

建筑结构试验

任课教师：薛伟辰

《建筑结构试验》课程介绍

建筑结构试验是以**实验技术**为手段，测量反映结构或构件**实际工作性能**的有关参数，为判断结构的**受力性能**和**安全储备**提供技术依据。

建筑结构试验是土木工程专业的一门专业技术课程。本课程的任务是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实施。

课时安排

第一章	结构试验概论	(2课时)
第三章	结构试验的荷载设备	(2课时)
第四章	结构试验的数据采集和测量仪器	(2课时)
第二章	结构试验设计	(4课时)
第五章	结构单调加载静力试验	(2课时)
第六章	结构低周反复静力加载试验	(2课时)
第九章	结构试验现场检测技术	(1课时)
第十章	结构试验的数据处理	(1课时)

第一章

结构试验概论

※ 结构试验与理论分析的关系

- ✓ 作为一门试验科学，目的是对结构的受力性能作出评价，并为验证和发展设计计算理论提供依据；
- ✓ 当设计计算理论比较完善，足以分析结构物的受力特性时，则无须进行结构试验；

如材料力学、结构力学中的计算方法、基本假设等（弹性材料）

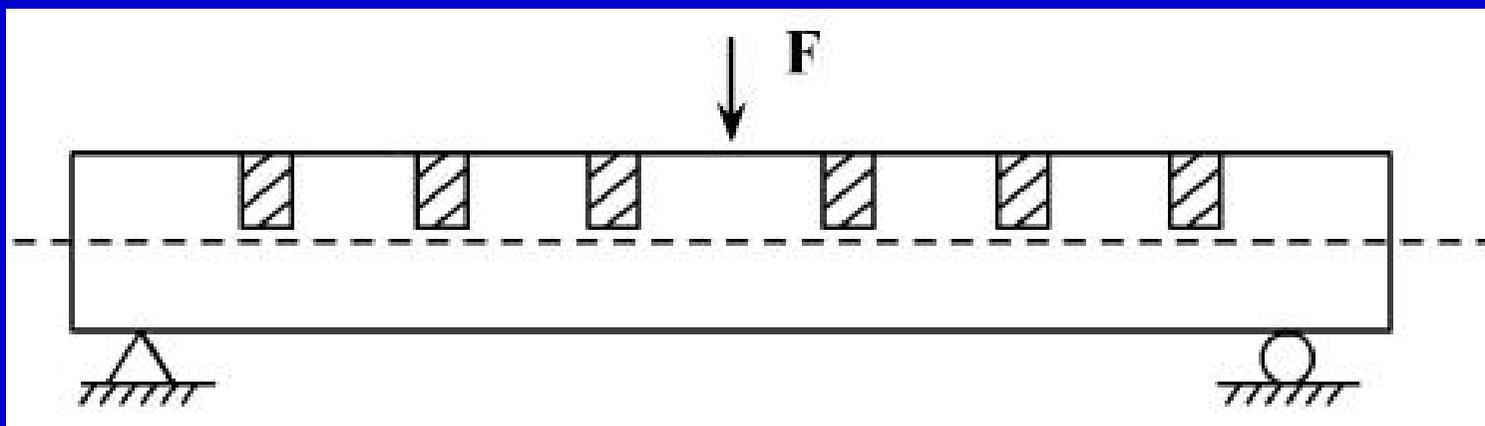
- ✓ 当设计计算理论有待完善或分析对象为新材料、新工艺或新型结构时，则需要进行结构试验。

如结构的弹性内力计算与塑性承载力设计方法、抗震性能、抗疲劳性能、长期性能、耐久性能等。

续前页

- ✓ 混凝土结构课程的实质：材料力学+结构力学；
- ✓ 混凝土结构中有一不可调和的矛盾：弹性方法计算内力，塑性理论计算强度；
- ✓ 粘结应力的测定；
- ✓ 塑性铰对于结构内力计算的影响；
- ✓ 混凝土及钢材的本构特性。

※ 简支受弯梁试验（路标试验）



- ✓ 研究简支受弯梁截面应力分布。

※ 简支受弯梁试验（路标试验）

- ✓ 17世纪初，伽利略提出截面应力均匀分布；
- ✓ 17世纪中，有人将其修正为三角形分布；
- ✓ 1713年，巴朗（法国）提出正确的应力分布型式，但未能进行试验验证；
- ✓ 1767年，容格密理（法国）提出路标试验；
- ✓ 1821年，拿维叶（法国科学院院士）推导了受弯构件应力分布的计算公式；
- ✓ 1850年左右，阿莫历思（法国科学院院士）完成了试验验证。

※ 结构试验在我国的发展历史

- ✓ 解放前，结构试验在我国几乎是空白；
- ✓ 1953年，长春市25.3m输电塔原型检验性试验；
- ✓ 1957年，武汉长江大桥静载和动载试验；
- ✓ 1959年，北京火车站35m × 35m双曲薄壳静力试验；
- ✓ 70年代后，上海体育馆、南京五台山体育馆网架模型试验；
- ✓ 1977年，“建筑结构测试技术的研究”八年规划；
- ✓ 上世纪80年代以来，随着大型高精度试验装置和数采系统的应用，标志着我国结构试验达到一个新水平。

※ 结构试验的发展趋势

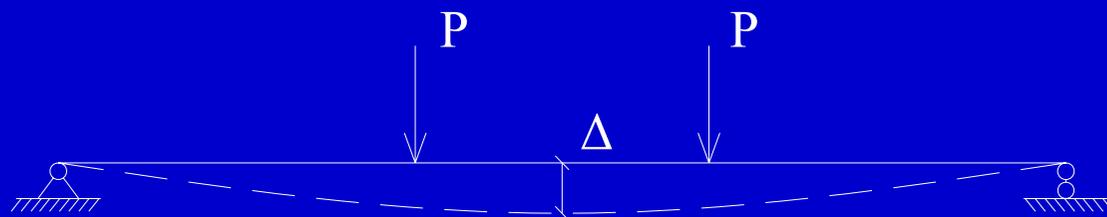
- ✓ 大型化、体系化；
- ✓ 精密性，包括试件设计、加载、测试；
- ✓ 计算机联机试验。

※ 我校的结构试验建设情况

- ✓ 共有六个试验室；
- ✓ 静力、拟动力、振动台、抗火、耐久性、风洞。
- ✓ 我系试验室为同济大学建筑结构试验。

1.1 结构试验的任务

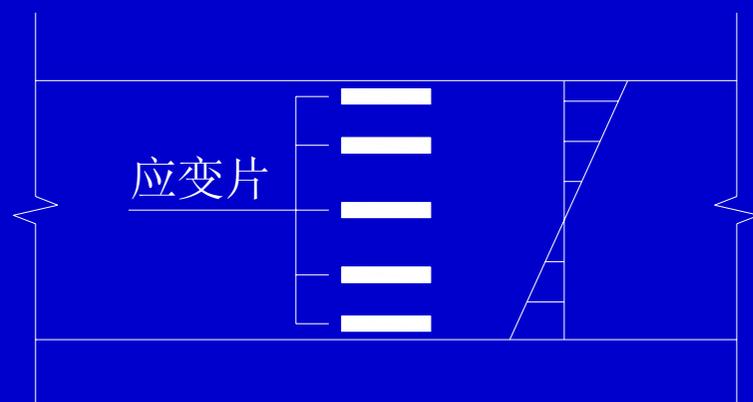
✓ 定义：课本P1-2



P-Δ曲线（构件）

M-φ关系（截面）

承载力、挠度、裂缝



平截面假定的验证

1.2 结构试验的目的

- ✓ 生产性试验（又称鉴定性试验或检验性试验）
- ✓ 科研性试验

(一) 生产性试验

- ✓ 特点：非探索性、有比较成熟的设计计算理论、针对实际结构或构件
- ✓ 应用场合：
 - ◆ 检验结构设计和施工质量；
此处的结构指重要建筑物，或采用新理论、新材料、新工艺的建筑物。如南浦大桥、秦山核电站安全壳等
 - ◆ 检验已有建筑物的可靠性，推断剩余寿命；
 - ◆ 鉴定加固，改造工程的实际受力性能；
 - ◆ 为工程事故鉴定处理提供技术依据；
 - ◆ 检验结构构件或部位的受力性能。
如预制构件、构造复杂的结构部件（框架、网架节点等）

(二) 科研性试验

- ✓ 特点：具有研究、探索、开发的性质，针对试件而不一定是具体结构。
- ✓ 应用场合：
 - ◆ 验证结构计算理论及有关假定、推断等；
预应力结构抗震设计、组合结构平截面假定、材料的本构特性等。
 - ◆ 为编制有关设计规范提供依据；
 - ◆ 推广应用新结构、新材料、新工艺。
如预应力结构、组合结构、FRP、材料本构、张弦梁等

1.3 建筑结构试验的分类

- ✓ 按试验对象：真型试验、模型试验；
- ✓ 按荷载性质：静力试验、动力试验；
- ✓ 按试验时间：短期荷载试验、长期荷载试验；
- ✓ 按试验场合：试验室试验、现场试验；
- ✓ 按破坏程度：破坏性试验与非破坏性试验。

(一) 真型试验与模型试验

✓ 真型试验

- ◆ 试验对象：实际结构或按比例复制的结构或构件
- ◆ 优点：完全反映真实结构受力特性，试验结论可靠
- ◆ 缺点：费用高，加载难度大，试验周期长

✓ 模型试验

- ◆ 试验对象：缩尺试件（几何相似、材料相似、力学相似）
- ◆ 优点：实施方便，费用低，多参数、多试件
- ◆ 缺点：严格的相似条件难以实现，尺寸效应的影响、初始缺陷

(二) 静力试验与动力试验

✓ 静力试验

- ◆ 单调静力试验、低周反复静力试验（伪静力试验、伪（拟）动力试验）
- ◆ 优点：加载设备简单，试验观测方便
- ◆ 缺点：不能反映结构动力性能

✓ 动力试验

- ◆ 振动台试验、疲劳试验、风载试验、抗爆抗冲击荷载试验等
- ◆ 优点：能真实反映结构的动力特性和动力响应
- ◆ 缺点：加载设备和测试手段复杂

(三) 短期荷载试验与长期荷载试验

✓ 短期荷载试验

- ◆ 一般试验全过程持续几分钟到几天
- ◆ 通常的结构试验绝大多数为短期荷载试验

✓ 长期荷载试验

- ◆ 试验全过程持续几个月、几年到数十年
- ◆ 主要研究与时间有关的结构特性，如：混凝土的收缩、徐变，预应力筋的松弛，结构的耐久性能等
 - 防腐 → EP筋，九年
 - 组合结构的收缩徐变微差分析 → 时随性能
 - 混凝土的碳化

（四）试验室试验与现场试验

✓ 试验室试验

- ◆ 在试件设计、加载方法、测试设备等方面均比较精确，可突出主要研究因素，而且可加载至破坏
- ◆ 适用于科研性试验
- ◆ 今后结构试验的主要发展方向

✓ 现场试验

- ◆ 试验比较简单，通常不会加载至破坏
- ◆ 优点是试件或结构的工作条件、结构型式等完全反映工程实际情况

(五) 破坏性试验与非破坏性试验

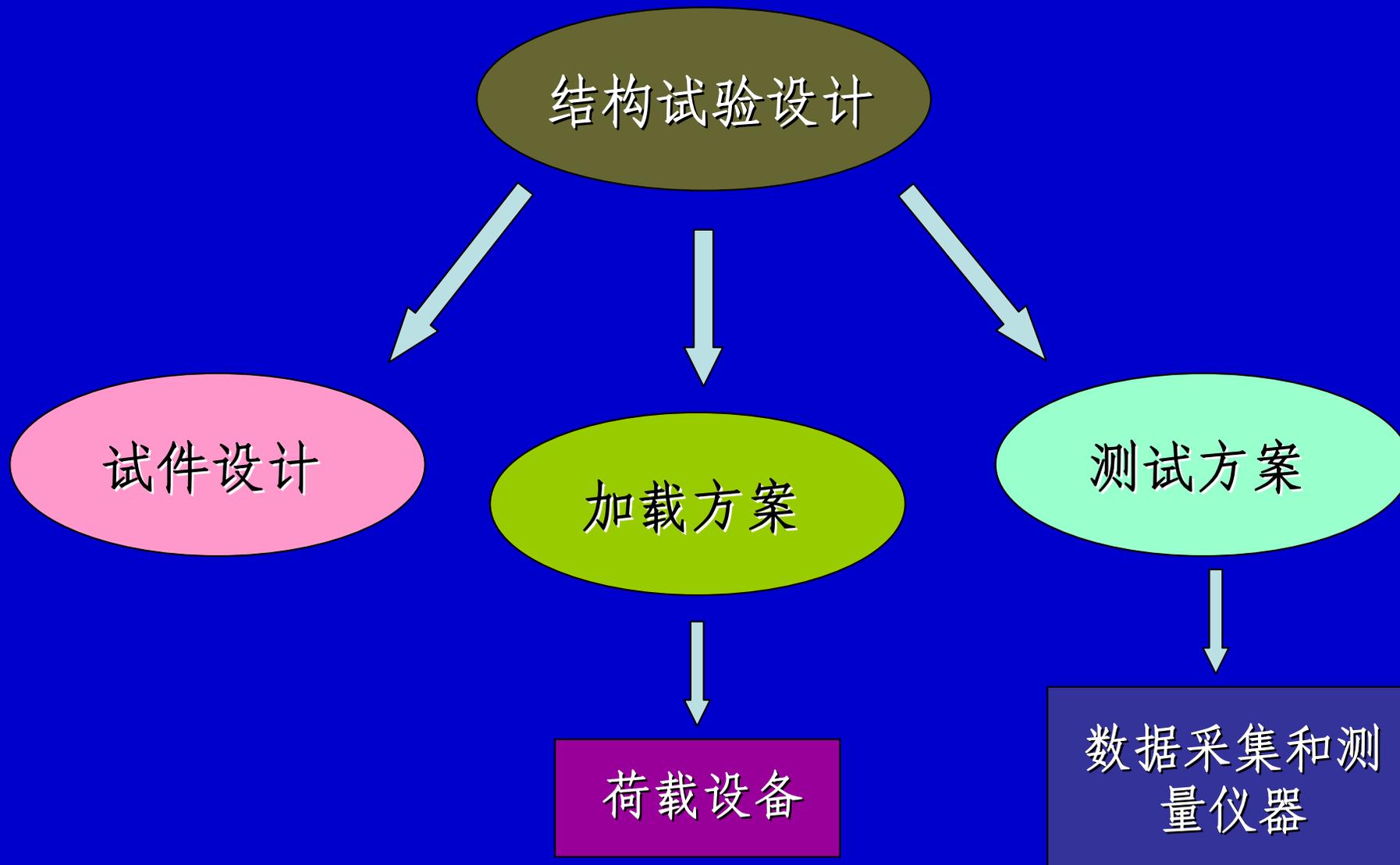
- ✓ 现场试验和长期荷载试验多为非破坏性试验
- ✓ 试验室试验与短期荷载试验多为破坏性试验

※ 思考题

- 1、简述结构试验的任务。
- 2、按试验目的的不同，结构试验可分为哪两类？
- 3、简述生产性试验的目的。
- 4、简述科研性试验的目的。
- 5、试对比真型试验与模型试验。
- 6、简述静力试验与动力试验的不同。
- 7、阐述短期试验与长期试验的区分。
- 8、说明试验室试验与现场试验的不同。

课时安排

第一章	结构试验概论	(2课时)
第三章	结构试验的荷载设备	(2课时)
第四章	结构试验的数据采集和测量仪器	(2课时)
第二章	结构试验设计	(4课时)
第五章	结构单调加载静力试验	(2课时)
第六章	结构低周反复静力加载试验	(2课时)
第九章	结构试验现场检测技术	(1课时)
第十章	结构试验的数据处理	(1课时)



第三章

结构试验的荷载设备

3.1 概述

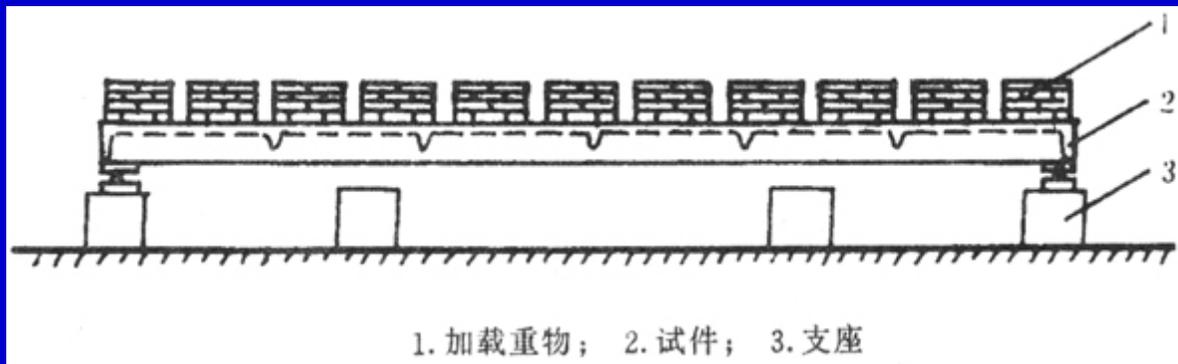
※ 结构试验中的加载方法:

- ✓ 重力加载法;
- ✓ 气压加载法;
- ✓ 液压加载法;
- ✓ 电磁加载法;
- ✓ 惯性力加载法;
- ✓ 人激振动加载法;
- ✓ 机械力加载法;
- ✓ 环境随机振动激振法。

3.2 重力加载法

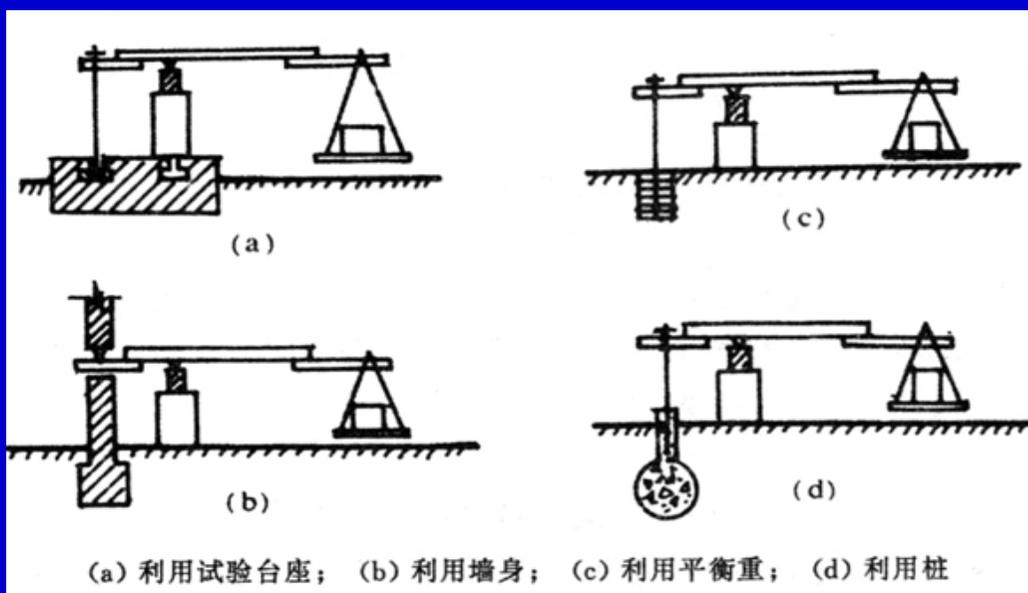
- ✓ 静力荷载；
- ✓ 既可模拟垂直加载，也可模拟水平加载；
- ✓ 简单易行、经济，但花费人工较多；
- ✓ 结构变形时荷载不会改变（当结构变形过大时不能自行卸载而导致结构倒塌）；
- ✓ 利用物体自重加载，但应避免试件弯曲变形而使荷载块产生拱作用，改变荷载分布。

- ✓ 重力加载包括重力直接加载法和杠杆加载法。



直接加载法

应注意避免因荷重块产生拱作用而改变荷载分布。



杠杆加载法

结构变形后荷载不改变, 但无法自行卸载。

※ 重力加载法



预应力钢-混凝土组合梁长期荷载试验

3.3 液压加载法

- ✓ 目前结构试验中最常用的加载方法；
- ✓ 可适用于静、动载试验，吨位可大、可小；
- ✓ 液压加载方法
 - ◆ 液压加载系统和试验台座；
 - ◆ 结构试验机系统。
- ✓ 液压加载装置
 - ◆ 液压加载器；
 - ◆ 结构试验机；
 - ◆ 地震模拟振动台。
 - ◆ 液压加载系统；
 - ◆ 电液伺服液压系统；

※ 液压加载器

- ✓ 手动液压加载器
 - ◆ 手工操作，简易方便
 - ◆ 但一人一台，难以同步加载
- ✓ 单向作用液压加载器
 - ◆ 适用于多个加载器组成同步加载系统使用，适应于多点加载要求
- ✓ 双向作用液压加载器
 - ◆ 可施加反复荷载（拉或压、推或拉）

