

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.04.008

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

卜良桃,王宇晗,侯琦,毛海斌

(湖南大学土木工程学院,湖南长沙 410082)

摘要:采用 5 种强度等级和 3 种钢筋网间距的聚乙烯醇纤维水泥砂浆试件进行后装拔出试验,将试验数据进行对比和回归分析,研究纤维砂浆强度与拔出力的关系以及不同钢筋网间距对拔出力的影响。选用圆环支承式装置进行试验,结果表明:在采用后装拔出法进行聚乙烯醇纤维水泥砂浆强度检测时,拔出力与其抗压强度呈良好的线性关系;当钢筋网间距为 50 mm×50 mm 时钢筋网对拔出力大小有明显影响;当钢筋网间距大于 75 mm×75 mm 时钢筋网对拔出力的影响可以忽略不计。

关键词:聚乙烯醇纤维水泥砂浆;后装拔出法;测强曲线;回归分析

中图分类号:TV432 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)04-0326-05

Experimental study of influence of steel mesh spacing on strength of fiber mortar-reinforced thin layer detected by post-install pull-out method

BU Liangtao, WANG Yuhua, HOU Qi, MAO Haibin

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

Abstract: A post-install pull-out experiment was carried out on polyvinyl alcohol fiber-engineered cementitious composite specimens of five strength levels with three types of steel mesh spacing. Through comparison of experimental data and regression analysis, the relationship between the fiber mortar intensity and pull-out force, and the effect of different steel mesh spacings on the pull-out force were studied. A circle bracing device was used in this experiment. The results show that there was a significant linear correlation between the post-install pull-out force and the compressive strength of the polyvinyl alcohol fiber-engineered cementitious composite. The steel mesh had a noticeable effect on the pull-out force when the steel mesh spacing was 50 mm×50 mm, while it had an insignificant effect on the pull-out force when the steel mesh spacing was 75 mm×75 mm.

Key words: polyvinyl alcohol fiber-engineered cementitious composite; post-install pull-out method; strength curve; regression analysis

目前,钢筋网纤维水泥砂浆加固法越来越广泛地应用于实际工程之中^[1],并取得满意的加固效果。聚乙烯醇纤维水泥砂浆具有良好的耐火性、耐久性、环保性^[2],是一种理想的加固材料,具有广阔的科研和应用前景^[3]。但在国内,对纤维水泥砂浆加固薄层抗压强度进行现场检测尚无检测方法及标准,有必要制定一种准确、简便的方法来解决这一难题。文献[4]采用三点支承式拔出仪对聚乙烯醇纤维砂浆抗压强度进行试验研究,针对纯纤维砂浆构件,现场检测其抗压强度,但未考虑钢筋网间距对试验的影响。

笔者采用精度较高的圆环支承式拔出仪,模拟实际加固工程的纤维水泥砂浆层厚度,对聚乙烯醇纤维水泥砂浆抗压强度进行试验研究。建立了考虑到钢筋网间距的聚乙烯醇纤维水泥砂浆测强曲线,为今后的标

准制定提供依据。

1 试验方案

1.1 试验材料选择

- a. 聚乙烯醇纤维:规格为 $\varnothing 0.02\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,抗拉强度为 $1\,400\text{ MPa}^{[5]}$ 。
- b. 水泥:普通硅酸盐水泥,强度等级为 42.5 MPa 。
- c. 外加剂(ZM):早强、高强、免振捣、自流密实、无收缩混凝土外加剂。
- d. 钢筋:湖南涟源钢铁集团有限公司生产的HPB235级 $\varnothing 6$ 钢筋。
- e. 砂:中砂,细度模数为 2.5 。
- f. 水:自来水。

1.2 试验试件设计

影响拔出力的因素较多^[6],本次试验选取试块强度和加固钢筋网间距2个主要参数。试验设置5种强度等级的聚乙烯醇纤维水泥砂浆,分别为M30,M35,M40,M50和M60;5种强度等级的混凝土试块分别为C20,C25,C30,C40和C50,与砂浆强度一一对应。每种强度等级混凝土浇筑尺寸为 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}\times 450\text{ mm}$ (拔出用)的素混凝土试块3件,共15件。同时每种强度等级聚乙烯醇纤维水泥砂浆预留 $70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}$ 试块3件(测定聚乙烯醇纤维水泥砂浆抗压强度)。每种强度等级设置3种间距的钢筋(分别为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$, $75\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ 和 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$)。

