

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.02

甘肃舟曲垭豁口滑坡复活机理及成因探讨

窦晓东¹, 张泽林²

(1. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 2019 年 7 月 19 日 18 时许, 甘肃舟曲县垭豁口滑坡复活, 约 $3.92 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的滑体顺坡而下, 迅速流入岷江, 堵塞河道, 造成河道水位上升, 江边公路中断, 滑坡变形持续至 8 月中旬。基于野外勘察、遥感解译、钻孔勘探等方法获取了滑坡变形的基本特征, 并开展了滑坡监测工作, 并结合气象资料, 探讨了该滑坡复活原因及启动机制。初步研究认为, 该滑坡为降雨诱发。通过对滑坡变形历史进行梳理, 结合滑带证据, 滑坡复活机理可概括为: 首先上部块体缓慢蠕变, 降雨后发生塑性流滑; 其次, 因上部滑体堆积在滑坡中部, 造成中部平台堆载, 引发中部滑体变形; 最终一滑而下, 刮产连带下部滑体坠入河道。滑坡的上中下三部分滑体逐步被激活, 最初缓慢变形, 随后加速启动。滑坡变形模式为蠕滑—拉裂—流滑。对滑坡变形过程和机理的初步判断为滑坡灾害应急处置提供了科学依据。

关键词: 垭豁口滑坡; 舟曲县; 蠕动; 流滑

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)02-0009-10

Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes (Zhouqu County, Gansu, China)

DOU Xiaodong¹, ZHANG Zelin²

(1. Geological Environmental Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The report described a recent landslide happened in Zhouqu Country, China. At 18: 00 pm Beijing time, on July 19, 2019, the Yahuokou landslide was reactivated, about $3.92 \times 10^6 \text{ m}^3$ of debris slumped from the slope caused Minjiang River channel blockage, water level rise, and road interruption. Fortunately, nobody was injured. In order to seek the geomorphologic and stratigraphic characteristics, the reactivated causes and the dynamics mechanism of the landslide, field survey, remote sensing image, drilling prospecting, landslide monitoring and rainfall data analysis were conducted. The outlook of the landslide event was given. Evidences of the sliding zone indicated the landslide is a flow-slide deformation pattern. The landslide mechanism is summarized as: firstly, slow plastic flow-slide occurred in the upper sliding body. Then the platform in the middle gentle slope was preloaded by the post upper part failure deposits, resulting in the “cutting and filling” effect. The failure form is creep-tension cracks-debris flow-slide. At last, the block on the lower part slumped. Specifically, the upper, middle and lower parts of the landslide all transferred stress in this mode, being activated step by step, and slowly slumped into the river.

Keywords: Yahuokou landslide; Zhouqu County; slumped; flow slid

收稿日期: 2020-04-03; 修订日期: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (41902269)

第一作者: 窦晓东 (1984-), 男, 甘肃兰州人, 学士, 高级工程师, 主要从事地质灾害研究。E-mail: 297455517@qq.com

通讯作者: 张泽林 (1984-), 男, 宁夏银川人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事地质灾害研究。E-mail: 249133236@qq.com

0 前言

老滑坡是斜坡长期变形稳定后的产物,通常处于稳定状态,但不排除在其他外部因素诱发下复活^[1-2]。老滑坡的复活多是受降雨、地震、河流侵蚀、冰雪冻融、人类工程活动引起,目前尤为常见。陇海铁路沿线、川藏公路沿线、关中天水盆地以及舟曲县均存在多处老滑坡,这些老滑坡的活动迹象一直是工程建设关注的主要问题^[2-8]。

舟曲县位于甘肃省南部,处于中国青藏高原隆起的东北缘,属西秦岭南部构造带。舟曲县因其特殊的地形、岩性和地质构造,是长江中上游著名的滑坡易发区域。由于气候多变、地震频繁、山体脆弱等因素,滑坡和泥石流多发。它也是甘肃省乃至全国地质灾害最严重的地区之一。据 1993 年调查统计,舟曲县发生山体滑坡 100 多起,其中灾害性山体滑坡超过 30 处^[9]。区内曾经发生多起老滑坡复活事件,例如,舟曲县峰迭乡水泉沟西南滑坡受 2010 年泥石流影响,局部发生变形,滑坡前缘受到降雨冲刷,具有一定危险性^[10]。舟曲南桥滑坡,属碎屑流滑坡,近二十年来有活动迹象,受降雨和地震影响,有蠕动变形特征^[11]。舟曲锁儿头滑坡一直在发生变形,受降雨影响活动性明显,目前的已对该滑坡进行了长期监测,监测显示滑坡位移与降雨量呈增长趋势^[12]。舟曲泄流坡滑在 2008 年汶川地震后开始活跃,该滑坡属顺层页岩滑坡,缓慢蠕动变形,近年来受到降雨的影响,有复活趋势^[13]。舟曲南峪江顶崖滑坡在长期

