

文章编号: 1674—8247(2024)05—0106—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.018

某高速铁路弱膨胀黏性土质路堑边坡变形演化特征

唐宇豪 付开隆 赵文龙 王仕兴

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:山区及丘陵地带高速铁路的修建易引发土质边坡位移变形,严重危害高速铁路安全运营。为研究广西某高速铁路黏性土质路堑边坡变形演化特征、探究边坡变形各项研究方法,本文利用星载合成孔径雷达干涉测量技术圈定边坡形变区域,以物探地震映像法时-频综合分析技术明确异常范围进而指导钻孔布置,辅以监测工作,详细探究研究区土质路堑边坡沉降变形机制。研究结果表明:(1)各项工作均可见由降雨导致小里程位置地基承载力下降,出现严重位移变形,受边坡整体性影响,中间里程位置岩土界面浅,以此为基点形成“翘板作用”引发大里程位置出现轻微上拱;(2)以综合方法为手段,提出以承载力和“翘板作用”两者为诱因共同影响土质路堑边坡位移趋势,为研究区病害整治提供了详实的基础资料,并可作为类似工程参考。

关键词:高速铁路;土质路堑边坡;干涉测量技术;地震映像法;监测;承载力;翘板作用

中图分类号:U238;U213.1

文献标志码:A

106

Evolution Characteristics of Deformation in Weak Expansive Clayey Slopes of a High-speed Railway Cutting

TANG Yuhao FU Kailong ZHAO Wenlong WANG Shixing

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The construction of high-speed railways in mountainous and hilly areas can easily induce displacement deformation of soil slopes, posing a severe threat to the operation safety of high-speed railways. To investigate the evolution characteristics of deformation of clayey cutting slopes along a high-speed railway in Guangxi, China, and to explore various methods for studying slope deformation, this paper employed satellite-based Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry to delineate deformation zones of the slopes. Furthermore, the time-frequency integrated analysis technique of geophysical seismic imaging was used to pinpoint abnormal areas guiding the placement of boreholes, complemented by monitoring activities, to meticulously examine the settlement and deformation mechanisms of the soil cutting slopes in the study area. The study findings reveal that: (1) Rainfall-induced reductions in foundation bearing capacity at the starting chainage position result in severe displacement deformation, with the overall slope integrity influencing a shallow rock-soil interface at the mid-chainage position. This serves as a pivot point for a “see-saw effect,” causing minor upward arching at the ending chainage position. (2) By employing a comprehensive approach, this study proposes that both bearing capacity reduction and the “see-saw effect” act as concurrent triggers influencing the displacement trend of the earth cutting slopes. These findings provide detailed foundational data for the remediation of

收稿日期:2023-11-21

作者简介:唐宇豪(1995-),男,工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科研基金(KDNQ203001)

引文格式:唐宇豪,付开隆,赵文龙,等.某高速铁路弱膨胀黏性土质路堑边坡变形演化特征[J].高速铁路技术,2024,15(5):106-112.

TANG Yuhao, FU Kailong, ZHAO Wenlong, et al. Evolution Characteristics of Deformation in Weak Expansive Clayey Slopes of a High-speed Railway Cutting [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5): 106-112.

issues in the study area and can serve as a reference for similar projects.

Key words: high-speed railway; soil cutting slope; interferometric measurement technology; seismic imaging method; monitoring; bearing capacity; see-saw effect

近年来,随着国家高速铁路网的大规模发展和山区及丘陵地带高速铁路的修建,边坡位移沉降问题随之产生。大量的工程实践表明,当边坡变形量累积到一定程度后,易诱发坡体塌滑灾害进而引发严重的安全事故,对铁路安全运营构成了极大的挑战^[1-2]。边坡变形机制复杂,传统监测手段受到成本及周期影响难以快速实施^[3],且由于场地因素难以进行有效地球物理探测。高速铁路是我国一张闪亮的名片,掌握边坡变形沉降快速观测方法、研究特定工点边坡沉降机制,对于边坡病害整治、保障铁路安全运营具有十分重要的意义^[4]。

