

普通高等教育“十二五”规划教材

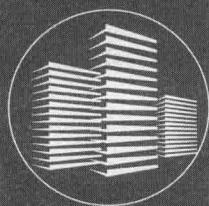
# 土木工程 结构试验与检测

TUMU GONGCHENG  
JIEGOU SHIYAN YU JIANCE

赵来顺 张淑云 主编



化学工业出版社



普通高等教育“十二五”规划教材

# 土木工程 结构试验与检测

TUMU GONGCHENG  
JIEGOU SHIYAN YU JIANCE

赵来顺 张淑云 主编

TU317-43  
26



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍土木工程结构试验与检测的基本理论和基本方法,内容包括概论、结构试验的荷载和加载方法、结构试验的量测技术、结构静载试验、结构动力试验、结构检测技术、结构试验的数据处理等。

本书可作为高等学校土木工程专业及相关专业高年级本科生与研究生的教材使用,也可作为从事结构工程的科研人员、试验人员和有关工程技术人员的专业技术参考书。

以建博联 “五十二” 规划教材

土木工程  
试验与检测

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程结构试验与检测/赵来顺,张淑云主编. —北京:化学工业出版社,2014.12  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-122-21983-1

I. ①土… II. ①赵…②张… III. ①土木工程-工程结构-结构试验-高等学校-教材②土木工程-工程结构-检测-高等学校-教材 IV. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 231594 号

责任编辑:满悦芝  
责任校对:宋夏

装帧设计:韩飞

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14½ 字数361千字 2015年3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: 32.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

土木工程结构试验与检测是土木工程专业的一门专业基础课,其任务是通过理论和实践性教学环节,使学生获得土木工程结构试验方面的基本知识和基本技能,初步掌握土木工程结构的检测方法,学会运用试验手段验证工程结构的计算理论,能够进行一般土木工程结构试验的规划和方案设计,并能进行试验与分析,为毕业后从事结构工程设计、科研及施工工作奠定良好的基础。

本教材根据土木类本科教学大纲要求编写,并配有《土木工程结构试验指导书》。教材内容注重理论与实践相结合,并结合编者在教学、科研、指导学生实验和大量土木工程结构试验及检测工作方面的经验,在阐明结构试验与检测技术基本原理的基础上,重点介绍基本试验与检测的方法,并力求反映近些年国内外最新的工程结构试验理论和试验方法,以适应本科教学的要求,并同时满足研究生教学及结构工程学科的科研人员和有关工程技术人员的参考需要。

本教材由西安科技大学赵来顺、张淑云、赵曼合编,其中第1、2章及第3章3.4~3.7节由赵来顺编写,第4、5、6章由张淑云编写,第7章及第3章3.1~3.3节由赵曼编写,全书由赵来顺负责统稿。另外,书中绘图、文字与例题校对工作由研究生白苗苗、王云、张艳、王印等完成,编者在此深表感谢。教材中借鉴和参考了有关兄弟单位的研究与应用成果,并得到西安科技大学教材建设项目支持,特此致谢。由于编者业务水平有限,书中难免有疏漏或不妥之处,敬请专家、同行和读者批评指正。

编 者

2014年12月

# 目 录

第 1 章 概论 .....	1
1.1 土木工程结构试验的作用及地位 .....	1
1.2 土木工程结构试验的任务及分类 .....	2
1.2.1 土木工程结构试验的任务 .....	2
1.2.2 土木工程结构试验的分类 .....	2
1.3 土木工程结构检测的任务及分类 .....	6
1.4 土木工程结构试验的程序 .....	7
1.5 土木工程结构试验设计 .....	9
1.5.1 试件设计 .....	9
1.5.2 试验方案设计 .....	14
复习思考题 .....	16
第 2 章 土木工程结构试验的荷载与加载方法 .....	17
2.1 概述 .....	17
2.2 重力加载法 .....	18
2.2.1 重力直接加载法 .....	18
2.2.2 杠杆-重力加载法 .....	19
2.3 液压加载法 .....	20
2.3.1 手动液压千斤顶加载 .....	20
2.3.2 同步液压加载 .....	21
2.3.3 双向液压加载 .....	22
2.3.4 试验机加载 .....	23
2.3.5 电液伺服液压加载 .....	24
2.4 机械力与气压加载法 .....	25
2.4.1 机械加载法 .....	25
2.4.2 气压加载法 .....	25
2.5 动力激振加载法 .....	26
2.5.1 惯性力加载法 .....	26
2.5.2 电磁加载法 .....	29
2.5.3 现场动力试验的激振方法 .....	30
2.6 模拟地震振动台加载 .....	32
2.7 土木工程结构试验荷载的支承装置 .....	34
2.7.1 反力装置 .....	35
2.7.2 支座装置 .....	39
2.7.3 加载辅助设备 .....	43
复习思考题 .....	44
第 3 章 土木工程结构试验的量测技术 .....	45
3.1 概述 .....	45
3.2 量测仪器的基本概念 .....	45
3.2.1 量测仪器的基本组成 .....	45
3.2.2 量测仪器的分类 .....	46
3.2.3 量测仪器的主要技术性能指标 .....	46
3.2.4 仪器的量测方法 .....	47
3.2.5 仪器误差及消除方法 .....	48
3.3 应变测量 .....	49
3.3.1 应变机测法 .....	49
3.3.2 应变电测法 .....	51
3.3.3 应变的其他测量方法 .....	61
3.4 位移与变形量测 .....	65
3.4.1 结构线位移量测 .....	65
3.4.2 结构角位移及其他变形量测 .....	68
3.5 力的量测 .....	71
3.5.1 荷载和反力测定 .....	71
3.5.2 拉力和压力测定 .....	71
3.5.3 结构内部应力测定 .....	72
3.6 裂缝、应变场应变及内部温度测定 .....	73
3.6.1 裂缝检测 .....	73
3.6.2 应变场应变测量 .....	74
3.6.3 内部温度测量 .....	76
3.7 数据采集系统 .....	76
3.7.1 数据采集系统的组成 .....	76
3.7.2 数据采集过程 .....	78
复习思考题 .....	79



