

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.008

基于纤维水泥砂浆加固的后装拔出试验

卜良桃, 张 欢

(湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为利用后装拔出法检测纤维水泥砂浆抗压强度, 模拟工程加固情况: 分别采用合成纤维(聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维)水泥砂浆、钢纤维水泥砂浆对素混凝土试块进行加固处理。加固后, 对加固薄层进行后装拔出试验, 获得拔出力。依据拔出力代表值和纤维水泥砂浆立方体抗压强度代表值之间的关系, 采用离散最小二乘逼近方法拟合测强公式。结果表明: 测强公式精确度比较高, 测强公式检验效果良好、符合实际意义, 其中钢纤维的掺入对增加拔出力的作用要高于合成纤维。依据测强公式, 后装拔出法可以现场检测推定 20~90 MPa 的纤维水泥砂浆抗压强度。

关键词: 合成纤维水泥砂浆; 钢纤维水泥砂浆; 后装拔出试验; 离散最小二乘逼近; 测强公式

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)02-0139-05

Post-install pullout test based on fiber cement mortar reinforcement

BU Liangtao, ZHANG Huan

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

Abstract: In order to use the post-install pullout method to test the compressive strength of fiber cement mortar and simulate the status of reinforcement, synthetic fiber (polypropylene fiber and polyvinyl alcohol fiber) cement mortar and steel fiber cement mortar were used to reinforce plain concrete blocks, respectively. After the reinforcement, post-install pullout testing of the reinforced layer was carried out to obtain the pullout force. Based on the relationship between the representative value of the pullout force and the representative value of the corresponding compressive strength of fiber cement mortar test cubes, a fitting strength measurement formula was established using the discrete least squares approximation method. Results show that the accuracy of the strength measurement formula was high and the effectiveness of the strength measurement formula was validated in practice. The incorporation of steel fiber has a better effect on the increase of the pullout force than the synthetic fiber. According to the strength measurement formula, the post-install pullout method can test the fiber cement mortar on-site when the compressive strength ranges from 20 to 90 MPa.

Key words: synthetic fiber cement mortar; steel fiber cement mortar; post-install pullout test; discrete least squares approximation method; strength measurement formula

目前,我国现有城镇房屋大约 50% 是 20 世纪 60 年代建成的,很大一部分建筑已经进入中老年期,为了贯彻“百年大计、质量第一”的方针政策,这些房屋需进行维修加固^[1]。纤维水泥砂浆由于具有延性好、防火耐高温性好、相容性好、抗老化耐久性好、施工简易、造价低等优点而被广泛应用于房屋加固领域^[2-4]。

依据房屋检测技术,检测混凝土强度的技术比较成熟,且方法很多。工程上由于纤维水泥砂浆加固技术的特殊性(加固厚度大部分在 30mm 左右),致使一些检测混凝土强度的方法不能直接运用于检测实际工程中的纤维水泥砂浆抗压强度^[5]。拔出法是将安装在混凝土中的锚固件拔出,控制锚固件的长度就可以很好地克服纤维水泥砂浆加固厚度的限制,这种方法破损小、测试结果可靠,后装拔出法可以随时随地对既有结构、在建结构和加固结构的纤维水泥砂浆的任何部位进行现场检测,方便、快捷^[6-10]。

工程上,对柱、梁、墙等构件进行高性能水泥复合砂浆加固时,加固薄层中用得比较多的纤维水泥砂浆有3种,分别为钢纤维水泥砂浆、聚丙烯纤维水泥砂浆、聚乙烯醇纤维水泥砂浆。考虑以上因素,利用后装拔出法对合成纤维、钢纤维等纤维水泥砂浆加固的加固试块进行试验研究,得出大量的后装拔出数据与立方体抗压强度值,然后分别对拔出力与相应的纤维水泥砂浆立方体抗压强度值之间的关系进行分析,拟合测强曲线。拟合的后装拔出法测强曲线能为工程中利用拔出法进行现场检测加固薄层的纤维水泥砂浆抗压强度提供参考和指导作用,具有广泛的应用价值。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验需素混凝土试块、合成纤维水泥砂浆、钢纤维水泥砂浆,材料如下:(a)32.5级和42.5级复合硅酸盐水泥(符合现行国家标准GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》^[11]的规定);中砂;纤维:钢纤维、聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维(符合CECS 38—2004《纤维混凝土结构技术规程》^[12]的规定)^[13]。(b)长沙市固力实业有限公司提供的RPC干混料、HPPC外加剂、锚固胶等。

