

国家自然科学基金青年基金项目51404273资助

WUGUANGGAOTIEQIAOLIANGSHEJISHIGONG
JIDONGLIXUEJIANCEGUANJIANJISHU

武广高铁桥梁设计施工 及动力学检测关键技术

● 高军 程宝辉 林晓 编著



长江出版社

国家自然科学基金青年基金项目51404273资助

WUGUANGGAOTIEQIAOLIANGSHEJISHIGONG
JIDONGLIXUEJIANCEGUANJIANJISHU

武广高铁桥梁设计施工 及动力学检测关键技术

● 高军 程宝辉 林晓 编著

长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

武广高铁桥梁设计施工及动力学检测关键技术/
高军,程宝辉,林晓编著. —武汉:长江出版社,2016.9
ISBN 978-7-5492-4594-9

I. ①武… II. ①高… ②程… ③林… III. ①高速铁路—
铁路桥—桥梁设计—研究—中国②高速铁路—铁路桥—
桥梁施工—研究—中国③高速铁路—铁路桥—动力学—
检测—研究—中国 IV. ①U448.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 230374 号

武广高铁桥梁设计施工及动力学检测关键技术

高军 程宝辉 林晓 编著

责任编辑:高婕好

装帧设计:蔡丹

出版发行:长江出版社

地 址:武汉市解放大道 1863 号

邮 编:430010

网 址:<http://www.cjpress.com.cn>

电 话:(027)82926557(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉市首壹印务有限公司

规 格:787mm×1092mm 1/16

15.5 印张 12 页彩页 320 千字

版 次:2016 年 11 月第 1 版

2016 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5492-4594-9

定 价:38.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

序

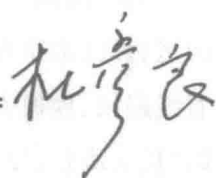
武广高铁是一条跨越华中、华南两大区域的行经大别山脉和南岭山脉复杂地质山区、长江水系和珠江水系的高速铁路,是我国长大高速铁路干线代表作之一,因其有线路长、规模大、标准高、技术新、工程复杂、类型齐全、特殊桥构多样等综合特点,以“长大高新、复杂齐全”著称于世,是中国高速铁路发展的里程碑。该高铁位于湖北、湖南、广东三省境内,属京广高速铁路南段,其承东启西,属路网骨干,是我国铁路“四纵四横”快速客运网的重要组成部分。其自武汉站引出,向南经湖北咸宁,湖南岳阳、长沙、株洲、衡阳、郴州,广东韶关、清远、佛山等市,终于广州南站,正线全长 1168.3km。

修建武广高铁,实现了京广线南段客货分线运输,有效而彻底地解决了京广线武广段运能紧张的局面,使粤汉间铁路旅行时间由 11h 缩短至 3h 左右。同时,武广高铁也是武汉城市圈、长株潭城市群及珠江三角洲都市圈间联系的现代化、大能力的快速交通纽带,对沿线国民经济的发展具有极大的推进作用,社会影响深远。

本书旨在既全面反映高速铁路桥梁设计、施工和动力学检测技术思想,又着重阐述典型桥梁桥式结构技术方案,特别是在世界范围内高速铁路桥梁设计首次采用的创新技术。书中比较详细地阐述了梁式桥、大跨度桥梁结构静动力特性对高速行车的适应性、桥上设置无缝钢轨和无砟条件下的各种变形控制、高性能混凝土后期徐变变形控制、桩基工程后期沉降控制等创新技术。为了解决大跨度斜拉桥加劲梁由于钢桁梁横截面较宽,横向受力较大引起钢桁杆件杆端附加弯矩较大而影响钢桁杆件设计这一技术问题,通过受力分析与试验研究,创新采用了宽幅双主桁钢桁梁斜拉桥,这种桥与传统的斜拉桥钢桁梁形式不同,仅设置桥面水平 K 撑和三角形双主桁,无竖向 K 撑、无中间竖向吊杆、无需增加主桁设置,既较好地改善了钢桁梁的受力,又达到了经济性的目的。首次采用主跨钢箱梁与边辅跨混凝土梁结合的四线铁路独塔弯斜拉桥,既较好地解决了弯斜拉桥与高速行车的适应性问题,又实现了四线铁路弯斜拉桥跨越城市高架高速公路和交叉分布的城市道路。

