

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

建筑 结构试验

● 刘杰 闫西康 主编

EDUCATION



普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

建筑结构试验

主 编 刘 杰 闫西康
副主编 冯士伦 王书祥



机械工业出版社

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

编 审 委 员 会

主任委员：

姜忻良 天津大学 教授、博导

副主任委员：

张向东 辽宁工程技术大学 教授、博导

李自林 天津城市建设学院 教授、博导

委 员：

李 珠 太原理工大学 教授、博导

魏连雨 河北工业大学 教授、博导

王成华 天津大学 教授

李 斌 内蒙古科技大学 教授

赵根田 内蒙古科技大学 教授

胡启平 河北工程技术大学 教授

张瑞云 石家庄铁道大学 教授

段树金 石家庄铁道大学 教授

段敬民 天津城市建设学院 教授

张敏江 沈阳建筑大学 教授

徐世法 北京建筑工程学院 教授

曹启坤 辽宁工程技术大学 教授

张泽平 太原理工大学 教授

前 言

建筑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。建筑结构试验以科学试验为手段,研究建筑结构的新材料、新体系、新工艺,检验和修正建筑结构的计算方法和设计理论,不断探索建筑结构的新理论、新技术,对建筑结构科学的发展起着重要作用,具有很强的实践性。本书是根据高等院校土木工程专业“建筑结构试验”教学大纲的要求编写而成的。“建筑结构试验”课程的任务是通过理论和实践教学环节,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,能够进行一般建筑结构试验的设计和操作,并得到初步的训练和实践,以适应生产和科研工作的需要。

本书以结构试验的基本理论和基础知识为重点,注重理论与实际相结合,系统地介绍了结构试验的加载方法和设备、结构试验的量测仪表和仪器、结构试验设计、结构构件的静载试验、结构动力试验、结构抗震试验、建筑结构现场检测技术、试验数据处理等。为了加强培养学生的实践动手能力,书中附有教学试验说明。

参加本书编写工作的有:天津大学刘杰(前言,第1、3、8章),河北工业大学闫西康(第7、9章),天津大学冯士伦(第2、4章),天津城市建设学院王书祥(第5、6章、附录)。天津大学研究生姜晓峰、张岩岩、魏鹏翔、邵朋、孙宗训为本书的编写做了大量辅助工作。全书由刘杰统稿,刘杰、闫西康担任主编,冯士伦、王书祥担任副主编。

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,对上述作者表示感谢。天津大学建筑工程学院姜忻良教授、机械工业出版社刘涛编辑为本书的组织和编写提供了很多帮助,给予了大力支持,在此一并致谢。

由于编者理论水平和实践经验有限,书中疏漏和错误之处在所难免,敬请同行专家和读者不吝赐教。

编 者

目 录

前言	
第1章 建筑结构试验概述	1
1.1 建筑结构试验的任务	1
1.2 建筑结构试验的作用	2
1.3 建筑结构试验的分类	3
本章小结	6
思考题	6
第2章 结构试验的加载方法和设备	7
2.1 概述	7
2.2 重力加载法	7
2.3 机械力加载法	9
2.4 气压加载法	10
2.5 液压加载法	11
2.6 惯性力加载法	16
2.7 电磁加载法	19
2.8 人工激振加载法	20
2.9 环境随机振动激振法	20
2.10 荷载支承设备和试验台座	20
本章小结	26
思考题	27
第3章 结构试验的量测仪表和仪器	28
3.1 量测仪表的工作原理及分类	28
3.2 应变测量仪器	31
3.3 位移测量仪器	45
3.4 力值测量仪器	50
3.5 裂缝及温度的测量	52
3.6 振动测量仪器	54
3.7 数据采集仪器	60
本章小结	63
思考题	63
第4章 结构试验设计	64
4.1 试件设计	65
4.2 模型设计	73
4.3 荷载设计	80
4.4 观测设计	83
4.5 安全与防护措施设计	86
4.6 试验文件资料	87
本章小结	88
思考题	88
第5章 结构构件的静载试验	89
5.1 试验前的准备	89
5.2 基本构件的静力试验	94
5.3 扩大构件的静力试验	100
5.4 量测数据的整理	108
5.5 结构性能的评定	116
本章小结	119
思考题	120
第6章 结构动力试验	121
6.1 数字信号分析	121
6.2 结构动力荷载特性试验	125
6.3 结构动力特性试验	126
6.4 结构动力反应试验	131
6.5 疲劳试验	133
本章小结	136
思考题	136
第7章 结构抗震试验	137
7.1 结构抗震试验概述	137
7.2 低周反复加载试验	140
7.3 拟动力试验	152
7.4 地震模拟振动台试验	156
本章小结	158
思考题	158
第8章 建筑结构现场检测技术	159
8.1 概述	159
8.2 混凝土结构现场检测技术	160
8.3 砌体结构现场检测技术	177
8.4 钢结构现场检测技术	186
本章小结	191

