

文章编号: 1007-9629(2010)01-0070-05

# 带裂缝混凝土的吸水性能及防水处理的影响

张 鹏<sup>1</sup>, 戴建国<sup>2</sup>, 赵铁军<sup>1</sup>, F. H. Wittmann<sup>1,3</sup>, 金祖权<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 混凝土耐久性中心, 山东 青岛 266033; 2. 香港理工大学 土木及结构工程学系, 香港;  
3. Aedificat Institute Freiburg, Freiburg, Germany)

**摘要:** 对小尺寸钢筋混凝土梁诱导了不同宽度的裂缝, 通过吸水试验研究了带裂缝混凝土的吸水性能, 以及混凝土表面涂覆硅烷和内掺硅烷对水分侵入的抑制效果. 结果显示, 带裂缝混凝土在吸水 4 h 内, 其吸水量与时间平方根呈良好的线性关系; 混凝土吸水系数随裂缝宽度的增大而增大, 且呈“S”形状; 经表面防水处理的混凝土, 水分以气态形式沿裂缝进入混凝土, 贯穿憎水层后逐渐凝结并最终与外界建立吸水通道, 防水效果取决于憎水层厚度和裂缝宽度; 内掺硅烷的混凝土整体憎水, 即使裂缝宽度达 0.4 mm, 其防水效果仍保持不变.

**关键词:** 裂缝; 防水处理; 硅烷; 憎水层; 吸水系数

中图分类号: TU528.1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2010.01.015

## Water Absorption Property of Cracked Concrete and Effect of Water Repellent Treatment

ZHANG Peng<sup>1</sup>, DAI Jian-guo<sup>2</sup>, ZHAO Tie-jun<sup>1</sup>, F. H. Wittmann<sup>1,3</sup>, JIN Zu-quan<sup>1</sup>

(1. Centre for Durability of Concrete, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2. Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

3. Aedificat Institute Freiburg, Freiburg, Germany)

**Abstract:** A series of small size RC beams were introduced with different crack widths and then treated with silane-based water repellent on the surface and inside the concrete. Their water absorption properties were then evaluated. The results indicate that a linear function of square root of time could describe well the water absorption for cracked concrete within 4 h of the test, the coefficient of water absorption increases with the increase of crack width following an “S” shape. For the cracked concrete with surface water repellent treatment, water vapor diffuses into concrete along the crack depth and then devaporates behind the hydrophobic layer, and finally a water absorption pathway with the outside is established. The efficiency of water repellent treatment depends on the thickness of hydrophobic layer and the crack width. While the internal water repellent concrete is integrally hydrophobic, the efficiency of treatment is well-maintained even the crack width is increased up to 0.4 mm.

**Key words:** crack; water repellent treatment; silane; hydrophobic layer; coefficient of water absorption

混凝土材料自配制开始直至完成服役寿命, 水分一直起着至关重要的作用, 尤其在混凝土的各种劣化作用(冻融、碳化、化学侵蚀、碱-骨料反应、收

缩徐变、钢筋锈蚀等)中, 水分更是不可缺少的必要条件, 而大多数劣化模型的控制参数<sup>[1-3]</sup>. 而当钢筋混凝土构件在各种力学和环境荷载作用下一旦产生了

收稿日期: 2009-03-02; 修订日期: 2009-04-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB623203); 国家自然科学基金重点项目(50739001); 国家自然科学基金资助项目(50708046); 山东省自然科学基金资助项目(Z2006F02; ZR2009FQ014)

第一作者: 张 鹏(1981—), 男, 山东潍坊人, 青岛理工大学博士生. E-mail: zhp0221@163.com

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

裂缝, 水和侵蚀性介质则会沿裂缝更快地侵入混凝土内部, 引起钢筋锈蚀或者其他与水分有关的混凝土耐久性失效. 因此, 研究混凝土开裂后的吸水性能和抑制水分侵入混凝土的有效措施, 对深入认识和理解混凝土材料的劣化机理, 认识和理解钢筋混凝土结构耐久性的失效过程, 以及如何提高混凝土的耐久性都具有十分重要的意义.

既往研究已经证明, 对混凝土进行硅烷防水处理是抑制水分侵入钢筋混凝土结构继而提高其使用寿命的有效措施之一<sup>[4-7]</sup>. 但在混凝土开裂的情况下, 防水处理是否仍能保持良好的防水效果尚存悬念. 本文对未防水处理的混凝土和采用 2 种不同方式防水处理后的混凝土诱导了不同宽度(0.1 ~ 0.5 mm)的裂缝, 并通过毛细吸水试验对带裂缝混凝土的吸水性能进行了试验研究.

