

沉管基槽开挖引起桥梁位移的有限元分析和模型试验

谷任国^{1,2}, 梁建勋^{1,2*}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室)

摘要:以澳门嘉乐庇海底隧道为工程背景,针对近邻桥梁位置进行隧道基槽的施工可能造成的不利影响,通过有限元模型分析和模型试验结合方式对开挖过程中的桥梁位移影响进行了研究。研究结果表明:桥梁侧向位移随着基槽开挖深度的增大而增大,并且在跨径较大的区段桥梁位移较大。研究认为应加强跨径较大区段附近的侧向位移监测,并对基槽开挖深度严格把控,避免基槽开挖深度过大对桥梁的稳定性造成不良影响。

关键词:基槽开挖;模型试验;有限元分析;桥墩位移控制

随着世界经济的快速发展,人们对交通需求的增长,海洋等水体的交通运输困难成为人们需要攻克的难题,为了提高人们的出行质量,便有了轮渡、桥梁和隧道的方式供人们出行。随着时代的发展,由于隧道和桥梁的方便且运输量大的特点,水下隧道和桥梁并举成为当代跨越海洋等水体的主流方式。自20世纪30年代起,国外有日本、挪威和英国等已建成海底隧道,中国也建成了厦门翔安海底隧道、港珠澳大桥海底隧道等。

在地下轨道建设时,时常出现对既有建筑物安全造成影响的情况,也有许多分析隧道建设对既有建筑的安全使用影响的研究方法。但是因为水下隧道和陆上隧道相比,环境有着根本不同,并且罕有可借鉴的水下隧道施工对既有桥梁的安全性分析,仅通过数值分析来分析隧道基槽开挖对既有桥梁的影响可能有欠考虑之处。所以为了充分考虑基槽开挖对既有桥梁可能造成的影响,该文以澳门嘉乐庇总督大桥附近修建的嘉乐庇海底隧道为背景,通过进行半桥荷载作用下的模型试验和数值模拟的方式,分析比较两种方法所得结果,从而得到沉管基槽开挖对嘉乐庇大桥较为全面的分析结果。

1 工程概况

拟建嘉乐庇海底隧道位于澳门半岛和氹仔岛之间,隧道全长为2 020 m,其中暗洞全长为1 570 m,敞

开段长度为450 m;水下隧道采用沉管工法,沉管隧道长度为1 100 m。根据纵断面线形需要,隧道澳门本岛侧纵坡为5%,氹仔侧纵坡为5%,沉管段纵坡为0.539 2%。而嘉乐庇总督大桥是澳门第一条连接澳门半岛和氹仔的跨海桥,大桥全长2 569.8 m,宽9.2 m,双线行车。该桥与拟建隧道结构边线的距离为153~185 m,沉管隧道基槽开挖坡度较缓,坡率为1:6,基槽开挖坡顶线距离嘉乐庇总督大桥最近距离为26 m。

嘉乐庇海底隧道沉管区间的土层按成因类型、土层结构及其性状特征可划分为5层,主要有淤泥、黏土、残积土、全风化花岗岩和强风化花岗岩。实际工程中沉管基槽拟开挖深度为20 m,基槽开挖主要在淤泥和黏土土层。

2 有限元模型分析

2.1 有限元模型分析和参数设置

结合基槽与桥梁位置关系以及开挖深度,采用有限元计算软件建立的三维计算模型如图1所示,分析9节沉管基槽的开挖对既有嘉乐庇大桥的位移影响,基槽开挖处对应桥墩为P16~P62。图1中 x 方向为横桥向, y 方向为顺桥向。因为沉管基槽施工开挖对紧邻桥梁结构影响的三维动态施工模拟能否准确地反映现场实际施工情况的前提是计算工况与现场实际施工工况相对应,所以根据工程经验,沉管基槽开挖顺序

收稿日期:2020-05-21(修改稿)

