

先斜拉后悬索组合梁自锚式悬索桥桥面板 浇筑方案研究

陈逸群, 许 骏

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要:以一拟建钢-UHPC组合梁自锚式悬索桥为工程背景,建立全桥空间有限元杆系结构模型,研究了在“先斜拉后悬索”的施工过程中,UHPC桥面板浇筑阶段、UHPC桥面板的分段浇筑方案对加劲梁受力性能的影响。研究表明:UHPC桥面板在临时斜拉桥成桥后浇筑,在最终成桥状态下桥面板和钢梁的受力性能均优于在吊杆张拉完成后浇筑和在斜拉-悬索体系转换完成后浇筑;在临时斜拉桥成桥后浇筑UHPC桥面板,先浇筑斜拉索区梁段后浇筑中支点附近梁段,在最终成桥状态下中跨桥面板和钢梁的受力性能均优于先浇筑中支点附近梁段后浇筑斜拉索区梁段。

关键词:自锚式悬索桥;钢-UHPC组合梁;桥面板;施工顺序;斜拉-悬索体系转换

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)04-0172-04

0 引 言

自锚式悬索桥造型优美,缆梁自锚,布置灵活,在公路与市政桥梁中得到广泛应用^[1]。加劲梁承受桥面荷载,锚固主缆参与整体受力,是桥梁结构关键受力构件之一。已建成的自锚式悬索桥多为混凝土梁、钢箱梁、钢-混组合梁等形式^[2]。其中,混凝土梁跨越能力小。钢箱梁造价高,正交异性钢桥面病害问题突出^[3-4]。钢-混组合梁跨越能力大,养护工作量小,造价适中,但自重较大且抗裂能力较差^[5]。基于上述情况,采用超高性能混凝土(UHPC)作为桥面板,可提高加劲梁的抗裂能力、耐久性,并能减轻自重。

对钢-混组合梁自锚式悬索桥,加劲梁混凝土板的施工顺序对结构受力性能的影响十分复杂^[6]。为了使加劲梁的受力情况更为有利,需要采取合理的桥面板施工顺序。国内学者针对组合梁桥面板施工顺序对结构受力性能的影响已经进行了一些研究。王红良等^[7]就桥面板浇筑顺序对钢-混组合连续梁桥受力的影响进行了研究。徐江洋^[8]针对采用悬臂安装方法施工的叠合梁斜拉桥,研究了钢梁与预制混凝土桥面板形成组合截面的顺序对结构受力性能的影响。雷发铨^[9]针对地锚式叠合梁悬索桥,研究了预制混凝土桥面板按不同顺序施工对钢梁受力

性能的影响。王天鹏等^[6]针对采用“先梁后缆”方法施工的叠合梁自锚式悬索桥,研究了吊索张拉、预制混凝土桥面板对称安装两者相对顺序对加劲梁内力的影响。

对于采用“先斜拉后悬索”方法施工的自锚式悬索桥,桥面板的施工阶段和分段浇筑方案对加劲梁受力性能的影响尚缺乏研究。本文针对一拟建钢-UHPC组合梁自锚式悬索桥,通过全桥空间有限元杆系结构模型计算,研究了在“先斜拉后悬索”的施工过程中,UHPC桥面板与钢梁的结合阶段、UHPC桥面板的分段浇筑方案对加劲梁受力性能的影响,可为同类型桥梁桥面板施工顺序确定提供参考。

1 工程概况

1.1 总体设计

拟建主桥桥型采用双塔双索面钢箱梁自锚式悬索桥,跨径布置为130 m+336 m+130 m=596 m,跨中主缆垂度65 m,矢跨比1:5.17,主桥平面位于直线段。

横断面为整幅布置,双向六车道+两侧慢行道:0.5 m(风嘴)+0.25 m(护栏)+3.5 m(慢行道)+1.5 m(锚固区)+0.5 m(防撞护栏)+11.75 m(机动车道)+0.6 m(中央分隔护栏)+11.75 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+1.5 m(锚固区)+3.5 m(慢行道)+0.25 m(护栏)+0.5 m(风嘴)=36.6 m(桥梁总宽)。桥梁总体布置方案见图1,标准横断面布置见图2。

