

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800464

铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度研究

杨立军^{1,2,3}, 邓志恒^{3*}, 陈 卫³, 杨海峰³

(1.湖南文理学院 洞庭湖生态经济区建设与发展省级协同创新中心, 湖南 常德 415000;

2.湖南文理学院 土木建筑工程学院, 湖南 常德 415000;

3.广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘 要:为了提高加固钢筋混凝土梁承载力的同时具有很好的延性和耗能能力,特别是满足侵蚀环境及寒冷环境中加固工程的需要,采用铝合金板加固钢筋混凝土梁是一个很好的解决办法。铝合金板通过粘贴层将力传给钢筋混凝土梁,故铝合金板与混凝土的粘贴粘结性能决定了铝合金板加固钢筋混凝土梁的效果。铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度作为铝合金板加固钢筋混凝土梁连接设计的基础,对其开展试验和理论研究。开展105个试件的铝合金板与混凝土面内单剪试验发现:对粘贴界面没有进行粗糙处理的试件发生了界面剥离破坏,其他试件均发生了混凝土层剥离破坏;界面剥离破坏的粘结性能远差于混凝土层剥离破坏,说明了对粘贴界面进行处理的必要性。通过试验得到铝合金板和混凝土连接的极限粘结荷载,根据铝合金板正应力的变化率与粘贴界面剪应力的关系,得到剪应力的分布曲线和有效粘结长度;假设剪应力沿有效粘结长度处处相等,得到了铝合金板与混凝土的粘贴试验粘结强度,并基于此讨论了界面处理、混凝土强度、铝合金板宽度、厚度和粘贴长度等因素对试验粘结强度的影响。结合试验数据的统计回归分析,提出计算铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度的修正Niedermeier模型,得到了铝合金板与混凝土的有效粘结长度和粘贴粘结强度的理论计算公式,其理论值和试验值吻合较好,误差最大值为8.98%,平均值为0.004,标准差为0.041。研究成果为铝合金板加固钢筋混凝土梁的粘贴设计提供了理论基础。

关键词:铝合金板;混凝土;粘贴粘结强度;面内单剪试验;剪应力

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)03-0101-07

Study on Interfacial Bond Strength Between Aluminum Alloy Plate and Concrete

YANG Lijun^{1,2,3}, DENG Zhiheng^{3*}, CHEN Wei³, YANG Haifeng³

(1.Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Hunan Univ. of Arts and Sci., Changde 415000, China; 2.College of Civil and Architecture Eng., Hunan Univ. of Arts and Sci., Changde 415000, China;

3.College of Civil Eng. and Architecture, Guangxi Univ., Nanning 530004, China)

Abstract: RC beam strengthened with aluminum alloy plate is a good solution for the purpose of increasing bearing capacity of concrete beam. At the same time, the ductility and energy-dissipating capacity will also be better, especially satisfying the reinforcement engineering at erosion and cold environments. As the stress of aluminum alloy plate is transmitted to the RC beam through the bonding layer, the strengthening effect of the RC beam strengthened with aluminum alloy plate is determined by the bonding property between aluminum alloy plate and concrete. As the study foundation of RC beam strengthened with aluminum alloy plate, the experimental and theoretical studies on interfacial bond strength between aluminum alloy plate and concrete were given. In-plane shear tests of 105 specimens were carried out. Specimens which were not treated on the bonding interface were failed in the form of interfacial debonding. The other specimens were failed in the form of being stripped of concrete layer. The bonding property of the interfacial debonding was much worse than the stripping of the concrete layer, indicating the necessity of treat-

收稿日期:2018-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51478126);国家自然科学基金地区基金项目(51768004);湖南省高等学校“双一流”建设项目(湘教通[2018]469)

作者简介:杨立军(1976—),男,教授,博士.研究方向:混凝土结构加固理论;建筑结构非线性振动. E-mail: yanglj9601@163.com

* 通信联系人 E-mail: dengzh@gxu.edu.cn

网络出版时间:2019-04-30 10:39:30

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190429.1613.003.html

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

ing on the bonding interface. The ultimate bond loads between aluminum alloy plate and concrete were got. Shear stresses distribution curves and effective bond length were obtained according to the relationship between the change rate of normal stress of aluminum alloy plate and interfacial shear stress. Assuming that the shear stress is the same along the effective bond length, the bonding strength between aluminum alloy plate and concrete was obtained. The influencing factors on interfacial bond strength, such as interface treatment, concrete strength, width and thickness of aluminum alloy plate and bonding length, were discussed. Based on statistics regression analysis of experiment data, the modified Niedermeier model of interfacial bond strength between aluminum alloy plate and concrete was put forward. The theoretical calculation formula on effective bond length and bonding strength was obtained. The theoretical values of bonding strength are in good agreement with the testing values. The largest error is 8.98%, the average error is 0.004, the standard deviation is 0.041.

