

表面波探测地下障碍物试验

周正东, 马良筠

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:介绍表面波探测地下障碍物的试验原理、试验方法、设备仪器以及试验结论. 试验验证了数值研究和理论分析所得的表面波频散曲线对浅层地下障碍物有较强敏感性的结论. 通过对频散曲线波动特征的进一步分析, 可有效地确定地下障碍物的位置、大小、形状及埋置深度. 试验表明表面波探测可广泛应用于工程实际的无损检测中.

关键词:表面波; 频散曲线; 障碍物

中图分类号: O347.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)03-0016-03

采用表面波对地下障碍物或土层异常点的探测在岩土工程、考古研究中有广泛的应用前景. 表面波探测地下障碍物在确定障碍物的弹模、阻尼以及障碍物和周围介质的硬度比方面有极大的优越性. 又由于表面波探测具有无损性、操作简易性和经济可靠性, 目前正受到国内外研究者的青睐.

表面波探测地下障碍物是表面波波谱分析法(SASW)的一个延伸. 最初 SASW 法在土木工程中主要用于估计层状介质的层厚和各层介质的弹模. 随着 SASW 法的广泛使用, Haupt, Dracinsky, Gucunski^[1]分别从数值模拟和试验研究上发现表面波对于靠近地表的障碍物具有很强的敏感性. 最近不少学者发现障碍物的垂直边界可引起显著的散射波, 从而使表面各点的频散曲线产生波动, 根据频散曲线的波动情况可确定障碍物的位置、大小、埋置深度和与周围介质大概的硬度比.

表面波探测地下障碍物的方法是近几年发展起来的无损检测方法^[2], 具有以下优点: ①可提供各种物理参数和几何信息; ②时空采样宽度大, 可实施点面结合的勘探; ③是一种不损坏结构和工程地质环境的技术; ④经济、快速.

1 表面波探测地下障碍物的理论依据

表面波探测地下障碍物的示意图见图 1.

根据弹性波动理论, 假定瑞利波以沿 x 轴正向传播, 其可表示为

$$R(\omega) = A(\omega)e^{-\xi\omega\frac{x}{C_R}}e^{i\omega(t-\frac{x}{C_R})} \quad (1)$$

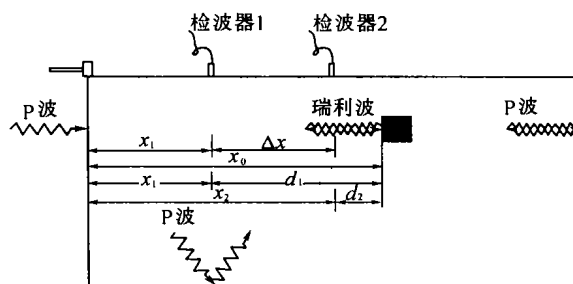


图 1 表面波探测障碍物示意图

式中: $R(\omega)$ 为瑞利波的地表响应; t 为时间; A 为振幅; ω 为瑞利波圆频率. 存在障碍物时, 地表的响应可近似为入射波和反射波的叠加. 设反射波与入射波的振幅比为 $\gamma(\omega)$, 则在 x_1, x_2 处的响应可表示为

$$R_1(\omega) = A(\omega)e^{-\xi\omega\frac{x_1}{C_R}}e^{i\omega(t-\frac{x_1}{C_R})} + A(\omega)\gamma(\omega)e^{-\xi\omega\frac{2x_0-x_1}{C_R}}e^{i\omega(t-\frac{2x_0-x_1}{C_R})} \quad (2)$$

$$R_2(\omega) = A(\omega)e^{-\xi\omega\frac{x_2}{C_R}}e^{i\omega(t-\frac{x_2}{C_R})} + A(\omega)\gamma(\omega)e^{-\xi\omega\frac{2x_0-x_2}{C_R}}e^{i\omega(t-\frac{2x_0-x_2}{C_R})} \quad (3)$$

式中: ξ 为波传播的衰减系数; x_1, x_2 如图 1 所示. $\gamma = 0$ 表示无反射波; $\gamma = 1$ 表示全反射. 对 x_1, x_2 处的响应的两条记录作互功率谱计算可得到 x_1, x_2 处任意频率的相位差 P :

$$P = \omega \frac{\Delta x}{C_R} + f(1 + \gamma e^{-2\xi\omega\frac{d_1}{C_R}}e^{-2i\omega\frac{d_1}{C_R}} + \gamma e^{-2\xi\omega\frac{d_2}{C_R}}e^{2i\omega\frac{d_2}{C_R}}) \quad (4)$$

