

混凝土无损检测技术

李为杜 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

本书以混凝土为主要对象,分别在混凝土的弹性、非弹性动态测量、结构混凝土质量和强度检测、材料受力过程力学行为监测等方面,叙述无损检测的基本原理、检测技术和分析评价方法。书中反映了我国近十年来结构混凝土质量无损检测的科研成果,吸取国内外行之有效的先进技术,注意理论联系实际。

本书可作为建筑材料、无机非金属材料等专业非破损检测的教材,也可供土建部门的工程技术人员和从事混凝土质量无损检测的工程技术人员参考。

责任编辑 陈全明

封面设计 王肖生

混凝土无损检测技术

李为杜 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

浙江上虞汤浦印刷厂排版

新华书店上海发行所发行

青浦任屯印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.5 字数: 320 千字

1989 年 9 月第 1 版 1989 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 定价: 2.25 元

ISBN 7-5608-0414-4/TB·15

目 录

绪论	1
第一章 共振法、敲击法测定混凝土材料的动态弹性、非弹性性质	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 材料动态弹性测量技术	1
§ 1-3 混凝土非弹性性质的测量	18
§ 1-4 共振法、敲击法的应用	23
第二章 超声波特性及低频超声波检测仪	31
§ 2-1 超声波的特性	31
§ 2-2 平面波的反射和折射	39
§ 2-3 超声波的衰减	45
§ 2-4 脉冲波传播特点的简述	46
§ 2-5 混凝土超声波检测仪及换能器	48
第三章 混凝土缺陷的超声波检测技术	58
§ 3-1 概述	58
§ 3-2 结构混凝土缺陷的分析方法	60
§ 3-3 结构混凝土缺陷的检测方法	65
§ 3-4 超声波声速测量的影响因素	78
§ 3-5 超声波频谱分析综述	83
第四章 回弹法非破损检测混凝土强度	97
§ 4-1 回弹仪测定混凝土强度的基本原理	97
§ 4-2 回弹仪的构造及标准状态	101
§ 4-3 回弹法测试的要求和回弹仪使用方法	103
§ 4-4 回弹法测强的影响因素	104
§ 4-5 结构混凝土强度评定	106
第五章 超声法、综合法非破损检测混凝土强度	109
§ 5-1 概述	109
§ 5-2 超声波脉冲法检测混凝土的强度	109
§ 5-3 超声-回弹综合法检测混凝土的强度	117
§ 5-4 修正系数法测定混凝土的强度	124
§ 5-5 混凝土非破损测强数据回归分析	127
第六章 声发射技术	148
§ 6-1 声发射的基本概念	148
§ 6-2 声发射技术的物理基础	150
§ 6-3 材料声发射特性	163
§ 6-4 声发射仪器及其工作原理简介	172
第七章 射线检测技术	173
§ 7-1 射线检测的物理基础	176

§ 7-2 射线探伤工艺	180
§ 7-3 射线探伤设备简介	184
§ 7-4 混凝土的射线照相法探伤	187
§ 7-5 射线的防护	189
主要参考文献	191

绪 论

混凝土无损检测技术,是采用电子学、物理学为基础的测试仪器,直接在材料试体或结构物上,非破损地测量与材料性能、结构质量有关的物理量,藉以确定或评价材料的弹性与非弹性性质、均匀性与密实度、强度,以及性能变化过程的一种新兴的测试方法。

以测定混凝土某些性能为例,无损检测的方法分类如图 0-1 所示。

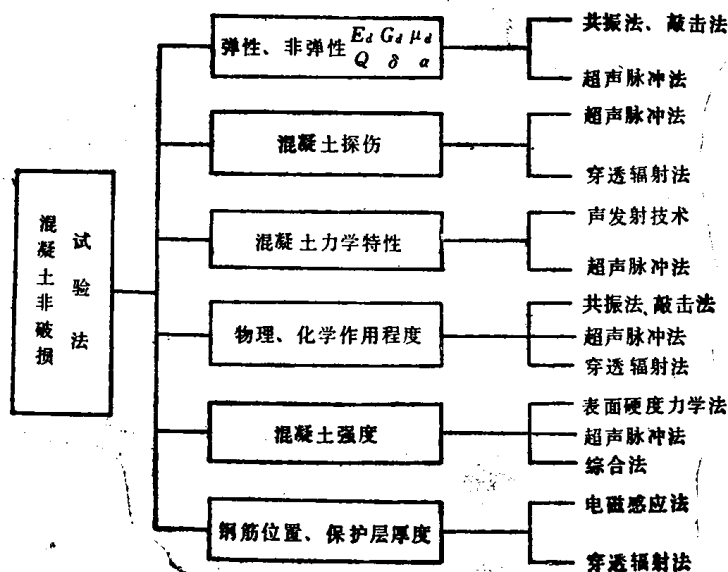


图 0-1 混凝土性能检测方法分类

无损检测技术,除用于混凝土材料质量和性能的测试研究外,还可作岩石、木材、高分子材料、玻璃陶瓷、复合材料等性质检测试验之用。

无损检测技术与常规破损试验方法比较,具有如下优点:

- 1) 无损于材料、结构的组织及使用性能;
- 2) 可直接在试体或结构物上对材料的质量和强度进行重复、全面的检测,不仅减少了试件的制作量,同时有效地弥补了材料试件不真实反映工程质量的难以避免的缺点;
- 3) 可以在同一材料试件上进行连续的测试,即根据不同龄期、温湿度变化、冻融腐蚀、固化、硬化等全过程的试验研究,避免因试件的变异带来的误差,使试验的结果具有良好的可比性;
- 4) 既可以对小试件又可以对大体积的结构表层、内部的质量作全面的检测,试验简便迅速;
- 5) 随着电子仪器及计算机技术的发展,采用检测信息的反馈,使无损检测技术有可能为“在线检测”和生产自动化创造条件。

本书以混凝土材料为主要对象,分别对混凝土动态弹性、非弹性性质的测量,结构混凝土

的均匀性和密实度检测,混凝土材料试体或工程构件受力过程的监测,叙述非破损检测的基本原理、检测技术和评价方法。对常用的或技术先进的方法作较详细阐述,对某些使用面较小或实际检测有局限性的方法仅作简单的介绍,而对那些简单的或容易从已有资料中查到的方法则不作罗列。

第一章 共振法、敲击法测定混凝土材料的动态弹性、非弹性性质

§ 1-1 概 述

共振法、敲击法均为声频振动方法,它可以测量材料试体的纵向振动、弯曲振动的固有频率,并根据数学关系式计算材料的动力弹性模量 E_d 、剪切模量 G_d 、泊松比 μ_d 以及表征材料非弹性性质的阻尼系数 α 、对数衰减率 δ 和内耗 Q^{-1} (Q ——材料的品质因数)等。

用共振法测定材料固有振动频率,以音频振荡器为外源激发试件作自由阻尼振动,当试体的固有振动频率与音频振荡器激发的频率相吻合时,振幅相应达到最大值 A_{max} ,试体即处于共振的状态,其固有振动频率可以从频率计上或音频振荡器调谐的频率刻度尺上读得。

敲击法系以机械力轻敲试件,瞬态使试件处于自由阻尼振动,藉以测定试件基振频率,仪器的判别电路相应测得基频振动周期参量,通过振动的数学关系式换算为上述的动态参量。

共振法、敲击法是非破坏的测试方法,在同一试件上可以连续测试诸如混凝土材料的硬化过程及温湿度的影响、冻融循环及化学侵蚀过程的性状和某些复合材料在温度变化、固化老化过程材料弹性模量的变化规律,研究材料在这些物理、化学过程中的特性。

共振法仍为实验室内测量棱柱或圆柱试件的固有振动频率,而敲击法还可以激发成吨重试体作自由阻尼振动测定基振频率。

共振法于1938年由美国 Powers 首先提出,在1939年 Hornibrook 采用电子仪器测量共振频率改善了这种方法,1947年美国 ASTM 把该方法作为暂行标准加以发表,并经过四次修订,1952年英国正式把共振法列入了国家标准。敲击法在英、美、日、比、法等国已普遍采用,我国于1978年在学习国外先进技术的基础上研制成功了“DEQ-1”型混凝土动态参数测定仪,为检测材料的动态参数提供了新型的手段。

§ 1-2 材料动态弹性测量技术

一、共振法的测试原理

(一)纵向振动

沿试件长度方向一端激发振动,使试件产生轴向拉伸和压缩变形的作用力,另一端接收的机械振荡,经转换、放大和显示,测定材料试体的固有频率,根据材料试体的已知质量密度和尺寸计算动力弹性模量。

图 1-1 a) 表示长度为 l 的无约束棱柱形杆,在距杆的左端 x 处取一个无限小长度 dx 的分段。以 $u(x, t)$ 表示 x 处横截面上一点的纵向位移,它是截面轴向坐标 x 与时间 t 的二元函数。微分段 dx 的应变量为

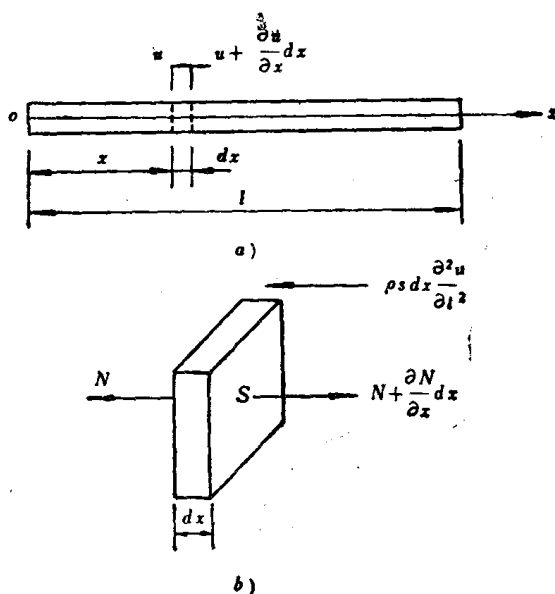


图 1-1 棱柱形杆的自由纵向振动

$$\epsilon = \frac{\Delta(dx)}{dx} = \frac{u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

