

港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计原则与方法

王胜年¹ 苏权科² 范志宏¹ 李全旺³ 周新刚⁴ 李克非³

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东广州 510230; 2. 港珠澳大桥管理局, 广东珠海 519015;

3. 清华大学, 北京 100084; 4. 烟台大学, 山东烟台 264005)

摘要: 系统阐述港珠澳大桥跨海工程混凝土结构耐久性设计的原则与方法, 首先介绍港珠澳大桥工程概况及 120 年使用年限的总体要求; 根据工程的环境、水文地质数据分析工程场址条件下混凝土结构劣化的主要过程和因素; 确定耐久性设计的控制过程为海洋氯离子侵入和表层混凝土碳化引起的钢筋锈蚀。针对耐久性控制过程, 分析耐久性极限状态、构件使用年限、环境作用类别和程度以及裂缝控制宽度; 然后建立针对港珠澳大桥工程场址条件的氯离子侵入过程设计模型, 使用全概率方法校准的分项系数法完成针对不同时用年限、不同暴露条件下的结构耐久性参数和混凝土保护层厚度设计; 最终确定用于港珠澳大桥混凝土结构 120 年使用年限的耐久性设计与质量参数。

关键词: 港珠澳大桥; 耐久性设计; 设计年限; 耐久性极限状态; 分项系数法; 可靠指标

中图分类号: TV431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-431X(2014)06-0001-08

Durability design principle and method for concrete structures in
Hong Kong-Zhuhai-Macau sea link projectWang Shengnian¹ Su Quanke² Fan Zhihong¹ Li Quanyang³ Zhou Xingang⁴ Li Kefei³

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. HZM Bridge Project Administration, Zhuhai 519015, China; 3. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The principles and procedure for the durability design of concrete structures in Hong Kong-Zhuhai-Macau (HZM) project for a design working life of 120 years are introduced. The environmental actions are firstly analyzed and classified for the project, and the possible deterioration processes for structural concrete are identified with respect to their mechanisms. The durability design is conducted from both materials composition control and performance-based design. The target design service life and durability limit states are attributed to concrete elements according to their structural importance and maintainability. According to the prescriptive requirements on material compositions, the carbonation-induced and chloride-induced corruptions of reinforcement steel are considered as most critical processes that control the design. The thickness and quality of concrete covers are determined from chloride penetration model using a partial factor design scheme. For chloride ingress, the partial factors are calibrated from full probabilistic approach for a target reliability $\beta = 1.3$. The statistical properties of parameters are regressed from 30-year exposure test data. Finally, the relation between the design values of chloride diffusion coefficient and the laboratory measured values is analyzed to establish a basis for durability quality control in construction.

Keywords: HZM bridge; durability design; service life; durability limit state; partial factor method; reliability index

E-mail: likefei@tsinghua.edu.cn

引 言

目前在建的港珠澳大桥是连接香港、珠海、澳门的跨海工程, 包括海中桥梁 28.8km(包括 3 个通航孔

桥)、两个海中人工岛以及 6.8km 的海中沉管隧道, 工程总投资超过 700 亿元。工程整体的设计使用年限为 120 年, 工程于 2008~2010 年完成初步设计, 2010 年开始施工, 预计于 2015/2016 年完成施工。工程设计中的主要技术挑战之一就是需要在严酷的海洋环境中保证工程整体 120 年的设计年限。

耐久性设计已经成为保证结构使用年限的重要手段。混凝土结构的耐久性是在使用期限内、在环境因素的作用下结构与构件的性能能够满足适用性与

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAG07B04)

作者简介: 王胜年, 学士, 教授级高级工程师

收稿日期: 2013-05-15

安全性的能力^[1]。近年来国内外学者在混凝土材料与结构水平上对耐久性问题进行了广泛和深入的研究^[2-3];和结构的真实服役状况调查相结合,能够对新建结构的耐久性设计提供研究和数据基础。混凝土结构耐久性设计可以分为定性设计方法和使用数学模型的定量设计方法。定性设计方法基于工程经验直接给出在确定环境作用和指定使用年限下的材料、构造以及防腐蚀要求^[4];是目前多数设计规范采用的方法^[5-7]。定量方法使用数学模型针对确定的环境作用、指定的使用年限以及明确的耐久性极限状态进行设计^[8-10]。应该指出,两种方法并不对立;由于目前学术界对不同耐久性过程的研究深度并不均一,提出数学模型的工程可用程度也有差异;因此合理的耐久性设计应该将定性设计与定量设计统一起来^[11-12]。本文介绍了港珠澳大桥工程初步设计阶段针对 120 年使用年限的耐久性设计原则,建立了海洋环境下耐久性设计的方法,给出了不同暴露条件下结构混凝土的定性与定量要求,以及耐久性设计指标与质量控制标准。

