地下空洞的面波探测

林义[1,2],黄云艳[3],孙克勤[3]

1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院,成都 610031
2. 中铁西北科学研究院有限公司,兰州 730000
3. 四川农业大学土木工程学院,成都 611830

摘要 利用有限元方法对Rayleigh面波的波场特征进行数值模拟,比较不同网格长度对Rayleigh面波频散的影响,针对20 Hz的主频震源,确定当网格划分长度为0.5 m时可满足要求。由于Rayleigh面波散射的时距关系为双曲线,在地面布置检波器可接收到地震信号,根据地震记录所携带的地质信息对非均匀地质体进行查找,通过数值模拟验证其有效性。以Lafayette体育馆的空洞为例,研究表明Rayleigh面波勘探结果与电法探测的结果吻合。通过频散数据按等效半空间法,反演得到*V*-*H*频散曲线排列和*x*-*H*-*V*速度等值线图,在勘探深度范围内,能较准确地确定地下空洞的位置。

关键词 Rayleigh面波;运动学;动力学;有限元;数值模拟

中图分类号 P631 **文献标志码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.32.004

Explorating Underground Cavity by Rayleigh Surface Wave

LIN Yi[1,2], HUANG Yunyan[3], SUN Keqin[3]

1. Faculty of Geoscience and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China
2. Northwest Research Institute Company Limited of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou 730000, China
3. College of Civil Engineering, Sichuan Agriculture University, Chengdu 611830, China

Abstract The industry urgently needs economic exploring methods to check and find the underground cave, with physical-mechanical properties different from the around medium. One of the exploring methods is the use of the Rayleigh surface wave. The Rayleigh surface wave theory and the dispersion characteristics in transmission are discussed in this paper, and the Rayleigh surface wave field characteristics are simulated by the finite element method. Shaking with different main frequency epicenters, some models are established with dissimilar depth and size, and tallied up the results of the kinetics and the dynamics characteristics of the Rayleigh surface wave. Using the experiment result of the Rayleigh surface wave exploring methods in Lafayette University's gymnasium from southeast to northwest, for instance, this methods in checking and finding the underground cave are discussed.

Keywords Rayleigh surface wave; kinetic; dynamic; finite element method; numerical simulation

伴随着公路、铁路、机场等国家基础设施的高速发展,大面积场地工程地质勘察越来越多,Rayleigh面波勘探具有分辨率高、受场地影响小、设备简单、速度快等优点,在工程勘察中有广泛应用。地下局部非均质体对Rayleigh面波传播具有散射和频散效应,针对防空洞、动物洞穴、冲刷淘蚀坑、煤矿采空区、岩溶空洞等地下空洞,Rayleigh面波勘探具有其他物探方法不具有的优势,应用越来越多。夏唐代等[1]利用有限单元法建立了平面内地基的动力刚度矩阵,分析了复杂地基中地质表面点的竖向位移与波速、表面相位移角和水平距离的变化关系。夏江海等[2]通过Rayleigh面波来反演剪切波的波速,结果表明反演计算的稳定性和效率都满足要求。曹圣华等[3]根据Rayleigh面波实测波速值区分软土或非软土地

收稿日期:2014-06-30;修回日期:2014-08-04
基金资助:国家自然科学基金项目(41274107)
作者简介:林义,工程师,研究方向为隧道地震超前预报,电子信箱:766708597@qq.com
引用格式:林义, 黄云艳, 孙克勤. 地下空洞的面波探测[J]. 科技导报, 2014, 32(32): 28-31.

