

胶州湾海底隧道衬砌混凝土服役寿命预测

金祖权^{1,2}, 赵铁军¹, 侯保荣², 李秋义¹

(1. 青岛理工大学土木学院, 山东 青岛 266033; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:胶州湾海底隧道是中国自行建造的第2条海底隧道,其设计服役寿命为100 a。分析了海底隧道衬砌混凝土的服役环境,建立了综合考虑氯离子扩散、碳化和弯曲荷载影响的服役寿命预测模型。调查了海底隧道现行施工里程的混凝土耐久性关键参数,建立了海底隧道混凝土氯离子扩散系数与回弹强度间的函数关系,通过预测模型计算了混凝土中氯离子随时间的演化规律及衬砌混凝土服役寿命。结果表明:隧道衬砌混凝土的保护层厚度波动值 $-4(-6) \sim +15$ mm,标准养护衬砌混凝土氯离子扩散系数均值为 $2.1(2.7) \times 10^{-12}$ m²/s,混凝土中初始氯离子浓度小于0.35 kg/m³。隧道衬砌混凝土氯离子扩散系数与回弹强度呈线性函数关系,施工里程内氯离子扩散系数波动为 $1.5 \sim 3.5 \times 10^{-12}$ m²/s。基于模型计算,胶州湾海底隧道左右线衬砌混凝土的服役寿命均超过100 a。

关键词:胶州湾海底隧道;服役寿命;寿命预测模型;衬砌混凝土;耐久性;氯离子扩散系数;保护层
中图分类号:U451.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)06-0086-06

Service Life Prediction of Lining Concrete for Jiaozhou Bay Subsea Tunnel

JIN Zu-quan^{1,2}, ZHAO Tie-jun², HOU Bao-rong¹, LI Qiu-yi²

(1. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China; 2. Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, Shandong, P. R. China)

Abstract: Jiaozhou Bay subsea tunnel is the second self-built tunnel in China with the designed service life over 100 years. On the basis of service environment of subsea tunnel concrete and the durability experiments of concretes, the service life prediction model considering chloride diffusion, carbonation and bending loading was proposed. The key durability coefficient of lining concrete in subsea tunnel was investigated. And the function of chloride diffusion coefficient and rebound strength of concrete was proposed. Moreover, the chloride content in concrete varied with service time and the service life of lining concrete for subsea tunnel was predicted with the proposed service life prediction model. It was found that the value of varied cover thickness was from $-4(6)$ to 15 mm. The chloride diffusion coefficient mean value of lining concrete in standard curing was $2.1(2.7) \times 10^{-12}$ m²/s. And the initial chloride content in concrete was less than 0.35 kg/m³. The relationship between chloride diffusion coefficient and rebound strength could be regressed to linear relationship, and the calculated chloride diffusion coefficient of lining concrete was varied from 1.5×10^{-12} m²/s to 3.5×10^{-12} m²/s. The predicted service life of lining concrete for Jiaozhou bay subsea tunnel was more than 100 years according to proposed model.

Key words: Jiaozhou bay subsea tunnel; service life; service life prediction model; lining concrete; durability; chloride diffusion coefficient; cover thickness

收稿日期:2009-07-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50708046;50739001);山东省教育厅项目(J08LA04)

作者简介:金祖权(1977-),男,副教授,博士,主要从事混凝土耐久性方面研究,(E-mail)jinzuquan@126.com。

青岛胶州湾海底隧道总长 9 570 m,其中海域段 3 950 m、陆域段 2 220 m、接线隧道长约 1 700 m;隧道全长中国第 1、世界第 3。隧道中线线间距为 55 m,隧道埋深根据合理埋深 25 m 控制,局部采用最小安全埋深 20 m。隧道采用双洞加服务隧道,矿山法施工,工期为 3~4 a,工程总投资 30 多亿元。胶州湾海底隧道薛家岛段从 2007 年开始施工,止 2008 年 12 月右洞衬砌混凝土施工里程为 YK8+860~YK8+64,喷射混凝土施工里程为 YK8+860~YK7+50;左洞衬砌混凝土施工里程为 ZK8+814.3~ZK8+266.2,喷射混凝土施工里程为(ZK8+814.3~ZK7+305);左右洞均已进入海域段。

