

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.018

GFRP—混凝土—钢组合梁桥的设计与应用

张海龙¹, 佟兆杰¹, 黄侨²

(1. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029; 2. 东南大学 交通学院)

摘要: GFRP—混凝土—钢组合梁桥是一种新型桥梁结构, 结构中的 GFRP 板可以有效减少混凝土碳化、钢筋锈蚀, 并显著改善组合板的受力, 从而提高桥面板的长期性能, 并进一步提高组合梁桥的使用寿命。该文结合预应力 GFRP—混凝土—钢组合连续梁桥的工程实践, 介绍了 GFRP—混凝土—钢组合梁桥的传力机理、GFRP 板的截面设计、GFRP—混凝土界面处理、GFRP 板对桥面板受力性能改善等内容。

关键词: GFRP—混凝土—钢组合梁桥; GFRP—混凝土组合板; 复合材料; 设计; 工程应用

1 引言

随着交通运输行业的发展, 2018 年中国公路桥梁总数已达 85.1 万座。但是由于设计、施工、养护、管理等方面的问题, 越来越多的桥梁无法达到设计寿命。而为了解决这一问题, 新技术、新材料、新工艺不断应用于桥梁创新中。近年来纤维增强复合材料(FRP)由于其优越的力学性能在桥梁工程中得到了一定应用, 如: 预应力碳纤维板、FRP 桥面板、FRP 斜拉索等。

钢—混组合梁桥的桥面板在荷载及环境侵蚀的耦合作用下, 成为了组合梁桥的易损构件之一。为了提高桥面板的耐久性, 将 FRP 材料加入到桥面板的设计

中成为了改善原有混凝土桥面板耐久性的方向之一。混凝土位于桥面板顶部, FRP 板位于桥面板底部, 两者组合形成 FRP—混凝土组合板。FRP 板可以参与横桥向受力代替部分底层钢筋, 并且可以阻挡来自于桥面板底部的环境侵蚀。钢梁与 FRP—混凝土组合板通过抗剪连接件连接, 两者组合即: FRP—混凝土—钢组合梁。

目前, 国内外学者对 FRP—混凝土—钢组合梁桥计算理论开展了一些研究, 如: 组合板、组合梁、FRP—混凝土界面的力学机理研究等, 但是关于 FRP—混凝土—钢组合梁桥的工程应用还较少。合肥市郎溪路工程高架桥 E 匝道第二联为预应力 GFRP—混凝土—钢组合连续梁桥, 该文结合该工程项目, 对该种桥型的设计

- *****
- [2] CJJ 69-95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [3] 许立言, 陶慕轩, 樊健生, 等. 大跨度钢—混凝土组合人行天桥舒适度分析[J]. 建筑结构学报, 2016(5).
- [4] Zoltowski K., Zoltowski P.. Dynamic Analysis of Pedestrian Bridges with FEM and CFD[R]. SoFiStik Seminar Lectures, 2005.
- [5] 徐海军, 戎华钦, 高星亮, 等. 大跨度曲线人行桥人致振动分析与耦合振动控制研究[J]. 中外公路, 2016(4).
- [6] 施颖, 张振宇, 姚君, 等. 某异形拱人行桥通行舒适度及其控制研究[J]. 浙江工业大学学报, 2017(5).
- [7] 乔云强, 吴桂楠. 单主缆悬索桥人致振动研究及减振控制[J]. 世界桥梁, 2018(2).

- [8] EN03 Human Induced Vibration of Steel Structures. Vibration Design of Footbridge[S].
- [9] Andriacchi T. P., Ogle J. A., Galante J. O.. Walking Speed as a Basis for Normal and Abnormal Gait Measurement[J]. Journal of Biomechanics, 1977, 10: 261-268.
- [10] Leonard D.. Human Tolerance Levels for Bridge Vibrations[R]. TRRL Report No. 34. Road Research Laboratory, 1996.
- [11] 黄国平, 侯苏伟, 王新忠. 基于单自由度共振反应的模态质量计算方法[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2017(5).

