

普通高等教育“十二五”规划教材

建筑结构 试验与检测

吴晓枫 主编

JIANZHU JIEGOU
SHIYAN YU JIANCE



化学工业出版社

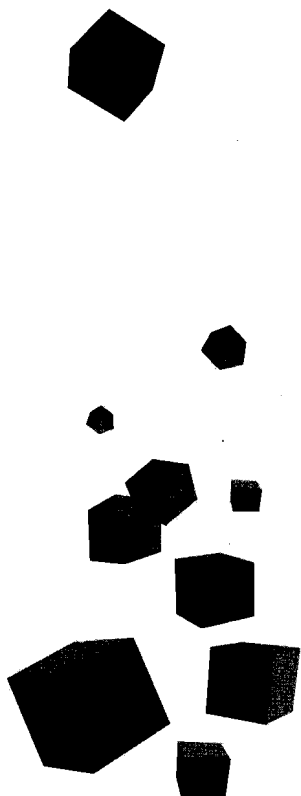


普通高等教育“十二五”规划教材

建筑结构 试验与检测

吴晓枫 主编

邓华锋 黄小红 肖云凤 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

前 言

建筑结构试验与检测是土木工程专业的一门专业技术课程。本教材紧密结合人才培养模式，使课程的设置与教学内容符合当今土木工程专业的教学计划和教学大纲的规定，在编写过程中，力求涵盖土木工程结构试验和检测的各学科领域，并反映最新的科学技术发展和工程应用成就。本书主要内容包括：建筑结构试验设计，加载设备，结构试验测试技术和量测仪表，结构试验数据处理，现场检测技术以及地基和桩基础检测技术等新内容，并力求体现内容精简、分量适当、主次合理、重点突出、语言通俗等特点。

本教材反映了国家现行相关规范和其他有关规定，采用新的国际通用符号和我国法定计量单位。

本书由常州工学院吴晓枫任主编，三峡大学邓华锋、中南林业科技大学肖云凤、常州工学院黄小红参加了编写工作。具体分工如下：第1章、第2章、第4章、第5章、第9章由吴晓枫编写，第3章由肖云凤编写，第6章、第7章由邓华锋编写，第8章由黄小红编写。由吴晓枫对全书进行了统稿和修改工作。

本书可作为土木工程专业基础技术课教材，也可供从事各类工程结构设计与施工的工程技术人员参考。

在本书编写过程中，参考了相关文献资料，特此向作者表示感谢。

由于作者的学识和水平有限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

2011年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 建筑结构试验的任务	1
1.2 建筑结构试验的目的	2
1.2.1 生产鉴定性试验	2
1.2.2 科学研究性试验	2
1.3 建筑结构试验和检测的分类	3
1.3.1 静力试验和动力试验	3
1.3.2 真型试验和模型试验	4
1.3.3 短期荷载试验和长期荷载试验	4
1.3.4 实验室试验和现场试验	5
1.3.5 结构检测	5
思考题	6
第 2 章 建筑结构试验设计	7
2.1 结构试验设计概述	7
2.2 结构试验的试件设计	8
2.2.1 试件形状	8
2.2.2 试件尺寸	9
2.2.3 试件数目	10
2.2.4 试件设计的构造要求	13
2.3 结构试验的模型设计	14
2.3.1 模型的相似	14
2.3.2 量纲分析法	17
2.4 结构试验的荷载设计	19
2.4.1 结构试验荷载图式的选择与设计	19
2.4.2 试验加载装置的设计	20
2.4.3 结构试验荷载值和加载制度的设计	22
2.5 结构试验的观测设计	22
2.5.1 观测项目的确定	23
2.5.2 测点的选择与布置	23
2.5.3 仪器的选择	24
2.5.4 仪器的测读原则	24
2.6 建筑结构试验的安全与防护措施设计	25
2.6.1 结构静力试验的安全防护措施	25
2.6.2 结构动力试验的安全防护措施	26
2.7 结构试验大纲和基本文件	26
2.7.1 结构试验大纲的内容	26
2.7.2 结构试验的基本文件	27
思考题	27
第 3 章 结构试验的加载设备	28
3.1 概述	28
3.2 重力加载法	28
3.2.1 重力直接加载	28
3.2.2 重力间接加载	28
3.3 机械力加载法	29
3.4 气压加载法	29
3.5 液压加载法	30
3.5.1 液压千斤顶的工作原理	30
3.5.2 静力试验液压加载装置的工作原理	31
3.5.3 大型结构试验机	32
3.5.4 电液伺服试验加载系统	32
3.5.5 电液伺服振动台	33
3.6 惯性力加载法	34
3.6.1 初位移法	35
3.6.2 初速度加载法	35
3.6.3 离心力加载法	35
3.6.4 直线位移惯性力加载	35
3.7 电磁加载法	36
3.8 人激振动加载法	36
3.9 环境随机振动激振法	37
3.10 荷载支承设备	37
3.10.1 支座	37
3.10.2 支墩	38
思考题	38
第 4 章 结构试验测试技术与量测仪表	40
4.1 概述	40
4.2 量测仪表的工作原理及分类	40
4.2.1 量测仪表的工作原理	40
4.2.2 量测仪表的技术指标及选用原则	41
4.2.3 仪器的率定	42
4.3 应变测量仪器	42
4.3.1 电阻应变片	42
4.3.2 电阻应变仪	44

