

文章编号:1005-0523(2019)05-0033-10

含石英砂胶层粘钢加固混凝土梁钢板受力试验研究

程海根¹,李浩¹,沈长江¹,张勇²

(1.华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;2.江苏省交通科学院股份有限公司江苏分院,江苏 苏州 330013)

摘要:为了研究粘钢加固混凝土梁界面受力情况,优化界面应力传递效果,采用一种新的施工工艺:通过在胶层中加入石英砂,对钢板厚度、胶层厚度和石英砂厚度3个因素进行组合,采用正交试验方法确定具有代表性的试件梁,进行试验加载,并分析混凝土梁底面钢板的受力情况。结果表明,在胶层中加入石英砂有助于界面应力的有效传递,使得钢板更充分发挥其作用。最后,在实际工程应用中,对于石英砂的用量,建议取石英砂与胶的体积比0.50~0.67。

关键词:粘钢加固;石英砂;胶层厚度;正应力

中图分类号:U445

文献标志码:A

混凝土结构工程中常采用的加固方法为直接加固和间接加固两大类,其中直接加固方法包括增大截面加固法、置换混凝土加固法、有粘结外包型钢加固法、粘贴纤维增强塑料加固法、粘贴钢板加固法^[1]、绕丝法、锚栓锚固法;间接加固法包括预应力加固法^[2]和增加支承加固法。增大截面加固法在早期采用较多,主要用于梁、板、柱、墙构件和一般构造物的混凝土加固,其对材料要求不高、施工工艺简单、适用性强,但它的主要缺点是湿作业多、施工周期长且加固后,建筑物净空会有所减小^[3]。置换混凝土加固法在工程结构加固技术中适用于承载构件受压区混凝土强度低或缺陷严重的混凝土的局部加固^[4-5],该技术可以从根本上解决承重构件受压区混凝土强度偏低的问题^[6-8],但同样存在施工周期长的缺点。有粘结外包型钢加固法又称为湿式外包钢加固法,广泛应用于钢筋混凝土柱、梁、桁架弦和腹杆的加固,其优点是施工简便、工期短,加固后截面尺寸变化不大,大幅度提高原结构的承载力和延性^[9-10],但其用钢量较大,不适用于无防护情况下的高温场所。粘贴纤维增强塑料加固法^[11-12]适用于各种受力性质的混凝土结构构件和一般构筑物,其具有材料强度高、质量轻、耐腐蚀及施工便利等优点^[13-15],但成本较高,且防火性能差,需要专门的防火处理^[16]。绕丝法加固适用于斜截面承载力不足或需施加横向约束力的混凝土结构构件,其对材料要求不高,施工工艺简单,但其和增大截面加固法一样施工周期较长。锚栓锚固法是通过锚栓将钢板直接固定在混凝土构件表面,使构件与钢板共同作用加固技术,可以大幅度提高构件承载力、刚度与延性,避免了粘钢加固时高应力下端部的剥离破坏^[17-18]。但其施工成本较高,施工会破坏构件美观,使混凝土梁表面削弱^[19]。预应力加固法适用于原结构刚度较小,需要改善结构正常使用性能并提高极限承载力的高应力条件下的大型梁、板、柱和桁架结构的加固。增加支承加固法适用于因使用功能变化和生产过程更新需要而改变布局的现有建筑结构的改造。预应力加固法防护处理较难,且费用较高,而增设支点加固法则显著影响使用空间;因此直接加固法是主要的加固措施。其中粘贴钢板加固混凝土梁由于其施工简便、加固效果可靠且加固后对原结构外观和净空无

收稿日期:2019-02-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51068005)

作者简介:程海根(1971—),男,教授,博士,研究方向为桥梁结构力学性能。

通讯作者:李浩(1991—),男,硕士研究生,研究方向为混凝土粘钢加固。

明显影响的特点,在结构加固以及工程改造领域中得到广泛应用^[20-21]。对于粘贴钢板加固的结构构件,研究者已经做了大量的理论和试验研究工作。如基于有限元模型的模拟计算^[22]、胶层厚度^[23-24]等因素对加固效果的影响、抗弯试验^[25]、抗剪承载力研究^[26]等。但是在上述研究中,对于粘钢加固梁混凝土—胶层—钢板之间的界面应力传递效率没有给出有效的优化建议;因此本试验在传统的粘钢加固基础上进行创新,采用新的施工工艺,在胶层中加入石英砂改变加固胶的性能,以期胶层能更有效地传递应力,钢板能够分担受拉钢筋更多的拉应力,充分发挥钢板作用,进而提高加固效果。本试验就影响粘钢加固的3个主要因素钢板厚度、胶层厚度和石英砂厚度进行正交试验组合,并对成品试件梁进行试验加载,最后分析所得的试验数据。

