

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.002

纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结性能钻芯拉拔试验研究

卜良桃,周云鹏

(湖南大学土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:为研究纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结性能,采用钻芯拉拔法试验制作模拟中型柱混凝土构件,并分别外包不同强度的聚乙烯醇纤维水泥砂浆、聚丙烯纤维水泥砂浆、钢纤维水泥砂浆。对制作的试验构件进行钻芯拉拔试验,得出界面破坏时的拉拔力,将得到的不同类型的纤维水泥砂浆构件拉拔力数据与构件混凝土轴心抗拉强度、纤维水泥砂浆抗压强度进行比较分析。结果表明,在该试验中合成纤维水泥砂浆的界面黏结强度比钢纤维水泥砂浆的界面黏结强度高;界面黏结强度与构件混凝土轴心抗拉强度呈正相关关系,与纤维水泥砂浆抗压强度呈正相关关系,界面黏结力与砂浆抗压强度呈线性相关关系。

关键词:纤维水泥砂浆;混凝土;界面;黏结性能;钻芯拉拔;相关系数;线性相关

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2016)04-0291-06

Core drilling and pull-off tests of interfacial bond behaviors between fiber cement mortar and concrete

BU Liangtao, ZHOU Yunpeng

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To investigate the interfacial bond behaviors between fiber cement mortar and concrete with core drilling and pull-off tests, medium-sized columnar concrete samples enclosed with different strengths of polyvinyl alcohol fiber cement mortar, polypropylene fiber cement mortar, and steel fiber cement mortar were prepared. Core drilling and pull-off tests were conducted on the samples to obtain the pulling force with failure occurring at the interface, and the results of different kinds of samples from pull-off tests were compared with the axial tensile strength of concrete and compressive strength of fiber cement mortar. The results show that the interfacial bond strength between synthetic fiber cement mortar and concrete is higher than that between steel fiber cement mortar and concrete, and that the interfacial bond strength is positively correlated with the axial tensile strength of concrete and compressive strength of fiber cement mortar. There is also a linear correlation between the interfacial bond strength and compressive strength of fiber cement mortar.

Key words: fiber cement mortar; concrete; interface; bond behavior; core drilling and pull-off; correlation coefficient; linear correlation

纤维水泥砂浆加固混凝土是在混凝土构件表面绑扎钢筋网,然后再抹上一层纤维水泥砂浆薄层形成完整的加固层,加固层与原构件作为一个整体协同工作共同受力,以提高结构承载力^[1-2]。常用的纤维有合成纤维及钢纤维^[3]。与传统的混凝土加大截面方法类似,纤维水泥砂浆加固技术的加固效果关键取决于加固层与原有结构层之间的黏结质量^[4]。如何使新加纤维水泥砂浆与原有混凝土的整体工作共同受力,防止出现界面黏结滑移或剥离破坏而导致加固作用失效,是该新型加固方法成功应用的关键点^[5-6]。所以研究新加纤维水泥砂浆层与原混凝土的界面黏结性能,探讨提高界面黏结强度的方法和措施,具有很强的工程背景和实际意义。

收稿日期:2015-08-17

基金项目:国家火炬计划(2013GH561393);国家自然科学基金(51278187)

作者简介:卜良桃(1963—),男,湖南南县人,教授,博士,主要从事工程结构加固理论与技术研究。E-mail:plt63@126.com

目前,国内对于界面黏结性能的试验研究主要集中在劈裂抗拉试验、直接抗拉试验、剪切强度试验、抗折强度试验和拉拔强度试验^[7]。钻芯拉拔法是一种解除约束的拔出法,它是一种将钻芯法与拔出法相结合的检验界面黏结状况的试验方法^[8]。钻芯拉拔法通过对结构的局部破坏来获得结构的实际抵抗破坏能力^[9],其优点在于能较真实地反映修补界面的实际工作情况,缺点在于影响因素较多且对结构产生一定的损伤^[10]。目前该试验方法多用于新老混凝土黏结性能研究,除文献[2]外该方法在纤维水泥砂浆与混凝土黏结性能的研究中应用较少。本文研究试验室中添加不同纤维的多种强度配比的水泥砂浆与混凝土构件黏结界面的实际抗拉破坏能力,采用钻芯拉拔法能够较好地完成预定的研究计划。

