

川东巴中市恩阳区近水平土质滑坡破坏模式 及专业监测预警

李乾坤^{1,2}, 苗朝^{1,2}, 程英建^{1,2}, 张勇^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734;
2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川成都 611734)

摘要:巴中市恩阳区属于典型川东北红层区域,近几年大量的人类工程活动及强降雨极易诱发浅表层土质滑坡,对人民的生命财产造成威胁。本文通过对巴中市恩阳区近3年(2020—2022年)新增的25处近水平土质滑坡进行统计分析,建立了区域典型的土质滑坡地质模型:此类近水平土质滑坡的基本特征为岩层倾角和地形坡度均在 10° 以内(多为 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$),呈近水平状,滑体土层厚度前缘薄,后缘厚,且滑坡前缘存在高陡临空面,岩、土分界面明显。在此基础上定性分析了此类滑坡的变形破坏模式:前缘滑移-拉裂,次级剪切滑动,逐级牵引滑移,整体滑动变形。选择区内一处典型的近水平土质滑坡为研究对象,以滑坡前缘和中后部地表位移为主要监测对象,并监测降雨强度,通过GNSS地表位移监测站、裂缝位移计、雨量计等监测设备对滑坡开展专业监测,监测数据表明,近水平土质滑坡的实际变形破坏模式与理论分析结论基本一致。本文的研究结论可为区内同类型滑坡在设计专业监测方案,制定精准防灾避险措施时,提供一定的理论支撑。

关键词:红层;近水平土质滑坡;破坏模式;滑坡监测预警;巴中市恩阳区

中图分类号:P642.22 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)05-0043-09

Damage patterns of near-horizontal soil landslides and professional monitoring and warning in Enyang District, Bazhong City, East Sichuan

LI Qiankun^{1,2}, MIAO Zhao^{1,2}, CHENG Yingjian^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, MNR, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: Enyang District in Bazhong City belongs to the typical red layer area in northeast Sichuan. In recent years, shallow surface soil landslides are very easy to be induced by a large number of human engineering activities and heavy rainfall, which pose a threat to people's lives and properties. In this paper, a typical geological model is established through analyzing the 25 new near-horizontal soil landslides in Enyang District of Bazhong City in the last 3 years (2020—2022). The basic characteristics of such near-horizontal soil landslides are that the dip angle of rock layer and topographic slope are within 10° (mostly $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$), which are nearly horizontal, the thickness of soil layer of the slide body is thin at the front edge and thick at the back edge, moreover, a high and steep free face at the front edge of the landslide exists and the interface between rock and soil is obvious. The deformation and damage mode of the landslide is qualitatively analyzed as follows: leading edge slip-tensioning, secondary shear sliding, step-by-step traction sliding, and overall sliding deformation. A typical near-horizontal soil landslide in the area was selected as the study object, and the leading edge and middle-rear surface displacements of the landslide were taking as the main monitoring objects. The

收稿日期:2023-05-25; 修回日期:2023-09-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.007

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“地质灾害防治技术应用”(编号:DD20230087)

第一作者:李乾坤,男,汉族,1986年生,工程师,工程力学专业,主要从事地质灾害防治技术研究及调查评价工作,四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号,44226118@qq.com。

引用格式:李乾坤,苗朝,程英建,等.川东巴中市恩阳区近水平土质滑坡破坏模式及专业监测预警[J].钻探工程,2023,50(5):43-51.

LI Qiankun, MIAO Zhao, CHENG Yingjian, et al. Damage patterns of near-horizontal soil landslides and professional monitoring and warning in Enyang District, Bazhong City, East Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2023,50(5):43-51.

rainfall intensity was monitored, and the landslide was professionally monitored by GNSS surface displacement monitoring station, fractometer displacement meter, rainfall meter and other monitoring equipment. The results show that the actual deformation and damage patterns of near-horizontal landslides are basically consistent with the theoretical analysis. The findings of this paper can provide some theoretical support for the same type of landslides in the region when designing professional monitoring programs and formulating precise disaster prevention and avoidance measures.

Key words: red bed; near-horizontal soil landslides; damage pattern; landslide monitoring and warning; Enyang District, Bazhong City

0 引言

四川省巴中市恩阳区属于川东北典型红层地区。红层在我国分布广泛,主要指在侏罗纪、白垩纪、三叠纪和古近纪形成的,主色调为红色的泥岩、粉砂岩和砂岩等岩性的一套陆相、湖相及河湖交替相碎屑岩。川东北滑坡主要分为以下2种:一类是近水平($3^{\circ}\sim 10^{\circ}$)岩层平推式滑坡,另一类是缓倾($10^{\circ}\sim 20^{\circ}$)堆积层土质滑坡^[1]。

