

[文章编号] 1003—4684(2020)01-0075-04

氯盐环境下混凝土氯离子传输和钢筋锈蚀研究

周 翔, 苏 骏, 左国望

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 通过对 16 组带裂缝 $100\times100\times400$ mm 的短梁进行在氯盐溶液的干湿循环试验,以裂缝宽度、混凝土保护层厚度和钢筋直径为变量,研究不同裂缝宽度的钢筋混凝土裂缝周围和沿裂缝深度的氯离子含量,以及裂缝底端钢筋锈蚀长度,探讨氯离子传输规律;钢筋锈蚀长度的影响因素;并提出钢筋锈蚀长度预测模型。结果表明:氯离子在带裂缝混凝土中以二维扩散的方式扩散,氯离子在裂缝周围 40~60 mm 区域的二维扩散效应表现得更加显著;混凝土深度为 10 mm 范围内氯离子浓度随裂缝增大的趋势相对平缓,当深度 >10 mm 后,其趋势变大;裂缝宽度对钢筋锈蚀长度影响最大,当裂缝宽度 $w<0.3$ mm 时,钢筋锈蚀长度的预测值与试验值符合程度较好,钢筋锈蚀长度预测模型具有一定合理性。

[关键词] 干湿循环;裂缝宽度;钢筋锈蚀;钢筋混凝土;氯离子

[中图分类号] TU528.1 [文献标识码] A

裂缝会影响混凝土构件的耐久性和强度,裂缝出现后,环境中的氯离子、二氧化碳等将以裂缝为通道渗透到混凝土内部并到达钢筋表面加速钢筋锈蚀,从而影响构件的耐久性^[1]。

L. Marsavina 等^[2]以横向裂缝的宽度为影响因素探究了氯离子的渗透性,结果表明氯离子的侵蚀深度随着裂缝宽度的变大和裂缝深度加深而变大。Branko Šavija 等^[3]将数值模拟结果与实验结果对比发现裂缝的大小是氯离子侵蚀混凝土程度的主要影响因素。金伟良^[4]提出了裂缝宽度不同的条件下氯离子在裂缝周围混凝土内扩散的计算方法。延永东^[5]研究了干湿循环环境下,带裂缝混凝土内氯离子的渗透规律,发现裂缝宽度 >0.1 mm 时混凝土内氯离子浓度受裂缝宽度的影响较大。陆春华^[6]研究了裂缝宽度对带裂缝混凝土梁内钢筋锈蚀的影响;聂红宇^[7]通过预埋设不锈钢片制备了横向裂缝宽度不同的钢筋混凝土试件并以裂缝宽度、混凝土强度等级、水胶比和保护层厚度等因素建立了混凝土裂缝处钢筋锈蚀长度 L 的预测模型。上述学者对带裂缝钢筋混凝土在氯盐环境下氯离子在混凝土内的传输和钢筋锈蚀进行了较多研究。

但是由于大多数情况下采用的裂缝宽度在规范规定的 0.4 mm 以内,而实际过程中 $>$ 规范限制的裂缝经常存在,因此研究超出宽度规范限制的带裂缝混凝土的氯离子传输性能和裂缝处钢筋锈蚀情况

是有必要的。文中对预设 0.25~0.75 mm 宽度的带裂缝混凝土的氯离子传输性能进行了研究并测得裂缝处钢筋锈蚀长度,以横向裂缝宽度、混凝土保护层厚度和钢筋直径为变量,提出裂缝处钢筋锈蚀长度的预测模型。

1 试验方案

1.1 试件材料参数

试件混凝土等级为 C30,采用 P.O42.5 级的普通硅酸盐水泥;细骨料选用细度模数为 2.6 河沙,级配良好;粗骨料采用 5~20 mm 碎石连续级配;掺料为 II 级粉煤灰;外加剂使用聚羧酸减水剂,参数:水, $175\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;水泥, $340\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;砂, $680\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;石, $1100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;粉煤灰, $80\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;外加剂, $7.4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

