



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

土木工程结构试验

主 编 叶成杰

赠送电子课件

- 介绍了土木工程试验中采用的新理论、新技术、新材料、新体系、新工艺
- 将建筑工程和道路桥梁工程的结构试验及土木工程现场检测技术进行整合



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书以适应大土木学科的发展为前提,在编写过程中将建筑工程和道路桥梁工程的结构试验及土木工程现场检测技术进行整合,力求系统地介绍“土木工程结构试验”这门科学的理论与技术。本书内容主要包括土木工程结构试验概述、土木工程结构试验设计、结构试验的加载设备、土木工程结构试验的量测技术、土木工程结构静载试验、土木工程结构动载试验、土木工程结构模型试验、土木工程结构抗震试验、试验数据处理与分析、建筑工程现场检测与评定、道路工程现场检测与评定、桥梁现场荷载试验与评定、大型桥梁的健康监测等。

本书可作为土木工程专业研究生和本科生的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构试验/叶成杰主编. —北京:北京大学出版社, 2012. 5

(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 978-7-301-20631-7

I. ①土… II. ①叶… III. ①土木工程—工程结构—结构试验—高等学校—教材 IV. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 089693 号

书 名: 土木工程结构试验

著作责任者: 叶成杰 主编

策划编辑: 吴 迪

责任编辑: 伍大维

标准书号: ISBN 978-7-301-20631-7/TU·0235

出 版 者: 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> <http://www.pup6.cn>

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

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 三河市博文印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 485 千字

2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 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

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

“土木工程结构试验”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践教学环节，使学生了解结构试验技术的基础知识，掌握结构试验的基本方法和试验组织的一般程序，能够根据本专业设计、施工和科学研究任务的需要，进行一般建筑结构试验的设计和作，得到初步的训练和实践，以适应土木工程专业学习、工作和科学研究的需要。

土木工程结构试验是以试验为手段的科学，主要研究和发展工程结构的新材料、新体系、新工艺，检验和修正工程结构的计算分析和设计理论，并不断探索工程结构的新理论、新技术，对工程结构科学的发展起着非常重要的作用，具有很强的实践性。

本书以适应大土木工程的发展为前提，在编写过程中将建筑工程和道路桥梁工程的结构试验及土木工程现场检测技术进行整合，力求系统地介绍土木工程结构试验这门学科的理论与技术。

本书根据高等院校土木工程专业“建筑结构试验”课程教学大纲的要求编写，采取集中讨论的方法确定编写方向及内容，具体分工如下：第1章由海南奔达实业有限公司武贵中和黑龙江建筑职业技术学院于顺达编写；第2章、第3章、第4章、第7章由黑龙江科技学院叶成杰编写；第5章、第6章、第8章由黑龙江科技学院孟丽岩编写；第9章、第10章由哈尔滨理工大学毕洪涛编写；第11章、第12章、第13章由哈尔滨理工大学卢成江编写。本书由叶成杰担任主编并负责统稿。

