

**T/CECS XXX-202X**

**中国工程建设标准化协会标准**

**海港工程混凝土材料与结构耐久性定量**

**设计标准**

Standard for quantitative durability design of concrete materials and structures for harbour engineering

**（征求意见稿）**

2022年9月

**前 言**

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2020年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2020〕23号）的要求，标准编制组在广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并广泛征求意见基础上，制订本标准。

本标准共分为10章和4个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、混凝土的原材料、环境作用等级的划分及量化、混凝土结构的耐久性定量设计、混凝土配合比设计的强度和耐久性指标配制值、兼顾强度与耐久性的混凝土配合比设计、混凝土配合比的试配及调整与确定、有特殊要求的混凝土配合比设计等。

请注意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。

本标准由中国工程建设标准化协会水运专业委员会归口管理，由广西大学负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见和建议，请寄送解释单位（地址：广西南宁市大学东路100号广西大学土木建筑工程学院，邮编：530004）。

主编单位：广西大学

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

**目 次**

[1 总则 7](#_Toc113871859)

[2 术语和符号 8](#_Toc113871860)

[2.1术语 8](#_Toc113871861)

[2.2符号 9](#_Toc113871862)

[3 基本规定 12](#_Toc113871863)

[3.1 设计原则 12](#_Toc113871864)

[3.2 设计工作年限 12](#_Toc113871865)

[3.3 材料要求 13](#_Toc113871866)

[3.4 构造要求 14](#_Toc113871867)

[3.5 耐久性规定 14](#_Toc113871868)

[3.6 附加防腐蚀措施 16](#_Toc113871869)

[3.7 耐久性监测 16](#_Toc113871870)

[3.8 耐久性维护 17](#_Toc113871871)

[4 混凝土的原材料 19](#_Toc113871872)

[4.1 一般规定 19](#_Toc113871873)

[4.2 矿物掺合料 19](#_Toc113871874)

[4.3 骨料 20](#_Toc113871875)

[4.4 拌合用水和外加剂 23](#_Toc113871876)

[5 环境作用等级的划分及量化 25](#_Toc113871877)

[5.1 环境作用等级的划分 25](#_Toc113871878)

[5.2 氯化物环境作用的量化 26](#_Toc113871879)

[6 混凝土结构的耐久性定量设计 29](#_Toc113871880)

[6.1 一般规定 29](#_Toc113871881)

[6.2 耐久性定量设计方法 29](#_Toc113871882)

[7 混凝土配合比设计的强度和耐久性指标配制值 34](#_Toc113871883)

[7.1 一般规定 34](#_Toc113871884)

[7.2 混凝土强度的配制值 34](#_Toc113871885)

[7.3 初始氯离子扩散系数的配制值 35](#_Toc113871886)

[8 兼顾强度与耐久性的混凝土配合比设计 37](#_Toc113871887)

[8.1 一般规定 37](#_Toc113871888)

[8.2 水胶比和矿物掺合料掺量的确定 39](#_Toc113871889)

[8.3 用水量和外加剂用量的确定 41](#_Toc113871890)

[8.4 胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量的确定 41](#_Toc113871891)

[8.5 砂率的确定 42](#_Toc113871892)

[8.6 粗、细骨料用量的确定 43](#_Toc113871893)

[8.7 兼顾强度和耐久性的混凝土配合比设计步骤 44](#_Toc113871894)

[9 混凝土配合比的试配、调整与确定 45](#_Toc113871895)

[9.1 混凝土试配 45](#_Toc113871896)

[9.2 配合比的调整与确定 45](#_Toc113871897)

[10 有特殊要求的混凝土配合比设计 47](#_Toc113871898)

[10.1 高性能混凝土配合比设计要求 47](#_Toc113871899)

[10.2 泵送混凝土配合比设计要求 47](#_Toc113871900)

[10.3 大体积混凝土配合比设计要求 48](#_Toc113871901)

[10.4 抗冻混凝土配合比设计要求 48](#_Toc113871902)

[10.5 自密实混凝土配合比设计要求 49](#_Toc113871903)

[10.6 超高性能混凝土配合比设计要求 50](#_Toc113871904)

[附录A 混凝土抗氯离子渗透性扩散系数的电迁移试验方法 51](#_Toc113871905)

[附录B 混凝土中钢筋脱钝临界氯离子浓度的测试方法 55](#_Toc113871906)

[附录C 设计工作年限为50年的混凝土结构耐久性参数组合值 58](#_Toc113871907)

[附录D 水胶比和矿物掺合料掺量取值 67](#_Toc113871908)

[本标准用词说明 82](#_Toc113871909)

[引用标准名录 83](#_Toc113871910)

[条文说明 84](#_Toc113871909)

Contents

[1 General Provisions 7](#_Toc113871859)

[2 Terms and Symbols 8](#_Toc113871860)

[2.1 Terms 8](#_Toc113871861)

[2.2 Symbols 9](#_Toc113871862)

[3 Basic Requirements 12](#_Toc113871863)

[3.1 Design Standard 12](#_Toc113871864)

[3.2 Design Service Life 12](#_Toc113871865)

[3.3 Design Requirements of Mix Proportion 13](#_Toc113871866)

[3.4 Detailing Requirements 14](#_Toc113871867)

[3.5 Durability Requirements 14](#_Toc113871868)

[3.6 Additional Anti-corrosion Measures 16](#_Toc113871869)

[3.7 Requirements of Durability Monitoring 16](#_Toc113871870)

[3.8 Requirements of Durability Maintenance 17](#_Toc113871871)

[4 Raw Materials of Concrete 19](#_Toc113871872)

[4.1 General Requirements 19](#_Toc113871873)

[4.2 Mineral Admixtures 19](#_Toc113871874)

[4.3 Aggregates 20](#_Toc113871875)

[4.4 Mixing Water and Chemical Admixtures 23](#_Toc113871876)

[5 Classification and Quantification of Environmental Action 25](#_Toc113871877)

[5.1 Classification of Environmental Action 25](#_Toc113871878)

[5.2 Quantification of Environmental Action 26](#_Toc113871879)

[6 Design of Durability Parameters of Concrete Structures 29](#_Toc113871880)

[6.1 General Requirements 29](#_Toc113871881)

[6.2 Quantitative Analysis and Design of Structural Durability 29](#_Toc113871882)

[7 Design of Concrete Mix Proportion Parameters 34](#_Toc113871883)

[7.1 General Requirements 34](#_Toc113871884)

[7.2 Concrete Strength Formulation Value 34](#_Toc113871885)

[7.3 Initial Chloride Diffusion Coefficient Formulation Value 35](#_Toc113871886)

[8 Concrete Mix Design Considering Strength and Durability 37](#_Toc113871887)

[8.1 General Requirements 37](#_Toc113871888)

[8.2 Water-Binder Ratio and Mineral Admixtures 39](#_Toc113871889)

[8.3 Water and Additives 41](#_Toc113871890)

[8.4 Cementitious Materials, Mineral Admixtures and Cement 41](#_Toc113871891)

[8.5 Sand Ratio 42](#_Toc113871892)

[8.6 Coarse and Fine Aggregate 43](#_Toc113871893)

[8.7 Concrete Mix Design Steps 44](#_Toc113871894)

[9 Trial Mixing, Adjustment and Determination of Mix Proportion 45](#_Toc113871895)

[9.1 Trial Mixing of Concrete 45](#_Toc113871896)

[9.2 Adjustment and Determination of Mix Proportion 45](#_Toc113871897)

[10 Concrete Mix Proportion with Special Requirements 47](#_Toc113871898)

[10.1 Mix Proportion Requirements of High Performance Concrete 47](#_Toc113871899)

[10.2 Mix Proportion Requirements of Pumping Concrete 47](#_Toc113871900)

[10.3 Mix Proportion Requirements of Mass Concrete 48](#_Toc113871901)

[10.4 Mix Proportion Requirements of Frost-Resistant Concrete 48](#_Toc113871902)

[10.5 Mix Proportion Requirements of Self-Compacting Concrete 49](#_Toc113871903)

[10.6 Mix Proportion Requirements of Ultra-High Performance Concrete 50](#_Toc113871904)

[Appendix A Value of Water-Binder Ratio and Mineral Admixture Content 51](#_Toc113871905)

[Appendix B Test Method for Critical Chloride Concentration of Rebar Depassivation in Concrete 55](#_Toc113871906)

[Appendix C Water-Binder Ratio and Mineral Admixture Contents 58](#_Toc113871907)

[Appendix D Electromigration Test Method for Permeability Diffusion Coefficien 67](#_Toc113871908)

[Explanation of Wording in This Standard 82](#_Toc113871909)

[List of Quoted Standards 83](#_Toc113871910)

[Addition: Explanation of Provisions 84](#_Toc113871909)

**1 总则**

**1.0.1** 为保障海洋氯化物环境下海港工程混凝土材料和结构满足规定的耐久性要求，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于海港工程混凝土结构的耐久性设计与普通混凝土配合比设计，不适用于轻骨料混凝土、纤维混凝土、蒸压混凝土等其他特种混凝土。

**1.0.3** 本标准的规定为结构达到设计工作年限的基本要求，实施时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。

**1.0.4** 海港工程混凝土结构的耐久性定量设计与混凝土配合比设计，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 术语和符号**

**2.1术语**

**2.1.1** 硅酸盐水泥混凝土 portland cement concrete

以硅酸盐水泥为胶凝材料制备的混凝土。

**2.1.2** 矿物掺合料混凝土 concrete with mineral admixtures

以水泥和粉煤灰、粒化高炉矿渣粉等矿物掺合料为胶凝材料（含生产水泥时掺加的矿物掺合料）制备的混凝土。

**2.1.3** 高性能混凝土 high performance concrete

采用常规材料和常规工艺，在常温下，以低水胶比、大掺量活性掺合料制作的抗氯离子渗透性高、尺寸稳定性好、工作性优良并具有较高强度的混凝土。

**2.1.4** 矿物掺合料掺量 percentage of mineral admixture

混凝土中矿物掺合料用量占胶凝材料用量的质量百分比。

**2.1.5** 外加剂掺量 percentage of chemical admixture

混凝土中外加剂用量占胶凝材料用量的质量百分比。

**2.1.6** 氯离子浓度 chloride concentration

混凝土中氯离子质量占胶凝材料质量的百分比。

**2.1.7** 初始氯离子浓度 initial chloride concentration

新拌混凝土硬化后实测的氯离子含量。

**2.1.8** 临界氯离子浓度critical chloride concentration

混凝土内部钢筋周围孔隙液中不至于引起钢筋去钝化的最高氯离子浓度。

**2.1.9** 表面氯离子浓度surface chloride concentration

根据混凝土内部扩散区不同深度的氯离子浓度，通过Fick第二定律拟合分析确定的混凝土表面的表观氯离子浓度。

**2.1.10** 氯离子扩散系数chloride diffusion coefficient

表示混凝土中氯离子从高浓度区向低浓度区传输速率的参数。

**2.1.11** 初始暴露龄期initial exposure age

混凝土开始暴露于氯化物环境的龄期。

**2.1.12** 初始氯离子扩散系数initial chloride diffusion coefficient

混凝土在初始暴露龄期时的氯离子扩散系数。

**2.1.13** 龄期衰减系数aging factor

描述氯离子扩散系数随时间衰减速度的参数。

**2.1.14** 混凝土保护层厚度concrete cover thickness

从混凝土表面到主筋公称直径外边缘之间的最小距离。

**2.1.15** 环境作用environmental action

温度、湿度及其变化以及二氧化碳、氧、盐、酸等环境因素对结构或材料性能的影响。

**2.1.16** 高强混凝土 high-strength concrete

强度等级不小于C60的混凝土。

**2.1.17** 抗冻混凝土 frost-resistant concrete

抗冻等级不低于F50的混凝土。

**2.1.18** 泵送混凝土 pumped concrete

可在施工现场通过压力泵及输送管道进行浇筑的混凝土。

**2.1.19** 大体积混凝土 mass concrete

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

**2.2符号**

*c*——混凝土保护层厚度的特征值；

——混凝土净保护层厚度的设计值；

*C*0——混凝土中的初始氯离子浓度；

Ca35——强度等级为C35的引气混凝土；

——混凝土中钢筋或预应力筋表面的氯离子浓度设计值；

——临界氯离子浓度的特征值；

——临界氯离子浓度的设计值；

——混凝土表面氯离子浓度的特征值；

——混凝土表面氯离子浓度的设计值；

*d*——主筋外侧的箍筋或其他构造钢筋的直径；

*D*0——基于快速电迁移方法（RCM法）测试的初始氯离子扩散系数；

*D*0,p——初始氯离子扩散系数的配制值；

erf(∙)——误差函数；

*f* ce,g——水泥强度等级值；

*f*cu,0——混凝土强度配制值；

*f*cu,k——混凝土强度标准值；

——氯离子扩散系数的试验方法转换系数；

——氯离子扩散系数的环境影响系数；

——氯离子扩散系数的应力影响系数；

——计算初始氯离子扩散系数配制值时选取的概率度；

*m*a——每立方米混凝土的外加剂用量；

*m*a0——计算配合比每立方米混凝土的外加剂用量；

*m*b——每立方米混凝土的胶凝材料用量；

*m*b0——计算配合比每立方米混凝土的胶凝材料用量；

*m*c——每立方米混凝土的水泥用量；

*m*c0——计算配合比每立方米混凝土的水泥用量；

*m*cp——每立方米混凝土拌合物的假定质量；

——每立方米混凝土的矿物掺合料用量；

——计算配合比每立方米混凝土的矿物掺合料用量；

——每立方米混凝土的粗骨料用量；

*m*g0——计算配合比每立方米混凝土的粗骨料用量；

*m*s——每立方米混凝土的细骨料用量；

*m*s0——计算配合比每立方米混凝土的细骨料用量；

*m*w——每立方米混凝土的用水量；

*m*w0——计算配合比每立方米混凝土的用水量；

*m*'wo——未掺外加剂时推定的满足实际坍落度要求的每立方米混凝土用水量；

*n*——龄期衰减系数；

*R*FA——粉煤灰掺量；

*R*SG——粒化高炉矿渣粉掺量；

*R*W/B——混凝土的水胶比；

*t*0——初始暴露龄期；

——氯离子扩散系数的衰减稳定时间；

*t*s——设计工作年限；

——环境温度；

——参考温度；

——混凝土中氯离子扩散过程的活化能；

*α*——混凝土的含气量百分数；

*β*——外加剂的减水率；

*β*a——外加剂的掺量；

*β*f——矿物掺合料的掺量；

*β*s——砂率；

*γ*c——水泥强度等级值的富余系数；

*δ*′——混凝土配合比校正系数；

*ρ*c——水泥密度；

*ρ*c,c——混凝土拌合物表观密度计算值；

*ρ*c,t——混凝土拌合物表观密度实测值；

*ρ*f——矿物掺合料密度；

*ρ*g——粗骨料的表观密度；

*ρ*s——细骨料的表观密度；

*ρ*w——水的密度。

**——混凝土强度的标准差；

——初始氯离子扩散系数的标准差；

——混凝土保护层厚度的安全裕度。

**3 基本规定**

3.1 设计原则

**3.1.1** 海港工程混凝土结构的耐久性设计应根据结构的设计工作年限、结构所处的环境类别和作用等级、施工条件、便于维护等进行，并考虑结构的全寿命成本因素。

**3.1.2** 海港工程混凝土结构的耐久性设计应考虑海洋氯化物环境的作用，并宜开展耐久性定量设计。对于其他环境作用下的耐久性设计，可参考国家有关规范执行或通过专门的研究和论证。

**3.1.3** 海港工程混凝土结构耐久性设计应包括下列内容：

**1** 确定混凝土结构和构件的设计工作年限；

**2** 划分混凝土结构和构件的环境类别和环境作用等级；

**3** 规定结构和构件的材料性能和耐久性控制指标；

**4** 确定钢筋的混凝土保护层厚度；

**5** 采用有利于减轻环境作用的结构形式和布置，有利于混凝土构件裂缝控制与防排水等构造要求以及提高施工质量附加要求；

**6** 采用合理的附加防腐蚀措施；

**7** 耐久性监测系统的要求和布置；

**8** 使用阶段的耐久性维护要求等。

3.2 设计工作年限

**3.2.1** 海港工程混凝土结构设计时，应根据工程的使用功能、建造和使用维护成本以及环境影响等因素规定设计工作年限，并应符合表3.2.1规定：

表3.2.1 海港工程的设计工作年限（年）

|  |  |
| --- | --- |
| 结构类型 | 设计工作年限 |
| 永久性港口建筑物 | ≥50 |
| 临时性港口建筑物 | 5～10 |

3.3 材料要求

**3.3.1** 材料选用应有利于提高海港工程混凝土结构在海洋环境下的安全性、适用性和耐久性，并应明确材料的质量和性能指标。

**3.3.2** 海港工程混凝土结构应根据结构所处的环境类别、环境作用等级和结构设计工作年限选择混凝土和防腐蚀材料。

**3.3.3** 海洋环境下设计工作年限为50年以上的混凝土结构，对于水位变动区和浪溅区的腐蚀严重部位和重要构件应采用高性能混凝土和必要的附加防腐蚀措施，并应根据环境类别和作用等级、施工条件、便于维护和全寿命成本等因素综合选用。

**3.3.4** 海港工程混凝土的强度等级应同时满足承载能力和耐久性的要求。不同环境作用等级和使用年限的混凝土结构，其混凝土最低强度等级应符合表3.3.4的规定，混凝土强度等级应根据28d或者设计规定龄期的立方体抗压强度，按照现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB 50107确定。

表3.3.4 海港工程混凝土的最低强度等级

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | 设计工作年限 | |
| 100年 | 50年 |
| Ⅰ-A | C25 | C20 |
| Ⅰ-B | C30 | C25 |
| Ⅰ-C | C35 | C30 |
| Ⅱ-D | Ca35 | Ca30 |
| Ⅱ-E | Ca40 | Ca35 |
| Ⅲ-C、Ⅲ-D，Ⅳ-C、Ⅳ-D，Ⅴ-C、Ⅴ-D | C40 | C35 |
| Ⅲ-E，Ⅳ-E，Ⅴ-E | C40 | C40 |
| Ⅲ-F，Ⅳ-F | C45 | C45 |

注：环境作用等级应符合本标准第5.1.5条的规定。

**3.3.5** 钢筋质量应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢第1部分：热轧光圆钢筋》GB 1499.1、《钢筋混凝土用钢第2部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2，《钢筋混凝土用余热处理钢筋》CB 13014、《冷轧带肋钢筋》GB 13788和《预应力混凝土用钢棒》GB 4463的有关规定。

**3.3.6** 碳素钢丝、钢绞线的质量应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223、《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224的有关规定。

3.4 构造要求

**3.4.1** 海港工程混凝土结构的保护层厚度*c*应满足表3.4.1的规定。

表3.4.1 海港工程混凝土结构的保护层厚度最小值（mm）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| 保护层厚度最小值 | 40 | 50 | 50 | 65 |

注：1.位于环境作用等级Ⅲ-F的薄壁混凝土构件，混凝土保护层厚度可取50mm；

2.当混凝土构件的主筋外侧配置有箍筋时，混凝土保护层厚度应按表中规定增加5mm；

3.位于Ⅲ-E、Ⅲ-F的现浇混凝土构件，其保护层厚度应按表中规定增加10mm~15mm；

4.表中的环境作用等值按本标准5.1.5条的规定确定。

**3.4.2** 对于不同的环境作用等级，海港工程混凝土结构在荷载作用下的表面裂缝最大宽度计算值不应超过表3.5.2中的限值。

表3.5.2 海港工程混凝土表面裂缝计算宽度的限值（mm）

|  |  |
| --- | --- |
| 环境作用等级 | 裂缝宽度限值 |
| Ⅲ-C | 0.30 |
| Ⅲ-D、Ⅲ-E | 0.20 |
| Ⅲ-F | 0.20 |

注：环境作用等级应符合本标准第5.1.5条的规定。

**3.4.3** 施工缝、伸缩缝等连接缝的设置宜避开局部环境作用不利的部位，当不能避开不利部位时应采取防护措施。

**3.4.4** 混凝土构件施工期吊环（耳）、紧固件、连接件应在构件安装就位后割除并做表面保护。

**3.4.5** 埋入混凝土中并长期暴露的金属件应采用耐腐蚀材料和采取防腐蚀措施，并宜与混凝土中钢筋绝缘。

3.5 耐久性规定

**3.5.1** 混凝土抗冻等级按28d龄期的试件用快冻试验方法测定时，应分为F350、F300、F250、F200等4级。水位变动区有抗冻要求的混凝土抗冻等级的选用，应符合表3.5.1的规定。浪溅区范围内的下部1m应按水位变动区选择抗冻等级。码头面层混凝土可选用比同一地区水位变动区低2~3级的抗冻等级。

表3.5.1 混凝土抗冻等级选用标准

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 结构所在地区 | 钢筋混凝土和  预应力混凝土 | 素混凝土 |
| 严寒地区  （最冷月平均气温低于-8℃） | F350 | F300 |
| 寒冷地区  （最冷月平均气温在-8℃~-3℃之间） | F300 | F250 |
| 微冻地区  （最冷月平均气温在-3℃~2.5℃之间） | F250 | F200 |

**3.5.2** 有抗渗性要求的混凝土，抗渗等级应根据所承受的水头、水力梯度、水质条件和渗透水的危害程度等因素确定，且不应低于表3.5.2的规定。

表3.5.2 混凝土抗渗等级的选用标准

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 最大作用水头与混凝土壁厚之比 | ＜5 | 5~10 | 10~15 | 15~20 | ＞20 |
| 抗渗等级 | P4 | P6 | P8 | P10 | P12 |

**3.5.3** 对于设计工作年限为50年的海港工程混凝土结构，初始氯离子扩散系数*D*0上限值应符合表3.5.3的规定。混凝土初始氯离子扩散系数的检测方法应符合本标准附录A的规定。

表3.5.3 海洋氯化物环境混凝土氯离子扩散系数上限值（10-12 m2/s）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| 11.0 | 8.5 | 6.0 | 5.0 |

注：1.表中的混凝土氯离子扩散系数上限值与本标准表3.4.1中规定的混凝土最小保护层厚度相对应，实际采用的保护层厚度高于表3.4.1的规定时，可对表中数据作适当调整；

2.表中的数值为华南地区的混凝土氯离子扩散系数最大值，当为其他地区时，可对表中数据作适当调整；

3.表中的数值为一维扩散的28d龄期混凝土氯离子扩散系数最大值，混凝土中氯离子为二维扩散时，可对表中数据作适当调整。

**3.5.4** 海港工程混凝土结构的几何外形应简洁、平顺，避免采用突变构造，受雨淋的表面或积水的表面宜做成斜面；易受漂流物、流水撞击或水流冲击异常剧烈的部位，宜采取耐冲击和耐磨损措施。

3.6 附加防腐蚀措施

**3.6.1** 海港工程混凝土结构的附加防腐蚀措施应根据环境类别和作用等级、施工条件、便于维护以及全寿命成本等因素综合考虑。

**3.6.2** 海港工程混凝土结构的附加防腐蚀措施可选用表面涂层、硅烷浸渍、环氧涂层钢筋和电化学保护等，采用其他附加防腐蚀措施时，应对其抵抗环境腐蚀的能力进行论证。

**3.6.3** 海港工程混凝土结构采用附加防腐蚀措施时，应在设计文件中明确其设计保护年限、主要材料的性能指标及其检验方法。

**3.6.4** 附加防腐蚀措施的最低保护年限应符合表3.6.4的要求，各种措施的材料品质、具体技术要求和检验方法应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153的规定。

表3.6.4 海港工程混凝土结构附加防腐蚀措施的保护年限（年）

|  |  |
| --- | --- |
| 附加防腐蚀措施 | 最低保护年限 |
| 表面涂层 | 10 |
| 硅烷浸渍 | 15 |
| 环氧涂层钢筋 | 20 |
| 电化学保护 | 30 |

3.7 耐久性监测

**3.7.1** 重要的海港工程混凝土结构应建立耐久性监测数据库和信息化管理平台。

**3.7.2** 对运营期难以定期检测或维护的重要构件，海港工程混凝土结构的耐久性设计文件中宜明确耐久性监测预警系统的设置，确定监测装置预留埋设位置，埋设数量，监测记录周期，确保长期动态的获取钢筋表面混凝土中氯离子浓度及钢筋脱钝情况等参数信息。

**3.7.3** 海港工程混凝土结构应根据其重要性和所处环境复杂程度实施结构健康监测，并应符合下列规定：

**1** 监测期间尚应进行巡视检查和系统维护；台风、洪水等特殊情况时，应增加监测频次；

**2** 监测点的布置应具有代表性，受荷不利和腐蚀严重部位宜适当增加监测点；

**3** 耐久性监测应针对环境作用下的劣化过程，通过埋设耐久性监测传感器或持续原位检测完成。传感器的选取应综合考虑混凝土结构耐久性失效机理和传感器的有效工作年限。监测项目宜包括氯离子渗透、钢筋锈蚀和冻融监测；

**4** 混凝土结构监测应设定监测预警值，监测预警值应满足工程设计及对被监测对象的控制要求。

3.8 耐久性维护

**3.8.1** 对于环境作用等级E级及以上的海港工程混凝土结构，应制定维护方案。

**3.8.2** 海港工程混凝土结构的耐久性设计文件中应明确日常检查周期，耐久性日常检查应包括下列内容：

**1** 混凝土表面的蜂窝、麻面、孔洞、裂纹、露筋等原始缺陷；

**2** 冻融循环、车船的撞击、生物作用等外力作用造成的裂缝、缺损、松动等；

**3** 钢筋锈蚀引起的构件表面锈迹、裂缝、空鼓、剥落和露筋等损伤；

**4** 混凝土结构耐久性监测系统的完好性；

**5** 附加防腐蚀措施的完好性。

**3.8.3** 超过结构设计工作年限或使用期超过50年的海港工程混凝土结构应进行检测评估，海港工程混凝土结构耐久性定期检测评估应符合下列规定：

**1** 耐久性检测项目和检测方法应按现行行业标准《港口水工建筑物检测与评估技术规范》JTJ 302的有关规定执行；

**2** 应根据耐久性检测结果对结构进行剩余使用年限的定量评估，评估方法应按现行行业标准《港口水工建筑物检测与评估技术规范》JTJ 302的有关规定执行；

**3** 耐久性定期检测评估周期宜满足表3.8.3的要求。

表3.8.3 海港工程混凝土结构耐久性定期检测评估周期

|  |  |
| --- | --- |
| 船坞、船台、滑道、重力式码头、斜坡码头、浮码头、船闸、斜坡式防波堤与护岸 | 高桩码头、板桩码头、重力墩式码头 |
|
| 5年~10年 | 3年~5年 |

注：1.跨海桥梁、氯化物环境作用下的工业和民用建筑、城市桥梁、涵洞、隧道等市政基础设施和一般构筑混凝土结构耐久性定期检测评估周期宜3年~5年；

2.检测评估周期可根据设计工作年限和结构耐久性状况作适当调整，也可以参考类似项目做适当调整。

**3.8.4** 状态完好、经检测评估预测其耐久性可达到设计工作年限的结构可不采取维修措施。检查和检测发现的破损构件应及时进行修补，已出现劣化、且经检测评估预测其耐久性不满足设计工作年限要求的结构，应进行耐久性的再设计并采取耐久性维修措施，修补材料和修补方法应按现行行业标准《港口水工建筑物修补加固技术规范》JTS 311的有关规定执行。

**3.8.5** 海港工程混凝土结构附加防腐蚀措施的日常检查与维护应符合下列规定：

**1**  涂装、涂层损坏时应及时维修，维修涂料应与原涂料相同或相容；

**2**  混凝土结构硅烷浸渍质量的吸水率、硅烷浸渍深度、氯化物吸收量的降低效果中任意一项不满足要求时，应采取相应措施及时处理；

**3** 阳极块缺损时应及时恢复，阳极块的腐蚀等效直径不满足设计要求时应及时更换，保护电位不满足要求时应及时查明原因，采取相应措施；

**4**  外加电流阴极保护防腐蚀系统的装置和运行状态出现异常，或保护电位超出规定范围应及时查明原因，采取相应措施。

**3.8.6** 工程设施管理单位应建立海港工程混凝土结构的防腐蚀维护动态管理台账，并定期监测、检测防腐蚀保护效果与质量。

**4 混凝土的原材料**

4.1 一般规定

**4.1.1** 海港工程混凝土结构原材料应针对工程功能需要和结构性能要求提出具体指标。

**4.1.2** 海港工程混凝土原材料应充分考虑环境条件的影响，满足新拌混凝土和硬化混凝土规定的性能要求。

**4.1.3** 海港工程混凝土原材料中的有害成分含量不得对混凝土强度、耐久性及体积稳定性等产生不利影响。

**4.1.4** 材料进场应附有检验报告单等质量证明文件，并按规定进行产品质量检验，其质量应符合国家现行有关标准的规定，并应满足设计要求。

**4.1.5** 材料在运输和贮存过程中，应做好标记，并应按品种、规格分别堆放，不得混杂，不得接触海水，并应防止其他污染。

**4.1.6** 海港工程混凝土配合比设计应采用工程实际使用的原材料。

4.2 矿物掺合料

**4.2.1** 海港工程混凝土用粉煤灰应符合下列规定：

**1** 粉煤灰的质量应符合表4.2.1的规定，其检测方法应符合国家现行标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596和《水运工程混凝土试验检测技术规范》JTS/T 236的有关规定；

表4.2.1 粉煤灰质量要求（%）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 指标 | |
| Ⅰ级 | Ⅱ级 |
| 细度（45μm方孔筛筛余） | ≤12 | ≤25 |
| 需水量比 | ≤95 | ≤105 |
| 烧失量 | ≤5 | ≤8 |
| 7d活性指数 | ≥80 | ≥75 |
| 28d活性指数 | ≥90 | ≥85 |
| 含水率 | ≤1.0 | |
| 氯离子含量 | ≤0.02 | |
| 三氧化硫含量 | ≤3.0 | |
| 氧化钙含量 | ≤10 | |
| 游离氧化钙含量 | ≤1.0 | |

注：粉煤灰中氧化钙含量大于5%时应经试验证明安定性合格。

**2** 钢筋混凝土和C30及C30以上的素混凝土应采用I级或II级粉煤灰；

**3** 高性能混凝土和预应力混凝土应采用I级粉煤灰或烧失量不大于5%、需水量比不大于100%的II级粉煤灰；

**4** 有抗冻要求的混凝土可采用I级或II级粉煤灰。

**4.2.2** 海港工程混凝土用粒化高炉矿渣粉应符合下列规定：

**1** 粒化高炉矿渣粉的质量应满足表4.2.2的规定，其检测方法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；

表4.2.2 粒化高炉矿渣粉质量要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 指标 | |
| S105级 | S95级 |
| 密度（kg/m3） | ≥2800 | ≥2800 |
| 比表面积（m2/kg） | ≥400 | ≥400 |
| 7d活性指数（%） | ≥95 | ≥75 |
| 28d活性指数（%） | ≥105 | ≥95 |
| 流动度比（%） | ≥85 | ≥90 |
| 烧失量（%） | ≤3.0 | |
| 含水率（%） | ≤1.0 | |
| 氯离子含量（%） | ≤0.02 | |
| 三氧化硫含量（%） | ≤4.0 | |

**2** 宜采用S95级及以上级别矿渣粉；

**3** 大体积混凝土用矿渣粉比表面积不宜大于450m2/kg。

4.3 骨料

**4.3.1** 细骨料严禁采用碱活性细骨料，宜采用河砂、机制砂或混合砂；不宜使用海砂，如需使用，应采用经氯离子检验合格的海砂，应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153的相关规定。

**4.3.2** 细骨料的杂质含量应符合表4.3.2的规定。

**表4.3.2 细骨料杂质含量限值**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 有抗冻性要求 | | 无抗冻性要求 | | |
| ＞C40 | ≤C40 | ＞C55 | C55～C30 | ＜C30 |
| 总含泥量（按质量计，%） | ≤2.0 | ≤3.0 | ≤2.0 | ≤3.0 | ≤5.0 |
| 其中泥块含量（按质量计，%） | ＜0.5 | ＜0.5 | ≤0.5 | ≤1.0 | ＜2.0 |
| 云母含量（按质量计，%） | ＜1.0 | | ≤2.0 | | |

**续表4.3.2**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 轻物质（按质量计，%） | ≤1.0 | ≤1.0 |
| 硫化物及硫酸盐  （按SO3质量计，%） | ≤1.0 | ≤1.0 |
| 有机物含量  （比色法） | 颜色不应深于标准色，当深于标准色时应采用水泥胶砂法进行砂浆强度对比试验，相对抗压强度不应低于95% | |

