

胡志刚, 周湘君, 周恺. 风化岩节理边坡顺层滑坡监测与稳定性仿真分析[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 159-167. [HU Zhigang, ZHOU Xiangjun, ZHOU Kai. Monitoring and Stability Simulation of Bedding Landslide of Weathered Rock Jointed Slope[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 159-167]

## 风化岩节理边坡顺层滑坡监测与稳定性仿真分析

胡志刚<sup>1</sup>, 周湘君<sup>1</sup>, 周 恺<sup>2</sup>

(1. 江西省交通设计研究院有限责任公司, 南昌 330052; 2. 中铁八局集团建筑工程有限公司, 成都 611731)

**摘要:** 为了保证顺层滑坡的有效监测, 提升顺层滑坡的监测精度, 实时获取风化岩节理边坡顺层滑坡滑动幅度, 提出风化岩节理边坡顺层滑坡监测方法。根据风化岩节理边坡顺层滑坡结构特征与失稳模式的分析结果, 选择顺层滑坡的监测内容并布设监测点, 安装传感器设备, 通过实时数据传输与处理, 得出顺层滑坡的监测结果, 并判断当前监测数据是否启动了预警程序。此研究以某高速公路风化岩节理边坡顺层滑坡为研究对象, 结合其地质特征, 构建相应的仿真模型, 行顺层滑坡监测方法。仿真与实例测试结果表明: 该监测方法的平均监测误差低于 0.1 mm, 监测精度较高, 可以以监测数据为基础, 计算仿真顺层滑坡样本的量化稳定系数; 该风化岩节理边坡顺层滑坡整体处于基本稳定状态。为该领域的相关研究提供理论和实践参考。

**关键词:** 风化岩; 节理边坡; 顺层滑坡; 滑坡监测; 稳定性分析

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0159-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.18

## Monitoring and Stability Simulation of Bedding Landslide of Weathered Rock Jointed Slope

HU Zhigang<sup>1</sup>, ZHOU Xiangjun<sup>1</sup>, ZHOU Kai<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Communications Design and Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330052, China; 2. Construction Company of China Railway NO.8 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In order to ensure the effective monitoring of bedding landslides, improve the monitoring accuracy of bedding landslides, and obtain the sliding amplitude of bedding landslides of weathered rock jointed slopes in real time, a monitoring method of bedding landslide of weathered rock jointed slope was proposed. According to the analysis results of structural characteristics and instability mode of bedding landslides of weathered rock jointed slopes, the monitoring content of bedding landslides was selected, and monitoring points were set up. Sensor equipment was installed, and the monitoring results of bedding landslides were obtained through real-time data transmission and processing. In addition, whether the current monitoring data has started the early warning program was judged. Taking the bedding landslide of weathered rock joint slope in a highway as the research object, combined with its geological characteristics, the corresponding simulation model was constructed, and the

收稿日期: 2024-08-10

作者简介: 胡志刚(1976-), 男, 工学学士, 高级工程师, 主要从事土木工程(道路与桥梁)研究。

E-mail: gongcanweir@163.com

monitoring method of bedding landslides was implemented. Simulation and test results show that the average monitoring error of this method is less than 0.1 mm, and the monitoring accuracy is high. The quantized stability coefficient of simulated bedding landslide samples can be calculated based on the monitoring data. The bedding landslide of the weathered rock jointed slope is basically stable. It provides a theoretical and practical reference for related research in this field.

**Keywords:** Weathered rock; Jointed slope; Bedding landslide; Landslide monitoring; Stability analysis

## 0 引言

风化岩是在太阳辐射、大气等因素的作用下,表面出现破碎、疏松或内部成分变化现象的岩石。而风化岩节理边坡是以受力后两侧岩块无显著位移的断裂风化岩结构演化形成的边坡<sup>[1]</sup>。在长时间的风化作用下,风化岩节理边坡表面逐渐光滑,进而形成顺层滑坡,节理边坡顺层滑坡的抗力较小,发生滑坡灾害的概率较高。

为了降低滑坡灾害的发生概率,设计并开发风化岩节理边坡顺层滑坡监测方法。首先,通过边坡监测可对滑坡的滑移范围以及情况进行初步判断,如果边坡出现明显的滑动现象,可以通过总结监测资料,如降雨、地震等因素,获取被监测边坡的作用情况机理;其次,在已变形的坡体表面进行施工时,将边坡监测方法作为辅助工具,可以保证工作人员的施工安全;最后,边坡监测方法的设计与应用还能够作为检验边坡工程治理效果的评价手段之一,为滑坡的滑动现象提供预警,及时采取适合的补救措施。由此可见,边坡监测方法作为一种有效防止边坡失稳灾害的手段,在各类边坡工程中具有较高的应用价值。