1 环境条件与作用

1.1 基本环境数据

港珠澳大桥的工程场址环境属于亚热带季风性气候,以下基本环境数据取自于初步设计阶段的环境、水文与气候的工程调查数据。工程场址的年平均温度为 22.3 ~ 23.1℃;年平均湿度为 77% ~ 80%,季节变化明显;主导风向为东和东南风,年平均风速为 3.1m/s(珠海)、3.6m/s(澳门)和 6.6m/s(香港)。水质分析表明,海水中氯离子(Cl^-)含量为 10700 ~ 17020mg/L,硫酸根(SO_4^{2-})含量为 1140 ~ 2260mg/L,海水 pH 值在 6.65 ~ 8.63 之间;海水的含盐度整体上东部(香港侧)高于西部(珠海-澳门侧),同一地点海水表层的含盐度低于底层含盐度,最高含盐度为 32.9(东部)和 25.4(西部)。

水文数据分析表明,重现期为 10 年和 100 年的设计高水位和设计低水位分别是 2.74m(高水位), -1.27m(低水位)和 3.47m(高水位), -1.51m(低水位)。重现期 100 年的 1% 波高为 5.47m;根据海港工程行业标准 JGJ 275—2000^[13]浪高的计算结果为 4.83m。最高天文潮位为 3.52m,最低天文潮位为 -1.32m;重现期 100 年的有效波高为 3.92m。根据以上数据,按照 JGJ 275—2000 针对无掩护条件得到海洋环境暴露区域的分布:大气区(> +6.26m),浪溅区(+6.26 ~ -0.40m),水位变动区(-0.40m ~ -2.10m),水下区(< -2.10m)。

1.2 环境作用

根据 GB/T 50476—2008^[7],混凝土结构的环境作用可按照不同的劣化机理划分为 5 类,每个环境分类中又区分环境作用等级。结合港珠澳大桥工程场址的环境数据,表 1 列出了港珠澳大桥主要混凝土结构的环境作用类别和等级,其中环境类别 I 表示大气环境、III 表示海洋环境、V 表示化学腐蚀环境。

表 1 港珠澳大桥混凝土结构环境作用划分

Table 1 Environmental classification for RC elements in HZM project

结构	类别	环境因素	作用等级	环境条件	构件(RC/PC)
桥梁	I	CO_2	I-B	隐蔽环境	箱梁(内)
		氯离子	III-C	海水淹没	桩基础, 承台(部分)
	III		III-D	盐雾作用	桥面 桥塔 (部分) 桥墩 (部分)
			III-F	水变/浪溅区	承台(部分), 桥墩(部分), 箱梁
	V	海水 SO_4^{2-} , Mg^{2+} , CO_2	V-D	SO_4^{2-} : 1000 ~ 4000mg/L Mg^{2+} : 1000 ~ 3000mg/L CO_2 : 30 ~ 60mg/L	承台 (水下部分)
隧道	I	CO_2	I-B	隐蔽环境	管节(内部)
	III	氯离子	III-D	盐雾	管节(内部)
			III-E	海水/空气	管节(外部)
			III-F	水变/浪溅区	防撞墩
人工岛	V	海水 SO_4^{2-} , Mg^{2+} , CO_2	V-D	SO_4^{2-} : 1000 ~ 4000mg/L Mg^{2+} : 1000 ~ 3000mg/L CO_2 : 30 ~ 60mg/L	管节(外部)
	III	氯离子	III-C	水变/浪溅区(素混凝土)	防波堤
	V	海水 SO_4^{2-} , Mg^{2+} , CO_2	V-D	SO_4^{2-} : 1000 ~ 4000mg/L Mg^{2+} : 1000 ~ 3000mg/L CO_2 : 30 ~ 60mg/L	防波堤

1.3 劣化过程分析

根据表 1 的环境因素分析,港珠澳大桥混凝土结构可能存在的耐久性过程包括:混凝土表层碳化引起的钢筋锈蚀(I类环境),海洋氯离子引起的钢筋锈蚀(III类环境),海水盐类对混凝土的腐蚀作用(V类环境),以及混凝土内部可能出现的碱-骨料反应和内部硫酸盐(延迟钙矾石生成)反应。

(1) 混凝土表层碳化引起钢筋锈蚀过程,包括两个阶段:外部 CO_2 进入混凝土内部引起混凝土的碳化

反应和由碳化反应导致的钢筋的锈蚀过程^[14]。干燥环境有利于碳化过程而湿润环境有利于钢筋的锈蚀过程;因此干湿交替是最为严酷的环境作用条件。耐久性设计的主要控制因素是混凝土保护层质量、厚度以及裂缝控制^[15]。

(2) 氯离子侵入引起的钢筋锈蚀过程,包括两个阶段:外部海洋氯离子向混凝土内部的迁移过程和钢筋表面由氯离子诱发的钢筋电化学锈蚀过程^[16]。前者的速率主要由混凝土的氯离子扩散系数以及材料的孔隙含水率决定;后者主要由钢筋电化学锈蚀反应因素决定,包括氧气、水的含量以及钢筋表面的阴阳极面积比例等。耐久性设计的控制因素包括混凝土保护层厚度与质量以及表面裂缝宽度的控制^[15]。