1 试验方案

1.1 试验原理

钻芯拉拔试验是一种改进的间接拉伸试验方法,它通过钻芯设备解除芯样周围的约束仅保留界面处的约束,然后粘贴拉拔盘来实现加载,借助拉拔设备可以获得界面破坏时的极限拉力,从而间接地得到界面的极限拉应力,其原理如图1所示。先在试验室制作混凝土试件,对界面进行人工凿毛后修补纤维水泥砂浆,经过自然养护后,使用金刚石薄壁空心钻钻取芯样,钻取芯样时应保证芯样垂直,芯样深度应大于砂浆层厚度,芯样顶面干燥后用结构胶黏结与芯样直径相当的拉拔盘,结构胶固结后使用拉拔仪进行拉拔,测得芯样的砂浆层与基底层剥离破坏时的拉拔力 P ,由拉拔力 P 与芯样直径 D 可以计算得到界面的黏结强度值。

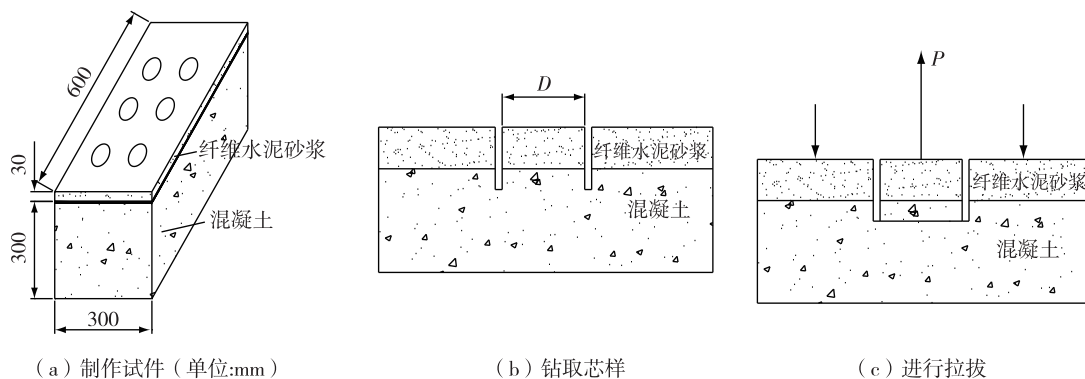


图1 钻芯拉拔试验原理

Fig. 1 Principle of core drilling and pull-off test

1.2 试验设计

采用标准方法制作尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ 的混凝土模拟中型柱试件,试件混凝土强度等级为C15、C20、C30、C40、C50。对试件表面进行人工凿毛^[11],然后分别抹压强度等级为M20、M30、M40、M50、M60、M70、M80、M90、M100的聚乙烯醇纤维水泥砂浆、聚丙烯纤维水泥砂浆、钢纤维水泥砂浆,砂浆层厚度为30 mm。各纤维种类对应的C15-M20、C20-M30、C20-M40、C30-M50、C30-M60、C40-M70、C40-M80、C50-M90、C50-M100纤维砂浆薄层加固混凝土构件各3个,每组砂浆预留边长70.7 mm的立方体试块3个。在制作好的模拟加固试件上使用内径60 mm的金刚石薄壁空心钻钻取芯样,每个试件上芯样数量为3个,相邻芯样间的间距不小于60 mm,芯样距试件边缘不小于60 mm^[12]。使用结构胶将金属拉拔盘粘贴在芯样顶部,并保证拉拔盘上的杆件垂直,待结构胶固结后使用精度为0.1 kN的锚杆拉力计进行拉拔。试验现场情况如图2所示。

