

流域水循环模拟与调控国家重点实验室资助

冲击弹性波理论与应用

吕小彬 吴佳晔 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

冲击弹性波理论与应用

吕小彬 吴佳晔 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地总结和阐述了有关冲击弹性波检测混凝土质量的理论、方法和工程经验,包括混凝土无损检测技术的概况、冲击弹性波的基本理论、信号采集、处理和分析技术、弹性波CT技术、瞬态表面波谱分析(SASW)方法、冲击回波(IE)方法、瞬态表面波测试裂缝深度技术、冲击弹性波测试混凝土动弹性模量和耐久性劣化技术、冲击弹性波测试不同混凝土试件弹性波速度的方法以及桩、杆和索等结构质量的检测等。本书尝试建立一套完整的基于冲击弹性波的混凝土无损检测的技术体系,在兼顾有关基础理论知识论述的同时,更注重该技术在工程中的实际应用。

本书适用于从事水利和其他土木工程混凝土结构质量检测和安全评估工作的科研和技术人员,也可供高等院校有关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

冲击弹性波理论与应用 / 吕小彬, 吴佳晔著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016.6
ISBN 978-7-5170-4481-9

I. ①冲… II. ①吕… ②吴… III. ①冲击波—弹性波—应用—混凝土坝—无损检验 IV. ①TV642

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第152757号

书 名	冲击弹性波理论与应用
作 者	吕小彬 吴佳晔 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 20.25印张 480千字
版 次	2016年6月第1版 2016年6月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	99.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

混凝土结构的无损检测和安全评估,对保证结构的安全运行具有非常重要的意义。我国在这方面的研究工作始于20世纪50年代中期,那时引进的回弹法和后来的超声波法到现在仍然还是混凝土强度和内部缺陷检测的主要手段。其技术先进性、原理相关性、现场适用性和结果可靠性等已不能满足我国迅猛发展的基础设施建设的需求,迫切需要一种更加合理、有效和准确的混凝土无损检测方法。冲击弹性波技术在国内外的研究起始于20世纪八九十年代,其衍生出的弹性波CT、冲击回波和瞬态表面波谱分析(SASW)等检测方法,已在外国土木工程行业得到非常广泛的应用,在我国虽已引进,但目前基础理论和应用技术的研究仍略显薄弱,制约了这项技术的发展。编写本书的目的就是系统归纳和总结有关冲击弹性波检测混凝土质量的理论、方法和工程经验,结合作者的研究成果,尝试建立一套完整的基于冲击弹性波的混凝土无损检测的技术体系。

本书共分为11章。第1章绪论部分对我国混凝土无损检测技术的发展和现状进行了扼要概述,并对冲击弹性波的技术优势进行了简单总结,提出了基于冲击弹性波的混凝土无损检测技术体系的基本概念;第2章讲述冲击弹性波的理论基础,主要包括冲击弹性波的产生、传播、衰减、反射、折射等,重点在于原理的阐述和公式的推导;第3章介绍有关弹性波信号采集、处理和分析的软、硬件知识,主要包括传感器的性能、A/D转换、数据通信以及传感器的选型、固定方法和共振修正等,并讨论了软、硬件降噪技术、信号频谱分析以及小波变换、信号积分等方面的有关内容;第4章论述了针对混凝土坝和大体积混凝土构件的冲击弹性波CT技术,介绍弹性波CT解析方法和射线追踪技术的基本原理,分析影响弹性波CT准确性的主要因素,然后结合几个工程项目说明该技术的实际应用情况;第5章表面波法讲述瑞雷波的基本理论和频散曲线的概念,着重讨论瞬态表面波谱分析(SASW)的原理、解析方法和工程应用实例,并提出一种适用性更强的基于卓越波长的瞬态表面波方法;第6章叙述冲击回波法的原理、分析方法和ASTM C1383标准“Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method”的相关规定等,并列举几个