函数 f 表示取复变量的相位角.

$$\text{记} \quad A_1 = \gamma e^{-2\xi\omega \frac{d_1}{C_R}} \quad A_2 = \gamma e^{-2\xi\omega \frac{d_2}{C_R}}$$

$$\varphi_1 = 2\omega \frac{d_1}{C_R} \quad \varphi_2 = 2\omega \frac{d_2}{C_R}$$

则式(4)可表示为

$$P = \omega \frac{\Delta x}{C_R} + f(1 + A_1 e^{-i\varphi_1} + A_2 e^{i\varphi_2}) \quad (5)$$

再由式(6)可计算得到相速度.

$$c = \frac{\omega \Delta x}{P} \quad (6)$$

根据式(5)和式(4)可得到以下表面波传播的重要性质:

a. 幅值 A_1, A_2 随频率的减小而增大. 同时当频率减小时, 入射波作用的相位差 $\omega \frac{\Delta x}{C_R}$ 的作用将迅速减小. 因此如果低频波被障碍物反射, 那它将在表面波测试中引起较大的相速度变化.

b. 由式(5)可知检波器距障碍物距离的减小或检波器间道间距的减小将加剧频散曲线的波动.

c. 假如检波器间的道间距很小, 则由式(5)中括号内的两个复正谐函数分别取最大值, 有 $\varphi_1 = n\pi, \varphi_2 = m\pi$, 其中 n, m 分别为整数. 并设在波动的频散曲线的连续两个峰值或谷值之间的频率差为 Δf , 可由以下近似关系式确定障碍物距第一个检波器的距离:

$$d = \frac{C_R}{2\Delta f} \quad (7)$$

2 试验模型制作

障碍物探测模型为大尺度模型(图2), 采用开挖、回填、碾压的方法建造.

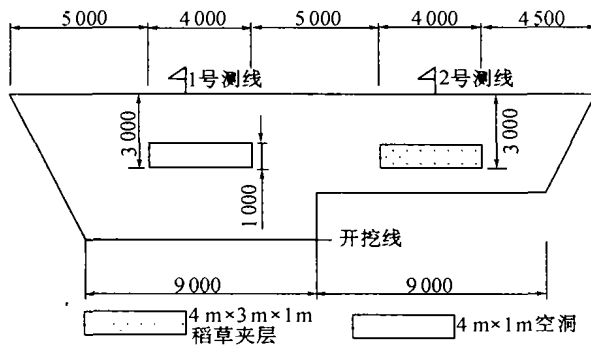


图2 模型剖面示意图(单位:mm)

障碍物分别为软弱夹层和空洞. 软弱夹层用稻草模拟, 其尺寸为 $4\text{ m} \times 3\text{ m} \times 1\text{ m}$, 其上顶面距地面 2 m . 空洞长为 4 m , 直径 1 m , 其中心线距地面 2.5 m . 模型内回填土为软粘土. 空隙率为 75% , 天然容重为 15.6 kN/m^3 , 泊松比为 0.24 . 表面波测试在模型回填、碾压完成3个月之后进行.

3 测试设备及分析软件

表面波测试的硬件主要由激震震源和数据采集系统组成, 频散曲线计算软件为多道瞬态地震面波频散数据处理软件(SASW1.0).

3.1 震源

本次试验由于障碍物埋置深度较浅, 故采用锤击作为震源, 铁锤重 5 kg . 为了得到高频信号, 在震源处垫直径为 20 cm , 厚 2 cm 的铁板. 锤击高度约 1.2 m .

3.2 数据采集系统

数据采集系统为德国 DMT 公司生产的 SUMMIT 系统, 由检波器、采集单元、数字传输线路和高分辨率、大动态范围遥测地震仪组成.

