

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.019

横向弯曲裂缝对混凝土内氯离子侵蚀作用的影响

陆春华, 张邵峰, 刘荣桂, 崔钊玮

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:分析了横向开裂混凝土内氯离子的侵入机理及其主要影响因素,建立了基于双重孔隙介质模型的修正 Fick 定律氯离子扩散模型,并对持续加载下的开裂钢筋混凝土梁构件进行了氯盐干湿循环侵蚀试验。试验采用浓度为 5% 的 NaCl 溶液,在进行 15 个干湿循环后,借助快速氯离子含量检测 RCT(Rapid Chloride Testing)法,对各裂缝处不同深度的氯离子含量进行了测定。试验结果表明:1)干湿循环侵蚀作用下,开裂混凝土表层 0~20 mm 范围内氯离子含量出现峰值,故可取表层对流区深度为 15~20 mm 左右;2)当表面裂缝宽度小于 0.3 mm 时,等效氯离子扩散系数平稳增大,模型的预测精度较高;当裂缝宽度大于 0.3 mm 后,等效氯离子扩散系数快速增大,氯离子侵入受对流作用的影响加大;3)受弯开裂混凝土等效氯离子扩散系数的劣化因子与裂缝宽度有直接关系,建议采用二次幂函数或分段函数来进行描述。

关键词:钢筋混凝土;受弯裂缝宽度;干湿循环;等效氯离子扩散系数

中图分类号:TU528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)06-0124-07

Influence of Transverse Flexural Crack on Chloride Penetration in Concrete

Lu Chunhua, Zhang Shaofeng, Liu Ronggui, Cui Zhaowei

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The mechanism for chloride penetration in cracked concrete and its major impact factors were analyzed. As a result, a revised chloride diffusion model based on Fick's Law was built by dual porous medium model. Then several cracked reinforced concrete beams self-anchored with sustained flexural loads were immersed in the 5% NaCl solution with the condition of dry-wet cycles. After 15 times of dry-wet cycles, the rapid chloride testing (RCT) was used for the determination of chloride ion content of the powder at each cracked sections. The test results show that: 1) with the condition of dry-wet cycles, the chloride content will occur a peak in the surface 20mm concrete, so the depth for surface convection zone can be assumed to be 15~20 mm; 2) when the crack width is less than 0.3mm, the equivalent chloride diffusion coefficient increases steadily, which agrees well with model's prediction; when the crack width is larger than 0.3mm, the equivalent chloride diffusion coefficient augments rapidly and influence of convection on chloride penetration becomes more significant; 3) the deterioration factor for equivalent chloride diffusion coefficient in flexural cracked concrete is directly correlative with crack width, which can be expressed by second order power function or separate function.

Key words: reinforced concrete; flexural crack width; dry-wet cycle; equivalent chloride diffusion coefficient

收稿日期:2013-03-20

基金项目:国家自然科学基金(50908103,51278230,51378241);中国博士后科学基金(2012M511215);江苏大学高级专业人才培养基金(11JDG132);高性能土木工程材料国家重点实验室开放项目(2011CEM010);教育部博士点基金(20123227110006)

作者简介:陆春华(1979-),男,博士,主要从事混凝土结构耐久性研究,(E-mail)lch79@ujs.edu.cn。

沿海混凝土结构在服役期间面临着各种耐久性问题,其中氯离子侵蚀造成的钢筋锈蚀及混凝土保护层开裂问题最为严重,不容忽视^[1-2]。与此同时,服役中的混凝土结构,在使用荷载、环境等因素的共同作用下,通常都是带裂缝工作的;规范规定的裂缝宽度限值通常在0.1 mm(CEB-FIP Model Code 1990)到0.4 mm(ACI Committee 222)之间^[3]。因此,研究荷载作用下裂缝对氯离子在混凝土结构中运输产生的影响是很有必要的^[4-5]。

