

劈裂裂缝混凝土在海洋潮汐区的氯离子传输

金祖权^{1,2}, 赵铁军¹, 庄其昌¹, 蒋金洋²

(1. 青岛理工大学土木学院, 山东青岛 266033; 2. 江苏省土木工程材料重点实验室, 南京 211189)

摘要:研究了不同尺度劈裂裂缝混凝土在海洋潮汐区环境作用下的氯离子浓度分布、氯离子传输以及钢筋锈蚀规律。试验结果表明:劈裂裂缝在制备过程中存在裂缝回复,裂缝宽度应以卸载后位移传感器获得的裂纹宽度值为准。裂缝混凝土氯离子浓度随深度增加而下降,然后在 10 mm 深度以下形成稳定段。裂缝区域稳定段氯离子浓度随裂缝宽度增加而呈指数函数增加,裂缝周边区域稳定段氯离子浓度则随裂缝宽度增加而线性增加;但与裂缝区域氯离子增加幅度相比,其增加幅度不明显。裂缝宽度大于 0.05 mm,30 d 海洋暴露后混凝土裂缝面氯离子渗透深度近 50 mm,沿垂直裂缝面向内平均渗透 20 mm 左右,钢筋表面锈蚀率快速增加。裂缝混凝土氯离子扩散系数与混凝土抗氯离子扩散能力、裂缝密度(包括裂缝的基体宽度/裂缝宽度)、裂缝对氯离子结合性能密切相关。当裂缝密度小于 70 时,裂缝混凝土氯离子扩散系数线性增加;距裂缝位置越近,混凝土氯离子扩散系数增加越大;裂缝越宽,其对混凝土影响范围越大。

关键词:劈裂裂缝;混凝土;海洋潮汐区;氯离子;裂缝密度

中图分类号:TU528.33 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)02-0052-06

Chloride Transport in Splitting Cracked Concrete at Marine Tidal Zone

JIN Zu-quan^{1,2}, ZHAO Tie-jun¹, ZHUANG Qi-chang¹, JIANG Jin-yang²

(1. College of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China;

2. College of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China)

Abstract: The chloride ion transport in concretes with different size of splitting cracks at marine tidal zone is investigated. The splitting crack widths of concrete are about 0.03 mm, 0.05 mm, 0.10 mm, 0.15 mm and 0.30 mm. The cracked concrete and sound concrete are placed at marine tidal zone for 30 d, and the chloride ion content in crack zone and perimeter zone of concrete, chloride ion penetration depth and steel bar corrosion area are quantitatively determined. It is shown that splitting crack will be recovered when the concrete is unloaded in split test. And the splitting crack width of concrete should be characterized by the value of displacement sensor when the concrete is unloaded in split test. The chloride ion content of cracked concrete decreases with increased depth, and then gets to remain steady from 10 mm to the inner. The relationship between chloride ion content and crack width in the steady zone can be regressed as the exponential function and the linear function for the crack zone and the perimeter zone of concrete, respectively. Due to away from the crack zone, the influence of splitting crack width on accelerated chloride ion ingression in the perimeter zone is less than that in the crack zone. When the splitting crack width is

收稿日期:2011-09-10

基金项目:国家自然科学基金(51178230,50708046);山东省自然科学基金(ZR2009FQ011,ZR1009FQ014);江苏省土木工程材料重点实验室开放基金

作者简介:金祖权(1977-),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.

more than 0.05 mm, the chloride ion penetration depth in crack plane and in vertical crack plane of concrete is 50 mm and 20 mm, respectively. And the steel corrosion area enlarges with the increasing crack width. And the chloride diffusion coefficient of cracked concrete is closely related to the resistance capacity to chloride penetration of concrete, crack density (matrix width, crack width), and chloride binding capacity of concrete. When the crack density of concrete is less than 70, the chloride diffusion coefficient of cracked concrete increases with decreased crack density linearly. The chloride penetration will accelerate near the crack zone. And the raised splitting crack width will lead to its influence area in concrete increased quickly.