由于海底隧道要求高安全建设、长寿命服役,国内外学者对耐久性进行了特殊的关注^[1-4]。考虑到胶州湾海底隧道 100 年服役寿命要求,设计时已按照相应的模型给出了衬砌混凝土的耐久性设计参数^[5]。然而这些参数在实际施工过程中与设计时并不完全吻合,这将导致预测寿命与实际情况存在差异。为此,陈肇元院士提出了混凝土耐久性再设计理论^[6]。为了回答胶州湾海底衬砌混凝土服役寿命,该文对胶州湾海底隧道衬砌混凝土主要耐久性参数进行了无损和钻芯检测,通过试验和模型计算,给出了衬砌混凝土中氯离子渗透规律和其相应的服役寿命。

1 模型推导

1.1 基本模型

胶州湾海底衬砌混凝土主要受到类海水渗透地下水、盐雾、高浓度 CO₂、冻融等环境作用影响^[7]。其中导致混凝土中钢筋锈蚀的主要因素为氯离子与碳化复合作用,为此改进了 Duracrete 基于氯盐腐蚀的寿命预测模型,如公式(1)所示。

$$t = \left\{ \left\{ \frac{2}{x - \Delta x} \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{C_c - C_0}{\gamma_1} \frac{1}{A(\tau w/b) \gamma_2} \right] \right\}^{-2} \cdot \frac{1}{Dk_{\text{carbon}} k_e k_c t_0^n \gamma_3} \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (1)$$

其中: t 为服役时间, a; $x, \Delta x$ 为保护层厚度、保护层厚度施工偏差, mm; C_c 为钢筋锈蚀临界氯离子浓度(%胶凝材料); A 为混凝土表面氯离子浓度与 W/B 关系的回归系数; W/B 为混凝土的水胶比; D 为混凝土氯离子扩散系数(28 d 测得值, m²/s); t_0 为混凝土氯离子扩散系数测试龄期; $k_{\text{carbon}}, k_e, k_c$ 为碳化影响系数, 扩散系数环境影响系数和养护影响系数; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为安全系数; n 为龄期系数; erf 为误差函数。

1.2 考虑弯曲荷载影响的寿命预测模型

考虑到结构混凝土在服役过程中将承受压荷载和弯曲荷载, 诸多学者研究表明混凝土的临界压荷载率在 0.80~0.95 之间, 当超过该值, 混凝土氯离子渗透性将大幅度提高^[8-9]; 隧道衬砌混凝土在实际运营过程中承受的压荷载很难达到该临界值。除受压荷载外, 依据隧道断面结构形式不同, 隧道衬砌混凝土可能会在拱脚、拱顶侧等部位承受弯曲荷载, 其最大应力比可能达到混凝土抗拉强度的 30% 左右。学者研究结果表明: 弯曲荷载将会导致混凝土氯离子扩散系数增加^[10-12]。参考文献[13], 则弯曲荷载对混凝土氯离子扩散系数影响关系可用公式(2)表示。

$$k_{\text{loading}} = D_{\infty}/D_0 = 1 + m(\sigma)^p \quad (2)$$

其中, k_{loading} 为弯曲荷载影响系数; D_{∞}, D_0 为弯曲荷载率为 σ 和 0 时的氯离子扩散系数; σ 为弯曲荷载率; m, p 为回归系数。

考虑弯曲荷载对混凝土中氯离子扩散的影响, 修正了原有寿命预测模型, 如公式(3)所示。

$$t = \left\{ \left\{ \frac{2}{x - \Delta x} \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{C_c - C_0}{\gamma_1} \frac{1}{A(\tau w/b) \gamma_2} \right] \right\}^{-2} \cdot \frac{1}{Dk_{\text{carbon}} (1 + m(\sigma)^p) k_e k_c t_0^n \gamma_3} \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (3)$$

