚀钢筋 |

注：1) 预制构件的保护层厚度可比表中规定减少5 mm；

2) 梁、柱等条形结构保护层厚度需增加5 mm。

3) 表中最大水胶比是基于硫酸盐—氯盐耦合环境下胶凝材料的矿物掺合料掺量通常≥20％给出的。

**9.3.5** 高浓度硫酸盐—氯盐耦合环境下的素混凝土结构构件，其混凝土的最低强度等级和最大水胶比应与配筋混凝土结构构件相同。

**9.3.6** 在干旱、高寒高以及浓度硫酸盐—氯盐耦合环境下的混凝土结构，宜采用引气混凝土，引气要求可按冻融环境中度饱水条件下的规定确定，引气后混凝土强度等级可按本标准表9.3.2的规定降低一级或两级。

**9.3.7** 预制构件、预应力钢筋混凝土等直接接触土体浇筑的构件，处于流水中或同时受水中泥沙冲刷的构件保护层厚度设计取值应符合下现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的有关规定。

**9.3.8** 耐腐蚀混凝土表层防护材料选用应符合现行国家标准《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942）的有关规定。

**9.3.9** 干湿交替的情况下会有较大的损害。不但会由于盐结晶作用而导致混凝土开裂破坏，还会由于扩散和对流作用加速氯离子向混凝土内部的传输速率。因此设计的保护层厚度可比表中规定增加5 mm或者采用相应的防腐措施。

**附录A 传输时变系数计算**

**A.0.1** 服役环境下的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。

**A.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(A.0.2)所示：

(A.0.2-1)

(A.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。

**A.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(A.0.3)所示：

(A.0.3-1)

(A.0.3-2)

**A.0.4** 式(A.0.3)的解析解形式如式(A.0.4)所示：

(A.0.4-1)

(A.0.4-2)

**A.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(A.0.5)所示：

(A.0.5)

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

**A.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：

(A.0.7-1)

式中：——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：

(A.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(A.0.7-3)，并引入混凝土结构或构件的边界条件和初始条件(A.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。

(A.0.7-3)

式中：*c*d——化学反应所消耗的硫酸盐浓度，详见附录C.0.2；

——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：

(A.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。

——表示环境中硫酸盐浓度，mol/m3。

**附录B 盐冻作用保护层剥落厚度计算**

**B.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。

**B.0.2** 盐冻环境作用下应分别考虑水泥浆体所受的盐结晶压、冰结晶压和水的静水压对孔壁的作用。

**B.0.3** 盐结晶压力可按式(B.0.3)计算。

(B.0.3)

式中：——盐结晶压力；

——盐晶体与固体基质间的界面能；

——孔隙有效半径。

**B.0.4** 考虑温度变化、湿度变化的影响，孔壁冰结晶压力和孔壁静水压力可按式(B.0.4)计算：

孔壁冰结晶压力： (B.0.4-1)

孔壁静水压力： (B.0.4-2)

式中：——体积模量；

——盐冻环境下的基体应变；

——每单位体积的冰溶解为水的熵；

、、——水、冰和整体的Biot系数；

——过冷度，即实际环境温度和冻结温度的差；

——热膨胀系数；

——冰与固体基质间的界面能；

——水与固体基质间的界面能。

**B.0.5** 固体基质受力可按式(B.0.5)计算：

(B.0.5)

式中：*——*固体基质间所受压力。

**B.0.6** 盐冻环境下结冰孔和未结冰孔的临界冻结半径可按式(B.0.6)计算，超出该孔径部分为冻结孔：

(B.0.6)

式中：——盐冻环境下水冰界面能；

——冻结孔中的水膜厚度。

**B.0.7** 盐冻环境下混凝土剥落层厚度可按式(B.0.7)计算：

(B.0.7)

式中：——盐冻环境下剥落层厚度计算值；

——设计混凝土结构直径；

——基体水化产物的微观抗拉强度；

*v*——泊松比；

——弹性模量；

——塑性阶段弹性模量衰减系数；

、——代表性体积单元内孔和总半径。

**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(A.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，宏观的硫酸盐扩散在是一个非稳态过程，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(A.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。

**C.0.3** 以不同环境条件设计寿命为算例，高浓度硫酸盐条件下混凝土保护层剥落厚度计算过程如表C.0.3所示：

表C.0.3不同服役年限的C50桩保护层破坏深度（mm）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 桩强度等级 | 浓度(mg/L) | 10年 | 20年 | 30年 | 40年 | 50年 | 60年 | 70年 | 80年 | 90年 | 100年 |
| C50 | 19000 | 8 | 20 | 30 | 42 | 54 | 64 | 76 | 88 | 100 | 110 |
| 23000 | 10 | 24 | 36 | 50 | 64 | 78 | 92 | 104 | 118 | 132 |
| 27000 | 12 | 28 | 42 | 58 | 74 | 90 | 104 | 120 | 136 | 152 |
| 34000 | 14 | 34 | 52 | 72 | 90 | 110 | 128 | 146 | 166 | 184 |
| C60 | 19000 | 4 | 10 | 16 | 22 | 28 | 34 | 40 | 46 | 52 | 58 |
| 23000 | 4 | 12 | 20 | 26 | 34 | 42 | 48 | 56 | 64 | 70 |
| 27000 | 6 | 14 | 22 | 32 | 40 | 48 | 56 | 66 | 74 | 82 |
| 34000 | 8 | 18 | 28 | 38 | 50 | 60 | 70 | 80 | 92 | 102 |
| C80 | 19000 | 0 | 0 | 2 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 8 | 8 |
| 23000 | 0 | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 8 | 10 | 12 | 12 |
| 27000 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| 34000 | 0 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 18 | 20 | 22 |

**附录D 严酷环境下混凝土耐久性时变设计方法**

**D.0.1** 严酷环境下混凝土耐久性时变设计方法应首先确定结构或构件的耐久性极限状态，随后依据环境计算耐久性极限状态分项系数值，基于环境类型使用对应的耐久性极限状态方程。其中，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。

**D.0.2** 结构构件耐久性极限状态的分项系数计算分析求解如下：

(D.0.2-1)

(D.0.2-2)

(D.0.2-3)

(D.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。

**D.0.3** 作用力及抗力的分项系数分别通过如下方程表达：

(D.0.3-1)

(D.0.3-2)

**D.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时，极限状态方程可用下列方程描述：

(D.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时，极限状态方程可用下列方程描述：

(D.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。

**D.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：

(D.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(D.0.5-1)在设计运算点p\*处的偏导数为：

(D.0.5-2)

(D.0.5-3)

(D.0.5-4)

(D.0.5-5)

将式(D.0.5-2)-( D.0.5-5)计算结果代入式(D.0.2-4)，计算出各随机变量的方向余弦，再通过式(D.0.2-1)和(D.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(D.0.2-1)和(D.0.2-2)、(D.0.2-4)及式(D.0.5-2)-(D.0.5-4)中进行迭代，当满足时停止迭代，此时得出的代入式(D.0.2-3)得出的值即为变量的“理论设计值”，再通过式(D.0.3-1)和(D.0.3-2)计算相应的分项系数。

**D.0.6** 严酷环境服役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，量化基本变量概率分布类型和统计参数；

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；

3) 计算达到设计使用年限时混凝土保护层剥落层厚度，提出混凝土保护层厚度设计初始值，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) 将混凝土基本变量参数及分项系数带入公式(D.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时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或者相应等级的耐蚀钢筋，并按照步骤1-4重新设计。

**附录E 硫酸盐—氯盐耦合作用保护层剥落厚度计算**

**E.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。

**E.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如下所示：

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：

 (E.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(E.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(A.0.7-3)，进一步表示为

(E.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

 (E.0.2-3)

—— Friedel盐生成或分解过程中所结合的氯离子含量，mol/m3

 (E.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：

 (E.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(E.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。

**E.0.3** 在E.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E.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。