收稿日期:2022-06-09

作者简介:陈逸群(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

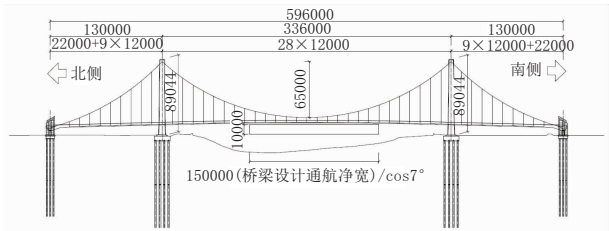


图1 主桥总体立面布置(单位:mm)

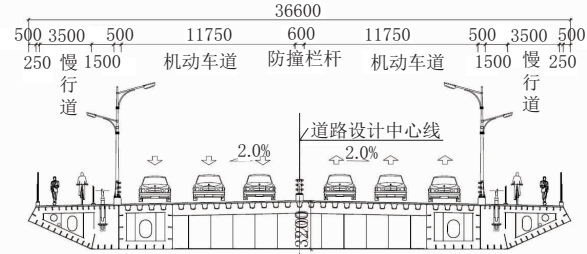


图2 主桥标准横断面布置(单位:mm)

1.2 结构设计

1.2.1 主塔

主塔采用门式塔,窗花形横撑。在加劲梁下方设置牛腿。单个塔柱由塔座、下塔柱、上塔柱、塔顶主索鞍室组成,塔高89 m。主塔采用哑铃型承台,承台基础采用 $\phi 2.0$ m钻孔灌注桩。主塔承台平面构造尺寸为 $49.2\text{ m} \times 18.2\text{ m}$ (横 $\times$ 顺),厚5 m,单个承台桩基础为34根 $\phi 2.0$ m钻孔灌注桩。

边墩采用矩形实心桥墩,截面尺寸为 4.5 m (横) $\times$ 2.5 m (顺)。

1.2.2 加劲梁

主桥加劲梁采用钢箱梁+正交异性组合钢桥面板,钢箱梁为P-K断面形式钢箱梁。加劲梁标准段加劲梁全宽36.6 m(含风嘴),顶板宽35.6 m,单个箱室底板宽4 m,风嘴宽0.5 m。道路中心线处梁高3.26 m,钢梁梁高3.2 m,上设6 cm UHPC层与钢桥面组成正交异性钢桥面板。其主要力学性能为:弹性模量 $E=4.5 \times 10^4\text{ MPa}$,剪切模量 $G=1.44 \times 10^4\text{ MPa}$,泊松比 $\gamma=0.2$,轴心抗压强度设计值 f_{cd} 不小于80 MPa,轴心抗拉强度设计值 f_{td} 不小于12 MPa,热膨胀系数为 $0.000\text{ }01/^{\circ}\text{C}$,容重 26 kN/m^3 。钢梁主要材质为Q345qD。钢梁由主纵梁(闭口箱梁)、横隔板、挑梁组成的双加劲梁梁格体系。其中,纵梁标准节段为12 m,每间隔4 m设置一道横梁和挑梁,吊索用钢锚箱锚固于钢挑梁上。

主缆锚固区采用混凝土结构,锚固段梁高由标准段3.2 m增加到6.0 m,桥宽为等宽36.6 m。钢-混凝土结合段采用有格室的后承压板连接方式。

1.2.3 主缆与吊索

主缆采用PPWS法施工,工厂预制平行钢丝索

股,现场在施工步道上逐股安装架设。主缆共2根,每根主缆中含37股平行钢丝索股,每股含127丝直径为5.3 mm的镀锌铝镁合金钢丝,抗拉强度不小于1 860 MPa。每根主缆共4 699丝,竖向排列成尖顶的近似正六边形。

吊索上端与索夹为销接式连接,下端与加劲梁采用锚箱连接。吊索采用垂直吊索形式,每个吊点共2根吊索。吊索采用预制平行钢丝束股外包PE进行防护,钢丝采用直径为 $\phi 7.0\text{ mm}$ 的镀锌铝高强度钢丝,抗拉强度不小于1 770 MPa。

1.3 施工方案

1.3.1 总体施工方案

本工程主桥采用“先斜拉后悬索”的施工方法。主桥锚固段及锚跨混凝土箱梁采用支架现浇施工,边跨钢箱梁从中跨拼装平台处往锚跨方向顶推施工。由于中跨通航要求,采用常规方法施工加劲梁比较困难且不经济,故在主塔设置临时锚固点,主塔与加劲梁之间设置7对临时斜拉索。采用斜拉扣挂法分节段施工中跨钢箱加劲梁,形成临时斜拉桥。钢箱加劲梁由船舶水上运输、架梁吊机梁面起吊。待全部加劲梁施工完成后进行斜拉-悬索体系转换,最终形成悬索桥。临时斜拉桥总体布置、施工梁段划分见图3。

