

基于公路规范的钢—GFRP—混凝土 组合梁桥受力性能分析

马莹¹, 宋伟豪², 王潇³, 王文炜²

(1. 南京工程学院, 南京 江苏 211167; 2. 东南大学 交通学院; 3. 中设设计集团股份有限公司)

摘要:利用有限元软件建立了钢—GFRP—混凝土组合梁桥的空间有限元模型,对钢—GFRP—混凝土组合梁桥进行了施工阶段及运营阶段的静力性能分析。计算结果表明:施工阶段 GFRP 板的应力、刚度及 T 形肋的局部稳定验算均满足要求;运营阶段组合梁桥的整体挠度、局部区域挠度及混凝土最大裂缝宽度也满足要求;GFRP 板和钢主梁的应力满足相应的材性指标。

关键词:钢—GFRP—混凝土组合梁桥;力学性能;有限元模型;数值分析

1 前言

FRP—混凝土组合梁桥指上部结构桥面或者纵梁等结构构件由纤维复合材料(FRP)与混凝土所组成的梁桥。FRP—混凝土组合桥面板体系上部的混凝土可以承受压应力,底部的拉应力由 FRP 材料承担,充分

发挥了两种材料的各自优点。此外,FRP 组合桥面板的轻质高强、易于运输和施工的特性也可满足桥梁工业化的要求,具有广阔的应用前景。

国外对 FRP—混凝土组合结构的研究开展相对较早;2004 年 Kitane 等开发了一种由 3 块梯形截面玻璃纤维复合材料(GFRP)板空箱和上部混凝土薄层组成的桥面板,并进行静力和疲劳试验;2007 年 Wael

(3) 推导了顶推框架桥头尾部只产生横向偏移情况下纠偏时适当超挖量的表达式。顶进方向向左侧偏移时右侧超挖量的表达式为 $B'Q = d - \frac{(m-n)a}{b}$;顶进方向向右侧偏移时左侧超挖量的表达式为 $A'Q = d - \frac{(n-m)a}{b}$ 。

参考文献:

[1] 刘淑敏,赵龙生.城市道路与高速公路相交节点方案研究[J].中外公路,2018(3).

[2] 邓祥辉,袁崇洋,姚军,等.某超浅埋大跨隧道下穿既有公路施工工法研究[J].中外公路,2018(4).

[3] 蒋华春,傅鹤林,梁新权,等.盾构隧道下穿地道桥施工扰动效应及控制对策研究[J].中外公路,2017(2).

[4] 胥明,张细宝,刘卫,等.南昌地铁盾构下穿建筑物注浆加固技术研究[J].中外公路,2016(1).

[5] 杨贵永,李晓文,易领兵.佛山市地铁区间隧道下穿施工对佛开高速桥影响的数值分析[J].中外公路,2018(5).

[6] 吴小萍,唐冬冬,华戈,等.开挖技术在麻栗垭隧道施工中的应用[J].公路工程,2018(4).

[7] 尤广杰.管棚支护下框架桥顶进设计和施工[J].铁道标准设计,2017(7).

[8] 刁心宏,杨守兴,陈力.桥式盾构法下穿既有铁路对路基沉降影响与方案研究[J].施工技术,2017(19).

[9] 曹宝飞.盾构施工对邻近群桩基础影响的数值模拟研究[J].公路工程,2017(3).

[10] 黄尚.软土地区大跨度斜交顶推框架桥设计与施工[J].公路交通科技(应用技术版),2017(6).

[11] 王全胜,李洋,杨聚辉,等.综合管廊 U 型盾构机械化施工工法研究与应用[J].隧道建设(中英文),2018(5).

[12] 吴飞轮.一种组合式滑板卷铺框架盾构机[P].中国专利:CN202560236U,2012-11-28.

[13] 吴飞轮.一种组合式滑板卷铺框架盾构机及其施工方法[P].湖南 CN102619526A,2012-08-01.

