

文章编号: 1001-4888(2018)04-0577-06

海水干湿作用下带初始裂缝 RC 梁 钢筋与混凝土粘结试验^{*}

焦俊婷¹, 叶英华², 陈勋¹, 严凌静¹

(1. 厦门理工学院 土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024; 2. 北京航空航天大学 机场与道路工程系, 北京 100091)

摘要: 钢筋与混凝土之间粘结是影响钢筋混凝土结构安全性与耐久性的关键因素之一。本文针对海水干湿环境中带预制裂缝钢筋与混凝土的粘结滑移性能进行研究。在实验室内模拟了沿海地区海水干湿循环环境, 制作了带有不同初始横向裂缝宽度 W 和不同混凝土强度 C 的铰梁, 并经海水浸泡 180d 干湿循环, 研究了钢筋与混凝土之间的粘结退化规律。结果表明: (1) 钢筋与混凝土之间的极限粘结应力随 W 增加而降低。混凝土强度分别为 C25、C35 时, $W=0.2\text{mm}$ 试件的极限粘结应力较无裂缝试件的极限粘结应力分别降低了 14.94%、15.92%。(2) 极限粘结应力随混凝土强度的提高而增大, 当初始横向裂缝宽度相同时, 混凝土强度 C35 试件的极限粘结应力比 C25 试件的大 11.5% 左右。(3) 峰值滑移随混凝土强度增加而减小。

关键词: 钢筋混凝土; 初始裂缝; 海水侵蚀; 粘结性能; 混凝土强度

中图分类号: TU528.571

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-042

0 引言

钢筋混凝土(简称 RC)结构在服役过程中会受环境作用,同时还伴有裂缝存在。沿海地区 RC 结构遭受海水侵蚀,由于裂缝存在,使引起材料劣化的氯离子、氧气、水易渗入混凝土,钢筋较早发生锈蚀。钢筋锈蚀引起钢筋与混凝土之间的化学胶着力破坏和摩擦力减小,降低变形钢筋横肋与混凝土之间的机械咬合力,导致钢筋与混凝土粘结性能退化^[1,2],从而降低混凝土结构的安全和耐久性。研究钢筋混凝土结构在服役过程中,受海水侵蚀和裂缝共同存在时钢筋与混凝土的粘结性能具有实际工程意义。

国内外现有研究主要集中在电化学加速钢筋锈蚀后钢筋与混凝土粘结性能的退化和本构关系方面^[3-8]。Fang 等^[3]用拔出试验研究了电化学加速不同锈蚀程度的约束、无约束光面或变形钢筋与混凝土的粘结强度、相对滑移。Auyeung 等^[4]试验研究了电化学加速不同程度钢筋锈蚀后,钢筋锈蚀损失质量小于 1% 时钢筋与混凝土粘结增强,而钢筋锈蚀损失质量大于 1% 时钢筋与混凝土粘结降低。何世钦等^[5]用梁试件试验研究了在盐水或冻融环境下电化学加速锈蚀后的钢筋与混凝土粘结性能,以及相应退化模型。徐港等^[6]用配箍筋梁试件试验研究了电化学加速锈蚀钢筋与混凝土的粘结性能。王磊等^[7]用中心拔出试验法研究了纵筋锈胀开裂后钢筋与混凝土的粘结性能。Simona 等^[8]使用拔出试验研究了电化学加速不同锈蚀程度钢筋与混凝土的粘结强度,钢筋锈蚀程度较低时粘结强度增加,而钢筋锈蚀程度较大时粘结强度降低,并给出了钢筋与混凝土粘结滑移退化本够模型。安新正等^[9]用劈裂和中心拔出试验法研究了 100% 再生粗骨料取代天然碎石制成的再生混凝土,在冻融循环后钢筋与混凝土

^{*} 收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478404, 51578031); 福建省青年创新基金(2016J05141)

