

瞬态面波法在尾矿库坝体安全评价中的应用

苏 鹏

山东正元地球物理信息技术有限公司物探工程部, 山东 济南

收稿日期: 2023年3月2日; 录用日期: 2023年4月14日; 发布日期: 2023年4月24日

摘要

作为矿山生产设施的重要组成部分, 尾矿库坝体的安全意义重大, 不仅关系到矿产开发, 还对库区下游的居民生活、生态环境具有巨大的潜在危害。为保证尾矿库的安全运行, 查明隐患的位置、埋深及坝体的压实密度等情况, 在分析坝体结构特征和周围环境的基础上, 结合尾矿库坝体隐患的性质和特点, 选用瞬态瑞利面波法探测。研究表明瞬态瑞利面波法能有效探明坝体压实密度分布特征, 查明覆盖层厚度, 纵向分辨率较高, 研究成果可作为尾矿库安全性评价的依据, 为其他尾矿库安全评价提供借鉴。

关键词

尾矿库, 安全环保, 瞬态瑞利面波法

Application of Transient Surface Wave Method in Safety Evaluation of Tailings Pond Dam

Peng Su

Geophysical Engineering Department of Shandong Zhengyuan Geophysical Information Technology Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: Mar. 2nd, 2023; accepted: Apr. 14th, 2023; published: Apr. 24th, 2023

Abstract

As an important part of mine production facilities, the safety of tailings pond dam is of great significance, which is not only related to mineral development, but also has great potential harm to the residents' life and ecological environment in the lower reaches of the reservoir area. In order to ensure the safe operation of the tailings pond dam, find out the location of hidden dangers, buried depth and compaction density of the dam body, on the basis of analyzing the structural characteristics of the dam body and surrounding environment, combined with the nature and characteris-

tics of hidden dangers of the tailings pond dam body, the transient Rayleigh surface wave method is selected for detection. The research shows that the transient Rayleigh surface wave method can effectively verify the distribution characteristics of the compaction density of the dam body and determine the thickness of the covering layer, with high longitudinal resolution. The research results can be used as the basis for the safety evaluation of tailings pond dam, and provide reference for other tailings pond dam safety evaluation.

Keywords

Tailings Pond Dam, Safety and Environmental Protection, Transient Rayleigh Surface Wave Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

矿产资源是社会发展所需资源中十分重要的组成部分，矿山安全生产是矿产资源得以开发利用的重要保证。尾矿库设施是矿山生产设施的重要组成部分，其坝体的稳定性关系到矿产开发，一旦发生溃坝等灾害，对库区下游的居民生活、生态环境危害巨大的[1] [2]。为保证尾矿库的安全，对于尾矿库坝体渗漏点隐患调查，以及尾矿库安全评价是十分必要的。调查尾矿库坝体安全隐患的主要手段有三种：人工查探、工程钻探以及物探技术。较之前两种勘查手段，物探技术具有高效、快捷、经济等众多优势[3] [4]。近年来，随着工程物探技术的发展，水平不断进步，探测的精度也在不断提高，工程物探被广泛地用于解决各种工程地质问题。

在综合考虑常规物探方法的基础上，对某尾矿库安全评估，提出采用瞬态瑞利面波法，查明尾矿库坝体岩性分布。探测结果表明，瞬态瑞利面波法能有效探明坝体压实密度分布特征，纵向分辨率较高，探测结果可作为尾矿库安全性评价的依据，可为其他尾矿库安全评价提供借鉴。

瑞利面波在传播过程中，具有横向振幅衰减小、信噪比高等特点，同时随着近十几年来信号处理技术的发展，大大提高了面波的勘探能力，被广泛应用在地球内部结构成像及地表横波速度结构成像等应用研究上[5] [6] [7]。

2. 工程地质情况

根据场地周边地质资料，区域内岩土层自上而下依次为：① 第四系耕植土(Q^{4ml})，② 第三系残积成因的粘土(Q^{3el})，③ 下卧基岩为强风化砂岩(K_1)、④ 中风化砂岩(K_1)。场地内各岩土层特征如下：1) 耕植土(Q^{4ml})：褐黄色，呈稍密状态，成分以粘性土为主，含植物根须，有砂感。2) 粘土(Q^{3el})：黄褐色-黄色，硬塑状态，土质较均一，切面光泽，韧性中等，干强度较高。3) 强风化砂岩(K_1)：据区域地质资料，该层属孔德龙古群陆源碎屑岩组褐红色砂岩，强风化，含有泥质及铁锰质结核。4) 中风化砂岩(K_1)：该层砂岩呈紫红色，薄层状构造，粉砂质结构，矿物成分主要为粉砂、泥质，少量白云母。

