



SHANQU GAOSU GONGLU
LIANXU GANGGOU QIAOLIANG JIANSHE YU GUANLI
LUNWENJI

山区高速公路 连续刚构桥梁建设与管理 论文集

贵州省交通运输厅 编



3



人民交通出版社
China Communications Press

山区高速公路 连续刚构桥梁建设与管理 论文集

贵州省交通运输厅 编



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

连续刚构桥梁在贵州省得到了广泛的应用,桥梁建设者通过不断的探索和实践、总结和创新取得了不少成果。随着我国交通基础设施的不断建设,在今后还将修建大量的连续刚构桥梁。贵州省交通运输厅通过本论文集对连续刚构桥梁从设计、施工、运营管养等各个环节进行经验总结,以期为今后连续刚构桥梁的建设及管养提供指导和借鉴。

本论文集包括 73 篇论文,其中科研类 14 篇、设计类 16 篇、施工类 33 篇、综合类 10 篇。

本论文集适合从事公路桥梁研究、设计、施工等工作的人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

山区高速公路连续刚构桥梁建设与管理论文集 / 贵州省交通运输厅编. -- 北京:人民交通出版社,2012.9

ISBN 978-7-114-10104-5

I. ①山… II. ①贵… III. ①山区道路-高速公路-连续刚构桥-桥梁施工-文集 IV. ①U448.23-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 225541 号

书 名: 山区高速公路连续刚构桥梁建设与管理论文集

著 者: 贵州省交通运输厅

责任编辑: 周 宇

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 880 × 1230 1/16

印 张: 25.25

字 数: 700 千

版 次: 2012 年 9 月 第 1 版

印 次: 2012 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10104-5

定 价: 68.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《山区高速公路连续刚构桥梁建设与管理论文集》

编 委 会

主 任：罗 强

委 员：康厚荣 张晓忠 许湘华 汪金育 梅世龙
廖朝华 应 松 彭元诚 马平均 阮有力
母进伟 刘经建 何志军 郑兴贵 毛 旭
秦 林

序

贵州,地处云贵高原东侧的梯级状大斜坡上,境内山多地少,地形起伏较大,素有“地无三尺平”之称,是全国唯一没有平原支撑的山区省份。特殊的地形地貌、复杂的地质条件造成的多数桥位不通航、两岸陆地没有施工便道或便道修建困难、材料及构件运输条件差成为了影响贵州公路桥梁方案选择的重要因素。

采用挂篮悬臂浇筑连续刚构桥梁,对施工场地要求不高,施工工艺成熟,且其运营的整体性、舒适性和耐久性均较好,因此连续刚构桥成为贵州山区跨径在 100 ~ 250m 桥梁的首选桥型,得到了广泛的应用。从 1998 年贵阳东北绕城高速公路上首座连续刚构都拉营大桥建成通车至今,我省共建成连续刚构公路桥梁 90 余座,其中跨径最大的是贵毕公路上的六广河大桥,主跨 240m,自 2001 年建成通车至今,运行情况良好。目前省内在建的连续刚构桥梁有 60 余座,其中:水盘高速公路上的北盘江大桥跨径达到 290m,为国内最大跨径的混凝土连续刚构桥梁,预计 2013 年年初建成通车;毕威高速公路上的赫章大桥,最大墩高达 195m,为世界同类桥梁的最高桥墩,预计 2013 年年底建成通车。

贵州桥梁建设者通过不断的探索和研究,结合地形、地质情况,在孔跨布置、结构设计、施工工艺等方面作了大胆尝试,对适用于山区的大跨径、高墩连续刚构桥梁进行不断的总结和创新,取得了不少成果。如镇胜高速公路上的沙银沟大桥,桥梁平面位于圆曲线上($R = 620\text{m}$),桥梁为适应路线线形需要,在跨越深谷时采用高墩大跨径的曲线连续刚构桥梁,该桥的建成为交通运输部西部交通科技项目“高墩大跨径弯桥设计与施工技术研究”的完成提供了有力支撑;为克服地形地质条件的限制,避免在斜坡上设置桥墩引起的岸坡稳定问题,在峡谷底设置桥墩,拓展连续刚构的应用范围,修建了多座 T 形刚构桥,如贵毕公路上的小阁丫大桥;当峡谷两岸阶地不对称、常规等边跨形式的连续刚构布置较困难时,结合地形采用边孔跨径相差较大的不对称连续刚构,如盐津河二桥(孔跨 $76\text{m} + 198\text{m} + 110\text{m}$);为减少桥梁施工对既有道路运营的影响,采用先沿铁路范围以外两侧浇筑上部箱梁,后转体合龙的方法修建了多座连续刚构(或 T 构)桥梁,如跨越铁路的都拉营大桥和鞍山大桥。

连续刚构桥梁在贵州省得到了广泛的应用,桥梁建设者通过不断的探索和实践,取得了良好的成效。同时,我们也清醒地认识到由于连续刚构桥梁固有的特点,有的桥梁在建设及运营过程中还存在一些问题,如施工期间的箱梁底板崩裂和运营期间的底板、腹板开裂及跨中下挠等。目前,贵州省的交通基础设施建设正在如火如荼进行中,还有 3 000 余公里高速公路以及大量的地方道路尚待建设,在今后的公路交通建设中还将修建大量的连续刚构桥梁,故有必要对连续刚构桥梁从设计、施工、运营管养等各个环节进行经验总结,为今后连续刚构桥梁的建设及管养提供指导和借鉴。本论文集的出版以期达到此目的。

我们期望并坚信,通过建、管、养各方面的不断探索和总结,贵州山区高速公路连续刚构桥梁的建设和管理水平必将迈上新的台阶,以更好地为贵州省的交通基础设施建设及经济社会发展服务。

