

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201705005

钢筋-再生混凝土黏结滑移性能试验

董宏英, 孙文娟, 曹万林, 赵洪飞

(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: 为研究钢筋与再生混凝土界面黏结性能和本构关系, 考虑再生粗骨料取代率、再生细骨料取代率、钢筋类型、钢筋直径、锚固长度的影响, 设计了15个梁式试件进行钢筋-再生混凝土黏结滑移性能试验。综合分析上述变量对荷载-滑移曲线、黏结强度、黏结效率的影响规律, 给出了黏结-滑移本构关系的建议。结果表明: 随再生粗骨料取代率增加, 钢筋与混凝土之间的黏结强度减小, 而抗滑移能力增强; 再生细骨料的加入, 导致再生混凝土的黏结性能明显退化; 螺纹钢钢筋与再生混凝土的黏结强度约为光圆钢筋的2倍; 钢筋与再生混凝土的界面黏结性能随着钢筋直径和锚固长度的增加而降低; 建议的钢筋-再生混凝土的黏结-滑移本构关系和参数, 与试验结果拟合较好。

关键词: 再生混凝土; 梁式试件; 黏结性能; 黏结效率系数; 黏结-滑移本构关系

中图分类号: TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)12-0082-09

Experimental study on bond-slip behavior between steel bars and recycled concrete

DONG Hongying, SUN Wenjuan, CAO Wanlin, ZHAO Hongfei

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

Abstract: To investigate the bond behavior and constitutive relationship at the interface between steel bars and recycled concrete, 15 beam-type specimens were designed to test the bond-slip behavior of reinforced recycled concrete. The design parameters included recycled coarse aggregate substitution, recycled fine aggregate substitution, steel bar shape, steel bar diameter and anchorage length. The influence of the above variables on the load-slip curves, bond strength and bond efficiency coefficient between steel bars and recycled concrete was analyzed synthetically, and the bond-slip constitutive relationship was proposed. The results show that: with the increase of recycled coarse aggregate replacement ratio, the bond strength between steel bars and concrete decreases; however, the anti-slip ability increases. The recycled fine aggregate addition makes the bond behavior become weaker significantly. The bond strength between deformed bars and recycled concrete is about 2 times of that between plain bars and recycled concrete. The interfacial bond behavior of reinforced recycled concrete becomes poorer with the increase of steel bar diameter and anchorage length. The proposed bond-slip constitutive relationship and parameters of reinforced recycled concrete fit the experimental results well.

Keywords: recycled concrete; beam-type specimens; bond behavior; bond efficiency coefficient; bond-slip constitutive relation

随着建筑业高速发展, 砂石骨料的需求量日益增大, 同时老旧建筑拆除以及自然灾害损毁产生了大量建筑垃圾。因此, 由建筑垃圾制备的再生混凝土作为绿色资源, 已成为建筑材料循环利用和建筑垃圾资源化的发展需求^[1]。

再生混凝土结构基础研究之一就是钢筋与再生混凝土界面黏结性能和本构关系。Xiao等^[2]通过拉拔试验研究表明, 再生混凝土与普通混凝土黏结性能发展以及退化过程相似; 胡琼等^[3]采用偏心置筋方式改

变保护层厚度, 结果表明适当增加保护层厚度和锚固长度可以提高再生混凝土黏结强度; Seara-Paz等^[4]试验结果得出, 抗压强度和黏结强度均随再生粗骨料取代率的增加而降低, 并且黏结强度与抗压强度平方根成比例关系; Kim等^[5]试验表明, 钢筋的布置方向、位置和混凝土取代率对高强再生混凝土黏结-滑移曲线影响不大; Guerra等^[6]和Prince等^[7]均在其研究中提到粗骨料取代率导致抗拉强度的改变, 从而影响钢筋-再生混凝土黏结强度。

黏结滑移性能试验按试验方式分为轴拉试验、拉拔试验和梁式试验, 以往研究大多以拉拔试验为主, 该方法并不能反映混凝土梁的真实受力状况。作者课题组也进行了一系列有关钢筋-中高强再生混凝土黏结性能试验研究^[8-9]。本文研究是其中的一部

收稿日期: 2017-05-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YF0703304);
国家自然科学基金重点项目(51438007)

作者简介: 董宏英(1966—), 女, 博士, 教授;
曹万林(1954—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 董宏英, donghy@bjut.edu.cn

分,针对 15 个梁式试件进行试验分析,研究水胶比为 0.42 时再生粗细骨料取代率、钢筋类型、钢筋直径、锚固长度对再生混凝土黏结滑移性能的影响。

1 试验概况

1.1 材料性能

混凝土材料:试验采用冀东牌 R42.5 普通硅酸盐水泥;天然粗骨料为山碎石;天然细骨料为河砂,细度模数 2.6;再生粗骨料和再生细骨料均由北京广渠门某混凝土建筑物拆除后,经破碎筛分而成。其中,再生粗骨料的泥块质量分数 0.32%、吸水率 2.99%、针片状颗粒质量分数 3.01%。再生细骨料的泥块质量分数 3.0%、吸水率 6.32%。各骨料的基本性能见表 1。为改善混凝土性能,在搅拌混凝土过程中添加 F 类 I 级粉煤灰以及强度等级 S95 的粒化高炉渣渣粉。

配合比:根据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》进行配合比设计,通过调整再生粗骨料

取代率 0%、33%、50%、66%、100%,细骨料取代率 0%、50%、100% 配制了 8 组水胶比为 0.42 的中等强度混凝土,混凝土配合比见表 2。由于再生骨料的吸水率直接影响配合比中实际用水量,因此本试验采用基于水灰比之上的配合比设计方法^[10],将再生混凝土的实际拌合用水分为两部分——骨料吸附用水和理论用水。由表 2 可以看出,粗骨料取代率为 33%~66%,细骨料为天然砂时,混凝土强度几乎没有差别,并且与普通混凝土强度相差不大。