高速铁路土质边坡存在不稳定因素^[5],铁路边坡位移及沉降变形传统监测方法单一,目前仅利用水准测量或位移传感器进行变形观测。水准测量或位移传感器虽精准度极高,但由于成本高、观测周期长且现场工作量大,难以有效应用于长大铁路大规模边坡变形普查。针对传统监测手段的不足,本文利用星载合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)进行边坡沉降普查^[6],该技术具有全时段、成本低、快速、覆盖范围广等优点,加之研究区几乎无植被覆盖,InSAR技术适用于蠕变形位移变形特征^[7]。国内外学者针对高速铁路沿线沉降变形以及边坡变形沉降机制问题有着大量的研究应用。葛大庆^[8]、刘欢欢^[9]等利用时序干涉测量技术对京津高速铁路沿线地表沉降机理进行研究;李名语^[10]基于ISBAS-InSAR技术对京雄城际铁路进行沉降监测并分析气候因子相关性。前人研究结果表明,基于长时间跨度的SAR影像具备快速、广域研究地表沉降变形及发展趋势的能力,能够为铁路沿线沉降变形研究圈定大致异常区域。

通过圈定的边坡位移位置进行地球物理探测工作,由于在建工程电磁干扰严重,土质边坡工作范围狭窄,多种方法不具备施测条件^[11-12]。本文利用地震映像法沿边坡脚布置物探测线,并利用魏格纳-威尔分布算法将时间域地震映像时间域资料转化为频率域^[13]。该方法具有无损、快速、抗干扰能力强、软弱层位置分辨率高的特点,魏栋华^[14]等利用魏格纳-威尔分布算法准确快速查找到铁路隧道内岩溶等软弱层分布。经物探地震映像时-频结果可准确快速确定异常位置,为钻孔位置选取提供理论依据^[15],辅以监测数据,详细探究高速铁路土质边坡沉降变形机制^[16],各方法结果展示了边坡各位置变形失稳特征。

1 研究区基本概况

本文研究区位于广西壮族自治区河池市金城江区。金城江区系云贵高原余脉地带,地势自西北向东南倾斜,一般海拔为400~600 m,最高海拔为1 114 m。跨中亚热带向南亚热带过渡的气候带,年平均气温20.4℃,年降水量为1 470 mm,日照充足,气候温和,雨量充沛。研究区位于金城江区西南,属侵蚀-溶蚀作用形成的岩溶浅丘地貌,地形平缓,地面标高220~250 m,相对高差30 m,自然横坡一般为10°~20°。某高速铁路穿梭其间,该铁路设计速度为350 km/h。

研究区位于隧道出口与桥梁间。设计和施工资料表明,该段铁路路基设置为桩板结构,边坡设置抗滑桩及挡土墙,铁路路基桩板结构、抗滑桩及挡土墙均已施工成型。

首先进行研究区地质调绘工作,该区域上覆第四系全新统坡人工填土层(Q_4^{ml}),洪积层(Q_4^{dl+pl})松软土及黏土,下伏二叠系下统茅口组(P_1m)灰岩地层。其中松软土呈软塑状,土质不均,黏性一般,含硅质角砾,具弱膨胀性,该层呈片状或透镜体状多分布于土石界面,厚约0~8 m,局部溶槽内厚度可达16 m。黏土呈硬塑状,黏性较好,土质均匀性较差,含角砾,角砾成分以硅质岩为主,料径一般2~10 mm,可见少量达20~40 mm,含量约为10%~40%,具有高液限、上硬下软特点,基岩面附近受水浸泡易软化,具弱膨胀性,研究区黏土层广泛分布,一般厚10~50 m,局部巨厚可达70 m。据土工试验资料表明,黏土层天然含水量 $\omega=24.55\%$,天然孔隙比 $e=0.81$,液限 $WL=40.82\%$,压缩系数 $av=0.32$,压缩模量 $E_s(V)=5.02$ MPa。

在研究区内取地下水水样作水质分析,水质类型为: HCO_3^- — Ca^{2+} · Na^+ 和 HCO_3^- · SO_4^{2-} — Na^+ · Ca^{2+} 型水。根据TB 10005-2010《铁路混凝土结构耐久性设计规范》^[17],在环境作用类别为化学侵蚀环境时,研究区地下水对混凝土结构无侵蚀性,边坡变形原因排除由水侵蚀作用,混凝土强度满足工程建设要求。因此,本文采用InSAR、物探、钻探、监测等多种手段探究边坡变形机制。

