

# 收缩裂缝对混凝土氯离子渗透及碳化的影响

金祖权<sup>1</sup>, 侯保荣<sup>1</sup>, 赵铁军<sup>2</sup>, 张鹏<sup>2</sup>

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

**摘要:**采用大板开裂方法制备了收缩裂缝宽度为 0.07 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.4 mm 和 0.62 mm 的混凝土试件, 对养护 7 d 的不同尺度裂纹混凝土海水浸泡腐蚀 30 d, 以及快速碳化 14 d。测试混凝土裂缝处及周边区域的碳化深度、自由氯离子及总氯离子浓度。试验结果表明: 混凝土的自由氯离子与总氯离子均随裂缝宽度增加而呈二次函数增加。氯离子在裂缝处的迁移速度高于周边区域, 但收缩裂缝尖端增加了氯离子结合能力, 降低了自由氯离子浓度。当收缩裂缝宽度小于 0.07 mm, 混凝土裂缝区域碳化深度没有变化。当收缩裂缝宽度小于 0.1 mm, 混凝土氯离子扩散系数与碳化深度增加幅度很小; 此后, 随裂缝宽度增加, 混凝土氯离子扩散系数与碳化深度均快速增加。此外, 混凝土裂缝处碳化深度比周边区域高 3 mm 左右。

**关键词:**混凝土; 收缩裂缝; 碳化; 氯离子

**中图分类号:** TU352.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2011)01-0007-05

## Influence of Shrinkage Cracks on Chloride Penetration and Carbonation of Concrete

JIN Zu-quan<sup>1</sup>, HOU Bao-rong<sup>1</sup>, ZHAO Tie-jun<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>

(1. Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, P. R. China;

2. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, P. R. China)

**Abstract:** The influence of shrinkage crack on chloride ion penetration and carbonation of concrete is investigated. The concrete samples with shrinkage crack of 0.07 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.4 mm and 0.62 mm are prepared, and both an accelerated carbonation test and Qingdao sea water corrosion test are conducted on sound concrete and cracked concretes. The depths of carbonation, the content of free chloride and total chloride in crack zone and perimeter zone of concrete are analyzed. The experimental result shows that both free chloride and total chloride content in cracked concrete increase with the rise of the shrinkage crack width, and they are related in quadratic function. The chloride penetration velocity in crack zone is higher than that in perimeter zone of concrete. However, the increased specific surface in shrinkage crack tip improves chloride binding capacity and decreases the free chloride content in this zone. When the shrinkage crack is less than 0.07mm, the carbonation depth in crack zone is same as that of sound concrete. The chloride diffusion coefficient and the carbonation depth of cracked concrete increase limited as the shrinkage crack is less than 0.1mm, and then increase significantly with the increasing of shrinkage cracked width. Moreover, the carbonation depth in crack zone is increased by 3mm in comparison with that in perimeter zone of cracked concrete.

**Key words:** concrete; shrinkage crack; carbonation; chloride

收稿日期: 2010-06-16

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); 山东省自然科学基金(ZR2009FQ011、ZR1009FQ014); 国家“973”计划(2009CB623203)

作者简介: 金祖权(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋工程钢筋混凝土耐久性研究, (E-mail) jinzuquan@126.com。