孙磊<sup>[2]</sup>为解决含软弱夹层的顺层岩质边坡失稳问题,计算得出该边坡的剩余下滑力,设置抗滑桩和锚杆框架梁等综合处治措施,处治效果较为理想。李友<sup>[3]</sup>基于反演力学参数,合理选择支挡位置,确定滑坡处治方案,做好滑坡周围的截排水等综合措施,为其他类似工程提供了借鉴和参考。凌晴等<sup>[4]</sup>针对滑坡稳定性评价不全面的问题,综合工程地质信息、地下水情况,提出了一种黄土滑坡稳定性评价方法。结合多源异构数据,构建三维滑坡地质模型,利用GNSS监测数据,结合工程地质数值模拟手段,对滑坡内部、外部变形信息进行全面的分析与评价,有效提升了评价结果的全面性与可靠性。Shirani<sup>[5]</sup>利用合成孔径传感器与差分干涉合成孔径雷达采集轨道雷达图像序列,

应用滑坡探测和测绘的雷达处理技术,分析研究地区的滑坡图像,可以在大范围内以高精度连续检测和监测小型陆地运动,且检测到的滑坡分布状态与现场调查之间具有相对较好的一致性。

然而上述方法没有针对顺层滑坡进行有效监测,存在监测精度低等问题,无法最大程度地保证顺层滑坡的稳定性,因此,本文对影响风化岩节理边坡顺层滑坡稳定性的所有影响因素以及滑坡的实时受力与位置信息进行采集、分析,监测当前滑坡滑动幅度的同时,判定其稳定性,从而提升监测方法的应用性能。

## 1 风化岩节理边坡顺层滑坡监测方法设计

风化岩节理边坡顺层滑坡监测是在滑坡地质灾害发生之前,对滑坡易发区的地形、地质结构进行观测,分析记录滑坡发生的条件及引发的其它地质灾害。对滑坡易发区进行滑坡监测,可提高其防灾水平和预警能力,达到治理滑坡易发区的目的。针对滑坡体的环境条件与特点,监测锚杆应力、深层水平位移等数据的变化,客观评价方案的合理性,分析边坡内部结构及位移,了解边坡的稳定性。

### 1.1 分析风化岩节理边坡顺层滑坡结构特征与失稳模式

顺层滑坡是滑坡失稳形式的一种,这种失稳方式主要是受到风化岩节理边坡上部滑体自身重力的影响,打破原有的受力平衡状态,通过增加滑面的倾斜角度实现滑坡整体应力的增加,当倾斜角度高于临界值,且自身重力分量大于滑面与滑体之间的摩擦力时,发生下滑灾害的概率便会增加。以岩层倾角作为坡体结构的划分依据<sup>[6]</sup>,可以将斜坡划分为五种类型,具体的类型划分情况如表1所示。

表1 风化岩节理边坡顺层滑坡分类表  
Table 1 Classification of bedding landslides of weathered rock jointed slopes

结构类型		$\alpha$	$\beta$
平缓层状斜坡	缓倾层状	$[-\infty, 10^\circ]$	$[0^\circ, 180^\circ]$
顺向层状斜坡	中倾外顺向层状	$[20^\circ, 45^\circ]$	$[0^\circ, 30^\circ]$
	陡倾外顺向层状	$[45^\circ, +\infty]$	
横向斜坡	横向	$[0, 90^\circ]$	$[60^\circ, 120^\circ]$
	缓倾外顺向层状	$[10, 20^\circ]$	
斜向层状边坡	斜向倾内层状	$[0, 90^\circ]$	$[120^\circ, 150^\circ]$
逆向层状斜坡	陡倾内逆向层状	$[45^\circ, +\infty]$	$[150^\circ, 180^\circ]$

表1中， $\alpha$ 和 $\beta$ 分别表示的是岩层倾角和岩层倾向与斜坡倾向之间夹角。分别从不同滑坡体的外观特征、受力特点等方面，进行结构特征分析<sup>[7]</sup>。风化岩节理边坡顺层滑坡的形态特征表现为滑坡体、滑坡面、滑坡裂缝、剪切裂缝等。

