

文章编号: 1671-6833(2015)01-0066-04

# 混凝土开裂部位氯离子渗透试验研究

唐先习<sup>1</sup>, 尹月西<sup>1</sup>, 国伟<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

**摘要:** 为研究混凝土裂缝宽度和深度对裂缝表面氯离子渗透的影响, 制作了带裂缝的钢筋混凝土试件并进行了氯离子渗透研究. 采用氯离子溶液浸泡时未开裂的试件、开裂试件的横断面进行研究. 对于开裂的试件, 通过对比裂缝的宽度、深度和裂缝表面氯离子渗透情况, 并与未开裂试件断面氯离子渗透情况进行对比分析. 研究结果表明, 裂缝宽度对于裂缝表面氯离子渗透几乎没有影响, 表面氯离子渗透主要与裂缝深度有关. 对混凝土开裂部位的耐久性研究方法提出了新的观点, 对混凝土结构耐久性的研究具有重要的参考价值.

**关键词:** 混凝土; 裂缝宽度与深度; 氯离子渗透; 试验研究

**中图分类号:** TU502 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.016

## 0 引言

钢筋混凝土是目前土木工程中应用最广泛的材料, 因此, 钢筋混凝土的耐久性是非常重要的. 钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构耐久性下降的最主要的原因, 在广大的含有氯离子的地区, 氯离子的侵蚀则是导致钢筋锈蚀的最主要因素. 由于混凝土裂缝是混凝土结构中普遍存在的现象, 氯离子在混凝土开裂部位的渗透性能会大大增加, 因此, 研究混凝土开裂部位氯离子的渗透情况则显得尤为重要.

对于混凝土开裂部位氯离子的渗透规律, 研究内容相对较少. 张士萍、金祖权等<sup>[1-2]</sup>通过对混凝土收缩裂缝部位氯离子渗透研究指出, 收缩裂缝的存在加强了氯离子在混凝土中的传输, 并且氯离子的扩散性能随着裂缝宽度的增加而增加. 张士萍等<sup>[3]</sup>研究了荷载作用下裂缝对氯离子渗透的影响, 同样得出氯离子扩散性能随着裂缝宽度的增加而增加的结论. 万小梅、JIANG Yu-chuan等<sup>[4-5]</sup>通过试验研究, 得出了氯离子扩散系数随着荷载的增加先减小后增加的结论, 实际上是混凝土内的微裂缝在荷载作用下的开展规律对氯离子扩散系数的影响. 李炜等<sup>[6]</sup>则研究了疲劳荷载对混凝土中氯离子扩散系数的影响, 其实质仍是

疲劳荷载造成的混凝土裂缝对氯离子扩散系数的影响. MU Song等<sup>[7]</sup>通过研究发现, 随着裂缝宽度的扩大, 氯离子的扩散系数不断增加. YU Bo等<sup>[8]</sup>对开裂混凝土边界条件和裂缝内的氯离子扩散系数进行了分析, 并建立了相关的氯离子扩散的时间依存模型.

以上对于混凝土裂缝部位氯离子渗透规律的影响, 取的裂缝因素往往只是裂缝的宽度, 并未涉及到裂缝的深度, 没有将裂缝的宽度和深度综合起来考虑裂缝对氯离子渗透的影响. 因此, 笔者主要针对这一方面, 研究混凝土裂缝的宽度和深度对氯离子渗透的综合影响.

## 1 试验目的与概况

### 1.1 试验目的

验证混凝土开裂后, 在混凝土裂缝表面氯离子渗透情况与裂缝宽度和深度之间的关系, 为混凝土结构在氯离子环境下耐久性能的研究奠定基础.

### 1.2 试验概况

#### 1.2.1 试件

本次试验的裂缝是在弯矩作用下钢筋混凝土试件产生的裂缝, 试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm, 在受拉混凝土一侧预埋直径为 6 mm 的钢筋, 见图 1、图 2. 经研究可知, 试件内部的裂

收稿日期: 2014-08-01; 修订日期: 2014-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51168030)

作者简介: 唐先习(1972-)男, 山东济宁人, 兰州理工大学副教授, 博士, 主要从事大跨度桥梁施工与桥梁耐久性等方面的研究, E-mail: 695913483@qq.com.