Key words: aluminum alloy plate; concrete; interfacial bond strength; in-plane shear test; shear stress

铝合金材料具有比强度高、耐腐蚀、变形性能好、强度和延性低温不敏感等优良力学性能^[1],采用铝合金板加固钢筋混凝土梁,可满足沿海侵蚀环境、潮湿、低温和高寒等极端环境的特殊需要^[2],相对于常用材料加固的钢筋混凝土梁具有突出的优点:其延性比FRP加固的钢筋混凝土梁好^[3],比钢板加固的钢筋混凝土梁耐腐蚀。目前关于铝合金板加固钢筋混凝土梁的研究已有开展。Abdalla^[4-5]、Obeidah^[6]、Rasheed^[3]、柳红滨^[7]、涂桂刚^[8]等进行了铝合金板加固钢筋混凝土梁的抗弯和抗剪试验研究;宋启玺^[9]、Abu-Obeidah^[10]等进行有限元分析,验证了铝合金板加固钢筋混凝土梁的可行性。铝合金板是通过粘结层将力传给钢筋混凝土梁的,因此铝合金板与混凝土的粘结性能是影响加固效果的一个重要因素。目前,对FRP等片材与混凝土的粘结性能进行了比较充分的研究,如:张普等^[11]对FRP板与混凝土湿粘结界面剪切性能进行了研究;郝海霞等^[12]对表层嵌贴CFRP-混凝土界面的粘结性能进行了研究;陈光明等^[13]对抗剪加固FRP与混凝土的粘结性能开展了试验研究;钟正强等^[14]分析了胶层厚度的影响;王玉田^[15]、王晓璐^[16]和鞠竹^[17]等研究了极端工况下FRP与混凝土的粘结性能。但未见关于铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度研究的报道。由于铝合金板的材料性能,尤其是其表面特性与这些材料差别较大,故其粘结强度不能简单地套用已有成果。基于此,铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度作为铝合金板加固钢筋混凝土梁连接设计的基础,对其开展试验和理论研究。通过面内单剪试验,得到了铝合金板和混凝土连接的极限粘结荷载、剪应力分布曲线和有效粘结长度。对试验数据进行回归分析,提出计算铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度修正Niedermeier模型,并结合试验数据验证了理论模型的可靠性。

1 面内单剪试验

1.1 试件设计

利用JN建筑结构胶将铝合金板粘贴在混凝土棱柱体上,混凝土棱柱体尺寸100 mm×100 mm×

510 mm,铝合金板尺寸共3个规格,即板宽 b_a ×厚 t_a 分别为45 mm×4 mm、45 mm×2 mm和30 mm×4 mm,铝合金板伸出混凝土棱柱体150 mm,用于试验机加载,见图1。



图 1 试件连接方式

Fig. 1 Connection modes of specimens

为考察界面处理、混凝土强度 f_{cu} 、铝合金板宽度 b_a 、厚度 t_a 、粘贴长度 l_a 等因素对粘结强度的影响,设计了I~V组试件,如表1所示。每个试件编号含有3个相同试件,试件总数量为105;界面处理代号用字母A~D表示,如表2所示。

试验用铝合金板型号为6061-T6,其力学性能如表3所示, $f_{0.1}$ ($f_{0.2}$)表示残余应变为0.1%(0.2%)时的应力, f_{au} (ε_{au})表示极限强度(极限应变), E_a 表示弹性模量, n 表示材料参数。

JN建筑结构胶力学性能如表4所示。 f_{pt} 、 f_{pm} 、 f_{pc} 分别表示胶体的抗拉强度、抗弯强度和抗压强度; E_p 和 ε_{pu} 分别表示胶体的弹性模量和伸长率。结构胶的粘结性能指标:钢对钢拉伸抗剪强度标准值为18.9 MPa,钢对C45混凝土正拉粘结强度为4.1 MPa,且混凝土内聚破坏。