4.3.3 实用电路及其应用	46	6.2.3 试件的检测安装方式	82
4.3.4 电阻应变片粘贴技术	47	6.2.4 试件的安装就位要求	82
4.4 位移测量仪器	50	6.3 单调静力荷载试验	83
4.4.1 结构线位移测定	50	6.3.1 单调静力荷载试验加载制度	83
4.4.2 结构转动变形测定	52	6.3.2 受弯构件的试验	87
4.5 力值测量仪器	54	6.3.3 受压构件的试验	91
4.5.1 荷载和反力测定	54	6.3.4 单调静力荷载试验数据整理分析、 结构性能评价	92
4.5.2 拉力和压力测定	54	6.4 拟静力试验	96
4.5.3 结构内部应力测定	55	6.4.1 加载设备和试验装置	96
4.6 裂缝、应变场应变及温度测定	56	6.4.2 加载方法和加载程序	97
4.6.1 裂缝测定	56	6.4.3 观测项目	99
4.6.2 内部温度测定	57	6.4.4 拟静力试验数据分析	100
4.7 振动测量仪器	58	6.5 拟动力试验	102
4.7.1 拾振器的力学原理	58	6.5.1 拟动力试验的基本原理	102
4.7.2 测振传感器	61	6.5.2 拟动力试验的设备	103
4.8 数据采集与记录系统	63	6.5.3 拟动力试验的试验步骤	103
4.8.1 数据采集系统的组成	63	6.5.4 拟动力试验的特点和局限性	103
4.8.2 数据采集系统的分类	63	6.5.5 钢筋混凝土框架足尺结构拟动力 试验	104
4.8.3 数据采集过程	64	思考题	106
思考题	64	第7章 结构试验现场检测技术	107
第5章 建筑结构试验数据处理	66	7.1 概述	107
5.1 概述	66	7.2 混凝土结构现场检测技术	107
5.2 数据的整理和换算	66	7.2.1 一般要求	107
5.3 数据的统计分析	67	7.2.2 回弹法检测混凝土强度	108
5.3.1 平均值	67	7.2.3 超声脉冲法检测混凝土强度	111
5.3.2 标准差	67	7.2.4 超声-回弹综合法检测混凝土 强度	112
5.3.3 变异系数	68	7.2.5 钻芯法检测混凝土强度	113
5.3.4 随机变量和概率分布	68	7.2.6 拔出法检测混凝土强度	114
5.4 误差分析	69	7.2.7 超声法检测混凝土强度缺陷	115
5.4.1 误差的分类	69	7.2.8 钢筋检测	118
5.4.2 误差的计算	70	7.3 砌体结构现场检测技术	119
5.4.3 误差传递	70	7.3.1 一般要求	119
5.4.4 误差的检验	71	7.3.2 砌体结构检测的要求	120
5.5 数据的表达	74	7.3.3 砂浆强度检测	121
5.5.1 表格方式	74	7.3.4 砌体强度检测	124
5.5.2 图像方式	74	7.4 钢结构现场检测技术	126
5.5.3 函数方式	76	7.4.1 一般要求	126
思考题	80	7.4.2 材料力学性能检测	126
第6章 建筑结构静力试验	81	7.4.3 超声法检测钢材和焊缝缺陷	127
6.1 概述	81	7.4.4 钢结构性能的静力荷载检验	128
6.2 静载检测的计划和准备工作	81	7.4.5 钢结构防火涂层厚度的检测	129
6.2.1 调查研究、收集资料、清楚任务、 明确目的	81		
6.2.2 检测方案的制定	81		

思考题	130	9.1.1 地基土的载荷试验	153
第 8 章 路基路面现场检测技术	131	9.1.2 复合地基静载试验	156
8.1 路基路面质量控制参数现场检测	131	9.2 桩基静载试验	157
8.1.1 取样方法	131	9.2.1 单桩静压试验	157
8.1.2 几何尺寸的测试	131	9.2.2 单桩静拔试验	160
8.1.3 路面厚度检测	133	9.2.3 单桩水平荷载试验	161
8.1.4 路基路面压实度检测	134	9.3 桩基动力检测	162
8.2 路面使用性能检测	138	9.3.1 低应变法	162
8.2.1 平整度检测	138	9.3.2 高应变法	165
8.2.2 路面破损状况现场检测	141	9.4 桩基完整性及缺陷检测	168
8.2.3 承载能力检测	143	9.4.1 声波透射法	168
8.2.4 路面抗滑性能检测	147	9.4.2 钻芯法	172
思考题	152	思考题	173
第 9 章 地基及桩基础检测	153	参考文献	174
9.1 地基承载力检测	153		

