

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240131003

甘肃积石山6.2级地震诱发中川乡流滑成因初探*

常晁瑜¹, 乔峰¹, 薄景山¹, 绽蓓蕾², 谷佳沛¹, 李昊宇¹, 田华俊¹

(1. 防灾科技学院, 河北三河 065201; 2. 青海省地震局, 青海西宁 810001)

摘要: 2023年12月18日, 甘肃临夏州积石山县6.2级地震触发了一种不同于传统滑坡的特殊流滑地质灾害。目前, 这类灾害的成因与机理尚不清晰, 前期识别仍存在一定困难。该研究对中川乡流滑进行了详细调查和分析, 对于此类灾害的防范具有重要的理论和现实意义。此次积石山地震所诱发的地质灾害具有低角度黄土斜坡流滑的特征, 滑动距离较长, 堆积区涌出浓稠泥浆, 导致大量房屋掩埋, 20人失踪。通过现场详细的考察和分析, 探讨了流滑的成因、运移特征以及涌动速度。调查结果表明: (1) 此次灾害发生于黄河的三级和二级阶地上, 上下高差79.2 m, 滑动距离约3.1 km, 总体坡度仅1.5°, 属于强震诱发低角度黄土斜坡流滑。(2) 本次流滑成因初步可以归纳为连续灌溉导致滑源土体高度饱水、强烈地震触发欠固结饱和黄土的结构性丧失、低塑性指数黄土发生流动破坏以及路基溃坝和冲沟变窄增强破坏。

关键词: 积石山地震; 中川乡流滑; 流滑特征; 流滑成因

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0349-08

A Preliminary Study on Causes of Flowslide in Zhongchuan Township Triggered by M6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province

CHANG Chaoyu¹, QIAO Feng¹, BO jingshan¹, ZHAN Beilei², GU Jiawei¹, LI Haoyu¹, TIAN Huajun¹

(1. College of geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;

2. Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China)

Abstract: On December 18, 2023, a 6.2 magnitude earthquake in Jishishan County, Linxia Prefecture, Gansu Province triggered a special flowslide, which differed significantly from conventional landslides. Currently, the causes and mechanisms of such disasters are unclear, and their early identification remains challenging. This study conducted detailed field investigation and analysis of the Zhongchuan Township flowslide, which could provide important theoretical and practical implications for preventing such disasters. The geological disaster triggered by the Jishishan earthquake was a low-angle loess slope flowslide, with a long sliding distance and viscous mud outbursts in the accumulation area, submerging multiple houses and leaving 20 people missing. Through in-depth field investigation and analyses, the causes, movement patterns, and surge velocities of the flowslide were explored. The results showed that: (1) the flowslide occurred on the second and third terraces of the Yellow River,

* 收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-03-30

基金项目: 河北省自然科学基金项目(D2023512028)、中国地震局地震科技星火计划项目(XH24061YA)、国家自然科学基金项目(U1939209)资助

作者简介: 常晁瑜(1990—), 男, 副教授, 博士。主要从事岩土工程研究。E-mail: changchaoyu@126.com

通信作者: 乔峰(1990—), 男, 副教授, 博士。主要从事岩土工程研究。E-mail: qiaofengCT@163.com

with an elevation difference of 79.2 m, a sliding distance of approximately 3.1 km, and an overall slope angle of merely 1.5°. This event was identified as a low-angle loess slope flowslide triggered by a strong earthquake. (2) The primary causes of the flowslide included high saturation of source loess induced by continuous irrigation, structural collapse of under-consolidated saturated loess triggered by a strong earthquake, flow failure of low-plasticity-index loess, and enhanced damage due to embankment failure and gully constriction.

