

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.01.007



再生混凝土与锈蚀钢筋间的粘结性能试验研究

王晨霞¹, 王宇¹, 李敬红², 宋波³, 曹芙波¹

(1. 内蒙古科技大学 建筑与土木工程学院 内蒙古 包头 014010; 2. 中国二冶集团有限公司, 内蒙古 包头 014030; 3. 包头市户外广告和牌匾设置管理服务处 内蒙古 包头 014010)

摘要:为了探究再生混凝土结构的耐久性能,对5组不同钢筋锈蚀率(0~9%)的再生混凝土梁式试件进行加载试验。分析不同钢筋锈蚀率对再生混凝土梁式试件的钢筋应变、局部粘结应力、粘结-滑移和极限粘结应力的影响。结果表明:钢筋锈蚀率大于3%时试件底部开始有细微锈胀裂缝出现;锈蚀率越大,荷载作用下钢筋应变沿锚固位置的变化曲线越平缓;局部粘结应力沿锚固段呈现出双峰分布,峰值主要集中在加载端和自由端附近;加载端附近位置滑移现象最先发生,远离加载端滑移现象延后;随着钢筋锈蚀率的增大,极限粘结强度先增加后降低,极限荷载下的滑移值增大。

关键词:再生混凝土;梁式试件;锈蚀钢筋;粘结-滑移

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)01-0046-08

Experimental analysis on bond behavior between recycled concrete and corroded steel bars

Wang Chenxia¹, Wang Yu¹, Li Jinghong², Song Bo², Cao Fubo¹

(1. Inner Mongolia University of Science and Technology Institute of Architecture and Civil Engineering, Baotou 014010, Inner Mongolia, P. R. China; 2. China Second Metallurgy Group Corporation Limited, Baotou 014030, Inner Mongolia, P. R. China; 3. Baotou outdoor advertising and plaque setting management service, Baotou 014010, Inner Mongolia, P. R. China)

Abstract: We carried out load tests on five groups of recycled concrete beam specimens of different corrosion rates to explore the recycled concrete structure durability, and analyzed the influence of different corrosion rates on steel bar strain, local bond stress, load-slip and the ultimate bond stress of recycled concrete beam specimens. The results show that lightly corrosive cracks appeared in the bottom of the beam when rebar corrosion rate was greater than 3%. The strain curve was flat when the corrosion rate of reinforcing steel bar was greater with the anchor position under the breaking load. The distribution of local bond stress along the anchor section was bimodal distribution, and peak mainly concentrated near the loading end and

收稿日期:2015-07-30

基金项目:内蒙古自然科学基金(2014MS0551、2015MS0552);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY159);包头科技计划项目(2014X1009)

作者简介:王晨霞(1977-),女,博士,主要从事再生混凝土耐久性研究,(E-mail) wangchenxia77@139.com.
曹芙波(通信作者),男,副教授,(E-mail) caofubo@139.com。

Received: 2015-07-30

Foundation item: Natural Science Foundation of Inner Mongolia (No. 2014MS0551, 2015MS0552); Scientific Research Project for Higher University of Inner Mongolia Autonomous Region (No. NJZY159); Science and Technology Plan Projects of Baotou (No. 2014X1009)

Author brief: Wang Chenxia (1977-), PhD candidate, main research interest: recycled concrete durability research, (E-mail) wangchenxia77@139.com.

Cao Fubo (corresponding author), associate professor, (E-mail) caofubo@139.com.

the free end. The slippage phenomenon happened first on the position near the loading end, and delayed away from the loading end. With the increase of rebar corrosion rate, ultimate bond strength increased first and then reduced and slip value increased under the ultimate load.

Keywords: recycled concrete; beam specimens; corroded steel bars; load-slip

近 50 年以来,人们对再生混凝土的认识已经从陌生逐渐发展到熟悉,尤其是在发达国家,再生混凝土的研究已经从非结构构件层面转向结构构件层面^[1],再生混凝土已经慢慢扩大了在实际工程中的应用^[2-3]。同时也将面临着耐久性问题,其中,由于氯离子侵蚀引起钢筋锈蚀问题是导致结构粘结耐久性破坏的一个主要因素。

中国对再生混凝土的研究比发达国家起步晚。目前,主要针对再生粗骨料的物理力学性能、再生混凝土材料的耐久性能进行了研究,而关于再生混凝土结构耐久性的研究比较少。由于再生粗骨料在形状、材料性能等方面不同于天然粗骨料以及再生混凝土特殊的界面结构^[4],使得我们不能完全按照普通混凝土技术进行设计、施工。学者们已有不少关于再生混凝土与钢筋间的粘结性能的研究^[5-11],而锈蚀钢筋与再生混凝土的粘结性能的研究则不多见^[12-14]。已有的研究多采用简单的中心拔出试验进行宏观的研究,拉拔粘结试验中,没有剪力和弯矩的作用,与实际工程中结构构件的受力状态不相符。考虑到实际工程中受弯构件的受力特点,本文采用半梁式粘结试验,同时,通过对钢筋进行开槽处理、内贴应变片的方法得出锚固区内各点的钢筋应变进而分析得出锈蚀钢筋与再生混凝土粘结滑移性能,可为今后钢筋再生混凝土结构在工程设计、施工以及结构耐久性等研究提供参考依据。

