

多媒体教学辅助教材

钢筋混凝土简支梁 加载试验模拟辅助教学软件

湖南大学土木工程学院

尚守平 彭 晖 刘兴彦 制作

中国建筑工业出版社

多媒体教学辅助教材

钢筋混凝土简支梁加载试验 模拟辅助教学软件

湖南大学土木工程学院

尚守平 彭 晖 刘兴彦 制作



中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土简支梁加载试验模拟辅助教学软件 / 尚
守平等制作. —北京: 中国建筑工业出版社, 2004

多媒体教学辅助教材

ISBN 7-112-06702-2

I. 钢… II. 尚… III. ①钢筋混凝土结构—简支
梁—结构荷载—试验—高等学校—教材 ②计算机辅助
教学—应用软件—高等学校—教材 IV. TU375.103

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 057568 号

**多媒体教学辅助教材
钢筋混凝土简支梁加载试验
模拟辅助教学软件**

湖南大学土木工程学院
尚守平 彭 晖 刘兴彦 制作

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店总店科技发行所发行
北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 2 字数: 46 千字
2005 年 4 月第一版 2005 年 4 月第一次印刷
印数: 1—3000 册 定价: 15.00 元(含光盘)

ISBN 7-112-06702-2
TU·5856 (12656)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本辅助教材主要包括一个 SSBCAI 软件（钢筋混凝土简支梁加载试验模拟辅助教学软件），能在 Windows 平台上运用动画、音频及视频等多媒体技术，模拟钢筋混凝土简支梁在两个对称集中力作用下受力变形的全过程。其中通过实时绘制荷载-挠度曲线等，能看出试验过程重要参数的变化规律，并对不同试验阶段进行分析，软件中内置六种简支梁典型破坏的真实试验视频，可以代替实际试验。为配合对试验的理解，本软件配有受弯构件的单调静力加载试验介绍，阐述试验方案设计、试验步骤等，并附有本软件的详细使用手册。（本书配光盘使用）

* * *

责任编辑：黎 钟

责任设计：崔兰萍

责任校对：黄 燕

目 录

第一部分 受弯构件的单调静力加载试验指导.....	1
一、试验目的	1
二、试验原理	2
三、试验设备	6
1. 荷载设备	6
2. 应变测量设备	8
3. 力传感器	11
4. 位移测量器	11
四、试验方案设计	14
1. 试件设计	15
2. 荷载设计	15
3. 观测设计	15
五、钢筋混凝土受弯构件试验步骤	17
第二部分 SSBCAI 软件使用手册	19
一、功能简介	19
二、界面介绍	19
三、使用指导	20
1. 使用试验模拟	20
2. 存储和访问数据	24
3. 其他功能	26

第一部分 受弯构件的单调静力加载试验指导

一、试验目的

结构试验是结构设计的重要组成部分，也是结构设计专业学生应该具备的专业技术基础知识。它的任务是使用仪器设备，利用各种实验技术为手段，通过有计划地对结构承受荷载后的性能进行观测和对测量结果（如应力、位移、疲劳寿命、振幅等）进行分析，达到对结构的工作性能和承载能力做出正确的评价和估计。此外，结构试验还是研究和发展结构理论的重要手段，为验证和发展结构的计算理论提供可靠的依据。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及至建立复杂结构体系的计算理论，都离不开试验研究。钢筋混凝土结构和砖石结构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。

静力试验是结构试验中最常见的基本试验，大部分建筑结构在工作时所承受的是静力荷载。如果试验的加载过程是从零开始一直逐步递增至结构或构件破坏，也就是在一个不长的时间内完成试验加载的全过程，则我们称它为结构单调加载静力试验。单调加载静力试验主要用于模拟结构承受静力荷载作用下的反应，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理。建筑结构中大量的基本构件试验主要是承受拉、压、弯、剪、扭等最基本作用力的梁、板、柱和砌体等一系列构件，通过单调加载静力试验能够研究在各种作用力单独或组合作用下构件的荷载和变形的关系。

钢筋混凝土受弯构件是土木结构中最普遍的一种构件，广泛应用于各种建筑结构和桥梁结构。掌握钢筋混凝土受弯构件的工作性能，了解其强度、抗裂度及各级荷载下的变形和裂缝开展情况，对于指导结构设计有重要的现实意义。

在受弯构件的教学试验中经常采用的一种荷载情况为两点对称加载（图 1-1），其特征为两个加载点对称布置在梁跨中点的两边，加载点中间的部分由于没有剪力的存在被称为纯弯段，而支座与加载点之间有弯矩和剪力共同作用的区域则被称为剪弯段。在进行两点对称加载的受弯构件加载试验时可通过其剪弯段观察剪力与弯矩共同作用的影响，而纯