试验采用南京赛峰科技仪器实业有限公司生产的SFTQ-80型多功能强度检测仪,采用圆环支承式拔出法(图1)。

1.3 试验过程

- a. 用专业钻孔机在试件的4个侧面分别钻孔,钻孔位置见图2。
- b. 将孔内砂浆残渣清尽,用专用磨槽机在复合砂浆孔内壁磨出环形槽。
- c. 检查成孔尺寸是否满足要求。
- d. 将胀簧拔头装入磨好的槽中,打入胀杆使胀簧的爪伸开卡在环形槽中。
- e. 安装拔出仪,逆时针旋转把手,使其退到最远位置,将主机显示数据调零,将拉拔仪套在拉杆上的螺母拧紧。
- f. 施加拔出力,顺时针旋转拉拔仪把手,加荷速度控制在 $0.5\sim 1.0\text{ kN/s}$,直至主机显示值不再上升或者纤维水泥复合砂浆被拔出,此时的仪器读数即为纤维水泥复合砂浆拔出力^[7]。

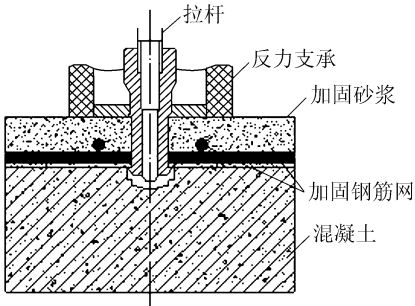


图1 圆环支承式拔出试验装置
Fig. 1 Test device of pull-out method with circle bracing

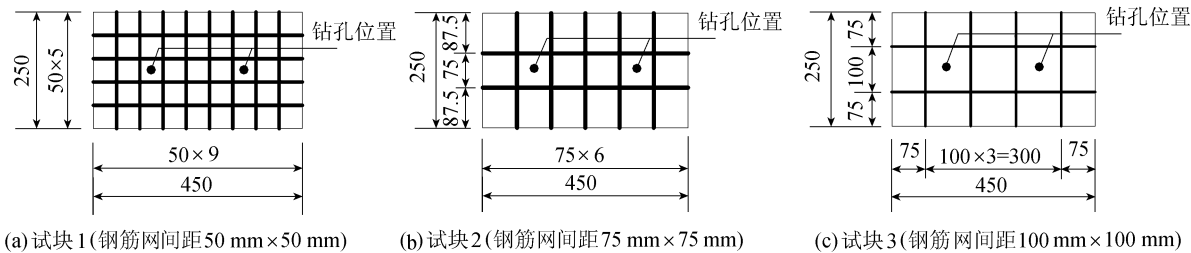


图2 拔出点位置示意图(单位:mm)
Fig. 2 Sketch map of position of pull-out point (units: mm)

2 加固砂浆薄层中无钢筋网试验结果与分析

2.1 数据初步分析

试验的相关数据采集及初步分析结果如表1所示。

2.2 试验数据回归分析

卜良桃等^[3-4]进行的研究表明:聚乙烯醇纤维水泥砂浆的后装拔出力与其抗压强度等级之间也存在着良好的线性相关性。

将加固砂浆试件的拔出力 and 立方体抗压强度值对应组合,参照推荐的回归方程式,按照最小二乘法原理进行回归计算分析^[8]:

$$f_{2,e} = aF + b \tag{1}$$

式中 a 和 b 为测强公式回归系数。

按照文献[7]的数学知识,通过计算分析得出 a 和 b 的数值分别为 2.154 和 5.707。代入式(1),得拟合直线方程式为

$$f_{2,e} = 2.154F + 5.707 \tag{2}$$

经回归分析并得聚乙烯醇纤维水泥砂浆的测强曲线如图 3 所示。

2.3 回归分析的显著性检验

R 表示 $f_{2,e}$ 与 F 线性关系的密切程度, $|R|$ 值越接近于 1,说明两者之间的线性相关性越好,拟合方程式的准确度越高,越接近实际情况。

将试验相关数据代入文献[9]中 R 的表达式,计算得 $R=0.986$,表明 $f_{2,e}$ 和 F 之间存在良好的线性相关性。

δ 是反映方程值偏离实际值范围的参数。将试验相关数据代入 δ 的表达式,计算得 $\delta=\pm 6.68\%$ 。

相对标准差 e_R 是衡量回归方程所揭示的规律性强弱的参数。计算得 $e_R=8.05\%$ 。该计算值小于文献[4]所设定的相对标准差 12%。

经过对线性回归分析的显著性检验,表明 $f_{2,e}$ 和 F 之间的线性相关性显著,二者之间存在明显可靠的线性关系。

3 钢筋网加固砂浆薄层试验结果及分析

3.1 数据采集

采集设置钢筋网的聚乙烯醇纤维水泥砂浆试件拔出力数据。

3.2 试验数据回归分析

对 3 种不同间距钢筋的纤维水泥砂浆试验数据进行直线拟合,得到相应的测强方程如表 2 所示。

数据进行回归分析,并最终得出不同钢筋网间距的聚乙烯醇纤维水泥砂浆测强曲线如图 4 所示。

3.3 回归分析的误差分析

参考文献[10]中的方法计算,3 组数据平均相对误差 δ 及相对标准差 e_R 如表 3 所示。由表 3 可见, δ 均小于 10%, e_R 小于 CECS 69—1994《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》^[11] 规定的允许值(12%),说明

表 1 加固砂浆薄层中无钢筋网试验数据

Table 1 Test data of reinforced fiber thin layer without bar-mat reinforcement

水泥砂浆强度等级	$f_{m,cu}/MPa$	F/kN	$f_{2,e}/MPa$	$\delta/\%$
M30	28.70	9.97	29.46	-2.6
	29.57	12.32	32.97	-10.3
	31.40	12.00	33.94	-7.5
	32.50	14.16	36.77	-11.6
	32.65	13.44	30.68	6.4
	34.36	11.54	37.44	-8.2
M35	35.60	13.34	30.56	16.5
	36.80	16.16	41.21	-10.7
	37.60	17.07	34.14	10.1
	38.00	16.51	37.77	0.6
	38.30	14.08	41.37	-7.4
	39.10	17.18	36.63	6.7
M40	41.50	13.96	43.66	-4.9
	41.90	20.23	37.44	11.9
	43.40	19.61	41.55	4.4
	44.20	17.01	45.64	-3.2
	45.00	18.14	49.75	-9.6
	46.20	16.57	44.27	4.4
M50	48.10	20.65	48.84	-1.5
	51.30	21.41	57.02	-10.0
	52.20	20.00	50.71	2.9
	52.80	20.95	55.14	-4.2
	53.70	22.18	51.21	4.9
	56.10	22.02	56.01	0.2
M60	57.70	25.45	54.45	6.0
	58.30	24.23	58.30	0
	59.20	21.99	55.83	6.0
	61.00	24.62	55.00	10.9
	62.30	24.08	60.00	3.8
	63.80	27.90	65.53	-2.6

注: $f_{m,cu}$ 为立方体试块抗压强度, $f_{2,e}$ 为水泥砂浆抗压强度推定值, F 为拔出力, δ 为 $f_{m,cu}$ 与 $f_{2,e}$ 相对误差。

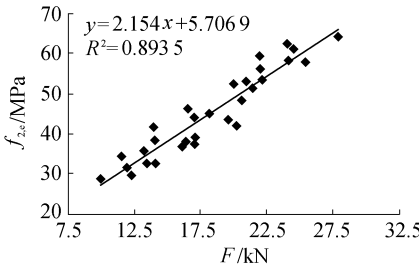


图 3 试验数据拟合直线关系

Fig. 3 Fitting straight line of test data

表 2 不同钢筋间距试块直线拟合参数
Table 2 Fitting parameters of specimens with different spacings of steel bars

钢筋网间距		R^2	a	b	拟合直线方程
横向/mm	纵向/mm				
50	50	0.954 5	2.024 9	3.768 2	$f_{2,e}=2.0249F+3.7682$
75	75	0.957 7	2.078 4	5.3563	$f_{2,e}=2.0784F+5.3563$
100	100	0.961 3	2.204 6	3.8815	$f_{2,e}=2.2046F+3.8815$

表 3 平均误差及相对标准差分析结果
Table 3 Analysis results of average error and relative standard deviation %

