

文章编号: 1001-1749(2023)03-0326-09

# 被动源面波法在大粒径不均匀体的适应性研究

王 俊<sup>1</sup>, 肖长安<sup>2</sup>, 张子豪<sup>3</sup>, 史亚龙<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团市政规划设计研究院有限公司, 昆明 650032;

2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司 信息技术研究院物探分院, 昆明 650032;

3. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650031)

**摘 要:** 通过在堰塞体上开展一系列被动源面波法试验, 包括台阵形式、噪声及地形影响等, 讨论了在堰塞体等大粒径不均匀体上利用被动源面波法进行密实性评价的可能性。通过在红石岩堰塞体的实际工作表明, 针对大粒径不均匀体被动源面波能够得到有效的频散曲线, 通过建立面波波速与密实性的相对关系, 可以得出堰塞体等大粒径不均匀体的整个密实性空间分布情况。

**关键词:** 被动源面波; 大粒径不均匀体; 密实度

**中图分类号:** P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.03.06

## 0 引言

被动源(天然源)面波法就是以平稳随机过程理论为依据, 从天然振动信号中提取瑞雷波的频散曲线, 通过对频散曲线的反演, 获得地下介质横波速度结构的一种勘探方法<sup>[1]</sup>。近年来, 被动源面波法被日渐广泛地应用在地层、构造、岩溶、采空区的探测中, 相对于主动源面波法, 被动源面波法在探测深度上具有较大的优势, 只要采用足够大尺寸的排列, 就能得到较大深度上的地质体横波波速分布特征。根据前人经验, 面波或横波的速度特征可以用来评价地层或填筑体的密实度<sup>[2-5]</sup>, 但人工源面波法探测深度受限, 通常只能达到二三十米。针对堰塞体等厚度相对大的大粒径不均匀体, 探测深度明显偏浅, 被动源面波法则成为一种可能的选择, 但前提是被动源面波在这种大粒径不均匀体中能获得较为丰富的面波频率成分, 即能够取得探测深度范围内较好的频散曲线<sup>[6-7]</sup>。这里在云南鲁甸红石岩堰塞坝上

开展了相关的试验和探测工作, 取得了一些针对大粒径不均匀体开展被动源面波探测的经验。

## 1 地质情况简述

红石岩堰塞体是2014年8·03鲁甸地震形成的, 位于原红石岩水电站大坝下游约600处, 堰塞体高83 m~96 m, 顺河向底长约910 m, 垂直河向最宽约307 m, 总方量约10 000 000 m<sup>3</sup>。堰塞体为快速倾倒崩滑, 其物质主要来自右岸高处, 左岸亦有滑崩物质汇入, 以碎块石为主, 碎块石成份均主要为弱、微风化、新鲜白云质灰岩、白云岩, 根据岩性组合初步估测, 最大粒径大于5 m, 堰塞体堆积物中块径50 cm以上的约占50%, 块径2 cm~50 cm以上的约占35%, 块径2 cm以下的约占15%, 现场情况见图1。

堰塞体表面分布有大孤石、块石, 架空现象严重, 地形起伏较大, 堰塞体内部物质组成不均匀性明显, 而且厚度达到100 m, 因此开展物探方法面临接

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 十三五国家重点研发计划重点专项(2018YFC1508500)

第一作者: 王俊(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程物探工作与研究, E-mail: 123512877@qq.com。

