

DOI:10.11918/202211044

表面开槽碳纤维布-混凝土界面抗剪性能试验

姜绍飞^{1,2}, 臧荣彬¹, 宋华霖¹, 崔二江³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福州 350108;
3. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为探究表面开槽法对碳纤维布(carbon fibre reinforced plastics, CFRP)-混凝土界面抗剪性能的影响, 开展了表面开槽法 CFRP-混凝土单剪试验, 研究槽宽深比(0.5、1.0 和 1.5)和沟槽形状(矩形、正梯形和倒梯形)对 CFRP-混凝土界面抗剪性能的影响, 重点探究失效模式、断裂能、平均剪应力等指标, 并提出表面开槽黏结界面抗剪设计方法。结果表明: 较未开槽粘贴法, 表面开槽法失效模式由 II 类剥离破坏转变为 VI 类断裂破坏, 界面断裂能最大提高 136.4%, 充分发挥 CFRP 布的抗拉强度和利用率; 槽宽深比与平均剪应力成正相关, 且存在最优值; 正梯形沟槽的平均剪应力分别较倒梯形和矩形沟槽提高 10.1% 和 11.8%。表面开槽法具有较好的抗剪性能, 提出的设计方法可用于指导其黏结界面抗剪设计。

关键词: 混凝土结构; 碳纤维布; 表面开槽法; 单剪试验; 界面抗剪性能

中图分类号: TU375; TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)06-0052-09

Experimental study on interfacial shear behavior of CFRP-concrete with surface groove

JIANG Shaofei^{1,2}, ZANG Rongbin¹, SONG Hualin¹, CUI Erjiang³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350108, China;

3. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: To investigate the effect of surface groove method on the interfacial shear behavior of CFRP-concrete, a series of simple shear tests on CFRP-concrete specimens with surface groove method were carried out, focusing on the effects of groove width-depth ratio (0.5, 1.0 and 1.5) and groove shape (rectangle, normal trapezoid and inverted trapezoid) on the interfacial shear behavior of CFRP-concrete, especially the failure modes, fracture energy, and average shear stress. The bond interfacial shear design method of surface groove was proposed. The results show that the failure mode of surface groove method is changed from class II debonding failure to class VI fracture failure, with the interfacial fracture energy increased by 136.4%, giving a full play to the tensile strength and utilization ratio of CFRP sheets. Furthermore, the groove width-depth ratio is positively correlated with the average shear stress, presenting an optimum volume, and with the average shear stress of normal trapezoidal groove improved, 10.1% and 11.8% higher than that of the inverted trapezoidal groove and rectangular groove respectively. As the surface groove method performs better shear behavior, the proposed method can be used to guide the shear design of bonding interface.

Keywords: concrete structure; carbon fibre reinforced plastics(CFRP); surface groove method; simple shear test; interface shear behavior

长期处于恶劣环境和超载影响下的钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构会出现耐久性损伤及退化, 为保障其安全运营, 进行加固、补强尤为重要。近年来, 纤维增强聚合物(fiber reinforced polymer, FRP)因其抗拉强度高、重量轻、绿色环保已成为修复或加固 RC 结构的可靠选择^[1]。表面黏结加固

(externally bonded reinforcement, EBR)是最常用的 FRP 加固既有 RC 结构的一种技术^[2-3]。研究表明, EBR 加固 RC 结构界面失效模式具有多样性, 如图 1 所示, 其中, II 类剥离破坏为加固 RC 结构主要失效模式^[4], FRP 的利用率仅为 20%~25%^[6]。图中破坏界面线条颜色与右侧文字颜色一一对应, 表

收稿日期: 2022-11-14; 录用日期: 2023-01-03; 网络首发日期: 2023-03-22

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230320.1653.003.html>

基金项目: 国家十三五重点专项课题(2020YFD1100403); 中国地震局重点专项(2020EEEVL0402)

作者简介: 姜绍飞(1969—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 宋华霖, songhualincn@gmail.com

示不同失效模式的破坏特征。因此,限制 FRP 的剥离以及提高其利用率愈发迫切和重要^[7]。

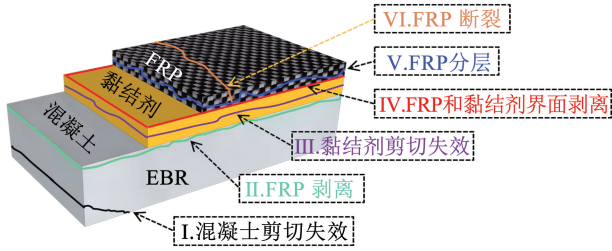


图1 典型失效模式

Fig. 1 Typical failure modes

为解决上述问题,很多措施和方法用来提升 EBR 技术的性能、减轻过早剥离失效的风险,如 U 形箍锚固、机械锚固、FRP 嵌入式锚固。U 形箍锚固虽然可以延缓 FRP 端部早期剥离,但 U 形箍会随着剪切滑移量的增大被剪断^[8-9]。为明晰机械锚固 FRP - 混凝土界面抗剪性能,文献[10]研究了纯外贴锚固、普通混合锚固和机械混合锚固 3 种不同端部锚固对 FRP - 混凝土界面抗剪性能的影响,发现机械混合锚固抗剪性能较纯外贴锚固、普通混合锚固显著提高,失效模式均表现为 VI 类断裂失效。而在 FRP 嵌入式锚固方面,文献[11]提出了一种由单束纤维制作的端部扇形锚固方法,该方法是将扇形锚固系统插入预钻混凝土孔洞,并均匀向外扩展纤维丝末端以锚固 FRP 片材。该方法在一定设计条件下可使 FRP 拉伸强度利用率超 60%。上述锚固方法表明可减轻/消除过早剥离失效的风险,但其加固效果极大地依赖于施工程度和细节。因此,文献[12]提出表面开槽法 (groove reinforcement, GR),对混凝土结构表面开槽,填充底层树脂,并用浸渍树脂将 FRP 条带直接黏附到凹槽表面。该方法加固

