

中国高速铁路工程建设系列丛书

*Gaosu Tielu Teshu Jiegou Qiaoliang
Lixue Texting yu Shigong Jishu*

高速铁路 特殊结构桥梁 力学特性与施工技术

高军 林晓 著



非外借

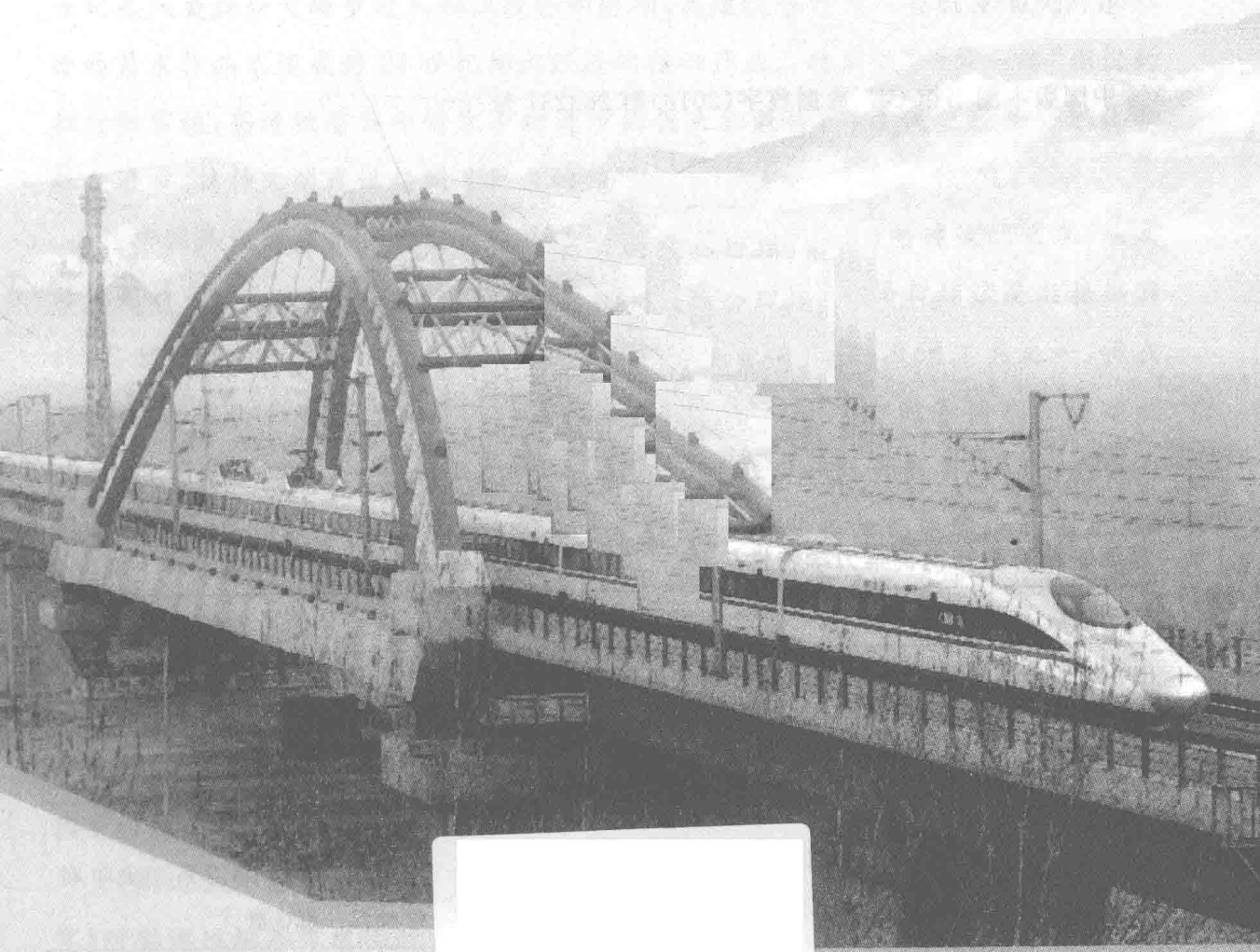
 中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

中国高速铁路工程建设系列丛书

*Gaosu Tielu Teshu Jiegou Qiaoliang
Lixue Tearing yu Shigong Jishu*

高速铁路 特殊结构桥梁 力学特性与施工技术

高军 林晓 著



 中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路特殊结构桥梁力学特性与施工技术/高军,林晓著. —武汉:中国地质大学出版社,2018.12