收稿日期:2020-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51078135)

作者简介:马莹,女,博士,讲师.E-mail:myingseu@163.com

Alnahhal 等美国学者对 Kitane 提出的 FRP-混凝土组合桥面板进行了数值模拟;此外 Hiroshi 和 Neto 也做了相关研究;李耘宇、王文伟等对 FRP-混凝土组合结构的优化设计、界面黏结性能及静力性能等方面进行了相关研究。该文基于 JTG 3362-2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(以下简称《规范》),从施工和运营两个阶段对钢-GFRP-混凝土组合梁桥的受力性能进行分析,以验证该种组合结构桥梁的适用性。

2 组合梁桥有限元模型

该文研究的对象是满足公路-I级标准的跨线简支钢-GFRP-混凝土组合梁桥,跨径为 20 m,由下部钢梁和上部 GFRP-混凝土组合桥面板组成。桥面板是由浇筑于上部的混凝土和一个带有 T 形肋的箱形截面 GFRP 板(以下简称 GFRP 板)组成的复合板。GFRP 板是由纤维与乙烯基树脂通过拉挤成型的型材,组合板由上、下两层板及竖向肋构成,如图 1 所示。T 形肋埋入混凝土中,起到剪力键的作用。T 形肋上也可预留孔洞,在孔洞内穿入钢筋形成复合剪力键。

GFRP 板可以作为受力构件也可以作为模板使用。GFRP-混凝土组合板截面尺寸如表 1 所示。

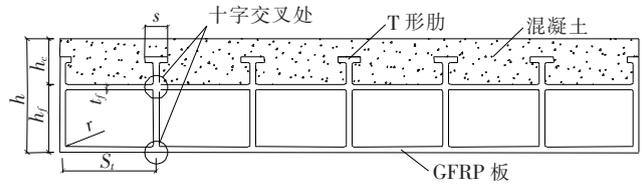


图 1 GFRP-混凝土组合板

表 1 GFRP-混凝土组合板截面尺寸

桥面板总高度 h/mm	空心箱室的高度 h_f/mm	板的厚度 d/mm	T形肋的上翼缘宽度 s/mm
160	120	10	40

钢-GFRP-混凝土组合简支梁桥的横断面构造形式如图 2(a)所示。全桥横向布置 5 片主梁,间距为 2 m。主梁采用工字形钢梁,高度 1.2 m,上、下翼缘厚度均为 640 mm,腹板厚度为 20 mm,如图 2(b)所示。桥梁在钢纵梁的两端支座、跨中、 $L/4$ 及 $3L/4$ 处设置了 5 根横向联系。横隔梁为采用 Q345 钢的桁架式结构,由 $140\text{ mm} \times 140\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的等边角钢联结而成。

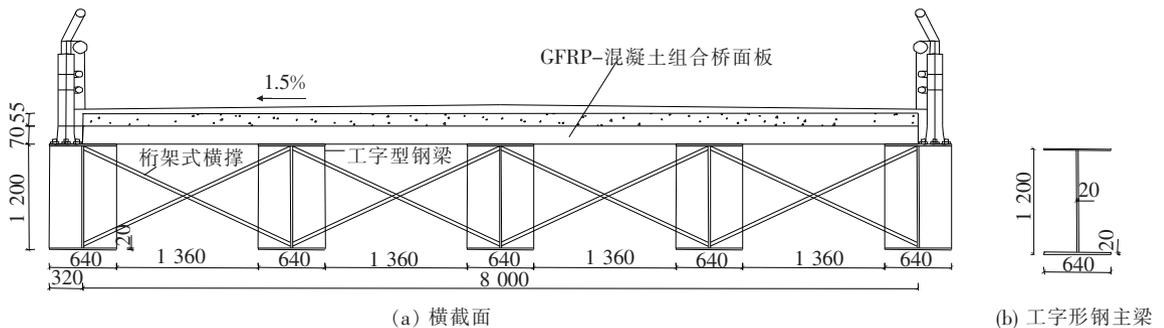


图 2 钢-GFRP-混凝土组合梁桥结构形式(单位:mm)

