

现浇 STC 铺装体系施工方案对悬索桥 成桥状态影响研究

沈锐利¹, 蒋雨骥¹, 张晋瑞²

(1.西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2.湖南省交通规划勘察设计院有限公司)

摘要:为解决钢桥面铺装层破损和桥面钢结构疲劳开裂两大病害难题,拟将超高韧性混凝土(STC)铺装体系运用于大跨度悬索桥。由于大跨度悬索桥桥面铺装面积大,施工时通常选择分块浇筑的方式,然而 STC 层自身刚度比沥青铺装大,分块现浇施工时,依次形成强度的各块 STC 将逐步提高桥面系刚度,与钢桥面形成组合结构协同受力,导致结构在 STC 浇筑、硬化过程中的受力状态不断发生变化,这种施工过程中的内力重分配,最终会影响设计成桥状态的实现。为了确定 STC 刚性铺装体系分块现浇施工方案对双跨连续悬索桥成桥状态的具体影响,以杭瑞高速公路上的岳阳洞庭湖大桥主桥为工程背景,利用 Ansys 软件对 STC 铺装体系现浇方案进行有限元模拟,基于计算结果比选最优施工方案。结果表明:不同的 STC 浇筑顺序、分块方式和配重方案对钢梁成桥线形有一定影响,对 STC 成桥内力影响较大。

关键词:双跨悬索桥; STC 刚性铺装; 现浇方案; 成桥状态

1 引言

正交异性钢桥面板具有自重轻、承载能力大等诸多优点,但工程实践发现沥青混凝土铺装层在反复车载作用下病害严重,钢桥面板也常出现疲劳裂缝,常规混凝土铺装层亦是抗拉强度不足,常出现开裂现象,因此,相关单位提出了超高性能轻型组合桥面:以 45 mm 厚的超高韧性混凝土(Super Toughness Concrete, STC)代替传统桥面铺装层,将常规的正交异性钢桥面板转化为钢—超高韧性混凝土组合桥面系,并在其上铺设 40 mm 厚沥青混凝土层,STC 与钢梁之间通过栓钉连接。面板上 STC 层的设置相当于增厚了钢面板的厚度,不仅能有效参与正交异性钢桥面的

局部受力,提高其截面刚度,大幅度降低钢结构应力水平,减少钢结构疲劳开裂和铺装层病害风险,同时又能参与钢桥面的整体受力,减小钢板厚度。目前,该组合桥面结构已在一座自锚式悬索桥——株洲枫溪大桥得到实现,实际应用表明该结构具有很好的经济性。

在大跨度悬索桥中运用该超高性能轻型组合桥面,STC 浇筑规模巨大,受施工设备浇筑能力限制,必须进行分幅、分块浇筑。然而 STC 自身刚度相比沥青铺装要大,如不采取配重措施,依次形成强度的 STC 将逐步提高桥面系刚度,与钢桥面形成组合结构协同受力,使结构在 STC 浇筑过程中的受力状态不断变化,即施工过程的结构内力重分配,这种内力重分配最终会影响设计成桥状态(内力、线形)的实现,其影响性大小尚无相关资料可供参考。因此,该文以杭瑞高速

- *****
- [12] 何健,叶爱君.连续斜交梁桥地震下碰撞效应分析[J].中南大学学报:自然科学版,2012(4).
- [13] 王军文,沈贤,李建中.地震作用下斜交简支梁桥旋转机理及斜度影响研究[J].桥梁建设,2014(3).
- [14] Silva, P.F., Megally, S., & Seible, F.. Seismic Performance of Sacrificial Exterior Shear Keys in Bridge Abut-

- ment, Earthquake Spectra, 2009, 25(3):643—664.
- [15] 徐略勤,李建中.新型滑移挡块的设计、试验及防震效果研究[J].工程力学,2016(2).
- [16] Duncan, J. M. & Mokwa, R. L.. Passive Earth Pressure: Theories and Test[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3):248—257.

