

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.056



铝合金板与混凝土的粘结性能

杨立军^{1a,1b,2}, 邓志恒², 杨海峰², 王云洋^{1b}, 江德明^{1b}

(1. 湖南文理学院 a. 洞庭湖生态经济区建设与发展省级协同创新中心;

b. 土木建筑工程学院, 湖南 常德 415000; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004)

摘要: 铝合金材料具有强度高、变形性能好、耐腐蚀等优点, 是沿海侵蚀环境中钢筋混凝土结构加固工程的理想材料; 而铝合金板与混凝土的粘结性能是铝合金板加固钢筋混凝土梁能否协同工作的关键问题。基于此, 对铝合金板与混凝土的粘结性能进行试验和理论研究。考虑混凝土强度、铝合金板宽度和厚度、粘贴长度及界面处理等因素对铝合金板和混凝土块体粘结性能的影响, 设计了一套试件固定装置, 采用万能试验机对 105 个铝合金板与混凝土棱柱体的粘贴试件进行了面内单剪试验。根据试验结果, 结合理论分析, 得到了铝合金板和混凝土连接的粘结破坏典型特征、剪应力分布曲线和粘结滑移曲线。研究表明, 试件存在两种破坏形式: 界面剥离破坏和混凝土层剥离破坏。界面处理对粘结性能有重要的影响, 粘贴界面没有进行糙化处理的试件发生了界面剥离破坏, 其他试件发生了混凝土层剥离破坏; 随着混凝土强度的提高、铝合金板宽度和厚度的变小, 粘结性能提高; 存在一个有效粘贴长度, 当粘贴长度大于有效粘贴长度后, 增大粘贴长度并不能提高连接的极限荷载。

关键词: 铝合金板; 粘结性能; 面内单剪试验; 剪应力; 剥离破坏

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)03-0111-09

Study on bond behaviors between aluminum alloy plate and concrete

Yang Lijun^{1a, 1b, 2}, Deng Zhiheng², Yang Haifeng², Wang Yunyang^{1b}, Jiang Deming^{1b}

(1a. Hunan Province Cooperative Innovation Center for The Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone; 1b. College of Civil and Architecture Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, P. R. China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

Abstract: The aluminum alloy material is of advantages, including as high strength, good deformation performance and corrosion resistance. And it is an ideal strengthen engineering material for reinforced concrete structures in coastal erosion environment. The bonding performance of the aluminum alloy plate and the concrete is the key issue for cooperative work of RC beam strengthened with aluminum alloy plate. Therefore, the bonding behaviors between aluminum alloy plate and concrete are studied theoretically and experimentally. In order to take into account the effects of concrete strength, width and thickness of

收稿日期: 2018-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(51478126, 51768004); 湖南省高等学校省特色学科(湘教通[2018]469)

作者简介: 杨立军(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事建筑结构加固理论研究, E-mail: yanglj9601@163.com.

邓志恒(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: dengzh@gxu.edu.cn.

Received: 2018-08-17

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51478126, 51768004); The Provincial Specialty Disciplines of Higher Education Institutions in Hunan Province (No. XIT[2018]469)

Author brief: Yang Lijun (1976-), professor, PhD, main research interest: reinforcement theory of building structure, E-mail: yanglj9601@163.com.

Deng Zhiheng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: dengzh@gxu.edu.cn.

aluminum alloy plate, bonding length and interfacial treatment on bonding performance between aluminum alloy plate and concrete block, a set of fixture device was designed. In-plane simple shear tests of 105 aluminum alloy plates adhering on concrete prism were carried out by universal testing machine. Combined with experimental results and theoretical analyses, the typical bond failure characteristics, the distribution of shear stress and the bond-slip curve were obtained. Results show that there are two types of failure modes on specimen: failure caused by debonding of interfacial and by stripping of concrete layer. Interfacial treatment has important influence on the bonding properties. Failure caused by interfacial debonding appeared on specimen with no rough treatment. Failure of the other specimens is stripped by concrete layer. The bonding performance is improved with the increase of concrete strength, and decrease of width and thickness of the aluminum alloy plate. The bonding ultimate load cannot be increased when the bonding length is greater than that of the effective bonding length.

Keywords: aluminum alloy plate; bond behavior; in-plane simple shear test; shear stress; debonding failure

铝合金材料具有比强度高(其密度为 $2\ 700\ \text{kg}/\text{m}^3$, 约为钢材密度的 $1/3$; 强度高, 结构用铝合金 6061-T6 的强度为 $210\sim 250\ \text{MPa}$, 与 Q235 钢材强度相当)、耐腐蚀、变形性能好(极限变形大于 10%)、强度和延性在低温环境中不降反升的力学性能^[1], 采用铝合金板加固钢筋混凝土梁, 能满足沿海侵蚀环境、潮湿、低温和高寒等极端环境加固工程中的特殊需要^[2]。相对于目前加固钢筋混凝土梁的常用材料, 铝合金材料的优点显而易见: 其变形性能比 FRP 好^[3], 耐腐蚀性优于钢板。目前, 对于铝合金板加固钢筋混凝土梁, Rasheed 等^[3]、Abdalla 等^[4-5]、Obeidah 等^[6]、柳红滨^[7]、涂桂刚^[8]进行了试验研究, 宋启玺^[9]、Abu-Obeidah 等^[10]进行了有限元分析。以上研究表明, 铝合金板在显著改善加固钢筋混凝土梁承载力的同时, 延性明显优于 CFRP 板。铝合金板与混凝土的粘结性能是铝合金板与钢筋混凝土梁能否协同工作的关键。目前, 与混凝土的粘结性能研究主要集中在 FRP、钢板等片材^[11-15], 铝合金板与混凝土的粘结性能研究尚为空白。由于铝合金板具有不同于这些片材的材料性能和表面特性, 有必要对铝合金板与混凝土的粘结性能进行研究。基于此, 进行了 105 个铝合金板与混凝土棱柱体的粘贴试件的面内单剪试验。根据试验结果, 结合理论分析, 得到了试件的破坏特征、粘结荷载-位移关系、剪应力分布规律、有效粘贴长度和粘结滑移特征。