组合桥面板的上部混凝土采用实体单元 Solid65 模拟,GFRP 板采用壳单元 Shell63 来模拟,厚度为 10 mm,钢筋采用杆系单元 Link8 模拟。下部工字形钢

梁采用壳单元 Shell63 模拟,厚度为 20 mm。横向联系采用梁单元 Beam44 模拟。有限元模型的材料性能如表 2 所示。表 2 中 GFRP 板的 X 方向为顺着纤维

表 2 材料物理力学性能

材料	单元类型	强度/MPa		弹性模量/GPa			泊松比			密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
		抗压强度	抗拉强度	X	Y	Z	XY	YZ	XZ	
GFRP	Shell63	31.0	1 042.00	40.0	8	8	0.300	0.300	0.200	2 000
混凝土	Solid65	32.4	2.65	34.5	—	—	0.167	—	—	2 700
R235 钢筋	Link8	—	195.00	210.0	—	—	0.300	—	—	7 850
工字形钢梁	Shell63	—	200.00	206.0	—	—	0.200	—	—	7 850
横向联结系	Beam44	—	200.00	206.0	—	—	0.200	—	—	7 850

方向,Y、Z方向为垂直于纤维方向。

在建立 GFRP-混凝土组合桥面板有限元模型时,给出两个假设:① GFRP-混凝土组合桥面板在钢纵梁上连接良好,在横桥向是连续的,不考虑材料非线性;② GFRP-混凝土组合桥面板和钢纵梁的连接以及 GFRP 板与混凝土之间是完全刚结,不考虑不同材料界面间的相对滑移,在有限元建模中通过共用节点来实现。

3 组合梁桥受力性能分析

3.1 施工阶段

3.1.1 箱形截面 GFRP 板挠度、应力验算

在施工阶段,GFRP 板作为模板承担混凝土的自重、施工人员与机械的自重以及浇筑混凝土时产生的冲击荷载,验算的内容是 GFRP 板的强度和刚度。强度验算是指板底部拉应力及上部压应力不应超过应力限值;刚度验算是指板的最大挠度应小于变形限值。目前尚无有关 GFRP 板作为模板的指标限值,故该文参照 JTG/T E50-2011《公路桥涵施工技术规范》中对钢模板的变形限值要求,即在荷载作用下最大变形不超过 1.5 mm。

GFRP-混凝土组合板简支在两片工字形钢主梁上,间距为 2 m。主梁的上翼缘宽度为 640 mm。GFRP 板的宽度为 1 m,简支在主梁上的接触面宽度为 40 mm。假定接触面不产生滑移及扭转,将 GFRP 板与主梁的交接处节点采用刚结约束,约束节点的 6 个自由度。计算结果如表 3 所示。计算结果表明:GFRP 板在施工阶段跨中挠度最大值为 0.39 mm,满足规范的限值要求。GFRP 板的顶部压应力最大值为 28.6 MPa,底部拉应力最大值为 9.4 MPa,与 GFRP 板材强度值相比较,压应力和拉应力远小于 GFRP 板

的极限强度,不会发生破坏。

表 3 施工阶段计算结果

跨中挠度/mm	顶部压应力/MPa	抗压强度/MPa	底部拉应力/MPa	抗拉强度/MPa
0.39	28.62	31	9.44	1 062

3.1.2 箱形截面 GFRP 板稳定验算

GFRP 型材的失稳破坏迄今为止没有研究者进行专门研究,该文对箱形截面 GFRP 板的局部稳定计算依照钢结构的计算方法进行。JTG D64-2015《公路钢结构桥梁设计规范》规定:受拉翼缘板的自由伸出肢宽一般不得大于 16 倍的板厚。对于 Q345 钢材,受压区翼缘板的自由伸出肢宽一般不得大于 12 倍的板厚。

