

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

建筑结构试验

张曙光 主编



中国电力出版社

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

普通高等教育



“十五”

TU317

17

2005

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

建筑结构试验

主 编 张曙光
编 写 高剑平 董世贵
主 审 潘景龙



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书是根据高等学校土木工程专业的教学要求,按照“建筑结构试验”教学大纲的要求编写而成。其主要内容包括结构试验概论、结构试验荷载模拟、结构试验量测技术、结构静载试验、结构动载试验、结构现场检测试验、结构模型试验、结构试验的数据处理。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,在阐明建筑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。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构试验/张曙光主编. —北京:中国电力出版社, 2005

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-3521-X

I. 建... II. 张... III. 建筑结构-结构试验-高等学校-教材 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 079673 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 9 月第一版 2005 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 312 千字

印数 0001—3000 册 定价 19.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多本教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237）

中国电力教育协会

前 言

本教材是根据高等学校土木工程专业的教学要求,按照“建筑结构试验”教学大纲的要求编写而成,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:结构试验概论、结构试验荷载模拟、结构试验量测技术、结构静载试验、结构动载试验、结构现场检测试验、结构模型试验、结构试验的数据处理。

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,并注意由浅入深安排教材内容。

参加本书编写工作的有:长春工程学院张曙光(第1章、第3章、第4章),华东交通大学高剑平(第5章、第7章、第8章),吉林建筑工程学院董世贵(第2章、第6章)。

本教材由张曙光任主编,承蒙哈尔滨工业大学潘景龙教授担任主审,潘老师审稿认真仔细,提出了许多中肯的修改意见,在此表示衷心感谢。

在本书的编写过程中,得到了编者所在院校领导以及中国电力出版社教材中心领导的鼓励和支持,在此表示深深的谢意。

限于编者的水平,书中难免有错误和不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

序

前言

第 1 章 结构试验概论	1
1.1 结构试验的目的与任务	2
1.2 结构试验分类	4
1.3 结构试验程序	6
第 2 章 结构试验荷载模拟	12
2.1 概述	12
2.2 重力荷载模拟	12
2.3 液压模拟加载	14
2.4 其他加载技术	19
2.5 结构试验支承装置	21
第 3 章 结构试验量测技术	30
3.1 概述	30
3.2 应变量测	31
3.3 位移量测	46
3.4 力的量测	52
3.5 裂缝、应变场应变及温度测定	53
3.6 试验数据记录方法	57
第 4 章 结构静载试验	65
4.1 概述	65
4.2 试验前的准备	66
4.3 加载与量测方案的设计	70
4.4 一般结构构件静载试验	73
4.5 结构抗震静载试验	91
4.6 静载试验量测数据的整理和分析	101
4.7 结构性能的检验与评定	112
第 5 章 结构动载试验	117
5.1 概述	117
5.2 动载试验荷载模拟技术	118
5.3 动载试验量测仪器	122
5.4 结构动力特性试验	132
5.5 动载特性的试验测定	138
5.6 结构动力反应试验	141

5.7 结构疲劳试验	145
第 6 章 结构现场检测试验	149
6.1 概述	149
6.2 混凝土结构现场检测	150
6.3 砌体结构现场检测试验	163
6.4 钢结构现场检测	166
第 7 章 结构模型试验	169
7.1 概述	169
7.2 模型试验理论基础	170
7.3 模型设计	177
7.4 模型材料与模型试验应注意的问题	185
第 8 章 结构试验的数据处理	189
8.1 概述	189
8.2 试验测量的误差	189
8.3 试验数据的误差分析	190
8.4 数据的表达方式	198
参考文献	208

第1章 结构试验概论

结构试验是一项科学性、实践性很强的活动,是研究和发展结构新材料、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。

理论的预言要通过实践的检验来证实,而试验是最有效的实践。新的试验技术(包括仪器、设备、方法等)能够向人们揭示新的事实,提出新的问题,导致新的假设和新学说的出现。结构理论和结构试验在建筑结构历史上的相互关系正是这样的。

