

引用本文:郝键铭,刘 远,郝宪武.不同结构组合形式的 GFRP-钢组合桁架梁受力性能研究[J].建筑科学与工程学报,2022,39(2):61-68.
HAO Jian-ming, LIU Yuan, HAO Xian-wu. Study on Mechanical Behavior of GFRP-steel Composite Truss Girder with Different Structural Combination Forms[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 61-68.

DOI:10.19815/j.jace.2021.05042

不同结构组合形式的 GFRP-钢组合桁架梁受力性能研究

郝键铭,刘 远,郝宪武

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为了研究玻璃纤维增强复合材料(GFRP)-钢组合结构的受力性能,根据各向异性体弹性力学理论确定 GFRP 材料的物理力学参数,依托淮河出海口闸区工作桥工程实例,利用 ABAQUS 建立基于板壳单元的桁架梁有限元模型,分析其受力特性。采用将部分应力较大的 GFRP 构件替换成钢构件的结构组合方案,对比分析了结构自重、跨中挠度、单元应力的变化情况,探索合理的杆件替换方案;引入组合桁架梁统一抗弯刚度的概念,将桁架结构等效为单梁模型进行简化计算;引入截面的共同工作系数以描述桁架梁腹杆对整体结构的抗弯贡献。结果表明:在基本荷载组合作用下, GFRP 桁架梁的各构件应力均远小于材料的强度,有很高的安全储备;对部分杆件的替换可以有效增加结构竖向刚度,减小在荷载作用下的跨中挠度;将上下弦杆替换为 Q345 钢材的方案对增强桁架梁竖向刚度的贡献较大,且结构形式较为合理;该研究可为类似工程的方案设计提供参考。

关键词:GFRP-钢组合桁架梁;跨中挠度;构件替换;共同工作系数

中图分类号:TU311

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)02-0061-08

Study on Mechanical Behavior of GFRP-steel Composite Truss Girder with Different Structural Combination Forms

HAO Jian-ming, LIU Yuan, HAO Xian-wu

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior of glass fiber reinforced plastic (GFRP)-steel composite structure, the physical and mechanical parameters of GFRP material were determined according to the theory of anisotropic elasticity mechanics. Based on the engineering example of the working bridge in the Huaihe River estuary gate area, the finite element model of the truss girder based on the plate-shell element was established by ABAQUS, and the mechanical behavior were analyzed. The structural combination scheme of replacing some GFRP members with large stress into steel members was adopted, and the changes of structural self-weight, mid-span deflection and element stress were compared and analyzed to explore a reasonable member replacement scheme. The concept of unified bending stiffness of composite truss girder was introduced, and the truss structure was equivalent to single beam model for simplified

收稿日期:2021-05-11

基金项目:陕西省自然科学基金计划项目(2020JM-219);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102210108)

作者简介:郝键铭(1991-),男,陕西绥德人,讲师,工学博士,E-mail:jianminghao@chd.edu.cn。

calculation. The cross-section common working coefficient was introduced to describe the bending contribution of truss girder web member to integral structure. The results show that under the action of basic load combination, the stress of each component of GFRP truss girder is far less than the material strength, and there is a high safety reserve. Replacement of some members can effectively increase the vertical stiffness of the structure and reduce the midspan deflection under load. The scheme of replacing the upper and lower chords with Q345 steel has a great contribution to enhancing the vertical stiffness of the truss girder, and the structural form is reasonable. The research can provide reference for the design of similar projects.

Key words: GFRP-steel composite truss girder; midspan deflection; member replacement; common working coefficient

