



21世纪交通版高等学校教材

桥梁结构试验

Bridge Structural Testing

(第二版)

章关永 主编

43
02



人民交通出版社
China Communications Press

U443-43
Z262.02

21 世纪交通版高等学校教材

-68

Bridge Structural Testing

桥梁结构试验

(第二版)

章关永 主编

U443-43

Z262.02

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了桥梁结构试验的各方面内容,主要包括桥梁试验用仪器设备、桥梁现场试验、桥梁振动试验、模型试验、桥梁无损检测等内容。附录为配合课程教学实验的实验指导书,供课程教学时选择使用。

本书可作为高等院校土木工程专业(桥梁、结构方向)及其他相关专业的教材使用,也可供从事桥梁、结构的科研、检测、设计、施工技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构试验/章关永主编.—2版.—北京:人民交通出版社,2010.1

ISBN 978-7-114-08197-2

I. 桥… II. 章… III. 桥梁结构—结构试验—高等学校—教材 IV. U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 007103 号

21 世纪交通版高等学校教材

书 名: 桥梁结构试验(第二版)

著 作 者: 章关永

责任编辑: 曲 乐 王文华

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.cccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16

字 数: 384 千

版 次: 2002 年 3 月 第 1 版 2010 年 1 月 第 2 版

印 次: 2010 年 1 月 第 2 版 第 1 次印刷 总第 4 次印刷

印 数: 8001—10000 册

书 号: ISBN 978-7-114-08197-2

定 价: 30.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

21 世纪交通版

高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

顾问:王秉纲 (长安大学)

主任委员:沙爱民 (长安大学)

副主任委员:(按姓氏笔画排序)

王 炜 (东南大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐 岳 (长安大学)

梁乃兴 (重庆交通大学)

韩 敏 (人民交通出版社)

委员:(按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王殿海 (吉林大学)

叶见曙 (东南大学)

石 京 (清华大学)

向中富 (重庆交通大学)

关宏志 (北京工业大学)

何东坡 (东北林业大学)

陈 红 (长安大学)

邵旭东 (湖南大学)

陈宝春 (福州大学)

杨晓光 (同济大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

陈静云 (大连理工大学)

赵明华 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

袁剑波 (长沙理工大学)

黄晓明 (东南大学)

符铨砂 (华南理工大学)

裴玉龙 (哈尔滨工业大学)

颜东煌 (长沙理工大学)

秘书长:沈鸿雁 (人民交通出版社)

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,全球经济一体化趋势进一步加强,科技对于经济增长的作用日益显著,教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪,面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点,我国的高等教育迎来了良好的发展机遇,同时也面临着巨大的挑战,高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一,加入 WTO,中国经济已融入到世界经济的发展进程之中,国家间的竞争更趋激烈,竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上,因此,高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二,我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期,这一时期,我国经济结构调整将进一步深化,对外开放将进一步扩大,改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题,高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求,党中央国务院提出扩大高等教育规模,着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤,同时,也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要,早在 1998 年 7 月,教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,原先的公路与城市道路工程,桥梁工程,隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求,对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养 21 世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的,面对新的变化,要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整,以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求,同时,也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求,人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析,提出了组织编写一套 21 世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想,得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000 年 6 月,由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的 12 所高校的专家学者组成 21 世纪交通版高等学校教材(公路类)编审委员会,并召开第一次会议,会议决定着组织编写土木工程专业具有交通特色的道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材。会议经过充分研讨,确定了包括基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次以及教学辅助层次在内的约 130 种教材,范围涵盖本科与研究生用教材。会后,人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作,经过自由申报及专家推荐的方式,近 20 所高校的百余名教授承担约 130 种教材的主编工作。2001 年 6 月,教材编委会召开第二次会议,全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲,之后,编写工作全面展开。

21 世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是:(1)顺应高等教育改革的形势,专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通,同时保留原专业的主干课程,既顺应向土木工程专业过渡的需要,又保持服务公路交通的特色,适应宽口径复合型人才培养的需要。(2)注重学生基本素质、基本能力的