SUMMIT 数据采集系统的主要性能如下: 检波器为 28 Hz , 100 Hz ; 采样间隔为 $1/128\text{ ms}$, $1/64\text{ ms}$, $1/32\text{ ms}$, $1/16\text{ ms}$, $\dots$, 8 ms ; 最大输入信号为 2 V RMS ; 系统输入噪声为 $0.6\text{ }\mu\text{V RMS}$ ($1/4\text{ ms}$ 时); 动态范围大于 130 dB ($1/4\text{ ms}$ 时); 系统分辨率为 24 bits (2 ms 时); 前置放大为自动增益控制.

3.3 SASW1.0 软件频散数据处理原理

SASW1.0 软件是利用地表单次冲击震源纵向多通道采集的地震记录, 提取瑞利面波相速度频散数据.

现场实测数据的互功率谱中包括相位信息. x_1, x_2 处的互功率谱的平均值记为 $\bar{S}_{r_1, r_2}(f)$, 则

$$\bar{S}_{r_1, r_2}(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ [R_2(f)]_i [R_1^*(f)]_i \} \quad (8)$$

式中: $R_1(f), R_2(f)$ 为 x_1, x_2 处两条记录的频谱; n 表示每条记录的采样个数; $*$ 表示对复数的共轭运算. $\bar{S}_{r_1, r_2}(f)$ 是一个复函数, 因此相位差可由式(9)计算得到:

$$\varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[\bar{S}_{r_1, r_2}(f)]}{\text{Re}[\bar{S}_{r_1, r_2}(f)]} \right\} \quad (9)$$

知道相位差, 则传播时间可由式(10)计算:

$$t = \frac{\varphi}{360f} \quad (10)$$

由此相速度 v_{ph} 根据式(11)计算:

$$v_{ph} = \frac{\Delta x}{t} \quad (11)$$

再根据频率 f , 相速度 v_{ph} 和波长 λ_{ph} 的关系可计算出波长 λ_{ph} :

$$\lambda_{ph} = \frac{v_{ph}}{f} \quad (12)$$

建立频散曲线的第一步是确定每一频率真实的相位差, 因此选用适当的互谱算法非常重要. 其次由

于式(9)所得的相位差是落在 $180^\circ \sim -180^\circ$ 之间的,所以在确定真实的相位差时应该对相位进行展开.最后在建立频散曲线时,对于对应的相干系数较小的相位应该剔除.建立频散曲线的具体算法可参见文献[3].

4 试验方案及结果

本次试验目的是为了验证实际运用上表面波探测地下障碍物的有效性.同时根据上述表面波探测地下障碍物的原理,得测线布置示意图,见图3.每一测线上检波器道间距为0.5m,炮间距为0.5m.测试位置逐步向障碍物埋置点偏移,偏移距为1m.为了消除测试过程中噪声的影响,在同一点进行3次重复试验,然后对每一检波器的3条记录进行平均,从而减少噪声干扰.因为有效信号的频率为20Hz以上,检波器选用检波为28Hz的垂直检波器,检波器垂直安装,并保证与地面有良好的耦合.在进行试验之前先通过计算机显示器对检波器状态和接受信号的质量进行监测,确保数据采集的可靠性.

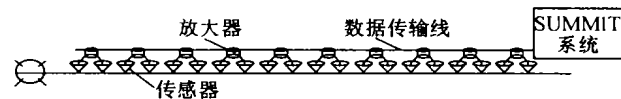


图3 测线布置示意图

图4为距空洞2m处的测试结果,图5为距软弱夹层为2m的测试结果.从图上可见离障碍物较近处的频散曲线表现出明显的波动现象.对于软夹层和空洞,频散曲线上波动处的相速度平均值减小,这很好地验证了理论分析的结论.按式(7)从实测频散曲线上估计障碍物离检波器的距离比较粗略,因为实测频散曲线波动的峰、谷值较难于确定,并且对瑞利波速度的估计也很粗略.但是从频散曲线的波