RC 梁抗弯试验表明,GR 技术可以有效地抑制 FRP 条带的脱黏,提高 FRP 与混凝土界面的加固效率。较常规 EBR 加固,GR 加固后抗弯强度提高 80%^[13]。为了推动 GR 技术的应用,开展了不同矩形沟槽尺寸试件单剪试验研究,发现沟槽尺寸对界面黏结强度有较大影响^[14]。上述研究表明,GR 可以较好地改善 FRP - 混凝土界面黏结强度,同时,矩形开槽方法操作简单、快速。随着研究的深入,发现黏结界面开槽的形状、尺寸严重影响黏结界面失效模式和整体工作性能,而开展沟槽形状、尺寸作用机制和界面黏结强度影响因素研究,对建立开槽相关设计理论十分必要。

通过表面开槽法 CFRP - 混凝土单剪试验,重点研究了失效模式、断裂能、平均剪应力等指标,剖析了槽宽深比和不同沟槽形状具体的作用机制,并提出了表面开槽黏结界面抗剪设计方法。

1 试验

1.1 试件设计

研究表明^[15],单搭接拉伸剪切试验可较合理地模拟实际 CFRP - 混凝土界面黏结特性,因此,采用该方法进行界面抗剪性能试验。共设计 3 组试验,其中,EBR 组为对照组,GR 组以槽宽深比为变量,GT 组以沟槽形状为变量^[16],每个试件编号均有 3 个平行试件。CFRP - 混凝土单剪试件尺寸为 300 mm × 100 mm × 100 mm,CFRP 布总长 350 mm,宽 50 mm,并设置 30 mm 非黏结区,防止加载端出现应力集中导致端部混凝土拉裂^[17]。此外,在加载端两侧粘贴 50 mm × 50 mm 同源片材进行保护,以增强试验机与 CFRP 布之间的摩擦力,试验详细设计见图 2。

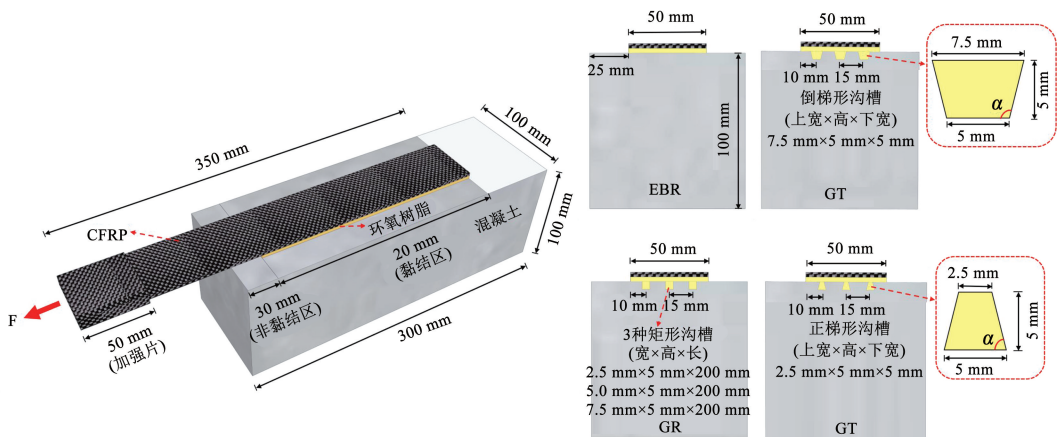


图2 单剪试件尺寸

Fig. 2 Schematic diagram of single shear specimen

1.2 试件制作

试件制作过程如图 3 所示,具体流程如下:1)按照设计尺寸制作沟槽模板,如图 3(a)所示;2)模板制作完成后,将模板固定至混凝土模具上,并浇筑混凝土,如图 3(b)所示;3)待标准养护 28 d 后拆除模板,使用研磨机对基体表面进行粗糙度处理,如

图 3(c)所示;4)使用无水乙醇擦拭基体表面和沟槽内表面,随后用鼓风机加速酒精挥发并吹去剩下的少量灰尘,如图 3(d)、(e)所示;5)在沟槽内和基体表面使用 CH-4A 微细缝灌缝胶,随后用刮板刮平,待底胶成形后将混合 CH-1A 碳纤维浸渍胶的 CFRP 布粘贴至混凝土表面,如图 3(f)所示。

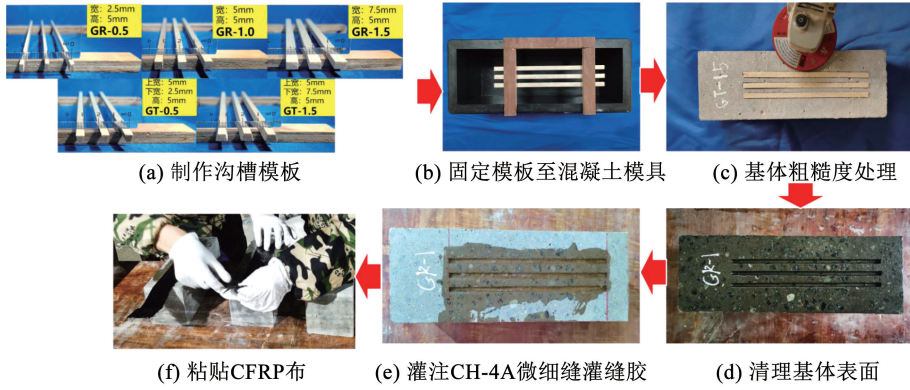


图 3 试件制作过程

Fig. 3 The production process of specimens

1.3 材料性能

混凝土设计强度等级为 C40,为保证材料强度的稳定性,制作过程中未掺杂任何添加剂,混凝土的配合比如表 1 所示。选择 3 000 kN 微机控制电液伺服压力试验机进行混凝土抗压强度和弹性模量测定,参考文献[18],加载速率控制为 0.04 MPa/s,实测立方体试块标准养护 28 d 后的平均抗压强度为 41.6 MPa,棱柱体试块平均弹性模量为 34.7 GPa。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix ratio of concrete

