

王芃,邵广周,恒翔天,等. 滑坡面瑞雷波波场模拟及 H/V 谱比探测. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):1031-1041. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230077.

Wang Peng, Shao Guangzhou, Heng Xiangtian, et al. Rayleigh Wave Field Simulation and H/V Spectral Ratio Detection on Landslide Surface. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (3): 1031 - 1041. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230077.

滑坡面瑞雷波波场模拟及 H/V 谱比探测

王 芃,邵广周,恒翔天,蓝笛瑄,王国顺,霍科宇

长安大学地质工程与测绘学院,西安 710054

摘要:滑坡是一种分布广泛、数量众多、危害巨大的地质灾害,准确确定滑坡滑动面对滑坡防治具有重大意义。传统的勘探手段,如钻探和地球物理方法在起伏较大的滑坡地形中具有诸多限制。本文以四川省屏山县东池庄滑坡为参考,建立了起伏地形软弱性土质滑坡模型,进行了瑞雷波波场模拟并经过模式分离后计算求得水平/垂直(H/V)谱比曲线。对比分析了波场传播及 H/V 谱比曲线的特征,发现在 110 道检波器排列中,中心部位检波器的峰值频率可作为计算土石分界面的卓越频率。设计了土层厚度分别为 25、31、35 m 的滑坡模型,发现土层厚度与峰值频率呈负相关关系。给出了地层为黏性土与泥岩时的频率-深度经验公式,得到了连续滑动面信息,经验公式计算结果与实际模型吻合较好。

关键词:软弱性滑坡;H/V 谱比曲线;波场模拟;峰值频率

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230077

中图分类号:P631.4

文献标志码:A

Rayleigh Wave Field Simulation and H/V Spectral Ratio Detection on Landslide Surface

Wang Peng, Shao Guangzhou, Heng Xiangtian, Lan Dixuan, Wang Guoshun, Huo Keyu

School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Landslide is a kind of geological hazard with wide distribution, large quantity and great harm. It is of great significance to determine the landslide sliding face accurately. Traditional exploration methods such as drilling and geophysical methods have many limitations in the undulating landslide terrain. Based on Dongchizhuang landslide in Pingshan County, Shandong Province, a soft soil landslide model with undulating terrain is established. Rayleigh wave field simulation is carried out and the horizontal/vertical (H/V) spectral ratio curve is calculated after model separation. The characteristics of

收稿日期:2023-04-01

作者简介:王芃(1999—),男,硕士研究生,主要从事主动源 H/V 谱比法方面的研究,E-mail: wp646656184@163.com

通信作者:邵广周(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事地震勘探与地球物理信号处理方面的研究,E-mail: shao_gz@chd.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFA0716902);国家自然科学基金项目(42174176,41874123)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFA0716902) and the National Natural Science Foundation of China (42174176, 41874123)

wave field propagation and H/V spectral ratio curve are compared and analyzed. It is found that the peak frequency of the geophone in the center can be used as the superior frequency for calculating the earth-rock interface in the 110-channel geophone arrangement. Landslide models with soil thickness of 25, 31 and 35 m are designed, and it is found that there is a negative correlation between soil thickness and peak frequency. The frequency-depth empirical formula is given when the stratum is clay and mudstone, and the information of continuous sliding surface is obtained. The results of the empirical formula agree well with the actual model.

Key words: weak landslide; H/V spectral ratio curve; wave field simulation; peak frequency

0 引言

滑坡是一种分布广泛、数量众多、危害巨大的地质灾害,特别是土体为块碎石土或粉质黏土,且其下伏基岩主要为泥质砂岩及泥岩的滑坡,其软弱性强,受到外界扰动后很容易出现滑动^[1]。以 2020 年为例,全国共发生地质灾害 7 840 起,其中滑坡 4 810 起^[2],占比 61.35%,对人民的生命财产安全造成极大威胁。当前,在黄土滑坡的灾害防治方面,已经取得了一系列行之有效的理论和经验。但准确确定黄土滑坡滑动面的位置仍旧是困扰工程技术人员的难题。若能确定滑动面位置,对滑坡体稳定性评价、滑坡推力计算甚至是对滑坡的防治设计都具有重要意义。

如何确定滑坡滑动面,传统的勘探手段主要有钻探和地球物理探测。钻探属直接勘探方法,能够直接深入地下取样,准确获得地质资料。但缺点明显,由于单个钻孔的探测区域特别小,使得平面数据连续性差,可能会疏漏重要区域;钻探过程需耗费大量人力物力,会破坏坡体,在复杂、危险区域无法进行工作。并且,许多滑坡地区的地形起伏大,地层倾角陡,使得电阻率法、电磁法难以奏效。地震反射法在滑坡探测与防治中曾取得一些效果^[3-4],但在滑坡地形起伏较大情况下观测耗时长、花费高且难度较大^[5]。

瑞雷面波勘探方法以其无损、经济、高效的特点,在工程无损检测中取得了长足的发展,也逐渐成功应用于多个滑坡灾害勘察与防治^[6-8]。通过模拟起伏地表下滑坡模型的波场传播特征及瑞雷波频散能量分布特征,可为进一步揭示滑坡的结构特征提供基础资料支持。目前基于水平地表的瑞雷波波场数值模拟研究已颇有成效^[9-12],然而在野外,特别是滑坡地区,地表都是起伏不定的。传统的方法采用的是笛卡尔坐标系下的正方形网格,应用于起伏地表模型时会产生虚假散射波使得数值模拟的准确度