(3) 盐类作用,包括物理和化学两个方面。物理作用是在外部干湿交替作用下,孔隙溶液的盐类结晶过程对材料造成的力学破坏^[17];化学作用主要指盐类与水泥水化产物发生化学反应,对材料的长期稳定性产生不利影响^[18]。海水中的硫酸盐可能同时导致上述的两个作用^[19]。耐久性设计控制因素包括混凝土的致密程度以及针对外部盐类的水泥的矿物组成。

(4) 混凝土内部膨胀反应,主要包括碱活性骨料和孔隙溶液之间的碱-骨料反应(AAR),以及内部钙矾石的延迟生成(DEF)。两者的产物均可通过体积膨胀对材料造成破坏作用,但破坏作用的显现需要较长的潜伏期^[20];目前对内部膨胀反应的工程措施,AAR主要通过控制骨料的碱活性和水泥的含碱量来实现,DEF通过控制水泥的铝酸三钙(C_3A)以及等价三氧化硫(SO_3)含量以及混凝土硬化过程中的水化温升来控制^[4,7,11-12]。

2 耐久性设计原则与方法

2.1 总体原则

针对港珠澳大桥结构混凝土的耐久性过程,耐久性设计需要从总体上合理地将材料设计和结构设计结合起来,来综合保证结构 120 年的设计使用年限。表 2 根据相关规范标准^[7,11],汇总了在材料和结构水平耐久性设计的内容。

经过港珠澳大桥工程对结构混凝土原材料以及水泥矿物成分的控制和有针对性的混凝土配合比设计,盐类作用(物理、化学)和混凝土内部膨胀反应的可能性被控制在很低的水平上;因此不再作为耐久性控制过程考虑。混凝土表层碳化和海洋氯离子的侵入引起的钢筋锈蚀过程是耐久性设计的控制过程。耐久性设计将分别在材料和结构水平上确定混凝土

材料设计和构件结构设计参数,并确定相应的设计安全裕度。

表 2 钢筋混凝土构件耐久性的材料与结构要求

Table 2 Durability requirements for RC elements at both material and structural levels

耐久性要求	碳化 锈蚀	氯离子 锈蚀	盐类作用		内部膨胀反应	
			物理	化学	AAR	DEF
水胶比	✓	✓	✓	✓	✓	✓
胶凝材料组成		✓		✓	✓	✓
胶凝材料用量	✓	✓	✓	✓	✓	✓
混凝土 Cl^- 含量		✓				
水泥 C_3A 含量				✓		✓
水泥 SO_3 含量				✓		✓
混凝土碱含量					✓	
骨料碱活性					✓	
保护层质量	✓	✓	✓	✓		
保护层厚度	✓	✓	✓	✓		
裂缝宽度	✓	✓	✓	✓		

2.2 设计年限和极限状态

港珠澳大桥整体设计年限为 120 年。以此为基本目标,结构层次的耐久性设计首先需要根据构件的重要性和技术可行性确定各个混凝土构件的设计使用年限。本文确定构件使用年限的原则为:主要受力构件和难以维护构件的设计使用年限与结构整体相同(120 年);次要构件和能够定期维护的构件可低于整体使用年限,但维护周期需要在设计阶段确定。

确定了构件的设计使用年限后,耐久性设计需要确定耐久性极限状态^[1,12]。对于钢筋锈蚀过程,可定义两种极限状态:(a) 钢筋表面脱钝极限状态,和(b) 钢筋有限锈蚀的极限状态。对于港珠澳大桥混凝土结构,主要受力构件的耐久性极限状态采用(a),次要和可更换构件可采用极限状态(b)。表 3 给出了港珠澳大桥混凝土结构主要构件的暴露环境等级划分、设计使用年限以及对应的耐久性极限状态。

2.3 耐久性设计方法

本文针对氯离子侵入过程进行耐久性设计,设计参数包括保护层混凝土质量(抗氯离子能力)、保护层厚度以及表面裂缝的控制宽度;相应的构件设计使用年限和对应的耐久性极限状态见表 3。本文耐久性设计使用数学模型,结合港珠澳大桥具体环境条件和华南地区长期暴露试验数据对模型参数进行校准,并使用分项系数方法完成耐久性设计。耐久性设计的保证率对应的可靠度指标设定为 $\beta = 1.3$,低于现有的 fib Model Code 的可靠度指标 $\beta = 1.5$ ^[21]。采用较低的可

表3 钢筋和预应力混凝土构件的设计年限、环境作用
以及耐久性极限状态 (DLS)

Table 3 Design lives for PC/RC elements and
their durability limit states (DLS)