1.2 试验仪器

试验需要的仪器如下:圆环支撑的ZH-60型后锚固强度检测仪、压力试机、锚固件、固定架、注胶枪、钻孔机。

1.3 试验分组

制作的素混凝土试块设计为5个强度等级,分别为:C15、C20、C30、C40、C50。用于加固的3种纤维水泥砂浆设计为9个强度等级:M20(C15)、M30(C20)、M40(C20)、M50(C30)、M60(C30)、M70(C40)、M80(C40)、M90(C50)、M100(C50),括号内为对应的素混凝土强度等级。每1种纤维的每一个强度等级分成6组,每一组由素混凝土试块和3个纤维水泥砂浆立方体试块组成,素混凝土试块大小为300 mm×300 mm×600 mm,立方体纤维水泥砂浆试块大小为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。

1.4 拔出试验

制作不同强度等级的素混凝土试块(300 mm×300 mm×600 mm),如图1所示。试块制作完成后进行养护,28 d后用钢纤维水泥砂浆和合成纤维水泥砂浆对试块进行加固处理(加固层厚度为30 mm,不设置钢筋网)^[14-15],加固时制作纤维水泥砂浆立方体试块。制作完成后,把加固试块和立方体试块置于相同的条件下养护,28 d后进行拔出试验。用钻孔机在加固试块上钻孔,钻孔深度为30 mm,2个钻孔之间的距离大于200 mm且钻孔离边界距离大于100 mm。清理孔洞,向钻孔内注入植筋胶,安装锚固件,利用锚杆固定锚固件并使锚固件垂直于砂浆层表面,其中锚固件锚固深度应控制在30 mm左右。待植筋胶强度达到试验要求时,安装拔出仪,缓慢摇动摇杆均匀增加拔出力至破坏(拔出力显示仪显示数据不再增加)。用压力试验机对纤维水泥砂浆立方体试块进行立方体抗压强度试验,并记录立方体抗压强度代表值。



图1 不同强度等级的混凝土试块

Fig. 1 Concrete blocks of different strength grades

2 试验数据及分析

2.1 试验数据

整理试验记录的原始数据,求出每种纤维水泥砂浆的每一组后装拔出法拔出力代表值和立方体抗压强度代表值,并将代表值汇总,部分试验数据见表1(每个强度等级只列出2组数据)。

2.2 试验分析

依据国内相关研究可知,后装拔出法测出的极限拔出力与纤维水泥砂浆抗压强度值存在比较高的线性相关性^[13],分别对3种纤维水泥砂浆拔出力代表值和相应的立方体抗压强度代表值建立一元线性回归模型^[16]。模型简化为

$$f_{\text{lm,c}} = AF + B$$

(1)

表 1 部分拔出试验数据

Table 1 Part of data of pullout test

强度等级	聚乙烯醇纤维水泥砂浆加固代表值			聚丙烯纤维水泥砂浆加固代表值			钢纤维水泥砂浆加固代表值		
	分组	拔出力 代表值	立方体抗压 强度代表值	分组	拔出力 代表值	立方体抗压 强度代表值	分组	拔出力 代表值	立方体抗压 强度代表值
		F/kN	f/MPa		F/kN	f/MPa		F/kN	f/MPa
M20	Y-1	8.56	22.07	B-1	9.65	24.96	G-1	9.30	26.09
	Y-2	8.40	25.06	B-2	9.47	29.06	G-2	10.69	28.69
M30	Y-1	11.18	32.27	B-1	11.65	32.27	G-1	11.96	33.80
	Y-2	10.85	32.10	B-2	11.78	31.70	G-2	11.10	29.91
M40	Y-1	13.10	43.95	B-1	14.33	44.79	G-1	13.79	42.66
	Y-2	13.93	44.43	B-2	13.63	44.04	G-2	14.00	42.16
M50	Y-1	14.10	50.23	B-1	15.34	50.72	G-1	16.12	53.51
	Y-2	14.07	52.74	B-2	14.47	49.26	G-2	16.04	51.91
M60	Y-1	14.47	59.36	B-1	17.35	60.54	G-1	17.95	59.15
	Y-2	17.38	61.25	B-2	15.83	60.15	G-2	19.13	58.36
M70	Y-1	17.99	67.05	B-1	17.33	66.72	G-1	21.90	64.26
	Y-2	19.65	73.92	B-2	20.00	70.31	G-2	21.17	63.20
M80	Y-1	18.61	67.16	B-1	19.96	77.56	G-1	21.59	79.98
	Y-2	19.27	77.77	B-2	21.60	85.06	G-2	22.21	80.60
M90	Y-1	20.42	89.14	B-1	20.34	83.00	G-1	21.60	83.16
	Y-2	21.81	92.74	B-2	20.09	83.03	G-2	26.43	97.98
M100	Y-1	16.80	79.90	B-1	21.90	83.52	G-1	22.91	89.92
	Y-2	22.81	91.90	B-2	17.60	78.27	G-2	24.19	81.00

