



高等学校教材

桥梁结构 试验

章关永 主编
胡大琳 主审



人民交通出版社
China Communications Press

高等学校教材

Qiaoliang Jiegou Shiyan

桥梁结构试验

章关永 主 编
胡大琳 主 审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为面向 21 世纪交通版高等学校教材,系统介绍了桥梁结构试验的各方面内容。具体包括: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、桥梁现场及模型试验实例。附录一为试验指导,附录二为桥梁无损检测技术及桥梁结构健康监测系统的最新发展。

本书可作为高等院校土木工程专业(桥梁方向)及其它相关专业的教材使用,也可供有关科研、检测、设计、施工技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构试验/章关永主编. —北京:人民交通出版社, 2002.1

ISBN 7-114-04178-0

I. 桥… II. 章… III. 桥梁结构-结构试验-高等学校-教学参考资料 IV. U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 003840 号

高等学校教材

桥梁结构试验

章关永 主编

胡大琳 主审

正文设计:王静红 责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京交通印务实业公司印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 11.5 字数: 278 千

2002 年 3 月 第 1 版

2002 年 3 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001~4000 册 定价: 22.00 元

ISBN7-114-04178-0

U·03058

面向 21 世纪交通版

高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

- 主任委员:王秉纲 (长安大学)
- 副主任委员:胡长顺 (长安大学)
- 陈艾荣 (同济大学)
- 王 炜 (东南大学)
- 杜 颖 (人民交通出版社)
- 委 员:周 伟 (交通部交通科学研究院)
- 郑健龙 (长沙交通学院)
- 张建仁 (长沙交通学院)
- 刘小明 (北京工业大学)
- 梁乃兴 (重庆交通学院)
- 周志祥 (重庆交通学院)
- 裴玉龙 (哈尔滨工业大学)
- 黄 侨 (哈尔滨工业大学)
- 钟 阳 (哈尔滨工业大学)
- 黄晓明 (东南大学)
- 叶见曙 (东南大学)
- 赵明华 (湖南大学)
- 郭忠印 (同济大学)
- 杨晓光 (同济大学)
- 王殿海 (吉林大学)
- 徐 岳 (长安大学)
- 符铎砂 (华南理工大学)
- 秘 书 长:韩 敏 (人民交通出版社)

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试验指导书,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或技术人员,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

目 录

第一章 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
1.2.1 科学研究性试验	2
1.2.2 生产性试验	3
1.3 桥梁结构试验的分类	3
1.3.1 原型试验和模型试验	3
1.3.2 静力试验与动力试验	4
1.4 桥梁结构试验的设计	5
1.4.1 试验的总体组织	5
1.4.2 试验方案的制定	6
1.5 试验数据的整理与试验报告的编写	6
第二章 桥梁试验用仪器设备	7
2.1 概述	7
2.1.1 仪器性能的基本技术指标	7
2.1.2 桥梁试验对仪器的要求	7
2.2 静动态测试仪器	8
2.2.1 机械式测试仪器	8
2.2.2 电测仪器	12
2.3 振动试验仪器设备	25
2.3.1 桥梁测振的常用仪器	25
2.3.2 测振仪器的标定	34
本章参考文献	36
第三章 桥梁现场试验	37
3.1 概述	37
3.2 桥梁现场试验的准备工作	37
3.2.1 收集资料	37
3.2.2 试验方案的拟订	38
3.2.3 仪器准备	40
3.3 桥梁现场荷载试验	41
3.3.1 现场准备	41
3.3.2 现场荷载试验	42