关于裂缝对混凝土渗透性能的影响,一些学者对此进行了一定的试验研究。Djerbi等^[6]、Ismail等^[7]、Jang等^[8]将圆柱体混凝土(或砂浆)试件横向加载产生劈裂裂缝后进行氯离子渗透/扩散性能试验研究,发现裂缝对混凝土内氯离子扩散性能的影响随着裂缝宽度的变化而变化,并给出了氯离子扩散系数与裂缝宽度之间的定量关系。金祖权等^[9]、Kwon等^[10]研究了早期收缩裂缝对混凝土氯离子的渗透性能的影响,得出裂缝处的氯离子含量以及对应的扩散系数随裂缝宽度增加而呈二次函数增大。Ishida等^[11]提出了开裂混凝土氯离子扩散性能的计算模型,并采用有限元程序对模型的适用性(主要针对预制裂缝)进行了验证分析。以上研究主要针对的是一类贯穿裂缝(如劈裂裂缝、收缩裂缝、预制裂缝等),而对横向受弯裂缝(梁构件主要受力裂缝)的研究并不多。Gowripalan等^[12]通过三点受弯加载试验使梁构件产生横向受弯裂缝,研究了受压区、受拉区以及裂缝位置处的氯离子扩散系数的差异,发现裂缝处的“等效氯离子扩散系数”最大,并建议用比值 w/c (裂缝宽度/保护层厚度)作为评价开裂混凝土结构耐久性的重要参数。但是,文献^[12]也同时指出,裂缝处的氯离子侵入过程及其相应的计算模型仍有待于进一步研究。

本文对持续加载开裂状态下钢筋混凝土梁构件进行了盐溶液干湿循环试验,研究了裂缝截面处的氯离子侵蚀分布规律,建立了考虑裂缝宽度影响的等效氯离子扩散系数的计算模型。

1 模型的建立

1.1 完好混凝土内氯离子侵入分析

完好状态下的混凝土结构中,氯离子的侵入过程是从混凝土表面向孔隙渗透,再由孔隙向钢筋渗透的模式^[13]。当混凝土孔隙处于饱和状态时,氯离子的侵入主要是内外浓度差引起的扩散过程^[1],一般采用Fick第二定律来进行描述;当考虑混凝土的氯离子结合效应时,其表达式为:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(t) \frac{\partial C_t}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中: C_t 、 C_f 分别为总氯离子浓度和自由氯离子浓度(按混凝土质量的百分数表示), $C_t = (1 + R)C_f$; R 为混凝土氯离子结合能力,与组成材料有关。 $D(t)$ 为时变氯离子扩散系数,可采用式(2)计算。

$$D(t) = D_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^m \quad (2)$$

式中: D_{ref} 为参考龄期 t_{ref} 对应时刻的氯离子扩散系数(通常取 $t_{\text{ref}} = 28$ d); m 为龄期指数,一般认为与胶凝材料有关。

对于干湿侵蚀区域,一般认为混凝土表层存在一个对流区域;而在对流区以内,氯离子侵入则以扩散为主^[14]。当假定表层氯离子浓度 C_s 恒定时,式(1)的数学解析式为:

$$C_f(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2 \sqrt{(1 + R)^{-1} D_m t}} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $C_f(x, t)$ 为 t 时刻距混凝土表面 x 处的自由氯离子浓度; C_0 为混凝土内初始氯离子浓度; Δx 为表层对流区深度; erf 为误差函数; D_m 为平均(表观)氯离子扩散系数;一般认为混凝土龄期达到30 a后其氯离子扩散系数可近似认为恒定,此时 D_m 可按式(4)计算:

$$D_m = \begin{cases} \frac{D_{\text{ref}} \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^m}{1 - m} & (t \leq 30 \text{ a}) \\ D_{\text{ref}} \left(\frac{t_{\text{ref}}}{30} \right)^m \left[1 + \frac{30}{t} \left(\frac{m}{1 - m} \right) \right] & (t > 30 \text{ a}) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 开裂混凝土内氯离子侵入分析

开裂混凝土内的氯离子侵入方式与完好混凝土内的侵入方式有所不同,除去环境条件因素外,主要受到混凝土材料自身的影响,具体体现在以下3个方面:1)裂缝的存在破坏了混凝土的完整性,将为氯离子的侵入提供了一个理想通道,侵入方式由原来的以扩散为主转变成扩散、对流以及毛细作用等综合的运输模式,并受到裂缝开展参数(表面宽度、深度以及开裂路径等)的综合影响;2)裂缝的存在也加快了水分的渗入,可使周围混凝土的水化作用更加充分,其产物将填充一部分裂缝空间(裂缝自愈合效应),对氯离子的侵入有一定的阻碍作用^[3];3)构件开裂后,裂缝周围的混凝土将回缩,同时拉应力减小(靠近裂缝处的混凝土拉应力为零),可使该处混凝土的抗渗性能有所提高。

