

文章编号:1673-2049(2015)04-0021-10

# 氯盐环境下开裂混凝土耐久性研究进展

延永东<sup>1</sup>,姚昌建<sup>2</sup>,刘荣桂<sup>1</sup>,陆春华<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013; 2. 杭州光明建筑设计院有限公司,浙江 杭州 310000)

**摘要:**为了明确裂缝对氯盐环境下钢筋混凝土结构耐久性的影响,结合已有文献分析了荷载裂缝、非荷载裂缝及预制裂缝下混凝土结构在氯盐环境下的耐久性变化规律,指出了裂缝形式(人工裂缝、自然裂缝)、宽度、深度、间距等参数对混凝土渗透性及氯离子传输、内部钢筋锈蚀的影响规律,介绍了已有的饱和与非饱和状态下开裂混凝土内氯离子传输过程的模型,指出了氯盐环境下开裂混凝土耐久性研究已得出的基本结论及需要深入研究的方面。所得结论可为氯盐环境下开裂混凝土的后期研究提供借鉴。

**关键词:**钢筋混凝土;裂缝;氯离子传输;钢筋锈蚀

**中图分类号:**TU528.07 **文献标志码:**A

## Research Progress on Durability of Cracked Concrete Under Chloride Environment

YAN Yong-dong<sup>1</sup>, YAO Chang-jian<sup>2</sup>, LIU Rong-gui<sup>1</sup>, LU Chun-hua<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

2. Hangzhou Guangming Architectural Design Institute, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

**Abstract:** To reveal the influence of crack on durability of reinforced concrete structure under chloride environment, authors analyzed the change rules about durability of concrete with load cracks, non-load cracks and artificial cracks by combining the existed references. The effects of crack type (artificial or natural crack), width, depth and distance on concrete durability which contains penetrability, chloride ingress and steel corrosion were pointed out. The models about chloride ion transportation in cracked concrete under saturated and unsaturated state were also introduced. The basic conclusions and key points needed in further study were finally put forward. The obtained results can be served as references for the future research on durability of cracked concretes under chloride environment.

**Key words:** reinforced concrete; crack; chloride ion transportation; steel corrosion

## 0 引言

氯盐环境是混凝土结构在服役过程中遭遇的一种危险环境,其中所含的氯离子在混凝土内的侵蚀是造成钢筋锈蚀的主要原因。各国通过研究氯离子

在混凝土内的传输来预测内部钢筋的脱钝时间。以往对氯离子在混凝土中的传输机理研究主要针对完好的混凝土结构。作为一种非均质材料,混凝土最大的缺点是抗拉强度低,在环境及荷载作用下,很容易开裂。实际工程中经常可以看到各种原因形成的

收稿日期:2014-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51178417,51278230,51378241);江苏大学高级人才基金项目(1281480002);

江苏省博士后基金项目(1202038C)

作者简介:延永东(1982-),男,陕西榆林人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:yand@ujs.edu.cn。

裂缝,如荷载裂缝、收缩裂缝、沉降裂缝等<sup>[1]</sup>。混凝土的非均质性使得裂缝形式比较复杂,宽度、深度、走向等具有一定的随机性,且受水泥持续水化的影响会发生一定程度的自愈<sup>[2]</sup>。裂缝表面具有较大的特征表面积和化学活性,容易加速其与外部物质的交换过程<sup>[3]</sup>。Isgor 等<sup>[4]</sup>指出,裂缝的一系列参数将改变混凝土的渗透性及有害物质在混凝土内的传输方式,由此引起的耐久性问题将对混凝土结构的失效概率、使用寿命及使用期的维护次数与成本产生不利影响,各国学者对此进行了一些试验研究与理论分析<sup>[5-6]</sup>。张士萍等<sup>[7]</sup>对不同裂缝宽度下氯离子、二氧化碳、水分在开裂混凝土内传输方面的研究进行了总结。本文根据现有文献及研究成果完善了这些总结,指出已经得到的结论及存在的问题,并为后续研究提出一些建议,以期为氯盐侵蚀环境下混凝土结构的耐久性设计及开裂混凝土结构的耐久性寿命预测与评估提供参考。

### 1 裂缝对混凝土渗透性的影响

渗透性包括透气性和透水性,是反映混凝土结构耐久性的一个重要指标<sup>[5]</sup>,也是影响氯离子在混凝土内侵蚀速度的一个关键因素。各国学者对开裂混凝土的渗透性变化进行了试验研究并建立了相应的计算方法。

#### 1.1 开裂混凝土渗透性试验

针对开裂混凝土的渗透性试验,各国学者采用的开裂试件、方法主要有:①圆柱体试件劈裂试验<sup>[8-10]</sup>,如图 1 所示,其中, $F$  为荷载,LVDT 为开裂位移测量装置;②棱柱体试件直接拉伸试验<sup>[11-13]</sup>;③普通试件通过温度、湿度等变化产生裂缝<sup>[13]</sup>。

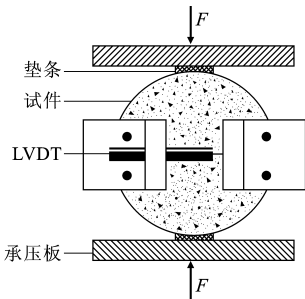


图 1 混凝土裂缝宽度测试装置

Fig. 1 Setup for Measuring Concrete Crack Width

通过试验得到的基本结论有:①开裂后普通混凝土的渗透系数随裂缝宽度的增加逐渐增大,其变化规律如图 2 所示<sup>[8]</sup>,其中  $\delta_{\text{res}}$  为残余横向位移, $k$  为不同张开位移下混凝土的相对渗透系数,OC 为

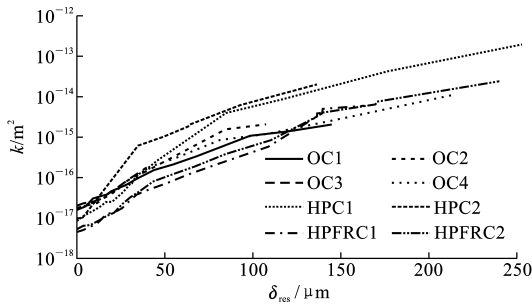


图 2 混凝土相对渗透系数与残余横向位移的关系

Fig. 2 Relation of Relative Permeability Coefficient and Residual Lateral Displacement of Concrete

