

# 运用弹性波 CT 法检测堰塞坝体密实性的可行性研究

张子豪<sup>1</sup>, 肖长安<sup>2</sup>, 李海侠<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650031;

2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650041)

**摘要:** 堰塞坝体与一般岩体相比, 结构十分松散, 不利于弹性波的传播, 笔者利用大功率震源, 高灵敏检波器开展弹性波 CT 试验, 评价其在堰塞坝体密实性评估中应用的可行性。正演模拟结果表明, 弹性波 CT 法基本能够反映松散堆积体的内部介质结构和波速情况; 现场堰塞坝堆积体上开展的钻孔内弹性波 CT 法测试反演波速与钻孔岩芯对比显示具有较好的对应性, CT 速度剖面可以综合反映钻孔间岩土体的密实情况。可见通过弹性波 CT 方法得到的纵波速度可对堰塞坝体地下密实性进行有效评价。

**关键词:** 弹性波 CT 成像; 弹性波 CT 正演; 堰塞坝体; 密实性检测

**中图分类号:** P642.2; P631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.03.09

## 0 引言

弹性波 CT 法又称地震波层析成像技术。这种技术主要是通过地震波速度信息进行专门的反演计算得到测区内岩土体弹性波速度的分布规律<sup>[1-2]</sup>。利用这种方法探查地下异常地质体的分布、形态及规模大小, 与常规地震相比具有分辨率高、效率高、空间位置准确等优点, 相比于钻孔岩芯可以从速度剖面上清楚地看到地下地质体的发育情况<sup>[3-4]</sup>, 弹性波 CT 技术被广泛应用于各类岩土工程实践<sup>[5]</sup>、岩溶探测<sup>[2][6][7][9]</sup>、基岩检测<sup>[8-9]</sup>、工程建设<sup>[10]</sup>、无损检测<sup>[11]</sup>等领域并取得了良好的应用效果。在堰塞坝体密实度检测中, 因为堰塞体通常为快速倾倒崩塌堆积, 地形起伏严重, 其内部通常大量填充块石, 粉土, 造成部分区域出现架空现象。因其组成物质的不均匀性, 常规弹性波 CT 测试在检测中会遇到波速衰减过快, 探测深度不够的问题, 部分坝体区域还会因为安全原因无法开展检测试验。因此笔者将根据堰塞坝体的

实际情况进行模型正演, 并在现场采用大功率震源, 高灵敏检波器开展弹性波 CT 试验, 得到反演波速信息结合钻孔岩芯数据进行对比, 验证弹性波 CT 法在堰塞坝体密实性检测方向的可行性。

## 1 模型正演建立

堰塞坝堆积体是一种在内外力综合作用下发生改变的地质情况, 工程上常见的堰塞坝体从剖面看都具有自下往上土粒变小的规律性<sup>[12]</sup>, 体现为堰塞坝上部主要为细小碎石, 并出现架空区域; 下部主要为巨大碎裂块组成, 甚至有的保留了基岩的特性<sup>[13]</sup>, 反映在地震波上即为纵波在上部传播速度总体低于堰塞坝体下部, 遇到架空或松散土体时纵波速度下降明显。综合考虑堰塞坝体的结构特征, 建立了三组正演模型。图 1~图 3 分别为模拟堰塞体情况的三组弹性波 CT 模型, 钻孔深度为 60 m, 钻孔间距 20 m。

模型 1(图 1(a))为三层均匀介质, 第一层, 深度

收稿日期: 2023-02-28

第一作者: 张子豪(1998-), 男, 硕士, 主要从事物探研究, E-mail: 519273824@qq.com。

通信作者: 肖长安(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事工程物探研究, E-mail: 55902568@qq.com。

0 m~20.5 m,纵波波速  $V_p=2\ 000\text{ m/s}$ ,第二层,深度 20.5 m~27.5 m,纵波波速  $V_p=1\ 500\text{ m/s}$ ,第三层,深度 27.5 m~60.0 m,纵波波速  $V_p=3\ 000\text{ m/s}$ ,反演计算结果(图 1(b))表明,可以较好地反映地下介质的分层情况,各层介质的波速对应也较为准确。

