

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.082



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



GFRP-RPC 组合双层交通梁桥的弹性性能 试验研究与有限元分析

祝明桥^{a,b}, 李军^{a,b}, 李志彬^a

(湖南科技大学 a. 土木工程学院; b. 湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心,
湖南湘潭 411201)

摘要:设计了一种面向双层交通的 GFRP-RPC 组合梁桥,该梁桥由 GFRP 材质的两榀桁架及带肋平板通过胶栓混合连接而成,通过浇筑自密实 RPC 混凝土形成组合梁桥整体。对组合梁桥缩尺模型(1:8)进行多工况的拟静力加载试验和有限元分析,并对其弹性工作性能进行研究。结果表明:浇筑 RPC 后,梁桥的刚度约提高 2.6 倍,表明此类 GFRP、混凝土组合形式有利于结构合理受力,下部加载时,梁桥变形约增大 10%,对结构较不利;弦杆受力符合平截面假定,组合结构受力合理;上、下弦杆分别为压弯、拉弯受力状态,上、下部加载时,下弦杆拉应力分别约为上弦杆的 1.5 倍和 2.5 倍,下弦杆为薄弱弦杆;斜腹杆受拉,直腹杆基本呈受压状态,上、下加载方式影响直腹杆的受力形式,下部承载设计时需考虑局部拉、压应力较大的情况;顶板侧面混凝土受压,底板侧面混凝土受拉,腹杆设置有利于板面混凝土均匀受力。

关键词:双层交通;组合梁桥;弹性性能;试验研究;有限元分析

中图分类号:U443.35;U448.12 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2023)01-0199-10

Experimental study and finite element analysis on elastic properties of GFRP-RPC composite double deck traffic beam bridge

ZHU Mingqiao^{a,b}, LI Jun^{a,b}, LI Zhibin^a

(a. School of Civil Engineering; b. Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricate Passive House,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China)

Abstract: A GFRP-RPC composite beam bridge for double deck traffic is designed. The bridge is composed of two GFRP trusses and ribbed plates, which are connected by glue bolts. The composite beam bridge is formed by pouring self compacting RPC concrete. The scale model (1:8) of composite beam bridge is tested and analyzed by quasi-static loading test and finite element method, and its elastic performance is studied. The results show that: After pouring RPC, the stiffness of the beam bridge increases about 2.6 times, which indicates that the combination of GFRP and concrete is conducive to the reasonable stress of the structure, and

收稿日期:2020-12-18

基金项目:国家自然科学基金(51578236);湖南省重点实验室开放基金(19K033);湖南省自然科学基金(2020JJ4313)

作者简介:祝明桥(1968-),男,博士,教授,主要从事桥梁工程研究,E-mail:1531290279@qq.com。

Received:2020-12-18

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51578236); Open Fund of Key Laboratory Foundation of Hunan (19K033); Natural Science Foundation of Hunan(2020JJ4313)

Author brief: ZHU Mingqiao (1968-), PhD, professor, main research interest: bridge engineering, E-mail: 1531290279@qq.com.

the deformation of the beam bridge increases about 10% when the lower part is loaded, which is unfavorable to the structure; the chord stress accords with the assumption of plane section, and the stress of composite structure is more reasonable; the upper and lower chords are in the force state of compression bending and tensile bending respectively, when the upper and lower chords are loaded, the tensile stress of the lower chords is about 1.5 and 2.5 times of that of the upper chords, and the lower chords are weak chords; when the diagonal web member is in tension, the straight web member is basically in compression state, and the loading mode of up and down affects the stress form of the straight web member. The design with larger local tensile and compressive stress should be considered for the lower bearing; the concrete on the side of the top plate is compressed, while the concrete on the side of the bottom plate is tensioned, indicating that the setting of the web member is conducive to the uniform stress of the slab concrete.

Keywords: double deck traffic; composite beam bridge; elastic properties; experimental study; finite element analysis

随着社会经济的快速发展和城镇化建设的持续进行,城市土地资源日趋紧张,城市公共交通日益拥堵。为缓解城市土地和交通的压力,在现代桥梁结构设计中,桥梁工程师们创造性地提出了双层交通的概念并使双层交通桥梁在城市公共交通中得到广泛应用。然而,在建成双层交通桥梁的过程中,现阶段广泛采用的传统建筑材料存在资源浪费和环境污染等不足,为促进社会经济和生态可持续发展,对材料也提出了更高要求。FRP(纤维增强复合材料)作为一种新型材料,具有轻质、高强、耐腐蚀等优异特性^[1-2],因此,被大量学者关注^[3-4],并逐渐受到桥梁工程界的青睐。

复合材料的节点连接在桥梁工程中广泛应用,而其连接节点设计与金属结构有较大差别,因此,不能沿用金属结构节点的设计原则和方法。为此,众多学者做了大量研究和深入探索^[5-7]。赵馨怡等^[8]、李曙光^[9]对拉挤FRP板进行了胶接、螺栓连接及胶栓混合连接试验发现,相对于单一的胶接和螺栓连接,胶栓混合连接具有刚度大、延性好等优点,且承载力也有所提高。同时,纤维增强复合材料在桥梁工程中的应用日益广泛、理论日益成熟。1970年英国利物浦建成了一座跨度10 m、桥宽1.5 m的GFRP连续梁人行天桥^[10];1982年,北京密云建成了一座跨径20.7 m的纯GFRP蜂窝箱梁公路桥;1986年,世界第一座后张法预应力悬索FRP桥在德国建成^[11];2000年,日本静冈修建了一座8 m长的FRP公路桥;2012年,重庆市彭水县建造了首座全FRP桁架桥^[12](茅以升公益桥)。此外,日本静冈建成的FRP公路桥测试结果表明,使用9年后,桥梁的力学性能和当初建设完成时一致,FRP材料作为桥梁结构材料具有良好的耐久性和功能性;全FRP桁架桥