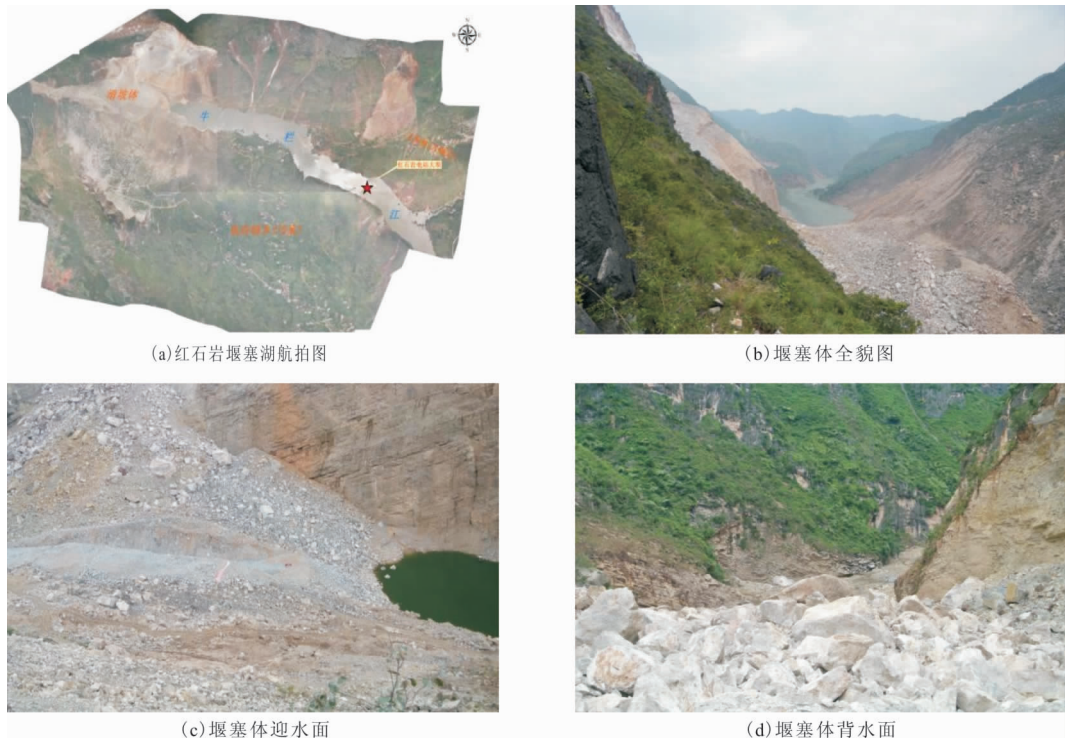


图 1 红石岩堰塞体地形地貌

Fig. 1 Topography and landform of Hongshiyuan damming body

地、散射等诸多不利条件,传统的电法、地震反射折射内方法较难取得较好的效果,而根据被动源面波的适用条件,具有开展试验工作以确定其有效性的价值<sup>[8]</sup>。

## 2 现场试验

### 2.1 不均匀体上的被动源面波频散曲线

为了确定大粒径不均匀体堰塞体上被动源面波的适应情况,在红石岩堰塞体上开展了被动源面波法布阵方式和采集参数试验,以期得到频率成分相对完整的频散曲线。

三角台阵包括 10 个检波器和 25 个检波器两种,如图 2 所示,图 3 为 30 m 边长 10 个检波器和 25 个检波器三角台阵得到的频散谱情况(采用空间自相关法),两个台阵均采用单次 2 min 采集,共采集 10 次的方式进行,采用 2.5 Hz 低频数字检波器接收信号,采样率为 2 ms。

由图 3 可以看出,三角台阵布置能够得到较好的频散谱,探测深度约为 80 m,25 个检波器三角台阵相对于 10 个检波器三角台阵得到的频散谱,能量更加集中,在 15 Hz~20 Hz 频段,频率相对完整,因此具有一定的优势,但两种台阵得到的频散谱趋

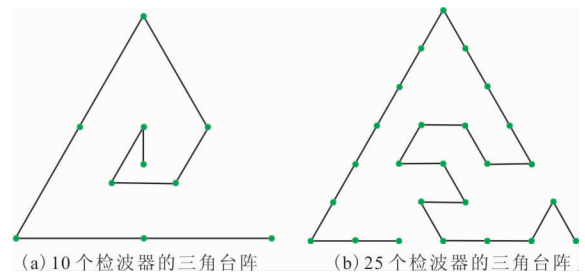


图 2 三角台阵检波器布置图

Fig. 2 Triangular array geophone layout

势基本一致,均能够提取有效的频散曲线,考虑到效率,笔者认为 10 个检波器更适合现场实际工作。

图 4 为采用不同边长的三角台阵取得的频散谱图,均为 10 个检波器。从图 4 可以看出,探测深度随着三角台阵的边长增加而加深,其中 20 m 边长时探测深度约 56 m;30 m 边长时探测深度约 72 m;50 m 边长时探测深度约 140 m,在该试验位置,探测深度约为三角台阵边长的 2 倍~3 倍。

图 5 为采用直线排列台阵得到的频散谱情况(扩展空间自相关法),其数据采集参数与三角台阵相同。由图 5 可以看出,直线排列也能得到较好的频散谱,直线 120 m 排列(图 5(a))的探测深度约 150 m,直线 48 m 排列(图 5(b))的探测深度约 90 m,2 m 道间距的频散谱相对 5 m 道间距频散谱,能