对于裂缝宽度的影响,文献^[6-8]通过对横向劈裂的圆柱体试件进行氯离子渗透/扩散试验研究后发现,当裂缝宽度小于某一范围内时,其对混凝土的氯离子渗透性能几乎没有影响,并将该值称为“临界裂缝宽度”,一般在50~70 μm 之间;随着裂缝宽度

的进一步增大,氯离子扩散系数也随之增大;当裂缝宽度增大到一定程度后(一般在 $100 \sim 125 \mu\text{m}$ 以上),氯离子在裂缝内的扩散相当于自由溶液中的扩散^[6-7]。但是对于受弯开裂构件来说,其弯曲裂缝与贯穿的劈裂裂缝是有所区别的,它是一条表面较宽而逐渐变小、直至闭合的不规则裂缝,见图 1(a)(其中 w 为表面裂缝宽度, d 为裂缝深度)。考虑到裂缝的自愈合效应,文献[3]提出用双重孔隙介质模型来分析氯离子在裂缝内的输运(见图 1(b)),此时需要将扩散系数进行一定的修正。Kwon 等^[10]认为裂缝宽度是影响开裂状态下混凝土氯离子扩散系数的主要参数,并结合现场实测结果,回归得到了早期开裂(由水化热和干缩引起)混凝土的平均氯离子扩散系数 $D(w)$ 计算模型,具体如下:

$$D(w) = (31.61w^2 + 4.73w + 1) \cdot D_m \quad (w \geq 0.1 \text{ mm}) \quad (5)$$

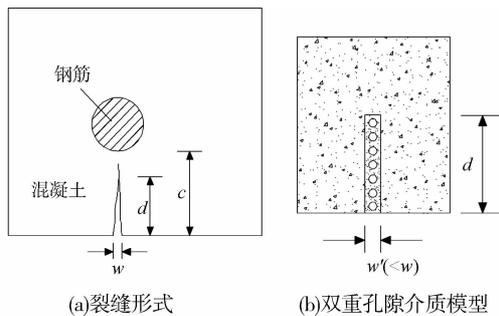


图 1 弯曲裂缝及其介质扩散模型

由此可见,对于受弯开裂的混凝土构件,氯离子在裂缝处的侵入过程仍然可以用 Fick 第二定律来进行描述,此时需要将氯离子扩散系数进行适当的修正。当假设混凝土内初始氯离子浓度 C_0 为零时,由式(3)可得裂缝处的氯离子扩散模型为:

$$C_f(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2 \sqrt{(1+R)^{-1} \cdot D_{eq} t}} \right) \right] \quad (6)$$

式中: D_{eq} 为考虑裂缝宽度影响的等效氯离子扩散系数,按式(7)进行计算:

$$D_{eq} = k_w \cdot D_m \quad (7)$$

式中: k_w 为考虑裂缝宽度的表观氯离子扩散系数劣化因子,可通过试验研究确定;为了方便应用,本文仍取表面裂缝宽度 w 来进行分析计算。

2 试验研究

2.1 试验材料

水泥采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料为碎石,粒径为 $5 \sim 25 \text{ mm}$;细骨料为天然江砂,细度模

数为 1.62,混凝土设计强度等级为 C30,其配合比见表 1。经测定,立方体标准试块 28 d 抗压强度为 31.8 MPa 。

表 1 混凝土配合比

W/C	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石子/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
0.43	185	430	560	1 250

2.2 试件制作

试件采用 $150 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 1 000 \text{ mm}$ 的钢筋混凝土梁,保护层厚度 c 取 30 mm ,具体配筋如图 2 所示。待试件浇筑、并自然养护 28 d 后,将试验梁进行两两自锚(三点受弯),通过调节不锈钢螺杆两端的螺帽进行加载,使梁跨中区域产生一定宽度的横向裂缝,见图 2。加载稳定后,采用 BJQF-A 型裂缝观测仪测得试件表面的裂缝宽度(见图 3),相关裂缝宽度及开展深度见表 2。

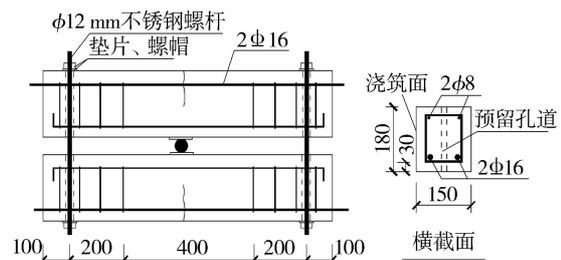


图 2 试件配筋及自锚加载图(单位: mm)