结构	构件	设计年限(年)	环境等级	DLS	裂缝宽度 (mm)
斜拉桥 (通航孔)	整体式墩塔	120	III-F	(a)	0.15
	钢箱梁	120	—	—	—
	混凝土铺装	120	III-D	(a)	0.20
	辅助墩	120	III-F	(a)	0.15
	承台	120	III-F	(a)	0.15
	桩基础(钢管复合桩)	120	III-C	(a)	0.20
箱梁桥 (非通航孔)	钢筋混凝土桥面	120	III-D	(a)	0.20
	预应力混凝土箱梁 (外侧)	120	III-D	(a)	0.20
	预应力混凝土箱梁 (外侧)	120	III-F	(a)	0.15
	预应力混凝土箱梁 (内侧)	120	I-B/III-D	(a)	0.20
	RC/PC 桥墩	120	III-F	(a)	0.15
	RC 承台	120	III-C, F	(a)	0.15
沉管隧道	桩基础(钢管复合桩)	120	III-C	(a)	0.20
	隧道管节 (海中, 外侧)	120	III-E	(a)	0.15
	隧道管节 (海中, 内测)	120	I-B, III-D	(a)	0.20
	隧道管节 (人工岛, 内外侧)	120	III-E	(a)	0.15
	防撞墩	120	III-F	(a)	0.15
	防浪块	120	III-C	—	—
人工岛	防波堤	120	III-C	—	—

靠度指标基于以下考虑: ①初步设计阶段的耐久性设计提供结构混凝土的基本要求, 后续的详细设计会在此基础上采取不同的附加措施; ②本文采用的 DLS 为钢筋脱钝状态, 对应相对保守的耐久性设计。最终的耐久性设计的可靠度指标在详细设计方案确定后会进行最终评估。

作为耐久性设计参数之一, 混凝土表面裂缝宽度理论上需要根据环境作用和构件的设计使用年限, 结合具体的耐久性过程来确定。然而目前有关裂缝对耐久性过程的定量影响尚未形成定论, 尚不能支撑工程设计。因此, 对于港珠澳大桥的混凝土结构的表面裂缝宽度控制通过综合分析现有研究数据和国际、国内标准来确定^[7 22], 见表 3。

3 氯离子侵入过程设计

3.1 基本模型

海洋环境中氯离子侵入模型采用工程应用较为广泛的 Fick 扩散模型^[8], 以钢筋表面脱钝作为 DLS, 设计方程为,

$$G = C_{cr} - C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_d}{2\sqrt{D_{Cl} \cdot t_{SL}}} \right) \right] \quad (1)$$

式中: C_{cr} 为临界氯离子浓度和混凝土表面氯离子浓度(%); x_d 为混凝土保护层厚度(m); D_{Cl} 为表观氯离子扩散系数(m^2/s); t_{SL} 为设计使用年限; erf 为数学误差函数。通过长期观测, 暴露条件下混凝土的表观氯离子扩散系数随时间呈现指数衰减的规律,

$$D_{Cl}(t) = D_{Cl}^0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n = D_{Cl}^0 \eta(t_0, t) \quad (2)$$

式中: n 为表观氯离子扩散系数时间衰减指数; D_0 为混凝土在龄期 t_0 时的表观扩散系数, 应该明确 D_0 本质上是暴露试验对应龄期 t_0 的表观扩散系数, 和在该龄期的实验室快速测试结果不同; $\eta(t_0, t)$ 为 D_{Cl} 的总体时间衰减系数。氯离子扩散系数衰减的主要机理之一是混凝土材料的微观结构由于内部不断水化而变得致密^[23]。但认为 D_{Cl} 会随时间无限衰减显然不合理; 因此在港珠澳大桥混凝土结构设计中, 结合材料的具体组成将衰减周期定为 30 年;

$$\eta(t_0, t) \big|_{t > 30 \text{ years}} = \eta(t_0, t = 30 \text{ years}) \quad (3)$$

也就是说, 模型认为材料的微观结构在 30 年后不再发展。因此, 氯离子侵入模型对于一个指定的设计年限 t_{SL} 包括 5 个模型参数: C_{cr} , C_s , x_d , D_0 , n (η)。

3.2 参数统计规律与分项系数

氯离子侵入模型的参数取值与结构的具体暴露环境以及材料组成有很大关系。为保证港珠澳大桥氯离子侵入模型计算的准确性, 需要结合港珠澳大桥的环境条件和结构材料组成确定这些参数。为此, 耐久性设计首先分析了华南地区近 30 年的暴露试验数据和工程调查数据, 确定了适于港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计的模型参数及其统计特征; 然后使用全概率方法, 以 $\beta = 1.3$ 为目标, 使用可靠度理论校准模型参数的设计取值及其分项系数。

图 1 给出了港珠澳大桥氯离子侵入过程耐久性设计参数的统计特征。表面氯离子浓度统计了湛江港暴露实验站近 12 年内 351 个试件的数据, 表明表面氯离子浓度符合正态分布; 临界氯离子浓度统计了不同暴露条件下 68 个试件的数据, 分析表明临界氯离子浓度在大气区服从对数正态分布、在水下区、水变区和

