

引用格式:郭富赞,王信,吴正军,张毅,孟兴民,石鹏卿.舟曲磨里巨型滑坡基本特征及破坏模式[J].山地学报,2022,40(4):557-569.

GUO Fuyun, WANG Xin, WU Zhengjun, ZHANG Yi, MENG Xingmin, SHI Pengqing. Characteristics and failure mode of giant Moli landslide in Zhouqu county, Gansu province, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(4):557-569.

## 舟曲磨里巨型滑坡基本特征及破坏模式

郭富赞<sup>1</sup>,王信<sup>1</sup>,吴正军<sup>2</sup>,张毅<sup>3</sup>,孟兴民<sup>3</sup>,石鹏卿<sup>1</sup>

(1. 甘肃省地质环境监测院,兰州 730000; 2. 甘肃省地矿局 第三地质矿产勘查院,兰州 730000;

3. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院,兰州 730000)

**摘要:**甘肃省舟曲县是我国滑坡灾害最为严重的县区之一,分布着很多巨型滑坡。舟曲磨里滑坡位于白龙江一级支流大水坝河上游左岸,为典型的断裂带巨型滑坡,处于不稳定状态,严重威胁当地民众的生命财产安全。本研究通过无人机测绘、现场调查、变形监测、数值模拟等技术手段,对磨里滑坡的发育特征、变形趋势和破坏模式进行了分析研究。结果表明:(1)磨里滑坡形态、结构清晰,平面形态呈长条形,长度 1500 m,宽度平均约 385 m,厚度 32~73 m,体积达  $2.12 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,滑体由破碎千枚岩组成,为巨型超深层堆积层滑坡,在舟曲南部具有典型性;(2)滑坡复活主要受强降雨引发,其下段首先发生滑动,中上段受牵引影响产生蠕动变形,滑坡下段的移动速率大于中上段移动速率,滑动形式为典型的牵引式滑动;(3)不同工况下滑坡处于不稳定-基本稳定状态,不利工况下滑坡的破坏模式以整体的失稳变形或滑动为主。研究结果表明该滑坡规模宏大,不具备工程治理条件,建议对受磨里滑坡威胁的民众尽快采取避险搬迁措施。该防治措施已被当地政府采纳和实施,取得了良好的防灾减灾效益。本研究可为类似地区巨型滑坡复活破坏机制研究、应急处置及风险防控提供技术方法参考。

**关键词:**舟曲;巨型滑坡;破坏模式;防治措施

**中图分类号:** X43

**文献标志码:** B

中国西部地区的滑坡具有规模大、机制复杂、危害大等特点<sup>[1]</sup>。白龙江流域地处青藏高原和四川盆地过渡区,特别是中游舟曲段,为高山峡谷区,外动力地质作用极为显著,巨型滑坡发育,危害严重<sup>[2-3]</sup>。近年来,受气候变化和地震影响,泄流坡滑坡、锁儿头滑坡、江顶崖滑坡、牙豁口等滑坡频繁成灾,危害村镇、堵断江河,严重威胁当地人民生命财产安全<sup>[4-8]</sup>。鉴于此,亟需开展断裂带巨型滑坡复活特征和破坏模式研究,探明滑坡复活破坏的工程地质条件和地形地貌特征及前兆信息,为该类型滑坡应急处置、工程治理和防灾减灾提供科学依据。

白龙江中游舟曲段滑坡规模巨大、机理复杂,直接影响山区城镇经济布局与工程建设,防控形势严

峻,是近年来专家学者研究的热点区域。滑坡复活过程和特征研究可以揭示滑坡复活破坏机理,为滑坡监测预警提供理论依据<sup>[9-16]</sup>。白龙江中游舟曲北部坪定—化马断裂带滑坡复活事件频繁发生,学者们针对锁儿头滑坡、大小湾滑坡、江顶崖滑坡和牙豁口滑坡开展了大量研究,主要利用工程地质钻探、InSAR 变形监测、遥感解译和数值模拟等技术方法,重点揭示了巨型滑坡发育特点、变形特征、形成机理和复活破坏过程等<sup>[2-8]</sup>,为滑坡灾害防治提供了科学依据。但是对于舟曲南部地区的黑松坪—三角坪断裂控制的巨型滑坡鲜有研究。磨里滑坡是黑松坪—三角坪断裂控制的滑坡之一。2021 年 2 月 26 日,受汛期降雨影响,位于舟曲县果耶镇的磨里滑坡

