

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.032

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



粘贴铝合金板加固钢筋混凝土梁的界面剪应力

杨立军^{1, 2, 3, 4}, 邓志恒³, 梁朋⁴, 杨海峰³

(1. 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, 南宁 530004; 4. 德成建设集团有限公司, 湖南 常德, 415000)

摘要:为给粘贴铝合金板加固钢筋混凝土(Reinforce Concrete, RC)梁的铝合金板和 RC 梁的连接设计提供依据,对其粘贴界面剪应力开展了理论和试验研究。假设结构胶剪切变形沿厚度方向线性变化,根据粘贴界面位移协调条件,得到了一般荷载作用下的无附加锚固铝合金板加固 RC 梁的粘贴界面剪应力的通解。在此基础上,给出了常见荷载作用下的粘贴界面剪应力解析表达式和最大值。考虑铝合金板厚度和 U 形箍连接等影响因素,设计了 6 根铝合金板加固 RC 梁,对其进行了简支梁三分点加载试验。考虑铝合金板正应力和界面剪应力的关系式,通过密布在铝合金板纵轴线上的应变片测得了铝合金板的粘贴界面剪应力。根据理论计算和试验结果,得到了界面剪应力分布曲线和最大剪应力。研究表明:界面剪应力的理论和试验结果符合较好,呈现相同的变化规律:界面剪应力在板端取得最大值后迅速滑落至横轴附近,裂缝截面界面剪应力呈现波动。随着铝合金板厚度和板端与支座距离变大,板端界面剪应力也越大,结构胶厚度越大,最大界面剪应力越小,设置 U 形箍连接,界面剪应力变小。

关键词:铝合金板;加固;钢筋混凝土梁;界面剪应力;粘贴界面

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)04-0113-11

Interfacial shear stress of reinforce concrete beam strengthened with aluminum alloy plate

Yang Lijun^{1, 2, 3, 4}, Deng Zhiheng³, Liang Peng⁴, Yang Haifeng³

(1. Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Changde 415000, Hunan, P. R. China; 2. College of Civil and Architecture Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, P. R. China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 4. Decheng Construction Group Co. Ltd., Changde 415000, Hunan, P. R. China)

Abstract: The theoretical and experimental researches on the bond interfacial shear stress of the RC beams strengthened with aluminum alloy plate (AAP) were carried out, in order to provide basis for the connection design between AAP and RC beam. It is assumed that the shear deformation of structural

收稿日期:2019-12-01

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,博士生导师, E-mail: dengzh@gxu.edu.cn.

Received:2019-12-01

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

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

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

adhesive changes linearly along the thickness direction. Then the general solutions of the interfacial shear stress of the RC beam strengthened with AAP without anchorage under general loads were obtained according to the displacement coordination condition of the bonding interface. The analytical expression and maximum value of the interfacial shear stress under several common loads were given. Considering the influencing factors such as the thickness of AAP and U-wraps connection, 6 RC beams strengthened with AAP were designed, and the three-point loading tests of simply supported beams were carried out. Based on the relationship between the normal stress and the interfacial shear stress of the AAP, the interfacial shear stresses of the AAP were got by the strain gauge densely attached to the longitudinal axis of the AAP. According to the theoretical and experimental results, the interfacial shear stress distribution curves and the maximum interfacial shear stress were obtained. The results show that the theoretical and experimental results of the interfacial shear stress distribution curves are in good agreement, showing the same change law: the interfacial shear stress quickly falls to the vicinity of the horizontal axis after reaching the maximum at the plate end. After the crack appears, the curve fluctuates at the crack. As the thickness of AAP and the distance between plate end and support become larger, the interfacial shear stress becomes also greater, the thickness of structural adhesive becomes larger, the interfacial shear stress becomes smaller, and setting U-wraps connection, the interfacial shear stress becomes smaller.

Keywords: aluminum alloy plate; strengthening; reinforced concrete beam; interfacial shear stress; bonding surface

铝合金材料具有良好的力学性能:较高的强质比(是普通钢材的3倍),不腐蚀,较好的变形性能,力学性能低温不敏感,具有特殊的光泽与质感,在工程中应用广泛^[1-2],尤其适合沿海侵蚀环境、潮湿、低温和高寒等极端环境混凝土结构的加固^[3]。目前钢板和FRP作为钢筋混凝土(Reinforce Concrete, RC)结构的加固材料得到了充分的研究^[4-6],但钢板容易腐蚀,腐蚀后力学性能退化;FRP是脆性材料,破坏前没有明显的征兆。由于铝合金相对于这两种材料具有明显的优点,是一种理想的RC结构加固材料,开始吸引了研究者的兴趣。

目前,对铝合金加固RC梁的研究集中在抗剪、抗弯性能及破坏模式方面。Abdalla等^[7]完成了不同方向铝合金板加固RC梁的抗剪试验,发现其抗剪承载能力可比未加固梁提高24%~89%;Obeidah^[8]和Abu-Obeidah等^[9]研究了不同形状与不同方向外粘铝板加固RC梁的抗剪性能,发现铝合金板加固RC梁的抗剪承载能力比基准梁提高10%~89%,并在此试验基础上,完成了三维非线性有限元模型开发,可用于铝合金板加固RC梁的抗剪性能预测;Rasheed等^[10]完成了外粘铝板加固RC梁的抗弯承载能力试验研究,发现在端部锚固条件下,RC梁抗弯承载能力提高的同时,其延性相比CFRP加固梁提高13%到40%左右;Xing等^[11]以纵向配筋率及混凝土强度为主要变量,完成了11根

铝合金筋体加固混凝土梁的抗弯试验研究;柳红滨^[12]基于板端钢筋是由于板端弯矩和板端裂缝间界面剪应力共同作用下屈服的假设,建立了板端弯剪破坏的破坏准则和计算公式,对铝合金加固RC梁破坏模式开展了理论与试验研究;宋启玺^[13]通过对铝合金筋体外预应力加固RC梁的理论研究和有限元模拟后发现,用同等强度的铝合金加固RC梁,加固梁的承载能力得到较大幅度提高的同时,加固梁的延性也会得到了相应的提高。以上研究表明铝合金加固RC梁在提高RC梁的承载力同时具有很好的延性。铝合金与RC梁的粘贴界面力学行为关乎两种材料是否能协同工作,是铝合金板加固RC梁可靠工作的关键因素。这方面的研究目前未有报导,虽然杨立军等^[14-15]通过铝合金板和混凝土块体的面内单剪试验对其粘结性能和粘结强度开展了研究,但因为其单向受力状态不同于铝合金板加固RC梁的弯剪复合受力状态,其成果仅能作为铝合金板加固RC梁粘贴界面力学行为的工作基础。

