

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201612126

CFRP 布混合粘贴形式界面剪切性能试验

付一小¹, 叶见曙¹, 马 莹²

(1.东南大学 交通学院,南京 210096;2.南京工程学院,南京 211167)

摘 要: 为了研究 CFRP 布混合粘贴的界面粘结性能,设计了 4 组自锚式面内双剪试验. 根据界面剪应力的发展规律,将 CFRP 布混合粘贴中碳纤维布由初始受力至破坏的过程划分为 3 个阶段. 试验考虑了碳纤维布不同的粘贴长度因素,分析试验中的破坏形式、破坏过程和界面粘结性能. 研究表明 CFRP 布混合粘贴形式中的钢板锚固件提高了 CFRP-混凝土界面的粘结强度,将破坏形态由碳纤维布的剥离破坏转变为碳纤维布的断裂破坏,极大地提高了碳纤维布材料的强度利用率. 碳纤维布在未剥离阶段其界面粘结性能较为稳定,钢板锚固件对碳纤维布的初始剥离影响较小;在碳纤维布持续剥离阶段,钢板锚固件可以延缓碳纤维布的剥离,使得界面粘结强度提高 18.02%.

关键词: CFRP 混合粘贴;面内剪切试验;钢板锚固件;界面粘结性能;机械锚固

中图分类号: U445.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)09-0097-06

Test on the interfacial shear performance of hybrid bonding CFRP

FU Yixiao¹, YE Jianshu¹, MA Ying²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The present study designed four self-anchored in-plane iosipescu shear tests to investigate the interfacial bonding property of hybrid bonding CFRP. According to the interfacial shear stress development trend, this study divided the destruction process of the carbon fiber sheets in hybrid bonding CFRP from the initial force to the final destruction into three stages. Considering the different paste lengths of the carbon fiber sheets in the tests, this paper analyzed the failure mode, destruction process, and the interfacial bonding property in the tests. This study shows that the steel sheet-fastenings in hybrid bonding CFRP improve the bonding strength of CFRP-concrete interface. It makes the failure mode change from carbon fiber sheets debonding failure to carbon fiber sheets fracture failure. As a result, it improves the use ratio of the strength of carbon fiber sheets tremendously. The interfacial bonding property of the carbon fiber sheets is stable at the non-debonding stage of the carbon fiber sheets. The steel sheet-fastenings have a few impacts on the initial debonding of the carbon fiber sheets. In the continual debonding process of the carbon fiber sheets, the steel sheet-fastenings can delay the debonding of the carbon fiber sheets and increase the interfacial bonding strength by 18.02%.

Keywords: hybrid bonding CFRP; in-plane iosipescu shear test; steel sheet-fastening; interfacial bonding property; mechanically fastened

碳纤维增强复合材料(CFRP)因其良好的高比强度和耐腐蚀性,已经被广泛的应用于混凝土结构或构件的加固和修复技术中. 已有的试验和工程使用情况表明,在混凝土构件表面粘贴碳纤维布受力不大时,就会产生粘结界面上的剥离,造成碳纤维布的高抗拉强度无法发挥. 为了保证碳纤维布与混凝土界面具有可靠的粘结,防止其过早的剥离,国内外研发了多种形式和构造的锚固措施.

香港城市大学的吴宇飞教授结合了碳纤维布外

贴和机械锚固措施,研制了一种新的组合式粘贴加固技术 HB-FRP(hybrid bonding FRP),称为混合粘贴加固技术^[1-3]. 这种技术是在粘贴的碳纤维布上沿其长度方向按一定间距布置具备机械锚固的钢扣件. 文献[4-9]将锚固措施改进为可用扭矩扳手调整预紧力的化学螺栓-钢板组合件,并用于钢筋混凝土梁的抗弯加固,如图 1 所示. 试验研究表明,CFRP 布混合粘贴形式可以较大程度地提高被加固梁正截面抗弯承载力,并且螺栓-钢板锚固件的锚固作用稳定可靠.