培养,为学生知识、能力、素质的综合协调发展创造条件。基于这样的考虑,将教材区分为二个主层次与一个辅助层次,即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前,中国的经济发展存在地区间的不平衡,各高校之间的发展也不平衡,因此,教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求,尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上,注意体现原创性内容,把握好技术发展与教学需要的关系,努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求,着力提高学生的创新思维能力,使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展,积极配套相应的教学辅件,便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一,全面做好教材建设工作,是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织,由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材,教材力求反映交通科技发展的先进水平,力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定,他们都是各校相关学科的骨干,在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编,能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐,随后,将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版,对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用,同时,也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是,该批教材中研究生教材占有较大比例,研究生教材多具有较高的理论水平,因此,该套教材不仅对在校学生,同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21世纪初叶,是我国社会经济发展的重要时期,同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期,公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务,希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力,尽快使全套21世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世,为我国交通事业的发展做出贡献。

21 世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001 年 12 月

第一版前言

本教材以面向 21 世纪交通版高等学校教材编审委员会审定的《桥梁结构试验》教学大纲为基本依据,并以同济大学 1998 年所编内部教材为基础编写而成。考虑到桥梁结构试验技术在实际工程上的应用日益广泛,这次重新编写增加了一些新内容和比较多的实例,希望能为从事桥梁结构试验工作的有关工程技术人员提供实用参考。

全书共分为七章,外加两个附录。其中第一章绪论;第二章为试验仪器设备部分,内容主要为桥梁结构试验常用的仪器设备介绍;第三章是现场荷载试验部分,内容包括桥梁静、动载试验及桥梁构件的试验;第四章介绍了桥梁结构振动试验的内容和方法;第五章是桥梁模型试验,内容从相似理论到模型设计实例介绍;第六、第七章分别介绍了桥梁静动载试验、振动试验和模型试验的一些实例。附录一是配合前面章节教学的实验指导书,附录二简要介绍了与桥梁结构试验有关的无损检测技术和桥梁健康监测系统的最新发展。

桥梁结构试验是一门实践性很强的课程,实际教学中为弥补课堂教学的不足,除了安排必要的实验课增加动手的机会外,还可利用多媒体手段放映一些实际试验的录像、照片等以提高学生的感性认识。

桥梁结构试验技术的进步很快,特别是仪器设备的发展,随着计算机微电子技术的飞速发展,一些新的试验仪器、设备对传统方法已形成某种冲击。但我们认为,作为土木工程专业的学生和技术人员,首先需要掌握最基本的结构试验技术要素,只有立足基础知识,才能不断接受新技术、新设备,及时跟上桥梁建设的新形势。

本书第一章、第五章由史家钧编著,其余章节及附录均由章关永编著。全书由同济大学章关永统稿并主编,长安大学胡大琳教授主审。

感谢同济大学桥梁试验室的同事,多年以来对桥梁结构试验课程建设的支持,书中许多实例,都有他们的付出。

编 者
2001 年 10 月

第二版前言

作为国内较早出版的桥梁试验检测方面的教科书,《桥梁结构试验》2002 年出版以来一直受到广大读者的厚爱并已重印过数次。根据各兄弟院校实际教学应用及意见反馈,也由于桥梁试验检测技术正经历日新月异的发展和变化,经与出版社协商,决定趁本书再版机会进行较大篇幅的改编。

改编后的全书共分成六章,取消了原来第六、第七章试验实例和附录二,将其主要内容编入各相关章节。原附录一实验指导书,也由于仪器设备的更新换代作了相应修改和增减。新增加“桥梁无损检测”一章,主要内容是笔者前年参编《土木工程质量无损检测技术》时所撰写。

本次改编,第二章试验仪器设备内容按测试参数重新分类编排,并力图反映最新资料。对第三、第四章内容则进行了较大篇幅的改动和增补,还将第三章原来桥梁动载试验部分调整到了第四章,两章都重新编入了诸多实例。所有改编与努力的目的是尽可能紧跟桥梁结构试验检测技术的发展,希望能更好地对从事桥梁试验检测的有关工程技术人员提供实用参考并有所帮助。

结合教材的改编和再版,还配有一教学课件,内容为笔者多年教学使用的 PPT 和一些实际桥梁试验的录像和照片等,可在人民交通出版社网上(www.ccpress.com.cn)下载。

