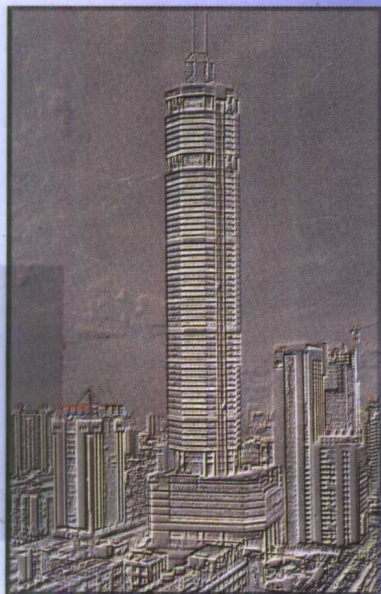


T UMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN

# 土木工程 结构试验

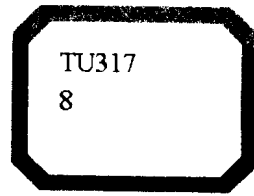


● 姚谦峰 陈平 编著

● 中国建筑工业出版社

T UMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN

TU317



# 土木工程结构试验

姚谦峰 编著  
陈 平

中国建筑工业出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

土木工程结构试验/姚谦峰,陈平编著. —北京:中国建筑工程出版社,2001.7

ISBN 7-112-04704-8

I. 土… II. ①姚… ②陈… III. 土木工程—结构试验  
IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 028222 号

本书是根据 1998 年全国高校专业目录调整后为土木工程专业结构试验课程编写的专业技术教材。内容包括:工程结构试验概论、结构试验荷载模拟、结构试验量测技术、工程结构静载试验、工程结构动载试验、结构可靠性检测与鉴定、工程结构模型试验、工程结构抗震试验及结构试验的数据处理等。

本书可供高等学校土木工程专业本科生、研究生作为教材使用;也可供从事工程结构试验的专业人员和有关工程技术人员作为参考用书。

\* \* \*

责任编辑:蒋协炳

**土木工程结构试验**

姚谦峰 编著  
陈平

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京云浩印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:16 $\frac{1}{4}$  字数:403 千字

2001 年 7 月第一版 2001 年 7 月第一次印刷

印数:1—4000 册 定价:22.00 元

ISBN 7-112-04704-8

TU·4187 (10178)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换  
(邮政编码 100037)

## 前 言

土木工程结构试验,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,具有较强的实践性。它与结构设计、施工实践以及推动土木工程结构学科的发展有着密切的关系,日益为人们注意并引起重视。

土木工程结构试验是土木工程专业的一门专业技术课程。本课程的任务是通过理论和实践教学环节,使学生获得工程结构试验方面的基础知识和基本技能,能够进行一般工程结构试验的设计与规划,并得到初步的训练和实践。

本教材是根据 1998 年全国高校专业目录调整后为土木工程专业学生编写的。编写的指导思想:一是力求涵盖土木工程各学科领域,在原建筑结构试验的基础上,增加了其他土木工程学科内容;二是力求反映科学技术的最新发现与最新成就,在阐述传统试验方法及手段的基础上,着重国内外最新发展的试验理论及方法的论述;三是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,并配以典型示例,以培养学生的动手能力;四是注意由浅入深,除了满足本科生教学要求外,增补了本领域部分前沿学科内容,可适应研究生教学的要求,同时可供工程技术人员参考。

本教材由姚谦峰、陈平合编,其中第 1、7、8、9 章由姚谦峰编写,第 2、3、4、5、6 章由陈平编写。教材内容按现行教学大纲要求,第一~六章供本科生使用,第七~九章供研究生使用。