外贴碳纤维布能否有效提高加固后结构的承载力,取决于 CFRP-混凝土界面能否有效的传递应力. 对于传统碳纤维布外贴方式,其破坏承载力全部来源于 CFRP-混凝土界面的粘结强度. 目前对于无锚

收稿日期: 2016-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51208097);
交通运输部建设科技项目(2014318J14250)

作者简介: 付一小(1984—),男,博士研究生;
叶见曙(1948—),男,教授,博士生导师

通信作者: 叶见曙,yejianshu@seu.edu.cn

固措施的 CFRP 界面粘结性能国内外已经提出了较多的强度模型公式^[10-13]。然而对于 CFRP 混合粘贴形式,由于其中引入了机械锚固体系,其破坏形态和过程不同于传统的碳纤维布外贴形式,应当进一步研究以便为这种加固技术的设计计算奠定基础。本文通过室内混凝土试件上粘贴碳纤维布的面内剪切试验,研究 CFRP 布混合粘贴形式的受力全过程和破坏状态。

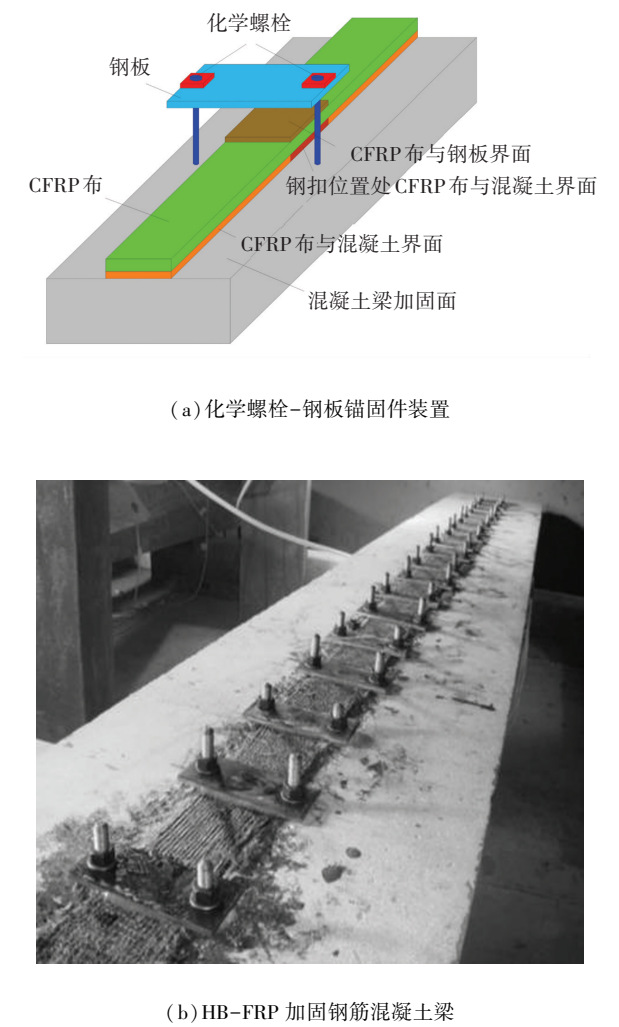


图 1 化学螺栓-钢板锚固件和 HB-FRP 抗弯加固钢筋混凝土梁

Fig.1 Adhesive anchor-steel sheet fastening and reinforced concrete beams flexural strengthened with HB-FRP

1 试验设计

1.1 试件参数

本文试计了 4 组自锚式面内双剪试验,每组由两根混凝土棱柱体(500 mm×170 mm×170 mm)试件组成,每组试件有 4 个剪切面。其中 SL1 组为 CFRP 普通粘贴形式作为对比,CFRP 粘贴长度

350 mm,不设置钢板锚固件。SL2~SL4 组为 CFRP 混合粘贴形式,CFRP 粘贴长度分别为 150、250、350 mm,设置单个钢板锚固件,钢板锚固件离加载端的距离分别为 135、235、335 mm。

试验设计的混凝土试件强度等级 C40,实测的混凝土立方体抗压强度为 44.6 MPa。锚固件由钢板和化学螺栓组成,钢板采用 Q235 热轧钢材,长、宽、厚分别为 80、30、3 mm。螺栓规格为直径 8 mm 的 4.8 级碳钢镀锌螺栓。碳纤维布材料公称厚度为 0.167 mm,抗拉强度 2 980 MPa,弹性模量 235 GPa,拉应变设计值为 0.008,伸长率为 1.7%。

