

# 冲击—回波法测量混凝土厚度与缺陷\*

顾轶东 林维正 苏勇

(同济大学声学研究所 上海·200092)

**摘要** 冲击回波法是近几年来新兴的一种超声检测方法,它是采用落球、锤击等方法在被测物件中产生应力波,用传感器接收回波,然后用时域或频域分析回波反射位置,以判断混凝土中缺陷位置的方法。本文就冲击回波法测量混凝土厚度及缺陷的问题进行了探讨,并利用冲击回波法进行了现场检测,以此促进向工程实用化发展。

**关键词** 冲击回波法,厚度,缺陷

## Detecting thickness and default of concrete by impact-echo method

GU Yidong LIN Weizheng SU Yong

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai · 200092)

**Abstract** Impact-Echo Method is a new ultrasonic testing technique. It is a method of detecting default position of concrete based on transient stress wave propagation generated by steel ball or hammer that impacts on the surface of specimen. A displacement transducer located close to the impact point is to monitor the surface displacements caused by the arrival of the reflected waves. The analysis of displacement waveform can be performed in the time domain or in the frequency domain that can be used to locate default in concrete structures. The use of impact-echo method for non-destructive testing of thickness and flaws of concrete was discussed in this paper. A in-suit test for the construct of concrete by the impact-echo method was made.

**Key words** impact-echo method, thickness, default

### 1 引言

冲击回波技术(Impact-Echo Method, 简称IE法)是本世纪80年代由美国Conell大学与国家标准技术研究院提出的并且被证明是一种全方位的技术。此项技术中,弹性波在物件内部产生共振,由共振频率来计算缺陷位置及物体厚度等。加拿大马尔霍察在1984年国际现场混凝土无损检测会议论文集的综述中,曾把冲击回波法列为“最有发展前途的现场检测方法之一”。在国内,南京水利科学研究院对此项技术也进行了一定的研究工作<sup>[1]</sup>。

### 2 基本原理

在冲击回波中,利用小钢球冲击混凝土表面产生冲击应力脉冲,脉冲包括纵波(P波)、横波(S波)和表面波,表面波沿表面传播,P波和S波沿球面波阵传入物体,在内部缺陷和物体边界处反射,反射的波传回顶端,在顶端表面,波再次反射传入物体,这样由于波在上表面和内部缺陷或外部边界之间多次反射形成谐振条件。当满足下列条件时,发生共振现象:

$$\delta t = nt = n/f \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

其中 $f$ 为基频。

\* 第一作者:顾轶东,男,1973年11月生,硕士研究生

收稿日期:99-1-3;修回日期:99-3-3

当  $n=1$  时, 基频共振幅值的最大值对应的波长是厚度  $D$  的两倍。  $n=1, 2, \dots$  时, 共振峰也出现在频谱上, 但幅值随着  $n$  的增大而迅速下降。 厚度可由基本共振方程得:

$$D = c \cdot \Delta t / 2 = c / 2f \quad (2)$$

其中  $c$  为  $P$  波声速。

本文利用有限元法对混凝土结构模型进行波动分析, 从中得到波的传播规律, 作为实际测试的理论指导依据。 计算程序采用美国 Algor 公司的 Super SAP 有限元软件包。 具体做法如下:

首先进行有限元网格剖分, 其中单元全部为 4 节点等参元; 网格剖分  $\Delta x = 0.5\text{cm}$ 。

其次选取单元的物理特性参数, 混凝土弹性模量  $E = 3.6 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ , 泊松比  $\mu = 0.2$ ; 密度  $\rho = 2400 \text{kg/m}^3$ 。

假定球的半径  $R = 2\text{cm}$ , 下落高度  $H = 10\text{cm}$ , 这样求得近似的冲击力  $F$  和冲击时间  $t_c$  的大小, 取  $F_{\max} = 1 \times 10^5 \text{N}$ ;  $t_c = 20\mu\text{s}$ ; 冲击力为半周期的正弦函数  $F(t) = A \sin(t \cdot \pi / t_c)$