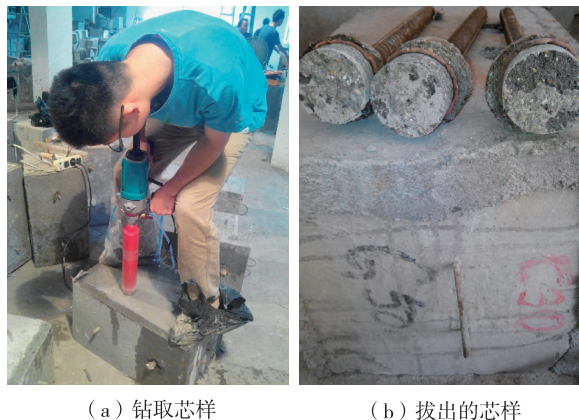


图2 钻芯拉拔试验现场

Fig. 2 Site of core drilling and pull-off test

试验所采用的纤维规格为:聚乙烯醇纤维、聚丙烯纤维、钢纤维规格均为 $\Phi 0.02\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,纤维掺入量体积比均为 0.4%。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

试验共设置有 27 组构件(纤维种类、混凝土强度与砂浆强度组合),每组 3 个构件,每个构件上钻取了 3 个芯样。使用精度为 0.1 kN 的锚杆拉力计对芯样顶部的拉拔盘施加竖向拉拔力,得到界面破坏时的破坏荷载,计算破坏荷载的平均值,由公式 $f_n = 4P/\pi D^2$ 计算出各组试件的界面黏结应力 f_n ,试验中芯样直径 $D=60\text{ mm}$ 。对预留的标准砂浆试块进行抗压试验,得到各组砂浆的抗压强度平均值 f_c 。钻芯拉拔试验结果见表 1。

表 1 钻芯拉拔试验结果
Table 1 Results of core drilling and pull-off tests

强度组合	分组编号	纤维种类	破坏荷载 P/kN	黏结应力 f_n/MPa	标准砂浆试块抗压强度平均值 f_c/MPa	f_n/f_c
C15-M20	A	聚乙烯醇纤维	3.38	1.1943	25.05	0.0477
		聚丙烯纤维	3.06	1.0828	27.35	0.0396
		钢纤维	3.15	1.1146	25.14	0.0443
C20-M30	B	聚乙烯醇纤维	3.31	1.1713	33.42	0.0350
		聚丙烯纤维	3.35	1.1854	32.98	0.0359
		钢纤维	3.20	1.1323	30.59	0.0370
C20-M40	C	聚乙烯醇纤维	3.48	1.2314	43.64	0.0282
		聚丙烯纤维	3.42	1.2120	44.36	0.0273
		钢纤维	3.25	1.1500	42.10	0.0273
C30-M50	D	聚乙烯醇纤维	3.53	1.2517	52.15	0.0240
		聚丙烯纤维	3.44	1.2173	50.58	0.0241
		钢纤维	3.43	1.2145	52.34	0.0232
C30-M60	E	聚乙烯醇纤维	3.68	1.3034	60.74	0.0215
		聚丙烯纤维	3.65	1.2916	62.79	0.0206
		钢纤维	3.65	1.2902	59.06	0.0218
C40-M70	F	聚乙烯醇纤维	3.75	1.3277	70.35	0.0189
		聚丙烯纤维	3.74	1.3225	68.65	0.0193
		钢纤维	3.67	1.2984	67.64	0.0192
C40-M80	G	聚乙烯醇纤维	3.78	1.3376	77.54	0.0173
		聚丙烯纤维	3.83	1.3537	78.75	0.0172
		钢纤维	3.81	1.3471	81.47	0.0165
C50-M90	H	聚乙烯醇纤维	4.06	1.4376	88.72	0.0162
		聚丙烯纤维	3.92	1.3871	82.92	0.0167
		钢纤维	3.85	1.3619	89.33	0.0152
C50-M100	I	聚乙烯醇纤维	4.09	1.4484	88.95	0.0163
		聚丙烯纤维	3.94	1.3924	83.71	0.0166
		钢纤维	3.89	1.3756	83.85	0.0164

2.2 界面黏结强度与纤维类型关系

对表 1 中的不同纤维种类水泥砂浆界面黏结应力进行比较,结果如图 3 所示。试验表明相同强度等级组合下,3 种纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结强度由高到低排序为:聚乙烯醇纤维砂浆、聚丙烯纤维砂浆、钢纤维砂浆。将聚乙烯醇纤维水泥砂浆与聚丙烯纤维水泥砂浆统称为合成纤维水泥砂浆,并将二者的界面黏结强度平均值与钢纤维水泥砂浆界面黏结强度进行对比,结果如表 2 所示。结果表明,相同的混凝土与砂浆强度等级组合下,纤维体积比同为 0.4%的合成纤维水泥砂浆界面黏结强度比钢纤维水泥砂浆高 0.56%~6.19%(G 组数据除外)。

