

活性粉末混凝土受弯构件中钢筋粘结性能

安明喆, 贾方方, 余自若, 季文玉

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为了研究活性粉末混凝土构件中钢筋的粘结特性, 采用梁式试验方法分析了各因素对粘结性能的影响, 建立了粘结应力-滑移本构模型, 并与普通 C40 混凝土进行对比. 研究表明: 活性粉末混凝土试件与 C40 混凝土试件的粘结应力-滑移曲线整体规律相同, 活性粉末混凝土的抗压强度及粘结强度都远大于普通混凝土, 其中极限粘结强度 τ_u 约为 C40 混凝土的 3 倍, 其对应的滑移值 s_u 约为 C40 混凝土的 2 倍, 相对粘结强度 $\tau_u/\sqrt{f_{cu}}$ 约为 C40 混凝土的 1.6 倍; 根据试验曲线及试件破坏过程对活性粉末混凝土与钢筋之间的粘结机理进行分析, 并根据试验数据统计回归出多因素影响下锚固特征值的经验公式, 建立了四折线的粘结应力-滑移本构模型.

关键词: 活性粉末混凝土; 梁式试验; 粘结强度; 粘结应力-滑移本构模型

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)08-0105-06

Bond properties of reinforcement anchored in reactive powder concrete flexural members

AN Mingzhe, JIA Fangfang, YU Ziruo, JI Wenyu

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China)

Abstract: Bond properties between reactive powder concrete and steel bar are studied through beam bond tests, and compared with C40 concrete. It is showed that, the bond stress-slip curve tendency of the two concretes is similar, and the compressive strength and bond strength of reactive powder concrete are much larger than that of C40 concrete. The ultimate bond stress of reactive powder concrete τ_u is about three times of C40 concrete, the responding slip s_u is about twice of that of C40 concrete, and the relative bond strength $\tau_u/\sqrt{f_{cu}}$ is about 1.6 times of that of C40 concrete. The bond mechanism between reactive powder concrete and steel bar is analyzed according to the test curve and failure mode, at the same time, an empirical formula including multifactor are established through statistical regression, and a simplified four-line bond stress-slip model is established that can provide a reference for engineering design.

Key words: reactive powder concrete; beam bond test; bond strength; bond stress-slip constitutive model

活性粉末混凝土具有超高强度、高韧性、高耐久性, 在土木工程领域具有广泛的应用前景^[1-2]. 为充分发挥活性粉末混凝土的超高强度, 工程中一般辅以钢筋共同受力^[3]. 活性粉末混凝土与钢筋之间的粘结性能及粘结应力-滑移本构模型是活性粉末混凝土构件中粘结长度设计及非线性分析的

依据, 所以活性粉末混凝土与钢筋之间粘结性能的研究具有一定的现实意义. 目前对钢筋与混凝土之间粘结性能的研究多以试验为主^[4-7], 粘结强度公式及粘结应力-滑移本构模型的建立也多是对试验数据的统计回归, 有一定的局限性, 对于不同混凝土基体不能简单套用. 文献[8-9]对活性粉末混凝土与钢筋之间的粘结性能进行了研究, 但对影响粘结强度的因素讨论较少, 且都采用中心拔出试验, 与实际构件受力方式不同. 为更好反映实际结构受力状态, 本文采用梁式受弯试验对活性粉末混凝土与钢筋之间的粘结性能进行研究.

收稿日期: 2012-12-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278039);

国家高技术研究发展计划项目(2006AA03Z536).

作者简介: 安明喆(1970—), 男, 教授, 博士生导师;

季文玉(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 安明喆, anmingzhe01@163.com.

1 试验概况

本次试验共有 14 组, 每组 3 个试件, 其中活性粉末混凝土试件 13 组, C40 混凝土试件 1 组, 用于与活性粉末混凝土试件进行对比分析. 活性粉末混凝土试件根据钢纤维掺量 V_f 的不同, 共有 5 种配合比, 其配合比及抗压强度 f_{cu} 、劈拉强度 f_{ts}

结果列于表 1. C40 混凝土配合比为, 水泥: 河砂: 碎石: 水 = 1: 1.62: 3.02: 0.5, 实测其 28 d 抗压强度 f_{cu} 为 44.69 MPa, 劈拉强度 f_{ts} 为 2.78 MPa. 试验中所用钢筋均为直径 16 mm 的变形钢筋, 实测屈服强度为 378 MPa, 极限抗拉强度为 550 MPa.

