



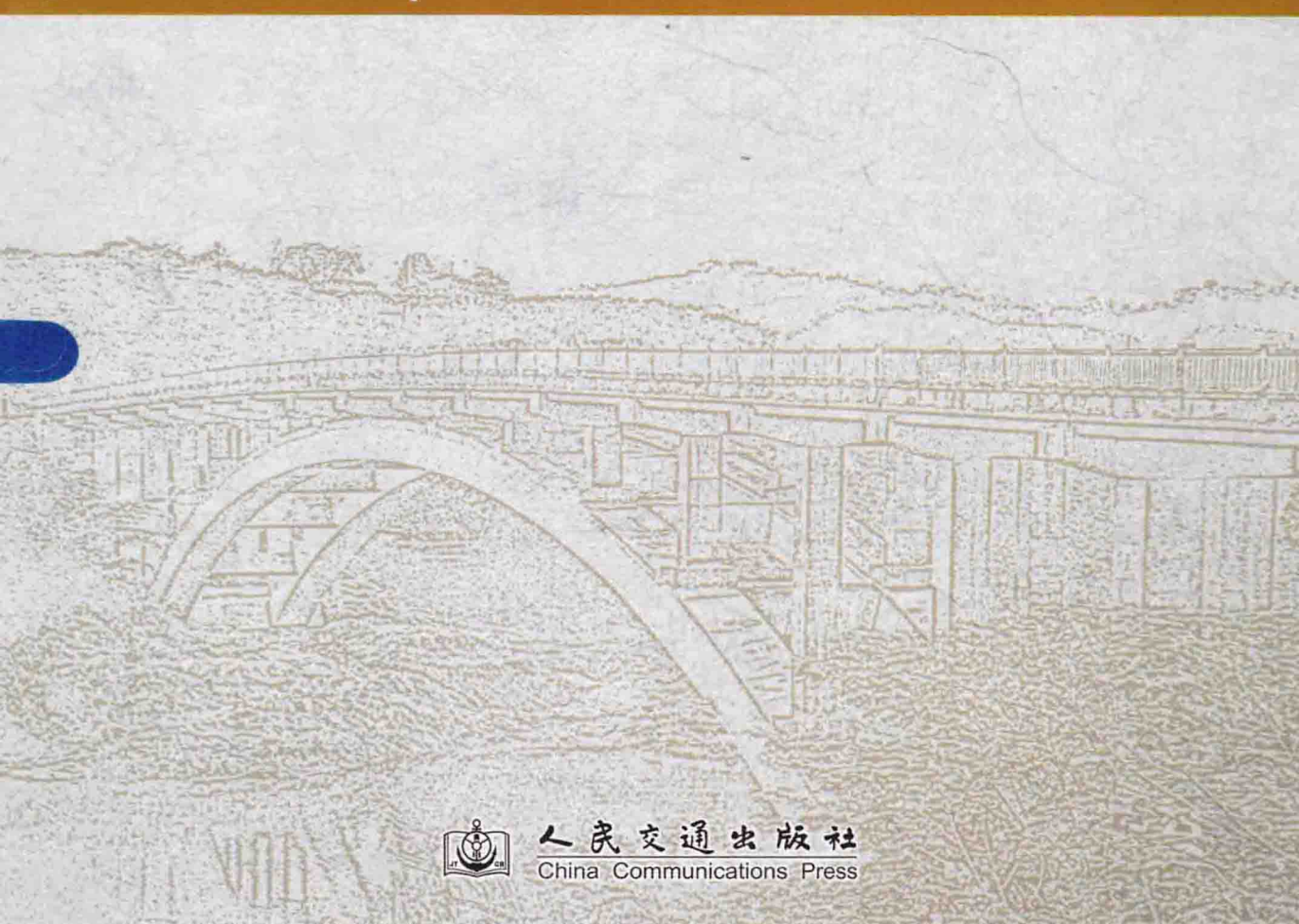
交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