通讯作者: 焦俊婷(1968—), 博士(后), 教授, 主要从事钢筋混凝土结构及其耐久性研究。Email: jtjiao@xmut.edu.cn

土的粘结滑移性能。

现有研究工作存在一些不足:(1)电化学腐蚀钢筋为均匀锈蚀,而实际构件腐蚀一般为点蚀。(2)混凝土构件一般带裂缝工作,关于带裂缝构件的钢筋混凝土滑移研究匮乏^[10,11]。裘杰等^[10]采用中心拔出试验得出带初始裂缝混凝土试件经过冻融循环与氯离子侵蚀后钢筋与混凝土粘结强度比无裂缝情况低。许豪文等^[11]采用中心拔出试验研究了带初始裂缝混凝土试件分别经过冻融循环与氯离子侵蚀、大气环境腐蚀后,钢筋与混凝土粘结强度受裂缝宽度的影响情况。鉴于此,本文采用与实际构件受力状态符合较好的梁试验法,模拟沿海地区带初始裂缝 RC 结构在海水浸泡干湿循环下钢筋与混凝土的粘结退化性能。试验研究了带有不同初始裂缝宽度 RC 梁经海水浸泡干湿循环 180d 后,钢筋与混凝土粘结的退化规律,为沿海地区混凝土结构设计和耐久性设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试件材料

水泥采用中国建筑材料科学研究院的普通硅酸盐水泥,强度等级 42.5;粗骨料采用厦门产粒径 6~14mm 的玄武岩碎石;细骨料采用厦门市石料厂产的中砂,细度模数 2.6,Ⅱ区级配合格;水用自来水。

表 1 材料力学性能

Tab. 1 Materials properties of concrete and steel

材料	配合比 水:水泥:砂:石子	f_{cu}/MPa	f_y/MPa
C25	0.60:1:2.15:3.50	38.16	—
C35	0.47:1:3.10:1.21	46.60	—
钢筋	—	—	492.30

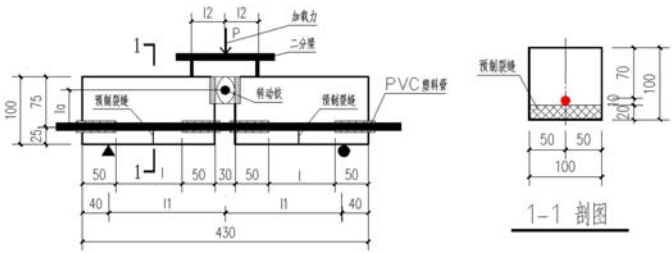


图 1 试件尺寸及其受力示意图(单位:mm)

Fig. 1 Specimen dimension and its force diagram (unit: mm)

1.2 试件设计

试件设计了 C25 和 C35 两种混凝土。钢筋用 HRB335 级螺纹钢,直径为 10mm,材料力学性能见表 1。钢筋与混凝土粘结试验用无箍筋铰梁,试件尺寸为 100mm×100mm×430mm(如图 1 所示),钢筋与混凝土粘结长度 $l=10d$ (d 为钢筋直径),在钢筋与混凝土粘结段中间预制不同宽度横向裂缝,无粘结部分用 PVC 塑料管包裹。试件混凝土强度和初始裂缝宽度不同,事件数量共 8 个,试件编号见表 2。

表 2 试件编号、混凝土强度、裂缝宽度、破坏形式及粘结强度

Tab. 2 Test specimen number, concrete strength, crack width, failure, and bond stress

试件编号	混凝土强度	W/mm	$P_{\max}/\text{kN}$	破坏形式	l_1/mm	l_2/mm	l_a/mm	l/mm	δ_m/mm	$\tau_{\max}/\text{MPa}$
1-W00	C25	0.00	34.26	贯通劈裂	175	47	52	100	0.70	13.42
1-W05	C25	0.07	39.6	局部劈裂	175	47	57	108	0.54	13.10
1-W10	C25	0.12	35.41	局部劈裂	175	47	57	110	0.58	11.51
1-W20	C25	0.19	38.67	局部劈裂	175	47	60	115	0.63	11.42
2-W00	C35	0.00	45.3	局部劈裂	175	45	55	110	0.62	15.49
2-W05	C35	0.06	43.56	局部劈裂	175	50	54	108	0.51	14.86
2-W10	C35	0.11	44.49	局部劈裂	175	50	57	115	0.54	13.50
2-W20	C35	0.20	35.75	局部劈裂	175	50	52	105	0.57	13.03

注: $P_{\max}$ 表示外加力 P 的最大值; δ_m 表示在 $P_{\max}$ 时钢筋与混凝土的相对滑移量,称为峰值滑移;初始裂缝宽度 W 由于制作误差,表中为实测值。