贵州省交通运输厅副厅长、总工程师:



2012 年 9 月

目 录

科 研 篇

空腹式连续刚构桥关键技术	彭元诚 汪金育 梅世龙 应 松(3)
不对称连续刚构的不对称系数.....	罗松涛 黄才良 荆友璋(15)
基于拉丁超立方抽样的蒙特卡罗数值模拟在桥梁结构可靠度分析中 的应用.....	张子翔 应 松 梅世龙 彭元诚 宗 昕(21)
基于蒙特卡罗数值模拟的桥梁可靠度分析.....	符 蓉 毛 旭 石大伟 彭元诚 宗 昕(29)
高墩大跨径连续刚构桥概率地震需求分析.....	龙晓鸿 彭元诚 汪金育 梅世龙(35)
大跨径连续刚构桥风振分析.....	彭元诚 宗 昕 吴游宇 秦 林(42)
高墩大跨径连续刚构桥双肢墩系梁设置道数与地震响应关系分析	饶毅刚 邓 果 陈 昊(50)
连续刚构桥高墩设计及墩梁结合部应力分析.....	陈冠桦 杨光强(55)
风力作用对高墩大跨连续刚构桥结构影响.....	袁 立(60)
超高墩大跨连续刚构桥地震响应分析.....	杨光强 杨 健(67)
石灰岩质集料机制砂混凝土力学性能的研究.....	蒋正武 彭元诚 梅世龙(71)
机制砂参数对混凝土性能的影响研究.....	严希凡 邓子龙 蒋正武 石大为 管桂平 梅世龙(77)
集料对自密实混凝土性能的影响.....	杨凯飞 韩 超 蒋正武 石大为 管桂平 梅世龙(83)
高墩大跨预应力混凝土连续刚构桥运营期间主要病害成因分析及其 健康监测内容研究.....	何 飞(88)

设 计 篇

思南岩头河大桥设计的几点优化.....	杨志军 陈 健(95)
弯连续刚构试验桥——贵州沙银沟大桥设计情况.....	吴怀义 杨 昀 杨万旭 杨 健(99)
超高墩大跨连续刚构桥设计	杨光强 韦定超(106)
节段施工连续刚构底板预应力外崩力的计算	杨 健 杨万旭 王银辉 姜明坤(110)
赤水市复兴大桥桥型设计	张阳宇(115)
防止连续刚构桥底板崩裂的设计措施	娄 锋(117)
思南县乌江二桥主桥桥型方案比选	高 丽 杨志军(120)
思南岩头河大桥非对称连续刚构设计	陈开国(125)

思南岩头河大桥桥型方案比选	刘泽华	(129)
大跨径连续刚构后期备用束设计探讨	韦定超 丁作常	(134)
多连跨大跨径刚构桥梁设计	刘立民 刘建军 陈健蕾	(138)
贵州山区超高墩大跨连续刚构设计问题与对策	李宇航	(141)
弯连续刚构桥梁设计	吴怀义 杨 健 刘立民	(144)
温泉特大桥高墩稳定性分析	丁作常 贾 宁	(149)
盐津河大桥设计特点	李银斌 余远程 杨鸿波	(155)
洋水河特大桥的主墩位置选择	唐 志 杜 镔 凌桂香	(159)

