

第七届

中国铁道学会桥梁工程委员会学术会议

论文集

(2003.10)



中国地质大学出版社

第七届

中国铁道学会桥梁工程委员会学术会议

论文集

(2003.10)

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

第七届中国铁道学会桥梁工程委员会学术会议论文集/中国铁道学会桥梁工程委员会, 中铁大桥局集团有限公司编. —武汉: 中国地质大学出版社, 2003. 10

ISBN7-5625-1789-4

- I. 第…
- II. 中…
- III. 桥梁工程—论文集
- IV. U44

第七届中国铁道学会桥梁工程委员会学术会议论文集(2003)

中国铁道学会桥梁工程委员会
中铁大桥局集团有限公司 编

责任编辑: 万希岭 技术编辑: 阮一飞 责任印制: 陈汉光 责任校对: 张咏梅

出版发行: 中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路31号) 邮编: 430074
电话: (027)87482760 传真: 87481537 E-mail: cbo@cug.edu.cn
经 销: 全国各地新华书店

开本: 787mm×1092mm 1/16 字数: 544千字 印张: 21.25
版次: 2003年10月第1版 印次: 2003年10月第1次印刷
印刷: 铁道部大桥工程局武汉印刷厂 印数: 1—500册

ISBN 7-5625-1789-4/U·5 定价: 58.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

目 录

设计篇

舟山连岛工程西堠门大桥吊拉组合体系桥梁方案设计	杨 进, 万田保(3)
宜昌长江铁路桥主桥方案构思与研究	罗世东, 严爱国(18)
万宜铁路万州长江大桥正桥钢梁设计	段雪炜, 徐 伟(26)
青岛海湾大桥工程建桥方案设计研究	徐恭义, 李华云(31)
株洲建宁大桥设计的一些特点	李振岭, 罗嗣碧(36)
柳州红光大桥悬索桥支承体系设计	万田保(39)
单层吊索塔架的设计	黄旺明(45)
长寿长江大桥单层吊索塔架设计	李芳军, 李德坤(52)
长寿长江大桥大型临时支墩设计	谢红跃, 李芳军, 李德坤(58)
铁路桥墩的计算机设计	王俊杰(63)
东海桥2500吨海上运架梁专用起重机设计	任继新, 吴元良(69)
部分斜拉桥的剪力滞效应及抗震性能	陈兴冲, 虞庐松, 李承根(72)
预应力桁架的设计与应用	李述宝(76)

施 工 篇

沿海大型桥梁工程中采用浮吊架梁方式的比选	周 璞, 华有恒(85)
郑州黄河二桥主桥施工技术	赵剑发, 冯广胜(92)
潮汐河段深水钻孔桩基础施工技术方案研讨	黄龙华, 刘杰文(97)
深水基础双壁吊箱围堰施工技术	李德坤, 李芳军, 朱云翔(103)
芜湖长江大桥主跨312m钢桁梁跨中合龙施工技术	陈理平, 万 方(109)
芜湖长江大桥主塔墩双壁钢围堰施工技术	于祥君(114)
强岩溶地区桩基施工中钢套筒的应用	崔淮宇, 农代培, 戴宗诚(121)
尤溪洲闽江大桥主桥空腹式刚架拱桥施工	邱训兵, 陈长明, 农代培(126)
夷陵长江大桥斜拉索设计与施工	孙叔禹(130)
我国大跨度钢桥的制造技术及展望	李军平(135)
东海跨海大桥大型构件预制场及设施布置的技术特点	黄龙华, 刘杰文(141)
艺校铁路立交桥连续梁预制及横向顶推架设施工方法	钟万波(148)
官厅湖特大桥施工概述	刘崇亮, 毛伟琦(156)
广州地铁工程施工技术总结	包长和(165)

长管棚在宜昌云集隧道施工中的应用	谭德怀(170)
大吨位磁悬浮轨道梁运输过川杨河施工方法	赵旭清(174)
岩溶地区水中大直径桩钻孔埋钻处理施工技术	戴尊勇, 张军成, 周运祥(178)
东海大桥Ⅲ标段深水港工程大乌龟岛场地布置	孟 钢, 刘晓霞(185)
华能南通电厂循环水泵房沉井下沉施工与地下水位控制	农代培, 范学梅(189)
双线箱梁预制质量控制	晏敬东(194)
采用长线法和短线法预制预应力混凝土箱梁节段的比较	钱建漳, 周一桥(201)
大掺量粉煤灰混凝土在官厅湖特大桥中的应用	肖佳鹏, 路新瀛(207)
秦沈客运专线高填方软基路基施工及沉降控制	肖佳鹏(211)
三角挂篮在攀枝花炳草岗大桥施工中的运用	谭德怀(215)