组分	水泥(P042.5型)	水	细砂	石子(粒径 8~15 mm)
质量分数	1.0	0.6	1.71	2.57

CFRP 布选用卡本 CFS - I - 300 型,理论厚度 0.167 mm,标准材性试样选择 100 kN 电子万能试验机,参考文献[19],加载速率控制为 2 mm/min。环氧树脂黏结剂为 CH-4A 型微细缝灌缝胶和 CH-1A 型浸渍胶,质量配合比分别为 10:4、10:5,标准材性试样选择 30 kN 电子万能试验机,参考文献[19],加载速率控制为 2 mm/min,实测黏结剂标准试件平均弹性模量分别为 1.53 和 2.45 GPa。各材料性能指标见表 2。

表 2 材料性能指标

Tab. 2 Material properties

材料种类	抗拉强度/ 受拉弹性模量/		伸长率/ %
	MPa	GPa	
CFRP 布	3 634	237	≥1.7
CH-4A 型微细缝灌缝胶	≥30	≥1.5	—
CH-1A 型浸渍胶	≥38	≥2.4	≥1.5

1.4 测点布置及试验方法

CFRP 布应变片布置如图 4 所示。采用无水乙醇清洁试件表面的 CFRP 布,完成后间隔 24 mm 粘贴 9 个应变片。通过 JM3813 静态应变采集箱对应变值进行采集。



图 4 单剪试件应变片粘贴示意

Fig. 4 Schematic diagram of strain gauges pasted on the single shear specimen

采用 100 kN 的电子万能试验机进行单剪试验测试,采用位移加载,加载速率控制为 2 mm/min,直至试件破坏。采用自主设计的 FRP 单剪试验稳定装置,如图 5 所示,上下两层通过调整螺栓实现对混凝土试样的稳定,再通过红外激光水平尺对钢板水平度进行微调,保证加载过程中 CFRP 布垂直状态。

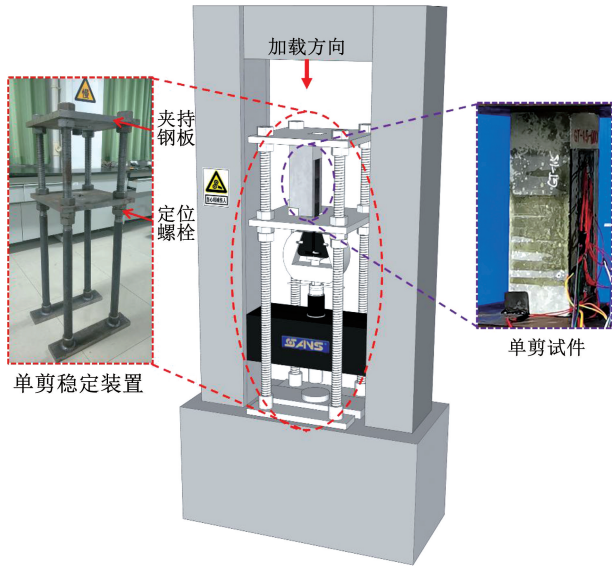


图 5 单剪试验加载设备及试件稳定装置

Fig. 5 Experimental setup of single shear test and stable apparatus of specimens

2 试验现象与结果分析

2.1 试验现象与失效模式

对于 EBR 组试件, 加载初期, 荷载增加缓慢, 当达到极限荷载时出现剥离声响, 此后荷载保持稳定, 剥离沿粘贴区向远端传递。有效黏结长度定义为传

递大部分黏结应力并获得最大承载能力的长度, 当黏结长度小于有效黏结长度时, CFRP 布迅速剥离混凝土基体, 加载结束。而对于 GR 和 GT 组试件, 加载初期, 荷载随位移增加较快上升, 随后变缓。当达到 95% 极限荷载时, 出现纤维丝断裂的声响。当达到极限荷载时, 纤维迅速断裂, 加载结束。

各试件的失效模式如图 6 所示, 可以看出, 对于 EBR 组试件, 发生了图 1 中的 II 类剥离失效, 剥离后的 CFRP 布表面黏附一层约为 1 mm 的混凝土层 (见图 6(a))。而对于 GR 和 GT 组试件, 失效模式转变为图 1 中的 VI 类断裂, CFRP 布前端出现拉伸断裂, 其断口形式有 3 种情况, 分别为水平断裂 (图 6(e))、非水平断裂 (图 6(b)、(c)、(d)) 和部分纤维束断裂 (图 6(f))。这是因为粘贴 CFRP 布时, 纤维丝在基体中呈现扭曲排布, 单剪时部分扭曲位置处纤维布受力不均匀, 首先出现抽丝而断裂^[20]。

表 3 为各组单剪试验结果, 可以看出, GR 和 GT 组试件极限承载力较 EBR 组试验分别提升了 146.6% ~ 158.3%, 这归因于 GR 和 GT 组试件粘贴区域下方保护层范围内环氧树脂胶体提供的界面抗剪能力。需要注意的是, GR 和 GT 组试件的极限承载力间存在一定差别, 可解释为纤维布在编制过程中存在一定缺陷。