物探方法是以地下介质间的物性差异作为其物性前提，通过观测、研究人工激发或天然物理场的空间或时间分布规律来达到解决工程地质问题的目的。根据现场的勘查情况和工程场地物探测试情况，场地内第四系、强风化及中风化泥质粉砂岩等不同地质对象之间存在较明显的地球物理性质差异。筑坝土石料、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩等介质存在较明显的物理力学性质差异，从而导致较明显的面波速度差异[8]，为实施瞬态瑞利面波法提供了有利的地球物理条件。

3. 瑞利面波方法与技术

瞬态瑞利面波法是一种利用面波的动力学和运动学特征, 进行工程质量检测的物探技术[9] [10]。当地表存在震源时, 一般会产生直达波、反射波、折射波及面波、转换波等扰动。在均匀、各向同性、半无限弹性介质中, R 波(瑞利面波)是在一定条件下由 P 波(地震纵波)与 SV 波(横波在垂直平面中的分量)叠加后相互干涉而成的, 沿自由表面在一个薄层内传播。随着离开自由表面的距离增大, 振幅按指数规律衰减; R 波具有垂直椭圆周极化的特点, 自由表面附近的质点是在垂直平面内作逆行椭圆振动。

假设有半无限理想弹性介质, 具有各向同性, 在震源激发点作垂直上下激震, 将同时产生 P 波、S 波、R 波在介质中传播。据 Miller (1995)计算, 其所激发的总能量分配为: R 波占 67%, S 波占 26%, P 波仅占 7%。所有波的能量, 都将随着传播距离 r 的增大而不断衰减。P 波与 S 波, 由于球面波前扩散, 按 $\frac{1}{r}$ 规律衰减; 在近震源及地表, 则按 $\frac{1}{r^2}$ 衰减。对于 R 波, 由于圆柱波前扩散, 按 $\frac{1}{\sqrt{r}}$ 衰减, 比体波衰减慢得多。由此可知, 若在震源附近观测, 接收到的振动将主要是 R 波成分, 瑞利波的能量主要集中在介质的自由表面附近[9] [10] [11] [12], 根据半波长理论, 不同波长的瑞利波传播特性反映了不同深度介质的变化情况[9]-[14]。

应用于浅层工程勘察时, 瞬态面波法一般采用人工锤击震源或落重锤的方式, 在地面产生一个包含所需频率范围的激励源[9] [10]。假设离震源一定距离处有一观测点 A, 记录到的面波公式是 $f(t)$, 根据傅里叶变换法, 频谱公式为:

$$F_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.1)$$

沿波的前进方向上与 A 点相距为 Δx 的观测点 B, 同样也记录到时间信号 $f_2(t)$, 其频谱为

$$F_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.2)$$

假若波从 A 点传播到 B 点, 由频散引起的, 得到如下关系式

$$F_2(\omega) = F_1(\omega) e^{-i\omega \Delta x} \quad (3.3)$$

$V_R(\omega)$ 是圆频率为 ω 的面波的相速度, 进行变换, 上式也可写成:

$$F_2(\omega) = F_1(\omega) e^{-i\omega \Delta x} \quad (3.4)$$

式中 ϕ 是 $F_2(\omega)$ 和 $F_1(\omega)$ 之间的相位差, 根据勘探深度等于半个波长[9]-[15], 即 $H = \lambda_R/2 = V_R/f$, 得到任一频率的相速度:

$$V_R(\omega) = 2\pi f \cdot \Delta x \quad (3.5)$$

根据上式, 只要知道 A、B 两点间的距离 Δx 和每一频率的相位差, 就可以求出每一频率的相速度 $V_R(\omega)$ [13]。

瑞利波从一点 A 传播另一点 B, 它们之间的变化完全是由频散引起的[13], 这就是瑞利波的频散特性。在浅层工程勘探中, 利用瑞利面波的这一特性, 在地面上沿波的传播方向, 以一定的道间距 Δx 设置 $N + 1$ 个检波器, 就可以获得 $N\Delta x$ 长度范围内瑞利波的传播特征[13], 从而根据瑞利波在地下的传播特性分析地下介质的分布情况[13]。

4. 工程布置及探测成果分析

经试验测试, 本次瞬态瑞利面波法采用 SWS-6 型工程勘探与工程检测仪, 采集道数 24 道, 测量点

距 40 m。为了全面覆盖尾矿库坝体，设置检波器点距 2 m，根据探测深度 40 m，选取 10 m 偏移距，采样间隔 0.5 ms，采样点数 1024 个。沿尾矿库坝体共布设 4 条测线，测线布置如图 1 所示。



