

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.005



GFRP 肋式剪力连接件受力性能对比试验研究

黄海林, 李遨, 祝明桥, 郭原草, 曾垂军

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 剪力连接件是保证 GFRP 混凝土组合梁/板中两种不同材料共同工作的重要构造, 设计了矩形肋和 T 形肋两类 GFRP 肋式剪力连接件, 进行了 3 组共 8 个 GFRP 肋式剪力连接件的推出试验, 包括: 矩形肋开孔、T 形肋开孔、T 形肋不开孔 3 组 GFRP 肋式剪力连接件, 得到了其破坏形态、极限承载力、荷载-滑移曲线及荷载-应变变化规律, 重点研究肋内开孔及肋的截面形式对 GFRP 肋式剪力连接件受力性能的影响。试验结果表明: GFRP 肋式剪力连接件的破坏形态均为混凝土劈裂破坏; 对比矩形肋开孔试件, T 形肋开孔试件强度高、延性好; 对比 T 形肋不开孔试件, T 形肋开孔试件强度与延性均能提高。基于试验结果, 建立了考虑肋内开孔及肋截面形式影响的 GFRP 肋式剪力连接件极限承载力计算公式, 拟合得到了 GFRP 肋式剪力连接件的荷载-滑移曲线上升段的理论模型, 建立了其抗剪刚度计算公式。

关键词: 组合结构; 肋式剪力连接件; 推出试验; 破坏机理; 粘结滑移

中图分类号: U443; TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)05-0034-09

Comparative analysis of push-out tests for two kinds of GFRP shear connectors

Huang Hailin, Li Ao, Zhu Mingqiao, Guo Yuancao, Zeng Chuijun

(College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China)

Abstract: Shear connectors are the important detailings affecting the mechanical properties of GFRP-concrete composite beams/decks. Rectangular rib and T-type rib GFRP shear connectors are put forward to improve the interfacial bond properties between GFRP and concrete. Eight push-out tests are conducted to evaluate the mechanical behaviors of two rectangular perforated rib GFRP shear connectors and three T-type perforated rib GFRP shear connectors, as well as three T-type rib GFRP shear connectors. The failure patterns, ultimate bearing capacities, load-slip behaviors and load-strain regularities are obtained by contrast tests. Results show that T-type perforated rib GFRP shear connectors show higher strength and better ductility than rectangular perforated rib GFRP shear connectors, and T-type perforated rib GFRP shear connectors show higher strength and better ductility than T-type rib GFRP shear connectors. An empirical equation to predict the ultimate shear resistance is proposed and validated by the experimental

收稿日期: 2015-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51308207, 51378202); 湖南省教育厅项目(14C0439)

作者简介: 黄海林(1984-), 男, 博士, 主要从事组合结构及新材料应用研究, (E-mail) hhlvsgenius@163.com.

Received: 2015-12-02

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51308207, No. 51378202); Project of Hunan Province Education Office (No. 14C0439).

Author brief: Huang Hailin(1984-), PhD, main research interests: composite structure and application of new materials, (E-mail) hhlvsgenius@163.com.

data. Idealized load-slip models and equations to predict the load versus slip relationship for all specimens are proposed. Curve fittings are performed to find fitting parameters for all tested specimens and the results show a very good correlation with those of the experiments. An empirical equation to predict the shear rigidity is proposed.

Keywords: composite structure; shear connector; push-out test; failure mechanism; bond-slip behavior

钢-混凝土组合梁/板在桥梁工程中得到了广泛的应用,但也存在诸多问题,其中,钢材锈蚀引发的结构承载力下降,严重影响了结构的使用性能,降低了结构的耐久性,为此世界各国每年都需花费巨资对已锈蚀结构或部件进行维修加固^[1-2]。因此,新材料的开发也就成了必然。玻璃纤维增强塑料(Glass Fiber Reinforced Plastic,简称 GFRP)是由玻璃纤维材料与基体材料按一定比例混合并经过拉挤、手糊等工艺复合形成的新型高性能材料,GFRP 优良的耐腐蚀性能与轻质高强特性使其成为代替钢材应用在恶劣环境的理想材料之一^[3]。与钢结构相比,GFRP 结构具有以下优势:轻质高强、抗腐蚀能力强、抗氧化、耐候性佳;外表美观,色泽持久;具有透波、无磁、绝热绝缘等功能特性^[4]。