1.2 加载和量测

在铝合金板与混凝土粘贴区域纵向对称轴上布置应变片,布置形式及其编号如图2所示,粘贴长度为25~200 mm的应变片布置实物如图3所示。

在加载端板端布置位移传感器,测试铝合金板端位移;位移和应变信号采用DH3821系统接入计算机自动采集;铝合金板粘结试件置于自制的试验装置(图4)内,采用万能试验机对铝合金板施加轴心拉力,如图5所示,粘结荷载由试验机测得。

表 1 粘结性能试验试件参数

Tab. 1 Parameters of the specimens of bond behavior tests

序号	试件编号	界面处理	f_{cu}/MPa	b_a/mm	t_a/mm	l_a/mm
1	I-1	A	41.3	45	4	150
2	I-2	B	41.3	45	4	150
3	I-3	C	41.3	45	4	150
4	I-4	D	41.3	45	4	150
5	II-1	A	41.3	45	4	25
6	II-2	A	41.3	45	4	50
7	II-3	A	41.3	45	4	75
8	II-4	A	41.3	45	4	100
9	II-5	A	41.3	45	4	125
10	II-6	与 I-1 为同一试件				
11	II-7	A	41.3	45	4	175
12	II-8	A	41.3	45	4	200
13	III-1	A	26.8	45	4	25
14	III-2	A	26.8	45	4	50
15	III-3	A	26.8	45	4	75
16	III-4	A	26.8	45	4	100
17	III-5	A	26.8	45	4	125
18	III-6	A	26.8	45	4	150
19	III-7	A	26.8	45	4	175
20	III-8	A	26.8	45	4	200
21	IV-1	A	41.3	30	4	25
22	IV-2	A	41.3	30	4	50
23	IV-3	A	41.3	30	4	75
24	IV-4	A	41.3	30	4	100
25	IV-5	A	41.3	30	4	125
26	IV-6	A	41.3	30	4	150
27	IV-7	A	41.3	30	4	175
28	IV-8	A	41.3	30	4	200
29	V-1	A	41.3	45	2	25
30	V-2	A	41.3	45	2	50
31	V-3	A	41.3	45	2	75
32	V-4	A	41.3	45	2	100
33	V-5	A	41.3	45	2	125
34	V-6	A	41.3	45	2	150
35	V-7	A	41.3	45	2	175
36	V-8	A	41.3	45	2	200

表 2 试件界面处理

Tab. 2 Interfacial treatment of the specimens				
试件材料	A	B	C	D
混凝土	凿毛	不凿毛	不凿毛	凿毛
铝合金板	打磨	打磨	不打磨	不打磨

表 3 铝合金板力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of aluminum alloy plates

型号	E_a/MPa	$f_{0.1}/\text{MPa}$	$f_{0.2}/\text{MPa}$	f_{au}/MPa	$f_{0.2} \cdot f_{0.1}^{-1}$	$\varepsilon_{au}/10^{-6}$	n
6061-1	71 941.3	245.8	265.3	314.77	1.079	101 000	9.12
6061-2	66 756.4	258.6	275.0	314.58	1.063	105 000	11.35
6061-3	68 301.1	250.7	271.5	313.77	1.083	104 753	8.69
平均值	68 999.6	251.7	270.6	314.37	1.075	103 584	9.72

表 4 JN 建筑结构胶力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of JN structural adhesive

指标	f_{pt}/MPa	f_{pm}/MPa	f_{pc}/MPa	E_p/GPa	$\varepsilon_{pu}/\%$
数值	36	65	92	6.1	1.8