模型 2(图 2(a))在模型 1 的基础上,在第一层

介质中增加了架空情况,架空位置波速 340 m/s,从反演计算结果(图 2(b))可以看出,第一层介质的整体波速下降较多,介质反演图像不均匀情况明显波速从小于 780 m/s 到 2 500 m/s 均有分布,而第二层介质的波速反演受到一定程度的影响,也产生了一定的不均匀性,第三层介质未受到影响。

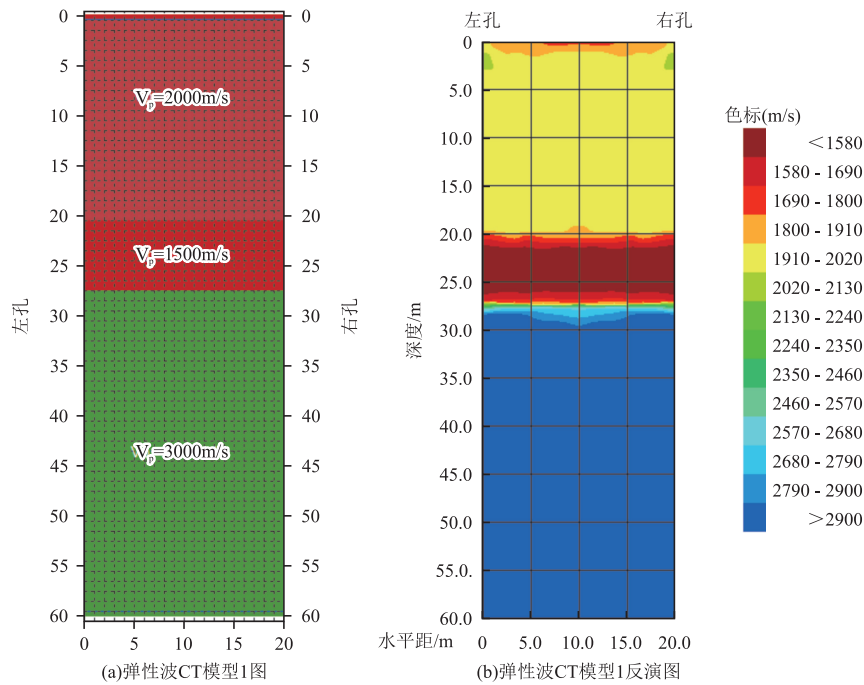


图 1 弹性波 CT 正演模型 1 及其反演图

Fig. 1 Elastic CT forward modeling model 1 and its inversion diagram

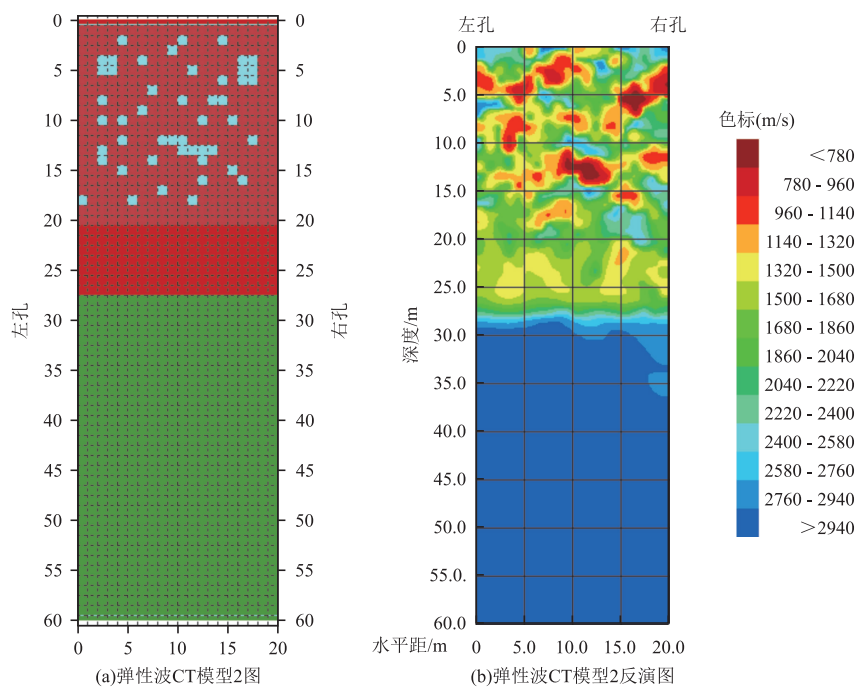


图 2 弹性波 CT 正演模型 2 及其反演图

Fig. 2 Elastic CT forward modeling model 2 and its inversion diagram

模型 3(图 3(a))在模型 2 的基础上继续增加架空情况,第二层介质右半部,第三层介质左侧等位置增加了架空情况,架空位置波速为 340 m/s。从反演计算结果(图 3(b))可以看出,第一层和第二层介质的界线已变得不明显,第二层和第三层介质的界线尚能分辨;第二层介质右侧波速下降明显,约为 750 m/s~1 100 m/s,左侧波速则变化不大,约为 1 500 m/s;第三层介质左侧波速整体下降,基本反映