感谢人民交通出版社对本次教材改编工作的支持。

编 者
2009 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 桥梁结构试验的任务	2
1.2 桥梁结构试验的目的	2
1.3 桥梁结构试验的分类	4
1.4 桥梁结构试验的内容	7
第 2 章 桥梁试验用仪器设备	9
2.1 概述	9
2.2 静、动态荷载测试仪器	10
2.3 振动试验仪器设备	37
2.4 无损检测仪器	48
2.5 本章小结	52
本章参考文献	53
第 3 章 桥梁现场试验	54
3.1 概述	54
3.2 桥梁静载试验	55
3.3 桥梁结构构件试验	74
3.4 桥梁结构实际承载能力的评定	80
3.5 桥梁现场试验实例	86
3.6 本章小节	110
本章参考文献	111
第 4 章 桥梁振动试验	112
4.1 概述	112
4.2 桥梁自振特性参数测定	113
4.3 桥梁动力反应测定	129
4.4 实桥振动试验举例	151
4.5 本章小节	168
本章参考文献	168
第 5 章 模型试验	170
5.1 概述	170

5.2	相似定理	170
5.3	静力试验模型	178
5.4	动力试验模型	179
5.5	一些相似常数的讨论	180
5.6	模型试验的相似误差	182
5.7	模型材料的选择	183
5.8	模型试验设计举例	186
5.9	本章小结	201
	本章参考文献.....	201
第 6 章	桥梁无损检测	202
6.1	概述	202
6.2	桥梁上部结构无损检测	204
6.3	混凝土桥面板	214
6.4	桥梁下部结构无损检测	216
6.5	桥梁无损检测技术应用前景	218
	本章参考文献.....	220
附录	实验指导书	221
【实验 1】	电阻应变片及粘贴技术	222
【实验 2】	接桥方式和静态电阻应变仪的使用	223
【实验 3】	动态电阻应变仪的使用	228
【实验 4】	钢简支梁自振特性参数测定	233
【实验 5】	摆式拾振器测振系统的标定	235
【实验 6】	数显回弹仪和超声波检测仪的使用	235

第 1 章 绪 论

改革开放 30 年,我国桥梁工程取得的成就举世瞩目。公路交通作为我国经济建设中重点投资建设的行业,正以前所未有的规模和速度向前发展。近年来我们依靠自己的技术力量相继建成多座现代化大跨度悬索桥、大跨径斜拉桥以及总长几十公里的跨海大桥。已建成和即将建成的一批大跨径桥梁,技术复杂,科技含量高,施工难度大,标志着我国桥梁建设水平已跻身世界前列。可以预计,再一个 30 年,一定会有更多横跨大河、连接海峡的大跨桥梁出现,我国桥梁工程建设也必将取得新的更大的突破。

桥梁工程作为一项综合性技术,是在诸多学科发展的基础上发展起来的。桥梁工程领域取得的巨大成就,固然与材料科学、施工技术、设计分析理论的进步密切相关,同时也离不开试验技术的进步,因为试验一直是人们获得经验的一种重要手段。从远古人类试图利用木头、植物的藤建造原始的独木桥和悬索桥时的尝试,到今天在由计算机控制的地震模拟振动台上进行的桥梁模型抗震试验,都是人类为征服自然建造桥梁的活动中不可缺少的部分。

今天,由于电子计算机的普遍应用,桥梁结构的设计方法和设计理论发生了根本性的变化。以前难以精确分析的复杂结构问题,借助电子计算机一个个迎刃而解。然而试验在桥梁科研、设计和施工中的地位并没有因此而改变,相反试验方法由于测试技术的进步,能迅速提供精确可靠的试验数据而愈受重视。试验仍然是解决桥梁工程领域科研和设计中出现的新问题时不可缺少的手段。

试验之所以仍然是我们解决问题不可缺少的手段,是因为受认识能力的限制,我们对诸如结构的材料性能等还缺乏真正透彻的了解。例如在进行结构动力反应分析时要用到的阻尼比至今尚不能用分析的方法求得。此外,还可能由于我们所研究的问题过于复杂,就目前我们对问题的认识水平还不能建立所研究问题的完善的数学模型,因此问题就不能仅用分析的办法解决。例如目前在进行大跨度斜拉桥抗风设计时,还不能单凭计算分析方法就能求出桥梁的颤振临界风速。这样我们就不得不借助于试验,或者用试验的方法直接测得我们所需的参数,或者通过试验求得部分中间参数,然后以这些参数为基础,再用分析的方法求得最后的结果。

