

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.153



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 铝合金板-混凝土界面粘结-滑移性能 双面剪切试验研究

陈钰<sup>1a</sup>, 黄海林<sup>1a,1b</sup>, 姜德文<sup>1a</sup>, 张明亮<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 a. 土木工程学院; b. 湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南建工集团有限公司, 长沙 410004)

**摘要:** 铝合金板具有强度高、耐腐蚀性及延性好等优点, 可用于潮湿、高寒等复杂恶劣环境中混凝土结构的加固, 但铝合金板-混凝土的界面性能是影响铝合金板加固混凝土结构效果的关键。进行48个铝合金板-混凝土试件的界面双剪试验, 分析铝合金板厚度、铝合金板粘结长度及结构胶种类对界面破坏机理、剥离承载力、粘结剪应力及滑移演化规律的影响。结果表明: 增加铝合金板厚度、铝合金板粘结长度以及采用低弹性模量的结构胶能有效提高界面的剥离承载力, 但铝合金板粘结长度应控制在有效粘结长度范围内; 试件的滑移量随着粘结长度的增加而增大, 且铝合金板越厚, 试件的滑移量越小。将双直线模型、双曲线模型、Nakaba模型计算结果与试验结果进行对比分析, Nakaba模型与铝合金板-混凝土粘结滑移曲线整体吻合较好。

**关键词:** 铝合金板; 双剪试验; 界面性能; 粘结滑移; 本构关系

**中图分类号:** TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)05-0181-10

## Double-sided shear experimental study of bond-slip performance of aluminum alloy plate-concrete interface

CHEN Yu<sup>1a</sup>, HUANG Hailin<sup>1a,1b</sup>, JIANG Dewen<sup>1a</sup>, ZHANG Mingliang<sup>2</sup>

(1a. College of Civil Engineering; 1b. Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricated Passive House, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China; 2. Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410004, P. R. China)

**Abstract:** Aluminum alloy plate has the advantages of high strength, good ductility, good corrosion resistance, which can be used to strengthen concrete structures in damp, cold and harsh environments. However, the interface performance of aluminum alloy plate-concrete is the key factor which affect the effect of concrete reinforced by aluminum alloy plate. Based on this, the interfacial double shear tests of 48 aluminum alloy plate-concrete specimens were completed. The influence of bond thickness of aluminum alloy plate, bond length of

**收稿日期:** 2021-06-16

**基金项目:** 湖南省教育厅优秀青年项目(19B188); 湖南省自然科学基金(2018JJ3161); 湖南建工集团基础科研项目(JGJTK-2018003)

**作者简介:** 陈钰(1997-), 女, 主要从事基于新材料的既有结构修复与加固研究, E-mail: chenylue@163.com。

黄海林(通信作者), 男, 副教授, 博士, E-mail: hhlvsgeenius@163.com。

**Received:** 2021-06-16

**Foundation items:** Outstanding Young Foundation of Education Bureau of Hunan (No. 19B188); Natural Science Foundation of Hunan (No. 2018JJ3161); Basic Research Project of Hunan Construction Industry Group (No. JGJTK-2018003)

**Author brief:** CHEN Yu (1997-), main research interests: repair and reinforcement of existing structures based on new materials, E-mail: chenylue@163.com.

HUANG Hailin (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: hhlvsgeenius@163.com.

aluminum alloy plate and structural adhesive type on the interface failure mechanism, interfacial peeling bearing capacity, bond shear stress and the slip evolution were analyzed. The results show that the peeling capacity of the interface can be effectively improved by increasing the thickness of the aluminum alloy plate, the bonding length of the aluminum alloy plate and using the structural adhesive with low elastic modulus, but the bonding length of the aluminum alloy plate should be controlled within the range of the limited bonding length. At the same time, with the increase of bond length, the slip of specimen increases, and the thicker the bond thickness of aluminum plate, the lower the slip of the specimen. Use double-line model, hyperbolic model, Nakaba model and test results for comparative analysis. The results show that the aluminum alloy plate-concrete bond slip is in good agreement with the curve of the Nakaba model.

**Keywords:** aluminum alloy plate; double shear test; interface properties; bond-slip; constitutive relationship

钢材和纤维复合材(FRP)是混凝土结构加固中常用的两种材料,已得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>,但用钢材和FRP加固混凝土结构仍有一些缺点需要克服。钢材耐蚀性差、维护成本高;FRP热阻低、延性差。铝合金作为一种新型加固材料,可以克服以上两种材料的缺陷,耐腐蚀性比钢材更好,延展性比FRP更好,且在低温环境中强度和延性不会降低,因此在潮湿、高寒等复杂恶劣环境下具有广阔的应用前景<sup>[5-8]</sup>。文献[9-10]采用四点弯曲试验研究了不同方向粘贴铝合金板的混凝土梁抗剪性能,结果表明:铝合金板可以作为混凝土抗剪加固材料,其中侧面45°粘贴铝合金板对混凝土梁的抗剪加固效果最好。文献[11-12]基于面内单剪试验研究了铝合金板与混凝土的粘结性能,提出了界面粘结强度的修正Niedermeier模型,得到了有效粘结长度计算式。文献[13-15]运用有限元方法对铝合金板-混凝土的界面粘结性能进行了研究,论证了有限元分析方法的可行性。文献[16]通过单剪试验研究了铝合金板与混凝土的界面粘结-滑移性能,分析了表面粗糙度和粘结长度两个参数对界面性能的影响,试验表明:现有的FRP-混凝土粘结-滑移模型(Nakaba模型和Savioa模型)可以用来预测铝合金板加固混凝土的界面粘结-滑移行为。姜德文等<sup>[17]</sup>通过面内双剪试验研究了混凝土强度等级和铝合金板等4个参数对界面粘结性能的影响。由于加固结构中铝合金板与混凝土的界面受力状态复杂,影响铝合金板与混凝土界面粘结性能的参数较多,且文献[17]的研究参数尚不完善。在文献[17]研究基础上,通过改变试验参数进一步分析铝合金板粘结长度、铝合金板厚度、结构胶种类3个参数对铝合金板-混凝土界面粘结性能的影响,并对比试验结果,得出适合理论计算的本构模型。