实际工程中,若参考钢-混凝土组合梁/板的设计思想,将 GFRP 与混凝土组合成梁/板结构,混凝土置于受压区,GFRP 置于受拉区,二者可通过界面剪力连接件协同工作,能充分发挥二者的材料性能,且可将底部的 GFRP 拉挤型材作为永久性模板,方便施工^[5]。为此,近年来各国致力于推动 GFRP 混凝土组合结构在桥梁工程、海洋工程、市政工程以及电力工程结构中的应用^[3, 6-7]。

界面滑移是影响 GFRP 混凝土组合梁/板受力性能的重要因素。实际工程中,可在 GFRP 混凝土组合梁/板的界面增设剪力连接件保证 GFRP 与混凝土的协同工作,目前常用的方法有界面喷砂、粘贴 GFRP 剪力连接件^[8]、预埋栓钉^[9]以及采用膨胀剂连接等。其中,以粘贴 GFRP 剪力连接件和预埋栓钉的方法最为可靠,为此,GB 50608—2010《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》规定:GFRP 混凝土组合梁的界面应粘贴树脂混凝土条、GFRP 波形板、GFRP 小工字梁等有效的剪力连接件保证界面可靠连接。为改善下部 GFRP 构件与上部混凝土的界面粘结性能,Kubo 等^[10]、Cho 等^[11]、Bank 等^[8, 12]、Fam 等^[5]、Keller 等^[13]、杨勇等^[14]、黄辉等^[15]、薛伟辰等^[16],分别借助不同构造做法各自开发了 GFRP 混凝土组合桥面板,其共同点在于:在

GFRP 底模上增设 GFRP 板肋,伸出的板肋兼作为剪力连接件。

围绕 GFRP 混凝土组合梁/板中剪力连接件的力学性能,国内外学者进行了初步探索,主要有:Nguyen 等^[17]通过在 GFRP 工字形构件上预埋抗剪栓钉,进行了采用栓钉的 GFRP 超高性能纤维改性混凝土界面推出试验研究;薛伟辰等^[16]、Nam 等^[18]也分别对开孔板 GFRP 剪力连接件进行了推出试验研究。以上推出试验研究为 GFRP 剪力连接件的工程应用提供了理论依据,但主要集中在栓钉和矩形开孔板两种形式。为此,笔者提出一种增设有 T 形肋或矩形肋剪力连接件的 GFRP 空心箱形构件,如图 1 所示。整个 GFRP 空心箱形构件通过拉挤工艺一次成型,能很好的保证伸出的剪力连接件与下部空心箱形构件形成整体共同受力,并通过对比试验重点研究了肋内开孔及肋的截面形式对 GFRP 肋式剪力连接件受力性能的影响。



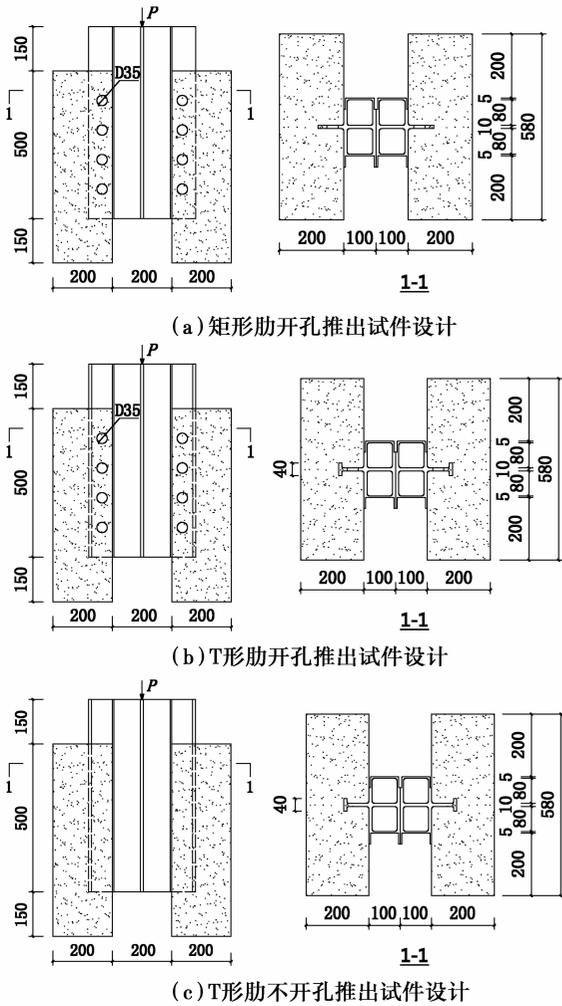
图 1 GFRP 空心箱形构件

Fig. 1 GFRP hollow box components

1 推出试件设计与制作

1.1 推出试件设计

参考欧洲规范 4 设计了 3 组共 8 个 GFRP 肋式剪力连接件,包括矩形肋开孔、T 形肋开孔以及 T 形肋不开孔 3 组 GFRP 肋式剪力连接件,编号分别为 JK1~JK2、TK1~TK3 及 T1~T3。每个推出试件由中间 GFRP 空心箱形构件与左右两边混凝土块组成。推出试件设计见图 2。推出试件 GFRP 材性参数见表 1,混凝土立方体抗压强度实测平均值为 31.2 MPa。