1.2 试件设计

本实验设计 $100\times100\times400$ mm 的钢筋混凝土梁,钢筋为 HRB400 级钢筋;考虑两种钢筋直径和两种保护层厚度;构成 a,b,c,d 四组试件,每组试件预设裂缝宽度分别采用采取 0、0.25 mm、0.5 mm、0.75 mm 四种不同宽度,为得到预设初始横向裂缝,将预设宽度的钢片埋入成型的混凝土中,并养护 28 d,但实际情况下裂缝宽度无法达到预设值,故本实验最终以实际值为研究变量,各组有关数值见表 1。

[收稿日期] 2019—06—25

[第一作者] 周 翔(1996—),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为工程结构抗震分析与加固技术

[通信作者] 苏 骏(1971—),男,安徽六安人,工学博士,湖北工业大学教授,研究方向为结构工程

表 1 试件分组表

试件 组号	预设裂缝 宽度/mm	实测裂缝宽 度 w /mm	保护层厚 度 c /mm	钢筋直径 d /mm
a1	0	0	25	18
a2	0.25	0.23	25	18
a3	0.5	0.32	25	18
a4	0.75	0.86	25	18
b1	0	0	20	18
b2	0.25	0.25	20	18
b3	0.5	0.48	20	18
b4	0.75	0.56	20	18
c1	0	0	25	16
c2	0.25	0.21	25	16
c3	0.5	0.47	25	16
c4	0.75	0.67	25	16
d1	0	0	20	16
d2	0.25	0.26	20	16
d3	0.5	0.42	20	16
d4	0.75	0.83	20	16

1.3 试验方法

1)将养护 28 d 后的试块四周涂抹环氧树脂胶后平铺放入质量分数为 10%的氯化钠溶液中,使溶液刚好淹没试块侵蚀面。每天定时补充缺失溶液到同一位置,干湿循环时间以每 24 h 为一个周期,共浸泡 45 d,为 45 次干湿循环。之后,将试块干燥,进行沿裂缝 10 mm、20 mm、25 mm、30 mm 和 40 mm 深度处取粉,将所取粉末筛除至粒径 <0.5 mm,然后将粉末在烘箱中烘干 8 h 至恒重,温度控制在 $100\pm5^{\circ}\text{C}$,从每个试样组中取出 3 g 粉末,配以 100 mL 去离子水于锥形瓶中,并利用 NCL-AL 型氯离子含量快速检测仪测定氯离子的含量,各组氯离子含量见表 2。

表 2 试件氯离子浓度及锈蚀长度表

试件 编号	不同裂缝深度处氯离子浓度/%				钢筋锈蚀 长度/mm
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	
a1	0.51	0.24	0.15	0.09	0
a2	0.95	0.49	0.29	0.14	20.48
a3	1	0.66	0.41	0.24	22.45
a4	1.07	0.89	0.49	0.26	53.46
b1	0.65	0.26	0.18	0.14	0
b2	0.94	0.49	0.34	0.22	28.82
b3	1	0.7	0.41	0.24	37.33
b4	1.07	0.81	0.47	0.27	43.01
c1	0.51	0.25	0.14	0.08	0
c2	1.04	0.58	0.33	0.15	20.73
c3	1.05	0.76	0.45	0.26	25.56
c4	1.08	0.86	0.5	0.28	51.12
d1	0.65	0.28	0.2	0.16	0
d2	1.01	0.7	0.46	0.28	29.07
d3	1.24	0.95	0.55	0.28	36.06
d4	1.31	1.2	0.7	0.39	65.42

从混凝土裂缝底端钢筋所在处开始,沿着混凝土裂缝的两端对称钻取粉末,取粉位置分别在距裂

缝 10 mm、20 mm、30 mm 和 40 mm 处,每个试块钻取 40 个孔,同理测得氯离子浓度,因钢筋直径对裂缝周围氯离子浓度影响不大,故只取不同保护层厚度的两组数据(表 3)。

