

西江二桥钢—超高性能混凝土轻型组合梁设计研究

韦勇克

(广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要:广西藤县西江二桥南桥为采用型钢—超高性能混凝土(UHPC)组合桥面板的斜拉桥。该文对大桥进行了结构优化设计、结构计算分析以及桥面板模型试验。结果表明:型钢—UHPC组合桥面板结构设计新颖合理,受力性能优异,且能大幅度节省大桥工程材料用量及后期管养成本,提高施工便利性,加快施工进度。

关键词:组合梁斜拉桥;超高性能混凝土;型钢—UHPC组合桥面板;UHPC接缝;设计方法

长期以来,传统组合梁斜拉桥以钢—混凝土组合梁为主梁,其力学性能较普通混凝土主梁具有自重较轻的优势,与钢主梁相比具有一定的经济优势,但仍存在以下两大主要问题:①钢—混凝土组合梁结构自重较大,经济适用跨径有限;②混凝土桥面板易开裂,进一步导致主梁刚度下降、内部钢筋及下部钢结构的锈蚀等问题,影响桥梁结构的耐久性和安全性。

目前,超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,以下简称UHPC)作为一种超高强度、超高韧性和耐久性的材料已经越来越多地应用到桥梁建设领域。基于UHPC的优异性能,邵旭东等已研发多种新型桥梁结构,如钢—STC轻型组合桥面板、型钢—UHPC轻型组合桥面等结构。这些新型结构已广泛应用到梁桥、拱桥、斜拉桥及悬索桥等各类桥型中,涵盖了旧桥加固和新桥建设领域。型钢—UHPC轻型组合桥面结构有望突破传统组合梁斜拉桥主梁自重、桥面板易开裂两大技术发展瓶颈,进而促进斜拉

桥其他主要构件的进一步优化,提升桥梁全寿命周期的经济性和安全性。

广西藤县西江二桥南桥为主跨450 m的双塔双索面组合—混合梁斜拉桥,主桥中跨组合梁采用型钢—UHPC轻型组合桥面结构。该文将通过阐述大桥的结构设计特点、结构受力性能并结合相应的模型试验研究展现该桥设计的合理性与创新性,希望对其他桥梁设计具有借鉴意义。

1 工程概况

藤县西江二桥南桥为(150+450+150) m组合—混合梁斜拉桥,边跨为50 m+100 m混凝土梁,主跨主梁采用钢—UHPC轻型组合梁。钢混结合面设置在中跨距离桥塔中心线8.75 m位置处。主跨组合梁采用分离式双边箱断面,桥面宽32.0 m,具体桥型及桥面布置分别如图1、2所示。

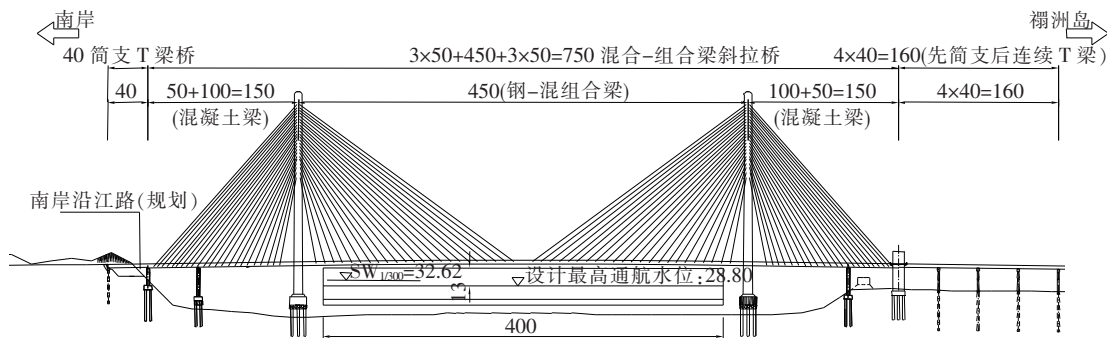


图1 桥型布置图(除标高为m外,其余单位:m)

