

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.243

引用格式: 高艳卫,何焕林,代军,等. 基于等值反磁通瞬变电磁法的某岩质边坡浅部岩溶发育规律[J]. 中国地质调查, 2025, 12(2): 104–111. (Gao Y, He H, Dai J, et al. Development law of shallow karst in a rock slope based on equivalent antimagnetic transient electromagnetic method[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(2): 104–111.)

基于等值反磁通瞬变电磁法的某岩质边坡 浅部岩溶发育规律

高艳卫¹, 何焕林¹, 代军¹, 刘荡平², 陈书平³, 刘建兴¹

(1. 航天规划设计集团有限公司, 北京 102627; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 3. 徐州中矿岩土技术股份有限公司, 江苏 徐州 221116)

摘要: 边坡赋存溶蚀空间的不确定性和非均质性是影响岩质边坡稳定性的重要因素。首先,从破坏岩体结构完整性、水文地质条件变化、岩体应力分布不均3方面分析了岩溶发育对岩质边坡稳定性的影响机理。然后,以山西某场地岩质边坡为例,在系统分析场地边坡工程地质条件的基础上,采用 HPTM-18 型高精度等值反磁通瞬变电磁系统设计并实施了6条物探测线,设置采集频率为12.5 Hz,叠加300次,重复2次。由探测和解译成果可以看出:边坡上部岩体风化严重、裂隙发育,下部岩体较为完整,边坡基岩上部岩溶现象较为普遍,未见构造集中发育带,未见明显富水区域。钻探验证结果表明物探解译的异常区岩心破碎,裂隙泥质充填,伴有突然掉钻现象,证明物探解译的岩溶发育区准确,可满足工程设计要求。研究成果可为该类型岩溶发育岩质边坡的稳定性评价提供重要的借鉴和参考。

关键词: 等值反磁通瞬变电磁法; 岩质边坡; 岩溶发育; 边坡稳定性; 数据解译

中图分类号: P641.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)02-0104-08

0 引言

岩溶作用形成的各种溶蚀空间(溶洞、溶隙、溶沟等)的大小、形状、分布等特征具有强烈的不确定性和非均质性,是影响岩质边坡稳定性的重要因素,主要体现在3个方面,即破坏岩体结构完整性、水文地质条件变化、岩体应力分布不均^[1]。溶蚀空间的存在会极大破坏岩体的完整性,降低岩体的抗滑力,使边坡在受到外力扰动时更容易发生失稳^[2]。此外,岩溶发育地区通常具有复杂的水文地质条件,地下水的流动和渗透会加剧岩石的溶蚀作用,进一步破坏岩质边坡的内部结构,地下水在溶蚀空间中聚集形成的静水压力也会增加边坡的滑动倾向^[3]。由于岩溶作用的不均匀性,在溶蚀空间周围会产生应力集中,导致局部岩石更容易破裂,

这种应力分布的不均性使得边坡的破坏模式和滑动面变得复杂和难以预测^[4-5]。由此可见,在岩溶发育地区的岩质边坡稳定性评价中需要注重分析溶蚀空间的影响。

近年来,众多学者对岩溶发育影响岩质边坡稳定性方面的研究逐渐增多。例如:张科等^[6]提出了一种露天矿山边坡稳定性随机岩溶模型,发现溶洞的存在会显著降低岩质边坡的安全系数;师海^[7]以沪昆高铁贵州段某路堑边坡为例,构建了岩溶化边坡岩体在不同加载方式和水动力作用下的疲劳损伤模型;钟祖良等^[8]以普贤崩塌为例,获得了采动条件下坡体的层间应力、沉降变形及地裂缝的发育规律;刘运思等^[9]对岩溶条件下高陡边坡的动力响应特征进行了研究,结果表明坡体内溶洞的尺寸越大,边坡的安全系数越低;徐建强等^[10]根据贵州省西部典型岩溶发育坡体的岩土体结构与

收稿日期: 2024-06-21; 修订日期: 2024-10-29。

基金项目: 航天规划设计集团有限公司“基于复杂地质条件下的边坡勘察及边坡支护设计专项研究(编号: KC07-2024007)”项目资助。

第一作者简介: 高艳卫(1989—),男,高级工程师,主要从事岩土工程勘察、设计、施工等相关研究与实践工作。Email: 898594909@qq.com。

岩溶发育规律,将该地区的土岩混合边坡划分为3种类型,并提出了每种类型边坡的承灾模式和防治技术。然而,对于如何准确探测出岩质边坡溶蚀空间的赋存规律还没有成熟的技术体系和方法^[11-14]。基于此,本文提出了一种采用等值反磁通瞬变电磁法的岩质边坡浅部岩溶探测方法,并以山西某岩溶发育边坡为例,进行了实地探测分析,旨在为该岩质边坡的稳定性评价提供借鉴和参考。