2)将取完粉的试块凿开拿出钢筋并用游标卡尺测量其锈蚀长度,各组钢筋锈蚀长度见表 2。

表 3 试件氯离子浓度表

试件 编号	距裂缝不同距离处氯离子浓度/%			
	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm
a1	0.67	0.63	0.6	0.59
a2	0.84	0.71	0.66	0.63
a3	0.87	0.75	0.69	0.67
a4	1.09	0.86	0.8	0.75
d1	0.74	0.79	0.78	0.78
d2	1.02	0.94	0.91	0.92
d3	1.18	1.1	1.09	1.05
d4	1.25	1.03	1.12	1.18

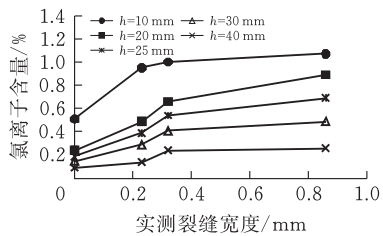
2 试验结果及分析

2.1 氯离子含量结果分析

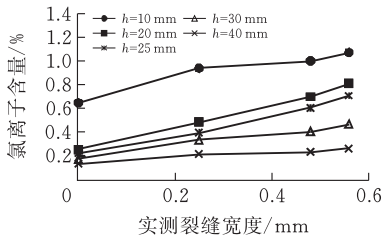
图 1 为不同宽度裂缝处氯离子浓度随混凝土深度的变化情况。完整混凝土中氯离子浓度显著低于其他裂缝的混凝土,同一深度范围内混凝土内氯离子浓度随着裂缝宽度增大而提高;当裂缝宽度 <0.35 mm 时,氯离子浓度提高趋势较大,但当裂缝宽度 >0.35 mm 时,氯离子浓度变化相对平缓;氯离子浓度因侵蚀深度增加而逐渐降低;10 mm $<$ 深度 $h > 30$ mm 范围内氯离子浓度因宽度变化相对平缓,在 10~30 mm 深度内,氯离子浓度变化更加显著,特别在深度 h 为 20 mm 或 25 mm 处(即裂缝底端),氯离子浓度在不同裂缝宽度混凝土内同一深度处差别最大。通过对上述现象分析,对于带裂缝混凝土试件,氯离子可以沿裂缝顺利到达裂缝端,然后从裂缝端开始腐蚀,腐蚀主要以扩散方式进行。裂缝使氯离子更容易到达裂缝底端。此外,实验中预置裂缝宽度较大,不可避免地会导致裂缝通道内不同对流作用程度。随着裂纹尖端吸附氯离子能力的增加,裂纹尖端表面吸附氯离子的量随着裂纹宽度增大而增加,相应裂纹尖端氯离子浓度也随之增加。

不同裂缝宽度周围区域氯离子浓度见图 2,完好混凝土中氯离子浓度低于其他带裂缝混凝土,同一位置氯离子浓度随裂缝宽度变大而增加;对于完好的混凝土,氯离子以浓度差从试件表面扩散渗透内部。因此,氯离子浓度基本与距离裂缝的距离 l 无关;而对于带裂缝混凝土,氯离子从试件表面和裂缝侧面向内部扩散,表现出二维扩散,裂缝周围范围内的氯离子的二维扩散效应伴随着裂缝宽度的增大而表现得更加显著,氯离子浓度变化在距离裂缝的

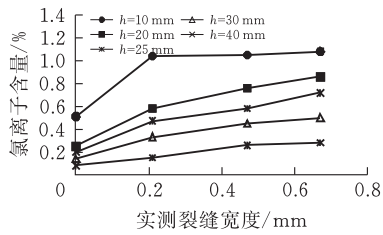
距离 l 大约在 20~30 mm 时基本达到稳定。



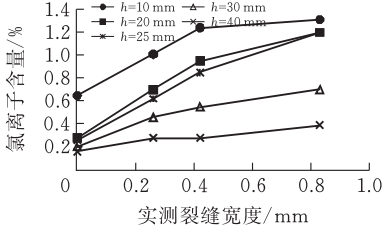
(a) a 组试件 $d=18\text{ mm}$, $c=25\text{ mm}$