图 1-1 b) 表示在 x 和 $x+dx$ 两截面上的内力分别为 N 和 $N + \frac{\partial N}{\partial x} dx$ 。对于细长杆 N 近似认为：

$$N = ES\epsilon = ES \frac{\partial u}{\partial x}$$

惯性力由材料的质量密度 ρ 、分段的体积 sdx (s 为杆的横截面积) 和加速度 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ 的乘积组成, 根据牛顿运动定律可得:

$$\begin{aligned} \rho s dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= N + \frac{\partial N}{\partial x} dx - N = \frac{\partial N}{\partial x} dx \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ES \frac{\partial u}{\partial x} \right] dx \end{aligned} \quad (1)$$

E 为材料的弹性模量, 对于等直杆, 面积 s 为常数, 上式成为:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{令 } a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (a \text{ 为弹性纵波沿 } X \text{ 轴的传播速度})$$

得偏微分方程:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

直杆按其固有型之一振动时, 式(2)的解为:

$$u = X \cdot (A \cos \omega t + B \sin \omega t) \quad (3)$$

式中 A 和 B 为常数, ω 为角频率, X 代表 x 的函数, 定义为固有振型的形状。

以 $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = X'_{(x)} \cdot (A \cos \omega t + B \sin \omega t)$ 及

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 \cdot X_{(x)}(A \cos \omega t + B \sin \omega t) \quad \text{代入偏微分方程(2)得:}$$

$$X'_{(x)} \cdot (A \cos \omega t + B \sin \omega t) + \frac{\omega^2}{a^2} X_{(x)}(A \cos \omega t + B \sin \omega t) = 0$$

按直杆作纵向振动,可得:

$$X'_{(x)} + \frac{\omega^2}{a^2} X_{(x)} = 0$$

即二阶线性常系数齐次的常微分方程:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{\omega^2}{a^2} X = 0$$

其解为:

$$X = C \cdot e^{i \frac{\omega}{a} x} + D e^{-i \frac{\omega}{a} x}$$

通过尤拉公式转换并进行线性组合,以实函数形式表示其解为:

$$X = C_1 \cos \frac{\omega}{a} x + D \sin \frac{\omega}{a} x \quad (4)$$

常数 C, D 根据细直杆端部边界条件确定,杆具有自由端,两端处正比于 $\frac{dX}{dx}$ 的轴向力为零:

$$\left(\frac{dX}{dx} \right)_{x=0} = 0 \quad \left(\frac{dX}{dx} \right)_{x=l} = 0$$

从(4)式: $\left(\frac{dX}{dx} \right)_{x=0} = -C \cdot \frac{\omega}{a} \sin \frac{\omega}{a} x + D \frac{\omega}{a} \cos \frac{\omega}{a} x = 0$

满足第一个条件,只有 $D=0$;而当 $C \neq 0$ 时,只有 $\sin \frac{\omega}{a} l = 0$ 才满足第二个条件。

令: $\frac{\omega_i l}{a} = i\pi (i=1, 2, 3 \dots, i=0 \text{ 为试体平动})$ 1、2、3 阶振型为:

$$\begin{cases} i=1 & \frac{\omega l}{a} = \pi \\ i=2 & \text{则} \quad \frac{\omega l}{a} = 2\pi \\ i=3 & \frac{\omega l}{a} = 3\pi \end{cases} \quad (5)$$

从(4)式:

$$\begin{cases} X_1 = C_1 \cos \frac{\omega}{a} x = C_1 \cos \frac{\pi}{l} \cdot x \\ X_2 = C_2 \cos \frac{2\pi}{l} \cdot x \\ X_3 = C_3 \cos \frac{3\pi}{l} \cdot x \end{cases}$$

纵向振动的前三阶的振型曲线如图 1-2 所示。

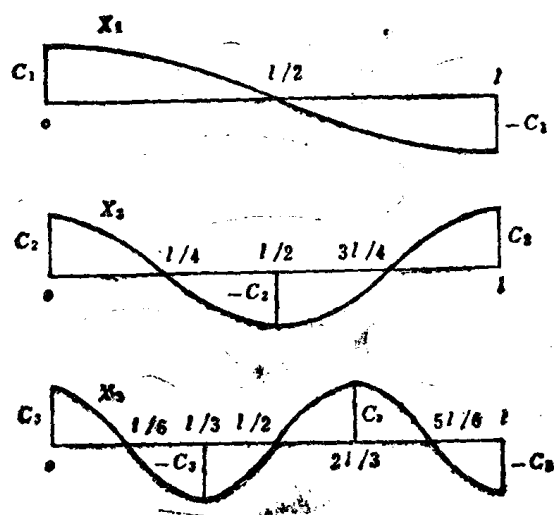


图 1-2 直杆纵向自由振动的振型

具有自由端杆的纵向振动时,固有频率 f 采用基本振型 ($i = 1$) 计算:

$$\omega = \frac{a\pi}{l} = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

动态弹性模量的计算公式:

$$\begin{aligned} E_d &= 4 l^2 f^2 \rho = 4 l^2 f^2 \cdot \frac{\gamma}{g} = 4 l^2 f^2 \frac{W}{b h l g} \\ &= 4.08 \times 10^{-3} \frac{l f^2 W}{b h} \text{ (N/cm}^2\text{)} = 4.08 \times 10^{-5} \frac{l f^2 W}{b h} \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

式中 l, b, h ——分别为棱柱试件的长、宽、高(cm);
 W ——试件重量(N);
 f ——基振频率(Hz);
 ρ, γ ——分别为材料的密度和容重(N/cm³);
 g ——重力加速度(980 cm/s²)

对各次振型频率与动弹模量的普适关系式写成:

$$E_d = \frac{4}{i^2} l^2 f^2 \rho \quad (i = 1, 2, 3 \cdots) \tag{6}$$

(二) 横向(弯曲)振动

图 1-3 a) 表示长度为 l 的棱柱形梁在 $X-Y$ 平面内作横向振动, 设该平面为任一横截面的称平面, 以 y 表示梁上距左端为 x 处微分段的横向位移; 图 1-3 b) 表示 dx 微分段自由体作的内力和惯性力, 剪力 Q 和弯矩 M (其方向正负号按惯例)。当梁作横向振动时, 诸力顺 y 向的动力平衡条件为:

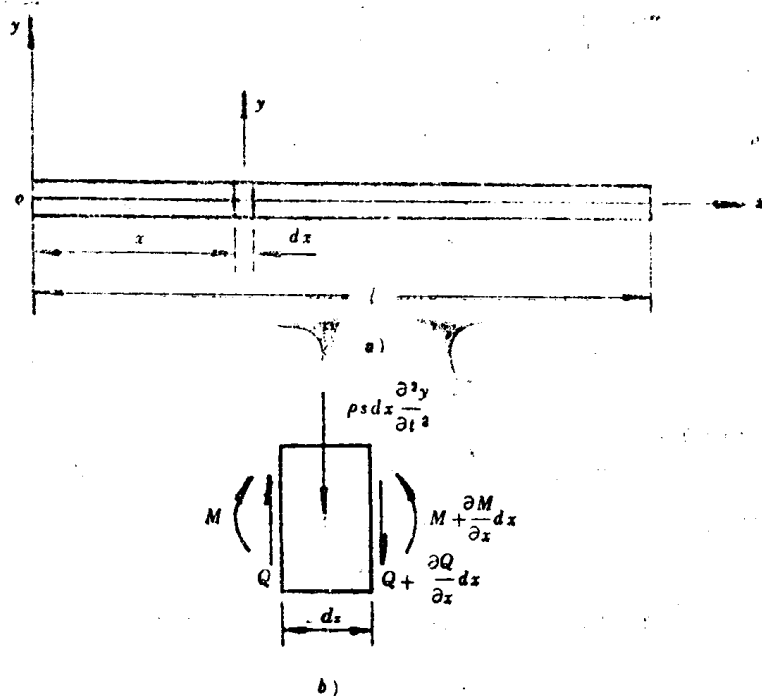


图1-3 棱柱形梁横向振动时力的分析

$$Q - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) - \rho s dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \rho s \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

力矩平衡条件为:(略去高阶微量惯性力矩)

$$-M - Q dx + M + \frac{\partial M}{\partial x} dx = 0$$

$$-Q dx + \frac{\partial M}{\partial x} dx = 0$$

$$Q = \frac{\partial M}{\partial x} \quad (8)$$

以(8)代入(7)式得:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \rho s \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

以梁的弯矩与挠度关系式 $M = EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ 代入(9)式得:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] + \rho s \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho s \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

或写成:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad \left(\text{令 } a = \sqrt{\frac{EJ}{\rho s}} \right) \quad (10)$$

当梁按固有振型之一作横向振动时，任一位置的挠度随时间谐和变化为：

$$y = X(A \cos \omega t + B \sin \omega t) \quad (11)$$

以(11)式求： $\frac{\partial^4 y}{\partial x^4}$ 、 $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ ，并代入(10)式，变高阶偏微分方程为常微分方程：

$$\frac{d^4 X}{dx^4} - \frac{\omega^2}{a^2} X = 0$$

或写成：
$$\frac{d^4 X}{dx^4} - k^4 X = 0 \quad \left(k^4 = \frac{\omega^2}{a^2}\right) \quad (12)$$