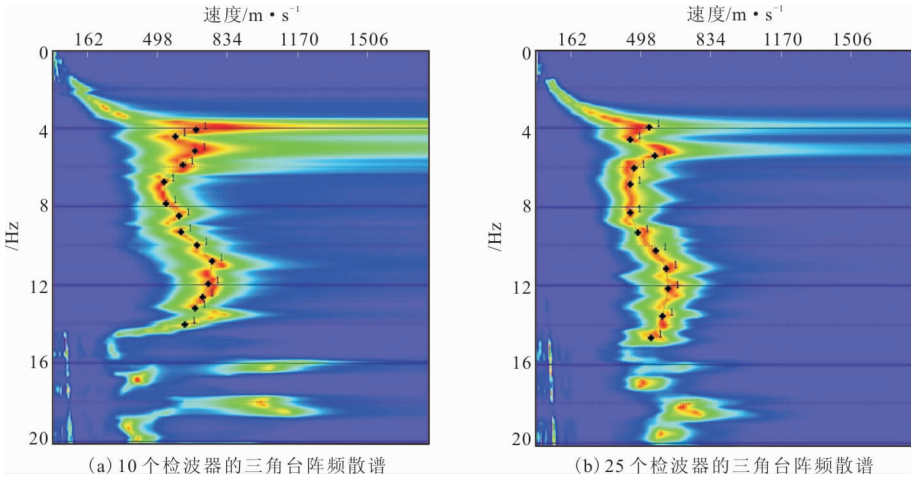


图3 三角台阵频散谱

Fig. 3 Dispersion spectra of triangular arrays

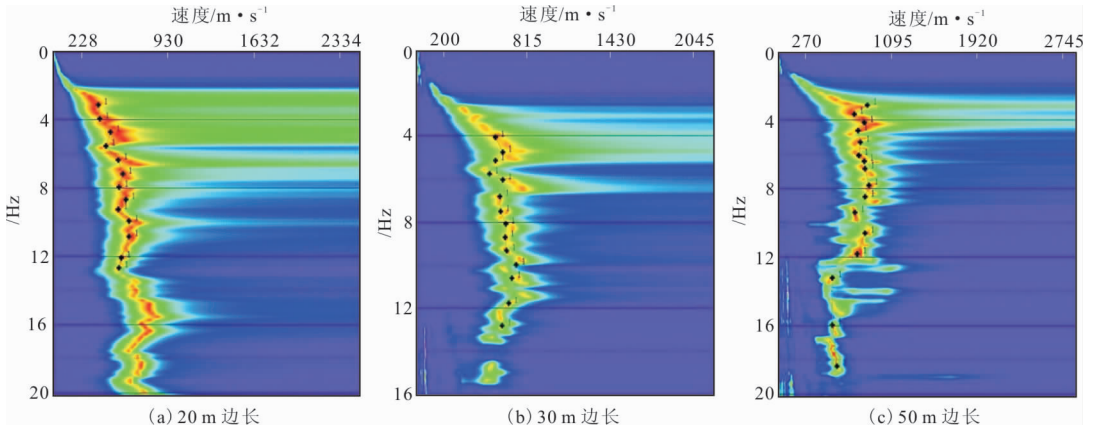


图4 不同边长的三角台阵频散谱对比图

Fig. 4 Comparison of the dispersion spectra of triangular arrays with different side lengths

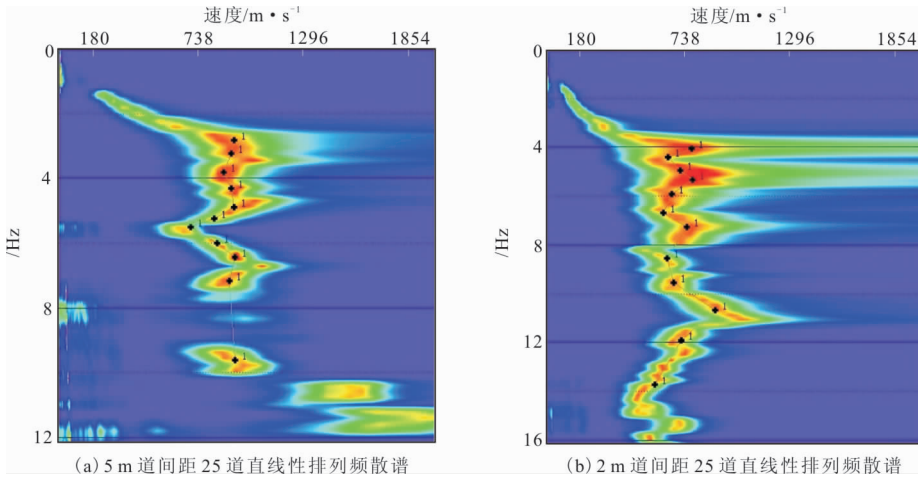


图5 直线性排列频散谱

Fig. 5 Dispersion spectra of linear arrays

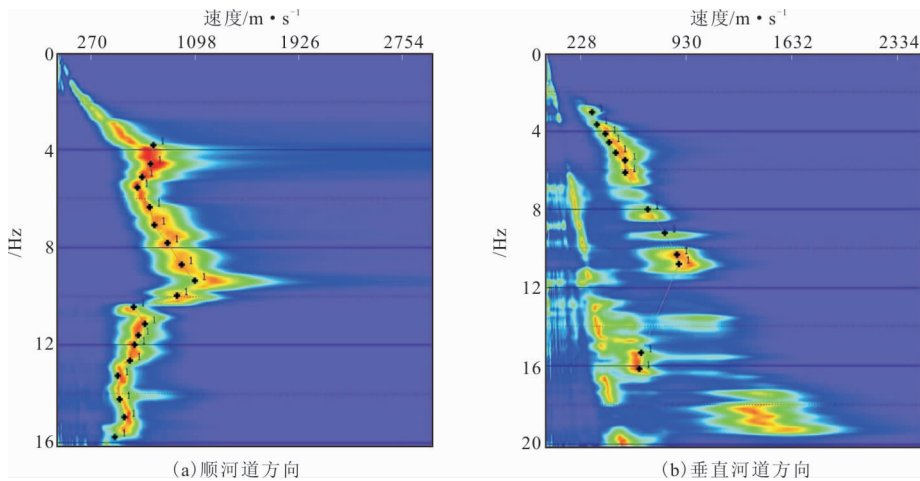


图 6 不同方向直线性排列的频散谱对比图

Fig. 6 Comparison of the dispersion spectra of linear arrays in different directions