层,获得比较连续的地层剖面。周熙襄等[4]探讨了利用地震勘探中面波信息进行地表结构调查的可行性。刘晶波等[5]基于黏弹性人工边界提出Rayleigh波的时域波动输入方法,重点研究了埋深对结构动力反应的影响,结果表明Rayleigh波对浅埋地下结构反应影响显著,存在临界埋深。周红等[6]利用局域离散波数法,研究了地形对近地表爆炸源产生的Rayleigh面波的影响,结果表明越陡的地形对面波传播的阻碍性越强,高频部分能量损失越多。熊章强等[7]应用高精度交错网格有限差分方法,建立震源位于地表时Rayleigh波数值模拟的自由边界条件,结果表明模拟结果与解析结果相对误差很小。刘晶波等[8]基于时域黏弹性人工边界的Rayleigh波输入方法,研究了垂直断层的宽度与剪切波速变化对Rayleigh波传播及场地地震反应的影响。

上述研究偏向于数值模拟方法或面波方法本身,将两者结合起来,用数值方法模拟面波勘探的研究偏少。本文应用有限元数值方法,在单个地下空洞的均匀半空间中,对Rayleigh波场的传播进行数值模拟,分析空洞对Rayleigh面波波场散射和频散响应的影响。

1　地下空洞的Rayleigh面波响应特征

由于面波波速与岩土介质的横波速度有着良好的相关关系[2],其频散特征的强度与介质的面波速度有着密切关系,可以根据岩土层速度值反演岩土层的物理状态和物理特征。面波勘探主要利用Rayleigh面波的两种特性:一是Rayleigh面波在层状介质中相速度v_R与频率f的相关性(即Rayleigh面波的频散特性);二是Rayleigh面波传播的相速度v_R,与岩土体的物理力学性质具有密切的相关性。在均匀介质中,Rayleigh面波的传播速度与频率无关,而在不均匀介质中Rayleigh面波速度是频率f的函数,Rayleigh面波勘探即以此特性为理论基础。

Rayleigh面波探测的基本原理:利用频散特性求得介质的Rayleigh面波波速,然后再利用波速与介质体其他物理力学参数的相关性对介质体进行工程评价。Rayleigh面波勘探的优势在于它不仅利用了波的运动学特征,更重要的是利用了波的动力学特征;而常规弹性波勘探仅利用波的运动学特征,且要求介质波速或波阻抗有较大差异。

夏江海等[9]发现,Rayleigh面波还具有以下重要特性:Rayleigh面波传播时,其质点振动是面的极化振动,质点的运动由相位相差为π/2的2个相互垂直振动合成;其振幅随深度的增加呈指数急剧衰减,波长不同则其穿透深度也不同。Rayleigh面波能量约占一次激发总能量的67%。在相同的介质中,Rayleigh面波的传播速度较横波、纵波速度低,传播过程中,Rayleigh面波遇到非均匀地质体发生散射,散射的时距关系为双曲线。

2　地下空洞的Rayleigh面波运动学特征

图1为Rayleigh面波遇到非均匀地质体发生散射的传播原理图。Rayleigh面波从震源出发沿浅层地表(路径1)传播,当在传播过程中遇到非均匀地质体时会发生散射沿路径2返回地面。

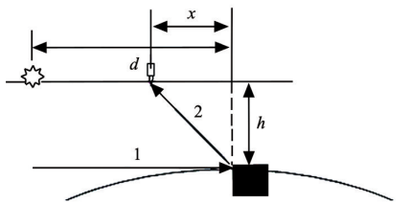


图1　Rayleigh面波散射

Fig. 1　Diagram of scattering Rayleigh surface wave

设非均匀地质体的埋深为h,距离震源的水平距离为d,检波器距离非均匀地质体在地面投影的水平距离为x,检波器到震源的距离$L=d-x$,Rayleigh面波速度为v,则Rayleigh面波沿路径1、2的传播时间t_x为

$$t_x=\frac{1}{v}\left[d+\left(x^2+h^2\right)^{1/2}\right] \tag{1}$$

由式(1)可知,Rayleigh面波散射的时距关系为双曲线,在地面布置检波器可以接收到地震信号,已知t_x和利用相位差计算得到的Rayleigh面波相速度v_R,就可以利用时距曲线上2点,由式(1)得到非均匀地质体的位置(h,d)。

