



21世纪全国本科院校土木建筑类 **创新型** 应用人才培养规划教材

土木工程试验

主 编 王吉民

提供电子课件

- 采用最新土木工程试验和检测技术的标准及规范
- 反映国内外土木工程试验和检测技术的最新进展



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

土木工程试验

主编 王吉民



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的基本内容和要求编写的专业技术基础课教材,以结构试验的基本理论和基础知识为重点,注重理论与土木工程技术相结合。全书内容包括绪论、结构试验设计、结构试验的荷载与加载设备、结构试验的量测技术、结构模型试验、工程结构静载试验、工程结构动载试验、工程结构抗震试验、工程结构物的非破损检测技术、结构试验数据处理。

本书可作为高等院校土木工程专业的教材,也可供从事工程结构试验的专业人员和相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程试验/王吉民主编. —北京:北京大学出版社,2013.2
(21世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材)
ISBN 978-7-301-22063-4

I. ①土… II. ①王… III. ①土木工程—试验—高等学校—教材 IV. ①TU-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第022469号

书 名: 土木工程试验

著作责任者: 王吉民 主编

策划编辑: 吴迪 卢东

责任编辑: 伍大维

标准书号: ISBN 978-7-301-22063-4/TU·0307

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电子信箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 17.75印张 415千字

2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

定 价: 34.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书是根据全国土木工程学科专业指导委员会颁布的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》，并结合国家相关专业技术规范编写的专业技术基础课教材。

土木工程试验是土木工程专业的一门具有较强实践性的专业技术基础课程，该课程的任务是通过理论和实验的教学环节，使学生获得结构试验技术的基础知识和基本技能，掌握结构试验的基本方法和试验组织的一般程序。根据本专业设计、施工和科学研究任务的需要，能够进行一般工程结构试验的设计和作，并得到初步的训练和实践，以适应土木工程生产和科研工作的需要。

本书在编写过程中紧密结合专业规范的要求，系统地介绍了土木工程结构试验的理论与技术。本书力求从整体上理顺构架，内容精炼、篇幅适当，主次分明、重点突出，在编写过程中注意吸收同类教材的长处，反映国内外土木工程试验和检测技术的最新进展，注重加强应用型人才实践动手能力的培养。本书共 10 章，内容包括绪论、结构试验设计、结构试验的荷载与加载设备、结构试验的量测技术、结构模型试验、工程结构静载试验、工程结构动载试验、工程结构抗震试验、工程结构物的非破损检测技术、结构试验数据处理。

本书由王吉民主编。本书承蒙程泽海教授的审阅并提出了许多宝贵的意见和建议。在编写本书的过程中引用和参考了一些公开出版的教材和文献，特此一并表示感谢。

由于编者的学识和水平有限，书中难免有不当和不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2012 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1	4.2 应变测量	68
1.1 工程结构试验的任务	1	4.3 位移与变形量测	77
1.2 工程结构试验的作用	2	4.4 力和应力的量测方法	86
1.3 结构试验的分类	4	4.5 裂缝与温度量测	89
1.4 结构试验技术的新发展	8	4.6 测振传感器	93
本章小结	9	4.7 数据采集系统	101
思考题	10	本章小结	104
思考题	10	思考题	104
第 2 章 结构试验设计	11	第 5 章 结构模型试验	106
2.1 结构试验的主要环节	12	5.1 结构模型试验概述	106
2.2 结构试验的试件设计	13	5.2 模型试验理论基础	108
2.3 试验荷载方案设计	21	5.3 结构模型设计	117
2.4 试验观测方案设计	26	5.4 模型材料与模型制作	123
2.5 材料的力学性能与结构试验的 关系概述	28	本章小结	127
2.6 试验大纲和试验报告	32	思考题	127
本章小结	33	第 6 章 工程结构静载试验	128
思考题	33	6.1 工程结构静载试验概述	128
第 3 章 结构试验的荷载与加载 设备	34	6.2 加载与量测方案的设计	130
3.1 荷载与加载设备概述	34	6.3 常见结构构件静载试验	137
3.2 重物加载法	35	6.4 量测数据整理	147
3.3 机械力加载法	37	本章小结	157
3.4 气压加载法	38	思考题	158
3.5 液压加载法	39	第 7 章 工程结构动载试验	159
3.6 惯性力加载法	48	7.1 工程结构动载试验概述	160
3.7 电磁加载法	51	7.2 数字信号分析处理基础	161
3.8 现场激振方法	54	7.3 工程结构动力特性试验	164
3.9 荷载支承装置和试验台座	55	7.4 工程结构动力反应试验	171
本章小结	63	7.5 工程结构疲劳试验	175
思考题	64	7.6 工程结构的风洞试验	179
第 4 章 结构试验的量测技术	65	本章小结	181
4.1 量测技术概述	65	思考题	181

