

DANZHULAN XIEDIAOGAN XUANSUOQIAO
GUANJIAN JISHU JI FENGXIAN GUANLI

单主缆斜吊杆悬索桥 关键技术及风险管理

唐俊 编著



人民交通出版社
China Communications Press

DANZHULAN XIEDIAOGAN XUANSUOQIAO
GUANJIAN JISHU JI FENGXIAN GUANLI

单主缆斜吊杆悬索桥 关键技术及风险管理

唐俊 编著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书主要介绍了单主缆斜吊杆悬索桥——双拥桥的关键技术及风险管理,共分为七章,内容包括绪论、溶蚀透水地层桥梁基础和重力式锚碇施工技术、变截面钢索塔制造与安装、主桥钢箱梁制造与安装、缆索安装及成桥体系转换、施工安全风险、项目管理和科技攻关。

本书适用于从事桥梁工程建设管理的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

单主缆斜吊杆悬索桥关键技术及风险管理/唐俊编
著. —北京:人民交通出版社,2012.8
ISBN 978-7-114-09916-8

I. ①单… II. ①唐… III. ①系杆拱桥—悬索桥—技
术管理—风险管理 IV. ①U448.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第147626号

书 名:单主缆斜吊杆悬索桥关键技术及风险管理

著 作 者:唐 俊

责任编辑:王 霞(wxcpress@126.com)

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:北京盛通印刷股份有限公司

开 本:787×960

印 张:14

字 数:216千

版 次:2012年8月 第1版

印 次:2012年8月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09916-8

定 价:85.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《单主缆斜吊杆悬索桥关键技术及风险管理》 编 委 会

主任委员：唐 俊

副主任委员：何奇钦 姚松柏 邓海洪 林智敏 罗 桃

编 委：李 飞 李 杨 黄 新 伍 军 王家斌

曹发辉 王海龙 刘明友 李光均 夏亚飞

周运志 申俊光 杨世文 王凯亮 项 进

甘 科

广西柳州市双拥(鸬鹚江)大桥技术专家组名单

组 长：杨 进

副组长：郑 机 周振强 强士中 闫子才

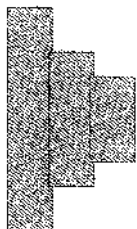
成 员：(按姓氏笔画排序)

尤继勤 王武勤 卢 伟 左莉萍 龙 勇

张自润 李兴华 沈锐利 周新亚 范文理

唐明翰 唐柏石 都昌林 黄道全 程季青

蒋劲松 穆金楷



前言

随着经济发展和科技进步,设计、施工单位创新能力逐步提升,在桥梁建设领域涌现出许多科技创新工程,积累了丰富的施工经验,提高了桥梁设计和施工水平。于2011年12月竣工的广西柳州市双拥(鸬鹚江)大桥工程为国内首座、世界上最大跨度的单主缆单索面公路悬索桥,为展现此独特桥型的施工技术及创新思路,特编写本书总结其施工关键技术,为读者研究、学习提供参考。

本书共分七章。书中重点介绍了溶蚀透水地层桥梁基础、利用空间支架提升安装变截面钢主塔、宽幅钢主梁单滑道连续顶推等施工技术,同时针对技术含量高、施工难度大、安全风险高的特殊桥型结构,对施工过程中的风险管理进行了总结。本书以施工方案、施工方法和过程控制为介绍重点,同时各项方案之间的相互关联性也体现出单主缆单索面悬索桥的成套施工技术。本书内容若涉及到有关专利技术,受专利保护。

本桥由中铁四局集团有限公司、中铁上海工程局有限公司为主要施工方完成施工,同时参与施工的单位还有中铁山桥集团有限公司、柳州欧维姆机械股份有限公司等。本桥施工过程中得到了投资方中铁西南投资管理有限公司与柳州市城市投资建设发展有限公司,设计方四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院,监控单位中铁大桥局武汉桥梁科学研究院,监理单位甘肃铁一院工程监理有限责任公司,勘测单位柳州市勘察测绘研究院等单位的大力帮助和指导,在此表示衷心感谢。

本书编写主要由负责项目施工的相关人员完成,限于编者水平,可能存在不当之处,恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2012年5月