笔者通过铝合金板纵轴线上密布应变片的铝合金板加固RC梁简支梁三分点加载试验,得到了铝合金板与RC梁的粘贴界面剪应力;推导了一般荷载作用下的无附加锚固铝合金板加固RC梁的粘贴界面剪应力的通解,得到了常见荷载作用下的粘贴界面剪应力解析表达式和最大值。结合理论和试验研究结果,分析了铝合金板与RC梁的粘贴界面剪

应力分布规律,为铝合金板加固 RC 梁的工程应用提供了依据。

1 界面剪应力的理论研究

1.1 一般荷载作用下的界面剪应力的通解

如图 1 所示铝合金板加固 RC 梁,铝合金板与 RC 梁通过满布的结构胶粘贴连接,没有设置附加锚固。设梁上作用任意分布力 $q(x)$, 跨度 l , RC 梁宽为 b , 高为 h , 形心轴与底边距离 y_0 , 铝合金板板端与支座距离 l_0 。设 RC 梁截面形心轴为 x 轴, y 轴通过铝合金板板端。

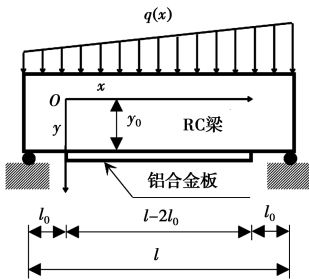


图 1 铝合金板加固 RC 梁

Fig. 1 RC beam strengthened with AAP

设结构胶界面剪应力 $\tau(x)$, 由图 2 所示微元体, 有

$$\frac{dN_c(x)}{dx} = b_a \tau(x), \frac{dM_c(x)}{dx} = Q_c(x) - b_a \tau(x) y_0 \quad (1)$$

$$\frac{dN_a(x)}{dx} = b_a \tau(x) \quad (2)$$

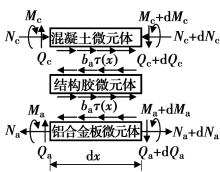


图 2 微元体

Fig. 2 The small elements

设结构胶水平位移 u_p , 由于位移协调, 上界面处水平位移为 RC 梁底面水平位移 u_c , 下界面处水平位移为铝合金板上表面水平位移 u_a 。考虑到结构胶厚度很小, 设剪切变形沿厚度 t_p 线性变化, 则结构胶剪应变 γ_p 为

$$\gamma_p = \frac{u_a - u_c}{t_p} \quad (3)$$

结构胶上、下界面处水平位移 u_c 和 u_a 分别为

$$\frac{du_c}{dx} = \frac{M_c(x) y_0}{E_c I_c} - \frac{N_c(x)}{E_c A_c}, \frac{du_a}{dx} = \frac{N_a(x)}{E_a A_a} - \frac{M_a(x) t_a}{2 E_a I_a} \quad (4)$$

式中: E_c 、 I_c 和 A_c 分别为 RC 梁弹性模量、截面惯性矩和面积; E_a 、 I_a 和 A_a 分别为铝合金板的弹性模量、截面惯性矩和面积。

设结构胶剪切模量为 G_p , 在剥离破坏前剪应力-剪应变关系符合胡克定律^[16], 即

$$\tau(x) = G_p \gamma_p \quad (5)$$

铝合金板厚度相对于 RC 梁高很小, 相应的惯性矩相对更小, 其承担的弯矩远小于 RC 梁, 设所有弯矩 $M(x)$ 由 RC 梁承担, 即有 $M_a(x) = 0, M_c(x) = M(x)$ 。这样, 对式(5)求导, 结合式(3)和式(4), 有

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{G_p}{t_p} \left[\frac{N_a(x)}{E_a A_a} + \frac{N_c(x)}{E_c A_c} - \frac{M(x) y_0}{E_c I_c} \right] \quad (6)$$

再次对式(6)求导, 并将式(1)~式(2)代入, 可得

$$\frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - \gamma^2 \tau(x) = -\lambda Q(x) \quad (7)$$

式中: $\lambda = \frac{G_p y_0}{t_p E_c I_c}, \gamma^2 = \frac{G_p b_a}{t_p} \left(\frac{1}{E_a A_a} + \frac{1}{E_c A_c} + \frac{y_0^2}{E_c I_c} \right)$ 。

式(7)即为界面剪应力 $\tau(x)$ 的控制方程, 其解为

$$\tau(x) = C_1 \cosh(\gamma x) + C_2 \sinh(\gamma x) + \tau_1(x) \quad (8)$$

式(8)中: C_1 、 C_2 为积分常数, 由边界条件确定, $\tau_1(x)$ 是对应于 $-\lambda Q(x)$ 项的特解。

式(8)即为任意分布力 $q(x)$ 作用下的无附加锚固铝合金板加固 RC 梁的界面剪应力 $\tau(x)$ 的通解。

1.2 常见荷载作用下的界面剪应力理论解

现在推导四集中荷载作用的铝合金板加固 RC 梁界面剪应力的理论解, 如图 3 所示。梁的剪力方程 $Q(x)$ 为

$$\begin{cases} Q_1(x) = P & (x < l_1 - l_0) \\ Q_2(x) = 0 & (l_1 - l_0 \leq x < l - l_1 - l_0) \\ Q_3(x) = -P & (l - l_1 - l_0 \leq x \leq l - 2l_0) \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 得到四集中荷载作用下的铝合金板加固 RC 梁的界面剪应力解为

$$\begin{cases} \tau'(x) = C_1 \cosh(\gamma x) + C_2 \sinh(\gamma x) + \frac{\lambda P}{\gamma^2} & (x < l_1 - l_0) \\ \tau''(x) = C_3 \cosh(\gamma x) + C_4 \sinh(\gamma x) & (l_1 - l_0 \leq x < l - l_1 - l_0) \\ \tau'''(x) = C_5 \cosh(\gamma x) + C_6 \sinh(\gamma x) - \frac{\lambda P}{\gamma^2} & (l - l_1 - l_0 \leq x \leq l - 2l_0) \end{cases} \quad (10)$$

