

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0026-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.006

富含砖粒再生混凝土与钢筋黏结滑移性能研究

安新正, 牛薇, 张亚飞, 马晓楠

(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 为研究富含砖粒再生混凝土与钢筋间的黏结滑移性能, 通过对48个富含砖粒立方体试件进行拔出试验, 研究了再生混凝土立方体抗压强度、钢筋类别、钢筋直径等因素对黏结滑移性能的影响规律。结果表明: 再生混凝土的强度值越大, 单位滑移值对应的载荷值越大, 荷载-滑移曲线越陡峭; 当混凝土强度和钢筋直径都相同时, 变形钢筋(HRB400级钢筋)的黏结应力约为光圆钢筋(HPB300级)的1.55~1.75倍。通过超声检测损伤, 提出了考虑损伤参数的再生混凝土与钢筋间的黏结滑移损伤本构模型。

关键词: 富含砖粒再生混凝土; 钢筋; 拔出试验; 超声检测; 黏结滑移损伤本构模型

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

Study on the Bond-slip Properties between Brick-rich Recycled Concrete and Steel Bars

AN Xinzheng, NIU Wei, ZHANG Yafei, MA Xiaonan

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

Abstract: In order to study the bond-slip performance between brick-rich recycled concrete and steel bars, 48 brick-rich cube specimens were tested through pull-out test. The effects of the cube compressive strength of recycled concrete, the shape of steel bar and the reinforcement diameter on the bond performance were studied. The results show the greater the strength value of recycled concrete, the larger the load value corresponding to the unit slip value, and the steeper the load-slip curve; when the strength and the reinforcement diameter are constant, the bonding stress of deformed steel bar (HRB400 grade steel) is about 1.55-1.75 times of Light round bar (HPB300). Lastly, through detecting damage by ultrasound, the bond-slip constitutive model considering damage between recycled concrete and steel bars was proposed.

Key words: brick-rich recycled concrete; steel; pull-out test; ultrasonic testing; bond-slip damage constitutive model

混凝土与钢筋间的黏结性能对于混凝土结构的设计以及正常工作起到了非常重要的作用^[1]。两者间的黏结滑移本构关系是混凝土构件发生剪切破坏, 裂缝宽度以及弹塑性分析的基础^[2-3]。目前, 多数的国内外研究学者^[4-6]研究的是由再生粗骨料制备的再生混凝土与钢筋间的黏结滑移性能, 对于富含砖粒再生混凝土与钢筋间的黏结滑移性能的研究很少涉及。本文对48个试件的富含砖粒再生混凝土试件进行了中心拉拔试验, 分析了混凝土立方体抗压强

度、钢筋直径、钢筋类型对于黏结滑移性能的影响, 并提出了考虑混凝土损伤的黏结滑移本构关系模型。

1 试验概况

1.1 原材料和配合比

本试验水泥采用太行山生产的P.O42.5级普通硅酸盐水泥; 砂采用细度模数为1.6的天然河砂; 粗骨料是由邯郸市废弃的混凝土建筑和粘土砖经破

收稿日期: 2018-09-21

特约专稿

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2015204111); 河北省科学技术研究与发展计划资助项目(15273609D)

作者简介: 安新正(1963-), 男, 河南镇平人, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事混凝土结构耐久性理论与设计的研究。

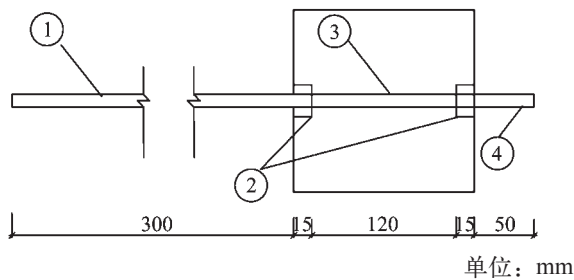
碎、挑拣和清洗后得到^[7]；减水剂为高效聚羧酸减水剂；水为邯郸市自来水。再生混凝土的配合比^[8-9]见下表 1。钢筋的基本力学性能见下表 2。

