

基于综合物探方法的公路不稳定边坡潜在滑面探测

赵 虎, 张 泉, 谭建秋, 钟邱平

Detection of the potential failure zones of the unstable slopes along highway using comprehensive geophysical methods

ZHAO Hu, ZHANG Quan, TAN Jianqiu, and ZHONG Qiuping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述

A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning

方然可, 刘艳辉, 黄志全 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 1-8

基于PFC^{3D}的鱼鳅坡滑坡运动过程分析

Analysis of Yuqiupo landslide motion process based on PFC^{3D}

张家勇, 邹银先, 杨大山 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 33-39

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用

Application of geographic detector in identifying influencing factors of landslide stability: A case study of the Jiangda County, Tibet

支泽民, 陈琼, 张强, 周强, 刘峰贵, 赵富昌, 陈永萍 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 19-26

青海西宁南北山滑坡、崩塌成因及影响分析

Causes and influential factor analysis of landslides and rockfalls in north & south mountain areas of Xining City, Qinghai Province

魏正发, 张俊才, 曹小岩, 魏赛拉加, 严慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 47-55

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-14

赵虎, 张泉, 谭建秋, 等. 基于综合物探方法的公路不稳定边坡潜在滑面探测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 117-122.
ZHAO Hu, ZHANG Quan, TAN Jianqiu, *et al.* Detection of the potential failure zones of the unstable slopes along highway using comprehensive geophysical methods[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 117-122.

基于综合物探方法的公路不稳定边坡潜在滑面探测

赵 虎, 张 泉, 谭建秋, 钟邱平

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:为查明公路边坡滑面分布情况, 采用瞬态面波和对称四极电测深法进行综合物探勘察, 成功识别出滑动面以及潜在滑面位置、形态和范围, 再结合钻孔, 得出滑坡体地质剖面, 高效准确的为滑坡处治设计提供了基础资料。工程实例应用表明, 瞬态面波成像在滑动面以及潜在滑面识别中准确直观, 且可以提供波速参数; 电测深法能够提供不同地质体的电阻率参数, 可以对瞬态面波进行有效补充; 两种方法互相结合, 可以较大限度的降低物探多解性, 结合少量钻孔, 能提供较为准确的滑坡体地质剖面, 可在公路不稳定斜坡探测中发挥重要作用。

关键词:公路; 滑坡; 瞬态面波; 电测深; 探测

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)01-0117-06

Detection of the potential failure zones of the unstable slopes along highway using comprehensive geophysical methods

ZHAO Hu, ZHANG Quan, TAN Jianqiu, ZHONG Qiuping

(Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: In order to find out the slip surface of the highway slope, the transient surface wave and the symmetric four-level electrical sounding method were used for comprehensive geophysical exploration. The position, shape and range of the potential slip surface were successfully identified. The geological section of the sliding body can be efficiently and accurately provided with basic data for landslide treatment design. The application of engineering examples shows that transient surface wave imaging is accurate and intuitive in the identification of sliding surface and, and can provide wave speed parameters; electrical sounding method can provide resistivity parameters of different geological bodies, and can perform transient surface waves. the combination of the two methods can greatly reduce the ambiguity of geophysical prospecting. Combined with a small number of drilling holes, it can provide a more accurate landslide body geological profile, which can play an important role in the detection of unstable highway slopes.

Keywords: highway; landslide; transient surface wave; electrical sounding; detection

0 引言

不稳定边坡是公路沿线常见的一种不良地质灾害现象^[1], 在降雨情况下, 往往会失稳滑动, 威胁公路运营

安全。公路沿线滑坡体正确处治以地质勘察的准确性作为前提, 地质钻探结合调绘工作是滑坡勘察的主流手段。但由于地质钻探工期较长且在不稳定边坡上施工有一定安全隐患, 而物探手段具有高效、快捷、可直观

收稿日期: 2021-01-01; 修订日期: 2021-03-02

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504901); 四川省交通科技项目(110102033)

第一作者: 赵 虎(1982-), 男, 河南确山人, 博士, 高级工程师, 主要从事公路工程物探及岩土勘察生产及科研工作。E-mail: zhaohu987@163.com

