

土木工程实验系列教材

TUMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN JICHU JIAOCHENG

土木工程结构试验基础教程

朱尔玉 季文玉 冯东 兰巍 编著

董德禄 主审



中国科学技术出版社

● 土木工程实验系列教材

土木工程结构试验 基础教程

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构试验基础教程/朱尔玉等编著. —北京:中国科学技术出版社, 2008. 1

(土木工程实验系列教材)

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5193 - 8

I. 土… II. 朱… III. 土木工程 - 工程结构 - 结构试验 - 高等学校 - 教材
IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 071949 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京国防印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:21 字数:400 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

定价:26.00 元

ISBN 978 - 7 - 5046 - 5193 - 8/TU · 67

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

总 序

随着我国国民经济的高速发展,大规模的基础设施建设呈现出日新月异的局面,这将需要大量的基础设施建设人才。土木工程专业是培养这些建设人才的主要渠道。

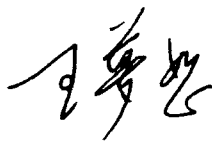
土木工程专业覆盖学科范围非常广泛,需要综合运用工程地质、工程测量、土力学、工程力学、工程设计、建筑材料、建筑设备、建筑经济等学科和施工技术、施工组织等领域的知识。

同时,土木工程又是实践性非常强的专业,实验和实习是培养高水平土木工程专业人才的必不可少的重要环节和手段。

北京交通大学土木工程专业在其 50 余年的发展历史中,始终重视实验、实习、课程设计、毕业设计等实践教学过程,从建立之初即建设了较为齐全的实验室。今天,实验教学设备和手段更加完善,实验技术和实验内容随着科技的发展不断更新。北京交通大学的教师根据多年来实验教学的经验,组织编写了土木工程专业的实验系列教材。

相信本套系列教材的出版,不仅对北京交通大学的实验教学有很好的促进作用,也会受到兄弟院校的欢迎。

中国工程院院士



前 言

土木工程结构试验以试验技术为手段,借助一定的仪器设备测量工程结构或构件实际工作性能的有关参数,为评判工程结构的安全性、适用性和耐久性提供科学依据。土木工程结构试验是一门实践性很强的专业技术,它所涉及的内容广泛,如物理学、机械与电子测量技术、土木工程技术、数理统计分析等,需要较多的基础知识和专业知识。随着科学技术的发展,土木工程结构试验的理论和技术也随之发展。

作者在多年教学和科研的基础上,编写了《土木工程结构试验基础教程》、《土木工程结构试验高级教程》丛书,涵盖了土木工程结构试验相关学科和领域的内容。

《土木工程结构试验基础教程》共7章:“第1章 工程结构试验概论”由北京交通大学朱尔玉和兰巍编写;“第2章 工程结构试验设计”由北京市建筑工程研究院徐瑞龙和中冶集团建筑研究总院许庆编写;“第3章 工程结构试验加载技术”由北京市政工程设计研究总院何立和北京交通大学田雪娟编写;“第4章 工程结构试验量测技术”由北京交通大学朱尔玉和冯东编写;“第5章 工程结构静载试验”由北京交通大学季文玉和蒋红根编写;“第6章 工程结构动力试验”由北京交通大学冯东和刘磊编写;“第7章 工程结构试验数据处理”由北京交通大学季文玉、蒋红根和荣峤编写。全书由朱尔玉、冯东统稿,重庆市轨道交通总公司董德禄主审。

通过对本书的学习,可使读者获得土木工程结构试验方面的基础知识和基本技能,掌握土木工程结构试验设计、加载技术、量测技术、工程结构静载试验方法、工程结构动力试验方法、试验数据处理等内容,为今后从事科学研究和工程结构试验打下良好的基础。

本书在编写过程中,吸收了行业专家的经验,参考和借鉴了有关专业图书的内容,取长补短,力求将国内外土木工程结构试验方面的最新技术和测试方法介绍给读者。另外,在丛书的出版过程中,得到了北京交通大学土木建筑工程学院有关领导以及中国科学技术出版社的大力支持。在此,编者向所有对此书出版提供帮助的人士表示衷心的感谢!