的降雨影响下,以及河流侵蚀坡脚,经过持续的活动变形,在 2018 年 7 月 12 日发生复活^[1]。以上滑坡均受到了 2008 汶川地震影响,导致该地区脆弱的地质环境急剧恶化,加剧了地层结构的破坏,增加了松散的岩屑和沉积物。县城老滑坡所在坡体有变形产生,随后一些滑坡发生复活,尤其是降雨季节滑坡的稳定性问题显得尤为重要。

北京时间 2019 年 7 月 19 日晚 18 时,垭豁口滑坡复活,约 $3.92 \times 10^6 \text{ m}^3$ 滑体顺坡而下,堵塞河道,造成河水位上升,交通中断。这次滑坡只是局部以流滑形式产出,整体还处于变形阶段。该滑坡的关键问题在于:(1) 它的复活原因;(2) 特殊的动力学机制;(3) 特殊的地貌和地层特征。鉴于此,本文主要报道 2019 年 7 月垭豁口滑坡事件的发生原因,并探讨滑坡的形成机制,以期工程应急处置和具体工程防治提供借鉴。

1 地质环境特征

垭豁口滑坡区位于甘肃省舟曲县境内,舟曲县属于构造侵蚀地貌,山高谷深,沟壑纵横,该区的地质特征和岩性单元主要受构造活动和地震活动影响较大。舟曲县历史上常发生强烈地震,历史记录中曾发生过 16 次 $M_s \geq 7.0$ 级的地震。垭豁口滑坡位于在两条走滑断层之间,研究区内的两条走滑断层分别呈近东西向和北东向(图 1)。舟曲县年平均降雨量为 435.8 mm,汛期 6—9 月降雨量通常高于平均值。汛期时最大日降水量 63.3 mm,最大小时降水量 47.0 mm。

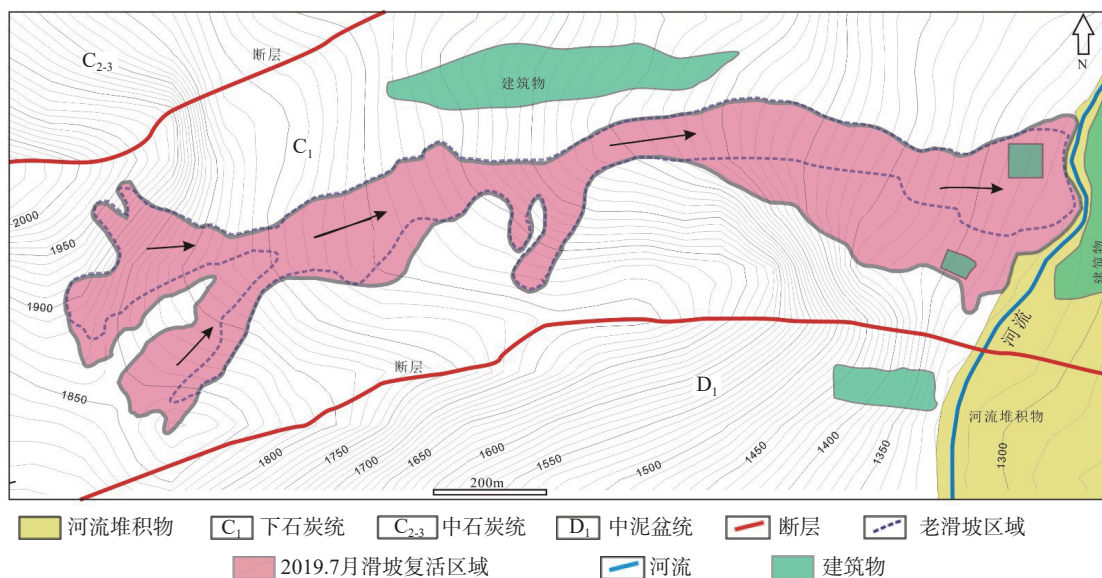


图 1 滑坡工程地质平面图

Fig. 1 Landslide engineering geological plan figure

研究区可见地层为下石炭统板岩、中—上石炭统灰岩、泥盆系千枚岩板岩和第四系冲洪积物。垭豁口滑坡周边基岩主要为下石炭纪的泥质板岩。这类岩体风化严重, 易于形成黏土质风化层, 并且遇水时膨胀, 抗剪性能极差。滑坡前缘为岷江, 由南向北流动。滑坡周边、坡脚处以及滑坡对岸有部分建筑物(图 1)。研究区内坡体破碎, 结构松散, 斜坡较陡。总体而言舟曲县地质环境脆弱, 水土流失较为严重。地层一直遭受断层活动、历史强震、降雨以及人类工程活动的影响。因此, 舟曲县是甘肃乃至全国地质灾害发育的地区。

垭豁口滑坡 1989 年首次发生时, 形成了堰塞湖, 造成过严重灾害。本次通过遥感解译, 并结合野外详细勘察, 查明了原始滑坡以及新复活滑坡的边界。图 2 为摄于 2019 年 6 月 30 日的垭豁口老滑坡全景图。