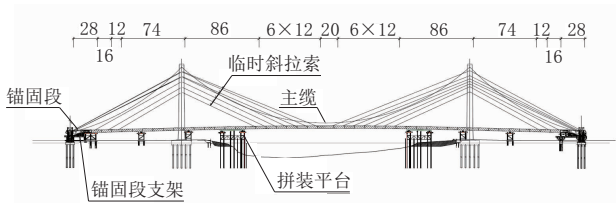


图3 临时斜拉桥总体布置图(单位:m)

1.3.2 UHPC桥面板施工顺序

根据总体施工方案,理论上UHPC桥面板可在以下阶段浇筑:

- (1)顶推边跨加劲梁前浇筑边跨梁段桥面板。
- (2)起吊中跨加劲梁前浇筑中跨梁段桥面板。
- (3)施工中跨加劲梁时,一个梁段完成斜拉扣挂后浇筑该梁桥面板。
- (4)在临时斜拉桥成桥后浇筑所有梁段桥面板。
- (5)在主缆架设完成后浇筑所有梁段桥面板。
- (6)在主缆吊索张拉完成后浇筑所有梁段桥面板。
- (7)在斜拉索及临时支架拆除后浇筑所有梁段桥面板。

在阶段(1)浇筑边跨梁段桥面板会使顶推梁段的重量变大,导致钢梁在顶推过程中的受力变得不

利,且加劲梁在顶推的过程中正负弯矩变化频繁,桥面板可能开裂。在阶段(2)浇筑中跨梁段桥面板会使起吊梁段的重量变大,导致临时斜拉索用量增大、架梁吊机的吨位需求增大,增加施工成本。在阶段(3)浇筑桥面板,下一个梁段需待该梁段桥面板 UHPC 达到设计强度后方可施工,会导致施工工期延长。综上所述,在阶段(1)、(2)、(3)浇筑 UHPC 桥面板会带来负面作用,不予考虑。

在阶段(4)浇筑桥面板可以与主缆架设同时施工,并且桥面板还可分担主缆自重对加劲梁产生的轴向压力,这对 UHPC 桥面板和钢梁的受力都是有利的。相比于阶段(4),在阶段(5)浇筑桥面板,桥面板不能获得主缆自重产生的压力储备,钢梁承担的压力则有所增加,两者的受力均偏向不利,施工周期也有所延长,因而不考虑。

综上所述,为研究 UHPC 桥面板浇筑阶段对加劲梁受力性能的影响,设计了 3 种桥面板的施工顺序,详见表 1。

表 1 桥面板浇筑方案主要施工步骤

步骤	方案一	方案二	方案三
1	临时斜拉桥成桥	临时斜拉桥成桥	临时斜拉桥成桥
2	浇筑 UHPC 桥面板	架设主缆	架设主缆
3	架设主缆	张拉吊索	张拉吊索
4	张拉吊索	浇筑 UHPC 桥面板	拆除临时斜拉索和临时支架
5	拆除临时斜拉索和临时支架	拆除临时斜拉索和临时支架	浇筑 UHPC 桥面板
6	施工附属设施	施工附属设施	施工附属设施

对于加劲梁受力性能最优的方案,再进一步研究桥面板分段浇筑方案对加劲梁受力性能的影响。设计了 3 种桥面板分段浇筑方案:方案 A 桥面板由两端向跨中浇筑,方案 B 桥面板由跨中向两端浇筑,方案 C 桥面板分别由两端、中跨中向主塔处中支点浇筑,详见图 4。分段浇筑时,锚固段和中跨跨中梁段为 3 个浇筑节段,其他梁段每 2 个梁段(共长 24 m)为一个浇筑节段,全桥共 47 个浇筑节段。浇筑时,待一个浇筑节段 UHPC 桥面板性能指标达到要求后,浇筑下一个节段。