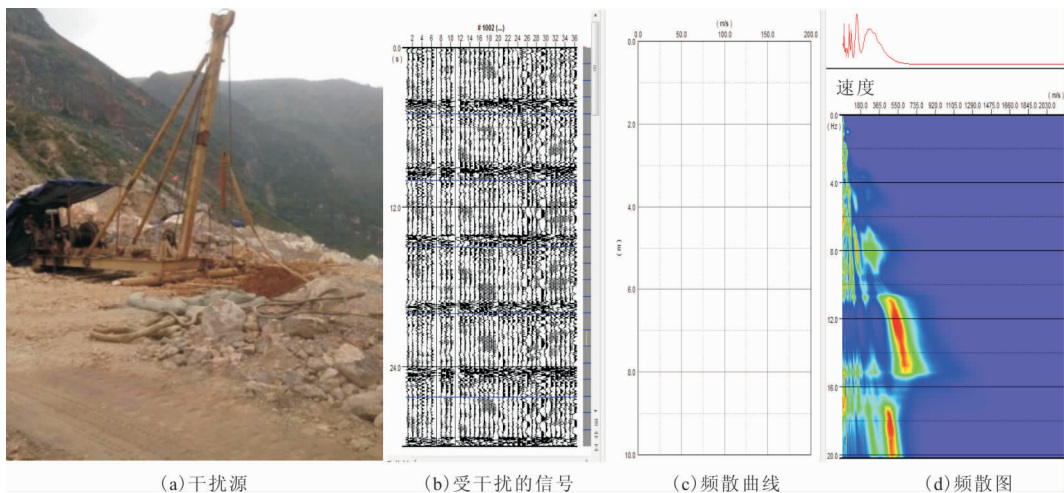


图 7 受竖井施工大型发电机干扰情况

Fig. 7 Interference by large generator during shaft construction

量相对集中,但考虑到效率和探测深度,在实施过程中也要根据情况酌情选用。

图 6 为不同方向布置的直线排列得到的频散谱图,测点位置大致相同,图 6(a)为顺河道方向,采用 2 m 道间距,36 道布置,探测深度约 100 m,图 6(b)为垂直河道方向,采用 2 m 道间距,36 道布置,探测深度约 50 m。由图 6 可以看出,两者之间的差别还是比较大的,顺河道方向布置得到的频散谱较为连贯,能量相对集中,而垂直河道方向得到的频散谱缺频比较严重,尤其是在 12 Hz~17 Hz,频散谱能量也相对分散,分析原因主要还是受地形影响比较大,垂直河道方向地形起伏要大的多。

从图 3 与图 5 的对比情况来看,三角台阵和直线台阵获得的频散谱质量接近,在相同检波器数量情况下,三角台阵获得的频散谱能量略优于直线台

阵,三角台阵 10 个检波器基本能达到直线台阵 25 个检波器其的频散谱质量,而直线台阵布置更加简便,在地形变化较大时,可以选择布阵的方向相对更加灵活,两者各有优势,实际应用时可根据情况灵活选择。

## 2.2 现场干扰条件试验

由于堰塞体现场巨石堆叠地形起伏大、多专业施工(发电机、钻井、竖井、挖机、车辆、人员、采石场作业)、多数测线上坡度较大,致使被动源面波采集时干扰较大,部分有效信号被干扰噪音掩盖。为了对现场干扰信号进行分析,找到解决办法,开展了试验工作。