图 3 构件表面裂缝宽度测定

表 2 试验梁表面裂缝宽度

编号	表面裂缝宽度 w/mm	加载方式
C0		不加载
C1-1	①0.125(46 mm) ②0.048(22 mm)	两两自锚
C1-2	①0.127(59 mm)	
C2-1	①0.286(104 mm) ②0.367(128 mm) ③0.476(154 mm)	两两自锚
C2-2	①0.243(97 mm) ②0.324(122 mm) ③0.445(145 mm)	

注:括号内的数值为裂缝深度。

2.3 干湿循环试验

试验前,将梁的2个侧面和受压底面用环氧树脂进行封闭,以保证氯离子沿受拉开裂面(侵蚀面)侵入。随后将两两自锚的试验梁放入质量分数为5%的NaCl溶液中,进行干湿循环试验,见图4。每个干湿循环周期为14 d,干湿比例为1:1,以模拟沿海混凝土结构侵蚀最严重的干湿交替区域。



图4 置于浸泡池中的自锚梁

经过15个干湿循环后,将试验梁取出,置于干燥处晾干1周。随后采用直径为16 mm的冲击钻在裂缝处沿深度方向进行钻孔取粉,具体方法为:前20 mm每隔5 mm取1次粉样,之后每隔10 mm取1次粉样,直至60 mm处(试验梁中的裂缝深度均接近或超过60 mm)。然后将颗粒状粉样研磨成粉末状、烘干;分成2份,每份取1.5 g分别用去离子水和蒸馏水萃取,摇匀后静置24 h,用标定过的RCT(Rapid Chloride Testing)测定各自的电位,并求得相应的总氯离子和自由氯离子质量分数。

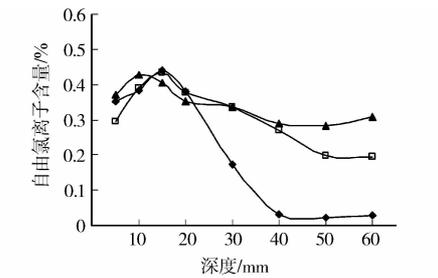
对于试验梁,由于裂缝间距较大(100~150 mm左右),可以忽略裂缝间氯离子侵蚀的相互影响。另外,在试验过程中,由于锚杆松弛、混凝土收缩等因素可能导致裂缝宽度和深度有所变化;因此,试验中我们通过监测锚杆应力以及定期检测构件表面裂缝宽度来实时监控裂缝开展参数的变化。从监测结果来看,锚杆应力有所降低,但主要裂缝的宽度和深度变化不大,这可能是试验周期相对较短(共210 d左右),远没有实际长期作用的影响明显,故在本文中并没有考虑裂缝宽度和深度的变化对试验结果的影响。

3 结果与分析

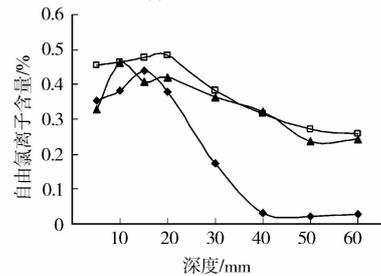
3.1 氯离子含量分析

经计算,各试验梁裂缝处不同深度的自由氯离子含量如图5所示(C1-1试件中的②号裂缝在箍筋处,未进行取粉)。考虑到裂缝宽度的影响,分别将其划分为0.1~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4以及0.4~0.5 mm 4个区段进行分析。

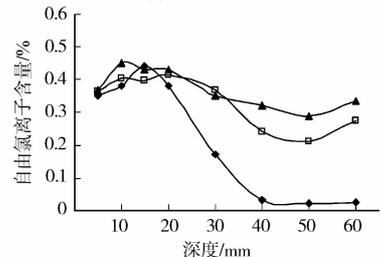
从图5中可以看出以下两点:1)在表层0~20 mm范围内,自由氯离子含量会出现一个峰值,随



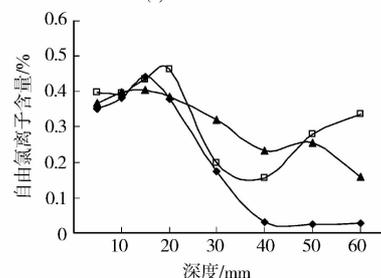
注: $w=0$ mm $w=0.125$ mm $w=0.127$ mm
(a) $w=0.1\sim 0.2$ mm



