

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.042

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 铝合金板加固钢筋混凝土梁的剥离破坏机理试验研究

杨立军<sup>1,2</sup>, 邓志恒<sup>2</sup>, 杨海峰<sup>2</sup>

(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; 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:**剥离破坏是铝合金板加固钢筋混凝土(RC)梁常见的早期破坏形式,为了避免剥离破坏的出现,对铝合金板加固 RC 梁的剥离破坏机理开展试验研究。制作了 24 根 RC 梁,利用结构胶将铝合金板粘贴在 RC 梁底部。为了研究附加锚固对剥离破坏的影响,部分试验梁在铝合金板特定位置设置了化学螺栓或 U 形箍。通过铝合金板加固 RC 梁的简支梁三分点对称单调加载试验,得到铝合金板加固 RC 梁的 4 种破坏模式:适筋破坏、超筋破坏、板端剥离破坏和中部裂缝剥离破坏。剥离破坏的原因是界面剪应力过大。利用铝合金板应变片的试验数据,得到了铝合金板的粘贴界面剪应力分布曲线,分析了界面剪应力分布规律:在板端取得最大值后迅速下降至零值,RC 梁裂缝处界面剪应力发生突变。板端剥离破坏发生的机理:铝合金板端界面剪应力达到铝合金板与混凝土的粘贴强度后,界面剪应力导致保护层内混凝土剥离;中部裂缝剥离破坏发生的机理:界面剪应力在混凝土齿状块体端部产生的正应力大于混凝土受拉强度,导致混凝土齿状块体从梁体剥离。在此基础上,得到了两种剥离破坏的判别式,并结合试验数据验证了判别式的准确性。

**关键词:**铝合金板;加固;钢筋混凝土梁;剥离破坏;破坏机理

**中图分类号:** TU375.1; TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)06-0095-08

## Experimental analysis of debonding failure mechanism of reinforced concrete beam strengthened with aluminum alloy plate

Yang Lijun<sup>1,2</sup>, Deng Zhiheng<sup>2</sup>, Yang Haifeng<sup>2</sup>

(1. Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone; 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:** Debonding failure is a common early damage form of aluminum alloy plate strengthened RC beam. In order to avoid the occurrence of debonding failure, the experimental research on the mechanism of aluminum alloy plate strengthened RC beam debonding failure was conducted. 24 RC beams were fabricated, and the aluminum alloy plates were adhered to the bottom of the RC beams with structural

**收稿日期:** 2020-01-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(51478126, 51768004)

**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,博士生导师, E-mail: dengzh@gxu.edu.cn.

**Received:** 2020-01-10

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51478126, 51768004)

**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, PhD, doctoral supervisor, E-mail: dengzh@gxu.edu.cn.

adhesive. In order to study the effect of additional anchoring on debonding failure, part of the test beams is equipped with chemical bolts or U-shaped hoops at specific positions on the aluminum alloy plate. Through the three-point symmetrical monotonic loading test of simply supported beams with aluminum alloy plates strengthened RC beams, four failure modes of RC beams strengthened by aluminum alloy plates are obtained: suitable reinforcement failure, over-reinforced failure, debonding failure at end plate or at mid-span induced by crack. The debonding failure is mainly caused by the excessive interfacial shear stress. Therefore, the test data of the strain gauge of the aluminum alloy plate were used to obtain the interfacial stress distribution curves, and the principle of interface shear stress distribution is analyzed. After reaching the maximum value at plate end, the stress quickly falls to around null. The interfacial shear stress in the cracking section of RC beam has a sudden change. The mechanism of debonding failure was analyzed: the mechanism of debonding failure at plate end is that after the interfacial shear stress reaches the bonding strength of the aluminum alloy plate and concrete, the interfacial shear stress will peel off the concrete in the protective layer; The mechanism of mid-span crack induced debonding failure is that the interfacial shear stress peels off the concrete fragment blocks from the beam body after the normal stress generated at the end of the concrete block is greater than the concrete tensile strength. On this basis, the discriminant formulae of two kinds of debonding failure were obtained, and the accuracy of the discriminants was verified by combining the test data. Above work provides a theoretical basis for the engineering application of RC beams strengthened with aluminum alloy plates.