<b>第 4 章 土木工程结构静载试验</b> .....	80
4.1 概述 .....	80
4.2 试验前的准备 .....	81
4.3 加载方案设计 .....	83
4.3.1 加载方案设计依据及要求 .....	83
4.3.2 试件就位形式 .....	84
4.3.3 加载图式选择与设计 .....	85
4.3.4 荷载值计算 .....	86
4.3.5 加载程序设计 .....	89
4.4 量测方案设计 .....	91
4.4.1 观测项目确定 .....	91
4.4.2 测点选择和布置 .....	92
4.4.3 量测仪器选择与测读原则 .....	92
4.5 常见工程结构静载试验 .....	93
4.5.1 受弯构件的试验 .....	93
4.5.2 受压构件的试验 .....	97
4.5.3 屋架试验 .....	99
4.5.4 薄壳和网架结构试验 .....	104
4.6 量测数据整理 .....	110
4.6.1 整体变形量测结果整理 .....	111
4.6.2 截面内力 .....	113
4.6.3 平面应力状态下的主应力计算 .....	116
4.6.4 试验曲线绘制 .....	118
4.7 结构性能的检验与评定 .....	119
4.7.1 构件承载力检验 .....	119
4.7.2 构件的挠度检验 .....	120
4.7.3 构件裂缝宽度检验 .....	121
4.7.4 构件的抗裂检验 .....	121
4.7.5 构件结构性能评定 .....	122
复习思考题 .....	124
<b>第 5 章 土木工程结构动力试验</b> .....	125
5.1 概述 .....	125
5.2 结构动力试验的量测仪器 .....	126
5.2.1 惯性式拾振器的力学原理 .....	127
5.2.2 测振传感器 .....	130
5.2.3 测振放大器 .....	134
5.2.4 显示与记录设备 .....	134
5.3 动力荷载的特性试验 .....	137
5.3.1 主振源的测定 .....	138
5.3.2 动荷载参数的确定 .....	139
5.4 结构动力特性试验 .....	141
5.4.1 自由振动法 .....	141
5.4.2 共振法 .....	142
5.4.3 脉动法 .....	144
5.5 结构动力反应试验 .....	148
5.5.1 测定结构的振动变位图 .....	148
5.5.2 结构动力系数的试验测定 .....	148
5.6 结构疲劳试验 .....	149
5.6.1 疲劳试验的内容 .....	150
5.6.2 疲劳试验荷载 .....	150
5.6.3 疲劳试验的步骤 .....	151
5.6.4 疲劳试验的观测 .....	151
5.7 结构抗震试验 .....	152
5.7.1 结构抗震试验的分类 .....	152
5.7.2 低周反复加载试验 .....	153
5.7.3 拟动力试验 .....	159
5.7.4 模拟地震振动台试验 .....	160
5.7.5 强震观测 .....	161
复习思考题 .....	162
<b>第 6 章 土木工程结构检测</b> .....	163
6.1 概述 .....	163
6.2 混凝土结构的检测 .....	164
6.2.1 混凝土强度检测 .....	164
6.2.2 混凝土外观质量及内部缺陷检测 .....	179
6.2.3 尺寸偏差检测 .....	184
6.2.4 变形与损伤检测 .....	184
6.2.5 混凝土结构中钢筋检测 .....	185
6.3 砌体结构的检测 .....	187
6.3.1 砌筑块材检测 .....	187
6.3.2 砌筑砂浆检测 .....	190
6.3.3 砌体强度检测 .....	195
6.3.4 砌筑质量与构造检测 .....	201
6.3.5 变形与损伤检测 .....	201
6.4 钢结构的检测 .....	202
6.4.1 钢材外观质量检测 .....	202

6.4.2 构件尺寸偏差检测 .....	202	6.4.5 磁粉与射线探伤 .....	204
6.4.3 钢材的力学性能检验 .....	203	复习思考题 .....	205
6.4.4 超声法检伤 .....	203		

**第7章 土木工程结构试验的数据处理** .....

7.1 概述 .....	206	7.3.3 误差传递 .....	209
7.2 试验数据的整理和换算 .....	206	7.3.4 误差的检验及处理 .....	210
7.2.1 试验数据的整理 .....	206	7.4 试验数据的表达方式 .....	212
7.2.2 试验数据换算 .....	207	7.4.1 表格方式 .....	212
7.3 试验数据的误差分析 .....	208	7.4.2 图像方式 .....	214
7.3.1 误差的分类 .....	208	7.4.3 函数方式 .....	216
7.3.2 误差计算 .....	209	复习思考题 .....	220