(中国高速铁路工程建设系列丛书)

ISBN 978-7-5625-4282-7

I. ①高…

II. ①高…②林…

III. ①高速铁路-铁路桥-桥梁结构-结构力学②高速铁路-铁路桥-桥梁施工

IV. ①U448.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 282237 号

高速铁路特殊结构桥梁力学特性与施工技术

高 军 林 晓 著

责任编辑:段连秀

策划编辑:段连秀

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://cugp.cug.edu.cn

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:170 千字 印张:6.75

版次:2018 年 12 月第 1 版

印次:2018 年 12 月第 1 次印刷

印刷:湖北睿智印务有限公司

印数:1—800 册

ISBN 978-7-5625-4282-7

定价:48.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序 一

随着世界经济全球化趋势的明显加快,经济的迅猛发展已是大势所趋。21世纪是人类社会大踏步进入知识经济的时期,高速铁路作为人类创意与科技相结合的艺术作品已经成为21世纪知识经济的核心产业。特别是“一带一路”倡议的推行和实施,高速铁路作为新生事物进步的代表和载体,对于促进经济全球化和
社会进步、精神文明建设起到了巨大的作用。

《中国高速铁路工程建设系列丛书》正是结合当前高速铁路建设的需求,从实际应用的角度出发,用典型精彩的案例、翔实的数据分析,结合现场试验数据编写的,具有重大的指导意义。高速铁路作为世界上主要的公共交通工具之一,将在21世纪获得全面发展。目前,继日、法、德、意、西班牙、比利时等国家相继建成4600km高速铁路后,世界上正在建设和已立项准备建设的新线有45条,总长为31000km。高速铁路的研究和建设必将适应可持续发展和交通运输的需求,在世界范围内形成一场新的铁路运输领域的建设高潮,孕育着高速铁路大发展时代的快速到来。

《高速铁路特殊结构桥梁力学特性与施工技术》对桁架桥梁结构模型进行静力分析,通过施加各种载荷,观察结构应力、变形最大处,找出桥梁的危险区域等内容进行了深入的研究。

《高速铁路基于非线性振动重正化超长大直径桩基施工新技术及动力学研究》对黏弹性桩基非线性动力学特性进行了研究。

《高速铁路GDS动荷载作用下软土累积变形试验及沉降控制技术》对高速铁路基底软土的各种物理指标(包括孔隙比、含水量、密度等)进行测试,采用GDS

三轴试验系统对宁波软土进行标准三轴剪切试验和循环三轴试验,揭示循环荷载作用下软土强度及变形的试验特性。

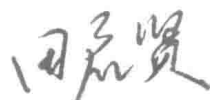
《高速铁路路基基于三维模式过渡段动力学特性分析及实车检测关键技术》通过现场试验、数值模拟对其加以研究,通过典型过渡段现场填筑试验研究,确定最佳工艺参数、质量检测控制指标及控制标准合理性,完善过渡段路基的施工工艺、质量及评价标准,验证并优化了无砟轨道过渡段路基的设计理念与设计措施,通过实车监测、评价,对过渡段路基的工作状态和长期安全稳定性进行了研究。

《高速铁路基于三维模式泥质充填断层破碎带隧道高精度地质探测及灾害精确控制关键技术》通过实验研究、理论分析、数值计算等手段,针对大体量高压隐伏岩溶隧道溃水特征与机理分析、溃水安全风险评价及岩溶综合治理措施等相关问题进行了系统深入的研究。

丛书特点:读者入门快,理论与实际相结合;内容丰富全面,理论前沿性、针对性强。特别是书中所提供的典型案例,其规范的设计以及理念和流程,既能激发读者的学习兴趣,又能培养其理论分析能力。本丛书能够系统地将高速铁路理论知识与大量的实践相结合,具有很强的实用性和可操作性。学习本丛书后,使读者在相关领域的理论、操作及设计技巧等方面大大提高。

适逢我国大规模高速铁路建设的开局之际,本丛书对于提高高速铁路路基结构物设计和施工合理性,指导规范化施工和设计,建立高速铁路建设、设计、施工和理论研究体系提供了理论依据和技术实践。作者是我的学生,也是高速铁路建设领域的专家和学者。该书提出的理念能在铁路、公路、水利水电、市政交通等行业得到广泛的应用和推广,对相关领域的科技进步将起到一定的作用。