下降。而本文采用的自适应贴体网格可使起伏地形部位网格自动贴合内部界面,有效压制散射波,提高计算精度。

H/V 谱比法是一种快速、高效的探测方法,最早由 Nogoshi 等^[13]在 1971 年提出,表示为微动水平分量和垂直分量的傅里叶谱之比。通过多分量的地震记录频谱比值反演浅部地层横波速度构造的方法被称为 HVSR(horizon-to-vertical spectral ratio)法。应用上,2022 年,孙晓倩等^[14]利用 H/V 谱比法计算了长江中下游不同区域的沉积厚度。同年,沈志平等^[15]将 HVSR 法应用于城市岩溶勘察,简便有效地探测出地下岩溶分布。另一方面,一些学者将 H/V 谱比法引入到主动源瑞雷波勘探中,认为 H/V 谱比法探测地下浅层二维结构具有较大潜力。2009 年,张立等^[16]借鉴被动源单点谱比法的研究思路并应用到主动源瑞雷波中,提出了瑞雷波椭圆极化频散的概念。宓彬彬等^[17-18]运用数值模拟证明在水平层状地层中,利用主动源瑞雷波测试采集不同检波器的 H/V 谱比曲线时,其他波形如体波和高阶瑞雷波会造成干扰,使得 H/V 谱比曲线杂乱无章,所以需要利用高精度线性 Radon 变换法在频率-相速度域中进行模式分离,并通过现场资料实例验证了模式分离法计算主动源瑞雷波 HVSR 的有效性,得出 H/V 谱比曲线波峰和波谷频率对基岩埋深非常敏感的结论。

主动源 H/V 谱比法几乎都应用于水平层状地层中,但是,这是否意味着该方法不可应用于起伏地形?本文针对黄土滑坡灾害,参考四川省屏山县东池庄滑坡,建立起伏地表的软弱土质滑坡模型,即是一次在地形起伏大、地层倾角陡情况下的有益尝试。本文进行瑞雷波波场模拟并求得 H/V 谱比曲线,总结分析 H/V 谱比曲线的特征,建立地层为黏性土与泥岩时依据卓越频率探测滑动面的经验公式,为探测滑坡滑动面提供依据。

1 滑坡面瑞雷波波场数值模拟

1.1 滑坡模型的建立

瑞雷波波场数值模拟已经过几十年的发展^[19-21],其传统的正演方法是交错网格有限差分法,采用的是笛卡尔坐标系下的正方形网格,使用阶梯状的折线来拟合起伏地形,但这会产生虚假散射波,使得数值模拟的准确度下降。研究表明^[22-25],自适应贴体网格在起伏地形区域网格能够自动贴合内部界面,增加疏密度,可以有效压制散射波,提高计算精度。通过模拟起伏地表下滑坡模型的波场传播特征及瑞雷波频散能量分布特征,能为进一步揭示滑坡结构特征提供基础资料。

本文建立了坡度约为 39° 的滑坡模型,滑坡最高点高度为 86.6 m(图 1),网格点数为 801×401 ,网格间距为 0.5 m,时间步长为 0.1 ms,且在模型边界处添加 20 层吸收层。震源设置主频为 20 Hz 的雷克子波,在地表水平位置 150 m 处垂直向下激发,偏移距为 20 m,延时时间设置为 0.05 s,以便产生完整波形。检波器设置为 110 道,道间距为 1 m。设置地震记录的采样间隔为 1 ms,采样时长为 1.0 s。

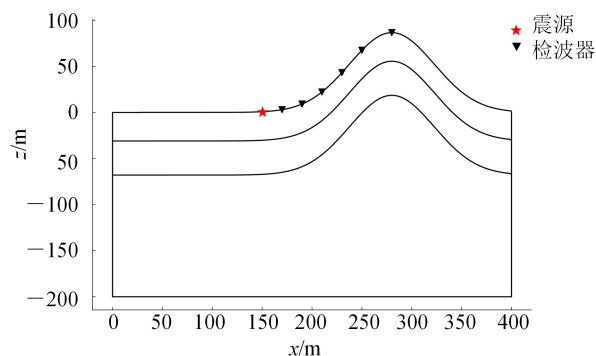


图 1 简化滑坡模型图

Fig.1 Simplified landslide model diagram

为更贴近实际,模型设置的地层信息以四川省屏山县东池庄滑坡^[26-27]为参考,参数如表 1 所示。

1.2 波场快照

图 2 是不同时刻水平、垂直分量的波场快照,清晰地展现了各种地震波在滑坡模型中的传播与反射。从图 2 中可以明显观察到体波(纵波、横波)在介质内部传播,瑞雷面波沿着滑坡的坡体上行传播。地震波在经过滑坡的土石分界面时,由于两侧性质的差异,产生了反射波与透射波,反射波迅速传播到

地表分界面并同时沿着坡体传播。由于其速度快于瑞雷波,在这个过程中快速追上已提前在坡体传播的瑞雷波,二者相遇并产生影响,随后又超过瑞雷波抢先抵达滑坡最高处。

研究这种易发生滑坡灾害地形地层中的波场传播规律和瑞雷波频散能量的分布特性,将对现实中地质模型的研究提供较大的参考价值,可为滑坡地质灾害的防控提供一定的理论依据,并可以用于全面评价滑坡体,为滑坡的治理设计以及后续施工提供准确资料。

2 H/V 谱比法探测实验

2.1 瑞雷波模式分离方法

本节滑坡模型纵波速度、横波速度、密度的设置仍参照表 1,滑坡最高点仍为 86.6 m。由于两层覆盖土层均为粉质黏土,土体参数非常接近,为更直观地研究粉质黏土层与泥岩层构造的 H/V 谱比曲线特征,将土层设置为饱和状态的含碎块石粉质黏土,层厚为 31 m,下伏基岩层设置为泥岩,其余设置均同上节。通过有限差分数值模拟得到的水平方向与垂直方向地震记录如图 3 所示。

图 4 为未经滤波处理和模式分离得到的第 51—55 道对应的 H/V 谱比曲线。根据排列,第 51—55 道是处于中心部位的检波器,偏移距的影响小,同时也处于滑坡体表面的中心位置,此处距震源有一定距离,体波干扰少,面波占优,获取的信息更具代表性。从图 4 中可以明显看出,尽管采取了中心检波器的信息,由原始地震记录得到的 H/V 谱比曲线仍分布杂乱,基本没有规律,不能正确体现瑞雷波椭圆极化的频散特性。这是由于波场中高阶瑞雷波、多次波、体波的影响,所以在主动源瑞雷波测试求取 H/V 谱比曲线时,一定要先进行滤波和模式分离,提取出基阶频散能量后再求取 H/V 谱比曲线。