1.3 试验方案

试验过程分三个阶段。

(1) 试件制作阶段。按照文献[10—12]中预制裂缝方式,在试件浇筑时预先插入厚度 0.05mm、

0.1mm、0.2mm 间隙片,分别在混凝土初凝时间 3h、4h、5h 时将间隙片拔出,制得初始横向裂缝宽度 W (见表 2,初始裂缝宽度由于制作误差,表中为实测值)。试件养护龄期 28d (带模养护 1d,拆模后室温养护 27d)。

(2) 试件腐蚀阶段。将试件在人工海水 (在自来水中加入 3.5% NaCl 制成) 中浸泡干湿循环 180d。每个干湿循环持续 1d (24h),在人工海水浸泡 8h,之后在大气环境中静置 16h。

(3) 试件加载试验阶段。试件完成腐蚀后,先在试件表面粘贴碳纤维布^[13] (避免试件试验时由于没有箍筋发生剪切破坏)。然后在最大量程 500kN 压弯试验机上进行试验,试验加载装置示意图如图 2 所示。在梁粘贴钢板的两端面自由钢筋上固定电子位移计 (量程 0~5mm),电子位移计顶在粘贴钢板上测量钢筋自由端相对于混凝土的滑移。在加载过程中,电子位移计接入 DH3815N 静态应变仪,加载力 P 与电子位移计的位移通过电脑同步采集。试验过程以等速位移加载方式加载,加载速度为 1.0mm/min。

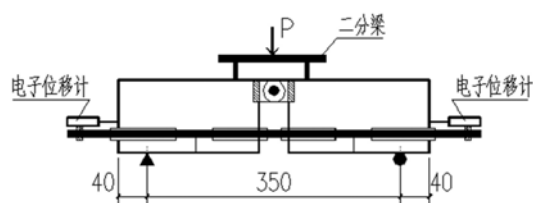


图 2 试验加载装置示意图

Fig. 2 Test loading device



图 3 试件劈裂破坏图

Fig. 3 The specimen splitting failure

分) 粘结滑移发展充分;而另外一半钢筋与混凝土粘结滑移不充分,混凝土没有出现劈裂破坏 (见图 3)。原因为试件左半部分、右半部分钢筋与混凝土粘结力不完全相等,粘结力偏小的比较容易出现滑移失稳,而一旦失稳,产生滑移的外部荷载减小,无法提供更大力使另一半继续滑移,这与文献[6]中的试验现象类似。(3) 试验完成后,发现所有混凝土劈裂试件裂缝最大处位于近梁铰端的梁底表面 (见图 3)。

3 试验结果与分析

3.1 粘结—滑移曲线

由测得数据可计算钢筋与混凝土之间平均粘结应力 τ ^[5]:

$$\tau = \frac{P(l_1 - l_2)/(2l_a)}{\pi dl} \quad (1)$$

式中, P 、 l 、 l_1 、 l_2 和 l_a 等符号含义如图 1 所示,其值见表 2。

根据测得的相对滑移 δ 以及计算的平均粘结应力 τ ,画出试件粘结应力—相对滑移 (τ — δ) 曲线,如图 4 所示 (说明:图 4 为试件中粘结滑移发展充分部分的 τ — δ 曲线)。图 4(a) 和图 4(b) 分别为 C25、

2 试验现象

2.1 试件破坏形态

试件破坏形态为混凝土贯穿劈裂和部分劈裂破坏。贯穿劈裂破坏指劈裂裂缝贯穿试件左半部分或右半部分,如图 3(a) 所示;部分劈裂破坏为仅在试件左半部分或右半部分的近铰端面至初始横向裂缝之间产生劈裂裂缝,如图 3(b) 所示,或仅在试件左半部分或右半部分两端面之间产生部分劈裂裂缝如图 3(c) 所示。

2.2 试验现象

在试验过程中混凝土劈裂破坏形态十分相近,(1) 当接近承载力峰值时,增加少许荷载,试件发出嘭的一声响,钢筋与混凝土粘结滑移失稳,荷载快速下降。(2) 试件左半部分和右半部分的粘结滑移不相等,只有左半部分 (或右半部分)