1 实验方案

1.1 材料性能

水泥为 P. O42.5 普通硅酸盐水泥;砂为天然河砂,属中砂;水为自来水;减水剂为聚羧酸减水剂;再生粗骨料由包头某储煤场地坪拆除后的废弃混凝土块经过人工、机械破碎并严格按照《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)要求筛分成粒径为 5~31.5 mm 的再生粗骨料。再生粗骨料性能指标见表 1,再生混凝土的配合比及实测强度见表 2。试验用钢筋性能指标见表 3。挑选废旧混凝土块经人工切割出 6 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,实测废旧混凝土抗压强度为 45.5 MPa。再生

混凝土 28 d 立方体抗压强度平均值为 35.5 MPa。

表 1 再生粗骨料性能指标

Table 1 Performance of recycled coarse aggregate

表观 密度/ (kg·m ⁻³)	堆积 密度/ (kg·m ⁻³)	吸水率 (24 h)/%	针片状 颗粒含 量/%	含泥 量/%	压碎 指标/%
2 455	1 277	3.3	8.9	4.55	15.5

表 2 再生混凝土配合比及强度

Table 2 Proportion and strength of recycled concrete

配合 比设 计	水胶 比	材料质量/(kg·m ⁻³)				实测 28 d 抗压强 度/MPa
		水泥	砂	再生粗 骨料	水 减水剂	
强度 等级						
C30	0.55	390	665	1 000	215 1.1	35.5

表 3 钢筋主要材性

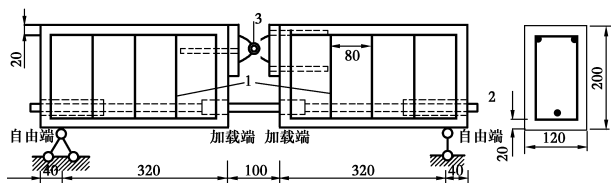
Table 3 Main material of steel

钢筋类型	直径/mm	抗拉强 度/MPa	屈服强 度/MPa	弹性模量/ (10 ⁵ MPa)
HRB400	20	564	415	2.02
HPB235	8	335	250	2.00

1.2 试件的设计和制作

试验制作了 5 组共 15 根再生粗集料取代率为 100% 的再生混凝土半梁试件(编号 RCB200(0~9))。采用电化学加速锈蚀方法,控制钢筋锈蚀率分别为 0、1%、3%、6%、9%。梁式试件尺寸为 120 mm×200 mm×820 mm,保护层厚度为 20 mm,其底部主筋为 20 mm 的 HRB400 级钢筋,锚固长度 10 d(d 为钢筋直径),箍筋布置为 Φ8@60,满足适筋梁配筋要求。梁尺寸及配筋如图 1 所示,梁 A、B 两肢用刚性铰连接,保证受力时不发生扭转变形。测试钢筋经铣床沿纵轴剖切成两半,并沿轴心进行纵向开槽,凹槽宽度为 4 mm,深度为 2 mm,钢筋合拢后,开槽剖面尺寸为 4 mm×4 mm,开槽形式及槽内应变片粘贴如图 2 所示。在贴应变片之前用细砂纸将槽底打磨光滑并用棉棒沾取丙酮擦净,粘贴应变片时将接触面气泡赶净使其与钢筋充分接触。每个

应变片的两个导线接头分别与两根直径为 0.25 mm 的漆包导线焊接,接头部位所处的钢筋槽用绝缘胶带做绝缘处理,防止应变片接头部分与钢筋接触而导致应变片电阻增大。槽内 11 片箔式应变片上下交错布置,将所有导线由钢筋尾部引出后用环氧树脂将凹槽填平,起到保护应变片和导线的作用,最后将两半钢筋合拢并在结合处点焊保证钢筋的整体性和受力均匀。锚固区以外的钢筋套有 PVC 管,管内灌入石蜡即保证了钢筋与混凝土不发生粘结和加载过程中端部混凝土挤压钢筋给粘结力测量带来误差,也防止浇筑过程中水泥砂浆浸入。



1.箍筋;2.测试钢筋;3.试验钢铰

图 1 试验梁几何尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig. 1 Size and reinforcement figure of test beam