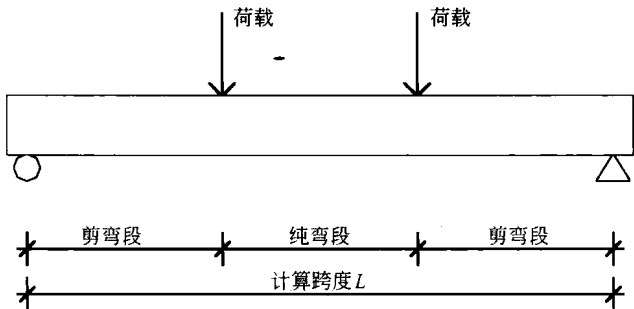


图 1-1 受弯构件的两点对称加载试验

弯段可以让试验者排除剪力的干扰，了解弯矩作用下截面的应力、应变分布情况以及验证平截面假定。

因此，两点对称加载的受弯试验是在建筑工程教学中应用最为普遍的教学试验。

二、试验原理

根据材料力学可以知道，材料为线弹性时，受弯构件截面的曲率和弯矩的关系为：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} = \frac{\bar{M}}{B}$$

式中， ρ 为曲率半径， E 为材料的弹性模量， I 为截面的惯性矩； $EI=B$ 为匀质弹性材料梁的抗弯刚度。这样，当受弯构件的截面和材料一定时，截面的抗弯刚度也一定，挠度与弯矩呈线性关系。

实际上，对于钢筋混凝土受弯构件来说，混凝土只在受力的最初阶段表现为弹性，其应力-应变曲线大部分为非线性，钢筋在达到屈服强度后其应力-应变曲线也不再为线性，因此钢筋混凝土远远不是一种线弹性材料，其材料性能具有极大的非线性。另外，混凝土的拉伸应变很小，钢筋混凝土受弯构件的受拉区混凝土在弯矩不大时就会开裂。随着弯矩的增大以及受拉区裂缝的不断出现与发展，受弯构件的截面抗弯刚度会随着受拉区混凝土逐步退出工作而降低。考虑以上的因素，钢筋混凝土梁的挠度与弯矩的关系是非线性的，其抗弯刚度显然不能简单地用 EI 这个常量来表示，需要根据弯矩大小、开裂与否等因素来推导钢筋混凝土受弯构件的刚度计算公式。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 通过考虑用裂缝位置与裂缝间部分截面钢筋应变与受压区混凝土应变的平均值来计算截面的曲率，从而计算截面抗弯刚度，推导出了计算钢筋混凝土受弯构件正截面短期抗弯刚度 B_s 的公式：

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}} \quad (1-a)$$

式中 γ_f 为 T 型、I 型截面受压翼缘面积与有效腹板面积之比，因此对于矩形截面的受弯构件来说，规范公式为：

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + 6\alpha_E \rho} \quad (1-b)$$

为便于计算，在公式中引入了开裂截面内力臂系数（取值为 0.87），为了反映裂缝对截面抗弯刚度的影响引入了钢筋应变不均匀系数 ψ 以及受压区边缘混凝土平均应变综合系数等系数。但这些系数都是针对使用荷载范围确定的，一般只适用于验算正常使用状态下的挠度，而全过程模拟软件中需要计算的荷载已超过了规范公式的适用范围，因此不能简单地采用规范公式。

由材料力学可知，衡量梁的弯曲变形程度的基本量应是梁的曲率，所以挠度与曲率存在着对应的关系。设梁的挠曲线方程为： $v=f(x)$ ，则根据材料力学的公式：

$$\varphi(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \left| \frac{d\theta}{ds} \right| = \frac{1}{[1 + (v')^2]^{\frac{3}{2}}} |v''| \quad (2)$$

式中 φ ——构件的曲率；
 ρ ——构件的曲率半径；

v ——挠度；

θ ——转角。

笔者考虑从挠度与曲率的关系着手，通过对曲率进行二重积分来求梁的挠度。

首先作如下假定：

(1) 在梁构件中沿轴线方向没有位移。实际情况中梁轴线在产生弯曲变形后，在梁的纵向也有线位移；但我们软件考虑的是细长梁小变形的情况，梁的挠度远小于跨长，横截面形心沿轴方向的线位移与挠度相比属于高阶微量，可略去不计。

(2) 在整个纯弯段截面中和轴相等，即为一直线，剪弯段上在梁开裂以后，由于裂缝的伸展，梁的中和轴是一条有起伏的曲线，但为了简化计算，可以认为梁的中和轴是一条平坦的曲线。

(3) 梁的刚度在整个跨度上是相等的。由于混凝土为弹塑性材料，再加上裂缝的影响，沿跨度各截面钢筋的应力和应变、混凝土的应力和应变、截面的曲率、刚度都是不同的。为了简化，及考虑到剪弯段剪切变形的影响，可以认为梁构件是通长等刚度的。这样，在纯弯段梁的曲率是一个常数，在剪弯段梁的曲率呈线性变化。

作出上述假定后，我们可以对公式(2)中的曲率进行二重积分，从而求出挠度。这样，确定荷载-挠度对应关系的工作就转变成为求一定荷载作用下沿构件长度方向的截面曲率分布，即弯矩-曲率的对应关系。首先，必须通过图 1-2 了解截面的应力-应变分布情况：