综 合 篇

高速铁路连续刚架桥抗震性能研究	马坤全(223)
对斜拉桥换索设计方法的探讨	蒋伟平, 李亚东(228)
脉动风作用下列车—斜拉桥体系的动力响应分析	张 楠, 夏 禾, 徐幼麟(233)
大跨高墩刚构——连续组合梁桥动力特性的分析	刘清华, 祝 兵, 刘名君(246)
系杆拱桥横梁裂缝成因讨论及静载试验	朱东生, 陈兴冲, 丁明波, 王常峰, 夏修身(253)
键为岷江大桥换索工程前后检测及荷载试验比较与分析	施 洲, 夏招广, 蒲黔辉(258)
大跨度缆索支承桥梁在列车作用下的线性与几何非线性分析比较	高 日, 苏光亚(264)
既有提速跨度20米双线上承钢板梁横向刚度加固技术研究	于鹏程, 王丽华(272)
秦沈客运专线600t运架设备设计研究	庞凤起, 王员根, 熊 鹏(280)
东海大桥70m预应力混凝土箱梁模板研制	庞凤起, 王员根, 熊 鹏(285)
斜拉桥斜拉索减振器施工技术探讨	何祖发, 李荣庆, 王戒躁(291)
钢管复合桩抗剪及抗压试验研究	黄 清, 王戒躁, 安慧群(296)
既有提速上承钢板梁横向加固试验研究	孙国钧(302)
斜孔钻孔桩动力头钻机的研究	周湘桥, 谢 军(309)
移动模架造桥机在多跨原位现浇施工中的应用研究	周湘桥, 孙笑萍(316)
危岩体预应力锚索加固施工和监测	董 政(321)
GPS定位技术在桥梁施工测量中的应用	傅新军(327)
浅议铁路桥梁混凝土耐久性检测技术	施顺涛(332)
浅谈企业信息化问题及其推进策略	王 艺(336)

设计篇

舟山连岛工程西堠门大桥吊拉组合体系 桥梁方案设计

杨进, 万田保

(中铁大桥勘测设计院, 湖北 武汉 430050)

摘 要:西堠门大桥所在位置的工程条件, 给采用吊拉组合桥梁的新结构体系, 提供了一个非常适宜的场所。本文详细阐述其方案构思、技术特色、主要计算分析结论以及实施的可行性等问题。

关键词:桥位特点; 悬吊斜拉组合; 吊杆疲劳; 技术经济优势

1 工程条件

西堠门大桥工程是舟山市大陆连岛工程中第四座跨海大桥。桥位起自册子岛南端的门头山, 经海域中的老虎山至金塘岛北端的上雄鹅咀, 水面相距约2100m。老虎山为位于水中的一个小孤岛, 潮位以上的陆域宽度约100m, 北至册子岛岸水面距离约420m, 南至金塘岛岸距离约1600m。桥位区岸坡陡峻, 水下20m等深线距岸边50m左右; 50m等深线宽达840m, 最大水深达93m以上。水域潮汐为不正规半日潮, 潮流运动形式以往复流为主, 实测涨潮流速为2.66m/s, 落潮流速为3.65m/s。

桥址区属东亚季风气候区, 全年四季分明, 天气复杂多变, 灾害性天气类型多, 发生频繁, 尤以龙卷风、雷暴最为严重。每年5—11月为台风期, 其中以8月份居多, 7月、9月次之, 年平均台风数约2.50次。

桥址区工程地质条件较好, 附近无晚更新世以来活动断裂, 两岸及老虎山属岩质较硬的流纹斑岩, 承载力高。老虎山岩体稳定, 经检查不存在隐患问题。

近场区内地震活动相对较弱, 存在发生5级左右中强震的可能性, 但其震级不会超过6级。

2 桥梁技术要求

桥上线路标准: 双向共四车道高速公路;

计算行车速度: 60km/h;

桥面净空宽度: 22.5m;

设计车辆荷载: 汽车——超20级, 挂车——120;

作者简介:杨进(1930—), 男, 教授级高工, 国家级专家, 工程设计大师, 西南交通大学兼职教授, 1953年毕业于华南工学院土木工程系。

桥下通航净空:净宽630m,净高49.5m;

最高通航水位: +3.28m;

设计基本风速: $V_{10} = 41.8\text{m/s}$ 。

3 桥型方案构思

设计中对桥型方案的制订,其思维方式是因地制宜、有的放矢。就本桥所在位置的水域条件和地形特点,不论采用何种结构方案,都会首先考虑利用中间的老虎山岛设置支撑点。从老虎山岛中心向北跨越水域达到册子岛上岸距离约420m,向南跨过水面至金塘岛岸边的距离至少要1652m。直观上,考虑采用经典的现代悬索桥方案是必然的。其方案布置可以有两种选择:一为主跨1652m,北主塔设在老虎山岛上,南主塔设在金塘岛岸边。北边跨420m采用悬吊式跨越,岸边设支墩与岸上的引桥相连接。主缆在此处向后适当延伸以使锚碇落到有利的位置。南主塔的后方为无悬吊式的边跨,直接与岸上的引桥相连接。主缆只起背缆的作用而进入锚碇(图1);二为将南主塔北移420m置于水深约45m的水中,主跨缩小为1232m,变成为典型的三跨式(420m + 1232m + 420m)悬索桥。两端主缆向后适当延伸,使两端锚碇均可落到有利的位置(图2)。前一个方案,其主跨的尺度,就目前已建成的同类型桥梁而言,仅次于日本的明石