1.2 加载及测试方案

面内剪切试验中靠近加载端界面受剪较大,碳纤维布表面应变分布复杂,因此在加载端附近每隔 10 mm 布置应变测点,其他它位置每隔 20 mm 布置应变测点。以 SL2 组试验为例剪切试验加载示意图及 CFRP 布表面应变测点布置如图 2 所示。

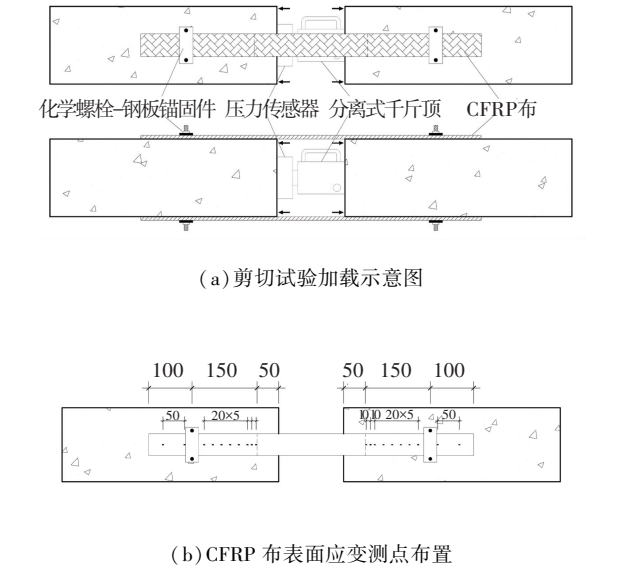


图 2 面内剪切试验示意图(mm)

Fig.2 Force diagram of in-plane iosipescu shear test(mm)

1.3 试验结果

SL1~SL4 组试验中,SL1 组由于没有钢板锚固件发生的是 CFRP 条的整体剥离破坏,破坏时荷载 12.75 kN,如图 3(a)所示。图中可见在剥离区段 CFRP-混凝土界面具备完整的剥离破坏特征。SL2、SL3、SL4 组试验发生的是 CFRP 布拉断破坏,破坏时荷载分别为 13.5、13.75、13.75 kN,如图 3(b)、3(c)、3(d)所示。碳纤维布在断裂前剥离已经产生,其中 SL2-A、SL2-C、SL3-A、SL3-B、SL3-C 面的碳纤维布在断裂前已经剥离至钢板锚固件的位置并且停止了继续剥离。