(a) 矩形肋开孔推出试件设计

(b) T形肋开孔推出试件设计

(c) T形肋不开孔推出试件设计

图 2 推出试件设计

Fig. 2 Push-out specimens design

表 1 GFRP 材性参数

Table 1 Material properties

质量密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵向拉 伸强度/ MPa	纵向压 缩强度/ MPa	横向拉 伸强度/ MPa	纵向拉伸 弹性模量/ GPa
2 000	473	265	24	13.8

1.2 推出试件制作

推出试件的中间 GFRP 空心箱形构件由两个增设有剪力连接件的 GFRP 箱型构件,通过粘接组合成型。粘贴步骤:首先,用砂纸打磨 GFRP 表面,打磨方向呈 45° ;随后,清理表面的灰尘并用酒精洗净;在 GFRP 粘贴面上抹结构胶并对中按压;最后,养护 7 d,成型后的中间 GFRP 构件见图 3。为避免加载时顶端 GFRP 上的局压应力过大而导致局压破坏,在顶端空心箱中用混凝土灌实,灌实长度为 150 mm。

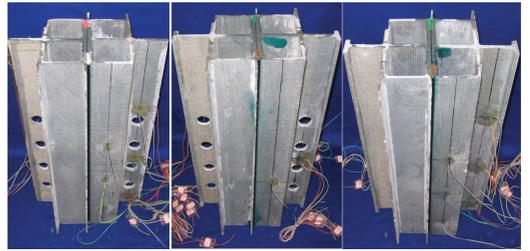


图 3 拼接成型后的中间 GFRP 空心箱形构件

Fig. 3 GFRP hollow box components after bonding

2 试验装置、加载方案及测点布置

试验用主要设备有:大刚度反力门架、250 t 千斤顶、JMZX 智能振弦实心荷载传感器、DH3816 静态应变测试分析系统以及百分表。试验装置见图 4。

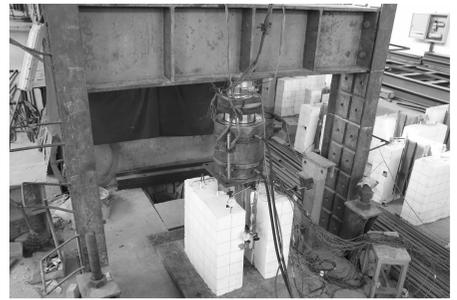


图 4 试验装置

Fig. 4 Test setup

加载分预加载和正式加载两阶段。预加载时每级荷载取 10 kN,荷载上限取 0.1 倍计算极限荷载;正式加载分 2 个控制阶段,开裂前采用力控制加载,每级荷载取计算极限荷载的 1/20,开裂后改由位移控制加载,每级位移加载取 0.2 mm。

为测量 GFRP 肋式剪力连接件的应变变化规律,在矩形肋、T 形肋以及 GFRP 空心箱的侧壁上布置应变片,应变测点布置见图 5。

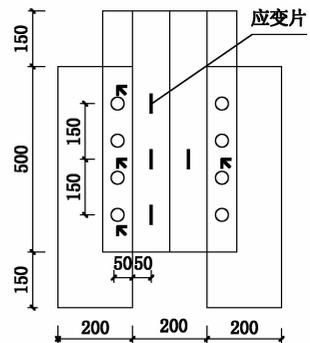


图 5 应变片布置示意图

Fig. 5 Strain gauge locations

为测量 GFRP 与混凝土粘贴界面的竖向滑移和混凝土块的水平侧移,分别布置了 2 个百分表,布置示意如图 6 所示。



图 6 百分表布置示意图

Fig. 6 Displacement transducer locations

3 试验结果及分析

3 组试件的主要试验结果见表 2。其中, p_u 为极限承载力、 s_u 为极限承载力对应的滑移量。

表 2 推出试验结果

Table 2 Test results

试件编号	p_u /kN		s_u /mm		破坏形态
JK1	389	385	2.019	2.011	混凝土块
JK2	380		2.003		劈裂破坏
TK1	551		2.038		混凝土块
TK2	670	607	1.965	2.319	劈裂破坏
TK3	600		2.954		
T1	417		1.863		混凝土块
T2	386	408	1.340	1.513	劈裂破坏
T3	422		1.336		