适逢我国大规模高铁建设的开局之际,本书对于提高特殊结构桥梁结构设计的合理性,指导高铁桥梁的规范化施工,建立高铁桥梁动力学检测模式和体系提供了理论依据和技术指南。希望本书提出的高铁桥梁,特别是特殊结构桥梁的设计理念,施工新技术、动力学检测技术体系,能在铁路、公路、水利水电、市政交通等行业的规划、设计、施工、检测和环保部门得以应用和推广。

中国工程院院士:



2016年8月

前 言

在武广高铁的研究、设计、建设过程中我国第一次将桥梁技术运用在时速 350km/h 高速铁路上。

时至今日,我国时速 300km/h 以上高速铁路已达 10000km 以上,其中桥梁占线路长达 55% 以上。武广高铁于 2009 年底建成通车以来,经运营实践检验,高速铁路桥梁技术已经在北京至上海等 20 多个项目中得到成功应用,标志着中国高速铁路桥梁技术已取得巨大进步,跻身世界先进行列。

本书旨在既全面反映高速铁路桥梁设计、施工和动力学检测技术思想,又着重阐述典型桥梁桥式结构技术方案,特别是在世界范围内高速铁路桥梁设计首次采用的创新技术。书中比较详细地阐述了以下创新技术:

(1)梁式桥及各种大跨度桥梁结构静动力特性对高速行车的适应性、桥上设置无缝钢轨和无砟条件下的各种变形控制、高性能混凝土后期徐变变形控制、桩基工程后期沉降控制等创新技术。

(2)简支梁首次采用单箱与多箱侧立面弧线箱梁和 6 片式 T 梁技术,以及首次采用节段拼装式预应力混凝土双箱梁技术,使得简支梁跨度突破世界高速铁路简支梁跨度先例,达到 64m。

(3)大跨度混凝土连续钢构桥梁结构,为实现桥上无砟轨道能够高速行车,利用现场施工材料进行模型梁收缩徐变变形理论与规律分析研究;采用体外后拉预应力索,控制二期恒载铺设,有效地控制了混凝土结构的后期徐变变形,使得高速铁路无砟轨道混凝土桥梁跨度首次达到最大双主跨 185m。首次采用的预应力混凝土 V 形连续钢构和 T 形刚构,能够最大限度地降低桥梁高度,能够实现桥梁转体施工。

(4)为高速铁路桥梁作前期研究的提篮式钢管混凝土简支系杆拱桥,自从武广高铁桥梁使用以来,已经在中国多个高速铁路项目上获广泛采用。双肋钢桁拱桥、自锚上承式混凝土拱桥及椭圆钢箱混凝土推力拱桥等桥式结构技术,都是在特定环境中首次采用的创新技术。

(5)梁、拱、索采用不同的形式组合起来控制变形和共同受力,力求充分发挥各自结构受力的特点,限制结构变形在可控或允许的范围,特别是指结构的后期变形(若不可控将会带来诸多的苦恼)。这种创新的组合桥式结构可以提高桥梁的整体刚度,