0 引言

桥梁工程长期暴露在露天的环境中,钢筋混凝土桥梁结构存在着较严重的结构耐久性问题,其中钢材锈蚀以及疲劳问题非常突出^[1-2],MBCS 公司制作的拉挤型材桁架的屋面系统^[3]成功解决了轻钢屋架腐蚀的问题。玻璃纤维增强复合材料(GFRP)桁架梁是一种以玻璃纤维复合增强材料制成的杆件代替传统桁架梁杆件的新型桥梁结构。与传统钢材或混凝土材料相比,GFRP 具有轻质、高强、耐腐蚀、抗疲劳性能较好的特点,可以满足桥梁工程耐久性、快速施工等要求。GFRP 型材属于各向异性材料,在桁架梁的轴向受力杆件中可以充分发挥 GFRP 材料的高纤维方向抗拉强度,并且其抗压强度一般也能满足要求。因此,桁架梁这种结构形式是复合材料较为广泛的应用形式,主要用于跨度较小的人行桥和有快速架设需求的工程^[4]。希腊佩特雷大学开发出用 GFRP 拉挤空心方管拼接成的桥梁^[5],自重仅为 13.5 t,可满足 30 t 的车辆荷载。重庆市茅以升公益桥是中国第一座全桥采用纤维增强复合材料的桁架桥,清华大学冯鹏等^[6]采用有限元软件分析了其静力性能与动力性能,结果表明该桥荷载效率较高,且结构有较强的安全储备。纤维增强复合材料在桥梁工程中的应用逐渐从加固补强转移到结构构件中,并已经进行了 FRP 桥面板^[7]、GFRP 管-钢管约束混凝土^[8]、FRP-混凝土组合梁^[9-10]、栏杆^[11]、索^[12]、大跨结构^[13]、GFRP 筋混凝土柱的海水侵蚀问题^[14]等的研究。若全桥使用 GFRP 型材,由于 GFRP 材料弹性模量较低,导致结构竖向刚度较小,跨中挠度值成为设计的主要控制因素,本文通过将部分 GFRP 构件替换为钢构件的方式提升竖向刚度,对 GFRP-钢组合桁架梁进行应力和变形分析,探索较为合理的杆件替换方案,并进行等效简化计

算的研究。

1 GFRP 桁架梁力学性能分析

GFRP 材料可通过拉挤成型的制作工艺制成纤维增强材料制品,产品性能良好,强度较高,密度较小,但其本质上是一种复合材料,与传统材料的物理力学性能有较大的不同,突出表现在应力-应变的关系上,对于这种层合板的结构形式(图 1),应采用各向异性体弹性力学理论^[15]进行研究。

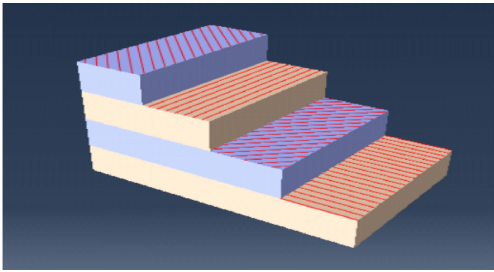


图 1 层合板结构形式

Fig. 1 Structural Form of Laminate

根据弹性力学理论基础,可以通过 GFRP 构件组成材料中的纤维和树脂的力学性能和纤维排布方向来预测单层板的弹性模量和强度,再根据单层板的厚度和刚度系数并通过层合板内力与内力矩和应变的关系可计算出层合板的力学性能,目前应用于复合材料强度分析的准则有最大应力准则、最大应变准则、霍夫曼准则、蔡-吴准则,对于本文中受力明确结构也可以在 GFRP 层合板的层面上进行失效判断,即通过比较层合板平均应力和试验得到的材料力学参数来判定构件是否破坏。依据《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》^[16]和《纤维增强塑料压缩性能试验方法》^[17]并参考文献^[18],得到 GFRP 层合板的材料参数,包括 3 个方向的弹性模量、泊松比、3 个方向的剪切模量,如表 1 所示。

本文背景工程为淮河出海口闸区工作桥的主桁

表 1 GFRP 材料参数
Table 1 GFRP Material Parameters

E_1 /MPa	E_2 /MPa	泊松比	G_{12} /MPa	G_{13} /MPa	G_{23} /MPa
35 000	14 600	0.22	4 840	4 840	2 420

注： E_1 、 E_2 、 E_3 分别为 3 个方向的弹性模量； G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 分别为 3 个方向的剪切模量。

架梁,GFRP 桁架梁结构计算跨径 $L=36.0\text{ m}$,桁高为 4 m ,高跨比为 $1/9$,桁架弦杆间距为 3.98 m ,节间长度为 4 m ,上下弦杆和斜腹杆为空腹矩形截面,上下横联为工字形截面,构件截面尺寸如表 2 所示。采用有限元软件 ABAQUS 对全桥进行分析,为模拟层合板特性,各构件采用壳单元建立,支座为一侧铰接一侧滑动。尽管拉挤工艺较为成熟,可以一次成型各种截面的 GFRP 型材,但在实际工程上,还是要通过节点板将各个构件连接起来,节点板处要承受各方向杆件传递来的拉力和压力。由于 GFRP 材料在垂直纤维方向上的材料强度较低,因此 GFRP 材料不适合作为复杂受力处的节点板,通常选用钢板作为各节点处的节点板。为提高节点连接性能,在节点板内加设内衬件用于提高局部刚度,连接方式采用机械连接,紧固件采用螺栓。在有限元模型中,各节点处通过节点耦合来实现共同作用。相应的有限元几何模型如图 2 所示。