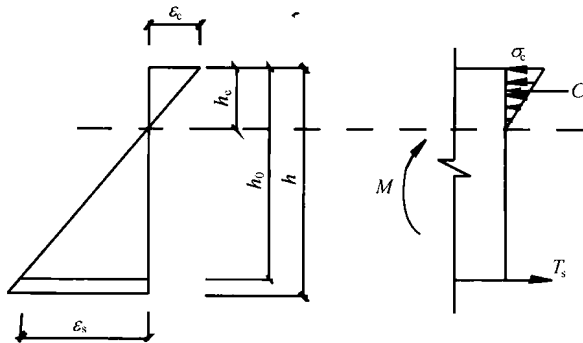


图 1-2 截面应力-应变示意

如图 1-2 所示，由平截面假定可以得到： $\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{h_0}$ ，所以只要确定受压混凝土边缘纤维的压应变和钢筋的拉应变，就可确定梁的曲率，从而求出梁的挠度。截面上存在着两个平衡关系：内力平衡与几何应变协调。内力平衡指受压区混凝土上的合压力 C 与钢筋上的合拉力 T_s 平衡（实际还有混凝土受拉区的合拉力，不过开裂后混凝土基本不承担拉力，因此不予考虑），即 $C = T_s$ 。几何应变协调指根据平截面假定，混凝土受压区边缘纤维应变 ϵ_c 与钢筋应变 ϵ_s 及受压区高度 h_c 之间存在如 $\frac{\epsilon_c}{\epsilon_s} = \frac{h_c}{h_0 - h_c}$ 的等式关系。根据我国《混凝土结构设计规范》采用的混凝土应力-应变关系曲线（RUSCH 曲线）对受压区进行积分，混凝土合压力 C 可表示为 ϵ_c 的函数，钢筋合拉力是 ϵ_s 的函数，因此等式 $C = T_s$ 可以转化为 ϵ_c 与 ϵ_s 之间的等式。这样，我们可以考虑通过这两个等式求解出 ϵ_c 与 ϵ_s 之间的关系式。当给 ϵ_c 一个确定的值时，可以求得与之对应的 ϵ_s ，进而确定与之对应的曲率与

弯矩。这样，我们就得到了一定截面的弯矩-曲率关系。

为了求出简支梁纯弯段与剪弯段的曲率，做如下假定：

(1) 截面变形符合平截面假定。

(2) 受力钢筋与混凝土之间以及碳纤维与混凝土之间没有滑移，应力-应变曲线连续。对于预应力碳纤维布加固的受弯构件，由于不容易发生粘结破坏，这一假定较非预应力碳纤维布加固的受弯构件要更为准确。

(3) 钢筋按理想弹塑性材料不考虑其强化部分提高的强度，则其应力 σ_s 与应变 ϵ_s 的关系为：

$$\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s \quad (\epsilon_s \leq \epsilon_y) \quad (3-a)$$

$$\sigma_s = \sigma_y \quad (\epsilon_s > \epsilon_y) \quad (3-b)$$

(4) 混凝土采用上升段-水平段两端曲线，其应力 σ_c 与应变 ϵ_c 的关系为：

$$\sigma_c = \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \cdot \sigma_0 \quad (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0) \quad (4-a)$$

$$\sigma_c = \sigma_0 \quad (\epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \quad (4-b)$$

式中， ϵ_c 为混凝土受压区边缘应变， ϵ_0 取为 0.002， ϵ_{cu} 取为 0.0033。

笔者根据上述假定及上述方法，推导出矩形截面梁的曲率和挠度公式如下：

当 $\epsilon_c < \epsilon_0$ 时，有 $\epsilon = \frac{\epsilon_c}{h_c} x$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] = \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x \right)^2 \right] \\ F_c &= \int_0^{h_c} \sigma \cdot dx = b \int_0^{h_c} \sigma_0 \cdot \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x \right)^2 \right] dx \\ &= b \sigma_0 \int_0^{h_c} \left[\frac{2 \epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x - \frac{\epsilon_c^2}{\epsilon_0^2 h_c^2} x^2 \right] dx \\ &= b \sigma_0 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x^2 - \frac{\epsilon_c^2}{3 \epsilon_0^2 h_c^2} x^3 \right) \Big|_0^{h_c} \\ &= b \sigma_0 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} h_c^2 - \frac{\epsilon_c^2}{3 \epsilon_0^2} h_c^3 \right) \\ &= b \sigma_0 \left(\frac{\epsilon_c h_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2 h_c}{3 \epsilon_0^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

当 $\epsilon_c > \epsilon_0$ 时，

$$\begin{aligned} \sigma &= \begin{cases} \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right] & \epsilon < \epsilon_0 \\ \sigma_0 & \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \\ F_c &= \int_0^{h_c} \sigma \cdot dx = b \int_0^{\frac{\epsilon_0 h_c}{\epsilon_c}} \sigma dx + b \int_{\frac{\epsilon_0 h_c}{\epsilon_c}}^{h_c} \sigma_0 dx \\ &= b \int_0^{\frac{\epsilon_0 h_c}{\epsilon_c}} \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x \right)^2 \right] dx + b \int_{\frac{\epsilon_0 h_c}{\epsilon_c}}^{h_c} \sigma_0 dx \\ &= b \sigma_0 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 h_c} x^2 - \frac{\epsilon_c^2}{3 \epsilon_0^2 h_c^2} x^3 \right) \Big|_0^{\frac{\epsilon_0 h_c}{\epsilon_c}} + b \sigma_0 x \Big|_{\frac{\epsilon_0 h_c}{\epsilon_c}}^{h_c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= b\sigma_0 \left(\frac{\epsilon_0 h_c}{\epsilon_c} - \frac{\epsilon_0 h_c}{3\epsilon_c} \right) + b\sigma_0 h_c - b\sigma_0 \frac{\epsilon_0 h_c}{\epsilon_c} \\
&= b\sigma_0 h_c - b\sigma_0 \frac{\epsilon_0 h_c}{3\epsilon_c}
\end{aligned} \tag{6}$$