表 1 骨料基本性能

Tab.1 Basic properties of aggregate

骨料类型	连续级配/ mm	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压碎 指标/%	含泥 量/%
天然粗骨料	5-25	2 760.23	9.70	0.40
天然细骨料	0.16-5	2 670.02	7.32	1.50
再生粗骨料	5-25	2 575.49	13.10	2.25
再生细骨料	0.16-5	2 455.02	11.32	3.50

表 2 混凝土配合比

Tab.2 Mix proportion of concrete

水胶比	ρ_c /%	ρ_f /%	粗骨料/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		细骨料/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		胶凝材料/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)			理论用水/ kg	f_{cu} / MPa
			山碎石	再生石	天然砂	再生砂	水泥	粉煤灰	矿粉		
0.42	0	0	879	0	879	0	271	90	90	190	42.96
	33	0	589	290	879	0	271	90	90	190	41.38
	50	0	439	439	879	0	271	90	90	190	41.18
	66	0	299	580	879	0	271	90	90	190	41.54
	100	0	0	879	879	0	271	90	90	190	32.61
	66	50	299	580	439	439	271	90	90	190	34.06
	100	50	0	879	439	439	271	90	90	190	31.41
	100	100	0	879	0	879	271	90	90	190	29.37

注: ρ_c 为再生粗骨料取代率, ρ_f 为再生细骨料取代率, f_{cu} 为实测立方体抗压强度。

钢筋材料:试件纵向受力钢筋有两种类型,一种为 HRB400 的螺纹钢(直径分别为 10、14、20 mm),另一种为 HPB300 的光圆钢筋(直径分别为 10、20 mm)。箍筋采用 HPB300,直径为 6 mm,间距 80 mm。架立筋采用 HRB400,直径为 12 mm。实测的钢筋力学性能见表 3。

表 3 钢筋力学性能

Tab.3 Mechanical properties of steel bars

钢筋类型	钢筋直径 d/mm	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	伸长率 $\delta/\%$
HRB400	10	516	762	18.2
	14	495	737	28.9
	20	498	688	19.4
HPB300	10	328	471	36.9
	20	324	470	37.3

1.2 试件设计与制作

本次试验采取同一根试件,左右梁段测试钢筋锚固长度不同的试验方法,当短锚固一侧钢筋与混

凝土发生黏结破坏后(钢筋自由端产生滑移),用预应力锚具将该侧钢筋限制,继续进行长锚固一侧试验。考虑混凝土再生粗骨料取代率 ρ_c 、再生细骨料取代率 ρ_f 、钢筋类型、钢筋直径 d 以及锚固长度 l_a (短锚固长度为 l_{a1} ,长锚固长度为 l_{a2}),设计并制作了水胶比 0.42 的 15 个梁式试件用于研究钢筋-再生混凝土的黏结滑移性能。各试件参数见表 4。

试件尺寸为 150 mm×300 mm×1 100 mm,左右梁段由钢铰连接,保护层厚度 25 mm。为保证底部测试钢筋有足够长度放置夹具及预应力锚具,钢筋外伸出混凝土表面各 200 mm。钢筋的锚固长度通过在其两端设置 PVC 套管的长短确定,非锚固部分采用 PVC 管隔离钢筋与混凝土,既确保了锚固段的长度又避免了非黏结区产生黏结应力。为防止浇筑时砂浆流入管内,浇筑前将 PVC 套管端部密封。试件尺寸及配筋见图 1,试件立体图见图 2。图中弯折钢筋设置的目的是防止试件在搬运过程中,左右梁段因扭转而影响试验结果,试验开始前将该钢筋锯断。

表 4 试件参数

Tab.4 Parameters of specimens

试件序号	试件编号	$\rho_c/\%$	$\rho_r/\%$	d/mm	l_{a1}/mm	l_{a2}/mm	钢筋类型
1	B0/0-R20	0	0	20	200	400	螺纹钢
2	B33/0-R10	33	0	10	100	200	螺纹钢
3	B50/0-R20	50	0	20	200	400	螺纹钢
4	B66/0-R10	66	0	10	100	200	螺纹钢
5	B66/0-R14	66	0	14	140	280	螺纹钢
6	B66/0-R20	66	0	20	200	400	螺纹钢
7	B66/50-R20	66	50	20	200	400	螺纹钢
8	B100/0-R20	100	0	20	200	400	螺纹钢
9	B100/50-R20	100	50	20	200	400	螺纹钢
10	B100/100-R10	100	100	10	100	200	螺纹钢
11	B100/100-R14	100	100	14	140	280	螺纹钢
12	B100/100-R20	100	100	20	200	400	螺纹钢
13	B50/0-P20	50	0	20	200	400	光圆钢筋
14	B66/0-P10	66	0	10	100	200	光圆钢筋
15	B66/0-P20	66	0	20	200	400	光圆钢筋

注： l_{a1} 为短锚固一侧锚固长度， l_{a2} 为长锚固一侧锚固长度。

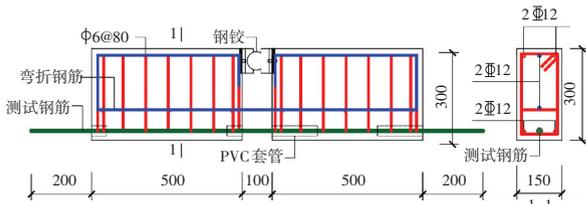


图 1 试件尺寸及配筋图 (mm)

Fig.1 Dimensions and reinforcement of specimens (mm)

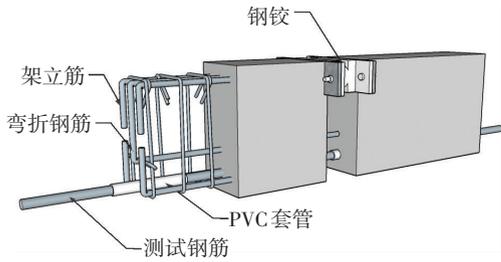


图 2 试件立体图

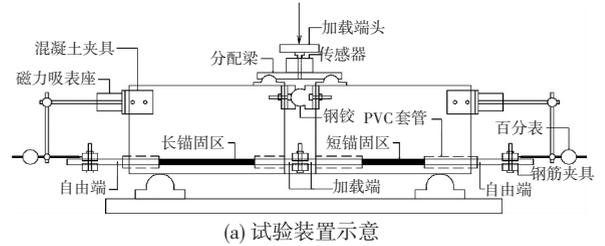
Fig.2 Stereogram of specimens

1.3 加载装置及测量内容

采用北京工业大学工程力学实验室 100 t 多功能电液伺服试验机进行加载,数据采集装置为 CRONOS-PL2-DIO 动态采集仪.试验装置见图 3.外荷载通过轮辐式拉压传感器施加在净跨 200 mm 的分配梁上,再传至混凝土试件.图 3(a)中电子百分表的磁力吸表座吸附在混凝土夹具表面,滑杆对准钢筋夹具,保证百分表量测的是混凝土与钢筋自由端的相对位移.图 3(b)为试验现场图.