Key words: splitting crack; concrete; marine tidal zone; chloride; crack density

海洋工程混凝土由于收缩开裂,受荷过大或腐蚀损伤,常常带裂缝工作。为探讨荷载裂缝对混凝土钢筋锈蚀的影响关系,Gowripalan,Jaffer 和 Vidal 等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钢筋锈蚀的影响规律^[1-3]。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^[4-6]。为获得裂缝宽度、粗糙度等对混凝土中水传输的定量影响。Kanematsu 和张鹏利用中子照相进行了研究,结果表明:当裂缝存在时,水分可以迅速迁移至裂纹尖端并向裂纹两边扩散,其扩散到裂缝尖端的时间甚至少于1 min^[7-8]。Wang 和 Aldea 通过裂缝混凝土的渗透试验结果表明:对于水渗透,混凝土临界裂缝宽度为50~100 μm ^[9-10]。

针对裂缝对混凝土中氯离子传输的影响,Djerbi,金祖权等对不同尺度的劈裂裂缝、收缩裂缝混凝土进行氯离子稳态扩散,并获得氯离子传输的临界裂缝宽度^[11-12]。但 Olga 对80~680 μm 宽裂缝混凝土的非稳态扩散试验结果表明:混凝土氯离子扩散系数与裂缝宽度和粗糙度无关^[13]。而 Win 对裂缝宽度大于0.1 mm 钢筋混凝土的毛细吸盐试验表明:氯离子将沿裂缝方向迅速渗透到混凝土内部,并沿钢筋方向和垂直钢筋方向向混凝土内部渗透^[14]。显然,裂缝影响到混凝土中的水、离子传输和钢筋锈蚀,并存在一个临界裂缝宽度。但混凝土中氯离子传输临界裂缝宽度因氯离子传输模式、混凝土类型不同而不相同。

考虑到海洋潮汐区混凝土中氯离子传输机制复杂,且钢筋混凝土腐蚀最为严重。本文通过实海暴露试验,研究了不同尺度劈裂裂缝对混凝土中氯离

子传输和钢筋锈蚀的影响规律,以期获得海洋潮汐区氯离子传输规律,以及裂缝影响规律,从而为海洋工程混凝土结构裂缝宽度设计和防护提供依据。

1 试验

1.1 原材料及混凝土配合比

山水东岳 P·O·42.5 水泥(用于 S1 和 S2)和 P.I.52.5 水泥(用于 S3),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,通过调整其掺量使得混凝土坍落度达到 160~200 mm。混凝土配合比及相应强度测试结果如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比及抗压强度

编号	水泥	超细 矿粉	粉 煤灰	砂子	石子	水	混凝土强度/MPa		
							3 d	7 d	28 d
S1	230		60	726	1 184	200	8.5	16.8	23.5
S2	360			720	1 080	190	17.7	24.4	34.9
S3	230	138	92	690	1 150	161	26.2	39.7	56.1

1.2 实验方法

成型 $\Phi 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的混凝土试件,标准养护 28 d 后进行劈裂实验。实验采用日本津岛实验厂生产的电子拉伸试验机,将混凝土试件置入自制的固定设备以防止试件受压时发生偏心移动。利用位移传感器控制裂缝宽度,当裂缝宽度达到 0.03 mm、0.05 mm、0.10 mm、0.15 mm、0.20 mm 和 0.30 mm 左右时停止加载。卸载后再次读出位移传感器读数,并利用裂缝宽度仪测试混凝土表面裂缝宽度。劈裂裂缝制备装置如图 1(a)所示,带裂缝混凝土试件如图 1(b)所示。对劈裂裂缝混凝土试件圆周进行环氧树脂封闭,然后置于青岛小麦岛海洋暴露站的海洋潮汐区暴露 30 d,沿裂缝处(裂缝两

边 5 mm)和裂缝周边(裂缝两边30 mm)均匀取样,混合后进行氯离子浓度分析。

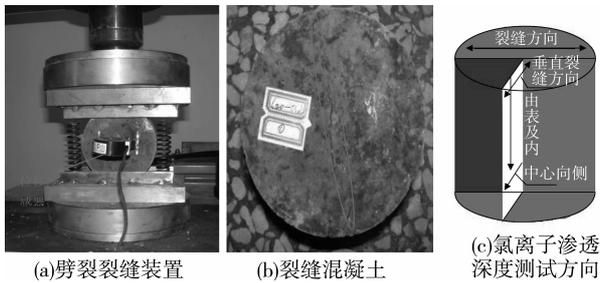


图 1 劈裂裂缝混凝土制备及氯离子深度测试方向

同时成型 100 mm×100 mm×100 mm 的混凝土试件,其表面放置 $\Phi 10$ mm 经除锈处理的圆面钢筋。用环氧树脂将带不同尺度裂缝的 $\Phi 100$ mm×50 mm 圆台(S2 系列)按照裂缝与钢筋平行方式粘结于带钢筋的混凝土的试件上。混凝土组合体在海洋潮汐区暴露 30 d,采用硝酸银喷涂测试裂缝面、垂直裂缝面各点的变色深度,取平均值视为氯离子渗透深度,如图 1(c)所示。裂缝混凝土沿交界面劈开,测试钢筋表面的锈斑面积。