收稿日期(Received date):2021-09-18;改回日期(Accepted date):2022-07-24

基金项目(Foundation item):甘肃省科技重大专项计划(19ZD2FA002);国家自然科学基金(42077230)。[Science and Technology Major Special Plans of Gansu Province(19ZD2FA002); National Natural Science Foundation of China(42077230)]

作者简介(Biography):郭富赞(1970-),男,甘肃景泰人,正高级工程师,主要研究方向:地质灾害防灾减灾。[GUO Fuyun(1970-), male, senior engineer, born in Jingtai, Gansu province, research on geological disaster prevention and reduction] E-mail: fyg51913@163.com

复活,造成磨里村、果耶村部分房屋变形,威胁 282 户 1119 人的生命财产安全,形成特大滑坡险情,引起了国家和社会的高度关注。磨里滑坡区地形平缓,与坪定—化马断裂带控制的滑坡地形条件显著不同。滑坡的形态、变形、物质组成等基本特征是否与坪定—化马断裂带控制的巨型滑坡具有可比性,是何种破坏模式,需采取怎样的防治措施,这些问题都急需解答。

本文以舟曲磨里滑坡为例,综合利用无人机测绘、工程地质钻探、变形监测、数值模拟等技术手段,分析研究了磨里滑坡的基本特征及变形破坏模式,为磨里滑坡防灾减灾工作提供了科学依据,同时为舟曲同类型滑坡的研究评价工作提供了参考。

## 1 滑坡区地质环境条件

磨里滑坡处于甘肃省甘南藏族自治州舟曲县果耶镇磨里村,位于白龙江一级支流大水坝河上游左岸,距县城 30 km。果耶村和磨里村即分布于滑坡体上,果耶村为镇政府所在地。滑坡位置为  $104^{\circ}25'40.62''\text{E} \sim 104^{\circ}26'13.82''\text{E}$ 、 $33^{\circ}38'35.64''\text{N} \sim 33^{\circ}39'17.04''\text{N}$ (图 1)。

舟曲县在大地构造上位于秦岭构造带西段,区内地质构造复杂,发育有白龙江复背斜、光盖山—迭山南麓断裂带、坪定—化马断裂带、迭部—白龙江断裂带等多条构造带,其迹线均为 NW ~ NWW 向。同时,受主断裂影响,区内还发育有近 NE 向的次级断

裂,复杂的地质构造条件控制着当地地貌形态和地层分布。在白龙江水系作用下,形成了舟曲一带地形陡峻、山高谷深的地貌格局。在内外营力的双重作用下,沿白龙江干流及其支流两岸断续塑造了众多高达 300 ~ 1100 m 的岩土质高陡边坡,为滑坡发育提供了基本条件。

磨里滑坡区出露地层为上志留统的白龙江群千枚岩、板岩,中泥盆统西汉水群灰岩、千枚岩,以及第四系全新统次生黄土、碎石层、坡积碎石层和滑坡堆积碎石土等。黑松坪—三角坪断裂带呈北西向自滑坡区北部穿过,控制了区域地貌和地层分布(图 2)。

果耶镇年平均气温约  $2^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>,年降水量约 500 ~ 900 mm,70% 的降雨量集中在 5—9 月,短时降水强度较大,1 小时降水量可达 60 mm 以上。大河坝河的丰水期为 6—9 月,多以集中洪流出现,水流大、流速高,具有很强的冲刷侧蚀能力。滑坡区地下水丰富,据钻孔揭露,地下水稳定水位埋深 4.0 ~ 16.5 m。地下水主要接受大气降水与滑坡体上部洼地的潜流补给,受地形条件控制,自北向南径流,排泄方式主要有蒸腾作用及地下水向东西两侧冲沟及坡脚大水坝沟的径流排泄。