图1 桥式方案构思之一

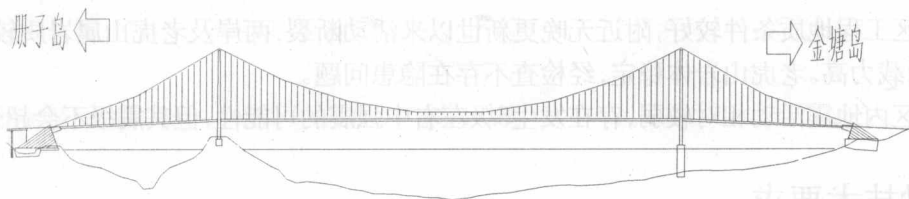


图2 桥式方案构思之二

海峡大桥,位居世界第二,与丹麦的大带桥相差不多。就技术工作而言,下部结构没有水下工程,桥梁的难点在于如何妥善解决好主梁的气动稳定问题。经济上可能是费用较大的方案。后一个方案的主跨大为减小,桥梁的气动稳定问题已在现有经验可以掌握的范围之内,最大的技术难点是北主塔处于深水之中的基础施工以及防船撞等问题。因此在经济方面并不见得会比

前者有利。上述两种方案,对于水中老虎山岛只是简单地按常规的概念作为一个支承点。其具有较高的承载能力和岩体稳定性较好的工程地质条件,完全可以为改善桥型结构的总体布置发挥作用。为在本桥恰当地采用悬吊与斜拉相组合的桥型结构提供了一个难得的机遇。本方案悬吊斜拉组合结构总体尺寸为: $[40\text{m} + (420\text{m} + 420\text{m}) + 1232\text{m}] = 2112\text{m}$ 。其中的 $(420\text{m} + 420\text{m})$ 为位于老虎山岛上的塔梁墩固结的一把伞斜拉结构,主梁为预应力箱梁,向左端伸出 40m 的平衡跨。右端连接跨长为 1232m 悬索支承的钢箱梁。悬索支承在北高南低相距 1652m 的主塔上,两端的锚碇分别处在两岸的引桥下方。

本方案既可使主梁的悬吊长度减短,改善了成桥的气动稳定性,又能维持一跨越过南水域,而不需修建深水基础等技术优势。其在技术、经济两个方面的好处不言而喻(图3)。

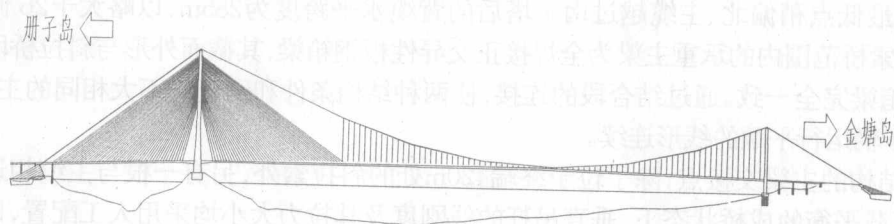


图3 桥式方案构思之三

4 悬吊斜拉组合结构体系

4.1 成桥线型设计

本桥为切合桥址地形的特殊状态,采用的悬吊与斜拉相组合的结构为不同于常规的非对称形式。左半叶为独塔PC箱梁斜拉桥;右半叶为高低塔钢箱梁悬索桥。两者共用位于水中老虎山岛上的高塔。该塔塔高的确定与悬索桥主缆荷载段的垂度 f 的选取直接相关。按照主桥在总体上的孔跨布置,支点不等高的悬索桥主缆水平跨度为 1652m ,仅右侧 1232m 范围直接承受荷载。左端的 420m 范围为空载拉缆,只有主缆本身自重起作用。按照主缆在成桥状态下曲线保持连续的原理,空缆段弦线达到塔顶与水平线的仰角 $\text{tg } \alpha = 4(\frac{f}{l} + \frac{f_1}{l_1})$ 。其中 f/l 为荷载段主缆的矢跨比, f_1/l_1 为空载段主缆的垂曲度。在本设计中,为使左塔的高度适当地得到降低,和弥补因空缆段较长而对其刚度的削弱,在主缆荷载段选用了较小的矢跨比 $f/l = 1/11$ 。至于整座主塔的全高除上述的结构因素外,还受地基条件、通航净空、主梁建筑高度等因素控制。由于本方案为非对称结构,主缆荷载段的下垂最低点偏离其中心位置,但对塔高的计算影响不大。

4.2 成桥结构状态

本方案的结构体系由北侧的独塔斜拉桥和南侧的非对称悬索桥组合而成。

北侧斜拉桥的主塔充分利用老虎山岛的有利地形和地基承载能力较高等工程条件。采用横桥向宽 64m 、纵桥向长 30m 、高 15m 的钢筋混凝土箱结构明挖扩大基础。自基础顶至桥面一段 32.40m 高度为厚壁箱形截面的刚性墩身。主梁在墩顶处与墩身固结向两端外伸。自墩顶桥面以上的 273.60m 高度为有三道横梁的门式框架的塔柱结构。其横向宽度与高度之比约为 $1/7$,

塔柱在横桥向具有较好的静力稳定性。塔柱顶部设置支承悬索主缆的鞍座。从塔柱顶面以下10m处开始向下布置48根斜拉索,由于主梁与塔墩为固结构造,主梁在塔下的无索区采用了44m的较大跨距,其余各点的索距均为8m。主梁为单箱三室的梭形截面预应力混凝土结构,通过前后共48对斜拉索与主塔墩共同组成为具有双向伸臂长达420m的对称伞形结构,远端斜拉索的仰角略大于 30° 。主梁向南在420m处与悬吊系的主梁相连。向北边跨一侧,主梁向北于420m处越过近塔辅助墩延伸40m止于悬索主缆北锚碇上的支点,形成具有平衡作用的锚跨。