**附录** .....

**参考文献** .....

1.1 绪论 .....	1	1.1.1 绪论 .....	1
1.2 绪论 .....	1	1.1.2 绪论 .....	1
1.3 绪论 .....	1	1.1.3 绪论 .....	1
1.4 绪论 .....	1	1.1.4 绪论 .....	1
1.5 绪论 .....	1	1.1.5 绪论 .....	1
1.6 绪论 .....	1	1.1.6 绪论 .....	1
1.7 绪论 .....	1	1.1.7 绪论 .....	1
1.8 绪论 .....	1	1.1.8 绪论 .....	1
1.9 绪论 .....	1	1.1.9 绪论 .....	1
1.10 绪论 .....	1	1.1.10 绪论 .....	1
1.11 绪论 .....	1	1.1.11 绪论 .....	1
1.12 绪论 .....	1	1.1.12 绪论 .....	1
1.13 绪论 .....	1	1.1.13 绪论 .....	1
1.14 绪论 .....	1	1.1.14 绪论 .....	1
1.15 绪论 .....	1	1.1.15 绪论 .....	1
1.16 绪论 .....	1	1.1.16 绪论 .....	1
1.17 绪论 .....	1	1.1.17 绪论 .....	1
1.18 绪论 .....	1	1.1.18 绪论 .....	1
1.19 绪论 .....	1	1.1.19 绪论 .....	1
1.20 绪论 .....	1	1.1.20 绪论 .....	1
1.21 绪论 .....	1	1.1.21 绪论 .....	1
1.22 绪论 .....	1	1.1.22 绪论 .....	1
1.23 绪论 .....	1	1.1.23 绪论 .....	1
1.24 绪论 .....	1	1.1.24 绪论 .....	1
1.25 绪论 .....	1	1.1.25 绪论 .....	1
1.26 绪论 .....	1	1.1.26 绪论 .....	1
1.27 绪论 .....	1	1.1.27 绪论 .....	1
1.28 绪论 .....	1	1.1.28 绪论 .....	1
1.29 绪论 .....	1	1.1.29 绪论 .....	1
1.30 绪论 .....	1	1.1.30 绪论 .....	1
1.31 绪论 .....	1	1.1.31 绪论 .....	1
1.32 绪论 .....	1	1.1.32 绪论 .....	1
1.33 绪论 .....	1	1.1.33 绪论 .....	1
1.34 绪论 .....	1	1.1.34 绪论 .....	1
1.35 绪论 .....	1	1.1.35 绪论 .....	1
1.36 绪论 .....	1	1.1.36 绪论 .....	1
1.37 绪论 .....	1	1.1.37 绪论 .....	1
1.38 绪论 .....	1	1.1.38 绪论 .....	1
1.39 绪论 .....	1	1.1.39 绪论 .....	1
1.40 绪论 .....	1	1.1.40 绪论 .....	1
1.41 绪论 .....	1	1.1.41 绪论 .....	1
1.42 绪论 .....	1	1.1.42 绪论 .....	1
1.43 绪论 .....	1	1.1.43 绪论 .....	1
1.44 绪论 .....	1	1.1.44 绪论 .....	1
1.45 绪论 .....	1	1.1.45 绪论 .....	1
1.46 绪论 .....	1	1.1.46 绪论 .....	1
1.47 绪论 .....	1	1.1.47 绪论 .....	1
1.48 绪论 .....	1	1.1.48 绪论 .....	1
1.49 绪论 .....	1	1.1.49 绪论 .....	1
1.50 绪论 .....	1	1.1.50 绪论 .....	1
1.51 绪论 .....	1	1.1.51 绪论 .....	1
1.52 绪论 .....	1	1.1.52 绪论 .....	1
1.53 绪论 .....	1	1.1.53 绪论 .....	1
1.54 绪论 .....	1	1.1.54 绪论 .....	1
1.55 绪论 .....	1	1.1.55 绪论 .....	1
1.56 绪论 .....	1	1.1.56 绪论 .....	1
1.57 绪论 .....	1	1.1.57 绪论 .....	1
1.58 绪论 .....	1	1.1.58 绪论 .....	1
1.59 绪论 .....	1	1.1.59 绪论 .....	1
1.60 绪论 .....	1	1.1.60 绪论 .....	1
1.61 绪论 .....	1	1.1.61 绪论 .....	1
1.62 绪论 .....	1	1.1.62 绪论 .....	1
1.63 绪论 .....	1	1.1.63 绪论 .....	1
1.64 绪论 .....	1	1.1.64 绪论 .....	1
1.65 绪论 .....	1	1.1.65 绪论 .....	1
1.66 绪论 .....	1	1.1.66 绪论 .....	1
1.67 绪论 .....	1	1.1.67 绪论 .....	1
1.68 绪论 .....	1	1.1.68 绪论 .....	1
1.69 绪论 .....	1	1.1.69 绪论 .....	1
1.70 绪论 .....	1	1.1.70 绪论 .....	1
1.71 绪论 .....	1	1.1.71 绪论 .....	1
1.72 绪论 .....	1	1.1.72 绪论 .....	1
1.73 绪论 .....	1	1.1.73 绪论 .....	1
1.74 绪论 .....	1	1.1.74 绪论 .....	1
1.75 绪论 .....	1	1.1.75 绪论 .....	1
1.76 绪论 .....	1	1.1.76 绪论 .....	1
1.77 绪论 .....	1	1.1.77 绪论 .....	1
1.78 绪论 .....	1	1.1.78 绪论 .....	1
1.79 绪论 .....	1	1.1.79 绪论 .....	1
1.80 绪论 .....	1	1.1.80 绪论 .....	1
1.81 绪论 .....	1	1.1.81 绪论 .....	1
1.82 绪论 .....	1	1.1.82 绪论 .....	1
1.83 绪论 .....	1	1.1.83 绪论 .....	1
1.84 绪论 .....	1	1.1.84 绪论 .....	1
1.85 绪论 .....	1	1.1.85 绪论 .....	1
1.86 绪论 .....	1	1.1.86 绪论 .....	1
1.87 绪论 .....	1	1.1.87 绪论 .....	1
1.88 绪论 .....	1	1.1.88 绪论 .....	1
1.89 绪论 .....	1	1.1.89 绪论 .....	1
1.90 绪论 .....	1	1.1.90 绪论 .....	1
1.91 绪论 .....	1	1.1.91 绪论 .....	1
1.92 绪论 .....	1	1.1.92 绪论 .....	1
1.93 绪论 .....	1	1.1.93 绪论 .....	1
1.94 绪论 .....	1	1.1.94 绪论 .....	1
1.95 绪论 .....	1	1.1.95 绪论 .....	1
1.96 绪论 .....	1	1.1.96 绪论 .....	1
1.97 绪论 .....	1	1.1.97 绪论 .....	1
1.98 绪论 .....	1	1.1.98 绪论 .....	1
1.99 绪论 .....	1	1.1.99 绪论 .....	1
2.00 绪论 .....	1	1.1.100 绪论 .....	1

