

大跨径悬索桥超高性能轻型组合桥面施工控制研究

张晋瑞¹, 陈国平², 胡建华³, 崔剑峰¹

(1.湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410008; 2.大岳高速洞庭湖大桥建设开发有限公司;
3.湖南省交通水利建设集团有限公司)

摘要:洞庭湖大桥为(1 480+453.6) m 双塔双跨板桁结合型钢桁梁悬索桥,该桥首次在大跨径悬索桥中采用了钢—超高韧性混凝土(STC)轻型组合桥面。STC层参与钢桁梁整体受力,为控制 STC 施工次应力不超过设计要求的 0.5 MPa,施工中需采取压重措施,经压重方案比选,浇筑过程中采取了部分压重方案,与全压重相比,大大简化了压重工序,节约压重荷载 6 600 t。悬索桥为重量敏感性结构,且 STC 局部受力性能受厚度和钢筋保护层厚度影响很大,实桥钢桥面存在的较大局部变形,成为控制 STC 施工精度的难点。该文分析了钢桥面产生变形的因素,发现钢桁梁制造误差对平整度影响最大。针对该问题,施工中提出了“曲线调坡”法和“直线调坡”法,通过调整整平机轨道和整平板,使得 STC 厚度满足控制要求。两者的区别仅在于整平板的线形是曲线还是直线,“曲线调坡”法拥有更高的调整精确度,“直线调坡”法拥有更便捷的操作性能,经比选后选用“直线调坡”法,应用中取得了良好的效果。

关键词:悬索桥;钢—超高韧性混凝土轻型组合桥面;压重;平整度;调坡

传统钢桁加劲梁悬索桥一般采用非成型钢桥面,随着悬索桥跨度的增大,恒载效应显著提高,为有效地减轻桥梁恒载,减少钢材用量,同时提高结构自身的抗弯、抗扭刚度,将正交异性钢桥面板与桁架直接结合得到了板桁结合型加劲梁。为综合解决正交异性钢桥面疲劳开裂和铺装易损坏的问题,提出了超高性能轻型组合桥面,并在 300 m 跨径的株洲枫溪大桥(自锚式悬索桥)上得到了应用。

岳阳洞庭湖大桥在国内外首次采用组合桥面板桁结合型加劲梁,鉴于其复杂性,对其施工控制提出了更高的要求。与传统分离式桥面系相比,结合型桥面系参与整体受力,后浇筑的 STC(超高韧性混凝土)层又参与组合桥面的受力,三者相互影响,为使所有结构受力合理,特别是不能使 STC 施工过程中产生较大的拉应力,需制定合理的施工工序和控制措施;大跨径悬索桥为重量敏感型结构,为控制现浇 STC 和铺装层重量,同时考虑到 STC 层总厚度相对于一般结构较薄,STC 层浇筑厚度不足将导致漏筋,STC 浇筑过厚又会使得钢筋相对位置发生较大变化,为保证 STC 性能满足设

计要求,DB43/T 1173—2016《钢—超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范》对其施工厚度和平整度提出了很高的要求,而钢桥面板不可避免地会产生变形,了解变形产生的原因和影响大小,并针对性地采取措施,对控制 STC 的浇筑厚度至关重要。

1 工程概况

1.1 项目简介

洞庭湖大桥主桥采用双塔双跨板桁结合型钢桁梁悬索桥,加劲梁跨径组成为(1 480+453.6) m,主梁全长 1 933.6 m。桥面系宽 33.5 m,钢桁加劲梁全宽 35.4 m,梁高 9 m,节间长度 8.4 m,标准节段长度 16.8 m,重量约 320 t,全桥共有 115 个节段。索塔采用门式框架塔,岳阳侧高 203.088 m,君山侧高 206.088 m;索塔单塔柱下设 40 根 D300 cm 桩基础。两岸锚碇均为地连墙基础重力式锚。岳阳侧索塔处及君山侧索塔处梁端设竖向支座和横向抗风支座;君山侧索塔处加劲梁设横向抗风支座。洞庭湖大桥总体布置见图 1,加劲梁标准横断面见图 2。

收稿日期:2019-08-07

基金项目:交通运输部建设科技项目(编号:2013318798320);湖南省交通科技项目(编号:201219)