1.3 胶州湾海底隧道衬砌混凝土寿命预测模型

胶州湾海底隧道施工至今, 对施工里程内的衬砌混凝土氯离子扩散系数钻芯取样测试, 因而该氯离子扩散系数已经反应了养护龄期的影响, 则隧道衬砌混凝土服役寿命预测模型应修正如公式(4)所示。

$$t = \left\{ \left\{ \frac{2}{x - \Delta x} \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{C_c - C_0}{\gamma_1} \frac{1}{A(\tau w/b) \gamma_2} \right] \right\}^{-2} \cdot \frac{1}{Dk_{\text{carbon}} (1 + m(\sigma)^p) k_e t_0^n \gamma_3} \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (4)$$

2 模型参数调查

2.1 衬砌混凝土保护层波动值

隧道混凝土保护层厚度及其波动值直接决定其服役寿命^[14], 胶州湾海底隧道衬砌混凝土靠近空气侧的保护层厚度设计值为 60 mm, 对左、右线已浇注衬砌混凝土在 1 m 和 2 m 高程的混凝土保护层偏差进行调查统计, 其结果如图 1 所示。

由图 1 可知: 胶州湾海底隧道衬砌混凝土保护层厚度控制比较理想, 其偏差值分别为 -4~+15 mm, -6~+15 mm。其中最大负偏差为 4 和 6 mm, 小于设计许可值, 有效的保证了胶州湾海底隧道的服役寿命。

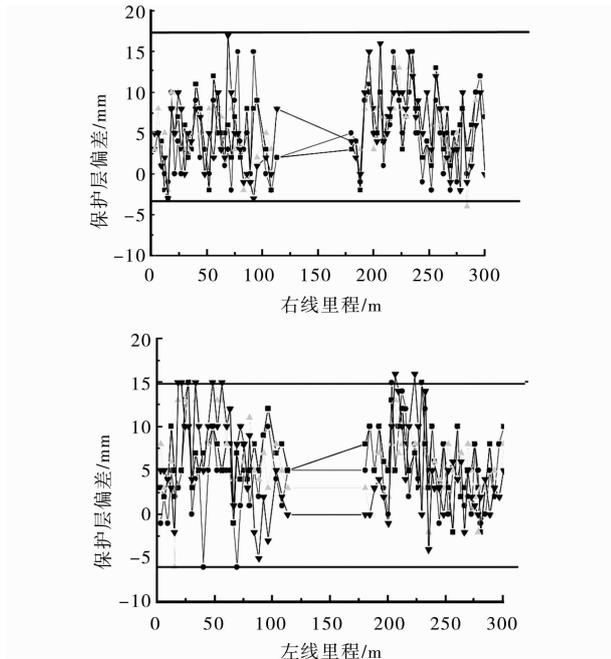


图 1 胶州湾海底隧道左右线里程衬砌混凝土保护层波动

2.2 衬砌混凝土氯离子扩散系数

2.2.1 标准养护衬砌混凝土氯离子扩散系数调查

考虑到混凝土氯离子扩散系数是影响隧道服役寿命的关键因素^[15],采用 RCM 方法对胶州湾海底隧道左右线标准养护 28 d 衬砌混凝土的氯离子扩散系数进行测试,其统计结果如图 2 所示。

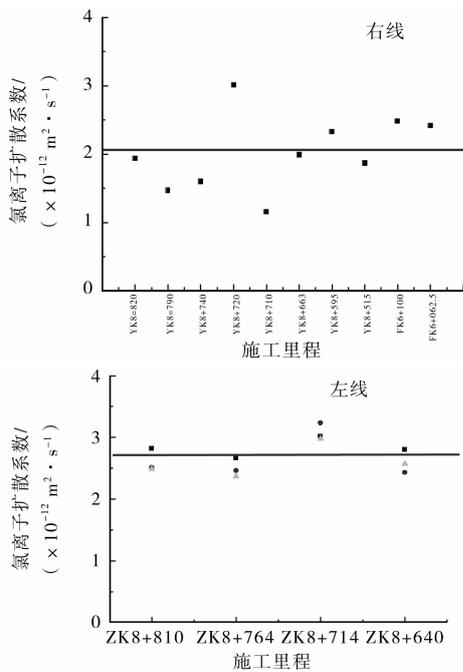


图 2 胶州湾海底隧道衬砌混凝土氯离子扩散系数

如图 2 可知:胶州湾海底隧道右线衬砌混凝土在 YK8+740~YK8+515 以及服务洞 FK6+100~FK6+062.5 的氯离子扩散系数平均值在 $2.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,左线在 ZK8+810~ZK8+640 施工里