Figure 1. Layout plan of survey line

图 1. 测线布置图

4.1. 资料解释

现场采用锤击方式激发瞬态面波信号，采用多道垂直分量检波器等间距的方式采集多道面波信号。通过一定的数学手段，将所采集的时空域内的多道面波信号转换到频率 - 速度域中，获得面波频散曲线后反演得到测线下方的横波速度结构。

面波频散曲线是以地层速度结构分层为基础。在层状介质中，面波能量的传播深度同它的波长有关，波长越长，能量传播的越深。瑞利面波法数据处理方法，采用的是频率波数谱分析法，当输入采集记录后，确定面波时域窗口，然后经过二维傅立叶变换，把记录数据从时间 - 空间域转换到频率 - 波数域，然后得到二维振幅谱图像，从而在振幅谱图中拾取面波振幅等值线图的极大值，最终根据拾取的极大值求得面波频散曲线。各测线的瑞利面波法等速度映像图如图 2~5 所示。

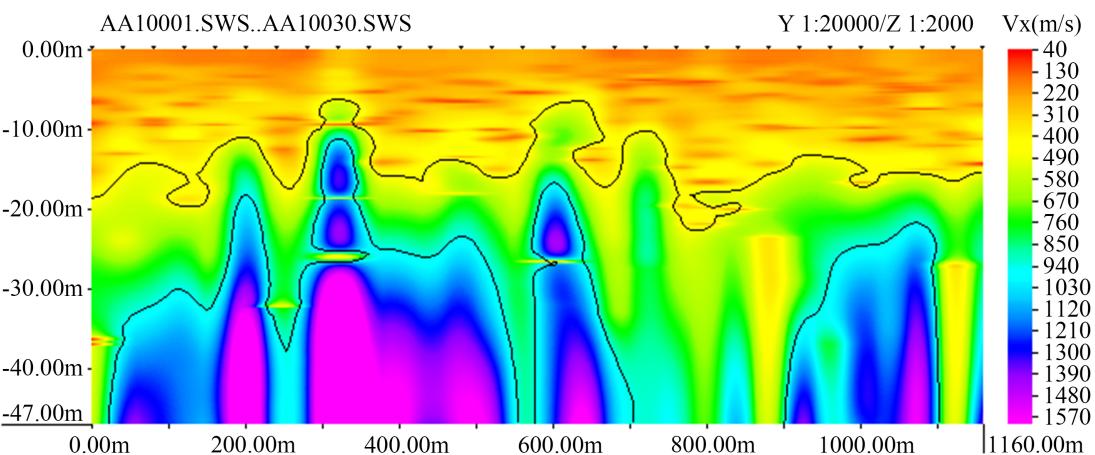


Figure 2. Surface wave velocity profile of 1-line

图 2. 1 测线面波速度剖面图