**本标准用词说明**

**1** 为了便于在执行本标准条文时区别对待，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，在条件允许时首先应这样做的：

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，采用“可”。

**2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

**引用标准名录**

GB/T 50476-2019 混凝土结构耐久性设计标准

GB 50010-2010混凝土结构设计规范

GB/T 51355-2019既有混凝土结构耐久性评定标准

JTG/T 3310-2019公路工程混凝土结构耐久性设计规范

TB 10005-2010铁路混凝土结构耐久性设计规范

GB/T 33953-2017钢筋混凝土用耐蚀钢筋

GB/T 33240-2016钢筋混凝土用镀锌铝合金-环氧树脂复合涂层钢筋

JTS/T 209-2020水运工程结构防腐蚀施工规范

DB21/T 1752-2009混凝土结构耐久性修复与防护技术规程

DB33/T 1128-2016混凝土结构耐久性技术规程

DL/T 5241-2010水工混凝土耐久性技术规范

JGJ/T 193-2009混凝土耐久性检验评定标准

T/CECS 746-2020混凝土耐久性修复与防护用隔离型涂层技术规程

CCES 01-2004混凝土结构耐久性设计与施工指南

CECS 220-2007混凝土结构耐久性评定标准

GB 175通用硅酸盐水泥

GB/T 21372硅酸盐水泥熟料

GB/T 1596用于水泥和混凝土中的粉煤灰

GB/T 18046用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉

GB/T 27690砂浆和混凝土用硅灰

GB 18445水泥基渗透结晶型防水材料

JG/T 355混凝土结构防护用成膜型涂料

JTJ 275海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范

JC/T 984聚合物水泥防水砂浆

T/CECS 607盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程

JGJ/T 192钢筋阻锈剂应用技术规程

JT/T 537钢筋混凝土阻锈剂

**中国工程建设标准化协会标准**

**严酷环境混凝土结构耐久性设计标准**

**T/CECS XXX:202X**

**条 文 说 明**

**目 次**

1 总则 ·······················································································46

2 术语和符号 ··············································································47

3 基本规定 ·················································································48

3.1 一般规定 ··································································· ····· 48

3.2 环境类别和环境作用等级······················································· 49

4 原材料············································································ ··········51

4.1 胶凝材料··········································································· ··· 51

4.2 骨料···················································································· 51

4.3 拌合、养护用水································· ···················· ······ ·········· 51

4.4 减水剂················································································ 52

4.5 提升材料·············································································· 52

4.6 混凝土·············································································· 52

5 多因素时变设计······································································ · 53

5.1 一般规定 ··························· ···· ········································· · 53

5.2 多因素时变设计方法······················································ ····· 54

5.3 分项系数设计确定·················· ···· ········································· · 55

6 盐冻环境设计······································································· 56

6.1 一般规定 ········································································· 56

6.2 环境作用等级 ························································ 56

6.3 材料与保护层厚度································································57

7 高浓度氯盐侵蚀环境设计···························································· 58

7.1 一般规定 ············································· ··························· 58

7.2 环境作用等级······································· ························58

7.3 材料与保护层厚度 ······························································· 59

8 高浓度硫酸盐侵蚀环境设计··················· ············ ··················· 60

8.1 一般规定 ······························································· ········· 60

8.2 环境作用等级································ ······································· 60

8.3 材料与保护层厚度 ········································ ······················ 61

9 硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境设计······················ ······························ 63

9.1 一般规定 ······························································· ········· 63

9.2 环境作用等级································ ······································· 63

9.3 材料与保护层厚度 ········································ ······················ 63

附录A 传输时变系数计算 ····························· ························· ········65

附录B 盐冻作用保护层剥落厚度计算 ················································ 66

附录C 硫酸盐作用保护层剥落厚度计算 ············································· 68

附录D 严酷环境下混凝土耐久性时变设计方法······································· 72

附录E 硫酸盐—氯盐耦合作用保护层剥落厚度计算··································73

**Contents**

1 General Provisions ········································ ···························· ·46

2 Terms and Symbols ·················································· ················· 47

3 Basic Requirement ···························································· ········ 48

3.1 General provisions ···································· ···················· · ··· 48

3.2 Environmental category and environmental action level············ · 49

4 Materials ······································································· ········ 51

4.1 Cementitious materials ············· ··· ································· ······ 51

4.2 Aggregates ······························································· ·············51

4.3 Mixing and curing water ··········································· ·················51

4.4 Admixture············································································· 52

4.5 Additional materials ·············································· ···················52

4.6 Concrete ································································· ·········· 52

5 Multi factor time-varying design ····················································53

5.1 General provisions ······························································ ···53

5.2 Method················································································ 54

5.3 Determination of partial coefficient design ············· ······················· 55

6 Salt freezing environment······························································ 56

6.1 General provisions ····························································· 56

6.2 Environmental action level ························································ 56

6.3 Material and thickness of cover thickness························· ················57

7 High concentration chlorine salt erosion environment·································58

7.1 General provisions ····························································· 58

7.2 Environmental action level ························································ 58

7.3 Material and thickness of cover thickness························· ················59

8 High concentration sulfate erosion environment ·················· ··················· 60

8.1 General provisions ····························································· 60

8.2 Environmental action level ························································ 60

8.3 Material and thickness of cover thickness························· ················61

9 Sulfate chloride coupling environment················ ······························ 63

9.1 General provisions ····························································· 63

9.2 Environmental action level ························································ 63

9.3 Material and thickness of cover thickness························· ················63

Appendix A Calculation of transmission time-varying coefficient··············· ········65

Appendix B Calculation of failure cover thickness in salt freezing environment ····66

Appendix C Calculation of failure cover thickness in sulfate environment·· ····· ··· 68

Appendix D Time-varying design of concrete durability in harsh environment 72

Appendix E Calculation of failure cover thickness in Sulfate chloride coupling environment 73

**1 总 则**

**1.0.2** 寒冷地区盐冻是混凝土结构损伤失效的主因，据统计北方很多地区最冷月均气温可达-12 ℃，最冷月均气温在-20 ℃及以下也存在部分地区，故将本标准对低温冻融的严酷环境取值上下限取值为-20 ℃~-12 ℃，超过该上限特殊环境需开展专项研究。环境中的氯化物以水溶氯离子的形式通过扩散、渗透、吸附等途径从混凝土构件表面向内部迁移，引起混凝土内钢筋的严重锈蚀，考虑到我国海洋中氯盐浓度一般不高于20000 mg/L，故作为海洋环境下水溶性氯离子浓度的上限，根据现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的规定水中氯盐浓度超出20000 mg/L、土中氯盐浓度超出30000 mg/kg时考虑为盐渍土地区环境，南方高温高湿炎热地区温度高，氯离子扩散速率增大，钢筋锈蚀也会加剧，水中氯离子浓度达到50000 mg/L在地质环境中也存在，本标准将水中氯离子浓度取值为5000 mg/L~100000 mg/L，涵盖了各种严酷海洋环境。青海、新疆、甘肃等西部地区的土壤属于典型的强盐渍土类型，该土壤中含有大量的硫酸盐、氯盐、镁盐等强腐蚀性介质，沿海一带的土壤类属滨海盐土，滨海盐土中的盐分组成主要是氯盐和硫酸盐。在《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607）中规定：氯离子浓度取1000 mg/L~250000 mg/L、硫酸根离子浓度取2000 mg/L~250000 mg/L，但在工程应用中部分地区如黄骅港城际铁路局部施工区域土壤硫酸盐浓度达到260000 mg/L，超出现有的盐渍土耐久性设计规范，故本标准土土中硫酸根离子浓度15000 mg/kg~30000 mg/kg。当氯离子浓度或硫酸根离子浓度二者其一达要求应来用本规程进行严酷环境下耐腐蚀混凝土的设计、制备与应用。对于氯离子浓度低于1000 mg/L，硫酸根离子浓度低于2000 mg/L，混凝土结构或构件的耐久性设计按照国家现行有关规定进行选取。

**2 术语和符号**

**2.0.2** 《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）、《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942）、《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607），对混凝土结构所处的服役环境和服役等级均做了划分，但实际服役环境中侵蚀环境或者侵蚀介质浓度往往超过上述标准规定的上限，故本标准所提出的严酷服役环境是高于现有标准中的冻融环境、炎热海洋环境、盐渍土环境中规定的上限，又基于实际服役环境给出的界限范围环境。