“十遂九裂”，“十坝九裂”，各类裂缝总是与混凝土结构相伴而生。分析裂缝成因，混凝土结构裂缝主要包括荷载裂缝、腐蚀损伤裂缝以及收缩裂缝。为探讨荷载裂缝对混凝土耐久性的定量影响关系，Song、Picandet 和 Djerbi 等对圆柱体素混凝土试件进行劈裂试验以获取不同尺度的微裂纹，并建立了混凝土碳化深度、氯气和水渗透系数以及氯离子扩散系数与裂纹宽度的定量关系<sup>[1-3]</sup>；Gowripalan、Jaffer 和 Vidal 等则对钢筋混凝土构件施加弯曲荷载，以获得 0.1 mm 以上的裂纹，并研究了荷载裂缝对氯离子渗透及钢筋锈蚀的影响规律<sup>[4-6]</sup>。Montes、Marsavina 和 Poursaee 采用薄片在素混凝土或构件上预制了 0.25 mm 以上的裂纹，耐久性试验结果表明：氯离子渗透与裂缝深度密切相关，但宽度影响并不明显；如果裂缝为顺筋裂纹，则将大大加速钢筋锈蚀，但纵筋裂纹的影响并不明显<sup>[7-9]</sup>。考虑到荷载裂缝产生的随机性，Kamali-Bernard 和 John 则采用计算机模拟获得混凝土在拉应力与收缩应力下裂纹发展情况以及裂纹中氯离子扩散与湿度传输规律<sup>[10-11]</sup>。此外，为动态追踪微裂纹对水分迁移及离子传输的影响，赵铁军和 Kanematsu 采用中子照相方法动态追踪了裂纹中水分迁移规律<sup>[12-13]</sup>，Win 采用电子探针技术监测了裂纹中氯离子迁移规律<sup>[14]</sup>。

与荷载裂缝不同的是，收缩裂缝可能在更早期

就已产生，且在数量和空间上分布的范围更广，这就使得研究的难度更大，相关的研究还非常缺乏。其中普渡大学的 Qi 探讨了收缩裂缝对混凝土中钢筋锈蚀的定量影响<sup>[15]</sup>，Seung 对裂缝宽度为 0、0.1 mm、0.2 mm 和 0.3 mm 的码头混凝土（服役时间为 8 a 和 11 a）取样分析结果表明：混凝土表面氯离子浓度与裂缝宽度无明显关系，但扩散系数则随裂纹宽度增加而增加；结构设计中采用的裂缝宽度为 0.2 mm 可能低估了裂缝对氯离子渗透的影响<sup>[16]</sup>。但考虑到带收缩裂缝混凝土拆模养护后将可能与腐蚀环境接触。因而，研究带不同尺度收缩裂缝混凝土在早龄期的气体与离子传输规律，并建立二者之间的定量关系尤为必要。为此，该文研究了混凝土早期收缩裂缝对其碳化及氯离子渗透的定量影响。

## 1 实验

### 1.1 原材料及配合比

山水东岳 P·O·42.5 水泥，其化学成分全分析如表 1 所示。粗骨料为青岛磊鑫 5~20 mm 的花岗岩碎石，连续级配，压碎值小于 12%。细骨料为青岛大沽河砂场的中砂，细度模数为 2.7。江苏博特聚羧酸高效减水剂。混凝土配合比为水泥：砂：石：水 = 350：780：1100：180，其 28 d 抗压强度为 38.6 MPa。

表 1 水泥的化学成分分析

Loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl
0.58	21.07	3.79	3.19	61.85	3.05	0.61	0.26	0.24	2.26	0.08	0.039

### 1.2 实验方法

参照中国《混凝土结构耐久性设计与施工指南》，成型 600 mm×600 mm×63 mm 的塑性开裂混凝土大板多块，浇注后采用钨灯照射和风扇吹风 24 h 后带模养护 3 d。将带裂缝混凝土板切割为 70 mm×100 mm×63 mm 试件，并记录混凝土试件上的裂缝长度及宽度。最终获得表面收缩裂缝宽度为 0.07 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.4 mm 和 0.62 mm 的混凝土试件，同时切割未开裂混凝土板为参比样。

对混凝土试件中不带裂缝面环氧封闭，并标准养护 7 d。裂缝混凝土快速碳化 14 d 或青岛海水溶液中浸泡 30 d。对试件裂缝处按 2~3 mm 间距钻样，对钻样剩余试件按 2~3 mm 间距磨样；粉末样品研磨至细度过 0.16 mm 筛。采用水溶法和酸溶法测试混凝土不同深度的自由氯离子与总氯离子浓度，并依据 Fick 第二定律计算其表观氯离子扩散系数。同时取混凝土粉末 0.6 g 浸泡到 250 mm 蒸馏