注：1.有抗冻要求和强度大于等于C30的混凝土，对砂的坚固性有怀疑时，应采用硫酸钠法进行检验，经浸烘5次循环的失重率不应大于8%；

2.对于惯用的砂源，可不进行云母含量、硫化物及硫酸盐、有机物含量试验；

3.轻物质是指表观密度小于2000kg/m3的物质。

**4.3.3** 细骨料颗粒级配分区应符合现行行业标准《水运工程混凝土质量控制标准》JTS 202-2的规定。

**4.3.4** 当采用机制砂或混合砂时，应符合现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检测方法标准》JGJ 52的有关规定。机制砂和混合砂中石粉含量应符合表4.3.4的规定。

表4.3.4 机制砂和混合砂中石粉含量限值（%）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 混凝土强度等级 | | ＞C50 | C50～C30 | ＜C30 |
| 石粉含量 | 亚甲蓝测定值MB＜1.4 | ≤5.0 | ≤7.0 | ≤10.0 |
| 亚甲蓝测定值MB≥1.4 | ≤2.0 | ≤3.0 | ≤5.0 |

**4.3.5** 粗骨料应采用质地坚硬的碎石、卵石或碎石与卵石的混合物，严禁采用碱活性粗骨料，其强度可用岩石抗压强度或压碎指标值进行检验，强度值或压碎指标值宜符合表4.3.5的规定。

表4.3.5 岩石抗压强度或压碎指标值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 岩石品种 | 混凝土强度等级 | 岩石立方体抗压强度（MPa） | 碎石压碎  指标值 |
| 沉积岩 | ＞C60 | ≥100 | ≤8 |
| C60～C40 | ≥80 | ≤10 |
| C35～C15 | ≥60 | ≤16 |
| 变质岩或深成的火成岩 | ＞C60 | ≥120 | ≤10 |
| C60～C40 | ≥100 | ≤12 |
| C35～C15 | ≥60 | ≤20 |
| 喷出的火成岩 | ＞C60 | ≥140 | ≤11 |
| C60～C40 | ≥120 | ≤13 |
| C35～C15 | ≥80 | ≤25 |

注：沉积岩包括石灰岩、砂岩等；变质岩包括片麻岩、石英岩等；深成的火成岩包括花岗岩、正长石或橄榄岩等；喷出的火成岩包括玄武岩和辉绿岩等。

**4.3.6** 卵石压碎指标值宜符合表4.3.6的规定。

表4.3.6 卵石的压碎指标值（%）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 混凝土等级 | ＞C60 | C60～C40 | C35～C15 |
| 压碎指标 | ≤8 | ≤12 | ≤16 |

**4.3.7** 粗骨料的物理性能宜符合表4.3.7的规定。

表4.3.7 粗骨料物理性能的要求

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标名称 | 有抗冻要求 | | | 无抗冻要求 | | |
| ＞C60 | C60～C30 | ＜C30 | ＞C60 | C60～C30 | ＜C30 |
| 针片状颗粒含量  （按质量计，%） | ≤10 | ≤15 | ≤25 | ≤10 | ≤15 | ≤25 |
| 山皮水锈颗粒含量（按质量计，%） | ≤25 | | | ≤30 | | |
| 颗粒密度（kg/m3） | ≥2300 | | | ≥2300 | | |

注：1.针片状颗粒是指颗粒的长度大于该颗粒所属粒级的平均粒径2.4倍者；片状颗粒是指颗粒的厚度小于平均粒径0.4倍者；平均粒径是指该粒径级上、下限粒径的平均值；

2.山皮水锈颗粒是指风化面积超过1/4的颗粒；

3.用卵石或卵石与碎石混合物配制受拉、受弯构件的混凝土时，应进行混凝土的抗拉强度试验；试验结果不合格时，应采取相应措施提高其抗拉强度；

4.对粗骨料的坚固性有怀疑时，应采用硫酸钠溶液法进行检验，经浸烘5次循环后的失重率有抗冻要求的混凝土应不大于3%，强度等级大于等于C30的混凝土不应大于5%。

**4.3.8** 粗骨料的杂质含量限值应符合表4.3.8的规定。

表4.3.8 粗骨料杂质含量限值

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 杂质名称 | 有抗冻要求 | | 无抗冻要求 | | |
| ＞C40 | ≤C40 | ＞C55 | C55～C30 | ＜C30 |
| 总含泥量  （按质量计，%） | ≤0.5 | ≤0.7 | ≤0.5 | ≤1.0 | ≤2.0 |
| 泥块含量  （按质量计，%） | ≤0.2 | ≤0.2 | ≤0.2 | ≤0.5 | ≤0.7 |
| 水溶性硫酸盐及硫化物（按质量计，%） | ≤0.5 | | ≤1.0 | | |
| 有机物含量（比色法） | 颜色不应深于标准色。当深于标准色时，应进行混凝土对比试验，其抗压强度降低率不应大于5% | | | | |

注：1.粗骨料中不得混入煅烧过的石灰石块、白云石块，颗粒表面不宜附有粘土薄膜；

2.对于惯用的石源，可不进行水溶性硫酸盐及硫化物、有机物含量检验；

3.含泥基本是非粘土质的石粉时，对无抗冻性要求的混凝土所用粗骨料的总含泥量可由1.0%、2.0%分别提高到1.5%、3.0%。

**4.3.9** 粗骨料连续级配应符合现行行业标准《水运工程混凝土质量控制标准》JTS 202-2的规定。

**4.3.10** 有抗冻要求的混凝土宜选用连续级配的粗骨料，并应进行坚固性试验。

**4.3.11** 粗骨料的最大粒径应满足下列要求：

**1** 应不大于80 mm；

**2**  应不大于构件截面最小尺寸的1/4；

**3** 应不大于钢筋最小净距的3/4；

**4** 海水环境应不大于混凝土保护层厚度的4/5，在南方地区浪溅区应不大于混凝土保护层厚度的2/3；

**5** 水下浇筑时，混凝土粗骨料的最大粒径应不大于导管内径的1/6、混凝土输送管的1/3和钢筋最小净距的1/4，同时应不大于40 mm。

4.4 拌合用水和外加剂

**4.4.1** 海港工程混凝土拌合用水的质量应符合表4.4.1的规定。

表4.4.1 拌和用水质量要求

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 钢筋混凝土 | 素混凝土 |
| pH值 | ＞5.0 | ＞4.5 |
| 不溶物（mg/L） | ＜2000 | ＜5000 |
| 可溶物（mg/L） | ＜2000 | ＜5000 |
| 氯化物（以Cl-计，mg/L） | ＜200 | ＜2000 |
| 硫酸盐（以SO2- 4计，mg/L） | ＜600 | ＜2200 |

**4.4.2** 海港工程混凝土拌合用水宜采用饮用水，不得使用影响水泥正常凝结、硬化和促使钢筋锈蚀的拌合水；钢筋混凝土和预应力混凝土均不得采用海水拌合；地表水、地下水、再生水在首次使用前应检测放射性。

**4.4.3** 海港工程混凝土拌合用水的检验方法应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63的规定。

**4.4.4** 海港工程混凝土用外加剂应符合下列规定：

**1** 混凝土应根据要求选用减水剂、引气剂、防冻剂、泵送剂、缓凝剂、膨胀剂等。外加剂的品质应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076、《混凝土膨胀剂》GBT 23439和《混凝土防冻剂》JC 475的有关规定；

**2** 外加剂中的氯离子含量不宜大于0.02%（占胶凝材料质量百分比）。高性能混凝土宜采用与胶凝材料匹配性好、减水率不小于25%的高效减水剂。

5 环境作用等级的划分及量化

5.1 环境作用等级的划分

**5.1.1** 海港工程混凝土结构暴露环境类别应按表5.1.1确定。

表5.1.1 海港工程混凝土结构的暴露环境类别

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 环境名称 | | 环境类别 | 腐蚀机理 |
| 一般环境 | | Ⅰ | 混凝土碳化引起钢筋锈蚀 |
| 冻融环境 | | Ⅱ | 反复冻融导致混凝土损伤 |
| 氯化物环境 | 海洋氯化物环境 | Ⅲ | 氯盐引起钢筋锈蚀 |
| 其他氯化物环境 | Ⅳ |
| 化学腐蚀环境 | | Ⅴ | 硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀 |

**5.1.2** 海港工程混凝土结构所处的环境作用等级，应根据结构受到的环境腐蚀作用程度，按表5.1.2确定。

表5.1.2 海港工程混凝土结构环境作用等级

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用  等级  环境类别 | A  (轻微) | B  (轻度) | C  (中度) | D  (严重) | E  (非常严重) | F  (极端严重) |
| Ⅰ | Ⅰ-A | Ⅰ-B | Ⅰ-C | - | - | - |
| Ⅱ | - | - | - | Ⅱ-D | Ⅱ-E | - |
| Ⅲ | - | - | Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| Ⅳ | - | - | Ⅳ-C | Ⅳ-D | Ⅳ-E | Ⅳ-F |
| Ⅴ | - | - | Ⅴ-C | Ⅴ-D | Ⅴ-E | - |

**5.1.3** 一般环境、其他氯化物环境、化学腐蚀环境条件下海港工程混凝土结构的作用等级应按现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GBT 50476中的规定确定。

**5.1.4** 海港工程混凝土结构应考虑海水氯盐环境下的冻融。海水氯盐冻融环境条件下海港工程混凝土结构的作用等级应根据当地调查确定。当无可靠调查资料时，应按表5.1.4确定。

表5.1.4 冻融环境作用等级

|  |  |
| --- | --- |
| 环境作用等级 | 环境条件 |

续表5.1.4

|  |  |
| --- | --- |
| Ⅱ-D | 微冻地区（最冷月平均气温-3℃~2.5℃） |
| Ⅱ-E | 寒冷地区（最冷月平均气温-8℃~-3℃）和  严寒地区（最冷月平均气温-8℃以下） |

**5.1.5** 海港工程混凝土结构的海洋氯化物环境作用等级应根据具体环境条件按表5.1.5确定。

表5.1.5 海洋氯化物环境作用等级

|  |  |
| --- | --- |
| 环境作用等级 | 环境条件 |
| Ⅲ-C | 水下区、土中区 |
| Ⅲ-D | 大气区、涨潮岸线300 m内的陆上室外环境 |
| Ⅲ-E | 水位变动区 |
| Ⅲ-F | 浪溅区 |

注：1.近海或海洋环境中的水下区、水位变动区、浪溅区和大气区的划分，按现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153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.位于岛上大气区的海港工程混凝土结构，其海洋氯化物环境作用等级应在大陆地区海港工程混凝土结构的海洋氯化物环境作用等级上提高一级。

5.2 氯化物环境作用的量化

**5.2.1** 海洋氯化物环境作用可利用混凝土表面氯离子浓度来量化。对于不同环境作用等级的海洋氯化物环境，其混凝土表面氯离子浓度特征值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据根据本标准第5.2.2~5.2.5条的规定确定，当无可靠统计资料时可采用表5.2.1中的数值。

表5.2.1 混凝土表面氯离子浓度特征值（%，占胶凝材料质量的百分比）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
|  | 4.3 | 3.0 | 4.9 | 6.0 |

**5.2.2** 当环境作用等级为Ⅲ-C时，混凝土表面氯离子浓度特征值宜按下式计算：

 (5.2.2)

式中：——混凝土表面氯离子浓度特征值（%，占胶凝材料的质量百分比）；

——拟合系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，、和可以分别取8.79、1.85和9.35；

——胶凝材料种类对水胶比影响规律的修正系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，对于水下区或土中区环境可取1.03；

——胶凝材料种类对时变影响规律的修正系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，对水下区或土中区环境可取1.14；

——水胶比；

*t*——暴露时间（a）；

——海水氯离子浓度（%，氯离子质量占海水质量的百分比）。

**5.2.3** 当环境作用等级为Ⅲ-D时，混凝土表面氯离子浓度特征值宜按下式计算：

 (5.2.3)

式中：——拟合系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，、、和可以分别取1.26、2.75、0.01和0.73；

——胶凝材料种类对水胶比影响规律的修正系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，对大气区环境可取1.17；

——胶凝材料种类对时变影响规律的修正系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，对大气区环境可取0.61；

*d*——离海岸距离（m）；

*v*——风速（m/s）；

**5.2.4** 当环境作用等级为Ⅲ-E时，混凝土表面氯离子浓度特征值宜按下式计算：

 (5.2.4)

式中：——拟合系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，和可以分别取9.81和7.91；

——胶凝材料种类对水胶比影响规律的修正系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，对水位变动区环境可取0.91；

——胶凝材料种类对时变影响规律的修正系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，对水位变动区环境可取1.32。

**5.2.5** 当环境作用等级为Ⅲ-F时，混凝土表面氯离子浓度特征值宜按下式计算：

 (5.2.5)

式中：——拟合系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，和可以分别取9.77和2.81；

——胶凝材料种类对水胶比影响规律的修正系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，对浪溅区环境可取1.14；

——胶凝材料种类对时变影响规律的修正系数，其取值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。当无可靠统计资料时，对浪溅区环境可取0.53。

6 混凝土结构的耐久性定量设计

6.1 一般规定

**6.1.1** 海港工程混凝土结构的耐久性定量设计宜采用以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法。

**6.1.2** 海港工程混凝土结构的耐久性设计应控制氯离子引起的钢筋锈蚀，其耐久性极限状态可分为下列两种：

**1** 钢筋开始脱钝的极限状态；

**2** 钢筋适量锈蚀的极限状态。

**6.1.3** 海港工程混凝土结构按钢筋开始脱钝的极限状态进行耐久性定量设计时，应将混凝土保护层厚度*c*、初始扩散系数*D*0及龄期衰减系数*n*同时选取为耐久性设计参数。

**6.1.4** 海洋氯化物环境下混凝土结构的耐久性定量设计宜按照以下步骤进行：

**1** 根据本标准第5章确定混凝土结构的环境作用等级和混凝土表面氯离子浓度特征值；

**2** 根据本标准第6.2.6条确定混凝土保护层厚度*c*的备选取值；

**3** 根据本标准第6.2.7条确定龄期衰减系数*n*的备选取值；

**4** 根据本标准第6.2.4条确定初始氯离子扩散系数*D*0、混凝土保护层厚度*c*及龄期衰减系数*n*的备选组合；

**5** 根据本标准第6.2.3条，从耐久性设计参数的备选组合中确定混凝土保护层厚度*c*、初始氯离子扩散系数*D*0和龄期衰减系数*n*的优选组合。

6.2 耐久性定量设计方法

**6.2.1** 当设计工作年限为50年时，海港工程混凝土结构的耐久性设计参数取值可以根据附录C中混凝土保护层厚度*c*、初始氯离子扩散系数*D*0和龄期衰减系数*n*的备选组合来确定。

**6.2.2**  对于设计工作年限为50年以上的海港工程混凝土结构，宜根据本标准第6.2.3~6.2.11条进行海港工程混凝土结构耐久性定量分析和设计。

**6.2.3** 海港工程混凝土结构按钢筋开始脱钝的极限状态进行耐久性设计时，应符合下式规定：

 （6.2.3）

式中：——混凝土中钢筋或预应力筋表面的氯离子浓度设计值（%）；

——基于快速电迁移方法（RCM法）测试的初始氯离子扩散系数（m2/s或mm2/a）；

——龄期衰减系数，按条文6.2.7确定；

——混凝土净保护层厚度的设计值（mm），按条文6.2.6确定；

——设计工作年限（a）；

——临界氯离子浓度的设计值（%），按条文6.2.5确定。

**6.2.4**  海港工程混凝土结构的混凝土保护层厚度*c*、龄期衰减系数*n*与初始氯离子扩散系数*D*0之间应满足下列要求：

 （6.2.4）

式中：——初始暴露龄期（a），可以取*t*0 = 28 d≈0.0767 a；

——氯离子扩散系数的衰减稳定时间（a），可以通过自然暴露试验数据或者同类已建工程的数据确定，如无可靠数据时，可以取年；

——混凝土表面氯离子浓度的设计值，按条文6.2.8确定；

——初始氯离子浓度（%），可以根据混凝土实测，也可以近似取；

——氯离子扩散的维数，对于一维扩散和二维扩散，*P*分别取1和2；

——氯离子扩散系数的分项系数，可以根据统计数据，根据可靠度原理计算，如无可靠统计数据时，可以取；

——氯离子扩散系数的环境影响系数，按条文6.2.9确定；

——氯离子扩散系数的试验方法转换系数，应根据室内快速试验与现场长期暴露试验结果的相关系数确定，如无可靠试验数据，可以取；

——氯离子扩散系数的荷载影响系数，按条文6.2.10确定；

erf(∙)——误差函数。

**6.2.5** 混凝土中钢筋或预应力筋开始脱钝的临界氯离子浓度设计值应按式（6.2.5）确定：

 （6.2.5）

式中：——临界氯离子浓度的分项系数，根据工程统计分析确定，当无可靠资料时，可按表6.2.5-1取值；

——临界氯离子浓度的特征值（%），应根据现场暴露试验数据或按照附录B中临界氯离子浓度测试方法进行工程实测确定，当无可靠资料时，可按表6.2.5-2取值。

表6.2.5-1 临界氯离子浓度的分项系数取值

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
|  | 1.1 | 1.1 | 1.2 | 1.2 |

表6.2.5-2 临界氯离子浓度的特征值取值（%，占胶凝材料质量的百分比计）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
|  | 1.50 | 0.6 | 0.6 | 0.5 |

**6.2.6** 混凝土净保护层厚度的设计值应考虑不同施工工艺的影响，并计入因生产施工水平而引起的施工偏差，应按式（6.2.6）确定：

 （6.2.6）

式中：*c*——混凝土保护层厚度的特征值（mm），其最小值应满足条文3.4.1的规定；

——主筋外侧的箍筋或其他构造钢筋的直径（mm）；当主筋外侧没有箍筋或其他构造钢筋时取；

——混凝土保护层厚度的安全裕度（mm），对于梁、墩、柱等条形构件可取为10mm，对于板、墙等面型薄壁构件可取为5mm。

**6.2.7** 龄期衰减系数*n*应考虑胶凝材料组成中矿物活性掺合料的影响，取值范围宜为0.40~0.65。

**6.2.8** 海港工程混凝土结构的混凝土表面氯离子浓度设计值应按式（6.2.8）确定：

 （6.2.8）

式中：——混凝土表面氯离子浓度的分项系数，当无可靠资料时，可按表6.2.8取值；

表6.2.8 混凝土表面氯离子浓度的分项系数

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境作用等级 | Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
|  | 1.1 | 1.2 | 1.1 | 1.1 |

**6.2.9** 混凝土中氯离子扩散系数的环境影响系数按式（6.2.9）确定。如无可靠的统计数据时，可以按表6.2.9取值。

 （6.2.9）

式中：——混凝土中氯离子扩散过程的活化能（J/mol），取35000 J/mol；

——理想气体常数（J/K/mol），取8.314（J/K/mol）；

——参考温度，取293K；

——环境温度。

表6.2.9 混凝土中氯离子扩散系数的环境影响系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 地区 | 华南地区 | 华东地区 | 北方地区 |
|  | 1.00 | 0.85 | 0.80 |

**6.2.10** 混凝土中氯离子扩散系数的应力影响系数应按式（6.2.10）确定：

 （6.2.10）

式中：*A*，*B*——与混凝土龄期有关的常数，根据工程统计分析确定，如没有可靠的统计数据时，对应28d龄期的系数*A*与*B*的取值分别为1.12和0.65；

——混凝土受拉区承受的应力水平，可根据荷载情况分析确定；如没有可靠的统计数据时，一般梁可参考取0.3，板和偏心受压柱的受拉区可取0.1。

**6.2.11** 同时存在不同扩散维数区域、且需要采用相同的混凝土进行同时浇筑的混凝土结构，应按照耐久性设计要求较高的情况来确定初始氯离子扩散系数*D*0和龄期衰减系数*n*的取值。

7 混凝土配合比设计的强度和耐久性指标配制值

7.1 一般规定

**7.1.1** 海港工程混凝土的配合比设计应兼顾混凝土强度和耐久性能的设计要求，同时应满足力学性能、拌合物性能、长期性能的设计要求。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、《混凝土物理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。

7.2 混凝土强度的配制值

**7.2.1** 海港工程混凝土的强度配制值应按下列规定确定：

**1** 当混凝土的设计强度等级小于C60时，混凝土强度配制值应按式（7.2.1-1）确定：

 （7.2.1-1）

式中：——混凝土强度配制值（MPa）；

——混凝土立方体抗压强度标准值，这里取混凝土的设计强度等级值（MPa）；

——混凝土强度标准差（MPa）。

**2** 当设计强度等级不小于C60时，混凝土强度配制值应按式（7.2.1-2）确定：

 （7.2.1-2）

**7.2.2** 海港工程混凝土强度标准差应按下列规定确定：

**1** 当具有近1～3个月的同一品种、同一强度等级混凝土的强度资料，且试件组数不小于30时，其混凝土强度标准差应按式（7.2.2）计算：

 （7.2.2）

式中：——第i组的试件强度（MPa）；

——*N*组试件的强度平均值（MPa）；

*N*——试件组数。

对于强度等级不大于C30的混凝土，当混凝土强度标准差计算值不小于3.0MPa时，应按式（7.2.2）计算结果取值；当混凝土强度标准差计算值小于3.0MPa时，应取3.0MPa。对于强度等级大于C30且小于C60的混凝土，当混凝土强度标准差计算值不小于4.0MPa时，应按式（7.2.2）计算结果取值；当混凝土强度标准差计算值小于4.0MPa时，应取4.0MPa。

**2** 当没有近期的同一品种、同一强度等级混凝土强度资料时，其强度标准差可按表7.2.2取值。

表7.2.2 标准差值（MPa）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 混凝土强度标准值 | ≤C20 | C25～C45 | C50～C55 |
|  | 3.5 | 4.5 | 5.5 |

7.3 初始氯离子扩散系数的配制值

**7.3.1** 海港工程混凝土的初始氯离子扩散系数配制值应按式（7.3.1-1）确定：

 （7.3.1-1）

式中：——初始氯离子扩散系数配制值（10-12m2/s或mm2/a）；

——初始氯离子扩散系数（10-12m2/s或mm2/a）；

——初始氯离子扩散系数的标准差，可根据混凝土氯离子扩散系数测试值的历史统计资料得到；

——计算初始氯离子扩散系数配制值时选取的概率度。

当混凝土耐久性保证率为95%时，=1.645，初始氯离子扩散系数配制值应按式（7.3.1-2）确定：

 （7.3.1-2）

式中：——初始氯离子扩散系数的变异系数，可根据混凝土氯离子扩散系数测试值统计确定。

8 兼顾强度与耐久性的混凝土配合比设计

8.1 一般规定

**8.1.1** 海港工程混凝土的水胶比最大允许值宜符合表8.1.1-1的规定。混凝土的最低胶凝材料用量应符合表8.1.1-2的规定，但胶凝材料最高用量不应超过500kg/m3。

表8.1.1-1 混凝土水胶比的最大允许值

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境条件 | | | 普通混凝土 | | | | 高性能混凝土 |
| 钢筋混凝土及  预应力混凝土 | | 素混凝土 | | 钢筋混凝土及预应力混凝土 |
| 北方 | 南方 | 北方 | 南方 |
| 大气区 | | | 0.55 | 0.50 | 0.65 | 0.65 | 0.40 |
| 浪溅区 | | | 0.40 | 0.40 | 0.65 | 0.65 | 0.35 |
| 水位变动区 | 严寒 | | 0.45 | — | 0.45 | — | 0.40 |
| 寒冷 | | 0.50 | — | 0.50 | — | 0.40 |
| 微冻 | | 0.55 | — | 0.55 | — | 0.40 |
| 不冻 | | — | 0.50 | — | 0.65 | 0.40 |
| 水下区 | 不受水头作用 | | 0.55 | 0.55 | 0.65 | 0.65 | 0.40 |
| 受水头作用 | 最大作用水头与混凝土壁厚之比小于5 | 0.55 | | | | 0.40 |
| 最大作用水头与混凝土壁厚之比为5~10 | 0.50 | | | | 0.40 |
| 最大作用水头与混凝土壁厚之比大于10 | 0.45 | | | | 0.40 |

注：除全日潮型港口外，其他海港有抗冻性要求的细薄构件水胶比最大允许值应酌情减小。

表8.1.1-2 混凝土的最低胶凝材料用量（kg/m3）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 环境  条件 | 普通混凝土 | | | | | | 高性能混凝土 | |
| 钢筋混凝土及预应力混凝土 | | | 素混凝土 | | | 钢筋混凝土及预应力混凝土 | |
| 北方 | | 南方 | 北方 | | 南方 | 北方 | 南方 |
| 大气区 | 320 | | 360 | 280 | | 280 | 380 | 380 |
| 浪溅区 | 400 | | 400 | 280 | | 280 | 400 | 400 |
| 水位变动区 | F350 | 400 | 360 | F350 | 400 | 280 | 400 | 380 |
| F300 | 360 | 360 | F300 | 360 | 280 |
| F250 | 330 | 360 | F250 | 330 | 280 |
| F200 | 300 | 360 | F200 | 300 | 280 |
| 水下区 | 320 | | 320 | 280 | | 280 | 380 | 380 |

注：有耐久性要求的大体积混凝土，胶凝材料用量应按混凝土的耐久性和降低水泥水化热综合考虑。

**8.1.2** 采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥时，混凝土中矿物掺合料的最大掺量宜符合表8.1.2的规定。采用掺量大于30%的C类粉煤灰的混凝土应以实际使用的水泥和粉煤灰掺量进行安定性检验。当选用的矿物掺合料掺量超过表8.1.2规定的限值时，应事先通过专门的分析研究和试验论证。

表8.1.2 混凝土中矿物掺合料最大掺量（%）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 矿物掺合料种类 | 普通混凝土 | | 高性能混凝土 | |
| P·I和P·II型  硅酸盐水泥 | P·O型普通  硅酸盐水泥 | P·I和P·II型  硅酸盐水泥 | P·O型普通  硅酸盐水泥 |
| 粉煤灰 | ≤30 | ≤20 | 25~40 | 20~35 |
| 粒化高炉  矿渣粉 | ≤70 | ≤60 | 50~80 | 25~40 |
| 复合掺合料 | ≤60 | ≤60 | ≤70 | ≤70 |

注：1.当混凝土中需掺入硅灰时，硅灰的质量和掺量应符合《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153的相关规定；

2.对于普通混凝土复合掺合料的粉煤灰掺入量不宜大于20%；对高性能混凝土复合掺合料的粉煤灰掺入量不宜大于25%；混掺硅灰时其掺入量不宜大于胶凝材料总量的8%。

**8.1.3** 海港工程混凝土拌合物中氯离子最大含量应符合表8.1.3的规定，其测试方法应符合现行行业标准《水运工程混凝土试验规程》JTJ 270中混凝土拌合物中氯离子含量的快速测定方法的规定。

表8.1.3 混凝土拌合物中氯离子含量的最高限值（%）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 预应力混凝土 | 钢筋混凝土 | 素混凝土 |
| 0.06 | 0.10 | 1.30 |

注：氯离子含量指水溶性氯离子占胶凝材料的质量百分比。

**8.1.4** 混凝土中最大碱含量不宜超过3.0kg/m3。有预防混凝土碱骨料反应设计要求的混凝土结构应符合现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55中的规定。

8.2 水胶比和矿物掺合料掺量的确定

**8.2.1** 海港工程混凝土的水胶比和矿物掺合料掺量的确定应根据实验测试结果，分别建立基于水胶比、粉煤灰掺量和粒化高炉矿渣粉掺量的混凝土强度配制值、初始氯离子扩散系数配制值和龄期衰减系数的计算模型，然后通过联立求解确定混凝土的水胶比、粉煤灰掺量和粒化高炉矿渣粉掺量。

**8.2.2** 当无可靠实验测试数据时，混凝土强度等级小于等于C50、掺粉煤灰和粒化高炉矿渣粉的海港工程混凝土，可根据混凝土强度标准值*f*cu,k、龄期衰减系数*n*和初始氯离子扩散系数*D*0及其变异系数，在附表D.0.1～附表D.0.15中选取相应的混凝土水胶比、粉煤灰掺量和粒化高炉矿渣粉掺量。

**8.2.3** 当附表D.0.1～附表D.0.15提供的龄期衰减系数*n*和初始氯离子扩散系数*D*0不满足要求时，应通过联立求解式（8.2.3-1）、式（8.2.3-2）和式（8.2.3-3）的方程组或直接根据式（8.2.3-4）、式（8.2.3-5）和式（8.2.3-6）计算确定混凝土的粉煤灰掺量、粒化高炉矿渣粉掺量和水胶比，计算结果应精确到小数点后两位：

 （8.2.3-1）

 （8.2.3-2）

 （8.2.3-3）

 （8.2.3-4）

 （8.2.3-5）

 （8.2.3-6）

其中：

 （8.2.3-7）

 （8.2.3-8）

 （8.2.3-9）

 （8.2.3-10）

 （8.2.3-11）

 （8.2.3-12）

 （8.2.3-13）

（8.2.3-14）

式中：——混凝土粉煤灰掺量计算公式中的系数；

——水泥强度等级值；

——水泥强度等级值的富余系数，可按实际统计资料确定；当缺少统计资料时，对于强度等级值为42.5的水泥，取值为1.16，对于强度等级值为52.5的水泥，取值为1.10；

、——混凝土强度计算模型中的回归系数，可按实际统计资料确定；当缺少统计资料时，对于碎石，和分别取0.53和0.20；对于卵石，和分别取0.49和0.13。

**8.2.4** 对于混凝土强度等级大于C50的掺粉煤灰和粒化高炉矿渣粉的混凝土，应通过专门的分析研究和试验论证，建立混凝土强度配制值、初始氯离子扩散系数配制值和龄期衰减系数的计算模型，代替式（8.2.3-1）、式（8.2.3-2）和式（8.2.3-3）形成方程组，然后通过联立求解确定混凝土的粉煤灰掺量、粒化高炉矿渣粉掺量和水胶比。

8.3 用水量和外加剂用量的确定

**8.3.1** 每立方米混凝土的用水量*m*w0应符合下列规定：

**1** 混凝土水胶比在0.40～0.60范围时，可按表8.3.1选取；

**2** 混凝土水胶比小于0.4时，可通过试验确定。

表8.3.1 用水量选用值（kg/m3）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 坍落度（mm） | 碎石最大粒径（mm） | | | |
| 16.0 | 20.0 | 31.5 | 40.0 |
| 10~30 | 200 | 185 | 175 | 165 |
| 30~50 | 210 | 195 | 185 | 175 |
| 55~70 | 220 | 105 | 195 | 185 |
| 75~90 | 230 | 215 | 205 | 195 |

注：1.采用卵石时，用水量可减少10kg/m3～15kg/m3；

2.采用粗砂时，用水量可减少5kg/m3~10kg/m3；采用细砂时可增加5kg/m3~10kg/m3；

3.掺外加剂后的用水量按外加剂的减水率进行计算调整。

**8.3.2** 每立方米混凝土中外加剂用量应按下式计算：

 （8.3.2）

式中：——计算配合比每立方米混凝土中外加剂用量（kg/m3）；

——计算配合比每立方米混凝土中胶凝材料用量（kg/m3），计算应符合本标准第8.4.1条的规定；

——外加剂掺量（%），应经混凝土试验确定。

8.4 胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量的确定

**8.4.1** 每立方米混凝土的胶凝材料用量应按下式计算，并应进行试拌调整，在拌合物性能和硬化性能指标均满足的情况下，取经济合理的胶凝材料用量。

 （8.4.1）

式中：——计算配合比每立方米混凝土的用水量（kg/m3）。

**8.4.2** 每立方米混凝土的矿物掺合料用量应按下式计算：

 （8.4.2）

式中：——计算配合比每立方米混凝土中矿物掺合料用量（kg/m3）；

——矿物掺合料掺量（%），可结合本标准表8.1.2和条文8.2.1～8.2.4的规定确定。

**8.4.3** 每立方米混凝土的水泥用量*m*c0应按下式计算：

 （8.4.3）

式中：——计算配合比每立方米混凝土中水泥用量（kg/m3）。

8.5 砂率的确定

**8.5.1** 砂率*β*s应根据骨料的技术指标、混凝土拌合物性能和施工要求，参考既有历史资料确定。

**8.5.2** 当缺乏砂率的历史资料时，混凝土砂率的确定应符合下列规定：

**1** 坍落度小于10mm的混凝土，其砂率应经试验确定；

**2** 坍落度为10mm～60mm的混凝土，其砂率根据粗骨料品种、最大公称粒径及水胶比应按表8.5.2选取；

**3** 坍落度大于60mm的混凝土，其砂率可经试验确定，也可在表8.5.2的基础上，按坍落度每增大20mm、砂率增大1%的幅度予以调整。

表8.5.2 混凝土的砂率（%）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 水胶比 | 卵石最大公称粒径（mm） | | | 碎石最大公称粒径（mm） | | |
| 10.0 | 20.0 | 40.0 | 16.0 | 20.0 | 40.0 |
| 0.40 | 26～32 | 25～31 | 24～30 | 30～35 | 29～34 | 27～32 |
| 0.50 | 30～35 | 29～34 | 28～33 | 33～38 | 32～37 | 30～35 |
| 0.60 | 33～38 | 32～37 | 31～36 | 36～41 | 35～40 | 33～38 |