式中: $f_{\text{fm,c}}$ ——纤维水泥砂浆强度换算值,MPa; A 、 B ——回归系数,单位分别为 $10^3/\text{m}^2$ 、MPa。

利用离散最小二乘法逼近方法计算 A 、 B 值:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n f_i F_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n F_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n F_i)^2}$$

$$B = f_a - AF_a$$

(2)

式中: f_i ——第 i 个构件的水泥砂浆立方体试块抗压强度代表值,MPa; F_i ——第 i 个构件的拔出力代表值,kN; n ——样本容量; f_a —— n 组水泥砂浆立方体试块抗压强度代表值的平均值,MPa; F_a —— n 个拔出力代表值的平均值,kN。

计算拟合公式和相关参数,见表 2。由表 2 可知:(a)3 种纤维水泥砂浆相关系数都大于 0.9,属于高度相关;(b)3 个指标即相对标准差、剩余标准差、回归变异系数都比较小,拟合公式比较精确。

表 2 测强公式的相关参数

Table 2 Strength measurement formula and related parameters

砂浆类别	相关系数	拟合公式	相对标准差/%	剩余标准差	回归变异系数/%
聚乙烯醇纤维水泥砂浆	0.946	$f_{\text{fm,c}}=5.17F-24.03$	10.66	5.19	8.67
聚丙烯纤维水泥砂浆	0.957	$f_{\text{fm,c}}=5.12F-24.61$	10.28	6.03	10.19
钢纤维水泥砂浆	0.977	$f_{\text{fm,c}}=4.37F-19.30$	8.27	4.83	8.18

试验中,拔出力由拔出仪、锚固深度、钻孔和锚固件大小、锚固件强度、纤维水泥砂浆抗压强度、锚固胶性能、钢筋网配置、锚固件安装状况、素混凝土试块的抗压强度等参数决定。进行后装拔出试验时,纤维水泥砂浆层存在压应力和剪应力,压应力和剪应力共同作用产生拉剪应力效应,使纤维水泥砂浆处于复杂的应力作用状态,当拔出力达到极限时砂浆薄层产生脆性破坏,破坏状态为椎体破坏。加固时不设置钢筋网、固定锚固深度和钻孔、锚固件与砂浆表面垂直、保证锚固胶的力学性能等,砂浆拔出破坏形态控制为椎体破坏,使拔出力与纤维水泥砂浆抗压强度之间有更好的映射关系。

2.3 测强公式检验

利用统计学方法^[17]对拟合公式进行 t 检验和 F 检验。对拟合公式检验分析如下:(a)在 $\alpha=0.05$ 显著性水平上,查自由度为 52 的 t 分布表,得 $t(52)=2.007$,置信度为 95% 的置信区间:聚乙烯醇纤维水泥砂浆系数 A 为(4.83, 5.51),系数 B 为(-29.79, -18.27);聚丙烯纤维水泥砂浆系数 A 为(4.69, 5.55),系数 B 为(-31.86, -17.36);钢纤维水泥砂浆系数 A 为(4.11, 4.63),系数 B 为(-24.22, -14.38)。(b)模型的实际意义检验:3 个回归公式的回归系数估计 $A>0$,说明纤维水泥砂浆抗压强度与拔出力成正比,拔出力越大纤维水泥砂浆抗压强度越高,符合实际情况。(c)总体显著性检验:全部因素对总体影响的显著效果,以显著性水平在 5% 以上进行分析得出 3 种纤维水泥砂浆 F 值,其中:聚乙烯醇纤维水泥砂浆 $F=908.195$,聚丙烯纤维水泥砂浆 $F=566.388$,钢纤维水泥砂浆 $F=1100.377$,3 种材料的 F 都大于 $F(1,52)$ ($F(1,52)=4.03$),说明拔出力对纤维水泥砂浆抗压强度影响显著。(d)在 5% 显著性水平以上进行单个系数显著检验,其中聚乙烯醇纤维水泥砂浆 $|t(A)|=30.136$,聚丙烯纤维水泥砂浆 $|t(A)|=23.799$,钢纤维水泥砂浆 $|t(A)|=33.172$,3 种材料的 $|t(A)|$ 皆大于 $t(52)$ ($t(52)=2.007$),说明拔出影响显著。(e)自相关检验中,由于 $d_L=1.49$ 和 $d_U=1.64$,可知合成纤维水泥砂浆无自相关,钢纤维水泥砂浆存在残差序列正相关。