1 试验设计

1.1 试件制作

本试验采用正交试验方法确定并制作了25根钢筋混凝土梁,梁截面设计尺寸为100 mm×160 mm,梁长为1 200 mm,混凝土强度等级为C40。在实际工程中,为了使粘钢尽可能包住受拉区混凝土外表面,混凝土梁底面粘贴钢板时钢板的宽度应尽可能接近梁的截面宽度,考虑到实际情况,需加固的混凝土梁边缘可能出现棱角碰缺的情况,将钢板的设计宽度从混凝土梁两侧外边缘各收进10 mm^[27](即试验梁底粘贴钢板宽度为80 mm,长度为900 mm)。25根试验梁配筋均相同:受拉区2Φ12,为HRB335级钢筋;受压区2Φ12,为HRB335级钢筋,其作用是架立筋;梁的两端540 mm长范围内配箍筋Φ8@60 mm,为HPB235级钢筋;保护层厚度20 mm。实际配筋率 $\rho=6.60>\rho_{\min}=0.24\%$,属于适筋梁。梁两端简支,支点间跨度1 020 mm,在其跨度三等分点处对称加载。所有梁加载位置、钢板尺寸、粘贴位置均相同。

本试验中施工工艺的创新是在胶层中加入石英砂,并将石英砂的含量作为一个试验变量。石英砂的用量是通过自然状态下等体积石英砂在胶层中所占的厚度来确定。试件梁构造图如图1所示。

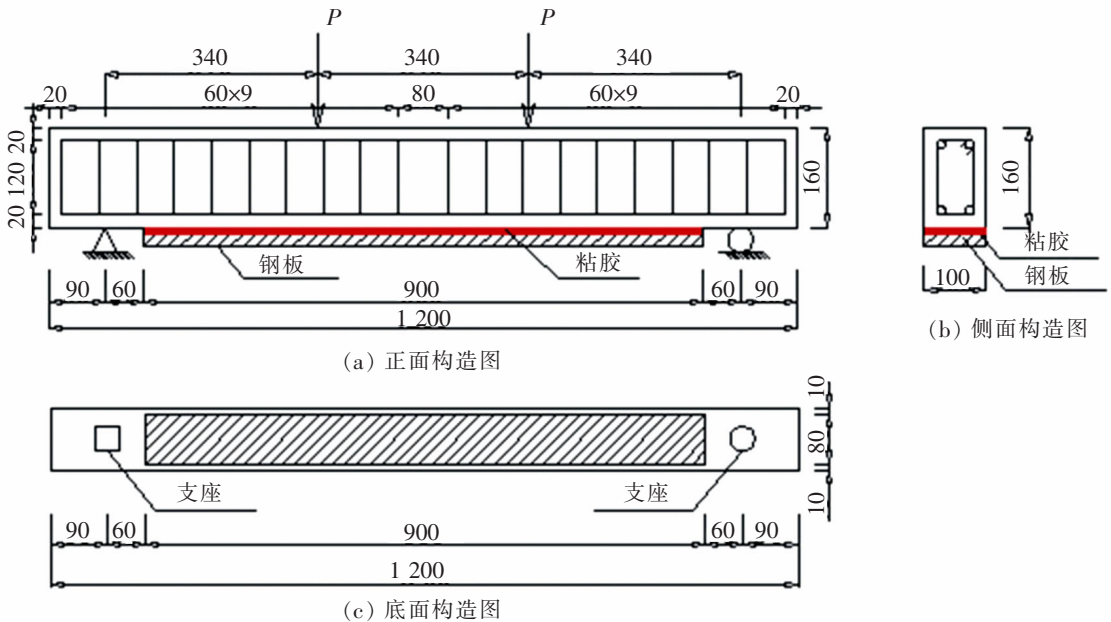


图1 试件梁构造图(单位:mm)

Fig.1 Beam structure of test piece (Unit:mm)

钢板厚度分别采用3.0 mm(A1),4.0 mm(A2),5.0 mm(A3),6.0 mm(A4),7.0 mm(A5);胶层厚度分别采用1 mm(B1),1.5 mm(B2),2.0 mm(B3),2.5 mm(B4),3.0 mm(B5);石英砂厚度分别采用0 mm(C1),0.5 mm(C2),1.0 mm(C3),1.5 mm(C4),2.0 mm(C5)。试验组合表如表1所示。