注：1.本表数值系中砂的选用砂率，对细砂或粗砂，可相应地减少或增大砂率；

2.采用人工砂配制混凝土时，砂率可适当增大；

3.只用一个单粒级粗骨料配制混凝土时，砂率应适当增大。

8.6 粗、细骨料用量的确定

**8.6.1** 当采用质量法计算混凝土配合比时，粗、细骨料用量及砂率应按下式计算：

 （8.6.1-1）

 （8.6.1-2）

式中：——计算配合比每立方米混凝土中粗骨料用量（kg/m3）；

——计算配合比每立方米混凝土中细骨料用量（kg/m3）；

——砂率（%）；

——每立方米混凝土拌合物的假定质量（kg），可取2350kg/m3～2450kg/m3。

**8.6.2** 当采用体积法计算混凝土配合比时，砂率应按式（8.6.1-2）计算，粗、细骨料用量应按下式计算。

 （8.6.2）

式中：——水泥密度（kg/m3），可按《水泥密度测定方法》GB/T 208测定；

——矿物掺合料密度（kg/m3），可按《水泥密度测定方法》GB/T 208测定；

——粗骨料的表观密度（kg/m3），可按《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52测定；

——细骨料的表观密度（kg/m3），可按《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52测定；

——水的密度（kg/m3），可取1000kg/m3；

*α*——混凝土的含气量百分数，在不使用引气剂或引气型外加剂时，*α*可取1。

8.7 兼顾强度和耐久性的混凝土配合比设计步骤

**8.7.1** 兼顾强度和耐久性指标的混凝土配合比设计，宜按照以下步骤进行：

**1** 根据本标准第6.2节确定初始氯离子扩散系数限值和龄期衰减系数；

**2** 根据混凝土的强度等级要求，根据本标准第7.1.1条的规定计算混凝土强度配制值；

**3** 根据步骤1中确定的初始氯离子扩散系数限值，利用本标准第7.2.1条计算混凝土的初始氯离子扩散系数配制值；

**4** 根据步骤1、步骤2和步骤3中确定的龄期衰减系数、混凝土强度配制值和初始氯离子扩散系数配制值，利用本标准第8.2节计算确定混凝土的水胶比和矿物掺合料掺量；

**5** 根据混凝土的工作性能要求，利用本标准第8.3.1～8.3.3条的规定确定用水量和外加剂用量；

**6** 根据步骤4确定的水胶比和矿物掺合料掺量，以及步骤5确定的用水量，利用条文8.4.1～8.4.3确定胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量；

**7** 根据混凝土的原材料性质，利用本标准第8.5节确定混凝土的砂率；

**8** 根据条文8.6.1或8.6.2，利用质量法或体积法计算混凝土的粗、细骨料用量。

9 混凝土配合比的试配、调整与确定

9.1 混凝土试配

**9.1.1** 混凝土试配应采用符合现行行业标准《混凝土试验用搅拌机》JG 244规定的强制式搅拌机进行搅拌，搅拌方法宜与施工采用的方法相同。

**9.1.2** 试验室成型条件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的规定。

**9.1.3** 每盘混凝土试配的最小搅拌量应符合表9.1.3的规定，并不应小于搅拌机公称容量的1/4且不应大于搅拌机公称容量。

表9.1.3 混凝土试配的最小搅拌量

|  |  |
| --- | --- |
| 粗骨料最大公称粒径（mm） | 拌合物数量（L） |
| ≤31.5 | 20 |
| 40.0 | 25 |

**9.1.4** 在计算配合比的基础上应进行试拌。计算水胶比宜保持不变，并应通过调整配合比其他参数使混凝土拌合物性能符合设计和施工要求，然后修正计算配合比，提出试拌配合比。

**9.1.5** 在试拌配合比的基础上应进行混凝土强度和氯离子扩散系数试验，并应符合下列规定：

**1** 应采用三个不同的配合比，其中一个应为本标准第8章确定的试拌配合比，另外两个配合比的水胶比宜较试拌配合比分别增加和减少0.05。对于强度等级为C60及其以上的高强混凝土，另外两个配合比的水胶比宜较试拌配合比分别增加和减少0.02，用水量应与试拌配合比相同，砂率可分别增加和减少1%；

**2**  进行混凝土强度和氯离子扩散系数试验时，拌合物性能应符合设计和施工要求，每个配合比应至少制作一组试件，并应标准养护到28d或设计规定龄期时进行试验。

9.2 配合比的调整与确定

**9.2.1** 混凝土配合比的调整应符合下列规定：

**1** 根据本标准第9.1.5条混凝土强度和氯离子扩散系数试验结果，确定同时满足强度和耐久性要求的水胶比和矿物掺合量掺量；

**2** 在试拌配合比的基础上，用水量*m*w和外加剂用量*m*a应根据确定的水胶比作调整；

**3** 胶凝材料用量*m*b应以用水量除以确定的水胶比计算得出；

**4**  粗骨料*m*g和细骨料用量*m*s应根据用水量和胶凝材料用量进行调整。

**9.2.2** 混凝土拌合物表观密度和配合比校正系数的计算应符合下列规定：

**1**  配合比调整后的混凝土拌合物的表观密度应按下式计算：

 （9.2.2-1）

式中：——混凝土拌合物的表观密度计算值（kg/m3）；

——每立方米混凝土的水泥用量（kg/m3）；

——每立方米混凝土的矿物掺合料用量（kg/m3）；

——每立方米混凝土的粗骨料用量（kg/m3）；

——每立方米混凝土的细骨料用量（kg/m3）；

——每立方米混凝土的用水量（kg/m3）。

**2** 混凝土配合比校正系数应按下式计算：

 （9.2.2-2）

式中：*δ*′——混凝土配合比校正系数；

——混凝土拌合物的表观密度实测值（kg/m3）。

**9.2.3** 当混凝土拌合物表观密度实测值与计算值之差的绝对值不超过计算值的2%时，按本标准第9.2.1条调整的配合比可维持不变；当二者之差超过2%时，应将配合比中每项材料用量均乘以校正系数。

**9.2.4** 配合比调整后，应测定拌合物氯离子含量，试验结果应符合本标准表8.1.3的规定。

**9.2.5** 生产单位可根据常用材料设计出常用的混凝土配合比备用，并应在启用过程中予以验证或调整。遇有下列情况之一时，应重新进行配合比设计：

**1** 对混凝土性能有特殊要求时；

**2** 水泥、外加剂或矿物掺合料等原材料品种、质量有显著变化时。

10 有特殊要求的混凝土配合比设计

10.1 高性能混凝土配合比设计要求

**10.1.1** 配制海港工程高性能混凝土的原材料除应符合第4章的有关规定外，尚应符合下列规定：

**1** 宜选用标准稠度用水量低的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥，不宜采用矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥或复合硅酸盐水泥；

**2** 粗骨料宜选用质地坚硬、级配良好、针片状颗粒少、空隙率小的碎石，最大粒径不应大于25mm；

**3** 细骨料宜选用级配良好、细度模数在2.6～3.2的中、粗砂。

**10.1.2** 高性能混凝土配合比设计除应符合第8章中有关规定外，其拌合物中胶凝材料浆体体积宜占混凝土体积的33%～37%。

10.2 泵送混凝土配合比设计要求

**10.2.1** 海港工程泵送混凝土所用原材料除应符合第4章的有关规定外，尚应符合下列规定：

**1** 选用连续级配的粗骨料，其针片状颗粒含量应不大于10%，粗骨料最大粒径与输送管径之比应符合表10.2.1的规定；

**2** 细骨料细度模数应为2.4～2.9，其通过0.315mm筛孔的颗粒含量应不少于15%；

**3** 掺用的泵送剂或减水剂及掺用的活性矿物掺合料，质量应符合国家现行标准《混凝土外加剂》GB 8076的有关规定。

表10.2.1 粗骨料最大粒径与输送管径之比

|  |  |
| --- | --- |
| 粗骨料品种 | 粗骨料最大粒径与输送管径比 |
| 碎石 | ≤1:3.0 |
| 卵石 | ≤1:2.5 |

**10.2.2**  海港工程泵送混凝土配合比设计除应符合第8章中有关规定外，尚应满足下列要求：

**1** 拌合物坍落度应按表10.2.2选用，但当泵送高度超过表10.2.2规定时，应事先通过专门的分析研究和试验论证；

**2** 泵送混凝土最小胶凝材料用量应根据管径、距离、坍落度、骨料种类、气候条件等因素确定；

**3** 泵送混凝土水胶比应不大于0.60；

**4** 砂率应根据骨料粒径、胶凝材料用量和拌合物的和易性等综合分析确定，并应在38%～45%的范围内。

表10.2.2 混凝土拌合物的坍落度选用值

|  |  |
| --- | --- |
| 泵送高度（m） | 坍落度（mm） |
| <30 | 100～140 |
| 30～60 | 140～160 |

10.3 大体积混凝土配合比设计要求

**10.3.1** 海港工程大体积混凝土采用的原材料除应符合第4章的规定外，尚应符合下列规定：

**1** 选用水化热低和凝结时间长的水泥、微膨胀水泥；

**2** 骨料应选用级配良好的洁净中砂和空隙率较小的粗骨料；

**3** 掺用的外加剂应选用缓凝剂、缓凝型减水剂或膨胀剂。

**10.3.2**  海港工程大体积混凝土的配合比设计除按第8章的有关规定执行外，在满足设计和施工要求的条件下，尚宜满足下列要求：

**1** 提高矿物掺合料掺量及骨料的含量，降低每立方米混凝土的水泥用量；

**2** 采用较小的水胶比；

**3** 采用微膨胀水泥或掺用膨胀剂时，应通过试验确定用量或掺量。

**10.3.3** 海港工程大体积混凝土在配合比确定后应进行水化热的验算或混凝土绝热温升的测定。

10.4 抗冻混凝土配合比设计要求

**10.4.1** 海港工程抗冻混凝土的原材料除应符合第4章的规定外，尚应符合下列规定：

**1** 应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥；

**2** 宜选用连续级配的粗骨料，粗骨料质量应符合本标准第4.3.7条有抗冻要求的规定；

**3** 细骨料质量应符合本标准第4.3.2条有抗冻要求的规定；

**4** 粗、细骨料均应进行坚固性试验，并应符合现行行业标准《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52的规定；

**5** 在钢筋混凝土和预应力混凝土中不得掺用含有氯盐的防冻剂；在预应力混凝土中不得掺用含有亚硝酸盐或碳酸盐的防冻剂。

**10.4.2** 抗冻混凝土的配合比设计除按第8章的有关规定执行外，尚应符合下列规定：

**1** 最大水胶比和最小胶凝材料用量应符合本标准第8.1节有抗冻性要求混凝土的相关规定；

**2** 矿物掺合料掺量应符合本标准第8.1节的相关规定；

**3** 应掺入适量引气剂，掺用引气剂的混凝土拌合物的含气量应符合表10.4.2的规定。

表10.4.2 有抗冻性要求的混凝土拌合物含气量控制范围

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 骨料最大粒径（mm） | 含气量（%） | 骨料最大粒径（mm） | 含气量（%） |
| 10.0 | 5.0~8.0 | 31.5 | 3.5~6.5 |
| 20.0 | 4.0~7.0 | 40.0 | 3.0~6.0 |
| 25.0 | 3.5~7.0 | 63.0 | 3.0~5.0 |

注：1.含气量为气体占混凝土体积的百分比；

2.泵送混凝土含气量应控制在5.0%~7.0%。

10.5 自密实混凝土配合比设计要求

**10.5.1** 海港工程自密实混凝土的原材料除应符合第4章的规定外，尚应符合下列规定：

**1** 水泥选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥；

**2** 粗骨料的最大粒径不大于20mm，针片状颗粒含量小于10%，空隙率小于40%；

**3** 细骨料选用级配合格的中砂，砂的含泥量小于1%。

**10.5.2** 海港工程自密实混凝土的配合比设计除按第8章的有关规定执行外，尚应符合下列规定：

**1** 根据所用的砂、石、高效减水剂和确定的和易性，并在达到要求的工作性和自密实性同时，选择较少的单位用水量；

**2** 单位体积胶凝材料用量为450kg/m3~600kg/m3；

**3** 水与胶凝材料的体积比为0.8~1.1；

**4** 粗集料体积一般为混凝土总体积的28%~35%；

**5** 根据经验，在保证自密实混凝土的和易性和填密度的情况下选取最佳砂率，砂的体积一般按占砂浆体积40%~50%选取。

10.6 超高性能混凝土配合比设计要求

**10.6.1** 超高性能混凝土配合比设计应符合下列规定：

**1** 水胶比不宜大于0.20；

**2** 骨料与胶凝材料各组分的相对比例宜按照颗粒堆积理论设计；

**3** 硅灰掺量不宜小于胶凝材料用量的10%；

**4** 粉煤灰微珠掺量可为胶凝材料的5%~15%；

**5** 胶凝材料用量和纤维掺量应符合现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387的相关规定。

附录A 混凝土抗氯离子渗透性扩散系数的电迁移试验方法

**A.0.1** 本试验方法可用于测定非稳态电迁移试验中混凝土的氯离子扩散系数。

**A.0.2** 试验仪器设备和化学试剂应满足下列要求：

**1** 试验装置如图A.0.2所示；

**2** 橡胶套筒、电解质水槽、阳极和阴极各6个，不锈钢管卡12个；

**3** 真空泵，真空度不大于1000Pa；

**4** 真空容器，内径不小于250mm；

**5** 温度计或可读热电偶，精度：0.2℃；

**6** 两脚规和游标卡尺，游标卡尺精度0.1mm；

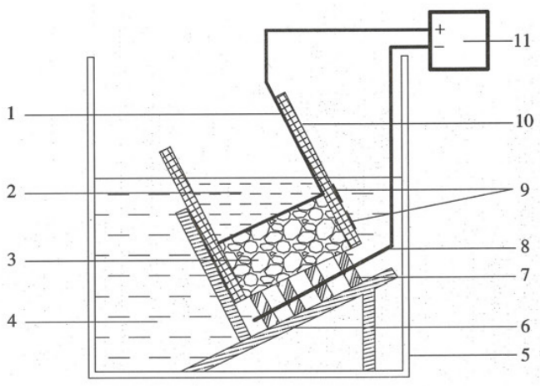
**7** 符合标准的蒸馏水或去离子水；

**8** 分析纯试剂配制的饱和氢氧化钙溶液；

**9** 化学纯试剂配制的10% 氯化钠溶液12L；

**10** 化学纯试剂配制的0.3mol/L氢氧化钠溶液约300ml；

**11** 显色指示剂，分析纯试剂配制的0.3mol/L硝酸银溶液。



图A.0.2 试验装置图

1-阳极；2-阳极溶液；3-试件；4-阴极溶液；5-电解质水槽；6-有机玻璃支架；7-阴极架；8-阴极；9-不锈钢关卡；10-橡胶套筒；11-直流稳压电源

**A.0.3** 试验步骤应符合下列规定：

**1** 制作直径100mm、厚度100mm、骨料最大粒径不大于25mm的混凝土试件，试件用内径100mm、高度100mm的圆柱体钢模按标准方法成型，或对硬化混凝土钻芯取样，试验以3块试件为一组；

**2** 试件成型后立即用塑料薄膜覆盖并放入标准养护室，24h后拆模并进行标准养护；

**3** 试件到达养护龄期，沿试块中间切成两个直径100mm、厚度50mm的圆柱形试件；当试件在实体混凝土结构中钻取时，先切割成标准试件尺寸，然后在标准养护室水池中浸泡72h后进行试验；

**4** 用刷子清洗表面及缝隙的浮灰，擦去试件表面多余的水分，当试件暴露于空气中至表面干燥后，将试件放入真空容器中进行抽真空处理；

**5** 试件抽真空时，每个试件的表面暴露在真空中，在5min内将真空容器中的绝对压力减少到1000Pa以下，保持真空3h后，维持这一真空度将饱和的氢氧化钙溶液吸入真空容器，直至淹没试件，试件浸泡1h后恢复常压，再继续浸泡(182)h；

**6** 将试块从氢氧化钙溶液中取出后，用干抹布擦干表面水分，用游标卡尺测量试件的厚度，精确到0.1mm，当试件达到表面干燥的状态后将试件塞进橡胶套筒内，新鲜的切割面朝下，用两个不锈钢管卡将试块与橡胶套筒箍紧至不渗漏；

**7** 将浓度为10%的氯化钠溶液注入阴极电解质水槽中，将0.3mol/L的氢氧化钠溶液注入橡胶套简内约300ml时，将橡胶套筒放入阳极电解质水槽中，测量此时氢氧化钠溶液的初始温度；注入氯化钠溶液的电解质水槽中的阴极连接电源负极，注入氢氧化钠溶液的橡胶套筒中的阳极连接电源正极；

**8** 以3个试件为1组，分别与电源的接口相连；

**9** 接通电源，调节各回路电压到30V，分别观察各回路初始电流，根据初始电流值从表A.0.3中选择试验电压；根据实际施加的试验电压测得的试验电流，选择试验时间进行试验；

**10** 通电结束测量氢氧化钠溶液的最终温度；

**11** 取出试件并用自来水冲洗试件表面，再用干抹布擦干表面，立即用压力试验机沿轴向劈成两半；

**12** 在新劈开的断面喷涂0.1mol/L的硝酸银溶液，放置15min。

**A.0.4** 氯离子渗透深度可采用下面两种方法获得：

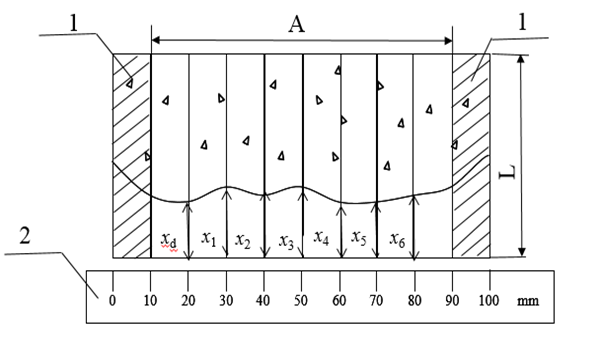
**1** 用两脚规和游标卡尺测量白色氯化银标示的渗透深度，从正中间向两每隔10mm测量一个数据，精确到0.1mm，当某一测点被骨料阻挡则将测点移动到最近未被阻挡的位置进行测量；共测得7个数据，测量位置如图A.0.4-1所示。氯离子渗透深度平均值为7个测点氯离子渗透深度的平均值。

**2** 采用图像获取装置获得图A.0.4-2所示显色区域及标志物的几何参数。然后使用Adobe Photoshop软件“工具”选项里的“快速选择工具”选取数码图片中显示为白色的氯离子扩散区域，设置为图层1，并利用Adobe Photoshop软件“编辑”菜单的“填充”选项将图层1填充为红色。然后，打开“直方图”窗口，获取图层1的像素值*P*1。类似地，使用“工具”选项里的“矩形选择工具”将图片中标志物设置为图层2，并填充为红色。接着，在“直方图”窗口中获取图层2的像素值。根据图层宽度与其像素值成正比的原理计算氯离子扩散深度平均值：

 (A.0.4-1)

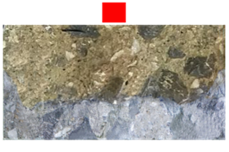
 (A.0.4-2)

式中，*x*d表示氯离子渗透深度平均值；代表扩散区域像素值；代表10mm2标志物像素值；代表扩散区域底部边长像素值；代表标志物底边长10mm的像素值。



图A.0.4-1 氯离子渗透深度测量示意图（测点法）

（1-试件边缘部分；2-尺子；A-测量范围；*x*1-x7氯离子渗透深度测点值）



图C.0.4-2 氯离子渗透深度测量示意图（图像法）

（边长为 10mm 的正方形标志物）

表A.0.3 初始电流、电压与试验时间的关系

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 初始电流  （用30V电压）（mA） | 施加的电压*U*  （调整后）（V） | 可能的新初始电流  （mA） | 试验持续时间  *t*（h） |
| <5 | 60 | <10 | 96 |
| 5<10 | 60 | 10<20 | 48 |
| 10<15 | 60 | 20<30 | 24 |
| 15<20 | 50 | 25<35 | 24 |
| 20<30 | 40 | 25<40 | 24 |
| 30<40 | 35 | 35<50 | 24 |
| 40<60 | 30 | 40<60 | 24 |
| 60<90 | 25 | 50<75 | 24 |
| 90<120 | 20 | 60<80 | 24 |
| 120<180 | 15 | 60<90 | 24 |
| 180<360 | 10 | 60<120 | 24 |
| 360 | 10 | 120 | 6 |

**A.0.5** 混凝土非稳态氯离子扩散系数应按下式计算：

 （A.0.5）

式中：*D*RCM——混凝土的非稳态氯离子迁移系数，精确到；

*U*——所用电压的绝对值（V）；

*T*——阳极溶液的初始温度和结束温度的平均值（℃）；

*L*——试件厚度（mm），精确到0.1mm；

——氯离子渗透深度的平均值（mm），精确到0.1mm；

*t*——试验持续时间（h）。

**A.0.6** 试验结果的评定应满足下列要求：

**1** 混凝土氯离子扩散系数为三个试样的算术平均值；

**2** 如最大值或最小值之一与中值的差值超过平均值的15%，则取中值为测定值；

**3** 如有两个测值与中值的差值都超过平均值的15%，则该组试验结果无效。

附录B 混凝土中钢筋脱钝临界氯离子浓度的测试方法

**B.0.1** 本试验方法可用于测定混凝土中钢筋脱钝临界氯离子浓度。

**B.0.2** 试验仪器、设备和化学试剂应满足下列要求：

**1** 试验装置如图B.0.2-1所示；

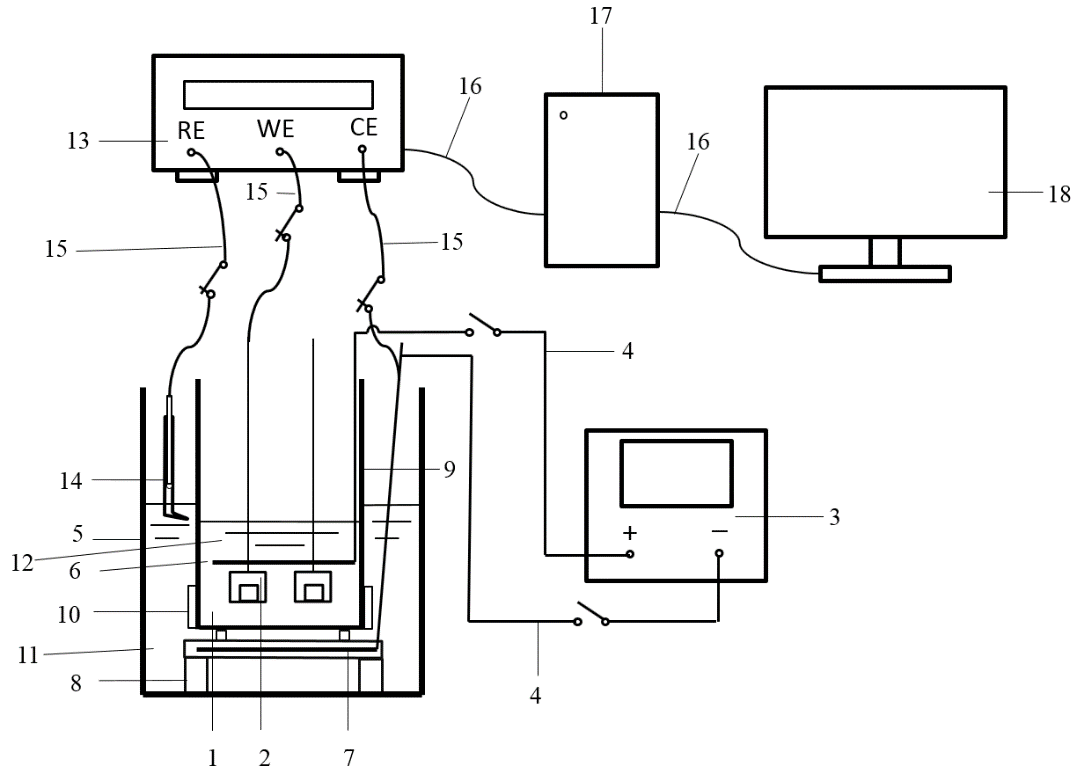
**2** 待测试件为预埋多根钢筋电极的直径为 100mm、高度为 35mm圆柱体混凝土试件，其底面与橡胶套筒下端面平齐；

**3** 钢筋电极由高度为10 mm、直径为10 mm的钢筋制成，上端面焊接有长度为20cm的铜芯线，下端面采用水砂纸逐级打磨至镜面，下端面为测试面，其余钢筋表面采用环氧树脂封装。钢筋电极的测试面与待测试件的底面平行，在圆柱体待测试件的横截面内均匀分布，如图B.0.2-2所示；

**4** 配置溶液的水应为符合标准的蒸馏水或去离子水；

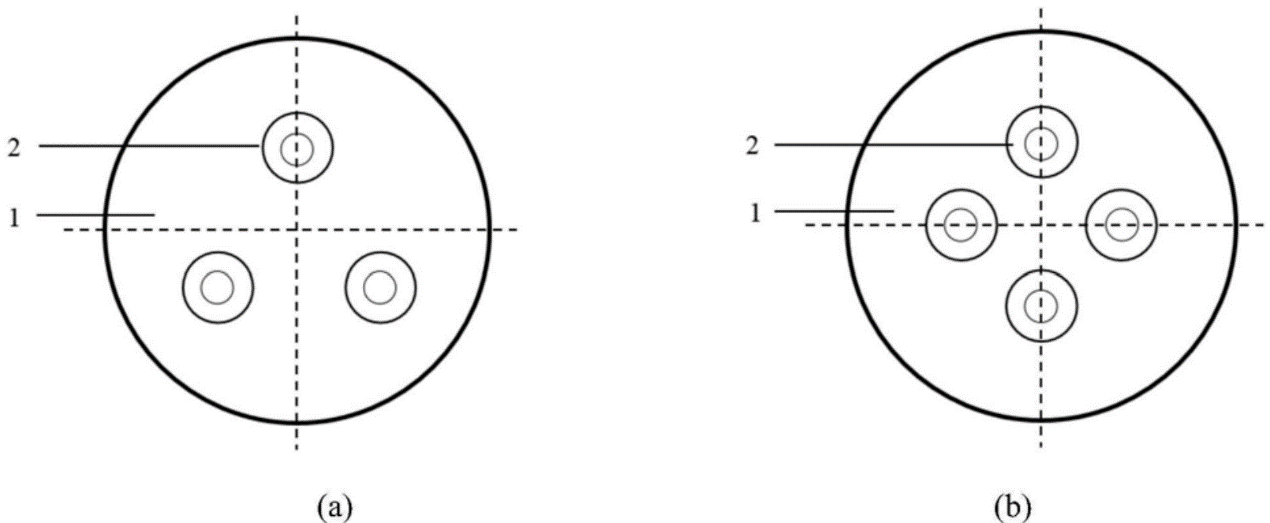
**5** 阳极溶液为化学纯试剂配制的0.3mol/L的氢氧化钠溶液；

**6** 阴极溶液为化学纯试剂配制的质量分数为5%的氯化钠溶液与浓度为0.3mol/L的氢氧化钠溶液。



图B.0.2-1 试验装置示意图

1-待测试件；2-钢筋电极；3-直流电源；4-导线；5-电解质水槽；6-阳极导电板；7-阴极导电板；8-支撑架；9-橡胶套筒；10-不锈钢喉箍；11-阴极溶液；12-阳极溶液；13-电化学工作站；14-饱和甘汞电极；15-测试导线；16-数据线；17-电脑主机；18-显示器



图B.0.2-2 待测试件中钢筋电极分布示意图

1-待测试件；2-钢筋电极

**B.0.3** 试验应按照下列步骤进行：

**1** 拌制骨料最大粒径不超过25mm的混凝土，将3~4根钢筋电极倒插进直径为100mm，高度为100mm底部均匀钻3~4孔的圆柱型模具中，使钢筋电极的上端面与塑料模具的内底面接触完好，将混凝土倒入模具中，振捣均匀；

**2** 试件硬化成型后，覆盖塑料薄膜，放入标准养护室养护，养护24h后拆模并进行标准养护；

**3** 待测试件养护龄期达到28天后，利用切割机将试件切割成高度为 35mm 的圆柱体试件，切割过程中保证切割面光滑平整；

**4** 将待测试件放入真空饱水机中，配合饱和氢氧化钙溶液饱水24h；

**5** 利用不锈钢喉箍将待测试件固定在橡胶套筒中，且待测试件底面与橡胶套筒下端面平齐，将二者整体放置在电解质水槽中的支撑架上；

**6** 在待测试件顶面放置阳极导电板，向橡胶套筒中注入300mL阳极溶液，向电解质水槽中注入7L阴极溶液，在待测试件下侧的阴极溶液中放置阴极导电板，利用通电导线将6V直流电源的正极和负极分别与阳极导电板和阴极导电板相连接；

**7** 当通电时间达到48小时后，断开通电导线，将待测试件从电解质水槽中取出静置24小时；

**8** 利用钢筋电极、饱和甘汞电极和阴极导电板分别作为工作电极（WE）、参比电极（RE）和辅助电极（CE），利用测试导线连接好三电极与电化学工作站，测试混凝土中钢筋电极的开路电位、极化电阻和腐蚀电流密度。电化学工作站通过数据线与电脑主机和显示器相连，对测试数据显示、存储和分析，并计算腐蚀电流密度特征参数，其计算公式为：

 （B.0.3-1）

式中：*C*——腐蚀电流密度的特征参数；

*in*——第*n*个氯离子电迁移循环的腐蚀电流密度测试结果；

*in-*1——第*n*-1个氯离子电迁移循环的腐蚀电流密度测试结果；

*i*1——第1个氯离子电迁移循的腐蚀电流密度测试结果；

*i*0——开展氯离子电迁移循环试验之前的腐蚀电流密度测试结果。

**9** 根据钢筋电极测试面脱钝量化判定准则判定混凝土中钢筋电极的测试面是否发生脱钝，钢筋电极测试面脱钝量化判定准则为：当腐蚀电流密度特征参数*C*≥5时钢筋电极测试面脱钝；当腐蚀电流密度特征参数*C*＜5时钢筋电极测试面未脱钝。如果未脱钝，则重复“通电、静置、测试”过程，直至钢筋电极发生脱钝为止。

**10** 当钢筋电极发生脱钝后，将待测试件劈裂，取钢筋电极测试面附近的混凝土粉末，将其磨碎过筛，并烘干至恒重后测定混凝土中的氯离子含量，即为钢筋脱钝的临界氯离子浓度。

**附录C 设计工作年限为50年的混凝土结构耐久性参数组合值**

表C.0.1 华南地区一维扩散区混凝土的*D*0限值（10-12m2/s）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *c*d（mm） |  | 环境作用等级 | | | |
| Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| 25 | 0.40 | 2.8 | - | - | - |
| 0.45 | 3.7 | - | - | - |
| 0.50 | 4.8 | - | - | - |
| 0.55 | 6.4 | - | - | - |
| 0.60 | 8.5 | - | - | - |
| 0.65 | 11.2 | - | - | - |
| 30 | 0.40 | 4.0 | - | - | - |
| 0.45 | 5.3 | - | - | - |
| 0.50 | 7.0 | - | - | - |
| 0.55 | 9.2 | - | - | - |
| 0.60 | 12.2 | - | - | - |
| 0.65 | 15.0\* | - | - | - |
| 35 | 0.40 | 5.4 | 2.8 | 2.1 | 1.7 |
| 0.45 | 7.2 | 3.7 | 2.7 | 2.2 |
| 0.50 | 9.5 | 4.9 | 3.6 | 2.9 |
| 0.55 | 12.6 | 6.5 | 4.8 | 3.9 |
| 0.60 | 15\* | 8.6 | 6.3 | 5.1 |
| 0.65 | 15.0\* | 11.3 | 8.3 | 6.8 |
| 40 | 0.40 | 7.1 | 3.7 | 2.7 | 2.2 |
| 0.45 | 9.4 | 4.9 | 3.6 | 2.9 |
| 0.50 | 12.4 | 6.4 | 4.7 | 3.8 |
| 0.55 | 15.0\* | 8.5 | 6.2 | 5.1 |
| 0.60 | 15.0\* | 11.2 | 8.2 | 6.7 |
| 0.65 | 15.0\* | 14.8 | 10.0\* | 8.9 |
| 45 | 0.40 | - | 4.7 | 3.4 | 2.8 |
| 0.45 | - | 6.1 | 4.5 | 3.7 |
| 0.50 | - | 8.1 | 6.0 | 4.9 |
| 0.55 | - | 10.7 | 7.9 | 6.4 |
| 0.60 | - | 14.2 | 10.0\* | 8.5 |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 50 | 0.40 | - | 5.7 | 4.2 | 3.4 |
| 0.45 | - | 7.6 | 5.6 | 4.5 |
| 0.50 | - | 10.0 | 7.4 | 6.0 |
| 0.55 | - | 13.2 | 9.8 | 7.9 |
| 0.60 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |

注：1.综合考虑混凝土的制备水平和耐久性要求，标注\*处表示：对于Ⅲ-C和Ⅲ-D级，*D*0的上限值控制为15.0×10-12 m2/s，对于Ⅲ-E和Ⅲ-F级，*D*0的上限值控制为10.0×10-12 m2/s。

2. *c*d为混凝土净保护层厚度的设计值，使用时需要考虑外侧箍筋直径、安全裕度等因素的影响，根据条文6.2.6计算混凝土保护层厚度的特征值。

3.表格计算结果未考虑应力水平的影响，若需考虑应力水平影响，可根据条文6.2.10计算应力影响系数，并在表格的基础上进行应力影响修正。

表C.0.2 华南地区二维扩散区混凝土的D0限值（10-12 m2/s）

| *c*d（mm） |  | 环境作用等级 | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| 20 | 0.40 | 1.0 | - | - | - |
| 0.45 | 1.3 | - | - | - |
| 0.50 | 1.8 | - | - | - |
| 0.55 | 2.3 | - | - | - |
| 0.60 | 3.1 | - | - | - |
| 0.65 | 4.1 | - | - | - |
| 25 | 0.40 | 1.6 | - | - | - |
| 0.45 | 2.1 | - | - | - |
| 0.50 | 2.8 | - | - | - |
| 0.55 | 3.7 | - | - | - |
| 0.60 | 4.8 | - | - | - |
| 0.65 | 6.4 | - | - | - |
| 30 | 0.40 | 2.3 | 1.4 | 1.1 | - |
| 0.45 | 3.0 | 1.9 | 1.5 | - |
| 0.50 | 4.0 | 2.5 | 2.0 | - |
| 0.55 | 5.3 | 3.3 | 2.6 | - |
| 0.60 | 7.0 | 4.3 | 3.4 | - |
| 0.65 | 9.2 | 5.7 | 4.5 | - |
| 35 | 0.40 | 3.1 | 1.9 | 1.5 | - |
| 0.45 | 4.1 | 2.6 | 2.0 | - |
| 0.50 | 5.4 | 3.4 | 2.7 | - |
| 0.55 | 7.2 | 4.5 | 3.5 | - |
| 0.60 | 9.5 | 5.9 | 4.7 | - |
| 0.65 | 12.5 | 7.8 | 6.2 | - |
| 40 | 0.40 | 4.1 | 2.5 | 2.0 | 1.7 |
| 0.45 | 5.4 | 3.3 | 2.6 | 2.2 |
| 0.50 | 7.1 | 4.4 | 3.5 | 3.0 |
| 0.55 | 9.4 | 5.8 | 4.6 | 3.9 |
| 0.60 | 12.4 | 7.7 | 6.1 | 5.2 |
| 0.65 | 15.0\* | 10.2 | 8.0 | 6.8 |
| 45 | 0.40 | - | 3.2 | 2.5 | 2.1 |
| 0.45 | - | 4.2 | 3.3 | 2.8 |
| 0.50 | - | 5.6 | 4.4 | 3.7 |
| 0.55 | - | 7.4 | 5.8 | 4.9 |
| 0.60 | - | 9.7 | 7.7 | 6.5 |
| 0.65 | - | 12.9 | 10.0\* | 8.6 |
| 50 | 0.40 | - | 3.9 | 3.1 | 2.6 |
| 0.45 | - | 5.2 | 4.1 | 3.5 |
| 0.50 | - | 6.9 | 5.4 | 4.6 |
| 0.55 | - | 9.1 | 7.2 | 6.1 |
| 0.60 | - | 12.0 | 9.5 | 8.1 |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 55 | 0.40 | - | - | - | 3.2 |
| 0.45 | - | - | - | 4.2 |
| 0.50 | - | - | - | 5.6 |
| 0.55 | - | - | - | 7.4 |
| 0.60 | - | - | - | 9.8 |
| 0.65 | - | - | - | 10.0\* |
| 60 | 0.40 | - | - | - | 3.8 |
| 0.45 | - | - | - | 5.0 |
| 0.50 | - | - | - | 6.7 |
| 0.55 | - | - | - | 8.8 |
| 0.60 | - | - | - | 10.0\* |
| 0.65 | - | - | - | 10.0\* |

注：1.综合考虑混凝土的制备水平和耐久性要求，标注\*处表示：对于Ⅲ-C和Ⅲ-D级，*D*0的上限值控制为15.0×10-12 m2/s，对于Ⅲ-E和Ⅲ-F级，*D*0的上限值控制为10.0×10-12 m2/s。

2. *c*d为混凝土净保护层厚度的设计值，使用时需要考虑外侧箍筋直径、安全裕度等因素的影响，根据条文6.2.6计算混凝土保护层厚度的特征值。

3.表格计算结果未考虑应力水平的影响，若需考虑应力水平影响，可根据条文6.2.10计算应力影响系数，并在表格的基础上进行应力影响修正。

表C.0.3 华东地区一维扩散区混凝土的*D*0限值（10-12m2/s）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *c*d（mm） |  | 环境作用等级 | | | |
| Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| 25 | 0.40 | 3.3 | - | - | - |
| 0.45 | 4.3 | - | - | - |
| 0.50 | 5.7 | - | - | - |
| 0.55 | 7.5 | - | - | - |
| 0.60 | 10.0 | - | - | - |
| 0.65 | 13.1 | - | - | - |
| 30 | 0.40 | 4.7 | - | - | - |
| 0.45 | 6.2 | - | - | - |
| 0.50 | 8.2 | - | - | - |
| 0.55 | 10.9 | - | - | - |
| 0.60 | 14.3 | - | - | - |
| 0.65 | 15.0\* | - | - | - |
| 35 | 0.40 | 6.4 | 3.3 | 2.4 | 2.0 |
| 0.45 | 8.5 | 4.4 | 3.2 | 2.6 |
| 0.50 | 11.2 | 5.8 | 4.3 | 3.5 |
| 0.55 | 14.8 | 7.6 | 5.6 | 4.6 |
| 0.60 | 15.0\* | 10.1 | 7.4 | 6.0 |
| 0.65 | 15.0\* | 13.3 | 9.8 | 8.0 |
| 40 | 0.40 | 8.4 | 4.3 | 3.2 | 2.6 |
| 0.45 | 11.1 | 5.7 | 4.2 | 3.4 |
| 0.50 | 14.6 | 7.5 | 5.6 | 4.5 |
| 0.55 | 15.0\* | 10.0 | 7.3 | 6.0 |
| 0.60 | 15.0\* | 13.2 | 9.7 | 7.9 |
| 0.65 | 15.0\* | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 45 | 0.40 | - | 5.5 | 4.0 | 3.3 |
| 0.45 | - | 7.2 | 5.3 | 4.3 |
| 0.50 | - | 9.6 | 7.0 | 5.7 |
| 0.55 | - | 12.6 | 9.3 | 7.6 |
| 0.60 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0 |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 50 | 0.40 | - | 6.8 | 5.0 | 4.0 |
| 0.45 | - | 8.9 | 6.6 | 5.3 |
| 0.50 | - | 11.8 | 8.7 | 7.1 |
| 0.55 | - | 15.0\* | 10.0\* | 9.3 |
| 0.60 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |

注：1.综合考虑混凝土的制备水平和耐久性要求，标注\*处表示：对于Ⅲ-C和Ⅲ-D级，*D*0的上限值控制为15.0×10-12 m2/s，对于Ⅲ-E和Ⅲ-F级，*D*0的上限值控制为10.0×10-12 m2/s。

2. *c*d为混凝土净保护层厚度的设计值，使用时需要考虑外侧箍筋直径、安全裕度等因素的影响，根据条文6.2.6计算混凝土保护层厚度的特征值。

3.表格计算结果未考虑应力水平的影响，若需考虑应力水平影响，可根据条文6.2.10计算应力影响系数，并在表格的基础上进行应力影响修正。

表C.0.4 华东地区二维扩散区混凝土的*D*0限值（10-12m2/s）

| *c*d（mm） |  | 环境作用等级 | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| 20 | 0.40 | 1.2 | - | - | - |
| 0.45 | 1.6 | - | - | - |
| 0.50 | 2.1 | - | - | - |
| 0.55 | 2.8 | - | - | - |
| 0.60 | 3.6 | - | - | - |
| 0.65 | 4.8 | - | - | - |
| 25 | 0.40 | 1.9 | - | - | - |
| 0.45 | 2.5 | - | - | - |
| 0.50 | 3.3 | - | - | - |
| 0.55 | 4.3 | - | - | - |
| 0.60 | 5.7 | - | - | - |
| 0.65 | 7.5 | - | - | - |
| 30 | 0.40 | 2.7 | 1.7 | 1.3 | - |
| 0.45 | 3.6 | 2.2 | 1.7 | - |
| 0.50 | 4.7 | 2.9 | 2.3 | - |
| 0.55 | 6.2 | 3.9 | 3.0 | - |
| 0.60 | 8.2 | 5.1 | 4.0 | - |
| 0.65 | 10.8 | 6.7 | 5.3 | - |
| 35 | 0.40 | 3.7 | 2.3 | 1.8 | - |
| 0.45 | 4.8 | 3.0 | 2.4 | - |
| 0.50 | 6.4 | 4.0 | 3.1 | - |
| 0.55 | 8.5 | 5.2 | 4.1 | - |
| 0.60 | 11.2 | 6.9 | 5.5 | - |
| 0.65 | 14.8 | 9.2 | 7.2 | - |
| 40 | 0.40 | 4.8 | 3.0 | 2.3 | 2.0 |
| 0.45 | 6.3 | 3.9 | 3.1 | 2.6 |
| 0.50 | 8.4 | 5.2 | 4.1 | 3.5 |
| 0.55 | 11.0 | 6.9 | 5.4 | 4.6 |
| 0.60 | 14.6 | 9.0 | 7.2 | 6.1 |
| 0.65 | 15.0\* | 12.0 | 9.5 | 8.0 |
| 45 | 0.40 | - | 3.8 | 3.0 | 2.5 |
| 0.45 | - | 5.0 | 3.9 | 3.3 |
| 0.50 | - | 6.6 | 5.2 | 4.4 |
| 0.55 | - | 8.7 | 6.9 | 5.8 |
| 0.60 | - | 11.5 | 9.1 | 7.7 |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 50 | 0.40 | - | 4.6 | 3.7 | 3.1 |
| 0.45 | - | 6.1 | 4.9 | 4.1 |
| 0.50 | - | 8.1 | 6.4 | 5.4 |
| 0.55 | - | 10.7 | 8.5 | 7.2 |
| 0.60 | - | 14.1 | 10.0\* | 9.5 |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 55 | 0.40 | - | - | - | 3.8 |
| 0.45 | - | - | - | 5.0 |
| 0.50 | - | - | - | 6.6 |
| 0.55 | - | - | - | 8.7 |
| 0.60 | - | - | - | 10.0\* |
| 0.65 | - | - | - | 10.0\* |
| 60 | 0.40 | - | - | - | 4.5 |
| 0.45 | - | - | - | 5.9 |
| 0.50 | - | - | - | 7.8 |
| 0.55 | - | - | - | 10.0\* |
| 0.60 | - | - | - | 10.0\* |
| 0.65 | - | - | - | 10.0\* |

注：1.综合考虑混凝土的制备水平和耐久性要求，标注\*处表示：对于Ⅲ-C和Ⅲ-D级，*D*0的上限值控制为15.0×10-12 m2/s，对于Ⅲ-E和Ⅲ-F级，*D*0的上限值控制为10.0×10-12 m2/s。

2. *c*d为混凝土净保护层厚度的设计值，使用时需要考虑外侧箍筋直径、安全裕度等因素的影响，根据条文6.2.6计算混凝土保护层厚度的特征值。

3.表格计算结果未考虑应力水平的影响，若需考虑应力水平影响，可根据条文6.2.10计算应力影响系数，并在表格的基础上进行应力影响修正。

表C.0.5 北方地区一维扩散区混凝土的*D*0限值（10-12m2/s）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *c*d（mm） |  | 环境作用等级 | | | |
| Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| 25 | 0.40 | 3.5 | - | - | - |
| 0.45 | 4.6 | - | - | - |
| 0.50 | 6.1 | - | - | - |
| 0.55 | 8.0 | - | - | - |
| 0.60 | 10.6 | - | - | - |
| 0.65 | 14.0 | - | - | - |
| 30 | 0.40 | 5.0 | - | - | - |
| 0.45 | 6.6 | - | - | - |
| 0.50 | 8.7 | - | - | - |
| 0.55 | 11.5 | - | - | - |
| 0.60 | 15.0\* | - | - | - |
| 0.65 | 15.0\* | - | - | - |
| 35 | 0.40 | 6.8 | 3.5 | 2.6 | 2.1 |
| 0.45 | 9.0 | 4.6 | 3.4 | 2.8 |
| 0.50 | 11.9 | 6.1 | 4.5 | 3.7 |
| 0.55 | 15.0\* | 8.1 | 6.0 | 4.9 |
| 0.60 | 15.0\* | 10.7 | 7.9 | 6.4 |
| 0.65 | 15.0\* | 14.2 | 10.0\* | 8.5 |
| 40 | 0.40 | 8.9 | 4.6 | 3.4 | 2.8 |
| 0.45 | 11.7 | 6.1 | 4.5 | 3.6 |
| 0.50 | 15.0\* | 8.0 | 5.9 | 4.8 |
| 0.55 | 15.0\* | 10.6 | 7.8 | 6.3 |
| 0.60 | 15.0\* | 14.0 | 10.0\* | 8.4 |
| 0.65 | 15.0\* | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 45 | 0.40 | - | 5.8 | 4.3 | 3.5 |
| 0.45 | - | 7.7 | 5.7 | 4.6 |
| 0.50 | - | 10.2 | 7.5 | 6.1 |
| 0.55 | - | 13.4 | 9.9 | 8.0 |
| 0.60 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 50 | 0.40 | - | 7.2 | 5.3 | 4.3 |
| 0.45 | - | 9.5 | 7.0 | 5.7 |
| 0.50 | - | 12.5 | 9.2 | 7.5 |
| 0.55 | - | 15.0\* | 10.0\* | 9.9 |
| 0.60 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |

注：1.综合考虑混凝土的制备水平和耐久性要求，标注\*处表示：对于Ⅲ-C和Ⅲ-D级，*D*0的上限值控制为15.0×10-12 m2/s，对于Ⅲ-E和Ⅲ-F级，*D*0的上限值控制为10.0×10-12 m2/s。

2. *c*d为混凝土净保护层厚度的设计值，使用时需要考虑外侧箍筋直径、安全裕度等因素的影响，根据条文6.2.6计算混凝土保护层厚度的特征值。

3.表格计算结果未考虑应力水平的影响，若需考虑应力水平影响，可根据条文6.2.10计算应力影响系数，并在表格的基础上进行应力影响修正。

表C.0.6 北方地区二维扩散区混凝土的*D*0限值（10-12m2/s）

| *c*d（mm） |  | 环境作用等级 | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ⅲ-C | Ⅲ-D | Ⅲ-E | Ⅲ-F |
| 20 | 0.40 | 1.3 | - | - | - |
| 0.45 | 1.7 | - | - | - |
| 0.50 | 2.2 | - | - | - |
| 0.55 | 2.9 | - | - | - |
| 0.60 | 3.9 | - | - | - |
| 0.65 | 5.1 | - | - | - |
| 25 | 0.40 | 2.0 | - | - | - |
| 0.45 | 2.6 | - | - | - |
| 0.50 | 3.5 | - | - | - |
| 0.55 | 4.6 | - | - | - |
| 0.60 | 6.1 | - | - | - |
| 0.65 | 8.0 | - | - | - |
| 30 | 0.40 | 2.9 | 1.8 | 1.4 | - |
| 0.45 | 3.8 | 2.3 | 1.9 | - |
| 0.50 | 5.0 | 3.1 | 2.5 | - |
| 0.55 | 6.6 | 4.1 | 3.2 | - |
| 0.60 | 8.7 | 5.4 | 4.3 | - |
| 0.65 | 11.5 | 7.1 | 5.6 | - |
| 35 | 0.40 | 3.9 | 2.4 | 1.9 | - |
| 0.45 | 5.1 | 3.2 | 2.5 | - |
| 0.50 | 6.8 | 4.2 | 3.3 | - |
| 0.55 | 9.0 | 5.6 | 4.4 | - |
| 0.60 | 11.9 | 7.4 | 5.8 | - |
| 0.65 | 15.0\* | 9.7 | 7.7 | - |
| 40 | 0.40 | 5.1 | 3.2 | 2.5 | 2.1 |
| 0.45 | 6.7 | 4.2 | 3.3 | 2.8 |
| 0.50 | 8.9 | 5.5 | 4.4 | 3.7 |
| 0.55 | 11.7 | 7.3 | 5.8 | 4.9 |
| 0.60 | 15.0\* | 9.6 | 7.6 | 6.4 |
| 0.65 | 15.0\* | 12.7 | 10.0\* | 8.5 |
| 45 | 0.40 | - | 4.0 | 3.2 | 2.7 |
| 0.45 | - | 5.3 | 4.2 | 3.5 |
| 0.50 | - | 7.0 | 5.5 | 4.7 |
| 0.55 | - | 9.2 | 7.3 | 6.2 |
| 0.60 | - | 12.2 | 9.6 | 8.2 |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 50 | 0.40 | - | 4.9 | 3.9 | 3.3 |
| 0.45 | - | 6.5 | 5.2 | 4.4 |
| 0.50 | - | 8.6 | 6.8 | 5.8 |
| 0.55 | - | 11.4 | 9.0 | 7.6 |
| 0.60 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 0.65 | - | 15.0\* | 10.0\* | 10.0\* |
| 55 | 0.40 | - | - | - | 4.0 |
| 0.45 | - | - | - | 5.3 |
| 0.50 | - | - | - | 7.0 |
| 0.55 | - | - | - | 9.2 |
| 0.60 | - | - | - | 10.0\* |
| 0.65 | - | - | - | 10.0\* |
| 60 | 0.40 | - | - | - | 4.8 |
| 0.45 | - | - | - | 6.3 |
| 0.50 | - | - | - | 8.3 |
| 0.55 | - | - | - | 10.0\* |
| 0.60 | - | - | - | 10.0\* |
| 0.65 | - | - | - | 10.0\* |

注：1.综合考虑混凝土的制备水平和耐久性要求，标注\*处表示：对于Ⅲ-C和Ⅲ-D级，*D*0的上限值控制为15.0×10-12 m2/s，对于Ⅲ-E和Ⅲ-F级，*D*0的上限值控制为10.0×10-12 m2/s。

2. *c*d为混凝土净保护层厚度的设计值，使用时需要考虑外侧箍筋直径、安全裕度等因素的影响，根据条文6.2.6计算混凝土保护层厚度的特征值。

3.表格计算结果未考虑应力水平的影响，若需考虑应力水平影响，可根据条文6.2.10计算应力影响系数，并在表格的基础上进行应力影响修正。

**附录D 水胶比和矿物掺合料掺量取值**

表D.0.1 C50水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.3）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | 0.31 | 0.02 | 0.50 | 0.29 | 0.06 | 0.54 | 0.26 | 0.09 | 0.58 | 0.23 | 0.12 | 0.62 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.32 | 0.04 | 0.48 | 0.29 | 0.07 | 0.52 | 0.27 | 0.10 | 0.56 | 0.24 | 0.14 | 0.60 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | 0.34 | 0.01 | 0.42 | 0.32 | 0.05 | 0.46 | 0.30 | 0.08 | 0.50 | 0.27 | 0.12 | 0.54 | 0.24 | 0.15 | 0.58 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | 0.35 | 0.03 | 0.40 | 0.32 | 0.06 | 0.44 | 0.30 | 0.10 | 0.48 | 0.27 | 0.13 | 0.52 | 0.25 | 0.16 | 0.56 |
| 2.5 | 78.8 | 0.37 | 0.01 | 0.34 | 0.35 | 0.04 | 0.38 | 0.32 | 0.08 | 0.42 | 0.30 | 0.11 | 0.46 | 0.28 | 0.15 | 0.50 | 0.25 | 0.18 | 0.54 |
| 3.0 | 94.6 | 0.37 | 0.02 | 0.32 | 0.35 | 0.06 | 0.36 | 0.33 | 0.09 | 0.40 | 0.30 | 0.13 | 0.44 | 0.28 | 0.16 | 0.48 | 0.25 | 0.19 | 0.52 |
| 3.5 | 110.4 | 0.37 | 0.03 | 0.30 | 0.35 | 0.07 | 0.34 | 0.33 | 0.10 | 0.38 | 0.30 | 0.14 | 0.42 | 0.28 | 0.17 | 0.46 | 0.26 | 0.21 | 0.50 |
| 4.0 | 126.1 | 0.37 | 0.05 | 0.28 | 0.35 | 0.08 | 0.32 | 0.33 | 0.12 | 0.36 | 0.30 | 0.15 | 0.40 | 0.28 | 0.19 | 0.44 | 0.26 | 0.22 | 0.47 |
| 4.5 | 141.9 | 0.37 | 0.06 | 0.26 | 0.35 | 0.10 | 0.30 | 0.33 | 0.13 | 0.34 | 0.30 | 0.17 | 0.38 | 0.28 | 0.21 | 0.41 | 0.26 | 0.24 | 0.45 |
| 5.0 | 157.7 | 0.36 | 0.08 | 0.24 | 0.35 | 0.11 | 0.28 | 0.33 | 0.15 | 0.32 | 0.30 | 0.19 | 0.35 | 0.28 | 0.22 | 0.39 | 0.26 | 0.26 | 0.43 |
| 5.5 | 173.4 | 0.36 | 0.09 | 0.22 | 0.34 | 0.13 | 0.26 | 0.32 | 0.17 | 0.29 | 0.30 | 0.20 | 0.33 | 0.28 | 0.24 | 0.37 | 0.26 | 0.27 | 0.41 |
| 6.0 | 189.2 | 0.36 | 0.11 | 0.20 | 0.34 | 0.15 | 0.23 | 0.32 | 0.18 | 0.27 | 0.30 | 0.22 | 0.31 | 0.28 | 0.25 | 0.35 | 0.26 | 0.29 | 0.38 |
| 6.5 | 205.0 | 0.35 | 0.13 | 0.17 | 0.34 | 0.16 | 0.21 | 0.32 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.23 | 0.28 | 0.28 | 0.27 | 0.32 | 0.26 | 0.31 | 0.36 |
| 7.0 | 220.8 | 0.35 | 0.15 | 0.15 | 0.33 | 0.18 | 0.18 | 0.32 | 0.22 | 0.22 | 0.30 | 0.25 | 0.26 | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.26 | 0.32 | 0.34 |
| 7.5 | 236.5 | 0.34 | 0.16 | 0.12 | 0.33 | 0.20 | 0.16 | 0.31 | 0.24 | 0.20 | 0.29 | 0.27 | 0.23 | 0.28 | 0.31 | 0.27 | 0.26 | 0.34 | 0.31 |
| 8.0 | 252.3 | 0.34 | 0.18 | 0.09 | 0.32 | 0.22 | 0.13 | 0.31 | 0.25 | 0.17 | 0.29 | 0.29 | 0.21 | 0.27 | 0.33 | 0.24 | 0.25 | 0.36 | 0.28 |
| 8.5 | 268.1 | 0.33 | 0.21 | 0.06 | 0.32 | 0.24 | 0.10 | 0.30 | 0.28 | 0.14 | 0.28 | 0.31 | 0.18 | 0.27 | 0.35 | 0.22 | 0.25 | 0.38 | 0.25 |
| 9.0 | 283.8 | 0.32 | 0.23 | 0.03 | 0.31 | 0.26 | 0.07 | 0.29 | 0.30 | 0.11 | 0.28 | 0.33 | 0.15 | 0.26 | 0.37 | 0.18 | 0.24 | 0.40 | 0.22 |
| 9.5 | 299.6 | - | - | - | 0.30 | 0.29 | 0.03 | 0.28 | 0.32 | 0.07 | 0.27 | 0.36 | 0.11 | 0.25 | 0.39 | 0.15 | 0.24 | 0.43 | 0.19 |
| 10.0 | 315.4 | - | - | - | - | - | - | 0.27 | 0.35 | 0.04 | 0.26 | 0.38 | 0.08 | 0.24 | 0.42 | 0.11 | 0.23 | 0.45 | 0.15 |
| 10.5 | 331.1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.25 | 0.41 | 0.03 | 0.23 | 0.45 | 0.07 | 0.22 | 0.48 | 0.11 |
| 11.0 | 346.9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.22 | 0.48 | 0.02 | 0.21 | 0.52 | 0.06 |

表D.0.2 C45水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.3）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | 0.35 | 0.01 | 0.52 | 0.32 | 0.04 | 0.56 | 0.29 | 0.08 | 0.59 | 0.26 | 0.11 | 0.63 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.35 | 0.02 | 0.50 | 0.32 | 0.05 | 0.54 | 0.29 | 0.09 | 0.58 | 0.26 | 0.12 | 0.62 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - |  |  |  | 0.35 | 0.03 | 0.48 | 0.33 | 0.07 | 0.52 | 0.30 | 0.10 | 0.56 | 0.27 | 0.14 | 0.60 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | 0.38 | 0.01 | 0.43 | 0.36 | 0.04 | 0.46 | 0.33 | 0.08 | 0.50 | 0.30 | 0.12 | 0.54 | 0.27 | 0.15 | 0.58 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | 0.39 | 0.02 | 0.41 | 0.36 | 0.06 | 0.45 | 0.33 | 0.09 | 0.48 | 0.30 | 0.13 | 0.52 | 0.28 | 0.16 | 0.56 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | 0.39 | 0.03 | 0.39 | 0.36 | 0.07 | 0.43 | 0.34 | 0.11 | 0.46 | 0.31 | 0.14 | 0.50 | 0.28 | 0.18 | 0.54 |
| 3.5 | 110.4 | 0.41 | 0.01 | 0.34 | 0.39 | 0.05 | 0.37 | 0.36 | 0.08 | 0.41 | 0.34 | 0.12 | 0.45 | 0.31 | 0.16 | 0.48 | 0.28 | 0.19 | 0.52 |
| 4.0 | 126.1 | 0.41 | 0.02 | 0.32 | 0.39 | 0.06 | 0.35 | 0.36 | 0.10 | 0.39 | 0.34 | 0.13 | 0.43 | 0.31 | 0.17 | 0.46 | 0.29 | 0.21 | 0.50 |
| 4.5 | 141.9 | 0.41 | 0.04 | 0.30 | 0.39 | 0.07 | 0.34 | 0.36 | 0.11 | 0.37 | 0.34 | 0.15 | 0.41 | 0.31 | 0.18 | 0.44 | 0.29 | 0.22 | 0.48 |
| 5.0 | 157.7 | 0.41 | 0.05 | 0.28 | 0.39 | 0.09 | 0.32 | 0.36 | 0.12 | 0.35 | 0.34 | 0.16 | 0.39 | 0.32 | 0.20 | 0.42 | 0.29 | 0.24 | 0.46 |
| 5.5 | 173.4 | 0.41 | 0.06 | 0.26 | 0.39 | 0.10 | 0.30 | 0.36 | 0.14 | 0.33 | 0.34 | 0.18 | 0.37 | 0.32 | 0.21 | 0.40 | 0.29 | 0.25 | 0.44 |
| 6.0 | 189.2 | 0.41 | 0.08 | 0.24 | 0.39 | 0.12 | 0.28 | 0.36 | 0.15 | 0.31 | 0.34 | 0.19 | 0.35 | 0.32 | 0.23 | 0.38 | 0.29 | 0.27 | 0.42 |
| 6.5 | 205.0 | 0.40 | 0.09 | 0.22 | 0.38 | 0.13 | 0.26 | 0.36 | 0.17 | 0.29 | 0.34 | 0.21 | 0.32 | 0.32 | 0.24 | 0.36 | 0.29 | 0.28 | 0.40 |
| 7.0 | 220.8 | 0.40 | 0.11 | 0.20 | 0.38 | 0.15 | 0.23 | 0.36 | 0.18 | 0.27 | 0.34 | 0.22 | 0.30 | 0.32 | 0.26 | 0.34 | 0.29 | 0.30 | 0.37 |
| 7.5 | 236.5 | 0.40 | 0.12 | 0.18 | 0.38 | 0.16 | 0.21 | 0.36 | 0.20 | 0.25 | 0.34 | 0.24 | 0.28 | 0.31 | 0.28 | 0.31 | 0.29 | 0.31 | 0.35 |
| 8.0 | 252.3 | 0.39 | 0.14 | 0.15 | 0.37 | 0.18 | 0.19 | 0.35 | 0.22 | 0.22 | 0.33 | 0.25 | 0.26 | 0.31 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.33 | 0.32 |
| 8.5 | 268.1 | 0.39 | 0.16 | 0.13 | 0.37 | 0.20 | 0.16 | 0.35 | 0.23 | 0.20 | 0.33 | 0.27 | 0.23 | 0.31 | 0.31 | 0.27 | 0.29 | 0.35 | 0.30 |
| 9.0 | 283.8 | 0.38 | 0.18 | 0.10 | 0.36 | 0.22 | 0.14 | 0.34 | 0.25 | 0.17 | 0.32 | 0.29 | 0.20 | 0.30 | 0.33 | 0.24 | 0.28 | 0.37 | 0.27 |
| 9.5 | 299.6 | 0.37 | 0.20 | 0.07 | 0.35 | 0.24 | 0.11 | 0.34 | 0.27 | 0.14 | 0.32 | 0.31 | 0.18 | 0.30 | 0.35 | 0.21 | 0.28 | 0.39 | 0.24 |
| 10.0 | 315.4 | 0.36 | 0.22 | 0.04 | 0.35 | 0.26 | 0.08 | 0.33 | 0.29 | 0.11 | 0.31 | 0.33 | 0.15 | 0.29 | 0.37 | 0.18 | 0.27 | 0.41 | 0.21 |
| 10.5 | 331.1 | 0.35 | 0.25 | 0.01 | 0.34 | 0.28 | 0.04 | 0.32 | 0.32 | 0.08 | 0.30 | 0.36 | 0.11 | 0.28 | 0.39 | 0.15 | 0.26 | 0.43 | 0.18 |
| 11.0 | 346.9 | - | - | - | 0.32 | 0.31 | 0.01 | 0.31 | 0.34 | 0.04 | 0.29 | 0.38 | 0.08 | 0.27 | 0.42 | 0.11 | 0.25 | 0.46 | 0.14 |
| 11.5 | 362.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.28 | 0.41 | 0.04 | 0.26 | 0.45 | 0.07 | 0.24 | 0.49 | 0.10 |

