

文章编号:1673-9469(2023)02-0021-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.004

双腹板工字型 GFRP 腰梁连接受力性能研究

郝增明¹,白晓宇^{1*},章伟¹,闫楠¹,张鹏飞²,刘作岩³,李明⁴,包希吉²,孙培富³

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 中建八局第二建设有限公司, 山东 济南 250014;

3. 青岛中建联合集团有限公司, 山东 青岛 266100; 4. 江苏海川新材料科技有限公司, 江苏 句容 212400)

摘要: 为研究深基坑支护中双腹板工字型 GFRP 腰梁连接节点力学性能, 针对 GFRP 腰梁的两种套筒式连接方法开展两点对称加载足尺试验, 借助 ABAQUS 有限元模拟软件建立两种连接方法的三维数值模型, 分析不同连接方法 GFRP 腰梁的受力性能, 并以腰梁跨中截面为研究对象, 揭示连接套筒与 GFRP 腰梁的横向变形规律, 掌握不同连接形式 GFRP 腰梁构件的极限状态和破坏形式。结果表明, 双腹板工字型 GFRP 腰梁承载力高, 构件的稳定性好; 采用内置式钢套筒连接构件变形较小, 节点承载力更高, 现场安装方便, 能够实现基坑支护中腰梁构件的循环利用, 是 GFRP 腰梁现场施工的合理连接方式。

关键词: GFRP 腰梁; 套筒式连接; 对称加载足尺试验; 节点力学性能; 有限元模拟; 破坏形式

中图分类号: TU473

文献标识码: A

Study on Mechanical Behavior of Double Web I-shaped GFRP Waist Beam Connection

HAO Zengming¹, BAI Xiaoyu^{1*}, ZHANG Wei¹, YAN Nan¹, ZHANG Pengfei², LIU Zuoyan³,
LI Ming⁴, BAO Xiji², SUN Peifu³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;

2. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan, Shandong 250014, China; 3. Qingdao Zhongjian United Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266100, China;

4. Jiangsu Haichuan New Material Technology Co., Ltd., Jurong, Jiangsu 212400, China)

Abstract: In order to study the mechanical performance of the connection nodes of double web I-beam GFRP waist beam in deep foundation support, two sleeve type connection methods of GFRP waist beams were tested with two points of symmetric loading footage, and the three-dimensional numerical models of the two connection methods were established with the help of ABAQUS finite element simulation software to analyze the force performance of GFRP waist beams with different connection methods, and the span section of waist beam was taken as the object of study to reveal the transverse deformation law of the connection. The transverse deformation law between the sleeve and the GFRP waist beam is studied, and the limit states and damage forms of the GFRP waist beam members with different connection methods are mastered. The results show that the double web I-beam GFRP waist beams have high bearing capacity and good stability of the members; the use of built-in steel sleeves to connect the members has less deformation, higher node bearing capacity, easy installation on site, and can realize the recycling of waist beam members in foundation pit support, which is a reasonable connection method for GFRP waist beam construction on site.

Key words: GFRP waist beam; sleeve connection; symmetrical loading full scale test; mechanical properties of joints; finite element simulation; form of destruction

收稿日期:2023-03-17

基金项目:山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE009);国家自然科学基金资助项目(51778312)

作者简介:郝增明(1997-),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向:地基与基础工程。

* 通讯作者:白晓宇(1984-),男,内蒙古呼和浩特人,博士,副教授,研究方向:地基基础及城市地下工程。

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)是由纤维材料和基体材料复合而成,因具有轻质高强、耐腐蚀、可模块化施工等优点,在土木工程领域得到快速发展,并被工程界广泛关注^[1-3]。目前工程结构中常用的纤维复合材料有玻璃纤维增强复合材料(GFRP)、碳纤维增强复合材料(CFRP)、玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)和芳纶纤维增强复合材料(AFRP)。其中相对造价成本较低的GFRP,在土木工程领域应用最为广泛,逐渐成为一个新的学科研究热点^[4-9]。但至今对这种新型GFRP构件的力学性能和连接设计还缺乏足够的认识,并没有形成相关设计标准及成熟的设计理论^[10],因此借助试验手段,从施工便捷、绿色环保与资源可重复利用角度出发,研究GFRP构件的受力特征和研发相应的附属连接件以实现循环利用,具有重要的科学意义与工程实用价值。