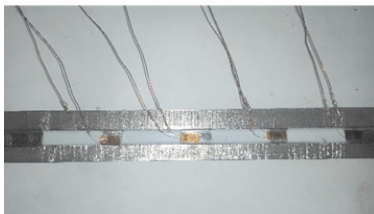


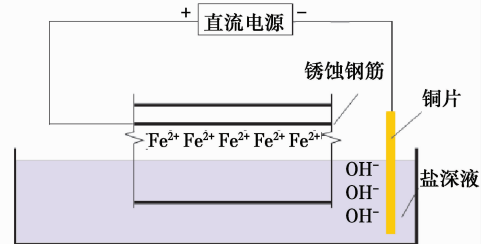
图 2 钢筋开槽及槽内应变片布置图

Fig. 2 Steel slitting and the strain gauge arrangement

1.3 测试钢筋快速锈蚀

仲伟球等^[15]研究发现:混凝土在浇筑时若不掺加氯盐,后期锈蚀率难以控制;试件在浇筑期间加入氯盐,即使在锈蚀电流强度较大的情况下,锈蚀误差一般也不会超过 10%。本试验浇筑再生混凝土期间掺入 5% 的 NaCl,目的在于增加试件内部氯离子浓度,较为精确的控制锈蚀率。试件养护完毕后,将试件放入约 5% 的 NaCl 溶液,液面不超过测试钢筋底面,试件端部外露钢筋采取绝缘措施以避免电流

强度损失。连接 HYL-A 直流稳压稳流电源进行电化学法锈蚀,装置如图 3 所示。锈蚀钢筋的电流密度取 0.02 mA/mm^2 ,通过安培表调节通过拟锈蚀钢筋需要的电流强度。锈蚀期间,定期(一般每隔 2~3 h)给试块洒水湿润,检查并调整通过钢筋的电流,确保电流稳定。在电流一定的情况下,根据法拉第定律,通过控制通电时间得到一定的钢筋锈蚀率。



(a) 原理图



(b) 实物图

图 3 钢筋快速锈蚀装置

Fig. 3 Reinforcement corrosion device

所有试件通电锈蚀完发现:锈蚀率大于 3% 的试件底面几乎都出现了沿顺筋方向的锈胀裂缝,锈胀裂缝宽度随锈蚀率的增加而变大,但箍筋的存在抑制锈胀裂缝的扩展,用混凝土裂缝检测仪检测到主裂缝宽度为 0.2~0.8 mm。加载试验完成后,取出锈蚀钢筋观察锈蚀情况发现:锚固区段内钢筋均发生不同程度的锈蚀,但锈蚀现象在钢筋表面呈现不均匀分布,靠近保护层一侧锈蚀程度较大,锈蚀率越大钢筋变形肋锈蚀越明显。每一组取一个试件,测得实际锈蚀率结果见表 4,钢筋实际锈蚀率与设计锈蚀率基本一致。

表 4 钢筋锈蚀率实测结果

Table 4 Measurements of rebar corrosion rate

编号	钢筋锈前质量/g		钢筋锈后质量/g		锈蚀失去质量/g		实际锈蚀率/g	
	A 肢	B 肢	A 肢	B 肢	A 肢	B 肢	A 肢	B 肢
RCB200-0	742.8	767.4	742.8	767.4	0	0	0	0
RCB200-1	748.5	748.0	740.2	740.5	8.2	7.4	1.1	1
RCB200-3	752.1	754.2	729.4	732.1	22.5	21.8	3	2.9
RCB200-6	761.4	753.1	717.6	708.5	43.3	44.4	5.7	5.9
RCB200-9	746.0	760.5	680.3	691.2	65.6	69.2	8.8	9.1

1.4 试件加载及数据采集

加载实验在内蒙古科技大学建筑结构实验室进行,加载设备如图 4 所示,通过手压油泵将荷载由液压千斤顶作用到分配梁顶,并将集中力传递到试验梁,两集中力作用点一端为固定铰支座,另一端滑动铰支座。采用荷载逐级加载,依据《混凝土结构试验方法标准》(GBT 50152—2012)每级荷载取 1 kN,当测试钢筋自由端有明显滑移时加载结束。钢筋应变片接 TDS-530 高速静态数据采集仪,自动采集数据。钢筋的加载端和自由端分别安装一套位移计,用于测量加载端和自由端位移,加载端、自由端的位置如图 1 所示。

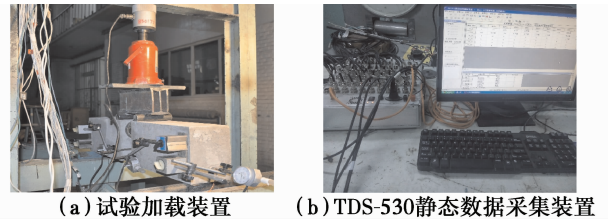


图 4 加载设备
Fig. 4 Load equipment

2 试验结果分析

2.1 测试钢筋应变分布规律

试件破坏时的极限荷载 P_U , 分别选取 $0.1P_U$ 、 $0.3P_U$ 、 $0.5P_U$ 、 $0.7P_U$ 、 $0.8P_U$ 、 $0.9P_U$ 的荷载强度下试件(破坏一肢)粘结区段钢筋应变数值变化,如图 5 所示。

