



高速铁路钢系杆拱桥

陈 列 郭建勋 李小珍 编著

GAOSUTIELU GANGXIGANGONGQIAO

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

高速铁路钢系杆拱桥

陈 列 郭建勋 李小珍 编著

中 国 铁 道 出 版 社

2010年·北 京

内 容 简 介

本书是在对国内外钢系杆拱桥资料和设计研究成果系统归纳、分析、总结的基础上编写完成的。全书共分八章,主要介绍了高速铁路的特点和对桥梁结构的要求,以及国内外高速铁路钢系杆拱桥概况;高速铁路钢系杆拱桥主要结构形式、构造特点、结构特性、结构设计参数选择,以及静力和动力分析;钢系杆拱桥主要构件的构造细节及其疲劳、厚板焊接变形和残余变形特性分析,以及对相关影响因素和作用进行的系统归纳分析;结构钢材防腐和桥面防腐防水的涂装材料、技术、措施和工程应用实例;整体钢桥面技术现状及分析理论,结合钢桥面板结构分析案例和模型静载及疲劳试验,对测试结果与计算理论的对比分析。

本书作者长期从事桥梁工程的设计、研究工作,主持和参与了我国高速铁路的设计、研究和技术咨询工作,故本书理论与实践并举,内容丰富,可供从事桥梁工程的技术人员、科研工作者以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路钢系杆拱桥/陈列,郭建勋,李小珍编著. —北京:
中国铁道出版社, 2010. 8
ISBN 978-7-113-11388-9

I. ①高… II. ①陈…②郭…③李… III. ①高速铁路-钢结构-系杆
拱桥-桥梁工程 IV. ①U448.13②U448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 075154 号

书 名: 高速铁路钢系杆拱桥
作 者: 陈 列 郭建勋 李小珍

责任编辑: 洪学英 张 悦 电话: (路) 021-73656 (市) 010-51873656
封面设计: 崔 欣
责任校对: 孙 玫
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 北京精彩雅恒印刷有限公司
版 次: 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷
开 本: 787 mm × 960 mm 1/16 印张: 18 字数: 350 千
书 号: ISBN 978-7-113-11388-9
定 价: 70.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部联系调换。

电 话: 市电 (010) 51873170, 路电 (021) 73170 (发行部)
打击盗版举报电话: 市电 (010) 63549504, 路电 (021) 73187

作者简介

陈 列,男,1962 年出生,四川乐山,工学硕士,西南交通大学博士研究生,教授级高级工程师,中铁二院工程集团有限责任公司副总工程师。

长期从事桥梁工程设计、研究工作,主要研究方向是箱梁约束扭转理论、大跨度混凝土桥结构分析。近年来致力于高速铁路设计综合技术、高速铁路大跨度钢桥和混凝土桥设计研究、高速铁路整体式声屏障设计研究、铁路桥梁减隔震技术标准和设计研究。担任武广客运专线韶花段、沪昆客运专线玉昆段设计总工程师,京沪高速铁路及京石、郑武、广深港、石太、合福、沪昆湖南段、兰新甘青段等客运专线总咨询师,武广客运专线副总咨询师。

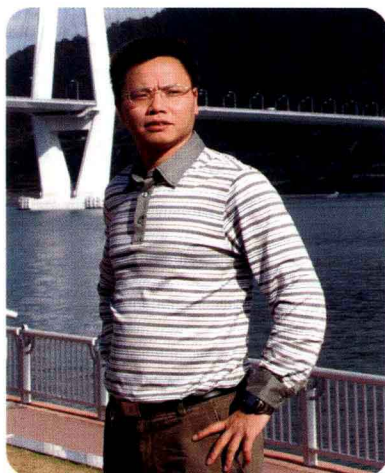
参加编写《中国高速铁路桥梁》、《汉英英汉铁路客运专线常用词汇》、《汉英英汉地铁轻轨词汇》以及翻译审核《德国铁路事故大事记》等图书,发表学术论文 60 余篇,曾获“南昆铁路建设立功奖章”、“火车头奖章”和全国优秀工程设计铜奖,铁道部优秀设计二、三等奖等。