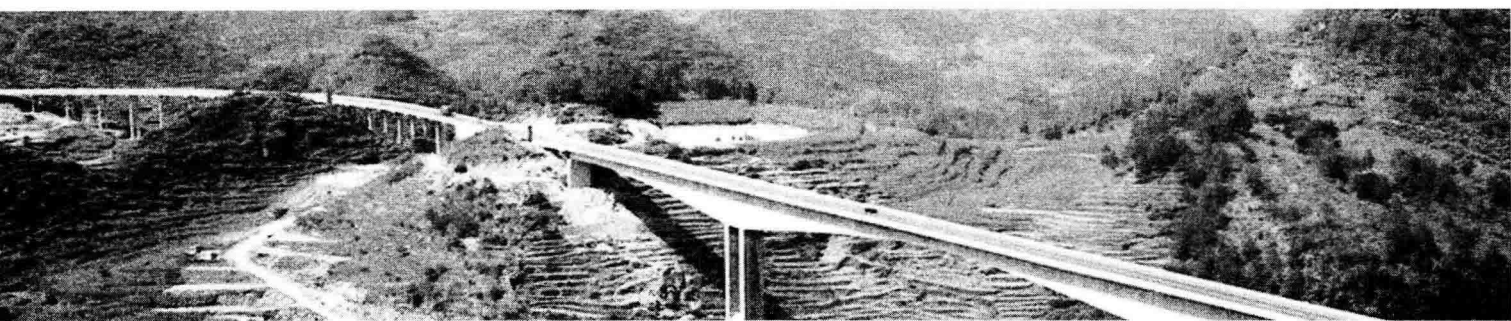
施 工 篇

小关水库特大桥主桥合龙顶推施工	杨志军	(165)
如何降低大体积混凝土水化热对施工质量影响	杨 旭 石继光	(169)
290m 空腹式刚构桥三角区箱梁施工支架受力分析	韩洪举	(173)
290m 空腹式刚构桥三角区施工技术	韩洪举 黄坤全	(179)
290m 刚构桥三角区施工期间支架及上弦箱梁的受力分析	郭吉平 韩洪举	(183)
高墩大跨径空腹式刚构桥空腹区施工方法研究	应 松 秦 林 陶 路	(189)
空腹式连续刚构桥施工过程受力特性分析	黄坤全 陶 路 彭旭民	(196)
空腹式连续刚构桥空腹区域施工过程扣索索力的优化	彭元诚 颜艳强 李国清 汪金育	(201)
公路 T 形连续刚构桥施工技术	田馥之	(210)
河头 1 号特大桥大跨径缆索吊设计	卢旭东	(218)
高墩边跨现浇段施工工艺研究	杨 旭 董 颖	(223)
连续刚构桥三向预应力施工技术	陈小欢	(227)
沙银沟大桥主桥施工监控测量方案及方法	卢道勇	(231)
浅析公路桥梁预应力施工中常见问题及防治措施	潘天军	(233)
桥梁高墩施工滑框翻模施工工艺研究	杨 旭 胡 涛 石继光	(236)
南高特大桥三角形挂篮设计与施工	何志军	(240)
南高特大桥挂篮荷载试验方法	彭 力	(245)
平寨特大桥边跨现浇支架设计与施工	汤利发	(249)
浅谈桥梁支架荷载试验方法	汤利发	(256)
通用有限元软件在桥梁施工支架计算中的应用	汤利发	(261)
悬臂模板在平寨特大桥桥墩施工中的应用	汤利发	(268)
贝雷梁挂篮设计与应用	李 江	(273)
空心薄壁高墩翻模施工技术	王海桥	(276)
空心薄壁高墩混凝土现场施工泵送技术	田汉丰	(279)
临近铁路既有石质路基及人工挖孔桩控制爆破施工工法	王 权	(283)

大体积混凝土温度应力施工控制探讨	王海桥	(288)
北盘江特大桥—8号墩承台大体积混凝土施工	彭泽鸣 邢应发	(292)
浅谈桥梁挂篮施工技术	陶永俊 孙瑞华	(295)
山区连续刚构桥高墩边跨不对称施工技术研究	孙建平 杨立军	(301)
平溪特大桥箱梁挂篮施工技术	毛 旭	(313)
平溪特大桥主墩墩身施工技术	毛 旭 刘险峰	(319)
落脚河大桥连续刚构挂篮施工工艺浅谈	张和阔	(323)
装配式钢箱——预应力混凝土组合连续刚构桥探索	向 红	(328)

综 合 篇

六广河大桥设计施工及营运情况的探讨	黄 盛 刘经健	(341)
高墩大跨径弯桥设计与施工技术指南	杨 昀 贺拴海 吴怀义 母敬伟	(347)
贵州省山区公路连续刚构桥梁特点	佘远程 李银斌 杨鸿波	(356)
连续刚构桥在地方公路上的运用与发展	郑兴贵	(360)
浅谈连续刚构桥梁悬臂箱梁施工监理	廖文龙	(362)
高墩形变观测数据间断点的识别方法	计中彦 汤 怀	(367)
赫章特大桥主墩形变观测结果分析	计中彦 汤 怀 卢道勇	(373)
大体积混凝土施工中的质量控制初探	彭 力	(379)
桥梁竖向预应力施工质量控制	李 庚	(383)
北盘江大桥大体积混凝土温控分析与监测	洪 滨	(386)



科研篇

空腹式连续刚构桥关键技术

彭元诚¹ 汪金育² 梅世龙² 应松²

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司 430056; 2. 贵州高速公路开发总公司 550004)

摘 要:空腹式连续刚构桥型为在常规连续刚构形式上的一种改型,其主要思路是加大箱梁根部高度并对箱梁根部的腹板进行挖空,从而提高结构承载效率,增强桥梁跨越能力。空腹式连续刚构桥具有与常规连续刚构桥相似的平衡悬臂施工特点和运营维护费用少、工程造价低廉的优点,其经济跨径为 220~350m,可望填补常规连续刚构桥适用跨径和斜拉桥适用跨径之间的空白,实现一种具有中国特色的新桥型。本文以一座实桥为例,简要介绍该桥型的结构与关键技术。

关键词:空腹式连续刚构 连续刚构 桥型研究 设计 关键技术

0 引言

连续刚构桥采用悬臂法施工,对机具、场地及运输条件的要求低,在山高坡陡、施工场地狭窄的山区,具有很强的适应性。连续刚构桥具有结构受力性能好、能适应一定的平面线形变化、行车平顺舒适、后期养护工作量小的特点,使之成为山区大跨径桥梁建设的首选。根据初步统计,截至 2011 年,我国 120m 以上大跨径连续刚构桥已超过 200 座。自 2000 年以来,由于多座大跨径连续刚构桥出现了跨中开裂、下挠问题,人们倾向于将跨径限制在 200~240m。

目前,提高连续刚构桥的跨越能力多从材料方面入手,挪威 Stolma 大桥和 Raftsund 大桥,主跨径为 301m 和 298m,跨中 184m 和 224m 箱梁采用 LC60 轻质混凝土;重庆石板坡大桥,主跨径 330m,跨中 103m 区段采用钢箱梁。这些提高跨越能力的方式,都因建设条件特殊、适应范围小而不具有普遍意义。

空腹式连续刚构桥,是近年由中交第二公路勘察设计研究院提出并申请专利的一种新桥型,是在常规连续刚构形式上的一种新的改型,其主要思路是通过在箱梁根部附近设置斜腿,加大根部区域的结构刚度,或者说,对箱梁根部的腹板进行挖空,减轻自重,具有梁—拱组合力学性能,从而提高其跨越能力。空腹式连续刚构采用平衡悬臂法施工,具有运营维护费用少、工程造价低廉的优点。贵州六盘水至盘县高速公路北盘江特大桥为空腹式连续刚构新桥型的典型实例,桥跨布置为 82.5m + 220m + 290m + 220m + 82.5m,五跨连续,其中,主跨 290m 为空腹式连续刚构,次主跨 220m 为常规连续刚构与空腹式连续刚构的组合,7 号主墩高 125m,8 号主墩高 178m。北盘江特大桥地处黔西山区,山高谷深,坡陡路险,施工条件极其困难,其规模、跨径均居世界第一。主桥桥型布置见图 1。