实现桥面梁变形的平顺性而满足高速行车要求;可以改善结构的受力峰值而使结构受力更趋合理,特别是避免因桥梁施工过程中受力大于运营期间承载能力而设计。

(6)斜拉桥在世界高速铁路桥梁中的应用已有成功的经验,相对而言,采用大跨度斜拉桥比较少。大跨度斜拉桥加劲梁一般采用钢桁梁。四线铁路时,由于钢桁梁横截面较宽,横向受力较大,引起钢桁杆件杆端附加弯矩较大而影响钢桁杆件设计。为了解决这一技术问题,通过受力分析与试验研究,创新采用了宽幅双主桁钢桁梁斜拉桥,与传统的斜拉桥钢桁梁形式不同,仅设置桥面水平 K 撑和三角形双主桁,无竖向 K 撑、无中间竖向吊杆、无需增加主桁设置,既较好地改善了钢桁梁的受力,又达到了经济性的目的。首次采用主跨钢箱梁与边辅跨混凝土梁结合的四线铁路独塔弯斜拉桥,既较好地解决了弯斜拉桥与高速行车的适应性问题,又解决了四线铁路弯斜拉桥跨越城市高架高速公路和交叉分布的城市道路问题。此外,矮塔预应力混凝土弯斜拉桥的创新应用,较好地解决了高速铁路进入市区立体交叉问题等。

书中引用了大量的资料,作者尽量注明出处,但疏漏之处难免,希望得到谅解。

本书内容丰富,信息量大,可作为从事高速铁路桥梁建设、设计、施工、咨询、监理人员及高校教师、学生的参考书。

限于作者水平,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正!

作者

2016年8月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 研究意义	1
第二节 国内外研究现状	3
第三节 研究成果	8
第二章 武广高铁桥梁设计	10
第一节 桥梁工程概况与特点	10
第二节 设计原则与采用的主要技术标准	14
第三节 基础工程设计	18
第四节 墩台设计	25
第五节 常用跨度桥梁设计	29
第六节 大跨度桥梁设计和特殊桥梁结构	32
第七节 桥面系工程设计	42
第三章 武广高铁桥梁工程施工	45
第一节 基础施工	45
第二节 墩台施工	57
第三节 简支箱梁制架	63
第四节 简支、连续梁桥位现浇	80
第五节 大跨度桥梁施工	98
第六节 特殊结构桥梁施工	144
第七节 桥面系工程施工	182
第四章 武广高铁桥梁动力学检测技术	195
第一节 试验目的、内容和评判标准	195
第二节 测试工点	199

第三节	测试数据分析	200
第四节	综合分析	214
第五章	高速铁路环境保护	222
第一节	铁路环境保护基本理论和相关法规	222
第二节	高速铁路环境保护管理程序	229
第三节	高速铁路环境保护技术	232
主要参考文献	252

第一章 绪论

第一节 研究意义

一、研究意义

高速铁路是当世界的一项重大技术成就,它集中反映一个国家的铁路线路结构、列车牵引动力、高速运行控制、高速运输组织和经营管理方面的技术进步,也体现了一个国家的科技和工业水平。高速铁路是社会经济发展的必然产物,有利于促进国家和地区间城市一体化发展进程,在经济发达、人口密集的地区经济和社会效益非常显著。高速铁路以速度快、安全性好、正点率高、全天候运行、舒适方便、输送能力强、耗能低、污染轻等一系列技术优势,已经成为世界各国和地区旅客运输发展的共同趋势。我国高速铁路的发展在世界各国中处于较超前的地位,目前已建成的京津高铁时速可达到 350km/h,是一条集中新技术、新工艺、新设备于一体的高新技术系统工程。已经建成的京沪高速铁路是《中长期铁路网规划》中投资规模最大、技术含量最高的一项工程,也是我国第一条具有世界先进水平的高速铁路,正线全长约 1318km,与既有京沪铁路的走向大体并行,全线为新建双线,设计时速 400km/h,初期运营时速 350km/h,共设置 21 个客运车站。

二、工程背景

本书的研究是以设计时速 350km/h 高速铁路武广高铁武汉至广州段作为工程背景来加以研究的,新建铁路武汉至广州高铁(以下简称武广高铁)位于我国中南部地区,是“四纵四横”高铁网北京至广州快速客运通道的重要组成部分,是实施《中长期铁路网规划》以来首批开工建设的技术标准最高、运营里程最长、运行速度最快的高铁。武广高铁铁路的建成,表明我国已完全掌握了具有自主知识产权的高速铁路成套技术,开启了中国铁路高速新时代。在武广高铁韶关至花都段的设计过程中,采用了大量的新技术、新材料和新设备。北起湖北省省会武汉市,途经湖南省省会长沙市,南抵广东省省会广州市,连接咸宁、岳阳、长沙、株洲、衡阳、郴州、韶关、清远等中

