



恒定荷载对海工高性能混凝土 抗氯离子渗透性能的影响*

黎鹏平¹, 熊建波^{1,2}, 王胜年¹

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230;
2. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 通常混凝土构件均处于受力状态, 而对自由状态的混凝土试件开展耐久性研究很难真实地反映出混凝土构件的耐久性状况。本研究采用施加恒定压荷载和弯曲荷载的方式, 研究荷载对混凝土抗氯离子渗透性能的影响。结果表明: 混凝土试件纯受弯段的氯离子浓度随弯曲应力水平的提高而增大, 且混凝土内的氯离子渗透深度随应力水平的提高而增大。试件距暴露面相同深度处的氯离子浓度随着压应力水平的提高先减少后增大。混凝土试件的氯离子扩散系数随压应力水平提高而先减少后增大, 压应力水平较低时可提高混凝土的抗氯离子渗透性能。对于典型的海洋工程高性能混凝土配合比, 混凝土试件的弯曲应力与其恒定荷载影响因子之间呈近似指数函数关系, 在混凝土结构耐久性设计中应考虑弯曲荷载对氯离子扩散系数的影响。

关键词: 恒定荷载; 高性能混凝土; 氯离子浓度; 氯离子扩散系数

中图分类号: TU 528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0093-06

Influence of constant load on resistance to chloride permeability of high performance concrete

LI Peng-ping¹, XIONG Jian-bo^{1,2}, WANG Sheng-nian¹

(1. Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology, Ministry of Communications,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Generally, concrete structures are under various stress state, but it is difficult to reflect the concrete structures durability in lab tests, which is often researched by the free-state concrete specimens. This paper probes into the influence of constant compressive load and flexural load on resisting chloride penetration in marine concrete by changing the load levels. The results show that both the chloride concentration among the pure bending section in concrete at a given depth and the chloride penetration depth in concretes increase with the increasing flexural load level. But the chloride concentration in concrete at a given depth and the chloride diffusion coefficient of concrete decrease first and then increase with the increasing compressive load. It can improve the anti-penetration of chloride for concrete when increasing compressive load at low level. Furthermore, there is a significant correlation between the flexural load levels and the constant load factor when expressed as an exponential function for typical high-performance concrete mix. The influences of flexural loads on chloride diffusion coefficient shall be considered in durability design of concrete structures.

Keywords: constant load; high-performance concrete; chloride concentration; chloride diffusion coefficient

收稿日期: 2014-12-18

*基金项目: 交通运输部交通运输建设科技项目 (201132849A1140); 国家科技支撑计划资助项目 (2011BAG07B04); 科技部专项资金项目 (2013EG124049)

作者简介: 黎鹏平 (1980—), 男, 博士, 高级工程师, 从事海工高性能混凝土耐久性研究。

由氯离子侵蚀而导致的混凝土中钢筋的腐蚀是海工交通基础设施遭受腐蚀破坏的主要原因,而混凝土内的氯离子扩散系数是反映混凝土抵抗氯离子渗透性的一个重要参数,因此国内外大量的研究人员对影响混凝土氯离子扩散系数的因素开展了大量研究^[1-5]。但以往的研究很少考虑荷载作用对氯离子扩散系数的影响,而实际的海工混凝土结构则遭受荷载和氯离子的共同腐蚀作用。目前国内外对多因素共同作用对海工混凝土耐久性的影响研究还处于起步阶段,且部分研究对象是卸载以后的混凝土试件^[6-9],不能充分考虑荷载与环境侵蚀的共同效应,使得研究成果并不具备工程普遍性,无法用于指导具体工程的耐久性设计。本试验采用对混凝土构件施加恒定荷载的试验方式,将恒定荷载的混凝土试件置于海洋环境模拟箱的浪溅区,研究恒定荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响。

1 试验原材料和方法

1.1 试验原材料

所用水泥为 P. II 42.5R 型硅酸盐水泥;粉煤灰符合 II 级粉煤灰的要求,密度为 $2\ 140\ \text{kg/m}^3$;矿渣为 S95 矿渣粉,密度为 $2\ 900\ \text{kg/m}^3$ 。河沙表观密度为 $2\ 650\ \text{kg/m}^3$,细度模数为 2.7, II 区级