武汉桥梁科学研究院院长
教授级高级工程师



2018年6月17日

序 二

高军同志在高速铁路建设管理和建造技术等方面具有扎实的基础理论知识,具有独立从事相关科研工作的能力。该同志学风严谨,勤于钻研,善于发现问题并灵活运用相关知识解决问题;能够对工艺方法和关键技术提出有效的措施,对实验现象和相关结果能够灵活运用有关理论进行深入分析,并能对所做工作进行阶段性总结,撰写发表有一定学术价值的学术论文。迄今为止,已公开发表学术论文 200 余篇,其中 SCI、EI、ISTP 收录 26 篇。

在对国内外高速铁路关键技术研究领域进行广泛调查研究的基础上,积极开展高速铁路路基、桥梁、隧道等方面的实验研究和实车运行试验,取得了一定的研究成果,具有较好的研究基础。高军作为主要研究人员参加了武汉—广州、北京—武汉、武汉—九江、郑州—万州、安庆—九江等高速铁路项目建设和科学研究,在高速铁路研制与应用方面积累了丰富的建设管理和研究经验,是高速铁路建设领域的专家和学者。

《高速铁路路基基于三维模式过渡段动力学特性分析及实车检测关键技术》,通过对现场试验,采用 ABAQUS 有限元软件对武广综合试验段 12 个路基测试断面进行了动态数值分析,对比分析获得了 12 个路基断面在不同轴重荷载条件下最大动应力、竖向动变形和动剪应变的变化特性数据,提出了在路基的两个横断面和底面施加三维一致黏弹性人工边界,在确保计算精度基础上缩小计算量;运用图形学理论,建立了 8 节点实体减缩积分单元计算模型。通过对桥与路基过渡段、桥与桥或桥与隧道过渡段、路堤与路堑过渡段、涵洞与路基过渡段、半挖半填横向过渡段试验,得到了不同工况下的 K_{30} 、 E_{v2} 、 E_{vd} 试验对比数据。通过两种车型、120 次高速条件下的动力学试验测试,得到了动应力、加速度、振动速度、动

位移均沿路基深度的衰减关系;对过渡段路基工作状态和长期安全稳定性进行了监测和评价,提出了车辆轴重是过渡段路基动应力设计的控制条件。

《高速铁路基于非线性振动重正化超长直径桩基施工新技术及动力学研究》基于广义 Winlder 模型,建立了分析桩基轴向及横向非线性动力学特性的数学模型,采用复模态分析等方法,得到了线性黏弹性桩基轴向及横向振动的阶振模态及固有频率的精确表达式。

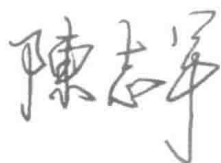
《高速铁路特殊结构桥梁力学特性与施工技术》精确分析了桥梁结构在各种载荷作用下的应力变化,采用有限元法在大型通用软件 ANSYS 平台上,对桥梁结构进行模拟分析,对桁架桥梁结构模型进行静力分析;通过施加各种载荷,观察结构应力、变形最大处,找出桥梁的危险区域;对桁架桥梁结构进行模态分析,得到桥梁的自振频率及振型,通过分析得到减轻桥梁共振的方法。

《高速铁路 GDS 动荷载作用下软土累积变形试验及沉降控制技术》基于试验数据,采用软黏土常见的 4 种非线性渗透模型和 3 种非线性压缩模型进行适用性分析,确定模型参数;寻求适用于软土沉降地区泥质的最佳压缩、渗透模型,为其固结变形计算提供基础;对同一模型不同液限黏土,模型参数存在差异,参数的获取需要依赖于渗透试验;为寻求能初步预测软黏土渗透系数的关系表达式,基于 Chapman - Richard 成长曲线建立了吹填淤泥 $kv - e/e^L$ 拟合方程。

《高速铁路基于三维模式泥质充填断层破碎带隧道高精度地质探测及灾害精确控制关键技术》从理论上揭示岩溶隧道不同含水构造的突水机理,建立隧道突水信息识别模型及其监测方法和岩溶隧道地质缺陷突水的力学模型。