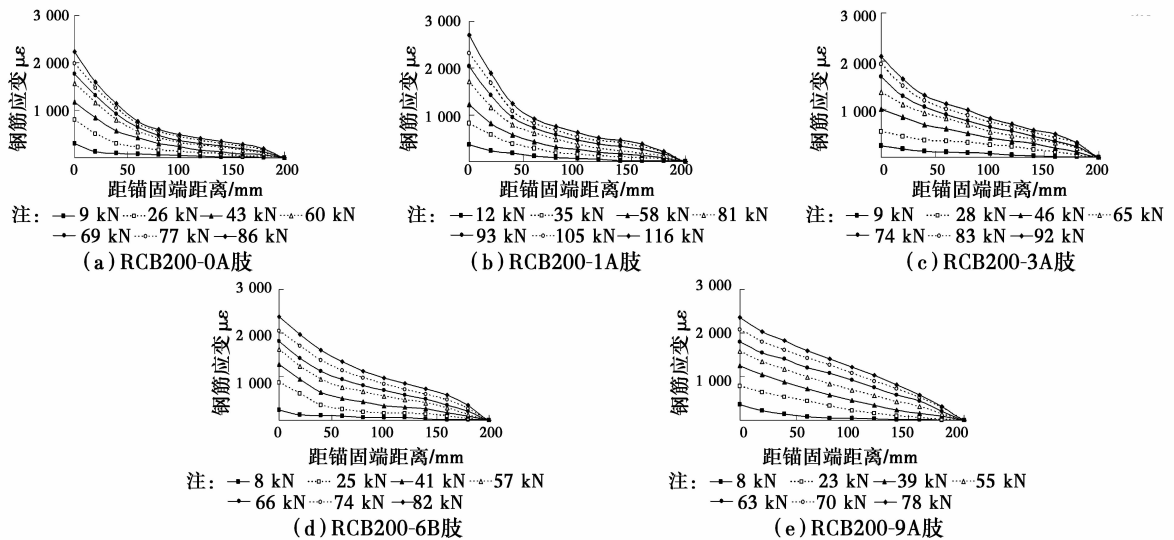


图 5 钢筋应变随锚固位置变化曲线

Fig. 5 Steel strain change with anchorage position

1) 锈蚀钢筋应变值由靠近加载端位置向自由端方向逐渐降低,总体呈现下凹趋势;荷载较小时,粘结区内钢筋应变数值均有所增加,靠近加载端位置应变值增加明显,远离加载端位置变化不大;随荷载强度增加时,粘结区内加载端附近钢筋应变与靠近自由端位置钢筋应变均有明显增大。

2) 相同荷载下,锈蚀率越小,钢筋应变随锚固位置变化曲线越陡峭;锈蚀率越大,钢筋应变随锚固位置变化曲线越平缓,即钢筋应力传递较缓慢。

2.2 局部粘结应力的研究

2.2.1 局部粘结应力的计算方法 局部粘结应力公认的理论为:再生混凝土与钢筋间的粘结作用可等效为一种剪切力作用,并非均匀分布,随锚固位置变化而不同。如若直接在再生混凝土与钢筋粘结界

面贴应变片测量应变,应变片保护难度加大且试验结果极易产生误差,同时必然会破坏此测点附近再生混凝土与钢筋的粘结作用。现阶段无法直接量测再生混凝土与钢筋界面间的剪切应力,只能通过钢筋开槽内贴应变片的方法量测钢筋应变,利用钢筋微段平衡条件计算局部粘结应力。

截取钢筋微段为隔离体,如图 6 所示。假定钢筋微段间粘结应力均匀分布,微段等效粘结应力大小为 $d\tau$,微段实际应力为 $d\sigma_s$,微段长度为 dx ,锈蚀后钢筋换算直径为 d^* ^[16],考虑钢筋开槽和锈蚀对直径造成的损耗,假定钢筋沿粘结区均匀锈蚀,可以表示成:

$$d^* = \left(\frac{m_0 + \rho_s V_v}{\rho_s} \right) - \left(\frac{m_0 - m_1}{\rho_s \times l_a} \right) \times \frac{4}{\pi} \quad (1)$$