配。粗骨料为最大粒径 20 mm 的复合级配碎石,表观密度 $2\ 660\ \text{kg/m}^3$ 。拌和用水为自来水。外加剂采用聚羧酸高效减水剂。

表 1 原材料的化学成分

胶凝材料	化学组成/%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	IL	
水泥	20.24	4.43	5.30	63.83	0.97	0.08	0.64	2.85	2.68	
粉煤灰	60.81	24.12	5.76	3.03	0.55	0.32	0.71	1.31	3.26	
矿渣	34.20	13.39	1.20	38.20	9.02	0.20	0.51	0.28	2.73	

1.2 试验方案

本研究采用的水胶比为 0.35,混凝土的坍落度控制为 $180\ \text{mm} \pm 20\ \text{mm}$ 。并采用纯水泥混凝土试件做对照试验,混凝土配合比及试件的力学性能见表 2。

压荷载试件尺寸为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$,弯曲荷载试件尺寸为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 515\ \text{mm}$,分别成型尺寸为 100 mm 的立方体试件和 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ 的棱柱体试件,分别用来测试 28 d 龄期时试件的抗压和抗折强度。构件置于养护室养护 28 d 龄期时采用恒力加载试验装置对构件施加恒定荷载:对于压荷载试验,试件的压荷载分别为抗压强度 0.15、0.30 和 0.50 倍;对于弯曲荷载试验,荷载分别为试件抗折强度的 0.15、0.30 和 0.50 倍。

表 2 混凝土配合比及试件的力学性能

编号	胶凝材料比例/%			W/C	混凝土配合比/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa
	水泥	粉煤灰	矿粉		胶材总量	砂	碎石	水		
L01	100			0.35	420	738	1 107	147	59.2	6.4
LF	70	30		0.35	420	721	1 082	147	62.0	6.7
LS	40		60	0.35	420	732	1 098	147	59.6	6.2
FS	40	20	40	0.35	420	723	1 084	147	61.8	6.4

构件加载后用环氧树脂将构件的侧面封闭,将预处理好的构件放置于海水环境模拟试验箱的浪溅区开展试验,模拟海水的氯离子浓度为 1.5%,环境温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ 。暴露龄期达到 90 d 时将构件取出并卸载加载装置,再开展混凝土的取粉和化学分析试验。每个配合比成型 18 组混凝土试件,每个试件的纯受弯段取 2 个混凝土粉样,混凝土粉样的氯离子百分含量采多个数据的平均

值。混凝土构件弯曲荷载试验装置见图 1。





图1 混凝土恒定压荷载和弯曲荷载加载试验

1.3 试验测试方法

1) 混凝土试件表面干燥后用金刚石钻头磨取距暴露面不同深度处的混凝土粉样, 对于弯曲荷载试件, 混凝土的取样部位仅为试件纯弯段的受拉区, 对于压荷载混凝土试件, 混凝土的取样部位为整个暴露面的中间部位。

2) 混凝土试件的氯离子扩散系数测试方法按照 JTS 257-2—2012 《海港工程高性能混凝土质量控制标准》的要求进行。

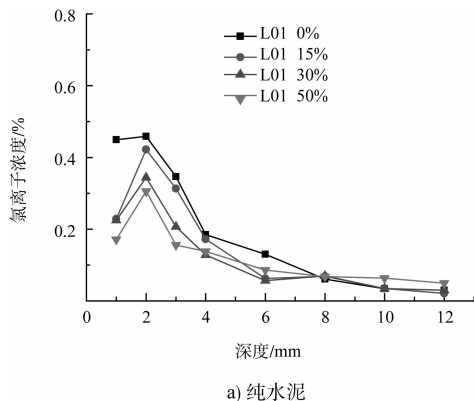
3) 混凝土粉样中的氯离子浓度测试所用仪器为瑞士万通公司的 785DMP 型自动电位滴定仪。