南侧悬索桥的主缆跨度为1652m。主缆越过斜拉桥塔顶后的背缆水平跨度为460m,以略大于 32° 的俯角进入北锚碇。主缆空载段的水平长度与斜拉桥主梁伸臂长相同,均为420m,并以略大于 21° 的弦倾角与主缆承载段的起点相接。主缆承载段的水平长度为1232m,矢跨比1/11,垂度最低点稍偏北。主缆越过南主塔后的背缆水平跨度为285m,以略大于 26° 俯角进入南锚碇。悬索桥范围内的承重主梁为全焊接正交异性板钢箱梁,其截面外形与斜拉桥段的预应力混凝土箱梁完全一致。通过结合段的连接,使两种结构条件和刚度均不大相同的主梁,能以具有确保车辆运行平顺的线形连续。

在两结构的主梁交接点,除了位于终端420m处的斜拉索外,另有一根与主缆相连的垂直吊杆。在恒载平衡的成桥状态下,垂直吊杆的线刚度及其拉力大小均采用人工配置,以不影响同点斜拉索的内力出现有害的交变为原则。

在成桥状态下,北主塔虽然总体高度较大,约达306m。由于在下端具有完全刚性的基础;在塔顶,纵向为主缆所约束。其因活载引起的塔身变形相对较小,技术问题并不突出。

本方案的主梁总长2112m,在北塔墩处为刚性固结节点,对结构的纵向变形形成约束。其余各墩上支点在纵向均放松,温度变化等纵向变形基本上得以自由释放。

从体系上看,关于侧向风作用问题,由于斜拉区主梁侧向抗挠刚度较大,全桥侧向风载的较大部分通过预应力混凝土梁段传递至北塔墩。

4.3 主要构件结构参数及结构细节

4.3.1 主缆

本方案由于中跨及边跨主缆切线角相差较大,中、边跨选用了不同的截面组成,北边跨、中跨、南边跨的主缆束股数分别为122、114、118。每束股由127根直径5.2mm高强镀锌钢丝构成,钢丝极限抗拉强度不小于1770MPa。基于前述主缆特定的恒载分布,通过求解方程得出主缆线型如图4。