表D.0.3 C40水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.3）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | | *n*=0.6 | | | | *n*=0.65 | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | 0.34 | 0.03 | 0.57 | | 0.31 | 0.07 | 0.61 | | 0.28 | 0.10 | 0.65 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.38 | 0.01 | 0.52 | | 0.35 | 0.04 | 0.55 | | 0.32 | 0.08 | 0.59 | | 0.28 | 0.11 | 0.63 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | 0.38 | 0.02 | 0.50 | | 0.35 | 0.05 | 0.54 | | 0.32 | 0.09 | 0.57 | | 0.29 | 0.13 | 0.61 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | 0.39 | 0.03 | 0.48 | | 0.36 | 0.07 | 0.52 | | 0.33 | 0.10 | 0.56 | | 0.29 | 0.14 | 0.59 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | - | - | - | 0.39 | 0.04 | 0.47 | | 0.36 | 0.08 | 0.50 | | 0.33 | 0.12 | 0.54 | | 0.30 | 0.15 | 0.58 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | 0.42 | 0.02 | 0.42 | 0.39 | 0.05 | 0.45 | | 0.36 | 0.09 | 0.49 | | 0.33 | 0.13 | 0.52 | | 0.30 | 0.17 | 0.56 |
| 3.5 | 110.4 | - | - | - | 0.42 | 0.03 | 0.40 | 0.40 | 0.07 | 0.43 | | 0.37 | 0.10 | 0.47 | | 0.34 | 0.14 | 0.50 | | 0.31 | 0.18 | 0.54 |
| 4.0 | 126.1 | - | - | - | 0.43 | 0.04 | 0.38 | 0.40 | 0.08 | 0.42 | | 0.37 | 0.12 | 0.45 | | 0.34 | 0.15 | 0.49 | | 0.31 | 0.19 | 0.52 |
| 4.5 | 141.9 | 0.45 | 0.01 | 0.33 | 0.43 | 0.05 | 0.36 | 0.40 | 0.09 | 0.40 | | 0.37 | 0.13 | 0.43 | | 0.34 | 0.17 | 0.47 | | 0.32 | 0.21 | 0.50 |
| 5.0 | 157.7 | 0.45 | 0.03 | 0.31 | 0.43 | 0.07 | 0.35 | 0.40 | 0.10 | 0.38 | | 0.37 | 0.14 | 0.41 | | 0.35 | 0.18 | 0.45 | | 0.32 | 0.22 | 0.48 |
| 5.5 | 173.4 | 0.45 | 0.04 | 0.30 | 0.43 | 0.08 | 0.33 | 0.40 | 0.12 | 0.36 | | 0.37 | 0.16 | 0.40 | | 0.35 | 0.19 | 0.43 | | 0.32 | 0.23 | 0.46 |
| 6.0 | 189.2 | 0.45 | 0.05 | 0.28 | 0.43 | 0.09 | 0.31 | 0.40 | 0.13 | 0.34 | | 0.37 | 0.17 | 0.38 | | 0.35 | 0.21 | 0.41 | | 0.32 | 0.25 | 0.44 |
| 6.5 | 205.0 | 0.45 | 0.07 | 0.26 | 0.42 | 0.11 | 0.29 | 0.40 | 0.14 | 0.32 | | 0.37 | 0.18 | 0.36 | | 0.35 | 0.22 | 0.39 | | 0.32 | 0.26 | 0.42 |
| 7.0 | 220.8 | 0.45 | 0.08 | 0.24 | 0.42 | 0.12 | 0.27 | 0.40 | 0.16 | 0.30 | | 0.37 | 0.20 | 0.34 | | 0.35 | 0.24 | 0.37 | | 0.32 | 0.28 | 0.40 |
| 7.5 | 236.5 | 0.44 | 0.09 | 0.22 | 0.42 | 0.13 | 0.25 | 0.40 | 0.17 | 0.28 | | 0.37 | 0.21 | 0.32 | | 0.35 | 0.25 | 0.35 | | 0.32 | 0.29 | 0.38 |
| 8.0 | 252.3 | 0.44 | 0.11 | 0.20 | 0.42 | 0.15 | 0.23 | 0.39 | 0.19 | 0.26 | | 0.37 | 0.23 | 0.29 | | 0.35 | 0.27 | 0.33 | | 0.32 | 0.31 | 0.36 |
| 8.5 | 268.1 | 0.44 | 0.12 | 0.18 | 0.41 | 0.16 | 0.21 | 0.39 | 0.20 | 0.24 | | 0.37 | 0.24 | 0.27 | | 0.34 | 0.28 | 0.30 | | 0.32 | 0.32 | 0.34 |
| 9.0 | 283.8 | 0.43 | 0.14 | 0.15 | 0.41 | 0.18 | 0.19 | 0.39 | 0.22 | 0.22 | | 0.36 | 0.26 | 0.25 | | 0.34 | 0.30 | 0.28 | | 0.32 | 0.34 | 0.31 |
| 9.5 | 299.6 | 0.42 | 0.16 | 0.13 | 0.40 | 0.20 | 0.16 | 0.38 | 0.24 | 0.19 | | 0.36 | 0.28 | 0.22 | | 0.34 | 0.32 | 0.26 | | 0.31 | 0.36 | 0.29 |
| 10.0 | 315.4 | 0.42 | 0.18 | 0.10 | 0.40 | 0.22 | 0.14 | 0.38 | 0.26 | 0.17 | | 0.35 | 0.30 | 0.20 | | 0.33 | 0.34 | 0.23 | | 0.31 | 0.38 | 0.26 |
| 10.5 | 331.1 | 0.41 | 0.20 | 0.08 | 0.39 | 0.23 | 0.11 | 0.37 | 0.27 | 0.14 | | 0.35 | 0.32 | 0.17 | | 0.33 | 0.36 | 0.20 | | 0.30 | 0.40 | 0.23 |
| 11.0 | 346.9 | 0.40 | 0.22 | 0.05 | 0.38 | 0.26 | 0.08 | 0.36 | 0.30 | 0.11 | | 0.34 | 0.34 | 0.14 | | 0.32 | 0.38 | 0.17 | | 0.30 | 0.42 | 0.20 |
| 11.5 | 362.7 | 0.39 | 0.24 | 0.01 | 0.37 | 0.28 | 0.05 | 0.35 | 0.32 | 0.08 | | 0.33 | 0.36 | 0.11 | | 0.31 | 0.40 | 0.14 | | 0.29 | 0.44 | 0.17 |
| 12.0 | 378.4 | - | - | - | 0.36 | 0.30 | 0.01 | 0.34 | 0.34 | 0.04 | | - | - | - | | - | - | - | | - | - | - |

表D.0.4 C35水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.3）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.37 | 0.02 | 0.59 | 0.34 | 0.06 | 0.62 | | 0.30 | 0.09 | 0.66 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.38 | 0.03 | 0.57 | 0.34 | 0.07 | 0.61 | | 0.31 | 0.10 | 0.64 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.39 | 0.04 | 0.56 | 0.35 | 0.08 | 0.59 | | 0.31 | 0.12 | 0.63 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | 0.42 | 0.01 | 0.51 | 0.39 | 0.05 | 0.54 | 0.36 | 0.09 | 0.58 | | 0.32 | 0.13 | 0.61 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.03 | 0.49 | 0.39 | 0.06 | 0.52 | 0.36 | 0.10 | 0.56 | | 0.33 | 0.14 | 0.59 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.04 | 0.48 | 0.40 | 0.08 | 0.51 | 0.37 | 0.11 | 0.54 | | 0.33 | 0.15 | 0.58 |
| 3.5 | 110.4 | - | - | - | 0.47 | 0.01 | 0.43 | 0.43 | 0.05 | 0.46 | 0.40 | 0.09 | 0.49 | 0.37 | 0.13 | 0.53 | | 0.34 | 0.16 | 0.56 |
| 4.0 | 126.1 | - | - | - | 0.47 | 0.02 | 0.41 | 0.44 | 0.06 | 0.44 | 0.41 | 0.10 | 0.48 | 0.37 | 0.14 | 0.51 | | 0.34 | 0.18 | 0.54 |
| 4.5 | 141.9 | - | - | - | 0.47 | 0.03 | 0.39 | 0.44 | 0.07 | 0.43 | 0.41 | 0.11 | 0.46 | 0.38 | 0.15 | 0.49 | | 0.35 | 0.19 | 0.52 |
| 5.0 | 157.7 | - | - | - | 0.47 | 0.04 | 0.38 | 0.44 | 0.08 | 0.41 | 0.41 | 0.12 | 0.44 | 0.38 | 0.16 | 0.47 | | 0.35 | 0.20 | 0.51 |
| 5.5 | 173.4 | 0.50 | 0.01 | 0.33 | 0.47 | 0.05 | 0.36 | 0.44 | 0.09 | 0.39 | 0.41 | 0.13 | 0.43 | 0.38 | 0.17 | 0.46 | | 0.35 | 0.21 | 0.49 |
| 6.0 | 189.2 | 0.50 | 0.03 | 0.31 | 0.47 | 0.07 | 0.35 | 0.44 | 0.11 | 0.38 | 0.41 | 0.15 | 0.41 | 0.38 | 0.19 | 0.44 | | 0.35 | 0.23 | 0.47 |
| 6.5 | 205.0 | 0.50 | 0.04 | 0.30 | 0.47 | 0.08 | 0.33 | 0.44 | 0.12 | 0.36 | 0.41 | 0.16 | 0.39 | 0.39 | 0.20 | 0.42 | | 0.36 | 0.24 | 0.45 |
| 7.0 | 220.8 | 0.50 | 0.05 | 0.28 | 0.47 | 0.09 | 0.31 | 0.44 | 0.13 | 0.34 | 0.41 | 0.17 | 0.37 | 0.39 | 0.21 | 0.40 | | 0.36 | 0.25 | 0.43 |
| 7.5 | 236.5 | 0.50 | 0.06 | 0.26 | 0.47 | 0.10 | 0.29 | 0.44 | 0.14 | 0.32 | 0.41 | 0.19 | 0.35 | 0.39 | 0.23 | 0.38 | | 0.36 | 0.27 | 0.41 |
| 8.0 | 252.3 | 0.49 | 0.08 | 0.24 | 0.47 | 0.12 | 0.27 | 0.44 | 0.16 | 0.30 | 0.41 | 0.20 | 0.33 | 0.39 | 0.24 | 0.36 | | 0.36 | 0.28 | 0.39 |
| 8.5 | 268.1 | 0.49 | 0.09 | 0.22 | 0.47 | 0.13 | 0.26 | 0.44 | 0.17 | 0.29 | 0.41 | 0.21 | 0.31 | 0.38 | 0.25 | 0.34 | | 0.36 | 0.30 | 0.37 |
| 9.0 | 283.8 | 0.49 | 0.10 | 0.21 | 0.46 | 0.14 | 0.24 | 0.44 | 0.19 | 0.27 | 0.41 | 0.23 | 0.29 | 0.38 | 0.27 | 0.32 | | 0.35 | 0.31 | 0.35 |
| 9.5 | 299.6 | 0.48 | 0.12 | 0.19 | 0.46 | 0.16 | 0.22 | 0.43 | 0.20 | 0.24 | 0.41 | 0.24 | 0.27 | 0.38 | 0.28 | 0.30 | | 0.35 | 0.33 | 0.33 |
| 10.0 | 315.4 | 0.48 | 0.13 | 0.16 | 0.45 | 0.17 | 0.19 | 0.43 | 0.22 | 0.22 | 0.40 | 0.26 | 0.25 | 0.38 | 0.30 | 0.28 | | 0.35 | 0.34 | 0.31 |
| 10.5 | 331.1 | 0.47 | 0.15 | 0.14 | 0.45 | 0.19 | 0.17 | 0.42 | 0.23 | 0.20 | 0.40 | 0.27 | 0.23 | 0.37 | 0.32 | 0.26 | | 0.35 | 0.36 | 0.28 |
| 11.0 | 346.9 | 0.47 | 0.17 | 0.12 | 0.44 | 0.21 | 0.15 | 0.42 | 0.25 | 0.18 | 0.39 | 0.29 | 0.20 | 0.37 | 0.34 | 0.23 | | 0.34 | 0.38 | 0.26 |
| 11.5 | 362.7 | 0.46 | 0.18 | 0.09 | 0.44 | 0.22 | 0.12 | 0.41 | 0.27 | 0.15 | 0.39 | 0.31 | 0.18 | 0.36 | 0.35 | 0.20 | | 0.33 | 0.40 | 0.23 |
| 12.0 | 378.4 | - | - | - | 0.43 | 0.24 | 0.10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | - |
| 12.5 | 394.2 | - | - | - | 0.42 | 0.27 | 0.07 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | - |
| 13.0 | 410.0 | - | - | - | 0.40 | 0.29 | 0.03 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | - |

表D.0.5 C30水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.3）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.37 | 0.04 | 0.64 | 0.33 | 0.08 | 0.68 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.42 | 0.02 | 0.59 | 0.38 | 0.05 | 0.63 | 0.34 | 0.09 | 0.66 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.42 | 0.03 | 0.58 | 0.38 | 0.06 | 0.61 | 0.34 | 0.10 | 0.65 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.04 | 0.56 | 0.39 | 0.08 | 0.60 | 0.35 | 0.11 | 0.63 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | - | - | - | 0.47 | 0.01 | 0.52 | 0.44 | 0.05 | 0.55 | 0.40 | 0.09 | 0.58 | 0.36 | 0.13 | 0.61 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | - | - | - | 0.48 | 0.02 | 0.50 | 0.44 | 0.06 | 0.53 | 0.40 | 0.10 | 0.57 | 0.37 | 0.14 | 0.60 |
| 3.5 | 110.4 | - | - | - | - | - | - | 0.48 | 0.03 | 0.49 | 0.44 | 0.07 | 0.52 | 0.41 | 0.11 | 0.55 | 0.37 | 0.15 | 0.58 |
| 4.0 | 126.1 | - | - | - | - | - | - | 0.48 | 0.04 | 0.47 | 0.45 | 0.08 | 0.50 | 0.41 | 0.12 | 0.53 | 0.38 | 0.16 | 0.57 |
| 4.5 | 141.9 | - | - | - | 0.52 | 0.01 | 0.43 | 0.49 | 0.05 | 0.46 | 0.45 | 0.09 | 0.49 | 0.42 | 0.13 | 0.52 | 0.38 | 0.17 | 0.55 |
| 5.0 | 157.7 | - | - | - | 0.52 | 0.02 | 0.41 | 0.49 | 0.06 | 0.44 | 0.46 | 0.10 | 0.47 | 0.42 | 0.14 | 0.50 | 0.39 | 0.18 | 0.53 |
| 5.5 | 173.4 | - | - | - | 0.53 | 0.03 | 0.40 | 0.49 | 0.07 | 0.43 | 0.46 | 0.11 | 0.46 | 0.42 | 0.15 | 0.49 | 0.39 | 0.19 | 0.52 |
| 6.0 | 189.2 | - | - | - | 0.53 | 0.04 | 0.38 | 0.49 | 0.08 | 0.41 | 0.46 | 0.12 | 0.44 | 0.43 | 0.16 | 0.47 | 0.39 | 0.21 | 0.50 |
| 6.5 | 205.0 | 0.56 | 0.01 | 0.34 | 0.53 | 0.05 | 0.37 | 0.50 | 0.09 | 0.40 | 0.46 | 0.13 | 0.43 | 0.43 | 0.18 | 0.45 | 0.40 | 0.22 | 0.48 |
| 7.0 | 220.8 | 0.56 | 0.02 | 0.32 | 0.53 | 0.06 | 0.35 | 0.50 | 0.10 | 0.38 | 0.46 | 0.15 | 0.41 | 0.43 | 0.19 | 0.44 | 0.40 | 0.23 | 0.47 |
| 7.5 | 236.5 | 0.56 | 0.03 | 0.31 | 0.53 | 0.07 | 0.34 | 0.50 | 0.12 | 0.36 | 0.46 | 0.16 | 0.39 | 0.43 | 0.20 | 0.42 | 0.40 | 0.24 | 0.45 |
| 8.0 | 252.3 | 0.56 | 0.04 | 0.29 | 0.53 | 0.09 | 0.32 | 0.50 | 0.13 | 0.35 | 0.46 | 0.17 | 0.38 | 0.43 | 0.21 | 0.40 | 0.40 | 0.25 | 0.43 |
| 8.5 | 268.1 | 0.56 | 0.05 | 0.27 | 0.53 | 0.10 | 0.30 | 0.50 | 0.14 | 0.33 | 0.46 | 0.18 | 0.36 | 0.43 | 0.23 | 0.39 | 0.40 | 0.27 | 0.41 |
| 9.0 | 283.8 | 0.55 | 0.07 | 0.26 | 0.52 | 0.11 | 0.29 | 0.49 | 0.15 | 0.31 | 0.46 | 0.19 | 0.34 | 0.43 | 0.24 | 0.37 | 0.40 | 0.28 | 0.39 |
| 9.5 | 299.6 | 0.55 | 0.08 | 0.24 | 0.52 | 0.12 | 0.27 | 0.49 | 0.16 | 0.30 | 0.46 | 0.21 | 0.32 | 0.43 | 0.25 | 0.35 | 0.40 | 0.29 | 0.38 |
| 10.0 | 315.4 | 0.55 | 0.09 | 0.22 | 0.52 | 0.13 | 0.25 | 0.49 | 0.18 | 0.28 | 0.46 | 0.22 | 0.30 | 0.43 | 0.27 | 0.33 | 0.40 | 0.31 | 0.36 |
| 10.5 | 331.1 | 0.55 | 0.10 | 0.20 | 0.52 | 0.15 | 0.23 | 0.49 | 0.19 | 0.26 | 0.46 | 0.24 | 0.28 | 0.43 | 0.28 | 0.31 | 0.40 | 0.32 | 0.33 |
| 11.0 | 346.9 | 0.54 | 0.12 | 0.19 | 0.51 | 0.16 | 0.21 | 0.48 | 0.21 | 0.24 | 0.45 | 0.25 | 0.26 | 0.42 | 0.29 | 0.29 | 0.39 | 0.34 | 0.31 |
| 11.5 | 362.7 | 0.54 | 0.13 | 0.17 | 0.51 | 0.18 | 0.19 | 0.48 | 0.22 | 0.22 | 0.45 | 0.26 | 0.24 | 0.42 | 0.31 | 0.27 | 0.39 | 0.36 | 0.29 |

表D.0.6 C50水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.2）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*= 0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | 0.31 | 0.02 | 0.49 | 0.29 | 0.06 | 0.53 | 0.26 | 0.09 | 0.57 | 0.23 | 0.12 | 0.62 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.32 | 0.04 | 0.47 | 0.29 | 0.07 | 0.51 | 0.27 | 0.11 | 0.55 | 0.24 | 0.14 | 0.59 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | 0.35 | 0.02 | 0.41 | 0.32 | 0.05 | 0.45 | 0.30 | 0.09 | 0.49 | 0.27 | 0.12 | 0.53 | 0.24 | 0.16 | 0.57 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | 0.35 | 0.03 | 0.39 | 0.32 | 0.07 | 0.43 | 0.30 | 0.10 | 0.47 | 0.27 | 0.14 | 0.51 | 0.25 | 0.17 | 0.55 |
| 2.5 | 78.8 | 0.37 | 0.01 | 0.33 | 0.35 | 0.05 | 0.37 | 0.32 | 0.08 | 0.41 | 0.30 | 0.12 | 0.45 | 0.28 | 0.15 | 0.48 | 0.25 | 0.19 | 0.52 |
| 3.0 | 94.6 | 0.37 | 0.03 | 0.31 | 0.35 | 0.07 | 0.35 | 0.33 | 0.10 | 0.38 | 0.30 | 0.14 | 0.42 | 0.28 | 0.17 | 0.46 | 0.26 | 0.21 | 0.50 |
| 3.5 | 110.4 | 0.37 | 0.05 | 0.29 | 0.35 | 0.08 | 0.32 | 0.33 | 0.12 | 0.36 | 0.30 | 0.15 | 0.40 | 0.28 | 0.19 | 0.44 | 0.26 | 0.22 | 0.48 |
| 4.0 | 126.1 | 0.37 | 0.06 | 0.26 | 0.35 | 0.10 | 0.30 | 0.33 | 0.13 | 0.34 | 0.30 | 0.17 | 0.38 | 0.28 | 0.20 | 0.41 | 0.26 | 0.24 | 0.45 |
| 4.5 | 141.9 | 0.36 | 0.08 | 0.24 | 0.35 | 0.12 | 0.28 | 0.33 | 0.15 | 0.31 | 0.30 | 0.19 | 0.35 | 0.28 | 0.22 | 0.39 | 0.26 | 0.26 | 0.43 |
| 5.0 | 157.7 | 0.36 | 0.10 | 0.21 | 0.34 | 0.13 | 0.25 | 0.32 | 0.17 | 0.29 | 0.30 | 0.20 | 0.33 | 0.28 | 0.24 | 0.36 | 0.26 | 0.28 | 0.40 |
| 5.5 | 173.4 | 0.36 | 0.12 | 0.19 | 0.34 | 0.15 | 0.23 | 0.32 | 0.19 | 0.26 | 0.30 | 0.22 | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.34 | 0.26 | 0.29 | 0.38 |
| 6.0 | 189.2 | 0.35 | 0.14 | 0.16 | 0.34 | 0.17 | 0.20 | 0.32 | 0.21 | 0.24 | 0.30 | 0.24 | 0.27 | 0.28 | 0.28 | 0.31 | 0.26 | 0.31 | 0.35 |
| 6.5 | 205.0 | 0.35 | 0.16 | 0.13 | 0.33 | 0.19 | 0.17 | 0.31 | 0.23 | 0.21 | 0.30 | 0.26 | 0.24 | 0.28 | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.33 | 0.32 |
| 7.0 | 220.8 | 0.34 | 0.18 | 0.10 | 0.32 | 0.21 | 0.14 | 0.31 | 0.25 | 0.18 | 0.29 | 0.28 | 0.21 | 0.27 | 0.32 | 0.25 | 0.25 | 0.36 | 0.29 |
| 7.5 | 236.5 | 0.33 | 0.20 | 0.07 | 0.32 | 0.24 | 0.11 | 0.30 | 0.27 | 0.14 | 0.28 | 0.31 | 0.18 | 0.27 | 0.34 | 0.22 | 0.25 | 0.38 | 0.26 |
| 8.0 | 252.3 | 0.32 | 0.23 | 0.03 | 0.31 | 0.26 | 0.07 | 0.29 | 0.30 | 0.11 | 0.28 | 0.33 | 0.15 | 0.26 | 0.37 | 0.19 | 0.24 | 0.40 | 0.22 |
| 8.5 | 268.1 | - | - | - | 0.30 | 0.29 | 0.03 | 0.28 | 0.32 | 0.07 | 0.27 | 0.36 | 0.11 | 0.25 | 0.39 | 0.15 | 0.24 | 0.43 | 0.19 |
| 9.0 | 283.8 | - | - | - | - | - | - | 0.27 | 0.36 | 0.03 | 0.26 | 0.39 | 0.07 | 0.24 | 0.42 | 0.11 | 0.23 | 0.46 | 0.14 |
| 9.5 | 299.6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.24 | 0.43 | 0.02 | 0.23 | 0.46 | 0.06 | 0.21 | 0.49 | 0.10 |
| 10.0 | 315.4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.20 | 0.54 | 0.04 |

表D.0.7 C45水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.2）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | 0.35 | 0.01 | 0.51 | 0.32 | 0.04 | 0.55 | 0.29 | 0.08 | 0.59 | 0.26 | 0.11 | 0.63 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.35 | 0.02 | 0.50 | 0.32 | 0.06 | 0.53 | 0.29 | 0.09 | 0.57 | 0.26 | 0.13 | 0.61 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | 0.36 | 0.04 | 0.48 | 0.33 | 0.07 | 0.51 | 0.30 | 0.11 | 0.55 | 0.27 | 0.14 | 0.59 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | 0.38 | 0.01 | 0.42 | 0.36 | 0.05 | 0.46 | 0.33 | 0.09 | 0.49 | 0.30 | 0.12 | 0.53 | 0.27 | 0.16 | 0.57 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | 0.39 | 0.03 | 0.40 | 0.36 | 0.07 | 0.43 | 0.33 | 0.10 | 0.47 | 0.31 | 0.14 | 0.51 | 0.28 | 0.17 | 0.55 |
| 3.0 | 94.6 | 0.41 | 0.01 | 0.34 | 0.39 | 0.04 | 0.38 | 0.36 | 0.08 | 0.41 | 0.34 | 0.12 | 0.45 | 0.31 | 0.15 | 0.49 | 0.28 | 0.19 | 0.52 |
| 3.5 | 110.4 | 0.41 | 0.02 | 0.32 | 0.39 | 0.06 | 0.36 | 0.36 | 0.09 | 0.39 | 0.34 | 0.13 | 0.43 | 0.31 | 0.17 | 0.47 | 0.29 | 0.20 | 0.50 |
| 4.0 | 126.1 | 0.41 | 0.04 | 0.30 | 0.39 | 0.07 | 0.34 | 0.36 | 0.11 | 0.37 | 0.34 | 0.15 | 0.41 | 0.31 | 0.18 | 0.44 | 0.29 | 0.22 | 0.48 |
| 4.5 | 141.9 | 0.41 | 0.05 | 0.28 | 0.39 | 0.09 | 0.31 | 0.36 | 0.13 | 0.35 | 0.34 | 0.16 | 0.39 | 0.32 | 0.20 | 0.42 | 0.29 | 0.24 | 0.46 |
| 5.0 | 157.7 | 0.41 | 0.07 | 0.26 | 0.39 | 0.10 | 0.29 | 0.36 | 0.14 | 0.33 | 0.34 | 0.18 | 0.36 | 0.32 | 0.22 | 0.40 | 0.29 | 0.25 | 0.43 |
| 5.5 | 173.4 | 0.41 | 0.08 | 0.23 | 0.38 | 0.12 | 0.27 | 0.36 | 0.16 | 0.30 | 0.34 | 0.20 | 0.34 | 0.32 | 0.23 | 0.37 | 0.29 | 0.27 | 0.41 |
| 6.0 | 189.2 | 0.40 | 0.10 | 0.21 | 0.38 | 0.14 | 0.25 | 0.36 | 0.18 | 0.28 | 0.34 | 0.21 | 0.31 | 0.32 | 0.25 | 0.35 | 0.29 | 0.29 | 0.38 |
| 6.5 | 205.0 | 0.40 | 0.12 | 0.19 | 0.38 | 0.16 | 0.22 | 0.36 | 0.19 | 0.25 | 0.34 | 0.23 | 0.29 | 0.31 | 0.27 | 0.32 | 0.29 | 0.31 | 0.36 |
| 7.0 | 220.8 | 0.39 | 0.14 | 0.16 | 0.37 | 0.17 | 0.19 | 0.35 | 0.21 | 0.23 | 0.33 | 0.25 | 0.26 | 0.31 | 0.29 | 0.30 | 0.29 | 0.33 | 0.33 |
| 7.5 | 236.5 | 0.39 | 0.16 | 0.13 | 0.37 | 0.19 | 0.17 | 0.35 | 0.23 | 0.20 | 0.33 | 0.27 | 0.24 | 0.31 | 0.31 | 0.27 | 0.29 | 0.35 | 0.30 |
| 8.0 | 252.3 | 0.38 | 0.18 | 0.10 | 0.36 | 0.21 | 0.14 | 0.34 | 0.25 | 0.17 | 0.32 | 0.29 | 0.21 | 0.30 | 0.33 | 0.24 | 0.28 | 0.37 | 0.27 |
| 8.5 | 268.1 | 0.37 | 0.20 | 0.07 | 0.35 | 0.24 | 0.11 | 0.34 | 0.27 | 0.14 | 0.32 | 0.31 | 0.17 | 0.30 | 0.35 | 0.21 | 0.28 | 0.39 | 0.24 |
| 9.0 | 283.8 | 0.36 | 0.23 | 0.03 | 0.34 | 0.26 | 0.07 | 0.33 | 0.30 | 0.11 | 0.31 | 0.34 | 0.14 | 0.29 | 0.38 | 0.17 | 0.27 | 0.41 | 0.21 |
| 9.5 | 299.6 | - | - | - | 0.33 | 0.29 | 0.03 | 0.32 | 0.33 | 0.07 | 0.30 | 0.36 | 0.10 | 0.28 | 0.40 | 0.14 | 0.26 | 0.44 | 0.17 |
| 10.0 | 315.4 | - | - | - | - | - | - | 0.30 | 0.36 | 0.02 | 0.29 | 0.40 | 0.06 | 0.27 | 0.43 | 0.09 | 0.25 | 0.47 | 0.13 |
| 10.5 | 331.1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.27 | 0.43 | 0.01 | 0.25 | 0.47 | 0.04 | 0.23 | 0.51 | 0.07 |

表D.0.8 C40水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.2）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.34 | 0.03 | 0.57 | 0.31 | 0.07 | 0.61 | 0.28 | 0.10 | 0.64 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.38 | 0.01 | 0.51 | 0.35 | 0.05 | 0.55 | 0.32 | 0.08 | 0.59 | 0.28 | 0.12 | 0.62 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | 0.39 | 0.02 | 0.50 | 0.35 | 0.06 | 0.53 | 0.32 | 0.10 | 0.57 | 0.29 | 0.13 | 0.60 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | 0.39 | 0.04 | 0.48 | 0.36 | 0.07 | 0.51 | 0.33 | 0.11 | 0.55 | 0.30 | 0.15 | 0.58 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | 0.42 | 0.01 | 0.42 | 0.39 | 0.05 | 0.46 | 0.36 | 0.09 | 0.49 | 0.33 | 0.12 | 0.53 | 0.30 | 0.16 | 0.56 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | 0.42 | 0.02 | 0.40 | 0.40 | 0.06 | 0.44 | 0.37 | 0.10 | 0.47 | 0.34 | 0.14 | 0.51 | 0.31 | 0.18 | 0.54 |
| 3.5 | 110.4 | - | - | - | 0.42 | 0.04 | 0.38 | 0.40 | 0.08 | 0.42 | 0.37 | 0.11 | 0.45 | 0.34 | 0.15 | 0.49 | 0.31 | 0.19 | 0.52 |
| 4.0 | 126.1 | 0.45 | 0.01 | 0.33 | 0.43 | 0.05 | 0.36 | 0.40 | 0.09 | 0.40 | 0.37 | 0.13 | 0.43 | 0.34 | 0.17 | 0.47 | 0.32 | 0.20 | 0.50 |
| 4.5 | 141.9 | 0.45 | 0.03 | 0.31 | 0.43 | 0.07 | 0.34 | 0.40 | 0.11 | 0.38 | 0.37 | 0.14 | 0.41 | 0.35 | 0.18 | 0.45 | 0.32 | 0.22 | 0.48 |
| 5.0 | 157.7 | 0.45 | 0.04 | 0.29 | 0.43 | 0.08 | 0.32 | 0.40 | 0.12 | 0.36 | 0.37 | 0.16 | 0.39 | 0.35 | 0.20 | 0.42 | 0.32 | 0.24 | 0.46 |
| 5.5 | 173.4 | 0.45 | 0.06 | 0.27 | 0.42 | 0.10 | 0.30 | 0.40 | 0.14 | 0.34 | 0.37 | 0.17 | 0.37 | 0.35 | 0.21 | 0.40 | 0.32 | 0.25 | 0.44 |
| 6.0 | 189.2 | 0.45 | 0.07 | 0.25 | 0.42 | 0.11 | 0.28 | 0.40 | 0.15 | 0.31 | 0.37 | 0.19 | 0.35 | 0.35 | 0.23 | 0.38 | 0.32 | 0.27 | 0.41 |
| 6.5 | 205.0 | 0.44 | 0.09 | 0.23 | 0.42 | 0.13 | 0.26 | 0.40 | 0.17 | 0.29 | 0.37 | 0.21 | 0.32 | 0.35 | 0.25 | 0.36 | 0.32 | 0.28 | 0.39 |
| 7.0 | 220.8 | 0.44 | 0.10 | 0.20 | 0.42 | 0.14 | 0.24 | 0.39 | 0.18 | 0.27 | 0.37 | 0.22 | 0.30 | 0.35 | 0.26 | 0.33 | 0.32 | 0.30 | 0.37 |
| 7.5 | 236.5 | 0.44 | 0.12 | 0.18 | 0.41 | 0.16 | 0.21 | 0.39 | 0.20 | 0.24 | 0.37 | 0.24 | 0.28 | 0.34 | 0.28 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.34 |
| 8.0 | 252.3 | 0.43 | 0.14 | 0.15 | 0.41 | 0.18 | 0.19 | 0.39 | 0.22 | 0.22 | 0.36 | 0.26 | 0.25 | 0.34 | 0.30 | 0.28 | 0.32 | 0.34 | 0.31 |
| 8.5 | 268.1 | 0.42 | 0.16 | 0.13 | 0.40 | 0.20 | 0.16 | 0.38 | 0.24 | 0.19 | 0.36 | 0.28 | 0.22 | 0.34 | 0.32 | 0.25 | 0.31 | 0.36 | 0.28 |
| 9.0 | 283.8 | 0.42 | 0.18 | 0.10 | 0.40 | 0.22 | 0.13 | 0.37 | 0.26 | 0.16 | 0.35 | 0.30 | 0.19 | 0.33 | 0.34 | 0.22 | 0.31 | 0.38 | 0.25 |
| 9.5 | 299.6 | 0.41 | 0.20 | 0.07 | 0.39 | 0.24 | 0.10 | 0.37 | 0.28 | 0.13 | 0.34 | 0.32 | 0.16 | 0.32 | 0.36 | 0.19 | 0.30 | 0.40 | 0.22 |
| 10.0 | 315.4 | 0.39 | 0.23 | 0.03 | 0.38 | 0.27 | 0.07 | 0.36 | 0.31 | 0.10 | 0.34 | 0.35 | 0.13 | 0.31 | 0.39 | 0.16 | 0.29 | 0.43 | 0.19 |
| 10.5 | 331.1 | - | - | - | 0.36 | 0.29 | 0.03 | 0.34 | 0.33 | 0.06 | 0.32 | 0.37 | 0.09 | 0.30 | 0.42 | 0.12 | 0.28 | 0.46 | 0.15 |
| 11.0 | 346.9 | - | - | - | - | - | - | 0.33 | 0.36 | 0.01 | 0.31 | 0.41 | 0.04 | 0.29 | 0.45 | 0.07 | 0.27 | 0.49 | 0.10 |
| 11.5 | 362.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.27 | 0.49 | 0.01 | 0.24 | 0.54 | 0.04 |