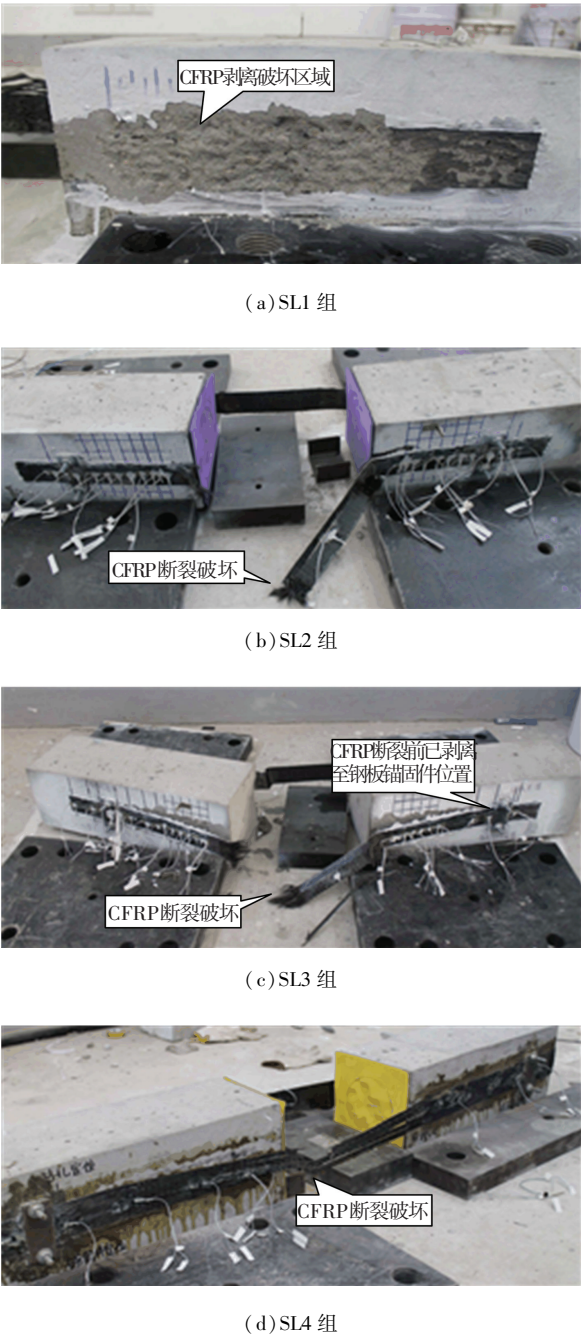


图 3 面内剪切试验破坏形态

Fig.3 Failure modes of in-plane iosipescu shear test

2 试验结果分析

2.1 碳纤维布表面应变分布与发展对比

试验结果分析显示 CFRP 混合粘贴的 SL2~SL4 组试验中碳纤维布表面应变分布与发展基本相似. 以 CFRP 普通粘贴的 SL1 组试验和 CFRP 混合粘贴的 SL3 组试验为例进行对比. 试验中碳纤维布表面应变沿粘贴长度方向的分布如图 4 所示.

面内剪切试验中 CFRP 的拉应力和界面剪应力相互平衡,随着拉应力的增大,当界面剪应力达到界面粘结强度后即会发生 CFRP 界面的剥离. 因此可

以通过碳纤维布表面拉应变的分布与发展考察界面剪应力的发展规律. 图 4 可以看到在 CFRP 未剥离时,SL1 和 SL3 组试验碳纤维布表面应变分布规律是相同的. 加载端附近的拉应力较大,因此碳纤维布表面拉应变也较大,说明此时加载端附近的 CFRP-混凝土界面剪应力同样较大,远离加载端,界面剪应力的传递会逐渐衰减. 因此随着远离加载端碳纤维布表面应变呈现递减趋势.

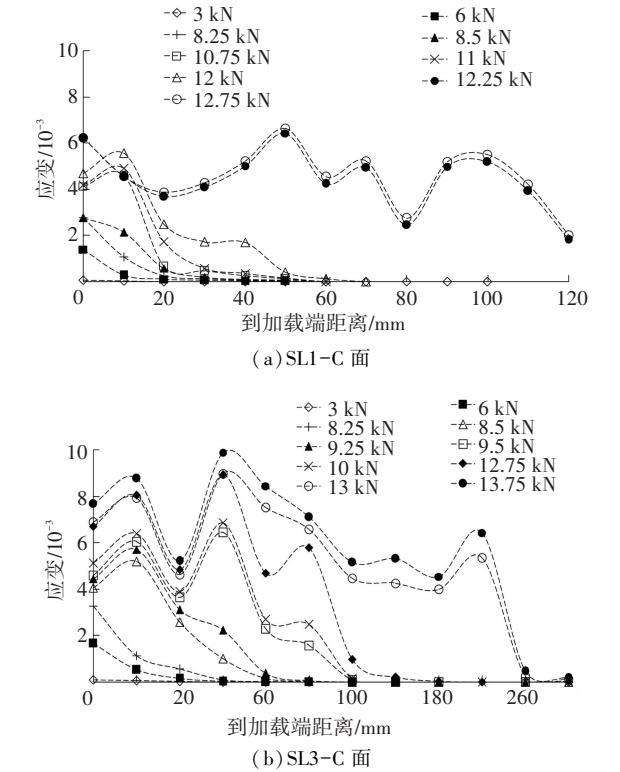


图 4 面内剪切试验破坏时 CFRP 表面应变分布

Fig.4 Strain distribution on the CFRP surface at the time of destruction in in-plane iosipescu shear test