第 8 章 工程结构抗震试验	183	9.4 钢结构的检测	250
8.1 结构抗震试验概述	184	本章小结	253
8.2 拟静力试验	185	思考题	253
8.3 拟动力试验	196	第 10 章 结构试验数据处理	254
8.4 模拟地震振动台试验	201	10.1 数据处理概述	254
8.5 天然地震试验	207	10.2 数据的整理和转换	255
本章小结	209	10.3 数据的统计分析	256
思考题	209	10.4 误差分析	259
第 9 章 工程结构物的非破损检测		10.5 数据的表达	265
技术	211	本章小结	274
9.1 非破损检测技术概述	212	思考题	274
9.2 混凝土结构的检测	213	参考文献	275
9.3 砌体结构的检测	235		

第 1 章 绪 论

教学目标

了解土木工程结构试验的任务，了解土木工程结构试验的作用和分类，了解土木工程结构试验的发展方向。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
结构试验的任务	(1) 了解结构试验可用以检验实际工程和发展结构的计算理论 (2) 了解结构试验所提供的实证是其他任何方法所不能取代的	试验对象 试验技术
结构试验的作用	(1) 了解结构试验是发展结构理论和计算方法的重要途径 (2) 了解结构试验是发现结构设计误区的主要手段 (3) 了解结构试验是验证结构理论的唯一方法 (4) 了解结构试验是工程结构质量鉴定的直接方式 (5) 了解结构试验是制定各类技术规范和技术标准的基础	结构理论 试验技术 质量鉴定 标准规范
结构试验的分类	了解分别按试验目的、对象、荷载性质、试验场地、持续时间、构件破坏与否的不同进行分类	

引言

土木工程结构试验是一项科学实践性很强的活动，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演变过程中，已成为一门真正的试验科学，是发展结构理论和完善工程设计方法的要求手段之一。通过本章的学习，读者可了解土木工程结构试验的任务、作用、分类和发展方向等有关结构试验的基本知识。

1.1 工程结构试验的任务

土木工程结构包括建筑结构、桥梁结构、地下结构、水工结构、隧道结构及各类特种结构等。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。

为了确保实现结构的功能,常采用以下三种途径。①理论分析:利用现有成熟的理论,计算分析结构在各种作用下的效应,使其满足规范、规程、标准的要求。②结构试验:对结构施加各种作用,通过测试技术评判结构是否满足要求。③计算机模拟:利用计算机程序模拟分析结构在各种作用下的效应,通过大量的参数分析,寻找其中的规律,从而解决结构功能问题。

上述三种解决结构功能的途径,彼此并不是独立的,而是互为指导和验证的关系。特别是随着土木工程结构的不断发展,结构越来越复杂,要确保这些结构功能的实现,这三种途径缺一不可。在结构分析中,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试验方法,即通过结构试验,采用试验应力分析方法来解决。特别是电子计算机技术的发展,它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技术,为实现荷载模拟、数据采集、数据处理,以及整个试验过程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。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。

土木工程结构试验的任务就是以土木工程结构物(实物或模型)为研究对象,以设备仪器为工具,以各种试验技术为手段,借助量测技术对结构物受作用后的性能进行观测,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。例如以下三个任务。

(1) 钢筋混凝土简支梁在竖向静力荷载作用下,通过检测梁在不同受力阶段的挠度、角变位、截面应变和裂缝宽度等参数,分析梁的整个受力过程以及结构的强度、挠度和抗裂性能。