表D.0.9 C35水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.2）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.37 | 0.02 | 0.59 | 0.34 | 0.06 | 0.62 | 0.30 | 0.09 | 0.66 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.38 | 0.03 | 0.57 | 0.35 | 0.07 | 0.60 | 0.31 | 0.11 | 0.64 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | 0.42 | 0.01 | 0.52 | 0.39 | 0.04 | 0.55 | 0.35 | 0.08 | 0.59 | 0.32 | 0.12 | 0.62 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.02 | 0.50 | 0.39 | 0.06 | 0.53 | 0.36 | 0.10 | 0.57 | 0.32 | 0.13 | 0.60 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.03 | 0.48 | 0.40 | 0.07 | 0.51 | 0.36 | 0.11 | 0.55 | 0.33 | 0.15 | 0.58 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.04 | 0.46 | 0.40 | 0.08 | 0.50 | 0.37 | 0.12 | 0.53 | 0.34 | 0.16 | 0.56 |
| 3.5 | 110.4 | - | - | - | 0.47 | 0.01 | 0.43 | 0.44 | 0.06 | 0.45 | 0.41 | 0.10 | 0.48 | 0.37 | 0.14 | 0.51 | 0.34 | 0.17 | 0.54 |
| 4.0 | 126.1 | - | - | - | 0.47 | 0.02 | 0.41 | 0.44 | 0.07 | 0.43 | 0.41 | 0.11 | 0.46 | 0.38 | 0.15 | 0.49 | 0.35 | 0.19 | 0.53 |
| 4.5 | 141.9 | - | - | - | 0.47 | 0.03 | 0.40 | 0.44 | 0.08 | 0.41 | 0.41 | 0.12 | 0.44 | 0.38 | 0.16 | 0.47 | 0.35 | 0.20 | 0.51 |
| 5.0 | 157.7 | - | - | - | 0.47 | 0.04 | 0.38 | 0.44 | 0.10 | 0.39 | 0.41 | 0.14 | 0.42 | 0.38 | 0.18 | 0.45 | 0.35 | 0.22 | 0.49 |
| 5.5 | 173.4 | 0.50 | 0.02 | 0.33 | 0.47 | 0.06 | 0.36 | 0.44 | 0.11 | 0.37 | 0.41 | 0.15 | 0.40 | 0.38 | 0.19 | 0.43 | 0.35 | 0.23 | 0.46 |
| 6.0 | 189.2 | 0.50 | 0.03 | 0.31 | 0.47 | 0.07 | 0.34 | 0.44 | 0.13 | 0.35 | 0.41 | 0.17 | 0.38 | 0.39 | 0.21 | 0.41 | 0.36 | 0.25 | 0.44 |
| 6.5 | 205.0 | 0.50 | 0.04 | 0.29 | 0.47 | 0.08 | 0.32 | 0.44 | 0.14 | 0.33 | 0.41 | 0.18 | 0.36 | 0.39 | 0.22 | 0.39 | 0.36 | 0.26 | 0.42 |
| 7.0 | 220.8 | 0.50 | 0.06 | 0.27 | 0.47 | 0.10 | 0.30 | 0.44 | 0.15 | 0.31 | 0.41 | 0.20 | 0.34 | 0.39 | 0.24 | 0.37 | 0.36 | 0.28 | 0.40 |
| 7.5 | 236.5 | 0.49 | 0.07 | 0.25 | 0.47 | 0.11 | 0.28 | 0.44 | 0.17 | 0.29 | 0.41 | 0.21 | 0.32 | 0.38 | 0.25 | 0.35 | 0.36 | 0.29 | 0.38 |
| 8.0 | 252.3 | 0.49 | 0.09 | 0.23 | 0.47 | 0.13 | 0.26 | 0.44 | 0.19 | 0.27 | 0.41 | 0.23 | 0.30 | 0.38 | 0.27 | 0.32 | 0.35 | 0.31 | 0.35 |
| 8.5 | 268.1 | 0.49 | 0.10 | 0.21 | 0.46 | 0.14 | 0.24 | 0.43 | 0.20 | 0.24 | 0.41 | 0.24 | 0.27 | 0.38 | 0.29 | 0.30 | 0.35 | 0.33 | 0.33 |
| 9.0 | 283.8 | 0.48 | 0.12 | 0.18 | 0.46 | 0.16 | 0.21 | 0.43 | 0.22 | 0.22 | 0.40 | 0.26 | 0.25 | 0.38 | 0.30 | 0.27 | 0.35 | 0.35 | 0.30 |
| 9.5 | 299.6 | 0.48 | 0.14 | 0.16 | 0.45 | 0.18 | 0.19 | 0.42 | 0.24 | 0.19 | 0.40 | 0.28 | 0.22 | 0.37 | 0.32 | 0.25 | 0.34 | 0.37 | 0.27 |
| 10.0 | 315.4 | 0.47 | 0.15 | 0.13 | 0.45 | 0.20 | 0.16 | 0.42 | 0.26 | 0.17 | 0.39 | 0.30 | 0.19 | 0.36 | 0.34 | 0.22 | 0.34 | 0.39 | 0.25 |
| 10.5 | 331.1 | 0.46 | 0.17 | 0.11 | 0.44 | 0.21 | 0.14 | 0.41 | 0.28 | 0.14 | 0.38 | 0.32 | 0.16 | 0.36 | 0.37 | 0.19 | 0.33 | 0.41 | 0.21 |
| 11.0 | 346.9 | 0.45 | 0.19 | 0.08 | 0.43 | 0.24 | 0.11 | 0.40 | 0.30 | 0.10 | 0.37 | 0.35 | 0.13 | 0.35 | 0.39 | 0.15 | 0.32 | 0.44 | 0.18 |
| 11.5 | 362.7 | 0.44 | 0.22 | 0.05 | 0.42 | 0.26 | 0.08 | 0.38 | 0.33 | 0.07 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 12.0 | 378.4 | 0.43 | 0.24 | 0.01 | 0.41 | 0.28 | 0.04 | 0.37 | 0.36 | 0.02 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

表D.0.10 C30水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.2）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*= 0.55 | | | *n*=0.6 | | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.41 | 0.01 | 0.61 | 0.37 | 0.04 | 0.64 | 0.33 | | 0.08 | 0.67 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.42 | 0.02 | 0.59 | 0.38 | 0.06 | 0.62 | 0.34 | | 0.09 | 0.66 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.03 | 0.57 | 0.39 | 0.07 | 0.61 | 0.35 | | 0.11 | 0.64 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.04 | 0.56 | 0.39 | 0.08 | 0.59 | 0.36 | | 0.12 | 0.62 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | - | - | - | 0.48 | 0.01 | 0.51 | 0.44 | 0.05 | 0.54 | 0.40 | 0.09 | 0.57 | 0.36 | | 0.13 | 0.60 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | - | - | - | 0.48 | 0.03 | 0.49 | 0.44 | 0.07 | 0.52 | 0.41 | 0.11 | 0.55 | 0.37 | | 0.14 | 0.59 |
| 3.5 | 110.4 | - | - | - | - | - | - | 0.48 | 0.04 | 0.47 | 0.45 | 0.08 | 0.51 | 0.41 | 0.12 | 0.54 | 0.38 | | 0.16 | 0.57 |
| 4.0 | 126.1 | - | - | - | 0.52 | 0.01 | 0.43 | 0.49 | 0.05 | 0.46 | 0.45 | 0.09 | 0.49 | 0.42 | 0.13 | 0.52 | 0.38 | | 0.17 | 0.55 |
| 4.5 | 141.9 | - | - | - | 0.52 | 0.02 | 0.41 | 0.49 | 0.06 | 0.44 | 0.46 | 0.10 | 0.47 | 0.42 | 0.14 | 0.50 | 0.39 | | 0.18 | 0.53 |
| 5.0 | 157.7 | - | - | - | 0.53 | 0.03 | 0.39 | 0.49 | 0.07 | 0.42 | 0.46 | 0.11 | 0.45 | 0.42 | 0.16 | 0.48 | 0.39 | | 0.20 | 0.51 |
| 5.5 | 173.4 | - | - | - | 0.53 | 0.04 | 0.38 | 0.49 | 0.09 | 0.41 | 0.46 | 0.13 | 0.44 | 0.43 | 0.17 | 0.47 | 0.39 | | 0.21 | 0.50 |
| 6.0 | 189.2 | 0.56 | 0.01 | 0.33 | 0.53 | 0.06 | 0.36 | 0.50 | 0.10 | 0.39 | 0.46 | 0.14 | 0.42 | 0.43 | 0.18 | 0.45 | 0.40 | | 0.22 | 0.48 |
| 6.5 | 205.0 | 0.56 | 0.03 | 0.31 | 0.53 | 0.07 | 0.34 | 0.50 | 0.11 | 0.37 | 0.46 | 0.15 | 0.40 | 0.43 | 0.20 | 0.43 | 0.40 | | 0.24 | 0.46 |
| 7.0 | 220.8 | 0.56 | 0.04 | 0.30 | 0.53 | 0.08 | 0.32 | 0.50 | 0.12 | 0.35 | 0.46 | 0.17 | 0.38 | 0.43 | 0.21 | 0.41 | 0.40 | | 0.25 | 0.44 |
| 7.5 | 236.5 | 0.56 | 0.05 | 0.28 | 0.53 | 0.09 | 0.31 | 0.50 | 0.14 | 0.33 | 0.46 | 0.18 | 0.36 | 0.43 | 0.22 | 0.39 | 0.40 | | 0.27 | 0.42 |
| 8.0 | 252.3 | 0.55 | 0.07 | 0.26 | 0.52 | 0.11 | 0.29 | 0.49 | 0.15 | 0.31 | 0.46 | 0.19 | 0.34 | 0.43 | 0.24 | 0.37 | 0.40 | | 0.28 | 0.40 |
| 8.5 | 268.1 | 0.55 | 0.08 | 0.24 | 0.52 | 0.12 | 0.27 | 0.49 | 0.17 | 0.29 | 0.46 | 0.21 | 0.32 | 0.43 | 0.25 | 0.35 | 0.40 | | 0.30 | 0.37 |
| 9.0 | 283.8 | 0.55 | 0.09 | 0.22 | 0.52 | 0.14 | 0.25 | 0.49 | 0.18 | 0.27 | 0.46 | 0.22 | 0.30 | 0.43 | 0.27 | 0.33 | 0.40 | | 0.31 | 0.35 |
| 9.5 | 299.6 | 0.54 | 0.11 | 0.20 | 0.52 | 0.15 | 0.23 | 0.49 | 0.20 | 0.25 | 0.46 | 0.24 | 0.28 | 0.43 | 0.28 | 0.30 | 0.40 | | 0.33 | 0.33 |
| 10.0 | 315.4 | 0.54 | 0.12 | 0.18 | 0.51 | 0.17 | 0.20 | 0.48 | 0.21 | 0.23 | 0.45 | 0.26 | 0.25 | 0.42 | 0.30 | 0.28 | 0.39 | | 0.35 | 0.30 |
| 10.5 | 331.1 | 0.53 | 0.14 | 0.15 | 0.51 | 0.18 | 0.18 | 0.48 | 0.23 | 0.21 | 0.45 | 0.27 | 0.23 | 0.42 | 0.32 | 0.25 | 0.39 | | 0.36 | 0.28 |
| 11.0 | 346.9 | 0.53 | 0.16 | 0.13 | 0.50 | 0.20 | 0.16 | 0.47 | 0.25 | 0.18 | 0.44 | 0.29 | 0.20 | 0.41 | 0.34 | 0.23 | 0.38 | | 0.38 | 0.25 |

表D.0.11 C50水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.15）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | 0.31 | 0.02 | 0.49 | 0.29 | 0.06 | 0.53 | 0.26 | 0.09 | 0.57 | 0.23 | 0.12 | 0.61 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.32 | 0.04 | 0.47 | 0.29 | 0.07 | 0.51 | 0.27 | 0.11 | 0.55 | 0.24 | 0.14 | 0.59 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | 0.35 | 0.02 | 0.41 | 0.32 | 0.06 | 0.45 | 0.30 | 0.09 | 0.49 | 0.27 | 0.13 | 0.53 | 0.25 | 0.16 | 0.57 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | 0.35 | 0.04 | 0.38 | 0.32 | 0.07 | 0.42 | 0.30 | 0.11 | 0.46 | 0.28 | 0.14 | 0.50 | 0.25 | 0.18 | 0.54 |
| 2.5 | 78.8 | 0.37 | 0.02 | 0.32 | 0.35 | 0.06 | 0.36 | 0.33 | 0.09 | 0.40 | 0.30 | 0.13 | 0.44 | 0.28 | 0.16 | 0.48 | 0.25 | 0.19 | 0.52 |
| 3.0 | 94.6 | 0.37 | 0.04 | 0.30 | 0.35 | 0.07 | 0.34 | 0.33 | 0.11 | 0.38 | 0.30 | 0.14 | 0.41 | 0.28 | 0.18 | 0.45 | 0.26 | 0.21 | 0.49 |
| 3.5 | 110.4 | 0.37 | 0.05 | 0.27 | 0.35 | 0.09 | 0.31 | 0.33 | 0.13 | 0.35 | 0.30 | 0.16 | 0.39 | 0.28 | 0.20 | 0.43 | 0.26 | 0.23 | 0.47 |
| 4.0 | 126.1 | 0.37 | 0.07 | 0.25 | 0.35 | 0.11 | 0.29 | 0.33 | 0.14 | 0.33 | 0.30 | 0.18 | 0.36 | 0.28 | 0.21 | 0.40 | 0.26 | 0.25 | 0.44 |
| 4.5 | 141.9 | 0.36 | 0.09 | 0.22 | 0.34 | 0.13 | 0.26 | 0.32 | 0.16 | 0.30 | 0.30 | 0.20 | 0.34 | 0.28 | 0.23 | 0.37 | 0.26 | 0.27 | 0.41 |
| 5.0 | 157.7 | 0.36 | 0.11 | 0.20 | 0.34 | 0.15 | 0.23 | 0.32 | 0.18 | 0.27 | 0.30 | 0.22 | 0.31 | 0.28 | 0.25 | 0.35 | 0.26 | 0.29 | 0.39 |
| 5.5 | 173.4 | 0.35 | 0.13 | 0.17 | 0.34 | 0.17 | 0.21 | 0.32 | 0.20 | 0.24 | 0.30 | 0.24 | 0.28 | 0.28 | 0.27 | 0.32 | 0.26 | 0.31 | 0.36 |
| 6.0 | 189.2 | 0.35 | 0.15 | 0.14 | 0.33 | 0.19 | 0.18 | 0.31 | 0.22 | 0.21 | 0.30 | 0.26 | 0.25 | 0.28 | 0.29 | 0.29 | 0.26 | 0.33 | 0.33 |
| 6.5 | 205.0 | 0.34 | 0.18 | 0.10 | 0.33 | 0.21 | 0.14 | 0.31 | 0.25 | 0.18 | 0.29 | 0.28 | 0.22 | 0.27 | 0.32 | 0.26 | 0.25 | 0.35 | 0.29 |
| 7.0 | 220.8 | 0.33 | 0.20 | 0.07 | 0.32 | 0.24 | 0.11 | 0.30 | 0.27 | 0.15 | 0.29 | 0.31 | 0.19 | 0.27 | 0.34 | 0.22 | 0.25 | 0.38 | 0.26 |
| 7.5 | 236.5 | 0.32 | 0.23 | 0.03 | 0.31 | 0.26 | 0.07 | 0.29 | 0.30 | 0.11 | 0.28 | 0.33 | 0.15 | 0.26 | 0.37 | 0.19 | 0.24 | 0.40 | 0.22 |
| 8.0 | 252.3 | - | - | - | 0.30 | 0.29 | 0.03 | 0.28 | 0.33 | 0.07 | 0.27 | 0.36 | 0.11 | 0.25 | 0.40 | 0.15 | 0.24 | 0.43 | 0.18 |
| 8.5 | 268.1 | - | - | - | - | - | - | 0.27 | 0.36 | 0.02 | 0.26 | 0.39 | 0.06 | 0.24 | 0.43 | 0.10 | 0.23 | 0.46 | 0.14 |
| 9.0 | 283.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.24 | 0.43 | 0.01 | 0.23 | 0.47 | 0.05 | 0.21 | 0.50 | 0.09 |
| 9.5 | 299.6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.19 | 0.55 | 0.02 |

表D.0.12 C45水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.15）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.6 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | 0.35 | 0.01 | 0.51 | 0.32 | 0.04 | 0.55 | 0.29 | 0.08 | 0.59 | 0.26 | 0.11 | 0.63 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.35 | 0.02 | 0.49 | 0.32 | 0.06 | 0.53 | 0.29 | 0.09 | 0.57 | 0.26 | 0.13 | 0.61 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | 0.36 | 0.04 | 0.47 | 0.33 | 0.08 | 0.51 | 0.30 | 0.11 | 0.55 | 0.27 | 0.15 | 0.59 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | 0.39 | 0.02 | 0.41 | 0.36 | 0.05 | 0.45 | 0.33 | 0.09 | 0.49 | 0.30 | 0.13 | 0.52 | 0.28 | 0.16 | 0.56 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | 0.39 | 0.03 | 0.39 | 0.36 | 0.07 | 0.43 | 0.34 | 0.11 | 0.46 | 0.31 | 0.14 | 0.50 | 0.28 | 0.18 | 0.54 |
| 3.0 | 94.6 | 0.41 | 0.01 | 0.33 | 0.39 | 0.05 | 0.37 | 0.36 | 0.09 | 0.41 | 0.34 | 0.12 | 0.44 | 0.31 | 0.16 | 0.48 | 0.28 | 0.19 | 0.52 |
| 3.5 | 110.4 | 0.41 | 0.03 | 0.31 | 0.39 | 0.06 | 0.35 | 0.36 | 0.10 | 0.38 | 0.34 | 0.14 | 0.42 | 0.31 | 0.18 | 0.46 | 0.29 | 0.21 | 0.49 |
| 4.0 | 126.1 | 0.41 | 0.04 | 0.29 | 0.39 | 0.08 | 0.32 | 0.36 | 0.12 | 0.36 | 0.34 | 0.16 | 0.40 | 0.32 | 0.19 | 0.43 | 0.29 | 0.23 | 0.47 |
| 4.5 | 141.9 | 0.41 | 0.06 | 0.27 | 0.39 | 0.10 | 0.30 | 0.36 | 0.14 | 0.34 | 0.34 | 0.17 | 0.37 | 0.32 | 0.21 | 0.41 | 0.29 | 0.25 | 0.44 |
| 5.0 | 157.7 | 0.41 | 0.08 | 0.24 | 0.39 | 0.12 | 0.28 | 0.36 | 0.15 | 0.31 | 0.34 | 0.19 | 0.35 | 0.32 | 0.23 | 0.38 | 0.29 | 0.26 | 0.42 |
| 5.5 | 173.4 | 0.40 | 0.10 | 0.22 | 0.38 | 0.13 | 0.25 | 0.36 | 0.17 | 0.29 | 0.34 | 0.21 | 0.32 | 0.32 | 0.25 | 0.36 | 0.29 | 0.28 | 0.39 |
| 6.0 | 189.2 | 0.40 | 0.11 | 0.19 | 0.38 | 0.15 | 0.23 | 0.36 | 0.19 | 0.26 | 0.34 | 0.23 | 0.29 | 0.31 | 0.27 | 0.33 | 0.29 | 0.30 | 0.36 |
| 6.5 | 205.0 | 0.39 | 0.13 | 0.16 | 0.37 | 0.17 | 0.20 | 0.35 | 0.21 | 0.23 | 0.33 | 0.25 | 0.27 | 0.31 | 0.29 | 0.30 | 0.29 | 0.32 | 0.34 |
| 7.0 | 220.8 | 0.39 | 0.16 | 0.13 | 0.37 | 0.19 | 0.17 | 0.35 | 0.23 | 0.20 | 0.33 | 0.27 | 0.24 | 0.31 | 0.31 | 0.27 | 0.29 | 0.34 | 0.31 |
| 7.5 | 236.5 | 0.38 | 0.18 | 0.10 | 0.36 | 0.21 | 0.14 | 0.34 | 0.25 | 0.17 | 0.32 | 0.29 | 0.21 | 0.30 | 0.33 | 0.24 | 0.28 | 0.37 | 0.27 |
| 8.0 | 252.3 | 0.37 | 0.20 | 0.07 | 0.35 | 0.24 | 0.10 | 0.34 | 0.28 | 0.14 | 0.32 | 0.31 | 0.17 | 0.30 | 0.35 | 0.21 | 0.28 | 0.39 | 0.24 |
| 8.5 | 268.1 | 0.36 | 0.23 | 0.03 | 0.34 | 0.27 | 0.07 | 0.33 | 0.30 | 0.10 | 0.31 | 0.34 | 0.14 | 0.29 | 0.38 | 0.17 | 0.27 | 0.42 | 0.20 |
| 9.0 | 283.8 | - | - | - | 0.33 | 0.30 | 0.02 | 0.31 | 0.33 | 0.06 | 0.30 | 0.37 | 0.09 | 0.28 | 0.41 | 0.13 | 0.26 | 0.45 | 0.16 |
| 9.5 | 299.6 | - | - | - | - | - | - | 0.30 | 0.37 | 0.01 | 0.28 | 0.40 | 0.05 | 0.26 | 0.44 | 0.08 | 0.25 | 0.48 | 0.11 |
| 10.0 | 315.4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.24 | 0.49 | 0.02 | 0.23 | 0.52 | 0.05 |

表C.0.13 C40水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.15）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.34 | 0.03 | 0.57 | 0.31 | 0.07 | 0.61 | 0.28 | 0.10 | 0.64 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | 0.38 | 0.01 | 0.51 | 0.35 | 0.05 | 0.55 | 0.32 | 0.08 | 0.58 | 0.29 | 0.12 | 0.62 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | 0.39 | 0.02 | 0.49 | 0.36 | 0.06 | 0.53 | 0.32 | 0.10 | 0.56 | 0.29 | 0.13 | 0.60 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | 0.39 | 0.04 | 0.47 | 0.36 | 0.08 | 0.51 | 0.33 | 0.11 | 0.54 | 0.30 | 0.15 | 0.58 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | 0.42 | 0.02 | 0.42 | 0.39 | 0.05 | 0.45 | 0.36 | 0.09 | 0.49 | 0.33 | 0.13 | 0.52 | 0.30 | 0.17 | 0.56 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | 0.42 | 0.03 | 0.40 | 0.40 | 0.07 | 0.43 | 0.37 | 0.11 | 0.46 | 0.34 | 0.14 | 0.50 | 0.31 | 0.18 | 0.54 |
| 3.5 | 110.4 | 0.45 | 0.01 | 0.34 | 0.43 | 0.04 | 0.38 | 0.40 | 0.08 | 0.41 | 0.37 | 0.12 | 0.44 | 0.34 | 0.16 | 0.48 | 0.31 | 0.20 | 0.51 |
| 4.0 | 126.1 | 0.45 | 0.02 | 0.32 | 0.43 | 0.06 | 0.35 | 0.40 | 0.10 | 0.39 | 0.37 | 0.14 | 0.42 | 0.34 | 0.18 | 0.46 | 0.32 | 0.21 | 0.49 |
| 4.5 | 141.9 | 0.45 | 0.04 | 0.30 | 0.43 | 0.08 | 0.33 | 0.40 | 0.11 | 0.37 | 0.37 | 0.15 | 0.40 | 0.35 | 0.19 | 0.43 | 0.32 | 0.23 | 0.47 |
| 5.0 | 157.7 | 0.45 | 0.05 | 0.28 | 0.43 | 0.09 | 0.31 | 0.40 | 0.13 | 0.34 | 0.37 | 0.17 | 0.38 | 0.35 | 0.21 | 0.41 | 0.32 | 0.25 | 0.44 |
| 5.5 | 173.4 | 0.45 | 0.07 | 0.25 | 0.42 | 0.11 | 0.29 | 0.40 | 0.15 | 0.32 | 0.37 | 0.19 | 0.35 | 0.35 | 0.22 | 0.39 | 0.32 | 0.26 | 0.42 |
| 6.0 | 189.2 | 0.44 | 0.09 | 0.23 | 0.42 | 0.12 | 0.26 | 0.40 | 0.16 | 0.30 | 0.37 | 0.20 | 0.33 | 0.35 | 0.24 | 0.36 | 0.32 | 0.28 | 0.39 |
| 6.5 | 205.0 | 0.44 | 0.10 | 0.21 | 0.42 | 0.14 | 0.24 | 0.39 | 0.18 | 0.27 | 0.37 | 0.22 | 0.30 | 0.35 | 0.26 | 0.34 | 0.32 | 0.30 | 0.37 |
| 7.0 | 220.8 | 0.44 | 0.12 | 0.18 | 0.41 | 0.16 | 0.21 | 0.39 | 0.20 | 0.25 | 0.37 | 0.24 | 0.28 | 0.34 | 0.28 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.34 |
| 7.5 | 236.5 | 0.43 | 0.14 | 0.15 | 0.41 | 0.18 | 0.19 | 0.39 | 0.22 | 0.22 | 0.36 | 0.26 | 0.25 | 0.34 | 0.30 | 0.28 | 0.32 | 0.34 | 0.31 |
| 8.0 | 252.3 | 0.42 | 0.16 | 0.13 | 0.40 | 0.20 | 0.16 | 0.38 | 0.24 | 0.19 | 0.36 | 0.28 | 0.22 | 0.34 | 0.32 | 0.25 | 0.31 | 0.36 | 0.28 |
| 8.5 | 268.1 | 0.41 | 0.18 | 0.09 | 0.39 | 0.22 | 0.13 | 0.37 | 0.26 | 0.16 | 0.35 | 0.30 | 0.19 | 0.33 | 0.34 | 0.22 | 0.31 | 0.38 | 0.25 |
| 9.0 | 283.8 | 0.40 | 0.21 | 0.06 | 0.38 | 0.25 | 0.09 | 0.36 | 0.29 | 0.13 | 0.34 | 0.33 | 0.16 | 0.32 | 0.37 | 0.19 | 0.30 | 0.41 | 0.22 |
| 9.5 | 299.6 | 0.39 | 0.23 | 0.02 | 0.37 | 0.27 | 0.06 | 0.35 | 0.31 | 0.09 | 0.33 | 0.35 | 0.12 | 0.31 | 0.39 | 0.15 | 0.29 | 0.44 | 0.18 |
| 10.0 | 315.4 | - | - | - | 0.36 | 0.30 | 0.01 | 0.34 | 0.34 | 0.05 | 0.32 | 0.38 | 0.08 | 0.30 | 0.43 | 0.10 | 0.28 | 0.47 | 0.13 |
| 10.5 | 331.1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.30 | 0.42 | 0.02 | 0.28 | 0.46 | 0.05 | 0.26 | 0.51 | 0.08 |

表C.0.14 C35水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.15）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*=0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.37 | 0.02 | 0.59 | 0.34 | 0.06 | 0.62 | 0.30 | 0.09 | 0.66 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.38 | 0.03 | 0.57 | 0.35 | 0.07 | 0.60 | 0.31 | 0.11 | 0.64 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | 0.42 | 0.01 | 0.51 | 0.39 | 0.05 | 0.55 | 0.35 | 0.09 | 0.58 | 0.32 | 0.12 | 0.62 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.02 | 0.49 | 0.39 | 0.06 | 0.53 | 0.36 | 0.10 | 0.56 | 0.33 | 0.14 | 0.60 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.04 | 0.48 | 0.40 | 0.07 | 0.51 | 0.37 | 0.11 | 0.54 | 0.33 | 0.15 | 0.58 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | 0.47 | 0.01 | 0.42 | 0.44 | 0.05 | 0.46 | 0.40 | 0.09 | 0.49 | 0.37 | 0.13 | 0.52 | 0.34 | 0.17 | 0.56 |
| 3.5 | 110.4 | - | - | - | 0.47 | 0.02 | 0.40 | 0.44 | 0.06 | 0.44 | 0.41 | 0.10 | 0.47 | 0.38 | 0.14 | 0.50 | 0.34 | 0.18 | 0.54 |
| 4.0 | 126.1 | - | - | - | 0.47 | 0.04 | 0.39 | 0.44 | 0.08 | 0.42 | 0.41 | 0.12 | 0.45 | 0.38 | 0.16 | 0.48 | 0.35 | 0.20 | 0.51 |
| 4.5 | 141.9 | 0.50 | 0.01 | 0.33 | 0.47 | 0.05 | 0.37 | 0.44 | 0.09 | 0.40 | 0.41 | 0.13 | 0.43 | 0.38 | 0.17 | 0.46 | 0.35 | 0.21 | 0.49 |
| 5.0 | 157.7 | 0.50 | 0.03 | 0.31 | 0.47 | 0.07 | 0.35 | 0.44 | 0.11 | 0.38 | 0.41 | 0.15 | 0.41 | 0.38 | 0.19 | 0.44 | 0.35 | 0.23 | 0.47 |
| 5.5 | 173.4 | 0.50 | 0.04 | 0.29 | 0.47 | 0.08 | 0.33 | 0.44 | 0.12 | 0.36 | 0.41 | 0.16 | 0.39 | 0.39 | 0.20 | 0.42 | 0.36 | 0.24 | 0.45 |
| 6.0 | 189.2 | 0.50 | 0.06 | 0.27 | 0.47 | 0.10 | 0.30 | 0.44 | 0.14 | 0.33 | 0.41 | 0.18 | 0.37 | 0.39 | 0.22 | 0.40 | 0.36 | 0.26 | 0.43 |
| 6.5 | 205.0 | 0.49 | 0.07 | 0.25 | 0.47 | 0.11 | 0.28 | 0.44 | 0.15 | 0.31 | 0.41 | 0.19 | 0.34 | 0.39 | 0.23 | 0.37 | 0.36 | 0.28 | 0.40 |
| 7.0 | 220.8 | 0.49 | 0.09 | 0.23 | 0.47 | 0.13 | 0.26 | 0.44 | 0.17 | 0.29 | 0.41 | 0.21 | 0.32 | 0.38 | 0.25 | 0.35 | 0.36 | 0.29 | 0.38 |
| 7.5 | 236.5 | 0.49 | 0.10 | 0.21 | 0.46 | 0.14 | 0.24 | 0.44 | 0.19 | 0.27 | 0.41 | 0.23 | 0.30 | 0.38 | 0.27 | 0.32 | 0.35 | 0.31 | 0.35 |
| 8.0 | 252.3 | 0.48 | 0.12 | 0.18 | 0.46 | 0.16 | 0.21 | 0.43 | 0.20 | 0.24 | 0.41 | 0.25 | 0.27 | 0.38 | 0.29 | 0.30 | 0.35 | 0.33 | 0.33 |
| 8.5 | 268.1 | 0.48 | 0.14 | 0.16 | 0.45 | 0.18 | 0.19 | 0.43 | 0.22 | 0.22 | 0.40 | 0.26 | 0.24 | 0.38 | 0.31 | 0.27 | 0.35 | 0.35 | 0.30 |
| 9.0 | 283.8 | 0.47 | 0.16 | 0.13 | 0.45 | 0.20 | 0.16 | 0.42 | 0.24 | 0.19 | 0.40 | 0.28 | 0.22 | 0.37 | 0.33 | 0.24 | 0.34 | 0.37 | 0.27 |
| 9.5 | 299.6 | 0.46 | 0.18 | 0.10 | 0.44 | 0.22 | 0.13 | 0.41 | 0.26 | 0.16 | 0.39 | 0.31 | 0.18 | 0.36 | 0.35 | 0.21 | 0.34 | 0.39 | 0.24 |
| 10.0 | 315.4 | 0.45 | 0.20 | 0.07 | 0.43 | 0.24 | 0.10 | 0.40 | 0.29 | 0.13 | 0.38 | 0.33 | 0.15 | 0.35 | 0.37 | 0.18 | 0.33 | 0.42 | 0.20 |
| 10.5 | 331.1 | 0.44 | 0.23 | 0.03 | 0.42 | 0.27 | 0.06 | 0.39 | 0.31 | 0.09 | 0.37 | 0.36 | 0.11 | 0.34 | 0.40 | 0.14 | 0.32 | 0.45 | 0.16 |
| 11.0 | 346.9 | - | - | - | 0.40 | 0.30 | 0.02 | 0.38 | 0.34 | 0.05 | 0.35 | 0.39 | 0.07 | 0.33 | 0.43 | 0.09 | 0.30 | 0.48 | 0.12 |
| 11.5 | 362.7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.33 | 0.42 | 0.02 | 0.31 | 0.47 | 0.04 | 0.28 | 0.52 | 0.05 |