# 第 1 章 概 论

## 1.1 土木工程结构试验的作用及地位

土木工程结构试验是研究和发展工程结构理论的重要手段。早在 1767 年,由法国科学家容格密里完成的简支木梁试验,证明了梁受弯时并非全截面受拉,而是上缘受压,下缘受拉。容格密里这个定性的试验总结了人们一百多年的探索,给人们指出了发展结构强度计算理论的正确方向和方法,被誉为“路标试验”。1821 年,法国科学家纳维叶进一步从理论上推导了受弯构件截面应力分布的计算公式,并经过二十多年的经验进行了验证,最终才得到了现在材料力学教科书上给出的正应力计算公式。纵观我国钢筋混凝土结构和砌体结构的计算理论发展史,几乎全部是以试验研究的直接结果作为基础的,从确定结构材料的力学性能到验证梁、板、柱等单个构件的计算方法,乃至建立复杂结构体系的计算理论,都离不开试验研究。另外,在近年来国内外蓬勃兴起的既有建筑物加固改造业中,通过结构试验与结构性能检测,可以准确地评定既有建筑物的可靠性,并为结构工程病害的成因分析及制定加固改造方案提供依据,同时也为研究和发展结构加固改造理论与技术提供了依据。由此可见,结构试验在工程结构学科的科学研究和技术创新中一直起着至关重要的作用,并具有较强的实践性。尽管近年来计算机的大量应用为工程结构的计算分析创造了条件,为结构理论的研究提供了方便,使结构试验不再是研究和发展结构理论的唯一方法。但由于实际结构的复杂性,特别在钢筋混凝土结构的塑性阶段性能、徐变性能、结构耐久性性能、钢结构的疲劳和稳定问题、结构的动力性能分析,以及力学模型的边界约束条件确定等方面,采用数值模拟分析法仍存在问题,还只有通过必要的实际结构试验研究才有可能解决技术难题。因此,结构试验仍然是结构理论研究和结构性能检验的主要手段。

与此同时,工程结构学科发展的要求又推动了结构试验与检测技术的发展和提高。随着超高层建筑、大跨度桥涵、海洋石油平台、地铁、隧道等各种土木工程结构的理论研究及设计方法的研究要求,尤其是结构抗震性能的研究要求,对结构整体工作性能、结构动力反应、结构非线性性能等问题的研究已日益突出,迫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。目前各种伪静力试验、拟动力试验、振动台试验等已打破了结构静载试验和动力试验的界限,尤其利用计算机控制的结构试验技术,以及新型高性能传感器的应用和远程网络控制技术的应用,为实现荷载再现、数据采集、数据处理,以及整个试验过程控制提供了条件,使结构试验技术发生了根本性的变化。目前,在工程结构学科发展演变过程中形成的结构试验、结构理论与结构计算三级构成的新学科结构中,结构试验本身也成为一门真正的试验科学,今后将有更深入的发展。

综上所述,结构试验是结构理论发展的先驱和路标,是研究和发展结构理论的重要手段,同时,结构理论的研究要求又推动了试验技术的发展和提高。



## 1.2 土木工程结构试验的任务及分类

### 1.2.1 土木工程结构试验的任务

工程结构在外荷载作用下将产生各种反应。外荷载包括常见的恒荷载和活荷载,又包括

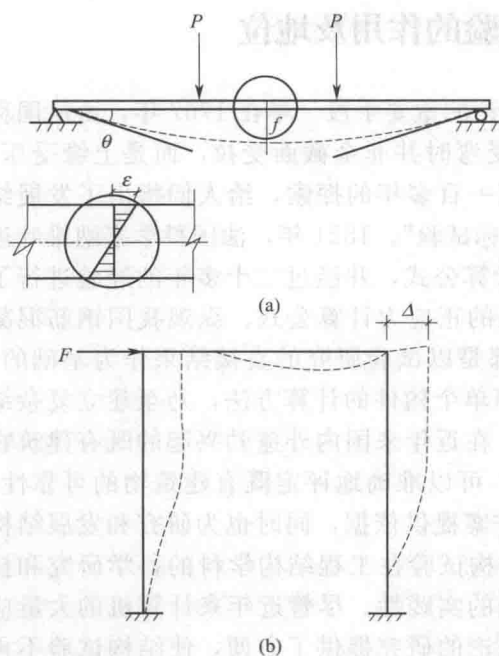


图 1-1 结构在不同荷载作用下的各种反应

地基基础的不均匀沉降,以及外界环境温度的变化等。结构反应即荷载效应,包括结构内力、应力、变形、转角、位移等。对由各种材料构成的结构构件或结构体系,其外荷载与结构反应可由结构试验联系起来,即由结构试验可得到结构反应,或由结构反应反求外荷载,或在已知外荷载和结构反应的情况下,可由结构试验结果修改或确定结构构件的材料、截面特征以及结构体系。如图 1-1(a)所示,钢筋混凝土简支梁在静荷载  $P$  作用下,可通过结构试验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,分析梁的整个受力过程及梁的强度、刚度和抗裂性能。如图 1-1(b)所示,一个框架结构承受水平的动荷载作用时,同样可由结构试验测得结构的自振频率、阻尼系数、振幅(动位移)和动应变等反应参数,进而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状况,并根据结构的功能要求,反求合理的截面特征参数。另外,在