2 2019 年复活的垭豁口滑坡

根据滑坡工程地质图(图 1), 处于休眠期的垭豁口滑坡前后缘海拔分别为 1 300 m 和 1 960 m, 滑坡东西长约 1.3 km, 滑坡覆盖面积约 0.197 km²。而 2019 年复活后的垭豁口滑坡覆盖面积约 0.33 km²。图 3(a)和图 3(b)分别为垭豁口滑坡 2019 年复活前后的遥感影像图, 表 1 为垭豁口滑坡历史变形破坏事件统计。

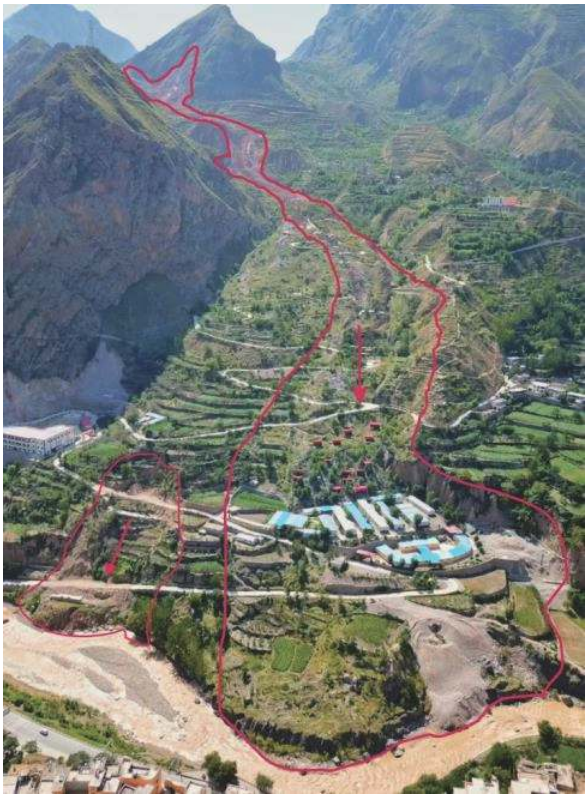
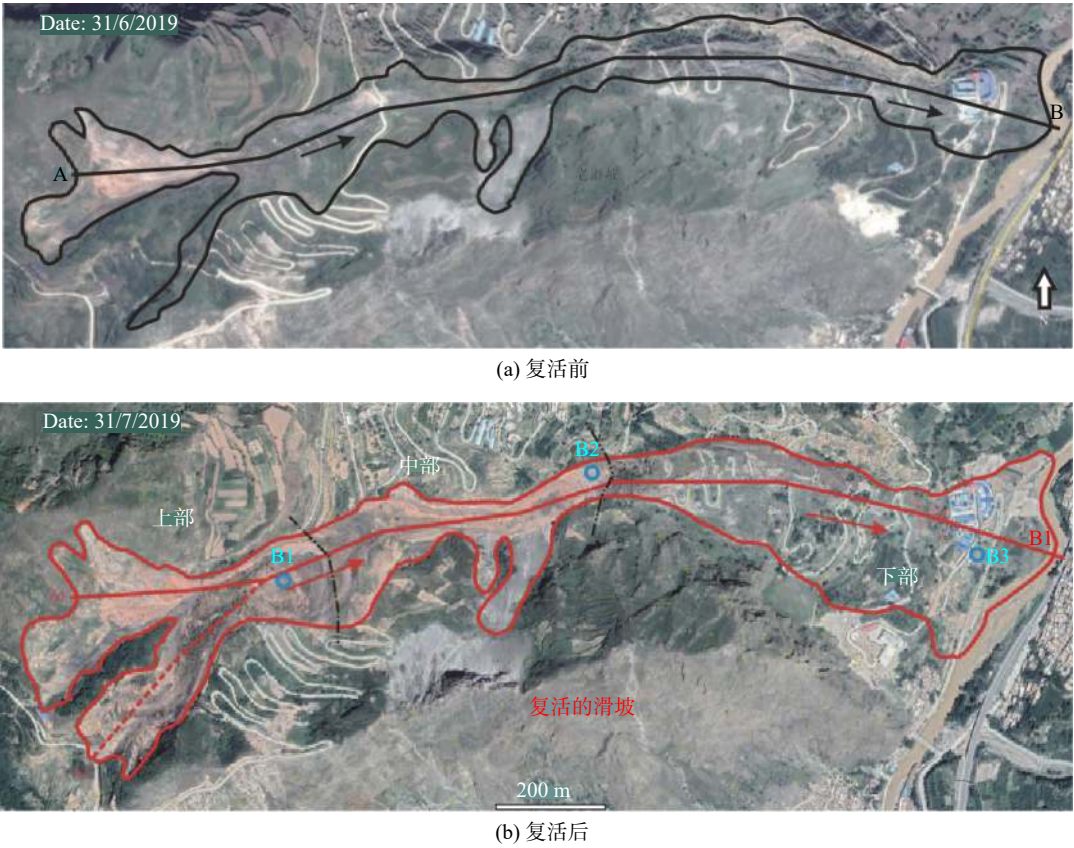