1 研究区概况

1.1 区域构造与岩体裂隙

研究区大地构造位于山西断隆东南缘、太行断拱南段中轴偏西部位,为一向西缓倾的单斜,倾角<10°,由东往西地层时代由老到新展布。晋获褶断带呈NNE向,从长治经平顺县西缘通过,县境内断裂构造发育较少,到目前为止未发现新构造运动活动记载,也未发现较大的区域性断裂。研究区北侧、东侧和南侧存在人工开挖形成的高陡岩质边坡,边坡坡角为[34°,87°],场地照片见图1所示。根据区域地质资料及地质调查,本场地地貌单元属低山丘陵地貌,场地内无褶皱发育,无断层通过,地质构造简单^[15]。场地下伏基岩为奥陶系,地层岩性为石灰岩,物理力学强度较好,且抗风化能力较好。边坡坡体表面局部严重风化,岩体完整性较差。岩层整体产状为330°∠8°。场地内主要发育两组节理:第一组节理产状为296°∠83°;第二组节理产状为158°∠87°,节理面微闭合,节理间距约4条/m。节理和溶蚀空间的发育对场地内斜坡的稳定性造成很大影响,是诱发地质灾害的重要影响因素。



图1 研究区岩质边坡地形地貌特征

Fig.1 Topographic and geomorphological characteristics of the rock slope in the study area

1.2 地层分布与工程参数

根据成因年代及地层岩性,研究区地层可分为5层(图2),其中素填土、粉质黏土、碎石土的土体工程参数如表1所示,强风化灰岩、中风化灰岩的岩体工程参数如表2所示。

岩性	厚度/m	岩性特征
素填土	[0.2,0.5]	褐黄色,稍湿,稍密,其成分以石灰岩碎地为主,含有少量粉质黏土,该层回填年限3 a以上
粉质黏土	[5.0,10.0]	褐黄色,稍湿,稍密,含云母、氧化物,局部含粉砂透镜体,软塑—硬塑,具中—高压缩性,无摇振反应,干强度中等,韧性低,含大量菌丝、姜石
碎石土	[5.0,10.0]	褐灰色,稍湿,密实,碎石含量50%~60%,碎石可见直径为3~10 cm,砾石含量约15%,砾石成分为浅灰、灰色灰岩,呈次圆状,充填物为少量黏性土,级配一般
强风化灰岩	[2.0,3.0]	灰、深灰色,强风化,密实,陡倾角裂隙发育,裂隙多呈张开状,沿裂隙面可见乳白色钙质薄膜,岩心多呈短太及碎块状,属较软岩,岩体破碎
中风化灰岩	[3.0,10.0]	灰、深灰色,中风化,致密坚硬,陡倾角裂隙较发育,裂隙多呈短太及碎块状,局部为扁柱及碎块状,属较硬岩—坚硬岩,岩体较破碎

图2 研究区地层分布及岩性特征

Fig.2 Stratigraphic distribution and lithological characteristics of the study area

表1 研究区素填土、粉质黏土、碎石土物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of plain fill, silty clay, and gravelly soil in the study area

地层	地基承载力特征值/kPa	天然重度/(kN·m ⁻³)	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
素填土	/	18.0	/	/	/
粉质黏土	150	19.0	10.0	25.0	21.0
碎石土	300	20.5	30.0	0.0	25.0

注:“/”为无数据。

表2 研究区强风化灰岩、中风化灰岩物理力学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of highly weathered limestone and moderately weathered limestone in the study area

地层	天然重度/(kN·m ⁻³)	压缩模量/MPa	地基承载力特征值/kPa	泊松比
强风化灰岩	23.0	45.0	700	0.30
中风化灰岩	28.0	50.0	2 000	0.16

2 边坡溶蚀空间探测设备与方案

2.1 探测设备

研究区岩质边坡的地层结构较为复杂,并伴随着不同规模的岩溶洞穴发育,存在地质环境复杂、探测难度高等施工难题。因此,本研究选择了国产HPTM-18型高精度等值反磁通瞬变电磁系统进

行边坡浅部岩溶发育规律研究,该系统由 HPTEM 天线、仪器主机、主机天线连接缆和操作 PC 组成,具有高精度、高分辨率、抗干扰能力强、施工方便等特点。等值反磁通瞬变电磁法通过使用两个发射电流相同但方向相反的微线圈来尽量减小或消除发射线圈和接收线圈之间的互感,这种设计在理论上可以减小互感的影响,但若想完全消除互感在实际操作中可能受到多种因素的影响,如线圈的精确对齐、电流的完美同步等。在上、下微线圈的几何中心水平面和无穷远处一次垂直磁场为零,但其他空间由于两个线圈产生的磁场并未完全抵消,会存在一次垂直磁场。因此,在相同的变化时间情况下,感应涡流的极大值面集中在近地表,同时近地表感应涡流的极大值面产生的磁场最强,随着关断电间歇的延时,又产生新的涡流极大值面逐渐向远离垂直发射线圈的方向扩散。在不考虑其他因素的情况下,局部地质体电导率越大,扩散速度和极大值的衰减幅度越小。