作者简介:张晋瑞,男,硕士,高级工程师.E-mail:154319549@qq.com

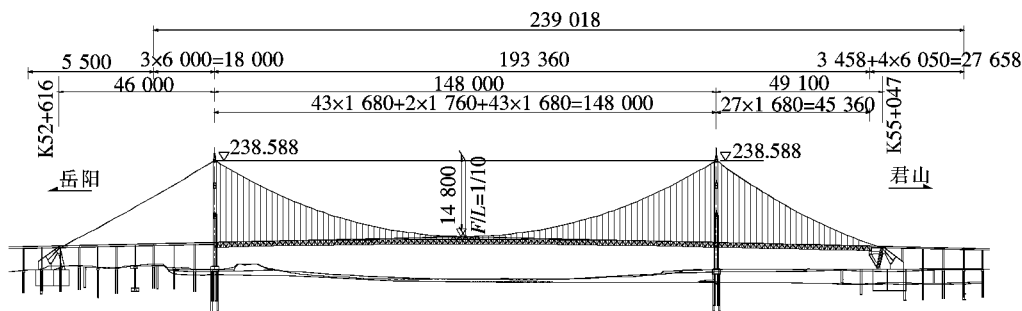


图 1 洞庭湖大桥总体布置示意(除标高单位为 m 外,其余单位:cm)

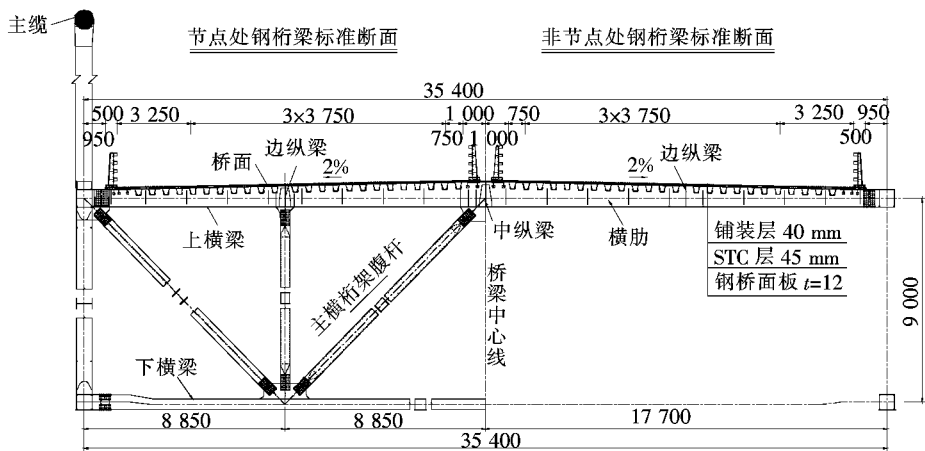


图 2 加劲梁标准横断面(单位:mm)

1.2 桥面系构造及施工方案

洞庭湖大桥桥面构造为:12 mm 钢桥面板+45 mm STC 层+40 mm SMA13 沥青层,即将常规的正交异性钢桥面系转化为钢—超高韧性混凝土轻型组合桥面系。钢桥面板上焊接 $\phi 13\text{ mm}\times 35\text{ mm}$ 焊钉,焊钉标准间距 150 mm;STC 结构层里布设 $\phi 10@37.5\text{ mm}$ HRB400 钢筋网,横向钢筋须布置在上层,钢桥面上现浇 45 mm STC 层。为改善路面适用性能、减少高强度 STC 对车轮的磨损,提供良好的行车舒适性,在 STC 层上设置 40 mm 厚 SMA—13 沥青铺装作为磨损层。沥青铺装前需对 STC 顶板进行抛丸糙化处理,并涂刷环氧树脂黏层。桥面系结构见图 3。

2 STC 施工应力控制

2.1 压重影响

大跨径悬索桥结构体系柔度大,荷载作用下变形大,洞庭湖大桥钢桁梁施工过程中竖向变形如图 4 所示。钢桁梁吊装完毕后主跨跨中上挠 4.3 m,且在君山索塔位置钢梁线形发生转折。假设 STC 在初凝前