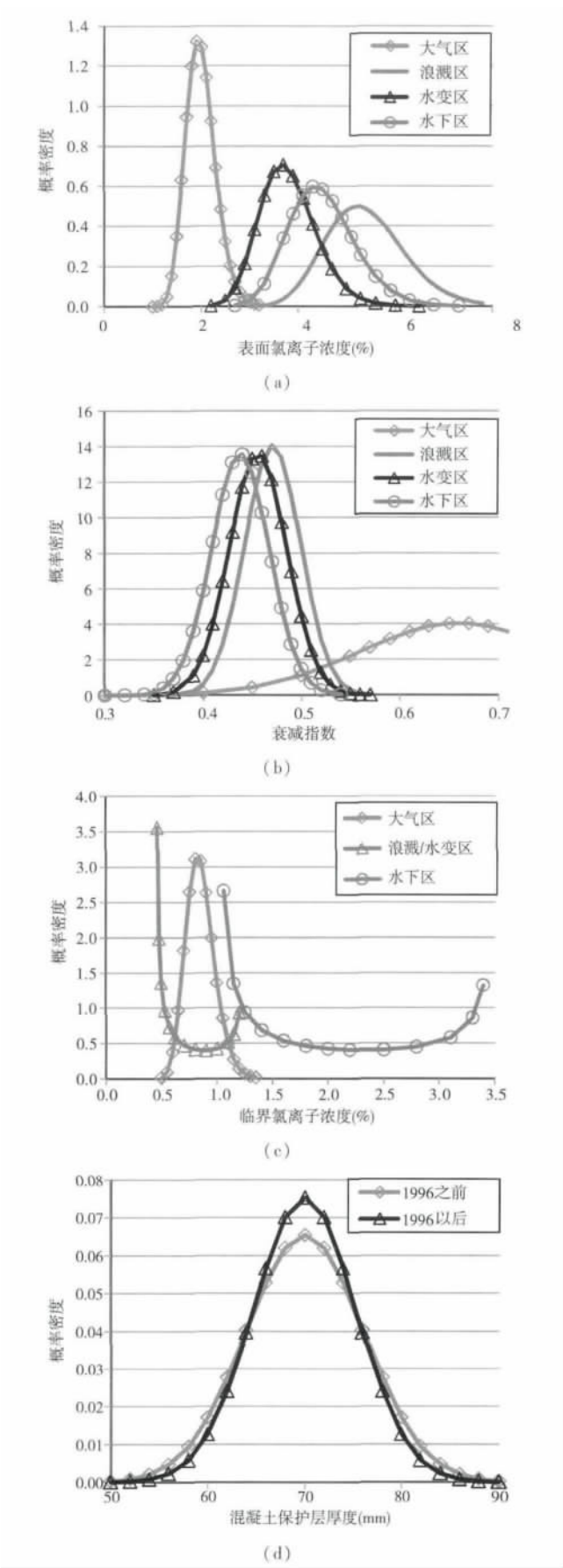


图 1 氯离子侵入过程模型参数
Fig.1 Statistical properties for model parameters
of chloride ingress

浪溅区服从 beta 分布;氯离子扩散系数统计了不同暴露龄期的 395 个试件数据,分析表明,氯离子扩散系数服从正态分布;其龄期衰减指数也服从正态分布;混凝土保护层厚度统计了近 30 年 1904 个海港工程调查数据;分析表明,保护层厚度服从正态分布;设计值大于 50mm 的保护层厚度的标准差分别为 6.1mm(1996 年之前)和 5.3mm(1996 年之后)。

基于模型参数的上述统计特征,本文使用全概率校准方法确定对应 $\beta = 1.3$ 的模型参数分项系数。按照结构设计习惯,保护层厚度不采用分项系数而是采用施工操作允差 Δx 来赋予保护层厚度指定的裕度,将保护层厚度区分为名义值 x_d^{nom} 和最小值 x_d^{min} 。将图 1 中保护层厚度分布规律中的平均值和 95% 保证率的分位值分别作为 x_d^{nom} 和最小值 x_d^{min} ,可以得到操作允差 Δx 约为 10mm;表 4 给出了设计参数的分项系数,限于篇幅,详细的校准算法予以省略。从校准过程来看,使用年限(50 年、120 年)对分项系数的影响很小,因此在本文对不同的年限采用相同的分项系数。耐久性设计将氯离子扩散系数 D_{Cl} 和保护层厚度 x_d 视为设计变量,在其他参数确定的前提下给出对应不同设计年限和暴露条件的设计值。

表 4 全概率法校准的设计参数的特征值和
分项系数 ($\beta = 1.3, t_{SL} = 50, 120$ years)

Table 4 Calibrated characteristic values and partial factors
for chloride ingress design for service life of 50 years and
120 years ($\beta = 1.3, t_{SL} = 50, 120$ years)