3　地下空洞的有限元数值模拟

建立均匀半空间的2维地质面,设纵波速度v_p为358 m/s,横波速度v_s为172 m/s;非均匀地质体的纵波速度v_p为340 m/s,横波速度v_s为170 m/s。震源采用零相位的Ricker子波,其解析式为

$$F=-A\left[1-2b^2\left(t-t_0\right)^2\right]\mathrm{e}^{\left[-b^2\left(t-t_0\right)^2\right]} \tag{2}$$

式中,$b=\pi f$,f为主频,A为最大振幅,F为激振力,t_0为Ricker子波的主峰时刻,接收排列长度为46 m,炮检距为6 m,道间距为2 m,为了模拟半无限空间,数值模拟模型如图2所示,边界设置为截断边界。

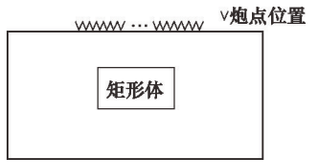
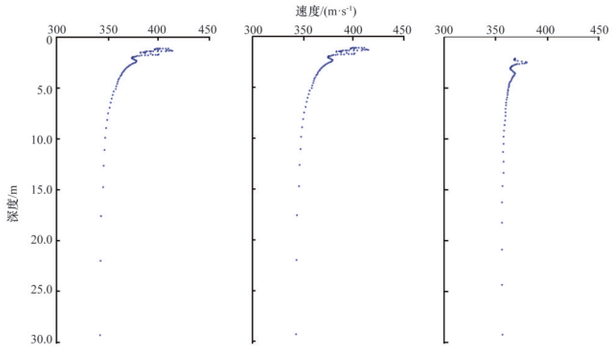


图2　观测系统示意

Fig. 2　Diagram of observing system

对不同尺寸的网格长度进行计算,以确定合适的网格长度。图3为采用网格长度为1、0.5、0.25 m进行计算所得到的频散曲线。由图3可知,网格长度越短,计算的结果相对于理论上的误差越小。兼顾计算精度和效率,将采样间隔设为0.1 ms,网格长度设为0.5 m。

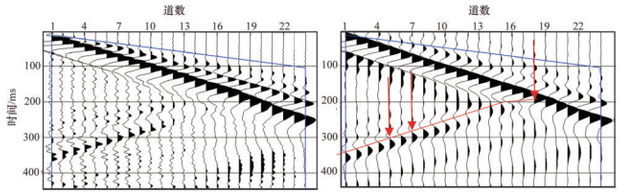


(a) 网格长度1 m (b) 网格长度0.5 m (c) 网格长度0.25 m

图3 频散曲线

Fig. 3 Dispersion curves

震源主频为20 Hz,非均匀地质体为10 m×10 m的矩形体,埋深5 m,图4(a)为模拟得到的时间记录,图4(b)是滤波后的时间记录。由图4(b)中的红色标线可知:在第18道,时距曲线前支与直达面波交汇,读取的时间点,利用式(1)可以算出d=40 m,选取第5道和第8道时距曲线上2点作为已知条件,其中第5道检波器距离非均匀地质体在地面投影的水平距离x_1为26 m,第8道检波器距离非均匀地质体在地面投影的水平距离x_2为20 m,在时间剖面上读取第5道沿路径的传播时间t_{x1}为0.320 s,读取第8道沿路径的传播时间t_{x2}为0.294 s,代入式(1)可得速度v_R为211.9 m/s,埋深h为9.9 m,与实际模型设计埋深10 m吻合。

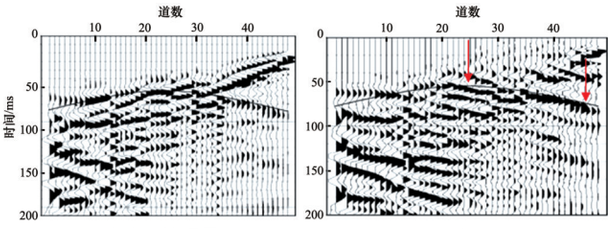


(a) 原始 (b) 滤波后

图4 模拟时间记录

Fig. 4 Time recording in simulation

在Lafayette大学体育馆的东南方向至西北方向,用面波勘探进行试验,炮间距为1 m,道间距为0.5 m,Rayleigh面波原始地震记录和F-K滤波后的地震记录如图5所示。