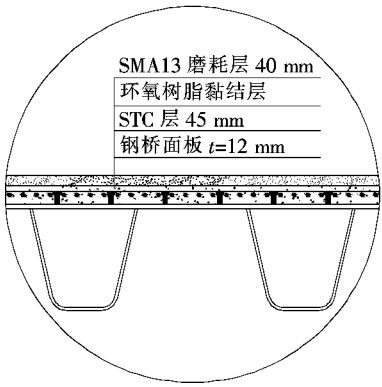


图 3 钢—STC 轻型组合桥面构造

能一次性浇筑完成,在不压重的情况下,STC 的施工次应力如图 5 所示,君山索塔附近将产生最大约 2 MPa 的拉应力。该桥桥面系为组合结构,STC 层参与整体受力,运营状态在最不利工况(恒载+温度+横向极限风荷载)作用下,STC 应力在君山索塔附近将比较高。为增加 STC 在运营阶段的应力储备,应尽量降低施工阶段的损耗。综合考虑后,在设计文件中规定了由施工引起的 STC 次拉应力不超过 0.5 MPa。

因此,为减小 STC 施工次应力,有必要在施工中

采取压重措施,以减小钢桁梁的变形。

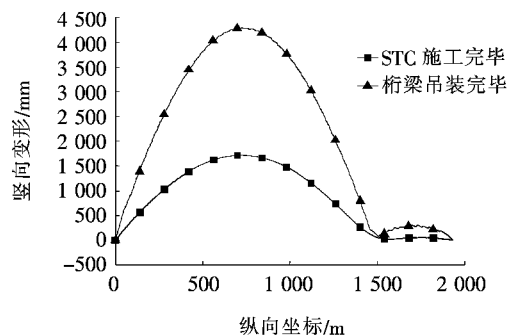


图 4 钢桁梁施工过程中竖向变形

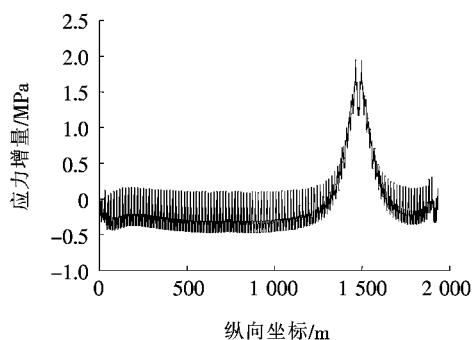


图 5 STC 不压重一次浇筑应力增量

2.2 施工分块及压重优化

洞庭湖大桥首次在大跨径悬索桥上采用钢-STC 组合结构。STC 层的施工面积约 6.5 万 m^2 , 考虑施工工艺、设备能力, STC 分块浇筑, 单块浇筑面积约 6000 m^2 , 横向接缝应设置在桁架节间跨中位置, 纵向接缝设置在桥梁中心线上, 接缝处设置 S 形钢板加强连接。为满足工期要求, STC 采用流水作业方式施工, 流水施工应按每 4 d 浇筑 1 段考虑, 浇筑采用错开、间断方式进行, 这样可以使工期得到节约。STC 分为 12 段进行施工, 最终采用的分块方式见图 6, 图中数字序号即为摊铺顺序号。STC 施工应在全桥钢梁刚结后进行, 其施工工序为: 焊接 S 形钢板→钢板补焊栓钉→铺设钢筋网→浇筑 STC 层→保湿养护→高温蒸气养护。全桥 STC 施工完成后, 在 STC 层表面抛丸糙化处理, 涂刷环氧树脂黏结层, 铺装层施工。

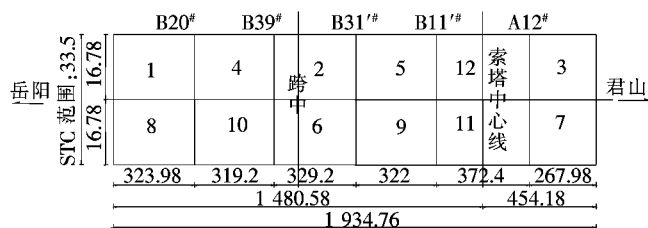


图 6 STC 施工分块示意(单位:m)