式中： m_0 为两半钢筋锈前实测质量， g ； l 为钢筋长度； V_v 为凹槽所占体积； l_a 为钢筋与混凝土锚固段长度， mm ； m_1 为钢筋锈后实测质量； ρ_s 为钢筋密度，取 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。由钢筋微段平衡可得

$$\pi d^* \cdot dx \cdot d\tau = d\sigma_s \cdot \pi d^{*2} / 4 \quad (2)$$

微段粘结应力与实测钢筋应变关系为：

$$d\tau = \frac{d^*}{4} \cdot \frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{(\sigma_{i+1} - \sigma_i)d^*}{4l_i} = \frac{E_s d^* (\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)}{4l_i} \quad (3)$$

式中： $d\tau$ 为钢筋与混凝土界面微段局部粘结应力， MPa ； σ_{i+1} 、 σ_i 为相邻钢筋测点应力， MPa ； E_s 为钢筋弹性模量， MPa ； ϵ_{i+1} 、 ϵ_i 为相邻钢筋测点应变值， mm ； l_i 为 i 测点与 $i+1$ 测点间距， mm 。

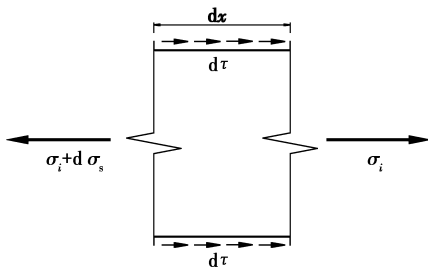


图 6 钢筋微段受力示意图

Fig. 6 Stress of the steel bar micro segment

将每级荷载作用下计算所得的局部粘结应力乘以相应区段的换算面积并进行数值累加，该值与加载端位置钢筋拉力值 P_i 相等。

$$P_i = \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot \pi d^* l_i \quad (4)$$

式(4)两边出现不等，则其差值依据各微段长度进行微调。局部粘结应力是再生混凝土与锈蚀钢筋微段界面粘结性能最直接反映。锈蚀钢筋与再生混凝土局部粘结应力分布规律可由锚固区段实测钢筋应变按照式(3)计算获得，并由式(4)进行修正。

2.2.2 不同荷载强度下局部粘结应力随锚固位置变化关系 试件(破坏一肢)锚固区段内再生混凝土与锈蚀钢筋的局部粘结应力分布如图 7 所示，可以得出：

1)加载初期，加载端附近局部粘结应力增加趋势明显，自由端附近局部粘结应力增长缓慢；荷载达到一定程度后，锚固区段内粘结应力均有增加。如图 7 (a)所示；加载试验初期，靠近加载端位置局部粘结应力峰值为 8.5 MPa，靠近自由端位置局部粘结应力值为 2.3 MPa。主要原因在于加载过程中，加载端附近粘结应力首先承受应力作用，并逐渐向自由端传递。宏观表现为初期加载过程中加载端附近钢筋应变值增长快，而自由端位置应变值变化较小。

2)局部粘结应力沿锚固段分布呈双峰分布，峰值主要集中在加载端和自由端附近，随着锈蚀率增大，局部粘结应力由加载端向自由端集中。区别在于：对于未锈蚀试件和锈蚀率较小的试件，加载端附近局部粘结应力峰值大于自由端附近局部粘结应力；对于锈蚀率达到 9%的试件，靠近自由端位置局部粘结应力峰值大于加载端附近位置局部粘结应力；锈蚀率为 6%试件，局部粘结应力在加载端与自由端峰值相近，局部粘结应力在整个锚固段分布较均匀。

