

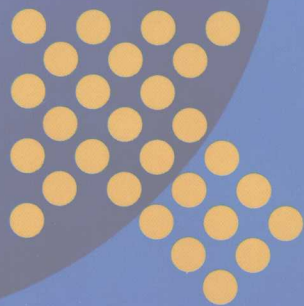
21世纪高等学校规划教材



TUMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN

# 土木工程结构试验

曹国辉 主 编  
祝明桥 胡习兵 副主编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

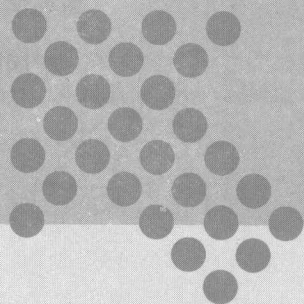
21世纪高等学校规划教材



TUMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN

# 土木工程结构试验

主 编 曹国辉  
副主编 祝明桥 胡习兵  
编 写 李知兵 郑日亮 贺 冉 祝 新  
主 审 李振宝



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。全书共分为 9 章，主要内容包括绪论、结构试验基本原理、结构试验加载方法与设备、结构试验测量技术、结构试验模型设计、结构荷载试验、建筑结构的现场检测技术、桥梁现场荷载试验、结构试验数据处理。本书在阐述传统试验方法及手段的基础上，介绍了国内外最新发展的试验理论及方法，注意理论与实践相结合，在阐明结构试验基本原理的基础上，重点介绍试验方法与技能，内容精练，重点突出，适用性强。

本书可作为高等院校土木工程及相关专业教材，也可作为从事结构试验的工程技术人員参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程结构试验 / 曹国辉主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-8485-6

I. 土… II. 曹… 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 (2009) 第 021208 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2009 年 4 月第一版 2009 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 316 千字

定价 21.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

本书为21世纪高等学校规划教材,是根据高等院校土木工程专业的教学要求,按照“土木工程结构实验”教学大纲的要求编写而成的,可作为高等院校土木工程专业的教材,也可供从事结构试验的工程技术人员参考。

本书主要内容包括绪论、结构试验基本原理、结构试验加载方法与设备、结构试验测量技术、结构试验模型设计、结构荷载试验、建筑结构的现场检测技术、桥梁现场荷载试验、结构试验数据处理。

本书在阐述传统试验方法及手段的基础上,介绍了国内外最新发展的试验理论及方法,注意理论与实践相结合;在阐明结构试验基本原理的基础上,重点介绍试验方法与技能,教材内容安排由浅入深,易于接受掌握。

本书编写分工如下:湖南科技大学祝明桥编写第1、2章,湖南城市学院曹国辉编写第3、4章、第8章第8.1、8.2节,湖南工学院李知兵编写第5章,中南林业科技大学胡习兵编写第6、7章,惠州市天堃道路桥梁工程检测有限公司郑日亮编写第8章第8.3节,湖南城市学院贺冉编写第9章第9.1~9.3节,祝新编写第9章第9.4节。

本书由曹国辉主编,祝明桥、胡习兵副主编,由北京工业大学李振宝审阅了全书,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

编者的水平有限,书中错误和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2009年1月



# 目 录

前 言	
第 1 章 绪论	1
1.1 结构试验的任务	2
1.2 结构试验的分类	3
1.3 结构试验的发展	6
1.4 结构试验课程的特点	8
本章小结	8
复习思考题	9
第 2 章 结构试验基本原理	10
2.1 结构试验的一般程序	10
2.2 结构试验设计的基本原则	12
2.3 测试技术基本原理	15
2.4 试验大纲及其他文件	16
本章小结	18
复习思考题	19
第 3 章 结构试验加载方法与设备	20
3.1 概述	20
3.2 静力加载方法	21
3.3 动力加载方法	28
3.4 荷载支承装置和试验台座	33
本章小结	40
复习思考题	41
第 4 章 结构试验测量技术	42
4.1 概述	42
4.2 测量仪表的技术指标	43
4.3 应变测量	45
4.4 位移与变形测量	55
4.5 力的测量	60
4.6 裂缝与温度测量	62
4.7 测振传感器	64
4.8 放大器与记录仪	67
4.9 数据采集系统	69
本章小结	72
复习思考题	72