郭建勋,男,1969年出生,四川仁寿人,工学学士,教授级高级工程师,中铁二院工程集团有限责任公司土木建筑设计研究一院桥梁所总工程师兼副所长。

长期从事桥梁工程设计和科研工作,主要方向是铁路钢结构桥梁、大跨度铁路混凝土桥梁等特殊结构桥梁设计。主持或参加水柏铁路北盘江大桥、渝怀铁路长寿长江大桥及跨乌江的三座大桥、重庆枢纽东阳2号大桥、福厦铁路钢系杆拱桥、南广铁路桂平郁江特大桥等项目的设计与研究。曾担任福厦及成兰铁路专业设计负责人,同时负责武广、福厦、遂渝二线、南广、成兰、尼日利亚阿布贾城铁及阿布贾至卡杜拉国铁等项目所级设计审查。

参编《中国高速铁路桥梁》、参译《铁路桥梁钢结构设计规范》、《铁路桥涵地基和基础设计规范》、《钢筋混凝土桥梁抗震设计和评估(美)》。发表论文20余篇。曾获全国优秀工程设计银奖、中国铁路工程总公司优秀工程设计二等奖、三等奖证书。



李小珍，男，1970 年出生，湖南安仁人，工学博士，教授，博士生导师，西南交通大学学术带头人，国家科技进步二等奖（2009 年）、四川省杰出青年学术技术带头人获得者。



长期从事桥梁结构动力学、车桥耦合振动领域的研究。特别是在高速铁路车辆—桥梁耦合振动方面的研究卓有成效，其研究成果被列入我国高速铁路规范，直接应用于秦沈线、芜湖长江大桥、武汉天兴洲公铁两用长江大桥、南京大胜关长江大桥等国家与铁道部“九五”攻关项目以及铁道部重大工程项目中。主持国家自然科学基金 1 项，四川省杰出青年基金项目 1 项，四川省应用基础重大项目 1 项，铁道部科技攻关项目多项，为高速铁路、客运专线桥梁的动力设计和刚度取值提供了大量技术支持和咨询。

主编的《列车—桥梁动力分析软件 BDAP2.0》、《风—列车—线路—桥梁系统耦合振动分析软件 WTTBDAS V1.0》获国家版权局计算机软件著作权，参编专著《桥梁结构有限元分析》和教材《大跨度铁路桥梁》和《桥梁工程》，发表论文 80 余篇，其中 EI 检索 32 篇。曾获 2005 年中国铁道学会科技进步三等奖。

序

Preface



随着我国经济社会的持续发展,人民生活水平的不断提升,铁路运输量开始不断增加,人们对出行的便捷性、安全性、舒适性、经济性等的要求也越来越高。高速铁路以其运力大、速度快、安全、舒适、可靠、全天候等优势,已成为现代主要的高速交通运输方式。

我国高速铁路正处在快速发展的黄金时期,也是高速铁路桥梁技术创新和快速进步时期。我国从事桥梁设计、研究和施工的科技人员抓住历史的机遇,对高速铁路桥梁设计进行了一系列认真的探索,建成了一批具有鲜明时代特色、理念先进、技术一流、形式新颖、造型美观的桥梁,并成为了一道道亮丽的风景线。

拱桥,既古老而又现代。中国的拱桥始建于东汉中后期,已有一千八百余年的历史。作为拱桥桥型之一的系杆拱桥,特别是钢系杆拱桥,具有跨越能力大、美观、经济、施工对交通干扰小等特点,在线路小角度斜交跨越城市干道、高速公路、通航河流等需要桥梁跨度大且线路以下净空高度受限时,具有独特的优势,在国内外高速铁路上均有成功的案例。

陈列、郭建勋、李小珍长期从事桥梁工程和高速铁路的设计和研究

工作,所著《高速铁路钢系杆拱桥》一书,是一部对高速铁路钢系杆拱桥设计研究进行系统论述的专业著作。作者对国内外高速铁路钢系杆拱桥的结构形式和特点,以及高速铁路下承式钢系杆拱桥结构体系、结构形式、设计方法、受力特点、动力特性、疲劳构造、厚板焊接、钢材防腐、桥面防水、结构试验等进行了系统分析和论述。书中图文并茂、资料丰富、可读性强,并用专门章节详细介绍了福厦铁路 128m 跨度下承式钢系杆拱桥设计情况,使设计分析理论与工程实践得以紧密结合。该书可供从事铁路桥梁设计、研究、工程建设的技术人员,大专院校相关专业的师生借鉴和参考。

