

Nondestructive Detection for Explaining Leaning of Manghong Octagonal Tower Base on Rayleigh Wave Technique

Yaqiong Liu, Rongyi Qian*, Xinglin Lu, Lichao Liu, Zhouwen Hu

China University of Geosciences (Beijing), Beijing
Email: yaqiongliu@cugb.edu.cn, *rongyiqian@cugb.edu.cn

Received: Apr. 5th, 2017; accepted: Apr. 26th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

Rayleigh wave detection technique has been used widely to detect the structural information of tower foundation for engineering constructions. There are many advantages, including nondestructive, near surface high resolution, cheapness and quickness, etc. The Manghong Octagonal tower was built in Kangxi period of Qing dynasty, located in Lancang county, Yunnan province and became one of the most important historical sites in China. At present, Manghong Octagonal Tower is inclining to north and the tower appears some cracks at the bricks on tower body. In order to protect cultural relics, nondestructive detection method has to be utilized to ascertain the structural information of tower foundation, and analyze the reason why the tower was inclined. In this paper, we used Rayleigh wave exploration technique with high resolution to obtain shear wave velocity structure of tower foundation. Combining with the engineering geological information, we can deduce the reason why the tower was inclined, and provide some basic advices for the protection of cultural relics. We processed the Rayleigh wave data from the two survey lines at the tower foundation, and obtained the information of the shear wave velocity structure. From there, we can deduce the backfill soil thickness is about 1 m near surface of tower foundation and the bedrock is sandy conglomerate. The tower foundation is located on the relative prominent bedrock surface, and a shear wave low-velocity area can be found on the north of foundation with weaker bearing stratum. We can conclude from the result of detection as follow: 1) the local fracture zone exist on the north of the tower; 2) the uneven supported power between the bearing stratum and tower foundation would lead the tower to inline north.

Keywords

Manghong Octagonal Tower, Rayleigh Wave, Nondestructively Detection, The Reason of Leaning

*通讯作者。

文章引用: 刘雅琼, 钱荣毅, 鲁兴林, 刘立超, 胡周文. 基于瑞雷面波技术的芒洪八角塔倾斜成因无损探测[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(2): 224-231. <https://doi.org/10.12677/ag.2017.72024>

基于瑞雷面波技术的芒洪八角塔倾斜成因无损探测

刘雅琼, 钱荣毅*, 鲁兴林, 刘立超, 胡周文

中国地质大学(北京), 北京

Email: yaqiongliu@cugb.edu.cn, *rongyiqian@cugb.edu.cn

收稿日期: 2017年4月5日; 录用日期: 2017年4月26日; 发布日期: 2017年4月30日

摘要

瑞雷面波探测技术具有无损、浅层分辨率高、经济高效等优势, 已广泛应用于探测各类建筑的地基结构信息。始建于清朝康熙年间的芒洪八角塔位于云南省澜沧县, 是全国重要保护文物。现今八角塔整体向北倾斜, 并出现了开裂现象, 为保护文物, 迫切需要采用无损探测方法探明塔基础结构信息, 分析塔身倾斜的原因。本篇文章研究应用瑞雷面波技术高分辨率探测塔基础地层的剪切波速度结构, 据此结合工程地质信息推断塔身倾斜原因, 为保护文物提供依据。通过在塔基础布置两条瑞雷面波测线获取剪切波速度结构信息, 推断八角塔基础浅地表层回填土厚度约为1 m, 其下基岩为砂砾岩, 塔基坐落在相对凸起的基岩面上, 塔基础的北侧有剪切波低速异常区, 持力层相对较弱。综合探测结果, 总结得出以下内容: 1) 塔北侧存在局部破碎带; 2) 持力层对塔基产生的支持力不均匀导致塔向北侧倾斜。

关键词

芒洪八角塔, 瑞雷面波, 无损探测, 倾斜成因

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

云南省芒洪八角塔始建于清朝康熙年间, 是全国重点文物保护单位“景迈古茶园”中一处重要的文物建筑, 位于云南省澜沧县芒景村芒洪寨景迈山角的一处台地上。八角塔是由砂岩垒砌建成的石塔, 外观为重檐攒尖顶八边形, 由塔基、塔身、塔顶组成, 通高 5.8 m (图 1(a))。八角塔具有独特的建筑风格, 塔身绘制的二十三块石雕图案融合了佛教、道教、儒家文化, 是体现中国文化融合发展的重要基石。

