

拉剪组合荷载下 FRP-钢胶接连接力学性能

姜旭¹, 孙凯¹, 强旭红^{1†}, 白洁²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
2. 中国建筑第八工程局有限公司工程研究院, 上海 200122)

摘要:为明确 FRP 桥面板与钢梁之间胶接连接的力学性能, 针对不同拉剪组合荷载下胶接连接的力学性能进行了系列试验研究, 包括极限破坏荷载、破坏模式、刚度以及强度破坏准则. 针对胶接连接的受力特点, 通过特制的圆盘加载试验装置, 实现了 6 种不同比例的拉伸和剪切荷载组合. 结果表明, 在纯剪切荷载下, 胶接连接在靠近钢梁位置的胶黏层内发生破坏. 在拉伸荷载和四种拉剪组合荷载下, 节点的破坏模式为 FRP 层间破坏与 FRP 夹心板和胶黏层之间界面破坏的组合. 荷载-位移曲线表明, 胶黏层内胶体材料分布具有不均匀性, 在试验过程中引起了胶接连接的偏心受力及应力重分布. 根据矢量分离后的拉应力和剪应力, 得到胶接连接的拉剪强度破坏准则.

关键词:胶接连接; 拉剪组合; 破坏模式; 桥面板; 强度准则

中图分类号: U448.38 **文献标志码:** A

Mechanical Behavior of FRP-to-steel Adhesively-bonded Joint under Tensile/shear Combined Loading

JIANG Xu¹, SUN Kai¹, QIANG Xuhong^{1†}, BAI Jie²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Engineering Research Institute of China Construction Eighth Engineering Division, Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to reveal the mechanical properties of the adhesively-bonded joint between fiber-reinforced polymer (FRP) bridge deck and steel beam, the mechanical behavior of adhesive joints under different tensile/shear combination loads was studied experimentally, including ultimate failure loads, failure modes, stiffness as well as strength failure criterion. Considering the mechanical characteristics of adhesively-bonded joint, six different load combinations of tensile and shear were achieved through a special test device. The results showed that under the pure shear loading, the failure of adhesive joints occurring in the adhesive layer was a cohesive failure at a location close to the steel support. Under the tensile and four combined loading conditions, the failure mode was the combination of fiber breaking (or FRP delamination) and interfacial adhesion failure between the FRP sandwich deck and adhesive

* 收稿日期: 2021-10-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFD1100400), National Key Research & Development Program of China(2020YFD1100400); 广东省重点领域研发计划资助项目(2019B111106002), Key Research Project of Guangdong Province of China(2019B111106002); 中建股份科技研发计划资助项目(CSCEC-2020-Z-1), CSCEC Technology R&D Program(CSCEC-2020-Z-1); 上海市科技计划资助项目(20DZ2253000), Shanghai Science and Technology Program(20DZ2253000); 上海市自然科学基金资助项目(21ZR1466100), Natural Science Foundation of Shanghai(21ZR1466100); 朔黄铁路发展有限责任公司科研项目(SHGF-18-50), Research Project of Shuohuang Railway Ltd. (SHGF-18-50)

作者简介:姜旭(1982—), 男, 辽宁沈阳人, 同济大学副教授, 博士生导师, 工学博士

† 通信联系人, E-mail: qiangxuhong@tongji.edu.cn

layer. Load-deformation curves indicated that the non-homogeneous characteristic of the adhesive layer was evident, which induced the eccentric loading on the adhesive joints and stress redistribution during the test process. According to the vectorially separated tensile and shear stress, the tensile-shear strength failure criterion of the adhesive joint was addressed.

Key words: adhesively-bonded joint; tensile/shear combined loading; failure loads; bridge decks; strength criterion

目前,FRP桥面板在国外的桥梁工程中被广泛应用,可以代替传统钢或混凝土桥面板用于桥梁新建或修复项目.FRP桥面板比混凝土桥面板轻约80%,更换为FRP桥面板的桥梁能承受更大的活荷载.此外,FRP桥面板还具有易于安装、对交通干扰小、对环境腐蚀和除冰盐抵抗力强、使用寿命长以及维护成本低等优点.常用的FRP桥面板可根据组装类型分为两类:夹心板和空腔模块板.为了提高使用效率,FRP桥面板通常由钢梁支撑形成组合梁结构共同受力,并通过钢梁弥补FRP材料延性差的缺点^[1].在FRP桥面板和钢梁之间,通过结构胶粘贴形成粘贴连接节点,与螺栓连接相比,胶接连接可减少施工时间,并通过消除紧固件可减重5%~10%^[2],同时,荷载传递更均匀且可提供更好的长期使用性能.近年来,这种FRP-钢组合梁桥逐渐得到应用^[3-7],如德国联邦B3公路的跨线桥、大广高速深州至大名段K17+487.363分离式立交桥等.

目前在土木工程领域,对组合荷载作用下FRP胶接连接的研究仍非常有限.研究主要集中在单层胶接连接和双层胶接连接的力学性能^[8-13],研究粘贴层重叠长度和粘贴层厚度、粘贴母材厚度和局部倒角程度等参数对胶接连接极限破坏荷载的影响.结果表明,贯穿厚度方向的拉伸(剥离)和剪切应力的组合是最不利的应力状态,通常会引发黏合角和黏合边缘下方粘贴母材的层间破坏.进一步的研究提供了准静态轴向拉伸荷载作用下胶接连接的概率强度评估方法^[14-16],但其应用背景与FRP桥面板与钢梁间胶接连接的应用场景仍有较大差异,且基于统计学的分析,对破坏模式缺乏描述.此外,也有研究针对湿热作用下的胶接连接性能展开^[17-18],结果表明长时间暴露在潮湿环境下会导致胶接连接强度降低,在45℃下浸泡会导致材料和节点的强度显著降低.