2 试验结果与讨论

2.1 混凝土劈裂裂缝尺度表述

混凝土在劈裂加载以及卸载后,通过位移传感器读出混凝土试件中间部位的变形,其结果如图 2 所示。在混凝土卸载后采用裂缝宽度仪测试混凝土表面裂缝宽度,并将其与位移传感器测试结果对照,其结果如图 3 所示。

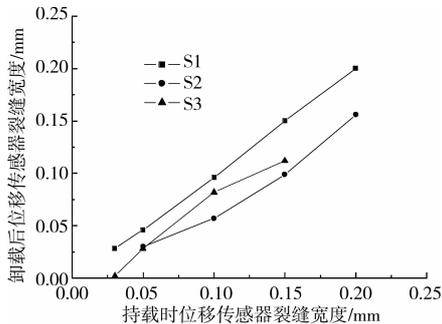


图 2 卸载后裂缝回复

由图 2 可知,混凝土在卸载后,裂缝将发生明显的回复。裂缝回复值随裂缝宽度增加而增加,其最大回复值为 0.034 mm。由图 3 可知:混凝土表面裂缝宽度明显大于位移传感器测试的裂缝宽度值,其最大差值在 0.19 mm 左右。混凝土类型对上述结果影响不明显。综合裂缝回复及试件上下表面的影

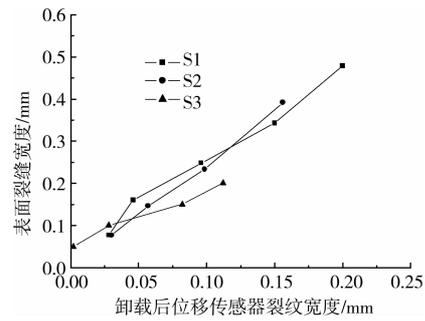


图 3 表面裂纹与位移传感器

响,劈裂裂缝尺度以卸载后位移传感器获得的裂缝宽度值为准。

2.2 裂缝混凝土氯离子浓度分布

将混凝土试件在海洋潮汐区腐蚀 30 d 后,采用水溶法测试裂缝处及其周边区域自由氯离子,其结果如图 4 所示。由图 4 可知,除了 S1 系列非裂纹混凝土在表层存在对流区外,其它裂缝混凝土氯离子浓度均随深度的增加而降低,大致在 10 mm 深度之后趋于稳定,其传输规律仍可用扩散定律进行描述。