水中 24 h，过滤，取 40 mL 过滤液，以酚酞作指示剂，用 1% 稀 HCl 溶液（0.12 mol/L）滴定，计算浸泡溶液 PH 值，并反推混凝土碳化深度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 裂缝宽度对混凝土中自由氯离子浓度的影响

带不同宽度收缩裂缝混凝土试件浸泡到青岛海水溶液中 30 d，测试混凝土裂缝处及裂缝周边不同深度的自由氯离子浓度，其结果如图 1 所示。

由图 1 可知：无论是在裂缝处还是在裂缝周边区域，随裂缝宽度增加，同一深度自由氯离子均相应增加，二者关系可表征为二次函数关系： $C_{ur} = C_{0,x}(1 + aw - bw^2)$ ，其中  $C_{ur}$ 、 $C_{0,x}$  分别为裂缝宽度为  $w$  和 0 的混凝土  $x$  深度氯离子浓度， $w$  为裂缝宽度。显然，裂缝成为氯离子向混凝土深部及周边区域渗透的有效途径。比较混凝土裂缝处与其周边区域的氯离子浓度，在 0~6 mm 范围内，裂缝处自由

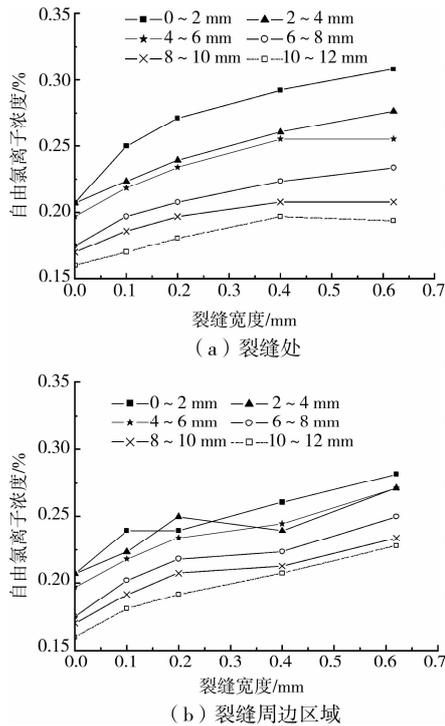


图 1 混凝土裂缝处及裂缝周边区域自由氯离子浓度分布  
氯离子浓度大于周边区域;但在 6~12 mm 内,周边区域自由氯离子浓度大于裂缝处氯离子浓度。

依据文献[17]关于混凝土氯离子结合能力的定义  $R = (C_t - C_f) / C_f$  (其中  $R$  为氯离子结合能力,  $C_t, C_f$  为总氯离子和自由氯离子量), 获得裂缝宽度为 0.1 mm 和 0.4 mm 混凝土不同深度的氯离子结合能力, 其结果如图 2 所示。对混凝土 10~12 mm 深处的裂缝区域及其周边区域粉末进行 DTG 分析, 其结果如图 3 所示。

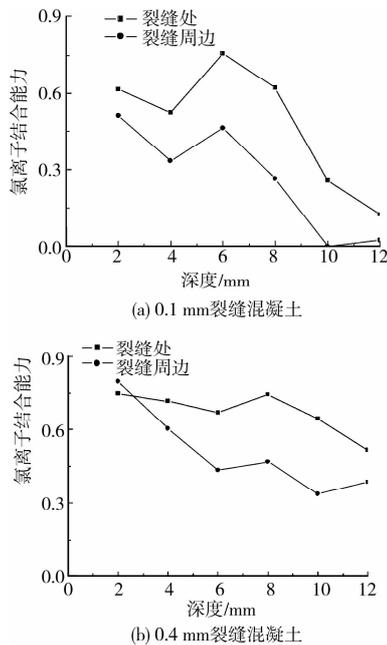


图 2 裂缝混凝土氯离子结合能力

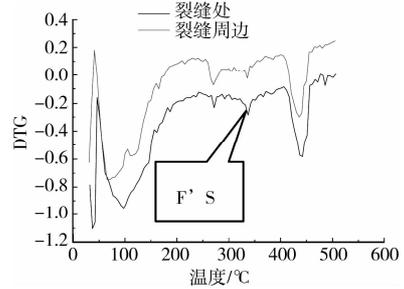


图 3 混凝土 DTG

由图 2 可知:无论混凝土的裂缝宽度大小,裂缝处混凝土对氯离子的结合能力均大于周边区域。由图 3 可知:无论混凝土开裂与否,混凝土均与氯离子发生化学结合,生成了 Friedel's 盐(特征温度 340~350℃)。比较裂缝处和裂缝周边混凝土的 Friedel's 峰值面积,其在裂缝处的生成量最多,裂缝周边次之,这与宏观试验结果一致。