C35 试件的 $\tau-\delta$ 曲线。从图 4 可以看出,试件 $\tau-\delta$ 曲线破坏形态相似。当接近承载力峰值时,增加少量 τ 则试件滑移失稳, τ 快速下降,试件失稳破坏。

3.2 极限粘结应力

极限粘结应力 $\tau_{\max}$ 表示当外荷载 P 达到最大值时计算得到的平均粘结应力,其值见表 2。

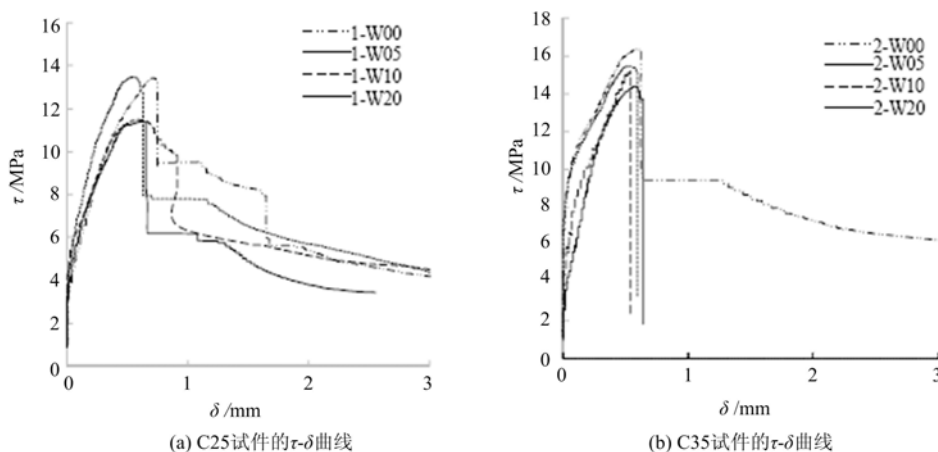


图 4 试件的 $\tau-\delta$ 曲线

Fig. 4 Specimen $\tau-\delta$ curves

3.3 初始裂缝宽度对极限粘结应力的影响

图 5 给出了 $\tau_{\max}$ 与 W 的关系。由图 5 可以看出,试件的 $\tau_{\max}$ 随着 W 的增加而下降。混凝土强度分别为 C25 时, $W=0.05\text{mm}$ 、 0.1mm 、 0.2mm 试件的 $\tau_{\max}$ 较无裂缝试件的 $\tau_{\max}$ 分别降低了 2.36%、14.28%、14.94%。混凝土强度分别为 C35 时, $W=0.05\text{mm}$ 、 0.1mm 、 0.2mm 试件的 $\tau_{\max}$ 较无裂缝试件的 $\tau_{\max}$ 分别降低了 4.08%、12.84%、15.92%。对于 C25、C35 混凝土,当 $W=0.05\text{mm}$ 时,试件的 $\tau_{\max}$ 较无裂缝试件的 $\tau_{\max}$ 降低幅度低于 5.0%;而当 $W=0.1\text{mm}$ 、 0.2mm 时,试件的 $\tau_{\max}$ 较无裂缝试件的 $\tau_{\max}$ 降低幅度超过 12.0%。可见当初始横向裂缝宽度较大($\geq 0.1\text{mm}$)时,裂缝宽度对钢筋与混凝土粘结的 $\tau_{\max}$ 影响较明显。

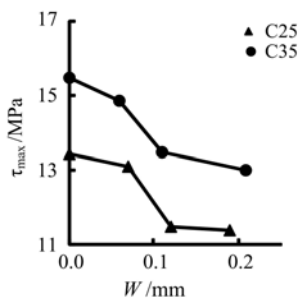


图 5 W 对 $\tau_{\max}$ 的影响

Fig. 5 Effect on $\tau_{\max}$ from W

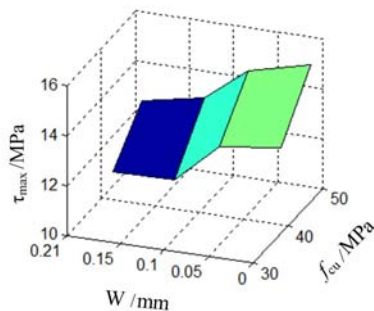


图 6 混凝土强度对 $\tau_{\max}$ 的影响

Fig. 6 Effect on $\tau_{\max}$ from concrete strength

3.4 混凝土强度对极限粘结应力的影响

表 3 和图 6 给出了混凝土强度对极限粘结应力的影响趋势。表 3 中数值为试件的 $\tau_{\max}$ 与其参照值的百分比,其中参照值为 C25 的同裂缝宽度试件的 $\tau_{\max}$ 值。