本书在编写过程中参考了近年来出版的多本优秀教材，书中直接或间接引用了参考文献所列书目中的部分内容，在此对上述文献的作者表示感谢。

由于编者的水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2012年2月

目 录

第 1 章 土木工程结构试验概述	1
1.1 土木工程结构试验的任务	2
1.2 结构试验的作用	3
1.3 土木工程结构试验的分类	4
1.3.1 按试验目的不同分类	4
1.3.2 按试验对象的尺寸分类	6
1.3.3 按试验荷载性质分类	7
1.3.4 按试验时间长短分类	7
1.3.5 按试验所在场地分类	8
1.4 土木工程结构试验的发展	8
本章小结	9
思考题	9
第 2 章 土木工程结构试验设计	10
2.1 土木工程结构试验的一般过程	11
2.1.1 概述	11
2.1.2 土木工程结构试验准备	12
2.1.3 土木工程结构试验实施	13
2.1.4 土木工程结构试验数据处理与分析	14
2.2 土木工程结构试验的试件设计	14
2.2.1 试件的形状	14
2.2.2 试件尺寸	15
2.2.3 试件数目	16
2.2.4 结构试验对试件设计的构造要求	19
2.3 试验荷载方案设计	20
2.3.1 荷载设计的一般要求	20
2.3.2 单调加载静力试验	21
2.3.3 结构低周反复加载静力试验	23
2.3.4 结构动力特性测试试验	25
2.3.5 结构动力加载试验	26
2.3.6 结构疲劳试验	28
2.3.7 试验加载装置的设计	30
2.4 结构试验观测方案设计	31
2.4.1 观测项目的确定	31
2.4.2 测点的选择与布置	31
2.4.3 仪器的选择与测读的原则	32
2.4.4 仪器仪表准备计划	33
2.5 结构试验与材料力学性能的关系	33
2.5.1 概述	33
2.5.2 材料力学性能试验的基本要求	34
2.5.3 材料力学性能的试验对强度指标的影响	35
2.6 试验大纲及其他文件	36
本章小结	38
思考题	38
第 3 章 结构试验的加载设备	39
3.1 概述	39
3.2 重力加载法	40
3.2.1 重力加载的荷载作用方式	40
3.2.2 重力加载的特点和要求	41
3.3 机械力加载法	42
3.4 气压加载法	43
3.4.1 气压加载的作用方式	44
3.4.2 气压加载的特点和要求	44
3.5 液压加载法	45
3.5.1 液压加载器的工作原理	45
3.5.2 静力试验液压加载设备	47
3.5.3 大型结构试验机	48
3.5.4 电液伺服试验加载系统	49
3.5.5 电液伺服振动台	50
3.6 惯性力加载法	51
3.6.1 初位移法的作用方式	52

3.6.2	初速度加载法的作用方式	52	5.3.2	量测方案	106
3.6.3	离心力加载法的作用方式	53	5.4	一般结构构件的静载试验	108
3.6.4	直线位移惯性力加载	54	5.4.1	受弯构件的静载试验	108
3.6.5	惯性力加载的要求	55	5.4.2	压杆和柱的静载试验	111
3.7	电磁加载法	55	5.4.3	桁架的静载试验	112
3.8	人激振动加载法	56	5.5	试验资料的整理与分析	113
3.9	环境随机振动激振法	56	5.5.1	试验原始资料的整理	113
3.10	荷载支承设备和试验台座	57	5.5.2	试验结果的表达	114
3.10.1	支座	57	5.5.3	应变测量结果计算	116
3.10.2	荷载支承设备	59	5.5.4	挠度测量结果计算	120
3.10.3	结构试验台座	61	5.5.5	结构性能评定	121
	本章小结	65		本章小结	126
	思考题	65		思考题	126
第4章	土木工程结构试验的量测技术	66	第6章	土木工程结构动载试验	127
4.1	概述	66	6.1	土木工程结构动载试验概述	128
4.2	测量仪表的基本特性	67	6.2	工程结构动力特性的试验测定	129
4.2.1	测量仪表的组成	68	6.2.1	人工激振法	129
4.2.2	测量仪表的技术指标	68	6.2.2	环境随机振动法	133
4.3	传感器	71	6.3	工程结构的动力反应试验测定	136
4.3.1	基本原理	71	6.4	工程结构疲劳试验	139
4.3.2	应变计	72	6.4.1	概述	139
4.3.3	位移传感器	82	6.4.2	疲劳试验项目	139
4.3.4	测力传感器	87	6.4.3	疲劳试验荷载	140
4.3.5	裂缝量测仪器	89	6.4.4	疲劳试验的步骤	140
4.3.6	测振传感器	89	6.4.5	疲劳试验的观测	141
4.4	试验记录仪与数据采集系统	95	6.4.6	疲劳试验试件的安装	142
4.4.1	概况	95	6.5	试验资料的整理与分析	143
4.4.2	X-Y记录仪	95	6.5.1	合成波形的谱量分析	143
4.4.3	光线示波器	96	6.5.2	工程结构自振特性的 数据处理方法	145
4.4.4	磁带记录仪	96	6.5.3	相关分析与频谱分析	150
4.4.5	数据采集系统	97		本章小结	154
	本章小结	99		思考题	155
	思考题	100	第7章	土木工程结构模型试验	156
第5章	土木工程结构静载试验	101	7.1	概述	157
5.1	土木工程结构静载试验概述	102	7.2	模型设计相似原理	158
5.2	试验前的准备	102	7.3	相似条件的确定方法	161
5.3	静载试验加载和量测方案的 确定	104	7.3.1	方程式分析法	161
5.3.1	加载方案	104	7.3.2	量纲分析法	163