有些问题虽然原则上能建立精确的数学模型,但是实施起来却会碰到诸如过分烦琐,计算机容量不够等问题,而往往采用简化计算的办,这样就扩大了计算模型与实际结构之间的差异,这时一般要通过试验来检验简化方法的可靠性与精度。

试验之所以仍然必不可少,还因为有一类问题需要同时应用分析和试验的方法,问题才能圆满解决。例如斜拉桥的施工控制问题,由于各种因素的影响,施工过程中各阶段结构的实际状态不可避免地会偏离设计状态,为了使结构竣工时的状态尽量符合设计要求,就必须通过试验测量出施工过程中各阶段结构的实际状态,将这些数据作为下一阶段结构参数的初始值,再用分析的方法求得下一阶段结构各参数的终了值,用于指导施工。

试验作为一种解决问题的方法,它还是对已有的桥梁结构由于自然灾害或意外事故引起的损伤进行识别或对新建桥梁进行质量评定时必不可少的手段。

本书主要目的是通过对目前常用的桥梁测试仪器设备、桥梁现场试验与模型试验方法及各种桥梁试验实际例子的介绍,使读者对桥梁结构试验技术有一个基本的了解,为今后从事桥梁科研、设计或施工等工作时增加一种解决问题的方法。

1.1 桥梁结构试验的任务

任何桥梁结构都可以看作一个系统。作用在桥梁结构上的外界作用(例如各种静荷载、动荷载、强迫位移、特定的温度场等)可以看作系统的输入,由外界作用引起的桥梁结构的位移、应力、振动等可以看作系统的输出。根据安全和使用要求提出的对位移、应力等的限制称为约束。

图 1-1 对结构分析方法和试验方法进行了比较。



图 1-1 结构分析方法和试验方法

在进行桥梁结构设计时,一般先根据经验选择适当的材料,假定结构各部分的尺寸,然后计算分析结构响应(验算截面强度、结构刚度等)。因此,结构分析的任务是给定系统(系统特性是已知或假定的),已知输入,求输出。如果输出满足所有的约束条件则设计通过,否则需要修改设计,即改变系统特性,使输出满足约束条件。

桥梁结构试验的任务则是既定系统(系统特性可以已知也可以未知),已知或未知输入(实际荷载),用测试手段求得输出(测量应力、挠度等)。测得输出后可以做以下分析:

- ①直接将测试值与分析值进行比较,以检验分析方法的合理性、正确性。
- ②在系统特性未知的情况下,根据系统的输入和输出反求系统的特性,以便判断系统的实际特性是否符合设计要求。
- ③在输入、系统特性均未知情况下,根据系统输出求系统特性(如结构动力特性)或识别系统特性。

1.2 桥梁结构试验的目的

如前所述,桥梁结构试验在桥梁的科研、设计和施工等方面起着重要的作用,根据试验侧重点的不同可以将试验分成两大类:科学研究性试验和生产性试验。

1) 科学研究性试验

科学研究性试验要达到以下目的。

(1) 验证新的结构分析理论、设计计算方法

例如李国豪教授提出的桁梁扭转理论,是将由上下弦杆、腹杆以及横向联结系等离散杆件组成的桁梁,转换成等效的连续结构,然后导出其平衡微分方程。这在当时计算机没有广泛应用的情况下,为解决桁梁桥的振动和侧倾稳定问题作出了重大贡献。在创建这一理论时正值十年动乱,学校的教学科研活动无法正常开展。李国豪教授为了验证这一理论,在自己家里亲