1.2 试件制作

每一种配合比预留 3 个 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试块，并测其在自然养护条件下的 28 d 立方体抗压强度值。直接拔出试件为 150 mm 的立方体试件，钢筋长度为 500 mm，插在试件的轴线位置。有效锚固长度为 120 mm，未黏结锚固区段内用 PVC 套管进行隔离，并用石蜡进行最后的密封。为了测量自由端滑移量的千分表安装，自由端伸出长度为 50 mm；加载端钢筋伸出混凝土表面 300 mm，充分考虑了荷载的施加以及荷载传感器的固定等因素。拔出试件简图见图 1。

1.3 试验方法

各试件均采用中心拉拔的试验方法进行。采用 RK-20T 的锚杆拉拔仪进行加载，加载端和自由端的滑移量用位移计进行量测。加载方案采用荷载控制的加载方案进行，每加载级距不超过试件极限荷载的 1/5，在接近极限荷载的 85% 时，荷载级距变为 1 kN，每级加载持荷时间为 1 min。当试件中钢筋发



注：①为加载端；②为 PVC 套管；
③为有效黏结区段；④为自由端

图 1 拔出试件简图

Fig.1 Diagram of pull-out specimens

生相对滑移时，则结束试验。在持荷间隙用瑞士生产的 TICO 混凝土超声波测试仪采用对测法对混凝土试块进行超声检测，记录每级荷载下的声时值。

2 试验结果及其分析

2.1 试件破坏形态

本试验所有试件均发生钢筋的拔出破坏，表现为随着荷载的逐级增加，试件未发出劈裂的声响，而且混凝土表面并未形成明显的裂缝，但通过试件的加载端可以明显看到，试件端部存有内裂缝，裂缝并未扩展到混凝土的表面。试件的破坏形态见图 2 所示。

2.2 试验结果及其分析

2.2.1 荷载 - 滑移曲线

钢筋自由端的相对滑移值：

$$S_F = S_2 - \frac{1}{2} (S_3 + S_4) \quad (1)$$

钢筋加载端的相对滑移值：

$$S_L = S_1 - \frac{1}{2} (S_3 + S_4) - \Delta S \quad (2)$$

钢筋 L 段的变形值： $\Delta S = \frac{P}{E_S A_S} L$ (3)

平均相对滑移值： $S = \frac{1}{2} (S_F + S_L)$ (4)

试件的荷载 - 滑移曲线如图 3 所示。

富含砖粒再生混凝土与钢筋间的黏结滑移破坏形式与普通混凝土类似，P-S 曲线由明显的上升段和下降段，也可以分为微滑阶段、内裂滑移阶段、损伤程度加深滑移阶段、下降阶段和残余阶段^[11]5 个阶段。滑移曲线均呈现为：达到极限荷载后，钢筋拔出速度快，荷载下降迅速，没有明显的平直滑移段。

图 3 各图可知，混凝土强度值越高，钢筋滑移时所需荷载越大，相同荷载下滑移量越小。

表 1 再生混凝土配合比

Tab.1 Mix proportions of recycled concrete

试件 编号	材料用量 / (Kg·m ⁻³)					混凝土立方体抗压强度 /MPa
	水 / (kg·m ⁻³)	水泥 / (kg·m ⁻³)	砂 / (kg·m ⁻³)	再生粗骨料 / (kg·m ⁻³)	粉煤灰 / (kg·m ⁻³)	f_{cu}
ZRC-A	161.25	206.12	697.50	986.5	21.79	17.8
ZRC-B	161.25	264.83	671.20	950.11	29.43	25.9
ZRC-C	161.25	295.57	640.71	947.42	32.84	29.6
ZRC-D	161.25	326.86	629.24	930.45	36.32	33.7