7.4 模型材料与选用	167	10.2 混凝土结构检测	216
本章小结	169	10.2.1 混凝土和钢筋材料强度的 检测方法	216
思考题	170	10.2.2 混凝土强度的检测	217
第8章 土木工程结构抗震试验	171	10.2.3 混凝土构件外观质量与 内部缺陷	224
8.1 土木工程结构抗震试验概述	172	10.2.4 尺寸与偏差	229
8.2 结构伪静力试验方法	173	10.2.5 结构变形	230
8.2.1 伪静力试验的基本概念	173	10.2.6 混凝土结构内部 钢筋检测	230
8.2.2 伪静力试验的加载装置	174	10.3 砌体结构检测	231
8.2.3 伪静力试验的加载方法	179	10.3.1 砌体结构检测的 主要内容	231
8.2.4 伪静力试验的测试项目	179	10.3.2 砌筑块材的检测	233
8.2.5 伪静力试验的数据 整理要点	181	10.3.3 砌筑砂浆	234
8.3 结构拟动力试验方法	183	10.3.4 砌体强度	238
8.4 结构模拟地震振动台试验	185	10.3.5 变形与损伤	242
8.4.1 模拟地震振动台在抗震 研究中的作用	186	10.4 钢结构检测	243
8.4.2 模拟地震振动台的组成	186	10.4.1 钢材外观质量检测	243
8.4.3 模拟地震振动台的加载 过程及试验方法	187	10.4.2 构件的尺寸偏差检测	243
8.5 人工地震模拟试验	189	10.4.3 钢材的力学性能的 检测	244
8.6 天然地震试验	191	10.4.4 超声探伤	245
本章小结	194	10.4.5 磁粉与射线探伤	245
思考题	195	本章小结	246
第9章 试验数据处理与分析	196	思考题	246
9.1 概述	196	第11章 道路工程现场检测与 评定	247
9.2 间接测定值的推算	197	11.1 路基路面几何尺寸及路面 厚度检测	248
9.3 试验误差分析	197	11.1.1 路基路面几何尺寸 检测	248
9.3.1 误差的概念	197	11.1.2 路面结构层厚度 检测	250
9.3.2 误差理论基础	198	11.2 路基路面压实度检测	252
9.3.3 量测值的取舍	203	11.3 路面平整度检测	258
9.3.4 间接测定值的误差分析	206	11.4 路面抗滑性能检测	260
9.4 试验结果的表达	207	11.4.1 构造深度试验方法	261
9.4.1 列表表示法	207	11.4.2 路面抗滑值检测 方法	264
9.4.2 图形表示法	208	11.4.3 路面横向力系数检测 方法	266
9.4.3 经验公式表示法	209		
本章小结	211		
思考题	212		
第10章 建筑工程现场检测与评定	213		
10.1 概述	213		

11.4.4	沥青路面渗水系数检测方法	267
11.5	路基路面承载力的现场测试	268
11.5.1	路基路面承载力检测	268
11.5.2	路基路面模量测试	274
	本章小结	280
	思考题	280
第 12 章	桥梁现场荷载试验与评定	281
12.1	桥梁结构的静载试验	282
12.1.1	试验方案	282
12.1.2	试验准备	289
12.1.3	加载试验	291
12.1.4	数据处理	293
12.1.5	试验结果与理论分析的比较	294
12.1.6	承载能力评定	295
12.2	桥梁结构的动载试验	296
12.2.1	试验方案	296
12.2.2	试验准备	297
12.2.3	加载试验	298
12.2.4	数据处理	299
12.2.5	结构性能的评定	301
	本章小结	302
	思考题	302

第 13 章	大型桥梁的健康监测	303
13.1	桥梁健康监测概论	303
13.2	健康监测技术	306
13.2.1	GPS 监测系统	306
13.2.2	实验模态分析法	308
13.2.3	结构损伤检测定位技术	308
13.3	桥梁健康监测系统的设计	310
13.3.1	监测系统设计准则和测点布置	310
13.3.2	监测项目	311
13.4	润扬长江大桥(斜拉桥)健康监测实例	312
13.4.1	斜拉桥监测测点布置	313
13.4.2	悬索桥监测测点布置	314
13.4.3	系统构成及功能	315
13.4.4	主要监测内容	316
13.4.5	监测手段和监测仪器的选择	316
13.4.6	桥梁结构状态识别与安全性评估	318
	本章小结	319
	思考题	319
	参考文献	320