自动手制作模型、进行加载试验(图 1-2),此事曾被桥梁工程界传为佳话。

又如在进行桥梁结构分析时所采用的荷载横向分布系数算法,就是将复杂的空间问题简化成平面问题进行计算,为了验证这种简化是否合理,曾配合理论分析做了一系列的模型试验。

以上两例说明了科学研究性试验,对于检验新的结构理论、验证新的计算方法方面的作用。

(2)为发展新的结构形式、新的建筑工艺开创道路积累经验

当一种新的结构形式或新的建筑工艺刚提出来时,往往缺少设计和施工方面的经验,为了积累这方面的实际经验,常常借助于试验。

例如,为寻求一种抗风稳定性好的斜拉桥主梁横断面形式,就要对各种不同横断面形式的桥梁进行抗风稳定性试验。

又如,应用于我国桥梁工程上的部分预应力混凝土工艺、预拉预应力混凝土(图 1-3)、预弯预应力混凝土工艺(图 1-4)等,在正式推广使用前都做过探索性的试验。



图 1-2 李国豪的桁梁扭转试验

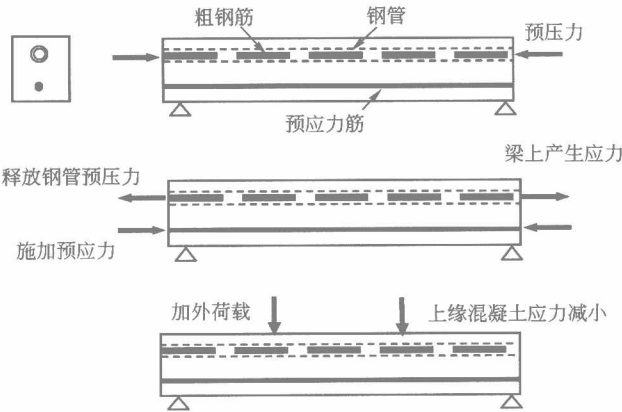


图 1-3 预拉预压混凝土梁研究

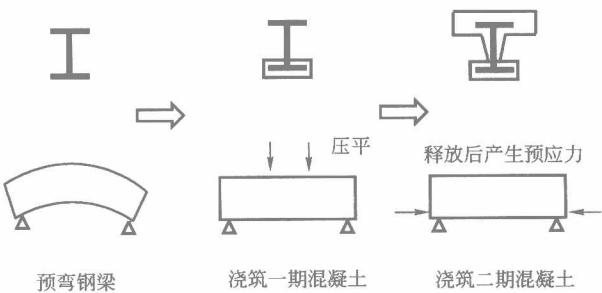
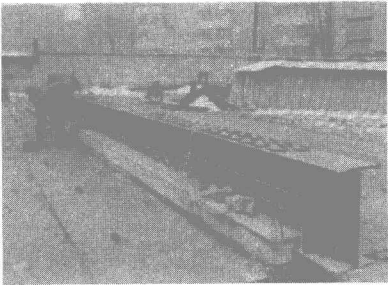


图 1-4 预弯预应力混凝土工艺研究

(3)为制定新的设计规范提供依据

随着设计理论的提高和设计观念的改变(例如从按容许应力设计到按极限承载力设计,从确定性设计到按概率设计等),设计规范也应作相应的修改,新规范的依据常常来自相应的试验。

科学研究性试验主要用于解决科研和生产中有探索性、开创性的问题,所以试验的针对性

较强。在进行试件设计、决定测试方法、选择测量仪器时,都要突出主要问题,而对其他方面只要求一般地满足。

2)生产性试验

生产性试验主要有以下几种情况。

(1)对新建桥梁进行鉴定

为了对新建桥梁的质量进行鉴定,必须通过一定的试验手段,对桥梁的主要质量指标(例如桥梁各部分的尺寸、混凝土质量、钢材的焊接质量、检验荷载作用下桥梁的最大挠度或挠曲线、最不利断面上的应力等)进行测试,根据测得的这些基本数据,对新建桥梁的质量进行评定。这种试验可以用来检验设计理论以及施工质量,为即将投入使用的桥梁的运行、养护提供依据。

(2)对既有桥梁进行鉴定

既有桥梁在运行过程中,因受到地震、台风、雨雪、冰冻等自然因素的影响以及冲击、过载等人为因素的作用,桥梁结构都会受到不同程度的损害。为了了解桥梁的实际损害程度以便决定采取何种养护或维修措施,就有必要对这些受损桥梁进行鉴定测试。对于一些重要桥梁,为了评估该桥结构实际技术状况和承载能力,确保大桥的运行安全,需要有一个科学的鉴定结论,并提出维修或拆除意见。如贵州的南盘江大桥是一座(已实行交通管制的)危桥,故对其进行了一次全面的特殊检测(图 1-5)和评估。



