

新老混凝土的钢筋加速锈蚀

张菊辉¹, 衣存浩¹, 王诗昆¹, 管仲国²

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 目前, 学者们围绕氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀及混凝土保护层开裂开展了大量研究, 但主要针对整体浇筑钢筋混凝土结构, 对新老混凝土结构的耐久性研究较少。通过设计制作 8 块水灰比分别为 0.60 与 0.53 的整体浇筑与二次浇筑混凝土试件, 采用半浸泡通电加速锈蚀试验, 研究二次浇筑试件在钢筋理论锈蚀率分别为 4%、6%、8% 时的混凝土表面锈胀裂缝发展规律以及锈后钢筋的力学性能变化, 并与整体浇筑试件进行对比。结果表明: 整体浇筑混凝土试件只产生纵向顺筋裂缝; 二次浇筑混凝土试件先产生界面横向裂缝, 后产生顺筋纵向裂缝。整体浇筑试件中钢筋为均匀锈蚀, 二次浇筑试件钢筋为非均匀锈蚀, 且界面处钢筋锈蚀最严重。由于新老混凝土结合面处钢筋截面损失严重, 二次浇筑试件相比整体浇筑试件, 钢筋力学性能明显下降。混凝土强度对整体浇筑试件内钢筋力学性能的影响可以忽略, 但对二次浇筑试件的影响较大。

关键词: 新老混凝土; 锈蚀率; 裂缝宽度; 钢筋锈蚀

中图分类号: TU528.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2096-08

网络出版时间: 2022-07-01



Accelerated Corrosion of Steel Bars in New and Old Concrete Structures

ZHANG Juhui¹, YI Cunhao¹, WANG Shikun¹, GUAN Zhongguo²

(1. College of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Until now, many studies have been carried out to investigate the effect of reinforcement corrosion on concrete cracking due to chloride attack, but they mainly focus on monolithic reinforced concrete structures, and few studies on the durability of new and old concrete structures. Eight integral casting and secondary casting concrete specimens with different water-cement ratios (*i.e.*, 0.60 and 0.53) were fabricated, and the semi-immersion accelerated corrosion was examined. The development law of rust expansion cracks on the concrete surface and the changes in the mechanical properties of the rusted steel bars for the secondary-casting specimens were investigated and compared with the integral-casting specimens at different theoretical corrosion rates of steel bars of 4%, 6% and 8%, respectively. The results show that the integrally poured concrete specimens only produce longitudinal cracks along the reinforcement, while the secondary-casting concrete specimens firstly produce interfacial transverse cracks and then produces longitudinal cracks. The steel bar in the integral-casting specimen is uniformly corroded, while the steel bars in the secondary pouring specimens are non-uniformly corroded, and the steel corrosion at the interface between unused and used concrete occurs most serious. The mechanical properties of the steel bars are reduced in the secondary-pouring specimens compared to the integral-pouring specimens due to the serious loss of the steel bar section at the interface between unused and used concrete. The influence of concrete strength on the mechanical properties of steel bars in the integral-casting specimens can be ignored, but it has an influence on the mechanical properties of steel bars in the secondary-casting specimens.

Keywords: new and old concrete; corrosion loss ratio; crack width; rebar corrosion

氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀是海洋混凝土结构耐久性降低最主要的因素^[1]。目前, 学者围绕氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀、混凝土保护层开裂及裂缝扩

展过程开展了大量研究^[2-7], 但主要针对整体浇筑钢筋混凝土结构。实际工程中, 存在着大量龄期、强度不同的新老混凝土结构, 如混凝土结构损伤后

收稿日期: 2022-01-05。 修订日期: 2022-02-16。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878491, 51408359)。

第一作者: 张菊辉(1981—), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2022-01-05. Revised date: 2022-02-16.

First author: Zhang Juhui (1981—), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: zhjhui@usst.edu.cn

的加固修复,施工过程中存在的后浇带等。但学者们针对新老混凝土结构的研究主要集中于结合面的黏结性能^[8-15],对新老混凝土结构的耐久性研究较少。查阅文献发现,仅有李国平等^[16]采用自然浸泡方法研究了接缝类型和荷载条件对节段接缝中抗氯离子渗透性能的影响,指出在无应变或一定压应变情况下,相比采用直接湿接缝和凿毛湿接缝的混凝土,整体浇筑混凝土的抗氯盐侵蚀性能最佳;并对分段成型的桥梁混凝土结构中常用的四种类型接缝开展了氯离子侵入、碳化、冻融及接缝部位钢筋锈蚀的耐久性试验^[17]。Liu 等^[18]基于通电加速锈蚀试验研究了钢筋锈蚀对新老混凝土结合面抗剪强度的影响。因此,本工作采用半浸泡通电加速锈蚀试验,考虑混凝土强度、钢筋锈蚀率的影响,研究新老混凝土结构中因钢筋锈蚀引起的锈胀裂缝发展及钢筋力学性能的变化。