按图 6 所示 STC 施工分块及顺序,对可能的几种压重方案进行模拟分析,结果如图 7 所示。

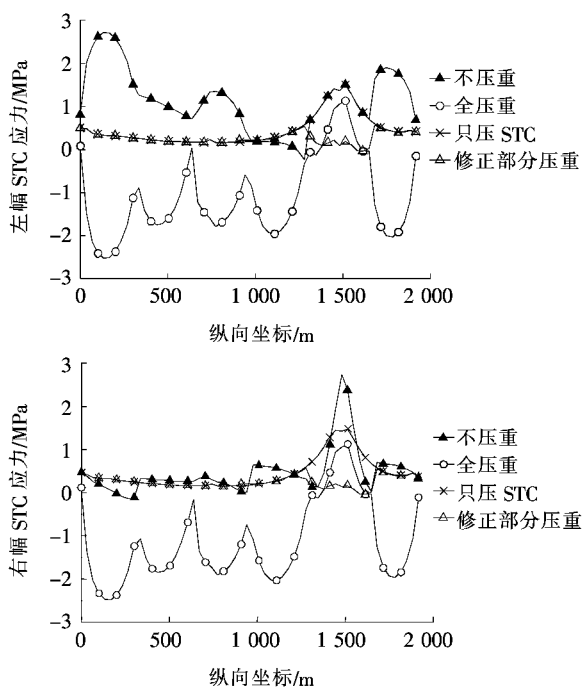


图 7 不同压重方案 STC 应力比较(拉应力为正)

从图 7 可以看出:

- (1) 如果不压重,STC 将普遍产生拉应力,最大将达 3 MPa,且 STC 受力不均匀。

(2) 全压重方案可以使除 11[#]、12[#] 块以外的区域 STC 成桥后保持压应力,但君山索塔附近的 11[#]、12[#] 区域仍然存在拉应力,最大超过 1 MPa,该方案所需压重荷载大,施工中需多次移动压重(STC 施工前撤除,达强度后补压铺装荷载),工期要求长,且由于该桥不能上下游同时浇筑,单幅 STC 浇筑过程中其自重与对应幅的压重不平衡,会产生额外的扭转次应力。

(3) 只压 STC 自重的方案,除 11#、12# 块以外的区域 STC 成桥后存在不超过 0.5 MPa 的拉应力,满足设计要求,但 11#、12# 区域拉应力最大约 1.5 MPa,不满足要求,为解决该问题,提出了修正的部分压重方案,即在 11#、12# 块施工时采取额外的压重措施。

(4) 修正部分压重方案能很好地满足设计要求,控制 STC 施工拉应力不超过 0.5 MPa,且大大简化了压重工序,该方案合计压重 9 050 t,与全压重方案需压重 15 650 t 比,节约压重荷载 6 600 t。

2.3 实桥控制措施

修正部分压重的具体方案为：

- (1) 一般区域(君山索塔两侧共计约 400 m 以外)

区域)通过在全桥钢桥面板上预加载 STC 层重量,然后在 STC 分块浇筑过程中,通过等代替换的方式,逐步卸载,使 STC 施工过程中钢桁梁线形保持不变,压重布置见图 8。

(2) 特殊区域(君山索塔两侧共计约 400 m 以内区域)因全桥 STC 重量和二期荷载在该范围内引起较大的变形,除预加载 STC 层重量外,还需通过在中边跨已浇筑的 STC 层上施加额外压重,压重布置见图 9。

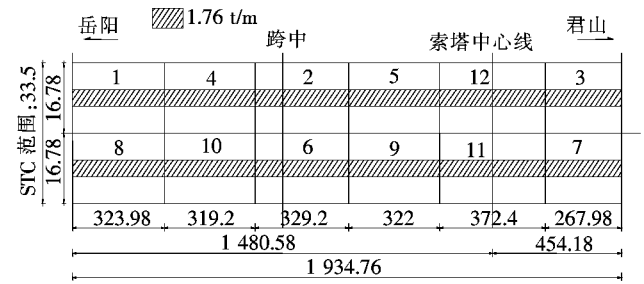


图 8 一般区域 STC 压重总体布置示意(单位:m)

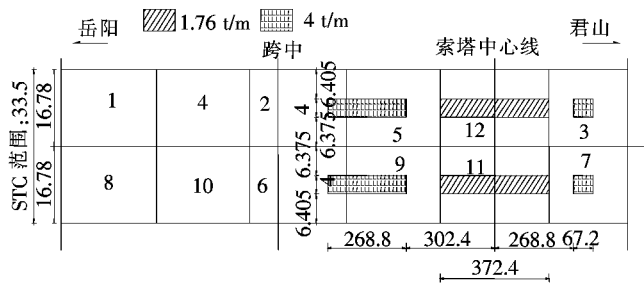


图 9 特殊区域 STC 压重总体布置示意(单位:m)

实桥压重见图 10,STC 施工应注意:

(1) 压重荷载应布置于 STC 重心,以免引起施工中钢桁梁扭转。

(2) STC 终凝前应防止桥面施工扰动。

(3) 11# 和 12# 块区域 STC 全部蒸养完成后才能撤除特殊区域额外压重。

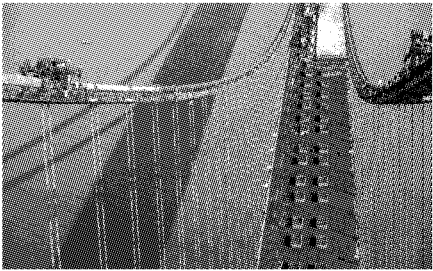


图 10 实桥水箱压重

3 钢桥面板局部变形对 STC 施工的影响及控制措施

3.1 局部变形的影响

洞庭桥钢桥面宽 33.5 m,横向跨度大,在加工制造、运输及安装阶段皆存在变形,多种因素的累积将引起较大的变形。局部变形的存在,一方面使 STC 浇筑厚度不均匀,如最小厚度按不低于设计值控制将引起重量增加,从而对主桥构件产生不利影响,重量增加对主桥的影响结果见表 1。

从表 1 可以看出:重量增加太多将引起索夹抗滑安全系数不足,主梁变形过大;另一方面使钢筋保护层

表 1 STC 厚度增加对主桥结构的影响

厚度	加劲梁 重量变 化/t	索塔应力/MPa		主缆 安全 系数	吊索		成桥位移/mm		
		短期组合 拉应力	标准组合 压应力		安全 系数	索夹 抗滑	岳阳索 塔纵向	君山索 塔纵向	加劲梁 竖向
理论厚度	0	0.66	-18.39	2.32	4.04	3.10	0	0	0
厚度增加 10%(4.5 mm)	745	-0.01	-0.06	2.30	4.01	2.99	0.019	-0.017	-0.167
规范厚度增加上限(3 mm)	500	-0.01	-0.04	2.31	4.02	3.04	0.013	-0.011	-0.112

厚度大小不一,保护层厚度太小不能满足耐久性要求,保护层厚度太大钢筋又不能充分发挥作用,降低了 STC 局部受力性能。

为了控制 STC 浇筑重量和质量,以满足整体和局部受力性能,对 STC 施工提出了以下要求:

(1) STC 平均厚度超方控制在 3 mm 以内,局部

最小厚度不小于 40 mm。

(2) 保证钢筋网顶面的净保护层在 10~15 mm 范围内。

为了解各种因素对桥面变形的影响大小,并在施工过程中对主要变形采取针对性的措施,下面对可能存在的影响因素进行分析并提出应对措施。

3.2 引起变形的因素

3.2.1 加工工艺误差

桥面板块制作精度是板桁组合结构叠合精度的关键,是影响节段制作精度的因素之一。根据钢板轧制

能力和制作需要,对桥面板和横梁进行分块制作,具体分块方案见图 11。工厂高程测点在半幅桥面上仅有 5 个控制点。

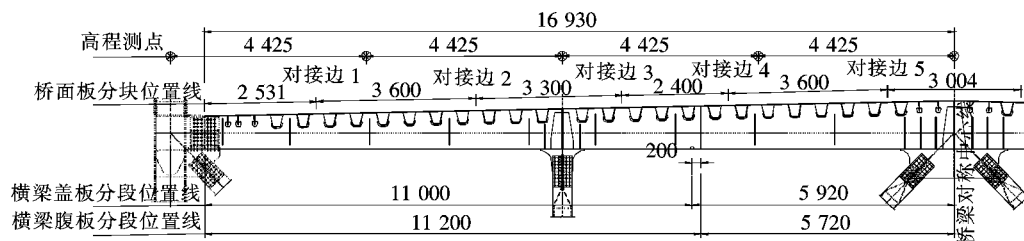


图 11 桥面板制造分块示意(单位:mm)

桥面板制作精度要求中,控制桥面板高差主要是桥面各点标高和桥面板平面度两项。桥面各点标高: ± 4.0 mm。桥面板块平面度:纵向,横肋间距/500 且 ≤ 3.0 mm;横向,纵肋间距/300 且 ≤ 1.5 mm。按照上述要求上限值计算的加工误差如下:

(1) 桥面设计横坡为 2%,半幅横向距离为 16 930 mm,因标高最大偏差 ± 4 mm 引起的横坡误差为 $\pm 0.05\%$ 。

(2) 桥面板平面度偏差的影响主要体现在钢板对接焊缝处,纵肋间距为 600 mm,按允许最大偏差 1.5 mm 计算,如果两钢板对接时存在折角,折角最大将达到 $\arctg(1.5/300)=0.286^\circ$,从而导致最宽 3 600 mm 的板两侧高程产生 18 mm 的误差。