思考题	191	试验3 简支钢梁非破坏试验	214
第9章 试验数据处理	193	试验4 钢筋混凝土梁正截面试验 ...	215
9.1 概述	193	试验5 自由振动法测定结构动力 特性试验	217
9.2 数据的整理和换算	193	试验6 模型钢框架动力特性测定 试验	218
9.3 数据的统计分析	194	试验7 预制板检验	219
9.4 误差分析	197	试验8 回弹法检测结构混凝土 强度	220
9.5 数据的表达	202	试验9 超声法检测混凝土裂缝的 深度	221
本章小结	208	参考文献	224
思考题	208		
附录 建筑结构试验课程——教学			
试验	209		
试验1 应变片和应变仪的使用	209		
试验2 等强度梁的应变测量	212		

第1章 建筑结构试验概述

本章提要 本章系统介绍建筑结构试验的意义、作用和目的,介绍结构试验的分类和结构试验的发展过程,重点是建筑结构试验的目的和分类。

建筑结构是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,该结构体系在规定的使用期内必须安全有效地承受外部及内部形成的各种作用,满足结构各种使用功能的要求,承受可能产生的各种风险。如结构建造阶段可能出现的各种施工荷载;正常使用阶段可能遭遇的各种外界作用,特别是自然或人为灾害的作用;建筑老化阶段产生的各种损伤的积累和正常抗力的丧失等。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,了解结构构件的刚度、抗裂性能以及实际所具有的强度及安全储备。这种结构分析工作可以利用传统和现代的设计理论和计算方法完成,也可以利用试验方法,即通过结构试验的分析方法来解决。

计算机技术的发展,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,以及实现整个试验自动化提供了便利条件,使结构试验技术发生了根本性的变化。试验技术人员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相互作用的各种信息,计算机技术大大提高了结构试验的技术水平能力。在结构工程学科发展过程中形成的结构试验、结构理论与结构计算三极结构中,结构试验已成为真正的试验科学,是发展结构理论、解决工程设计方法的主要手段之一。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 建筑结构试验的任务

工程结构在外荷载作用下可能产生各种反应,通过结构试验可以获得结构的各种反应,以此判断结构的工作性能。常见的结构试验有以下几种:

- 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、刚度和抗裂性能。
- 2) 结构承受动力荷载作用,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) 结构在低周反复荷载作用下,通过试验获取应力-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。

建筑结构试验的任务是:在工程结构的试验对象(局部或整体、实物或模型)上,使用仪

器设备和工具,以各种试验技术为手段,在荷载(重力荷载、机械扰动荷载、地震荷载、风荷载等)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。

1.2 建筑结构试验的作用

1.2.1 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,伽里略(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,认为该断面应力分布不是均匀的,而是三角形分布的。后来胡克和伯努利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。由于无法验证,该理论只是一个假设,受弯梁断面上存在压应力的理论并未被人们接受。

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,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”。

1821 年法国科学院院士拿维叶从理论上推导了材料力学中,受弯构件断面应力分布的计算公式。20 年后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。人类对这个问题进行了 200 多年的不断探索至此告一段落。由此可以看到,试验技术不仅对于验证理论,而且在选择正确的研究方法上都起了重要作用。

1.2.2 建筑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,在工程设计中应用广泛。到 20 世纪 80 年代,人们为了满足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“+”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,并误认为柱子的受力特性与柱的截面形式无关。但试验证明,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的区别。

1.2.3 建筑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,都必须通过试验

加以证实。隔振结构、消能结构设计理论的发展也离不开建筑结构试验。

1.2.4 建筑结构试验是建筑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)在进行灾害或事故后建筑工程的评估、鉴定时,不论进行质量鉴定的目的如何,最可靠、最直接的检验方式仍然是结构试验。