因此,未贯通混凝土的收缩裂缝在其深部形成了诸多微细裂缝,导致了混凝土内部比表面积增加,从而增加了其对氯离子的结合能力。这就导致了裂缝尖端及更深处混凝土自由氯离子浓度低于同深度周边区域氯离子浓度。

### 2.2 裂缝宽度对混凝土总氯离子浓度的影响

测试不同裂缝宽度混凝土裂缝处及周边区域的总氯离子浓度,其结果如图 4 所示。显然,随裂缝宽度增加,混凝土裂缝处及周边区域的总氯离子浓度均相应增加;二者关系仍可用二次函数表征。此外,在 0~12 mm 范围内,裂缝处的总氯离子浓度均高于周边区域。

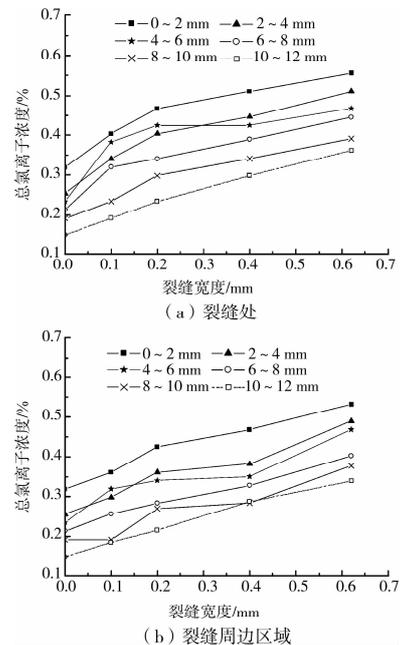


图 4 混凝土裂缝处及裂缝周边区域总氯离子浓度分布

### 2.3 裂缝宽度对混凝土氯离子扩散系数的影响

根据测试的混凝土自由氯离子与总氯离子浓度分布,依据 Fick 第二扩散定律计算出不同裂缝宽度混凝土裂缝处及混凝土整体的氯离子扩散系数,其结果如图 5 所示。

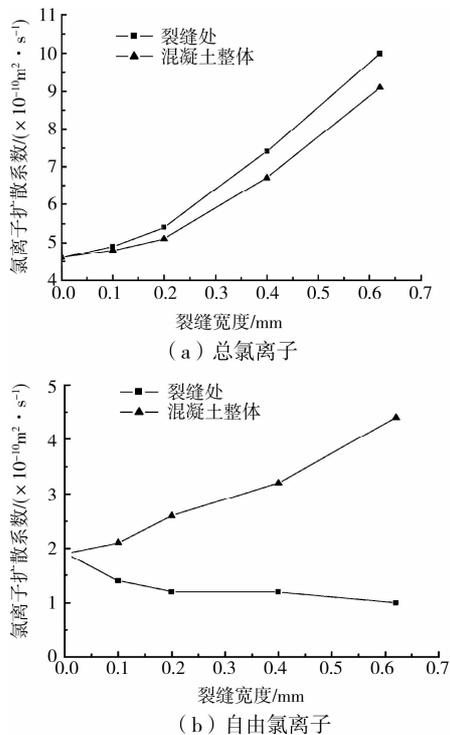


图 5 裂缝对混凝土氯离子扩散系数的影响

由图 5 可知:对整个混凝土而言,无论采用自由氯离子还是总氯离子计算,其氯离子扩散系数均随裂缝宽度增加而增加。但当裂缝宽度小于 0.1 mm 时,混凝土氯离子扩散系数增加幅度仅有 4.4%~10%,该收缩裂缝宽度对混凝土中氯离子传输影响较小。

