

[文章编号] 1003—4684(2020)02-0088-04

开裂混凝土氯离子扩散性能研究

叶梦琦, 李 扬

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为探索裂缝对开裂混凝土氯离子扩散性能的影响,采用无损裂缝制备方法预制相应裂缝宽度的混凝土试块,并进行 70 d 自然浸泡试验后对混凝土内部氯离子浓度进行测定。试验结果表明:裂缝使氯离子在混凝土中加速扩散,且氯离子在裂缝周围区域影响范围约为 30~80 mm;氯离子浓度在 20 mm 深度后增长显著并在 35 mm 后趋于稳定;裂缝宽度对带裂缝混凝土氯离子扩散系数影响显著,可由裂缝宽度的三次函数描述带裂缝混凝土内氯离子传输规律。

[关键词] 裂缝;混凝土;氯离子扩散

[中图分类号] TV431 [文献标识码] A

裂缝是混凝土最常见的病害之一,正常使用状态下混凝土使用过程中常常伴随着裂缝。一般而言,当混凝土结构的最大裂缝宽度数值没有超过最大裂缝宽度限值时,裂缝对混凝土结构耐久性的损伤比较可控。但是当构件所处环境存在氯盐侵蚀,裂缝对结构的影响则是不容忽视的。就我国而言,我国东部地区沿海面积庞大,受海洋环境影响不可避免地会受到氯盐侵蚀;我国西北地区湖泊含盐量高,盐湖效应也会导致类似海洋环境的影响。陆地环境同样面临着相同的问题,例如干旱寒冷地区冬季施撒除冰盐清理道路冰雪等也是造成氯盐侵蚀的主因之一。因此,氯盐侵蚀环境下带裂缝混凝土抗氯性能的探索具有可研性,近年来,许多学者对这一课题也深有探究。蔡健^[1]等在研究氯盐侵蚀下预应力混凝土梁的耐久性时通过力学损伤理论考虑弯曲荷载作用对氯离子扩散系数的影响。胡思聪^[2]等在氯离子侵蚀规律和钢筋锈蚀机理的基础上研究了非一致氯盐侵蚀对钢筋混凝土材料受损程度的影响。Yuya Sakai^[3]等采用水银侵入孔隙度测定法测量了胶凝材料的各项孔隙结构指标并建立其与自由氯离子扩散之间的相关关系。Bjorn Van Bellegheem^[4]等主要研究氯离子在自愈合混凝土中垂直于裂缝的渗透传输。综合现有研究,国内外学者普遍认为带裂缝混凝土中裂缝能够加速氯离子的迁移作用,但是在裂缝的开展程度与氯离子的扩散程度的对应量化关系方面,相关公开的资料较少;此外,裂缝往往对其周边混凝土的氯离子扩散以及附近钢筋的锈蚀

产生显著影响,不同开裂情况对应这种影响范围研究资料尚不充分。据此,基于完整混凝土试块现存的氯离子扩散计算模型,在考虑时间依赖性和裂缝宽度的前提下,建立带裂缝混凝土的氯离子扩散模型,为裂缝宽度控制标准修订以及混凝土耐久性寿命预测提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试块制作

采用娲石集团水泥厂的 P.O 42.5 级的普通硅酸盐水泥,采自新洲合顺砂厂细度模数为 2.6 的河沙,粗骨料为 5~20 mm 的碎石,掺料为Ⅱ级粉煤灰。混凝土配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比设计

混凝土等级	C25
水灰比/(kg·m ⁻³)	0.44
用水量/(kg·m ⁻³)	175
水泥用量/(kg·m ⁻³)	398
沙子用量/(kg·m ⁻³)	566
石子用量/(kg·m ⁻³)	1261
28 d 抗压强度	30.1

试验采用 100 mm×100 mm×400 mm 混凝土小块。采用无损制备裂缝方法^[5]在混凝土块 100 mm×400 mm 的表面上预制初始裂缝。在新拌混凝土时预埋厚度为 0~1.0 mm 间呈 0.25 mm 等差数值依次递增 5 种不同宽度的不锈钢片,在混凝土凝结硬化前拔出不锈钢片后养护 28 d。在试验过程中混凝土存在自愈合能力的影响以及人为因素