现如今八角塔整体向北倾斜, 塔身出现破损、开裂现象。为进一步修缮和保护八角塔的整体结构, 需要探测查明塔身倾斜原因。因此选用瑞雷波探测技术探测塔基础剪切波速度结构, 推断其持力特点。与传统的钻孔测量方法相比[1], 瑞雷面波探测是一种快速、经济、无损的探测技术。瑞雷面波以柱面波形式沿自由地表传播, 具有传播距离远、衰减慢、能量强、信噪比高等特点。夏江海等[2] [3]研究表明瑞雷波速度受剪切波速度的影响最大, 可以利用反演的瑞雷波速度估计浅地表剪切波速度。前人的研究

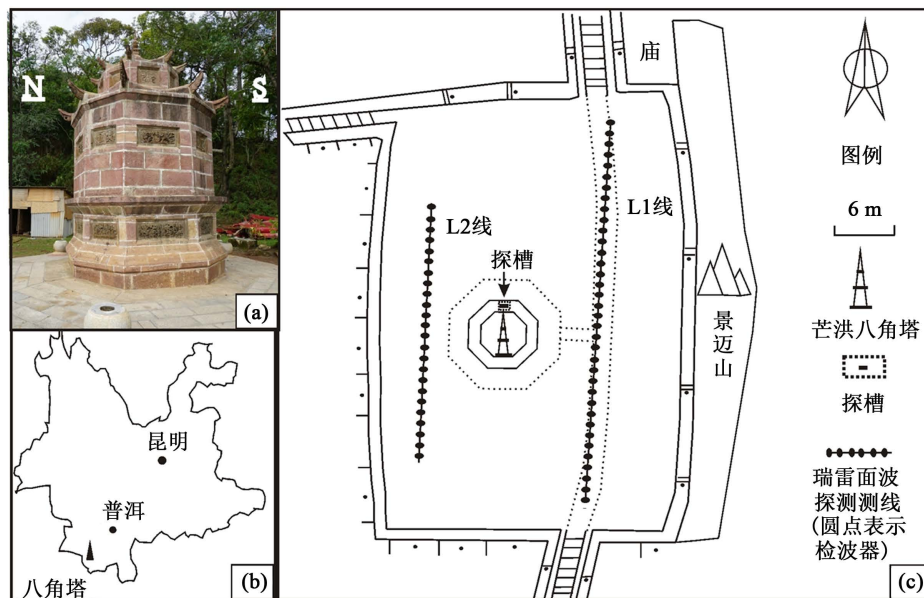


Figure 1. Manghong Octagonal Tower survey: (a) the overall structure; (b) the distribution of field sites; (c) the work layout of tower foundation

图 1. 芒洪八角塔概况: (a) 整体结构; (b) 地理位置; (c) 塔基础探测工作布置

成果表明, 瑞雷面波和钻探获得的剪切波速度具有很好的一致性[4]。Foti 等[5]将瑞雷面波与钻探方法应用于比萨斜塔探测, 证明了瑞雷面波探测能获得可靠的剪切波速度。瑞雷面波探测方法已经应用于一系列的浅表地球物理问题及建筑物无损探测中[6] [7] [8]。

本篇文章研究利用瑞雷面波法高分辨率探测芒洪八角塔基础结构, 利用剪切波速度结构信息, 分析八角塔基础下方是否存在不良地质体, 并划分出基岩覆盖层与基岩层风化的分界面, 推断八角塔倾斜的原因。

2. 研究区概况与数据采集

研究区位于耿马 - 澜沧地震带西侧, 八角塔所处台地浅表层为人工回填粘土层, 其下基岩主要为石炭、侏罗纪砂砾岩。区域内地震活动频繁, 构造复杂, 断裂走向为北东向。在八角塔的东南侧约 15 m, 出露砂砾岩露头有宽约 5 m 北西走向的破碎带。在八角塔西侧, 可见砂砾岩露头和稀疏的北西西向裂隙。断裂带的存在会影响八角塔基础结构的稳定性, 瑞雷面波可以探测塔基础结构。结合区域内地质资料和瑞雷面波探测结果, 判断八角塔下方是否存在局部断裂、破碎带。