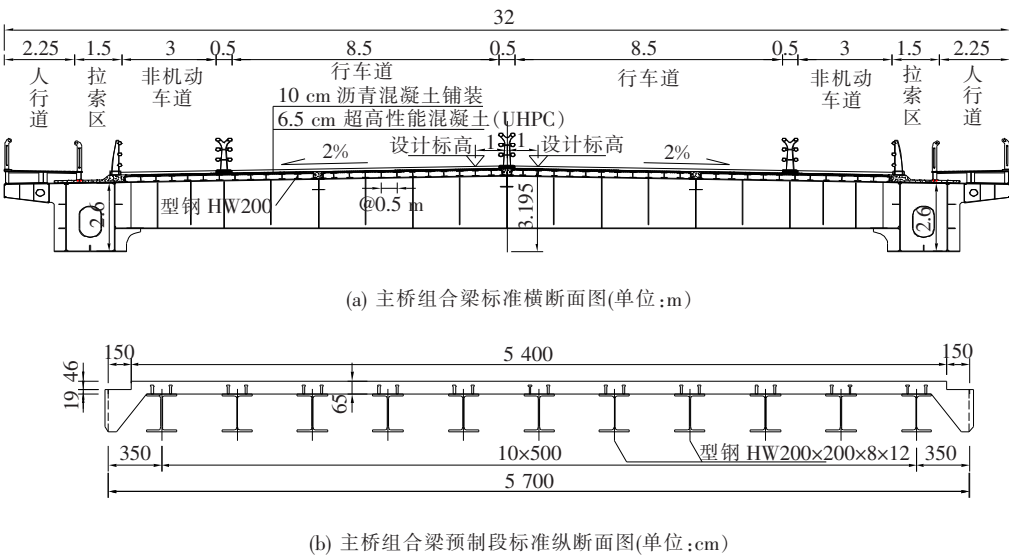


图 2 主桥组合梁标准断面图

该桥主跨组合梁初步设计采用普通混凝土桥面板。桥面板采用工厂预制+现浇湿接缝连接的形式。板厚均为 26 cm,采用 C60 混凝土。桥面板布置纵向预应力体系。为减小混凝土板的收缩徐变对叠合梁内力重分布的影响,混凝土桥面板在安装前需预存放 6 个月以上。

由于普通混凝土的局限性,施工图设计阶段,组合梁桥面板采用型钢—超高性能混凝土(UHPC)轻型组合桥面板,如图 3 所示。组合桥面预制板总厚度为 26.5 cm,其中 UHPC 厚度为 6.5 cm;湿接缝处 UH-PC 厚度为 27.5 cm。组合桥面板内 H 型钢横桥向标准间距为 0.5 m。桥面铺装采用 10 cm 沥青混凝土。

2 中跨钢—UHPC 组合梁设计

全桥主梁共 4 种类型(A~D),51 个梁段,其中 A 梁段为边跨混凝土梁,长度为 158.32 m;B~D 梁段为主跨组合梁。B梁段共2段,为钢混结合段,长度6.15

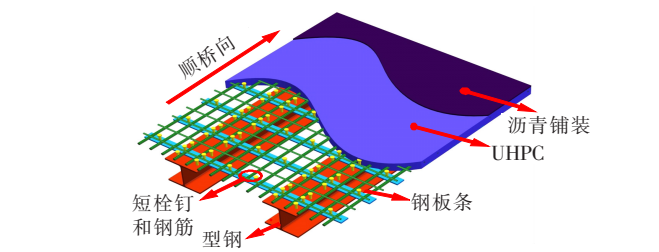


图 3 型钢—UHPC 轻型组合桥面板示意图

m;C 梁段(标准梁段)共 46 段,长度 9 m;D 梁段(合龙段)为 1 段,长度 6.2 m。

2.1 钢梁设计

组合梁由主纵梁、横梁、小纵梁及挑梁组成。两片主纵梁的中心间距为 26.5 m,横梁和挑梁顺桥向标准间距均为 4.5 m。单个钢梁节段内的主纵梁、横梁、挑梁、小纵梁均在工厂内通过焊接和螺栓连接形成整体,随后运输至施工现场,进行节段拼装。各梁段主要参数如表 1 所示。

表 1 梁段参数

| 梁段 类型 | 梁段 长度/ cm | 主梁中 心高度/ mm | 桥面板 厚度/ mm | UHPC 桥面板 厚度/mm | 主纵梁/mm | | | | 横梁/mm | | |
|----------|-----------------|-------------------|------------------|----------------------|--------|----------|-----|----------|-------|-----|-----|
| | | | | | 梁高 | 上翼 缘厚 | 腹板厚 | 下翼 缘厚 | 顶板厚 | 腹板厚 | 底板厚 |
| A | 15 832 | 3 120 | 300 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| B | 615 | 3 195 | 275 | 65 | 2 655 | 25 | 20 | 30 | 25 | 12 | 35 |
| C | 900 | 3 195 | 275 | 65 | 2 655 | 25 | 20 | 30 | 25 | 12 | 35 |
| D | 620 | 3 195 | 275 | 65 | 2 655 | 25 | 20 | 30 | 25 | 12 | 35 |