2 InSAR工作

传统位移监测手段在边坡隐患识别中有很大的局限

性,难以高效、广域、快速圈定潜在的地质隐患区。近年来,InSAR 技术已经广泛应用于地质灾害勘察工作,特别是在滑坡、地基沉降等方面已经获得了大量应用实例。本文利用小基线集(SBAS)算法进行时序InSAR 分析工作,该算法选取较短的时空基线进行干涉以减弱 InSAR 处理中的去相关问题,通过设置时空基线的阈值,将 SAR 影像分为若干个小集合,降低了时空失相干的影响,提高了整体的相干性。技术路线如图 1 所示。

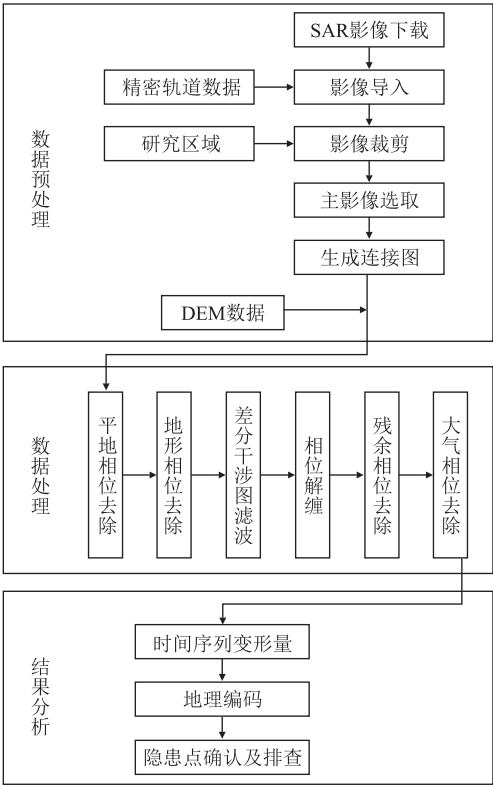


图1 InSAR 工作技术路线图

待研究区边坡、抗滑桩及邻近路基工程成型且未施工后,选取 2020 年 8 月 21 日至 2022 年 6 月 12 日共计 53 景 Sentinel-1A 卫星升轨单视复数(Single Look Complex,SLC)影像,具体参数如表 1 所示。

表 1 SAR 数据主要参数表

卫星	轨道	成像模式	极化方式	重访周期/d	景数/个
Sentinel-1A	升轨	IW	VV 极化	12	53

对于获取的 53 景 SAR 影像,采用如图 1 所示的技术流程进行 SBAS-InSAR 处理工作。在数据预处理工作时,为避免数据失相干,将空间基线阈值确定为 150 m(2%),时间基线阈值确定为 60 d,并将 2021 年 8 月 4 日 SAR 影像数据确定为主影像,将大于给定阈值的干涉对从干涉图网络中剔除,由此可得干涉生成的时空基线图,如图 2 所示。在数据处理工作时,依次

进行平地相位去除、地形相位去除、差分干涉滤波、相位解缠、残余相位去除以及大气相位去除。由此可得反演结果,进行地理编码并输出。通过 SBAS-InSAR 技术对铁路土质边坡区域的时序 SAR 影像数据进行处理后,得到雷达视线(Line of Sight,LOS)方向下的形变结果。研究区出现明显沉降变形,形变监测点附近区域年均形变量达到约 10 mm/a,铁路道床区域未见明显沉降量。利用中国气象数据网数据研究区降雨量统计,得到监测点形变时序曲线及降雨统计(2020 年 8 月—2022 年 6 月),如图 3 所示。