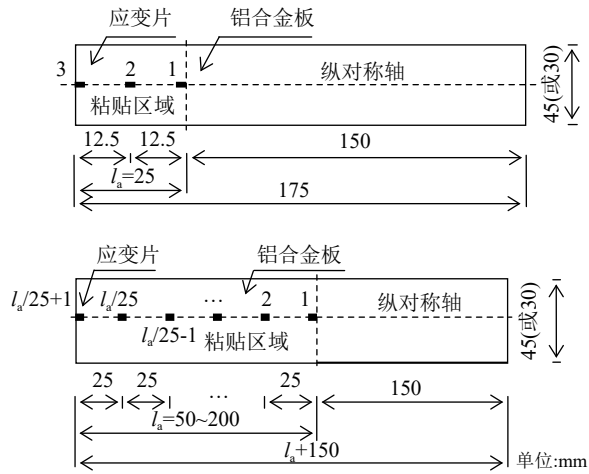


图 2 应变片布置及其编号

Fig. 2 Layout and number of strain gauges



图 3 应变片布置

Fig. 3 Layout of strain gauges



图 4 试验装置

Fig. 4 Test equipment

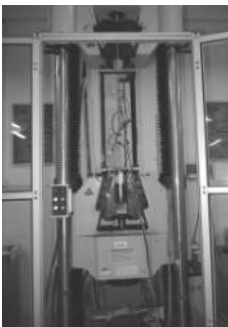


图 5 试件加载

Fig. 5 Specimen during loading

2 试验结果及分析

2.1 剥离破坏形式

试件发生了两种破坏形式：界面剥离破坏和混凝土层剥离破坏。由于界面光滑，界面与胶层粘结力较小，处理代号B、C、D的试件发生了界面剥离破坏。其中：处理代号为C和D的试件破坏发生在铝合金板界面，如图6(a)所示；处理代号为B的试件破坏发生在混凝土界面，如图6(b)所示。处理代号为A的试件发生了混凝土层剥离破坏，如图7所示，其粘结荷载和极限位移远大于界面剥离破坏的试件，说明了界面处理的必要性。



(a) 铝合金板界面剥离破坏 (b) 混凝土界面剥离破坏

图 6 界面剥离破坏

Fig. 6 Interfacial debonding failure

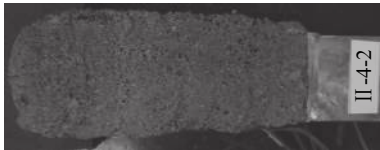


图 7 混凝土层剥离破坏

Fig. 7 Concrete debonding failure

2.2 极限粘结荷载

面内单剪试验测得了 I ~ V 组共 105 个试件的极限粘结荷载，每个试件编号的极限粘结荷载 F_{au} 取其 3 个试件的平均值，如表 5 所示。

2.3 剪应力分布曲线

粘结剪应力 τ 与铝合金板正应力 σ_a 的关系为：

$$\tau = -t_a \frac{d\sigma_a}{dx} \tag{1}$$

表 5 粘结强度的理论值与试验值对比

Tab. 5 Comparison of interfacial bond strength between theoretical results and experimental results

试件 编号	$F_{au}/$ kN	$\tau_{u1}/$ MPa	$\tau_u/$ MPa	$\delta_{tu}/\%$	试件 编号	$F_{au}/$ kN	$\tau_{u1}/$ MPa	$\tau_u/$ MPa	$\delta_{tu}/\%$
I-1	11.95	1.76	1.77	-0.56	III-7	10.63	1.35	1.35	0
I-2	6.95	1.76	1.03	70.87	III-8	11.04	1.31	1.36	-3.68
I-3	5.80	1.76	0.86	104.65	IV-1	2.60	3.57	3.47	2.88
I-4	6.10	1.76	0.90	95.56	IV-2	4.64	3.27	3.09	5.83
II-1	3.51	3.06	3.12	-1.92	IV-3	6.35	2.97	2.82	5.32
II-2	5.87	2.80	2.61	7.28	IV-4	7.35	2.67	2.45	8.98
II-3	7.97	2.54	2.36	7.63	IV-5	9.04	2.36	2.41	-2.07
II-4	10.04	2.28	2.23	2.24	IV-6	8.82	2.06	1.96	5.10
II-5	12.26	2.02	2.18	-7.34	IV-7	9.37	1.94	1.95	-0.51
II-6	11.95	1.76	1.77	-0.56	IV-8	9.42	1.94	1.96	-1.02
II-7	12.04	1.66	1.67	-0.60	V-1	2.77	3.45	3.69	-6.50
II-8	12.11	1.66	1.68	-1.19	V-2	4.74	3.02	3.16	-4.43
III-1	2.76	2.43	2.45	-0.82	V-3	5.92	2.59	2.63	-1.52
III-2	4.95	2.25	2.20	2.27	V-4	6.96	2.17	2.32	-6.47
III-3	6.68	2.07	1.98	4.55	V-5	6.63	1.94	1.95	-0.51
III-4	8.78	1.89	1.95	-3.08	V-6	6.66	1.94	1.96	-1.02
III-5	9.23	1.71	1.64	4.27	V-7	6.59	1.94	1.94	0
III-6	10.33	1.53	1.53	0	V-8	6.59	1.94	1.94	0