四阶常微分方程解的一般形式为：

$$X = C_1 e^{kx} + C_2 e^{-kx} + C_3 e^{ikx} + C_4 e^{-ikx}$$

将指数形式根加以转换并作线性组合，其实函数的形式为：

$$X = C_1(\cos kx + \operatorname{ch} kx) + C_2(\cos kx - \operatorname{ch} kx) + C_3(\sin kx + \operatorname{sh} kx) + C_4(\sin kx - \operatorname{sh} kx) \quad (13)$$

常数 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 根据梁横向振动自由端的边界条件确定，即两端的弯矩、剪力均为零：

$$\left(\frac{d^2 X}{dx^2}\right)_{x=0} = 0 \quad \left(\frac{d^3 X}{dx^3}\right)_{x=0} = 0$$

当 $\left(\frac{d^2 X}{dx^2}\right)_{x=0} = 0$ 、 $\left(\frac{d^3 X}{dx^3}\right)_{x=0} = 0$ 时，通解(13)式中常数 $C_2 = C_4 = 0$ ，因此，该式可写成：

$$X = C_1(\cos kx + \operatorname{ch} kx) + C_3(\sin kx + \operatorname{sh} kx) = 0 \quad (14)$$

当 $\left(\frac{d^2 X}{dx^2}\right)_{x=l} = 0$ 、 $\left(\frac{d^3 X}{dx^3}\right)_{x=l} = 0$ 时，由(14)式得：

$$\begin{cases} C_1(-\cos kl + \operatorname{ch} kl) + C_3(-\sin kl + \operatorname{sh} kl) = 0 \\ C_1(\sin kl + \operatorname{sh} kl) + C_3(-\cos kl + \operatorname{ch} kl) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

常数 C_1 、 C_3 非零解，(15)式的行列式为：

$$\begin{vmatrix} -\cos kl + \operatorname{ch} kl & -\sin kl + \operatorname{sh} kl \\ \sin kl + \operatorname{sh} kl & -\cos kl + \operatorname{ch} kl \end{vmatrix} = 0$$

即： $(-\cos kl + \operatorname{ch} kl)^2 - (\operatorname{sh}^2 kl - \sin^2 kl) = 0$

以 $\operatorname{ch}^2 kl - \operatorname{sh}^2 kl = 1$ 、 $\cos^2 kl + \sin^2 kl = 1$ 代换得：

$$\cos kl \cdot \operatorname{ch} kl = 1$$

令 $kl = m_n$ ，各振型的 m_n 常数为：

振型： $k_1 l$ $k_2 l$ $k_3 l$ $k_4 l$ $k_5 l$ $k_6 l \dots$

m : 4.730 7.853 10.996 14.137 17.279 20.420...

将根 $k_n l$ 值代入(15)式，求出每一振型的 C_1/C_3 ，从方程(14)确定弯曲振动的挠度曲线，即横向振动的振型曲线，前三阶的振型曲线如图 1-4 所示。

梁的基振频率与动力弹性模量的关系为：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{k_1^2 a}{2\pi} \quad \left(k^2 = \frac{\omega}{a}\right)$$

即:

$$f = \frac{\left(\frac{m_n}{l}\right)^2 \cdot a}{2\pi} \quad \left(kl = m_n, \quad a = \sqrt{\frac{EJ}{\rho s}}\right)$$

对于基振型式:

$$E_d = \frac{(2\pi l^2 f)^2 \cdot s}{m_n^4 J} \cdot \rho \quad (16)$$

$$= 9.43 \times 10^{-4} \cdot \frac{l^3 f^2 W}{bh^3} \quad (\text{N/cm}^2) \quad \text{棱柱体}$$

$$= 9.43 \times 10^{-6} \cdot \frac{l^3 f^2 W}{bh^3} \quad (\text{MPa})$$

$$\left(m_n = 4.73, J = \frac{bh^3}{12}, \rho = \frac{W}{bhl g}\right)$$

$$= 1.61 \times 10^{-3} \cdot \frac{l^3 f^2 W}{d^4} \quad (\text{N/cm}^2) \quad \text{圆柱体}$$

$$= 1.61 \times 10^{-6} \cdot \frac{l^3 f^2 W}{d^4} \quad (\text{MPa})$$

$$\left(d \text{——试件直径 } J = \frac{\pi d^4}{64}\right)$$

(16)式系根据细长杆横向振动导出, 忽略了振动时试件截面的转动与剪力变形的影响, 而采用简单的弯矩方程 $M = EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$, 当截面尺寸与长度之比较大时, 截面的转动与剪力变形的影响不能忽视, G·Pickett 提出了矩形截面杆件横向弯曲振动公式的修正系数 T_n , 弯曲振动的动力弹性模量与固有频率关系的普适表达式为

$$E_d = \left(\frac{2\pi l^2 f}{m_n^2}\right)^2 \cdot \frac{s\rho}{f} \cdot T_n \quad (17)$$