(2) 结构承受动力荷载作用时,可以测量结构的自振频率、阻尼系数、振幅和动应变等参量,研究结构的动力特性和结构对动力荷载的反应。

(3) 在结构抗震研究中,结构在低周反复荷载作用下,通过试验获得应力-变形关系滞回曲线,为分析抗震结构的强度、刚度、延性、刚度退化、变形能力等提供数据资料。

可见,土木工程结构试验的任务是以试验方式测定相关数据,由此反映结构或构件的工作性能、承载能力以及相应的安全度,为结构的安全使用或设计理论的建立提供科学依据。

1.2 工程结构试验的作用

1) 结构试验是发展结构理论和计算方法的重要途径

17世纪初期,伽利略(1564—1642)首先研究了材料的强度问题,提出许多正确的理论。但他在1638年出版的著作中,也错误地认为受弯梁的断面应力分布是均匀受拉的。46年后,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,而是呈三角形分布的。其后,虎克和伯努利建立了平面假定。1713年法国人巴朗进一步提出中和层的理论,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,巴朗的理论只是一个假设,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,槽的方向与梁轴线垂直,槽内嵌入硬木垫块。试验证明,这种梁的承载能力丝毫不低于整体并未开槽的木梁。试验现象表明,只有梁的上缘受压力时,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,誉为“路标试验”。它总结了人们100多年来的探索成果,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。

1821年,法国科学院院士拿维叶从理论上推导了现代材料力学中受弯构件断面应力分布的计算公式。经过了20多年,才由法国科学院另一位院士阿莫列用试验的方法验证了这个公式。人类对这个问题曾进行了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到,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) 结构试验是发现结构设计误区的主要手段

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为广泛。建筑设计技术发展到了20世纪80年代,为了满足人们对建筑空间使用功能的需要,出现了异形截面柱框架,如“T”形、“L”形和“十”字形截面柱。起初,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区别,只是截面形状不同,并误认为柱的受力特性与柱的截面形式无关。但通过试验证明,柱的受力特性与柱截面的形状有很大关系,矩形截面柱的破坏特征属于拉压型破坏,异形截面柱的破坏特征属于剪切型破坏,异形截面柱和矩形截面柱在受力性能方面有本质上的区别。

3) 结构试验是验证结构理论的唯一方法

从最简单的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,都应通过试验加以证实。隔振结构、消能结构设计理论的发展也离不开结构试验研究成果的积累。

4) 结构试验是工程结构质量鉴定的直接方式

已建的结构工程,由单一的结构构件到结构整体,不论进行质量鉴定的目的如何,最直接的检验方式仍是结构试验。例如,灾害或事故后建筑工程的评估、鉴定等。

5) 结构试验是制定各类技术规范和技术标准的基础

为了使土木建筑技术能够健康的发展,需要制定一系列技术规范和技术标准。土木工程领域所使用的各类技术规范和技术标准都离不开结构试验成果。

我国现行的各种结构设计规范为了设计理论和设计方法的发展,不仅总结了大量已有科学试验的成果和经验,还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、砌体等实体或缩尺模型的试验以及实体建筑物的试验研究,为我国编制各种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,绝大多数都是以试验研究的直接结果为基础的,这进一步体现了工程结构试验学科在发展和改进设计理论、设计方法上的作用。

1.3 结构试验的分类

1.3.1 按试验目的进行分类

1. 科研性试验

科学研究性试验的目的是验证结构设计计算的各种假定，通过制定各种设计规范，发展新的设计理论，改进设计计算方法，为发展和推广新结构、新材料及新工艺提供理论依据与实践经验。

(1) 验证结构设计理论的假定。

在结构设计中，人们经常为了计算上的方便，对结构计算图式和本构关系做某些简化。构件静力和动力分析中的本构关系的模型化，则完全是通过试验加以确定的。

(2) 为制定或修订设计规范提供依据。

在我国现行的各种工程结构设计规范制定或修订过程中，除了总结已有大量科学试验的成果和经验以外，为了理论和设计方法的发展，有目的地开展了大量钢筋混凝土结构、砌体结构和钢结构的梁、柱、框架、节点、墙板、砌体等实物和缩尺模型的试验，以及实体结构物的试验研究，从而为编制或修订各类结构设计规范提供了基本资料与试验数据。事实上，我国现行规范中所采用的钢筋混凝土结构构件和砌体结构的计算理论，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结构设计理论和改进结构设计方法上的作用。