滑移是滑坡发生后与母岩土完全分离而发生滑动的部分。在滑动行为产生的同时，滑动面会

形成厚度为几毫米至几米的扰动带，含水量一般其上下土层较高，由压碎岩、岩粉、岩屑、土等组成。在具体外貌特征分析过程中，主要是对各个组成要素之间的位置关系进行分析。由于滑坡表面形状的不同，可以将滑动行为分为平面形和圆弧形两种类型，如图1所示。

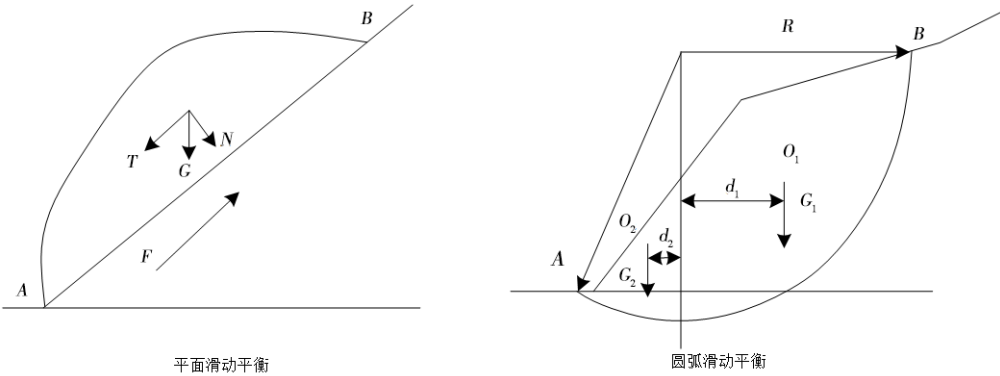


图1 顺层滑坡滑动平衡受力示意图  
Fig.1 Sliding balance force of bedding landslide

图1中，在顺层滑坡的重力分量 $T$ 不低于滑体与滑面之间的滑动阻力 $F$ 时，判定该情况下滑坡处于稳定状态，此时，滑坡的受力情况可以表示为：

$$K = \frac{F}{T} \tag{1}$$

式(1)中， $K$ 表示的是抗滑系数，若计算得出的 $K$ 值不大于1，此时顺层滑坡整体不处于稳定状态，存在发生滑坡灾害的概率。

1.2 设置滑坡监测点并采集异常信息

在监测点布设时，往往要选择能反映滑坡位移变化和滑坡的特点，在各监测点整体空间位移理论上<sup>[8]</sup>，应反映边坡滑体的空间位移。监控点的布设位置应能反映坡体的变形，因此，监测点的设置位置一般选择在坡体的截面位置上，如果最

佳监测点位置存在地质条件极差的情况,可以选择变形破坏明显的坡体断面作为监测点的布设环境。断裂、裂隙等测点布置比较理想。若某一滑坡面积很大,一般不能全部覆盖该滑坡的变形区,为了保证监测精度,可以选择多个断面的多个测点完成测点布置,在测点布设的过程中,尽量避免选择人为活动频繁的位置,最大程度地降低无效监测点的设置数量。按照顺层滑坡的内部结构特点,可以将断

面监测划分为重要监测段和次要监测段两个部分,其中主要监测段的测点布设密度控制在[2 m/个, 5 m/个],而次要监测段的测点密度可以高于5 m/个,但不能小于15 m/个<sup>[9]</sup>。坡度监测的主要依据包括坡度的几何尺寸、坡度监测地质情况等。对同一边坡在监测过程中,各监测仪器应平行布置,并采用多点位移计监测等方法。设置位移计时,各位移仪应保持同一方向,否则会影响监测数据。