以上成果均具有国际领先水平,代表目前国内和国际高速铁路建设的技術方向。

华中科技大学建筑工程学院
桥梁工程系主任、教授



2018 年 6 月 17 日

前 言

高速铁路桥梁在高速铁路建设中起到了至关重要的作用,我国高速铁路桥梁的建设发展迅速,与实际工程结合中也凸显其特色。

高速铁路桥梁由于桥梁建设投资规模大,列车高速运行时对桥上线路的平顺性要求高,特别是采用无砟轨道技术后,对桥梁的变形控制提出了更高的要求,因此高速铁路桥梁是我国高速铁路建设中重点研究的问题之一。

桥梁建设作为高速铁路土建工程的重要组成部分,主要功能是为高速列车提供平顺、稳定的桥上线路,以确保运营的安全和旅客乘坐的舒适。我国通过借鉴德国、日本等国家高速铁路桥梁的先进技术和成功建设经验,逐渐完善技术的同时形成自己的特色。高速铁路桥梁与普通铁路桥梁相比,在数量、设计理念及方法、耐久性要求、养护维修等诸多方面都存在着较大差异。其特点可归纳为以下几个方面:

(1)高架桥所占比例大。主要原因是在平原、软土以及人口和建筑密集地区,通常采用高架桥通过。

(2)大跨度桥多。据统计,在建与拟建客运专线中,100m以上跨度的高架桥梁至少在200座以上。其中,预应力混凝土连续梁桥的最大跨度为128m,预应力混凝土刚构桥的最大跨度为180m。

(3)特殊桥跨数量越来越多,如提篮拱、钢箱拱、系杆拱等。

(4)桥梁刚度大,整体性好。为了保证列车高速、舒适、安全行驶,高速铁路桥梁必须具有足够大的竖向、横向刚度以及良好的整体性,以防止桥梁出现较大挠度和振幅。严格控制由混凝土产生的徐变上拱和不均匀温差引起的结构变形,以

保证轨道的高平顺性。

我国的高速铁路桥梁技术得到了飞速发展,高速铁路建设技术已经步入世界先进水平的行列。我们只有在现有的技术上不断创新,研究更多的新技术,才能在世界高速铁路建设的领域中保持领先地位。

目前急需解决的问题包括:

- (1)车、线、桥耦合振动计算理论及方法;
- (2)连续等跨布置桥梁的动力性能;
- (3)新型大跨度结构及其动力分析和长钢轨纵向力的解决方案;
- (4)采用各种无砟轨道技术后,桥梁结构与线路的适应性;
- (5)桥梁结构的耐久性设计理论与方法等。

本书全面介绍了高速铁路特殊结构桥梁的特点,我国高速铁路特殊结构桥梁的主要设计标准、主要结构形式及施工关键技术,提出了在基础理论研究、新技术的应用方面与国外存在的差距及急需解决的问题。

由于日常工作繁忙、理论研究不足以及个人水平所限等原因,本书所述内容可能与预期存在差距,存在纰漏及不当之处敬请各位专家、学者、技术人员及广大读者给予批评指正。

著 者

2018年9月

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 桥梁研究的背景和意义	(2)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.3 高速铁路桥梁的特点	(5)
1.4 本书研究内容	(12)
第二章 桥梁线性静力学分析和模态分析	(13)
2.1 静力分析	(13)
2.1.1 静力分析的定义	(13)
2.1.2 线性静力分析的基本步骤	(13)
2.2 模态分析	(15)
2.2.1 动力学分析的定义及重要性	(15)
2.2.2 模态分析的主要步骤	(16)
第三章 钢桁架桥梁结构 ANSYS 分析	(18)
3.1 钢桁架桥的静力分析	(18)
3.1.1 基本情况	(18)
3.1.2 建立模型	(19)
3.1.3 施加边界条件和载荷	(25)
3.1.4 求解	(26)
3.1.5 查看计算结果	(27)
3.2 钢桁架桥的模态分析	(30)
3.2.1 求解	(30)

