

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.020

# 混凝土收缩裂缝几何特征及其对氯离子渗透的影响

朱红光<sup>1</sup>, 易成<sup>1</sup>, 孙辅廷<sup>2</sup>, 谢永兰<sup>1</sup>, 周家杰<sup>1</sup>, 吴凯波<sup>1</sup>, 刘宏<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京100083; 2.华能煤业有限公司,北京100070)

**摘要:**为准确表达收缩裂缝的几何特征并分析其对混凝土中氯离子渗透规律的影响,通过对干缩开裂混凝土板进行取样,观测和统计分析了收缩裂缝的几何特征,并采用ASTM法研究了裂缝对混凝土中氯离子渗透的影响规律.结果表明:混凝土收缩裂缝存在显著的深宽比特征,其均值约为44.31,开裂角度均值约为2.6度;对比不同的裂缝宽度表征参量如最大宽度、最小宽度、平均宽度以及比表面积等与ASTM法6h电通量关系后发现,最大宽度是表征裂缝对开裂混凝土渗透性影响的适宜参量;开裂混凝土中氯离子的渗透系数与裂缝最大宽度成正线性关系,并且当收缩裂缝宽度小于0.18 mm时,裂缝对渗透系数影响可以忽略.收缩裂缝的宽度变化会显著影响混凝土的抗渗性能,实际工程中应该根据混凝土保护层厚度来确定其容许的最大裂缝宽度.

**关键词:**收缩裂缝;深宽比;氯离子渗透;开裂尖端角度;裂缝宽度

中图分类号: TU528.0

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)12-0142-06

## Geometrical characteristic of concrete shrinkage crack and its effect on chloride ion permeability

ZHU Hongguang<sup>1</sup>, YI Cheng<sup>1</sup>, SUN Fuyan<sup>2</sup>, XIE Yonglan<sup>1</sup>, ZHOU Jiajie<sup>1</sup>, WU Kaibo<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>1</sup>

(1.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2.Huaneng Coal Industry Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** To accurately describe the geometrical characteristic of shrinkage crack and determine the influence on chloride ion permeability in concrete, by taking samples of shrinkage cracking concrete slab and observing the morphology, the characteristics of shrinkage cracks was statistically analyzed, and the effect law of cracks on chloride ion permeability, tested with ASTM method, was studied. The experimental result shows that the depth and width of shrinkage cracks in concrete are obviously related, which the depth-to-width ratio is 44.31, and the crack tip angle is 2.6 by average. Based on the comparative analysis of the relationship between width parameters e.g. maximum width, minimum width, average width, specific surface area etc. and 6 h electric flux, the maximum width is a suitable parameter for describing the effect of shrinkage crack on permeability of concrete. The permeability coefficient of cracked concrete has a positive linear relation with cracks' maximum width, and the impact of cracks on the permeability coefficient can be neglected when the width is less than 0.18 mm. The width changes of shrinkage cracks significantly affect the impermeability of the concrete, in practical project the allowed maximum width should be determined in accordance with the thickness of concrete cover.

**Keywords:** shrinkage crack; depth-to-width ratio; chloride ion permeability; crack tip angle; crack width

氯离子渗透是导致混凝土耐久性失效的一个重要因素,混凝土材料抗压强度很高,抗拉强度却很低,在混凝土水化过程和荷载作用下极易产生裂缝,因此在实际混凝土结构中,混凝土构件通常是带裂缝服役的.混凝土表面裂缝的存在,增大了混凝土与外界氯离子介质的接触面积,并且减小了混凝土保

护层的有效厚度,因此外界离子更容易渗入内部引发钢筋锈蚀<sup>[1]</sup>.