**2.0.3** 在冻融环境、硫酸盐侵蚀为主的侵蚀环境，混凝土结构或构件表面开始损伤开裂，保护层从表面出现逐层剥落，这里的剥落厚度指的是钢筋混凝土保护层的设计厚度与损伤开裂剥落后的平均保护层厚度之差。

**3 基本规定**

**3.1 一般规定**

**3.1.1** 混凝土结构的耐久性设计可分为经验方法和定量方法。经验方法将环境作用按其严重程度定性地划分成几个作用等级，在工程经验类比的基础上，对不同环境作用等级下的混凝土结构构件，直接规定混凝土材料的耐久性质量要求(通常用混凝土强度、水胶比、胶凝材料用量等指标表示)和钢筋保护层厚度等构造要求。近年来，经验方法有很大的改进：首先是按照材料的劣化机理确定不同的环境类别，在每一类别下再按温、湿度及其变化等不同环境条件区分其环境作用等级，从而更为详细地描述环境作用；其次是对不同设计使用年限的结构构件，提出不同的耐久性要求。

在结构耐久性设计的定量方法中，环境作用需要定量界定，然后针对结构劣化的主因选用适当的劣化模型求出环境作用效应，得出耐久性极限状态下的环境作用效应与耐久性抗力的关系，可针对使用年限来计算材料与构造参数，也可针对确定的材料与构造参数来验算使用年限。作为耐久性设计目标，结构设计使用年限应具有规定的安全度，所以在环境作用效应与耐久性抗力关系式中应引入相应的安全系数，当用非确定性方法设计时应满足所需的保证率。

应该说明，耐久性设计的经验方法和定量方法并不对立，两者在同一设计过程中互为补充：经验方法确定总体布置、构造、耐久性控制过程以及材料类型，定量方法在此基础上对确定的耐久性极限状态、进行材料性质和构造参数的定量设计。

本标准将定量和传统的经验方法相结合，除了细化环境的类别和作用等级外，在混凝土的耐久性质量要求中，本标准既规定了不同环境类别与作用等级下的混凝土最低强度等级、最大水胶比和混凝土原材料组成，又提出了混凝土抗冻耐久性指数、氯离子扩散系数等耐久性指标的量值规定外，基于服役环境的劣化模型给出了以盐冻和硫酸盐为主侵蚀环境下的保护层剥落厚度，同时从耐久性要求出发，对结构构造方法、施工质量控制以及当混凝土结构的保护层厚度不满足设计使用年限时，给出了经济且适用的附加防护措施。

**3.1.2** 本条提出混凝土结构耐久性设计的基本内容，重点参考了参考现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）条文中3.1.2规定。需要强调的是对于严酷环境下的重要工程，需要预置耐久性监测和预警系统。为确保使用年限，除进行施工建造前的结构耐久性设计外，尚应根据竣工后实测的混凝土耐久性和保护层厚度进行结构耐久性的再设计，以便针对问题及时采取措施；在结构的使用年限内，尚需根据实测的材料劣化数据时结构的剩余使用年限作出判断，并针对问题继续进行再设计，必要时追加防腐措施或适时修复。为达到预期服役寿命，基于既有结构耐久性检测结果以及劣化模型预测综合研判，通过调整环境作用效应与耐久性抗力的关系，对施工前的混凝土进行耐久性再设计。

**3.2 环境类别和环境作用等级**

**3.2.2** 本条文既要保持和现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）中有关于环境类别和作用等级的衔接性，又要基于当前混凝土结构服役的特殊暴露环境，将本标准严酷环境分类编号如下所示：

1) 盐冻环境（II-F），寒冷/严寒地区且混凝土结构或构件受盐侵蚀影响的环境。温度在-20℃及以下的盐冻环境下混凝土盐分加剧水分向混凝土内部传输，含水量较高时冻融作用会引起内部或表层损伤，保护层快速剥落，进而加速盐类传输，引起钢筋锈蚀，是严酷环境耐久性设计的重点问题。

2) 高浓度氯盐侵蚀环境（III-F），氯离子可从混凝土表面迁移到混凝土内部，高浓度梯度作用促使氯离子迁移更加迅速，在钢筋表面积累到一定浓度(临界浓度)后会引发钢筋的锈蚀，是严酷环境耐久性设计的重点问题之一。

3) 高浓度硫酸盐环境（V-F），混凝土的劣化主要是土、水中的高硫酸盐对混凝土的化学作用，同时也有盐结晶等物理作用所引起的破坏，引起混凝土保护层剥落，是严酷环境耐久性设计的重点问题之一。

4) 硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境（VI），硫酸盐—氯盐耦合向混凝土内部传输，由硫酸盐引起混凝土保护层腐蚀剥落，氯盐传输和保护层剥落加速钢筋锈蚀作用，两者破坏耦合发生，极大地加速混凝土耐久性的退化，是严酷环境耐久性设计的重点问题之一。

**3.2.3** 本条文将环境作用在现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）基础上，按其对混凝土结构的影响程度定性地划分成4个等级，用数字1-4表示。由于腐蚀机理不同，不同环境类别相同作用等级（如II-F-3、III-F-3、V-F-3、VI-3）的耐久性要求相近、但不完全相同。与各个环境作用等级相对应的具体环境条件，可分别参见本标准第6章到第9章中的规定。

把环境类别细化到环境作用等级完成了耐久性的设计从经验的方法到适度定量方法的过渡。当实际的环境条件处于两个相邻作用等级的界限附近时，有可能出现难以判定的情况，需要设计人员根据当地环境条件和既有工程劣化状况的调查，并综合考虑工程重要性等因素后确定。在确定环境对混凝土结构的作用等级时，还应充分考虑环境作用因素在结构使用期间可能发生的演变。

由于本标准中所指的环境作用是指直接与混凝土表面接触的局部环境作用，所以同一结构中的不同构件或同一构件中的不同部位所承受的环境作用等级可能不同。

**4 原材料**

**4.1 胶凝材料**

**4.1.2** 考虑到低温或硫酸盐环境下碳硫硅钙石的防治，混合材中石粉的掺量不宜超过5%。

**4.1.3** 参考现行行业标准《铁路混凝土结构耐久性设计规范》（TB 10005）规定：“当混凝土结构所处环境为氯盐环境是，不应使用抗硫酸盐硅酸盐水泥”。

**4.1.5** 参考现行行业标准《铁路混凝土结构耐久性设计规范》（TB 10005）条文说明：“对硅酸盐水泥与普通硅酸盐水泥的比表面积的上限进行限制，规定为不大于350 m2/kg，目的就是为了防止混凝土在凝结硬化过程中，因内外温差过大造成开裂”。

**4.1.6** 现行国家标准《盐渍土地区建筑技术规范》（GB 50942）规定：“硫酸盐为主的环境下，水泥宜选用熟料中铝酸三钙含量小于5％的普通硅酸盐水泥或抗硫酸盐水泥，配制混凝土时，宜掺加矿物掺合料”。

**4.1.7** 现行行业标准《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607）中规定：“严酷环境宜采用磨细矿渣粉、粉煤灰、硅灰等作为矿物掺合料”。磨细矿渣的掺入可提升混凝土抗氯离子渗透性能，而且与水泥水化产物易形成交联结构有利于抵抗硫酸盐的侵蚀，考虑到低温环境下碳硫硅钙石腐蚀的防治，石从石尖制砂应控制石粉含量。

**4.1.8** 参考现行行业标准《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607）中条文说明：在硫酸盐为主的侵蚀环境下，混凝土中掺入S105级矿渣存在潜在的二次钙矾石膨胀破坏的风险。