表C.0.15 C30水胶比和矿物掺合料掺量取值（=0.15）

| *D*0 | | *n*=0.4 | | | *n*=0.45 | | | *n*=0.5 | | | *n*= 0.55 | | | *n*=0.6 | | | *n*=0.65 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ×10-12 m2/s | mm2/a | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG | *R*W/B | *R*FA | *R*SG |
| 0.5 | 15.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.41 | 0.01 | 0.60 | 0.37 | 0.04 | 0.64 | 0.33 | 0.08 | 0.67 |
| 1.0 | 31.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.42 | 0.02 | 0.59 | 0.38 | 0.06 | 0.62 | 0.34 | 0.10 | 0.65 |
| 1.5 | 47.3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.03 | 0.57 | 0.39 | 0.07 | 0.60 | 0.35 | 0.11 | 0.64 |
| 2.0 | 63.1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.43 | 0.04 | 0.55 | 0.40 | 0.08 | 0.58 | 0.36 | 0.12 | 0.62 |
| 2.5 | 78.8 | - | - | - | - | - | - | 0.48 | 0.02 | 0.50 | 0.44 | 0.06 | 0.53 | 0.40 | 0.10 | 0.57 | 0.37 | 0.14 | 0.60 |
| 3.0 | 94.6 | - | - | - | - | - | - | 0.48 | 0.03 | 0.48 | 0.45 | 0.07 | 0.52 | 0.41 | 0.11 | 0.55 | 0.37 | 0.15 | 0.58 |
| 3.5 | 110.4 | - | - | - | - | - | - | 0.49 | 0.04 | 0.47 | 0.45 | 0.08 | 0.50 | 0.41 | 0.12 | 0.53 | 0.38 | 0.16 | 0.56 |
| 4.0 | 126.1 | - | - | - | 0.52 | 0.01 | 0.42 | 0.49 | 0.06 | 0.45 | 0.45 | 0.10 | 0.48 | 0.42 | 0.14 | 0.51 | 0.38 | 0.18 | 0.54 |
| 4.5 | 141.9 | - | - | - | 0.53 | 0.03 | 0.40 | 0.49 | 0.07 | 0.43 | 0.46 | 0.11 | 0.46 | 0.42 | 0.15 | 0.49 | 0.39 | 0.19 | 0.52 |
| 5.0 | 157.7 | - | - | - | 0.53 | 0.04 | 0.38 | 0.49 | 0.08 | 0.41 | 0.46 | 0.12 | 0.44 | 0.43 | 0.16 | 0.47 | 0.39 | 0.21 | 0.50 |
| 5.5 | 173.4 | 0.56 | 0.01 | 0.33 | 0.53 | 0.05 | 0.36 | 0.50 | 0.09 | 0.39 | 0.46 | 0.14 | 0.42 | 0.43 | 0.18 | 0.45 | 0.40 | 0.22 | 0.48 |
| 6.0 | 189.2 | 0.56 | 0.02 | 0.32 | 0.53 | 0.07 | 0.35 | 0.50 | 0.11 | 0.37 | 0.46 | 0.15 | 0.40 | 0.43 | 0.19 | 0.43 | 0.40 | 0.23 | 0.46 |
| 6.5 | 205.0 | 0.56 | 0.04 | 0.30 | 0.53 | 0.08 | 0.33 | 0.50 | 0.12 | 0.35 | 0.46 | 0.16 | 0.38 | 0.43 | 0.21 | 0.41 | 0.40 | 0.25 | 0.44 |
| 7.0 | 220.8 | 0.56 | 0.05 | 0.28 | 0.53 | 0.09 | 0.31 | 0.50 | 0.14 | 0.33 | 0.46 | 0.18 | 0.36 | 0.43 | 0.22 | 0.39 | 0.40 | 0.26 | 0.42 |
| 7.5 | 236.5 | 0.55 | 0.07 | 0.26 | 0.52 | 0.11 | 0.29 | 0.49 | 0.15 | 0.31 | 0.46 | 0.19 | 0.34 | 0.43 | 0.24 | 0.37 | 0.40 | 0.28 | 0.40 |
| 8.0 | 252.3 | 0.55 | 0.08 | 0.24 | 0.52 | 0.12 | 0.27 | 0.49 | 0.17 | 0.29 | 0.46 | 0.21 | 0.32 | 0.43 | 0.25 | 0.35 | 0.40 | 0.30 | 0.37 |
| 8.5 | 268.1 | 0.55 | 0.10 | 0.22 | 0.52 | 0.14 | 0.24 | 0.49 | 0.18 | 0.27 | 0.46 | 0.23 | 0.30 | 0.43 | 0.27 | 0.32 | 0.40 | 0.31 | 0.35 |
| 9.0 | 283.8 | 0.54 | 0.11 | 0.19 | 0.51 | 0.16 | 0.22 | 0.49 | 0.20 | 0.25 | 0.46 | 0.24 | 0.27 | 0.43 | 0.29 | 0.30 | 0.40 | 0.33 | 0.32 |
| 9.5 | 299.6 | 0.54 | 0.13 | 0.17 | 0.51 | 0.17 | 0.20 | 0.48 | 0.22 | 0.22 | 0.45 | 0.26 | 0.25 | 0.42 | 0.31 | 0.27 | 0.39 | 0.35 | 0.30 |
| 10.0 | 315.4 | 0.53 | 0.15 | 0.15 | 0.50 | 0.19 | 0.17 | 0.47 | 0.23 | 0.20 | 0.45 | 0.28 | 0.22 | 0.42 | 0.33 | 0.25 | 0.39 | 0.37 | 0.27 |
| 10.5 | 331.1 | 0.52 | 0.16 | 0.12 | 0.50 | 0.21 | 0.15 | 0.47 | 0.25 | 0.17 | 0.44 | 0.30 | 0.19 | 0.41 | 0.35 | 0.22 | 0.38 | 0.39 | 0.24 |
| 11.0 | 346.9 | 0.51 | 0.18 | 0.09 | 0.49 | 0.23 | 0.12 | 0.46 | 0.28 | 0.14 | 0.43 | 0.32 | 0.16 | 0.40 | 0.37 | 0.18 | 0.37 | 0.42 | 0.20 |
| 11.5 | 362.7 | 0.50 | 0.21 | 0.06 | 0.47 | 0.25 | 0.08 | 0.45 | 0.30 | 0.11 | 0.42 | 0.35 | 0.13 | 0.39 | 0.39 | 0.15 | 0.36 | 0.44 | 0.17 |
| 12.0 | 378.4 | 0.49 | 0.23 | 0.02 | 0.46 | 0.28 | 0.05 | 0.43 | 0.32 | 0.07 | 0.40 | 0.37 | 0.09 | 0.37 | 0.42 | 0.11 | 0.34 | 0.48 | 0.12 |
| 12.5 | 394.2 | - | - | - | 0.44 | 0.31 | 0.01 | 0.41 | 0.36 | 0.03 | 0.38 | 0.41 | 0.04 | 0.35 | 0.46 | 0.05 | 0.32 | 0.52 | 0.06 |

**本标准用词说明**

**1** 为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，在条件许可时首先应这样做的：

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** 条文中指明应按其它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**

1. 《通用硅酸盐水泥》GB 175

2 《混凝土外加剂》GB 8076

3 《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476

4 《水泥密度测定方法》GB/T 208

5 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596

6 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046

7 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080

8 《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081

9 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082

10 《混凝土试验用搅拌机》JG 244

11 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52

12 《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55

13 《混凝土用水标准》JGJ 63

14 《水运工程混凝土试验规程》JTJ 270

15 《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153

16 《水运工程混凝土质量控制标准》JTS 202-2

17 《海港工程高性能混凝土质量控制标准》JTS 257-2

18 《港口水工建筑物修补加固技术规范》JTS 311

19 《港口水工建筑物检测与评估技术规范》JTJ 302

**中国工程建设标准化协会标准**

**海港工程混凝土材料与结构耐久性定量**

**设计标准**

**T/CECS XXX-202X**

**条 文 说 明**

**目 次**

[1 总则 87](#_Toc113890069)

[2 术语和符号 88](#_Toc113890070)

[2.1 术 语 88](#_Toc113890071)

[2.2 符 号 88](#_Toc113890072)

[3 基本规定 89](#_Toc113890073)

[3.1 设计原则 89](#_Toc113890074)

[3.2 设计工作年限 89](#_Toc113890075)

[3.3 材料要求 89](#_Toc113890076)

[3.4 构造要求 90](#_Toc113890077)

[3.5 耐久性规定 91](#_Toc113890078)

[3.6 附加防腐蚀措施 92](#_Toc113890079)

[3.7 耐久性监测 92](#_Toc113890080)

[3.8 耐久性维护 93](#_Toc113890081)

[4 混凝土的原材料 94](#_Toc113890082)

[4.1 一般规定 94](#_Toc113890083)

[4.2 矿物掺合料 94](#_Toc113890084)

[4.3 骨料 95](#_Toc113890085)

[4.4 拌合用水和外加剂 96](#_Toc113890086)

[5 环境作用等级的划分及量化 97](#_Toc113890087)

[5.1 环境作用等级的划分 97](#_Toc113890088)

[5.2 环境作用的量化 98](#_Toc113890089)

[6 混凝土结构耐久性设计参数的确定 101](#_Toc113890090)

[6.1 一般规定 101](#_Toc113890091)

[6.2 结构耐久性定量分析和设计 101](#_Toc113890092)

[7 混凝土配合比设计的强度和耐久性指标配制值 106](#_Toc113890093)

[7.1 混凝土强度配制值的确定 106](#_Toc113890094)

[7.2 初始氯离子扩散系数配制值的确定 106](#_Toc113890095)

[8 兼顾强度和耐久性的混凝土配合比设计 107](#_Toc113890096)

[8.1 一般规定 107](#_Toc113890097)

[8.2 水胶比和矿物掺合料掺量 107](#_Toc113890098)

[8.3 用水量和外加剂用量 108](#_Toc113890099)

[8.4 胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量 109](#_Toc113890100)

[8.5 砂率 109](#_Toc113890101)

[8.6 粗、细骨料用量 109](#_Toc113890102)

[8.7 混凝土配合比设计步骤 109](#_Toc113890103)

[9 混凝土配合比的试配、调整与确定 110](#_Toc113890104)

[9.1 混凝土试配 110](#_Toc113890105)

[9.2 配合比的调整与确定 110](#_Toc113890106)

[10 有特殊要求的混凝土配合比设计 112](#_Toc113890107)

[10.1 高性能混凝土配合比设计要求 112](#_Toc113890108)

[10.2 泵送混凝土配合比设计要求 112](#_Toc113890109)

[10.3 大体积混凝土配合比设计要求 113](#_Toc113890110)

[10.4 抗冻混凝土配合比设计要求 113](#_Toc113890111)

1 总则

**1.0.1** 传统的混凝土结构耐久性设计主要基于工程经验和定性分析，难以实现混凝土的耐久性定量设计，导致部分混凝土结构在远早于设计工作年限时就发生严重的耐久性劣化问题。本标准提出了混凝土耐久性定量设计和制备技术，通过混凝土结构耐久性定量设计与混凝土材料配合比设计来保证海洋氯化物环境下海港工程混凝土材料和结构满足规定的耐久性要求。

**1.0.2** 规定了本标准适用的范围是处于海洋氯化物环境的海港工程混凝土结构的耐久性设计与普通混凝土配合比设计。轻骨料混凝土、纤维混凝土、蒸压混凝土等其他特种混凝土的耐久性劣化机理不同于普通混凝土，因此不适用于本标准。

**1.0.3** 本标准的目标是为了确保主体结构能够达到规定的设计工作年限要求。满足规定的设计工作年限要求，需要考虑结构的材料性能、环境作用、结构的外形特征对耐久性的影响，而且要考虑这些因素的变异性，需要有一定的保证率。由于氯盐环境作用下混凝土结构的耐久性劣化是一个非常复杂的过程，目前缺乏足够多的数据积累。因此，在本标准的使用过程中，如果有可靠的试验数据及类似工程数据，相关参数的取值以及结构的构造要求和材料要求可以适当高于本标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

本标准给出的术语是为了在条文的叙述中使有关的俗称和不统一的称呼在本规程及今后的使用中形成统一的概念，利用已知的概念特征赋予其含义，所给出的英文译名是参考国外资料和专业词典拟定的。

2.2 符 号

本规程的符号采用现行国家标准《标准编写规则第2部分：符号》GB/T 20001.2的有关规定。

3 基本规定

3.1 设计原则

**3.1.1** 本条规定了海港工程混凝土结构耐久性设计应考虑的因素。其中，设计工作年限越长，海港工程混凝土结构对耐久性要求越高；氯离子浓度、风速、温度等环境条件对海港工程混凝土结构耐久性影响较大，对于处于大气区、水位变动区、浪溅区等不同环境条件的海港工程混凝土结构的耐久性存在显著差异；混凝土的浇捣和养护工艺对混凝土耐久性也会产生显著影响；加强日常检查、定期检测评估和适时维修也可以提高海港工程混凝土结构的耐久性；此外，建造成本和维护成本也会影响海港工程混凝土结构耐久性。因此，海港工程混凝土结构耐久性应根据结构的设计工作年限、结构所处的环境、施工条件、便于维护等进行合理设计，并考虑结构的全寿命成本因素。

**3.1.2** 海洋氯化物环境中的氯离子通过扩散、渗透、迁移等方式向混凝土内部传输，造成海港工程混凝土结构内部钢筋发生锈蚀，是导致其耐久性劣化的主要原因之一。所以海港工程混凝土结构的耐久性设计应考虑海洋氯化物环境的作用，并宜开展耐久性定量设计，从而保证其满足预定的设计工作年限要求。

**3.1.3** 海港工程混凝土结构的耐久性设计应根据结构构件的设计工作年限以及环境类别和作用等级，提出结构材料的性能和耐久性控制指标，并且需要满足规定的原材料、构造和施工要求，必要时还需要采取合理的附加防腐蚀措施。

3.2 设计工作年限

**3.2.1** 本条根据《港口工程结构可靠性设计统一标准标准》（GB 50158）、《防波堤与护岸设计规范》（JTS 154）确定海港工程结构的设计工作年限。

3.3 材料要求

**3.3.1** 材料的种类、质量和性能都会对海港工程混凝土结构的安全性、适用性和耐久性产生影响，所以应合理选用材料种类，并明确其质量和性能指标。

**3.3.2** 不同的环境类别、环境作用等级和结构设计工作年限，对于海港工程混凝土结构的耐久性需求不同，所以应根据结构所处的环境类别、环境作用等级和结构设计工作年限选择混凝土和防腐蚀材料，才能保证海港工程混凝土结构满足预定的耐久性要求。

**3.3.3** 由于干湿交替作用，处于水位变动区和浪溅区的海港工程混凝土结构的耐久性劣化严重，利用普通混凝土难以满足预定的耐久性要求。掺活性矿物掺合料的高性能混凝土因孔结构得到了明显的改善，且活性矿物掺合料的水化产物可结合部分氯离子，从而显著提高其抗氯离子渗透性能。虽然基于理想状态的理论预测，使用高性能混凝土的结构可以达到50年以上的使用寿命，但海水环境混凝土结构耐久性影响因素复杂，客观存在施工质量偏差、服役期结构荷载变化和环境作用的不确定性等，与实际情况可能会有偏差。鉴于此，偏于安全考虑，海洋环境设计工作年限50年以上的混凝土结构，对于水位变动区和浪溅区的腐蚀严重部位和重要构件除采用高性能混凝土外，还应采取必要的附加防腐蚀措施。

**3.3.4** 考虑到海港工程主要采用高性能混凝土，Ⅲ、Ⅳ级环境的海港工程混凝土主要参考《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153中对于海水环境混凝土质量的规定。对于Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ级环境的海港工程混凝土，主要参考《混凝土结构耐久性设计标准》GB 50476的规定，同时考虑到混凝土强度等级过高会导致水化热增大、混凝土开裂风险增加，本标准对混凝土强度等级做了调整。

3.4 构造要求

**3.4.1**保护层厚度决定了氯离子从混凝土表面传输到钢筋表面的距离，是影响混凝土结构寿命的重要因素之一，因此需要规定混凝土保护层最小厚度值，以防止混凝土过早发生钢筋腐蚀损坏。考虑到Ⅲ-E、Ⅲ-F区的现浇混凝土构件施工过程中质量难控制及容易过早接触海水，混凝土浇筑后的早期，胶凝材料正处于水化过程中，掺合料的二次水化仍在进行，这时混凝土的密实性、抗氯离子渗透性能较低，接触海水时氯离子会以较快的速度侵人混凝土。因此，对Ⅲ-E、Ⅲ-F区的现浇混凝土构件，采取提高现浇混凝土保护层厚度10mm~15mm的方法适度补偿。

**3.4.2**混凝土裂缝为外部环境中的氯离子、侵蚀性物质、水分和氧气等物质向混凝土内部的传输提供了便捷通道，会明显加剧混凝土结构的耐久性劣化。因此，应规定混凝土的最大裂缝宽度限值要求。需要说明的是，本文所指的裂缝为荷载造成的横向裂缝，不包括收缩和温度等非荷载作用引起的裂缝，更不能作为荷载裂缝计算值与非荷载裂缝计算值两者叠加后的控制标准。控制非荷载因素引起的裂缝，应通过混凝土原材料的优选、配合比优选、精心的施工养护以及合理的构造措施来实现。

**3.4.3**混凝土施工缝、伸缩缝等连接缝是混凝土结构的相对薄弱部位，容易成为氯盐和腐蚀性物质侵蚀混凝土内部的通道，故应在设计与施工中避开局部环境作用的不利部位。

**3.4.4、3.4.5**暴露在外的吊环、紧固件和连接件等金属件受外部环境的影响容易锈蚀，锈蚀产物将沿着金属件与混凝土结合处从外向内扩展，导致混凝土保护层开裂产生氯离子传输通道；部分埋入混凝土的金属部件若与混凝土中钢筋接触，易构成腐蚀电偶，加速钢筋或埋入件的腐蚀速度。因此，对部分暴露在外的吊环、紧固件、连接件等金属埋人件与混凝土中的钢筋绝缘，并采取必要的防腐蚀措施。

3.5 耐久性规定

**3.5.1** 室内试验和实际工程表明：饱和的混凝土才发生冻融破坏，不饱和的混凝土破坏程度要轻；冻融循环次数虽对冻融破坏有一定影响，但只限于表面浅层，而最冷月的气温则影响到深层，因此比冻融次数的影响更严重。

**3.5.3** 针对海洋氯化物环境下对于设计工作年限为50年的海港工程混凝土结构，根据本标准条文3.4.1中规定的混凝土最小保护层厚度，相应的规定了初始氯离子扩散系数*D*0的上限值。如果实际保护层厚度高于最小保护层厚度，宜根据附录C进行调整，对于设计工作年限不是50的海港工程混凝土结构，宜根据本标准第6章的规定计算*D*0的上限值。

**3.5.4** 海港工程混凝土结构构件的形状和构造应有效地避免水、汽和有害物质在混凝土表面的积聚。棱角部位受到两个侧面的环境作用并容易造成碰撞损伤，在可能条件下应加以避免。碰撞、冲击等会造成结构物的损伤，影响海港工程混凝土结构的安全性、适用性和耐久性。对于使用期间可能遭受碰撞和冲击的海港工程混凝土结构，设计时应该设置专门的耐冲击和耐磨损措施

3.6 附加防腐蚀措施

**3.6.1** 附加防腐蚀措施是在混凝土结构本身的耐久性要求满足相应规定的基础上附加的技术措施。当环境条件或施工条件十分恶劣且无相似工程经验可以借鉴时，可以综合考虑维护以及全寿命成本等因素采取合理的附加防腐蚀措施。

**3.6.2** 结合海港工程混凝土结构的特点，本条规定参考《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153选取了四种常用的附加防腐蚀措施。

**3.6.3** 海港工程混凝土结构附加防腐蚀措施的效果，需要经过长期的工程应用并经检验措施有效。附加防腐蚀措施直接关系混凝土结构的耐久性，措施采取不当，不但未达到预期的防腐蚀效果，还会对混凝土性能产生负面影响，甚至加快腐蚀进程。因此，采用其他附加防腐蚀措施时，需要经过专门充分的技术论证。

**3.6.4** 不同的附加防腐蚀措施具有不同的保护效果，为使所设计的附加防腐蚀措施技术可靠，并满足混凝土结构能够达到预定的设计工作年限的基本要求，设计文件中需要附加防腐蚀措施的设计保护年限、主要材料的性能指标及其检验方法。

3.7 耐久性监测

**3.7.1~3.7.3** 海港工程混凝土结构设计工作年限长达几十年其至上百年，在这期间，混凝土结构耐久性的劣化是一个从量变到质变的缓慢过程，因此耐久性维护体现预防为主的原则，这样则能够将危害结构耐久性、安全性的影响消灭在萌芽状态。海洋环境氯离子是混凝土内部钢筋腐蚀破坏的最主要诱因，环境中的氯离子通过扩散和渗透等物理化学途径从混凝土构件表面向混凝土内部传输，在钢筋表面积聚的浓度不断增加，达到诱发钢筋锈蚀的临界浓度。钢筋的腐蚀过程是缓慢的，而且钢筋埋在混凝土内部，肉眼无法观测，对于重要的构件，不便于定期做破损检测。因此，对于重要工程，在环境严酷的部位安装监测混凝土中氯离子浓度和钢筋锈蚀情况的耐久性监测装置，便于及时掌握氯离子在混凝土中的渗透扩散情况，提前预知混凝土结构的防腐蚀耐久性状况，以便及时采取相应技术措施，为工程结构的安全运营提供保障。

3.8 耐久性维护

**3.8.2** 日常检查是海港工程混凝土结构耐久性维护的一项常态化工作。日常检查主要以目视手段，辅以敲击、尺量、摄像等方法对结构外观进行全面的检查。一般情况下混凝土结构出现不同程度的材料劣化和损伤，可反映混凝土的不同耐久性状态。通过耐久性日常检查，一方面能够及时发现问题，处理问题，起到预防为主的作用；另一方面也是下一步对结构耐久性进行检测评估提供基础资料。

**3.8.3** 海港工程混凝土结构耐久性定期检测评估是工程项目投入使用经过一定的年限后，针对混凝土结构耐久性进行的系统检测和状态评估，通过检测评估，了解混凝土材料的劣化情况，掌握结构耐久性状态及未来的发展趋势。按照我国现行行业标准《港口水工建筑物检测与评估技术规范》JTJ 302混凝土结构进行外观检测和专项检测，以查明混凝土结构的耐久性状况，预测混凝土结构的剩余使用年限等，并为结构的适时维修提供依据。

**3.8.4**氯离子在混凝土中的传输过程、以及氯盐环境下钢筋的腐蚀过程是复杂的过程，外部作用力充满不确定性。因此根据定期检测评估结果进行适时维修是延长混凝土结构使用年限的一项主要技术措施，对结构采取及时有效的维修，能够明显降低工程全寿命成本。

当检测评估预测其耐久性不满足设计工作年限时，则需要及时采取有效的维修措施。我国现行行业标准《港口水工建筑物修补加固技术规范) JTS 311 针对混凝土结构耐久性损伤和目标使用年限，在修补方法的选择、材料性能、质量控制及技术要求等都作了具体规定。

4 混凝土的原材料

4.1 一般规定

**4.1.2** 不同环境条件对混凝土的工作性和体积稳定性、强度、耐久性等有不同要求，原材料选用应充分考虑环境对新拌混凝土和硬化混凝土的要求。

**4.1.3** 混凝土的原材料包括水泥、矿物掺合料、粗骨料、细骨料、拌合水和外加剂等，混凝土原材料中的有害成分主要有氯离子、泥团泥块、有机物、硫酸盐和硫化物等，这些物质将影响混凝土强度、耐久性及体积稳定性等，因此应对有害成分的含量进行控制。

**4.1.4** 配制高性能混凝土的主要措施是使用优质活性矿物掺合料。矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥或复合硅酸盐水泥在生产过程中已掺入了各种掺合材料而掺和材料的质量、掺入量和掺入方式难以被需方所掌握，且不同厂家、不同批次的水泥会有不同或是波动，用这些水泥拌制混凝土质量风险比较大。

**4.1.5**  存放在现场的材料品种有时很多，而不同品种的材料其性能也不同，混合存放将会不利于材料使用过程的检验和管理，可能会影响混凝土的性能及工程质量，应按品种、规格分别堆放，不得混杂。同时，还要防止材料受潮或受到海水等污染。

**4.1.6** 混凝土的配合比设计应根据实际使用的原材料的具体性能进行确定，才能确保混凝土的性能满足要求。

4.2 矿物掺合料

**4.2.1** 粉煤灰质量指标要求主要参照《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153和《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596标准制定。海港工程高性能混凝土和预应力混凝土通常强度不低，新拌混凝土对用水量比较敏感，因此对高性能混凝土和钢筋混凝土规定采用I级粉煤灰或需水量比不大于100%的II级粉煤灰。有抗冻要求的混凝土在掺加合适的引气剂后，掺加I级粉煤灰或II级粉煤灰不影响混凝土抗冻性能。

**4.2.2** 粒化高炉矿渣粉的质量指标要求参照《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736和《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046标准制定。由于S75级粒化高炉矿渣粉的活性指数较低，与水泥水化产物发生二次水化作用的程度较低，提高混凝土的密实性作用相对较弱，因此在较为严酷的海洋环境中不宜采用S75级粒化高炉矿渣粉。

4.3 骨料

**4.3.1~4.3.4** 天然河砂由于资源的有限性，有很多地区天然砂不足或没有天然砂，或因环保政策禁采天然砂。国外有30多年应用机制砂作为混凝土细骨料历史，国内核电、公路、铁路等工程领域均有应用，但是应规定机制砂或混合砂中石粉的含量。其中，石粉指机制砂或混合砂中小于0.075mm以下的颗粒。研究证明，机制砂中石粉含量0~30%时，对普通混凝土性能影响很小。机制砂中的石粉如不夹泥土则不能视为有害物质，是否夹泥土需通过亚甲蓝法判定。对于高性能混凝土石粉含量限值比《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52做了更严格的规定。海砂中含有的氯离子对钢筋有较大的腐蚀作用，将对混凝土结构耐久性构成严重的危害。当条件限制不得不使用海砂时，需要采取有效措施，严格控制海砂中的氯离子含量，采用海砂时，对浪溅区、水位变动区的钢筋混凝土，海砂中氯离子含量以胶凝材料的质量百分率计不应超过0.07%;当含量超过限值时，应通过淋洗降至限值以下，使其不致影响混凝土的耐久性。由于海水（弱碱性，pH值约为7.9~8.4）可不断提供新的碱来源，当所用细骨料为碱活性细骨料时，很难保证不会发生碱-骨料反应，因此严禁使用碱活性细骨料。

**4.3.5~4.3.11** 粗骨料中含泥量、泥块含量、硫酸盐及硫化物和有机质等杂质，主要影响混凝土工作性、水泥水化和降低混凝土性能。粗骨料最大粒径限值主要考虑满足浇筑成型混凝土的密实性、均匀性，满足混凝土拌合物顺利通过管道等要求。由于海水（弱碱性，pH值约为7.9~8.4）可不断提供新的碱来源，当所用粗骨料为碱活性粗骨料时，很难保证不会发生碱-骨料反应，因此严禁使用碱活性粗骨料。

4.4 拌合用水和外加剂

**4.4.1~4.4.3** 混凝土和预应力混凝土对水中氯离子含量有严格的限值规定，因此，拌和用水采用饮用水时也要按照现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63对拌和用水进行检验。水中不溶物（泥土、悬浮物等）和可溶物（各类可溶性盐）含量也对混凝土主要性能有显著影响，这些因素都应该予以控制。海水中含有大量的氯盐、硫酸盐、镁盐等化学物质，掺入混凝土中后，会对钢筋产生锈蚀，对混凝土造成腐蚀，严重影响混凝土结构的安全性和耐久性，因此，严禁直接采用海水拌制和养护钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的混凝土。有些地下水、地表水、再生水可能有放射性，应用时应进行相关指标检测并控制。

**4.4.4** 高性能混凝土水胶比小，用水量较低，同时要求混凝土具有较高的工作性和坍落度损失水，因此要求使用的高效减水剂的减水率不低于25%，并与胶凝材料匹配性好。参照《混凝土外加剂》GB 8076对外加剂的品质进行规定，并限制外加剂中的氯离子含量按胶凝材料质量百分比计不大于0.02%，主要是控制混凝土拌合物中总的氯离子含量不超过规定要求。

5 环境作用等级的划分及量化

5.1 环境作用等级的划分

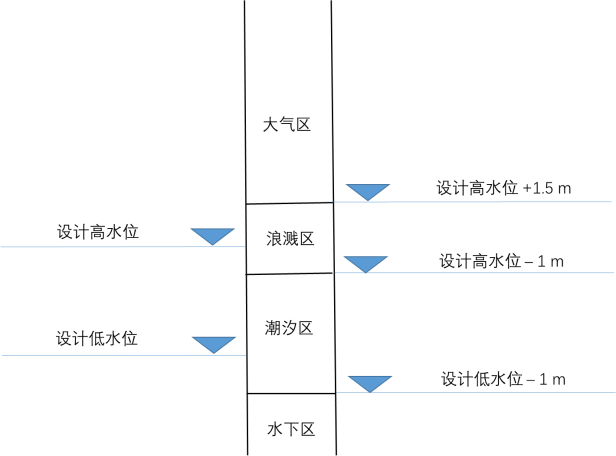
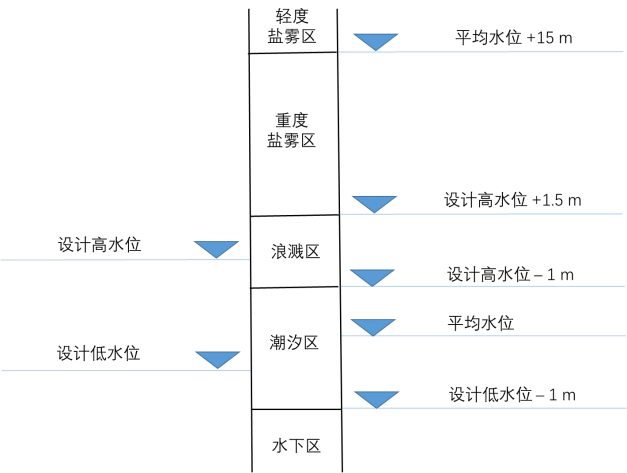
**5.1.1** 根据海港工程混凝土结构的腐蚀机理，海港工程混凝土结构的暴露环境可划分为一般环境（受正常大气和温度、湿度作用）、冻融环境、海洋氯化物环境、其他氯化物环境（受除冰盐等作用）、化学腐蚀环境（受硫酸盐等作用）五类。

**5.1.2** 本条根据海港工程混凝土结构所受的环境腐蚀作用程度划分环境作用等级。与各环境作用等级相对应的具体环境条件可参见正文5.1.3~正文5.1.5。

**5.1.4** 海港工程混凝土结构主要与海水接触，应主要考虑其与海水接触条件下的冻融环境作用。现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB 50476中通过平均气温以及结构饱水程度进行冻融环境作用等级的划分，但结构饱水程度在实际工程中往往难以确定。为了便于使用，本标准通过平均气温划分海港工程混凝土结构的冻融环境作用等级。

**5.1.5** 现行标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB 50476与《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153中对水下区、水位变动区、浪溅区和大气区的划分均参考了《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275中的规定；不同的是，GB 50476 进一步将大气区划分为轻度盐雾区与重度盐雾区，而JTJ 153 未区分轻度盐雾区与重度盐雾区，如图5.1.5所示。考虑到目前轻度盐雾区与重度盐雾区界限的划分缺乏充分依据，因此本标准不对大气区进行轻度盐雾区与重度盐雾区的划分。同时为偏于保守，本标准在环境作用量化时采用重度盐雾区对大气区进行表征。此外，海港工程混凝土结构的腐蚀调查显示，浪溅区的腐蚀严重程度比水位变动区大得多，对于混凝土材料、构造及防腐蚀措施等耐久性要求均有较大的区别，因此本标准将浪溅区的环境作用等级比水位变动区的提高一级。

对于岛上的大气区的海港工程混凝土结构，由于岛四面环海，其结构表面的氯盐沉积量相比大陆地区更大，所以其海洋氯化物环境作用等级应比大陆地区的提高一级。

(a) JTS 153 (b) GB 50476

图 5.1.5 海洋氯化物环境划分的对比

5.2 环境作用的量化

**5.2.1** 不同的环境条件下，混凝土中氯离子的传输机理和积聚规律有所不同，导致混凝土表面氯离子浓度的特征值存在差异。因此，混凝土表面氯离子浓度的特征值宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定。此外，本标准通过综合对比中国、欧盟、葡萄牙、日本、挪威等国家和地区所建立的计算模型以及我国华南海港和东南海港的工程实测数据，结合编制组的研究成果（Construction and Building Materials. 2021, 303: 124578、Ocean Engineering. 2017, 138: 105-111、土木工程学报, 2017, 50(12): 46-55.、硅酸盐学报, 2019, 47(11): 1566-1573.、海洋工程, 2014, 32(5): 31-39和Structural Concrete. 2018, 19: 1512-1520.），给出了不同环境作用等级下表面氯离子浓度特征值，供使用者在无法根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定混凝土表面氯离子浓度特征值时参考。