根据研究区地形地质条件, 在八角塔东西两侧分别布置一条地震测线, 距塔东侧 6 m 的测线(图 1(c)中 L1 线)长度为 35 m, 距塔西侧 4 m 测线(图 1(c)中 L2 线)长度为 23 m, 为高分辨率探测芒洪八角塔基础结构, 测线设计时加密布设点距为 1 m 的测点。测线布置详细情况见图 1(c)。

本次瑞雷面波数据采集选用 Geode 地震仪, 由于瑞雷面波穿透深度与波长有关[8], 为了增加瑞雷面波的探测深度, 获得频率成份丰富的瑞雷面波数据, 选择频率为 4.5 Hz 的低频率检波器, 重锤震源激发。经过现场试验[9], 数据采集时选择道间距 1 m、24 道接收的观测系统。采样间隔为 0.125 ms, 记录长度为 500 ms。

野外采集的原始瑞雷面波探测单炮记录见图 2, 瑞雷面波发育良好, 信噪比高, 能量强, 主频频率为 40 Hz, 频带范围为 15~75 Hz; 折射波、反射波、直达波等干扰波的能量较低、采集得到的单炮记录能满足后续处理对原始资料的要求。

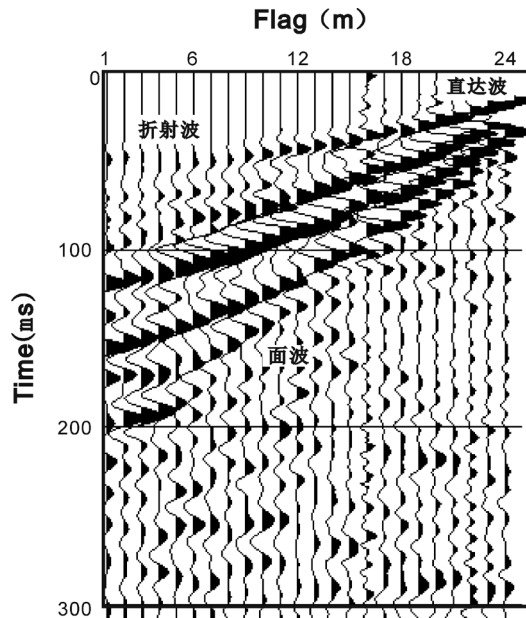


Figure 2. The single shot record of Rayleigh wave exploration
图 2. 瑞雷面波探测单炮记录

3. 数据处理

瑞雷面波速度的反演处理通常需要如下步骤：(1) 提取频散曲线，将采集的时间 - 空间域的炮集记录通过二维傅里叶变换将其映射到频率 - 波数域，在频率 - 波数域计算每个峰值频率对应的相速度，将所有的峰值频率及其对应的相速度连成一条线，便可获得瑞雷波频散曲线[10]；(2) 反复迭代反演频散曲线，直到拟合出最优的反演结果，得到该频散曲线对应的地质模型参数。详细的处理流程如图 3 所示。

本次研究中，瑞雷面波数据处理通过对瑞雷面波单炮记录进行频率滤波等处理后，利用 Seisimager/SW 软件计算出瑞雷面波单炮记录的实测频散曲线，提取的准确性直接影响了反演结果的真实可靠性[11]。瑞雷面波频散曲线提取前，需要对原始地震数据做剔除干扰道、频率滤波、切除折射波、直达波等数据处理，提高瑞雷面波的信噪比。