收稿日期:2018—10—26(修改稿)

作者简介:沈锐利,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:rlshen@163.com

公路上的岳阳洞庭湖大桥主桥为背景工程,利用 Ansys 软件建立 STC 铺装体系施工计算有限元模型,分析不同施工方案对悬索桥成桥状态的影响。

2 背景工程及有限元模型

2.1 工程概况

洞庭湖大桥为双塔双跨悬索桥,如图 1 所示,主梁采用板桁结合方案,桁高 9 m,宽 35.4 m。加劲梁跨径

组成为 $(1\ 480+453.6)$ m,桥面铺装采用超高性能轻型组合桥面铺装体系,如图 2 所示。

2.2 有限元模型

洞庭湖大桥加劲梁总长 1 933.6 m,板桁结构有限元模型庞大,离散单元众多,计算效率低,因此该文建立等效模型,使其弯曲刚度、扭转刚度与实际一致。参照文献[10],对板桁加劲梁抗弯刚度、扭转刚度进行等效计算,并保证加劲梁质量分布与实际一致,建立全桥等效模型如图 3 所示。

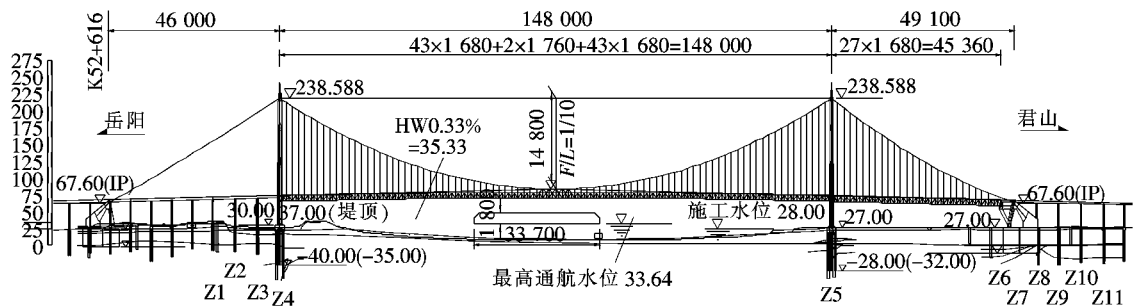


图 1 洞庭湖大桥结构示意图(除标高单位为 m 外,其余单位:cm)

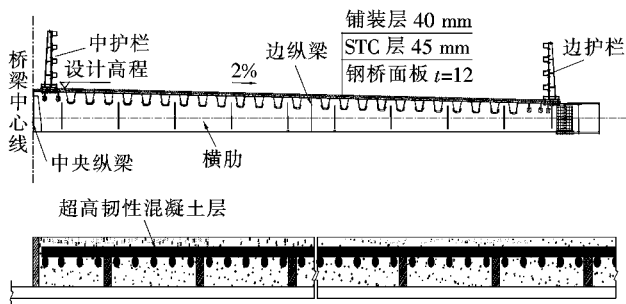


图 2 超高性能轻型组合桥面铺装体系示意图

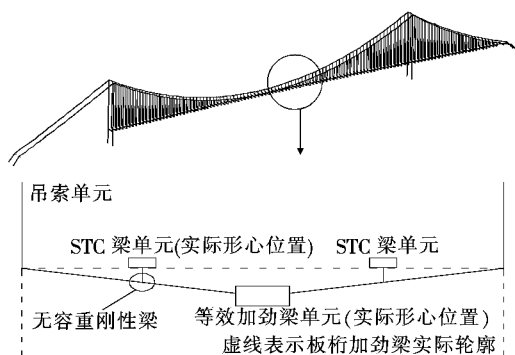


图 3 有限元简化模型

Ansys 有限元模型:主缆、吊索使用 Link10 单元,桥塔、索鞍、等效加劲梁、STC 使用 Beam4 单元;等效加劲梁以钢桁梁实际形心位置建模,对于相邻的形心不等高加劲梁,梁段间使用主从节点固结;横桥向通过刚臂将等效加劲梁与吊索连接;STC 以形心建模,通

过无重度刚性梁与横桥向刚臂连接,准确体现 STC 形心与主梁形心的空间位置关系,如图 3 所示;主缆锚固点和塔底采用固结约束,散索鞍处释放转动自由度,加劲梁为纵漂体系,释放纵桥向平动自由度与转动自由度。计算过程中,将每一块 STC 湿重的施加和形成强度后参与受力分别作为一个施工阶段,同时考虑施工过程中临时荷载变化、主索鞍顶推等客观影响因素,准确模拟 STC 浇筑工况。