续前页



液压千斤顶



电动泵

※ 液压加载系统

- ✓ 组成部分
 - ◆ 液压加载器
 - ◆ 液压控制台
 - ◆ 反力架
 - ◆ 台座
- ✓ 适用于各类结构的静载试验（包括拟静力试验）

续前页

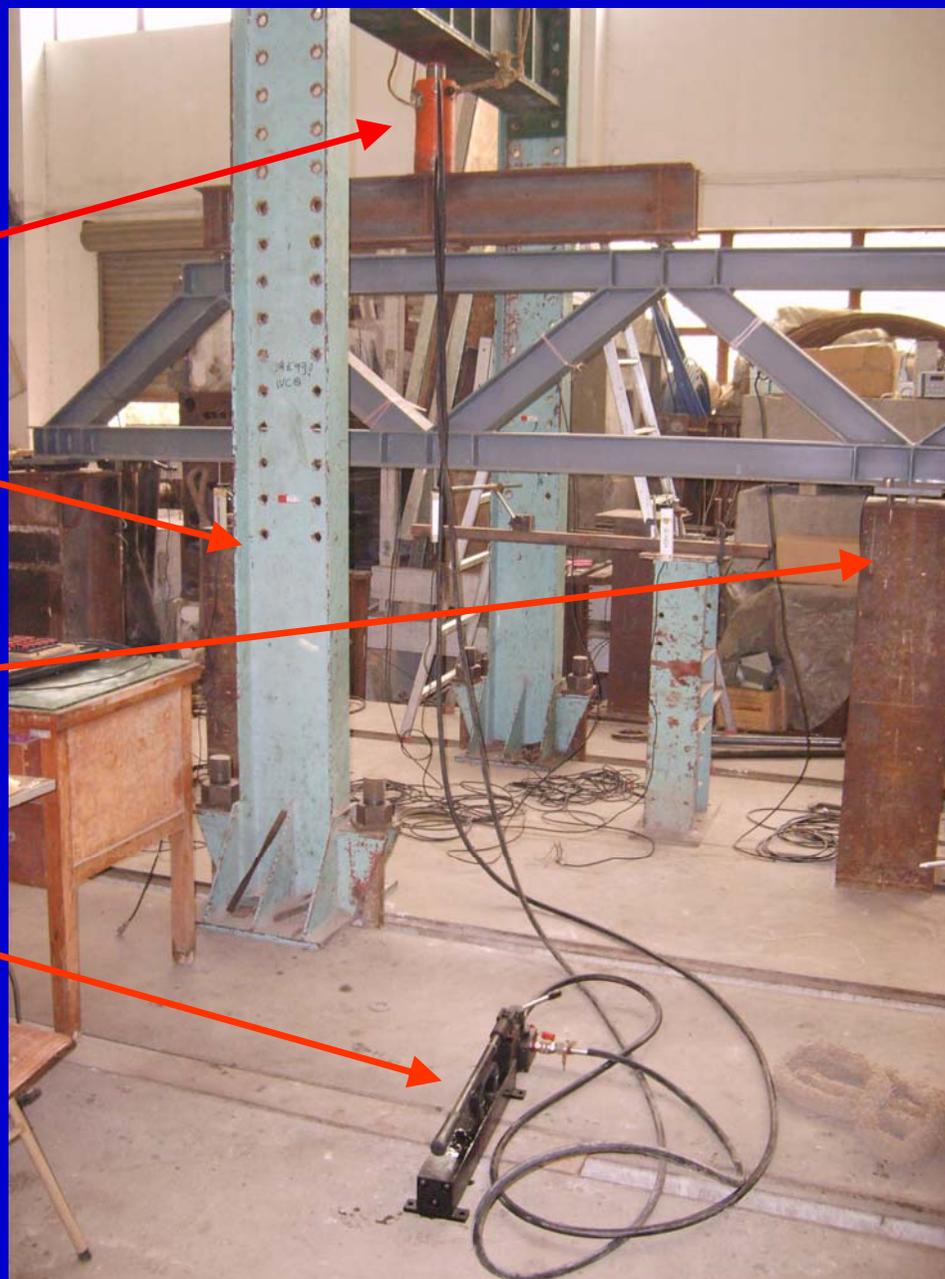
液压千斤顶

竖向反力架

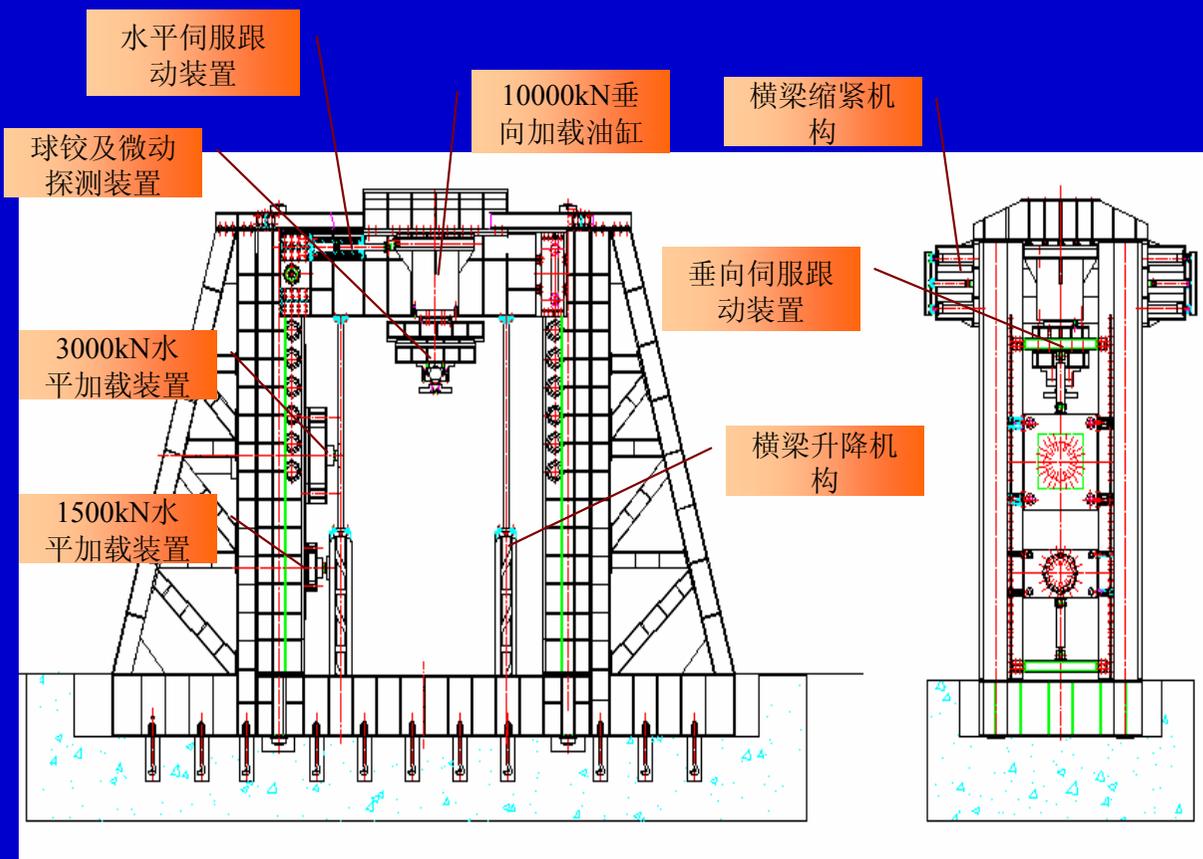
支墩

手动油泵

5M钢桁架结构
静力分析试验



※ 结构试验机



10000kN大型多功能试验机系统（同济大学建筑结构试验室）

※ 电液伺服液压系统

- ✓ 目前较为先进的加载设备；
- ✓ 可进行结构静力试验，也可进行结构动力试验（包括疲劳试验）；
- ✓ 当与计算机联机后，可进行复杂的加载程序控制、数据采集和数据分析处理等工作。

※ 地震模拟振动台

- ✓ 实现各类地震波的自动控制加载及数据采集分析，是标准意义上的结构动力试验，可进行6个自由度方向的加载。

※ 地震模拟振动台

美国MTS公司三向六自由度模拟地震振动台，台面尺寸4m×4m，最大试件质量25t。

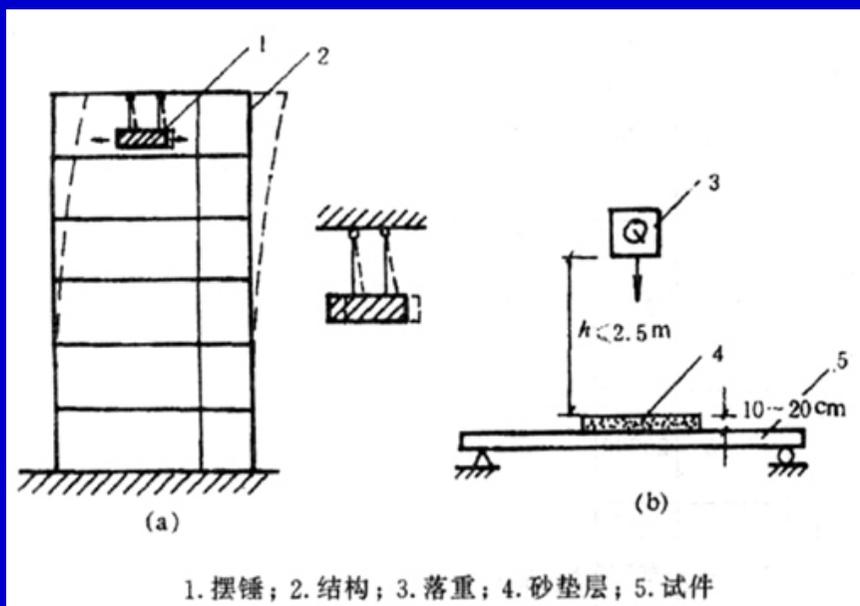
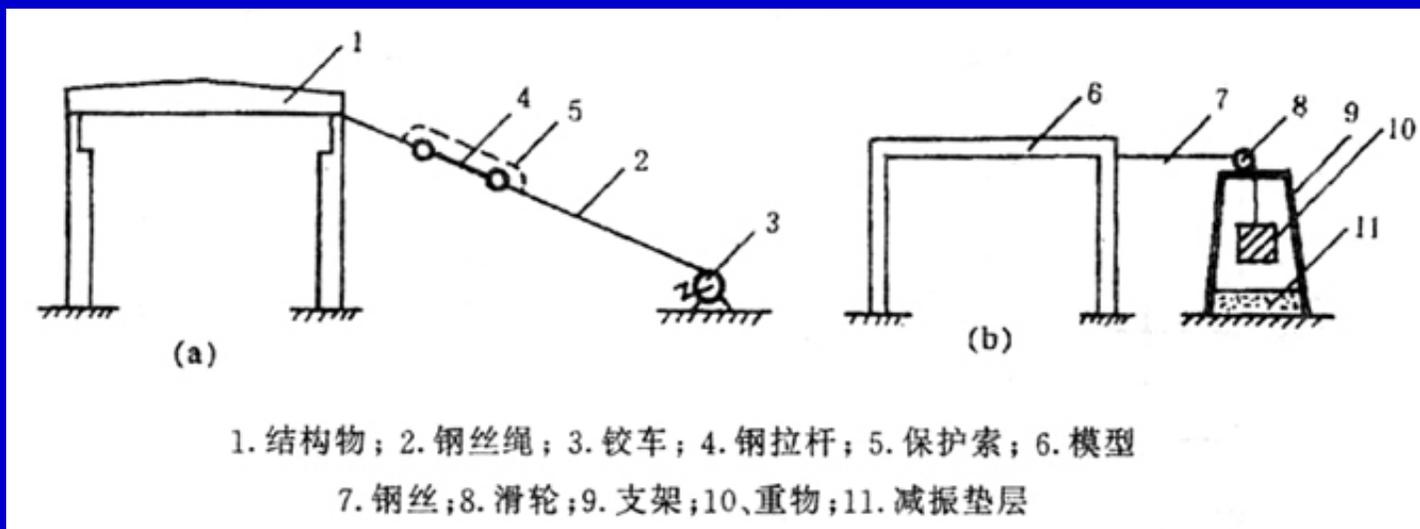
同济大学土木工程防灾国家重点实验室
(国内前列)



3.4 惯性力加载法

- ✓ 利用运动物体质量的惯性施加动力荷载；
- ✓ 冲击力加载法
 - ◆ 初位移加载法；
 - ◆ 初速度加载法；
 - ◆ 反冲激振法。
- ✓ 离心力加载法
 - ◆ 优点：结构简单，容易产生较大振幅和激振力；
 - ◆ 缺点：频率低，振幅调节难，只能产生简谐荷载。
- ✓ 直线位移惯性力加载法
 - ◆ 激振力大，但频率较小（ $< 1\text{Hz}$ ），且设备笨重。

※ 惯性力加载法



初位移加载法

初速度加载法

3.5 机械力加载法

- ✓ 常用机具包括：吊链（葫芦）、卷扬机、花篮螺丝、螺旋千斤顶、弹簧等；
- ✓ 适用于施加水平荷载；
- ✓ 优点：设备简单，集中力的方向便于控制；
- ✓ 缺点：荷载较小，加卸载速度慢，荷载作用点的变形会引起荷载值的较大改变。

3.6 气压加载法

- ✓ 利用压缩空气加载、利用抽真空产生负压加载；
- ✓ 适用于平板、壳体等平面结构施加均布荷载；
- ✓ 优点：加、卸载方便，荷载稳定、安全，结构破坏时能够自动卸载；
- ✓ 缺点：加载面无法观测。

3.7 电磁加载法

- ✓ 可进行静、动载试验;
- ✓ 电磁式激振器
 - ◆ 优点: 频率范围宽、重量轻、控制方便、可按给定信号产生多个波形的激振力;
 - ◆ 缺点: 激振力不大、适用于小型结构试验。
- ✓ 电磁振动台
 - ◆ 优点: 频率范围宽、振动稳定、波形失真小、振幅和频率的调节较为方便、容易实现自动控制;
 - ◆ 缺点: 激振力小、适用于小型结构试验。

3.8 人激振动加载法

- ✓ 人身体有规律的运动，在共振情况下可产生较大的激振力（有阻尼自由振动）。

3.9 环境随机振动激振法

- ✓ 又称脉动法；
- ✓ 由地面脉动产生建筑物脉动，再对其进行模态参数识别。

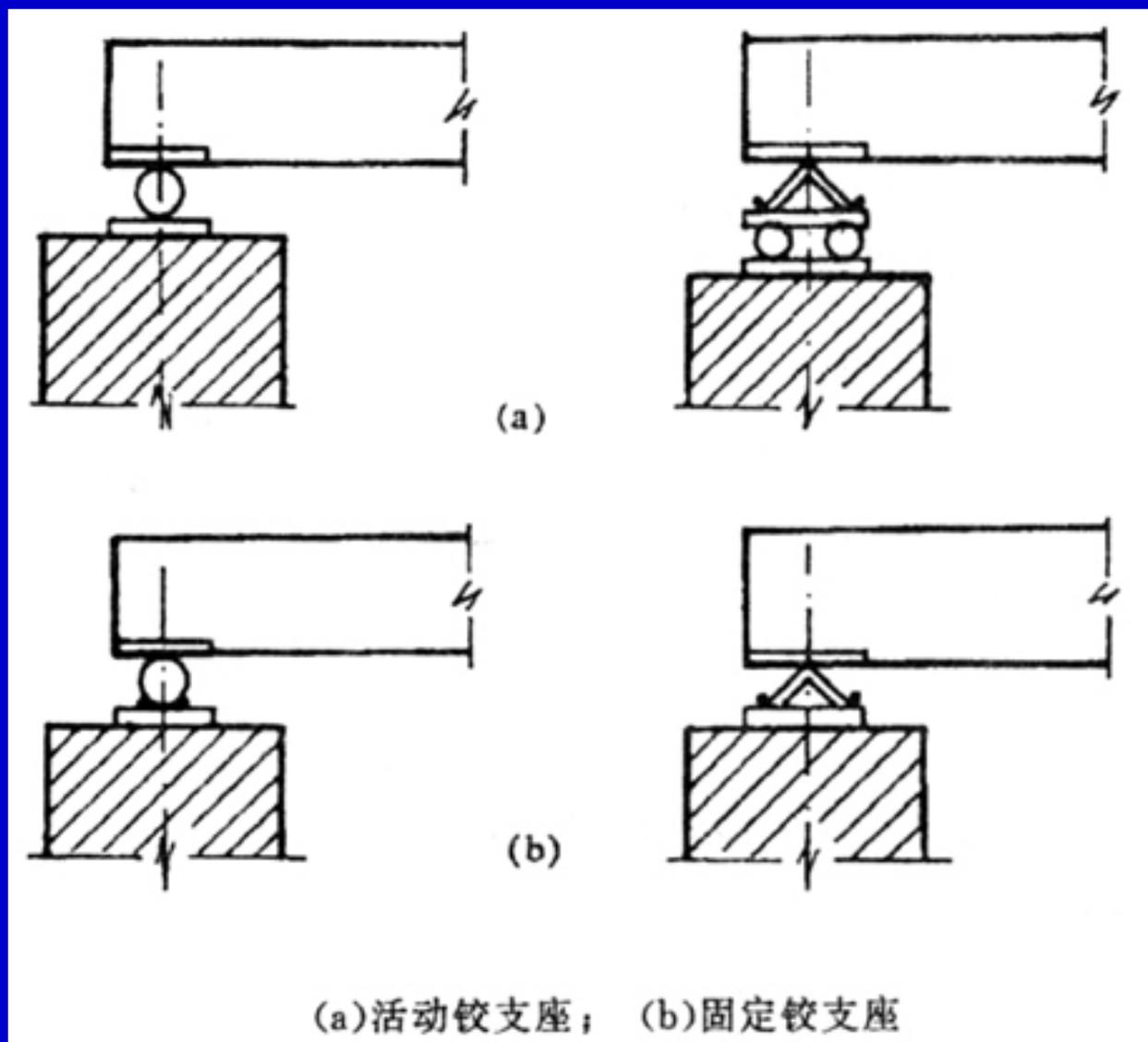
3.10 荷载支承设备和试验台座

- ✓ 支座；
- ✓ 荷载支承机构；
- ✓ 结构试验台座；
- ✓ 现场试验荷载装置。

※ 支座

- ✓ 支墩：简易支座，钢或钢筋砼制作，现场试验多为砖砌体；
- ✓ 支座按作用形式分：滚动铰支座、固定铰支座、球铰支座；
- ✓ 对铰支座的基本要求（课本P58 - 59）
 - ◆ 必须保证结构在支座处能自由转动；
 - ◆ 必须保证结构在支座处力的传递；
 - ◆ 构件支座处铰的上下垫板要有一定刚度；
 - ◆ 滚轴长度，一般取为试件支承处截面宽度；
 - ◆ 滚轴直径，可按表选用，并进行强度验算。

※ 支座的基本形式



※ 荷载支承机构

- ✓ 又称反力架或荷载架；
- ✓ 试验室试验
 - ◆ 反力架（由横梁立柱组成）；
 - ◆ 抗弯大梁或空间桁架式台座（适用于中小型构件）
、试验台座。
- ✓ 现场试验
 - ◆ 反力支架（包括平衡重、锚固桩头、现浇地梁和箍架等）。
- ✓ 型钢反力架、丝杆反力架；

※ 荷载支承机构的形式

横梁



试验台座（槽式）



立柱

竖向反力架

※ 荷载支承机构

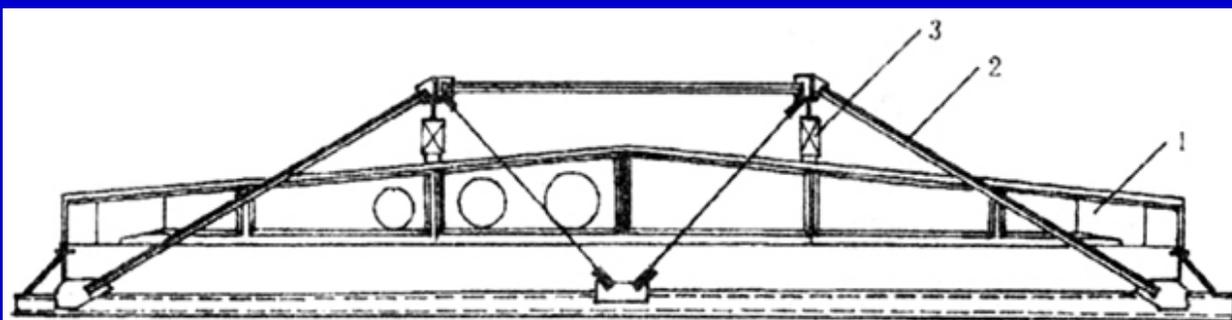


水平反力架

※ 结构试验台座

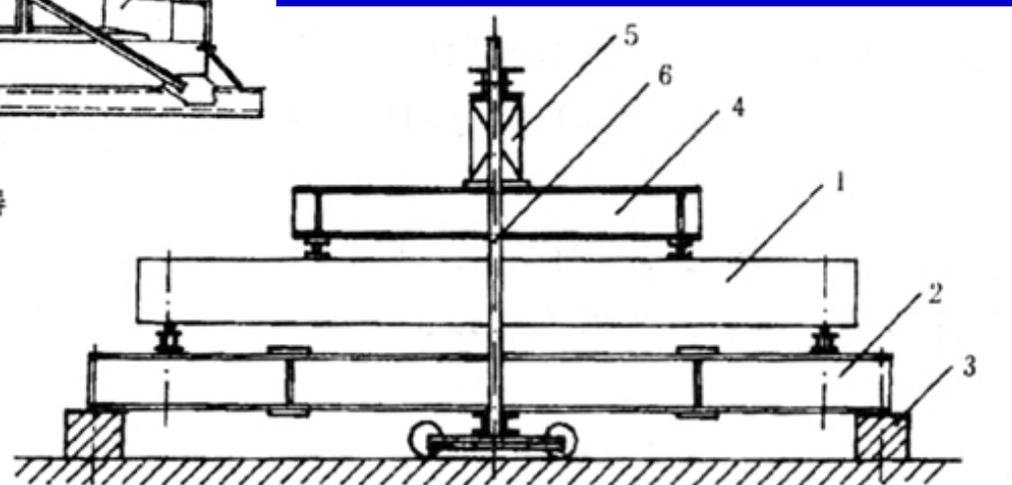
✓ 抗弯大梁式台座和空间桁架式台座

- ◆ 适用于中小型构件试验，跨度短、荷载小；
- ◆ 特点：自平衡式，对支座和支承条件无要求。



1. 试件(屋面大梁); 2. 空间桁架式台座; 3. 液压加载器

空间桁架式台座



1. 试件; 2. 抗弯大梁; 3. 支座; 4. 分配梁; 5. 液压加载器; 6. 荷载加荷架

抗弯大梁式台座

※ 结构试验台座（试验台座）

✓ 板式试验台座

- ◆ RC板或PC板（厚板），由结构自重和刚度来平衡所施加的荷载。
- ◆ 槽式试验台座：加载点可沿台座纵向移动，但由于地脚螺丝较松，**不适用于**动力荷载试验。
- ◆ 地脚螺丝式试验台座：可适用于**静力试验**和**动力试验**，但试件就位**灵活性差**，螺丝受损后**修复困难**。

✓ 箱式试验台座

- ◆ 特点：**承载力高、刚度大、台座空间利用率高**，但**安装和移动设备困难**。

※ 结构试验台座（试验台座）

✓ 抗侧力试验台座

- ◆ 作用：通过拉压千斤顶或电液伺服加载系统对试件施加模拟地震作用的低周反复荷载，进行拟动力和拟静力试验。
- ◆ 试验台座采用RC或PC的实体墙或箱形墙，有L型、U型等。