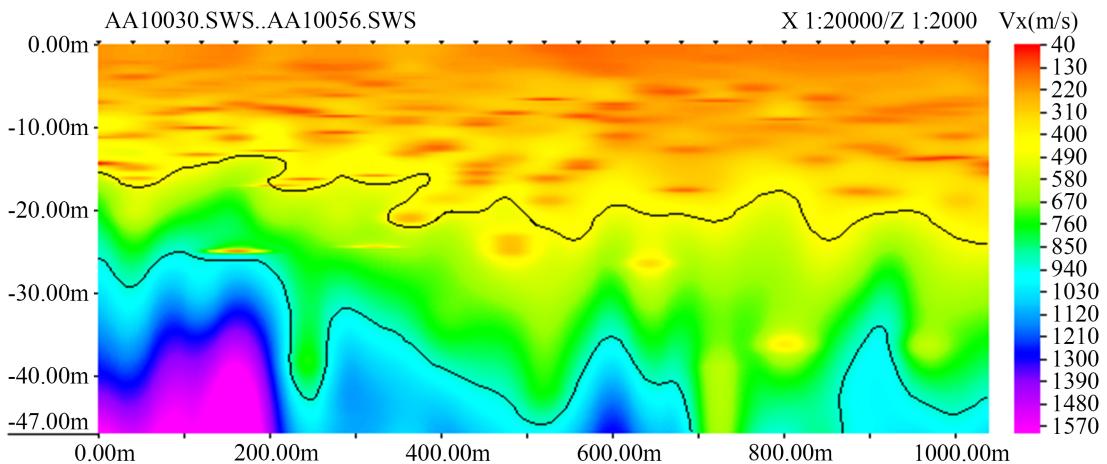


Figure 3. Surface wave velocity profile of 2-line
图 3.2 测线面波速度剖面图

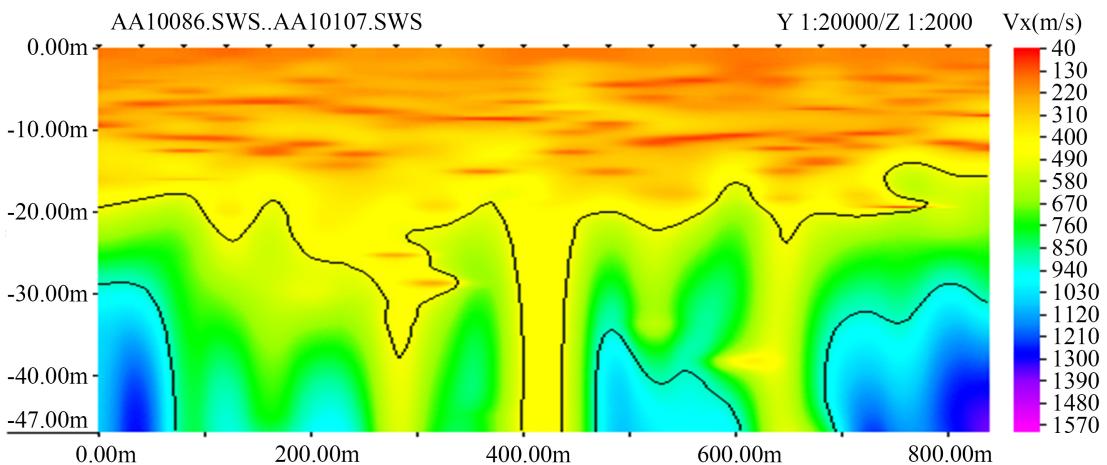


Figure 4. Surface wave velocity profile of 3-line
图 4.3 测线面波速度剖面图

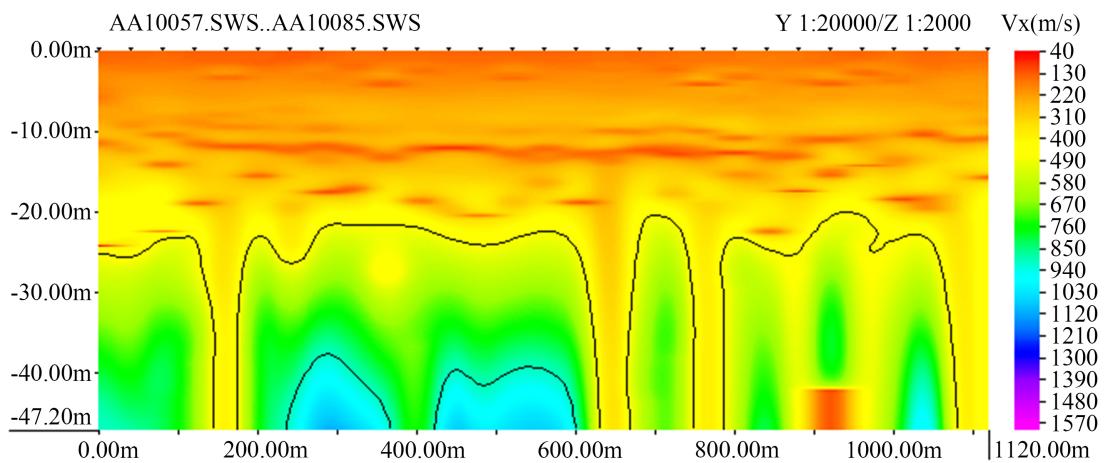


Figure 5. Surface wave velocity profile 4-line
图 5.4 测线面波速度剖面图

4.2. 综合分析

通过资料处理、综合分析, 从瑞利面波等速度映像图(图 2~5)可以看出, 瑞利面波波速分三个区间, 小于 450 m/s, 450~900 m/s 和大于 900 m/s。结合地质调查, 钻孔资料, 面波波速在小于 450 m/s 段为筑坝土料; 瑞利面波波速在 450~900 m/s 段, 为覆盖层厚度; 瑞利面波波速大于 900 m/s 段, 为基岩即中风化砂岩。