图 2 垭豁口滑坡地貌景观
Fig. 2 The panorama of Yahuokou landslide



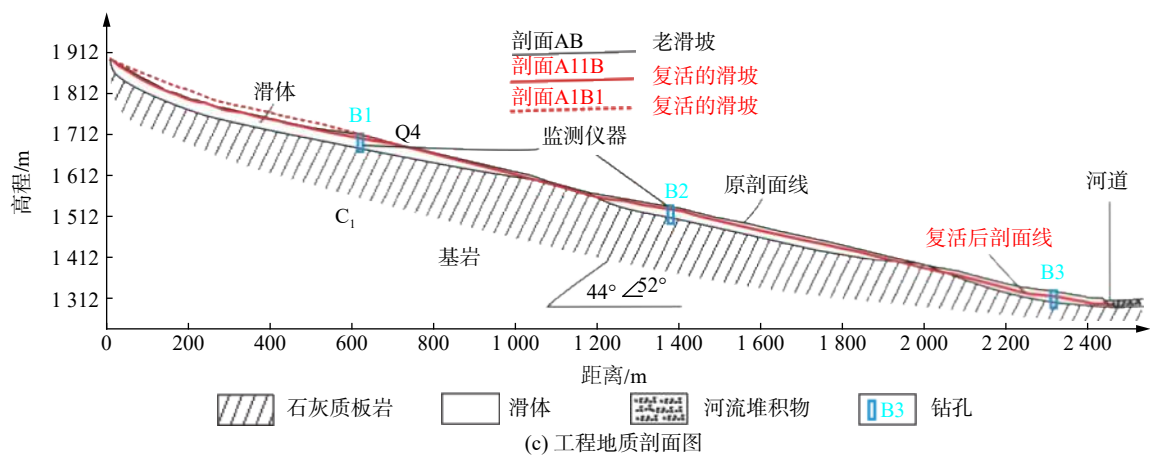


图 3 滑坡发生前后遥感影像图及工程地质剖面图

Fig. 3 Remote sensing images and profile of the Yahuokou landslide

表 1 垭豁口滑坡变形破坏事件统计

Table 1 Approximate timeline of slope deformation and failure at the Yahuokou landslide

时间轴	垭豁口滑坡活动特征
1989年	滑坡首次滑动, 堵塞河道形成堰塞湖
2019-07-16	斜坡中部可见20 cm裂缝, 并且该部位30 m的下部土方松动。
2019-07-17	在斜坡下部的路面上可见22 cm的裂缝
2019-07-18	道路塌陷, 滑体向前移动约20 m, 堆积宽度约30 m。
2019-07-19	滑坡再次发生。在中间部分, 滑体向前推动45 m, 宽度为50 m。一条300 m长的公路在滑坡的前缘被毁。滑坡体积约 $3.92\times10^6\text{ m}^3$, 主体距岷江100 m。
2019-07-20	滑体又向下推动了10 m, 道路周围的农田都发生变形。
2019-07-21	安装了滑坡监测仪器(图3)
2019-08-09—12	滑坡仍在变形。滑坡体处于连续滑动状态, 前缘变形区向岷江扩展。
2019-08-14—16	滑坡前缘和中部裂隙增大、变宽, 隆起高度增大, 偶有碎块落入河中。山体滑坡的松散堆积物坠入河中堵塞宽度约4~8.5 m, 部分河道窄至4.8 m。河道上下游水位差约0.4 m, 河床略有抬升。

历经多日连续降雨后, 2019 年 7 月 19 日垭豁口滑坡发生复活, 约 $3.92\times10^6\text{ m}^3$ 滑体一滑而下, 堆积坡脚堵塞河道, 向坡前推移约 45 m, 300 m 长的公路被滑坡摧毁。滑坡可见高陡后壁, 滑动方向约为 120° , 坡体平均坡度 30° , 坡度较缓, 滑体平均厚度约为 20 m(图 3)。坡脚堆积的滑体坠入岷江, 滑坡前缘剪出口清晰可见, 剪出口岩体为揉皱的灰质板岩, 层理清晰, 局部覆盖碎石土。滑坡下部开口宽度约 400 m, 中部较窄 200 m。中部滑坡流滑区域狭长, 前缘堆积体从平面图上看呈现出近似扇形堆积体。滑坡上部区域分为南北两块, 见图 3(b), 此次滑坡发生主要来源于南部区域。

在 2019 年 7 月 19 日之前, 滑坡就存在变形迹象。2019 年 7 月 16 日至 19 日期间, 滑坡上部可见明显裂隙, 而在滑坡下部, 路基也有鼓胀现象。在 7 月 19 日滑坡下滑后, 第二天, 上部滑体仍然有变形, 滑体又向前推移了 10 m, 毁坏道路及农田。并且滑坡下部排水渠道也被破坏, 部分滑体涌入河道, 见图 4(a)—图 4(c)。