表 1 试验组合表
Tab.1 Test combination

钢板厚度	胶层厚度	石英砂厚度				
		C1	C2	C3	C4	C5
A1	B1	A1B1C1	A1B1C2	A1B1C3	A1B1C4	A1B1C5
	B2	A1B2C1	A1B2C2	A1B2C3	A1B2C4	A1B2C5
	B3	A1B3C1	A1B3C2	A1B3C3	A1B3C4	A1B3C5
	B4	A1B4C1	A1B4C2	A1B4C3	A1B4C4	A1B4C5
	B5	A1B5C1	A1B5C2	A1B5C3	A1B5C4	A1B5C5
A2	B1	A2B1C1	A2B1C2	A2B1C3	A2B1C4	A2B1C5
	B2	A2B2C1	A2B2C2	A2B2C3	A2B2C4	A2B2C5
	B3	A2B3C1	A2B3C2	A2B3C3	A2B3C4	A2B3C5
	B4	A2B4C1	A2B4C2	A2B4C3	A2B4C4	A2B4C5
	B5	A2B5C1	A2B5C2	A2B5C3	A2B5C4	A2B5C5
A3	B1	A3B1C1	A3B1C2	A3B1C3	A3B1C4	A3B1C5
	B2	A3B2C1	A3B2C2	A3B2C3	A3B2C4	A3B2C5
	B3	A3B3C1	A3B3C2	A3B3C3	A3B3C4	A3B3C5
	B4	A3B4C1	A3B4C2	A3B4C3	A3B4C4	A3B4C5
	B5	A3B5C1	A3B5C2	A3B5C3	A3B5C4	A3B5C5
A4	B1	A4B1C1	A4B1C2	A4B1C3	A4B1C4	A4B1C5
	B2	A4B2C1	A4B2C2	A4B2C3	A4B2C4	A4B2C5
	B3	A4B3C1	A4B3C2	A4B3C3	A4B3C4	A4B3C5
	B4	A4B4C1	A4B4C2	A4B4C3	A4B4C4	A4B4C5
	B5	A4B5C1	A4B5C2	A4B5C3	A4B5C4	A4B5C5
A5	B1	A5B1C1	A5B1C2	A5B1C3	A5B1C4	A5B1C5
	B2	A5B2C1	A5B2C2	A5B2C3	A5B2C4	A5B2C5
	B3	A5B3C1	A5B3C2	A5B3C3	A5B3C4	A5B3C5
	B4	A5B4C1	A5B4C2	A5B4C3	A5B4C4	A5B4C5
	B5	A2B5C1	A2B5C2	A2B5C3	A2B5C4	A2B5C5

采用正交试验分析,三因素五水平,使用正交表 L25(56),共做 25 组试验,正交试验表如表 2 所示。

表 2 正交试验表
Tab.2 Orthogonal test

试验号	钢板厚度	胶层厚度	石英砂厚度	试验号	钢板厚度	胶层厚度	石英砂厚度
1	A1	B1	C1	14	A3	B4	C1
2	A1	B2	C2	15	A3	B5	C2
3	A1	B3	C3	16	A4	B1	C4
4	A1	B4	C4	17	A4	B2	C5
5	A1	B5	C5	18	A4	B3	C1
6	A2	B1	C2	19	A4	B4	C2
7	A2	B2	C3	20	A4	B5	C3
8	A2	B3	C4	21	A5	B1	C5
9	A2	B4	C5	22	A5	B2	C1
10	A2	B5	C1	23	A5	B3	C2
11	A3	B1	C3	24	A5	B4	C3
12	A3	B2	C4	25	A5	B5	C4
13	A3	B3	C5				

注:在实际试验操作中发现第 16,17 根和 21 根试件梁因石英砂与胶的比例过大,掺和之后,胶的粘结性能大大降低;因此将这 3 组试件梁剔除。

1.2 试件的加载方案

将第 16,17 根和 21 根试件梁剔除,剩余 22 根试件梁均采用分配梁在三等分点处对称加载,保证梁处于纯弯状态。试件梁在初始状态时粘贴钢板,然后将试件梁准确定位放置于反力架下。最后使用千斤顶对试件梁直接加载,当钢板剥离或试件梁破坏时,停止加载。

为测量试件梁的底部拉应力,分别在钢板端部、四分之一处、跨中处粘贴应变片。为了避免因意外情况导致某些数据偏差过大,每一根梁设计了 5 个测点,从左到右依次为测点 1~测点 5。试件加载及测点布置简图如图 2 所示。