收稿日期: 2020-11-12(修改稿)

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2019M653085); 中国交通建设股份有限公司资助项目(编号: 271400140114)

作者简介: 张海龙, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 30527601@qq.com

计、建造进行介绍。

2 项目概况

合肥市郎溪路工程高架桥 E 匝道第二联为 GFRP—混凝土—钢组合连续梁桥,其跨径为(25+35+25) m,2018 年竣工,如图 1 所示。该桥的桥面板为 GFRP—混凝土组合桥面板,该桥的组合梁为 GFRP—混凝土—钢组合梁。桥梁总长 85 m,桥宽 8.5 m,桥梁的截面形式为 GFRP+混凝土+钢梁。桥梁总体布置图如图 2 所示。



图 1 GFRP—混凝土—钢组合梁桥

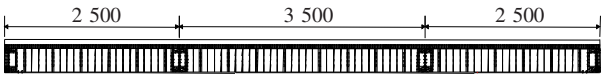


图 2 桥梁总体布置图(单位:cm)

3 GFRP—混凝土—钢组合梁桥的设计

图 3 为 GFRP—混凝土—钢箱梁断面图,位于混凝土底面的 GFRP 板与混凝土组合形成 GFRP—混凝土组合桥面板,组合板与钢梁通过栓钉进行连接。GFRP 板在栓钉处断开,由于 GFRP 板不连续通过钢腹板,可以避免栓钉处 GFRP 板与栓钉相交的复杂处理。

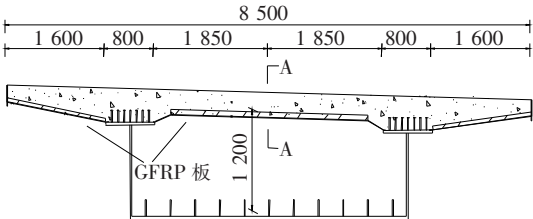


图 3 GFRP—混凝土—钢箱梁断面图(单位:mm)

在受力方面,在横桥向正弯矩区,GFRP 板位于桥面板底部承担拉力,可以降低横桥向钢筋的配置。在耐久性方面,GFRP 板阻挡了来自桥面板底部的氯离子、二氧化碳的侵蚀,有效降低了钢筋锈蚀、混凝土碳

化及荷载耦合作用的危害,提高了桥面板的长期性能,并进一步提高了组合梁桥的使用寿命。此外,GFRP—混凝土板与钢梁通过伸入到桥面板中的栓钉连接,纵桥向受力主要由 GFRP—混凝土—钢组合梁承担,横桥向受力主要由 GFRP—混凝土板承担,整个结构受力明确。

图 4 为 GFRP 板横断面图,GFRP 板由底板、肋板、定位板组成。每个 GFRP 板单元的宽度为 450 mm,其中 GFRP 板宽 449 mm,胶层厚度 1 mm。GFRP 板与 GFRP 板通过涂抹在肋板上的环氧树脂形成一体,为了提高板与板间的拼接精度,在肋板相交的位置设置定位板。此外,为了方便纵桥向钢筋的架设,在 GFRP 肋板顶部开槽,如图 5 所示。

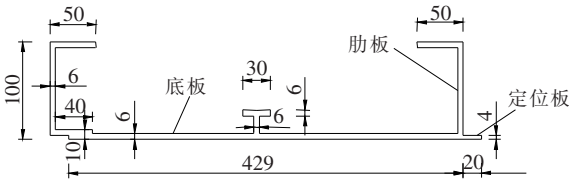


图 4 带定位板的 GFRP 板横断面图(单位:mm)



图 5 GFRP 板实景图

GFRP 板与混凝土通过 GFRP 底板表面的界面连接在一起。GFRP 板与混凝土的界面形式有无黏结界面、砾石界面、粗砂界面和湿胶界面,如图 6 所示。不同界面形式的简支板静力试验结果表明:湿胶界面和 50%覆盖率的砾石界面提供的组合作用最好。这里考虑到在胶体凝固前完成混凝土浇筑的湿胶界面不适合于实际工程环境,采用 50%覆盖率的砾石界面作为工程中的 GFRP—混凝土界面形式。图 7 为不同界面形式的 GFRP—混凝土组合板静力加载图。