2.2 型钢—UHPC 组合桥面板设计

型钢—UHPC 组合桥面板分为预制板、工厂现浇缝以及现场现浇缝 3 部分制作。其中,预制板由 65 mmUHPC、8 mm 横向钢板条和型钢(HW200×200)通过焊钉连接形成组合桥面板,预制板总高度为 265 mm。单个梁段横向分为 4 块预制板,纵向由横梁划分成多块预制板(图 4)。型钢标准间距为 500 mm,其上翼缘布置两列 $\phi 13\times 45$ mm 焊钉,焊钉横桥向间距为 120 mm,顺桥向标准间距为 100 mm。型钢端头局部采用 $\phi 16$ mm $\times 45$ mm 焊钉与现场横向现浇缝加强连接。横向钢板条尺寸为 50 mm $\times 8$ mm,间隔按 200 mm 布置。横向钢板条顶面布置单排 $\phi 13$ mm $\times 35$ mm 焊钉,焊钉横桥向间距为 120~128 mm。

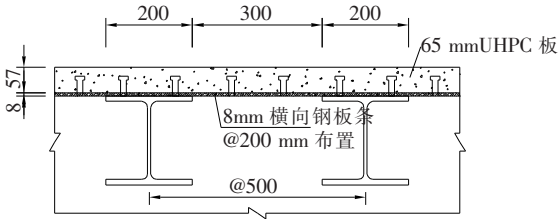
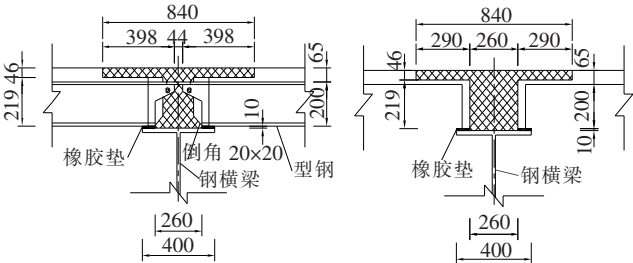


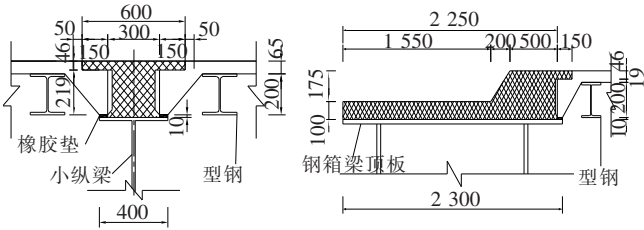
图 4 预制板条带横断面(单位:mm)

预制板制作完成后吊装搁置在钢梁上,在工厂内完成工厂现浇缝的浇筑,形成一个整体的叠合梁段。预制板通过焊钉与钢主纵梁、钢横梁、小纵梁顶板进行连接,与钢梁支撑面设置宽度 50~70 mm、厚度为 10 mm 的 BW-S120 型膨润土橡胶遇水膨胀止水条。梁段间的横向和纵向现浇缝需在工地现场浇筑,钢横梁上的横向现浇缝缝宽 220~260 mm,小纵梁上的纵向现浇缝缝宽 300 mm,接缝高度均为 275 mm。钢主纵梁上的纵向现浇缝缝宽 2 250 mm,接缝高度 100 mm。横向 T 形接缝的上台阶宽度为 290~310 mm,高度为 46 mm。纵向 T 形接缝的上台阶宽度为 150 mm,高度为 46 mm。且主纵梁上的工地现场接缝采用含异形(Z 形)钢板进行加强,具体构造见图 5、6。



(a) 对应设置型钢的位置 (b) 对应未设置型钢的位置

图 5 横向接缝构造图(单位:mm)



(a) 小纵梁位置 (b) 主纵梁位置

图 6 纵向接缝构造图(单位:mm)