2 试验结果及分析

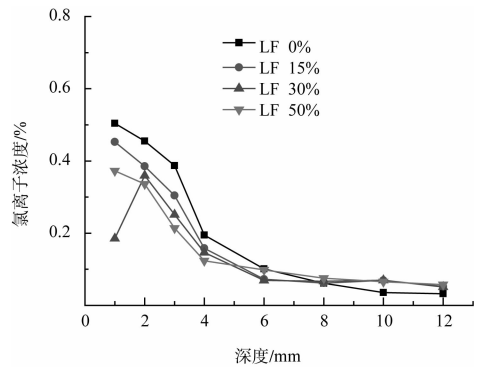
2.1 压荷载对混凝土内氯离子浓度分布的影响

暴露龄期 90 d 时压应力水平对混凝土内氯离子浓度分布的影响见图 2。

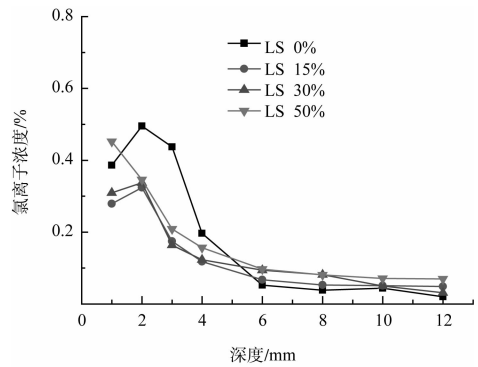
由图 2 可见, 相同配合比混凝土试件内的氯离子浓度总体上随压应力水平的增加而降低, 当压应力水平较低时, 相同深度处的氯离子浓度间的差异很小, 混凝土内的氯离子渗透深度也较为接近。当压应力水平提高到 50% 时, 试件内的氯



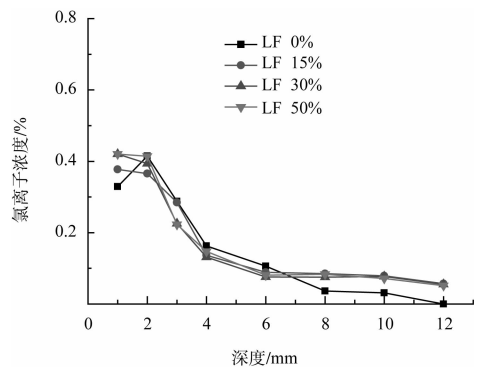
a) 纯水泥



b) 粉煤灰



c) 矿渣粉



d) 复合掺合料

图2 压荷载对混凝土内氯离子浓度分布的影响

离子浓度出现增加的现象, 如纯水泥混凝土试件 L01, 2 mm 深度处应力水平为 30% 时氯离子浓度为 0.339 9%, 应力水平为 50% 时氯离子浓度增加至 0.355 9%。

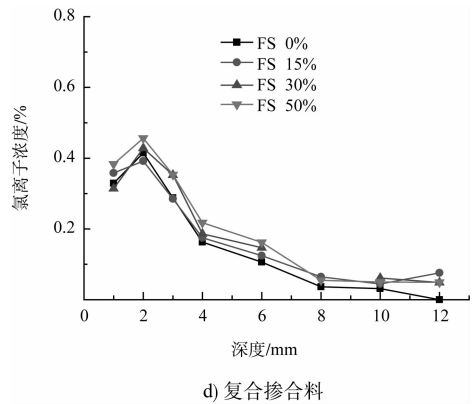
当轴压荷载过大时, 在混凝土内的部分压应力体现出的作用是剪切应力, 一般认为当压应力超过抗压强度的 30% 后, 混凝土试件的应变应包括弹性应变和塑性应变两部分, 当应力水平过高后剪切应力会使混凝土产生塑性应变, 这些塑性