图 1-5 南盘江大桥旧桥鉴定

随着交通运输事业的发展,许多公路都要提高运输等级,线路上的桥梁也要进行改建或重建。为了采取切合实际的旧桥改造方案,以便获得最佳的经济和社会效益,常常有必要对既有桥梁的实际承载能力进行测定,从而决定采用何种措施来满足线路对桥梁的诸如承载能力、桥宽、纵坡等各项指标的要求。

1.3 桥梁结构试验的分类

桥梁结构试验除了按试验目的可以分成科研性试验和生产性试验外,经常还按试验对象、测试内容等进行分类。

1)原型试验和模型试验

(1)原型试验

原型试验的对象是实际结构或构件。桥梁结构原型试验的对象一般就是实际桥梁,所以原型试验也称实桥试验。

原型试验,一般直接为生产服务,但也有一些以科研为目的。例如对诸多既有桥梁的质量鉴定试验、新建桥梁的鉴定试验,以及一些大型、新型桥梁结构的施工控制测试等,基本上都属于生产性试验,而对有的大跨度斜拉桥进行施工全过程动力特性测试,则基本上是以科研为目的,是为斜拉桥的抗震、抗风研究积累实测资料。

原型试验是以实际结构为测试对象,试验结果真实地反映了实际结构的工作状态。对于

评价实际结构的质量、检验设计理论都比较直接可靠,特别是质量鉴定性试验,只能在实际结构上进行。原型试验存在所需费用大、周期长、现场测试条件差等问题。

(2)模型试验

当进行桥梁结构的原型试验,由于投资大、周期长、测量精度受环境影响,在物质上或技术上存在某些困难时,往往采用模型试验的办法,来解决设计分析中的疑难问题,特别是科学研究性试验,则更需要借助模型进行试验。模型是仿照真实结构,按照一定比例关系复制成的真实结构的试验代表物,它具有实际结构的全部或部分特征,但模型的尺寸比原型小得多。

根据不同的试验目的,可以将模型分成两类。一类模型试验以解决生产实践中的问题为主要目的,这类模型试验中模型的设计制作与试验要严格按照相似理论,使模型与原型之间满足几何相似、力学相似和材料相似的关系,这样,模型就能反映原型的特性,模型试验的结果可以直接返回到原型上去。这种模型试验常常用于解决一些目前尚难于用分析的办法解决的工程实际问题。

如杭州钱江四桥(主跨 196m 下承式钢管混凝土拱桥)初步设计阶段,为更好了解双层桥面(该桥设计活载上层汽车、下层轻轨)结构整体和局部的受力性能,做过一个 1/10 的全桥静力相似模型和 1/5 的拱脚模型加载试验(图 1-6)。

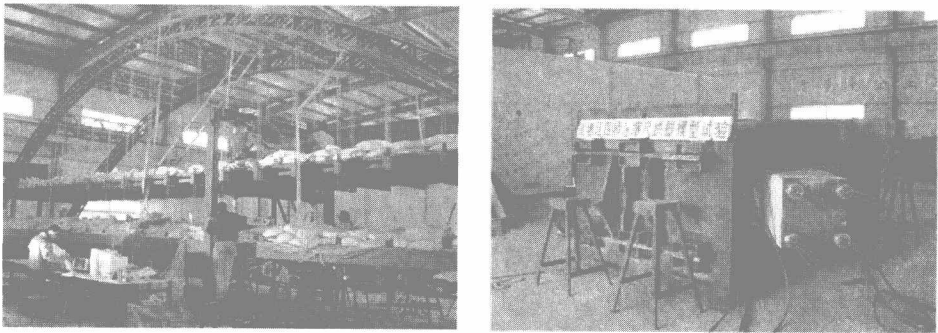


图 1-6 杭州钱江四桥主跨整体静力 1/10 模型和拱脚 1/5 模型试验

还有一类模型试验,主要是用来验证计算理论或计算方法的。这类试验的模型与原型之间不必满足严格的相似条件,一般只要求满足几何相似和边界条件相似,将这种模型的试验结果与理论计算的结果对比较核,用以研究结构的性能,验证设计假定与计算方法的正确性,并认为这些结果所证实的一般规律与计算理论可以推广到实际结构中去。

