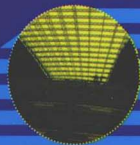
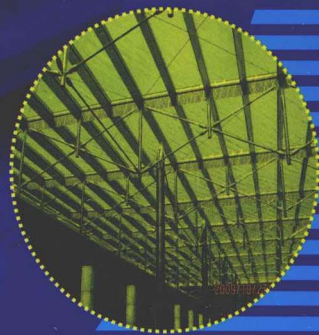


JIANZHU JIEGOU
SHIYAN

 高等学校
土建类专业规划教材

建筑结构试验

杨艳敏 王勃 朱坤 编



化学工业出版社

高等学校土建类专业规划教材

建筑结构试验

杨艳敏 王 勃 朱 坤 编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书根据高等院校土木工程专业教学大纲的要求编写, 主要包括结构试验概论、结构试验荷载及设备、结构试验测量技术、结构静力荷载试验、结构动力试验、结构抗震试验、结构试验现场检测技术、模型试验、结构试验数据处理 9 章内容。本书以建筑结构试验的基本理论和基础知识为重点, 同时介绍了试验的方法与技能, 注重理论与实践相结合, 内容精炼, 突出重点, 适用性强。

本书可供高校土木工程专业本科生及研究生使用, 也可作为从事土木工程专业人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构试验/杨艳敏, 王勃, 朱坤编. —北京:
化学工业出版社, 2010.5
高等学校土建类专业规划教材
ISBN 978-7-122-08196-4

I. 建… II. ①杨…②王…③朱… 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 (2010) 第 063976 号

责任编辑: 陶艳玲
责任校对: 边涛

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 415 千字 2010 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

建筑结构试验是一门以试验为手段的科学，研究和发展结构新材料、新工艺、新体系，为结构的安全使用和设计计算理论的建立提供重要依据。土木工程专业培养目标是使学生获得工程师的基本训练，在实验中培养学生的工程素质。本书要求学生掌握结构试验的基本方法与技能，熟悉先进的试验方法和分析技术，并能针对不同的工程结构类型提出合理的试验设计方案。本书配有典型示例，注重理论与实践相结合，侧重培养学生工程经验和实际案例的积累以及严谨的科研作风和良好的科学思维模式。并在每章后附有习题（部分习题摘自全国一级注册结构工程师执业资格考试试题），使读者进一步巩固试验理论知识，为培养土木工程师具备将相关领域知识综合运用于土木工程设计、施工、结构鉴定及科学研究的能力奠定基础。

本书为适应土木工程专业“创新型”人才培养的需要，根据高等院校土木工程专业的教学要求编写，可供高校土木工程专业本科生及研究生使用，也可供从事土木工程专业的技术人员参考。

本书编写人员：杨艳敏（第4、5、6、8章），王勃（第1、2、9章），朱坤（第3、7章）。本教材承蒙刘殿忠教授审阅，并提出了宝贵意见。在初稿编写过程中得到谢晓娟、蒋丽歌、李正佳、付德成、田宝吉的帮助，书中参考了所列书目中的部分内容，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。有关意见请发至：yangyanmin@jliae.edu.cn。

编者
2010年3月

目 录

第 1 章 结构试验概论	1	3.3.2 电阻应变计的构造、性能、种类	34
1.1 结构试验的任务	2	3.3.3 电阻应变仪	35
1.2 结构试验分类	2	3.4 位移测量	39
1.2.1 试验目的不同	2	3.4.1 线位移测量	39
1.2.2 试验对象不同	3	3.4.2 角位移测量	41
1.2.3 试验荷载不同	3	3.5 力的测量	42
1.2.4 试验荷载持续时间不同	4	3.5.1 机械式力传感器	43
1.2.5 试验场地不同	4	3.5.2 电阻应变式力传感器	43
1.3 建筑结构试验的特点	5	3.5.3 振动弦式力传感器	43
1.4 结构试验技术新发展	5	3.6 裂缝与温度测量	43
本章小结	6	3.6.1 裂缝测量	43
复习思考题	6	3.6.2 温度测量	44
第 2 章 结构试验荷载及设备	7	3.7 振动参数测量	45
2.1 概述	7	3.7.1 拾振器的基本原理	45
2.2 加载方法	7	3.7.2 测振仪器	48
2.2.1 重力加载法	7	3.8 放大器与记录仪	51
2.2.2 液压加载法	9	3.9 数据采集系统	51
2.2.3 机械力加载法	15	3.9.1 数据采集系统的组成	51
2.2.4 气压加载法	15	3.9.2 数据采集的过程	52
2.2.5 惯性力加载法	16	3.9.3 数据采集系统分类	52
2.2.6 人激振动加载法	17	本章小结	53
2.2.7 环境随机振动激振法	18	复习思考题	53
2.2.8 电磁加载法	18	第 4 章 结构静力荷载试验	55
2.3 加荷辅助设施	18	4.1 概述	55
2.3.1 支座与支墩	18	4.2 试验前准备工作	55
2.3.2 反力装置及分配梁	20	4.2.1 调查研究、收集资料	55
2.3.3 试验台座	22	4.2.2 结构静载试验大纲	56
2.3.4 现场试验的荷载装置	25	4.2.3 试件设计	56
本章小结	26	4.2.4 材料力学性能测定	60
复习思考题	26	4.2.5 试验仪器、设备与试验场地的 准备	60
第 3 章 结构试验测量技术	28	4.2.6 试件安装就位	61
3.1 概述	28	4.2.7 安装加载设备和测量仪表	61
3.2 测量仪表的基本特征	28	4.2.8 试验控制特征值的计算	62
3.2.1 测量仪表的基本组成	28	4.3 加载方案设计	62
3.2.2 测量仪表的技术指标	29	4.3.1 结构类型与荷载图式	62
3.2.3 仪表的基本测量方法	29	4.3.2 试件就位形式	63
3.2.4 测量仪表的选用原则	30	4.3.3 加载图式	64
3.2.5 仪表的率定	30	4.3.4 静载试验的加载程序	66
3.3 应变测量	31	4.3.5 试验荷载计算	67
3.3.1 电阻应变计的工作原理	33		