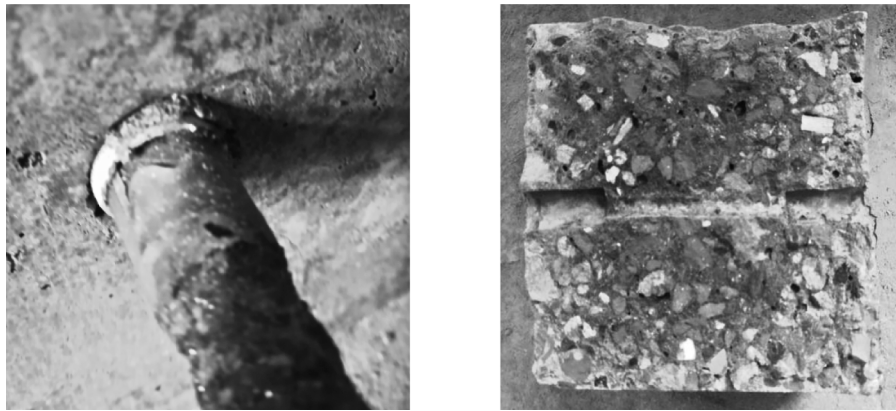


图2 试件破坏形态图

Fig.2 Test piece failure pattern

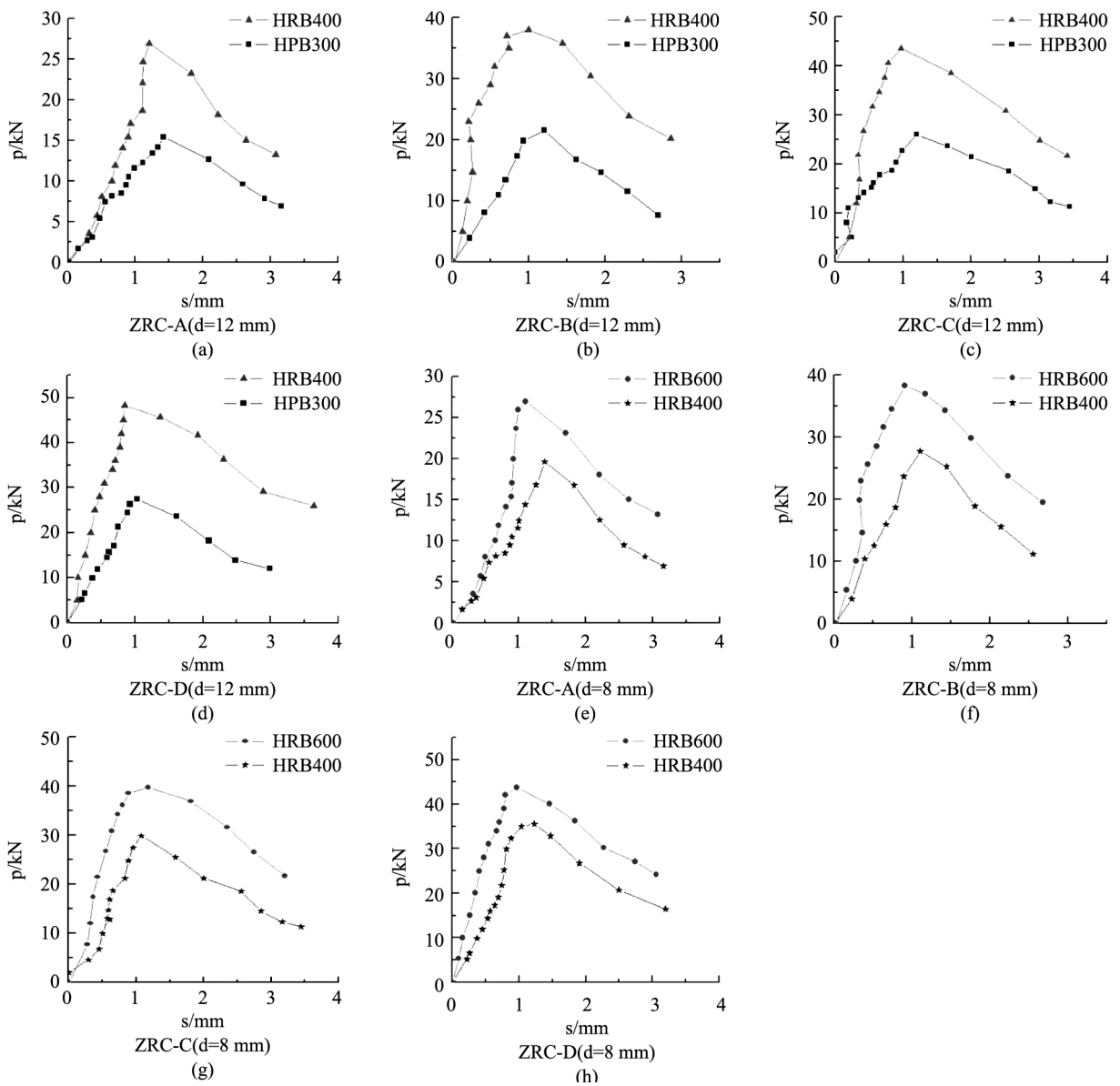


图3 不同试件的P-S曲线

Fig.3 P-S curve at different test pieces

表 2 钢筋的基本性能
Tab.2 Basic properties of rebar

钢筋类型	直径 /mm	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	伸长率 /%	弹性模量 /MPa
HRB600	8	643.58	752.09	29	200 000
HRB400	12	436.78	615.44	30	200 100
HRB400	8	458.18	620.76	32	200 000
HPB300	12	349.22	578.37	31	199 900

从图 3(d) 和图 3(h) 中可以看出, HRB400 级钢筋配置试件较 HPB300 级钢筋配置试件, 钢筋滑移时所需荷载值更大; 同样 HRB600 级钢筋滑移时所需荷载值明显大于 HRB400 钢筋。同等荷载条件下, 随着钢筋强度的变小, 滑移值在不断增大。说明钢筋外形对于钢筋与混凝土的黏结滑移性能影响很大, 带肋钢筋的黏结性能明显优于光圆钢筋。

2.2.2 黏结强度

1. 根据平均黏结应力假设, 黏结强度按式 (5) 进行计算。

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi d l_a} \quad (5)$$

式中: τ_u : 再生混凝土与钢筋间的黏结强度, 单位: MPa

P_u : 极限荷载值, 单位: kN

d : 钢筋直径, 单位: mm