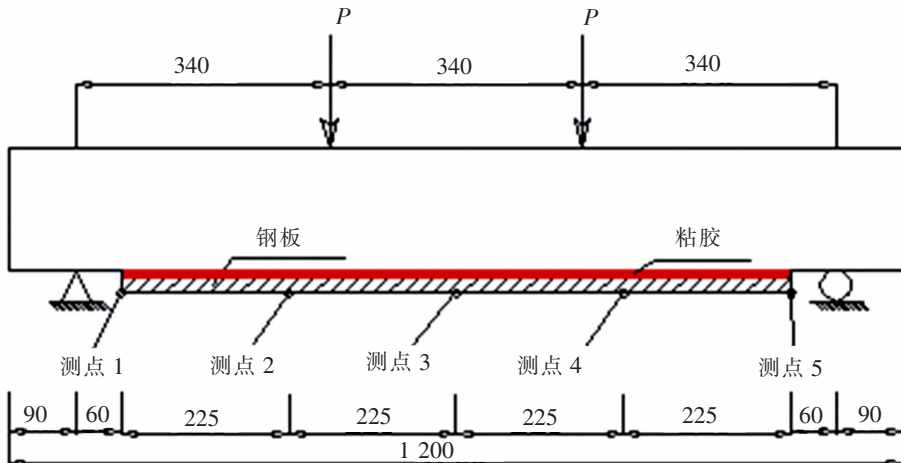


图 2 试件加载及测点布置简图(单位:mm)

Fig.2 Sample loading and measuring points layout (Unit:mm)

2 试验分析

通过22组试验结果发现,部分试件梁在荷载 P 加载至15 kN时,钢板会发生剥离现象,且荷载 P 为5 kN时,测点应力分布规律也较明显;因此对荷载 P 为5 kN时试验所得的数据进行分析。为了更清晰地展示其相关规律,本文采用origin软件绘图,其中 X 轴表示序号, Y 轴表示应力值。

2.1 钢板底面端部正应力分析

根据试验数据可知,在已进行的22组试验中石英砂与胶层的体积比最大为1:1,最小为0(即胶层中不加入石英砂),按照石英砂与胶层的体积比从高到低的顺序重新排列,体积比相同时按试件号从小到大的顺序排列,列出随石英砂比例变化的钢板底面端部正应力变化,结果见表3。然后分别绘制钢筋混凝土梁在荷载 $P=5$ kN状态下钢板底面端部各测点的正应力随胶层中含石英砂比例变化的线形图。

由表3中测点1数据可以看出序号8(即第4根试件梁)与相近条件下试件梁钢板底面端部测点1应力数值明显相差过大,将其去除。再根据已绘制的线形图(如图3)可以看出,钢板正应力值随着石英砂与胶体积比的降低先增大后减小,最后趋于平稳。序号7对应的钢板正应力值达到最大,即石英砂与胶体积比在0.67左右时钢板端部正应力达到最大。

由表3中测点5数据可以看出序号4(即第9根试件梁)与相近条件下试件梁钢板底面端部测点5应力数值相差一个数量级,明显异常,故将其去除。再根据已绘制的线形图(如图4)可以看出,钢板正应力随着石英砂与胶体积比的降低先缓慢增大后减小,最后趋于平稳。序号7对应的钢板正应力值达到最大,即石英砂与胶体积比在0.67左右时钢板端部正应力达到最大。

表3 钢板底面端部各测点正应力随石英砂比例变化表
Tab.3 Changes in normal stress of measuring point with the proportion of quartz sand

						MPa					
序号	试件号	砂与胶体积比	测点1	测点5	理论值	序号	试件号	砂与胶体积比	测点1	测点5	理论值
1	11	1.0	0.45	-0.53	2.9	12	24	0.40	-0.2	-0.4	4.0
2	12	1.0	0.26	0.85	2.9	13	2	0.33	0.26	0.42	1.9
3	13	1.0	1.2	0.92	2.9	14	20	0.33	0.31	0.2	3.5
4	9	0.8	0.45	12.13	2.4	15	23	0.25	-0.6	0.2	4.0
5	8	0.75	0.2	1.1	2.4	16	19	0.20	-0.6	3.8	3.5
6	5	0.67	1.6	1.6	1.9	17	15	0.17	0.31	-0.2	3.0
7	7	0.67	4.4	2	2.4	18	1	0	0.17	0.31	1.9
8	4	0.60	-5.4	-2.6	1.9	19	10	0	0.1	1.4	2.4
9	3	0.50	0.3	-0.4	1.9	20	14	0	0.4	0.61	3.0
10	6	0.50	0.78	1.32	2.4	21	18	0	2.4	-1.2	3.5
11	25	0.50	0.26	0.18	4.0	22	22	0	0.41	0.6	4.0

