

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2023.03.027

UHPC 在槽形钢-混凝土组合梁的应用与分析

刘 瑜

[上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200065]

摘 要:以某大跨连续钢-混凝土组合梁为工程背景,对钢-UHPC 组合梁和钢-C50 混凝土组合梁进行整体和局部对比分析。结果表明,整体计算中,钢-UHPC 组合梁的刚度略小于钢-C50 混凝土组合梁,基本组合下钢-UHPC 组合梁中钢梁应力比钢-C50 混凝土组合梁下降约 27%。局部有限元分析中,频遇组合下钢-C50 混凝土组合梁的桥面板已开裂;钢-UHPC 组合梁桥面板的最大拉应力作用范围比钢-C50 混凝土组合梁小,仅出现在纵肋下缘,且最大拉应力小于 UHPC 材料的开裂应力。钢-UHPC 组合梁可大幅降低结构自重,进一步减小钢梁截面,有望解决大跨度连续组合梁中桥面板开裂问题。

关键词:钢-UHPC 组合梁;大跨连续组合梁;有限元分析;桥面板应力

中图分类号:U444

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)03-0113-04

0 引言

钢-混凝土组合梁与钢筋混凝土梁相比,可以降低结构自重,减小截面尺寸,增加有效使用空间,节省支模工序和模板,缩短施工周期;与纯钢梁相比,可以减少用钢量,增大刚度,增加稳定性和整体性,增强结构抗火性和耐久性等。综合钢-混凝土组合梁的优越性,其在桥梁建设中的应用越来越成熟^[1]。对于长大多跨梁式桥,当其跨度超过 30 m 后,从经济性的角度出发,可采用连续钢-混凝土组合梁结构。

连续钢-混凝土组合梁的跨径布置灵活,结构刚度较大,梁高相对较低,因此在实际工程中的应用较为普及。但由于连续结构支点负弯矩的影响,混凝土桥面板处于受拉状态,当其开裂时会影响结构的安全性能和使用性能。因此工程设计中组合梁大部分采用简支结构,若采用连续组合梁结构,则可通过在负弯矩混凝土中张拉预应力、采用支点顶升等措施来避免混凝土结构裂缝^[2]的开展。

随着超高性能混凝土(UHPC)材料研究的深入,UHPC 在钢-混凝土组合梁中的应用越来越多^[3]。根据已有试验分析,UHPC 桥面板具有优越的承压性能和抗弯折性能^[4-6]。结合受力性能、总体造价等的对比可知,钢-UHPC 组合梁较传统钢-混凝土组合梁具有更大的优势^[7]。本文以某一联 5 × 100 m 的跨河大桥为工程背景,探讨 UHPC 桥面板在大跨度

连续钢-混凝土组合梁中的应用。

1 工程概况

本工程上部结构为连续钢-混凝土组合梁,跨径布置为 5 × 100 m (见图 1)。采用等高组合梁,总高 5.0 m,高跨比 1/20,混凝土顶板宽 16.56 m。钢梁采用开口槽型梁,高 4.6 m,截面由顶板、腹板、底板、腹板水平加劲肋、底板纵向加劲肋等构件组成。除支点处钢梁采用实腹式横梁,其余位置均采用空腹式横梁,空腹式横梁标准间距为 4 m,由腹板、底板横向加劲、顶板横梁和撑杆组成。空腹横梁之间采用腹板竖向加劲肋。

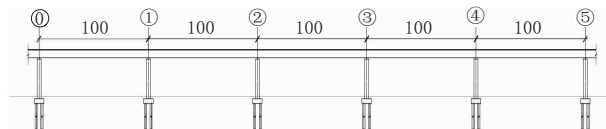


图 1 桥梁立面图(单位:m)

钢-C50 混凝土组合梁见图 2,其桥面板采用预制钢筋混凝土板,与钢梁上翼缘和横梁结合位置板厚均为 40 cm,中间渐变至 28 cm。混凝土桥面板与钢梁间通过布置于钢梁顶板的圆柱头焊钉连接,通过浇筑预制板之间的湿接缝和预制槽内混凝土,形成整体组合梁截面参与受力。