<b>第 5 章 结构试验模型设计</b> .....	73
5.1 概述 .....	73
5.2 模型设计的理论基础 .....	73
5.3 结构模型设计 .....	80
5.4 模型材料与选用 .....	83
本章小结 .....	85
复习思考题 .....	85
<b>第 6 章 结构荷载试验</b> .....	86
6.1 结构静力试验 .....	86
6.2 结构动力试验 .....	102
6.3 结构抗震试验 .....	108
本章小结 .....	121
复习思考题 .....	122
<b>第 7 章 建筑结构的现场检测技术</b> .....	123
7.1 概述 .....	123
7.2 混凝土结构的现场检测技术 .....	124
7.3 钢结构的现场检测技术 .....	135
7.4 砌体结构的现场检测技术 .....	138
本章小结 .....	149
复习思考题 .....	149
<b>第 8 章 桥梁现场荷载试验</b> .....	150
8.1 概述 .....	150
8.2 桥梁结构静载试验 .....	151
8.3 桥梁结构动载试验 .....	172
本章小结 .....	180
复习思考题 .....	180
<b>第 9 章 结构试验数据处理</b> .....	181
9.1 概述 .....	181
9.2 结构试验数据的整理和换算 .....	181
9.3 结构试验数据的误差分析 .....	182
9.4 结构试验数据的表达 .....	196
本章小结 .....	200
复习思考题 .....	201
<b>参考文献</b> .....	202

## 第1章 绪 论

土木工程结构包括房屋结构、桥梁结构、地下结构等。结构形象的理解就是“骨架”，其功能是承受荷载作用并产生作用效应，产生的作用效应须满足各级规范要求（包括规范、规程、标准等）。

结构  $\xrightarrow{\text{承受}}$  作用  $\xrightarrow{\text{产生}}$  作用效应  $\xrightarrow{\text{满足}}$  要求（规范、规程、标准）

确保实现结构的功能，常采用以下三种途径：

第一种途径是理论分析：利用现有成熟的理论，计算分析结构在各种作用下的作用效应，使其满足规范、规程、标准要求。例如：《混凝土结构》、《钢结构》、《砌体结构》、《桥梁结构》等课本知识，都是从理论的角度解决实现结构功能问题。

第二种途径是试验：对结构施加各种作用，通过测试得到结构在作用下的作用效应，从而评判结构是否满足要求。

第三种途径是计算机程序模拟分析：利用计算机程序模拟分析结构在各种作用下的作用效应，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。由于新的结构理论还不够成熟，所以结构试验必不可少，但是结构试验不可能完全模拟真实状态，试验本身会受到各种条件的限制，例如：试验经费、试验环境等；而借助计算机程序模拟试验，一方面可以弥补试验的不足，另一方面可以通过大量的参数分析寻找其中的规律，从而发展新结构理论。因此，结构理论、结构试验和计算机程序模拟分析，构成了现代土木工程结构体系的三大支柱，见图 1-1。

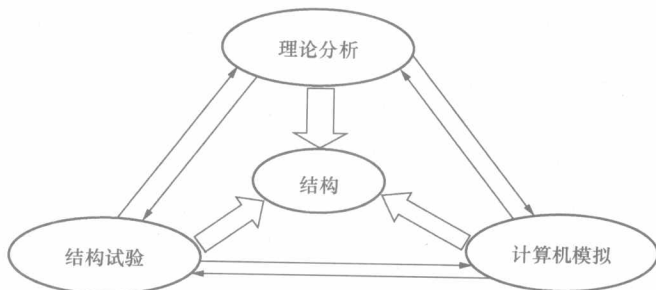


图 1-1 结构理论、结构试验和计算机模拟三者关系

本课程将重点讲述土木工程结构试验。

土木工程结构试验是一项科学性、实践性很强的活动，是研究和发展土木工程结构新材料、新体系、新工艺以及探索结构设计理论的重要手段，在土木工程结构科学研究和技术革新等方面起着重要的作用。