目录

第一章 绪论	1
第一节 悬索桥的发展.....	1
第二节 工程概况	12
第三节 总体设计和主桥设计	20
第二章 溶蚀透水地层桥梁基础和重力式锚碇施工技术	28
第一节 溶蚀透水地质钻孔桩施工技术	28
第二节 索塔基础施工	33
第三节 锚碇深基坑围护方案的设计与施工	40
第三章 变截面钢索塔制造与安装	61
第一节 索塔加工制造与运输	61
第二节 索塔吊装方案设计与施工	74
第三节 索塔安装施工	83
第四节 索塔养护维修平台设计	91
第五节 索塔安装的监控量测	93
第四章 主桥钢箱梁制造与安装	100
第一节 钢箱梁加工制造与运输.....	100
第二节 钢箱梁安装方案设计与施工.....	109
第三节 钢箱梁顶推监控量测.....	130
第五章 缆索安装及成桥体系转换	137
第一节 施工部署.....	137
第二节 主索鞍及散索鞍安装.....	141
第三节 猫道设计与架设.....	144

第四节	主缆架设	154
第五节	主缆防护涂装	163
第六节	索夹及吊索安装	165
第七节	主缆施工线形监控	169
第六章	施工安全风险管理	176
第一节	双拥大桥施工安全风险管理的目的和主要内容	176
第二节	施工技术方案的风险评估和方案比选	178
第三节	施工监控、预警系统	183
第四节	应急预案和演练	202
第七章	项目管理和科技攻关	208

第一章

绪 论

第一节 悬索桥的发展

一、悬索桥的历史

(一)概述

桥面支承在悬索(通常称大缆)上的桥称为悬索桥,英文为 Suspension Bridge,是“悬挂的桥梁”之意,故也有译作“吊桥”的。“吊桥”的悬挂系统大部分情况下用“索”做成,故译作“悬索桥”。悬索桥的构造方式出现于19世纪初,是由索桥演变而来。悬索桥主要由缆索作为桥梁的主要承重结构,由缆索、索塔、锚碇、吊索和桥面等部分组成,见图1-1。缆索作为主要的受力构件,通常由高强度钢丝、钢缆制成。由于悬索桥具有用料少、自重轻的特点,被大跨度或特大跨度的桥梁采用,也成为了大跨径桥梁主要的结构形式。

悬索桥的主要缺点是刚度小,横向晃动大,在行车荷载和横向风荷载作用下容易产生较大的挠度和振动,不利于稳定。



图 1-1 悬索桥

(二) 悬索桥的分类

1. 以桥面刚度大小分类

按照桥面系的刚度大小,悬索桥分为柔性悬索桥和刚性悬索桥。柔性悬索桥桥面一般没有加劲梁,刚度小,桥面随着悬索形状变化而产生变形,不利于行车,通常作为临时性便桥或人行桥。刚性悬索桥桥面采用加劲梁,刚度大,加劲梁与缆索一道承担桥梁结构的竖直荷载,现代悬索桥绝大部分采用刚性悬索桥形式。

2. 以悬索桥结构特点分类

(1) 美国式悬索桥。美国式悬索桥的基本特征是采用竖直吊索,并用钢桁架作为加劲梁。这种形式的悬索桥绝大部分为三跨地锚式,加劲梁为非连续结构,在索塔处设置伸缩缝,桥面为钢筋混凝土桥面,索塔为钢结构。其优点是可以通过增加桁架高度来保证梁有足够的刚度,且便于实现双层通车。

(2) 英国式悬索桥。英国式悬索桥的基本特征是采用呈三角形的斜吊索和高度较小的流线型扁平翼状钢箱梁作为加劲梁。除此之外,这种形式的悬索桥采用连续的钢箱梁作为加劲梁,桥塔处不设置伸缩缝,用混凝土桥塔代替钢桥塔,部分桥梁还将主缆与加劲梁在主跨中点处固结。英国式悬索桥的优点是钢箱加劲梁可减轻恒载,从而减小主缆的截面,降低用钢量和造价;钢箱梁抗扭刚度大,受到的横向风力小,有利于抗风,并大大减小桥塔所承受的横向力;三角形布置的斜吊索可以提高桥梁刚度,但这种斜吊索在吊点处构造复杂。

日本此花大桥(图 1-2)于 1990 年通车,跨径布置为 $120\text{m} + 300\text{m} +$

120m,是现有最大跨径的自锚式悬索桥。该桥采用单主缆,用 PWS 法施工,包含 30 束股,每束 184 丝;仅一个索面,吊索做成倾斜形,构成三角形吊杆,与钢箱加劲梁一起,体现了英国式悬索桥的特点。