作者简介:谷任国,男,博士,副教授。E-mail:212864437@qq.com

*通信作者:梁建勋,男,硕士研究生。E-mail:704084619@qq.com

应按分段、分层进行。将拟开挖土体划分为 ex1~ex11 共 11 个区段,每个区段宽约 100 m,见图 1。另外每个区段分为 2~4 层进行开挖。

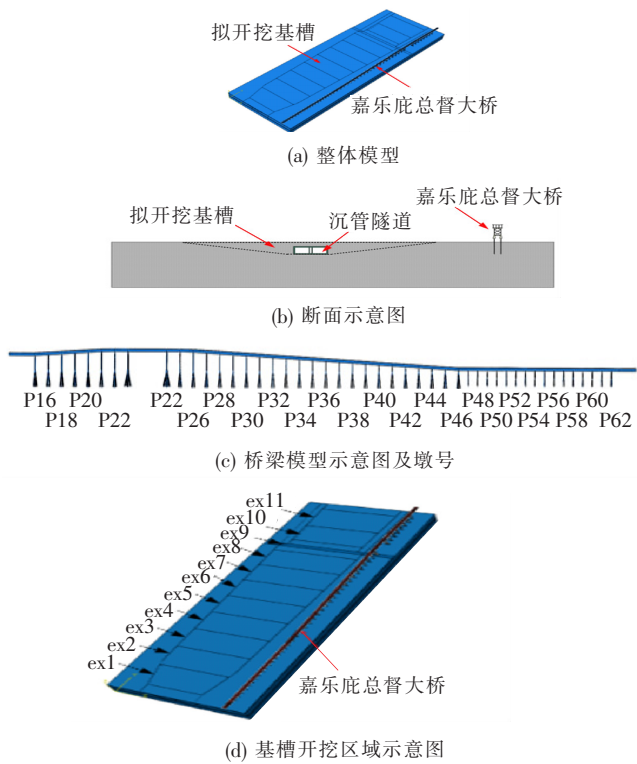


图 1 三维有限元模型

基槽周边地层的力学性质对约束基槽开挖过程桥梁结构的受力和变形起着关键作用,为此,进行三维模拟分析计算时须充分结合工程的地层分布特点合理选取计算参数。三维有限元计算模型中的地层主要根据工程地质勘察资料进行适当简化,主要有淤泥、黏土、残积土、全风化花岗岩、强风化花岗岩等地层,各地层的计算参数取值主要依据工程地质勘察资料确定,如表 1 所示。

三维有限元计算模型的边界条件为:模型底部 z 方向的位移约束,模型前后 y 方向的位移约束,模型左右 x 方向的位移约束。

根据 JTG B01—2014《公路工程技术标准》,取公路—I 级汽车荷载(550 kN,车长 15 m),故桥面竖向荷载为:
$$\frac{1}{15} \times 100 \times 550 \div (7.8 \times 100) = 4.6 \text{ kPa}$$
,半桥荷载为 2.3 kPa,切向荷载取桥面半桥荷载的 10%,为 0.23 kPa。

2.2 有限元模型计算结果

取工况 0 为初始地应力场分析,工况 1 为修建既有嘉乐底总督大桥并施加桥面荷载,工况 2 对应 ex1 开挖区,以此类推,工况 12 对应 ex11 开挖区。为了考虑基槽开挖可能造成的桥梁最大侧向位移情况,荷载

表 1 岩土层参数

土层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	λ	κ	屈服应力 比 K	应力比 M
淤泥	1 610	2.77	0.35	10.3	11.3	0.274 1	0.041 1	0.887 5	0.380 3
黏土	1 900	13.85	0.35	13.0	20.0	0.043 3	0.006 5	0.860 5	0.486 4
残积土	1 830	33.24	0.35	13.0	30.0	0.073 6	0.011 0	0.860 5	0.486 4
全风化花岗岩	1 850	99.72	0.35	16.0	32.0	0.063 5	0.009 5	0.831 7	0.607 0
强风化花岗岩	1 850	138.50	0.20	16.0	32.0	0.063 5	0.009 5	0.831 7	0.607 0

选择靠近隧道方向半桥荷载形式。图 2 为新建海底隧道沉管基槽开挖不同工况下对应的桥墩顶位移分布情况。在靠近基槽侧的半桥荷载作用下,当基槽开挖至基底时,既有桥梁最大横向水平位移为 P28 桥墩处,其值为 4.06 mm,最大竖向位移为 P28 桥墩处,其值为 2.02 mm。