中国工程院院士



2010 年 3 月

前言

Foreword



铁路是现代化的产物,铁路的发展过程,又是推进现代化的过程,并已发展成为有着巨大竞争力的交通工具,对社会发展产生了巨大的影响。铁路建设一方面要适应经济发展带来的运输量不断增加的需要,同时又要满足旅客出行方便、快捷、舒适、安全的要求。作为现代科学技术高度发达产物的高速铁路,与其他运输方式相比,以安全可靠、技术创新、优质服务为其标志,以速度高、客运量大、全天候、能耗低、污染轻、占地少、舒适、效益高为其突出特点,对世界各国的社会经济和技术产生了巨大的影响,已成为现代交通和铁路发展的一个重要方向。

高速铁路为保证其高速度运行时的乘坐舒适性和安全性,以及易于维修养护,采用全封闭行车、立体交叉、大曲线半径、铺设经过优化设计并适应高速行车要求的跨区间无缝线路,强调对结构变形和沉降、结构动力特性的严格控制。高速铁路桥梁与普通铁路桥梁相比,具有更大的刚度、更小的变形、更好的动力特性;同时,在重视桥梁景观设计,体现时代特色,提升铁路工程的品质方面有了长足的进步。伴随着线路曲线半径的增大,高速铁路与既有交通网小角度交叉难以避免,使得桥梁跨度增加,如采用普通的梁式结构,势必提高线路高程,增加相对于路基而言造价较高的桥梁比例,增大工程投资。因此,跨越既有交通运输网时,结合工程自然条件,通过采用下承式桥梁结构减小桥面高程,优化线路设计,改善景观效果,是高速铁路设计中考虑的方案之一。

拱桥造型优美、曲线圆润、富有动感,既古老又现代,并随着材料科学的发展、分析计算手段的进步、设计建造水平的提高而被广泛应用在工程中。特别是钢系杆拱桥,具有跨越能力大、桥面至梁底结构高度小、动力性能好、美观大方、施工对既有交通干扰小等特点,在线路小角度斜交跨越城市干道、高速公路、通航河流时,具有独特的优势,成为高速铁路大跨度桥梁中具有竞争力的主要形式之一,在国内外高速铁路中都得到了应用。

《高速铁路钢系杆拱桥》以作者八年来在高速铁路下承式钢系杆拱桥设计、咨询、研究方面的成果为基础,从结构体系、结构形式、设计方法、受力特点、动力特性、疲劳构造、厚板焊接、钢材防腐、结构模型试验等方面对高速铁路下承式钢系杆拱桥进行了系统分析和论述,详细介绍了福厦铁路 128 m 下承式钢系杆拱桥工程实例。全书共分八章,第一章绪论介绍高速铁路的特点和对桥梁结构的要求,以及国内外高速铁路钢系杆拱桥概况;第二、三章论述高速铁路钢系杆拱桥主要结构形式、构造特点、结构特性、结构设计参数选择,以及静力和动力分析;第四、五章讨论了钢系杆拱桥主要构件的构造细节及其疲劳构造分析、厚板焊接变形和残余变形特性分析,对相关影响因素和作用进行了系统的归纳分析;第六、七章从满足结构耐久性要求等方面,论述钢材防腐和钢桥面板防腐、防水涂装材料、技术、措施和工程应用实例;第八章介绍整体钢桥面技术现状及分析理论,结合钢桥面板结构分析案例和模型静载试及疲劳试验,对测试结果与计算理论进行了对比分析。

朱颖教授级高级工程师在 2002 年福厦铁路方案设计时,积极倡导和支持作者将钢系杆拱桥这一桥式应用到高速铁路设计中,并在八年的设计研究和本书编写过程中,给予了大力的指导和支持;马庭林设计大师对高速铁路下承式钢系杆拱桥设计研究工作也给予了大力的指导和支持;本书编写过程中,得到了强士中教授的精心指导,魏建高级工程师给予了积极的帮助;文中引用了袁明、陈良江、徐勇、艾智能、

李慧君、张玉玲、牛斌、杜存山、祝和权、高芒芒等同志参与高速铁路钢系杆拱桥设计研究的部分成果或报告,以及朱颖、魏建、刘春彦等同志的国外考察报告图片,借此表示衷心的感谢。

高速铁路钢系杆拱桥设计研究涉及结构静力和动力学、空气动力学、机车和车辆动力学、轮轨关系和轨道谱、结构设计原理、温度作用、钢材焊接和疲劳、钢材防腐、高分子材料防水技术、工务工程等学科,专业性强、学科门类多、技术新颖和难度大,加之作者水平所限,书中不当之处,敬请读者指正,以便更正和完善。