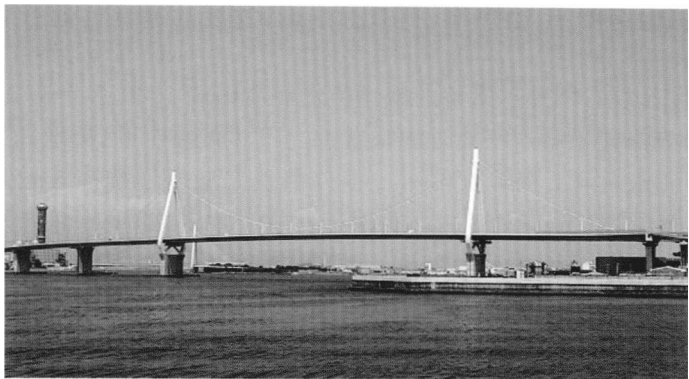


图 1-2 日本此花大桥

(3)混合式悬索桥。混合式悬索桥的基本特征是采用竖直吊索和流线型钢箱梁作为加劲梁。混合式吊桥的出现,显示了钢箱加劲梁的优越性,同时避免了采用有争议的斜吊索。我国目前修建的悬索桥大多数属于这种类型。

3. 以缆索锚固位置分类

(1)锚碇式悬索桥。悬索桥的主要承重受力构件缆索锚固在锚碇上,锚碇的结构形式通常分为重力式锚碇和隧洞式锚碇。重力式锚碇依靠巨大自重来抵抗主缆的垂直分力,水平分力则由锚碇与地基间的摩擦力或嵌固力来抵抗。隧洞式锚碇则是将主缆中的拉力直接传递给周围的基岩。大部分悬索桥为锚碇式悬索桥,在悬索桥的主要部件中包括锚碇。

(2)自锚式悬索桥。悬索桥的主要承重受力构件缆索锚固在加劲梁上,取消锚碇。具有代表性的自锚式悬索桥是日本此花大桥,它是现有的最早修建的特大跨径自锚式悬索桥。

(三)悬索桥的历史

悬索桥具有悠久的历史,早期热带原始人利用森林中的藤、竹、树茎做成悬式桥以渡小溪。使用的悬索有竖直的,有斜拉的,或者两者混合的。婆罗洲、爪哇原始藤竹桥,都是早期悬索桥的雏形,不过具有文字记载的悬索桥雏形来源于我国。

据《盐源县志》记载,公元前 3 世纪,我国四川境内就修建了“笮”(竹索桥),而在徐霞客的《铁索桥记》中记录了 1629 年贵州境内建造的一座跨度约 122m 的铁索桥。四川大渡河上的泸定桥,是一座由 9 条铁链组成的悬索桥,于 1706 年建成。后来红军长征途中著名的“强渡大渡河”战役就是

在这座桥上发生的,更提高了其知名度。可见我国是开始建造悬索桥最早的国家之一。但至此建造的都是人行桥,坡度陡,摆幅大。1938年在我国湖南建成了一座公路悬索桥,可通行10t重的汽车。其后又建成了一些公路悬索桥,但跨度小,宽度窄,荷载标准低,发展的速度远远滞后于西方国家。

20世纪以前,国外悬索桥的修建历史比我国晚1000多年。文献记载,1734年西方修建了第一座临时的铁索桥。19世纪后半叶,奥地利工程师约瑟夫·朗金和美国工程师查理斯·本分别独立地构思自锚式悬索桥的造型。美国城市的发展促进了大跨桥梁的建设。20世纪30年代修建的旧金山至奥克兰海湾大桥,全长1280m,是当时世界上最长、建造水平最高的桥梁。至今它仍是旧金山半岛到东海湾的主要通道,交通繁忙,每天通行28万车次。美国是世界上拥有悬索桥最多的国家。由于其在技术和设计上的优势,使悬索桥成为超过千米的成熟桥型,也形成了美国式悬索桥风格。20世纪以后,欧洲悬索桥施工技术进一步发展并不断创新,具有代表性的是法国于1959年建成的主跨为680m的缇卡维尔悬索桥。该桥的创新点体现在第一次采用了扁平纤细且截面具有良好抗风性能的全焊流线型钢箱梁,打破了钢桁架加劲梁“一统天下”的局面。该桥还采用了斜吊索以提高桥梁的抗风阻尼。欧洲大部分悬索桥为英国人设计,所以形成了英国悬索桥风格。20世纪80年代以来,世界各国修建悬索桥进入了高峰。目前已建成的跨度最大的悬索桥是日本明石大桥,跨度为1991m。截止到2009年,共建成跨度超过800m的悬索桥40座,跨度超过1000m的悬索桥26座。