4.4	观测方案设计	70	5.5.1	工程应用	130
4.4.1	确定观测项目	70	5.5.2	结构风工程研究思路	130
4.4.2	测点的选择和布置	70	5.5.3	风洞试验的理论基础	131
4.4.3	选择测量仪器仪表	73	5.5.4	试验方法	131
4.5	结构静载试验	74	5.5.5	试验设备	132
4.5.1	受弯构件试验	74	5.5.6	参数计算	132
4.5.2	受压构件试验	79	本章小结		135
4.5.3	屋架结构静载试验	81	复习思考题		135
4.5.4	砌体结构静载试验	83	第6章 结构抗震试验		137
4.5.5	钢筋混凝土平面楼盖试验	84	6.1	概述	137
4.5.6	薄壳和网架结构	86	6.1.1	结构抗震性能	137
4.5.7	单层工业厂房整体结构试验	91	6.1.2	结构抗震试验的内容	137
4.5.8	足尺房屋结构的整体试验	92	6.1.3	结构抗震试验分类	137
4.6	静力试验的数据整理	95	6.2	拟静力试验	139
4.6.1	挠度	95	6.2.1	试验目的	139
4.6.2	截面内力	97	6.2.2	试验对象	139
4.6.3	平面应力状态下的主应力计算	98	6.2.3	试验设备与加载装置	141
4.6.4	试验曲线与图表绘制	100	6.2.4	加载制度	142
4.7	结构性能评定	102	6.2.5	测点布置与数据采集	146
4.7.1	构件的承载力检验	102	6.3	拟动力试验	146
4.7.2	构件的挠度检验	104	6.3.1	试验方法分析	147
4.7.3	构件的抗裂检验	104	6.3.2	试验步骤	147
4.7.4	构件裂缝宽度检验	105	6.3.3	拟动力试验方法的误差分析	149
4.7.5	构件结构性能评定	105	6.3.4	子结构拟动力试验方法与技术	149
本章小结		107	6.4	地震模拟振动台试验	153
复习思考题		107	6.4.1	地震模拟振动台系统	155
第5章 结构动力试验		110	6.4.2	控制系统与控制方法	156
5.1	概述	110	6.5	人工地震试验	159
5.1.1	基本特点	110	6.5.1	动力反应问题	159
5.1.2	结构动力荷载的类型	110	6.5.2	化爆激发方式	159
5.1.3	结构动力试验的内容	111	6.5.3	测量技术问题	160
5.2	结构动力特性试验	111	6.6	天然地震试验	160
5.2.1	振动荷载法	112	6.7	结构抗震性能的评定	161
5.2.2	撞击荷载法	114	6.7.1	概况	162
5.2.3	脉动法	116	6.7.2	滞回曲线和骨架曲线的特征	163
5.3	结构动力反应试验	122	6.7.3	恢复力特性的模型比	166
5.3.1	动应变的测定	122	本章小结		168
5.3.2	结构动位移的测定	123	复习思考题		168
5.3.3	动力系数的测定	124	第7章 结构试验现场检测技术		170
5.4	结构疲劳试验	125	7.1	概述	170
5.4.1	疲劳试验的目的及内容	125	7.1.1	结构检测程序	170
5.4.2	疲劳试验的分类与特征	125	7.1.2	结构可靠性的评级方法与标准	171
5.4.3	疲劳试验的具体方法	127	7.2	混凝土结构现场检测技术	171
5.4.4	疲劳试验的安装	129	7.2.1	混凝土结构可靠性试验方法比较	172
5.5	风洞试验	129	7.2.2	混凝土强度检测	172