1.2.5 建筑结构试验是制定各类技术规范和技术标准的基础

土木建筑技术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的成果。

我国现行的各种结构设计规范总结了大量已有科学试验的成果和经验。为了设计理论和设计方法的发展,工作人员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,体现了建筑结构试验在发展和改进设计理论、设计方法上的作用。

1.3 建筑结构试验的分类

实际工作中,根据试验目的不同,建筑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。建筑结构试验除了上述按试验目的分为鉴定性试验和科研性试验以外,还经常以试验对象、荷载性质、试验场地、试验时间等不同因素进行分类。

1.3.1 按试验目的分类

1. 生产鉴定性试验

这类试验经常具有直接的生产目的,是以实际建筑物或结构构件为试验对象,经过试验对具体结构作出正确的技术结论。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和大量的试验研究外,在实际结构建成以后,还应通过试验,综合地鉴定其质量的可靠程度。

(2) 鉴定预制构件的产品质量 构件厂或现场成批生产的钢筋混凝土预制构件,在出厂或现场安装之前,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,推断该批产品的质量。

(3) 工程改建或加固,通过试验判断结构的实际承载能力 旧有建筑在需要改变结构实际工作条件、扩建加层或进行加固时,必须通过结构试验确定结构的实际承载能力。

(4) 为处理受灾结构和工程事故,提供技术根据 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。

(5) 已建建筑结构可靠性检验,推定结构剩余寿命 已建建筑结构随建造年代和使用时间的增长,结构物出现不同程度的老化现象,为保证已建建筑的安全使用,延长使用寿

命,防止发生破坏、倒塌等重大事故,需要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,推断结构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进行的,离开理论指导,鉴定性试验就会成为盲目的试验;鉴定性试验又为结构设计理论积累宝贵的资料,为设计理论更新提供了重要依据。

2. 科学研究性试验

科学研究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、新工艺提供实践经验和设计依据,试验的目的是:

1) 验证结构计算理论的各种假定。结构设计中,为计算上的方便,经常对结构计算图式或本构关系作某些简化的假定,这些假定是否成立需通过试验加以验证。

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以及施工工艺的发展,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,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,需要对钢筋混凝土结构、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,进行系统的科学研究性试验,提出符合实际情况的设计理论、计算公式、试验方法标准和可靠性鉴定分级标准,完善规范体系。科学研究性试验必须事先周密考虑,按计划进行。试验对象是专为试验而设计制造的模型,以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,一般用于生产性试验。工业厂房结构的刚度试验、楼盖承载能力试验、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试验均属此类试验。

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,可以在实验室内试验,也可以在现场进行。

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,或在结构设计方案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,可以采用比原型结构缩小的模型进行试验。模型试验又分为:

(1) 相似模型试验 模型的设计制作与试验根据是相似理论。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,可以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。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,不需依靠相似理论,无需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。小构件试验是通过将试验结果与理论计算进行对比校核研究结构的性能,验证设计假定与计算方法的正确性,并认定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

静力试验是结构试验中最常见的基本试验。大部分工程结构在工作时所承受的是静力荷载,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。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。在结构静力单调加载过程中,荷载从零开始逐步递增,直到结构破坏为止,在不长的时间段内完成试验加载的全过程,常称为“结构静力单调加载试验”。

为了探索结构抗震性能,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的反复静力荷载,有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采用较多的一种形式。

静力试验的优点是: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的发展,给人以最明确、最清晰的破坏概念。

2. 动力试验

研究主要承受动力作用的结构或构件在动力荷载作用下的工作性能需要进行结构动力试验。如厂房在起重机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;多层厂房安装的设备相互之间的振动影响;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、抗冲击问题等都属于动力试验范畴。在结构抗震性能的研究中,可以采用静力加载模拟,但最符合实际受力特点的是施加动力荷载进行试验。抗震动力试验常采用电液伺服加载设备或地震模拟振动台等设备进行;现场或野外的动力试验,常采用环境随机振动试验测定结构动力特性模态参数;也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、几小时或者几天。

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,也属于短期荷载试验。严格地讲,短期荷载试验不能代替长期荷载试验,由于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”,它将持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,但对实际结构物进行长期系统的观测,所积累的数据资料对于研究结构实际工作性能,完善结构理论将具有极为重要的意义。

1.3.5 按试验所在场地分类

1. 实验室试验

结构和构件的试验可以在具有专门设备的实验室内进行,也可以在现场进行。

在实验室内进行试验,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,消除对试验结果产生影响的次要因素,所以实验室适合进行研究性试验。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便利条件。