### 2.2.1 现场施工干扰试验

现场各个专业施工(钻井、竖井、挖机、人员)致使采集环境噪音、震动干扰较大,干扰噪音会淹没微

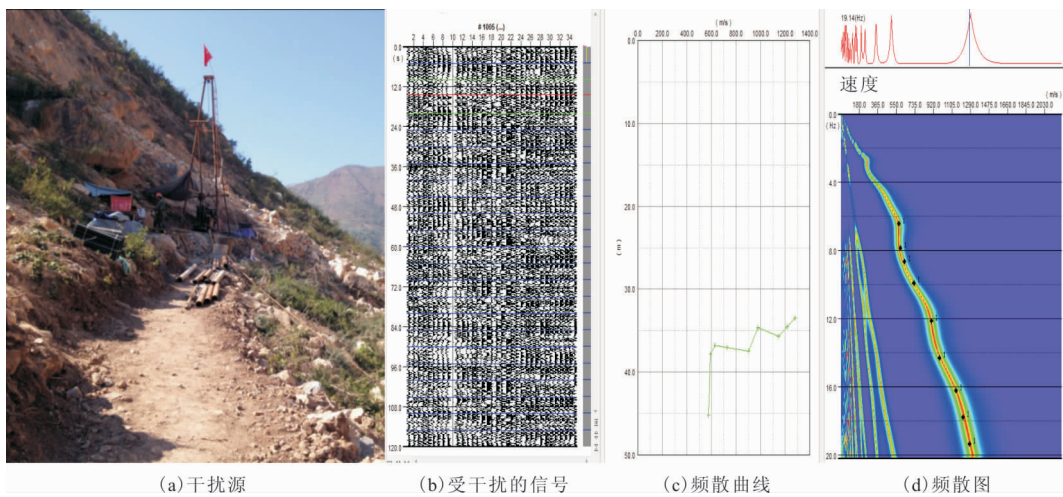


图 8 受钻井施工干扰情况

Fig. 8 Interference by drilling construction

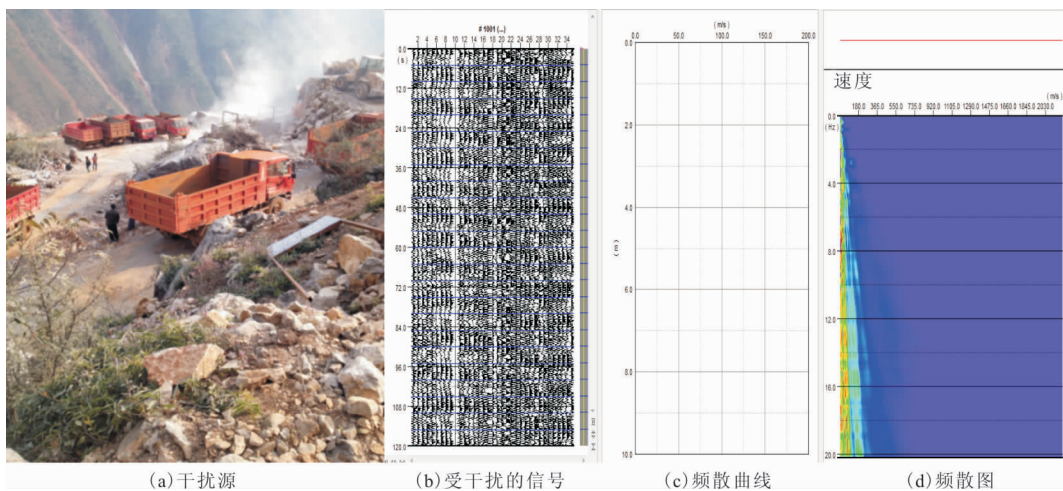


图 9 受采石场施工干扰情况

Fig. 9 Interference by quarry construction

动信号中包含的地层固有特性。如图 7~图 9 所示几个数据就是因为靠近钻机,不远处有挖机等干扰情况下采集的差数据。由图 7 可以看出,频率特征不明显,能量不集中或者集中在某一个固定频率,不能看到瑞雷波的“之”字形频散曲线,不能用“之”字形频散曲线来解释地表下低速层介质的位置、厚度,即不能进行反演和推断。野外施工及干扰因素分析,见图 7~图 9。

解决办法:①在场地条件允许的情况,尽量使用抗干扰能力较强的三角型或“L”型排列阵;②数据处理时将干扰较强的数据进行切除等处理;③采集过程中,适时进行初步处理,对数据质量较差的点进行重测。

### 2.2.2 现场地形起伏问题试验

面波并不是严格沿有起伏的地表滑行,当地形

起伏剧烈时,面波的特性会有变化,随频率不同,这种变化的程度也不一样,实际采集中应该尽量避免起伏地表。在地表起伏较大的地段布置观测排列,同样会造成数据质量降低,如图 10 所示就是无法从频散曲线来反演推断地表下低速层介质的位置、厚度及其他参数信息。