### 1 试验

#### 1.1 原材料与试件制备

本试验着重研究的是裂缝对混凝土吸水性能的影响, 因此为避免在小尺寸试件(100 mm × 100 mm × 300 mm)中产生水分移动局部效应, 在混凝土试件制备中仅使用了细骨料. 试验原材料包括: P · O 42.5 级青岛山水水泥, 细度为 342 m<sup>2</sup>/kg, 其化学组成见表 1; 最大粒径为 2.5 mm 的青岛大沽河砂; 自来水. 试验用混凝土的基准配合比及其强度见表 2. 为了在诱导裂缝时控制裂缝宽度, 在试件内部沿长度方向放置了两层共 6 根直径为 8 mm、长度为 305 mm 的光圆钢筋(见图 1). 试件成型 24 h 后拆模, 将其放入养护室((20 ± 3) °C, RH > 95%)内养护到试

表 1 水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of cement %

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	IL
22.90	3.10	7.35	57.50	4.07	1.52	0.47	0.99	2.72

表 2 混凝土配合比和强度

Table 2 Mix proportion of concrete and its compressive strength

m(W)/m(C)	Mix proportion/(kg · m <sup>-3</sup> )			Compressive strength/MPa		
	Cement	Sand	Water	3 d	7 d	28 d
0.6	500	1 650	300	10.3	20.0	29.2

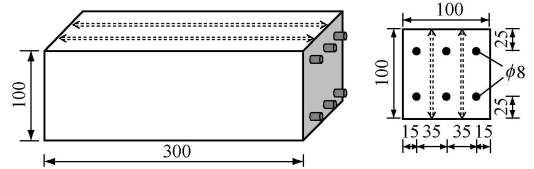


图 1 钢筋位置示意图

Fig. 1 Location of steel reinforcements (size; mm)

验龄期. 另外, 为避免混凝土表面状况对防水处理效果的影响, 在浇注时不使用脱模剂.

#### 1.2 防水处理

对不同试件分别进行了表面防水处理和内掺硅烷防水处理, 前者是在试件表面涂覆一定量的硅烷凝胶, 后者是在混凝土制备时向其内部掺加 2% (占水泥质量分数) 的硅烷乳液. 2 种硅烷的成分、用量以及相应试件的符号如表 3 所示. 将进行表面防水处理的试件在 14 d 龄期时从养护室中取出, 然后置于试验室(RH ≈ 50%)中自然干燥 7 d, 再进行硅烷涂覆, 然后继续置于试验室内干燥 7 d; 内掺硅烷防水处理的试件在养护 14 d 后直接从养护室中取出, 然后置于试验室中自然干燥 14 d.

表 3 试验用硅烷的成分和用量

Table 3 Component of silane-based products used in this project and their dosages

Code	Type	Component	Active silane content/%	Dosage	Method
00					No treatment
G100	StoCryl HG200(silane gel)	Alkylalkoxy silane	100	100 g/m <sup>2</sup>	Surface painting
G400				400 g/m <sup>2</sup>	
IW	Protectosil MH50(silane emulsion)	Silane	50	2% mass of cement	Internal addition

#### 1.3 诱导裂缝

防水处理完成后, 沿长度方向将试块切为 3 块厚度为 25 ~ 30 mm 且包含上下两层钢筋的试件, 然后采用三点弯曲的方式对试件缓慢施加荷载直至其产生裂缝(见图 2). 维持荷载直至裂缝稳定后卸载, 然后用裂缝观测仪测定裂缝宽度. 利用这种方式对未防水处理和防水处理的试件都诱导了不同宽度的裂缝. 底面裂缝宽度从 0.10 mm 至 0.50 mm 不等.

最后, 切取试件裂缝两侧约 100 mm 的区域(如图 2 所示)以进行下一步的吸水试验. 试件裂缝宽度及其编号如表 4 所示, 其中每种情况均制备 2 个试件, 试验结果取其平均值.

#### 1.4 吸水试验

吸水试验前, 先将试件放入 55 °C 烘箱内烘干 4 d, 直至试件质量基本恒定, 随后取出试件, 待降至室温后用自黏铝箔将其除底面和顶面外的其余 4 个侧

面进行密封,然后放入平底容器内,并在试件底部的非裂缝部位用小垫块支撑试件.向容器中倒水,直至

水面高出试件底面( $5 \pm 1$ ) mm.在不同的吸水时间称量试件的质量变化,得到其吸水数据.