T 形肋的局部稳定计算公式可表示如下:

$$\frac{b}{t} \leq \left[\frac{b}{t} \right] \quad (1)$$

式中: b 、 t 分别为板件的宽(高)度和厚度; $\left[\frac{b}{t} \right]$ 为允许的板件宽厚比,钢结构受压区的翼缘板允许宽厚比为 12。

GFRP 板的 T 形肋上翼缘宽度 b 为 40 mm,厚度为 10 mm。经计算,GFRP 板 T 形肋的宽厚比为 4,远小于许可的宽厚比,因此 T 形肋不会产生局部失稳破坏。

3.2 运营阶段

在正常使用阶段组合桥面板局部区域的计算通过施加车辆荷载来实现。车辆荷载根据 JTG D60-2015《公路桥涵设计通用规范》中规定取值(表 4)。

车辆的总长度为 15 m,宽度为 2.5 m。两辆车之间的距离大于 10 m,因此在纵桥向只能布置一辆重车。最不利荷载布置在横桥向,车辆的后车轮作用在两片主梁之间;在纵桥向,车辆的后车轮作用在两个横向分布系之间。

表 4 车辆荷载的主要技术指标

车辆	重力标准值/kN			轴距/ m	轮距/ m	前轮着地宽度 及长度/(m×m)	中、后轮着地宽度 及长度/(m×m)	车辆外形尺寸 (长×宽)/(m×m)
	前轴	中轴	后轴					
550	30	2×120	2×140	3+1.4+7+1.4	1.8	0.3×0.2	0.6×0.2	15×2.5

3.2.1 钢-GFRP-混凝土组合梁桥挠度计算

根据 JTG D64-2015《公路钢结构桥梁设计规范》规定:对于简支或连续梁由汽车荷载(不计冲击力)所引起的竖向挠度不应超过 $L/600$ (其中 L 为梁的计算跨径),即:

$$\delta \leq [\delta] = L/600 \quad (2)$$

式中: $[\delta]$ 为跨中截面允许挠度。

在有限元模型中,桥面板施加均布荷载,在跨中施加集中力荷载,计算结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出:跨中最大挠度值为 2.11 mm。

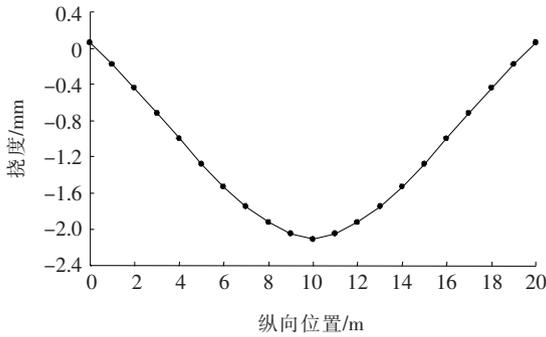


图 3 纵桥向组合简支梁桥的挠度图

该桥跨径为 20 m,使用式(2)计算的挠度允许值为 3.33 mm,满足规范要求。

在最不利车轮荷载作用下的 GFRP-混凝土组合桥面板的挠度图如图 4 所示。参照 JTG D64-2015《公路钢结构桥梁设计规范》规定:钢桥面板的顶板相对挠度不大于纵向加劲肋腹板间距的 $L/300$ 。组合梁桥的两个主梁之间的距离为 2 m,按要求,桥面板的相对挠度限值为 6.67 mm。由图 4 可知,组合桥面板的最大挠度出现在边梁的中部区域,其值为: $\delta=3.71-2.359=1.351$ mm,满足规范要求。

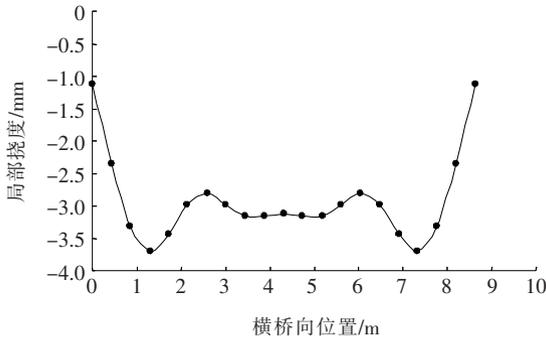


图 4 横桥向最不利截面的挠度图

3.2.2 GFRP-混凝土组合桥面板的应力

按照 JTG 3362-2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定,运营阶段下钢-GFRP-混凝土组合梁桥的应力计算采用正常使用极限状态作用频遇组合。在作用频遇组合中考虑结构自重和汽车荷载的作用,不考虑人群荷载、风荷载、温度梯度以及其他荷载效应作用,并且在计算中汽车荷载需要乘以频遇值系数 0.7。