1 实验

1.1 制备

设计整体浇筑和二次浇筑 2 种钢筋混凝土试件,如图 1 所示,试件尺寸均为 150 mm×150 mm×450 mm,内部浇筑 1 根钢筋。钢筋长 500 mm,除锈并在两端焊接导线,然后涂抹环氧树脂进行密封。对于二次浇筑试件(图 1b),除准备大小为 150 mm×150 mm×450 mm 的木模具外,同时准备 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体泡沫,按钢筋直径和保护层厚度要求钻好孔并塞填在 B 部分;先浇筑 A 部分,10 d 后取出泡沫,在浇筑 B 部分之前,先对结合面进行人工凿毛,凿毛完成后,即对 B 部分进行浇筑并养护 28 d,养护结束后用 ZBL-F800 裂缝综合测试仪观测新老混凝土结合面,将结合面出现明显初始裂缝的试件弃用并进行重新制备,以防对试验结果造成影响。

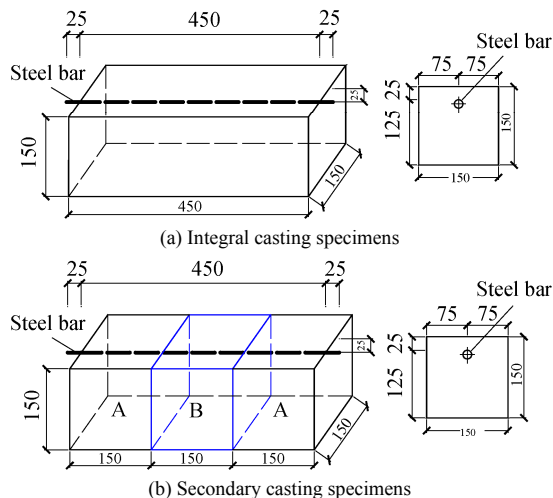
1.2 方法

所有试件均采用半浸泡通电加速锈蚀法。首先将养护好的试件在 5% 的 NaCl 溶液中浸泡 2 d,然后控制液面高度统一在钢筋下弧面之下 20 mm。连接直流稳压稳流电源,将电流密度^[19]控制为 2.5 mA/cm²,根据 Faraday 电解定律估算加速锈蚀试验中钢筋的通电时间:

$$t = \frac{\Delta m_L \cdot Z \cdot F}{M \cdot I} \quad (1)$$

其中: Δm_L 为质量损失(g); M 为铁的摩尔质量(g/mol); I 为直流电流(A); t 为通电时间(s); Z

为铁氧化的价电子数,取 2.5; F 为 Faraday 常数,取 96 485 C/mol。



Unit: mm

图 1 试件设计

Fig. 1 Specimen design

1.3 试件材料

试件设计主要考虑不同浇筑方式、混凝土强度对钢筋锈蚀的影响,具体见表 1。其中试件 1-b 和 5-b 为整体浇筑试件,二次浇筑试件因主要模拟施工过程中的后浇带,不考虑 A、B 部分的混凝土强度差异,混凝土强度等级保持一致。试验选用水灰比(r)分别为 0.60 和 0.53 的两种普通混凝土,水泥选用海螺牌 P.O42.5,砂选用粒径在 0.25~0.50 mm 之间的中砂,碎石选用粒径 5~10 mm 和 10~20 mm 两种。表 2 为试验用混凝土配合比。两种混凝土的实测立方体抗压强度平均值分别为 30.2 MPa 和 41.9 MPa。钢筋选用 HPB300 热轧光圆钢筋,统一直径为 16 mm,距混凝土表面净保护层厚度为 25 mm,钢筋的实测屈服强度为 314 MPa,实测抗拉强度为 465 MPa。

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

Specimen No.	Casting method	Theoretical corrosion rate/%	Concrete strength/MPa
1-b	Integral casting	8	30.2
2-b	Secondary casting	4	30.2
3-b	Secondary casting	6	30.2
4-b	Secondary casting	8	30.2
5-b	Integral casting	8	41.9
6-b	Secondary casting	4	41.9
7-b	Secondary casting	6	41.9
8-b	Secondary casting	8	41.9

表 2 混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of concrete

kg/m³

Water-cement ratio (r)	Cement (P.O42.5)	Slag (S95)	Fly ash (F-I)	Sand	Stone (5–20 mm)	Water
0.60	350	0	0	719	1170	210
0.53	300	60	60	895	940	160

2 结果与讨论

2.1 表面裂缝的发展

在持续通电过程中,可观察到试件表面逐渐有锈蚀产物溢出,整体浇筑试件在钢筋两侧有黑褐色锈蚀产物溢出;而二次浇筑试件由于界面相对薄弱,其漏锈位置发生在新老混凝土结合面处,并有红棕色锈蚀产物溢出。随着通电时间延长,锈蚀产物逐渐累积,最终导致混凝土保护层开裂。