模型的架空位置情况,波速约为 750 m/s~930 m/s,但其他部位也有一定程度的影响,第三层非架空位置的波速基本仍在 3 000 m/s。

从以上弹性波 CT 的正演计算表明:弹性波 CT 技术基本能够反映松散堆积体的内部介质结构和波速情况,但随着架空情况的增多,对整体波速分布有一定程度的影响,主要反映在对完整介质局部波速降低上。

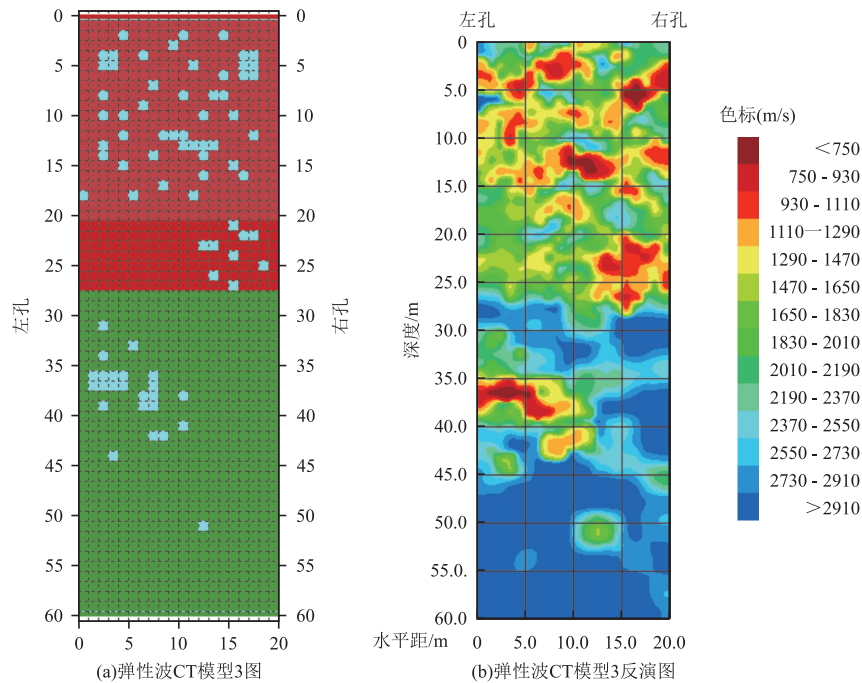


图 3 弹性波 CT 正演模型 3 及其反演图

Fig. 3 Elastic CT forward modeling model 3 and its inversion diagram

## 2 现场试验

### 2.1 试验现场布设

为了验证钻孔内弹性波 CT 法在堰塞坝等大粒径松散体中适应情况,在红石岩堰塞坝中采用大功率震源,高灵敏检波器弹性波仪开展了现场试验工作。实验地点位于原红石岩水电站大坝下游约 600 m 处,堰塞体为快速倾倒崩滑,其物质主要来自右岸高处,左岸同样有滑塌物质汇入,以碎块石为主,碎块石成分均主要为弱、微风化、新鲜白云质灰岩、白云岩。堰塞体地形起伏较大,表面广泛分布有巨石、块石,其余