本教材承蒙丰定国教授、童岳生教授审阅,并提出了宝贵意见。在初稿编写过程中得到张兴虎、王泽军、刘熙等同志的帮助。教材中应用了有关兄弟单位的成果,特此一并致谢。

由于编者业务水平有限,编写中漏误之处在所难免,敬请专家同行和读者批评指导。

# 目 录

前 言

<b>第一章 工程结构试验概论</b> .....	1
1.1 工程结构试验的目的与任务 .....	1
1.2 工程结构试验分类 .....	3
1.3 工程结构试验设计 .....	5
<b>第二章 结构试验荷载模拟</b> .....	11
2.1 概述 .....	11
2.2 重力模拟荷载 .....	11
2.3 液压模拟加载 .....	13
2.4 其他加载技术 .....	18
2.5 结构试验荷载支承装置 .....	20
<b>第三章 结构试验量测技术</b> .....	30
3.1 概述 .....	30
3.2 应变量测 .....	31
3.3 位移与变形量测 .....	43
3.4 力的量测 .....	49
3.5 裂缝,应变场应变及温度测定 .....	51
附录 .....	55
<b>第四章 工程结构静载试验</b> .....	59
4.1 概述 .....	59
4.2 试验前的准备 .....	60
4.3 加载与量测方案的设计 .....	64
4.4 常见结构构件静载试验 .....	67
4.5 量测数据整理 .....	85
4.6 结构性能的检验与评定 .....	93
<b>第五章 工程结构动载试验</b> .....	99
5.1 概述 .....	99
5.2 动载试验荷载模拟技术 .....	100
5.3 动载试验量测仪器 .....	104
5.4 结构动力特性试验 .....	116
5.5 结构动力反应试验 .....	126
5.6 结构疲劳试验 .....	132
<b>第六章 结构可靠性检测与鉴定</b> .....	136
6.1 概述 .....	136

# 第一章 工程结构试验概论

土木工程结构试验是一项科学性很强的活动,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等方面起着重要的作用。

土木工程结构包含有: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(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。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。计算机增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极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,最终对试验对象作出科学的技术评价或理论分析。

## 1.1 工程结构试验的目的与任务

### 1.1.1 结构试验的目的

在实际工作中,根据不同的试验目的,结构试验可归纳为两大类。

#### 1. 科学研究性试验

科学研究性试验具有研究、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,而有系统地进行的试验研究。

研究性试验的试验对象即试件,它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。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作连续观察、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。这类试验通常研究以下几个方面的问题。

(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出某些简化的假定。如在构件静力和动力分析中,本构关系的模型化,则完全是通过试验加以确定的。

(2) 为制订设计规范提供依据。我国现行的各种结构设计规范除了总结已有大量科学试验和经验以外,为了理论和设计方法的发展,进行了大量钢筋混凝土结构、砌体结构和钢结构的构件及足尺和缩尺模型的试验,以及实体结构物的试验研究,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。随着土木工程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结构体系的应用,钢—混凝土组合结构、轻型钢结构的设计推广,升板、滑模施工工艺的发展,以及大跨度结构、高耸结构、超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,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。

## 2. 生产鉴定性试验

生产鉴定性试验是非探索性的。一般是在比较成熟的设计理论基础上进行。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。

检验性试验的试验对象一般是真实的结构或构件,这类试验常应用在以下几方面:

(1) 检验结构的质量,说明工程的可靠性。对某些重要性结构或采用新材料、新工艺及新设计计算理论而设计建造的结构物或构筑物,在建成后需进行总体的结构性能检验,以综合评价其结构设计及施工质量的可靠性。

(2) 检验构件或部件的结构性能,判定构件的设计及制作质量。例如预制构件厂或建筑工地生产的预制构件,在出厂或吊装前均应对其承载力、刚度和变形性能进行抽样检验,以确定其结构性能是否满足结构设计和构件检验规程所要求的指标。此外对某些结构构造较复杂的部件(如网架节点、特种桥梁、高耸桅杆和焊接构件等)均应进行严格的质量检验。检验性试验应严格按照有关的检验规程或规定进行。

(3) 判断旧结构的实际承载力,为改造、扩建工程提供数据。当结构物由于使用功能发生了变化,原有结构物需要加固、改造时(如厂房、桥梁等)往往需要通过试验实测及分析,从而确定原有结构物的实际潜力。

(4) 检验和鉴定已建结构物的可靠性。这类结构一般是指经过几十年的使用,发生过异常变形或局部损伤,继续使用时人们对其安全性及可靠性持有怀疑。鉴定这类结构的性



能首先应进行全面的科学调查。调查的方法包括观察、检测和分析。检测手段大多采用无损检测方法。在调查和分析基础上评定其所属安全等级,最后推算其可靠性。这类鉴定工作应按照可靠性鉴定规程的有关规定进行。

(5) 为处理工程事故提供依据。对于因遭受地震、水灾、火灾、爆炸而损伤的结构,或在建造期间及使用过程中发生过严重的工程事故,产生了过度变形和裂缝的结构,都要通过试验为加固和修复工作提供依据。

### 1.1.2 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,利用设备仪器为工具,采用各种实验技术为手段,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根据。

## 1.2 工程结构试验分类

工程结构试验除了上述按试验目的分为生产鉴定性试验和研究性试验以外,还经常以试验对象、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 原型试验和模型试验

#### 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。

对于实际结构试验一般均用于生产鉴定性试验。例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下的动力特性试验等均在实际结构上加载量测,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,它可以在试验室内试验,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。