2.2 数据采集与处理

本次采用 HPTEM Data Process 数据处理系统对等值反磁通瞬变电磁系统采集数据进行处理,处理流程如图 3 所示。首先,对现场采集到的数据进行剔飞值、去噪等数据编辑;然后,进行地形校正、平滑滤波等数据预处理,通过参数分析、曲线类型分析、视电阻率分析等进行定性分析,通过正演分析、模型拟合反演、拟二维反演等方法进行定量分析;最后,参考研究区前期的地质勘探数据和资料,通过定性

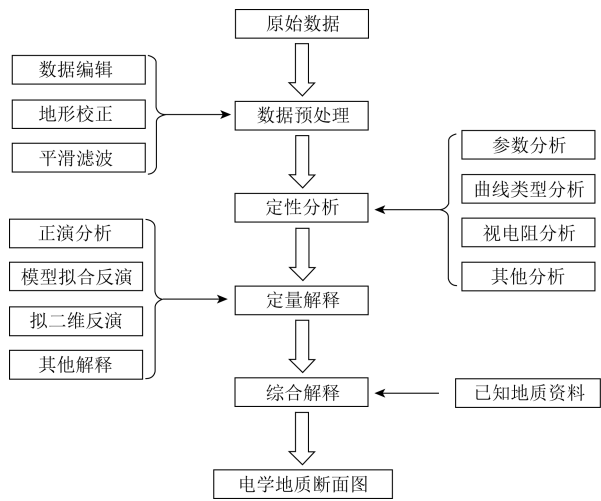


图 3 等值反磁通瞬变电磁法数据处理流程

Fig. 3 Data processing flow of equivalent antimagnetic transient electromagnetic method

分析与定量分析相结合的方式进行综合解译。在正式进行数据采集前,还需要进行自检调平校验。将发射与接收线框水平放置,调整发射线框与接收线框的相对位置,观测衰减曲线的形态来评估调平效果。调平后的衰减曲线没有负值,且衰减过程较为稳定,表明仪器正常,调平校验完成后可进行数据采集。虽然调平后的衰减曲线在特定时间段内表现出了细微的畸变,但畸变幅度相对于整体衰减趋势而言十分微小。因此,认为总体衰减特征仍然是合理的,完全能够反映地下介质的电性特征。

2.3 探测方案

本次探测工作共布置瞬变电磁法测线 6 条,编号为 L1—L6,测线总长度为 1 049 m,包含测点 330 个,点距为 3.0~4.0 m,根据实际位置及重要程度适当微调测点点距。6 条测线的具体布置方式如图 4 所示:测线 L1 长度为 171 m,包含 28 个测点;测线 L2 长度为 153 m,包含 52 个测点;测线 L3 长度为 216 m,包含 73 个测点;测线 L4 长度为 201 m,包含 68 个测点;测线 L5 长度为 164 m,包含 42 个测点;测线 L6 长度为 144 m,包含 37 个测点。HPTEM-18 高精度瞬变电磁仪的发送频率在 0~10 KHz 之间,可以按照 0.1 Hz 步进进行增大或减小调节。但在现场实际工作中,通常选择 25 Hz、12.5 Hz、6.25 Hz、2.5 Hz 这 4 个频率。HPTEM-18 高精度瞬变电磁仪的探测深度和发送频率有关,探测深度越大,所要求的发送频率就越小,反之,则

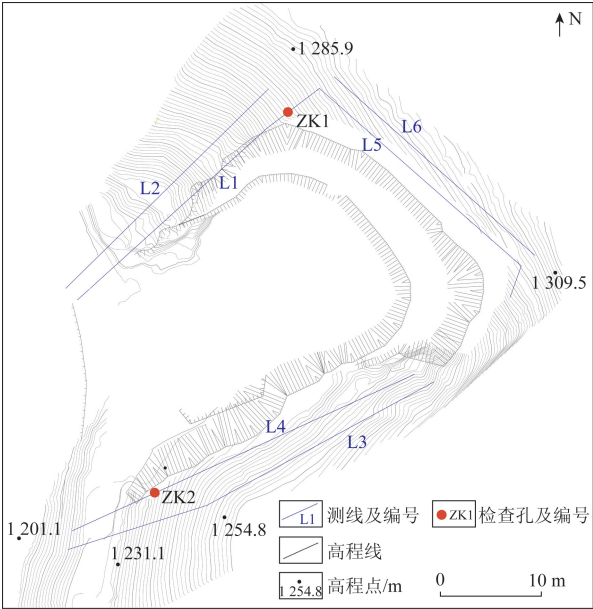


图 4 探测线平面位置

Fig. 4 Layout plan of geophysical survey lines

发送频率就越大。通过现场试验,本次物探采集工作选择的频率为 12.5 Hz。叠加次数的选择主要与研究区的噪声水平有关,理论上叠加次数越大,采集到的衰减曲线信号信噪比就越高。在本次探测工作中,根据实测信号质量,兼顾工作效率,设置叠加次数为 300~400 次,并重复探测 2 次。通过现场试验,本次物探采集工作选用的叠加次数为 300 次,重复 2 次探测,可达到最佳工程探测效果。