垭豁口滑坡自复活后, 变形持续发生, 滑坡整体还有可能滑动, 因此, 对该滑坡进行详细的应急调查, 清理

了河道淤积滑体, 并且通过钻探查明了滑坡地层, 并在钻孔中布设了滑坡滑速监测仪, 见图 3(b)。

自 7 月至 8 月滑坡一直有活动迹象, 监测数据显示(图 5), 自 7 月 21 至 8 月 3 日, 滑坡上部块体滑速逐渐降低, 并趋于稳定。但是, 自 7 月 21 日至 7 月 30 日, 滑坡中部和下部块体的滑速达到了 0.9 m/h。

8 月 9 日至 8 月 12 日, 滑坡又发生变形, 坡体中下部小路已被冲毁。滑坡体处于蠕动状态, 前缘变形区向岷江扩展(图 6)。到 8 月 14 日至 8 月 16 日, 滑体前缘南侧裂隙增大、逐渐拓宽, 隆起高度增加, 偶有碎屑流坠入河中。滑体松散堆积物逐渐坠入河中, 堵塞部分河道, 原先 8~10 m 宽的河道变窄至 4.8 m。8 月 15 日 15 时至 8 月 16 日 7 时, 滑坡后缘产生 1.6 cm 裂隙。滑坡中部产生了 1 m 滑动, 平均速度为 0.1 m/h。而滑坡下部滑塌了 1.83 m, 平均速度为 0.2 m/h, 滑坡前缘向河流推进 0.8 m。随后监测到滑体滑动速度有所下降, 至 8 月 16 日午时后, 滑体的滑速度下降到 0.1 m/h 以下。图 5 也说明了 7 月 30 日至 8 月 14 日之间, 降雨确实对滑坡活动产生了一定的影响。



图 4 2019.07.16—22 日垭豁口滑坡变形的证据

Fig. 4 Field evidences and damages caused by the landslide reactivation in 16—22 July 2019

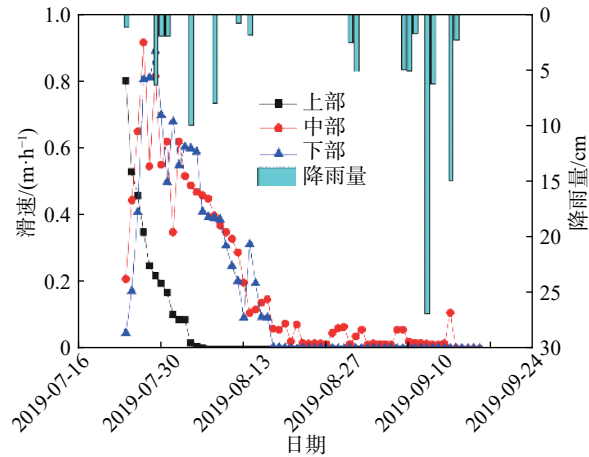


图 5 滑坡位移及降雨监测数据

Fig. 5 Data of landslide displacement monitoring and regional rainfall

滑坡前缘河床轻微隆起,河道上下游水位差约 0.4 m。此时开展了第二轮应急抢救,使用挖掘机清理河道及道路滑坡堆积体。8 月 16 日后,滑体中部滑速小范围内波动,滑坡仍处于蠕变阶段。值得庆幸的是,复活的滑坡只造成了部分经济损失,未造成人员伤亡。

3 滑坡机理探讨

垭豁口滑坡属碎屑流,滑距较长,见图 3(c)。滑坡基岩为反倾的碳质板岩,滑坡体主要为板岩碎屑以及部分黏土。钻孔揭示滑坡体岩性由上至下依次为:上层为碎石土和卵砾石,中部为灰黑色砾石及黏土,砾石多为板岩岩屑;下部为含水较高的风化灰色板岩。钻孔岩心

可见,滑动面具有明显的擦痕,与水平向夹角 $8^{\circ} \sim 19^{\circ}$ (图 7),且滑动带平均厚度 0.6 m,滑体上部较薄,下部逐渐增厚,上部滑动面深度在 1.5 ~ 8.8 m,中部滑动带深度在 15.8 ~ 16 m,而下部滑动带深度可达 22.6 ~ 24 m。

滑坡探槽(图 8)揭示该滑坡属缓慢流滑形式,滑带上的擦痕清晰顺直,相对较为光滑。上部滑体为松散的碎屑,下部滑体为软黏土(图 8、图 9),且滑带厚约 0.6 ~ 1.0 m。

垭豁口滑坡诱发因素有降雨、地震、人类工程活动、河流侵蚀和断层活动等。该区域内新构造运动非常活跃,区域断层水平滑动速率约 $1.3 \pm 0.1 \text{ mm/a}$,垂向

滑动速率约 $0.39 \pm 0.04 \text{ mm/a}$ ^[14]。由于该滑坡位于两条断层之间(图 1),近 30 年来,在该区域附件震级大于 $M_s 5.0$ 的地震多有发生^[7, 14-20],地震及滑坡的活动性均受控于区域内的走向断层。