国内FRP桥面板体系的研究集中于FRP桥面板本身,对其设计参数、静力性能、疲劳性能及设计方法进行大量研究^[19-25].在FRP桥面板与钢梁连接节

点方面,倪章军^[26]对FRP-钢组合梁桥空间受力进行了分析,并提出可以假定GFRP桥面和工字形钢纵梁是完全组合受力(刚结)的.进一步地,朱坤宁等^[27]推导了FRP-钢组合梁桥在温差荷载和均布荷载下连接界面剪力效应的计算公式.结果表明,在温差作用下,组合梁跨中界面剪应力最小,越靠近组合梁端部界面,剪应力增大越快.

通常,FRP桥面板与钢梁之间的黏结节点存在剪应力和拉应力两种典型的应力状态,且拉应力和剪应力的组合很容易引发胶接连接的断裂破坏^[24, 28].此前的研究受限于加载方式,多局限于荷载方向单一、所有工况荷载加载方向相同、缺乏组合荷载下胶接连接的受力状态与破坏模式.FRP-钢胶接连接作为复合桥面板系统中重要的传力细节,其性能直接影响到系统整体传力效率,其安全性至关重要.因此,有必要对拉剪组合荷载下FRP-钢胶接连接力学性能进行进一步研究.

本文以FRP夹心板和钢梁之间的胶接连接力学性能为重点,进行了组合荷载作用下胶接连接的试验研究.采用特定的拉剪加载装置,该装置能够提供6种不同比例的拉伸和剪切荷载组合,通过圆盘加载试验研究了FRP-钢胶接连接的力学性能和破坏模式,并通过分析矢量分离的拉应力和剪应力,得出组合荷载下胶接连接的拉剪强度破坏准则.

1 试验过程

1.1 试验装置

为在胶接连接中实现复杂的应力状态,研发了一种特殊的轮盘加载装置,用于提供纯拉荷载、纯剪荷载以及拉剪组合荷载,如图1所示.加载轮盘分为上、下两部分,并把中心区域切除,以便布置位移传感器.两个传力钢块分别通过8个螺栓固定于上、下两个加载轮盘上,胶接连接试件位于加载设备的中心.加载时,通过3对螺栓孔固定加载方向进行均匀传力,该加载设备可提供6种加载工况:0°(纯拉)、

18°、36°、54°、72°和90°(纯剪)角加载,实现不同比例的拉伸和剪切荷载组合作用。

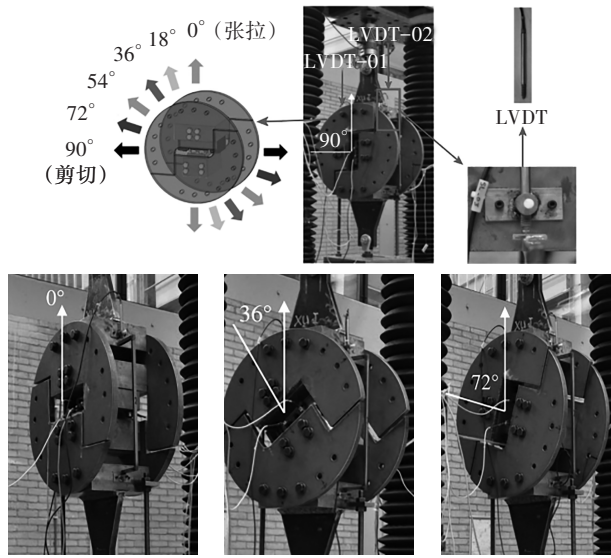


图1 加载装置
Fig.1 Loading device

1.2 试件设计

如图2所示,提取FRP桥面板和钢梁之间的胶连接进行试验研究.试验试件由FRP夹心板、粘贴层和钢板组成,每个加载角度进行3次重复试验,共需18个试验样本,试件编号见表1.

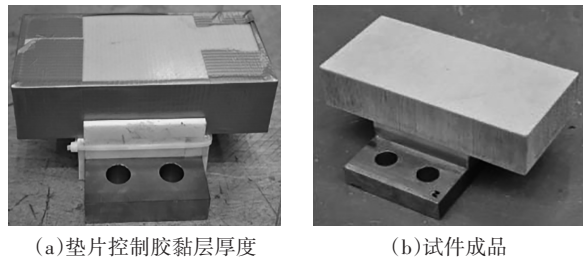


图2 试验试件

Fig.2 Preparation process of adhesive joint specimens

表1 试件设计

Tab.1 Adhesively-bonded joint specimens

试件编号	加载条件	试件数量
S-SB-01~03	90°角(剪切)	3
T-SB-01~03	0°角(张拉)	3
18°-SB-01~03	18°角	3
36°-SB-01~03	36°角	3
54°-SB-01~03	54°角	3
72°-SB-01~03	72°角	3

考虑到加载装置的尺寸限制和安装便利性,试件粘贴层面积取为90 mm × 90 mm,其上为一块

190 mm×90 mm的FRP夹层桥面板,其下为190 mm×90 mm钢板块,通过4个螺孔连接到加载设备上. FRP夹心板的上下表面层为复合材料,由3层0.94 mm厚的EQX1200(玻璃纤维增强层压聚酯复合材料)组成,性能参数如表2所示,中间辅以软木材料形成夹心结构.