第 1 章 绪 论

建筑结构试验是研究和发展结构计算理论的重要手段。从确定工程材料的力学性能到验证由各种材料构成的不同类型的承重结构或构件（梁、板、柱等）的基本计算方法，以及近年来发展的大量大跨、超高、复杂结构体系的计算理论，都离不开试验研究。特别是混凝土结构、钢结构、砖石结构、公路桥涵和地基基础等设计规范所采用的计算理论，几乎全部是以试验研究的直接结果作为基础的。近几年来，计算方法的发展和计算机技术的广泛应用，为采用数学模型方法对结构进行计算分析创造了条件，尽管可以减少一定数量的试验研究，但由于实际结构的复杂性和结构在整个生命周期中可能遇到各种风险，试验研究仍是必不可少的主要手段。

同时，建筑工程学科的发展又推动了试验检测技术的发展。随着超高层建筑、大跨度桥涵结构、高速公路以及核反应堆压力容器、海洋石油平台、地铁、隧道、大型港口设施等各种工程结构物的出现，对结构整体工作性能、结构动力特性、结构非线性性能等问题的研究已经日益突出，这就使结构试验由过去的单个构件试验向整体结构试验和足尺试验发展。目前，所采用的各种结构的伪静力试验、拟动力试验和振动台试验等已打破了过去静载试验和动载试验的界限，能较准确地再现各种复杂荷载作用，加之传感技术的发展应用和量测数据的快速自动采集以及试验数据的分析处理方法等方面的进步，促使试验检测技术的发展发生了根本性的变化。在结构动力分析方面，为了对地震和风荷载等产生的结构动力反应进行实测和实施结构控制，近年来迅速发展的实验模态分析方法和系统识别技术也引起专家们的普遍关注，并开始进入应用阶段。

试验检测技术的发展和各种现代科学技术的发展密切相关，尤其是各类学科的交叉发展和相互渗透所做出的贡献功不可没。近几年来国内外推出的光纤传感量测技术就是典型的例子。大跨度桥梁和超高层建筑的“健康”监测技术的开发研究，就综合运用了光纤传感技术、微波通信、卫星跟踪监控等多项新技术，并已经在中国香港青马大桥、江阴长江大桥、南京长江第二大桥和深圳帝王大厦等重要工程中实施与应用，并对这些工程的安全使用发挥了重要作用。另外在非破损检测方面，混凝土结构雷达和红外热成像仪等新技术的出现为结构损伤检测开辟了新的途径。这些发展无疑使试验检测技术产生了质的飞跃。由此可以看出，试验检测技术是由各学科知识的综合运用而发展起来的，其本身已逐步成为一门真正的试验科学，今后也将有更深入的发展。

1.1 建筑结构试验的任务

建筑结构试验是土木工程的专业基础课，其研究对象是建设工程的结构物。这门学科的任务是在试验对象上应用科学的试验组织程序，以仪器设备为工具，利用各种实验手段，在荷载或其他因素作用下，通过量测与结构工作性能有关的各种参数，从强度、刚度和抗裂性能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。

所以，建筑结构试验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重要根据的学科。

1.2 建筑结构试验的目的

在实际工作中,根据试验目的的不同,建筑结构试验可以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。

1.2.1 生产鉴定性试验

鉴定性试验经常具有直接生产目的,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得出正确的技术结论。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,除需在设计阶段进行必要而大量的试验研究外,在实际结构建成以后,还应通过试验综合性地鉴定其质量的可靠程度。上海南浦大桥和杨浦大桥建成后的荷载试验以及秦山核电站安全壳结构整体加压试验均属于此类。

(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出厂或在现场安装之前,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,以推断一批产品的质量。

(3) 工程改建或加固时通过试验判断结构的实际承载能力

既有建筑扩建加层或进行加固,单凭理论计算难以得到确切结论时,常常需要通过试验确定结构的实际承载能力。旧结构缺少设计计算书和图纸资料时,在需要改变结构实际工作条件的情况下进行结构试验更有必要。

(4) 为处理受灾结果和工程事故提供技术依据

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。唐山地震后,北京农业展览馆主体结构由于加固的需要,曾进行环境随机振动试验,利用传递函数谱进行结构模态分析,通过振动分析最终获得该结构模态函数。

(5) 通过已建结构可靠性检验推定结构剩余寿命

已建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,甚至进入老龄期、退化期或更换期,有的进入危险期。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,国内外对建筑物的使用寿命,特别是对剩余使用期限特别关注。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,可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。