由于水平所限,加上时间仓促,书中难免疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 1 月于北京交通大学

目 录

第1章 工程结构试验概论	(1)
1.1 工程结构试验的任务与作用	(2)
1.2 工程结构试验分类	(5)
第2章 工程结构试验设计	(12)
2.1 工程结构试验设计的主要环节	(12)
2.2 工程结构试验一般过程	(14)
2.3 结构试验的试件设计	(19)
2.4 结构试验荷载设计	(30)
2.5 结构试验的观测设计	(34)
2.6 材料的力学性能与结构试验的关系	(37)
2.7 结构试验大纲和试验基本文件	(41)
第3章 工程结构试验加载技术	(44)
3.1 概述	(44)
3.2 重力加载技术	(45)
3.3 液压加载技术	(48)
3.4 电液伺服加载系统	(57)
3.5 机械力加载系统	(59)
3.6 气压加载系统	(60)
3.7 惯性力加载	(61)
3.8 电磁加载法	(66)
3.9 振动台加载	(67)
3.10 其他激振方法	(73)
3.11 加载辅助设备	(75)
第4章 工程结构试验量测技术	(87)
4.1 概述	(87)
4.2 量测仪表的基本概念	(87)

4.3	应变电测法	(92)
4.4	钢弦式传感器	(119)
4.5	应变的其他量测方法	(123)
4.6	光纤光栅法	(126)
4.7	力和应力的量测方法	(128)
4.8	位移测量	(131)
4.9	光电挠度计	(137)
4.10	应变场的应变及裂缝测定	(140)
4.11	测温元件	(146)
4.12	测振传感器	(149)
4.13	数据采集系统	(166)
第5章	工程结构静载试验	(170)
5.1	概述	(170)
5.2	试验准备	(172)
5.3	加载方案设计	(174)
5.4	观测方案设计	(183)
5.5	常见结构静载试验	(190)
5.6	量测数据整理和换算	(218)
5.7	结构性能评定	(229)
第6章	工程结构动力试验	(235)
6.1	概述	(235)
6.2	工程结构动力特性试验	(237)
6.3	工程结构动力反应测定	(247)
6.4	工程结构疲劳试验	(250)
6.5	工程结构风洞试验	(260)
6.6	工程结构抗震试验	(266)
第7章	工程结构试验数据处理	(291)
7.1	概述	(291)
7.2	试验数据整理	(292)
7.3	数据误差分析	(295)
7.4	数据的表达	(306)
	参考文献	(323)

第1章 工程结构试验概论

工程结构试验是一项科学实践性很强的学科,是研究和发展工程结构新材料、新体系、新工艺以及探索结构设计新理论的重要手段,在工程结构科学研究和技术革新等方面起着重要的作用。

工程结构包含有:建筑结构、桥梁结构、隧道结构、地下结构、水工结构及各类特种结构(如高耸结构及各种构筑物)等,这些工程结构都是以各种工程材料为主体构成的不同类型的承重构件相互连接而成的组合体。为满足结构在功能及使用上的要求,必须使得这些结构在规定的使用期内能安全有效地承受外部及内部形成的各种作用。为了进行合理的设计,工程技术人员必须掌握在各种作用下结构的实际工作状态,了解结构构件的承载力、刚度、受力性能以及实际所具有的安全储备。

在应力分析工作中,一方面可以利用传统的理论计算方法,另一方面也可以利用实验方法,即通过结构试验,采用实验应力分析方法来解决。特别是电子计算机技术的发展,它不仅为用数学模型方法进行计算分析创造了条件,同样利用计算机控制的结构试验,为实现荷载模拟、数据采集和数据处理,以及整个试验实现自动化提供了有利条件,使结构试验技术的发展,产生了根本性的变化。人们利用计算机控制的多维地震模拟振动台可以实现地震波的人工再现,模拟地面运动对结构作用的全部过程;用计算机联机的拟动力伺服加载系统帮助人们在静力状态下量测结构的动力反应;由计算机完成的各种数据采集和自动处理系统可以准确、及时、完整地收集并表达荷载与结构行为的各种信息。计算机也加强了人们进行结构试验的能力。因此,结构试验仍然是发展结构理论和解决工程设计方法的主要手段之一。在结构工程学科的发展演变过程中形成的由结构试验、结构理论与结构计算三级构成的新学科结构中,结构试验本身也成为一门真正的试验科学。

