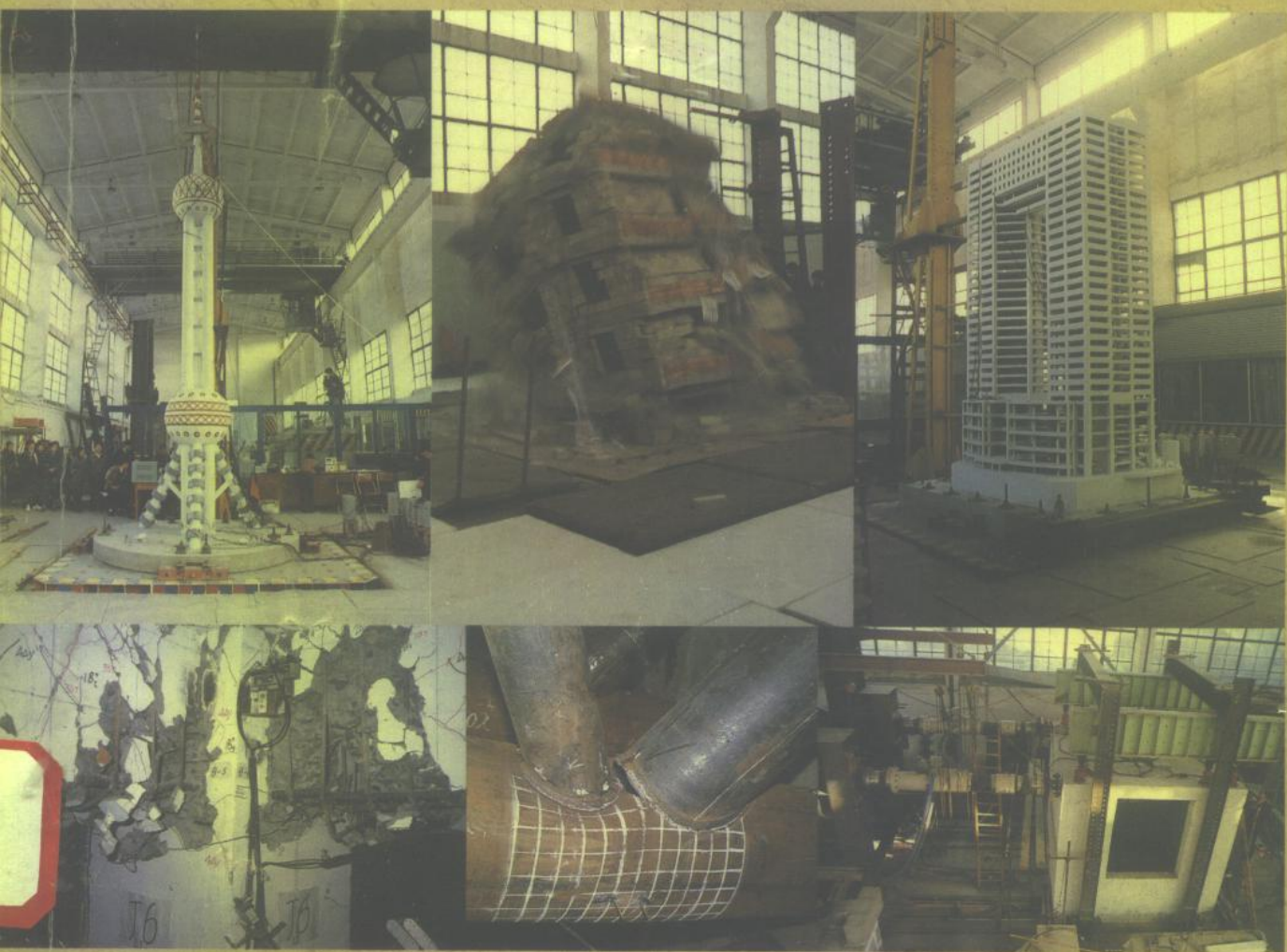


姚振纲 刘祖华 编著

# 建筑结构试验

同济大学出版社



# 建 筑 结 构 试 验

姚振纲 刘祖华 编著

同济大学出版社

DZ/00/20  
内 容 提 要

本书是同济大学为工业与民用建筑专业建筑结构试验课程编写的专业技术教材。内容包括结构试验概论、结构试验设计、结构试验的荷载设备、结构试验的数据采集和测量仪器、结构单调加载静力试验、结构低周反复加载静力试验、结构动力特性试验、结构抗震动力加载试验、结构试验现场检测技术和结构试验数据处理等。

本书可供高等学校土建结构专业和其他有关专业作为教材使用。也可供结构工程专业研究生、从事结构试验的专业人员和有关工程技术人员作为参考用书。

责任编辑 方 芳

封面设计 李志云

**建筑结构试验**  
姚振纲 刘祖华 编著  
同济大学出版社出版  
(上海四平路 1239 号)  
新华书店上海发行所发行  
同济大学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:430千字

1996年9月第1版 1996年9月第1次印刷