1 试验方案

1.1 试验设计

用丙酮清理糙化(或不糙化)铝合金板与混凝土棱柱体连接界面, 界面干燥后, 在铝合金板粘贴范围

均匀涂抹按比例配制好的结构胶, 胶层厚度 $3\ \text{mm}$ 左右, 然后将铝合金板粘贴在混凝土棱柱体表面, 做成铝合金板和混凝土棱柱体粘结性能面内单剪试验试件, 如图 1 所示。图 1 中, 铝合金板 ABCD 部分为粘贴区域, 其长度 AC 用 l_a 表示; 伸出棱柱体 CE 部分长 $150\ \text{mm}$, 用于试验机夹具对试件沿铝合金板轴向加载。

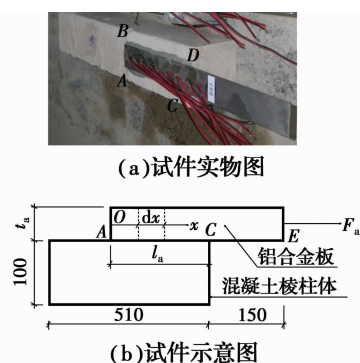


图 1 面内单剪试验试件

Fig. 1 The specimen of in-plane simple shear test

铝合金板采用广西南南铝业股份有限公司生产的 6061-T6 铝合金板, 板宽 b_a 有 $45\ \text{mm}$ 和 $30\ \text{mm}$ 两种尺寸, 板厚 t_a 有 $4\ \text{mm}$ 和 $2\ \text{mm}$ 两种尺寸; 结构胶采用湖南固特邦土木技术发展有限公司生产的 JN 建筑结构胶; 混凝土棱柱体采用南宁华润西乡塘混凝土有限公司生产的商品混凝土浇筑, 尺寸为 $100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}\times 510\ \text{mm}$ ^[16]。

试件有 4 种界面处理方式, 分别用 A、B、C 和 D 表示, 即: A 为混凝土凿毛, 铝合金板糙化; B 为混凝土凿毛, 铝合金板不糙化; C 为混凝土不凿毛, 铝合金板糙化; D 为混凝土不凿毛, 铝合金板不糙化。

试件分为 5 组, 设置了一组对比组(第 II 组), 分别单独变化对比组的界面处理(第 I 组)、混凝土强

度(第 III 组)、铝合金板宽(第 IV 组)和板厚(第 V 组)等因素,将其粘结性能与对比组对比,以研究界面处理、混凝土强度、铝合金板宽度和厚度等因素对粘结性能的影响;第 II 组~第 V 组中,每组各有仅粘贴长度不同的 8 个试件,其粘贴长度分别为 25、50、75、……,200 mm,以研究粘贴长度对铝合金板和混凝土块体粘结性能的影响。面内单剪试验试件参数如表 1 所示。为了剔除试验的偶然性和离散性影响,所有试件都设计了 3 个相同试件,故共有 5 组合计 105 个试件。试验在广西大学土木建筑工程学院实验室完成。

表 1 面内单剪试验试件参数

Table 1 Details of the specimens of in-plane simple shear test

No.	MIT	f_{cu}	$b_a/$ mm	$t_a/$ mm	$l_a/$ mm	No.	MIT	f_{cu}	$b_a/$ mm	$t_a/$ mm	$l_a/$ mm
I-1	B	C35	45	4	150	III-8	A	C20	45	4	200
I-2	C	C35	45	4	150	IV-1	A	C35	30	4	25
I-3	D	C35	45	4	150	IV-2	A	C35	30	4	50
II-1	A	C35	45	4	25	IV-3	A	C35	30	4	75
II-2	A	C35	45	4	50	IV-4	A	C35	30	4	100
II-3	A	C35	45	4	75	IV-5	A	C35	30	4	125
II-4	A	C35	45	4	100	IV-6	A	C35	30	4	150
II-5	A	C35	45	4	125	IV-7	A	C35	30	4	175
II-6	A	C35	45	4	150	IV-8	A	C35	30	4	200
II-7	A	C35	45	4	175	V-1	A	C35	45	2	25
II-8	A	C35	45	4	200	V-2	A	C35	45	2	50
III-1	A	C20	45	4	25	V-3	A	C35	45	2	75
III-2	A	C20	45	4	50	V-4	A	C35	45	2	100
III-3	A	C20	45	4	75	V-5	A	C35	45	2	125
III-4	A	C20	45	4	100	V-6	A	C35	45	2	150
III-5	A	C20	45	4	125	V-7	A	C35	45	2	175
III-6	A	C20	45	4	150	V-8	A	C35	45	2	200
III-7	A	C20	45	4	175						