近水平岩层平推式滑坡,最早由张倬元等^[2]提出其成因模式,认为滑坡后缘裂隙填充水的水平侧压力和滑面底部的浮托力是诱发此类滑坡的主要因素。范宣梅等^[3]对平推式滑坡的启动机制和启动判据公式进行了验证。黄润秋等^[4]提出在平缓地层内产生的大规模的滑坡,是由地下水的顶托、水垫效应和裂隙水压力对构造裂隙的“楔裂”、“撕开”起主导作用而形成的。赵勇等^[5]计算了平推式滑坡的启动水头,得出平推式滑坡的启动条件为临界水头 h_{cr} 小于滑面到地面的距离 d 。郭晓光等^[6]提出U形槽模式多级平推式滑动理论,认为多级平推式滑坡存在牵引后退式和推动前进式2种不同的启动和运动模式。

缓倾堆积层土质滑坡是川东北红层区强降雨后诱发数量最多的一类,2011年的一场强降雨曾引发四川南江县上千处缓倾堆积层土质滑坡^[1]。李江等^[7]对缓倾土质滑坡的发育环境、分布规律和影响因素进行了研究,认为降雨是诱发此类滑坡的主要因素。张明等^[8]认为川东红层缓倾土质滑坡破坏失稳是静水压力和滑带土剪切强度降低共同作用的结果。王维早^[9]通过模型试验得出的结论为:缓倾土质滑坡多发生在3~5 m厚度。成国文等^[10]对万州近水平地层区堆积层滑坡进行了研究,详细分析了其物质来源、结构成因、形成模式以及变形破坏特征,指出了近水平地层的堆积体滑坡存在多级剪切带。周云涛等^[11]研究了特大型近水平崩积层滑坡的破坏特点,认为超孔隙水压力是滑坡破坏的诱因,并推导

了考虑超孔隙水压力的滑坡稳定性系数表达式。

近年来巴中市恩阳区由于受强降雨和人类工程活动的影响,发育了大量的近水平的浅表层土质滑坡,这类滑坡具有坡度及倾角较缓(通常小于 10°),突发性、隐蔽性较强等特点。因此本文在分析滑坡孕灾背景条件的基础上,开展恩阳区境内近水平土质滑坡的地质模型和变形破坏模式研究,并对典型滑坡开展专业监测预警示范。

1 近水平土质滑坡孕灾地质条件

通过现场调查,从地形地貌、滑体结构、地层岩性等方面对巴中恩阳近3年(2020—2022年)新增的25处近水平土质滑坡进行了统计分析,得出该类滑坡的基本特征如下:

(1)滑坡平均坡度在 10° 以内,由于地形坡度较缓,因此这类滑坡表面大多经过农耕改造,呈阶梯状地形,每级阶梯宽度在3~8 m之间(见图1)。



图1 近水平土质滑坡地形特征(摄于滑坡中部)

Fig.1 Topographic features of near-horizontal soil landslides(taken in the middle)

(2)滑体土主要构成物质为含碎石粉质粘土,碎石含量较少,占3%~5%,以粉质粘土为主。滑坡前缘土体较薄,多在0.5~3 m之间,后缘土体较厚,大多在8~12 m之间(见图2)。



图2 近水平土质滑坡土体结构特征(摄于滑坡前缘)

Fig.2 Soil structure characteristics of near-horizontal soil landslide (taken at the front)

(3)滑坡前缘存在天然形成或由人工开挖形成的高陡临空面,临空面高度多在5~15 m之间,岩、土分界面清晰,下伏基岩为厚—中厚层砂岩、泥岩互层,岩层倾角 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ (见图3)。



图3 近水平土质滑坡临空面特征(无人机航拍)

Fig.3 Characteristics of free face of near-horizontal soil landslide (drone photography)

基于以上调查分析结论,建立近水平土质滑坡的地质模型如图4所示。

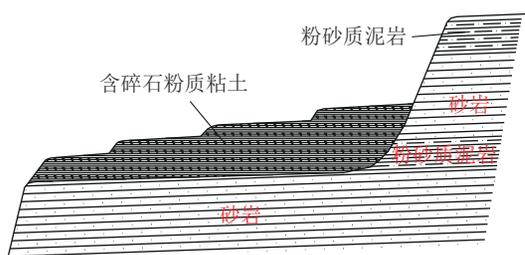


图4 近水平土质滑坡地质模型

Fig.4 Geological model of near-horizontal soil landslide

2 近水平土质滑坡变形破坏模式及诱导因素

2.1 近水平土质滑坡变形破坏模式

(1)启动阶段。滑坡前缘滑移-拉裂,产生局部

失稳、滑塌。由于红层地区坡残积土具有失水易收缩、吸水易膨胀的特性,受大气环境的影响,土体在干湿循环作用下内部产生大量的不规则裂隙。加之滑坡所处斜坡地形平坦,多为农耕地,浅表层土体中还存在大量的农作物根系通道,这些都为雨水入渗提供了良好通道。张群等^[12]对南江红层地区缓倾角浅层土质滑坡降雨入渗深度的研究表明,红层地区考虑大气环境影响的降雨入渗最大深度为5.37 m。而恩阳地区近水平土质滑坡的特征之一便是滑坡前缘土体厚度在0.5~3 m之间。