Keywords: Jishishan earthquake; Zhongchuan Township flowslide; flowslide characteristics; flowslide causes

0 引言

2023年12月18日23时59分在甘肃临夏州积石山县(35.70°N, 102.79°E)发生6.2级地震,震源深度10 km^[1-3]。此次地震中,距离震中约15 km,位于地震烈度Ⅷ度区的青海省海东市、黄河左岸官厅盆地的中川乡金田村和草滩村一带,发生一处自北向南沿着黄河阶地面流动的特殊地质灾害(图1、图2),这一地质灾害发生的斜坡角度较小,滑动的距离较长^[4-5],堆积区更有“砂涌”喷出,浪头高达3 m的浓稠泥浆,翻涌着漫入村庄,造成大量房屋掩埋,20人失踪^[6]。



图1 进入金田村的公路被3 m高的泥浆覆盖

Fig.1 Road to Jintian village covered by 3-meter-high mud



图2 大量房屋被泥浆覆盖

Fig.2 Multiple houses covered by mud

在人类传统的认知里,无论是滑坡还是泥石流,滑动的距离受高差和坡度的影响,即坡度大、坡高大的地方才能高速滑动,进而形成长距离的灾害现象。然而,本次流滑在如此小的坡度发生长距离的滑动并造成严重灾害,这对人们传统的知识体系造成了冲击,引起了民众和专家学者的广泛关注。震后报道中,此次灾害被解释为“砂涌”、“泥石流”或“平地泥石流”等多种发生机理,然而,地震诱发砂土液化现象,在地震现场往往表征为典型的“喷砂冒水”现象,在地表留下一个个串珠状的像火山锥似的小鼓包和圆形坑,不会发生长距离滑动。在中川乡流滑现场,无论是滑源区、流通区还是堆积区,均无喷沙冒水的典型现象^[7];“泥石流”一般是以细粒土为主的流动体,它的发生往往需要一定的水源,甚至会伴随强降雨与坝体溃决等现象,然而地震发生前,并未发生强降雨和坝体溃决,所以需要解释泥石流中水的来源问题。因此,这次灾害也并非常规意义上的泥石流。

为了探寻该灾害的成因,笔者收集了灾害发生地的地震和地质资料,并第一时间前往该灾害发生地开展现场调查,以期查明此次灾害的发生机理。

1 与流滑相关的地震和地质情况

1.1 地震情况

中川乡流滑位于积石山地震发震断裂——拉脊山断裂带的NEE方向,距离发震断裂9.12 km(图3)。距离宏观震中7.02 km,位于地震烈度的Ⅷ度(8度)区。

根据中国地震局工程力学研究所强震动观测中心观测数据(表1),距中川乡流滑15 km以内的地震台站有6个(图4),均记录到了强烈的地震动,其中距离中川乡流滑最近(7.53 km)的GS.N002B台

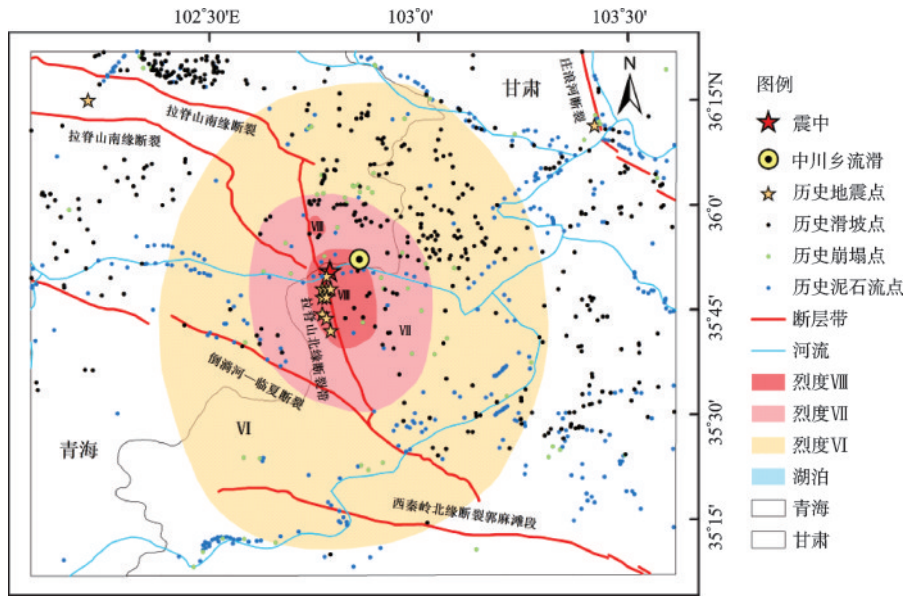


图3 积石山地震烈度

Fig.3 Seismic intensity of Jishishan earthquake

表1 台站数据记录表
Table 1 Station data records

台站名称	震中距/km	震中方位角/(°)	PGA/(cm·s ⁻²)			中川乡流滑的距离/km
			EW	NS	UD	
1#	11.4	225.7	619.8	-598.4	-444.2	10.64
2#	7.1	204.7	1 071.4	856.8	796.1	7.53
3#	3.6	168.1	905.8	778.5	-702.4	10.53
4#	17.1	246	469	392.3	-250.2	14.65
5#	17.9	243.4	396.4	340.5	214.9	14.28
6#	10.9	183.9	477.2	-454.2	-238.2	9.30