加载方式采用单调加载,过程分为两阶段:第一阶段进行短锚固侧钢筋-混凝土黏结滑移性能试验,当该侧钢筋与混凝土产生黏结破坏后,结束第一阶段,用预应力锚具(见图 3(c))限制该侧钢筋与混凝土

土的相对滑移;第二阶段进行长锚固侧黏结滑移试验,直至该侧黏结破坏或钢筋拉断结束试验.



(a) 试验装置示意



(b) 试验现场图



(c) 预应力锚具安装图

图 3 试验装置

Fig.3 Test setup

试件的加载示意图 4,混凝土梁中测试钢筋所受拉力为 P ,根据受力平衡则钢铰产生拉力为 P ,分

配梁的一个分力为 $F/2$, 根据力矩平衡原理, 钢筋拉力见式(1), 其中纵筋中心线至梁底距离 a 包括保护层厚度 25 mm、箍筋直径 6 mm、纵筋半径。因此对于直径为 10 mm 的测试钢筋 $a = 36$ mm, 直径为 14 mm 的测试钢筋 $a = 38$ mm, 直径为 20 mm 的测试钢筋 $a = 41$ mm。

$$P = 175F / (260 - a). \quad (1)$$

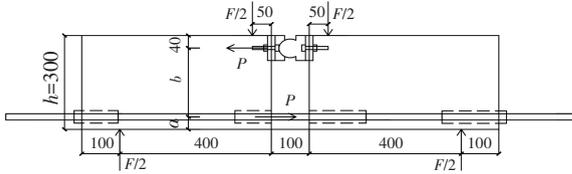


图 4 试验加载示意 (mm)

Fig.4 Load test equipment diagram (mm)

2 试验结果与分析

2.1 试验破坏形态

试件左右梁段锚固长度不同, 因此一个试件可能产生两种破坏形式。根据再生粗细骨料取代率、钢筋直径和外形、锚固长度不同, 钢筋-再生混凝土梁黏结破坏形态有 3 种:

1) 拉断破坏。该种破坏形态主要出现在直径为 10、14 mm 螺纹钢, 锚固长度为 $10d$ 的梁段以及直径为 20 mm 螺纹钢, 锚固长度为 $20d$ 的梁段。直径为 20 mm 螺纹钢试件在加载过程中, 梁底出现受弯裂缝和沿钢筋锚固长度方向的纵向裂缝, 梁侧出现由分配梁接触点向支座方向发展的斜裂缝, 加载端混凝土劈裂。直径为 10、14 mm 螺纹钢试件因保护层厚度相对较大, 未出现裂缝。试件最终因钢筋与混凝土之间的黏结强度较大且超过测试钢筋的极限抗拉强度, 自由端未产生滑移而钢筋拉断结束试验。图 5(a) 为梁段 B100/0-R20-20d 试验时, 加载端混凝土劈裂破碎, 钢筋拉断现场破坏图。

2) 劈裂拔出破坏。该种破坏形态主要出现在直径为 20 mm 螺纹钢, 锚固长度为 $10d$ 的梁段。加载开始后, 量测加载端滑移的百分表指针迅速旋转, 自由端百分表未变化, 随着荷载的增加, 梁底及梁侧裂缝出全, 加载端混凝土劈裂, 自由端开始出现滑移, 荷载下降, 试件挠度增大加快, 最终界面黏结失效, 钢筋拔出。图 5(b) 为梁段 B66/0-R20-10d 侧面和底面的裂缝开展情况。

3) 拔出破坏。该种破坏形态主要出现在钢筋类型为光圆钢筋的梁式试件。由于光圆钢筋与混凝土之间黏结主要依赖化学胶着力和摩擦力, 因此二者之间黏结作用较小。加载过程中, 梁表面没有产生明显裂缝, 自由端滑移后荷载并未过多下降。图 5(c) 为

梁段 B50/0-P20-20d 加载端钢筋拔出破坏图。



(a) 拉断破坏



(b) 劈裂拔出破坏



(c) 拔出破坏

图 5 试件破坏形态

Fig.5 Failure modes of specimens

2.2 荷载-滑移曲线及特征值

试验测得钢筋-再生混凝土梁 3 种黏结破坏形态下的荷载-滑移曲线 ($P-S$ 曲线) 如图 6 所示, (a) 为再生粗骨料取代率 66%、细骨料为天然砂、直径 14 mm 的螺纹钢、锚固长度为 $10d$ 的梁段 $P-S$ 曲线, 该侧发生的是拉断破坏, 曲线特征是近似一条平行于纵坐标轴的直线, 并且滑移量为 0; (b) 为再生粗骨料取代率 66%、再生细骨料取代率 50%、直径 20 mm 的螺纹钢、锚固长度为 $10d$ 的梁段 $P-S$ 曲线, 该侧发生的是劈裂拔出破坏, 曲线经历短暂劈裂阶段, 黏结力达到黏结强度后进入下降段, 荷载下降较快且滑移量大幅度增加, 残余段滑移量继续增加而荷载几乎不再变化; (c) 为再生粗骨料取代率 66%、细骨料为天然砂、直径 20 mm 的光圆钢筋、锚固长度为 $10d$ 的梁段 $P-S$ 曲线, 该侧发生的是拔出破坏, 与 (b) 曲线形状类似, 但下降段滑移量小且荷载降低幅度小, 较早进入残余阶段。