成像等特点,因此物探方法发挥的作用越来越大^[2-6]。

在公路边坡灾害探测中,常用的物探手段包括:电法^[7]、探地雷达、瞬变电磁法、浅层地震等方法,且都取得了不错的效果。单一方法应用研究较多,将电阻率与速度参数有机结合的应用较少。文章依据公路不稳定边坡探测实例,通过常规对称四极电阻率测深与瞬态面波^[8-10]相结合,对滑坡体进行勘察,准确高效的圈定滑坡范围,识别滑面及潜在滑面位置,为后续处治工作提供了合理可靠的支撑。

1 研究区地质概况

1.1 研究区概述

G5 京昆高速(雅安至西昌段)90 km 附近右侧存在不稳定斜坡,坡高约 50 m,为 5 级坡。通车前已进行过处治,坡角为重力式挡墙,坡体采用框架梁形式进行防护。但在强降雨及周边施工开挖扰动情况下,受重力及水压力作用,出现滑移变形,框架梁发生严重变形错位。边坡表面多处可见土体裂缝,部分框架梁被剪断(图 1),对该段高速公路运营威胁极大。



图 1 现场坡体框架梁破坏情况

Fig. 1 Supporting structure failure of the slope

1.2 边坡结构特征

坡角采用重力式挡墙,I、II级坡面为自然削坡后植被防护,由于坡度小,自然坡角稳定,坡体及表面未出现变形现象,上部 III—V 级坡面采用框架护坡(图 2),经地面调查和钻探揭示,防护主体为第四系崩坡残积 Q_4^{col+dl} 碎石土和 Q_3^{col+dl} 碎石土。边坡变形部分主要为 Q_4^{col+dl} 松散含角砾黏土层及部分碎石土层。

1.3 边坡变形特征

依照地质调绘分析,变形段边坡高约 50 m,分 5 级,边坡坡比为 1 : 1.25,每级边坡高约 10 m,平台宽约 2 m,边坡上部 3~5 级边坡为框架锚杆处治,主体为黏土层及崩坡积层块石土,路嵌挡墙为重力式挡墙,墙体无明显变形,下部 2 级采用削坡及植被护坡。边坡主要为含砾黏土、块石土。I、II 级坡面无明显变形,局部



图 2 边坡照片

Fig. 2 Photograph of the slope

有浅表性滑塌,长约 5~8 m,影响深度约 1 m,钻孔 ZK4 处于 II 级平台,出现拉裂缝,其附近坡表变形严重,致使 3 级坡表框架梁严重变形拉裂,土体呈隆起剪出状。III 级平台及 IV 级平台挡墙前均出现长约 30 m 贯通性拉裂缝,其中 IV 级平台挡墙墙体出现变形,下部局部出现淘空现象。V 级坡面菱形框架梁出现整体下沉,边缘出现剪断现象。边坡后缘已形成高约 1~2 m 的陡坎,并形成宽约 0.2 m 裂缝,深约 1 m,有逐渐垮塌后退趋势。滑坡后沿排截水沟出现垮塌拉裂现象。

2 边坡变形分析及物探方法选择

2.1 边坡变形机理

由于斜坡前期开挖时坡度较陡,坡表植被难以形成较好防护效果,加上长时间降雨渗透使覆盖层抗剪能力减弱,引起坡体失稳。同时,由于 Q_3^{col+dl} 地层较为密实,新近系与第四系地层之间易产生相对富水区,在斜坡重力作用下,逐渐产生滑移现象,并会持续加剧,对防护结构造成破坏,坡体拉裂变形,最终造成整个边坡结构失稳垮塌,严重威胁下方高速公路。因此,需要快速对斜坡开展准确的勘察设计工作。

2.2 边坡地球物理特征分析

通过边坡变形机理分析,主要为富水带引起滑动,从物性特征来看,会产生明显的电阻率及波速变化,且由于斜坡滑动时还会产生裂隙发育区域,附近土体或岩体会造成不同程度的破坏,从而产生明显的物性差异。

通常来说,滑体内波速比稳定区域会明显降低,横波和纵波比 (V_p/V_s) 也相应增大,且这种变化与岩(土)体破坏程度呈正比。相应的,滑体电阻率也呈类似特征,在含水情况下则会更加明显。