(a)原始记录 (b) F-K滤波后的记录

图5 实例时间记录

Fig. 5 Time recording of real case

在时间剖面上,读取Rayleigh面波沿路径传播到第24道检波器的时间为0.0547 s,其检波器距离非均匀地质体在地面投影的水平距离为0 m,读取第46道时间为0.0735 s,其检波器距离非均匀地质体在地面投影的水平距离为11 m,非均匀地质体距离震源的水平距离为d为13 m,代入式(1)计算得到Rayleigh面波速度v_R为347 m/s,深度h为6.0 m。在相同的场地,用电法探测的剖面结果如图6所示,其探测到的空洞埋深约为6 m,Rayleigh面波勘探结果与电法探测的空洞深度也非常吻合。

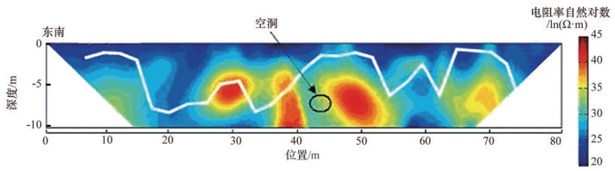


图6 电法探测结果

Fig. 6 Diagram of electrical result

4 地下空洞的Rayleigh面波动力学特征

研究等效均匀半空间频散曲线,模拟建模的均匀半空间介质参数与模拟Rayleigh面波运动学特征的参数相同,观测系统的炮间距为6 m,道间距为2 m,接收排列长度为46 m,共24道检波器,采样间隔Δt为0.2 ms,网格长度Δx为2 m,震源的主频为20 Hz,地下空洞为6 m×6 m的矩形体,距离初始震源水平位置的范围为40~46 m,其顶部埋深范围为10~16 m;将每条测线中点位置的检波点定义为该测线的测点;在动力学特性有限元数值模拟中,共布置了22个测线,每条测线完成测点后,震源和检波器均向右移动2 m。

改进的等效半空间法如图7所示,将22条测线的频散曲线按水平方向等间距排列,由图可见10 m左右频散点分布比较散乱,判断为空洞顶部位置,与设计的空洞顶部深度10 m吻合。

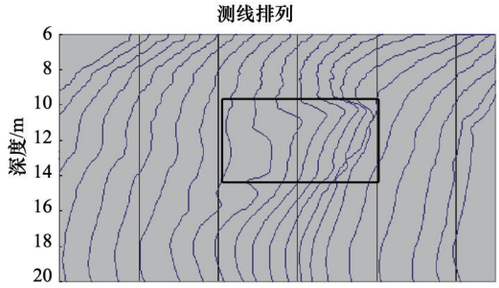


图7 频散曲线

Fig. 7 Dispersion curves

研究等效均匀半空间速度等值线,测点位置到震源距离定为x,将V-H表示的频散数据加入测点位置参数x后,可以绘制出x-H-V的速度等值线如图8所示,图8中阴影为低速异常体,空洞的埋深位置约13 m,距初始震源的水平位置约

43 m,设计空洞距离初始震源的水平位置为40~46 m,埋深范围为10~16 m;可见,埋深和距初始震源的水平位置都较好吻合。

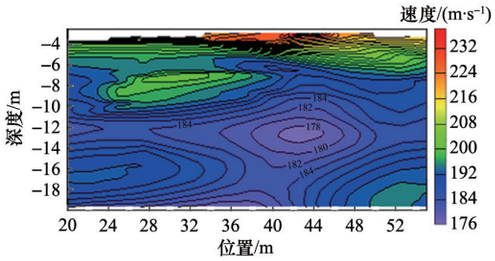


图8　*x*–*H*–*V*速度等值线

Fig. 8　*x*–*H*–*V* contour map of velocity

5　结论

1）地下空间的Rayleigh面波的运动学特征。Rayleigh面波散射的时距关系为双曲线,在地面布置检波器可以接收到地震信号,利用相位差计算得到Rayleigh面波的速度,利用时距曲线上的两点,可以根据地震记录所携带的地质信息对非均匀地质体进行查找,但使用时要综合考虑地质情况和震源的主频范围。所以在勘探前,收集尽量多的地质资料(如弹性波波速),进而选择合适的震源主频;只有合适的震源主频才能得到较好的地震记录,提高勘探精度。