## 1 试件概况

### 1.1 试件设计

共设计了16组(每组3个)48个试件,试件参数设计见表1,双剪试验试件构造设计如图1所示。其中混凝土的设计尺寸为300 mm×150 mm×150 mm,设计强度等级为C40,配合比为 $m_{\text{水泥}}:m_{\text{砂}}:m_{\text{石}}:m_{\text{水}}=1:1.74:3.53:0.49$ 。铝合金板采用西南铝业有限责任公司生产的6061-T6,厚度分别为1、2、3 mm。试验用结构胶粘剂有3种:瑞士西卡公司生产的sika-30CN、湖南固特邦公司生产的JN、上海悍马公司生产的HM-120。

### 1.2 试验加载装置

双剪试验加载装置为自行设计制作,如图2所

表1 试件参数设计

Table 1 Design of specimen parameters

试件编号	铝合金板厚度/mm	粘结长度/mm	结构胶种类
L-HM-2-100	2	100	HM-120
L-HM-2-150	2	150	HM-120
L-HM-2-200	2	200	HM-120
L-JN-2-100	2	100	JN(固特邦)
L-JN-2-150	2	150	JN(固特邦)
L-JN-2-200	2	200	JN(固特邦)
L-SK-1-50	1	50	sikadur-30CN
L-SK-1-100	1	100	sikadur-30CN
L-SK-1-150	1	150	sikadur-30CN
L-SK-2-100	2	100	sikadur-30CN
L-SK-2-150	2	150	sikadur-30CN
L-SK-2-200	2	200	sikadur-30CN
L-SK-3-100	3	100	sikadur-30CN
L-SK-3-150	3	150	sikadur-30CN
L-SK-3-200	3	200	sikadur-30CN
L-SK-3-250	3	250	sikadur-30CN

注:“L-HM-2-100”表示结构胶为HM-120,铝合金板厚度为2 mm,粘结长度为100 mm。

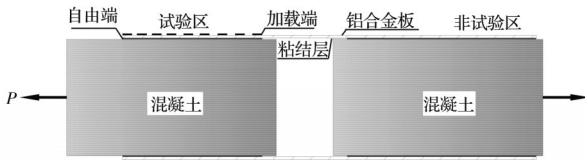


图 1 双剪试验试件构造设计

Fig. 1 Structure design of double shear test specimen

示。试件非试验区粘结长度为 270 mm,试验区粘结长度比非试验区短,所以理想破坏模式为试验区界面发生粘结失效破坏。试验正常加载时速率控制在 2 kN/min。为测量铝合金板沿粘结长度方向的应变分布,在铝合金板上等间距布置应变片,应变测点布置如图 3 所示。

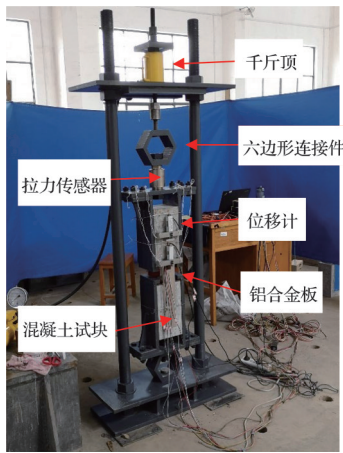


图 2 双剪试验加载装置

Fig. 2 Loading setup for double shear test

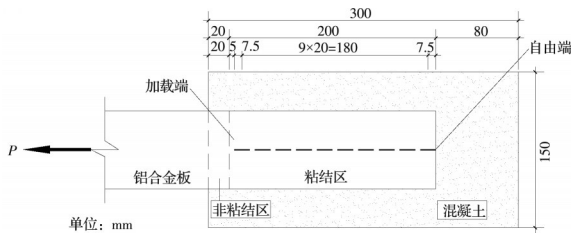


图 3 铝合金板上应变测点布置图

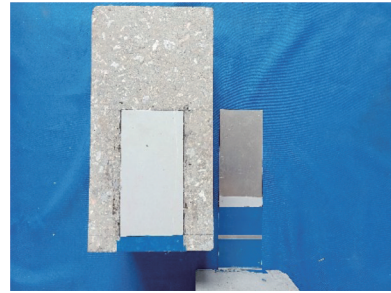
Fig. 3 Layout of strain measuring points aluminum alloy plate

## 2 试验结果与分析

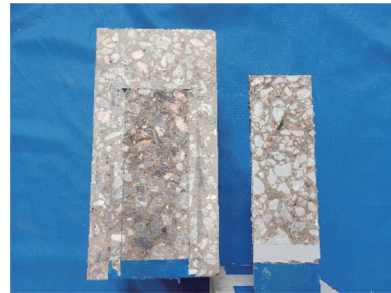
### 2.1 破坏形态

典型破坏形态有两种:1)铝合金板-结构胶界面分层破坏。破坏发生在铝合金板与结构胶的界面,如图 4(a)所示,这是因为铝合金板表面过于光滑,因此,在进行结构加固时宜对铝合金板的表面进行有效的粗糙处理。2)混凝土-结构胶界面剥离破坏。破坏发生在混凝土和结构胶的界面,混凝土界面露出粗骨料,如图 4(b)所示,这是因为混凝土表层发生受拉破坏,加固混凝土较为常见的破坏形式是混