钢筋网间距		δ	e_R
横向/mm	纵向/mm		
50	50	6.34	7.60
75	75	5.84	7.32
100	100	5.35	6.55

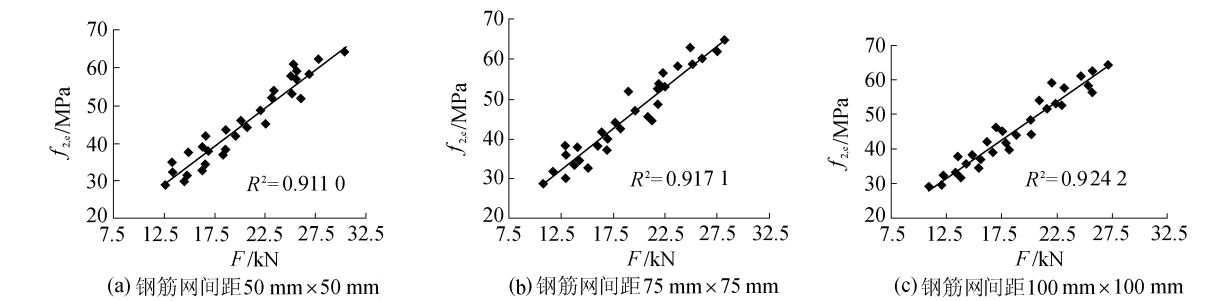


图 4 不同钢筋网间距的 $f_{2,e} \sim F$ 关系

Fig. 4 Relationship between $f_{2,e}$ and F for different steel mesh spacings

此次拟合的直线方程误差范围在规范允许之内。

3.4 钢筋网间距影响分析

将无钢筋网得到的拟合直线与有钢筋网得到的拟合直线进行对比,得图 5。由图 5 可以看出,钢筋网间距为 75 mm×75 mm 及 100 mm×100 mm 的 2 条拟合直线与无钢筋拟合直线较接近。分别对设有钢筋网的 3 组数据与无钢筋网的数据进行对比分析,钢筋网间距为 50 mm×50 mm 时 $R^2=0.8891$,钢筋网间距为 75 mm×75 mm 时 $R^2=0.9352$,钢筋网间距为 100 mm×100 mm 时 $R^2=0.9190$ 。由此可知,与钢筋网间距为 50 mm×50 mm 的拟合直线相比,钢筋网间距为 75 mm×75 mm 和 100 mm×100 mm 的拟合直线与无钢筋网的拟合直线相关性更显著。

为了进一步验证试验结果,对试验中不同钢筋网间距的拉拔破坏区域进行分析。图 6 为在布置不同间距钢筋网情况下,拉拔试验破坏面与钢筋位置的关系。

本次试验采用的圆环式拔出仪内径为 55 mm,支撑圆环壁厚 15 mm,外径为 85 mm。当钢筋网间距为 50 mm×50 mm 时,钢筋位置十分接近拉拔破坏面,且实际操作中由于钢筋笼编制的误差以及钢筋位置探测时的误差^[12],钢筋很可能穿过破坏面,对拉拔力造成影响(图 6(a));当钢筋网间距为 75 mm×75 mm 时,钢筋位置位于拉拔仪支撑圆环外边缘下方,拉拔破坏面与钢筋网之间有一定间隔,钢筋网对拉拔力的影响很小(图 6(b));当钢筋网间距为 100 mm×100 mm 时,圆环式拔出仪完全位于钢筋网之间,拉拔破坏面与钢筋网间隔较大,钢筋网对拉拔力几乎无影响(图 6(c))。以上结果说明当钢筋网间距大于拉拔破坏面时,可以忽略钢筋网对拉拔力的影响。

4 结 论

- a. 聚乙烯醇纤维水泥砂浆的后装拔出法拔出力与其抗压强度之间存在显著的线性相关性。
- b. 加固薄层中钢筋网的布置对聚乙烯醇纤维砂浆的后装拔出力存在一定影响,在同等强度条件下,与无钢筋网试块相比。当钢筋网间距为 50 mm×50 mm 时,拔出力增大;当钢筋网间距大于 75 mm×75 mm 时,对拔出力几乎无影响。

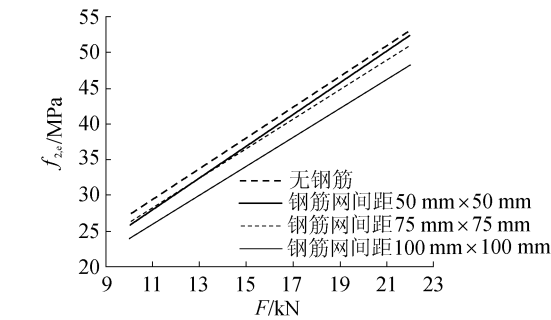


图 5 无钢筋网及有钢筋网的 $f_{2,e} \sim F$ 回归直线对比

Fig. 5 Comparison of $f_{2,e}$ - F regression lines with and without steel meshes