l_a : 钢筋的埋置长度, 单位: mm

2. 黏结效率系数

将 $\beta_1 = \frac{\tau_u}{f_{cu}}$ 定义为相对黏结强度的黏结效率系数。

注: $\sigma = \frac{\tau_u}{l_a/d}$ 为单位锚固长度内的黏结应力。

由表 3 可看出:

在钢筋直径相同的情况下, 随着再生混凝土强度值的增大, HRB400 级钢筋的黏结效率系数在不断减小, 当直径为 12 mm 时, β_1 分别为 0.335 6, 0.323 1, 0.321 2 以及 0.315 0; 但对于光圆钢筋来说, 黏结效率系数与强度值呈现正相关关系, 分别为 0.191 6, 0.196 5, 0.201 7 以及 0.203 6。

再生混凝土强度值越大, 单位锚固长度内的黏结应力越大; 相同强度值及相同钢筋直径下的再生混凝土试件, HRB400 级钢筋的 σ 高于 HPB300 级钢筋, 约为 HPB300 级钢筋的 1.55-1.75 倍。

3 各因素对试件黏结性能的影响分析

3.1 钢筋直径对试件黏结性能的影响

由图 4 可知钢筋直径越大, 钢筋与再生混凝土之间的黏结强度越小。不同直径的钢筋, 其肋间距以及肋高都有着很大的差距, 且其与钢筋直径呈正比例关系。钢筋直径越大, 肋高及肋间距越大, 混凝土与钢筋间的黏结强度越低。从表 3 可知对于 HRB400 级钢筋, 当钢筋直径为 8 mm 时, A、B、C、D 四种试件的黏结强度为 6.63 MPa、9.29 MPa、10.28 MPa 以及 11.61 MPa, 当直径为 12 mm 时, 各试件的黏结强度分别为 5.97 MPa、8.40 MPa、9.51 MPa 以及 10.62 MPa, 相比于 8 mm 的试件, 黏结强度降低了约 7.49%-9.95%; β_1 降低了约 7.52%-9.95%。