※ 槽式试验台座



槽式试验台座，高出地面500mm（同济大学建筑结构试验室）

※ 现场试验荷载装置

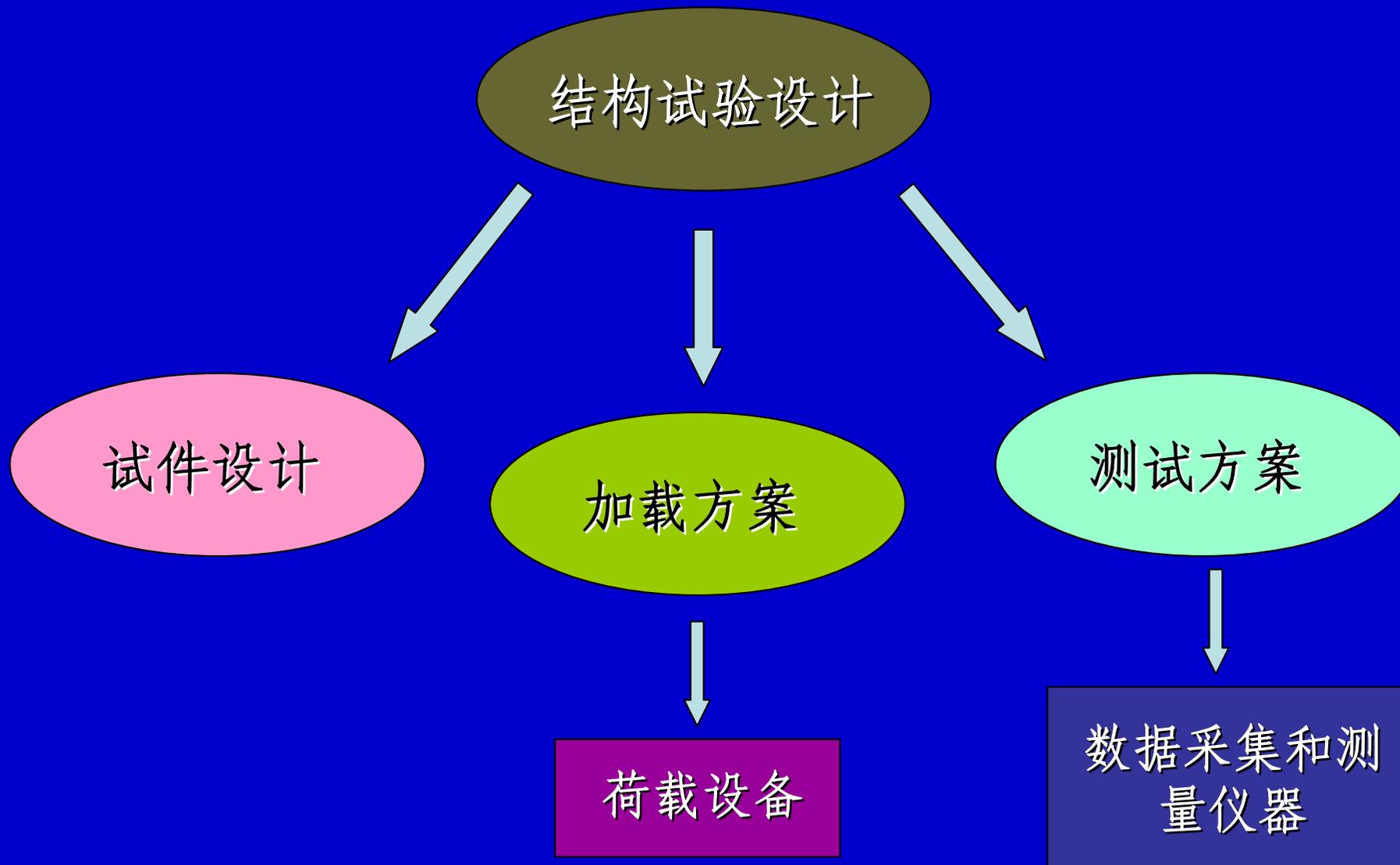
- ✓ 关键问题：如何提供支座反力。
- ✓ 解决方法
 - ◆ 平衡重式
 - ◆ 压桩作为地锚
 - ◆ 成对试验加载

※ 思考题

- 1、简述重力加载法的特点。
- 2、如何避免重力加载法中的拱效应？
- 3、液压加载器有哪几种？
- 4、电液伺服加载系统的主要功能有哪些？
- 5、阐述机械力加载法的常用机具及其特点。
- 6、简述气压加载法的优点和缺点。
- 7、支座有哪几种基本形式？
- 8、结构试验台座的分类及其特点。

课时安排

第一章	结构试验概论	(2课时)
第三章	结构试验的荷载设备	(2课时)
第四章	结构试验的数据采集和测量仪器	(2课时)
第二章	结构试验设计	(4课时)
第五章	结构单调加载静力试验	(2课时)
第六章	结构低周反复静力加载试验	(2课时)
第九章	结构试验现场检测技术	(1课时)
第十章	结构试验的数据处理	(1课时)



第四章

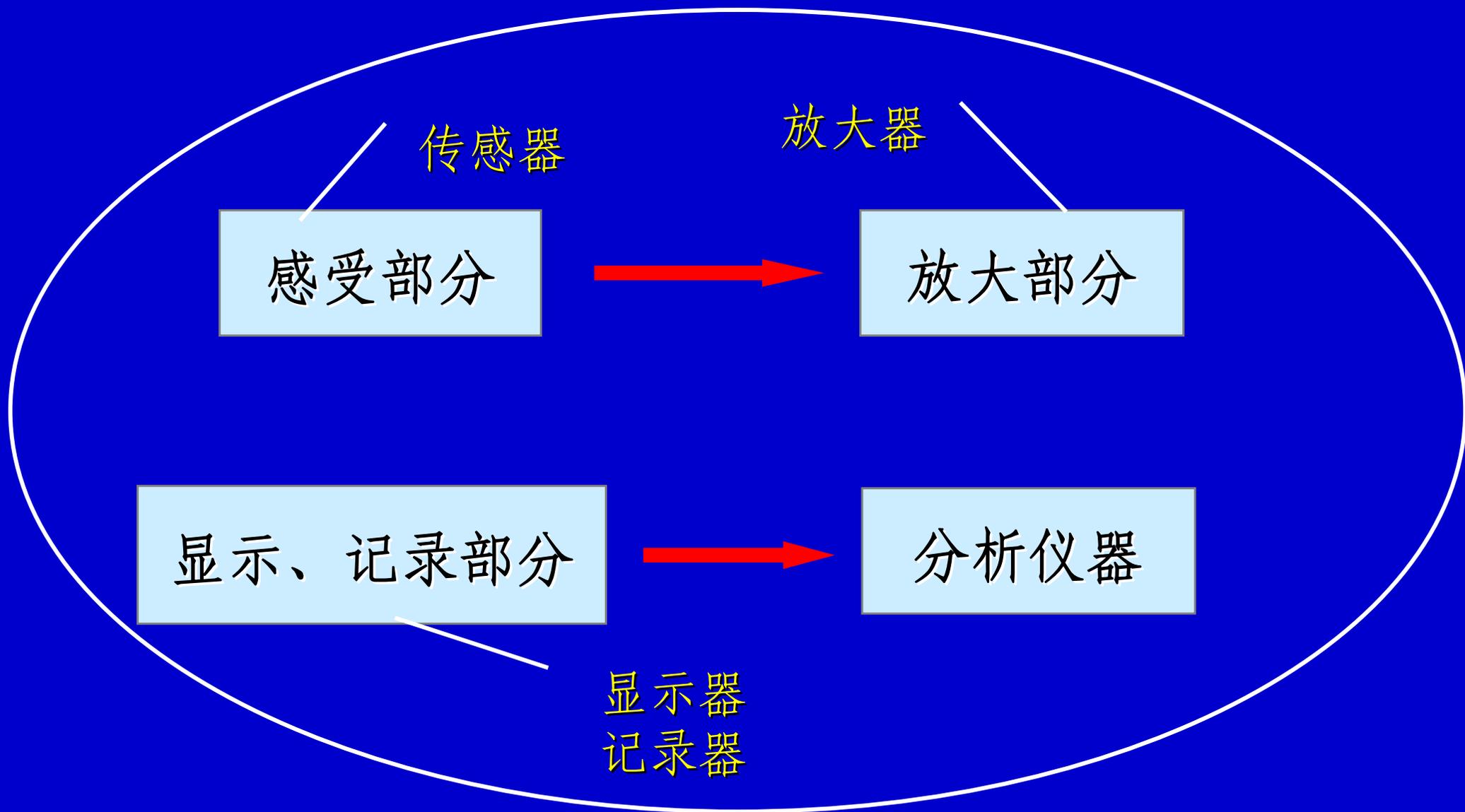
结构试验的数据采集和测量仪器

※ 主要内容

- ✓ 4.1 概述
- ✓ 4.2 传感器
- ✓ 4.3 记录器
- ✓ 4.4 数据采集系统

4.1 概述

- ✓ 数据采集：用多种仪器和装置测量结构试验中的输入（作用）和输出（效应、响应）数据。
- ✓ 结构试验数据采集的发展过程：
 - ◆ 人工测量、人工记录：直尺、秤等
 - ◆ 仪器测量、人工记录：YJ-5应变仪等
 - ◆ 仪器测量、仪器记录：传感器 + X-Y记录仪等
 - ◆ 数据采集系统：输力强数据采集系统等



数据采集系统

4.1 概述（续）

- ✓ 结构静力试验：主要测量局部纤维应变和整体变形，多使用复合式仪表。
- ✓ 结构动力试验：量测结构动力特征和动态反应，使用动态模拟仪器。
- ✓ 数据采集的仪器设备（按功能与使用情况分）：传感器、放大器、显示器、记录器、分析仪器等。

4.1 概述（续）

- ✓ 测量仪器设备的主要技术性能指标：
 - ◆ **刻度值**（最小分度值）：指示或显示装置所能指示的最小量测值。
 - ◆ **量程**：仪器可以测量的最大范围。
 - ◆ **灵敏度**：仪器对被测物理量变化的反应能力。
 - ◆ **分辨率**：测量被测物理量最小变化值的能力。
 - ◆ **线性度**：仪器校准曲线对理想拟合直线的接近程度。
 - ◆ **稳定性**：规定时间内保持示值与特性参数不变的能力。
 - ◆ **重复性**：重复测试同一数值时保持示值一致的能力。
 - ◆ **频率响应**：动测仪器输出信号随输入信号变化的特性。

4.1 概述（续）

- ✓ 结构试验对仪器设备的使用要求
 - ◆ 自重轻、尺寸小，不影响结构工作与受力；
 - ◆ 合适的灵敏度和量程；
 - ◆ 安装使用方便，稳定性和重复性好；
 - ◆ 价廉耐用，可重复使用，安全可靠，维修容易；
 - ◆ 多功能，多用途，适应多方面需要。
- ✓ 数据采集应遵循同时性和客观性原则。
- ✓ 为确定仪器设备的灵敏度和精确度、确定试验数据的误差，应在试验前后对仪器设备进行标定。

4.2 传感器

(一) 基本原理：（教材P70-71）

- ✓ **机械式传感器**：利用机械原理进行工作，包括感受机构、转换机械、显示装置和附属装置四部分。
- ✓ **电测传感器**：利用某种特殊材料的电学性能、或某种装置的电学原理，把所需测量的非电物理量变化转换成电量变化，主要包括感受部分、转换部分、传输部分和附属装置四部分。
- ✓ **其他传感器**：包括红外线传感器、激光传感器、光纤传感器和超声波传感器等。

(二) 电阻应变计

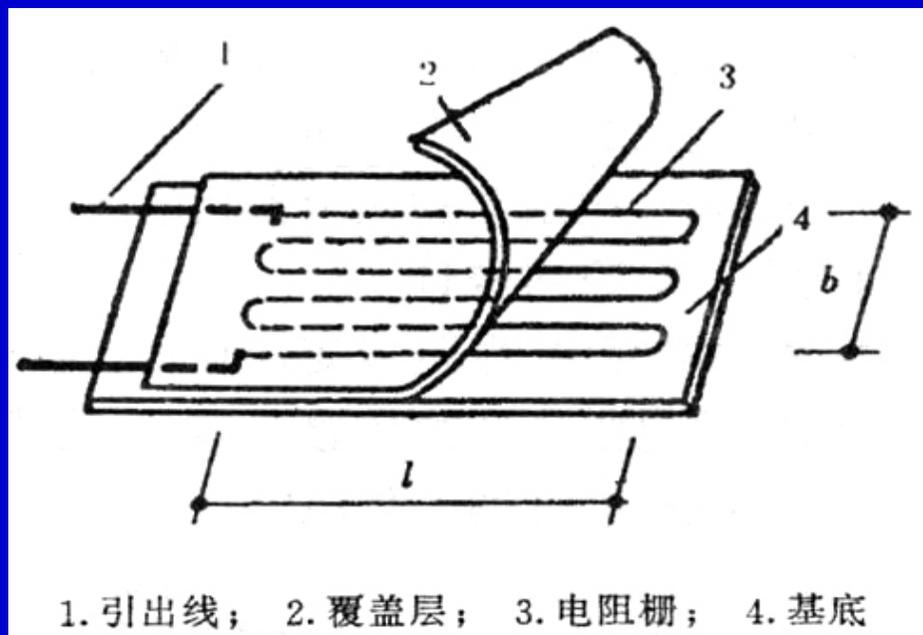
- ✓ **工作原理**: 利用某种金属丝导体的“应变电阻效应”。

单位应变引起的
相对电阻变化 $\longrightarrow \frac{dR}{R} = K\varepsilon$

K: 灵敏系数
 ε : 应变

- ✓ **构造组成**:

- ◆ 引出线
- ◆ 覆盖层
- ◆ 电阻栅
- ◆ 基底材料



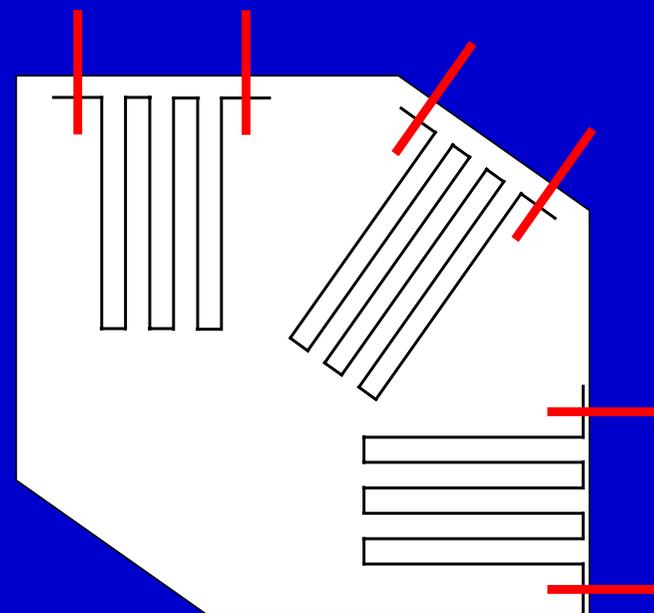
(二) 电阻应变计 (续)

- ✓ 电阻应变计的**特点**: 灵敏度高, 应变片尺寸小 (应力集中区密集贴片), 质量轻, 粘贴牢固, 适用于高、低温环境 ($-50^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$)。
- ✓ 主要技术指标
 - ◆ **电阻值** R : 120Ω 。
 - ◆ **标距** l : 即电阻栅的有效长度。钢筋片 2×1 、 3×2 等, 砷片 80×4 、 100×5 等 (大于4倍最大粗骨料粒径, 还与应变梯度有关)。
 - ◆ **灵敏度系数** K : 即单位应变引起应变计的电阻变化。应与应变仪的灵敏度系数设置相协调。

(二) 电阻应变计 (续)

✓ 电阻应变仪的分类

- ◆ 按电阻栅的种类分：丝绕式、短接式、箔式、半导体式、焊接式；
- ◆ 按电阻栅的形状分：单向应变片、应变花（双向、三向）；
- ◆ 按基底材料分：纸基、胶基；
- ◆ 按使用极限温度分：低温、常温、高温。



三向应变花

✓ 电阻应变计的粘贴方法:

顺序	工作内容		方法	要求
1	应变片检查 分选择	外观检查	借助放大镜肉眼检查	应变片应无气泡、霉变、锈点、栅级应平直、整齐均匀
		阻值检查	用万用表检查	应无短路或断路
			用单臂电桥测量电阻值并分组	同一测区应用阻值基本一致的应变计，相差不大于 0.5%
2	测点处理	测点检查	检查测点处表面状况	测点应平整、无缺陷、无裂缝
		打磨	用砂布或磨光机	平整、无浮浆、并不使断面减少
		清洗	用丙酮或酒精清洗	棉花干擦是无污染
		打底		胶层厚度 0.05-0.1mm 左右，硬后用砂布打磨
		测线定位		纵线与应变方向一致
3	应变计粘贴	上胶	用镊子夹应变计引出线，在背面上一层薄胶，测点也涂上薄胶，将片对准放上	测点上十字中心与应变计上的标志对准
		挤压	在应变计上盖一小片玻璃纸，用手指沿一个方向滚压，挤出多余胶水	胶层应尽量薄，并注意应变计位置不滑动。
		加压	快干胶粘贴，用手指轻压1-2分钟，其它胶则适当方法加压 1-2 小时	胶层应尽量薄，并注意应变计位置不滑动。

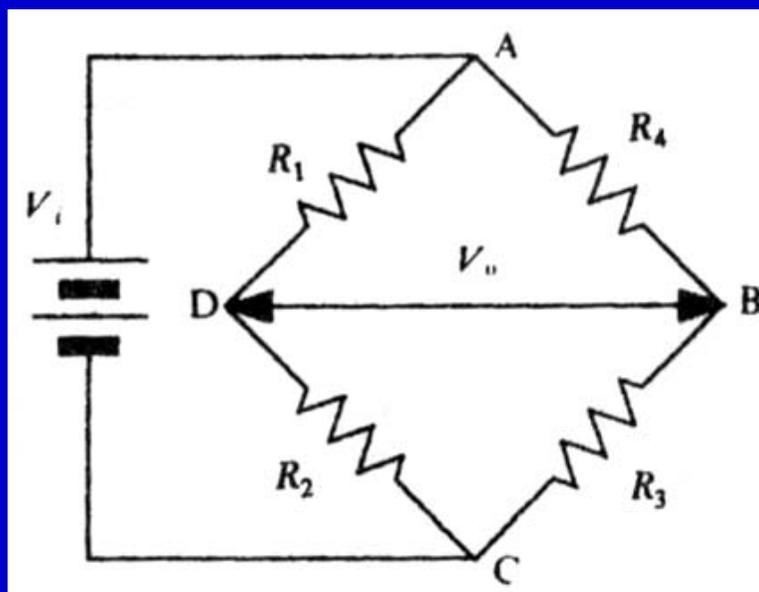
✓ 电阻应变计的粘贴方法（续）：

顺序	工作内容		方法	要求
4	固化处理	自然干燥	在室温 15 度以上，湿度 60%以下 1-2 天	胶强度达到要求
		人工固化	气温低，湿度大，在自然干燥后，用人工加温度。	加热温度不超过 50 度，且受热均匀
5	粘贴质量检查	外观检查、阻值检查、绝缘度检查		
6	导线连接	引出线绝缘	应变计引出线底下贴胶布	保证引出线不与试件形成短路。
		固定点设置	用胶固定电线	保证电线轻微拉动时，引出线不断
		导线焊接	把引出线与导线焊接	无虚焊
7	防潮防护			

(三) 应变测量

✓ 电阻应变计测量应变

- ◆ 采用惠斯登电桥（1/4电桥接法、半桥接法、全桥接法），将电阻变化转换为电压或电流的变化，使信号放大，从而进行测量；
- ◆ 读数：零位读数法（电阻）、偏位读数法（电压）

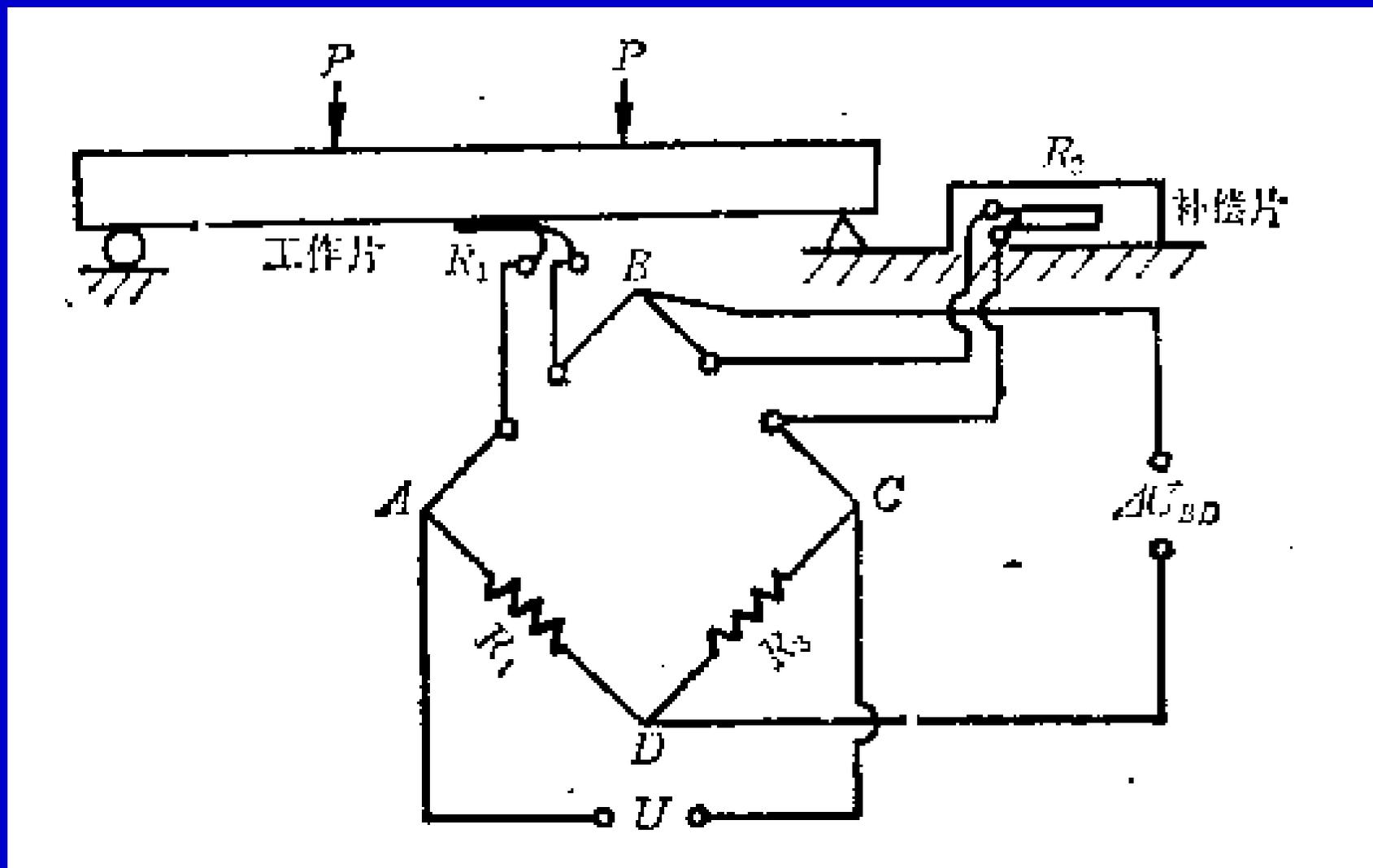


惠斯登电桥

(三) 应变测量 (续)