[收稿日期] 2019—09—27

[第一作者] 叶梦琦(1994—),女,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为混凝土结构耐久性

造成的误差都会影响裂缝宽度的实际值,因此采用裂缝测量仪对预制初始裂缝进行复测保证试验结构的准确性。试块初始预制裂缝宽度及其实测值见表 2。

表 2 初始预制裂缝宽度及其实测值

试块编号	初始预制裂缝/mm	裂缝实测值/mm
A1	0.25	0.22
A2	0.25	0.27
B1	0.50	0.54
B2	0.50	0.45
C1	0.75	0.51
C2	0.75	0.84
D1	1.0	0.87
D2	1.0	无效
E	0	0

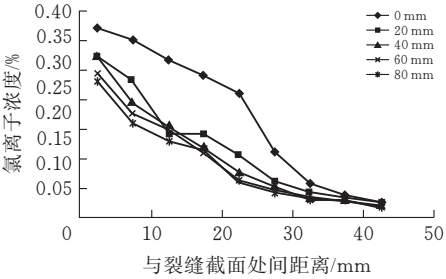
1.2 自然浸泡试验

为保证试验研究氯离子在混凝土表面的一维侵蚀,因此除暴露面外其它非侵蚀面涂抹环氧树脂进行防腐处理。将试块放入质量分数为 3.5%浓度的 NaCl 溶液中进行自然浸泡试验,浸泡时间为 70 d,每间隔 15 d 更换一次溶液保证浓度一定。浸泡期结束后将试块取出放置常温下干燥 48 h,随后进行钻孔取粉工作。对试块沿裂缝截面及距离裂缝截面 20~80 mm 间呈 20 mm 等差数值依次递增处采用小型冲击钻钻孔取粉,其余试块沿侵蚀面侧面按 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、35 mm、50 mm 的取粉深度依次钻孔取粉。在烘箱中将粉末烘干 2 h 后用孔径为 0.63 mm 的方孔筛过滤,将粉末收集并各自封袋保存后采用硝酸银测量法测定自由氯离子浓度。

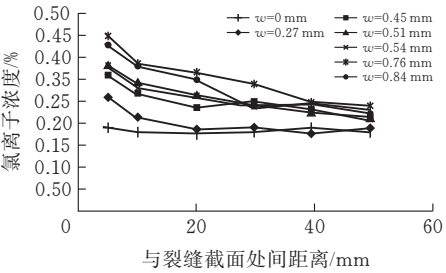
2 试验结果分析

结合试验数据,得到不同裂缝宽度、不同取粉深度的带裂缝混凝土试块裂缝周围区域的氯离子浓度见图 1,分析试验结果可得如下结论:

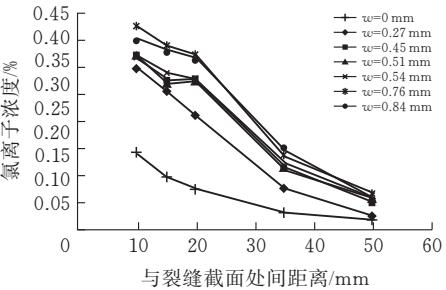
- 1)带裂缝混凝土内氯离子浓度远高于完整混凝土试块,并且在裂缝截面处氯离子浓度到达最大值,自由氯离子浓度随着与裂缝截面处间距的增大而减小。
- 2)随着裂缝宽度的增加,与裂缝截面间距相同的地方氯离子浓度不断递增,在 0.2~0.6 mm 的裂缝宽度范围内与裂缝截面处间距 20~30 mm 处混凝土试块的氯离子浓度基本保持稳定,由此可得裂缝周围区域氯离子扩散影响深度约为 40~60 mm。同理在 0.6~1.0 mm 的裂缝宽度范围内裂缝周围区域氯离子扩散影响深度约为 60~80 mm。