如图 1-7 是一座预应力混凝土制作(没有具体原型)的曲梁桥模型,主要目的是研究三跨(独墩)低高度曲线箱梁的空间受力性能和动力特性。

2)静力试验与动力试验

(1)静力试验

静力试验是结构试验中最常见的基本试验。因为桥梁结构工作时所受的荷载主要是静力荷载,桥梁结构的自重当然属于静力荷载,就是荷载位置随时间而变的移动车辆荷载一般也是作为静载来考虑。这样做的原因,一方面是因为区分静力问题与动力问题的主要标志并不是与结构受力状态有关的各物理量是否随时间变化,而是由结



图 1-7 预应力混凝土曲梁桥模型受力研究试验

结构的运动加速度引起的惯性力是否已经大到不可忽略的程度,通常由移动车辆荷载引起的结构反应的动态增量部分只占全部反应的极小部分。另一方面将移动车辆荷载作为动力问题来考虑,分析起来过于复杂,因此常用将静力荷载乘以冲击系数的办法来近似考虑移动车辆荷载的动力影响。

实桥静力加载试验一般采用车辆荷载进行加载,这样做的好处是容易实施。在一些不具备车辆加载条件的桥梁,也可以通过重力或其他类型的加载设备来实现和满足加载要求。图 1-8 为某城市轨道交通一连续梁桥采用水箱进行静力加载的情形。

静力试验是了解结构特性的重要手段,不仅用它来直接解决结构的静力问题,就是在进行结构动力试验时,一般也要先进行静力试验,以测定与结构有关的特性参数。

(2)动力试验

桥梁结构的动力试验目前主要包括两方面的内容:一是测量桥梁结构的自振特性;二是测量桥梁结构的动力响应,包括移动车辆或其他外荷载作用下桥梁指定断面上的动应变、动挠度或加速度等。

桥梁自振特性的测量对象可以是实际桥梁,也可以是桥梁模型。测量模型的自振特性时,一般要对模型进行专门的激励(输入),然后测量模型的响应(输出),在已知激励和响应(或只有响应)的情况下,求出模型(系统)的自振特性。模型自振特性测量目前已有成熟的模态试验分析方法。测量实桥的自振特性时也可以同模型试验一样,对实桥进行激振,测得输入和结构的响应后,可以求出自振特性。有时也可以不用对实际结构进行专门的激振,而是利用自然因素(如风、水流、地脉动等)作为实际桥梁的振源(只要能满足一定的条件),测出实际桥梁在这些自然因素作用下的响应,求出实际桥梁的自振特性。

正确确定桥梁结构的自振特性是进行桥梁动力响应的基础。结构自振特性中除阻尼比外,频率与振型可以用计算的方法求得,但计算时所采用的计算图式与实际结构往往有区别,所以用试验的方法确定桥梁结构的自振特性就很有必要。

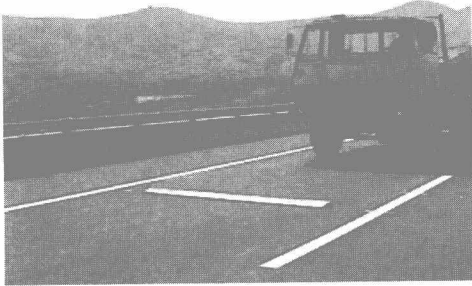


图 1-9 移动车辆跨越障碍物

移动车辆荷载作用下的动应变或动挠度测定,一般用于实桥试验,试验时将单辆或多辆载重车辆按不同的车速通过桥梁,有时为了模拟路面的不良情况,还在桥面上设置人工障碍(如图 1-9 中有一定宽度和高度的木板),使行驶车辆产生跳动,以形成对桥梁的冲击作用,此时测出指定断面上的动应变或动挠度,将动态情况下的峰值与相应的静态数值相比,可以求出车辆振动引起的动态增量。用测试的方法确定桥梁的动态增量,是研究车辆对桥梁动力作用的一种手段,由试验求得的数据可以作为确定桥梁冲击系数的依据。