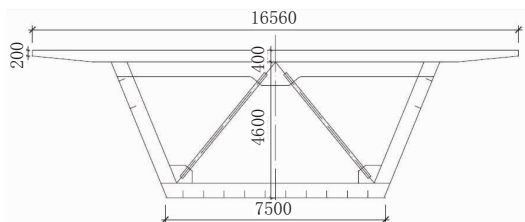


图 2 钢-C50 混凝土组合梁(单位:mm)

收稿日期:2022-07-04

作者简介:刘瑜(1987—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

钢-UHPC组合梁见图3,其钢结构部分与钢-C50混凝土组合梁的钢梁截面保持一致。根据已有对桥面板型式的研究^[8],本文桥面板采用华夫板型式,华夫板型式可以进一步降低自重,并提高结构刚度。

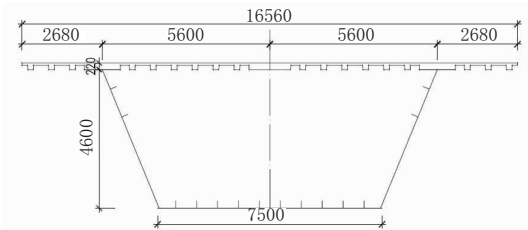


图3 钢-UHPC组合梁(单位:mm)

UHPC华夫板结构的纵肋间距为700 mm,横肋间距为1000 mm。华夫板面板厚80 mm,肋高140 mm,桥面板上铺设50 mm SMA-13铺装层。考虑施工方便,纵向、横向加劲肋采用梯形截面,纵肋底宽180 mm,顶宽200 mm;横肋底宽100 mm,顶宽120 mm。

2 整体静力计算

2.1 有限元模型

整体计算模型采用Midas/Civil软件,对钢-UHPC组合连续梁和钢-C50混凝土组合连续梁受力进行对比分析。模型中上部主梁采用梁单元模拟(见图4)。有限元模型中荷载作用及荷载组合根据规范^[9-10]选取,主要为自重、二期恒载、汽车荷载、温度作用及支座沉降等。

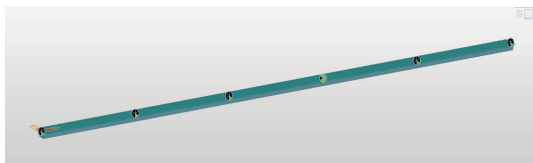


图4 整体计算模型

为减小负弯矩区桥面板拉应力,本次施工顺序为:逐孔架设钢梁→提拉钢梁→浇筑跨中桥面板→桥面板叠合卸载提升力→施工支点钢梁→对称顶升支点→浇筑支点混凝土→支点桥面板叠合后回落支点。通过钢梁提拉和支点顶升等措施^[11-12]对桥面板施加预压力,改善大跨度连续组合梁负弯矩的受力性能。

2.2 竖向挠度对比

在汽车荷载作用下,2种方案中最大竖向挠度见表1。

表1 汽车荷载下组合梁竖向位移

组合梁方案	竖向位移/mm
钢-C50混凝土组合梁	32.7
钢-UHPC组合梁	40.5

汽车活荷载作用下钢-C50混凝土组合梁的最大挠度为32.7 mm,钢-UHPC组合梁的最大挠度为40.5 mm,均未超过规范要求的 $L/600$ 。虽然UHPC弹性模量较C50混凝土高,但UHPC桥面板的截面远小于常规C50混凝土桥面板,其整体组合截面刚度较小,故UHPC桥面板的竖向挠度略偏大。

2.3 钢梁应力对比

在荷载基本组合作用下,2种方案中钢梁的上下翼缘应力包络图见图5~图8。

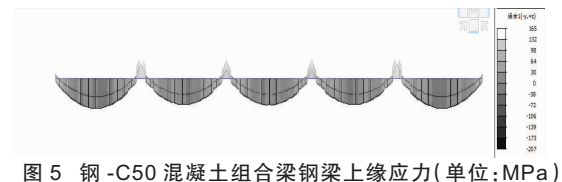


图5 钢-C50混凝土组合梁钢梁上缘应力(单位:MPa)