依据《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—1995)中的公式可计算得到单位面积人群荷载 $W=4.14\text{ kPa}$ 。

表 2 构件截面参数
Table 2 Section Parameters of Components

构件	截面类型	高度/mm	宽度/mm	腹板厚度/mm	顶、底板厚度/mm
弦杆、腹杆	方管	300	300	15	15
上下横联	工字形	300	200	15	15

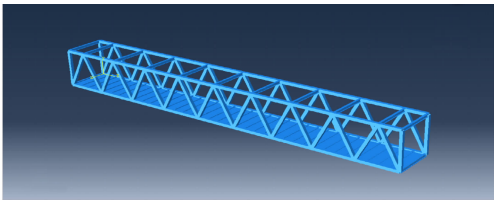


图 2 有限元几何模型

Fig. 2 Finite Element Geometric Model

首先进行结构在基础荷载(自重)和 4.14 kPa 荷载作用下的结构响应,位移变化如图 3 所示。根据 GFRP 桁架梁模型的计算结果整理可得挠度最大值发生在跨中处,最大挠度达到 57.92 mm ,大于桁架桥挠度容许值 $L/800$ (45 mm),这是由于 GFRP 材料弹性模量较低,导致结构竖向刚度较小,是限制 GFRP 桥梁结构跨径的主要原因。北京玻璃研究院对该桥进行了成桥荷载试验(图 4)^[18],通过与实测结果对比发现,成桥荷载试验的跨中最大挠度值为 42.23 mm ,与数值模拟结果有一定的误差。其原因为数值模型中为计算简便没有考虑桥面板以及其他附属设施的影响,而且本桥在实际施工过程中设计了一定的预拱度,这加大了施工控制和结构验算的难度,有限元计算模型中也不易于模拟分析。成桥荷载与有限元模型都显示结构的最大挠度已经逼近甚至超出规范限值,这一结论验证了有限元模拟的可靠性,也体现了增强全 GFRP-桁架

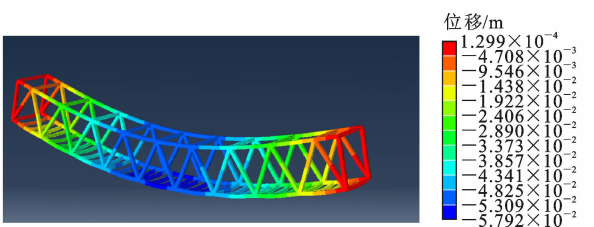


图 3 全 GFRP 桁架梁位移云图

Fig. 3 Displacement Cloud Map of Full GFRP Truss Beam



图 4 荷载试验

Fig. 4 Load Experiment

梁抗弯刚度的必要性。

通过全 GFRP 桁架梁的模态屈曲分析得出前 4 阶振型,如图 5 所示。一般情况下,为了保证行人过桥时的舒适性,桥梁的自振频率要与行人走路的频率有较明显区别,大多数规范都是通过 1 阶竖弯振型频率作为主要指标来控制桥梁的振动性能。本结