科学研究理论往往需要在实践中进行验证。对土木工程结构而言，确定材料的力学性能、



建立复杂结构计算理论、验证梁、板、柱等单个构件的计算方法，都离不开具体的试验研究。因此，土木工程结构试验是研究和发展结构计算理论不可缺少的重要环节。

今天，由于电子计算机的普遍应用，土木工程结构的设计方法和设计理论已经发生了根本性的变化，以前需要大量手工计算，难以精确分析的复杂结构问题，现在可凭借计算机简而化之。但结构试验在科研、设计和施工中的地位并没有因此而改变。由于测试技术的进步，迅速提供精确可靠的试验数据比过去更加受到重视，因此土木工程试验仍是解决土木工程结构领域科研和设计问题的必不可少的手段。其原因主要有以下几个方面：

(1) 结构试验是人们认识自然的重要手段。认识的局限性使人们对诸如结构的材料性能等问题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不能用分析的方法求得。而试验及其应用则是拓宽人们认识局限性的重要手段。

(2) 结构试验是验证结构理论的有效方法。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，不能对研究问题建立完善数学模型的结构平面分析理论和结构空间分析理论，以及隔震结构、耗能结构的理论发展都离不开结构试验这种有效的理论验证方法。

(3) 结构试验是土木工程结构质量鉴定的直接方式。对于已建的结构工程，无论是某一具体的结构构件还是结构整体，任何目的的质量鉴定，所采用的直接方式仍是结构试验。

(4) 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总结了已有大量科学试验的成果和经验；为设计理论和设计方法的发展进行了大量针对钢筋混凝土结构、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。对实体构造物的试验研究，为我国编制各种结构设计规范提供了基本的资料和试验数据。

(5) 结构试验是建筑工程自身发展的需要。自动控制系统和电液伺服加载系统在结构试验中的广泛应用，从根本上改变了试验加载的技术：由过去重力加载逐步改进为液压加载，进而过渡到低周反复加载、拟动力加载及地震模拟随机振动台加载；在试验数据的采集和处理方面，工程试验已实现了测量数据的快速采集、自动化记录和数据自动化处理分析；这些都是结构试验自身发展的产物。

土木工程结构试验是土木工程专业的一门技术基础课程。它主要的研究内容包括：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测量技术，试验数据的采集，信号分析及处理技术以及对试验对象作出科学的技术评价或理论分析等。

学习本课程的目的是通过理论和试验的教学环节，使学生掌握结构试验方面的基本知识和基本技能，并能根据设计、施工和科学研究任务、需要，完成一般土木工程结构的试验设计与试验规划，为今后从事土木工程结构科研、设计或施工等工作积累解决问题的手段和方法。

## 1.1 结构试验的任务

土木工程结构试验的任务是以土木工程结构（实物或模型）为研究对象，通过加载技术对研究对象施加各种作用，借助测试技术对结构物受作用后的性能进行观测。通过对测量数据的分析，如变形、应变、温度、振幅、频率、裂缝宽度等，从强度（稳定）、刚度、抗裂性以及结构实际破坏形态来判明结构的实际工作性能，评估结构的承载能力，确定结构对使用



要求的符合程度。通过结构试验检验并发展结构计算理论,例如:

(1) 钢筋混凝土简支梁在静力集中荷载作用下,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及结构的承载力、刚度和抗裂性能。

(2) 当一个框架承受水平动力荷载作用时,同样可以从测得结构的自振频率、阻尼系数、振幅和动应变等数据研究结构的动力特性和结构在承受动力荷载作用下的动力反应。

(3) 在结构抗震研究中,经常是通过低周期反复荷载作用下,由试验所得的应力与变形关系滞回曲线来分析抗震结构的承载力、刚度、延性、刚度退化和变形能力等。

因此,结构试验的任务,是通过加载技术进行试验,借助测试技术测定有关数据,由此反映结构构件的工作性能、承载能力和相应的安全度,为结构的安全使用和设计理论的建立提供重要依据。

## 1.2 结构试验的分类

结构试验可按试验目的、试验对象的尺寸、荷载的性质、作用时间的长短、所在场地的情况等因素进行分类。

### 1.2.1 根据不同试验目的分类

根据不同试验目的,结构试验可分为生产性试验和科研性试验两大类。

#### (一) 生产性试验

这类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作出正确的技术结论,常用来解决以下有关问题:

(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来综合鉴定其质量的可靠程度,例如大跨桥梁的成桥试验。

(2) 对已建结构进行可靠性检验,以推断和估计结构剩余寿命。已建结构随着使用时间的增长,结构物会逐渐出现不同程度的老化现象,有的构件进入到老龄期,退化期或是更换期,有的甚至进入到危险期。为了保证已建结构物的安全使用,尽可能地延长其使用寿命并防止整个建筑的破坏、倒塌等重大事故的发生,国内外对结构物的使用寿命,尤其是使用寿命中的剩余期限,即剩余寿命特别关注。通常会先对已建结构物进行观察、检测和分析普查,再按可靠性鉴定规程评定结构所属的安全等级,并由此来判断其可靠性、评估其剩余寿命。可靠性鉴定大多采用非破损检测的试验方法。

(3) 工程改建和加固,通过试验来判断具体结构的实际承载能力。旧有建筑的扩建加层、加固或由于需要提高建筑抗震设防烈度而进行的加固等情况,当仅凭理论计算不能得到分析结论时,常通过试验确定这些结构的潜在能力。这在缺乏旧有结构设计计算与图纸资料,而要求改变结构工作条件的情况下更有必要。

(4) 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(例如施工质量事故、结构过度变形和严重开裂等)的危险建筑,必须进行必要的详细检测。

(5) 鉴定预制构件的产品质量。构件厂或现场生产的各种预制构件,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,以判断成批产品的质量。

## (二) 科研性试验

科研性试验通常用来解决下面两方面的问题。

(1) 验证结构计算理论或通过结构试验创立新的结构理论。随着科学技术的进步,新方法、新材料、新结构、新工艺不断涌现。例如,高性能混凝土结构的工程应用,高温高压工作环境下的核反应堆安全壳,新的结构抗震设计方法,全焊接钢结构节点的热应力影响区等。每一种新的结构体系、新的设计方法都必须经过试验的检验,结构计算中的基本假设也需要试验验证。结构工程科学的每个新发现和进步都离不开结构试验,作为一门实验科学,结构工程强调结构试验在推动结构工程技术发展中所起的作用。

(2) 制订结构设计规范和标准。由于土木工程结构关系到公共安全和国家经济发展,结构的设计、施工、维护必须有章可循,这些规章就是结构设计规范和标准,施工验收规范和标准以及其他技术规程。我国现行的各种结构设计和施工规范在编写过程中除了总结已有的工程经验和结构理论外,还进行了大量的混凝土结构、砌体结构、钢结构的梁、柱、板、框架、墙体、节点等构件的结构试验。系统的结构试验和研究为结构的安全性、使用性、耐久性提供了可靠的保证。

### 1.2.2 按试验对象分类

#### (一) 原型试验

原型试验的对象是实际结构或者是按实物结构足尺复制的结构或构件。

实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、楼盖承载力试验等都是在实际结构上加载测量的。针对结构动力特性的风振测试和通过环境随机振动测定也是在高层建筑上直接进行。另外,桥梁结构中大跨桥梁的成桥试验等均属此类。在原型试验中另一类就是对实际结构构件的试验,也可以在现场试验。为了保证测试的精度,防止环境因素对试验的干扰,目前国外已将这类足尺模型试验从现场转移到结构试验室进行。如日本已在室内完成了7层框架结构房屋足尺模型的抗震静力试验,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。

#### (二) 模型试验

模型是依照原型并按一定的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,但大部分结构模型是尺寸比原型小得多的缩尺结构。当试验研究有特殊需要时也可以制作成1:1的足尺模型作为研究对象。由于受投资大、周期长、测量精度、环境因素等的影响,进行原型结构试验在物质和技术上常会存在某些困难。人们在结构设计的方案阶段进行初步比较或对设计理论和计算方法进行探索研究时,多采用比原型结构小的模型进行试验。

模型的设计制作与试验是根据相似理论进行:用适当的比例和相似材料制成与原型几何相似的试验对象,在其上施加相似力系使模型受力后重现原型结构的实际工作状态,最后按相似理论由模型试验结果推算出实际结构的工作性能。因此,模型试验对模拟条件要求比较严格,即要求做到几何相似、力学相似和材料相似。这类满足严格的相似条件的模型称为相似模型。