实践是检验真理的唯一标准。科学实践是人们正确认识事物本质的一个源泉,可以帮助人们认识事物的内在规律。在工程结构学科中,人们为了正确认识结构的性能和不断深化这种认识,结构试验也是一种已被实践所证明的行之有效的方法。

工程结构试验是土木工程专业的一门技术基础课程。它研究的主要内容有:工程结构静力试验和动力试验的加载模拟技术,工程结构变形参数的量测技术,试验数据的采集、信号分析及处理技术,最终对试验对象做出科学的技术评价或理论分析。

1.1 工程结构试验的任务与作用

1.1.1 工程结构试验的任务

结构在外荷载作用下,它就可能产生各种反应。如钢筋混凝土简支梁在静力集中荷载作用下,可以通过测得梁在不同受力阶段的挠度、角变位、截面上纤维应变和裂缝宽度等参数,来分析梁的整个受力过程以及结构的承载力、刚度和抗裂性能。当一个桥梁承受动力荷载或移动荷载作用时,同样可以从测得结构的自振频率、阻尼系数、振幅(动位移)和动应变等研究结构的动力特性和结构承受动力荷载作用下的动力反应。近年来,在结构抗震研究中,经常是通过结构在承受低周反复荷载作用下,由试验所得的恢复力与变形关系即滞回曲线来分析结构的承载力、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等。

由此可见,工程结构试验的任务就是在结构物或试验对象(实物或模型)上,利用设备仪器,采用各种实验技术,在荷载(重力、机械扰动力、地震作用、风力……)或其他因素(温度、变形)作用下,通过量测与结构工作性能有关的各种参数(变形、挠度、应变、振幅、频率……),从强度(稳定性)、刚度和抗裂性以及结构实际破坏形态来判断结构的实际工作性能,估计结构的承载能力,确定结构对使用要求的符合程度,并用以检验和发展结构的计算理论。

由结构试验的任务可知,它是以不同形式的实验方法为手段,以测定结构构件的工作性能、承载能力和相应的安全度为目的,为结构的安全使用和设计计算理论的建立提供重要的依据。

1.1.2 工程结构试验的作用

1. 工程结构试验是发展结构理论的重要途径

17 世纪初期伽利略(1564—1642)首先研究了材料的强度问题,提出过许多正确的理论。但他在 1638 年出版的著作中,也曾错误地认为受弯梁的断面应力分布是均匀受拉的。过了 46 年,法国物理学家马里奥脱和德国数学家兼哲学家莱布尼兹对这个假定提出了修正,认为其应力分布不是均匀的,而是按三角形分

布的。后来虎克和伯努里又建立了平面假定。1713 年法国人巴朗进一步提出了中和层理论,认为受弯梁断面上的应力分布以中和层为界,一边受拉,另一边受压。由于当时无法验证,巴朗的理论只不过是一个假设而已,受弯梁断面上存在压应力的理论仍未被人们接受。

1767 年法国科学家容格密里首先用简单的试验方法,令人信服地证明了梁断面上压应力的存在。他在一根简支梁的跨中,沿上缘受压区开槽,槽的方向与梁轴垂直,在槽内塞入硬木垫块(图 1-1)。试验证明,这种开槽梁的承载能力丝毫不低于整体未开槽的木梁。这说明只有上缘受压力才可能有这样的结果。当时,科学家们对容格密里的这个试验给予了极高的评价,将它誉为“路标试验”,因为它总结了人们 100 多年来的摸索成果,像十字路口的路标一样,为人们指出了进一步发展结构强度计算理论的正确方向和方法。