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,常用于生产鉴定性试验。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。现场试验与实验室试验相比,由于客观环境条件的限制,不便于使用高精度仪器设备进行观测,试验的方法比较简单,试验精度较差。目前,采用的非破损检测技术所进行的结构现场试验,提高了试验精度,可获得近乎实际工作状态下的数据资料。

本章小结

本章系统介绍了建筑结构试验的意义、作用和目的,主要介绍了建筑结构试验的分类。学习本章后应提高对建筑结构试验课程重要性的认识,了解建筑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作用。

思考题

- 1-1 建筑结构试验的作用是什么?
- 1-2 建筑结构试验分为哪几类?各类试验的目的是什么?
- 1-3 生产检验性试验通常解决哪些问题?
- 1-4 科学研究性试验通常解决哪些问题?
- 1-5 你对建筑结构测试技术的发展有多少了解?

第2章 结构试验的加载方法和设备

本章提要 本章系统地介绍了建筑结构试验中的加载方法和加载设备,包括重力加载法、机械力加载法、气压加载法、液压加载法、惯性力加载法、电磁加载法、人工激振加载法、环境随机振动激振法、荷载支承装置和试验台座等内容。其中,液压加载法是本章的重点内容。学习本章时,应着重了解各种加载方法的作用方式、工作特点和要求,以及各种加载方法的适用范围等,并应对各种加载设备的基本结构有一定的了解。

2.1 概述

大多数建筑结构试验都需要根据试验目的和要求对试验对象施加荷载,以便模拟结构的实际工况,并采集结构产生的各种反应作为结构分析的重要信息,因此结构加载试验是最基本的结构试验。除少部分试验,如结构长期观测、环境激励下的结构试验外,结构试验都需采用专门的加载设备。

在结构试验方案设计中,正确设计加载方案和选择加载设备是试验成败的关键。结构实验室的加载设备、加载能力或试验现场的加载条件是决定试验设计中试件形状和尺寸的关键因素。若加载方案设计不当,加载设备选择不合理,会影响试验工作顺利进行,甚至导致试验失败,发生安全事故。试验人员应当熟悉各种加载方法和设备,掌握各种加载设备的性能特点,根据不同试验目的和试验对象正确选择加载手段和设备。

结构试验中加载的方法和设备种类很多;按荷载性质可分为静力试验设备和动力试验设备;按加载方法分为重力加载法、机械力加载法、液压加载法、电液伺服加载法、人工爆炸加载法、环境激振加载法、惯性力加载法、电磁加载法、压缩空气或真空作用加载法以及地震模拟振动台加载法等。各种加载方法使用其相应的设备,具有各自的特点。

2.2 重力加载法

重力加载法属静力加载,具有加载方便、能就地取材、试验荷载稳定等特点,适用于建筑结构现场试验。重力加载法是利用物体的重力直接作用在试验对象上,通过控制重物数量改变加载值的大小。在实验室和现场试验中,凡是便于搬运,质量稳定并便于测定的物体均可用于重力加载,常用的加载重物有标准铸铁砝码、水、砂、石、砖、钢锭、混凝土块、载有重物的汽车等。重力加载法分为重力直接加载和间接加载两种方法。

2.2.1 重力加载的荷载作用方式

1. 重力直接加载

重力直接加载是将物体的重力直接作用于结构上的一种加载方法,在结构表面堆放重物模拟构件表面的均布荷载(见图 2-1)。试验时可将块状重物按分级重量逐级施放或在结构表

面围设水箱(见图 2-2), 设置防水膜并向水箱内注水进行加载。用水加载时, 根据水的密度及灌注深度可计算作用于结构表面的荷载大小。利用水加载有许多优点, 水的重力作用最接近于结构所受的重力状态; 易于施加和排放, 加卸载便捷; 适用于大面积的平板试件, 如楼面、屋面、桥面等建筑物的现场试验。水塔、水池、油库等特殊结构, 利用水加载不但操作方便, 而且与结构的实际使用状态一致, 能检验结构的抗裂、抗渗性能。但水加载要求水箱具有良好的防水性能; 水深随结构的挠度发生变化; 对结构表面平整度要求较高; 观测仪表布置较为困难。