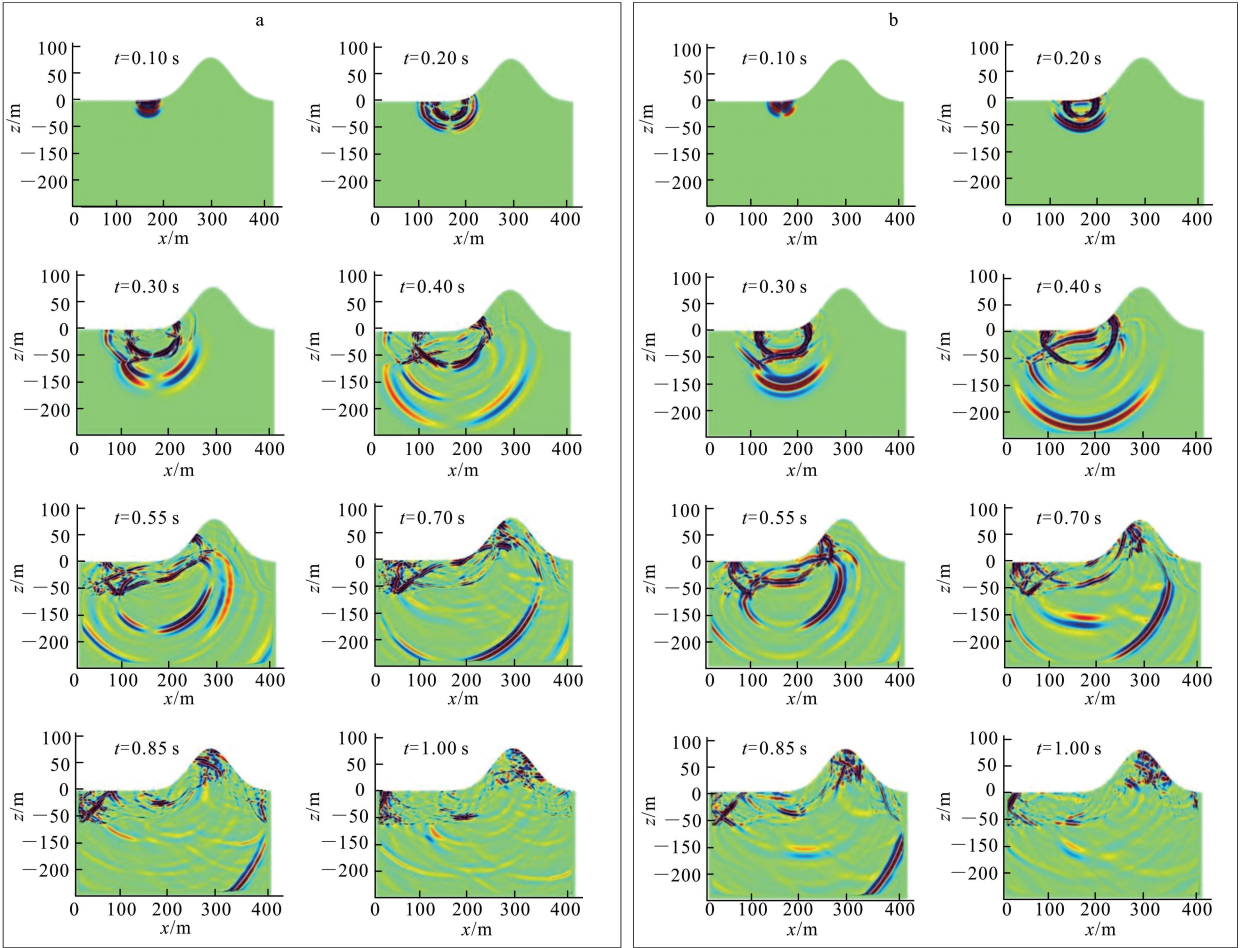
将原始地震记录进行线性 Radon 变换得到频散能量图(图 5)。从图 5 可以看出,在地表起伏的情况下,高阶面波与基阶面波的频率非常接近,这在求取 H/V 谱比曲线时影响极大。

根据能量峰值计算频散曲线,随后提取出基阶面波。模式分离后的基阶频散能量如图 6 所示。将提取后的基阶瑞雷波频散能量转换到 $f-p$ (f 为频率, p 为慢度)域中,然后沿 f 域方向做一维傅里叶反变换转换到 $\tau-p$ (τ 为截距时间)域,经过线性 Radon 反变换得到时间域基阶瑞雷波地震记录,处理后的水平、垂直方向基阶地震记录如图 7 所示。

表 1 滑坡模型地层参数

Table 1 Stratigraphic parameters of the landslide model

地层	厚度/m	密度/(kg/m ³)	横波速度/(m/s)	纵波速度/(m/s)	泊松比
含碎块石粉质黏土(饱和状态)	31	2 030	230	410	0.27
含碎石粉质黏土(饱和状态)	37	1 970	180	316	0.26
泥岩	∞	2 470	460	797	0.25



a. 水平分量波场快照;b. 垂直分量波场快照。t. 时刻。

图 2 滑坡模型不同时刻水平(a)、垂直(b)分量波场快照

Fig.2 Wave field snapshot of horizontal (a) and vertical (b) components at different time of the landslide model

2.2 H/V 谱比曲线结果分析

得到水平方向和垂直方向的基阶地震记录后，计算 H/V 谱比曲线。排列中心处检波器接收到地震信号的 H/V 谱比曲线(图 8)与未模式分离时求取的 H/V 谱比曲线(图 4)差别较大，可以清晰看出选取的 5 道检波器的 H/V 谱比曲线具有相同的峰值频率(19.46 Hz)与波谷频率，呈现出明显的规律性，准确体现了瑞雷波的椭圆极化性质。

继续观测偏移距较大检波器的 H/V 谱比曲线，我们发现从第 69 道检波器开始，H/V 谱比曲线出现双峰现象(图 9a)，到 90 道双峰现象消失，H/V 谱比曲线重新趋于稳定(图 9b)。在被动源中，双峰现象被认为是地下存在两个波阻抗界面的结果^[28]，结合上述波场模拟结果，本文认为在起伏地表情况下出现双峰现象是因为在土石分界面处地震波发生反射、透射现象，反射波在坡体追上并超越瑞雷波的