3 探测成果及解译

3.1 异常解释原则与依据

等值反磁通瞬变电磁反演算法主要基于采集的时间-电压数据,通过一系列的数学处理和优化算法,反演出地下地质体的电阻率分布。反演算法通过迭代计算,不断调整地下地质体的电阻率分布,使反演结果逐渐逼近真实情况。在迭代过程中,利用目标函数来评估反演结果的优劣,并据此调整反演参数。根据反演电阻率断面图中电阻率的数值、异常区的形态,并参考研究区附近勘察钻孔的编录数据,确定岩土分界面。当岩土分界面下出现电阻率数值逐步增大,电阻率曲线相对平缓,解译为岩层风化程度逐渐减弱。结合本次探测地段的特殊性,具体解释原则如下:①结合前期地质勘察资料,将浅部电阻率值普遍 $< 200 \Omega \cdot \text{m}$ 区域解译为覆盖层或全风化岩层的电性反映,覆盖层主要为坡积碎石土;②结合前期地质勘察资料,将电阻率值在 $200 \sim 400 \Omega \cdot \text{m}$ 范围的区域解译为全-强风化岩体,将浆电阻率值在 $400 \sim 500 \Omega \cdot \text{m}$ 范围的区域解译为强风化岩体,将电阻率值 $> 500 \Omega \cdot \text{m}$ 且分布较均匀的深部高阻区域解译为中风化岩体;③反演电阻率断面图中局部相对异常高阻区解译为岩溶发育现象,形成小范围的空洞,或该区域岩体中孔洞较多,局部相对异常低阻区解译为岩层裂隙发育区。

3.2 探测成果及解译

由图 5(a)和图 6(a)可知,L1 测线圈定出 3 个异常区:异常 1 分布在距离 $[116, 161] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 243, 1\ 272] \text{ m}$ 处,呈相对低阻的封闭状态,解译为岩层裂隙较为发育区;异常 2 和异常 3 分别在距离 $[101, 107] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 234, 1\ 239] \text{ m}$ 和距离

$[100, 111] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 216, 1\ 224] \text{ m}$ 处,呈相对高阻的封闭状态,解译为该区域存在岩溶空洞或该区域岩体中的孔洞较多。根据图 5(b)和图 6(b)可知,L2 测线浅部电阻率普遍较低,解译为覆盖层或全风化岩层的反映,覆盖层以下的电阻率等值线相对平缓,连续性较好,结合地质调查与钻探,解译为灰岩地层。根据图 5(c)和图 6(c)可知,L3 测线圈定出 2 个异常区:异常 1 分布在距离 $[14, 74] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 210, 1\ 239] \text{ m}$ 处,电阻率等值线紊乱不连续,呈相对低阻的封闭状态,解译为岩层裂隙较为发育区;异常 2 分布在距离 $[80, 86] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 211, 1\ 216] \text{ m}$ 处,呈相对高阻的封闭状态,解译为该区域可能存在岩溶空洞或该区域岩体中孔洞较多。根据图 5(d)和图 6(d)可知,L4 测线圈定出 3 个异常区:异常 1 在距离 $[40, 48] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 219, 1\ 235] \text{ m}$ 处,视电阻率曲线连续向下塌陷,两侧视电阻率高,解译为岩层裂隙较为发育区;异常 2 和异常 3 分别在距离 $[56, 70] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 230, 1\ 237] \text{ m}$ 和距离 $[52, 69] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 204, 1\ 212] \text{ m}$ 处,呈相对高阻的封闭状态,解译为该区域存在岩溶空洞或该区域岩体中孔洞较多。根据图 5(e)和图 6(e)可知,L5 测线圈定出 9 个异常区:异常 1 分布在距离 $[131, 142] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 287, 1\ 297] \text{ m}$ 处,呈相对低阻的封闭状态,解译为岩层裂隙较为发育区;异常 2—8 主要集中在距离 $[0, 94] \text{ m}$ 、高程 $1\ 230 \text{ m}$ 以上,视电阻率等值线紊乱不连续,呈相对高阻区的封闭状态,解译为该区域可能存在岩溶空洞或该区域岩体中孔洞较多;异常 9 分布在距离 $[159, 163] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 266, 1\ 274] \text{ m}$ 处,呈高阻区域的封闭状态,解译为该区域可能存在岩溶空洞或该区域岩体中孔洞较多。根据图 5(f)和图 6(f)可知,L6 测线圈定出 7 个异常区:异常 1 在距离 $[0, 51] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 273, 1\ 288] \text{ m}$ 处,呈相对低阻的封闭状态,解译为岩层裂隙较为发育区;异常 2—6 主要集中在距离 $[38, 103] \text{ m}$ 、高程 $1\ 240 \text{ m}$ 以上,视电阻率等值线紊乱不连续,呈相对高阻区域的封闭状态,解译为该区域可能存在岩溶空洞或该区域岩体中孔洞较多;异常 7 分布在距离 $[134, 144] \text{ m}$ 、高程 $[1\ 289, 1\ 296] \text{ m}$ 处,呈相对高阻的封闭状态,解译为该区域可能存在岩溶空洞或该区域岩体中孔洞较多。