3 模型试验

由工程概况和相关资料可知,基槽开挖最低点标

高为 20.676 m,因为设计上按沉管隧道和桥梁平行考虑,可算得最低点处基槽开挖的坡顶距桥梁的最短距离为 26 m,该区段可能对桥梁造成的影响最大,所以取对应区域(包含 P20~P27 桥墩)进行模型试验。

3.1 模型参数选取

考虑到基槽开挖对桥梁结构位移的影响相关因素,选取因变量桥梁结构位移 δ 和重要物理变量:海水深度 H_w 、基槽开挖深度 H 、基槽开挖宽度 B 、基槽开挖中线与桥梁的距离 d 、基槽开挖坡度 α 、桥梁所受均布荷载 q 、桥梁混凝土的弹性模量 E 、基槽每层开挖厚

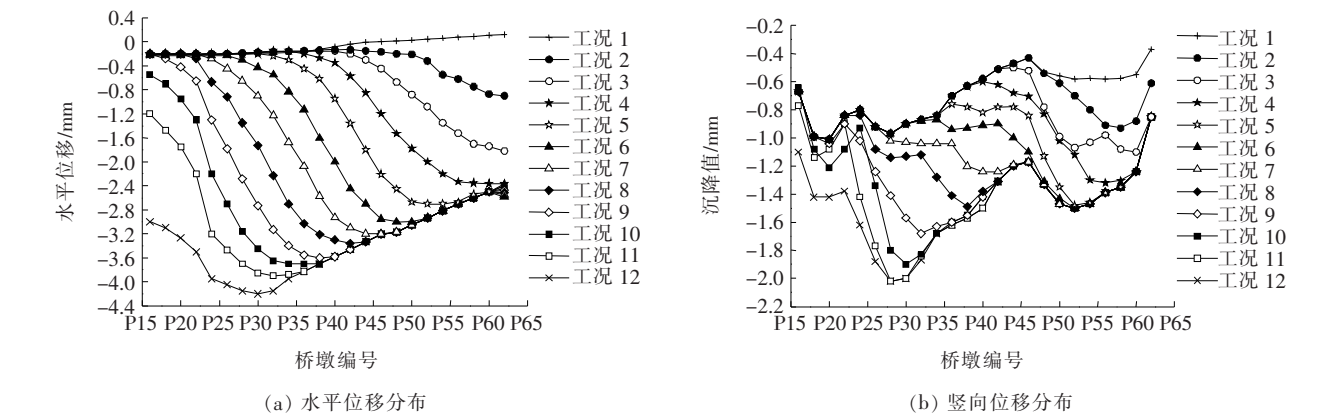


图 2 沉管基槽开挖至底的模型位移图

表 2 试验各关键物理量量纲									
量纲	H	B	d	a	q	E	H_w	H_{Δ}	γ
[F]	0	0	0	0	1	1	0	0	1
[L]	1	1	1	0	-1	-2	1	1	-3

度 H_{Δ} 、土的重度 γ ,模型各关键物理量量纲如表 2 所示,另外应力、泊松比和内摩擦角等量纲参数的相似参数为 1。该文采用量纲分析法(π 定理)确定试验重要的物理量关系。

表 3 模型参数									
项目	a	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	H_D	d	B	H	H_w	E/MPa	q
原型	—	16.1	—	—	—	—	—	3×10^4	—
模型	—	15.6	—	—	—	—	—	2.7×10^3	—
比例	1	1	20 : 1	20 : 1	20 : 1	20 : 1	20 : 1	11.1 : 1	20 : 1

可得量纲方程:

$$\frac{\delta}{H}=f\left(\frac{B}{H}, \frac{d}{H}, \alpha, \frac{q}{EH}, \frac{H_w}{H}, \frac{H_{\Delta}}{H}, \frac{\gamma H}{E}\right) \quad (1)$$

由式(1),令模型尺寸和原型尺寸比为 1 : 20,选用 C30 混凝土弹性模量近似等效实际桥梁弹性模量,选用南方松木为模型材料,选址于南沙区软土场地进行试验,按 GBT 50123—1999《土工试验方法标准》测得场地淤泥重度为 15.6 kN/m³,模型参数列于表 3。