结构抗震性能研究中,可通过结构在承受低周反复荷载作用下的伪静力试验,得到恢复力和变形关系的滞回曲线,分析结构的承载能力、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等。

由此可见,土木工程结构试验的任务就是在结构物或试验对象(实物或模型)上,利用试验仪器、设备为工具,以各种试验技术为手段,在荷载(重力、机械扰动力、地震力、风力或温度变形等)作用下,通过量测与结构工作性能有关的各种反应参数(变形、挠度、应变、振幅、频率等),从强度、刚度、稳定性和抗裂性,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,并用以检验和发展工程结构的计算理论。

### 1.2.2 土木工程结构试验的分类

土木工程结构试验可按试验目的、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。

#### 1.2.2.1 探索性试验和验证性试验

在实际工作中,根据不同的试验目的,结构试验与检测可分为探索性试验和验证性试验。

(1) 探索性试验 探索性试验是为科学研究及开发新技术(材料、工艺、结构形式)等

目的而进行的探讨结构性能和规律的试验。探索性试验具有研究、探索和开发的性质,故又称研究性试验、开发性试验。如为创造某种新型结构体系及其计算理论、为制定或修改结构设计规范提供依据,为发展和推广新结构、新材料与新工艺提供试验数据或实践经验,以及对病害建筑的原因分析等所做的试验,均属探索性试验。

探索性试验的试验对象(试件或试验结构)是专门为试验研究而设计制作的,它不一定是研究任务中的具体结构模型,更多的是经过力学分析后抽象出来的模型。试件设计时,原则上应突出解决问题的关键和研究的主要因素,能反映研究任务中的主要参数,忽略一些对实际工作只有次要影响的因素,尽可能简化试验设备和试验装置。如开滦煤矿工业广场的受煤煤仓,主体结构为由筒壁、折形底板、圈梁和立柱组成的钢筋混凝土空间结构,1976年唐山大地震中受煤煤仓被震塌。为研究煤仓受震倒塌的原因,设计制作了1:100的有机玻璃煤仓结构试验模型,采用气压和重力(黄砂,用于模拟实际煤的荷载)两种加载方法,进行了缩小比例的弹性模型试验。通过试验,分析其在弹性工作阶段的内力及计算方法是否可靠,结构内部应力及总变形是否异常,并取得结构的自振频率等动力特性资料,为重新设计和建造提供依据。

探索性试验一般都是破坏性试验,而且主要在实验室内进行,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,为研究设计理论和计算方法提供依据。

(2) 验证性试验 验证性试验是为证实科研假定和计算模型、核验新技术(材料、工艺、结构形式)的可靠性等目的而进行的试验。验证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,如为验证结构计算理论某些假定的正确性所做的试验。又如在既有工程结构现场进行加载和量测的原位加载试验,得出检验结构构件是否符合结构设计规范和施工验收规范的要求,并对检验结果作出技术结论等,故又称鉴定性试验。

验证性试验的试验对象一般是真实的结构或构件。除特殊情况外,一般不做破坏性试验,且多为短期荷载试验。这类试验常用来解决以下几方面的问题:

- ① 验证结构计算理论的科学假定和计算模型的正确性。
- ② 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、新生产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。
- ③ 产品质量检验。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范所要求的指标。

④ 判断既有建筑的实际承载力,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,从而确定原建筑物的结构潜力,为结构加固、改造提供依据。

⑤ 检验和鉴定既有建筑物的可靠性,推断其剩余寿命。建成并投入使用两年以上的建筑物称为既有建筑,这类建筑物经过几十年的使用,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。这类鉴定工作应该按照国家有关建

筑物可靠性鉴定规范的规定进行。

⑥ 为处理工程事故提供依据。对因遭受地震、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。

### 1.2.2.2 原型试验和模型试验

根据试件大小可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者是按实物结构足尺复制的结构或构件。原型试验一般用于验证性试验,例如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此类试验。在原型试验中,另一类是足尺结构或构件的试验,如构件的足尺试验对象就是一根梁、一块板或一榀屋架之类的实物构件,它可以在实验室内试验,也可以在现场进行。由于建筑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,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性能进行全面观测了解。如西安建筑科技大学结构试验室可进行4层楼一个单元的足尺试验,日本曾在室内完成了7层房屋足尺结构的伪静力试验。还有些既有建筑物的扩建、改造或增层,为了判定原有结构的实际承载力,可从原结构上拆下具有代表性的物件(梁或板)进行加载试验,或在原结构上进行原位加载试验。

(2) 模型试验 由于原型试验投资大、周期长、测量精度受环境因素等影响,在经济或技术方面存在一定困难。因此,在结构方案设计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,可采用按原型结构缩小的模型进行试验。模型是仿照真型(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,但尺寸却是比真型小得多的缩尺结构。