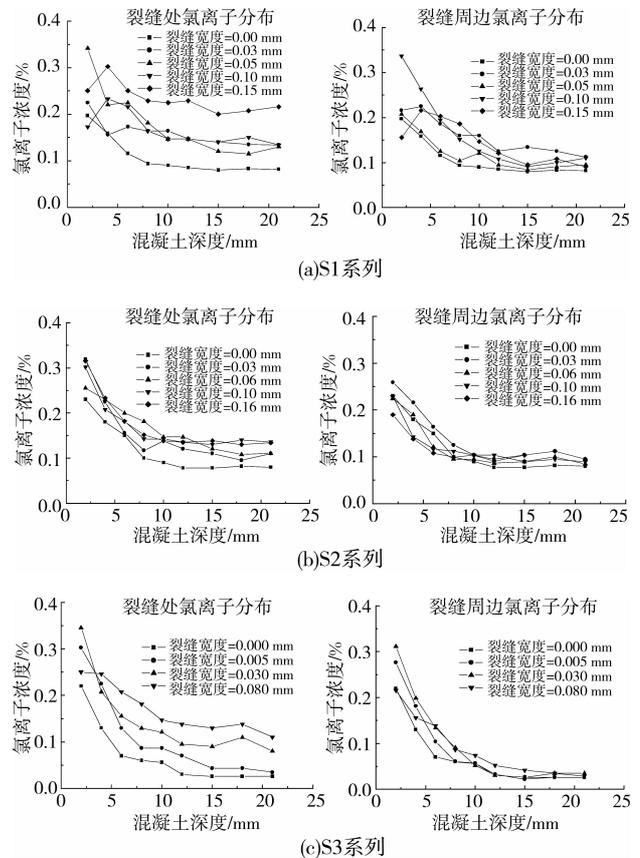


图 4 潮汐区裂缝混凝土氯离子分布

求出裂缝混凝土稳定段氯离子平均值,并与非裂缝混凝土稳定段氯离子浓度相减,从而建立稳定段氯离子浓度差与裂缝宽度的关系,其结果如图 5

所示。显然,混凝土裂缝区域稳定段的氯离子浓度随裂缝宽度增加而呈指数函数增加,其关系可表示为 $C = a(1 - b^w)$, 其中 C 为稳定段氯离子浓度差, w 为裂缝宽度。而裂缝周边区域稳定段氯离子浓度则随裂缝宽度增加而线性增加,但与裂缝区域氯离子增加幅度相比,其增加幅度并不明显。

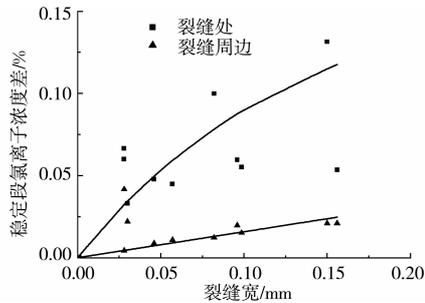


图 5 混凝土稳定段氯离子浓度差与裂缝宽度的关系

2.3 裂缝混凝土的氯离子传输

依据裂缝混凝土氯离子浓度分布,按照 Fick 第二定律计算出裂缝混凝土的表观氯离子扩散系数,其结果如表 2 所示。显然,随裂缝宽度增加,混凝土裂缝区和裂缝周边区域的氯离子扩散系数相应增加。但相比于裂缝区域,裂缝周边混凝土氯离子扩散系数增加幅度相对较小,也即是离裂缝面越远,裂缝对氯离子传输影响越小。

表 2 裂缝混凝土氯离子扩散系数 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

类型	裂缝宽度/mm	氯离子扩散系数/($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	
		裂缝区	裂缝周边
S1	0.000	3.8	3.8
	0.028	3.6	6.0
	0.046	9.4	4.5
	0.096	11.0	8.0
	0.150	25.0	9.8
S2	0.000	2.6	2.6
	0.030	5.2	4.2
	0.057	7.4	4.4
	0.098	9.3	3.7
	0.156	9.1	8.0
S3	0.000	1.3	1.3
	0.002	3.6	2.4
	0.028	4.9	3.3
	0.082	7.8	3.7

2.4 裂缝混凝土氯离子扩散系数预测

混凝土劈裂裂缝为贯穿线性分布,其氯离子传输方向与裂纹方向一致,作者在前期研究中建立了裂纹混凝土氯离子扩散系数与裂纹宽度的关系,如式 1 所示^[15]。

$$D = \left(1 + \frac{D_c \cdot L_c}{D_m \cdot L_m}\right) D_m \quad (1)$$

其中: D 、 D_m 、 D_c 分别为裂缝混凝土氯离子扩散系数,无裂缝混凝土氯离子扩散系数和氯离子在裂缝中扩散系数, L_c 、 L_m 分别为裂缝宽度和整个基体宽度。

作者在收缩裂纹对氯离子传输影响研究中发现,裂纹对氯离子具有一定的吸附作用,假设其线性结合能力为 R 。因而,裂缝中氯离子扩散系数为:

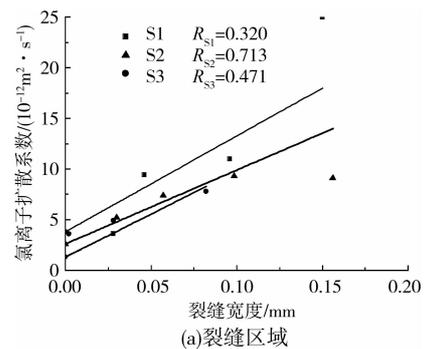
$$D_c = \frac{D_w}{1+R}$$

其中,氯离子在 25°C 水中的扩散系数 $D_w = 1.25 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