## 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。目前在试验室内进行的大量结构试验均属于这一类。

### 1.2.2 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调加载试验。

静力试验的最大优点是加载设备相对来说比较简单,荷载可以逐步施加,并可根据试验要求,分阶段观测结构的受力及变形的发展,给人们以最明确和清晰的破坏概念。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。目前在抗震静力试验中虽然发展一种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,同时每个加载周期还是远远大于实际结构的基本周期。

#### 2. 动力试验

对于那些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,通过动力加载设备直接对结构构件施加动力荷载。如研究厂房结构及桥梁结构等在动力设备作用下的振动特性,吊车梁及桥墩的疲劳强度与疲劳寿命,高层建筑和高耸结构(电视塔、烟囱等)在风载作用下的动力问题等。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,目前抗震动力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有很大的差别,并且要比静力试验复杂得多。

### 1.2.3 短期荷载试验和长期荷载试验

对于主要承受静力荷载的结构构件实际上荷载是长期作用的。但是在进行结构试验时限于试验条件、时间和基于解决问题的步骤,我们不得不大量采用短期荷载试验,即荷载从零开始施加到最后结构破坏或到某阶段进行卸荷的时间总和只有几十分钟,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,则整个加载过程也仅在几天内完成,与实际工作有一定差别。对于爆炸、地震等特殊荷载作用时,整个试验加载过程只有几秒甚

至是微秒或毫秒,这种试验实际上是一种瞬态的冲击试验。所以严格地讲这种短期荷载试验不能代替长年累月进行的长期荷载试验。这种由于具体客观因素或技术的限制所产生的影响,我们在分析试验结果时必须加以考虑。

对于研究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,钢筋混凝土受弯构件裂缝的开展与刚度退化等就必须要进行静力荷载的长期试验。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甚至于数年,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,经常需要对试验环境有严格的控制,如保持恒温恒湿,防止振动影响等,当然这就必须在试验室内进行。如果能在现场对实际工作中的结构物进行系统长期的观测,则这样积累和获得的数据资料对于研究结构的实际工作,进一步完善和发展工程结构的理论都具有极为重要的意义。

#### 1.2.4 试验室试验和现场试验

工程结构和构件的试验可以在有专门设备的试验室内进行,也可以在现场进行试验。

试验室试验由于可以获得良好的工作条件,可以应用精密和灵敏的仪器设备进行试验,具有较高的准确度。甚至可以人为的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,所以适宜于进行研究性试验。这样有可能突出研究的主要方面,而消除一些对试验结构实际工作有影响的次要因素。这种试验可以在原型结构上进行,也可以采用模型试验,并可以将结构一直试验到破坏。尤其近年来发展足尺结构的整体试验,大型试验室为之提供了比较理想的条件。

现场试验与室内试验相比由于客观环境条件的影响,使用高精度的仪器设备来进行观测受到了一定的限制,相对来看,进行试验的方法也比较简单,所以试验精度和准确度较差。现场试验多数用以解决生产鉴定性的问题,所以试验是在生产和施工现场进行的,有时研究或检验的对象就是已经使用或将要使用的结构物,它可以获得近乎完全实际工作状态下的数据资料。

### 1.3 工程结构试验设计

#### 1.3.1 结构试验的一般程序

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分析等主要环节。它们之间的关系如图 1-1 所示。

##### 1. 结构试验设计

结构试验设计是整个结构试验中极为重要的并且带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能对整个试验起着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的目的,充分了解本项试验研究或生产鉴定的任务要求,因为结构试验所具有的规模与所采用的试验方法都是根据试验研究的目的任务要求不同而变化的。试件的设计制作、加载量测方法的确定等各个环节不可单独考虑,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最后达到预期的目的。