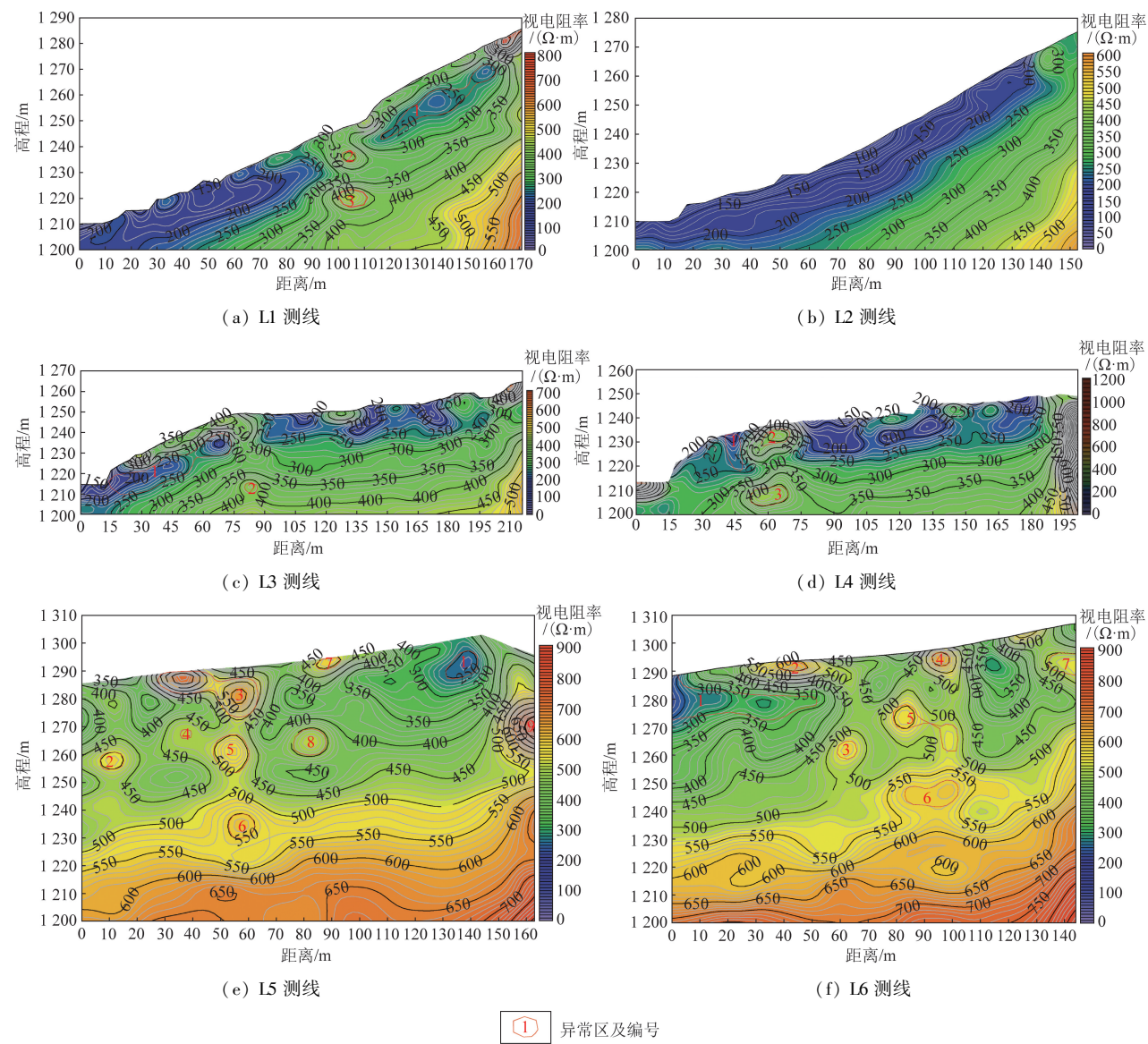


图 5 L1—L6 测线物探测试成果

Fig. 5 Geophysical testing results of L1 – L6 survey lines

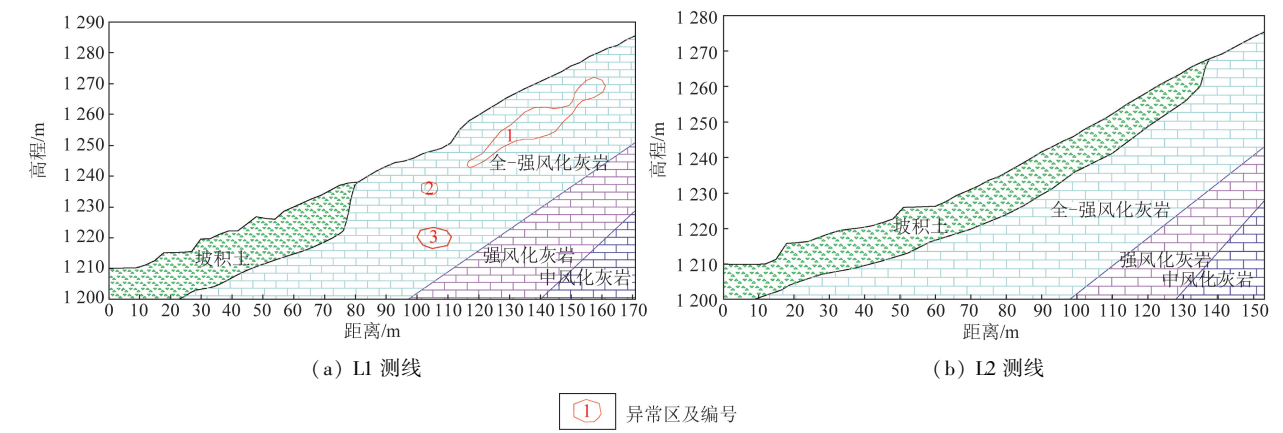


图 6-1 L1—L6 测线物探测试地层解译

Fig. 6-1 Interpretation of geophysical testing strata for L1 – L6 survey lines