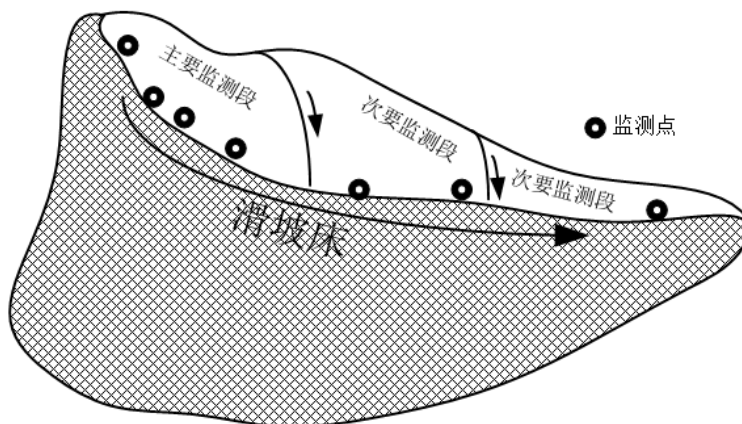


图2 滑坡监测点布置图

Fig.2 Layout of landslide monitoring points

综合考虑岩体内部断面位置、节理发育状况等因素,并根据监测内容在主控断面上布设监测点。结合风化岩节理边坡顺层滑坡结构特征与失稳模式的分析结果,确定内部边坡变形量、滑面土体压力、地下水位以及附加锚索应力等作为顺层滑坡的监测内容。其中边坡变形量的监测采用测斜仪设备,通过测斜仪上实时数据的读取,推测出边坡内部潜在滑面的位置<sup>[10]</sup>。在土体压力监测过程中,需要在抗滑桩两侧安装不同深度的土压力盒设备,完成不同土体深度位置上的压力测试,同时也可以为地表位移监测提供参考数据。

地下水是影响顺层滑坡滑动的重要影响因素之一,如果地下水位过高则会降低滑体与滑面之间的摩擦力,因此对顺层滑坡位置上的地下水位进行监测是十分重要的。在地下水流通管道中嵌入一个感应设备,通过测算该设备与地下水位之间的距离,得出实时地下水位的监测结果。

在完成监测内容选定以及测点布设的基础上,在测点位置上安装相应的监测设备。其中,位移计的安装分为两部分,一是锚头和测杆的安装和连接,二是测力仪本体传感器与测杆的连接与固定<sup>[11]</sup>。在格构梁结构梁的受力传感器部分安装完毕

后,传感器将传感器绑在格构梁内的受力主筋上,格构梁混凝土浇筑完成后将其完全固定。最后在锚具与锚垫板之间安装锚索测力仪,锚索测力仪的结构如图3所示。

利用敲击的方式提高锚索测力仪与锚垫板之间的牢固程度,并在此基础上记录张拉初值<sup>[12]</sup>。同理可以实现其他传感器设备的安装。

### 1.3 实时采集并处理顺层滑坡数据

由于风化岩节理边坡顺层滑坡在短时间内的变化程度不大,因此,设置滑坡数据的监测周期为15 d/次,持续监测时间为60 min。利用安装的监测设备,得出初始监测数据。完成一期监测工作后,获取监测噪声数据,编制噪声变化曲线图<sup>[13]</sup>,实现监测成果的综合分析。在监测工作中主要针对两种异常情况进行数据处理,第一种是由于监测设备故障导致某一个时间段的监测数据缺失,此时可以通过前后两个实测值的内插得出,处理过程可以表示为;

$$x = x_i + \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} (x_{i+1} - x_i) \quad (2)$$



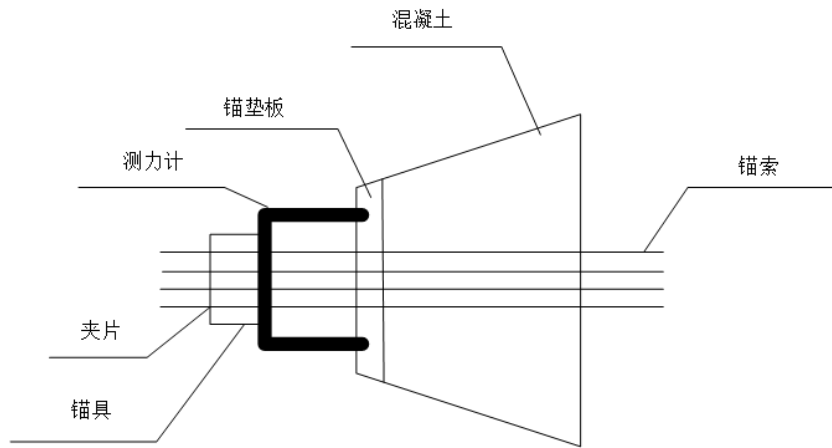


图3 锚索测力仪结构图

Fig.3 Structure of anchor cable dynamometer

式(2)中,变量 $x$ 、 $x_i$ 和 $x_{i+1}$ 分别表示的是不同时刻实际监测值的累计变形量, $t$ 和 $t_{i+1}$ 为监测数据的采集时间。第二种异常情况是由于外界环境或监测设备的破坏,导致获得的监测结果存在明显异常或误差较大的数据,针对这种类型的异常数据,需要对其进行剔除处理。