根据以上分析可知,当发生连续降雨或短时强降雨后,雨水沿土体裂隙和植物根系通道入渗,受大气环境影响,雨水从土体较薄的滑坡前缘区域渗透至岩土界面,在岩土界面处产生滞水,随着雨水在基岩顶面不断汇集,致使岩、土接触面处土体软化,抗剪强度大幅降低,最终在滑坡前缘形成局部失稳、滑塌,并牵引滑坡中后部形成张拉裂缝(见图5a)。

(2)牵引破坏,次级剪切滑动阶段。当滑坡前缘发生局部失稳滑塌时,在土体粘聚力的作用下,牵引滑坡中后部土体,产生拉张裂缝,降雨渗入裂隙后产生较大的静水压力。同时,由于滑坡中后部土体较厚,雨水仅能渗透至土体内部一定深度,从而导致滑坡中后部土体在垂直方向上产生较大的抗剪强度差异,在静水压力的作用下,沿张拉裂缝末端在土体内部形成次级剪切滑面(见图5b)。

次级剪切滑面形成后,由于滑坡前缘土体已经滑塌并形成新的临空面,滑坡中后部土体失去阻滑支撑,在新形成的临空面处剪出,滑动堆积至滑坡前缘,形成新的斜坡地形(见图5c、图6)。

(3)二次滑塌,逐级向后牵引阶段。如图5(c)所示,当滑坡中后部发生次级剪切滑动后,土体堆积至滑坡前缘形成新的斜坡地形。土体滑动后产生了更多的土体裂隙,为降雨入渗提供了良好条件,且相比于原始地形,斜坡坡度增大,前缘土层厚度减小。在降雨作用下,斜坡前缘将再次失稳滑动,产生二次滑塌,二次滑塌的牵引作用使第一次次级滑动产生的张拉裂缝变形加剧,降雨渗入张拉裂缝后产生较大的静水压力,并沿张拉裂缝末端在土体内部形成二次次级剪切滑面。滑坡二次滑塌的牵引作用也会在滑坡后缘形成新的牵引张拉裂缝(见图5d)。

(4)整体滑动变形阶段。二次次级剪切滑面形成后,滑坡后部表层土体发生二次次级剪切滑动,向

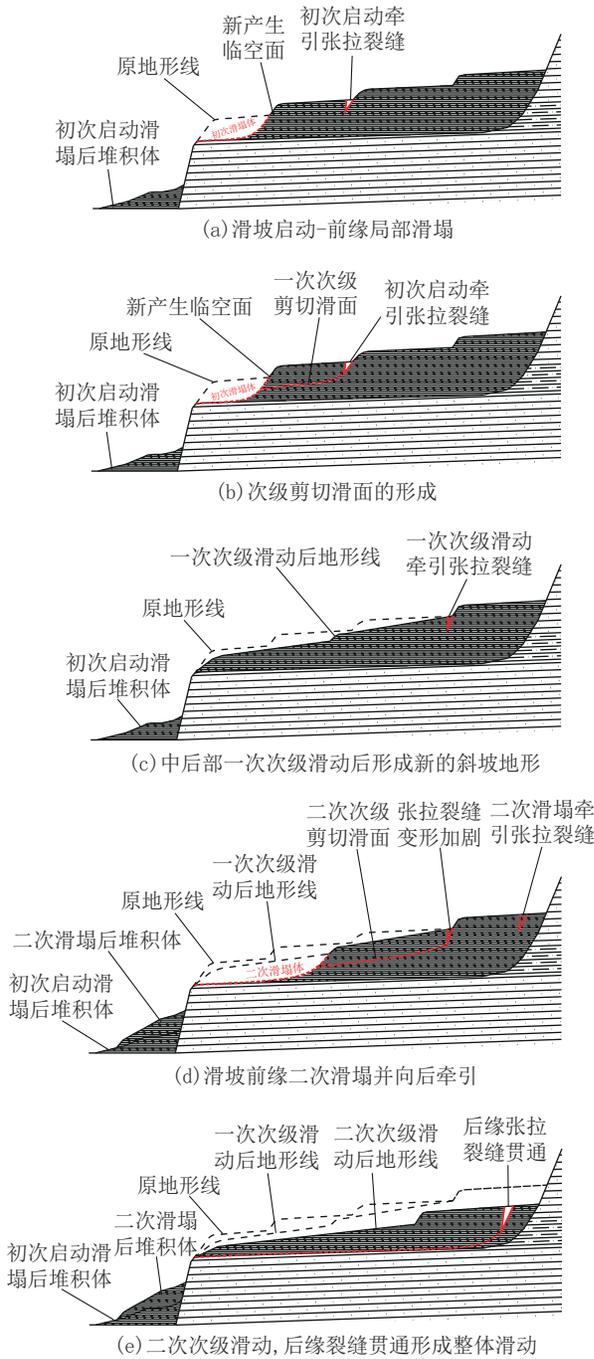


图5 近水平土质滑坡变形破坏模式地质模型

Fig.5 Geological model of deformation and failure pattern of near-horizontal soil landslide