周志祥 范 亮 著

钢箱—混凝土

Steel Box-Concrete
Composite
Arch Bridge

组合拱桥



人民交通出版社
China Communications Press



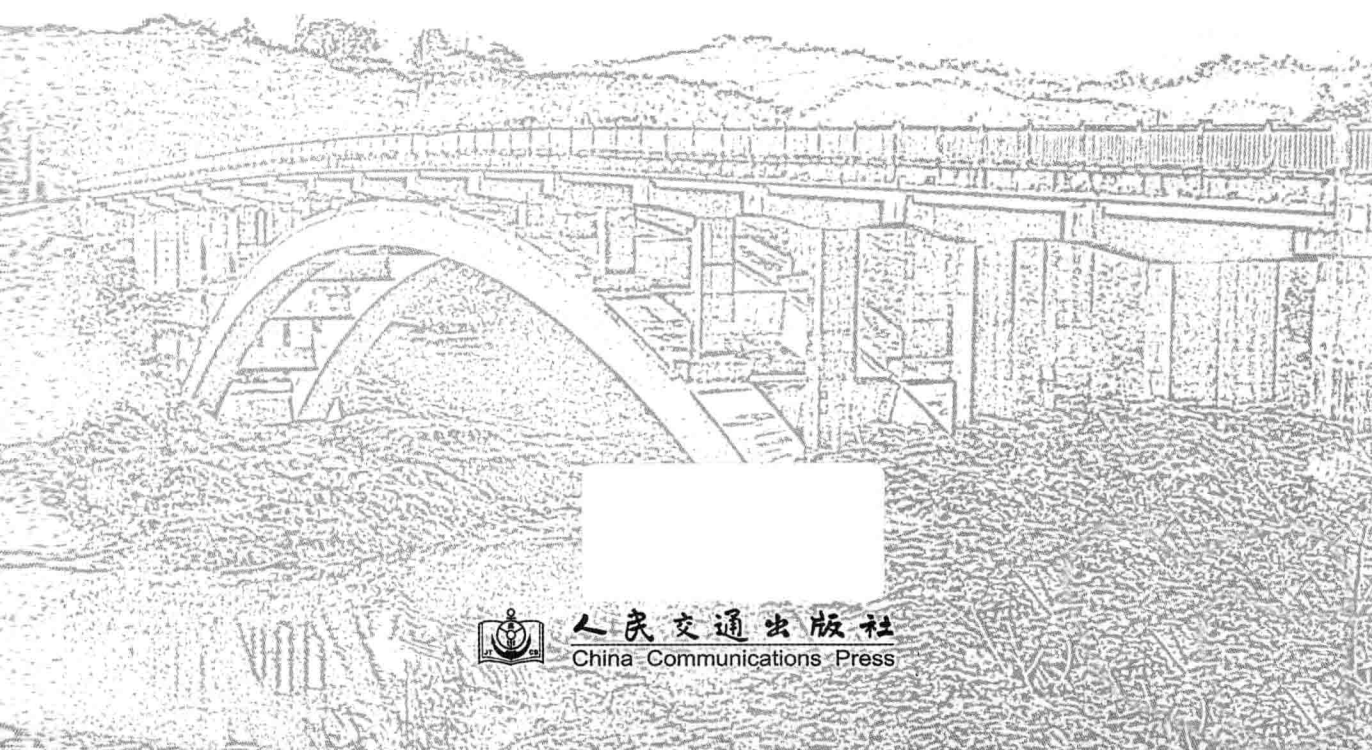
交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

周志祥 范 亮 著

钢箱—混凝土

Steel Box-Concrete
Composite
Arch Bridge

组合拱桥



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书基于保持传统混凝土拱桥实用、经济、美观、耐久的优势,克服其施工风险大和结构延性差等缺陷的目的,探索了山区条件下拱桥建设的适宜结构体系和施工技术,提出了在适宜条件下具有综合优势的钢箱—混凝土组合拱桥,阐述了其结构原理、施工技术及优缺点;提出钢箱与混凝土结合的 PBH 剪力联结构造,依据试验研究和理论分析建立了其分析方法和抗剪强度计算公式;开展了钢箱—混凝土组合构件的压弯性能试验研究,论述了从加载到破坏的全过程结构行为,建立了其承载能力计算公式;以图文并茂的方式阐述了钢箱—混凝土组合拱的主要构造细节;给出了钢箱—混凝土组合拱桥在三座桥梁中的应用实例。

本书可供从事桥梁相关工作的工程技术人员、学者参考使用,也可作为相关专业学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钢箱—混凝土组合拱桥 / 周志祥, 范亮著. — 北京 :
人民交通出版社, 2014. 1

(交通运输行业高层次人才培养项目著作书系)

ISBN 978-7-114-11132-7

I. ①钢… II. ①周…②范… III. ①钢箱梁—混凝土结构—拱桥—研究 IV. ①U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 009973 号

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

书 名: 钢箱—混凝土组合拱桥

著 作 者: 周志祥 范 亮

责任编辑: 周 宇 卢俊丽

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.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 12.5

字 数: 288 千

版 次: 2014 年 1 月 第 1 版

印 次: 2014 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11132-7

定 价: 42.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系
编审委员会

主 任:杨传堂

副主任:戴东昌 周海涛 徐 光 王金付
陈瑞生(常务)

委 员:李良生 李作敏 韩 敏 王先进
石宝林 关昌余 沙爱民 吴 澎
杨万枫 张劲泉 张喜刚 郑健龙
唐伯明 蒋树屏 潘新祥 魏庆朝
孙 海



书系前言

Preface of Series

进入 21 世纪以来,党中央、国务院高度重视人才工作,提出人才资源是第一资源的战略思想,先后两次召开全国人才工作会议,围绕人才强国战略实施做出一系列重大决策部署。党的十八大着眼于全面建成小康社会的奋斗目标,提出要进一步深入实践人才强国战略,加快推动我国由人才大国迈向人才强国,将人才工作作为“全面提高党的建设科学化水平”八项任务之一。十八届三中全会强调指出,全面深化改革,需要有力的组织保证和人才支撑。要建立集聚人才体制机制,择天下英才而用之。这些都充分体现了党中央、国务院对人才工作的高度重视,为人才成长发展进一步营造良好的政策和舆论环境,极大激发了人才干事创业的积极性。

