

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201706170

锈蚀钢筋与高强再生混凝土的黏结性能试验

叶涛萍,曹万林,董宏英,张益轩

(城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学),北京 100124)

摘要:为研究锈蚀钢筋与高强再生混凝土之间的黏结滑移性能,采用通电加速锈蚀法获得36个中心拉拔钢筋被锈蚀的试件并进行中心拉拔试验.试件设计参数有5个:再生粗骨料取代率、钢筋外形、钢筋直径、锚固长度和钢筋锈蚀率.依据试验结果,对试件的黏结破坏形态和每个设计参数对锈蚀钢筋与高强再生混凝土间黏结性能的影响进行分析.结果表明:锈蚀钢筋与高强再生混凝土间的黏结破坏形式有3种,即钢筋拔断、钢筋拔出和混凝土劈裂;高强再生混凝土与锈蚀后螺纹钢钢筋间的黏结强度要明显高于锈蚀后光圆钢筋;锈蚀钢筋与高强再生混凝土间的黏结强度,随着再生粗骨料取代率的增加整体呈减小趋势,随着钢筋直径的增大而减小,随着锚固长度的增大而减小,随着钢筋锈蚀率的增大而减小,但当钢筋锈蚀率达到某一界限后这种减小便不明显.

关键词:锈蚀钢筋;高强再生混凝土;黏结性能;拉拔试验

中图分类号: TU528.01, TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)08-0132-10

Bond behavior between corroded steel bars and high-strength recycled concrete

YE Taoping, CAO Wanlin, DONG Hongying, ZHANG Yixuan

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology),
Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: To investigate the bond behavior between corroded steel bars and high-strength recycled concrete, a central pull-out test was carried on 36 specimens which were produced by electricity to accelerate corrosion. In this paper, the design parameters comprises replacement rate of recycled coarse aggregate, rebar shape, rebar diameter, anchorage length and corrosion rate of rebar. Based on the test results, the bond failure forms of specimens and the influences of each design parameter on the bond behavior between corroded steel bars and high-strength recycled concrete were analyzed. The results indicate that there are three failure forms in the failure process, including steel bar pull-off, steel bar pull-out and concrete splitting. The bond strength between high-strength recycled concrete and corroded rebar is obviously higher than that of corroded plain round bar. The bond strength decreases with the increase of replacement rate of recycled coarse aggregate, rebar diameter, anchorage length, and corrosion rate of rebar. When the bar corrosion rate reaches a certain value, the reduction of bond strength is not obvious.

Keywords: corroded steel bar; high-strength recycled concrete; bond strength; pull-out test

再生混凝土^[1]不仅能有效利用由建筑垃圾中含量较高的废旧混凝土制成的再生骨料,解决垃圾处理困难问题和减少生态环境污染;而且能减少天然砂石的开采,缓解自然资源日益匮乏的压力.它是可持续发展战略下,应运而生的一种经济环保的绿色建筑材料,是建筑垃圾资源化再利用的重大举措,成为学界研究热点.因此,开展对再生混凝土性能及应用技术的研究意义重大^[2].

钢筋与再生混凝土间黏结性能的研究是钢筋再

生混凝土结构研究的关键. Butle^[3]和 Mostafa等^[4]研究表明,钢筋与再生混凝土间的黏结性能受再生骨料压碎率和再生骨料取代率影响;曹万林等^[5]研究表明,再生粗细骨料取代率、混凝土强度等级、钢筋外形及钢筋锚固长度是影响钢筋与中高强再生混凝土黏结性能的关键因素;赵军等^[6]研究了再生粗骨料取代率和黏结强度间的关系,结果发现,随着取代率的增大,其黏结强度先增加后减小,且取代率为60%时,其值最大;肖建庄等^[7]研究表明,钢筋与再生混凝土间的黏结强度较普通混凝土有所降低;杨海峰^[8]研究表明,黏结应力的分布随着再生混凝土强度等级的增加均匀性降低;董宏英等^[9]研究表明再生细骨料取代对黏结性能的影响较再生粗骨料大.可见,再生混凝土与钢筋间黏结滑移性能的研究已较丰富,但钢筋锈蚀后与再生混凝土间黏结滑移

收稿日期: 2017-06-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703304); 国家自然科学基金重点资助项目(51438007)

作者简介: 叶涛萍(1986—),女,博士研究生;
曹万林(1954—),男,教授,博士生导师

通信作者: 曹万林, wlcao@bjut.edu.cn

性能的研究尚相对缺乏. 肖建庄等^[10]研究表明, 随着钢筋锈蚀率的增大, 锈蚀钢筋与再生混凝土间的黏结强度先升后降, 且其退化速率较普通混凝土快; 杨海峰等^[11]研究表明, 其黏结刚度较未锈蚀钢筋退化显著, 但再生混凝土开裂后, 黏结刚度下降幅度不明显. 以上关于钢筋锈蚀后的研究^[10-11]主要是针对 5 倍钢筋直径的锚固长度、低钢筋锈蚀率和低、中强度等级再生混凝土的研究, 而对于较大锚固长度、较高钢筋锈蚀率的钢筋与高强再生混凝土黏结性能的研究尚少. 基于此, 本文进行了 36 个锈蚀钢筋-高强再生混凝土试件的中心拉拔试验, 分析了钢筋外形、再生粗骨料取代率、钢筋直径、钢筋锚固长度和钢筋锈蚀率对锈蚀钢筋-高强再生混凝土间黏结性能的影响, 并得出相应结论, 以期能为再生混凝土在工程中的应用提供参考依据.

1 试验概况

1.1 试件设计

共 36 个外形尺寸为 150 mm × 150 mm × 450 mm 的试件, 拉拔钢筋位于试件中心轴向位置, 两端用 PVC 套管隔离钢筋与混凝土, 并设置纵向钢筋和横向约束箍筋, 以确保试件锈胀后的完整性及与实际混凝土构造的一致性. 为真实体现钢筋锈蚀过程中混凝土保护层厚度的影响, 在试件一侧正中距中心拉拔钢筋 25 mm 处预留尺寸为 10 mm × 50 mm × 450 mm 的条形洞口. 混凝土强度等级均按 C60 设计. 试件设计参数有: 再生粗骨料取代率 (0, 50%, 100%), 钢筋外形 (光圆钢筋, 螺纹钢筋), 钢筋直径 (14 mm, 20 mm), 锚固长度 (10d, 15d, 20d) 及钢筋锈蚀率 (5%, 10%, 15%). 各试件参数见表 1.