现浇缝均采用 T 形接缝的形式,主要达到两方面的目的:① 避免在高拉应力区出现断缝;② 阻滞现浇 UHPC 收缩,避免界面出现收缩裂缝,避免出现渗漏病害。

2.3 结合段设计

钢混结合面设置在距离桥塔中心线 8.75 m 的位置,以避免主梁负弯矩峰值区域。钢混结合段总长 6.15 m,与组合梁 C 梁段连接,主要通过设置钢格室、剪力连接件及张拉预应力进行两者的有效结合。

组合梁的分离式钢箱及桥面板均设置多格室结构。其中,桥面板的钢格室长 1.5 m,高 0.72 m,宽 0.7~1.13 m。钢格室之间的隔板开有圆孔并通过 $\phi 20$ mm 钢筋与混凝土形成 PBL 剪力键。钢格室伸入混凝土梁 1 m。分离式钢箱的钢格室长 1.5 m,宽 0.75 m,高 1.3 m。桥面板、分离式钢箱分别采用渐变 T 形加劲肋高度和增设纵向加劲肋的方式对刚度进行平缓过渡,过渡段长度均为 3 m;组合梁的 UHPC 面板通过渐变厚度的方式进行刚度过渡,UHPC 面板伸入混凝土梁 1.5 m。

2.4 型钢—UHPC 组合梁优势

通过以上优化设计,采用新型桥面结构的主要优势如下:

(1) 经济性优良,充分节省投资。采用新桥面结构后南桥的主跨将减重约 5 000 t,因此可以相应优化斜拉索、桥塔、主跨钢梁、边跨混凝土梁等相关构件,大幅节省了南桥的造价。表 2 为初步设计方案和施工图方案主要材料变化对比表。

表 2 桥面优化前后材料用量变化对比

| 项目 | 边跨主梁混凝土/m ³ | 中跨主梁钢结构/t | 斜拉索/t | 桥塔钢锚梁/t |
|----------------|------------------------|-----------|-------|---------|
| 26 cm 普通混凝土桥面板 | 13 526 | 5 933 | 1 800 | 1 636 |
| 型钢—UHPC 组合桥面板 | 10 691 | 3 924 | 1 459 | 1 314 |
| 增减量 | -2 835 | -2 009 | -341 | -322 |

(2) 受力性能优异,提高施工便利性。无需在桥面板内设置预应力钢束,便于施工,加快施工进度;UHPC 预制板蒸养后无收缩,无需长期存放,可节省预制场占地和存放费用;UHPC 徐变系数仅为普通混凝土的 15%,长期徐变很小,可减小因徐变引起的组合梁应力重分布及桥塔偏位,进一步保证桥梁长期运营安全性。

(3) 具有超高的结构耐久性能,节省后期管养成本。UHPC 作为钢梁顶板的有效防护层,能有效提高钢梁的耐久性,减轻管养单位的压力。

3 钢—UHPC 轻型组合梁结构计算分析

3.1 整体计算

3.1.1 计算参数

采用空间有限元软件 Madis Civil 进行全桥结构整体静力分析。主梁及索塔采用梁单元模拟,斜拉索采用空间索单元模拟,钢—UHPC 轻型组合梁按“施工阶段联合截面”进行模拟。

材料特性按 JTG D62—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》等相关规定取值。UHPC 弹性模量为 42.1 GPa,重度为 27 kN/m³,泊松比为 0.2。

汽车车道荷载采用公路—I 级按四车道横向布载。风荷载取值时,考虑 100 年一遇的桥位区设计基本风速为 24 m/s。主跨主梁桥面板 UHPC 不计收缩,徐变系数取 0.2。其余荷载按 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》及其他相关规范规定取值。

3.1.2 计算结果

在设计中,需重点关注中跨钢—UHPC 组合梁在成桥和运营阶段的受力状态,故分别提取中跨钢梁和 UHPC 的应力结果,如图 7 所示。该文仅展示 UHPC 上缘在成桥状态和运营阶段作用效应频遇组合下的应力包络图,分别如图 8、9 所示。

由图 7~9 可以看出:① 成桥状态:中跨组合梁 UHPC 桥面板的上、下缘应力皆为压应力,满足受力要求。中跨钢梁上、下缘应力,远小于钢梁设计强度 270 MPa;② 运营状态:在承载能力极限状态基本组合下,钢梁上、下缘应力均小于钢梁设计强度 270 MPa;③ 在正常使用极限状态下,主跨 UHPC 桥面板上、下缘应力最大拉应力均小于 UHPC 名义容许弯拉应力;④ 汽车荷载作用下,中跨向上最大位移为 23.6

mm,向下最大位移为 310 mm,总位移为 333.6 mm $\approx 450 \times 10^3$ mm/1 351 $< 450 \times 10^3$ mm/400,满足设计要求。