式中 b ——梁宽；

σ_0 ——混凝土峰值压应力；

ϵ_0 ——混凝土峰值压应力对应的压应变；

ϵ_c ——给定的混凝土压应变；

h_c ——受压区高度。

$$\begin{aligned}
&\text{由 } \Sigma N = 0 \Rightarrow F_c = F_s \Rightarrow b\sigma_0 h_c \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{3\epsilon_0^2} \right) = \epsilon_s E_s A_s \left. \vphantom{\begin{aligned} &\text{平截面假定} \Rightarrow \frac{\epsilon_c}{\epsilon_s} = \frac{h_c}{h_0 - h_c} \Rightarrow \epsilon_s = \frac{h_0 - h_c}{h_c} \epsilon_c \end{aligned}} \right\} \Rightarrow \\
&\left\{ \begin{aligned} h_c &= \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4ABh_0}}{2A} \\ \epsilon_s &= \frac{2Ah_0 + B - \sqrt{B^2 + 4ABh_0}}{-B + \sqrt{B^2 + 4ABh_0}} \epsilon_c \end{aligned} \right. \quad \left(\epsilon_c < \epsilon_0, \epsilon_s < \frac{f_y}{E_s} \text{ 时} \right) \tag{7-a}
\end{aligned}$$

$$\text{式中 } A = b\sigma_0 \left(\frac{3\epsilon_c \epsilon_0 - \epsilon_c^2}{3\epsilon_0^2} \right) \quad B = \epsilon_c E_s A_s$$

$$\varphi = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{h_0} = \frac{\epsilon_c \left[1 + \frac{2Ah_0 + B - \sqrt{B^2 + 4ABh_0}}{-B + \sqrt{B^2 + 4ABh_0}} \right]}{h_0} \tag{7-b}$$

$$\begin{aligned}
&\text{由 } \Sigma N = 0 \Rightarrow F_c = F_s \Rightarrow b\sigma h_c - b\sigma_0 h_c \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c} = \epsilon_s E_s A_s \left. \vphantom{\begin{aligned} &\epsilon_s = \frac{h_0 - h_c}{h_c} \epsilon_c \end{aligned}} \right\} \Rightarrow \\
&\left\{ \begin{aligned} h_c &= \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4ABh_0}}{2A} \\ \epsilon_s &= \frac{2Ah_0 + B - \sqrt{B^2 + 4ABh_0}}{-B + \sqrt{B^2 + 4ABh_0}} \epsilon_c \end{aligned} \right. \quad \left(\epsilon_c > \epsilon_0, \epsilon_s < \frac{f_y}{E_s} \text{ 时} \right) \tag{8-a}
\end{aligned}$$

$$\text{式中 } A = b\sigma_0 \left(\frac{3\epsilon_c - \epsilon_0}{3\epsilon_c} \right), B \text{ 同 } \epsilon_c < \epsilon_0 \text{ 时情况}$$

$$\varphi = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{h_0} = \frac{\epsilon_c \left[1 + \frac{2Ah_0 + B - \sqrt{B^2 + 4ABh_0}}{-B + \sqrt{B^2 + 4ABh_0}} \right]}{h_0} \tag{8-b}$$

当 $\epsilon_c < \epsilon_0$ ，且 $\epsilon_s > \frac{f_y}{E_s}$

$$\begin{aligned}
&b\sigma_0 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{3\epsilon_0^2} \right) h_c = f_y A_s \\
&h_c = \frac{f_y A_s}{b\sigma_0 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{3\epsilon_0^2} \right)} \tag{9-a}
\end{aligned}$$

$$\epsilon_s = \frac{h_0 - h_c}{h_c} \epsilon_c = \frac{b\sigma_0 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{3\epsilon_0^2} \right) h_0 - f_y A_s}{f_y A_s} \epsilon_c \quad (9-b)$$

$$\varphi = \frac{\epsilon_s + \epsilon_c}{h_0} = \frac{\left[\frac{b\sigma_0 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{3\epsilon_0^2} \right) h_0 - f_y A_s}{f_y A_s} + 1 \right] \epsilon_c}{h_0} \quad (9-c)$$

当 $\epsilon_c > \epsilon_0$ ，且 $\epsilon_s > \frac{f_y}{E_s}$

$$\begin{aligned} b\sigma_0 \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c} \right) h_c &= f_y A_s \\ h_c &= \frac{f_y A_s}{b\sigma_0 \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c} \right)} \end{aligned} \quad (10-a)$$

$$\epsilon_s = \frac{h_0 - h_c}{h_c} \epsilon_c = \frac{b\sigma_0 \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c} \right) h_0 - f_y A_s}{f_y A_s} \epsilon_c \quad (10-b)$$

$$\varphi = \frac{\epsilon_s + \epsilon_c}{h_0} = \frac{\left[\frac{b\sigma_0 \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c} \right) h_0 - f_y A_s}{f_y A_s} + 1 \right] \epsilon_c}{h_0} \quad (10-c)$$