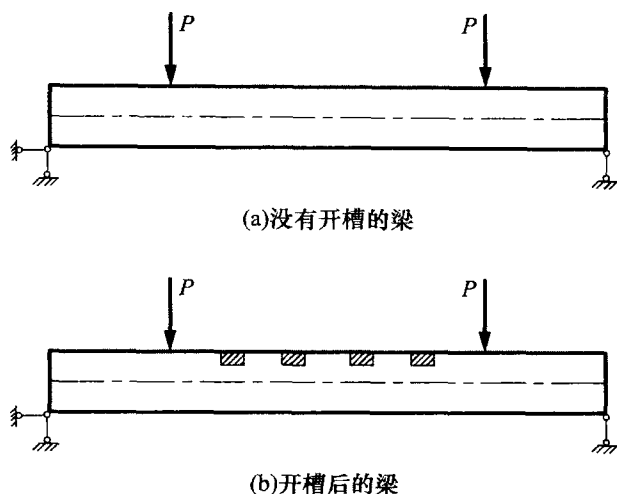


图 1-1 路标试验图示

1821 年法国科学院院士拿维叶从理论上推导了现在材料力学中受弯构件断面应力分布的计算公式,又经过了 20 多年后,才由法国科学院另一位院士阿莫列恩用实验的方法验证了这个公式。

人类对这个问题进行了 200 多年的不断探索,至此才告一段落。从这段漫长的历程中可以看出,不仅对于验证理论,而且在选择正确的研究方法上,试验技术都起了重要的作用。

2. 工程结构试验是发现结构设计问题的主要手段

人们对于框架矩形截面柱和圆形截面柱的受力特性认识较早,在工程设计中应用最广。建筑设计技术发展到今天,为了满足人们对建筑空间的使用需要,出现了异形截面柱,如 T 形、L 形和“十”形截面柱。在未做试验研究之前,设计者认为,矩形截面柱和异形截面柱在受力特性方面没有本质的区别,其区别就在于截面形状的不同,因而误认为柱子的受力特性与柱截面形式无关。试验证明,柱子的受力特性与柱子截面的形状有很大关系,矩形截面柱的破坏特征属拉压型破坏,异形截面柱破坏特征属剪切型破坏。所以,异型截面柱和矩形截面柱在受力性能方面有本质的区别。

钢筋混凝土剪力撑结构的设计技术已经被人们所掌握,这种新结构的设计思想源于三角形的稳定性,是框架和桁架相互结合的产物。设计者设想把框架的矩形结构通过加斜撑的方式分隔成若干个三角形。最初,有人把这种结构形式叫做框桁结构,设计者第一榀试验研究的结构简图见图 1-2。

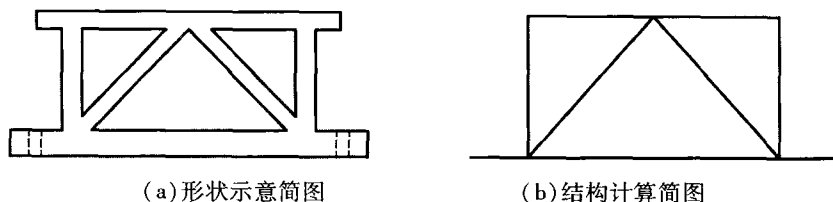


图 1-2 钢筋混凝土剪力撑结构雏形示意图

从计算理论的角度看,这种结构是合理的、可行的,但经过试验研究,才发现图 1-2 的结构形式是失败的,因为斜撑的拉杆几乎不起作用,不能抵消压杆的竖向分力,整个结构由于两斜撑交点处的框架梁首先出现塑性角而被破坏。在试验研究的基础上,经过多次改进,才形成了图 1-3 的结构形式。