✓ 电阻应变计测量应变

- ◆ **温度补偿技术**: 粘贴在试件测点上的应变计所反映的应变值, 除了试件受力的变形外, 还包含试件与应变计受**温度影响**而产生的变形以及由于试件材料与应变计的温度线膨胀系数不同而产生的变形等。这种变形一般采用温度补偿方法加以消除。
- ◆ 消除温度影响的方法: **温度补偿法**。



温度补偿应变计法

(三) 应变测量 (续)

✓ 其他方法测量应变

◆ 位移法:

- ◆ 用两点之间的相对位移近似表示两点之间的平均应变

$$\varepsilon = \Delta l / l$$

- ◆ 小标距 (50mm ~ 250mm): 手持应变仪 (引申仪)、杠杆引申仪、百分表、位移传感器;
- ◆ 大标距: 收敛仪、水准仪、经纬仪。
- ◆ 光测法: 多用于结构局部应力分析 (云纹法、激光衍射法、光弹法)。

(四) 力传感器和压力传感器

- ✓ 主要有机械式传感器和电测式传感器两类；
- ✓ 机械式：拉力测力计、压力测力计、拉压力测力计；
- ✓ 电测式（应变式）：压力传感器、拉压传感器（较为常见，采用应变计量测方法，可自制）。



电测式荷载传感器

(五) 线位移传感器

- ✓ 简称位移传感器；
- ✓ 机械式百分表、电子百分表、千分表、位移计、
量程10~30mm
量程1~3mm
量程50、100、200、300mm
 水准仪、经纬仪等。



机械式百分表



电子百分表

(五) 线位移传感器 (续)

位移计



千分表



经纬仪

(六) 角位移传感器

- ✓ 倾角仪、倾角传感器等。

(七) 裂缝测量仪器

- ✓ 裂缝测量的两项内容：开裂时刻与位置、裂缝宽度与长度；
- ✓ 判断裂缝是否出现的方法
 - ◆ 目测 试件表面刷白，裂缝一般与主拉应力垂直；
 - ◆ 应变 通过钢筋应变和砼应变综合判定；
 - ◆ 曲线 通过 $P-\Delta$ 、 $P-\gamma$ 曲线拐点判定。
- ✓ 常用裂缝宽度测量仪器：读数显微镜、裂缝标尺。

(八) 测振传感器 (拾振器)

✓ **基本原理**: 测量结构振动参数 (位移、速度、加速度等) 的仪器

- ◆ **利用相对运动原理** 手持式测振仪;
- ◆ **利用惯性原理** 惯性式测振传感器。

振动方程:

$$x = x_0 \sin \omega t$$

✓ **传感器的频率特性**

◆ **位移传感器:**

$$\frac{\omega}{\omega_n} \quad \text{应尽可能大}$$

◆ **加速度传感器:**

$$\frac{\omega_n}{\omega} \quad \text{应尽可能大}$$

ω 为振动体的频率
 ω_n 为传感器固有频率

(八) 测振传感器 (续)

✓ 磁电式速度传感器 (教材P84-85)

- ◆ 灵敏度高、性能稳定

✓ 压电式加速度传感器 (教材P86)

- ◆ 优点: 动态范围大 (可达 10^5g), 频率范围宽, 稳定性好, 机械强度高, 温度范围宽;
- ◆ 缺点: 灵敏度较低。



压电传感器

4.3 记录器

(一) 概况 (教材P70-71)

- ✓ 数据的记录方式：模拟式、数字式。
- ✓ 常用的记录器：光线示波器、磁带记录仪、磁盘驱动器、X-Y记录仪。

(二) X-Y记录仪

- ✓ 模拟式记录器；
- ✓ 可记录一个X轴（荷载）、二~三个Y轴（位移、应变等）；
- ✓ 多用于静力测试。

(三) 光线示波器

- ✓ 模拟式记录器；
- ✓ 可同时记录多条曲线；
- ✓ 主要用于振动测试。

(四) 磁带记录仪

- ✓ 有模拟式和数字式两种；
- ✓ 多用于测量振动参数；
- ✓ 特点：工作频带宽、同时多通道记录、录放速度可调、可将磁信号还原为电信号。

4.4 数据采集系统

(一) 数据采集系统的组成 (教材P90 图4-23)

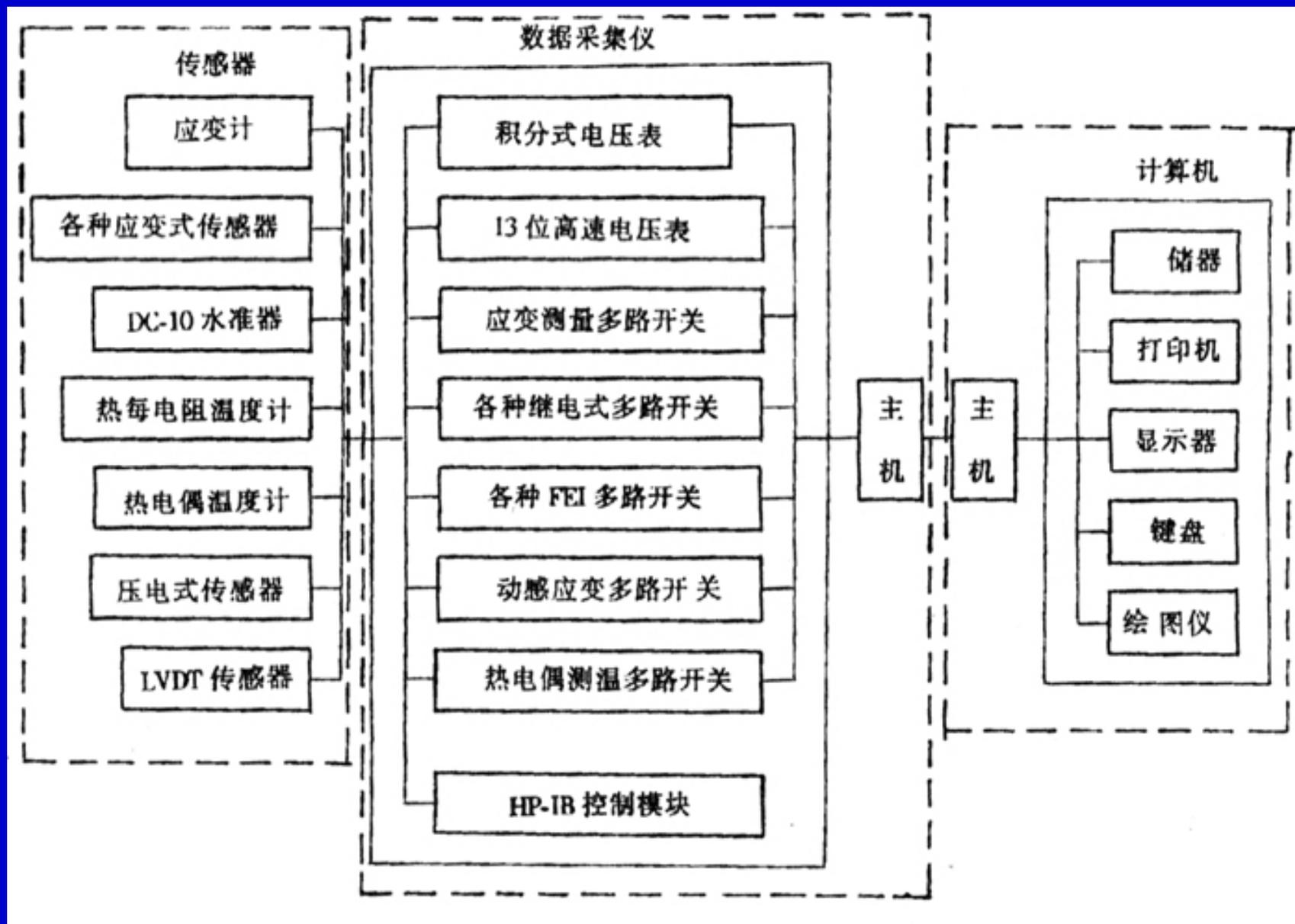
✓ 传感器部分: 包含电测传感器

数据采集部分: 扫面传感器, 对数据进行采集

计算机部分: 控制数据采集仪, 并进行数据处理

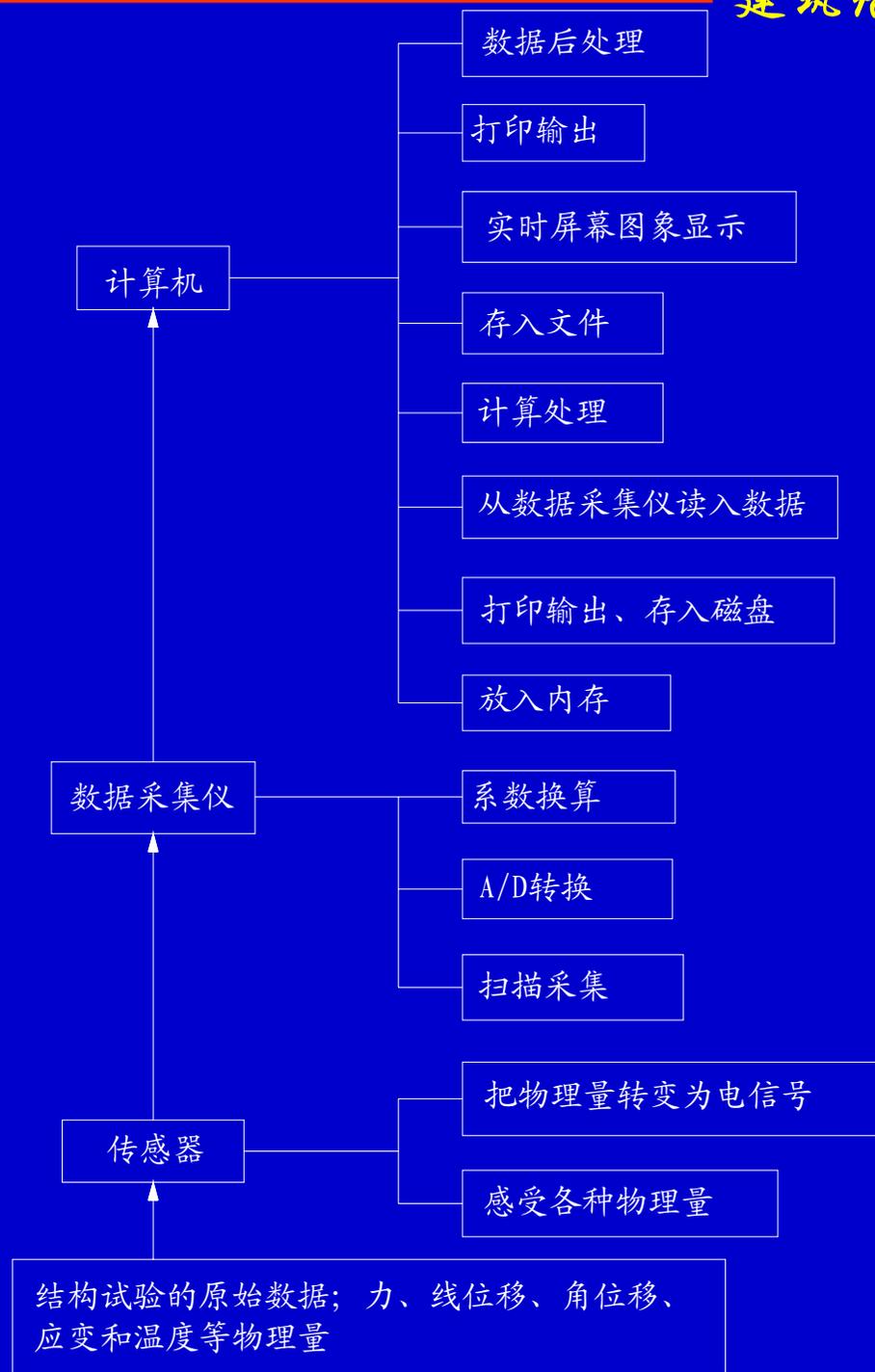
✓ 按系统组成模式分:

- ◆ 大型专用系统
- ◆ 分散式系统
- ◆ 小型专用系统
- ◆ 组合系统



数据采集系统的组成

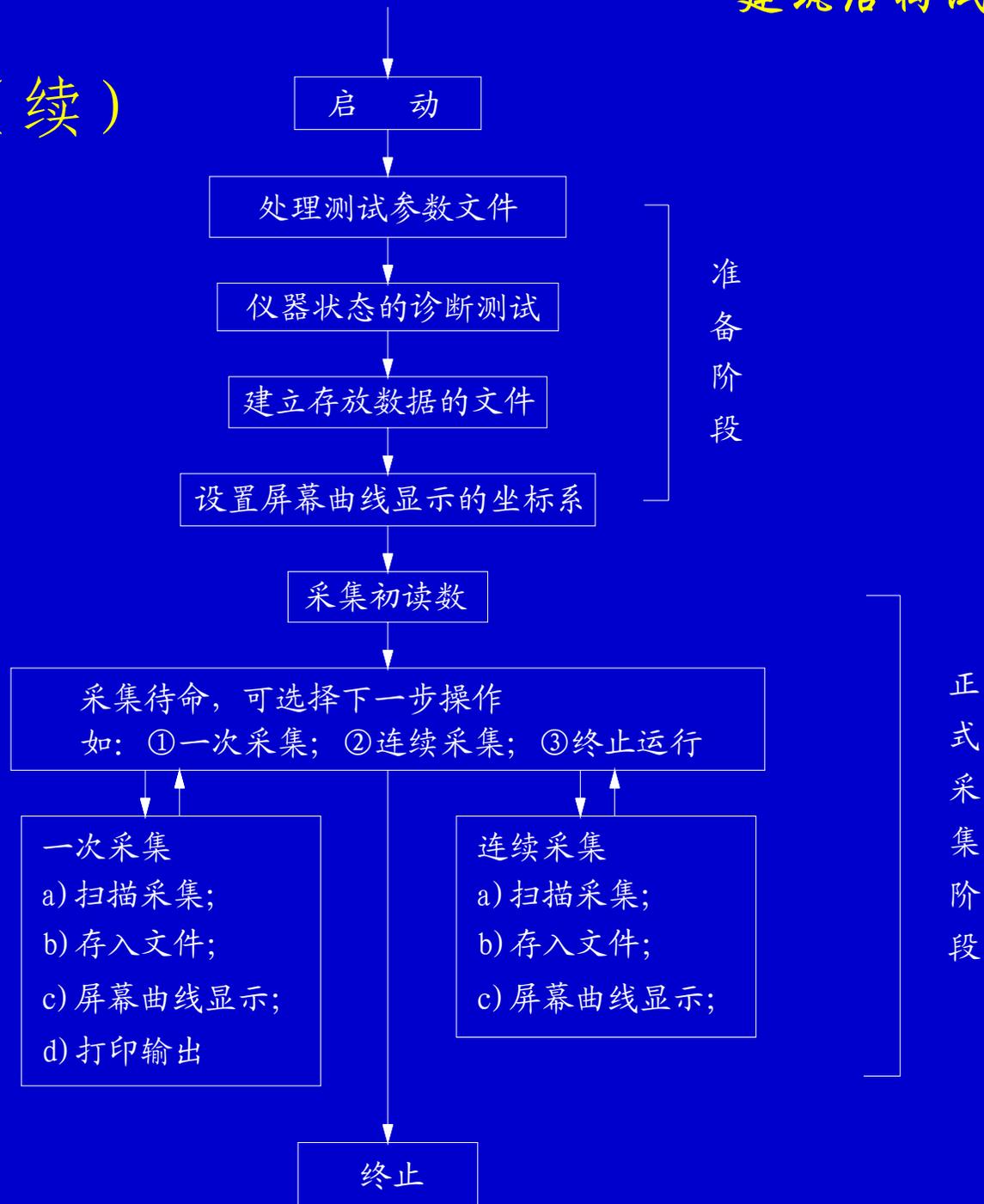
(二) 数据采集过程 (教材P90-92)



数据流通过程图

(二) 数据采集过程 (续)

(教材P90-92)



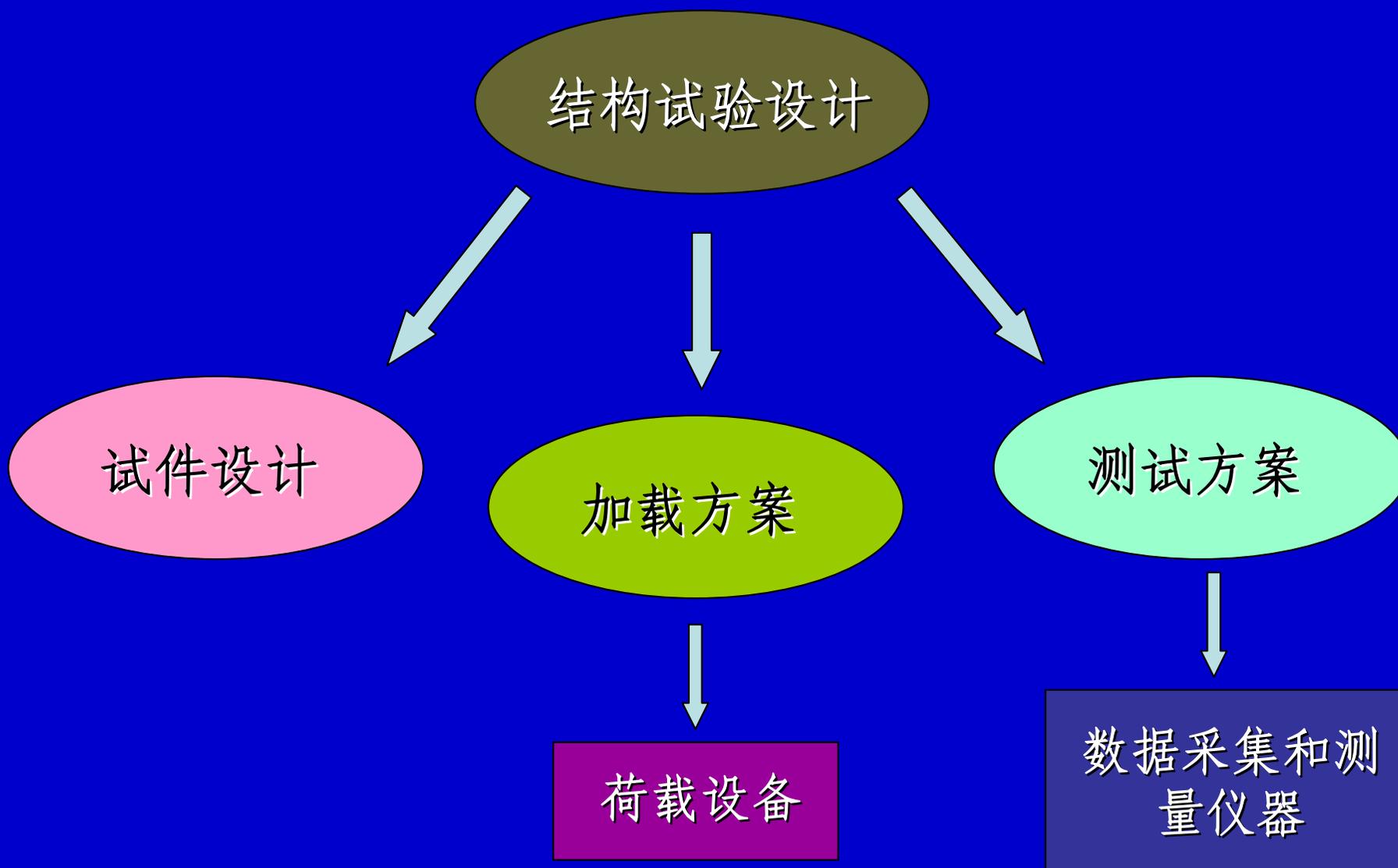
数据采集程序框图

思考题:

- 1、数据采集应遵循的两个原则是什么？
- 2、传感器的功能是什么？
- 3、简述电阻应变计的工作原理。
- 4、简述电阻应变计的主要粘贴步骤。
- 5、何谓1/4电桥、半桥接法以及全桥接法。
- 6、简述电阻应变计的构造组成。
- 7、常用的位移传感器有哪些？
- 8、裂缝测量主要有哪两项内容，常用方法是什么？
- 9、常用的数据记录器有包括哪些？
- 10、简述数据采集系统的硬件组成。

课时安排

第一章	结构试验概论	(2课时)
第三章	结构试验的荷载设备	(2课时)
第四章	结构试验的数据采集和测量仪器	(2课时)
第二章	结构试验设计	(4课时)
第五章	结构单调加载静力试验	(2课时)
第六章	结构低周反复静力加载试验	(2课时)
第九章	结构试验现场检测技术	(1课时)
第十章	结构试验的数据处理	(1课时)



第二章

结构试验设计

主要内容

- ✓ 2.1 概述
- ✓ 2.2 试件设计
- ✓ 2.3 结构试验的模型设计
- ✓ 2.4 结构试验荷载设计
- ✓ 2.5 结构试验的观测设计
- ✓ 2.6 材料的力学性能与结构试验的关系
- ✓ 2.7 结构试验大纲和试验基本文件

2.1 概述

- ✓ 结构试验全过程包括：试验设计、试验准备、试验实施和试验分析等几部分。
- ✓ 结构试验设计定义 (P9):
 - ◆ 对结构试验进行全面的**设计与规划**；
 - ◆ 设计的计划和试验大纲对试验起着**统管全局**和**具体指导**的作用。

2.1 概述（续）

✓ 试验设计的主要内容（以简支梁试件设计为对象）

(1) 确定试验参数，结合试验经费与时间，进行试件设计

◆ 如适筋梁试验：强剪弱弯原则、板的抗剪问题、梁截面尺寸的确定、经济配筋率问题。

(2) 加载设计

◆ 支承条件、加载方式（等弯矩段）、加载设备、加载制度（荷载与位移混合控制）。

(3) 观测设计

◆ P- Δ 、挠度、裂缝、应变、曲率等。尽可能多地测量内容，充分利用试验。

2.2 试件设计

- ✓ 缩尺模型与足尺模型
 - ◆ 缩尺模型必须满足严格的相似条件。

- ✓ 试件设计的内容及要求
 - ◆ 内容：试件形状的选择、试件尺寸与数量的确定、构造措施等；
 - ◆ 要求：结构与受力的边界条件、试验的破坏特征、试验的加载条件。