因此,组成滑坡的地质体物性参数与稳定区域存在较为明显的差异,是利用物探技术研究滑坡的物理基础。

2.3 综合物探方法选择及基本原理

根据2.2节对地球物理特征的分析,本次研究选用电法勘探与瞬态面波相结合的综合物探手段。

2.3.1 电测深勘探基本原理

电测深法^[7,11-13]是利用探测地质体的导电性质的不同,根据电阻率的变化特征判断地质体分布情况,完成勘察目标。

根据现场条件及技术要求,本次工作采用对称四极装置进行数据采集,其电极排列方式如图3所示。该装置主要特征为两边极距的对称性,即:AM=BN,采用该装置测量时,测量深度与供电极距AB为成正比关系,随着AB逐渐增加,探测深度逐步增大。在固定测点使用不断变化的AB采集,能够得到该点不同深度的电阻率值。利用双对数坐标纸进行绘制(纵坐标为 ρ_s 为变量,横坐标为AB/2),即可取得该点的一维电阻率曲线。

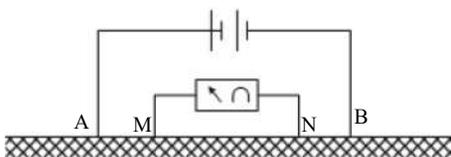


图3 对称四极排列装置形式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of symmetrical quadrupole arrangement device

2.3.2 瞬态面波勘探基本原理

相对常用的折射、反射等浅层地震勘探,瞬态面波法^[14-17]在20世纪70年代国际上才开始研究,基本原理是通过瑞雷面波频散曲线,采用定量分析,取得不同地下介质弹性波的传播速度,根据速度的差异,可以反映出地层物性差异情况。基于以上原理,能够划分岩土界面、软弱带等,达到解决相应地质问题的目的。瞬态面波勘察法对薄层分辨率高,能通过成像直观表示地下地质体及地质构造,能够在滑坡探测上取得较好的成像效果。

工程勘察时,通常采用瑞雷面波,因此瞬态面波勘探又常称为瑞雷波法,主要具有以下特点:

(1) 当传播介质均匀时,瑞雷波波长 r 和振动频率 f 没有联系,也就是说,均匀介质条件下瑞雷波扩散不具有频散性。

层状介质时, r 是 f 的函数,此种情况下瑞雷波扩散表现为频散性特征。

(2) 通过计算可知:当深度 z 为 r 的一半时,瑞雷面波就会损失大半能量。在深度接近波长时,能量衰减更强,一般来说,瑞雷波的穿透深度约等于 r 。因此,瑞雷波特定波长的波速主要与深度 $r/2$ 以内地层物性密切相

关,是瑞雷波勘探的物性基础。

根据公式 $r = V_r/f$,瑞雷波波长与弹性波频率有关,根据各种频率的弹性波速,就能取得 V_r-r 曲线:频散曲线。频散曲线的特性以及变化规律取决于地质情况,根据频散曲线反演变换,就能获取地下一定深度范围内的地质构造特征以及不同深度瑞雷波速值 V_r 。

(3) 瑞雷波速度 V_r 同横波速度 V_s 可以相互转换,主要根据式(1)计算:

$$V_r = \frac{0.87 + 1.12\delta}{1 + \delta} V_s \quad (1)$$

根据式(1)得到地质体与 V_r 、 V_s 的关系见表1,利用此相关性,能够获得地下地质体的横波速度。

表1 地质体中 V_r 、 V_s 关系表
Table 1 Relationship of V_r and V_s in geological body

泊松比	0.25	0.38	0.40	0.50
V_r/V_s	0.920	0.939	0.943	0.955

3 综合物探方法关键技术研究

3.1 电测深关键技术分析

3.1.1 测量装置及极距选择

(1) 装置选择:在电法勘探中,根据现场条件进行装置选择是开展工作的一个重要环节,通常来说,装置设计主要由研究区地形条件、目标体规模、测量精度等方面决定,而四极装置可以达到最大的测量电位,能够节省外接电源,减少供电电压,最重要的是可以压制干扰,提高信噪比,在场地条件允许下,为最优选择方案。因此本次研究工作采用对称四极装置,最大供电电压为400V。