由主缆线型图可知,由于中跨主缆空载长度的存在,主缆中心线最低点不在悬吊区的中点,而偏向斜拉区0.75m。

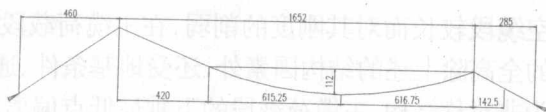


图4 主缆线型

4.3.2 钢箱加劲梁

钢箱加劲梁高4m,横梁上开设多个大尺寸孔以利箱内通风,并方便检修人员通行,钢箱加劲梁截面如图5。

4.3.3 预应力混凝土箱梁

标准段预应力箱梁与钢箱梁外形相同,现浇段预应力箱梁梁高由4m过渡到固接处的6m,标准段预应力箱梁截面如下图6。

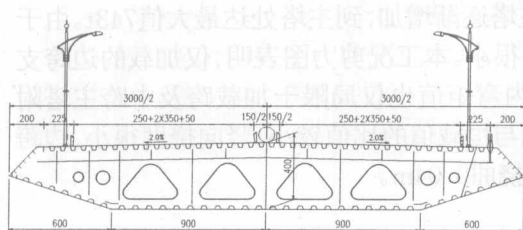


图5 钢箱加劲梁截面

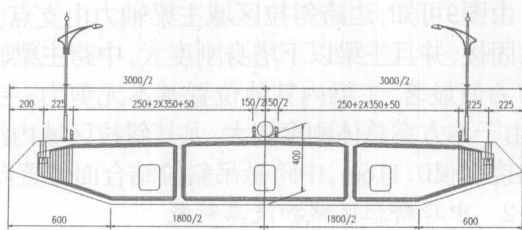


图6 预应力箱梁截面

4.3.4 主塔

北塔为悬吊斜拉两体系共用主塔。因该主塔较高,为保障必要的结构刚度及稳定性,选用了较大的截面尺寸,老虎山良好的地质条件为该主塔提供了方便,北塔如图7。

4.3.5 锚碇

锚碇处地质条件较好。方案设计中结合地形特点和总体布置,选用重力式嵌岩锚。结构外形上,锚体部分设计成顺大缆方向的直角形,以求力与结构的和谐统一。

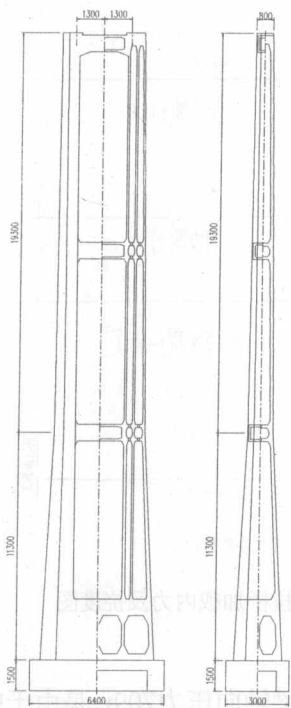


图7 主塔结构图

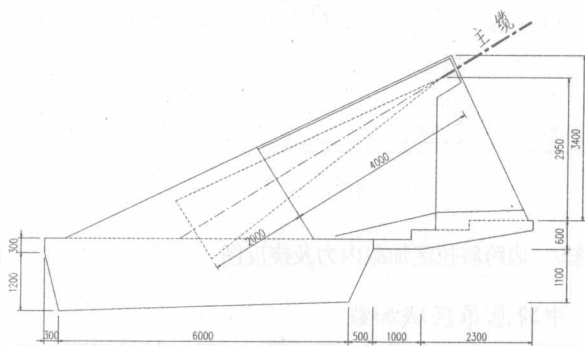


图8 锚碇结构图

5 总体静力分析

5.1 不同区域汽车荷载加载时结构行为

为全面考察悬吊斜拉组合结构的结构行为、传力途径,针对全长2112m主梁的不同结构区段按汽车荷载作用在边跨斜拉区域、中跨斜拉区域、中跨悬吊区域、中跨全跨、边跨及中跨同时加载进行静力分析,其结果表明主梁受力具有明显的结构特征,分别介绍如下:

5.1.1 边跨斜拉区域加汽车荷载

该工况下主梁的轴力、剪力、弯矩、挠度图如图9,其中轴力为负表示受压,弯矩为正值表示下缘受拉、示意在轴线的上方;主梁的挠度向下,表示在轴线的下方(以下同)。

由图9可知,边跨斜拉区域主梁轴力由支点向主塔逐渐增加,到主塔处达最大值743t。由于塔梁固接,并且主梁以下塔身刚度大,中跨主梁轴力很小。本工况剪力图表明,仅加载的边跨支点剪力值显著,主梁内其他位置基本无剪力;主梁内弯矩值也仅局限于加载跨及中跨主塔附近。由于本方案总体刚度较大,尤其斜拉区域内活载与恒载值的比值较小,竖向挠度很小,边跨竖向挠度仅0.116m,中跨悬吊斜拉结合面位置向上挠曲0.04m。

5.1.2 中跨斜拉区域加汽车荷载

该工况主梁内力及挠度如图10。图10中,主梁轴力主要出现在加载区域,向塔处增加;剪力及弯矩只有支点处有较大值;结合面处竖向挠度0.13m,结合面以左24m及32m处(分别对应两个节间和三个节间)挠度最大,为0.153m。

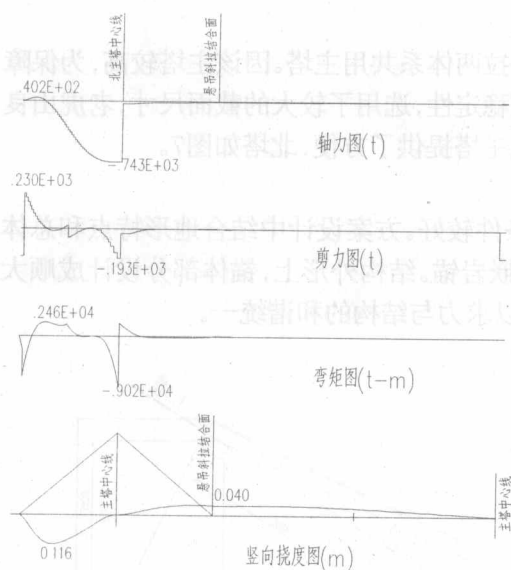


图9 边跨斜拉区加载内力及挠度图

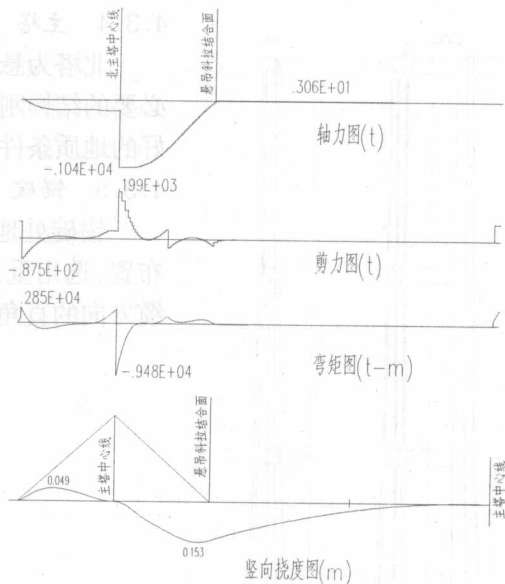


图10 中跨斜拉桥加载内力及挠度图

5.1.3 中跨悬吊区域加载

该工况主梁内力及挠度如图11。图11轴力图中,边跨非加载主梁轴向压力709t,是由于中跨加载时两体系共用的主塔向跨中挠曲,由边跨近塔顶处的斜拉索导入的压力,剪力图也反映这一现象。主梁内的弯矩值仅左侧支点处出现10700t-m,系由主梁梁端(锚跨)支点负反力所致;悬吊区弯矩均匀一致,所加集中荷载处局部出现峰值;挠度最大值出现在悬吊区中部,与主跨1232m悬索桥同等工况下挠度值相当。