3.2 模型安装

该试验范围为 P20~P27 桥墩区段,其中 P23~

P24 区段跨径为 73 m,该处为通航水域,另外几跨长度均为 25 m,按相似比 1 : 20 得到的桥梁模型纵断面图如图 3 所示。

桥梁模型安装流程为:场地平整→桥桩与承台连接→桥墩与盖梁连接→检查桥梁各部件的完整→基槽开挖→桥墩与承台连接→桥桩基坑开挖→埋入桥桩并夯实土层→完成桥梁搭接→进行高程校准。其中桥梁材料都为南方松木,相应部件都由专门木工加工,连接采用打樨方式,并用乳胶和气压钉进行加固,以保证节点连接稳固。

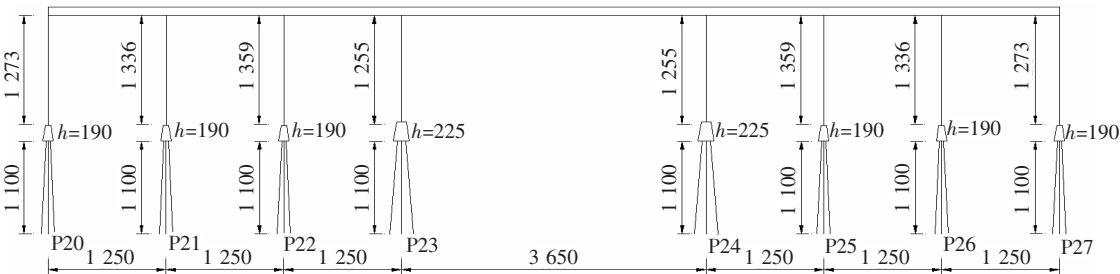


图 3 桥梁模型纵断面图(单位:mm)

因为模型试验主要测试桥梁侧向位移的变化情况,对 P22~P26 一共 5 个桥墩进行测量,采用精度为

0.5 mm 的钢尺测量,每个桥墩布置 4 个测点,并以全站仪矫正,测点布置如图 4 所示。

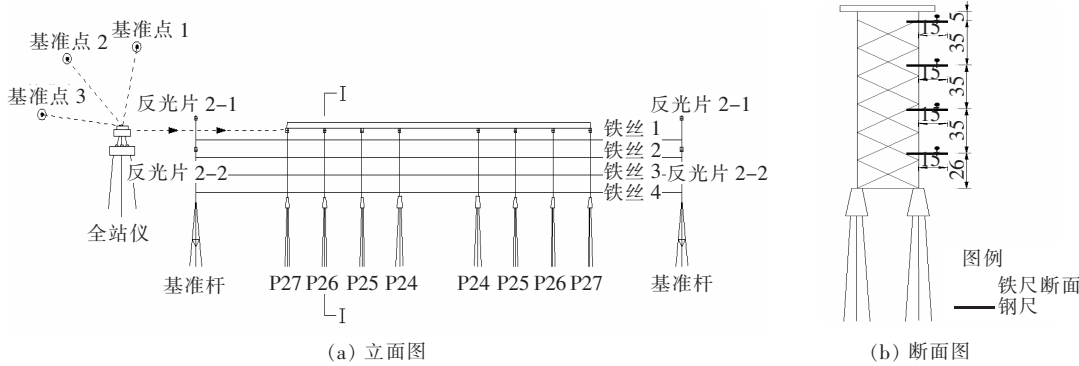


图 4 试验测点布置图(单位:cm)

3.3 模型试验

据相似准则可得到模型试验中基槽开挖的相关信息:根据前面提到的相似关系,可以得到模型试验时基槽开挖的相关数据:基槽开挖坡顶线距离桥梁 1.5 m,基槽长度为 14.2 m,基槽宽度为 12 m,放坡比例为 1 : 6,基槽中心深度为 1 m,基槽底部宽度为 1.6 m。所以开挖工况可设置为:Ⅰ区第 1 层、Ⅰ区第 2 层、Ⅰ区第 3 层、Ⅱ区第 1 层、Ⅱ区第 2 层、Ⅱ区第 3 层,依次轮流开挖,基槽开挖方案如图 5 所示。模型试验过程中,每个工况开挖完成后先待监测数据稳定并记录后,再进行下一工况开挖。待所有施工工况完成以后,对场地进行隔离与防护,并保证接下来的几天能够正常测量,等到桥梁的侧向位移不再变化时便可以停止观测。