国以才立,业以才兴。面对风云变幻的国际形势,综合国力竞争日趋激烈,我国在全面建成小康社会的历史进程中机遇和挑战并存,人才作为第一资源的特征和作用日益凸显。只有深入实施人才强国战略,确立国家人才竞争优势,充分发挥人才对国民经济和社会发展的重要支撑作用,才能在国际形势、国内条件深刻变化中赢得主动、赢得优势、赢得未来。

近年来,交通运输行业深入贯彻落实人才强交战略,围绕建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通的战略部署和中心任务,加大人才发展体制机制改革与政策创新力度,行业人才工作不断取得新进展,逐步形成了一支专业结构日趋合理、整体素质基本适应的人才队伍,为交通运输事业全面、协调、可持续发展提供了有力的人才保障与智力支持。

“交通青年科技英才”是交通运输行业优秀青年科技人才的代表群体,培养选拔“交通青年科技英才”是交通运输行业实施人才强交战略的“品牌工程”之一,1999 年至今已培养选拔 282 人。他们活跃在科研、生产、教学一线,奋发有为、锐意进取,取得了突出业绩,创造了显著效益,形成了一系列较高水平的科研成果。为加大行业高层次人才培养力度,“十二五”期间,交通运输部设立人才培养专项经费,重点资助包含“交通青年科技英才”在内的高层次人才。

人民交通出版社以服务交通运输行业改革创新、促进交通科技成果推广应

用、支持交通行业高端人才发展为目的,配合人才强交战略设立“交通运输行业高层次人才培养项目著作书系”(以下简称“著作书系”)。该书系面向包括“交通青年科技英才”在内的交通运输行业高层次人才,旨在为行业人才培养搭建一个学术交流、成果展示和技术积累的平台,是推动加强交通运输人才队伍建设的重要载体,在推动科技创新、技术交流、加强高层次人才培养力度等方面均将起到积极作用。凡在“交通青年科技英才培养项目”和“交通运输部新世纪十百千人才培养项目”申请中获得资助的出版项目,均可列入“著作书系”。对于虽然未列入培养项目,但同样能代表行业水平的著作,经申请、评审后,也可酌情纳入“著作书系”。

高层次人才是创新驱动的核心要素,创新驱动是推动科学发展的不懈动力。希望“著作书系”能够充分发挥服务行业、服务社会、服务国家的积极作用,助力科技创新步伐,促进行业高层次人才特别是中青年人才健康快速成长,为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通作出不懈努力和突出贡献。

交通运输行业高层次人才培养项目
著作书系编审委员会
2014年3月

作者简介

Author Introduction



周志祥,男,1958年生,教授,博士生导师,首批新世纪百千万人才工程国家级人选,国务院政府特殊津贴获得者,交通运输部新世纪百千万人才第一层次人选,重庆市桥梁与隧道学科学术带头人,山区桥梁与隧道国家重点实验室培育基地主任,重庆交通大学土木建筑学院党总支书记,任全国土木工程学科教学指导委员会委员,中国土木工程学会桥梁及结构工程学会理事等多种社会兼职。承担国家和省部级以上科技项目20余项,发表论文100余篇,出版专著和教材5部,获得授权发明专利23项,省部级科技成果奖15项。首创“钢箱—混凝土组合拱桥”,成功应用于重庆万盛区藻渡大桥等四座桥梁,完成“山区拱桥建设维护新技术研发及应用”,获得2009年度国家科技进步二等奖(排名第2);提出并主持研究成功“混凝土桥梁裂缝仿生监测系统”,完成“公路在用桥梁检测评定与维修加固成套技术”,获得2009年度国家科技进步二等奖(排名第9);首创“横张预应力混凝土梁施工方法”,成功应用于红槽房大桥等七座桥梁,获得重庆市科技进步一等奖;提出并主持完成“适于陡峻山区的整体式悬挑结构复合道路的修筑方法”,成功应用于西藏、云南、四川等地道路改造工程;主研“重庆朝天门长江大桥工程建设关键技术研究”,获得重庆市科技进步一等奖。



作者简介

Author Introduction



范亮,女,1979年生,博士,重庆交通大学土木建筑学院副教授。主持国家自然科学基金项目“钢箱—混凝土组合结构 PBH 剪力连接件的传力机制与疲劳性能研究”,主研国家及省部级以上科技项目 10 余项,发表论文 20 余篇,出版专著 2 部,获省部级科技奖 2 项。现主要从事钢—混凝土组合结构性能及其在桥梁工程中的应用研究。



前言

Foreword

拱桥起源于人们模仿石灰岩溶洞中天然形成的“天生桥”，是人类历史上最先发展的桥型之一。拱桥在我国具有悠久的历史，从古代不足 10m 跨径的石拱桥发展到目前超过 500m 跨径的特大跨拱桥，是历代匠人、技工、专家和学者们智慧和勤劳的结晶。混凝土拱桥具有实用、经济、美观、耐久的突出优势，尤其适宜于山区地形，曾于 20 世纪后半叶在西部山区的大中跨径桥梁建设中占居主导地位。在 2000 年前后，混凝土拱桥的实际应用逐渐减少，以致目前已趋于不用。而与此同时，混凝土连续刚构桥的实际应用却得到迅猛发展。事实上，混凝土拱桥较同跨径混凝土连续刚构桥的工程造价通常约低 30%，而混凝土连续刚构桥还普遍存在纵、横、斜向开裂和后期挠度过大的病害。那么，混凝土拱桥为什么会落到“趋于不用”的境地？笔者带着这一问题进行了调研和思考，主要认识有两点：一是混凝土主拱结构无论是采用搭架现浇还是采用预制节段吊装成拱，施工安全风险均较大且风险期长；二是受压混凝土主拱结构的破坏具有明显的脆性，对结构缺陷和意外作用相对敏感；相反，混凝土连续刚构桥无论在施工阶段还是使用阶段发生垮塌事故的安全风险均较小，对结构缺陷和意外作用的敏感度较低，如至今尚无存在严重裂缝和过大挠度的混凝土连续刚构桥发生垮塌导致重大人员伤亡的案例。