表 1 活性粉末混凝土配合比及基本力学性能

V_f / %	水泥 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硅粉 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石英砂 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢纤维 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	f_{cu} / MPa	f_{ts} / MPa
0.0	706	160	1 249	0	122	74	88.68	7.66
0.5	706	160	1 249	40	122	74	102.52	8.54
1.0	706	160	1 249	80	122	74	127.00	9.87
1.5	706	160	1 249	120	122	74	130.02	11.34
2.0	706	160	1 249	160	122	74	142.87	15.03

所有试件编号及各试件具体参数列于表 2. 表中试件编号 B 为梁式试验 (Beam test) 的缩写, 后面数字依次为: 粘结长度 - 保护层厚度 - 钢纤维掺量. BC40 为 C40 混凝土试件. C40 混凝土试

件的粘结长度为 80 mm, 保护层厚度为 20 mm, 试件内未配置箍筋, 为协助受剪, 在剪应力区粘结碳纤维布. 活性粉末混凝土试件具体尺寸及试验过程见文献 [10 - 11].

表 2 梁式试件参数

混凝土类型	试件编号	V_f / %	保护层厚度 / mm	粘结长度 / mm
活性粉末混凝土	B50 - 20 - 0.0	0.0	20	50
	B50 - 20 - 0.5	0.5	20	50
	B50 - 20 - 1.0	1.0	20	50
	B50 - 20 - 1.5	1.5	20	50
	B50 - 20 - 2.0	2.0	20	50
	B50 - 15 - 2.0	2.0	15	50
	B50 - 25 - 2.0	2.0	25	50
	B64 - 20 - 2.0	2.0	20	64
	B64 - 25 - 2.0	2.0	25	64
	B64 - 30 - 2.0	2.0	30	64
	B80 - 20 - 2.0	2.0	20	80
	B80 - 25 - 2.0	2.0	25	80
	B80 - 30 - 2.0	2.0	30	80
C40 混凝土	BC40	0.0	20	80

2 不同混凝土基体粘结性能比较

本次试验中 B80 - 20 - 2.0 组活性粉末混凝土试件与 C40 混凝土试件参数相同, 结合试验结果对其粘结应力 - 滑移曲线及粘结强度进行对比分析.

2.1 粘结应力 - 滑移曲线

图 1 为本次试验中 B80 - 20 - 2.0 组活性粉末混凝土试件与 C40 混凝土试件的粘结应力 - 滑移曲线对比图.

从图 1 可知, 两种不同混凝土与变形钢筋之间的粘结应力 - 滑移曲线整体规律相似, 但各阶

段曲线特征略有差异。C40 混凝土的自由端滑移要早于活性粉末混凝土, C40 混凝土试件在粘结强度为 5 MPa 左右时, 自由端开始滑移; 活性粉末混凝土试件在粘结强度为 10 MPa 时, 自由端开始滑移; 自由端开始滑移后, 活性粉末混凝土试件的粘结应力增长较快, 曲线的上升段斜率较大, 而 C40 混凝土粘结应力增长相对较慢; 活性粉末混凝土试件粘结应力约为 33 MPa, C40 混凝土试件

约为 11 MPa 时, 曲线开始呈现非线性特征, 活性粉末混凝土试件曲线的非线性段较长且较 C40 混凝土试件曲线缓和; 粘结应力开始下降后, C40 混凝土试件的粘结应力下降较快, 曲线斜率较大, 且有较长的残余段, 而活性粉末混凝土试件曲线的下降段较缓和, 到滑移值达到 5 mm 时仍持续下降, 未出现残余阶段。