7.2.3	混凝土缺陷检测	178	8.4.3	模型试验应注意的问题	209
7.2.4	混凝土结构钢筋检测	182	本章小结		210
7.2.5	承载能力验算评级	184	复习思考题		210
7.3	砌体结构现场检测技术	185	第9章 结构试验数据处理		212
7.3.1	砌筑块材、砂浆强度检测	186	9.1 概述		212
7.3.2	砌体强度检测	187	9.2 数据的整理和换算		212
7.3.3	承载力的评定	188	9.3 误差分析		214
7.4	钢结构现场检测技术	189	9.3.1 误差的分类		214
7.4.1	钢材强度测定	189	9.3.2 误差的计算		215
7.4.2	连接构造和腐蚀的检查	189	9.3.3 误差的传递		216
7.4.3	超声探伤	189	9.3.4 误差的检验		217
7.4.4	磁粉与射线探伤	190	9.4 数据的表达		219
7.4.5	承载能力和构造连接的鉴定评级	191	9.4.1 表格方式		220
本章小结		191	9.4.2 图像形式		221
复习思考题		191	9.4.3 函数方式		222
第8章 模型试验		193	本章小结		226
8.1 概述		193	复习思考题		226
8.1.1 模型试验的分类		193	附录		227
8.1.2 模型试验的特点		194	附录1 电阻应变片工作特性等级及粘贴技术		227
8.1.3 模型试验的应用		194	附录2 回弹法测强数据表(部分)		229
8.2 模型试验的理论基础		195	附录3 结构试验指导书		234
8.2.1 模型的相似要求和相似常数		195	试验一 电阻应变片粘贴技术及其灵敏系数测定		234
8.2.2 模型设计的相似原理		197	试验二 预制钢筋混凝土空心板鉴定试验		236
8.2.3 相似条件的确定方法		198	试验三 4.2M 钢桁架静载试验		237
8.3 模型设计		202	试验四 钢筋混凝土简支梁试验		241
8.3.1 结构模型设计的程序		203	试验五 回弹法测强试验		243
8.3.2 静力结构模型设计		203	试验六 钢筋混凝土短柱破坏试验		245
8.3.3 动力结构模型设计		204	参考文献		247
8.4 模型材料与选用		208			
8.4.1 模型材料的选择		208			
8.4.2 常用的几种模型材料		208			

第 1 章 结构试验概论

各种建筑物、构筑物和工程设施是在经济条件制约下，以工程材料为主体制成的各种承重构件（梁、板、柱等）相互连接构成的组合体。建（构）筑物在规定的使用期限内，必须安全有效地承受外部及内部各种荷载和作用，以满足在功能及使用上的要求。为此设计者在进行合理设计时，必须综合分析结构在整个使用过程中可能受到的各种风险，掌握各种作用下结构的实际受力状态，了解结构构件的刚度、抗裂性以及安全储备等。

在力学分析中，一方面利用传统的理论计算方法，另一方面利用试验方法，即通过结构试验，采用试验应力分析方法解决。目前计算机技术的发展，为利用数学模型方法进行计算分析创造了条件，同时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、数据整理以及试验过程的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模拟地震波的作用；用计算机联机的电液伺服加载系统可以在静力状态下测量结构的动力反应；计算机完成的各种数据采集和处理工作可以准确、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，因此结构试验仍将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理论分析、结构试验、计算机模拟三者关系如图 1-1 所示，结构试验本身也成为一门真正的试验科学。可见，结构试验是解决土木工程结构领域科研和设计问题必不可少的手段，主要包括以下原因。

（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材料的结构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，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，为设计理论和设计方法的发展进行了大量试验。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资料和试验数据。

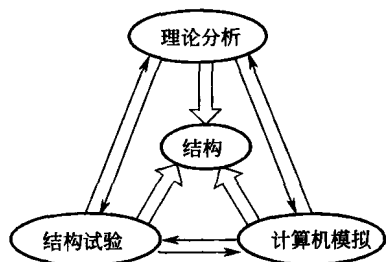


图 1-1 理论分析、结构试验、计算机模拟三者关系

(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技术,由过去重物加载逐步改进为液压加载,进而过渡到低周反复加载、拟动力加载和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。

建筑结构试验是一门技术基础课程。它的主要研究内容有:工程结构中静力试验和动力试验的加载模拟,工程结构变形参数的量测,试验数据的采集处理以及对试验对象的技术评价或理论分析。科学实践是人们正确认识事物本质的一个源泉,可以帮助人们认识事物的内在规律。在结构工程学科中,人们为了正确认识结构的性能和不断深化这种认识,结构试验也是一种已被实践所证明的非常有效的方法。