(3) 为发展和推广新结构新材料与新工艺提供实践经验。

随着建筑科学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设计，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，由认识到实践的多次反复，从而积累资料，使设计计算理论不断改进和完善。

2. 生产性试验

生产性试验经常具有直接的生产目的。它以实际建筑物或结构构件为试验鉴定对象，经过试验对具体结构构件做出正确的技术结论，常用于解决以下问题。

(1) 综合鉴定重要工程和建筑的设计与施工质量。

对于一些比较重要的结构与工程，除了在设计阶段进行大量必要的试验研究外，在实际结构建成后，还要求通过试验，综合鉴定其质量的可靠程度。

(2) 对已建结构进行可靠性检验，以推断和估计结构的剩余寿命。

已建结构随着建造年代和使用时间的增加，结构物逐渐出现不同程度的老化现象，有的已到了老龄期、退化期或更换期，有的则到了危险期。为了保证已建建筑物的安全使用，尽可能地延长它的使用寿命和防止建筑物的破坏、倒塌等重大事故的发生，国内外对

建筑物的使用寿命,尤其对使用寿命中的剩余期限,即剩余寿命特别关注。通过对已建建筑物的观察、检测和分析,按可靠性鉴定规程评定结构所属的安全等级,由此来判断其可靠性和评估其剩余寿命。

(3) 工程改建和加固,通过试验判断具体结构的实际承载能力。

既有建筑的扩建加层、加固或由于需要提高建筑抗震设防烈度而进行的加固等,对于在单凭理论计算得不到分析结论时,经常是通过试验确定这些结构的潜在能力,这在缺乏既有结构的设计计算与图样资料,而要求改变结构工作条件的情况下更有必要。

(4) 鉴定预制构件的产品质量。

构件厂或现场生产的钢筋混凝土预制构件,在构件出厂或在现场安装之前,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,通过一定数量的试件试验,以推断成批产品的质量。

(5) 处理受灾结构和工程质量事故,通过试验鉴定提供技术依据。

对遭受地震、火灾、爆炸等而受损的结构,或在建造和使用过程中发现有严重缺陷的危险建筑,如施工质量事故、结构过度变形和严重开裂等,有必要通过详细的试验研究,鉴定结构受损或存在缺陷的程度,为确定是否加固以及具体加固方案提供技术依据。

1.3.2 按试验对象进行分类

1. 原型试验

原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,如核电站安全壳加压整体性的试验、工业厂房结构的刚度试验、楼盖承载能力试验以及桥梁在移动荷载作用下的动力特性试验等,均在实际结构上加量测。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。在原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的对象就是一根梁、一块板或一榀屋架之类的实物构件,它可以在实验室内试验,也可以在现场进行。

由于工程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。为了保证测试精度,防止环境因素对试验的干扰,目前国外已将这类足尺结构从现场转移到结构实验室内进行试验,如日本已在实验室内完成了七层房屋足尺结构的抗震拟静力试验。近年来国内大型结构实验室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、测量精度受环境因素等影响,在经济上或技术上存在一定困难。因此,人们在结构设计的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,可以采用按原型结构缩小的模型进行试验。

模型是仿照原型(真实结构)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。模型的设计制作及试验是根据相似理论,用适当的比例和相似的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,最后按照相似理论由模型试验结果推算实际结构的工作。

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。目前在实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。这类模型仅是原型结构缩小几何比例尺寸的试验代表物,将这类模型的试验结果与理论计算对比较核,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,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。

1.3.3 按试验荷载性质进行分类

1. 静力试验

静力试验是结构试验中最常见的基本试验。因为大部分土木工程结构在使用过程中所承受的荷载是以静荷载为主,一般可以通过重物或各种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结构破坏为止,也就是在一个不长的时间段内完成试验加载的全过程。因此,这类试验也称为“结构静力单调加载试验”。