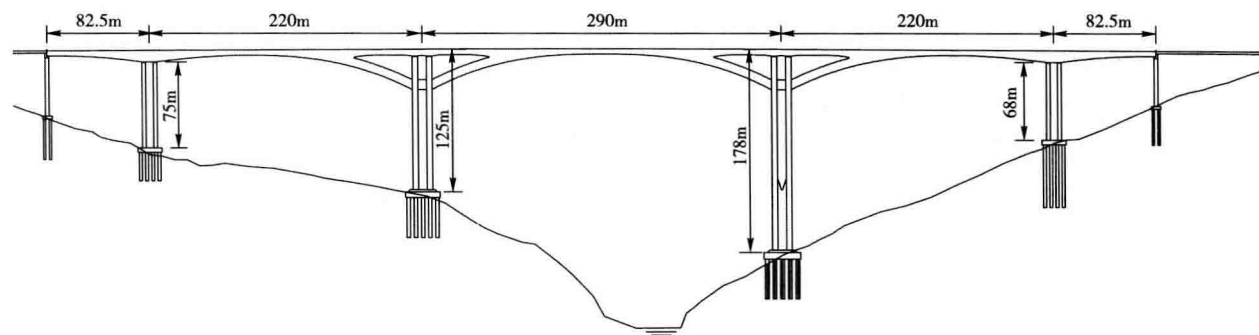


图 1 北盘江特大桥梁主桥布置

1 空腹式连续刚构桥的结构要素与参数

空腹区域长度、下弦倾角等参数的变化对结构受力的合理性、经济性影响非常大,通过结构的拓扑优化,进行结构体系的研究,可从理论层次论证这种新桥型的合理性并得出关键性的结构要素。

(1) 梁底曲线

实腹式区段的梁底缘与下弦底缘按统一的幂次函数曲线计算,平顺变化,幂函数次数 2.5 ~ 3.0。

(2) 空腹区域长度

空腹区域长度,根据下弦悬臂施工时的受力、成桥后下弦受力、跨中实腹式区段的受力综合考虑,根据拓扑优化和力学计算分析比较,建议取跨径的 1/6 ~ 1/4。

(3) 根部总高度和下弦最大倾角

下弦根部至梁顶的高度,即根部总高度,取跨径的 1/9 ~ 1/7,下弦的最大倾角控制在 25° ~ 35°。

(4) 上、下弦梁高

上弦梁段的高度取空腹区域长度的 1/12 ~ 1/10、跨径的 1/60 ~ 1/50;下弦梁段的高度取跨径的 1/43 ~ 1/38;实腹式区段的梁高,上、下弦会合处高度取实腹式区段长度的 1/18 ~ 1/15、跨径的 1/25 ~ 1/23,跨中梁高取跨径的 1/60 ~ 1/40。

2 空腹区域上、下弦施工

空腹式连续刚构桥施工,关键是空腹区域上弦箱梁和下弦斜腿的施工及合龙段施工。根据结构特点,提出了三种悬臂施工方案,如图 2 所示。

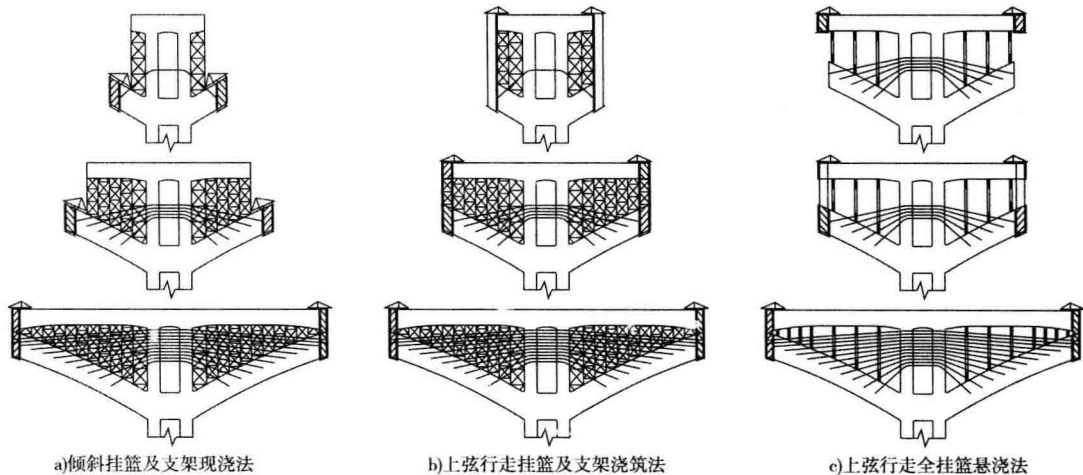


图2 空腹区域悬臂施工方法

2.1 倾斜挂篮及支架现浇法(方案1)