由表 3 和图 6 可以看出,试件的 $\tau_{\max}$ 随着混凝土强度增大而增大。相同初始横向裂缝宽度试件,混凝土强度 C35 试件的 $\tau_{\max}$ 比 C25 试件的大 11.5% 左右。因为混凝土强度越大,混凝土对钢筋的握裹力越强,即钢筋与混凝土的粘结力越大。

表 3 混凝土强度对 $\tau_{\max}$ 的影响 /%

Tab. 3 Effect on $\tau_{\max}$ from concrete strength /%

混凝土 强度	W /mm			
	0.00	* 0.07	* 0.11	* 0.20
C25	100	100	100	100
C35	115	113	117	114

注：“*”表示实测预制裂缝宽度“约为”的含义，具体实测预制裂缝宽度见表 2。

表 4 混凝土强度对 δ_m 的影响 /%

Tab. 4 Effect on δ_m from concrete strength /%

混凝土 强度	W /mm			
	0.00	* 0.07	* 0.11	* 0.20
C25	100	100	100	100
C35	89	94	93	90

注：“*”表示实测预制裂缝宽度“约为”的含义，具体实测预制裂缝宽度见表 2。

3.5 混凝土强度对峰值滑移的影响

表 4 给出了 δ_m 与混凝土强度 f_{cu} 的关系。表 4 中数值为试件的 δ_m 与其参照值的百分比，其中参照值为 C25 的同裂缝宽度试件的 δ_m 值。

由表 4 可知，试件的 δ_m 随着混凝土强度增加而下降。相同初始横向裂缝宽度试件，初始横向裂缝宽度依次为 0.0mm、* 0.07mm、* 0.11mm、* 0.20mm，混凝土强度 C35 试件的 δ_m 比 C25 试件的 δ_m 降低幅度依次为 11.0%、6.0%、7.0%、10.0%。原因是混凝土强度越大，混凝土对钢筋的握裹力越强，即钢筋与混凝土的粘结力越大，使得其相对滑移减小。

4 结论

本文通过铰梁试验研究了经历海水浸泡 180d 干湿循环与初始裂缝共同作用下钢筋与混凝土的粘结退化规律。分析了初始裂缝、混凝土强度对钢筋与混凝土粘结退化规律的影响，得出如下主要结论：

(1) 钢筋与混凝土之间的极限粘结应力随初始横向裂缝宽度增加而降低。对于 C25、C35 混凝土，当初始横向裂缝宽度较小 ($<0.1\text{mm}$) 时，试件的 $\tau_{\max}$ 较无裂缝试件的 $\tau_{\max}$ 降幅不大 ($<5.0\%$)；当初始横向裂缝宽度较大 ($\geq 0.1\text{mm}$) 时，试件的 $\tau_{\max}$ 较无裂缝试件的 $\tau_{\max}$ 降幅超过 12.0%。表明初始横向裂缝宽度对钢筋与混凝土粘结的 $\tau_{\max}$ 影响明显。

(2) 极限粘结应力随着混凝土强度的提高而增大。当初始横向裂缝宽度相同时，混凝土强度 C35 试件的 $\tau_{\max}$ 比 C25 的 $\tau_{\max}$ 高 11.5% 左右。