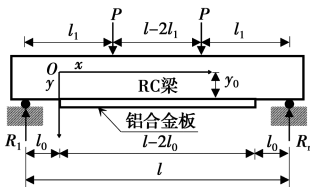


图 3 四集中荷载作用的铝合金板加固 RC 梁

Fig. 3 RC beam strengthened with AAP under four concentrated loads

当 $x=0$ 时, $N_a=N_c=0$, 由式(6)可以得到

$$\left. \frac{d\tau'(x)}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{G_p y_0}{t_p E_c I_c} M(0) = -\lambda M(0) \quad (11)$$

由梁的对称性, 有

$$\text{当 } x=0.5l-l_0 \text{ 时, } \tau''(x)=0 \quad (12)$$

根据界面剪应力 $\tau(x)$ 连续性条件, 有

$$\begin{aligned} \tau'(l_1-l_0) &= \tau''(l_1-l_0), \\ \tau''(l-l_1-l_0) &= \tau'''(l-l_1-l_0), \\ \left. \frac{d\tau'(x)}{dx} \right|_{x=l_1-l_0} &= \left. \frac{d\tau''(x)}{dx} \right|_{x=l_1-l_0}, \\ \left. \frac{d\tau''(x)}{dx} \right|_{x=l-l_1-l_0} &= \left. \frac{d\tau'''(x)}{dx} \right|_{x=l-l_1-l_0} \end{aligned} \quad (13)$$

这样, 由 6 个边界条件得到 6 个方程, 可以求出 6 个积分参数 $C_1 \sim C_6$ 为

$$C_2 = -\frac{\lambda M(0)}{\gamma}, C_4 = C_2 - \frac{\lambda P}{\gamma^2} \sinh[\gamma(l_1-l_0)] \quad (14a)$$

$$C_3 = -C_4 \tanh[\gamma(0.5l-l_0)] \quad (14b)$$

$$C_1 = C_3 + C_4 \coth[\gamma(l_1-l_0)] - C_2 \coth[\gamma(l_1-l_0)] \quad (14c)$$

$$C_6 = C_4 - \frac{\lambda P}{\gamma^2} \sinh[\gamma(l-l_1-l_0)] \quad (14d)$$

$$C_5 = C_3 + C_4 \coth[\gamma(l-l_1-l_0)] - C_6 \coth[\gamma(l-l_1-l_0)] \quad (14e)$$

将积分常数 $C_1 \sim C_6$ 的值代入式(10), 即可得到四集中荷载作用的铝合金板粘贴界面的剪应力 $\tau(x)$ 的解析式。当 $l_1=l/3$ 时, 即为简支梁三分点加载时铝合金板粘贴界面的剪应力 $\tau(x)$ 的解析式。

最大界面剪应力 τ_{\max} 在 $x=0$ 即铝合金板板端取得, 其表达式为

$$\tau_0 = C_1 + \frac{\lambda P}{\gamma^2} \quad (15)$$

同样, 由式(8)可以求得其他荷载作用时的铝合金板加固 RC 梁的界面剪应力的解析解。

当如图 3 所示铝合金板加固 RC 梁作用均布荷载 q 时, 界面应力理论解 $\tau(x)$ 和最大界面剪应力

τ_{\max} 为

$$\tau(x) = D_1 \cosh(\gamma x) + D_2 \sinh(\gamma x) + \frac{\lambda q}{\gamma^2} \left(\frac{l}{2} - l_0 - x \right) \quad (16)$$

$$\tau_{\max} = D_1 + \frac{\lambda q}{\gamma^2} \left(\frac{l}{2} - l_0 \right) \quad (17)$$

式中: $D_2 = \frac{\lambda}{\gamma} \left(\frac{q}{\gamma^2} - M(0) \right)$;

$$D_1 = -D_2 \tanh\left(\gamma \left(\frac{l}{2} - l_0 \right)\right).$$

当如图 3 所示铝合金板加固 RC 梁跨中作用集中荷载 P_1 时, 界面应力理论解 $\tau(x)$ 和最大界面剪应力 τ_{\max} 为

$$\tau(x) = E_1 \cosh(\gamma x) + E_2 \sinh(\gamma x) + \frac{\lambda P_1}{2\gamma^2} \quad (18)$$

$$\tau_{\max} = E_1 + \frac{\lambda P_1}{2\gamma^2} \quad (19)$$

式中: $E_2 = -\frac{\lambda M(0)}{\gamma}$; $E_1 = \operatorname{sech}\left(\gamma \left(\frac{l}{2} - l_0 \right)\right) \left[\frac{\lambda P_1}{2\gamma^2} - E_2 \sinh\left(\gamma \left(\frac{l}{2} - l_0 \right)\right) \right]$ 。

2 界面剪应力的试验研究

2.1 试验设计

以三分点加载的铝合金板加固 RC 梁来验证界面剪应力理论解, 铝合金板加固 RC 梁示意图如图 4 所示, 试验梁净跨 2 700 mm, 梁宽 b 梁高 $h = 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。通过工字钢分配梁对试验梁三分点进行加载, 形成了长 900 mm 的纯弯段 BC 和剪弯段 AB、CD。箍筋和架立筋采用 HPB300 级钢筋, 架立筋 28, 纯弯段箍筋 8@180, 剪弯段箍筋 8@100; 梁底配置纵筋 212, HRB400 级钢筋。混凝土设计强度等级为 C35。RC 梁端部附近区域弯矩较小, 仅在纯弯段及纯弯段附近 550 mm 区域内贴板加固, 为了贴板方便, 铝合金板宽度稍小于 RC 梁宽度, 取铝合金板长度 $l_a \times$ 宽度 b_a 为 2 000 mm \times 180 mm, 厚度 t_a 有 2 mm, 4 mm 和 6 mm 3 种规格, 型号为 6061-T6。

为便于粘贴铝合金板, 翻转 RC 梁使受拉底面朝上。对铝合金板和混凝土粘贴界面进行打磨糙化、吹风机吹尘和乙醇清洗, 粘贴界面自然干糙后在 RC 梁底面对称均匀涂抹 3 mm 厚 JN 建筑结构胶, 粘贴铝合