2.2 试件设计（续）

（一）试件形状

- ✓ 基本原则：受力和边界条件的模拟。
- ✓ 如框架节点的试验方案，板柱结构的受力特征（板带宽度的选取）。

（二）试件尺寸

- ✓ 尺寸效应（构件与结构）；
- ✓ 混凝土抗压强度试验

$100 \times 100 \times 100$	0.95
$150 \times 150 \times 150$	1.0
$200 \times 200 \times 200$	1.05

(三) 试件数量

- ✓ 生产性试验：按试验任务的要求来确定试件数量。
- ✓ 科研性试验：
 - (1) 单因素 根据因素的水平数来确定试件数量；
 - (2) 多因素 采用正交试验设计法来进行试验设计并对试验结果进行科学分析。
- ✓ 多因素试验存在的问题：
 - (1) 全面试验的次数（试件数量）与实际可行的试验次数之间的矛盾。n个因素，m个水平，则全面试验次数 m^n 。
 - (2) 实际所做的少数试验与全面掌握内在规律的要求之间的矛盾。

(三) 试件数量 (续)

- ✓ 正交试验设计: 指利用事先制好的正交表来安排多因素试验, 并进行试验结果分析的一种试验设计方法。
- ◆ 正交表是正交试验设计法中合理安排试验并对试验结果进行统计分析的一种特殊表格。
- ◆ 常用正交表有 $L_4(2^3)$ 、 $L_9(3^4)$ 、 $L_{12}(3^1 \times 2^4)$ 等。

(三) 试件数量 (续)

✓ 正交表的特点 (凡符合下列两个特点的表均称为正交表) :

- (1) 每一列中, 不同的数字出现的次数相等;
- (2) 任意两列中, 将同一横行的数字看成有序数对 (左列的数放在前, 右列的数放在后) 则每种数对出现的次数相等。如 (1、2) (1、1) (2、1) (2、2) 各出现一次。

(三) 试件数量 (续)

$L_4(2^3)$ 正交表

水平 试件	因素		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

(三) 试件数量 (续)

完全试验的试件数量

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

(三) 试件数量 (续)

$L_9(3^4)$ 正交表

水平 试件	因素			
	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

(三) 试件数量 (续) $L_{12}(3^1 \times 2^4)$ 正交表

水平 试件	因素				
	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

(三) 试件数量 (续)

✓ 正交试验结果分析——直观分析法

◆ 目的:

- (1) 确定各因素的主次关系;
- (2) 确定各影响因素的最佳水平。

◆ 具体步骤:

- (1) 填写评介指标, 将每个试件的试验结果填入正交表的右栏内;
- (2) 计算各因素的水平效应值 K_{mf} 、 \bar{K}_{mf} 和极差 R_m 值。
- (3) 比较各因素的极差 R 值, 根据其大小, 列出各因素的主次关系。 R 值较大者, 即对试验结果的影响较大、即主要因素。
- (4) 比较同一因素下各水平的效应值 \bar{K}_{mf} , 能使指标达到满意值的为较理想的水平值。

K_{mf} 正交表中 m 列第 f 水平相应的指标值之和

$\bar{K}_{mf} = K_{mf} / r$, m 列第 f 水平的重复次数

R_m m 列中 \bar{K}_{mf} 的极大值与极小值之差

(四) 结构试验加载与测试对试件设计的要求

- ✓ 试件支承条件的要求：支承点的水平、局压、支承点的明确（跨度）。
- ✓ 试件加载点的要求：分配梁（简支梁型式）、局压。
- ✓ 试件破坏型式和破坏机制的要求：如 弯与剪的破坏问题、节点与梁柱构件的强度问题、防止粘结滑移的措施。
- ✓ 试验测量的要求：预埋件、预留孔道、预贴应变片。
- ✓ 辅助试件的要求：试件材料的材性试件、节点或局部结构构件的单体试件。

2.3 结构试验的模型设计

- ✓ 结构模型设计要求按相似理论进行设计，以保证“试验过程与试验结果相似”
 - ◆ 几何相似
 - ◆ 材料相似
 - ◆ 物理相似
 - ◆ 荷载相似
- ✓ 科研性试验中常采用小型试件，即缩尺模型。

2.3 结构试验的模型设计（续）

✓ 相似原理

相似原理是研究自然界相似现象的性质和鉴别相似现象的基本原理，由三个相似定理组成：

- ◆ **第一相似定理**：彼此相似的现象，单值条件相同，其相似准数也相同，由牛顿在1786年首先提出，它确定了相似现象的性质。
- ◆ **第二相似定理**：某一现象各物理量之间的关系方程式，都可表示为相似准数之间的函数关系。相似准数常用 π 表示。第二相似定理也称 π 定理，为模型设计提供了理论基础。
- ◆ **第三相似定理**：现象的单值条件相同，并且由单值条件导出的相似准数相等，是现象彼此相似的充要条件。

2.3 结构试验的模型设计（续）

（一）模型的相似要求和相似常数

✓ 相似常数的独立性

✓ 几何相似

要求模型和真型之间所有对应部分尺寸成比例。 S_l （长度）、 S_A （面积）、 S_w （抗弯模量）， S_I （惯性矩）， S_x （位移）、 S_ε （应变）。

✓ 质量相似

S_m （质量）、 S_ρ （比重）。

✓ 荷载相似

S_P （集中力）、 S_w （面力）、 S_q （体力）、 S_M （弯矩）。

(一) 模型的相似要求和相似常数 (续)

✓ 物理相似

S_σ (应力)、 S_τ (剪力)、 S_γ (剪切角)、 S_E (弹性模量)。

✓ 时间相似

S_t , 时间相似不是指时刻相似, 而是指时刻的间隔相似。

✓ 边界条件相似

指模型的支承与约束条件相似。

✓ 初始条件相似

针对动力问题, 包括初始位置、位移、速度、加速度等。

✓ 无量纲量的相似常数均为1

(二) 模型设计的相似条件 (教材P19-25)

- ✓ 按模型设计的相似理论确定相似条件的方法有：方程式分析法、量纲分析法。
- ✓ **方程式分析法**：已知各参数与物理量的函数关系，并有显式表达式时。适用于较简单的物理现象。
- ✓ **量纲分析法**：对较复杂的物理现象，不能用显式表达来描述各参数与物理量之间的函数关系。此时，物理参数的合理选择对模型设计具有决定性的作用。

取决于对该物理现象的正确认识程度

(二) 模型设计的相似条件 (续)

1、静力试验模型的相似条件 (P20)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{S_M}{S_p \cdot S_l} = 1 \\ \frac{S_\sigma \cdot S_l^2}{S_p} = 1 \\ \frac{S_f \cdot S_E \cdot S_l}{S_p} = 1 \end{array} \right.$$

- ✓ 可见，相似常数的数目多于相似条件的数目，模型设计时须预先假设几个相似常数，一般假设几何相似常数 S_l 和材料相似常数 S_E 。

续前页

- ✓ 考虑自重荷载的模型相似条件

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{S_M}{S_\gamma \cdot S_l^4} = 1 \\ \frac{S_\sigma}{S_\gamma \cdot S_l} = 1 \\ \frac{S_f \cdot S_E}{S_\gamma \cdot S_l^2} = 1 \end{array} \right.$$

S_γ —— 为材料容重的相似常数

① 当 $\sigma_m = \sigma_p$, $S_\sigma = 1$, $S_\gamma = \frac{1}{S_l}$, 此时模型材料很难实现, 只能采用附加质量方法, 但强度与刚度须保持不变。

② 当材料相当, $S_\gamma = S_E = 1$, $\begin{cases} \sigma_m = S_l \cdot \sigma_p \\ f_m = S_l^2 \cdot f_p \end{cases}$, 须提高测量精度。

2、动力试验模型的相似条件（教材P22-23）

✓ 单自由度体系受迫振动的振动方程

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = -m \frac{d^2 x_g}{dt^2}$$

即：
$$1 + \frac{c \cdot dx/dt}{m \cdot d^2 x/dt^2} + \frac{kx}{m d^2 x/dt^2} = -\frac{d^2 x_g/dt^2}{d^2 x/dt^2}$$
 x 为未知量

∴ 动力模型的相似条件为

$$\begin{cases} S_c \cdot S_t / S_m = 1 \\ S_k \cdot S_t^2 / S_m = 1 \end{cases}$$

此外，自频及周期的相似常数为：
$$S_T = \sqrt{\frac{S_m}{S_k}} \quad S_w = \sqrt{\frac{S_k}{S_m}}$$

运动初始条件的相似：
$$S_x = S_l \quad S_{\dot{x}} = \frac{S_l}{S_t} \quad S_{\ddot{x}} = \frac{S_l}{S_i}$$

续前页

- ✓ 关于重力加速度的相似常数 S_g

模型试验中的相似关系：
$$\frac{S_E}{S_g \cdot S_\rho} = S_l$$

- ◆ 当选用 $S_g=1$ ，而 S_l 一般 $(\frac{1}{2}, \frac{1}{6})$ 之间， $S_E/S_\rho \in [\frac{1}{2}, \frac{1}{6}]$

这在模型选用材料时很难实现，通常需对材料试级配。

- ◆ 当选用材料相同， $S_E = S_\rho = 1$ ，则 $S_g = 1/S_l$ ，采用附加质量法。

3、钢筋混凝土结构和砌体结构试验模型的相似条件（ 教材P24-25）

4、模型材料

✓ 模型材料的要求

- ◆ 相似要求：材料的基本性质相似。
- ◆ 测量要求：为便于测量仪表有足够的读数，弹性模量应适当低一些。
- ◆ 材料性能稳定，受环境温度、湿度的影响较小。
- ◆ 加工制作方便

续前页

✓ 模型材料的种类

- ◆ **金属**（一般钢材和铝合金）：弹性好、变形量大、泊松比与钢筋砼相似。
- ◆ **塑料和有机玻璃**：强度大、弹性模量低、各向同性、加工方便、但徐变较大、热稳定性较差。
- ◆ **石膏**：加工容易、成本低、泊松比与砼十分接近、弹性模量可人为调整、但抗拉强度低、较脆。石膏被广泛用于制作弹性模型，也可大致模拟砼的塑性性能。
- ◆ **水泥砂浆**：相比上述三种材料，最接近混凝土，常用于制作砼薄壁结构，此时采用的钢筋为钢丝或铅丝。
- ◆ **细石混凝土**：非弹性性能较难模拟，缩尺比例不宜太小。主要缺点是粘结应力模拟不好，不适用于研究 W_{max} 、 f 等。

2.4 结构试验荷载设计

✓ 结构试验荷载的分类

◆ 按作用形式

集中荷载、分布荷载。

◆ 按作用方向

垂直荷载、水平荷载、任意方向荷载。

◆ 单调荷载、重复荷载、反复荷载

◆ 动力荷载、静力荷载

续前页

(一) 试验加载图式 (教材P25)

✓ 定义:

试验荷载在试验结构上的布置形式 (包括荷载类型与分布情况)

✓ 试验加载图式要与结构设计计算时荷载图式一致

(二) 试验加载装置的设计

✓ 试验加载装置包括

- ◆ 竖向加载装置：荷载架
- ◆ 水平加载装置：反力架、反力墙（砵制）
- ◆ 其他加载装置：
 - (1) 荷载传递装置 分配梁、垫块或垫梁、滑动轴承等；
 - (2) 荷载支承装置 支座（固定式、滑动式、铰接式、滚动式）、支墩。

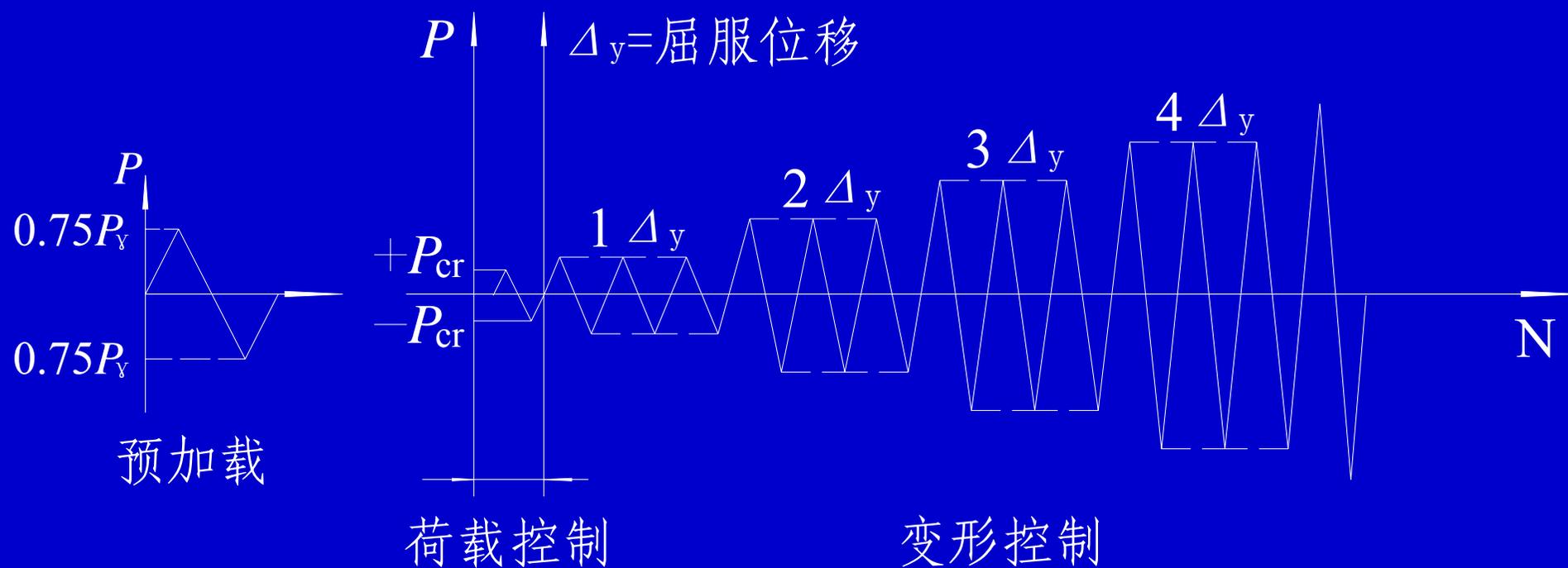
续前页

- ✓ 试验加载装置的基本要求
 - ◆ 满足最大试验荷载的要求，并有一定的安全储备50~100%；
 - ◆ 满足自身刚度的要求；
 - ◆ 符合试验结构的受力条件，能模拟试验结构的边界条件和变形条件；（如：框架节点受力中，P- Δ 效应的模拟。）
 - ◆ 满足试件的支承条件：如支承点的摩擦力影响使实际弯矩减小；
 - ◆ 构造简单，加工、组装方便。

(三) 试验的加载制度

- ✓ 定义：结构试验中控制荷载与加载时间的关系。
- ✓ 结构试验的加载制度分类：
 - ◆ 单调静力加载：预加载、预定荷载、破坏荷载
 - ◆ 伪静力加载：荷载与位移混合的低周反复加载（见后图）
 - ◆ 伪动力加载：由计算控制，按地震位移反应时程曲线加载
 - ◆ 抗震动力加载：按模拟地震时地面运动加速度地震波加载
- ✓ 《混凝土结构试验方法标准》(GB50152-92)
- ✓ 《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-96)

低周反复加载制度



2.5 结构试验的观测设计

✓ 观测设计的内容

确定测试项目、选择测点位置、选择测试仪器和测试方法。

(一) 观测项目的确定

✓ 试件在荷载作用下的变形分为以下两类

- ◆ 整体变形：能够反映试件的整体工作性能，如P- Δ 、P- γ 曲线
- ◆ 局部变形： ε 、 ω_{\max} 、f、 τ -s曲线等。

续前页

(二) 测点的选择与布置

✓ 测点的布置原则

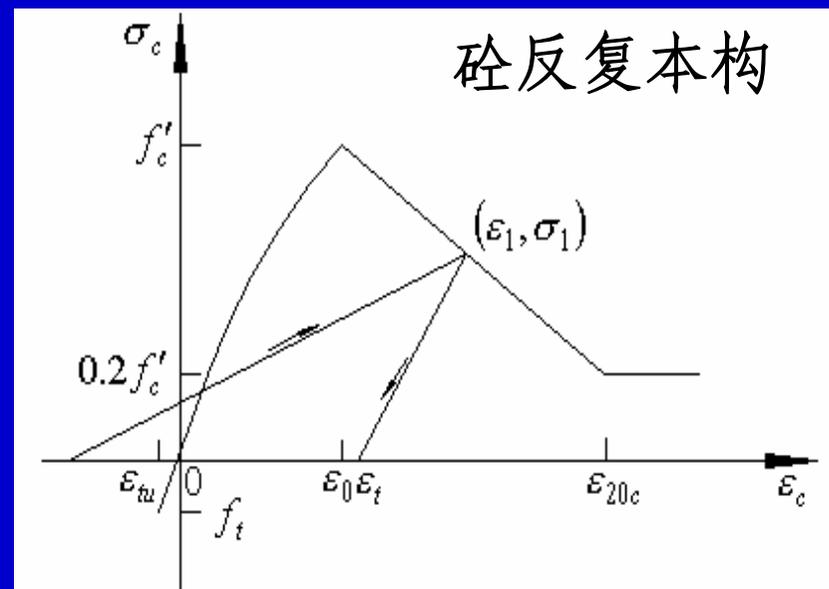
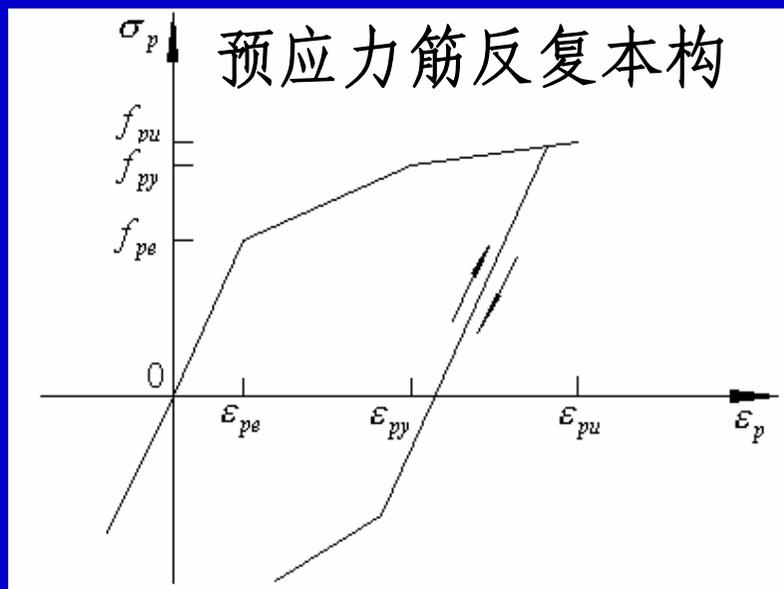
- ◆ 满足试验要求为目的，宜少不宜多；
- ◆ 测点的位置要有一定的代表性；
- ◆ 应布置一定量的校核性测点（受力明确的部位）；
- ◆ 测点的布置应便于试验时操作和测读。

(三) 仪器的选择与测读的原则（教材P30-31）

2.6 材料的力学性能与结构试验的关系

(一) 概述

- ✓ 结构设计中最基本的公式 $R \geq S$
- R需要试件材料的基本力学性能数据: f_c f_{cu} E_c f_y f_u E_s α
- 抗震试验中尚需要考虑周期性反复荷载下的材料本构关系 (见下图)。



续前页

- ✓ 包兴格效应：
 - ✓ 钢材在拉（压）超过弹性极限后、反面弹性极限会明显降低。1887年，德国包兴格提出。

- ✓ 测定试件材料力学性能的方法：
 - ◆ 直接试验法，同条件试件；
 - ◆ 间接测定法（非破损试验法或半破损试验法），回弹仪、超声波法等。

(二) 材料试验结果对结构试验的影响

- ✓ 真正的试件材性很难准确测得。

(三) 试验方法对材料强度指标的影响

- ✓ 试件尺寸与形状的影响：尺寸效应（加载面的约束及内部缺陷）

$$f_c = 0.76 f_{cu} \quad f_t = 0.76 f_{cu}^{\frac{2}{3}} \quad f'_c = 0.83 f_{cu}$$

- ✓ 试验加载速度的影响（教材P32 - 34）

2.7 结构试验大纲和试验基本文件 (教材P35-36)

思考题:

- 1、结构试验包括哪些主要环节?
- 2、结构试验设计的定义为?
- 3、生产性试验的试件数目的确定原则是什么?
- 4、采用什么方法确定多因素科研试验的试件参数?
- 5、简述模型设计中主要的相似要求。
- 6、确定相似条件的方法有哪两种，试对比分析。
- 7、试列出不考虑自重荷载的静力试验模型的相似条件。
- 8、阐述结构试验荷载的分类。
- 9、何谓结构试验的加载制度。
- 10、简述试验测点选择与布置的原则。

课时安排

第一章	结构试验概论	(2课时)
第三章	结构试验的荷载设备	(2课时)
第四章	结构试验的数据采集和测量仪器	(2课时)
第二章	结构试验设计	(4课时)
第五章	结构单调加载静力试验	(2课时)
第六章	结构低周反复静力加载试验	(2课时)
第九章	结构试验现场检测技术	(1课时)
第十章	结构试验的数据处理	(1课时)

第五章

结构单调加载静力试验

主要内容

- ✓ 5.1 概述
- ✓ 5.2 结构单调加载静力试验的加载制度
- ✓ 5.3 基本构件的单调加载静力试验
- ✓ 5.4 扩大构件的单调加载静力试验
- ✓ 5.5 建筑物或其部件的单调加载静力试验

