

高等学校教学用书

# 建筑结构试验

西安冶金建筑学院 傅恒菁 主编

---

冶金工业出版社

高等学校教学用书

# 建筑结构试验

西安冶金建筑学院 傅恒菁 主编

---

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等学校教学用书  
**建筑结构试验**

西安冶金建筑学院 傅恒菁 主编

\*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

北京大兴孙河印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 14.25 字数 336 千字

1992年10月第一版 1992年10月第一次印刷

印数00,001~4,000册

ISBN 7-5024-1065-1

U·81(陈) 定价3.75元

# 目 录

绪言	1
<b>第一章 建筑结构试验总论</b>	<b>3</b>
第一节 结构试验的程序	3
第二节 试验结构的设计	5
第三节 试验方案的拟定	11
第四节 试验结论	13
<b>第二章 结构试验荷载</b>	<b>14</b>
第一节 重力模拟荷载	14
第二节 液压模拟荷载	16
第三节 其它荷载模拟	21
第四节 动力荷载模拟	23
第五节 地震作用模拟	26
第六节 加荷装置设计	29
<b>第三章 结构反应参数量测</b>	<b>38</b>
第一节 概述	38
第二节 测量仪表的基本概念	38
第三节 应变测量	41
第四节 位移与变形测量	57
第五节 应变场的应变及裂缝测定	63
第六节 力的测定	67
第七节 其它物理量测定	69
<b>第四章 结构静载试验</b>	<b>76</b>
第一节 试验对象考察	76
第二节 加荷方案设计	77
第三节 观测方案设计	87
第四节 量测数据整理	95
第五节 结构性能检验与评定	105
<b>第五章 结构动力试验</b>	<b>111</b>
第一节 概述	111
第二节 振动测量系统	112
第三节 结构动力特性试验	123
第四节 结构动力反应测定	128
第五节 结构抗震试验	131
第六节 结构疲劳试验	137
<b>第六章 旧建筑物的可靠性鉴定</b>	<b>142</b>

第一节	概述	142
第二节	混凝土结构的鉴定和等级评定	146
第三节	砌体结构的鉴定和等级评定	151
第四节	钢结构的鉴定和等级评定	153
第五节	地基基础的鉴定与评级	155
第六节	围护结构系统和结构布置及支撑系统的等级评定	156
第七节	工业建筑物的综合鉴定评级	157
第八节	结构耐久性评估	160
<b>第七章</b>	<b>试验数据处理</b>	<b>164</b>
第一节	测量误差	164
第二节	回归分析	174
第三节	误差的鉴别技术	185
第四节	信号处理及分析	189
<b>第八章</b>	<b>结构实验示例</b>	<b>204</b>
第一节	预应力多孔板结构性能检验	204
第二节	结构模型撞击试验	209
第三节	工业厂房可靠性鉴定与等级评定	213
<b>参考资料</b>		<b>220</b>

## 绪 言

结构试验是一项科学实践活动，是研究和发展建筑结构新材料、新体系、新施工工艺以及探索结构设计新理论的重要手段，在建筑科学研究和技术革新等方面起着重要作用。

结构试验是建筑工程专业的一门技术基础课程。它研究的主要内容有：建筑结构静力试验和动力试验的加载模拟技术，结构变形的量测技术，试验数据的处理技术，信号分析技术，直至最后对试验对象作出技术评价或理论分析。

我国结构试验发展的初期，主要是为了适应国民经济恢复时期的需要，对一些改建和扩建工程进行现场静力试验。例如，在鞍山钢铁公司扩建工程、黄河铁桥加固等工程中，对某些旧建筑物及构筑物进行了技术检验，为扩建及加固工作提供了科学依据，取得了宝贵经验。

随着国民经济建设的发展，结构试验日益成为经济建设不可缺少的一种技术手段。例如，1953年长春市对25.3m高的输电铁塔进行了原型结构的检验性试验。当时由于试验手段落后，加载设备是用吊盘内装铁块作垂直荷载，水平荷载是用人工铰车施力，铁塔主要杆件的应变当时只能用机械式杠杆引伸仪量测，铁塔的水平变位则用经纬仪观测。1957年，我国对武汉长江大桥全面地进行了静载和动载试验，它是我国建筑史上第一次进行的以工程验收为目的的结构试验。