2. 重力间接作用

为了增加重力加载时的作用效果或将荷载转变为集中力荷载, 常采用杠杆原理把荷载放大后作用在结构试件上, 如图 2-3 所示。利用杠杆支点间的比例关系, 可将作用力放大 5 倍以上; 在支点处使用分配梁还可实现对试件的两点加载, 如图 2-4 所示。杠杆加载装置应根据实验室或现场试验条件按力的平衡原理设计。根据荷载大小可采用单梁式、组合式或桁架式杠杆。试验时杠杆和挂篮的自重是直接作用于试件上的荷载, 杠杆各支点位置必须准确测量, 实际加载值应根据各支点的比例关系计算获得。

2.2.2 重力加载的特点和要求

1. 重力加载的特点

重力加载是一种传统的加载方式, 有如下特点:

1) 重力加载可以就地取材, 重复使用, 根据情况采用符合要求的石、砖或水等重物。

2) 加载值稳定, 波动小。采用杠杆间接加载时, 作用在试件上的荷载大小不随试件的变形而变化, 特别适用于长期性的结构试验, 如混凝土结构的徐变试验等。

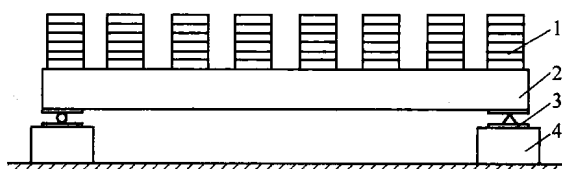


图 2-1 重物直接加载

1—重物 2—试件 3—支座 4—支墩

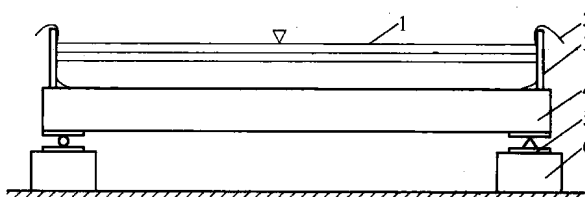


图 2-2 用水加载均布荷载

1—水 2—防水膜 3—水箱 4—试件 5—支座 6—支墩

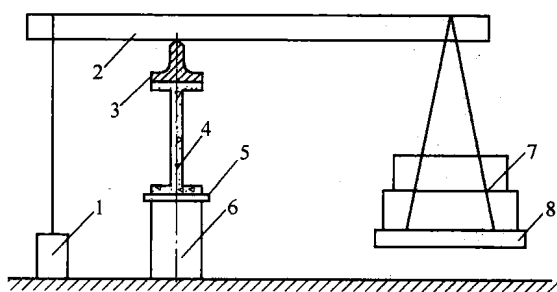


图 2-3 杠杆机构加载原理

1—锚杆 2—杠杆 3—杠杆支点 4—试件 5—支座
6—支墩 7—重物荷载 8—荷载挂篮

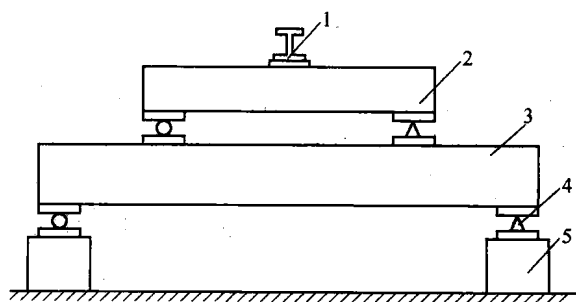


图 2-4 杠杆加载采用荷载分配梁装置

1—杠杆 2—分配梁 3—试件 4—支座 5—支墩

- 3) 重力加载能较好地模拟均布线荷载或均布面荷载,更接近于结构实际受力的状态。
- 4) 采用汽车载重加载可实现对结构的动力加载,如桥梁结构动力加载等。
- 5) 重力加载的劳动量很大,加卸载速度缓慢,耗费时间长。大荷载值试验时,需要动用大量的人力、物力进行试验的准备、加卸载以及重物的分装和运输等。
- 6) 重物占据空间大、安全性差、组织难度大;有时重力加载试验由于重物体积过大无法堆放而难以实现;进行破坏性结构试验时,加载重物随结构破坏塌落,易造成安全事故。

2. 重力加载的要求

重力加载采用的材料有如下要求:

- 1) 加载重物的重量在试验期间应稳定,砂、石、砖等吸湿性材料加载时其含水量的变化会导致荷载减少或增加,试验过程中应采取措施防止含水量变化,试验结束后应立即抽样复查加载量的准确性。采用水等液体加载时,防水膜必须有效,水的渗漏会使荷载量减小。
- 2) 加载重物堆放时应防止因重物起拱而产生卸荷作用;砂、石等颗粒状材料应采用容器分装、逐级称量并规则地堆放在结构上;砖、砝码、钢锭等块状重物应分堆放置,堆与堆之间要有一定的间隙(一般 30 ~ 50mm)。
- 3) 铁块、混凝土块等块状重物应逐块或逐级分堆称量,最大块重应符合加载分级的需要,不宜大于 25kg;红砖等小型块状材料,宜逐级分堆称量。块体大小应均匀,含水量一致,经抽样核实,块重确系均匀的小型块材,可按平均块重计算加载量。
- 4) 采用水作为均布荷载时,水中不应含有泥、砂等杂物,可根据水柱高度或精度不低于 1.0 级的水表计量加载量。
- 5) 称量重物的衡器,示值误差应小于 $\pm 1.0\%$, 试验前应由计量监督部门认可的专门机构标定并出具检定证书。

2.3 机械力加载法

机械力加载是利用简单的机械原理对结构试件加载,建筑结构试验中采用的有卷扬机加载法、倒链加载法,机械千斤顶加载法、弹簧加载法等。

2.3.1 机械力加载法的作用方式

1) 卷扬机加载装置是由卷扬机、钢丝绳、链条测力计或测力传感器、滑轮组、锚固装置等组成。通过钢丝绳或链条对试验结构施加拉力荷载,或使结构产生初位移,如图 2-5 所示。荷载大小由测力计或测力传感器进行测量。

2) 机械式千斤顶加载是利用螺旋千斤顶对结构施加压力荷载,加载值可达 600kN,荷载由压力传感器测量。

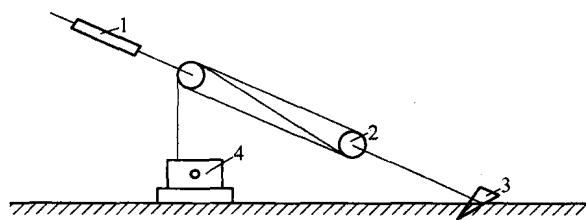


图 2-5 卷扬机加载装置

- 1—链条测力计或测力传感器 2—滑轮组
3—固定桩 4—绞盘或卷扬机

3) 弹簧加载法是利用弹簧压缩变形的恢复力对结构施加压力荷载, 荷载值的大小通过弹簧刚度与弹簧的压缩变形决定, 图 2-6 所示是利用弹簧加载装置对简支梁进行试验的装置。加载前使弹簧产生相应荷载值的变形, 使弹簧保持压缩状态, 依靠弹簧的回弹力施加荷载。弹簧加载法常用于长期加载试验。

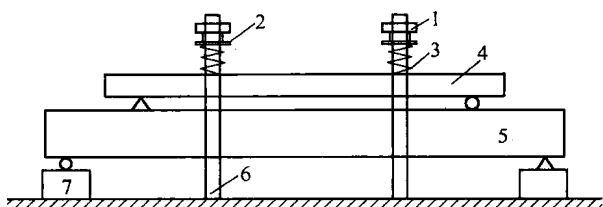


图 2-6 弹簧加载的试验装置

1—螺母 2—垫片 3—彈簧 4—分配梁
5—試件 6—螺杆 7—支墩

2.3.2 机械力加载法的特点和要求

机械力加载设备简单，容易实现加载；采用钢丝绳等索具时，便于改变荷载作用方向。机械力加载法适用于对结构施加水平集中荷载。机械加载能力有限，荷载值不宜太大；采用卷扬机等机械设备加载时，应保证钢丝绳和滑轮组的质量，并具有足够的安全储备；采用卷扬机、倒链等机具加载时，力值量测仪表应串联在绳索中，直接测定加载值，当绳索通过导向轮或滑轮组对结构加载时，力值量测仪表宜串联在靠近试验结构端的绳索中。

2.4 气压加载法

气压加载法是利用压缩气体或真空负压对结构施加荷载，对试验对象施加的是均布荷载。

2.4.1 气压加载法的作用方式

1. 气压正压加载

气压正压加载通过橡胶气囊给试验对象施加荷载，如图 2-7 所示。气囊安置于结构试件表面和反力支承板之间，压缩空气通过管道阀门进入气囊，气囊充气膨胀对物体施加荷载，荷载大小通过连接于气囊管道上的气压表或阀门测量。