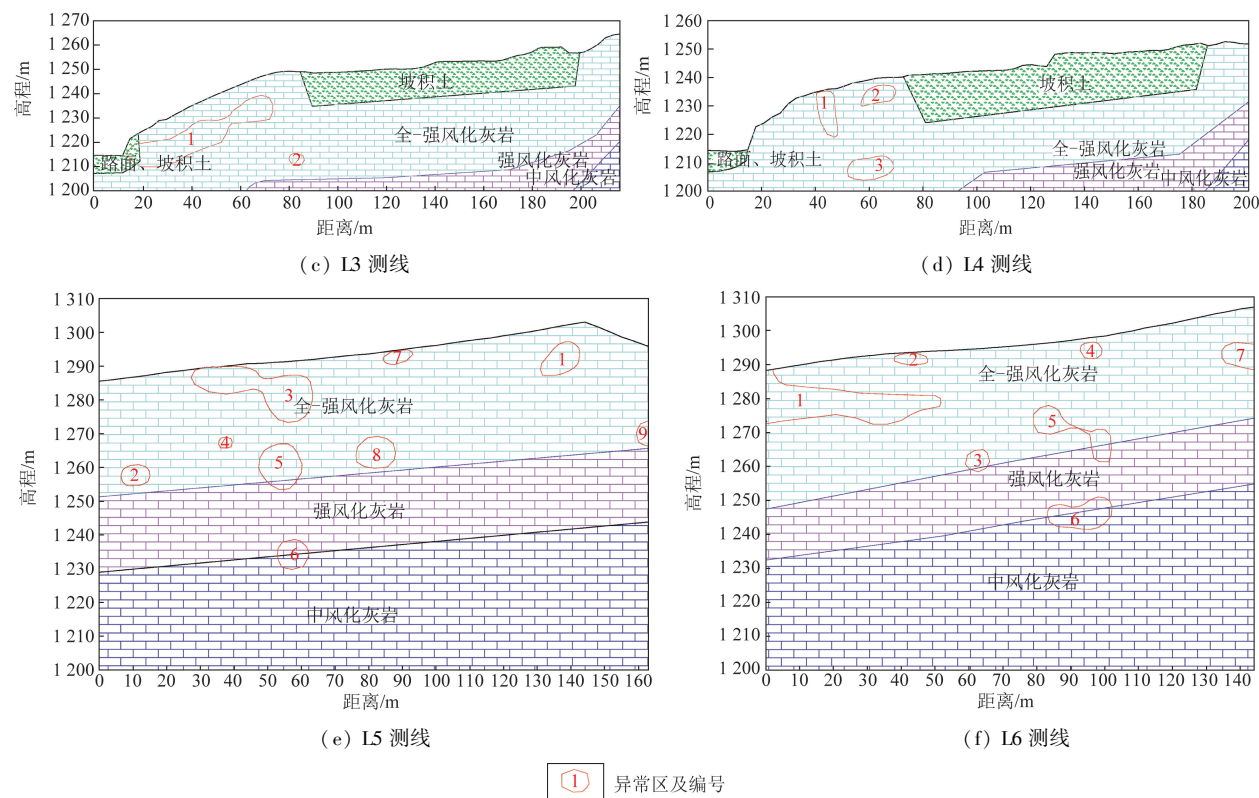


图 6-2 L1—L6 测线物探测试地层解译

Fig. 6-2 Interpretation of geophysical testing strata for L1 - L6 survey lines

综合分析 L1—L6 测线的探测与解译成果,可以看出:边坡上部岩体风化严重、裂隙发育,视电阻率较低;下部岩体则较为完整,视电阻率随深度逐渐升高,且等值线的连续性也较好。此外,在边坡基岩上部岩溶现象较为普遍,这也是造成边坡上部视电阻率较低且不连续的原因之一,但是在边坡上部未见构造集中发育带和明显的富水区域。