5.1.4 中跨满布汽车荷载工况

该工况内力及挠度如图12。

本工况下,由于中跨斜拉区域加载,相应产生主梁轴力,除此之外,内力及挠度图形状与前一工况相似,支点处的弯矩值较前一工况大。

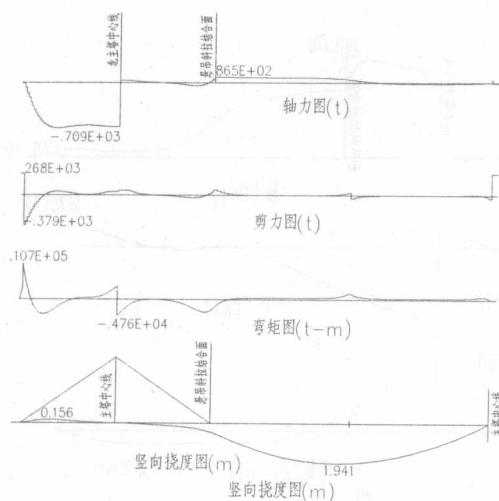


图11 中跨悬吊区加载内力及挠度图

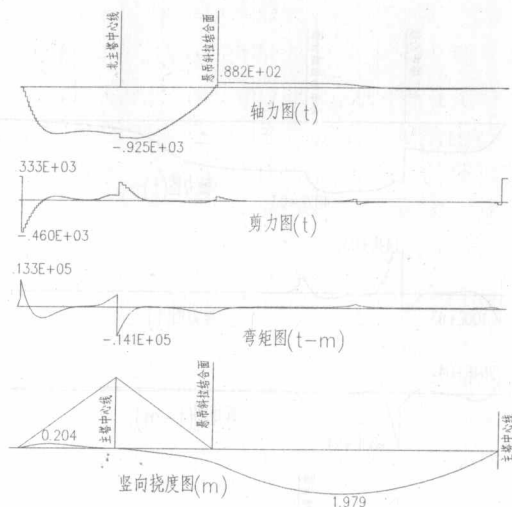


图12 中跨满载内力及挠度图

5.1.5 全桥满布汽车荷载工况

该工况与中跨满载相比,边跨主梁内轴向压力为逐渐增加,且量值更大,边跨由支座负反力引起的支点弯矩减小。

5.2 全桥体系升温

该工况下主缆、悬吊区钢箱梁整体升温 30°C ,斜拉索升温 25°C ,主塔及预应力主梁整体升温 20°C ,内力及挠度如图13。由于主梁升温伸长,加之北塔处塔梁固接,主梁内产生最大值为 482t 的压力;斜拉索因升温而伸长,北塔处主梁负弯矩(上缘受拉)为 $9590\text{t}\cdot\text{m}$;竖向挠度主要出现在悬吊区内,系由边、中跨主缆伸长所致。

5.3 侧向风荷载作用工况

该工况下主梁、主塔、主缆、斜拉索受侧向风载,内力及侧向挠度如图14。

本工况主梁内轴力值很小,水平面内有较大剪力,剪力值在主塔处达最大值 522t ,可见本方案中跨斜拉区内主梁所受风载多依赖主梁抗弯能力传递到塔梁固接处(本方案斜拉索为平行双索面),中跨悬吊区域内钢箱主梁部分区段内风载经由悬吊斜拉结合面及预应力主梁传递至共同主塔;塔梁固接处主梁侧向弯矩达 22 万吨米,为最大值,相应主梁以下主塔塔身受扭矩作用;侧向挠度图也表明,斜拉区域主梁侧向刚度远大于该区主缆拉索侧向刚度。

5.4 结合面区段的结构行为

悬吊斜拉结合面的结构行为是组合结构计算中考察的重点,计算内容包括吊、拉索力的加载影响区及结合面处主梁弯矩、挠度、相应的内力及位移值。

5.4.1 结合面区段前后的斜拉索、竖吊索的索力及其变幅

结合面区段斜拉索(编号X1、X2、X3、X4)及吊索(D1、D2、D3)的恒载索力、最大活载索力、应力幅如表1。其中D1吊索恒载拉力系在成桥后通过压重方式实现,以在任何情况下不出现松弛为原则。表中索力指上、下游共计。由表中应力幅看出,除D1吊索以外的斜拉索及吊索应力幅均不超过 200MPa 。