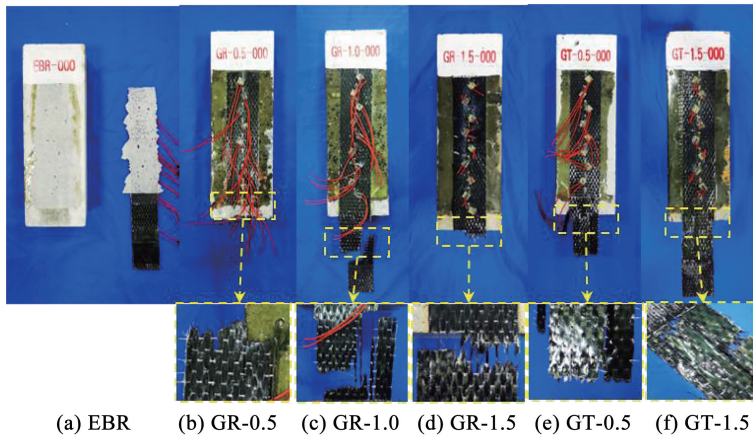


图 6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure modes of specimens

表 3 单剪试验结果

Tab. 3 Simple shear test results

组别	试件编号	影响因素		α_v	τ_m / MPa	F_{\max} / kN	σ	失效模式
		沟槽宽深比	沟槽形状					
EBR	EBR	—	—	—	—	10.3	0.51	II 类
GR	GR-0.5	0.5 (宽 2.5 mm、深 5 mm)	矩形	0.075	5.70	25.6	0.60	VI 类
	GR-1.0	1.0 (宽 5.0 mm、深 5 mm)	矩形	0.150	6.21	26.4	0.55	VI 类
	GR-1.5	1.5 (宽 7.5 mm、深 5 mm)	矩形	0.225	6.41	25.4	0.61	VI 类
GT	GT-1.5	1.5 (宽 7.5 mm、深 5 mm)	倒梯形	0.188	6.31	26.6	0.50	VI 类
	GT-0.5	0.5 (宽 2.5 mm、深 5 mm)	正梯形	0.113	6.94	25.8	0.56	VI 类

注: 1) 胶体体积占比 $\alpha_v = V_e / V_c$, V_e 为沟槽内胶体体积, V_c 为粘贴区域下方保护层范围内的体积; 2) 沟槽平均剪应力 $\tau_m = G_f / s_{\max}$, G_f 为界面断裂能, s_{\max} 为界面最大滑移量; 3) F_{\max} 为极限承载力; 4) σ 为同一编号 3 个平行试件间的标准差; 5) II 类指 CFRP 布剥离破坏, VI 类指 CFRP 布断裂破坏。

2.2 荷载 - 位移曲线

图 7 为不同类型试件的端部荷载 - 位移曲线。需要注意的是,由于试验机采集的位移存在较大误差,需剔除黏结区前端 CFRP 布变形和夹持端滑移,为精确量化滑移值,采用积分获取,即

$$s_i = \int \varepsilon dx \quad (1)$$

进一步改写成数值积分形式

$$s_i = \frac{\Delta x}{2} (\varepsilon_0 + 2 \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j + \varepsilon_i) \quad (2)$$

式中: s_i 为 i 点滑移量, Δx 为相邻应变片中心距离, ε_i 为 i 点应变片的应变值, ε_0 为距离加载端最远处应变值。

将不同类型试件的端部荷载 - 位移曲线分为两类曲线。

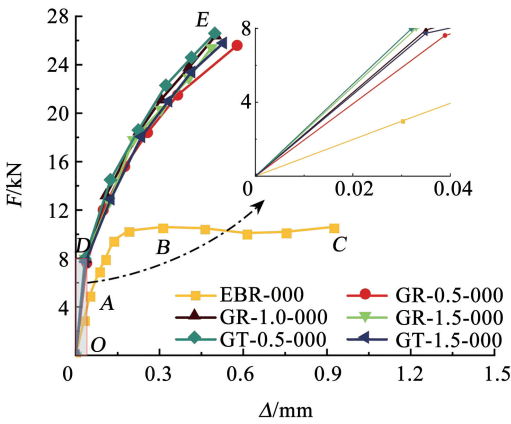


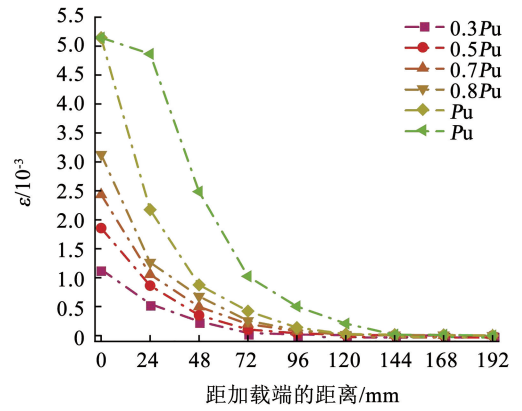
图 7 荷载 - 位移曲线
Fig. 7 Load-slip curves

2.2.1 三阶段曲线

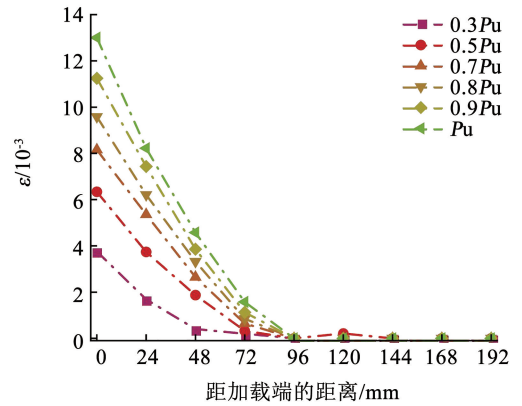
EBR 组试件荷载 - 位移曲线可简化为 3 个阶段:1) OA 线性阶段,随着位移的增加,CFRP 布被拉紧,荷载呈较慢线性增长,主要由加载前端 3 个应变片区域受力,如图 8 (a) 所示;2) AB 软化阶段,位移继续增加,荷载增加速度减慢,应变向远端传递,直至达到有效黏结长度;3) BC 剥离阶段,此阶段荷载不再继续上升,达到界面极限承载力,界面剥离长度不断增加,最终发生剥离破坏。