凝土界面的剥离,进一步说明铝合金板加固混凝土结构的可行性。主要试验结果见表 2。



(a) 铝合金板-结构胶界面分层破坏



(b) 混凝土-结构胶界面剥离破坏

图 4 试件典型破坏形态

Fig. 4 Typical failure modes of specimens

表 2 主要试验结果

Table 2 Main test results

试件编号	粘结强度 $\tau_{avg}/\text{MPa}$	加载端相对滑移值 $s/\text{mm}$	极限荷载 $P_u/\text{kN}$
L-HM-2-100	0.57	0.101	8.57
L-HM-2-150	0.53	0.122	12.02
L-HM-2-200	0.56	0.155	16.86
L-JN-2-100	0.80	0.094	11.99
L-JN-2-150	0.68	0.131	15.41
L-JN-2-200	0.60	0.153	18.14
L-SK-1-50	0.55	0.122	4.16
L-SK-1-100	0.68	0.150	10.22
L-SK-1-150	0.50	0.153	11.18
L-SK-2-100	0.93	0.137	13.88
L-SK-2-150	0.82	0.167	18.51
L-SK-2-200	0.66	0.171	19.72
L-SK-3-100	1.16	0.121	17.42
L-SK-3-150	0.92	0.147	20.63
L-SK-3-200	0.88	0.148	26.46
L-SK-3-250	0.79	0.184	29.67

### 2.2 界面极限承载力分析

图 5 给出了铝合金板粘结长度、厚度以及结构胶种类对试件界面极限承载力影响的柱状图。由图 5(a)可知:当铝合金板厚度均为 3 mm 时,试件界



面极限承载力随铝合金板粘结长度的增加而增大。由图 5(b)可知:当粘结长度为 150 mm 时,相比厚度为 2、1 mm 的试件,铝合金板厚度为 3 mm 的试件极限承载力分别提高了 11.5% 和 84.5%;粘结长度为 100 mm 的试件也呈现出相同的规律。可见,当结构胶均采用 Sikadur-30CN 时,试件界面极限承载力随铝合金板粘结厚度的增加而明显增大。由图 5(c)可知:当粘结长度为 100 mm 时,相比采用 JN 和 HM-120 结构胶的试件,采用 Sikadur-30CN 结构胶的试件极限承载力分别提高了 15.8%、62.0%;当粘结长度为 150 mm 时,相比采用 JN 和 HM-120 结构胶的试件,采用 Sikadur-30CN 结构胶的试件极限承载力分别提高了 20.1%、54.0%;当粘结长度为 200 mm 时,相比采用 JN 和 HM-120 结构胶的试件,采用 Sikadur-30CN 结构胶的试件极限承载力分别提高了 8.7%、17.0%。可见,当粘结长度相同时,结构胶的种类会明显影响界面粘结强度。

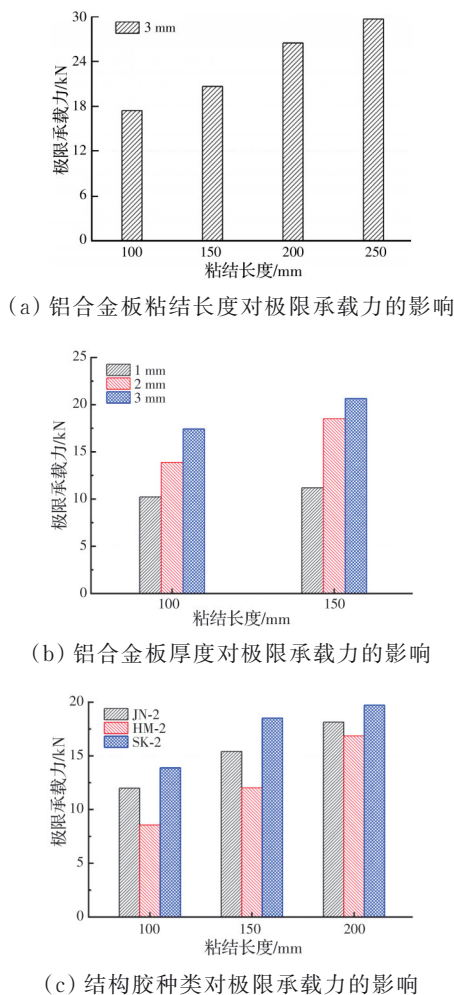


图 5 不同参数对试件界面极限承载力的影响  
Fig. 5 Influence of different parameters on the ultimate bearing capacity of specimen interface

### 2.3 铝合金板-混凝土界面应变规律

典型试件的铝合金板应变分布规律如图 6 所示。由图 6 可知,铝合金板的应变发展呈现出相似的规律,荷载加载初期,界面的荷载-应变呈线性变化,随着荷载的增加,加载端附近的应变增大,但自由端附近的应变几乎没有变化,说明界面的应力传递只发生在加载端附近。加载端的应变随荷载的增加而不断增长,且有效粘结长度(界面的有效传力区域)也

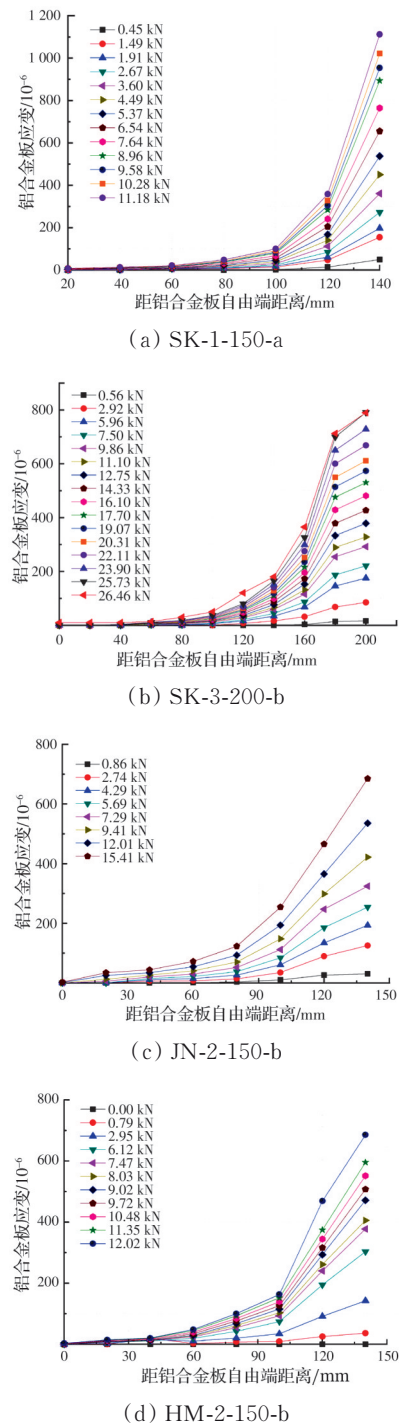


图 6 各级荷载下铝合金板的应变分布  
Fig. 6 Strain distribution of aluminum alloy plates under different loads