等城市,至花都站引入广州铁路枢纽,全长 968.57km。武广高铁是我国 2020 年前铁路中长期发展规划中北京—武汉—广州—深圳高铁中的一段,与既有京广铁路构成京广铁路大通道,是我国铁路网的重要繁忙干线铁路。全线设车站 18 个,桥梁长度约 369km,隧道长度约 161km。

(一) 工程地质

沿线平原、阶地、丘间谷地大面积分布第四系冲积、冲洪积、坡洪积、坡残积松散堆积层;下伏基岩主要为侏罗系、白垩系砂砾岩、砂岩、泥岩、页岩夹炭质页岩、砂质页岩及煤层,石炭系灰岩、砂页岩,局部含煤铁,泥盆系砂页岩、灰岩,燕山期花岗岩及前寒武系片岩、板岩、变质砂岩等。沿线地下水类型主要有第四系孔隙水、基岩裂隙水及岩溶水。武汉至花都段不良地质、特殊岩土类型和分布特征与地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水等条件密切相关。不良地质分布类型主要有风化剥落、坍塌、滑坡、崩塌、危岩落石、顺层等,特殊岩土分布类型主要有岩溶及岩溶地面塌陷、软土及松软土、膨胀土等。

(二) 无砟轨道对线下结构物的沉降要求

随着列车运行速度的提高,对轨道结构与路基结构也提出了更高的要求。在隧道内、高架结构和桥梁上铺设无砟轨道,已被普遍认可并已标准化。而在高速铁路土质路基上的应用则十分谨慎,除德国 Rheda 轨道铺设应用较多并基本定型外,其他国家多处于积极的试铺试验中。基于我国对土质路基无砟轨道的研究尚处于初级阶段,不同高铁宜根据沿线的自然地理背景、地质条件结合建设标准,选择代表性段落进行深入试验研究,待积累一定的经验后推广使用。

无砟轨道对沉降变形,特别是不均匀沉降要求严格。一般局部的沉降应在扣件的可调整范围内,大范围的均匀沉降应该满足线路竖曲线圆顺的要求。对于调高量为 30mm 的扣件,扣除施工误差 +6mm 和 -4mm,仅有 20mm 可以调整,再考虑列车运行时轨道结构需要预留 5mm 的变形,实际留给运营期间路基的允许沉降量仅为 15mm,这是局部调整的极限。对于长度大于 20m 的均匀地基,根据德国的经验,在施工铺轨阶段时,在满足调整后轨面高程竖曲线半径的条件下,进行包括路基、涵洞、桥梁、隧道在内整段土工工程的整体沉降分析后,可以放宽沉降标准至 30mm。

对于路桥、路涵等过渡段范围的沉降差异造成的折角,日本新干线板式轨道线路规定不大于 1/1000,德国高速铁路无砟轨道技术标准中规定不大于 1/500,我国首次在路基上铺设无砟轨道,折角控制采用不大于 1/1000。过渡段沉降的逐渐过渡和折角的要求也在于控制不均匀沉降。

第二节 国内外研究现状

一、国外研究现状

从1964年日本建成世界上第一条200km/h的高速铁路以来,法国、德国、意大利、西班牙、瑞典、韩国等国家相继发展了具有自身特点的高速铁路,最高运营速度达300km/h。高速铁路给这些国家创造了可观的经济和社会效益。

为了保证高速铁路行车和安全舒适,各项技术标准要求均很高,高架车站、桥梁所占比例较大。在高速铁路修建中,如何快速优质地建造满足高速铁路运营、维护保养及耐久性等特殊结构的桥梁工程,成为各国研究和发展的关键问题。在大规模建设高速铁路之前,均投入了大量的人力和物力进行前期实验和研究。

岩溶地面塌陷是全球广泛分布的地质灾害问题,据不完全统计,已有包括中国、美国、南非、法国、英国、德国、俄罗斯、波兰、捷克、比利时、土耳其、加拿大以及以色列等16个国家发生过严重的岩溶地面塌陷。