2.1.1 整体浇筑试件 整体浇筑试件在钢筋通电锈蚀的过程中,主要发生纵向顺筋裂缝。对其表面裂缝发展情况进行观测,发现当钢筋的理论锈蚀率达到 2%时,试件 1-b ($r=0.60$)表面已经产生了局部的微裂缝,而试件 5-b ($r=0.53$)混凝土表面无裂缝。

图 2 给出了整体浇筑试件 1-b ($r=0.60$)和 5-b ($r=0.53$)分别达到 4%、6%、8%理论锈蚀率时,混凝土表面的顺筋裂缝发展情况(由于锈胀裂缝较

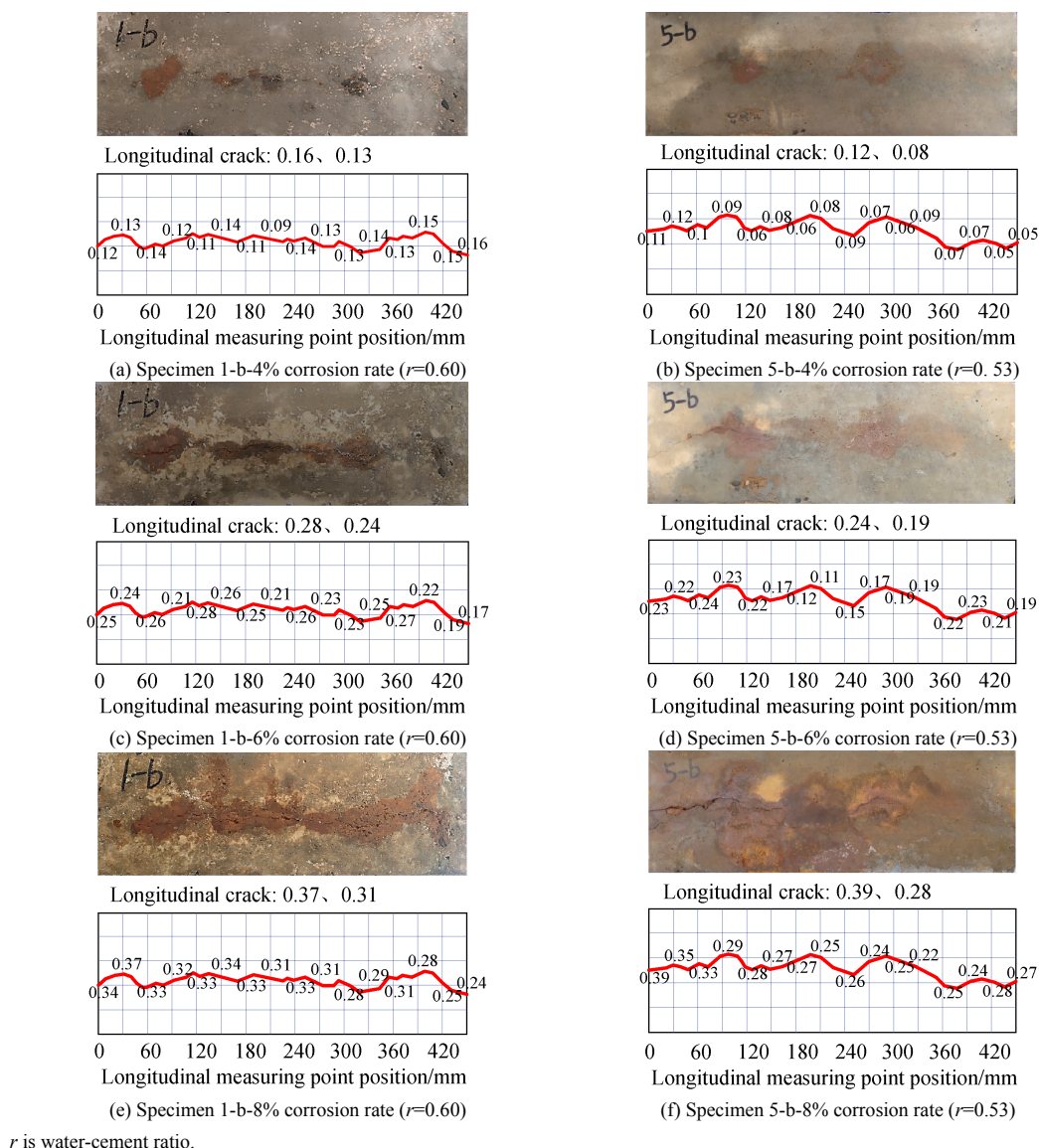


图 2 整体浇筑试件 1-b 与 5-b 的裂缝发展

Fig. 2 Crack development of integral casting Specimens 1-b and 5-b

小,除给出实际裂缝发展图外,还采用网格描出裂缝发展情况,每 3 cm 为 1 个测点,红线表示锈胀裂缝,数字表示该处裂缝宽度,网格左上角标注为纵向裂缝最大值与平均值)。可以看出,当钢筋的理论锈蚀率达到 4% 时,试件 1-b 和 5-b 的锈胀裂缝已经贯穿整个混凝土表面,且有少量锈蚀产物溢出,整体浇筑试件 1-b 和 5-b 的最大纵向裂缝宽度分别为 0.16 mm 和 0.12 mm;当理论锈蚀率达到 6% 时,试件 1-b 和 5-b 表面的锈迹更加明显,纵向裂缝进一步发展,试件 1-b 和 5-b 的最大纵向裂缝宽度分别达到 0.28 mm 和 0.24 mm;当理论锈蚀率达到 8% 时,试件 1-b 和 5-b 表面的锈蚀产物已经沿着裂缝密布在整个试件表面,此时试件 1-b 和 5-b 的最大纵向裂缝宽度比较接近,分别达到 0.37 mm 和 0.39 mm。但总体而言,整体浇筑试件 1-b ($r=0.60$) 在 4%、6%、8% 理论锈蚀率下的平均裂缝宽度(分别为 0.13、0.24 mm 与 0.31 mm)均大于试件 5-b ($r=0.53$) (分别为 0.08、0.19 mm 与 0.28 mm),纵向裂缝宽度特征值与理论锈蚀率之间基本成线性关系(图 3)。

