

南益高速公路南洞庭(胜天)大桥设计构思与创新技术

朱朝银, 张贵明, 徐自然

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 南洞庭(胜天)大桥为南益高速公路上的一座特大型桥梁。该文主要介绍大桥总体设计构思和 UHPC 轻型组合桥面板方案比选, 进一步通过全桥整体模型计算、节段模型分析以及桥面板足尺模型试验对华夫板轻型组合桥面结构安全性能进行验证, 分析结果表明: UHPC 轻型组合梁在构造上满足结构受力要求, 在经济上也更优于普通混凝土组合梁。UHPC 轻型组合梁方案为未来斜拉桥的设计提供了一种新的主梁结构形式。

关键词: 斜拉桥; UHPC 轻型组合梁; 华夫板; 节段模型分析; 足尺模型试验

1 前言

南洞庭(胜天)大桥是湖南省南县至益阳高速公路的控制性工程, 大桥位于 S204 茅草街大桥下游 3.1 km, 处于澧水、沱江、藕池河西支、南茅运河等多水汇流区, 水流复杂, 航运繁忙。经防洪、通航等多部门论证, 在该桥位处拟建桥梁的跨径不宜小于 450 m。

适用于主跨约 450 m 的桥型有拱桥、悬索桥和斜拉桥等。大跨度拱桥的基础通常承受着巨大的水平推力, 若在洞庭湖软基地带修建抗推力的大型下部基础, 则基础造价高、桥梁整体经济效应差; 而地锚式悬索桥需设置大体积锚碇, 锚碇位于水域中, 阻水高、施工难度大; 自锚式悬索桥虽然无需大型锚碇, 但该桥主跨跨径过大, 主梁受力复杂, 经济效应差; 相比而言, 该桥位处修建斜拉桥具有布置灵活、适应性好、施工技术成熟、造价相对较低的优势, 是较为合理的桥型。经比

选, 大桥主桥拟采用跨径布置为 $(181.95 + 450 + 181.95)$ m 的双塔双索面斜拉桥, 其桥型总体布置见图 1。

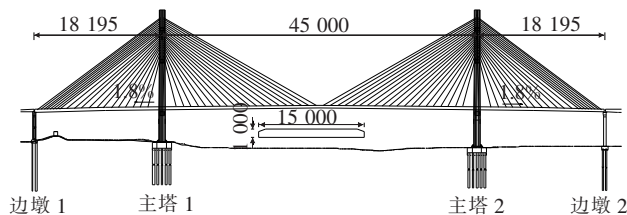


图 1 桥型总体布置图(单位: cm)

2 设计构思

根据材料不同, 斜拉桥主梁主要可分为混凝土梁、钢梁以及钢—混凝土组合梁等。Svensson 针对 200~1 000 m 跨径斜拉桥经济性的研究表明: 混凝土斜拉桥适用的经济跨径为 200~400 m, 钢—混凝土组合梁

[8] 蔡唐涛. 下穿隧道对既有桥梁结构影响的数值分析[J]. 路基工程, 2016(1).

[9] 彭坤, 陶连金, 高玉春, 等. 盾构隧道下穿桥梁引起桩基变位的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012(3).

[10] 陈发东. 盾构隧道施工对临近桥梁桩基及周围土体影响的模拟研究[J]. 中外公路, 2018(6).

[11] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.

[12] 元乐, 宋修广, 张宏博, 等. 管桩水平承载特性室内模型

试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017(10).

[13] 朱合华, 徐前卫, 傅德明, 等. 地层适应性盾构模型试验设计方法初探[J]. 岩土力学, 2006(9).

[14] 李永志. 桥梁结构缩尺模型的设计制作与试验[J]. 建材技术与应用, 2007(6).

[15] 李勇, 闫维明, 刘晶波, 等. 桥梁结构缩尺模型模拟地震振动台试验研究进展[J]. 工程抗震与加固改造, 2013(5).

[16] 柳春光, 孙国帅, 韩亮, 等. 桥梁桩墩结构振动台模型试验研究及其进展[J]. 中外公路, 2012(1).