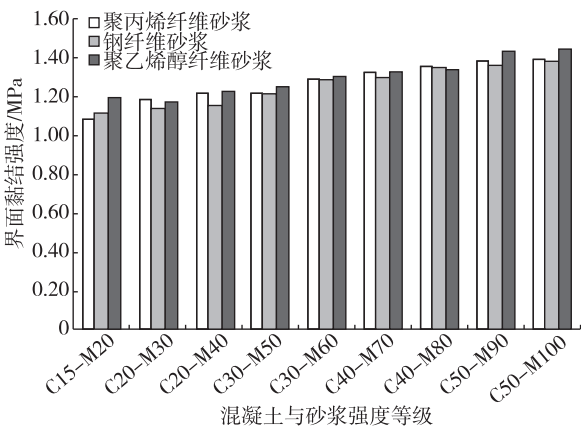


图 3 相同强度组合下不同种类砂浆界面黏结强度对比

Fig. 3 Comparison of interfacial bond strengths for different types of mortar interfaces with same strength level

表 2 合成纤维水泥砂浆与钢纤维水泥砂浆黏结强度对比

Table 2 Comparison of interfacial bond strengths of synthetic fiber cement mortar and steel fiber cement mortar

分组编号	砂浆黏结强度/MPa		强度比
	合成纤维	钢纤维	
A	1.138 5	1.114 6	1.021 4
B	1.178 3	1.132 3	1.040 6
C	1.221 2	1.150 0	1.061 9
D	1.234 5	1.214 5	1.016 5
E	1.297 5	1.290 2	1.005 6
F	1.325 1	1.298 4	1.020 6
G	1.345 7	1.347 1	0.998 9
H	1.412 3	1.361 9	1.037 1
I	1.420 4	1.375 6	1.032 5

2.3 界面黏结强度与构件混凝土及砂浆强度关系

2.3.1 界面黏结强度与混凝土强度关系

试验所得的纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结强度和构件混凝土强度等级之间的关系如图 4 所示,界面黏结强度与构件混凝土强度等级呈正相关关系。