3.2.2	查看计算结果	(31)
3.3	钢桁架桥的共振问题	(35)
3.4	钢桁架桥结构的优化设计	(35)
第四章	桥梁结构动力特性	(42)
4.1	动态地震力计算方法	(42)
4.2	桩基模拟	(42)
4.2.1	桩基模拟的必要性	(42)
4.2.2	桩基模拟	(43)
4.3	桥梁结构模型建立	(46)
4.4	连续刚构桥自振特性计算	(46)
第五章	连续刚构桥的地震反应谱分析	(49)
5.1	反应谱地震动的输入	(49)
5.2	反应谱振型分析	(49)
5.3	反应谱内力计算分析	(52)
5.4	连续刚构桥的时程分析	(54)
5.4.1	地震动输入	(54)
5.4.2	时程分析计算结果	(55)
第六章	大跨度桥梁施工范例	(58)
6.1	桥跨结构简介	(58)
6.2	施工技术	(58)
6.2.1	总体施工方案	(58)
6.2.2	挂篮结构及拼装预压	(59)
6.2.3	梁体施工	(60)
6.3	施工控制及成果	(63)
6.3.1	控制原则及方法	(63)
6.3.2	施工控制中的计算与分析	(65)
6.3.3	现场监控工作	(65)
6.3.4	主桥施工阶段的监控成果	(66)
6.3.5	施工小结	(67)

第七章 特殊结构桥梁施工实例	(68)
7.1 单跨 112m 提篮拱结构桥梁	(68)
7.1.1 施工方案	(69)
7.1.2 系梁施工	(69)
7.1.3 钢管拱施工	(74)
7.1.4 吊杆施工	(77)
7.1.5 施工监测	(77)
7.1.6 施工小结	(79)
7.2 单跨 140m 钢箱系杆拱桥	(81)
7.2.1 桥跨结构简介	(81)
7.2.2 施工技术	(81)
7.2.3 施工监控	(87)
7.2.4 施工小结	(87)
7.3 跨广州环城高速公路东平水道钢桁拱梁桥	(87)
7.3.1 杆件安装	(88)
7.3.2 钢梁跨中合龙	(89)
7.3.3 架设控制要点	(90)
7.3.4 施工监控	(91)
7.3.5 施工小结	(94)
参考文献	(95)

第一章 绪论

自 1964 年日本建成世界上第一条 200km/h 高速铁路以来,由于其快速和安全所带来的社会效益和经济效益,以及对国民经济和科技发展所起的作用,已引起世界各国的高度重视,各经济发达国家竞相发展高速铁路。实践证明,高速铁路是现代世界经济发展和人类生活水平提高的需要,是运输市场激烈竞争的出路,是现代高新技术发展的产物。它在 200~1000km 的运距范围内具有很大的竞争力。它极大地提高了铁路运输的服务质量和管理水平,使曾经被视为“夕阳工业”的世界铁路得以复兴,呈现出蓬勃发展、方兴未艾之势。目前欧洲和日本已将一条条独立的高速铁路连接成高速铁路网。高速铁路网的形成,实现了铁路从传统型产业向现代型产业发展的历史性转变。

我国改革开放以来,经济发展迅速,各行各业与国际接轨,使得国内铁路也面临着巨大的挑战。既有铁路不能适应市场经济发展的需要,繁忙干线运输能力紧张、运输质量和服务水平低下、管理手段落后等,迫切需要我国铁路人把握世界铁路技术发展的趋势,抓住机遇,以既有线提速改造和新建一流的高速铁路为契机,使我国铁路事业发生了质的飞跃,从而在运输市场竞争中立于不败之地。

我国在 1990 年就计划将广深既有线提速至 160km/h(局部达到 200km/h),目前该准高速铁路早已投入运营。秦沈高速铁路客运专线是我国第一条真正意义上的高速铁路,该线也已经运营多年。我国高速铁路的长远发展是在全国建成“四横四纵”的高速铁路网,我国高速铁路发展很快将进入一个崭新的历史时期。

根据我国《中长期铁路网规划》(2008 年调整),“到 2020 年,全国铁路营业里程达到 12×10^4 km 以上,复线率和电化率分别达到 50% 和 60% 以上,主要繁忙干线实现客货分线,基本形成布局合理、结构清晰、功能完善、衔接顺畅的铁路网络,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。”

高速铁路比传统的普通铁路具有很大的优越性。

(1) 高速度。速度在 200km/h 以上的铁路才称为高速铁路。目前高速铁路最高运营速度已超过 300km/h。

(2) 高舒适性。贯彻以人为本的理念,突出设计上的人性化,满足舒适性的要求。由于高速度的原因,线路轨道不平顺、行车运行控制难度、行车事故后果被放大,轨道上微小的不平顺或长波不平顺对列车都将造成巨大的振动激励。因此,要求桥上轨道和路基与桥的连接部必须具有极好的平顺性。