水灰比 0.49 的普通混凝土,HPC 为水灰比 0.29 的高性能混凝土,HPFRC 为水灰比 0.29 且内掺 1% (体积分数)的钢纤维;②当裂缝宽度小于 0.05 mm 时,水分渗透速度几乎不变,当裂缝宽度介于 0.05~0.2 mm 时,水分渗透速度明显加快,但当裂缝宽度在 0.2 mm 以上时,其增加趋势逐渐变缓,试验时荷载是否作用于开裂混凝土也对其试验结果有影响,如图 3 所示<sup>[10]</sup>;③采用直接拉伸混凝土试件来产生裂缝,当混凝土受拉应变达到  $1 \times 10^{-3}$  时,其渗透性可增大 100 倍<sup>[12]</sup>;④受裂缝形态和界面过渡区的影响,同样宽度范围内普通混凝土的渗透性大于砂浆,而试件厚度对渗透性的影响很小<sup>[9]</sup>;⑤混凝土的渗透性与裂缝分布形态及连通性有很大关系,均布裂缝对混凝土的渗透性影响要大于局部裂缝<sup>[13]</sup>;⑥由于裂缝处自愈合的发生,混凝土渗透系数随时间增加逐渐降低<sup>[14-15]</sup>;⑦粗糙裂缝表面的微通道效应对渗流过程影响显著,使得表面粗糙度大的断裂面渗流量更大,且裂隙内的水分呈非稳态流动<sup>[16]</sup>;⑧浸泡不久裂缝内水分即达到饱和,且水分渗透速度和分布与混凝土内的初始相对湿度有关<sup>[17]</sup>。

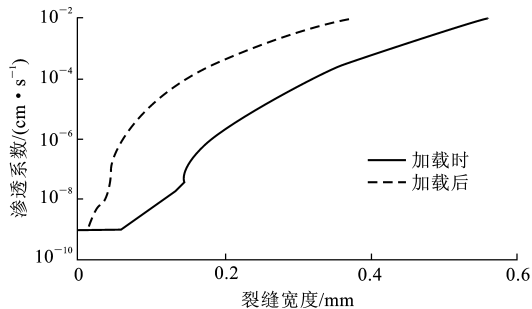


图 3 混凝土渗透系数与裂缝宽度的关系

Fig. 3 Relation of Permeability Coefficient and Crack Width of Concrete

#### 1.2 开裂混凝土渗透性计算

裂缝处的水分流量及渗透系数可用平行板模型来计算,但需根据裂缝的曲折性、粗糙性、自愈合性

等特点进行修正。

单一裂缝下混凝土的渗透系数  $k_{v0}$  可以表示为

$$k_{v0} = \frac{\xi \omega^2}{12} \quad (1)$$

多裂缝下混凝土的渗透系数  $k_v$  可以表示为

$$k_v = \frac{\xi \omega^3}{12s} \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为裂缝宽度;  $s$  为裂缝平均间距;  $\xi$  为考虑裂缝曲折性和粗糙性的折减系数, Akhavan 等<sup>[18]</sup>指出, 当裂缝处的雷诺数小于 2 300 且液体流动属于稳定层流时,  $\xi = \tau / (1 + 8.8 R_r^{1.5})$ ,  $\tau$  为表征裂缝曲折性的参数,  $\tau = (X_{\max} / L_e)^2$ ,  $X_{\max}$  为试件长度,  $L_e$  为裂缝的有效长度,  $R_r$  为表征裂缝粗糙度的参数,  $R_r = R_a / (2\omega)$ ,  $R_a$  为实际裂缝表面与裂缝光滑表面之间的平均距离。

自愈合会使裂缝处的渗透性逐渐减小, 渗透量随时间变化的关系可用下式来表示<sup>[19]</sup>

$$q_{(t)} / q_0 = 65 \omega_m^{-1.05} t^{-1.3+4\omega} - 10^5 \omega_m^{5.8} \quad (3)$$

式中:  $q_{(t)}$  为  $t$  时刻的渗透速度;  $q_0$  为初始时刻的水流速度;  $\omega_m$  为表面平均裂缝宽度。

## 2 裂缝对氯离子在混凝土内传输的影响

氯离子侵入混凝土并造成钢筋锈蚀是氯盐环境下混凝土耐久性破坏的主要表现形式, 混凝土开裂后氯离子传输会发生一定的变化, 各国对此进行了一些试验和理论研究。

### 2.1 氯离子在开裂混凝土内的传输试验

各国对氯离子在开裂混凝土内的传输试验主要考虑了裂缝形式(人工裂缝、荷载裂缝、收缩裂缝)及宽度(0.03~0.6 mm)对裂缝处及其附近混凝土内氯离子含量的影响。人工裂缝通过在混凝土浇筑过程中插入一定厚度的不锈钢片到指定深度来得到, 其优点是试验结果明确, 也方便进行数值模拟; 缺点是裂缝面处砂浆较多, 也不能反映真实裂缝的曲折性。Marsavina 等<sup>[20]</sup>采用此方法研究了氯离子在裂缝处的侵蚀。自然裂缝的产生有 5 种方式: ①对梁式试件施加弯曲荷载<sup>[21-22]</sup>; ②对试件施加轴向拉力<sup>[23]</sup>; ③对圆柱体试件施加径向压力<sup>[24-25]</sup>, 如图 1 所示; ④采用楔形劈裂来产生裂缝<sup>[26-27]</sup>, 如图 4 所示; ⑤通过中心膨胀来产生裂缝; ⑥采用平板法产生收缩裂缝。方式①需要在混凝土受拉区配置一定数量的纵向钢筋, 裂缝宽度比较容易控制; 方式②也需要在混凝土内配置一定数量的受拉钢筋, 且试件最