试验中各梁段的破坏形态及黏结滑移特征值见表 5。表中 f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; F_u 为梁式试件的极限承载力; P_u 为试件达到承载力时等效钢筋拉力; τ_u 为黏结破坏时的平均黏结强度, 当破坏形态

为拉断破坏时,钢筋与混凝土之间的平均黏结应力用 τ 表示。 β_1 为相对混凝土强度的黏结效率系数, $\beta_1 = \tau_u / f_{cu}$; β_2 为相对初滑黏结应力(即对应钢筋自由

端开始出现滑移时的黏结应力 τ_1) 的黏结效率系数, $\beta_2 = \tau_u / \tau_1$; β_3 为相对锚固长度 ($n = l_a / d$) 的黏结效率系数, $\beta_3 = \tau_u / n$ 。

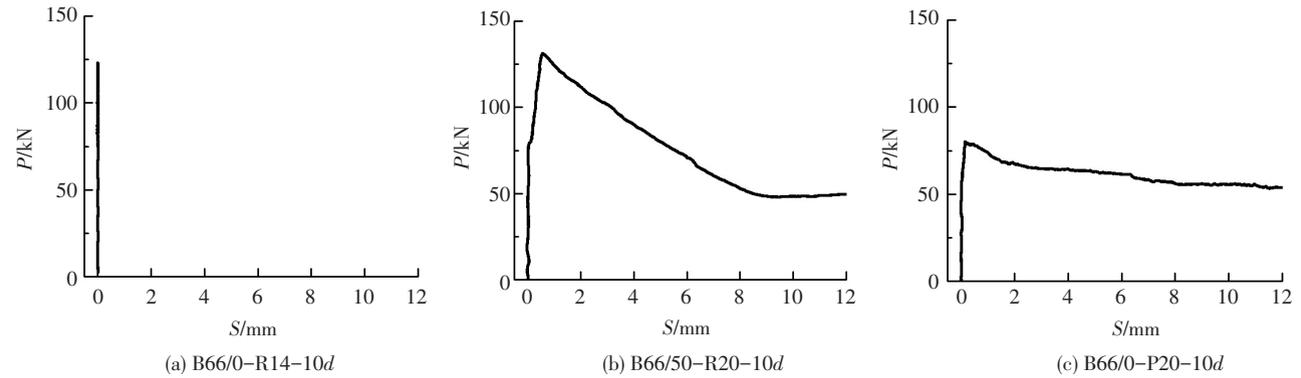


图 6 典型 P-S 曲线

Fig.6 Typical curves of P-S

试件 B33/0-R10-10d(20d)、B66/0-R10-10d(20d)、B66/0-R14-10d(20d) 在进行锚固长度为 10d 一侧试验时,梁段已发生拉断破坏,因而该试件不能再进行锚固长度为 20d 一侧的黏结滑移性能试验。试件 B100/100-R14-10d(20d) 因结束第一阶段后锚具未能将短锚固 10d 一侧钢筋自由端滑移限制住,因此未能测得锚固长度为 20d 一侧钢筋实际的滑移值。

筋-再生混凝土拉拔试验^[9]结果对比,见表 6,其中试件水胶比 0.42、试验钢筋均为直径 20 mm 的螺纹钢筋。但需要说明的是,二者试件并不是同时浇筑,因此结论可能存在偏差。

根据过镇海教授^[11]论述表明,普通混凝土拉拔试件比梁式试件测得的平均黏结强度高,其比值约为 1.1~1.6。故将本文结果与作者课题组已做的钢

筋-再生混凝土的梁式试件黏结强度相比较拉拔试件黏结强度偏低,其原因是梁式试件模拟工程结构中混凝土梁弯剪段的黏结特性,与拉拔试件相比,其受复杂应力作用,因而钢筋周围混凝土应力状态不同。除此之外,梁式试件的混凝土保护层厚度小于拉拔试件的混凝土保护层厚度,这是前者黏结强度低于后者的主要原因。

表 5 各梁段破坏形态及黏结滑移特征值

Tab.5 The damage mode and bond-slip characteristic values of beams

梁段编号	破坏形态	f_{cu}/MPa	F_u/kN	P_u/kN	τ/MPa	τ_u/MPa	τ_1/MPa	β_1	β_2	β_3
B0/0-R20-10d	劈裂拔出破坏	42.96	239.55	191.42	—	15.24	8.52	0.35	1.79	1.52
B0/0-R20-20d	拉断破坏	42.96	303.54	242.55	9.66	—	—	—	—	0.48
B33/0-R10-10d	拉断破坏	41.38	90.86	70.98	22.61	—	—	—	—	2.26
B50/0-R20-10d	劈裂拔出破坏	41.18	211.25	168.80	—	13.44	7.89	0.33	1.70	1.34
B50/0-R20-20d	拉断破坏	41.18	288.83	230.80	9.19	—	—	—	—	0.46
B66/0-R10-10d	拉断破坏	41.54	86.28	67.41	21.47	—	—	—	—	2.15
B66/0-R14-10d	拉断破坏	41.54	159.58	125.80	20.44	—	—	—	—	2.04
B66/0-R20-10d	劈裂拔出破坏	41.54	211.82	169.26	—	13.48	8.10	0.32	1.66	1.35
B66/0-R20-20d	拉断破坏	41.54	302.02	241.34	9.61	—	—	—	—	0.48
B66/50-R20-10d	劈裂拔出破坏	34.06	164.80	131.69	—	10.49	6.01	0.31	1.75	1.05
B66/50-R20-20d	拉断破坏	34.06	281.71	225.11	8.96	—	—	—	—	0.45
B100/0-R20-10d	劈裂拔出破坏	32.61	187.39	149.74	—	11.92	9.13	0.37	1.31	1.19
B100/0-R20-20d	拉断破坏	32.61	306.28	244.74	9.74	—	—	—	—	0.49
B100/50-R20-10d	劈裂拔出破坏	31.41	151.64	121.17	—	9.65	5.71	0.31	1.69	0.96
B100/50-R20-20d	拉断破坏	31.41	321.92	257.24	10.24	—	—	—	—	0.51
B100/100-R10-10d	劈裂拔出破坏	29.37	67.05	52.38	—	16.68	12.35	0.57	1.35	1.67
B100/100-R14-10d	劈裂拔出破坏	29.37	98.98	78.03	—	12.68	8.53	0.43	1.49	1.27
B100/100-R14-20d	拉断破坏	29.37	158.94	125.29	20.36	—	—	—	—	1.02
B100/100-R20-10d	劈裂拔出破坏	29.37	117.62	93.99	—	7.48	3.80	0.25	1.97	0.75
B100/100-R20-20d	劈裂拔出破坏	29.37	290.64	232.24	—	9.25	5.61	0.31	1.65	0.46
B50/0-P20-10d	拔出破坏	41.18	104.03	83.13	—	6.62	4.80	0.16	1.38	0.66
B50/0-P20-20d	拔出破坏	41.18	134.02	107.10	—	4.26	4.20	0.10	1.01	0.21
B66/0-P10-10d	拔出破坏	41.54	38.30	29.92	—	9.53	4.57	0.23	2.09	0.95
B66/0-P10-20d	拔出破坏	41.54	66.35	51.84	—	8.25	6.17	0.20	1.34	0.41
B66/0-P20-10d	拔出破坏	41.54	101.48	81.09	—	6.46	4.35	0.16	1.49	0.65
B66/0-P20-20d	拔出破坏	41.54	147.09	117.54	—	4.68	4.58	0.11	1.02	0.23