缝宽度和深度可由试件两侧面的裂缝宽度和深度近似按直线内插法推导。在本试验过程中,选择已制造出裂缝的混凝土试件进行干湿循环,结合实验室的环境条件,一个干湿循环采用浸泡 48 h、晾干 48 h 的方式。氯化钠溶液采用质量分数为 3% 和 5% 两种浓度,对于质量分数为 3% 的氯化钠溶液,试件浸泡的循环次数分为 10、20、30、40 和 50 个循环等情况;同时,对于质量分数为 5% 的氯化钠溶液,仅做了 30 个干湿循环的浸泡,以便与质量分数为 3% 的氯化钠溶液的试验结果进行对比。

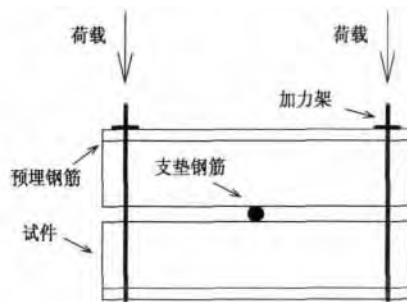


图 1 构件加载示意图

Fig. 1 Component Load Diagram

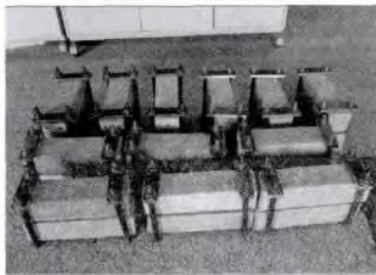


图 2 施加荷载后的构件

Fig. 2 Components under Loading

### 1.2.2 试验方法

对于混凝土内氯离子含量的检测,目前主要有 3 种方法:硝酸银喷涂法、电位法和化学滴定法。其中电位法和化学滴定法均需将混凝土内氯离子含量测试部位的混凝土取下磨碎,然后溶于溶液中,不适用于本试验测定混凝土裂缝表面氯离子含量,因此,本试验采用硝酸银喷涂法<sup>[9]</sup>。

在试验过程中,由于混凝土裂缝断面表面不平整,加上氯化银在裂缝表面的颜色显现不明显,所以仅涂硝酸银很难测定裂缝表面氯离子的渗透范围。在这种情况下,采用铬酸钾和硝酸银配合使用的办法。在试件表面先滴铬酸钾指示剂,等裂缝表面变干后再滴硝酸银溶液,则裂缝表面先出现砖红色,即为铬酸银。由于氯离子与银离子反应的能力要大于铬酸根离子,因此,裂缝表面慢慢出现白色,即为新生成的氯化银,用这种方法确定裂缝

内氯离子渗透范围,试验过程见图 3、图 4。



图 3 试件断面上滴加铬酸钾

Fig. 3 Add potassium chromate on the sections



图 4 铬酸钾变干后滴加硝酸银

Fig. 4 Add silver nitrate after potassium chromate dry

在试验过程中,采用质量分数 2.5% 的铬酸钾指示剂和 0.1 mol/L 硝酸银溶液。当试件浸泡到试验规定的次数后,将试件的加力架拆下,先用压力机将试件从裂缝部位压开,然后将钢筋截断。通过在裂缝断面上滴加铬酸钾和硝酸银的方法,确定裂缝表面氯离子的渗透情况。

## 2 试验结果与分析

结合试验目的,选择有代表性的试件的混凝土裂缝表面氯离子渗透情况进行分析,以验证混凝土裂缝的宽度和深度对氯离子渗透的影响。试件横断面氯化银析出情况见图 5~图 8。

### 2.1 采用质量分数为 3% 氯化钠溶液 10 个干湿循环

试件进行了 10 个干湿循环。这一试件两侧的裂缝,一侧长度为 7 cm,试件顶部裂缝最宽处为 1.80 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为 0.08 mm;另一侧长度为 8 cm,试件顶部裂缝最宽处为 1.90 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为 0.06 mm。裂缝断面处氯化银析出的情况见图 5,从图上可以看出,在裂缝开裂区域,断面上有白色的氯化银析出,而在混凝土尚未开裂的区域,约 1.3 cm 宽的区域内,未有白色的氯化银析出,断面颜色呈灰

色.这主要与干湿循环时间较短,氯离子向未开裂混凝土内部渗透较浅有关.