3.1 试验过程及破坏形态

1) 两类 GFRP 肋式剪力连接件受力全过程

矩形肋开孔试件 JK1~JK2: 两个试件表现出基本相同的受力性能, 下面, 仅以试件 JK1 为代表来说明本组试件从开始加载到最终破坏的受力全过程。开裂前荷载稳定上升, 滑移变化较小。354 kN 时, 左右两边混凝土块顶面沿矩形肋端部边缘突然出现 45°角斜主裂缝; 继续加载, 左右两边混凝土块内表面底部同时出现人字形劈裂缝, 该裂缝始于底部矩形肋最外边缘并同时向两侧呈人字形延伸, 左右两边混凝土块外表面顶部出现一些细小的竖向劈裂缝, 且不断向下延伸; 389 kN 时, 两边混凝土块出现劈裂破坏, 破坏始于两边混凝土块顶面的斜主裂缝

迅速扩展, 破坏时 GFRP 肋式剪力连接件基本完整。典型破坏形态及裂缝分布见图 7。



(a) 混凝土块顶面 45°角斜主裂缝、外表面顶部竖向劈裂缝分布



(b) 混凝土块内表面底部人字形劈裂缝分布

图 7 矩形肋试件典型破坏形态及裂缝分布图

Fig. 7 Typical failure pattern and crack distribution

T 形肋开孔试件 TK1~TK3: 3 个试件表现出基本相同的受力性能, 下面仅以试件 TK1 为代表, 来说明本组试件从开始加载到最终破坏的受力全过程。开裂前荷载稳定上升, 滑移变化较小。373 kN 时, 左边混凝土块内表面底部出现八字形劈裂主裂缝, 该裂缝始于底部 T 形肋翼缘两端并同时向外侧呈八字形延伸, 继续加载, 裂缝不断延伸, 左边混凝土块外表面底部出现一些细小的裂缝, 靠近中间位置有一条向上延伸的竖向劈裂缝; 480 kN 时, 左右两边混凝土块顶面沿 T 形肋翼缘端部出现 45°角斜裂缝; 551 kN 时, 右边混凝土块内表面底部出现八字形劈裂缝, 且裂缝一直延伸扩展, 此时左边混凝土块内表面底部八字形劈裂主裂缝宽度约 2 mm, 荷载-滑移曲线进入下降段, 继续加载最后两边混凝土块出现劈裂破坏, GFRP 肋式剪力连接件基本完整。典型破坏形态及裂缝分布见图 8。

2) 肋内开孔对试件受力性能的影响

T 形肋不开孔试件 T1~T3 呈现出与 T 形肋开孔试件 TK1~TK3 基本相同的受力性能, 其最终破坏形态与裂缝分布机理相同, 最终左右两边混凝土块出现劈裂破坏, 破坏始于混凝土块内表面底



(a) 混凝土块外表面底部竖向劈裂缝分布



(b) 混凝土块顶面45°角斜裂缝分布



(c) 混凝土块内表面底部八字形劈裂主裂缝分布

图8 T形肋试件典型破坏形态及裂缝分布图

Fig. 8 Typical failure pattern and crack distribution

部的八字形劈裂主裂缝,破坏时 GFRP 肋式剪力连接件基本完整;区别在于 T 形肋开孔后,孔内混凝土榫产生的销栓效应明显提高了试件的极限承载力,改善了试件的抗剪延性,对比表 2 可知,T 形肋开孔后,平均强度提高 48.8%,极限强度对应的平均滑移增大 53.3%。可见,T 形肋开孔后,能显著改善 GFRP 肋式剪力连接件的受力性能,但不能改变其最终破坏形态。

3) 肋的截面形式对试件受力性能的影响

对比矩形肋开孔试件 JK1~JK2 与 T 形肋开孔试件 TK1~TK3,可以发现:两者开孔形式相同,肋的截面形式不同,T 形肋明显增大了 GFRP 与混凝土的接触面积;尽管最终破坏时两类试件均为混凝土劈裂破坏,但破坏时起控制的主裂缝不同,矩形肋开孔试件破坏始于左右两边混凝土块顶面的斜主裂缝迅速扩展,而 T 形肋开孔试件破坏始于混凝土块内表面底部八字形劈裂主裂缝迅速扩展。根据表