在正常使用极限状态下作用频遇组合桥面板混凝土层的应力分布如图 5 所示。

从图 5 可以看出:最不利截面混凝土层的最大压应力位于边梁跨中上表面,其值为 10.07 MPa,小于 C50 混凝土的抗压强度设计值 22.4 MPa;最不利截面

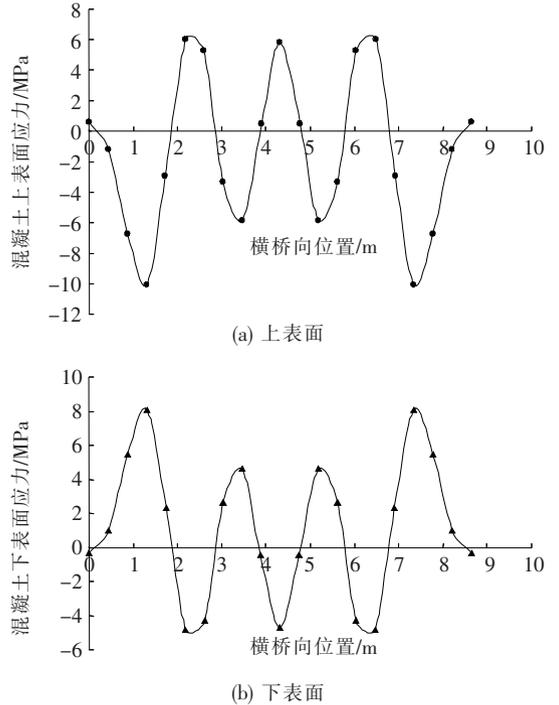


图 5 最不利截面混凝土层应力分布

混凝土层的最大拉应力位于边梁跨中下表面,其值为 8.09 MPa,大于 C50 混凝土的抗拉强度设计值 1.83 MPa。根据应力计算结果,组合板负弯矩区混凝土和边梁跨中混凝土下表面的拉应力均超过了混凝土的抗拉强度设计值,混凝土已经开裂。根据 JTG 3362-2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定,在正常使用极限状态下,钢筋混凝土构件的裂缝宽度,应按作用频遇组合并考虑长期效应的影响进行验算,且不得超过规范规定的裂缝宽度限值。处于 I 类和 II 类环境条件下的钢筋混凝土受弯构件,裂缝宽度不应超过 0.2 mm;处于 III 类和 IV 类环境下的钢筋混凝土受弯构件,裂缝宽度不应超过 0.15 mm。JTG 3362-2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定,钢筋混凝土受弯构件,其最大裂缝宽度可按下式计算:

$$W_{cr} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss} \left(\frac{c+d}{0.30+1.7\rho_{te}} \right)}{E_s} \quad (3)$$