程的氯离子扩散系数平均值在 $2.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,均低于隧道设计要求值 $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.2.2 衬砌混凝土氯离子扩散系数与回弹强度的关系 胶州湾海底隧道取芯混凝土回弹强度和氯离子扩散系数、标准养护和现场养护衬砌混凝土的回弹强度与氯离子扩散系数测试结果如图 3 所示。

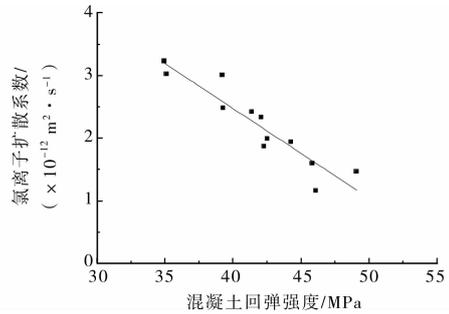


图 3 胶州湾隧道衬砌混凝土回弹强度与氯离子扩散系数关系

由图 3 可知:胶州湾海底隧道衬砌混凝土氯离子扩散系数随回弹强度增加而线性降低。因此,就胶州湾隧道衬砌混凝土而言,在其测试范围内可用线性公式(5)来表示。

$$D = 8.198 - 0.143 2 \times f_c \quad (\text{相关系数 } R^2 = 0.87) \quad (5)$$

其中, D 为衬砌混凝土氯离子扩散系数 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$); f_c 为衬砌混凝土回弹强度,MPa。

2.2.3 施工里程衬砌混凝土氯离子扩散系数波动

采用回弹法测试胶州湾海底隧道衬砌混凝土的回弹值,依据公式(5)计算出隧道左右线衬砌混凝土氯离子扩散系数波动,其结果如图 4 所示。

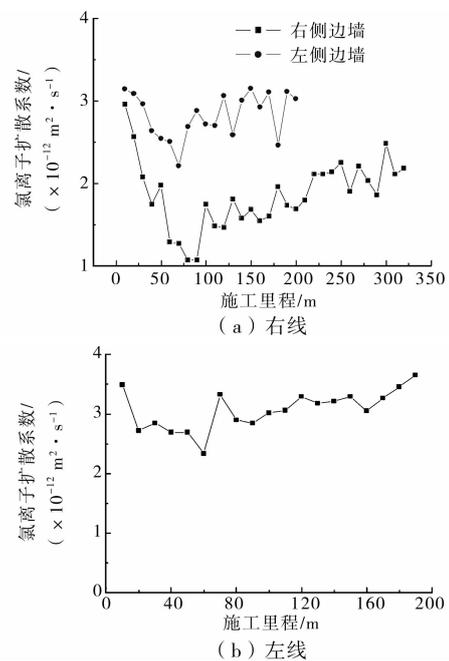


图 4 胶州湾海底隧道衬砌混凝土氯离子扩散系数波动

由图 4 可知:胶州湾海底隧道左右线衬砌混凝土在施工里程方向上氯离子扩散系数波动为 $1.5 \sim 3.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。由于隧道洞口段受到冰冻气候以及干湿交替的影响,其氯离子扩散系数明显高于隧道中间部位。

表 1 胶州湾海底隧道衬砌混凝土初始氯离子浓度

单位	Ca	Si	Al	Fe	Mg	S	Ti	Cr	Ba	Na	K	Cl
右线	43.84	34.03	7.66	4.407	2.266	0.791	0.455	0.283	0.234	1.181	4.324	0.013 5
左线	44.14	33.12	8.02	4.32	2.56	0.932	0.551	0.302	0.243	1.202	4.052	0.014

2.4 弯曲荷载影响系数确定

以 3.5%NaCl, 3.5%NaCl+5.0%Na₂SO₄ 为腐蚀液,对混凝土试件按 4 点弯曲施加弯曲荷载,荷载率分别为 25%,50%。C30 和 C50 混凝土在腐蚀液中浸泡 250 d,混凝土中氯离子浓度分布如图 5 所示。