应变片各点处界面剪应力为：

$$\tau_i = -t_a \frac{\sigma_{a,i} - \sigma_{a,i+1}}{\Delta_{i,i+1}} \tag{2}$$

式中： $\sigma_{a,i}$ 为第*i*个应变片处的应力，由其应变 $\varepsilon_{a,i}$ 根据式(3)求得； $\Delta_{i,i+1}$ 为相邻应变片的距离。

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a} + 0.002 \left(\frac{\sigma_a}{f_{0.2}} \right)^n \tag{3}$$

根据式(2)可做出沿粘结长度各点的粘结剪应力分布曲线，如图8所示。由图8可知：粘结剪应力在粘结长度上分布不均匀，呈倒“U”形分布，两端小，中间大；随着粘结荷载变大，参与受力的胶层长度变大，当粘结荷载增大到一定程度时，参与受力的胶层长度保持为一定值不再变化，此值称为有效粘结长度*l_e*；相距加载端大于有效粘结长度的各点，粘结剪应力等于0。

2.4 粘结强度试验值

由图8可知，不同位置的界面剪应力并不相等。为计算铝合金板与混凝土连接的试验粘结强度，假设参与受力的胶层面积 $A_v=b_a l_e$ 上的剪应力处处相等，将极限粘结荷载 F_{au} 除以界面受剪面积 A_v ，即得到粘结强度的试验值 τ_u ：

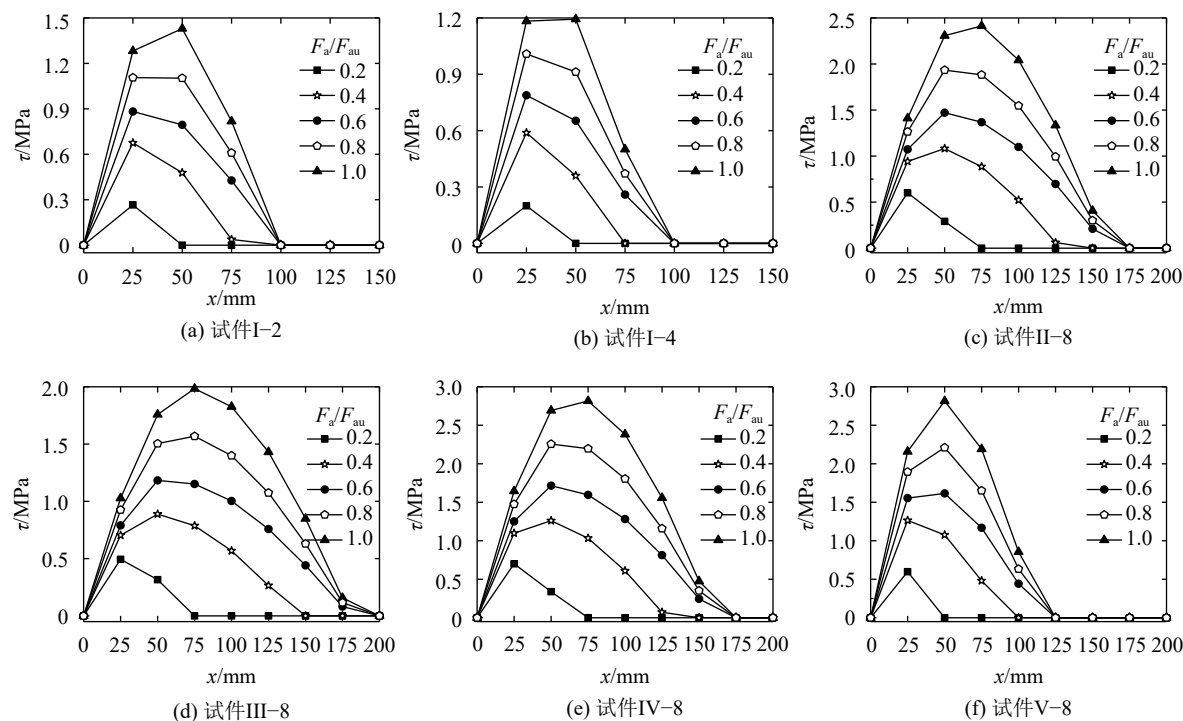


图 8 试件剪应力分布曲线

Fig. 8 Shear stresses distribution curves of specimens

$$\tau_u = \frac{F_{au}}{b_a l_e} \quad (4)$$

粘结强度影响的柱状图, 如图9所示。由图9可知:
1) 界面越光滑, 粘结强度越低。如图9(a)所示 (A、B、C和D分别为试件 I-1、I-2、I-3、I-4), 界面处理代号为B、C和D的试件粘结强度远低于界面处理代号为A的试件。建议粘贴界面进行粗糙处理。