**4.2 骨料**

**4.2.2** 参考现行行业标准《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607）中条文说明：“考虑到低温环境下碳硫硅钙石腐蚀的防治，石灰岩类机制砂应控制石粉含量”。

**4.3 拌合、养护用水**

**4.3.2** 参考现行行业标准《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607）中条文规定：水中的氯离子和硫酸根离子含量不应大于1000 mg/L。

**4.4 减水剂**

**4.4.2** 参考现行行业标准《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607）中条文说明：“耐腐蚀混凝土采用较低水胶比配制，需要选择减水率高的聚羧酸减水剂，保障工作性与密实程度。现行国家标准《混凝土外加剂》（GB 8076）规定，高性能减水剂含气量≤6%，对于耐腐蚀混凝土而言，控制合理的含气量有助于提升抗冻和抗结晶腐蚀破坏性能，含气量应根据实际工程情况进行调整。聚羧酸系高性能减水剂不得与茶系、氨基磺酸盐和三聚氰胺系高效减水剂混合使用，与其他品种外加剂同时使用时，宜分别掺加，复配使用时应关注相容性”。

**4.5 提升材料**

**4.5.8** 参考现行行业标准《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607）中条文规定：“钢筋阻锈剂宜选用复合氨基醇类有机阻锈剂，临界氯离子浓度提高倍数不应小于1倍，盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率不应大于30%”。

**4.6 混凝土**

**4.6.2** 本条重点参考国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）、铁路混凝土结构耐久性设计规范》（TB 10005）和《盐渍土环境耐腐蚀混凝土应用技术规程》（T/CECE 607）中关于侵蚀环境下对混凝土原材料的选用要求，重点补充了严酷环境下混凝土的水胶比不宜大于0.4。通过大量试验和理论模拟证明当水胶比超过0.4混凝土中孔的连通度显著提高，混凝土结构腐蚀剥落严重。

**4.6.3** 通过大量的试验和理论模拟证实，当温度为-10℃时，对应的结冰孔的最可几孔径约为12 nm，C45混凝土的最可几孔径一般为10 nm~20 nm，故低温盐冻下混凝土的强度等级不宜低于C45。

**4.6.4** 通过大量的试验和理论模拟证实，C50混凝土的最可几孔径一般为8 nm~15 nm，在这样大概率的孔隙作用中硫酸根离子的传输速率相对低，若混凝土中的C3A的含量相对低时，其损伤程度发展也相对缓慢。

**5 多因素时变设计**

**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，混凝土保护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** 对于盐冻状态下混凝土损伤机理及劣化规律、抗冻性评价指标，各国学者开展了大量理论分析和试验研究，东南大学课题组通过多年研究部分理论预测结果和试验经对比结果表明，冻融损伤的质量与单位体积下混凝土平均剥落厚度(经换算后)的误差在25%内，理论上这样的时变模型对冻融环境下的混凝土结构耐久性设计很有指导作用。本标准选择两个极限状态：一为混凝土表面剥落极限状态，由于混凝土冻融损伤造成混凝土材料性能劣化是一个由外及里的发展过程，冻融损伤过程中，混凝土中的水化产物由冻融前的堆积状密实状态逐步变成疏松状态，胶凝力下降，造成混凝土表面剥落，对混凝土耐久性产生较大影响；另一方面，混凝土表面剥落造成混凝土对内部钢筋的保护作用降低，损伤后混凝土微裂缝逐渐发展，裂缝宽度、长度和连通度增加，加速了腐蚀介质的渗透，促进了混凝土中钢筋的锈蚀，对严酷盐冻环境作用的结构设计以钢筋初始锈蚀为极限状态。

**5.1.4** 在硫酸盐或者硫酸盐-氯盐耦合的严酷条件下的耐久性极限状态，本条重点参考了参考现行国家标准《既有混凝土结构耐久性评定标准》（GB/T 51355）条文中8.1中的规定，在这个条文上增加了混凝土开始失效极限状态。处于硫酸盐侵蚀环境的混凝土结构，混凝土的破坏分为表层剥落和强度损失，上述两种破坏形式都会降低混凝土结构服役寿命。对混凝土结构而言，硫酸盐的侵蚀也是从表及里传输过程，硫酸盐与水泥水化产物形成石膏或者钙矾石类膨胀物质，导致造成混凝土表面损伤开裂，对重要或者高浓度硫酸盐服役环境下的工程适宜采用混凝土开始失效极限状态进行耐久性设计。

**5.1.5** 混凝土结构耐久性的设计方法有经验方法和定量方法。，再细分分别是经验的方法、半定量方法和定量控制耐久性失效概率的方法。对缺乏侵蚀作用或作用效应统计规律的结构或结构构件，宜采取经验方法确定耐久性的系列措施，具有一定侵蚀作用和作用效应统计规律的结构构件，可采取半定量的耐久性极限状态设计方法，如环境等级以及环境的作用程度。而关于环境作用下混凝土构件的性能时变模型，各国学者开展了大量理论分析、试验研究和既有结构的服役状况调研，目前日渐成熟，已逐步用于混凝土结构的耐久性设计。因环境多变复杂，单一的设计方法仍无法准确反映结构的时变，目前在耐久性设计仍部分采用半定量和定向相结合方法确定，本标准重点以概率理论和性能时变指标定量化为基础，通过分项系数设计表达方式进行极限状态的设计。本规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，以可靠指标度量结构构件的可靠度，采用分项系数的设计表达式进行耐久性设计。

**5.2 多因素时变设计方法**

**5.2.2** 混凝土结构或者构件进行耐久性极限状态设计时，对不同的设计状况应采用相应的环境作用组合，在每一种环境作用组合中还必须选取其中的最不利组合进行有关的极限状态设计。设计时应针对各种有关的极限状态进行必要的计算或验算，当有实际工程经验时，也可采用构造措施来代替验算。

**5.2.3** 基本变量是指极限状态方程中所包含的影响结构耐久性可靠度的各种物理量。它包括：引起环境作用效应S的各种作用，如温度变化、湿度变化、盐侵蚀、化学腐蚀等；构成混凝土结构抗力R的各种因素，如保护层厚度、材料性能（氯离子扩散系数、临界氯离子浓度、强度等级、含气量等）、几何参数等。分析结构可靠度时，也可将环境作用效应或混凝土结构抗力作为综合的基本变量考虑，基本变量一般可认为是相互独立的随机变量。极限状态方程是当混凝土结构处于极限状态时各有关基本变量的关系式。

**5.2.7** 环境对混凝土结构或者构件的影响可以具有机械的、物理的、化学的或者生物的性质，并且很有可能使结构的材料性能随时间发生不同程度的退化。在耐久性设计时对于环境对结构的作用，应用环境的代表值乘以一个大于1的分项系数表达，而材料性能的标准值是用标准的试件在实验室按照标准的方法测试获得的，如混凝土的强度等级。

**5.2.8** 对严寒地区或者硫酸盐为主的侵蚀环境中，结构混凝土的极限状态既可以按照钢筋开始锈蚀作为耐久性设计的依据，也可以按照保护层剥落厚度作为耐久性设计依据，在耐久性设计时应考虑环境因素与混凝土结构损伤之间的交互作用。

**5.3 分项系数设计确定**

**5.3.1** 尽管概率极限状态设计方法全部更新了结构可靠性的概念与分析方法，但提供给设计人员实际使用的仍然是分项系数设计表达方式，它与设计人员长期使用的表达形式相同，从而易于掌握。概率极限状态设计方法必须以统计数据为基础，考虑到对各类严酷环境、各种材料所具有的统计数据在质与量两个方面都很有很大差异，或在某些领域根本没有统计数据，因而规定当缺乏统计数据时，可以不通过可靠指标*β*，直接按工程经验确定分项系数。