滑坡前缘堆积,二次次级剪切滑动产生的牵引作用使二次滑塌在滑坡后缘产生的拉张裂缝变形加剧并直至贯通,最后在后缘拉张裂缝静水压力和基覆界面滞水的浮托力共同作用下,滑坡产生整体滑动变形(见图5e)。



图6 次级剪切滑动后形成新地形

Fig.6 New topography formed after secondary sliding

2.2 近水平土质滑坡变形破坏诱发因素

对滑坡进行受力分析可知,滑坡发生滑动破坏,需要满足以下2个条件之一:(1)滑坡的下滑力增大,超过阻滑力;(2)滑坡滑面处土体抗剪强度下降导致阻滑力大幅减小。

滑坡下滑力增大的情况,一种是由于降雨导致覆盖层土体呈饱和状态,另一种情况是基于殷坤龙等^[13]对万州地区近水平地层滑坡和堆积体成因机制的研究成果,在滑坡变形破坏前由于蠕变产生后缘裂隙,降雨渗入后缘裂隙后产生较大的静水压力,对滑坡产生额外的近水平推力,从而导致滑坡发生变形破坏。

根据对恩阳区近3年(2020—2022年)新增的25处近水平土质滑坡的调查分析发现,由于其岩层倾角较小(3°~5°),土体重力在滑动方向的分力基本可以忽略。加之在启动前均没有明显的地面变形,后缘也未曾出现拉张裂缝,因此自重增加和静水压力都不是此类近水平土质滑坡启动的主要原因^[14-15]。

通过现场走访和调查,滑坡变形破坏通常发生在2~3天连续降雨或者短时间强降雨后。在降雨初期,通常可见少量雨水从基岩顶面流出,随着降雨的持续,基岩顶面流出的水逐渐浑浊,伴有少许泥沙,当滑坡前缘发生局部滑塌后,可见基岩顶部残留的滑带土呈软塑一流塑状,抗剪强度几乎为零(见图7)。

根据上述分析,可以确定,土体抗剪强度降低导致滑坡阻滑力大幅减小是此类近水平土质滑坡的主要诱发因素。



图 7 基岩顶面滑带残留

Fig.7 Sliding zone residues on top of bedrock



图 8 滑坡全貌

Fig.8 Full view of the landslide

3 典型近水平土质滑坡专业监测预警

3.1 典型近水平土质滑坡分析

选择一处典型的近水平土质滑坡开展地质勘查工作,对滑坡特征进行分析。滑坡位于恩阳区玉山镇,滑坡区属侵蚀剥蚀桌状低山地貌,区内地质构造简单,构造形迹以宽缓褶皱为主,断层不发育。滑坡区平面上呈近梯形状。滑坡所处斜坡坡度 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$,最大高差约 10 m。滑坡前缘以高陡临空面为界,后缘以拉张下挫裂缝处为界,左右边界以剪切裂缝为界,主滑方向 322° 。滑坡区中部长约 80 m,宽约 110 m,面积约 8800 m^2 ,根据勘查结果,滑坡堆积层平均厚度约 4.0 m,估算体积约 $3.52\times 10^4 m^3$,属小型土质滑坡(见图 8)。

滑坡区出露的地层主要为第四系全新统残坡积堆积层(Q_4^{dl+el})和白垩系下统苍溪组(K_1c)基岩。根据钻孔揭示和现场调查,滑体土为含碎石粉质粘土,呈黄褐色,稍湿—潮湿,呈可塑状态,含少量的风化碎石,厚度在 1.5~9 m 之间,属残坡积成因。下伏基岩为砂泥岩互层,细砂岩为厚层层状构造,细粒结构,钙、硅质胶结,岩层优势产状 $155^{\circ}\angle 3^{\circ}$,主要由长石、云母及岩屑等矿物组成。岩体呈弱风化状态,结构完整,强度较高,该层在滑坡区大量分布,为第四系堆积层下伏基岩。细砂岩下部为粉砂质泥岩:呈弱风化,砖红色块状构造,粉砂质结构,层厚 0.5~1.2 m,强度不高,易破碎(见图 9)。