综上所述,由于工厂高程控制点半幅桥面仅选取了有限的 5 个点,且这些位置受桁梁杆件的约束作用强,不易产生较大的变形,使得各点标高偏差对桥面板横向各点标高影响不大;而桥面板组装时非桁架杆件连接处竖向约束小,对于较宽的板即使很小的焊接转角变形也能引起不容忽视的桥面标高误差,而仅通过平面度偏差的限制无法避免这些误差的产生。

3.2.2 支撑条件

钢桁梁在工厂组拼胎架、运梁栈桥及起吊安装后,所受支撑条件不同,钢桥面板的变形也不同。按组拼胎架的测量结果控制的桥面高程,现场安装后会发生高程变化,支撑条件对桥面变形的影响见图 12。

从图 12 可以看出:当在组拼胎架上支撑较多时,桥面板变形较小,当吊装就位仅由吊索支撑时,变形较大,两者在横桥向跨中位置最大相差约 3 mm。

3.2.3 测量环境温度

桥面标高测量应选取气温相对稳定,且不受阳光

直晒的时段进行。但钢桁梁制造安装时间长,跨越不同季节,且制造和安装地点相距甚远,气候条件不同,难以采用统一的测量温度。测量温度对桥面板标高的影响结果见图 13。

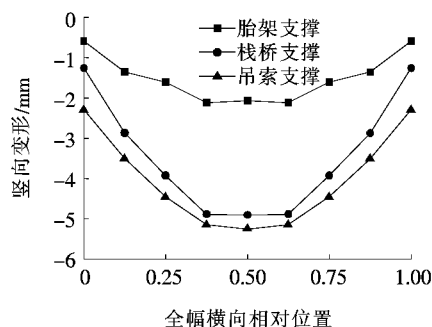


图 12 支撑条件对桥面变形的影响

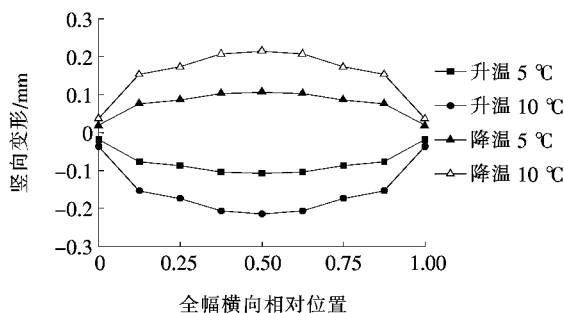


图 13 测量环境温度对桥面变形的影响

从图 13 可以看出:均匀温度变化对桥面板变形影响很小,可忽略不计。

3.3 桥位实测变形

钢桁梁合龙后,STC 施工前,通过高程测量掌握 STC 浇筑前钢桥面的实际高程、纵横坡等情况,为后续 STC 浇筑的厚度、重量及标高等各项指标控制提供依据。钢桥面测点纵桥向布置在横梁及横隔板对应的

位置,横桥向以横向跨中为基准线,均匀布置。标准梁 横断面的测点分布见图 14。

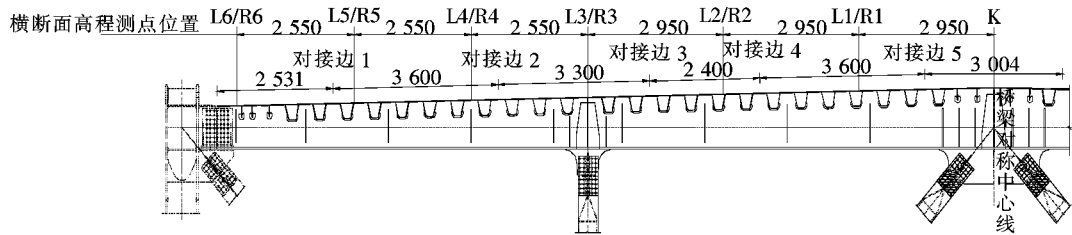


图 14 桥面横断面高程测点布置(单位:mm)