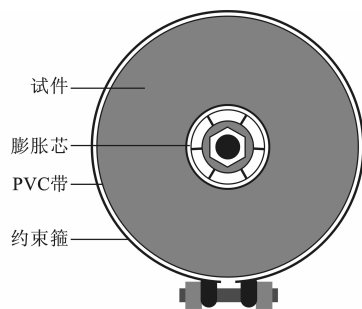


图4 楔形劈裂方法产生裂缝

Fig. 4 Crack by Expansive Core Method

好做成哑铃型以便于施加荷载; 方式③需要 LVDT 来控制裂缝宽度, 否则不容易得到宽度较小的裂缝; 方式④, ⑤需要特制的加载仪器, 裂缝宽度也较难控制; 方式⑥中裂缝宽度、数量均难以控制。由于方式①可实现加载与浸泡同时进行, 因此在研究中使用较多。

通过对实际工程的调查和室内试验, 得出了如下基本结论: ①相同侵蚀时间内, 裂缝处的氯离子浓度显著增加<sup>[23, 28-30]</sup>; ②侵蚀一定时间后, 垂直裂缝路径的氯离子浓度分布与从暴露表面向混凝土内的分布相似<sup>[31]</sup>; ③裂隙表面在静态溶液中对离子的吸附能力远大于在动态溶液中的吸附能力, 裂隙水的流动会显著提高裂隙表面的溶蚀速率<sup>[32-33]</sup>; ④短期侵蚀下, 裂缝处的氯离子浓度与裂缝宽度有关, 而长期侵蚀下, 裂缝处的氯离子浓度受裂缝宽度影响很小<sup>[34]</sup>; ⑤传统的非稳态电迁移法不能用于测量开裂混凝土试件的氯离子扩散系数, 而稳态电迁移法可以通过氯离子流量和电流大小来评价其抗氯离子渗透的能力<sup>[35]</sup>; ⑥裂缝的自愈合效应可以减小氯离子在裂缝处的扩散系数<sup>[36-37]</sup>; ⑦混凝土内粉煤灰掺量在 15% 以上时能有效改善开裂混凝土的抗氯离子渗透性能, 其等效氯离子扩散系数是普通混凝土的 1/8~1/6<sup>[38]</sup>。

Ismail 等<sup>[26-27]</sup>进行了不同宽度裂缝下砂浆和砌体试件在静止 NaCl 溶液中的浸泡, 然后沿垂直裂缝方向进行了取样测试, 并与从暴露表面取样得到的结果进行了比较, 发现随裂缝宽度增加, 同一深度的氯离子含量逐渐增大, 当砂浆裂缝宽度达到 0.325 mm 和砌体裂缝宽度达到 0.06 mm 时, 垂直裂缝方向的传输与沿暴露表面的传输类似, 如图 5 所示。

由此可见, 裂缝宽度对氯离子在开裂附近混凝土内的短期传输有很大影响, 这一影响可以用裂缝内氯离子扩散系数  $D_{cr}$  来体现。Olga 等<sup>[39]</sup>发现裂缝内氯离子扩散系数与混凝土自身材料无关, 只与

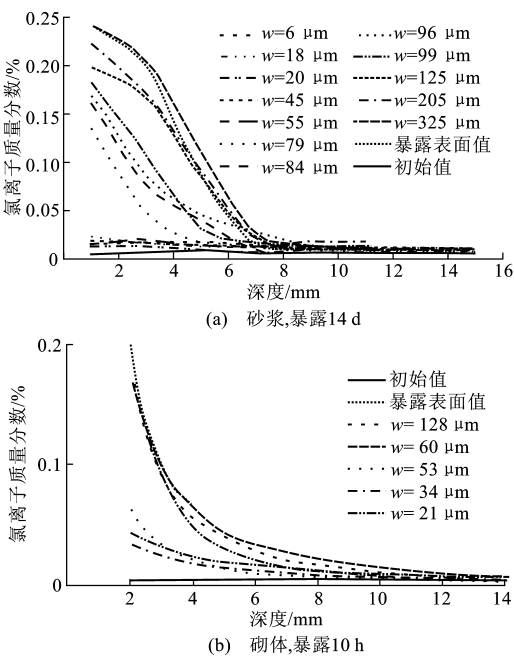


图5 试件沿垂直裂缝方向的氯离子质量分数分布

Fig.5 Distributions of Chloride Ion Mass Fraction of Specimens in Perpendicular-to-crack Directions

裂缝宽度和环境条件有关。另外一些学者研究发现裂缝内的氯离子扩散系数  $D_{cr}$  随着裂缝宽度的变化存在上下限<sup>[40-44]</sup>,如表1所示,其中上限为氯离子在水中的扩散系数,下限为氯离子在相应混凝土内的扩散系数。

表1 影响  $D_{cr}$  的裂缝宽度上下限

Tab.1 Upper and Lower Limitations of Cracking Widths for  $D_{cr}$

数据来源	$w_1/\mu\text{m}$	$w_2/\mu\text{m}$	材料
文献[41]	50	100	混凝土
文献[26]	30	100	砌体
文献[27]	30	125	砂浆
文献[5]	30		混凝土
文献[42]		75	混凝土
文献[43]	30	80	混凝土
文献[44]	100		海工混凝土收缩裂缝
	50		海工混凝土劈拉裂缝

注:  $w_1, w_2$  分别为裂缝宽度下限和上限。

笔者对已有文献中的试验结果进行了总结,得出了裂缝宽度在 0.03~0.125 mm 之间  $D_{cr}$  的计算公式<sup>[45]</sup>,即

$$D_{cr} = -35.6 \exp(-0.00835w) + 28.3 \quad (4)$$
$$w_1 \leq w \leq w_2$$

2.2 饱和状态下氯离子在开裂混凝土内的传输计算

根据混凝土裂缝开展情形,可将饱和状态下氯

离子在开裂混凝土内的传输分为单一裂缝与多裂缝 2 种情形分别进行分析。

2.2.1 单一裂缝下氯离子的传输计算

单一裂缝下氯离子传输的计算目前主要采用 2 类方法来进行考虑:一类为简化分析方法,即不改变原始传输方程,只在有关参数(主要为氯离子扩散系数)的计算中加入裂缝修正系数;另外一类为精确分析方法,主要是考虑氯离子在裂缝中传输的特殊性建立新的方程。前者较为简单,可得出方程的解析解,但在裂缝位置计算所得误差会较大,适合于只考虑裂缝宏观作用的情况,可在混凝土结构耐久性设计规范中采用,但需得出不同开裂情况下较为准确的修正参数;后者较为复杂,一般无法得出方程的解析解,只能采用数值方法或其他方法求解近似解,因此不太适用于混凝土结构耐久性设计规范,但可以准确预测裂缝位置的氯离子浓度变化规律,因此适用于分析裂缝位置氯离子的详细分布。