参数		水下区	水变区	浪溅区	大气区
C_{cr} (% binder)	特征值	2.0	0.75	0.75	0.85
	分项系数 γ_c	2.0	1.7	1.7	1.1
C_s (% binder)	特征值	4.50	3.82	5.44	1.98
	分项系数 γ_s	1.05	1.05	1.05	1.1
D_{Cl} ($10^{-12} m^2/s$)	特征值	3.0	3.0	3.0	3.0
	分项系数 γ_D	1.05	1.1	1.1	1.1
η (-)	特征值	0.074	0.067	0.061	0.047
	分项系数 γ_η	1.05	1.05	1.05	1.35
x_d (mm)	名义厚度 x_d^{nom}	60	80	80	50
	操作允差 Δx_d	10	10	10	10

3.3 设计结果

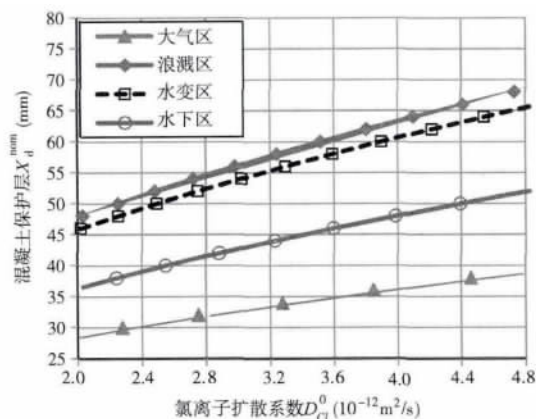
使用表 4 得到的校准参数与分项系数,针对氯离子侵入的分项系数法设计方程成为:

$$G_1 = \frac{C_{cr}}{\gamma_c} - \gamma_s C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_d^{nom} - \Delta x_d}{2 \sqrt{(\gamma_D D_{Cl}^0) \cdot (\gamma_\eta \eta) \cdot t_{SL}}} \right) \right] \geq 0$$

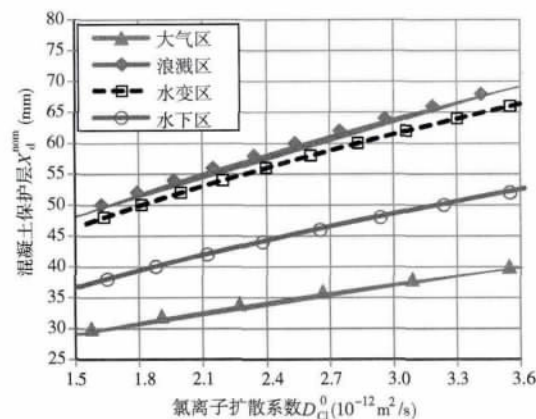
(4)

以下设计过程将氯离子扩散系数的特征值 D_{Cl}^0 和

保护层厚度的名义值 x_d^{nom} 作为设计变量。使用式 (4) 图 2 和图 3 分别表示了针对设计年限 50 年和 120 年和不同暴露条件下混凝土构件的设计结果; 针对每个设计年限, 图中还表示了初始暴露龄期分别为 28d 和 56d 的氯离子扩散系数的设计结果。由图 2 得出, 如果将浪溅区保护层厚度定在 55 ~ 65mm, 50 年设计使用年限的氯离子扩散系数设计取值区间为 $(2.9 \sim 4.3) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (28d) 和 $(2.1 \sim 3.1) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (56d); 由图 3 得出, 如果设计年限为 120 年, 浪溅区保护层厚度定在 75 ~ 85mm, 则相应的氯离子扩散系数的设计取值区间为 $(2.5 \sim 3.3) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (28d) 和 $(1.8 \sim 2.4) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (56d)。



(a) 暴露龄期为 28d



(b) 暴露龄期为 56d

图 2 不同暴露条件下钢筋混凝土构件保护层厚度与氯离子扩散系数的关系

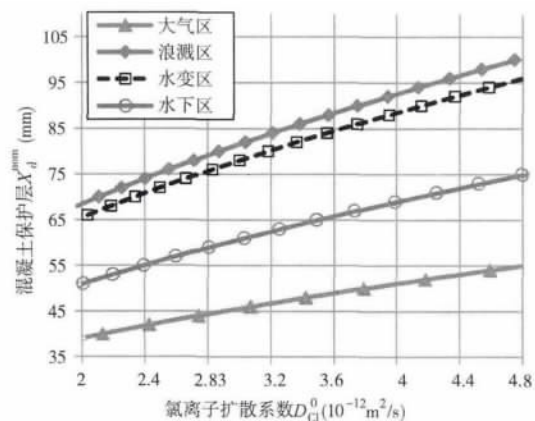
($\beta = 1.3$, $t_{\text{SL}} = 50$ years)

Fig. 2 Concrete cover thickness and quality for RC elements in different exposure zones