荷载效率高、结构安全储备较高、舒适性良好;陈军^[13]进行了1组FRP-UHPC板桁组合梁桥多工况作用下的静力加载试验,结果表明,在单调循环荷载下,FRP-UHPC板桁组合梁桥具有较好的线弹性工作性能,胶栓混合杆件节点能明显提高组合梁桥的刚度。工程理论和实践表明,FRP-混凝土组合结构桥梁的研究具有广泛的前景和深远的意义。

目前,GFRP材料应用于单层交通结构的研究较多^[14-16],针对双层交通桥梁的研究较少。而GFRP材料应用于双层交通桥梁结构中不仅可避免使用钢材所带来的锈蚀问题,还可作为永久性模板,实现免支模。同时,随着自密实混凝土与RPC混凝土(活性粉末混凝土)的深入研究^[17-18],自密实RPC混凝土得以广泛使用。在施工过程中,自密实RPC混凝土因无需振捣,提高了施工效率且可以避免声污染的产生。此外,在GFRP-RPC组合结构中,GFRP材料可替代钢材参与结构受力并与RPC混凝土共同工作,发挥两种材料各自的优异特性。因此,GFRP-RPC组合结构在双层交通桥梁中的应用研究具有一定的工程意义和实践价值。笔者研究GFRP-RPC组合双层交通梁桥在正常工作状态下的受力性能,对一模型进行了双层交通弹性阶段的试验研究与有限元分析。

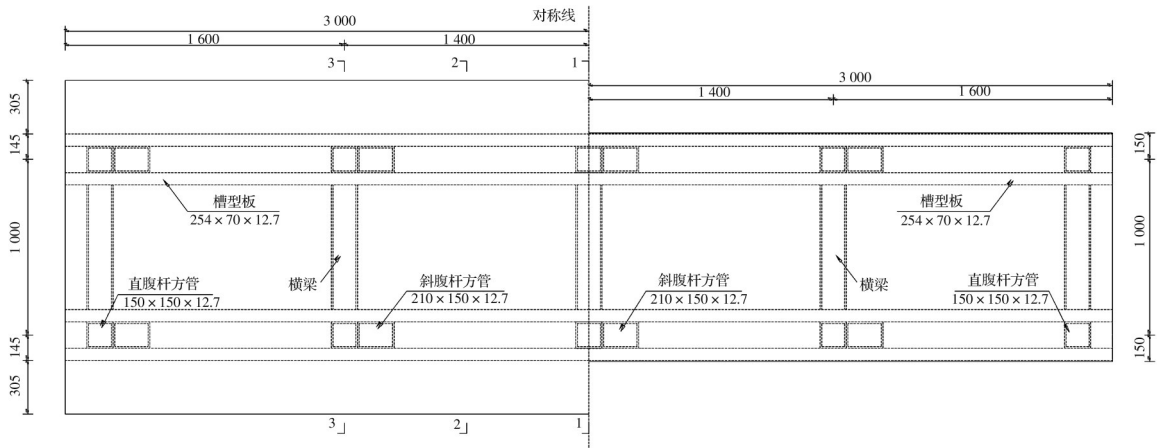
1 试验概况

1.1 GFRP-RPC组合双层交通梁桥模型

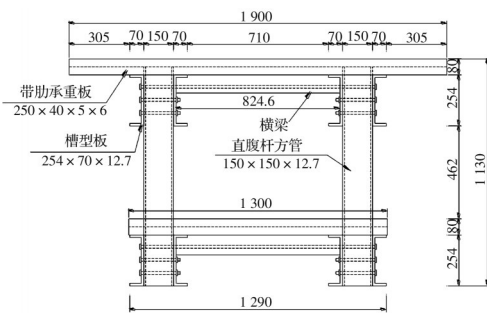
综合考虑试验场地及试验成本的限制,对实际双层交通梁桥进行1:8比例缩尺。如图1所示,模型梁桥总长6 m,桥高1.13 m,顶板宽1.9 m、悬挑305 mm,底板宽1.3 m、悬挑75 mm,顶板和底板厚度均

为 80 mm,顶板和底板的双层纵、横向分布筋均为直径 6.5 mm 的 HRB400 级钢筋,直、斜腹杆 GFRP 管壁厚 12.7 mm,顶板和底板下侧 GFRP 板材厚 5 mm、宽 250 mm,肋高 40 mm,板长适应顶板、底板宽度分别为 1.9、1.3 m。杆件编号及名称如图 1(c) 所示。顶板、底板处带肋 GFRP 板之间的连接方式为胶接连接,与横梁之间的连接方式为胶栓混合连接,纵梁(弦杆)与直、斜腹杆之间的连接方式为螺

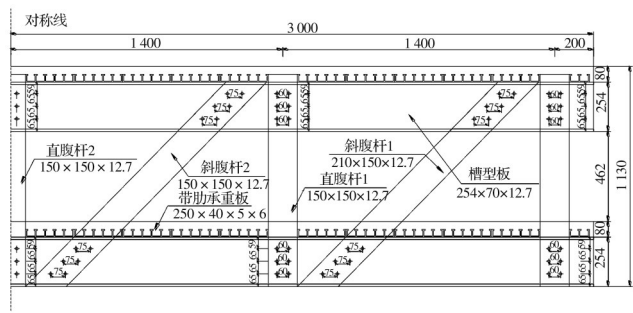
栓连接,此外,在纵梁(弦杆)、横梁和直腹杆的节点处,直腹杆通过螺栓分别与带肋 GFRP 板和横梁进行连接。试验模型分两次完成,先拼装 GFRP 管材与板材,后浇筑顶板、底板混凝土及腹杆管内混凝土。GFRP 纤维丝沿管材与板材长向布置,混凝土搅拌分两次完成,底板、腹杆混凝土一次浇筑完成,顶板混凝土单独浇筑完成,混凝土搅拌方式为机械搅拌。