注:No. 表示试件编号;MIT(Modes of Interfacial Treatment) 表示界面处理方式。

1.2 试验装置及加载制度

设计了一套用于固定试件的装置,其制作材料为 Q235 钢,如图 2 所示,采用 WAW-600 微机控制电液伺服万能试验机对试件进行加载,加载装置如图 3 所示。试件安装示意图如图 4 所示,试验时将试件放置在该装置上、下两块水平钢板之间,铝合金板 CD 紧贴上面水平钢板空洞左侧板壁伸出,旋紧 4 根竖向螺杆菌上的螺栓,压紧混凝土棱柱体。然后,将试件固定装置放置于试验机上、下夹具之间,利用试

验机下夹具锚固试件固定装置的竖向钢板,上夹具夹紧铝合金板 CE 部分。由于试验机上、下夹具中心、竖向钢板和铝合金板位于同一竖向面上,保证了铝合金板轴心受拉,试件承受面内剪力。

利用上夹具对铝合金板施加轴心拉力,加载制度采用位移控制,加载速率 0.2 mm/min,单调加载,当试件发生剥离破坏时停止加载。

与混凝土连接区域(即图 1 中 ABCD 部分)的铝合金板外表面轴向上布置应变片,粘贴长度 $l_a = 25$ mm 时,应变片间距 12.5 mm,共 3 个应变片;粘贴长度 $l_a = 50 \sim 200$ mm 时,应变片间距 25 mm,共 $(l_a/25 + 1)$ 个应变片。应变片自加载端(即 CD)开始编号,应变片布置如图 5 所示。试件在试验机上安装就位后,将 L 形钢片较短的一端用 502 胶水贴在铝合金板伸出试件固定装置部分(CE),较长的一端距离上水平钢板 5 mm,在其上设置位移传感器,用来测试铝合金板在 CD 的轴向位移,如图 4 所示。应变和位移信号通过 DH3821 静态应力-应变测试系统,荷载信号通过试验机微机控制系统自动采集和存储。



图 2 试件固定装置

Fig. 2 The fixture device



图 3 加载装置

Fig. 3 The loading device

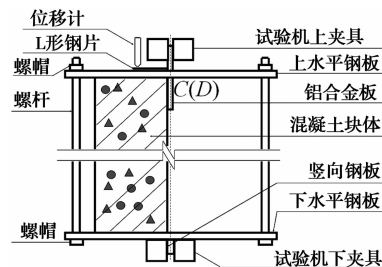


图 4 试件安装示意图

Fig. 4 The specimen installation schematic diagram



图 5 应变片布置

Fig. 5 The layout of strain gauges

1.3 材料力学性能

根据厂商提供的报告,结构胶力学性能如表 2 所示。表 2 中: f_{pt} 为抗拉强度; f_{pm} 为抗弯强度; f_{pc} 为抗压强度; E_p 为弹性模量; ϵ_{pu} 为伸长率。

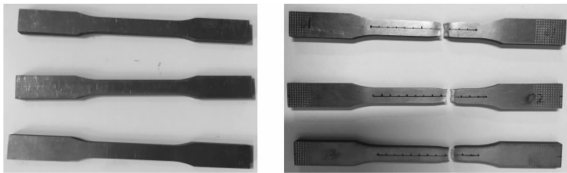
表2 结构胶力学性能

Table 2 Mechanical properties of structural adhesive

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

将混凝土棱柱体和混凝土立方体标准试块在标准条件下养护 28 d,按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016)采用华龙混凝土压力试验机对混凝土立方体标准试块进行抗压试验,试验结果为: $f_{cu}=26.8 \text{ MPa}(C20)$, $f_{cu}=41.3 \text{ MPa}(C35)$ 。

依据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)中的试验方法,对试验用铝合金板采用 MTS 809 Axial/Torsional Test System 进行拉伸试验。铝合金板矩形拉伸试样如图 6 所示,力学性能指标如表 3 所示。表 3 中: E_a 为铝合金在原点处的弹性模量; $f_{0.1}$ 和 $f_{0.2}$ 分别为残余应变为 0.1% 和 0.2% 时所对应的应力; f_{au} 为铝合金的极限强度; ε_{au} 为极限应变; n 为表征铝合金材料本构关系的一个参数(如式(3)所示)。



(a) 拉伸试验前试样 (b) 拉伸试验后试样

图6 铝合金板矩形拉伸试样

Fig. 6 The rectangular tensile specimens of aluminum alloy plate

表3 铝合金板力学性能

Table 3 The mechanical properties of aluminium alloy plates

试件编号	$E_a/$	$f_{0.1}/$	$f_{0.2}/$	$f_{au}/$	$f_{0.2}/$	$\varepsilon_{au}/$	n
	MPa	MPa	MPa	MPa	$f_{0.1}$	$\mu\varepsilon$	
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