Kwon 等<sup>[46]</sup>与陆春华等<sup>[47]</sup>采用第 1 类方法研究了一定条件下裂缝对氯离子扩散系数的修正,得出了早期收缩裂缝与弯曲荷载裂缝下修正系数  $k_w$  的计算方法。

早期收缩裂缝下的修正系数  $k_{ws}$  为

$$k_{ws} = 31.61w^2 + 4.73w + 1 \quad w > 1.0 \text{ mm} \quad (5)$$

弯曲荷载裂缝下的修正系数  $k_{wf}$  为

$$k_{wf} = 47.18w^2 - 8.18w + 1 \quad w > 1.0 \text{ mm} \quad (6)$$

根据混凝土孔隙液是否饱和可将氯离子在开裂混凝土内的传输分为饱和与非饱和 2 种情况。饱和状态下的计算方法主要有离散裂缝模型和弥散裂缝模型。离散裂缝模型适合于单一裂缝或开裂情况比较复杂的情况<sup>[48]</sup>。

裂缝内氯离子传输方程为

$$\frac{\partial C_{cr}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{cr} \frac{\partial C_{cr}}{\partial x} - u \frac{\partial C_{cr}}{\partial x} \right) + \frac{2}{w} \phi D_0 \frac{\partial C_{ma}}{\partial x} \quad (7)$$

混凝土内氯离子传输方程为

$$\frac{\partial C_{ma}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_0 \frac{\partial C_{ma}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_0 \frac{\partial C_{ma}}{\partial y} \right] \quad (8)$$

式中:  $C_{cr}, C_{ma}$  分别为裂缝内和混凝土内的氯离子浓度;  $D_0$  为氯离子在混凝土内的扩散系数;  $\phi$  为混凝土孔隙率。

由于裂缝中的部分氯离子在传输过程中会通过裂缝壁向两侧混凝土内扩散,因此计算时需要将式(7),(8)结合起来进行考虑。

各国学者在具体计算过程中采用离散裂缝模型较多,且进行了一些改进。Li 等<sup>[49]</sup>根据裂缝内氯离

子浓度与流动速度之间的关系,将氯离子在裂缝内的扩散分为努森流(Knudsen Flow)和粘性流(Viscous Flow)2种形式,分别得出了这2种情形下氯离子扩散系数,并考虑表面氯离子浓度的时间依赖性,利用分解法得到了不同流动速度下裂缝内氯离子浓度的计算公式。Kato等<sup>[50]</sup>通过对裂缝处和裂缝周围混凝土内氯离子浓度的不断迭代来简化计算氯离子在开裂混凝土内的扩散。另外,氯离子传输方式与溶液是否发生流动有关,若溶液不发生流动,则氯离子传输以扩散为主;若溶液发生流动,则在裂缝内对流与扩散均需考虑。

### 2.2.2 多裂缝下氯离子的传输计算

当混凝土表面出现的裂缝较多且间距较小时,氯离子通过相邻2条裂缝侵入混凝土后会在部分区域耦合,造成其浓度与单一裂缝内侵入的有很大不同,此时精确结果应通过确立合适的传输方程和边界条件来得到。由于裂缝路径的曲折性与氯离子在混凝土孔隙内传输的复杂性,这一目的很难达到,为此各国学者借用弥散裂缝模型的概念来简化考虑裂缝对氯离子传输过程的影响,即假设氯离子传输方程与在普通混凝土内相似,只在表观扩散系数的计算中考虑裂缝宽度与裂缝间距的影响进行修正,所得到的等效扩散系数 $D$ 的计算公式为<sup>[43]</sup>

$$D = D_0 + \frac{w}{s} D_{cr} \quad (9)$$

这种方法概念明确,计算简单,且具有一定的精度,可用于混凝土结构耐久性设计规范。如日本混凝土学会(Japan Concrete Institute)<sup>[51]</sup>采用这种方法来考虑多裂缝对氯离子在混凝土内传输的影响,其提出弯曲荷载作用下设计扩散系数 $D_d$ 的计算方法为

$$D_d = \gamma D_0 + \frac{w}{s} \left( \frac{w}{w_a} \right)^2 D_{cr} \quad (10)$$

式中: $\gamma$ 为与材料有关的系数; $w_a$ 为允许裂缝宽度。

### 2.3 非饱和状态下氯离子在开裂混凝土内的传输计算

混凝土的非饱和状态存在情形较多,如海洋浪溅区、潮位变动区等。这一状态下氯离子在完好混凝土内的传输方式主要是对流和扩散。氯离子传输过程与混凝土的水分饱和度及其变化密切相关。Boulfiza等<sup>[52]</sup>建立了干湿循环作用下水分和氯离子在开裂混凝土内传输的二维传输耦合模型,即

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} - u_{ij} C) \quad (11)$$

式中: $\theta$ 为混凝土(裂缝)的含水量; $C$ 为混凝土(裂

缝)内的氯离子浓度; $D_{ij}$ 为氯离子二维扩散系数; $u_{ij}$ 为水分流动速度; $x_i, x_j$ 均为位置坐标。

笔者也尝试建立了非饱和状态下氯离子在开裂混凝土内传输的统一模型<sup>[53]</sup>,即

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \text{div} [D_{cl}(S) \text{grad}(C_f) + C_f D_{H_2O} \text{grad}(S)] \quad (12)$$