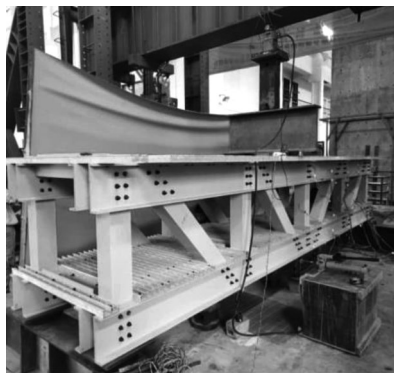
(a) 顶板平面图(左)和底板平面图(右)



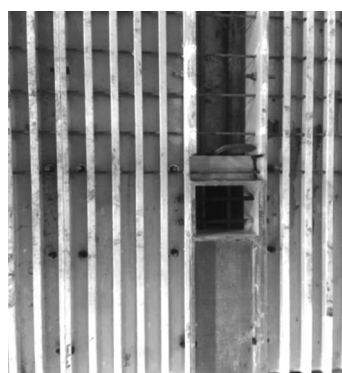
(b) 左视图



(c) 正视图



(d) GFRP拼装成型试验试件



(e) 暗梁处细部构造

图 1 GFRP-PC 组合双层交通梁桥模型 (1:8) (单位: mm)

Fig. 1 GFRP-PC composite double deck traffic beam bridge model (1:8) (Unit: mm)

1.2 材料

模型 RPC 混凝土材料性能试验按照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)^[19]的规定进行,材料配合比如表 1 所示。在每次进行混凝土浇筑的同时,预留 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的相应混凝土试块,混凝土各项力学性能指标如表 2 所示。模型中使用的纤维材料为 GFRP(玻璃纤维增强塑料)材料,各项力学性能指标如表 3 所示。

表 1 RPC 材料配合比

Table 1 Mix proportion of RPC materials

水泥	硅灰	水	石英砂	石英粉	高效减水剂
1	0.25	0.25	1.1	0.37	0.059 4

表 2 RPC 材料性能

Table 2 Properties of RPC materials

位置	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/10 ⁴ MPa
底板和腹杆	70.69	44.88	5.30	3.7
顶板	70.68	44.87	5.30	3.7

表 3 GFRP 材料性能

Table 3 Properties of GFRP materials

平行纤维方向极限抗拉强度/MPa	平行纤维方向	平行纤维方向	垂直纤维方向	垂直纤维方向
	抗拉弹性模量/MPa	抗压弹性模量/MPa	抗拉弹性模量/MPa	抗压弹性模量/MPa
580	1.9×10 ⁴	1.5×10 ⁴	6.0×10 ³	6.0×10 ³

1.3 试验加载和有限元模型

1.3.1 加载和测试方案 试验包含两组共 4 个工况。双层交通两端简支,纵向加载位置为跨中控制截面处(1-1 截面),横向加载位置如图 2 所示,分别为桥面板支撑处和横向跨中控制截面处,以此模拟车辆荷载,探究在上述工况条件下实际双层交通梁桥的力学性能。其中,试验 I-a 和 I-b 采用两点加载的方式进行集中力加载,加载对象分别为未浇筑 RPC 的纯 GFRP 结构和 GFRP-RPC 组合结构,均在顶板施加荷载;试验 II-a 和 II-b 采用单点加载的方式进行集中力加载,试验对象均为浇筑后的组合结构,分别在顶板和底板进行加载。试验构件两端均为简支边界条件,一端支座处放置两个固定橡胶支座,另一端支座处放置两个涂抹润滑油的滑动橡胶支座。基于试验仅针对双层交通的弹性工作性能,

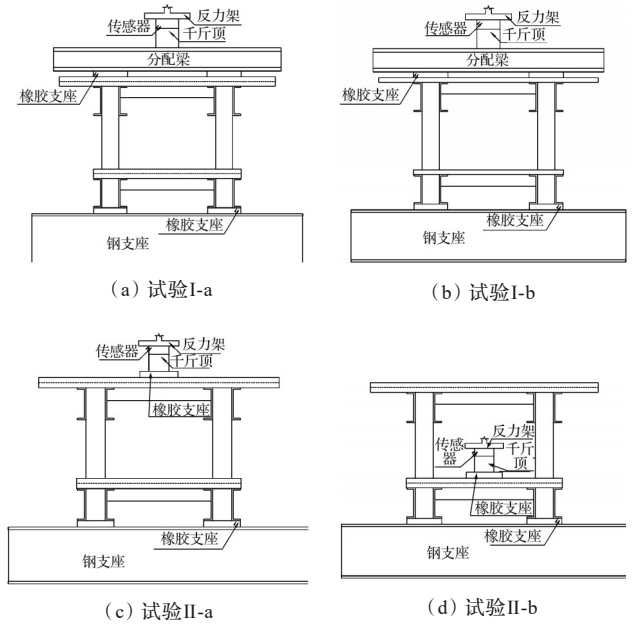
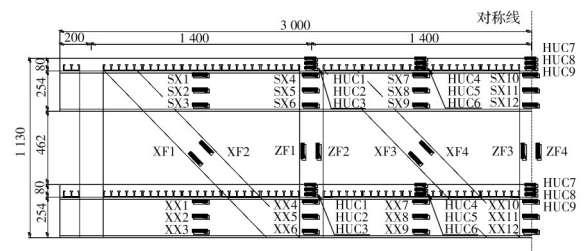


