

文章编号: 1674—8247(2020)03—0046—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.010

二维瞬态面波在隧底隐伏岩溶探测中的应用

王先龙

(云桂铁路广西有限责任公司, 南宁 530022)

摘要:本文介绍了一种新的隧底隐伏岩溶探测方法—基于共中心点道集的二维瞬态面波方法。基于共中心点道集(CMPCC)的二维瞬态面波方法观测系统采用固定排列和滚动排列两种方式,数据处理时采用叠加的方式来压制随机噪音干扰,从而提高了数据质量,同时还具有较高的横向分辨率。本文采用钻孔的方式来固定检波器,从而保证了检波器和地面的耦合;采用30 kg尼龙棒敲击橡胶垫的方式达到激发低频信号的目的,从而保证了数据质量。后续钻探验证表明,面波处理结果和钻探结果具有较高的一致性,证明了该方法在隧底隐伏岩溶探测中具有较好的效果。

关键词:隧道;岩溶;二维面波;探测

中图分类号:U452.1 文献标志码:A

Application of 2D Transient Surface Wave in the Detection of Hidden Karst at the Bottom of the Tunnel

WANG Xianlong

(Guangxi Co., Ltd., of YunGui Railway, Nanning 530022, China)

Abstract: A new detection method for the hidden karst at the bottom of tunnel is introduced in the paper, which is the 2D transient surface wave method on the basis of CMPCC. Fixed arrangement and rolling arrangement are adopted for the observation system of the 2D transient surface wave method. The superposed method is adopted to suppress the random noise interference during data processing, so as to improve the data quality, and the method has high lateral resolution. The drilling method is used to fix the detector, so as to ensure the coupling between detector and the ground. The low frequency signal is excited by tapping the rubber pad with 30 kg nylon rod to ensure the data quality. The subsequent drilling verifies that the processing results of surface wave are consistent with that of drilling, which proves this method has a good effect in the detection of hidden karst at the bottom of the tunnel.

Key words: tunnel; karst; 2D surface wave; detection

随着高速铁路建设速度的加快和区域的扩张,高速铁路建设遇到的地质问题越来越复杂。在我国南方石灰岩地区,岩溶发育,岩溶形态复杂多样,大小千差万别,分布规律性差,若不能有效处理,将为高速铁路运营带来极大的安全隐患。对于在施工开挖过程中揭

露出来或通过地面钻探、地表物探等手段已经判识的溶洞、溶腔、暗河等,可采取工程措施进行处理。但是对于隐伏在隧道底部的溶洞,其探测方法的有效性就显得非常重要。目前,在隧底隐伏岩溶探测中,常用的无损探测方法有地质雷达方法、高密度地震映像方法

收稿日期:2020-06-09

作者简介:王先龙(1974-),男,高级工程师。

引文格式:王先龙. 二维瞬态面波在隧底隐伏岩溶探测中的应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 46-50.

WANG Xianlong. Application of 2D Transient Surface Wave in the Detection of Hidden Karst at the Bottom of the Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 46-50.

等。本文结合工程实例,介绍一种新的探测方法,即基于共中心点道集的二维瞬态面波方法。

1 地面二维瞬态面波方法

1.1 二维瞬态面波简介

早在1887年,英国数学物理学家瑞雷在求解自由表面半空间中的平面弹性波场时,就预言了一种振幅沿纵向指数衰减的面波的存在. 这种面波的速度小于同一介质中的纵波和横波的速度,质点运动轨迹为一逆向椭圆。这一结论在天然地震记录中得到了证实,人们称其为瑞雷波或瑞雷面波^[1]。之后,许多学者对瑞雷波在各种介质中的传播理论进行了广泛的研究^[2]。Tokimatsu 通过对主动源面波的研究推动了面波地震勘探方法的发展,他的总结在主动源面波发展方面具有巨大影响^[3];Kansas Geological Survey 发展了Tokimatsu 在主动源面波方面的发展,并提出了多道分析的方法(MASW)^[4-5],极大地提高了面波分析方法的稳定性和准确率。同时该机构还提出了基于面波勘探的二维分析方法^[6-9],其在面波勘探方面的巨大贡献激发了很多学者对面波勘探的研究。面波方法最关键的理论是提取层状介质的频散曲线, Saito 等人^[10-11]研究了提取频散曲线的方法。日本学者 Hayashi, K. 等人^[12]仿照多次覆盖地震反射技术,提出了共中心点互相关技术(CMPCC)。该方法利用共中心点互相关和同偏移距多炮集叠加技术,克服了低频相速度精度与横向分辨率的矛盾,对二维瞬态面波勘探具有非常重要的意义。本文采用的就是基于CMPCC 的二维瞬态面波方法。