第1章

土木工程结构试验概述

教学目标

- 了解建筑结构试验的任务。
- 掌握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) 了解土木工程结构试验对工业生产的作用 (2) 了解土木工程结构试验对设计理论发展的作用	试验对象 仪器设备 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问题的主要手段 (3) 了解结构试验是验证结构理论的唯一方法 (4) 了解结构试验是鉴定土木工程结构质量的直接方式 (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 计算方法 质量鉴定
结构试验分类	(1) 了解根据试验目的的分类 (2) 了解根据试验对象的分类 (3) 了解根据荷载性质和作用时间不同的分类 (4) 了解根据试验场地不同的分类	

引言

土木工程结构试验是土木工程专业的技术基础课。在结构工程学科的发展演变过程中,结构试验已成为一门科学——真正的试验科学。结构试验是发展结构理论和完善工程设计方法的主要手段之一。土木工程结构试验究竟是一个什么样的工作?通过试验过程能够解决什么样的实际问题?结构试验在工业生产和科学研究中起到什么样的作用?通过本章的学习,读者可了解到结构试验的任务、结构试验的作用、结构试验的分类等有关结构试验的基本知识。

土木工程结构是用不同类型的承重构件(梁、板、柱等)相互连接而形成的结构体系,在一定的经济条件制约下,要求结构在规定的使用期内能够安全有效地承受外部及内部形成的各种作用,以满足结构使用功能的要求。设计者必须综合考虑结构在其整个生命周期中如何适应可能产生的各种风险,以达到使用功能要求。如在建阶段结构可能出现的各种施工荷载;正常使用阶段结构可能遭遇的各种外界作用,特别是自然和人为灾害的作用;

结构老化阶段可能经历的各种损伤的积累和正常抗力的丧失；等等。为了对工程结构进行合理的设计，工程技术人员必须掌握工程结构在上述各种作用下的实际应力分布和工作状态，了解结构构件的强度、刚度、稳定性、抗裂性能以及实际具有的安全储备。

在结构分析工作中，可以利用传统或现代的设计理论或有限元数值计算方法，也可以采用试验应力分析方法来解决。运用数值方法计算时，必须在建立正确数学模型的前提下，才能得出精确的结果。在土木工程中，对于非匀质材料和某些特种结构的计算，用数值方法求解时，必须用试验方法加以验证或提供必要的参数。从分析方法的深远意义来看，试验方法更是理论分析必不可少的实践验证。

结构试验是发展结构理论和完善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结构试验、结构理论与结构计算三级学科结构中，结构试验已成为一门科学——真正的试验科学。电子计算机技术的发展提高了人类进行结构试验的能力，不仅为使用数学模型方法进行计算分析创造了条件，也为利用计算机控制结构试验，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，使结构试验技术发生了根本性的飞跃。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；计算机联机的拟动力电液伺服加载系统可以在静力状态下量测结构的动力反应；计算机控制的各种数据采集和自动处理系统可以准确、及时、完整地收集并再现荷载与结构行为的各种信息。

工程结构试验还是研究和发​​展工程结构新材料、新体系、新工艺以及探索工程结构计算分析、设计理论的重要手段，在工程结构科学研究和技术创新等方面起着重要作用。

1.1 土木工程结构试验的任务

“土木工程结构试验”是土木工程专业的技术基础课。土木工程结构试验的任务是在工程结构的试验对象(局部或整体、实物或模型)上应用科学的试验组织程序，使用仪器设备和工具，利用各种实验技术，在荷载(重力、机械扰动力、地震力、风力等)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、频率等)，从强度(稳定)、刚度和抗裂性以及结构实际破坏形态等方面判明工程结构的实际工作性能，估计工程结构的承载能力，确定工程结构对使用要求的符合程度，并用以检验和发展工程结构的计算理论。例如：

(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，通过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响应。

(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。

因此，由结构试验的任务可知，土木工程结构试验是以试验方式测定有关数据，由此反映结构或构件的工作性能、承载力和相应的安全度，为结构的安全使用和实际理论的建立提供重要的根据。