**5.3.2** 本条规定了各种基本变量的设计值确定方法。

1) 环境作用的设计值一般可表示为环境作用的代表值和环境作用的分项系数的乘积。环境作用可考虑为环境温度、盐浓度等环境参数的变化。

2) 材料性能的设计值一般可表示为材料性能的标准值和材料性能的分项系数的乘积。材料性能可考虑为施工因素、原材料因素等对材料属性产生的一系列变化。

3) 几何参数的设计值考虑为混凝土结构或构件的形状、尺寸的影响，例如条形、面型结构的对耐蚀性能产生的不同影响。

4) 结构抗力设计值应综合考虑材料性能和几何参数变异性的综合影响。

**6 盐冻环境设计**

**6.1 一般规定**

**6.1.1** 盐冻环境下混凝土结构的耐久性设计，应控制混凝土遭受长期冻融循环作用引起的损伤。

**6.1.2** 混凝土抗冻性与混凝土强度直接相关，冬期施工中混凝土接触负温时的强度越大越对抗冻性提升有利。施工初期混凝土开口孔隙多，盐侵蚀较快，盐冻环境对混凝土的膨胀驱动力不会衰减，而混凝土自身性能尚未达标，则会加剧冻融损伤。

**6.1.3** 存在硫酸盐的盐冻环境需要考虑盐的结晶作用对孔隙产生压力、冰结晶作用对孔隙产生压力以及水对孔隙的压力，而硫酸盐结晶压力与其浓度相关，当硫酸盐浓度较大（＞5000 mg/L）时会对混凝土产生更大膨胀驱动力，引起更为严重的腐蚀，需开展专项研究。

**6.2 环境类别和环境作用等级**

**6.2.1** 本标准对盐冻环境作用等级的划分，主要考虑混凝土所处环境的温度、混凝土饱和度和含盐量等。温度主要与环境最低温度和年冻融次数有关；饱和度与混凝土表面接触水的频率和表面积水的难易程度有关；盐分含量指混凝土表面受冻时冰水中的盐含量。

我国现行国家标准中对混凝土抗冻等级的要求多按当地最冷月份的平均气温进行区分，这在使用上有其方便之处，但应注意当地气温与构件所处地段的局部温度往往差别很大。比如严寒地区朝南构件的冻融次数多于朝北的构件，而微冻地区可能相反。由于缺乏各地区年冻融次数的统计资料，现仍暂时按当地最冷月的平均气温表示气温变化对混凝土冻融的影响程度。温度影响混凝土受冻程度，其冻结孔隙半径与温度相关，如附录B式(B.0.6)所示。

考虑-12 ℃环境下，冻结孔直径为10 nm，包含所有的非凝胶孔。且我国幅员辽阔，有多数城市最冷月均气温可达-12℃，故以此为其中之一界限。-20 ℃环境下，冻结孔径约为3 nm，几乎包含所有可测凝胶孔，且最冷月均气温在-20 ℃及以下且存在冻融作用的环境国内较少，因此，本标准对低温下限取值为-20 ℃，超过该上限特殊环境需开展专项研究。

对于饱水程度，分为高度饱水和中度饱水两种情况，前者指受冻前长期或频繁接触水体或湿润土体，混凝土体内高度饱水；后者指受冻前偶受雨淋或潮湿，混凝土体内的饱水程度不高。混凝土受冻融破坏的临界饱水度约为85％～90％，含水量低于临界饱水度时不会冻坏。在表面有水的情况下，连续的反复冻融可使混凝土内部的饱水程度不断增加，一旦达到或超过临界饱水度，就有可能很快发生破坏。

含盐分的水溶液不仅会造成混凝土的内部损伤，而且能使混凝土表面起皮剥蚀，盐中的氯离子还会引起混凝土内部钢筋的锈蚀。盐冻环境的剥蚀作用程度与混凝土湿度有关；不同构件及部位由于方向、位置不同，受盐直接、间接作用或溅射的程度也会有很大的差别。

**6.2.2** 埋置于含盐土中冰冻线以上的混凝土构件，发生冻融交替的次数明显低于暴露在大气环境中的构件，但仍要考虑盐冻损伤的可能，可根据具体情况适当降低环境作用等级。

**6.2.3** 在冬季喷洒除冰盐的环境中，道路上含盐的积雪常被扫到两侧并堆置在墙柱和护栏底部，容易造成底部混凝土的严重破坏。

**6.3 材料与保护层厚度**

**6.3.1** 本条规定了在盐冻环境下混凝土原材料选用原则。

**6.3.2** 本条规定了在盐冻环境下各类设计的混凝土结构的钢筋保护层剥落的厚度参考值。

**6.3.3** 按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的规定，对处于盐冻环境下的混凝土进行了配合比参数的限定，按照本标准表6.3.3的性能指标要求，通过大量试验，提出了混凝土最大水胶比、最小胶材用量以及最小保护层厚度的要求。对于耐盐冻腐蚀混凝土而言，混凝土保护层厚度不宜小于50 mm，且宜采用表层防护材料、基体抗侵蚀材料、钢筋阻锈材料等。

**6.3.4** 按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的规定，对处于盐冻环境下的混凝土提出了抗冻耐久性指数要求。

**6.3.5** 按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的规定，本条对盐冻环境下混凝土结构含气量做出了规定。

**7 高浓度氯盐侵蚀环境设计**

**7.1 一般规定**

**7.1.1** 环境中的氯化物以水溶氯离子的形式通过扩散、渗透和吸附等途径从混凝土构件表面向内部迁移，可引起混凝土内钢筋的严重锈蚀。氯离子引起的钢筋锈蚀难以控制、后果严重，因此是混凝土结构耐久性的重要问题。氯盐对于混凝土材料也有一定的腐蚀作用，但相对较轻。

**7.1.2** 定期检测可以尽早发现问题，并及时采取补救措施。目前针对钢筋锈蚀的检测技术发展迅速，通过设计阶段置入的钢筋锈蚀传感器、使用阶段无损采集数据、配合电化学保护技术，能够将氯盐引起的钢筋锈蚀控制在保护层开裂之前，降低氯盐侵蚀环境中钢筋混凝土构件的长期维护成本。

**7.2 环境类别和环境作用等级**

**7.2.1** 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。

本标准考虑到我国海洋中氯盐浓度一般不高于20000 mg/L，故以此浓度为界限，按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的规定将海洋环境的浪溅区、潮汐区按同一类作用等级考虑。水中氯盐浓度超出20000 mg/L、土中氯盐浓度超出30000 mg/kg的考虑为盐渍土地区环境。南方炎热地区温度高，氯离子扩散速率增大，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。

**7.2.2** 海水激流对混凝土表面有气蚀作用，海砂对构件表面有磨蚀作用，因此相应的环境作用等级宜适当提高。

**7.2.3** 近海和海洋环境的氯化物对混凝土结构的腐蚀作用与当地海水中的含盐量有关。不同地区海水的含盐量可能有很大差别，沿海地区海水的含盐量受到江河淡水排放的影响并随季节而变化，海水的含盐量有时可能较低，可取年均值作为设计的依据。

河口地区虽然水中氯化物含量低于海水中的，但是对于大气区和浪溅区，混凝土表面的氯盐含量会不断积累，其长期含盐量可以明显高于周围水体中的含盐浓度。在确定环境作用等级时，应充分考虑到这些因素。

**7.3 材料与保护层厚度**

**7.3.2** 按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）、《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942）等的规定，对处于高浓度氯盐侵蚀环境下的混凝土进行了配合比参数的限定，按照本标准表6.3.3的性能指标要求，通过大量试验，提出了混凝土最大水胶比、最大氯离子扩散系数、最小胶材用量以及最小保护层厚度的要求。对于耐盐冻腐蚀混凝土而言，混凝土保护层厚度不宜小于50 mm，且宜采用表层防护材料、基体抗侵蚀材料、钢筋阻锈材料、耐蚀钢筋等。

本标准推荐采用RCM法测试氯离子扩散系数，具体试验方法可参见现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082），其试验方法与过程与NT Build 492标准相同。混凝土的抗氯离子侵入性也可以用其他试验方法及其指标表示。

**7.3.3** 本条规定了不同环境作用下，混凝土胶凝材料中矿物掺和料的选择原则。混凝土的胶凝材料除水泥中的硅酸盐水泥外，还包括水泥中具有胶凝作用的混合材料（如粉煤灰、火山灰、矿渣、沸石岩等）以及配制混凝土时掺入的具有胶凝作用的矿物掺和料（粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等）。