#### 1.4 风化岩节理边坡顺层滑坡监测

根据历史边坡滑动灾害数据,实现对风化岩节理边坡顺层滑坡的位移预测,并将其作为检测滑坡是否异常的判断标准,进而判断是否需要启动相应的预警程序。在顺层滑坡监测环节,按照滑坡灾害的危险程度,将滑坡预警分为蓝色、黄色、橙色和红色四个等级。如果监测地点的移动总值大于最初估计值,滑动程度随时间的推移产生变化程度较小,此时证明滑坡处于灾害的初始阶段,可以启动蓝色预警<sup>[14]</sup>。如果位移监测结果超过设置的门限值,且位移速率较大,随时间的变

化滑坡的破坏概率高于25%,此时,将启动黄色预警程序。

同理,当滑坡位移变形总量有进一步扩大的趋势,滑坡表面可以观察到明显的裂缝,且裂缝集中度较高时,判定当前滑坡滑动幅度较大,危险系数较高,此时启动橙色预警程度<sup>[15]</sup>。如果滑坡累计的总位移量很大,边坡内部结构的变形速度持续增加,裂缝发育明显且逐步连通,且破坏概率高于70%时,启动红色预警程序。当红色预警程序启动时,需要使用短信或电话的方式及时通知周围人员。

## 2 仿真实验

### 2.1 选择仿真工程样本

此次仿真实验选择某高速公路修建过程中遗留下的K66+232~K66+418路堑边坡作为研究对象,其结构剖面如图4所示。

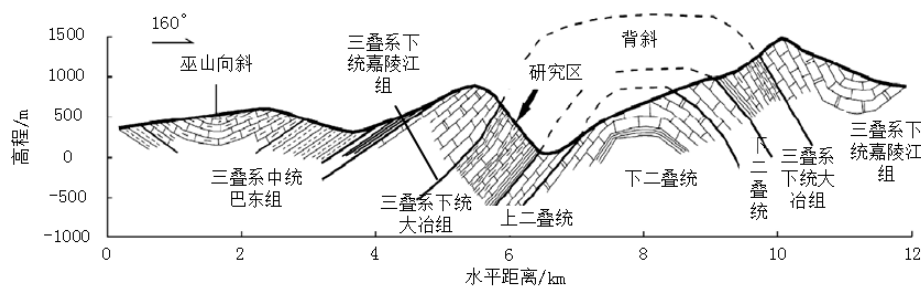


图4 研究区地质构造图

Fig.4 Geological structure of study area

从图4中可以看出,研究区域岩层以单斜风化岩为主,产状几乎为 $330^{\circ}\sim 350^{\circ}$ 。从地势变化方面来看,背斜轴面呈直立、开放的箱形褶皱,轴向 $NE70^{\circ}$ 。在滑坡顶部风化岩的产状比较平缓,产状变化范围为 $[2^{\circ}, 15^{\circ}]$ 。就水文地质特征而言,研究滑坡对应公路路线的冲沟是地下水汇流排泄区,冲沟的两侧坡脚或谷底多见地下水渗流,K66+570右23 m处下降泉流量约15 t/d,局部呈下降趋势。

研究风化岩的物理特征,可以直接分辨出相对完整的风化岩块,将这种类型的碎石或岩块放置到水中不会发生破碎现象,但浸水一、两天后,相对破碎的岩块有可能完全崩解。通过成因研究和分析,可以看出,相对完整的岩块岩层结构没有受到相对稳定的破坏,因此,在水侵作用下不会轻易渗透到岩层中。与之相比,相对破碎的风化岩块极易受到矿山开发等人为活动或外界环境因素的影响,由于山体的过度开发导致内部边坡的结构层出现明显的开裂和扭曲现象,给地下水以及降水提供渗入的条件,造成破坏,最后粉碎。由此可见,选择滑坡体内地质情况复杂,发生顺层滑坡的可能性较大,在该研究区域内选择具有代表性的顺层路堑边坡剖面作为仿真实验的样本剖面原型。