从图 2 瑞利面波等速度映像图上看, 根据面波速度小于 450 m/s, 推测坝体土料平均厚度约为 20 m, 土料压实密度较好, 面波速度大于 450, 小于 900 m/s, 推测为覆盖层厚度, 平均深度 20~30 m, 平均厚度 10 m 以上, 面波速大于 900 m/s, 推测为基岩界面, 为中风化砂岩。从图 3 瑞利面波等速度映像看到, 存在明显速度分层。从图 4 瑞利面波等速度映像看到, 异常段面波速度大于 450 m/s, 小于 900 m/s, 向深部延伸。从图 5 瑞利面波等速度映像看到, 异常段面波速度大于 450 m/s, 小于 900 m/s, 向深部延伸, 表明该处筑坝土料较厚。

5. 钻孔验证

为了验证坝体结构, 查明覆盖层厚度, 以及岩性分布的准确性, 进行了钻孔验证, 验证结果表明, 瞬态瑞利面波结构划分准确, 岩性划分精准。

ZK-10 号钻孔位于 2 测线 80 m 位置, 钻孔深度 16.5 m, 0~3.2 m 岩性为压实筑坝土石料; 3.20~10.1 m, 岩性为强风化泥质粉砂岩; 10.1~16.5 m 中风化泥质粉砂岩。ZK-9 号钻孔位于 2 测线 160 m, 钻孔深度 16.5 m, 0~9.4 m 岩性为强风化泥质粉砂岩; 9.4~16.5 m 中风化泥质粉砂岩。ZK-5 号钻孔位于 3 测线 120 m, 钻孔深度 45.1 m, 0~25.9 m 岩性为压实筑坝土石料, 25.9~34 m 为强风化泥质粉砂岩; 34~45.1 m 中风化泥质粉砂岩。ZK-6 号钻孔位于 3 测线 220 m, 钻孔深度 45.2 m, 0~19 m 岩性为压实筑坝土石料, 19~25.1 m 为强风化泥质粉砂岩; 25.1~45.2 m 中风化泥质粉砂岩。

6. 结论

结合本次工程探测结果, 可得出以下:

- 1) 瞬态瑞利面波法数据采集前, 需设计合适的观测系统参数, 应根据勘探目的层的深度及目标体的尺寸设计不同的观测参数, 针对不同工程目的应结合现场试验结果确定观测参数。
- 2) 实际应用中, 为获得较高的分辨率, 一般选用较小的道间距, 同时要参考探测深度及现场仪器设备布置条件。瞬态面波法的最小偏移距理论上越大越好, 但偏移距增大对震源能量和仪器性能要求更高, 就该尾矿库坝体隐患勘察而言, 选用偏移距 10~20 m, 可获得较好的探测结果。
- 3) 瞬态瑞利面波法具有较高的纵向分辨率, 对尾矿库坝体岩土层划分较精准, 可以作为尾矿库安全评价的依据, 可应用于其他相关的工程地质勘探。

参考文献

- [1] 姜清辉, 胡利民, 林海. 尾矿库溃坝研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 77-86.
- [2] 张力霆, 齐清兰, 李强, 等. 尾矿库坝体溃决演进规律的模型试验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 229-235.
- [3] 汪楷洋. 综合物探方法在尾矿库坝体安全性评价中的研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [4] 姚景新. 深度神经网络算法在尾矿库安全评价中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [5] 于广明, 宋传旺, 潘永战, 等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3238-3248.
- [6] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 594-600.

-
- [7] 赵江倩, 鞠海燕, 黎剑华. 综合物探法在尾矿坝隐患勘察中的应用[J]. 金属矿山, 2011(2): 102-105.
 - [8] 赵宪堂, 苏鹏. 多道瞬态瑞利波在评价地基强度中的应用研究[J]. 山东大学学报工学版, 2019, 49(S1): 36-41.
 - [9] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
 - [10] 杨天春, 何继善. 层状介质中瑞利波特性[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013.
 - [11] 杨天春. 瑞利波“之”字形频散与道路结构频散曲线的正演研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2004.
 - [12] 张玮. 物探方法在九寨沟景区地质环境调查中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2010.
 - [13] 赵宪堂, 刘勇. 瞬态瑞利波法在强夯地基检测中的应用分析[J]. 工程勘察, 2010, 38(12): 83-87.
 - [14] 张碧星, 兰从庆, 喻明, 等. 分层介质中面波的能量分布[J]. 声学学报, 1998, 23(2): 97-106.
 - [15] 张恒山, 王庆海. 瑞雷波勘探的波长解释法新探[J]. 物探与化探, 1998(4): 279-283.