3.3 钻探验证

为验证本次等值反磁通瞬变电磁法探测和解

译成果的准确性,共布设 2 个钻探验证钻孔。ZK1 位于 L1 测线异常区 1 上方;ZK2 位于 L4 测线异常区 1 上方。从钻探过程来看,当钻至异常区时均发生了明显的泥浆漏失现象,部分区域还伴有明显的突然掉钻现象。从钻孔岩心特征来看,异常区的岩心整体较为破碎,裂隙内伴有泥质充填,部分区域存在 10~50 cm 的岩心缺失(图 7,图 8)。由钻探验证钻孔的现象可以说明本次物探解译的精度较高,完全可以满足工程设计的需求。

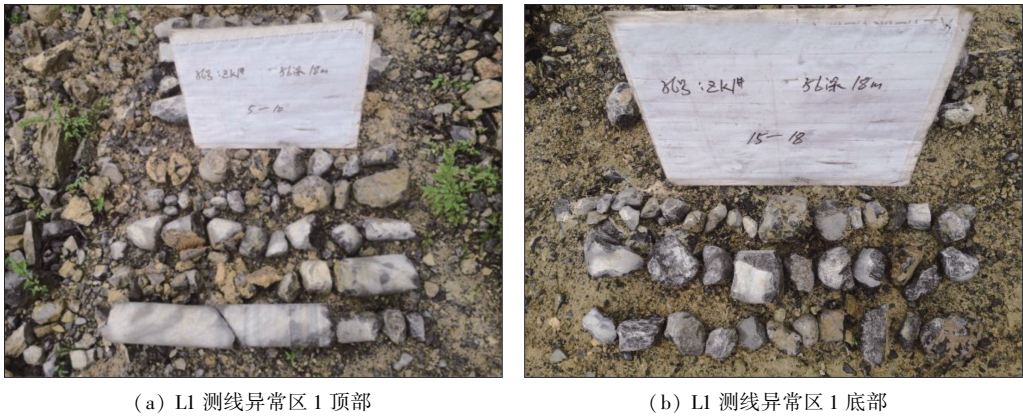


图 7 钻孔 ZK1 穿越物探异常区时岩心特征

Fig. 7 Rock core characteristics of ZK1 borehole crossing geophysical anomaly area



图8 钻孔 ZK2 穿越物探异常区时岩心特征

Fig.8 Rock core characteristics of ZK2 borehole crossing geophysical anomaly area

4 结论与建议

(1) 以山西某场地岩质边坡为例,在系统分析场地边坡工程地质条件的基础上,采用 HPTEM - 18 型高精度等值反磁通瞬变电磁系统设计并实施 36 条物探测线。物探结果表明:边坡上部岩体风化严重、裂隙发育,下部岩体较为完整;边坡基岩上部岩溶现象较为普遍,探测场区内未见构造集中发育带,未见明显富水区域。

(2) 根据瞬变电磁法结果,拟建场地岩溶较为发育,须考虑溶蚀空间对边坡稳定性可能造成的不利影响。针对浅层溶洞,建议采用注浆加固方式,将溶洞充填密实,增加其稳定性。针对暴露在外的岩溶土洞,建议利用片石、混凝土等材料对原充填物进行置换。

参考文献 (References):

[1] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 4 版. 北京:地质出版社,2016.
Zhang Z Y, Wang S T, Wang L S, et al. Principles of Engineering Geological Analysis[M]. 4th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2016.

[2] 刘宏,宋建波,王文俊. 岩溶区层状缓倾角岩质边坡变形破坏机制研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(4): 67 - 73.
Liu H, Song J B, Wang W J. Study on the deformation and failure mechanism of sandwich glacis slope in karst region[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, 18(4): 67 - 73.

[3] 夏开宗,刘秀敏,陈从新,等. 考虑突变理论的顺层岩质边坡失稳研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 477 - 486.
Xia K Z, Liu X M, Chen C X, et al. Analysis of mechanism of bedding rock slope instability with catastrophe theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 477 - 486.

[4] 唐尧,王立娟,李力生,等. 地质灾害分布规律及主控要素分析——以甘洛县为例[J]. 中国地质调查, 2024, 11(3): 101 - 107.
Tang Y, Wang L J, Li L S, et al. Analysis of the distribution law and main control factors of geological hazards: A case study of Ganluo County[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(3): 101 - 107.

[5] 朱涛,翟亚锋,翟会君. 浅层顺层滑坡成灾机制分析及其稳定性评价[J]. 中国地质调查, 2023, 10(6): 88 - 94.
Zhu T, Zhai Y F, Zhai H J. Disaster mechanism analysis and stability evaluation of shallow bedding landslide[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(6): 88 - 94.