(2) 极距选择:电法勘探过程中,极距的选择与勘探深度密切相关,在本次研究中,电法勘探深度要求超过35m。为了使 $MN \ll AB$ 以及勘探精度的要求,在初始时使 $MN/AB = 1/3$,随后固定MN,逐渐增大AB进行测量。 $MN/2 = 0.5$ 不变,AB/2取1.5m、2m、3m、5m、7m、10m、15m、20m、30m、50m、70m、90m等十二个极距跑极测量,能探测地下0-50m深度内岩体电性参数。

3.1.2 研究区电阻率分析测试及解释原则

精确解释的前提是对场区物性参数的准确统计测试,因此,解释前首先要将研究区电阻率参数进行统计,本次依据现场试验及工区综合统计得出以下电阻率参数见表2。

在深度转换时,利用已有钻孔资料进行约束校正,

根据钻孔资料揭示的地质分层信息, 试验并确定了本次电测深资料解释深度转换采用极距(AB/2)与深度的比值系数为 0.95 ~ 0.5 之间, 转换后物探成果解释深度与钻探揭示的地层深度基本吻合。

表 2 研究区电阻率实测参数表
Table 2 Measured parameters of resistivity in study area

岩性	电阻率值 $\rho/(\Omega \cdot m)$	表现特征
黏土层	<200	等值线平滑
稳定堆积体(冰水堆积层)	200 ~ 500	等值线紊乱
基岩	>500	等值线平滑
滑面	<200	低阻闭合圈

3.2 瞬态面波关键技术研究

3.2.1 原始数据采集关键问题

在时域内, 原始数据采集质量与频散曲线有直接关系。同地震反射类似, 瞬态面波法同样有最佳窗口。为提高原始数据精度, 增加处理解释精度, 面波数据采集时应注意以下关键采集问题:

- (1) 采样时每道设计排列不能超过面波域, 同时采集到足够长记录;
- (2) 采集时要避开附近振动干扰, 减少直达波的后续波或反射、折射波干扰面波;
- (3) 采集的波形真实可靠。

依照上述原则, 排列设计时, 应根据勘探深度的要求设计合适的偏移距以及道间距, 若偏移距较小, 高频分量较大, 能凸显浅部信号; 要想得到深部信息, 则应加大偏移距, 使高频分量衰减, 凸显低频分量。

在震源选择上, 瞬态瑞雷波法的激震可采用大锤或吊锤自由落下, 常规来说, 勘探深度 20 ~ 30 m 范围内时, 24 磅大锤激发就能得到较为理想的频散曲线, 在介质较软, 或勘探深度要求较深时, 需要较重吊锤自由落下, 能够得到理想的低频震动。

本次研究使用的设备为北京水电物探研究所研制的 SWS-6 型面波仪, 单点激发, 12 道接收进行数据采集。偏移距 10 ~ 30 m, 道间距 1 m, 采样间隔 0.5 ms, 记录长度 1 024 ms。面波的激发采用锤击法, 重 15 kg。实际工作中, 为获取更可靠的面波数据, 每个测点上应重复锤击 3 ~ 5 次, 采用面波干扰小、能量强、信噪比高的激发记录作为该测点的面波采集数据。

3.2.2 研究区波速分析测试及解释原则

与电法勘探一样, 研究区波速参数的准确统计也是面波解释的重要前提条件, 由于面波波速近似等于横波波速, 因此本次依据现场孔内剪切波测试得出以下参数, 见表 3。

表 3 研究区横波波速实测参数表
Table 3 Measured parameters of shear wave velocity in study area

岩性	横波波速 $v/(m \cdot s^{-1})$	表现特征
粘土层	<200	低速层
稳定堆积体(冰水堆积层)	200 ~ 1 000	波速变化大
滑面	<200	低速带