当按总氯离子计算时,裂缝处混凝土氯离子扩散系数随裂缝宽度增加而增加,与混凝土整体区域演变规律一致,但其值均大于周边区域氯离子扩散系数。这表明:总氯离子在裂缝处的传输速度要高于周边区域。但按自由氯离子计算混凝土氯离子扩散系数时,其裂缝处氯离子扩散系数随裂缝宽度增加先下降,后趋于稳定。这表明:裂缝虽加速了氯离子总体迁移速度,但混凝土收缩裂缝深处存在的诸多微细裂缝却增加了对氯离子的结合能力,从而降低了混凝土深部自由氯离子迁移量。

### 2.4 裂缝宽度对混凝土碳化的影响

不同宽度裂缝混凝土快速碳化 14 d,测试裂缝处不同深度粉末溶液 PH 值,结果如图 6(a)所示。

从图 6(a)可以看出,裂缝处混凝土的 PH 值演变存在 2~3 个区域,即完全碳化区(PH 值稳定值),半碳化区(PH 值线性增加段)和未碳化区(PH 值第 2 稳定段)。

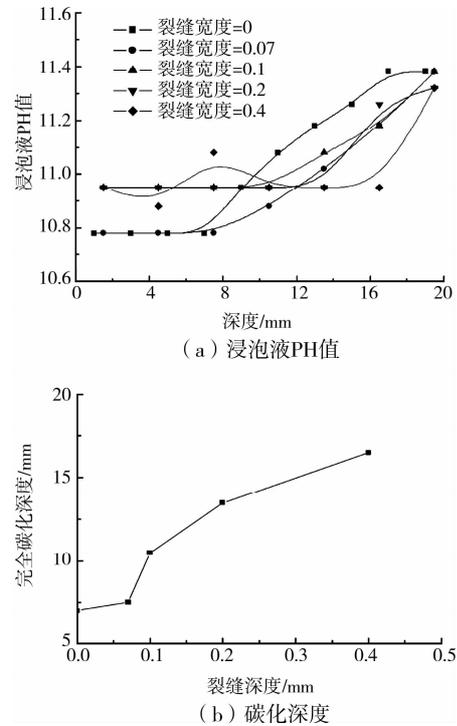


图 6 裂缝宽度对混凝土碳化的影响

计算不同裂缝混凝土的完全碳化区深度,其结果如图 6(b)所示。其中,未开裂混凝土及裂缝宽度为 0.07 mm 的混凝土试件,其完全碳化区深度为 7 mm,当裂缝宽度增加到 0.1 mm,其完全碳化区深度为 10.5 mm,增加了 50%;此后随裂缝宽度增加,混凝土裂缝处完全碳化区深度相应增加。因此,对于碳化而言,收缩裂缝宽度为 0.07 mm 时,其对混凝土碳化影响较小。

测试裂缝周边混凝土的 PH 值,并计算其完全碳化区深度,其结果如图 7 所示。当裂缝宽度小于 0.1 mm,其对周边混凝土碳化影响很小。此后,随裂缝宽度增加,碳化深度呈二次函数关系上升。此外,与裂缝处混凝土碳化深度相比,裂缝周边混凝土碳化深度降低了 3 mm 左右。

## 3 结论

1) 无论是在裂缝处还是在裂缝周边区域,混凝土自由氯离子与总氯离子均随裂缝宽度增加而呈二次函数增加。收缩裂缝处的总氯离子迁移速度高于周边区域,但裂缝尖端存在的微细裂缝增加了氯离子结合能力,降低了自由氯离子浓度。