在增大,此阶段自由端应变的增长速率先增大后减小,而加载端应变的增长速率开始减小。当荷载达到一定值后,铝合金板界面的有效粘结长度不再增加,在此传力区域内铝合金板的应变随荷载的增加而增大,直至试件彻底发生剥离破坏。

考虑到试验过程中一些偶然因素的影响,将试验区铝合金板的拉应变作为判定条件,定义应变大于铝合金板极限拉应变的5%作为有效发展测点,因此,由界面应变的有效发展长度可以确定出界面的有效粘结长度,各试件有效粘结长度见表3。由表3可知:1)有效粘结长度随铝合金板粘结长度的增加而增加,但界面极限承载力不会随粘结长度的增加而不断增大,且不同参数的试件都存在一个有效粘结长度。2)大部分试件的有效粘结长度分布在80~120 mm之间,但铝合金板的厚度会影响试件界面粘结刚度,过薄的铝合金板会使界面裂缝提前出现,从而影响有效粘结长度,因此,厚度为1 mm的铝合金板试件有效粘结长度小于80 mm。3)在铝合金板厚度和粘结长度一定的情况下,结构胶的种类会影响有效粘结长度,主要受结构胶弹性模量的影响,有效粘结长度随结构胶弹性模量的减小而增大。建议在工程加固时,选择弹性模量较低的结构胶和厚度较大的铝合金板。

表 3 各试件有效粘结长度

Table 3 Effective bond length of specimens

试件编号	有效粘结长度/mm
L-HM-2-100	80
L-HM-2-150	80
L-HM-2-200	100
L-JN-2-100	80
L-JN-2-150	100
L-JN-2-200	100
L-SK-1-50	30
L-SK-1-100	60
L-SK-1-150	60
L-SK-2-100	100
L-SK-2-150	120
L-SK-2-200	120
L-SK-3-100	80
L-SK-3-150	80
L-SK-3-200	100
L-SK-3-250	110

2.4 不同参数下铝合金板的应变规律

2.4.1 不同粘结长度下铝合金板的应变规律

图7给出了粘结长度分别为100、150、200、250 mm时铝合金板的应变规律。由图7可知:在相同荷

载下,应变的增长速率随粘结长度的增大而减慢,表明粘结长度越长的试件应力传递速度越慢。虽然各试件粘结长度不同,但有效粘结长度与上文提到的一致,有效传力区域在80~120 mm之间。

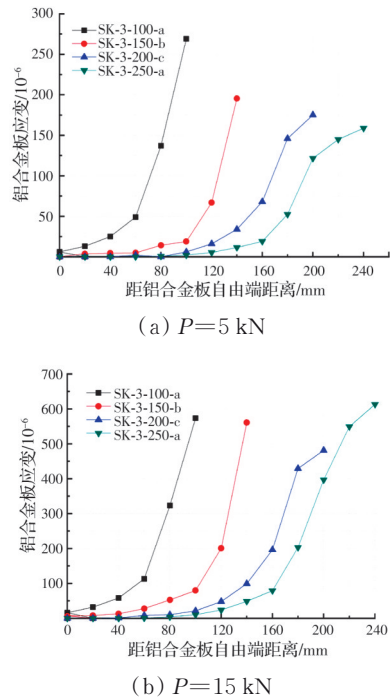


图 7 不同粘结长度下铝合金板的应变规律

Fig. 7 Strain of aluminum alloy with different bond lengths

2.4.2 不同厚度下铝合金板的应变规律

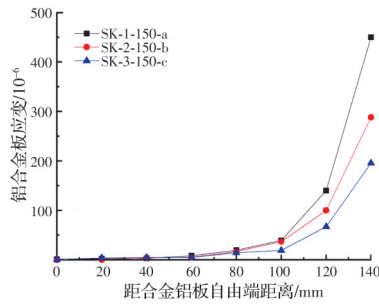
图8给出了厚度分别为1、2、3 mm时铝合金板的应变规律。由图8可知:在相同荷载下,应变增长速率随铝合金板厚度的减小而加快,主要原因是铝合金板的刚度随厚度的减小而减小,界面的应力传递速度随厚度的减小而加快。

2.4.3 不同结构胶种类下铝合金板的应变规律

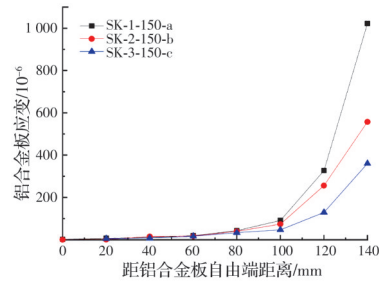
图9给出了不同结构胶种类下铝合金板的应变规律。由图9可知:采用Sikadur-30CN结构胶的试件界面应力传递最快,且试件的界面剥离承载力会高于另外两种结构胶,这是因为Sikadur-30CN结构胶的弹性模量最低,有效粘结长度随结构胶弹性模量的减小而增大,最终界面剪应力重分布提高了界面承载力。