岩溶塌陷发育的广泛性与危害性,已引起国际社会的普遍关注,进入70年代以来,召开了多次与塌陷有关的国际会议,使世界各国的研究者有机会交流和商讨解决这一地质灾害问题的经验与方法。例如,1973年,国际工程地质协会在德国汉诺威首次举行了“岩溶塌陷与沉降:与可溶岩有关的工程地质问题”国际讨论会。1984—2008年先后在美国佛罗里达州、密苏里州、肯塔基州、德克萨斯州举行了十一届“岩溶塌陷和岩溶的工程与环境影响多学科国际讨论会”。1996年,美国学者Sowers编写了《Building on Sinkholes: Design and Construction of Foundations in Karst Terrain》(《塌陷上的建筑物——岩溶区的基础设计与施工》),全面介绍了岩溶塌陷的机理和防治问题;2004年,英国学者Tony Waltham等组织来自各国的20多位专家编写了《SINKHOLES and SUBSIDENCE: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction》(《塌陷与沉降——岩溶与洞穴发育岩体中的工程与建设》)系统介绍了工程活动中岩溶隐患的处置问题。国外在岩溶塌陷灾害研究方面,主要注重如下几个方面:

(一) 岩溶塌陷发育条件的勘测技术

岩溶塌陷发育的基础条件是隐伏岩溶的存在,具有高度不均一性的隐伏岩溶发育带的探测一直被认为是极具挑战性的问题,发达国家由于仪器设备方面的优势,各种地球物理方法都曾运用到这一领域,目前使用较多的是地质雷达、高密度电法、浅

层地震,以及声波电磁波孔间透视、CT层析法等。

(二)岩溶塌陷发育的过程、机理和临界条件研究

岩溶塌陷发育机理的揭示是有效防治的前提,由于岩溶塌陷发育过程的特殊性,使得模型试验成为主要的研究手段。如:1970年日本学者 Nogushi、1986年前苏联学者 B. П. XOMEHKO、1984年美国学者 Hodek、1995年美国学者 Tharp 先后采用物理模型试验或数值分析的方法,系统研究了非黏性土潜蚀塌陷的过程。

此外,国外一些学者还尝试采用岩土工程离心机进行塌陷试验,如: Borms 和 Bennermark、Marir 专门研究了上覆软土“突入”隧道造成地面下沉塌陷问题; Bertin 针对佛罗里达州的土层情况,模拟了上覆砂层、粉砂层的塌陷问题; Howell 和 Jenkins 模拟研究了英国岩盐洞穴的上覆砂层塌陷; Sterling 和 Ronayne 试验了洞穴上覆黏土层的沉陷,但没有测量黏土的强度,也没有把结果推广到其他土层条件;在 Sterling 的基础上, Craig 用离心模型研究了黏土直接覆盖洞穴或黏土—砂层—洞穴的条件,建立起无量纲的安全系数(VS)的极限值,塌陷与土层强度、土层厚度、其他上覆荷载以及洞穴开口直径有关,然后,运用他的无量纲比率,可以推广到其他没有专门模拟的土层条件,他还检验了一个简单的分析模型去预测他所观测的塌陷发育机理;以 Craig 的试验为基础, Maryland 大学的 Abdulla 和 Goodings 运用离心机塌陷破坏机理和导致塌陷的临界组合条件,重点研究了上覆在洞穴上方的弱固结砂层的塌陷破坏与洞穴开口大小、洞穴自身强度、弱固结砂层强度厚度、上覆砂层的厚度,以及地表荷载的关系。