表 6 拉拔试验和梁式试验对比

试验方法	$\rho_c/\%$	$\rho_f/\%$	l_a/mm	τ_u/MPa	比值
拉拔试验	66	0	10d	13.87	1.03
梁式试验				13.48	
拉拔试验	100	0	10d	14.44	1.21
梁式试验				11.92	

注:比值为拉拔试验黏结强度/梁式试验黏结强度

2.3 影响钢筋-再生混凝土黏结滑移性能因素

2.3.1 再生粗骨料取代率

实测不同粗骨料取代率下,钢筋-再生混凝土荷载-滑移曲线见图 7.由表 5 和图 7 可知,再生粗骨料取代率为 50%、66%、100%的再生混凝土相比普通混凝土 τ_u 分别降低 11.81%、11.55%、21.78%.因而当细骨料为天然砂时,随着再生粗骨料取代率的增加,钢筋-再生混凝土黏结强度减小.当再生粗骨料取代率为 50%~66%时,黏结强度几乎不变.

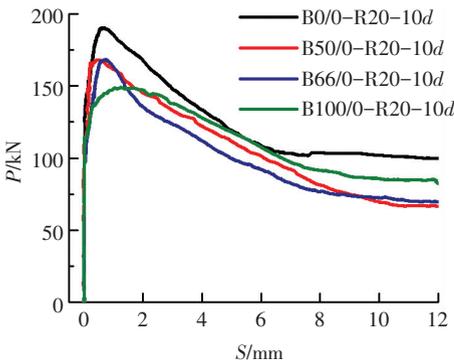


图 7 不同粗骨料取代率 P-S 曲线

Fig.7 P-S curves of coarse aggregate replacement ratio

直径 20 mm 螺纹钢、锚固长度 10d 的梁段,当细骨料为天然砂时,不同再生粗骨料取代率与相对混凝土强度的黏结效率系数 β_1 和相对初滑黏结应力的黏结效率系数 β_2 之间的关系见图 8.由表 5 和图 8 可知,相比普通混凝土,再生粗骨料取代率为 50%、66%时, β_1 分别降低 5.71%、8.57%;但粗骨料取代率为 100%时, β_1 则增加了 5.71%.其原因可能是再生骨料与水泥石的“弹性协调”使得混凝土构成比较均匀,另外再生粗骨料表面的微裂缝吸入新的水泥颗粒,使得加荷前再生混凝土出现的微裂缝较少,因此骨料与水泥石的界面黏结力较强^[12].

β_2 主要评价的是钢筋与混凝土间抗滑移能力强弱.随着再生粗骨料取代率的增加, β_2 大致呈下降趋势,即自由端出现滑移时相对黏结应力增大,抗滑移能力增强.其主要原因是再生骨料表面较粗糙,再生粗骨料取代率越高,越能在界面处产生更强的咬合力.

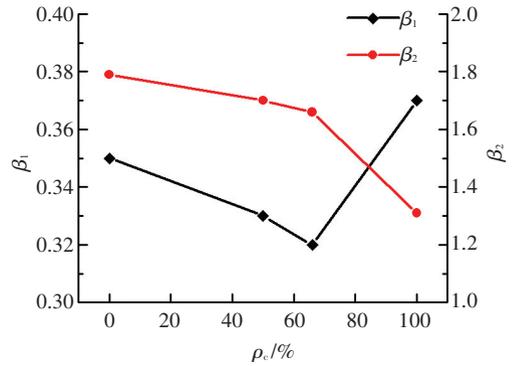


图 8 黏结效率系数与粗骨料取代率关系

Fig.8 Relations of bond efficiency coefficient and coarse aggregate replacement ratio

2.3.2 再生细骨料取代率

实测不同再生细骨料取代率下,钢筋-再生混凝土荷载-滑移曲线见图 9.由表 5 和图 9 可知,直径 20 mm 的螺纹钢、锚固长度 10d 的梁段,当再生粗骨料取代率为 66%时,再生细骨料取代率为 50%比细骨料为天然砂的 τ_u 降低 22.18%;当再生粗骨料取代率为 100%时,再生细骨料取代率为 50%、100%比细骨料为天然砂的 τ_u 分别降低 19.04%、37.25%.由此可知,随着再生细骨料取代率的增加,钢筋-再生混凝土黏结强度减小.将梁段 B66/50-R20-10d 和梁段 B100/50-R20-10d 比较同样可得,细骨料取代率一定($\rho_r=50\%$)时,钢筋-再生混凝土黏结强度随再生粗骨料取代率增加而降低.