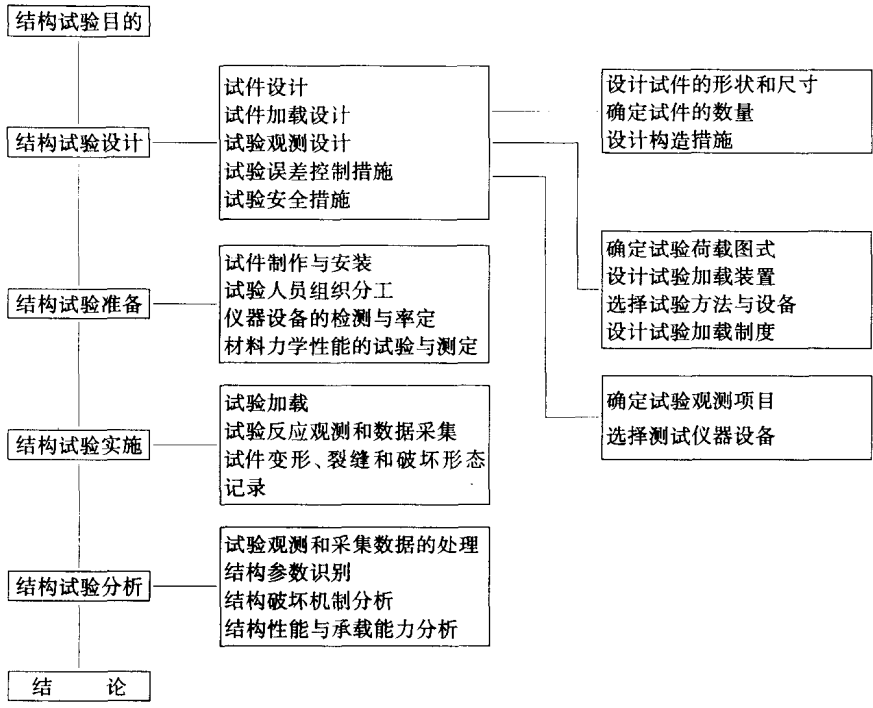


图 1-1 结构试验设计总框图

研究性试验的一般工作程序框图如图 1-2 所示。它反映了试验设计的主要内容。首先应根据研究课题,了解其在国内外的现状和前景,并通过收集和查阅有关的文献资料,确定试验研究的目的和任务;确定试验的规模和性质,在此基础上决定试件设计的主要组合参数,并根据试验设备的能力确定试件的外形和尺寸;进行试件设计及制作;确定加载方法和设计加载系统;选定量测项目及量测方法;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、经费开支及预算、试验设备、仪表及附件的清单等等。

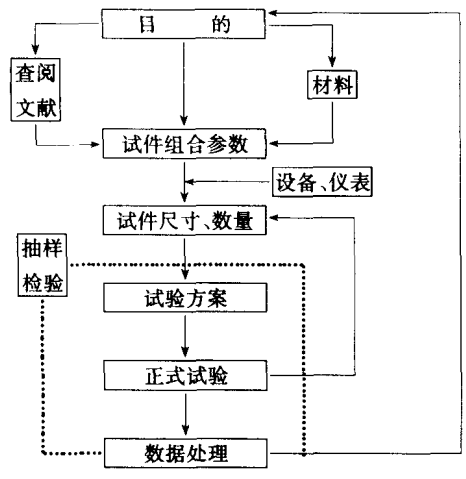


图 1-2 研究性试验工作程序

检验性试验的设计,因为试件往往是某一具体结构,一般不存在试件设计和制作问题,但需要收集和该试件设计的原始资料、设计计算书和施工文件等,并应对构件进行实地考察,检查结构的设计和施工质量状况,最后根据检验的目的要求制订试验计划。对已建结构物作技术鉴定时,其工作程序框图如图 1-3 所示。这时需要了解该结构物在使用期限内是否遭受过严重损伤、地震、爆炸或火灾等损害,根据初步调查情况成立专门的鉴定机构,组织有关技术人员拟定试验方案和鉴定计划。

制订试验计划应有针对性,比如,先对试件作初步的理论计算及必要分析,这样就可以有目的地设置观测点,选取相匹配的设备和仪表,以及确定加载程序等等。由于现代仪器设备和测试技术的不断发展,大量新型的加载设备和测量仪器被使用到结构试验领域,这对试验工作者又提出了新的技术要求,对此方面的知识不足和微小疏忽,均会导致对整个试验不利的后果,所以在进行试验总体设计时,要求对所使用的仪器设备性能进行综合分析,要求对试验人员事先组织学习,掌握这方面知识,以利于试验工作的顺利进行。

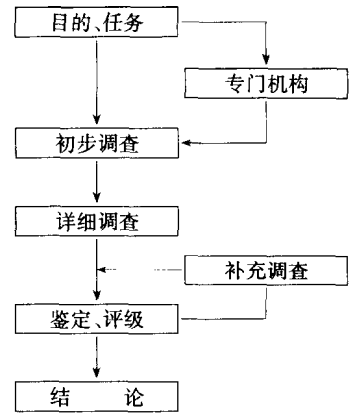


图 1-3 鉴定性实验工作程序

## 2. 结构试验准备

结构试验准备工作十分繁琐,不仅涉及面很广,而且工作量很大,据估计准备工作约占全部试验工作量的 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 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到底。在试验准备阶段控制和把握好几个主要环节(如试件的制作和安装就位,设备仪表的安装、调试和率定等)是极为重要的。