模型的设计制作与试验是根据相似理论,用适当的比例和相似材料制成与真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),使模型受力后重演真型结构的实际工作,最后按照相似理论由模型试验结果推算实际结构的工作状况。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。如前述的唐山开滦煤矿的煤仓结构就是采用相似理论设计的有机玻璃模型进行试验的。建筑结构教学试验中,通过钢筋混凝土小梁验证受弯构件正截面的设计计算理论也属于模型试验,不过其不一定满足严格的相似条件而已。

### 1.2.2.3 静力试验和动力试验

按试验荷载的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大量、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,故称为结构静力单调加载试验。

静力试验的优点是加载设备相对比较简单,操作比较容易;荷载可以逐步施加,还可以停下来仔细观测结构变形的发展,给人们以最明确和清晰的破坏概念。缺点是不能反映荷载作用下的应变速率对结构产生的影响,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较大。

近年来,为了探索结构的抗震性能,结构抗震试验无疑成为一种重要的研究手段。结构抗震静力试验是以静力的方式模拟地震作用的试验,它是一种控制荷载或控制变形作用于结构的周期性的反复静力荷载,为区别于一般单调加载试验,称之为低周反复静力加载试验,或称为伪静力试验。

(2) 动力试验 对于主要承受动力作用的结构或构件,为了解结构在动力荷载作用下的工作性能,一般要进行动力试验。动力荷载与时间有关,而且荷载值也会改变,因此,动力试验需要通过动力加载设备直接对结构构件施加动力荷载。

动力试验中,由于荷载特性的不同,其加载设备和测试手段与静力试验有很大的差别,并且要比静力试验复杂得多。例如结构抗震性能试验研究中,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。目前抗震动力试验需要用电液伺服加载设备或地震模拟振动台等专用设备来进行,其设备造价和试验经费较静力试验都昂贵得多。

#### 1.2.2.4 短期荷载试验和长期荷载试验

按试验荷载作用时间长短分为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,实际的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,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。对于承受动力荷载的结构,即便是结构的疲劳试验,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,整个试验加荷过程只有几秒钟甚至是微秒或毫秒,这种试验实际上是一种瞬态的冲击试验。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。

(2) 长期荷载试验 为了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称为持久试验,它将连续进行几个月或几年时间,通过试验获得结构变形随时间变化的规律。为了保证试验的精度,经常需要对试验环境有严格的控制,如保持恒温恒湿、防止振动影响等,当然这就必须在实验室内进行。如果能在现场对实际工作中的结构物进行系统、长期的观测,所积累和获得的数据资料对于研究结构的实际工作性能,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。

#### 1.2.2.5 实验室试验和现场试验

根据试验地点的不同分为实验室试验和现场试验。

实验室试验具有良好的工作条件,可以应用精密和灵敏的仪器设备进行试验,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,所以适宜于进行探索性试验。因此,实验室试验可以突出研究问题的主要方面,消除一些对试验结构实际工作有影响的次要因素。这种试验可以在真型结构上进行,也可以采用小尺寸的模型试验,并可以将结构一直加载到破坏。尤其近年来发展足尺结构的整体结构试验,大型实验室可为试验提供比较理想的条件。

现场试验由于客观环境条件的影响,不宜使用高精度的仪器设备来进行观测,相对而言,试验方法比较简单粗率,所以试验精度和准确度较差。现场试验多数用于解决生产性的



问题,所以大量的试验是在生产和施工现场进行,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。

#### 1.2.2.6 其他

结构试验的类型除了按上述情况区分外,也可按结构试验的最终结果分为破坏性试验和非破坏性试验。非破坏性试验多用在现场工程质量检验及既有建筑物的性能检验;也可按试验对象的特征分为单个构件(或部件)和整体房屋(或构筑物)试验;也可按结构特点分为杆系结构试验、平面结构试验及空间结构试验等。

### 1.3 土木工程结构检测的任务及分类

土木工程结构检测是为评定工程结构的质量或鉴定既有工程结构的性能等所实施的检查和测试工作。检查是指利用目测了解结构或构件的外观情况,例如目测检查地基基础是否有沉降,结构是否有倾斜、开裂,混凝土结构表面是否有蜂窝、麻面,钢结构焊缝是否存在夹渣、气泡,连接节点是否有松动等,主要用于定性判断;测试是指通过工具或仪器测定结构构件的材料性能、几何特征及受力性能。因此,土木工程结构检测的任务就是在既有工程上采用外观检查,专用检测仪器、设备的无损或局部破损定量测试的方法,检查和测定结构或构件的外观质量及内在质量(材料强度、内部缺陷等)和与结构工作性能有关的各参数(承载能力、变形、振幅、频率等),对工程结构或构件质量作出评价,为工程质量检查验收及既有建筑可靠性鉴定提供依据,为既有建筑工程病害成因分析、病害状况判断和制定加固改造方案提供依据。

土木工程结构检测可按检测目的分为结构工程质量检测和既有结构性能检测。

(1) 结构工程质量的检测 结构工程质量检测的目的在于控制在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。当其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 对施工质量的抽样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其对结构可靠性的影响。

(2) 既有结构性能的检测 既有结构性能检测的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,应对其现状缺陷和损伤、结构构件承载力、结构变形等涉及结构性能的项目进行检测:

- ① 结构安全性鉴定;
- ② 结构抗震性鉴定;
- 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、环境侵蚀等影响结构安全的鉴定;
- ⑦ 结构工程病害(开裂、下沉、倾斜等)的检测鉴定。