式中 T_n ——与试件 h/l 或 d/l 及泊松比 μ 有关的修正系数, 对于混凝土材料的 T_n 取值见图 1-5 (注脚 n ——振型次数)

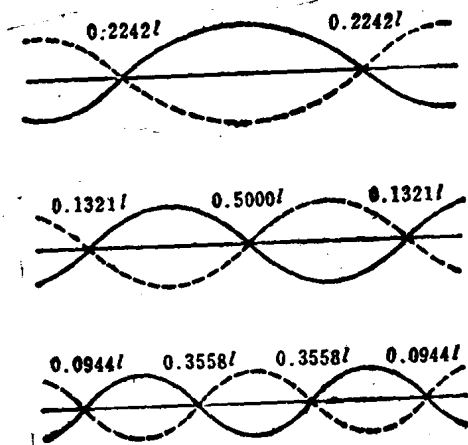


图 1-4 前三阶弯曲振动的振型曲线

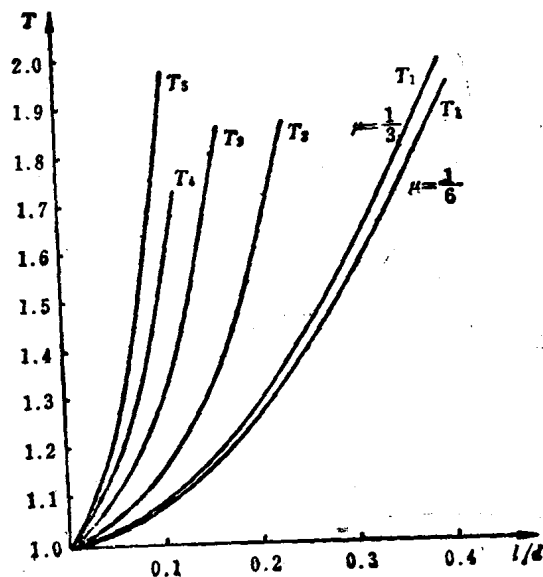


图 1-5 修正系数 T 与细长比的关系

(三) 扭转振动

图 1-6 a) 表示圆截面直杆进行扭转振动, 令 θ 表示位于离左端 x 处任一横截面的转动量(绕杆轴线)。扭转振动时, 微分段上的弹性扭矩和惯性扭矩见图 1-6 b)。

平衡方程为:

$$T + \frac{\partial T}{\partial x} dx - T - \rho J_p dx \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0$$

式中 T —— x 处横截面的内扭矩;

J_p ——横截面的极惯矩, 该段的质量惯性矩为 $\rho J_p dx$;

$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$ ——转动加速度

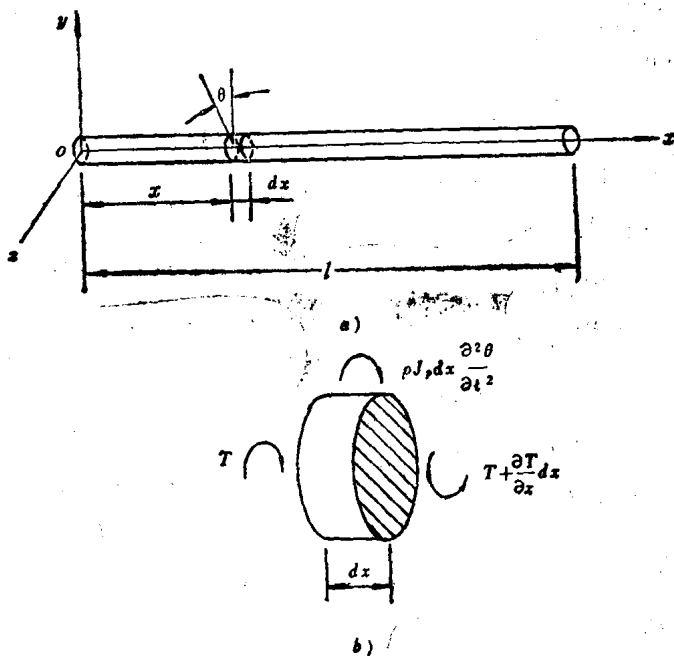


图 1-6 圆直杆扭转振动

从扭转理论得:

$$T = GJ_p \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (19)$$

式中 G 为剪切弹性模量, 将(19)式代入(18)式得:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{V_a^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (20)$$