图 4(a)为处理后瑞雷面波单炮记录，与原始数据单炮记录(图 2)相比，直达波、折射波、反射波等干扰波得到了较好地压制。将处理后的瑞雷面波单炮记录做二维傅里叶变换后得到瑞雷面波频率波数谱(图 4(b))，并拾取频率波数谱中最大频散能量对应的频率和速度，获得基阶模式的瑞雷面波频散曲线。图 4(c)中虚线显示基阶模式瑞雷面波频散曲线信噪比都大于 0.6，表明获得的基阶模式的瑞雷面波频散曲线可靠，能满足瑞雷面波反演的精度要求。最后，采用遗传算法对每个瑞雷面波频散曲线进行单独反演，搜索范围为观测值的 0.8~1.2 倍，种群个数为 100，遗传代数为 50，通过反复迭代反演，取最优的拟合结果，得到一维剪切波速度和深度剖面(图 4(d))。

4. 数据分析

通过数据处理，分别反演得到每个测点的一维剪切波速度和深度参数，按测点位置绘制成测线下方的二维剪切波速度和深度剖面(图 5)，对比两条测线的速度变化趋势具有很好的一致性。根据剪切波速度结构特征，将速度分为 4 层，第一层介质速度为小于 200 m/s，厚度约 1 m；第二层介质速度约为 200~360 m/s，厚度约 2 m；第三层介质速度约为 360~520 m/s，厚度约 2 m；第四层介质速度大于 520 m/s，深度大于 5 m。

