

《水利水电施工》
丛 书

水工建筑物混凝土的 超 声 检 测

罗 骥 先 编 著

《水利水电施工》丛书

水工建筑物混凝土的 超 声 检 测

罗 骐 先 编 著



水利电力出版社

《水利水电施工》丛书
水工建筑物混凝土的超声检测
罗 骥 先 编著

★

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)
新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力出版社印刷厂印刷

★

787×1092毫米 32开本 5印张 106千字
1986年9月第一版 1986年9月北京第一次印刷
印数0001—3120册 定价1.05元
书号 15143·6007

329.62

内 容 提 要

混凝土的超声检测是一项新技术，它与传统的检测和其他无损检测方法相比，具有一定的优越性和特点。目前这项测试技术正日益推广应用到工程中。水电、交通、建筑、铁道、冶金等部门均广泛地开展研究和应用。水电部、交通部颁发的《水工混凝土试验规程》、《港口工程混凝土试验方法》均已将超声检测混凝土强度和裂缝的方法编入试行。

本书专门论述混凝土特别是水工建筑物混凝土的超声检测技术。书中简要叙述了声学基本原理、超声换能器原理、构造及超声仪电路原理。着重对超声法探测混凝土强度、内部缺陷、裂缝及其他方面应用的原理、探测方法、数据处理分析等作了较详细的论述。本书可供从事混凝土超声检测、建筑材料试验、工程质量检验的工程技术人员和工人参考。

主编 纪云生

副主编 杨建九 蒋元骧 朱云祥 葛文辉

责任编辑 陈锡青



水利科普丛书编审委员会名单

主任委员 史梦熊

副主任委员 董其林

委	员	丁联臻	王万治	史梦熊
		田 园	李文治	郝凤山
		杨启声	张宏全	张林祥
		沈坤卿	陈祖安	陈春槐
		汪景琦	郑连第	郭之章
		赵珂经	茹 智	陶芳轩
		谈国良	徐曾衍	蒋元驹
		曹述互	曹松润	董其林
		颜振元		

[以姓氏笔划为序]。

序

水是人类生存和社会生产必不可少的物质资源。水利工作的基本任务是除水害、兴水利，开发、利用和保护水资源，为工农业生产和人们的物质、文化生活创造必要的条件。普及水利科学技术知识，让更多的人了解和掌握水利科学技术，也是两个文明建设的内容之一。为此，针对水利战线职工和社会上不同文化程度读者的需要，分层次地编写出版水利科普读物是十分必要的。

为了帮助水利科技人员的知识更新，掌握一些现代科技知识，并使水利科技成果更广泛地得到推广应用，尽快地形成生产力；为了使广大农村水利工作人员，掌握一些实用的水利基础知识，并应用于生产实际；为了总结和宣传我国水利建设的伟大成就和悠久历史，介绍水利在四化建设和人民生活等方面的重要作用，激发广大人民群众和青少年热爱祖国江河、关心水利事业，我们组织编写了七套水利科普丛书，包括：《现代科技》丛书、《水利科技成果》丛书、《水利水电施工》丛书、《小水电技术》丛书、《农村水利技术》丛书、《中国水利史》小丛书、《水与人类》丛书。这些科普丛书将由水利电力出版社陆续出版。

编写和审定这些丛书时，力求做到以思想性和科学性为前提，同时注意通俗性、适用性和趣味性。由于我们工作经验不足，书中可能存在某些不妥和错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

中国水利学会科普工作委员会

一九八四年七月

前 言

混凝土建筑物，特别是水工混凝土建筑物这样关系重大的永久性建筑物如何检验其混凝土质量，如何探测建造过程或运行过程中出现的各种内部隐患、裂缝及其他损坏情况以便为建筑物的验收、补强、估计安全度提供依据，这一直是人们关心的重大问题。为检测建筑物混凝土的质量，传统的方法是预留混凝土试件作破型或其他性能检验。这种方法可以直接获得混凝土强度或其他性能的资料，但这种方法的缺点之一是预留试件有时不能完全代表现场的混凝土。虽然也可以从某些结构物上凿（钻）取试样作检验，但毕竟费工费时，且给结构物造成一定破坏。至于隐藏在结构物内部的缺陷、裂缝及其他损坏，用传统的检测手段是难以探测出来的。因此，用某种方法直接在结构物上检测混凝土的质量和探测内部缺陷或裂缝一直是人们追求的目标。随着科学技术的发展，出现了混凝土无损检测技术。