波动方程(20)中扭转波的传播速度为:

$$V_a = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

可见, 方程(20)与(2)具有相同的数学形式, 符号 θ , V_a 和 G 分别对应于 u , a 和 E , 因此,

棱柱形杆纵向振动的公式推导是适用于圆形杆的扭曲振动的,扭曲振动的公式为:

$$G = 4 Kl^2 f^2 \rho \quad (21)$$

式中 K 为截面形状系数,试件的横截面为圆形时, $K=1$; 正方形截面 $K=1.183$, 矩形截面 K 按下式计算:

$$K = \frac{b/h + h/b}{4b/h - 2.52(b/h)^2 + 0.21(b/h)^4}$$

动态泊松比是动力试验的试体横向缩短和纵向伸长的相对变形之比,它可以根据共振试体纵向振动的基振频率和扭曲振动的基振频率直接计算。材料力学中,

$$G = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1+\mu}$$

即泊松比

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (22)$$

以(6)式和(21)式代入(22)式,得矩形横截面试体的

$$\mu = \frac{1}{2K} (f_{纵}/f_{扭})^2 - 1 \quad (23)$$

圆形横截面试体的

$$\mu = \frac{1}{2} (f_{纵}/f_{扭})^2 - 1 \quad (24)$$

二、测试方法

(一)共振法试验装置

共振法试验系统如图 1-7 所示。音频发生器的电振荡经激发器转换为机械振荡,迫使试体发生振动,接收器则将试体受激的机械振动转换为电振荡,经电子仪器放大由电表指示读数,或同时用阴极射线示波器观察共振状态的接收信号。

试体共振状态系调节音频发生器的激发频率,使试体的振动达到最大振幅,这个最大的振幅即表明激发振动频率与试体的固有频率相吻合,换句话说,试体的振动和激发振动共振时,其振动振幅急剧增大达最大值,示波器出现李沙育图形,试体处于共振状态。测得试体共振时的频率,根据试体的质量密度和尺寸可以计算出该材料的动力弹性模量。

共振试验系统图中 $a)$ 、 $b)$ 、 $c)$ 系取第一主振型的支承或夹持、激发和接收点的装置。根据前述的振型曲线,梁的纵向、横向振动 1 至 4 次谐波的波腹波节如图 1-8 所示。由于波腹处容易激发振动,所以试验时宜在波腹处激发,同时接收器应置于波腹处,接收灵敏度最高,而作不同主振型试验,梁的支座或夹持应在波节处,便可得到良好的试验效果。

(二)混凝土试件基型振动的频率范围

确定各种材料试件的共振频率需要仔细探索试验,从美国、罗马尼亚的有关资料摘录的标准混凝土试件的共振频率范围列于表 1-1、1-2 中,以供参考。

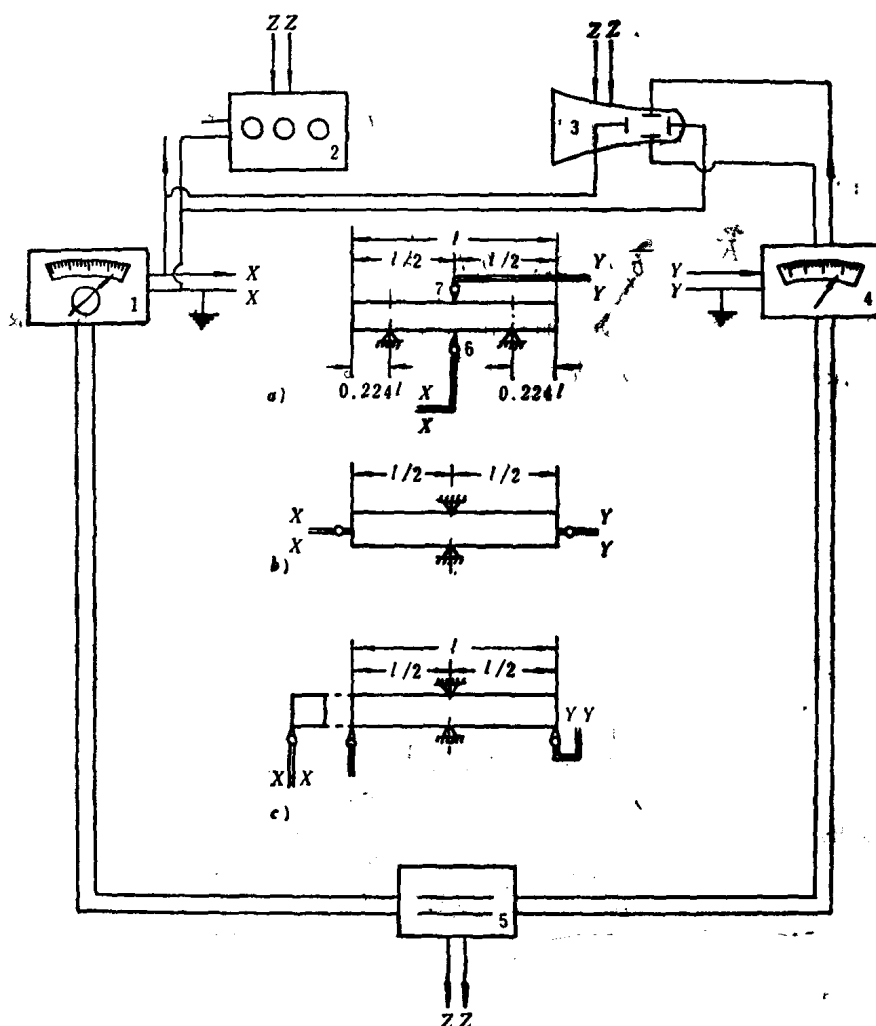
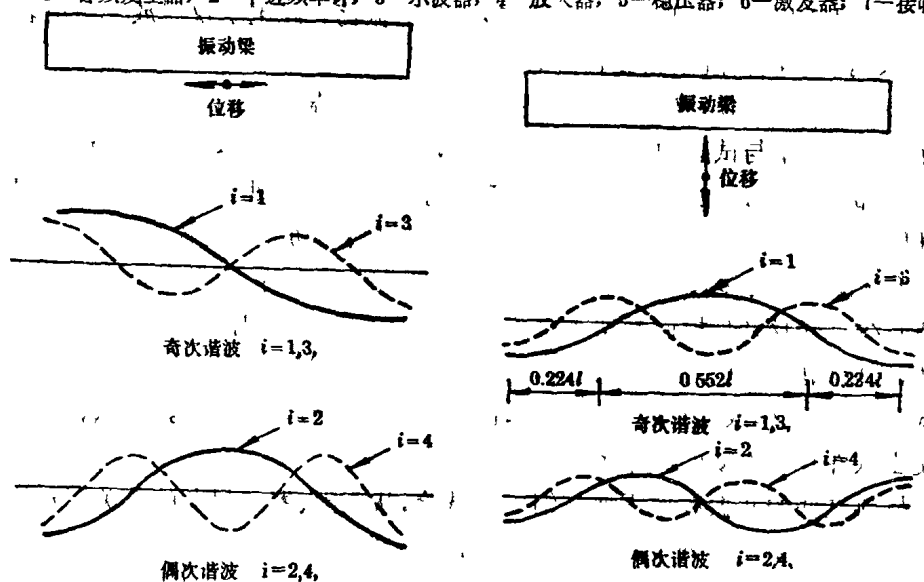