(三)岩溶塌陷基础数据库建设

国外一直比较重视岩溶塌陷灾害基础数据库的建设工作,并提出了数据格式标准,如早在 1984 年,美国存在严重岩溶塌陷问题的 Pennsylvania 和 Florida 相继建立了岩溶塌陷数据库;1988 年第五届国际滑坡会议组建了世界滑坡目录工作组,开始建立世界滑坡目录。进入 90 年代, GIS 技术的普及和发展,使数据库建设提升到可视化阶段,美国国家及一些州地调局开始直接向用户提供基于 GIS 的地质灾害数字图件,并直接放在互联网上,供用户卸载。如全美滑坡图、宾夕法尼亚州地质调查局 Kochanov 博士制作的宾州岩溶塌陷图等;英国国家地调局的 Cooper 建立了基于 ArcView 的岩溶地质灾害数据库。

(四)岩溶塌陷危险性预测与风险评估

运用计算机技术,结合灾害发生的危险性与社会经济易损性,评估灾害风险,已成为近年来国外地质灾害研究工作的重要内容。如 1996 年,美国克罗拉多大学研制

开发了基于 GIS 技术的计算机决策支持系统(DSS),专门用于地质灾害的风险评价工作。美国的 Raghu 采用泊松方程来模拟新泽西州 Warren 县在给定时间内、给定面积区域发生塌陷的概率。美国的 Upchurch 提出了用于塌陷风险评估数据的评价方法。南非的 Calitz 开展了南非 Lebowakgomo 白云岩地区潜在地面塌陷风险的评估工作,意大利的 Salvati 和美国的 Tharp 提出了根据岩溶水压力对塌陷影响进行意大利中部 Latium 地区岩溶塌陷评估的概念模型,英国国家地调局的 Cooper 用 ArcView 对英国岩溶地质灾害进行了评估。

(五) 岩溶塌陷预测预警

预测预警是岩溶塌陷防治工作的重要课题,由于岩溶塌陷的产生在时间上具突发性,在空间上具隐蔽性,在机制上具复杂性,因此,被普遍认为难以采取地面常规监测手段,对塌陷进行监测预报。国外早在 1984—1987 年就尝试运用地质雷达进行潜在塌陷的监测工作,如美国学者 Benson 等在北卡罗来纳州 Wilmington 西南部的一条军用铁路进行了试验,监测周期为半年,取得了良好的效果。但由于操作复杂、连续性较差、无法对测线外的潜在塌陷进行监测,所以难以在大范围内推广。TDR 是时域反射法(Time Domain Reflectometry)的简称,它是一种远程电子测量技术。其最早被应用于电力和通讯工业,用于确定通信电缆和输电线路的故障与断裂,近年来被引用到岩土工程监测中,如 2001 年,美国 O'Connor 在马里兰州 Frederick 县境内的 70 号洲际高速公路采空区塌陷高风险区进行路基沉降监测。2002 年,美国西北大学 Dowding 等首次将这一技术运用到岩溶区高速公路路基塌陷监测中,并在岩溶塌陷最为发育的佛罗里达州高速公路进行监测试验研究,但由于试验段为已建公路,只将电缆埋设在路边排水沟上,显然无法实现对路基土洞塌陷的预警,而且,到目前为止,还没有成功预报的实例。

(六) 岩溶塌陷对环境的影响

岩溶塌陷除了对工程设施造成破坏外,还会给环境带来很大影响,塌陷坑往往会成为地表工农业和生活污水灌入补给岩溶地下水的通道,给地下水带来潜在威胁,因此,岩溶塌陷将提高岩溶含水层的脆弱性。针对这一问题,美国在塌陷危险区开展工程建设,如高速公路、废物堆放场地等,都必须对地表污水通过塌陷坑进入含水层的可能性进行监测评价。

二、国内研究现状

目前,中国的高速铁路最高设计时速可达 350km/h,代表了当今世界的高铁速度,中国是目前世界上高速铁路发展最快、系统技术最全、集成能力最强、运营里程最

强、运营速度最高、在建规模最大的国家。截至目前,中国开通运营的高速铁路已经达到 10000km。

本世纪是中国高速铁路桥梁建设的快速时期。随着高速铁路建设的全面推进,中国的桥梁建设取得了实质性进展,目前中国在建高速铁路规模达到 12700km,其中桥梁比重接近 50%。广珠城际铁路桥梁比重最高,达到 90%,武汉天兴洲长江大桥、南京大胜关大桥,分别是目前世界上最大跨度的公铁两用斜拉桥、钢拱桥。