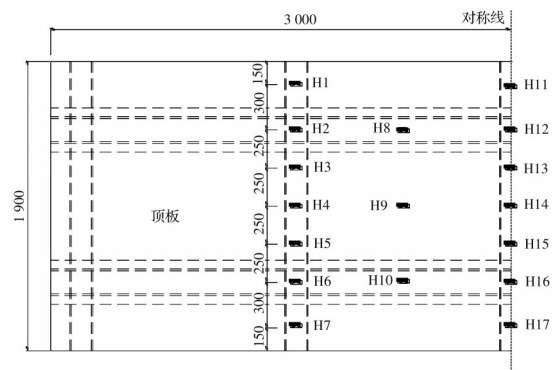
图 2 加载方式图

Fig. 2 Loading mode diagram

测量变量主要包括顶板和底板的混凝土纵向应变(底板对应顶板位置贴 U3、U4、U5、U8、U9、U10、U13、U14、U15 应变片)、纵梁 GFRP 的纵向应变和底板挠度,钢筋应变未在考虑范围。应变片和位移计的设置情况如图 3 所示。各工况下的每级荷载增量、加载形式、加载位置、构件形式和总荷载量见表 4。



(a) 双层交通侧面应变片布置



(b) 顶板混凝土应变片布置

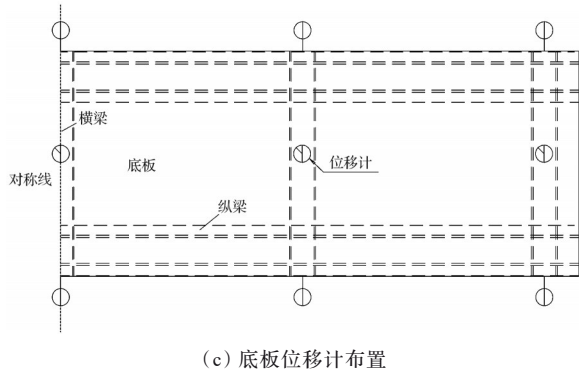


图 3 应变片和位移计设置(单位:mm)

Fig. 3 Setting of strain gauge and displacement gauge (Unit: mm)

1.3.2 有限元模型 为与试验结果进行对比,采用 ABAQUS 有限元软件对试验 II-a 和 II-b 两种工况进行模拟分析,建立的有限元模型如图 4 所示。其中,对混凝土板、GFRP 板采用 C3D8R 单元进行模拟;混凝土材料设定为各向同性材料,材料参数

采用实测数据输入,GFRP 板材选用 Engineering Constants 输入材料空间 3 个方向的拉、压弹性模量和剪切弹性模量,其中,鉴于 GFRP 板材同方向拉、压弹性模量有所不同,各个方向的拉、压弹性模量参照试验结果选取,并最终通过模拟值验证选取的可行性;试验模拟中,混凝土未开裂,模型未考虑嵌入钢筋;模型中 GFRP 板材之间、GFRP 板材与混凝土之间通过 Tie 连接方式进行连接。

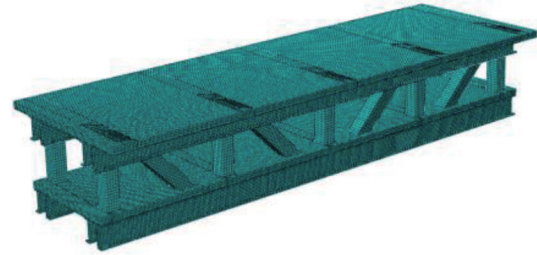


图 4 试件有限元模型图
Fig. 4 Finite element model of specimen

表 4 试验工况
Table 4 Test conditions

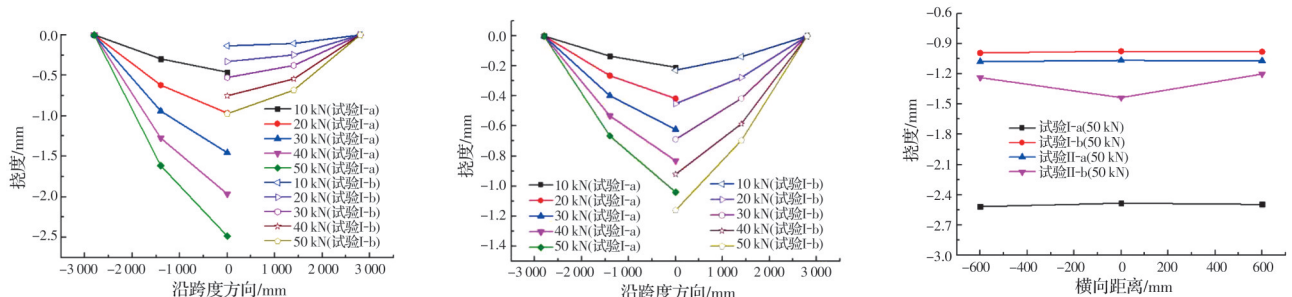
试验工况	加载形式	加载位置	构件形式	加载级数	荷载增量/kN	总荷载量/kN
I-a	两点加载	顶板	纯 FRP 结构	10	10	100
I-b	两点加载	顶板	FRP-RPC 组合结构	10	10	100
II-a	单点加载	顶板	FRP-RPC 组合结构	10	10	100
II-b	单点加载	底板	FRP-RPC 组合结构	5	10	50

2 试验与分析结果

2.1 挠度

2.1.1 试验挠度对比 集中荷载作用于纯 GFRP 结构顶板跨中两侧(试验 I-a)和组合梁桥顶板跨中两侧(试验 I-b)时,底板挠度沿跨度方向的分布曲线如图 5(a)所示。组合梁桥顶板跨中单点加载(试验 II-a)和组合梁桥底板跨中单点加载(试验 II-b)的

底板挠度沿跨度方向的分布曲线如图 5(b)所示。图 5 利用了结构在纵向的对称特性,即挠度值为底板中部在纵向平均后的结果,且图中仅绘制一半长度的挠度曲线。由图 5(a)可知,当两点加载时(试验 I-a 和 I-b),纯 GFRP 结构的挠度约为组合梁桥的 2.6 倍,即浇筑 RPC 后,组合梁桥刚度约提高为纯 GFRP 结构的 2.6 倍。主要原因为梁、板和柱截