表2 FRP材料性能

Tab.2 FRP laminate properties (g·m⁻²)

产品名称	总重	重量均匀性				
		粗纱				针织纱
		0°	45°	90°	-45°	
EQX 1200	1 193	283	300	300	300	10

结构胶型号为BUFA-BONDING PASTE740-0110,生产厂商为BÜFA,其性能参数如表3所示.在恒温20 °C和相对湿度50%条件下进行常温固化.根据欧洲在类似项目的使用经验,如图2所示,通过使用垫片将胶黏层标称厚度控制为6 mm.根据先前对不同表面预处理方法黏结质量的研究^[16],喷砂方法被证明是保证界面黏结质量的可靠且质量可控的表面预处理方法,因此试件都进行粒度200 μm喷砂处理.

表3 胶黏剂性能

Tab.3 Adhesive properties

参数	数值
黏度/(MPa·s)	1 800 000
固体质量分数/%	9
断裂伸长率(钢)/%	3.7
弹性模量/MPa	3 400
拉伸强度(钢)/MPa	14.5
热变形温度/°C	70
固化时间/min	60

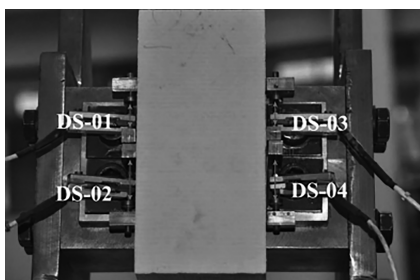
1.3 加载过程

拉剪组合加载装置可以通过改变加载轮盘的角度来提供6个方向的加载工况,整个装置通过2个铰接接头传力,避免由于试件未对中而产生的偏心加载导致额外附加弯矩.

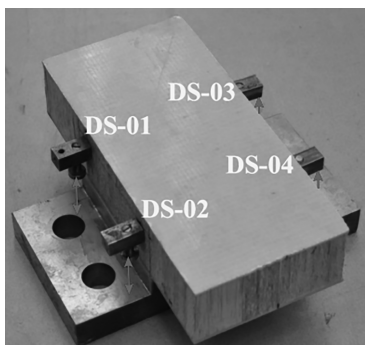
如图1所示,胶接连接的准静态试验由LVDT(线性可变差动变压器)以0.001 mm/s的速率控制位移.当将胶接连接试样安装在加载装置中时,连接L形钢型材的4个螺栓首先没有完全拧紧.施加1 kN的预紧力以使每个加载组件接触彼此消除缝隙,以这种方式,荷载可以从加载装置平稳地传递到胶接

连接. 之后,将这 4 个螺栓完全拧紧,然后卸载预紧力,测试以 0 kN 的负载开始.

对于剪切荷载情况,如图 3(a)所示,两个位移传感器都固定在胶接连接的两侧,以监测 FRP 夹心板和钢支撑之间的相对变形. 对于拉伸荷载条件,位移传感器如图 3(b)所示. 对于组合荷载,传感器布置如图 3(c)所示,左侧测量的是 FRP 夹心板与钢支撑之间的竖向变形(拉伸变形),右侧测量的是水平变形(剪切变形). 在测试之前,所有仪器(LVDT 和位移传感器)均已校准.



(a)剪切荷载位移传感器布置



(b)拉伸荷载位移传感器布置



(c)组合荷载位移传感器布置

图 3 传感器布置

Fig.3 Sensor arrangement

2 试验结果及讨论

2.1 剪切荷载(90°角荷载)破坏模式

对于在剪切荷载下的试件,线性加载直至破坏. 胶接连接的最终破坏均为脆性破坏,纤维断裂时没有任何可见的迹象或破断声. 对于在拉伸荷载(0°角荷载)和 4 个组合荷载条件下的胶接连接,当施加的荷载接近极限破坏荷载时,由于不同的破坏模式,FRP 层压板中的纤维断裂会发出破断声.

剪切荷载下的试件胶接连接的破坏模式是胶层破坏,发生在靠近胶黏层和钢支撑之间的界面. 这种破坏模式表明断裂从胶黏层边缘区域开始,然后不断扩展触发整个胶接连接的最终破坏. 图 4 为剪切荷载下试验结果,断裂位置离界面大约 10 mm.

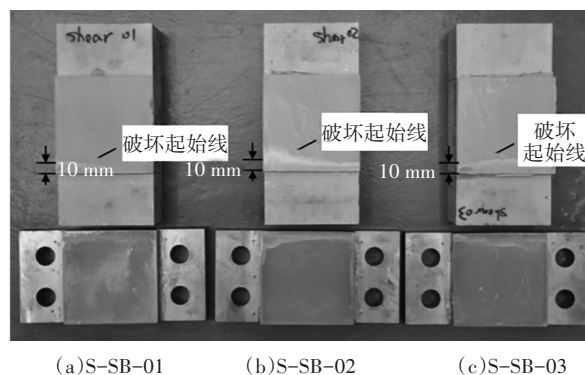
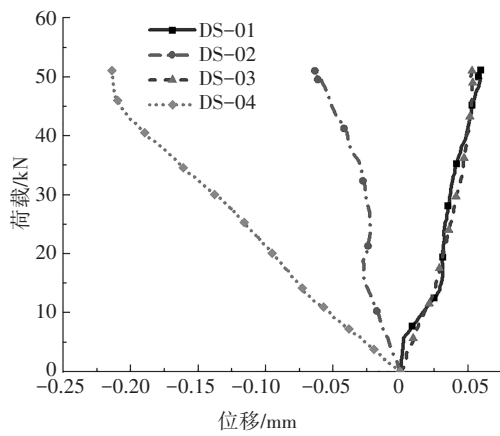