## 1.4 土木工程结构试验的程序

土木工程结构试验一般可分为四个阶段：试验设计阶段、试验准备阶段、试验实施阶段和试验资料整理分析阶段。各阶段之间的关系如图 1-2 所示。

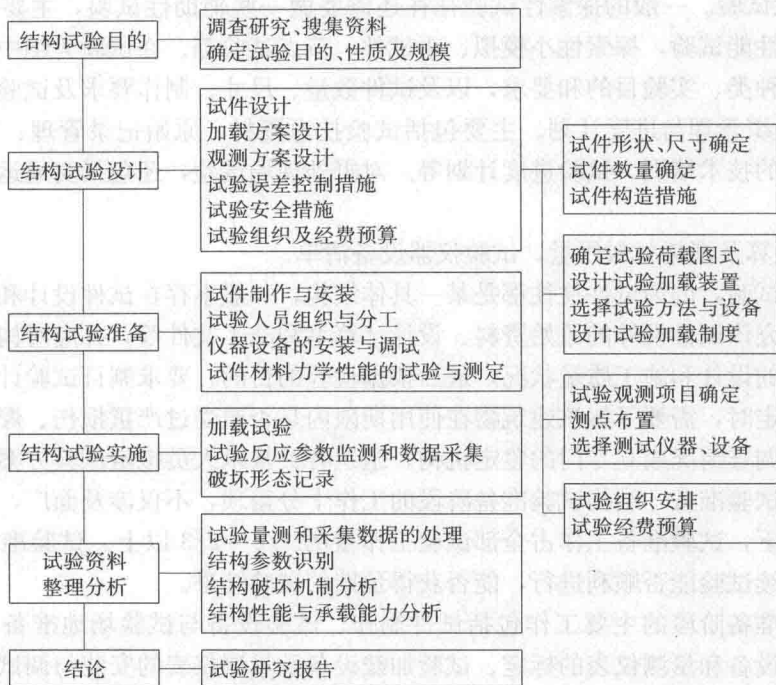


图 1-2 结构试验程序框图

(1) 结构试验设计 结构试验设计或称试验规划是结构试验的总体构思，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，对整个试验起到统管全局和具体指导的作用，关系到整个试验的成败。

对于研究性试验，在结构试验设计时，首先应根据研究课题内容，了解国内外的研究状况及发展趋势，查询国内外有关资料，包括前人已做过的类似试验、试验成败情况、试验方法及试验结果等，以避免重复试验，并在以上工作的基础上确定试验目的、任务和规模，最后提出试验大纲。试验大纲是指导试验的技术文件，具体应包含下列内容。

① 概述。主要介绍试验背景、目的、任务与要求等，并简要介绍调查研究的情况，必要时还应介绍试验依据的相关标准、规范等。试验目的是试验大纲的主题，包括本次试验预期要得到哪些成果，以及为达到这些目的要进行哪几项试验。应明确要取得哪些数据和资料，如荷载-挠度曲线图，弯矩-曲率变化图，钢筋混凝土构件的开裂荷载、裂缝宽度、破坏荷载及形态，试件的极限变形及设计荷载下的最大应力等，并详细列出与此相应的观测项目。

② 试件设计与制作要求。试件是试验的对象。试件设计主要介绍设计的依据及分析和计算，试件的规格、数量和编号，制作施工图及对材料、施工工艺的要求等。

③ 试验方案。土木结构试验方案包括加载方案、观测方案及安全措施。

a. 加载方案。主要介绍试验加载方案设计的依据及要求、加载方法及加载装置、加载图式及加载程序等,并给出试验控制荷载特征值(开裂荷载、屈服荷载、最大荷载等)。

b. 观测方案。主要介绍观测项目内容、测点布置、仪器仪表的选择及标定、观测方法与顺序,以及相关的补偿措施等。并给出试验观测控制特征值(如变形值、内力值等)。

c. 安全措施。应介绍试验准备及试验实施阶段人身、构件和仪器设备的安全防护措施。

④ 辅助性试验。一般的探索性试验往往还需要做一些辅助性试验,主要为测定试件所用材料的力学性能试验,探索性小模拟、小试件、节点试验等。在试验大纲中应列出辅助性试验的内容、种类、实验目的和要求,以及试件数量、尺寸、制作要求及试验方法等。

⑤ 试验组织管理与进度计划。主要包括试验技术资料、原始记录管理、试验人员的组织分工、必要的技术培训、试验进度计划等。对野外现场试验,还包括交通运输、水、电安排等。

⑥ 经费预算及消耗材料用量,试验仪器设备清单。

对验证性试验,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。对既有建筑物作技术鉴定时,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。

(2) 结构试验准备 结构试验准备阶段的工作十分繁琐,不仅涉及面广,而且工作量很大,一般情况下,试验准备工作占全部试验工作量的 $1/2\sim 2/3$ 以上。试验准备工作的好坏直接影响到后续试验能否顺利进行,能否获得预期的试验结果。

结构试验准备阶段的主要工作包括试件制作、试验设备与试验场地准备、试件安装就位、加载配套设备和量测仪表的标定、试验加载设备及量测仪表的安装与调试、辅助性试验以及试验人员的组织安排和试验记录表格的准备等。另外,试验准备阶段还应根据需要进行计算各加载阶段的荷载控制值及主要特征部位的内力及变形控制值,以备在试验过程进行随时监控。试验准备阶段的各项工作均应按既定结构试验大纲要求进行,其具体内容见后续章节。

(3) 结构试验实施 加载试验阶段是整个试验过程的中心环节,应按既定试验大纲中设计的加载程序和观测顺序进行,并做好试验记录,作为备忘录归入试验资料档案。

在试验过程中,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,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,或根据实际情况,调整试验加载量,实现动态控制,保证试验的正常进行。

试验过程中,除认真读数记录外,必须仔细观察试件的外观变化,例如砌体结构和混凝土结构裂缝的出现、裂缝的走向及其宽度,以及试件的破坏特征。尤其对试验过程发生的突变,应随时加以监控,及时采取措施予以排除。

