

# 基于弹性波法的堤防混凝土面板脱空检测方法数值模拟研究

吕守航

(吉林省水利水电勘测设计研究院, 吉林 长春 130012)

**摘要** 堤防作为水利工程的一个重要组成部分, 水利工程能否正常运转离不开对堤防安全的保障。当雨季降水较多时, 面板底层的土体受流水的冲刷, 细小颗粒被带走, 下部介质体出现疏松, 逐渐形成脱空。脱空导致土体物理力学性质减弱, 增加溃坝风险。脱空早期难以被发现, 一般选择用物理探查的方法进行脱空检测。为验证弹性波探测方法结果的准确性, 本文基于弹性波法对混凝土面板脱空区检测进行数值模拟研究, 通过研究弹性波的传播规律, 得到脱空区数值模型的检测结果。

**关键词** 面板脱空; 弹性波场; 弹性波; 时频分析; 数值模拟

中图分类号: TP31

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)11-0007-03

## 1 研究背景

堤防混凝土面板脱空多是受降水影响, 面板下的土颗粒受到冲刷, 细小土颗粒被流水带走所引起的。随着夏季汛期雨水的逐年增多, 洪水暴发的概率增大, 溃堤的事故多有发生, 严重威胁着人民群众的生命和财产安全, 只有及时地探测脱空区的存在, 尽早地对脱空区进行治理, 将脱空区域进行加固, 才能有效避免灾难的发生。

土体的缺失致使堤防工程存在无法预知的安全隐患<sup>[1-2]</sup>。堤防工程混凝土面板多数采用钢筋混凝土, 在进行面板脱空检测时, 利用电磁类检测方法, 钢筋对检测结果影响较大。本文所提弹性波法是一种探测混凝土面板脱空的无损检测方法, 具备快速检测、数据可快速处理等优点。检测时通过敲击震源产生弹性波, 弹性波被传感器接收, 形成波形曲线, 通过识别波形曲线的变化特征判断是否有脱空区存在<sup>[3]</sup>。

## 2 弹性波场数值模拟原理

### 2.1 弹性波场理论

弹性波属于应力波, 当介质受到外力干扰而打破自身平衡状态时, 介质在应力作用下发生形变, 形变将应力传递给相邻介质, 从而使振动在弹性介质中传播<sup>[4]</sup>。

波阻抗是指地震波在介质中的传播速度与介质的密度的乘积, 当地震波在均匀的介质中传播时, 地震波的振幅、速度及其方向均与原始状态相同。但是在各向异性层状介质中传播时, 由于介质的速度与密度改变, 层状介质的波阻抗不同, 地震波自震源向外传播,

地震波将逐层地发生反射、透射、折射, 透射波继续向下传播, 直到最底层的底面<sup>[5]</sup>。

### 2.2 正演模拟理论

正演模拟是通过数值模型模拟地质体的形状、产状和物性数据来观测模型所产生的地球物理效应的数值计算方法(数值模拟)。

弹性波正演方法主要有射线法和波动方程法<sup>[6]</sup>, 射线法可以准确地计算弹性波的传播路径和旅行时间等运动学特征, 波动方程模拟法主要考虑弹性波动力学特征, 能够更真实地模拟地层的弹性波场特征<sup>[7]</sup>。

本次数值模拟研究采用基于有限差分法的二维全波场数值方法进行模拟。有限差分法首先将模型网格化, 将模型划分为若干网格节点的集合体。基于差商和微商的相关性, 将弹性波方程中的微分形式转化为差分形式进行运算<sup>[8]</sup>。

### 2.3 弹性波法检测堤防混凝土面板脱空原理

堤防混凝土面板脱空实质是层状介质中包含了低速异常体, 由弹性波的传播规律可知, 在利用弹性波进行脱空检测时, 波传至层间时将产生反射、折射和透射波, 由于脱空的存在, 弹性波在脱空区域发生多次反射现象, 从而形成高频振荡, 并且脱空较浅时, 会导致弹性波返回地面的时间变化, 从而导致弹性波的接收时间变化, 弹性波的同相轴有断开、下沉的现象。

当弹性波传至低速异常体角点处时, 弹性波将产生绕射, 随着探测点与脱空的相对位置由远及近, 绕射波同相轴发育为双曲线型, 弹性波、绕射波将在脱

空叠加使波场复杂化,波形记录出现异常震荡,并且对应位置记录能量有所增强。堤防混凝土面板发生脱空的状态对振动信号的特征会有相关影响,当面板下部出现脱空时,采集到的振动信息最大振速变大,主频降低,振动持续时间增加。