混凝土无损检测包括许多项目和方法。按通常的以工作原理分类，可大致分为：表面硬度法、声学法、放射线法、电法、电磁法、化学法、局部破坏法等等。若以用于现场检测混凝土结构物质量的方法而论，目前较为常用的则是表面硬度法中的回弹法、射线法中的X射线、 γ 射线法、声学法中的超声脉冲法[●]以及近几年来逐渐兴起的局部破坏法中的拔出法。

● 目前超声检测中所用的均是超声脉冲波，为区别于超声连续波，严格说来，使用超声脉冲波的名称较为准确，但为了方便和照顾一般习惯，在一般情况下通常还是将超声脉冲波简称为超声波，将超声脉冲法简称超声法。

在上述这些无损检测方法中，超声法具有突出的特点。具体表现在以下几方面：

(1) 当超声波通过混凝土内部传播后，将带来许多混凝土内部质量的信息。接收超声波并对这些信息加以分析，可得到混凝土结构物内部质量情况，这不同于基本上只反映表层混凝土质量情况的表面硬度法及局部破坏法。

(2) 超声波通过混凝土是靠混凝土介质传播振动。介质愈是密实则超声波传播愈远。这不同于射线法靠穿透通过介质，所以超声法可探测厚度较大的混凝土结构物。以目前一般超声仪和换能器而论，通常可探测10m左右厚的混凝土体。这种优点对于较大的结构物，特别是水工结构物的检测更是必要的。

(3) 混凝土的物理力学性能不同，超声波在其中传播的速度及其他声学参数也不同。若混凝土内部存在缺陷、裂缝时，还将引起声波的绕射、反射及异常的衰减等现象。这就是说，超声波声学参数与混凝土质量、性能、内部状况等许多方面有着内在联系，因此超声法可在混凝土检测的许多方面发挥作用。

目前超声法可应用于混凝土以下几方面的检测：

(1) 检测混凝土强度，包括测定混凝土结构物现有强度及用于与强度发展、变化有关的检测，诸如测定混凝土凝结时间；确定构件拆模、起吊、滑升时间，以及用于混凝土遭受冻融、火灾、化学侵蚀等作用后破坏情况的检测。

(2) 检测混凝土裂缝，包括探测混凝土受荷过程中裂缝的出现、发展，以监测受荷的极限；探测结构物上裂缝的深度、走向。另外，也可用检测裂缝的类似方法检测混凝土接缝质量以及灌浆、浸渍处理效果等。

(3) 探测混凝土内部缺陷(空洞、架空、疏松区)的部位及其大致范围。

(4) 其他方面的应用,包括探测混凝土路面或隧道喷锚支护层厚度;测定混凝土弹性参数;判断钢筋与混凝土粘结情况等等。

超声法用于混凝土检验,在国外始于四十年代末。随着测试技术研究不断深入和发展,仪器设备不断改进和完善,这项技术已在工程中得到普遍推广应用。目前许多国家及国际学术机构都先后制定了混凝土超声检测的规程或建议。

我国于五十年代后期开始进行这项技术的研究、应用,取得了相当进展。近几年来发展尤为迅速。水电、交通、建筑、铁道、冶金等部门均广泛地开展研究和应用。国内各类工程,包括葛洲坝水电枢纽工程都曾应用超声检测技术进行检测,取得良好的技术经济效益。水利电力部颁发的《水工混凝土试验规程》和交通部颁发的《港口工程混凝土试验方法》均已将超声检测混凝土强度和裂缝的方法编入试行。国内一些地区(如北京、上海)的建筑部门也编制了超声测量混凝土强度的建议和制定了地区测强基准曲线。

以上情况表明,这项测试新技术正在蓬勃发展,今后它将在我国的工程建设中发挥更大作用。

当然,作为一项新的测试技术,超声法也还有它不够完善,有待改进、提高的地方,同时也有一定局限性,具体内容将在结语中另叙。

为了在水电工程及其他建设工程中推广应用混凝土超声检测技术,作者在从事研究应用的基础上,吸收了国内其他研究者的宝贵经验,选择介绍了国外有关文献,综合编成本书,供从事混凝土超声检测、建筑材料试验及工程质量检验

的技术人员和工人交流、参考。

本书承水利电力部北京水利水电勘测设计院刘云祯同志审阅，并提出了许多宝贵意见；本书中还引述了一些单位和个人的研究成果，他们的名字在文中已列出；一些超声仪和换能器制造厂为本书提供了宝贵资料；在本书编写过程中还得到作者所在单位南京水利科学研究院的同志们热情帮助，在此谨向他们一并表示衷心感谢。