二、悬索桥在我国的发展现状

悬索桥以其结构受力特点,在跨越能力方面具有明显优势,在跨越江河、海峡、港湾的大跨度桥梁和跨越崇山峻岭、峡谷的高桥中受到青睐。我国现代大跨度悬索桥建造是在改革开放以后开始的。国民经济的蓬勃发展,促进了交通建设的飞跃。主跨452m的广东汕头海湾大桥于1995年建成通车,被誉为中国第一座大跨度现代悬索桥。20世纪90年代以来,我国(不包括港、澳、台)建成的现代大跨度悬索桥及其主要施工方法汇总见表1-1。其中江苏江阴长江大桥主跨1385m,是目前列为世界第五的大跨度悬索桥;江苏润扬长江大桥主跨1490m,为世界第三的大跨度悬索桥;不久前竣工的舟山西堠门跨海大桥主跨1650m,为世界第二。在跨越大峡谷方面,湖北恩施四渡河大桥,桥面离峡谷底面约500m;湖南矮寨大桥跨越峡谷深达330m。

续上表

序号	桥名	桥梁跨度和桥型	塔 柱		锚 碇		加 劲 梁		主 缆	
			结构形式	施工方法	结构形式	施工方法	结构形式	架设方法	结构形式	施工方法
5	湖南 吉首矮寨大桥	主跨 1176m, 塔梁分离式桁架梁悬索桥	双柱门式钢筋混凝土框架结构, 塔高 129.316m, 索塔高 61.924m	爬模施工	吉锚为重力式锚碇, 索锚为重力式施工锚	钻爆法开挖	钢桁梁加劲	桥面吊机由两端向跨中拼装	双主缆间距 27m, $\frac{f}{L} = \frac{1}{9.6}$	PPWS
6	广东 珠江黄埔大桥	主跨 1180m, 单跨桁架梁悬索桥	双柱钢筋混凝土门式结构, 塔高 193.5m	爬模施工	重力式圆形锚碇	地下连续墙围护结构	全焊扁平钢箱梁, $H = 3.5m$, $B = 41.69m$	跨缆吊机, 近塔无吊索区钢箱吊装采用增设临时吊索荡摆施工	双主缆间距 27m, $\frac{f}{L} = \frac{1}{10}$	PPWS
7	贵州 坝陵河大桥	主跨 1088m, 钢桁梁悬索桥	门式钢筋混凝土框架结构, 塔柱为单室箱形截面, 东塔高 185.788m, 西塔高 201.316m	爬模施工	东锚为重力式框架锚, 西锚为重力式隧道锚	明挖钻孔法	钢桁梁, $H = 10.0m$, $B = 28.0m$, 节间距 10.8m	桥面吊机至索塔向跨中吊装	双主缆间距 27m, $\frac{f}{L} = \frac{1}{10.3}$	PPWS

续上表

序号	桥名	桥梁跨度和桥型	塔 柱		锚 碇		加 劲 梁		主 缆	
			结构形式	施工方法	结构形式	施工方法	结构形式	架设方法	结构形式	施工方法
8	泰州 长江大 桥	主跨 2 × 1080m, 三塔两跨 钢箱梁悬索桥	边塔为门式钢 筋混凝土框架结 构, 塔柱为箱形 截面, 塔高 181.7m, 中塔为单箱多室 钢结构, 纵人 字形, 塔高 192m	边塔爬 模施工, 中塔采用 大节段提 升技术	钢筋混凝土重 力锚, 基础为沉 井	沉井	全焊扁平流线 型钢箱梁, 单箱 三室, $H = 3.5m$, $B = 39.1m$	跨缆吊 机	双主缆间距 34.8m, $\frac{f}{L} = \frac{1}{9}$	PPWS
9	宜昌 长江大 桥	主跨 960m, 单 跨双铰钢箱梁悬 索桥	门式塔, 南塔 高 142.227m, 北 塔高 112.415m	整体大 块箱模板 浇筑, 每 次高 4 ~ 4.5m	深埋重力式锚 碇, 基底设 8 根 $\phi 2m$ 钢筋混 凝土锚固柱	扩大明 挖	全焊扁平钢箱 梁, $H = 3.0m$, $B = 30.0m$	缆载吊 机, 最大吊 重 146.6t	双主缆间距 24.4m, $\frac{f}{L} = \frac{1}{10}$	PPWS
10	湖北 西陵长 江大桥	主跨 900m, 单 跨双铰钢箱梁悬 索桥	门式刚筋混凝 土框架结构, 塔 高 120m	爬模施工	重力锚	扩大明 挖	全焊扁平钢箱 梁, $H = 3.0m$, $B = 20.6m$	跨缆吊 机	$\frac{f}{L} = \frac{1}{10.465}$	PPWS
11	湖北 恩施四 渡河大 桥	主跨 900m, 单 跨双铰钢桁梁悬 索桥	钢筋混凝土门 式结构, 塔柱为 薄壁箱形截面, 宜昌塔塔高 117.6m, 恩施塔 高 122.2m	爬模施工	宜昌岸为隧道 式重力锚, 恩施 岸为重力锚	钻爆法 开挖	华伦钢桁梁, $H = 6.5m$, $B =$ 26.0m	缆索吊 机吊装, 最大吊重 91.6t	$\frac{f}{L} = \frac{1}{10}$, 采用火 箭弹先导索过峡谷	PPWS