其基本思路是,下弦倾斜行走挂篮悬浇下弦、支架法浇筑上弦。

(1) 在浇筑完成主墩及其与下弦的根部连接段后,在下弦安装可倾斜行走、浇筑的挂篮。

(2) 对称浇筑下弦节段混凝土、养护,达到标号和养护龄期后,张拉下弦预应力,张拉下弦临时扣索。

(3) 前移挂篮,在已完成的下弦处,搭设支架、预压,安装上弦箱梁模板。

(4) 左右平衡浇筑上弦箱梁混凝土,张拉预应力。

(5) 重复(2) ~ (4),直至上、下弦会合部位。

- (6) 拆除下弦挂篮。
- (7) 在已完成的上弦箱梁梁端安装挂篮。
- (8) 对称浇筑上、下弦会合段,完成空腹区域施工。
- (9) 转入常规区段箱梁悬臂浇筑阶段,完成悬臂施工。

2.2 上弦行走挂篮及支架浇筑法(方案2)

其基本思路是,上弦行走挂篮悬浇下弦、支架法浇筑上弦。

- (1) 浇筑墩柱及上弦箱梁0号块。
- (2) 在完成的0号块顶处安装挂篮。
- (3) 对称浇筑下弦节段混凝土,张拉预应力,张拉下弦临时扣索。
- (4) 在已浇筑下弦安装相对应的上弦箱梁节段模板支架、预压。
- (5) 对称浇筑上弦箱梁节段混凝土,张拉预应力。
- (6) 前移挂篮。
- (7) 重复(3)~(6),直至完成上、下弦节段的施工。
- (8) 悬臂对称浇筑上、下弦会合段,完成空腹区域施工。
- (9) 转入常规区段箱梁悬臂浇筑,完成悬臂施工。

2.3 上弦行走全挂篮悬浇法(方案3)

其基本思路是,上下弦均采用挂篮悬浇,挂篮行走于上弦,上弦逐段支架顶托。

- (1) 浇筑墩柱及上弦箱梁0号块。
- (2) 在完成的0号块顶处安装挂篮。
- (3) 对称浇筑上弦箱梁节段混凝土,张拉预应力。
- (4) 将底篮放低到下弦,对称浇筑下弦(斜腿)节段混凝土,张拉预应力,张拉下弦临时扣索。
- (5) 在已完成的上、下弦(斜腿)之间安装钢支架,采用千斤顶对上弦顶托,在焊好顶托连接部后方可拆移千斤顶。
- (6) 前移挂篮。
- (7) 重复(3)~(6),直至完成上、下弦节段的施工。
- (8) 悬臂对称浇筑上、下弦会合段,完成空腹区域施工。
- (9) 转入常规区段箱梁悬臂浇筑,完成悬臂施工。

三种方案的共同点是对下弦都采用挂篮浇筑,主要差别是挂篮行走的位置和上弦箱梁的浇筑方法。其比较分析如下。

方案1的优点是,上、下弦施工期间的受力明确,上弦箱梁的受力较理想;缺点是,挂篮行走于斜腿,要特殊设计,且挂篮与临时扣索存在一定干扰不能后退,斜腿挂篮的拆卸存在困难,在完成斜腿部分浇筑后要重新安装位于箱梁端部的常规挂篮,存在较大的工序转换。

方案2的优点是,挂篮为常规形式,施工期间一直位于箱梁上,没有二次拆装问题;缺点是,为了使得挂篮可以在箱梁上行走,浇完下弦后需要逐步搭设节段支架浇筑上弦箱梁,上弦箱梁及其支架均参与了后续节段的受力,上弦箱梁的受力不甚明确,完成后的状态不如方案1理想。

方案3的优点是,挂篮为常规形式,施工期间一直位于箱梁上,且上、下弦均采用挂篮浇筑,没有二次拆装问题;缺点是,为了使得挂篮可以在箱梁上行走,浇完下弦后需要逐步搭设节段支架顶托上弦箱梁,上弦箱梁及其支架均参与了后续节段的受力,顶托力的控制要求非常严格,上弦箱梁的受力状态不明确,完成后的状态最差。

综合各方面因素,推荐北盘江大桥采用方案1,其中,箱梁节段最大长度4.5m,最大浇筑质量350t;下弦节段最大长度4.0m,最大倾角 29.2° ,最大浇筑质量240t。

3 北盘江大桥设计

3.1 上部构造

全桥共五跨,采用C55混凝土。7、8号为主悬浇T主墩,采用290m跨径空腹式T构,最大悬臂长度144m。下弦底缘与主梁底缘线为2.5次抛物线、平顺衔接;桥墩处上下弦高度35m,跨中箱梁高4.5m;下弦为等截面箱形断面,宽6.5m,高7.5m;上弦为单箱单室断面,悬臂长2m,箱底宽6.5m,顶板厚0.28m;上弦标准梁高5m,与桥墩节点处高度增加至7m,与下弦交汇后形成整体。主要断面见图3。

6、9号墩为次悬浇T主墩,采用150m跨径T构,最大悬臂长度74m,采用常规设计,单箱单室,悬臂长度为2m,顶板厚0.28m;墩顶处箱梁高10m,为保证与主悬浇空腹式T构的衔接,跨中梁高取4.5m,梁高及底板厚度均按二次抛物线变化。

主桥上部构造按全预应力混凝土设计,采用三向预应力。箱梁纵向预应力、会合段箱梁竖向预应力、0号块与墩身连接采用 $\phi^15.2$ 预应力钢绞线、群锚体系,顶板横向预应力采用 $\phi^15.2$ 钢绞线,扁锚体系,钢绞线抗拉标准强度 $f_{pk} = 1\ 860\ \text{MPa}$,设计锚下张拉控制应力 $f_{con} = (0.7 \sim 0.75) \times 1\ 860 = 1\ 302 \sim 1\ 395\ \text{MPa}$;箱梁部分节段、下弦节段竖向预应力采用JL32精轧螺纹钢筋,YGM锚体系,抗拉标准强度 $f_{pk} = 785\ \text{MPa}$,设计锚下张拉控制应力 $f_{con} = 706.5\ \text{MPa}$ 。