静力加载试验最大的优点是加载设备相对简单,荷载可以逐步施加,还可以停下来仔细观察结构变形和裂缝的发展,给人们以最明确和清晰的破坏概念。在实际工作中,即使是承受动力荷载的结构,在试验过程中为了了解静力荷载作用下的工作特性,在动力试验之前往往也先进行静力试验,如结构构件的疲劳试验就是这样。静力试验的缺点是不能反映应变速率对结构性能的影响,特别是在结构抗震试验中静力试验的结果与任意一次确定性的非线性地震反应的结果都相差很远。

近年来由于探索结构抗震性能的需要,结构抗震试验无疑成为一种重要的手段。结构抗震静力试验是以静力的方式模拟地震作用的试验,它是一种通过施加控制荷载或控制变形作用于结构的周期性的反复静力荷载而进行试验,为区别于一般静力单调加载试验,一般称之为“低周反复静力加载试验”,也称之为“拟静力试验”。目前,国内外结构抗震试验较多集中在这一方面。

拟动力试验也是一种结构抗震试验方法,是将地震实际反应所产生的惯性力作为荷载加在试验结构上,使结构所产生的非线性力学特征与结构在实际地震动力作用下所经历的真实过程完全一致。由于这种试验是用静力方式进行的而不是在振动过程中完成的,故称为“拟动力试验”。

2. 动力试验

动力试验是指通过动力加载设备直接对结构或构件施加动力荷载的试验。对于在实际工作中主要承受动力作用的结构或构件,为了了解结构在动力荷载作用下的工作性能,一般要进行结构动力试验。例如,研究厂房结构承受吊车及动力设备作用下的动力特性,吊车梁和桥墩的疲劳强度与疲劳寿命问题,多层厂房由于楼层上机器设备振动产生的影响,高层建筑和高耸构筑物(塔桅、烟囱等)在风荷载作用下的动力问题,结构抗爆炸、抗冲击问题等。特别是在结构抗震性能的研究中,除了用上述静力加载模拟以外,更为理想的是

直接施加动力荷载进行试验。目前抗震试验一般用电液伺服加载设备或地震模拟振动台等设备来进行。对于现场或野外的动力试验,可利用环境随机振动试验测定结构的动力特性及模态参数。另外,还可以利用人工爆炸产生人工地震的方法甚至直接利用天然地震对结构进行抗震试验。由于荷载特性的不同,动力试验的加载设备和测试手段也与静力试验有很大的差别,并且要比静力试验复杂得多。

1.3.4 按试验场地进行分类

1. 实验室试验

实验室试验由于具备良好的工作条件,可以应用精密和灵敏的仪器设备进行试验,试验结果具有较高的准确度。甚至可以人为地创造一种适宜的工作环境,以减少或消除各种不利因素对试验的影响,所以适宜于进行研究性试验。这种试验可以在原型结构上进行,也可以在模型结构上进行,并可以将结构一直试验到破坏。近年来大型结构实验室的建设,特别是应用电子计算机控制试验,为发展足尺结构的整体试验和实现结构试验的自动化提供了更为有利的工作条件。

2. 现场试验

现场结构试验是指在生产或施工现场进行的实际结构的试验,较多用于生产性试验,试验对象主要是正在生产使用的已建结构或将要投入使用的新结构。由于受客观条件的干扰和影响,高精度高灵敏度的仪表设备的应用经常会受到限制,因此试验精度和准确度较差。特别是由于现场试验中没有实验室所用的固定加载设备和试验装置,对试验加载会带来较大的困难。但是,目前应用非破损检测技术手段进行现场试验,仍然可以获得近乎实际工作状态下的数据资料。