3 对 比

绘制 3 种纤维水泥砂浆测强曲线,如图 2 所示。结合图 2、表 2 等综合分析可知:(a)在砂浆强度较低时,3 种纤维水泥砂浆的拔出力相差不大,随着砂浆强度的提高,钢纤维水泥砂浆的拔出力增长最快,在对拔出力的贡献上钢纤维影响要优于聚乙烯醇纤维、聚丙烯纤维,依据拔出力和纤维水泥砂浆抗压强度的关系可知钢纤维增加砂浆的抗压强度要高于聚乙烯醇纤维、聚丙烯纤维;(b)聚乙烯醇纤维水泥砂浆和聚丙烯纤维水泥砂浆测强公式比较接近,2 条直线几乎重合,聚乙烯醇纤维和聚丙烯纤维的掺入对砂浆强度影响的效果基本相同;(c)聚乙烯醇纤维和聚丙烯纤维的掺入对增加砂浆的抗裂性能突出^[18];(d)钢纤维水泥砂浆测强公式相对标准差和回归变异系数都小于合成纤维水泥砂浆,钢纤维水泥砂浆测强公式准确值要高于合成纤维水泥砂浆;(e)钢纤维水泥砂浆测强公式检验效果最好、最显著。

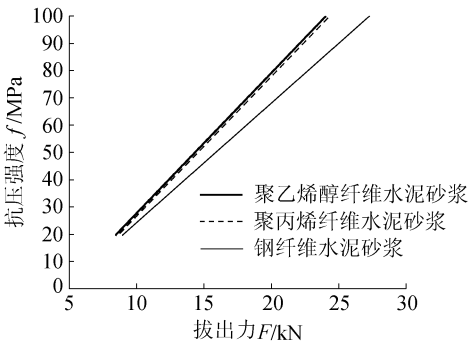


图 2 纤维水泥砂浆测强曲线
Fig. 2 Strength measurement curve of fiber cement mortar

4 结 论

- a. 对不同纤维水泥砂浆不同强度等级的抗压强度与后装拔出力之间的关系进行分析,获得纤维水泥砂浆抗压强度的测强公式,聚乙烯醇纤维水泥砂浆测强公式为 $f_{m,c}=5.17F-24.03$,聚丙烯纤维水泥砂浆测强公式为 $f_{m,c}=5.12F-24.61$,钢纤维水泥砂浆测强公式为 $f_{m,c}=4.37F-19.30$ 。
- b. 分析 3 种纤维水泥砂浆试验数据,样本相关系数皆大于 0.9,属于高度相关,相对标准差、剩余标准差、变异系数都比较小,测强公式拟合优良,对预测推定纤维水泥砂浆抗压强度比较准确。
- c. 对拟合公式进行 t 检验和 F 检验,检验结果良好,拔出力对纤维水泥砂浆抗压强度影响显著,拔出影响显著,符合工程实际意义。钢纤维水泥砂浆检验结果要优于合成纤维水泥砂浆。
- d. 聚乙烯醇纤维、聚丙烯纤维的掺入对砂浆的抗压强度影响效果基本相同,并可增加砂浆的抗裂性能。随着砂浆抗压强度的提高,掺入钢纤维对增加拔出力的作用要高于聚乙烯醇纤维和聚丙烯纤维。
- e. 试验模拟实际工程中加固处理状况,而每一种纤维水泥砂浆设计强度等级都为 9 个:M20、M30、M40、M50、M60、M70、M80、M90、M100,M100 的纤维水泥砂浆实际抗压强度没有达到设计强度等级,利用后装拔出法依据测强公式可以现场推定检测的纤维水泥砂浆抗压强度范围为 20 ~ 90 MPa。

参考文献:

[1] 卜良桃,陈大川,毛晶晶. 建筑结构加固改造设计与施工(续)[M]. 长沙:湖南大学出版社,2008:1.
[2] 尚守平,姜巍,刘一斌,等. HPFL 加固砖砌体抗压强度试验研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2010,35(6):877-881.