腰梁是基坑支护中传递围护结构和锚杆(索)之间水平力的构件,将挡土结构与支撑系统连成整体,常采用型钢、钢筋混凝土等传统材料,但在基坑支护完成后将会被永久埋藏于地下。若采用拉挤成型工艺生产可循环使用的GFRP腰梁^[11],应用于实际工程可达到节约资源、保护环境的目的,实现可拆卸式的模块化施工,但开发合理有效的受力连接件是亟待解决GFRP腰梁循环使用的关键问题。目前,FRP连接方法包括机械连接、胶结连接、联锁式连接,以及上述方式的组合式连接等^[12-13]。对于不同连接方式的选择,国内外学者也展开了重点讨论研究,Mottram等^[14]指出新型纤维增强复合材料制成的梁柱结构,连接方式最一开始是从钢结构体系发展而来,包括螺栓连接、胶结连接以及两者组合连接,但与仅起强度控制的钢结构连接不同,FRP结构受变形以及稳定性的控制较大。Smith等^[15]采用袖套式连接方法进行FRP箱型截面形式梁柱的连接,并通过对比试验,得出采用袖套式连接比螺栓连接构件节点的强度和刚度分别提高了90%和330%。Duthinh等^[16]指出采用拉挤型“狗骨式”连接件粘结的ACCS联锁式连接系统,若取消粘结剂的使用则能实现可拆卸循环使用。何雷^[17]通过试验对比常见连接方式对拉挤型材节点连接的影响,结果表明胶-栓混接试件胶层破坏荷载比胶结试件提高了97.6%,但会造成FRP板胶层破坏时表面纤维撕裂,连接承载力比螺栓连接下降12.7%,并得出胶-栓混接比

胶结承载力高,比螺栓连接刚度大的结论。黄志超等^[18]总结常见连接方法的优缺点和实用性,指出机械连接技术成熟、应用最广泛,混合连接是基于机械连接的延伸,胶结技术正趋于成熟,冷碾铆接目前缺乏研究,但具有较好的发展前景。刑立峰等^[19]通过试验对比3种螺栓连接结构的形式,结果表明三者破坏形式均为挤压破坏,3倍开孔螺栓连接承载力最大,带预埋件的螺栓连接次之,且预埋金属钢板连接对承载力提升尤为显著。

基于新型纤维增强复合材料的特殊性,导致连接技术方面没有得到足够的发展,难以满足FRP结构体系在土木工程领域增长的需求。为实现GFRP腰梁应用于基坑支护工程的合理性和可靠性,达到现场施工便捷、快速安装并可拆卸的目的,本文将根据腰梁现场施工的特点和要求,提出两种套筒式连接方案以解决双腹板工字型GFRP腰梁的连接问题。通过对两种连接方案的双腹板工字型GFRP腰梁进行对称加载足尺试验,研究不同连接方式下腰梁的破坏形式和承载特性,并结合ABAQUS有限元模拟分析构件在不同连接方案下的受力性能。基于加载试验和数值模拟结果,明确双腹板工字型GFRP腰梁应用于施工现场的最佳连接方案,为GFRP腰梁的推广应用奠定基础。

1 GFRP 腰梁连接设计

基坑支护工程中,为增强支护体系的整体稳定性,一般会结合当地经验设置腰梁连接。传统钢腰梁的连接主要通过钢板、钢筋进行现场焊接,但对腰梁节点处的构造要求,现行规范并无明确规定^[20-21]。基于目前FRP构件的连接方法,粘结连接因可使用共固化技术等优点,被广泛应用于工程领域,但对需要现场连接的拉挤成型GFRP腰梁受力构件限制很明显。螺栓连接、铆接等是目前拉挤成型FRP构件的主要连接形式,有拉伸试验证明^[22],GFRP构件采用螺栓连接能有效提高刚度和极限承载力,使材料的强度得到充分发挥,但工程中需要根据工况现场钻孔,精准把控孔距,均限制了该构件在工程中的实用程度。

章伟等^[23]为优化设计复合材料腰梁截面形式,开展了两种GFRP腰梁截面形式的弯曲性能试验。结果表明,双背槽钢工字型腰梁满足稳定性要求,能充分发挥复合材料的强度特性,是应用于工程施工比较适宜的截面形式,将其整合成型即