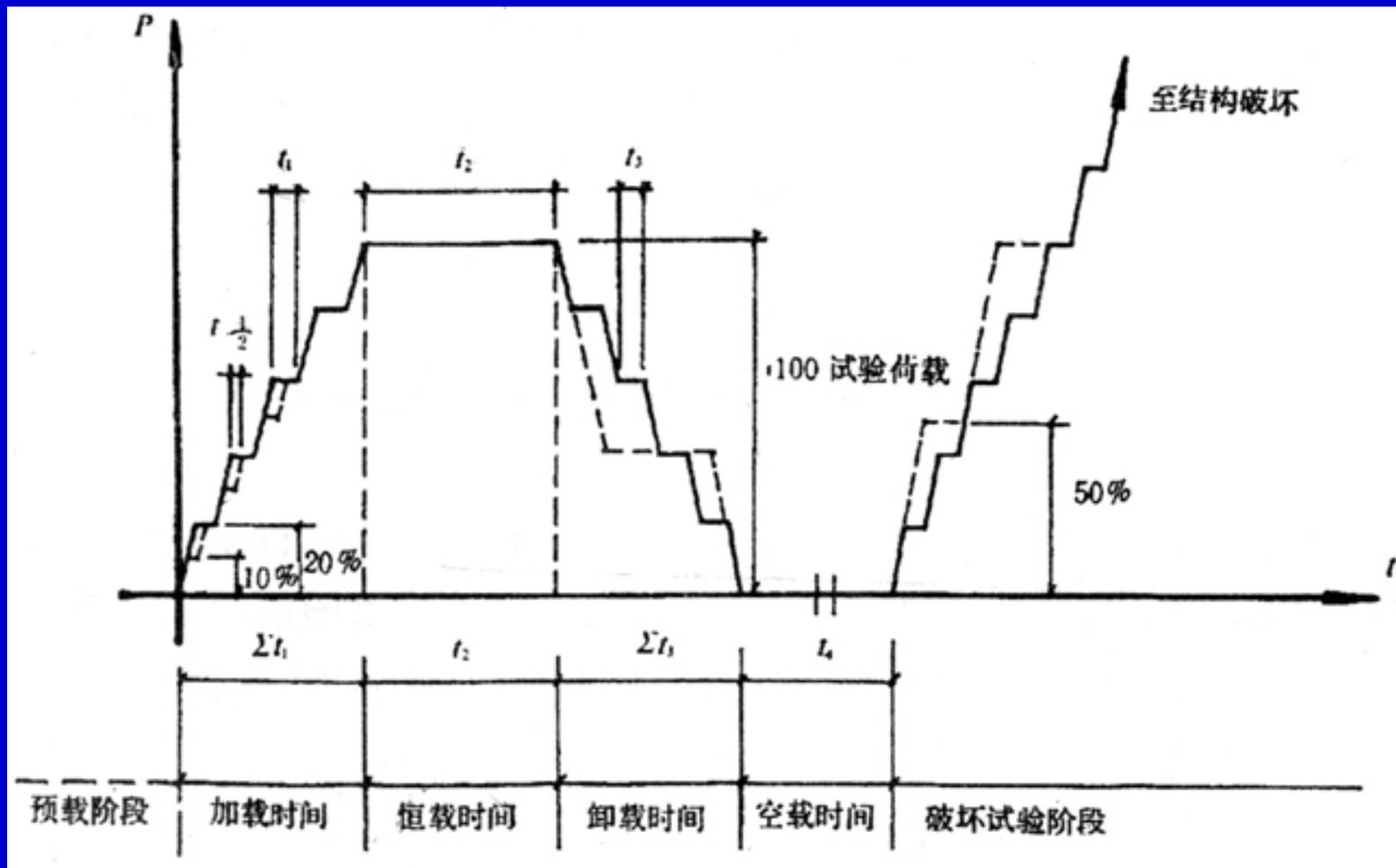
5.1 概述

- ✓ 定义：单调加载静力试验是指在短时期内对试验对象进行平稳的**一次连续施加荷载**，荷载从“零”开始一直加到结构构件破坏，或是在短时期内平稳地施加若干次预定的重复荷载后，再连续增加荷载直到结构构件破坏。
- ✓ 单调加载静力试验是**最普遍**的试验类型。
- ✓ 单调加载静力试验主要用于模拟结构**承受静荷载作用**下观测和研究结构构件的强度、刚度、抗裂性等基本性能和破坏机制。

5.2 结构单调加载静力试验的加载制度

- ✓ 加载制度定义：试验进行期间荷载与时间的关系。
- ✓ 试验加载应与结构的实际受力情况吻合，如三种荷载组合（短期、长期、基本）情况。
- ✓ 典型的单调加载静力试验的加载程序（见后图，教材P94）。
- ✓ 预加载试验
 - ◆ 预加载荷载值为开裂荷载的70%左右，一般为开裂荷载的30-70%。

续



单调静力试验的加载程序

5.2 结构单调加载静力试验的加载制度（续）

✓ 荷载量分级要求

- ◆ 开裂前，在达到开裂荷载计算值的90%以前，按荷载短期效应组合的20%分级；
- ◆ 开裂前，达到开裂荷载计算值的90%后，按荷载短期效应组合的5%分级；
- ◆ 开裂后，直至达到荷载短期效应组合值，仍按20%分级；
- ◆ 超过荷载短期效应组合值后，直到结构屈服前，按10%分级；
- ◆ 结构屈服后，按 Δy 的倍数施加荷载，按 $2\Delta y$ 、 $3\Delta y$ 、 $4\Delta y$ 分级。

荷载值下降
 ◆ 对非线性分析重要；
 ◆ 按荷载加难以控制。

5.2 结构单调加载静力试验的加载制度（续）

- ✓ 分级加载级间间歇时间 t_1 （卸载级间间歇时间 t_3 ）
 - ◆ 砼结构 $\geq 10\text{min}$ ，钢结构略少；
 - ◆ 基本原则：变形、应变等基本稳定。
- ✓ 恒载持续时间 t_2 （应力、内力传递需要一定时间）
 - ◆ 一般科研性试验 $\geq 30\text{min}$
 - ◆ 生产鉴定性试验 $\geq 10\text{min}$
 - ◆ 新结构和大跨结构 $\geq 12\text{h}$
- ✓ 空载持续时间 t_4 ： $1.5t_2$

5.3 基本构件的单调加载静力试验

(一) 受弯构件的试验

✓ 试件的安装和加载方法

◆ 简支座与固定支座的实现

➢ (1)



梁下部
会伸长

➢ (2) 应尽量保证加载面与支承面平整（砂浆、垫沙层、橡胶+钢板）

◆ 加载方法：千斤顶+分配梁 最常见

➢ 一般采用等效荷载的加载图式（按照所研究的界面位置）

(一) 受弯构件的试验 (续)

✓ 试验项目和测点布置

(1) 挠度测量

- ◆ 梁的挠度 f , $P-f$ 曲线、框架的 $P-\Delta$ 曲线、节点的 $P-\gamma$ 曲线
- ◆ 梁的真实挠度 f
 - a) 剔除支座位移;
 - b) 对宽度较大的梁, 两边对称贴片, 以消除扭转的影响 (支座偏心、加载点偏心);
 - c) 挠度的预计大小 (选择仪器的量程)。

(一) 受弯构件的试验 (续)

(2) 应变测量

- ◆ 一般在以下几个截面上: M_{+max} 、 M_{-max} 、 σ_l 、 σ_y 或弯矩突变处;
- ◆ 贴片的原则: ①按应变梯度; ②受拉区少、压区密 (如采用引伸仪则不用); ③一般情况下多采用不均匀布置的方法。

➢ a) 单向应力测定: 单向片

钢筋粘结应力

➢ b) 平面应力测定: 多个单向片、应变花

可确定有效翼缘宽度

➢ c) 箍筋和弯筋应力测量: 预埋式和表面开槽式

孔边最大应力, 孔边跨度

➢ d) 翼缘与孔边应力测量: 连续贴片 (力学分析结果)

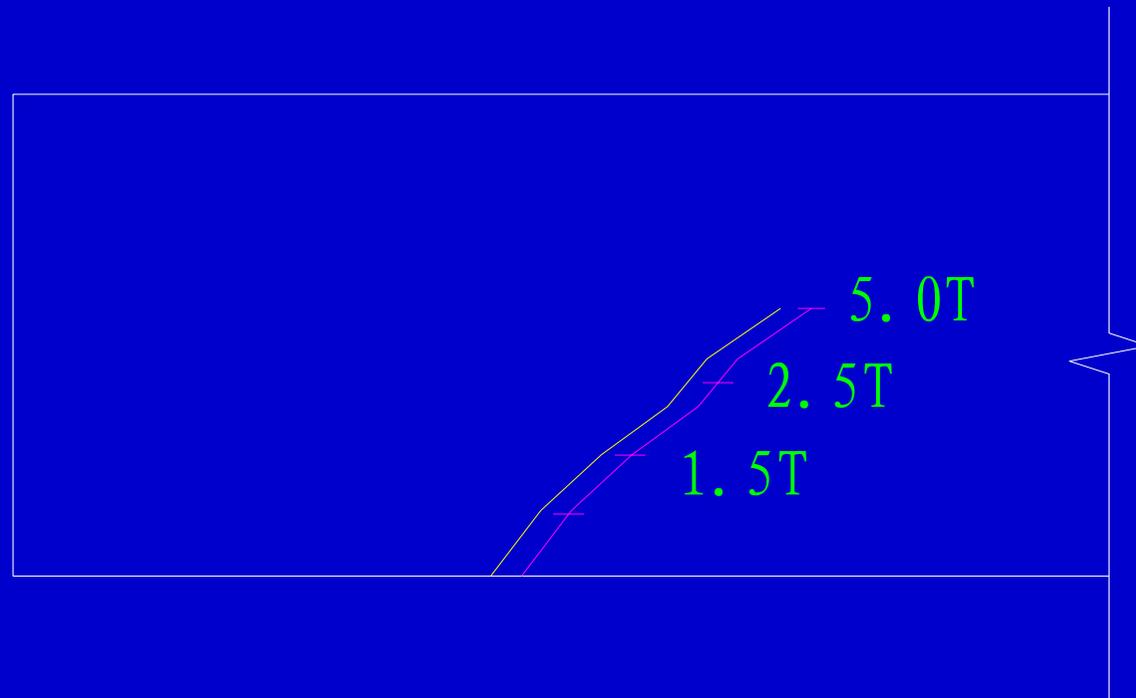
➢ e) 校核测点: 不受力位置, 检验系统误差

(一) 受弯构件的试验 (续)

✓ 裂缝测量

- ◆ 裂缝包括：弯曲裂缝、剪切裂缝、弯剪裂缝。
- ◆ 基于力学分析，在裂缝位置的垂直方向布置测点。
- ◆ 裂缝永远与 σ_1 垂直（事故处理常用原则）。
- ◆ 裂缝出现的判别方法：①目测；②P- Δ 曲线；③应变值。
- ◆ 最大裂缝宽度的测量方法：等弯矩段选取3条，在纵筋水平位置处采用读数放大镜或裂缝标尺。
- ◆ 裂缝的标注方法：试验完毕后绘制裂缝开展图。

续前页



裂缝的标注方法

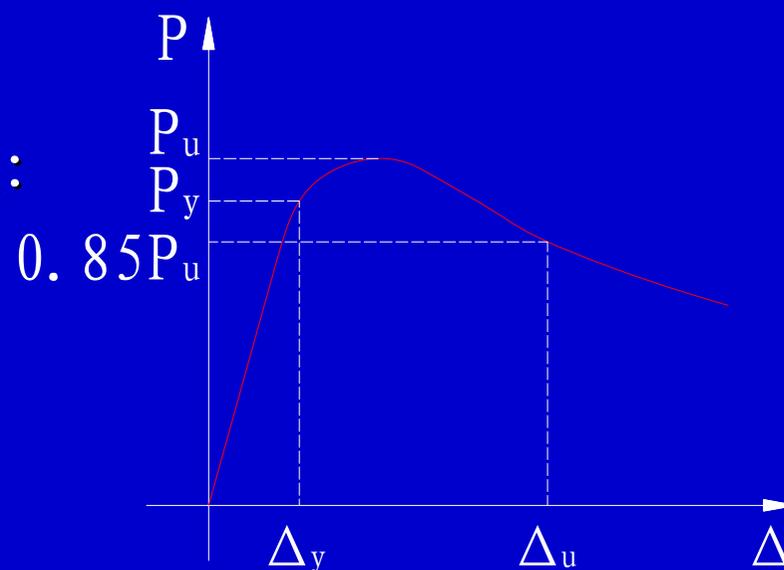
(一) 受弯构件的试验 (续)

✓ 受弯塑性铰测量

◆ 测量内容：塑性铰的出现、长度，钢筋及砼的应变情况、裂缝情况。

◆ 延性系数

▷ 测量P - Δ 曲线的意义：



$$\mu = \Delta_u / \Delta_y$$

◆ 钢筋在塑性铰区的连续贴片 (教材P102-103)。

(二) 压杆和柱的试验

- ✓ 主要研究轴压比和长细比的影响。
- ✓ 试件的安装和加载方法
 - ◆ 正位试验（试验机上或大型荷载架上进行）、卧位试验（大型试件）两端采用可动铰支座（反弯点截取试件模型），可考虑 $P-\Delta$ 效应。
 - ◆ 对受压构件的安装就位，关键在于对中：首先进行几何对中，再进行物理对中（通过应变测量，施加20-40%试验荷载）。

(二) 压杆和柱的试验 (续)

✓ 试验项目和测点布置

- ◆ 试验项目： $P-\Delta$ 曲线、 ε_s 、 ε_c 、 ω_{\max} 等，注意需要成对测量。
- ◆ 为研究混凝土受压区的实际应力图形，可采用测力板进行测定（教材P105，类似自制传感器）
 - (1) 将测力板浇筑在棱柱体试件中进行标定；
 - (2) 将测力板浇筑在试件中进行测量。

5.4 扩大构件的单调加载静力试验 (教材P106—120)

5.5 建筑物或其部件的单调加载静力试验

一、钢筋砼平面楼盖试验

- ✓ 楼盖包括板、次梁、主梁三个部分，试验目的是研究活荷载的作用。

续前页

(一) 试验荷载布置

- ✓ 对于连续梁，活荷载最不利布置的原则
 - ◆ 跨中 M_{\max} ：该跨布置，左右隔跨布置
 - ◆ 支座 M_{\max} ：该支座左、右跨布置，左右隔跨布置
 - ◆ 支座最大剪力：同支座 M_{\max}
- ✓ 可从弯矩图、挠曲线来理解
- ✓ 试验中为简化，可忽略较远跨的影响或仅在荷载数值上考虑其影响
- ✓ 板的试验
 - ◆ 确保为单向板

续前页

✓ 次梁的试验

- ◆ 当主梁支承次梁时，可将次梁视为连续梁
- ◆ 当柱支承次梁时，将次梁视为固支梁
- ◆ 实际上结构中均为弹性支座，无绝对意义上的铰支、固支

✓ 主梁的试验

- ◆ 同次梁的试验

✓ 柱的试验

- ◆ N_{\max} : 柱相邻跨满布
- ◆ M_{\max} : 同梁端 M_{\max} 时布置方案

(二) 试验观测

- ✓ 平面楼盖试验一般为非破坏性，这是由于T形梁（强度大），多梁式经常为现场试验
- ✓ 板、梁挠度的观测
 - ◆ 工程中：精密水准仪、引出法
 - ◆ 消除支座的影响
- ✓ 混凝土梁、板中混凝土及钢筋的原始应力测定
 - ◆ 卸载法
- ✓ 荷载的施加一般采用成袋砂、石、水泥

二 单层工业厂房整体结构空间工作试验

- ✓ 单层工业厂房由排架、屋盖系统、山墙等组成，由于屋盖系统和山墙对各榀平面排架的约束作用，从而形成空间结构。
- ✓ 试验目的：确定厂房整体空间作用性质及具体分配系数。

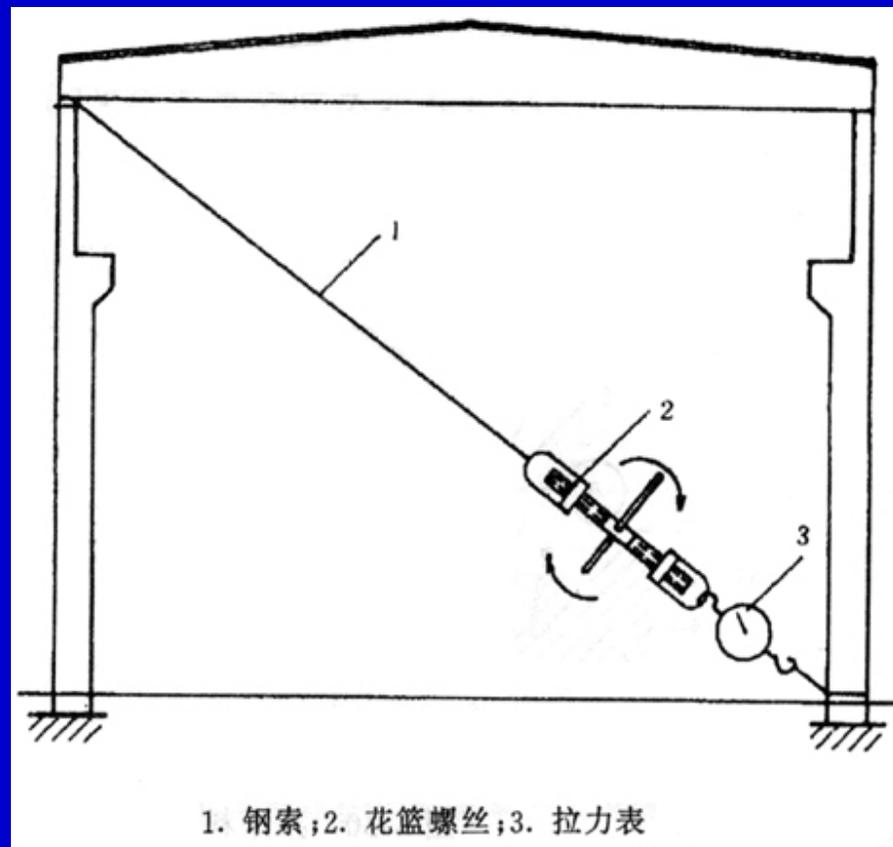
续前页

(一) 试验荷载布置

- ✓ 采用机械力加载的方式
- ✓ 加载方法

(二) 试验观测

- ✓ 主要测量加载柱列各柱柱顶的横向水平位移，从而可确定分配系数。



三 足尺房屋结构的整体试验

- ✓ 一般花费巨大，试验设备、台座、荷载架等的要求都很高，但能反映真实结构的实际工作性能，通常用作模拟试验基础上的验证性试验。
- ✓ 五层中型砌块建筑足尺结构抗震静力试验（教材P129-134）
 - ◆ 足尺试验意义及特点（教材P133）

思考题：

- 1、简述单调加载静力试验的定义。
- 2、绘出阐述结构单调加载静力试验的加载制度。
- 3、试根据弯矩和剪力等效原则绘出均布荷载下简支梁的等效荷载加载图式。
- 4、如何布置测量简支梁弯曲应力、剪应力分布的应变测点？
- 5、混凝土梁裂缝的测量有几种方法？
- 6、柱的安装和加载方案有哪两种，特点是什么？
- 7、何谓几何对中与物理对中，在柱的试验中如何实现？
- 8、如何布置测量柱的侧向位移和变形曲线的测点？
- 9、屋架安装和加载方法有几种，特点是什么？

课时安排

第一章	结构试验概论	(2课时)
第三章	结构试验的荷载设备	(2课时)
第四章	结构试验的数据采集和测量仪器	(2课时)
第二章	结构试验设计	(4课时)
第五章	结构单调加载静力试验	(2课时)
第六章	结构低周反复加载静力试验	(2课时)
第九章	结构试验现场检测技术	(1课时)
第十章	结构试验的数据处理	(1课时)

第六章

结构低周反复加载静力试验



房屋倒塌

自八层以下陷入地下





压坏临近的五层公寓

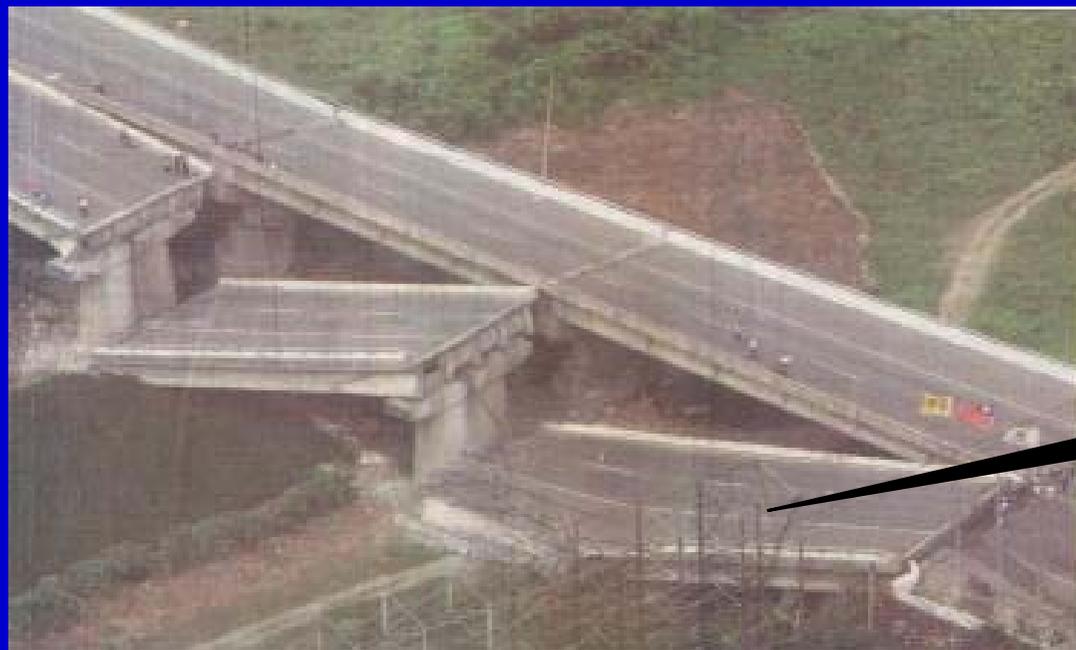
共十二层，第二层折断，
倒塌



房屋倒塌情况



整个大楼从楼梯间裂开



交通中断

水坝断裂



主要内容

- ✓ 6.1 概述
- ✓ 6.2 结构低周反复加载静力试验的加载制度
- ✓ 6.3 结构低周反复加载静力试验
- ✓ 6.4 计算机 - 加载器联机试验

6.1 概述

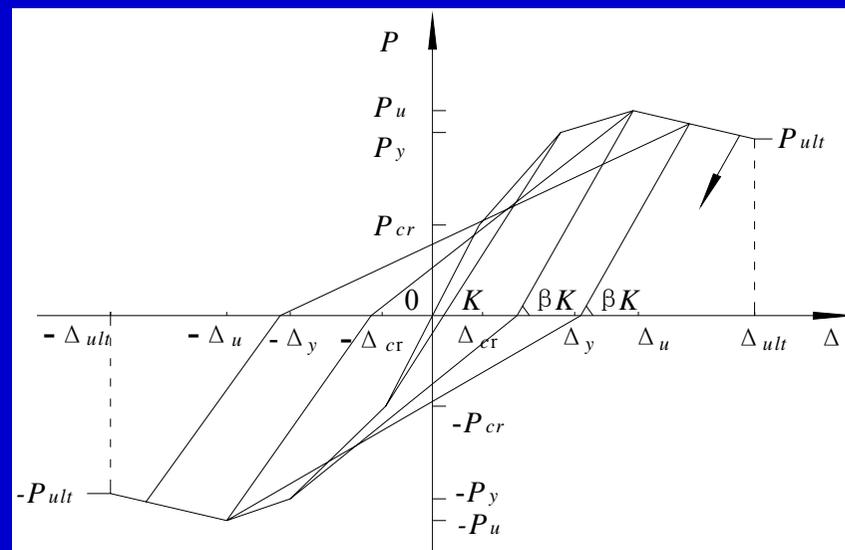
- ✓ 建筑结构抗震设计的基本概念：抗震延性的保证，包括抗震设计计算和抗震构造措施两部分。
- ✓ 三个水准的抗震要求，二阶段的抗震验算。
- ✓ 结构抗震性能研究的主要内容：地震荷载作用下结构的破坏机制、破坏形态、延性、耗能、强度等。
- ✓ 结构抗震性能研究的主要试验手段：
 - ◆ 伪静力试验
 - ◆ 伪动力试验
 - ◆ 振动台试验