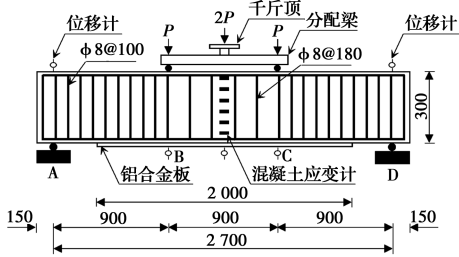


图 4 试验梁示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test beams

金板时均匀压紧铝合金板,使结构胶缓缓均匀从板的边缘挤出,此后在铝合金板上均匀平铺重物,直至结构胶达到设计强度后卸去重物。部分铝合金板加固 RC 梁在结构胶粘贴的基础上,在板端或梁的三分点处(即 B、C 位置)设置了铝合金 U 形箍附加锚固,U 形箍由宽 50 mm 厚 5 mm 的 5052-T6 铝合金板冷弯而成,U 形箍内侧均匀涂抹 3 mm 厚 JN 建筑结构胶后固定在 RC 梁预定位置,U 形箍顶部采用 M12 化学螺栓固定在 RC 梁侧面,化学螺栓钻入混凝土 80 mm,如图 5 所示。用 U0、U1 和 U2 区分 U 形箍设置情况:U0 表示没有设置 U 形箍,U1 表示仅在铝合金板板端设置 U 形箍,U2 表示在铝合金板板端和梁的三分点处均设置 U 形箍。

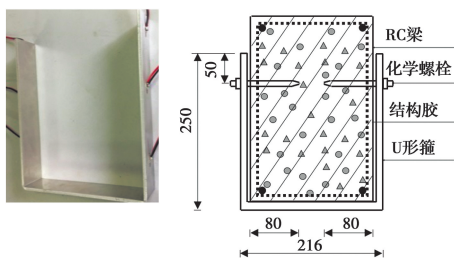


图 5 U 形箍和 U 形箍连接

Fig. 5 U-wraps and its connection

混凝土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 RC 试验梁同时浇筑了 3 个 150 mm × 150 mm × 150 mm 混凝土立方体标准试块,试块与 RC 梁在同样环境下养护 28 d 后,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同养试块进行了抗压试验,测得立方体抗压强度为 41.3 MPa;铝合金材料从深圳市宝安区西乡鑫锦发铜铝材料行购买,力学性能如表 1 所示。表 1 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 ϵ_{au} 对应的极限

强度, n 为反映材料应变硬化的参数。JN 建筑结构胶由湖南固特邦土木技术发展有限公司生产,力学性能如表 2 所示。表 2 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, ϵ_{pu} 为伸长率。钢筋为柳州钢铁股份有限公司生产,力学性能如表 3 所示。表 3 中, f_y 和 f_u 分别为钢筋的屈服强度和极限强度, ϵ_y 、 ϵ_{su} 和 E_s 分别为钢筋的屈服应变、极限应变和弹性模量。

表 1 铝合金板力学性能

Table 1 Mechanical properties of aluminium alloy plates

E_a /MPa	$f_{0.1}$ /MPa	$f_{0.2}$ /MPa	f_{au} /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 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	$\epsilon_{pu}/\%$
36	65	92	6.1	1.8

表 3 钢筋力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel bars

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

考虑铝合金板厚度和 U 形箍设置方式等因素,设计了 6 根铝合金板加固 RC 梁,试验梁的参数如表 4 所示。

表 4 试验梁的参数

Table 4 Parameters of test beams

序号	试件编号	板厚/mm	U 形箍位置	破坏方式
1	SL-2-U0	2		适筋破坏
2	SL-4-U0	4		板端剥离破坏
3	SL-4-U1	4	板端	适筋破坏
4	SL-6-U0	6		板端剥离破坏
5	SL-6-U1	6	板端	中部裂缝剥离破坏
6	SL-6-U2	6	板端、梁的三分点	适筋破坏

液压千斤顶以 5 kN 为一级对试验梁施加单调静力荷载,每级荷载持荷 5 min,直到试件破坏,加载图如图 6 所示。试件破坏的标准为:1)RC 梁最大裂缝宽度达到 1.5 mm,或挠度达到跨度的 1/50;2)受压区混凝土压碎;3)铝合金板与 RC 梁剥离。

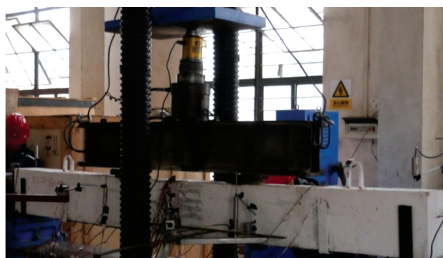


图 6 试验梁加载图

Fig. 6 Drawing of test beams under loading

2.2 测点布置

在混凝土梁跨中侧面沿高度方向布置 6 个混凝土应变片;试验梁支座、跨中和纯弯段端点布置位移计,二者布置示意图如图 4 所示。U 形箍两个侧面各布置 3 个应变片,如图 5 所示。主筋在纯弯段三分点处各设置一个应变片,纯弯段端点处箍筋中部布置一个应变片,如图 7 所示。

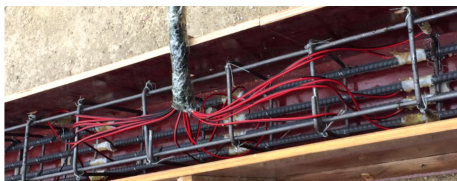


图 7 钢筋应变片布置

Fig. 7 Arrangement of strain gauges of bars

液压千斤顶和反力板之间放置压力式荷重传感器测试荷载大小。铝合金板纵轴线上每相距 50 mm 布置一个应变片,从左到右编号分别为 A1~A39,应变片布置如图 8 所示(图中只画出了对称的左半部分)。荷载、应变传感器等信号通过 DH3821 测试分析系统实时采集,存储在计算机中。