根据假定，对细长梁来说，其挠曲线是平坦的曲线，因此 v' 是一个很小的量， $v' \times v'$ 与 1 相比十分小，可忽略不计。故式 (2) 又可近似地写为：

$$\varphi(x) = \frac{1}{\rho(x)} = |v'|$$

根据在纯弯段上梁的曲率不变（见图 1-3），在剪弯段上曲率呈线性变化的假定，设 x 轴为从左到右，在纯弯段 $f'' = \varphi_c$ ，在左边的剪弯段 $f'' = \frac{\varphi_c x}{a}$ ，在右边的剪弯段 $f'' = \frac{(L-x)\varphi_c}{a}$ ；对上述三段曲线分别进行二重积分，根据 $x=0$ ， $x=a$ ， $x=L-a$ ， $x=L$ 处的边界条件，可以求出它们各自的挠度曲线：

$$\begin{aligned} f &= -\frac{\varphi}{2} x^2 + \frac{L}{2} \varphi x - \frac{\varphi a^2}{6} & (0 < x < a) \\ &= -\frac{\varphi}{6a} x^3 + \frac{L-a}{2} \varphi x & (a < x < L-a) \\ &= -\left(\frac{3L-x}{6a} \right) \varphi x^2 + \left(\frac{L^2}{3a} + \frac{(L-a)^3 + a^3}{6aL} \right) \varphi x - \frac{(L-a)^3}{6a} \varphi - \frac{\varphi a^2}{6} & (L-a < x < L) \end{aligned}$$

三、试验设备

1. 荷载设备

结构试验为模拟结构在实际受力工作状态下的结构反应，必须对试验对象施加荷载，所以结构的荷载试验是结构试验的基本方法。试验用的荷载形式、大小、加载方式等都是根据试验的目的和要求，以如何能更好地模拟原有荷载等因素来选择。

产生荷载的方法与加载设备有很多种类：在静力试验中有利用重物直接加载或通过杠

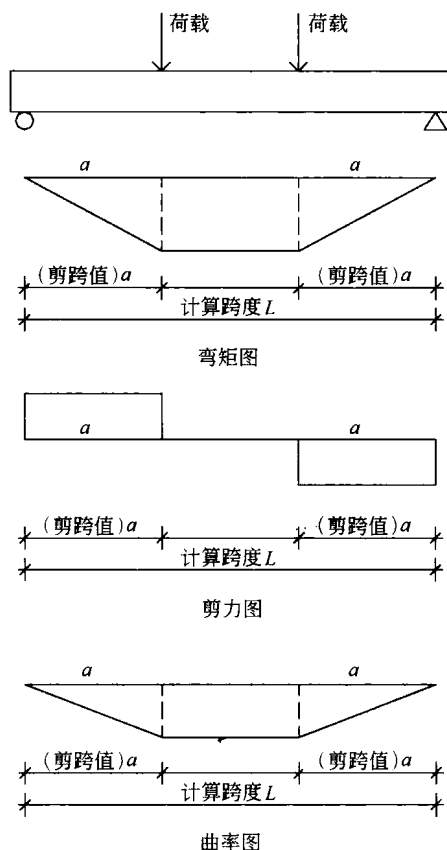


图 1-3 两点对称加载试验内力与变形

杆作用的间接加载的**重力加载方法**，有利用液压加载器（千斤顶）和液压试验机等的**液压加载方法**，有利用绞车、定动滑轮组、弹簧和螺旋千斤顶等机械设备的**机械加载法**，以及利用压缩空气或真空作用的**特殊加载方法**等。在动力试验中可以利用惯性力或电磁系统激振；比较先进的设备是由自动控制、液压和计算机系统相结合而组成的电液伺服加载系统和由此作为振源的地震模拟振动台加载设备等；此外人工爆炸和利用环境随机激振（脉动法）的方法也开始广泛应用。这里主要介绍钢筋混凝土受弯构件常用的加载设备：螺旋千斤顶和液压加载设备。

螺旋千斤顶是利用齿轮蜗杆机构传动的原理，使用时用测力计测定其加载值。它用于对结构施加变形荷载，设备简单，使用方便。当试验规模较小时，是一种理想的加载设备。

液压加载也是结构试验中应用得比较普遍的一种加载方法。它的最大优点是利用油压使液压加载器（千斤顶）产生较大的荷载，试验操作安全方便。特别是对于大型结构试验，当要求荷载点数多、吨位大时更为合适。

液压加载设备一般由油泵、管路系统、操纵台、千斤顶、加载架和试验台组成。所用的千斤顶又称为液压加载器，是液压加载设备中的一个主要部件。其主要工作原理是用高压油泵将具有一定压力的液压油压入液压加载器的工作油缸，使之推动活塞，对结构施加荷载，荷载值由油压表读数和加载器活塞受压底面积求得，也可由液压加载器与荷载承力