由图 5 所示,弯曲荷载并不改变氯离子在混

2.3 衬砌混凝土初始氯离子浓度

采用 X 荧光光谱仪测试了隧道衬砌混凝土中的全部元素含量,其结果如表 1 所示。由表 1 可知:隧道衬砌混凝土的初始氯离子浓度在 0.013%~0.014% 左右,折算为胶凝材料量为 0.072~0.074 5 kg/m³。

土中的扩散规律,但随弯曲荷载率增加,混凝土内部的氯离子浓度也相应增加。根据 FICK 第二扩散定律,得到混凝土在不同荷载下的氯离子扩散系数,结果如图 6(a)所示。采用乘幂关系 $D_{\sigma} = D_0(1 + 0.84 \times (\sigma)^{1.53})$ 表征弯曲荷载与氯离子扩散系数的关系,其结果如图 6(b)所示。

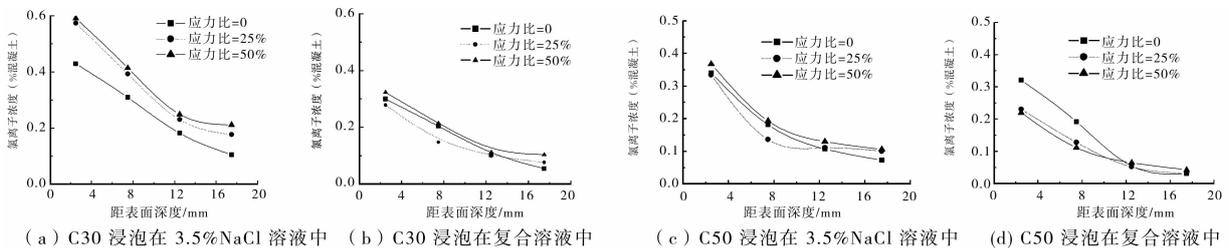


图 5 承受不同弯曲荷载混凝土在 3.5%NaCl 溶液和复合溶液中氯离子浓度分布

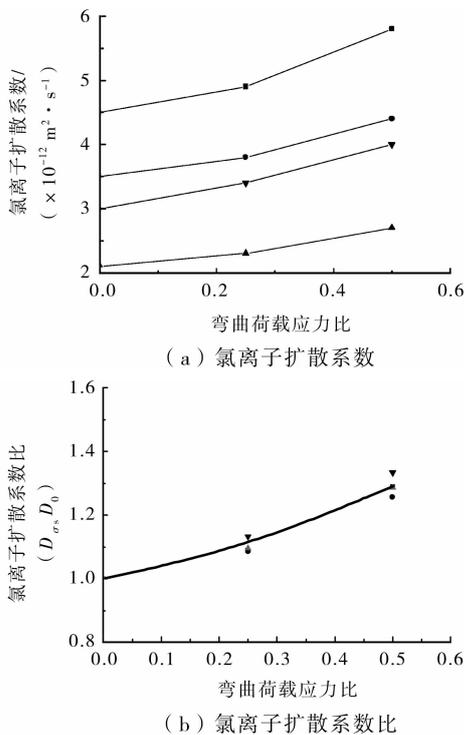


图 6 弯曲荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响

3 海底隧道衬砌混凝土服役寿命预测

考虑重度盐雾中的氯离子和汽车尾气中的 CO₂ 复合作用导致衬砌混凝土中钢筋锈蚀,同时考虑衬砌洞口部位承受汽车飞溅水(雨天)干湿循环作用。参考 Duracrete 模型参数,胶州湾海底隧道衬砌混凝土服役寿命预测模型参数取值如表 2 所示。

根据文中建立的使用寿命预测模型公式(4),以及表 2 提供的衬砌混凝土模型参数取值,计算出胶州湾海底隧道左右线衬砌混凝土在不同服役年限中的氯离子渗透过程,其结果如图 7 所示。