1.2.2 科学研究性试验

科研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、新材料及新工艺提供实践经验和设计依据。

(1) 验证结构计算理论的各种假定

在结构设计中,为计算上的方便,经常对结构计算图式或结构关系进行某些简化假定。这些假定是否成立,可通过试验加以验证。在构建静力和动力分析中结构关系的模型化,完全是通过试验加以确定的。

(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及施工工艺的发展,都离不开科学试验。

(3) 为制定设计规范提供依据

为了制定我国的设计标准、施工验收标准、试验方法标准和结构可靠性鉴定标准等,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,进行了系统的科研性试验,提出了符合我国国情的设计理论、计算公式、试验方法标准和可靠性鉴定分级标准,进一步完善了规范体系。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,几乎全部是以试验研究的分析结果为基础建立起来的。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。

1.3 建筑结构试验和检测的分类

建筑结构试验可按试验目的、荷载性质、试验对象、试验周期、试验场合等因素进行分类。

1.3.1 静力试验和动力试验

(1) 静力试验

静力试验是建筑结构试验中最常见的基本试验,一般可以通过重力或各种类型的加载设备来实现和满足加载要求。“静力”一般是指试验过程中,结构本身运动的加速度效应可以忽略不计。静力试验分为单调静力加载试验、拟静力试验和拟动力试验。

单调静力加载试验的加载过程是荷载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。

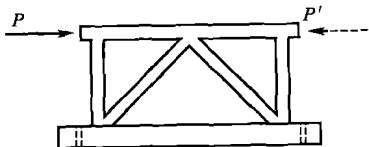


图 1.1 结构伪静力试验示意图

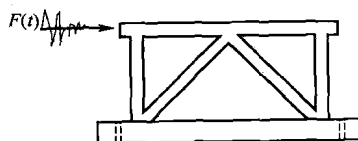


图 1.2 结构拟动力试验示意图

拟静力试验也称低周反复荷载试验或伪静力试验。为了探索结构的抗震性能,在实验室常采用一对使结构来回产生变形的水平集中力 P 和 P' 来代替结构地震所产生的力,把水平集中力 P 和 P' 称为结构试验抗震静力,用图 1.1 所示的方式来模拟地震作用进行试验。它是一种采用一定的荷载控制或变形控制的周期性反复静力荷载试验,加之试验频率比较低,为区别于一般单调静力加载试验,称之为低周反复荷载试验;又因为低周反复静力加载试验是采用静力试验手段来验证结构部分动力性能的,所以也称之为伪静力试验。

拟动力试验是模拟某地震力慢动作作用于试验对象上的过程。在拟动力试验中,首先是通过计算机将实际基底地震加速度转换成作用在结构上的位移以及与次位移相应的加振力 $F(t)$ 。随着地震波加速度时程曲线的变化,作用在结构上的位移和加振力也随之变化,这样就可以得出失真情况下,某一实际地震波作用后结构连续反应的全过程(图 1.2)。

静力试验的最大优点是加载设备相对来讲比较简单,荷载可以逐步施加,还可以停下来仔细观察结构变形的发展,给人们以最明确、最清晰的破坏概念。

(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,为了研究结构在施加动力荷载作用下的工作性能,一般要进行结构动力试验。如研究厂房在吊车及动力设备作用下的动力性能,吊车梁的疲劳强度与疲劳寿命问题,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,特别是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,利用环境随机振动试验测定结构动力特性模态参数也日益增多。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试验有很大的差别,并且要比静力试验复杂得多。

结构动力试验包括结构动荷载试验、结构动力特性试验、结构动力反应试验和结构疲劳试验等。

1.3.2 真型试验和模型试验

(1) 真型试验

真型是实际结构或者是按实物结构足尺复制的结构或构件。真型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的试验就是一种非破坏性的真型试验。对于工业厂房结构的刚度试验、楼盖承载能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此类。

由于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等进行全面观测了解。

(2) 模型试验

结构的真型试验,具有投资大、周期长的特点。当进行真型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,都可以采用比原型结构小的模型进行试验。

① 相似模型试验 模型是仿照原型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,但尺寸却比原型小。

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。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。模型要求一定的模拟条件,即要求几何相似、力学相似和材料相似等。

② 缩尺模型试验及小构件试验 是结构试验常用的研究形式之一,它有别于相似模型试验。

采用小构件进行试验,无须依靠相似理论,无须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,是用试验结果与理论计算进行对比校核的方法研究结构的性能,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去。

1.3.3 短期荷载试验和长期荷载试验

(1) 短期荷载试验

对于主要承受静力荷载的结构构件实际上荷载经常是长期作用的。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，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载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果，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，整个试验加载过程只有几秒甚至是毫秒或毫秒级，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。

(2) 长期荷载试验

对于结构在长期荷载作用下的性能研究，如混凝土结构的徐变、预应力结构中的钢筋松弛等就必须进行静力荷载的长期试验。这种长期荷载试验也可以称为持久试验，它将连续进行几个月或几年时间，通过试验以获得结构变形随时间变化的规律。