架之间所设的测力计直接测读；或用传感器将信号输给电子秤显示或由记录器直接记录。使用液压千斤顶加载时，最好配用荷载维持器，否则试件产生较大变形时，很难保持所需要的荷载值。试验规模较小时，可以使用手动液压千斤顶和用一个刚度很大的梁代替试验台座。

2. 应变测量设备

应力测量是结构试验中很主要的内容。了解应力沿构件的分布，特别是了解结构危险截面处的应力分布及最大应力值，对于建立强度计算理论，或验证设计是否合理、计算方法是否正确，都有很直接的价值。利用所测的应力资料还可直接了解结构的工作状态和强度储备。直接测量应力比较困难，目前还没有较好的方法而常常借助于测量应变值后通过材料的应力-应变关系将应变换算为应力值。所以应力测量往往是应变测量。

应变的定义是单位长度上的变形（拉伸、压缩和剪切变形），在结构试验中，可以用两点之间的相对位移近似地表示两点之间的平均应变。设两点之间的距离为 L （称为标距），被测物体发生变形后，两点之间有相对位移 ΔL ，则在标距内的平均应变 ϵ 为 $\Delta L/L$ ， ΔL 是以两点之间的距离增加为正，表示得到拉应变，以减少为负，表示得到压应变；测出的结果是标距范围内的平均应变。因此，对于应力梯度较大的结构及非均质材料，应注意应变计标距 L 的选择。

应变计的种类很多，用得最多的是电阻应变片。电阻应变片是将应变这一非电参量转换为电参量——电阻的变化，从而将电测法引进结构试验，使结构试验的量测技术发生了质的变化。由于电子仪器的高度发展，使电测法不仅具有精度高、灵敏度高、可远距离测量、便于多点测量、能快速采集数据和自动记录等优点，而且便于将量测信号和计算机联接，为用计算机控制试验和用计算机分析处理数据创造了条件。

(1) 应变片的工作原理

由物理学可知，金属电阻丝的电阻为

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

式中 R ——电阻；

ρ ——电阻率 ($\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$)；

l ——电阻丝长度 (m)；

A ——电阻丝面积 (mm^2)。

当电阻丝受到拉伸或压缩后，相应的电阻变化为：

$$\begin{aligned} dR &= \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \\ &= \left(\frac{\rho}{A}\right) dl - \left(\frac{\rho l}{A^2}\right) dA + \left(\frac{l}{A}\right) d\rho \\ \frac{dR}{R} &= \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \end{aligned}$$

以 $\frac{dl}{l} = \epsilon$

$$\frac{dA}{A} = -2\mu\epsilon$$

将 $\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V} = c(1-2\mu) \frac{dl}{l}$ 代入, 得

$$\frac{dR}{R} = [1 + 2\mu + c(1 - 2\mu)]\epsilon$$

$$\frac{dR}{R} = K_0 \epsilon$$

式中 V ——导线体积;

c ——由材料成份确定的常数;

μ ——电阻丝材料的泊桑比;

K_0 ——电阻丝的灵敏系数。

对某一种金属材料而言, μ 、 c 为定值, K_0 为常数。 $dR/R = K_0 \epsilon$ 就是利用电阻丝测量应变的理论根据。当金属电阻丝用胶贴在构件上, 可以认为它和构件共同变形时, ϵ 即代表构件的应变。 $dR/R = K_0 \epsilon$ 则说明电阻丝感受的应变和它的电阻相对变化成线性关系。这也是非电量 ϵ 转换为电量——电阻值的相对变化 ($\Delta R/R$) 的转换关系。

(2) 电阻应变片的构造

电阻丝一般做成栅状。基底使电阻丝和被测构件之间绝缘并使丝栅定位。覆盖层保护电阻丝免受划伤并避免丝栅间短路。用作应变片的电阻丝是直径仅为 0.025mm 左右的镍铬或铜细丝, 极细弱, 需用引出线作为电阻丝和量测导线连接的过渡。

电阻应变片的性能指标一般有几项:

1) 电阻值 $R(\Omega)$ 一般应变仪均按 120 Ω 设计, 应变片的电阻值一般也为 120 Ω 。选用时, 应考虑与应变仪配合。

2) 标距 l 即敏感栅的有效长度。用应变片测得的应变值是整个标距范围的名义平均应变, 应根据试件测点处应变梯度的大小来选择应变片的标距。

3) 灵敏系数 K 表示单位应变引起应变片的电阻变化。应使应变片的灵敏系数与应变仪的灵敏系数设置相协调, 如不一致时应应对测量结果进行修正。

4) 应变极限 应变片保持线性输出时所能量测的最大应变值; 除取决于金属电阻丝的材料性质外还和制作及粘贴用胶有关, 一般情况下为 (1~3)% 左右。

5) 机械滞后 试件加载和卸载时应变片 ($\Delta L/L$)- ϵ 这一特性曲线不重合的程度。

6) 零飘 在恒定温度环境中电阻应变片的电阻值随时间的变化。

7) 蠕变 在恒定的荷载和温度环境中, 应变片电阻值随时间的变化。

其他还有横向灵敏系数、温度特性、频响特性、疲劳寿命、绝缘电阻等性能的要求。横向灵敏系数指应变片对垂直于其主轴方向应变的响应程度。此值将影响对主轴方向量测的准确性, 现已可从改进电阻应变片的形状等方面使横向灵敏度减小到对量测值无影响的程度, 如箔式应变片和短接式应变片的横向灵敏度接近于零。应变片的温度特性指金属电阻丝的电阻随温度而变化以及因电阻丝和被测试件材料之间线膨胀系数不同引起电阻值变化所产生的虚假应变, 又称应变片的热输出。由此引起的测试误差较大, 可在量测线路中接入温度补偿片来消除这种影响。应根据每批电阻应变片的工作指标对其名义值的偏差程度将电阻应变片分成等级; 使用时, 根据试验量测的精度要求选定所需电阻应变片的等级。