很多研究者都发现了裂缝对氯离子渗透的巨大影响.张士萍等<sup>[2]</sup>评估了带裂缝混凝土的渗透性质,发现氯离子质量分数随裂缝宽度增加而增加;金祖权等<sup>[3]</sup>、Zhang S等<sup>[4]</sup>和 Zhang R等<sup>[5]</sup>发现混凝土的氯离子质量分数和渗透系数都随裂缝宽度呈二次函数影响关系;陈小荣等<sup>[6]</sup>通过模拟发现氯离子扩散系数随着裂纹张开角度的增大而增大;国外 Marsavina等<sup>[7]</sup>用插片构造裂缝的方法研究了试验时间对氯离子侵入深度的影响;Jang等<sup>[8]</sup>、Park

收稿日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(51578539);北京市自然科学基金(8164061)

作者简介: 朱红光(1984—),男,博士(后),讲师;

易成(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者: 易成, uu\_gr@qq.com

等<sup>[9]</sup>通过对圆柱形试件进行劈裂式循环加卸载获得破损试件,研究了试验时间和劈裂带变形-COD对氯离子渗透性的影响;Yoon等<sup>[10]</sup>发现骨料对裂缝发展和渗透的传输有很大影响。

现有研究多数基于荷载裂缝(张拉、劈裂)或者插片预制裂缝来进行讨论,而实际工程中混凝土主要为养护不良而失水产生的收缩裂缝<sup>[11]</sup>,二者在几何形态上存在显著差别;由于存在离子吸附的问题<sup>[12]</sup>,采用混凝土内部的氯离子质量分数来分析渗透性并不可靠;这些研究所得结论的可靠性值得商榷。也有研究表明裂缝深度对混凝土的氯离子渗透性是有影响的,但是对裂缝宽度和深度这两个因素的影响研究都是孤立的,事实上收缩所产生的自然裂缝,其深度和宽度是存在某种关系的。本文采用混凝土大板养护收缩开裂的方法获取了收缩裂缝试件,对裂缝形貌进行观测和统计,分析了收缩裂缝的宽度-深度规律;用电迁移试验方法研究了收缩裂缝对混凝土抗氯离子渗透性能的影响规律。本文研究结果能为混凝土结构的耐久性设计和防控提供参考。

## 1 试验方法

### 1.1 氯盐环境下的混凝土强度要求及相关规定

《混凝土结构耐久性设计规范》规定处于氯离子环境下的结构,混凝土强度等级应在 C40 及以上。同时,《普通混凝土配合比设计规程》对除冰盐环境混凝土水胶比的规定,最大值为 0.50。

### 1.2 试件制备

根据以上规定确定试件水灰比和强度,本文按照最低要求选择强度等级为 C40 的混凝土,水灰比为 0.50,配合比为水泥:河沙:碎石=1:2:3.48,其 28 d 抗压强度为 40.5 MPa。

裂缝的制取参考了周边约束诱导混凝土产生收缩裂缝的方法<sup>[15]</sup>,鉴于这里只为获取试验所需的收缩裂缝而不关注混凝土的早期抗裂性,因此进行了方案改进。采用 500 mm×500 mm×50 mm 带底板的方形模具,浇筑完成后对混凝土板中心  $\Phi$  300 mm 区域进行加温、吹风以加速收缩,外围区域正常养护,持续 3 d 获得开裂的混凝土板。中心区域的混凝土受到两方面的约束:由于养护条件不同,板外围混凝土与中心区域不均匀收缩而产生的周边约束;由于上下层收缩不均匀而产生的上下层间的约束作用。这与实际工程中大面积混凝土现浇底板、侧墙以及路桥现场施工混凝土所处的情形相似。带模养护 28 d 后取芯  $\Phi$ 100 mm 开裂混凝土圆柱形试件,再将试件标准养护 90 d,以使裂缝充分发展。试件的典型裂缝形态见图 1。