部分表面有薄层土壤和灌木分布,架空现象严重<sup>[14]</sup>。

现场共计布置 3 个钻孔,孔深 60 m,钻孔位于堰塞坝靠近中心区域(图 4),示意图见图 5(a),现场照片见图 5(b)。钻孔间距最大 23 m,为了测试需要钻孔采用 PVC 管或橡胶带护壁(如图 6 所示),为了解决 PVC 管与堰塞体之间的架空,在 PVC 管和堰塞体之间灌入沙子或水泥浆<sup>[15]</sup>。

现场试验采用弹性波 CT 方式,其射线网络如图 7 所示,共开展三对孔的测试工作,包括 ZK1(发射)—ZK2(接收)、ZK2(发射)—ZK3(接收)、ZK1(发射)—ZK3(接收),接收道数 24 道,发射和接收点距皆为 1 m。

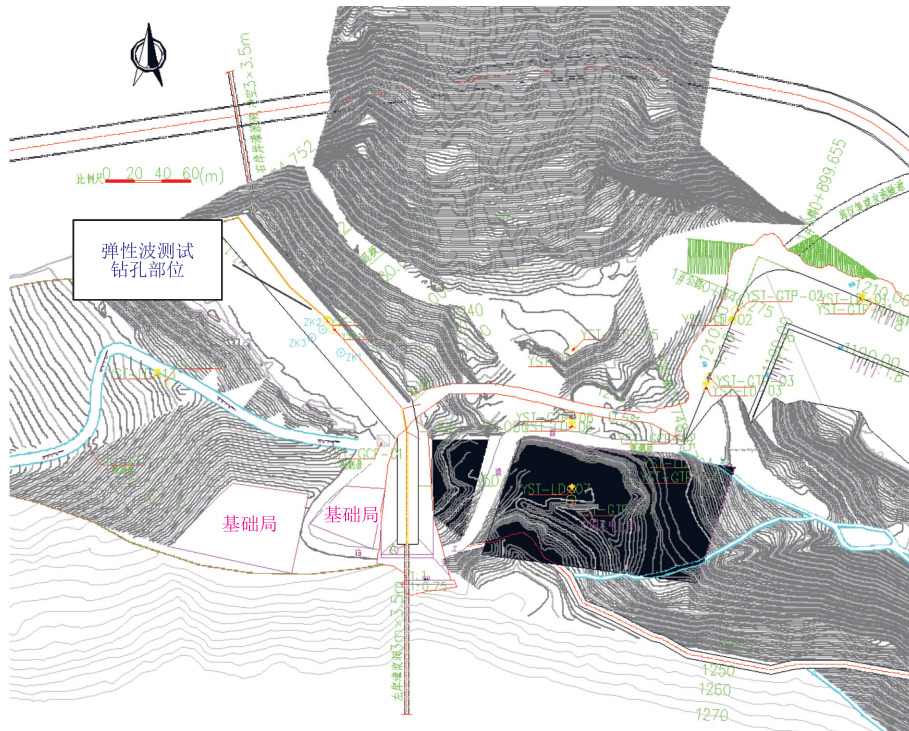
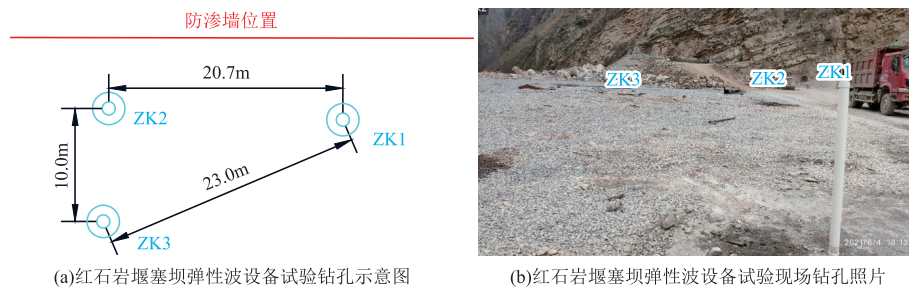


图 4 红石岩堰塞坝弹性波设备试验钻孔位置图

Fig. 4 Location map of test drilling holes for elastic wave equipment in Hongshiyuan dam