以 B3 梁段为例,桥面相对变形数据见图 15,图中以 K 点和 L6/R6 点的连线作为实测横坡,其余点相对该连线的高差作为相对变形,负数表示桥面板下凹。

从图 15 可以看出:主要由于上一节所述加工工艺误差的存在,使得桥面板整体呈现折线形,整体平面度较差,且一个梁段内纵向不同位置变形都不一致。

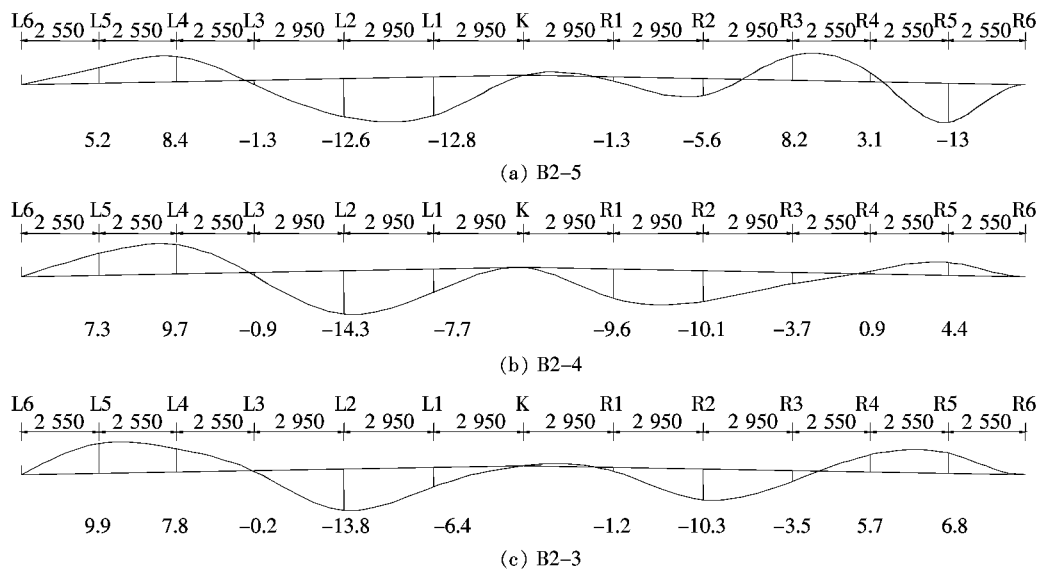


图 15 桥面实测相对变形(单位:mm)

3.4 施工解决措施

3.4.1 基本思路

钢-STC 轻型组合结构桥面是钢桁梁的主体结构,STC 的最小厚度和钢筋及栓钉等的保护层厚度是组合结构超高力学性能和耐久性能的重要保证。同时,悬索桥为重量敏感结构,STC 厚度的变化将导致桥面恒载发生变化,对主桥受力产生影响。但由于桥面平整度较差,对 STC 浇筑厚度、重量及标高等各项指标控制提出了挑战。为解决该难点,针对洞庭湖大桥 STC 施工采用的整平机,提出了“曲线调坡”法和“直线调坡”法,整平机及轨道构造见图 16,轨道纵向 6 m 一道,连接位置高程可调,整平板横向分成多块,每块高程可调。

“曲线调坡”是通过各梁段的测量结果,利用梁段的直线拟合纵坡调节轨道线形,利用全部横断面的平

均多项式拟合横坡调节每块整平板的横坡,实现各个断面的线形基本与桥面线形一致,从而确保桥面各点的 STC 厚度满足要求。“直线调坡”与“曲线调坡”的区别仅在于横向不分段调整整平板坡度,其取值为一条直线。下文以一次浇筑的 B3~B20 梁段“曲线调坡”为例说明调坡过程。

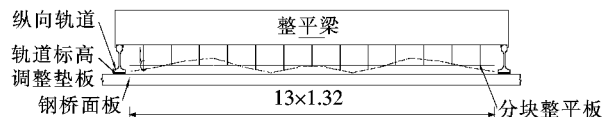


图 16 整平机及轨道构造示意(单位:m)

3.4.2 调坡过程

调坡过程如图 17 所示。

具体流程为:① 横坡拟合。对每个测量横断面都进行横坡线性拟合;② 高差的多项式拟合。高差=横

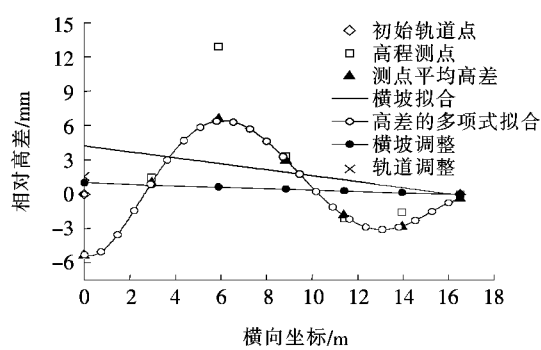


图 17 调坡流程示意

坡拟合后标高—桥面测量标高,采用横向各个测量位置纵向整个浇筑段的高差平均值进行横向多项式拟合,相当于一次浇筑整平板标高采用统一值,施工过程中不再调整;③ 横坡调整。对高差进行多项式调整,如测点负高差仍大于3 mm,对其所在横断面再次进