2 试验结果及分析

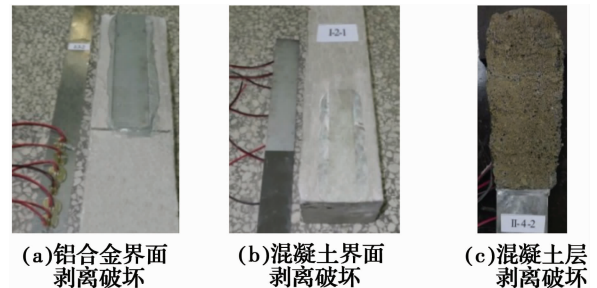
2.1 剥离破坏形式

试件破坏前,铝合金板与混凝土块体没有明显的相对变形,听到二者剥离的劈啪声音后,相对变形骤然增大,随即铝合金板和混凝土块体剥离,试件发生剥离破坏。共有两种剥离破坏形式,分别为:

1) 界面剥离破坏:界面处理为 B、C 和 D 的构件

发生的破坏形式;破坏发生在铝合金板界面或混凝土界面,破坏界面没有明显摩擦凹痕,也没有残留结构胶;混凝土没有出现裂缝,破坏时粘结荷载和相对位移小于混凝土层剥离破坏试件。其破坏原因是,界面没有糙化时,界面和结构胶之间粘结力小于混凝土受拉强度,结构胶-铝合金板(或混凝土)界面成为薄弱环节。由于铝合金板相对于混凝土表面更平滑,当铝合金板没有糙化(无论混凝土界面是否打磨,即 B、D 界面处理方式)时,发生结构胶-铝合金板界面剥离破坏,如图 7(a) 所示。当铝合金板糙化,混凝土不打磨(即界面处理方式为 C)时,发生结构胶-混凝土界面剥离破坏,如图 7(b) 所示。界面剥离破坏是加固时不允许出现的破坏形式,因此,必须对界面糙化,以增强界面和胶层的粘结荷载。

2) 混凝土层剥离破坏:界面处理为 A 的构件发生的破坏形式,破坏时粘贴在铝合金板上的结构胶将混凝土界面表层 5 mm 之内的混凝土撕脱,残留在铝合金板上,破坏界面凹凸不平,属于混凝土受拉破坏,如图 7(c) 所示。混凝土层剥离破坏是《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)推荐的破坏形式,验证了铝合金板用于混凝土结构加固的适用性。



(a) 铝合金界面剥离破坏 (b) 混凝土界面剥离破坏 (c) 混凝土层剥离破坏

图7 剥离破坏形式

Fig. 7 The debonding failure modes

2.2 粘结荷载-位移曲线

面内单剪试验测得的 5 组共 105 个试件的极限粘结荷载如表 4 所示。从表中可以看出,虽然 3 个试件的极限粘结荷载有所差别,但差别不是很大。试件极限粘结荷载与其平均值相差最大的是 I-3 的第 1 个试件,为 10%,其他试件的误差介于 -9.14%~8.84% 之间。

分别以同一编号的 3 个试件粘结荷载的平均值 F_a 作为纵坐标,铝合金板在 CD 处轴向位移的平均值 s 作为横坐标,作出试件的粘结荷载-位移曲线,如图 8 所示。

表 4 极限粘结荷载试验结果
Table 4 The experimental results of ultimate bond loads

										kN				
No.	1	2	3	F_a	No.	1	2	3	F_a	No.	1	2	3	F_a
I-1	6.40	5.81	6.08	6.10	III-2	5.07	4.84	4.94	4.95	IV-6	9.28	8.39	8.79	8.82
I-2	6.81	7.09	6.96	6.95	III-3	6.99	6.39	6.67	6.68	IV-7	9.31	9.43	9.37	9.37
I-3	6.38	5.27	5.74	5.80	III-1	8.50	9.05	8.78	8.78	IV-8	9.31	9.52	9.42	9.42
II-1	3.44	3.58	3.51	3.51	III-5	9.61	8.85	9.22	9.23	V-1	2.59	2.96	2.75	2.77
II-2	6.30	5.48	5.84	5.87	III-6	10.31	10.34	10.33	10.33	V-2	4.53	4.96	4.73	4.74
II-3	8.57	7.40	7.93	7.97	III-7	10.60	10.66	10.63	10.63	V-3	5.83	6.00	5.92	5.92
II-1	10.27	9.81	10.03	10.04	III-8	10.61	11.49	11.02	11.04	V-4	6.50	7.46	6.92	6.96
II-5	11.38	13.22	12.19	12.26	IV-1	2.68	2.53	2.60	2.60	V-5	6.59	6.66	6.63	6.63
II-6	11.91	11.99	11.94	11.95	IV-2	4.91	4.38	4.62	4.64	V-6	6.59	6.73	6.66	6.66
II-7	11.95	12.12	12.04	12.04	IV-3	6.68	6.03	6.33	6.35	V-7	6.59	6.60	6.58	6.59
II-8	11.95	12.26	12.11	12.11	IV-4	8.00	6.75	7.30	7.35	V-8	6.59	6.60	6.58	6.59
III-1	2.74	2.78	2.75	2.76	IV-5	8.86	9.21	9.04	9.04					