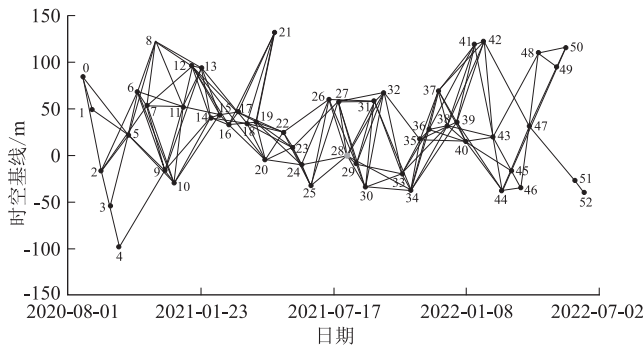


图2 时空基线图

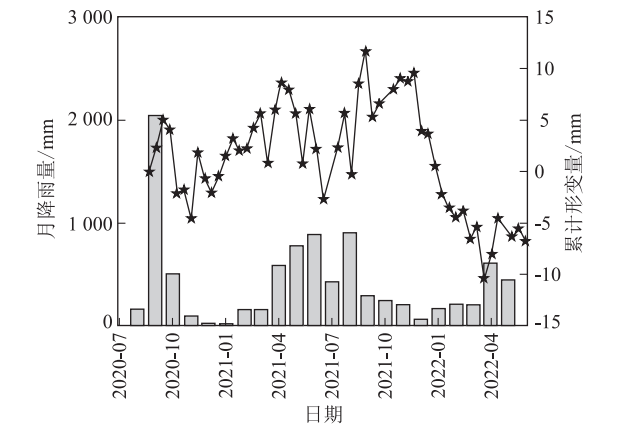


图3 形变监测点时间序列形变曲线及研究区降雨量统计图

由图 3 可知,研究区当地降水量呈现明显季节特征,夏季降水量大,冬季降水量小,而监测点于 2021 年 11 月开始出现明显形变特征,变形量呈现突变下降形态,其与雨季降水量数据并未对应一致,沉降变形原理需通过其他手段进行探讨。通过 SBAS-InSAR 技术能够较好地圈定位移区域。为研究该土质边坡沉降变形机理,本文利用地球物理探测及地质钻探工作,并辅以地表监测工作,探究其失稳机制。

3 地球物理探测

为研究该区域边坡位移机制,沿铁路方向于挡土墙角布置物探测线。测线邻近铁路线路位置,施工电

磁干扰严重,且该区域段落狭窄,多种物探方法因场地原因施测受限。经综合分析本文采用地震映像法进行地球物理探测工作,并利用魏格纳-威尔分布算法将时间域地震映像资料转化为频率域,利用时、频资料进行综合分析判释。

地震映像法在工作过程中使用相同的偏移距,单点激发、单道检波器进行接收,由于采用了相同的偏移距,地震记录上的时间变化主要为地下地质体的反映,拼接起来的地震时间剖面图直观反映了地质体的形态和特征。魏格纳-威尔分布算法是一种应用较为广泛的信号处理方法,该方法利用魏格纳-威尔分布函数将时间域信号转化为频率域,其物理实质是获取地震信号的魏格纳-威尔分布来计算其时频分布。相比较传统傅里叶变换,该方法可以准确把信号描述为时间和频率的二维函数,反映出信号频率随时间的变化,能够更加直观反映出里程位置瞬时频率的精确变化。魏格纳-威尔分布定义为:

$$\omega(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中: $z(t)$ ——原始地震信号;
 t ——时间(s);
 f ——频率(Hz);
 $z^*(t)$ —— $z(t)$ 的共轭复数。

地震映像时-频分析技术内外业工作流程如图4所示。首先获取地震映像外业原始数据,对该数据抽取共偏移道集、进行炮点编辑、能量均衡以及滤波后,获得时间剖面资料,并通过魏格纳-威尔分布算法将时间域资料转化为频率域,利用时-频资料综合分析解释。由上述流程可得到的地震映像时间剖面和瞬时频率剖面,如图5所示。

由图5(a)可知,时间剖面里程000~023位置仅出现两层地震波反射同相轴,其对应为地表锤击直达波与地表混凝土填充底界面反射波,未见深部地层反射波信号;而在里程023~050位置,深部岩层反射波信号较明显,从浅至深地震映像时间剖面上可见分别存在直达波、混凝土底界面反射波、黏土层底界面反射波。由图5(b)可知,瞬时频率剖面中间段023~050里程位置瞬时频率相对较高,作为频率背景场,000~023、050~058位置地下岩层瞬时频率相对较低,频率降至240 Hz以下,反映地下岩层基岩面较低,整体呈现低频特性。

地球物理工作进一步明确了地下地质体异常位置,000~023位置时间剖面上可见深部反射波信号缺失且瞬时频率整体相对较低,表明该段黏土层厚度急剧增加,造成检波器无法接收到深部反射波信号,黏土