注: 1#、2#、3#、4#、5#、6#对应台站名称分别为GS.N0031、GS.N002B、GS.N0028、GS.N0029、GS.JSNGJ、QH.B0030

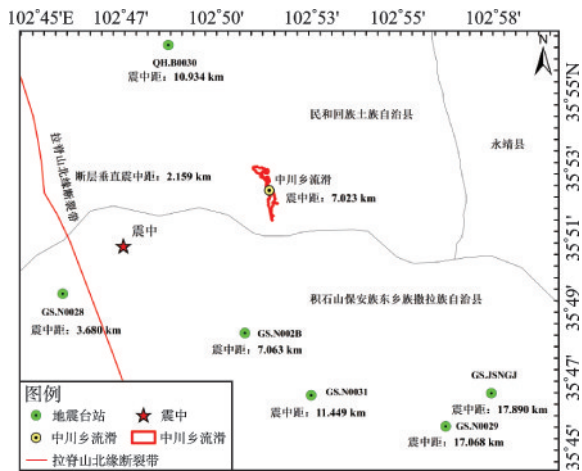


图4 地震台站分布

Fig.4 Distribution of seismic stations

记录到的峰值加速度为此次地震中所有台站中的最大值,东西、南北、垂直向加速度峰值分别达到1 071.4、856.8、796.1 cm/s²;距离中川乡流滑10.53 km的GS.N0028台仪器烈度最大,东西、南北、垂直向加速度峰值分别为905.8、778.5、-702.4 cm/s²,东西、南北、垂直向速度峰值分别为57.3、-52.1、-16.3 cm/s,计算仪器地震烈度为9.5度。

1.2 地质情况

流滑发生在青海省民和县官亭盆地黄河北岸的二级和三级阶地上,官亭盆地位于青海省民和县的最南端,属黄河上游山间小盆地^[8]。该盆地西起积石峡东口,东至寺沟峡西口,东西跨越14 km,南北宽约7 km,面积约为60 km²,俯瞰形态近似三角形。盆地内属黄河冲击平原,平均海拔在1 800 m左右,黄河自西向东穿流而过。根据当地村民介绍,流滑前缘地下水位约3 m,后缘的滑源区地下水位约11 m,流滑区农田长期引黄河水灌溉,每年3~4次,地震发生时滑源区农田正在进行冬灌。

二级阶地面和三级阶地面平坦开阔,是人类活动的主要场所。阶地面高出黄河平水位约50~70 m,是典型的基座阶地,基底为晚第三系红色粘土,其上有卵石层、黄色砂层、风成黄土和洪积土等。阶地向东南部黄河河谷缓倾斜,地面坡度一般