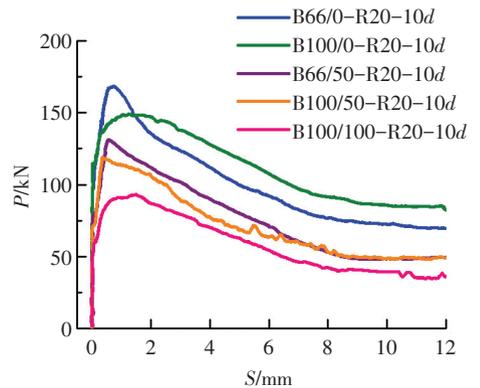


图 9 不同细骨料取代率 P-S 曲线

Fig.9 P-S curves of fine aggregate replacement ratio

直径 20 mm 螺纹钢、锚固长度 10d 的梁段,当再生粗骨料取代率 100%时,不同再生细骨料取代率与相对混凝土强度的黏结效率系数 β_1 和相对初滑黏结应力的黏结效率系数 β_2 之间的关系见图 10.由表 5 和图 10 可知,再生粗骨料取代率一定($\rho_c=100\%$)时,随着再生细骨料取代率的增加, β_1 呈线性降低, β_2 呈增长趋势.因此,细骨料的加入,大幅度降低钢筋-再生混凝土的黏结强度以及抗滑移能力,黏结性能明显退化.

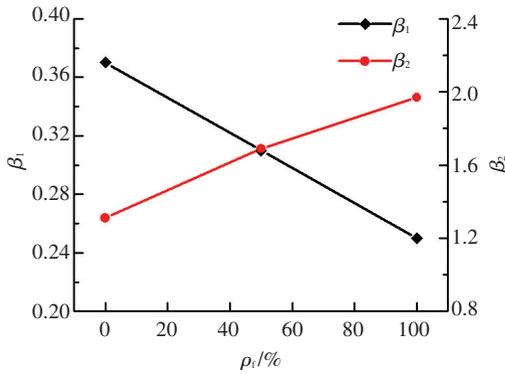


图 10 黏结效率系数与细骨料取代率关系

Fig. 10 Relations of bond efficiency coefficient and fine aggregate replacement ratio

2.3.3 钢筋外形

不同钢筋外形对钢筋-再生混凝土黏结强度影响见图 11. 采用螺纹钢的梁段 B66/0-R10-10d、B66/0-R20-10d、B50/0-R20-10d 钢筋与再生混凝土之间的 τ_u 分别是光圆钢筋梁段 B66/0-P10-10d、B66/0-P20-10d、B50/0-P20-10d 的 2.25、2.09、2.03 倍. 因此螺纹钢-再生混凝土黏结强度大约为光圆钢筋-再生混凝土黏结强度的 2 倍. 其原因是光圆钢筋与再生混凝土界面不存在机械咬合, 而机械咬合作用在螺纹钢与再生混凝土界面中起最主要影响, 因而光圆钢筋比螺纹钢的黏结强度小很多.

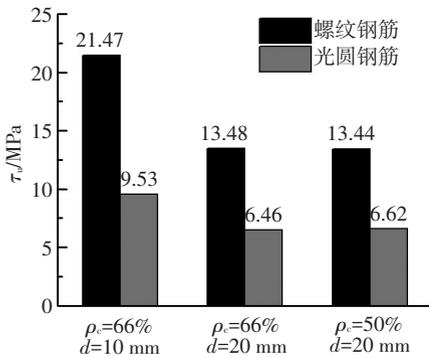


图 11 钢筋外形对黏结强度的影响

Fig. 11 Influence of steel bar type on bond strength

2.3.4 钢筋直径

不同钢筋直径对钢筋-再生混凝土黏结强度及黏结效率系数影响见表 5 和图 12. 当混凝土再生粗骨料取代率为 100%, 细骨料取代率为 100%, 锚固长度为 10d 的螺纹钢时, 钢筋直径为 10、14、20 mm 的梁段 τ_u 分别为 16.68、12.68、7.48 MPa; 相对混凝土强度的黏结效率系数 β_1 分别为 0.57、0.43、0.25; 相对初滑黏结应力的黏结效率系数 β_2 分别为 1.35、1.49、1.97. 由此可知, 随着螺纹钢直径的增加, 钢筋-再生混凝土的 τ_u 降低, β_1 降低而 β_2 增加, 即黏结性能随钢筋直径增加而降低. 其主要原因是随着钢筋直径的增加, 混凝土对钢筋的握裹能力越差; 并

且在其他因素相同时, 钢筋与混凝土的界面初始损伤也随钢筋直径增加而增加^[13].

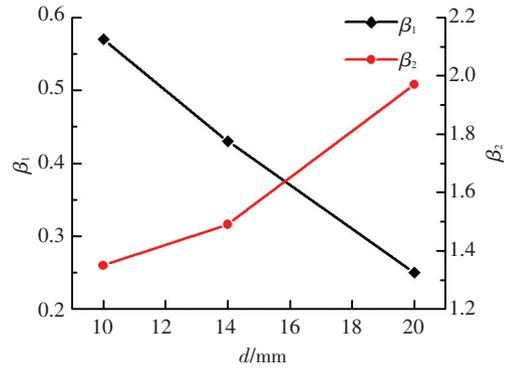


图 12 黏结效率系数与钢筋直径关系

Fig. 12 Relations of bond efficiency coefficient and steel bar diameters

2.3.5 锚固长度

对于光圆钢筋, 不同锚固长度对钢筋-再生混凝土黏结强度影响见图 13. 由表 5 和图 13 可知, 采用锚固长度为 10 倍钢筋直径的梁段 B66/0-P10-10d、B66/0-P20-10d、B50/0-P20-10d 钢筋与再生混凝土之间的 τ_u 分别是锚固长度为 20 倍钢筋直径梁段的 1.16、1.38、1.55 倍, β_1 分别为 1.15、1.45、1.6 倍. 可见, 钢筋-再生混凝土的黏结强度随锚固长度的增加而降低. 不同锚固长度与相对锚固长度的黏结效率系数 β_3 之间的关系见图 14. 由图 14 可知, 相对锚固长度的黏结效率系数随着锚固长度的增加而降低. 产生上述现象的原因是: τ_u 为平均黏结强度, 随着锚固长度增加, 虽然极限荷载增加, 但是沿锚固长度范围内钢筋与再生混凝土应力分布越不均匀, 从而导致黏结强度降低.