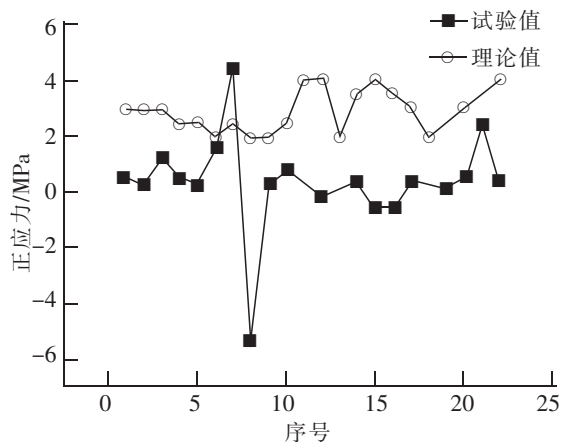


图3 钢板底面端部测点1正应力随石英砂比例变化线形图
Fig.3 Linear diagram of the normal stress of the bottom end of the steel plate with the proportion of quartz sand

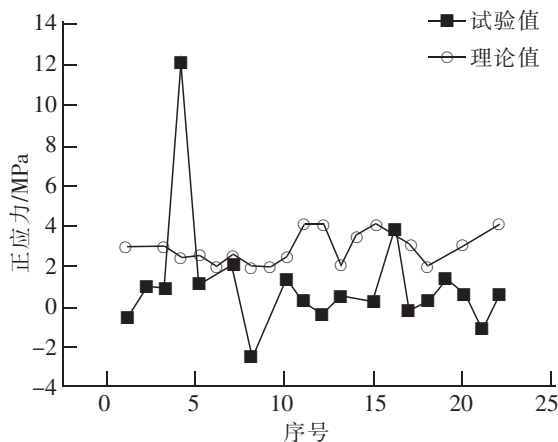


图4 钢板底面端部测点5正应力随石英砂比例变化线形图
Fig.4 Line diagram of the normal stress of the measuring point 5 with the proportion of quartz sand

2.2 钢板底面 1/4 处截面正应力分析

按照石英砂与胶层的体积比从高到低的顺序重新排列, 体积比相同时按试件号从小到大的顺序排列, 列出随石英砂比例变化的钢板底面 1/4 处截面正应力变化, 结果见表 4。然后分别绘制钢筋混凝土梁在荷载 $P=5\text{ kN}$ 状态下钢板底面 1/4 处截面各测点正应力随胶层中含石英砂比例变化的线形图。

表 4 钢板底面 1/4 处截面各测点正应力随石英砂比例变化表

Tab.4 Changes in the normal stress of the measuring point 2 and 4 with the proportion of quartz sand

						MPa					
序号	试件号	砂与胶体积比	测点 2	测点 4	理论值	序号	试件号	砂与胶体积比	测点 2	测点 4	理论值
1	11	1.0	7.93	8.6	10.3	12	24	0.40	9.2	7.8	14.1
2	12	1.0	1.8	7.4	10.3	13	2	0.33	6.45	5.94	6.6
3	13	1.0	9.73	11.07	10.3	14	20	0.33	10.8	10.2	12.2
4	9	0.8	11.87	0.8	8.5	15	23	0.25	10.4	8.8	14.1
5	8	0.75	11.2	11.3	8.5	16	19	0.20	9.2	9.8	12.2
6	5	0.67	13.07	12.87	6.7	17	15	0.17	5.8	9.4	10.4
7	7	0.67	15.4	11.8	8.4	18	1	0	5.34	6.45	6.6
8	4	0.60	13.4	13	6.7	19	10	0	10	11	8.5
9	3	0.50	14	10.8	6.6	20	14	0	10.6	9	10.3
10	6	0.50	11.6	13	8.4	21	18	0	13.6	5.2	12.2
11	25	0.50	8.6	9.2	14.2	22	22	0	8	6.6	14.0

由表 4 中测点 2 数据可以看出序号 2(即第 12 根试件梁)与相近条件下试件梁钢板底面端部测点 2 应力数值明显相差过大, 故将其去除。再根据已绘制的线形图(如图 5)可以看出, 钢板正应力随着石英砂与胶体积比的降低先增大至峰值, 然后减小。序号 14~16 所对应的钢板正应力再次小幅度上升, 峰值大致出现在序号 7~9 处, 即石英砂与胶体积比在 0.50~0.67。

由表 4 中测点 4 数据可以看出序号 4(即第 9 根试件梁)与相近条件下试件梁钢板底面端部测点 4 应

力数值明显相差过大,故将其去除。再根据已绘制的线形图(如图 6)可以看出,钢板正应力随着石英砂与胶体积比的降低先增大至峰值,然后减小。序号 14~16 时对应的钢板正应力再次小幅度上升,峰值大致出现在序号 6~10 处,即石英砂与胶体积比在 0.50~0.67。