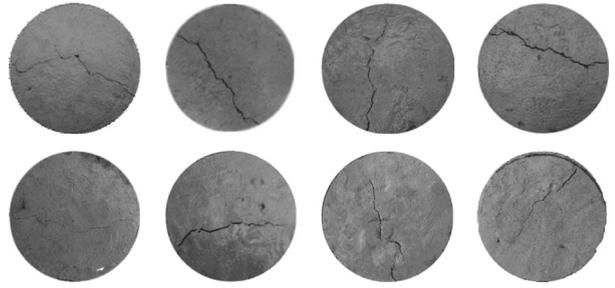


图 1 圆柱形混凝土试件典型裂缝图像

Fig.1 Typical images of cracks in cylindrical concrete specimens

### 1.3 氯离子渗透试验

参考张士萍等<sup>[2]</sup>的结论,本试验采用 ASTM C1202 电通量法测试了完整试件和收缩裂缝试件的渗透性。试验前先对试件进行真空饱水,然后用石蜡将试件四周密封,只暴露上下两个渗透面,试验测试装置见图 2。试验最终得到的结果为试件 6 h 电流值和电通量值。

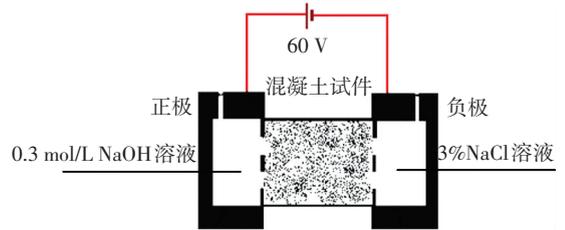


图 2 ASTM 法试验装置原理

Fig.2 The schematic diagram of the test device of ASTM method

## 2 混凝土收缩裂缝的几何特征

### 2.1 裂缝几何参数的测量

本文对裂缝几何参数的测量主要从宽度、深度以及裂缝比表面积 3 个方面进行。

#### 2.1.1 宽度 $w$

采用裂缝宽度监测仪,精度为 0.01 mm。对每个试件沿着裂缝长度方向每隔 5~10 mm 取一个测点,依次进行宽度测量,并对测量结果进行统计分析,得到了各测点裂缝宽度、试件的最大缝宽、最小缝宽及平均宽度。

#### 2.1.2 深度 $d$

对裂缝深度采用硝酸银显色法测定。由于自然浸泡中氯离子渗透进入混凝土试件内部所需时间较长(通常是数天),如果只浸泡 2 h,那么氯离子只会进入裂缝并在其表面附着,因此采用硝酸银显色法测定的劈裂面显色深度可以认为是裂缝深度。

将真空饱水后的混凝土试件置于 5% 的氯化钠溶液中浸泡 2 h,试件开裂面朝下,氯化钠溶液以刚没过上表面为好。然后将试件置于压力机上沿裂缝方向进行劈裂,对劈裂面立即喷涂 0.1 mol/L 的  $\text{AgNO}_3$  溶液,测定劈裂面的显色深度,取劈裂左右两

部分测定的深度平均值为该点的显色深度.图 3 为硝酸银显色法测试裂缝深度典型图像.

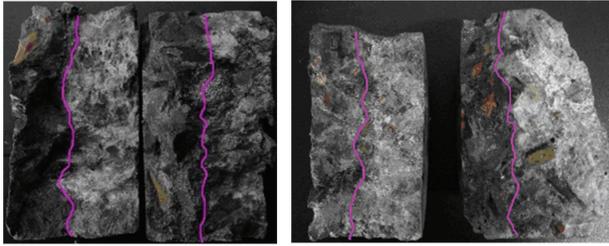


图 3 硝酸银显色法测试裂缝深度

Fig.3 Crack depth by silver nitrate chromogenic method

### 2.1.3 裂缝比表面积 $K_A$

为考虑裂缝长度对氯离子渗透的可能影响,本文引入裂缝比表面积  $K_A$ ,定义为试件表面裂缝面积  $A_{cr}$  与试件面积  $A$  的比值.

通过 Photoshop 对开裂试件的裂缝图像进行阈值处理,处理后的典型图像见图 4,然后在 Auto CAD 中对裂缝求面积,与试件表面积比值即得到裂缝比表面积.