对于悬索桥施工过程分析来说,确定结构合理成桥状态是保证施工过程计算正确性的基础。该文建立了与设计线形及内力基本一致的成桥状态计算模型(计算吊索力总和与材料净重统计差 8.9 kN),并在此基础上开展后续研究,以增量的方式分析各施工方案对成桥状态的影响。

3 STC 浇筑方案

超高性能轻型组合桥面结构在中国尚无系统规程,设计和施工都需做多方案比较。该项目 STC 纵桥向浇筑范围长 1 934.7 m,横桥向宽 33.5 m,对于规模如此巨大的 STC 现浇工程,分块浇筑时,不同浇筑长度、浇筑顺序和施工配重量决定了施工过程中钢桁梁刚度、线形的变化和内力分配情况,最终对成桥状态产生影响。

确定单次浇筑长度时,应主要考虑设备浇筑能力、施工成本等客观因素,过大或过小的分块没有实际的操作意义,每块现浇区域控制在单幅 300 m 范围比较合理,全桥需分 12 块完成。因此,该文不作浇筑长度影响性分析,仅基于该分块方案对无配重条件下的不同顺序浇筑,以及合理顺序条件下的不同配重量浇筑两大类方案进行比较,探究合理施工方案。

3.1 无配重浇筑

无配重分块浇筑 STC,可以节省配重物资、工期等各类成本,但通过不同顺序进行浇筑,钢梁逐步下挠至成桥线形的过程中,依次形成强度的各块 STC 将逐步提高桥面系刚度,与钢桥面形成组合结构协同受力,限制钢梁变形,引起结构受力变化,最终影响设计成桥状态的实现。

该节通过有限元计算,以加劲梁成桥线形和 STC 成桥内力为分析对象,研究 3 种不同浇筑顺序(方案)的影响性大小。3 种方案分别为:方案 1:跨中至两岸、方案 2:两岸至跨中、方案 3:设置合理后浇段,如图 4 所示。

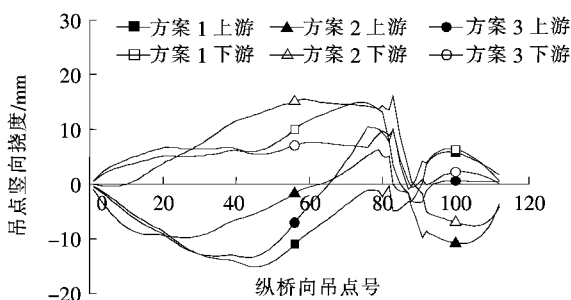
岳阳	跨中		索塔中心线		君山	
STC 范围:33.5 m	4(2)[4]	2(4)[2]	1(6)[1]	3(5)[3]	5(3)[11]	6(1)[5] 上游
	10(8)[9]	8(10)[7]	7(12)[6]	9(11)[8]	11(9)[12]	12(7)[10] 下游
	323.98	319.20	329.20	322.00	372.40	267.98

注: x、(x)、[x] 分别表示方案 1、2、3 的浇筑顺序。

图 4 STC 分块及浇筑顺序

3.1.1 3 种方案结果比较

各施工方案下,上下游各吊点挠度如图 5 所示,上下游桥面铺装层 STC 层的轴向应力如图 6 所示。其中吊点号对应全桥 113 根吊索,单元号对应纵向 114 个 STC 梁单元,两者编号均为岳阳至君山方向。



注:该文所有吊点挠度图所示数值,均已扣除“STC 不参与施工过程受力的成桥挠度值”。

图 5 上、下游各吊点挠度值

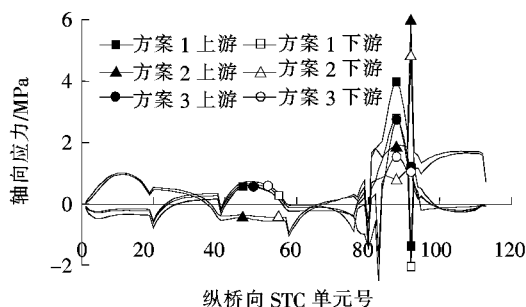


图 6 上、下游 STC 轴向应力

由图 5、6 可知:

(1) 方案 1:将 STC 分幅从主跨跨中往两岸逐块浇筑,先形成强度的部分提高了桥面系刚度,限制钢梁变形,导致成桥加劲梁发生不可恢复扭转,相比设计状态,主跨上游高程值偏低,下游偏高,主跨上、下游最大高差 2.1 cm,出现在跨中区域,君山边跨钢梁扭转现象不明显。在君山桥塔区域,上、下游 STC 拉应力较大,上游最大值达到 3.986 MPa,下游达到 2.779 MPa。

(2) 方案 2:相比设计状态,仍然是上游高程值偏低,下游偏高,主跨上、下游最大高差 1.8 cm,出现在跨中区域,边跨钢梁扭转现象不明显。然而边跨先浇 STC 拉应力值整体达到 1.6 MPa 以上,桥塔区域上、下游 STC 拉应力值进一步变大,上游最大值达到 5.953 MPa,下游达到 4.790 MPa。

(3) 方案 3:将君山桥塔区域作为后浇段,相比设计成桥状态,仍然是主跨上游高程值偏低,下游偏高,跨中上、下游高差最大,达到 2.0 cm,边跨钢梁扭转现象不明显。值得注意的是,相比方案 1 与方案 2,方案 3 推迟了君山桥塔区 STC 参与受力的时间,有效降低了 STC 拉应力,上游最大值为 2.746 MPa,下游最大值仅为 1.537 MPa。

3.1.2 改良方案

将君山桥塔区域作为后浇段虽然有效降低了该区域成桥拉应力,但分幅浇筑时,上游 STC 先形成强度,与组合结构协同受力,下游 STC 湿重作用于桥面后,上、下游因此而存在较大的应力差。现场如果能突破施工设备最大单次浇筑能力的限制,实现该区域上、下游同步浇筑(方案 4),如图 7 所示 11 号块,就能有效避免上、下游 STC 应力大、差值大的问题。若现场施工能力无法满足该区域一次浇筑的要求,也可以考虑将该后浇段横桥向分两块完成,即缩小后浇段单次浇筑规模(方案 5),如图 7 所示[11]、[12]号块。

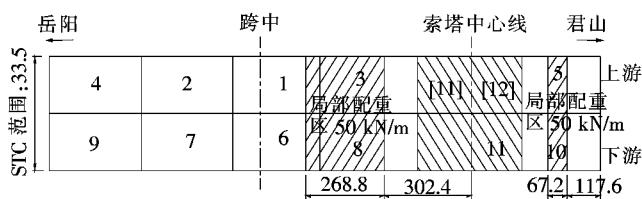


图 7 STC 分块及浇筑顺序(单位:m)

图 8、9 反映了施工方案 4、5 下加劲梁上下游的挠度差和 STC 铺装层的轴向应力。

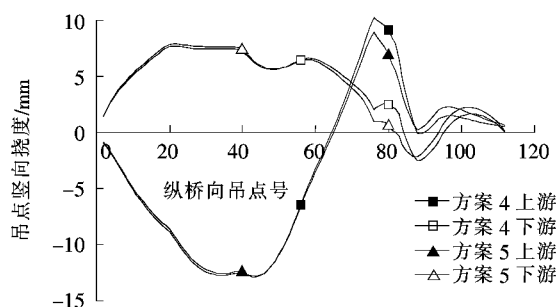


图 8 上、下游各吊点挠度值(改良方案)

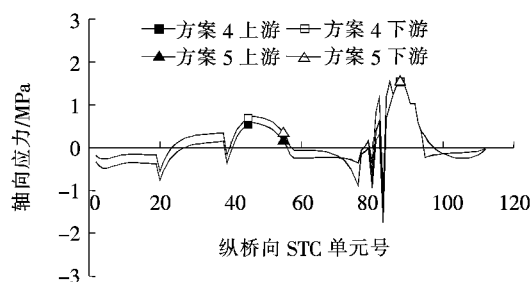


图 9 上、下游 STC 轴向应力值(改良方案)