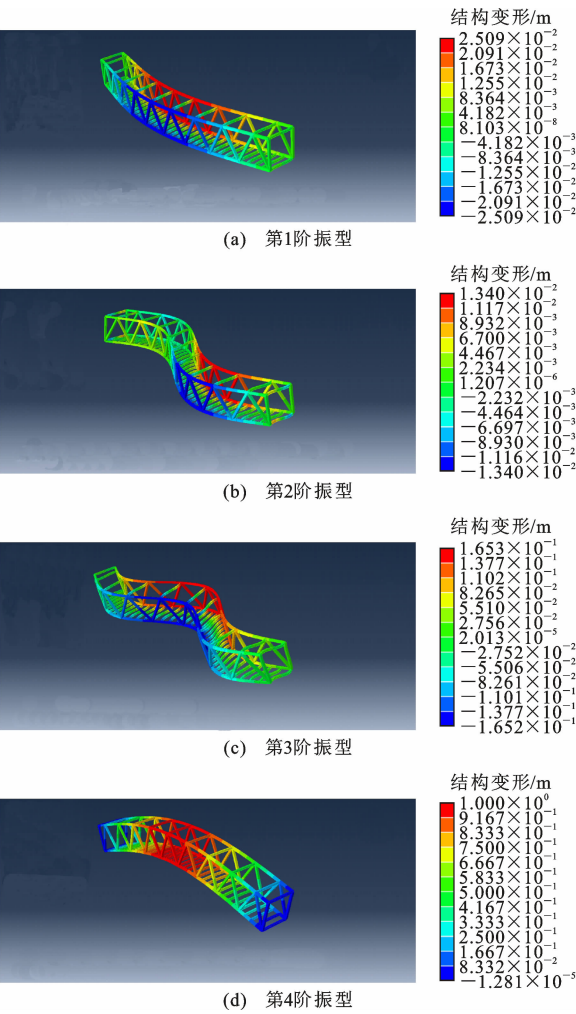


图5 GFRP桁架梁前4阶振型

Fig. 5 First Four Mode Shapes of GFRP Truss Beam

构的1阶竖弯振型出现在第4阶振型,其频率值为5.864 Hz,符合规范要求的桥梁自振频率规定,能够达到较好的行人舒适性。最后进行GFRP桁架梁的应力分析,将桁架梁主要构件的应力云图进行整理分析,得出主要构件的最大应力,如表3所示(拉为正,压为负)。

表3 各构件最大应力

Table 3 Maximum Stress of Each Component

构件	下弦杆	上弦杆	上平横联	下平横联	主桁腹杆
最大应力/MPa	28.45	-24.37	-16.05	12.80	-12.70

参考相关文献和试验数据^[19-20]可得GFRP材料的抗拉强度和抗压强度分别为600 MPa和540 MPa,通过材料强度与构件最大应力的比值可得材料的强度安全系数,可以表征GFRP材料的强度储备。从表3可知,GFRP桁架梁的最大拉应力为28.45 MPa,出现在下弦杆跨中处,材料的强度安全系数为21.08。最大压应力为24.37 MPa,出现在

上弦杆跨中处,材料的强度安全系数为22.15。因此,在基本荷载组合作用下,GFRP桁架梁的各构件应力均远小于材料的强度,有很高的安全储备。






2 GFRP-钢组合桁架梁设计优化及结果对比

GFRP桁架梁的材料强度满足受力要求,但GFRP材料弹性模量较小,导致结构整体竖向刚度较小,在基础荷载组合作用下跨中挠度超过规范要求的限值。在实际工程中需要设置反拱等一些措施减小跨中挠度,本节通过改变构件组合类型,替换部分杆件的方式增加结构竖向刚度,从而减小跨中挠度。为了研究各杆件对桁架桥挠度的影响,分步将拉压应力较大的GFRP杆件用Q345钢材代替,且不改变原桥GFRP杆件的截面尺寸。在相同荷载作用下分别进行静力模拟计算,杆件替换示意及其结果如表4所示。

通过对比可知,对部分杆件的替换可以有效增加结构竖向刚度,减小荷载作用下的跨中挠度。由于GFRP材料在纤维方向的弹性模量相对较小,首先对应力较大的上下弦杆进行替换,上弦杆替换后跨中挠度减小为41.65 mm,变化率为-28.09%;上下弦杆均替换后跨中挠度减小为22.74 mm,变化率为-60.73%。此时结构挠度已经能完全符合规范要求,结构总支反力的增加在可接受的范围内,并且保留一定量的GFRP材料,可使其自重轻、耐腐蚀、抗疲劳的优点充分发挥,满足桥梁工程耐久性、快速施工等要求。进一步对上下弦杆和上下横联进行替换时发现,跨中挠度反而有一定的增大,这是由于横向构件并不是对结构挠度起主要控制作用的受力构件,经过替换后反而增大了结构自重,因此使桁架桥跨中挠度不降反增。将上下弦杆、受压腹杆替换成Q345钢材后,结构跨中挠度进一步减小到18.44 mm,变化率为-68.16%,但此时结构总支反力已经较大,结构已经接近于钢桁架桥,GFRP构件较少,其材料优越性的发挥受到限制,工程借鉴意义较小。通过分析不难发现,部分杆件的替换可以有效地减小跨中挠度,在实际工程应用中,可以通过GFRP和钢材的组合,发挥这2种材料各自的优点。相比于全GFRP桁架梁,GFRP-钢组合桁架梁的竖向刚度可以得到极大提升,可突破全GFRP桁架梁的跨径限制,并且通过组合钢杆件可以减小工程造价。此外,相比于钢桁架梁,GFRP-钢组合桁架梁存在一定量的GFRP材料,可使其自重轻、耐腐