4 GFRP—混凝土板工程实例分析

采用单向板的理论公式对实桥中的 GFRP—混凝土组合板进行刚度、抗弯承载力、应力计算,并通过与原设计方案的比较说明 GFRP 板对原结构受力性能

的影响。

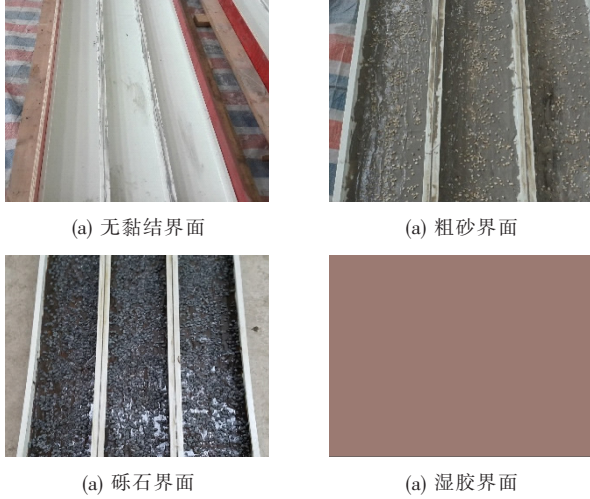


图 6 不同 GFRP—混凝土界面形式



图 7 不同界面形式的 GFRP—混凝土简支板试验

4.1 开裂刚度计算

参考文献[12]的换算截面法进行 GFRP—混凝土组合板开裂截面弯曲刚度计算,计算模型如图 8 所示。由于 GFRP 肋板设置了槽口,在弯曲计算中偏于安全地忽略肋板的贡献。取横桥向单位板宽 GFRP—混凝土板进行计算,如图 9 所示。

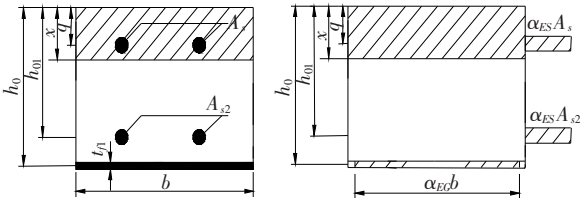


图 8 开裂截面换算截面计算图式

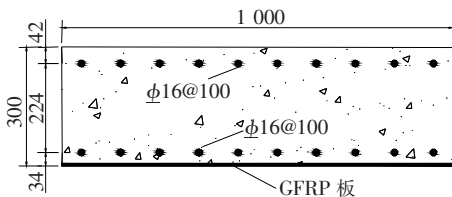


图 9 横桥向单位板宽图(单位:mm)

首先依据换算截面受拉区和受压区对中和轴的净距相等求解受压区高度 x 。

$$\frac{1}{2}bx^2 + \alpha_{ES}A_s(x-q) = \alpha_{ES}A_{s2}(h_{01}-x) + \alpha_{EG}t_{f1}b(h_0-x) \quad (1)$$

式中: b 为桥面板的宽度; t_{f1} 为 GFRP 底板的厚度; A_s 为上层钢筋面积; q 为混凝土顶面到受压钢筋中心线的距离; x 为混凝土受压区的高度; A_{s2} 为下层钢筋面积; h_0 为混凝土顶面到 GFRP 底板中心线的距离; h_{01} 为混凝土顶面到受拉钢筋中心线的距离; α_{ES} 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值; α_{EG} 为 GFRP 在桥纵向的弹性模量与混凝土弹性模量的比值。

由方程(1)得到 x , 将其代入式(2)可得组合板开裂截面换算截面惯性矩:

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bx^3 + \alpha_{ES}A_s(x-q)^2 + \alpha_{ES}A_{s2}(h_{01}-x)^2 + \alpha_{EG}t_{f1}b(h_0-x)^2 \quad (2)$$

受拉钢筋应力 σ_{s2} 可通过式(3)计算:

$$\sigma_{s2} = \alpha_{ES} \frac{M}{I_{cr}}(h_{01}-x) \quad (3)$$

当 $t_{f1}=0$ 时,由方程(1)求解得原设计桥面板的受压区高度 x' 。之后通过式(4)得原设计桥面板开裂截面换算截面惯性矩 I'_{cr} ,通过式(5)得受拉钢筋应力 σ'_{s2} 。

$$I'_{cr} = \frac{1}{3}bx'^3 + \alpha_{ES}A_s(x'-q)^2 + \alpha_{ES}A_{s2}(h_{01}-x')^2 \quad (4)$$

$$\sigma'_{s2} = \alpha_{ES} \frac{M}{I'_{cr}}(h_{01}-x') \quad (5)$$

表 1 为加入 GFRP 板后钢筋应力及开裂截面换算截面惯性矩的变化。表 1 中 I'_{cr} 的计算值为 $5.68 \times 10^8 \text{ mm}^4$, I_{cr} 的计算值为 $8.44 \times 10^8 \text{ mm}^4$, 加入 GFRP 板后,组合板的惯性矩提高了约 49%。将计算惯性矩代入式(3)、(5)中并进行比较,得到加入 GFRP 板后组合板的钢筋应力降低了约 30%。由于 GFRP 板的贡献,钢筋应力降低了,疲劳荷载下桥面板的受力性能得到了改善。此外,考虑到 GFRP 板对混凝土的保护以及对裂缝宽度的限制,组合板的耐久性将会进一步提升。整体来说,在原钢筋混凝土板基础上加入 GFRP 板,将改善桥面板在疲劳、锈蚀下的受力。