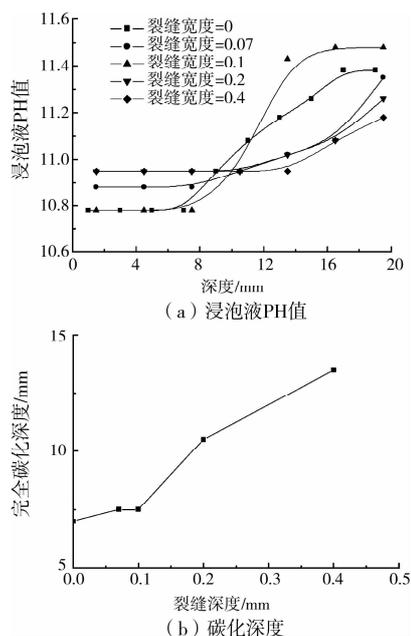


图7 裂缝周边混凝土碳化

2)当收缩裂缝宽度小于0.1 mm,混凝土整体氯离子扩散系数增加幅度仅有4.4%~10%;此后,随收缩裂缝宽度增加而线性增加。但裂缝处自由氯离子扩散系数随裂缝宽度增加先下降后稳定。

3)当收缩裂缝宽度小于0.07 mm和0.1 mm,裂缝宽度对混凝土裂缝区域和周边区域碳化深度影响不大;后随裂缝宽度增加而呈二次函数增加。裂缝处碳化深度比周边区域高3 mm左右。

#### 参考文献:

- [1] SONG HA-WON, KWON SEUNG-JUN, BYUN KEUN-JOO, et al. Predicting carbonation in early-aged cracked concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2006,36: 979-989.
- [2] VINCENT PICANDET, ABDELHAFID KHELIDJ, HERV BELLEGOU. Crack effects on gas and water permeability of concretes [J]. Cement and Concrete Research,2009,39: 537-547.
- [3] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 877-883.
- [4] GOWRIPALANA N, SIRIVIVATNANONB V, LIM C C. Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 725-730.
- [5] SHAHZMA J JAFFER, CAROLYN M HANSSON. Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions[J]. Cement and Concrete Research, 2009,39: 116-125.
- [6] VIDAL T, CASTEL A, FRANCOSI R. Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment [J]. Cement and Concrete Research, 2007,37: 1551-1561.
- [7] PEDRO MONTES, THEODORE W BREMNER, DEREK H LISTER. Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosion of steel in high performance concrete subjected to a simulated marine environment [J]. Cement & Concrete Composites, 2004,26: 243-253.
- [8] MARSAVINA L, AUDENAERT K, DE SCHUTTER G, et al. Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009,23: 264-274
- [9] AMIR POURSAEE, CAROLYN M HANSSON. The influence of longitudinal cracks on the corrosion protection afforded reinforcing steel in high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008,38: 1098-1105.
- [10] KAMALI-BERNARD S, BERNARD F. Effect of tensile cracking on diffusivity of mortar: 3D numerical modeling[J]. Computational Materials Science, 2009, 47: 178-185.
- [11] JOHN E, BOLANDER JR, STEFANO BERTON. Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays [J]. Cement & Concrete Composites, 2004,26: 861-871.
- [12] 赵铁军, 张鹏, WITTMANN F H, 等. 采用中子照相观测无裂缝和带裂缝混凝土的水分侵入[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(5):9-16.
- ZHAO TIE-JUN, ZHANG PENG, WITTMANN F H, et al. Observation of water penetration into uncracked and cracked steel reinforced concrete elements by means of neutron radiography[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008, 29(5): 9-16.
- [13] KANEMATSU M, MARUYAMA I, NOGUCHI T, et al. Quantification of water penetration into concrete through cracks by neutron radiography [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009, 605: 154-158.
- [14] PA PA WIN, MAKIKO WATANABE, ATSUHIKO MACHIDA. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004,34 :1073-1079.
- [15] CHENGQING QI. Quantitative of Assessment of plastic shrinkage cracking and its influence on the corrosion of reinforcement[D]. Pur Due University, 2004.
- [16] SEUNG JUN KWON, UNG JIN NA, SANG SOON PARK, et al. Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion[J]. Structural Safety, 2009,31: 75-83.
- [17] 王新友, 李宗津. 混凝土使用寿命预测的研究进展[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(3): 249-256.
- WANG XIN-YOU, LI ZONG-JIN. Study on development of service life prediction of concrete[J]. J Build Mater, 1999, 2(3): 249-256.