70年代以后，结构试验日益成为人们学习和掌握建筑新技术、研究结构新体系不可缺少的基本手段。从确定结构材料的物理力学性能，到验证各种结构构件的受力特点和破坏特征，直至建立一个结构体系的计算理论，都要建立在试验研究的基础上。例如70年代，对上海市体育馆及南京市五台山体育馆等建筑所进行的网架结构模型试验，为建立网架结构的计算理论和模型相似理论等提供了大量实测资料。

随着建筑科学技术的迅速发展，原来的单个构件的性能试验，日益不能满足建筑科学发展的要求，必须进一步向整体结构试验的方向发展。结构的整体工作性能，尤其是结构的非线性性能、结构的动力性能等，已愈来愈为建筑科学工作者所重视。

我国结构动力试验的工作起步较晚。早期主要是由科学研究机构研制一些小型振动台和起振设备（例如用火车车架作台面的机械式振动台等），用它们对建筑物、高炉及水坝等结构模型进行动力试验。以后又研制出了脉动测量仪，开始对新丰江、小丰满和匡山等地的大型水坝工程实地进行了脉动观察和测量。60年代以后又研制出了我国第一批工程强震加速度计。从此，为研究实际地震作用下的结构性能开辟了新领域。

由于我国地震带分布面广（据统计全国三分之二以上的省都有七度以上的地震史），为了确保人民生命财产的安全，建筑科学研究工作者广泛开展了多种结构的抗震试验。除钢筋混凝土框架、剪力墙等基本抗震结构试验外，还作了大量的砖砌体和砌块结构的抗震试验。近十多年来，在野外进行的规模较大的足尺房屋抗震破坏性试验就有十多次。例如，1973年北京的装配整体式框架结构（两层、一开间）抗震试验；1976年昆明的装配式大板结构（五层、三开间）抗震试验；1978年兰州的粉煤灰密实砌块结构（五层、三开间）抗震试验；1979年上海的中型砌块结构和1981年石家庄的框架轻板结构的抗震试验

等。此外，大比例结构模型的抗震试验，近年来也日益增多，国家研究机构和很多大专院校都相继进行过结构模型抗震试验，如1982年中国建筑科学研究院对12层轻板框架结构模型进行的抗震试验，1991年西安冶金建筑学院对混合结构（空心砖）模型（六层、二开间）进行的抗震试验等等。抗震试验研究为发展抗震计算理论和制订抗震规范提供了十分丰富的试验资料。

近年来，随着自动控制系统和电液伺服加载系统在结构试验中的出现，从根本上改变了试验加载技术的面貌，已由过去的重力加载逐步改进为液压加载、结构试验机加载，进而过渡到低周反复加载、拟动力加载以及地震模拟振动台加载等，并且实现了随机振动在结构上的再现。在试验数据的采集和处理方面，出现了量测数据的快速采集、自动化记录和数据自动处理分析系统；尤其是试验过程的计算机控制，以及系统识别技术在振动试验数据处理上的应用等，更为结构试验技术的迅速发展开辟了广阔前景。

综上所述，结构试验技术，在建筑科学中日益显示出其重要性。

科学技术的发展，一靠理论研究，二靠实验。

作为“工业及民用建筑”专业的学生，除了认真学习理论知识之外，尚应努力掌握各种实验技术，提高自己动手的能力。因此，学习《结构试验》这门课程，应重视理论与实践的结合，认真掌握课程内容，培养和提高观察事物及分析问题的能力，为在祖国的社会主义建设中做出贡献。

# 第一章 建筑结构试验总论

## 第一节 结构试验的程序

### 一、结构试验的分类

根据结构试验的目的,结构承受的荷载性质,荷载在结构上的停留时间,以及试验要求的最终结果等情况,可将结构试验分为研究性试验及检验性(鉴定性)试验两类。

#### 1. 研究性试验

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。试件的外形应尽可能地考虑到简化加载设备条件;试件的尺寸取决于实验设备的容量、场地及环境条件;为了减小尺寸效应,试件尺寸应尽量和实际结构相接近;考虑到材料的变异性,同样的试件应作2个以上。