根据施工里程内胶州湾海底隧道左右线衬砌混凝土的氯离子扩散系数和保护层厚度偏差调查,计算出海底隧道衬砌混凝土不同里程的服役寿命,其结果如图 8 所示。

由图 7、8 可知:随腐蚀时间增加,衬砌混凝土同一深度中氯离子浓度相应增加,这种趋势在前期表现尤为突出。考虑到衬砌混凝土中钢筋脱钝临界浓度为 0.85%胶凝材料,隧道左右线衬砌混凝土的服役寿命均超过 100 a。分析施工里程内衬砌混凝土

的服役寿命,隧道左右线衬砌混凝土施工质量稳定,服役寿命均超过设计要求。但隧道左右线洞口段的

服役寿命均小于其它里程,这主要是洞口段混凝土更易受到外部气候变化的影响。

表 2 衬砌混凝土模型参数取值

模型参数	C_c	k_c	k_{carbon}	A	γ_1	γ_2	γ_3	n	m	ρ
重度盐雾环境	0.85%胶凝材料	0.68	1.24	2.57	1.2	1.7	3.25	0.37	0.84	1.53

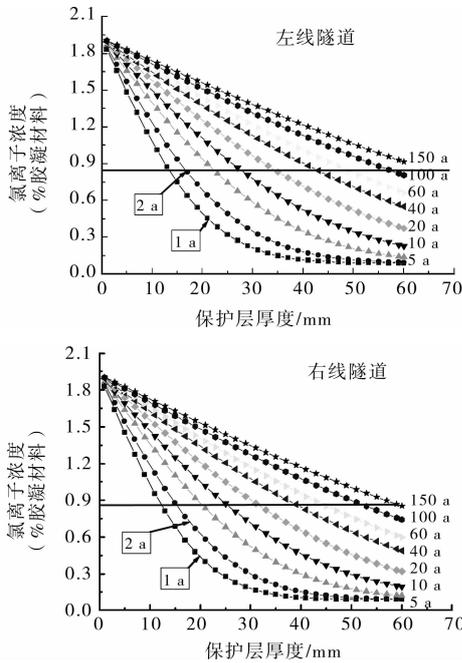


图 7 不同服役年限衬砌混凝土中氯离子渗透规律

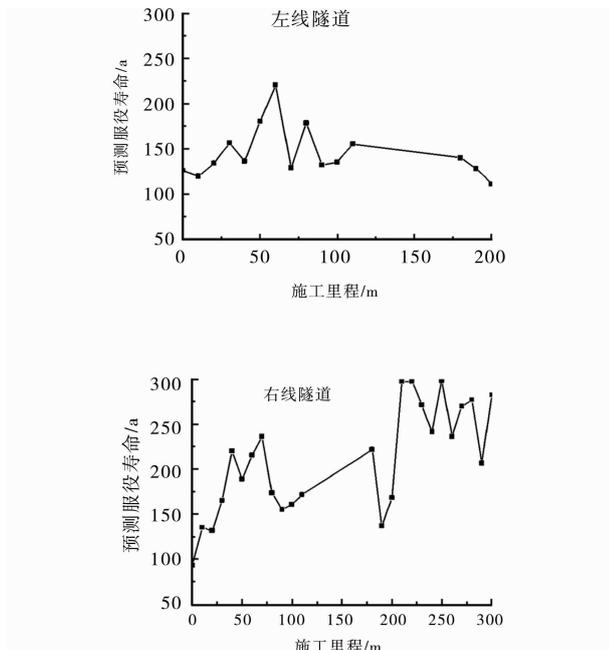


图 8 胶州湾海底隧道左右线衬砌混凝土服役寿命预测

4 结论与建议

1)胶州湾海底隧道衬砌混凝土服役过程中主要

受到盐雾中的氯离子、汽车尾气中的 CO₂、弯曲荷载以及汽车飞溅水(雨天)干湿循环复合作用。该文综合考虑上述因素建立了胶州湾海底隧道衬砌混凝土服役寿命预测模型。

2)胶州湾海底隧道左右线衬砌混凝土保护层最大负偏差值为-4 mm和-6 mm,标准养护衬砌混凝土的氯离子扩散系数平均值为 2.1(2.7)×10⁻¹² m²/s。施工里程内衬砌混凝土氯离子扩散系数波动为 1.5~3.5×10⁻¹² m²/s。洞口段受到冰冻气候及干湿交替影响,其氯离子扩散系数明显高于隧道中间部位。