式中: $D_{H_2O}$ 为混凝土(裂缝)内的水分扩散系数,与混凝土孔隙及裂缝分布有关; $D_{cl}(S)$ 为混凝土(裂缝)内与饱和度有关的氯离子扩散系数, $S$ 为饱和度; $C_t, C_f$ 分别为总氯离子浓度和自由氯离子浓度。

式(13)既适用于混凝土,也适用于裂缝,只是混凝土和裂缝中部分参数的取值有所不同。

另外,Kato<sup>[50]</sup>通过对裂缝内和混凝土内氯离子传输过程的不断迭代计算了干湿交替作用下氯离子在自然开裂混凝土内的传输,所得结果与试验结果吻合较好。陆春华等<sup>[54]</sup>通过分析受弯混凝土内的氯离子含量,发现当裂缝宽度小于0.3 mm时,可以近似采用等效扩散模型计算开裂截面的氯离子含量,其中等效扩散系数的劣化特性可用裂缝宽度的多项函数表示。

目前各国对非饱和状态下氯离子在多裂缝混凝土的传输研究较少,还没有明确的计算方法。鉴于这种情形在海洋环境中不可避免,因此有必要加强这方面的研究。

## 3 氯盐环境下开裂混凝土内的钢筋锈蚀

氯离子在开裂混凝土内的侵入最终会对内部的钢筋产生一定的影响。各国学者采用不同的检测方法对氯盐环境下受弯开裂构件内的钢筋锈蚀进行了研究。Sagues等<sup>[55]</sup>通过试验发现裂缝会导致开裂区氯离子局部侵蚀加快,钢筋脱钝时间缩短,尤其早期荷载裂缝会将钢筋直接暴露在有害物质中,为钢筋锈蚀提供极其便利的条件。Vidal等<sup>[56]</sup>通过试验研究了不同锈蚀情况下混凝土保护层的开裂情况,并建立了相应的模型。Jaffer等<sup>[57]</sup>采用如图6所示的装置研究了氯盐环境下受弯开裂普通混凝土及高性能混凝土中钢筋-混凝土界面及裂缝面处的钢筋锈蚀量及其分布,发现普通混凝土和高性能混凝土裂缝两侧钢筋锈蚀产物分布长度分别为40 mm和75 mm。在动荷载作用下,裂缝的开合还会导致钢筋锈蚀产物从钢筋-混凝土表面扩散到裂缝和混凝土孔隙中,引起二次锈胀开裂。

Sistonen等<sup>[58]</sup>从电化学角度探讨了长期氯盐

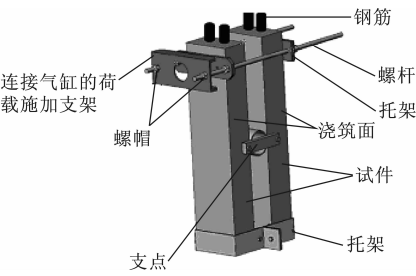


图 6 对梁施加动力荷载的装置

Fig. 6 Setup for Applying Dynamic Load to Beams

浸泡环境下开裂混凝土内热浸镀锌钢筋的 3 种锈蚀机理： $\eta$  和  $\xi$  相的局部脱钝；非均匀镀锌层的  $\eta$  和  $\xi$  相的局部脱钝和镀锌层裂缝共同作用导致镀锌层剥离；非均匀镀锌层的  $\eta$  相的全部脱钝和  $\xi$  相的部分脱钝及铁基体的开裂导致镀锌层和铁基体的分离。这些锈蚀与混凝土密实性之间没有不同程度的关系。Saraswathy 等<sup>[59]</sup>进行了氯盐环境中悬臂加载开裂混凝土板的钢筋锈蚀试验，测试了其开路电位、线性极化电阻、自由氯离子含量、pH 值、钢筋质量损失等。发现当裂缝宽度为 0.1 mm 时，钢筋的锈蚀电位变化没有一定的规律性，线性极化电阻和钢筋锈蚀量、自由氯离子含量增加，pH 值则减小 0.4 左右。Francois 等<sup>[60]</sup>在前期研究中发现 0.5 mm 以下的裂缝对钢筋锈蚀的发展有不同程度的影响，超出此范围则影响程度基本不变，而在后期的研究中却发现裂缝本身及其宽度对钢筋锈蚀影响很小<sup>[61]</sup>。Jacobsen 等<sup>[62]</sup>指出 0.4 mm 以下的裂缝对钢筋锈蚀没有影响；目前大部分研究针对的是普通混凝土，对高性能混凝土中裂缝的影响研究较少。Poursaei 等<sup>[63]</sup>研究了横向裂缝和纵向裂缝对高性能混凝土内钢筋锈蚀的影响发现：纵向开裂后，由于钢筋直接暴露在锈蚀环境中且面积较大，因此混凝土的高性能无法发挥作用；横向开裂后，由于氯离子在高性能混凝土裂缝壁处传输较普通混凝土要慢，裂缝自愈合更明显；裂缝路径的特殊性使得高性能混凝土相比于普通混凝土能发挥一定的阻锈作用，但效果不如其在完好混凝土内的作用。Arya 等<sup>[64]</sup>采用在浇筑混凝土时预埋不锈钢薄片的方法来产生裂缝，研究了混凝土裂缝频数（每米长度内的裂缝数量）及裂缝密度（每米长度内总的裂缝宽度）对内部钢筋锈蚀的影响，发现减小裂缝频数可以降低钢筋的锈蚀速度和锈蚀量。

综上所述，裂缝处的钢筋会发生提前锈蚀，裂缝频数（或密度）对锈蚀量及锈蚀速度的影响要大于裂缝宽度，目前只有一些定性的结果，缺乏裂缝参数与

钢筋锈蚀参数之间的定量计算方法。

#### 4 氯盐环境下开裂混凝土结构的耐久性评估与寿命预测

混凝土开裂后对其进行耐久性评估及剩余寿命预测具有重要意义。由于裂缝处的钢筋锈蚀情形与其他地方有较大差别，因此准确评价结构的服役状态是评估整个结构的关键，选择合理的极限状态则是对开裂混凝土进行剩余寿命预测的关键。Lu 等<sup>[65]</sup>建立了除冰盐环境下受弯开裂钢筋混凝土桥梁中箍筋和受拉主筋初锈时间的可靠度预测模型，其失效概率  $P_i(t)$  表示为

$$P_i(t) = P[C_{cr,i} \leq C(s, t)] \quad (13)$$

式中： $C_{cr,i}$  为钢筋表面的临界自由氯离子浓度（取为 0.10%~0.25% 水泥质量的均匀分布）； $C(s, t)$  为计算得到的钢筋表面自由氯离子浓度。