**8 高浓度硫酸盐侵蚀环境设计**

**8.1 一般规定**

**8.1.1** 本标准考虑的土中和地表、地下水中的高浓度硫酸盐侵蚀。对于埋入盐渍土中、腐蚀环境严重的混凝土构件，设计可与混凝土材料供应方协商采用非硅酸盐类水泥，并掺用矿物掺和料。

**8.2 环境类别和环境作用等级**

**8.2.1** 本标准根据水、土环境中硫酸根离子的不同浓度范围将环境作用划分为V-F-1、V-F-2、V-F-3、V-F-4共4个等级。浓度低于V-F-1等级的不需在设计中特别考虑，浓度高于V-F-4等级的应作为特殊情况另行对待。盐渍土环境作用对混凝土的腐蚀，至今尚缺乏足够的数据积累和研究成果。重要工程应在设计前作充分调查，以工程类比作为设计的主要依据。

表8.2.1规定的土中硫酸根离子浓度，是在土样中加水溶出的浓度（水溶值）。有的硫酸盐（如硫酸钙）在水中的溶解度很低，在土样中加酸则可溶出土中含有的全部硫酸根（酸溶值）。但是，只有溶于水中的硫酸盐才会腐蚀混凝土。不同国家的混凝土结构设计规范，对硫酸盐腐蚀的作用等级有较大差别，采用的浓度测定方法也有较大出入，有的用酸溶法测定（如欧盟规范），有的则用水溶法（如美国，加拿大和英国）。当用水溶法时，由于水土比例和浸泡搅拌时间的差别，溶出的量也不同。所以最好能同时测定硫酸根离子的水溶值和酸溶值，以便于判断难溶盐的数量。

硫酸盐对混凝土的化学腐蚀是两种化学反应的结果：一是与混凝土中的水化铝酸钙起反应形成钙矾石；二是与混凝土中的氢氧化钙结合形成硫酸钙（石膏），两种反应均会造成体积膨胀，使混凝土开裂。硫酸盐对混凝土的化学腐蚀过程很慢，通常要持续很多年，开始时混凝土表面泛白，随后开裂，剥落破坏。当土中构件暴露与流动的地下水时，硫酸盐得以不断补充，腐蚀的产物也被带走，材料的损伤程度就会非常严重。相反，在渗透性很低的黏土中，当表面浅层混凝土遭硫酸盐腐蚀后，由于硫酸盐得不到补充，腐蚀反应就很难进行。

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

**8.2.2** 部分暴露于大气中而其他部分又接触含盐水和土的混凝土构件应特别考虑盐结晶作用。在日温差剧烈变化或干旱和半干旱地区，混凝土孔隙中的盐溶液容易浓缩并产生结晶或在外界低温过程的过程作用下析出结晶。对于一端置于水和土而另一端露于空气中的混凝土构件，水和土中的盐会通过混凝土毛细孔隙的吸附作用上升，并在干燥的空气中蒸发，最终因浓度的不断提高产生盐结晶。我国盐渍土地区电杆，墩柱，墙体等混凝土构件在地面以上1 m左右高度范围内常出现这类破坏。对于一侧接触水或土而另一侧暴露于空气中的混凝土构件，情况也与此相似。表注中的干燥系数定义为：

式中：K表示干燥度系数；表示日平均温度≥10℃稳定期的年积温（℃）；表示日平均温度≥10℃稳定期的年降水量（mm）。

**8.3 材料与保护层厚度**

**8.3.1** 硫酸盐腐蚀环境中的混凝土结构耐久性设计必须有针对性，对于不同种类的腐蚀性物质，采用的水泥品种和掺合料的成分及合适掺量并不完全相同。在混凝土中加入少量硅灰一般都能起到比较显著的作用；粉煤灰和其他火山灰质材料因其本身的Al2O3含量有波动，效果差别较大，并非都是掺量越大越好。

因此当单独掺加粉煤灰等火山灰质掺合料时，应当通过实验确定其最佳掺量。在西方，抗硫酸盐水泥或高抗硫酸盐水泥都是硅酸盐类的水泥，只不过水泥中的C3A和C3S的含量不同程度地减少。当环境中的硫酸盐含量异常高时，最好是采用不含硅酸盐的水泥，如石膏矿渣水泥或矾土水泥。但是非硅酸盐类水泥的使用条件和配合比以及养护等都有特殊要求，需通过试验确定后使用。此外，要注意在硫酸盐腐蚀环境下的粉煤灰掺合料应使用低钙粉煤灰。

**8.3.2** 本条规定了在高浓度硫酸盐侵蚀环境下的混凝土结构的最低强度等级。

**8.3.3** 本条规定了在不同硫酸盐浓度侵蚀环境下混凝土结构的剥落厚度设计推荐值。

**8.3.4** 按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的规定，对处于高硫酸盐环境下的混凝土进行了配合比参数的限定，通过大量试验及数值模拟，提出了混凝土最大水胶比、最小胶材用量以及最小保护层厚度的要求。对于高浓度硫酸盐侵蚀环境下混凝土保护层厚度不宜小于50 mm，当保护层超过50 mm后，仍不满足设计服役寿命时，宜采用表层防护材料、基体抗侵蚀材料、钢筋阻锈材料等。

**8.3.5** 水、土中的硫酸盐侵蚀环境下中的素混凝土结构构件，其混凝土的最低强度等级和最大水胶比应与配筋混凝土结构构件相同。

**8.3.6** 本条规定了在干旱、高寒硫酸盐环境和含盐大气环境中的混凝土结构采用引气混凝土。

**8.3.7** 本条规定了预制构件，预应力钢筋，直接接触土体浇筑的构件，处于流水中或同时受水中泥沙冲刷的构件保护层厚度设计取值应符合下现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的有关规定。

**8.3.8** 本条规定了耐腐蚀混凝土表层防护材料选用应符合现行国家标准《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942）的有关规定。

**8.3.9** 本条规定了干湿交替的情况下设计的保护层厚度可比表中规定增加10 mm或者采用相应的防腐措施。

**9 硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境设计**

**9.1 一般规定**

**9.1.1** 本标准考虑的土中和地表、地下水中的硫酸盐—氯盐耦合侵蚀。对于埋入盐渍土中、腐蚀环境严重的混凝土构件，设计可与混凝土材料供应方协商采用非硅酸盐类水泥，并掺用矿物掺和料。

**9.2 环境类别和环境作用等级**

**9.2.1** 本标准根据水、土环境中硫酸根离子和氯离子的不同浓度范围将环境作用划分为VI-1、VI-2、VI-3、VI-4共4个等级。浓度低于VI-1等级的不需在设计中特别考虑，浓度高于VI-4等级的应作为特殊情况另行对待。硫酸盐—氯盐耦合环境作用对混凝土的腐蚀，至今尚缺乏足够的数据积累和研究成果。重要工程应在设计前作充分调查，以工程类比作为设计的主要依据。

水、土中的硫酸根离子和氯离子对混凝土的腐蚀作用，除浓度外，还与硫酸盐的阳离子种类及浓度、混凝土表面的干湿交替程度、环境温度以及土的渗透性和地下水的流动性等因素有很大关系。腐蚀混凝土的硫酸盐和氯离子主要来自周围的水、土，也可能来自原本受过硫酸盐和氯盐腐蚀的混凝土骨料以及混凝土外加剂等。

**9.3 材料与保护层厚度**

**9.3.1** 氯盐可能会减弱硫酸盐的危害。其原因是石膏和硅酸三钙在有氯化钠存在时水中的溶解度加大并被海水带走，从而缓解了钙矾石的生成。海水中的硫酸盐含量很高，但有大量氯化物存在，所以不再单独考虑硫酸盐的作用。但是，上述硫酸根离子和氯离子之间的抑制作用在土中可就可能很微弱。

硅酸盐水泥混凝土抗硫酸盐以及酸类物质化学腐蚀的能力较差。硅酸盐水泥水化产物中的氢氧化钙不论在强度上或化学稳定性上都很弱，几乎所有的化学腐蚀都与其有关，在压力水，流动水尤其是软水的作用下氢氧化钙还会溶析，是混凝土的薄弱环节。