电阻应变片的种类很多, 按敏感栅的种类划分, 有: 丝绕式、箔式、半导体等; 按基底材料划分, 有: 纸基、胶基等; 按使用极限温度划分, 有: 低温、常温、高温等。箔式

应变片是在薄胶膜基底上胶合金薄膜，然后通过光刻技术制成，具有绝缘度高、耐疲劳性能好、横向效应小等特点，但价格较高。丝绕式多为纸基，虽有防潮性能较差、耐疲劳性能稍差、横向效应较大等缺点，但价格较低，且易粘贴，可用于一般的静力试验。

用应变片测量试件等的应变，应该使应变片与被测物体变形一致，才能得到准确的应变测量结果。通常采用粘结剂把应变片粘贴在被测物体上，粘贴的好坏对测量结果影响很大。首先，贴片用的粘结剂应有足够的抗剪强度，能有效传递应力。此外，粘结剂应具有绝缘性能良好，变形能力大，蠕变小，化学稳定性好等特点。粘贴的技术要求也十分严格，为保证粘贴质量使测量正确，有如下要求：1) 测点基底平整、清洁、干燥；2) 同一组应变片规格型号应相同；3) 粘贴牢固，方位准确，不含气泡。常用的粘结剂有氰基丙烯酸酯类、环氧类等。另外，在应变片粘贴完成后，有时还需要对应变片作防潮绝缘处理，常用的防潮材料有石蜡、环氧树脂等。

(3) 电阻应变仪

用作电阻应变片的金属电阻丝， K_0 值在 $1.5 \sim 2.6$ 之间，制成电阻应变片后， K 值一般在 2.00 左右，机械应变一般在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 范围内，则 $\Delta R/R$ 约为 $2 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-5}$ ，这样微弱的电信号很难直接检测出来，必须依靠放大仪器将信号放大。电阻应变仪是电阻应变片的专用放大仪器。根据电阻应变仪工作频率范围的高低可分静态电阻应变仪（图 1-4）和动态电阻应变仪。静态应变仪本身带有读数及指示装置；作多点量测时需配用预调平衡箱，通过多点转换开关依次将各测点与应变仪接通，逐点量测。动态应变仪上仅有一粗略的指示表头，需将经动态应变仪放大的信号接入记录仪器后才能得到量测值。一台动态应变仪上有多路放大线路，当进行多点量测时，每一测点接通一路放大线路同时量测。

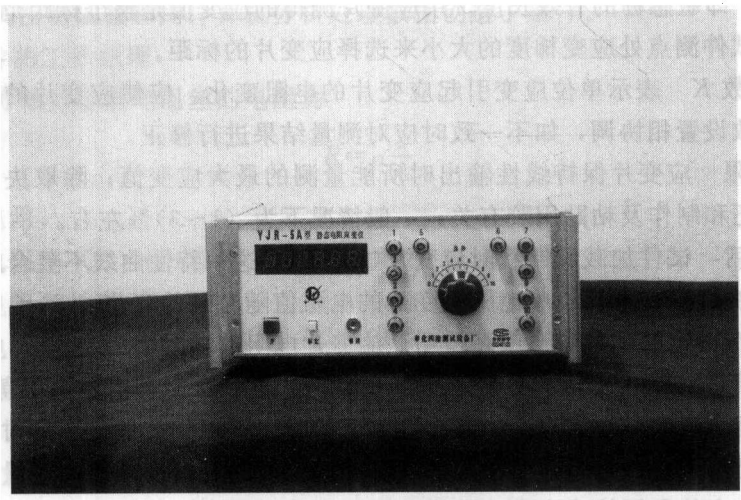


图 1-4 静态电阻应变仪

电阻应变仪由测量电路、放大器、相敏检波器和电源等部分组成，其具体的电路结构细节在此不作详述。

(4) 手持式应变仪

手持式应变仪常用于现场测量，适用于测量实际结构的应变，标距为 $50 \sim 250\text{mm}$ 读数的位移计可选用百分表或千分表（图 1-5）。手持式应变仪的工作原理是：在标距两端