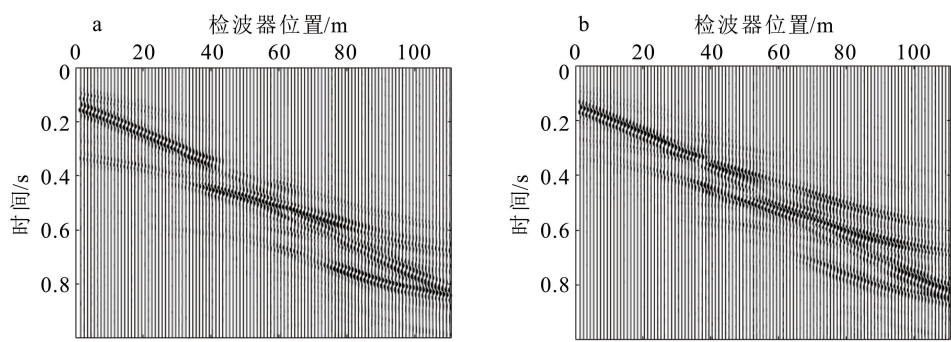


图 3 滑坡模型瑞雷波水平方向(a)和垂直方向(b)地震记录

Fig.3 Rayleigh wave horizontal (a) and vertical (b) seismic records of the landslide model

过程中产生了影响,使得瑞雷波的能量进行了重新分配。因此,出现双峰现象时,表明瑞雷波的能量正在进行重新分配;而到第 90 道双峰现象消失,表明重分配的结束。峰值频率上双峰现象最高峰的峰值频率仍然和中心处相等,至第 90 道双峰现象消失,峰值频率也仍然与中心检波器处峰值频率相等。

2.3 土层厚度与峰值频率的关系

探测沉积土层的厚度是 H/V 谱比法的应用重点,研究表明^[29-30],H/V 谱比曲线的峰值频率等于或极接近于沉积土层的卓越频率。本节设计了土层厚度为 25 m 与 35 m 的滑坡模型,土层类型仍为饱和状态下的含碎块石粉质黏土,基岩层仍为泥岩,具体信息同表 1。同样经过模式分离后,选取排列中心处 5 道检波器所记录的信息作为标准,求得 H/V 谱比曲线(图 10)。单峰型曲线直接读取单峰对应的频率值作为峰值频率。当土层厚度为 25 m 时,峰值频率为 19.97 Hz(图 10a);土层厚度增大为 31 m 时,峰值频率为 19.46 Hz(图 8);当土层厚度再

次增大为 35 m 时,峰值频率为 18.62 Hz(图 10b)。即随着土层厚度的逐渐增大,峰值频率呈降低趋势,土层厚度与峰值频率呈负相关关系,证明了本文数

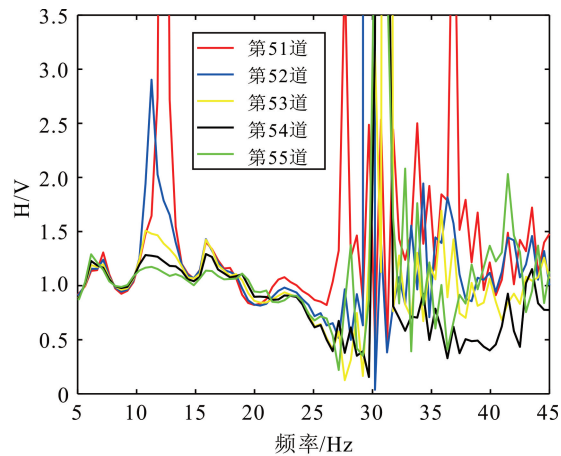


图 4 滑坡模型未模式分离的 H/V 谱比曲线

Fig.4 H/V spectral ratio curve of the landslide model without mode separation

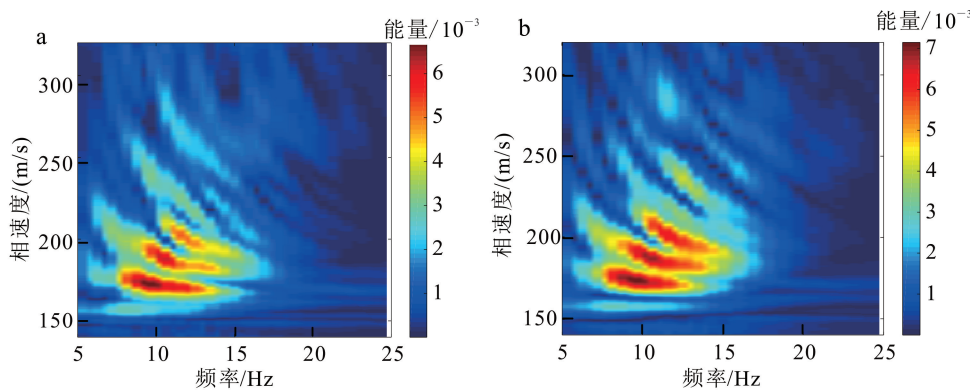


图 5 滑坡模型瑞雷波水平方向(a)和垂直方向(b)频散能量图

Fig.5 Rayleigh wave horizontal (a) and vertical (b) dispersion energy diagram of the landslide model