表4 试件底面的裂缝宽度及试件编号

Table 4 Crack width on bottom surface of specimens and specimens' code

Specimen code	00	00-15	00-25	00-50	G100	G100-12	G100-28
Crack width/mm	—	0.15	0.25	0.50	—	0.12	0.28
Specimen code	G400	G400-10	G400-35	1W	1W-10	1W-30	1W-40
Crack width/mm	—	0.10	0.35	—	0.10	0.30	0.40

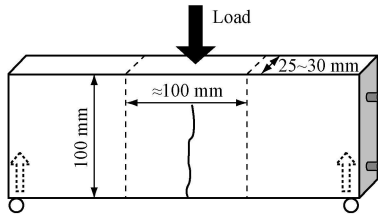


图2 试件诱导裂缝示意图

Fig. 2 Schematic of specimen for crack-inducing

## 2 结果与讨论

### 2.1 未防水处理混凝土试件带裂缝时的吸水性能

毛细吸附是水向混凝土内部侵入速度最快的一种形式,已有文献对其机理和模型做了大量研究<sup>[8-9]</sup>.作为多孔材料,混凝土表面与水接触时,水会通过混凝土的毛细吸附作用进入其内部.如果不考虑其他因素可能产生的影响,在吸水初期,一维方向上混凝土的吸水量可表示为<sup>[8-9]</sup>:

$$\Delta W = A \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: $\Delta W$ 为混凝土的单位面积吸水量,  $\text{g}/\text{m}^2$ ;  $A$ 为吸水系数,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0.5}$ ;  $t$ 为吸水时间,  $\text{h}$ .

未防水处理混凝土试件无裂缝和带裂缝时的吸水曲线如图3所示.由图3可以看出,在混凝土吸水的开始阶段,其吸水速度非常快,此时时间开方定律能够很好地描述试件吸水量随吸水时间的变化.然而当吸水时间超过4 h后,无论是无裂缝还是带裂缝混凝土试件,吸水曲线的斜率趋于变小,这主要与

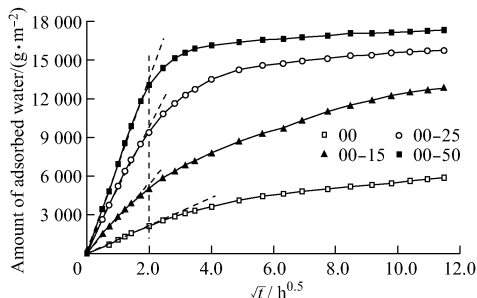


图3 未防水处理试件无裂缝和带裂缝时的吸水曲线

Fig. 3 Water absorption curves for untreated specimens without and with crack

混凝土孔隙结构的水饱和度变化以及重力作用有关,但目前还没有公认的合理解释<sup>[10]</sup>.一般常以初始阶段的线性吸水系数来表征混凝土的吸水能力.

对前4 h吸水曲线按线性关系拟合(见图3中虚线),得到未防水处理试件在无裂缝和裂缝宽度为0.15, 0.25, 0.50 mm时的吸水系数,结果见图4中方形图例所示.由图4可见:(1)混凝土吸水系数随裂缝宽度的增大而增大,当裂缝宽度达到一定值后,吸水系数变化趋于平缓.混凝土吸水系数随裂缝宽度的变化趋势可由“S”形方程即式(2)来表示,相应的拟合曲线如图4中实线所示.

$$A = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(w_c - A_3)/A_4}} + A_2 \quad (2)$$

式中: $w_c$ 表示试件裂缝宽度; $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ 和 $A_4$ 为方程的拟合参数.具体地说, $A_1$ 和 $A_2$ 分别为“S”曲线的最小值和最大值; $A_3$ 代表曲线的中心拐点,可以理解为在以裂缝宽度 $A_3$ 为中心的一个范围内,混凝土吸水系数的增大最快,对裂缝宽度的敏感性也最强; $A_4$ 表示上述区域的上下变化范围.(2)“S”曲线拐点位置处的裂缝宽度为0.200 mm,在0.135 ~ 0.265 mm内裂缝宽度对水分吸收的影响最明显.(3)当裂缝宽度为0.135 mm时,混凝土吸水系数为无裂缝时的2倍;当裂缝宽度在0.135 ~ 0.265 mm时,混凝土吸水系数为无裂缝时的2 ~ 5倍;当裂缝宽度超过0.265 mm后,混凝土吸水系数的增长逐渐放缓.