1.3.4 实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实验室内进行，也可以在现场进行。

(1) 实验室试验

实验室试验由于具备良好的工作条件，可以应用精密灵敏的仪器设备，具有较高的准确度，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，所以适宜于进行研究性试验。这样有可能突出研究主要方向，消除一些对试验结构实际工作有影响的次要因素。

(2) 现场试验

现场试验与室内试验相比，由于客观环境条件的影响，不宜使用高精确度的仪器设备进行观测，相对来看，进行试验的方法也可能比较简单，所以试验精确度较差。现场试验多数用以解决生产性的问题，所以大量的试验是在生产和施工现场进行的。有时研究的对象是已经使用或将要使用的结构物，现场试验可以获得实际工作状态下的数据资料。

1.3.5 结构检测

结构检测是为评定结构工程的质量或鉴定既有结构的性能等所实施的检测工作。结构检测的含义应是广义的，不应单纯局限于仪器量测的数据。检测包括检查和测试。检查一般是指利用目测了解结构或构件的外观情况，如结构是否有裂缝，基础是否有沉降，混凝土结构表面是否存在蜂窝、麻面，钢结构焊缝是否存在夹渣、气泡，连接构件是否松动等。检查主要是进行定性判别；测试是指通过工具或仪器测量了解结构构件的力学性能和几何特征。对观察到的情况要详细记录，对量测的数据要做好原始记录，并对原始记录进行必要的统计和计算。

结构检测可分为结构工程质量的检测和既有结构性能的检测。

(1) 结构工程质量的检测

结构工程质量的检测目的在于控制新建结构在施工过程中可能出现的质量问题，处理工程质量事故，评估新结构、新材料和新工艺的应用等。当遇到下列情况之一时，应进行结构工程质量的检测。

- ① 涉及结构安全的试块、试件及有关材料检验数量不足。
- ② 对施工质量的抽检检测结果达不到设计要求。
- ③ 对施工质量有怀疑或争议，需要通过检测进一步分析结构的可靠性。

④ 发生工程事故，需要通过检测分析事故的原因及对结构可靠性的影响。

(2) 既有结构性能的检测

既有结构性能的检测目的在于评估既有结构的安全性和可靠性，为结构的改造和加固处理提供依据。检测对象为已建成并投入使用的结构。当其遇到下列情况之一时，应对其现状缺陷、损伤结构构件承载力和结构变形等涉及结构性能的项目进行检测。

- ① 结构的安全鉴定。
- ② 结构的抗震鉴定。
- ③ 大修前结构的可靠性鉴定。
- ④ 改变用途、改造、加层或扩建前的结构鉴定。
- ⑤ 达到设计使用年限要继续使用的技术鉴定。
- ⑥ 受到灾害、环境侵蚀等影响建筑的安全鉴定。
- ⑦ 对既有结构的工程质量有怀疑或争议时的工程质量鉴定。

思 考 题

1. 建筑结构试验分为几类？有何作用？
2. 简述土木工程结构试验与检测技术的发展。

第2章 建筑结构试验设计

2.1 结构试验设计概述

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式都因试验研究的目的任务要求不同而不同。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，而必须将各种因素相互联系综合起来才能使设计结果在执行与实施中达到预期的目的。

在明确试验目的后，可通过调查研究并收集有关资料，确定试验的性质与规模、试件的形式，然后根据一定的理论做出试件的具体设计。试件设计必须考虑本试验的特点与需要，在设计构造上做出相应的措施，在设计试件的同时，还需要分析试件在加载试验过程中各个阶段的预测内力和变形，特别是对具有代表性的并能反映整个试件工作状况的部位所测定的内力、变形数值，以便在试验过程中加以控制，随时校核；还要选定试验场所，拟定加载与量测方案；设计专用的试验设备、配件和仪表附件夹具，制定技术安全措施等。除技术上的安排外，还必须针对试验的规模，组织试验人员，并提出试验经费预算以及消耗性器材数量与试验设备清单。

在上述规划的基础上，提出试验研究大纲及试验进度计划。试验规划是一个指导试验工作具体进行的技术文件，对每个试验、每次加载、每个测点及每个仪表都应该有十分明确的目的性与针对性，切忌盲目追求试验次数多，仪表测点多，以及不切实际地要求提高量测精确度。

对于以具体结构为对象的工程现场鉴定性试验，在进行试验设计前必须对结构进行实地考察，对该结构的现状和现场条件建立初步认识。在考虑试验对象的同时，还必须通过调查研究，收集有关文件、资料，包括设计资料，如设计图纸、计算书及作为设计依据的原始资料、施工文件、施工日志、材料性能试验报告及施工质量检查验收记录等。关于使用情况则需要深入现场向使用者（生产操作工人、居民）调查了解，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。

由于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应用到结构试验领域，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。