3.3.3 桥梁结构构件试验	45
3.3.4 试验数据整理	52
3.4 桥梁现场荷载试验实例	56
3.5 桥梁结构实际承载能力的评定	60
3.5.1 桥梁实际工作模型的建立	61
3.5.2 桥梁实际承载力的评定	63
本章参考文献	64
第四章 桥梁振动试验	65
4.1 概述	65
4.2 桥梁自振特性参数测定	66
4.2.1 自振特性参数	66
4.2.2 桥梁自振特性参数测定	67
4.2.3 桥梁动力反应测定	75
4.3 桥梁振动试验实例	79
本章参考文献	84
第五章 模型试验	86
5.1 概述	86
5.2 相似定理	86
5.3 静力试验模型	94
5.4 动力试验模型	95
5.5 一些相似常数的讨论	97
5.6 模型试验的相似误差	99
5.7 模型材料的选择	100
5.8 模型试验设计举例	102
本章参考文献	108
第六章 桥梁现场试验实例	109
[例 6-1] 上海杨浦大桥主桥(斜拉桥)竣工试验	109
[例 6-2] 山东东明黄河公路大桥主桥连续刚构—连续梁组合结构竣工试验	115
[例 6-3] 上海杨浦大桥主桥(斜拉桥)施工全过程动力特性测试	118
[例 6-4] 广东虎门大桥主桥(悬索桥)动力特性测定	125
[例 6-5] 日本雪吊桥(人行斜拉桥)振动试验	129
第七章 桥梁模型试验实例	133
[例 7-1] 杭州钱江三桥静力模型试验	133
[例 7-2] 深圳雅园立交 20 号桥(曲线箱梁)静力模型试验	136
[例 7-3] 脊骨梁桥模型试验	143
附录一 试验指导书	148
试验一 电阻应变片及粘贴技术	148
试验二 接桥方式和静态电阻应变仪的使用	149
试验三 静态电阻应变仪的标定	152
试验四 动态电阻应变仪的使用	153

试验五 摆式拾振器测振系统的标定 155

试验六 钢悬臂梁自振特性测定 156

附录二 桥梁无损检测技术及桥梁结构健康监测系统的最新发展 158

一、桥梁无损检测 158

二、光纤传感器技术在桥梁状态监测中的应用 163

三、桥梁结构健康监测系统 170

参考文献 174

第一章 绪 论

随着科学技术的进步,国家基础设施建设的迅猛发展,我国桥梁建设取得了举世瞩目的成就,在最近二十年时间里相继建成了多座跻身世界跨径记录的现代化大跨度桥梁,高速公路也建成 1.9 万余公里。可以预计,下一个二十年,一定会有更多横跨大江大河、连接海峡的大跨桥梁出现,21 世纪我国桥梁工程建设必将取得新的更大的突破。

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,但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。以前靠手算难以精确分析的复杂的结构问题,现在借助电子计算机均可迎刃而解。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,是因为认识能力的局限使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,目前我们还不能对要研究的问题建立的完善的数学模型,因此问题也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繁琐,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距,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的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。

本课程的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例的介绍,使学生对桥梁结构试验技术有一个基本的了解,为今后从事桥梁的科研、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,而由外界作用引起的桥梁结构的位移、应力、应变、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。

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,然后对结构进行结构分析。因此,结构分析的任务是给定系统(系统特性是已知的),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是:给定系统(系统特性可以是已知的也可以是未知的),已知输入,用测试的手段求得输出。测得输出后一方面可以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;另外在系统特性未知的情况下,还可以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。

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、设计及施工各方面都起着重要的作用,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。

1.2.1 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、腹杆以及横向联接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,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做出了重大贡献。

又如在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。

例如为了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。另外,应用于我国桥梁工程上的部分预应力混凝土工艺、预拉及预弯预应力混凝土工艺等在正式推广使用前都曾做过探索性的试验。

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是解决科研和生产中有探索性、开创性的问题,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性满足即可。

1.2.2 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荷载等人为因素的作用,桥梁结构都会受到不同程度地损害。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,如南京长江大桥,为了确保其运行安全,除了日常的养护、检查外,每隔十年还要进行一次大规模的测试鉴定工作。

另外,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,经常还以试验对象、测试内容等对试验进行分类。

1.3.1 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,但也有以科研为目的的。例如近年来交通运输系统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。一类是以解决生产实践中的问题为主要目的的模型试验,这类模型试验的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以用分析的办法解决的工程实际问题。

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同时满足边界条件。将这种模型的试验结果与理论计算的结果对比较核,可用以研究结构的性能,验证设计假定与计算方法的正确性,并确认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。

1.3.2 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大量最常见的基本试验。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的。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。

静力试验一般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,静力试验的加载过程是从零开始逐步递增,一直到预定的荷载为止。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:一是测量移动车辆荷载作用下桥梁指定断面上的动应变或指定点的动挠度,二是测量桥梁结构的自振特性和动力响应。

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(比如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。

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)的情况下可以求出模型(系统)的自振特性。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。

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都通过模拟震动台试验和风洞试验进行。在有条件的地方,也可以在实桥上进行实时测试。

1.4 桥梁结构试验的设计

1.4.1 试验的总体组织

为了使试验能顺利进行并能达到预期的目的,试验的总体组织工作十分重要。试验组织者必须熟悉与试验有关的各个方面,特别是大型复杂的试验,试验的组织者须做大量细致的工作,最好要有一定的实践经验。在进行试验组织时必须做好以下几方面的工作:

1. 明确试验目的

在进行其他各项工作以前必须首先了解清楚试验要达到的目的以及各项具体要求。如果提出试验要求的不是试验组织者本人,则试验组织者有必要与提出试验要求的人进行讨论,询问提出各项试验要求的前提与背景,通过试验要解决的问题,然后再将试验目标确定下来,最好要能分清各项目的主次,试验时万一不能兼顾各项目标时可以放弃次要目标而保证完成主要任务。

2. 阅读有关文献

在明确试验目的以后,应该阅读与试验有关的文献资料。如果有人做过类似的试验则通过阅读他人试验报告或情况介绍,弄清试验目的有何不同,哪些地方可以改进等等。

3. 收集设计、计算资料

如果试验对象具有实际工程背景,在组织试验时要向有关部门收集与试验有关的设计资料,以便对试验对象有透彻的了解。在试验前应模拟试验状态对结构进行必要的分析计算,以便对试验结果有初步的估计。

4. 拟定试验方法

在以上几步工作的基础上,可以拟定试验方法。拟定试验方法主要是根据试验目的和客观条件确定静力试验的加载方法和动力试验的激振方法,选择合适的测试仪器和观察方法,确定试验程序。

5. 测试仪器设备的准备和试验人员的组织

在确定了试验方法以后,就可着手测试仪器设备的准备和试验人员的组织。为了保证试

验的顺利进行,测试仪器的规格、数量、测试精度等都要能满足试验的要求,对于使用数量大、容易损坏的仪器还应有一定数量的备件。

对于规模较大的试验,通常需要较多的测试人员,单靠某一个单位的专业测试人员往往是不够的,还需要几个单位的测试人员通力合作;此外,还可能需非专业测试人员的协助,试验前应该做好所有参加试验人员的组织工作。

1.4.2 试验方案的制定

在完成试验组织的基础上,还应订出详细的试验方案以便照此执行。试验方案一般应包括如下内容:

①试验目的以及测量要求;②加载方法;③测试内容;④测量方法;⑤试验程序;⑥试验进度;⑦试验人员的组织和分工;⑧安全措施。

1.5 试验数据的整理与试验报告的编写

测试过程完毕并不意味试验的结束,试验过程中的原始记录,是试验结果的真实记录。但是原始记录的数据必须经过分析、整理或画成图表以后才能清晰明了地反映试验结果的情况。

试验报告则是整个试验的总结。试验报告要概括试验的各主要环节,内容至少应包括:

1. 介绍试验目的、要求及依据等;
2. 试验实施情况(包括:试验荷载、加载方式、测试内容、测点布置和测试仪器等等);
3. 试验量测数据结果,各种关系曲线及相关分析;
4. 对试验结果的综合分析;
5. 结论;
6. 试验和报告的日期,主持和参加单位,试验单位资质及人员名称,主持人签名。

一项试验,从进行试验设计开始直到写出试验报告为止,是一个前后紧密联系的过程,必须从一开始就非常慎重非常细致地对待试验的每一个环节。试验前对有关试验的各个方面、各个环节考虑得当,试验计划订得周密,可以使试验进行得井然有序;试验过程中一丝不苟、认真测读有利保证试验数据正确无误。但是在整理分析数据、撰写试验报告阶段如果草率从事,就会使整个试验前功尽弃,使花了大量精力测得的试验数据说明不了什么问题或者引出错误的结论。因此,在进行数据整理时必须十分仔细,使经过整理后的数据能真实反映试验实际。对试验结果中反映出来的与常识或理论不符的“反常”现象要仔细推敲并反复核对,不宜轻易判断为测试中的失误,往往这些反常现象揭示了在理论分析时被忽视而客观存在的事实,这正是试验优于理论的地方。参照理论分析的结果,对试验结果进行分析说明是试验报告的重要组成部分,也是试验人员深化对试验认识的过程。试验报告的结论部分应该明确回答作为试验目的所希望解决的问题,同时列出通过试验发现的新规律、新事实。

第二章 桥梁试验用仪器设备

2.1 概 述

桥梁试验,无论是静动荷载试验还是振动测试,目的都是要获得桥梁结构的各种参数(如内力、变形、动态增量、自振特性等),为了得到这些参数,需要有相应的仪器设备去测试。实际工作中,我们的问题是怎样选用合适的仪器设备并正确地使用它们以满足试验要求,所以必须了解桥梁试验中一些常用的测试仪器的基本性能和使用方法。