图 4 剪切荷载下试件破坏模式

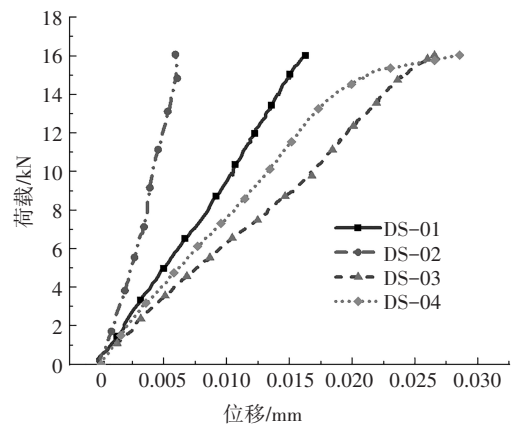
Fig.4 Failure mode of adhesive joints under pure shear loading

图 5(a)~图 5(c)为从 4 个位移传感器得到的剪切荷载下 FRP 夹心板与钢支撑之间的相对位移结果,胶接连接的剪切变形为同一方向,位移传感器数据的正负仅表明相对位置. 与 DS-01 和 DS-03 的变形数据相比,DS-02 和 DS-04 的测试数据明显有很大的偏差,表明剪切力施加不均匀. 此外,胶黏层的非均匀性质也可使荷载分布不均匀. 而对于 DS-01 和 DS-03,测得的变形彼此匹配,表明在胶接连接距荷载边缘较远的一端试件两侧的荷载已经平衡. DS-01 和 DS-03 位移的绝对值小于 DS-02 和 DS-04 的一半,此外,所有的荷载-变形曲线都不是线性增加的. 这是由于胶黏层的非均匀性质,在整个测试过程中胶黏层的应力持续重分布. 在胶接连接制作过程中,胶黏层也会存在一定的孔隙率. 因此在测试过程中,偏心荷载是不可避免的.

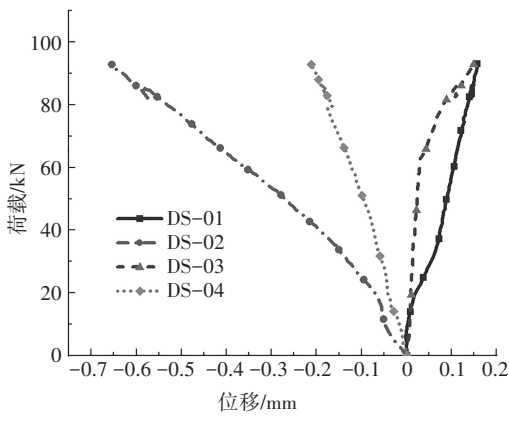
图 5(d)~图 5(f)为拉伸荷载下 FRP 夹心板和钢支撑的竖向变形,4 个位移传感器数值彼此不同,再次表明荷载没有均匀施加. 用位移传感器测得的 FRP 夹心板和钢支架之间的相对变形很小,约为 0.01 mm. 除了拉伸荷载外,在整个测试过程中还存在胶黏点的纵向和横向的少量附加弯矩. 此外,在整个测试过程中,FRP 夹心板和钢支架之间的竖向变形并非线性,当施加的荷载接近破坏荷载时,应力会通过胶接连接重新分布. 如图 6 所示,可以发现在胶黏层的断裂表面上,在边缘区域有一些断裂引发的区域,这证实了由于胶黏层的局部断裂区域引发了应力的重新