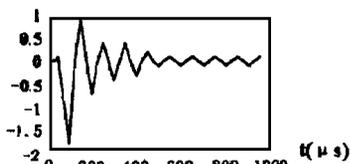


图 1 利用 SAP 计算模拟的冲击回波响应图

用直接积分法求解波动有限元问题时, 模型在空间和时间都进行了离散化, 并引入了计算误差。 为了提高计算精度, 可以选择合适的时间步长与空间离散步距的匹配方式, 使两者引起的误差相当。 赵振峰<sup>[2]</sup> 给出了空间与时间的匹配关系式  $\Delta x = c \cdot \Delta t$ 。 并通过计算指出, 单纯加密  $\Delta x$  或  $\Delta t$  对计算精度的改善程度不大; 当满足匹配关系时, 同样的计算量却取得了较好的结果。

$$\text{根据匹配原则 } \Delta x = c \cdot \Delta t \quad (3)$$

则  $\Delta t = \Delta x / c = 0.5 \times 10^{-2} / 4000 = 1.25 \times 10^{-6} = 1.25\mu\text{s}$  其中波速  $c = 4000 \text{m/s}$ 。

计算机模拟采用上述参数, 并取如表 1

中混凝土模型 1 同样的尺寸大小, 图 1 给出了通过 SAP 计算后的位移响应曲线。

### 3 模型与实验仪器

#### 3.1 混凝土板及缺陷模型的制作

混凝土模型制作见表 1

模型编号	尺寸(m)	缺陷类型
1	400 × 400 × 200	无缺陷
2	1500 × 1500 × 250	预埋 3 个泡沫塑料和裂缝
3	500 × 500 × 220	裂缝

#### 3.2 实验仪器及传感器

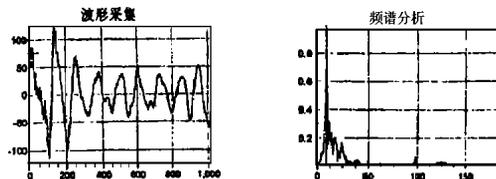
本实验的数据采集和分析选用同济大学自制 U-Sonic 型超声检测仪, 仪器具有数据波形采集、频谱分析功能。

采用的传感器是 YD 系列压电式加速度计(电荷灵敏度:  $0.3 \text{mV/m} \cdot \text{s}^{-2}$ ; 频率范围  $20 \text{kHz}$ )。 它具有工作频带宽、体积小、重量轻、安装方便等特点, 适合于实验选用。

### 4 实验与现场应用

#### 4.1 混凝土板厚度分析

采用对穿法测得模型 1 的平均声速为  $4000 \text{m/s}$ , 分析结果如图 2 所示, 由于图 1 的计算机模拟采用了与模型 1 相同的条件, 对比图 1 与图 2 中的采集波形所知理论与实际是吻合的。



时域分析:  
 $t: 51\mu\text{s}$ ;  
 声速:  $4000 \text{m/s}$ ;  
 实测厚度:  
 $20.4 \text{cm}$ ;  
 误差 2%

频域分析:  
 主频:  $9.82 \text{kHz}$ ;  
 声速:  $4000 \text{m/s}$ ;  
 试件厚度:  
 $20 \text{cm}$ ;  
 实测厚度:  $20.4 \text{cm}$ ;  
 误差 2%