17世纪初期,伽利略(1564~1642)首先研究材料的强度问题,提出许多正确理论,但在1638年出版的著作中,也错误地认为受弯梁的横截面应力分布是均匀受拉。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,认为应力分布是不均匀的,而是按三角形分布的。后来伯努里又建立了平面假定学说。1713年法国人巴朗进一步提出中和层的理论,认为受弯梁横截面上的应力分布以中和层为界,一边受拉,一边受压。由于当时无法验证,巴朗的理论不过只是一个假设而已,受弯梁横截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率先用简单的试验方法,令人信服地证明了受弯梁横截面上压应力的存在。他在一根木制简支梁的跨中,沿上缘受压区开槽,槽的方向与梁轴垂直,槽内塞入硬木垫块。试验证明,这种梁的承载能力丝毫不低于整体的未开槽的木梁。这说明只有上缘受压,才可能出现这样的结果。当时科学家们对容格密里的这个试验给予很高的评价,誉为“路标试验”,因为它总结了人们一百多年来的摸索,象十字路口的路标一样,给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出现在材料力学中受弯构件横截面应力分布的计算公式;然而用试验方法验证这个公式,则又经过了二十多年,才由法国科学院另一位院士阿莫列恩完成。人类对这个问题经历了二百多年的不断探索,才告一段落。从这段漫长的历程中可以看到,试验技术在理论验证以及研究方法的正确选择上,均起到了重要的作用。结构理论的发展与结构试验就是这样紧密地联系在一起的。

土木工程结构中的建筑结构、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),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。在一定的经济条件制约下,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,要求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等。

在进行结构应力分析时,一方面可以利用传统的力学理论计算方法解决,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

的飞速发展,为采用数学模型方法进行结构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,也为实现荷载模拟、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。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可以实现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。

建筑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:结构静力试验和动力试验的加载模拟技术,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 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,即科学研究性试验和生产鉴定性试验。

1. 科学研究性试验

科学研究性试验其目的在于验证结构设计理论,或验证各种科学判断、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。因此具有研究、探索和开发的性质。

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,而常常是通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。因此,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,以便对受载荷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。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,本构关系的选择,则需通过试验加以确定。

(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进一步发展,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,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

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,都离不开结构试验。而且一种新材料的应用,一个新结构的设计和新工艺的使用,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,以便积累资料,丰富认识,使设计计算理论不断改进、不断完善。

2. 生产鉴定性试验

生产鉴定性试验一般是在经过成熟的设计理论设计的实际结构上进行的。其目的是通过试验来检验结构构件是否符合设计要求和相应的结构设计规范以及施工验收规范的要求,并对检验结果作出技术结论。因此生产鉴定性试验是非探索性的。

检验性试验的试验对象一般是真实的结构、构件或其中的一部分,这类试验通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。例如南浦大桥、杨浦大桥建成后的载荷试验就是为检验该结构的质量,说明工程的可靠性而进行的试验。

(2) 检验构件或部件的结构性能,判定构件的制作质量是否满足设计要求或相应的技术标准要求。对于预制构件厂或建设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、焊接构件等)均应进行严格的质量检验。检验时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,例如已使用多年的结构需要扩建加层,或由于生产需要提高吊车起重能力,要求对原有结构物进行加固、改造。这时往往需要通过现场试验实测及分析,来确定原有结构物的实际潜力。检测手段大多采用无损检测方法,或微破损检测方法。

(4) 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现有严重缺陷(如质量事故、过度的变形和裂缝)的结构物,往往要求通过试验,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,就会产生各种反应。如钢筋混凝土简支梁在静力集中荷载作用下,可以通过测定梁在不同受力阶段的挠度、截面转角、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其承载力、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,同样可以通过测定结构的自振频率、阻尼系数、振幅(动位移)和动应变等,来研究结构的动力特性和结构承受动力荷载时的动力反应。近年来在结构抗震研究中,经常是通过结构在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,结构试验的任务就是在结构物或试验对象(实物或模型)上,以设备、仪器