**Keywords:** aluminum alloy plate; strengthening; reinforced concrete beam; debonding failure; failure mechanism

由于环境侵蚀、使用功能改变、长期超荷使用、设计标准提高、超过服役年限以及施工或设计失误等诸多原因,很多混凝土结构不能满足结构的安全性、适用性和耐久性要求,需要采取适当的技术措施,对其进行补强与加固处理。在混凝土构件表面粘贴片材加固由于不显著增大构件截面,不改变结构传力途径,施工方便,是目前应用最广泛的加固技术。钢板和 FRP 作为常用的粘贴片材,得到了较多的研究<sup>[1-4]</sup>,但两种材料有明显的缺点:钢板容易腐蚀,维护成本高;FRP 为脆性材料,变形性能差。文献[5]指出,在 pH 值为 4~9 的环境中,铝合金是最耐腐蚀的材料。铝合金材料以其比强度高、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,特别适合应用于侵蚀、潮湿、低温和高寒等极端环境,是一种很好的加固材料<sup>[6]</sup>。已有学者对铝合金板加固钢筋混凝土(RC)梁的粘结、抗弯和抗剪性能开展了试验、理论和有限元模拟研究<sup>[7-12]</sup>,验证了铝合金板加固 RC 梁的可行性和优越性。剥离破坏是由于粘贴片材连接失效发生的早期破坏,具有突然性和脆性,是加固设计要避免的破坏形式,目前关于粘贴片材加固 RC 梁剥离破坏的研究主要集中在 FRP 片材<sup>[13-16]</sup>,如文献[13]基于部分黏结作用复合梁理论,对端部锚固 CFRP 加固 RC 梁 IC 剥离过程

进行了有限元模拟;文献[14]考虑 FRP 的剥离破坏,利用纤维梁模型对 FRP 抗剪加固 RC 梁进行了数值模拟;文献[15]对 CFRP 加固 RC 梁进行了两点对称简支加载试验,研究了 CFRP 初始剥离时的应变;文献[16]提出了用于预测 FRP 加固 RC 梁剥离破坏的弯曲疲劳性能的模型。铝合金板加固 RC 梁的剥离破坏鲜有报道。铝合金板的力学性能和材料表面性能与 FRP 存在明显差异,有必要对铝合金板加固 RC 梁的剥离破坏开展专门研究。笔者通过 24 根铝合金板加固 RC 梁的简支梁三分点单调对称加载试验,研究了铝合金板加固 RC 梁剥离破坏机理,通过理论分析得到了剥离破坏的判别式,为铝合金板应用于 RC 梁加固工程提供了理论基础。

## 1 试验研究

### 1.1 试验设计

RC 梁全长 3 000 mm,两端支承在铰支座上,铰支座中心间距  $l=2\ 700$  mm,RC 梁宽  $b=200$  mm,高  $h=300$  mm,在梁的三分点处对称施加集中荷载,如图 1 所示。纯弯段 EF 箍筋配置  $\Phi 8@180$ ,弯剪段 DE、FG 箍筋  $\Phi 8@100$ ,架立筋通长设置,  $2\ \Phi 8$ 。混凝土和纵筋各分为两种情况:C20 和 C35,  $2\ \Phi 12$  和  $4\ \Phi 12$ 。

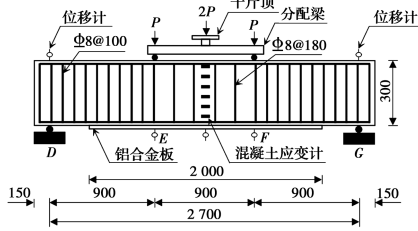


图 1 简支梁三分点对称加载试验梁(单位:mm)

Fig. 1 Thesimply supported test beam under the one-third symmetrical loads(unit:mm)

在 RC 梁底部采用结构胶粘贴铝合金板对梁加固,试验中结构胶采用 JN 建筑结构胶;铝合金板材料型号为 6061-T6,长度  $l_a \times$  宽度  $b_a \times$  厚度  $t_a = 2\ 000\ \text{mm} \times 180\ \text{mm} \times 2$ (或 4、6) mm,铝合金板端部距离支座 350 mm。

为了增强铝合金板与 RC 梁的粘贴性能,部分试验梁在板端、梁的三分点处设置了化学螺栓和 U 形箍。化学螺栓和化学螺栓连接如图 2 所示,U 形箍和 U 形箍连接如图 3 所示。化学螺栓直径 12 mm,U 形箍由长度  $\times$  宽度  $\times$  厚度 = 720 mm  $\times$  50 mm  $\times$  5 mm 的 5052-T6 铝合金板冷弯而成。