印数:1—2200 定价:19.80元

ISBN 7-5608-1698-3/TU. 211

## 主要符号

- $A$ ——结构构件截面面积,电阻丝截面面积,结构构件振动的振幅,超声波的波幅
- $A_m$ ——模型截面面积
- $A_p$ ——真型截面面积
- $B$ ——磁感应强度
- $D$ ——布氏硬度计钢珠直径
- $E$ ——材料弹性模量,感应电动势
- $E_m$ ——模型材料弹性模量
- $E_p$ ——真型材料弹性模量
- $F$ ——结构抗震恢复力,电磁激振器的电磁感应力,钻芯法检测芯样混凝土抗压试验最大压力值,拔出法检测测点的拔出力,推出法检测的极限推力值,砌体原位轴心抗压试验破坏荷载
- $G$ ——材料剪切模量
- $G_m$ ——模型材料剪切模量
- $G_p$ ——真型材料剪切模量
- $H_B$ ——钢材的布氏硬度
- $H_s$ ——标准试件的布氏硬度
- $H(i\omega)$ ——传递函数
- $I$ ——结构构件截面惯性矩,交变电流
- $I_m$ ——模型截面惯性矩
- $I_p$ ——真型截面惯性矩
- $K$ ——结构构件刚度,系数
- $M$ ——弯矩或扭矩