1°~5°^[9]。在二级阶地的前缘断面上,可见呈透镜状的沟谷堆积体和规模较大的古洪积扇的堆积体(图5)。

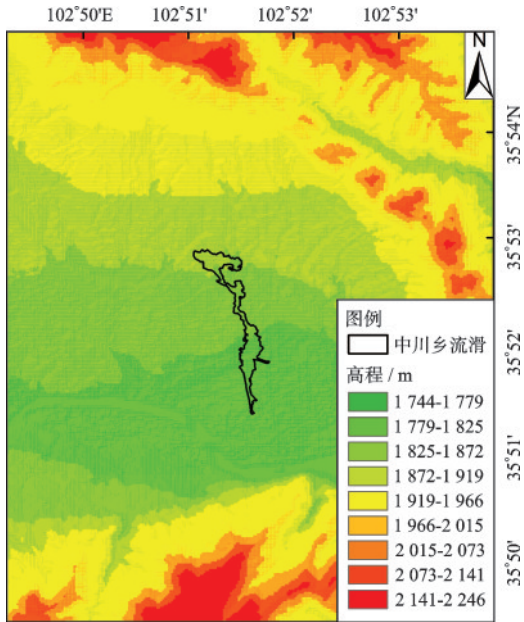


图5 中川乡流滑附近高程图

Fig.5 Elevation map of area near flowslide in Zhongchuan Township

官亭盆地周边山地由白垩纪的紫红色、红色砂岩和第三纪泥岩组成(图6),流滑区外围出露地层主要有上第三纪红层,第四纪上更新统风积风积黄土、黄土状土及冲洪积粉土、砂卵砾石及全新统第四纪粉土、卵砾石、冲洪积粉土,流滑区后缘地层揭露情况(图7),滑源区地层从上到下依次为现代土(0~0.4 m)、晚更新世黄土(0.4~0.7 m)、黑垆土(0.7~1.0 m)、红色粘土质泥石流沉积层(1.0~1.6 m)、马兰黄土(1.6 m⁻)。

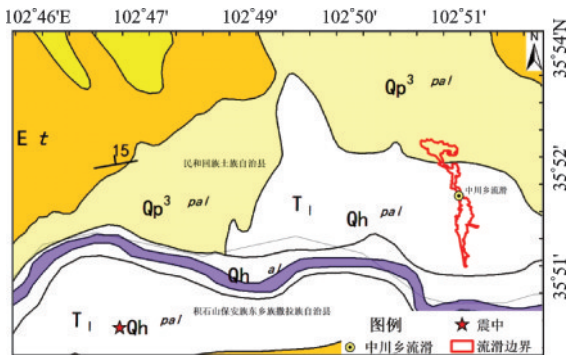


图6 官亭盆地周边地质

Fig.6 Geological map of area around Guanting Basin

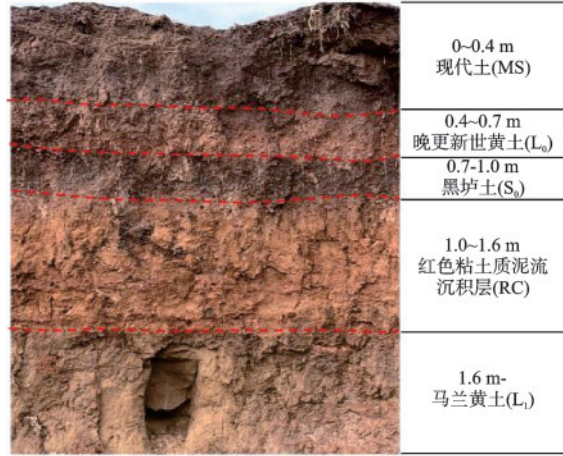


图7 中川乡流滑地层分布

Fig.7 Stratigraphic distribution of flowslide area in Zhongchuan Township

2 中川乡流滑特征

中川乡流滑后缘和前缘高差79.2 m,流滑长度约3100 m,平均坡度仅1.5°,流滑面积达47.9*10⁴ m²,根据运动特征,可将流滑分为滑源区、流通区和堆积区。

2.1 滑源区

滑源区约16.0*10⁴ m²,长约350 m,宽约450 m,原来是农田,12月15日开始周边农田开始冬灌,地震发生时滑源区农田正在冬灌,土体含水量在较高水平。

调查发现,滑源区后缘出现拉裂缝,后缘壁直立,高2~5 m,一处在后缘附近的高压电塔倾倒损坏。滑源区变为高低起伏、小丘林立,形成波浪状,很多土丘保持原有的地层结构倾倒,倾倒的地层厚约1~3 m,表明滑源区上部土体没有发生“液化”或“泥化”,而是底部土体发生流滑运动后,带动上部土体滑动,发生拉裂破坏而倾倒(图8)。在滑源区中心保留一处“孤岛”(图9),周边土体均滑走,该“孤岛”高8 m,长7 m,宽2 m,位于在原道路和水渠的交叉口处,北侧为水渠,南侧和东测为道路,猜测形成“孤岛”的原因是路基压实且水渠的部分阻挡作用。引水灌溉的水渠被冲毁,现场发现的最远移动距离约350 m。原本道路边的一排树,连同根部泥土被冲到了下游210 m的地方,地震发生时,一个正在冬灌的村民发现脚下的土地在移动,立刻抱紧这几颗大树中的一棵,随着大树一起滑动210 m左