图 2 化学螺栓和化学螺栓连接

Fig. 2 Chemical bolts and the connections

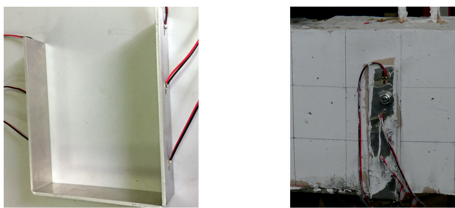


图 3 U 形箍和 U 形箍连接

Fig. 3 U-wraps and the connection

铝合金板与 RC 梁连接有 A、B1、B2、C1 和 C2 等 5 种连接方式,A 为仅用结构胶连接;其他方式在结构胶连接的基础上设置了附加锚固:B1 为板端设置化学螺栓;B2 为板端设置 U 形箍;C1 为板端设置化学螺栓、中间三分点设置 U 形箍;C2 为板端、中间三分点处设置 U 形箍。

根据 RC 梁、铝合金板厚度和连接方式的不同,

共设计了 24 根铝合金板加固 RC 梁,参数如表 1 所示。

表 1 试验梁的参数

Table 1 Parameters of test beams

序号	试件编号	混凝土	主筋	板厚/ mm	连接 方式	破坏 模式
1	S20(2)-2-A	C20	2Φ12	2	A	适筋破坏
2	S20(2)-4-A	C20	2Φ12	4	A	板端剥离破坏
3	S20(2)-4-B1	C20	2Φ12	4	B1	板端剥离破坏
4	S20(2)-4-B2	C20	2Φ12	4	B2	适筋破坏
5	S20(4)-2-A	C20	4Φ12	2	A	适筋破坏
6	S20(4)-4-A	C20	4Φ12	4	A	板端剥离破坏
7	S20(4)-4-B1	C20	4Φ12	4	B1	中部裂缝剥离破坏
8	S20(4)-4-B2	C20	4Φ12	4	B2	中部裂缝剥离破坏
9	S20(4)-4-C1	C20	4Φ12	4	C1	超筋破坏
10	S20(4)-4-C2	C20	4Φ12	4	C2	超筋破坏
11	S35(2)-2-A	C35	2Φ12	2	A	适筋破坏
12	S35(2)-4-A	C35	2Φ12	4	A	板端剥离破坏
13	S35(2)-4-B1	C35	2Φ12	4	B1	适筋破坏
14	S35(2)-4-B2	C35	2Φ12	4	B2	适筋破坏
15	S35(2)-6-B2	C35	2Φ12	6	B2	中部裂缝剥离破坏
16	S35(2)-6-C2	C35	2Φ12	6	C2	适筋破坏
17	S35(4)-2-A	C35	4Φ12	2	A	适筋破坏
18	S35(4)-4-A	C35	4Φ12	4	A	板端剥离破坏
19	S35(4)-4-B1	C35	4Φ12	4	B1	中部裂缝剥离破坏
20	S35(4)-4-B2	C35	4Φ12	4	B2	中部裂缝剥离破坏
21	S35(4)-4-C1	C35	4Φ12	4	C1	适筋破坏
22	S35(4)-4-C2	C35	4Φ12	4	C2	适筋破坏
23	S35(4)-6-B2	C35	4Φ12	6	B2	中部裂缝剥离破坏
24	S35(4)-6-C2	C35	4Φ12	6	C2	超筋破坏

### 1.2 测点布置

在 RC 梁侧面布置 6 个混凝土应变片,试验梁三分点布置位移计,布置示意图如图 1 所示。在 U 形箍侧面设置 3 个应变片,如图 3 所示;在铝合金板外表面轴线上除板端外每隔 50 mm 布置应变片,如图 4 所示;在液压千斤顶和反力板之间设置压力式荷重传感器,如图 5 所示。所有信号由 DH3821 测试分析系统自动采集。

### 1.3 试验原材料

混凝土由南宁华润西乡塘混凝土有限公司生产,由 28 d 混凝土立方体同养试块抗压试验得到,C20 立方体抗压强度  $f_{cu} = 26.8\ \text{MPa}$ ;C35 立方体抗

压强度  $f_{cu} = 41.3 \text{ MPa}$ 。

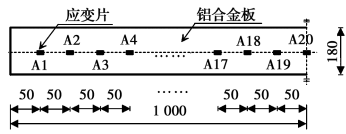


图 4 铝合金板应变片布置(单位:mm)

Fig. 4 Aluminum alloy plate strain gauges arrangement (units:mm)