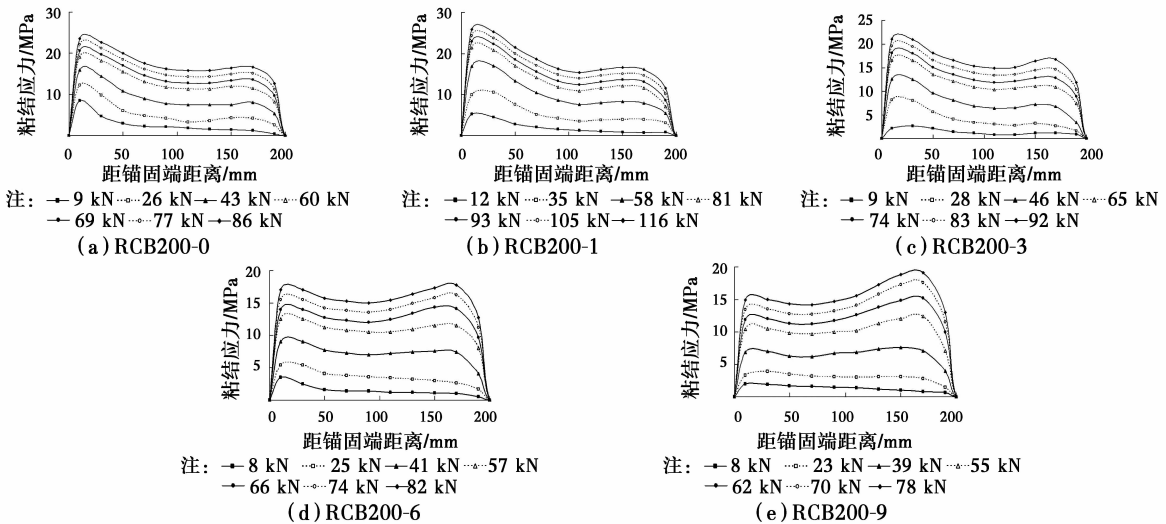


图 7 局部粘结应力随锚固位置变化规律

Fig. 7 Local bond stress along with the anchor position

2.2.3 局部粘结应力随锈蚀率的变化规律 破坏荷载下,局部粘结应力随锈蚀率变化关系曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出:

1)局部粘结应力分布在整个锚固区段。应力峰值出现在加载端和自由端端部位置。加载端附近应力分布受锈蚀率影响大,自由端附近应力分布受锈蚀率影响较小。

2)锈蚀率较小组试件,粘结应力主要集中在加载端附近;锈蚀率较大组试件,局部粘结应力向自由端发展,粘结应力峰值集中在自由端附近。主要是因为:锈蚀率较小时,再生混凝土与钢筋的胶着力虽然由于锈蚀产物的出现被破坏,但相互之间的摩擦力及机械咬合力却得到了明显的增强,导致再生混凝土梁式试件在承受跨中附近两点加载时,下部测试钢筋与再生混凝土的粘结应力主要集中在加载端附近,应力并未向自由端快速传递,仅随荷载强度的增加,向自由端发展;当锈蚀率较大时,再生混凝土与锈蚀钢筋的粘结性能发生退化,应力快速向自由端传递,造成加载端附近粘结应力峰值下降明显且向自由端集中。

3)锈蚀率为 6%时,局部粘结应力在整个锚固区段呈现较为均匀分布,应力分布曲线平缓。原因在于:6%的锈蚀量时,锚固区段内锈蚀钢筋与再生混凝土粘结应力被削弱,试件承受荷载作用,应力较快向自由端方向传递,加载端附近应力峰值有较大程度下降,自由端应力峰值有一定程度的提高,沿锚固段分布较为均匀。

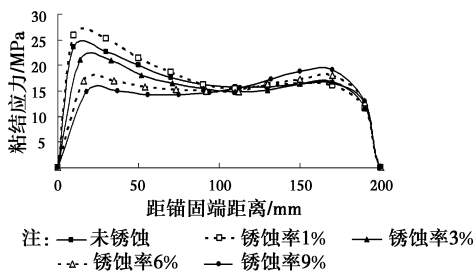


图 8 局部粘结应力随锈蚀率变化规律

Fig. 8 Local bond stress along with the corrosion rate

2.2.4 局部粘结应力-相对滑移曲线 锚固区段内各处钢筋与混凝土的位移差值为两者的相对滑移,为了准确计算相对滑移值,试验采取钢筋开槽内贴

应变片及在试件两侧混凝土外表面与钢筋应变片对应位置粘贴混凝土应变片的手段。

依据试件微段平衡方程可以得到

$$\bar{\sigma}_{ci}A_c + \sigma_{si}A_s = 0 \quad (5)$$

式中: $\bar{\sigma}_{ci}$ 为测点混凝土横截面上的平均应力; A_c 为混凝土横截面面积; σ_{si} 为*i*测点钢筋应力; A_s 为钢筋截面面积。

把混凝土横截面的应力分布简化为如图 9 所示。根据应力等效的原则,用图 9 中的梯形应力分布图来代替曲线应力分布图, σ_{ci} 为替代后界面处混凝土的应力, ϵ_{ci} 为相应的应变, σ_{ci0} 、 ϵ_{ci0} 为混凝土试件外表面的应力、应变,由混凝土应变片测得,则

$$\sigma_{ci} = 2\bar{\sigma}_{ci} - \sigma_{ci0} \quad (6)$$

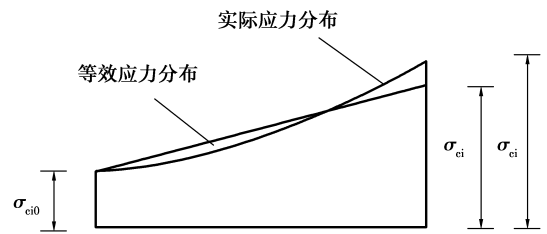


图 9 混凝土等效应力分布示意图

Fig. 9 Concrete equivalent stress distribution diagram

锚固区段内各处钢筋与混凝土的相对滑移可用式 (7) 计算。

$$S_x = S_f + \sum_i^k = 1(\Delta l_{si} - \Delta l_{ci}) \quad (7)$$

式中: S_f 钢筋自由端位移; $\Delta l_{si} = \frac{\epsilon_{si} + \epsilon_{s(i+1)}}{2} l_i$, $\Delta l_{ci} = \frac{\epsilon_{ci} + \epsilon_{c(i+1)}}{2} l_i$, ϵ_{si} 、 ϵ_{ci} 分别为各测点钢筋、混凝土应变值; Δl_{si} 、 Δl_{ci} 分别为各微段长度及微段钢筋、混凝土变形。