现代科学技术,特别是计算机技术的发展,已经带给桥梁试验技术许多新的内容,其中包括了一些仪器设备、测试手段和分析方法等方面的更新。同时,大多数沿用至今的仪器设备(如机械式仪器)还是有它应有的地位,有的甚至是不可缺少的。

本章主要介绍桥梁静、动载试验和振动试验中常用的仪器设备及有关基本知识,侧重点放在实用上。

2.1.1 仪器性能的基本技术指标

常用仪器性能一般有下列几项基本技术指标

1. 测量精度:这里系指仪器所具有的可读数能力(最小分辨率)。如千分表的精度为 0.001mm ,某静态电阻应变仪的最小可读数为 $1\mu\epsilon$ 等。
2. 量程:仪器的最大测量范围即量程(在动态测试中称作动态范围)。如千分表的量程是 1mm ,某静态电阻应变仪的最大测量范围是 $30\,000\mu\epsilon$ 等。
3. 灵敏度:被测量的单位变化引起的仪器读数值(输出与输入的比值)叫做灵敏度,数值上它与精度互为倒数。例如电测位移计的灵敏度(S_d) = 输出电压/输入位移。
4. 信噪比:仪器测得的信号中信号与噪声的比值,称作信噪比,这个比值越大,测量效果越好。
5. 稳定性:指仪器受环境条件干扰影响后其指示值的稳定程度。
6. 误差:仪器指示值与被测真值之差称为仪器的绝对误差。试验时,往往采用精度高一级的计量设备所复现的被测值来代表约定真值,并以此来衡量实际误差。

2.1.2 桥梁试验对仪器的要求

桥梁试验对所用仪器设备的基本要求有如下三点:

1. 性能(如精度、量程等)能满足桥梁结构(野外、室内模型)试验的具体要求。
2. 使用时不影响原结构的受力性能和工作情况(这对模型尤为重要)。
3. 使用方便、结构可靠、经济耐用。

每种仪器不一定能同时满足上述要求,有些还相互矛盾,所以选用时应该根据具体情况决定。

2.2 静动态测试仪器

桥梁静动态测试仪器按测试对象分类大致如表 2-1 所列。

桥梁静动态仪器分类表

表 2-1

序 号	参 数	机械式仪器	电(声、光)测仪器
1	力、荷载	测力环、拉力环	拉压力传感器
2	变位	千分表、百分表、挠度计	位移计、水准仪、经纬仪全站仪、测距仪
3	应变	千分表引伸仪、手持应变仪	电阻应变计、电阻应变仪、数据采集器、数据采集系统
4	裂缝	塞尺、读数尺	声发射检测仪、读数显微镜
5	混凝土强度	回弹仪	试验机、超声波检测仪

机械式仪器用在桥梁试验中已有相当长的历史,实用上它是以它的直观和可靠取胜的。另外实桥结构一般尺寸都比较大,在精度要求可满足的情况下,往往也还使用如千分表引伸仪这样的简单仪器。

电测仪器的发展很快,精度比较高,量程也比机械式大得多,目前在许多方面早已取代机械式仪器。

从 80 年代开始,无损检测技术开始进入桥梁试验。许多早年建造的混凝土桥梁的质量(如混凝土强度、开裂情况等)需要鉴定,有时一些桥梁梁体的施工质量也需要检定,在这些方面,无损检测技术有望得到重视和研究推广。

2.2.1 机械式测试仪器

这里机械式测试仪器是指各种用于非电量测试的仪表、器具或设备。

机械式仪器的特点是:准确度高,对环境适应性强,读数有一定的灵敏度,工作可靠直观,可重复使用,其性能在许多方面能满足桥梁原型和模型的试验要求;它的不足之处是灵敏度较差,不利于远距离操纵,难以自动测量与记录。

1. 位移(或应变)测量仪表

桥梁测试中最常用的机械式位移量测仪表是千分表、百分表和挠度计,应用这类仪表一般可以非常方便地直接测到结构的位移;另外由这类不同精度和量程的仪表再配以其他机械装置可组成各种测量其他参数的仪器(如测量应变的千分表引伸仪、测量拉压力的拉压式测力计等)。