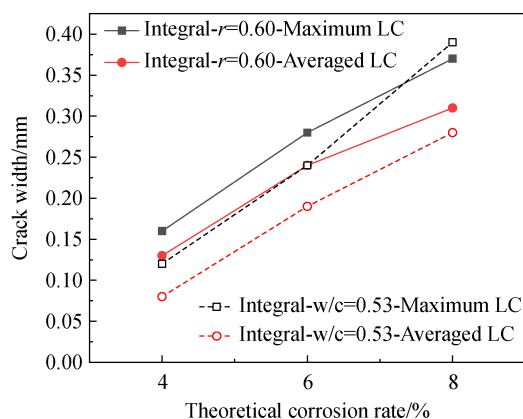


图 3 锈蚀率 vs. 整体浇筑试件纵向裂缝

Fig. 3 Theoretical corrosion rate vs. longitudinal Crack (LC) for integral casting specimens

2.1.2 二次浇筑试件 二次浇筑的混凝土试件在钢筋通电锈蚀的过程中,首先在新老混凝土结合面处产生横向裂缝,然后才产生纵向顺筋裂缝,而且纵向裂缝总是先出现在新混凝土表面,即 B 部分。

图 4 给出了二次浇筑的 2 种混凝土试件分别达到 4%、6%、8% 理论锈蚀率时,混凝土表面的裂缝发展情况。同样对横向裂缝每 3 cm 为 1 个测点测量其裂缝宽度,并在网格右上角给出横向裂缝最大裂缝宽度及平均宽度。结果表明,在钢筋分别达

到 4%、6%、8% 理论锈蚀率时,混凝土水灰比为 0.60 的二次浇筑试件表面的纵向裂缝平均宽度分别为 0.09、0.21 mm 与 0.29 mm,横向裂缝平均宽度分别为 0.21、0.27 mm 与 0.33 mm,均大于水灰比为 0.53 的混凝土二次浇筑试件(其纵向裂缝平均宽度分别为 0.07、0.06、0.11 mm,横向裂缝平均宽度分别为 0.17、0.24、0.29 mm)。这说明在理论锈蚀率相同的情况下,二次浇筑试件混凝土表面的纵向裂缝与横向裂缝的平均宽度均随着混凝土水灰比的减小而降低,即随着混凝土强度的增大而减小(图 5)。值得注意的是,通电锈蚀过程中,采用水灰比为 0.53 的混凝土二次浇筑试件 6-b 在 4% 理论锈蚀率下产生的纵向裂缝宽度最大值大于水灰比为 0.60 的试件 7-b,这可能与试件 6-b 成型时存在的初始新老混凝土结合面接缝较大有关,因此,在实际施工过程中需特别注意后浇混凝土的浇筑与养护过程,结合面的初始缺陷对结构的耐久性影响超过混凝土强度的改变。此外,对比整体浇筑与二次浇筑试件,发现二次浇筑试件表面纵向裂缝的平均宽度远小于整体浇筑试件,这主要是因为二次浇筑试件的锈蚀产物在横向裂缝处释放了锈胀应力。