单主缆独塔双杆悬索桥

续上表

序号	桥名	桥梁跨度和桥型	塔 柱		锚 碇		加 劲 梁		主 缆	
			结构形式	施工方法	结构形式	施工方法	结构形式	架设方法	结构形式	施工方法
12	虎门 大桥	主跨 888m, 单跨双铰钢箱梁悬索桥	门式钢筋混凝土框架结构, 塔高 147.55m, 塔柱为空心薄壁结构	爬模施工	重力式锚碇	地下连续墙围护	扁平流线型钢箱梁, $H=3.012\text{m}$, $B=35.6\text{m}$	跨缆吊机	$\frac{f}{L}=\frac{1}{10.5}$	PPWS
13	厦门 海沧大桥	三跨 (230m + 648m + 230m) 连续全漂浮钢箱梁悬索桥	门式钢筋混凝土框架结构, 塔高 130m	爬模施工	空腹框架式重力锚碇	扩大明挖	扁平流线型钢箱梁, $H=3.0\text{m}$, $B=36.6\text{m}$	跨缆吊机	双主缆间距 34m, $\frac{f}{L}=\frac{1}{10.5}$	PPWS
14	重庆 长江桥 公塔大桥	三跨 (211m + 600m + 211m) 连续钢箱梁悬索桥	门式框架结构, 东塔高 163m, 西塔高 160m	爬模施工	西锚为三角形重力锚, 东锚为隧道式重力锚	钻爆法开挖	扁平流线型钢箱梁, $H=3.0\text{m}$, $B=35.5\text{m}$	缆索吊装	双主缆间距 33.5m, $\frac{f}{L}=\frac{1}{10}$	PPWS
15	汕头 海湾大桥	三跨 (154m + 452m + 154m) 半悬浮体系, 预应力混凝土加劲梁悬索桥	三层门式框架结构, 塔柱为 D 形空心截面, 钢筋混凝土结构, 塔高 95.1m	爬模施工	嵌岩重力式锚碇, 其上采用重力式挡土墙和填料压重	扩大明挖	预应力钢筋混凝土箱梁, 单箱三室截面, $H=2.2\text{m}$, $B=25.2\text{m}$	采用 180t 缆索吊机安装, 节段间湿接缝长 30cm	双主缆间距 25.2m, $\frac{f}{L}=\frac{1}{10}$ (主跨), $\frac{f}{L}=\frac{1}{29.6}$ (边跨)	PPWS