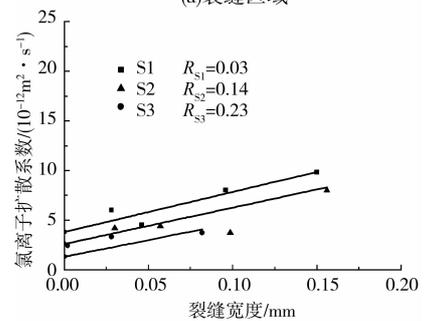
因此,裂缝混凝土氯离子扩散系数与裂缝宽度的关系如式 2 所示。

$$D = \left(1 + \frac{D_w \cdot L_c}{(1+R) \cdot D_m \cdot L_m}\right) D_m \quad (2)$$

依据式(2)计算出不同裂缝宽度混凝土氯离子扩散系数,并与测试结果进行比较,其结果如图 6 所示。



(a) 裂缝区域



(b) 裂缝周边区域

图 6 裂缝混凝土氯离子扩散系数模拟

由图 6 可知,采用式(2)可以较好的模拟裂缝混凝土氯离子扩散系数与裂缝宽度的关系。显然,随裂缝宽度增加,无论是裂缝周边还是裂缝区域,其氯离子扩散系数均随之线性增加。此外,在裂缝区域内,混凝土裂缝对氯离子结合影响明显大于裂缝周边区域,裂缝宽度对混凝土氯离子扩散系数的影响也更明显。

依据式(2),我们可以看出裂缝混凝土氯离子扩散系数与混凝土抗氯离子扩散能力、裂缝密度(包括

裂缝的基体宽度/裂缝宽度)、裂缝对氯离子结合性能密切相关。根据该式,建立 S1 系列裂缝混凝土氯离子扩散系数与裂缝密度的关系,以及 S1 混凝土不同区域的氯离子扩散系数预测结果如图 7 所示。显然,当裂缝密度小于 70 时,裂缝混凝土的氯离子扩散系数将线性增加。此外,距裂缝位置越近,混凝土氯离子扩散系数增加越大;裂缝越宽,其对混凝土影响范围越大,氯离子扩散系数增加速度也越快。

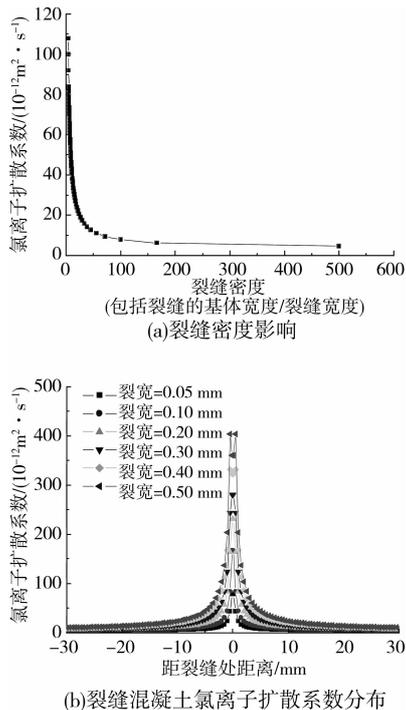


图 7 裂缝混凝土氯离子扩散系数预测

2.5 裂缝混凝土氯离子渗透深度及钢筋锈蚀

采用硝酸银喷涂测试裂缝混凝土裂缝面和垂直裂缝面的氯离子平均渗透深度如图 8(a)所示,测试不同劈裂裂缝混凝土钢筋表面锈蚀率,其结果如图 8(b)所示。

由图 8(a)可知,经过 30 d 海洋潮汐区暴露试验,当裂缝宽度大于 0.05 mm 时,氯离子沿裂缝面已将混凝土全部渗透,并沿裂缝向混凝土内部平均渗透了 20 mm 左右。与未开裂混凝土相比,混凝土裂缝面氯离子渗透深度增加了 1.5 倍,且具有二维扩散的特征,这与氯离子扩散系数模拟计算结果相符。由图 8(b)可知,潮汐区裂缝混凝土中的钢筋均发生了不同程度的锈蚀,当裂缝宽度大于 0.05 mm 时,钢筋锈蚀率将发生快速增长。此外,比较图 8(a)和图 8(b)可知,当裂缝宽度小于等于 0.05 mm 时,虽然氯离子渗透深度未达到钢筋表面,但钢筋依然发生了少量锈蚀,这表明钢筋表面氯离子浓度已