2.2 钢筋锈蚀分析

破型取筋后,根据 GB/T16545—2015《金属和合金的腐蚀试样上腐蚀产物的清除》^[20]中的化学试剂法对钢筋进行酸洗、烘干。将烘干后的钢筋应用 0.01 g 精度的电子秤对其进行称重,根据钢筋锈蚀前后质量的变化确定钢筋的质量损失,表达式如下:

$$\eta_w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

其中: η_w 为钢筋的质量损失率; m_1 为钢筋锈蚀之前的质量(g); m_2 为钢筋锈蚀后酸洗钢筋并烘干后的质量(g)。

同时,对酸洗之后的钢筋直径进行测量,沿钢筋长度方向每 3 cm 选 1 个测点,钢筋与混凝土粘结断口截面为第 1 个测点,共 16 个测点,与混凝土顺筋裂缝宽度测点一一对应。每个测点用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量 2 次,相同测点测量位置相互垂直,取 2 次数据平均值作为该点直径。得到钢筋锈蚀后的直径后,可以通过截面损失率来计算钢筋直径的损失,如式(3)所示:

$$\eta_s = \frac{s_1 - s_2}{s_1} \times 100\% = 1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \quad (3)$$

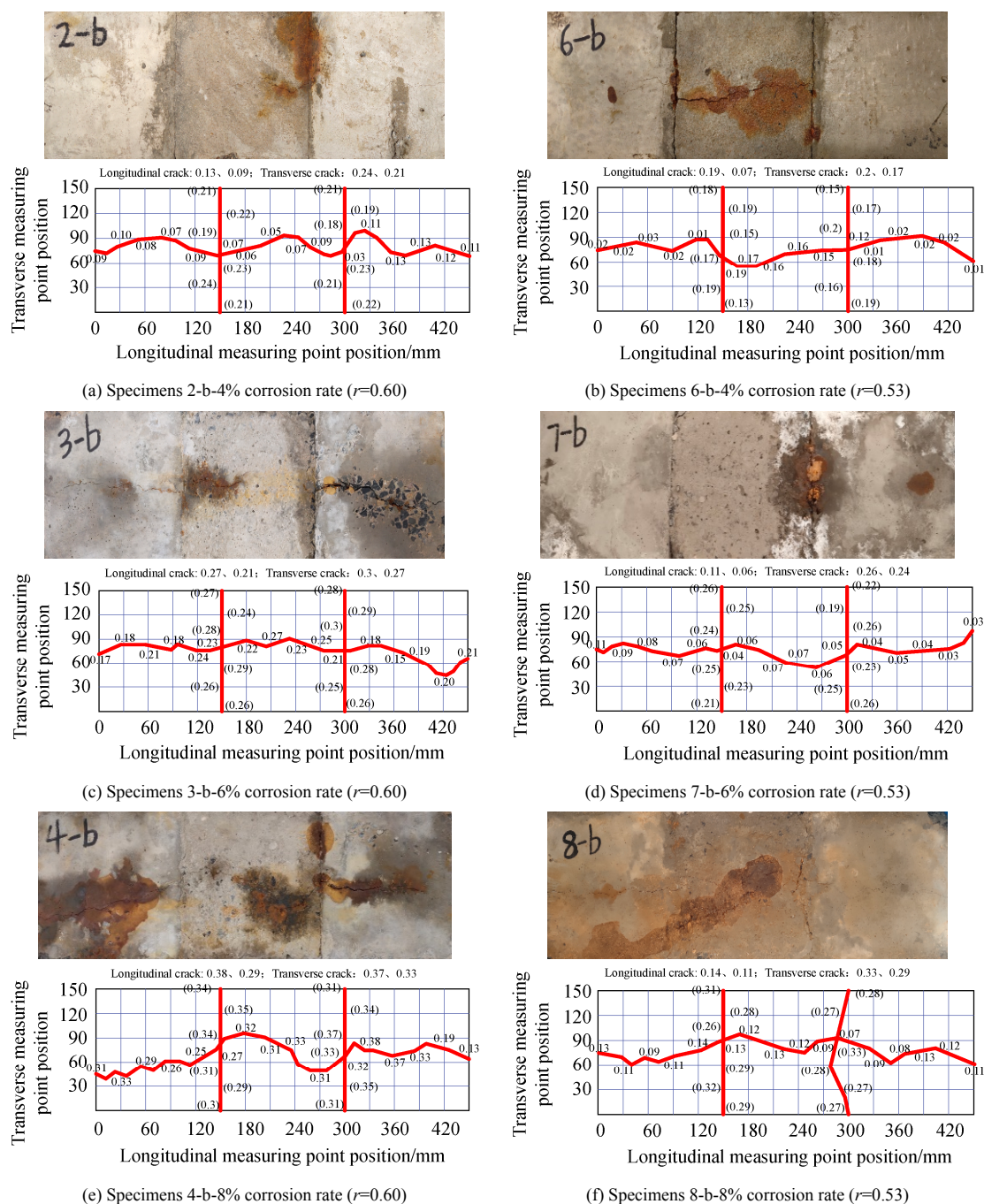


图4 二次浇筑试件的裂缝发展
Fig. 4 Development of crack development of secondary-casting specimens