## 2.2 构建顺层滑坡仿真分析模型

采用有限元软件对坡体的工况进行模拟,根据风化岩节理边坡顺层滑坡特征,设置力学参数,将工程区域土坡坡度参数设置为 $20^{\circ}$ ,分析土体稳定性;土体内部的摩擦角设置为 $35^{\circ}$ ,内聚力设置为30 kPa,描述土体内部颗粒之间存在的阻力,计算土体抗剪强度;弹性模量设置为5 MPa,剪切模量设置为3 MPa,评价土体力学性质;由于坡体多为风化岩,将密度可以设置为 $2.5\text{ g/cm}^3$ ,分析土体的黏附性和硬度。将所有工程数据导入其中,构建的风化岩节理边坡顺层滑坡的仿真模型如图5所示。

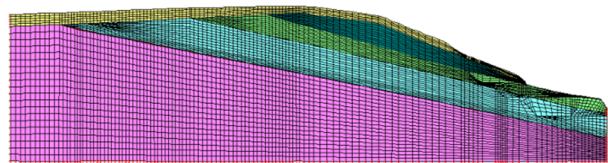


图5 风化岩节理边坡顺层滑坡仿真模型

Fig.5 Simulation model of bedding landslide of weathered rock jointed slope

在较低应变速率下,滑坡的动力力学参数与静态力学参数差别不大,且组成顺层滑坡的风化岩的部分物理量,例如变形模量和泊松比等,不会受到应变率的变化而发生明显变化,因此在稳定性数值的仿真模拟分析实验中,可以将滑坡力学参数看作是静态参数。仿真模型的网格划分的尺寸将受到输入应力的限制,为了保证应力能够在模型介质内部有效传播,以弹性波传播理论为基础,弹性波在横竖两个方向上的传播速度表示为:

$$\begin{cases} v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \\ v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,变量 $E$ 为模型介质的弹性模量, $\rho$ 和 $\mu$ 为材料密度和泊松比。

## 2.3 风化岩节理边坡顺层滑坡监测程序执行与结果分析

在构建的仿真模型中,应用YTDG0720型号的传感器,获取风化岩节理边坡顺层滑坡关键参数信息。并对监测点当日的降雨量、地表水平累计位移、地下水平累计位移、孔隙水压力、地表裂缝宽度数据进行处理和分析,以实时反映边坡的变化情况。通过对数据的长期监测和分析,可以确定边坡变形趋势,为边坡稳定性评估提供科学依据。同时,将数据与预设模型进行对比分析,以确定模型的准确性和可行性。

首先将设计的风化岩节理边坡顺层滑坡监测方法转换成程序代码进行嵌入,并确定监测点的位置,实际顺层滑坡的测点布置情况如图6所示。

在仿真模型的相应位置上,添加触控程序,保证该点的位移数据能够被实时采集。通过对仿真模型位置的调整,模拟风化岩节理边坡顺层滑坡的滑动过程,并记录不同时间滑坡主体的位置数据,以此作为检测监测精度的对比标准数据。通过监测程序的运行,得出顺层滑坡的实时监测结果,如图7所示。

由图7可知,应用YTDG0720型号的传感器对不同日期WY01监测点边坡累计水平位移进行监测。在2020-10-22时,监测点的边坡累积水平位移为5.34 mm;日期为10-23时,监测点的边坡累积水平位移为4.34 mm;日期为10-24时,监测点的边坡累积水平位移为5.67 mm;日期为10-25时,

监测点的边坡累积水平位移为 5.39 mm；日期为 10-26 时，监测点的边坡累积水平位移为 8.29 mm，各日期 WY01 监测点边坡累计水平位移变化较明

显，且监测数据还包括了监测当日的降雨量、地表水平累计位移、地下水平累计位移、孔隙水压力、地表裂缝宽度，检测精度较强。



图6 实际风化岩节理边坡顺层滑坡监测点设置图

Fig.6 Setting of actual monitoring points on bedding landslide of weathered rock jointed slope