采用 Monte Carlo 模拟得到的不同时间下初锈概率  $P_i(t)$  如图 7 所示，其中， $P_{\max}$  为锈蚀概率最大值。

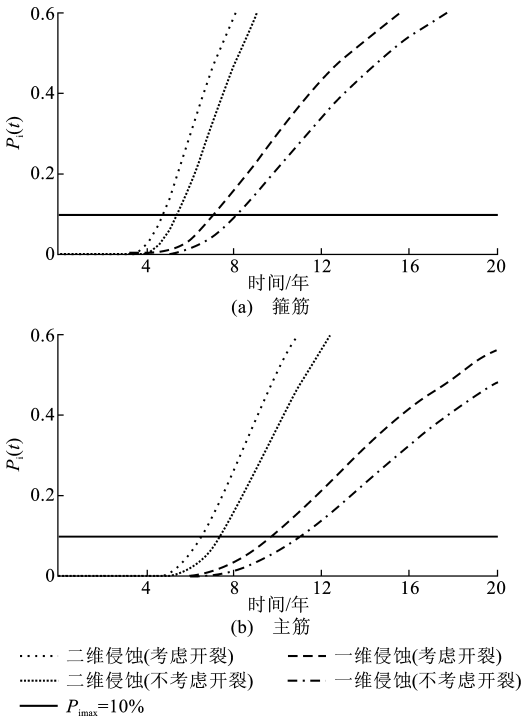


图 7 桥梁中箍筋与主筋的初锈概率

Fig. 7 Probabilities of Corrosion Initiation of Stirrup and Longitudinal Reinforcement in Bridges

由图 7 可以看出，裂缝会使钢筋的初锈时间提前，并使得同一时间下的锈蚀概率增大，其中二维侵蚀下的锈蚀概率要大于一维侵蚀下的结果。Kwon 等<sup>[46]</sup>采用可靠度方法对早期开裂混凝土码头在氯

盐环境下的耐久性寿命进行了预测,结果表明,随着裂缝宽度的增大,混凝土的预期寿命逐渐减小。另外,裂缝对混凝土结构耐久性及其寿命的影响存在一定的变数,实际应用过程中可采用不确定性分析方法,如伍振志等<sup>[66]</sup>采用模糊综合评价方法分析了裂缝对隧道管片结构耐久性的影响。

## 5 结 语

(1)混凝土开裂后其渗透性增加,渗透系数与裂缝宽度、裂缝曲折性及粗糙性有关,且由于自愈合的发生,其渗透速度会逐渐减缓。

(2)开裂后裂缝周围的氯离子传输速度增加,裂缝内的氯离子扩散系数随裂缝宽度的增加呈三阶段变化,但存在上下限值。

(3)氯盐环境下开裂处的钢筋会提前锈蚀,锈蚀发展程度与裂缝宽度之间有一定的关系,随着裂缝频数的增加,钢筋的锈蚀速度和锈蚀量逐渐增大。目前关于裂缝对构件整体使用寿命的影响还存在分歧,没有取得一致的结论。

(4)开裂混凝土的耐久性涉及到流体力学、结构力学、损伤力学、电化学等多方面的知识,是一个综合性的课题。目前还有必要从氯离子在实际开裂混凝土的传输模拟、开裂混凝土内钢筋锈蚀机理、开裂混凝土耐久性极限状态的确定及寿命预测等方向进行深入研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.  
WANG Tie-meng. Control of Cracking in Engineering Structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [2] 张 雄, 张小伟, 李旭峰. 混凝土结构裂缝防治技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
ZHANG Xiong, ZHANG Xiao-wei, LI Xu-feng. Prevention and Control Technology of Cracking in Concrete Structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [3] REINHARDT H W. Penetration and Permeability of Concrete; Barriers to Organic and Contaminating Liquids[M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [4] ISGOR O B, RAZAQPUR A G. Finite Element Modeling of Coupled Heat Transfer, Moisture Transport and Carbonation Processes in Concrete Structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(1): 57-

73.

- [5] FRANCOIS R. Effects of Cracks on Local Diffusion of Chloride and on Long-term Corrosion Behavior of Reinforced Concrete Members[C]// ZHAO T J. Proceedings of an International Workshop on Durability of Reinforced Concrete Under Combined Mechanical and Climate Loads. Berlin: Aedificatio Publishers, 2005: 113-121.
- [6] 杨林虎, 李克非, 李全旺. 裂缝控制宽度对氯盐侵蚀环境中钢筋混凝土受弯构件劣化及维护成本的影响[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 1-7.  
YANG Lin-hu, LI Ke-fei, LI Quan-wang. Impact of Crack Control Width on Degradation and Maintenance Cost of Flexural Reinforced Concrete Members in Chloride Environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 1-7.
- [7] 张士萍, 刘加平, 孙 伟, 等. 裂缝对混凝土中介质传输的影响[J]. 混凝土, 2009(12): 1-4.  
ZHANG Shi-ping, LIU Jia-ping, SUN Wei, et al. Effect of Cracking on Transport Properties in Concrete[J]. Concrete, 2009(12): 1-4.
- [8] PICANDET V, KHELIDJ A, BELLEGOU H. Crack Effect on Gas and Water Permeability of Concretes[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(6): 537-547.
- [9] ALDEA C M, SHAH S P, KARR A. Permeability of Cracked Concrete[J]. Materials and Structures, 1999, 32: 370-376.
- [10] WANG K, JANSEN D C, SHAH S P, et al. Permeability Study of Cracked Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 381-393.
- [11] TSUKAMOTO M, WORNER J D. Permeability of Cracked Fibre-reinforced Concrete[J]. Journal of Concrete and Concrete Structures: Darmstadt Concrete, 1991, 6: 123-135.
- [12] GERARD B. Cracking and Permeability of Concrete Under Tension[J]. Materials and Structures, 1996, 29: 141-151.
- [13] YANG Z F, WEISS W J, OLEK J. Water Transport in Concrete Damaged by Tensile Loading and Freeze-thaw Cycling[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(3): 424-434.
- [14] CHARRON J P, DENARIE E, BRUHWILER E. Transport Properties of Water and Glycol in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) Under High Tensile Deformation[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(5): 689-698.
- [15] REINHARDT H W, JOOSS M. Permeability and Self-