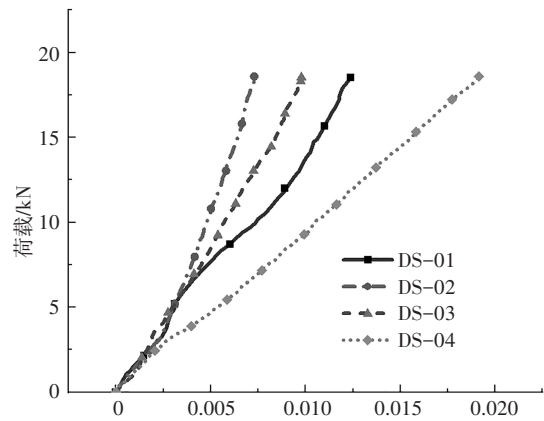
(a)S-SB-01



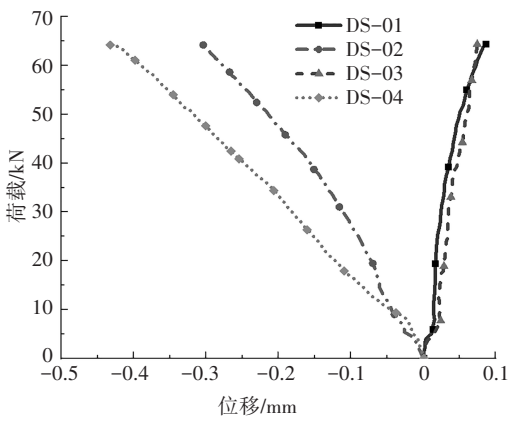
(e)T-SB-02



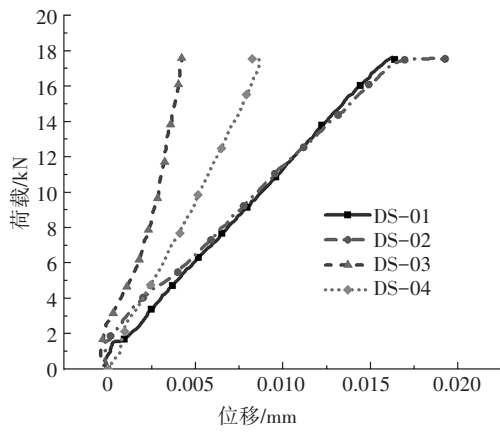
(b)S-SB-02



(f)T-SB-03



(c)S-SB-03

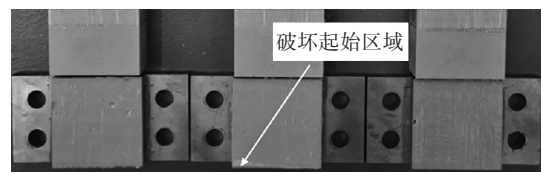


(d)T-SB-01

图5 剪切荷载和拉伸荷载下试件荷载-变形曲线

Fig.5 Load-deformation curves under tensile loading and shear loading

分布,直到黏接区域的其余部分无法再承受全部荷载,胶接连接才以脆性模式破坏.



(a)T-SB-01 (b)T-SB-02 (c)T-SB-03

图6 拉伸荷载下试件破坏模式

Fig.6 Failure mode of adhesive joints under pure tensile loading

2.2 拉伸荷载和组合荷载破坏模式

拉伸荷载和组合荷载下的破坏模式为纤维断裂(或FRP层间破坏)和界面破坏的组合,界面破坏发生在胶黏层与FRP夹心板之间.典型的破坏模式如图7、图8所示,所有断裂面均通过FRP夹心板和胶黏层之间的界面.从FRP夹心板破坏面的角度,一些

区域的纤维断裂或FRP分层很明显,但这些区域没有完全覆盖胶黏剂黏合区域.在72°角荷载条件下,72°-SB-01试件胶黏层出现开裂并且沿着胶黏层和钢支撑之间的界面扩展,如图9所示,断裂面几乎转换到了胶黏层和钢支撑之间的界面.这表明胶黏层和FRP夹心板或钢支撑之间的上下界面几乎同时达到破坏.但对于其他两个72°角荷载条件下的试件,胶黏层中的裂纹是不可见的,取而代之的是大部分的FRP分层或纤维断裂区域.试验结果表明,可控的黏结技术对确保胶接连接的力学性能至关重要.



图7 纤维断裂和界面破坏的组合

Fig.7 Combination of fiber breaking and interfacial failure between adhesive layer and FRP laminates

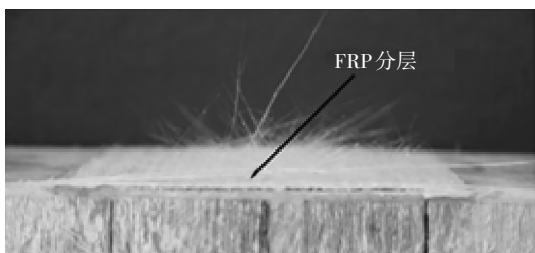


图8 FRP层合板的分层破坏

Fig.8 Delaminating failure in FRP laminates

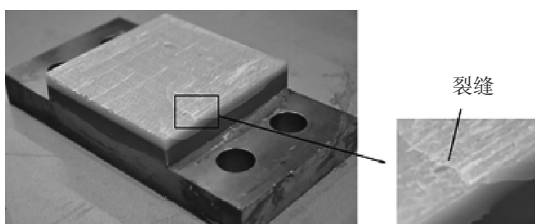
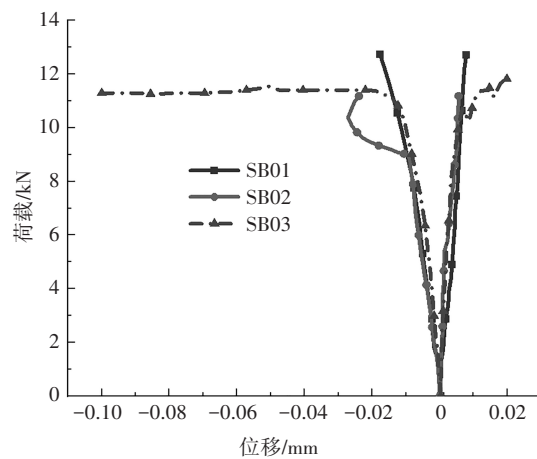