CFRP 开始剥离后,由图 4(a) 可以看到无钢板锚固件的 SL1 组试验中,荷载由 12 kN 增至 12.25 kN 时,碳纤维布表面应变在距离加载端 20~120 mm 的范围有大幅度的突增,随后迅速发生了脆性的剥离破坏. 说明 CFRP 普通粘贴形式中一旦碳纤维布开始剥离,加载端位置较大的破坏剪应力将很快地向远离加载端位置传递并且破坏 CFRP-混凝土界面的粘结,造成碳纤维布迅速的剥离破坏. 图 4(b) 显示含有钢板锚固件的 SL3 组中 CFRP 开始剥离后,碳纤维布表面应变在粘贴长度范围内呈现分段增长特征. 分别在 8.25~8.5 kN, 9.25~9.5 kN, 12.75~13 kN 加载过程中发生了 3 次碳纤维布的剥离. 并且最终剥离停止于钢板锚固件位置,锚固件位置外侧碳纤维布的应变没有增长. 说明钢板锚固件可以延缓碳纤维布的脆性剥离破坏,同时阻止碳纤维布的剥离向锚固件外侧延伸.

2.2 剪切试验中 CFRP-混凝土界面受力过程

面内剪切试验中界面剪应力是导致碳纤维布剥离的主要因素,取 CFRP 条上一小段隔离体 Δl , 其受力平衡如图 5 所示^[14-15].

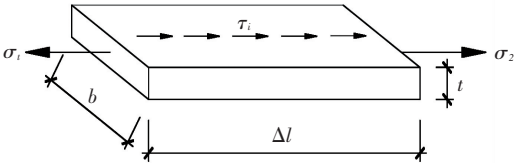


图 5 CFRP 任意段 Δl 上应力分布

Fig.5 Stress distribution of an arbitrary region Δl on CFRP

由平衡条件列出方程为

$$\sigma_1 b t = \sigma_2 b t + \tau_i b \Delta l, \tag{1}$$

式中 $\sigma_1 = E_f \varepsilon_1, \sigma_2 = E_f \varepsilon_2$.

将 σ_1 和 σ_2 代入式(1) 得

$$E_f \varepsilon_1 b t = E_f \varepsilon_2 b t + \tau_i b \Delta l, \tag{2}$$
$$\tau_i = \frac{E_f t \Delta \varepsilon}{\Delta l}.$$

式中: τ_i 为 Δl 范围内 CFRP 与混凝土界面的平均剪应力, Δl 为 CFRP 表面相邻应变测点之间的距离, $\Delta \varepsilon$ 为 Δl 长度上的应变差值, E_f 为 CFRP 弹性模量, t 为 CFRP 布厚度.

从图 5 的平衡关系可以看出, 只有当界面存在剪应力 τ_i 时受力平衡才符合式(2), 当 Δl 区域上的 CFRP 开始发生剥离, 界面剪应力会逐渐消失, σ_1 与 σ_2 之间的差值也随之减小. 当 Δl 区域上的 CFRP 完全剥离后, 界面剪应力 τ_i 消失, σ_1 与 σ_2 应力值相同, 表明此区域上的 CFRP 处于完全弹性受拉状态. 因此可以认为当某一位置的 CFRP-混凝土界面剪应力出现回落时, 表示此位置的 CFRP 开始出现剥离.

根据上述原则可认定面内剪切试验中处于加载端位置的界面剪应力 τ_i 开始减小时为整条 CFRP 初始剥离的时刻, 此时刻之前为碳纤维布未剥离的第 1 阶段; 当靠近钢板锚固件内侧最近位置的界面剪应力 τ_i 减小时为整条 CFRP 完全剥离至钢板锚固件的时刻, 此时刻之后为碳纤维布弹性受拉的第 3 阶段; 介于以上两个时刻之间的过程即为 FRP 条处于持续剥离的第 2 阶段. 根据以上界面平均剪应力的发展规律, 以 SL1 和 SL3 组试验为例划分 3 个阶段的荷载值见表 1.

表 1 可以看出 CFRP 普通粘贴的 SL1 组试验只存在第 1 阶段和第 2 阶段, CFRP 混合粘贴的 SL3 组试验由初始受力到破坏的全过程存在 3 个阶段.