行直线插值调整;④ 轨道纵坡调整。单个节段内纵坡分两段进行直线拟合,并根据拟合后的轨道标高现场调整轨道安装高程。

STC 浇筑厚度按 45 mm 控制,B3~B20 梁段经调整后,STC 最小厚度为 37.8 mm,最大厚度为 60.5 mm;超过 50 mm 的点数为 64 个,占总数的 8.7%,小于 40 mm 的点数为 6 个,占总数的 0.8%;STC 厚度平均值为 45.7,理论超方 1.6%。

3.4.3 调坡方法对比

直线调坡与曲线调坡类似,区别仅在于不进行高差的多项式拟合,即横向不分段调整整平板坡度,其取值为一条直线。两种方法的优缺点对比见表 2,综合考虑后,洞庭湖大桥采用了“直线调坡”法,STC 最小厚度原则不低于 40 mm,钢筋保护层厚度为 10~15 mm,STC 实际超方量为 4.7%。

表 2 STC 浇筑调坡方法比较

调坡方法	STC 厚度	STC 表面平整度	施工难度	STC 用量	SMA 层厚
曲线调坡	最大 60.5 mm,最小 37.8 mm,平均 45.7 mm	表面平整度较差	难	超方约 1.6%	层厚分布不均
直线调坡	最大 70.5 mm,最小 38.5 mm,平均 47.0 mm	表面平整度较好	易	超方约 4.4%	层厚分布均匀

4 结论

洞庭湖大桥首次在大跨径悬索桥上采用钢—STC 组合结构,由于 STC 参与整体受力,且其厚度控制严格,对 STC 施工提出了更高的要求。通过该文的分析,可以得出以下结论:

(1) 大跨径悬索桥桥面系采用钢—STC 组合结构时,施工影响因素多,为减小 STC 施工次应力的产生,有必要进行施工配重。控制 STC 浇筑厚度的钢桥面板平整度误差主要由加工制造误差引起,目前的偏差指标不足以限制较大误差的产生。

(2) 针对钢桥面平整度问题,结合施工设备的可调性,STC 施工中提出了“曲线调坡”和“直线调坡”法,“曲线调坡”拥有更高的精度,“直线调坡”法具有更好的操作性,综合考虑,洞庭湖大桥采用了“直线调坡”法,有效控制了 STC 厚度和超方量,达到了较好效果。

(3) 该文的研究成果适用于所有桥梁。只是对于悬索桥这种主要由重力刚度提供整体刚度的桥梁,其恒载重量对结构影响更大,因此按该文介绍的方法对桥面系施工重量进行精确控制意义更大。

参考文献:

[1] 中交第二公路工程局有限公司.(公路桥梁施工系列手册)悬索桥[M].北京:人民交通出版社,2014.

[2] 小西一郎.钢桥(第三分册)[M].朱立冬,应达之,许克宾,等,译.北京:人民铁道出版社,1980.

[3] 侯满,刘波,彭运动.贵瓮高速公路清水河大桥钢桁梁设计关键技术[J].公路交通科技(应用技术版),2017(3).

[4] 吴国光.岳阳洞庭湖大桥关键技术研究及对策[J].中外公路,2013(6).

[5] 彭旺虎,邵旭东,胡建华.大跨悬索桥桁架加劲梁的选型和设计[J].公路交通科技,2009(3).

[6] 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).

[7] 张欣,刘榕.株洲市枫溪大桥的设计与关键技术研究[J].中外公路,2017(2).

[8] 张晋瑞,李程,胡建华,等.岳阳洞庭湖大桥主桥结构设计与整体分析[J].中外公路,2017(6).

[9] 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].

[10] 湖南省交通规划勘察设计院.岳阳洞庭湖大桥桥面系施工图变更设计[Z],2016.

[11] 中铁宝桥集团有限公司.大岳高速洞庭湖大桥钢桁梁制造规则[Z],2016.