因此,该滑坡的活动性与活动断裂关系密切。根据此次滑坡的应急调查,以及滑速监测,初步判定滑坡复活的主要因素是降雨。强降雨冲刷坡面,连续降雨通过裂隙渗透至滑坡内部,导致滑带软化,抗剪强度急剧降低。降雨及滑速监测数据表明(图 5),在集中降雨日,滑坡上中下块体滑动速度呈波动状态,滑坡持续蠕变,且变形逐渐增加。河流对滑坡的侵蚀主要表现为前缘坡



(a) 滑体堆积堵塞河道



(b) 滑体堆积堵塞河道

图 6 2019.08.09—16 日滑坡再次变形破坏的证据

Fig. 6 Field evidences and damages by the landslide reactivation in 9—16 August 2019



(a) 钻孔 2, 滑面 15.8~16 m



(b) 钻孔 3,
滑面 22.6~24 m



(c) 钻孔 1, 滑面 7.5~8.8 m

图 7 滑坡钻孔图

Fig. 7 Evidences from the boreholes on the landslide



(a) 滑坡上部滑带; (b) 滑坡中部滑带; (c) 滑坡下部滑带; (d) 滑坡平面图遥感影像

图 8 滑坡滑动带特征

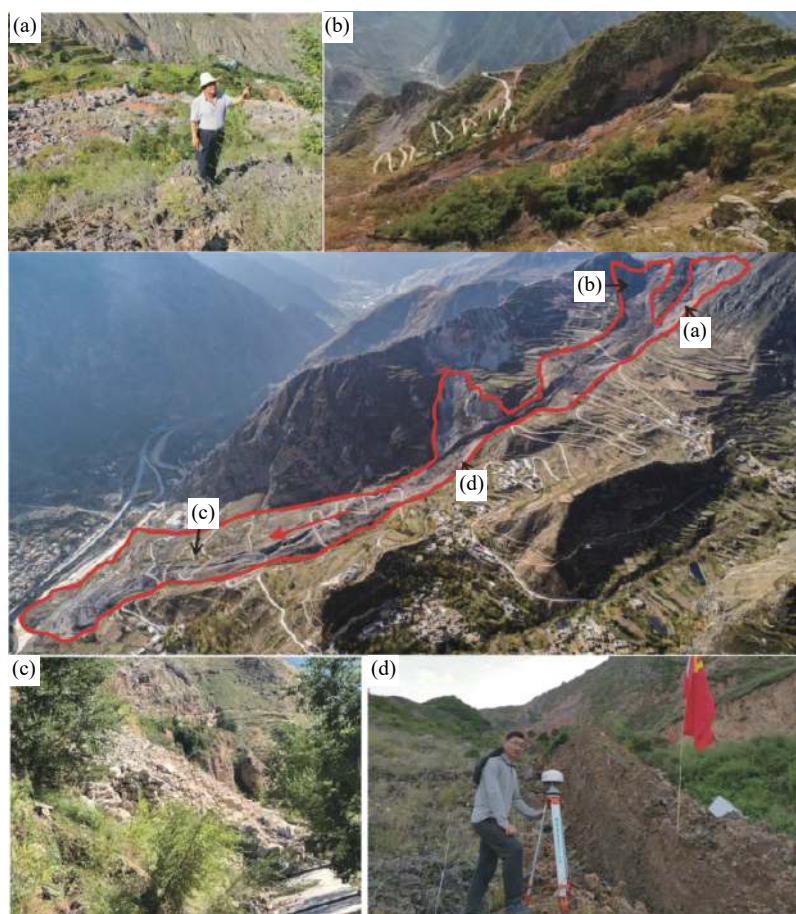
Fig. 8 Evidence of landslide slip zone

脚的侧向侵蚀和冲刷,削弱了滑坡前缘支撑。在滑坡体上修路建房,开挖或加载均对滑坡稳定性造成一定影响。

表 1 统计了垭豁口滑坡的变形发展历史,此次滑坡复活后,通过详细勘察,初步将滑坡的发生机制总结为(图 10):

(1)滑坡发生的主要原因是滑体内部含水量过高,

来不及排出,导致滑体发生塑性挤出和缓慢滑动。在滑坡上部(图 3 和图 10),北部块体首先发生滑动。随后,上部南侧块体受到牵引作用,逐渐滑动。上部块体先发生缓慢的塑性流动,在陡坡段滑速加剧。最终,滑坡上部整体滑塌,失稳。上部滑体堆积在中部平台地段,形成“滑移-加载效应”。因而在滑坡中部(图 10),受上部堆积体的加载和推挤作用。逐渐产生塑性流动,在中部