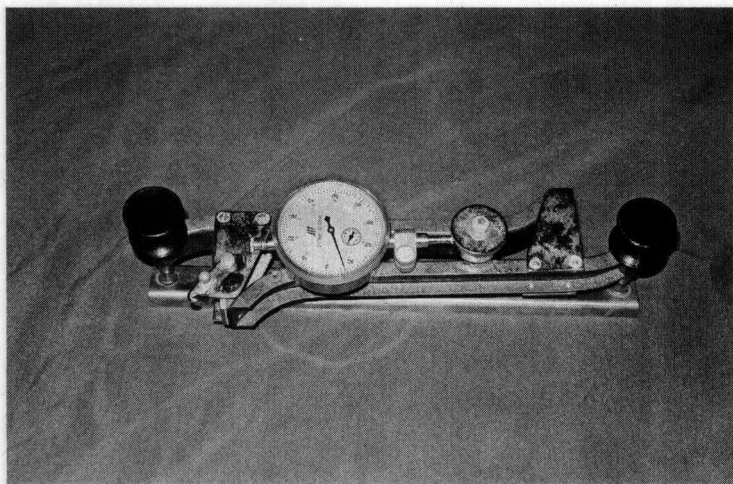


图 1-5 手持式应变仪

粘贴两个脚标（每边各一个），通过测量结构变形前后两个脚标之间距离的改变，求得标距内的平均应变。手持式应变仪的操作步骤为：1）根据试验要求确定标距，在标距两端粘贴两个脚标（每边各一个）；2）结构变形前，用手持式应变仪先测读一次；3）结构变形后，再用手持式应变仪测读；4）变形前后的读数差即为标距两端的相对位移，由此可求得平均应变。

百分表、千分表也可用于测量应变，原理同手持式应变仪。

3. 力传感器

结构试验中，荷载及超静定结构的支座反力是经常需要测定的外力。当用油压千斤顶加载时，因千斤顶所附的压力表读数较粗略，特别在卸载时因摩擦等阻尼的影响，压力表读数不能正确反映实际荷载值，需在千斤顶和试件间安装测力传感器。测力传感器是用来测量对结构（试件）施加的荷载、支座反力等参量的。测力传感器主要有机械式和电测式两类。这些传感器的基本原理是用一个弹性元件去感受拉力或压力，使这个弹性元件发生与拉力或压力成对应关系的变形。用机械装置把这些变形按规律进行放大和显示的即为机械式传感器，如压力环（图 1-6）；用电阻应变片将这些变形转变成电阻变化然后再进行测量的即为应变式传感器（图 1-7）。测量时，机械式传感器为直读仪器，可以直接从传感器上读取力值；应变式传感器应与应变仪或数据采集仪器连接，从应变仪上读到应变值再换算成荷载值，也可由数据采集仪或通过数据采集仪接入计算机，自动换算成荷载值输出。

4. 位移测量器

结构的位移代表结构的整体变形，它概括了结构总的工作性能。通过位移测定，不仅可了解结构的刚度及其变化情况，还可区分结构的弹性和非弹性性质。结构任何部位的异常变形或局部损坏都会在位移上得到反映。因此，在确定测试项目时，首先应该考虑结构或构件的整体变形——位移的量测。

（1）线位移测量器

线位移测量器（简称位移测量器）可用来测量结构的位移，包括结构的反应和对结构

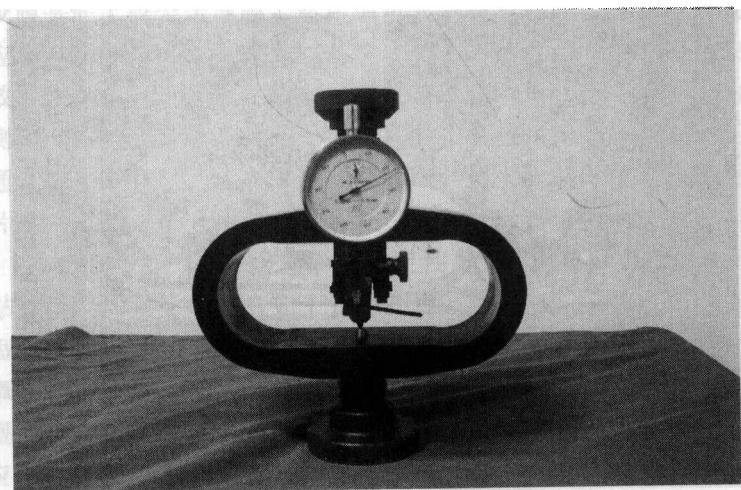


图 1-6 压力环



图 1-7 应变式力传感器

的作用、支座位移。它测到的位移是某一点相对另一点的位移，即测点相对于位移测量器支架固定点的位移。通常把测量器支架固定在试验台或地面的不动点上，这时所测到的位移表示测点相对于试验台座或地面的位移。

常用的位移测量器有机械式百分表（图 1-8）、电子百分表、滑阻式测量器和差动电感式测量器。它们的工作原理是用一个可滑动的测杆去感受线位移，然后把这个位移量用各种方法转换成表盘读数或各种电量。例如，机械式百分表是用一组齿轮把测杆的滑动（即位移）转换成指针的转动，即表盘读数；电子百分表是通过弹簧把测杆的滑动转变为固定在表壳上悬臂小梁的弯曲变形，再用应变计把这个弯曲变形转变成应变输出；滑阻式测量器是通过可变电阻把测杆的滑动转变成两个相邻桥臂的电阻变化，与应变仪等接成惠斯登电桥，把位移转换成电压输出；差动式测量器是把测杆的滑动变成滑动铁芯和线圈之间的相对位移，并转换成电压输出。当测量要求不高时，还可用水准仪、经纬仪及标尺等进行测量。