- (SHANG Shouping,JIANG Wei,LIU Yibin,et al. Experimental investigation on brick masonry strengthened with HPFL[J]. Journal of Guangxi University:Natural Sciences,2010,35(6):877-881. (in Chinese))
- [3] 尚守平,刘洸. HPFL加固混凝土结构斜截面承载力计算及工程应用[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2011,38(2):1-7. (SHANG Shouping, LIU Wei. Calculation of diagonal section resistance and engineering application of strengthening RC structures using HPFL[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences,2011,38(2):1-7. (in Chinese))
- [4] 卜良桃,彭超,李为. 钢纤维水泥砂浆加固钢筋混凝土足尺梁抗弯性能[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(1):98-103. (BU Liangtao,PENG Chao,LI Wei. Flexural behaviors of RC beams reinforced by steel fiber fibrocement mortar [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2010,38(1):98-103. (in Chinese))
- [5] 尚守平. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构设计与施工指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:16-17.
- [6] 张雪丽,徐宏伟,姜俊,等. 后装拔出法检测混凝土强度测强曲线的试验与研究[J]. 建筑技术,2012,43(6):551-553. (ZHANG Xueli,XU Hongwei,JIANG Jun,et al. Experimental research for test of concrete compressive strength conversion curve by pull-out method[J]. Architecture Technology,2012,43(6):551-553. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 王金山,李海文,石磊,等. 拔出法检测混凝土强度技术破坏机理研究综述[J]. 建筑结构,2010,40(增刊2):562-565. (WANG Jinshan, LI Haiwen, SHI Lei, et al. Development of failure mechanism of pull out method to estimate concrete compressive strength [J]. Journal of Building Structures,2010,40(Sup2):562-565. (in Chinese))
- [9] 崔士起,石磊,王金山,等. 有约束后锚固拔出法试验受力机理及回归曲线分析[J]. 建筑结构,2009,39(3):95-98. (CUI Shiqi,SHI Lei,WANG Jinshan,et al. Regression and analysis of mechanism of pull-out post-anchored method to check concrete strength[J]. Journal of Building Structures,2009,39(3):95-98. (in Chinese))
- [10] 陈海彬,胡寿康,冯少波. 预拌混凝土后装拔出法地区测强曲线的研究[J]. 混凝土,2012(2):114-116. (CHEN Haibin,HU Shoukang,FENG Shaobo. Research on local curve of pull-out post-insert method for premixed concrete[J]. Concrete,2012(2):114-116. (in Chinese))
- [11] GB 175—2007 通用硅酸盐水泥[S].
- [12] CECS 38—2004 纤维混凝土结构技术规程[S].
- [13] 卜良桃,李静媛. 后装拔出法检测聚乙烯醇纤维水泥复合砂浆抗压强度的试验[J]. 沈阳建筑大学学报,2010,26(2):211-215. (BU Liangtao,LI Jingyuan. Technical specification for test of PVA-ECC strength by postinstall pullout method [J]. Shenyang Construction University Journal,2010,26(2):211-215. (in Chinese))
- [14] 卜良桃,王宇晗,侯琦. 钢筋网间距对拔出法检测纤维砂浆加固薄层强度影响的试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2013,41(4):326-330. (BU Liangtao,WANG Yuhan,HOU Qi. Experimental study of influence of steel mesh spacing on strength of fiber mortar-reinforced thin layer detected by Post-install pull-out method[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2013,41(4):326-330. (in Chinese))
- [15] 卜良桃,侯琦,陈送送. 后装拔出法检测PP-ECC抗压强度的试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2013,40(7):16-21. (BU Liangtao,HOU Qi,CHEN Songsong. Experimental evaluation of the strength of polypropylene-engineered cementitious composite in the post-installed pull-out method[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences,2013,40(7):16-21. (in Chinese))
- [16] 曾金平. 数值计算方法[M]. 长沙:湖南大学出版社,2004:23-58.
- [17] 高铁梅. 计量经济分析方法与建模:EViews应用及实例[M]. 北京:清华大学出版社,2009:110-178.
- [18] 康秋波,方永浩,邓红芬. 玄武岩/聚丙烯纤维水泥砂浆的力学性能与抗裂性[J]. 材料导报,2011,25(12):122-126. (KANG Qiubo,FANG Yonghao,DENG Hongfen. Mechanical properties and crack-resistance of cement mortar with basalt/polypropylene hybrid fiber[J]. Materials Review,2011,25(12):122-126. (in Chinese))