(b) b 组试件 $d=18\text{ mm}$, $c=20\text{ mm}$

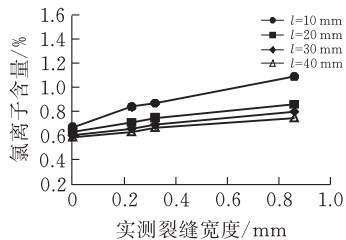


(c) c 组试件 $d=16\text{ mm}$, $c=25\text{ mm}$

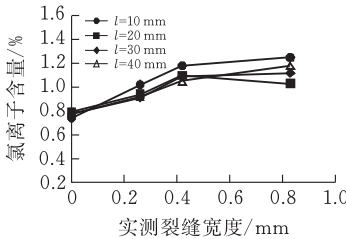


(d) d 组试件 $d=16\text{ mm}$, $c=20\text{ mm}$

图 1 裂缝处沿混凝土深度氯离子含量



(a) a 组试件 $d=18\text{ mm}$, $c=25\text{ mm}$



(b) b 组试件 $d=16\text{ mm}$, $c=20\text{ mm}$

图 2 裂缝周围区域氯离子含量

2.2 裂缝处钢筋锈蚀长度分析

2.2.1 钢筋锈蚀长度预测模型建立 钢筋锈蚀长度与实测裂缝宽度关系见图 3,随着裂缝宽度的增加,裂缝处钢筋的腐蚀长度明显增加。当裂缝宽度一定时,钢筋的腐蚀长度随保护层厚度的增加而减小,钢筋直径对钢筋锈蚀的影响不大。主要原因可能是:氯离子在裂缝端部以扩散方式向裂缝位置钢筋处侵蚀,保护层厚度提高使氯离子到达裂缝底端的渗透距离增加,单位时间到达裂缝底端的氯离子数量减少。由图 3 发现裂缝宽度和钢筋锈蚀长度可能呈线性关系,但是无法从中得出保护层的厚度以及钢筋的直径对锈蚀长度的影响规律,因此,利用 MATLAB 软件对上诉因素进行多元线性回归分析,有关系数见表 4,由此得到回归模型为:

$$L_2 = 46.42 + 56.12w - 1.91c + 0.35d$$

式中: L_2 为计算钢筋锈蚀长度; w 为裂缝宽度; c 为混凝土保护层厚度; d 为钢筋直径。

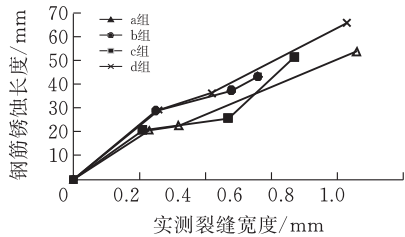


图 3 裂缝处钢筋锈蚀长度

表 4 多元线性回归参数

系数	系数估计值	系数置信区间
b (常数)	46.42	[25.22, 67.62]
w (裂缝宽度)	56.12	[47.35, 64.89]
c (保护层厚度)	-1.91	[-2.90, -0.92]
d (钢筋直径)	0.35	[0.23, 0.47]

$$R_2 = 0.9783; F = 124.615; p < 0.001; s_2 = 13.5114$$

2.2.2 钢筋锈蚀长度预测模型验证 为验证钢筋锈蚀模型可信度,选取和文中的研究相似的文献^[9]中的 8 组数据用以检验文中提出的裂缝处钢筋锈蚀长度预测模型。各试件相关参数见表 6。

表 6 钢筋锈蚀长度试验值与计算值

编号	w/mm	c/mm	d/mm	L_1/mm	L_2/mm	L_1/L_2
G1	0.2	20	10	24.5	22.9	1.07
G2	0.3	20	10	27.3	28.5	0.96
G10	0.3	20	8	26.6	27.8	0.96
G11	0.5	20	8	32.2	39.1	0.82
G14	0.3	25	10	22.4	18.9	1.18
G15	0.5	25	10	25.8	30.2	0.85
G16	0.3	30	10	20.7	9.5	2.17
G17	0.5	30	10	23.2	20.7	1.12