2）地下空间的Rayleigh面波的动力学特征。在均匀各向同性结构体中,对不同网格长度进行模拟,发现网格长度对频散影响较大,网格越短模拟的速度越接近于理论上的速度。空洞存在的深度范围内,频散曲线中出现断点且频散点分布散乱,说明频散的"之"字型曲线[10]与地下异常体存在着对应关系;通过频散数据按等效半空间法,反演得到*V*–*H*频散曲线排列和*x*–*H*–*V*速度等值线图,在勘探深度范围内,能比较准确地确定地下空洞的位置。在*x*–*H*–*V*速度等值线图中,把测线排列的中点定义为测线点能很好反映地下空洞的水平位置。

参考文献(References)

[1] 夏唐代, 张忠苗, 吴世明. Rayleigh面波法原理的数值模拟[J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 1996, 30(3): 277–285.
Xia Tangdai, Zhang Zhongmiao, Wu Shiming. Numerical simulation of the principle of Rayleigh surface wave method[J]. Journal of Zhejiang Universiy: Natural Science Edition, 1996, 30(3): 277–285.

[2] Xia J H, 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.

[3] 曹圣华, 杨晓东, 朱正坤, 等. 瑞利面波法用于软土地基勘察的试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(4): 419–423.
Cao Shenhua, Yang Xiaodong, Zhu Zhengkun, et al. Experimental study on reconnaissance of soft foundations by Rayleigh surface wave method [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2003, 31(4): 419–423.

[4] 周熙襄, 王振国. 利用瑞利面波调查表层结构的可行性探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(2): 181–186.
Zhou Xixiang, Wang Zhenguo. Discuss ion on feasibility of using Rayleigh wave to investigate near–surface structure[J]. Oil Geophysics Prospecting, 2004, 39(2): 181–186.

[5] 刘晶波, 李彬. Rayleigh波作用下地下结构的动力反应分析[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 131–135.
Liu Jingbo, Li Bin. Dynamic response analysis of underground structures during propagation of Rayleigh waves[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 131–135.

[6] 周红, 陈晓非. 凹陷地形对Rayleigh面波传播影响的研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1182–1189.
Zhou Hong, Chen Xiaofei. A study on the effect of depressed topography on Rayleigh surface wave[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(4): 1182–1189.

[7] 熊章强, 张大洲, 秦臻, 等. 瑞雷波数值模拟中的边界条件及模拟实例分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(4): 824–830.
Xiong Zhangqiang, Zhang Dazhou, Qin Zhen, et al. Boundary conditions and case analysis of numerical modeling of Rayleigh wave [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2008, 39(4): 824–830.

[8] 刘晶波, 刘祥庆, 赵冬冬. 垂直断层破碎带对Rayleigh波传播与场地地震动反应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 507–514.
Liu Jinbo, Liu Xiangqin, Zhao Dongdong. Effects of vertical fault fracture zones on the spreading of Rayleigh wave and ground motion[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 507–514.

[9] Xia J H, Chen C, Tian G, et al. Resolution of high–frequency Rayleigh–wave data[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2005, 10(2): 99–110.

[10] 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]. 长沙: 中南大学, 2004.
Yang Tianchun. Forward modeling of zigzag dispersion and pavement systems dispersion curvers[D]. Changsha: Central South University, 2004.

(编辑　陈华姣)

科技导报
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》"卷首语"栏目征稿

"卷首语"栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿信箱:kjdbbjb@cast.org.cn。