2.5 不同参数下粘结界面剪应力分析

试件界面的平均粘结剪应力可由公式  $\tau_t = t_t \cdot \frac{d\sigma_{\bar{n}}}{dx} = t_t \cdot E_t \cdot \frac{d\epsilon_{\bar{n}}}{dx}$  计算得到(其中  $E_t$  为铝合金弹性模量,  $t_t$  为铝合金板厚度),根据计算结果,绘出各级荷



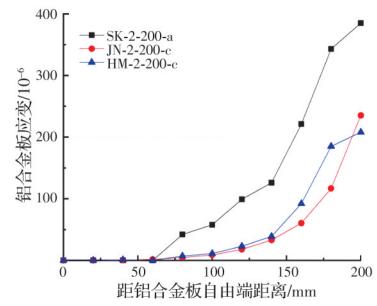
(a)  $P=5\text{ kN}$



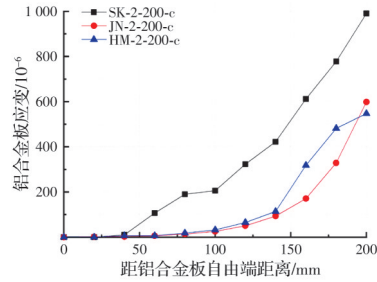
(b)  $P=10\text{ kN}$

图 8 不同厚度下铝合金板的应变规律

Fig. 8 Strain of aluminum alloy with different thickness



(a)  $P=5\text{ kN}$



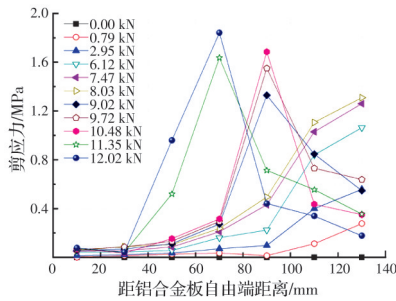
(b)  $P=15\text{ kN}$

图 9 不同结构胶下铝合金板的应变规律

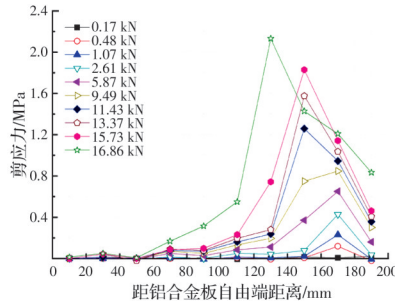
Fig. 9 Strain of aluminum alloy with different structural adhesives

载下界面剪应力分布规律,如图 10 所示。由图 10 可知:加载过程中界面的剪应力从加载端向自由端

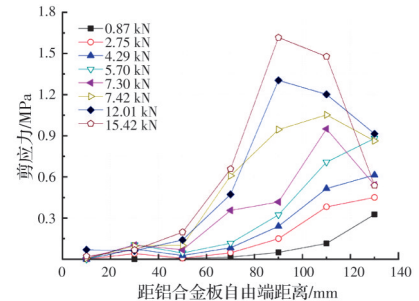
传递,且每个试件都存在一个有效粘结长度,当超过有效粘结长度,应力将不会向自由端传递。



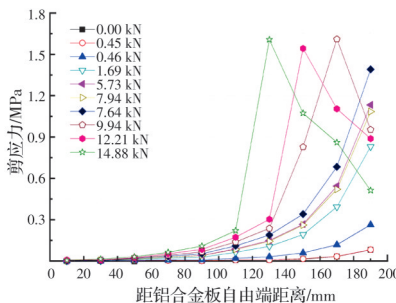
(a) HM-2-150-b



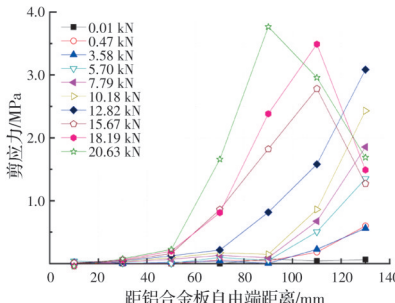
(b) HM-2-200-c



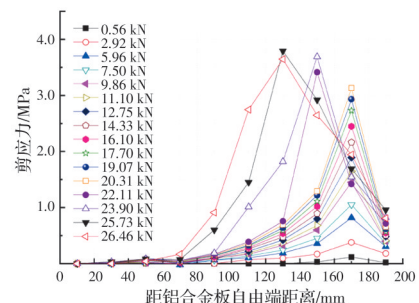
(c) JN-2-150-b



(d) JN-2-200-c



(e) SK-3-150-b



(f) SK-3-200-b

图 10 各级荷载下界面剪应力分布曲线

Fig. 10 Interfacial shear stress distribution for specimens under different loads