解决办法:①遇到地形起伏较大的测点,选择地形起伏变化较小的方向进行布阵;②在地形起伏较大的地方用 RTK 测量每个检波点的空间位置坐标,带入处理软件进行处理。

## 3 成果

### 3.1 剖面成果

图 11 为堰塞体上一条典型探测剖面,该剖面从

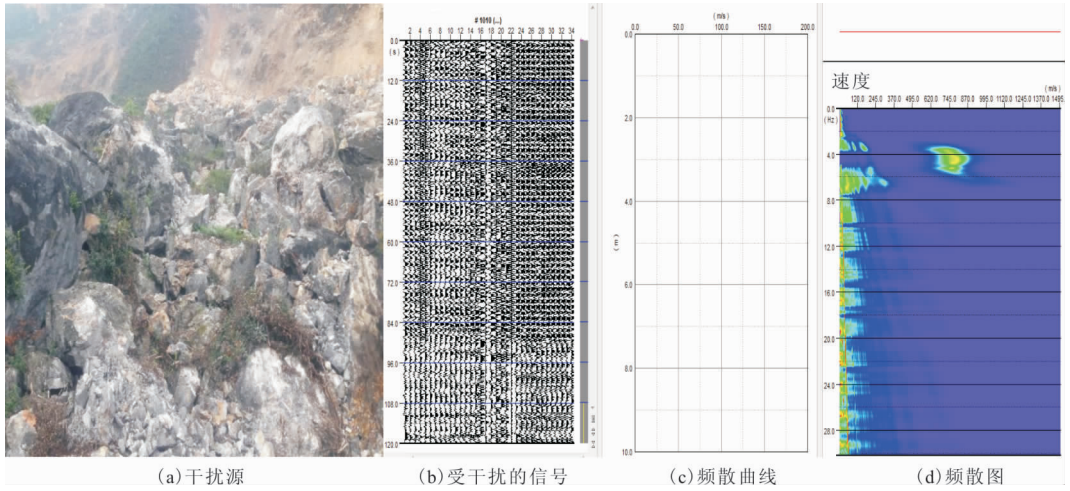


图 10 受地形起伏影响情况

Fig. 10 Interference by topographic relief

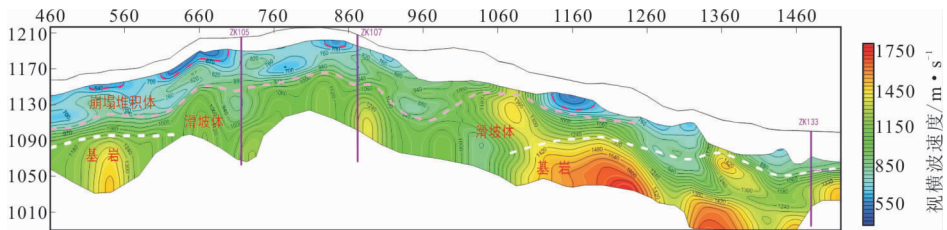


图 11 堰塞体典型面波波速剖面

Fig. 11 Velocity profile of surface wave in damming body

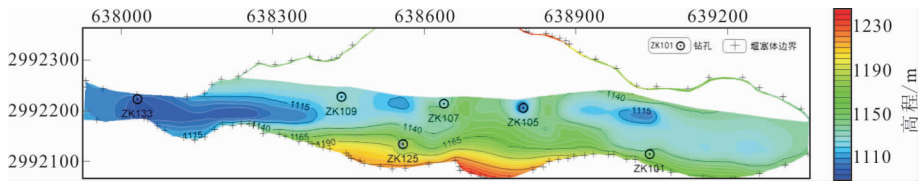


图 12 堰塞体底界面高程等值线图

Fig. 12 Elevation contour map of the bottom interface of the damming body

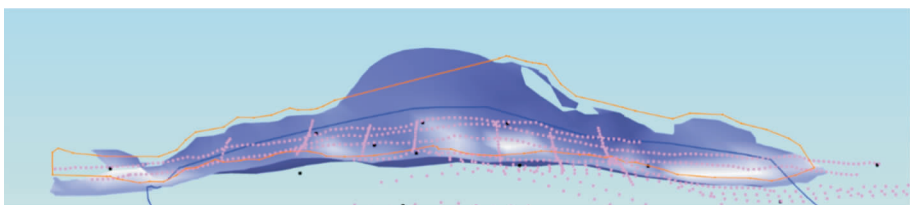


图 13 堰塞体底界面三维模型

Fig. 13 Three-dimensional model of the bottom interface of the damming body

堰塞体上游向下游顺河向布置,剖面长度为1 060 m,桩号460 m~1 520 m,43个测点,从探测剖面可以看出,在视横波波速900 m/s左右存在明显的分界面,小于900 m/s的区域为较为松散的崩塌堆积体,波速分布不均匀,大于900 m/s的区域,为古滑

坡体,波速分布相对均匀。

在460 m~720 m段位于堰塞体迎水面段,视横波波速为700 m/s~1 500 m/s,基岩顶面高程在1 082 m~1 100 m,基岩顶面视横波波速在1 100 m/s左右;堰塞体与古滑坡体分界面高程在1 100

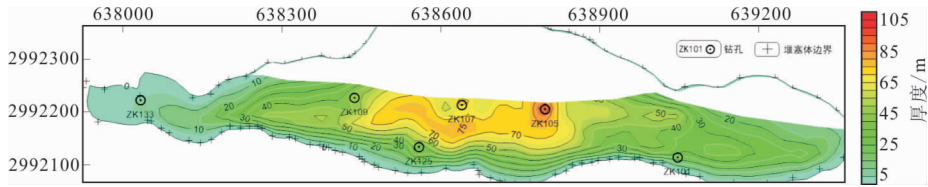


图 14 堰塞体厚度等值线图

Fig. 14 Thickness contour map of the damming body

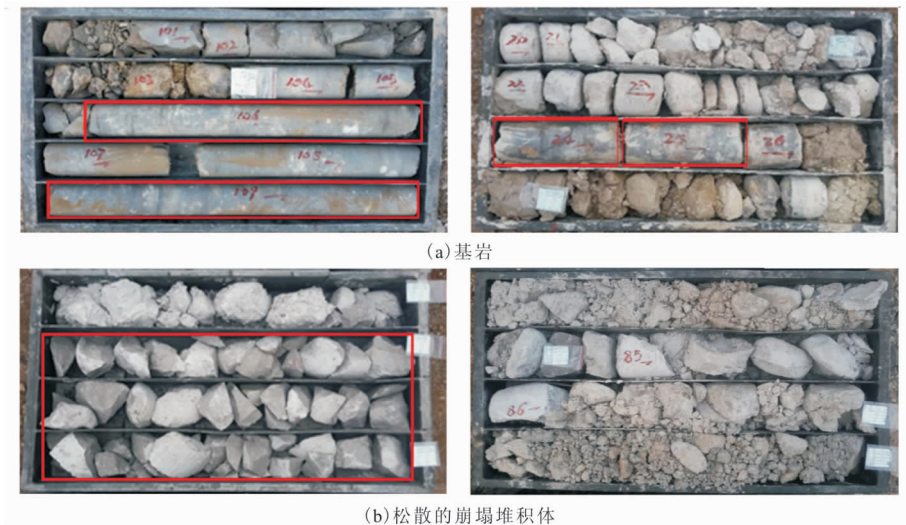


图 15 密实与松散区的岩芯照片

Fig. 15 Core photos of dense and loose areas

m~1 150 m。桩号范围 520 m~560 m、600 m~700 m、820 m~860 m、1 130 m~1 200 m 的表层存在四个低速异常区,推测为软弱物充填或者存在架空现象,较为松散,相对密度较低。堰塞体与古滑坡体分界面高程在 1 110 m~1 166 m,基岩面高程约为 1 150 m~1 195 m。