中国铁路不断学习借鉴世界发达国家高速铁路建设技术经验,积累和探索符合我国国情的高速铁路桥梁建设的技术标准以及设计、施工技术,在桥梁设计、施工、科研以及建设管理等方面实现了重大跨越,深水大跨桥建造技术进入了世界先进行列,大吨位桥梁建造技术取得了重大突破,特殊桥梁结构广泛应用,在高速桥梁极速标准体系拥有自主知识产权。

作为我国六大类型地质灾害之一,岩溶塌陷一直受到国家有关部门和学者的高度重视,特别是近 20 年来,投入了大量人力物力,开展岩溶塌陷防治研究工作,取得了大量成果。1997 年、1998 年先后在桂林市和牡丹江市举办了两届“地面塌陷及其对工程建设的影响与防治”学术讨论会。主要成果包括:

(一)我国岩溶塌陷的宏观分布规律

岩溶研究所先后开展了“中国南方岩溶塌陷研究”“长江流域岩溶塌陷研究”和“中国北方岩溶塌陷研究”等项目,此外,有关单位还开展了“铁路沿线岩溶塌陷及防治”工作,基本摸清了我国岩溶塌陷发育的现状和宏观分布规律,确定我国岩溶塌陷基本类型。

(二)岩溶塌陷的机理研究

1993 年,岩溶地质研究所建立起大型物理模型试验和渗透变形试验为代表的岩溶塌陷试验室,对武汉、唐山、湘潭、玉林、桂林、铜陵等城市不同类型岩溶塌陷发育的机理进行试验研究,取得了很好的效果。2004 年,实验室进行彻底改造,引进了美国 GEOMATION 公司生产的 2380 数据自动采集系统,对试验过程进行全自动监测,使试验研究工作上升到新的高度,也使开展岩溶塌陷临界条件的研究成为可能。

(三)岩溶塌陷的勘查评价技术

包括地质雷达、浅层地震和电磁波、声波透视(CT)等技术在内的综合物探方法,在地矿部门组织实施的武汉、唐山、湘潭、玉林、桂林、深圳等城市岩溶塌陷勘察中得到了很好的应用。2001 年,刘传正等出版了《地质灾害勘察指南》一书,针对不同的灾害类型,系统地提出了勘察技术与方法。

(四) 岩溶塌陷灾害管理与风险评估

地理信息系统(GIS)技术已得到广泛应用,岩溶研究所从1997年起,结合岩溶塌陷灾害防治工作的特殊性,先后运用GIS技术,开发了桂林、玉林和六盘水三个城市的岩溶塌陷地理信息系统,并对岩溶塌陷灾害风险进行评估。2002年,岩溶所完成了“1/400万全国地面塌陷风险区划”工作。

(五) 岩溶塌陷预测

研究表明,岩溶水(气)压力的变化在岩溶塌陷发育过程中具有重要意义,雷明堂等通过对武汉市岩溶塌陷模型试验,提出岩溶水位下降速率、幅度对塌陷发育有重要影响;何宇彬认为岩溶水动力是产生塌陷的根本原因;陈国亮等通过对铁路沿线岩溶塌陷研究,提出诱发塌陷的压强差效应;蒋小珍通过湘潭、铜陵等市岩溶塌陷的模型试验研究,指出岩溶水压力变化对塌陷具有重要的触发作用,可以以此作为衡量塌陷发育的临界条件,Tharp采用数学模型,分析研究了岩溶水水头变化对基岩面上土洞的稳定性的影响。1999年,在地质行业基金支持下,岩溶所开展了岩溶塌陷时空预报方法研究,提出了基于岩溶塌陷发育机理的系统压力监测方法,并成功地在桂林进行了试验。2000年,在新一轮地质大调查项目的支持下,岩溶研究所在广西桂林柘木开展了岩溶塌陷预测预报方法综合研究工作,为深入系统地研究岩溶塌陷打下良好的基础。光纤传感包括BOTDR(布里渊光时域反射)和OTDR(光时域反射),最早用于光纤质量的检测,如测量光纤的断点位置、光纤的轴向应变量和光纤损耗等。如果把光纤埋设在岩土体中,岩土体的变形、破坏将会引起光纤发生相应的应变甚至断点,因此通过测量光纤不同位置的应变或断点位置,就可以计算出相应位置岩土体的变形量或破坏位置、规模,达到对岩土体变形破坏连续监测的目的。2005年岩溶所塌陷项目组与上海日本横河公司合作开展了BOTDR技术在岩溶塌陷监测预报的室内试验研究工作。