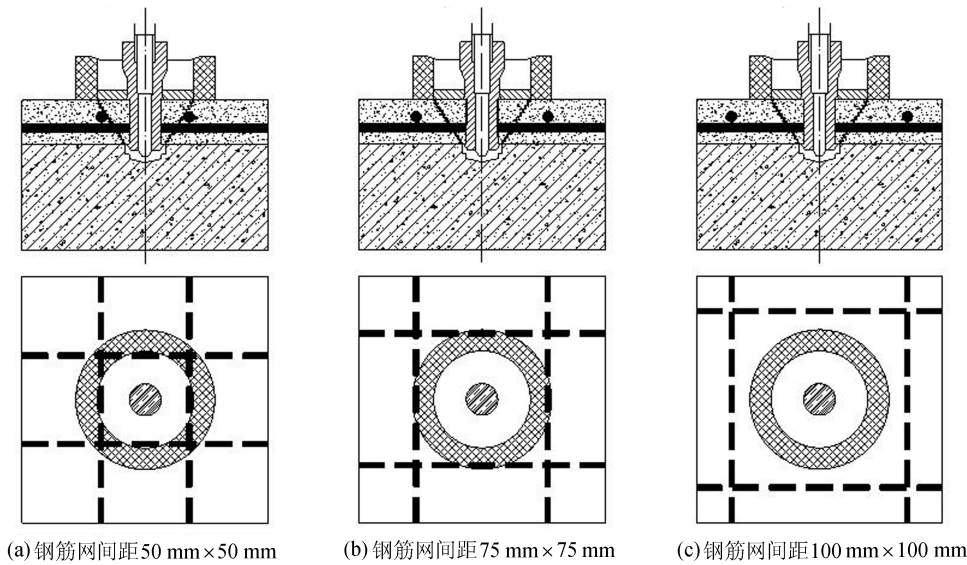


图6 钢筋网间距对拉拔试验试件破坏面的影响

Fig. 6 Influence of steel mesh spacing on failure surface of specimen in pull-out test

c. 当加固砂浆薄层中钢筋网间距为 50 mm×50 mm 时,拟合的测强曲线为 $f_{2,e}=2.0249F+3.7682$, 根据该拟合曲线得到的聚乙烯醇纤维水泥砂浆抗压强度推定值与实测抗压强度值吻合良好。

参考文献:

[1] 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.

[2] 李惠强. 建筑结构诊断鉴定与加固修复[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 205-248.

[3] 卜良桃, 万长胜, 尹鹏. PVA-ECC 加固 RC 足尺梁受弯性能试验研究[J]. 湖南大学学报, 2010, 37(1): 6-10. (BU Liangtao, WAN Changsheng, YIN Peng. Experimental study of RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious mortar in flexure[J]. Journal of Hunan University, 2010, 37(1): 6-10. (in Chinese))

[4] 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): 211-214. (BU Liangtao, LI Jingyuan. Technical specification for test of PVA-ECC strength by postinstall pullout method[J]. Shenyang Construction University Journal, 2010, 26(2): 211-214. (in Chinese))

[5] 卜良桃, 陈军, 鲁晨. PVA-ECC 加固 RC 足尺梁二次受力试验研究[J]. 湖南大学学报, 2011, 38(1): 1-7. (BU Liangtao, CHEN Jun, LU Chen. Experimental on full-scale RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious mortar in flexure subjected to secondary load[J]. Journal of Hunan University, 2011, 38(1): 1-7. (in Chinese))

[6] 汉南特 D J. 纤维水泥与纤维混凝土[M]. 陆建业, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 96-158.

[7] CECS 69—2011 拔出法检测混凝土强度技术规程[S].

[8] 曾金平. 数值计算方法[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2004: 23-58.

[9] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 12-40.

[10] 同济大学应用数学系. 工程数学概率统计简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 103-106.

[11] CECS 69—1994 后装拔出法检测混凝土强度技术规程[S].

[12] 国家建筑工程质量监督检验中心. 混凝土无损检测技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1996: 30-50.