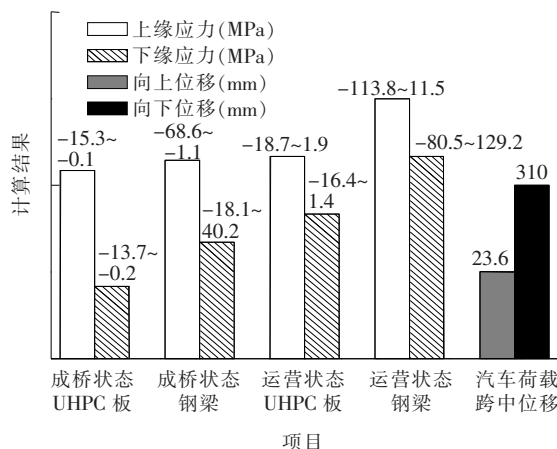


图 7 中跨主梁应力及变形汇总表

(注:拉应力为正,压应力为负)

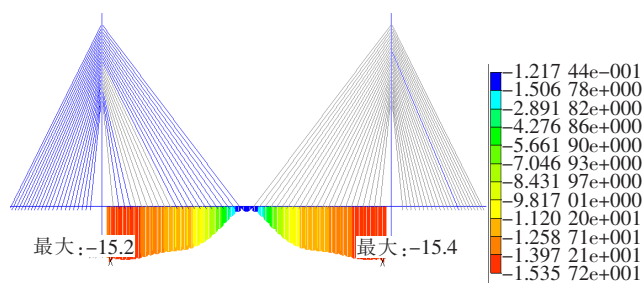


图 8 成桥状态 UHPC 板上缘应力包络图(单位:MPa)

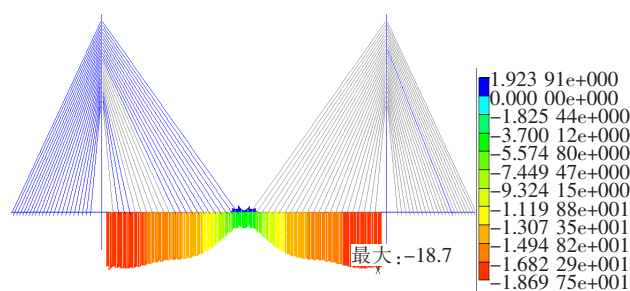


图 9 运营状态 UHPC 板上缘应力包络图(单位:MPa)

3.2 局部计算

3.2.1 模型参数

为了研究型钢—UHPC 组合桥面板在车轮荷载等作用下的受力性能,该文利用大型有限元软件 Ansys 对中跨标准节段进行了有限元分析。该模型纵向取 23.5 m(含 6 道横隔板),横隔板间距为 4.5 m,为更准确地反映车辆偏载工况下各关注点的应力情况,建立了桥梁全宽模型,同时考虑过人孔等构造细节对受力的影响。

UHPC 桥面板采用三维八节点六面体 Solid185 单元模拟,钢板采用 Shell181 单元模拟,栓钉采用 Combine14 单元模拟。网格尺寸划分时,桥面板高度方向网格尺寸为 30 mm,即顶板划分为 2 层,型钢腹板划分为 4 层,总体网格尺寸取 50 mm,局部细化网格,Ansys 分析模型见图 10。所用材料参数如表 3 所示,其中栓钉的抗剪刚度偏安全地取 120 kN/mm。

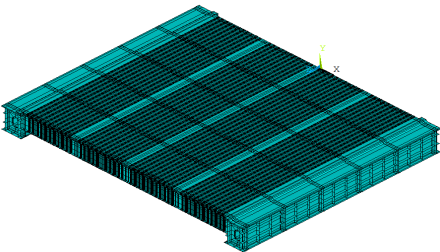


图 10 Ansys 分析模型示意图

表 3 材料参数

| 构件 | 材料 | 弹性模量/GPa | 密度/(kg·m ⁻³) | 泊松比 |
|---------|---------|----------|--------------------------|-----|
| UHPC 顶板 | UHPC150 | 42.1 | 2 700 | 0.2 |
| 型钢及钢板件 | Q345 | 206.0 | 7 850 | 0.3 |