图9 72°-SB-01试件裂缝

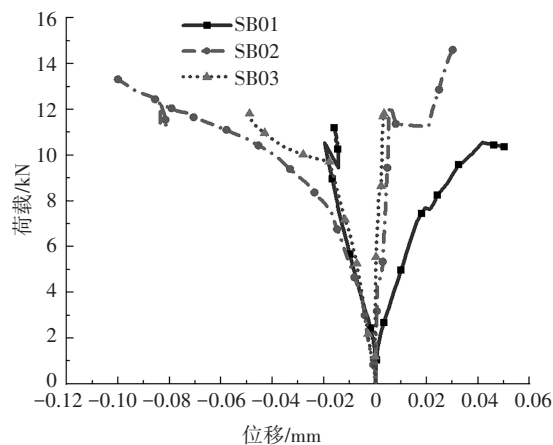
Fig.9 Failure mode of 72°-SB-01

对于其他4个组合荷载条件,位移传感器测得的变形证明了水平和垂直方向都存在偏心荷载.图10说明了在4个荷载角下,位移传感器位置处的FRP夹心板和钢支架之间的平均变形.负区域中的变形值表示DS-02和DS-04中测得的水平变形的平均值,而正区域表示DS-01和DS-03中测得的竖向变形平均值.在加载过程的初始阶段,3个重复样本

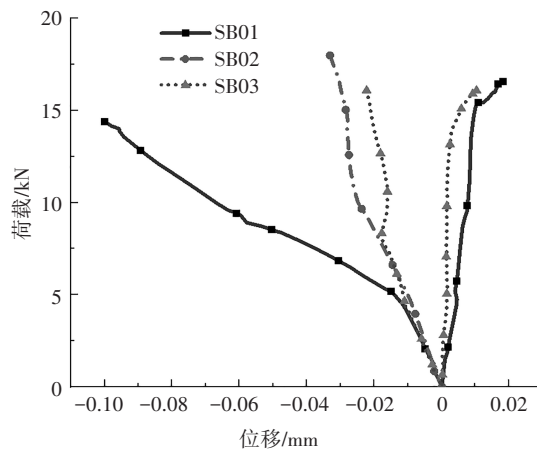
的试验数据趋于一致,但是,随着试验的进行,水平和垂直变形都会发生一些偏差.荷载-位移曲线呈现非线性,尤其是对于DS-02和DS-04的平均值,这也是由胶黏剂材料的不均匀性造成的.在整个试验过程中,胶接连接中的应力分布不均匀,是根据胶黏层的局部刚度重新分布的.因此,由于胶黏层中的孔隙度彼此不同,每个加载角的3个试件荷载-位移曲线不完全一致,随着荷载的增加偏差逐渐增大.



(a)18°角



(b)36°角



(c)54°角

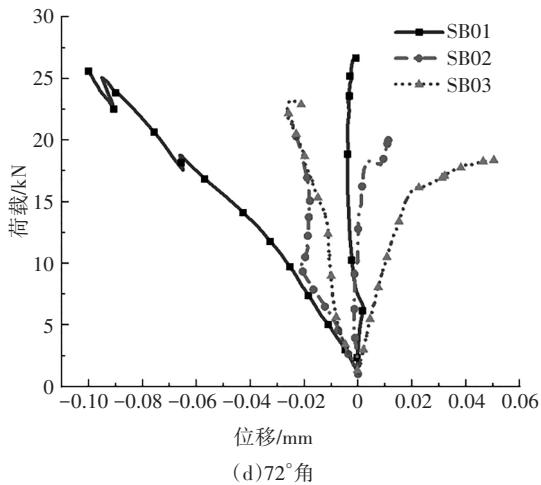


图 10 组合荷载下试件荷载-变形曲线
Fig.10 Load-deformation curves under four combined loading conditions

2.3 破坏准则

表 4 列出了 6 个荷载角(0°、18°、36°、54°、72°和

表 4 6 个加载角度下胶接连接极限荷载

Tab.4 Ultimate failure loads of adhesive joints under six loading conditions

荷载角度/(°)	01 试件极限荷载/kN	02 试件极限荷载/kN	03 试件极限荷载/kN	平均值/kN	偏差
0(张拉)	17.5	16.1	18.7	17.4	7.9%
18	12.7	11.2	11.8	11.9	6.7%
36	11.2	14.6	11.8	12.5	16.5%
54	16.5	17.7	16.1	16.8	5.6%
72	26.6	20	23.2	23.3	14.3%
90(剪切)	51	92.9	64.1	69.3	34.0%

注:偏差 $D = \frac{\max\{|\text{最大破坏荷载} - \text{平均破坏荷载}|, |\text{最小破坏荷载} - \text{平均破坏荷载}|\}}{\text{平均破坏荷载}}$

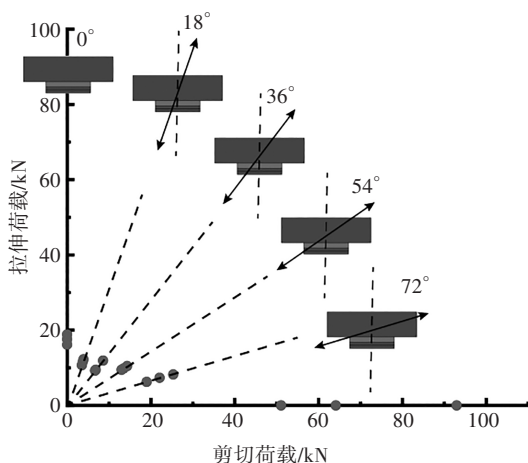


图 11 6 种加载角度下胶接连接极限荷载
Fig.11 Failure loads of adhesive joints under the six angle loading conditions

90°)下胶接连接的极限破坏荷载.在 18°角荷载条件下,胶接连接的承重能力最低,平均为 11.9 kN.同时,在剪切(90°)角荷载条件下,胶接连接具有最高的承载能力,平均破坏荷载为 69.3 kN,但同时也具有 6 个加载条件中最大的偏差 34.0%.对于 4 个组合荷载条件(18°、36°、54°、72°),随着加载角度从 18°增大到 72°,承载能力从 11.9 kN 逐渐增加到 23.3 kN.