**9.3.2** 本条规定了高浓度硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境下各类设计的混凝土结构的最低强度等级。

**9.3.3** 本条规定了在高浓度硫酸盐—氯盐耦合侵蚀环境下各类设计的混凝土结构的剥落厚度设计推荐值。

**9.3.4** 按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的规定，对处于硫酸盐—氯盐耦合环境下的混凝土进行了配合比参数的限定，通过大量试验及数值模拟，提出了混凝土最大水胶比、最小胶材用量以及最小保护层厚度的要求。对于抗硫酸盐混凝土而言，混凝土保护层厚度不宜小于50 mm，且宜采用表层防护材料、基体抗侵蚀材料、钢筋阻锈材料等。

**9.3.5** 水、土中的硫酸盐—氯盐耦合环境下中的素混凝土结构构件，其混凝土的最低强度等级和最大水胶比应与配筋混凝土结构构件相同。

**9.3.6** 本条规定了在干旱、高寒和含盐大气环境中在硫酸盐—氯盐耦合侵蚀下的混凝土结构采用引气混凝土。

**9.3.7** 本条规定了硫酸盐—氯盐耦合环境下预制构件，预应力钢筋，直接接触土体浇筑的构件，处于流水中或同时受水中泥沙冲刷的构件保护层厚度设计取值应符合下现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的有关规定。

**9.3.8** 本条规定了硫酸盐—氯盐耦合环境下耐腐蚀混凝土表层防护材料选用应符合现行国家标准《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942）的有关规定。

**9.3.9** 本条规定了硫酸盐—氯盐耦合环境下干湿交替的情况下设计的保护层厚度可比表中规定增加10 mm或者采用相应的防腐措施。

**附录A 传输时变系数计算**

**A.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。

**A.0.6** 在数学上，式(A.0.4-2)存在不可积的几类特殊表达式，此时无法使用式(A.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(A.0.2-1)求解以获得氯离子传输的时空分布。

**A.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B 盐冻作用保护层剥落厚度计算**

**B.0.2** 盐冻作用下，混凝土主要破坏形式为内部膨胀驱动力所引起的损伤，损伤累积后表现为混凝土表面剥落、内部疏松。在此，我们考虑降温后水结冰产生的孔隙壁面的膨胀、降温后盐析出结晶对孔隙壁面的膨胀压力以及结晶体对连通孔隙内的水所产生的压力，进而通过水将应力传递给孔隙壁面。

**B.0.4** 冰结晶压和水的静水压力通过多孔介质弹性力学基本理论求得，在此中考虑了水冰相变作用、水分迁移、温度效应以及体积变化。

**B.0.5** 混凝土孔隙的固体基质所受力与结晶压力和静水压力间应考虑界面能的影响。

**B.0.7** 考虑混凝土基体的损伤作用，当由冻融引起的固体基质所受外界荷载超出其强度值，则认为发生塑性损伤。塑性损伤引起孔隙分布改变，考虑至下一步冻融循环中。本标准的混凝土剥落厚度计算以代表性体积单元的孔隙损伤累积计算而来。

以II-F-4类环境条件设计寿命为算例，盐冻条件下C70混凝土保护层剥落厚度计算过程如表B.0.7.1所示：

表B.0.7.1 II-F-4类环境条件设计寿命保护层剥落厚度计算

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 服役年限 | 应变 | 孔隙率 | 体积模量  （GPa） | 剪切模量  （GPa） | 质量损失  （%） | 剥落厚度  （mm） |
| 0 | 0 | 0.08 | 26.15 | 16.10 | 0 | 0 |
| 10 | -0.000247 | 0.088595 | 25.56 | 15.78 | 0.86 | 4.3 |
| 20 | -0.000196 | 0.091586 | 25.36 | 15.67 | 1.16 | 5.8 |
| 30 | -0.000155 | 0.094028 | 25.19 | 15.58 | 1.40 | 7.0 |
| 40 | 0.000017 | 0.096438 | 25.02 | 15.49 | 1.64 | 8.2 |
| 50 | 0.000068 | 0.099254 | 24.83 | 15.38 | 1.93 | 9.7 |
| 60 | 0.000114 | 0.101810 | 24.65 | 15.28 | 2.18 | 10.9 |
| 70 | 0.000157 | 0.104161 | 24.49 | 15.20 | 2.42 | 12.2 |
| 80 | 0.000198 | 0.106346 | 24.34 | 15.11 | 2.63 | 13.3 |
| 90 | 0.000236 | 0.108393 | 24.20 | 15.04 | 2.84 | 14.3 |
| 100 | 0.000273 | 0.110325 | 24.07 | 14.96 | 3.03 | 15.3 |

注：剥落厚度以直径为1 m的圆柱体混凝土为算例。

以II-F-4类环境条件设计寿命为算例，盐冻条件下使用防护涂层材料和基体抗侵蚀材料后C70混凝土保护层剥落厚度计算过程如表B.0.7.2所示：

表B.0.7.2 II-F-4类环境条件使用防护措施设计寿命保护层剥落厚度计算

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 服役年限 | 应变 | 孔隙率 | 体积模量  （GPa） | 剪切模量  （GPa） | 质量损失  （%） | 剥落厚度  （mm） |
| 0 | 0 | 0.08 | 26.15 | 16.10 | 0 | 0 |
| 10 | -0.000247 | 0.08 | 25.74 | 15.89 | 0 | 0 |
| 20 | -0.000224 | 0.005689 | 25.42 | 15.70 | 1.16 | 2.9 |
| 30 | -0.000033 | 0.007734 | 25.15 | 15.56 | 1.40 | 3.9 |
| 40 | 0.000043 | 0.009446 | 24.85 | 15.39 | 1.64 | 4.7 |
| 50 | 0.00011 | 0.010936 | 24.59 | 15.25 | 1.93 | 5.5 |
| 60 | 0.000171 | 0.012265 | 24.35 | 15.12 | 2.18 | 6.2 |
| 70 | 0.000228 | 0.013469 | 24.14 | 15.01 | 2.42 | 6.8 |
| 80 | 0.000281 | 0.014576 | 23.94 | 14.90 | 2.63 | 7.3 |
| 90 | 0.00056 | 0.015602 | 23.71 | 14.77 | 2.84 | 7.8 |
| 100 | 0.000633 | 0.016561 | 23.48 | 14.64 | 3.03 | 8.3 |

注：使用规定防护涂层材料假定寿命十年，十年后开始劣化；基体抗侵蚀材料起密实孔隙作用，提升混凝土基体交联度，抵抗盐侵蚀传输与破坏，提升基体值10%。

以II-F-4类环境盐冻融下水胶比混凝土冻融循环试验和模拟对比，混凝土质量损失率试验与数值计算如表B.0.7.3所示：

表B.0.7.3 II-F-4类环境混凝土质量损失实验调研与计算值（%）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 冻融次数 | 实验室数据 | | F. H. Wittmann院士组 | | | | 国内文献调研 | | | |
| C50 | | C60 | | C30 | | C50 | | C30 | |
| 实测 | 计算 | 实测 | 计算 | 实测 | 计算 | 实测 | 计算 | 实测 | 计算 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 0.82 | 1.10 | 1.49 | 1.06 | 6.07 | 1.90 | 0.51 | 1.10 | 0.31 | 1.90 |
| 50 | 2.98 | 2.16 | 3.05 | 2.14 | 7.01 | 4.04 | 0.86 | 2.16 | 0.59 | 4.04 |
| 75 | 4.14 | 3.31 | 3.30 | 3.21 | 8.00 | 6.38 | 1.40 | 3.31 | 1.46 | 6.38 |
| 100 | 4.64 | 4.54 | 3.85 | 4.46 | 9.16 | 9.03 | 2.04 | 4.54 | 2.59 | 9.03 |
| 125 | 4.93 | 5.15 | 4.84 | 5.02 | 10.36 | 10.55 | 3.00 | 5.15 | 4.95 | 10.55 |
| 150 | 4.96 | 5.91 | 5.20 | 5.56 | 12.45 | 12.18 | 4.12 | 5.91 | 6.95 | 12.18 |
| 175 | 5.20 | 6.66 | 6.35 | 6.11 | 13.20 | 13.84 | 5.65 | 6.66 | 11.31 | 13.84 |
| 200 | 5.64 | 7.37 | 7.40 | 6.77 | 14.55 | 15.54 | 8.50 | 7.37 | 19.20 | 15.54 |
| 225 | 5.86 | 8.09 | 8.60 | 7.43 | 15.62 | 17.86 |  | 8.09 |  | 17.86 |
| 250 | 6.70 | 8.80 | 8.74 | 8.07 | 16.91 | 20.29 |  | 8.80 |  | 20.29 |
| 275 | 7.20 | 9.55 | 8.94 | 8.71 | 17.38 | 22.79 |  | 9.55 |  | 22.79 |
| 300 | 9.52 | 10.48 | 9.35 | 9.34 | 18.97 | 25.23 |  | 10.48 |  | 25.23 |