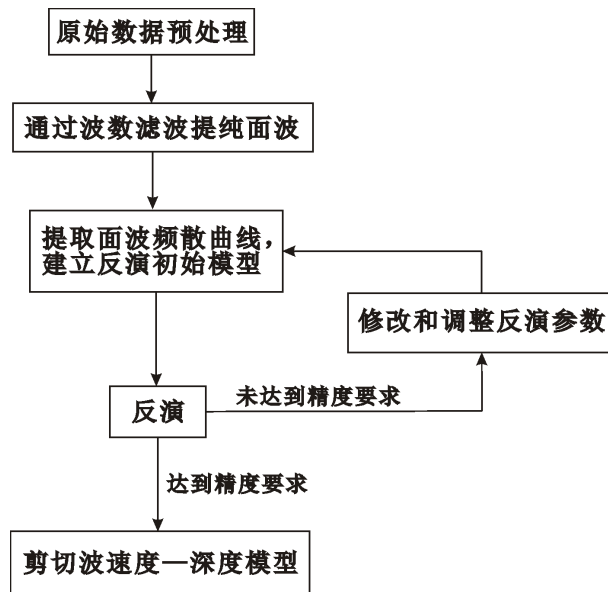


Figure 3. The flow of data process of Rayleigh surface wave
图3. 瑞雷面波数据处理流程

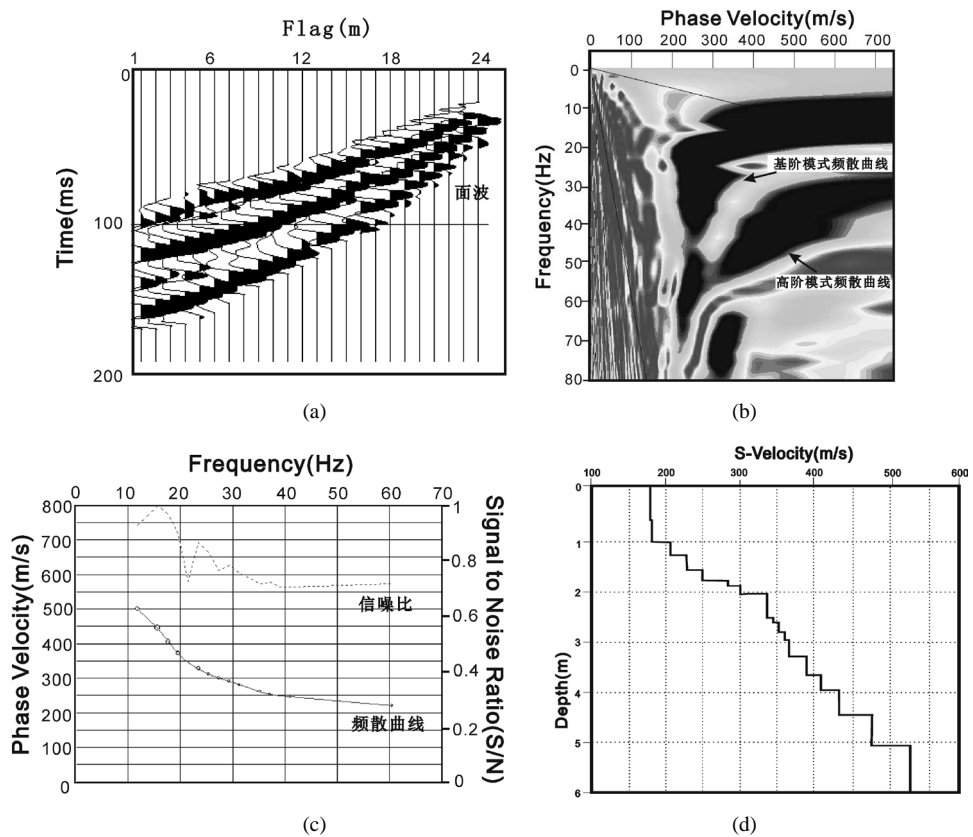


Figure 4. The flow of data process of Rayleigh wave. (a) The single shot record of Rayleigh wave exploration after applying the pre-processing; (b) Rayleigh wave frequency wavenumber spectrum; (c) dispersion curve and signal to noise ratio of curve; (d) layer structure from dispersion curve inversion

图4. 单个测点数据处理流程。(a) 提纯后瑞雷面波单炮记录；(b) 瑞雷面波频率波数谱；(c) 瑞雷面波实测频散曲线和频散曲线信噪比；(d) 频散曲线反演地层结构参数图

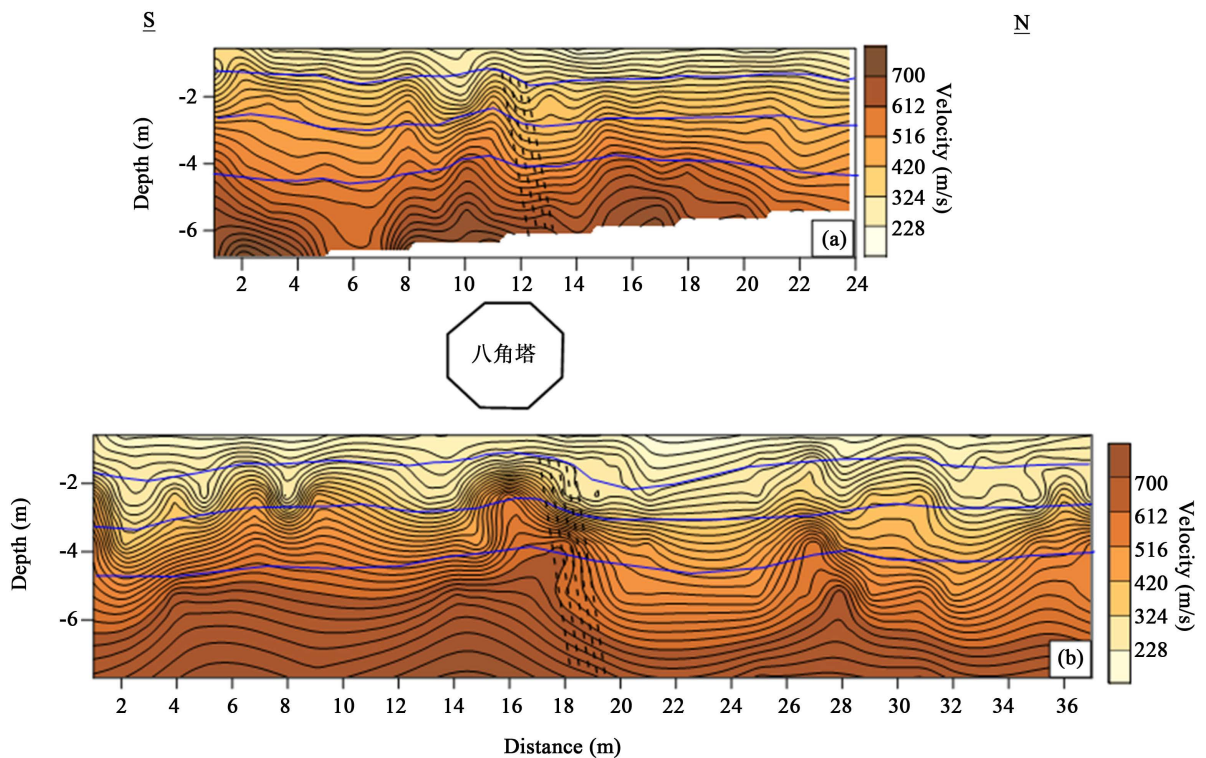


Figure 5. Shear wave exploration speed profile of Line 1 (b) and Line 2 (a)