为工具,采用各种试验技术手段,在荷载(重力、机械扰动力、地震作用、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。

简言之,结构试验就是以不同形式的试验方法为手段,以测定结构构件的工作性能、承载能力和相应的安全程度为目的,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 结构试验分类

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。

1.2.1 原型试验和模型试验

结构试验按试验对象分为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构件。

对于实际结构的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、楼盖承载力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于原型试验,它们是在现场进行试验。而对于一些预制构件,如一根梁、一块板或一榀屋架等,也可以在试验室内进行试验。

2. 模型试验

由于进行原型结构试验投资大、周期长,而且测量精度容易受环境因素等影响,在经济上或技术上存在一定困难。因此,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,可以采用模型试验。建筑结构中的局部构件(如梁、板、柱)大多可做足尺的结构试验,而对整体结构通常是做缩尺比例的模型试验。因此,模型试验也是结构试验的一个重要组成部分。

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),使模型受力后再现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情况。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模型试验。

1.2.2 静力试验和动力试验

结构试验按荷载性质分为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。故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情况,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,则可以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

结构试验按试验进行时间长短分为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,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几微秒或几毫秒,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,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。这种长期荷载试验将连续进行几个月甚至于数年才能完成,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进行严格的控制,如保持恒温恒湿,防止振动影响等,这就要求试验必须在试验室内进行。如果能在现场对实际结构进行系统、长期的观测,那么这样积累和获得的数据资料对于研究结构的实际工作情况,以及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

结构试验按试验场合分为试验室试验和现场试验。

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。试验室试验可以获得良好的工作条件,因此可以应用精密和灵敏的仪器设备进行试验,量测结果具有较高的准确度。在试验室内,甚至可以人为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情况有影响的次要因素。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。特别是近年发展起来的足尺结构的整体试验,大型试验室的建设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程度的限制,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 结构试验程序

1.3.1 结构试验的一般程序

结构试验包括试验设计、试验准备、试验实施和试验分析等主要环节。它们之间的关系如图 1-1 所示。

1. 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能对整个试验起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,必须对各种因素的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。

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。对于研究性试验首先应根据研究课题,了解其在国内外的发展现状和前景,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。

检验性试验的设计,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

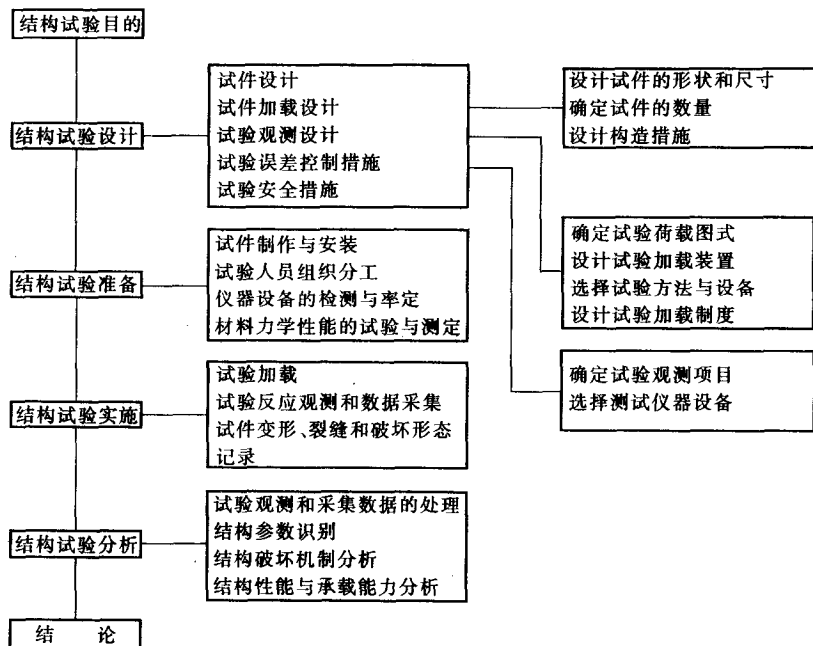


图 1-1 结构试验设计总框图

需要收集和研究的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。

制订试验计划应具有针对性。先对试件做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，选取相匹配的试验设备和量测仪表，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，对这些新技术的知识掌握不足和操作过程中的微小疏忽，都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，对试验人员事先组织学习，以利于试验工作的顺利进行。