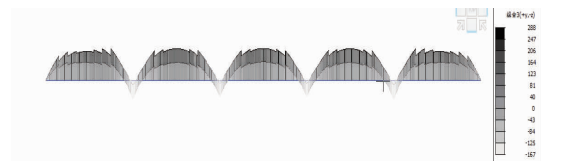


图6 钢-C50混凝土组合梁钢梁下缘应力(单位:MPa)

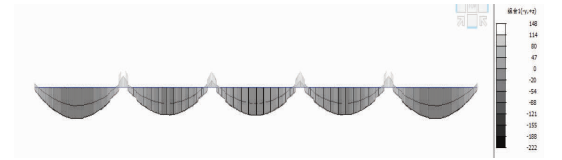


图7 钢-UHPC组合梁钢梁上缘应力(单位:MPa)

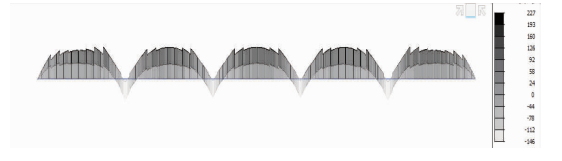


图8 钢-UHPC组合梁钢梁下缘应力(单位:MPa)

根据计算结果可知:2种方案的跨中最大压应力变化很小,约在7%以内;而跨中最大拉应力变化较大。采用钢-UHPC组合梁后桥面板自重明显下降,钢梁最大拉应力下降约27%,故采用钢-UHPC组合梁后,在同种钢材下,钢梁截面可进一步优化。

2.4 桥面板应力对比

在荷载频遇组合作用下,2种方案中桥面板的最大拉应力见图9、图10。

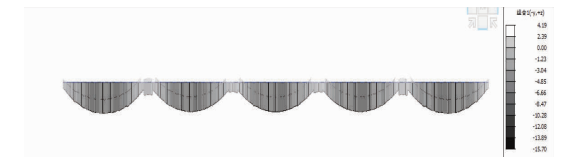


图9 钢-C50混凝土组合梁桥面板上缘应力(单位:MPa)

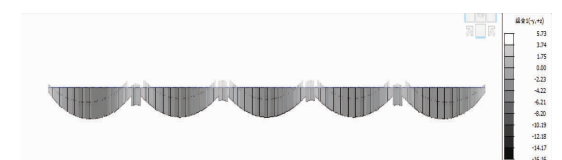


图10 钢-UHPC组合梁桥面板上缘应力(单位:MPa)

根据计算结果可知:频遇组合下钢-C50混凝土组合梁桥面板的应力达到4.19 MPa,桥面板已开裂;钢-UHPC组合梁桥面板的最大拉应力为5.73 MPa,根据已有试验研究,UHPC桥面板开裂强度在20 MPa左右,因此桥面板未开裂。仅考虑整体计算可知,UHPC桥面板强度储备较大。

3 节段模型的局部荷载下受力分析

3.1 模型建立

从全桥中选取标准段局部模型,采用Ansys软件进行计算。局部模型中横向宽度取桥梁全宽16.56 m,纵向取5个标准段横梁间距,长20 m。局部有限元分析模型见图11。局部有限元分析模型中钢梁部分采用壳单元Shell63,混凝土桥面板采用8节点实体单元Solid45建立。本次局部分析中钢梁与混凝土之间采用共节点,不考虑接触面间的相对滑移。综合计算所需时间和精度要求,单元大小控制在50 mm左右。

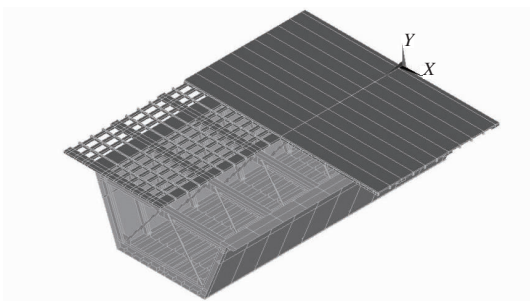


图11 局部有限元模型

模型中钢材的弹性模量为206 GPa,密度为7 850 kg/m³,泊松比为0.3;UHPC的弹性模量为42.0 GPa,密度为2 600 kg/m³,泊松比为0.2;C50混凝土的弹性模量为35.4 GPa,密度为2 500 kg/m³,泊松比为0.2。