1.1 结构试验的任务

结构在外荷载作用下,可能产生各种反应。结构试验这门学科的任务就是在结构物(实物或者模型)上使用试验设备,利用各种试验技术,在各种荷载及诸如温度、变形等其他因素作用下,通过测量与结构工作性能有关的各种参数(如强度、刚度、抗裂性以及结构实际破坏形态等),来判明建筑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,用以检验和发展结构的计算理论。

例如,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强度、刚度和抗裂性能;框架承受水平的动力荷载作用时,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;在结构抗震研究中,通过低周反复荷载作用,由试验所得的力与变形关系的滞回曲线来分析抗震结构的承载能力、刚度、延性、刚度退化和变形能力等。

由结构试验的任务可知,它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了重要依据。

1.2 结构试验分类

实际工作中可以根据不同的标准,对结构试验进行分类。以试验目的不同为标准,可分为:生产性试验和科学研究性试验;以试验对象为标准可分为:原型试验和模型试验;以荷载性质为标准可分为:静力试验和动力试验;以试验时间为标准可分为:短期荷载试验和长期荷载试验;以试验场所为标准可分为实验室试验和现场试验。

1.2.1 试验目的不同

(1) 生产性试验

生产性试验具有直接生产的目的。它是以实际建筑物或者结构构件为试验鉴定的对象,经过试验对具体结构做出正确的技术结论。通常用于以下几方面。

① 结构的设计和施工通过试验进行鉴定 对于一些比较重要的结构,除在设计阶段进行大量必要的试验研究外,在实际结构建成以后还要求通过试验综合鉴定其质量的可靠度。

② 工程改建或加固中,通过试验判断具体结构的实际承载力 对于旧有建筑的扩建加层,如为了生产需要提高车间起重能力,或者由于建筑抗震需要进行加固。单凭理论计算不

能得到分析结论时,通过结构试验确定结构的潜在承载能力。对于缺乏旧有结构的设计计算书与图纸时,在要求改变结构的工作条件情况下进行试验很有必要。

③ 处理工程事故,通过试验鉴定提供技术依据 对于遭受地震、火灾、爆炸等原因而损坏的结构,或者在建过程中发现有严重的质量缺陷的建筑,往往也需要进行详细的检验。

④ 已经建成的结构的可靠性检验,通过试验判断和估计结构的剩余寿命 已建建筑结构随着时间增长会出现不同程度的退化现象,为了保证安全使用防止建筑物倒塌等重大安全事故的发生,需要通过建筑进行观察检测,按照可靠性鉴定规程评定建筑的安全等级,以此推断其可靠性估计剩余寿命。

⑤ 鉴定预制构件产品的质量 预制构件在进行现场安装之前必须根据科学抽样原则,通过少量试验推断成批产品的质量。

(2) 科学研究性试验

① 通过结构试验验证结构计算理论或者创立新的结构理论 随着科学技术的不断发展,新材料、新方法、新结构、新工艺的不断涌现,新的结构体系、新的设计理论必须通过试验的检验;结构计算中的基本假设也需要试验验证,同时结构试验也是新发现的源泉。我们称结构工程为试验科学,就是强调结构试验在推动结构工程技术发展中所起的作用。

② 通过结构试验制定技术标准 工程结构关系到公共安全和国民经济的发展,建筑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。制定上述标准中除了总结已有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、钢结构的结构试验。系统的结构试验和研究为结构的安全性、适用性、耐久性提供了可靠的保证。

1.2.2 试验对象不同

根据试验对象的不同,结构试验分为原型试验和模型试验。在原型试验中试验对象的尺寸与实际相同或接近,可不考虑结构尺寸效应的影响。完全足尺的原型试验一般是鉴定性的试验,大多在现场进行,并且大多为非破坏性试验。随着建筑结构抗震研究的发展,国内外已开始重视对结构整体性的研究。通过对这类足尺结构的试验研究,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破坏阶段的实际工作进行全面观测了解。原型试验的投资大、试验周期长、加载设备复杂。

在实验室中能进行大量的模型试验,模型试验是指被试验的结构或构件与原型在几何形状上基本相似,具有原型结构的主要特征,但各部分结构或构件按比例缩小。与原型试验相比,模型试验的关键是模型的设计与制作。模型必须按照相似理论制作,所受荷载也应与实际相符,这样就可以从模型试验推断原型结构的力学性能。模型试验常用于验证原型结构的设计参数或结构设计的安全度。

1.2.3 试验荷载不同

根据结构试验中被试验的结构或构件所承受的荷载不同而把试验分为结构静载试验和动载试验。

(1) 静载试验

静载试验是结构试验中最常用的试验方式,在静载试验过程中结构本身的惯性力可以忽略不计。根据试验性质的不同静载试验又可分为单调静力荷载试验、低周反复荷载试验和拟动力试验。