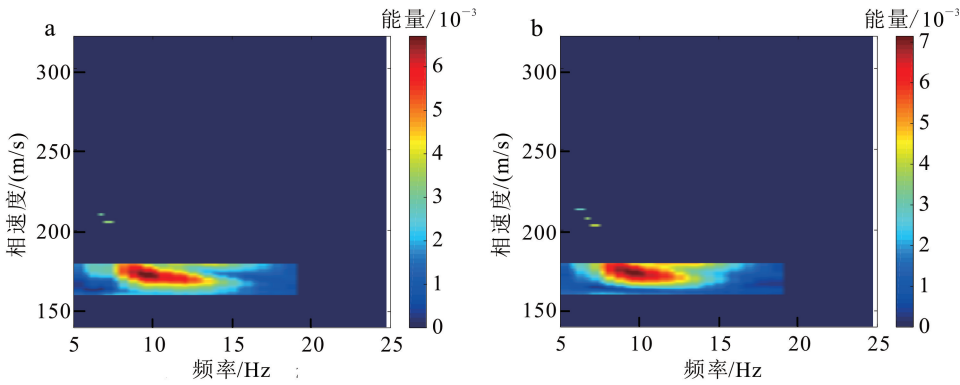


图 6 滑坡模型瑞雷波水平方向(a)和垂直方向(b)基阶频散能量图

Fig.6 Rayleigh wave horizontal (a) and vertical (b) fundamental-order dispersion energy diagram of the landslide model

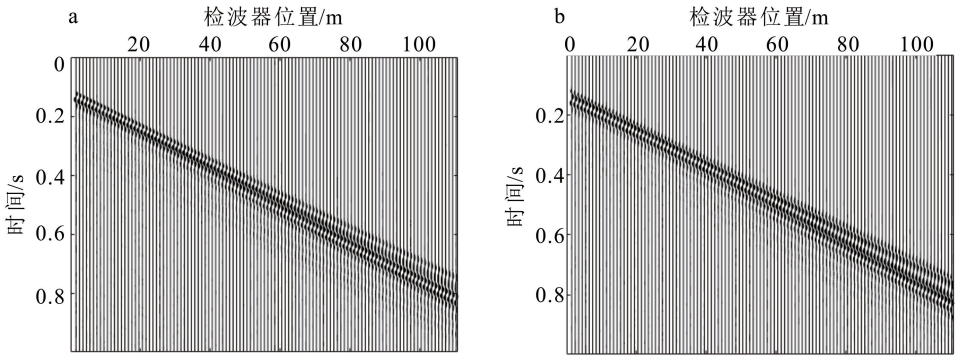


图 7 滑坡模型瑞雷波水平方向(a)和垂直方向(b)基阶地震记录

Fig.7 Rayleigh wave horizontal (a) and vertical (b) fundamental seismic records of the landslide model

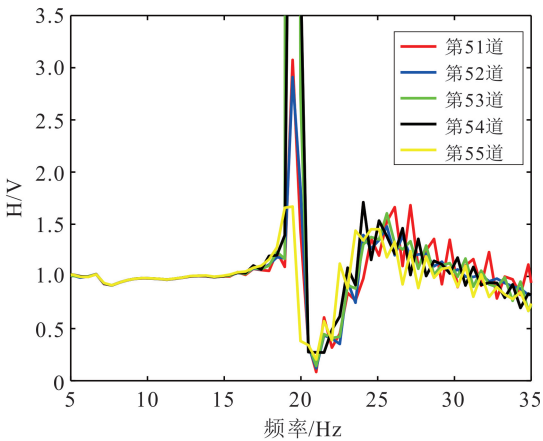


图 8 滑坡模型模式分离后基阶瑞雷波 H/V 谱比曲线

Fig.8 H/V spectral ratio curve of fundamental Rayleigh wave of the landslide model after mode separation

了与上文相同的最高点为 86.6 m 的滑坡模型。将基岩层由泊松比 0.25 的泥岩层更改为泊松比为 0.20 的砂岩层,泥岩层的纵波速度为 797 m/s、横波速度为 460 m/s、密度为 2 470 kg/m³,砂岩层的纵波速度为 980 m/s、横波速度为 600 m/s、密度为 2 470 kg/m³。同样选取中心排列处 5 道检波器记录的地震记录,经过模式分离后求得 H/V 谱比曲线(图 11),可以看到明显的峰值频率与波谷频率。当基岩层为泊松比 0.25 的泥岩层时,峰值频率为 19.46 Hz(图 8);保持土层的厚度与性质不变,减小基岩层的泊松比,将基岩改为泊松比 0.20 的砂岩层时,峰值频率为 18.95 Hz(图 11)。即随着基岩层泊松比的逐渐减小,峰值频率呈降低趋势。

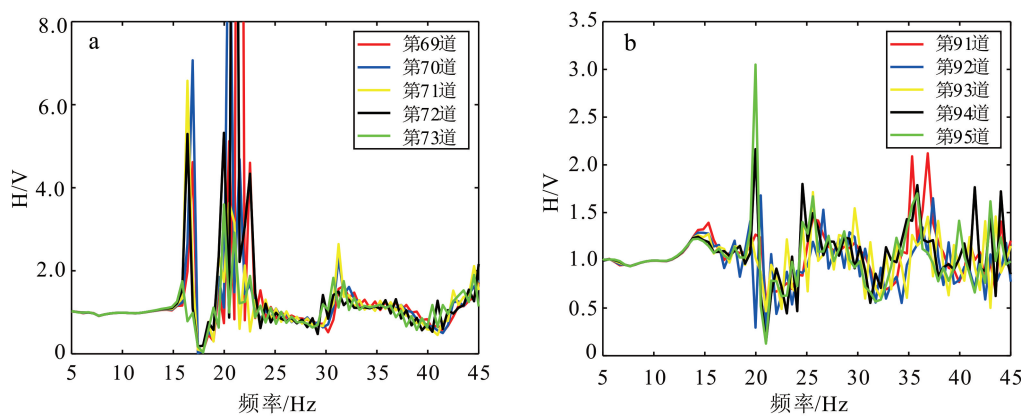
3 H/V 谱比法探测滑动面

值模拟方法与选取参数的有效性。

2.4 泊松比与峰值频率的关系

为研究泊松比对 H/V 谱比曲线的影响,设计

前文中滑坡模型的地表起伏度与地下基岩起伏度是相同的,即坡面各点处竖直向下的土层厚度是



a. 双峰现象 H/V 谱比曲线;b. 重新趋于稳定的 H/V 谱比曲线。

图 9 滑坡模型远离中心检波器各道 H/V 谱比曲线

Fig.9 H/V spectral ratio curve of each channel away from the central geophone of the landslide model