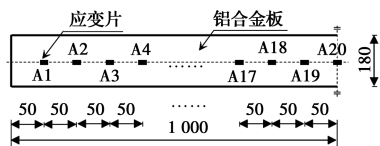


图 8 铝合金板应变片布置示意图

Fig. 8 AAP strain gauges arrangement diagram

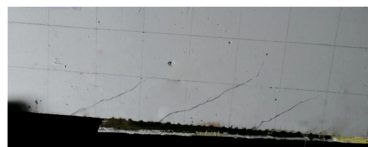
2.3 试验结果

如表 4 所示,试验梁的破坏方式有:钢筋和铝合金板屈服后混凝土压碎——适筋破坏;铝合金板板端剥离破坏;中部裂缝剥离破坏。3 种破坏的照片如图 9 所示。适筋破坏是延性破坏,后两种破坏统称为剥离破坏,属于早期破坏,具有突然性,是脆性破坏。发生板端剥离破坏时,界面剪应力将铝合金板板端从梁体分离,破坏界面平行于板面,从板端向

跨中发展。发生中部裂缝剥离破坏时,界面剪应力将梁中部裂缝间的混凝土块体从梁体撕裂,沿纵筋向板端发展。



(a) SL-6-U2 适筋破坏



(b) SL-4-U0 板端剥离破坏



(c) SL-6-U1 中部裂缝剥离破坏

图 9 试验梁破坏方式

Fig. 9 Failure modes of test beams

试验梁裂缝发展态势基本相同,加载至 10%~25% 极限荷载 P_u 时,纯弯段开始出现竖向裂缝,裂缝一出现就上升到一定的高度;加载至 $0.5P_u$ 左右时,弯剪段出现斜向裂缝,所有裂缝宽度和高度随着裂缝变大而变大。图 10 给出了 SL-4-U1 的裂缝分布展开图。图 10 中,最上面一排数字代表该点与梁的支座之间距离,单位为 cm,裂缝处数字代表该裂缝出现时千斤顶施加给梁的荷载值,单位为 kN。

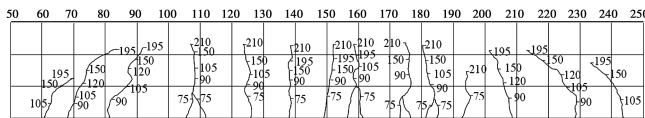


图 10 SL-4-U1 裂缝展开图

Fig. 10 Unwinding diagram of the cracks on the surfaces of SL-4-U1

图 11 为 SL-4-U1 在三分点荷载 $P=20、40、\dots、100$ kN 作用下截面应变沿梁高度方向分布图。图中纵坐标 x 代表到梁底的距离,横坐标 ϵ 代表相应位置截面应变。可以看出,当荷载增大时,中和轴向梁顶移动,截面平均应变沿截面高度方向呈线性分布,符合平截面假定。说明铝合金板和 RC 梁连接

良好,连接能有效地抵抗二者的相对滑移,共同抵抗外力,有很好的承载性能。

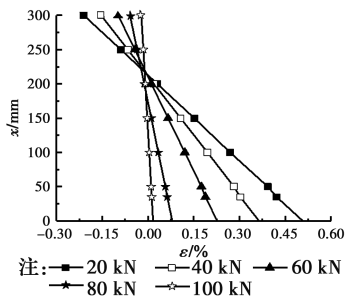


图 11 SL-4-U1 应变分布

Fig. 11 Strain distribution of SL-4-U1

图 12 给出了试验梁三分点荷载 P -跨中挠度 f 曲线。由图 12 可以看出,适筋破坏的试验梁不但具有很好的承载能力,而且具有很好的延性,剥离破坏的试验梁承载能力和延性均有所降低。

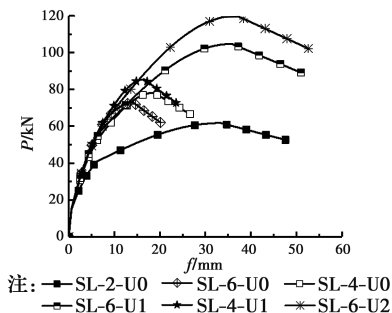


图 12 荷载-挠度曲线

Fig. 12 Load-deflection curves

图 13 给出了试验梁三分点荷载 P -铝合金板应变 ϵ_a 曲线。由图 13 可以看出,相对于剥离破坏的试验梁,适筋破坏的试验梁利用了铝合金板强度的同时,发挥了铝合金板良好变形的特性,铝合金板最大应变 ϵ_a 介于 $0.6\% \sim 0.8\%$,试验梁具有很好的延性。

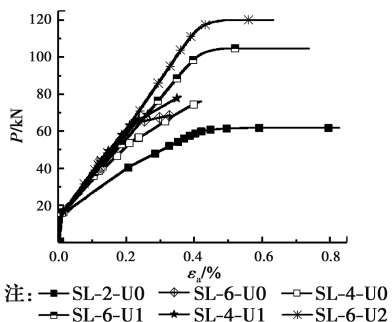


图 13 荷载-铝合金板应变曲线

Fig. 13 Load-strain of AAP curves

2.4 界面剪应力的试验解

设图 2 铝合金板微元体厚度 t_a ,宽度 b_a ,正应力 σ_a ,则其截面积 $A_a = b_a t_a$,将轴力 $N_a = \sigma_a b_a t_a$ 代入式(2),有

$$\tau = t_a \frac{d\sigma_a}{dx} \quad (20)$$

铝合金板正应力 σ_a 可以由应变片测得的正应变 ϵ_a 根据式(21)得到。

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a} + 0.002 \left(\frac{\sigma_a}{f_{0.2}} \right)^n \quad (21)$$

这样,由相邻两点的正应力 $\sigma_{a,i}, \sigma_{a,i+1}$ 可以得到其间的界面剪应力

$$\tau_i = -t_a \frac{\sigma_{a,i} - \sigma_{a,i+1}}{\Delta_{i,i+1}} \quad (22)$$

式中: $\Delta_{i,i+1}$ 是第 i 个和第 $i+1$ 个应变片的间距,试验中 $\Delta_{i,i+1} = 50 \text{ mm}$ 。