在力学和环境荷载作用下混凝土的开裂难以避免,如果没有预先或在开裂后及时采取必要的防水处理措施,水分则迅速侵入混凝土内部.从耐久性角度来看,大量水分侵入会带入各种侵蚀性离子,给钢筋混凝土结构带来更严重的腐蚀危险.因此建议,以毛细吸附为主要侵入机理的海水浪溅区内的钢筋混凝土结构的最大允许裂缝宽度为0.135 mm,这也与JTJ 268—96《水运工程混凝土施工规范》规定的限值基本一致.

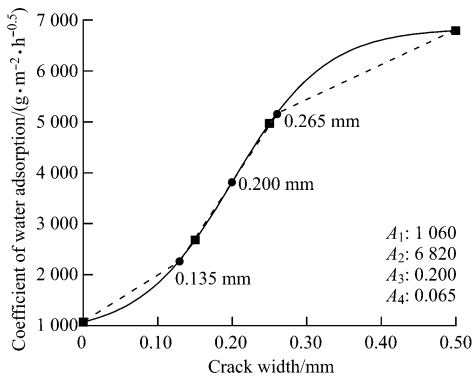


图 4 未防水处理试件吸水系数随裂缝宽度的变化

Fig. 4 Coefficient of water absorption as a function of crack width for untreated specimen

### 2.2 已防水处理混凝土试件带裂缝时的吸水性能

本试验对试件进行了表面涂覆硅烷凝胶和内掺硅烷乳液的防水处理. 硅烷凝胶或乳液进入混凝土后, 首先水解形成硅烷醇, 然后脱醇与硅酸盐基体中的羟基反应生成硅氧烷链并相互缩合, 在毛细孔壁上形成一层憎水膜, 降低毛细孔的吸附作用, 从而抑制水分进入. 表面防水处理的 G100 和 G400 试件中硅烷的平均渗透深度(憎水层厚度)分别为 2.2 mm 和 4.4 mm, 内掺硅烷乳液的 IW 试件整体憎水. 图 5 为已防水处理和未防水处理试件无裂缝时的吸水曲线. 显然, 2 种防水处理均大大降低了混凝土的吸水量, 但硅烷涂覆量较少的 G100 试件在长时间吸水后, 其防水能力有所下降.

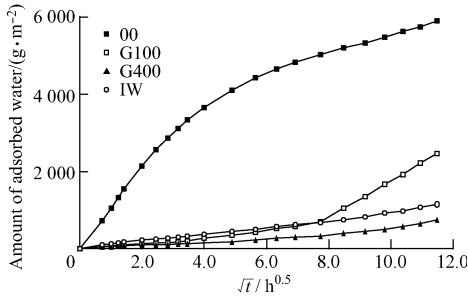
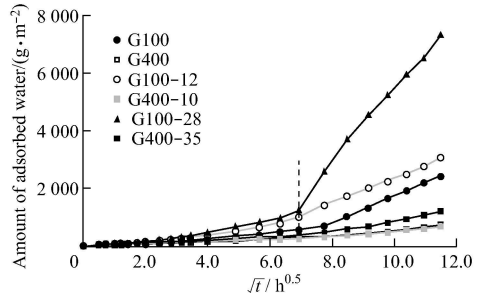


图 5 已防水处理和未防水处理试件无裂缝时的吸水曲线

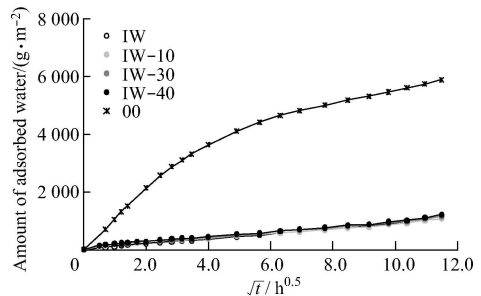
Fig. 5 Water absorption curves for water repellent treated and untreated specimens without crack