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。

#### 2. 检验性试验

检验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。对某些重要性建筑或采用新材料、新工艺及新设计计算理论而设计建造的建筑物或构筑物(如桥梁),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(如钢网架球节点等)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。当建筑物由于使用功能发生了变化(例如车间工艺流程的改变,设备的更新换代等),原有建筑物需要改扩建、加层或提高桥式吊车的起重能力或楼面承载能力时,往往需要通过试验实测及分析,从而确定旧建筑物的结构潜力。

4) 检验和鉴定旧建筑物的可靠性,推断旧建筑物的剩余寿命。这类旧建筑物一般都



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普查。普查的方法包括观察、检测和分析，检测手段大多只能采用无损检测方法。在普查和分析基础上评定其所属安全等级，最后推算其可靠性或剩余寿命。这类鉴定工作应按照建筑物可靠性鉴定规程YBJ219-89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、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。

此外，结构试验就其试验荷载的性质不同（如定值荷载和变值荷载），也可分为结构静载试验和结构动力试验；有时也按结构试验的最终结果分为破坏性试验和非破坏性试验；按试验荷载在结构上停留时间的长短分为长期荷载试验和短期荷载试验；就试验对象的特征可分为单个构件（或部件）和整体房屋（或构筑物）试验等。

## 二、结构试验的一般程序

结构试验大致可划分为四个阶段：试验规划阶段，试验准备阶段，加载试验阶段和资料整理分析阶段。

### 1. 试验规划阶段

试验规划是指导整个试验工作的纲领性技术文件。因而试验规划的内容应尽可能地细致和全面，规划的任何一点疏忽都可能导致试验的失败。

研究性试验的一般工作程序如图1-1所示。它反映了试验规划的主要内容。首先应根据研究课题，了解其在国内外的的发展现状和前景，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支承系统；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它辅助试件的试验；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

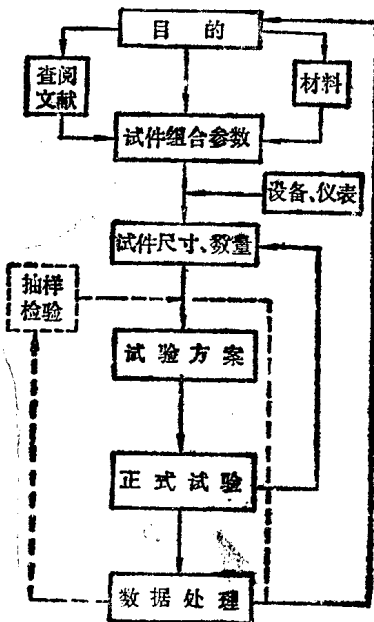


图 1-1 结构试验工作程序

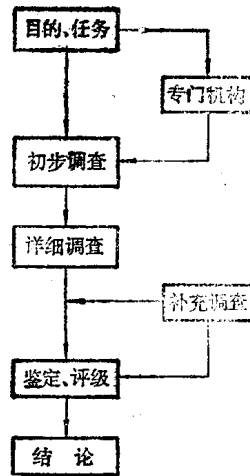


图 1-2 结构鉴定程序

工；建筑材料需用计划、经费开支及预算、试验设备、仪表及附件的清单等等。

检验性试验的规划，因为试件往往都是某一具体结构，一般不存在试件设计和制作问题，但需要收集和研究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。对旧建筑物作技术鉴定时，其工作程序如图1-2所示。这时需要了解该建筑物在使用期限内是否遭受过严重损伤、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，以及确定加荷程序等等。

### 2. 试验准备阶段

结构试验准备工作十分繁琐，不仅牵涉面很广，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。试验准备阶段控制和把握好几个主要环节（例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作好工作日记。

### 3. 加载试验阶段

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相，作为原始资料保存，以便往后研究分析时使用。

### 4. 试验资料整理分析阶段

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（有量测数据、试验曲线、变形观察记录、破坏特征描述等）后，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，作到去粗取精，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，制订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。

## 第二节 试验结构的设计

试验结构的型式和大小与试验的目的有关。它可以是真实结构，也可以是其中的某一部分。若把真实结构称作真型（原型）或足尺，则不论是整体或它的一部分，由于都是足

尺，势必导致试验的规模很大，所需加荷设备的容量和费用会很高，制作试件的材料费、加工费也随之增加。所以当进行研究性试验时，一般都应将原型尺寸按一定的比例缩小，缩小后的试件称缩尺试件或称模型。据调查，全国各大型结构实验室所作结构试验的试件，绝大部分均为缩尺的部件，少量为整体模型试件。设计缩尺试件应根据相似理论找出其模型律，同时应尽可能根据正交设计的原理来选择设计参数。