图 2

#### 4.2 混凝土板缺陷分析

把模型 2 作为缺陷分析模型, 在混凝土板表面的横向及纵向每隔  $10 \text{cm}$  划分网格,

在每个交叉点上用冲击回波采集波形, 然后根据声速(4100m/s) 计算出厚度, 测试结果如图 3 所示。

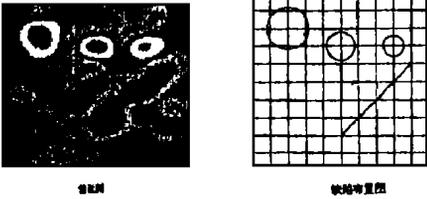


图 3

由此可见, 利用此方法可以比较清楚地判断出缺陷的类型和位置。

### 4.3 混凝土垂直表面裂缝深度分析

在大多数情况下, 冲击回波法的共振频率可成功地用于定位混凝土结构内部裂缝和孔洞的位置。但有时在频谱中辨认出对应于缺陷的峰值时遇到了困难, 这里采用一种基于时域分析<sup>[3]</sup>的测试方法来解决这个问题。

在测试中我们选用模型 3 作为实验模型, 图 4 和图 5 分别表示了实验布置图的切面和俯视图。

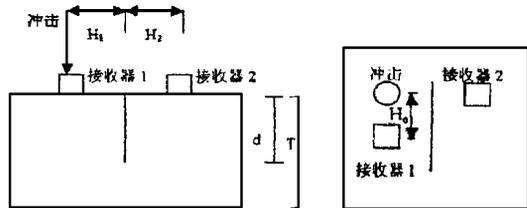


图 4

图 5

由冲击源冲击后, 表面波第一个到达接收换能器并且激发监控系统。若  $R$  波到达的时间为  $t_1$ , 已知  $R$  波波速为  $c_R$ , 那么冲击开始的时间为  $(t_1 - H_0/c_R)$ 。由于冲击产生的  $P$  波直到在裂缝底部发生衍射时才到达裂缝后面的区域, 此时第二个接收换能器才开始接收衍射的  $P$  波, 若衍射  $P$  波到达第二个接收换能器的时间为  $t_2$ , 那么  $P$  波从冲击点到第二个接收换能器的最短时间可由下式获得:

$$\Delta t = t_2 - (t_1 - H_0/c_R) = t_2 - t_1 + (H_0/c_R) \quad (4)$$

若在混凝土板中已知  $P$  波的声速为  $c_P$ , 从冲击点到第二个接收换能器最短的传播距

离可以计算为  $c_P \times \Delta t$ 。假如从裂缝到冲击点和第二个接收换能器之间的距离相应为  $H_1$  和  $H_2$ , 那么裂缝的深度可根据几何关系求得并由下式计算:

$$d = \left[ \frac{(c_P \times \Delta t)^2 + H_1^2 - H_2^2}{2 \times c_P \times \Delta t} \right]^2 - H_1^2 \quad (5)$$

在实验中, 我们测得表面波声速  $c_R$  为 3610m/s,  $P$  波声速  $c_P$  为 3941m/s, 通过仪器采集和记录波形, 如图 6 所示。其中,  $H_0 = 2\text{cm}$ ,  $H_1 = 9\text{cm}$ ,  $H_2 = 9\text{cm}$ ,  $t_1 = -0.6\mu\text{s}$ ,  $t_2 = 80.4\mu\text{s}$ 。代入式(4), 即  $\Delta t = 86.5\mu\text{s}$ ; 代入式(5) 得出  $d = 14.47\text{cm}$ ; 相对误差为:  $[(14.50 - 14.47) / 14.5] \times 100\% = 0.2\%$