(a) 试验 I-a 和 I-b 的挠度对比(沿跨度方向) (b) 试验 II-a 和 II-b 的挠度对比(沿跨度方向) (c) 底板跨中(1-1 截面)挠度的横向分布

图 5 底板挠度的分布曲线

Fig.5 Deflection distribution curve of bottom plate

面的增大和纯 GFRP 结构体系向组合结构体系的变化。表明在工程实践中此种 GFRP、混凝土组合形式有利于结构合理受力。由图 5(b)可知,受自上而下传力的影响,当单点加载时(试验 II-a 和 II-b),底板加载挠度约为顶板的 1.1 倍,表明底板受力时双层交通较危险。图 5(c)为底板跨中挠度横向分布规律图,由图可知,在顶板直接受力的情形下,梁桥底板挠度沿横向分布较均匀,说明纯 GFRP 结构和组合梁桥横向刚度分布均匀,组合双层交通横向设计合理,结构横向受力合理。

2.1.2 有限元模拟与试验的对比结果 浇筑 RPC 后,对试验 II-a 和 II-b 进行有限元模拟,组合双层交通梁桥底板 1-1 截面和 3-3 截面处竖向挠度的模拟值和试验值如图 6 所示。为减弱加载点局部受力对挠度的影响,试验与模拟均采用截面沿横向中部与两侧挠度的平均值。由图 6 可知,各模拟值与试验值偏差在 5% 以内,能有效模拟试验各工况。如图 6 所示,模拟结果与试验结果均表明,相比顶板受力时组合梁桥的竖向挠度,底板受力偏大。

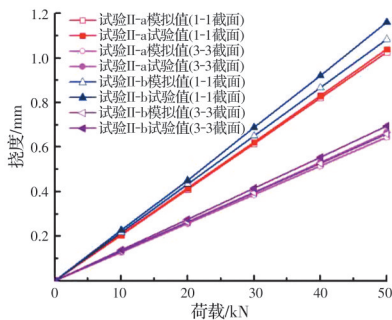


图 6 底板 1-1 截面、3-3 截面的荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curves of 1-1 section and 3-3 section of bottom plate

2.2 GFRP 和混凝土应变

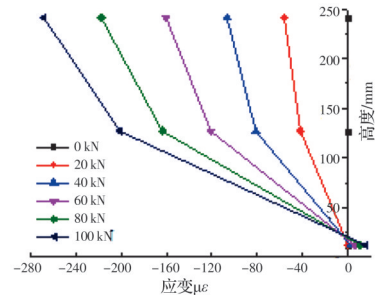
2.2.1 弦杆及其上部混凝土纵向应变沿高度的分布 以弦杆的下翼缘端部和板顶作为高度起点和终点,测定并分析 2-2 截面处弦杆 GFRP 应变(SX7、SX8、SX9、XX7、XX8、XX9)和混凝土应变(H8、H9、H10、U8、U9、U10)。应变沿高度的分布如图 7 所示(左、右侧图分别为上、下弦杆荷载-应变图)。

浇筑前、后工况如图 7(a)、(b)所示:纯 GFRP 结构受压区主要存在于上弦杆,受拉区主要存在于下弦杆。浇筑 RPC 后,上弦杆出现明显受拉区。主要原因为:浇筑前体系偏于桁架受力,上弦杆为压杆,下弦杆为拉杆;浇筑后体系偏于梁板承力,以受弯为主。结果表明:混凝土的浇筑改变了上弦杆的

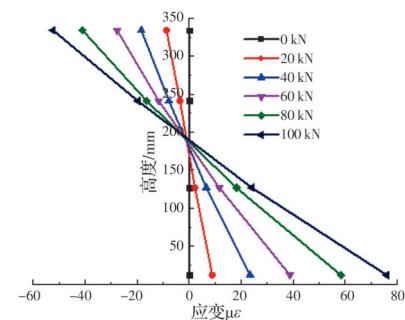
受力形式,有利于 GFRP 受拉性能的发挥。浇筑混凝土后,组合结构受力更加合理。

上、下部加载工况如图 7(c)、(d)所示,由图可见,结构受弯基本符合平截面假定,表明上、下部加载时,下弦杆应变沿高度分布较一致,主要承受拉应变。上部加载时,下弦杆拉应力约为上弦杆的 1.5 倍,下部加载时,下弦杆拉应力约为上弦杆的 2.5 倍。说明在实际工程中,上、下弦杆均主要承受拉应力且下弦杆受拉较严重。