达到钢筋锈蚀临界浓度。因此,使用硝酸银喷涂法不能测试临界氯离子浓度,仅能测试大致的氯离子渗透深度。

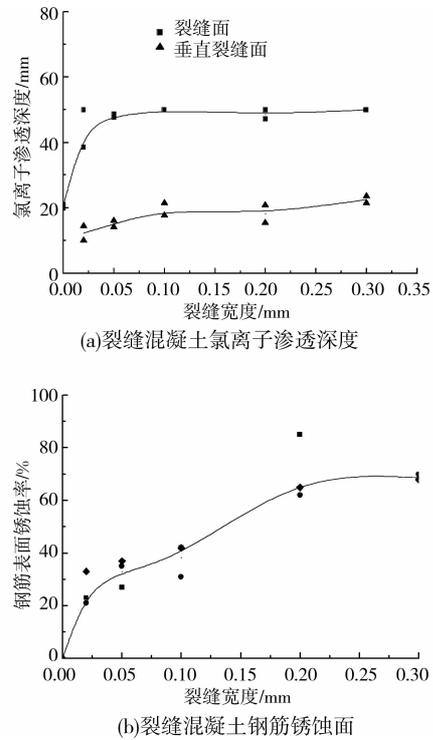


图 8 裂缝对氯离子渗透及钢筋锈蚀率的影响

3 结论

1) 混凝土劈裂裂缝制备过程中将发生裂缝回复现象,混凝土表面裂缝宽度大于位移传感器测试的裂缝宽度值,建议以卸载后位移传感器获得的裂纹宽度值表征劈裂裂缝尺度。

2) 海洋潮汐区裂缝混凝土氯离子传输仍可用扩散定律进行描述。但裂缝混凝土稳定段氯离子浓度随裂缝宽度增加而呈指数函数增加。裂缝周边区域稳定段氯离子浓度则随裂缝宽度增加而线性增加,但与裂缝区域氯离子增加幅度相比,其增加幅度并不明显。

3) 裂缝混凝土氯离子扩散系数随裂缝宽度增加而线性增加;并当裂缝密度小于 70 时,裂缝混凝土氯离子扩散系数线性增加。距裂缝位置越近,混凝土氯离子扩散系数增加越大;裂缝越宽,其对混凝土影响范围越大。

4) 劈裂裂缝宽度大于 0.05 mm 时,经过 30 d 海洋潮汐区暴露,氯离子沿混凝土裂缝面渗透 50 mm,沿垂直裂缝面向内平均渗透 20 mm 左右,钢筋表面锈蚀面积快速增加。

参考文献:

- [1] GOWRIPALANA N, SIRIVIVATNANONB V, LIM C C. Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30: 725-30.
- [2] 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.
- [3] VIDAL T, CASTEL A, FRANÇOIS 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.
- [4] PEDRO MONTES, THEODORE W, BREMNER, et al. 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.
- [5] MARSAVINA L, AUDENAERT K, SCHUTTER G DE, et al. Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23: 264-274.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 张鹏, 赵铁军, WITTMANN F H. 开裂混凝土中水分侵入过程的可视化追踪及其特征分析 [J]. *硅酸盐学报*, 2010, 38(4): 659-665.
- ZHANG PENG, ZHAO TIE-JUN, WITTMANN F H, et al. Visualization tracing and characteristic analysis of water invasion into cracked concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 38(4): 659-665.
- [9] WANG K, JANSEN D C, SHAH S P. permeability study of cracked concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(3): 381-393.
- [10] ALDEA C M, SHAH S P, KARR A. Permeability of cracked concrete [J]. *Rilem Material Structure*, 1999, 32: 370-376.
- [11] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008(38): 877-883.
- [12] 金祖权, 侯保荣, 赵铁军, 等. 收缩裂缝对混凝土氯离子渗透及碳化的影响 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(1): 7-11.
- JIN ZU-QUAN, HOU BAO-RONG, ZHAO TIE-JUN, et al. Influence of shrinkage cracks on chloride penetration and carbonation of concrete [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(1): 7-11.
- [13] OLGA G R, HOOTON R D. Influence of cracks on chloride ingress into concrete [J]. *Journal of ACI Materials*, 2003, 100(2): 120-126.
- [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] 金祖权. 西北地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测 [D]. 南京: 东南大学, 2006.

(编辑 王秀玲)