试件破坏后,要绘制破坏特征图,有条件的可拍照或录像,作为原始资料保存,以便以后研究分析时使用。

(4) 试验资料的整理分析 试验资料的整理分析一般包括原始资料的收集整理、数据处理及试验结论两部分工作。

① 原始资料的收集整理 任何一个试验研究项目,都应有一份详细的原始记录,连同

试验过程中的试件外观变化观察记录、仪表设备标定数据记录、材料的力性能试验结果、试验过程中的工作日志等,经查实后收集完整,不得丢失。

对于试验的量测数据记录及记录曲线,应由负责人、记录人员签名,不能随便涂改,以保证数据的真实性和可靠性,并将全部原始资料完善归档。

② 数据处理和试验结论 从各种量测仪表获得的量测数据和记录曲线,一般不能直接解答试验任务书中所提出的各类问题,它们只是试验的原始数据,必须对这些数据进行科学地整理、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试验报告,并给出试验结论。

试验报告是试验过程的真实反映和试验成果的集中体现,应准确、清楚、全面地反映科研或工程背景、探讨目的、试验方案,详尽的试验过程和现象描述、量测结果等。试验报告应实事求是,并根据试验结果进行分析,得出试验结论。

由于试验目的的不同,试验的技术结论内容和表达形式也不完全一样。

验证性试验的技术结论应根据《建筑结构设计统一标准》规定,对试验结构或构件的结构性能作出“合格”、“不合格”的技术结论。验证性试验的技术报告主要包括下列内容。

- a. 检验或鉴定的原因和目的;
- b. 试验前或试验后存在的主要问题,结构所处的工作状态;
- c. 采用的检验方案或鉴定整体结构的普查方案;
- d. 试验数据的整理和分析结果;
- e. 技术结论或建议;
- f. 试验计划,原始记录,有关的设计、施工和使用情况调查报告等附件。

探索性试验大多是为了探讨验证某一新的结构理论,因而试验的技术结论无论从深度和广度上都远比验证性试验结论复杂,要求的内容也完全取决于具体的试验研究目的,对于试验发现的新问题应提出建议和进一步的研究计划。

## 1.5 土木工程结构试验设计

### 1.5.1 试件设计

试件是试验的对象,试件设计包括试件形状选择、试件尺寸与数量确定以及构造措施等,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,并以最少的试件数量获得最多的试验数据,反映研究的规律,满足研究任务的需要。

#### 1.5.1.1 试件形状选择

试验试件的形状与实际结构构件的形状可能相同,也可能不相同。对于探索性试验,试件形状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,即试件受荷载作用后的受力状况(内力分布状况)应与实际构件受荷载作用后的受力状况保持一致。另外还需考虑试验条件、试验的可行性及试验安全,其中试验条件涉及实验室的设备及技术水平,试验可行性指在满足试验目的的前提下,尽可能简化试验,方便操作,节省费用,并具有良好的可操作性。例如钢筋混凝土框架在水平力作用下,梁和柱的内力如图 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内力,可能的选择试

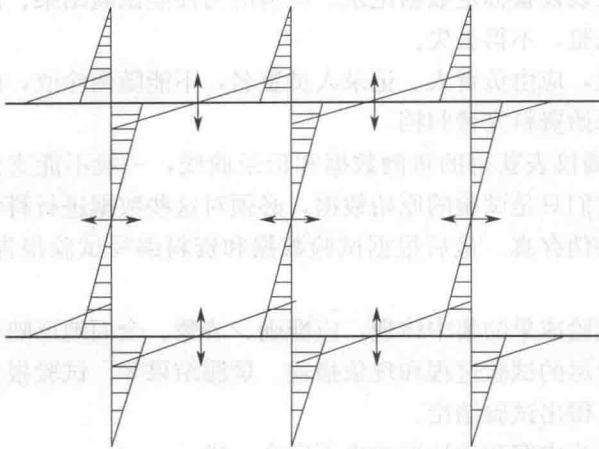


图 1-3 水平力作用下的框架内力

件设计时事先对梁、柱部分进行适当的加固处理，以保证试验正常进行，达到预期的试验效果。

表 1-1 框架柱型式与  $N$ 、 $M$ 、 $V$  关系

柱型式						
$N_{\max}$	$P$	$P \cos \theta$	$P \cos \theta$	$N$	$N$	$N$
$M_{\max}$	$Pa$	$P a \cos \theta$	$P \frac{h}{2} \sin \theta$	$\frac{h}{2} V$	$\frac{h}{2} V$	$\frac{h}{2} V$
$V_{\max}$	—	$P \sin \theta$	$P \sin \theta$	$V$	$V$	$V$

### 1.5.1.2 试件尺寸确定

试件的尺寸和大小与试验目的有关，它可以是真型结构，也可以是其中的某一部分，或按原型尺寸按一定比例缩小后的缩尺试件（或称模型）。

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  $C_L = L_m/L$ 。

一般来说，静力试验试件的合理尺寸应不大又太小。太小的试件需考虑尺寸效应，如普通混凝土构件的截面小于  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ，砖砌体小于  $74\text{cm} \times 36\text{cm}$ ，砌块砌体小于  $60\text{cm} \times 120\text{cm}$  的试件都有尺寸效应，必须予以考虑。当砌块砌体试件大到  $120\text{cm} \times 244\text{cm}$  时，尺寸效应才不显著。另外，对砌体墙试件，当小于真型的  $1/4$  时，不但灰缝和砌筑等方面的条件难于相似，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。