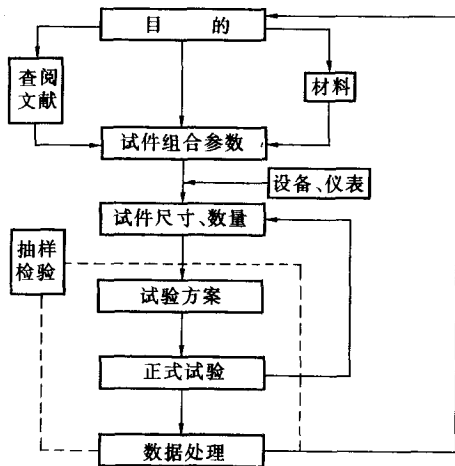


图 1-2 研究性试验工作程序

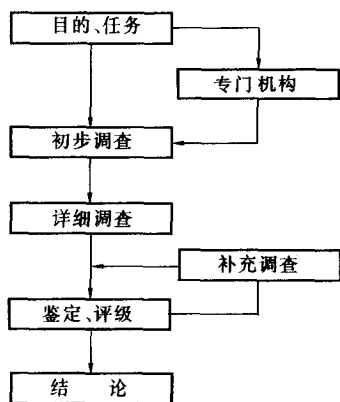


图 1-3 检验性试验工作程序

2. 试验准备

试验准备工作十分繁琐, 不仅涉及面很广, 而且工作量很大, 准备工作约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将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是极为重要的, 如试件的制作和安装就位, 设备仪表的安装、调试和率定等都应该做好。

准备阶段的工作, 有些还直接与数据整理和资料分析有关 (如预埋应变片的编号和仪表的率定记录等), 为便于事后核对, 试验组织者每天都应做好工作日记。

3. 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。如果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。

在试验过程中除要认真读数记录外, 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, 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, 有条件时可以拍照或录像, 作为原始资料保存, 以便今后研究分析时使用。

4. 试验分析

在试验准备阶段和加载试验阶段, 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), 这些数据和资料一般不能直接回答试验研究所提出的各类问题, 必须将其进行科学的整理、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, 各阶段的工作虽没有明显的界限, 但计划时不能只孤立地考虑某一阶段的工作, 必须兼顾各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, 也可以采用其缩尺的模型。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情况, 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。采用原型结构进行结构试验是最为理想的, 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,采用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构件基本性能试验大都是采用缩尺的构件,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的选择等,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,来反映研究的规律以满足研究任务的需要。

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,结构所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,其主要承受竖向均布荷载;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所需要选用的设备有很大差别,因而每进行一项试验都应针对具体试验对象选择相应的加载方案。

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、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具有产生荷载作用的设备、承受荷载作用的承力台以及载荷载(反力架),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。

结构动力试验的加载方案,由动力试验目的所决定。一般包括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分别在本书第二、四、五章中作详细介绍。

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,所采用的量测仪表与量测方法也随之而各不相同。例如对于单个静态参数,可以利用简单的单一仪表进行测定。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,则必须采用多种仪表组成的测试系统来完成。按测量结果的表达方式不同,可将测试系统归纳为两类:非连续测试系统和连续测试系统。

(1) 非连续测试系统

对于非连续测试系统,例如用单个机械式仪表,量测静力试验结构的挠度和侧向移动等整体变形时,所测得的结果都是非连续的数据。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并分别记录,所测得的结果是指某一时刻或与某一级荷载对应的应变值,也是一组非连续的数据。

(2) 连续测试系统