1.2 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年)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,也曾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,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亚于整体并未开槽的木梁。试验表明,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,誉之为“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。过了20多年,才由法国科学院另一位院士阿莫列思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,在选择正确的研究方法上,试验技术都起了重要作用。

2. 土木工程结构试验是发现结构设计问题的主要手段

人们对框架矩形截面柱和圆形截面柱的受力特性认识较早,两者在工程设计中应用最广。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,只是截面形状不同而已,并误认为柱子的受力特性与柱的截面形状无关。但后来通过试验证明,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. 土木工程结构试验是验证结构理论的唯一方法

最简单的受弯杆件截面应力分布的平截面假定理论,以及弹性力学平面应力问题中从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土木工程结构试验。

4. 土木工程结构试验是鉴定土木工程结构质量的直接方式

对于已建的结构工程,不论是单一的结构构件还是整体结构,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，如灾害或事故后建筑工程的评估、鉴定等。

5. 土木工程结构试验是制定各类技术规范和技术标准的基础

我国现行的各种结构设计规范及技术标准是总结了大量已有科学实验的成果和经验的行业准则。为了设计理论和设计方法的发展，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。例如，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。土木工程试验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，这充分体现了土木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。为了使土木工程技术能够健康地发展，需要制定相应的技术规范和技术标准，而各类技术规范和技术标准的制定都离不开结构试验成果。

1.3 土木工程结构试验的分类

土木工程结构试验的分类方法很多，除了按试验目的不同进行分类外，还经常按试验对象、荷载性质、试验场地、试验时间的不同进行分类。

1.3.1 按试验目的不同分类

在实际工作中，根据试验目的的不同，结构试验分为生产鉴定性试验(简称鉴定性试验)和科学研究性试验(简称科研性试验)两大类。

1. 生产鉴定性试验(鉴定性试验)

鉴定性试验通常具有直接的生产目的，以实际建筑物或结构构件为试验对象，通过试验对具体结构做出正确的技术结论。此类试验经常解决以下问题。

1) 鉴定结构设计和施工质量的可靠程度

比较重要的结构与工程，除在设计阶段进行必要而大量的试验研究外，在实际结构建成以后，还应通过试验，综合性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以及秦山核电站安全壳结构整体加压试验均属此例。

2) 鉴定预制构件产品质量

构件厂或现场成批生产的钢筋混凝土预制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，依据预制构件质量检验评定标准和试验规程的要求，进行试件的抽样检验，以推断一批产品的质量。

3) 为改建、扩建或加固工程判断结构的实际承载能力

对旧有建筑进行改建、扩建或进行加固，单凭理论计算难以得到确切结论时，常需要通过试验确定结构的实际承载能力。旧结构缺少设计计算书和图纸资料时，在需要改变结构实际工作条件的情况下进行结构试验以提供必要的基础数据。

4) 为处理受灾结构和工程事故提供技术依据

对遭受地震、火灾、爆炸等灾害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性建筑，必须进行详细的检验。唐山地震后，北京农业展览馆主体结构由于加固的

需要,曾进行环境随机振动试验,利用传递函数谱进行结构模态分析,通过振动分析最终获得该结构的模态参数。

5) 检验结构的可靠性,估算结构的剩余寿命

已建结构随使用时间的增长,结构物会出现不同程度的老化现象,甚至进入老龄期、退化期或更换期,有的则进入危险期。为保证已建建筑的安全使用,延长其使用寿命,防止发生破坏、倒塌等重大事故,国内外对建筑物的使用寿命,特别是对剩余使用期限特别关注。通过对已建建筑的观察、检测和分析,依据可靠性鉴定规程评定结构的安全等级,可推断结构的可靠性并估算其剩余寿命。可靠性鉴定大多采用非破损检测的试验方法。

鉴定性试验是在比较成熟的设计理论基础上的,离开理论的指导,鉴定性试验就会成为盲目的试验。

鉴定性试验本身有着重要的科学价值,大量的鉴定性试验为结构设计理论积累了宝贵的资料。例如,上海等地曾对机械加工车间及计量室类型的房屋进行实测,收集了有关楼盖的固有频率、机床振动及其相互的影响、楼盖振动对精密加工的影响以及振动的传播与衰减等数据,为设计理论更新提供了重要依据。