2,对比矩形肋开孔试件的平均强度,T 形肋不开孔试件、T 形肋开孔试件分别高出 6.0%、57.7%,可见肋的截面形式对试件承载力的影响要远大于孔内混凝土榫对试件承载力的影响,因此,实际工程中若需要较高的抗剪强度,建议首先采用 T 形肋,其次可在肋内开孔;对比 T 形肋开孔试件极限强度对应的平均滑移,矩形肋开孔试件小 13.3%,可见 T 形肋比矩形肋试件的延性要好。

3.2 荷载-滑移曲线

矩形肋开孔试件的荷载-滑移曲线如图 9(a)所示,可分为 2 个阶段:直线阶段,在加载初期,荷载与滑移基本呈直线关系;非线性阶段,当荷载增大到一定程度时,混凝土与 GFRP 的滑移量增长速度较快,荷载-滑移曲线基本呈非线性增长。对于矩形肋开孔试件,由于左右两边混凝土块顶面的斜主裂缝一旦出现,立即导致试件混凝土出现劈裂破坏,故其荷载-滑移曲线不存在下降段。

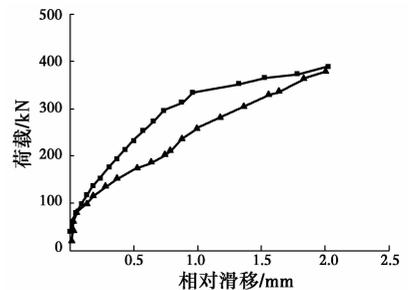
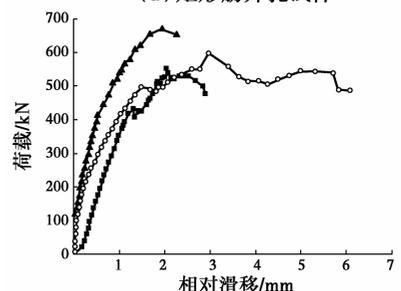
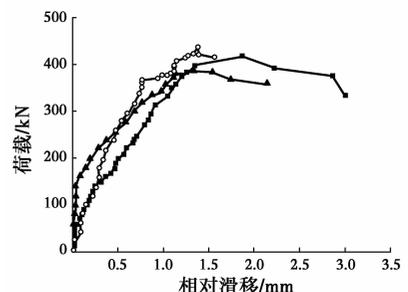
注: — JK-1 — JK-2
(a) 矩形肋开孔试件注: — TK-1 — TK-2 — TK-3
(b) T形肋开孔试件注: — T-1 — T-2 — T-3
(c) T形肋不开孔试件

图9 荷载-滑移曲线

Fig. 9 Load versus slip curves

对比矩形肋开孔试件,T形肋开孔试件的荷载-滑移曲线可分3个阶段:直线阶段、非线性阶段以及下降阶段,直线阶段、非线性阶段基本呈现出与矩形肋开孔试件相同的规律,区别在于T形肋开孔试件存在下降阶段,其荷载-滑移曲线见图9(b)。由于GFRP与混凝土的接触面已做喷砂处理,在加载初期,剪力连接件和混凝土之间无明显滑移,GFRP与混凝土共同受力、协同变形,故两类试件基本表现出相同的受力性能。当界面出现滑移后,抗滑移能力取决于GFRP肋式剪力连接件与混凝土的强度。对比矩形肋开孔试件,T形肋增大了GFRP与混凝土的接触面积,提高了界面摩擦力,改善了抗剪延性。当T形肋开孔试件达到极限强度时,混凝土块内表面底部的八字形劈裂主裂缝宽度过大导致试件无法继续承载,荷载急速下降,滑移继续增大,荷载-滑移曲线呈下降趋势。

对比T形肋开孔试件,T形肋不开孔试件的荷载-滑移曲线也可分为3个阶段,如图9(c)所示,区别在于:T形肋开孔后,流进孔内的混凝土榫阻止了GFRP与混凝土界面之间的相对错动,故在非线性和下降阶段,T形肋开孔试件能提供更高的抗剪刚度与抗剪强度。

3.3 GFRP 肋式剪力连接件轴向压应变变化规律

3组试件GFRP肋式剪力连接件肋上荷载-轴向压应变基本呈相同的变化规律,典型的GFRP肋式剪力连接件肋上荷载-轴向压应变曲线见图10。试件最终破坏时,GFRP肋式剪力连接件肋上的平均压应变在 $3\ 560 \times 10^{-6}$,远未达到材料本身的极限压应变,这与前文所述破坏时GFRP肋式剪力连接件基本完整的试验现象吻合。