3.4 模型试验结果与数值分析结果比较

为了得到原桥的侧向位移,依据模型和实体结构存在的应力相等、应变成比例关系,可以得到原桥位移换算公式如下:

$$\sigma_P = \frac{Q_P}{H_P} = \sigma_M = \frac{Q_M}{H_M} \tag{2}$$

$$\epsilon_P = \frac{Q_P}{H_P \cdot E_P} \tag{3}$$

$$\epsilon_M = \frac{Q_M}{H_M \cdot E_M} \tag{4}$$

$$\Delta_P = \frac{Q_P}{Q_M} \cdot \frac{E_M}{E_P} \cdot \Delta_M \tag{5}$$

式中: σ_P 、 σ_M 为原型和模型对应的应力; Q_P 、 Q_M 为原型和模型对应的分布荷载; ϵ_P 、 ϵ_M 为原型和模型的应变; H_P 、 H_M 为原型和模型对应的尺寸; E_P 、 E_M 为原型和模型对应的弹性模量; Δ_P 、 Δ_M 为原型和模型对应的侧向位移。

令Ⅰ区第 1 层开挖为工况 1,以此类推Ⅱ区第 3 层开挖为工况 6,根据相似准则,由式(4)结合表 2、3,可得到换算后的原桥侧向位移如表 4 所示。

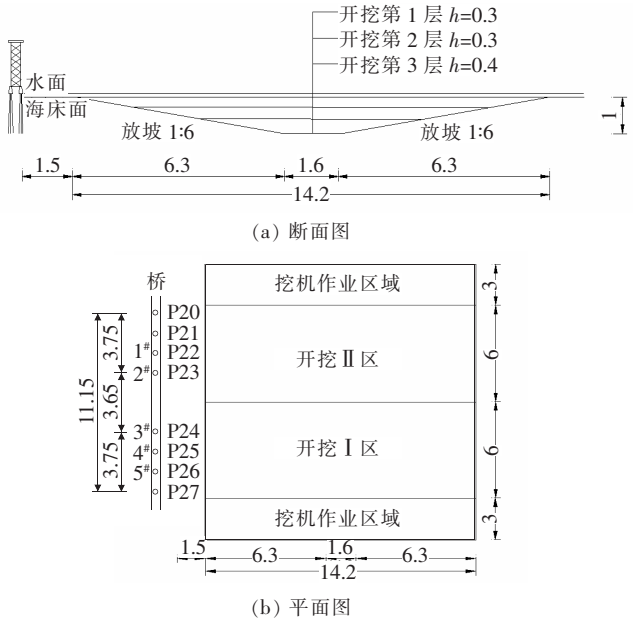


图 5 基槽开挖方案图(单位:m)

表 4 换算得到的原桥侧向位移

工况	不同桥墩编号的侧向位移/mm				
	P22	P23	P24	P25	P26
1	0	1.4	2.2	0.4	0.7
2	0	1.3	2.2	1.8	1.6
3	1.1	2.9	2.5	2.2	2.7
4	2.2	3.8	3.4	2.5	1.4
5	2.0	3.4	3.1	1.6	1.6
6	2.2	3.8	4.5	3.1	2.0

由表4可知:桥梁侧向位移基本上随着基槽开挖深度的增大而增大,并且最大值出现在P24处,为4.5 mm,相对于其他跨来说,P23~P24跨位移较大,分析认为P23~P24跨径为73 m,相对于其他跨25 m来说,受到基槽开挖施工影响要大,是需要重点监控区段。在基槽开挖过程中同样应严格控制好基槽开挖深度,足够沉管施工即可,应避免基槽开挖深度过大,给桥梁的安全稳定带来不利影响。

由有限元模型计算结果可知,桥梁的最大侧向位移和竖向位移均发生在P28桥墩附近,分别为4.06 mm和2.02 mm。相对于模型试验结果来说,相差不大,并且P28在P24附近,所以建议实际施工中可针对P23~P28区段加强监控。模型试验和有限元模型计算部分结果对比见图6。