作 者

2010年3月于四川成都

目 录

Contents



1 绪 论	(1)
1.1 高速铁路的特点	(1)
1.2 高速铁路对桥梁结构的要求	(1)
1.2.1 安全性要求	(1)
1.2.2 高平顺性要求	(1)
1.2.3 景观要求	(2)
1.2.4 跨越能力要求	(2)
1.2.5 结构高度的影响	(3)
1.2.6 施工要求	(3)
1.3 下承式钢系杆拱桥的特点	(3)
1.4 国外高速铁路钢系杆拱桥	(5)
1.4.1 法国地中海线 Avignon Sud 桥	(5)
1.4.2 法国地中海线 Garde Adhémar 桥	(6)
1.4.3 法国地中海线 Mornas bow-string 桥和 Mondragon bow-string 桥	(8)
1.4.4 韩国京釜高速铁路钢系杆拱桥	(9)
1.4.5 日本山梨磁悬浮试验线钢系杆拱桥	(10)
1.5 国内高速铁路钢系杆拱桥	(10)
1.5.1 福厦铁路木兰溪特大桥和丘后特大桥	(10)
1.5.2 武广客运专线汀泗河特大桥	(14)
1.5.3 哈大客运专线新开河特大桥	(16)
1.5.4 甬台温铁路雁荡山大桥	(17)
2 钢系杆拱桥结构形式及受力特点分析	(20)
2.1 概 述	(20)

2.2	结构形式的分类	(22)
2.3	结构静力和稳定分析方法	(25)
2.4	结构特征分析及设计参数选择	(29)
2.4.1	不同矢跨比条件下系杆拱受力特性	(29)
2.4.2	拱肋内倾角度对结构受力的影响	(31)
2.4.3	吊杆形式对结构受力的影响	(32)
2.4.4	不同拱梁刚度比条件下系杆拱受力特性的分析	(36)
2.4.5	拱肋横向联结系对结构的影响	(37)
2.4.6	桥面构造	(39)
2.5	结构设计	(55)
2.5.1	主拱结构形式	(55)
2.5.2	桥面结构形式	(57)
2.5.3	福厦铁路 128 m 钢系杆拱桥设计	(63)
2.6	结构静力分析	(73)
2.6.1	计算的内容及方法	(73)
2.6.2	设计荷载	(74)
2.6.3	荷载组合	(75)
2.6.4	主要控制指标	(76)
2.6.5	主要计算分析结论	(78)
3	动力分析	(87)
3.1	概 述	(87)
3.1.1	车桥动力分析	(87)
3.1.2	车桥动力分析研究的历史演变和研究现状	(88)
3.2	车桥动力分析模型	(90)
3.3	车辆与桥梁振动性能的评价	(93)
3.3.1	车辆运行安全性评价	(93)
3.3.2	车辆运行平稳性评价	(95)
3.3.3	桥梁振动性能评价	(100)
3.4	车—线—桥动力分析理论	(106)
3.4.1	机车车辆动力学模型	(107)
3.4.2	桥梁有限元分析模型	(110)
3.4.3	轨道计算模型	(113)
3.4.4	轮轨接触几何关系和轮轨作用力	(114)

3.4.5	桥轨相互作用关系	(116)
3.4.6	车线桥振动方程及其求解	(116)
3.5	钢系杆拱桥的车桥动力分析	(117)
3.5.1	桥梁动力分析模型的建立	(117)
3.5.2	桥梁自振特性分析	(120)
3.5.3	车桥动力分析	(123)
3.6	风荷载作用下钢系杆拱桥的车桥动力分析	(127)
3.6.1	风—车—桥耦合振动分析的基本思路	(127)
3.6.2	车辆计算分析模型	(128)
3.6.3	桥梁计算分析模型	(129)
3.6.4	轮轨相互作用力	(129)
3.6.5	作用于桥梁上的风荷载	(130)
3.6.6	作用于车辆上的风荷载	(131)
3.6.7	风—车—桥耦合振动方程及求解	(132)
3.6.8	脉动风场的随机模拟	(133)
3.6.9	风—车—桥耦合振动响应及评价	(137)
4	构造细节及疲劳构造分析	(144)
4.1	概 述	(144)
4.2	拱 脚	(144)
4.2.1	拱脚构造方案	(144)
4.2.2	拱脚构造细节	(146)
4.2.3	拱脚仿真分析计算	(147)
4.3	正交异性钢桥面板	(149)
4.4	拱肋与吊杆的连接节点	(154)
4.5	系梁与吊杆的连接节点	(154)
4.6	系梁与横梁连接肱板	(154)
5	厚板焊接变形和残余应力分析	(157)
5.1	概 述	(157)
5.1.1	国外研究现状及规定	(157)
5.1.2	国内研究现状及规定	(158)
5.1.3	主要研究进展	(159)
5.2	焊接变形分析机理	(159)