3.2 混凝土强度、钢筋外形及钢筋强度对黏结性能的影响

由图 5 可知, 对于任意一种钢筋类型的试件来讲, 随着立方体抗压强度值的增大, 钢筋与混凝土之间的黏结强度也在不断增大。从图中可以明显看出, 带肋钢筋的黏结性能明显优于光圆钢筋。同种混凝土强度和钢筋直径的试件, 带肋钢筋的黏结强度约为光圆钢筋的 1.55 ~ 1.75 倍。当直径为 8 mm 时, HRB600 级钢筋的黏结强度明显高于 HRB400 级钢筋。从表 2 中钢筋的基本性能可知, HRB600 级钢筋屈服强度明显大于 HRB400 级钢筋, 同种情况下, 当 HRB400 级钢筋在试验过程中已经受拉屈服时, 黏结应力已经出现了明显的降低, HRB600 级钢筋此时可能会仍旧处于弹性阶段, 其黏结应力并未出现明显的波动。

4 考虑损伤因子的黏结滑移本构关系

4.1 富含砖粒再生混凝土损伤检测

根据文献 [10] 中关于混凝土损伤的超声检测试验研究可知, 从损伤力学角度分析, 混凝土在受损的过程中, 损伤程度可由式 (6) 的损伤变量 D 表示。

$$D = 1 - \frac{V^2}{V_0^2} \quad (6)$$

式中： V_0 、 V 分别为损伤前后的声速值。

从图6中可以看出，损伤程度由曲线偏离D=1的大小来判断，易知无论是光圆钢筋还是带肋钢筋，再生混凝土的损伤都是随着荷载的增加而增加的。在达到极限荷载的60%前，混凝土损伤并不明显，之后随着荷载的增加损伤越来越大。立方体抗压强度值高的再生混凝土损伤略低于较低强度的混凝土，但变化趋势不太显著。

4.2 考虑损伤因子的黏结滑移本构关系

根据4.1中的试验分析结果，在加载初期，混

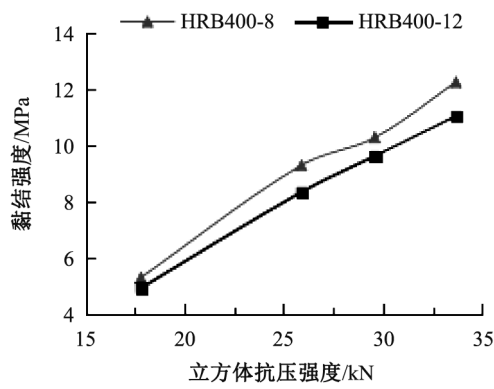


图4 不同混凝土强度下钢筋直径对黏结强度的影响
Fig.4 Effect of reinforcement diameter on bond strength under different concrete strengths

凝土损伤并不明显，到加载的中后期才出现比较明显损伤，而黏结滑移本构关系又是研究钢筋与再生混凝土黏结性能的重要指标以及有限元分析的重要基础，因此考虑损伤因子的黏结滑移本构关系也具有一定的意义。本次试验的P-S曲线，有着明显的上升段和下降段，所以根据HARAJI以及过镇海教授的相关研究成果^[12-13]，本次试验的黏结滑移本构方程也分为上升段和下降段，本构关系参数见表4。