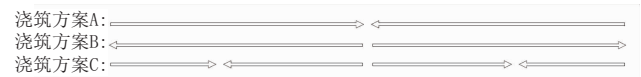


图 4 桥面板分段浇筑方案

2 加劲梁受力性能分析

2.1 有限元模型

采用 Midas Civil 软件建立全桥有限元模型(见

图 5),主缆与吊索采用索单元模拟,桥塔和横梁采用梁单元模拟。加劲梁采用双层梁单元模拟,下层梁单元为钢梁,上层梁单元为 UHPC 桥面板,上、下层梁单元节点间为弹性连接。主缆与索塔顶端、主缆锚固点与主梁末端采用主从约束,主梁为半飘三跨连续梁体系,主梁在索塔处限制单侧横向位移和竖向位移,在边墩处限制竖向位移和单侧横向位移,塔底、边墩底固结。比较方案一、方案二和方案三加劲梁的受力性能时,施工过程的模拟按照表 1 中所示步骤进行,3 个方案 UHPC 桥面板均按照一次全部浇筑考虑。比较浇筑方案 A、浇筑方案 B 和浇筑方案 C 时,UHPC 桥面板按照图 4 所示方案进行浇筑。



图 5 全桥有限元模型

2.2 结果分析

2.2.1 UHPC 桥面板浇筑阶段对加劲梁受力性能的影响

全桥模型计算得到的方案一、方案二和方案三成桥状态下 UHPC 桥面板正应力、钢梁截正应力见图 6、图 7。图中应力正值为拉应力,负值为压应力;钢梁正应力为上、下缘正应力的绝对值最大值。

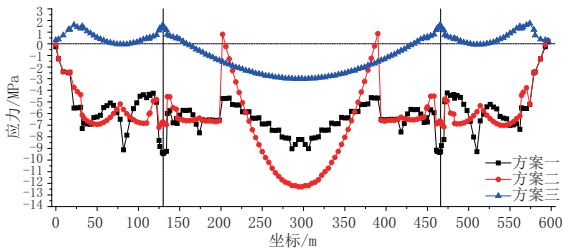


图 6 成桥状态下 UHPC 桥面板正应力图

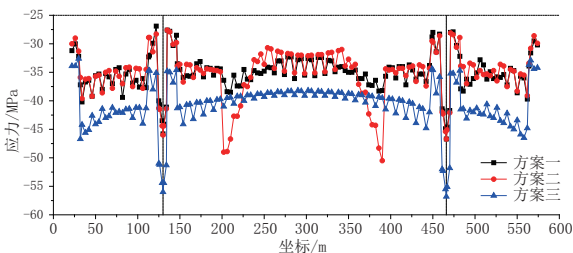


图 7 成桥状态下钢梁正应力图

由图 6 可知:在成桥状态下,方案三桥面板的压应力储备最小,在桥塔处和边跨 1/4 跨径处出现拉应力,拉应力最大值为 1.62 MPa。方案二在中跨跨中处桥面板的压应力储备最大,但在中跨 1/4 跨径处会出现拉应力,拉应力最大值为 0.82 MPa。方案一在全桥范围内桥面板压应力储备较均匀,虽然在跨中处的

压应力小于方案二,但在桥塔处的压应力大于方案二。在使用阶段,加劲梁的负弯矩主要出现在桥塔处,故桥塔处桥面板有更大的压应力储备对桥面板受力是更为有利的,方案一桥面板的受力性能最优。

由图7可知:在成桥状态下,方案三钢梁在桥塔控制截面处压应力最大;方案二钢梁在桥塔处压应力较小,但在中跨1/4处压应力最大并超过桥塔处;方案一在全桥范围内钢梁的最大压应力均较小,在桥塔控制截面处钢梁压应力也最小,受力性能最优。

综上所述,方案一加劲梁的受力性能最优,即UHPC桥面板在临时斜拉桥成桥后浇筑,桥面板和钢梁的受力性能均优于在吊杆张拉完成后浇筑和在斜拉-悬索体系转换完成后浇筑。

2.2.2 UHPC桥面板分段浇筑方案对加劲梁受力性能的影响

全桥模型计算得到的按照分段浇筑方案A、方案B和方案C在成桥状态下UHPC桥面板正应力、钢梁正应力见图8、图9。图中应力正值为拉应力,负值为压应力;钢梁正应力为上、下缘正应力的绝对值最大值。