准备阶段的工作,有些还直接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。

## 3. 结构试验实施

对试验对象施加外荷载是整个试验工作的中心环节。参加试验的每一个工作人员都必须集中精力,各就其位,各尽其职,尽心做好本岗位工作。试验期间,一切工作都要按照试验规划规定的程序和方法进行。对试验起控制作用的重要数据,如钢筋的屈服应变,构件的最大挠度和最大侧移,控制截面上的应变等,在试验过程中应随时整理和分析,必要时还应跟踪观察其变化情况,并与事先计算的理论数值进行比较;如有反常现象应立即查明原因,排除故障,否则不得继续加载试验。

试验过程中除认真读数记录外,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,裂缝的走向及其宽度,破坏的特征等。试件破坏后要绘制破坏特征图,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。

## 4. 结构试验分析

通过试验准备和加载试验阶段,获得了大量数据和有关资料(如量测数据、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。最后根据试验数据和资料编写总结报告。

以上各阶段的工作性质虽有差别,但它们都是互相联系又互相制约的,各阶段的工作没有明显的界限,计划时不能只孤立地考虑某一阶段的工作,必须兼顾各个阶段工作的特点和要求,作出综合性的决策。

### 1.3.2 结构试验的试件设计

在进行结构承载力和变形试验时,作为结构试验的试件可以取为实际结构的整体或是

它的一部分,当不能采用足尺的原型结构进行试验时,也可用其缩尺的模型。采用模型试验可以大大节省材料、减少试验工作量和缩短试验时间,用缩尺模型作结构试验时,应考虑试验模型与试验结构之间力学性能的相关关系,但是要想通过模型试验的结果来正确推断实际结构的工作,模型设计要做到完全相似往往有困难,此时应根据试验目的设法使主要的试验内容能满足相似条件。如能用原型结构进行结构试验,当然是最为理想的。但是由于原型结构试验规模大、试验设备的容量和费用也大,所以大多数情况下还是采用缩尺的模型试验。就我国目前开展试验研究工作的实际情况来看,整体原型结构的试验还是少数,在规范编制过程中所进行的基本构件的基本性能试验大都是用缩尺的构件,但它不一定存在缩尺比例的模拟问题,经常是由这类试件试验结果所得的数据,直接作为分析的依据。

试件设计应包括试件形状的选择、试件尺寸与数量以及构造措施等,同时还必须满足结构与受力的边界条件、试件的破坏特征、试验加载条件的要求,以最少的试件数量获得最多的试验数据,反映研究的规律以满足研究任务的需要。关于这些将在以后的各章中有所介绍。

### 1.3.3 结构试验方案拟定

试验方案包括加载方案,量测方案以及试验安全防护措施等。

#### 1. 加载方案

试验加载方案取决于试验对象的结构形式、试验的目的和要求,结构承受的荷载性质和受荷形式等。例如楼盖是结构体系中的承重结构,它主要作用有竖向均布荷载;而框架除承受竖向集中荷载外还承受水平方向的风荷载和地震作用。显然这两种结构的加载方案和需用设备有很大差别,因而每进行一项试验都应针对具体试验对象选择其加载方案。

结构静力试验的加载方案可分为重力加载、杠杆重力加载、机械力加载、真空气压加载、结构试验机加载、液压千斤顶加载以及电液伺服加载等。实现以上加载方案都必须有产生荷载作用的设备、承受荷载作用的承力台以及载荷架,只有将它们组成配套的加载系统才能对试验对象实现加载。图 1-4 为最简单的静力液压加载系统。由一台液压千斤顶产生一个集中力  $P$ ,经过荷载分配梁和支座将力传递至试验对象的各加载点上;千斤顶产生的力由横梁和立柱组成的载荷架及承力台来平衡;从而形成了一套完整的液压加载系统。加载系统的承力部件必须有足够的承载力和刚度,荷载分配系统必须是静定结构系统,以便保证荷载传递的准确性。