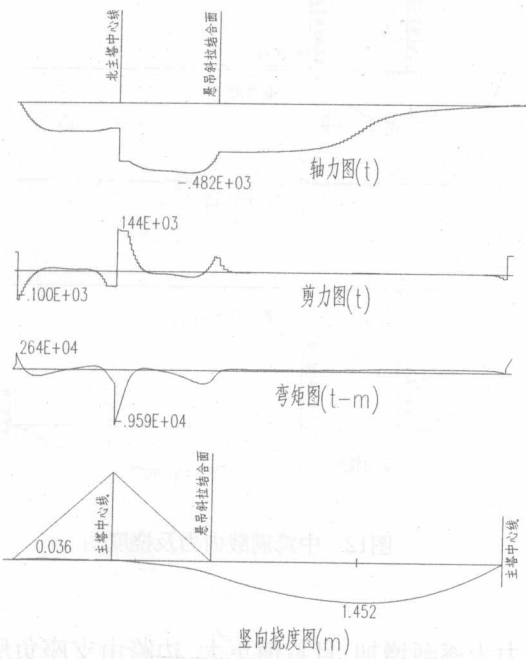


图13 全桥体系升温内力及挠度图

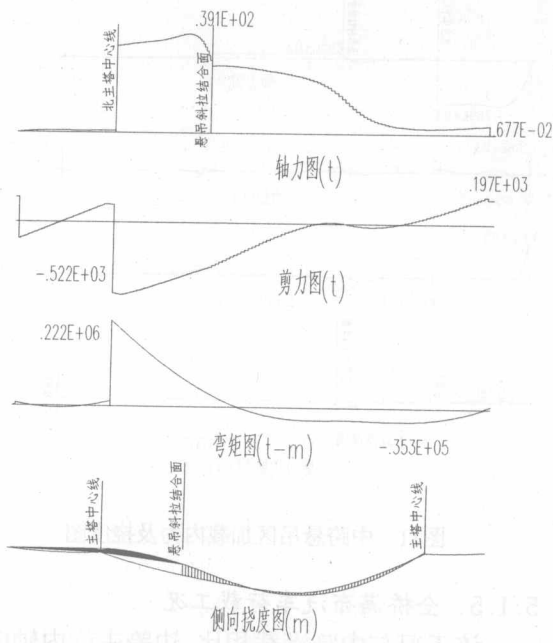


图14 侧向风载作用下内力及挠度图

表1 结合面区段斜拉索恒载索力、应力幅

索编号	恒载内力(t)	活载拉力(t)	活载卸载(t)	应力幅(MPa)
X1	1011.7	199.8	-118.8	186.53
X2	912.3	165.4	-106.8	159.37
X3	947.6	165.4	-94.8	152.34
X4	980.6	149.3	-82.6	135.77
D1	200 *	156.2	-128.7	
D2	252	87.33	-60.9	169.99
D3	252	47.6	-28.1	86.81

结合面以左斜拉区域内及以右悬吊区相当长范围内加载均可导致结合面下挠,其中尤以竖向力作用于距结合面48m处悬吊区内最为显著;荷载作用于悬吊区的右半部时,由于左侧主缆上挠、右侧主缆下挠,结合面主梁向上位移。结合面弯矩影响线(广义)图则显示,荷载在结合面附近移动时,弯矩值变化很快,且出现正、负交替,表明结合面处的确存

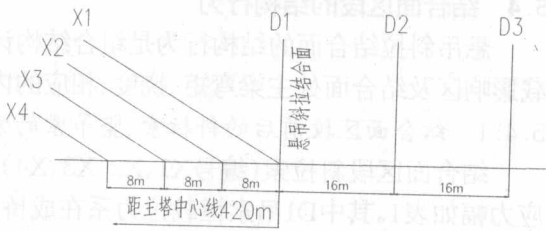


图15 结合面位置示意图

在传力方式的变化。当荷载作用在结合面以右相当长范围内,斜拉主梁的梁端成为悬吊区钢箱主梁的支承,负弯矩明显。结合面处吊索索力影响线(广义)也呈正、负交替形状,反映该吊索必然存在汽车荷载作用时索力增加和卸载现象。由图示,当竖向力作用在结合面以右32m~392m总长360m区域内,由于加载区主缆下挠、结合面处的吊索卸载。进一步的计算还表明,可能出现卸载的吊索仅三对,深入悬吊区后,吊索无明显卸载现象。

5.4.2 结合面最大正、负弯矩计算

以所求得广义弯矩影响线为据加汽车荷载,并略调整加载长度,得出针对结合面最大正弯矩(下缘受拉)和负弯矩(上缘受拉)布载时,全桥主梁的弯矩图,如图16。

由该图看出,虽然加载工况针对结合面产生最大弯矩而言,实际出现最大正、负弯矩的截面在结合面以左32m处,结合面左、右弯矩变化剧烈,向左深入斜拉区后弯矩值变化与普通斜拉桥弯矩变化幅度相仿,向右深入悬吊区后弯矩值平稳,趋势与普通悬索桥相同。计算所得结合面最大正、负弯矩分别为4830t-m和6690t-m,相对于宽30m、高4m的主梁而言,结合面的弯矩绝对值不大。

5.4.3 结合面最大正、负挠度计算

参照广义挠度影响线加载,并经计算得出针对结合面最大正挠度(向上)、负挠度(向下)加载时主梁的挠曲线如图17。

结合面最大正、负挠度分别为0.249m和0.84m,与斜拉区作为悬臂结构的跨度之比为1/1680及1/500,可见竖向挠曲刚度较大;挠度曲线线型匀顺,结合面附近有明显拐点,提示弯矩值变化;负挠度图还可验证,结合面左侧预应力混凝土主梁为右侧钢箱梁的弹性支点。

5.4.4 汽车荷载作用时主梁内各点最大弯矩值

主梁内各截面最大弯矩值见下图18,图中竖线表示截面所在位置,竖线旁的数值为弯矩值,正值标在横线以上,负值标注在横线下方。由该图看出,斜拉区域不同截面最大正负弯矩值相差较大,尤其支