图 10 为局部粘结应力-相对滑移关系曲线(X 为锚固段内测点距加载端距离)。由图 10 可以看出:加载端附近位置,滑移现象最先发生,远离加载端处滑移现象延后,自由端附近测点最晚出现滑移现象。随荷载强度不断增加,应力由跨中位置向自由端传递,钢筋与再生混凝土间粘结作用逐步被破坏,滑移现象开始向自由端方向逐渐发生。随着钢筋锈蚀率的增大,极限荷载下的滑移值增大。

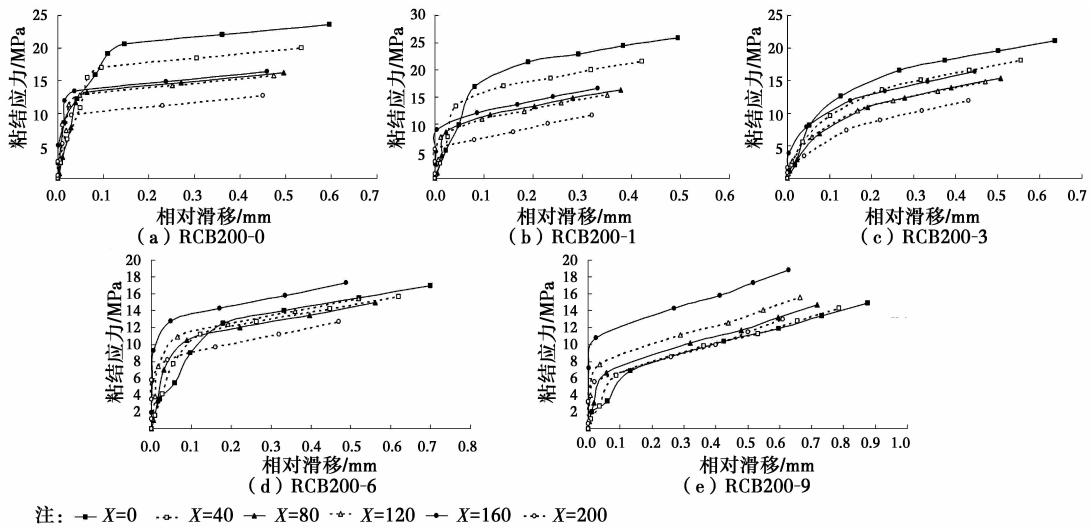


图 10 局部粘结应力-相对滑移曲线

Fig. 10 Local bond stress and slip curve

3 极限粘结应力结果分析

由极限粘结应力计算式(8)可以得出各组试件的极限粘结应力,计算结果见表 5。

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi d \cdot l_a} \quad (8)$$

式中: P_u 为极限粘结力, kN; τ_u 为极限粘结应力, MPa。

表 5 各组试件粘结力特征值

Table 5 Bond eigenvalues of each specimen

试件编号	锚固长度/m	实际锈蚀率/%		极限荷载/kN	极限粘结力/kN	极限粘结应力/MPa
		A 肢	B 肢			
RCB200-0	200	0	0	86.3	120.82	9.6
RCB200-1	200	1.1	1	100.8	141.12	11.3
RCB200-3	200	3	2.9	92.1	128.94	10.25
RCB200-6	200	5.7	5.9	82	114.8	9.14
RCB200-9	200	8.8	9.1	78.1	109.34	8.79

由表 5 可以看出:极限粘结应力随锈蚀率的增加,呈现出先增加后降低的变化趋势。锈蚀率为 1% 时,极限粘结应力达到最大,锈蚀率超过 1%,粘结应力开始降低。钢筋锈蚀削弱了钢筋与再生混凝土之间的极限粘结应力,但极限粘结应力削弱幅度随锈蚀率的增加而减小。原因在于:钢筋发生微锈蚀,再生混凝土与钢筋在粘结界面生成一层锈化产物,其相互间存在的化学胶着力虽被破坏,但锈蚀产

物的出现增加了钢筋表面的粗糙度,锈蚀产物体积微膨胀,使得混凝土对锈后钢筋的约束增强。随着锈蚀程度增加,钢筋锈蚀产物积累增多体积膨胀,混凝土保护层出现锈胀裂缝,混凝土对钢筋的约束作用降低;同时,锈蚀产物质地较疏松,造成锈蚀钢筋与再生混凝土界面的摩擦系数减小,进而导致锈后钢筋与再生混凝土间的摩擦力减小;锈蚀钢筋横向肋发生锈蚀,破坏钢筋与再生混凝土间的机械咬合力,导致钢筋与再生混凝土间的粘结性能发生衰退。