应变使得外界氯离子更容易进入混凝土内部，进一步提高混凝土的荷载对氯离子的迁移也越有利，混凝土中的氯离子含量也越高。

2.2 弯曲荷载对混凝土内氯离子浓度分布的影响

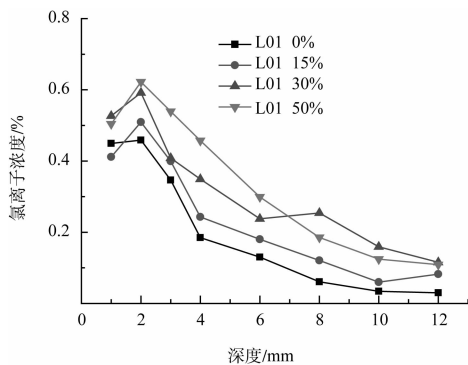
暴露龄期为 90 d 时弯曲荷载对混凝土内氯离子浓度分布的影响如图 3 所示。

由图 3 可见，相同配合比混凝土试件在弯曲荷载作用下，受拉区距表面相同深度处的氯离子浓度总体上随弯曲应力水平的提高而增大，混凝土内的氯离子渗透深度也随荷载水平的提高而逐渐增大。同时，由图 3 可见，胶凝材料组成对混

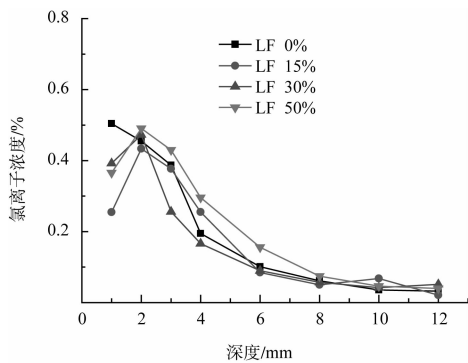


d) 复合掺合料

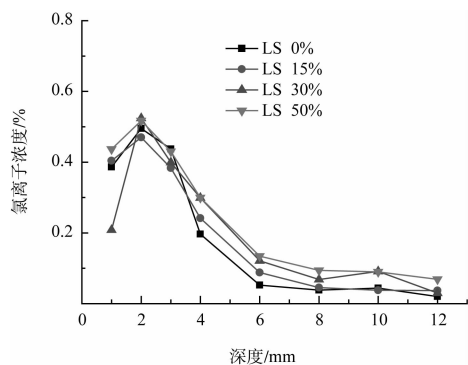
图 3 90 d 暴露龄期时弯曲荷载对混凝土内氯离子浓度分布的影响



a) 纯水泥



b) 粉煤灰



c) 矿渣粉

凝土内的氯离子浓度分布也有很大的影响：在相同的应力水平作用下且距混凝土表面同一深度处，掺合料混凝土试件的氯离子浓度要显著地低于纯水泥混凝土试件，如弯曲应力水平为 30% 且距混凝土表面 4 mm 处，纯水泥混凝土试件的氯离子浓度为 0.349%，而粉煤灰混凝土和复合掺合料混凝土的氯离子浓度分别为 0.195% 和 0.186%。在弯曲荷载作用下，受拉区产生的拉应力使得混凝土微观结构逐步劣化，表面及内部产生微裂纹乃至微裂缝损伤，随着微裂纹或微裂缝的发展、扩张，氯离子在混凝土中的扩散和渗透速度加快，从而使更多的氯化物渗入混凝土中，导致氯化物含量增加。

2.3 压荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响

国内外研究表明，氯离子在混凝土内的渗透可以用 Fick 第二定律进行描述，氯离子扩散系数也可以用 Fick 第二定律的解释解进行表征^[10-13]，压应力水平对混凝土氯离子扩散系数的影响如图 4 所示。由图 4 可见，相同配合比混凝土试件的氯离子扩散系数均随压应力水平的提高先减少后增大，当混凝土的轴压荷载的应力水平达到 50% 时，压荷载混凝土试件的氯离子扩散系数与无荷载混凝土试件的氯离子扩散系数较接近，且部分试件的扩散系数要高于无荷载试件的氯离子扩散系数。尽管计算的扩散系数具有一定的离散性，但是其总体的变化趋势是压应力水平约为 30% 时试件的氯离子扩散系数最低。过高的压应力水平会导致混凝土产生塑性应变从而增加了混凝土内的微裂缝，导致外界氯离子更容易进入混凝土内部从而