由图 8、9 可知:① 方案 4 不但有效降低了该区域 STC 的最大拉应力值,仅为 1.542 MPa,也成功消除了上、下游 STC 应力差;② 方案 5 结果与方案 4 相当。

通过方案 1~5 的比较可以得到无配重浇筑方案的推广性结论:一般区域可按照从跨中往两岸的顺序,上、下游分幅、分块浇筑;君山桥塔区域必须作为后浇段,且要求上、下游同步浇筑,现场可根据最大单次浇筑能力设置后浇段规模,或将后浇段适当进行横向分块。

3.2 配重浇筑

无配重施工决定了钢桁梁线形将随着 STC 荷载的增加而不断变化,因此早强 STC 的刚度无法避免参与施工作用。如果浇筑 STC 前通过配重使钢桁梁提前接近成桥线形,则可从另一个角度降低分幅、分块浇筑 STC 对成桥状态的影响。该节分全桥区域的部分配重(方案 6)、局部区域的合理配重(方案 7)、全桥区

域全配重(方案 8)3 种方案进行计算分析。

3.2.1 方案 6:全桥区域部分配重

方案 6 为全桥钢桥面板上预加载 STC 层重量(STC 自重),然后在 STC 分块浇筑过程中,通过等代替换的方式,随着 STC 湿重的施加而逐步卸载对应配重,使 STC 施工过程中钢桁梁线形始终保持不变,避免形成强度的 STC 参与受力。

基于无配重浇筑施工计算结果,合理设置后浇段可以有效减小君山桥塔区域 STC 成桥内力,因此,方案 6 以方案 3 浇筑次序为基础分析成桥状态。

3.2.2 方案 7:局部区域合理配重

基于无配重浇筑施工分析结果,可以发现不配重条件下无论采取何种浇筑顺序,对一般区域 STC 成桥内力影响不大,该项目只需针对君山桥塔区域采取相关浇筑措施,避免成桥大应力即可。因此,综合上述各方案分析成果,方案 7 仅对局部区域合理配重,即先不配重浇筑一般区域 STC,再对恰当位置进行适量配重,完成君山桥塔区域 STC 浇筑,以降低其成桥拉应力值。经过一系列方案研究,选择图 7 所示区域进行线荷载配重,重量为 50 kN/m。

3.2.3 方案 8:全桥区域全配重

方案 8 将各梁段上对应的二期恒载重量作为等效荷载进行桥面预压,使 STC 在成桥线形下完成替换荷载浇筑,施工全过程钢桁梁呈设计成桥线形且保持不变,形成强度的 STC 不参与组合桥面结构的受力,此方案也避免了由不同浇筑顺序带来的影响。

3.2.4 结果分析

方案 6~8 上、下游各吊点挠度值如图 10 所示,STC 轴向应力值如图 11 所示。

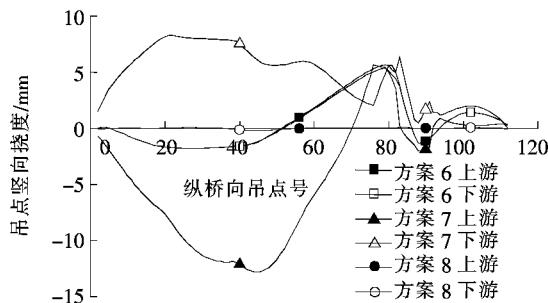


图 10 上、下游各吊点挠度值

由图 10、11 可知:

(1) 方案 6:当钢桥面板预加载 STC 层重量进行荷载替换浇筑施工时,相比设计成桥状态,全桥钢梁已无扭转现象,绝对高程最大差值仅为 5.6 mm,上、下游

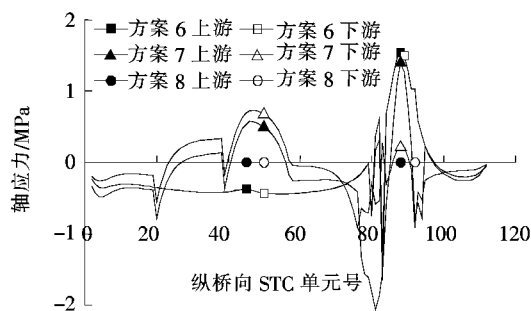


图11 上、下游STC轴向应力值

STC成桥拉应力基本相等,君山桥塔区域最大值为1.539 MPa。

(2) 方案7:相比设计成桥状态,方案7主跨钢梁上、下游存在2.0 cm高差,全桥STC拉应力处于较小状态,君山桥塔区域最大值仅为1.398 MPa。相比方案6全桥区域部分配重方案,两者最终成桥状态差别不大,但配重量由9 520 t降至1 680 t,配重范围从1 933.6 m减少至336 m,大量节约了配重成本。