结构试验是一项细致而复杂的工作，必须进行很好的组织与设计，按照试验的任务制定试验计划与大纲，并通过试验计划与大纲的执行来实现与完成提出的要求。在整个试验工作中，必须十分严肃认真，否则，不仅主观的愿望无法实现，同时会带来人力物力与时间上的

浪费,影响试验结果,以致整个试验失败或发生安全事故。对一个结构,必须在试验前做好各项试验的设计规划准备工作,了解情况要具体、细致,计划准备要全面周到,对试验过程中可能出现的情况要事先有所估计,并采取相应的措施,对试验成果必须珍惜,要及时整理分析,充分加以利用,总之,要求用最小的耗费,达到试验预期要求,并且取得最大的成果。

2.2 结构试验的试件设计

在进行结构强度和变形试验时,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,当不能采用足尺的真型结构进行试验时,也可用其缩尺的模型。采用模型试验可以大大节省材料、试验工作量并缩短试验时间,用缩尺模型进行结构试验时,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,模型设计必须根据相似理论按比例缩小,对于一些比较复杂的结构要使模型结构和实际结构在各个物理现象间均满足相似条件往往有困难,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。如能用真型结构进行结构试验,可以得到反映真型形状的试验结果。但由于真型结构试验规模大、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,整体真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多是用缩尺的构件,但它不一定存在缩尺比例的模拟问题,经常将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、试件尺寸与数量的确定以及构造措施的研究考虑,同时必须满足结构与受力的边界条件、试验的破坏特征、试验加载条件的要求,最后以最少的试件数量获得最多的试验依据,反映研究的规律,满足研究任务的需要。

2.2.1 试件形状

在试件设计中设计试件形状时,虽然和试件的比例尺无关,但是重要的是要构造和设计目的相一致的应力状态。这个问题对于静定体系中的单一构件,如梁、柱、桁架等一般构件的实际形状都能满足要求,问题比较简单。但对于从整体结构中取出部分构件单独进行试验时,特别是在比较复杂的超静定体系中必须要注意其边界条件的模拟,使其能如实反映该部分结构构件的实际工作。

当进行图 2.1(a) 所示受水平荷载作用的框架结构应力分析时,若分析 A—A 部位的柱脚、柱头部分时,试件要设计成图 2.1(b) 所示的形式;若进行 B—B 部位的试验,试件设计成图 2.1(c) 所示的形式;对于梁设计成图 2.1(f)、(g) 所示的形式,则应力状态可与设计目的相一致。

进行钢筋混凝土柱的试验研究时,若要探讨其挠曲破坏性能,可使用图 2.1(d) 所示的试件,但若进行剪切性能的探讨,则图 2.1(d) 中反弯点附近的应力状态与实际应力情况有所不同,为此有必要采用图 2.1(e) 所示的适用于反对称加载的试件。

在做梁柱连接的节点试验时,试件受轴向力、弯矩和剪力的作用,这样的复合应力使节点部分发生复杂的变形,但其中主要是剪切变形,以致节点部分由于大剪力作用发生剪切破坏。为了明确节点的强度和刚度,使其应力状态能充分反映,避免在试验过程中梁柱部分先于节点破坏,在试件设计时必须事先对梁柱部分进行加固,使整个试验能达到预期的效果。这时十字形试件如图 2.1(h) 所示,节点两侧梁柱的长度一般取 $1/2$ 梁跨和 $1/2$ 柱高,即按