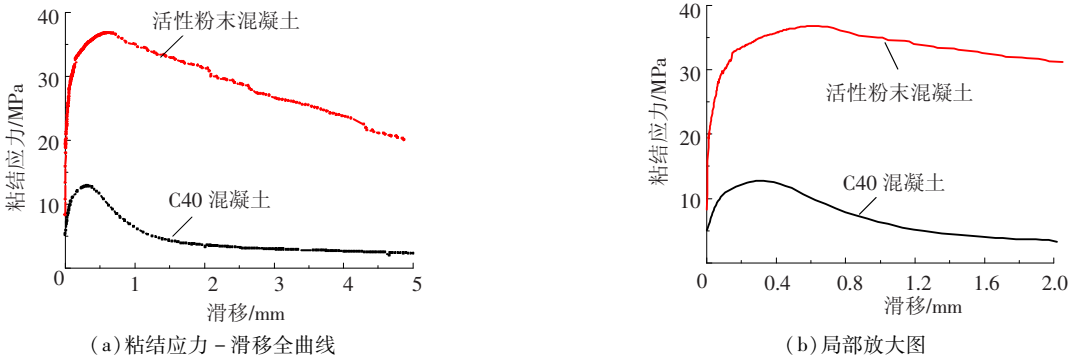


图1 不同混凝土粘结应力-滑移关系曲线

2.2 粘结强度

表3列出了活性粉末混凝土试件(B80-20-2.0)与C40混凝土试件的基本力学性能及粘结强度试验值。从表中可以看出, 活性粉末混凝土

抗压强度较C40混凝土大大提高, 约为C40混凝土的3倍, 由于抗压强度是影响粘结强度的一个主要因素^[4], 为消除抗压强度的影响, 表中还列出了两种试件的相对粘结强度 $\tau_u/\sqrt{f_{cu}}$ 。

表3 不同混凝土粘结强度比较

混凝土类型	f_{cu}/MPa	f_{ts}/MPa	τ_u/MPa	s_u/mm	$\tau_u/\sqrt{f_{cu}}$
活性粉末混凝土	142.87	15.03	36.82	0.6419	3.08
C40混凝土	44.69	2.78	12.83	0.3005	1.92

从表3可以看出, 试验条件相同时, 变形钢筋在活性粉末混凝土受弯构件中的极限粘结强度 τ_u 及其对应的滑移值都远大于C40混凝土构件, 其中极限粘结强度 τ_u 约为C40混凝土的3倍, 其对应的滑移值 s_u 约为C40混凝土的2倍, 相对粘结强度 $\tau_u/\sqrt{f_{cu}}$ 约为C40混凝土的1.6倍。相对粘结强度的提高说明活性粉末混凝土粘结性能优异不仅仅是因为其具有较高的抗压强度。

3 活性粉末混凝土受弯构件中钢筋的粘结性能

3.1 受力过程及粘结机理分析

活性粉末混凝土独特的配制机理及钢纤维的掺入并没有改变其与变形钢筋之间的粘结受力机理, 活性粉末混凝土与变形钢筋之间的粘结应力同普通混凝土一样, 主要由三部分组成^[12]: 化学胶着力、摩阻力、机械咬合力。

试验中所有活性粉末混凝土试件的 $\tau \sim s$ 曲线见图2(a)。结合试验现象对试验曲线进行分析可知, 活性粉末混凝土梁式受弯试件的破坏过程可分为4个阶段, 见图2(b)。

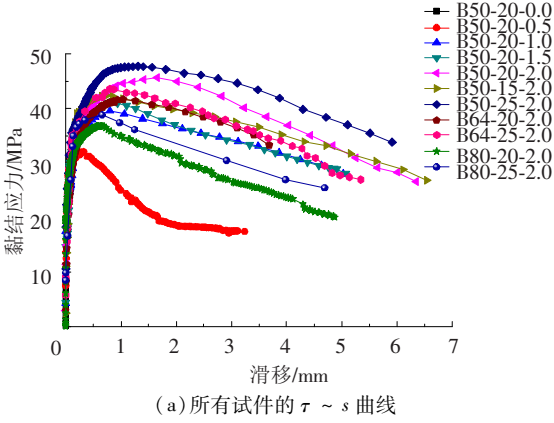
加载初期, 粘结应力未发展到自由端, 活性粉末混凝土中的水泥凝胶体在钢筋表面的化学胶着力在起作用。由于活性粉末混凝土配制过程中掺加了硅粉, 且采用高温养护, 硅粉与水泥水化作用产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应, 生成了具有网状结构且致密的C-S-H凝胶^[13], C-S-H凝胶与钢筋表面具有较强的化学胶着力, 从而大大提高了粘结应力(图2(b)(0-c)段)。