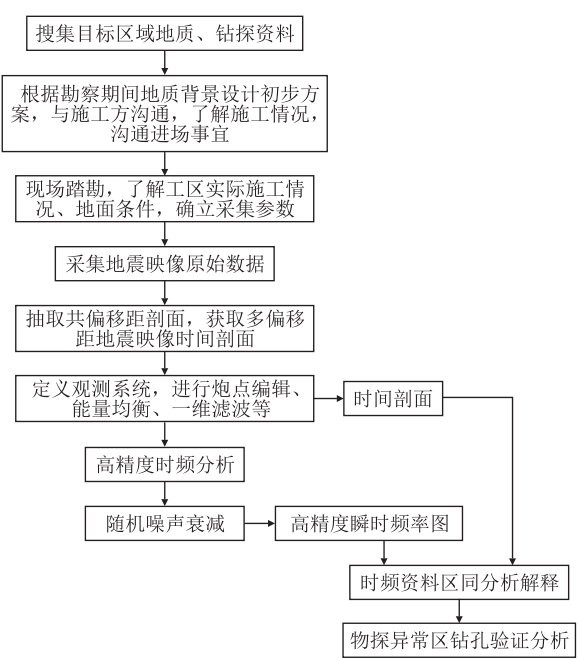


图4 地震映像时-频分析技术内外业工作流程图

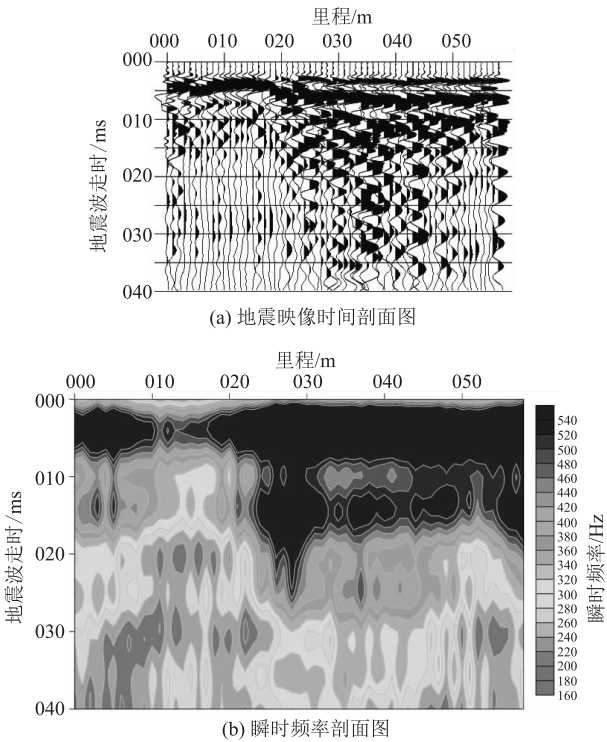


图5 地震映像时-频分析结果图

层相对于基岩的低频特性造成该段瞬时频率整体呈现低频特征。地球物理探测结果为钻探位置的选取提供了依据。

4 钻探及监测工作

为进一步验证地球物理探测结果,于边坡坡脚进行钻孔工作。本文于测线006、014、021、027、035、052

位置进行钻孔工作,钻探结果显示地下岩层在小里程000~023位置黏土、松软土等覆盖层较厚,其深度达40~52 m,呈漏斗状分布,在014位置所示覆盖层厚度达到最大。023~033段岩土分界面急剧变化,在033位置岩土界面埋深最浅,此后在033~060段岩土界面厚度又逐渐增大至30 m。下伏茅口组灰岩在小里程

端溶洞、溶蚀裂隙发育。

2022年6月4日至9月16日对边坡进行了位移监测,设9个观测点a~i,对应物探测线里程位置分别为010、015、020、025、030、035、040、045、052,分别观测 x 、 y 、 z 3个方向的形变量,如图6所示。