1.2 共中心点二维瞬态面波方法

1.2.1 观测系统设置

CMPCC 二维瞬态面波方法的数据采集仿照多次覆盖地震反射技术,进行连续滚动或固定排列数据采集,如图1所示。

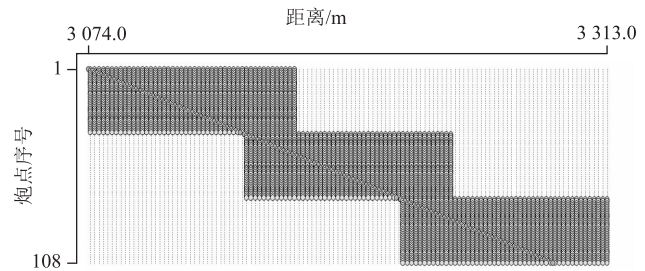


图2 CMPCC 二维瞬态面波排列布置图(滚动式)

CMPCC 二维瞬态面波数据处理有两个重要思想:
(1)共中心点互相关思想

对每一炮记录,每两道的中点记为共中心点,两道做互相关分析,然后把相关波形记录以两道间的相位差的形式保存下来。这样的记录将与炮点位置无关,也将去除道间差异,互相关波形的相位差记录只与两道之间的距离有关。

(2)叠加思想

把所有炮的相同共中心点、相同道间距的“共中心点互相关记录”叠加在一起,形成一个“共中心点互相关记录”。这样的一道记录,随着炮点的增加,将极大地压制随机干扰,其各种频率成分也将趋于稳定。

把相同共中心点、不同道间距的“共中心点互相关记录”,按道间距的大小,从小到大排列起来,形成共中心点互相关道集。这样就形成了以共中心点为测点的CMPCC 记录。

1.2.2 采集参数选择

二维瞬态面波采集参数如表1所示。

表1 二维瞬态面波采集参数表

参数	设置
观测系统	线性
观测系统长度	探测目标深度的两倍
道间距	1.5~3 m
检波器个数	12个或是更多
检波器型号	4.5 HZ 垂直检波器
激发点	在排列头或尾部至少1炮
偏移距	大约10%~20%排列长度,通常情况下建议为40%排列长度
震源设备	3.6、7.2或9 kg大锤,大锤规格按照排列长度增加
触发	锤击开关放在大锤柄上同触发开关连接
采样间隔	0.5或1 ms
采样长度	1~2 s
叠加	根据数据质量,在安静时刻激发

2 隧道中二维瞬态面波实施面临的问题

在隧道中进行岩溶探测不同于在具有覆盖层的地表进行勘探。隧底一般为混凝土结构,同时震源敲击点也在混凝土表面,因此如何固定检波器,保证检波器和地面的耦合,保证震源能激发出较低的频率,是影响勘探效果的关键。

2.1 检波器的固定

检波器一般采用石膏黏贴、加配底座和钻孔等固定方式。石膏凝固需要耗费较长的时间,对于生产来说效率低下。同时,当采用较重的震源敲击时,贴在地上的检波器容易弹起脱落,导致采集到的信号失真,检波器耦合差。加配重物的方式会使检波器接触地面的

面积增大,同时较重的配重影响生产效率。因此,本文推荐采用在混凝土上钻孔,将检波器尖端插入孔中固定的方式,钻孔直径一般6~10 mm。实验结果表明,该方式在检波器耦合和生产效率上都相对较好。