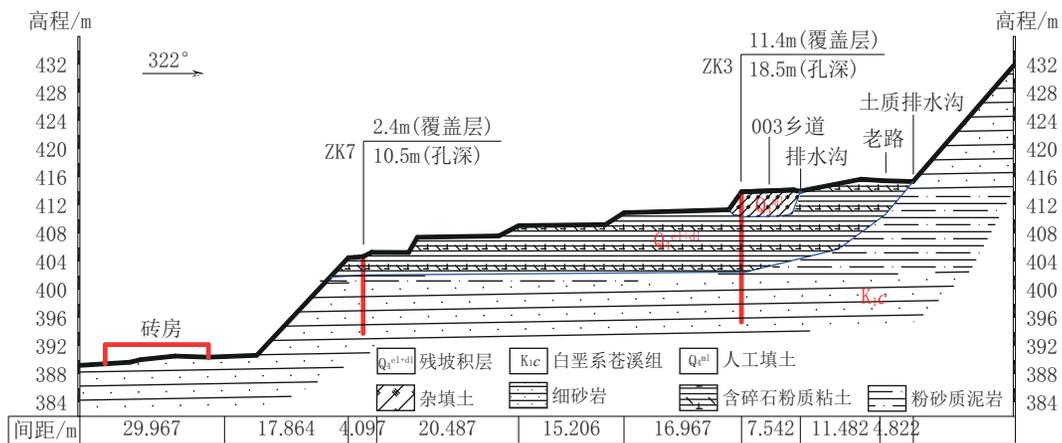


图 9 滑坡地质剖面

Fig.9 The geology profile of the landslide

滑坡变形历史主要有 2 次,第一次为 2018 年 6 月 20 日,受暴雨影响首次出现滑坡迹象,主要表现为滑坡前缘临空面顶部土体向陡崖下方滑落,并于近前缘端形成 2 级滑坡台阶。第二次为 2018 年 6 月

27 日连续降雨后,滑体前缘土体进一步向陡崖下方滑落,堆积至居民房屋背后;滑坡体后缘出现张拉裂缝及地面下挫,滑坡体中部左右两侧居民房屋出现拉张裂缝。

3.2 专业监测预警设备布置

根据滑坡勘查结论以及滑坡变形破坏情况,滑坡覆盖层较薄,其变形破坏主要集中在浅表层的土体中,因此位移监测主要选择能够准确反映地表变形的设备。此外,降雨是近水平土质滑坡的主要启动因素,因此有必要设置较为灵敏的雨量监测设备。综合以上分析,选择GNSS(Global Navigation Satellite System)地表位移监测站、裂缝位移计、雨量计作为主要监测设备。

为监测该滑坡的变形趋势和规律,在滑坡主剖面上设置地表位移监测站和裂缝位移计。根据近水平土质滑坡破坏模式(图5)的分析,该滑坡具有前缘牵引、多级滑动的特点,因此,针对滑坡出现的前缘变形、陡坎或者裂缝对监测设置由滑坡前缘向后缘布设^[16]。在滑坡初次启动后形成的滑坡台阶处布置GNSS01位移监测设备,追踪滑坡的二次滑动变形情况;在滑坡中后部布置GNSS02位移监测设备,用于追踪滑坡中后部在前缘发生变形后受到的牵引破坏情况;在滑坡后缘裂缝处,布置裂缝位移计,用于采集后缘裂缝的张拉变形数据;在滑坡危险区范围以外布置压电式雨量计和GNSS设备监测基站。监测设备布置如图10和图11所示。

3.3 专业监测预警数据分析

GNSS的位移监测原理为:当GNSS监测站点处的滑坡地表发生变形时,监测设备与监测基站进行数据交换,通过正北和正东2个方向的坐标变化,计算出变形后的位置与初始位置的相对变化,然后换算为在正北和正东方向的位移变化,从而得出滑



图10 监测设备布置

Fig.10 Layout of monitoring equipment

坡在水平方向的位移变化情况。以正东和正北方向构成的平面为基准,在垂直于该平面的方向上测量GNSS监测站点坐标变化,从而得出滑坡在竖直方向的位移变化情况。

选择2022年1月1日—12月31日全年的数据进行处理分析,数据间隔为5d,取当日5次数据的平均值。由于滑坡主滑方向为322°,因此滑动方向的位移可分解为正西和正北方向,数据分析时需将GNSS测得的正东方向数据取正后得到滑坡正西方向的位移,然后用2个方向位移分量求出滑动方向的水平合位移。

监测预警模型采用许强等^[17-19]提出的基于变形观测的滑坡4级综合预警模型(图12),该模型将重力式滑坡的变形分为初始变形、等速变形、初加速、匀加速和临滑5个阶段,预警等级分为蓝色、黄色、