由图6可知,土质边坡整体沿 x 、 z 方向位移量较大,

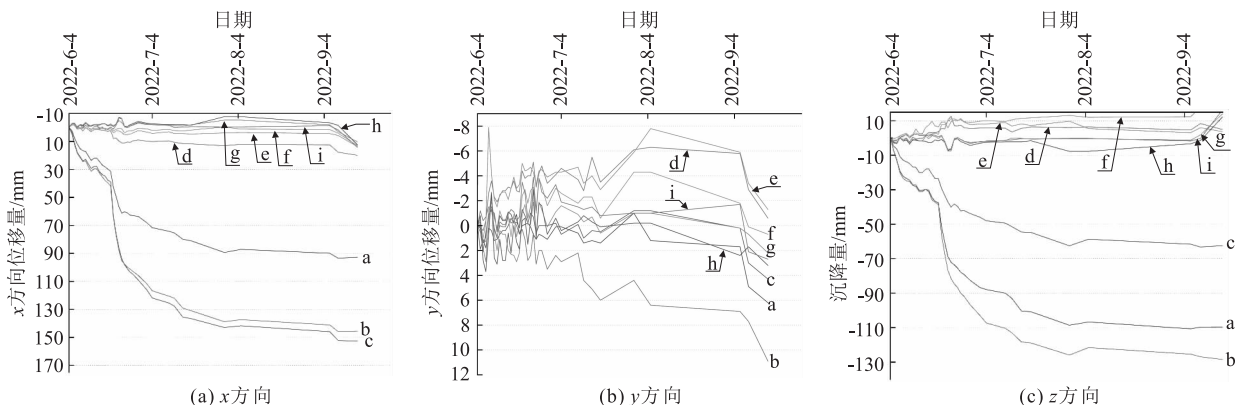


图6 边坡变形量曲线图

特别是小里程方向a、b、c三点变形量较大,且位移变形时间集中在2022年6—8月,对应当地雨季。 y 方向受到抗滑桩及挡土墙影响,变形量较小,对线路侵限影响较小。

小里程端(a~c点)为物探异常区,该段黏土层厚,呈漏斗状分布。钻探结果揭示下伏灰岩溶蚀裂隙发育,推测在6—8月雨季期间,黏土经溶蚀裂隙不断流失造成地基承载力不断减弱,对上伏土质边坡承载力逐渐减小。受抗滑桩和挡土墙对线路方向的保护, y 方向位移量较小。因此小里程端在雨季期间整体沿 x 、 z 方向不断位移,在8月后,随着降雨量的降低,小里程端变形量逐渐降低。

大里程端(f~i点)物探及钻探资料揭示,该段黏土层厚度呈不断增长趋势,土石界面由20 m逐步下降至30 m,灰岩溶蚀裂隙不发育。在6—8月雨季期间, x 方向保持整体稳定,位移量较小,但在此期间 z 方向出现轻微上抬倾向。推测中间里程位置黏土层厚度锐减至最低,由于小里程下沉影响,以中间里程位置为“支点”带动大里程端出现轻微上翘趋势。

5 边坡失稳机制探讨

通过对研究区土质边坡及邻近位置进行地质调绘,发现研究区地下水对混凝土结构无侵蚀性,采用多种方法(包括InSAR、物探、钻探以及位移监测工作)对于边坡失稳机制进行研究^[18]。首先在研究区进行InSAR工作,结果表明在研究区存在位移变形异常,形变监测点附近区域年均形变量达到约10 mm/a。由此

在土质边坡坡脚进行物探工作,根据地震映像时-频剖面,可见小里程方向存在物探异常区,其深部反射波能量较低且呈现低频特征,整体频率低于240 Hz。通过物探结果指导钻孔孔位布置,钻孔结果可见小里程黏土、松软土等覆盖层厚度达到40~52 m,中间里程黏土覆盖层厚度突降至20 m,大里程位置黏土覆盖层厚度逐渐增加至30 m。等间距布置9个位移监测点,可见6—8月雨季期间小里程端 x 、 z 方向位移量达到150 mm,8月后降雨量减少,该段变形量随之降低至5 mm内。中间里程位置在相同时间范围内变化量较小,各方向变形值介于-8~8 mm。而大里程端在6—8月雨季期间, x 方向保持整体稳定,位移量较小, z 方向出现轻微上抬倾向,上抬幅度约10 mm。

通过现场各项工作结果,可见该段土质路堑边坡存在失稳变形现象,借助多种方法对边坡变形演化特征进行综合分析,得到以下推论:

(1)小里程端下伏灰岩溶蚀裂隙发育,推测在6—8月雨季期间,黏土经溶蚀裂隙不断流失造成地基承载力减弱,造成上伏弱膨胀粘性土边坡承载力逐渐减小^[19-20]。受抗滑桩和挡土墙对线路方向的保护, y 方向位移量较小。因此,小里程端在雨季期间整体沿 x 、 z 方向不断位移。

(2)小里程端因承载力的降低造成沿 x 、 z 方向的急剧变形,以地下弱膨胀黏土层为整体,中间里程位置黏土层厚度减至最低,由此位置为支点形成类似“翘板”作用,带动大里程端出现轻微上翘趋势。

降雨导致的小里程位置地基承载力的下降、中间

位置基岩面为支点的“翘板作用”,造成研究区黏性土质路堑边坡非均匀变形。

6 结论

针对研究区高速铁路土质边坡变形沉降问题,本文采用地质调绘、时序干涉测量、地球物理探测、钻探、监测等多种方法,对研究区土质路堑边坡变形演化特征进行综合分析,得到主要结论如下:

(1)采用时序干涉测量能突破传统监测手段周期长、效率低的局限,能够高效、广域、快速圈定出变形异常区,采用 SBAS-InSAR 技术能够较好识别高速铁路土质路堑边坡变形区域。

(2)地震映像时-频分析方法适用于浅层岩土界面追踪,研究区中间里程位置松软土及黏土层较薄,地震映像法时间域剖面可见明显土石界面反射波同相轴,瞬时频率较高;小里程位置呈漏斗状分布,造成地震映像时间域剖面土石界面反射波同相轴缺失,瞬时频率呈现低频特征。该结果为钻孔布置提供了理论依据。

(3)经钻孔和监测结果综合分析可知,降雨导致小里程位置黏性土不断流失,进而引起地基承载力下降。以地下弱膨胀黏土层为整体,中间位置基岩面为支点的“翘板作用”,造成研究区黏性土质路堑边坡各位置非均匀变形。

(4)建议在小里程位置进行沉降处理措施,防止位移变形,在中间里程位置进行整体加固处理,避免其出现开裂,引起边坡失稳。

参考文献:

- [1] 刘国栋. 降雨影响下黄土边坡挡土墙工程的后评价研究[D]. 西安:长安大学, 2023.
LIU Guodong. Post-evaluation Research on Retaining Wall Engineering of Loess Slopes under the Influence of Rainfall [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [2] 田辉, 龚建辉, 朱曦. 高陡边坡桥台锥坡垮塌病害成因及加固措施[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 100-103.
TIAN Hui, GONG Jianhui, ZHU Xi. Cause of Collapse and Reinforcement of Truncated Conical Slope of the Abutment on High and Steep Slopes [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 100-103.
- [3] 唐光民, 戴可人, 卓冠晨, 等. 基于 InSAR 相位梯度叠加的毛尔盖库岸滑坡隐患快速识别[J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1096-1105.
TANG Guangmin, DAI Keren, ZHUO Guanchen, et al. Rapid Identification of Potential Landslides in the Maoergai Reservoir Based on InSAR Phase Gradient Stacking [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(5): 1096-1105.
- [4] 崔维孝. 雅万高速铁路泥页岩路堑边坡工程对策研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4): 99-103.
CUI Weixiao. Study on Engineering Countermeasures for Shale Cutting Slope of Jakarta-Bandung High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 99-103.
- [5] 张建, 李江腾, 林杭, 等. 降雨触发浅层坡体失稳的迟滞现象及其与土质参数的关联性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 150-157.
ZHANG Jian, LI Jiangteng, LIN Hang, et al. Delay Phenomenon of Shallow Slope Failure Triggered by Rainfall and Its Correlation with Soil Parameters [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 150-157.
- [6] 张浩, 杨晓琳, 马海涛, 等. 基于地基干涉雷达的含水土质边坡变形监测研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(11): 1154-1163.
ZHANG Hao, YANG Xiaolin, MA Haitao, et al. Deformation Monitoring of Water Bearing Soil Slope Based on Ground Interferometric Radar [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(11): 1154-1163.
- [7] 戴可人, 沈月, 吴明堂, 等. 联合 InSAR 与无人机航测的白鹤滩库区蓄水前地质灾害隐患广域识别[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2069-2082.
DAI Keren, SHEN Yue, WU Mingtang, et al. Identification of Potential Landslides in Baihetan Dam Area before the Impoundment by Combining InSAR and UAV Survey [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2069-2082.
- [8] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 949-956.
GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 949-956.
- [9] 刘欢欢, 张有全, 王荣, 等. 京津高铁北京段地面沉降监测及结果分析[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2424-2432.
LIU Huanhuan, ZHANG Youquan, WANG Rong, et al. Monitoring and Analysis of Land Subsidence along the Beijing-Tianjin High-speed Railway (Beijing Section) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2424-2432.
- [10] 李名语, 李政, 姚京川, 等. 基于 ISBAS-InSAR 的京雄城际铁路建设期区域沉降监测及气候因子相关性分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(11): 71-81.
LI Mingyu, LI Zheng, YAO Jingchuan, et al. ISBAS-InSAR-based Ground Subsidence Monitoring and Climatic Correlation Analysis during Construction Period of Beijing-Xiong'an Intercity Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(11): 71-81.
- [11] 周越. 典型边坡滑坡地球物理特征与演化机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
ZHOU Yue. Research on Geophysical Characteristics and Evolution Mechanism of Typical Slope Landslides [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [12] 彭冬菊. 边坡地质灾害隐患探测方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
PENG Dongju. Research on Detection Methods of Geological Hazards