(a) A1 试块混凝土裂缝周围区域氯离子含量



(b) 不同裂缝宽度混凝土裂缝周围区域氯离子含量



(c) 不同裂缝宽度混凝土裂缝处沿混凝土深度氯离子含量

图 1 裂缝宽度和深度对氯离子渗透的影响

3)自由氯离子浓度随着混凝土取粉深度的增加不断减小,而且随着裂缝宽度的增大,同一混凝土深度处的氯离子浓度不断递减。深度范围小于 20 mm 时氯离子浓度减小程度小于深度范围大于 20 mm 处,混凝土深度超过 20 mm 时氯离子浓度递减程度明显。可能原因是氯盐侵蚀过程发生变化,最开始时因为裂缝的存在,氯离子通过裂缝能够很顺利的到达裂缝最底部,氯离子浓度变化程度相对较小;而在此之后,氯盐侵蚀则转变成以扩散为主,所以深度范围大于 20 mm 后氯离子浓度变化程度相对明显。

3 带裂缝混凝土的氯离子扩散模型

文献[6-8]给出完整混凝土氯离子扩散模型符合一维 Fick 第二扩散定律:

$$C(x,t)=C_0+(C_s-C_0)[1-\operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})]$$

式中: C_0 为浸泡前氯离子初始浓度, C_s 为混凝土表面氯离子浓度; x 为氯离子扩散深度; D 为浸泡时间为 t 且扩散深度为 x 处时的氯离子扩散系数; $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为高斯误差函数。

文献[9-10]给出氯离子扩散系数对时间具有依

赖性,考虑时间效应修正系数表达式为

$$D(t)=D_0\left(\frac{t_0}{t}\right)^m$$
$$C(x,t)=$$
$$C_0+(C_S-C_0)\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_0t_0^m(1-m)}-1t^{1-m}}\right)\right]$$

式中: m 为龄期指数; D_0 为在 NaCl 溶液中浸泡时间为 t_0 后的氯离子扩散系数。

文献[11-12]给出基于双重孔隙介质模型,考虑裂缝宽度作为氯离子在混凝土试块中扩散的主要诱因,并设想通过完整混凝土的氯离子扩散系数和裂缝宽度的相关关系合理表达带裂缝混凝土的平均氯离子扩散系数,在此引入裂缝宽度和氯离子扩散系数之间的函数关系:

$$D(w)=f(w)\cdot D_0$$

将试验数据进行拟合分析,得到不同裂缝宽度的平均氯离子扩散系数 $D(w)$ 并计算劣化系数 $f(w)$,结果见表 3。由图 2 可知,对劣化系数 $f(w)$ 进行二次多项式和三次多项式的回归分析,发现三次多项式拟合回归模型更为理想,回归结果如下:

$$f(w)=-10.474w^3+5.224w^2+8.3489w+0.9862$$

$$C_f=C_0+(C_S-C_0)\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{(-10.474w^3+5.224w^2+8.3489w+0.9862)D_0t_0^m(1-m)^{-1}t^{1-m}}}\right)\right]$$

4 结 论

1)裂缝加速了氯离子在混凝土中的扩散作用;伴随着裂缝宽度的增加,与裂缝截面间距相同的位置处氯离子浓度不断递增,在裂缝宽度为 0.2~0.6 mm 范围内裂缝周围影响区域约为 40~60 mm;同理在裂缝宽度为 0.6~1.0 mm 范围内裂缝周围影响区域约为 60~80 mm。

2)随着裂缝宽度的增大,同一混凝土深度处的氯离子浓度不断递减;裂缝周围区域氯离子浓度在 20 mm 深度后增长显著并在 35 mm 深度后走向稳定。

3)裂缝宽度作为带裂缝混凝土中氯离子扩散的主要诱因,对带裂缝混凝土氯离子扩散系数影响显著可由裂缝宽度的三次函数描述带裂缝混凝土内氯离子传输规律。

[参 考 文 献]

[1] 蔡健,魏沐杨,罗赤字,等. 弯曲荷载与氯盐侵蚀共同作用下的预应力混凝土梁耐久性研究[J]. 工程力学, 2018, 35(7):208-218.