图1-7 共振试验系统

a) 弯曲实验振动图; b) 纵向振动实验图; c) 扭曲振动实验图

1—音频发生器; 2—十进频率计; 3—示波器; 4—放大器; 5—稳压器; 6—激励器; 7—接收器



混凝土试件共振频率的范围

试 件 的 尺 寸(mm)	横向谐振频率 (Hz)	纵向谐振频率 (Hz)
152×152×710 (棱柱)	550~1150	1800~3200
101×101×510 (棱柱)	900~1600	2500~4500
152×305 (圆柱)	2500~4500	4000~7500

混凝土试件三种振动状态共振频率范围 表 1-2

试 件 尺 寸 (cm)	主 频 率 (Hz)		
	纵 向 振 动	弯 曲 振 动	扭 曲 振 动
20×20×80	1700~2000	700~800	1000~1200
10×10×55	3200~3700	1000~1300	1700~2100
10×10×40	3400~4000	1200~1500	1900~2300
10×10×30	6000~7000	3200~3600	3600~4100
4×4×16	9000~11000	3600~4500	5300~6400
φ=15 l=30	6000~7000	3000~4000	3600~4200

同一材料试件因尺寸较大,其截面和重量也较大,则具有较低的共振频率;试件越长,共振频率就越低;试件表面粗糙,测得的 E_s 则偏高;混凝土的孔隙率增加,其动力弹性模量降低的百分率如图 1-9 曲线 1 所示,曲线 2 和 3 分别为弯曲强度和抗压强度降低的百分率。

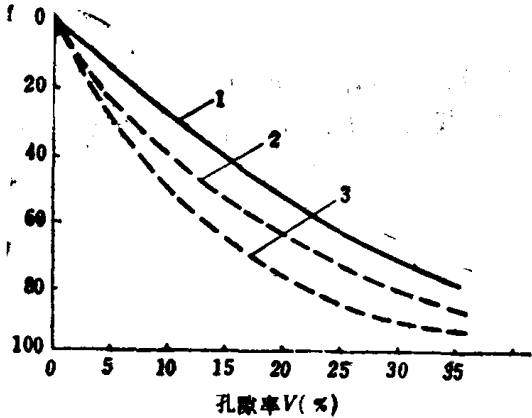


图 1-9 混凝土孔隙率增加, E_s 、 R_b 和 R_c 降低的百分率

(三)共振状态的监测

试验中采用阴极射线示波器监测共振状态,即在示波器的 x - x 、 y - y 两轴引进相同频率的垂直运动,其分振动可写成:

$$\begin{aligned}x &= A_1 \cos \omega t \\y &= A_2 \cos (\omega t + \varphi)\end{aligned}$$

式中 φ 为分运动之间周相差,在分运动的频率相等时,按 φ 的特殊值,合成运动的定值图像有:

- 1) $\varphi = 0$, $y = \frac{A_2}{A_1}x$, 是发生在矩形的一条对角线上的直线运动,且 x 及 y 永远具有相