**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。

**C.0.3** 以不同环境条件设计寿命为算例，试算了高浓度硫酸盐条件下混凝土保护层剥落厚度。

统计高浓度硫酸盐条件下混凝土保护层剥落厚度计算破坏深度和实测破坏深度。根据附录C的模型计算保护层剥落厚度。同时根据国际上应用范围较广的ACI365模型，计算出相同条件下的混凝土保护层破坏深度。具体数值如表C.0.3.1所示。

表C.0.3.1混凝土保护层剥落厚度计算破坏深度和实测破坏深度（mm）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境中硫酸盐浓度  (mg/L) | 强度等级 | 水胶比 | 侵蚀时间  （年） | 实测保护层破坏深度  (mm) | 本模型计算保护层破坏深度  (mm) | ACI365模型保护层破坏深度  (mm) |
| 19000 | C50 | 0.34 | 10 | 9 | 12 | 17 |
| 20 | 23 | 26 | 34 |
| 30 | 29 | 35 | 52 |
| C60 | 0.30 | 10 | 4 | 6 | 17 |
| 20 | 9 | 15 | 34 |
| 30 | 18 | 21 | 51 |
| C70 | 0.23 | 10 | 0 | 0 | 16 |
| 20 | 0 | 0 | 31 |
| 30 | 2 | 1 | 47 |
| 23000 | C50 | 0.34 | 10 | 12 | 15 | 25 |
| 20 | 26 | 32 | 50 |
| 30 | 29 | 40 | 74 |
| C60 | 0.30 | 10 | 4 | 8 | 24 |
| 20 | 10 | 15 | 48 |
| 30 | 19 | 25 | 71 |
| C70 | 0.23 | 10 | 0 | 0 | 23 |
| 20 | 2 | 0 | 45 |
| 30 | 2 | 1 | 68 |
| 27000 | C50 | 0.34 | 10 | 13 | 18 | 34 |
| 20 | 23 | 30 | 67 |
| 30 | 39 | 48 | 101 |
| C60 | 0.30 | 10 | 6 | 10 | 32 |
| 20 | 11 | 18 | 65 |
| 30 | 24 | 30 | 97 |
| C70 | 0.23 | 10 | 0 | 0 | 31 |
| 20 | 2 | 0 | 61 |
| 30 | 5 | 8 | 92 |
| 34000 | C50 | 0.34 | 10 | 12 | 20 | 52 |
| 20 | 35 | 50 | 105 |
| 30 | 48 | 61 | 157 |
| C60 | 0.30 | 10 | 6 | 15 | 50 |
| 20 | 20 | 30 | 100 |
| 30 | 31 | 42 | 150 |
| C70 | 0.23 | 10 | 0 | 0 | 48 |
| 20 | 3 | 7 | 95 |
| 30 | 6 | 10 | 143 |

在ACI365模型中，硫酸盐产生的线性应变是通过砂浆的自由膨胀来计算的，而实际混凝土中，因硫酸盐而生成的膨胀应变受混凝土中粗骨料约束，导致所计算的混凝土的剥落层厚度偏大。相比较《既有混凝土结构耐久性评定标准》GB/T 51355-2019中比ACI365中进行了改进，也是针对水泥砂浆的，结果值仍然偏大。本标准剥落厚度模型中基于硫酸盐在混凝土中的传输-反应-损伤全过程，用结晶压理论和固相体积膨胀理论相结合客观反映了硫酸酸盐对混凝土的损伤，也客观地提出了保护层剥落的判据，计算精度显著提高。

根据其他课题组的典型数据，高浓度硫酸盐条件下混凝土保护层剥落厚度计算破坏深度和实测破坏深度如表C.0.3.2所示。所计算的保护层破坏深度与实测值均在30%以内。

表C.0.3.2 混凝土保护层剥落厚度计算破坏深度和实测破坏深度（mm）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 数据源 | 环境中硫酸盐质量分数 | 强度等级 | 水胶比 | 侵蚀时间  （天） | 实测质量损失（%） | 实测保护层破坏深度(mm) | | 计算保护层破坏深度(mm) |
| 金祖权教授组数据 | 5% | C30 | 0.45 | 100 | 0.59 | 0.053 | | 0.065 |
| 200 | 0.61 | 0.054 | | 0.073 |
| 300 | 0.67 | 0.060 | | 0.074 |
| 400 | 0.71 | 0.063 | | 0.073 |
| 500 | 0.73 | 0.065 | | 0.077 |
| 600 | 0.85 | 0.076 | | 0.086 |
| 700 | 0.91 | 0.081 | | 0.110 |
| C50 | 0.37 | 100 | 0.27 | 0.024 | | 0.033 |
| 200 | 0.30 | 0.027 | | 0.033 |
| 300 | 0.32 | 0.028 | | 0.031 |
| 400 | 0.38 | 0.034 | | 0.041 |
| 500 | 0.45 | 0.040 | | 0.047 |
| 600 | 0.46 | 0.041 | | 0.048 |
| 700 | 0.47 | 0.042 | | 0.053 |
| C70 | 0.28 | 100 | 0.15 | 0.013 | | 0.017 |
| 200 | 0.20 | 0.018 | | 0.024 |
| 300 | 0.31 | 0.028 | | 0.034 |
| 400 | 0.45 | 0.040 | | 0.054 |
| 500 | 0.47 | 0.042 | | 0.056 |
| 600 | 0.50 | 0.045 | | 0.059 |
| 700 | 0.54 | 0.048 | | 0.063 |
| 余宏发教授组数据 |  | C30 | 0.45 | 100 | 0.27 | 0.060 | 0.074 | |
| 200 | 0.97 | 0.216 | 0.259 | |
| 300 | 2.27 | 0.508 | 0.688 | |
| 400 | 0.23 | 0.051 | 0.060 | |
| 500 | 0.73 | 0.163 | 0.188 | |
| 600 | 2.02 | 0.452 | 0.621 | |
| 700 | 3.41 | 0.766 | 0.891 | |
| 800 | 4.56 | 1.027 | 1.420 | |
| C70 | 0.23 | 100 | 0.56 | 0.125 | 0.142 | |
| 200 | 0.63 | 0.140 | 0.180 | |
| 300 | 0.41 | 0.091 | 0.109 | |
| 400 | 0.19 | 0.042 | 0.053 | |
| 500 | 1.28 | 0.286 | 0.374 | |
| 600 | 1.75 | 0.391 | 0.469 | |
| 700 | 2.61 | 0.585 | 0.751 | |
| 800 | 3.93 | 0.884 | 1.039 | |
| 金伟良教授组数据 | 1% | C25 | 0.57 | 30 | 2.38 | 0.514 | 0.696 | |
| 60 | 2.41 | 0.520 | 0.656 | |
| 90 | 2.42 | 0.522 | 0.607 | |
| 120 | 2.44 | 0.527 | 0.652 | |
| 180 | 2.41 | 0.520 | 0.647 | |
| 240 | 2.39 | 0.516 | 0.648 | |
| 300 | 2.35 | 0.507 | 0.694 | |
| 360 | 2.32 | 0.501 | 0.672 | |

**附录D 严酷环境下混凝土耐久性时变设计方法**

**D.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，初定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(D.0.3-1)、(D.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E 硫酸盐—氯盐耦合作用保护层剥落厚度计算**

**E.0.1** 根据国家现行有关试验标准方法经试验确定计算混凝土材料的物理参数，这是混凝土保护层剥落厚度计算的前提。

**E.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。混凝土因硫酸盐侵蚀引起的保护层剥落厚度的计算过程如附录C所示。