(3) 方案8:该方案上、下游成桥线形逼近设计状态,钢梁不存在扭转现象,亦有效避免了STC成桥内力的存在。然而,洞庭湖大桥二期恒载达到18 000 t以上,通过预压实现成桥线形所需配重过大,可操作性、经济性、工期都面临巨大的挑战。

4 分析与结论

对STC铺装体系不同浇筑方案的有限元模拟表明:采用不同浇筑顺序、分块方式和配重方案对钢桁梁成桥线形有一定影响,对STC成桥内力状态影响较大。

(1) 对于无配重浇筑方案,配重物资、人力、工期等各类成本小,但分幅、分块现浇STC必须选择合理顺序,设置后浇段并控制规模,将STC成桥内力控制在要求范围内,但钢梁成桥时无法避免扭转,上、下游高差约2 cm。

(2) 对于部分配重方案,若在全桥桥面预加载STC层重量,可有效避免钢梁扭转,上、下游STC拉应力很小且基本相等。若仅在君山桥塔区域分幅浇筑前进行局部配重,主跨加劲梁存在扭转,STC最大拉应力仅1.398 MPa。两种方案对最终成桥状态的影响

差别不大,但局部区域配重方案在成本上有明显优势。

(3) 对于二期恒载全配重方案,最终成桥线形逼近设计状态,不存在钢梁扭转现象,亦不影响STC成桥内力。然而配重量达到18 000 t以上,提前通过配重实现成桥线形的可操作性、经济性较差。

综上所述,洞庭湖大桥STC现场浇筑时,推荐无配重浇筑方案,将君山桥塔区STC留至最后一次浇筑完成,提前分块时要注意控制好该后浇段规模;亦可按照局部区域合理配重浇筑方案,先完成一般区域的浇筑,再对要求位置进行合理配重,最后完成君山桥塔区域的分幅浇筑。

参考文献:

- [1] 欧键灵,曹志光,宁平华.广东清远北江四桥工程主桥超高性能混凝土—钢组合桥面板结构设计[J].城市道桥与防洪,2016(8).
- [2] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等.正交异性钢板—薄层RPC组合桥面基本性能研究[J].中国公路学报,2012(2).
- [3] Murakoshi J, Yanadori N, Ui T, et al. Research on Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement on Orthotropic Steel Deck[C].Proceeding of the 2nd International Orthotropic Bridge Conference, ASCE, 2008:359—371.
- [4] DB43/T 1173—2016 钢—超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范[S].
- [5] Rasmus W, John F O, Stan H, et al. Analysis of an Orthotropic Deck Stiffened with A Cement—Based Overlay [J].Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2007, 12(3): 350—363.
- [6] 李嘉,冯小田,邵旭东,等.STC钢桥面铺装新体系的力学计算与实桥试验对比分析[J].中国公路学报,2014(3).
- [7] 李嘉,王懿,李洪,等.超高性能轻型组合桥面铺装体系基本力学性能研究[J].公路交通科技,2015(7).
- [8] 刘榕,邵旭东,张欣,等.自锚式悬索桥钢—STC轻型组合桥面结构理论研究[C].桥梁新技术交流会论文集,2013.
- [9] Zhu L D, Xiang H F, Xu Y L. Triple—Girder Model for Modal Analysis of Cable—Stayed Bridges with Warping Effect[J].Engineering Structures, 2000, 22(10): 1 313—1 323.
- [10] 王磊.板桁加劲梁抗扭惯性矩的计算方法[D].西南交通大学硕士学位论文,2017.
- [11] 张林钊.钢—混凝土组合箱梁桥面板的组合施工技术研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2015.