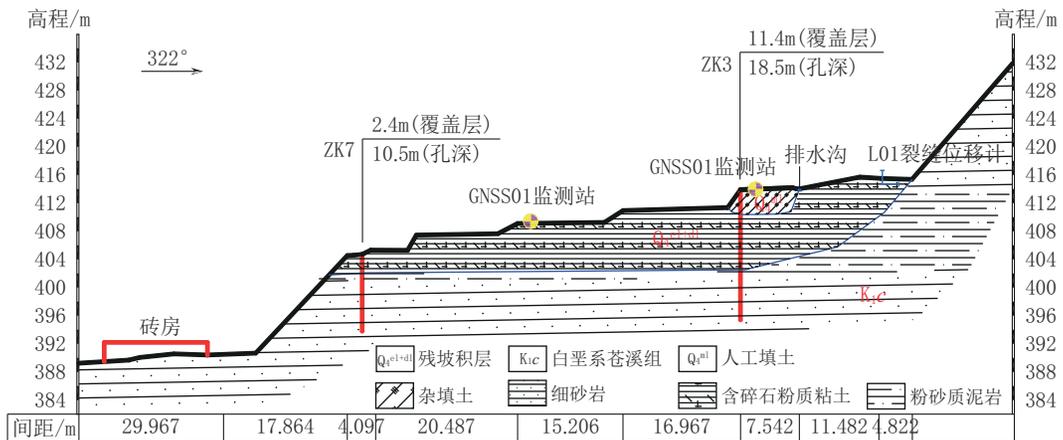


图11 监测设备布置剖面

Fig.11 Profile of monitoring equipment layout

橙色和红色 4 个预警等级。

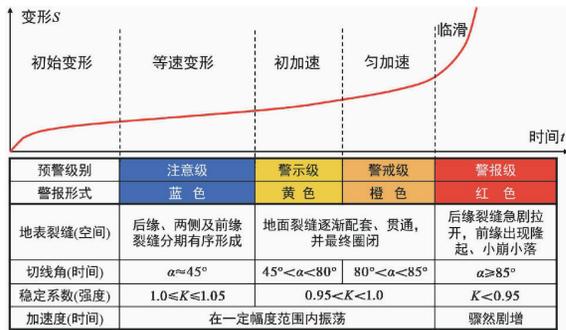
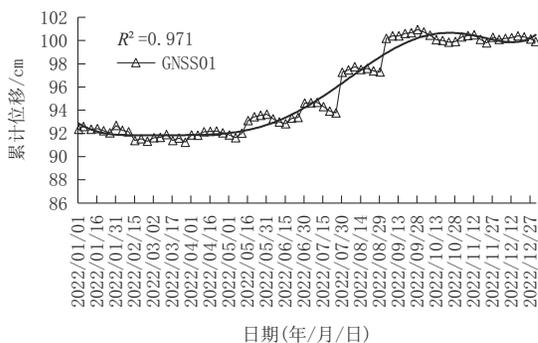


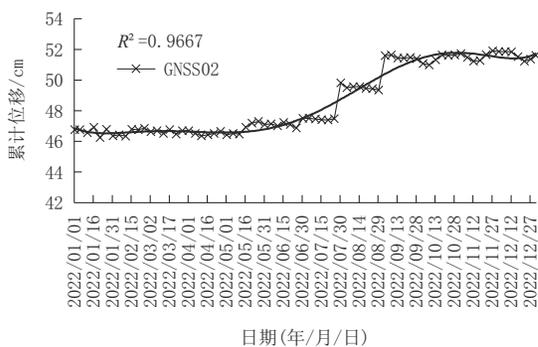
图 12 基于变形观测的滑坡 4 级综合预警

Fig.12 Outline of the four-level comprehensive warning for landslide based on the deformation observation

根据滑坡前缘测点 GNSS01 和滑坡中后部测点 GNSS02 测得的滑坡水平位移曲线(图 13)可知:



(a) GNSS01(滑坡前缘)水平位移



(b) GNSS02(滑坡中后部)水平位移

图 13 滑坡地表水平位移

Fig.13 Horizontal displacement of landslide surface

(1)滑坡前缘的水平位移大于滑坡中后部的水平位移,前缘监测点累计位移约为中后部监测点累计位移的 2 倍,由此可见,滑坡前缘优先变形,牵动后缘产生位移,呈现出前缘牵引、后缘逐级滑移的变形破坏模式,与图 5 提出的近水平土质滑坡的变形

破坏模式一致。同时滑坡前缘的变形大于滑坡中后部,滑坡前缘为强变形区。

(2)根据图 13(a)滑坡前缘位移数据拟合曲线来看,5月11日至6月5日期间,位移拟合曲线的斜率有明显增大,表明滑坡变形在此期间开始加速。从图 13(b)滑坡中后部位移数据拟合曲线看,5月21日至6月10日期间,位移拟合曲线的斜率有明显增大,表明滑坡中后部变形在此期间加速。同时,根据滑坡降雨量数据(图 14)可以发现,5月11日至6月10日期间,该滑坡区域的降雨量出现明显的增幅,降雨量平均值达到 158 mm,最大降雨量达到 230 mm,表明强降雨导致了滑坡的加速变形。