- healing of Cracked Concrete as a Function of Temperature and Crack Width[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(7): 981-985.
- [16] 李克非, 马明军, 王晓梅. 水泥基材料裂隙水流动规律的试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(11): 229-233.  
LI Ke-fei, MA Ming-jun, WANG Xiao-mei. Experimental Study on Water Flow Behavior Through Fracture Surfaces of Cement-based Materials[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 229-233.
- [17] 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, 2009, 605(1/2): 154-158.
- [18] AKHAVAN A, SHAFATIAN S, RAJABIPOUR F. Quantifying the Effects of Crack Width, Tortuosity and Roughness on Water Permeability of Cracked Mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(2): 313-320.
- [19] EDVARSEN C. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(4): 448-454.
- [20] 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(1): 264-274.
- [21] YAN Y D, JIN W L, CHEN J. Experiments of Chloride Ingression in Flexural Reinforced Concrete Beams[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(2): 277-286.
- [22] 付传清, 卢沈杰, 金贤玉, 等. 荷载裂缝对混凝土中氯离子扩散的影响[J]. 混凝土, 2015(2): 4-9.  
FU Chuan-qing, LU Shen-jie, JIN Xian-yu, et al. Influence of Load Crack on Chloride Diffusion in Concrete[J]. Concrete, 2015(2): 4-9.
- [23] GOWRIPALANA N, SIRIVIVATNANONB V, LIM C C. Chloride Diffusivity of Concrete Cracked in Flexure[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(5): 725-730.
- [24] JANG S Y, KIM B S, OH B H. Effect of Crack Width on Chloride Diffusion Coefficients of Concrete by Steady-state Migration Tests[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(1): 9-19.
- [25] ALDEA C M, SHAH S P, KARR A. Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3): 181-187.
- [26] ISMAIL M, TOUMI A, FRANCOIS R, et al. Effect of Crack Opening on the Local Diffusion of Chloride in Cracked Mortar Samples[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8/9): 1106-1111.
- [27] ISMAIL M, TOUMI A, FRANCOIS R, et al. Effect of Crack Opening on the Local Diffusion of Chloride in Inert Materials[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(4): 711-716.
- [28] LINDQUIST W D, DARWIN D, BROWNING J, et al. Effect of Cracking on Chloride Content in Concrete Bridge Decks[J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(11/12): 467-473.
- [29] 张士萍, 刘加平, 董良峰. 收缩裂缝对混凝土氯离子传输的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 90-92, 143.  
ZHANG Shi-ping, LIU Jia-ping, DONG Liang-feng. Influence of Shrinkage Cracking on Chloride Ions Transport of Concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(6): 90-92, 143.
- [30] 张邵峰, 陆春华, 陈 妤, 等. 裂缝对混凝土内氯离子扩散和钢筋锈蚀的影响[J]. 工程力学, 2012, 29(增 1): 97-100.  
ZHANG Shao-feng, LU Chun-hua, CHEN Yu, et al. Influence of Cracks on Chloride Diffusion and Reinforcement Corrosion in Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S1): 97-100.
- [31] WIN P P, WATANABE M, MACHIDA A. Penetration Profile of Chloride Ion in Cracked Reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(7): 1073-1079.
- [32] 王晓梅, 李克非. 水泥基材料裂隙表面离子吸附过程[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 1-6.  
WANG Xiao-mei, LI Ke-fei. Adsorption Behavior of Ions on Fracture Surfaces of Cement-based Materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(1): 1-6.
- [33] 王晓梅, 李克非. 水泥基材料裂隙表面溶蚀过程[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(3): 525-530.  
WANG Xiao-mei, LI Ke-fei. Leaching Behavior of Fracture Surfaces of Cement-based Materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(3): 525-530.
- [34] 张 君, 居贤春, 公成旭. 混凝土中的裂缝对氯盐侵蚀作用的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(6): 720-724.  
ZHANG Jun, JU Xian-chun, GONG Cheng-xu. Effect of Cracks in Concrete on Chloride Penetration[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31