} 本章内容

6.1 概述 (续)

✓ 结构低周反复加载静力试验的主要研究内容

- ◆ 恢复力模型：相当于结构的物理方程，常用M-N- ϕ 方程、M- ϕ 方程表示



- ◆ 抗震性能判定：强度、刚度、变形、延性、耗能等

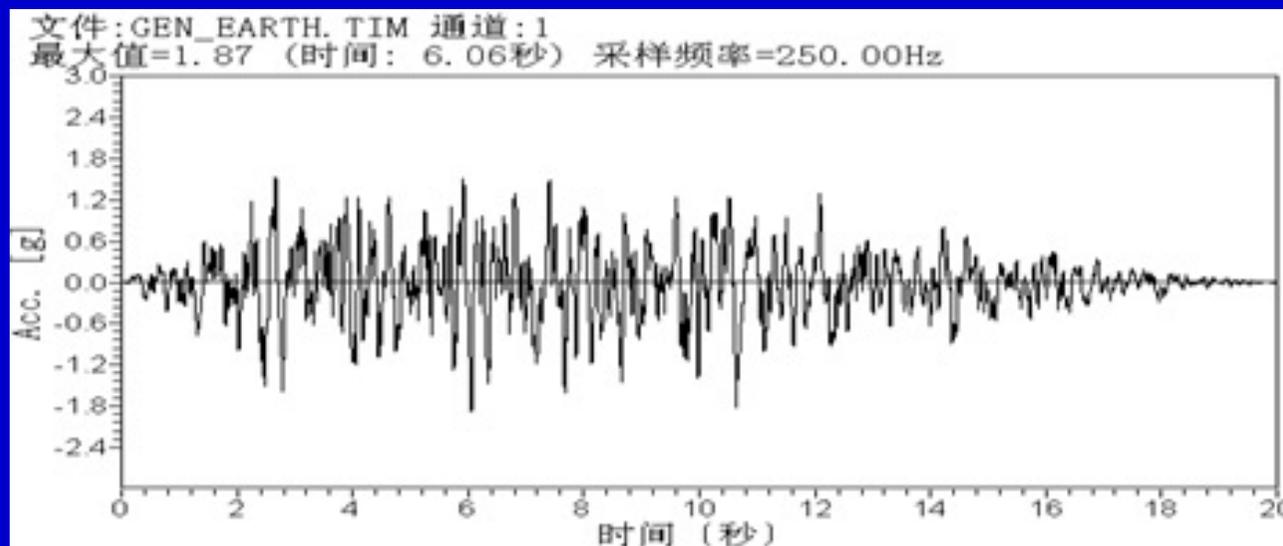
- ◆ 破坏机制研究：为抗震设计提供方法和依据

✓ 一般情况下低周反复加载静力试验结果偏于安全。

(除以抗震承载力调整系数 γ_{RE})

6.2 结构低周反复加载静力试验的加载制度

- ✓ 真实地震的位移时程曲线（多为加速度时程曲线）



（一）单向反复加载制度

- ✓ 常用的三种加载方法

①控制位移加载法；②控制荷载加载法；③控制荷载和位移混合加载法。

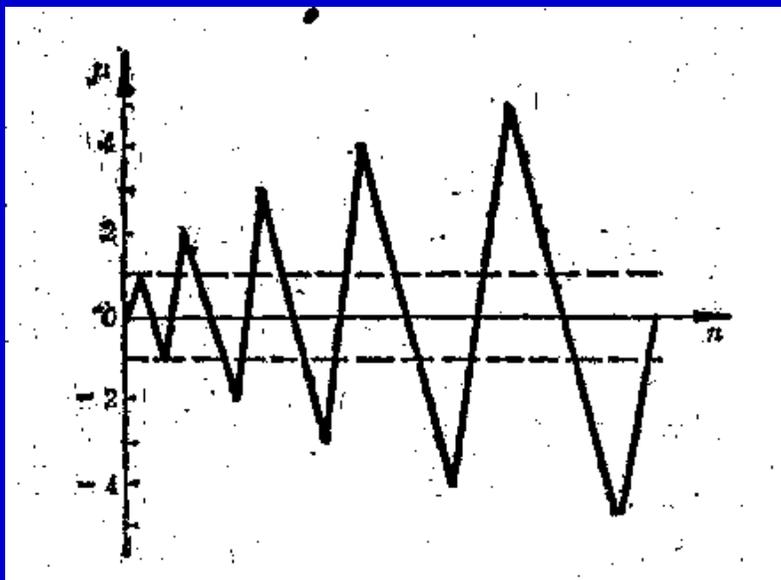
(一) 单向反复加载制度 (续)

1、控制位移加载法

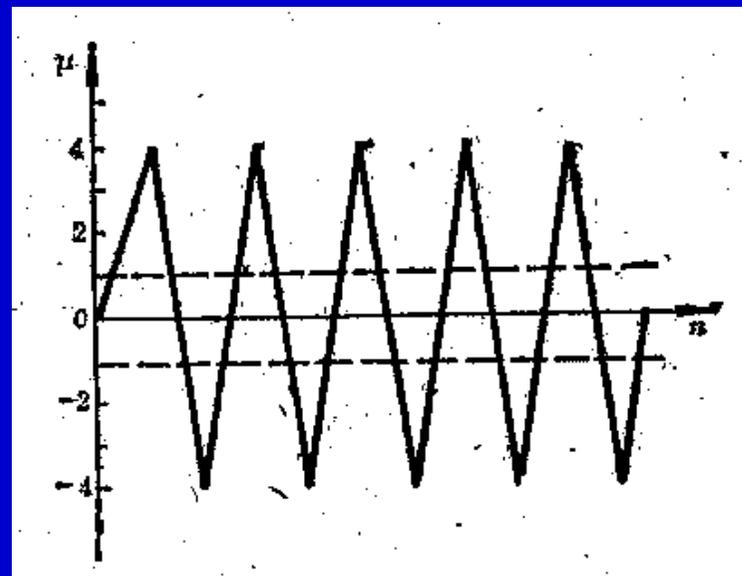
✓ 常以屈服位移或最大层间位移的某一百分比来控制加载

- ◆ 变幅加载：常作为探索性试验研究用（我国规范规定同一级荷载下重复三次）。
- ◆ 等幅加载：用于研究强度退化和刚度退化（规范规定不少于5次）。
- ◆ 变幅等幅混合加载：研究内容广，常用于综合性研究。

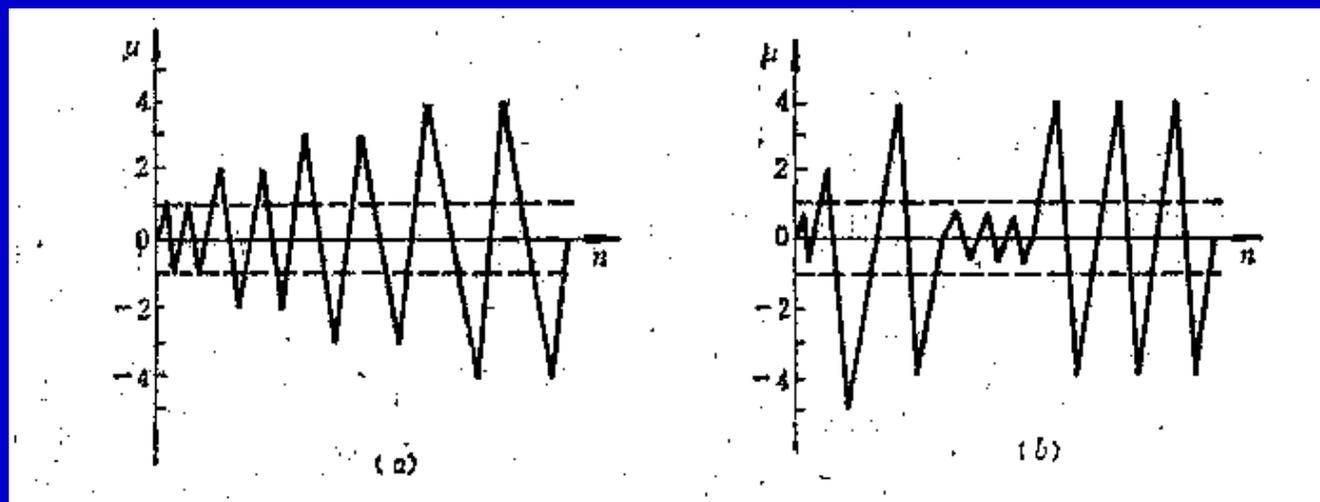
续



等幅加载制度



变幅加载制度



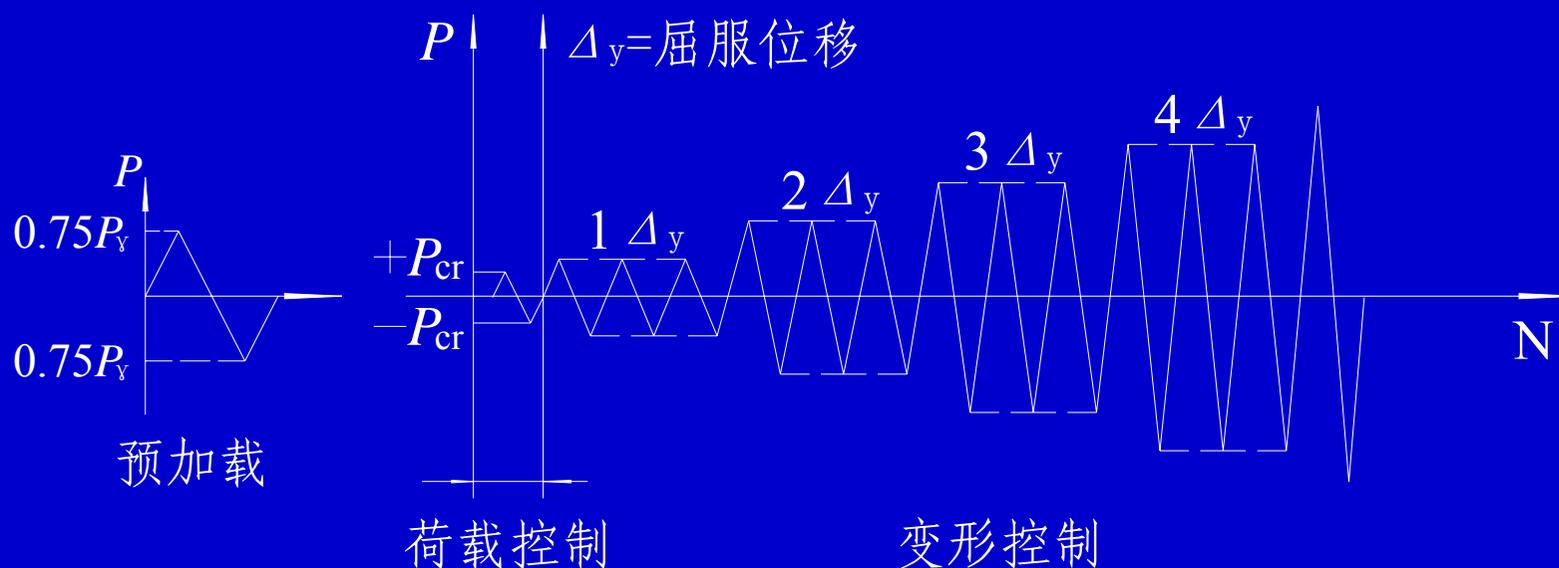
变幅等幅混合加载制度

(一) 单向反复加载制度 (续)

2、控制荷载加载法 (教材P138)

3、控制荷载和控制位移的混合加载法

✓ 我国规范规定的加载制度



(二) 双向反复加载制度

✓ 用于研究地震作用下空间结构的抗震性能

- ◆ 实际结构受力情况
- ◆ 结构计算模拟的选取

1、 X、 Y轴双向同步加载

2、 X、 Y轴双向非同步（异步）加载

6.3 结构低周反复加载静力试验

- ✓ 伪静力试验的特点：试验装置及加载设备简单、观测方便，但加载制度是人为确定的，与真实情况差异较大，且不能考虑应变速度及阻尼的影响，试验值偏低。

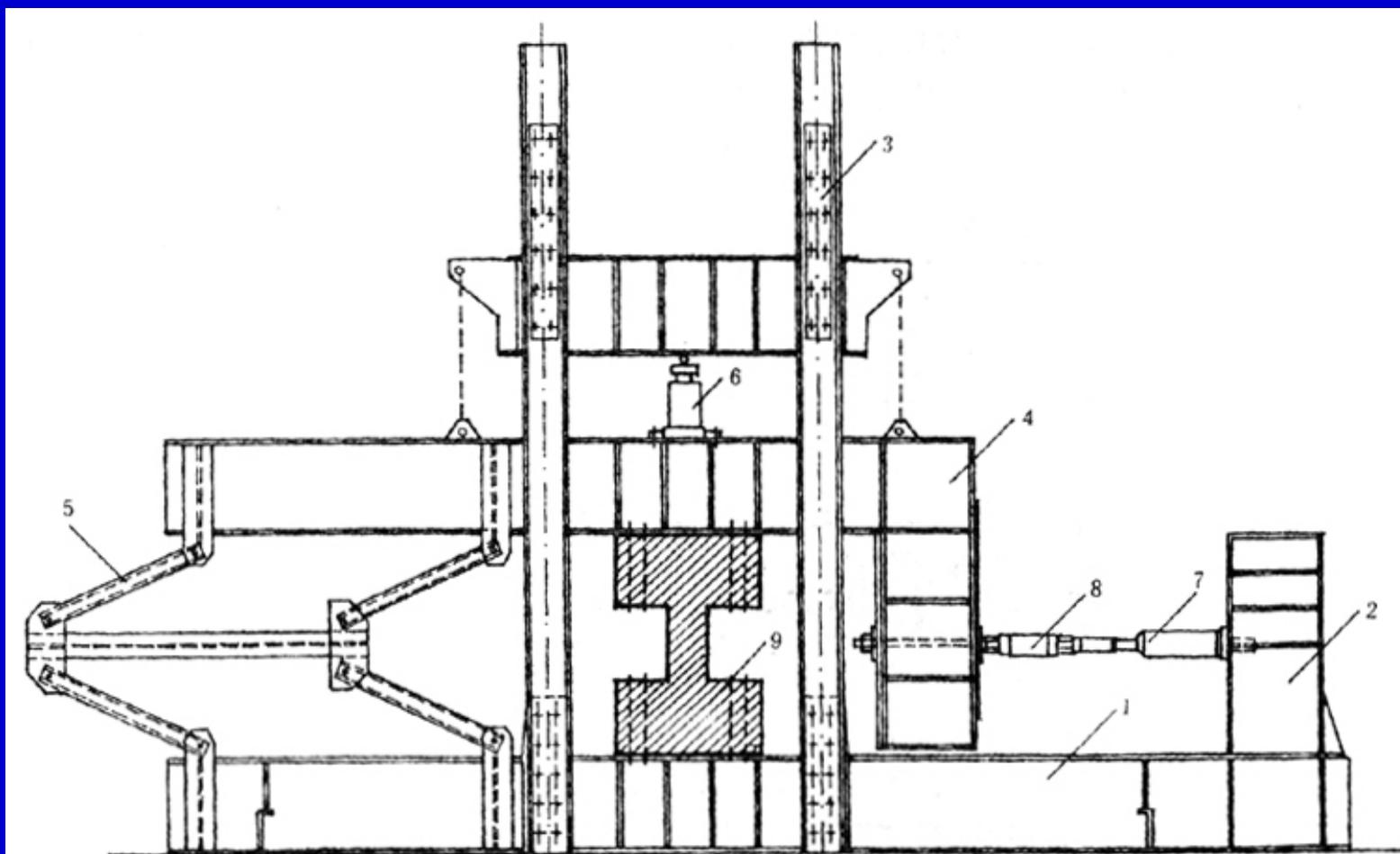
（一）砖石及砌块结构抗震性能研究

- ✓ 主要研究砌体结构的破坏机制、抗震性能及设计方法等。

(一) 砖石及砌块结构抗震性能研究 (续)

- 1、试件和边界条件的模拟：符合实际结构受力图式。
- 2、试验装置和加载设计
 - ✓ 墙体顶部能自由平移，避免竖向荷载产生水平约束。
 - ✓ 竖向荷载的施加需配置稳压装置。
 - ✓ 多个加载器的同步加载：液压加载器的优点，或采用多个分配梁式。
 - ◆ 建研式低周反复加载装置：钢横梁的水平移动（见后图）

续



1. 抗弯大梁； 2. 抗侧力支架； 3. 竖向荷载支承架； 4. Γ形刚架； 5. 四联杆机构；
6. 竖向荷载加载器； 7. 大冲程水平双作用加载器； 8. 荷载传感器； 9. 试件

日本建研式低周反复加载装置

(一) 砖石及砌块结构抗震性能研究 (续)

3、试验观测项目与测点布置

- ✓ 裂缝及初裂荷载：初裂荷载的判定（目测、应变片、曲线拐点）
- ✓ 破坏荷载
- ✓ 墙体位移和荷载变形曲线：消除支座位移影响、平面外偏心影响
- ✓ 应变测量：由于墙体（砖、砂浆）由两种材料组成，具有不均匀性，用大标距的电阻应变片或机械引伸仪测量，或大标距的位移计等

(二) 钢筋混凝土框架梁柱节点组合体的抗震性能 试验

- ✓ 框架节点复杂的受力特征（水平荷载下）：以抗剪为主。

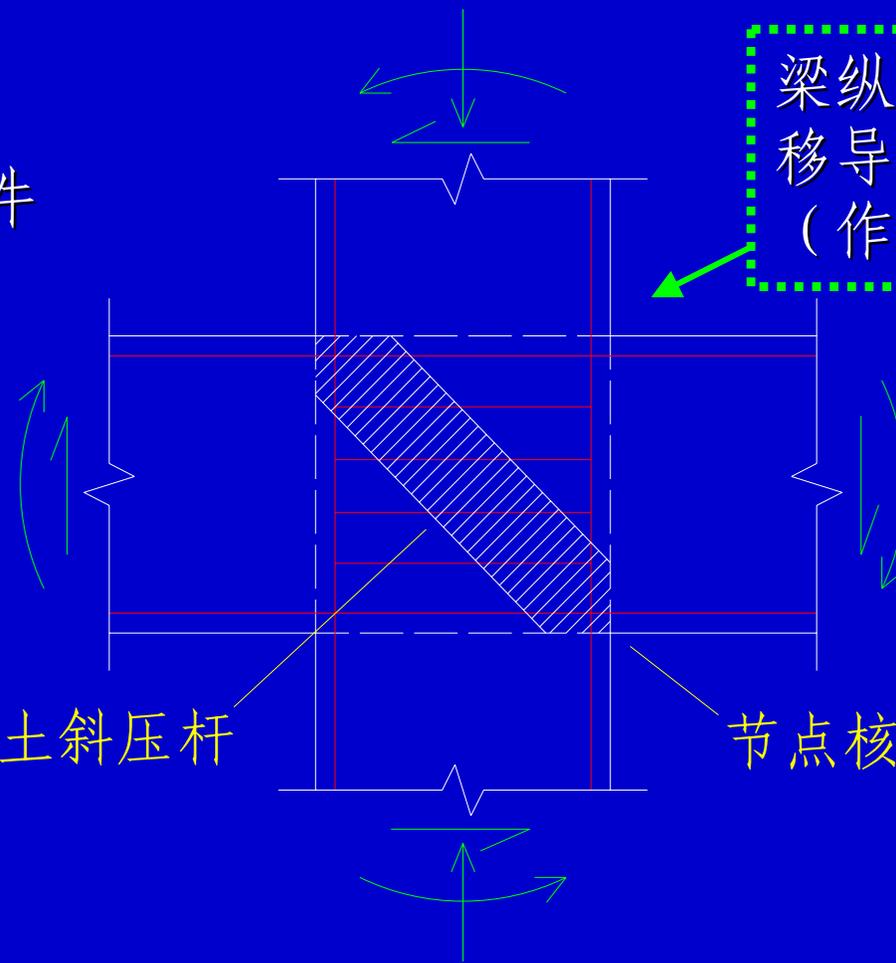
- ◆ 强节点弱构件
- ◆ 强剪弱弯
- ◆ 强柱弱梁

下柱塑性铰，下柱固定，反弯点法。

混凝土斜压杆

节点核心区

梁纵筋屈服内渗滑移导致节点转动（作为支座位移）



(二) 钢筋混凝土框架梁柱节点组合体的抗震性能 试验 (续)