表 4 桁架部分杆件用 Q345 钢材替换有限元结果对比

Table 4 Comparison of Finite Element Results of Replacing Some Truss Members with Q345 Steel

替换方案	杆件替换(虚线部分为 GFRP,粗实线为 Q345 钢材)	挠度/mm	挠度变化/%	总支反力/kN
全 GFRP		57.92	0.00	752.4
上弦杆替换		41.65	-28.09	830.0
上下弦杆均替换		22.74	-60.73	908.0
上下弦杆、上下横联均替换	上下弦杆、上下横联均替换为 Q345 钢材	23.22	-59.91	1 025.2
上下弦杆、受压腹杆替换		18.44	-68.16	981.2
全 Q345 钢材		14.53	-74.91	1 170.4

蚀、抗疲劳的优点充分发挥,满足桥梁工程耐久性、施工速度等要求,可减小施工难度以及桥梁后期维修加固费用。基于对比分析结果,可以建立合理的 GFRP-钢组合桁架梁的评价机制体系,从结构刚度、工程造价、施工难易程度等多方面寻求最优方案。

在静力对比的基础上,进行各组合方案的模态分析,并提取前 4 阶自振频率进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 各替换方案下桁架梁前 4 阶自振频率
Table 5 The First Four Natural Frequencies of Truss Beam Under Each Replacement Scheme

替换方案	1 阶自振频率/Hz	2 阶自振频率/Hz	3 阶自振频率/Hz	4 阶自振频率/Hz
全 GFRP	1.270 9	3.119 7	5.619 5	5.857 9
上弦杆替换	1.308 1	3.112 3	5.670 1	5.950 9
上下弦杆均替换	1.325 1	3.195 5	5.780 2	7.023 8
上下弦杆、受压腹杆替换	1.334 9	3.264 2	5.816 2	7.199 8
全 Q345 钢材	1.706 3	3.849 6	6.512 6	7.302 9

通过有限元模型分析不同设计方案的自振特性,从所得到的前 4 阶模态可以得出以下结论:①不同设计方案仅使各阶自振频率大小发生变化,但桁架梁前 4 阶模态的振动形式并未发生改变;②结构的第 1 阶振型为 1 阶正对称侧弯,结构的第 2 阶振型为 1 阶反对称侧弯,结构的第 3 阶振型为 2 阶正对称侧弯,结构的第 4 阶振型为 1 阶正对称竖弯;③桥梁较早出现的振型都是以横向弯曲为主,说明该桥对横向动力荷载作用比较敏感。由表 5 可以看出,当采用钢材代替部分 GFRP 构件时,桁架梁的

自振频率均有了一定程度的提升,尤其是将上下弦杆替换后,结构的第 4 阶频率提升显著,表明这样的 GFRP-钢组合桁架梁相比于全 GFRP 桁架梁有更好的动力特性。

3 GFRP-钢组合桁架梁腹杆共同工作系数

通过前文分析,上下弦杆均替换为 Q345 钢材,其余构件为 GFRP 材料的设计方案在静力和动力分析中均具有良好的性能。针对这种优化后的组合桁架梁结构,本节为了简便计算 GFRP-钢组合桁架梁的整体抗弯刚度,参考相关等效理论^[21-26],引入组合桁架梁统一抗弯刚度的概念,将桁架结构等效为单梁模型来简化计算。

等效过程最关键的内容是如何描述斜腹杆对截面抗弯的贡献。首先假设存在一种腹板,其抗剪强度使得上下弦杆能共同抗弯,整个截面具有同一条中性轴,如图 6(a)所示,此时截面统一抗弯惯性矩 I_1 为

$$I_1=I_t+I_b+\frac{A_tA_b}{A_t+A_b}c^2$$

(1)

式中: I_t 、 I_b 分别为上下弦杆对自身中性轴的惯性矩; A_t 、 A_b 分别为上下弦杆截面面积; c 为上下弦杆形心间的距离。

假设上下弦杆之间没有腹板连接,两者独立受弯,如图 6(b)所示,此时截面抗弯惯性矩 I_2 为

$$I_2=I_t+I_b$$

(2)