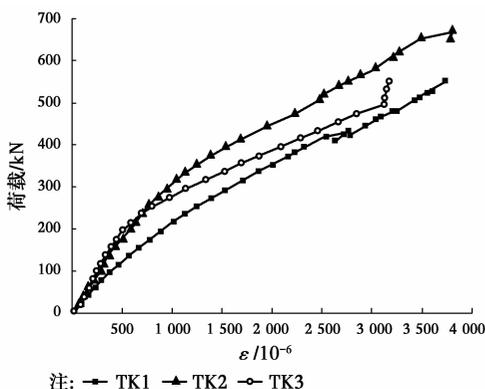


图10 GFRP 肋式剪力连接件肋上
荷载-轴向压应变曲线

Fig. 10 Load versus strain curves in the ribs

3.4 GFRP 空心箱体侧壁轴向压应变变化规律

3组试件GFRP空心箱体侧壁的荷载-轴向压应变基本呈相同的变化规律,典型的GFRP空心箱体侧壁荷载-轴向压应变曲线见图11。由图11可知,GFRP空心箱体侧壁的轴向应变比GFRP肋式剪力连接件肋上的轴向应变小,且基本呈线性变化,试件最终破坏时,GFRP空心箱体侧壁的平均压应变在 600×10^{-6} ,远小于GFRP肋式剪力连接件肋上的平均压应变,表明顶部施加的集中荷载能很好的通过GFRP空心箱体均匀传递给左右两边的剪力连接件。由于试验当中混凝土的应变数据离散较大,故本文未对其进行说明,但试验当中可以通过肉眼观察,非常容易捕捉到左右两边混凝土块的开裂情况以及最终破坏形态,见图7、图8。

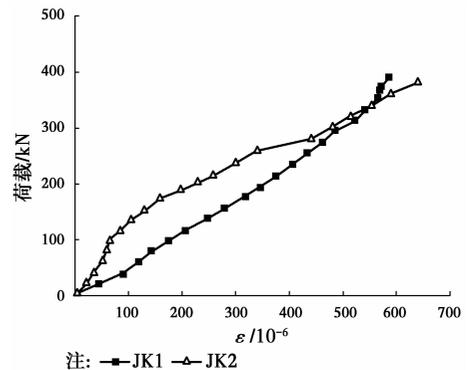


图11 GFRP 空心箱体侧壁
荷载-轴向压应变曲线

Fig. 11 Load versus strain curves in the GFRP sidewalls

4 GFRP 肋式剪力连接件受力性能计算

4.1 GFRP 肋式剪力连接件极限承载力计算公式

基于以上试验研究结果可知,两类GFRP肋式剪力连接件最终破坏均由混凝土劈裂破坏控制,GFRP肋式剪力连接件基本完整,影响GFRP肋式剪力连接件极限承载力的主要因素有:1)左右两边混凝土块的强度;2)GFRP肋式剪力连接件中肋的截面形式,主要包括矩形肋和T形肋两种情况;3)肋内孔洞内混凝土榫提供的销栓力。GFRP肋式剪力连接件极限承载力 V_u 计算公式为

$$V_u = V_{c1} + V_{c2} \quad (1)$$

$$V_{c1} = n_1 \alpha_1 \alpha_2 A_c f_t \quad (2)$$

$$V_{c2} = n_2 \gamma_b \alpha_h f_t b h \quad (3)$$

式(1)中: V_{c1} 为混凝土榫所提供的抗剪销栓

力,按式(2)进行计算; V_{c2} 为左右两边混凝土块所提供的强度,按式(3)进行计算。需要说明的是,对于T形不开孔试件,其极限承载力仅取决于左右两边混凝土块的强度,故式(1)应改为 $V_u = V_{c2}$ 。

式(2)中: n_1 为混凝土榫的数目; α_1 为孔洞截面系数,对于圆孔可取1.0; α_2 为剪力连接件截面形状系数,T形肋剪力连接件建议取1.2,矩形剪力连接件建议取1.0; A_c 为单个孔洞截面面积; f_t 混凝土轴心抗拉强度设计值。

式(3)中: n_2 为混凝土块的数目,取2.0; η 为两边混凝土块共同受力均匀系数,取值不超过1.0,主要表明两边混凝土块共同受力的均匀度,本文中取1.0; b 为混凝土块厚度; h 为混凝土块高度; α_b 、 α_h 分别为与混凝土块厚度 b 、高度 h 有关的承载力折减系数,取值不超过1.0,主要反映混凝土块参与受力面的面积大小,本文中T形肋试件 α_b 与 α_h 均取1.0,矩形肋试件 α_b 与 α_h 分别取0.88和1.0。