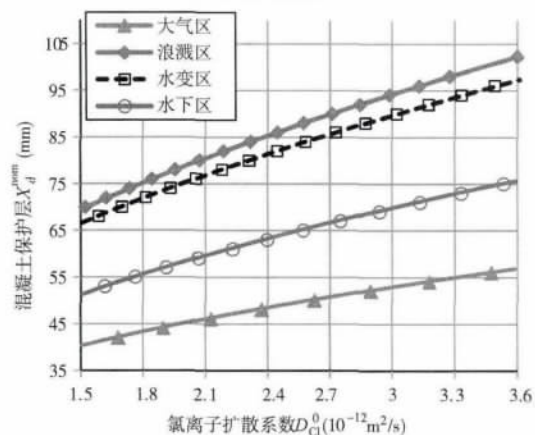
($\beta = 1.3$, $t_{\text{SL}} = 50$ years)

4 耐久性设计参数与质量控制

根据图 2 和图 3 的设计结果, 保护层厚度和对应的氯离子扩散系数被确定为港珠澳大桥混凝土结构



(a) 暴露龄期为 28d



(b) 暴露龄期为 56d

图 3 不同暴露条件下钢筋混凝土构件保护层厚度与氯离子扩散系数的关系

($\beta = 1.3$, $t_{\text{SL}} = 120$ years)

Fig. 3 Concrete cover thickness and quality of RC elements in different exposure zones

($\beta = 1.3$, $t_{\text{SL}} = 120$ years)

耐久性设计的基本参数, 表 5 汇总了设计结果, 为便于设计采用, 保护层厚度和氯离子扩散系数都进行了模数化处理。

值得注意的是, 通过氯离子侵入模型设计得到指定龄期的氯离子扩散系数 $D_{\text{Cl}}(t_0)$, 对应于暴露龄期为 t_0 的表观氯离子扩散系数, 即该系数是现场回归得到的扩散系数, 理论上属于氯离子的非稳态扩散系数 (NSSD), 与暴露环境、胶凝材料水化程度和材料孔隙含水状态有密切关系^[24-25]。港珠澳大桥耐久性质量控制确定使用快速电迁移方法 (RCM)^[26] 作为氯离子扩散系数的质量检测方法, 该方法得到的是电场作用下的非稳态氯离子迁移系数 (NSSM), 数值上并不等于同龄期 (t_0) 的 NSSD 扩散系数; 因此导致了氯离子扩散系数的耐久性设计值 (NSSD) 不能直接用来作为质量控制值 (NSSM) 来使用。为探寻两者的关系, 前期的耐久性研究特别将长期暴露试件按照相同配合

表 5 港珠澳大桥混凝土构件耐久性设计参数与
质量控制参数($\beta = 1.3$)

Table 5 Durability design results for RC elements
in HZM project ($\beta = 1.3$)

构件	暴露 环境	t_{SL} (year)	DLS	x_d^{nom} (mm)	D_{Cl}^0 设计值 ($10^{-12} m^2/s$)		D_{Cl} 控制值 ($10^{-12} m^2/s$)	
					28d	56d	28d	56d
箱梁	盐雾	120	(a)	45	3.0	2.0	6.0	4.0
(外侧)	浪溅	120	(a)	80	3.0	2.0	6.0	4.0
箱梁(内侧)	盐雾	120	(a)	45	3.0	2.0	6.0	4.0
桥墩、塔	盐雾	120	(a)	50	3.5	2.2	7.0	4.5
(外侧)	浪溅	120	(a)	85	3.5	2.2	7.0	4.5
桥墩(内侧)	盐雾	120	(a)	50	3.5	2.2	7.0	4.5
	浪溅	120	(a)	85	3.5	2.2	7.0	4.5
承台	水下	120	(a)	65	3.5	2.2	7.0	4.5
桩基础	水下	120	(a)	65	3.5	2.2	7.0	4.5
附属结构 (人工岛)	浪溅	50	(a)	60	3.5	2.2	7.0	4.5
隧道(外侧)	浪溅	120	(a)	80	3.5	2.2	7.0	4.5
隧道(内侧)	盐雾	120	(a)	50	3.5	2.2	7.0	4.5

比在实验室重新成型进行 RCM 试验,得到相同配合比的 NSSM 扩散系数。试验结果表明,两者存在保守的 2 倍关系:即 NSSM 扩散系数约为 NSSD 扩散系数的 2 倍。通过这一关系,表 5 的耐久性设计值被转换为耐久性质量控制值。当然,两者的相关关系还需在后续试验中进一步验证。

5 研究结论

本文介绍了港珠澳大桥混凝土结构 120 年设计使用年限的耐久性设计基本原则和方法。根据水文和环境数据确定了混凝土结构的暴露区域划分以及结构混凝土可能的耐久性过程。通过环境影响因素和材料组成确定了不同耐久性过程的风险水平。耐久性设计总体原则确定为通过材料成分控制盐类腐蚀和内部膨胀反应,通过材料与结构设计来控制碳化、氯离子引起的钢筋锈蚀过程。