$M_m$ ——模型弯矩

$M_p$ ——真型弯矩

$N$ ——轴向力

$P$ ——集中荷载或离心力

$P_d$ ——动力集中荷载

$P_m$ ——模型集中荷载

$P_p$ ——真型集中荷载

$P_s$ ——静力集中荷载

$P_y$ ——屈服荷载

$R$ ——反力,电阻值,回弹值

$S_A$ ——截面面积相似常数

$S_C$ ——阻尼系数相似常数

$S_E$ ——弹性模量相似常数

$S_G$ ——剪切模量相似常数

$S_I$ ——截面惯性矩相似常数

$S_K$ ——刚度相似常数

$S_M$ ——弯矩或扭矩相似常数

$S_p$ ——集中荷载相似常数

$S_T$ ——周期相似常数

$S_V$ ——体积相似常数或电压灵敏度

$S_w$ ——截面模量相似常数,线荷载相似常数

$S_f$ ——挠度相似常数

$S_q$ ——重力加速度相似常数

$S_l$ ——长度相似常数

$S_m$ ——质量相似常数

$S_{mq}$ ——重量相似常数

$S_q$ ——面荷载相似常数或电荷灵敏度

$S_t$ ——时间相似常数

$S_x$ ——位移相似常数

$S_v$ ——速度相似常数

$S_a$ ——加速度相似常数

$S_x(\omega)$ ——脉动源功率谱密度函数

$S_y(\omega)$ ——建筑物脉动反应功率谱密度函数

$S_g$ ——重力密度相似常数或剪应变相似常数

$S_\epsilon$ ——应变相似常数

$S_\nu$ ——泊松比相似常数

$S_\rho$ ——质量密度相似常数

$S_\sigma$ ——应力相似常数

$S_\tau$ ——剪应力相似常数

$T$ ——周期

$V$ ——剪力、体积、电压

$V_i$ ——输入电压

$V_o$ ——输出电压

$W$ ——结构构件截面模量或线荷载

$W_m$ ——模型截面模量

$W_p$ ——真型截面模量

$a$ ——距离或加速度

$a_m$ ——模型的距离

$a_p$ ——真型的距离

$b$ ——构件截面宽度

$b_m$ ——模型截面宽度

$b_p$ ——真型截面宽度

$c$ ——阻尼系数

$d$ ——厚度或直径

$d_c$ ——裂缝深度

$d_t$ ——混凝土表面损伤层厚度

$d_m$ ——混凝土平均碳化深度

$f$ ——结构构件挠度, 振动频率, 钢材强度, 砌体抗压强度

$f_c$ ——混凝土抗压强度

$f_{cu}$ ——测区混凝土强度换算值

$g$ ——重力加速度

$h$ ——结构构件截面高度

$h_b$ ——梁的截面高度

$h_c$ ——柱的截面高度

$h_m$ ——模型截面高度

$h_p$ ——真型截面高度

$l$ ——结构构件的长度和跨度或电阻丝和导线长度

$l_m$ ——模型长度和跨度

$l_p$ ——真型长度和跨度

$m$ ——质量

$m_m$ ——模型质量

$m_p$ ——真型质量

$m_{t_0}$ ——无缺陷区平均声时值

$n$ ——结构振动衰减系数或线圈匝数

$q$ ——均布荷载

$r$ ——半径

$t$ ——时间

$t_n$ ——混凝土缺陷处最大声时值

$t_m$ ——模型时间  
 $t_0$ ——跨裂缝平测声时值  
 $t_p$ ——真型时间  
 $u$ ——粘结应力  
 $v$ ——地面质点运动速度或超声声速值  
 $v_a$ ——未损伤混凝土的声速  
 $v_f$ ——损伤表层混凝土的声速  
 $v_u$ ——考虑测试面修正后的声速  
 $x$ ——线位移  
 $x_m$ ——模型线位移  
 $x_p$ ——真型线位移  
 $\dot{x}$ ——线速度  
 $\ddot{x}$ ——线加速度  
 $\ddot{x}_0$ ——地面运动加速度  
 $x(t)$ ——脉动源输入激励  
 $y(t)$ ——建筑物脉动输出响应  
 $\alpha$ ——角度或系数  
 $\beta$ ——角度或系数  
 $\gamma$ ——剪应变或重力密度  
 $\gamma_m$ ——模型剪应变或模型重力密度  
 $\gamma_p$ ——真型剪应变或真型重力密度  
 $\varepsilon$ ——结构构件应变  
 $\varepsilon_c$ ——混凝土压应变  
 $\varepsilon_m$ ——模型应变  
 $\varepsilon_p$ ——真型应变  
 $\varepsilon_r$ ——钢筋应变