数据处理使用 SWS-6 型面波仪专用处理软件进行, 利用频散曲线变化特征分析测点位置面波速度随深度的变化情况, 判断地下地质条件。频散曲线与地下介质的层厚度、波速等参数有紧密联系, 分析这些变化规律和特征, 可以初步确定速度层的层数以及各层的厚度和速度范围, 再结合已有地质资料对曲线进行综合分析, 得到各层的厚度以及波速, 达到对地质体分层和识别滑坡的目的。

4 成果分析

4.1 测线布设

依照现场地形, 结合前期调绘圈定的滑坡体的范围, 垂直布置纵横两条剖面(沿高速公路方向为纵剖面, 垂直高速路线方向为横剖面), 电测深法与面波法测线重合, 以便互相验证。具体测线位置见图 4。

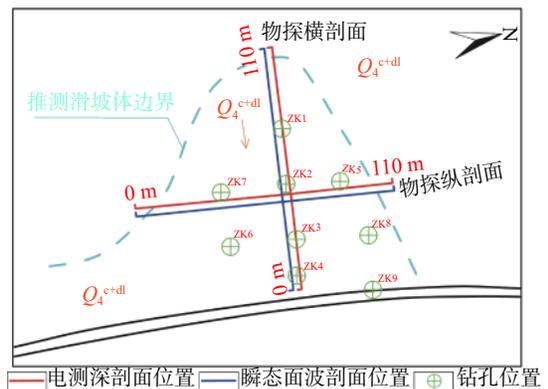


图 4 物探测线布置图

Fig. 4 Layout of geophysical prospecting detection line

4.2 物探成果解释

根据上述处理解释方法得到物探解释成果图件(图 5、6、7、8), 结合地质调绘资料进行综合地质解释。

根据解释资料分析: 面波横剖面(图 5)中 30 ~ 80 m 范围, 表层 3 ~ 5m 深度存在明显低速带, 波速 $V < 150$ m/s, 分析认为是主滑体, 面波纵剖面图(图 6)中清晰可见低速黏土层, 同时波速相对较高的稳定层中也有明显的低速夹层, 解释为滑面和潜在滑面。但由于震源激发能量受限, 探测深度约 30 m, 无法探测基岩, 必需