对于海洋环境氯离子引起的钢筋锈蚀过程使用了 Fick 模型进行量化耐久性设计。对于主要混凝土构件 DLS 取为钢筋表面脱钝状态;设计采用了分项系数法进行,初步设计的目标设计可靠度指标为 $\beta = 1.3$ 。在近 30 年华南地区暴露试验和工程调查数据的基础上,分析确定了各个模型参数的统计规律;在此基础上使用全概率方法以 $\beta = 1.3$ 为目标校准了模型

参数的分项系数和操作允差(保护层厚度)。基于校准模型的设计给出了不同暴露条件、不同设计年限下钢筋保护层厚度(名义值)与对应的氯离子扩散系数设计值之间的关系。

确定了港珠澳大桥混凝土构件的钢筋保护层厚度和质量(氯离子扩散系数)的关系与取值,并作为港珠澳大桥混凝土结构设计的耐久性基本要求为详细设计阶段所采纳。本文进一步探讨了作为耐久性设计值的暴露条件氯离子扩散系数(NSSD)和作为耐久性质量控制值的快速电迁移系数(NSSM)的关系;并根据试验研究结果,实现了设计值与质量控制值的转换。

参 考 文 献

- [1] ISO13823: 2008 General principles on the design of structures for durability [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2008
- [2] DuraCrete. Probabilistic performance based durability design: modeling of degradation [R]. Netherlands: DuraCrete, 1998
- [3] Sarja A. Durability design of concrete structures—Committee report 130-CSL[J]. Materials and Structures, 2000, 33(1): 14-20
- [4] Hobbs D W, Matthews J D, Marsh B K. Minimum requirements of durable concrete: carbonation and chloride-induced corrosion, freeze-thaw attack and chemical attack [M]. Crowthorne: British Cement Association, 1998
- [5] EN 1992-1-1 Eurocode 2: design of concrete structures [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002
- [6] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (318R-05) [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2005
- [7] GB/T 50476—2008 混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009(GB/T 50476—2008 Code for durability design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009 (in Chinese))
- [8] FIB Bulletin 34: Model code for service life design [S]. Lausanne: FIB, 2006
- [9] French Association of Civil Engineering. Concrete design for a given structure service life, durability management with regard to reinforcement corrosion and alkali-silica reaction [R]. Paris: AFGC, 2007
- [10] Alexander M G, Ballim Y, Stanish K. A framework for use of durability indexes in performance-based design and specifications for reinforced concrete structures [J]. Materials and Structures, 2008, 41(5): 921-936
- [11] CCES 01—2004 混凝土结构耐久性设计与施工指南

- [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005 (CCES 01—2004 Guide to durability design and construction of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005(in Chinese))
- [12] Li K F, Chen Z Y, Lian H Z. Concepts and requirements of durability design for concrete structures: an extensive review of CCES01 [J]. Materials and Structures, 2008, 41 (4): 717-731
- [13] JTJ 275—2000 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001 (JTJ 275—2000 Corrosion prevention technical specifications for concrete structures of marine harbor engineering [S]. Beijing : China Communications Press, 2001 (in Chinese))
- [14] Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation [J]. ACI Materials Journal, 1991, 88 (4): 363-373
- [15] Bohni H. Corrosion in reinforced concrete structures [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005
- [16] Tuutti K. Corrosion of steel in concrete [R]. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982
- [17] Valenza J J, Scherer G W. Mechanism for salt scaling [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89 (4): 1161-1179
- [18] Ganjian E, Pouya H S. Effect of magnesium and sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to the seawater tidal zone [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (7): 1332-1343
- [19] Skalny J, Marchand J, Odler I. Sulphate attack on concrete [M]. London: Taylor & Francis, 2004
- [20] Ulm F J, Coussy O, Li K F, et al. Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126 (3): 233-242
- [21] Federation International du Beton. Model code 2010 [S]. Lausanne: Federation International du Beton, 2010
- [22] Otieno M, Beushausen H, Alexander M. Towards incorporating the influence of cover cracking on steel corrosion in RC design codes: the concept of performance-based crack width limits [J]. Materials and Structures, 2012, 45 (12): 1805-1816
- [23] Andrade C, Castellote M, D Andrea R. Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices [J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 412 (1): 209-216
- [24] Tang L P. Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions: Part 1. Theoretical considerations [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29 (9): 1463-1468
- [25] Tang L P. Concentration dependence of diffusion and migration of chloride ions: Part 2. Experimental evaluations [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29 (9): 1469-1474
- [26] NT Build 492 Concrete, Mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady migration experiments [S]. Espoo: NORDTEST, 1999

王胜年(1963-) 男, 学士 教授级高级工程师。主要从事高性能海工混凝土研究。

苏权科(1962-) 男, 学士 教授级高级工程师。主要从事工程组织与质量管理方面工作。

范志宏(1979-) 男, 硕士 高级工程师。主要从事高性能海工混凝土研究。

李全旺(1975-) 男, 博士 副教授。主要从事结构可靠度研究。

周新刚(1963-) 男, 博士 教授。主要从事结构可靠度与混凝土耐久性研究。

李克非(1972-) 男, 博士 教授。主要从事混凝土结构耐久性研究。