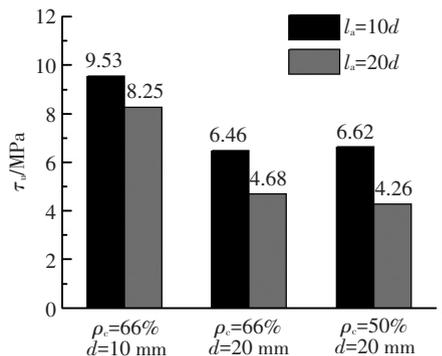


图 13 锚固长度对黏结强度的影响

Fig. 13 Influence of anchorage length on coefficient bond strength

对于螺纹钢, 大部分梁段在长锚固段试验过程中, 因黏结强度大于钢筋极限抗拉强度并未发生黏结破坏而是发生拉断破坏, 但拉断破坏时钢筋-再生混凝土之间的黏结应力远小于短锚固段试验时的黏结强度. 比如梁段 B50/0-R20-10d 黏结破坏时的 τ_u 为 13.44 MPa, β_3 为 1.34; 梁段 B50/0-R20-20d

拉断破坏时的 τ 为 9.19 MPa 而 β_3 仅为 0.46.因此螺旋钢筋同光圆钢筋类似,钢筋-再生混凝土黏结强度随着锚固长度的增加而降低.

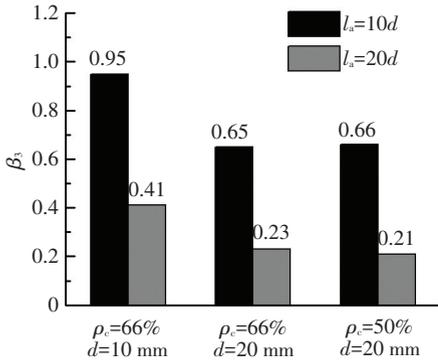


图 14 黏结效率系数与锚固长度关系

Fig.14 Relation of bond efficiency and anchorage length

3 黏结-滑移本构关系

由图 7 和图 9 可知,再生混凝土的黏结滑移曲线特征与普通混凝土的荷载-滑移曲线类似,分为微滑移阶段、滑移阶段、劈裂阶段、下降阶段、残余阶段^[14].因此粗、细骨料的加入对荷载-滑移曲线形状影响不大.本文选取直径 20 mm 螺旋钢筋、锚固长度 10d 的再生混凝土梁段进行研究,将微滑移阶段、滑移阶段、劈裂阶段合并为上升阶段,建议采用式(2)~(4)^[15]对黏结应力 τ -滑移值 s 进行拟合分析.

上升阶段: $0 \leq s < s_u$

$$\tau = \tau_u \left(\frac{s}{s_u} \right)^\alpha, \quad (2)$$

下降阶段: $s_u \leq s < s_f$

$$\tau = \tau_u - (\tau_u - \tau_f) \left(\frac{s - s_u}{s_f - s_u} \right), \quad (3)$$

残余阶段: $s \geq s_f$

$$\tau = \tau_f, \quad (4)$$

式中: τ_u 为黏结强度, MPa; s_u 为对应黏结强度的滑移量, mm; α 为拟合参数; τ_f 为残余强度, MPa; s_f 为曲线下降阶段和残余阶段转折点处的滑移量, mm.

拟合后各曲线上上升段参数 α 的取值见表 7.由表 7 可知,钢筋-再生粗骨料混凝土 α 的取值范围在 0.19~0.25,与钢筋-普通混凝土的 0.21 相差不大.而再生细骨料部分或全部取代天然砂后, α 取值会增加,其范围在 0.28~0.34.

表 7 参数 α 取值

Tab.7 Values of the parameter α

梁段编号	α	梁段编号	α
B0/0-R20-10d	0.21	B66/50-R20-10d	0.34
B50/0-R20-10d	0.19	B100/50-R20-10d	0.29
B66/0-R20-10d	0.25	B100/100-R20-10d	0.28
B100/0-R20-10d	0.19		

图 15 为部分梁段试验曲线与拟合曲线的对比,可以看出,试验曲线与拟合曲线吻合较好.