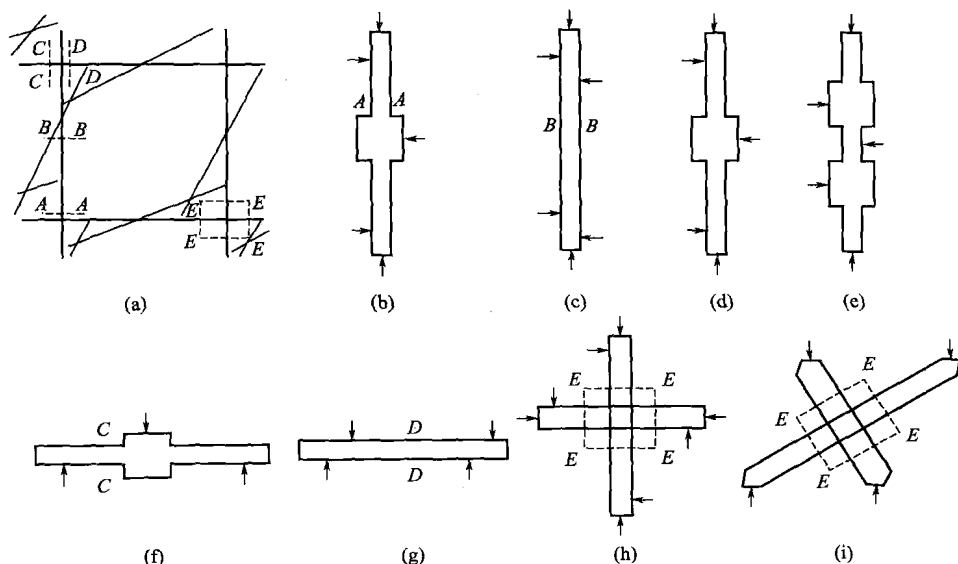


图 2.1 框架结构中的梁柱和节点试件

框架承受水平荷载时产生弯矩的反弯点 ($M=0$) 的位置来决定。边柱节点可采用 T 字形试件。当试验目的是为了解初始设计应力状态下的性能, 并同理论做对比时, 可以采用图 2.1 (i) 所示的 X 形试件。为了在 X 形试件中再现实际的应力状态, 必须根据设计条件给定的各个力的大小来确定试件的尺寸。

以上所介绍的任一种试件的设计, 其边界条件的实现与试件的安装、加载装置与约束条件等有密切关系, 必须在试验总体设计时进行周密考虑, 才能付诸实施。

2.2.2 试件尺寸

根据结构试验所用试件的尺寸的大小, 试件从总体上分为真型 (实物或足尺结构)、模型和小试件三类。

从国内外已发表的试验研究文献来看, 钢筋混凝土试件中的小尺寸试件可以小到构件截面边长只有几厘米, 大尺寸可以大到结构物的真型。

国内试验研究中采用框架截面尺寸大约为真型的 $1/4 \sim 1/2$, 还做过 3~5 层的足尺轻板框架试验。

在框架节点方面, 国内外一般都做得比较大, 为真型的 $1/2 \sim 1$ 倍, 这和节点中要求反映配筋特点有关。

作为基本构件性能研究, 压弯构件的截面为 $(16\text{cm} \times 16\text{cm}) \sim (35\text{cm} \times 35\text{cm})$, 短柱 (偏压剪) 为 $(15\text{cm} \times 15\text{cm}) \sim (50\text{cm} \times 50\text{cm})$, 双向受力构件为 $(10\text{cm} \times 10\text{cm}) \sim (30\text{cm} \times 30\text{cm})$ 。

在剪力墙方面单层墙体的外形尺寸为 $(80\text{cm} \times 100\text{cm}) \sim (178\text{cm} \times 274\text{cm})$, 多层的剪力墙为真型的 $1/10 \sim 1/3$ 。我国昆明、南宁等地区曾先后进行过装配式混凝土和空心混凝土大板结构的足尺房屋试验。

砖石及砌块的砌体试件尺寸一般取为真型的 $1/4 \sim 1/2$ 。我国兰州、杭州与上海等地先后做过砖石和砌块多层以及若干单层足尺房屋的试验。

一般来说, 静力试验试件的合理尺寸应该是不大又不小, 太小的试件要考虑尺寸效应。

对于微型混凝土截面在 $4\text{cm} \times 6\text{cm}$ 或 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 以内或微型砌体 (砖块尺寸为 $1.5\text{cm} \times 3\text{cm} \times 6\text{cm}$), 普通混凝土的截面小于 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$, 砖砌体小于 $74\text{cm} \times 36\text{cm}$, 砖块砌体小于 $60\text{cm} \times 120\text{cm}$ 的试件都有尺寸效应, 必须加以考虑。当砌块砌体试件大到 $120\text{cm} \times 240\text{cm}$ 时, 尺寸效应才不显著。因此普通混凝土试件截面边长在 12cm 以上, 砌体墙最好是真型的 $1/4$ 以上, 对于比例小于 $1/4$ 的不但灰缝和砌筑等方面的条件难以相似, 而且容易出现失稳破坏。但是, 在满足构造模拟要求的条件下太大的试件尺寸也没有必要。虽然足尺结构具有反映实际构造的优点, 但试验所耗费的经费和人工如用来做小比例尺试件试验, 可以大大增加试验数量和品种, 而且实验室的条件比野外现场要好, 测试数据的可信度也高。

局部性的试件尺寸可取为真型的 $1/4 \sim 1$ 倍, 整体性的结构试验试件可取 $1/10 \sim 1/2$ 。

对于动力试验, 试验尺寸经常受试验激振加载条件等因素的限制, 一般可在现场的真型结构上进行试验, 量测结构的动力特征。对于在实验室内进行的动力试验, 可以对足尺结构进行疲劳试验, 至于在模拟振动台上试验时, 由于受振动台台面尺寸和激振力大小等参数限制, 一般只能做缩尺的模型试验。国内在地震模拟振动台上已经完成了一批比例为 $1/50 \sim 1/4$ 的结构模型试验。日本为了能满足原子能反应堆的足尺试验的需要, 研制了负载为 1000t , 台面尺寸为 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 垂直水平双向同时加振的大型模拟地震振动台。