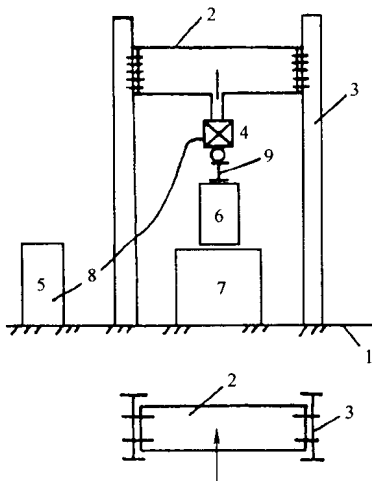


图 1-4 液压加载系统示意

- 1—承力台;2—横梁;3—立柱;4—千斤顶;  
5—油泵;6—试件;7—支墩;8—油管;  
9—荷载分配梁

结构动力试验的加载方案,由动力试验目的所决定。一般有结构的动力特性试验,结构抗震性能试验及结构疲劳性能试验等。它们所用的设备包括各种激振器和振动台,使结构承受重复疲劳荷载的结构疲劳试验机,使结构承受反复地震作用的拟动力试验装置以及模

拟地震振动台等。这些设备都必须根据试验需要,有目的地选择和有针对性地进行组合设计,才能正确使用。尤其当由计算机控制试验过程时更应做好加载方案设计。具体加载设备和试验方案的拟定将在本书第二、四、五章作详细介绍。

## 2. 量测方案

量测方案应针对试验对象的被测参数来选定。结构试验量测的参数主要有结构的整体变形(如挠度、侧移、振幅等)和局部纤维的变形(如应变等)两种。这两种不同形式的参数,其采用的量测仪表与量测方法也因之而异。例如对于单个静态参数的测定,可以利用简单的单一仪表来进行。当量测与时间因素有关的动态参数或两个变量之间相互关系的静态曲线时,必须采用多种仪表组成的测试系统来完成。按其测量结果的表达方式不同,可将测试系统归纳为两类:

(1) 非连续测试系统。例如用单个机械式仪表,量测静力试验结构的挠度和侧移等整体变形时,所测得的都是非连续的数据。又如测量应变用的电阻应变仪,一般采用人工控制,即每个测点的应变由人工逐点读取和分别记录,所得结果是指某一时刻或与某一参数(或荷载)对应的应变值,也是一组非连续的数据。

(2) 连续测试系统。它所得量测结果为一族连续的曲线。例如荷载位移曲线,需要配备的量测仪表有荷载传感器,位移传感器和记录两者关系所用的  $x-y$  函数记录仪,这时需将以上仪表按一定线路联接组成测试系统才能得到荷载-位移曲线。

现代连续测试系统,还可以借助计算机进行自动控制,对试验参数进行自动扫描、高速记录、储存、显示以及进行数据处理和分析等。

因而,量测方案设计除应确定被测参数和参数的测点布置外,正确选择量测仪表,并将其组成相互匹配的测试系统,最后对测试系统的灵敏度进行标定等都是量测方案设计的主要内容。关于测试系统选用的仪表和量测方案设计的具体内容,请参阅本书第三、四、五章有关章节。

## 3. 安全防护措施

结构试验中的安全问题,是关系到工作人员生命安全的大事,是保证试验设备不受损坏、试验能够顺利进行的基础。因此,在试验工作中应自始至终贯彻“安全第一、预防为主”的方针。

在制订试验计划时,对试验准备阶段,加载试验阶段和试验结束后的构件拆除阶段,都应提出可靠的安全防护技术措施。进行大型结构试验时尤应给以足够重视。

### (1) 试验准备与结束阶段的安全与防护。

从结构试验所发生的事故调查表明,有相当多的事故发生在试验准备阶段,例如在试件安装就位、加载设备的起吊与拆除,都曾发生过安全事故。对这些试验环节的安全操作规定,可参照我国有关安全规程中的条文执行。例如《建筑企业安全生产工作条例》,《建筑安装工人安全技术操作规程》等。此外,还应针对结构试验的特点,在试验方案中拟定更具体的安全操作细则。

试验中所使用的各种加载设备,尤其是大型加载设备,例如各种试验机,拟动力试验装置,机房控制系统,车间的吊车等,均应有各自的操作规程,并应指定专人使用、维修和保养。

试验用的载荷载、支座、支墩及支撑等均应有足够的承载力、刚度和稳定性,能够承受试验荷载可能产生的冲击作用。此外,还应注意载荷载的连接件及其与承力台的紧固件必须工作可靠。

在试验大型构件(如屋架、桁架和桥梁)时,由于构件比较高,为防止可能产生的侧向失稳或倒塌现象,应设置侧向支撑或安全架。支撑或安全架不应与构件直接接触,以免阻碍结

构的正常变形。

试验中,为便于工作人员读数、观察裂缝和进行加载等操作,在试件附近或周围应设置安全可靠的工作平台。

#### (2) 试验阶段的安全与防护。

试验过程中,为保证人员、仪表设备的安全,试验区域内宜设置明显标志,非试验人员不得入内。

各种机械式量测仪表,如千分表、百分表及杠杆引伸仪等,当结构进入破坏阶段时,由于变形过大或因试件表面材料酥松,可能导致安装在试件上的仪表发生松动,严重的甚至跌落。因而当试验荷载达到极限荷载的85%左右时,可将大部分量测仪表拆除,留下少量起控制作用的仪表并应对其加强保护措施,或改变量测方法后继续工作。