在目前国内对安全、质量及民生问题空前重视的政策环境下，混凝土拱桥存在的上述问题严重妨碍了其在 大、中跨径桥梁中的应用和发展，设计方往往被迫选择高墩多跨简支梁桥、连续刚构桥或斜拉桥等桥型，虽然会明显增加桥梁建设和维护成本，但却相对安全。为此，笔者及其研究团队进行了多年不懈的努力，希望探索出既保持传统混凝土拱桥主要优点，又能克服其主要缺点的新型拱桥结构体系和施工技术。

本书共分为八章。第 1 章针对传统混凝土拱桥施工安全风险大和结构延性差的问题，探索并实践了混凝土八字形刚架拱桥，提出并研究了中段微弯八字形组合结构拱桥；第 2 章针对八字形拱桥的力学性能和施工工艺问题，提出外形与常规拱桥一致的钢箱—混凝土组合拱桥，阐述了其结构原理、施工技术及优缺

点;第3章在已有PBL剪力键的基础上,针对钢箱—混凝土组合拱的构造特点,提出了钢箱与混凝土结合的PBH剪力联结构造,开展了PBH剪力键关于荷载—滑移曲线及抗剪刚度,屈服抗剪承载力和极限抗剪承载力的试验研究;第4章研究建立了钢板—混凝土滑移的本构关系,分析讨论了PBH剪力联结构造的破坏模式,初步建立了PBH剪力联结构造的荷载—滑移本构关系和承载力计算公式;第5章开展了钢箱—混凝土偏压构件受载性能试验研究,研究了钢箱—混凝土组合压弯构件中约束混凝土的本构模型,探讨了考虑界面滑移的钢箱—混凝土组合压弯构件全过程分析方法;第6章分析了影响钢箱—混凝土偏压构件承载力的主要因素,提出了大偏压破坏与小偏压破坏的判据,推导了其正截面承载力计算公式;第7章分别讨论了钢箱拱肋截面形式、节段划分、纵向加劲肋和横隔板的构造,钢箱拱肋变高度的位置选择、强化加劲肋的设置、区域内钢筋构造及混凝土的过渡方式,钢箱节段对接构造、拱肋合龙段构造、钢箱与混凝土的联结钢筋构造,拱上立柱、横系梁与钢箱拱肋的联结构造,转动铰构造及其力学性能分析;第8章分别从桥梁总体情况、设计概要、施工技术、监测与控制、效益比较几方面介绍了钢箱—混凝土组合拱桥在工程中的应用情况。

本书中的项目研究得到国家自然科学基金项目(51078373)“钢箱—混凝土组合拱结构性能与分析方法研究”、国家自然科学基金项目(51308571)“钢箱—混凝土组合结构PBH剪力连接件的传力机制与疲劳性能研究”和交通运输部西部交通建设项目(2006 318 814 48)“钢—混凝土组合拱桥竖转设计与施工关键技术研究”的支持,还先后得到交通运输部、重庆市交通委员会、重庆市公路局、江津区交通委员会、万盛区交通委员会、遂宁市交通运输局等单位相关专家和领导的支持和帮助,尤其是郑皆连院士、范文理教授对本书编写给予了悉心指导和帮助,重庆市交通委员会乔墩研究员及重庆交通大学的周建庭、高燕梅、吴海军、张江涛、徐勇等老师和王邵锐、李永久、丁小戈、周胜怡、许华东、贺鹏等研究生参与了其中的一些研究工作。在此谨向所有参与本书工作及给予支持、指导、关心和帮助的单位领导、专家和个人致以真诚的感谢,同时感谢人民交通出版社对本书撰写和出版给予的大力支持。