[2] 胡思聪,王连华,李立峰,等. 非一致氯离子侵蚀下近

$$R^2=0.9829$$

表 3 不同裂缝宽度的带裂缝混凝土
平均氯离子扩散系数

裂缝宽度 w/mm	平均氯离子系数/ $(\times 10^{-11}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	表面氯离子 浓 $C_s/\%$	劣化系 数 $f(w)$	R^2
0	2.09	0.3468	1	0.9524
0.27	6.919	0.4485	3.31	0.9845
0.45	10.625	0.455	5.08	0.9604
0.51	11.361	0.4481	5.44	0.951
0.54	10.385	0.4739	4.97	0.977
0.84	11.624	0.5106	5.56	0.9513
0.87	10.979	0.5354	5.25	0.9586

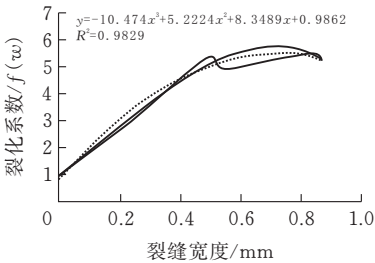


图 2 自然浸泡 70 d 后各函数模型拟合结果

因此,考虑时间依赖性和裂缝宽度的带裂缝混凝土氯离子扩散模型修正为

海桥梁时变地震易损性研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4):62-71.

[3] Yuya Sakai. Relationship between pore structure and chloride diffusion in cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229:768-777.

[4] Bjorn Van Belleghem. Evaluation and comparison of traditional methods and EPMA to determine the chloride ingress perpendicular to cracks in self-healing concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227:406-413.

[5] 张希瑾,田稳苓,王浩宇,等. 带裂缝混凝土氯离子扩散作用试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 2 (39):36-42.

[6] 何世钦. 氯离子环境下钢筋混凝土构件耐久性能试验研究[D].大连: 大连理工大学, 2004.

[7] Weyers R E. Service life model for concrete structures in chloride laden environment[J]. Aci Materials Journal, 1998, 95(4):445-453.

[8] 钟小平,金伟良,张宝健. 氯盐环境下混凝土结构的耐久性设计方法[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3):544-549.

[9] Mangat P S, Limbachiya M C. Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials[J]. Cement & Concrete Research, 1999, 29 (9): 1475-1485.

[10] Grassl P. A lattice approach to model flow in cracked concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(7):454-460.

[11] 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.

[12] Kwon S J, Na U J, Sang S P, 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.

Study on Chloride ion Diffusion Properties of Cracked Concrete

YE Mengqi, LI Yang

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to explore the influence of crack on chloride diffusion property of cracked concrete, a 70 d natural immersion test was conducted on concrete test block with corresponding crack width prefabricated by the method of nondestructive crack preparation. The test results show that the cracks provide convenience for chloride ion diffusion in concrete. The influence range of chloride ions around the fracture is about 30~80mm. The chloride ion concentration increased significantly after 20 mm depth and became stable after 35mm. The distribution of chloride ions in cracked concrete can be described by the cubic function of crack width.

Keywords: crack; concrete; chloride ion diffusion

[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 51 页)

Development of Information Measuring Equipment for Grounding Resistance of Transmission Line Tower

PENG Honggang, WANG Mulang, HE Zebin, XU Yan

(Guangzhou Power Supply Company Limited, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings in the grounding operation and maintenance of the transmission line tower, an information measurement equipment based on the mobile internet technology is developed. The equipment is based on the principle of non-power frequency method, which filters out the influence of stray current in the ground and ensures the measurement accuracy. At the same time, after the measurement is completed, the measurement conditions and results are automatically uploaded to the cloud data platform. The measurement data are matched with the database of ‘grounding parameter big data cloud platform’ by calculating the distance matching between the measured GPS and the Actual GPS. In the measurement process, the “offline data” are directly converted into “online data”, which effectively improves the working efficiency and accuracy of the grounding operation and maintenance. Finally, the grounding resistance of some ultra-high voltage line towers is measured on site. The test results show that the developed information measuring equipment has high measurement accuracy and strong anti-interference ability, greatly reduces the operation and maintenance and measurement time of the tower grounding, and effectively promotes the informationization and datamation of the grid grounding operation and maintenance.

Keywords: tower grounding measurement; information equipment; non-power frequency method; big data cloud platform

[责任编辑: 张岩芳]