在结构试验中,还可能发生试验结构的局部倒塌或整体倒塌事故,因而事先应设置安全托架或支墩,但不应阻碍结构的自由变形。

对于在试验中可能跌落的千斤顶、荷载分配梁和个别仪表等,均应用保护绳悬吊在试件附近的固定点上。

试验前,必须对参与试验的全体工作人员进行安全教育,在现场进行大型结构试验时,一般应设安全员随时检查安全工作。

#### 1.3.4 结构试验结果分析与结论

由于试验目的的不同,其试验的技术结论内容和表达形式也不完全一样。检验性试验的技术结论,可根据现行《建筑结构设计统一标准》中的有关规定进行编写。例如,该标准对结构设计规定了两种极限状态,即承载能力极限状态和正常使用极限状态,因而在结构性能检验的报告中必须阐明试验结构在承载能力极限状态和正常使用极限状态两种情况下,是否满足设计计算所要求的功能(例如构件的承载能力、变形、稳定、疲劳或裂缝开展等)。只有检验结果同时都满足两个极限状态设计所要求的功能,则该构件的结构性能可评为“合格”,否则为“不合格”。

判断结构是否已经达到承载力极限状态设计所要求的功能,或正常使用极限状态设计所要求的功能,《结构设计统一标准和构件检验标准》对此均作了相应的规定,并给出了具体的“极限状态标志”作为判断的依据。详细内容参见本书第四章有关章节。

对整体结构进行可靠性鉴定要比单个构件的检验复杂得多。首先应对单个构件作鉴定,然后按项目作鉴定并评定其质量等级,最后对整体结构作出综合性评定,有关整体结构可靠性鉴定的方法将在第六章作简要介绍。

检验性(或鉴定性)试验的技术报告,主要应包括:

- (1) 检验或鉴定的原因和目的;
- (2) 试验前或试验后,存在的主要问题,结构所处的工作状态;
- (3) 采用的检验方案或鉴定整体结构的调查方案;
- (4) 试验数据的整理和分析结果;
- (5) 技术结论或建议;
- (6) 试验计划、原始记录、有关的设计、施工和使用情况调查报告等附件。

研究性试验,大多是为了探讨或验证某一新的结构理论,因而试验的技术结论无论从深度和广度上都远比检验性试验结论复杂,要求的内容也完全取决于具体的试验研究目的。



## 第二章 结构试验荷载模拟

### 2.1 概 述

作用于工程结构上的荷载种类繁多。就直接作用而言,有结构的自重;建筑物楼(屋)面的活荷载、雪荷载、灰载、施工荷载;作用于工业厂房上的吊车荷载、机械设备的振动荷载;作用于桥梁上的车辆振动荷载;作用于海洋平台上的海浪冲击荷载等;在特殊情况下,还有地震、爆炸等荷载。除了直接作用,一般情况下,尚有温度、收缩、支座沉降等间接作用。

以上荷载按其作用的范围分,有分布荷载、集中荷载;按作用的时间长短分,有短期荷载、长期荷载;按荷载对结构的动力效应分,有静力荷载、动力荷载等;振动荷载尚有简谐振动与随机振动之分。

结构试验除极少数是在实际荷载下实测外,绝大多数是在模拟荷载条件下进行的。结构试验的荷载模拟即是通过一定的设备与仪器,以最接近真实的模拟荷载再现各种荷载对结构的作用。荷载模拟技术是结构试验最基本的技术之一。

结构试验中荷载模拟的方法也有多样。就静载试验而言,有重物、液压、气压、机械和电液伺服加载系统以及和它们相配合的各种试验装置。其中同步异荷液压加载及与计算机连接的电液伺服加载则代表了加载技术方面的最新发展。在具体结构试验中应根据试件的结构特点,试验的目的,场地的条件以及经费开支等综合选择。荷载模拟设备无论采用何种方法,加载设备必须满足以下基本要求:

(1) 试验荷载的作用,应符合实际荷载作用的传递方式,能使被试验结构、构件再现其实际工作状态的边界条件,使截面或部位产生的内力与设计计算等效。

(2) 产生的荷载值应当明确,满足试验的准确度,除模拟动力作用之外,荷载值应能保持相对稳定,不会随时间、环境条件的改变和结构的变形而变化,保证荷载量的相对误差不超过 $\pm 5\%$ 。