本书是笔者及课题组师生针对传统混凝土拱桥所遇到的实际问题,在国内外大量已有研究成果的基础上开展的一些探索工作,谬误之处在所难免,恳请同行读者们批评指正。

周志祥

2013年9月于重庆交通大学



目 录

Contents

第1章 山区拱桥结构体系与施工技术探索	1
1.1 拱桥研究背景	1
1.2 八字形混凝土拱桥的探索	2
1.3 中段微弯八字形组合结构拱桥的探索	9
第2章 钢箱—混凝土组合拱桥的基本概念	16
2.1 钢箱—混凝土组合拱桥的提出	16
2.2 钢箱—混凝土组合拱桥的构造特点	18
2.3 钢箱—混凝土组合拱桥的结构方案	20
2.4 钢箱—混凝土组合拱桥的施工技术	27
2.5 钢箱—混凝土组合拱桥与混凝土拱桥的比较	29
第3章 PBH 剪力联结构造力学性能试验研究	31
3.1 常用剪力联结构件分类	31
3.2 PBH 剪力联结构造的基本概念	32
3.3 PBH 剪力联结构造力学性能试验模型设计	35
3.4 PBH 剪力联结构造的抗剪刚度及承载力	39
3.5 试验情况	40
第4章 PBH 剪力联结构造力学模型与计算方法	50
4.1 PBH 剪力联结构造有限元分析方法研究	50
4.2 钢板—混凝土滑移本构关系	54
4.3 PBH 剪力联结构造承载力计算方法	58
4.4 PBH 剪力联结构造荷载—滑移本构关系	67
第5章 钢箱—混凝土组合压弯构件试验研究及全过程分析	69
5.1 构件设计及加载方案	69
5.2 钢箱—混凝土组合构件受弯试验	71
5.3 钢箱—混凝土组合构件偏压试验	74
5.4 钢箱—混凝土组合压弯构件中约束混凝土本构模型	77
5.5 考虑界面滑移的钢箱—混凝土组合压弯构件全过程分析方法	85
第6章 钢箱—混凝土组合压弯构件承载力计算	92
6.1 $M-N$ 曲线及大小偏压破坏定义	92



6.2 承载力影响因素及多参数拓展分析	96
6.3 钢箱—混凝土压弯构件正截面承载力计算公式	104
第7章 钢箱—混凝土组合拱桥的主要构造细节	109
7.1 钢箱拱肋的构造	109
7.2 钢箱拱肋变高度区段构造	112
7.3 钢箱—混凝土组合拱肋构造	114
7.4 拱上立柱、横系梁与钢箱拱肋的联结构造	119
7.5 转动铰构造及其力学性能分析	121
第8章 钢箱—混凝土组合拱桥的工程应用	134
8.1 四川遂宁界福路人行桥	134
8.2 万盛区藻渡大桥	141
8.3 重庆江津夹滩笋溪河大桥	165
参考文献	178
索引	182

第1章 山区拱桥结构体系与施工技术探索

1.1 拱桥研究背景

我国西南地区(重庆、云南、贵州、四川、广西、西藏等)多属山岭重丘区,大江大河、高山深谷众多,地形复杂险峻,仅重庆市内就有长江、嘉陵江、涪江、乌江、沱江等十余条大河。随着西部地区高等级公路的大量修建,必将遇到为数众多的跨越深山峡谷的大、中跨径桥梁,这些桥梁往往成为控制整个工程工期及投资的关键因素。目前,国内外可用于上述地区的桥型有悬索桥、斜拉桥、拱桥、连续刚构桥和连续梁桥。其中,混凝土拱桥由于跨越能力大、承载能力高、经济实用、造型美观而成为我国西部山岭重丘区跨越深谷河流常用的桥型之一。由于以下因素,混凝土拱桥更有其独特的优势。

(1)地形及地质条件优越。我国西南地区属多山深谷地形,U形及V形河谷众多,岩层埋深浅、岩石整体性比较好,适宜于大、中跨径拱桥的修建。

(2)经济实用。与斜拉桥、悬索桥等其他桥型相比,大跨径拱桥避免了高墩、高塔的修建,节约了下部结构的建设费用,且其建筑材料以混凝土和普通钢材等单价较低的材料为主。一般认为,在跨径为40~200m时,混凝土拱桥的造价较其他桥型低。对于西部经济欠发达地区,混凝土拱桥无疑具有明显的经济优势。

(3)后期养护费用低。一般情况下,整体性强、施工质量好的混凝土拱桥具有经久耐用的优势,通常无需大型养护,这是针对跨越山区深谷条件下桥梁建设的一大优势。

多年的工程实践表明,混凝土拱桥具有经济、实用、美观、耐久的优点,尤其适用于山区地形,在20世纪90年代以前得到十分广泛的应用。但在此之后,混凝土拱桥的应用逐渐减少甚至趋于不用。人们不禁要问:具有如此突出优势的桥型为什么会落到“趋于不用”的境地?事实上,即便在类似西南山区这种自然地理条件下修建大、中跨径的混凝土拱桥,也确实存在一些难以避免的问题。

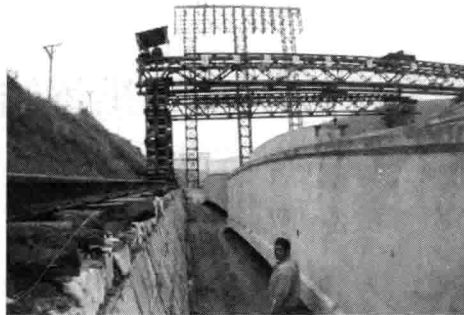
(1)主拱施工工艺复杂、工期长、安全风险大。分节段预制拱肋、缆索吊装就位、空中悬臂拼装、跨中合龙成拱是混凝土拱桥最常用的施工方式(图1.1-1)。主拱形成的施工过程中,空中结构多为非稳定体系,依靠施加扣索、浪风等施工临时措施保持该结构体系的面内外稳定性。由于不确定因素多,主拱施工阶段是拱桥历史上发生垮塌风险最高的施工阶段。为避免此风险,也有采用在拱架上浇筑主拱圈混凝土的方法,但对大中跨径拱桥,高安全度的拱架施工措施费用较高,经济性与整体稳定性成为混凝土拱桥施工的突出矛盾。如2005年11月在某省发生了钢拱架垮塌的重大事故,造成严重的群死群伤及重大经济损失和不良社会影响。