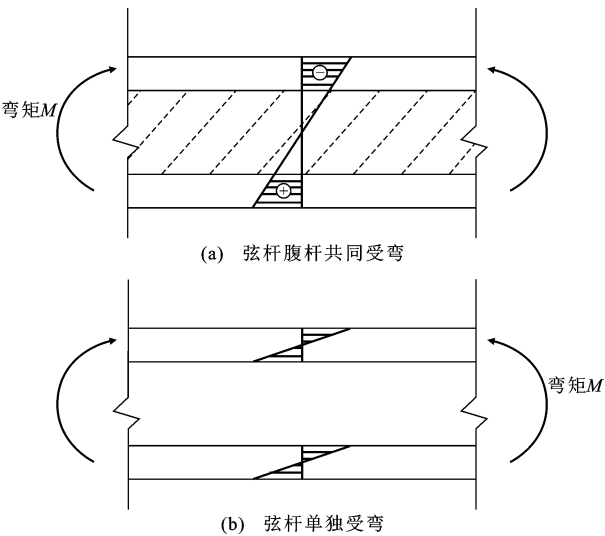


图 6 不同腹板截面正应力分布

Fig. 6 Normal Stress Distribution of Different Web Sections

然而,在工程实际中,腹杆具有一定的抗剪刚度,但不足以使上下弦杆满足平截面假定,因此结构的整体抗弯刚度介于 I_1 、 I_2 之间,可写成

$$I=I_t+I_b+k\frac{A_tA_b}{A_t+A_b}c^2\tag{3}$$

式中: I 为截面惯性矩; k 为截面共同工作系数,它表征了腹杆对于结构抗弯的贡献。

根据材料力学公式,简支梁在均布荷载作用下截面惯性矩为

$$I=\frac{5ql^4}{384Ef}\tag{4}$$

式中: q 为自重荷载的均布荷载值; l 为简支梁计算跨径; E 为钢结构弹性模量; f 为跨中挠度。

联立式(3)与式(4)得 GFRP-钢组合桁架梁截面的共同工作系数 k 为

$$k=\frac{A_t+A_b}{A_tA_b c^2}\left(\frac{5ql^4}{384Ef}-I_t-I_b\right)\tag{5}$$

该工程桥梁跨径为 36 m,桁架高度为 4 m,桁架腹杆倾角 α 、桁架长度 N 、桁架高度 H 均对 k 值有影响,其中腹杆倾角是由桁架高度和节间长度综合决定的,考虑到桁架高度 4 m 比较符合闹区工作桥的使用要求,桁架高度固定不变,通过改变节间长度(2、3、4、6 m)来改变腹杆倾角。利用有限元模型计算跨中挠度,由式(5)计算共同工作系数,结果列于表 6。

从表 6 可以看出,随着节间长度的增加,结构整体挠度先减小后增大,其原因如下:当桁架高度一定时,节间长度增大,腹杆数量和上平横联的数量将减

表 6 不同节间长度下的共同工作系数				
Table 6 Common Working Coefficients Under Different Internode Lengths				
节间长度/m	2	3	4	6
跨中挠度/mm	23.59	22.49	22.74	24.79
共同工作系数	0.371 8	0.393 6	0.409 1	0.393 4

小,从而导致桥梁重量减小;节间长度进一步增大会使腹杆的长度以及受力增大,因此过大的节间长度会使跨中挠度增大。综合考虑认为,当桁架高度为 4 m 时,节间长度取 3~6 m 较为合适,引入的共同工作系数可以很好地描述桁架腹杆构件对于整体结构抗弯的贡献,可在一定程度上指导实际工程。

4 结 语

(1)全 GFRP 桁架梁在基础荷载作用下,GFRP 桁架梁的最大拉应力为 28.45 MPa,出现在下弦杆跨中处,材料的强度安全系数为 21.08。最大压应力为 24.37 MPa,出现在上弦杆跨中处,材料的强度安全系数为 22.15。因此在基本荷载组合作用下,GFRP 桁架桥的各构件应力均远小于材料的强度,有很高的安全储备。最大挠度达到 57.92 mm,大于桁架桥挠度容许值 $L/800$ (45 mm),这是由于 GFRP 材料弹性模量较低,导致结构竖向刚度较小,这是限制 GFRP 桥梁结构跨径的主要原因,是 GFRP 桁架梁分析与设计的主要考虑因素。