① 单调静力荷载试验的加载过程是从零开始逐步递增,直到结构破坏,在一个不长的

时间内完成加载。

② 低周反复荷载试验是一种结构抗震试验方法，结构在遭受地震作用时，要承受反复作用的惯性力。低周反复荷载试验利用加载系统使结构承受逐渐增大的反复作用荷载或者交替变化的位移，直到破坏。在这类试验中结构或构件的受力类似于地震作用，但加载速度远低于实际结构在地震作用下的变形速度，故而这类试验也被称为伪静力加载试验。

③ 结构拟动力试验也是一种结构抗震试验方法，目的是模拟结构在地震作用下的行为。在试验中将测得的力、位移等数据输入到计算机，计算机根据结构的当前状态和已经输入的地震波，控制加载系统使结构产生计算确定的位移，由此形成一个递推过程最终得到结构在地震作用下的时程响应曲线。

(2) 动载试验

动载试验中利用各类动载试验设备使结构受到动力作用并观测动力响应，进而掌握结构的动力性能。如研究厂房结构承受吊车及动力设备下的动力特性，吊车梁的疲劳强度等问题。动力试验的加载设备和测试手段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 试验荷载持续时间不同

按照荷载作用时间的长短，结构静载试验又分为短期荷载试验和长期荷载试验。实际中结构所受的荷载往往是长期作用的，但是限于实验室条件与试验时间等因素，我们不得不进行大量的短期荷载试验，即从零加载直到结构破坏，或到某阶段进行卸荷时的总时间只有几十分钟、几个小时或者几天。严格上说短期荷载试验不能代替长年累月的长期荷载试验，像这种由于具体客观因素或技术的限制所产生的影响在最后试验数据分析时必须加以考虑。

对于研究结构在长期荷载作用下的性能，如混凝土徐变、预应力中钢筋的松弛等就必须进行静力荷载的长期试验，也可称为持久试验。它将连续进行几个月或者几年的时间。通过试验获得结构变形随时间变化的规律。为了保证试验精度常常要对试验环境进行严格的控制，如保持恒温恒湿、防止振动等，所以长期荷载试验必须在实验室进行。

1.2.5 试验场地不同

按照试验场所不同结构试验可分为实验室结构试验和现场结构试验。

(1) 实验室结构试验

实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，随着大型结构实验室的建设，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。

(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，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实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 建筑结构试验的特点

建筑结构试验这门课程与其他专业课有着密切的关系，主要表现在以下各方面。

首先，建筑结构试验课程以土木工程的专业知识为基础。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，在结构试验过程中，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，才能准确的理理解结构受力的本质，并通过试验结果提高结构理论水平。

近年来，随着建筑法规的不断完善，在对结构进行鉴定性试验和科研性试验时，试验方法必须遵守相应的规则。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)等各方面的专门技术标准及规范。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、统一评价标准，其作用与结构设计规范相同，在进行结构试验时必须严格遵守。

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，应该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领悟。

1.4 结构试验技术新发展

结构试验技术的发展与结构实践经验的积累和试验仪器设备及量测技术的发展有着极为密切的联系。由于结构试验应用的日益广泛，目前几乎每一个重要工程的新建结构都在经过规模或大或小的检验后才投入使用，建筑设计规范的制定和建筑结构理论的发展也与试验研究紧密联系。在现代建造技术的支持下，大型结构试验设备不断投入使用，加载设备模拟实际受力状态的能力越来越强。例如，以再现极端灾害条件为目的相继投入使用了大型风洞、大型火灾模拟试验系统等，结构试验人员和工程师能更准确掌握结构性能，改善结构防火抗灾能力，发展结构设计理论。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。另一方面，近代仪器设备和测量技术的发展，特别是非电量电测自动控制和电子计算机等先进技术设备应用到结构试验领域，为试验工作提供了有效的工具和先进的手段，使试验的加载控制、数据采

集、数据处理以及曲线图表绘制等实现了整个试验过程的自动化。同时国内科研机构，高等院校及生产单位等新建的结构实验室和科技工作者对结构试验的研究，也为建筑结构试验的发展在理论和物质上提供了有利的条件。

当今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内容。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。新材料的运用，特别是新型半导体材料的研究与开发，促进了很多对于应力、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500点/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。

当今科学试验已经成为一种独立的社会实践，它将有力的促进生产的发展。建筑结构试验将与其他科学试验工作一样，必然会对于建筑事业的发展产生巨大的促进和推动作用。

本章小结

① 按试验目的不同、试验对象不同、试验荷载不同、试验荷载持续时间不同、试验场地不同，对结构试验进行分类。

② 主要介绍生产鉴定性试验解决的一些工程问题。

③ 简单介绍结构试验的研究内容：工程结构中静力试验和动力试验的加载模拟，工程结构变形参数的量测，试验数据的采集处理以及对试验对象的技术评价或理论分析。

④ 分析建筑结构试验的特点，展望结构试验技术新发展，先进的结构试验技术必将促进建筑业的发展。

复习思考题

简答题

1. 结构试验的目的是什么？
2. 建筑结构试验可分为几类？有何作用？

第 2 章 结构试验荷载及设备

2.1 概述

工程结构的作用分为直接作用和间接作用。直接作用主要是荷载作用，其中包括结构的自重以及施加在结构上的荷载，比如作用在屋面上的活荷载、雪荷载等。间接作用主要有温度变化、地基不均匀沉降和结构内部的物理或化学作用等。