1.3.5 按试验持续时间进行分类

1. 短期荷载试验

短期荷载试验是指结构试验时限于试验条件、试验时间或其他各种因素和基于及时解决问题的需要,经常对实际承受长期荷载作用的结构构件,在试验时将荷载从零开始到最后结构破坏或某个阶段进行卸载的时间总共只有几十分钟、几小时或者几天。对于承受动荷载的结构,即使是结构的疲劳试验,整个加载过程也仅在几天内完成,与实际工作年限有一定差别。对于遭受地震、爆炸等特殊荷载作用时,整个试验加载过程只有几秒甚至是微秒或毫秒级的时间。这种试验实际上是一种瞬态的冲击试验,属于动力试验的范畴。严格地讲,这种短期荷载试验不能代表长年累月进行的长期荷载试验。这种由于具体的客观因素或技术的限制所产生的影响,在试验结果的分析 and 应用时须加以考虑。

2. 长期荷载试验

长期荷载试验是指结构在长期荷载作用下研究结构变形随时间变化的规律的试验,如混凝土的徐变、预应力结构中钢筋的松弛、钢筋混凝土构件裂缝的开展与刚度退化等都需

要进行静力荷载作用下的长期试验。这种长期荷载试验也可称为“持久试验”，它将连续进行几个月或几年时间，通过试验以获得结构的变形随时间变化的规律。为了保证试验的精度，对试验环境要有严格控制，如保持恒温、恒湿、防止振动影响等。所以，长期荷载试验一般是在实验室内进行的。如果能在现场对实际工作中的结构构件进行系统而长期的观测，则这样积累和获得数据资料对于研究结构的实际工作性能、进一步完善和发展结构理论都具有极为重要的意义。

1.3.6 按试验构件破坏与否进行分类

1. 非破坏性试验

非破坏性试验有使用性能检验和承载力检验，检验的对象可以是实际的结构或构件，也可以是足尺的模型。通过使用性能检验以证实结构或构件在规定荷载作用下不会出现过大的变形和损伤，而承载力检验则用于证实结构或构件的设计承载力。

2. 破坏性试验

破坏性试验的目的是为了掌握结构或构件由弹性阶段进入塑性阶段甚至破坏阶段时结构性能和破坏形态等试验资料，常用于确定结构或模型的实际承载力。实际上，原型结构的破坏性试验无论在费用上还是在方法上均存在一些具体的问题，特别是在结构进入破坏阶段后试验是比较困难的。因此，破坏性试验的对象一般以模型结构或构件为对象，也可以是足尺的模型或不再使用的结构或构件。

1.4 结构试验技术的新发展

现代科学技术的不断发展，为结构试验技术水平的提高创造了条件。同样，高水平的结构试验技术又促进了结构工程学科的不断发展和创新。现代结构试验技术和相关理论及方法在以下几个方面得以迅速发展。

1.4.1 先进的大型和超大型试验装置

在现代制造技术的支持下，大型结构试验设备不断投入使用，使加载设备模拟结构实际受力条件的能力越来越强。例如，电液伺服压力试验机的最大加载能力达到 50000kN，可以完成实际结构尺寸的高强度混凝土柱或钢柱的破坏性试验。模拟地震振动台台阵由多个独立振动台组成，当振动台排成一列时，可用于模拟桥梁结构遭遇地震作用；若排列成一个方阵，可用于模拟建筑结构遭遇地震作用。复杂多向加载系统可以使结构同时受到轴向压力、两个方向的水平推力和不同方向的扭矩，而且这类系统可以在动力条件下对试验结构反复加载。特别是大型风洞、大型离心机、大型火灾模拟结构试验系统等装置相继投入运行，使研究人员和工程师能够通过结构试验更准确地掌握结构性能，改善结构防灾抗灾能力，发展结构设计理论。

1.4.2 现代测试技术

现代测试技术的发展以新型高性能传感器和数据采集技术为主要方向。传感器是信号检测的工具,理想的传感器具有精度高、灵敏度高、抗干扰能力强、测量范围大、体积小、性能可靠等特点;利用微电子技术,使传感器具有一定的信号处理能力,形成所谓的“智能传感器”;新型光纤传感器可以在上千米范围内以毫米级的精度确定混凝土结构裂缝的位置;大量程高精度位移传感器可以在 1000mm 测量范围内,达到 $\pm 0.001\%$ 的精度;基于无线通信的智能传感器网络已开始应用于大型工程结构的健康监测。此外,测试仪器的性能也得到极大的改进,特别是与计算机技术相结合后,数据采集技术发展更为迅速。高速数据采集器的采样频率达到 500Hz,可以清楚地记录结构经受爆炸或高速冲击时响应信号前沿的瞬态特征。利用计算机存储技术,长时间、大容量的数据采集已不存在困难。