4.2 抗弯承载力计算

参考文献[13]的截面分析法进行抗弯承载力计算,计算图式如图 10 所示。其中: ϵ_{as1} 为上层钢筋应

表1 钢筋应力及开裂截面惯性矩对比

换算指标	截面特性计算公式	提高/%
截面惯性矩	$(I_{cr}-I'_{cr})/I'_{cr}\times 100\%$	49
钢筋应力	$(\sigma_{s2}-\sigma'_{s2})/\sigma'_{s2}\times 100\%$	-30

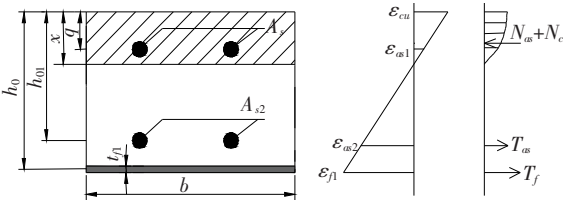


图10 抗弯承载力计算图示

变; ϵ_{as2} 为下层钢筋应变; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变,这里取 0.003 3; ϵ_{f1} 为 GFRP 板中心线应变; N_c 为受压区混凝土合力; N_{as} 为上层钢筋合力; T_f 为 GFRP 板合力; T_{as} 为下层钢筋合力。

当计算原钢筋混凝土板抗弯承载力时,令 $T_f=0$ 进行求解。基于平截面假定推导截面应变的相互关系,之后通过内力平衡方程计算出极限抗弯承载力。

基于截面分析法的钢筋混凝土板抗弯承载力为 199 kN·m,GFRP—混凝土组合板抗弯承载力为 560 kN·m,抗弯承载力提高了 181%。

5 结语

GFRP—混凝土—钢组合梁桥利用 GFRP 板在横桥向受力的贡献,降低了活载作用下桥面板中的钢筋应力,增强了桥面板的抗疲劳性能,并且通过 GFRP 优良的耐久性能提高了混凝土桥面板的抗环境侵蚀能力。GFRP—混凝土组合桥面板改善了原桥面板的受力,提高了桥面板的长期性能,并进一步提高组合梁桥的使用寿命。此外,由于 GFRP 板在抗弯承载力中的贡献,原钢筋混凝土桥面板承载力得以提高。

GFRP—混凝土—钢组合梁桥作为一种新型组合梁桥,为中小跨径桥梁设计提供了一种新的选择。随着对该种组合梁桥设计理论及工程实践的积累,越来越多的 GFRP—混凝土—钢组合梁桥将在工程中得到应用。

参考文献:

[1] Deng J, Lee M M K, Li S. Flexural Strength of Steel—

Concrete Composite Beams Reinforced with a Prestressed CFRP Plate[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 379—384.

[2] 朱坤宁,万水. FRP—钢组合结构桥梁建造关键技术研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(3).

[3] Wang X, Wu Z. Integrated High—Performance Thousand—Metre Scale Cable—Stayed Bridge with Hybrid FRP Cables[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(2):166—175.

[4] 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.

[5] 佟兆杰,黄侨,高达文,等. 不同连接程度 GFRP—混凝土桥面板力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019(5).

[6] Cheng L. Flexural Fatigue Analysis of a CFRP Form Reinforced Concrete Bridge Deck[J]. Composite Structures, 2011,93(11):2 895—2 902.

[7] 郭诗惠,张钢,蔡春声. GFRP—混凝土组合桥面板的试验研究及有限元分析[J]. 中外公路,2013(3).

[8] Noël M, Fam A. Design Equations for Concrete Bridge Decks with FRP Stay—in—Place Structural Forms[J]. Journal of Composites for Construction,2016,20(5).

[9] Zuo Y, Liu Y, He J. Experimental Investigation on Hybrid GFRP—Concrete Decks with T—Shaped Perforated Ribs Subjected to Negative Moment[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 728—741.

[10] 王文伟,黄辉,戴建国,等. 钢—GFRP—混凝土组合梁受弯性能试验[J]. 中国公路学报,2016(9).

[11] Goyal R, Mukherjee A, Goyal S. An Investigation on Bond between FRP Stay—in—Place Formwork and Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 741—751.

[12] 佟兆杰,黄侨,鲍卫刚,等. GFRP—混凝土组合连续板的静力性能试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2017(11).

[13] 佟兆杰. GFRP—混凝土—钢组合梁桥力学性能的试验研究及理论分析[D]. 东南大学博士学位论文,2018.

[14] 冀伟,罗奎,张经纬. 双 I 形 GFRP 波形腹板—混凝土组合梁的力学性能分析[J]. 中外公路,2020(5).

[15] 张冰,冯贵森,魏威,等. 椭圆形 GFRP—混凝土—钢组合空心柱的抽压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019 (S1).