$\epsilon_t$ ——混凝土拉应变  
 $\dot{\epsilon}$ ——应变速率  
 $\theta$ ——角度或角位移  
 $\lambda$ ——剪跨比或对数衰减率  
 $\mu$ ——结构延性系数或动力系数  
 $\nu$ ——泊松比  
 $\nu_m$ ——模型材料泊松比  
 $\nu_p$ ——真型材料泊松比  
 $\xi$ ——阻尼比  
 $\rho$ ——质量密度, 钢筋配筋率或电阻率  
 $\rho_m$ ——模型质量密度  
 $\rho_p$ ——真型质量密度  
 $\rho_s$ ——配箍率  
 $\sigma$ ——应力  
 $\sigma_m$ ——模型应力  
 $\sigma_p$ ——真型应力  
 $\sigma_c$ ——混凝土压应力  
 $\sigma_o$ ——竖向应力  
 $\tau$ ——剪应力  
 $\tau_m$ ——模型剪应力  
 $\tau_p$ ——真型剪应力  
 $\omega$ ——角速度或圆频率  
 $\omega'$ ——有阻尼圆频率  
 $\Delta$ ——结构构件的变形和位移  
 $\Delta_y$ ——屈服位移

## 前 言

建筑结构试验是以实验技术为手段,测量能反映结构或构件实际工作性能的有关参数,为判断结构的承载能力和安全储备提供重要依据。建筑结构试验与结构设计、施工实践和推动建筑结构学科的发展有着极为密切的关系,日益为人们注意并引起重视。

建筑结构试验是工业与民用建筑专业的一门专业技术课程。本课程的任务是通过理论和实践教学环节,使学生获得建筑结构试验方面的基础知识和基本技能,能够进行一般建筑结构试验的设计与规划,并得到初步的训练和实践。

1978年,为适应当时工民建专业的教学需要,编者与张誉教授合作编写了《建筑结构试验》讲义,并在全国兄弟院校间进行交流,其中部分内容后来被吸收编入1982年出版的高等学校试用教材。随着建筑结构学科和结构试验技术的发展,特别是建筑结构抗震学科与结构试验现场检测技术的迅速发展,原有教材内容已经不能满足学科发展和当前教学的要求,为此对原有讲义进行了全面修改。

本教材编写的指导思想是加强结构试验设计。用较大篇幅增加了结构抗震试验的内容,特别是将低周反复静力加载试验部分独立成章,并增补了计算机-加载器联机试验(拟动力试验)的内容。在结构动力特性试验中扩充了环境随机振动测量结构动力特性的内容。在动力加载试验中充实了非周期性结构动力加载试验的内容,包括模拟地震振动台动力加载试验,人工地震模拟动力加载试验和天然地震结构动力试验等三个主要部分。

本教材已是第五次修改稿,在结构试验数据和量测技术中增加了数据采集系统。并增加了第九章结构试验现场检测技术,第十章结构试验的数据处理。本教材反映了同济大学和同济大学工程结构研究所在结构试验研究中的成果。

参加本教材编写的有:姚振纲(第一、二、三、五、六、七、八、九章),刘祖华(第四、十章),其中,第四章初稿由李炳生高级工程师编写,刘祖华副教授在重新编写时作了修改和补充。全书由姚振纲负责主编。

本教材承朱振德教授和陆竹卿教授审阅,提出了宝贵意见。在初稿编写过程中,得到朱伯龙教授的帮助。教材中应用了有关兄弟单位的试验成果,特此一并致谢。

由于编者业务水平有限,编写中必有漏误之处,敬希专家同行和读者批评指正。

姚振纲

1996年6月

# 目 录

## 第一章 结构试验概论

1.1 结构试验的任务 .....	(1)
1.2 结构试验的目的 .....	(2)
1.2.1 生产性试验 .....	(2)
1.2.2 科学研究性试验 .....	(3)
1.3 建筑结构试验的分类 .....	(4)
1.3.1 真型试验和模型试验 .....	(4)
1.3.2 静力试验和动力试验 .....	(5)
1.3.3 短期荷载试验和长期荷载试验 .....	(6)
1.3.4 试验室试验和现场试验 .....	(6)