利用冲击回波检测混凝土板内部质量和预应力波纹管灌浆密实度的工程应用实例；第7章提出利用瞬态表面波测试混凝土表面裂缝深度的新方法，讲述其基本原理以及减小测试误差的双方向激振技术，与其他几种常规检测方法进行比较，并给出几个工程应用实例；第8章介绍测试混凝土动弹性模量的动态法，提出利用冲击弹性波测试动弹模的方法，论述其基本原理和模型分析结果，并根据系统性试验数据验证该方法的可靠性；第9章讲述在试验室内利用冲击弹性波测试混凝土抗冻性衰减的方法，并与常规的横向自振频率法进行对比，提出应用冲击弹性波检测现场混凝土耐久性劣化的概念；第10章讲述利用冲击弹性波测试不同类型混凝土试件弹性波速度的方法，并与常规超声波测试结果进行对比，为建立准确评价混凝土质量的弹性波速度专用测强曲线提供一种全新的可靠方法；第11章讲述利用冲击弹性波检测桩、杆和索等结构质量的基本原理和测试方法。

参加本书编写工作的还有李萌、李秀琳、王荣鲁和黄昊几位同志。李萌同志参与了第1章、第4章和第6章，李秀琳同志参与了第2章和第5章，王荣鲁同志参与了第3章和第7章，黄昊同志参与了第10章和第11章的编写。

本书中的一些基础理论来自于国内外有关文献和学术专著，也有一部分是作者本人完成的科研成果，书中的工程实例均来自于作者近几年承担的比较有代表性的混凝土结构检测项目。本书涉及的知识点比较多，加之自身水平有限，难免会出现一些错误和论述不妥之处，诚挚欢迎混凝土质量检测行业的专家和同行的批评指正，共同促进该项技术的发展。

作者

2015年11月18日于北京、成都

目 录

前言	
1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 无损检测技术概述	2
1.3 弹性波 (P 波) 速度评定混凝土质量参考标准	3
1.4 常规无损检测方法简介	4
1.5 冲击弹性波无损检测技术体系概况	6
参考文献	7
2 冲击弹性波的理论基础	9
2.1 概述	9
2.2 振动的基本原理	9
2.3 波动的基本理论	17
2.4 弹性波的基本理论	19
2.5 半无限空间中瑞利波 (Rayleigh) 的频散特性	33
2.6 弹性板中朗姆 (Lame) 波的频散特性	36
2.7 有限厚弹性体中表面波的特性	38
2.8 P 波的频散性	42
2.9 S 波及 Love 波的频散特性	43
2.10 小结	45
2.11 其他测试媒介	45
3 信号采集及分析	49
3.1 信号采集基础	49
3.2 振动及波动信号测试	54
3.3 信号分析基础	64
3.4 数字成像技术基础	76
参考文献	78
4 弹性波 CT	79
4.1 弹性波 CT 概述	79
4.2 弹性波 CT 基本原理	80

4.3	大体积混凝土坝冲击弹性波 CT 技术	97
4.4	大尺寸混凝土构件冲击弹性波 CT 技术	111
	参考文献	119
5	表面波法	121
5.1	表面波检测的应用范围	121
5.2	瑞雷波基本理论	122
5.3	R 波频散曲线	124
5.4	傅里叶变换基本概念	131
5.5	瞬态表面波分析——SASW 方法	135
5.6	瞬态表面波分析—f-k 法简介	149
5.7	基于卓越波长的瞬态表面波法	149
	参考文献	154
6	冲击回波法	155
6.1	概述	155
6.2	基本原理	155
6.3	冲击回波分析方法	159
6.4	ASTM C1383 相关规定	164
6.5	系统误差分析	166
6.6	冲击回波典型时域曲线和频谱图	167
6.7	钢筋的影响	169
6.8	冲击回波检测设备	170
6.9	冲击回波检测混凝土板内部质量	172
6.10	冲击回波检测混凝土板内部缺陷	174
	参考文献	179
7	裂缝深度及倾斜的检测	181
7.1	概述	181
7.2	无损测试方法及原理	182
7.3	模型、现场验证	196
7.4	现场典型应用	199
7.5	其他方法	202
8	混凝土动弹性模量测试	205
8.1	概述	205
8.2	动弹性模量测试方法	207
8.3	冲击弹性波测试动弹性模量	210
8.4	试验研究	218
8.5	沥青混凝土动弹性模量测试	228
	参考文献	231