由于严格的相似条件给模型设计和试验带来一定困难,在结构试验中尚有另一类型的模

型,称为缩尺模型。缩尺模型是真型结构缩小几何尺寸的试验代表物,它不需遵循严格的相似条件,将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。例如,在教学试验中通过钢筋混凝土结构受弯构件的小梁试验可以同样说明钢筋混凝土结构正截面的设计计算理论。

### 1.2.3 按试验荷载的性质分类

#### (一) 结构静力试验

结构静力试验是结构试验中最多、最常见的基本试验,绝大部分结构在工作中承受的是静力荷载。在静力荷载作用下研究结构的承载力、刚度、抗裂性和破坏机理,一般可以通过重力或各种类型的加载设备来模拟和实现试验加载要求。

静力试验的加载过程是使荷载从零开始逐步递增直到试验某一预定目标或破坏为止,是在一个不长的时间段内完成试验加载的全过程。人们称这种试验为结构静力单调加载试验。

近年来由于探索结构抗震性能的需要,结构抗震试验成为一种重要的试验方式。结构抗震静力试验是以静力的方式模拟地震作用的试验,它是一种通过控制荷载或控制变形,作用于结构的周期性反复静力荷载。为与一般单调加载试验区别,称其为低周反复静力加载试验,也称伪静力试验。目前国内外结构抗震试验较多集中在这一方面。

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,也可以暂时停止以便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。在实际应用中,即使是承受动力荷载的结构,在试验过程中为了解静力荷载下的工作特性,往往在动力试验之前先进行静力试验,如结构构件疲劳试验。

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,静力试验结果往往与任意一次确定性的非线性地震反应相差很远。目前在抗震静力试验中,虽然已出现了计算机与加载器联机试验系统,可以弥补后一种缺点,但设备耗资较大,且每个加载周期远远大于实际结构的基本周期,故使用较少。

#### (二) 结构动力试验

结构动力试验是研究结构在不同性质动力作用下结构动力特性和动力反应的试验。如研究厂房结构承受吊车及动力设备作用的动力特性,吊车梁的疲劳强度与疲劳寿命,多层厂房由于机器设备在楼上安装后产生的振动影响,高层建筑和高耸构筑物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,除了应用上述静力加载模拟试验以外,更为理想是直接施加动力荷载进行试验。目前抗震试验一般使用电液伺服加载设备或地震模拟振动台等设备进行。

工程结构风洞实验装置是一种能够产生和控制气流以模拟建筑或桥梁等结构物周围的空气流动,并可量测气流对结构的作用、观察有关物理现象的管状空气动力学试验设备。在多层房屋和工业厂房结构设计中,房屋的风载体型系数就是风洞试验的结果。结构风洞试验模型可分为钝体模型和气弹模型两种。其中,钝体模型主要用于研究风荷载作用下结构表面各个位置的风压;气弹模型则主要用于研究风致振动以及相关的空气动力学现象。超大跨径桥梁、大跨径屋盖结构和超高层建筑等新型结构体系常用风洞试验来确定与风荷载有关的设计参数。

对于现场或野外的动力试验,利用环境随机振动试验测定结构的动力特性模态参数的做

法也日益增多。另外,还可以利用人工爆炸产生人造地震的方法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差别,并且要比静力试验复杂得多。

#### 1.2.4 按试验时间分类

##### (一) 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,对于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加载到最后结构破坏或某个阶段进行卸荷的时间总共只有几十分钟、几小时或者几天;或者当结构受地震爆炸等特殊荷载作用时,整个试验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,短期荷载试验不能代表长年累月进行的长期荷载试验,对其中由于具体的客观因素或技术限制所产生的影响,必须在试验结果的分析和应用时加以考虑。

##### (二) 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规律的试验,如混凝土的徐变、预应力结构钢筋的松弛等需要在静力荷载作用下进行的长期试验。长期荷载将连续进行几个星期或几年时间,通过试验获得结构的变形随时间变化的规律。为保证试验精度,试验环境应有严格控制,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试验室内进行的。但如果能在现场对实际工作中的结构构件进行系统的、长期的观测,那么这样积累和获得数据资料将对于研究结构的实际工作性能以及进一步完善和发展结构理论具有更为重要的意义。