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	再生粗骨料取代率/%	钢筋外形	钢筋直径/mm	锚固长度/mm	目标锈蚀率/%
H/0 - P14/A210 - 10% - 25	0	光圆	14	210	10
H/50 - P14/A210 - 10% - 25	50	光圆	14	210	10
H/100 - P14/A210 - 10% - 25	100	光圆	14	210	10
H/0 - P14/A280 - 10% - 25	0	光圆	14	280	10
H/50 - P14/A280 - 10% - 25	50	光圆	14	280	10
H/100 - P14/A280 - 10% - 25	100	光圆	14	280	10
H/0 - P20/A300 - 10% - 25	0	光圆	20	300	10
H/50 - P20/A300 - 10% - 25	50	光圆	20	300	10
H/100 - P20/A300 - 10% - 25	100	光圆	20	300	10
H/0 - P20/A400 - 10% - 25	0	光圆	20	400	10
H/50 - P20/A400 - 10% - 25	50	光圆	20	400	10
H/100 - P20/A400 - 10% - 25	100	光圆	20	400	10
H/0 - R14/A140 - 5% - 25	0	螺纹	14	140	5
H/50 - R14/A140 - 5% - 25	50	螺纹	14	140	5
H/100 - R14/A140 - 5% - 25	100	螺纹	14	140	5
H/0 - R14/A140 - 10% - 25	0	螺纹	14	140	10
H/50 - R14/A140 - 10% - 25	50	螺纹	14	140	10
H/100 - R14/A140 - 10% - 25	100	螺纹	14	140	10
H/0 - R14/A280 - 10% - 25	0	螺纹	14	280	10
H/50 - R14/A280 - 10% - 25	50	螺纹	14	280	10
H/100 - R14/A280 - 10% - 25	100	螺纹	14	280	10
H/0 - R14/A280 - 15% - 25	0	螺纹	14	280	15
H/50 - R14/A280 - 15% - 25	50	螺纹	14	280	15
H/100 - R14/A280 - 15% - 25	100	螺纹	14	280	15
H/0 - R20/A200 - 5% - 25	0	螺纹	20	200	5
H/50 - R20/A200 - 5% - 25	50	螺纹	20	200	5
H/100 - R20/A200 - 5% - 25	100	螺纹	20	200	5
H/0 - R20/A200 - 10% - 25	0	螺纹	20	200	10
H/50 - R20/A200 - 10% - 25	50	螺纹	20	200	10
H/100 - R20/A200 - 10% - 25	100	螺纹	20	200	10
H/0 - R20/A300 - 5% - 25	0	螺纹	20	300	5
H/50 - R20/A300 - 5% - 25	50	螺纹	20	300	5
H/100 - R20/A300 - 5% - 25	100	螺纹	20	300	5
H/0 - R20/A300 - 10% - 25	0	螺纹	20	300	10
H/50 - R20/A300 - 10% - 25	50	螺纹	20	300	10
H/100 - R20/A300 - 10% - 25	100	螺纹	20	300	10

试件编号表示为 H/a - P(R)b/Ac - d% - 25, 其中 H 表示设计强度等级为 C60 的高强混凝土, P、R 分别表示光圆钢筋和螺纹钢, A 表示钢筋与混凝土之间的锚固长度, a、b、c、d 分别以数字形式表

示再生粗骨料取代率、钢筋直径、锚固长度及钢筋目标锈蚀率, 25 表示混凝土保护层厚度为 25 mm. 试件尺寸和构造如图 1 所示.

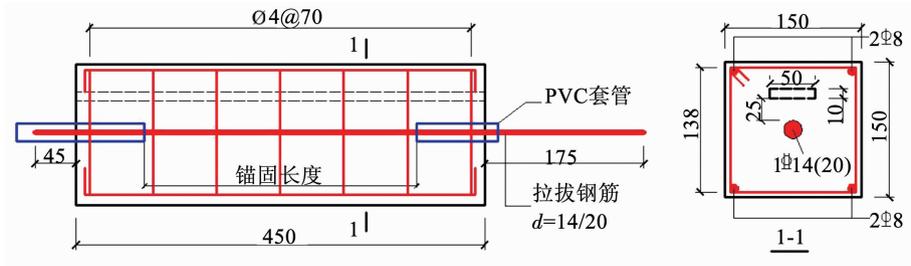


图 1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Specimen size and steel bar details

1.2 材料选择

1.2.1 混凝土

再生粗骨料的骨料特性见表 2. 因再生粗骨料吸水率高, 拌制混凝土前, 先预湿再生粗骨料, 使其

适量吸水达到饱和面干状态, 以免在拌制混凝土时因再生粗骨料吸水过多而影响混凝土的有效水胶比和工作性. 混凝土配合比及预留的 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试块抗压强度见表 3.

表 2 粗骨料特性

Tab. 2 Properties of coarse aggregate

种类	堆积密度/(kg · m ⁻³)	表观密度/(kg · m ⁻³)	压碎指标/%	吸水率/%	含泥量/%	泥块含量/%	针片状含量/%
天然粗骨料	1 454.27	2 760.24	9.71	0.42	0.41	0	4.98
再生粗骨料	1 252.98	2 575.05	13.10	2.99	2.25	2.57	3.01

表 3 混凝土配合比

Tab. 3 Mix proportion of concrete

编号	水胶比	粗骨料取代率/%	混凝土各种材料用量/(kg · m ⁻³)							立方体抗压强度 f _{cu} /MPa
			水泥	粉煤灰	矿粉	机制砂	山碎石	再生石子	水	
H/0	0.32	0	434	54	54	757	926	0	175	63.74
H/50	0.32	50	434	54	54	757	463	463	175	66.56
H/100	0.32	100	434	54	54	757	0	926	175	60.76

1.2.2 钢筋

HRB400 级螺纹钢, 其基本性能见表 4.