3.2.2 荷载及荷载工况

分析时考虑的荷载包括:自重、二期恒载、车辆荷载及温度作用等。其中,考虑到该桥在运营阶段将兼顾市政桥梁的功能,故车辆荷载偏安全地依据 CJJ 11—2011《城市桥梁设计规范》按城—A 汽车荷载考虑,顺桥向按中支点负弯矩最不利工况布置,横桥向采用两车道加载。根据规范,横桥向布置多车道汽车荷载时,应考虑汽车荷载的横向折减,同时,多车道布载的荷载效应不得小于两条车道布载的荷载效果,而桥面板应力为局部控制,故施加在模型上的荷载为两车道荷载,以此荷载作用作为结构的最不利受力工况。

由于标准重车的中后轴相距 6.0 m,纵向间距较大,可不考虑中后轴之间的叠加效应,计算时仅考虑双中轴的作用,且加载轴中每个车轮作用面积为 250 mm×600 mm(纵桥向×横桥向),每个中轴轴重为 140 kN。

车辆荷载计算具体加载位置如图 11 所示,横桥向和纵桥向相互组合共 18 种荷载工况,能基本涵盖各受力关注点的最不利状态。

分析各荷载工况对结构各受力关注位置的影响效应,取最不利的荷载工况进行荷载组合。

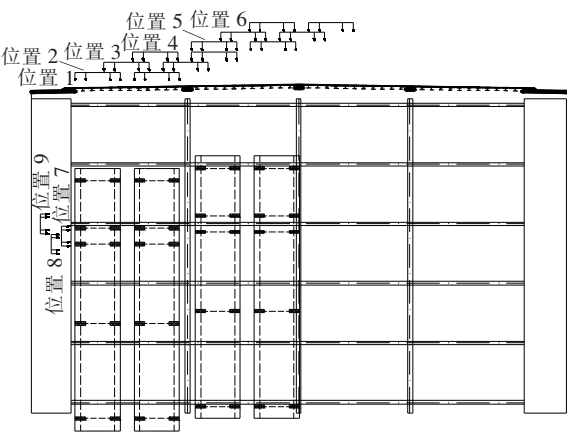


图 11 车辆荷载工况布置示意图

3.2.3 计算结果

通过分析得到 UHPC 层、型钢、钢板条及钢梁的应力,具体如图 12、13 所示。

由图 12 可知:

(1) 在频遇组合下,UHPC 层横桥向顶、底面的最大拉应力分别为 8.3、5.7 MPa,纵桥向顶、底面的最大拉应力分别为 6.5、4.1 MPa。车辆荷载工况作用下最大应力为 9.6 MPa,均小于 UHPC 层的名义容许弯拉应力(14.3 MPa),满足受力要求。

(2) 车辆荷载工况、作用效应频遇组合及基本组合作用下,型钢、钢板条及钢梁最大应力均小于钢材设计强度,满足设计要求。

由图 13 可知:直径 19 mm(横梁及小纵梁顶板位置)和 13 mm(型钢顶部及钢板条位置)栓钉的最大等效剪力分别为 9.992、6.881 kN,分别小于其抗力 78.4、37.2 kN,即在 18 种车辆荷载工况作用下,型钢—UHPC 轻型组合桥面板的栓钉抗剪承载力满足设计要求;且计算可得,直径 19 mm 栓钉的最大滑移量为 9.992/120=0.083 mm,直径 13 mm 栓钉的最大滑移量为 6.881/120=0.057 mm,均小于规范规定的最小滑移限值 0.2 mm。即在 18 种车辆荷载工况作用下,型钢—UHPC 轻型组合桥面板的栓钉滑移量满足设计要求。

4 型钢—UHPC 组合桥面板模型试验

由前文可知,型钢—UHPC 组合桥面板在各种荷载工况作用下理论上均能满足受力要求。为充分了解该桥面结构的受力性能,开展了纵向条带和横向接缝的负弯矩试验。荷载试验在湖南大学桥梁新技术实验室进行,采用 MTS 逐级加载。