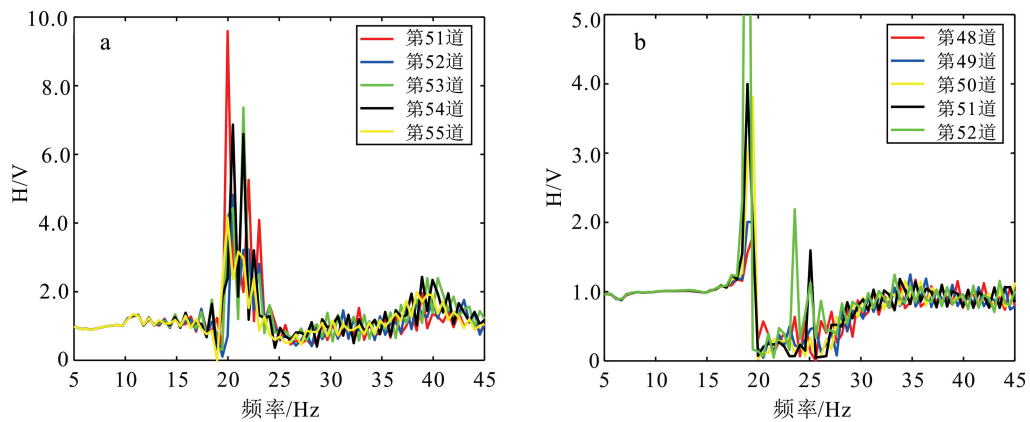


图 10 土层厚度 25 m(a)与 35 m(b)的滑坡模型 H/V 谱比曲线

Fig.10 H/V spectral ratio curve of the landslide model with soil layer thickness of 25 m (a) and 35 m (b)

相同的。为更清晰地展现 H/V 谱比法探测滑动面的连续性,本节设计了地表起伏时基岩层呈水平状态的滑坡模型(图 12)。该模型中随着检波器的位置由坡底逐渐靠近坡顶,各道检波器竖直向下处的土层厚度也逐渐提升。模型的纵波速度、横波速度、密度的设置仍参照表 1,滑坡最高点仍为 86.6 m,土层设置为饱和状态的含碎块石粉质黏土,土层距水平地表深度为 31 m,下伏基岩层为泥岩,其余设置均同首节。

经过模式分离后求得 H/V 谱比曲线,发现从 63 道开始出现双峰现象,面波的能量开始重新分配,不取用此状态下的 H/V 谱比曲线。选取第 30—61 道中 12 道检波器的数据,直接读取单峰对应的频率值为峰值频率 f_0 (表 2)。

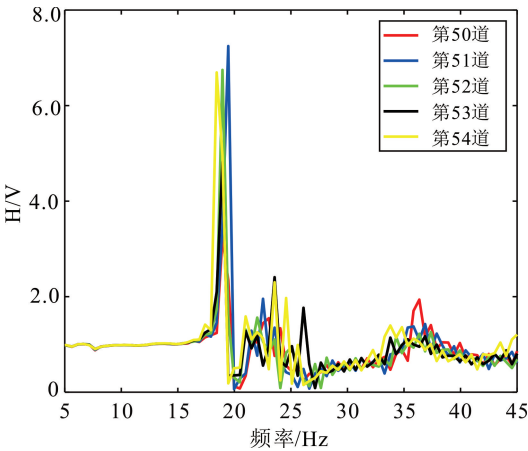


图 11 基岩泊松比为 0.20 时的滑坡模型 H/V 谱比曲线

Fig.11 H/V spectral ratio curve of the landslide model when Poisson's ratio of bedrock is 0.20

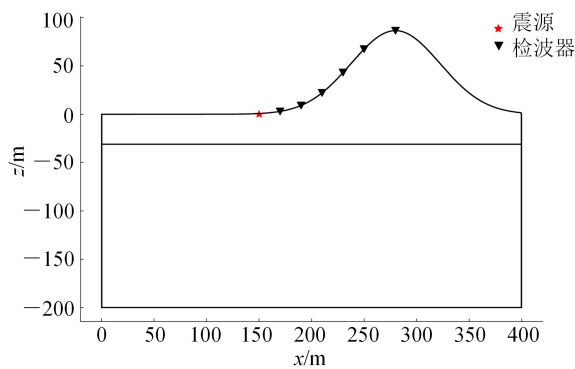


图 12 简化水平基岩滑坡模型图

Fig.12 Simplified horizontal bedrock landslide model diagram

从滑坡位移预测、滑坡变形失稳机制等方面的研究^[31-32]可知,滑动面是一种重要因素。而在软弱滑坡中,土石分界面很可能成为滑动面。1999 年 Seht 等^[33]发现土石分界面深度 h 和 H/V 谱比曲线的峰值频率之间存在如下幂函数关系:

$$h = a f_0^b。$$
 (1)

式中, a 、 b 为常数。利用选取的 12 道检波器计算出的峰值频率与对应的土层竖直深度数据进行幂函数拟合,得到对应情况下的 a 、 b 值。

按照上述方法,本文得到了土层为饱和状态的含碎块石粉质黏土、基岩层为泥岩情况下的频率-深度关系式:

$$h = 4288.3 f_0^{-1.403}。$$
 (2)

其决定系数为

$$R^2 = 1 - E/T = 0.9799。$$
 (3)

式中: R^2 为决定系数; E 为残差平方和; T 为总平方和。 $R^2 \in [0, 1]$, R^2 越接近于 1,拟合效果越好。式(3)表明式(2)的拟合效果较好。

将 f_0 代入式(2)来估算土石分界面深度,并与模型的实际数据进行对比,得到的结果与误差见表 2。根据计算结果,平均相对误差仅为 1.67%,平均绝对误差不超过 1 m,可以认为即使在滑坡地形中,地层为黏性土与泥岩时,也可以采用 H/V 谱比法获得可靠的 a 、 b 值。

根据本节计算出的数据,得到了滑坡中连续 30 m 的滑动面信息,结果如图 13 所示。与钻探方法相比,本方法进一步提高了滑坡平面数据的连续性,降低了疏漏重要区域的可能性,在滑坡探测中具有重要意义。