5.3	焊接接头控制参数的主要影响因素	(160)
5.3.1	分析方法	(161)
5.3.2	焊接过程的实现	(161)
5.3.3	桥梁焊接构件基础参数的影响分析	(163)
5.3.4	箱形截面焊接参数的影响分析	(169)
5.4	减小厚板焊接变形工艺控制参数	(173)
5.4.1	焊接道数	(173)
5.4.2	焊接温度	(173)
5.4.3	焊接截面尺寸	(173)
5.4.4	反预变形尺寸	(173)
5.5	主要分析结论	(173)
6	钢材防腐	(176)
6.1	概 述	(176)
6.2	桥梁的腐蚀环境	(176)
6.2.1	大气腐蚀	(177)
6.2.2	水 腐 蚀	(180)
6.2.3	土壤腐蚀	(181)
6.3	铁路钢桥的腐蚀特性	(181)
6.3.1	钢铁腐蚀机理	(182)
6.3.2	钢桥构件的腐蚀形态	(182)
6.3.3	铁路钢桥不同部位的腐蚀特性	(184)
6.4	钢桥的防腐措施	(185)
6.4.1	涂料保护	(185)
6.4.2	阴极保护	(186)
6.5	桥梁防腐蚀涂料及涂装技术	(187)
6.5.1	桥梁防腐蚀涂料	(187)
6.5.2	铁路钢桥的防腐蚀用涂料	(193)
6.5.3	铁路钢梁涂装体系	(196)
6.5.4	铁路钢梁涂装技术	(197)
6.6	桥梁热喷涂长效防腐蚀技术	(198)
6.6.1	热喷涂技术的特点	(198)
6.6.2	热喷涂长效防腐	(199)
6.6.3	电弧喷涂长效防腐蚀工艺	(201)

6.6.4	国外热喷涂技术在桥梁上的应用	(202)
6.6.5	我国热喷涂技术现状及在桥梁建设的应用	(203)
6.7	目前我国铁路钢桥防腐保护涂装发展动向	(204)
6.7.1	高性能涂料	(205)
6.7.2	应用水性涂料	(205)
6.7.3	使用复合保护涂料	(205)
6.8	我国铁路与公路钢桥涂装标准比较	(206)
6.9	福厦铁路 128 m 钢系杆拱桥涂装保护设计	(206)
6.9.1	主结构与大气接触表面	(207)
6.9.2	钢箱杆件内部封闭部分	(207)
6.9.3	高强度螺栓联结部分摩擦面	(207)
6.9.4	人行走道、检查设备等辅助结构	(207)
7	钢桥面板防腐、防水	(208)
7.1	概 述	(208)
7.2	钢桥面板防腐、防水材料	(210)
7.2.1	桥面防腐材料——环氧富锌防锈漆	(210)
7.2.2	聚脲弹性体防水材料	(215)
7.2.3	聚脲弹性体性能测试	(218)
7.2.4	配套和应用性能试验	(221)
7.2.5	福厦铁路 128 m 钢系杆拱桥桥面防腐、防水设计	(223)
8	钢桥面模型试验及分析	(227)
8.1	概 述	(227)
8.1.1	国外钢桥整体钢桥面发展	(227)
8.1.2	国内钢桥整体钢桥面运用	(229)
8.2	系杆拱桥钢桥面分析理论	(230)
8.2.1	整体分析的空间板梁单元模型	(230)
8.2.2	整体分析的空间杆系单元模型	(231)
8.2.3	桥面系分析的空间板壳单元法	(234)
8.2.4	算例	(235)
8.3	高速铁路整体钢桥面模型试验	(237)
8.3.1	试验目的、方法、理论计算与测点布置	(237)
8.3.2	试验模型安装	(241)

8.3.3	位移测试结果与分析	(244)
8.3.4	应力测试结果与分析	(250)
8.3.5	结 论	(256)
8.4	小试件疲劳试验	(257)
8.4.1	试验目的、方法、理论计算与测点布置	(257)
8.4.2	U 肋测试结果与分析	(259)
8.4.3	连接焊缝测试结果与分析	(260)
8.4.4	相关规范验算结果	(263)
8.4.5	U 肋加劲构造参数研究	(264)