为双腹板工字型 GFRP 腰梁。根据基坑支护现场施工的特点,本文针对双腹板工字型 GFRP 腰梁提出两种套筒式连接方案,即外置式和内置式套筒连接,套筒采用钢板焊接,套筒长度均为 500 mm,厚度为 4 mm,几何尺寸根据腰梁定制,尽量减少缝隙产生。套筒式连接方案如图 1 所示。

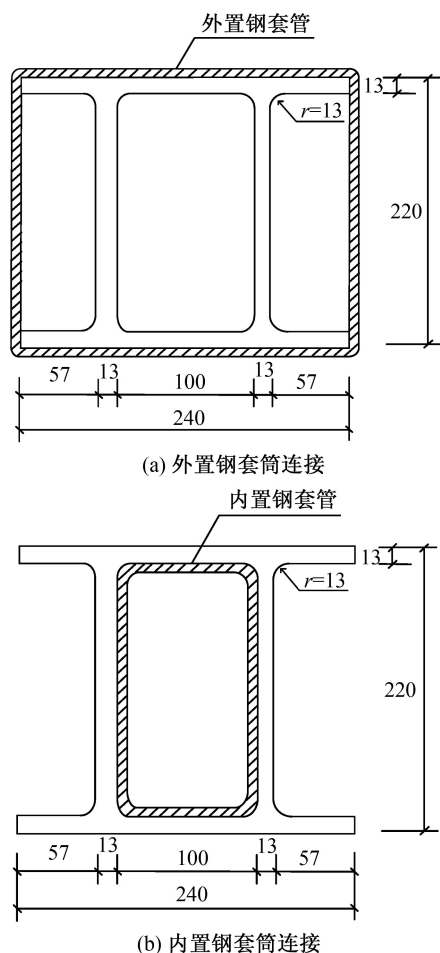


图 1 GFRP 腰梁套筒式连接方案(单位:mm)

Fig. 1 GFRP waist beam sleeve connection scheme (unit: mm)

2 GFRP 腰梁连接受力性能试验

本试验在 5 000 kN 长柱压力试验机上进行,重点针对 GFRP 腰梁两种套筒式连接进行两点对称加载试验,试验选用跨度为 1.8 m 的简支形式,整个构件长度为 2.0 m,节点位于跨中位置。在上翼缘进行对称加载,加载点间距为 1.0 m,加载方式为位移控制,加载速率约 0.3 mm/min。通过测试腰梁跨中挠度、支座沉降、极限破坏荷载等指标,分析两种连接方案的承载性能和破坏形式。外置钢套筒连接试验如图 2。

加载过程显示,采用外置钢套筒连接时,当加载至 40 kN 时,外置钢套筒上部一侧焊接处开始出

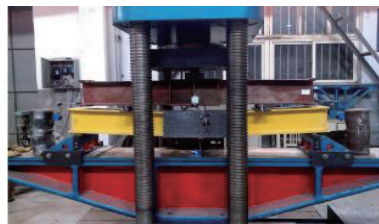
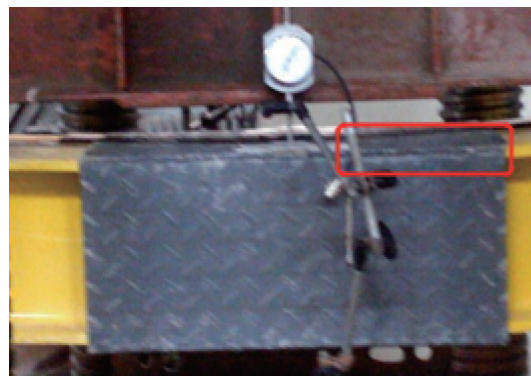