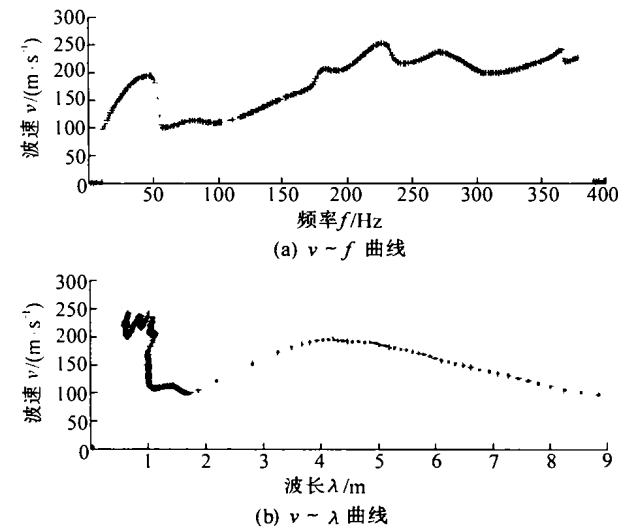


图4 距空洞2m处频散曲线

动程度仍可辨别障碍物的大概位置.从图4中 $v \sim f$ 曲线可见,频散曲线两波峰间频差为35Hz,平均波速为225m/s,故根据式(7)估计第一个检波器距空洞大约为3.2m,实际为2m;从 $v \sim \lambda$ 曲线中可见波动主要集中在波长为1~3m处,根据瑞利波传播理论,对指定的波长的瑞利波其传播深度为1~1/2波长,可以判别软夹层的埋置深度为1~2m,实际埋深为2.5m.

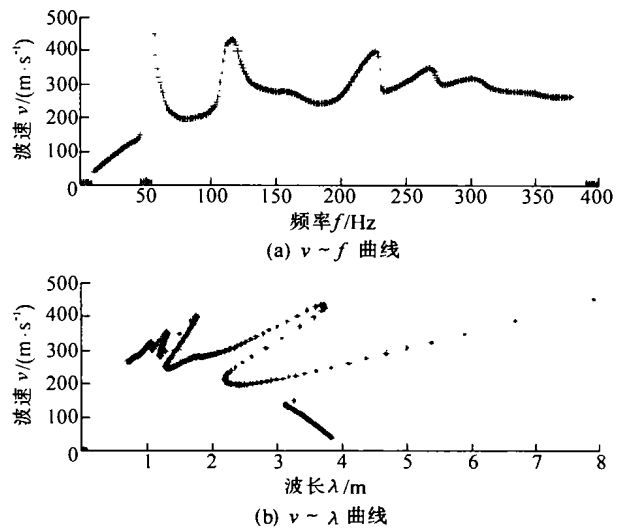


图5 距软弱夹层2m处频散曲线

5 结语

试验表明表面波探测地下障碍物的理论是正确的.通过表面波频散曲线的波动特征可有效地探测出地下障碍物的位置和埋置深度以及障碍物的性质.同时模型试验也为现场实测积累了经验.

在实测时由于障碍物的具体位置未知,所以测线应该对同一震源位置沿不同方向布置(近似圆形发射状).对不同方向的频散曲线进行对比,选择最严重的一个方向为障碍物所在方向,根据式(7)估计障碍物所在位置,再在预计的位置进行测试,确定其精确位置.通过频散曲线波动处相速度平均速度的变化情况可粗略估计障碍物的性质,再根据频散曲线波动处所对应的波长确定障碍物埋置深度.为了减弱噪声的干扰,在测试过程中对同一地点的测试应重复进行几次,然后使用平均响应.

由于地下环境的复杂性以及研究弹性波在土介质中传播的困难性,为了精确测定地下障碍物的位置和性质,提高表面波探测的精度首先需要进一步研究精确确定实测频散曲线的方法,其次需对弹性波在复杂介质中的传播规律及土介质中的波做深入的研究.

(下转第53页)