其中: η_s 为钢筋的截面损失率; s_1 和 s_2 分别为钢筋锈蚀前后的截面积(mm^2); d_1 和 d_2 分别为钢筋锈蚀前后的直径(mm)。

2.2.1 钢筋的截面损失 图6为钢筋酸洗后的实物图,其中最左一根为整体浇筑试件内部的锈蚀钢筋,其余为二次浇筑试件的。可以看出,整体浇筑试件钢筋的电加速锈蚀为均匀锈蚀。而二次浇筑试件中的钢筋呈现出均匀锈蚀,在老混凝土结合面处有明显的截面损失,这是因为二次浇筑试件

的裂缝首先在新老混凝土结合面处产生,为外界氧气和水分传递到界面处的钢筋表面提供了通道;同时新老混凝土结合面处的混凝土内部存在更多的孔隙,电解质溶液中的离子会更快地渗透到钢筋表面,这都使得界面处的钢筋最先钝化,最先开始锈蚀,最先结合电解池中阴极产生的氢氧根,最先生成锈蚀产物。而外界氧气和水分从裂缝进入会使得界面处锈蚀产物氧化的更完全,锈胀体积更大,裂缝更宽,物质传输更快。因此,新老混凝土结合

面处的钢筋有更多铁失去电子参与反应, 导致其较大的截面损失。

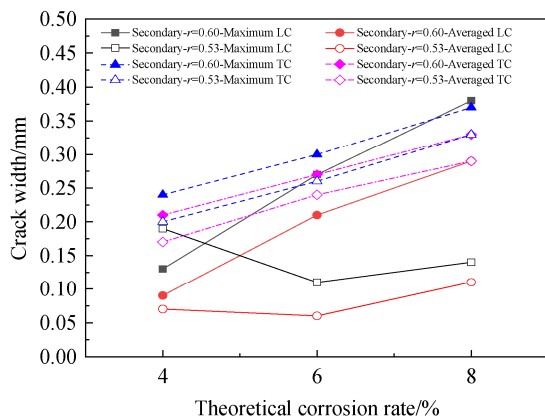


图 5 理论锈蚀率 vs. 二次浇筑试件纵向与横向裂缝
Fig. 5 Theoretical corrosion rate vs. longitudinal crack (LC) and transverse crack (TC) for secondary-casting specimens



图 6 锈蚀钢筋截面损失实图
Fig. 6 Section loss of corroded rebars

图 7 给出了所有试件沿钢筋长度方向的截面损失情况。结果表明, 二次浇筑试件的新老混凝土结合面处钢筋直径损失最为严重, 其中试件 4-b (水灰比 0.6~8.0%理论锈蚀率) 的钢筋锈蚀程度最大, 其钢筋最大截面损失率为 11.93% (发生在结合面处), 平均截面损失率为 9.70%。其次, 混凝土强

度对钢筋截面损失的影响较大。二次浇筑试件, 在理论锈蚀率分别为 4%、6%、8%的情况下, 采用水灰比为 0.53 的混凝土, 相较水灰比为 0.60 的混凝土, 混凝土强度的提高能有效降低钢筋的最大截面损失率, 降低幅度分别为 14.2%、11.8%和 10.9%。整体浇筑试件(即试件 1-b 和 5-b)的钢筋截面损失沿钢筋全长基本是均匀分布的, 最大与最小截面损失相差不到 5%, 其平均截面损失值分别为 7.96% 和 7.76%, 可以看出, 混凝土强度的变化对整体浇筑试件的钢筋截面损失率影响很小。

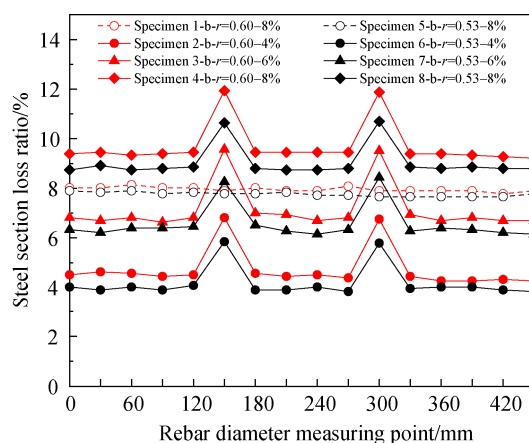


图 7 钢筋各测点截面损失率的变化
Fig. 7 Variation of steel section loss ratio

2.2.2 钢筋锈蚀率对比 表 3 给出了钢筋的质量损失率、截面损失率与理论锈蚀率的对比, 其中截面损失率取平均值和最大值两特征值。结果表明, 法拉第定律可以较好地预测钢筋的锈蚀率, 无论整体浇筑试件还是二次浇筑试件, 钢筋的质量损失率均普遍小于理论锈蚀率, 但两者之间差异很小, 最大相差幅值仅为 6.25%。采用截面损失率来表征钢筋的锈蚀程度时, 只有整体浇筑试件的结果与理论锈蚀率比较接近, 相差不到 3%; 二次浇筑