(a)红石岩堰塞坝弹性波设备试验钻孔示意图

(b)红石岩堰塞坝弹性波设备试验现场钻孔照片

图 5 红石岩堰塞坝弹性波设备试验现场

Fig. 5 Hongshiyuan dam elastic wave equipment test site



(a)橡胶带+PVC管护壁

(b)PVC管护壁

图 6 钻孔护壁措施

Fig. 6 Drilling wall protection measures

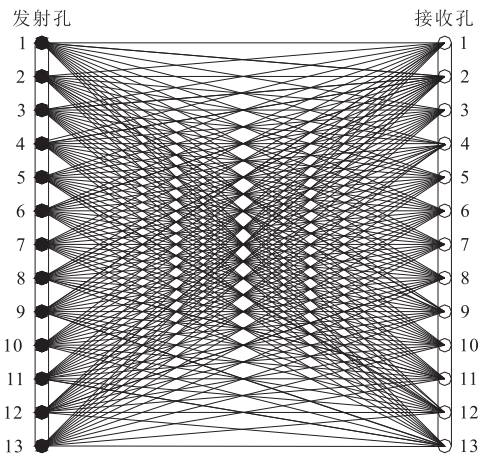


图 7 弹性波 CT 射线网络示意图

Fig. 7 Schematic diagram of elastic CT ray network

## 2.2 弹性波测试结果

此次弹性波 CT 试验共进行了三对孔, 由于 ZK1 钻孔故障, 部分测试段无法进行, 但从测试的情况来看, 已经达到测试目的。

图 8 为测试的两个典型原始波形图, 由图可以看出, 初至波较为清晰, 其中图 8(a) 为 ZK2-ZK3 测试波形, 最小穿透距离 10 m, 最大穿透距离 20.1 m, 图 8(c) 为 ZK1-ZK3 测试波形, 最小穿透距离 23 m, 最大穿透距离 31.1 m。

图 9 为各钻孔剖面数据进行反演分析所获得的纵波速度剖面分布图, 由图可以看出, 整体波速分布十分不均匀, 呈现高低波速交替出现的分布性状, 其中在深度  $-52\text{ m}\sim-56\text{ m}$  之间存在低波速带, 波速范围  $800\text{ m/s}\sim 1\,400\text{ m/s}$ , 深度  $-58\text{ m}$  以下波速有升

高的趋势, 波速范围  $2\,000\text{ m/s}\sim 2\,800\text{ m/s}$ 。从水平分布来看, 靠近 ZK1、ZK2 一侧波速整体较高, 即上游侧波速相对较高。

## 3 弹性波 CT 反演结果与钻孔岩芯对比分析

通过钻孔岩芯揭示与波速剖面对比情况如图 10 所示, 可以看出高波速与相对大的孤石、低波速与粉土含量多有一定的对应性, 但是总体来讲, 由于钻孔岩芯是反映钻孔位置的情况, 而 CT 速度剖面是剖面间岩土体的综合反映, 而且如果孤石周边架空较多的话, 波速也会较低, 因此两者之间并不能完全对应, CT 速度剖面更有利于对堰塞体的整体情况进行反映, 因此参考价值也要更大。