注:1、2 和 3 分别为同一编号的 3 个试件极限粘结荷载; F_a 为同一编号试件极限粘结荷载平均值。

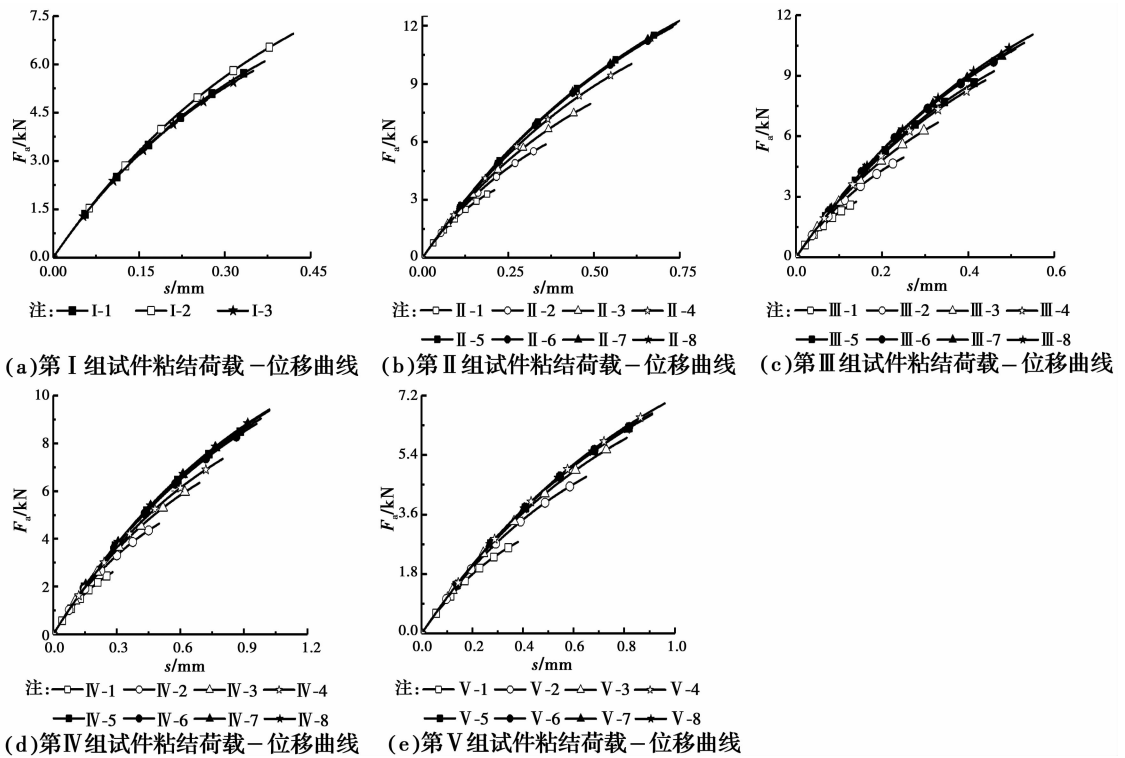


图 8 试件粘结荷载-位移曲线

Fig. 8 The bond load-displacement curves of specimens

从图 8 和表 4 可以看出:

- 1) 随着荷载的增大,由于损伤的积累,曲线斜率逐渐变小;试件从加载到破坏过程中,基本没有塑性变形,破坏时板端位移很小,小于 1 mm。
- 2) 随着粘贴长度的变大,极限粘结荷载变大。但粘贴长度增大到某一值时,极限粘结荷载不再增加。说明铝合金板和混凝土的粘贴存在一个有效粘

贴长度,当超过有效粘贴长度后,增加粘贴长度不会再增加试件的极限粘结荷载。

2.3 剪应力分布曲线

从图 1(b)中取出长度为 dx 的铝合金板元,如图 9 所示。设铝合金板厚度为 t_a ,宽度为 b_a ,正应力为 σ_a ,正应变为 ϵ_a ,粘结剪应力为 τ ,沿 x 向建立平衡方程,有

$$b_a t_a (\sigma_a + d\sigma_a) = b_a t_a \sigma_a - \tau b_a dx \quad (1)$$

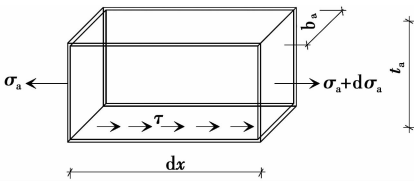


图9 试件受力分析图

Fig. 9 The stress analysis of the specimen

由式(1)可得

$$\tau = -t_a \frac{d\sigma_a}{dx} \quad (2)$$

铝合金材料的本构关系为^[17]

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

将应变片测得的该点铝合金板应变 $\epsilon_{a,i}$ 代入式(3),求得相应的 $\sigma_{a,i}$,继而由式(2)求得各点的粘结剪应力为

$$\tau_i = -t_a \frac{\sigma_{a,i} - \sigma_{a,i+1}}{\Delta_{i,i+1}} \quad (4)$$

式(4)中, $\Delta_{i,i+1}$ 是第 i 个和第 $i+1$ 个应变片的间距, i 从 1 开始取值,最大值为 9,在 $l_a = 200$ mm 时取得。应该指出,式(4)求得的是相邻应变片间的平均界面剪应力,忽略了铝合金板厚度的影响,其精度与应变片间距、铝合金板厚度相关。图 10 给出了部分试件界面剪应力 τ 沿粘贴长度的分布曲线,图中, x 是指与加载端(图 1 中 CD)的距离,剪应力 τ 为同一编号的 3 个试件平均值。从图 10 可知:

1) 界面剪应力呈现中间大,两端小的倒“U”形分布,加载端 CD 界面剪应力为零(此处铝合金板正应力最大),最大剪应力在临近加载端一侧出现。当荷载较小时,出现位置在 25 mm 处左右。随着粘结荷载 F_a 的变大,由于混凝土表面细微裂缝的出现,初始损伤的积累,应力发生重分布,最大剪应力向自由端 AB 略有移动,其出现位置距离加载端最大不超过 75 mm。

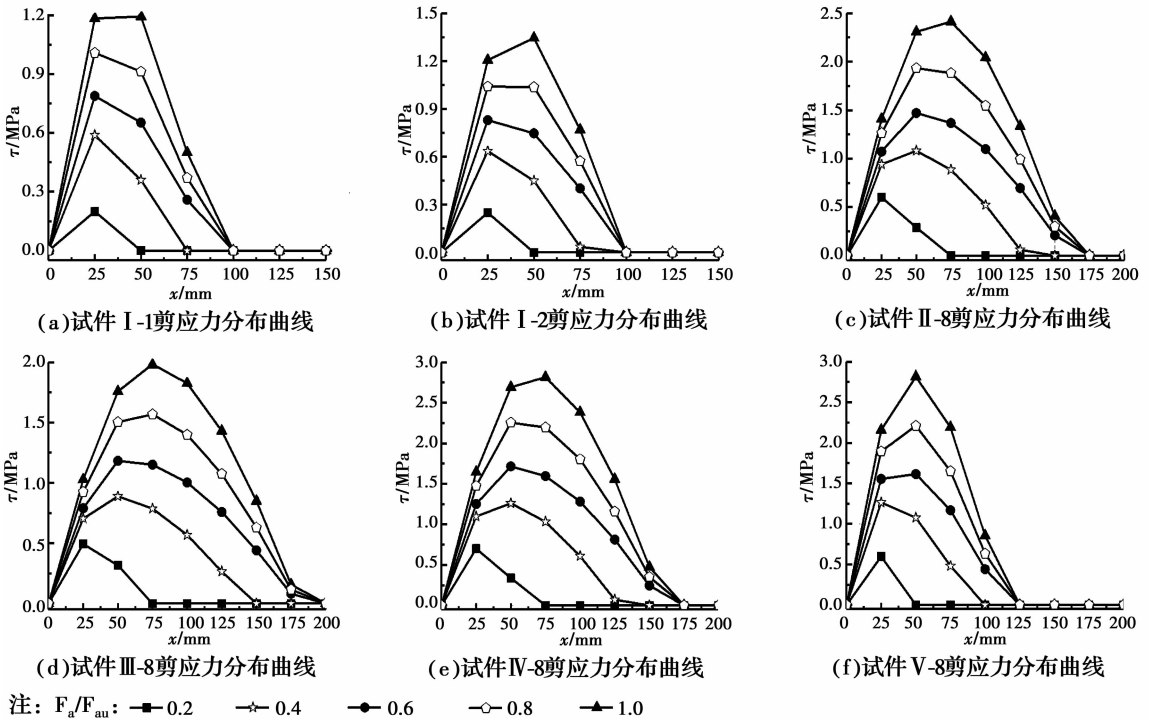


图10 试件剪应力分布曲线

Fig. 10 The shear stresses distribution curves of specimens

2) 随着粘结荷载 F_a 变大,参与受剪的结构胶长度变大,当荷载大于极限粘结荷载 F_{au} 的 60% 左右时,参与受剪的结构胶长度不再随粘结荷载 F_a 的增大而增大,而是保持为一定值;由于结构胶的粘贴长度 l_a 大于有效粘贴长度 l_e ,所以,自由端一侧有效粘贴长度 l_e 之外的界面剪应力 τ 等于零,有效粘贴长度和实际粘贴长度无关。

分析图 10,可得到相关因素对剪应力分布的

影响。

1) 界面处理的影响。试件 I-1、试件 I-2 和试件 II-8 的不同点在于界面处理不同(由于粘贴长度都大于有效粘贴长度,粘贴长度的不同不会对试件受力性能造成影响)。从图 10(a)~(c)可以看出,试件 I-2 的最大剪应力略大于试件 I-1,说明光滑的铝合金板表面对粘结性能影响较混凝土大。试件 I-1 和 I-2 的最大剪应力小于 1.3 MPa,距离加载端

100 mm处剪应力等于零;试件 II-8 的最大剪应力为 2.4 MPa 左右,距离加载端 175 mm 处剪应力等于零;试件 I-1、I-2 的有效粘贴长度和最大剪应力都小于试件 II-8。界面最大剪应力与混凝土和铝合金板材料表面的粗糙程度有关。材料表面越粗糙,与胶层的胶结作用、摩擦力和机械咬合作用越大,其最大剪应力随之变大。光滑的界面使得连接能承担的最大剪应力大幅变小,影响了胶层的应力重分布,其荷载传递能力相应变弱,有效粘贴长度相应变小。可见,粘贴铝合金板前必须对界面进行粗糙处理,以增加连接承载力。