(3)高安全性。高速铁路必须具有一流的安全保障系统,这不仅要求土建工程具有较高的可靠性和稳定性,而且更需要进行实时的安全监测、监视与控制。在能见度很低的大雾天气里,高速公路封闭,民航飞机延误起飞,而高速铁路就能够不受影响地安全运营。自1964年建成高速铁路以来,全世界范围内只有极少的列车事故。

(4)高密度。高速列车追踪列车间隔时间普遍可以达到3分钟。要体现高速铁路的优势,就必须保证列车在高速铁路线上高密度地连续运行。

(5)通车即按设计速度运行。目前世界上所建设的高速铁路除日本东海道新干线在开通运营的第一年未达到设计速度外,其后修建的新干线和其他国家的高速铁路均在通车之日即按设计速度运营。

(6)很强的本土化。高速铁路具有很强的本土化特征,必须结合我国的现实条件。尽管日本和欧洲各国经过几十年的实践,积累了大量经验,并各自制定了一套高速铁路专用的技术标准,如日本的《新干线网结构物设计标准》、国际铁路联盟的《高速线上桥梁技术标准》、联邦德国的《铁路新干线上桥梁的特殊规程 BesB(DS899/59)》以及1993年修订的《德国铁路桥梁及其他工程结构物规范 VEI(DS804)》,但这些规范中的规定值一般是根据各国具体情况经过研究后确定的,因此,无法套用到我国高速铁路线上。鉴于此,需要集中我国铁路界的力量,结合我国国情,对高速铁路的关键技术进行详细、系统的研究,为我国高速铁路设计规范的制定提供理论依据。

为了保证高速铁路行车的安全与舒适,各项技术标准要求均很高,由于线路高度的限制及要求全线封闭等原因,高架、立交桥梁在各类工程结构中所占的比例较大,因此,在高速铁路的修建中,如何将桥梁快速、优质的建成是非常关键的。

1.1 桥梁研究的背景和意义

供铁路、道路、渠道、管线、行人等跨越河流、海湾、湖泊、山谷、低地或其他交通线路时使用的建筑结构称为桥梁。桥梁是公路、铁路、港口、码头、乡村道路及水利设施等各种道路工程的关键节点,是线路在跨越障碍时的延伸和连接部分。如今,大力发展交通运输事业,建立四通八达的公路、铁路交通网,对发展经济、提高国力、促进交流具有十分重要的意义。

在公路、铁路线路中,桥梁、涵洞是其重要组成部分。从技术上讲,一座重要的特大跨度桥梁通常会集中体现出一个国家在工程设计、建筑材料和制造工艺等方面的水平。从经济上讲,一条线路上桥涵的造价通常要占到总造价的10%~20%(对山区铁路,比值会更高)。从美学上讲,桥梁不仅仅是满足使用要求的工程结构物,还常作为建筑艺术实体永久地存在于社会生活之中。工程宏大、结构造型雄伟壮观的城市立交桥、高架桥,往往成为一座城市的标志。桥梁作为土木工程之花,盛开遍布在城市乡村。

古代桥梁大致指 19 世纪中叶以前所修建的桥梁。这些桥梁的设计和施工完全依靠建造者的经验,没有力学知识的指导。建桥材料以天然的或加工过的木材、石材为主,以及竹索、藤索、铁索、铸铁乃至锻铁。在桥式方面,有梁、拱、索桥三大类。当时技术落后,工具简陋,不会修建深水基础,施工周期也长。

现代桥梁指 19 世纪后期以来,由工程师使用工程力学、设计规范及桥梁知识所兴建的桥梁。19 世纪 20 年代,世界上出现了铁路,现代桥梁主要是为适应铁路建设的需要,逐步发展起来的。20 世纪初,钢筋混凝土也逐渐受到桥梁界的重视,开始用于中、小跨度桥梁,建桥工具得到很大发展,出现了蒸汽机、打桩机、电动工具、风动工具、起重机具、铆钉机等。在深水基础方面,可以施工沉井、压气沉箱和大直径桩。