2.2 震源的改造

为了激发较低的频率,在生产中采用30 kg尼龙棒敲击橡胶垫的方式增加低频信号能量,从而达到增加勘探深度的效果。

3 探测方案及效果验证

3.1 测线布置

隧道隐伏岩溶探测一般在仰拱布置3条测线,左右线轨道中线和隧道中线各1条。

3.2 二维瞬态面波方法采集参数及观测系统

二维瞬态面波方法采用仪器为NZ48型48道地震仪,采样长度为1 s,采样间隔为250 us,道间距为1 m,48道采集。按照半波长理论,勘探深度可以达到20 m。

现场检波器沿测线布置,每隔1 m采用冲击钻钻孔,钻孔深度为5 cm,孔径6~10 mm。钻孔完毕后将检波器固定在钻孔上,固定排列方式是将48个检波器同时连续固定在已完成的钻孔上。滚动排列时,将前36个检波器整体拔出,然后重新固定在第49~84个钻孔位置上。

数据采集时,在排列的-0.5 m、0.5 m、1.5 m、2.5 m等位置进行敲击,敲击点间距为1 m,每敲击1次采集1炮记录。固定排列时,从-0.5~47.5 m共敲击49炮。当排列滚动后,仍按照上述规律进行数据采集,从而实现整个测线的多次覆盖。

检波器应固定牢靠,不可晃动,以用手轻轻碰触不晃动为标准。在数据采集时,首先要保证没有震动的影响,基于CMPCC的二维瞬态面波方法虽具有较好的抗干扰能力,但现场的随机强震动仍会对数据质量产生影响。其次要记录好每个炮点和检波器位置,记录文件号和炮点对应关系,以便于准确确定异常点的位置。

3.3 二维瞬态面波方法数据处理流程

二维瞬态面波方法数据处理主要包括面波频散曲线提取、分层反演剪切波速度和厚度。利用面波频散曲线生成速度彩色剖面,并在此基础上绘制探测成果剖面图。二维瞬态面波方法数据处理流程如图2所示。

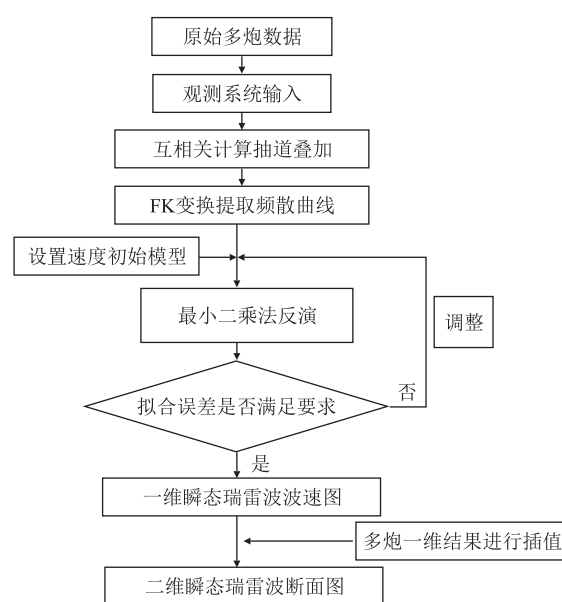


图2 二维瞬态面波方法数据处理流程图

其中频散曲线是通过数据采集所取得的多道记录计算得到,频散曲线的可信度可通过测定沿曲线显示的信噪比进行估计。计算频散曲线的反演是通过迭代的方法寻找最可能的解。保证探测结果可靠性的重要手段是对频散曲线中相关变化点的真实性和重复性进行检验和确认。

3.4 物探地质解释

(1) 测区地球物理特征

一般情况下,隧底由钢筋混凝土、隧底松动扰动带、基岩、基岩内的溶洞溶孔等岩溶发育带组成。按照物理性质,钢筋混凝土的地震面波相速度一般为1 000~2 000 m/s,扰动带变化范围较大,是明显的低速带。完整灰岩的地震面波相速度为1 500~4 000 m/s之间,变化范围较大。岩溶发育带的形态复杂多变,但不变的规律是在基岩内部形成低速区,一般充填型溶洞面波速度小于800 m/s,空溶洞的面波速度更低。