(2)自重大,施工场地及设备要求高。采用缆索吊装施工法的常规混凝土拱桥需要庞大的拱箱节段预制场地,由于预制节段的自重大,对运输吊装设备的要求也较高,混凝土拱桥

的跨径也因此受到制约。



a) 成拱期间的扣索、浪风稳定措施



b) 庞大的预制场地

图 1.1-1 混凝土拱桥的缆索吊装施工方法

(3) 主拱结构接缝多,延性抗震能力较弱。分节段预制,缆索吊装合龙成拱的主拱结构不可避免地存在众多的纵、横向接缝,极易使主拱实际状态与设计理想状态间存在明显的偏差而产生病害;混凝土主拱结构的延性抗震能力通常较差,随着拱桥跨径的增加,地震波效应作用下的不良地震响应尤其显著。如 20 世纪 70 年代的唐山大地震导致 30 多座拱桥不同程度的破坏。

鉴于同条件下混凝土拱桥的施工安全性和结构对同样缺陷的敏感性问题的敏感性通常较梁桥(含简支梁、连续梁、连续刚构桥等)更为突出,在目前国内对安全、质量及民生问题空前重视的政策环境下,上述问题的存在严重妨碍了大、中跨径混凝土拱桥在西部山岭重丘地区的应用及发展,设计方往往被迫选择高墩多跨简支梁桥、连续刚构桥或斜拉桥等使用其他施工方法的桥型,明显增加了桥梁建设成本。例如,在云南元江—磨黑高速公路建设中,许多适合修建大跨径拱桥的桥位,均采用了其他结构体系的桥型。因此,探索保持传统混凝土拱桥的上述优点,克服其主要缺点的拱桥新的结构体系和施工技术,对于加快山区交通基础设施的建设具有重要的现实意义和深远的历史意义。为此,作者及其研究团队进行了多年不懈的努力探索,在历经八字形刚架拱桥及八字形组合结构拱桥的尝试和研究后,最终提出在适宜条件下具有综合优势的钢箱—混凝土组合拱桥,并初步构建了其设计计算方法和施工成套技术。

1.2 八字形混凝土拱桥的探索

1.2.1 八字形刚架拱桥的提出

针对常规混凝土拱桥施工安全风险大、风险期长的问题,作者基于简化施工工艺,优化结构体系,保证施工安全,缩短风险工期的考虑,提出了一种由立柱竖转形成的预应力混凝土八字形刚构拱桥(图 1.2-1)。其主要施工步骤(图 1.2-2)为:①在桥位的设定位置完成基础施工。②在基础上以立柱施工的方式完成斜腿刚架拱肋的斜腿部分施工,其下端与基础作临时固结。③安装作为斜腿刚架拱肋水平撑的钢管混凝土劲性骨架并与立柱上端刚结。④用钢缆绳系住立柱的顶端,拆除立柱与基础的临时固结形成转动铰,控制钢缆绳的放松速度,使两岸的立柱及劲性骨架在竖直平面内绕立柱下端缓慢转动直至合龙,并联结成斜腿刚

架拱肋。⑤拆除钢缆绳,对钢管混凝土劲性骨架区段外包混凝土形成完整的拱圈;⑥按设计要求对拱肋的斜腿及横撑施加预应力。⑦完成拱上建筑的施工,适时封闭拱脚的临时铰使其成为固结。

与常规混凝土拱桥相比,八字形刚架拱桥的构思途径如下:

(1) 优化结构体系、增强抗震能力。常规大跨度混凝土拱桥的拱轴线为连续曲线,主拱结构以承受轴向压力为主,用材经济,但结构延性抗震能力较差;在施工过程中拱肋的受力状况会不断发生变化,与成桥后的受力相比,施工过程中拱肋的受力存在明显差异。如为了方便预制吊装,拱肋通常会被分为若干段,其施工过程包括预制、吊运、搁置、悬挂、安装等,所以在吊运过程中,每一段拱肋的受力相当于双悬臂曲梁,以受弯为主;在悬挂阶段,拱肋又以受压弯为主,与成桥阶段的受力均有较大差异。