上升段的本构方程：

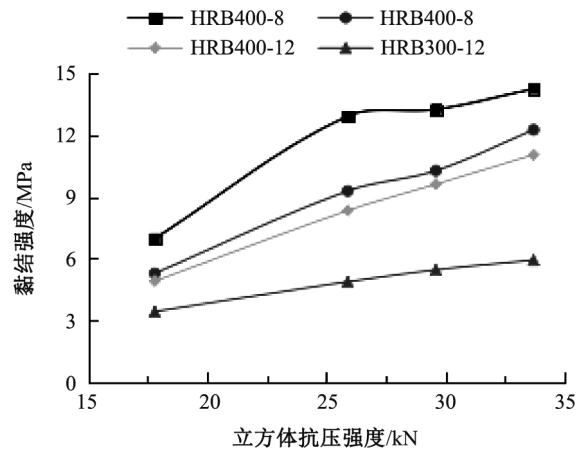


图5 不同立方体抗压强度下试件的黏结强度
Fig.5 Bond strength of test pieces under different cubic compressive strength

表3 主要试验结果
Tab.3 Main test results

试件编号	\bar{P}_u / kN	$\bar{\tau}_u / MPa$	β_1	σ / MPa	破坏形态
ZRC-A-1	27	8.96	0.503 5	0.597 3	钢筋拔出破坏
ZRC-A-2	20	6.63	0.372 7	0.442 0	钢筋拔出破坏
ZRC-A-3	27	5.97	0.335 6	0.597 0	钢筋拔出破坏
ZRC-A-4	15	3.41	0.191 6	0.341 0	钢筋拔出破坏
ZRC-B-1	39	12.94	0.499 6	0.862 7	钢筋拔出破坏
ZRC-B-2	28	9.29	0.358 7	0.619 3	钢筋拔出破坏
ZRC-B-3	38	8.40	0.323 1	0.844 0	钢筋拔出破坏
ZRC-B-4	23	5.09	0.196 5	0.509 0	钢筋拔出破坏
ZRC-C-1	40	13.27	0.448 3	0.884 7	钢筋拔出破坏
ZRC-C-2	31	10.28	0.347 3	0.685 3	钢筋拔出破坏
ZRC-C-3	43	9.51	0.321 2	0.951 0	钢筋拔出破坏
ZRC-C-4	27	5.97	0.201 7	0.597 0	钢筋拔出破坏
ZRC-D-1	43	14.27	0.423 4	0.951 3	钢筋拔出破坏
ZRC-D-2	35	11.61	0.344 6	0.774 0	钢筋拔出破坏
ZRC-D-3	48	10.62	0.315 0	1.062 0	钢筋拔出破坏
ZRC-D-4	31	6.86	0.203 6	0.686 0	钢筋拔出破坏

注：1表示d=8 mm的HRB600级钢筋；2表示d=8 mm的HRB400级钢筋；3表示表示d=12 mm的HRB400级钢筋；4表示d=12 mm的HRB300级钢筋。