## 第二章 结构试验设计

2.1 结构试验设计概述 .....	(8)
2.2 结构试验的试件设计 .....	(10)
2.2.1 试件形状 .....	(10)
2.2.2 试件尺寸 .....	(13)
2.2.3 试件数目 .....	(14)
2.2.4 结构试验对试件设计的要求 .....	(16)
2.3 结构试验的模型设计 .....	(17)
2.3.1 模型的相似要求和相似常数 .....	(17)
2.3.2 模型设计的相似条件 .....	(19)
2.4 结构试验荷载设计 .....	(25)
2.4.1 试验加载图式的选择与设计 .....	(25)
2.4.2 试验加载装置的设计 .....	(26)

2.4.3	结构试验的加载制度 .....	(27)
2.5	结构试验的观测设计 .....	(28)
2.5.1	观测项目的确定 .....	(28)
2.5.2	测点的选择与布置 .....	(29)
2.5.3	仪器的选择与测读的原则 .....	(30)
2.6	材料的力学性能与结构试验的关系 .....	(31)
2.6.1	概述 .....	(31)
2.6.2	材料试验结果对结构试验的影响 .....	(32)
2.6.3	试验方法对材料强度指标的影响 .....	(32)
2.7	结构试验大纲和试验基本文件 .....	(35)

### 第三章 结构试验的荷载设备

3.1	概述 .....	(37)
3.2	重力加载法 .....	(38)
3.2.1	重力直接加载方法 .....	(38)
3.2.2	杠杆加载方法 .....	(39)
3.3	液压加载法 .....	(40)
3.3.1	液压加载器 .....	(40)
3.3.2	液压加载系统 .....	(41)
3.3.3	大型结构试验机 .....	(42)
3.3.4	电液伺服液压系统 .....	(42)
3.3.5	地震模拟振动台 .....	(45)
3.4	惯性力加载法 .....	(48)
3.4.1	冲击力加载 .....	(48)
3.4.2	离心力加载 .....	(51)
3.4.3	直线位移惯性力加载 .....	(52)
3.5	机械力加载法 .....	(53)

3.6	气压加载法 .....	(54)
3.7	电磁加载法 .....	(55)
3.7.1	电磁式激振器 .....	(55)
3.7.2	电磁振动台 .....	(56)
3.8	人激振动加载法 .....	(57)
3.9	环境随机振动激振法 .....	(58)
3.10	荷载支承设备和试验台座 .....	(58)
3.10.1	支座 .....	(58)
3.10.2	荷载支承机构 .....	(60)
3.10.3	结构试验台座 .....	(61)
3.10.4	现场试验的荷载装置 .....	(65)

#### **第四章 结构试验的数据采集和测量仪器**

4.1	概述 .....	(68)
4.2	传感器 .....	(70)
4.2.1	基本原理 .....	(70)
4.2.2	电阻应变计 .....	(71)
4.2.3	应变测量 .....	(73)
4.2.4	力传感器和压力传感器 .....	(79)
4.2.5	线位移传感器 .....	(80)
4.2.6	角位移传感器 .....	(80)
4.2.7	裂缝测量仪器 .....	(81)
4.2.8	测振传感器 .....	(82)
4.3	记录器 .....	(87)
4.3.1	概况 .....	(87)
4.3.2	X-Y 记录仪 .....	(87)
4.3.3	光线示波器 .....	(87)

4.3.4	磁带记录仪	(88)
4.4	数据采集系统	(89)
4.4.1	数据采集系统的组成	(89)
4.4.2	数据采集的过程	(90)

## 第五章 结构单调加载静力试验

5.1	概述	(93)
5.2	结构单调加载静力试验的加载制度	(93)
5.3	基本构件的单调加载静力试验	(95)
5.3.1	受弯构件的试验	(95)
5.3.2	压杆和柱的试验	(103)
5.4	扩大构件的单调加载静力试验	(106)
5.4.1	屋架试验	(106)
5.4.2	薄壳和网架结构试验	(111)
5.5	建筑物或其部件的单调加载静力试验	(120)
5.5.1	钢筋混凝土平面楼盖试验	(120)
5.5.2	单层工业厂房整体结构空间工作试验	(126)
5.5.3	足尺房屋结构的整体试验	(128)