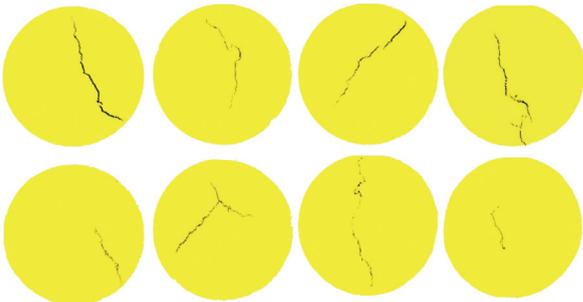


图 4 开裂试件阈值处理后的典型图像

Fig.4 Typical images of cracking specimen after threshold processing

## 2.2 裂缝深宽比统计规律

假设收缩裂缝呈三角形,对收缩裂缝令

$$\lambda = d/w, \tag{1}$$

式中: $d$  为裂缝某点深度, $w$  为裂缝在该点宽度, $\lambda$  为裂缝深宽比.

实验获得有效数据点位 56 个,符合一般统计学要求的样本数(>30).将这些点位数据采用 SPSS 软件和 excel 统计功能进行分析.统计学参数见表 1.

表 1 深宽比数据的统计学参数结果

Tab.1 Data of statistical parameters results

数据个数	最小值	平均值	直方图柱数
56	18.84	44.31	13
最大值	区间	标准偏差	直方图组距
76.65	57.81	13.14	5.00

对测试结果的数据进行正态分布拟合检验分析,本文采用卡方检验法,检验原理简述为:

把随机变量  $X$  的值域划分为  $k$  个不相交的区间,设  $v_i$  是样本观察值落入区间  $A_i$  的频数,那么有

$\sum v_i = n, p_i$  为事件  $A$  发生的理论频率.当事件为真时,  $\sum (v_i/n - p_i)^2$  应该较小,此时应予以肯定,否则  $\sum (v_i/n - p_i)^2$  应该较大.

$$\text{令 } \chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(v_i - np_i)^2}{np_i}, \text{ 试验测得裂缝深宽比}$$

数据见图 5,对数据求卡方值,当卡方值小于由自由度  $n$  以及可靠概率指标  $\alpha$  确定的卡方值时,认为检验通过.

图 5 直方图柱数 = 13,故自由度  $n = 13 - 2 - 1 = 10$ ,求得  $\chi^2 = 4.48 < \chi^2(10, 0.95) = 18.307$ ,接受检验,认为收缩裂缝深宽比的分布符合正态分布规律.

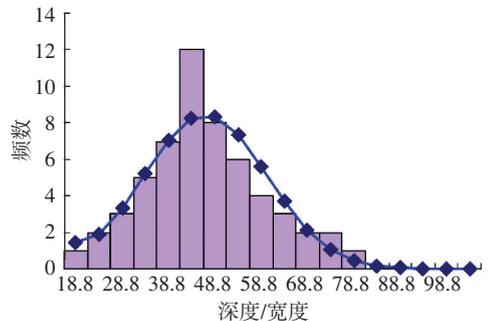


图 5 裂缝深宽比统计直方图

Fig.5 Statistics histogram of depth-width ratio of cracks

根据前面提出的裂缝三角形假设,选上述预期正态分布的均值 44.31 为深宽比均值,由此可以推算,裂缝尖端角度均值约  $2.6^\circ$ .图 5 中处于均值点左右的 4 个柱形所占数据量为 33 个,超过总数据量的 50%.因此从统计学上说,裂缝尖端开裂角度是在  $2 \sim 3^\circ$  的范围.

以上统计结果说明,混凝土收缩裂缝的深度与宽度之间存在相关性,越宽的裂缝其深度也越大,反之亦然.因此,对于不同宽度的收缩裂缝,其对混凝土氯离子渗透性的影响有可能是深度或者宽度和深度的耦合作用,但可以通过单一因素如宽度来反映.同时,这也证明了本文在引言中的观点,使用插片预制裂缝或者荷载裂缝并不能代表混凝土由于收缩产生的裂缝(插片裂缝深宽比可人为控制,荷载裂缝深宽比由加载方式和试件形状决定).