为了更清晰地识别荷载组合效应,将极限破坏荷载矢量分解为剪切荷载和拉伸荷载,如图 11 所示.横轴表示施加到胶接连接的剪切荷载,纵轴表示拉伸荷载.在拉伸和剪切荷载的组合作用下,与纯拉伸和纯剪切荷载条件相比,胶接连接的承载能力显著降低.从表 4 中可以看出,由于不同的破坏模式,在剪切荷载作用下(69.3 kN)胶接连接的失效荷载明显高于其他荷载条件.在不同的组合荷载条件下,胶接连接的破坏荷载对矢量力与合力的拉伸荷载比率更为敏感.

为了研究胶接连接的破坏准则,考虑平均应力值,平均应力值通过拉伸/剪切荷载除以胶黏剂黏合面积得到,通过最小二乘法以椭圆函数进行曲线拟合.首先,通过 6 个荷载条件下的所有测试结果,获得了拟合曲线[式(1)],并在图 12 中用虚线表示.

可以发现测试结果与拟合方程之间的一致性不佳.4 种组合荷载条件下的所有测试数据均低于拟合曲线,这表明该拟合方程对于胶接连接的设计并不保守.为了解决此问题,仅选择 4 个组合荷载的测试结果作为基本曲线拟合数据.修正的拟合方程式由式(2)表示,并在图 12 中用实线表示.修正后, R^2 由 0.34 提高至 0.68,拟合优度提高 1 倍.在 FRP 桥面板和钢梁间胶接连接的工程应用中,该连接主要在

拉伸和剪切的组合荷载下起作用,而不是仅在剪切或拉伸荷载下,因此修正后的破坏准则更加保守和实用.

拟合曲线:

$$\left(\frac{\sigma}{1.54}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{9.59}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

修正拟合曲线:

$$\left(\frac{\sigma}{1.41}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{3.18}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

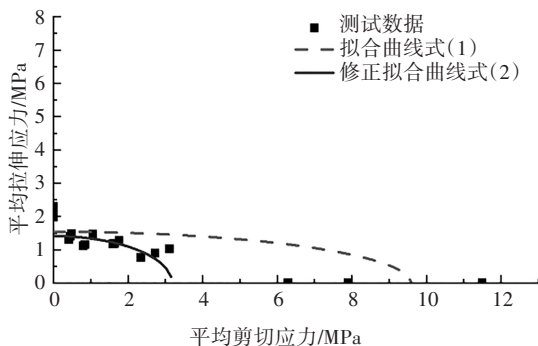


图12 胶接连接破坏准则

Fig.12 Shear-tensile failure criterion for the adhesively-bonded joint

3 结论

本文对FRP桥面板与钢梁间的胶接连接,在剪切、拉伸和拉剪组合荷载条件下进行了试验研究.可以得出以下结论:

1)在剪切荷载下,胶接连接为脆性破坏,胶黏层中在靠近钢支撑的位置处发生胶层破坏.对于在拉伸和4个组合荷载条件下的胶接连接,破坏模式是纤维断裂(或FRP分层)和FRP夹心板与胶黏层之间界面黏合破坏的组合,除了72°-SB-01试样外,破坏模式为胶黏层出现开裂并且沿着胶黏层和钢支撑之间的界面扩展.

2)胶黏层的非均质性十分明显,这会导致胶接连接上的偏心荷载和受载过程中的应力重分布.工程应用中需在FRP夹心板和胶黏层之间提供良好的界面黏合质量,以提高力学性能和在拉伸与组合荷载下胶接连接的最终破坏荷载.

3)在18°角荷载条件下,胶接连接的承重能力最低,平均破坏荷载为11.9 kN.最高的承载能力在纯剪切荷载条件下获得,平均破坏荷载为69.3 kN.针对矢量分离的拉伸应力和剪切应力,获得了胶黏接

头的剪切拉伸破坏准则,可用于胶接连接力学性能的理论评估.