直接作用按作用的范围，可分为均布荷载作用和集中荷载作用；按作用的时间长短，可分为短期荷载作用和长期荷载作用；按对结构的动力效应分可分为静力荷载作用及动力荷载作用，其中静力荷载作用是指对结构或者构件不引起加速度或者加速度可以忽略不计的作用；动力荷载作用是指使结构或者构件产生不可忽略的加速度反应的作用。

结构试验为模拟结构在实际受力状态下的反应，需要对试验对象施加荷载。试验用的荷载形式、大小、加载方式等一般是根据试验目的、要求和实验室设备水平以及现场的实际条件来选择。正确而合理的荷载设计对整个试验工作至关重要，如果设计不妥就会影响工作进展，甚至造成整个试验的失败，严重的还会发生事故。因此必须要进行正确的荷载设计，同时合理选择加载设备。

静力试验中有利用重物的直接加载法和利用杠杆作用的间接加载法；利用液压加载器（千斤顶）和液压试验机的液压加载法；利用绞车、滑轮组、弹簧和螺旋千斤顶等机械的机械加载法以及利用压缩空气或真空作用的气压加载法等。

动力荷载试验中一般利用惯性力或电磁系统激振，动力荷载设备有电液伺服加载系统和由此作为振源的地震模拟振动台加载设备等。此外也广泛使用人激振动加载法和利用环境随机激振的方法。

试验荷载以及加载设备应该满足以下要求。

- ① 荷载值准确稳定且符合实际荷载作用模式及传递模式，产生的内力应与设计计算等效。
- ② 荷载易于控制，能够按照设计要求的精度逐级加载和卸载。
- ③ 加载设备本身应具有足够的承载力、刚度、足够的安全储备。
- ④ 加载设备不参与试验结构或构件的工作，不影响结构或构件的自由变形以及受力状态。
- ⑤ 尽量采用先进的加载技术，满足自动化要求，减少人为误差，提高试验精度。

2.2 加载方法

2.2.1 重力加载法

重力加载法又可分为直接加载法和杠杆加载法。

(1) 直接加载法

直接加载法就是借助一定的支承装置，利用物体本身的重量作为荷载，直接施加于试验

结构或构件上的方法，如图 2-1 所示。实验室内可利用的重物有专门的标准铸铁砝码、混凝土立方体块、水箱等；在现场可以就地取材，利用普通的砂、石、砖块等建筑材料。需要注意的是利用松散材料时应将之装入袋内以便于堆放，同时某些松散材料的重量会随环境的湿度发生改变。重物直接作用在结构表面模拟均布荷载时，为了防止荷载本身的起拱作用引起结构局部卸载，最好使用形体较为规则的块状材料加载。同时注意将块体叠放整齐，每堆重物的宽度小于试验结构跨度的 $1/6$ ，堆与堆之间留有 $5\sim 15\text{cm}$ 的间隔。如果是利用铁块钢锭作为荷载，为了试验的方便与操作安全每块重物的质量不应大于 25kg 。

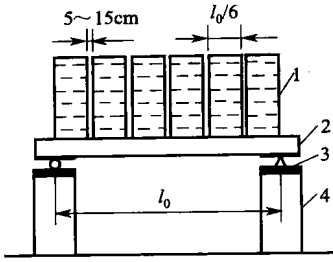


图 2-1 利用重物作均布加载试验
1—重物；2—试件；3—支座；4—支墩

模拟集中荷载时可以将重物置于荷载盘上，通过吊篮形成集中荷载，如图 2-2 所示。此外也可借助钢索和滑轮导向对结构施加水平荷载。

对于大面积平板结构如楼面、平屋顶等，采用水做试验荷载较为合适，既简便又经济。加载时利用进水管进水，水的相对密度为 1，从标尺处的水深就可知道荷载值的大小， 10cm 高度代表 1kN/m^2 的荷载。卸载时利用虹吸管原理放水，可以节省大量的劳动，如图 2-3 所示。但当结构产生较大变形时应注意水荷载的不均匀性对结构受力产生的影响。