粘结强度试验值 τ_u 如表5所示。

2.5 粘结强度的影响因素

根据表5的粘结强度的试验值 τ_u , 做出相关因素对

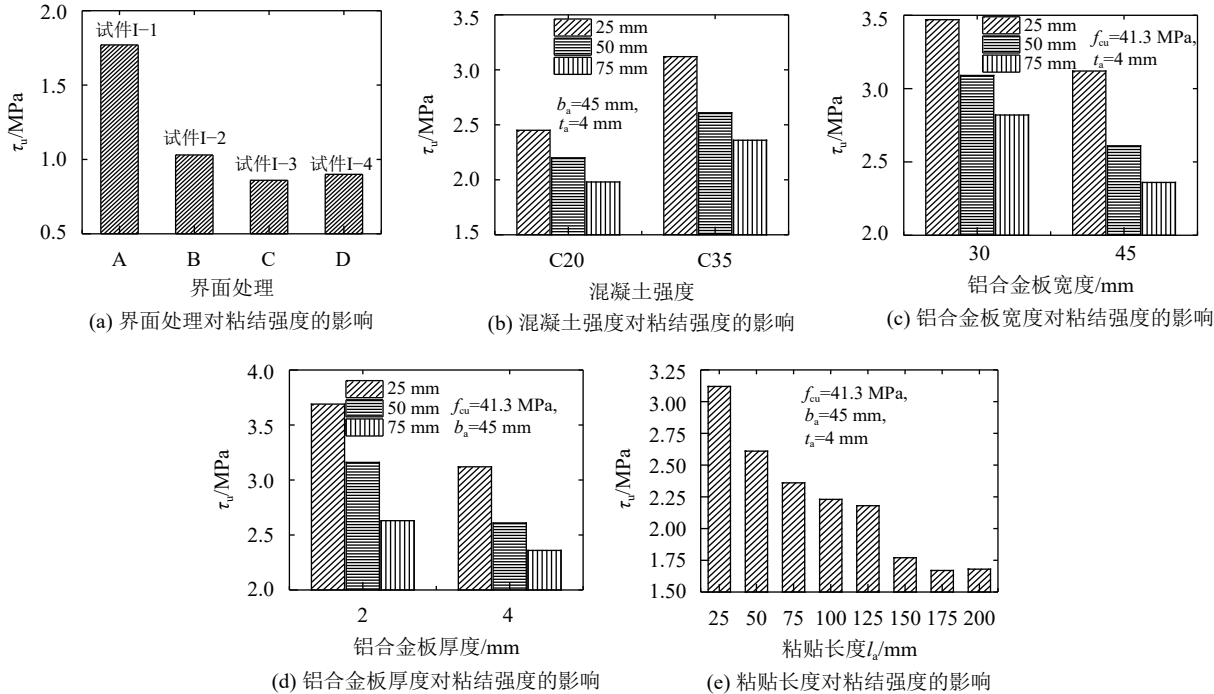


图 9 粘结强度影响因素

Fig. 9 Influencing factors on interfacial bond strength

2)如图9(b)所示,混凝土强度越高,粘结强度也越高。如前所述,界面处理代号为A的试件均发生了混凝土层的剥离破坏,混凝土强度越高,其抗拉强度越高,相应的粘结强度也越高。

3)由图9(c)~(d)可知,铝合金板宽度和厚度越小,粘结强度越高。因为铝合金板宽度和厚度越小,单位长度的铝合金板受外围混凝土的约束越大,相应的粘结强度越大。

4)由图9(e)可知,随着粘贴长度变大,其粘结强度越低,当粘贴长度达到有效粘贴长度时,其粘结强度不再变化。

3 粘结强度的理论计算

3.1 理论计算模型

国内外对混凝土粘贴片材加强的粘结强度进行了很多研究,基于断裂力学理论分析和试验数据回归提出很多计算模型。为计算钢板与混凝土的极限粘结荷载 F_u ,德国Niedermeier^[18]基于断裂力学理论,提出Niedermeier模型:

$$\begin{cases} F_u = 0.78b_s \sqrt{2G_a E_s t_s}, l_a \geq l_e; \\ F_u = 0.78b_s \frac{l_a}{l_e} \left(2 - \frac{l_a}{l_e}\right) \sqrt{2G_a E_s t_s}, l_a < l_e \end{cases} \quad (5)$$