2.2.2 两阶段曲线

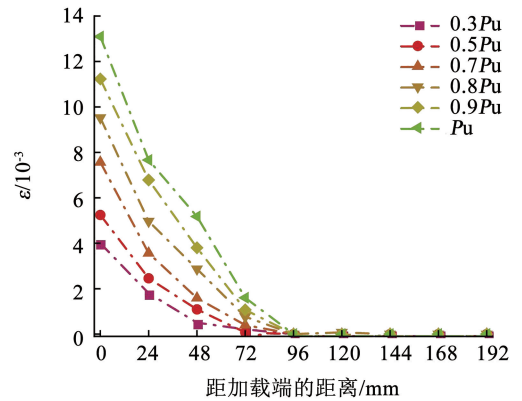
GR、GT 组试件荷载 - 位移曲线较为相近,可简化为两个阶段:1) OD 线性阶段,随着位移的增加,CFRP 布被拉紧,荷载呈较快线性增长,主要由加载前端两个应变片区域受力,如图 8 (b)、(c) 所示;2) DE 软化阶段,位移继续增加,荷载增加速度减慢,应变向远端传递,最终发生 CFRP 布断裂失效,与有效黏结长度无关。



(a) EBR-000



(b) GR-1.0-000



(c) GT-0.5-000

图 8 CFRP 布应变分布图

Fig. 8 Strain distribution curves of CFRP

2.3 黏结 - 滑移曲线

黏结 - 滑移曲线表征 CFRP - 混凝土界面在承受荷载状况下的黏结行为,在 CFRP 布表面连续布设应变片,滑移采用式 (2) 获取,界面剪应力由差分原理获取,如图 9 所示。

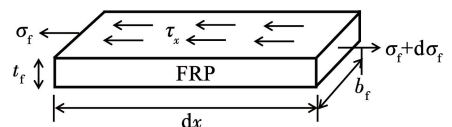


图 9 FRP 微段受力图

Fig. 9 Force diagram of FRP microsection

根据受力平衡原理,可得微分段的力平衡方程为

$$\sigma_f b_f t_f + \tau_x b_f dx = (\sigma_f + d\sigma_f) b_f t_f \quad (3)$$

式中: σ_f 为界面承受的拉应力, b_f 、 t_f 分别为FRP的宽度和厚度, τ_x 为微分段平均剪应力。

将 $\sigma_f = E_f \varepsilon_f$ 代入式(3)化简得

$$\tau_x = E_f t_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (4)$$

通过差分原理得到CFRP布*i*点平均剪应力为

$$\tau_i = E_f t_f \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{\Delta x} \quad (5)$$

式中: E_f 和 t_f 分别为CFRP弹性模量、厚度, Δx 为相邻应变片中心距离, ε_i 和 ε_{i-1} 分别为相邻应变片的应变值。

图10为不同试件CFRP-混凝土界面端部黏结应力-滑移曲线,可以看出,EBR组试件和GR、GT组试件黏结-滑移曲线具有明显的区别。EBR组试件具有明显的上升段和下降段,而GR、GT组试件均只有上升段,原因是开槽试件的抗剪性能还未充分发挥,均表现为CFRP布拉伸断裂失效,无法获取其端部完整的黏结-滑移曲线。较EBR组试件最大剪应力所对应的滑移量,GR和GT组试件的滑移量更大,这归因于表面开槽法增强了界面黏结强度,抑制了CFRP布的脱黏,CFRP布的应变为其极限应变的70.7%~90.6%,较EBR试件有明显提升。

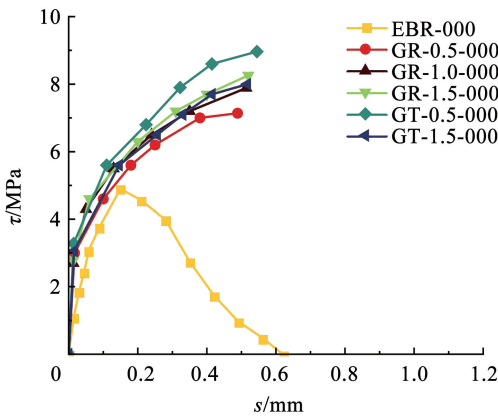


图10 黏结应力-滑移曲线

Fig. 10 Bond-slip curves

为量化黏结界面的剪切能力,引入界面断裂能 G_f ,即黏结-滑移曲线与坐标轴包围面积。图11为不同类型试件的界面断裂能,柱状图中的数字代表GR、GT组试件界面断裂能相对于EBR组试件的增加百分比,可以看出,GR、GT组试件的界面断裂能较EBR组试件提升了74.1%~136.4%,其中,GT-0.5-000试件的界面断裂能提升最大。