9 混凝土耐久性劣化检测	233
9.1 概述	233
9.2 混凝土力学性能与相对动弹性模量关系	235
9.3 混凝土耐久性劣化的检测	237
9.4 试验研究	238
9.5 冲击弹性波监测混凝土耐久性劣化	249
参考文献	249
10 混凝土试件弹性波速度测试	251
10.1 概述	251
10.2 冲击回波法测试方案	252
10.3 有限元动力响应分析	252
10.4 150mm×150mm×150mm 立方体试件	252
10.5 ϕ 100mm×100mm 芯样	257
10.6 弹性波速度评价混凝土强度曲线	262
10.7 冲击回波与超声波测试的比较	263
参考文献	267
11 基桩、锚杆、锚索检测技术	269
11.1 无损检测的理论基础	269
11.2 基桩完整性检测	275
11.3 锚杆检测	297
11.4 锚索长度检测	311

1 绪论

1.1 引言

混凝土在水利、工业与民用建筑、道路桥梁、港口等基础设施建设中应用范围最广、使用量最大的建筑材料，其质量好坏往往关系着整个工程的安全。因此，对混凝土质量的控制至关重要。

混凝土质量控制可以分为两个阶段：施工期检查和运行期维护。在施工期检查中，在混凝土生产和浇筑中随机抽取新鲜拌和物，制备试样送养护室养护至规定龄期后，在试验室内依据相应规范进行抗压、抗渗、抗冻、收缩、徐变及抗冲磨等性能的标准试验，根据试验结果来评定混凝土质量。这种方法虽然最直观，但是由于取样数量有限，而且试件的成型方法与现场浇筑情况有一定差异。因此，有时并不能真实、全面地反映工程的实际施工质量。在这种情况下，往往需要对已建结构进行有损和无损检测来更全面、准确地评价整个工程的质量。有损检测一般指的就是取芯，通过钻取芯样加工成圆柱体试件，进行抗压试验来测试已建结构混凝土的实际强度。取芯检测不但费工费时，而且还会对结构造成一定程度的损伤，同时很难修复。拉拔法等少损方法也属于强度检测，检测效率介于准确的取芯方法和快速的无损检测方法之间。而真正适合大范围开展的是无损检测。在施工期，混凝土无损检测注重于强度，检测方法主要是回弹法和超声回弹综合法。

混凝土结构在服役过程中，由于受荷载的作用和外界环境因素（冻融循环、干湿交替、碳化、温度变化、溶蚀、碱骨料反应、化学侵蚀等）的影响，可能会产生结构损伤和混凝土耐久性劣化。如不及时发现这些问题并采取科学有效措施进行防护，将会导致建筑物破坏逐步积累，发展到一定程度时会使结构不能满足原设计的要求，令业主和管理方不得不再次投入大量资金进行修复加固，这将既提高了结构运行的成本，又降低了运营效益。因此，在结构运行期对结构损伤和混凝土耐久性劣化的范围、程度和发展趋势做出及时、准确的判断，具有非常重要的意义。然而在我国水利和其他土木工程行业，相比施工期检查，混凝土结构的运行期维护存在较大欠缺。首先，对在役结构的定期检测和安全评估没有系统性的规划，对结构混凝土质量现状的检测在很多情况下都是应急性的，比如在运行过程中忽然发现一些小问题越来越严重，又比如管理单位正好有申请立项的机会等。再者，运行期混凝土质量检测主要是依靠无损方法，但总体来讲和施工期相比并没有很大的区别，一般情况下还是采用回弹、超声波等比较常规的检测手段，技术水平不高，检测结果往往并不能反映结构混凝土的真实状况，而且检测的参数基本仍以强度为主，忽略了耐久性劣化因素对混凝土性能造成的影响。