中心拉拔钢筋选用 HPB300 级光圆钢筋和

表 4 钢筋基本性能

Tab. 4 Basic characters of steel bars

钢筋类型	公称直径 d/mm	屈服强度 f _y /MPa	抗拉强度 f _u /MPa	弹性模量 E _s /10 ⁵ MPa	伸长率 δ/%	单位质量 m/ (g · m ⁻¹)
HPB300	14	345.0	517.0	2.07	29.1	1 209
HPB300	20	271.3	402.1	2.08	30.9	2 382
HRB400	14	464.3	645.0	2.06	20.8	1 211
HRB400	20	436.6	600.1	2.10	19.4	2 385

1.3 钢筋锈蚀

1.3.1 通电加速锈蚀

为能在短时间内实现钢筋锈蚀, 采用通电加速锈蚀法, 根据电流强度及通电时间由 Faraday 电

第一定律计算钢筋锈蚀量, 然后根据目标锈蚀率及其他参数反算通电时间, 具体表达式如下:

$$\Delta w = \frac{M}{NF} Q = kit, \quad (1)$$

$$i_{\text{corr}} = \frac{1\,000i}{\pi dl}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\Delta w}{m} \times 100\% . \quad (3)$$

式中: Δw 为金属在时间 t 内的理论锈蚀量, kg; M 为金属的原子量; N 为金属被氧化过程失去的价电子数; F 为 Faraday 常数, $F = 96\,485\text{ C}$; Q 为在时间 t 内通过金属的电量, C; k 为金属的电化学当量, $k = M/(NF)$, kg/(A · s); 本试验中 $k = 2.907 \times 10^{-7}\text{ kg}/(\text{A} \cdot \text{s})$; i 为流出阳极金属的电流强度, A; t 为加速锈蚀通电时间, h; i_{corr} 为腐蚀电流密度, mA/cm²; l 为加速锈蚀的金属长度, cm; d 为金属直径, cm; η 为金属质量理论锈蚀率, %; m 为未锈蚀金属质量, kg.

试件浸泡前, 先将自由端 PVC 套管内的钢筋用

蜡封实, 并在 PVC 套管和混凝土接触的试件表面涂满环氧树脂, 以防氯离子渗入; 加载端外露钢筋涂环氧树脂包裹以防被锈蚀. 通电过程具体如下: 先将试件完全浸泡于浓度为 5% 的 NaCl 溶液中 5 ~ 7 d, 使 Cl⁻ 渗透到钢筋表面破坏钢筋表面钝化膜; 随后, 将试件置于浓度为 5% 的 NaCl 溶液, 且液面高度以不接触目标锈蚀钢筋下表面为宜; 接通直流稳压电源, 阳极接拉拔钢筋, 阴极接置于溶液中的不锈钢管, 以 NaCl 溶液形成回路; 由式 (2) 可知控制电流是电流密度与目标锈蚀钢筋表面积的乘积, 其中电流密度一般控制在 1 ~ 2 mA/cm² [12], 电流大小用直流稳压电源的电流计监测, 且每 9 ~ 12 h 读取记录, 校正一次数据, 待达到目标锈蚀率, 断电结束锈蚀. 通电加速锈蚀装置如图 2 所示.

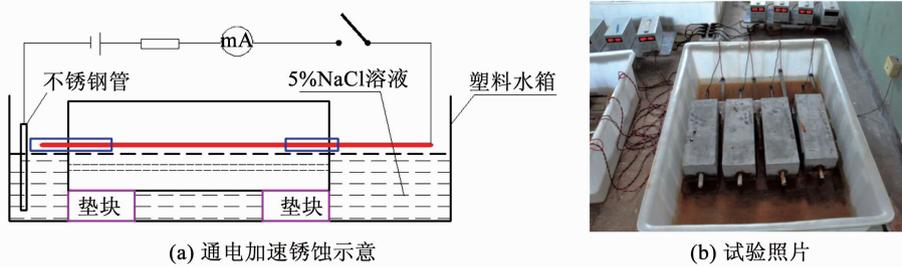


图 2 加速锈蚀装置

Fig. 2 Accelerated corrosion device

1.3.2 钢筋实际锈蚀率的测定

由于通电加速锈蚀过程中存在杂散电流及其他因素影响, 按 Faraday 电解第一定律计算的理论锈蚀率与实际锈蚀率会有一定误差, 最终以实测的锈蚀率为准. 实测锈蚀质量 m_c 按《水运工程混凝土试验规程》(J TJ 270—98) [13] 方法进行测定. 实测锈蚀率按式 (4) 计算.

$$\eta_1 = \frac{m - m_c}{m} . \quad (4)$$

1.4 拉拔试验加载装置及加载制度

中心拉拔试验在北京工业大学完成, 装置见图 3, 其中试验承台部分由曹万林教授研发.

加载制度严格按照标准试验方法 [14] 中的规定执行, 加载速率与钢筋直径直接相关, 即

$$V_F = 0.03d^2 . \quad (5)$$

式中: V_F 为加载速率, kN/min; d 为钢筋直径, mm.

2 试验结果

2.1 锈蚀结果

通电加速锈蚀后, 对试件进行清洗, 测量并记录其最大锈胀裂缝宽度、长度及所在位置. 中心拉拔试验后, 对试件进行破形, 取出锈蚀后的中心拉拔钢筋, 酸洗除锈, 称重并按式 (4) 计算实际锈蚀率. 部分照片见图 4.

锈蚀结果见表 5, 其中 w_{max} 和 l_{max} 表示试件最大锈胀裂缝宽度和长度, η_1 和 η 表示钢筋实际锈蚀率和目标锈蚀率. 可以看出, 最大锈胀裂缝宽度随再生粗骨料取代率变化的规律性不明显, 但随锚固长度和钢筋锈蚀率增大而呈增宽趋势, 这是因为在其他条件相同时, 其产生的铁锈量大, 对钢筋外围的混凝土挤压力大, 更易引起混凝土开裂, 开裂后氯离子更易渗入, 从而加速钢筋锈蚀, 这是一个相互影响的结果; 在其他条件相同时, 钢筋实际锈蚀率有随再生粗骨料取代率增大而增大的趋势, 特别是在 100% 再生粗骨料取代时表现明显.