3.2 下部构造

全桥主墩为6、7、8、9号桥墩,采用C50混凝土。其中7、8号为主悬浇T主墩,6、9号为次悬浇T主墩,主墩的高度分别为75m、118m、171m、68m,均采用双肢薄壁空心截面。7、8号主墩两肢间净距7m,与斜腿交会点以上采用等截面,余下部分横桥向按1:100放坡,8号主墩高度大,底部51m两肢桥墩间采用0.5m厚薄壁连为整体。单肢等截面部分为顺桥向4.5m,横桥向7.5m。主墩基础采用承台接群桩基础。7号主墩承台厚5m,采用25根直径2.8m桩基础;8号主墩承台厚6m,采用25根直径3m桩基础;承台顶另设2m墩座。6、9号主墩两肢间净距6m,单肢截面顺桥向3m,墩顶5m段横桥向7.5m,墩顶5m以下按1:100放坡。四角设0.5m圆弧过渡。6、9号主墩承台、桩基按整体设计,承台厚4m,采用16根直径2.4m桩基础。主墩主要截面见图4。

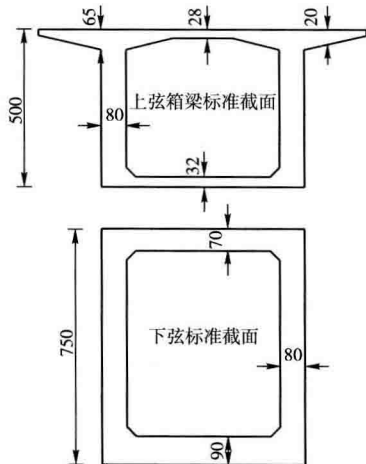


图3 上构主要截面(尺寸单位:cm)

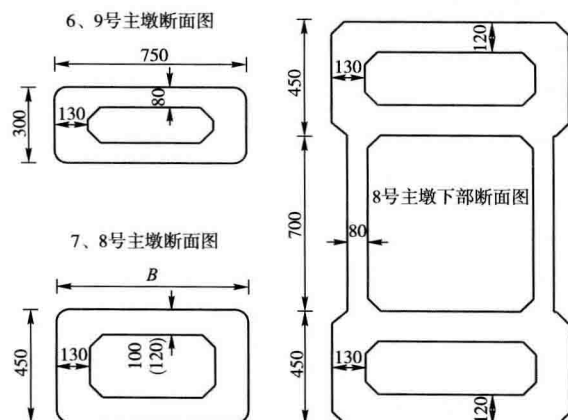


图4 主墩主要截面(尺寸单位:cm)

4 主桥结构分析

4.1 施工及运营阶段静力分析

按施工流程逐阶段计算结构各截面内力、应力和位移,每个悬臂的施工阶段计算包括挂篮就位、

梁段浇筑、张拉预应力与灌浆及挂篮前移四个主要工况。成桥运营计算包括恒载、活载、预应力、混凝土收缩、徐变、支座沉降、温度及静风力等工况,按规范进行最不利荷载组合,并据此进行截面的配束设计。总体静力计算分别采用“桥梁博士”和 MIDAS 软件进行计算和校核。局部应力情况复杂位置采用有限元实体模型进行分析。

4.1.1 计算参数

(1)永久作用:持久状况永久作用,除考虑了混凝土结构自重、混凝土收缩及徐变作用、预加力等作用外,还考虑了基础变位作用,基础变位按 0.02m 不均匀沉降位移考虑。

(2)可变作用:包括基本可变作用、温度作用和风荷载。其中,基本可变作用按公路—I级考虑,横向按双车道加载,同时考虑横向偏载影响,按规范规定进行了纵向折减。温度作用主要考虑了整体升、降温及按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)规定的结构梯度温度进行计算。

风荷载:根据调查,推算桥址处设计基准风速 30.4m/s,施工阶段按 10 年重现期计算,设计风速 25.5m/s。风荷载按《公路桥梁抗风设计规范(附条文说明)》(JTG/T D60-01—2004)计算。

4.1.2 施工全过程静力分析

在北盘江特大桥施工全过程静力空间行为分析和稳定分析中,通过采用 MIDAS 计算模型来实现;在山区峡谷风荷载作用下的动力响应与减振分析中,采用 ANSYS 计算模型来进行;结构的地震反应谱和时程分析,采用 ANSYS 计算模型来实现,采用 SAP2000 计算模型来进行全桥地震易损性方面的研究。不同的有限元计算模型如图 5 所示。