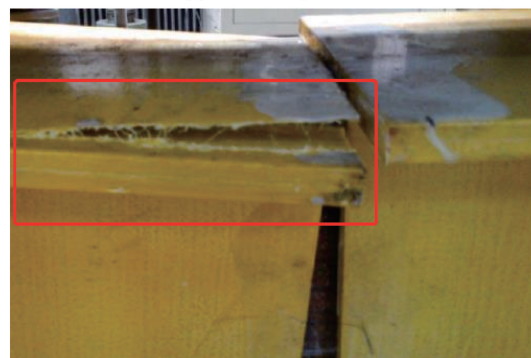
图 2 GFRP 腰梁外置钢套筒连接试验

Fig. 2 GFRP waist beam external steel sleeve connection test

现裂缝,见图 3(a)。分析产生破坏原因,钢套筒角焊缝的连接质量是主要问题,套筒与 GFRP 腰梁之间存在缝隙也会造成一定影响;采用内置钢套筒连接时,加载至 30 kN 时,内置钢套筒与腰梁开始发生滑移,连接点处 GFRP 腰梁上翼缘相互挤压,加载至 60 kN 时,GFRP 腰梁上翼缘节点开始出现压曲破坏,见图 3(b)。分析原因,内置套筒与 GFRP 腰梁之间存在缝隙,导致滑移现象产生,试验过程中缝隙内安装防滑垫未取得理想效果,摩擦阻力的发挥受缝隙影响较大。综合以上试验结果,与常规工字型截面腰梁相比,双腹板工字型 GFRP 腰梁的截面形式承载力较高,构件稳定性得到有效加强。对比两种连接方案,内置式钢套筒连接节点承载力更高,使纤维增强复合材料的强度发挥更充分,且构件间的缝隙均制约着两种方



(a) 外置钢套筒连接



(b) 内置钢套筒连接

图 3 两种连接方案 GFRP 腰梁破坏形式

Fig. 3 Failure modes of GFRP waist beam in two connection schemes

案的连接效果。为进一步优化连接方案,后期的试验或工程应用中应精确套筒的尺寸要求,减少钢套筒与 GFRP 腰梁间的缝隙,充分发挥二者的摩擦力,防止滑移现象发生。

3 有限元模拟及结果分析

为深入研究不同连接方案 GFRP 腰梁的受力状态,基于 GFRP 腰梁连接受力性能试验,利用 ABAQUS 有限元软件建立两种连接方案的三维数值模型进行分析,并将有限元计算结果与试验结果进行对比,最终确定更适合 GFRP 腰梁构件施工现场连接的最优方案。为模拟结果更精确,模型采用 C3D8I 单元(八节点线性六面体单元,非协调模式)建模^[24]。腰梁长度为 2.0 m,采用跨度 1.8 m 的简支梁支座。数值模拟时,钢套筒材料为各项同性,泊松比取 0.25,弹性模量为 206 GPa,钢套筒与腰梁摩擦系数设为 0.2,GFRP 腰梁需考虑材料各向异性的特殊性质,材料性能参数见表 1。

表 1 GFRP 腰梁材料力学性能参数

Tab. 1 Mechanical property parameters of GFRP

waist beam materials	
材料性能参数及符号	取值
纵向拉伸模量 E_L^t /GPa	35.40
纵向压缩模量 E_L^c /GPa	35.40
横向拉伸模量 E_T^t /GPa	7.20
横向压缩模量 E_T^c /GPa	9.20
面内剪切模量 G_{LT} /GPa	2.74
纵向泊松比 ν_L	0.28
纵向拉伸强度 X_L /GPa	296.00
纵向压缩强度 X_c /GPa	249.00
横向拉伸强度 Y_L /GPa	50.00
横向压缩强度 Y_c /GPa	70.00
面内剪切强度 S /GPa	31.40

3.1 变形分析

有限元加载方式与室内足尺试验相同,对称荷载 P 为 25 kN,并根据对称性以跨中截面为对称面,取腰梁构件一半进行模拟计算,得出两种连接方案的竖向(Y 方向)变形,如图 4 所示。

图 4 中显示,两种方案竖向变形均在节点处最大,模拟计算变形结果分别为 15.02 cm 和 2.93 cm,与室内试验挠度实测值 16.80 cm 和 3.42 cm 较为接近,二者相对误差为 10.59% 和 14.30%,误差较小,在工程允许范围内。结果显示,两种方案挠度实测值稍偏大,分析主要原因是有限元建模过程中材料弹性参数的取值问题,例如材料弹性模量