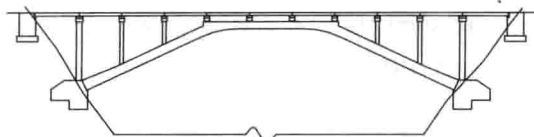


图 1.2-1 由立柱竖转形成的预应力混凝土八字形刚架拱桥的结构形式

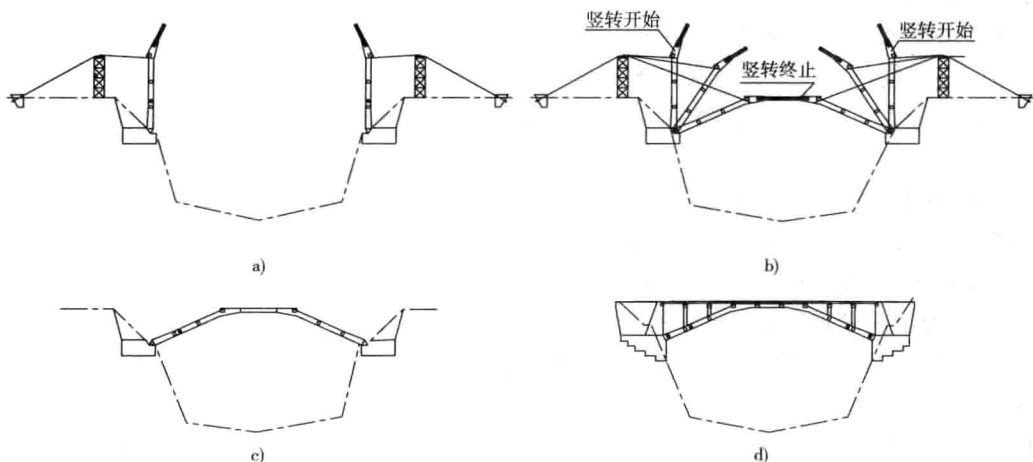


图 1.2-2 预应力混凝土八字形刚架拱桥主要施工工序

八字形刚架拱桥采用分段直线形拱肋,可简化结构构造,减少拱肋施工分段,方便施工。八字形主拱结构从施工到使用各阶段的受力特点均为压弯构件,可以通过施加预应力来调节主拱截面压力作用位置,使其仍满足常规混凝土拱桥要求的压力线与拱轴线基本吻合的条件,以避免产生明显拉应力的设计理念。这种分段直线形的主拱结构也为施加预应力提供了方便。压弯构件用材的经济性不及轴压构件,但压弯结构的延性抗震能力相对较强。

(2) 减小施工风险和工期、简化施工工艺。常规大跨径混凝土拱桥对施工技术要求较高:拱圈为曲线结构,施工精度要求较高;主拱沿纵横向划分为多节段预制,接头构造复杂,质量不易保证;节段自重、运输吊装设备要求高,控制难度大。预应力混凝土八字形刚架拱桥采取的方案为:将常规的曲线形拱圈改为分段直线形拱圈,以直代曲,可明显简化主拱施工;拱肋采用立柱方式浇筑,工艺成熟且无垮塌风险;拱肋采用竖向转体合龙成拱施工方法,将常规预制吊装形成混凝土主拱需数十天高风险工期缩短为仅需几小时的竖向转体风险工期,且风险程度明显降低。

1.2.2 八字形刚架拱桥的受力特点

1) 主拱受力特点

从立柱竖转直至全桥施工完毕,主拱结构承受弯矩、轴向压力、剪力的联合作用。

(1) 立柱施工阶段:拱肋斜腿段截面受力与普通桥墩立柱受力相同,主要承受自重和施工荷载引起的压力。此时拱肋具有普通钢筋混凝土柱的受力特征。

(2) 竖转阶段:斜腿段跨中此时会承受较大的正弯矩,而因为水平段的劲性骨架已在上一阶段安装完毕,所以水平段的劲性骨架会对主拱圈转折段产生负弯矩(因扣索扣挂在主拱圈转折段),为了使拱肋截面应力合理,拟在拱肋内布置预应力钢束。

(3) 拱上加载及成桥阶段:拱顶劲性骨架合龙段外包混凝土,以及拱上立柱和桥面板、桥面系施工及成桥后,主拱结构为压弯构件,且部分区段弯矩较大,尤以斜腿段与水平段之间的转折截面负弯矩最大(因为转折段刚度较大,且封铰时间较晚,所以使得负弯矩大部分集中于转折段,而拱脚负弯矩较小),为使拱肋截面应力合理,需在拱肋内布置预应力钢束。

2) 合理拱轴线

八字形刚架拱桥为分段直线形的拱结构,由左右两段斜拱腿及拱顶水平段组成,各段均为等截面直线构件。因此从竖转开始到成桥后运营阶段,斜腿段中部会承受较大正弯矩,转折区段存在较大负弯矩,拱肋跨中区段存在较大正弯矩,为使拱肋截面应力合理,应在拱肋内布置预应力钢束。

八字形刚架拱桥属于预应力混凝土结构,可以通过引入预加力的作用,使其压力线与拱轴线吻合。如此可使结构的受力合理,拱圈各个截面内力分布均匀,以受压为主;同时拱圈采用分段直线形,大大减小了施工难度,并与新的施工工艺协调配合,施工所需机具少、工艺简单,施工速度显著提高,造价可望明显降低。

压力线的控制原则仍然是通过适时分批施加预应力,使八字形刚架拱桥的上、下缘混凝土都不出现拉应力。由此确定出拱圈各个截面压力线与拱轴线偏离的极限值 K_s 和 K_x ,然后绘出压力线包络图。只要各个施工阶段及运营阶段压力线的位置都落在 K_s 和 K_x 所围成的