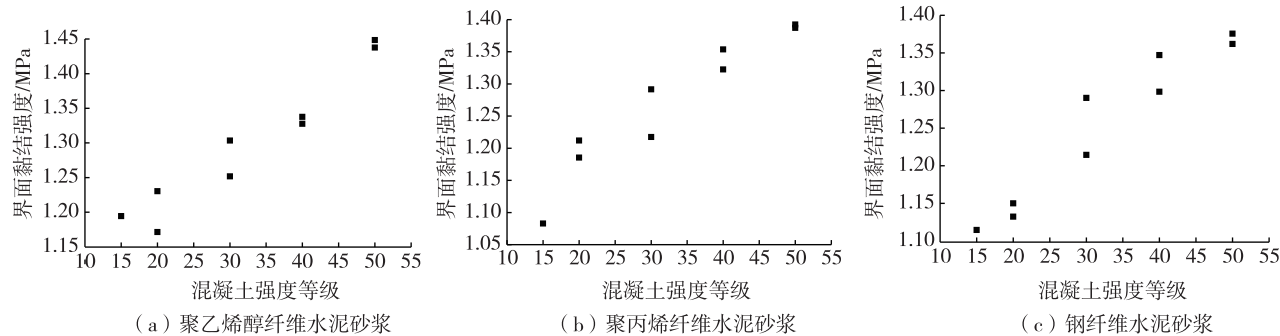


图 4 界面黏结强度与混凝土强度等级关系

Fig. 4 Relationship between interfacial bond strength and concrete strength

现行混凝土结构设计规范^[13]中,C15、C20、C30、C40、C50 混凝土的轴心抗拉强度标准值分别为 1.27 MPa、1.54 MPa、2.01 MPa、2.39 MPa、2.64 MPa,将实验获得的聚乙烯醇纤维水泥砂浆、聚丙烯纤维水泥砂浆及钢纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结强度值与对应的混凝土轴心抗拉强度标准值进行对比,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,界面黏结强度与混凝土轴心抗拉强度标准值比值最大为 0.940 4,且随着混凝土强度等级的提高,界面黏结强度与轴心抗拉强度标准值的比值越来越小,当混凝土强度等级不变时,比值与砂浆强度呈现出正相关关系。数据表明,在使用复合砂浆薄层加固混凝土构件时,当构件强度一定时,提高砂浆强度等级可以在一定程度上提高界面的黏结强度,但提高后的强度始终要远小于原构件混凝土的轴心抗拉强度,即二者不能很好地协同工作,因此在实际的工程加固中,通常需要铺设钢筋网来增强加固层与原构件的共同受力性能。

表 3 界面黏结强度与混凝土轴心抗拉强度比值

Table 3 Ratio of interfacial bond strength to axial tensile strength of concrete

分组编号	抗拉强度标准值 /MPa	强度比		
		聚乙烯醇纤维	聚丙烯纤维	钢纤维
A	1.27	0.940 4	0.852 6	0.877 7
B	1.54	0.760 6	0.769 8	0.735 3
C	1.54	0.798 9	0.787 0	0.746 8
D	2.01	0.622 7	0.605 6	0.604 2
E	2.01	0.648 5	0.642 6	0.641 9
F	2.39	0.555 5	0.553 3	0.543 3
G	2.39	0.559 7	0.566 4	0.563 6
H	2.64	0.544 5	0.525 4	0.515 9
I	2.64	0.548 6	0.527 4	0.521 1

2.3.2 界面黏结强度与纤维水泥砂浆强度关系

试验所得的纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结强度和纤维水泥砂浆强度等级之间的关系如图 5 所示,界面黏结强度与砂浆强度等级呈正相关关系。因 M90 及 M100 砂浆试块实压强度与强度等级相差较大,图 5 中该 2 组数据仅作为参考。

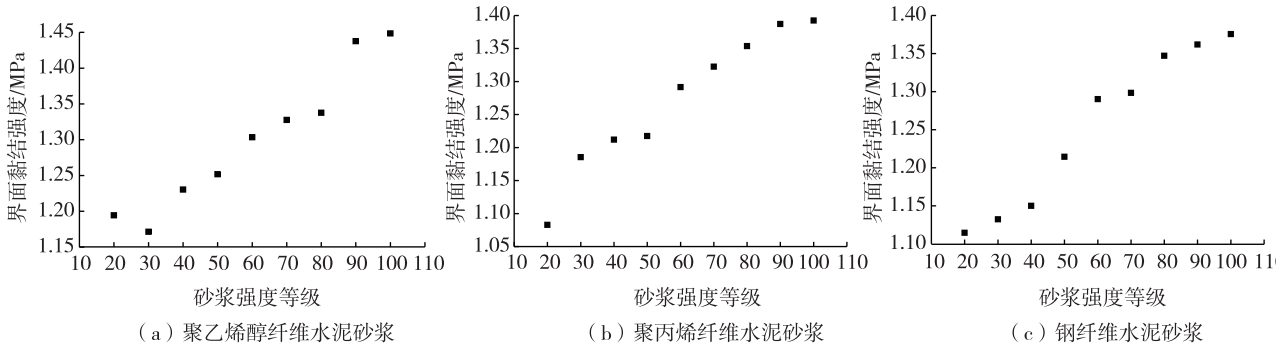


图 5 界面黏结强度与纤维水泥砂浆强度等级的关系

Fig. 5 Relationship between interfacial bond strength and strength level of fiber cement mortar

将试验所得的纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结强度与获得的砂浆抗压强度进行比较,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结强度和纤维水泥砂浆抗压强度的比值介于 0.015 2~0.047 7 之间。在本次试验的强度范围内,随着砂浆强度的提高,界面黏结强度提高,黏结强度与砂浆抗压强度的比值降低,且降低的比率逐渐变缓。以聚乙烯醇纤维水泥砂浆为例,当砂浆抗压强度由 20 MPa 提高至 30 MPa 时,比值由 0.047 7 减小至 0.035 0,减少了 0.012 7;当砂浆强度由 30 MPa 提高至 40 MPa 时,比值由 0.035 0 减小至 0.028 2,减少了 0.006 8。