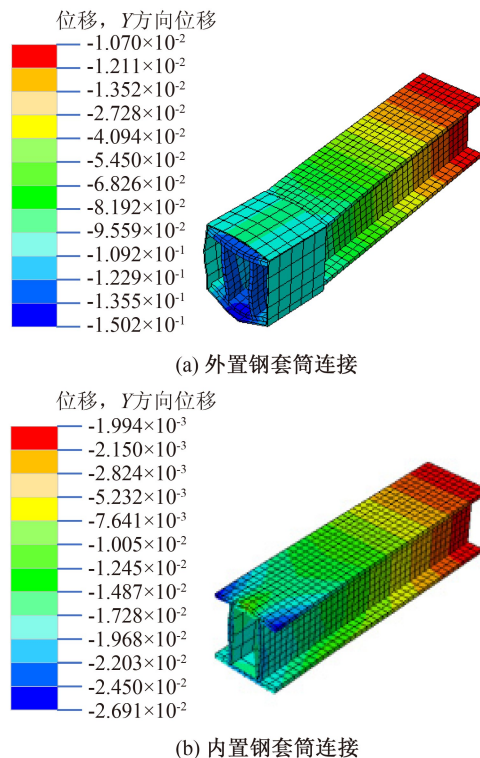


图 4 两种连接方案竖向变形云图(单位:m)

Fig. 4 Vertical deformation nephogram of two connection schemes (unit:m)

24.8 GPa 是根据构件弯曲试验的结果,由欧拉-伯努利梁理论计算得出的,没有考虑剪切变形的影响,导致实测结果略大于模拟值。且内置钢套筒连接节点变形明显小于外置钢套筒连接节点,证明内置钢套筒连接的构件整体刚度明显大于外置钢套筒连接构件,模拟结果与室内两点对称加载足尺试验中内置钢套筒连接方式承载力更高的结果相吻合。

截取跨中截面变形云图(图 5),分析两种连接方案的横向变形规律。图 5 中显示,两者横向变形均非常明显。对于外置钢套筒连接方案,GFRP 腰梁控制外置钢套筒的变形,腰梁上翼缘内凹,下翼缘外凸,腹板侧凹,外置钢套筒四周面板均呈现外凸。对于内置钢套筒连接方案,则是内置钢套筒约束 GFRP 腰梁变形,腰梁上翼缘外凸,两腹板侧突,下翼缘无明显变形,内置钢套筒两侧面板内凹,上下面板则无明显变形。对比两种连接方式的横向变形规律,内置钢套筒方案中套筒约束腰梁,可使 GFRP 腰梁变形幅度有效减少,进一步证明了内置钢套筒连接方案的优越性。

3.2 应力状态分析

两种连接方案 GFRP 腰梁正应力和剪应力云图如图 6、图 7 所示,可以看出,外置钢套筒连接构

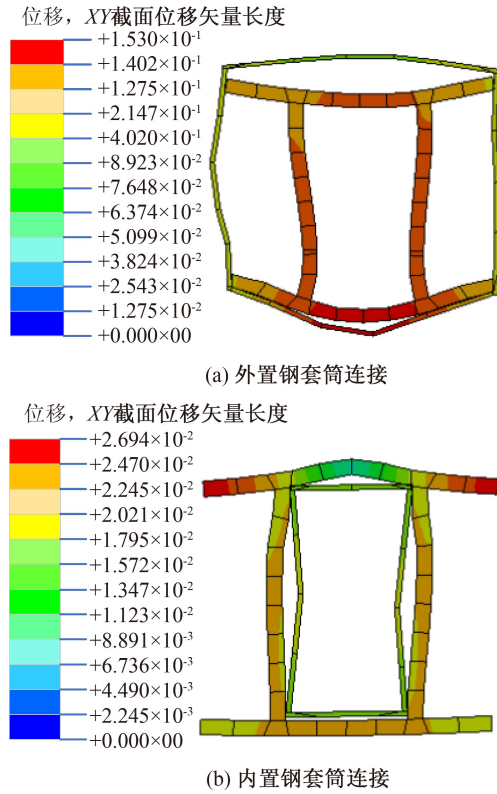


图5 两种连接方案跨中截面变形云图(单位:m)

Fig. 5 Deformation nephogram of midspan section of two connection schemes (unit: m)