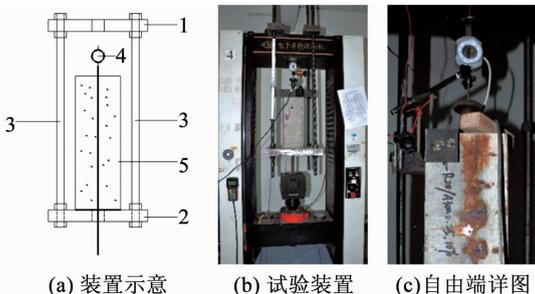


图 3 拉拔试验装置

Fig. 3 Pull-out test device

1—连接上梁的钢板; 2—支承试件的钢板; 3—悬挂试件承台的连接螺杆; 4—电子百分表, 用来测量钢筋自由端的滑移量; 5—通电锈蚀后的试件



图 4 锈蚀照片

Fig. 4 Pictures of corrosion

表 5 锈蚀结果

Tab. 5 Results of corrosion

试件编号	w_{\max}/mm	l_{\max}/mm	$\eta_1/\%$	$\eta/\%$
H/0 - P14/A210 - 10% - 25	—	—	—	10
H/50 - P14/A210 - 10% - 25	0.26	360	11.84	10
H/100 - P14/A210 - 10% - 25	0.26	270	12.70	10
H/0 - P14/A280 - 10% - 25	0.90	350	11.98	10
H/50 - P14/A280 - 10% - 25	0.20	370	12.65	10
H/100 - P14/A280 - 10% - 25	0.50	360	13.52	10
H/0 - P20/A300 - 10% - 25	0.30	360	10.09	10
H/50 - P20/A300 - 10% - 25	0.30	370	8.01	10
H/100 - P20/A300 - 10% - 25	0.30	310	10.11	10
H/0 - P20/A400 - 10% - 25	1.00	450	8.60	10
H/50 - P20/A400 - 10% - 25	1.40	450	8.01	10
H/100 - P20/A400 - 10% - 25	0.60	400	8.91	10
H/0 - R14/A140 - 5% - 25	0.10	280	5.24	5
H/50 - R14/A140 - 5% - 25	0.00	0	5.12	5
H/100 - R14/A140 - 5% - 25	0.10	370	5.73	5
H/0 - R14/A140 - 10% - 25	0.20	200	10.21	10
H/50 - R14/A140 - 10% - 25	0.06	110	9.99	10
H/100 - R14/A140 - 10% - 25	0.06	150	10.28	10
H/0 - R14/A280 - 10% - 25	0.20	170	10.14	10
H/50 - R14/A280 - 10% - 25	1.20	400	9.93	10
H/100 - R14/A280 - 10% - 25	0.40	350	10.68	10
H/0 - R14/A280 - 15% - 25	0.30	300	14.86	15
H/50 - R14/A280 - 15% - 25	0.20	310	12.51	15
H/100 - R14/A280 - 15% - 25	0.30	310	15.44	15
H/0 - R20/A200 - 5% - 25	0.24	250	5.26	5
H/50 - R20/A200 - 5% - 25	0.34	340	5.24	5
H/100 - R20/A200 - 5% - 25	0.56	280	6.20	5
H/0 - R20/A200 - 10% - 25	0.42	300	11.09	10
H/50 - R20/A200 - 10% - 25	0.30	300	11.56	10
H/100 - R20/A200 - 10% - 25	0.24	290	11.62	10
H/0 - R20/A300 - 5% - 25	0.52	380	5.84	5
H/50 - R20/A300 - 5% - 25	0.30	370	6.37	5
H/100 - R20/A300 - 5% - 25	0.36	450	6.27	5
H/0 - R20/A300 - 10% - 25	1.60	370	12.64	10
H/50 - R20/A300 - 10% - 25	1.16	450	13.48	10
H/100 - R20/A300 - 10% - 25	0.80	450	12.12	10

2.2 拉拔试验结果

2.2.1 破坏形态

试验中,主要有钢筋拉断破坏、钢筋拔出破坏和混凝土劈裂破坏 3 种破坏形态,见图 5。

钢筋拉断破坏主要表现为随着加载端荷载的增大,钢筋相继发生屈服和颈缩,但未见钢筋与混凝土间产生滑移,最终以钢筋拔断宣告破坏。主要出现在锚固长度大且锈蚀率低的试件上。由于钢筋与混凝土

之间的黏结应力大于钢筋的抗拉强度,而钢筋自由端一直未见滑移,钢筋屈服后又出现颈缩现象,随之钢筋被拉断。但也有个别试件是从内部拉断,这是由于这些试件的拉拔钢筋在通电锈蚀过程中发生了较严重的坑蚀现象,截面减小,大大降低了钢筋在坑蚀处的强度,导致试件在荷载不是很大时,钢筋在坑蚀处被拔断。

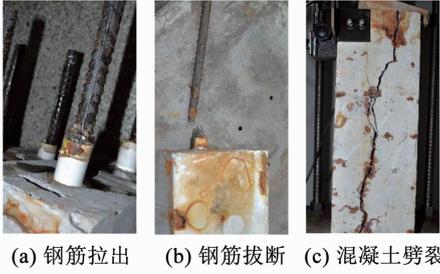


图 5 中心拉拔试验破坏形态

Fig. 5 Failure forms of bond-slip test

钢筋拔出破坏主要表现为在荷载不是很大时, 钢筋自由端无明显滑移迹象, 随着荷载的增大, 钢筋自由端滑动, 最终受拉钢筋被拔出, 滑移量增大荷载减小. 主要出现在中心拉拔钢筋为光圆钢筋及锚固长度不大且锈蚀率较大的试件上.

混凝土劈裂破坏主要表现为受拉钢筋被拔出的同时, 试件表面通电加速锈蚀产生的锈胀裂缝突变宽, 随后滑移量增大荷载骤降. 主要出现在理论锈蚀

率较高且锚固长度较大的试件上. 这是由于这些试件产生的铁锈量大, 造成混凝土的损伤大、裂缝宽, 当施加荷载达到其黏结力时, 对外侧混凝土的挤压力最大, 并沿着之前已经形成较宽裂缝的混凝土界面传递, 造成这个界面混凝土的裂缝开裂增大, 继而钢筋周围的约束减小, 滑移增大荷载骤降.