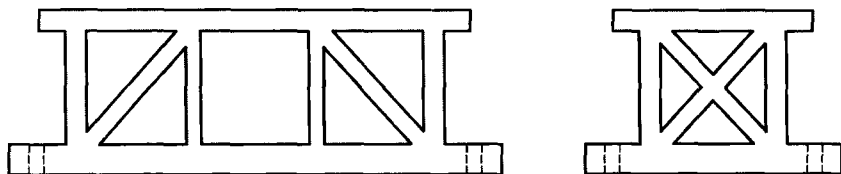


图 1-3 钢筋混凝土剪力撑结构设计示意图

笼式工程结构是 20 世纪 90 年代末出现的一种能够减小地震作用的结构形式。因地震作用的大小与工程结构平面刚度的大小相关,即工程结构的平面刚

度越大,地震对建筑物的影响也越大,反之则越小。所以,设计者从住宅建筑属小开间建筑这一特点入手,将普通框架结构的大截面梁柱,改变成数量较多的小截面梁柱,并将小梁小柱沿墙的长度方向和高度方向密布,使房间就像笼子一样。将该结构做成1:3的模型,经试验发现,模型的底层有数量不多的斜裂缝,第二层下部混凝土局部被压碎,钢筋屈曲,破坏程度最严重,第三层下部破坏程度次之,第五~第八层几乎没有破坏,顶层墙面有几条斜裂缝。所以,就结构破坏特征而言,笼式工程结构与普通工程结构有差异。

钢管混凝土结构的梁柱连接方式有焊接连接和螺栓连接两大类数十余种具体形式,究竟哪一种最优,也必须通过试验研究才能确定。

3. 工程结构试验是验证结构理论的唯一方法

从最简单的结构受弯杆件截面应力分布的平截面假定理论、弹性力学平面应力问题中应力集中现象的计算理论,到比较复杂的结构平面分析理论和结构空间分析理论,都可以通过试验方法来加以证实。

隔振结构、消能结构的发展也离不开工程结构试验。

4. 工程结构试验是工程结构质量鉴定的直接方式

对于已建的结构工程,不论是某一具体的结构构件还是结构整体,也不论进行质量鉴定的目的如何,所采用的直接方式仍然是结构试验。比如,灾害后的建筑工程、事故后的建筑工程等的质量鉴定。

5. 工程结构试验是制定各类技术规范和技术标准的基础

为了土木建筑技术能够得到健康的发展,需要制定一系列技术规范和技术标准,土木界所用的各类技术规范和技术标准都离不开结构试验成果。

6. 工程结构试验是自身发展的需要

从加荷技术发展的历史过程来看,有重物加载→机械加载→电磁加载→液压加载→伺服加载;从测试技术发展的历史过程看,有直尺测试→机械测试→电子测试→计算机智能测试技术,这些都是工程结构试验自身发展的产物。

1.2 工程结构试验分类

工程结构试验可按试验对象、荷载性质、试验场合、试验时间等不同因素进行分类,现简述如下。

1.2.1 生产性试验和科研性试验

1. 生产性试验

生产鉴定性试验简称生产性试验,是非探索性的,一般是在比较成熟的设计理论上进行。其目的是通过试验来检验结构构件是否符合结构设计规范及施工验收规范的要求,并对检验结果作出技术结论。这类试验经常用来解决以下有关问题:

(1)鉴定结构设计和施工质量的可靠程度。对于一些比较重要的结构与工程,除在设计阶段进行必要的试验研究外,在实际结构建成以后,还要通过试验综合地鉴定其质量的可靠程度。上海南浦大桥和杨浦大桥建成后的荷载试验和秦山核电站安全壳结构整体加压试验均属此例。

(2)为工程改建或加固判断结构的实际承载能力。对于旧有建筑的扩建加层或进行加固,在单凭理论计算不能得到分析结论时,经常需要通过试验来确定这些结构的潜在能力,这对于缺乏原有结构的设计计算与图纸资料时,在要求改变结构工作条件的情况下更有必要。我国曾对上海几个解放前建造的冷库的楼盖做了承载能力试验,通过鉴定楼盖的现有承载能力,以期提高楼面荷载来满足增加仓库冷库储藏量的需要。

(3)为处理工程事故提供技术根据。对于遭受地震、火灾、爆炸等原因而受损的结构,或是在建造和使用过程中发现有严重缺陷(施工质量事故,结构过度变形和严重开裂等)的危险性建筑,也往往有必要进行详细的检验。上海某塑料厂的成型车间,在施工过程中发生火灾,致使一座三层的混合结构房屋遭到破坏,砖墙开裂,楼盖混凝土保护层剥落,钢筋外露,最后选择了楼面中破坏较为严重的楼板和次梁进行了荷载试验,从而得出了楼面结构在受灾破坏情况下的承载能力。唐山地震后,为对北京农业展览馆主体结构加固的需要,通过环境随机振动试验,采用传递函数谱进行了结构模态分析,并通过振动分析获得了结构模态参数。以上的试验均为进行结构加固提供了必要的数据和资料。