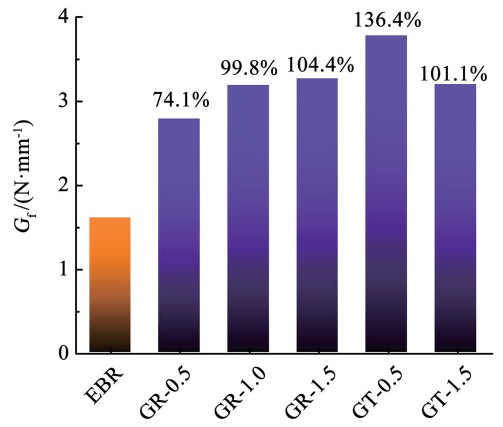


图11 界面断裂能

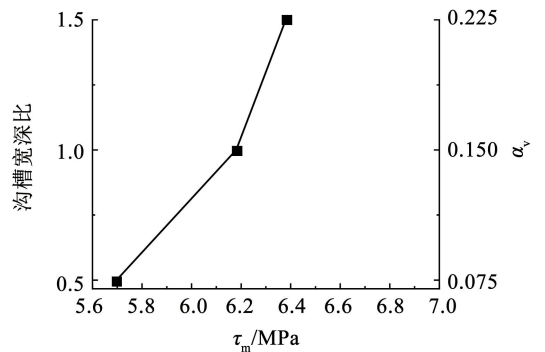
Fig. 11 Interfacial fracture energy

2.4 沟槽平均剪应力(τ_m)影响因素

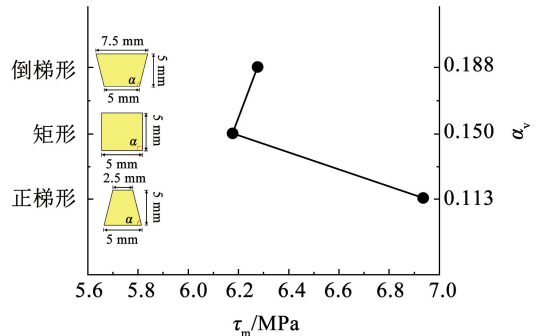
τ_m 反映了沟槽内部环氧树脂与混凝土间咬合力,为明晰不同试件沟槽内咬合力的差异,研究沟槽宽深比和沟槽形状对 τ_m 的影响(图12)。

2.4.1 沟槽宽深比

图12(a)为不同沟槽宽深比对 τ_m 的影响,可以看出,随着槽宽深比的增加, τ_m 不断提高,但增幅放缓。



(a) 沟槽宽深比的影响



(b) 沟槽形状的影响

图12 不同影响因素对沟槽平均剪应力的影响

Fig. 12 Influence of different factors on average shear stress of groove

图13为不同沟槽宽深比剖面图,可以清晰地看出,随着沟槽宽深比的增加,沟槽内环氧树脂的体积明显增大,使得粘贴区域下方保护层范围内 α_v 变

大,环氧树脂渗透到深层混凝土空隙中形成的交互层体积更大,其硬化后与混凝土相互交错抱合的咬合力增强,将剪应力传递至深层混凝土中,从而提高了 τ_m 。而增幅放缓解释为槽宽深比对提高 τ_m 有限,存在最优值。当沟槽宽深比由 0.5 变为 1.0, τ_m 提升了 8.93%,而当沟槽宽深比由 1.0 变为 1.5, τ_m 仅提升 3.31%,因此,本文的研究表明最优槽宽深比为 1.0。

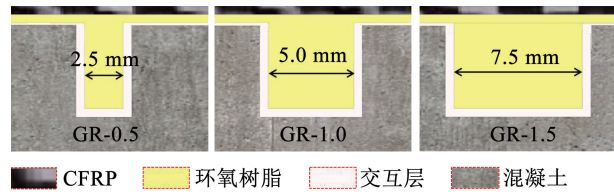


图 13 不同沟槽宽深比剖面图

Fig. 13 Cross-section of different groove width-depth ratio

2.4.2 沟槽形状

图 12(b)为不同沟槽形状对 τ_m 的影响,可以看出,在保证沟槽下底宽度和深度相同情况下,倒梯形

沟槽试件 τ_m 略大于矩形沟槽试件,原因与沟槽宽深比的依据相同,即倒梯形沟槽试件具有更大的交互层体积,相互交错抱合的咬合力更强。

值得注意的是,正梯形沟槽试件 α_v 分别为倒梯形和矩形沟槽试件的 60%、75%, τ_m 却分别提升了 10.1%、11.8%。图 14 为正梯形沟槽受力图,分析发现在外力 F 作用下,沟槽内环氧树脂会形成斜压杆^[21]使得表面环氧树脂剪切变形产生的剪切力 τ_f 传递至深层混凝土中,形成剪切力 τ_m ,在传递力的过程中会形成斜向外的剪切力 τ_2 ,使得黏结界面产生向外剥离力 f_b 。对于倒梯形和矩形沟槽,其沟槽夹角 α 为钝角和直角,无法提供指向混凝土基体的约束力 f_a ,故向外剥离力 f_b 仅由界面咬合力 f_β 承担。而对于正梯形沟槽,其沟槽夹角 α 为锐角,可以提供指向混凝土基体的约束力 f_a ,故向外剥离力 f_b 由界面咬合力 f_β 和起抵抗作用的锐角提供的指向混凝土基体的约束力 f_a 的竖向分量 f_{ay} 共同承担,从而更好地抑制其向外剥离,在 α_v 较小的情况下提升 τ_m 。

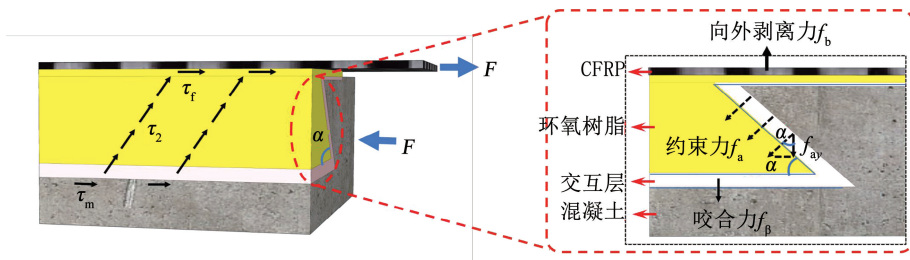


图 14 正梯形沟槽受力图

Fig. 14 Normal trapezoidal groove diagram

3 表面开槽黏结界面抗剪设计方法

3.1 基本假设

在抗剪设计前,作以下基本假设:1)黏结界面仅承受纵向水平剪切力,不承受面外正应力;2)CFRP和混凝土基体的力学行为为线弹性;3)CFRP布承受的正应力沿着宽度方向均匀分布;4)GR界面纵向水平剪切力全部由粘贴区域下方保护层范围沟槽内环氧树脂胶体承担。