[6] 张科,杨红宣,范文臣. 基于溶洞随机模型的岩质边坡稳定性评估研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1381 - 1386.
Zhang K, Yang H X, Fan W C. Rock slope stability analysis based on karst cave stochastic model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1381 - 1386.

[7] 师海. 沪昆高速铁路边坡岩溶化岩体力学特性及振动疲劳效应研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
Shi H. Study on Mechanical Properties and Vibration Fatigue of Rock Cutting Slope on Shanghai - Kunming High - Speed Railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.

[8] 钟祖良,王南云,李滨,等. 采动作用下上硬下软型缓倾岩质高边坡变形机理试验研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 509 - 517.
Zhong Z L, Wang N Y, Li B, et al. Experimental study on the deformation mechanism of upper - hard and lower - soft gently dipping rock on high slopes under the mining effect[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 509 - 517.

[9] 刘运思,牟天光,肖洪波,等. 岩溶地区陡峭岩质高边坡动力稳定性分析[J]. 湖南文理学院学报:自然科学版, 2019, 31(1): 74 - 78.
Liu Y S, Mou T G, Xiao H B, et al. Dynamic stability analysis of steep rock high slope in karst area[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2019, 31(1): 74 - 78.

[10] 徐建强,阎宗岭,李海平,等. 黔西岩溶区公路土岩混合边坡致灾模式及调控技术[J]. 公路交通技术, 2019, 35(6): 25 - 30, 42.
Xu J Q, Yan Z L, Li H P, et al. Disaster mode and control technology of soil - rock mixed slope in highway in karst area of western Guizhou[J]. Technology of Highway and Transport, 2019, 35(6): 25 - 30, 42.

[11] 孙茂锐,丁昕,李星,等. 高密度电法和地质雷达在安徽某隧道岩溶探测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2023(3): 53 - 56.
Sun M R, Ding X, Li X, et al. Application of high - density electrical method and ground radar in karst detection of a tunnel in Anhui[J]. Site Investigation Science and Technology, 2023(3): 53 - 56.

[12] 田方正. 无充填型及充水型岩溶的 TGP 与地质雷达响应特征分析[J]. 勘察科学技术,2023(5):60-64.
Tian F Z. Analysis of TGP and geological radar response characteristics of non-filled and water-filled karst cave[J]. Site Investigation Science and Technology,2023(5):60-64.

[13] 祁昌龙. 高速公路岩溶边坡失稳机理及治理措施研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.
Qi C L. Study on Mechanism and Control Measures of Highway Karst Slope Instability[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2022.

[14] 田凯,姚品品,铁永波,等. 地下水渗流场对库区滑坡稳定性影响的数值模拟——以白马库区羊角滩滑坡为例[J]. 中国地质调查,2022,9(4):74-81.
Tian K,Yao P P,Tie Y B,et al. Numerical simulation study of the influence of groundwater seepage field on the stability of landslide in reservoir:A case study in Yangjiaotan landslide of Baimaku area[J]. Geological Survey of China,2022,9(4):74-81.

[15] 杨瑞芳. 辛安泉域岩溶地下水脆弱性评价研究[D]. 太原:太原理工大学,2016.
Yang R F. Study on the Karst Groundwater Vulnerability Evaluation of Xin'an Spring Area[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2016.

Development law of shallow karst in a rock slope based on equivalent antimagnetic transient electromagnetic method

GAO Yanwei¹, HE Huanlin¹, DAI Jun¹, LIU Dangping², CHEN Shuping³, LIU Jianxing¹

(1. China Aerospace Planning and Design Group Co. Ltd., Beijing 102627, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation Design and Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China; 3. Xuzhou China Mining Geotechnical Technology Co. Ltd., Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: The uncertainty and heterogeneity of karst dissolution occurrence space in slope are important factors affecting the stability of rock slope. First, the impact mechanism of karst development on the stability of rock slopes was analyzed from three aspects, that is damage to the integrity of rock structure, changes in hydrogeological conditions, and uneven distribution of rock stress. Then, a rock slope in a site in Shanxi Province was taken as an example. On the basis of the systematic analysis of the engineering geological conditions of the slope, the HPTEM-18 high-precision equivalent antimagnetic transient electromagnetic system was used to design and implement 6 geophysical detection lines with the acquisition frequency of 12.5 Hz, superimposing time of 300, and repeating time of 2. According to the detection and interpretation results, it could be seen that the upper part of the slope was seriously weathered with developed fractures, while the lower part of the slope was relatively intact. Karst phenomena were common in the upper part of the bedrock, and the structural concentrated development zone and water-rich area were not seen. The drilling verification results show that the rock cores in the abnormal area interpreted by geophysical exploration were broken, and the fissures were filled with mud. The sudden drop of drilling indicated that the karst development area interpreted by geophysical exploration was accurate and could meet the requirements of engineering design. The research results could provide important reference and guidance for the stability evaluation of karst developed rock slope of this type.

Keywords: equivalent antimagnetic transient electromagnetic method; rock slope; karst development; slope stability; data interpretation

(责任编辑: 刘丹)