(4)检验结构可靠性、估算结构剩余寿命。已建结构随着使用时间的增长,结构物逐渐出现不同程度的老化现象,有的已到了老龄期、退化期和更换期,有的则到危险期。为了保证已建建筑的安全使用,尽可能地延长它们的使用寿命,防止建筑物破坏、倒塌等重大事故的发生,国内外对建筑物的使用寿命,特别是对使用寿命中的剩余期限,即剩余寿命特别关注。通过对已建建筑进行观察、检测和分析普查后,按可靠性鉴定规程评定结构所属的安全等级,由此推断其可靠性并估计其剩余寿命。目前,可靠性鉴定大多数采用非破损检测的试验方法。

我国解放前和建国初期建成的钢铁厂,如武汉钢铁厂、本溪钢铁厂等的炼铁、炼钢、轧钢等车间均进行过检查和鉴定。

(5) 鉴定预制构件的质量。对于在构件厂或现场成批生产的钢筋混凝土预制构件,在构件出厂或现场安装之前,必须根据科学抽样试验的原则,按照预制构件质量检验评定标准和试验规程的要求,通过少量试件的试验,推断成批产品的质量。

2. 科研性试验

科学研究性试验简称科研性试验,具有研究、探索和开发的性质。其目的在于验证结构设计的某一理论,或验证各种科学的判断、推理、假设及概念的正确性,或者是为了创造某种新型结构体系及其计算理论,而进行的试验研究。研究性试验的试验对象即试件,不一定是研究任务中的具体结构,更多的是经过力学分析后抽象出来的模型。模型必须反映研究任务中的主要参数。因而,研究性试验的试件都是针对某一研究目的而设计和制作的。研究性试验一般都在室内进行,需要使用专门的加载设备和数据测试系统,以便对受载试件的变形性能进行连续观察、测量和全面的分析研究,从而找出其变化规律,为验证设计理论和计算方法提供依据。

(1) 验证结构计算理论的假定。在结构设计中,人们经常为了计算上的方便,对结构构件的计算图式和本构关系作某些简化的假定。例如在某较大跨度的钢筋混凝土结构厂房中,采用30~36m跨度竖腹杆形式的预应力钢筋混凝土空腹桁架,在设计这类桁架的计算图式时,可假定为多次超静定的空腹桁架,也可按两铰拱计算,而将所有的竖杆看成是不受力的吊杆,一般这可以通过试验研究方法加以验证。再如在构件静力和动力分析中,对本构关系的采用,则完全是通过试验加以确定的。

(2) 为制定设计规范提供依据。我国现行的各种结构设计规范除了总结已有大量科学实验的成果和经验以外,为了理论和设计方法的发展,进行了大量钢筋混凝土结构、砖石结构和钢结构的梁、柱、框架、节点、墙板、砌体等实物和缩尺模型的试验,以及实体建筑物的试验研究,为我国编制各类结构设计规范提供了基本资料与试验数据。事实上现行规范采用的钢筋混凝土结构构件和砖石结构的计算理论,几乎全部是以试验研究的直接结果为基础的,这也进一步体现了结构试验学科在发展设计理论和改进设计方法上的作用。

(3) 为发展和推广新结构、新材料与新工艺提供实践经验。随着工程结构和基本建设发展的需要,新结构、新材料和新工艺不断涌现。例如在钢筋混凝土结构中各种新钢种的应用,薄壁弯曲轻型钢结构的推广,升板、滑模施工工艺的

发展,以及大跨度结构、高层建筑与特种结构的设计施工等。但是一种新材料的应用,一个新结构的设计和新工艺的施工,往往需要经过多次的工程实践与科学试验,即由实践到认识,再由认识到实践的多次反复,从而积累资料,丰富认识,使设计计算理论不断改进和不断完善。结合我国钢材生产的特点,曾对 16 锰及硅钛类或硅钒类等钢种的原材料和使用这类钢材的结构构件做了大量的试验研究工作。上海某剧场改建工程中,在以往理论研究和通过模型试验积累的经验基础上,采用了一种新的眺台结构形式——预应力悬带结构,有效地解决了建筑空间与结构受力性能的矛盾。为了试验悬带眺台的结构性能,进行了现场的静力和动力试验,获得了结构刚度、次弯矩影响、预应力损失和结构自振频率等多项第一手资料,为这种新型结构的推广使用提供了经验。在目前高层建筑的设计和建设中,曾对筒中筒的结构体系进行了较多的试验研究。又如在桥墩的升板结构与滑模施工中,通过现场实测积累了大量与施工工艺有关的数据,为发展以升带滑、滑升结合的新工艺创造了条件。