表 4 界面黏结强度与砂浆抗压强度比值

Table 4 Ratio of interfacial bond strength to compressive strength of cement mortar

分组编号	聚乙烯醇纤维	聚丙烯纤维	钢纤维
A	0.047 7	0.039 6	0.044 3
B	0.035 0	0.035 9	0.037 0
C	0.028 2	0.027 3	0.027 3
D	0.024 0	0.024 1	0.023 2
E	0.021 5	0.020 6	0.021 8
F	0.018 9	0.019 3	0.019 2
G	0.017 3	0.017 2	0.016 5
H	0.016 2	0.016 7	0.015 2
I	0.016 3	0.016 6	0.016 4

2.4 界面黏结强度与纤维水泥砂浆抗压强度线性拟合

计算可得各种纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结强度和砂浆抗压强度之间的相关系数分别为:聚乙烯醇纤维水泥砂浆 $r=0.964\ 7$;聚丙烯纤维水泥砂浆 $r=0.977\ 8$;钢纤维水泥砂浆 $r=0.999\ 6$ 。 $0.8<r<1$,即 3 种纤维水泥砂浆与混凝土的界面黏结强度和砂浆抗压强度具有高度的线性相关关系,对数据进行拟合如图 6 所示。

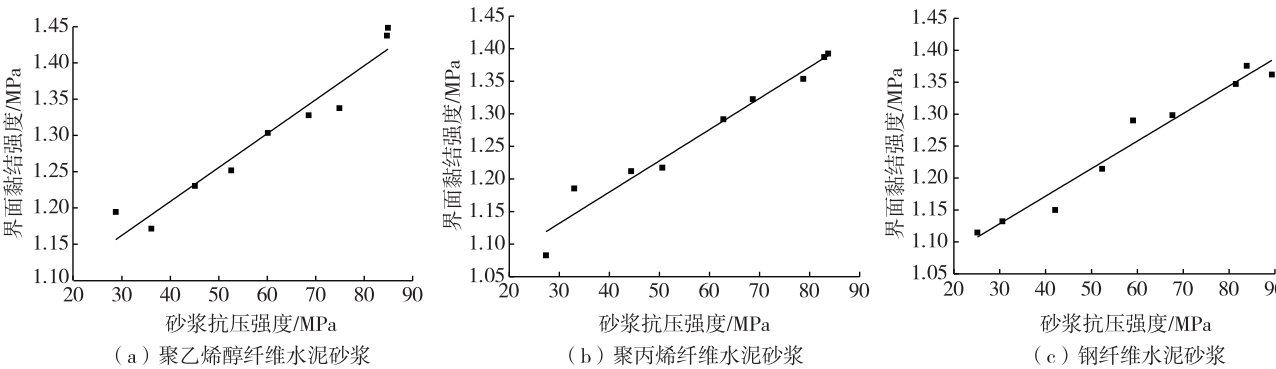


图 6 界面黏结强度与砂浆抗压强度线性拟合结果

Fig. 6 Linear fitting of relationship between interfacial bond strength and compressive strength of cement mortar

图 6 对应的线性拟合公式为:聚乙烯醇纤维水泥砂浆 $f_n = 0.004\ 11f_c + 1.053\ 23$,聚丙烯纤维水泥砂浆 $f_n = 0.004\ 8f_c + 0.987\ 99$,钢纤维水泥砂浆 $f_n = 0.004\ 31f_c + 0.999\ 25$ 。