### 3.2 堰塞体底界面分析

根据本次多条被动源面波探测结果得出了堰塞体的底界面,并估算了堰塞体的规模。

从图 12 可以看出,纵向上堰塞体中部稍高,迎水面和背水面较低,背水面最低;横河向上河床部位低,左、右两岸高。

图 13 为根据综合解释成果构建的堰塞体底界面三维模型。从图 13 可以看出,堰塞体底界面中部区域较高,上游迎水面次之,背水面最低、坡降较大。

图 14 为堰塞体厚度等值线图。在工作范围内,堰塞体厚度一般在 30 m~70 m,底界面最大埋深为 78.1 m,平均埋深为 41.9 m。整体上看,堰塞体迎水面和背水面较薄,厚度在 10 m~30 m,背水面尾部最薄;中部最厚,厚度在 50 m~70 m;河床部位厚,左、右两岸薄。

依据测量边界对堰塞体覆盖范围的面积进行了估算,并结合解释的平均厚度推算了堰塞体方量。经过推算,堰塞体覆盖范围面积约  $25.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,周长约 3 164.42 m,方量约  $1 056 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

### 3.3 堰塞体密实性

#### 3.3.1 堰塞体相对密实度与波速的关系

总体上看,松散的堆积体其相速度小,密实的堆积体其相速度就大,因此崩塌堆积体的相对密实度与面波的相速度有较好的一致性。从勘探区被动源波速成果看,堰塞体上部、古滑坡滑坡体浅表部细颗粒少、架空现象较多,相对松散,其面波相速度较低在 300 m/s~650 m/s;堰塞体底部崩塌堆积体、震前河床左岸江边滑坡体、古河床冲积及其上部的滑坡堆积体和新河床冲积层细颗粒多、填充较密度,其相对密实情况处于中等水平,相速度在 500 m/s~850 m/s;基岩相速度在 750 m/s~1 350 m/s(图 15)。

根据文献资料的结论,崩塌堆积体的瑞雷面波波速值随密实度增大呈非线性增大<sup>[9]</sup>,因此可利用瑞雷面波波速值 VR 来评价崩塌堆积体的密实程度。根据工程经验及本工程的特点,依据瑞雷面波波速值将堰塞体的相对密实情况分为:松散、中等密实、密实等三个等级(表 1)。

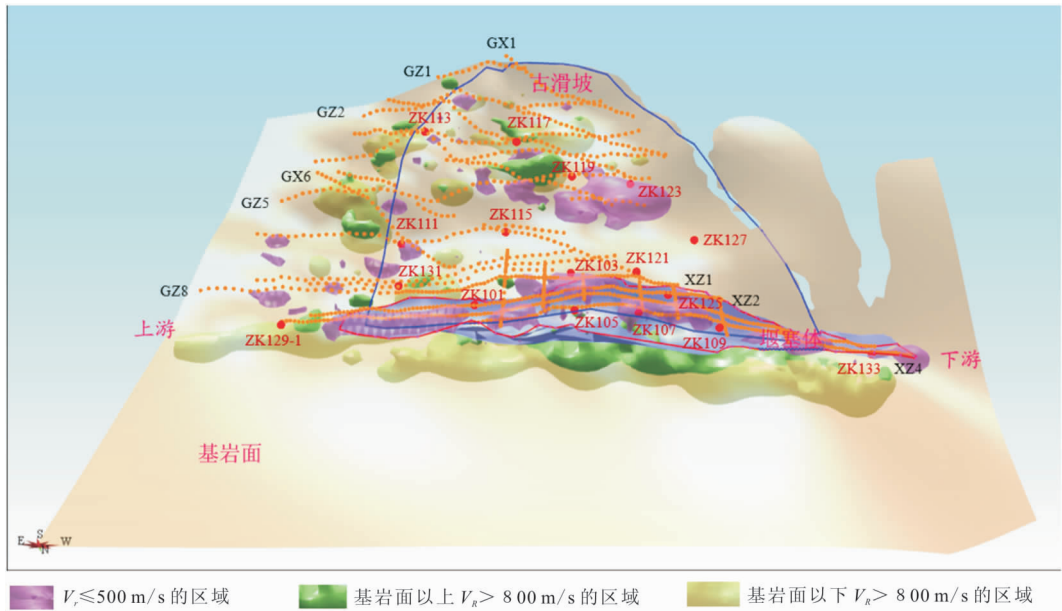


图 16 面波相速度分布特征图

Fig. 16 Characteristic map of surface wave phase velocity distribution

表 1 堰塞体相对密实度分类表

Tab. 1 Classification table of relative compactness of damming body

序号	波速范围/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	相对密实分类等级
1	$V_R > 800$	相对密实
2	$800 \geq V_R > 500$	中密实
3	$500 \geq V_R > 000$	相对松散

1)  $V_R \leq 500$  m/s 的崩塌堆积体,相对松散,往往由巨石和大块石组成,且粒径较大、架空严重,其间基本没有小颗粒填充。需要引起注意的是,除了松散的崩塌堆积体外,密实程度好、阻水性较好的粘土,其面波相速度也在 500 m/s 以下。