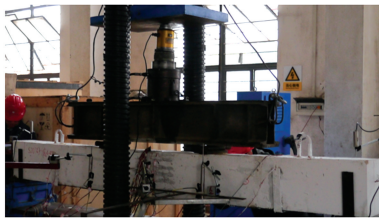


图 5 试验梁加载装置

Fig. 5 Loading device for test beams

钢筋采用柳州钢铁股份有限公司产品,由拉伸试验得到其力学性能,如表 2 所示。表中:  $f_y(\epsilon_y)$  和  $f_u(\epsilon_{su})$  分别为钢筋屈服状态和极限状态的强度(应变);  $E_s$  为弹性模量。

表 2 钢筋力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel bars

钢筋	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$\epsilon_y/\%$	$\epsilon_{su}/\%$	$E_s/\text{GPa}$
HPB300	349	552	0.17	1.82	210
HRB400	369	530	0.18	2.31	210

铝合金材料从深圳鑫锦发铜铝材料行购买, JN 建筑结构胶由湖南固特邦土木技术发展有限公司生产。铝合金力学性能如表 3 所示,表中:  $E_a$  为弹性模量;  $f_{0.1}(f_{0.2})$  为残余应变 0.1%(0.2%)时的应力;  $f_{au}$  为与极限应变  $\epsilon_{au}$  对应的极限强度;  $n$  为反映材料应变硬化的参数。JN 建筑结构胶力学性能如表 4 所示,表中:  $f_{pt}$ 、 $f_{pm}$  和  $f_{pc}$  分别为抗拉强度、抗弯强度和抗压强度;  $E_p$  为弹性模量;  $\epsilon_{pu}$  为伸长率。

表 3 铝合金板力学性能

Table 3 Mechanical properties of aluminium alloy plates

$E_a/\text{MPa}$	$f_{0.1}/\text{MPa}$	$f_{0.2}/\text{MPa}$	$f_{au}/\text{MPa}$	$f_{0.2}/f_{0.1}$	$\epsilon_{au}/10^{-6}$	$n$
68 999.6	251.7	270.6	314.37	1.075	103 584	9.72

表 4 结构胶力学性能

Table 4 Mechanical properties of structural adhesive

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

### 1.4 加载制度

试验梁加载装置如图 5 所示。工字钢分配梁跨中放置液压千斤顶,试验梁中部三分点设置分配梁的球形铰支座,千斤顶通过反力系统以 5 kN 为一级施加集中荷载,每级荷载持荷 5 min,直到试件破坏。

### 1.5 试验梁的破坏模式

如表 1 所示,试验梁的破坏模式存在 4 种类型:适筋破坏、超筋破坏、铝合金板端剥离破坏、中部裂缝剥离破坏。试验梁的破坏模式如图 6 所示。



(a) S35(2)-6-C2 适筋破坏



(b) S35(4)-6-C2 超筋破坏



(c) S35(2)-4-A 板端剥离破坏



(d) S35(2)-6-B2 中部裂缝剥离破坏

图 6 试验梁破坏模式

Fig. 6 The failure modes of test beams

适筋破坏、超筋破坏是正截面破坏,前者具有明显征兆,延性破坏;后者是受拉纵筋和铝合金板配置过多,导致混凝土抗压能力不足,是脆性破坏。铝合金板端剥离破坏和中部裂缝剥离破坏统称为剥离破坏,为早期破坏,具有突然性,为脆性破坏。两种剥离破坏都是由于界面剪应力过大产生的。

### 1.6 试验梁的荷载-挠度曲线

部分试验梁三分点荷载  $P$ -跨中挠度  $f$  曲线如图 7 所示。从图中可以看出,发生剥离破坏时,试验梁承载能力和延性均有所降低,适筋破坏的试验梁

具有很好承载能力和很好的延性。

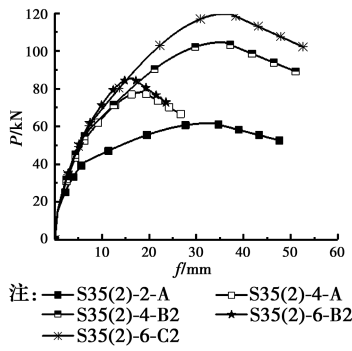


图 7 荷载-挠度曲线  
Fig. 7 The load-deflection curves

1.7 界面剪应力分布曲线

试验中测得铝合金板正应变  $\epsilon_a$ , 由式(1)可以求得铝合金板正应力  $\sigma_a$ 。

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a} + 0.002 \left( \frac{\sigma_a}{f_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

界面剪应力  $\tau$  和铝合金板正应力  $\sigma_a$  的关系为

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

相邻应变片之间的界面剪应力计算式为

$$\tau_i = t_a \frac{\Delta\sigma}{\Delta_{i,i+1}} = t_a \frac{\sigma_{a,i+1} - \sigma_{a,i}}{\Delta_{i,i+1}} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{a,i}$ 、 $\sigma_{a,i+1}$ 分别为第  $i$  点和第  $i+1$  点测得的应力; $\Delta_{i,i+1}$ 为两点间距, $\Delta_{i,i+1}=50$  mm。