续上表

序号	桥名	桥梁跨度和桥型	塔 柱		锚 碇		加 劲 梁		主 缆	
			结构形式	施工方法	结构形式	施工方法	结构形式	架设方法	结构形式	施工方法
16	广东佛山平胜大桥	独塔单跨 350m, 四索面自锚式钢箱梁悬索桥	三柱门式塔, 塔高 138.87m, 塔柱为钢筋混凝土箱形结构	下塔柱及横梁采用支架现浇, 上塔柱采用爬模施工	自锚, 主缆锚固在两岸混凝土加劲梁上		主跨采用单箱三室全焊钢箱梁, $H = 3.5\text{m}$, $B = 26.1\text{m}$; 边跨采用单箱三室钢筋混凝土箱梁	钢箱梁主跨多点顶推法架设, 边跨混凝土梁采用支架现浇	$\frac{f}{L} = \frac{1}{12.5}$	PPWS
17	杭州江东大桥	83m + 260m + 83m 自锚式连续钢箱梁悬索桥	独柱式索塔, 上塔柱高 63m, 下塔柱高 34m	爬模施工	自锚		扁平分离式钢箱梁, 中间以钢横梁连接, $H = 3.5\text{m}$, $B = 47.0\text{m}$	顶推施工	$\frac{f}{L} = \frac{1}{4.5}$ (主跨)	PPWS
18	常州京杭运河龙城大桥	三跨 (30m + 113.8m + 72.2m) 连续自锚式悬索与斜拉组合桥	索塔为斜塔, 采用变截面拱形门式结构, 顺桥向倾斜 30°, 主桥以上高度 37m	竖向转体施工	自锚		主梁为钢—混凝土组合梁, 其余部分为预应力混凝土梁	采用支架法施工	双索面, 主缆体系成空间曲线, 在塔顶散成 7 股作为边跨的斜拉索	

图 10-1-10 常州京杭运河龙城大桥 (主桥以上高度 37m)

图 10-1-10



图 10-1-10

图 10-1-10

图 10-1-10

图 10-1-10

图 10-1-10

图 10-1-10

图 10-1-10

图 10-1-10

图 10-1-10

图 10-1-10

如今,随着我国城市化进程的加快,在繁华市区修建的悬索桥,注重外型优美、和周边的环境协调,构思新颖、独具特色。其中柳州双拥(鹧鸪江)大桥采用单主缆地锚式悬索桥体系,为柳州市增添了一道亮丽的风景。据统计世界上已建成跨度 800m 以上的悬索桥,中国占 40%,跨度 1000m 以上的悬索桥,中国占 38%。我国的现代悬索桥建设规模已经跨入世界先进行列。

为充分发挥悬索桥的跨越能力,同时有利于保证桥梁横向稳定性,目前建成的悬索桥多为双主缆结构。柳州双拥(鹧鸪江)大桥主桥是我国最大跨度的单主缆地锚式悬索桥,主跨为 430m,桥面宽度为 38.5m。单主缆悬索桥跨度的不断增大,一方面能够为桥塔设计拓宽美学思路,使桥梁的结构特色充分显现;另一方面也充分体现了我国桥梁设计与施工技术水平的进步。随着桥梁科研、设计和施工技术水平的提高,我国的悬索桥会修建得更多更美。

三、双拥(鹧鸪江)大桥的主要特点和难点

广西柳州双拥(鹧鸪江)大桥为单主缆、地锚式悬索结构体系桥梁,主桥长 510m,跨径组合为 40m+430m+40m。该桥横跨柳江,最大水深为 28m,桥梁基础为溶蚀透水地质。其方案设计与施工的主要工程特点和难点是溶蚀透水地质重力式锚碇施工、“人”字形变截面钢结构索塔施工、扁平流线型钢箱梁柔性支墩单支点连续顶推施工、主缆安装及成桥体系转换等。

(1)重力式锚碇锚固系统采用预应力锚固系统,锚固方式为前锚式,锚固系统由索股锚固连接构造和预应力钢束锚固构造组成。锚体从结构受力和功能上可分为锚块、基础、前锚室等几部分,均为大体积防渗混凝土结构,共有 30000m³,防渗等级为 P10 级。锚碇基础为圆形,直径为 57m,基础高 10m,锚碇顶板至基底高 30.95m。

锚碇基坑深度为 22m,基底位于柳江常水位以下 10m。基坑临近柳江、厂房、城市道路、湘桂铁路等。针对柳江边溶蚀透水地质特点,结合场区环境及施工平面布置,确定柳江常水位以上部分(高 12m)采用喷锚网支护放坡开挖,柳江常水位以下部分(高 10m)采用环形板墙+排桩进行支护垂直开挖,土层止水采用高压旋喷桩,溶蚀透水岩层采用帷幕注浆止水。该施工具有场区环境复杂、防水施工难度大、开挖深度深等难点。重力式锚碇施工如图 1-3 所示。

(2)索塔为“人”字形塔,高 104.811m,设两道横梁,桥塔均为钢结构,由塔柱、横梁和塔冠三部分组成。塔柱高 77.749m,截面为三角形变截面。塔冠高 27.062m,整体形状为两个锥体。钢塔主体采用 Q345C 钢板,面板厚 28~42mm。塔柱沿高度方向划分为 13 个节段,索塔主体部分共分为 34