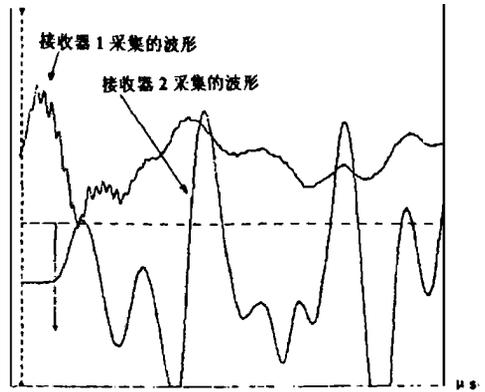


图 6

### 4.4 上海市龙水南路现场路面厚度检测

我们利用冲击回波对龙水南路路面厚度进行了现场检测, 并通过现场取芯来验证测试结果。采用表面声透射法测得路面的声速为 4182m/s, 其测试结果如表 2 所示。

表 2

取芯编号	声速 (m/s)	主频 (kHz)	测量厚度 (cm)	实际厚度 (cm)	相对误差 (%)
1	4182	10.01	20.89	21.50	2.8
2	4182	8.53	24.51	25.50	3.9
3	4182	9.03	23.15	23.00	0.6
4	4182	8.55	24.47	24.00	2.0
5	4182	8.55	24.47	24.00	2.0

下面给出一处取芯处的典型频谱图。

主频: 10kHz; 测量厚度: 20.89cm, 实际厚度: 21.50cm, 相对误差:  $[(21.50 - 20.89) / 21.50] \times 100\% = 2.8\%$

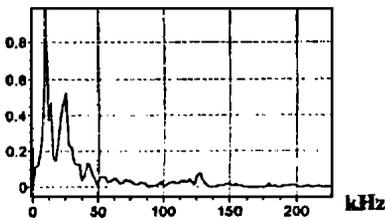


图 7

## 5 结 论

总结本文的研究工作,可得出下列结论:

(1) 利用有限元软件包动态模拟波动过程,其结果与实验结果相符,以此证明了冲击回波法检测混凝土厚度及缺陷的可行性。

(2) 冲击回波方法对于测量混凝土厚度,特别是对于一个可测面的情况下,是一种全方位的技术,它的精度较高,一般可达到误差

3%。

(3) 利用冲击回波法可以测量混凝土内部缺陷的位置,也可测量混凝土垂直表面裂缝的深度。在测量裂缝深度时,采用双接收换能器,并利用时域分析可达到很高的精度。

## 参考文献

- 1 罗骥先,傅翔,宋人心. 冲击反射法检测混凝土内部缺陷与厚度,混凝土:5~91
- 2 赵振峰,刘迎曦. 波动方程有限元离散中的变量匹配. 地震工程与工程振动,1991;11(4)
- 3 Y. lin, T. Liou and C. M. Siao, . Recent developments in the impact echo technique for nondestructive evaluation of concrete structures. 1996, 11; 14th WCNDT

## 简 讯

### 上海市建委主持召开

### “上海大剧院观众厅音质设计及可调混响技术研究”科技成果鉴定会

由华东建筑设计研究院科研所声学组承担并完成的“上海大剧院观众厅音质设计及可调混响技术研究”科技成果鉴定会,于1999年3月5日由市建委主持召开,来自同济大学、南京大学、东南大学、上海建筑设计研究院、上影厂及广电局技术中心等单位的建声专家组成了鉴定专家委员会,课题负责人章奎生同志及杨志刚同志和上海大剧院艺术中心技术部应后捷经理先后作了观众厅音质设计及研究总报告、实验室可变吸声体试验报告及大剧院主观音质评价报告。专家们对本项成果进行了认真负责的讨论和评价,认为本成果技术资料齐全、测试数据可靠、厅内混响特性优良、声场分布均匀、反射声丰富、

隔声好、噪声低,并在声学设计中成功地采用了电动可调吸声帘幕、气垫移动伸缩式大型舞台音乐反射罩、池座声反射栏板、开闭式耳光口等新设计,使上海大剧院开创了国内大型剧院能在自然声条件下演出歌剧及交响乐,并取得优秀的音质效果。评价认为大剧院音质设计要求高、难度大,能取得一次成功是很不容易的,实测音质性能与国际著名剧院及音乐厅指标相接近,表明建声设计为上海大剧院的建设成功起到了重要的作用。鉴定委员会一致同意通过鉴定,认为该项成果达到了国际先进水平。

章奎生 1999年3月8日