#### 1.2.5 按试验场所分类

##### (一) 试验室结构试验

试验室结构试验由于其具备良好的工作条件、可以应用精密和灵敏的仪器设备、具有较高的准确性、甚至可以人为地创造一个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,所以适用于研究性试验。其试验的对象可以是原型或模型,也可以对结构进行破坏性试验。近年来大型结构试验室的建设,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际结构试验的自动化提供了更为有利的工作条件。

##### (二) 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,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试验室中应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,目前应用非破坏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 结构试验的发展

现代科学技术的不断发展,为结构试验水平的提高创造了物质条件;同样,高水平的结构试验又促进结构工程学科不断发展和创新。近年来,现代结构试验和相关的理论及方法在

以下几个方面发展迅速。

### 1.3.1 先进的大型和超大型试验装备

在现代制造技术的支持下,大型结构试验设备不断被投入使用,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可达 50 000kN,可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。拟建设的地震模拟振动台阵列,由多个独立振动台组成。当振动台排成一列时,可用来模拟桥梁结构遭遇地震作用;若排列成一个方阵,可用来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。以再现极端灾害条件为目的,大型风洞、大型离心机、大型火灾模拟结构试验系统等试验装备也相继投入运行,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。

### 1.3.2 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。上个世纪末,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。

### 1.3.3 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。新材料,特别是新型半导体材料的研究与开发,促进了很多对于力、应变、位移、速度、加速度、温度等物理量敏感的传感器的发展。如利用微电子技术,使传感器具有一定的信号处理能力,形成所谓“智能传感器”;使用新型光纤传感器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;使用大量程高精度位移传感器在 1000mm 测量范围内,将精度控制到 $\pm 0.01\text{mm}$ ,即 0.001%的精度;将基于无线通讯的智能传感器网络应用于大型工程结构健康监控等。另一方面,测试仪器的性能也得到极大的改进,特别是由于与计算机技术相结合,使数据采集技术发展迅速。高速数据采集器的采样速度达到 500m/s,可以清楚的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,长时间大容量数据采集已不存在困难。

### 1.3.4 计算机与结构试验

毫无疑问,计算机已渗透到我们日常生活中,甚至成为我们生活的一部分。计算机同样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(DSP),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。可以说离开了计算机,现代结构试验技术就不复存在。特别值得一提的是大型试验设备的计算机控制技术和结构性能的计算机仿真技术。多功能高精度的大型试验设备(以电液伺服系统为代表)的控制系统于上世纪末告别了传统的模拟控制技术,转而采用计算机控制技术,使

试验设备能够完成复杂、快速的试验任务。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,通过计算机仿真处理,结合试验数据,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 结构试验课程的特点

结构试验是土木工程专业的一门专业课,这门课程与其他专业课有着密切的关系。首先,结构试验课程以土木工程结构的专业知识为基础。设计一个结构试验,在试验中准确的测量数据、观察试验现象,需要试验人员具有完整的结构概念,能够对结构性能做出正确的计算。因此,材料力学、结构力学、弹性力学、混凝土结构、砌体结构、钢结构等结构专业课程是本课程的基础,掌握本课程的理论和方法,也将对结构性能和结构理论有更深刻的理解。其次,结构试验依靠试验加载设备和仪器仪表来进行,了解这些设备和仪器的基本原理和使用方法是本课程的一个重要环节。掌握机械、液压、电工学、电子学、化学、物理学等方面的知识,也对理解结构试验方法很有帮助。此外,电子计算机是现代结构试验技术的核心,结构试验中,常运用计算机进行试验控制、数据采集、信号分析和误差处理,结构试验技术也涉及自动控制、信号分析、数理统计等课程。总之,结构试验是一门综合性很强的课程,结构试验常常以直观的方式表现结构性能,但必须综合运用各方面的知识,全面掌握结构试验技术,才能准确的理解结构受力的本质,通过试验结果提高结构理论水平。

在对结构进行鉴定性试验和科研性试验时,试验方法必须遵守一定的规则。近年来,我国先后颁布了《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—1992),《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—1996)等专门技术标准。对不同类型的结构,也用技术标准的形式规定了检测方法。通过这些与结构试验有关的技术标准或在技术标准中与结构试验有关的规定,可以确保试验数据准确、结构安全可靠、统一评价尺度,其作用与结构设计规范相同,在进行结构试验时必须遵守。