- on Slopes[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [13] 魏栋华, 许多, 曹云勇. 识别隐伏岩溶的魏格纳-威尔分布改进方法[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2397-2401.
WEI Donghua, XU Duo, CAO Yunyong. Hidden Karst Identification with Modified Wigner-Ville Distribution Method[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(6): 2397-2401.
- [14] 魏栋华. 地震映像高精度时频分析方法在铁路隧底隐伏岩溶识别中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(1): 46-52.
WEI Donghua. Application of Seismic Image High-precision Time-frequency Analysis Method in Identification of Hidden Karst at the Bottom of Railway Tunnel[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45(1): 46-52.
- [15] 唐宇豪, 魏栋华, 索朗, 等. 地震映像法和地质雷达法在铁路隧底岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(5): 665-670.
TANG Yuhao, WEI Donghua, SUO Lang, et al. Application of Seismic Imaging Method and Ground Penetrating Radar Method in Karst Detection at the Bottom of Railroad Tunnels[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(5): 665-670.
- [16] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651-1659.
XU Qiang. Understanding and Consideration of Related Issues in Early Identification of Potential Geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1651-1659.
- [17] TB 10005-2010 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S].
TB 10005-2010 Durability Design Code for Railway Concrete Structures[S].
- [18] 齐永正, 张航, 马文刚, 等. 复杂工况土质边坡的失稳破坏特征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6190-6196.
QI Yongzheng, ZHANG Hang, MA Wengang, et al. Characteristics of Soil Slope Collapse under Complex Conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 6190-6196.
- [19] 周孝鑫, 谭钦文, 林志果, 等. 京广铁路 K1219 路基土质边坡深层滑移失稳机制与整治对策[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 85-94.
ZHOU Xiaoxin, TAN Qinwen, LIN Zhiguo, et al. Deep Sliding Instability Mechanism and Remediation Measures: The Subgrade Soil Slope along the Jingguang Railway at K1219[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 85-94.
- [20] 连继峰, 罗强, 蒋良滩, 等. 雨水浸润软化下路基土质边坡浅层稳定分析[J]. 铁道学报, 2017, 39(4): 101-108.
LIAN Jifeng, LUO Qiang, JIANG Liangwei, et al. Stability Analysis of Shallow Soil Slope under Effect of Rainfall Infiltration[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(4): 101-108.

(上接第86页)

- [7] 周清, 王奉伟. 灰色预测模型背景值改进方法比较分析[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 231-234.
ZHOU Qing, WANG Fengwei. Comparison and Analysis of Background Value Optimization for Grey Prediction Model[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2015, 38(2): 231-234.
- [8] 严雪晴. 基于灰色模型的广州港吞吐量预测[J]. 天津航海, 2023(1): 28-30.
YAN Xueqing. The Throughput Forecasting of Guangzhou Port Based on Grey Model[J]. Tianjin of Navigation, 2023(1): 28-30.
- [9] 邢笑琦, 刘海峰. 基于灰色预测模型对J省大病保险基金的现状分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2022(22): 57-60.
XING Xiaoqi, LIU Haifeng. Analysis on the Current Situation of Serious Illness Insurance Fund in J Province Based on Grey Prediction Model[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2022(22): 57-60.
- [10] 徐庆儒. 基于灰色预测模型的农村居民人均可支配收入预测研究[J]. 农业与技术, 2022, 42(18): 171-174.
XU Qingru. Study on the Prediction of Rural Residents' Per Capita Disposable Income Based on Grey Prediction Model[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(18): 171-174.
- [11] 柴乃杰, 周文梁. 基于无偏灰色组合动态模型的铁路客运量预测研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(2): 10-15.
CHAI Naijie, ZHOU Wenliang. Research on Forecasting Railway Passenger Flow Based on Unbiased-gray Combined and Dynamic Model[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(2): 10-15.
- [12] 潘丽, 李林. 基于灰色马尔科夫模型的上海铁路客运量预测[J]. 物流科技, 2019, 42(3): 99-102.
PAN Li, LI Lin. Passenger Traffic Forecast of Shanghai Railway Based on Grey Markov Model[J]. Logistics Sci-Tech, 2019, 42(3): 99-102.