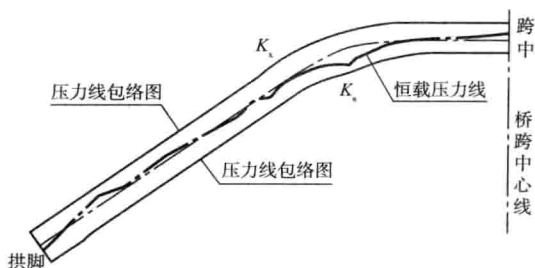


图 1.2-3 预应力混凝土八字形刚架拱桥压力线包络图

区域内,就能保证八字形刚架拱桥在最小外荷载和最不利荷载作用下,其上、下缘混凝土均不会出现拉应力。所以分段直线形的拱轴线只要通过适时施加预加力,也可以成为合理拱轴线。

预应力混凝土八字形刚架拱桥的压力线包络图,如图 1.2-3 所示。

用公式表示即为:

$$-K_s \leq E \leq K_x \quad (1.2-1)$$

3) 八字拱矢跨比

八字形混凝土拱桥的主拱肋由三段直线构成,分为两个斜腿和一个水平撑。它的总体构思可归纳为“以直代曲、立柱施工、竖转成拱”,即以立柱方式完成刚架拱肋斜腿部分的施工,再由上而下竖转合龙成拱,形成“八”字结构。

图 1.2-4 为两种不同的斜腿与水平撑按桥跨方向的分配方式。图 1.2-4a) 为竖转预应

力混凝土八字形刚架拱,斜腿较短,水平段较长,这样斜腿的受力行为趋向于拱,但水平段的受力行为趋向于梁,跨中弯矩较大,不能较好地发挥混凝土材料抗压性能好的特性,从而减弱了八字形混凝土拱桥的跨越能力。假设把水平段缩短些,斜腿适当加长,使得三段依桥跨方向大致按1:1:1分配,如图1.2-4b)所示,那么跨中弯矩减小,而且基本与斜腿中部弯矩相等,结构受力趋于合理。大量的结构计算也验证了这一设想。对于在水平段与斜腿中部由弯矩引起的拉应力,可以通过设置较少的预应力钢束抵消。从拱桥压力线的角度来讲,就是通过适当的预应力来调整拱桥的压力线,使其逼近拱轴线,使拱全截面以受压为主,这样就可充分发挥混凝土材料的特性,增强八字形混凝土拱桥的跨越能力。

图1.2-5为两种不同矢跨比的八字形混凝土拱桥。图1.2-5a)所示的较坦,即矢跨比较小。我们知道,拱桥之所以在恒载作用下没有弯矩只受压力,是由于拱脚产生的水平力与矢高的乘积能够抵消恒载产生的弯矩。如果矢高较小,如图1.2-5a)所示,那么水平力与矢高的乘积就小,抵消恒载产生的弯矩也小,此时结构的受力行为趋向于梁。研究表明:拱桥的矢跨比小于1/10时,它的受力将与梁相似;当矢跨比在1/10~1/5时才表现为拱的受力特性。因而,将八字形混凝土拱桥的矢跨比适当增大,如图1.2-5b)所示,其受力才较合理。作者研究分析得出,八字形混凝土拱桥的矢跨比范围为1/6~1/5,斜腿的倾角范围为 25° ~ 32° 。

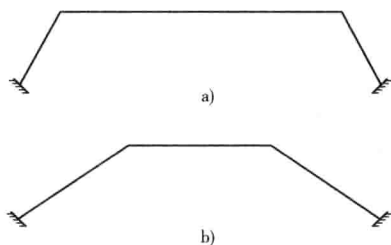


图1.2-4 八字形刚架桥线形比较(一)

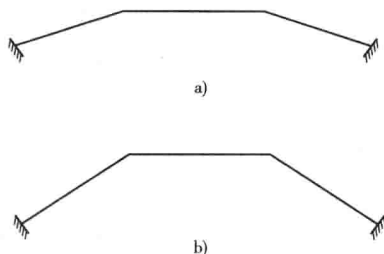


图1.2-5 八字形刚架桥线形比较(二)

1.2.3 八字形刚架拱桥的工程示例

下面以渝邻高速公路古路中学立交桥为背景,简要介绍由立柱竖转形成的八字形刚架拱桥的初步设计。

1) 工程概况

古路中学立交桥为跨越渝邻高速公路的一座立交桥,如图1.2-6所示,要求的净跨径为40m,桥梁宽度为净7m(行车道)+2×0.75m(人行道)+2×0.25m(栏杆)=9m,设计荷载为汽车—20级,挂车—100级,人群荷载为 3.5kN/m^2 。

2) 结构与构造特点

(1) 立面布置:净跨径 $L_0=40\text{m}$,刚架拱的两斜腿和水平段各占跨径的1/3,斜腿倾角为 25° 。矢跨比为1/6,净矢高为6.67m。

(2) 横断面布置:刚架拱肋采用 $100\text{cm}\times 75\text{cm}$ 的实心矩形截面,考虑到拱脚截面弯矩很大,故将该截面增高到1.2m,至第一根立柱位置肋高变为1.0m,水平段部分肋高0.8m,肋宽0.75m。拱肋之间用 $75\text{cm}\times 50\text{cm}$ 的矩形横系梁连接。

(3) 拱上建筑布置:拱上立柱采用双柱形式,桥面板采用标准跨径为4.64m的钢筋混凝土预制实心板。水平段盖梁直接与拱肋连接,既作为系梁,又作为盖梁。