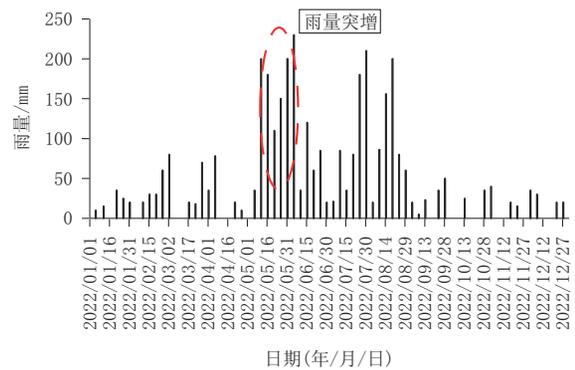


图 14 滑坡降雨量数据

Fig.14 Rainfall data in the landslide area

监测数据分析结果表明:滑坡整体破坏模式为,前缘先产生变形,随后牵引后部土体,进而使滑坡中后部产生变形破坏,监测数据反映的滑坡实际变形情况与理论分析结论基本一致。

3.4 防治措施建议

结合监测数据与变形破坏模式,提出如下防治措施建议:

(1)针对滑坡前缘牵引、后缘逐级滑移的变形破坏模式,宜在滑坡前缘设置支挡工程,针对该滑坡,可在滑坡前缘设置抗滑桩防治工程,抵御滑坡的进一步变形^[20]。

(2)针对滑带土体呈软塑一流塑状,建议设置截排水工程,防止降雨渗入至滑带土体内,减少滑带土的强度劣化,针对该滑坡,可在滑坡边界外设置截水沟,在坡体内设置排水沟。

4 结论与建议

通过对四川省巴中市恩阳区近 3 年(2020—

2022年)新增的25处近水平土质滑坡进行统计分析,总结了区内近水平土质滑坡的3个基本特征:

(1)岩层倾角和地形坡度均在 10° 以内,呈近水平状。

(2)滑体土层为含碎石粉质粘土,碎石含量约占 $3\% \sim 5\%$,前缘土体较薄,厚度在 $0.5 \sim 3$ m之间,后缘土体较厚,大多在 $8 \sim 12$ m之间。

(3)滑坡前缘存在高陡临空面,临空面高度通常 $5 \sim 15$ m,岩、土分界面明显,下伏基岩为厚层—中厚层砂泥岩互层结构,岩层倾角 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。

基于以上总结成果,建立近水平土质滑坡地质模型,定性分析了滑坡的变形破坏模式为:

(1)启动阶段。受降雨软化基覆界面土体的影响,滑坡前缘产生局部滑移-拉裂。

(2)牵引破坏,次级剪切滑动阶段。受前缘局部滑塌影响,滑坡中后部形成次级剪切滑面,并产生次级滑动,堆积至滑坡前缘,改变滑坡原始地形。

(3)逐级牵引,整体滑动变形阶段。滑坡前缘发生多次滑塌,滑坡后部发生多次次级剪切滑动,并逐级牵引,导致滑坡张拉裂缝贯通,最终在后缘张拉裂隙静水压力产生的水平推力和基覆界面处滞水的润滑、浮托作用下,滑坡整体失稳破坏。

通过对典型近水平土质滑坡开展地质灾害专业监测,利用滑坡前缘和中后部的位移数据分析,证实了该类土质滑坡的变形模式与理论分析的结论基本一致。

随着极端天气逐年增多,研究区内近水平土质滑坡数量呈逐年增多的趋势,上述研究成果可为川东北红层地区同类型滑坡专业监测方案设计提供理论支撑,为制定精准的防灾避险措施提供技术依据,利于当地防灾减灾工作的开展。

由于所选的典型滑坡处于变形初、中期,现有的监测数据还无法论证其最终失稳破坏模式,后续可通过开展相应的模型试验对其变形破坏模式进行更深入的研究,进一步完善红层地区近水平土质滑坡的变形破坏模式。

参考文献(References):

[1] 许强,唐然.红层及其地质灾害研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):28-50.
XU Qiang, TANG Ran. Study on red beds and its geological hazards[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineer-