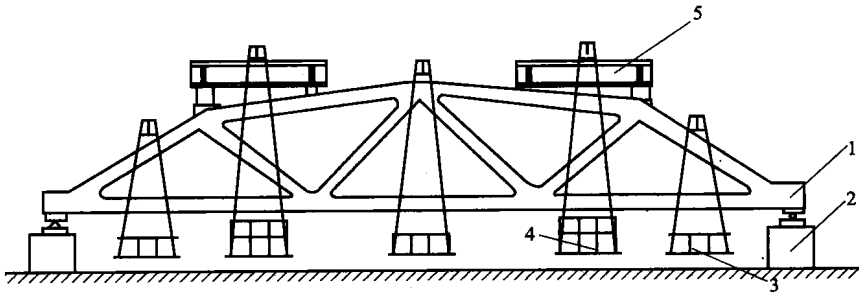


图 2-2 用重物作集中加载试验
1—试件；2—支座；3—重物；4—加载吊篮；5—分配梁

(2) 杠杆加载法

利用重物施加集中荷载，经常会受到荷载量的限制。这时可利用杠杆原理将荷载放大后再作用在结构上，如图 2-4 所示。杠杆加载法设备组装简单，只需杠杆、支点、荷载盘即可，现场用杠杆加载的支承方式，如图 2-5 所示。此方法适合做持久荷载试验及进行与刚度有关的试验。

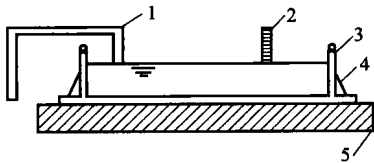


图 2-3 用水作均布荷载的试验装置
1—水管；2—标尺；3—防水胶布或塑料布；
4—侧向挡板；5—试件

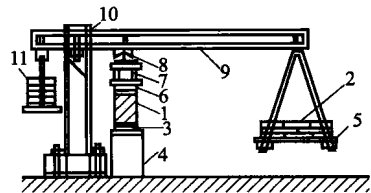


图 2-4 用杠杆加载
1—试件；2—重物；3—支座；4—支墩；5—荷载盘；
6—分配梁支座；7—分配梁；8—加载支点；9—杠杆；
10—荷载支架；11—杠杆平衡重

利用杠杆加载，杠杆必须具有足够的刚度、平直度。三点之间的距离确定荷载的放大比例，加载点、支点及重物悬挂点必须明确位置，这三点尽量在同一直线上，以免因结构变形使杠杆倾斜，改变杠杆原有放大率。

2.2.2 液压加载法

液压加载一般为油压加载，利用油压使千斤顶产生较大的荷载，试验安全操作方便，尤其适合荷载点数多、吨位大的大型结构试验。液压加载系统由油箱、油泵、阀门、液压加载器（千斤顶）等用油管连接，配以测力计和支承结构而组成，其中液压加载器是重要的部件，它的工作原理是利用高压油泵将具有一定压力的液压油压入液压加载器的工作缸，使之推动活塞运动，对结构施加荷载。荷载值由液压表示值和加载活塞受压底面积求得，也可由液压加载器与荷载承力架之间所置的测力计直接读取，或用电子传感器将信号输给电子秤显示或利用记录器直接记录。

在静力试验中常用的加载器有普通手动液压加载器，还有专门为结构试验设计的单向作用及双向作用液压加载器。

普通手动液压加载器构造原理如图 2-6 所示。使用时先拧紧放油阀，掀动手动油泵的手柄，使储油缸中的油通过单向阀压入工作油缸，推动活塞上升。这种加载器的活塞最大行程为 20cm 左右，一般能产生 $40\text{N}/\text{mm}^2$ 或更大的液体压力。