4 结论

1) 锈后钢筋应变值由靠近加载端位置向自由端方向逐渐降低,总体呈现下凹趋势;相同荷载下,锈蚀率越大,钢筋应变随锚固位置变化曲线越平缓。

2) 引入锈蚀钢筋换算直径,截取钢筋微段进行局部粘结应力分析得出:局部粘结应力沿锚固段分布呈双峰分布,峰值主要集中在靠近加载端和靠近自由端;随锈蚀率增大,局部粘结应力由加载端向自由端集中。加载端附近,滑移现象最先发生,远离加载端处滑移现象延后。

3) 随着钢筋锈蚀率的增大,极限粘结强度先增大后减小,极限荷载下的滑移值逐渐增大。

4) 梁式试验所得结论与已有的中心拔出试验结果基本一致。

参考文献:

[1] Choi W C, Yun H D. Compressive behavior of

- reinforced concrete column with recycled aggregate under uniaxial loading [J]. *Engineering Structures*, 2012, 41: 285-293.
- [2] Mori T. An application of recycled concrete aggregate concrete to structures [J]. *Concrete Journal*, 2000, 38 (6).
- [3] Topcu I B. Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(12): 1817-1823.
- [4] 陈云刚, 孙振平, 肖建庄. 再生混凝土界面结构特点及其改善措施[J]. *混凝土*, 2004, 172(2): 10-13.
Chen Y G, Sun Z P, Xiao J Z. Recycled concrete interface structure characteristics and its improvement measures [J]. *Concrete*, 2004, 172 (2): 10-13. (in Chinese)
- [5] 王大富, 黄庆丰, 施养杭. 再生混凝土黏结滑移性能的试验研究[J]. *混凝土*, 2011(6): 64-66.
Wang D F, Huang Q F, Shi Y H. Bond slip behavior research on recycled concrete [J]. *Concrete*, 2011(6): 64-66. (in Chinese)
- [6] Xiao J Z, Falkner H. Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(2): 395-401.
- [7] Ajdukiewicz A, Kliszczewicz A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2002, 24: 269-279.
- [8] 王博, 白国良, 代慧娟, 等. 再生混凝土与钢筋粘结滑移性能的试验研究及力学分析[J]. *工程力学*, 2013, 30 (10): 54-64.
Wang B, Bai G L, Dai H J, et al. Study on bond-slip performance between recycled concrete and steel and mechanical analysis [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 30(10): 54-64. (in Chinese)
- [9] 陈宗平, 徐金俊, 黄开旺, 等. 高强钢筋与再生混凝土界面黏结性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2013, 43 (11): 16-20.
Chen Z P, Xu J J, Huang K W, et al. The stick performance research between high strength steel with recycled concrete [J]. *Industrial Construction*, 2013, 43 (11): 16-20. (in Chinese)
- [10] Kim S W, Yun H D. Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete [J]. *Engineering Structures*, 2013, 48 (3): 133-143.
- [11] Butler L, West J S, Tighe S L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41 (10): 1037-1049.
- [12] 肖建庄, 雷斌. 钢筋锈蚀与再生混凝土间粘结性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011(1): 58-62.
Xiao J Z, Lei B. Experimental study on bond behavior between corroded steel bars and recycled concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2011 (1): 58-62. (in Chinese)
- [13] 张伟平, 张誉. 胀裂后锈蚀钢筋与混凝土粘结性能退化规律的试验研究[J]. *建筑结构*, 2002, 17(1): 31-33.
Zhang W P, Zhang Y. Experimental study on corroded reinforced and recycled concrete bonding performance degradation after the burst [J]. *Building of Structures*, 2002, 17(1): 31-33. (in Chinese)
- [14] 杨海峰, 邓志恒, 覃英宏. 钢筋锈蚀后与再生混凝土间粘结-滑移本构关系研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(10): 114-122.
Yang H F, Deng Z H, Qin Y H. Research on bond-slip constitutive relationship between reinforcement corrosion and recycled concrete [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2015, 32 (10): 114-122. (in Chinese)
- [15] 仲伟球, 贡金鑫. 钢筋电化学快速锈蚀试验控制方法[J]. *建筑技术开发*, 2002, 29(4): 28-29, 67.
Zhong W Q, Gong J X. Control method for quick electro-chemical corrosion experiment of rebars [J]. *Building Technique Development*, 2002, 29 (4): 28-29, 67. (in Chinese)
- [16] 张永利. 锈蚀钢筋混凝土构件粘结性能及承载性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
Zhang Y L. The cohesive force of corroded reinforced concrete members and bearing capacity study [D]. Xi'an; Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)