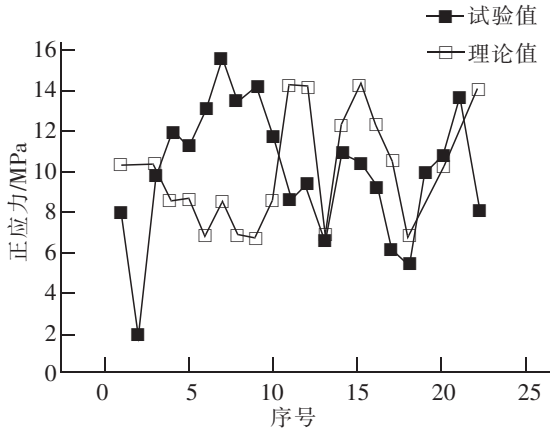


图 5 钢板底面 1/4 截面测点 2 正应力随石英砂比例变化线形图

Fig.5 Linear diagram of the normal stress of the measuring point 2 with the proportion of quartz sand

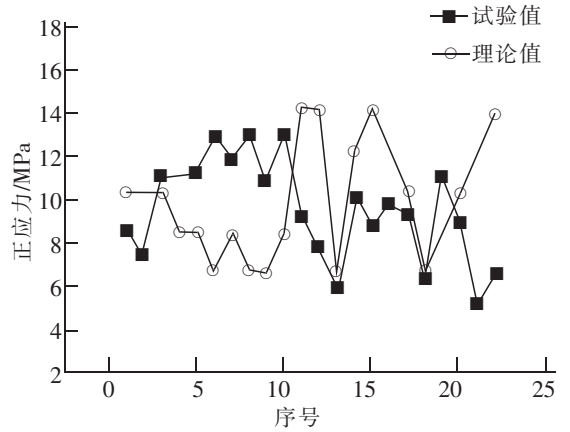


图 6 钢板底面 1/4 截面测点 4 正应力随石英砂比例变化线形图

Fig.6 Linear diagram of the normal stress of the measuring point 4 with the proportion of quartz sand

2.3 钢板底面跨中截面正应力分析

按照石英砂与胶的体积比从高到低的顺序重新排列,体积比相同时按试件号从小到大的顺序排列,列出随石英砂比例变化的钢板底面跨中截面正应力变化,结果见表 5。然后绘制钢筋混凝土梁在荷载 $P=5$ kN 状态下钢板底面跨中截面正应力随胶层中含石英砂比例变化的线形图。

表 5 钢板底面跨中截面测点正应力随石英砂比例变化表

Tab.5 Changes in the normal stress of the measuring point 3 with the proportion of quartz sand

序号	试件号	砂与胶体积比	测点 3	理论值	MPa
1	11	1.0	11.13	16.6	
2	12	1.0	14.2	16.7	
3	13	1.0	14.4	16.7	
4	9	0.8	20.47	13.7	
5	8	0.75	-9.2	13.7	
6	5	0.67	18.07	10.8	
7	7	0.67	17.8	13.7	
8	4	0.60	21.4	10.8	
9	3	0.50	16.8	10.7	
10	6	0.50	21.7	13.6	
11	25	0.50	11.4	22.9	
12	24	0.40	12.4	22.8	
13	2	0.33	13.6	10.7	
14	20	0.33	15.8	19.8	
15	23	0.25	8.8	22.8	
16	19	0.20	15	19.8	
17	15	0.17	15.6	16.8	
18	1	0	12.5	10.7	
19	10	0	14.6	13.8	
20	14	0	14.2	16.7	
21	18	0	12.4	19.7	
22	22	0	9.8	22.7	

由表5中测点3数据可以看出序号5(即第8根试件梁)与相近条件下试件梁钢板底面端部测点4应力数值明显相差过大,故将其去除。再根据已绘制的线形图(如图7)可以看出,钢板正应力随着石英砂与胶体积比的降低先增大后减小,最后趋于平稳。序号6~10对应的钢板正应力值达到最大,即石英砂与胶体积比在0.50~0.67时钢板端部正应力达到最大。

2.4 跨中挠度分析

由试验数据可知,在已进行的22组试验中石英砂与胶层的体积比最大为1:1,最小为0(即胶层中不加入石英砂),按照石英砂与胶的体积比按从高到低的顺序重新排列,体积比相同时,按试件号排列,列出随石英砂比例变化的钢板剥离时的跨中挠度表,如表6。然后绘制钢筋混凝土梁在对称荷载 $P=5\text{ kN}$ 作用下跨中挠度随胶层中含石英砂比例变化的线形图。

表6 跨中挠度随胶层中含石英砂比例变化表

Tab.6 Variation of mid-span deflection with the proportion of quartz-bearing sand in the glue layer