这样,根据式(21),由试验测得的铝合金板应变片的读数 $\epsilon_{a,i}$,可以得到铝合金板各点应力 $\sigma_{a,i}$,继而由式(22)即可得到各点的界面剪应力试验值 τ_i 。表 5 以试验梁 SL-2-U0 在三分点荷载 $P=10 \text{ kN}$ 作用下为例,给出了界面剪应力试验值 τ_i 求解过程,表中 x 为该点与铝合金板端的距离,考虑结构对称,仅给出了 $0 \sim 1000 \text{ mm}$ 内界面剪应力。

表 5 界面剪应力试验值求解过程(SL-2-U0, $P=10 \text{ kN}$)

Table 5 Solving process of test value of interfacial shear stress(SL-2-U0, $P=10 \text{ kN}$)

$x_i /$ mm	$\epsilon_{a,i} /$ 10^{-6}	$\sigma_{a,i} /$ MPa	$\tau_i /$ MPa	$x_i /$ mm	$\epsilon_{a,i} /$ 10^{-6}	$\sigma_{a,i} /$ MPa	$\tau_i /$ MPa
0	0	0	0.283	550	274	18.92	0.008
50	103	7.08	0.186	600	277	19.12	0.003
100	170	11.72	0.101	650	278	19.20	0.004
150	206	14.23	0.065	700	280	19.30	-0.004
200	230	15.84	0.042	750	278	19.21	0.003
250	245	16.89	0.024	800	279	19.27	0.004
300	253	17.49	0.016	850	281	19.36	0.004
350	259	17.89	0.013	900	282	19.46	0.003
400	264	18.23	0.011	950	283	19.52	-0.004
450	268	18.50	0.009	1000	282	19.43	0.004
500	272	18.73	0.007	1050	283	19.52	

2.5 界面剪应力的影响因素

根据试验梁在三分点荷载 $P=50 \text{ kN}$ 作用下粘结界面的剪应力试验值,做出界面剪应力的影响因

素柱状图,如图 14 所示。由图 14 可知:

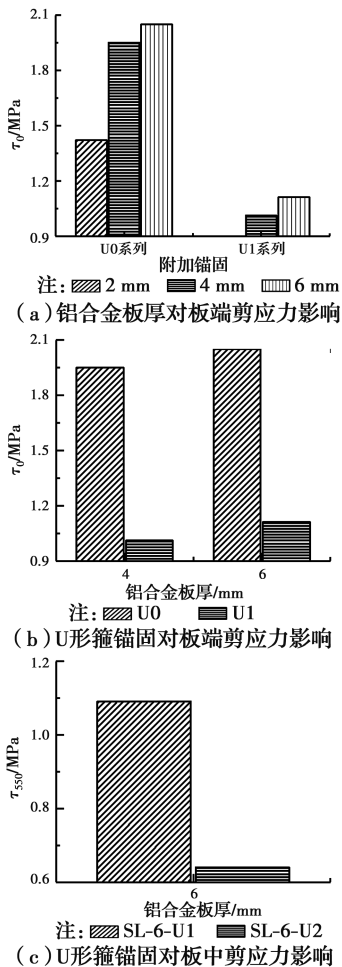


图 14 界面剪应力的影响因素

Fig. 14 Influencing factors on interfacial shear stress

1) 铝合金板厚度越大,板端剪应力 τ_0 越高。如图 14(a)所示,当不设 U 形箍锚固时(即图 14(a)中的 U0 系列),试验梁 SL-2-U0、SL-4-U0、SL-6-U0 在相同荷载(即 $P=50$ kN)作用下,板端剪应力 τ_0 分别为 1.42、1.95 和 2.05 MPa;当在板端设置 U 形箍锚固时(即图 14(a)中的 U1 系列),试验梁 SL-4-U1、SL-6-U1 板端剪应力 τ_0 从 0.99 MPa 增加到了 1.11 MPa。式(16)表明,界面剪应力与铝合金板厚及其应力变化率之乘积成正比。因而铝合金板厚度变大,界面剪应力随之变大。

2) 在板端设置 U 形箍锚固后,板端界面剪应力 τ_0 变小。如图 14(b)所示,铝合金板厚 $t_a=4$ mm 时,板端增设 U 形箍的试验梁(SL-4-U1)板端剪应力 $\tau_0=0.99$ MPa,比 SL-4-U0 的板端剪应力 $\tau_0=1.95$ MPa 要小;同样,SL-6-U1 的板端剪应力 $\tau_0=1.11$ MPa,小于 SL-6-U0 的板端剪应力 $\tau_0=$

2.05 MPa。由于铝合金板将部分界面剪应力通过 U 形箍传递给 RC 梁,从而铝合金板-结构胶-RC 梁界面的剪应力变小。

3) 在梁的三分点处设置 U 形箍后,该处粘贴界面的剪应力 τ_{550} 变小(U 形箍距离板端 550 mm,故其剪应力用 τ_{550} 表示)。如图 14(c)所示,SL-6-U2 的界面剪应力 $\tau_{550}=0.64$ MPa,小于 SL-6-U1 的界面剪应力 $\tau_{550}=1.09$ MPa。其原因和板端设置的 U 形箍相同。

3 界面剪应力的理论解和试验解对比

为了与界面剪应力的理论解对比,图 15 给出了无附加锚固的铝合金板加固 RC 梁 SL-2-U0、SL-4-U0 和 SL-6-U0 在三分点荷载 $P=10$ 、20 和 40 kN 作用下铝合金板粘贴界面剪应力分布曲线的试验结果。

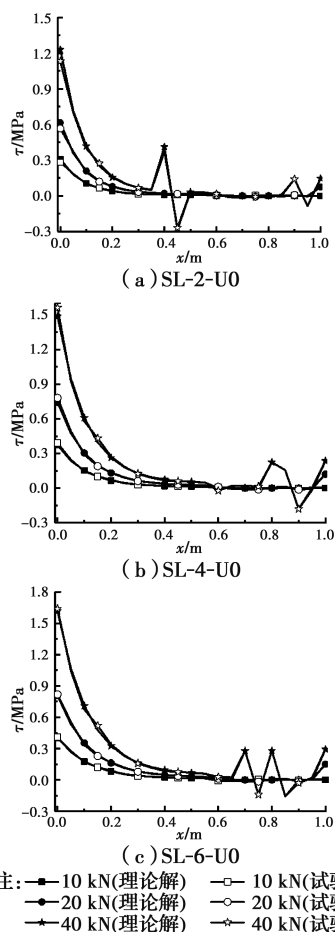


图 15 界面剪应力分布试验曲线和理论曲线对比

Fig. 15 Comparisons of interfacial shear stress distribution curves between the test and the theory