为保证混凝土结构的安全，需要对施工期和运行期内的混凝土实行严格的质量控制。

无损检测是实现这一目标最有效的技术手段，正确选择和使用合理的无损检测方法是从事混凝土结构检测和安全评估的工程技术人员应具备的一项能力。

1.2 无损检测技术概述

混凝土的无损检测是指在不对结构造成破坏的条件下，通过测试与目标性能有直接或间接关系的参量，通过该参量来推定目标性能的方法。从原理上讲，测试的参量与所求的目标性能之间相关性越好，无损检测的结果可靠性就越高。

根据其所依托的技术手段，混凝土无损检测方法大体可分为波动振动类（包括冲击弹性波、超声波、声波、打声法等）、电磁波类（包括雷达、电磁诱导、红外线、可视光、射线等）以及其他类等。无损检测主要方法分类见表 1-1。

表 1-1 无损检测主要方法分类

类别	代表检测方法	检测参量
波动振动类	冲击弹性波、超声波、声波	振幅、频率、相位、时间、速度
电磁波类	电磁诱导、微波（探地雷达）	振幅、频率、相位、时间、速度
	红外线、可见光（激光）	颜色、灰度、相干等
	X 射线	射线的衰减
其他类	回弹法等	回弹值

超声波、声波和冲击弹性波在本质上并无太大区别，都属于在媒质中传播的弹性波（应力波），仅在信号的激励及接收方式、频谱范围等方面有所不同。超声波、声波一般通过对压电晶体或者振动膜施加电压激发信号，同样通过对压电晶体或者振动膜的振动产生电荷/电压来接收信号；超声波的频率在 20kHz 以上，而声波的频率一般在 20Hz~20kHz 之间，为人耳可听见的范围。冲击弹性波则是通过对被测结构表面实施瞬时机机械激振（一般采用冲击锤）产生弹性波信号，通过加速度传感器接收信号；由普通冲击锤激发的冲击弹性波的卓越频率一般在几百赫兹到几千赫兹之间，在频率上属于声波的范畴。

冲击弹性波检测仪见图 1-1，超声检测仪见图 1-2。

超声波法具有信号的发生时刻易于控制以及波长短对微小缺陷敏感的优点。但是，由于其激振能量低、频率高。因此，穿透能力差、测试范围小，且易受外界干扰影响，在小型混凝土构件和金属结构缺陷检测中应用较为广泛，不太适合大体积混凝土的检测。而且，超声波的频谱特性相对较差，难以采用 IE、SASW 等频谱分析方法。

由于它具有能量大、测试距离远且适用于频谱分析等优点，冲击弹性波已得到广泛的应用，低应变桩完整性检测和岩锚检测等都是其代表性的方法。近年来，借助于电子技术的进步，冲击弹性波激振时刻的确定问题得到了很好的解决。同时，通过改变冲击锤的大小、导入自动激振装置，使得其激振信号的频率范围也得到了扩展。国际上以弹性波 CT、冲击回波和表面波谱分析（SASW）为代表的冲击弹性波技术的理论研究和工程应用取得了长足进步，使其发展成为一种方便、快捷、适用性强的混凝土无损检测方法。

借助其他行业的技术发展，近些年来混凝土无损检测还引入了一些新的方法和手段，如电磁波（地质雷达）、红外线、放射线等。但是这些方法检测的参量（如地质雷达法中

的介电常数或电磁波速)并不能与混凝土最重要的性能指标(强度、动弹模等)建立明确、直接的物理关系,在一些特定场合(如检测混凝土内部严重缺陷、面板脱空、衬砌厚度、钢筋定位、渗漏等)中,作为辅助甚至主要检测手段是没有问题的,但是单独利用它们来评价混凝土的现实质量状况至少在现阶段是不可行的。



图 1-1 冲击弹性波检测仪



图 1-2 超声检测仪

1.3 弹性波(P波)速度评定混凝土质量参考标准

需要强调的是,在表 1-1 给出的所有方法中,弹性波速度是唯一与混凝土的力学性能(强度、动弹模等)直接相关的参量。在小应变条件下,可以合理地假设混凝土为理想弹性体,P波速度与混凝土的动弹性模量之间存在直接的理论关系:

三维(无限媒质中传播):

$$V_{P3} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1-1)$$

一维(杆件中传播):

$$V_{P1} = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1-2)$$

上二式中 V_{P3} 和 V_{P1} ——P波三维和一维传播速度, m/s;

E_d ——混凝土动弹性模量, Pa;

ρ ——混凝土密度, kg/m^3 ;

μ ——混凝土动泊松比。

由于混凝土的动弹性模量与强度有很好的相关关系,因此P波速度与强度之间也有较好的相关关系,弹性波速度可以用来评价检测断面内部混凝土质量分布情况。目前工程界仍比较广泛地使用 Leslie 和 Cheeseman 于 1949 年提出的 P 波速度检测混凝土质量评价标准^[1],见表 1-2。

以上评价标准一般用来定性判断混凝土质量的优劣。不同混凝土的 P 波速度和强度之间的关系是不同的,其影响因素众多,包括骨料品种、级配、龄期、钢筋的数量和走

向、含水量等，特别是骨料的品种。为了提高质量评估的准确性和可靠性，对某一特定工程，建立 P 波速度和混凝土强度之间的相关关系是很有必要的。

表 1-2 常用 P 波速度评价混凝土质量参考标准

P 波速度/(m/s)	>4500	3600~4500	3000~3600	2100~3000	<2100
混凝土质量	优良	较好	一般 (可能有问题)	差	很差

1.4 常规无损检测方法简介

目前在我国的水利和其他土木工程中，混凝土无损检测最常见的是混凝土强度和缺陷（裂缝、破碎、疏松、孔洞等）的检测。

1.4.1 强度检测

我国在混凝土结构无损检测的研究工作始于 20 世纪 50 年代中期，通过引进瑞士、英国、波兰等国的回弹仪和超声仪，结合工程应用开展了许多研究工作，至今在检测方法上已取得很大进展。目前，回弹法和超声回弹综合法在相关行业（如建工、水工、交通、港口等）都已建立了非常成熟的技术规范。

回弹法是通过测试混凝土表面的硬度来推定混凝土的抗压强度。但表面硬度与混凝土强度之间并没有直接、明确的理论关系，两者之间相关性的影响因素很多，如原材料（特别是骨料）的品种、环境因素造成的表面硬度变化（碳化、表面腐蚀等）、含水率、含气量等，只是在某些特定的条件下两者具有很好的相关关系。因此，应用回弹法时须根据实际情况选择使用三类测强曲线，即统一测强曲线、地区测强曲线和专用测强曲线，在各类行业规范中一般只给出统一测强曲线。回弹法的检测设备是回弹仪，按标称动能可分为两种：中型回弹仪（标称动能 2.207J）和重型回弹仪（标称动能 29.43J），分别适用于厚度小于 60cm 和大于 60cm 的结构构件的强度检测。回弹法最大的缺点是只适合于均质混凝土的检测，由于检测参量为表面硬度，因此，从原理上讲只能反映表面混凝土的质量，无法对内部混凝土的强度分布状况进行准确评价。

回弹法的另一个问题是碳化深度修正。工程经验表明，利用回弹法检测已建水工混凝土建筑物时，使用《回弹法检测混凝土强度技术规程》（JGJ/T 23—2011）和《水工混凝土试验规程》（DL/T 5150—2001，SL 352—2006）规范规定的碳化深度修正方法有时会严重低估混凝土的真实强度，而且经常遇到混凝土龄期不超过一年而碳化深度却已远远超出规范修正上限（一般是 6mm）的情况，采用规范规定的统一测强曲线会对混凝土强度评估造成比较大的误差。而且，活性掺合料在混凝土中的应用越来越广泛，其对碳化深度的影响也颇有争议，新修订的《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T 23—2011）试图对这个问题有所回应，但除了在碳化深度测量方法和测区强度换算表上进行了少许局部修改外，并没有提出根本性的解决办法。