2)  $V_R > 800$  m/s 的崩塌堆积体,相对密实,往往由块石组成,粒径大,其间有较多的小颗粒填充,且较密实,或者是勘探区范围内粒径较大的新鲜孤石或新鲜基岩。

3)  $800 \text{ m/s} \geq V_R > 500$  m/s 的崩塌堆积体,其相对密实情况介于前两者之间。

### 3.3.2 面波相速度空间分布特征

图 16 为相速度  $V_R \leq 500$  m/s 和  $V_R > 800$  m/s 的区域在空间的分布情况。从图 16 可以看出: $V_R \leq 500$  m/s 的紫红色区域的内部,代表相对较松散的低波速区域在空间的分布; $V_R > 800$  m/s 的绿色和浅绿色区域的内部,代表相对密实的高波速区域在空间的分布;高波速区与低波速区是互不交叉的。

在堰塞体范围内相速度  $V_R \leq 500$  m/s 的区域主要分布在堰塞体底界面以上,崩塌堆积体的表层;中等密实区域主要分布在堰塞体底界面至基岩顶面之间的区域;相对密实的高波速区域的空间分布主要分布在基岩面以下的基岩。

## 4 结论

1) 从在红石岩堰塞体上开展的被动源面波试验可以看出,针对大粒径不均匀体,被动源面波能够得到有效的频散曲线,为利用面波或横波波速评价其密实性打下了基础。

2) 从进行的面波实际探测工作成果来看,通过建立面波波速与密实性的相对关系,可以得出堰塞体的整个密实性空间分布情况。

### 参考文献:

- [1] 田钢,石战结,Don. W. Steeples,等. 多道面波分析方法在测量土壤压实度方面的应用研究[J]. 地球物理学进展,2003,18(3):450-454.  
TIAN G, SHI Z J, DON. W. STEEPLES, et al. The MASW method used in soil compaction study[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 450-454. (In Chinese)
- [2] 王千年,车爱兰,冯少孔,等. 高密度面波法在堆石体结构中的传播特性及在密实度检测中的应用[J]. 上海交通大学学报,2013,47(10):1574-1578.

- WANG Q N, CHE A L, FENG S K, et al. Application of high-density rayleigh-wave exploration to evaluation of rockfill density [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(10): 1574—1578. (In Chinese)
- [3] 毋光荣, 余凯, 马若龙天然源面波勘探技术在工程中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(3): 279—285.
- WU G R, YU K, MA R L. The application of natural source surface wave method to engineering project [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(3): 279—285. (In Chinese)
- [4] 吴学明, 王超凡, 高才坤, 等. 被动源面波法在水电工程勘察中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2016(4): 493—500.
- WU X M, WANG C F, GAO C K et al. Application of passive source surface wave method in hydroelectric engineering investigation [J]. Calculation Technology of Geophysical and Geochemical Exploration, 2016(4): 493—500. (In Chinese)
- [5] 张维, 何正勤, 胡刚, 等. 用面波联合勘探技术探测浅部速度结构[J]. 地球物理学进展, 2013(04): 2199—2206.
- ZHANG W, HE Z Q, HU G, et al. Surface wave combined exploration technique is used to detect shallow velocity structures [J]. Progress in Geophysics, 2013(04): 2199—2206. (In Chinese)
- [6] 张维, 何正勤, 胡刚, 等. 用人工源和天然源面波联合探测浅层速度结构[J]. 震灾防御技术, 2012, 7(1): 26—36.
- ZHANG W, HE Z Q, HU G, et al. Detect the velocity structure of shallow crust with artificial and nature rayleigh wave technology [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2012, 7(1): 26—36. (In Chinese)
- [7] 丰赞, 沙椿. 面波联合勘探在深厚覆盖层地区应用实例分析[J]. 物探与化探, 2018(02): 392—397.
- FENG Y, SHA C. Case study of combined surface wave exploration in deep overburden area [J]. Geophysical and geochemical exploration, 2018(02): 392—397. (In Chinese)
- [8] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. 岩石学报, 2013(05): 1841—1845.
- XU P F, LI S H, DU J G. Micro detection: a new method for detecting stratigraphy and hidden fault tectonics [J]. Journal of Petrology, 2013(05): 1841—1845. (In Chinese)
- [9] 赵东. 被动源面波勘探方法与应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 759—764.
- ZHAO D. Passive surface waves methods and applications [J]. Geophysics & Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 759—764. (In Chinese)

## Study on the adaptability of passive source surface wave in large particle size inhomogeneous body

WANG Jun<sup>1</sup>, XIAO Changan<sup>2</sup>, ZHANG Zihao<sup>3</sup>, SHI Yalong<sup>2</sup>

(1. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650032, China;

2. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650032, China;

3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China)

**Abstract:** In this paper, a series of surface wave method tests for passive sources are carried out on the damming body, including array form, noise, and terrain influence. The possibility of using passive source surface waves to evaluate the compactness of large particle size inhomogeneities, such as the damming body, is discussed. The work on the Hongshiyuan damming body shows that: the passive source surface wave can obtain effective dispersion curves for large particle size inhomogeneities. The whole compactness spatial distribution of large particle size inhomogeneities can be obtained by establishing the relative relationship between surface wave velocity and compactness.

**Keywords:** passive source surface; large particle size inhomogeneous body; compactness