注: $w=0$ mm $w=0.243$ mm $w=0.286$ mm
(b) $w=0.2\sim 0.3$ mm



注: $w=0$ mm $w=0.324$ mm $w=0.367$ mm
(c) $w=0.3\sim 0.4$ mm



注: $w=0$ mm $w=0.445$ mm $w=0.476$ mm
(d) $w=0.4\sim 0.5$ mm

图5 裂缝处自由氯离子含量随深度的变化情况

后氯离子含量随深度增加而逐渐降低;这与本文采用的干湿侵蚀方式有关、也是符合实际情况的。已有研究及现场检测结果均表明^[14],海水干湿交替作用主要影响混凝土表层,即在表层混凝土内氯离子的侵入受对流作用比较明显,进而影响表层氯离子浓度以及氯离子扩散系数。2)在20~60 mm深度内,当裂缝宽度 w 小于0.3 mm时(图5(a)、(b)),同一裂缝处的氯离子含量随深度增大而逐渐降低,相同深度处的氯离子含量随裂缝宽度的增大而略有增大;当裂缝宽度 w 大于0.3 mm时(图5(c)、(d)),氯离子含量随深度增大时下降不多,有的还出现了略有提高的情况,这说明当弯曲裂缝的宽度和

深度较大时,裂缝处的氯离子侵入受对流等作用的影响也会变大。

此外,通过将总氯离子含量与自由氯离子含量进行比较分析,得出本试验混凝土的氯离子结合能力系数 R 在 $0.8 \sim 1.1$ 之间,为方便计算,此处取 $R=1.0$ 。

3.2 表层对流区深度

如前所述,在盐溶液干湿交替作用下,混凝土表层存在一个对流区域,在该区域以内氯离子的侵入则以扩散为主(见式(3))。关于对流区深度 Δx ,一些学者已有一定研究,如欧盟 DuraCrete 研究项目认为正常情况下混凝土表层对流区深度为 $14 \text{ mm}^{[15]}$;金伟良等^[14]通过对海水干湿区构件的氯离子含量现场检测分析,得出对流层深度为 $8 \sim 10 \text{ mm}$ 。从本文的实测结果图 5 中可以看出,对于开裂混凝土的氯离子侵入,其表层同样存在一个对流区,但是对流区深度与构件表面的裂缝宽度大小有关;当裂缝宽度 w 小于 0.3 mm 时,对流区深度 Δx 可取为 15 mm ,当裂缝宽度 w 大于 0.3 mm 时,对流区深度 Δx 可取为 20 mm 。

3.3 等效氯离子扩散系数

结合图 5,选取侵入深度在 $15 \sim 60 \text{ mm}$ 范围内的试验结果,用公式(3)进行拟合(当 $w < 0.3 \text{ mm}$ 时, Δx 取 15 mm ;当 $w > 0.3 \text{ mm}$ 时, Δx 取 20 mm),从而得到不同裂缝处混凝土的等效氯离子扩散系数 D_{eq} 。这里,借助 Matlab 软件工具箱进行拟合,相关结果见表 3。

图 6 给出表面裂缝宽度 w 与劣化因子 k_w 之间的变化关系。从表 3 和图 6 中可以看出,当裂缝宽度 $w \leq 0.324 \text{ mm}$ 时,劣化因子 k_w 平稳增大,等效扩散系数是完好混凝土的 2.2 倍以内,拟合精度较高;当裂缝宽度 w 在 $0.367 \sim 0.476 \text{ mm}$ 范围内时,劣化因子 k_w 迅速增大,最大等效扩散系数达到完好混凝土的 8~9 倍,拟合精度有所下降。

土的 8~9 倍,拟合精度有所下降。

表 3 不同宽度裂缝处等效氯离子扩散系数及劣化因子

裂缝宽度 w/mm	$D_{\text{eq}}/(10^{-5} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	SSE	R^2	k_w
0	0.73	0.003 6	0.978 9	1.00
0.125	1.50	0.001 7	0.963 9	2.05
0.127	0.74	0.001 1	0.898 4	1.02
0.243	1.39	0.035 6	0.989 1	1.90
0.286	1.47	0.001 4	0.942 3	2.02
0.324	1.60	0.002 7	0.903 5	2.20
0.367	3.25	0.003 8	0.644 5	4.45
0.445	6.78	0.006 3	0.786 4	9.28
0.476	6.05	0.009 4	0.687 3	8.29