**5.2.2** 海洋水下区和土中区环境下，混凝土表面氯离子浓度主要受海水氯离子浓度、暴露时间、水胶比和胶凝材料等因素的共同影响。本标准综合考虑上述表面氯离子浓度影响因素，建立了海洋水下区混凝土表面氯离子浓度计算模型，并根据来自世界各地12个暴露试验站的149组水下区自然暴露数据（见表5.2.2），确定了模型中各系数的参考取值。

**表5.2.2 海洋水下区混凝土表面氯离子浓度自然暴露数据**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | Cs,sub /% | *t* /a | 胶凝材料 |  | Cs,sw /% | 地点 |
| 1 | 0.24~5.66 | 0.10~16.00 | OPC、FA、SF、SG | 0.40~0.50 | 1.58~1.84 | 挪威海域 |
| 2 | 3.86~6.05 | 3.00~10.00 | OPC、SG | 0.50 | 1.84 | 日本清水 |
| 3 | 1.74 | 0.75 | SF | 0.40 | 2.15 | 伊朗波斯湾 |
| 4 | 2.80~5.18 | 1.00~10.00 | OPC、FA | 0.35~0.65 | 1.61 | 中国湛江 |
| 5 | 1.94~5.08 | 0.75~21.00 | OPC、FA、SF | 0.30~0.75 | 1.37 | 瑞典西海岸 |
| 6 | 3.31~6.67 | 16.00~40.00 | OPC、SG | 0.40~0.54 | 1.78 | 荷兰海域 |
| 7 | 4.31~5.48 | 17.00~34.00 | SG | 0.45 | 0.73 | 丹麦海域 |
| 8 | 0.94~3.17 | 0.27~0.72 | OPC | 0.56 | 1.05 | 中国杭州湾 |
| 9 | 1.33~3.94 | 1.00 | OPC | 0.40 | 0.34~2.25 | 欧洲各国 |
| 10 | 2.87~5.90 | 18.00~25.00 | OPC | 0.50 | 1.81 | 韩国海域 |
| 11 | 4.00~4.60 | 13.00 | OPC | 0.40~0.45 | 1.05 | 中国宁波 |
| 12 | 2.20~5.10 | 7.00 | OPC、FA、SF、SG | 0.45~0.65 | 1.81 | 日本石川 |

**5.2.3** 海洋大气区环境下，混凝土表面氯离子浓度主要受风速、离海岸距离、暴露时间、水胶比和胶凝材料等环境条件和材料因素的共同影响。本标准综合考虑上述表面氯离子浓度影响因素，建立了海洋大气区混凝土表面氯离子浓度计算模型，并根据来自世界各地11个暴露试验站的146组大气区自然暴露数据（见表5.2.3），确定了模型中各系数的参考取值。

**表5.2.3 海洋大气区混凝土表面氯离子浓度自然暴露数据**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | Cs,air /% | *t* /a | 胶凝材料 |  | *v* /m·s-1 | 地点 |
| 1 | 0.69~2.00 | 0.50~4.00 | OPC、SF | 0.30~0.50 | 4.00 | 葡萄牙西海岸 |
| 2 | 0.49~1.02 | 1.50~4.25 | OPC | 0.40~0.55 | 3.20 | 中国乍浦港 |
| 3 | 0.54~0.87 | 5.17~6.67 | OPC | 0.40 | 2.50 | 中国北部湾 |
| 4 | 0.25~1.44 | 0.50~5.00 | OPC、SG、SF | 0.49~0.63 | 8.5 | 新西兰 |
| 5 | 1.19~3.38 | 0.75~10.30 | OPC | 0.35~0.75 | 5.00 | 瑞典西海岸 |
| 6 | 1.15~1.48 | 1.00~10.00 | OPC、SG | 0.50 | 3.60 | 日本清水 |
| 7 | 0.15~3.04 | 0.50~25.00 | OPC | 0.44~0.65 | 4.00~7.14 | 巴西东北部 |
| 8 | 0.58~1.34 | 2.00 | OPC | 0.46~0.76 | 6.00 | 墨西哥 |
| 9 | 0.61~1.16 | 25 | SG | 0.36 | 3.09 | 克罗地亚 |
| 10 | 1.04 | 2.83 | OPC | 0.53 | 5.20 | 中国青岛 |
| 11 | 0.31~1.13 | 0.49~2.33 | FA | 0.35~0.47 | 4.56 | 美国佛罗里达 |

**5.2.4~5.2.5** 海洋水位变动区与浪溅区混凝土表面氯离子浓度主要受暴露时间、水胶比和胶凝材料等因素的共同影响。本标准综合考虑上述表面氯离子浓度影响因素，分别建立了海洋水位变动区与浪溅区混凝土表面氯离子浓度计算模型，并根据来自世界各地8个暴露试验站的337组水位变动区数据（见表5.2.4）与世界各地4个暴露试验站的291组浪溅区自然暴露数据（见表5.2.5），确定了模型中各系数的参考取值。

**表5.2.4 海洋水位变动区混凝土表面氯离子浓度自然暴露数据**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | Cs,tid /% | *t* /a | 胶凝材料 |  | 地点 |
| 1 | 3.40~7.60 | 2.00~10.00 | OPC、FA | 0.45~0.65 | 泰国海湾 |
| 2 | 3.31~9.51 | 25.00 | OPC、FA、SG | 0.40~0.60 | 加拿大海域 |
| 3 | 2.32~4.73 | 0.50~3.00 | OPC | 0.50 | 葡萄牙西海岸 |
| 4 | 1.49~3.90 | 0.25~4.00 | SG | 0.35 | 中国湛江 |
| 5 | 2.44~6.17 | 0.51~8.97 | OPC、SG | 0.45 | 挪威海域 |
| 6 | 1.73~2.22 | 5.17~6.67 | OPC | 0.40 | 中国北部湾 |
| 7 | 2.89~8.10 | 0.25~8.00 | SF | 0.35~0.50 | 伊朗波斯湾 |
| 8 | 1.85~3.13 | 0.65~44.36 | OPC | 0.38~0.42 | 韩国海域 |

**表5.2.5 海洋浪溅区混凝土表面氯离子浓度自然暴露数据**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | Cs,spl /% | *t* /a | 胶凝材料 |  | 地点 |
| 1 | 3.40~7.30 | 0.25~17.00 | OPC、FA、SG | 0.35~0.55 | 中国湛江 |
| 2 | 1.30~5.79 | 0.50~5.00 | OPC、SG、SF | 0.40~0.63 | 新西兰 |
| 3 | 0.81~3.36 | 0.81~5.00 | OPC、SF | 0.30~0.50 | 葡萄牙西海岸 |
| 4 | 1.29~8.23 | 2.42~13.83 | OPC、FA、SG | 0.32~0.55 | 海南八所港 |

6 混凝土结构耐久性设计参数的确定

6.1 一般规定

**6.1.1** 混凝土结构或构件的材料参数、施工养护条件和结构几何外形等在一定范围内波动，同时环境作用指标也应具有变异性。因此，海洋氯化物环境下海港工程混凝土结构耐久性定量设计宜采用以概率理论为基础。以分项系数表达的极限状态设计法是现阶段结合可靠度性分析的实用方法。

**6.1.2** 钢筋开始脱钝的极限状态定义为混凝土中钢筋表面的氯离子浓度积累达到钢筋脱钝并导致钢筋开始生锈的极限状态；钢筋适量锈蚀的极限状态定义为钢筋锈蚀发展导致混凝土构件表面开始出现顺筋裂缝，或钢筋截面的径向锈蚀深度达到0.1mm。由于目前没有广泛认可的模型可以分析钢筋开始脱钝到混凝土构件表面开始出现顺筋裂缝或钢筋截面的径向锈蚀深度达到0.1mm阶段的过程，所以采用钢筋适量锈蚀的极限状态进行耐久性定量设计时，需通过专门的研究论证。

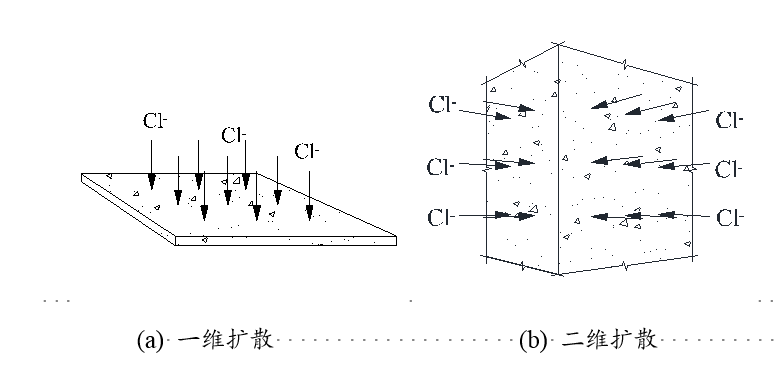
**6.1.3** 传统的耐久性设计方法通常将混凝土强度、水灰比、水泥用量、氯离子扩散系数等相互关联的材料性能参数同时选取为耐久性设计参数，不仅导致各参数的功用目标不明确，而且各参数的取值也相互干扰。鉴于此，本标准将混凝土保护层厚度、初始氯离子扩散系数及其龄期衰减系数同时选取为海洋氯化物环境下混凝土结构的耐久性设计参数。其中，氯离子扩散系数及其龄期衰减系数是材料性能参数，分别代表了混凝土的抗氯离子侵蚀性能及其时变性质；混凝土保护层厚度属于结构几何参数，与氯离子扩散维数一起反映了结构几何条件对氯离子扩散过程及其浓度分布的影响。因此，将混凝土保护层厚度、氯离子扩散系数及其龄期衰减系数选取为混凝土结构的耐久性设计参数，可以有效克服现行耐久性设计方法所存在的设计参数重复设置、不能反映材料性能衰变特性等缺陷。此外，荷载作用产生的应力通过改变混凝土内部的孔隙结构而影响氯离子扩散系数，因此在对海港工程混凝土结构进行耐久性设计时需要考虑应力的影响。应力水平定义为混凝土所受的拉应力与混凝土28d龄期的抗折强度标准值的比值。

6.2 结构耐久性定量分析和设计

**6.2.1~6.2.2** 针对设计工作年限为50年的海洋氯化物环境下海港工程混凝土结构，分别计算出不同环境作用等级作用下耐久性设计参数*c*、*D*0及*n*的候选组合，见附录C。对海港工程混凝土结构进行耐久性定量设计时，可以从附录C中选取合适的混凝土保护层厚度设计值*c*、初始氯离子扩散系数*D*0和龄期衰减系数*n*备选组合。当不适合根据附录C确定混凝土结构的耐久性设计参数取值时（如涉及工作年限不为50年），应根据本标准第6.2.3~6.2.11条对海港工程混凝土结构开展耐久性定量设计。

**6.2.3** 混凝土结构耐久性极限状态设计应针对确定的极限状态开展设计，海港工程混凝土结构主要考虑氯离子侵入混凝土内部并在钢筋表面积聚，导致钢筋脱钝生锈，混凝土保护层开裂剥落，引起的混凝土结构耐久性劣化。混凝土从开始服役到钢筋发生脱钝锈蚀时约占混凝土结构使用寿命的70%以上，钢筋开始脱钝的极限状态是对结构和构件耐久性保证率较高、相对保守的极限状态，一般适用于重要的结构和构件，或者维护难度较大的构件。预应力筋的延性差，破坏呈脆性，一旦开始锈蚀，发展速度较快，所以也宜偏于安全考虑，以预应力筋开始脱钝作为耐久性极限状态。

对于钢筋混凝土结构的不同构件（如板、墙、梁和柱）或不同部位（如角部、中部和棱边），氯离子的扩散维数和浓度分布规律具有显著差异，所以需要根据结构的几何外形，确定氯离子在混凝土结构中的扩散维数。板、墙等面形构件或矩形构件的中部，遭受来自一个暴露面的氯离子侵蚀作用，混凝土中的氯离子扩散过程属于一维扩散，如图6.4.3（a）所示；梁、柱等条形构件的棱边区域，遭受来自两个暴露面的氯离子侵蚀作用，混凝土中的氯离子扩散过程属于二维扩散，如图6.4.3（a）所示。



(a) 一维扩散 (b) 二维扩散

图6.4.3 混凝土中氯离子扩散维数示意图

氯离子在混凝土中的传输是一个非常复杂的物理化学过程，其传输积聚过程中受材料性能、环境条件和结构构件形状的影响，国内外广泛采用Fick第二定律来描述混凝土中氯离子的扩散，考虑氯离子扩散系数的时变性，混凝土中钢筋表面在ts时刻的氯离子浓度设计值可由下列公式计算：

**1** 一维扩散：

 (6.4.3-2)

**2** 二维扩散：

 (6.4.3-3)

式中：

——混凝土表面氯离子浓度的设计值(%)；

——混凝土中的初始氯离子浓度(%)；

——混凝土保护层厚度的设计值(mm)；

——设计工作年限(a)；

——在时刻的氯离子扩散系数设计值(m2/s或mm2/a)，其表达式为：

 (6.4.3-4)

式中：

——混凝土快速试验（RCM法）初始氯离子扩散系数（m2/s或mm2/a）；

——氯离子扩散系数的分项系数；

——混凝土中氯离子扩散环境影响系数；

——混凝土氯离子扩散系数试验方法转换系数，应根据室内快速试验与现场长期暴露试验结果的相关系数确定；

——混凝土应力影响系数；

——混凝土开始暴露于氯化物环境中的龄期(d)，一般与混凝土快速试验时龄期相同，可以取*t*0 = 28 d≈0.0767 a；

*n*——龄期衰减系数；

erf(∙)——误差函数。

**6.2.4** 混凝土耐久性分析模型使用的氯离子扩散系数是采用现场暴露试验数据利用Fick第二定律拟合得到的表观氯离子扩散系数，而工程质量检测是采用NT Build 492标准的快速电迁移方法（RCM）测试得到的氯离子扩散系数，两者之间通过混凝土氯离子扩散系数试验方法转换系数*k*c进行转换，《水运工程结构耐久性设计标准》JTS153给出了混凝土氯离子扩散系数试验方法转换系数*k*c取值为0.5，可以参考使用。氯离子在混凝土中的传输速率与环境条件有关，其中温度影响较大。同时，应力水平对氯离子的扩散也有影响，因此本标准考虑了环境温度和应力对氯离子扩散系数的影响。

**6.2.5** 混凝土中钢筋脱钝临界氯离子浓度的分项系数和特征值宜根据海港工程结构所处实际环境条件和既有工程调查确定，并考虑混凝土构件使用环境的温度、湿度以及混凝土材料的组成特性等因素的影响。本标准根据试验数据和收集的国内外实体工程调查数据，并结合国内外规范中临界氯离子浓度研究成果，给出了不同环境作用等级下临界氯离子浓度的特征值和分项系数，供参考使用。

**6.2.6** 由于实际工程中施工水平参差不齐，造成混凝土的保护层厚度具有波动性。由于保护层厚度为几何参数，在海港工程混凝土结构耐久性设计中，把保护层厚度偏差的安全裕度作为分项系数。对于梁、墩、柱等条形构件的保护层厚度安全裕度可取为10mm，对于板、墙等面型薄壁构件的保护层厚度安全裕度可取为5mm。

**6.2.7** 龄期衰减系数*n*是反映氯离子扩散系数衰减速率的重要参数，矿物掺合料的种类及掺量对龄期衰减系数有重要的影响。编制组统计了杭州湾跨海大桥、青岛海湾大桥、泉州湾跨海大桥、厦漳跨海大桥、惠州海湾大桥、龙门大桥、中化兴中石油转运岙山基地3#码头、港珠澳大桥沉管隧道、深中通道、青岛海底隧道、大连湾海底隧道等桥梁、港口码头和海底隧道的混凝土配合比设计，根据美国Life-365计算程序给出的龄期衰减系数与矿物掺合料的种类及掺量的关系式 ，计算出实际工程中龄期衰减系数的典型取值范围为0.40~0.65。

**6.2.8** 混凝土表面氯离子浓度的分项系数的取值与环境条件、混凝土结构所处的暴露位置等因素有关，宜根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定，且用于确定分项系数的混凝土结构的原材料和配合比、施工和暴露条件应与所设计的海港工程混凝土结构相近。此外，本标准根据收集的现场自然暴露试验数据和国内外实体工程调查数据，结合国内外规范指南中表面氯离子浓度研究成果，给出了不同环境作用等级下表面氯离子分项系数，供使用者在无法根据当地工程实测数据或现场自然暴露试验数据确定混凝土表面氯离子浓度分项系数时参考。

**6.2.9** 氯离子在混凝土中的传输速率与环境条件有关。其中，温度影响较大，温度的高低会直接影响离子的传输速率，本标准采用环境影响系数来表征环境温度对氯离子额扩散系数的影响程度。《水运工程结构耐久性设计标准》JTS153给出了南方地区、华南地区、北方地区的氯离子扩散环境影响系数*k*e取值，可以参考使用。

**6.2.10** 应力不仅会引起混凝土内部孔隙结构发生变化，而且应力超过一定值后会导致混凝土中浆体和骨料的界面过渡区产生微裂缝，从而影响氯离子在混凝土中的传输。《水运工程结构耐久性设计标准》JTS153给出了混凝土应力影响系数的计算模型，本标准基于JTS153的计算模型，通过试验数据统计回归分析，确定了受拉区应力水平为0.05~0.75时，对应28d龄期的系数A与B的取值分别为1.12和0.65。混凝土受拉区应力水平，可根据荷载情况分析确定，没有可靠统计数据时，一般梁可参考取0.3，板和偏压柱的受拉区可取0.1。

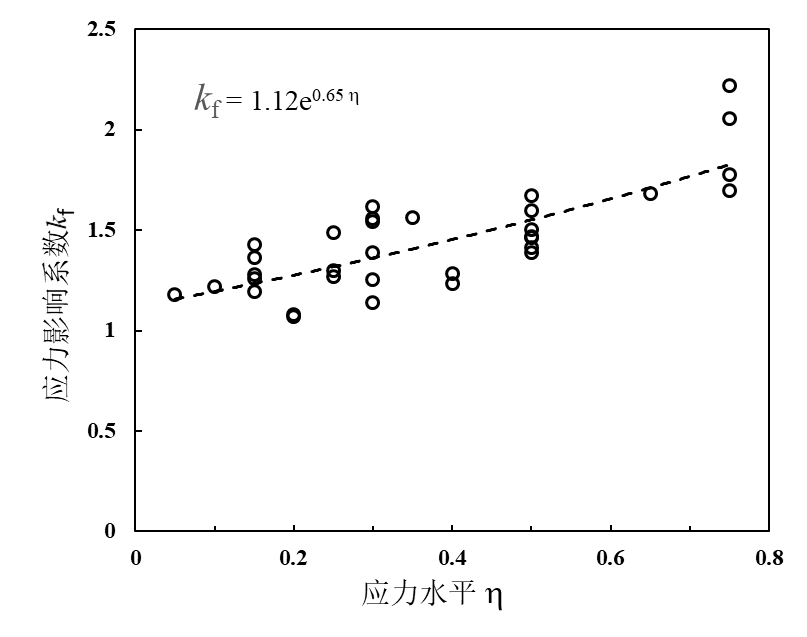


图6.2.10 应力水平对应力影响系数的影响

7 混凝土配合比设计的强度和耐久性指标配制值

7.2 混凝土强度配制值的确定

**7.2.1** 混凝土强度配制值对生产施工的混凝土强度应具有充分的保证率。对于强度等级小于C60的混凝土，实践证明现行配合比设计规范中的计算公式是合理的，因此本规范继续采用；对于强度等级不小于C60的混凝土，传统的计算公式难以满足要求，式（7.2.1-2）已经在现行交通行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTJ 041中采用，并在公路桥涵和建筑工程等实际工程中得到检验。

**7.2.2** 根据实际生产技术水平和大量调研，并参照《水运工程混凝土施工规范》JTS 202相关规定确定表7.2.2的强度标准差取值。

7.3 初始氯离子扩散系数配制值的确定

**7.3.1** 混凝土的初始氯离子扩散系数配制值的计算模型（7.3.1-1）是参考强度配制值的计算模型（7.2.1-1）建立的，具有95%的保证率。式（7.3.1-2）中初始氯离子扩散系数的变异系数是根据国内外研究学者的研究成果选取的，也可根据当地实测的混凝土初始氯离子扩散系数的历史统计资料并参照本规范的式7.3.1-2计算得到。

8 兼顾强度和耐久性的混凝土配合比设计

8.1 一般规定

**8.1.1** 在满足混凝土强度等级的前提下，控制混凝土的最大水胶比可以有效改善其抗渗性和密实性，提高混凝土耐久性。此外，由于要满足混凝土的耐久性要求，单位体积混凝土的胶凝材料用量不能太少。在控制最大水胶比的条件下，参考《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153对混凝土的最小胶凝材料用量进行了规定，表8.1.1中最小胶凝材料用量是满足混凝土施工性能和掺加矿物掺合料后满足混凝土耐久性能的胶凝材料用量下限。

**8.1.2** 规定矿物掺合料最大掺量主要是为了保证混凝土的强度和耐久性。当采用超出表8.1.2给出的矿物掺合料最大掺量时，可以通过对混凝土性能进行理论分析或试验论证，证明结构混凝土安全性和耐久性可以满足设计要求后，还是能够采用的。

**8.1.3** 本条文规定了海港工程混凝土拌合物中氯离子含量的最高限值。本规范采用测定混凝土拌合物中氯离子的方法，与测试硬件后混凝土中氯离子的方法相比，时间大大缩短，有利于配合比设计和控制。本规范中氯离子浓度均采用酸溶值。表8.1.3中的氯离子含量为酸溶性氯离子含量，与控制水溶性氯离子含量相比，偏于安全，且与全文氯离子浓度的单位保持一致。

**8.1.4** 为了防止混凝土可能发生的碱骨料反应，需对混凝土的碱含量进行规定。本条参考《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55中的有关规定。

8.2 水胶比和矿物掺合料掺量

**8.2.1** 为了方便使用，附表D.0.1～附表D.0.15基于混凝土强度等级小于等于C50时海港工程常用混凝土的初始氯离子扩散系数和龄期衰减系数，利用本规程8.2.2中的计算步骤计算得到相应条件下的混凝土水胶比和矿物掺合料掺量，供使用者直接选用。

**8.2.2** 根据《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55表5.1.3中提供的粉煤灰影响系数系数和粒化高炉矿渣粉影响系数取值，通过回归分析建立粉煤灰和粒化高炉矿渣粉掺量对混凝土强度配制值的影响模型，结合《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55公式（5.1.1）中普通混凝土水胶比与混凝土强度配制值的相关关系模型，建立本标准中混凝土强度计算模型，即本标准公式（8.2.3-1）。考虑到单一课题组试验结果容易受到试验设备、材料和环境条件等因素的影响，局限性较大，编制组收集了国内外分布于不同地域的多个课题组测得的164组混凝土的初始氯离子扩散系数试验数据，并根据上述最小二乘法拟合建立本规程中混凝土初始氯离子扩散系数计算模型，即本标准公式（8.2.3-2），试验数据的遴选原则为：(1)扩散系数的试验方法遵循CCES 01-2004规定的RCM标准试验的要求和步骤；(2)混凝土的主要胶凝材料类别为硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥、I级或II级粉煤灰、S95级矿粉，且掺合料的掺量不超过《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55规定的限值，水胶比范围在0.29~0.55；(3)混凝土试件按照RCM标准试验方法制备并养护，试件养护龄期为28d。

**8.2.3** 如果当地具有足够的实验测试数据，可根据实验结果建立更符合当地实际情况的混凝土强度、初始氯离子扩散系数和龄期衰减系数计算模型。

**8.2.4** 本标准第8.2.3条的公式（8.2.3-1）~公式（8.2.3-3）仅适用于混凝土强度等级小于C50、掺粉煤灰和粒化高炉矿渣粉的混凝土，如果需要对混凝土强度等级大于C50的掺粉煤灰和粒化高炉矿渣粉混凝土进行配合比设计，需通过专门的分析研究和试验论证，建立混凝土强度计算模型、初始氯离子扩散系数计算模型和龄期衰减系数计算模型。

8.3 用水量和外加剂用量

**8.3.1** 表8.3.1-1和表8.3.1-2是未掺加外加剂的干硬性和塑性混凝土的用水量，经多年应用，证明基本符合实际。干硬性和塑性混凝土也可以掺加外加剂，掺加外加剂后的用水量可在表8.3.1-1和表8.3.1-2的基础通过试验进行调整。

**8.3.2** 本条中的外加剂特指具有减水功能的外加剂。

**8.3.3** 本条具有指导性作用，尤其对于缺乏经验和试验资料者更为重要。在实际工作中，有经验的专业技术人员通常将满足混凝土性能和节约成本作为目标，结合经验并经试验来确定流动性或大流动性混凝土的外加剂用量和用水量。

8.4 胶凝材料、矿物掺合料和水泥用量

**8.4.1** 对于同一强度等级混凝土，矿物掺合料掺量增加会使水胶比相应减小，如果取用水量不变，按公式（8.4.1）计算的胶凝材料用量也会增加，并可能不是最节约的胶凝材料用量，因此，公式（8.4.1）计算结果仅仅为初算的胶凝材料用量，实际采用的胶凝材料用量应经过试拌选取一个满足拌合物性能要求的、较节约的胶凝材料用量。

**8.4.2、8.4.3** 计算矿物掺合料用量所采用的矿物掺合料掺量是在计算水胶比过程中选用不同掺量经过比较后确定的。计算得出的胶凝材料、矿物掺合料和水泥的用量还要在试配过程中调整验证。

8.5 砂率

**8.5.1、8.5.2** 本节对砂率的取值具有指导性，经实际应用，证明基本符合实际。在实际工作中，也可以根据经验和历史资料初选砂率。砂率对混凝土拌合物性能影响较大，可调整范围略宽，也关系到材料成本，因此，按本节选取的砂率仅是初步的，需要在试配过程中调整后确定合理的砂率。

8.6 粗、细骨料用量

**8.6.1、8.6.2** 在实际工程中，混凝土配合比设计通常采用质量法。混凝土配合比设计也允许采用体积法，可视具体技术需要选用。与质量法比较，体积法需要测定水泥和矿物掺合料的密度以及骨料的表观密度等，对技术条件要求略高。

8.7 混凝土配合比设计步骤

**8.7.1** 混凝土耐久性定量设计步骤：首先选择混凝土的氯离子扩散系数及其龄期衰减系数作为混凝土抗氯盐耐久性能指标参数，根据预定的强度指标和耐久性能指标的取值，通过求解代数方程组得到混凝土水胶比和矿物掺合料掺量，结合混凝土的工作性能要求，确定混凝土配合比设计主要参数的取值。

9 混凝土配合比的试配、调整与确定

9.1 混凝土试配

**9.1.1** 本条提及的搅拌方法的内涵主要包括搅拌方式、投料方式和搅拌时间等。

**9.1.2** 本条规定了试配过程中试件成型的基本要求。

**9.1.3** 如果搅拌量太小，由于混凝土拌合物浆体粘锅因素影响和体量不足等原因，拌合物的代表性不足。

**9.1.4** 在试配过程中，首先是试拌，调整混凝土拌合物。在试拌调整过程中，在计算配合比的基础上，保持水胶比不变，尽量采用较少的胶凝材料用量，以节约胶凝材料为原则，通过调整外加剂用量和砂率，使混凝土拌合物坍落度及和易性等性能满足施工要求，提出试拌配合比。

**9.1.5** 调整好混凝土拌合物并形成试拌配合比后，即可制备试件进行混凝土强度和耐久性试验。由于混凝土强度试验和耐久性试验是在混凝土拌合物调整适宜后进行，所以强度试验和耐久性试验采用的三种配合比的混凝土拌合物性能应维持不变，即三个不同水胶比的混凝土的用水量维持不变，增加和减少胶凝材料用量，并相应减少和增加砂率。在没有特殊规定的情况下，混凝土强度试件和耐久性试件在28d龄期分别进行抗压试验和氯离子扩散系数测定试验；当规定采用其他龄期的设计强度或设计耐久性指标时，混凝土强度试件和耐久性试件应在相应的龄期进行抗压试验和氯离子扩散系数测定试验。强度试验方法应符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081的有关规定，氯离子扩散系数检测方法应符合现行交通行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153的有关规定。

9.2 配合比的调整与确定

**9.2.1** 通过绘制强度和胶水比关系图，按线性比例关系采用略大于配制强度的强度对应的胶水比做进一步配合比调整偏于安全。也可以直接采用前述至少3 个水胶比混凝土强度试验中一个满足配制强度的胶水比做进一步配合比调整，虽然相对比较简明，但有时可能强度富余较多，经济代价略多。

**9.2.2、9.2.3** 混凝土配合比是指每立方米混凝土中各种材料的用量。在配合比计算、混凝土试配和配合比调整过程中，每立方米混凝土的各种材料混成的混凝土可能不足或超过1m3，即通常所说的亏方或盈方，通过配合比校正，可使依据配合比计算的混凝土生产方量更为准确。

**9.2.4** 在确定设计配合比前，对混凝土氯离子含量进行试验验证是非常有必要的。

**9.2.5** 备用的混凝土配合比在启用时，即便是条件类同，进行配合比验证试验是不可省略的。原材料质量显著变化是指诸如水泥胶砂强度、外加剂减水率和矿物掺合料性质等发生明显变化。

10 有特殊要求的混凝土配合比设计

10.1 高性能混凝土配合比设计要求

**10.1.1** 原材料的选用和质量控制对高强混凝土非常重要。在水泥方面，由于高强混凝土强度高，水胶比低，所以采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥无论是技术还是经济都比较合理，既胶砂强度较高，适合配制高强度等级混凝土，由于混合材较少，可掺加较多的矿物掺合料来改善高强混凝土的施工性能。在骨料方面，如果粗骨料粒径太大或（和）针片状颗粒含量较多，不利于混凝土中骨料合理堆积和应力合理分布，直接影响混凝土强度，也影响混凝土拌合物性能。细度模数为2.6～3.0的细骨料最适用于高强混凝土，使胶凝材料胶多的高强混凝土中总体材料颗粒级配更加合理；骨料含泥量（包括泥快）较多将明显影响高强混凝土强度。

**10.1.2** 如果胶凝材料用量太少，且水胶比小则浆体不足，将影响混凝土流动性及施工实用性。

10.2 泵送混凝土配合比设计要求

**10.2.1** 良好的骨料颗粒粒型和级配有利于配制泵送性能良好混凝土。在混凝土中掺用泵送剂或减水剂以及粉煤灰，并调整其掺用量，是配制泵送混凝土的基本方法。

**10.2.2**  混凝土泵送高度越高需要混凝土具有更好的流动性，因此本条依据《水运工程混凝土施工规范》JTS/T 153对不同泵送高度的混凝土坍落度进行了规定；如果胶凝材料用量太少，水胶比大则浆体太稀，黏度不足，混凝土容易离析。水胶比小则浆体不足，混凝土中骨料用量相对过多，这些都不利于混凝土的泵送。工程中泵送混凝土的砂率通常控制在35%～45%。泵送混凝土出机到泵送时间段内的坍落度经时损失值可以通过调整外加剂进控制，通常坍落度经时损失控制在30 mm/h以内比较好。

10.3 大体积混凝土配合比设计要求

**10.3.1、10.3.2** 采用低水化热的胶凝材料，有利于限制大体积混凝土由温度应力引起的裂缝。粗骨料粒径太小则限制混凝土变形作用较小。掺用缓凝型减水剂有利于缓解温升，起到温控作用。由于采用低水化热的胶凝材料有利于限制大体积混凝土由温度应力引起的裂缝，所以大体积混凝土中胶凝材料中往往提高矿物掺合料的含量，使混凝土强度发展较慢，设计采用混凝土60d或90d龄期强度也是合理的，但当标准养护时间和标准试件未能两全时，维持标准试件进行抗压强度试验比较合理。混凝土膨胀剂掺量的确定与一般化学外加剂掺量的确定方法一样，必须通过试验的方法确定，确定混凝土膨胀剂掺量的正确方法是按照《混凝土膨胀剂应用技术规范》GBJ 50119中的试验方法，使用实际工程原材料，进行限制膨胀率试验，以达到工程设计的限制膨胀率和强度指标时的膨胀剂掺量为准。

**10.3.3** 在配合比试配和调整时通过混凝土绝热温升测试设备测定混凝土的绝热温升，或通过计算求出混凝土的绝热温升，从而在配合比设计过程中控制混凝土绝热温升。

10.4 抗冻混凝土配合比设计要求

**10.4.1、10.4.2** 硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥不仅强度高，水化热高，在耐磨和耐腐蚀性能方面也比较优越，能有效防止混凝土在低温环境中出现结冻的现象。在混凝土中掺加引气剂，能在混凝上中产生许多独立且均匀分布稳定而封闭的微小气泡，当孔隙内自由水冻结时，气泡被压缩，大大减轻冰冻给孔隙带来的冻胀压力，从而保护混凝土不被破坏。本条依据现行行业标准《水运工程混凝土施工规范》JTS 202确定了不同骨料粒径下混凝土含气量的选择范围。