2.2.2 试验结果

各试件的中心拉拔试验结果见表 6. 其中 P_u 为外加极限荷载, τ_u 在钢筋拉断破坏时为黏结应力、钢筋拔出破坏和混凝土劈裂破坏时为黏结强度, 由式 (6) 计算, f_{cu} 为实测混凝土抗压强度, K 为相对于混凝土抗压强度的 (再生) 混凝土黏结效率系数, $K = \tau_u / f_{cu}$.

$$\tau_u = \frac{1\ 000P_u}{\pi dl_a} \quad (6)$$

式中: τ_u 为黏结应力 (强度), MPa; P_u 为极限荷载, kN; l_a 为锚固长度, mm; d 为钢筋直径, mm.

表 6 中心拉拔试验结果

Tab. 6 Results of center pull-out test

试件编号	破坏形态	P_u /kN	τ_u /MPa	f_{cu} /MPa	K
H/0 - P14/A210 - 10% - 25	—	—	—	63.74	—
H/50 - P14/A210 - 10% - 25	拔出	54.24	5.88	66.56	0.088 3
H/100 - P14/A210 - 10% - 25	拔出	49.45	5.36	60.76	0.088 2
H/0 - P14/A280 - 10% - 25	拔出	52.11	4.23	63.74	0.066 4
H/50 - P14/A280 - 10% - 25	拔出	55.17	4.48	66.56	0.067 3
H/100 - P14/A280 - 10% - 25	拔出	50.88	4.13	60.76	0.068 0
H/0 - P20/A300 - 10% - 25	劈裂	93.99	4.99	63.74	0.078 3
H/50 - P20/A300 - 10% - 25	拔出	91.01	4.83	66.56	0.072 6
H/100 - P20/A300 - 10% - 25	拔出	87.03	4.62	60.76	0.076 0
H/0 - P20/A400 - 10% - 25	拔出	86.18	3.43	63.74	0.053 8
H/50 - P20/A400 - 10% - 25	拔出	81.81	3.26	66.56	0.048 9
H/100 - P20/A400 - 10% - 25	拔出	84.27	3.35	60.76	0.055 2
H/0 - R14/A140 - 5% - 25	拔出	—	—	63.74	—
H/50 - R14/A140 - 5% - 25	拔断	96.87	15.74	66.56	0.236 5
H/100 - R14/A140 - 5% - 25	拔出	87.65	14.24	60.76	0.234 4
H/0 - R14/A140 - 10% - 25	拔出	91.04	14.79	63.74	0.232 1
H/50 - R14/A140 - 10% - 25	拔断	87.73	14.25	66.56	0.214 2
H/100 - R14/A140 - 10% - 25	拔断	77.53	12.60	60.76	0.207 3
H/0 - R14/A280 - 10% - 25	拔断	90.39	7.34	63.74	0.115 2
H/50 - R14/A280 - 10% - 25	拔断	83.60	6.79	66.56	0.102 0
H/100 - R14/A280 - 10% - 25	拔断	73.60	5.98	60.76	0.098 4
H/0 - R14/A280 - 15% - 25	拔断	89.62	7.28	63.74	0.114 2
H/50 - R14/A280 - 15% - 25	劈裂	90.98	7.39	66.56	0.111 0
H/100 - R14/A280 - 15% - 25	拔断 (内断)	75.75	6.15	60.76	0.101 3
H/0 - R20/A200 - 5% - 25	拔出	161.14	12.83	63.74	0.201 3
H/50 - R20/A200 - 5% - 25	拔断	159.76	12.72	66.56	0.191 1
H/100 - R20/A200 - 5% - 25	拔出	152.25	12.12	60.76	0.199 5
H/0 - R20/A200 - 10% - 25	拔出	152.15	12.11	63.74	0.190 1
H/50 - R20/A200 - 10% - 25	劈裂	151.89	12.09	66.56	0.181 7
H/100 - R20/A200 - 10% - 25	劈裂	118.27	9.42	60.76	0.155 0
H/0 - R20/A300 - 5% - 25	拔断	170.71	9.06	63.74	0.142 2
H/50 - R20/A300 - 5% - 25	拔断	167.21	8.88	66.56	0.133 3
H/100 - R20/A300 - 5% - 25	拔断	159.27	8.45	60.76	0.139 1
H/0 - R20/A300 - 10% - 25	拔出	142.01	7.54	63.74	0.118 3
H/50 - R20/A300 - 10% - 25	劈裂	142.91	7.59	66.56	0.114 0
H/100 - R20/A300 - 10% - 25	拔断 (内断)	112.53	5.97	60.76	0.098 3

注: “—” 表示试件损坏或试验数据丢失

3 种破坏形态下,实测的典型荷载 P - 滑移 s 曲线如图 6 所示. 其中纵坐标为试验过程中钢筋加载

端的荷载 P , 横坐标为中心拉拔钢筋自由端滑移量 s .

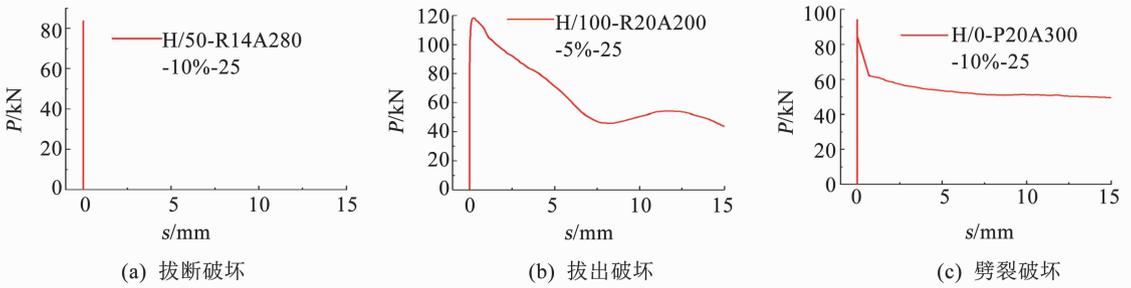


图 6 实测部分试件 $P-s$ 曲线
Fig. 6 Typical $P-s$ curves

3 结果分析

3.1 钢筋外形对黏结性能的影响

由表 6 可知:当拉拔钢筋为光圆钢筋时,除有一个试件发生混凝土劈裂破坏外,其他试件钢筋均被拔出,当钢筋为螺纹钢筋时,试件表现出钢筋拔出、钢筋拔断和混凝土劈裂 3 种不同的破坏形式;当钢筋直径、锚固长度、锈蚀率和再生粗骨料取代率均相同时,螺纹钢筋的极限荷载、黏结强度以及再生混凝土黏结效率系数 K 均明显高于光圆钢筋,见图 7. 如