2. 科学研究性试验(科研性实验)

科研性试验的任务是验证结构设计理论和各种科学判断、推理、假设以及概念的正确性,为发展新的设计理论,发展和推广新结构、新材料及新工艺提供实践经验和设计依据。

1) 验证结构计算理论的各种假定

在结构设计中,为了计算方便,经常对结构计算图式或结构关系作某些简化的假定,这些假定是否成立,可通过试验加以验证。在构件静力和动力分析中,结构关系的模型化完全是通过试验加以确定的。

2) 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的发展,新结构、新材料和新工艺不断涌现。如轻质、高强、高效能材料的应用,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及施工工艺的发展,都离不开科学试验。一种新材料的应用、一种新型结构的设计或新工艺的实施,往往需要多次的工程实践与科学试验,即从实践到认识,再从认识到实践的多次反复,从而积累经验,使设计计算理论不断改进和完善。

3) 为制定设计规范提供依据

为了制定我国自己的设计标准、施工验收标准、试验方法标准和结构可靠性鉴定标准等,对钢筋混凝土结构、钢结构、砌体结构以及木结构等,从基本构件的力学性能到结构体系的分析优化,都进行了系统的科研性试验,提出了符合我国国情的设计理论、计算公式、试验方法标准和可靠性鉴定分级标准,进一步完善规范体系。实际上,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分析结果为基础建立起来的。

进行科研性试验必须事先周密考虑,按照计划进行,试验对象常常是专为试验而设计制造的。在试验设计和进行的时候,应突出研究的主要问题,忽略对结构有较小影响的次

要因素，使试验工作合理，观测数据易于分析总结。

1.3.2 按试验对象的尺寸分类

1. 原型试验

原型试验的试验对象是实际结构或按实际结构足尺复制的结构或构件。

原型试验中的一类试验是原物试验。原物试验一般用于生产性试验，例如秦山核电站安全壳加压整体性能的试验就是一种非破坏性的现场原物试验。对于工业厂房结构的刚度试验、楼盖承载能力试验等均应在实际结构上加载量测。另外，在高层建筑上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。

原型试验中的另一类是足尺结构或构件的试验，试验对象是一根梁、一块板或一榀屋架之类的足尺构件，可以在试验室内试验，也可以在现场进行试验。

为满足结构抗震研究的需要，国内外已经开始重视对结构整体性能的试验研究，通过对足尺结构进行试验，可以对结构构造、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况等进行全面观测了解。从20世纪70年代起，我国各地先后进行了装配式整体框架结构、钢筋混凝土大板结构、新型砌体结构、中型砌块结构、框架轻板结构等不同开间、不同层高的足尺结构试验，共10多例。其中1979年夏季，在上海完成的五层硅酸盐砌块房屋的抗震破坏试验中，利用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获得结构物在静力低周反复荷载作用下的特性曲线。在甘肃进行的足尺砌体结构现场爆破震动试验也取得了良好的试验成果。

2. 模型试验

结构的原型试验具有投资大、周期长的特点，当进行原型结构试验在物质上或技术上存在某些困难，或在结构设计阶段进行初步探索以及在对设计理论、计算方法进行探讨研究时，都可以采用比原型结构缩小的模型进行试验。

1) 相似模型试验

模型是仿照原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，但尺寸却比原型小的缩尺结构。

模型的设计制作与试验根据的是相似理论。模型是用适当的比例尺和相似材料制成的与原型几何相似的试验对象，在模型上施加相似力系能使模型重现原型结构的实际工作状态。根据相似理论即可由模型试验结果推算实际结构的工作情况。对模型要求严格的模拟条件，即要求几何相似、力学相似和材料相似等。

2) 缩尺模型试验

缩尺模型试验即小构件试验，是结构试验常用的研究形式之一。它有别于模型试验，采用小构件进行试验时，不需依靠相似理论，无须考虑相似比例对试验结果的影响，即试验不要求满足严格的相似条件，而是用试验结果与理论计算进行对比校核的方法研究结构的性能，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。

1.3.3 按试验荷载性质分类

1. 静力试验

大部分工程结构在工作时所承受的是静力荷载，因此，静力试验是结构试验中使用次数最多、最常见的基本试验。试验过程中通过重力或各种类型的加载设备即可实现或满足加载要求。根据加载制度的不同，静力试验分为结构静力单调加载试验和结构低周反复静力加载试验两种。