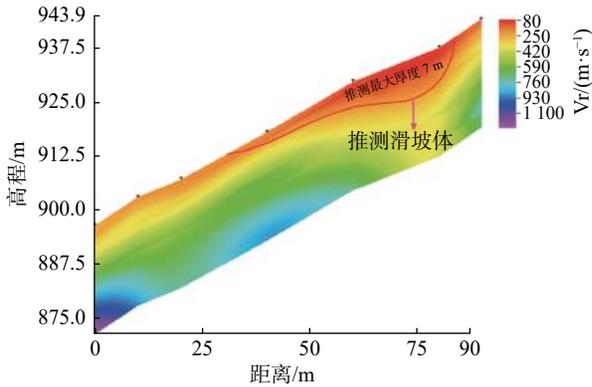


图 5 面波横剖面成果图

Fig. 5 Cross section of surface wave

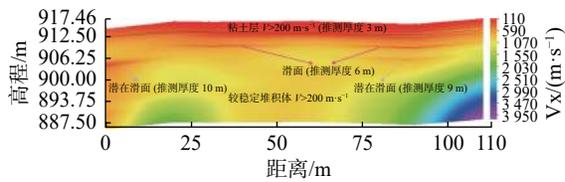


图 6 面波纵剖面成果图

Fig. 6 Longitudinal section of surface wave

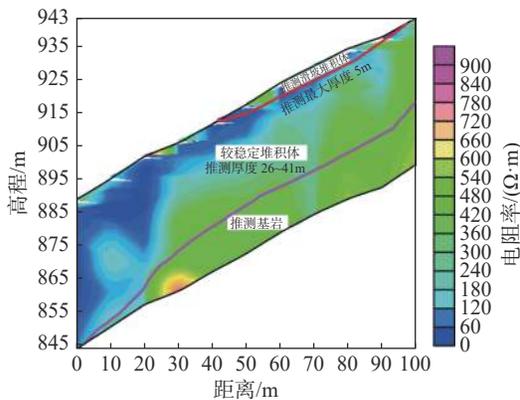


图 7 电测深横剖面成果图

Fig. 7 Cross section of electrical sounding method

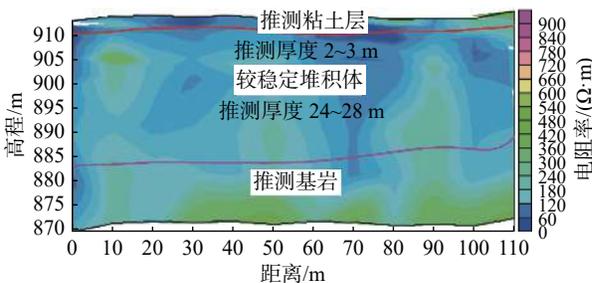


图 8 电测深纵剖面成果图

Fig. 8 Longitudinal section of electrical sounding method

结合电测深成果才能得到岩土界面。

在电测深成果图中(图 7、图 8), 分层也较为清晰, 能够得出明确的三层界面: 黏土层、稳定堆积体层以及

基岩, 但纵向分辨率较面波成果低, 较难识别出滑面具体位置, 解释时要参考面波成果图进行滑面判别。

依照两种方法成果综合分析, 滑坡体厚度约为 3~4 m, 剖面 75 m 附近较厚, 约 6~7 m, 推测在横剖面 30 m 处剪出, 横剖面 90 m 处为滑坡后缘, 覆盖层整体厚度超过 30 m, 滑坡体及覆盖层形态见图 5~8。

4.3 地质验证

(1) 结合现场坡体变形情况, 坡体剪出位置与物探推测位置吻合, 边坡在测线 58 m、72 m、97 m、103 m 和 116 m 处出现土体裂缝及部分框架梁破坏位置, 均在物探推测滑坡体范围内, 变形范围与物探成果推测一致; 根据现场调绘的滑体厚度也与推测结果一致。

(2) 依照综合物探解释成果, 结合地质调绘, 在推测主滑面位置布设 5 个钻孔, 绘制出边坡综合地质成果图(图 9), 钻探揭示滑面深度、滑坡体规模等与物探结果基本吻合, 表明综合物探能在不稳定边坡勘察中取得良好效果。

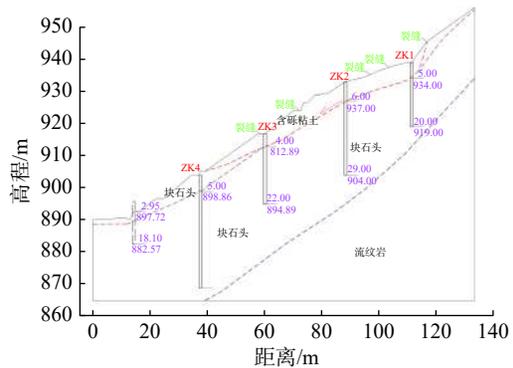


图 9 地质剖面成果图

Fig. 9 Geological profile

5 结论

(1) 综合瞬态面波与电测深成果, 较为准确的推测出滑坡体的规模、形态以及滑面位置, 与地质资料对比, 两者具有很好的一致性。

(2) 电法勘探与面波勘探相结合, 可互相验证, 利于消除物探多解性, 在滑坡探测中具有快速、有效、直观的特点, 可在类似条件下滑坡识别进行推广应用。

(3) 由于地质体不同物性参数的差异, 造成不同物探方法对地质体表现结果并不完全一致, 解释时必须有效结合地质调绘及钻孔信息, 去伪存真, 才能发挥物探工作的作用, 没有地质基础的物探解释可能会造成误判。

参考文献 (References) :