### 一、试件的模型律

模型的试验结果与原型之间存在着一定的关系，这种关系称模型律。模型律可用相似常数  $C$  来表示。实际工作中  $C$  也称缩尺比。例如原型的线性尺寸为  $L$ ，与其对应位置的模型线性尺寸为  $L_m$ ，则其缩尺比  $C_L = \frac{L}{L_m}$ ，即模型的线性尺寸为原型的  $\frac{1}{C_L}$ 。面截的缩尺

比是两个方向线性尺寸的乘积，因而缩尺比为  $C_L^2 = \frac{A}{A_m}$ ，即模型面积为原型面积的  $\frac{1}{C_L^2}$ 。而惯性矩  $I$  和截面抵抗矩  $W$  的缩尺比分别为  $C_L^4 = \frac{I}{I_m}$ ， $C_L^3 = \frac{W}{W_m}$ 。

对施加有外荷载的静载试验，其荷载的相似常数为  $C_L^2 = \frac{F}{F_m}$ ，轴向应力  $\sigma$  和剪应力  $V$  的相似常数也为  $C_L^2$ ，弯矩的相似常数为  $C_L^3$ 。这时模型的应力和原型的应力相等，即

轴向应力：
$$\sigma_m = \frac{N_m}{A_m} = \frac{N}{C_L^2} \cdot \frac{C_L^2}{A} = \sigma$$

剪应力：
$$\tau_m = K \frac{V_m}{A_m} = K \frac{V}{C_L^2} \cdot \frac{C_L^2}{A} = \tau$$

弯曲应力：
$$\sigma_m = \frac{M_m}{Z_m} = \frac{M_m}{C_L^3} \cdot \frac{C_L^3}{Z} = \sigma$$

对变形而言，当模型梁的材料和弹性模量与原型梁完全相同时，则模型梁在外力作用下的挠度为原型梁的  $\frac{1}{C_L}$ ，因为：

$$f_{m,F} = \alpha \frac{F_m L_m^3}{EI_m} = \alpha \frac{FL^3}{EI} \cdot \frac{C_L^4}{C_L^5} = \frac{1}{C_L} f_F \quad (1-1)$$

式中  $f_{m,F}$ 、 $f_F$ ——在外荷载作用下模型梁的挠度和原型梁的挠度；

$L_m$ 、 $I_m$ ——模型梁的计算跨度和截面惯性矩；

$L$ 、 $I$ 、 $E$ ——原型梁的计算跨度、截面惯性矩和弹性模量。

但若要计入自重引起的挠度，则相似常数就不再是  $\frac{1}{C_L}$ ，因为这时模型梁的总挠度由

两部分组成，即

由模型梁自重引起的挠度  $f_{m,G}$  为：

$$f_{m,G} = \beta \frac{G_m L_m^4}{EI_m} = \beta \frac{GL^4}{EI} \cdot \frac{1}{C_L^2} = \frac{1}{C_L^2} f_G \quad (1-2)$$

故模型梁的总挠度 $f_m$ 为:

$$\begin{aligned} f_m &= f_{m,F} + f_{m,G} = \frac{1}{C_L} f_F + \frac{1}{C_L^2} f_G \\ &= \frac{1}{C_L} \left( f_F + \frac{1}{C_L} f_G \right) \end{aligned} \quad (1-3)$$

由公式(1-3)知,考虑模型梁自重对挠度的影响后,挠度的模型律变为不确定的了。为了解决此问题,可以采用改变原型与模型结构材料的弹性模量或容重等方法,但这种方法具体做起来却相当困难。因此,在实践中可以考虑对模型预先施加均布荷载以增大模型的挠度,该挠度称模型的附加挠度,用 $f_{m,d}$ 表示,且使得:

$$f_{m,G} + f_{m,d} = \frac{1}{C_L} f_G \quad (1-4)$$

将公式(1-2)代入公式(1-4),得模型梁附加挠度与自重挠度的关系为:

$$f_{m,d} = f_{m,G}(C_L - 1) \quad (1-5)$$

最后的总挠度为:

$$f_{m,F} + f_{m,G} + f_{m,d} = \frac{1}{C_L} (f_F + f_G) \quad (1-6)$$

由此证明,若对模型梁预加均布荷载,且使其荷载值为模型自重的 $(C_L - 1)$ 倍时,

模型的挠度将为原型挠度的 $\frac{1}{C_L}$ 。

按照上述关系将模型梁的变形换算为原型梁时,不论其量纲如何,均可保持原来的强度和变形关系。

## 二、试件的形式

试验结构设计的基本要求,是构造一个与实际受力相一致的应力状态。例如钢筋混凝土框架在水平力作用下,梁和柱的应力如图1-3所示。框架柱受有轴力 $N$ 、剪力 $V$ 和反对称的弯矩 $M$ 。如何构造一个柱使其受这样一组复合应力,可能的选择有表1-1几种方案。究竟选哪一种方案,要根据试验研究的目的和对 $N$ 、 $V$ 、 $M$ 组合的要求,现有试验设备的容量和拥有的试验技术水平等条件而选定。

设计试件时,还应兼顾到便于试验加载和安全试验等问题。例如为了对偏心受压柱施加偏心力,设计柱试件时应在柱的两端附设构造牛腿;为了防止柱头破坏先于柱身破坏,设计时应加强柱头的构造措施等。

## 三、试件的正交设计

为了达到试验目标,需要设计多少试件是人们非常关注的事。一般,试件的数量主要取决于变动参数的多少,变动参数多则试件数量大。若能采用科学方法(正交设计)进行设计,则可以减少试件数量

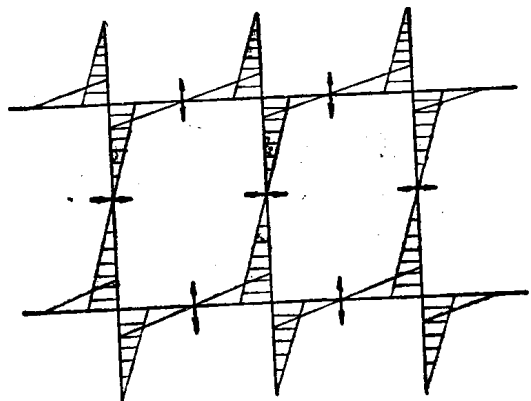
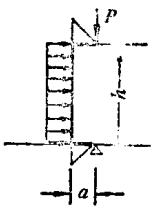
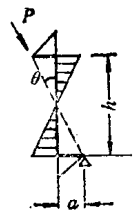
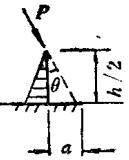
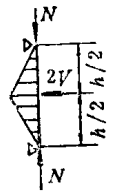

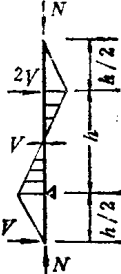


图 1-3 水平力作用下框架内力

表 1-1 框架柱型式与N、M、V关系

柱型式						
N	P	$P \cos \theta$	$P \cos \theta$	N	N	N
M	$Pa$	$P \frac{a}{2} \cos \theta$	$P \frac{h}{2} \sin \theta$	$\frac{h}{2} V$	$\frac{h}{2} V$	$\frac{h}{2} V$
V	-	$P \sin \theta$	$P \sin \theta$	V	V	V

当试验目标是研究柱子的强度时，应考虑若干对强度起控制作用的参数，比如混凝土抗压强度、配筋率、轴压比和偏心距等。这些参数在正交设计中叫作主要分析因子，分析因子的数目可以是1, 2, ...或n,对每一个分析因子又考虑几种状态（比如混凝土的不同强度等级），这种状态在正交设计中叫作水平数。两种状态的水平数为2，三种状态的水平数为3,依此类推。试验目标是要获得各种参数和相应的各种状态对试验目标的影响，因此必须把各种因子和水平组合起来。其组合方法之一，是按单因素考虑。比如影响混凝土强度的主要因素有水泥标号和水灰比，按单因素组合时，应该将这两个因素的所有水平一一搭配起来，逐组轮换全面进行试验，然后才能从中选出最佳方案。依此法进行试验，试件的数相当多（参阅表1-2所示）。如当水平数为4，因子由2增加到3时，试件数目将从 $4^2 = 16$ 个增加到 $4^3 = 64$ 个；5个因子则将作 $4^5 = 1024$ 个试验，10个因子就要作 $4^{10} = 1048576$ 次试验，显然试件数量已大到不可接受的程度。因而，设计试件必须严格控制主要参数的数量。这种组合方式的缺点是工作量仍然相当大，且试验结果不一定就是最理想的。如能采用另一种组合方式（多因素组合），即将参数组合和试验结果合并一起考虑，一方面使组合出来的试件数量少，同时还能提供丰富的试验数据和有用信息，最终得出全面的试验结论。这种组合方式叫正交设计。