(2)通过对全 GFRP 桁架梁部分杆件进行重新组合的各种方案对比分析可以发现,将应力较大的上下弦杆替换成弹性模量较大的钢材即可满足规范要求的跨中挠度,替换后跨中挠度减小为 22.74 mm,变化率为-60.73%。同时结构总反力的增加在可接受的范围内,并且保留一定量的 GFRP 材料,可使其自重轻、耐腐蚀、抗疲劳的优点充分发挥,可以满足桥梁工程耐久性、快速施工等要求,并且 GFRP-钢组合桁架梁的动力性能也有进一步的提升。

(3)引入组合桁架梁统一抗弯刚度的概念,将桁架结构等效为单梁模型来简化计算,引入了截面的共同工作系数。通过固定桁架高度,改变节间长度的变参数对比,更精准地描述了桁架腹杆对整体结构抗弯的贡献,可在以后类似的工程实际中,根据结构刚度、工程造价、施工难易程度等多方面对这一系数进行补充和修正,建立一套评价标准体系。

参考文献:

References:

- [1] 陈肇元,徐有邻,钱稼茹. 土建结构工程的安全性及耐久性[J]. 建筑技术,2002,33(4):248-253.
CHEN Zhao-yuan, XU You-lin, QIAN Jia-ru. Safety and Durability of Structural Works in Civil Engineering[J]. Architecture Technology, 2002, 33(4): 248-253.
- [2] 牛荻涛,杨德柱,罗大明. 混凝土结构耐久性评定方法体系[J]. 建筑结构,2021,51(17):115-121,114.
NIU Di-tao, YANG De-zhu, LUO Da-ming. Durability Assessment Method of Existing Concrete Structures[J]. Building Structure, 2021, 51(17): 115-121, 114.
- [3] GILBY J. Pultrusion Provides Roof Solution[J]. Reinforced Plastics, 1998, 42(6): 48-52.
- [4] 徐以扬,方海,刘伟庆. 复合材料拉挤型材在桁架桥梁结构中的应用与发展[J]. 世界桥梁,2010,38(4):32-34,38.
XU Yi-yang, FANG Hai, LIU Wei-qing. Application and Development of Composite Extruded Profile in Truss Bridge Structure [J]. World Bridges, 2010, 38(4): 32-34, 38.
- [5] KOSTOPOULOS V, MARKOPOULOS Y P, VLA-CHOS D E, et al. Design and Construction of a Vehicular Bridge Made of Glass/Polyester Pultruded Box Beams[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2005, 34(4): 201-207.
- [6] 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 Peng, TIAN Ye, QIN Zhao-ping. Static and Dynamic Behavior of a Truss Bridge Made of FRP Pultruded Profiles[J]. Industrial Construction, 2013, 43(6): 36-41.
- [7] 王进潇,程斌,闫兴非,等. 全FRP车行桥梁结构设计与分析[J]. 公路工程,2020,45(1):92-97.
WANG Jin-xiao, CHENG Bin, YAN Xing-fei, et al. Structure Design and Analysis of All FRP Vehicle Bridge[J]. Highway Engineering, 2020, 45(1): 92-97.
- [8] 王俊,刘伟庆,方海,等. GFRP管-钢管双壁约束混凝土组合柱轴压性能与承载力实用计算方法研究[J]. 建筑结构,2012,42(2):133-138.
WANG Jun, LIU Wei-qing, FANG Hai, et al. Experiment and Capacity Calculation Theory Research of Hybrid GFRP-concrete-steel Double Skin Tubular columns Under Axial Compression [J]. Building Structure, 2012, 42(2): 133-138.
- [9] 黄辉. 钢-FRP-混凝土组合梁桥构件的受力性能与设计方法研究[D]. 南京:东南大学,2016.
HUANG Hui. Mechanical Performance and Design Method Study on the Specimens of Steel-FRP-concrete Composite Bridge[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [10] 黄海林,周福林,言兴,等. GFRP型材-混凝土组合梁受弯性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(2):79-89.
HUANG Hai-lin, ZHOU Fu-lin, YAN Xing, et al. Experiment on Flexural Behavior of GFRP Profile-concrete Composite Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(2): 79-89.
- [11] 冯鹏,齐玉军,叶列平,等. GFRP栏杆的受力性能及其结构安全性研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2010(6):48-54.
FENG Peng, QI Yu-jun, YE Lie-ping, et al. Mechanical Performance and Safety Analysis of GFRP Railing System [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010(6): 48-54.
- [12] 谢旭,朱越峰. CFRP拉索设计对大跨度斜拉桥力学特性的影响[J]. 工程力学,2007,24(11):113-120.
XIE Xu, ZHU Yue-feng. Study on Behavior of Long-span CFRP Cable-stayed Bridges[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 113-120.
- [13] FENG P, YE L P, TENG J G. Large-span Woven Web Structure Made of Fiber-reinforced Polymer[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(2): 110-119.
- [14] 孙丽,杨泽宇,居理宏,等. GFRP筋混凝土柱海水环境受压性能[J]. 建筑科学与工程学报,2018,35(5):188-193.
SUN Li, YANG Ze-yu, JU Li-hong, et al. Compression Performance of GFRP Reinforced Concrete Columns Under Seawater Environment [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(5): 188-193.
- [15] 沈观林,胡更开,刘彬. 复合材料力学[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2013.
SHEN Guan-lin, HU Geng-kai, LIU Bin. Mechanics of Composite Materials[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [16] 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
Fiber-reinforced Plastics Composites — Determination of Tensile Properties: GB/T 1447—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [17] 纤维增强塑料压缩性能试验方法: GB/T 1448—2005