2.2.3 试件数目

在进行试件设计时, 除了对试件的形状尺寸应进行仔细研究外, 对于试件数目即试验量的设计也是一个不可忽视的重要问题, 因为试验量的大小直接关系到能否满足试验的目的、任务以及整个试验的工作量问题, 同时也受试验研究、经费预算和时间期限的限制。

对于生产性试验, 一般按照试验任务的要求有明确的试验对象。对于预制厂生产的一般工业与民用建筑钢筋混凝土和预应力混凝土预制构件的质量检验和评定, 可以按照《预制混凝土构件质量检验评定标准》(GBJ 321—90, 下文简称《标准》) 中结构性能检验规定, 确定试件数量。

按《标准》(GBJ 321—90) 规定成批生产的构件, 应按统一工艺, 正常生产的 1000 件, 但不超过三个月的同类型产品为一批 (不足 1000 件者亦为一批), 在每批中随机抽取一个构件作为试件进行检验。这里的“同类型产品”是指采用同一钢种、同一混凝土强度等级、同一工艺、同一结构形式的构件。对同类型产品进行抽样检验时, 试件宜从设计荷载最大、受力最不利或生产数量最多的构件中抽取。

当连续抽取 10 批, 每批的结构性能均能符合《标准》规定的要求时, 对同一工艺、正常生产的构件, 可改以 2000 件, 但亦不超过三个月的同类型产品为一批, 在每批中仍随机抽取一个试件进行检验。

对于科研性试验, 其试验对象是按照研究要求而专门设计的, 这类结构的试验往往是属于某一研究专题工作的一部分, 特别是对于结构构件基本性能的研究, 由于影响构件基本性能的参数较多, 所以要根据各参数构成的因子数和水平数来决定试件数目, 参数多则试件的数目也自然会增加。

因子是对试验研究内容有影响的发生变化的影响因素, 因子数是试验中变化着的影响因素的个数, 不变化的影响因素不是因子数。水平即为因子可改变的试验档次, 水平数则为变化着的影响因素的试验档次数。

试验数量的设计方法有四种, 即优选法、因子法、正交法和均匀法。这四种方法是四门独立的学科, 下面就其特点做简要介绍。

(1) 优选设计法

针对不同的试验内容,利用数学原理合理安排试验点,用步步逼近、层层选优的方式以求迅速找到最佳试验点的试验方法称为优选法。

单因素问题设计方法中的 0.618 法是优选法的典型代表。优选法对单因素问题试验数量设计的优势最为显著,其多因素问题设计方法已被其他方法所代替。

(2) 因子设计法

因子设计法又称全面试验法或全因子设计法,试验数量等于以水平数为底以因子数为指数的幂函数,即

$$\text{试验数} = \text{水平数}^{\text{因子数}}$$

因子设计法试验数的设计值见表 2.1。

由表 2.1 可见,因子数和水平数稍有增加,试件的个数就呈几何级数倍地增加,所以因子设计法在结构试验中不常采用。

表 2.1 用因子法计算试验数量

因子数	水平数				因子数	水平数			
	2	3	4	5		2	3	4	5
1	2	3	4	5	4	16	81	256	625
2	4	9	16	25	5	32	243	1024	3125
3	8	27	64	125					

(3) 正交设计法

在进行钢筋混凝土柱剪切强度的基本形式试验研究中,以混凝土强度、配筋率、配箍率、轴向应力和剪跨比作为设计因子,如果利用全因子设计法设计,当每个因子各有 2 个水平数时,试验试件数为 32 个。当每个因子有 3 个水平数时,则试件的数量将猛增为 243 个,即使混凝土强度等级取一个级别,即采用 C20,试验试件数仍需要 81 个,这样多的试件实际是很难做到的。

为此试验工作者在试验设计中经常采用一种解决多因素问题的试验设计方法——正交试验设计法,主要应用根据均衡分散、整齐可比的正交理论编制的正交表来进行整体设计和综合比较,科学地解决了各因子和水平数相对结合可能带来的影响,也解决了实际所做少量试验与要求全面掌握内在规律之间的矛盾。

现仍以钢筋混凝土柱剪切强度基本性能研究问题为例,用正交试验法做试件数目设计。如果同前面所述主要影响因素为 5,而混凝土只用一种强度等级 C20,这样实际因子数就只为 4,当每个因子各有 3 个档次,即水平数为 3。详见表 2.2。

表 2.2 钢筋混凝土柱剪切强度试验分析因子与水平数

主要分析因子		因子档次(因子数)			主要分析因子		因子档次(因子数)		
代号	因子名称	1	2	3	代号	因子名称	1	2	3
A	钢筋配筋率	0.4	0.8	1.2	D	剪跨比	2	3	4
B	配箍率	0.2	0.33	0.5	E	混凝土强度等级 C20	13.5MPa		
C	轴向应力	20	60	100					

根据正交表 $L_9(3^4)$,试件主要因子组合如表 2.3 所示。这一问题通过正交设计法进行