表 2 根据峰值频率计算的深度与误差

Table 2 Depth and relative error calculated from peak frequency

道号	f_0/Hz	竖直深度/m	计算深度/m	相对误差/%	绝对误差/m
30	25.09	45.637	46.643	2.20	1.006
33	24.58	47.682	48.006	0.68	0.324
35	24.06	49.152	49.468	0.64	0.316
37	23.55	50.708	50.978	0.53	0.270
40	23.04	53.202	52.568	1.19	0.634
43	22.01	55.887	56.052	0.30	0.165
45	22.02	57.781	56.016	3.05	1.765
48	21.50	60.771	57.926	4.68	2.845
50	19.97	62.858	64.247	2.21	1.389
52	19.45	65.017	66.670	2.54	1.653
55	18.95	68.376	69.151	1.13	0.775
61	17.92	75.450	74.791	0.87	0.659
平均误差				1.67	0.983

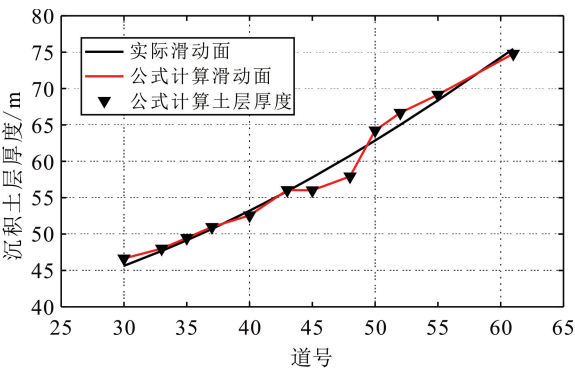


图 13 水平基岩滑坡模型实际滑动面与公式计算滑动面对比

Fig.13 Comparison between the actual sliding surface and the calculated sliding surface of the horizontal bedrock landslide model

4 结论

本文针对黄土滑坡灾害,参考四川省屏山县东池庄滑坡,建立了起伏地表的软弱土质滑坡模型,是一次在地形起伏大、地层倾角陡的情况下的有益尝试。本次进行了波场模拟并计算得到了 H/V 谱比曲线,对比分析波场传播及 H/V 谱比曲线的特征,得出如下结论:

1)滑坡地形中,主动源 H/V 谱比曲线出现的

双峰现象是由于土石分界面处产生的反射波在迅速传播到地表分界面并沿着坡体传播的过程中,追上并超越了瑞雷波,对瑞雷波产生了一定的影响,使得瑞雷波的能量进行了重新分配。

2) 滑坡沉积土层的厚度与 H/V 谱比曲线的峰值频率呈负相关关系,随着滑坡基岩层泊松比的减小,H/V 谱比曲线的峰值频率降低。

3) 滑坡地形中,在 110 道检波器排列时,中心部位检波器的峰值频率可作为计算土石分界面的卓越频率。滑坡地层为黏性土与泥岩时,也可以采用 H/V 谱比法获得可靠的频率-深度经验公式并快速得到滑动面信息。本方法进一步提高了滑坡平面数据的连续性,降低了疏漏重要区域的可能性,在滑坡滑动面探测方面有着较大的发展潜力,对滑坡地质灾害的防治具有一定的实用意义。

参考文献 (References):

- [1] 秦前波,刘鹏辉,庄诗鸿,等. 顺层岩质边坡变形演化成因分析及治理研究[J]. 广东土木与建筑, 2017, 24(6): 41-45.
- [2] 中华人民共和国自然资源部. 去年我国共成功预报地质灾害 534 起[EB/OL]. (2021-01-18) [2023-03-02]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202101/t20210118_2598832.html.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Last Year Our Country Successfully Forecast of Geological Disasters 534 [EB/OL]. (2021-01-18) [2023-03-02]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202101/t20210118_2598832.html.
- [3] Bichler A, Bobrowsky P, Best M, et al. Three-Dimensional Mapping of a Landslide Using a Multi-Geophysical Approach: The Quesnel Forks Landslide [J]. Landslides, 2004, 1(1): 29-40.
- [4] Bruni F, Martillier F. Test of High-Resolution Seismic Reflection and Other Geophysical Techniques on the Bouplandslide in the Swiss Alps [J]. Surveys in Geophysics, 2000, 21(4): 335-350.
- [5] 徐兴倩, 苏立君, 梁双庆. 地球物理方法探测滑坡体结构特征研究现状综述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1449-1458.
Xu Xingqian, Su Lijun, Liang Shuangqing. A Review of the Research Status of Landslide Structure Detection by Geophysical Methods [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1449-1458.
- [6] 许新刚, 岳建华, 李娟娟, 等. 面波勘查技术及在滑坡地质调查中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1367-1372.
Xu Xingang, Yue Jianhua, Li Juanjuan, et al. Research on Surface Wave Exploration Technology and Its Application in Landslide Geological Survey [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1367-1372.
- [7] 李庆春, 吴华, 周学明. 路基下伏地质缺陷弹性波数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 2016-2025.
Li Qingchun, Wu Hua, Zhou Xueming. Numerical Simulation of Elastic Wave on Geological Defects Under Subgrade [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(6): 2016-2025.
- [8] 赵勇刚, 刘江. 瞬态面波剖面法在滑坡探查中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(增刊 1): 116-118.
Zhao Yonggang, Liu Jiang. Application of Transient Surface Wave Profile Method in Landslide Exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(Sup. 1): 116-118.
- [9] 王序宇, 张立, 孙康, 等. 水平层状介质中 Rayleigh 波多模式速度频散和椭圆极化频散特征物理实验模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 2044-2052.
Wang Xuyu, Zhang Li, Sun Kang, et al. Physical Experimental Simulation of Multi-Mode Velocity Dispersion and Elliptic Polarization Dispersion of Rayleigh Waves in Horizontal Layered Media [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(5): 2044-2052.
- [10] 王天, 张立, 孙康, 等. Rayleigh 波椭圆极化与地震映像在城市地层扰动探测中的数值模拟和应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(8): 3156-3167.
Wang Tian, Zhang Li, Sun Kang, et al. Numerical Simulation and Application of Rayleigh Wave Elliptic Polarization and Seismic Mapping in Urban Stratum Disturbance Detection [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3156-3167.
- [11] 张立, 孙康, 陈雨翔, 等. 瑞利面波高阶模式椭圆极化频散特征理论推导及数值模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(6): 2648-2656.
Zhang Li, Sun Kang, Chen Yuxiang, et al. Theoretical Derivation and Numerical Simulation of Rayleigh Surface Wave Dispersion Characteristics for Higher-Order Mode Elliptic Polarization [J]. Progress