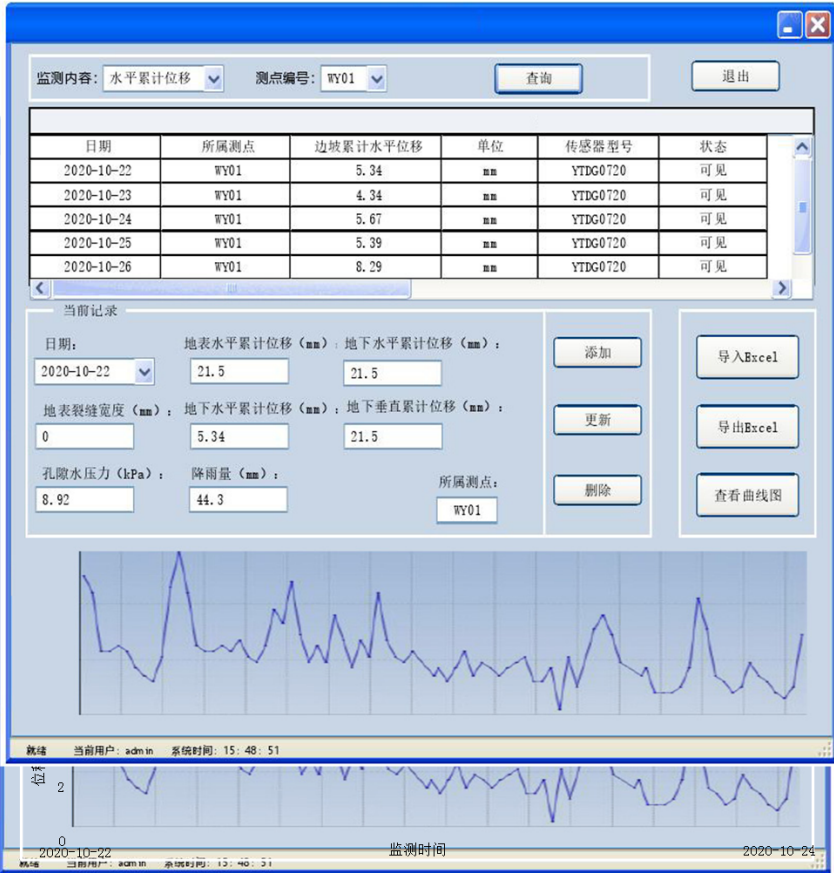


图7 顺层滑坡监测结果

Fig.7 Monitoring results of bedding landslide



同理可以得出，图6中表示的不同测点在不同时刻的位移监测结果，通过与设置的位移数据对比，得出反映顺层滑坡监测精度的测试结果，如表2所示。

表 2 顺层滑坡监测精度测试结果  
Table 2 Monitoring precision test results  
of bedding landslide

测点编号	设置位移量/mm	监测位移量/mm
WY01	5.35	5.34
WY02	6.21	6.21
WY03	8.34	8.34
WY04	7.08	7.08
WY05	5.42	5.41
WY06	5.63	5.62
WY07	4.87	4.87

由表2可知，各监测点的设计位移量与检测位移量的测试结果基本相似，仅WY05、WY06监测点的设置位移量与监测位移量相差了0.01，监测准确性较高，设计顺层滑坡监测方法的平均监测误差为0.043 mm，小于0.1 mm，符合监测方法的应用要求。

3 实例分析

在某高速公路建设工程中，边坡基岩为砂岩、

灰岩、石灰岩及菱镁矿岩等岩石，主要受风化和节理的影响。且该地高速公路穿越多山地带，属于地震密集区，地质构造复杂，其岩石边坡的自然条件差异大，安全问题极为突出。该高速公路所在区域具有季节性强降雨的特点，容易导致山体地下水水环境变化的加剧，对边坡的稳定性构成严峻威胁。应用YTDG0720型号的传感器实际得出的风化岩节理边坡顺层滑坡监测数据为基础，量化计算研究滑坡样本的稳定性。设置滑坡稳定系数作为稳定性的量化计算指标，其表达式为：

$$K_s = \frac{cA + (W\cos\varphi - P_u - P_v\sin\varphi)\operatorname{tg}\psi}{W\sin\varphi + P_v\cos\varphi}$$

(4)

式(4)中，参数*c*为风化岩节理边坡顺层滑坡表面物质的粘聚力， $\varphi$ 和 $\psi$ 对应的是架构面的倾角和摩擦角，变量*P<sub>u</sub>*和*P<sub>v</sub>*分别为滑坡孔隙水和裂隙静水的压力值，另外变量*A*表示的是单位滑体的面积，可以表示为：

$$A = (H - Z)\operatorname{csc}\varphi$$

(5)

式(5)中，*H*对应的是滑坡脚与坡顶之间的高度差。*Z*为坡顶到滑面的深度，可以从顺层滑坡监测结果中直接得出量化数据。

基于图5实际风化岩节理边坡顺层滑坡监测点设置结果，根据*K<sub>s</sub>*值的范围可以将滑坡稳定性分为6个阶段，获取的滑坡稳定性阶段划分结果如表3所示。