### 3 构建模型

#### 3.1 数值模拟软件的操作

Tesseral 是一款基于有限差分理论进行数值模拟的全波场模拟建模程序,允许用户构建二维的密度—速度地质剖面模型,输入地球物理参数,定义纵波和横波的速度及介质密度值。它可以模拟物理参数复杂的模型,包括介质速度、密度呈梯度变化,薄互层各向异性介质等。软件可自定义地震观测系统,包括偏移距、采样率、采样长度及道间距等。

Tesseral 同时支持利用其他软件生成的网格数据建立数值模型。计算模块计算合成波形和波场快照,计算模块支持计算多种波动方程,主要包括声波方程模型、弹性波动方程模型,各向异性弹性波动方程模型等。

#### 3.2 数值模型的构建

利用建模器创建模型,定义模型边界、大小,对不同介质进行分区,设置介质横波速度、纵波速度以及介质密度,其中介质波速可设置为梯度变化。

在炮点页设置震源激发类型、炮点排列,设定炮集数与炮间距,定义震源主频和子波类型,在观测系统页输入观测系统参数,设置检波器个数与道间距,同时定义首道位置,定义采样间隔和采样长度。

模型设置完毕后,进入全波场设置界面,设置所需波动方程,点击运行,进行数值模拟运算,运算结束后将波场快照数据及模拟数据进行保存,进行进一步数据处理。

在进行堤防混凝土面板脱空弹性波检测模拟时,由于建立的数值模型存在边界,当弹性波传播到边界时将会产生反射,对接收到的地震信号产生干扰,因此,在数值模拟的过程中用吸收边界的方法对边界进行处理。

为研究检测过程中有脱空所体现的检测结果,构建数值模型进行模拟。本次数值模型长 200 m,深度 50 m。模型分三层,第一层模拟混凝土面板,第二层土体,第三层高速体。为进行对比,首先建立无异常体模型,后建立有异常体模型,低速异常体模拟脱空,异常体长 1 m,高 1 m。数值模型如图 1 所示。

#### 3.3 弹性波场数值模拟分析

为有针对性地了解弹性波的传播规律,建立正确的试验方向,利用数值模拟软件对数值模型进行弹性波场数值模拟,数值模拟以主频 200 Hz 雷克子波为震源,采样率设置为 0.2 ms,将震源放置于异常体的正上方。

通过波场快照分析可知,当混凝土面板下无脱空时,弹性波以激发点为起点,均匀向四周传播,由于介质在竖直方向速度渐变,因此波形呈椭圆弧状向周围扩散,纵波、横波能够较清晰地分辨。

当混凝土面板下有脱空时,波处于较长时间的高频震荡状态,在空洞的作用下能量出现衰减,传播的过程中弧顶消失,波传至低速异常体位置时将产生绕射,弹性波和低速异常体产生的绕射波将在脱空位置叠加,产生复杂的波场。波振幅衰减较大,能量削弱较快,可作为判定脱空的一项参数。

#### 3.4 弹性波数值模拟波形记录分析

波形记录数值模拟采样率 0.2 ms,采样总时长为 0.2 s,偏移距为 2,主频为 200 Hz 的雷克子波做震源。为研究有脱空时波形记录的特征和无脱空时波形记录的区别,对有脱空和无脱空波形记录进行对比分析,利用软件抽取共偏移距得到共偏移距波形记录。处理后的波形记录如图 2 和图 3 所示。

通过对脱空波形记录进行分析可知,第一次弹性波理论到达时间 25.5 ms,与数值模拟中同相轴位置相符合,提取共偏移距所得的弹性波记录剖面在走时上未发生变化,因此可确定建立的数值模型是可靠的。