注:SSE为误差平方和; R^2 为确定系数。

为了给出 k_w 与 w 之间的关系,分别选用幂函数(二次和四次)和指数函数进行拟合,相关结果见表 4,对应的拟合曲线见图 6(均选用 $w > 1.0 \text{ mm}$ 时的曲线)。文献[10]也给出了开裂混凝土等效氯离子扩散系数与裂缝宽度的关系(见公式(5)),并采用二次幂函数进行了描述,相关拟合曲线也在图 6 中给出(需要指出的是,文献[10]主要针对的是水化热和干缩引起的早期裂缝,与本文的弯曲裂缝是有区别的)。

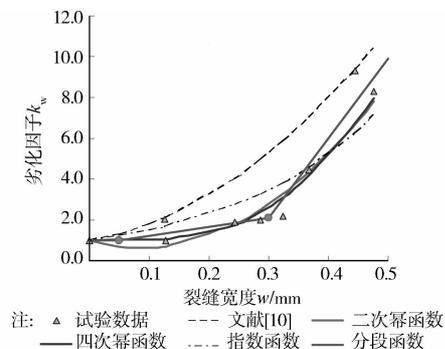


图 6 不同函数模型的拟合结果

表 4 各拟合模型的具体参数

拟合模型		SSE	R^2	
二次幂函数	文献[10]	$k_w = 31.61w^2 + 4.73w + 1 (w > 1.0 \text{ mm})$	19.731	0.760
	本文	$k_w = 47.18w^2 - 8.18w + 1 (w > 1.0 \text{ mm})$	3.601	0.913
四次幂函数	$k_w = -132w^4 + 188.1w^3 - 32.95w^2 + 1.94w + 1 (w > 1.0 \text{ mm})$	2.133	0.949	
指数函数	$k_w = e^{4.13w} (w > 1.0 \text{ mm})$	6.736	0.838	

从图 6 和表 4 可以得出以下结论:1)从拟合精度来看,幂函数的拟合结果要优于指数函数,并且四次幂函数的拟合精度最高,其次是二次幂函数。2)对于二次幂函数,文献[10]给出的计算模型与本试

验数据在变化趋势上是一致的,但与本文给出的二次幂函数相比,其对应误差平方和 SSE 较大,其中的原因与裂缝类型不同有关。文献[10]针对的是混凝土水化热和干缩引起的早期裂缝,这种裂缝一般

由内部扩展至表面,是一种贯穿裂缝;而本文试验考虑的是弯曲裂缝,是一种表面较宽而逐渐变小、直至闭合的裂缝(见图1(a));因此,对于表面裂缝宽度相同的两种裂缝,早期裂缝对氯离子扩散过程的影响肯定要大于弯曲裂缝,从而导致文献[10]模型的计算结果要明显大于本文的试验结果。3)综合分析本文试验和文献[10]的实测结果,可以初步推断开裂混凝土等效氯离子扩散系数的劣化因子 k_w 与其裂缝开展宽度 w 有直接关系,并可以近似地采用裂缝宽度的幂函数来进行描述。4)虽然四次幂函数的拟合结果是所选模型中精度最高、最为理想的,但其表达式较为复杂,不利于实际工程的应用计算。因此,综合考虑模型精度及实际应用的方便,当表面裂缝宽度大于0.1 mm时,建议采用二次幂函数模型来分析弯曲裂缝对混凝土氯离子扩散系数的影响;此时,开裂混凝土内氯离子的侵入行为仍可以用式(6)来进行分析,其等效氯离子扩散系数具体表达式为:

$$D_{eq} = k_w \cdot D_m = (47.18w^2 - 8.18w + 1) \cdot D_m \quad (w > 0.1 \text{ mm}) \quad (8)$$

此外,考虑到计算公式的完整性,需要增加裂缝宽度小于0.1 mm的情况。如前所述,裂缝对混凝土氯离子扩散性能的影响存在着一个“临界裂缝宽度 w_{cr} ”,这里初步取 w_{cr} 为0.05 mm;与此同时,结合表3和图6中的分析结果,本文认为用分段函数来描述表面裂缝宽度 w 与劣化因子 k_w 之间的变化关系也是可取的、实用的,第2个分段裂缝宽度取为0.3 mm(见式(9)),相应的曲线同样见图6。

$$k_w = \begin{cases} 1, & (w \leq 0.05 \text{ mm}) \\ 4.40w + 0.78, & (0.05 \text{ mm} < w \leq 0.3 \text{ mm}) \\ 39.0w - 9.6, & (0.3 \text{ mm} < w \leq 0.5 \text{ mm}) \end{cases} \quad (9)$$