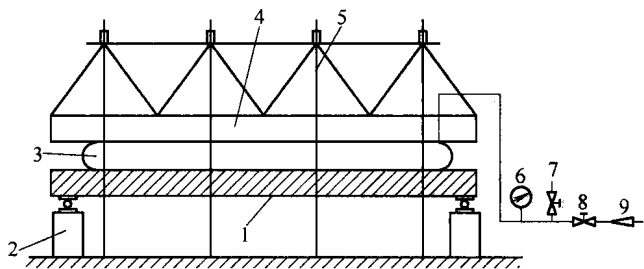


图 2-7 气压加载装置示意图

1—试件(板) 2—荷载支撑装置 3—气囊 4—支撑板
5—反力桁架 6—气压表 7—排气阀 8—进气阀 9—压缩空气进入

2. 真空负压加载

真空负压加载是气压加载的另一种形式，特别适用于面积大、形状复杂的密封结构，如壳体结构。试件应制成中空的密封结构，如图 2-8 所示，试验时从试件空腔向外抽出气体，使结构内外形成压力差，实现由外向内的均布加载，能较真实地模拟结构实

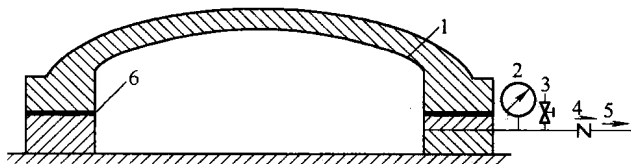


图 2-8 真空加载试验

1—试验壳体 2—真空表 3—进气阀 4—单向阀
5—接真空泵 6—橡胶支撑密封垫

际受力状态。试验时利用真空泵阀门或连接管上的真空表对所施加的荷载进行测量。

2.4.2 气压加载法的特点和要求

1. 气压加载法的特点

- 1) 能真实地模拟面积大、外形复杂结构的均布受力状态。
- 2) 加卸载方便、可靠。
- 3) 荷载值稳定、易控。
- 4) 需要采用气囊或将试件制作成密封结构, 试件制作工作量大。
- 5) 施加荷载值不能太大。
- 6) 构件内表面无法直接观测。
- 7) 气温变化易引起荷载波动。

2. 气压加载法的要求

- 1) 气囊或真空内腔需密封, 接缝及构件与基础间应采用薄膜、凡士林等密封。
- 2) 为控制荷载大小, 有时需在真空室或气囊壁上开设调节孔。
- 3) 充气胶囊不宜伸出试验结构的外边缘, 基础及反力架要有足够的强度。
- 4) 为防止气压变化引起荷载波动, 应增加恒压控制装置, 使气压保持在允许的范围内。
- 5) 应根据气囊与结构表面接触的实际面积和气囊中气压值计算确定加载量。

2.5 液压加载法

液压加载法是建筑结构试验中最理想、最普遍的一种加载方法。液压加载能力大, 新型试验机加载能力可达 30000kN, 可直接进行原型试验; 液压加载装置体积小, 便于搬运和安装; 由液压加载系统、电液伺服阀和计算机可构成先进的闭环控制加载系统, 适用于振动台动力加载系统或多通道加载系统。

2.5.1 液压加载器的类型及工作原理

液压千斤顶是液压加载系统中的主要部件, 由活塞、液压缸和密封装置构成, 其密封装置采用密封环形式, 如图 2-9 所示。当液压泵将液压油压入千斤顶的工作液压缸时, 活塞在压力油的作用下向前移动, 与试件接触后, 活塞便向结构施加荷载, 荷载值的大小由液压油的压强和活塞工作面积确定。即

$$F = pA \quad (2-1)$$

式中 F ——荷载值;

p ——液压油压强;

A ——活塞工作面积。

液压油的压强由连接于管路的压力表测定, 在生产性试验中, 压力表须由法定计量部门检定; 为了确定千斤顶实际作用力, 可在千斤顶端部与试件(或反力架)之间安设测力传感器直

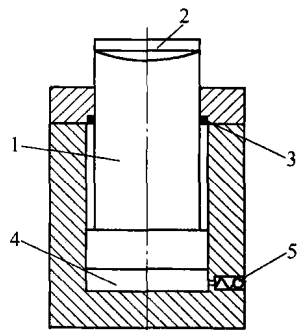


图 2-9 液压千斤顶构造图

1—活塞 2—荷载盘 3—密封圈
4—液压缸 5—进油口