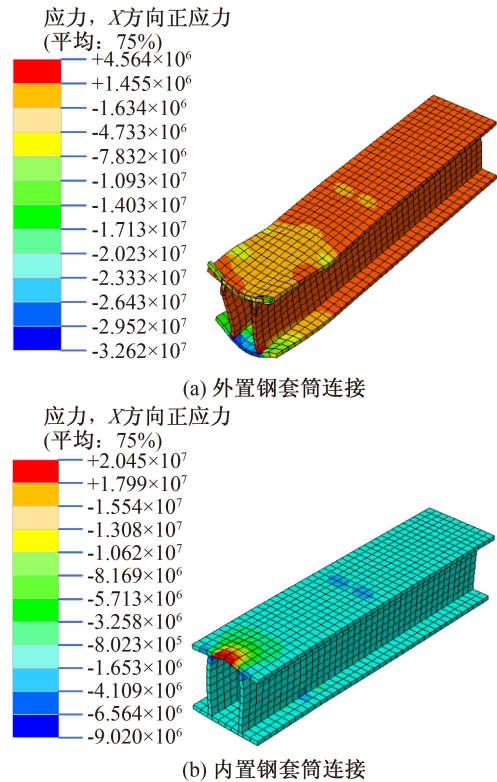


图6 两种连接方案正应力云图(单位:Pa)

Fig. 6 Normal stress nephogram of two connection schemes (unit: Pa)

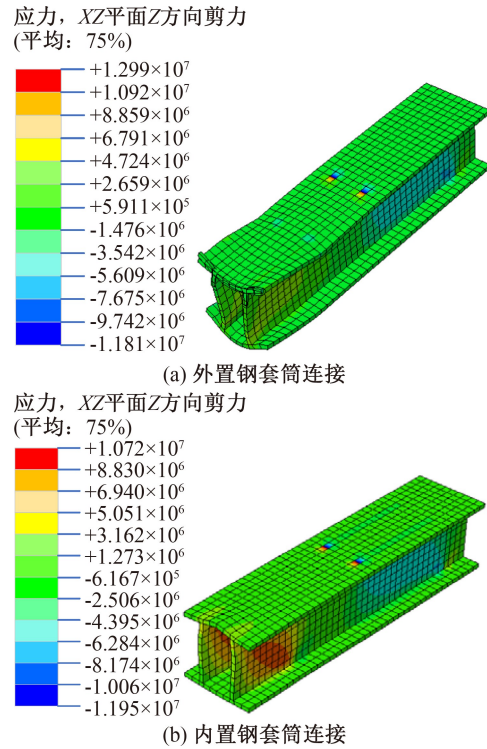


图7 两种连接方案剪应力云图(单位:Pa)

Fig. 7 Shear stress nephogram of two connection schemes (unit: Pa)

件正应力分布比较均匀,且数值偏大,而内置钢套筒连接构件正应力分布多集中于腰梁连接处,并未发生应力的扩散现象。剪应力状态两种连接方案基本一致,且在上翼缘处均会产生较大的弯曲应力,但在腹板位置横向屈曲的应力外置钢套筒连接构件约为内置钢套筒连接构件的2倍。

3.3 破坏形式分析

同时对比两种连接方案的极限状态(表2)。从表2、图6、图7可以看出,GFRP腰梁容易产生局部破坏,产生该现象的原因主要有两点:(1)GFRP腰梁自身横向抗拉、抗压强度较低,在承受上翼缘较大的弯曲荷载时,会使上翼缘变形明显,产生上翼缘的局部破坏;(2)GFRP腰梁腹板的剪切强度较低,容易发生平面内的局部剪切破坏。

综合分析室内试验和有限元模拟结果发现,内置钢套筒连接节点承载力更高,GFRP腰梁的整体刚度更大,内置钢套筒能有效约束GFRP腰梁的横向变形,降低腰梁上翼缘和腹板局部变形的风险,而且现场施工便捷,是GFRP腰梁现场施工的最优连接方法。

表 2 两种连接方案模拟分析结果

Tab. 2 Simulation analysis results of two connection schemes

类型	$\sigma_{\text{容许}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{外套筒}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{内套筒}}/\text{MPa}$
局部屈曲(翼缘)	86.7	22.7	22.8
翼缘拉伸破坏	118.4	29.0	16.9
翼缘纵向压缩破坏	88.9	22.7	22.8
翼缘横向压/拉破坏	23.3/16.7	32.7(压)	20.8(拉)
腹板横向屈曲	28.0	21.0	11.9
腹板横向压缩破坏	23.3	11.8	12.0
腹板剪切屈曲	28.1	11.8	12.0
腹板剪切破坏	10.5	11.8	12.0