参考文献

- [1] KELLER T, SCHOLLMAYER M. Through-thickness performance of adhesive joints between FRP bridge decks and steel girders[J]. *Composite Structures*, 2009, 87(3): 232-241.
- [2] 方海,徐超,刘伟庆,等. FRP桥面板-钢纵梁连接件研究的分析与建议[J]. *钢结构*, 2014, 29(2): 9-13.
FANG H, XU C, LIU W Q, *et al.* Analysis and suggestions on research of connections between FRP bridge deck and steel girder [J]. *Steel Construction*, 2014, 29(2): 9-13. (In Chinese)
- [3] KNIPPERS J, PELKE E, GABLER M, *et al.* Bridges with glass fibre-reinforced polymer decks: the road bridge in friedberg, Germany [J]. *Structural Engineering International*, 2010, 20(4): 400-404.
- [4] GABLER M, KNIPPERS J. Improving fail-safety of road bridges built with non-ductile fibre composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 1054-1063.
- [5] KELLER T. Recent all-composite and hybrid fibre-reinforced polymer bridges and buildings [J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2001, 3(2): 132-140.
- [6] KELLER T, ROTHE J, DE CASTRO J, *et al.* GFRP-balsa sandwich bridge deck: concept, design, and experimental validation [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(2): 04013043.
- [7] 周印霄. 一种波形钢腹板-FRP桥面板组合桥梁的应用[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2016, 33(9): 89-91.
ZHOU Y X. Application of bridge comprised of corrugated steel web and FRP slab [J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2016, 33(9): 89-91. (In Chinese)
- [8] KELLER T, VALLÉE T. Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part I: stress-strain analysis and failure modes [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2005, 36(4): 331-340.
- [9] KELLER T, VALLÉE T. Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part II: joint strength prediction [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2005, 36(4): 341-350.
- [10] VALLÉE T, KELLER T. Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part III: effects of chamfers [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2006, 37(4/5): 328-336.
- [11] HESHMATI M. Durability and long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints [M]. Gothenburg: ProQuest LLC, 2017: 17-28.
- [12] OLIVIER G, CSILLAG F, TROMP E, *et al.* Static, fatigue and creep performance of blind-bolted connectors in shear experiments on steel-FRP joints [J]. *Engineering Structures*, 2021, 230: 111713.
- [13] LUPĂȘTEANU V, ȚĂRANU N, UNGUREANU D. Failure particularities of adhesively bonded joints between steel and carbon fi-

- bre reinforced polymers composite elements[J]. Buletinul Institutului Politehnic Din Lasii. Sectia Constructii, Arhitectura, 2018, 64(1):63-72
- [14] VALLÉE T, CORREIA J R, KELLER T. Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: experimental and numerical investigations[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(13):1903-1914.
- [15] VALLÉE T, CORREIA J R, KELLER T. Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part II: strength prediction[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(13):1915-1930.
- [16] YU Q Q, GU X L, ZHAO X L, *et al.* Characterization of model uncertainty of adhesively bonded CFRP-to-steel joints[J]. Composite Structures, 2019, 215:150-165.
- [17] HESHMATI M, HAGHANI R, AL-EMRANI M. Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges[J]. Composites Part B:Engineering, 2016, 92:447-462.
- [18] HESHMATI M, HAGHANI R, AL-EMRANI M. Durability of bonded FRP-to-steel joints: effects of moisture, de-icing salt solution, temperature and FRP type[J]. Composites Part B:Engineering, 2017, 119:153-167.
- [19] 冯鹏. 新型FRP空心桥面板的设计开发与受力性能研究[D]. 北京:清华大学, 2004.
FENG P. Development and study on an innovative FRP bridge deck[D]. Beijing:Tsinghua University, 2004. (In Chinese)
- [20] 马文刚, 孙栋, 申楠公. 装配式公路钢桥FRP桥面板研究[J]. 城市道桥与防洪, 2014(11):187-189.
MA W G, SUN D, SHEN N G. Study of FRP bridge deck for steel assembled highway bridges[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(11):187-189. (In Chinese)
- [21] 张弓. GFRP桥面板力学性能试验与有限元分析[D]. 南京:东南大学, 2009.
ZHANG G. Experimental study and finite element analysis of GFRP bridge deck[D]. Nanjing: Southeast University, 2009. (In Chinese)
- [22] 郑毅. FRP夹芯板在复杂曲面桥梁封护系统中的应用技术研究[D]. 北京:清华大学, 2017.
ZHENG Y. Research on the technologies and applications of FRP curved sandwich panel in envelope structure[D]. Beijing:Tsinghua University, 2017. (In Chinese)
- [23] 胡程鹤. 纤维增强复合材料夹芯板的力学性能研究[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(9):64-66.
HU C H. Mechanical property of a fiber-reinforced polymer sandwich plate[J]. New Building Materials, 2015, 42(9):64-66. (In Chinese)
- [24] 郭诗惠, 蔡春声, 张建仁, 等. 界面优化下的GFRP-混凝土组合桥面板静力性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3):19-27.
GUO S H, CAI C S, ZHANG J R, *et al.* Static experimental study on performance of GFRP-concrete composite bridge deck with an optimized interface[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3):19-27. (In Chinese)
- [25] 邵旭东, 张哲, 刘梦麟, 等. 正交异性钢-RPC组合桥面板弯拉强度的实验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(10):7-13.
SHAO X D, ZHANG Z, LIU M L, *et al.* Research on bending tensile strength for composite bridge deck system composed of orthotropic steel deck and thin RPC topping[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(10):7-13. (In Chinese)
- [26] 倪章军. GFRP桥面/钢纵梁组合梁桥结构性能分析与研究[D]. 上海:同济大学, 2005.
NI Z J. Research on structural performance of GFRP deck / steel longitudinal beam composite bridge[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (In Chinese)
- [27] 朱坤宁, 万水. 温差和荷载引起的FRP-钢组合梁界面剪应力分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2011, 12(4):387-392.
ZHU K N, WAN S. Interfacial shear stress of FRP-Steel composite beams subjected to temperature and load action[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(4):387-392. (In Chinese)
- [28] DA SILVA L F M, DAS NEVES P J C, ADAMS R D, *et al.* Analytical models of adhesively bonded joints—part I: literature survey[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29(3):319-330.