产生深宽比关系的物理机制:混凝土板某区域由于养护问题产生非均匀收缩变形,当该变形超过了抗拉极限就会产生收缩裂缝;混凝土板的上表面自由,下表面受到底板的约束,沿厚度方向的上下层混凝土之间由于黏结应力而相互约束,逐渐抵消非均匀收缩,使得收缩值沿板厚逐渐减少<sup>[13]</sup>.本文认为正是这种厚度方向不同混凝土层之间的相互约束使得收缩裂缝呈现深宽比关系.对于不同种类的混凝土,虽然自由表面的非均匀收缩变形是不同的,即

可能产生的收缩裂缝宽度不一样,但混凝土内部的黏结应力相差不大(参考普通混凝土的抗拉强度),即厚度方向的不同层间约束作用是相似的,由此缝宽沿深度减小的幅度是相近的(等比例减少),因此非均匀收缩的不同会引起裂缝深度的变化,但深宽比关系却是相似的. Benboudjema 等<sup>[14]</sup>也有相似的结论,试件尺寸不影响混凝土的收缩特征.

混凝土收缩裂缝角度的确定,可用于确定导致混凝土保护层失效的裂缝宽度.当裂缝宽度达一定值后,裂缝便会穿透保护层,蔓延至钢筋表面的位置.因此,开裂深宽比的研究,有助于根据混凝土表面开裂情况对工程结构有效保护层厚度及时提出预警.

### 3 裂缝对混凝土氯离子渗透性能的影响

通过 ASTM 氯离子电迁移试验,观测了开裂混凝土试件的裂缝最大宽度、最小宽度、平均宽度以及比表面积等参量对氯离子渗透的影响.

#### 3.1 裂缝参量对 ASTM 法电通量试验结果的影响

裂缝参量与电通量关系的分析结果见图 6~9. 图 6、7 中存在一个误差较大的数据点,通过检查该数据点的测试试件后发现,其裂缝发展与其他试件稍有区别,该试件裂缝一侧是水泥浆体,另一侧是混凝土的粗骨料.由于受到粗骨料的限制,裂缝只能在水泥浆体一侧单侧收缩,致使该试件裂缝宽度偏小,结果出现较大偏差(若将该试件裂缝宽度翻倍,其结果在图中就能处于较合理的位置).