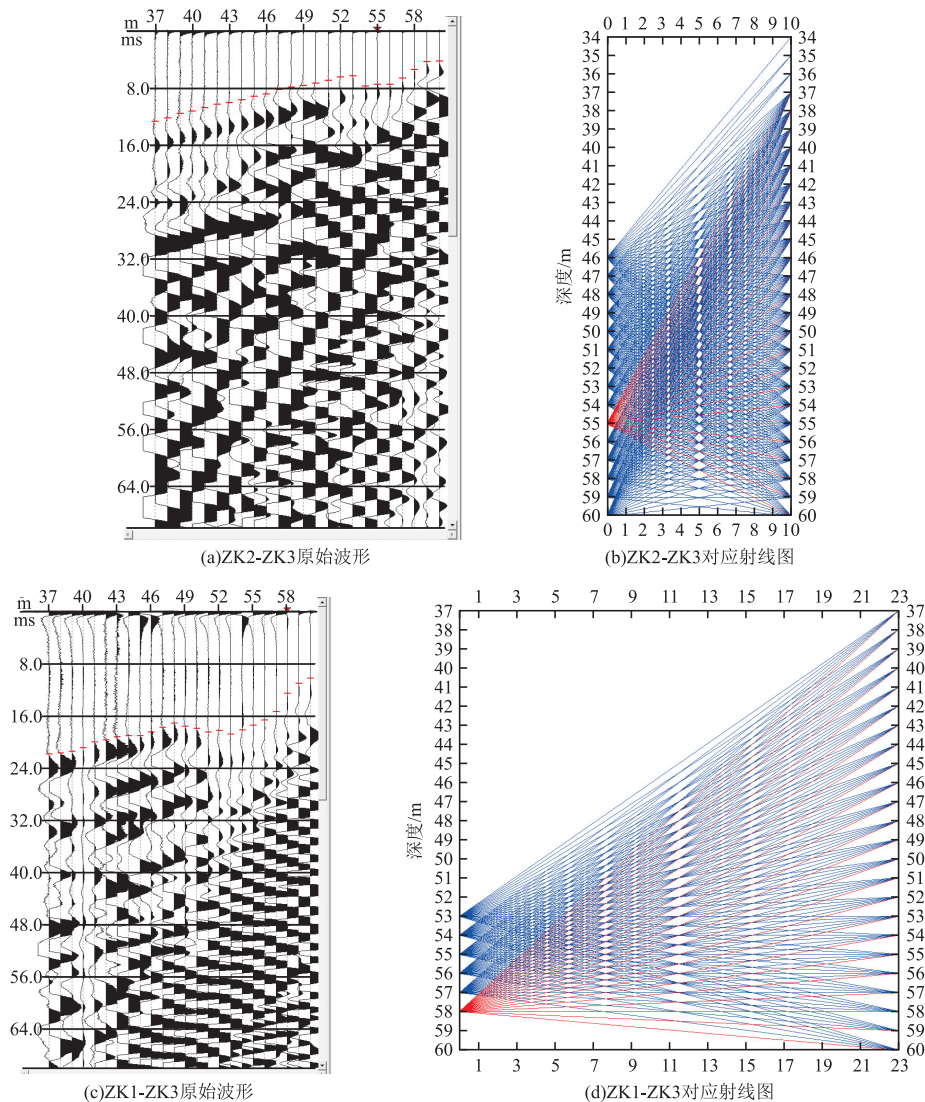


图 8 实验采集的弹性波 CT 原始波形

Fig. 8 The original waveform of elastic CT collected in the experiment

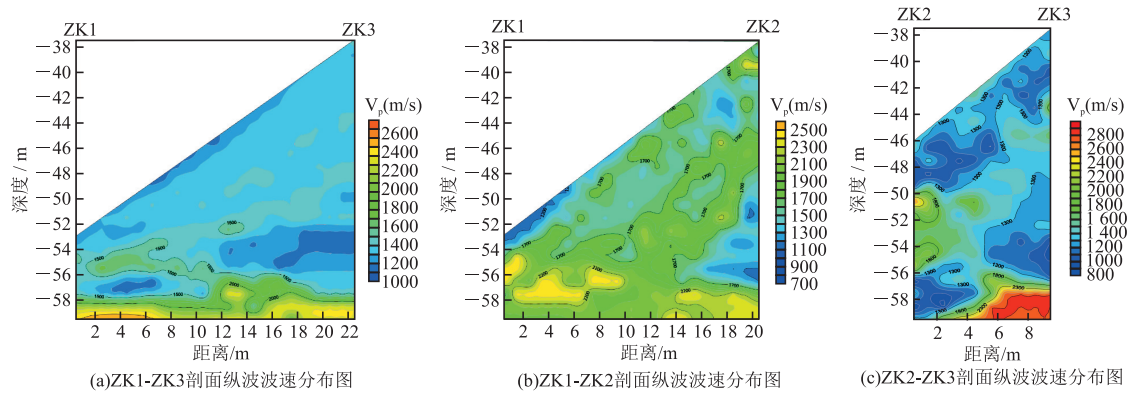


图 9 钻孔剖面纵波速度剖面分布图

Fig. 9 Profile distribution of P-wave velocity in borehole section

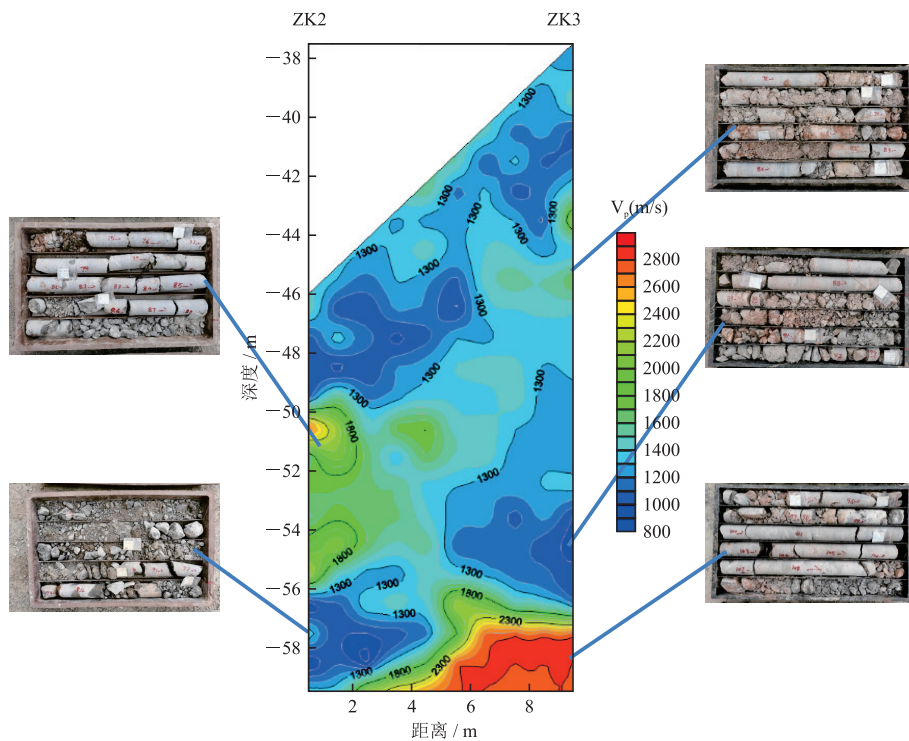


图 10 钻孔岩芯与波速剖面的对应情况

Fig. 10 Correspondence between drill core and wave velocity profile

### 4 结论

笔者根据堰塞坝体的情况进行了多种模型的正演模拟,并结合了现场试验探讨了弹性波 CT 在堰塞坝体密实性评估应用中的可行性。弹性波 CT 法可以对堰塞坝体的内部介质结构有一个整体情况的反应,还可以通过波速变化情况对堰塞坝体进行密实性检测,其中高波速与相对大的孤石、低波速与粉土、粒石含量高有一定的对应性。相对于钻孔数据

而言,弹性波 CT 反演得到的速度剖面更能综合反映钻孔间岩土体的密实情况,因此能够用来对堰塞坝体进行密实性评价。

#### 参考文献:

[1] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1988.  
WANG Z D. Shallow seismic prospecting application technology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. (In Chinese)