### 2.6 荷载-滑移演化规律

图 11 为典型的荷载-滑移演变规律。界面的相对滑移可由固定在试件加载端和自由端的位移计

测得,荷载-滑移曲线可反映界面的滑移总量,也可间接反映界面的粘结-滑移刚度。在加载过程中,相比加载端的滑移,试件自由端的相对滑移可以忽略不计。



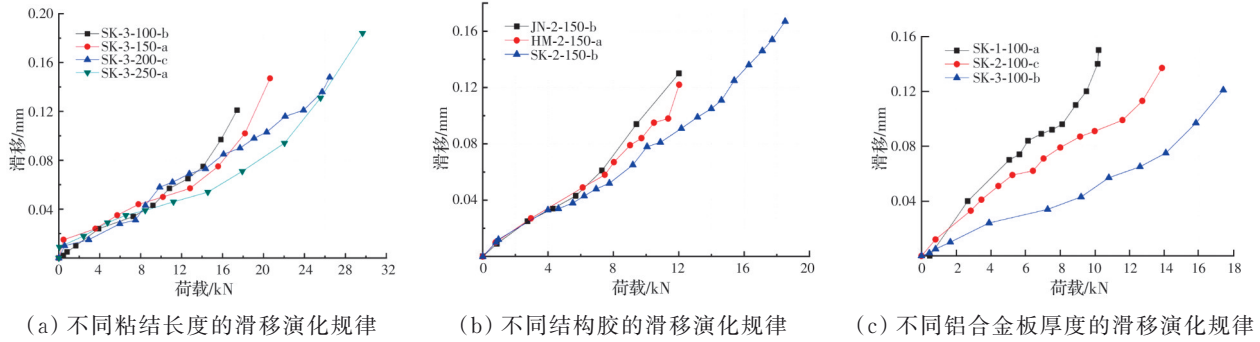


图 11 铝合金板-混凝土加载端荷载-滑移曲线

Fig. 11 Load-slip curve of aluminum alloy plate-concrete loading end

由图 11 可知,不同参数下铝合金板-混凝土加载端荷载-滑移曲线可分为 3 个阶段:1)线性增长阶段:该阶段荷载较小,荷载-滑移曲线呈线性增长。2)快速增长阶段:随着荷载的增加,荷载-滑移曲线呈非线性增长,加载端界面出现滑移。3)失稳增长阶段:该阶段荷载增加不大,但界面滑移急剧增加,加载端界面首先剥离,最终自由端剥离导致试件破坏。由图 11(a)可知,滑移量随粘结长度的增加而增大。由图 11(b)可知,相比 JN 和 HM-120 结构胶的试件,采用 Sikadur-30CN 结构胶的试件极限滑移值最大,这是因为 Sikadur-30CN 结构胶的弹性模量较低,有利于增强结构的延性。由图 11(c)可知,滑移量随铝合金板厚度的增大而明显降低,并且铝合金板的厚度对试件的刚度有非常显著的提高。

### 3 粘结-滑移模型讨论

#### 3.1 粘结剪应力-滑移量散点图

局部粘结剪应力可通过试件沿粘结长度方向的微段单元受力平衡求得<sup>[17]</sup>。

$$\tau_x = E_a t_a \frac{d\epsilon_a}{dx} \quad (1)$$

式中: $E_a$ 为铝合金板的弹性模量; $t_a$ 为铝合金板的厚度; $\epsilon_a$ 为铝合金板的应变。

界面  $i$  处的滑移值  $s_i$  可按式(2)进行计算<sup>[17]</sup>。

$$s_i = \left[ \frac{\epsilon_{x=0} + \epsilon_i}{2} + \sum_{j=1}^{i-1} \epsilon_j \right] \Delta x \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{x=0}$ 为自由端  $x=0$  处的应变值; $\epsilon_i$ 为  $i$  点应变; $\epsilon_j$ 为  $j$  点应变; $\Delta x$ 为相邻应变片之间的距离。

结合试验测得的应变数据,采用式(1)和式(2)可以得到截面  $i$  处的局部剪应力和滑移值。图 12 为按照上述公式得到的粘结剪应力-滑移量散点图。

由图 12 可知:各试件的粘结-滑移曲线都具有上升段和下降段,且下降段的滑移值比上升段大;上升段曲线的斜率不断减小,这是因为粘结剪应力

从原点增加到峰值的过程中,粘结界面的损伤不断发展,界面刚度随之减弱。在相同的粘结长度下,由于 3 种结构胶的弹性模量不同,对界面的受力性能有一定影响,因此,采用不同结构胶的试件会出现不同的峰值剪应力。试件界面的峰值剪应力、极限滑移值随着粘结长度的增加有所增大。试验得出的粘结-滑移曲线呈明显的上升段非线性特征和下降段塑性软化行为,可采用分段曲线模式进行模拟。

#### 3.2 试验结果与不同粘结-滑移本构模型对比

粘结-滑移本构关系是分析铝合金板-混凝土界面受力的基础。而现有的双直线模型<sup>[18]</sup>、双曲线模型<sup>[19]</sup>、Nakaba 模型<sup>[20]</sup>是 FRP 加固混凝土结构中最具有代表性的粘结-滑移本构模型,采用这 3 种模型与本文及文献[21]的散点图进行拟合,拟合曲线如图 13 所示。

##### 1) 双直线模型<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{s}{s_0} & \frac{s}{s_0} \leq 1 \\ \frac{\tau}{\tau_{\max}} = 1 - \frac{\frac{s}{s_u} - 1}{\frac{s_u}{s_0} - 1} & \frac{s}{s_0} > 1 \end{cases}$$

式中: $s_u$ 为极限滑移量; $s_0$ 为剪力达到最大时对应的滑移量。

##### 2) 双曲线模型<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_{\max}} = \left( \frac{s}{s_0} \right)^a & \frac{s}{s_0} \leq 1 \\ \frac{\tau}{\tau_{\max}} = e^{-b\left(\frac{s}{s_0} - 1\right)} & \frac{s}{s_0} > 1 \end{cases}$$

式中: $a$ 、 $b$ 为回归系数。

##### 3) Nakaba 模型<sup>[20]</sup>

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \left[ \frac{s}{s_0} \frac{n}{n-1 + (s/s_0)^n} \right]$$