三、研究的必要性

桥梁建设所面临的主要问题如下:

(1)梁式桥及各种大跨度桥梁结构静动力特性对高速行车的适应性、桥上设置无缝钢轨和无砟条件下的各种变形控制、高性能混凝土后期徐变变形控制未得到有效验证。

(2)提篮式钢管混凝土、简支系杆拱桥结构动力与无砟轨道平顺性的适应性。

(3)双肋钢桁拱桥、自锚上承式混凝土拱桥及椭圆钢箱混凝土推力拱桥等桥式结构施工技术是否与350km/h高铁适应。

(4)梁、拱、索,采用不同的形式组合起来控制变形和共同受力,这种创新的组合桥式结构可以提高桥梁的整体刚度,但是能否实现桥面梁变形的平顺性而满足高速行驶要求。

(5)钢箱系杆拱结构因结构的受力峰值而使结构受力改变,能否满足桥梁施工过程中受力大于运营期间承载能力。

(6)跨度斜拉桥加劲梁一般采用钢桁梁,四线铁路时,由于钢桁梁横截面较宽,横向受力较大引起钢桁杆件杆端附加弯矩较大而影响钢桁杆件受力。

第三节 研究成果

(1)梁式桥及各种大跨度桥梁结构静动力特性对高速行驶的适应性、桥上设置无缝钢轨和无砟条件下的各种变形控制、高性能混凝土后期徐变变形控制、桩基工程后期沉降控制等创新技术。

(2)简支梁首次采用单箱与多箱侧立面弧线箱梁和6片式T梁技术,以及首次采用节段拼装式预应力混凝土双箱梁技术,使得简支梁跨度突破世界高速铁路简支梁跨度先例达到64m。

(3)大跨度混凝土连续钢构桥梁结构,为实现桥上无砟轨道能够高速行驶,利用现场施工材料进行模型梁收缩徐变变形理论与规律分析研究;采用体外后拉预应力索,控制二期恒载铺设,有效地控制了混凝土结构的后期徐变变形,使得高速铁路无砟轨道混凝土桥梁跨度首次达到最大双主跨185m。首次采用的预应力混凝土V形连续钢构和T形刚构,能够最大限度地降低桥梁高度,实现桥梁转体施工。

(4)为高速铁路桥梁作前期研究的提篮式钢管混凝土简支系杆拱桥,自从武广高铁桥梁使用以来,已经在中国多个高速铁路项目上得到比较广泛地采用。双肋钢桁拱桥、自锚上承式混凝土拱桥及椭圆钢箱混凝土推力拱桥等桥式结构技术,都是在特定环境中首次采用的创新技术。

(5)梁、拱、索,采用不同的形式组合起来控制变形和共同受力,力求充分发挥各自结构受力的特点,限制结构变形在可控或允许的范围,特别是指结构的后期变形(若不可控将会带来诸多的苦恼)。这种创新的组合桥式结构可以提高桥梁的整体刚度,实现桥面梁变形的平顺性而满足高速行驶要求;可以改善结构的受力峰值而使结构受力更趋合理,特别是避免因桥梁施工过程中受力大于运营期间承载能力而设计。

(6)斜拉桥在世界高速铁路桥梁中应用已有成功的经验,相对而言,采用大跨度斜拉桥比较少。大跨度斜拉桥加劲梁一般采用钢桁梁,四线铁路时,由于钢桁梁横截