3.2 抗剪设计方法

采用表面开槽法进行加固时,应先按照文献[22]设计开槽加固粘贴区宽度 b_f 和长度 l ,同时,为保证GR界面具有足够的抗剪能力,需确定沟槽内环氧树脂胶体应满足的最小胶体体积占比 α_{vmin} 。

为确定最小胶体体积占比 α_{vmin} ,需先确定沟槽内环氧树脂胶体与混凝土间的咬合力系数 β ,其反映了沟槽平均剪应力 τ_m 较粘贴表面平均剪应力 τ_f 的提升幅度。

单剪试件失效时极限承载力 F_{max} 与粘贴表面平均剪应力 τ_f 表示为

$$F_{max} = b_f l \tau_f \quad (6)$$

式中 b_f 和 l 分别为粘贴区宽度和长度。

而界面断裂能 G_f 与其所对应的沟槽平均剪应力 τ_m 表示为

$$G_f = s_{max} \tau_m \quad (7)$$

式中 s_{max} 为黏结-滑移曲线最大滑移值。

引入咬合力系数 β ,则粘贴表面平均剪应力 τ_f 与沟槽平均剪应力 τ_m 表示为

$$\tau_m = \beta \tau_f \quad (8)$$

联立式(6)~(8)得

$$\beta = \frac{G_f b_f l}{F_{max} s_{max}} \quad (9)$$

将2.2和2.3节相关试验结果代入式(9),可得不同沟槽形式试件沟槽内环氧树脂和混凝土间的咬合力系数,见表4。

表4 咬合力系数

Tab.4 Interlocking force coefficient

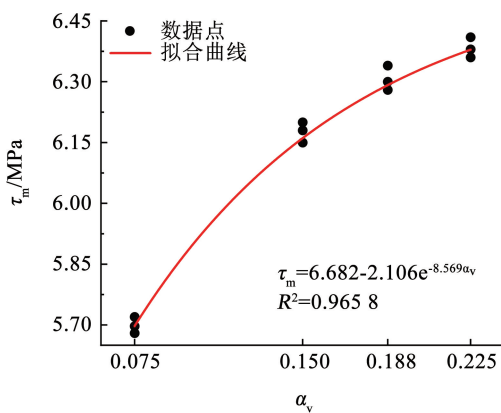
试件编号	GR-0.5	GR-1.0	GR-1.5	GT-0.5	GT-1.5
β	2.236	2.351	2.524	2.609	2.446

对上述咬合力系数取平均值得 $\beta_a = 2.431$ 。

为确保 GR 界面具有足够的抗剪能力,需满足沟槽平均剪应力 τ_m 不小于按 β_a 所求得的剪应力,即

$$\tau_m \geq \beta_a \tau_f \quad (10)$$

采用式(10)确定 α_{vmin} , 还需建立 α_v 与 τ_m 间的关系。基于前文机制分析,采用非线性回归方法拟合 τ_m 与 α_v 的关系式,如图 15 所示。

图 15 τ_m 与 α_v 拟合曲线Fig. 15 τ_m and α_v fitting curve

拟合后具体表达式为

$$\tau_m = 6.682 - 2.106e^{-8.569\alpha_v} \quad (11)$$

可以看出, τ_m 与 α_v 呈指数性相关,拟合度较好,该式可用于后续表面开槽黏结界面抗剪设计中。

联立式(6)、(10)和(11),可以得出所需填充的最小胶体体积占比应满足如下要求:

$$6.682 - 2.106e^{-8.569\alpha_{vmin}} \geq \beta_a \frac{\sigma_f t_f b_f}{b_f l} \quad (12)$$

进一步简化得

$$\alpha_{vmin} \geq \ln \left[\left(6.682 - \beta_a \frac{\sigma_f t_f b_f}{b_f l} \right) / 2.106 \right]^{-\frac{1}{8.569}} \quad (13)$$

式中: σ_f 和 t_f 分别为实际应用 FRP 的抗拉强度和厚度, b_f 和 l 分别为实际应用加固粘贴区宽度和长度。

针对表面开槽黏结界面抗剪设计,同时考虑混凝土保护层厚度的要求,建议沟槽长度和深度分别取为 l 和 5 mm,宽度不宜小于 2.5 mm;由于沟槽方向对界面抗剪性能没有显著影响^[23],既可以顺纤维布方向也可以垂直于纤维布方向开设槽口;在条件允许下尽可能选取正梯形沟槽,切割的方法可以选用高压射流技术^[24]。同时,为便于切割,正梯形沟

槽槽口宽度不宜小于 10 mm;沟槽应尽可能均匀分布于粘贴区。

4 结 论

1) GR 和 GT 组试件的失效模式由 EBR 组试件 II 类剥离破坏转变为 VI 类断裂破坏,其断口形式有 3 种情况,分别为水平断裂、非水平断裂和部分纤维束断裂。

2) 与 EBR 组试件相比,GR、GT 组试件黏结-滑移曲线仅有上升段,且界面断裂能提升了 74.1% ~ 136.4%,其中,GT-0.5-000 的界面断裂能提升最大。