(2) 资料解释

二维瞬态面波速度断面如图3所示,为面波反演结果。

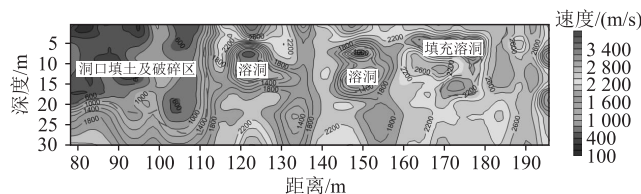


图3 二维瞬态面波速度断面图

从图3可以看出,桩号里程118~125段深度6~15 m处、桩号里程145~155段深度6~17 m处和桩号里程165~178段深度4~19 m处地震面波相速度均低于800 m/s。以上范围存在面波相速度低速区,推测为岩溶裂隙发育区,部分区域岩溶内部有充填。桩号里程77~110段位于泄水洞洞口外侧小里程方向,同样存在低速异常。根据现场调查,该段表层仅有

30 cm素混凝土,混凝土下层为杂填土及弃渣,按1 m道间距观测系统采集的数据不能分辨出表层30 cm的混凝土,因此该段整体表现为杂填土和弃渣的地震面波相速度。

3.5 钻孔验证

物探工作完成后,现场进行了钻探验证工作,在桩号里程176 m处布置钻孔,钻探结果如图4所示。

层次	层深 高程	地层剖面 1:200	层厚 /m	地层 时代	岩层说明及钻进情况	初见 水位	稳定水位 稳定时间	标贯 试验	样品编号 起止深度
(1)	0.50		0.50		(1)灰岩:浅灰色,弱风化(W2),隐晶质结构,中厚层状构造,钙质胶结,岩质较硬,节理裂隙较发育,岩芯较破碎,多呈块状,块径为20~120 mm,岩芯采取率为86%		∇ 1.89 24 h		
(2)	-0.50		2.00						
(3)	-2.50		0.50						
(4)	-3.00		0.20		(2)溶洞:全充填,褐黄色硬塑状黏土充填,含约30%角砾				
(5)	-3.20		0.90						
	-4.10				(3)灰岩:浅灰色,弱风化(W2),隐晶质结构,中厚层状构造,钙质胶结,岩质较硬,节理裂隙较发育,岩芯较完整,多呈柱状,节长30 cm,少量呈块状,块径90 cm,岩芯采取率为96%,RQD为60%				
(6)	12.90		8.80		(4)溶洞:无充填,钻具无压自由下落				
	-12.90				(5)灰岩:浅灰色,弱风化(W2),隐晶质结构,中厚层状构造,钙质胶结,岩质较硬,节理裂隙较发育,岩芯较完整,多呈柱状,节长10~25 cm,少量呈块状,块径80~110 mm,岩芯采取率为97%,RQD为74%				
(7)	20.49		7.59		(6)溶洞:全充填,褐黄色硬塑状黏土充填				
	-20.49				(7)灰岩:浅灰色,弱风化(W2),隐晶质结构,中厚层状构造,钙质胶结,岩质较硬,节理裂隙较发育,岩芯较破碎,多呈块状,块径20~90 mm,部分呈柱状,节长10~30 cm,岩芯采取率为90%,RQD为26%				

图4 标号里程176 m处钻孔柱状图

从图4可以看出,地表以下0.5~3.2 m为半充填溶洞,充填物为硬塑状黏土;4.1~12.9 m为全充填溶洞,充填物为硬塑状黏土,钻探结果基本与二维瞬态面波方法判断结果吻合。

4 结论

(1)由于隧道内钢筋混凝土结构的特殊性,将二维瞬态面波方法应用于隧底隐伏岩溶探测,必须解决检波器的固定和激发低频面波信号的特殊要求。本文采用在钻孔中固定检波器,同时采用尼龙棒敲击橡胶垫的方式,可保证低频信号具有较强的能量。不仅满足了生产效率的要求,也解决了检波器和地面耦合的问题,达到了提高面波信噪比的目的。