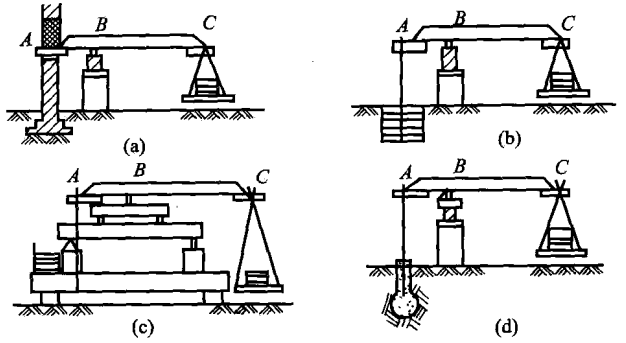


图 2-5 现场试验中杠杆加载的支承方式
(a) 利用试验台座；(b) 利用墙身；(c) 利用平衡重；(d) 利用桩

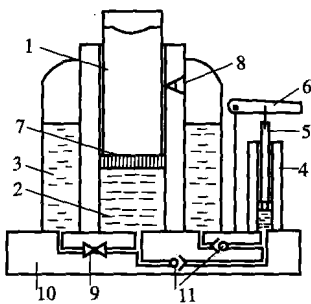


图 2-6 手动液压加载器

- 1—工作活塞；2—工作油缸；3—储油缸；4—油泵油缸；
- 5—油泵活塞；6—手柄；7—油封；8—安全阀；
- 9—泄油阀；10—底座；11—单向阀

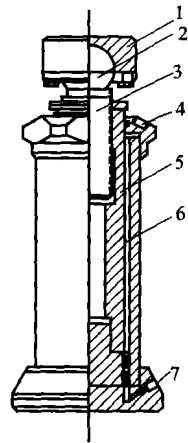


图 2-7 单向作用液压加载器

- 1—顶帽；2—球铰；3—活塞丝杆；4—活塞复位油管接头；
- 5—活塞；6—油缸；7—工作压力油管接头

为了配合结构试验同步液压加载的需要，专门设计的单向液压加载器的构造如图 2-7 所示。它的特点是储油缸、油泵、阀门等不附在加载器上，构造简单，只有活塞和工作油缸。其活塞行程较大，顶端装有球铰，在 15° 范围内可转动。整个加载器还可以倒转使用，适宜

同步加载系统使用。

双向作用液压加载器如图 2-8 所示，其特点是在油缸两端各有一个进油孔，设置油管接头，可通过油泵以及换向阀交替供油，使活塞对结构产生拉压双向作用，施加反复荷载。

2.2.2.1 液压加载系统

使用前述液压加载器在试验台座或现场进行试验时，还需配置各种支承系统，来承受液压加载器对结构加载的平衡力系。利用普通液压加载器配合反力架和静力试验台座是最简单的一种加载方法。设备简单、作用力大、加载卸载安全可靠。但是当要求多点加载时，就需要多人同时操纵多台液压加载器，很难达到同步。比较理想的方法是采用多个单向液压加载器组成的同步液压加载系统来进行试验，即在油泵出口接上分油器，组成一个油源供多个加载器使用的同步加载系统。

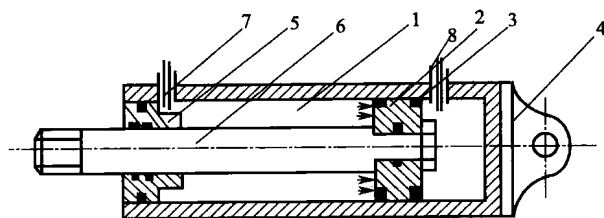


图 2-8 双向作用液压加载器

- 1—工作油缸；2—活塞；3—油封装置；4—固定环；
5—端盖；6—活塞杆；7、8—油管接口

多个单向液压加载器组成的同步液压加载系统来进行试验，即在油泵出口接上分油器，组成一个油源供多个加载器使用的同步加载系统。

2.2.2.2 大型结构试验机

大型结构试验机是实验室内进行大型结构试验的专门设备，是一个比较完善的液压加载系统。比较典型的试验机有长柱试验机、万能材料试验机和结构疲劳试验机等。

结构长柱试验机用以进行柱、墙板、砌体、节点、梁的受压、受弯试验。该设备的构造与原理和一般材料试验机相同，由液压操纵台、大吨位的液压加载器和试验机架三部分组成，如图 2-9 所示。它的最大加载值能够达到 10000kN，机架高度达 10m 以上。

大型结构试验机可以通过中接口与计算机连接由程序控制自动操作。此外还配有专门的数据处理设备，极大提高了试验效率。

结构疲劳试验机可作正弦波形荷载的疲劳试验，也可做静载试验和长期荷载试验等。疲劳试验机主要由脉动发生系统、控制系统和千斤顶工作系统三部分组成，结构疲劳试验装置如图 2-10 所示。工作原理如图 2-10(b) 所示，从高压油泵输出的高压油经脉动器与工作千斤顶和控制系统中的油压表连通，当飞轮带动曲柄运动时，使脉动器活塞上下移动而产生脉动油压。脉动频率通过电磁无级调速电机控制飞轮转速进行调整。国产 PME-50A 疲劳试验机，试验频率为 100~500 次/min，可做单向（拉或压）应力疲劳试验。疲劳次数由计数器自动记录，计数至预定次数或试件破坏时即自动停机。

图 2-10(a) 为疲劳试验机进行吊车梁疲劳性能试验。疲劳试验时，由于千斤顶运动部件的惯性和试件质量影响，会产生一个附加力作用在构件上，该值在测量仪表中未测出，故实际荷载值需按机器说明加以修正。

疲劳试验机安全可靠，使用方便。目前国内使用的机型除国产 PME-50A 以外，还有瑞士的 Amsler 机等，因为附有蓄力器等一套系统，可进行交变（拉、压）应力疲劳试验。由

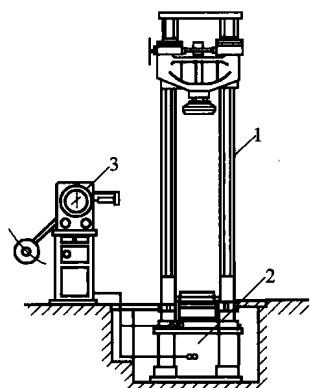


图 2-9 结构长柱试验机

- 1—试验机架；2—液压加载器；
3—液压操纵台