斜拉桥则为 400~600 m,钢主梁斜拉桥用于跨径 600 m 以上斜拉桥较为经济。此外,混凝土梁自重大、收缩徐变效应明显、受力特性复杂、运营期间病害多;钢主梁桥面沥青混凝土铺装层价格昂贵、寿命短,需频繁更换,正交异性钢桥面板在反复车载作用下易出现疲劳裂纹;钢—混组合梁则能充分利用不同材料的受力性能,具有强度高、刚度大、延性好等优点,为拟建桥梁的优选主梁方案。

钢—混组合梁桥面板可分为普通混凝土桥面板和高性能混凝土桥面板。传统的普通混凝土桥面板在负弯矩区容易开裂,从而导致主梁刚度下降、内部钢筋锈蚀等问题,虽然可以通过配置预应力筋、顶升中间支座、增加配筋率等措施来缓解裂缝的发展,但是这些措

施不仅增大桥梁施工难度,还会因为收缩徐变引起的预应力损失使得结构受力更为复杂,在一定程度上限制了钢—混组合结构的应用。普通混凝土桥面板开裂的本质原因在于混凝土材料的低抗拉强度以及显著的收缩徐变效应。而超高性能混凝土(UHPC)桥面板因具有抗压强度高、抗拉强度大、耐久性能好、蒸气养护后收缩徐变小等特点,改善了普通混凝土材料的诸多力学性能短板。同时,采用 UHPC 材料可减小桥面板厚度,进一步减轻钢—混组合梁自重,更有利于组合梁在大跨度桥梁结构中的应用。基于此,该文以拟建桥梁为项目背景,从主桥整体经济性方面对普通混凝土组合梁和 UHPC 轻型组合梁进行比较,其结果如表 1 所示。

表 1 组合梁方案工程数量及费用比较

方案	塔柱		承台		桩基		桥面板		预应力		斜拉索		建安	维护	全寿命
	数量/ m ³	费用/ 万元	数量/ m ³	费用/ 万元	数量/ m ³	费用/ 万元	数量/ m ³	费用/ 万元	数量/ t	费用/ 万元	数量/ t	费用/ 万元	费/ 万元	费/ 万元	成本/ 万元
普通混凝土组合梁	19 672	9 254	18 708	4 132	35 412	8 927	7 513	2 607	315	363	1 346	5 240	51 614	25 468	77 082
UHPC 轻型组合梁	17 601	8 551	15 150	3 433	28 854	7 848	3 696	6 355	0	0	1 078	4 276	51 414	20 906	72 320
费用增幅/%	-7.6		-16.9		-12.1		143.8		-100		-18.4				

注:钢结构数量相当。

由表 1 可知:UHPC 轻型组合梁由于自重减小,可使下部结构及斜拉索材料减少 10%~20%,虽然两种主梁方案的建安费相当,但 UHPC 轻型组合梁后期维护费用低,故而其全寿命周期成本相比较小,在经济性比选中较有优势。

3 UHPC 轻型组合梁关键技术

3.1 UHPC 物理特性

超高性能混凝土(UHPC)是一种基于最大密实度理论配置的新兴混凝土,其组成材料主要包括:水泥,级配良好的细砂,磨细石英粉,硅灰等矿物掺合料,高效减水剂,微细钢纤维。国内外研究表明:这种混凝土具有较高的抗压强度(140~230 MPa)、可利用的抗拉强度(7~10 MPa)、良好的耐久性能(寿命约为普通混凝土的 4 倍);经高温蒸养后,后期徐变仅为普通混凝土的 20%,后期收缩几乎可以不考虑。

此外,适当掺入钢纤维后,UHPC 立方体抗压强

度、单轴抗压强度均将增大,抗拉强度提高幅度尤为明显,抗拉韧性显著提高。

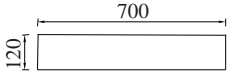
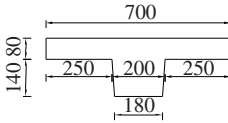
3.2 轻型组合梁构造

合理的构造形式有利于充分发挥材料的高性能特点、提高结构静动力性能。普通混凝土桥面板常采用等厚形式(26~28 cm)。根据 UHCP 材料特性,该文拟定两种 UHPC 轻型桥面板形式,方案 1 为等厚桥面板,其标准厚度为 12.0 cm;方案 2 为带纵横肋桥面板(称为华夫板),其板厚 8 cm、肋高 14 cm、纵肋间距 70 cm。不同结构形式的截面特性对比如表 2 所示。表 2 表明:采用华夫板结构形式可大幅增加桥面板的纵向抗弯刚度,进而有利于提高全桥整体刚度,故下文将以华夫板结构形式的轻型组合梁作为重点研究对象,华夫板桥面布置如图 2 所示。