20 世纪 30 年代,随着汽车工业的发展,公路桥梁也开始大力发展。可以把 20 世纪 50 年代发展起来的、主要为公路和城市道路服务的桥梁称之为当代桥梁。在材料方面,除常规钢材和钢筋混凝土外,还有预应力混凝土、高强螺栓、高强钢丝、低合金钢以及其他新型材料。用于桥梁建造的机具和设备有焊接机、张拉千斤顶、振动打桩机、水上平台、大吨位起重机和浮吊、钻孔机等。在桥梁基础方面,可修建高位承台、大直径打入斜桩和就地灌注桩、浮运沉井等。在梁、拱和悬索桥等基本桥式的基础上,发展了许多新式桥型和构造,如连续刚构桥、斜拉桥、梁拱组合体系、箱形梁、结合梁、正交异性钢桥面板等。结构设计理论得到改进,逐步从容许应力法向极限状态法发展;结构分析也更加注重大跨、柔细结构的振动(地震、风振)问题。施工技术和工艺得到重视,出现了不少新的施工方法,如悬臂施工、转体施工、浮运法和整体吊装等。

随着社会经济和科学技术的快速发展,造桥技术不断进步,桥梁结构逐步向轻巧、纤细方向发展。同时,桥梁的载重、跨径和桥面宽不断增长,结构形式不断变化,传统的桥梁平面杆系结构程序也越来越不能满足设计要求。有限元分析软件正是这种综合程序的代表,它可以模拟桥梁钢筋预应力的松弛、混凝土的开裂以及温度应力等因素对桥梁的影响。同时,也可以方便地计算出箱梁的畸变应力、剪力滞效应,以及桥梁构件与支撑部位的接触状态。桥梁结构是土木行业中常见的建筑工程结构之一,对桥梁进行较为精确的受力分析,合理模拟其各种工况下的受力情况,对于桥梁的设计与安全控制有着十分重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

在人类文明的发展历史上,桥梁占有十分重要的地位。古代桥梁多以木、石、藤、竹乃至皮革之类的天然材料制成,我国古代木桥和石桥曾长时间占据世界领先地位。炼铁技术成熟以后,我国又建成了大量的铁索桥。中国古代桥梁技术曾经有过辉煌的业绩。

自 20 世纪 50 年代以来,我国桥梁技术迅猛发展,特别是在跨度方面,已经成功地位居世界先进水平。其中,我国重庆石板坡长江大桥(主跨 330m)为世界跨度最大的预应力混凝土梁桥,虎门辅航道桥(主跨 270m)和黄石长江大桥(主跨 245m)也名列前茅;世界最大混凝土桥为我国万县长江大桥(主跨 420m),江界河大桥(主跨 330m)和缙江大桥(主跨 312m)分居第三、第四。世界最大斜拉桥为我国苏通长江大桥(主跨 1088m),其后 9 名中我国桥梁就占据了 6 个席位。世界十大悬索桥中,我国也占据了 2 个名次。

18 世纪英国工业革命后,欧美各国率先进入了近代桥梁建设时期。1779 年英国煤溪谷(Coal brook dale)铸铁拱桥(主跨 30.65m)的诞生标志着用天然材料建造桥梁的历史结束,而 1883 年美国 486m 跨径的布鲁克林(Brooklyn)悬索桥和 1890 年苏格兰 520m 跨径的福思(Forth)湾悬臂桁架桥的建成更是代表了近代桥梁的巅峰。进入 20 世纪后,随着钢结构和混凝土技术的不断成熟,桥梁工程进入了新的发展时期,特别是大跨度桥梁的建设取得了惊人的发展和进步。其中,美国率先突破桥梁千米跨度记录——1931 年建成的纽约华盛顿桥(中跨 1067m)和 1937 年建成的旧金山金门大桥(中跨 1280m);英国在二次世界大战后也在桥梁工程方面延续着战胜国的强劲势头,并以 1410m 跨度的亨伯大桥刷新了记录;日本在渡过了战后最困难时期后,开始实施宏伟的连岛工程计划,建成了世界上最大跨度的桥梁——1991m 跨度的明石海峡大桥;丹麦、瑞典和土耳其等国也紧跟跨海工程的潮流。到 20 世纪末,这 6 个国家都拥有了千米级的大桥。此外,德国和法国在斜拉桥建设方面不断创新,也取得了巨大的成功。

桥梁风振研究始于发生 Tacoma 桥风毁事故的 1940 年,60 多年来世界各国对于桥梁风振进行了大量深入地研究,取得了巨大的成就。风对桥梁结构的动力作用激发了桥梁风致振动,而振动起来的桥梁又可能反过来改变流场和空气力,形成风与结构的相互作用。当空气力受结构振动影响较小时,空气力作为一种迫力,主要导致桥梁结构的强迫振动——随机抖振;当空气力受结构振动影响较大时,受振动结构反馈作用的空气力则主要表现为一种自激作用,导致桥梁结构的自激振动——涡振、颤振或驰振。因此,桥梁风致振动一般可分成 4 种形式,即颤振、驰振、涡振和抖振,其中驰振极少可能在主梁上发生,而抖振是一种机理比较明确的随机振动现象,重点是研究颤振和涡振的机理及评估方法。