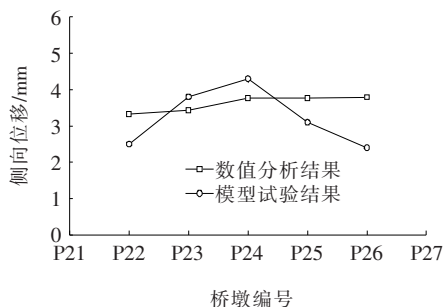


图6 沉管基槽开挖至底的模型位移图

由图6可知:模型试验桥墩侧向最大位移发生在P24桥墩,为4.5 mm;模型试验结果两端P22和P26墩侧向位移比数值模拟的结果小1 mm左右,分析认为是这两个桥墩位于模型试验开挖区段的两端,开挖区域叠加效果不明显造成的。模型试验中间桥墩P23、P24(受开挖边界影响较小)较数值分析结果大约0.4 mm和0.8 mm,分析认为是由于桥梁模型仅为整个实际桥梁的一小段,其刚度较实际桥梁差造成的误差,但总体而言,数值模拟的结果和模型试验的结果比较接近。

因为嘉乐底总督大桥为老旧桥,结合专家建议,考虑由基槽开挖引起的位移控制值按GB 50157—2013《地铁设计规范》中的30%选取,即侧向位移为6 mm,竖向位移为3 mm,所以两种研究方法计算结果最大值均小于规范要求的位移限值,并且因为模型试验和有限元分析的方法计算结果相互限制的缘故,增强了结论的说服力,可为相应工程提供参考。

4 结论

(1) 通过室外大型缩尺模型试验发现,在基槽开

挖过程中,P23和P24间的侧向位移相对较大,分别为3.8 mm和4.5 mm,是需要重点监控的区域;另外随着基槽开挖深度的增加,桥梁侧向位移呈现增大的趋势,所以需要合理控制开挖深度,足够沉管施工即可,避免深度过大对桥梁稳定造成不利影响。

(2) 通过有限元模型分析计算发现,在基槽开挖过程中,最大侧向位移和竖向位移均出现在P28左右,分别为4.06 mm和2.02 mm,最大位移发生区域仍处于P23~P24附近,所以建议对P23~P28区段加强监控。

(3) 相对于有限元模型分析结果而言,模型试验可直观地观察到桥梁侧向位移随着基槽开挖深度增大而增大的现象,并且模型试验充分地还原了复杂的水下基槽开挖条件;而相对于模型试验来说,有限元模型分析可计算得到桥墩的竖向位移而不单单是侧向位移,并且有限元是以整体桥梁为基础进行计算,可全面考虑到整体桥梁相互作用的效应。有限元模型结合模型试验的方法可较为全面直观地考察沉管基槽开挖对桥梁位移变形的影响。

(4) 模型试验和有限元模型计算结果相近,两者最大侧向位移值分别为4.5、4.06 mm,均小于限值6 mm,有限元计算所得最大竖向位移为2.02 mm,小于限值3 mm,由此可推测实际基槽开挖过程中嘉乐底大桥位移处于控制值范围,两种研究方法相互限制,增强了结论的说服力,可为相应工程提供参考。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(11).
- [2] 王梦恕. 台湾海峡海底铁路隧道建设方案[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011(S2).
- [3] Hashimoto K, Tanabe Y. Construction of the Seikan Undersea Tunnel—II. Execution of the Most Difficult Sections[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1986, 1(3-4): 373-379.
- [4] PALMSTROM A. The Challenge of Subsea Tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 145-150.
- [5] 楚楚. 世纪梦工程——英法海底隧道[J]. 中学科技, 2007(7).
- [6] 黄欣. 盾构掘进施工引起的地表沉降分析与研究[J]. 铁道建筑技术, 2015(1).
- [7] 郭晨. 近距离重叠盾构隧道施工影响的数值模拟[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2009.

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。

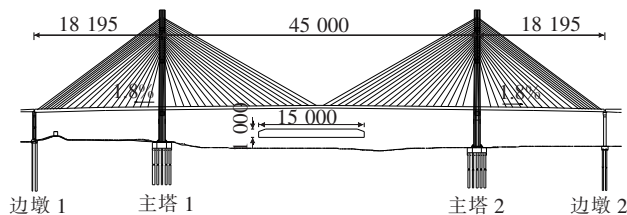


图 1 桥型总体布置图(单位: cm)

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).