表 1 面内剪切试验 3 个阶段荷载值

Tab.1 Load value of three stages in in-plane iosipescu shear test

测试面 编号	荷载值/kN			CFRP 布变化
	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	
SL1-A	0~12.75	—	—	未发生剥离
SL1-B	0~10.00	10.00~12.75	—	未完全剥离
SL1-C	0~10.75	10.75~12.75	—	已完全剥离
SL1-D	0~12.75	—	—	未发生剥离
SL3-A	0~8.00	8.00~12.50	12.50~13.75	已完全剥离
SL3-B	0~11.75	11.75~13.00	13.00~13.75	已完全剥离
SL3-C	0~8.50	8.50~13.00	13.00~13.75	已完全剥离
SL3-D	0~7.25	7.25~13.75	—	未完全剥离

2.3 CFRP 混合粘贴界面粘结强度

由上一节的分析可知 CFRP-混凝土界面的剪应力产生于碳纤维布未剥离和持续剥离阶段. 首先考察 CFRP 普通粘贴的 SL1 组试验, 根据滕锦光等^[13] 界面粘结强度计算公式推导剥离破坏时极限状态下 CFRP 表面最大应变 $\varepsilon_{f, \max}$ 计算式为

$$\varepsilon_{f, \max} = 0.427 \beta_L \sqrt{\frac{2 - \frac{\omega_f}{s_f}}{1 + \frac{\omega_f}{s_f}} \sqrt{\frac{f_c}{E_f t_f}}}. \tag{3}$$

式中: ω_f 为 CFRP 布宽度, s_f 为混凝土试件宽度, t_f 为 CFRP 布厚度, E_f 为 CFRP 弹性模量, β_L 为和有效粘结长度有关的折减系数^[13].

根据式(3) 计算得出 SL1 组试验中剥离破坏时 CFRP 表面最大应变为 0.006 029. 面内剪切试验中加载端位置的碳纤维布表面应变最大, SL1 组试验中发生剥离破坏的 C 面碳纤维布表面最大应变实测值为 0.006 239, 与计算值的误差为 3.37%. 可见滕锦光等^[13] 界面粘结强度计算公式较为准确, 可以作为 CFRP 混合粘贴形式中界面粘结强度的计算依据. 下面分别考察第 1 阶段和第 2 阶段 CFRP 界面的粘结强度. 试验中实测的 CFRP 初始剥离应变为 ε_1 , 以式(3) 的计算值 $\varepsilon_{\max}$ 作为参考, SL1~SL4 组试验第 1 阶段末(即碳纤维布初始剥离时) $\varepsilon_1/\varepsilon_{\max}$ 的比值见表 2.

根据表 2 计算出 SL1 组试验中 $\varepsilon_1/\varepsilon_{\max}$ 的平均值为 68.45%, SL2 组试验中 $\varepsilon_1/\varepsilon_{\max}$ 的平均值为 70.07%, SL3 组试验中 $\varepsilon_1/\varepsilon_{\max}$ 的平均值为 69.87%, SL4 组试验中 $\varepsilon_1/\varepsilon_{\max}$ 的平均值为 68.57%. 可以看到 4 组试验中 $\varepsilon_1/\varepsilon_{\max}$ 的比值较为接近. 4 组试验所有比值数据平均值为 0.692 4, 标准差为 0.038 3, 变异系数为 5.53%, 比值呈正态分布, 离散程度较小.

说明 SL1~SL4 组试验在初始剥离时 CFRP-混凝土界面的粘结性能差异不大,在第 1 阶段界面粘结强度基本相同. 钢板锚固件对于 CFRP 初始剥离的影响较小. 因此可以根据第 1 阶段界面的粘结强度计算 CFRP 混合粘贴形式抗剥离承载力. 在初始剥离时 CFRP 混合粘贴中碳纤维布最大应变由式(3)可改写为

$$\varepsilon_{f, \max} = 0.296 \sqrt{\frac{2 - \frac{\omega_f}{s_f}}{1 + \frac{\omega_f}{s_f}}} \sqrt{\frac{f_c}{E_f t_f}}. \quad (4)$$