节段模型的主要荷载为钢梁、桥面板、沥青铺装层的自重以及汽车车辆荷载。其中沥青铺装层仅作为恒载施加于混凝土桥面板;车辆荷载的中后轴局部荷载作用面积按《公路桥涵设计通用规范》^[10]中0.2 m(纵向)×0.6 m(横向)取用。

3.2 荷载加载工况

连续组合梁以纵桥向受力为主,本次局部荷载作用下,着重分析桥面板在最不利荷载工况下上下缘的最大拉应力。为获取车辆荷载的最不利布置,本次局部模型共考虑了如图12所示的15种加载工况,横向荷载根据桥面布置考虑3种布置方式;纵向根据车轮位置考虑在1/2横梁、3/8横梁、2/8横梁、

1/8横梁及横梁位置共5种纵向位置进行加载计算。

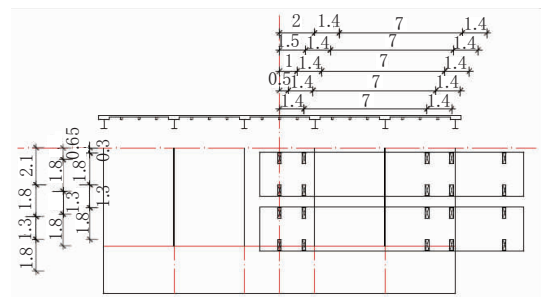


图12 车辆荷载局部加载(单位:m)

在钢-C50混凝土组合梁中,常规桥面板下,横向工况1和横向工况2作用下C50混凝土桥面板拉应力较大,且纵向荷载工况对最大拉应力影响不大。

在钢-UHPC组合梁中,华夫板式桥面板下,横向工况1和横向工况2作用下2种加载方式下UHPC桥面板肋板的最大拉应力基本一致,且均在纵向工况1作用下出现最大拉应力。

3.3 组合梁局部应力

3.3.1 纵向应力分布

根据前述不同工况下应力局部加载分析,车辆荷载作用下2种组合梁方案的纵向局部最大拉应力见图13、图14。

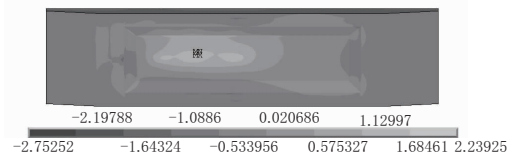


图13 钢-C50混凝土桥面板纵向局部应力(单位:MPa)

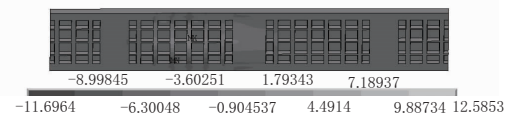


图14 钢-UHPC桥面板纵向局部应力(单位:MPa)

车辆荷载作用下,桥面板的局部纵向拉应力位于桥面板下缘。钢-C50混凝土组合梁的拉应力作用范围较大,最大值达到2.24 MPa。钢-UHPC组合梁桥面板的局部纵向拉应力位于桥面板纵肋下缘,最大值达到12.58 MPa,其作用范围较小,设计中可仅在纵肋加强配置纵向受力钢筋。

3.3.2 横向应力分布

车辆荷载作用下2种组合梁方案的横向局部最大拉应力见图15、图16。

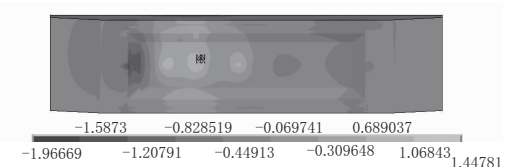


图15 钢-C50混凝土桥面板横向局部应力(单位:MPa)

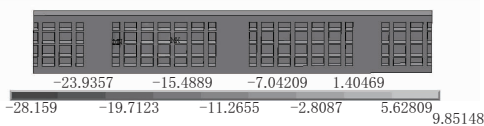


图 16 钢-UHPC 桥面板横向局部应力(单位:MPa)

车辆荷载作用下,钢-C50 混凝土组合梁的桥面板横向最大拉应力为 1.45 MPa,钢-UHPC 组合梁的桥面板横向最大拉应力为 9.85 MPa,出现在横肋下缘。2 种组合梁的桥面板横向拉应力均小于其纵向最大拉应力,且整体模型中桥面板主要为纵向受力,结构总体控制应力为纵桥向。