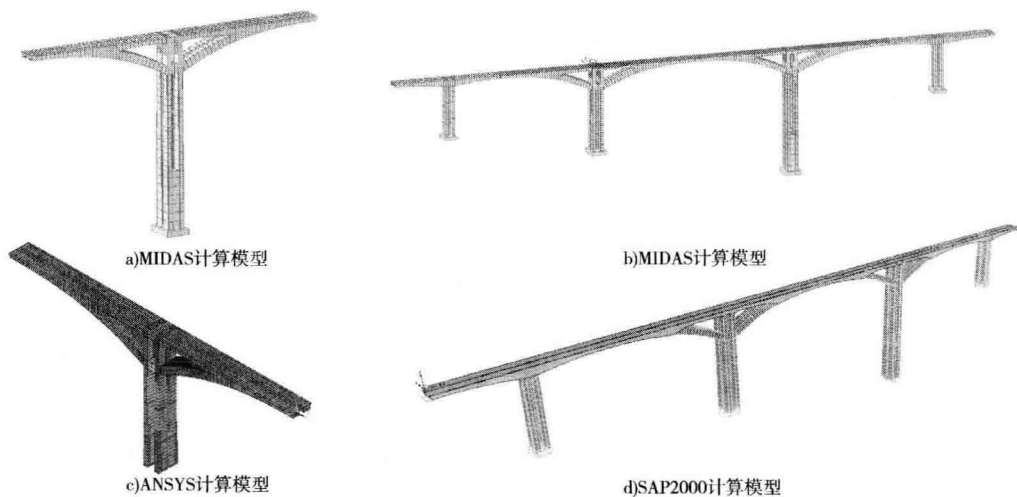


图5 施工、成桥阶段三维有限元模型

选取 2011 年 4 月所得的监控数据为对象,将 7 号墩左、右幅相关截面的应力监控数据和 MIDAS 计算数据进行对比,相关对比结果如表 1 所示。由表 1 可知,应力测试结果同理论计算值间的变化规律基本吻合,数据变化比较有规律,无异常现象。7 号墩左、右幅应力实测平均值拉应力均不大于容许值,结构处于安全状态。

综合考虑短暂状况与持久状况时的各种工况,包括自重、施工荷载、预应力、预应力二次力、收缩徐变次内力、非线性温差、活载、基础变位等作用,对箱梁施工、使用阶段各截面的内力、应力、位移,进行了计算分析,并按规范进行验算。经计算,主跨活载(汽车)最大竖向位移 6.5cm \downarrow , $\delta/L = 1/4462 < 1/600$ 。各不利工况下,主梁混凝土正截面没有出现拉应力,标准组合最大压应力为 16.5MPa,亦满足规范要求。主墩最大压应力为 11.7MPa。计算结果表明结构安全可靠,各项指标均满足规范要求。

7号墩左幅 z^2 、 z^2 截面应力测试结果

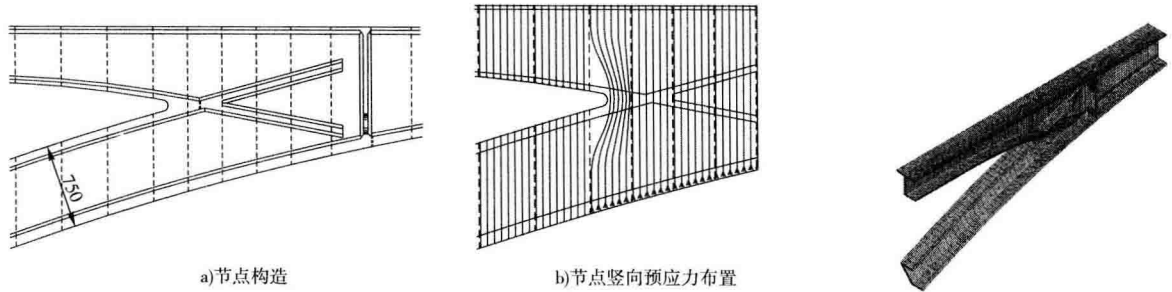
表 1

测点位置		z^2 '截面顶板			z^2 '截面底板		z^2 截面顶板			z^2 截面底板		
工况	测点号	896	58	85	233	266	853	84	874	237	204	228
z^2 张拉后	实测值	-1.3	-1.3	-1.3	0.2	0.2	-1.3	-1.3	-1.3	0.2	0.2	0.2
	理论值	-1.3	-1.3	-1.3	0.2	0.2	-1.3	-1.3	-1.3	0.2	0.2	0.2
	差值	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
z^3 浇筑后	实测值	-1.3	-1.6	-1.5	0.2	0.1	-1.2	-1.7	-1.3	-0.1	-0.3	-0.1
	理论值	-1.2	-1.2	-1.2	0.2	0.2	0.2	-1.2	-1.2	-1.2	0.2	0.2
	差值	-0.1	-0.4	-0.3	0.0	-0.1	-1.4	-0.5	-0.1	1.1	-0.5	-0.3
z^5 张拉后	实测值	-2.1	-2.5	-2.1	-0.2	-0.4	-1.9	-2.6	-1.9	-0.7	-1.0	-0.7
	理论值	-1.3	-1.3	-1.3	0.2	0.2	0.2	-1.3	-1.3	-1.3	0.2	0.2
	差值	-0.8	-1.2	-0.8	-0.4	-0.6	-2.1	-1.3	-0.6	0.6	-1.2	-0.9
...	

注:表中应力 = 应变 $\times E_c$ (规范设计值); 应力单位为: MPa; 压应力为“-”, 拉应力为“+”; 差值 = 实测值 - 计算值。

4.1.3 下弦—梁体会合节点空间应力分析

北盘江特大桥的下弦与主梁梁体的会合处为整桥的一个关键点,其构造、受力复杂;全桥杆系计算模型并不能反映出该会合点处的真实的应力分布。因此,需要建立空间实体模型,准确模拟出该处的应力情况。下弦与梁体会合处构造、竖向预应力布置及实体模型如图 6、图 7 所示。