取 $l=2\ 700\text{ mm}$ 、 $l_0=350\text{ mm}$ 、 $l_1=900\text{ mm}$, 结构胶、混凝土和铝合金板等材料力学性能取表 1~表 3 中相应数值, RC 梁截面惯性矩 I_c 及形心轴与底边距离 y_0 按试验梁裂缝开展实际情况确定, 由式 (7) 求得 λ 和 γ 的值, 将 λ 和 γ 的值代入式 (14), 得到积分常数 $C_1\sim C_6$, 继而由式 (10) 求得界面剪应力 τ_i 的理论解。为了便于和试验结果对比, 将相应试验梁粘贴界面剪应力理论结果, 一并列在图 15 中。图 15 中横坐标 x 为与铝合金板左边板端的距离, 由于结构对称, 只给出 $0\sim 1\text{ m}$ 的剪应力。

从图 15 可以看出, SL-2-U0、SL-4-U0 和 SL-6-U0 等 3 根试验梁的铝合金板粘贴界面剪应力分布曲线的理论解和试验解相差不大, 二者符合较好。在 10 kN 荷载作用下, 铝合金板粘贴界面剪应力在

板端取得最大值, 然后迅速下降, 在弯剪区 ($x\leq 550\text{ mm}$) 时略大于零, 曲线平行横轴, 进入纯弯区 ($x>550\text{ mm}$) 剪应力基本为零。在 20 、 40 kN 荷载作用下, 受拉侧混凝土出现裂缝, 裂缝处混凝土退出工作, 拉力由铝合金板和钢筋承担, 铝合金板正应力的变化使得裂缝处界面剪应力激增, 曲线呈现波动。

界面剪应力在板端取得最大值, 表 6 给出了 SL-2-U0、SL-4-U0 和 SL-6-U0 在三分点荷载 $P=15$ 、 37.5 和 60 kN 作用下铝合金板板端界面剪应力的理论值 τ_{01} 、试验值 τ_{02} 和二者相对误差 δ , $\delta=(\tau_{01}-\tau_{02})/\tau_{02}$ 。从表 6 可以看出, 理论值 τ_{01} 和试验值 τ_{02} 符合较好, 相对误差 δ 最大值小于 5.37% , 验证了理论方法的可靠性。

表 6 板端剪应力理论值与试验值

Table 6 Theoretical and test plate endpoint shear stresses

试件	$P=15\text{ kN}$			$P=37.5\text{ kN}$			$P=60\text{ kN}$		
	τ_{01}/MPa	τ_{02}/MPa	$\delta/\%$	τ_{01}/MPa	τ_{02}/MPa	$\delta/\%$	τ_{01}/MPa	τ_{02}/MPa	$\delta/\%$
SL-2-U0	0.46	0.44	5.37	1.15	1.21	-4.94	1.85	1.93	-4.31
SL-4-U0	0.56	0.59	-5.12	1.39	1.35	3.41	2.23	2.30	-2.82
SL-6-U0	0.61	0.62	-2.34	1.52	1.48	2.35	2.42	2.49	-2.63

4 界面剪应力特性分析

4.1 界面剪应力分布曲线

为了分析界面剪应力的变化规律, 利用三分点加载的铝合金板加固 RC 梁界面剪应力的理论解 (式 (10)、式 (14)), 材料性能、梁参数及截面惯性矩 I_c 按试验梁裂缝开展实际情况选取, 图 16(a) 给出了 SL-2-U0 在 $0.1P_u$ 、 $0.3P_u$ 、 $0.5P_u$ 、 $0.7P_u$ 和 $0.9P_u$ 作用下的剪应力分布曲线 (P_u 为试验梁的极限荷载)。从图 16(a) 可以看出:

1) 在 $0.1P_u$ 作用下界面剪应力在板端取得最大值, 然后迅速下降到零值附近, 其后应力基本没有变化。

2) 在 $0.3P_u$ 作用下试验梁纯弯区梁底混凝土出现裂缝, 裂缝所在截面应力发生重分配, 铝合金板应力发生突变, 纯弯区界面剪应力曲线呈波浪状。

3) 随着荷载的增大, 混凝土裂缝变多, 界面剪应力除板端应力变大以外, 其波浪也越来越多; 当荷载不大于 $0.5P_u$ 时, 波浪只在纯弯区出现; 荷载达到 $0.7P_u$ 后, 弯剪区裂缝的出现使得该区域剪应力也

呈波浪状。

为了与三分点加载的铝合金板加固 RC 梁界面剪应力分布曲线进行比较, 材料性能、梁参数及截面惯性矩 I_c 相关参数按试验梁 SL-2-U0 选取, 并按荷载相等的原则将三分点集中荷载 P 等效为跨中集中荷载 P_1 和均布荷载 q , SL-2-U0 的极限荷载 P_u 为 61.77 kN , 则三分点集中荷载 $P=0.1P_u$ 、 $0.3P_u$ 、 $0.5P_u$ 、 $0.7P_u$ 和 $0.9P_u$ 时, 跨中集中荷载 $P_1=2P$, 其值分别为 12.35 、 37.06 、 61.77 、 86.48 、 111.19 kN ; 均布荷载 $q=2P/l$, 其值分别为 4.58 、 13.73 、 22.88 、 32.03 、 41.18 kN/m 。分别根据跨中集中荷载 P_1 作用下的界面剪应力的理论解式 (16)、均布荷载 q 作用下的界面剪应力的理论解式 (18), 得到界面剪应力分布曲线, 如图 16(b) 和 16(c) 所示。从图 16 中可以看出, 3 种荷载作用形式的界面剪应力分布曲线具有相似的分佈规律: 在板端取得最大值, 然后以曲线形式迅速衰减到横轴附近。另外, 由于无法预知 RC 梁裂缝分布情况, 跨中集中荷载和均布荷载作用下的界面剪应力计算时全梁采用统一的梁参数及截面惯性矩, 曲线是一条光滑曲线, 与实际界