3) 槽宽深比与沟槽平均剪应力成正相关,且存在最优值;由于槽形状的改变,正梯形沟槽试件胶体体积分别为倒梯形和矩形沟槽试件的 60%、75%,沟槽平均剪应力却分别提升了 10.1%、11.8%,在 α_v 相对较小的情况下提升沟槽平均剪应力。

4) 在实际界面抗剪设计中,为抑制界面剥离失效,更好地发挥 FRP 的材料性能,建议开设沟槽大小应满足本文提出的最小胶体体积占比。

综上,本文研究的表面开槽加固法较未开槽加固法具有明显的优势,可以有效抑制黏结界面剥离,充分发挥 CFRP 布的高强抗拉性能,且正梯形沟槽可以显著提升界面抗剪性能,后续可依据本文初步提出的黏结界面抗剪设计方法进一步开展相关试验研究。

参 考 文 献

- [1] NASER M Z, HAWILEH R A, ABDALLA J A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: a critical review [J]. Eng Stru, 2019, 198: 109542. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109542
- [2] ZHOU J K, LIN W K, GUO S X, et al. Behavior of FRP-confined FRP spiral reinforced concrete square columns under axial compression [J]. J Build Eng, 2022, 45: 103452
- [3] CHEN C, XIAO X, ZHOU Y, et al. FRP shear-strengthened RC beams: re-examining the shear-crack effect [J]. J Compos Constr, 2022, 26(5): 04022065
- [4] AMIR T R, NILOUFAR M, MOSTOFINEJAD D. Bond mechanism of EBROG method using a single groove to attach CFRP sheets on concrete [J]. Constr Build Mater, 2019, 197: 693
- [5] FAYSAL R M, BHUIYAN M M H, AL MOMIN K, et al. A review on the advances of the study on FRP-concrete bond under hygrothermal exposure [J]. Constr Build Mater, 2023, 363: 129818
- [6] KALFAT R, MAHAIDI R, SMITH S T. Anchorage devices used to improve the performance of reinforced concrete beams retrofitted with FRP composites: state-of-the-art review [J]. J Compos Constr, 2011, 17(1): 14

- [7] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面黏结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 10
LU Xinzheng, YE Lieping, TENG Jinguang, et al. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface [J]. Journal of Building Structures, 2005(4): 10. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2005.04.002
- [8] ORTON S L, JIRSA J O, BAYRAK O. Design considerations of carbon fiber anchors[J]. J Compos Constr, 2008, 12(6): 608
- [9] CERONI F. Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials[J]. Constr Build Mater, 2010, 24: 1547
- [10] 董坤, 荆范华, 郝爱江, 等. 端锚 CFRP-混凝土界面剥离全过程解析模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 71
DONG Kun, JING Fanhua, HAO Aijiang, et al. Analytical models of the whole debonding process of CFRP-to-concrete interface with end anchorage [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4): 71
- [11] KARANTZIKIS M, PAPANICOLAOU C G, ANTONOPOULOS C P, et al. Experimental investigation of non-conventional confinement for concrete using FRP[J]. J Compos Constr, 2005, 9(6): 480
- [12] MOSTOFINEJAD D, MAHMOUDABADI E. Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams[J]. J Compos Constr, 2010, 14(6): 804
- [13] MOSTOFINEJAD D, KASHANI A T. Experimental study on effect of EBR and EBROG methods on debonding of FRP sheets used for shear strengthening of RC beams[J]. Compos B Eng, 2013, 45(1): 1704
- [14] MOSTOFINEJAD D, MOFRAD M H, HOSSEINI A, et al. Investigating the effects of concrete compressive strength, CFRP thickness and groove depth on CFRP-concrete bond strength of EBROG joints[J]. Constr Build Mater, 2018, 189: 323
- [15] 姜绍飞, 崔二江, 王娟, 等. 氯盐干湿循环作用下 CFRP 混凝土界面黏结性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 265
JIANG Shaofei, CUI Erjiang, WANG Juan, et al. Bond behavior of CFRP-concrete interface in chlorine salt solution with wet-dry cycles[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 265. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0530
- [16] 姜绍飞, 臧荣彬, 宋华霖. 混凝土构件加固法以及混凝土加固结构: CN114508245A[P]. 2022-05-17
JIANG Shaofei, ZANG Rongbin, SONG Hualin. Concrete member reinforcement method and concrete reinforcement structure: CN114508245A[P]. 2022-05-17
- [17] CUI E, JIANG S, WANG J, et al. Bond behavior of CFRP-concrete bonding interface considering degradation of epoxy primer under wet-dry cycles [J]. Constr Build Mater, 2021, 292: 123286
- [18] 中国建筑科学研究院有限公司. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
- [19] 四川省住房和城乡建设厅. 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范: GB/50728—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
- [20] WANG Q, SONG H L, LU C L. Experimental study of the relaxation properties of carbon fiber cloth [J]. Materials, 2020, 13: 3603
- [21] 赵勇, 万宇杰, 王晓锋. 钢筋套筒灌浆接缝受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2): 221
ZHAO Yong, WAN Yujie, WANG Xiaofeng. Experimental study on shear performance of steel sleeve grouting joint[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2): 221. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.c244
- [22] 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程: CECS 146—2003(2007)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007
- [23] GHAHSAREH F M, MOSTOFINEJAD D. Groove classification in EBROG FRP-to-concrete joints [J]. Constr Build Mater, 2021, 275: 122169
- [24] 杨俊, 周建庭, 张中亚, 等. UHPC-NC 键槽界面抗剪性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 132
YANG Jun, ZHOU Jianting, ZHANG Zhongya, et al. Shear performance of keyway interface between UHPC and normal concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 132. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.08.011

(编辑 刘 彤)