表 3 钢筋的理论锈蚀率与质量损失率、截面损失率的对比

Table 3 Comparison among theoretical corrosion rate, mass loss ratio and section loss ratio of steel bars

Specimen No.	r	Casting method	Theoretical corrosion rate/%	Mass loss ratio/%	Averaged section loss ratio/%	Maximum section loss ratio/%
1-b	0.60	Integral casting	8	7.75	7.96	8.14
2-b	0.60	Secondary casting	4	3.92	4.74	6.82
3-b	0.60	Secondary casting	6	5.94	7.14	9.57
4-b	0.60	Secondary casting	8	7.96	9.71	11.93
5-b	0.53	Integral casting	8	7.50	7.76	7.90
6-b	0.53	Secondary casting	4	3.85	4.19	5.85
7-b	0.53	Secondary casting	6	5.90	6.57	8.44
8-b	0.53	Secondary casting	8	7.93	9.04	10.70

试件的截面损失率的平均值与最大值均大于理论锈蚀率，最大相差幅度分别为 21.38% (试件 4-b)、70.50% (试件 2-b)。其中，二次浇筑试件 4-b 的截面损失最大，其平均与最大截面损失率分别为 9.71% 与 11.93%，相比理论锈蚀率 8%，相差幅度分别达 21.38% 与 49.13%。这主要是因为截面损失率评价的是钢筋全长的直径损失情况。通常最大截面损失位于新老混凝土结合面处，此时该处的钢筋直径损失最大。

由于新老混凝土界面的存在加速了钢筋的锈蚀，二次浇筑试件的钢筋质量损失率大于整体浇筑试件，但两者之间差异不大，仅相差 2.71% (试件 4-b 与 1-b 对比) 与 5.7% (试件 8-b 与 5-b 对比)；但以截面损失率平均值和最大值表征的钢筋锈蚀程度却差异较大，两者之间相差幅度介于 16.49%~46.56% 之间。

2.2.3 锈蚀钢筋的力学性能 对锈蚀后的钢筋进行力学性能拉伸试验，发现整体浇筑试件内的钢

筋，断口位置发生在钢筋中间；二次浇筑试件内的钢筋，其断口发生在新老混凝土结合面处。表 4 给出了不同试件锈后钢筋的屈服强度与极限强度实测值，并与未锈蚀钢筋的力学性能进行对比。可以看出，由于新老混凝土结合面处钢筋截面损失严重，二次浇筑试件的锈后钢筋力学性能，相比整体浇筑试件，呈现出明显下降。其次，整体浇筑试件 1-b 与 5-b，在理论锈蚀率达到 8% 时，锈后钢筋的屈服强度和极限强度，相较未锈蚀钢筋，均分别下降约 12% 和 15%，这表明混凝土强度的变化对整体浇筑试件钢筋力学性能的影响可以忽略。至于二次浇筑试件，表 4 中的数据表明，当理论锈蚀率为 4% 和 8% 时，采用水灰比为 0.53 的混凝土，相比采用水灰比为 0.60 的混凝土，混凝土强度的提高能有效降低锈后钢筋的屈服强度和极限强度损失。这是因为锈后钢筋的力学性能很大程度上取决于结合面处钢筋的锈蚀程度，而混凝土强度是影响结合面处粘结程度的一个重要影响因素。

表 4 锈后钢筋的力学性能
Table 4 Mechanical properties of corroded steel bars

Specimen No.	r	Casting method	Ultimate strength/MPa	Ultimate strength reduction ratio/%	Yield strength/MPa	Yield strength reduction ratio/%
1-b	0.60	Integral casting	394	15.27	274	12.74
2-b	0.60	Secondary casting	443	4.73	299	4.78
3-b	0.60	Secondary casting	388	16.56	264	15.92
4-b	0.60	Secondary casting	369	20.65	246	21.66
5-b	0.53	Integral casting	395	15.05	276	12.10
6-b	0.53	Secondary casting	450	3.23	304	3.18
7-b	0.53	Secondary casting	393	15.48	265	15.61
8-b	0.53	Secondary casting	375	19.35	269	14.33

3 结论

1) 通电加速锈蚀过程中，整体浇筑试件的表面只产生顺筋纵向裂缝，而二次浇筑试件首先在新老混凝土结合面处产生横向裂缝，然后才产生纵向顺筋裂缝，且纵向裂缝总是先出现在新混凝土表面，但纵向裂缝的平均宽度远小于整体浇筑试件。

2) 整体浇筑试件钢筋的通电加速锈蚀为均匀锈蚀；而二次浇筑试件中的钢筋呈现出不均匀锈蚀，在新老混凝土结合面处有明显的截面损失。增大混凝土强度，能有效降低二次浇筑试件中钢筋的最大截面损失率，但对整体浇筑试件影响较小。

3) 整体浇筑试件以质量损失率、截面损失率

来衡量钢筋的实际锈蚀率时，均与理论锈蚀率较为接近，三者差异不大；但二次浇筑试件因发生不均匀锈蚀，结合面处的钢筋直径损失较大，采用截面损失率更能有效评价钢筋的锈蚀程度。

4) 整体浇筑试件的锈后钢筋断口位置发生在钢筋中间；二次浇筑试件的锈后钢筋，其断口发生在新老混凝土结合面处。混凝土强度的变化对整体浇筑试件内锈后钢筋力学性能的影响可以忽略，但对二次浇筑试件的影响较大。

参考文献:

- [1] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(4): 371–380, 403.
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. J Zhejiang Univ (Eng Sci) (in Chinese), 2002, 36(4): 371–380, 403.