表 2 SL1~SL4 试验第 1 阶段末 CFRP 表面实测应变

Tab.2 Measured strain of CFRP surface at the first stage in group SL1~SL4

测试面编号	$\varepsilon_1/10^{-6}$	$\varepsilon_1/\varepsilon_{\max}$
SL1-A	—	—
SL1-B	4 117	0.683
SL1-C	4 138	0.686
SL1-D	—	—
SL2-A	4 589	0.761
SL2-B	3 942	0.654
SL2-C	4 252	0.705
SL2-D	4 119	0.683
SL3-A	3 781	0.627
SL3-B	4 598	0.763
SL3-C	4 058	0.673
SL3-D	4 416	0.732
SL4-A	4 105	0.681
SL4-B	4 171	0.692
SL4-C	3 971	0.659
SL4-D	4 286	0.711

考察第 2 阶段(即碳纤维布持续剥离时) CFRP 表面应变增值 $\Delta\varepsilon_2$ 与计算值 $\varepsilon_{\max}$ 的比值,见表 3.

表 3 显示 CFRP 普通粘贴的 SL1-C 面发生了碳纤维布的剥离破坏,说明第 2 阶段已经完成. 其在持续剥离阶段 CFRP 表面应变增值为 0.002 210 1,占破坏时最大应变的 34.8%. CFRP 混合粘贴的 SL2-A、SL2-C、SL3-A、SL3-B、SL3-C 面同样碳纤维布完全剥离,第 2 阶段已经完成,CFRP 混合粘贴中 $\Delta\varepsilon_2/\varepsilon_{\max}$ 比值的平均值为 52.82%. 可见 CFRP 混合粘贴形式在第 2 阶段的碳纤维布表面应变增值大于 CFRP 普通粘贴形式,平均值提高了 18.02%. 钢板锚固件抑制了界面的粘结滑移,减缓了碳纤维布的脆性剥离. 在第 2 阶段提高了 CFRP-混凝土界面的粘结强度. 因此在界面粘结完全破坏的极限状态

下 CFRP 混合粘贴中碳纤维布最大应变由式(3)可改写为

$$\varepsilon_{f, \max} = 0.504 \sqrt{\frac{2 - \frac{\omega_f}{s_f}}{1 + \frac{\omega_f}{s_f}}} \sqrt{\frac{f_c}{E_f t_f}}. \quad (5)$$

试验中 SL2-A、SL2-C 面和 SL3-A、SL3-B、SL3-C 面的碳纤维布完全剥离,界面的粘结已经全部破坏. 根据式(5)计算界面粘结完全破坏时碳纤维布表面最大应变值并和实测值对比,见表 4.

表 3 SL1~SL4 组试验第 2 阶段 CFRP 表面实测应变

Tab.3 Measured strain of CFRP at the second stage in group SL1~SL4

编号	$\Delta\varepsilon_2/10^{-6}$	$\Delta\varepsilon_2/\varepsilon_{\max}$	CFRP 布变化
SL1-A	—	—	未发生剥离
SL1-B	2 232	0.370	未完全剥离
SL1-C	2 101	0.348	剥离破坏
SL1-D	—	—	未发生剥离
SL2-A	3 054	0.506	已完全剥离
SL2-B	4 926	0.817	未完全剥离
SL2-C	3 308	0.549	已完全剥离
SL2-D	1 315	0.218	未完全剥离
SL3-A	3 013	0.499	已完全剥离
SL3-B	3 321	0.551	已完全剥离
SL3-C	3 229	0.536	已完全剥离
SL3-D	3 486	0.578	未完全剥离
SL4-A	7 747	1.285	未完全剥离
SL4-B	2 941	0.488	未完全剥离
SL4-C	5 707	0.946	未完全剥离
SL4-D	—	—	未发生剥离

表 4 第 2 阶段末 CFRP 表面最大应变实测与计算值对比

Tab.4 Comparison between the calculated maximum strain value and the experimental value of CFRP surface at the end of the second stage

编号	式(5)计算值	实测应变/ 10^{-6}	误差/%
SL2-A	7 116	7 038	1.10
SL2-C	7 116	7 560	6.24
SL3-A	7 116	6 994	1.71
SL3-B	7 116	7 292	2.47
SL3-C	7 116	6 903	2.99

表 4 显示式(5)的计算值和实测应变值误差较小. 说明 CFRP 混合粘贴形式中当 CFRP-混凝土界面的粘结完全破坏时,其界面粘结强度比 CFRP 普通粘贴时提高了,界面破坏时碳纤维布表面最大应

变基本可以达到式(5)的计算值.