ing, 2023,42(1):28-50.
[2] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994:377-380.
ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. The Analytical Principle on Engineering Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:377-380.
[3] 范宣梅,许强,张倬元,等.平推式滑坡成因机制研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3753-3759.
FAN Xuanmei, XU Qiang, ZHANG Zhuoyuan, et al. Study on genetic mechanism of translational landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(S2):3753-3759.
[4] 黄润秋,赵松江,宋肖冰,等.四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机理分析[J].水文地质工程地质,2005,32(1):13-15.
HUANG Runqiu, ZHAO Songjiang, SONG Xiaobing, et al. The formation and mechanism analysis of Tiantai landslide, Xuanhan County, Sichuan Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005,32(1):13-15.
[5] 赵勇,许模,赵红梅.平推式滑坡后缘启动水头探讨[J].人民长江,2011,42(17):32-36.
ZHAO Yong, XU Mo, ZHAO Hongmei. Discussion on starting water head in trailing edge of translational landslide[J]. Yangtze River, 2011,42(17):32-36.
[6] 郭晓光,黄润秋,邓辉,等.平推式滑坡多级拉陷槽形成过程及成因机理分析[J].工程地质学报,2013,21(5):770-778.
GUO Xiaoguang, HUANG Runqiu, DENG Hui, et al. Formation and mechanism analysis of multi-level rift trough in translational sliding landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2013,21(5):770-778.
[7] 李江,许强,胡泽铭,等.红层缓倾角土质滑坡发育环境、分布规律及影响因素研究[J].科学技术与工程,2014(12):88-93.
LI Jiang, XU Qiang, HU Zeming, et al. Study on factors of development environment distribution characteristics and soil landslides on low-angled rock formation of red bed[J]. Science Technology and Engineering, 2014(12):88-93.
[8] 张明,胡瑞林,殷跃平,等.川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3783-3790.
ZHANG Ming, HU Ruilin, YIN Yueping, et al. Study of mechanism of landslide induced by rainfall in gently inclined red stratum in East Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(S2):3783-3790.
[9] 王维早.强降雨诱发平缓浅层堆积层滑坡成因机理研究——以南江县红层滑坡为例[D].成都:成都理工大学,2017.
WANG Weizao. Study on formation mechanism of gentle inclined and shallow accumulative landslide induced by heavy rainfall: A case study of landslide in red layer, Nanjiang County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
[10] 成国文,李善涛,李晓,等.万州近水平地层区堆积层滑坡成因与变形破坏特征[J].工程地质学报,2008,16(3):304-310.
CHENG Guowen, LI Shantao, LI Xiao, et al. Forming causes

- and deformation-destruction characters of accumulative stratum landslide in horizontal stratum in Wanzhou[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(3):304-310.
- [11] 周云涛,陈洪凯,张勇,等.超孔隙水压诱发特大型近水平崩塌积层滑坡破坏研究[J].*工程地质学报*,2016,24(5):732-740.
ZHOU Yuntao, CHEN Hongkai, ZHANG Yong, et al. Failure of super-huge landslide in collapsed debris deposits with nearly horizontal sliding surface induced by excess pore water pressure[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(5):732-740.
- [12] 张群,许强,易靖松,等.南江红层地区缓倾角浅层土质滑坡降雨入渗深度与成因机理研究[J].*岩土工程学报*,2016,38(8):1447-1455.
ZHANG Qun, XU Qiang, YI Jingsong, et al. Rainfall infiltration depth and formation mechanism of slow-inclination soil landslides in Nanjiang[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8):1447-1455.
- [13] 殷坤龙,简文星,周春梅,等.万州区近水平地层滑坡和堆积体成因机制与防治工程研究[R].武汉:中国地质大学,2005:153-154.
YIN Kunlong, JIAN Wenxing, ZHOU Chunmei, et al. Study on the mechanism of the translational landslide in Wanzhou District and prevention project[R]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005:153-154.
- [14] 胡泽铭.四川红层地区缓倾角滑坡成因机理研究[D].成都:成都理工大学,2013.
HU Zeming. Study on formation mechanism of the slow-inclination landslide in red stratum region, Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [15] 徐伟,冉涛,田凯.西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式——以云南彝良县为例[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6):127-133.
XU Wei, RAN Tao, TIAN Kai. Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of Southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6):127-133.
- [16] 冯振,李滨,赵超英,等.三峡库区山区城镇重大地质灾害监测预警示范研究[J].*地质力学学报*,2016,22(3):685-694.
FENG Zhen, LI Bin, ZHAO Chaoying, et al. Geological hazards monitoring and application in mountainous town of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(3):685-694.
- [17] 许强,汤明高,徐开祥,等.滑坡时空演化规律及预警预报研究[J].*岩石力学与工程学报*,2008,27(6):1104-1112.
XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6):1104-1112.
- [18] 许强,汤明高,黄润秋.大型滑坡监测预警与应急处置[M].北京:科学出版社,2015.
XU Qiang, TANG Minggao, HUANG Runqiu. Large-scale Landslide Monitoring, Early Warning and Emergency Treatment[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] 许强,董秀军,李为乐.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7):957-966.
XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7):957-966.
- [20] 张国信,陈豫津,王谦,等.边坡抗滑桩加固的三维有限元计算[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(9):81-89.
ZHANG Guoxin, CHEN Yujin, WANG Qian, et al. 3D finite element computations for slope reinforcement with anti-slide piles[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(9):81-89.

(编辑 荐华)