提高了混凝土的氯离子扩散系数。同时由该图可见, 利用掺合料取代部分水泥后, 各掺合料试件的氯离子扩散系数要低于同荷载水平的纯水泥混凝土试件的氯离子扩散系数。

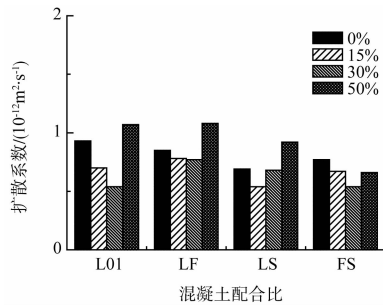
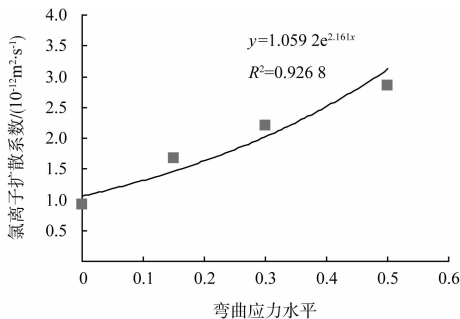


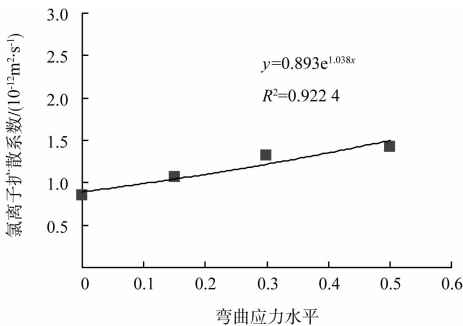
图4 压应力水平对混凝土氯离子扩散系数的影响

2.4 弯曲荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响

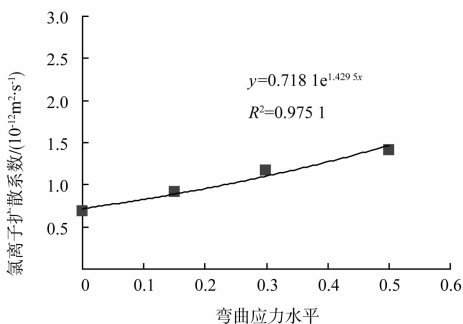
弯曲应力水平对混凝土氯离子扩散系数的影响如图5所示。



a) 纯水泥



b) 粉煤灰



c) 矿渣粉

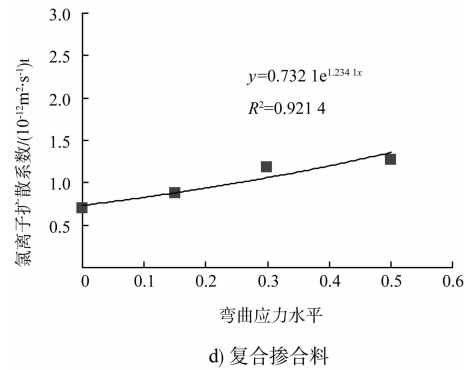


图5 弯曲应力水平对混凝土氯离子扩散系数的影响

由图5可见, 混凝土试件的氯离子扩散系数均随弯曲应力水平的提高而增大, 但配合比不同氯离子扩散系数的变化也不同, 如纯水泥混凝土试件, 应力水平由0%增加至50%时试件的氯离子扩散系数由0.93增加至2.85。同时由图5可见, 掺合料混凝土试件的氯离子扩散系数要低于同荷载水平的纯水泥混凝土试件的氯离子扩散系数。通过对氯离子扩散系数随应力水平变化的规律进行拟合可见, 混凝土试件的氯离子扩散系数与混凝土弯曲应力水平呈指数函数关系。

在我国现行的标准和规范中关于混凝土结构耐久性设计和寿命预测模型中, 氯离子扩散系数的控制指标都是以无荷载的混凝土试件为标准, 而上述试验表明弯曲荷载会影响混凝土的氯离子扩散系数。由上述试验结果可知, 弯曲荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响规律与典型的混凝土配合比无关, 对于典型的海工高性能混凝土配合比, 弯曲应力与混凝土氯离子扩散系数的恒定荷载影响因子的关系如图5所示。