正交设计是一种科学安排试验方案（指试件设计方案）和分析试验结果的有效方法。它是通过一套特殊的表格（正交表）设计试件，从而分析影响试件质量指标的主要因素和次要因素，为选取最佳参数提供依据。由于正交设计把试验结果和试件数量联系在一起，因而为合理安排试验作了全面指导。

正交表如表1-3、1-4所示。 $L_9(3^4)$ 表示有4个因子，每个因子有3个水平，组成的试件数目为9个； $L_{12}(3^1 \times 2^4)$ 表示有1+4=5个因子，第1个因子有3个水平，第2~5个因子各有2个水平，组成的试件数目为12个。更多因子和水平的正交表可查阅有关正交设计的书籍，在此不再赘述。

应该指出的是，利用正交表组织试验，虽然对所得结果作综合评价可以取得很好效果，但因正交设计不能提供某一因子的单值变化，因而要建立单个因子与试验目标间的函数关系有一定困难。此外，试件的数量还取决于结构性能的变异程度、试验研究的特点，

试验技术水平、以及试验结果所要求的精确度等。

表 1-2 试件组合数目

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

表 1-3  $L_9(3^4)$

因子 水平 试件	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表 1-4  $L_{12}(3^1 \times 2^4)$

因子 水平 试件	1	2	3	4	5
1	2	1	1	1	2
2	2	2	1	2	1
3	2	1	2	2	2
4	2	2	2	1	1
5	1	1	1	2	2
6	1	2	1	2	1
7	1	1	2	1	1
8	1	2	2	1	2
9	3	1	1	1	1
10	3	2	1	1	2
11	3	1	2	2	1
12	3	2	2	2	2

#### 四、试件制作与安装误差

为了使试件的实际承载力计算值与设计值尽量接近，必须加强试件制作成型和试验安装就位过程中的误差控制。

##### 1. 试件尺寸偏差

钢筋混凝土构件是借助模板来成型的，因而必须考虑在成型振捣过程中混凝土有向两侧膨胀的可能，初凝后又有收缩趋势，因而一般应预先调整模板尺寸，并提高对模板的刚

度要求。这样可以减小试件的尺寸偏差，并将其控制在允许误差范围之内。又如砖砌体结构，砖的尺寸误差是不可避免的；在人工砌筑过程中，其总体尺寸的偏差，表面平整度和垂直度的偏差等也在所难免，但提高砌筑工人的技术水平可以有效地减小人为误差。总之，试件的这些偏差或误差虽然不可避免，但可人为加以控制，这样对承载力的影响也将减至最低。

## 2. 保护层厚度控制

在钢筋混凝土构件中，为防止钢筋锈蚀和充分发挥主筋的作用，混凝土保护层的厚度不能过小，也不能过大，必须满足设计要求的厚度。因此，主筋和箍筋的下料长度必须十分准确；箍筋加工时必须保证其设计规定的几何尺寸；在钢筋骨架的绑扎过程中，主筋和箍筋必须放置在设计位置上；在浇注混凝土前必须充分检查，发现问题及时纠正；浇注混凝土时还要注意不能把钢筋骨架直接放在底模上，应按要求留出保护层厚度，振捣时不能使钢筋骨架在模板中移动等。这些都是保证混凝土保护层厚度准确，保持试件截面有效高度不变的重要措施。

## 3. 材料强度控制

钢筋混凝土试件的混凝土强度是通过混凝土立方体强度来确定的，因此立方体试块必须与试件混凝土保持同一性，即必须是同一批搅拌，同一条件下养护，同一拆模时间，同一时间试验，并尽量采用相同材料的模板成型。这样，试块就具有较好的代表性，试块与试件之间的差别可以大为减小。