结构试验强调动手能力的训练和培养,是一门实践性很强的课程。学习这门课程,必须完成相关的结构和构件试验,熟悉仪器仪表的操作。除掌握常规测试技术外,很多知识是在具体试验中掌握的,要在试验操作中注意体会。

## 本章小结

(1) 结构试验的任务就是在结构物或试验对象上,使用仪器设备和工具,采用各种试验技术手段,在荷载或其他因素作用下,通过测量与结构工作性能有关的各种参数,从强度、刚度和抗裂性以及结构实际破坏形态来判明结构的实际工作性能,估计结构的承载力,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。

(2) 根据不同的试验目的,结构试验可归纳为生产性试验和科研性试验两大类。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作出正确的技术结论。科学研究性试验的目的是验证结构设计计算的各种假定,为制定各种设计规范、发展新的设计理论、改进设计计算方法、发展和推广新结构、新材料

及新工艺提供理论依据与试验依据。

(3) 结构试验除了按试验目的分为生产性试验和科研性试验外, 还可按试验对象分为原型试验、模型试验; 按试验荷载的性质分为结构静力试验、结构动力试验; 按试验时间分为短期荷载试验、长期荷载试验; 按试验场所分为试验室结构试验、现场结构试验。

### 复 习 思 考 题

- 1-1 简述结构试验的任务。
- 1-2 土木工程结构试验分为哪几类? 有何作用?
- 1-3 目前结构试验有何发展?



## 第2章 结构试验基本原理

### 2.1 结构试验的一般程序

结构试验大致可分为结构试验设计、试验准备、试验实施及试验分析等主要环节。每个环节的工作内容和相互关系如图 2-1 所示。

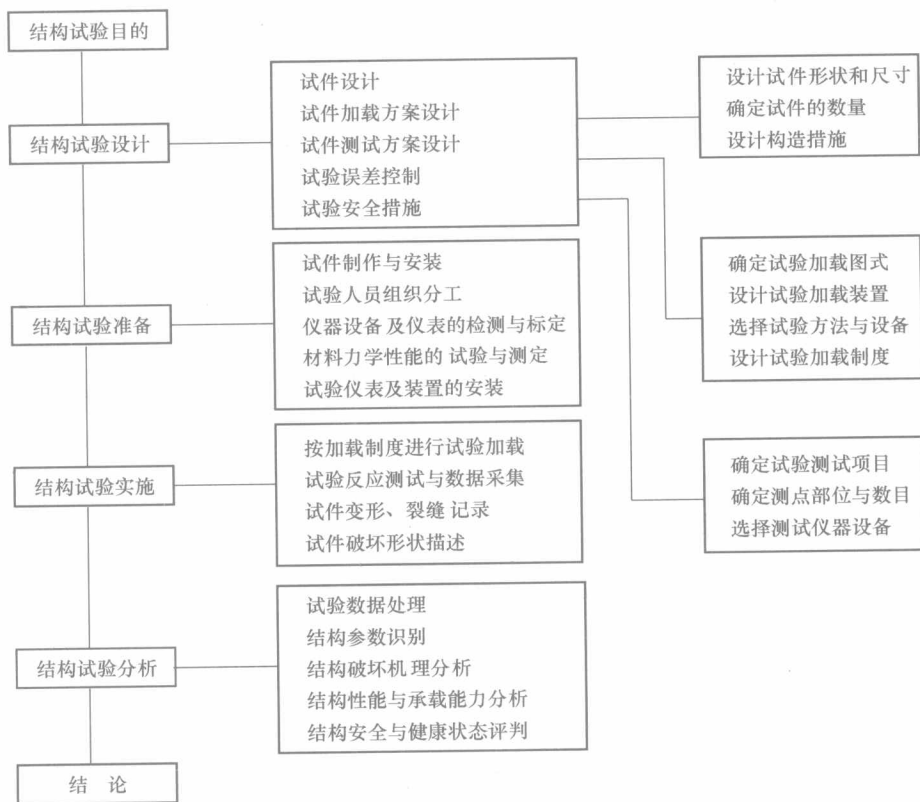


图 2-1 结构试验程序框图

#### 2.1.1 结构试验设计

结构试验设计是整个结构试验与测试技术中极为重要且具有全局性的一项工作。它的主要内容是对所要进行的结构试验工作进行全面的设计与规划，从而使设计的计划与试验大纲对整个试验起到统管全局和具体指导的作用。