为了弥补回弹法无法检测混凝土内部质量的欠缺，建工、水工、交通及港口等行业都引入了超声波法或超声回弹综合法，利用超声波在混凝土中的传播速度（一般是 P 波速度）来推定混凝土的强度。如前所述，在理想弹性体的条件下，超声波传播速度与混凝土的动弹性

模量有直接的理论关系，而混凝土动弹模与强度之间的相关性又比较好。因此，其检测原理要优于依靠表面硬度的回弹法。但是在实际应用中，受各种因素的影响，超声波速度与混凝土强度之间的相关性并不太好。日本建筑学会曾对普通混凝土的压缩强度与超声波速度的相关关系作了调查，结果表明其相关系数只有 0.46 左右（见图 1-3）。而对于同一种配比的混凝土，其强度与波速之间的相关关系则大为改善。因此，当采用超声波速度来推定混凝土强度时，首先如回弹法那样应建立专用测强曲线，对提高测试的准确性是非常重要的。

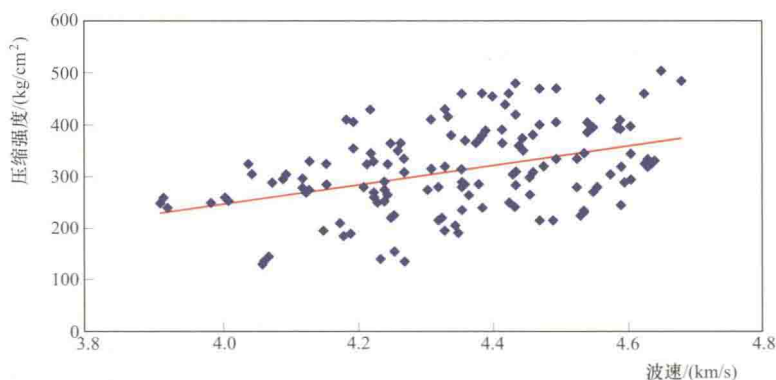


图 1-3 混凝土强度与超声波速度之间的关系曲线图（日本建筑学会）

1.4.2 缺陷检测

混凝土是一种由水、水泥（活性掺合料）、砂、石等混合而成的非均质材料，受施工质量、荷载以及外界环境因素影响容易产生各类各样的缺陷，如剥离、脱空、表面疏松层、内部缺陷（如不密实、孔洞、破碎等）以及裂缝等，混凝土结构中关注比较多的主要是内部缺陷和裂缝的检测。

内部缺陷的检测最常见的是超声波法。测试的基本原理就是当超声波测线穿过内部缺陷时，该测线上超声波的声时将会延长，波速会降低。一般用图 1-4 所示的方法来检测和判断内部缺陷的大致位置和尺寸，图中虚线为超声波测线。图 1-4（b）中的斜向交叉

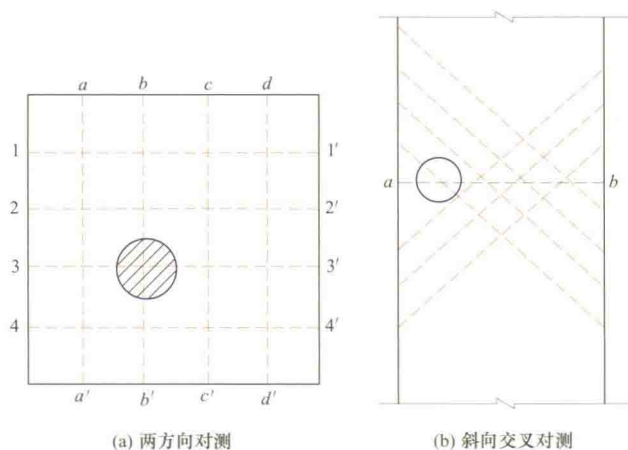


图 1-4 超声波检测混凝土内部缺陷示意图

对测可以演变为超声波 CT 扫描, 提高缺陷识别的准确性。除了利用上述超声波速度的变化外, 还可以利用测线上超声波频率、振幅等特性的衰减来判断缺陷的存在, 但影响这种方法准确性的因素很多, 在实际应用中并不普遍。