右,没有受伤,于是这几棵树被当地村民称为“救命树”(图10)。

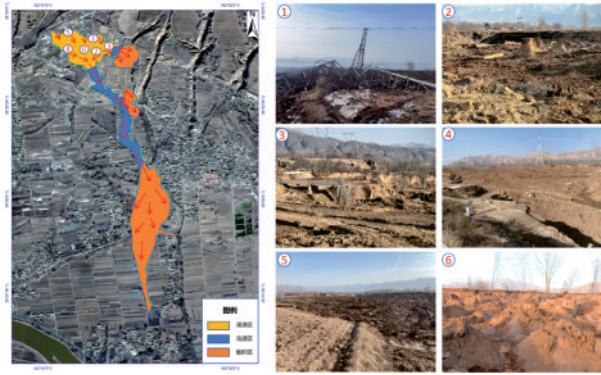


图8 滑源区照片

Fig.8 Photos of flowslide source area

注:①滑源区后缘高压电塔倒塌②滑源区中部滑床裸露③输水渠垮塌④滑源区右侧拉张裂缝⑤滑源区后缘拉张裂缝⑥滑源区高低起伏的土丘



图9 滑源区保留的“孤岛”

Fig.9 “Isolated island” retained in flowslide source area



图10 流滑后的“救命树”

Fig.10 “Life-saving trees” after flowslide

现场采用测距仪量测,滑源区现有地面和原有地面高度差最小为1.8 m,最大为11.5 m。

2.2 流通区

流滑主要沿两个方向滑动,即向东和向南。向东的流通区范围较小,面积约 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^2$,形成了东部区域的堆积区(图11)。向南的流通区主要顺着一条季节性冲沟流下,流通长约1 150 m,面积约 $5.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,该流通区的土体以饱和的泥流为主向下流动,冲沟的深度逐渐变小,在向南流通区的中部地震前筑有一处顶部6 m宽,底部20 m宽的土坝,此处土坝横跨建造在季节性冲沟中,成为东西方向道路的路堤。据当地村民介绍说,流滑物质到此处后被土坝阻挡,转为向东北方向的冲沟内堆积,随着堆积物质增多,泥流高度增加,高势能的泥流将土坝冲毁,继续向下流动。

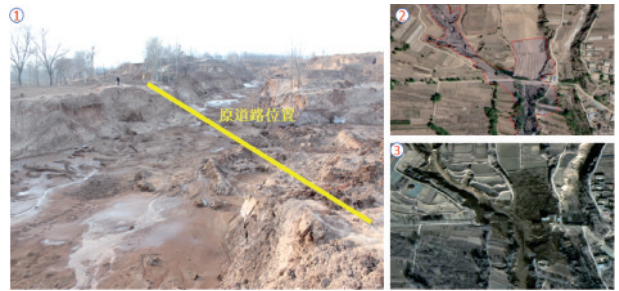


图11 东侧流通区

Fig.11 East-side flow area of flowslide

注:①坡体东侧滑移,堵塞道路②原坝区影像③流滑冲击后坝区影像

2.3 堆积区

堆积区主要集中在三个区域(图12),一处位于滑源区东侧较低洼处,此处堆积物质较少,有冲毁的水渠和水泥路面遗留在堆积区表面,堆积区有较多保持原状的大块土体;第二处位于流通区原土坝处,饱和的泥流向下流通受限,在此处淤积,淤积最高时,可以达到12 m深,土坝被冲垮后,淤积在此处的大部分泥流向北沿原有的冲沟流走,在此处堆积的泥流物质厚度约0.5 m左右。可以想象,此处土坝造成的泥流拥塞和溃坝,提升了下游泥流的冲击速度,造成下游金田村大范围的堆积;第三处堆积区是造成本次灾害的主要区域,此处堆积区面积最大,达到 $22.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积厚度1~3 m,形成一处处土丘,土丘高度0.3~2 m,小型土丘居多,此处掩埋区内原有房屋,造成较大的经济损失和人员伤亡。此次中川乡流滑的堆积类型包含沟床堆积、龙头堆积、环状堆积、缝隙堆积等多种形态。