3 结 论

a. 水泥砂浆中添加的纤维种类会影响砂浆与混凝土界面的黏结强度,本试验中合成纤维水泥砂浆与混凝土界面黏结强度比相同强度等级的钢纤维水泥砂浆界面黏结强度高 0.56%~6.19%。

b. 界面黏结强度与构件的混凝土强度等级呈正相关关系,随着混凝土强度等级的提高,界面钻拉强度与混凝土轴心抗拉强度标准值之间的比值减小,本试验获得的界面黏结强度与轴心抗拉强度比值为 0.5159~0.9404。

c. 界面黏结强度与砂浆抗压强度呈正相关关系,随着砂浆抗压强度的提高,界面黏结强度提高,黏结强度与砂浆抗压强度之间的比值减小,本次试验获得的钻拉强度与砂浆抗压强度比值介于 0.0152~0.0477 之间。

d. 对试验数据的相关系数进行计算表明界面黏结强度与砂浆抗压强度之间存在高度的线性相关关系。

参考文献:

- [1] ACI Committee. A guide for the design, construction and repair of ferrocement[J]. ACI Structural Journal, 1996, 85(3): 323-351.
- [2] 卜良桃,周宁,鲁晨,等. PVA-ECC 与混凝土界面钻芯拉拔试验研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(2): 45-51. (BU Liangtao, ZHOU Ning, LU Chen, et al. Research on the bond-performance of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite to concrete[J]. Journal of Shandong University(Engineering science), 2012, 42(2): 45-51. (in Chinese))
- [3] 中国工程建设标准化协会. CECS 38:2004 纤维混凝土结构技术规程[S].北京:中国计划出版社,2004.
- [4] 尹鹏,卜良桃,陈大川. 高性能水泥复合砂浆与混凝土黏结劈拉试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(8): 69-73. (YIN Peng, BU Liangtao, CHEN Dachuan. Experimental research on splitting tensile behavior of adhesion between high performance cement-mortar and concrete[J]. Industrial Construction, 2011, 41(8): 69-73. (in Chinese))
- [5] 尚守平,熊伟. 无机组合材料高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层 (HPFL) 加固混凝土结构新技术简介[J]. 施工技术, 2008, 37(4): 4-6. (SHANG Shouping, XIONG Wei. Introduction on the new technique of reinforcing RC structures using innovative high performance ferrocement laminate (HPFL)[J]. Construction Technology, 2008, 37(4): 4-6. (in Chinese))
- [6] 汤繁华,蒋隆敏. 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层加固钢筋混凝土结构的技术研究进展[J]. 工业建筑, 2011, 41(12): 106-110. (TANG Fanhua. JIANG Longmin. Technology research work on HPFL strengthened RC structure[J]. Industrial Construction, 2011, 41(12): 106-110. (in Chinese))
- [7] 高丹盈,程红强. 纤维混凝土与既有混凝土黏结性能研究[M]. 北京:科学出版社,2008:3-5.
- [8] 王金山,吕宏迪,孙兴亮,等. 胶粘剥离拔出法检测混凝土强度的试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(增刊1): 40-41. (WANG Jinshan, LYU Hongdi, SUN Xingliang, et al. Experimental study on tensile bond strength test to check concrete strength[J]. Journal of Building Structures, 2007, 37(Sup1): 40-41. (in Chinese))
- [9] 傅翔,宋人心,王五平. 钻芯拉剥法现场检测修补混凝土黏结强度[J]. 施工技术, 2005, 34(7): 72-73. (FU Xiang, SONG Renxin, WANG Wupin. Detection of bond strength of patching concrete with the core-drilling and pulling-stripping method[J]. Construction Technology, 2005, 34(7): 72-73. (in Chinese))
- [10] AUSTIN S, ROBINS P, PAN Youguang. Tensile bond testing of concrete repair[J]. Materials and Structures, 1995, 28: 249-259.
- [11] 丁巍巍,龙广成,吴克刚. 新老混凝土界面处理与评价[J]. 粉煤灰, 2009(21): 23-25. (DING Weiwei, LONG Guangcheng, WU Kegang. Treatment and assessment of new/old concrete interface[J]. Coal Ash, 2009(21): 23-25. (in Chinese))
- [12] 卜良桃,周宁,毛晶晶. 新老混凝土黏结界面的钻芯拉拔强度的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(5): 599-605. (BU Liangtao, ZHOU Ning, MAO Jingjing. Research on pull strength of new concrete to old adherence with core-drilling and pull-stripping test[J]. Xi'an University of Arch & Tech(Natural Science), 2009, 41(5): 599-605. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建设出版社,2010.