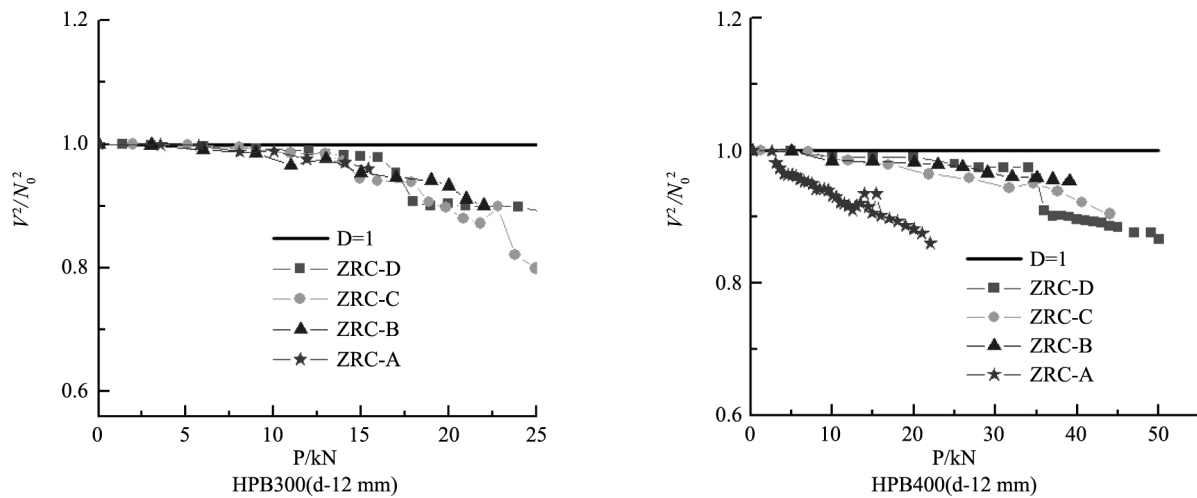


图 6 不同强度下的 D-P 曲线
Fig.6 D-P curve at different intensity

$$\frac{\tau \times D}{\tau_u} = \left(\frac{S \times D}{S_u} \right)^a \quad (7)$$

下降段的本构方程：

$$\frac{\tau \times D}{\tau_u} = \frac{(S \times D)/S_u}{b[(S \times D)/S_u - 1]^2 + (S \times D)/S_u} \quad (8)$$

式中： τ_u 为黏结强度； S_u 为黏结强度相对应的滑移量。
a, b 无量纲的系数。

表 4 本构关系参数表

Tab.4 Parameters of constitutive relation

试件编号	a	b	试件编号	a	b
ZRC-A-3	1.40	1.17	ZRC-A-4	0.79	1.62
ZRC-B-3	0.49	0.86	ZRC-B-4	0.59	1.54
ZRC-C-3	0.55	0.89	ZRC-C-4	0.53	2.75
ZRC-D-3	0.61	0.87	ZRC-D-4	0.82	3.15

5 结论

1) 本试验中的含砖粒再生混凝土立方体试件的破坏形式均为钢筋的拔出破坏，分为：微滑阶段、内裂阶段、损伤程度加深滑移阶段、下降阶段以及残余阶段五个阶段。

2) 钢筋与再生混凝土间的黏结强度随混凝土强度值的增加而增加，但随钢筋直径的增加而减小。相同条件下，对于螺旋钢筋，随着混凝土强度值的增加而降低；但对于光圆钢筋，随着强度的增加而增加。

3) 从 D-P 曲线可以看出，同种试验条件下，混凝土强度较高的试件在持荷过程中损伤程度低于混凝土强度值低的试件，试件的损伤程度逐渐加深。

参考文献：

- [1] 杨海峰, 邓志恒, 李雪良, 等. 再生混凝土-钢筋黏结滑移本构关系研究 [J]. 建筑结构学报, 2013(16): 429-430.
- [2] 胡晓鹏, 牛荻涛, 张永利. 粉煤灰混凝土黏结性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2013(1): 139-140.
- [3] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 146-162.
- [4] 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): 89-90.
- [5] 王晨霞, 吴瑾, 陈志辉. 钢筋与再生混凝土黏结滑移性能的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2013(2): 226-227.
- [6] 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(2): 127-128.
- [7] 安新正, 牛薇, 张亚飞, 等. 含砖粒再生混凝土基本性能研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(1): 30-33.
- [8] 王新永, 李云霞, 李秋义. 再生混凝土的用水量和强度试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2006(12): 13-15.
- [9] 王江, 薛燕飞, 周辉. 再生混凝土抗压强度研究 [J]. 混凝土, 2006(7): 47-49.
- [10] 李士伟, 林维正, 李少波, 等. 混凝土损伤的超声检测试验研究 [J]. 无损检测, 2004(3): 127-141.
- [11] 肖建庄, 李丕胜, 秦薇. 再生混凝土与钢筋间的黏结滑移性能 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 13-16.
- [12] HARAJI M H. Development/splice strength of reinforcing bars embedded in pail and fiber reinforced concrete [J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(5): 511-520.
- [13] 过镇海. 混凝土的强度和变形试验基础和本构关系 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

(责任编辑 李新)