2.2.2 弦杆 GFRP 纵向应变沿跨度分布 沿跨度方向上、下弦杆的荷载-应变曲线如图 8 所示。弦杆



(a) 试验 I-a 弦杆应变沿高度的分布



(b) 试验 I-b 弦杆应变沿高度的分布

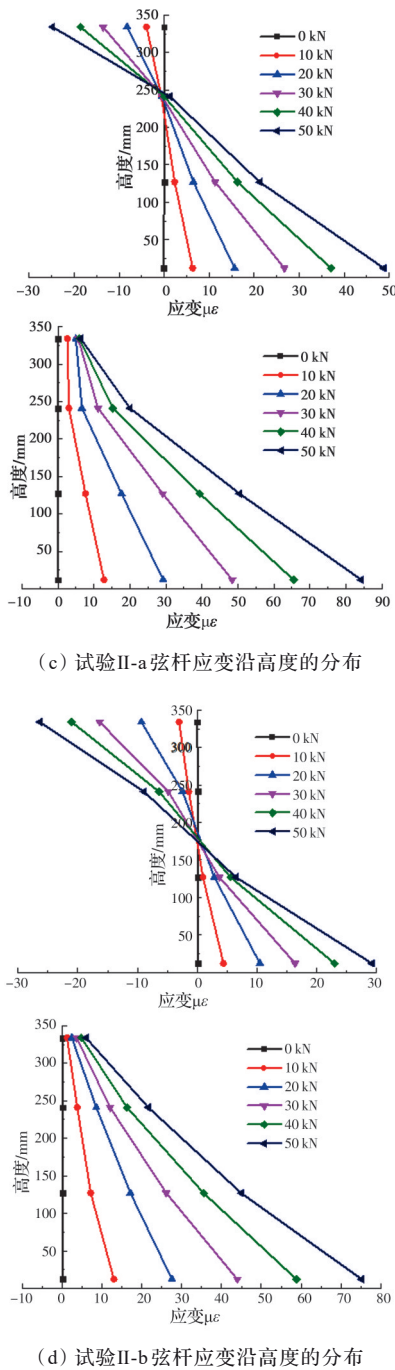


图 7 弦杆应变沿高度的分布(左、右侧分别为上、下弦杆)
 Fig. 7 Distribution of chord strain along height (upper chord and lower chord respectively on left and right sides)

受力形式受浇筑前后结构体系变化的影响较大。结果表明:浇筑混凝土前,上、下弦杆主要承受轴向压应力和轴向拉应力;浇筑混凝土后,上、下弦杆分别呈弯压和弯拉的受力状态,跨中承受拉应力,靠近支座处承受压应力。主要是因为浇筑前后局部连接刚度加强程度不同,说明浇筑前后弦杆完成了由拉压受力至拉弯、压弯的变化。

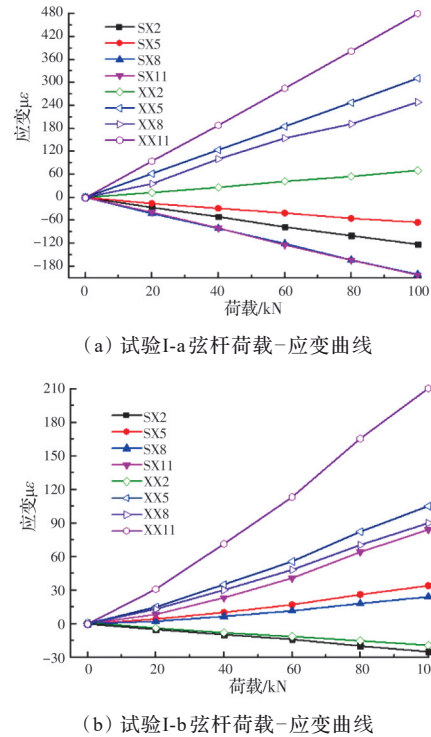
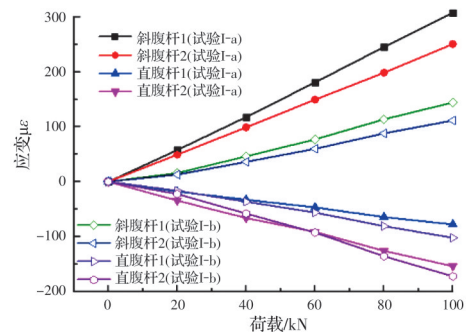
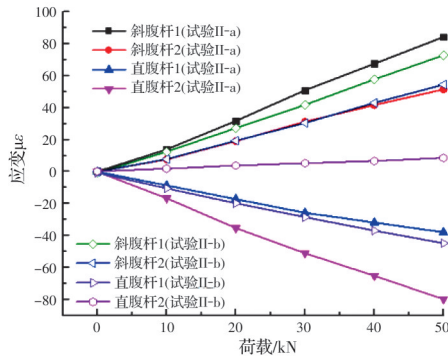


图 8 沿跨度方向弦杆荷载-应变曲线
 Fig. 8 Chord-load strain curve along span direction

2.2.3 斜腹杆与直腹杆 GFRP 沿杆件方向的应变 在试验 I -a 和 I -b 两种工况下测试腹杆左、右侧的应变 (XF1、XF2、XF3、XF4、ZF1、ZF2、ZF3、ZF4),同一腹杆应变取平均值。浇筑前后斜腹杆和直腹杆 GFRP 沿杆件方向的荷载-应变曲线如图 9 (a) 所示。结果表明:1)斜腹杆均承受拉应力,直腹杆均承受压应力。斜腹杆 1 受力大于斜腹杆 2,直腹杆 1 受力小于直腹杆 2;2)浇筑混凝土后斜腹杆受力明显减小,直腹杆受力变化不大,拉、压形式未改变。因腹杆主要存在于桁架体系中,浇筑前后仅存在受力大小的变化,受力形式没有改变。上、下加载时,试验 II -a 和 II -b 两种工况下,斜腹杆和直腹杆 GFRP 沿杆件方向的荷载-应变曲线如图 9 (b) 所示。结果表明:1)斜腹杆均承受拉应力,斜腹杆 1 受力大于斜腹杆 2;2)上、下部加载时,斜腹杆受力变



(a) 腹杆 GFRP 的荷载-应变曲线(试验 I-a 和 I-b)



(b) 腹杆 GFRP 的荷载-应变曲线 (试验 II-a 和试验 II-b)

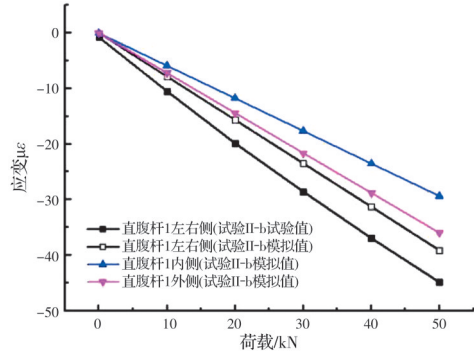
图 9 腹杆沿杆件方向的荷载-应变曲线

Fig. 9 Load strain curve of web member along member direction

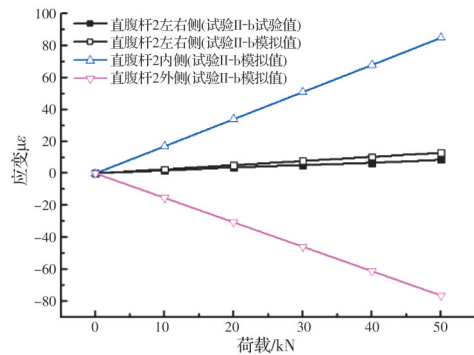
化不大;在受力形式上,下部加载时,直腹杆 2 承受拉应力。直腹杆受力形式的变化主要是由于桁架受力点的移动所致,因与力的作用方向存在夹角,其对斜腹杆受力形式的影响较小。试验表明:在实际工程中,斜腹杆设计以考虑受拉杆件为主;直腹杆以受压设计为主,局部宜考虑受拉影响。