笔 者

一九八四年六月

目 录

序

前 言

第一章 声学基础	1
§ 1-1 声波的基本概念	1
§ 1-2 声波的分类及特点	3
§ 1-3 声波在固体中的传播速度	5
§ 1-4 声波在介质界面上的反射和折射	7
§ 1-5 声波在传播过程中的衰减	11
第二章 超声换能器	13
§ 2-1 超声换能器简介	13
§ 2-2 压电效应及准压电效应	14
§ 2-3 常用换能器的构造及性能	16
§ 2-4 超声换能器的指向性及超声波的绕射	20
§ 2-5 换能器与被测体之间的声耦合	21
第三章 超声仪原理及使用方法	25
§ 3-1 超声仪简介	25
§ 3-2 超声仪电路原理	28
§ 3-3 各声学参数的测读方法	35
§ 3-4 分贝	42
第四章 超声检测混凝土的一般方法	45
§ 4-1 超声检测混凝土的特点	45
§ 4-2 超声检测混凝土的几种测试方法	47
第五章 超声检测混凝土强度	56

§ 5-1	测量原理	56
§ 5-2	$R \sim C$ 曲线	56
§ 5-3	率定及计算 $R \sim C$ 曲线的方法	64
§ 5-4	现场测试混凝土强度的方法	71
§ 5-5	钢筋对声速测量的影响及修正	72
§ 5-6	测试距离对声速测量的影响	79
§ 5-7	换能器频率对声速测量的影响	82
§ 5-8	声时测读标准的问题	86
§ 5-9	超声测强的其他方法和途径	88
第六章	超声探测混凝土裂缝及灌浆接缝质量	96
§ 6-1	超声探测裂缝的原理	96
§ 6-2	超声探测裂缝的应用	98
第七章	超声探测混凝土内部缺陷	117
§ 7-1	超声探测缺陷原理	117
§ 7-2	测试结果的分析	124
§ 7-3	现场测试步骤	127
§ 7-4	声速、振幅测值综合判断缺陷的方法	128
§ 7-5	内部缺陷尺寸的估计	133
§ 7-6	探测缺陷实例	135
§ 7-7	超声探测缺陷的其他方法	139
结语		143
参考文献		145

第一章 声 学 基 础

§ 1-1 声波的基本概念

振动的传播过程称为波动。波动是一种很普遍的物质运动形式，例如机械波、电磁波等。声波是机械波。当物体因外力作用而振动时，迫使其周围介质也发生振动并使振动向外传播。传播振动的介质可以是气体、液体和固体。在固体介质中传播的机械波通常又称为弹性波。当机械波的频率在人耳可闻的范围（16~20000赫兹，Hz）时，叫声波，低于此范围的叫次声波，而超过20000(Hz)的则称为超声波。

不论次声波、声波、超声波，其本质都是机械波，它们之间虽各有特性，但有许多共性，对它们的研究统属于声学范畴。

需要强调的是，声波向外传播的只是介质运动形式而不是介质本身。介质质点本身只是在其平衡位置作往复的振动。

对于物体这种运动状况，可用波动方程来描述。所谓波动方程，即声波在传播过程中，介质质点在任何时刻离开其平衡位置的位移表达式。以理想的无衰减的介质中传播的平面波为例，其波动方程可表示为：

$$y = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{C} \right) \quad (1-1)$$

式中 y —— 离原点为 x 处的质点在时刻 t 的位移；

A —— 振动的幅度；

C ——声波传播速度^①；

ω ——振源作谐振动的圆频率，它等于振动物体在 2π 秒(s)内的振动次数，即：

$$\omega = 2\pi f$$

其中 f ——振动频率。

若时间 t 给定，则某质点的位移将单纯是 x 的函数。这时波动方程表示在给定时刻 t ，不同质点的位移分布情况。若以 x 为横坐标， y 为纵坐标，由(1-1)式可得一条正弦曲线，如图1-1。

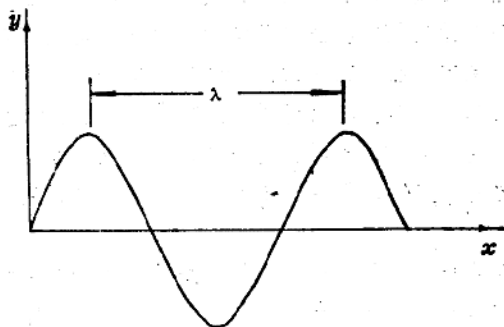


图 1-1 波形图

在波形图上，两个相邻的，振动状态相同（同相）的质点之间的距离，即一个完整波形的长度，叫波长，以 λ 表示。波长也可定义为在一个周期 T 时间内声波传播的距离，即：

$$\lambda = CT \quad (1-2)$$

因为波动的周期 T 与波动的频率 f 互为倒数，即：

① 声波传播速度简称波速或声速。

$$T = \frac{1}{f}$$

所以(1-2)式也可写成:

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (1-3)$$

(1-3)式是声速、波长、频率间的基本关系。例如,当频率为50kHz的超声波通过混凝土,测得声波的传播速度为4000m/s,则由(1-3)式可计算出混凝土中声波的波长

$$\lambda = \frac{4000 \times 10^2}{50 \times 10^3} = 8\text{cm}$$

同样,如果 x 给定,则 x 处质点的位移将单纯是时间 t 的函数,波动方程表示 x 处质点的位移随时间变化的情况。若以 t 为横座标, y 为纵座标,由(1-1)式也可得出一条正弦曲线。超声仪示波屏上的波形就表示在接收换能器处介质振动(位移)随时间变化的曲线。值得强调的是,这时两相邻的振动状态相同的点(例如波峰~波峰或波谷~波谷)间的横座标值代表的是周期 T 的大小。

§1-2 声波的分类及特点

声波在介质中传播时,按照介质质点振动方向与波的传播方向之间的关系可分为纵波和横波。

纵波: 介质质点的振动方向与波的传播方向一致,这种波称为纵波。例如空气或水中传播的声波,就是纵波。

横波: 介质质点的振动方向与波的传播方向相垂直,这种波称为横波。例如在绷紧的绳子上传播的波,就是横波。图1-2表示两种波的传播和质点振动情况。

单纯的纵波和单纯的横波是最简单的两种波。但是,自

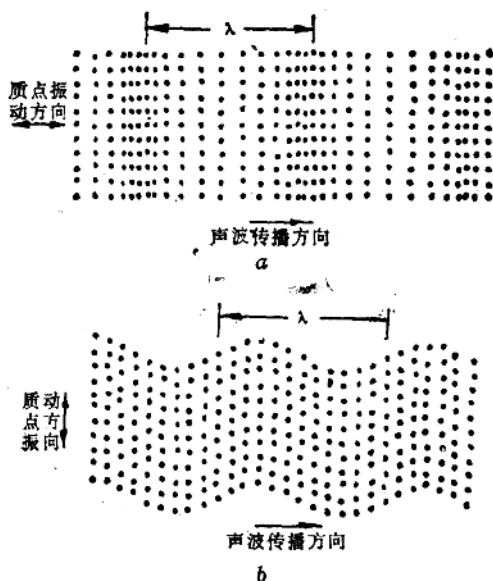


图 1-2 质点振动与波的传播方向的关系
a—纵波；b—横波

自然界中的机械波还有许多复杂的形式，如表面波、弯曲波、扭转波等。从运动学的角度看，根据迭加原理，任何复杂的波都是纵波和横波迭加的结果。

纵波的传播是依靠介质时疏时密（即时而拉伸，时而压缩），使介质容积发生变形引起压强的变化而传播的，因此和介质的容变弹性有关。它在固体、液体、气体中都能传播。横波的传播是使介质产生剪切变形时引起的剪切应力变化而传播的，因此和介质的切变弹性有关。由于气体、液体无一定形状，当它的形状发生变化时，不产生切变应力，所以气体、液体不能传播横波。在气体、液体中只有纵波

存在。

至于水面的水波，是一种特殊的表面波。

另外，若按波的波阵面的形状分，声波还可分为平面波、球面波和柱面波。

§ 1-3 声波在固体中的传播速度

不同类型的波，在不同边界条件的固体中的传播速度各不相同。根据波动方程可导出其传播速度的公式。

对于在无限大介质中传播的纵波速度 C_p ：

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1-4)$$

在有限的固体中传播时，则形成制导波，其速度变小。在薄板（板厚远小于波长）中纵波的速度 C_L ：

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (1-5)$$

在细长杆（横向尺寸远小于波长）中纵波的速度 C_o ：

$$C_o = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1-6)$$

对于在无限介质中传播的横波速度 C_s ：

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (1-7)$$

式中 E ——弹性模量；

G ——剪切弹性模量；

σ ——泊松比；

ρ ——密度。

把(1-4)、(1-7)两式相除，得到纵横波速度之比：