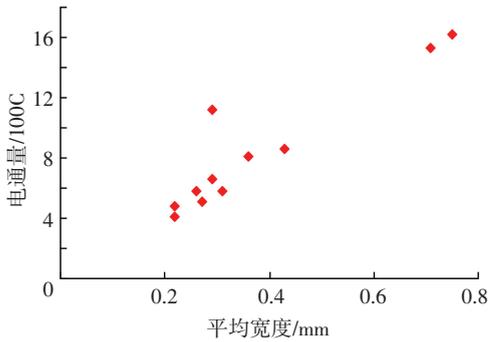


图 6 电通量-裂缝平均宽度

Fig.6 The relationship of electric flux and crack's mean width

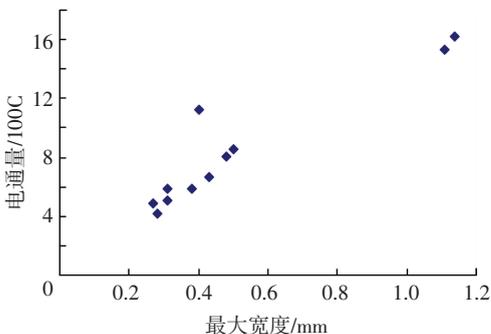


图 7 电通量-裂缝最大宽度

Fig.7 The relationship of electric flux and crack's maximum width

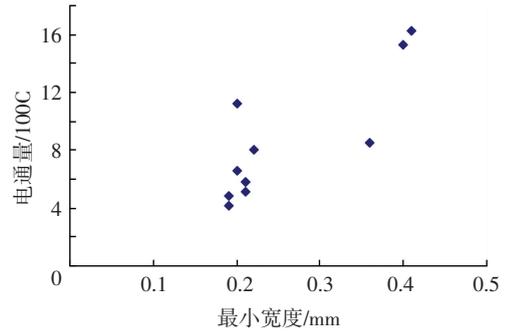


图 8 电通量-裂缝最小宽度

Fig.8 The relationship of electric flux and crack's minimum width

综合对比图 6~8 可发现,裂缝宽度,无论是平均宽度、最大宽度还是最小宽度,均与电通量呈正线性关系;说明裂缝宽度的增大会导致 ASTM 法测试电通量的增加.但平均宽度和最大宽度与电通量的正线性关系显著,而最小宽度则不够明显.

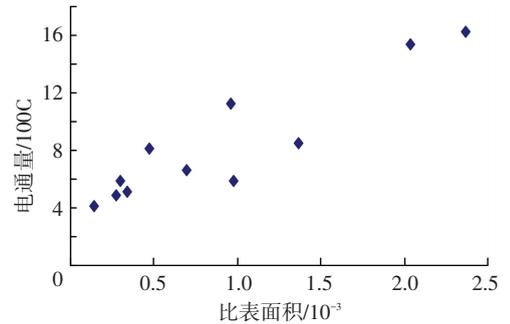


图 9 电通量-裂缝比表面积

Fig.9 The relationship of electric flux and crack's specific surface area

由图 9 可看出,ASTM 电通量与裂缝比表面积正相关,可以认为裂缝比表面积增大会加快混凝土氯离子渗透,但相较于裂缝宽度的表达方式,这种对应关系不够显著,数据点的离散明显偏大.

综合上述分析可以认为,裂缝的平均宽度或者最大宽度是适合分析混凝土氯离子渗透性的裂缝参量,其与电通量基本呈线性关系.

#### 3.2 裂缝对混凝土氯离子渗透系数的影响

根据 Nernst-Planck 方程

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} - cD \frac{zF}{RT} \cdot \frac{\partial V}{\partial x}, \quad (2)$$

略去自由扩散项后,认为  $\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V}{L}$ , 移项,有

$$D = \frac{L}{c} \cdot \frac{RT}{zFV} J, \quad (3)$$

将  $Q = zNe$ ,  $J = \frac{N/N_A}{At}$ , 代入式(3), 可得

$$D = \frac{L}{c} \cdot \frac{RT}{zFV} \cdot \frac{1}{N_A Aet} Q. \quad (4)$$

式中:  $L$  为试件厚度,  $L = 0.05$  m;  $J$  是离子流量

( $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ );  $D$  为扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $c$  为浓度 ( $\text{mol}/\text{m}^3$ );  $F$  是法拉第常数 ( $F=96\,480\text{ J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$ );  $R$  是气体摩尔常数 ( $R=8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ );  $V$  为电压 ( $\text{V}$ );  $z$  为电荷载体带电量绝对值, 氯离子  $z=1$ ;  $e$  为基元电荷 ( $1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$ );  $N$  为电荷载体数;  $A$  为试件横截面积;  $N_A$  阿伏伽德罗常数 ( $6.02 \times 10^{23}$ ). 将各量数值代入式(4), 便可以由电通量  $Q$  计算出渗透系数  $D$ . 选择最大宽度来进行结果分析, 见图 10.