(2)基于共中心点道集的(CMPCC)多次覆盖叠加二维瞬态面波数据采集与数据处理方法的应用,使二

维瞬态面波方法具有较好的横向分辨率,能分辨出不规则的具有横向特征的地质体,对于解决探测隐伏岩溶这种不规则地质体问题具有一定的优势。

(3)钻孔验证结果显示,二维瞬态面波的探测结果和钻探结论基本吻合,证明基于CMPCC的二维瞬态面波在隧道基底岩溶探测中具有一定的优势,可作为一种隧底隐伏岩溶探测的新方法使用。

参考文献:

[1] 中铁第一勘察设计院集团有限公司.瞬态面波适用性研究报告[R].西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司,2014.
China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Scientific Research Report of Applicability of Transient Surface Wave [R]. Xi'an: China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 2014.

[2] 肖柏勋.高模式瑞雷面波及其正反演研究[D].长沙:中南大学,2000.

XIAO Boxun. High Models Rayleigh Wave and Forward Modelling and Inversion of Its Dispersion Curves [D]. Changsha: Central South University, 2000.

[3] HAYASHI K. Discontinuous-Grid Finite-Difference Seismic Modeling Including Surface Topography [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(6): 1750–1764.

[4] 刘云祯, 王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例[J]. 物探与化探, 1996, 20(1): 28–34.

LIU Yunzhen, WANG Zhendong. Data Collection and Processing System of Transient Surface Wave Method and Examples of its Application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 20(1): 28–34.

[5] PARK C B, MILLER R D, XIA Jianghai. Multichannel Analysis of Surface Waves [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 800–808.

[6] XIA Jianghai, MILLER R D, PARK C B. Estimation of Near-surface Shear-wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves [J]. Geophysics, 1999, 64(3): 691–700.

[7] PARK C B, MILLER R D, RYDEN N, et al. Combined Use of Active and Passive Surface Waves [J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2005, 10(3): 323–334.

[8] CAPON J. High-resolution Frequency-wavenumber Spectrum Analysis [J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8): 1408–1418.

[9] XIA Jianghai, MILLER R D, PARK C B. Configuration of Near-Surface Shear-wave Velocity by Inverting Surface Wave [C]// Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1999. Environment and Engineering Geophysical Society, 1999.

[10] Saito M, Kabasawa H. Computation of Reflectivity and Surface Wave Dispersion Curves for Layered Media 2 Rayleigh Wave Calculations [J]. Butsuri-tansa, 1993, 46: 283–298.

[11] XU Tong, MCMECHAN G A. Efficient 3-D Viscoelastic Modeling with Application to Near-surface Land Seismic Data [J]. Geophysics, 1998, 63(2): 601–612.

[12] HAYASHI K, SUZUKI H. CMP Cross-correlation Analysis of Multichannel Surface-wave Data [J]. Exploration Geophysics, 2004, 35(1): 7–13.

(编辑:刘会娟 白雪)

(上接第45页)

[6] 李安洪. 卸荷板-托盘路肩挡土墙[J]. 铁道标准设计, 1996(3): 25–26.

LI Anhong. Unloading Plate-Tray Shoulder Retaining Wall [J]. Railway Standard Design, 1996(3): 25–26.

[7] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册-路基[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.

The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Technical Manual of Railway Engineering Design: Subgrade [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1992.

[8] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册-路基(第二版). 北京: 人民交通出版社, 2001.

The Second Highway Survey and Design Institute of the Ministry of Communications. Highway Design Manual: Subgrade (The Second Edition). Beijing: China Communications Press, 2011.

[9] 尉希成. 支挡结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.

YU Xicheng. Design Manual of Retaining Structure [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1995.

[10] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].

GB 50010-2010 Code for Design of Concrete Structures [S].

[11] JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

JTG 3362-2018 Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].

[12] TB 10025-2019 铁路路基支挡结构设计规范[S].

TB 10025-2019 Code for Design on Retaining Structures of Railway Subgrade [S].

[13] JTG/D 30-2015 公路路基设计规范[S].

JTG/D 30-2015 Specifications for Design of Highway Subgrades [S].

[14] JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S].

JGJ 94-2008 Technical Code for Building Pile Foundations [S].

(编辑:刘会娟 张红英)