随着荷载增大, 化学胶着力破坏, 自由端开始滑移, 变形钢筋凸出的肋对活性粉末混凝土的机械咬合力及钢筋与周围活性粉末混凝土之间的摩擦力开始发挥主要作用, 粘结应力迅速增加, 自由端滑移较小, $\tau \sim s$ 关系曲线接近直线, 粘结刚度

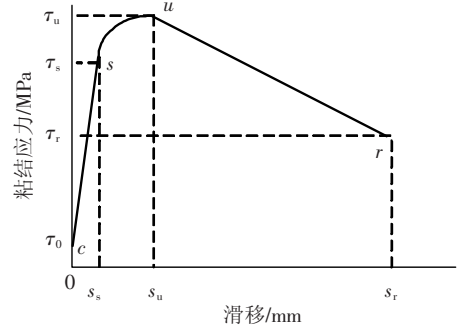
较大(图 2(b) (c - s) 段).

荷载继续增大,钢筋的凸肋产生楔的作用,挤压力的径向分力使周围活性粉末混凝土环向受拉,滑移迅速增加, $\tau \sim s$ 关系曲线开始呈现非线性特征,曲线变得缓和(图 2(b) (s - u) 段).

荷载达到最大值后,开始下降,钢筋被徐徐拔出,滑移继续增大,试件破坏(图 2(b) (u - r) 段). B50 - 20 - 0.5 组试件在滑移值达到 2 mm 左右时,粘结应力不再下降,滑移继续增加,出现了残余段.



(a) 所有试件的 $\tau \sim s$ 曲线



(b) $\tau \sim s$ 曲线的简化

图 2 活性粉末混凝土试件 $\tau \sim s$ 曲线

活性粉末混凝土与钢筋之间粘结强度的提高与其独特的配制过程、致密的基体、水化产物中 C - S - H 凝胶数量的增加、钢纤维的阻裂限裂及抗拉强度的提高息息相关.

3.2 锚固特征值的统计回归

从图 2 可以看出, $\tau \sim s$ 曲线大致可分为 4 个阶段,根据试验现象及曲线特征定义 4 个特征点:初始滑移强度 τ_0 (图 2(b) 中 c 点对应的粘结应力);劈裂强度(滑移加速强度) τ_s (s 点对应的粘结应力);极限粘结强度 τ_u (u 点对应的粘结应

力);残余粘结强度 τ_r (r 点对应的粘结应力),相应的特征滑移为 s_0, s_s, s_u . 由于除 B50 - 20 - 0.5 组试件外,大部分试件在滑移值达到 5 mm 时粘结应力仍呈下降趋势,为分析简便,除 B50 - 20 - 0.5 组外,取滑移值为 5 mm 时对应的粘结应力为残余粘结强度 τ_r .

表 4 为本文所有梁式试件的试验结果,其中 B80 - 30 - 2.0 试件由于钢筋被拉断,未得到试验数据.

表 4 梁式试件试验结果

试件编号	τ_0 /MPa	τ_s /MPa	τ_u /MPa	s_s /mm	s_u /mm	破坏形式
B50 - 20 - 0.0	8.01	28.80	28.80	0.080 1	0.080 1	S
B50 - 20 - 0.5	8.81	29.49	32.05	0.046 2	0.327 4	S + P
B50 - 20 - 1.0	8.98	33.32	39.56	0.174 4	0.725 1	S + P
B50 - 20 - 1.5	9.10	34.34	41.41	0.123 8	0.860 1	S + P
B50 - 20 - 2.0	8.69	32.85	45.68	0.122 0	0.983 8	P
B50 - 15 - 2.0	8.73	30.86	41.70	0.159 2	1.033 0	S + P
B50 - 25 - 2.0	8.30	35.07	47.35	0.106 2	1.095 6	P
B64 - 20 - 2.0	9.51	34.38	41.28	0.144 2	0.825 7	S + P
B80 - 20 - 2.0	10.37	33.01	36.82	0.145 9	0.641 9	S + P
B64 - 25 - 2.0	9.37	35.28	43.93	0.117 3	0.845 0	S + P
B80 - 25 - 2.0	10.14	33.74	38.81	0.118 3	0.660 3	S + P
B80 - 30 - 2.0	—	—	—	—	—	B
BC40	5.33	10.31	12.83	0.0810	0.300 7	S + P