针对直腹杆的受力特点,采用有限元方法对比模拟分析直腹杆的荷载-应变曲线,如图 10 所示,其中,腹杆靠近加载点侧为内侧,与其相对为外侧,与其相邻为左右侧(试验应变片布置侧),测点与模拟选取点在侧面中心。结果表明:1)在受压方面,直腹杆 1 各面均呈受压状态且较均匀。直腹杆 2 外侧受压大于直腹杆 1;2)直腹杆 2 内侧受拉较大,左右侧受拉较小。说明在局部受力时直腹杆拉压较严重,设计宜考虑 GFRP 材料弹性模量小、变形大和局部受力不均匀对结构的影响。

2.2.4 侧面混凝土纵向应变沿高度分布 在试验 II-a 和 II-b 两种工况下,顶板和底板侧面混凝土应变沿高度分布曲线如图 11 所示,其中,侧面混凝土应变取 2-2 截面应变(HUC4、HUC5、HUC6、HDC4、HDC5、HDC6)。悬臂部分理论上无应力产生,因桥面板体系整体性较好,故出现沿高度方向的应力分布。由图 11 可见:1)上部加载时,顶板出现较为明显的受压区和受拉区,其中,上侧受压,下侧受拉。所测底板混凝土基本承受拉应力;2)下部加载时,所测顶板混凝土基本承受压应力,底板混凝土基本承受拉应力,表明实际工程悬中臂处底板设计宜以受拉为主,顶板设计则以受压为主,部分受拉。



(a) 直腹杆 1 沿杆件方向的荷载-应变曲线(试验 II-b)

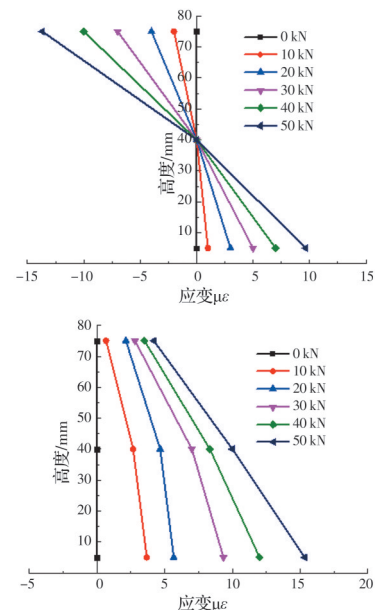


(b) 直腹杆 2 沿杆件方向的荷载-应变曲线(试验 II-b)

图 10 直腹杆荷载-应变曲线(试验 II-b)

Fig. 10 Load-strain curve of straight web member (test II-b)

2.2.5 顶板混凝土荷载-应变曲线 针对下部加载传力问题,试验测定了顶板 1-1 截面、2-2 截面和 3-3 截面混凝土的应变。图 12 所示为试验 II-a 和 II-b 中顶板 1-1 截面(H13、H14、H15)、2-2 截面(H9)和 3-3 截面(H3、H4、H5)混凝土纵向应变随荷载的变化曲线,其中,应变取平均值。由图 12 可知:试验



(a) 试验 II-a 顶板应变沿高度分布

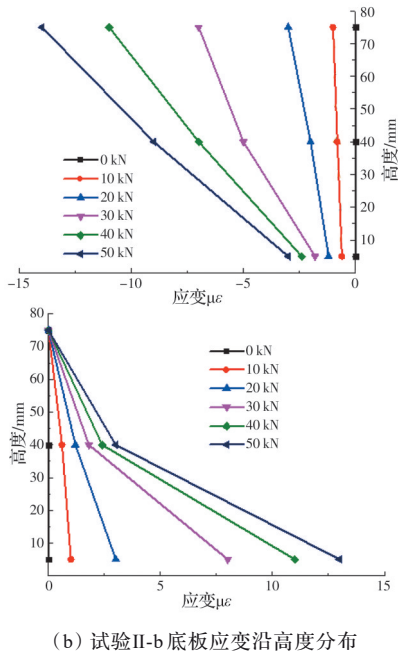


图 11 侧面混凝土应变沿高度的分布曲线
Fig. 11 Distribution curve of lateral concrete strain along height

II-a工况下,顶板3个截面的应变值较离散,加载处(1-1截面)应变偏大,其余两截面应变偏小;试验II-b工况下,3个截面应变分布较集中,1-1截面和3-3截面应变相近且较2-2截面偏大。结果表明:下部加载时,因腹杆传力于上部结构,与腹杆连接处顶板顶面混凝土压应力较小,混凝土压应力控制截面为直腹杆之间的截面(如2-2截面)。说明腹杆的设置使组合双层交通梁桥的受力更加合理,避免了结构在局部荷载作用下出现应力集中问题。