4 桥面板设计应力对比

根据整体模型和局部有限元模型计算,荷载频遇组合作用下,钢-UHPC 组合梁桥面板的总体设计应力见表 2。

表 2 钢-UHPC 组合梁桥面板总体拉应力 单位:MPa

应力位置	整体应力	局部应力	合计应力
桥面板下缘	4.55	9.80	14.35
桥面板上缘	5.73	2.29	8.02

根据已有钢-UHPC 组合梁桥面板的试验研究^[13-14],UHPC 桥面板在正、负弯矩作用下初裂应力分别为 19.4 MPa 和 13.8 MPa。根据计算可知,本方案中钢-UHPC 组合梁桥面板设计拉应力均小于试验初裂应力值,UHPC 桥面板不开裂。

5 结 语

(1)在大跨度连续钢-混凝土组合梁中桥面板采用 UHPC 桥面板,有望较好解决传统钢-混凝土组合连续梁负弯矩的开裂问题。

(2)通过对某大跨连续梁的整体静力计算可知,钢-UHPC 组合梁结构自重重要轻于钢-C50 混凝土组合梁结构自重,在基本组合作用下钢梁应力下降约 27%,故钢-UHPC 组合梁中钢梁尺寸可进一步优化,使钢材用量减少,工程造价降低。

(3)通过对节段模型的计算分析可知,在车辆荷

载作用下,钢-UHPC 组合梁的局部应力大于钢-C50 混凝土组合梁桥面板,但作用范围较小,主要作用于桥面板纵肋下缘,设计时可仅在纵肋加强配置纵向受力钢筋。

(4)在荷载频遇组合作用下,钢-C50 混凝土组合梁的桥面板出现开裂,随着裂缝的开展可能导致截面刚度下降并引发其他病害问题;UHPC 桥面板的最大应力小于试验初裂应力,UHPC 桥面板不开裂,能较好地满足正常使用要求。

(5)综合考虑连续钢-UHPC 组合梁的受力性能以及 UHPC 材料费用,可仅在负弯矩区采用 UHPC 桥面板,其余受压位置仍可采用普通混凝土,从而在满足受力性能的条件下取得较大的经济效益。

参考文献:

- [1] 聂建国.钢-混凝土组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 邵长宇.大跨度钢-混凝土连续组合箱梁桥关键技术研究[D].上海:同济大学,2007.
- [3] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用[J].土木工程学报,2021,54(1):1-13.
- [4] 王皓磊,孙韬,刘晓阳,等.钢-UHPC 连续组合梁抗弯性能试验[J].中国公路学报,2021,34(8):218-233.
- [5] 李文光,邵旭东.钢-UHPC 组合板受弯性能的试验研究[J].土木工程学报,2015,48(11):93-102.
- [6] 刘新华,周聪,张建仁,等.钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验[J].中国公路学报,2020,33(5):110-121.
- [7] 邵旭东,周爱国,潘仁胜,等.超高性能轻型组合梁与传统钢梁及组合梁的对比分析[C]//2013 年二省二区大型桥梁学术交流会议论文集,广州:广东省科学技术协会科技交流部,2013:5.
- [8] 吴佳佳,邵旭东,刘榕.钢-UHPC 轻型组合梁桥面板结构型式研究[J].公路工程,2017,42(4):76-81
- [9] JTG/TD64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
- [10] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [11] 刘伟,王成伟,高波.黄河区 80 m 跨钢箱梁整孔架设提升力施加方案比选分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019(11):163-166.
- [12] 王彬,刘来君,季建东.临猗黄河大桥组合梁负弯矩区力学性能优化措施研究[J].桥梁建设,2021,51(6):85-91.
- [13] 邵旭东,李玉祺,廖子南,等.UHPC 华夫桥面板抗弯性能试验及有限元分析[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(3):52-63.
- [14] 邵旭东,吴佳佳,刘榕,等.钢-UHPC 轻型组合桥梁结构华夫桥面板的基本性能[J].中国公路学报,2017(3):218-255.