注: S—活性粉末混凝土劈裂破坏; S + P—活性粉末混凝土劈拉与钢筋拔出共同发生的破坏形式; B—钢筋拉断破坏; P—钢筋拔出破坏

从表4可以看出,活性粉末混凝土的抗压强度、钢纤维体积掺量、保护层厚度、钢筋粘结长度都会对粘结强度及相应的滑移值产生影响.初始滑移强度随粘结长度的增大而增大;劈裂强度(滑移加速强度) τ_s 随保护层厚度的增大而增大;极限粘结强度 τ_u 随活性粉末混凝土抗压强度、钢纤维体积掺量、保护层厚度的增大而增大,随钢筋

粘结长度的增大而减小;特征滑移值 s_s 随保护层厚度增大而减小, s_u 受钢纤维体积掺量及钢筋粘结长度影响较大.根据表4中试验结果,综合考虑各因素,结合试验现象及试验曲线特征对各粘结锚固特征值进行统计回归,拟合出粘结锚固特征值的经验公式,列于表5.

表5 粘结锚固特征值经验公式

受力阶段	锚固特征值	经验公式
微滑移阶段	τ_0	$\tau_0 = 6.075 + 0.8(l_a/d)$
滑移阶段	τ_s	$\tau_s = (2.2 + 0.45c/d) \sqrt{f_{cu}}$
	s_s	$s_s = 0.245 - 0.085c/d$
滑移加速段 (劈裂段)	τ_u	$\tau_u = (2.675 + 0.711c/d)(0.65 + 1.257d/l_a)(0.815 + 0.1V_f) \sqrt{f_{cu}}$
	s_u	$s_u = (0.021 + 3.197d/l_a)(0.129 + 0.456V_f)$
下降段	τ_r	$\tau_r = (0.526 + 0.25V_f)(0.606 + 0.352c/d)(3.02 + 86.2d/l_a)$
	s_r	5 mm

3.3 粘结应力-滑移本构模型

根据曲线的特征点将 $\tau \sim s$ 曲线分段,特征点的出现代表曲线斜率的改变.对 $\tau \sim s$ 曲线的分析发现,曲线的各个阶段都大约呈线性,仅在第三个阶段呈非线性特征,为应用方便,将其简化为直线,所以本次试验中得到的受弯构件中活性粉末混凝土与钢筋的粘结应力-滑移曲线可简化为四折线模型,见图3.四折线模型可用式(1)表示:

$$\tau = \begin{cases} \tau_0, & s = 0; \\ \tau_0 + k_1 s, & 0 < s \leq s_s; \\ \tau_s + k_2 (s - s_s), & s_s < s \leq s_u; \\ \tau_u - k_3 (s - s_u), & s_u < s \leq 5. \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_0 、 τ_s 、 τ_u 、 s_s 、 s_u 分别为锚固特征值,可用表5中各公式计算得出; k_1 、 k_2 、 k_3 为各阶段锚固刚度,即粘结应力-滑移曲线的斜率,可用锚固特征值

$$\text{表示, } k_1 = \frac{\tau_s - \tau_0}{s_s}, k_2 = \frac{\tau_u - \tau_s}{s_u - s_s}, k_3 = \frac{\tau_u - \tau_r}{5 - s_u}.$$

将 k_1 、 k_2 、 k_3 代入式(1)即可得受弯构件中活性粉末混凝土与钢筋之间的粘结应力-滑移本构模型方程:

$$\tau = \begin{cases} \tau_0, & s = 0; \\ \tau_0 + \frac{\tau_s - \tau_0}{s_s} s, & 0 < s \leq s_s; \\ \tau_s + \frac{\tau_u - \tau_s}{s_u - s_s} (s - s_s), & s_s < s \leq s_u; \\ \tau_u - \frac{\tau_u - \tau_r}{5 - s_u} (s - s_u), & s_u < s \leq 5. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)即为由本次试验拟合得到的活性粉末混凝土与钢筋之间的粘结应力-滑移本构模型方程的具体形式.根据表5,式中各粘结锚固特征值 τ_0 、 τ_s 、 τ_u 、 s_s 、 s_u 都是活性粉末混凝土抗压强度、钢纤维体积掺量、保护层厚度及粘结长度等因素的函数,所以式(2)具有一定的代表性,可为活性粉末混凝土构件的非线性分析提供参考依据.