图 5. L1 线(b)和 L2 线(a)剪切波探测速度剖面

剪切波速度剖面显示了八角塔基岩结构分布特征,结合在八角塔北侧(对八角塔无损区域,具体位置见图 1)进行探槽挖掘得到的地层横截面, (图 6), 在地层深度达到 1 m 左右时出现砂砾岩,推断八角塔塔基结构从上到下分为四层,依次为回填粘土、强风化层砂砾岩、中风化层砂砾岩、弱风化层砂砾岩,层位变化平稳,横向速度变化较大, L1 测线测点号 14~19 段与 L2 测线测点号 9~14 段都出现明显的剪切波波速度升高,两侧剪切波速度小,中间剪切波速度大,根据野外踏勘结果,这两处位置对应八角塔基础正下方,推断八角塔坐落在凸起的基岩面上。图 5 显示, L1 测线测点号 17~18 和 L2 测线测点号 14~15 处有明显的剪切波低速异常区域(图 5 中黑色虚线),这些低速区为岩石破碎的区域,推测塔基础北侧持力层存在局部破碎带,对塔基产生的支持力不均匀导致成塔向北侧倾斜。综合 L1 和 L2 测线的瑞雷面波探测成果,绘制八角塔浅地表剪切波速度 - 深度剖面示意图(图 7)。

5. 结论

本文利用瑞雷面波法在芒洪八角塔周围进行探测,通过数据处理和资料分析获得了八角塔塔基浅地表的剪切波速度结构,结合野外调查和探槽资料,得出以下结论:

(1) 推断芒洪八角塔塔基浅层结构分为四层,表层回填粘土的厚度约为 1 m,其下强风化层砂砾岩厚度约为 2 m,中风化层砂砾岩厚度约为 2 m,深度大于 5 m 为弱风化层砂砾岩。八角塔塔基坐落在相对凸起的基岩面上,塔基础北侧存在低速异常区,参考地质调查信息,推测塔基础北侧存在局部破碎带,持力层对塔基产生的支持力不均匀导致塔向北侧倾斜。

(2) 瑞雷面波探测结果和探槽方法确定的芒洪八角塔基础基岩面位置基本吻合,在研究区内选用合理的采集参数,对埋深浅、横向变化大的地层具有较高的分辨率,得到可靠的地基浅表结构信息。