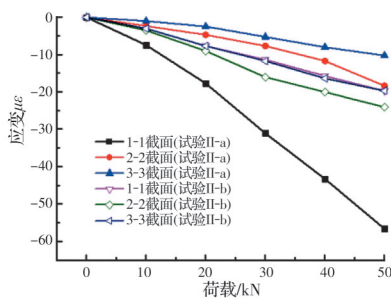


图 12 顶板顶面混凝土荷载-应变曲线
Fig. 12 Load-strain curve of concrete on top of roof

3 结论

1)浇筑RPC后,组合梁桥的刚度约提高为纯GFRP结构的2.6倍。此种GFRP、混凝土组合形式有利于结构合理受力。结构横向刚度分布均匀,

且在相同荷载下,底板受力时梁桥位移约为顶板受力时的1.1倍,对结构更为不利。

2)浇筑前后试验对比表明,纯GFRP结构上弦杆受压,下弦杆受拉。浇筑后,上、下弦杆均承受拉应力,沿高度符合平截面假定。混凝土的浇筑改变了弦杆的受力大小与形式,有利于结构受力。

3)组合双层交通梁桥的上、下部加载试验表明,上、下弦杆分别为弯压和弯拉的受力状态。上部加载时,下弦杆拉应力约为上弦杆的1.5倍,下部加载时,下弦杆拉应力约为上弦杆的2.5倍,下弦杆为薄弱弦杆。

4)浇筑混凝土对斜腹杆受力影响较大。上部加载时,斜腹杆受拉,直腹杆受压,边部斜腹杆与中部直腹杆受力偏大。且上、下部加载试验中,加载方式对直腹杆的受力形式影响较大,下部承载设计宜考虑局部受力。

5)下部加载时,顶板顶面混凝土沿跨度分布更均匀,靠近腹杆与上弦杆连接处受力较小。腹杆设置有利于力的均匀分配。上、下部加载时,顶板侧面混凝土基本受压,底板侧面混凝土基本受拉。

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.
YE L P, FENG P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36. (in Chinese)

[2] 琚宏昌, 张凤, 张贝宜, 等. FRP复合材料在土木工程中应用的研究进展[J]. 混凝土, 2012(2): 11-17.
JU H C, ZHANG F, ZHANG B Y, et al. Research advance for application of FRP composites in civil construction [J]. Concrete, 2012(2): 11-17. (in Chinese)

[3] ZHANG L F, LIU W Q, WANG L, et al. Mechanical behavior and damage monitoring of pultruded wood-cored GFRP sandwich components [J]. Composite Structures, 2019, 215: 502-520.

[4] GEMI L, MORKAVUK S, KÖKLÜ U, et al. An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 172: 186-194.

[5] 孔凡荣, 游敏, 郑小玲, 等. 搭接长度对胶接接头工作应力分布影响的数值分析[J]. 机械强度, 2004, 26(2): 213-217.
KONG F R, YOU M, ZHENG X L, et al. Numerical analysis of the effect of lap length on the stress distribution of adhesively bonded joints [J]. Journal of

- Mechanical Strength, 2004, 26(2): 213-217. (in Chinese)
- [6] LANG T P, MALLICK P K. The effect of recessing on the stresses in adhesively bonded single-lap joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999, 19(4): 257-271.
- [7] 张少锋, 张博, 罗琴, 等. 复合材料单搭胶结接头剪切试验及应力分析[J]. 环境技术, 2017, 35(6): 39-44.
ZHANG S F, ZHANG B, LUO Q, et al. Shear tests and stress analysis of single lap adhesive joint of composite material [J]. Environmental Technology, 2017, 35(6): 39-44. (in Chinese)
- [8] 赵馨怡, 黄盛楠, 冯鹏, 等. 复合材料胶栓混合连接机理的试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(Sup1): 314-321.
ZHAO X Y, HUANG S N, FENG P, et al. Experimental research on hybrid connecting method for FRP constructional elements [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(Sup1): 314-321. (in Chinese)
- [9] 李曙光. FRP构件的连接及其设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
LI S G. Research on connecting and design method for FRP constructional elements[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] 聂虎元. 先进复合材料在桥梁中的应用现状和发展前景[J]. 工程技术(文摘版):00234.
NIE H Y. The application status and development prospects of advanced composite materials in bridges [J]. Engineering Technology (Abstract Edition): 00234. (in Chinese)
- [11] 王文伟, 李果. 纤维增强塑料(FRP)在混凝土结构中的研究与应用[J]. 混凝土, 2001(10): 37-39.
WANG W W, LI G. Research and application of FRP for RC structures [J]. Concrete, 2001(10): 37-39. (in Chinese)
- [12] 冯鹏, 田野, 覃兆平. 纤维增强复合材料拉挤型材桁架桥静动力性能研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(6): 36-41.
FENG P, TIAN Y, QIN Z P. Static and dynamic behavior of a truss bridge made of FRP pultruded profiles [J]. Industrial Construction, 2013, 43(6): 36-41. (in Chinese)
- [13] 陈军. FRP-UHPC板桁组合梁桥节点连接及整体受力性能试验与理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
CHEN J. Experimental and theoretical research on joint connections and the FRP-Truss-UHPC-Deck hybrid bridge system [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [14] DRYGALA I J, POLAK M A, DULINSKA J M. Vibration serviceability assessment of GFRP pedestrian bridges [J]. Engineering Structures, 2019, 184: 176-185.
- [15] ZHANG D D, LV Y, ZHAO Q L, et al. Development of lightweight emergency bridge using GFRP-metal composite plate-truss girder [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109291.
- [16] ABDELKARIM O I, AHMED E A, BENMOKRANE B, et al. Design and field testing of a first continuous slab-on-girder bridge with a hybrid GFRP-steel-reinforced bridge deck in Canada [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(8): 04020044.
- [17] ABDELMONEM A, EL-FEKY M S, NASR E S A R, et al. Performance of high strength concrete containing recycled rubber [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116660.
- [18] SASANIPOUR H, ASLANI F, TAHERINEZHAD J. Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116598.
- [19] 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009 [S]. 北京: 建筑工业出版社, 2009.
Standard test method for basic properties of building mortar: JGJ/T 70-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)