a)节点构造

b)节点竖向预应力布置

图 6 下弦与梁体会合处构造

图 7 实体模型

实体模型分析表明,在该构造计算中,下弦—梁体会合节点处受力合理,各项应力指标满足规范要求。

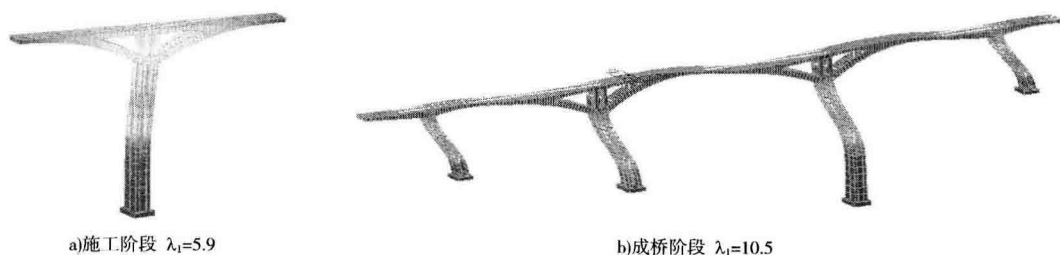
4.2 高墩稳定分析

主墩高度最大为 172m,桥面距墩底 178m,属典型的高墩类型。高墩稳定分析包括高墩整体屈曲稳定性、薄壁局部屈曲稳定性及高墩低频风振对施工、运营阶段安全性影响等。

采用 MIDAS/Civil 进行屈曲分析时,需要构成几何刚度,为了构成几何刚度,需要静力分析的内力结果。为此分别进行了施工最大悬臂阶段及成桥运营阶段的第一类稳定分析、第二类稳定分析以及局部稳定分析,计算结果如下。

4.2.1 第一类稳定分析

施工最大悬臂阶段、成桥阶段第 1 阶屈曲模态如图 8 所示。



a)施工阶段 $\lambda_1=5.9$

b)成桥阶段 $\lambda_1=10.5$

图 8 施工最大悬臂阶段、成桥阶段第 1 阶屈曲模态

4.2.2 第二类稳定分析

第二类稳定分析采用截面边缘纤维屈服准则和压溃准则作为失稳判据,对成桥阶段四种荷载工况进行稳定分析(考虑风荷载和日照偏差引起的初始缺陷),其中工况 1-1、工况 1-3 的荷载—位移如图 9 所示,成桥阶段二类稳定分析结果如表 2 所示。

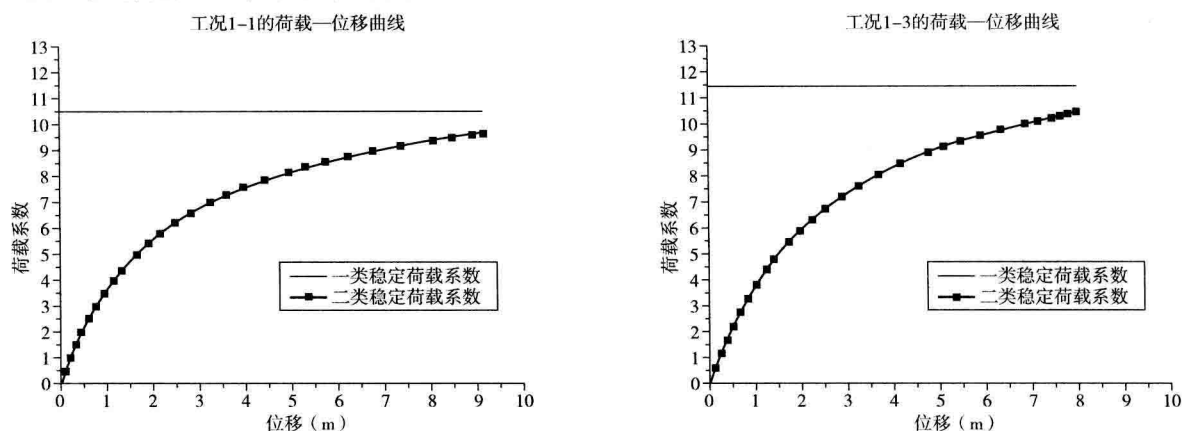


图 9 工况 1-1 和工况 1-3 的荷载—位移曲线

北盘江大桥进行的弹塑性稳定分析结果表明,成桥阶段的最小稳定安全系数均大于最小荷载组合系数,结构偏安全。

成桥阶段二类稳定分析结果

表 2

荷载工况	屈曲准则	稳定安全系数
1-1	准则 1:桥墩压应力达 $0.8f_{ck} = 26\text{MPa}$	4.363
	准则 2:压溃准则	9.659
1-2	准则 1:桥墩压应力达 $0.8f_{ck} = 26\text{MPa}$	4.351
	准则 2:压溃准则	9.359
1-3	准则 1:桥墩压应力达 $0.8f_{ck} = 26\text{MPa}$	4.631
	准则 2:压溃准则	9.556
1-4	准则 1:桥墩压应力达 $0.8f_{ck} = 26\text{MPa}$	4.362
	准则 2:压溃准则	9.556

4.3 动力与抗震分析

4.3.1 全桥动力特性计算

计算模型考虑桥梁二期恒载的质量。从计算结果来看,基本周期为 6.01s,属长周期。第一振型为横桥向侧弯。

4.3.2 地震反应谱及时程分析

按《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008),该桥主跨 290m,属 A 类抗震设防类别。E1 地震作用抗震重要性系数 $C_i = 1.0$,E2 地震作用抗震重要性系数 $C_i = 1.7$;抗震设防烈度为 6 度,地震动峰值加速度为 $0.05g$,地震动反应谱特征周期调整为 $0.3s$,场地类别为 I 类;场地系数 $C_s = 1.2$;阻尼调整系数为 $C_d = 1.0$;经计算,E1 地震作用水平设计加速度反应谱最大值 $S_{max} = 0.135g$,E2 地震作用水平设计加速度反应谱最大值 $S_{max} = 0.2295g$ 。采用反应谱的方法对全桥进行抗震计算(图 10),考虑地震作用,对结构的承载能力极限状态进行验算。Imp. Vall 波水平向地震动记录,如图 11 所示。