图 12 中川乡流滑现场堆积情况

Fig.12 Accumulation conditions at flowslide site in Zhongchuan Township

3 地震流滑的典型案例及机理

值得说明,这种特殊的地质灾害在国内外地震史上均有记载^[10],以洪洞特大地震诱发郇堡流滑、临汾大地震诱发堡头村流滑、塔吉克斯坦地震诱发吉萨尔村流滑、海原特大地震诱发石碑塬流滑和新庄流滑为典型代表,由于均由强烈地震诱发,发生斜坡的坡度小,且运动呈现流动状,被称为强震诱发低角度黄土斜坡流滑,本文继续沿用这一名词对本次特殊的地质灾害命名。

1303年9月17日洪洞8级特大地震中,赵城县郇堡发生大规模流滑现象。郇堡流滑原始地面坡度约 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$,受灾范围从东北的郇堡桥、韩家庄至西南的营田、北郇堡一线,流滑体长约1600 m,宽1400 m,滑动体摧毁许多村堡、水渠、道路,滑体上的村落随滑体迁徙好几公里。《元史·五行志》记载了这次流滑灾害:“[元大德七年]八月辛卯夕,地震,太原、平阳尤甚,坏官民庐舍十万计。平阳赵城县范宣义郇堡徙十余里。^[11]”

1695年5月18日临汾7 $\frac{1}{4}$ 级大地震中,临汾城东的堡头村发生流滑灾害。据乾隆四十二年的王金印墓志铭所述,因黄土地震液化导致地势较为平坦的村庄四周沟壁大规模崩塌,发生低角度流动,致

使村庄中间出现宽约100 m的深沟,居民不得不迁至村西另建房舍,村子被“地震沟”分成东西两半,东、西堡头村的地名由此而生。

1920年12月16日海原8 $\frac{1}{4}$ 级特大地震中,石碑塬地区发生了规模的流滑现象,上覆土体沿小于 3° 的缓斜坡坡降方向滑移了近1.5 km,滑动土体宽1.2~1.8 km。这次流滑现象使石河堡村被压埋,营城河改道向西推移了约400 m。同样在这次地震中,海原县九彩乡新庄村地区发生了大范围的流滑灾害,在较为平坦的场地上流滑向前滑移1500 m并沿黄土沟顺流而下,形成一个小型堰塞湖,并造成较为严重的震害。

1964年3月27日,美国阿拉斯加 M_w 9.2特大地震中,阿拉斯加安克雷奇的特纳根高地发生大规模流滑现象,在相对平坦的三角形平原上向前流滑600多米,流滑前缘物质流入大海之中。

1989年1月23日,在前苏联塔吉克斯坦发生的5.5级地震中,在半干旱缓斜坡丘陵地形地貌的吉萨尔村地区,因灌溉和地震共同作用,近乎平坦的风成黄土层中形成大规模的流滑,向前流滑了2 km,导致100多栋房屋被掩埋,220人丧生或失踪。

2018年9月28日在印度尼西亚苏拉威西岛发生的 M_w 7.5大地震中,受灌溉影响,帕卢市的巴拉洛阿、佩托波和西德拉几个村庄因“土壤液化”在第四纪砂质黏土冲积扇上发生大面积低角度流滑,最大位移长度1.1 km,数千栋房屋移动、下沉或倒塌。

学者们对以上流滑调查,总结成因机理为地震液化效应,即饱和的砂土或黄土在地震作用下,孔隙水压力增加,有效应力减小,从固体状态变为流体状态的过程^[12]。发生滑动的机制根据流滑方式的不同又可以归结为不排水剪切效应和水膜效应两种。不排水剪切效应观点认为当孔压接近总应力时,剪缩作用下不仅丧失大部分有效强度,还由于瞬间产生的超孔压导致土体结构破坏,原本结构完整的饱和土体瞬间瓦解转化为流态,发生长距离的流滑现象。水膜效应观点认为液化的土体超孔隙水压力的向上消散,在砂土亚层或黏土层等液化土透性较低的土层下方会形成抗剪强度几乎为0的水膜层,进而在重力作用下上方的土层发生滑移,从而发生液化流滑大变形现象。