测量在诸如地震荷载和风荷载作用下桥梁结构的动力响应的目的是研究桥梁结构抗震和抗风性能,确保桥梁结构抵抗突发性自然灾害的能力。这类动力响应的测试分析一般

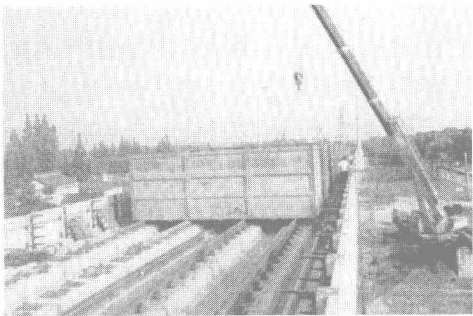


图 1-8 轻轨桥梁采用水箱进行静力加载

都通过模拟震动台试验和风洞试验(图 1-10)进行。在有条件的地方,也可以在实桥上
实时测试。

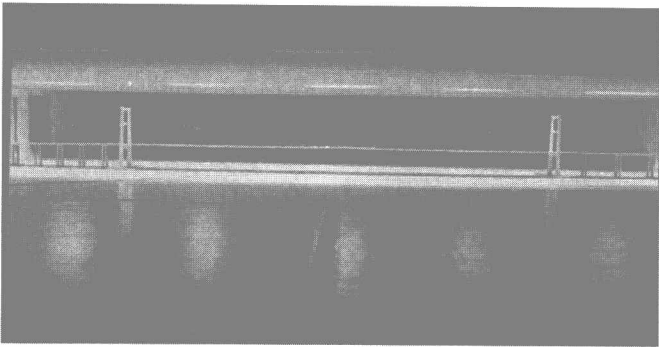


图 1-10 江阴长江大桥气动全模型风洞试验

1.4 桥梁结构试验的内容

本节列举日本多多拉大桥建设前后所进行的各项试验研究,并以它诠释桥梁结构试验内容,也希望读者能结合前几节所述进一步体会(或了解)桥梁结构试验的魅力。

全长 1 480m、主跨 890m 的多多罗大桥(图 1-11)是日本本州四国高速公路上第二大跨度桥梁,1999 年建成时为世界第一跨度斜拉桥。日本是一个多台风、多地震的国家,因此多多罗大桥在抗风、抗震设计上要求很高。为建设这样一座特大跨径的跨海大桥,建设者的指导思想是宁可在制造时多花时间、财力,也要保证日后运营的安全和维护的经济,所以在设计、科研、工艺等各个方面做了一系列的试验研究。

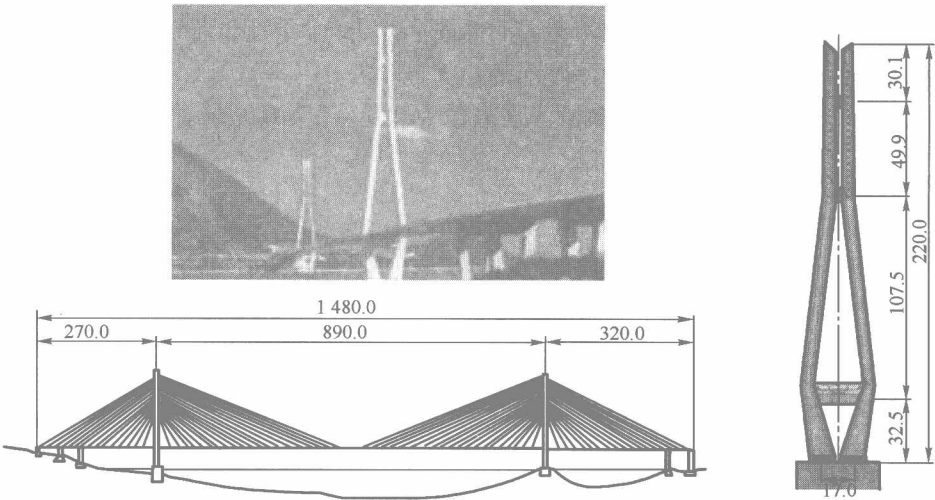


图 1-11 多多罗大桥(尺寸单位:m)

- 1)抗风(风洞试验)
- (1)1/70 全桥气动模型($L=21.2\text{m}$,结构动力特性为主)
- (2)1/200 全桥模型($L=7.4\text{m}$,环境模拟为主)(图 1-12)
- (3)1/70 桥塔($H=3.3\text{m}$,选型为主)