表 2-2 列出了一些机械式位移量测仪表的主要性能指标。

常用机械式位移测量仪表的主要性能指标

表 2-2

名 称	精 度	量 程
千分表	0.001mm	1 ~ 10 mm
百分表	0.01mm	10 ~ 50 mm
挠度计	0.1mm	不限

机械式位移量测仪表的原理基本一样,都是利用顶杆、齿轮、滑轮、弹簧、指针和刻度盘

等,将被测机械量变向,并转换成可读值的仪表。它一般包括三大部分:

传感机构——直接感受被测量的变化;

转换机构——把传感机构受到的变化转换成可直接读取的量;

指示机构——通过用指针在刻度盘或其它读数装置上指示出被测量的大小。

千分表和百分表是比较大众化的仪表,在桥梁模型测试中有十分广泛的应用。

利用千分表 0.001mm 的读数精度,可装配成测结构应变的千分表引伸仪(也称千分表应变计)。千分表引伸仪在实桥测试中有较多的应用,因为它使用起来非常方便,标距 L 任意可调,在精度能满足要求的情况下,对测量实际(如混凝土)构件表面应变有独到之处。

如图 2-1 所示,当被测物受拉(或受压)时, L 会发生 $\pm \Delta L$ 的变化,应变 $\epsilon = \pm \Delta L/L$ 。显然,被测应变的精度与引伸仪的标距有关。

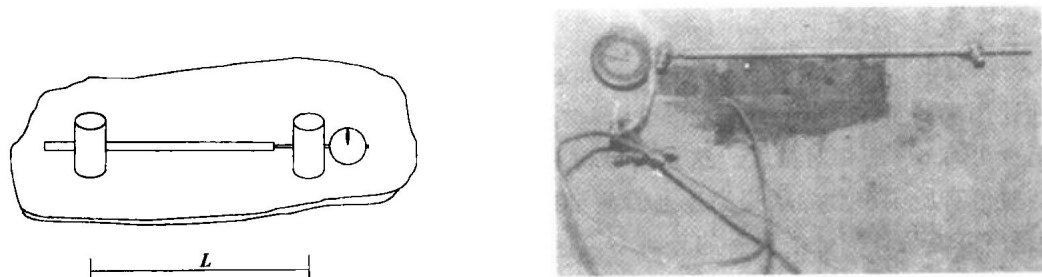


图 2-1 千分表引伸仪

图 2-2 是一种绕丝式挠度计,它特别适用于中小桥挠度测量。使用时可将参考系设在地面(或河床)的相对固定物上(这是与千分表、百分表使用方法上的最大区别),通过细钢丝与结构物联系,细钢丝随着结构物的位移变化而变化并带动表面指针运动。

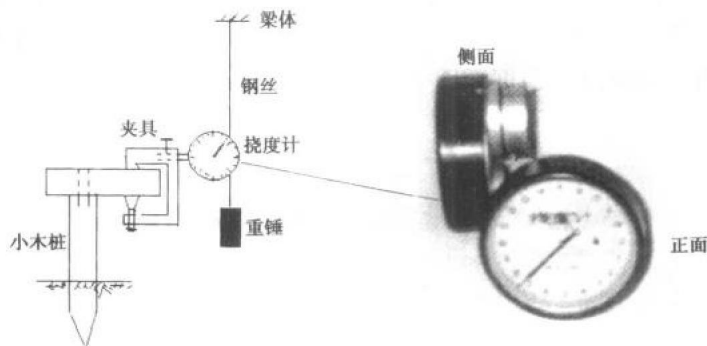


图 2-2 挠度计及其安装

2. 连通管

连通管是一种可用来测量桥梁结构挠度的简单装置。

利用物理学上“连通器中处于水平平面上的静止液体的压强相同”的原理,如图 2-3 所示, $p_a = p_1 + \gamma h_1 = p_2 + \gamma h_2$, 即 $p_2 - p_1 = \gamma h$ 。表面压强相同, $p_2 = p_1$ 时,连通器两柱的液面高度相同, $h = 0$ 。

连通管临时用在桥上测挠度,可用 $\phi(10 \sim 15)$ mm 的白塑料软管和三通,配普通(毫米刻度的)钢卷尺,人工可测读

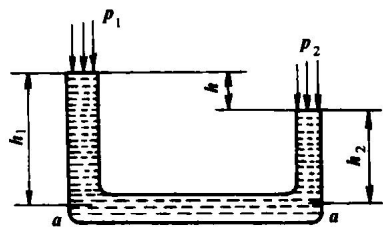


图 2-3 连通器