(a)—(b)滑坡顶部特征; (c)滑坡下部特征; (d)滑坡中部特征

图 9 2019 垭豁口滑坡变形特征

Fig. 9 Field evidences and damages by the landslide reactivation in 2019

滑体后缘形成拉槽。该滑坡的变形模式可概括为：蠕变-拉裂-流滑。最终，在滑坡体下部(图 10)，也以此方式复活。总之，滑坡的上、中、下三部分均以此方式传递应力，逐步被激活，缓慢滑入江中。同时，在蠕变和产生张拉裂缝的作用下，形成了三个相对独立的滑体。

(2) 目前滑坡仍处于活跃期，威胁滑坡对岸居民安全(图 11)。应急处置只是疏通河道，周边居民部分搬迁撤离。已经实施了滑坡的滑速监测，急需进一步开展具体的防治工程。

4 结论

2019 年 7 月 19 日，垭豁口滑坡复活，约 $3.92 \times 10^6 \text{ m}^3$ 滑体顺坡而下，堵塞河道，造成河道水位上升，交通中断。为查明滑坡的发生机制，判断滑坡后期的活动性，本文基于现场详细勘察、物探工程，以及滑坡监测等手段，探讨了滑坡的动力学过程，主要得到以下结论：

(1) 滑带证据显示该滑坡属于流滑运动机制。滑坡的主要诱因是降雨，降水入渗至滑体内部，造成滑带含

水率剧增，导致的塑性挤出和缓慢蠕动，最终发生流滑。滑坡发生过程可概括为：首先是上部滑体发生缓慢的塑性流动和滑移，滑坡上部总体滑塌，失稳。其次，上部滑体堆积在滑坡中部，然后对中部原始块体进行预加载和推压。中部块体开始变形，至中部块体后缘形成拉槽，发生塑性流动，失稳。最后，中部块体堆载至滑坡下部，又连带下部滑体复活，三部分滑体一起流入江中，上部块体和中部块体依次对其下部滑体造成堆载，即“滑移—加载效应”。总的变形过程为蠕变—拉裂—流滑。特殊之处在于，滑坡的上、中、下三部分均以此方式传递应力，逐步被激活，同时形成了三块相对独立的滑体，缓慢地滑入江中。

(2) 经过持续降雨后，2019 年 7 月 20 日至 8 月 16 日，垭豁口滑坡历经初期的复活，只是局部以流滑形式产出，而整体仍然处于蠕变阶段，威胁着河对岸的居民。初步的应急处置措施已经实施，包括立警示牌，疏通河道，开展滑坡的监测，后期需要具体的工程防治措施以确保滑坡的稳定。

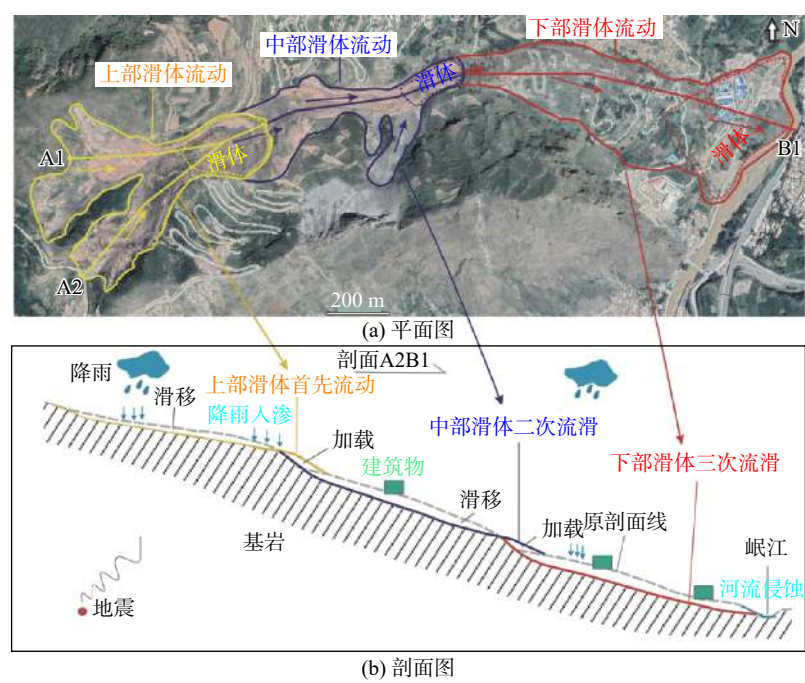


图 10 滑坡变形过程及发生机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of landslide event process and mechanism



图 11 滑坡潜在影响范围

Fig. 11 Schematic diagram of landslide potential impact area

参考文献 (References) :

[1] 郭长宝,任三绍,李雪,等. 甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理 [J]. 现代地质, 2019, 33(1): 206–217. [GUO Changbao, REN Sanshao, LI Xue, et al. Development characteristics and reactivation mechanism of the Jiangdingya ancient landslide in the Nanyu town, Zhouqu County, Gansu Province [J]. Geoscience, 2019, 33(1): 206–217. (in Chinese with English abstract)]

[2] 张永双,吴瑞安,郭长宝,等. 古滑坡复活问题研究进展与展望 [J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 728–740. [ZHANG Yongshuang, WU Ruian, GUO Changbao, et al. Research progress and prospect on reactivation of ancient landslides [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(7): 728–740. (in Chinese with English abstract)]

[3] 吴玮江,王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006. [WU Weijiang, WANG Nianqin. Landslide hazards in Gansu[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese).]