钢筋直径为 14 mm、锚固长度 280 mm、锈蚀率 10% 的试件,再生粗骨料取代率分别为 0、50%、100% 时,螺纹钢筋的黏结强度较光圆钢筋的黏结强度分别提高了 73.5%、51.6%、44.8%,平均提高 56.5%. 这是由于不同外形的钢筋与混凝土的黏结机理不同,光圆钢筋与混凝土之间的黏结作用主要由摩擦力和化学胶着力组成;而螺纹钢筋由于纵、横肋的存在,钢筋与混凝土之间的黏结作用主要由化学胶着力、摩擦力和机械咬合力组成,从而使黏结强度大大提高,其不同钢筋外形与混凝土间的黏结机理见图 8.

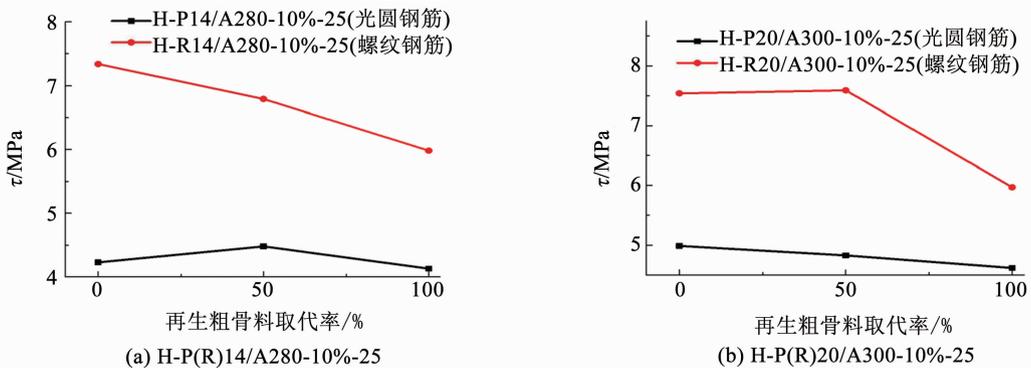


图 7 钢筋外形和黏结强度关系

Fig. 7 Relationship between bar type and bond strength

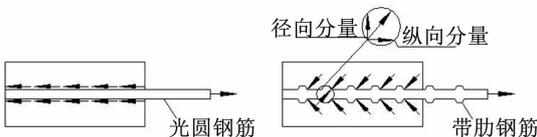


图 8 钢筋外形与混凝土间的黏结机理

Fig. 8 Bonding mechanism between steel bar and concrete

3.2 再生粗骨料取代率对黏结性能的影响

由图 6 b) 可知:锈蚀钢筋与高强再生混凝土的荷载 P - 滑移 s 曲线与普通混凝土的基本相似. 由图 9 可知:黏结强度随着再生粗骨料取代率的增加而整体呈现减小趋势,其中 100% 取代的试件减小明显,且锈蚀率较大的表现更为明显. 原因可能有:

1) 再生粗骨料表面粗糙、孔多,其吸水率及孔隙率较天然粗骨料高,在混凝土硬化过程中会吸收大量水分,导致混凝土的有效水胶比减小而使其强度增高. 2) 再生粗骨料压碎指标大,致使再生混凝土的抗压强度降低. 3) 再生粗骨料含泥量高,再生混凝土干缩性增加导致黏结性能降低. 4) 再生骨料与天然骨料间存在某种耦合,适当的比例拌和不会降低黏结性能反而会有所提高^[15]. 5) 再生混凝土抗氯离子渗透性能随再生骨料取代率的增加而降低^[16],加重钢筋锈蚀,同时混凝土的损伤也随之增大,从而降低二者之间的黏结强度.

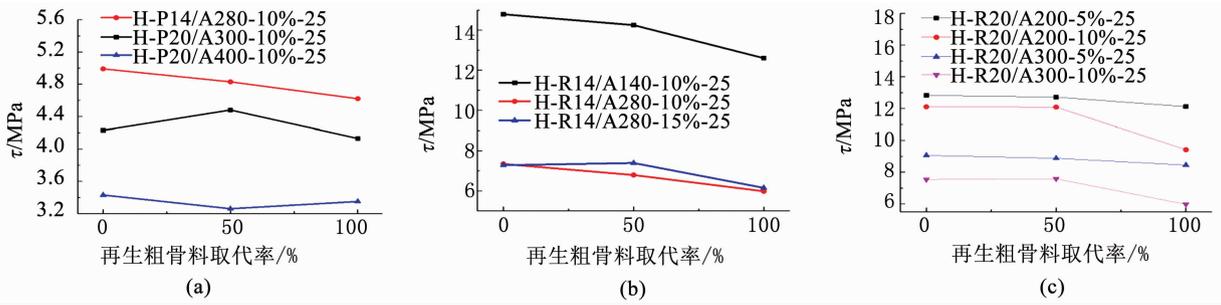


图 9 再生粗骨料取代率和黏结强度关系

Fig. 9 Relationship between replacement rate and bond strength

3.3 钢筋直径对黏结性能的影响

由表 6 可知: 当其他设计参数均相同时, 钢筋直径从 14 mm 增大到 20 mm 时, 极限荷载随之增大、黏结强度和再生混凝土黏结效率系数 K 均随之减

小, 其中锈蚀率为 10% 的光圆钢筋及螺纹钢筋, 当直径从 14 mm 增加到 20 mm 时, K 均减小 20% 左右, 具体表现见图 10.