超声波检测裂缝深度主要有平测法和对测法, 如图 1-5 所示。平测法适用于只有一个可测临空面的表层浅裂缝深度 (一般在 50cm 以内) 的检测; 对测法可用于深裂缝, 在裂缝两侧钻孔进行跨孔对测。另外, 在有两个相对可测临空面条件下还可以采用斜测法进行检测。检测的基本原理就是利用超声波在完整和开裂混凝土中声时的差距来计算或判断裂缝的深度。经典的对于直裂缝的平测法见图 1-5, 跨缝 (A-B) 与不跨缝 (A-C) 时传感器间距都是 d , 跨缝时超声波从 A 必须绕裂缝的底端才能传播到 B, 通过两种情况下超声波传播的声时差, 并利用图 1-5 中的几何关系, 可以比较容易地得到裂缝深度 H 。

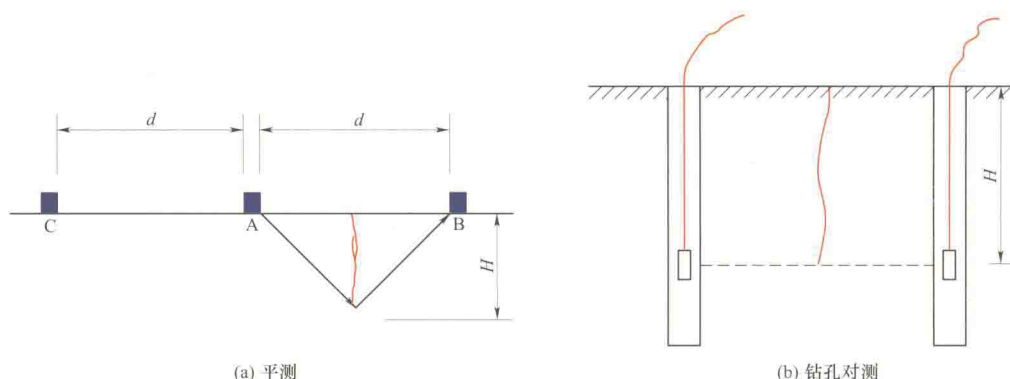


图 1-5 超声波检测混凝土裂缝深度示意图

超声波法准确检测裂缝深度的前提条件是裂缝的缝面处于完全张开状态, 且缝内无水和其他杂质填充, 但在实际工程 (尤其是水利工程) 中基本不存在这种理想状况。由于检测利用的是 P 波 (压缩波), 只要缝面有接触或是缝内有填充物 (包括水), 超声波就会穿透裂缝而非绕过缝端传播, 造成跨缝声时减少, 从而使裂缝深度计算出现误差, 一般用超声波法测试得到的裂缝深度要比实际小得多。

1.5 冲击弹性波无损检测技术体系概况

与传统的超声波相比, 冲击弹性波主要具有以下特点:

- (1) 冲击弹性波由冲击锤激发, 能量大且集中, 测试深度明显提高, 能够穿透 10m 以上的混凝土。
- (2) 冲击弹性波的卓越频率一般在几百到几千赫兹左右, 波长较长, 受混凝土骨料颗粒散射影响小, 受外界杂散波影响小。
- (3) 现场适用性强, 操作方便, 适合对大体积混凝土结构进行快速、全面检测。
- (4) 频谱特性好, 适合于 IE、SASW 等有限元数值模拟分析。

根据目前国内外的研究和应用情况, 冲击弹性波技术可以概括为以下几个方面的内容:

- (1) 冲击弹性波层析成像 (CT) 技术。当被测结构具有两个 (或以上) 相对的可测

临空面时，可以采用弹性波 CT 技术对其内部混凝土质量分布状况进行检测。根据结构尺寸以及信号激振和接收方式的不同，可以分为大体积混凝土结构（如混凝土坝）弹性波 CT 和大尺寸混凝土构件（如墙、墩、基础等）弹性波 CT。