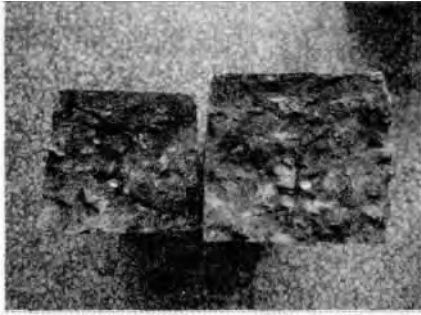


图5 采用质量分数为3%氯化钠溶液10个干湿循环的试件

Fig.5 Specimens after 10 dry-wet circulations of 3% sodium chloride solution

## 2.2 采用质量分数为3%氯化钠溶液30个干湿循环

试件进行了30个干湿循环,这一试件两侧的裂缝,一侧长度为8 cm,试件顶部裂缝最宽处为1.07 mm,且为分叉裂缝,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.04 mm;另一侧长度为8 cm,试件顶部裂缝最宽处为1.04 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.25 mm,从裂缝尖端到试件底面,发生了起皮破坏,无法测出裂缝的宽度,实际上相当于这一侧的裂缝近似贯通.裂缝断面处氯化银析出的情况见图6,从图上可以看出,横断面上开裂部分氯化银的析出现象较为明显.而在混凝土尚未开裂的区域,即图上标定的长约5 cm,宽约1.5 cm的三角区域,未有白色的氯化银析出,断面颜色呈灰色.但三角区域接近试件表面的边部,已出现氯化银析出现象,说明氯离子已渗入试件表面,这与干湿循环时间较长有一定的关系.



图6 采用质量分数为3%氯化钠溶液30个干湿循环的试件

Fig.6 Specimens after 30 dry-wet circulations of 3% sodium chloride solution

## 2.3 采用质量分数为3%氯化钠溶液50个干湿循环

试件进行了50个干湿循环.裂缝断面处氯化

银析出的情况见图7.在图上的4个试件中,从左向右,第一个试件为干湿循环50次的试件,这一试件两侧的裂缝长度均为8 cm,试件顶部裂缝最宽处分别为0.35 mm、0.38 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.02 mm、0.03 mm.第二个试件为对比试件,这一试件一直浸泡,未进行干湿循环,浸泡时间与其他试件的50个循环总时间相同.第二个试件两侧的裂缝,一侧长度为9 cm,试件顶部裂缝最宽处为0.73 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.04 mm;另一侧长度为8 cm,试件顶部裂缝最宽处为0.63 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.01 mm.两个试件均在裂缝处压断.第3个、第4个试件断面处非原来的裂缝处.由断面处的氯化银析出现象可以看出,对于左侧的两个试件,表面析出氯化银较多,并且整个断面上都已经含有氯离子.这说明氯离子不但渗透到裂缝端部,而且沿裂缝端部向未开裂的混凝土渗透,其渗透区域与试件未开裂表面的氯离子渗透区域已经连接上,这与50次干湿循环所需的时间更长有关.因此,对于左边两个试件来说,仅从裂缝表面,未测出对比试件与干湿循环试件之间的氯离子规律渗透差别.对于右侧的两个试件,周边出现部分氯化银析出现象,中间部位则没有氯化银析出,这说明中间部位未渗入氯离子.