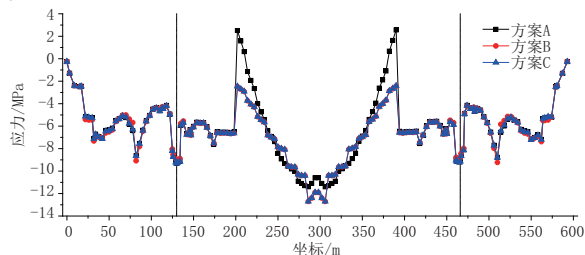


图8 收缩徐变完成后 UHPC 桥面板正应力图

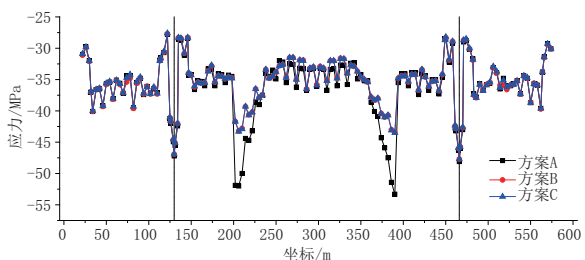


图9 收缩徐变完成后钢梁正应力图

由图8可知:在成桥状态下,分段浇筑方案A、方案B和方案C桥面板的正应力在边跨范围内基本一致。在中跨临时支架附近,方案A桥面板会出现2.51 MPa的拉应力,而方案B此处桥面板为2.48 MPa的压应力。在中跨跨中位置,方案B桥面板的压应力(11.90 MPa)也大于方案A(10.60 MPa),受力性能更优。中跨范围内分段浇筑方案C和方案B桥面板的正应力基本一致。

由图9可知:在成桥状态下,分段浇筑方案A、方案B和方案C钢梁的正应力在边跨范围内基本一

致。在中跨临时支架附近,方案A钢梁最大压应力为52.00 MPa,而方案B此处钢梁最大压应力仅为43.20 MPa的压应力,受力性能更优。中跨范围内分段浇筑方案C和方案B钢梁的正应力基本一致。

综上所述,分段浇筑方案B和方案C加劲梁的受力性能更优。在方案B和方案C中,中跨桥面板均先浇筑斜拉索区梁段,后浇筑中支点附近梁段;而在方案A中,中跨桥面板先浇筑中支点附近梁段,后浇筑斜拉索区梁段。通过对比可以看出,先浇筑斜拉索区梁段后浇筑中支点附近梁段,中跨桥面板和钢梁的受力性能优于先浇筑中支点附近梁段后浇筑斜拉索区梁段。

3 结论

本文针对钢-UHPC组合梁自锚式悬索桥,通过全桥空间有限元杆系结构模型计算,研究了在“先斜拉后悬索”的施工过程中,UHPC桥面板浇筑阶段、UHPC桥面板的分段浇筑方案对加劲梁受力性能的影响,最终结论如下:

(1)UHPC桥面板在临时斜拉桥成桥后浇筑,在最终成桥状态下桥面板和钢梁的受力性能均优于在吊杆张拉完成后浇筑和在斜拉-悬索体系转换完成后浇筑。

(2)在临时斜拉桥成桥后浇筑UHPC桥面板,先浇筑斜拉索区梁段后浇筑中支点附近梁段,在最终成桥状态下中跨桥面板和钢梁的受力性能均优于先浇筑中支点附近梁段后浇筑斜拉索区梁段。

参考文献:

- [1] 吴月星,周建庭,孙马,等.空间异形索面悬索桥主缆成桥线形计算方法[J].桥梁建设,2020,50(5):37-43.
- [2] 王子军,周建波.宝鸡联盟路渭河大桥主桥设计[J].世界桥梁,2019,47(5):1-6.
- [3] 周立兵,张刚,王敏.军山长江大桥钢-UHPC组合桥面改造效果研究[J].桥梁建设,2020,50(2):50-55.
- [4] 廖卫东,陈露一,高立强,等.武汉军山长江大桥超高性能混凝土组合桥面改造技术及实施效果分析[J].世界桥梁,2019,47(6):65-69.
- [5] 夏飞,段宝山.泊松效应对组合梁斜拉桥混凝土板纵向开裂的影响研究[J].世界桥梁,2016,44(2):68-72.
- [6] 王天鹏,易锦,陈立忠.钢-混凝土叠合梁自锚式悬索桥结构体系转换方案的比较研究[J].施工技术,2018,517(18):50-53.
- [7] 王红良,钱金巨,王立超,等.连续组合梁桥桥面板施工顺序影响研究[J].公路与汽运,2021,202(1):121-125.
- [8] 徐江洋.钢混叠合梁斜拉桥施工控制及叠合面关键技术研究[D].西安:长安大学,2019.
- [9] 雷发铮.南宁良庆悬索桥钢砼叠合梁吊装施工研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.