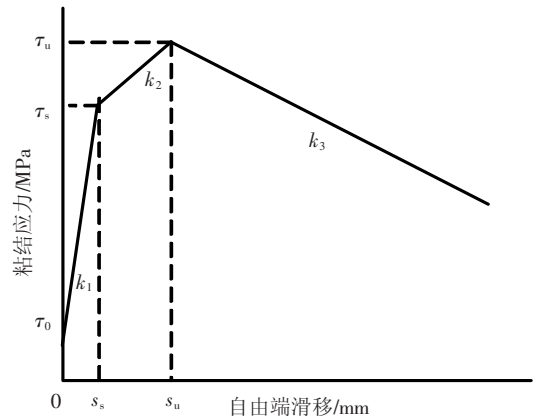


图3 粘结应力-滑移本构模型

4 结论

1) 活性粉末混凝土与C40混凝土试件的粘结应力-滑移曲线整体规律相同,但C40混凝土试件自由端滑移较早且具有较长的残余段,而同条件下活性粉末混凝土试件的粘结应力-滑移曲线未出现残余段.

2) 活性粉末混凝土的抗压强度及粘结强度都远大于普通混凝土,其中极限粘结强度 τ_u 约为C40混凝土的3倍,其对应的滑移值 s_u 约为C40混

凝土的 2 倍,相对粘结强度 $\tau_u/\sqrt{f_{cu}}$ 约为 C40 混凝土的 1.6 倍.

3) 活性粉末混凝土的粘结机理同普通混凝土相同,根据试验曲线结合试验现象分析了其粘结破坏机理,活性粉末混凝土独特的配制方式、水化产物中 C-S-H 凝胶数量的增加以及钢纤维的掺入可大大提高其粘结强度.

4) 钢纤维掺量、保护层厚度、粘结长度对锚固特征值都有影响,根据试验数据统计回归出多因素影响下锚固特征值的经验公式,建立了四折线的粘结应力-滑移本构模型,可为工程设计提供参考.

参考文献

[1] 柯开展,蔡文尧. 活性粉末混凝土(RPC)在工程结构中的应用与前景[J]. 福建建材,2006(2):17-19.

[2] CHEN J. Materials design of Ducal® [C]//Sustainable and Science-driven Engineering of Cement-based Materials. Beijing:Tsinghua University,2011:130-140.

[3] 原海燕. 配筋活性粉末混凝土受拉性能试验研究及理论分析[D]. 北京:北京交通大学,2009.

[4] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京:清华大学,1990.

[5] AZIZINAMINI A, STARK M, ROLLER J, et al. Bond performance of reinforcing bars embedded in high-

strength concrete [J]. ACI Structural Journal, 1993,90(5):554-561.

[6] GHAZI F K. Bond behaviour for normal and high strength concrete [J]. Journal of Engineering and Development, 2005,9(4):99-119.

[7] HARAJI M H, HOUT M, JALKH W. Local bond stress-slip relationship of reinforcing bars embedded in fiber-reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 1995,92(4):343-354.

[8] WEISSE D, HOLSCHEMACHER K. Some aspects about the bond of reinforcement in ultra high strength concrete[R] Leipzig:University of Leipzig,2003.

[9] 安明喆,张盟. 变形钢筋与活性粉末混凝土的粘结性能试验研究[J]. 中国铁道科学,2007,28(2):50-54.

[10] 贾方方,安明喆,余自若,等. 钢筋与活性粉末混凝土黏结性能的梁式试验研究[J]. 铁道学报,2012,34(6):1-5.

[11] 贾方方,安明喆,张鸿儒,等. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土与钢筋粘结性能的影响[J]. 建筑材料学报,2012,15(6):857-861.

[12] 王传志,滕智明. 钢筋混凝土结构理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985.

[13] 安明喆,王军民,崔宁,等. 活性粉末混凝土的微观结构研究[J]. 低温建筑技术,2007(3):1-3.

(编辑 赵丽莹)