1.4.3 计算机技术的应用

计算机已成为结构试验必不可少的一部分。安装在传感器中的微处理器、数字信号处理器、数据存储和输出、数字信号分析和处理、试验数据的转换和表达等,都与计算机密切相关。多功能、高精度的大型试验设备(以电液伺服系统为代表)的控制系统于 20 世纪末告别了传统的模拟控制技术,进而采用了计算机控制技术,使试验设备能够快速地完成复杂的试验任务。以大型有限元分析软件为标志的结构分析技术也极大地促进了结构试验的发展。在结构试验前,通过计算分析预测结构性能,制订试验方案。完成结构试验后,通过计算仿真处理,结构试验数据对结构性能做出完整的描述。在结构抗震、抗风、抗火等研究方向和工程领域,计算机仿真技术和结构试验的结合越来越紧密。

1.4.4 基于网络的远程协同结构试验

互联网的飞速发展,为我们展现了一个崭新的世界。当外科手术专家通过互联网进行远程外科手术时,基于网络的远程结构试验体系也正在形成。20 世纪末,美国国家科学基金会投入巨资建设“远程地震模拟网络”,希望通过远程网络将各个结构实验室联系起来,利用网络传输试验数据和试验控制信息,网络上各站点(结构实验室)在统一协调下进行联机结构试验,共享设备资源和信息资源,实现所谓“无墙实验室”的科学构想。我国也在积极开展这一领域的研究工作,并已开始进行网络联机结构抗震试验。基于网络的远程协同结构试验技术集结构工程、地震工程、计算机科学、信息技术和网络技术于一体,充分体现了现代科学技术相互渗透、交叉、融合的特点。

本章小结

本章系统介绍了土木工程结构的试验意义、作用和目的,介绍了土木工程结构试验的分类和结构试验技术的发展历程。学习本章后应了解本课程的内容,提高对本门课程重

要性的认识，了解土木工程结构试验在工程结构科学研究、计算理论的发展和技术创新等方面所起的重要作用。

思 考 题

1. 结构试验的作用是什么？
2. 土木工程结构试验分为哪几类？各类试验的目的是什么？
3. 简述你对土木工程结构测试技术发展的了解。

第2章 结构试验设计

教学目标

了解结构试验设计的主要环节；掌握结构试件的形状、尺寸、数目和构造的基本要求；掌握结构试验荷载的加载图式的选择和加载装置的设计；能够正确地确定观测项目，合理布置测点和选择量测仪器；掌握结构试验中试件、荷载和量测设计的内容及关系；了解材料力学性能与结构试验的关系、加载速度与应变速率的关系以及对材料本构关系的影响。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
结构试验的主要环节	(1) 掌握结构试验设计阶段、准备阶段、实施阶段和完成阶段的内容 (2) 理解各环节流程以及相互联系	
试件的形状、尺寸、数量及构造要求	(1) 掌握试件形状设计的要求 (2) 掌握试件尺寸设计的要求 (3) 掌握试件数量设计的要求 (4) 掌握构造措施设计的要求	边界条件 尺寸效应 正交设计法 量测方法
试件的荷载方案设计	(1) 理解试验加载图式的选择与设计 (2) 了解试验加载装置设计的要求 (3) 了解试验加载制度的内容	加载图式 就位形式
试验观测方案的设计	(1) 掌握观测项目确定的内容 (2) 掌握测点选择和布置的原则 (3) 掌握仪器选择与测读的方法	结构变形 测试布置
材料的力学性能与结构试验的关系	(1) 了解试件尺寸与形状对强度指标的影响 (2) 了解试验加载速度对强度指标的影响	尺寸效应 应变速率
试验大纲和试验报告	(1) 掌握试验大纲的具体内容 (2) 了解试验其他文件的内容	



引言

土木工程结构试验包括结构试验设计、结构试验准备、结构试验实施和结构试验结果分析等主要环