钢材力学性能的均匀性一般较好，但必须选用同一批的钢筋。不同批的钢材不要在同一试件内混用，否则应逐根留出钢筋试样；计算时按其每根钢筋的实际强度取用。此外，同一组试件的钢筋应该取用同一批钢材，否则也应分别留出试样。

## 4. 严格要求传感器、应变片等的埋置技术

为了量测钢筋混凝土结构控制截面上的钢筋应变，一般都在混凝土浇捣前，预先在钢筋测点位置上粘贴电阻应变片，并作好防水防潮处理；电阻片引出线的编号和测点编号必须一一对应，不能有任何差错。混凝土浇捣时，引出线应加以保护，以防折断。为了量测混凝土的内部应变，需要在浇捣混凝土前预先埋置传感器，对传感器的位置和方向都必须采取有效的固定措施。为了量测钢筋相对于混凝土的滑移，其预埋装置，必须严格与周围的混凝土隔离。从混凝土内部引出的全部测量导线理顺后分成束，从构件的适当部位引出。

## 5. 试件的安装就位

为了减少试件的安装误差，试件就位后的计算跨度（梁）和计算高度（柱）必须与计算简图相一致；由于支座约束条件与构件的内力传递及变形有关，因而安装试件时，应严格按照设计要求选择支座形式。一般在试件就位前，应在试件上先画出支座反力的作用线位置和外荷载作用点位置，需要对中的试件还要画出中心线位置，产生荷载作用的设备要附设定位零件，以便荷载有明确的着力点。

以上各类误差，有的属于主观人为产生的误差，有的属于仪器产生的系统误差，有的则是不可避免的随机误差。我们应该尽量精心操作，以克服主观造成的误差。对系统误差可以采用率定仪表的办法来加以修正。随机误差则可以用概率统计办法加以估计（具体方法详见本书第七章有关内容）。

## 五、辅助试件

辅助试件一般应包括:

1) 反映结构材料性能的材性试件。主要有混凝土的立方体试件、棱柱体试件和劈裂试验的试件等; 钢材的物理力学性能试件; 砖砌体的强度和弹性模量试件等。

2) 为整体结构试验的需要而补充的某些杆件或节点试件。

3) 对处于复杂应力状态的某些部位, 或难于直接计算和进行应力测定的区段, 均可将其局部部位做成单独试件进行试验研究。

辅助试件, 对正确估计和判断整体结构的承载力有重要意义, 也是试验数据处理和结构性能评定的基本依据。

### 第三节 试验方案的拟定

试验方案包括加载方案, 试验量测方案以及试验安全防护措施。

#### 一、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。例如楼板是结构体系中的承重结构, 它主要承受竖向均布荷载; 柱(特别是多、高层结构的柱) 除承受竖向集中荷载外还承受水平方向的风荷载和地震荷载。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强度和刚度, 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。

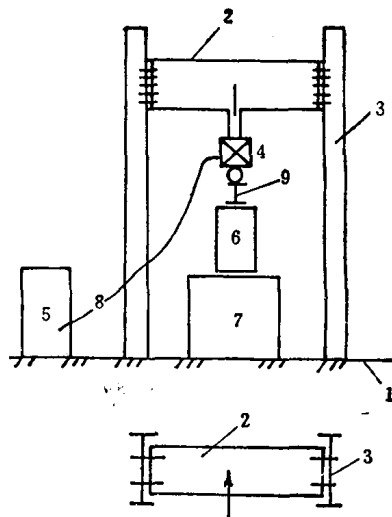


图 1-4 液压加载系统示意

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励结构起振的激振器和振动台, 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荷载作用的拟动力试验装置等。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作好加载方案设计。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。

#### 二、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（如荷载）对应的应变值，也是一组组非连续的数据。

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重传感器，位移传感器和记录两者关系用的  $x-y$  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。

### 三、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失、试验能得到顺利进行的基础。在试验安全工作中应贯彻“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过程中、起吊或运输加载设备的过程中以及拆除加载装置过程中，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规定执行，例如《国家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，机房的控制系统，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。

试验用的载荷架、支座、支墩及支撑等均应有足够的强度、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，还应注意载荷架的联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（如屋架和桁架）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，以免阻碍构件的正常变形。