3)弯曲荷载不改变氯离子在混凝土中的扩散规律,但随弯曲荷载率增加,混凝土内部的氯离子浓度也相应增加。可采用乘幂关系 $D_{\infty} = D_0(1 + 0.84 \times (\sigma)^{1.53})$ 表征弯曲荷载与氯离子扩散系数间的关系。

4)基于模型计算,衬砌混凝土同一深度中氯离子浓度随服役年限增加而相应增加,左右线衬砌混凝土服役寿命均超过 100 a。

5)考虑到洞口段衬砌混凝土服役环境恶劣,建议对洞口段混凝土进行防水处理;为保证寿命预测模型的准确性,建议安装混凝土耐久性传感器实时监测并对寿命预测模型进行修正。

参考文献:

[1] 孙钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(8):1513-1521.
SUN JUN. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(8):1513-1521.

[2] EDVARDSEN C K, KIM Y J, PARK S J. Busan-geoje fixed link concrete durability design for the bridges and tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2006,21(3/4):432.

[3] 吕明, GRØV E, NILSEN B. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(23):4219-4225.
LU MING, GRØV E, NILSEN. Norwegian experience

- in subsea tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4219-4225.
- [4] AHMET GOKCE, FUMIO KOYAMA, MASAHIKO, et al. The challenges involved in concrete works of Marmaray immersed tunnel with service life beyond 100 years [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(5): 592-601.
- [5] 曲立清, 金祖权, 赵铁军, 等. 海底隧道钢筋混凝土基于氯盐腐蚀的耐久性参数设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2333-2340.
- QU LI-QING, JIN ZU-QUAN, ZHAO TIE-JUN, et al. Study on durability parameter design of subsea tunnel reinforced concrete based on chloride corrosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2333-2340.
- [6] 陈肇元. 土建结构工程的安全性与耐久性[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2003: 174-187.
- [7] 赵铁军, 金祖权, 王命平. 胶州湾海底隧道衬砌混凝土的环境条件与耐久性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 3823-3829.
- ZHAO TIE-JUN, JIN ZU-QUAN, WANG MING-PING. Environmental condition and durability of lining concrete in Qingdao Jiaozhou Bay Subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 3823-3829.
- [8] HOSEINI M, BINDIGANAVILE V, BANTHIA N. The effect of mechanical stress on permeability of concrete, A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(4): 213-220.
- [9] LIM C C, GOWRIPALAN N, SIRIVIVATNANONB V. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression [J]. Cement & Concrete Composites, 2000, 22(5): 353-360.
- [10] JAFFER S J, HANSSON C M. Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(2): 116-125.
- [11] NIU JIANGANG, NIU DITAO, SONG HHU, et al. Durability of concrete structures under load [C]// Southeast University. 1st international conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, October 13-15, 2008, Nanjing, China: 517-524.
- [12] 赵尚传, 贡金鑫. 弯曲荷载作用下水位变动区域混凝土中氯离子扩散规律试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 76-82.
- ZHAO SHANG-CHUAN, GONG JIN-XIN. Test of chloride diffusion rules in concrete at tidal zone under flexural load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 76-82.
- [13] 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 荷载作用下混凝土的碳化深度[J]. 建筑材料学报, 2005(2): 179-183.
- JIN ZU-QUAN, SUN WEI, ZHANG YUNSHENG, et al. Study on carbonation of concrete under loading [J]. Journal of Building Materials, 2005(2): 179-183.
- [14] 杨林德, 高占学. 公路隧道混凝土衬砌结构的耐久性与保护层厚度[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 64-67.
- YANG LIN-DE, GAO ZHAN-XUE. The durability for concrete lining structure of highway-tunnel and the thickness of concrete cover [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(12): 64-67.
- [15] SONG H W, PACK S W, ANN K Y. Probabilistic assessment to predict the time to corrosion of steel in reinforced concrete tunnel box exposed to sea water [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(10): 3270-3278.

(编辑 王秀玲)