根据式(1)~(3)计算的GFRP肋式剪力连接件承载力计算值与试验值对比结果见表3。由表3可知,对于矩形肋开孔试件与T形肋不开孔试件,按本文公式计算的极限承载力与试验值吻合很好;对于T形肋开孔试件,按本文公式计算的极限承载力具备较高的安全储备。

表 3 GFRP 肋式剪力连接件承载力

试验值与计算值对比结果

Table 3 Comparison of ultimate shearing capability between test value and calculated value

试件 编号	试验值/ kN	计算值/ kN	试验值/ 计算值
JK1	389	385	1.05
JK2	380	385	1.05
TK1	551	607	1.46
TK2	670	607	1.46
TK3	600	607	1.46
T1	417	408	1.05
T2	386	408	1.05
T3	422	408	1.05

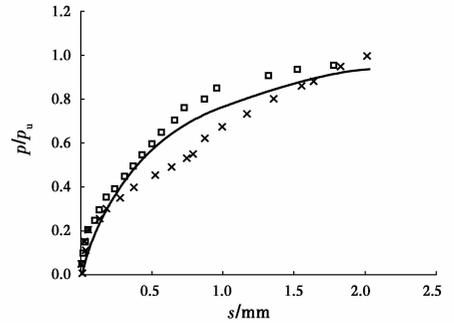
4.2 抗剪刚度计算公式

荷载-滑移曲线综合反映了试件的抗剪性能,是分析滑移规律的重要依据。本文通过软件拟合建立了两类GFRP肋式剪力连接件的荷载-滑移曲线上

升段的理论模型,如图12所示,计算公式为

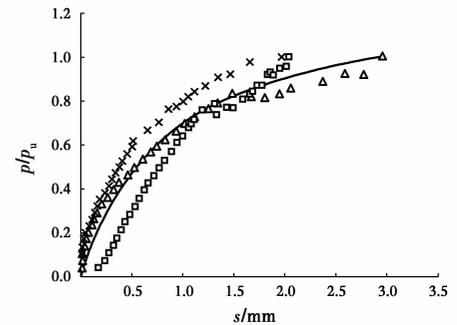
$$\frac{p}{p_u} = \frac{s}{\alpha + \beta s} \quad (4)$$

式中: s 表示界面滑移, p 为承载力; p_u 为GFRP肋式剪力连接件的极限承载力; α 、 β 的取值与肋内开孔情况、肋的截面形式相关,其取值为



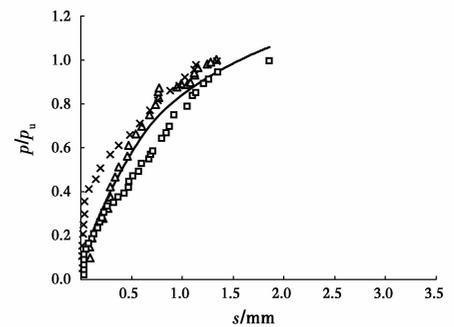
注:—拟合曲线 □ JK1 × JK2

(a) 矩形肋开孔试件



注:—拟合曲线 □ TK1 × TK2 △ TK3

(b) T形肋开孔试件



注:—拟合曲线 □ T1 × T2 △ T3

(c) T形肋不开孔试件

图 12 荷载-滑移拟合曲线

Fig. 12 Load versus slip fitting curves

矩形肋开孔试件: $\alpha = 0.468, \beta = 0.830$

T形肋开孔试件: $\alpha = 0.668, \beta = 0.770$

T形肋不开孔试件: $\alpha = 0.509, \beta = 0.661$

根据以上试验研究结果可知,3组试件在荷载不超过 $0.4p_u$ 时,荷载-滑移曲线基本近似成直线。为此,本文中假定当荷载不超过 $0.4p_u$ 时,抗剪刚度

基本保持不变,可得抗剪刚度 K

$$K = 0.4p_u/s_{0.4p_u} \quad (5)$$

式中: p_u 为 GFRP 肋式剪力连接件的极限承载力; $s_{0.4p_u}$ 为荷载达到 $0.4p_u$ 时所对应的滑移量。

将 $p = 0.4p_u$ 代入式(4),得

$$s_{0.4p_u} = \frac{\alpha}{2.5 - \beta} \quad (6)$$

故最终抗剪刚度 K 为

$$K = \frac{1 - 0.4\beta}{\alpha} p_u \quad (7)$$

5 结 论

通过 3 组共 8 个 GFRP 肋式剪力连接件的推出试验,重点研究肋内开孔及肋的截面形式对 GFRP 肋式剪力连接件受力性能的影响,其结论如下:

1)所有试件均呈相同的破坏机理,最终破坏时混凝土出现劈裂破坏,GFRP 肋式剪力连接件基本完整。

2)对比矩形肋开孔 GFRP 肋式剪力连接件,T 形肋开孔 GFRP 肋式剪力连接件能提供更高的抗剪强度以及更好的抗剪延性;对比 T 形肋不开孔剪力连接件,肋内开孔后,T 形肋开孔 GFRP 肋式剪力连接件能提供更高的抗剪强度以及更好的抗剪延性。

3)基于试验得到的破坏机理,建立了考虑肋内开孔情况及肋截面形式影响的 GFRP 肋式剪力连接件极限承载力计算公式。

4)基于试验结果,拟合得到了 GFRP 肋式剪力连接件的荷载-滑移曲线上升段的理论模型,建立了其抗剪刚度计算公式。

参考文献:

- [1] TENG J G, YU T, FERNANDO D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78(6): 131-143.
- [2] ZHAO X L, ZHAO L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures [J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1808-1823.
- [3] HOLLAWAY L C. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2419-2445.
- [4] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V L, et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review [J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(2): 73-87.
- [5] NELSON M, FAM A. Full bridge testing at scale constructed with novel FRP stay-in-place structural forms for concrete deck [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50(2): 368-376.
- [6] 冯鹏. 复合材料在土木工程中的发展与应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9): 99-104.
FENG P. Development and application of composite in civil engineering [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(9): 99-104. (in Chinese)
- [7] NAM J H, YOON S J, MOON H D, et al. Development of FRP-concrete composite bridge deck in Korea state-of-the-art review [J]. Key Engineering Materials, 2006, 236-328: 1715-1718.
- [8] HANUS J P, BANK L C, OLIVA M G. Combined loading of a bridge deck reinforced with a structural FRP stay-in-place form [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(4): 1605-1619.
- [9] CORREIA J R, BRANCO F A, FERREIRA J. GFRP-concrete hybrid cross-sections for floors of buildings [J]. Engineering Structures, 2009, 31(6): 1331-1343.
- [10] MATSUI S, ISHIZAKI S, KUBO K. An experimental study on durability of FRP-RC composite deck slabs of highway bridges [C]// 3rd Int. Conf. on Concrete Under Severe Conditions: Environment & Loading. Vancouver, Canada: CONSEC'01, 2001: 933-940.
- [11] CHO K, PARK S, KIM S, et al. Shear connection system and performance evaluation of FRP-concrete composite deck [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2010, 14(6): 855-865.
- [12] BANK L C, OLIVA M G, BAE H, et al. Pultruded FRP plank as formwork and reinforcement for concrete members [J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10(5): 525-535.
- [13] KELLER T, SCHAUMANN E, VALLEE T. Flexural behavior of a hybrid FRP and lightweight concrete sandwich bridge deck [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(3): 879-889.
- [14] 杨勇, 刘玉擎, 范海丰. FRP-混凝土组合桥面板疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(6): 66-73.
YANG Y, LIU Y Q, FAN H F. Experimental study on the fatigue behavior of FRP-concrete composite decks

- [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 66-73. (in Chinese)
- [15] 黄辉, 王文炜, 戴建国. 两跨连续 GFRP-混凝土空心组合板受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(10): 59-65.
- HUANG H, WANG W W, DAI J G. Experimental study on structural performance of two-span continuous GFRP-concrete composite hollow slabs[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(10): 59-65. (in Chinese)
- [16] 薛伟辰, 张赛, 葛畅. FRP 混凝土组合梁抗剪连接件试验研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2014, 109(1): 207-210.
- XUE W C, ZHANG S, GE C. Experimental study of shear connector in FRP-concrete composite beam[J]. *Highway Traffic Technology (Application Technology)*, 2014, 109(1): 207-210. (in Chinese)
- [17] NGUYEN H, MUTSUYOSHI H, ZATAR W. Push-out tests for shear connections between UHPFRC slabs and FRP girder[J]. *Composite Structures*, 2014, 118: 528-547.
- [18] NAM J, YOON S, OK D, et al. Perforated FRP shear connector for the FRP-concrete composite bridge deck [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 334/335: 381-384.

(编辑 王秀玲)