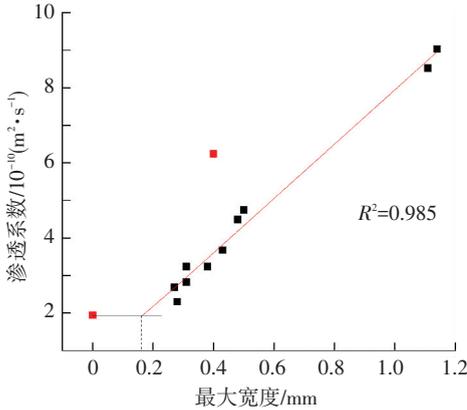


图 10 渗透系数-裂缝最大宽度

Fig.10 The relationship of permeability coefficient and crack's maximum width

将图 10 中氯离子渗透系数  $D$  与裂缝最大宽度  $\omega_{\max}$  进行描述, 关系为

$$D = 0.71 + 7.24\omega_{\max} \quad (5)$$

式中  $D$  的单位为  $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ .

## 4 讨论与工程应用

相比于图 6、7 及图 10 中裂缝宽度与开裂混凝土氯离子渗透参量之间较好的线性关系, 图 9 中比表面积与氯离子渗透参量的关系并不显著, 鉴于比表面积耦合了裂缝宽度和长度两个几何参数的影响, 因此试验结果说明裂缝长度可能对开裂混凝土的氯离子渗透影响并不显著, 其相较于裂缝宽度来说, 是次一级的影响参数.

式(5)中裂缝宽度与混凝土中氯离子渗透系数的关系, 从表面看似是裂缝宽度直接影响混凝土中氯离子的渗透; 但由节 2 收缩裂缝的深宽比特征也可得到裂缝深度与氯离子渗透系数之间的关系. 因此, 式(5)可能只是对应规律而非物理关系, 究竟是裂缝的宽度还是深度实质地影响了混凝土中氯离子渗透还需深入探讨.

将图 10 中的拟合直线向下延伸, 与未开裂试件所测数据点的水平线相交, 得到裂缝影响氯离子渗透的下限宽度为 0.18 mm. 此数值比 Djerbi 等<sup>[15]</sup> 和 Kwon 等<sup>[16]</sup> 的下限值 (分别为 0.08 mm 和 0.10 mm) 稍大. 本文认为是由于不同的裂缝几何特征所导致.

Djerbi 等<sup>[15]</sup> 通过加载得到裂缝, 其并无深宽比特征; Kwon 等<sup>[16]</sup> 的试件来源于港口工程, 但为早龄期混凝土, 裂缝发展远未充分, 深宽比关系不显著. 而本文是养护时间较长的收缩开裂试件, 与工程实际的服役混凝土较为相符. 因此, 即使采用相同的几何参数-最大宽度来表达对开裂混凝土中氯离子渗透的影响, 但是由于裂缝深度不同, 便得到不一致的结果. 较为合理的解释就是, 裂缝深度可能是比宽度更为实质的影响参数, 结合本文关于收缩裂缝深宽比关系的结论, 这一解释则更为充分.

中国 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》规定, 对于氯盐影响环境, 最大裂缝宽度限值为 0.2 mm. 根据本文研究结果, 当裂缝最大宽度为 0.2 mm 时, 相对无裂缝混凝土其渗透系数增大了约 20%. 根据 GB/T 50476—2008《混凝土结构耐久性设计规范》对于处于氯盐环境下的普通混凝土结构, 设计使用年限为 50 a 时, 保护层厚度最低要求为 40~60 mm. 当最大宽度为 0.2 mm 时, 根据本文的深宽比研究结果推算裂缝深度约为 9 mm, 混凝土保护层厚度损失率同样达 20%. 也就是说, 中国相关规范中对氯离子环境条件下混凝土结构裂缝最大宽度和最小保护层厚度的规定限值都是以损失率达到 20% 为控制条件的. 那么, 对于保护层厚度处于非常规范范围, 如 <40 mm 或 >60 mm, 则应该根据本文研究结果, 相应的加大或者减小对最大缝宽的限制.