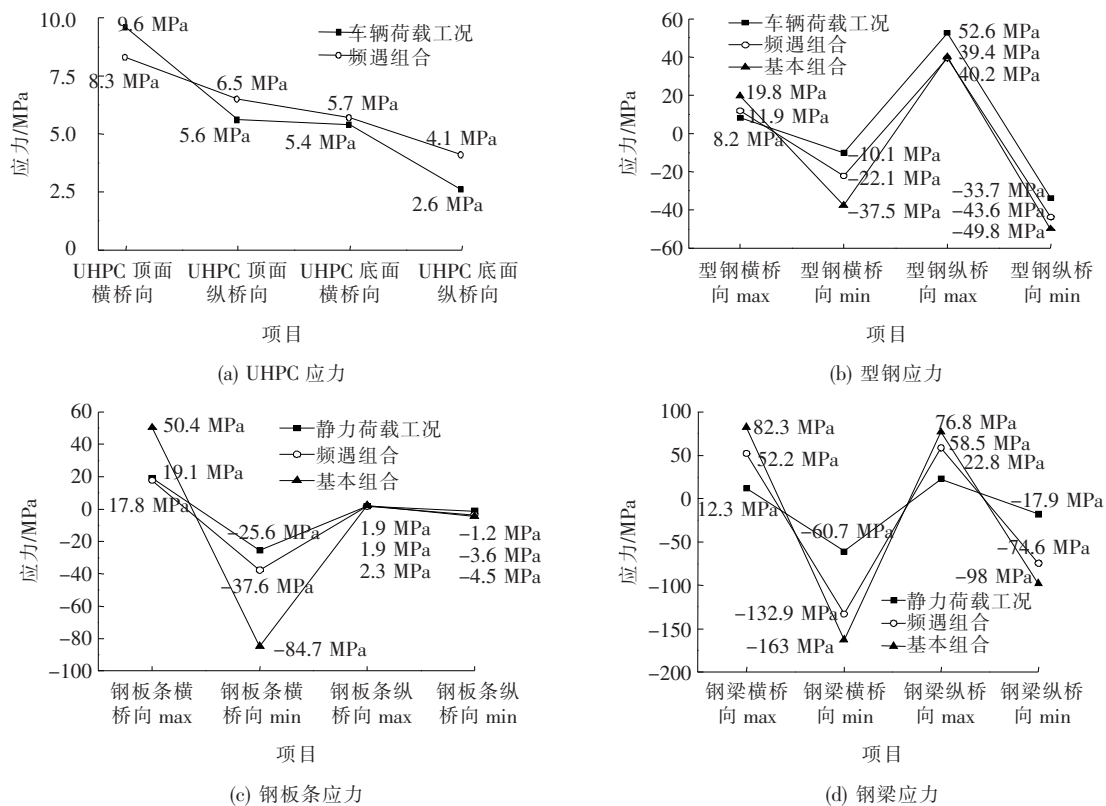


图 12 各工况及其最不利组合各受力部位应力

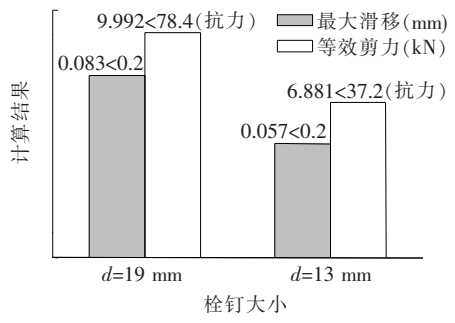


图 13 静力荷载工况下栓钉滑移及等效剪力

4.1 纵向条带负弯矩试验

按照该桥型钢—UHPC 组合桥面板构造尺寸,截取一个标准宽度的条带,制作了足尺试验模型,进行四点加载试验(图 14)。

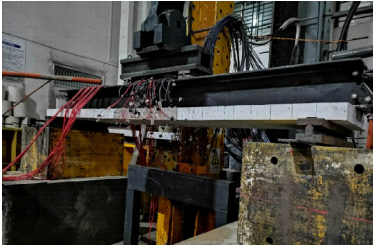


图 14 纵向条带负弯矩试验

试验结果表明:型钢—UHPC 轻型组合桥面结构的抗裂强度达到 13 MPa 以上,而有限元计算中桥面板的应力为 5 MPa 左右,其安全系数达到 2.6,说明型钢—UHPC 组合桥面结构在负弯矩作用下具有很好的抗裂安全性。

4.2 横向接缝负弯矩试验

横向接缝的负弯矩试验包括分次浇筑的试件和一次浇筑的对比试件。同样按照该桥型钢—UHPC 组合桥面板构造尺寸,截取一个标准宽度的条带,制作了足尺试验模型(图 15)。