(3) 加载设备本身应有足够的承载力和刚度,并有足够的储备,保证使用安全可靠。

(4) 加载设备不应参与结构工作,以致改变结构的受力状态或使结构产生次应力。

(5) 应能方便调节和分级加(卸)载,易于控制加(卸)载速率,分级值应能满足精度要求。

(6) 尽量采用先进技术,满足自动化的要求,减轻劳动强度,方便加载,提高试验效率和质量。

### 2.2 重力模拟荷载

#### 2.2.1 直接重力加载法

重力加载就是利用物体本身的重量施加于结构作为荷载。在试验室内,可以利用的重

物有专门浇铸的标准铸铁砝码、混凝土立方试块、水箱等；在现场，可就地取材，经常用普通的砂、石、砖块等建筑材料，或是钢锭、铸铁、废构件等。

图 2-1 为重物直接放在结构表面(如板壳等试件)上形成的均布荷载。为防止荷载本身的起拱作用引起结构局部卸载，可用砖石、铸铁块等块材加载，但需分堆堆放整齐，每堆重物的宽度、间隙应符合图中的要求。对于屋架、梁等的试验，也可将重物置于荷载盘上，通过吊盘形成集中荷载(见图 2-2)；也可借助钢索和滑轮导向，对结构施加水平荷载，如图 2-3 所示。

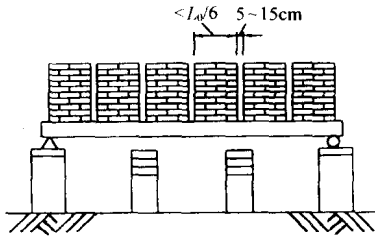


图 2-1 用重物在板上加均布荷载

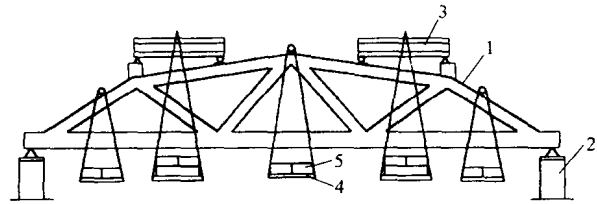


图 2-2 重物作集中荷载试验

1—试件；2—支座；3—分配梁；4—吊盘；5—重物

松散材料作重物时，应装入袋内使用。对吸水性强或水分蒸发量大的重物应考虑其含水量对重量的影响。

对于大面积平板结构(如楼面、平屋顶等)，采用水作试验荷载较为合适，一般采用图 2-4 装置作为均布荷载加于结构物表面。用水作为重力荷载既简便又经济，每施加  $1000\text{N}/\text{m}^2$  的荷载只需要 100mm 高的水。加载时可用水管进水，大大减轻了运输及加载的劳动强度。在现场试验水塔、水池及油库等特种结构时，水更是理想的试验荷载，不仅符合结构的实际使用条件，且能检验结构物的抗裂和抗渗性能。

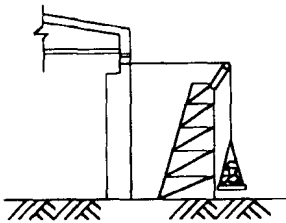


图 2-3 用重物加水平荷载

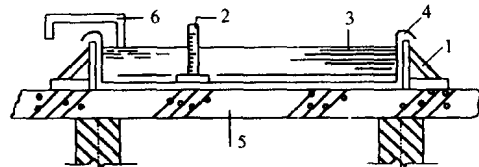


图 2-4 用水作均布荷载的装置

1—侧向支撑；2—标尺；3—水；4—防水胶布或塑料布；  
5—试件；6—水管

### 2.2.2 间接重力加载法(杠杆—重力荷载)

利用重物作集中荷载，经常会受到荷载量的限制。这时可以利用杠杆将荷重放大后作用在结构上，这不仅能扩大重力荷载的使用范围而且可减轻加载的劳动强度。图 2-5~图 2-7 为几种杠杆加载示意图。在使用过程中应注意使杠杆的三个着力点在同一水平线上，以免因结构变形使杠杆倾斜而改变原有的放大倍率。

重力加载系统的优点是设备简单，取材方便，荷载恒定，加载形式灵活。采用杠杆间接重力加载，对持久荷载试验及进行刚度与裂缝的研究尤为合适。因为荷载是否恒定，对裂缝的开展与闭合有直接影响。重力加载的缺点是荷载量不能很大，操作笨重而费工。此外，当