式中, b_s 、 t_s 和 E_s 分别为钢板的宽度、厚度和弹性模量, G_a 为界面断裂能。有效粘贴长度 l_e 和界面断裂能 G_a 的计算公式为:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_s t_s}{4f_{ct}}}, G_a = c_a k_a^2 f_{ct} \quad (6)$$

式中: f_{ct} 为混凝土抗拉强度; c_a 为基于试验数据得到的常量; k_a 为与钢板宽度和混凝土试件宽度相关的系数,表达式为:

$$k_a = \sqrt{\frac{2.25 - 1.125b_s/b_c}{1 + b_s/400}} \quad (7)$$

式中, b_c 为与钢板粘贴的混凝土的宽度。

为利用Niedermeier模型计算铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度,将钢板宽度 b_s 、厚度 t_s 和弹性模量 E_s 分别用铝合金板宽度 b_a 、厚度 t_a 和弹性模量 E_a 代替,结合本文试验数据进行统计回归,得到Niedermeier模型的未知参数 c_a 为:

$$c_a = 0.145 - 0.025 \ln b_a \quad (8)$$

采用式(6)得到有效粘贴长度的理论值,与本次试验对比,发现相差不大,其误差也和试验应变片间距有关,在回归得到修正系数 c_a 的过程中已经考虑了二者的误差。铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度 τ_u 为:

$$\tau_u = \frac{F_{au}}{b_a l_e} \quad (9)$$

将式(5)代入式(9),并利用式(6)进行化简:

$$\begin{cases} \tau_u = \frac{0.78k_a \sqrt{2c_a f_{ct} E_a t_a}}{l_e}, l_a \geq l_e; \\ \tau_u = 0.78k_a \left(\frac{2}{l_e} - \frac{l_a}{l_e^2}\right) \sqrt{2c_a f_{ct} E_a t_a}, l_a < l_e \end{cases} \quad (10)$$

以上即得到了计算铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度的修正Niedermeier模型。

3.2 理论结果与试验对比验证

利用修正Niedermeier模型计算了各试件的粘结强度 τ_{ui} ,与试验得到的粘结强度 τ_u 进行了比较,如表5所示。为比较二者差值,计算了误差 $\delta_{\tau_u} = \frac{100(\tau_{ui} - \tau_u)}{\tau_u} \%$ 。

由表5可知,铝合金板或混凝土界面没有打磨或凿毛的试件 I-2、I-3和 I-4,其试验结果远小于理论结果。前文对此已有充分展述:粘贴铝合金板加固时必须对材料表面进行粗糙,以增大界面与胶层的胶结作用、摩擦力和机械咬合作用。

对界面表面进行粗糙处理的试件理论值和试验值符合较好,最大误差为8.98%,小于10%;误差平均值为0.004,标准差为0.041,说明了修正Niedermeier模型能较准确地计算铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度。

4 结 论

通过铝合金板与混凝土粘贴粘结强度的试验和理论研究,得到了以下结论:

1)发生界面剥离破坏的极限粘结荷载、粘结强度和有效粘贴长度小于混凝土层剥离破坏,所以加固前必须对界面进行凿毛或打磨处理,防止发生界面剥离破坏。

2)粘结剪应力在粘结长度上分布不均匀,呈倒“U”形分布,两端小,中间大。

3)参与受力的胶层长度存在一个定值,即有效粘结长度,通过密布的应变片确定了有效粘结长度,假设参与受力的胶层上剪应力处处相等,得到了粘结强度的试验值。

4)根据试验结果,讨论了相关因素对粘结强度的影响:界面越光滑,粘结强度越低;混凝土强度越高,铝合金板宽度和厚度越小,粘结强度越高;随着粘贴长度的变大,粘结强度越低,当粘贴长度达到有效粘贴长度后,其粘结强度不再变化。

5)结合试验数据的回归分析,提出计算铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度修正Niedermeier模型,理论结果和试验结果符合较好,验证了本文模型的可靠性。

参考文献:

- [1] Kissell J R, Ferry R L. Aluminum structures: A guide to their specifications and design[M]. New York: Wiley, 2002.
- [2] Xing Guohua, Xie Pengyu, Song Qixi, et al. Behavior of reinforced concrete beams strengthened by external prestressed aluminum alloy bars[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(3): 831–836. [邢国华, 谢鹏宇, 宋启玺, 等. 铝合金筋体外预应力加固混凝土梁受力性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(3): 831–836.]
- [3] Rasheed H A, Abdalla J, Hawileh R, et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded aluminum alloy plates[J]. *Engineering Structures*, 2017, 147: 473–485.
- [4] Abdalla J A, Abu-Obeidah A, Hawileh R A. Behavior of shear deficient reinforced concrete beams with externally bonded aluminum alloy plates[C]. The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Seoul, 2011.
- [5] Abdalla J A, Abu-Obeidah A S, Hawileh R A, et al. Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally bonded aluminum alloy plates: An experimental study[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 128: 24–37.
- [6] Obeidah A A. Behavior of shear deficient reinforced concrete beams with externally bonded aluminum alloy plates[D]. New Jersey: The State University of New Jersey, 2012.
- [7] Liu Hongbin. Theoretical and experimental study on failure modes of reinforced concrete beams with aluminum alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. [柳红滨. 铝合金加固钢筋混凝土梁破坏模式的理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.]
- [8] Tu Guigang. Experimental investigation and numerical analysis of reinforced concrete beams stiffened using aluminum alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. [涂桂刚. 铝合金加固钢筋混凝土梁试验研究及数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.]
- [9] Song Qixi. Study on the flexural performance of reinforced concrete beams strengthened by prestressed aluminum alloy wire[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. [宋启玺. 铝合金筋体外预应力加固混凝土梁受力性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.]
- [10] Abu-Obeidah A, Hawileh R A, Abdalla J A. Finite element analysis of strengthened RC beams in shear with aluminum plates[J]. *Computers and Structures*, 2015, 147: 36–46.
- [11] Zhang Pu, Zhu Hong, Chen Quan, et al. Experimental analysis of shear performance of wet-bonding interface between FRP plate and concrete[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(3): 74–79. [张普, 朱虹, 陈泉, 等. FRP板与混凝土湿粘结界面剪切性能试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(3): 74–79.]
- [12] Hao Haixia, Zhang Jianren, Gao Yong, et al. Simplified analysis on bond performance of near-surface mounted CFRP-concrete interface[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(4): 52–59. [郝海霞, 张建仁, 高勇, 等. 表层嵌贴CFRP-混凝土界面粘结性能简化分析[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(4): 52–59.]
- [13] Chen Guangming, Liu Di, Li Yunlei, et al. Bond behavior between shear strengthening FRP and concrete: An experimental study[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(7): 164–175. [陈光明, 刘迪, 李云雷, 等. 抗剪加固FRP与混凝土界面粘结性能的试验研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(7): 164–175.]
- [14] Zhong Zhengqiang, Yu Yi, Liu Bo. Experimental study on influence of adhesive layer thickness on bond stress of concrete beams strengthened with prestressed CFRP[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(11): 55–62. [钟正强, 喻奕, 刘波. 胶层厚度对预应力CFRP加固混凝土梁粘结应力的影响试验[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(11): 55–62.]
- [15] Wang Yutian, Jiang Fuxiang, Zhao Tiejun, et al. Bond properties of CFRP-high performance concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Civil and Architectural & Environmental Engineering*, 2015, 37(2): 85–91. [王玉田, 姜福香, 赵铁军, 等. 冻融循环下CFRP-高性能混凝土的粘结性能[J]. *土木建筑与环境工程*, 2015, 37(2): 85–91.]
- [16] Wang Xiaolu, Zha Xiaoxiong, Zhang Xuchen. Bond behavior of FRP rebar and concrete at elevated temperature[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(6): 8–15. [王晓璐, 查晓雄, 张旭琛. 高温下FRP筋与混凝土的粘结性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(6): 8–15.]
- [17] Ju Zhu, Wang Zhenqing, Li Xiaoji, et al. The experimental investigation of bond behavior between GFRP bar and concrete in high temperature[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 33(11): 1351–1357. [鞠竹, 王振清, 李晓霁, 等. 高温下GFRP筋和混凝土粘结性能的实验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(11): 1351–1357.]
- [18] Niedermeier R. Stellungnahme zur richtlinie für das verkleben von betonbauteilen durch ankleben von stahlaschen-entwurf[R]. Munich: Technische Universität München, 1996.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Yang Lijun, Deng Zhiheng, Chen Wei, et al. Study on interfacial bond strength between aluminum alloy plate and concrete[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(3): 101–107. [杨立军, 邓志恒, 陈卫, 等. 铝合金板与混凝土的粘贴粘结强度研究[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(3): 101–107.]