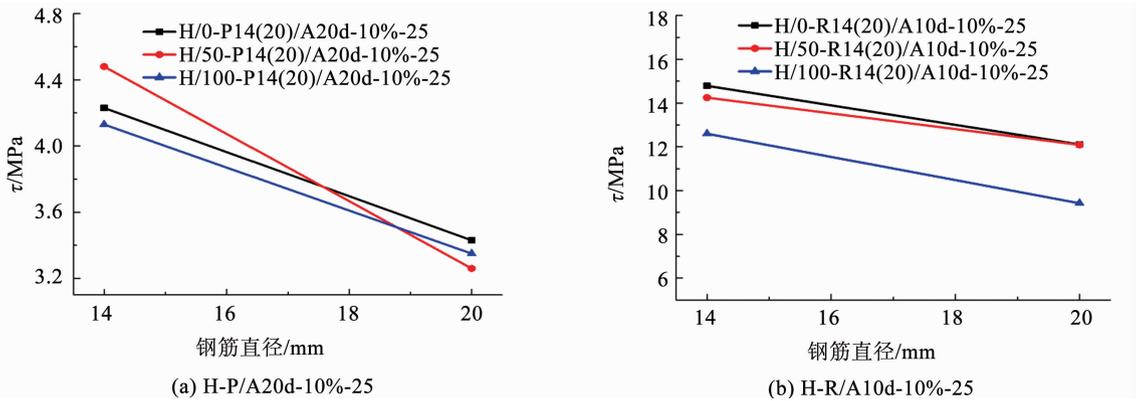


图 10 钢筋直径和黏结强度关系

Fig. 10 Relationship between bar diameter and bond strength

3.4 锚固长度对黏结性能的影响

由表 6 和图 11 可知: 当其他设计参数均相同时, 随着锚固长度的增大, 再生混凝土黏结效率系数 K 和黏结强度均随之减小. 其中直径为 20 mm、锈蚀率为 10% 的拉拔钢筋为光圆钢筋的试件, 锚固长度 15d 和 20d 的平均黏结强度分别为 4.81 和 3.35 MPa, 15d 锚固长度比 20d 锚固长度的平均黏结强度提高 43.9%; 直径为 14 mm、锈蚀率为 10% 的拉拔钢筋为螺纹钢筋的试件, 锚固长度 10d 和

20d 的平均黏结强度分别为 13.88 和 6.70 MPa, 10d 锚固长度比 20d 锚固长度的平均黏结强度提高 107.4%. 可见, 不同直径和外形的钢筋, 锚固长度减小 5d 后的平均黏结强度提高约为 50%. 由图 11 可知, 各图曲线斜率几乎平行, 说明随着钢筋锚固长度的变化, 平均黏结强度呈现某种近似直线的关系变化. 这是因为钢筋锚固长度的增大, 增加了黏结应力分布的不均匀性, 从而导致数值的减小.

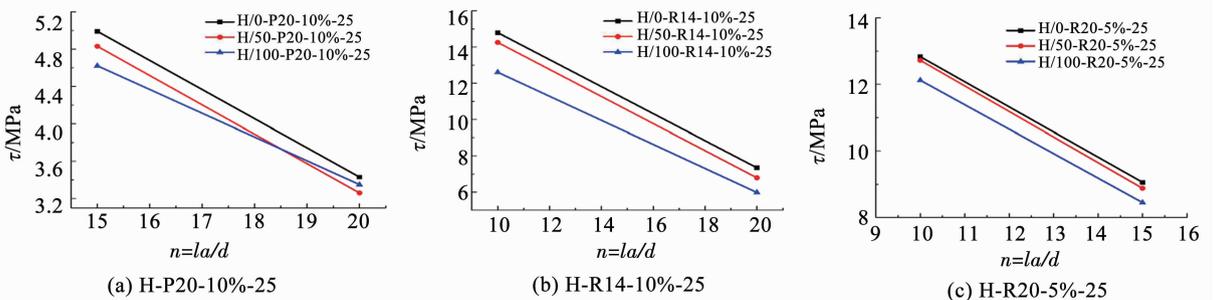


图 11 锚固长度和黏结强度关系

Fig. 11 Relationship between anchorage length and bond strength

3.5 钢筋锈蚀率对黏结性能的影响

由表 6 和图 12 可知:在其他设计参数均相同时,随着钢筋锈蚀率的增大,钢筋发生破坏的极限荷载、锈蚀钢筋与高强再生混凝土间的黏结强度以及混凝土黏结效率系数 K 均随之减小;二者间的黏结性能绝大部分随着钢筋锈蚀率的增大而降低,且锚固长度越大,降幅越明显,再生粗骨料取代率越大降幅越明显,特别是 100% 再生粗骨料取代,如图 12 (b)、(c) 所示;但当钢筋锈蚀率达到某一界限后,这种变化便不明显,甚至会出现黏结强度随钢筋锈蚀率增大而增大的现象,如图 12(a)。

造成上述现象的原因可能有以下几点:1) 钢筋锈蚀使锈蚀部分体积增大至原体积的 3~5 倍并附

于钢筋表面产生径向挤压而使外围约束混凝土产生环向拉应力。锈蚀率较小时,锈蚀产物体积膨胀增加混凝土对钢筋的约束作用,摩阻力增大,黏结强度相应增大;锈蚀率继续增大,大量锈蚀产物挤压周围包裹的混凝土而产生锈胀裂缝,裂缝的产生将减弱保护层对钢筋的约束,导致黏结强度减小;当锈蚀率达到某一数值后,钢筋与混凝土间的黏结强度不再随锈蚀率的增大而呈现减小趋势。2) 钢筋锈蚀产生铁锈并附于钢筋表面,影响钢筋与混凝土间的化学胶着力,进而影响钢筋与混凝土间的黏结性能。3) 相同条件下,锈蚀率越大,产生的铁锈量越多,对钢筋与混凝土间的黏结性能影响越大,但当达到一定量时,影响便不明显。