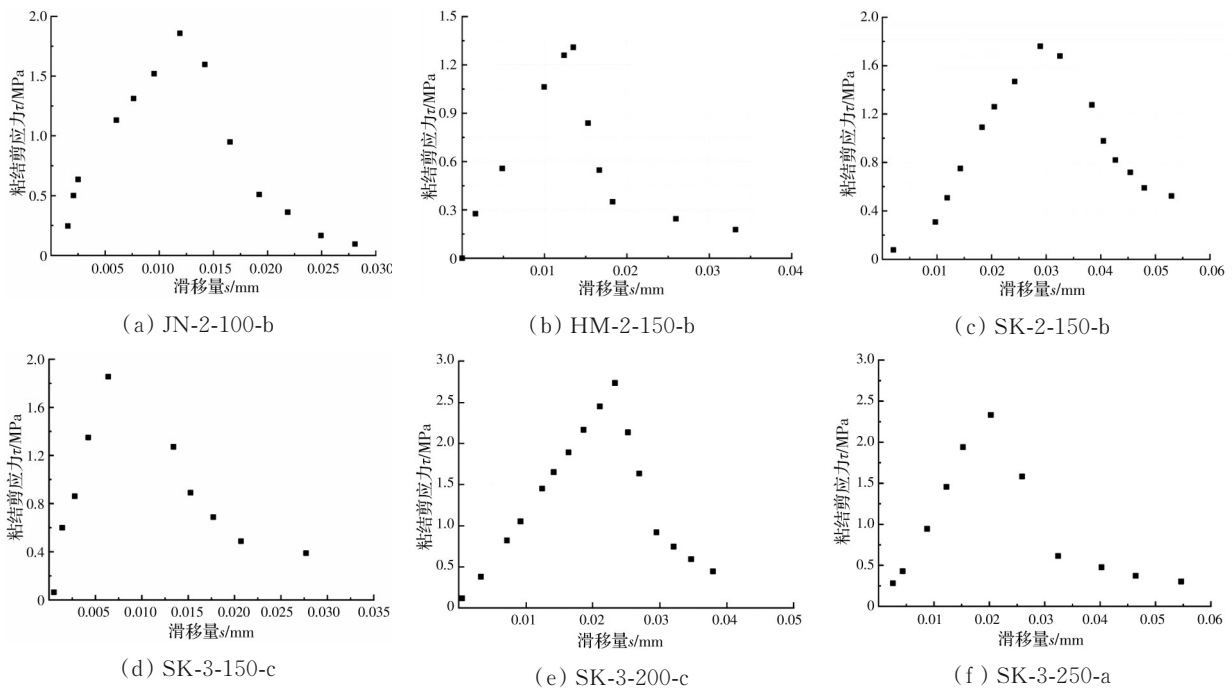


图 12 粘结剪应力-滑移量散点图  
 Fig. 12 Scatter plots of bond shear stress-slip

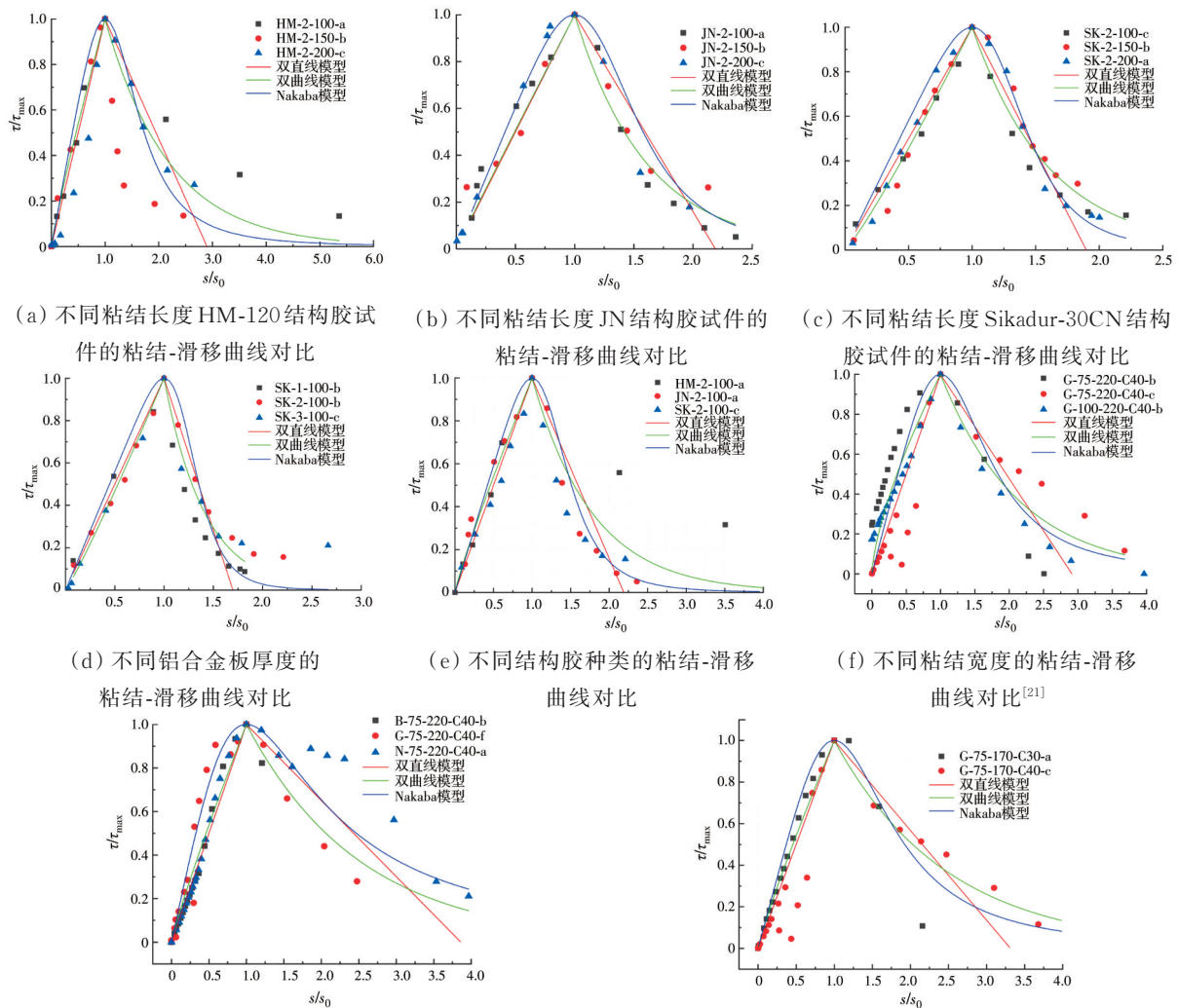


图 13 不同粘结-滑移本构模型与铝合金板-混凝土试验粘结-滑移散点图的对比  
 Fig. 13 Comparison between different bond-slip constitutive models and experimental bond-slip scatter plots of aluminum alloy plate-concrete