图7 采用质量分数为3%氯化钠溶液50个干湿循环的试件

Fig.7 Specimens after 50 dry-wet circulations of 3% sodium chloride solution

## 2.4 采用质量分数为5%氯化钠溶液30个干湿循环

试件进行了30个干湿循环,这一试件两侧的裂缝,一侧长度为8 cm,试件顶部裂缝最宽处为0.80 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.01 mm;另一侧长度为7 cm,试件顶部裂缝最宽处为0.7 mm,最窄处裂缝尖端部位宽度为0.01 mm.裂缝断面处氯化银析出的情况见图8,从图上可以看出,在裂缝开裂区域,断面上有白色的氯化银析出,而在混凝土尚未开裂的区域,也有少量的氯化



银析出,这说明氯离子已经渗透到了整个截面,这与氯化钠溶液中氯离子含量较高有一定的关系。

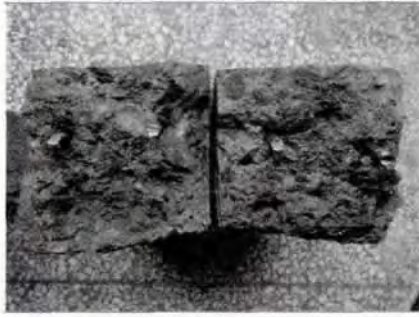


图 8 采用质量分数为 5%氯化钠溶液 30 个干湿循环的试件

Fig.8 Specimens after 10 dry-wet circulations of 5% sodium chloride solution

### 3 结论

通过对以上试件的侧面裂缝长度与氯离子渗透区域进行对比分析可知,对于混凝土的裂缝部位,裂缝开裂表面氯离子均已渗透到。由此可以看出,裂缝表面氯离子的侵蚀与裂缝宽度关系不大,而与裂缝深度密切相关。因此,仅从混凝土裂缝在结构表面的宽度来判断裂缝内部其氯离子渗透情况是不合适的;从混凝土结构耐久性研究方面而言,不应仅仅限定不同环境条件下的裂缝表面宽度值,而应考虑裂缝宽度和深度对氯离子渗透的综合影响。

笔者仅研究了不同裂缝的表面氯离子渗透情况,而未对裂缝的不同宽度和深度处垂直于裂缝表面方向的氯离子渗透深度展开研究,今后的研究应该从这些方面进行加强。

## Experimental Study of the Chloride Ion Penetration on the Crack Parts of Concrete

TANG Xian-xi<sup>1</sup>, YIN Yue-you<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute co. Ltd., Ji'nan 250013, China)

**Abstract:** For the study of the effect of chloride ion penetration on crack surface by crack width and depth, the reinforced concrete specimens with cracks were made and the chloride ion penetration experiments were carried out. The transverse sections of specimens without crack and cracking while soaked in Chlorine ion solution were used for experiments. For the cracking specimens, the analysis were carried through compared of the crack width, the crack depth and the chloride ion penetration of crack surface, and compared with the transverse section of specimens without crack. The research results show that, the crack width has negligible effect on surface chloride ion penetration of concrete cracks, surface chloride ion penetration was mainly related with the crack depth. The new viewpoint of concrete durability research on the cracking parts were put forward, which has important reference value for the study of the durability of concrete structures.

**Key words:** concrete; width and depth of crack; chloride ion penetration; experimental study

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张士萍,刘加平. 荷载裂缝对混凝土氯离子扩散的影响[J]. 混凝土, 2011(11): 24-26.
- [4] 万小梅,苏卿,赵铁军,等. 单轴受压混凝土的微裂缝和氯离子侵入性[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 104-110.
- [5] JIANG Yu-chuan, HUO Da, TENG Hai-wen, et al. Testing and evaluation on the chloride ion penetrability of concrete under compressive stress[J]. Key Engineering Materials, 2012, 544: 415-420.
- [6] 李炜,蒋林华,王永亮,等. 疲劳作用对混凝土中氯离子扩散系数影响的研究[J]. 混凝土, 2014(1): 31-34.
- [7] MU Song, LIU Jian-Zhong. Transient diffusion behavior of chloride ions in concrete with a macro crack[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405-408: 2671-2676.
- [8] YU Bo, HUANG Zhong-Hui, WU Ming, et al. Concentration distribution of chloride ion in cracked concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351-352: 1581-1584.
- [9] 陈正,杨绿峰,曾建聪. 混凝土氯离子提取液中氯离子含量测定方法研究[J]. 新型建筑材料, 2010(10): 73-76.