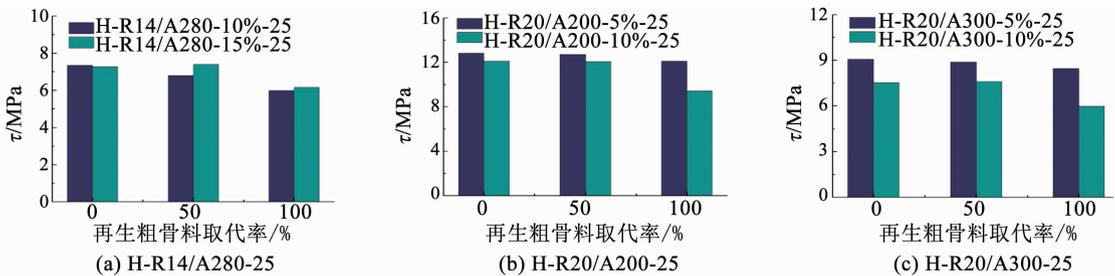


图 12 锈蚀率和黏结强度关系

Fig. 12 Relationship between corrosion rate and bond strength

4 结 论

1) 黏结破坏形式主要有 3 种,即钢筋拉断、钢筋拔出和混凝土劈裂。

2) 相同条件下,高强再生混凝土与锈蚀后螺纹钢筋间的黏结强度明显高于锈蚀后光圆钢筋,但随再生粗骨料取代率的变化趋势一致,特别是取代率 100% 时表现明显。

3) 相同条件下,当钢筋直径从 14 mm 增加到 20 mm 时,锈蚀钢筋与高强再生混凝土间的极限荷载随之增大、黏结强度和黏结效率系数 K 随之减小,其中钢筋锈蚀率为 10% 时, K 减小 20% 左右。

4) 相同条件下,钢筋锚固长度的增大,将引起锈蚀钢筋与高强再生混凝土间黏结强度和黏结效率系数 K 的减小,其中不同直径和外形的钢筋,锚固长度减小 $5d$ 后的平均黏结强度提高约为 50%。

5) 相同条件下,钢筋锈蚀率的增大,将导致锈蚀钢筋与高强再生混凝土间极限荷载、黏结强度以及黏结效率系数 K 的减小,黏结性能大致呈现随着钢筋锈蚀率的增大而降低,且锚固长度越大,降幅越明显,但当钢筋锈蚀率达到某一界限后,这种降低便不明显。

参 考 文 献

- [1] 肖建庄. 再生混凝土 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [2] 曹万林, 张勇波, 董宏英, 等. 再生混凝土结构抗震性能研究进展与评述 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 63. DOI: 10.13197/j. eeev. 2013. 06. 63. caowl. 009.
CAO Wanlin, ZHANG Yongbo, Dong Hongying, et al. A review of mechanical properties and structural behavior of recycled concrete [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(6): 63. DOI: 10.13197/j. eeev. 2013. 06. 63. caowl. 009.
- [3] BUTEER 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.004>.
- [4] MOSTAFA T. The shrink feature of recycled aggregates concrete [J]. Concrete International, 1996, 12(11): 379. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.558>.
- [5] 曹万林, 刘熙, 乔崎云, 等. 钢筋中高强再生混凝土黏结滑移性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(Sup2): 127. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2016. S2. 019.
CAO Wanlin, LIU Xi, QIAO Qiyun, et al. Experimental study on bond slip behavior of ordinary and high strength recycled concrete and steel bars [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(Sup2): 127. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2016. S2. 019.

- [6] 赵军, 王根伟. 粗骨料取代率再生混凝土的粘结特性试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(2): 225.
ZHAO Jun, WANG Genwei. Test and study on bonding properties of recycled aggregate concrete with aggregate replacement rate [J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(2): 225.
- [7] XIAO Jianzhuang, FALKNER H. Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (2): 395. DOI: 10. 1016/j. conbuildmat. 2005. 08. 008.
- [8] 杨海峰. 再生混凝土受压本构关系及其与钢筋间粘结滑移性能研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2012.
YANG Haifeng. Research on compression constitutive relationship and bond - slip properties of recycled concrete [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [9] 董宏英, 孙文娟, 曹万林, 等. 钢筋 - 再生混凝土黏结滑移性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49 (12): 82. DOI: 10. 11918/j. issn. 0367 - 6234. 201705005.
DONG Hongying, SUN Wenjuan, CAO Wanlin, et al. Experimental study on bond - slip behavior between steel bars and recycled concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49 (12): 82. DOI: 10. 11918/j. issn. 0367 - 6234. 201705005.
- [10] 肖建庄, 雷斌. 锈蚀钢筋与再生混凝土间粘结性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32 (1): 58. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2010. 01. 007.
XIAO Jianzhuang, LEI Bin. Experimental study on bond behavior between corroded steel bars and recycled concrete [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32 (1): 58. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2010. 01. 007.
- [11] 杨海峰, 李雪良, 曾健, 等. 钢筋锈蚀后与再生混凝土间粘结滑移性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(4): 902.
YANG Haifeng, LI Xueliang, ZENG Jian, et al. Experimental study on bond - slip properties between corroded rebar and recycled concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34 (4): 902.
- [12] 金伟良. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
JIN Weiliang. Durability theory and design methods of concrete structure in the chloric environment [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [13] JTJ 270—98 水运工程混凝土试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
JTJ 270 - 98. Testing Code of Concrete for Port and Waterway Engineering [S]. Beijing: China Communication Press, 1999.
- [14] GB 50152—92 混凝土结构试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50152 - 92. Standard methods for testing of concrete structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [15] HARA JI M H. Development splice strength of reinforcing bars embedded in plain and fiber reinforced concrete [J]. Aci Materials Journal, 1994, 91(5): 511.
- [16] 肖开涛, 林宗寿, 万惠文, 等. 再生混凝土氯离子渗透性研究 [J]. 山东建材, 2004, 25(1): 31.
XIAO Kaitao, LIN Zongshou, WAN Huiwen, et al. Study on chloride ion permeability of recycled concrete [J]. Shandong Building Materials, 2004, 25(1): 31.

(编辑 刘 彤)