- in Geophysics, 2022, 37(6): 2648 - 2656.
- [12] 邵广周, 李庆春, 吴华. 基于波场数值模拟的瑞利波频散曲线特征及各模式能量分布[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(2): 306 - 315.
- Shao Guangzhou, Li Qingchun, Wu Hua. Rayleigh Wave Dispersion Curve and Energy Distribution of Each Mode Based on Numerical Simulation of Wave Field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(2): 306 - 315.
- [13] Nogoshi M, Igarashi T. On the Amplitude Characteristics of Microtremor: Part 2[J]. Journal of the Seismological Society of Japan, 1971, 24(1): 26 - 40.
- [14] 孙晓倩, 李信富. 利用 H/V 谱比法研究长江中下游地区沉积层厚度[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(6): 2301 - 2307.
- Sun Xiaoqian, Li Xinfu. Study of Sedimentary Thickness in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River by H/V Spectral Ratio Method[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(6): 2301 - 2307.
- [15] 沈志平, 陈发达, 张虎, 等. HVSR 探测方法在城市岩溶勘察中的应用[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4): 1757 - 1763.
- Shen Zhiping, Chen Fada, Zhang Hu, et al. Application of HVSR Detection Method in Urban Karst Exploration[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4): 1757 - 1763.
- [16] 张立, 刘争平. 水平层状介质中基阶瑞利面波椭圆极化特征数值分析与研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1686 - 1695.
- Zhang Li, Liu Zhengping. Numerical Analysis and Research on Elliptic Polarization Characteristics of Fundamental Rayleigh Surface Waves in Horizontal Layered Media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1686 - 1695.
- [17] 宓彬彬. 复杂浅地表弹性介质面波分析方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- Mi Binbin. Study on Surface Wave Analysis Method of Elastic Medium in Complex Shallow Surface[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [18] Mi B, Xia J. Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Joint Inversion of Dispersion and HVSR Curves of Rayleigh Waves from Multicomponent Active-Seismic Records[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 660(1): 012056.
- [19] Alterman Z, Abramovici F. Propagation of a P-Pulse in a Solid Sphere[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1965, 55(5): 821 - 861.
- [20] Fuyuki M, Matsumoto Y. Finite Difference Analysis of Rayleigh Wave Scattering at a Trench[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1980, 70(6): 2051 - 2069.
- [21] Richard P G, Witte D C, Ekström G. Generalized Ray Theory for Seismic Waves in Structures Withplanar Nonparallel Interfaces[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1991, 81(4): 1309 - 1331.
- [22] Barfield W D. An Optimal Mesh Generator for Lagrangian Hydrodynamic Calculations in Two Space Dimensions[J]. Journal of Computational Physics, 1970, 6(3): 417 - 429.
- [23] Brackbill J U, Saltzman J S. Adaptive Zoning for Singular Problems in Two Dimensions[J]. Journal of Computational Physics, 1982, 46(3): 342 - 368.
- [24] Antonios E G, Antonie J E. Directional Control in Grid Generation [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 7(4): 422 - 439.
- [25] 蒋丽丽. 面向地质条件的贴体网格生成技术[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- Jiang Lili. Grid Generation Technology Based on Geological Conditions [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [26] 贾晓强. 屏山县东池庄滑坡的稳定性分析和数值模拟[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- Jia Xiaoqiang. Stability Analysis and Numerical Simulation of Dongchizhuang Landslide in Pingshan County [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [27] 薛荣俊, 张维冈. 纵横波速度比泊松比及分辨率比较研究[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1999, 29(4): 704 - 708.
- Xue Rongjun, Zhang Weigang. Comparative Study on Poisson's Ratio and Resolution of Longitudinal and Transverse Wave Velocity [J]. Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Science Edition), 1999, 29(4): 704 - 708.
- [28] 张若晗, 徐佩芬, 凌甦群, 等. 基于微动 H/V 谱比法的土石分界面探测研究: 以济南中心城区为例[J]. 地球物理学报, 2020, 63(1): 339 - 350.
- Zhang Ruohan, Xu Peifen, Ling Suqun, et al. Detection of Soil-Rock Interface Based on Fretting H/V Spectral Ratio Method: A Case Study of the Central City of Jinan [J]. Chinese Journal of

Geophysics, 2020, 63(1): 339 - 350.

[29] Haghshenas E, Bard P Y, Theodulidis N, et al. Empirical Evaluation of Microtremor H/V Spectral Ratio[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(1): 75 - 108.

[30] Lunedei E, Malischewsky P. A Review and Some New Issues on the Theory of the H/V Technique for Ambient Vibrations [J]. Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, 2015(39): 371 - 394.

[31] 熊超, 孙红月. 基于多因素-多尺度分析的阶跃型滑坡位移预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4): 1175 - 1184.

Xiong Chao, Sun Hongyue. Step-Like Landslide Displacement Prediction Based on Multi-Factor and Multi-Scale Analysis[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(4): 1175 - 1184.

[32] 唐军峰, 唐雪梅, 周基, 等. 滑坡堆积体变形失稳机制: 以贵州剑河县东岭信滑坡为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 503 - 516.

Tang Junfeng, Tang Xuemei, Zhou Ji, et al. Deformation and Instability Mechanism of Landslide Accumulation: A Case Study of Donglingxin Landslide Accumulation in Jianhe County, Guizhou Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 503 - 516.

[33] Seht I V, Wohlenberg J. Microtremor Measurements Used to Determine Thickness of Soft Sediments[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(1): 250 - 259.