3 结 论

1) CFRP 混合粘贴形式中的钢板锚固件提高了 CFRP-混凝土界面的粘结强度. 将破坏形态由 CFRP 普通粘贴形式中的碳纤维布剥离破坏转变为断裂破坏,极大地提高了碳纤维布材料的强度利用率.

2) CFRP 混合粘贴形式界面受剪时碳纤维布由开始受力至破坏可划分为 3 个阶段:碳纤维布初始受力至即将剥离阶段;碳纤维布在钢板锚固件之间持续剥离阶段;碳纤维布完全剥离至钢板锚固件后弹性受拉纤维破坏阶段.

3) 碳纤维布初始剥离时其表面最大应变占破坏时最大应变的 69.24%,比值数据离散程度小. CFRP 混合粘贴时在碳纤维布未剥离阶段其界面粘结性能较为稳定,受钢板锚固件的影响较小.

4) 钢板锚固件可以延缓碳纤维布的持续剥离,试验研究证实 CFRP 混合粘贴中碳纤维布的剥离在粘贴长度范围内呈现分段剥离的特征,不同于 CFRP 普通粘贴时一次剥离即破坏的特征. 在碳纤维布持续剥离阶段界面粘结强度提高了 18.02%.

参考文献

- [1] WU Yufei, HUANG Yue. Hybrid bonding of FRP to reinforced concrete structures[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3): 266-273. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(266).
- [2] YUN Yanchun, WU Yufei, TANG Waichang. Performance of FRP bonding systems under fatigue loading [J]. Engineering Structures, 2008, 30(11): 3129-3140. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.026.
- [3] WU Yufei, WANG Zhenyu, LIU Kang, et al. Numerical analyses of hybrid-bonded FRP strengthened concrete beams [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009, 24(5): 371-384. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2009.00596.x.
- [4] WU Zhimin, HU Chenghe, WU Yufei, et al. Application of improved hybrid bonded FRP technique to FRP debonding prevention [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(6): 2898-2905. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.033.
- [5] 胡程鹤, 吴智敏, 宿莹, 等. FRP 复合锚固技术试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(3): 209-314. DOI: 10.13409/j.cnki.jd-

pme.2010.03.018.

- HU Chenghe, WU Zhimin, SU Ying, et al. Experimental study of hybrid FRP anchorage technique[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(3): 209-314. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2010.03.018.
- [6] 石昌文, 何化南, 董海, 等. 新型 CFRP 抗弯加固方法的试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 76-82.
- SHI Changwen, HE Huanan, DONG Hai, et al. Experiment research on new method of flexural strengthened with CFRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(1): 76-82.
- [7] 胡程鹤. 改进的复合粘结 FRP 技术的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- HU Chenghe. Experimental study on improved hybrid bonded FRP technique[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [8] 宿莹, 吴智敏, 胡程鹤, 等. CFRP 布加固钢筋混凝土梁的新型复合粘结技术[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 66-72.
- SU Ying, WU Zhimin, HU Chenghe, et al. New hybrid bonding technique of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheet[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 66-72.
- [9] 宿莹. CFRP 布加固钢筋混凝土梁的新型复合粘结技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- SU Ying. New hybrid bonding technique of CFRP to reinforced concrete beams[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [10] CHAJES M J, FINCH J, WILLIAM W, et al. Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(2): 208-217.
- [11] MAEDA T, KOMAKI H, TSUBOUCHI K, et al. Strengthening effect of carbon fiber sheet adhesion method using flexible layer[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 2001, 23: 185-192.
- [12] YUAN H, TENG J G, SERACINO R, et al. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints[J]. Engineering Structures, 2004, 26(5): 553-565. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.11.006.
- [13] CHEN J F, TENG J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 784-791. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(784).
- [14] CASAS J R, PASCUAL J. Debonding of FRP in bending: simplified model and experimental validation[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(10): 1940-1949. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.055.
- [15] KIM Y J, GORDON W R, GREEN M F. Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP sheets: using nonmetallic anchor systems[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(1): 44-52. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:1(44).

(编辑 魏希柱)