已防水处理试件开裂前后的吸水曲线见图 6. 由图 6(a)可以看出, 经表面防水处理试件的吸水过程可分为 2 个阶段, 当吸水时间在 48 h 以内时, 各试件开裂后的吸水量随吸水时间的增加有一定程度增加, 但幅度均不大; 48 h 后, G400 试件的吸水量随时间的增加保持平稳增长, 带 0.10 mm 裂缝的 G400-10 试件其吸水量较无裂缝试件(G400)并没有明显变化, 但 G100 试件的吸水则陡然上升, 尤其是裂缝宽度为 0.28 mm 时其吸水量迅速增长, 此时可以理解为水分已经沿裂缝贯穿了试件中较薄的憎

水层, 侵入到了混凝土深处的非憎水区. 由图 6(b)可见, 内掺硅烷试件的吸水量比未防水处理试件小得多, 并且开裂后其吸水量也没有明显增大, 说明裂缝扩展对内掺硅烷试件的防水效果影响非常小.



(a) Surface water repellent treated specimen



(b) Internal water repellent specimen

图 6 已防水处理试件开裂前后的吸水曲线

Fig. 6 Water absorption curves for water repellent treated specimens before and after cracking

水分在已表面防水处理混凝土裂缝处的侵入过程可由图 7(a)来说明<sup>[11]</sup>. 当混凝土表面与水接触时, 由于硅烷憎水层的存在, 液态水被抑制在试件外部, 仅以水汽的形式向混凝土内部扩散. 随着水汽的更多进入, 其在裂缝深处两侧的非憎水区逐渐凝结成液态水, 然后才逐渐与外部水连接, 此时所形成的液面力图收缩表面, 在液面产生附加压力即毛细管吸附力, 导致混凝土吸水速度急剧增大, 这也是图 6(a)中 G100-28 试件在 48 h 后吸水量突然增大的原因. 如果裂缝较宽或者憎水层的厚度很小, 裂缝处水分的侵入以及连接通道的建立过程就较快; 反之, 硅烷渗入形成的憎水层越厚, 对水分侵入的抑制效果就越好. 本试验认为, 对于混凝土表面上宽度在 0.1 mm 以内的裂缝, 由表面防水处理形成的憎水层厚度达到 4.4 mm 时可有效抑制水分沿裂缝的侵入.

对于内掺硅烷的混凝土试件, 由于整体憎水, 即使试件产生裂缝, 在裂缝深处基体仍是憎水的, 即便有少量水汽沿裂缝路径进入到了试件内部, 也不会 在裂缝两侧大量凝结形成液态水(如图 7(b)所示), 试验结果也表明, 内掺硅烷的试件在开裂后, 即使裂缝宽度达到了 0.4 mm, 与未开裂时相比, 其吸水量

也基本没有增大. 从无裂缝试件的吸水结果来看, 涂覆  $400 \text{ g/m}^2$  硅烷凝胶的防水效果最好, 内掺硅烷的次之, 而涂覆  $100 \text{ g/m}^2$  硅烷凝胶的防水效果较差;

而从带裂缝试件的吸水结果来看, 内掺硅烷的试件显示了其独特的优点, 在裂缝宽度较大的情况下, 其防水效果仍保持良好.

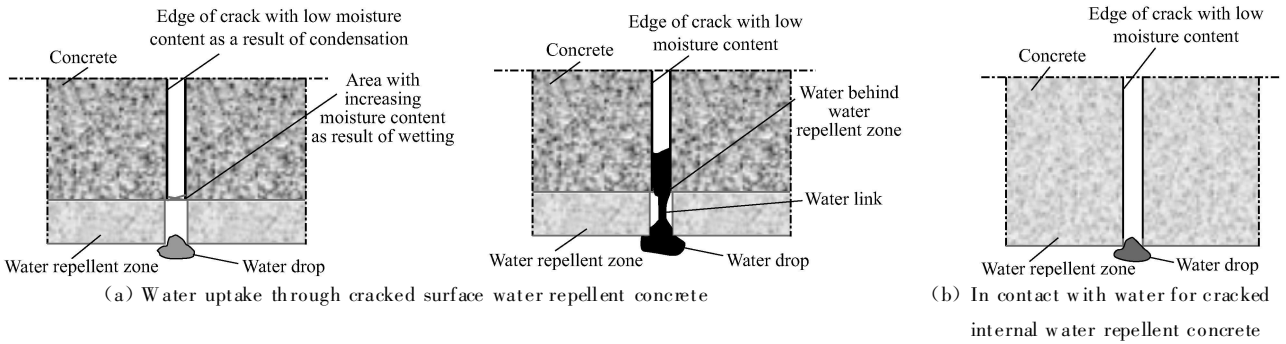


图7 已防水处理混凝土裂缝处的水分侵入示意图

Fig. 7 Schematic of water penetration into cracked water repellent concrete

### 3 结论

1. 在毛细吸水初始 4 h 内, 混凝土吸水量和时间平方根呈良好线性关系; 裂缝越宽, 混凝土吸水系数越大; 混凝土吸水系数随裂缝宽度的变化呈“S”形状; 混凝土裂缝宽度为  $0.135 \sim 0.265 \text{ mm}$  时, 其吸水系数的增长速度最快, 对裂缝宽度的敏感性最强.