(2) 瞬态表面波方法。当被测结构只有一个可测临空面时，可以采用瞬态表面波的频散特性对表面下内部混凝土的质量进行检测。此类结构在工程中非常普遍，如面板、底板、衬砌、溢洪道、边墙以及大坝上、下游面等。瞬态表面波法中应用最多的是表面波谱分析即 SASW 方法。

(3) 冲击回波 (IE) 方法。对于面板、楼板、墙、衬砌和渡槽槽壁等板状薄壁混凝土结构，可以采用冲击回波的方法检测整个板厚度范围内混凝土的质量以及判断结构内部可能存在的缺陷。根据冲击回波的原理还可以衍生出基桩、锚杆和锚索等检测方法。

(4) 冲击弹性波测试混凝土动弹性模量技术。利用冲击弹性波检测方法获得的都是结构内部混凝土弹性波 (P 波或 R 波) 速度的数值大小及分布状况的信息。弹性波速度 (V_P 和 V_R) 与混凝土的动弹性模量 E_d 之间具有直接的理论相关关系。因此，采用相同检测方法对结构混凝土弹性波速度的变化情况进行长期观测，就能够跟踪混凝土动弹性模量的变化趋势，实现对混凝土耐久性劣化的监测。

参 考 文 献

- [1] Leslie, J. R. and W. J. Cheeseman. An Ultrasonic Method for Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures. ACI Proceedings, Vol. 46, Sept. 1949, 17 - 36.



喀腊塑克水电站

2 冲击弹性波的理论基础

2.1 概述

如前所述，冲击弹性波与电磁波一样，属于波动的范畴。但是，波动本身随着时间的变化，其位置也发生变化（即为波的传播）。因此，波动的测试只能采用在某个或者某几个固定点设置传感器，通过各个传感器拾取的信号推算波动的相关参数。

所以，传感器拾取的信号是该质点的相关信息。对于弹性波而言，拾取的信号实质上是质点的振动信号，即冲击弹性波的测试其实是通过测试微观上的振动信号，来反映宏观上的波动信息。

因此，振动与波动是两种既有区别又有联系的不可分割的物理现象。其中，振动是物质的一种运动形式，而波动则是振动的传播过程。

连续弹性体中的一个质点在外力作用下，在其平衡位置附近沿直线往复运动，则该质点的运动称为机械振动。对于连续介质，当某一质点振动时，该质点的振动能量就会传递到周围质点上，从而引起周围质点的振动。这种振动能量在介质内部的传播过程称为波动。冲击弹性波的检测是通过对某一质点的振动的测试而实现的。同时，直接诱发测试对象的振动，通过分析其时域和频域动力响应，也是一种诊断和分析结构系统特性的方法。因此，了解和掌握振动、波动的基本理论是非常必要的。

所以，本章中对振动和波动两方面进行了介绍。

2.2 振动的基本原理

一个物体或质点对应一个静止参考点作往复运动，称为振动。物体振动时的运动轨迹，既可以是一条线，也可以是一条平面曲线或空间曲线。其中，空间曲线的振动是最复杂的，但仍可以看作是振动在三个坐标轴上的三个直线振动的合成。因此，直线振动是基本的振动。

2.2.1 简谐振动

2.2.1.1 简谐振动的特征

简谐振动既是一种最基本也是最简单的激振振动，同时也是一种周期振动，它可以视作一个物体或质点相对于基准位置作往复运动的，在一定的间隔时间 T （周期）后，运动自身精确地重复。因此，周期振动可以用振动位移 $x(t)$ 为时间 t 的函数关系用式（2-1）表示：

$$x(t) = x(t + T) \quad (2-1)$$

周期振动的波形形式多样，其中，单自由度体系正弦或余弦振动是周期振动中最简单的形式，也称为简谐振动。最典型的例子是单摆和弹簧悬挂重荷（质量—弹簧系统）的振动，单自由度简谐振动见图 2-1。