w 为裂缝宽度; c 为保护层厚度; d 为钢筋直径; L_1 为试验钢筋锈蚀长度; L_2 为计算钢筋锈蚀长度

将表 6 中的实测钢腐蚀长度与模型计算的钢腐

蚀长度进行比较。除明显的问题值外,均值和标准差分别为 0.99 和 0.084。可以看出,文中的计算模型具有一定准确性和合理性。

3 主要结论

- 1)裂缝的存在使氯离子以二维扩散的方式渗入混凝土内部,随着横向裂缝的宽度增大,氯离子的二维扩散效应在裂缝周围 40~60 mm 区域更加显著。
- 2)带裂缝混凝土内的氯离子浓度高于完好的混凝土,;同一位置处氯离子的浓度随着裂缝宽度的增大而增大;随着距离裂缝距离的增加,氯离子侵蚀深度的加深,氯离子在混凝土中的浓度逐渐减小;当裂缝宽度<0.35 mm 时,氯离子浓度的提高趋势较大。深度<10 mm 或>30 mm 范围内氯离子浓度因宽度变化相对平缓,在 10~30 mm 深度内,氯离子浓度变化更加显著,特别在深度为 20 mm 或 25 mm 处(即裂缝底端),氯离子浓度在不同裂缝宽度混凝土内同一深度处的差别最大。
- 3)建立了钢筋锈蚀长度预测模型,钢筋锈蚀长度受裂缝宽度,保护层厚度,钢筋直径等因素影响,其中裂缝宽度影响最大;对预测模型检验,结果表明混凝土保护层厚度一定时,当裂缝宽度 $w<0.3$ mm 时,钢筋锈蚀长度的预测值与试验值符合程度较好,由于各国对混凝土裂缝宽度的最大限值基本在

0.3 mm 左右,预测模型具有一定合理性。

[参 考 文 献]

[1] 张红光,王曙光,刘伟庆.开裂开裂混凝土内氯离子扩散机理及数值模拟研究[J].混凝土,2014(9):19-25.

[2] 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):264-274.

[3] Branko Šavija, José Pacheco, Erik Schlangen. Lattice modeling of chloride diffusion in sound and cracked concrete [J]. Cement&Concrete Composites, 2013 (42):30-40.

[4] 金伟良,延永东,王海龙,等.饱和状态下开裂混凝土中氯离子扩散简化分析[J].交通科学与工程,2010,26 (1):23-28.

[5] 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运输规律[J].中南大学学报,2013,44 (5):2060-2067.

[6] 陆春华,金伟良,延永东.氯盐干湿环境下受弯横向裂缝对钢筋混凝土耐久性影响[J].海洋工程,2012, 30 (1): 131-136, 144.

[7] 聂红宇,卫军.开裂状态对氯离子环境中混凝土结构耐久性影响研究[D].长沙:中南大学,2012.

Study on Chloride Ion Transport in Concrete and Steel Corrosion in Chloride Environment

ZHOU Xiang, SU Jun, ZUO Guowang

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

Abstract: Through the dry-wet cycle test of 16 groups of cracked 100×100×400 mm short beams in the chloride salt solution, the crack width, the thickness of the concrete protective layer and the diameter of the steel bar were used as variables to study the cracks around the reinforced concrete cracks with different crack widths. The chloride ion content along the depth of the crack and the length of the steel corrosion at the bottom of the crack were discussed. The chloride ion transport law and the influence factors of the corrosion length of the steel were discussed. The prediction model of the steel corrosion length was proposed. The results show that the chloride ion diffuses in the two-dimensional diffusion mode in the cracked concrete, and the two-dimensional diffusion effect of chloride ion in the 40~60 mm region around the crack is more significant. The chloride ion concentration increases with the crack in the concrete depth of 10mm. The trend is relatively flat. When the depth is greater than 10 mm, the trend becomes larger; the crack width has the greatest influence on the corrosion length of the steel. When the crack width is at $w<0.3$ mm, the predicted value of the corrosion length of the steel is in good agreement with the experimental value, and the steel corrosion is good. The length prediction model has certain rationality.

Keywords: dry-wet cycle; crack width; corrosion of reinforcement; chloride ion

[责任编辑:裴 琴]