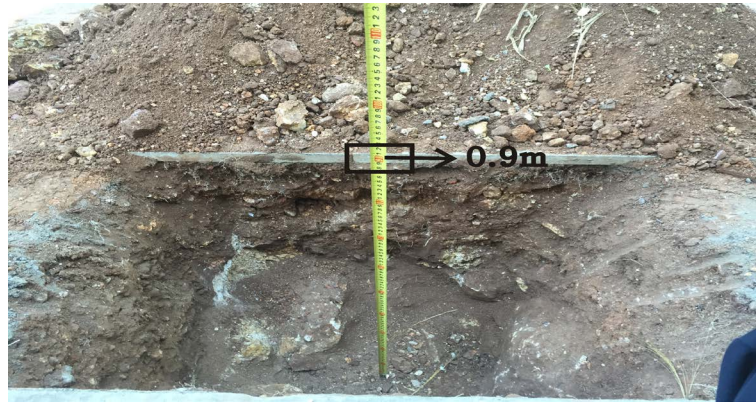


Figure 6. Exploratory trench
图 6. 探槽剖面

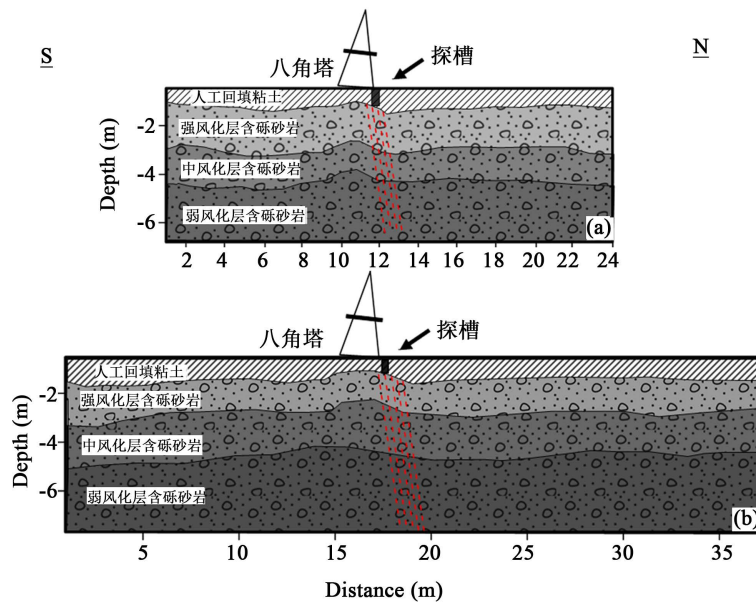


Figure 7. Geological cross-section of octagonal tower foundation structure of Line 1 (b) and Line 2 (a)
图 7. L1 线(b)和 L2 线(a)八角塔塔基结构地质解释剖面图

瑞雷面波探测方法具有无损、分辨率高、操作简便、成果直观等特点，广泛应用于工程地质勘查中，尤其是对场地地质分层的效果较好，能提供准确的覆盖层厚度变化情况，可与钻探或探槽方法配合使用，是文物勘察的一种高效探测方法。

参考文献 (References)

- [1] Fiore, V.D., Cavuoto, G., Tarallo, D., Punzo, M. and Evangelista, L. (2016) Multichannel Analysis of Surface Waves and Down-Hole Tests in the Archeological “Palatine Hill” Area (Rome, Italy): Evaluation and Influence of 2d Effects on the Shear Wave Velocity. *Surveys in Geophysics*, **37**, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9350-2>
- [2] Xia, J., Miller, R.D. and Park, C.B. (2012) Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves. *Geophysics*, **64**, 691-700. <https://doi.org/10.1190/1.1444578>
- [3] 夏江海, 高玲利, 潘雨迪, 沈超, 尹晓菲. 高频面波方法的若干新进展[J]. *地球物理学报*, 2015(8): 2591-2605.
- [4] Thitimakorn, T. (2010) Comparison of Shear-Wave Velocity Profiles of Bangkok Subsoils from Multi-Channel Analysis of Surface Wave and Down Hole Seismic Methods. *Journal of Applied Sciences Research*, **6**, 1953-1959.

- [5] Foti, S. (2003) Small-Strain Stiffness and Damping Ratio of Pisa Clay from Surface Wave Tests. *Geotechnique*, **53**, 455-461. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.5.455>
- [6] Penumadu, D. and Park, C.B. (2005) Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) Method for Geotechnical Site Characterization. *Geo-Frontiers Congress*, 1-10.
- [7] 杨建强, 钱荣毅, 邓佳林, 雷小琼, 王粲. 瑞雷面波折射层析及井间 CT 探测在基岩地基勘察中的应用研究[J]. *工程地球物理学报*, 2012, 9(2): 231-237.
- [8] Pegah, E. and Liu, H. (2016) Application of Near-Surface Seismic Refraction Tomography and Multichannel Analysis of Surface Waves for Geotechnical Site Characterizations: A Case Study. *Engineering Geology*, **208**, 100-113.
- [9] 杨成林, 宣紫燕, 张家奇, 等. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 2-5.
- [10] 曾校丰, 钱荣毅, 邓新生, 林万顺. 面波勘探及其在沙漠地区表层地质结构调查中的应用[J]. *现代地质*, 2001(1): 94-97.
- [11] 宋先海, 李端有, 顾汉明, 唐力, 等. 瑞雷波探测理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 63-66.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org