- [2] 金伟良, 王晓舟. 基于锈胀开裂路径的混凝土构件耐久性性能概率预测模型及应用[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 95–104.
JIN Weiliang, WANG Xiaozhou. J Build Struct (in Chinese), 2011, 32(1): 95–104.
- [3] 王雪松, 金贤玉, 金南国, 等. 荷载作用下开裂钢筋混凝土梁锈胀开裂模式及锈蚀分布研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 4(11): 151–157.
WANG Xuesong, JIN Xianyu, JIN Nanguo, et al. J Build Struct (in Chinese), 2013, 4(11): 151–157.
- [4] DU X L, JIN L. Meso-scale numerical investigation on cracking of cover concrete induced by corrosion of reinforcing steel[J]. Eng Failure Anal, 2014(39): 21–33.
- [5] ZHANG J H, LING X Z, GUAN Z G. Finite element modeling of concrete cover crack propagation due to non-uniform corrosion of reinforcement[J]. Constr Build Mater, 2017(132): 487–499.
- [6] WANG X G, SONG X W, ZHANG M P, et al. Experimental comparison of corrosion unevenness and expansive cracking between accelerated corrosion methods used in laboratory research[J]. Constr Build Mater, 2017(153): 36–43.
- [7] ZHANG Y L, SU R K L. Concrete cover delamination model for non-uniform corrosion of reinforcements[J]. Constr Build Mater, 2019(223): 329–340.
- [8] 李平先, 赵国藩, 张雷顺. 新老混凝土粘结面的抗冻融劈拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 20–25.
LI Pingxian, ZHAO Guofan, ZHANG Leishun. Chin Civ Eng J (in Chinese), 2006, 39(4): 20–25.
- [9] 高丹盈, 程红强, 朱海堂. 钢纤维混凝土与老混凝土劈拉粘结强度的研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 505–509.
GAO Danying, CHENG Hongqiang, ZHU Haitang. J Build Mater (in Chinese), 2007, 10(5): 505–509.
- [10] 肖成志, 田稳冬, 刘波, 等. 设置界面构造锚筋的新老混凝土粘结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 75–81.
XIAO Chengzhi, TIAN Wenling, LIU Bo, et al. J Build Struct (in Chinese), 2011, 32(1): 75–81.
- [11] SANTOS P M D, JULIO E N B S, et al. Factors affecting bond between new and old concrete[J]. ACI Mater J, 2011, 108(4): 449–456.
- [12] HE Y, ZHANG X, HOOTON R D, et al. Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding[J]. Constr Build Mater, 2017(151): 582–590.
- [13] LIU J, FANG J X, CHEN J J, et al. Evaluation of design provisions for interface shear transfer between concretes cast at different times[J]. J Bridge Eng, 2019, 24(6): 06019002.
- [14] ZHANG X H, ZHANG S, LUO Y M, et al. Effects of interface orientations on bond strength between old conventional concrete and new self-consolidating concrete[J]. ACI Struct J, 2020, 117(5): 191–201.
- [15] RASHID K, AHMAD M, UEDA T, et al. Experimental investigation of the bond strength between new to old concrete using different adhesive layers[J]. Constr Build Mater, 2020(249): 118798.
- [16] 李国平, 胡皓, 任才, 等. 桥梁混凝土结构接缝的耐久性能[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 98–103.
LI Guoping, HU Hao, REN Cai, et al. Chin Civ Eng J (in Chinese), 2018, 51(7): 98–103.
- [17] LI G P, HU H, REN C. Resistance of segmental joints to chloride ions[J]. ACI Mater J, 2016, 113(4): 471–481.
- [18] LIU J, HUANG H, MA Z J, et al. Effect of shear reinforcement corrosion on interface shear transfer between concretes cast at different times[J]. Eng Struct, 2021, 232(6): 111872.
- [19] 干伟忠, 金伟良, 高明赞. 混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 41–47.
GAN Weizhong, JIN Weiliang, GAO Mingzan. J Build Struct (in Chinese), 2011, 32(2): 41–47.
- [20] GB/T 16545–2015. 金属和合金的腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
GB/T 16545–2015. Corrosion of metals and alloys-Removal of corrosion products from corrosion test specimens[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.