(3) 峰值滑移随着混凝土强度增加而下降。当初始横向裂缝宽度相同时，混凝土强度 C35 试件的 δ_m 比 C25 试件的 δ_m 降低 6.0%~11.0%。

参考文献：

- [1] 王传志, 腾智明. 钢筋混凝土结构理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 331—336 (WANG Chuanzhi, TENG Zhiming. Reinforced concrete structure theory[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1985: 331—336 (in Chinese))
- [2] 张俊, 居贤春, 公成旭. 混凝土中的裂缝对氯盐侵蚀作用的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(6): 720—724 (ZHANG Jun, JU Xianchun, GONG Chengxu. Effect of cracks in concrete on chloride penetration[J]. Journal of Harbin in Engineering University, 2010, 31(6): 720—724 (in Chinese))
- [3] Fang C, Lundgren K, Chen L, et al. Corrosion influence on bond in reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): 2159—2167.
- [4] Auyeung Y B, Balaguru P, Chung L. Bond behavior of corroded reinforcement bars[J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(2): 214—221.
- [5] 何世钦, 贡金鑫. 钢筋混凝土梁中锈蚀钢筋粘结性能的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2168—2170 (HE Shiqin, GONG Jinxin. Experimental studies on bond characteristics of corroded steel bar in reinforced concrete beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2168—2170 (in Chinese))
- [6] 徐港, 卫军, 王青. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的梁式试验[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 549—556 (XU Gang, WEI Jun, WANG Qing. Beam test study on bond behavior of corroded reinforcing bar in concrete

- [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(4):549—556 (in Chinese))
- [7] 王磊, 马亚飞, 张建仁, 等. 锈胀开裂后变形钢与混凝土粘结性能实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(2):151—157 (WANG Lei, MA Yafei, ZHANG Jianren, et al. Experimental research on bond property between corroded deformed reinforcement and concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(2): 151—157 (in Chinese))
- [8] Simona C, Stefania I, Zila R. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete[J]. Materials and Structures, 2016, 49(1-2):537—551.
- [9] 安新正, 易成, 王小学, 等. 冻融后钢筋再生混凝土粘结性能研究[J]. 实验力学, 2013, 28(2):227—234 (AN Xinzhen, YI Cheng, WANG Xiaoxue, et al. Study of bond performance between steel bar and recycled aggregate concrete subjected to freeze-thaw cycling[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2): 227—234 (in Chinese))
- [10] 裴杰, 刁波, 沈宇, 等. 冻融与初始裂缝对钢筋混凝土黏结强度的影响[J]. 混凝土, 2014(7):13—19 (XI Jie, DIAO Bo, SHEN Bei, et al. Effect of freeze-thaw and initial cracks on bond strengths between reinforcement bars and concrete[J]. Concrete, 2014(7):13—19 (in Chinese))
- [11] 许豪文, 刁波, 沈宇, 等. 裂缝宽度及环境对钢筋混凝土粘结性能的影响[C]. 第 24 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册), 2015: 434—438 (XU Haowen, DIAO Bo, SHEN Bei, et al. Effect of cracks width and environment on bond behavior between reinforcement bars and concrete[C]. Proceedings of the Twenty-fourth National Conference on Structural Engineering (Part I), 2015:434—438 (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] CECS146:2003. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2007 (CECS146:2003. Technical specification for concrete structures strengthened with carbon fiber sheets[S]. Beijing: China Planning Press, 2007 (in Chinese))
- [14] GB/T50476—2008. 混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008 (GB/T50476—2008. Code for durability design of concrete structures[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008 (in Chinese))

Experiment of steel-concrete bonding properties of RC beam with initial crack and in seawater erosion environment

JIAO Jun-ting¹, YE Ying-hua², CHEN Xun¹, YAN Ling-jing¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Department of Airport and Road Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The bond between steel bar and concrete is one of the key factors affecting the safety and durability of reinforced concrete structure. In this paper, the bond slip behavior between steel bar and concrete of RC beam with pre-fabricated cracks and in dry and wet seawater environment is studied. The coastal area sea water circulation environment was simulated in laboratory. Hinged beams with different initial transverse crack widths W and different concrete strengths C were fabricated, which were subjected to 180 day sea water wet and dry cyclic erosion treatment. Then the bond degradation behavior between steel bar and concrete was studied. Results show that (1) the ultimate bond stress between steel bar and concrete decreases along with the increase of W . When concrete strengths are C25 and C35 respectively and $W=0.2\text{mm}$, the ultimate bond stresses of specimens were reduced by 14.94% and 15.92% respectively compared with that of specimens without initial crack. (2) The ultimate bond stress increases along the increase of concrete strength. When the initial transverse crack widths are the same, the ultimate bond stress of concrete strength C35 is higher than that of C25 by about 11.5%. (3) The peak value slip decreases with the increase of concrete strength.

Keywords: reinforced concrete; initial crack; sea water erosion; bonding property; concrete strength