根据式(3),图 8 给出了部分试验梁在弯矩  $M=0.1M_u$ 、 $0.3M_u$ …… $0.9M_u$  ( $M_u$  为试验梁极限弯矩)作用下的界面剪应力分布试验曲线,图中  $x$  为测点与板端距离,考虑对称,只给出了  $0\sim 1$  m 区间的界面剪应力。从图 8 可以看出:随着荷载变大,板端界面剪应力变大,界面剪应力分布试验曲线形状也发生变化。试验梁裂缝出现前( $M=0.1M_u$ ),界面剪应力分布试验曲线是一条光滑曲线,界面剪应力在板端取得最大值  $\tau_{max}$  后以双曲线形式迅速下降,弯剪区界面剪应力稍大于零,至纯弯区减至零。裂缝出现后( $M>0.1M_u$ ),曲线出现波浪。 $M<0.7M_u$  时波浪只在纯弯区出现, $M>0.7M_u$  后,弯剪区也出现了波浪。

1.8 铝合金板端界面剪应力

界面剪应力在板端取得最大值,表 5 给出了试验梁在三分点荷载  $P=20,35,50$  kN 作用下的铝合金板端界面剪应力试验值。

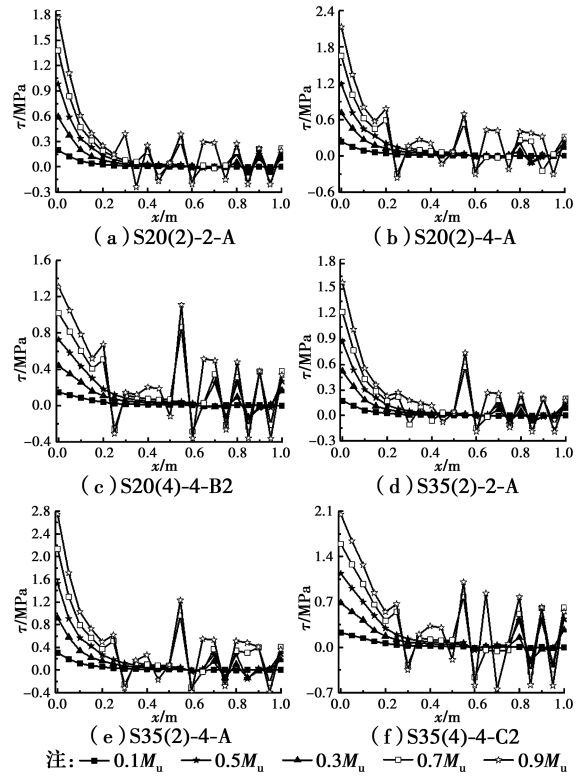


图 8 界面剪应力分布曲线

Fig. 8 The interfacial shear stress distribution curves

表 5 板端界面剪应力

Table 5 The interfacial shear stresses of plate end MPa

试件编号	$P=$			试件编号	$P=$		
	20 kN	35 kN	50 kN		20 kN	35 kN	50 kN
S20(2)-2-A	0.59	1.00	1.47	S35(2)-4-B1	0.40	0.72	0.99
S20(2)-4-A	0.78	1.41	1.95	S35(2)-4-B2	0.41	0.73	1.06
S20(2)-4-B1	0.37	0.66	0.93	S35(2)-6-B2	0.45	0.81	1.13
S20(2)-4-B2	0.40	0.69	0.97	S35(2)-6-C2	0.40	0.74	1.10
S20(4)-2-A	0.48	0.84	1.19	S35(4)-2-A	0.52	0.95	1.30
S20(4)-4-A	0.64	1.15	1.59	S35(4)-4-A	0.75	1.31	1.89
S20(4)-4-B1	0.37	0.65	0.92	S35(4)-4-B1	0.36	0.65	0.89
S20(4)-4-B2	0.37	0.63	0.91	S35(4)-4-B2	0.35	0.63	0.91
S20(4)-4-C1	0.36	0.66	0.99	S35(4)-4-C1	0.33	0.56	0.77
S20(4)-4-C2	0.37	0.64	0.88	S35(4)-4-C2	0.35	0.61	0.87
S35(2)-2-A	0.57	1.04	1.42	S35(4)-6-B2	0.40	0.73	1.01
S35(2)-4-A	0.78	1.35	1.95	S35(4)-6-C2	0.38	0.68	0.94