4 结论

1)对于受弯开裂的混凝土构件,氯离子在裂缝处的侵入过程可以采用修正的Fick第二定律来进行描述;试验结果表明,当表面裂缝宽度在0.1~0.3 mm内时,修正模型的预测结果十分理想。

2)在氯盐干湿交替侵蚀作用下,开裂混凝土的表层同样存在一个对流区;当表面裂缝宽度小于0.3 mm时,表面对流区深度可取为15 mm;当裂缝宽度大于0.3 mm后,对流区深度增大至20 mm,且氯离子侵入受对流作用的影响变大。

3)受弯开裂混凝土等效氯离子扩散系数的劣化因子可采用裂缝宽度的幂函数来进行描述(文中给

出了二次幂函数式(8)和分段函数式(9)两种模型),并呈现出如下特点:当表面裂缝宽度在0.1~0.3 mm内时,等效氯离子扩散系数增长较平稳;当裂缝宽度大于0.3 mm,该值快速增大。

4)影响氯离子在混凝土内传输的因素较多,除了荷载和侵蚀条件外,还有混凝土配合比、养护条件、环境温湿度以及环境氯化物浓度等。此外,在长期荷载作用下,横向裂缝开展宽度与深度会不断发生变化,再加上裂缝自愈合效应的影响,实际氯离子的侵蚀作用是一个时变的复杂过程,相关内容有待于进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 金伟良,袁迎曙,卫军,等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [2] 吴瑾,吴胜兴. 氯离子环境下钢筋混凝土结构耐久性寿命评估[J]. 土木工程学报,2005,38(2):59-63.
Wu J, Wu S X. Durability assessment for reinforced concrete structures in chloride environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(2):59-63.
- [3] 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):2127-2133.
Yan Y D, Jin W L, Wang H L. Chloride ingress in cracked concrete under saturated state [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(12): 2127-2133.
- [4] Wang H L, Lu C H, Jin W L, et al. Effect of external loads on chloride transport in concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7): 1043-1049.
- [5] Win P P, Watanabe M, Machida A. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8): 1073-1079.
- [6] 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.
- [7] Ismail M, Toumi A, François 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.
- [8] 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.
- [9] 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 Z Q, Hou B R, Zhao T J, 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.
- [10] 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.
- [11] 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(7): 913-923.
- [12] Gowripalan N, Sirivivatnanon V, Lim C C. Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(5): 725-730.
- [13] 张奕. 氯离子在混凝土中的运输机理研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
- [14] 金伟良, 金立兵, 延永东, 等. 海水干湿交替区氯离子对混凝土侵入作用的现场检测和分析[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 364-370.
- Jin W L, Jin L B, Yan Y D, et al. Field inspection on chloride ion-intrusion effect of seawater in dry-wet cycling zone of concrete structure [J]. Shuili Xuebao, 2009, 40(3): 364-370.
- [15] Dura Crete. General guidelines for durability design and redesign [S]. European Union-Brite Euram III, 2000.
- (编辑 王秀玲)

(上接第 66 页)

- [11] 周世军, 张家玮. 恒载效应对拱形梁的影响分析[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 120-125.
Zhou S J, Zhang J W. Analysis of the effect of dead loads on static arch beams [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 120-125.
- [12] 张家玮, 周世军, 赵建昌. 考虑恒载效应的拱形梁静力近似解[J]. 计算力学学报, 2010, 27(4): 655-660.
Zhang J W, Zhou S J, Zhao J C. Approximate solutions of static arch beams considering static loads effect [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27 (4): 655-660.
- [13] Washizu K. Variational methods in elasticity and plasticity [M]. 3rd ed. Pergamon Press, 1982.
- [14] 老大中. 变分法基础[M]. 北京, 国防工业出版社, 2007.
- [15] Szileard R. 板的理论与分析[M]. 陈太平, 等. 译. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [16] Timoshenko S, Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells [M]. 2nd ed. McGraw-Hill Book Company, 1959.
- (编辑 薛婧媛)