[4] 王立朝,温铭生,冯振,等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 1–9. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the baige landslide at Jinshajiang river, Tibet, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 1–9. (in Chinese with English abstract)]

[5] 张卫雄,翟向华,丁保艳,等. 甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 7–14. [ZHANG Weixiong, ZHAI Xianghua, DING Baoyan, et al. Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 7–14. (in Chinese with English abstract)]

[6] WANG L M, WU Z J, WANG P, et al. Characteristics, causation, and rehabilitation of Zhouqu extraordinarily serious debris flows in 2010, China [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(8): 2342–2348.

[7] WANG G L. Lessons learned from protective measures

- associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China [J]. *Nat Hazards*, 2013, 69: 1835 – 1847.
- [8] XIAO H J, LUO Z D, NIU Q G, et al. The 2010 Zhouqu mudflow disaster: possible causes, human contributions, and lessons learned [J]. *Natural Hazards*, 2013, 67(2): 611 – 625.
- [9] 赵俊华. 舟曲县滑坡泥石流遥感影像判读与灾害防治 [J]. *人民长江*, 2004, 35(12): 1 – 2. [ZHAO Junhua. Remote sensing image interpretation of landslide and mud-rock flow in Zhouqu County and disaster prevention [J]. *Yangtze River*, 2004, 35(12): 1 – 2. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 姜鑫, 滕鸿伟, 冯娟. 舟曲县峰迭乡水泉沟西南滑坡成因机制及稳定性分析 [J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2015(3): 84 – 88. [JIANG Xin, TENG Hongwei, FENG Juan. The genesis mechanism and stability analysis of the southwest landslide in Shuiquangou Fengdie of Zhouqu [J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2015(3): 84 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 焦赞, 王国亚. 地震荷载对滑坡稳定性的影响评估——以甘肃舟曲南桥滑坡为例 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 692 – 700. [JIAO Yun, WANG Guoya. The impact assessment of earthquake on landslide stability: A case study of landslides in Nanqiao village, Zhouqu, Gansu [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 692 – 700. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李文彦, 张媛, 韩鑫, 等. 舟曲锁儿头滑坡裂缝变形特征研究 [J]. *人民长江*, 2013, 44(3): 33 – 35. [LI Wenyan, ZHANG Yuan, HAN Xin, et al. Research on deformation characteristics of cracks in Suo'ertou landslide in Zhouqu [J]. *Yangtze River*, 2013, 44(3): 33 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 宋丙辉, 谌文武, 吴玮江, 等. 甘肃舟曲泄流坡滑坡滑带土的抗剪强度特性 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(6): 7 – 12. [SONG Binghui, CHEN Wenwu, WU Weijiang, et al. Shear strength characteristics of soil in the slide zone of Xieliupo landslide in Zhouqu, Gansu Province [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2011, 47(6): 7 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 侯圣山, 李昂, 陈亮, 等. 基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 47 – 53. [HOU Shengshan, LI Ang, CHEN Liang, et al. Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 47 – 53. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪H1滑坡变形机制 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 73 – 81. [WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 73 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘兴旺, 袁道阳, 邵延秀, 等. 甘肃迭部—白龙江南支断裂中东段晚第四纪构造活动特征 [J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(6): 111 – 119. [LIU Xingwang, YUAN Daoyang, SHAO Yanxiu, et al. Characteristics of late quaternary tectonic activity in the middle-eastern segment of the southern branch of Diebu-Bailongjiang fault, Gansu [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(6): 111 – 119. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 任进舟. 南峪滑坡与小震活动 [J]. *西北地震学报*, 1993(2): 94 – 96. [REN Jinzhou. The Nanyu landslip and small earthquake activity [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1993(2): 94 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 黄晓, 杨为民, 张春山, 等. 舟曲泄流坡滑坡变形特征及其形成机理 [J]. *地质力学学报*, 2013, 19(2): 178 – 187. [HUANG Xiao, YANG Weimin, ZHANG Chunshan, et al. Deformation characteristics and formation mechanism of xieliupo landslide in Zhouqu [J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19(2): 178 – 187. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杜国梁, 张永双, 高金川, 等. 基于GIS的白龙江流域甘肃段滑坡易发性评价 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22(1): 1 – 11. [DU Guoliang, ZHANG Yongshuang, GAO Jinchuan, et al. Landslide susceptibility assessment based on gis in Bailongjiang watershed, Gansu Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(1): 1 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李绍红, 朱建东, 王少阳, 等. 考虑降雨类型的基岩型浅层边坡稳定性分析方法 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 131 – 135. [LI Shaohong, ZHU Jiandong, WANG Shaoyang, et al. Stability analysis methods for the bedrock shallow slope considering rainfall types [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 131 – 135. (in Chinese with English abstract)]