在进行结构试验的总体设计时，首先应该反复研究试验目的，充分了解本项试验研究或生产鉴定的任务要求，进行调查研究，收集相关资料，包括在该方面已有的理论假定、试验及其试验方法、试验结果和存在的问题等。在以上工作的基础上确定试验的性质与规模。试件的设计制作、加载测量方法的确定等各个环节不可孤立考虑，而必须对各种因素相互联系，

综合考虑,才能使设计结果在执行与实施中达到预期目的。

对于科研性试验,首先应根据研究课题了解其在国内外的状况和前景,并通过收集和查阅有关的文献资料,确定试验研究的目的是任务;确定试验的规模和性质,并在此基础上决定试件设计的主要组合参数,根据试验设备的能力确定试件的外形和尺寸;进行试件设计与制作;确定加载方法,设计加载系统;选定测量项目及测量方法;进行设备和仪表的率定;作好材料性能试验或其他辅助试件的试验;制定试验安全防护措施;提出试验进度计划和试验技术人员分工;工程材料需用计划、经费开支预算、试验设备、仪表及附件的清单等。

生产性试验的设计,往往是针对某一已建成的具体结构进行,一般不存在试件设计和制作问题,但应向有关设计、施工和使用单位或人员申请查阅相关试验项目的设计图纸、计算书、设计依据、施工记录、材料性能试验报告、隐蔽工程验收记录、使用历史(年限、过程、荷载情况等)、事故过程等材料档案,并对构件进行实地考察,检查结构的设计和施工质量状况,最后根据试验目的和要求制定试验计划。对于受灾损伤的结构,还必须了解受灾的起因、过程与结构的现状。对于实际调查的结果要加以整理(书面记录、草图、照片等)作为拟定试验方案,进行试验设计的依据。

### 2.1.2 结构试验准备

结构试验准备阶段是将结构试验设计阶段确定的试件按要求制作、安装与就位,将加载设备和测试仪表率定、安装就位,完成辅助试验工作,准备记录表格,算出各加载阶段结构各特征部位的内力及变形值。结构试验准备工作十分繁琐,不仅涉及面广,而且工作量大,通常准备工作占全部试验工作量的 $1/2\sim 2/3$ 以上。试验准备阶段的工作质量直接影响到试验结果的准确程度,有时还关系到试验能否顺利进行完毕。因此在试验准备阶段控制和把握试件的制作和安装就位、设备仪表的安装、调试和率定等主要环节是极为重要的。

辅助试验完成后,要及时整理试验结果并作为结构试验的原始数据完整记录,对结构试验设计确定的加载制度控制指标进行必要的修正。结构试验准备工作,有时还与数据整理和资料分析有关,例如预埋应变片的编号和仪表的率定记录等。为了便于事后查对,试验组织者每天都应做好工作日记。

### 2.1.3 结构试验实施

按试验设计与试验准备阶段确定的加载制度进行正式加载试验。对试验对象施加外荷载是整个试验工作的中心环节,应按规定的加载顺序和测量顺序进行。重要的测量数据应在试验过程中随时整理分析,并与事先计算的数值进行比较,发现有反常情况时应查明原因或故障,将问题弄清楚后才能继续加载。

试验过程中除认真读数记录外,还必须仔细观察结构的变形,例如砌体结构和混凝土结构的开裂和裂缝的出现、走向及宽度,破坏的特征等。试件破坏后要绘制破坏特性图,有条件的可拍照或录像,作为原始资料保存,以便今后研究分析时使用。

### 2.1.4 结构试验分析

通过试验准备和加载试验阶段获得的大量数据和有关资料(如测量数据、试验曲线、变形观察记录、破坏特征描述等),一般不能直接回答试验研究所提出的各类问题,必须将数据进行科学的整理、分析和计算,做到去粗取精,去伪存真,再根据试验数据和资料编写总结报告。总结报告中应提出试验中发现的新问题及进一步的研究计划。