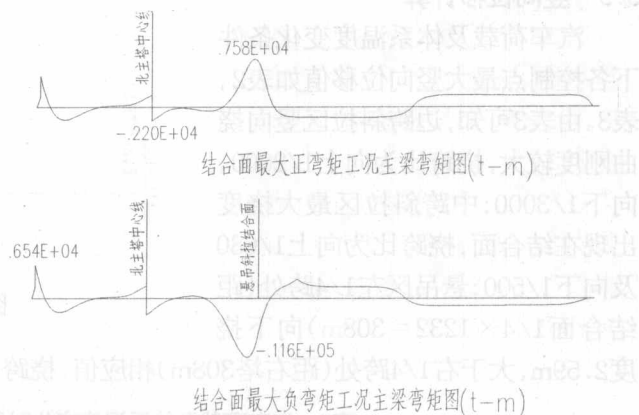


图16 结合面最大弯矩时主梁弯矩图

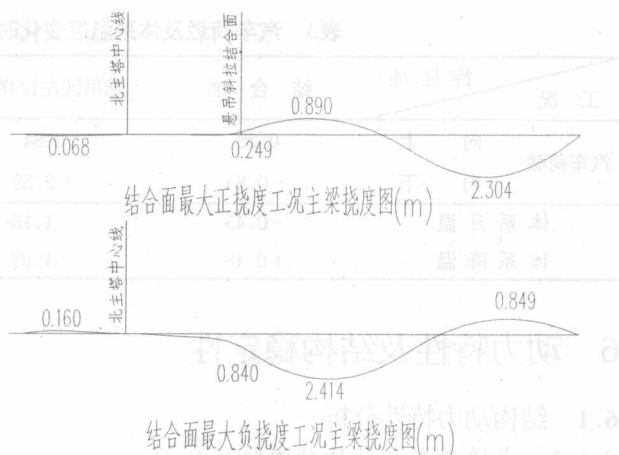


图17 结合面最大挠度时主梁挠度图

点、结合面附近变化最快;悬吊区主梁最大弯矩随截面位置变化不明显。就各截面弯矩总值而言,相对于本方案所采用的主梁截面尺寸而言,也仅结合面以左32m处弯矩值较大。

5.5 竖向位移计算

汽车荷载及体系温度变化条件下各控制点最大竖向位移值如表2、表3。由表3可知,边跨斜拉区竖向挠曲刚度较大,挠跨比为向上1/2000、向下1/3000;中跨斜拉区最大挠度出现在结合面,挠跨比为向上1/680及向下1/500;悬吊区左1/4跨处(距结合面 $1/4 \times 1232 = 308\text{m}$)向下挠度2.59m,大于右1/4跨处(距右塔308m)相应值,挠跨比为1/475。

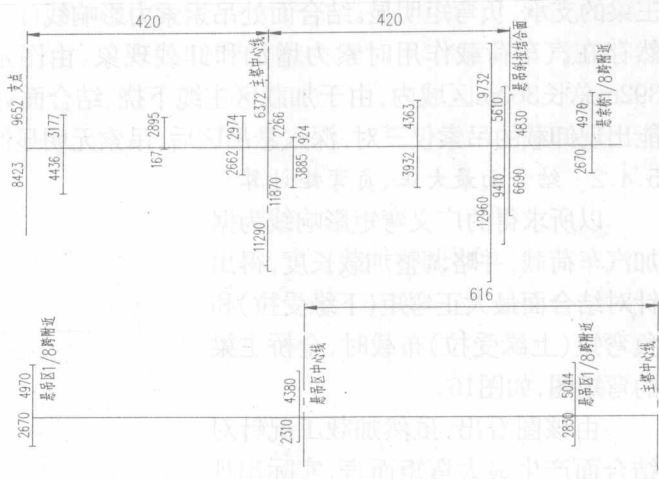


图18 主梁内各点最大弯矩

表2 汽车荷载及体系温度变化时各控制点最大位移值

工 况 \ 特 征 项		中跨主缆拉索中点	结合面处主缆	边跨预应力梁内	中跨预应力梁中部
汽车荷载	向 上	0.34	0.36	0.21	0.05
	向 下	-0.26	-0.74	-0.14	-0.38
体系升温		-0.22	-0.45	+0.03	-0.26
体系降温		+0.22	+0.47	-0.05	+0.26

表3 汽车荷载及体系温度变化时各控制点最大位移值

工 况 \ 特 征 项		结 合 面	悬吊区左1/4跨处	悬吊区段跨中	悬索区段右1/4跨处
汽车荷载	向 上	0.25	0.84	0.16	0.91
	向 下	-0.84	-2.59	-2.24	-2.20
体系升温		-0.45	-1.15	-1.45	-1.08
体系降温		+0.48	+1.23	+1.59	+1.19

6 动力特性及结构稳定性

6.1 结构动力特性分析

6.1.1 成桥状态的结构动力特性分析

成桥状态的振型主要特点见下表3,从振型特性来看:

(1)由于本桥采用悬吊斜拉混合体系,其高塔为一塔两用,斜拉桥区塔梁固结,斜拉区刚度大,前十阶振型均出现在悬吊区。