表 3 滑坡稳定性阶段划分表  
Table 3 Classification of landslide stability stages

序号	<i>K</i> 值范围	滑坡稳定阶段
1	[0.90, 0.95]	全滑坡大动阶段
2	[0.95, 1.00]	等速滑动阶段
3	[1.00, 1.05]	主滑段处于微动阶段
4	[1.05, 1.10]	蠕动阶段
5	[1.10, 1.20]	固结稳定状态

通过公式5的计算，确定仿真模型中各个测点的稳定性安全系数分别为1.023、1.032、1.153、1.012、1.115、1.066和1.157，经过*K<sub>s</sub>*值的比对可以看出仿真模型的测点WY01、WY02和WY04处于微动阶段，WY03、WY05和WY07处于固结稳定状态，而WY06为蠕动阶段，即风化岩节理边坡顺

层滑坡整体处于基本稳定状态，稳定性较好。

4 结束语

在多因素的影响下，风化作用使岩石变为松散的碎屑物，以降水为主的环境因素会在不同程度上



增加滑动面的剪应力,进而加大滑坡滑动的发生概率,对此,进行风化岩节理边坡顺层滑坡监测与稳定性仿真分析,并获得一下结论:

(1)滑坡体内地质情况复杂,发生顺层滑坡的可能性较大,以此根据历史边坡滑动灾害数据,按照滑坡灾害的危险程度,将滑坡预警分为不同等级,监测滑坡位移变形总量。

(2)选择多个断面的多个测点完成测点布置,对风化岩节理边坡顺层滑坡的位移预测,第一时间获得顺层滑坡的状态信息,在滑坡灾害前及时采取应对措施,将自然灾害带来的负面影响降到最低。

(3)应用有限元软件模拟风化岩节理边坡顺层滑坡的滑动过程,判断滑坡是否处于稳定状态,量化计算研究滑坡样本的稳定性,判断风化岩节理边坡顺层滑坡整体是否处于基本稳定状态。

#### 参考文献

- [1] 陈正东,李正忠,赖勇.基于三维数值模拟的含软弱夹层顺层岩质边坡开挖稳定性研究[J].矿产勘查,2020,11(2):395-402.
- [2] 孙磊.含软弱夹层顺层岩质边坡稳定性分析及处治研究[J].铁道勘察,2019,45(4):53-57.
- [3] 李友.某公路路堑顺层岩质滑坡稳定分析与处治措施研究[J].西南公路,2020(2):7-10.
- [4] 凌晴,张勤,张静,等.融合工程地质资料与GNSS高精度监测信息的黑方台党川黄土滑坡稳定性研究[J].测绘学报,2022,51(10):2226-2238.
- [5] Shirani K, Pasandi M. Landslide monitoring and the inventory map validation by ensemble DInSAR processing of ASAR and PALSAR images (Case study: Doab-Samsami Basin in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran)[J]. Geotechnical and geological engineering, 2021, 39(2):1201-1222.
- [6] 王滋东.顺层岩质边坡稳定性分析及治理措施[J].江西建材,2020,253(2):89-90.
- [7] 张劲松,崔向雷,李贤.麻昭高速公路顺层岩质边坡变形机制分析及治理措施研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,(8):109-111.
- [8] 范昊天,孙少锐,王亚山,等.基于离散元的含软弱夹层岩质边坡滑移机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(3):12-17+30.
- [9] 王瑞.浅谈顺层岩质边坡稳定性分析及治理[J].华北自然资源,2019(5):71-72.
- [10] 万财华,章涛.顺层岩质边坡稳定性分析——以重庆某楼盘边坡为例[J].城市住宅,2019,26(6):159-161.
- [11] 靳静,梁小勇,杨广庆.岩质边坡滑坡治理的现场监测分析[J].公路,2019,64(3):16-21.
- [12] 张巴图,秦宏楠,马海涛,等.基于边坡雷达的滑坡监测预警预报技术研究[J].中国科技成果,2020,21(4):36-39.
- [13] 王海,张梓钦,杨国香,等.五孟高速公路顺层岩质边坡变形破坏模型试验[J].科学技术与工程,2021,21(9):93754-3762.
- [14] 谭淋耘,黄润秋,裴向军.库水位下降诱发的特大型顺层岩质滑坡变形特征与诱发机制[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):302-314.
- [15] 吴多华,刘亚群,李海波,等.地震荷载作用下顺层岩体边坡动力放大效应和破坏机制的振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(10):1945-1956.