[1] DE VITA P, AGRELLO D, AMBROSINO F. Landslide

- susceptibility assessment in ash-fall pyroclastic deposits surrounding Mount Somma-Vesuvius: Application of geophysical surveys for soil thickness mapping [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2006, 59(2): 126 – 139.
- [2] 祁生文, 孙进忠, 何华. 瑞雷波勘探的研究现状及展望 [J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(4): 630 – 635. [QI Shengwen, SUN Jinzhong, HE Hua. Review of raleigh wave exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(4): 630 – 635. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993. [YANG Chenglin. Rayleigh wave exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. (in Chinese)]
- [4] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1988. [WANG Zhendong. Shallow seismic exploration application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. (in Chinese)]
- [5] 吴赛男, 田毅. 我国单体滑坡模拟和区域滑坡易发性评价研究进展 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 113 – 119. [WU Sainan, TIAN Yi. Review on progress of individual landslide simulation and assessment of regional landslide susceptibility in China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 113 – 119. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 肖滨, 赵建三, 郭云开, 等. 地球物理方法在高速公路路基质量检测中的应用 [J]. *公路*, 2003, 48(1): 101 – 106. [XIAO Bin, ZHAO Jiansan, GUO Yunkai, et al. Application of geophysical method to quality detection of expressway subgrade [J]. *Highway*, 2003, 48(1): 101 – 106. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王磊, 蔡晓光, 李孝波, 等. 西吉县西南山区典型黄土地震滑坡高密度电法物探解译分析 [J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(1): 351 – 357. [WANG Lei, CAI Xiaoguang, LI Xiaobo, et al. Interpretation analysis of high-density electrical prospecting of typical seismic loess landslides in the southwestern mountainous area of Xiji County [J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(1): 351 – 357. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 房浩, 李晨, 雷晓东, 等. 东南沿海典型浅覆盖区高密度电阻率法残坡积层测深研究 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 85 – 93. [FANG Hao, LI Chen, LEI Xiaodong, et al. Study on thickness measurement of eluvial slope layer by high density resistivity method in typical shallow covered areas of southeast Coast [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 85 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 宋先海, 肖柏勋, 顾汉明, 等. 反演瞬态瑞雷波频散曲线映射二维横波速度剖面 [J]. *物探化探计算技术*, 2003, 25(2): 105 – 109. [SONG Xianhai, XIAO Boxun, GU Hanming, et al. Mapping of 2-D shear-wave velocity section by the inversion of the dispersion curves of instantaneous Rayleigh wave [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 25(2): 105 – 109. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赖思静, 杨伟, 李海平. 几种典型面波时域信号的特征分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增刊 1): 4854 – 4859. [LAI Sijing, YANG Wei, LI Haiping. Characteristic analysis of time signals for several typical surface waves [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Sup 1): 4854 – 4859. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 何永波, 李德庆, 杨振宇, 等. 综合物探方法在滑坡地质勘探中的应用研究 [J]. *CT理论与应用研究*, 2015, 24(1): 11 – 20. [HE Yongbo, LI Deqing, YANG Zhenyu, et al. The application of integrated geophysical method in the landslide exploration [J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2015, 24(1): 11 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 杨丽娜, 戴彦雄. 浅析瞬态面波测试在工程勘察工作中的应用 [J]. *岩土工程技术*, 2018, 32(6): 303 – 305. [YANG Lina, DAI Yanxiong. A brief analysis of the transient surface wave test in engineering investigation [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2018, 32(6): 303 – 305. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘崧. 物探方法在研究三峡库区滑坡中的应用前景 [J]. *地质科技情报*, 1994, 13(3): 81 – 89. [LIU Song. Prospects for application of geophysical methods to the study of landslides in the reservoir area of the Three Gorges [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1994, 13(3): 81 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [14] POUS J, QUERALT P, CHAVEZ R. Lateral and topographic effects in geoelectric soundings [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1996, 35(4): 237 – 248.
- [15] 崔燕丽. 伪随机多功能多频观测系统的数据处理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2002. [CUI Yanli. Research on data processing of pseudo-random multifunctional multi-frequency observation system [D]. Changsha: Central South University, 2002. (in Chinese)]
- [16] 陈华, 尹健民, 肖国强, 等. 瞬态瑞雷波法检测堆石体地基的强夯效果 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增刊 1): 1897 – 1899. [CHEN Hua, YIN Jianmin, XIAO Guoqiang, et al. Inspection of compaction effect on rock-filled foundation by Rayleigh wave [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Sup 1): 1897 – 1899. (in Chinese with English abstract)]
- [17] BESTUZHEVA N P, BYKOVTSSEV G I, DUROVA V N. Study of transient surface waves in nonlinearly elastic media [J]. *Soviet Applied Mechanics*, 1981, 17(12): 1062 – 1067.