桥梁颤振是一种发散性的自激振动,主要是由于振动结构能够在流动的空气中不断吸收能量,而该能量又大于结构阻尼在振动中所耗散的能量。当气流经过流线形断面时,气流的流动速度主要影响或改变了流线型断面扭转和弯曲自由度运动之间的振幅以及相位关系,从而引起不同自由度之间的耦合振动和气动负阻尼,导致扭转耦合颤振;当气流绕过钝体断面时,气流的流动速度主要影响或改变了钝体断面扭转自由度运动的振幅以及相位,从而引起扭转振动和气动负阻尼,导致扭转颤振。对于一般介于流线型和钝体之间的桥梁断面,有可能产生从扭转颤振到耦合颤振的各种情况。

早期结构抗震计算采用的是静力理论,即忽略了地面运动特性与结构的动力特性因素,简单地把结构在地震时的动力反应视作静力作用于结构物上进行抗震计算。随后的

地震震害资料分析和对地震作用的深入研究,抗震计算的静力理论愈来愈暴露出它的不合理性。20世纪40年代,对地震作用提出了反应谱理论,50年代后已被各国的抗震规范所应用。反应谱法还是采用“地震荷载”的概念,但在计算最大地震力时,同时考虑了地面运动和结构的动力特性,比静力法有很大的进步。结构在强震作用下,通常都要进入弹性范围,产生较大的塑性变形,利用结构延性抗震。

20世纪80年代后,随着计算机技术的广泛应用和强震记录的增多,动态时程非线性分析方法得到了很好的应用。动态时程分析法采用多节点多自由度的结构有限元动力计算图式,把地震强迫振动的激振——地震加速度时程直接输入,应用专门计算程序对结构进行地震时程动力反应分析。动态时程分析法可以考虑各种不同的因素,诸如结构的各种复杂非线性因素、结构-地基-土的相互作用、地震波相位差及不同地震波多分量多点输入,以及分块阻尼等问题,使桥梁抗震计算分析结果更加符合实际震害现象。

在俄罗斯、美国和西德等国家,还推广采用先简支后连续式的桥跨结构,以有利于结构的标准化。在设计理论方面,目前国外已从容许应力方法过渡到极限状态设计,有些国家并从强度极限状态推广到挠度、裂缝、振动、疲劳的极限状态负荷能力。由于电子计算机的发展,结构的受力分析可由简化的平面问题过渡到较为精确的空间立体计算,对于超静定次数很高的结构,不但能大大加快计算速度,而且可能进行结构的优化设计。

随着计算机科学的发展,增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)方法在结构抗震方面研究的应用引起了许多学者的关注,IDA可以看作是时程分析方法的延伸,它不再是对结构在某一确定地震荷载“点”的动力反应分析,而是通过一组不同强度的地震波将“点”分析连成了“线”分析,甚至通过结构在几条地震波下的IDA,将“线”分析拓展为“面”分析,增量动力分析是逐级施加地震动荷载来研究结构整个损伤、破坏过程,得到桥梁结构地震的易损性曲线,从而为结构地震损伤、破坏风险的评估提供理论基础。目前,在各国的桥梁工程研究中,有限元法 ANSYS 软件占据非常重要的位置。

1.3 高速铁路桥梁的特点

行车速度大于200km/h即为高速铁路,客运专线的基础设施设计时速为350km/h,客货混运铁路的运营速度大于200km/h。不管哪种高速铁路,其运行速度均较快,技术标准要求较高,站间距离长,且要与周围环境协调,要求尽量减小噪声污染,所以高速铁路对桥梁的要求与普通铁路不同,且高速铁路参数限制严格,曲线半径大、坡度小,并需要全封闭行车,桥梁建筑物数量多于普通铁路。在平原及人口稠密地区,经常选用高架线路;而在山区及丘陵地带,谷架桥会明显增多。因此,高速铁路桥梁通常可以分为3种类型:高架桥、谷架桥和跨河桥。

高架桥:用以穿越既有交通路网、人口稠密地区及地质不良地段。高架桥通常墩身不高,跨度较小,但桥梁很长,往往伸展达十余公里。