式中:各项符号意义详见 JTG 3362-2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》。

按照该文中的配筋计算得到裂缝宽度: $W=0.160$ mm $\leq W_{cr}=0.2$ mm,满足规范要求。

在运营阶段,GFRP-混凝土组合桥面板中的箱形截面 GFRP 板的应力如图 6 所示。

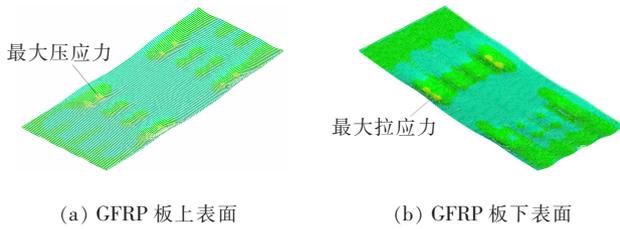


图6 箱形截面 GFRP 板底部应力分布图

在运营阶段位于主梁之间区域的箱形截面 GFRP 板底部的应力为拉应力,最大值出现在边梁跨中下表面,为 5.18 MPa,远小于 GFRP 板的抗拉强度极限值 1 042 MPa;在主梁负弯矩区附近的应力为压应力,最大值为 9.65 MPa,小于 GFRP 板的抗压强度值 31 MPa。

3.2.3 工字形钢梁验算

工字形钢梁的纵向应力分布如图 7 所示。在正常使用极限状态频遇组合作用下,工字形钢梁上翼缘最大压应力为 19.7 MPa,小于 Q345 钢材的容许压应力 200 MPa;工字形钢梁下翼缘最大拉应力为 10.6 MPa,小于 Q345 钢材的容许拉应力 210 MPa。

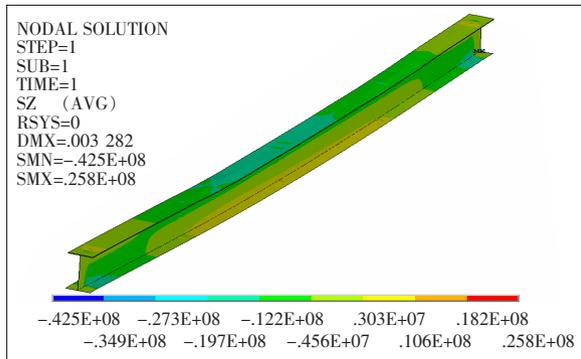


图7 工字形钢梁应力分布(单位:Pa)

4 结论

(1) 新型钢-GFRP-混凝土组合梁桥在施工阶段 GFRP 板的应力、刚度及 T 形肋的局部稳定验算均满足要求。

(2) 运营阶段下组合简支梁桥的整桥挠度及组合桥面板的局部挠度均满足规范要求;箱形截面 GFRP

板的应力满足材性指标。

(3) 组合桥面板负弯矩区及边跨跨中的混凝土最大裂缝宽度满足规范要求。正常使用极限状态频遇组合下,工字形钢主梁应力满足材性指标。

参考文献:

- [1] 王文炜. FRP 加固混凝土结构技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 王潇. GFRP-混凝土桥面板的分析与设计方法研究[D]. 东南大学硕士学位论文, 2013.
- [3] Aref, A., Kitane, Y. and Lee, G. C. Analysis of Hybrid FRP-Concrete Multi-Cell Bridge Superstructure, *Composite Structures*, 2005, 69(3): 346-359.
- [4] Alnahhal, W. and Aref, A. Structural Performance of Hybrid Fiber Reinforced Polymer-Concrete Bridge Superstructure Systems, *Composite Structures*, 2008, 84(4): 319-336.
- [5] Neto S. S. and Rovere H. L. L. Composite Concrete/GFRP Slabs for Footbridge Deck Systems[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(10): 2 554-2 564.
- [6] 李耘宇, 王言磊, 欧进萍. FRP-混凝土组合梁优化设计方法探讨[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2015(3).
- [7] 钱稼茹, 刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2008(2).
- [8] 廖乐佳. FRP-混凝土组合梁受弯性能理论分析及其数值模拟研究[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2014(9).
- [9] 王景全, 李嵩林, 吕志涛. FRP 型材-混凝土组合梁桥界面抗剪计算模型与试验[J]. *桥梁建设*, 2014(1).
- [10] 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(10).
- [11] 黄辉, 王文炜, 戴建国. 湿技术条件下 GFRP 板-混凝土界面黏结性能试验研究. [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015(3).
- [12] 王文炜, 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).
- [13] JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [14] JTG/T F50-2011 公路桥涵施工技术规范[S].
- [15] JTG D64-2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [16] JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S].