- (6):720-724.
- [35] 张士萍,刘加平,缪昌文.预置表面裂缝对混凝土中氯离子传输的影响[J].建筑材料学报,2011,14(4):550-553.
- ZHANG Shi-ping, LIU Jia-ping, MIAO Chang-wen. Influence of Cracking on Transport of Chloride in Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4):550-553.
- [36] EDVARSEN C. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(4):448-454.
- [37] 延永东,金伟良,王海龙.自愈合对氯离子在开裂混凝土内侵蚀的影响[J].工业建筑,2011,41(5):6-9.
- YAN Yong-dong, JIN Wei-liang, WANG Hai-long. Influence of Self-healing on Chloride Ion Ingress in Cracked Concrete[J]. Industrial Construction, 2011, 41(5):6-9.
- [38] 陆春华,崔钊玮,张邵峰,等.粉煤灰对受弯开裂钢筋混凝土内氯离子侵蚀的影响[J].建筑材料学报,2013,16(5):787-793.
- LU Chun-hua, CUI Zhao-wei, ZHANG Shao-feng, et al. Influence of Fly Ash Content on Chloride Corrosion in Flexurally Cracked Reinforced Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5):787-793.
- [39] OLGA G R, DOUG H R. Influence of Cracks on Chloride Ingress into Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(2):120-126.
- [40] ISHIDA T, IQBAL P O, ANH H T L. Modeling of Chloride Diffusivity Coupled with Non-linear Binding Capacity in Sound and Cracked Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(10):913-923.
- [41] TAKEWAKA K, YAMAGUCHI T, MAEDA S. Simulation Model for Deterioration of Concrete Structures Due to Chloride Attack[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(2):139-146.
- [42] KATO Y, UOMOTO T. Modeling of Effective Diffusion Coefficient of Substances in Concrete Considering Spatial Properties of Composite Materials[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2005, 3(2):241-251.
- [43] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of Traversing Crack on Chloride Diffusion into Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(6):877-883.
- [44] 庄其昌.裂缝对海工混凝土耐久性影响研究[D].青岛:青岛理工大学,2010.
- ZHUANG Qi-chang. Influence of Crack on Durability of Marine Concrete[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010.
- [45] 延永东,金伟良,王海龙.饱和状态下开裂混凝土内的氯离子输运[J].浙江大学学报:工学版,2011,45(12):2128-2133.
- YAN Yong-dong, JIN Wei-liang, WANG Hai-long. Chloride Ingression in Cracked Concrete Under Saturated State[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(12):2128-2133.
- [46] KWON S J, NA U J, PARK S S, et al. Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion[J]. Structural Safety, 2009, 31(1):75-83.
- [47] 陆春华,张邵峰,刘荣桂,等.横向弯曲裂缝对混凝土内氯离子侵蚀作用的影响[J].土木建筑与环境工程,2013,35(6):124-130.
- LU Chun-hua, ZHANG Shao-feng, LIU Rong-gui, et al. Influence of Transverse Flexural Crack on Chloride Penetration in Concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(6):124-130.
- [48] BOULFIZA M, SAKAI K, YOSHIDA H. Chloride Ingress in Marine Concrete Structures: A Discrete Representation of Cracking[J]. Doboku Gakkai Nenji Gakujutsu Koenkai Koen Gaiyoshu, 2000, 55(5):396-397.
- [49] LI C Q, ZHENG J J, SHAO L. New Solution for Prediction of Chloride Ingress in Reinforced Concrete Flexural Members[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(4):310-325.
- [50] KATO E, KATO Y, UOMOTO T. Development of Simulation Model of Chloride Ion Transportation in Cracked Concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2005, 3(1):85-94.
- [51] Japan Concrete Institute. Interface Problem Between Structural and Durability Design of Concrete Structures[R]. Tokyo: Japan Concrete Institute, 1998.
- [52] BOULFIZA M, SAKAI K, BANTHIA N, et al. Prediction of Chloride Ions Ingress in Uncracked and Cracked Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(1):38-48.
- [53] 延永东,金伟良,王海龙,等.干湿交替作用下氯离子在开裂混凝土中的输运规律[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(5):2060-2067.
- YAN Yong-dong, JIN Wei-liang, WANG Hai-long, et al. Chloride Transport in Cracked Concrete Under Wet-dry Cycling Condition[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(5):2060-2067.

- [54] 陆春华,刘荣桂,崔钊玮,等. 干湿交替作用下受弯开裂钢筋混凝土梁内氯离子侵蚀特性[J]. 土木工程学报,2014,47(12):82-90.  
LU Chun-hua, LIU Rong-gui, CUI Zhao-wei, et al. Study on Chloride Penetration into Flexural Cracked Reinforced Concrete Beams Subjected to Drying-wetting Cycles[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12):82-90.
- [55] SAGUES A A, KRANC S C. Computation of Corrosion Distribution of Reinforcing Steel in Cracked Concrete[C]//FHWA. Proceedings of the International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures. Washington DC: FHWA, 1998:1-12.
- [56] VIDAL T, CASTEL A, FRANCOIS R. Analyzing Crack Width to Predict Corrosion in Reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1):165-174.
- [57] 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.
- [58] SISTONEN E, CWIRZEN A, PUTTONEN J. Corrosion Mechanism of Hot-dip Galvanised Reinforcement Bar in Cracked Concrete[J]. Corrosion Science, 2008, 50(12):3416-3428.
- [59] SARASWATHY V, SONG H W. Evaluation of Corrosion Resistance of Portland Pozzolana Cement and Fly Ash Blended Cements in Pre-cracked Reinforced Concrete Slabs Under Accelerated Testing Conditions [J]. Materials Chemistry and Physics, 2007, 104(2/3):356-361.
- [60] FRANCOIS R, ARLIGUIE G. Reinforced Concrete: Correlation Between Cracking and Corrosion [C]//MALHOTRA V M. Proceedings of the Second CAN-MET/ACI International Conference on Durability of Concrete: Vol II. Montreal: ACI, 1999:1221-1238.
- [61] FRANCOIS R, ARLIGUIE G. Influence of Service Cracking on Reinforcement Steel Corrosion[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1998, 10(1):14-20.
- [62] JACOBSEN S, MARCHAND J, GERARD B, et al. Durability and Self Healing — A Review [C]//GJORV OE, SAKAI K, BANTHIA N. Proceedings of the Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Environment and Loading: Vol. 1. Tromsø: E & FN Spon, 1998:217-231.
- [63] POURSAEE A, HANSSON C M. The Influence of Longitudinal Cracks on the Corrosion Protection Afforded Reinforcing Steel in High Performance Concrete[J]. Cement and Concrete Research 2008, 38(8/9):1098-1105.
- [64] ARYA C, OFORI-DARKO F K. Influence of Crack Frequency on Reinforcement Corrosion in Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(3):345-354.
- [65] LU Z H, ZHAO Y G, YU Z W, et al. Probabilistic Evaluation of Initiation Time in RC Bridge Beams with Load-induced Cracks Exposed to De-icing Salts [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3):365-372.
- [66] 伍振志, 杨林德, 时蓓玲, 等. 裂缝对隧道管片结构耐久性影响及其模糊评价[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4):224-228.  
WU Zhen-zhi, YANG Lin-de, SHI Bei-ling, et al. Study on the Influence of Crack on the Durability of Tunnel Segments Using Fuzzy Evaluation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4):224-228.