面剪应力分布曲线略有差异。事实上,由于 RC 梁裂缝开展的随机性,无法采用一给定的理论解预测带有随机性的界面剪应力的具体分布。由于界面剪应力的最大值在板端取得,该值理论值与试验值符合良好,与裂缝无关,界面剪应力最大值是工程上最主要的关注点,并且理论解能够反映界面剪应力的变化规律,因此不影响理论解对实际工程的指导价值。

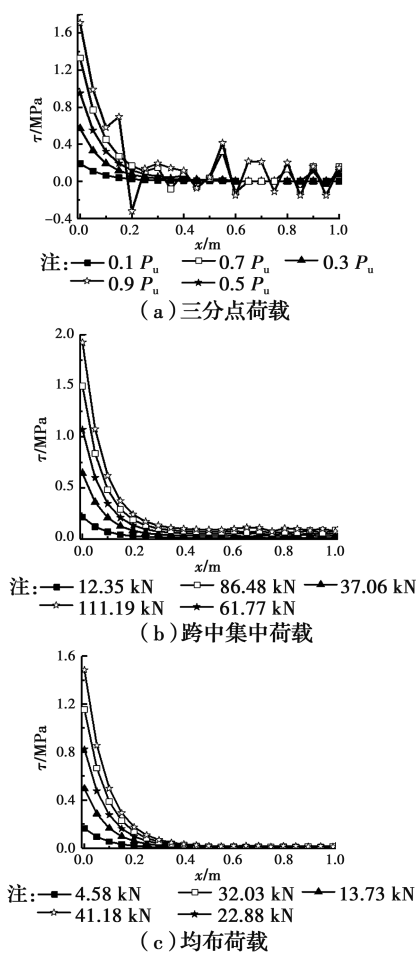


图 16 界面剪应力分布曲线

Fig. 16 The curves of interfacial shear stress distribution

4.2 板端界面剪应力

最大界面剪应力是工程中最主要的关注点,最大界面剪应力在板端取得。之前根据试验结果讨论了铝合金板厚和附加锚固对最大界面剪应力 τ_{\max} 的影响,现在利用常见荷载作用下的界面剪应力最大值理论解式(15)、式(17)和式(19)、讨论荷载形式、板端与支座距离 l_0 和结构胶厚度 t_p 对最大界面剪应力 τ_{\max} 的影响。表 7 给出了三分点集中荷载 $P=25$ kN、跨中集中荷载 $P_1=2P=50$ kN 和均布荷载 $q=2P/l=18.52$ kN/m 的铝合金板加固梁的板端

界面剪应力,除表中给定的参数外,其他参数均按试验梁 SL-4-U0 选取。比如,当表中给定板端与支座距离 l_0 时,其结构胶厚度 t_p 按试验中 3 mm 选取;当表中给定结构胶厚度 t_p 时,其板端与支座距离 l_0 按试验中 350 mm 选取。

表 7 最大界面剪应力理论值

Table 7 The maximum interfacial shear stresses

荷载形式	N/mm ²					
	l_0 /mm			t_p /mm		
	0	200	400	2	4	6
跨中集中荷载	0.03	0.60	1.16	1.43	0.84	0.66
三分点集中荷载	0.03	0.54	1.06	1.30	0.76	0.60
均布荷载	0.02	0.50	0.90	1.13	0.66	0.52

从表 7 可以看出,相同条件下不同荷载形式的最大界面剪应力,跨中集中荷载时最大,均布荷载时最小,亦即荷载分布越分散和越均匀,最大界面剪应力 τ_{\max} 越小;当其他参数相同时,板端与支座距离 l_0 越小,最大界面剪应力越小,加固时宜取较小的 l_0 值,当然 l_0 越小,所需的加固材料越多;当其他参数相同时,结构胶厚度 t_p 越大,最大界面剪应力越小;但实际工程中并不是结构胶厚度 t_p 越大越好,结构胶厚度 t_p 越大,发生胶层撕裂破坏的可能性变大,对施工技术和结构胶质量提出了更高的要求。

5 结论

1) 根据粘贴界面位移协调条件,推导了一般荷载作用下无附加锚固的铝合金板加固 RC 梁的界面剪应力的通解,在此基础上,得到了常见荷载作用下的界面剪应力理论解及其最大值,理论解与试验结果符合较好,验证了本文理论方法的可靠性。

2) 在 RC 梁裂缝出现以前,界面剪应力在板端取得最大值,随着与板端距离的变大,界面剪应力迅速衰减至零值附近。裂缝出现以后,裂缝截面界面剪应力呈波浪变化。

3) 板端界面剪应力随着铝合金板的厚度和板端与支座距离变大,最大界面剪应力越大;结构胶厚度越大,最大界面剪应力越小;当荷载总量相同时,荷载分布越分散和越均匀,最大界面剪应力越小。

4) 由于铝合金板将部分界面剪应力通过 U 形箍传递给 RC 梁,增设 U 形箍锚固使得铝合金板-结构胶-RC 梁界面的剪应力变小,在板端和 RC 梁主

要裂缝处设置 U 形箍锚固,可以有效加强铝合金板和 RC 梁的连接。

参考文献:

- [1] KANDROTAIT È-JANUTIEN È R. Behaviour of truck's compressor's connecting rods made of aluminium alloy under different manufacturing conditions [J]. *Transport*, 2016, 31(1): 41-46.
- [2] KŁOSOWSKI P, MLECZEK A. Identification of bodner-partom viscoplastic model parameters for some aluminum alloys at elevated temperature [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(7): 04017034.
- [3] 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)
- [4] 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.
- [5] ALVER N, TANARSLAN H M, TAYFUR S. Monitoring fracture processes of CFRP-strengthened RC beam by acoustic emission [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, 23(1): B4016002.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] OBEIDAH A A. Behavior of shear deficient reinforced concrete beams with externally bonded aluminum plates [D]. New Jersey: The State University of New Jersey, 2012.
- [9] 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.
- [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] XING G H, OZBULUT O E. Flexural performance of concrete beams reinforced with aluminum alloy bars [J]. *Engineering Structures*, 2016, 126: 53-65.
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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 Environmental Engineering*, 2019, 41(3): 112-120. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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, 22(4): 613-617, 681.
- BAO A H, YIN X G. Resist-shearing capacity of concrete beam bonded by steel-sheets [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2005, 22(4): 613-617, 681. (in Chinese)