通过对脱空波形记录进行分析可知,脱空的存在导致弹性波传播路径受到干扰,以脱空为中心在弹性波记录中形成弧状,在脱空弹性波发生多次震荡。因此,

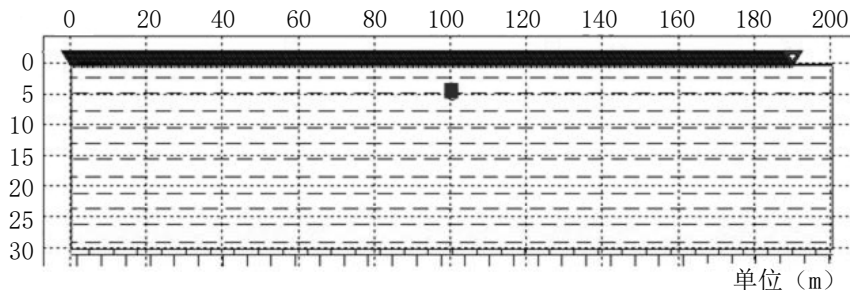


图 1 水平层状模型示意图

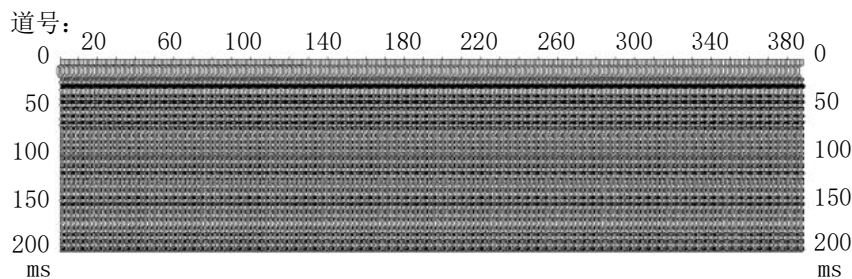


图 2 无脱空的数值模拟波形记录

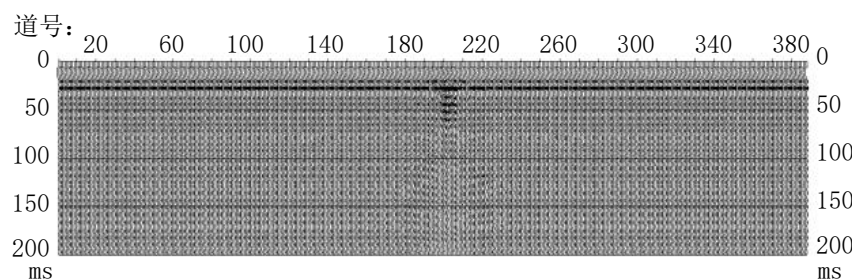


图 3 有脱空的数值模拟波形记录

通过分析弹性波记录波形的震荡以及绕射弧也可以判断脱空的存在。

### 3.5 弹性波数值模拟波形时频分析

将有脱空区域和无脱空区域单道波形记录进行提取,将波形记录导出为文本,利用基于 matlab 的 AOK 时频变换工具进行时频分析,分析弹性波在波形记录中不同时段波的分布规律。

将无脱空地地震波形记录进行时频分析可知,地震波形记录在 0.01 s 处有一能量团,主频率集中在 60 Hz,时间持续到 0.05 s。同时伴随短暂的高频成分,持续时间为 0.01 s 左右,说明在无脱空的介质中,弹性波高频持续时间较短。

将有脱空地地震波形记录时频分析可知,波形出现长时间的高频震荡现象,主频振幅增大,瞬时能量较强。波场是多种频率弹性波叠加状态,波场较复杂。

## 4 结论

1. 通过对弹性波场的数值模拟分析可知,弹性波在层状均匀介质传播过程中,纵波和横波以及弹性波能够很好地识别,弹性波同相轴连续,各个波的能量由中心点出发向外逐渐减弱。在脱空区域弹性波产生高频振荡,弹性波能量衰减,传播的过程中弧顶消失,波传至低速异常体位置时将产生绕射,局部产生多次反射并产生绕射弧,并出现多种频率叠加的现象,产生复杂的波场。

2. 通过数值模型波形记录研究可知,以脱空为中

心,在弹性波记录中产生绕射弧,同相轴发生错动,在脱空区弹性波发生多次震荡,与无脱空相比,波形衰减较慢。

3. 通过数值模拟单道波形记录时频对比分析可知,无脱空时,波的成分单一,且持续时间较短,而脱空区域出现较长时间的高频振荡,且能量比较强,波场由多种波叠加。

4. 弹性波法通过波场分析、波形记录和单道记录时频分析确定了弹性波法对堤防混凝土面板脱空检测的可行性,可利用单道波形记录的变化特征和弹性波时频分析中弹性波频率的变化特征判定脱空的存在。

### 参考文献:

- [1] 魏孟茜.浅析强化堤防管理确保水利工程安全[J].工程建设与设计,2017(20):166-167.
- [2] 吕宇航.基于弹性波法的道路下方脱空区探测方法研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [3] 吕宇航.基于弹性波法的输水隧洞衬砌脱空检测方法试验研究[J].科学技术创新,2020(09):137-138.
- [4] 同[2].
- [5] 孙茂锐,丁昕,等.近地表隐伏断层地震波场响应特征与初至波成像应用研究[J].地质与勘探,2023(59):1043-1053.
- [6] 黄蔚森.时域地震波有限差分正演与自由表面边界的研究[D].南昌:东华理工大学,2023.
- [7] 梁展源.非均匀介质弹性参数地震波形反演方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2020.
- [8] 同[2].