[2] 牛建军, 杜立志, 谷成. 岩溶探测中的弹性波 CT 方

- 法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 630—633.
- NIU J J, DU L Z, GU C. The application of elastic CT method in Karst prospecting[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(4): 630—633. (In Chinese)
- [3] 邱庆程, 李伟和. 跨孔地震 CT 层析成像在岩溶勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2001, 25(3): 236—240.
- QIU Q C, LI W H. The application of crosshole seismic CT method to the detection of Karst caves in bridge foundation investigation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(3): 236—240. (In Chinese)
- [4] 李高, 郑旭辉, 张宝君, 等. 基于弹性波 CT 技术的岩体破裂探测方法[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(5): 681—688.
- LI G, ZHENG X H, ZHANG B J, et al. A detecting method for rock mass fracture based on elastic wave CT technique[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2015, 24(5): 681—688. (In Chinese)
- [5] 袁志亮. 声波 CT 技术的应用[C]//2004 全国资源与环境调查及工程勘察与监测学术交流会议论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2004: 219—223.
- YUAN Z L. Application of Acoustic CT Technology [C]//Proceedings of the 2004 National Resources and Environmental Investigation and Engineering Survey and Monitoring Symposium. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2004: 219—223. (In Chinese)
- [6] 李谭伟, 李振兴, 葛延明, 等. 综合物探方法在株州湘江大桥勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(3): 785—792.
- LI T W, LI Z X, GE Y M, et al. The application of comprehensive geophysical prospecting method to the investigation of Xiangjiang bridge in Zhuzhou[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3): 785—792. (In Chinese)
- [7] 李川, 徐旺兴, 孔华, 等. 桥梁桩基底部溶洞的井间电磁波 CT 探测研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(1): 73—78.
- LI C, XU W X, KONG H, et al. Study on cross-hole electromagnetic-wave CT exploration of Karst caves under bridge piles[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2021, 49(1): 73—78. (In Chinese)
- [8] 胡龙胜. 弹性波在基岩检测中的试验研究[J]. 港工技术, 2007, 44(4): 52—54.
- HU L S. Test and study of elastic wave in base rock detection[J]. Port Engineering Technology, 2007, 44(4): 52—54. (In Chinese)
- [9] 李小伟, 纪银刚, 邱松, 等. 地震 CT 与折射波法在第四系覆盖层厚度勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2018, 46(5): 73—78.
- LI X W, JI Y G, QIU S, et al. Application of seismic CT and refraction wave method to detect the thickness of Quaternary overburden[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(5): 73—78. (In Chinese)
- [10] 龚选波, 张继伟, 周玉凤, 等. 综合物探技术在深圳地铁 16 号线岩溶勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2018, 46(7): 62—67.
- GONG X B, ZHANG J W, ZHOU Y F, et al. Application of comprehensive geophysical technology in Karst investigation in Line No. 16 of Shenzhen Metro [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(7): 62—67. (In Chinese)
- [11] 高远富, 王仲刚, 周凌, 等. 钢管混凝土叠合柱弹性波 CT 空洞与脱空缺陷检测分析[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(1): 89—96.
- GAO Y F, WANG Z G, ZHOU L, et al. Analysis on defect detection for cavity and empty in steel tube-reinforced concrete column by elastic wave CT[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 37(1): 89—96. (In Chinese)
- [12] 刘衡秋, 朱志刚, 何维彬. 地质灾害危险性评估工作发展现状及若干技术问题探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4): 128—130.
- LIU H Q, ZHU Z G, HE W B. The development status and some technical issues of geological disaster risk assessment [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(4): 128—130. (In Chinese)
- [13] 董文阳. 基于微动法的松散堆积体探测技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- DONG W Y. Research on detection technology of loose accumulation based on micro-motion method [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (In Chinese)
- [14] 吴学明, 高才坤, 王俊, 等. 综合物探方法在红石岩堰塞体探测中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(3): 364—371.
- WU X M, GAO C K, WANG J, et al. Study of comprehensive geophysical prospecting method in detecting of the Hongshiyuan damming body [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(3): 364—371. (In Chinese)
- [15] 程盼, 邹金锋, 罗恒, 等. 松散填土层中注浆效果检测方法试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),

2013, 44(9): 3800—3806.

CHENG P, ZOU J F, LUO H, et al. Experimental research on detection method of grouting effect in loose

filled soil [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44 (9): 3800 — 3806. (In Chinese)

## Feasibility study on using elastic CT method to detect the density of weir dam

ZHANG Zihao<sup>1</sup>, XIAO Changan<sup>2</sup>, LI Haixia<sup>1</sup>

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China;

2. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650041, China)

**Abstract:** Compared with ordinary rock mass, the structure of the weir dam is very loose, which is not conducive to the propagation of elastic waves. In this paper, a high-power source and a high-sensitivity geophone are used to carry out elastic CT tests to evaluate its application in the evaluation of the compactness of the weir dam feasibility. The results of forward modeling show that the elastic CT method can reflect the internal medium structure and wave velocity of the loose accumulation body; the inversion wave velocity of the elastic CT method in the borehole carried out on the on-site dam accumulation body is compared with the drill core. With good correspondence, the CT velocity profile can comprehensively reflect the compactness of rock and soil between boreholes. The results of this paper show that the longitudinal wave velocity obtained by the elastic CT method can effectively evaluate the underground compactness of the weir dam.

**Keywords:** elastic CT; elastic CT forward modeling; weir dam; compactness detection