图 15 横向接缝负弯矩试验

横向接缝分次浇筑试件的试验结果与有限元计算结果对比如表 4 所示,荷载一位移曲线如图 16 所示。

由表 4 可知:试验中型钢—UHPC 轻型组合桥面

表 4 横向接缝负弯矩试验结果

| 关注位置 | 抗裂强度/ MPa | 计算值/ MPa | 安全系数 |
|------|--------------|-------------|------|
| 接缝界面 | 6.20 | 1.77 | 3.50 |
| 刚度突变 | 18.35 | 6.50 | 2.83 |
| 接缝顶部 | 15.03 | 3.81 | 3.94 |

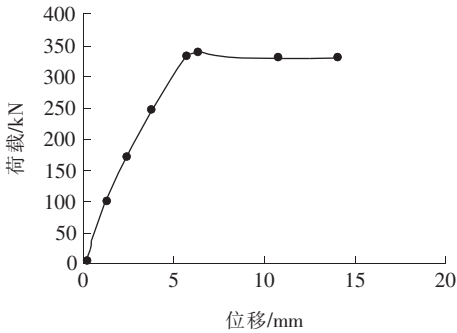


图 16 分次浇筑试件负弯矩试验荷载-位移曲线

结构横向接缝界面、刚度突变、接缝顶部位置 3 处的抗裂安全系数分别为 3.50、2.83 和 3.94，满足设计要求。试验中极限荷载为 342.0 kN。

横向接缝一次浇筑试件的试验荷载位移曲线如图 17 所示，试验的极限荷载为 354.3 kN，抗裂强度为 13.8 MPa，比较图 16、17 可以看出：一次浇筑整体蒸养的湿接缝试件的抗裂强度与纵向条带的负弯矩抗裂强度基本接近，同时一次浇筑整体蒸养的湿接缝试件的极限荷载略高于分次浇筑的湿接缝试件。可见，是否分次浇筑对接缝试件的极限承载能力影响不大。

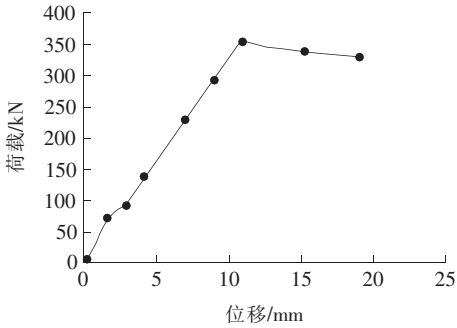


图 17 一次浇筑试件负弯矩试验荷载-位移曲线

5 结论

该文通过对藤县西江二桥南桥进行结构优化设计、全桥结构整体静力计算分析、组合梁标准节段局部计算分析、桥面板模型试验等研究，得出以下主要结论：

- (1) 型钢-UHPC 组合桥面板结构受力性能优异，UHPC 桥面板、型钢、钢板条、钢主梁及剪力钉等各主要受力构件的验算指标均满足相关规范和设计要求。
- (2) 采用该桥面结构对中跨组合梁进行减重后，可以进一步优化中跨主梁钢结构、斜拉索、边跨混凝土梁、桥塔等构件设计，减少工程材料用量，降低工程造价。同时，采用该结构有利于提高施工便利性、加快施工进度，提高结构耐久性，降低运营的管养成本。
- (3) 纵向条带和横向接缝负弯矩试验结果表明：型钢-UHPC 组合桥面结构在负弯矩作用下具有非常优异的抗裂安全性，满足设计要求。

参考文献：

[1] 白先梅,李治学. 钢-混凝土组合梁桥的发展概况与运用[J]. 交通科技与经济,2012(4).

[2] 陈宝春,李聪,黄伟,等. 超高性能混凝土收缩综述[J]. 交通运输工程学报,2018(1).

[3] 邵旭东,曹君辉. 面向未来的高性能桥梁结构研发与应用[J]. 建筑科学与工程学报,2017(5).

[4] 张法,毛志坚,彭力军. 钢-STC 轻型组合结构桥面新技术应用的保证体系[J]. 中外公路,2017(5).

[5] 黄政宇,胡功球. 热养护过程中超高性能混凝土的收缩性能研究[J]. 材料导报,2016(4).

[6] JTG D62-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[7] JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S].

[8] CJJ 11-2011 城市桥梁设计规范[S].

[9] DBJ/T 15-130-2017 高性能混凝土应用技术规范[S].

[10] 陈德宝,曾明根,苏庆田,等. 钢-UHPC 组合桥面板湿接缝界面处理方式[J]. 中国公路学报,2018(12).