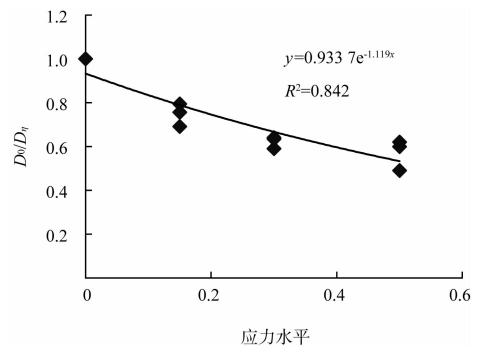


图5 混凝土弯曲应力水平与氯离子扩散系数的恒定荷载影响因子的关系

由图 5 可见, 对于典型的海洋工程高性能混凝土配合比, 其弯曲应力与恒定荷载影响因子之间呈近似指数函数关系:

$$\frac{D_0}{D_\eta} = 0.934e^{-1.20\eta} \quad (1)$$

式中: η 为自变量应力水平; D_0 为无荷载混凝土试件的氯离子扩散系数; D_η 为应力水平为 η 的弯曲荷载作用下混凝土试件的氯离子扩散系数。与无荷载混凝土试件相比较, 弯曲应力水平为 50% 的混凝土试件的氯离子扩散系数增加了约 1 倍, 因此在混凝土结构耐久性设计中应考虑弯曲荷载对氯离子扩散系数的影响。

3 结论

1) 混凝土试件纯受弯段的氯离子浓度随着弯曲应力水平的提高而增大, 且混凝土内的氯离子渗透深度随应力水平的提高而增大。试件距暴露面相同深度处的氯离子浓度随着压应力水平的提高先减少后增大。

2) 混凝土试件的氯离子扩散系数随压应力水平提高而先减少后增大, 压应力水平较低时可提高混凝土的抗氯离子渗透性能, 压应力水平较低时在混凝土耐久性设计时可不考虑荷载对氯离子扩散的影响。

3) 对于典型的海洋工程高性能混凝土配合比, 混凝土试件的弯曲应力与其恒定荷载影响因子之间呈近似指数函数关系, 应力水平为 50% 的试件的氯离子扩散系数约为无荷载试件氯离子扩散系数的 2 倍, 在混凝土结构耐久性设计中应考虑弯曲荷载对氯离子扩散系数的影响。

参考文献:

[1] Li P P, Su D G, Wang S N. Influence of binder composition and concrete pore structure on chloride diffusion coefficient in concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science, 2011, 26(1): 160-164.

- [2] Aponte D F, Barra M. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30(5): 537-546.
- [3] Yildirim H, Ilica T, Sengul O. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1 282-1 288.
- [4] Leng F G, Feng N Q, Lu X Y. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(6): 989-992.
- [5] Rui L, Yuebo C, Changyi W, et al. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1): 1-7.
- [6] Samaha H R, Hover K C. Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete [J]. ACI Materials Journal, 1992, 89(4): 416-424.
- [7] Lim C C, Gowripalan N, Sirivivatnanon V. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression [J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(5): 353-360.
- [8] Zhang W M, Ba H J, Chen S J. Effect of fly ash and repeated loading on diffusion coefficient in chloride migration test [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2 269-2 274.
- [9] 孙伟, 蒋金洋, 王晶, 等. 弯曲疲劳荷载作用下 HPC 和 HPFRCC 抗氯离子扩散性能研究[J]. 中国材料进展, 2009, 28(11): 20-25.
- [10] NT BUILD 443-1995, Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration[S].
- [11] Mangat P S, Molloy B T. Prediction of long term chloride concentration in concrete [J]. Materials and Structure, 1994, 27(6): 338-346.
- [12] Maage M, Helland S, Poulsen E. Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6): 602-608.
- [13] Eric J. Numerical simulation of reinforced concrete deterioration-Part I: chloride diffusion [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(2): 173-180.

(本文编辑 郭雪珍)