4 本次流滑成因机理

对比本次流滑和上节几处典型流滑特征,在众

多的相似之外也有较多不同的特征,例如现场未发现典型土壤液化造成的喷砂冒水或地面开裂后液化土体喷出的典型现象;流通区和堆积区流动特征明显,流动距离更长,可达3 km;受灾集中在堆积区等。因此,本次流滑的成因也有自身的独特性。通过调查和总结,本次流滑成因可以归纳为有连续灌溉导致滑源土体高度饱水、强烈地震触发欠固结饱和黄土的结构性丧失、低塑性指数黄土发生流动破坏和路基溃坝和冲沟变窄增强破坏。

4.1 连续灌溉导致滑源土体高度饱水

调查揭示流滑前缘的堆积区距黄河仅800 m,地下水位约3 m,后缘的滑源区地下水位约11 m,流滑区大部为农田,长期引黄河水灌溉,每年3~4次,地震发生时正在进行冬季灌溉,之前已经连续灌溉3 d,根据地震当天的哨兵2号数据和现场调查,田间表层含水量高,局部含水量可达80%,地震发生时地表和地下土壤层均高度饱水(图13)^[6]。这为地震后流滑的形成提供了水分来源。



图13 滑源区土壤高度饱水

Fig.13 Highly saturated soil in flowslide source area

4.2 强烈地震触发欠固结饱和黄土的结构性丧失

流滑震中距18.68 km,距离发震断裂9.12 km,处于地震烈度的Ⅷ度,距离流滑15 km以内的6个地震台站,最小的水平向加速度为 340.5 cm/s^2 ,最大的水平向加速度为 $1\ 071.4 \text{ cm/s}^2$,表明地震发生时该处地震动振幅较大。根据周边强震记录估计,

此处中川乡流滑附近的加速度峰值在 400 cm/s^2 以上。

根据调查揭示的地层,发生流滑的滑源区物质主要为马兰黄土,分布在1.6~19 m的范围,马兰黄土具有大孔隙、弱胶结、竖向节理发育的特征。马兰黄土属于典型的风积土,具有较强的结构性,在干燥环境中,原状黄土强度高,即使在较大的覆盖层压力下,多孔结构也可能持续存在。然而,干燥的黄土一旦湿润,原状黄土中起到胶结作用的可溶盐将有机会溶于水,使黄土结构破坏。

地震发生时,受持续灌溉和地下水位上升的双重影响,原来干燥的马兰黄土的大孔隙被大量的水填充,这些马兰黄土迅速处于欠固结状态,维持黄土结构的可溶盐逐步溶解于水中,结构性开始被破坏。此时,当地强烈的地震作用下,孔隙水压力增大,有效应力减小,进一步降低土的强度。在持续荷载下,体积的显著减少和抗剪切强度的损失,导致黄土沉积物结构大量破坏并发生沉降。饱和层的形变会使得上部地层应力重新分布,局部开裂或形成剪切面。

4.3 低塑性指数黄土发生流动破坏

众所周知,任何具有低塑性指数的土壤都有发生液化和流式破坏的巨大潜力。马兰黄土的塑性指数一般在10左右,如果有足够数量的水入侵超过液限,缺乏内聚力的扰动黄土往往容易坍塌。滑动带饱和土体结构疏松,结构的瓦解以及滑动时的应力的释放使得饱和带呈现流体状态,沿沟谷产生高速的流动。

4.4 路基溃坝和冲沟变窄增强破坏

滑源区形成泥石流后,泥石流汇聚到沟谷,沿着沟谷向下流动,受沟谷路基土坝的堵塞,泥石流高度增加,势能增大,溃坝后速度大幅提升,同时,原来冲沟的宽度变窄发生造成泥石流高度抬升,速度增大,从沟谷急速喷出,主要在金田村造成大面积堆积,形成灾害,掩埋村庄,造成灾害的发生。

5 结 论

本文通过资料收集和实地调查,得到了中川乡流滑的发生条件,初步推测了流滑发生的过程,讨论了流滑的发生机理,主要结论如下:

(1)调查揭示此次灾害发生于黄河的三级和二级阶地上,上下高差79.2 m,滑动距离约3.1 km,总体坡度仅1.5°,属于强震诱发低角度黄土斜坡流滑。

(2)本次流滑成因初步可以归纳为连续灌溉导致滑源土体高度饱水、强烈地震触发欠固结饱和黄土的结构丧失、低塑性指数黄土发生流动破坏和路基溃坝和冲沟变窄增强破坏。

参考文献:

- [1] 铁永波,张宪政,曹佳文,等.积石山 $M_s6.2$ 级和泸定 $M_s6.8$ 级地震地质灾害发育规律对比[J].成都理工大学学报(自然科学版),2024,51(1):9-21,59.
Tie Y B, Zhang X Z, Cao J W, et al. Comparison of the development laws of geological hazards in the $M_s6.2$ Jishishan Earthquake and the $M_s6.8$ Luding Earthquake [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(1): 9-21, 59. (in Chinese)
- [2] 王立朝,侯圣山,董英,等.甘肃积石山 $M_s6.2$ 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(3):108-118.
Wang L C, Hou S S, Dong Y, et al. Basic characteristics of co-seismic geological hazards and risk prevention and control suggestions for the $M_s6.2$ earthquake in Jishishan, Gansu Province [J]. Journal of Geological Hazards and Prevention, 2024, 35(3): 108-118. (in Chinese)
- [3] 蒋伟,王永志,袁晓铭,等.2023年甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震宏观灾害特征与若干思考[J].防灾减灾工程学报,2024,44(1):1-11
Jiang W, Wang Y Z, Yuan X M, et al. The macroscopic disaster characteristics and some thoughts of the 2023 Jishishan $M_s6.2$ earthquake in Gansu Province [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering, 2024, 44(1): 1-11. (in Chinese)
- [4] Bradley K, Mallick R, Andikagumi H, et al. Earthquake triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation [J]. Nature Geoscience, 2019, 12(11):935-939.
- [5] Watkinson M I, Hall R. Impact of communal irrigation on the 2018 Palu earthquake-triggered landslides [J]. Nature Geoscience, 2019, 12(11):940-945.
- [6] 王运生,赵波,吉锋,等.2023年甘肃积石山 $M_s6.2$ 级地

震灾害异常的启示[J].成都理工大学学报(自然科学版),2024,51(1):1-8.

Wang Y S, Zhao B, Ji F, et al. Insights from the abnormalities of damage caused by the $M_s6.2$ earthquake in Jishishan, Gansu Province in 2023 [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 51(1): 1-8. (in Chinese)

- [7] 许强,彭大雷,范宣梅,等.甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥石流特征与成因机理[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):207-222.
Xu Q, Peng D L, Fan X M, et al. Characteristics and causal mechanism of liquefaction-type landslide-mudflow in Zhongchuan Township, Qinghai Province triggered by the $M_s6.2$ earthquake in Jishishan, Gansu Province [J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2025, 50(2): 207-222. (in Chinese)
- [8] 徐岳仁,窦爱霞,李智敏,等.2023年12月18日甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震触发次生灾害快速评估[J].地震,2024,44(1):209-215.
Xu Y, Dou A X, Li Z M, et al. Rapid assessment of secondary disasters triggered by the $M_s6.2$ earthquake in Jishishan, Gansu Province on December 18, 2023 [J]. Seismology, 2024, 44(1): 209-215. (in Chinese)
- [9] 王兰民,许世阳,王平,等.2023年积石山6.2级地震诱发大规模黄土液化流滑的特征与启示[J].岩土工程学报,2024,46(2):235-243.
Wang L M, Xu S Y, Wang P, et al. Characteristics and lessons of liquefaction-triggered large-scale flow slide in loess deposit during Jishishan $M_s6.2$ earthquake in 2023 [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(2): 235-243. (in Chinese)
- [10] 常晁瑜.强震作用下黄土斜坡流滑机理及动态演化[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2022.
Chang C Y. Mechanism and dynamic evolution of sliding flow on loess slopes under strong earthquakes [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)
- [11] 宋濂.元史[M].北京:中华书局,1976:1345-1468.
- [12] 王兰民.黄土地层大规模地震液化滑移的机理与风险评估[J].岩土工程学报,2020,42(1):1-19.
Wang L M. Mechanism and risk assessment of large scale seismic liquefaction slip in loess strata [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 1-19. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)