3.3 轻型组合梁斜拉桥整体计算

采用空间有限元程序 Midas Civil 2015 对华夫板 UHPC 轻型组合梁斜拉桥进行全桥模拟分析,有限元模型中除斜拉索采用只受拉桁架单元模拟外,其余均

表 2 桥面板截面特性对比

项目	示意图(单位:mm)	A/mm^2	I_y/mm^4
方案 1(等厚度板)		84 000	100 800 000
方案 2 (华夫板)		82 600	286 638 267

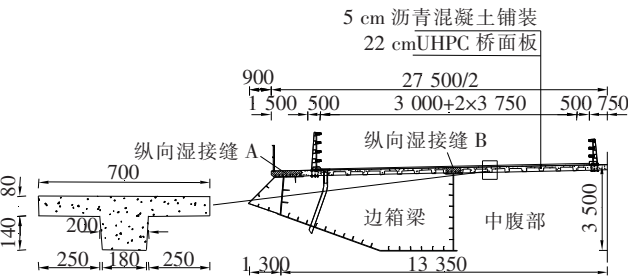


图 2 钢-UHPC 轻型组合桥梁横截面(单位:mm)

采用梁单元模拟。计算荷载主要考虑恒载、汽车、温度、风荷载、制动力及支座沉降等作用。全桥整体计算结果如表 3~5 所示。

表 3 UHPC 桥面板应力

荷载	上缘/MPa		下缘/MPa	
	压应力	拉应力	压应力	拉应力
恒载	-6.3	1.4	-6.3	1.3
汽车荷载	-5.4	4.3	-3.0	2.3
最不利组合	-17.2	8.2	-13.8	7.1
最不利发生位置	梁端	中跨跨中	索塔附近梁段	中跨跨中

表 4 钢梁应力

荷载	上缘/MPa		下缘/MPa	
	压应力	拉应力	压应力	拉应力
恒载	-74.2	54.5	-90.9	17.8
汽车荷载	-19.1	14.8	-55.7	63.3
最不利组合	-110.8	84.6	-145.6	73.7
最不利发生位置	索塔附近梁段	中跨跨中	索塔附近梁段	梁端

表 3~5 表明:轻型组合梁华夫板最大组合拉应力为 8.2 MPa,最大压应力为 17.2 MPa;同时钢梁应力及结构整体刚度均满足现有规范要求。

表 5 主梁位移

位移	荷载	主梁中跨/m	主梁边跨/m
竖向	汽车荷载	0.146(-0.439)	0.205(-0.219)

注:向上为正。

3.4 轻型组合梁节段模型有限元分析

根据全桥整体模型计算结果,选取拉应力最大的跨中梁段作为分析对象,采用大型通用有限元程序 Ansys14.0 对其进行计算分析。为减小边界约束和加载对桥面板受力的影响,选取跨中 10 个横梁间距间的主梁建立空间实体一板壳有限元模型,其中 UHPC 桥面采用实体单元 Solid45 模拟,主梁钢结构部分采用壳单元 Shell63 模拟,并通过桥面板下缘和钢主梁顶面节点间建立约束方程模拟焊钉连接件对桥面板的约束作用,节段有限元模型如图 3 所示。

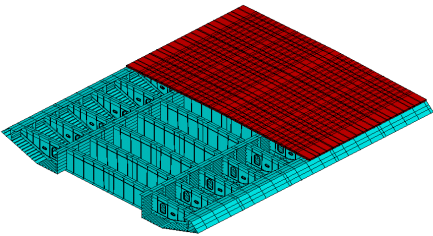


图 3 节段有限元计算模型

节段模型中 UHPC 桥面板应力由主梁整体受力效应和桥面车辆荷载效应两部分组成。计算整体受力效应时,将采用悬臂加载方式进行,即一端嵌固约束,在节段另一端截面形心处建立刚域,使得钢箱梁断面上各点与形心处变形协调,满足边界条件的平截面假定,并在截面形心节点处施加从全桥整体模型中得到的截面内力。桥面板车辆加载采用 550 kN 标准车,并考虑 1.3 的冲击系数,车轮位置采用试算法多工况布置,以得到车辆荷载最不利工况。节段模型中桥面板效应计算结果如表 6 所示。

表 6 节段模型桥面板应力

荷载	顶缘/MPa		底缘/MPa	
	主压	主拉	主压	主拉
车辆效应	-14.6	10.2	-7.8	3.6
整体+车辆 组合效应	-12.5	12.5	-6.5	6.5

由表 6 可知:在车辆荷载单独作用下,桥面板最大主拉应力出现在车轮作用位置桥面板纵肋顶缘,最大

值为 10.2 MPa,最大主压应力出现在桥面板底面横肋与实心板的交界处,最大值为 -14.6 MPa;在整体荷载和车辆荷载共同作用下,最大主拉应力出现在车轮作用位置桥面板纵肋顶缘处,最大值为 12.5 MPa。