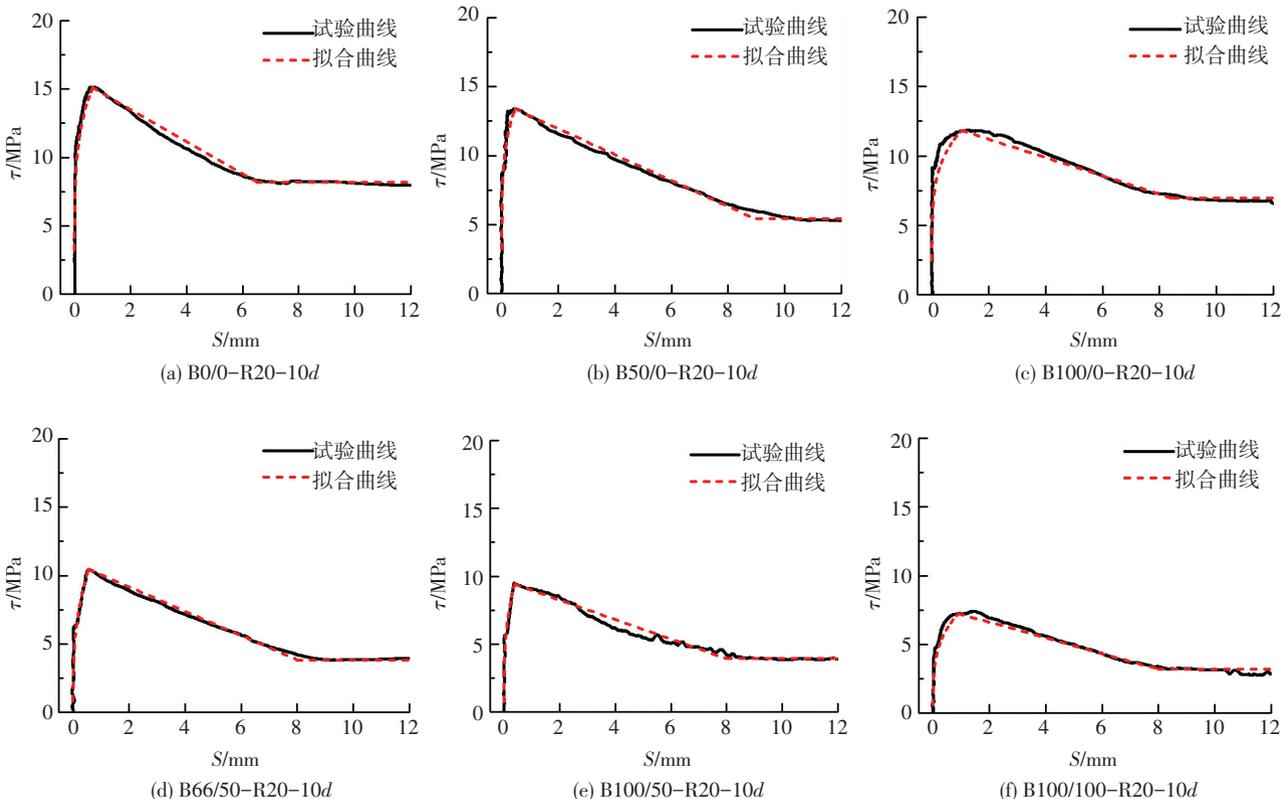


图 15 试验曲线与拟合曲线对比

Fig.15 Comparison between test and fitted curves

4 结 论

1) 根据再生粗细骨料取代率、钢筋类型和直径、锚固长度的不同,钢筋-再生混凝土梁黏结破坏形态分为拉断破坏、劈裂拔出破坏和拔出破坏。

2) 细骨料为天然砂时,随着再生粗骨料取代率增加,钢筋与混凝土之间的黏结强度减小,而抗滑移能力增强。相比普通混凝土,再生粗骨料取代率为 100% 的黏结强度降低 21.78%,黏结效率系数 β_1 反而略有提高。再生粗骨料取代率一定时,再生细骨料取代率的增加,大幅度降低钢筋-再生混凝土的黏结强度和抗滑移能力,黏结性能明显退化。

3) 螺纹钢与再生混凝土的黏结滑移性能明显好于光圆钢筋,其黏结强度比光圆钢筋增大一倍。无论是光圆钢筋还是螺纹钢,钢筋与混凝土的界面黏结性能均随着钢筋直径和锚固长度的增加而降低。

4) 再生混凝土的荷载-滑移曲线特征与普通混凝土的荷载-滑移曲线类似,建议了钢筋-再生混凝土的黏结-滑移本构关系和参数,结果拟合较好。

参 考 文 献

- [1] 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):63-73. 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 & Engineering Vibration, 2013, 33(6): 63-73. DOI: 10.13197/j.eeev.2013.06.63.caowl.009.
- [2] XIAO Jianzhuang, FALKNER H. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars [J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(2): 395-401.
- [3] 胡琼,陈伟伟,邹超英.再生混凝土粘结性能试验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(12):1849-1854.
HU Qiong, CHEN Weiwei, ZOU Chaoying. Experimental study on bonding properties of recycled concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(12): 1849-1854.
- [4] SEARA-PAZ S, GONZÁLEZ-FONTEBOA B, EIRAS-LÓPEZ J, et al. Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete [J]. Materials and Structures, 2014, 47(1): 323-334. DOI: 10.1617/s11527-013-0063-z.
- [5] KIM S H, LEE S H, LEE Y T, et al. Bond between high strength concrete with recycled coarse aggregate and reinforcing bars [J]. Material Research Innovations, 2015, 18(S2): S2-278-S2-285. DOI: 10.1179/1432891714Z.000000000417.

- [6] GUERRA M, CEIA F, BRITO J D, et al. Anchorage of steel rebars to recycled aggregates concrete [J]. Construction & Building Materials, 2014, 72: 113-123. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.081.
- [7] PRINCE M J R, SINGH B. Bond strength of deformed steel bars in high-strength recycled aggregate concrete [J]. Materials and Structures, 2015, 48(12): 3913-3928. DOI: 10.1617/s11527-014-0452-y.
- [8] 曹万林,林栋朝,董宏英,等.钢筋-中高强度再生混凝土黏结滑移性能梁式试验研究[J].建筑结构学报,2017(4):129-140. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.04.014.
CAO Wanlin, LIN Dongzhao, DONG Hongying, et al. Beam-type experimental study on bond-slip properties between rebars and medium/high strength recycled concrete [J]. Journal of Building Structures, 2017(4): 129-140. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.04.014.
- [9] 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(增刊2):127-134,142. 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(S2): 127-134. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.S2.019.
- [10] 史魏,侯景鹏.再生混凝土技术及其配合比设计方法[J].建筑技术开发,2001,28(8):18-20.
SHI Wei, HOU Jingpeng. Technology and mix design on recycled concrete [J]. Building technique development, 2001, 28(8): 18-20.
- [11] 过镇海.钢筋混凝土原理[M].第3版.北京:清华大学出版社,2013:135-136.
- [12] 肖建庄,李佳彬,兰阳.再生混凝土技术研究最新进展与评述[J].混凝土,2003(10):17-20,57.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete-A review [J]. Concrete, 2003(10): 17-20, 57.
- [13] 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. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.0396.
WANG Bo, BAI Guoliang, DAI Huijuan, et al. Experimental and mechanical analysis of bond-slip performance between recycled concrete and rebar [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 54-64. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.0396.
- [14] 肖建庄,李丕胜,秦薇.再生混凝土与钢筋间的粘结滑移性能[J].同济大学学报(自然科学版),2006,34(1):13-16.
XIAO Jianzhuang, LI Pisheng, QIN Wei. Study on bond-slip between recycled concrete and rebars [J]. Journal of Tongji University, 2006, 34(1): 13-16.
- [15] CEB-FIP C. Model code 1990 [S]. Paris: Comite Euro-International Du Beton, 1991: 83-84.

(编辑 赵丽莹)