式中: $n$ 为回归系数。

由图13可知,在上升段,双直线与双曲线模型均与试验结果吻合较好,但在下降段,双直线模型无法模拟界面塑性软化行为,尽管双曲线模型能够体现界面塑性软化行为,但与试验散点偏离较大。而Nakaba模型能很好地拟合试验散点,建议采用Nakaba模型进行铝合金板加固混凝土结构的理论计算分析。

## 4 结论

1)界面分层破坏是因为铝合金板界面光滑,采用该方法加固混凝土结构时,建议对其表面进行糙化处理。

2)界面剥离承载力随铝合金板厚度的增加而提高,工程结构加固时建议选用厚度不低于1 mm的铝合金板,有效粘结长度控制在80~120 mm之间。JN和HM-120结构胶的界面剥离承载力低于Sikadur-30CN结构胶,工程结构加固时建议选用弹性模量较低的结构胶。

3)剥离承载力并不随铝合金板粘结长度的增大而无限提高,工程结构加固时建议将铝合金板粘结长度控制在有效粘结长度范围。

4)低弹性模量的结构胶有利于增强结构的延性,试件的滑移量随粘结长度的增加而增大,随铝合金板厚度的增加而降低,并且铝合金板厚度对试件的刚度有非常显著的提高。

5)Nakaba模型能很好地拟合试验散点,建议采用Nakaba模型进行铝合金板加固混凝土结构的理论计算分析。

## 参考文献

- [1] 周延阳. 混凝土表层嵌贴CFRP板粘结机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.  
ZHOU Y Y. Investigation of bond mechanics of NSM CFRP strips to concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [2] 彭晖, 丑佳璇, 孙溢, 等. 表层嵌贴CFRP-混凝土结构的黏结性能研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 156-166.  
PENG H, CHOU J X, SUN Y, et al. Bond behavior of Near-surface-mounted CFRP to concrete structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 156-166. (in Chinese)
- [3] 齐云. 粘钢加固混凝土梁的粘结应力研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.  
QI Y. Study on the interfacial stresses of the strengthened RC beams bonded with steel plates [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [4] APRILE A, SPACONE E, LIMKATANYU S. Role of bond in RC beams strengthened with steel and FRP plates [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(12): 1445-1452.
- [5] 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)
- [6] MAZZOLANI F M. Competing issues for aluminum alloys in structural engineering [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2004, 6(4): 185-196.
- [7] 姜德文. 基于双剪试验的铝合金板-混凝土界面粘结滑移性能及其本构曲线研究[D]. 湖南湘潭: 湖南科技大学, 2019.  
JIANG D W. Aluminum alloy plate-concrete interface based on double shear test bond slip test and constitutive curve study [D]. Xiangtan, Hunan: Hunan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] 沈祖炎, 郭小农, 李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 100-109.  
SHEN Z Y, GUO X N, LI Y Q. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 100-109. (in Chinese)
- [9] 许颖, 王青原, 谢明, 等. 铝合金片材加固钢筋混凝土梁的抗剪性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 47-53.  
XU Y, WANG Q Y, XIE M, et al. Shear behavior of reinforced concrete beams strengthened with aluminum alloy sheets [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 47-53. (in Chinese)
- [10] ABDALLA J A, ABU-OBEIDAH A R, HAWILEH R A. Use of aluminum alloy plates as externally bonded shear reinforcement for R/C beams [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 17: 403-410.
- [11] 杨立军, 邓志恒, 杨海峰, 等. 铝合金板与混凝土的粘结性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3): 111-119.  
YANG L J, DENG Z H, YANG H F, et al. Study on bond behaviors between aluminum alloy plate and concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(3): 111-119. (in Chinese)
- [12] 杨立军, 邓志恒, 陈卫, 等. 铝合金板与混凝土的粘帖粘结强度研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(3): 101-107.

- YANG L J, DENG Z H, CHEN W, et al. Study on interfacial bond strength between aluminum alloy plate and concrete [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(3): 101-107. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] ABU-OBEIDAH A, HAWILEH R, ABDALLA J A. Finite element modeling of shear deficient beams bonded with aluminum plates [C]//*Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*. September 4-7, 2012. Dubrovnik, Croatia. Stirlingshire, UK: Civil-Comp Press, 2012.
- [15] 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.
- [16] ABDALLA J A, HRAIB F H, HAWILEH R A, et al. Experimental investigation of bond-slip behavior of aluminum plates adhesively bonded to concrete [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017, 31(1): 82-99.
- [17] 姜德文, 黄海林, 刘光伟, 等. 铝合金板混凝土界面的粘结滑移性能及其本构关系[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(3): 80-89.
- JIANG D W, HUANG H L, LIU G W, et al. Bond-slip performance and constitutive curve of aluminum alloy sheet-concrete interface [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(3): 80-89. (in Chinese)
- [18] MONTI G, RENZELLI M, LUCIANI P. FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones [C]//*Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003: 183-192.
- [19] 郭樟根, 孙伟民, 曹双寅. FRP与混凝土界面黏结-滑移本构关系的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(3): 1-5.
- GUO Z G, SUN W M, CAO S Y. Experimental study on bond-slip behavior between FRP and concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(3): 1-5. (in Chinese)
- [20] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T, et al. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete [J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(3): 359-367.
- [21] 刘光伟. 基于双剪试验的铝合金板-混凝土界面粘结滑移性能研究[D]. 湖南湘潭: 湖南科技大学, 2018.
- LIU G W. Study on bond slip performance of aluminum alloy-concrete interface based on double shear test [D]. Xiangtan, Hunan: Hunan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)