序号	试件号	砂与胶体积比	跨中挠度	序号	试件号	砂与胶体积比	跨中挠度
1	11	1.0	0.34	12	24	0.40	0.17
2	12	1.0	0.22	13	2	0.33	-
3	13	1.0	0.3	14	20	0.33	0.18
4	9	0.8	0.68	15	23	0.25	0.21
5	8	0.75	1.04	16	19	0.20	0.22
6	5	0.67	0.47	17	15	0.17	0.72
7	7	0.67	0.62	18	1	0	0.31
8	4	0.60	0.58	19	10	0	0.24
9	3	0.50	0.95	20	14	0	0.60
10	6	0.50	1.26	21	18	0	0.01
11	25	0.50	0.14	22	22	0	0.21

再根据已绘制的线形图(见图8)可以看出,试件梁跨中挠度随石英砂与结构胶体积比的降低大概趋势为先升高,再降低,当达到不含石英砂时,挠度再次出现小幅度上升。试件梁跨中挠度在序列号为1~3(石英砂与结构胶体积比为1.0)和11~16(石英砂与结构胶体积比为0.5~0.2)时较小,由此可以得出结论:当使用粘钢加固技术时,若在胶层中加入石英砂,对于挠度控制要求较高的建筑结构构件,石英砂与胶层的体积比建议取1.0或在0.2~0.5。

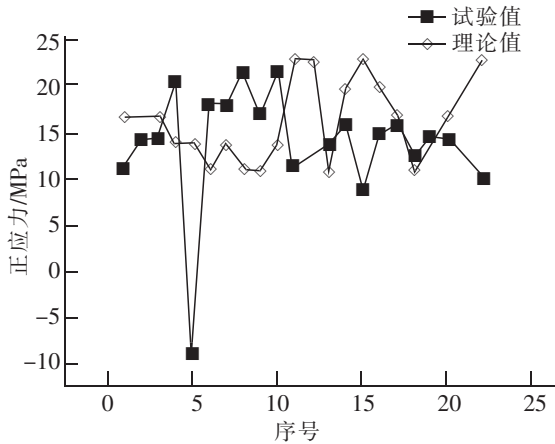


图7 钢板底面跨中截面测点3正应力随石英砂比例变化线形图

Fig.7 Linear diagram of the normal stress of the measuring point 3 with the proportion of quartz sand

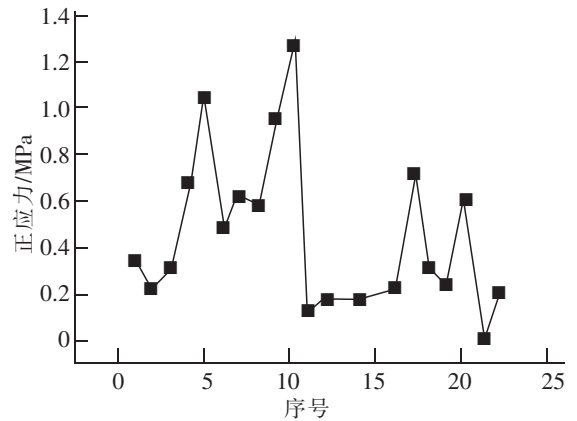


图8 跨中挠度随胶层中含石英砂比例变化的线形图
Fig.8 Linear diagram of mid-span deflection varying with the proportion of quartz-bearing sand in the rubber layer

3 结论

在试验荷载 P 为 5 kN 的状态下,通过对试件梁底面钢板的正应力分析,得出以下结论:

- 1) 随着胶层中石英砂含量的降低,钢板底面正应力也随之变化,其变化趋势基本为先增大,达到峰值,然后再降低。
- 2) 试件梁底面钢板正应力增大,表明在同等荷载作用下,在胶层中加入石英砂有助于界面应力的有效传递,试件梁底面钢板能更好地发挥作用,更有效地分担混凝土梁受拉钢筋的拉应力。
- 3) 在钢板端部,加入石英砂后的试件梁底面正应力增大不太明显,但在钢板 1/4 和跨中处,随着石英砂的加入,钢板底面正应力有显著的提高。
- 4) 在实际工程施工中,对于石英砂的用量,建议为石英砂与胶的体积比 0.50~0.67。

参考文献:

- [1] OSMAN B H, WU E, JI B, et al. Repair technique of pre-cracked reinforced concrete (RC) beams with transverse openings strengthened with steel plate under sustained load[J]. Journal of Adhesion Science & Technology, 2017, 31(3): 1-20.
- [2] 曹忠民, 赖恒力, 邱荣文, 等. 预应力钢绞线网加固 RC 柱抗震性能影响因素研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(4): 15-20.
- [3] 沈华. 增大截面加固梁的正截面抗弯性能试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013(12): 1639-1645.
- [4] 陈尚建, 刘海波, 欧阳普英. 置换混凝土法在结构加固设计中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41: 77-79.
- [5] 陈东. 无支撑置换混凝土加固方法与施工技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [6] 潘立. 高强材料等截面置换混凝土柱、墙表层加固方法的应用研究[J]. 建筑结构, 2013(1): 85-90.
- [7] 马健华, 马淑芳. 混凝土整体置换法在结构加固中的应用[J]. 施工技术, 2016(10): 79-81.
- [8] 谢洪阳, 陈斌, 王诗祥. 置换混凝土加固施工技术[J]. 施工技术, 2015, 44(16): 39-41.
- [9] 刘立新. 外包型钢加固法设计与施工体会[J]. 山西建筑, 2007, 33(21): 75-76.
- [10] 陈哲. 谈外包型钢加固法的设计与施工体会[J]. 建筑设计管理, 2010(1): 64-66.

- [11] VATANI OSKOU EI A. Repairing of seismically damaged RC exterior beam-column connection using CFRP[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2010, 29(12): 3257-3274.
- [12] TANARSLAN H M. Repairing and strengthening earthquake damaged RC beams with composites[J]. Waset Org, 2010, 62(5): 365-378.
- [13] 徐玉野, 林燕卿, 杨清文, 等. CFRP加固火灾后混凝土短柱抗震性能的试验研究[J]. 工程力学, 2014(8): 92-100.
- [14] 吴毅彬, 金国芳, 李敏峰. 基于可靠度的 FRP 加固混凝土结构研究综述[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(1): 85-89.
- [15] 伍希志, 任会礼, 钟懿. 基于粘聚力理论的 CFRP 加固钢板剥离机理研究[J]. 固体力学学报, 2015(3): 197-203.
- [16] 陈智. 芳纶纤维加固钢筋混凝土梁正截面承载力研究[D]. 长沙: 湖南科技大学, 2015.
- [17] 向宇翔. 直剪型锚栓钢板抗剪加固钢筋混凝土梁有限元分析和试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [18] 全学友, 邓扬, 刘辉, 等. 直接剪切型锚栓钢板加固混凝土梁的抗弯承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2018(18): 88-92.
- [19] 韩大刚. 锚栓钢板加固法抗弯性能试验及设计方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [20] 朱小琳, 尤宽山. 粘钢加固法在水利枢纽墩墙加固中的应用[J]. 广西水利水电, 2018(4): 34-36.
- [21] 王秀丽. 粘钢加固法在隧道衬砌裂损快速修补中的应用研究[J]. 施工技术, 2018, 47(10): 61-65.
- [22] SHI C, WU J, ZHANG Z, et al. Nonlinear finite element analysis of the out-of-plane bending shear behavior of steel plate reinforced concrete slab based on abaqus[J]. Industrial Construction, 2015, 512(45): 57-82.
- [23] 黄亚, 陈耀庆, 郑威. 胶层厚度对粘钢加固钢筋混凝土梁的影响[J]. 工业建筑, 2010(40): 1140-1142.
- [24] 鲍安红, 黎桢君, 黄唯. 胶层厚度对梁底粘钢加固的剥离影响仿真研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015(5): 41-44.
- [25] 吴志雄. 厚钢板加固混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 福建建设科技, 2006(2): 27-28.
- [26] 鲍安红, 殷学纲. 考虑钢板剥离影响的加固混凝土梁抗剪承载力研究[J]. 应用力学学报, 2005(4): 613-617.
- [27] 江雪, 王雷. 钢筋混凝土梁粘钢加固试验研究[J]. 施工技术, 2004, 33(6): 20-21.

Experimental Study on Normal Stress of Concrete Beams Strengthened with Quartz Sand and Bonded Steel

Cheng Haigen¹, Li Hao¹, Shen Changjiang¹, Zhang Yong²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. JSTI Group, Nanchang 330013, China)

Abstract: Thanks to the advantages of convenient construction, reliable reinforcement effect and obvious economic benefits, the method of pasting steel plate reinforced concrete beams has been widely used in the field of structural reinforcement and engineering transformation. A new construction process was adopted in the experiment: by adding quartz sand to the glue layer, the three factors of steel plate thickness, rubber layer thickness and quartz sand thickness were combined. The representative experiment beams which were loaded were determined by orthogonal test method, and then the interface stress of the steel plate on the bottom of the concrete beams was analyzed. The results show that the addition of quartz sand in the glue layer contributes to the effective transmission of interfacial stress, so that the steel plate can fully exert its effect. Finally, suggestions are proposed for the dosage of quartz sand in practical engineering application.

Key words: paste steel plate reinforcement; quartz sand; glue thickness; normal stress