## 第六章 结构低周反复加载静力试验

6.1	概述	(135)
6.2	结构低周反复加载静力试验的加载制度	(136)
6.2.1	单向反复加载制度	(137)
6.2.2	双向反复加载制度	(138)
6.3	结构低周反复加载静力试验	(139)
6.3.1	砖石及砌块结构抗震性能试验	(139)
6.3.2	钢筋混凝土框架梁柱节点组合体的抗震性能试验	(144)
6.4	计算机—加载器联机试验	(150)

6.4.1	计算机—加载器联机系统的工作原理 .....	(152)
6.4.2	计算机—加载器联机试验的工作流程 .....	(153)
6.4.3	七层钢筋混凝土框架足尺结构的联机试验 .....	(156)

## 第七章 结构动力特性试验

7.1	概述 .....	(160)
7.2	人工激振法测量结构动力特性 .....	(161)
7.2.1	结构自振频率测量 .....	(161)
7.2.2	结构阻尼的测量 .....	(162)
7.2.3	振型测量 .....	(165)
7.3	环境随机振动法测量结构动力特性 .....	(168)
7.3.1	模态分析法 .....	(168)
7.3.2	主谱量法 .....	(177)

## 第八章 结构抗震动力加载试验

8.1	概述 .....	(184)
8.2	结构抗震动力加载试验的加载制度和加载设计 .....	(185)
8.2.1	周期性动力加载试验的加载制度 .....	(185)
8.2.2	非周期性动力加载试验的加载设计 .....	(186)
8.3	结构抗震周期性动力加载试验 .....	(190)
8.3.1	偏心激振器周期性动力加载试验 .....	(190)
8.3.2	电液伺服加载器周期性动力加载试验 .....	(191)
8.3.3	单向周期性振动台动力加载试验 .....	(195)
8.4	结构抗震非周期性动力加载试验 .....	(197)
8.4.1	地震模拟振动台动力加载试验 .....	(197)
8.4.2	人工地震模拟动力加载试验 .....	(206)
8.4.3	天然地震结构动力试验 .....	(212)

## 第九章 结构试验现场检测技术

9.1	概述 .....	(218)
-----	----------	-------

9.2	混凝土结构现场检测技术 .....	(219)
9.2.1	回弹法检测混凝土强度 .....	(219)
9.2.2	超声脉冲法检测混凝土强度 .....	(221)
9.2.3	超声回弹综合法检测混凝土强度 .....	(222)
9.2.4	钻芯法检测混凝土强度 .....	(223)
9.2.5	拔出法检测混凝土强度 .....	(225)
9.2.6	超声法检测混凝土缺陷 .....	(227)
9.2.7	混凝土结构钢筋位置和钢筋锈蚀的检测 .....	(232)
9.3	砖砌结构的现场检测技术 .....	(234)
9.3.1	砖砌体强度的间接测定法 .....	(234)
9.3.2	砖砌体原位轴心抗压强度测定法 .....	(236)
9.4	钢结构现场检测技术 .....	(237)
9.4.1	钢材强度测定 .....	(237)
9.4.2	超声法检测钢材和焊缝缺陷 .....	(238)

## 第十章 结构试验的数据处理

10.1	概述 .....	(240)
10.2	数据的整理和换算 .....	(240)
10.3	数据的统计分析 .....	(246)
10.4	误差分析 .....	(249)
10.4.1	误差的分类 .....	(249)
10.4.2	误差计算 .....	(250)
10.4.3	误差传递 .....	(251)
10.4.4	误差的检验 .....	(252)
10.5	数据的表达 .....	(254)
10.5.1	表格方式 .....	(254)
10.5.2	图像方式 .....	(256)



10.5.3 函数方式.....	(258)
<b>参考文献</b> .....	<b>(264)</b>