2. 经表面防水处理的混凝土开裂后, 水分首先以水汽的形式扩散到裂缝深处的非憎水基体, 在裂缝两侧逐渐凝结形成液态水, 最终与外界建立吸水连接; 当憎水层厚度较小 ( $\leq 2.2 \text{ mm}$ )、裂缝宽度又较大 ( $\geq 0.28 \text{ mm}$ ) 时, 水分在 48 h 后就突破憎水层; 而在裂缝宽度较小 ( $\leq 0.1 \text{ mm}$ ) 的情况下, 132 h 后水分仍未突破  $4.4 \text{ mm}$  的憎水层. 总体来说, 即使混凝土产生裂缝, 合理的防水处理仍能在很大程度上抑制混凝土吸水.

3. 内掺硅烷的混凝土即使裂缝宽达  $0.4 \text{ mm}$ , 由于其整体憎水, 因此水汽虽能进入裂缝深处, 但无法凝结形成液态水, 故混凝土吸水量并未较未开裂的增加, 这也是内掺硅烷不同于表面防水处理的一个显著特点.

#### 参考文献:

[ 1 ] MEHTA P K. Durability—Critical issues for the future[ J ]. Concrete International, 1997, 19(7): 69-76.  
 [ 2 ] 赵铁军. 混凝土渗透性[ M ]. 北京: 科学出版社, 2006: 121-149.  
 ZHAO Tie-jun. Permeability of concrete[ M ]. Beijing: Science Press, 2006: 121-149.  
 [ 3 ] NEVILLE A M. Properties of concrete[ M ]. 4th Edition.

U K; Prentice Hall 1995; 412-525.

- [ 4 ] MEIERS J, BAUML M F. Internal impregnation of concrete by means of silanes[ J ]. Restoration of Buildings and Monuments, 2006, 12(1): 43-52.  
 [ 5 ] WITTMANN F H, 战洪艳, 赵铁军. 混凝土表面防水处理与氯离子隔离层的建立[ J ]. 建筑材料学报, 2005, 8(1): 1-6.  
 WITTMANN F H, ZHAN Hong-yan, ZHAO Tie-jun. Water repellent treatment of concrete surface and establishment of chloride barrier[ J ]. Journal of Building Materials, 2005, 8(1): 1-6.  
 [ 6 ] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 硅烷对海工高性能混凝土防腐性能的影响[ J ]. 中国港湾建设, 2005, 25(1): 26-30.  
 JIANG Zheng-wu, SUN Zhen-ping, WANG Pei-ming. Effects of silane on anti-corrosion properties of high-performance marine concrete[ J ]. China Harbour Engineering, 2005, 25(1): 26-30.  
 [ 7 ] DAI J G, AKIRA Y, YOKOTA H. Various surface impregnation treatments of pre-conditioned concrete subjected to seawater immersion test[ J ]. Restoration of Buildings and Monuments, 2007, 13(4): 1-12.  
 [ 8 ] HALL C. Barrier performance of concrete—A review of fluid transport theory[ J ]. Materials and Structures, 1994, 27(5): 291-306.  
 [ 9 ] DANIEL A Q. Microstructure and transport properties of porous building materials[ J ]. Materials and Structures, 1998, 31(5): 317-324.  
 [ 10 ] KRUS M, SEDLBAUER K, RUCKER P. Redistribution of the pore water in the cement gel of concrete[ A ]. Transport in Concrete: Nano- to Macrostructure[ C ]. Freiburg: Aedificatio Publisher, 2007: 61-70.  
 [ 11 ] LUNK P, WITTMANN F H. The behaviour of cracks in water repellent concrete structures with respect to capillary water transport[ A ]. Proceedings of 2nd International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials[ C ]. ETH Zürich, Switzerland; Aedificatio Publisher, 1998: 63-76.