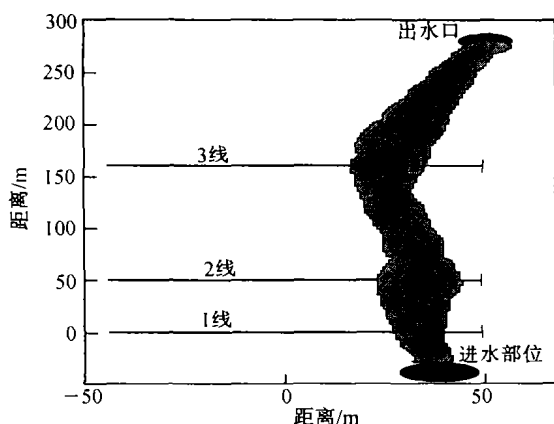


图5 洪泽湖大堤 52K+315 断面渗漏通道路径漏或其它挡水建筑物的渗漏检测。

DB-3^I型堤坝管涌渗漏检测系统在江西、湖北、湖南等省的堤防查险及防汛工作中已发挥出巨大效益,但在洪泽湖堤防渗漏检测中尚属首次,为在众多

的隐患探测方法中筛选出一个目前最为合理的隐患探测方法,我们将该方法和传统的较为准确的“同位素示踪”法进行检测比较,从这次检测的结果看,两种方法检测的结论完全一致,而从检测的过程和总体效益看,DB-3^I型堤坝管涌渗漏检测系统更具有明显的经济、快速和操作方便的优势,最重要的是它还能应用于汛期恶劣环境(表1),是江、河、湖、库堤坝管涌、渗漏探测的首选设备,具有广阔的应用前景。

表1 DB-3^I型堤坝管涌渗漏检测系统与“同位素示踪”法检测效益对比

检测方法	投资/万元	检测时间/d	检测过程	可操作性
同位素示踪法	15 (一次性)	12	布点、钻孔、投放元素、检测、计算分析	需中高级专业技术人员操作
DB-3 ^I 系统	11 (可重复使用)	1	安装仪器、布线、检测、分析	培训后即可操作

(收稿日期:2001-09-10 编辑:熊水斌)

(上接第35页)

d. 左右两岸沿灌浆斜洞、灌浆支洞,接坝基帷幕下游侧(与坝轴线近乎垂直)全线竖直向上、向下各布设一排排水孔。

e. 左岸在导流洞和2号施工支洞内各设一条长度分别为220m、198m的排水洞,命名分别为左排1号、左排2号,其向上、向下各钻设一排排水孔。右岸EL187m及坝顶各打一条排水洞(坝顶排水洞兼作交通洞),其向上、向下各钻设一排排水孔。

各层排水洞、排水孔和阻水帷幕灌浆孔以打穿地质缺陷所在岩层为深度控制,这样,形成左右岸分层排水、高水高排、排堵结合的综合处理措施。

4 结 语

管涌发生后,坝肩左右岸共补打4条排水洞(其中1条兼作交通洞),增加排水孔约15000m,补强及岸坡阻水帷幕灌浆孔2032m,各排水洞排水效果明显。尤其在暴雨后,部分排水孔大量出水,出水点集中出现在溶蚀带、断层、层间错动部位,其它部位无水或出水极少。通过绕坝渗流孔观测,2000年汛期同等降雨强度下地下水位远低于1999年。

经过2000年汛期大暴雨及水库正常高水位(EL236m)的考验,证明坝肩分层排水、高水高排、阻排结合的方案切实可行,达到了预期目的。本文介绍的管涌处理措施,值得岩溶地区,特别是高山峡谷岩溶地区的坝工建设借鉴。

(收稿日期:2001-02-15 编辑:张志琴)

(上接第45页)

c. 任何物探方法都有其局限性和多解性,地电影像技术也不例外,仅以一种参数——电阻率值的高低作为解释依据,必定产生认识上的不足。因此,需要尽可能结合已知资料,并辅以其它物探方法,以利于资料解释、分析,保证探测结果的准确性。

中国煤田地质总质水文地质局物理探测队乔建民、龚惠民等参加了野外试验,北京骄鹏工程技术有限公司刘力高级工程师给予了指导,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 刘建伟.电阻率连续测深法及其在堤坝隐患探测中的应用[J].工程勘察,2000(3):35~38.
- [2] 刘康和.物探技术在水利水电工程中的应用简介[J].水利水电科技进展,1999,19(4):61~63.
- [3] 崔元星.电阻率层析成像的实质及其应用[J].水文地质工程地质,1997(2):42~44.

(收稿日期:2001-03-05 编辑:张志琴)

(上接第18页)

参考文献:

- [1] Ganji V, Gucunski N, Maher M H. Detection of underground obstacles by SASW method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123(3): 212~219.
- [2] 王兴泰.工程与环境物探新方法新技术[M].北京:地质出版社,1996.
- [3] Nazarian S, Desia M R. Automated surface wave method: field testing[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1993, 119(7): 1094~1111.

(收稿日期:2001-02-21 编辑:张志琴)