1、试件和边界条件的模拟：十字型节点、上下左右反弯处截取试件

✓ 由于节点受力的复杂性，试件比例不少于1/2并辅以足尺试件。

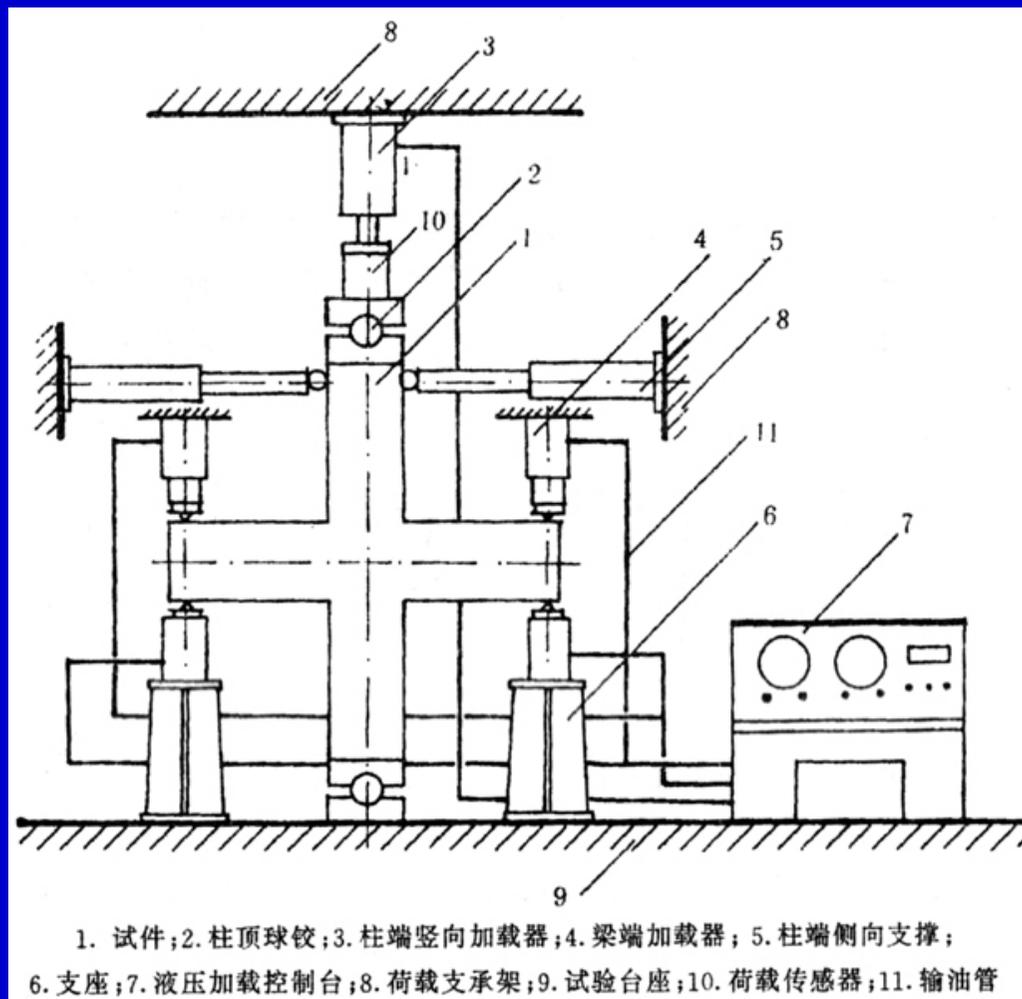
✓ 柱端加载方案和梁端加载方案：区别在于P- Δ 效应

研究柱端塑性铰

研究梁端塑性铰
和核心区抗剪

✓ X形试件：梁有轴力、柱轴力可变。

2、试验装置和加载设计



3、试验观测项目的测点布置 (教材P149-150)

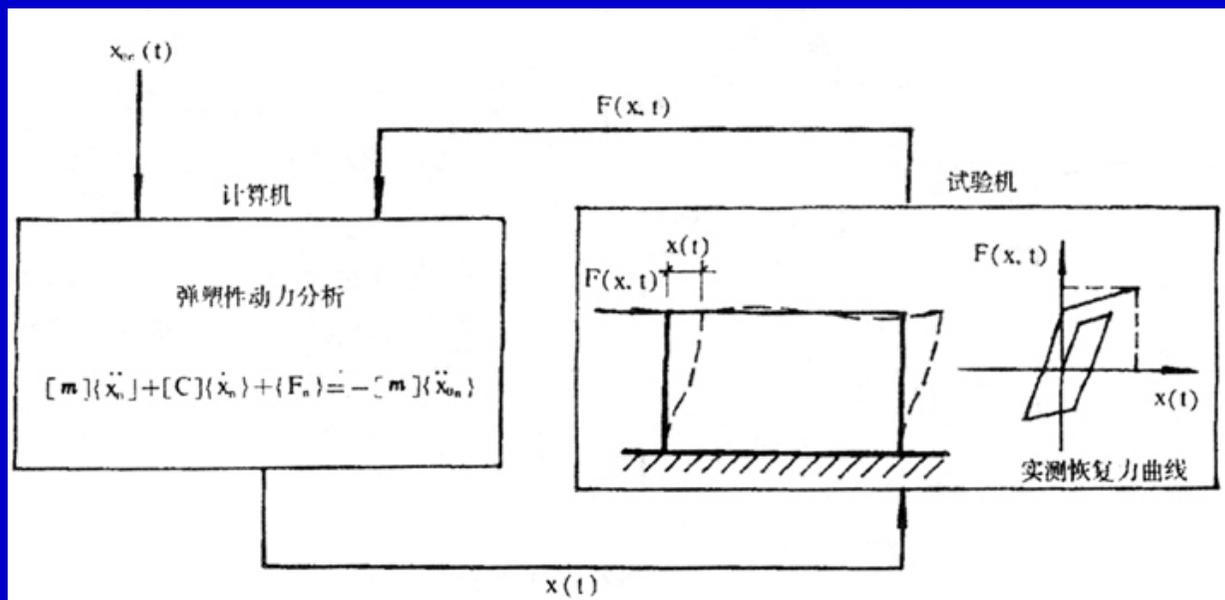
6.4 计算机—加载器联机试验

通过计算机分步求解结构非线性地震反应微分方程

- ✓ 即为伪（拟）动力试验，其实质就是按照某种确定性的地震反应进行加载。而由于结构的恢复力模型未知，运动方程无法求解，故采用“边试验、边求解”的方法分步得到实测的结构恢复力模型，然后可完成整个试验加载过程。
- ✓ 加载设备可利用伪静力试验设备，但必须可联机控制加载，即计算机控制的电液伺服加载系统（包含数个作动器，即加载器）。

6.4 计算机—加载器联机试验（续）

- ✓ 伪动力试验设备由电液伺服加载器和计算机两部分组成
 - ◆ 计算机：利用分步试验结果，求解动力方程。根据某一时刻的地面运动加速度计算结构位移，并以此控制加载系统。
 - ◆ 加载系统：完成伺服加载过程。



6.4 计算机—加载器联机试验（续）

1、伪动力试验的工作流程

① 在计算机系统中输入某一确定性的地震地面运动加速度（按时间分段）；

② 由计算机按输入的第几步的地面运动加速度 \ddot{x}_{on} ，求解第n+1步位移 x_{n+1} ；

③ 按位移 x_{n+1} 控制加载系统对结构加载；

④ 测量结构的恢复力 F_{n+1} ；

⑤ 重复上述步骤②—④，直到完成整个加载过程。

6.4 计算机—加载器联机试验（续）

2、伪动力试验的特点

✓ 优点：

- ① 适用于复杂结构的非线性地震反应分析，试验结果比较准确；
- ② 可以缓慢再现结构地震反应，便于观测；
- ③ 可进行真型或大比例尺的结构在确定性地震下的试验研究。

续前页

✓ 缺点:

- ① 不能实时再现真实地震反应，不能进行材料特性与时间有关的结构试验；
- ② 结构实际反应所产生的惯性力用加载器的荷载来代替，因此仅适用于离散质量分布的结构；
- ③ 计算机系统除进行运动方程的数值积分外，还需要准确控制加载器，精度方面很难实现；
- ④ 试验设备庞大，分析系统复杂，试验费用高。

6.4 计算机—加载器联机试验（续）

- ✓ 子结构的伪动力试验：
 - ◆ 国际发展新趋势，很有发展前途；
 - ◆ 可进行大型结构的真型试验；
 - ◆ 边界条件很难准确模拟。

- ✓ 七层钢筋混凝土框架足尺结构的伪动力试验（教材 P156-159）

思考题：

- 1、简述结构抗震性能研究的三种试验方法。
- 2、伪静力试验和伪动力试验是否属于静力试验？
- 3、单向反复加载方案有哪三种？
- 4、控制位移的单向反复加载方案可分为几种？
- 5、结构低周反复加载试验的特点是什么？
- 6、钢筋混凝土梁柱节点组合体试件低周反复静力加载试验中边界条件的模拟通常有哪两种加载方式，画出加载图示简图并说明各自特点？
- 7、如何布置框架节点低周反复加载试验的测点？
- 8、简述拟动力试验的工作流程。
- 9、拟动力试验的特点是什么？
- 10、试对比拟静力试验与拟动力试验。

课时安排

第一章	结构试验概论	(2课时)
第三章	结构试验的荷载设备	(2课时)
第四章	结构试验的数据采集和测量仪器	(2课时)
第二章	结构试验设计	(4课时)
第五章	结构单调加载静力试验	(2课时)
第六章	结构低周反复加载静力试验	(2课时)
第九章	结构试验现场检测技术	(1课时)
第十章	结构试验的数据处理	(1课时)

第九章

结构试验现场检测技术

主要内容

- ✓ 9.1 概述
- ✓ 9.2 混凝土结构现场检测技术
- ✓ 9.3 砖砌结构的现场检测技术
- ✓ 9.4 钢结构现场检测技术

9.1 概述

- ✓ 结构现场检测 → 结构可靠性鉴定
 - ◆ 结构现状及剩余寿命预测
 - ◆ 加固工程，改造工程（发达国家的热点，我国今后数十年的发展方向之一）
- ✓ 结构检测按破损情况分类
 - ◆ 破损检测：破损检测或荷载试验主要用于整体结构和构件承载力、变形的测定。这明显区别于无损和半破损检测。
 - ◆ 半破损检测
 - ◆ 非破损检测

} 半破损和非破损检测的一个重要特点是对比性和相关性，即事先须建立对检测结果的评价指标，目前尚依赖于有关检测规范、规程

9.1 概述（续）

✓ 结构检测的主要方法有

① 材料强度检测

混凝土结构 非破损检测：回弹法、超声法、回弹超声
综合法

半破损检测：钻芯法、拔出法

钢结构 非破损检测：表面硬度法

砌体结构 非破损检测：回弹法

半破损检测：扁顶法、原位轴压法、冲击
法、推出法

续



回弹仪



钻芯法

续前页

② 材料内部缺陷、探伤检测（均为非破损检测）

混凝土结构 混凝土：超声法

钢筋：半电池电位法

钢筋位置检测法

钢结构 超声法

9.2 混凝土结构现场检测技术

(一) 回弹法检测混凝土强度

- ✓ 回弹法定义：指在结构混凝土上测得回弹值和碳化深度值来评定混凝土强度的方法。回弹值越大、碳化深度越浅，混凝土强度越高。
- ✓ 回弹法的特点：仪器简单、使用方便、测试速度快、试验费用低、误差一般在 $\pm 15\%$ 以内。

(一) 回弹法检测混凝土强度 (续)

- ✓ 回弹法适用于龄期14~365天、C10~C50级、自然养护的普通混凝土，不适用于内部有缺陷或遭化学腐蚀、火灾、冻害的混凝土和其它的混凝土。
- ✓ 《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》
JGJ/T23-2001

(二) 超声脉冲法检测混凝土强度

- ✓ 基本原理：超声波在混凝土中传播时，其速度的平方与混凝土的弹性模量 E_c 成正比、与混凝土的密度成反比、与混凝土的强度成正比。
- ✓ 在普通混凝土检测中，常用500KHz以下的低频超声波，在探测大体积混凝土时用20~30KHz的超声波。

(三) 超声回弹综合检测混凝土强度

- ✓ 定义：是建立在超声传播速度和回弹值与混凝土抗压强度之间相互关系的基础上，以声速和回弹值综合反映混凝土抗压强度的一种非破损检测方法。首先在罗马尼亚提出，得到国际上的普遍认可。
- ✓ 特点：①检测精度优于回弹法和超声法；②既能反映混凝土的弹性性质（超声），又能反映混凝土的塑性性质（回弹）；③既能反映混凝土的表层状态（回弹），又能反映混凝土混凝土的内部构造（超声）。

(四) 钻芯法检测混凝土强度

- ✓ 定义：使用取芯钻机从被检测结构上直接钻取圆柱形的混凝土芯样，并由芯样的抗压强度推算结构混凝土的强度。
- ✓ 特点：①属于半破损检测方法，需及时修补；②试验结果直观可靠，从某种意义上比预留混凝土试块更能反映实际情况；③试验费用高，试验周期长（需取芯，芯样需处理）；④不宜用于混凝土强度低于C10的情况。

(五) 拔出法检测混凝土强度

- ✓ 定义（教材P225）：属于半破损检测法。
- ✓ 试验方法有两种：
 - ① 预埋法，也称无装法、LOK试验，适用于工程施工和验收
 - ② 后装法，也称CAPO试验，适用于已建结构检测
- ✓ 特点：能比较直接反映混凝土的强度，虽然仅仅测量表面以下一定深度，但比回弹法深，比超声法影响因素少，比取芯法方便、费用低、损伤范围小。

(六) 超声法检测混凝土缺陷

- ✓ 在施工验收、事故处理、加固改造和已建建筑物可靠性鉴定中，都必须进行混凝土缺陷和损伤检测。

1、混凝土裂缝检测

① 浅裂缝检测：对混凝土开裂深度小于或等于
500mm的裂缝检测

- ◆ 检测方法 平测法：结构裂缝部位只有一个可测表面
斜测法：结构裂缝部位有两个可测表面

② 深裂缝检测：对在大体积混凝土中预计裂缝宽度
>500mm的裂缝检测

- ◆ 钻孔探测 还可用于钻孔灌注桩的质量检验

(六) 超声法检测混凝土缺陷 (续)

2、混凝土内部空洞缺陷的检测

- ✓ 具体检测方法有：声速法、波形法、振幅法、频率法等。
- ✓ 有缺陷处：

变慢	波形畸变 首波滞后	减小	高频分量减少 低频分量增加
↑	↑	↑	↑

3、混凝土表层损伤的检测

- ✓ 混凝土结构由火灾、冻害、化学侵蚀引起的混凝土表层损伤，其损伤厚度可用表面平测法检测。
- ✓ 此外，超声法还可测定施工缝的质量、加固修补结构面质量、混凝土匀质性的检测。

(七) 混凝土结构钢筋位置和钢筋锈蚀的检测

1、钢筋位置的检测

- ✓ 钢筋位置测试仪：利用电磁感应原理，可以检测钢筋混凝土结构中钢筋的位置、直径和保护层厚度。
- ✓ 电磁感应检测适用于：配筋稀疏、保护层不太大、钢筋在同一平面内。

2、钢筋锈蚀的检测

- ✓ 检测方法：半电池电位法、双极法、磁差频率法。

混凝土结构检测方法的比较

试验方法	试验目的	破损情况	代表性	可靠性	主要限制条件
破坏荷载试验	构件强度和性能	试件破坏	优	高	必须从结构上取出，试验条件应与计算条件一致
超载试验	构件强度和性能	构件可能破坏	优	高	构件宜从结构上取出，试验条件与计算条件一致，当做原位试验时，应考虑相邻构件的影响
取芯试验	混凝土强度	应修补	良	高	取芯试件尺寸和分布有限制和要求
拔出试验	混凝土强度	应修补	接近表面	中	最小边距和构件厚度限制
超声波试验	混凝土强度、密实度、缺陷	无损伤	优	中	应做对比试验，被测面要处理
回弹试验	混凝土强度	无损伤	表面	低	有条件限制，并需测碳化深度
化学分析法	混凝土质量、配合比、水泥含量	微破损	接近表面	中	应有计划，分布曲样

9.3 砖砌体结构的现场检测技术

(一) 砖砌体强度的间接测定法

- ✓ 冲击法：适用于M5-M15的砂浆和MU5-35的砖块的抗压强度检测。
- ✓ 回弹法：利用专门的砖块回弹仪和砂浆回弹仪检测抗压强度。
- ✓ 推出法：通过测定水平砂浆的抗剪强度推算其抗压强度。

9.3 砖砌体结构的现场检测技术（续）

（二）砖砌体原位轴心抗压强度测定法

- ✓ 扁顶法：由扁式液压加载器量测，可以测定砌体抗压强度、原位工作应力、应力-应变曲线等。
- ✓ 原位轴压法：可以测定结构不受扰动情况下的抗压强度，结果较为可靠，而且试验对结构造成的局部损失易修复。

9.4 钢结构现场检测技术

(一) 钢材强度测定

- ✓ 表面硬度法：利用布式硬度计测定。

(二) 钢材和焊缝缺陷检测

- ✓ 超声法：能探测试件深处的缺陷，在钢材中可深达1.5m。频率较高（0.5-2MHz）
 - ◆ 脉冲反射法：又分为纵波探伤和横波探伤两种
 - ◆ 透射法
- ✓ 磁粉探伤：利用钢材或焊缝缺陷处磁力线发生偏转的原理。
- ✓ 射线探伤：利用钢材或焊缝缺陷处射线衰减较少的原理。

思考题:

- 1、超声回弹综合法中是否还要进行混凝土碳化深度的修正？为什么？
- 2、超声法检测混凝土强度，混凝土强度和超声波波速度关系是什么？
- 3、简述超声回弹综合法检测混凝土强度的工作原理以4、及测区的选择方法。
- 5、混凝土强度的局部破损检测技术有哪几种？各自特点？
- 6、简述混凝土内部缺陷的超声法检测技术。
- 7、阐述混凝土强度与缺陷的几种检测方法。
- 8、试对比混凝土内部钢筋位置和内部钢筋锈蚀的几种检测技术？
- 9、砌体结构强度的非破损检测技术有哪几种，原理是什么？
- 10、钢材强度测定方法及原理？

课时安排

第一章	结构试验概论	(2课时)
第三章	结构试验的荷载设备	(2课时)
第四章	结构试验的数据采集和测量仪器	(2课时)
第二章	结构试验设计	(4课时)
第五章	结构单调加载静力试验	(2课时)
第六章	结构低周反复静力加载试验	(2课时)
第九章	结构试验现场检测技术	(1课时)
第十章	结构试验的数据处理	(1课时)

第十章

结构试验的数据处理

主要内容

- ✓ 10.1 概述
- ✓ 10.2 数据的整理和换算
- ✓ 10.3 数据的统计分析
- ✓ 10.4 误差分析
- ✓ 10.5 数据的表达

10.1 概述

- ✓ 数据处理的内容和步骤
 - ◆ 原始数据的整理与转换
 - ◆ 数据的统计分析
 - ◆ 数据的误差分析
 - ◆ 数据的表达

10.2 数据的整理和换算

✓ 国家标准《数值修约规则》（一）

◆ 负数修约时，先将它的绝对值按上述规则修约后再加负号

◆ 一次修约，不得连续修约

数值运算时

加减：先加减运算，再修约

乘除：先乘除运算，再按最小有效位数修约

乘方、开方：同“乘除”运算

10.2 数据的整理和换算（续）

✓ 国家标准《数值修约规则》（二）

- ◆ 将数值修约成规定有效位数的数值
- ◆ 拟舍弃数字的最左一位数字小于5，则舍去
- ◆ 拟舍弃数字的最左一位数字大于等于5，但其后跟有并非全部为零的数字，则进1
- ◆ 拟舍弃数字的最左一位数为5，而右边无数字或皆为0时，若所保留的末位数字为奇数则进1，为偶数则舍去

10.2 数据的整理和换算（续）

- ✓ 数据的换算（教材P241-246）

10.3 数据的统计分析（教材P246-249）

- ✓ 平均值：算术平均值、几何平均值、加权平均值
- ✓ 标准差
- ✓ 变异系数
- ✓ 随机变量和概率分布

10.4 误差分析

- ✓ 误差的定义：真值与测量值的差值称为测量误差，简称误差
- ✓ 实际试验中，真值是无法确定的，常用平均值代替
- ✓ 绝对误差、相对误差，相对误差为绝对误差除以真值
- ✓ 误差的分类：系统误差，随机误差、过失误差

10.4 误差分析（续）

（一）误差的分类

1、系统误差（经常误差）

- ✓ 特点：误差值在整个测量过程中保持一定规律，而且是避免的
- ✓ 产生原因：测量方法、测量工具、环境、操作不当、主观性等
- ✓ 表示方法：准确度（表示系统误差的大小），它反映平均值 \bar{x} 的大小
- ✓ 处理办法：查明系统误差的原因，在测量中采取改进措施或在数据处理时对测量结果进行修正

(一) 误差的分类 (续)

2、随机误差 (偶然误差)

- ✓ 特点: 误差的绝对值和符号变化无常, 但当测量数据较多时, 随机误差的数值分布符合一定的统计规律, 一般是正态分布, 随机误差是不可避免的
- ✓ 产生原因: 测量仪器、方法和环境条件的随机变化等
- ✓ 表示方法: 精确度 (它与准确度是独立的, 反映标准差 σ 的大小)
- ✓ 处理办法: 对随机误差进行统计分析, 在数据处理时进行修正

(一) 误差的分类 (续)

3、过失误差 (粗差)

- ✓ 一般数值较大, 应予以剔除

(二) 误差计算

误差的平均值:
$$\bar{a} = \frac{1}{n}(a_1 + a_2 + \cdots + a_n) \quad a_i = x_i - \bar{x}$$

误差的标准差:
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n a_i^2}$$

误差的标准差:
$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{a}}$$

(三) 误差传递 (微分原理, 教材P251)

(四) 误差的检验

- ✓ 误差的检验: 区分误差的类型, 尽可能减小误差或计算中考虑误差

1、系统误差的发现和消除

- ✓ 系统误差有积累变化、周期变化、按复杂规律变化三种, 可通过数种不同的测量方法或同时用几种测量工具进行测量比较即可发现

(四) 误差的检验 (续)

2、随机误差：进行统计分析予以检验

3、异常数据的舍弃

✓ 教材P253，并参阅有关数据处理的专著

✓ 常用的过失误差判别范围和鉴别方法

◆ 3σ 法：误差服从正态分布，误差绝对值大于 3σ 的概率仅为 0.3%，大于应剔除该数据

◆ 肖维纳方法：进行 n 次试验，误差服从正态分布，误差绝对值大于 $\alpha \cdot \sigma (|x_i - \bar{x}| > \alpha \cdot \sigma)$ 的概率小于 $1/2n$ ，大于应剔除该数据

◆ 格拉布斯方法：以 t 分布为基础，某数据误差绝对值满足 $|x_i - \bar{x}| > T_0(n, \alpha) \cdot S$ 时，应剔除

10.5 数据的表达（教材P254-263）

- ✓ 表格方式：有汇总表格和关系表格两类
- ✓ 图象方式：曲线图、形态图、直方图、馅饼形图
- ✓ 函数方式：函数回归分析、系统参数识别

思考题:

- 1、什么是系统误差？其特点是什么？
- 2、什么是随机误差？其特点是什么？
- 3、过失误差产生的原因有哪些？在进行数据分析时应如何处理？
- 4、数据表达的方式包括哪些？

谢谢各位同学！