由表 5 可以看出:

1)外荷载越大,板端界面剪应力越大,二者近似成正比关系。

2)相同外荷载作用下相同连接方式的铝合金板加固 RC 梁,铝合金板厚度越大,板端界面剪应力越大。如试验梁 S20(2)-2-A 在  $P=20$  kN 时  $\tau=0.59$

MPa, S20(2)-4-A 为 0.78 MPa。由式(2)可以看出界面剪应力与板厚及正应力变化率的乘积成正比。

3) 仅连接方式不同的试验梁, 板端设置化学螺栓或 U 形箍时界面剪应力变小。如  $P=50$  kN 时, S35(2)-4-B1 和 S35(2)-4-B2 界面剪应力分别为 0.99、1.06 MPa, 较之 S35(2)-4-A 的 1.95 MPa 小得多。试验测试的是铝合金板-结构胶-RC 梁界面的界面剪应力。当设置 U 形箍时, 铝合金板通过 U 形箍将部分剪应力传给了 RC 梁; 当设置化学螺栓时, 化学螺栓直接将剪力传给 RC 梁, 从而铝合金板端界面剪应力变小。可见, 板端锚固有效分担了部分界面剪应力, 加强了铝合金板与 RC 梁的连接。

## 2 板端剥离破坏

试验中 S20(2)-4-A、S20(2)-4-B1、S20(4)-4-A、S35(2)-4-A 和 S35(4)-4-A 等 5 根铝合金板加固 RC 梁发生了铝合金板端剥离破坏。发生板端剥离破坏的机理是, 铝合金板端界面剪应力  $\tau_0$  达到铝合金板与混凝土的粘贴强度  $[\tau]$  后, 界面剪应力  $\tau_0$  导致保护层内混凝土剥离, 即板端剥离破坏的判别式是  $\tau_0 \leq [\tau]$ 。

极限弯矩  $M_u$  作用下发生板端剥离破坏的试验梁板端界面剪应力  $\tau_0$  和粘贴强度  $[\tau]$ , 如表 6 所示, 表中  $\delta = (\tau_0 - [\tau]) / [\tau]$ ,  $[\tau]$  按文献[7]公式计算。从表 6 可以看出,  $\tau_0$  和  $[\tau]$  吻合较好,  $\delta$  较小, 最大值为 8.66%。 $\delta$  的平均值  $Ave(\delta) = 0.06$ , 标准差  $Std(\delta) = 0.02$ 。

表 6 板端界面剪应力与粘贴强度

Table 6 Plate end interfacial shear stresses and bond strength

试件编号	$\tau_0$ /MPa	$[\tau]$ /MPa	$\delta/\%$
S20(2)-4-A	2.47	2.31	6.93
S20(2)-4-B1	2.51	2.31	8.66
S20(4)-4-A	2.41	2.31	4.33
S35(2)-4-A	3.05	2.93	4.10
S35(4)-4-A	3.14	2.93	7.17

板端锚固影响试验梁的破坏模式。如 S20(2)-4-A 发生板端剥离破坏, 在板端设置 U 形箍后, S20(2)-4-B2 发生了适筋破坏, 极限弯矩  $M_u$  变大的同时, 板端剥离破坏被克服; S20(4)-4-A 发生板端剥离破坏, S20(4)-4-B1 和 S20(4)-4-B2 发生了中部裂

缝剥离破坏, 一方面, 板端剥离破坏被克服, 另一方面, 其极限荷载相对 S20(4)-4-A 有较大的提高。图 9 给出了试验梁铝合金板端部 U 形箍应力  $\sigma_a$ -试验梁三分点荷载  $P$  曲线, 从图 9 可以看出, 随着试验梁荷载  $P$  的增大, U 形箍应力  $\sigma_a$  也随着变大, U 形箍参与了粘贴界面受力。

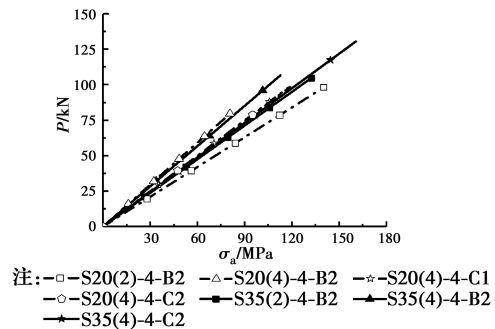


图 9 端部 U 形箍应力-荷载曲线

Fig. 9 Curves between stresses of plate end U-wraps and loads

S20(2)-4-B1 是试验中唯一一根设置了板端附加锚固仍然发生板端剥离破坏的试验梁, 如图 10 所示。发生这种情况的原因是化学螺栓受到混凝土的握裹力不足以承担铝合金板的拔出力。增加化学螺栓数目, 扩大螺栓间距, 条件许可情况下增加植入深度, 可以有效避免这种破坏。