2) 混凝土强度的影响。试件 II-8 和试件 III-8 仅混凝土强度不同。从图 10(c)~(d)可以看出,相对于试件 III-8(C25 混凝土),试件 II-8(C30 混凝土)的最大剪应力变大,有效粘贴长度变小。试验中,界面处理方式 A 的试件均发生了混凝土层剥离破坏,在加载初期,加载端结构胶下几毫米厚的混凝土内出现一条与界面平行的裂缝,随着粘结荷载的变大,自加载端向自由端发展,荷载增至极限粘结荷载时,结构胶连同表面混凝土被铝合金板从混凝土块体上剥离下来。因此,最大剪应力的大小与混凝土受拉强度密切相关。混凝土受拉强度越大,能承受的最大剪应力随之变大。试件 III-8 的有效粘贴长度较大,说明只要对界面进行粗糙处理,就能保

证结构胶荷载传递和应力重分布。

3) 铝合金板宽度的影响。试件 II-8 和试件 IV-8 仅铝合金板宽度不同。从图 10(c)、(e)可以看出,相对于试件 IV-8($b_a = 30$ mm),试件 II-8($b_a = 45$ mm)的最大剪应力变小,有效粘贴长度不变。铝合金板宽度对连接承载力的影响体现在周围混凝土对连接的约束上,铝合金板宽度越小,单位铝合金板受外围混凝土的约束越大,相应的粘结荷载越大。

4) 铝合金板厚度的影响。试件 II-8 和试件 V-8 仅铝合金板厚度不同。从图 10(c)、(f)可以看出,相对于试件 V-8($t_a = 2$ mm),试件 II-8($t_a = 4$ mm)的最大剪应力变小,有效粘贴长度差别在图上没有体现出来(因为应变片间距 25 mm,小于 25 mm 的差别有可能得不到体现)。

2.4 粘结滑移曲线

第 i 个应变片处的滑移 s_i 为

$$s_i = s_{i-1} - \frac{\epsilon_{a,i} + \epsilon_{a,i+1}}{2} \Delta_{i,i+1} \quad (5)$$

s_1 等于加载端位移,由加载端位移计测得。这样,由式(4)和式(5)就可以得到各试件不同位置的粘结滑移曲线。剪应力 τ_i 和滑移 s_i 分别取同一编号的 3 个试件平均值,得到各试件的粘结滑移曲线,如图 11 所示,图例中的 25、50 mm 等指的是与加载端 CD 的距离。

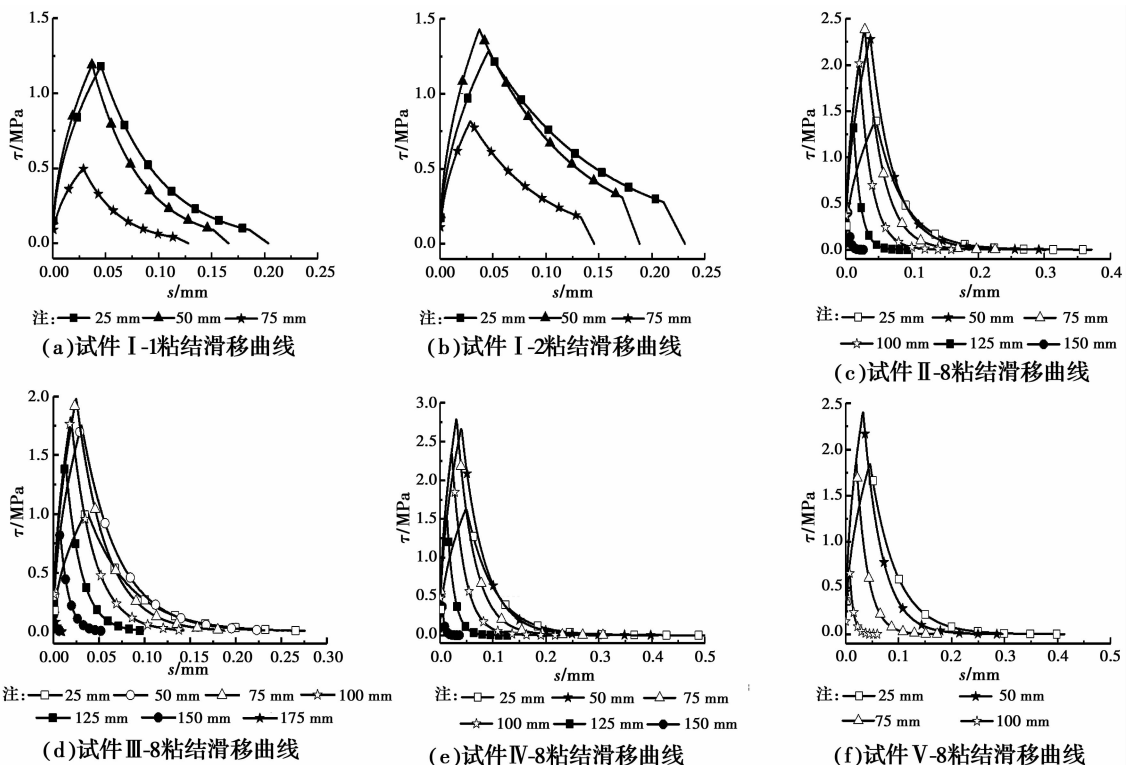


图 11 粘结滑移曲线

Fig. 11 The bonding-slip relationship curves

从图 11 可以看出, 粘结滑移曲线具有如下特点:

1) 粘结滑移曲线具有上升段和下降段, 曲线上上升段中滑移很小, 大部分滑移是在下降段完成的。在下降段随着滑移的增大, 曲线向水平轴逼近。

2) 剪应力向极限剪应力爬坡接近时, 曲线割线斜率变小, 曲线的原点切线斜率最大, 顶点割线斜率最小。这是因为, 原点时试件处于弹性阶段, 剪应力向极限剪应力趋近的过程是混凝土裂缝出现和发展的过程, 是由弹性状态向塑性状态转化的过程, 是损伤不断累积的过程, 相应也是界面刚度减小的过程。

3) 试件 I-1 和试件 I-2 是界面剥离破坏, 除了具有最大剪应力和极限位移小于混凝土层剥离破坏的试件特点外, 其粘结滑移曲线也具有不一样的特征, 在下降段由于界面发生滑移, 其剪应力突然下掉至零, 更具有突发性。

4) 粘结滑移曲线与横坐标所围的面积表征了连接的界面断裂能, 界面断裂能越大, 连接的承载性能越好。从界面断裂能的角度, 也可以得出相同的结论, 从图 11 可以看出, 试件 I-1 的界面断裂能最小, 试件 IV-8 的界面断裂能最大。

3 结论

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。为此, 自行设计了一套试验固定装置, 对 5 组共 105 个铝合金板与混凝土棱柱体连接体试件进行了面内单剪试验, 得到如下结论:

1) 试件存在两种破坏形式: 界面剥离破坏和混凝土层剥离破坏。

2) 界面处理对粘结性能有着重要的影响, 当混凝土不凿毛, 或铝合金板不糙化时, 发生了界面剥离破坏, 其粘结性能较差, 必须对界面进行凿毛或糙化处理。

3) 界面剪应力呈现中间大, 两端小的倒“U”形分布, 加载端界面剪应力为零, 最大剪应力在临近加载端 25 mm 左右出现。随着粘结荷载的变大, 最大剪应力向自由端略有移动, 其出现位置距离加载端最大不超过 75 mm。

4) 随着混凝土强度的提高、铝合金板宽度和厚度的变小, 粘结性能提高。

5) 试验中, 试件剪应力不为零, 距离加载端长度不大于 175 mm, 说明存在一个有效粘贴长度。当粘贴长度大于有效粘贴长度后, 增大粘贴长度并不能提高连接的极限荷载。

参考文献:

- [1] KISSELL J R, FERRY R L. Aluminum structures; a guide to their specifications and design [M]. New York: Wiley Online Library, 2002.
- [2] 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.
XING G H, XIE P Y, SONG Q X, 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. (in Chinese)
- [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, South Korea, 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 and Building Materials, 2016, 128: 24-37.
- [6] OBEIDAH A A. Behavior of shear deficient reinforced concrete beams with externally bonded aluminum plates [D]. The State University of New Jersey, 2012.
- [7] 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.
LIU H B. Theoretical and experimental study on failure modes of reinforced concrete beams with aluminum alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 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.
TU G G. Experimental investigation and numerical analysis of reinforced concrete beams stiffened using aluminum alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 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.
SONG Q X. Study on the flexural performance of reinforced concrete beams strengthened by prestressed

- aluminum alloy wire [D]. Xi'an: Changan University, 2015. (in Chinese)
- [10] ABU-OBEIDAH A, HAWILEH R A, ABDALLA J A. Finite element analysis of strengthened RC beams in shear with aluminum plates [J]. *Computers & Structures*, 2015, 147: 36-46.
- [11] 邓军, 黄培彦. CFRP板与钢梁粘结剥离破坏的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(5): 124-129.
DENG J, HUANG P Y. Experimental study on debonding failure of steel beams strengthened with a CFRP plate [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(5): 124-129. (in Chinese)
- [12] 张普, 朱虹, 陈泉, 等. FRP板与混凝土湿粘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.
ZHANG P, ZHU H, CHEN Q, 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. (in Chinese)
- [13] 王言磊, 郝庆多, 欧进萍. GFRP板与混凝土粘结性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(2): 27-31.
WANG Y L, HAO Q D, OU J P. Experimental investigation on bond behavior between GFRP plate and concrete [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(2): 27-31. (in Chinese)
- [14] 薛伟辰, 曾磊, 谭园. 高强度CFRP板粘结性能试验研究[J]. *铁道学报*, 2009, 31(1): 115-120.
XUE W C, ZENG L, TAN Y. Experimental studies on bond behavior of high strength CFRP plates [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2009, 31(1): 115-120. (in Chinese)
- [15] 王言磊, 郝庆多, 欧进萍. 具有粗砂层的FRP板与混凝土粘结性能试验研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2007, 31(3): 393-396.
WANG Y L, HAO Q D, OU J P. Experimental investigation on bond behavior for coarse sand coated interface between FRP plate and concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2007, 31(3): 393-396. (in Chinese)
- [16] CHAJES M J. Bond and force transfer of composite-material plates bonded to concrete [J]. *ACI Structural Journal*, 1996, 93(2): 208-217.
- [17] AMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. Washington: NASA Scientific and Technical Information Facility, 1943:1-23.

(编辑 王秀玲)