## 5 结论

1) 混凝土收缩裂缝存在显著的深宽比特征. 通过对混凝土收缩裂缝的几何特征进行统计分析, 确定了裂缝深宽比均值大约为 44.31, 其尖端开裂角度约为  $2.6^\circ$ .

2) 裂缝宽度对混凝土氯离子渗透系数有正线性的影响关系. 对于收缩裂缝, 采用平均缝宽和最大缝宽可以较好描述其影响, 最小宽度与裂缝比表面积描述准确性较差. 本文建议采用最大缝宽描述裂缝对混凝土氯离子渗透性能的影响.

3) 通过不同裂缝几何参数对开裂混凝土氯离子渗透的描述结果对比, 以及本文试验结果与前人结论的比较分析, 得出裂缝深度是影响开裂混凝土氯离子渗透的本质参数. 而裂缝长度对开裂混凝土中氯离子渗透的影响并不显著. 目前中国相关规范中对氯离子环境条件下混凝土结构裂缝最大宽度和最小保护层厚度的规定限值都是以损失率达到 20% 为控制条件. 若实际工程中混凝土保护层厚度处于非常规范范围时 (如 <40 mm 或 >60 mm), 应该根据保护层厚度来确定容许的最大裂缝宽度.

目前混凝土收缩裂缝产生的物理机制尚待明确, 本文相关结论有待进一步研究与验证。

## 参考文献

- [1] 杨建森, 王培铭. 盐碱溶液对混凝土氯离子渗透性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(12): 2048-2053.  
YANG Jiansen, WANG Peiming. Influence of saline-alkaline solution on chloride permeability of concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(12): 2048-2053.
- [2] 张士萍, 刘加平, 董良峰. 收缩裂缝对混凝土中氯离子传输的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 90-92.  
ZHANG Shiping, LIU Jiaping, DONG Liangfeng. Influence of shrinkage cracking on chloride ions transport of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(6): 90-92.
- [3] 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 Zuquan, HOU Baorong, ZHAO Tiejun, 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.
- [4] ZHANG Shaofeng, LU Chunhua, LIU Ronggui. Experimental determination of chloride penetration in cracked concrete beams[J]. Procedia Engineering, 2011, 24(8): 380-384.
- [5] ZHANG Ruijin, CASTEL A, FRANCOIS R. Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(3): 415-425.
- [6] 陈小荣, 毛科峰, 郑建军. 界面裂纹对混凝土氯离子扩散系数的影响[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(4): 30-33.  
CHEN Xiaorong, MAO Kefeng, ZHENG Jianjun. Effect of interfacial cracks on chloride diffusion coefficient of concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(4): 30-33.
- [7] 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.
- [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] PARK S S, KWON S J, JUNG S H. Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation [J]. Construction and Building Materials, 2012, 29(4): 183-192.
- [10] YOON I S. Chloride penetration through cracks in high-performance concrete and surface treatment system for crack healing [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2012, 2012(2): 1-8. DOI:10.1155/2012/294571.
- [11] 王铁梦. 钢筋混凝土结构的裂缝控制 [J]. 混凝土, 2000, 22(5): 3-6.  
WANG Tiemeng. Cracking control of reinforced concrete construction [J]. Concrete, 2000, 22(5): 3-6.
- [12] COPUROGLU O, SCHLANGEN E. Modeling of frost salt scaling [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(1): 27-39.
- [13] 高小建, 何忠茂, 杨英姿, 等. 周边约束状态下板式混凝土早期开裂及收缩应变的分布 [J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(3): 334-339.  
GAO Xiaojian, HE Zhongmao, YANG Yingzi, et al. Distribution of shrinkage strain and induced cracks of a round restrained concrete plate at early age [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2004, 32(3): 334-339.
- [14] BENBOUDJEMA F, TORRENTI J M. Prediction of drying shrinkage in concrete structures: study of size effect [C]// International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering. Hong Kong, China: RILEM Publications SARL, 2011: 288-293.
- [15] 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.
- [16] 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.

(编辑 赵丽莹)