图 10 S20(2)-4-B1 剥离破坏

Fig. 10 Debonding failure of S20(2)-4-B1

## 3 中部裂缝剥离破坏

S20(4)-4-B1、S20(4)-4-B2、S35(2)-6-B2、S35(4)-4-B1、S35(4)-4-B2 和 S35(4)-6-B2 等 6 根铝合金板加固 RC 梁发生了中部裂缝剥离破坏, 剥离破坏发生于集中荷载附近斜裂缝相交的位置。这些试验梁破坏时箍筋正应力没有达到屈服强度, 说明不是由于斜截面抗剪能力不足造成的。发生中部裂缝剥离破坏的机理是: 相继出现的弯剪型斜裂缝将混凝土分割成齿状块体, 犹如一固支于受拉纵筋的悬臂梁, 悬臂梁跨度为纵向受拉钢筋外表面到梁底的

距离  $c$ , 高度为裂缝间距  $l_{cr}$ , 如图 11 所示。设界面剪应力  $\tau$  对悬臂梁根部产生的弯矩为  $M$ , 其大小为

$$M = b_a l_{cr} c \tau \quad (4)$$

式中, 假设裂缝间界面剪应力  $\tau$  均布。

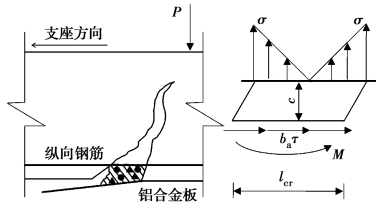


图 11 齿状混凝土及其受力分析

Fig. 11 The dentate concrete and the force analysis

弯矩  $M$  在悬臂梁根部产生的最大正应力  $\sigma_{max}$  为

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{6M}{b_a l_{cr}^2} \quad (5)$$

当  $\sigma_{max}$  大于混凝土受拉强度  $f_t$  时, 即

$$\sigma_{max} > f_t \quad (6)$$

加固梁发生中部裂缝剥离破坏, 铝合金板上的结构胶将混凝土齿状块体从梁上撕离。部裂缝剥离破坏的判别式是

$$\tau \leq [\tau]_{中} = \frac{l_{cr} f_t}{6c} \quad (7)$$

当界面剪应力  $\tau > [\tau]_{中}$  时发生中部裂缝剥离破坏。

$c$  按试验梁制作尺寸选定, 取 28 mm,  $f_t$  取材料性能试验结果,  $f_t = 2.12$  MPa (C20),  $f_t = 2.69$  MPa (C35),  $l_{cr}$  取试验梁实测裂缝间距, 根据式 (7) 即可得到中部裂缝剥离破坏强度  $[\tau]_{中}$ 。表 7 给出了发生中部裂缝剥离破坏试验梁的强度  $[\tau]_{中}$  和极限状态的裂缝位置界面剪应力试验值  $\tau$ , 以及二者相对误差  $\zeta$ ,  $\zeta = (\tau - [\tau]_{中}) / [\tau]_{中}$ 。从表 7 可以看出, 强度  $[\tau]_{中}$  与界面剪应力试验值  $\tau$  相近, 相对误差  $\zeta$  介于  $-8.84 \sim 1.07$  之间。

表 7 界面剪应力与中部裂缝剥离破坏强度

Table 7 The interfacial shear stresses and the strength of intermediate crack induced debonding failure

试件编号	$l_{cr}/\text{mm}$	$[\tau]_{中}/\text{MPa}$	$\tau/\text{MPa}$	$\zeta/\%$
S20(4)-4-B1	129.52	1.63	1.49	-8.84
S20(4)-4-B2	126.62	1.60	1.54	-3.62
S35(2)-6-B2	142.36	2.28	2.29	0.46
S35(4)-4-B1	124.53	1.99	1.98	-0.70
S35(4)-4-B2	120.14	1.92	1.88	-2.27
S35(4)-6-B2	122.35	1.96	1.98	1.07