结构静力单调加载试验的加载过程是荷载从零开始逐步增加，一直加到试验某一预定目标或结构破坏为止，是在不长的时间段内完成试验加载的全过程，因此称其为“结构静力单调加载试验”。

为了探索结构的抗震性能，常采用结构抗震静力试验的方式模拟地震作用。抗震静力试验采用控制荷载或控制变形的周期性反复静力荷载，区别于一般单调加载试验，故称之为“低周反复静力加载试验”，也叫伪静力试验，是国内外结构抗震试验中采用较多的一种形式。

静力试验最大的优点是加载设备相对简单，荷载可以逐步施加，并可以停下来仔细观察结构变形和裂缝的发展，给人以最明确、最清晰的破坏概念。对于承受动力荷载的结构，为了了解其在静力荷载下的工作特性，往往在动力试验前先进行静力试验。静力试验的缺点是不能反映应变速率对结构的影响，特别是在结构抗震试验中与任意一次确定性的非线性地震反应相差很远。目前抗震静力试验中虽然发展了一种计算机与加载器联机试验系统可以弥补静力单调加载试验的不足，但设备耗资巨大，而且加载周期还是远大于实际结构基本周期，因此静力单调加载试验仍具有广泛的实用意义。

2. 动力试验

结构动力试验是研究结构或构件在动力荷载作用下的动力特性和动力反应的试验。如研究厂房在吊车或动力设备作用下的动力特性；吊车梁的疲劳强度与疲劳寿命问题；在多层厂房内，使用机器设备时产生的振动影响；高层建筑和高耸构筑物在风载作用下的动力问题；结构抗爆炸、抗冲击问题；等等。

在结构抗震性能的研究中，除可以采用上述静力加载模拟外，最为理想的是直接施加动力荷载进行试验。目前，抗震动力试验在试验室常采用电液伺服加载设备或地震模拟振动台等设备进行；对于现场或野外的动力试验，常利用环境随机振动试验测定结构动力特性模态参数。此外，还可以利用人工爆炸产生人工地震或直接利用天然地震对结构进行试验。

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，并且比静力试验更为复杂。

1.3.4 按试验时间长短分类

1. 短期荷载试验

承受静力荷载的结构构件，其工作荷载是长期作用的。在结构试验时，限于试验条

件、时间和试验方法，不得不采用短期荷载试验，即荷载从零开始施加到某个阶段进行卸荷或直至结构破坏，整个试验时间只有几十分钟、几小时或几天。

结构动力试验，如结构疲劳试验，整个加载过程仅在几天内完成，与实际工作条件有很大差别。至于爆炸、地震等特殊荷载作用时，整个试验加载过程只有几秒甚至是数微秒或数毫秒，试验实际上是瞬态的冲击过程，严格地讲，这种短期荷载试验不能代替长期荷载试验。由于具体客观因素或技术限制所产生的种种影响，在分析试验结果时必须加以考虑并进行修正。

2. 长期荷载试验

结构在长期荷载作用下的性能，如混凝土结构的徐变、预应力结构中钢筋的松弛等，都必须进行静力荷载的长期试验。长期荷载试验也称为“持久试验”，它将连续几个月或几年时间，通过试验最终获得结构变形随时间变化的规律。为了保证试验的精度，应对试验环境进行严格控制，如保持恒温、恒湿、防止振动等。长期荷载试验一般需在实验室内进行。对实际应用中的结构物进行长期、系统的观测，所积累和获得的数据资料对于研究结构的实际工作性能，进一步完善结构理论具有极为重要的意义。

1.3.5 按试验所在场地分类

结构和构件的试验可以在有专门设备的实验室内进行，也可以在现场进行。

1. 实验室结构试验

对于实验室试验，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，具有较高的准确度，甚至可以人为地创造一个适宜的工作环境，减少或消除各种不利因素对试验的影响，突出主要的研究方向，消除对试验结构影响的次要因素，所以适合于进行研究性试验。实验室试验的对象可以是真型结构或模型结构，试验可以进行到结构破坏。近年来，大型结构实验室的建设和计算机技术的发展，为足尺结构的整体试验以及结构试验的自动化提供了极为有利的条件。