3.5 轻型组合梁桥面板模型试验

为了验证 UHPC 轻型组合桥面板在计算拉应力作用下的抗裂安全性,从主桥标准节段取含单根纵肋的条带模型进行足尺试验。试验梁总长 3 700 mm,计算跨径 3 500 mm(即一个横隔板间距),宽 700 mm,梁高 220 mm,翼缘板厚 80 mm;试件中布置纵向受拉钢筋、纵向受压钢筋、横向钢筋、箍筋,钢筋等级均为 HRB400。试件加载方案如图 4 所示。

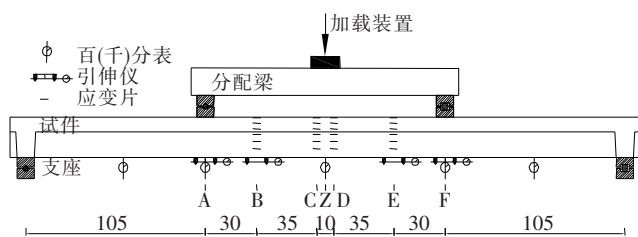


图 4 试件加载方案(单位:cm)

足尺模型试验梁下缘在各级名义拉应力作用下的裂缝宽度如图 5 所示。

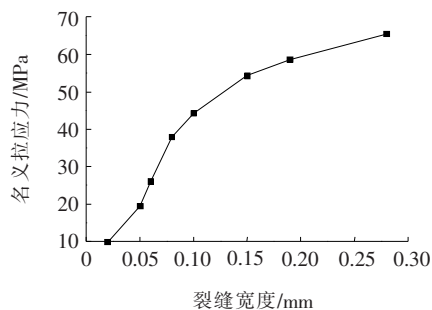


图 5 UHPC 桥面板裂缝宽度试验结果

国内外研究成果表明,当最大裂缝宽度不超过 0.05 mm 时,此宽度的裂缝对 UHPC 的耐久性无影响。而在足尺模型受弯试验中,UHPC 表面裂缝宽度为 0.05 mm 时,裂缝长度仅几厘米,模型上需仔细寻找才能发现,此宽度和长度的裂缝工地现场一般不易发现,因而可以将 0.05 mm 定义为 UHPC 抗裂设计极限。

根据试验结果,当裂缝宽度为 0.05 mm 时,其名义拉应力为 19.36 MPa,而该文中拟采用的 UHPC 华夫板轻型组合梁在节段模型分析中的最大主拉应力为 12.5 MPa,因而可初步判断该文 UHPC 轻型桥面结构安全性能满足要求。

4 结语

该文介绍了南益高速公路南洞庭(胜天)大桥采用 UHPC 轻型组合梁斜拉桥的构思过程。通过全桥整体模型计算、节段模型分析以及桥面板足尺模型试验,验证了 UHPC 轻型组合梁的结构安全性能。综合分析结果表明:南洞庭(胜天)大桥采用 UHPC 轻型组合梁的形式在构造上满足结构受力要求,在经济上更优于普通混凝土组合梁,是一种较为合理的桥型方案。

参考文献:

- [1] Svensson, H. S., Lovett T. G. The Twin Cable-Stayed Baytown Bridge, Proceedings of the International Bridge-Conference[J]. Bridges into the 21st Century, 1995; 383-390.
- [2] 王迎军,朱桂新,陈旭东. 虎门大桥钢桥面铺装的使用和维护[J]. 公路交通科技, 2004(8).
- [3] Graybeal B A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete (FHWA-HRT-06-103)[R]. McLean, VA, Federal Highway Administration, 2006; 45-70.
- [4] 邵旭东,胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京:人民交通出版社, 2015.
- [5] Rafiee A. Computer Modeling and Investigation on the Steel Corrosion in Cracked Ultra High Performance Concrete[M]. Kassel University Press GmbH, 2012; 182-184.
- [6] 陈宝春,黄卿维,王远洋,等. 中国第一座超高性能混凝土(UHPC)拱桥设计与施工[J]. 中外公路, 2016(6).
- [7] 朱忠,徐发生,周燕强. 带板肋的钢-UHPC 轻型组合桥梁疲劳性能理论与试验研究[J]. 中外公路, 2018(1).
- [8] 湖南省交通规划勘察设计院. 南县至益阳高速公路第 6 合同段胜天特大桥施工图设计图纸[R], 2015.