中部三分点设置 U 形箍后, 与中部裂缝剥离破坏的 6 根梁相对应的 S20(4)-4-C1、S20(4)-4-C2、S35(2)-6-C2、S35(4)-4-C1、S35(4)-4-C2 和 S35(4)-6-C2 都克服了中部裂缝剥离破坏, 可见设置 U 形箍后, U 形箍与铝合金板协同受力, 有效地阻止了铝合金板和混凝土梁的分离趋势。图 12 给出了试验梁铝合金板中部 U 形箍应力  $\sigma_a$ -试验梁荷载  $P$  曲线, 从曲线中可以看出, 在裂缝出现以前, U 形箍参与截面受剪, 应力  $\sigma_a$  随剪力增大而线性增大, 裂缝出现后, 裂缝处界面剪应力增大, 铝合金板界面剪应力相应变大, U 形箍应力  $\sigma_a$ -试验梁三分点荷载  $P$  曲线斜率变小。

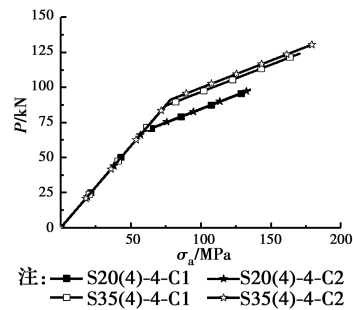


图 12 中部 U 形箍应力-荷载曲线

Fig. 12 The curves between stresses of central U-wraps and loads

## 4 结论

1) 铝合金板加固 RC 梁的剥离破坏有板端剥离破坏和中部裂缝剥离破坏两种破坏形式。

2) 通过密布在铝合金板表面的应变片测得了界面剪应力分布曲线, 得到了界面剪应力的分布规律: 界面剪应力在板端取得最大值后以双曲线形式迅速下降, 弯剪区界面剪应力稍大于零, 至纯弯区减至零。裂缝处界面剪应力发生突变。

3) 板端剥离破坏发生的机理: 铝合金板端界面剪应力达到铝合金板与混凝土的粘贴强度后, 界面剪应力导致保护层内混凝土剥离。中部裂缝剥离破坏发生的机理: 界面剪应力在混凝土齿状块体端部产生的正应力大于混凝土受拉强度导致混凝土齿状块体从梁体剥离。

4) 在板端或板中设置 U 形箍或化学螺栓锚固, 可以增加连接承载力。

## 参考文献:

- [1] 郭蓉, 杜力峰, 郭娇, 等. 预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁的受弯性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(6): 61-67.  
GUO R, DU L F, GUO J, et al. Flexural property of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer plate [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(6): 61-67. (in Chinese)
- [2] AYKAC S, KALKAN I, AYKAC B, et al. Strengthening and repair of reinforced concrete beams using external steel plates [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(6): 929-939.
- [3] TAJADDINI A, IBELL T, DARBY A, et al. Prediction of capacity for moment redistribution in FRP-strengthened continuous RC T-beams [J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(1): 04016066.
- [4] YU J T, XU Y N, YU K Q, et al. Preliminary study to enhance ductility of CFRP-strengthened RC beam [J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(1): 04016070.
- [5] SZUMIGAŁA M, CHYBI ŃSKI M, POLUS Ł. Preliminary analysis of the aluminium timber composite beams [J]. Civil and Environmental Engineering Reports, 2017, 27(4): 131-141.
- [6] 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, 44(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, 44(3): 831-836. (in Chinese)
- [7] 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.  
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)
- [8] 杨立军, 邓志恒, 杨海峰, 等. 铝合金板与混凝土的粘结性能研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3): 112-120.  
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 Environment Engineering, 2019, 41(3): 112-120. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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)
- [12] 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.
- [13] 王珍珍, 周智, 白石, 等. 端部锚固 CFRP 板加固 RC 梁 IC 剥离过程非线性分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 1-11.  
WANG Z Z, ZHOU Z, BAI S, et al. Nonlinear analysis of IC debonding process for the RC beams strengthened with end-anchored CFRP plates [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 1-11. (in Chinese)
- [14] FERREIRA D, OLLER E, MARÍ A, et al. Analysis of FRP shear strengthening solutions for reinforced concrete beams considering debonding failure [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(5): 04016018.
- [15] 徐俊艳, 郑彬彬, 李贵炳. 外贴 CFRP 增强钢筋混凝土梁许用剥离应变研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7): 70-75.  
XU J Y, ZHENG B B, LI G B. Allowable debonding strain limitation of externally CFRP-strengthened RC beam [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(7): 70-75. (in Chinese)
- [16] CHEN C, CHENG L J. Predicting flexural fatigue performance of RC beams strengthened with externally bonded FRP due to FRP debonding [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(11): 04017082.

(编辑 章润红)