4 结论

1) 室内足尺试验结果进一步验证了双腹板工字型 GFRP 腰梁截面形式承载力较高, 构件稳定性得到加强, 使纤维增强复合材料轻质高强的特性得到充分发挥。

2) 通过室内足尺试验揭示了内置钢套筒连接优于外置钢套筒连接方案。连接节点承载力更高, 极限破坏荷载提高 20 kN, 腰梁变形更小, 室内试验挠度实测值降低 13.38 cm, 且该方案连接性能可继续优化, 通过精确套筒的尺寸要求, 减少钢套筒与腰梁间的缝隙, 充分发挥二者的摩阻力, 防止构件滑移。

3) 借助 ABAQUS 有限元分析表明 GFRP 腰梁破坏形式为局部破坏, 内置钢套筒连接腰梁整体刚度明显大于外置钢套筒连接。内置钢套筒起到约束 GFRP 腰梁变形的作用, 使腰梁变形幅度减小。模拟结果与室内足尺试验结果相吻合, 验证了内置钢套筒连接方案的优越性。

参考文献:

- [1] 叶列平, 冯 鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
- [2] 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.
- [3] 闫清峰, 张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15314-15322.
- [4] 杨 涛, 郝海超, 卢维平, 等. 碱环境下玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁的受力性能[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(4): 1-4.
- [5] 寇海磊, 荆 皓, 徐 客, 等. 基于分段式模型考虑界面损伤的 GFRP 锚杆-砂浆粘结性能数值模拟[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2021, 38(3): 30-36.
- [6] 孙 丽, 杨泽宇, 朱春阳, 等. GFRP 筋纤维混凝土黏结滑移性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S2):

259-264.

- [7] 王 伟. 新型 FRP 筋在混凝土结构中的应用及研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(4): 24-27.
- [8] 李 文, 武先梅, 徐 珍. 混凝土强度影响 GFRP 板-混凝土组合梁力学性能研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2019, 36(2): 15-20.
- [9] 郑文英, 赵 慧, 王建祥. CFRP 加固技术在某工程中的应用[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(1): 23-25.
- [10] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V, et al. Fiber-reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(2): 73-87.
- [11] 章 伟, 张明义, 王传鹏. GFRP 拉挤成型构件徐变性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(7): 74-77.
- [12] BANK L C, MOSALLAM A S, MCCOY G T. Design and Performance of Connections for Pultruded Frame Structures[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1994, 13(3): 199-212.
- [13] LIU Z. Testing and Analysis of a Fiber-reinforced Polymer (FRP) Bridge Deck[D]. Blacksburg, VZ: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [14] MOTTRAM J, ZHENG Y. State-of-the-Art Review on the Design of Beam-to-Column Connections for Pultruded Frames[J]. Composite Structures, 1996, 35(4): 387-401.
- [15] SMITH S, PARSONS I, HJELMSTAD K. Experimental Comparisons of Connections for GFRP Pultruded Frames[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(1): 20-26.
- [16] DUTHINH D, BAJPAI K. Strength of an Interlocking FRP Connection[R]. National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [17] 何 雷. 采用 FRP 螺栓的拉挤型材胶栓混接受力性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [18] 黄志超, 陈伟达, 程雯玉, 等. 复合材料连接技术进展[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(4): 1-6.
- [19] 邢立峰, 曹安港, 毕凤阳, 等. 纤维增强复合材料螺栓连接性能试验研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(3): 102-105.
- [20] 张 飏, 杨 松. 新型嵌入式型钢腰梁在基坑支护工程中的应用[J]. 工业建筑, 2007, 37(4): 16-18.
- [21] 王宪章, 姜晓光, 李 伟. 无腰梁预应力锚索护壁桩锚固新技术[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 321-323.
- [22] 刘玉擎, 都 鹭, 辛灏辉, 等. 拉挤 GFRP 型材层合板螺栓连接试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 223-229.
- [23] 章 伟, 张明义, 高立堂. 复合材料腰梁受弯性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(11): 33-36.
- [24] 许 伟, 张雪飞, 吴建明, 等. 混凝土强度对组合梁动力性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2013, 29(3): 470-476.

(责任编辑 周雪梅)