- [S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- Fiber-reinforced Plastics Composites — Determination of Compressive Properties: GB/T 1448—2005 [S]. Beijing:Standards Press of China,2005.
- [18] 陈思鹏. GFRP 桁架桥的力学性能分析与试验研究 [D]. 南京:东南大学,2017.
- CHEN Si-peng. Experimental Study on Mechanical Properties of GFRP Pedestrian Truss Bridge [D]. Nanjing:Southeast University,2017.
- [19] 周祝林,杨云娣. 单向纤维复合材料的弹性常数研究 [J]. 玻璃钢,1995(3):1-12.
- ZHOU Zhu-lin, YANG Yun-di. Study on Elastic Constants of Unidirectional Fiber Composites[J]. Glassfiber Reinforced Plastics,1995(3):1-12.
- [20] 王秉权,杨荫萍. 单向纤维增强复合材料弹性常数的实验研究[J]. 复合材料学报,1986,3(2):82-89,111.
- WANG Bing-quan, YANG Yin-ping. Experimental Determination of Elastic Constants for Unidirectional Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1986,3(2):82-89,111.
- [21] 王 彤,谢 旭,王 渊,等. 桁腹式组合桁梁结构计算理论[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(4):711-720,741.
- WANG Tong, XIE Xu, WANG Yuan, et al. Analysis of Prestressed Composite Truss Girders with Steel Truss Webs[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2014,48(4):711-720,741.
- [22] 黄华琪,张建东,刘 钊. 钢桁腹式混凝土组合箱梁桥的空间梁格模型[J]. 现代交通技术,2011,8(6):27-30,43.
- HUANG Hua-qi, ZHANG Jian-dong, LIU Zhao. Spatial Grillage Model of Steel Truss-web and Concrete Composite Box-girder Bridge[J]. Modern Transportation Technology,2011,8(6):27-30,43.
- [23] 周绪红,秦凤江,狄 谨,等. 基于能量原理的板桁结合型加劲梁连续化分析方法[J]. 中国公路学报,2014,27(6):34-43.
- ZHOU Xu-hong, QIN Feng-jiang, DI Jin, et al. Continuous Analysis Method for Deck-truss Composite Stiffening Girder Based on Energy Principle[J]. China Journal of Highway and Transport,2014,27(6):34-43.
- [24] 崔子鑫,李海超,张艳萍,等. 一种板桁结合型加劲梁竖向抗弯刚度的近似算法[J]. 国防交通工程与技术,2020,18(4):5-9,58.
- CUI Zi-xin, LI Hai-chao, ZHANG Yan-ping, et al. An Approximate Calculation Method for the Vertical Bending Stiffness of a Deck-truss Composite Stiffener [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence,2020,18(4):5-9,58.
- [25] 宛青云. 组合桁腹梁桥桁-箱等效理论研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2019.
- WAN Qing-yun. Study on Truss-box Equivalence Theory of Composite Truss Bridge with Steel Truss Webs[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology,2019.
- [26] 屈 鹏. 纤维/树脂复合材料多尺度结构对力学性能的影响[D]. 济南:山东大学,2012.
- QU Peng. Influence of Multi-scale Structure of Fiber Reinforced Resin Matrix Composites on Mechanical Properties[D]. Jinan:Shandong University,2012.