2. 现场结构试验

现场结构试验是指在生产或施工现场进行的实际结构试验，常用于生产性试验，试验对象是正在使用的已建结构或将要投入使用的新结构。与室内试验相比，现场试验由于受到客观环境条件的影响，不宜使用高精度的仪器设备进行观测，且试验的方法也比较简单，试验精度较差。目前，由于采用非破损检测技术进行结构现场试验，因而提高了试验精度，可以获得近乎实际工作状态下的数据资料。

1.4 土木工程结构试验的发展

纵观世界土木工程建设的历史，大体上经历了3个发展阶段。第一阶段为大规模新建；第二阶段为新建与维修、改造并重；第三阶段除部分新建外，重点转向对既有建筑物的维修改造，并使其现代化。20世纪70至80年代，世界各国都开始重视这一规律。我国

目前已处于这一转变之中，并且在已有建筑物鉴定、建筑物的特殊维修改造技术等方面获得了很大成功，使结构试验又有了新的发展。

1949年新中国成立后，结构试验与其他科学一样，也获得了飞速的发展。1957年，完成了武汉长江大桥的鉴定性试验任务。1973年，上海体育馆和南京五台山体育馆进行了网架模型试验。此后，北京、昆明、南宁、兰州等地先后进行了十余次规模较大的足尺结构抗震试验。1977年，我国制订了“建筑结构测试技术的研究”的八年规划，为使测试技术达到世界先进水平奠定了良好的基础。

目前，我国已经建立了一批不同规模的结构实验室并拥有一支实力雄厚的专业技术队伍，积累了丰富的试验技术经验。全国各建筑科学研究机构、高等院校都已展开对基本构件和结构体系的力学性能研究；地震力、振动荷载对结构影响的研究；已建结构的检测技术和可靠性评定的研究；加载设备、电液伺服自动控制加载系统的研究；新的特种结构和新的测试技术的研究，并已取得一定的成果。

近年来，大型结构试验机、模拟地震台、大型起振机、高精度传感器、电液伺服控制加载系统、信号自动采集系统等各种仪器设备和测试技术的发展，大型试验台座的建立，都标志着我国结构试验已经达到了一个新的水平。

智能仪器的出现、计算机和终端设备的广泛使用以及各种试验设备自动化水平的提高，为结构试验开辟了新的广阔前景。结构试验正朝着大型化、体系化、精密性(包括试件设计、加载、测试)、计算机联机试验的趋势发展。

土木工程结构试验必然会对建筑科学的发展产生巨大的促进和推动作用。

本章小结

本章系统地介绍了土木工程结构试验的意义、作用和目的，介绍了土木工程结构试验的分类和结构试验的发展历程，学习本章后应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. 土木工程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. 生产鉴定性试验通常解决哪些问题？
4. 科学研究性试验通常解决哪些问题？
5. 简述你对建筑结构测试技术发展的了解。

第2章

土木工程结构试验设计

教学目标

掌握结构试件的形状、尺寸与数量的基本要求。

掌握结构试验荷载的加载图示和试验荷载的取值。

能够正确地确定量测项目，合理地选择量测仪器，并能提出试验的安全措施。

理解结构试验设计中试件设计、荷载设计和量测设计3个主要部分的内容以及相互关系。

掌握实验室与现场试验常用的加载方法，能在结构试验设计中选择和设计加载方案。

了解材料的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
结构试验的一般程序	(1) 掌握结构试验的程序 (2) 了解各工序的相互联系与逻辑关系	
试件的形状、尺寸与数量	(1) 掌握试件形状设计的要求 (2) 掌握试件尺寸设计的具体要求 (3) 掌握试件数量设计的方法	边界条件 反弯点 尺寸效应 试件数量确定方法
试验的荷载方案设计	(1) 掌握荷载方案设计的内容 (2) 了解加载装置设计的要求	静力荷载 低周反复加载 动力荷载
试验观测方案设计	(1) 掌握观测项目的确定内容 (2) 掌握测点选择与布置的原则 (3) 掌握仪器的选择与测读的原则 (4) 了解试验仪器仪表准备计划的内容	整体变形 局部变形
结构试验与材料力学性能的关系	了解结构试验与材料力学性能的关系	应变速率
试验大纲及其他文件	(1) 掌握试验大纲的具体内容 (2) 了解试验其他文件的内容	