1.2.2 原型试验和模型试验

1. 原型试验

原型试验(又称真型试验)的试验对象是实际结构或是按实物结构足尺复制的结构或构件。

对于实物试验一般均用于生产性试验,例如秦山核电站安全壳加压整体性的试验就是一种非破坏性的现场试验。对于工业厂房结构的刚度试验、楼盖承载能力试验等均在实际结构上加载和量测;另外,在高层建筑上直接进行风振测试和通过环境随机振动测定结构动力特性等均属此类试验。

在真型试验中另一类就是足尺结构或构件的试验,以往一般对构件的足尺试验做得较多,事实上试验对象就是一根梁、一块板或一榀屋架之类的实物构件,它可以在试验室内试验,也可以在现场进行。

由于建筑结构抗震研究的发展,国内外开始重视对结构整体性能的试验研究,因为通过对这类足尺结构物进行试验,可以对结构构造、各构件之间的相互作用、结构的整体刚度以及结构破坏阶段的实际工作性能进行全面观测了解。从 1973 年起我国各地先后进行的装配整体式框架结构、钢筋混凝土大板、砖石结构、中型砌块、框架轻板等不同开间和不同层高的足尺结构试验有 10 例之多。其中 1979 年夏上海五层硅酸盐砌块房屋的抗震破坏试验中,通过液压同步加载器加载,在国内足尺结构现场试验中第一次比较理想地测得了结构物在低周重复荷载下的恢复力特性曲线。

由于对测试要求保证精度,为了防止环境因素对试验结果的干扰,目前国外已将这类足尺结构从现场转移到结构试验室内进行试验。如日本已在室内完成了七层房屋足尺结构的抗震伪静力试验。近年来国内大型结构试验室的建设也已经考虑到这类试验的要求。

2. 模型试验

由于进行原型结构试验投资大、周期长、测量精度受环境等因素影响,在经济上或技术上存在一定困难。因此,人们在结构设计方案阶段进行初步探索比较或对设计理论和计算方法进行科学研究时,往往采用按原型结构缩小的模型进行试验。

模型是仿照真型并按照一定比例关系复制而成的试验代表物,它具有实际结构的全部或部分特征,但其尺寸却比真型小得多。

模型的设计制作及试验是根据相似理论,用适当的比例尺和相似材料制成与原型几何相似的试验对象,在模型上施加相似力系(或称比例荷载),使模型受力后重演原型结构的实际工作情况,最后按照相似理论由模型试验结果推算出实际结构的工作性能。为此这类模型要求有比较严格的模拟条件,即要求做到几何相似、力学相似和材料相似。目前在试验室内进行的大量结构试验均属于这一类。

由于严格的相似条件给模型设计和试验带来一定的困难,在工程结构试验中尚有另一类型的模型,它仅是真型结构缩小几何比例尺寸的试验代表物,将该模型的试验结果与理论计算对比校核,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,这类试验就不一定要满足严格的相似条件了。上海体育馆的屋盖采用了直径为125m圆形的三向钢网架结构,就是通过一个1/20的模型试验来验证该体型网架的变形和内力分布,同时用以探求理论计算中不易发现的次应力等问题,通过试验数据与计算比较后得到了满意的结果。

1.2.3 静力试验和动力试验

1. 静力试验

静力试验是结构试验中最常见的基本试验,因为大部分工程结构在工作时所承受的是静力荷载。一般可以通过重力或各种类型的加载设备来实现并满足加载要求。静力试验的加载过程是从零开始逐步递增,一直到结构破坏为止,也就是在一个不太长的时间段内完成试验加载的全过程。我们称它为结构静力单