## 2 滑坡基本特征

### 2.1 滑坡形态特征

滑坡平面形态呈“长条状”,剖面形态呈“折线

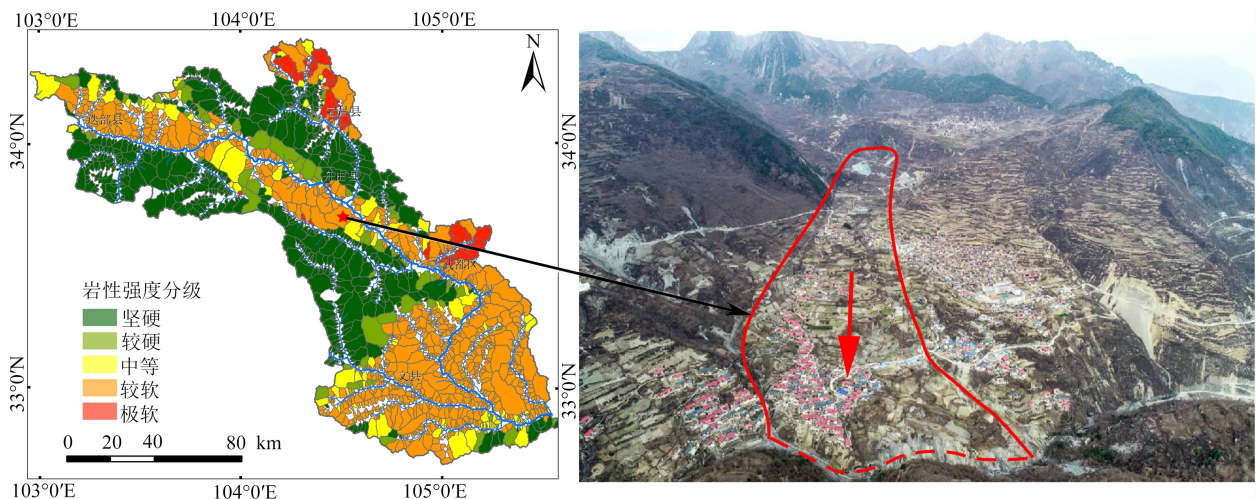


图 1 磨里滑坡地理位置及全貌图

Fig. 1 Location and general view of Moli landslide, Zhouqu county, Gansu province, China

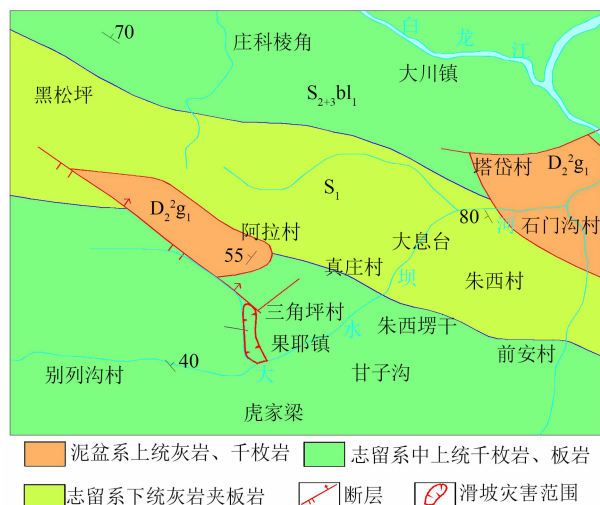


图2 磨里滑坡及临近区域地质图

Fig. 2 Geological map of Moli landslide and adjacent areas

型”,主滑方向  $170^\circ$ ,后缘高程 1968 m,前缘高程 1620 m,相对高差 348 m。滑坡体上窄下宽,宽度 240 ~ 530 m,平均宽度 385 m,沿滑动方向最大长度 1500 m,滑坡区面积  $5.3 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,滑体厚度 32 ~ 73 m,平均厚度 40 m,总体积  $2.12 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,为一超深层巨型堆积层滑坡。滑体后部坡度较大,约  $15^\circ \sim$

$25^\circ$ ;中下部坡段较缓,约  $10^\circ \sim 15^\circ$ ;滑体前部为人工开挖形成的高 2 ~ 6 m 的陡坎,坡度约  $32^\circ \sim 55^\circ$ ,局部地段近直立(图 3)。

滑坡轮廓清晰,后壁部分山坡近直立,两侧冲沟走向与主滑方向基本一致,冲沟长度约 1.6 km,切割深度为 5 ~ 10 m。滑坡东侧边界裂缝基本贯通,长达 1.5 km 的侧缘裂缝直至大水坝左岸;滑坡后缘拉张裂缝明显,泉水出露,形成滑坡洼地;滑坡前缘受大水坝河水切割,形成 10 ~ 35 m 高陡临空面。滑坡剪出口位于陡坡中下部。

## 2.2 滑坡结构特征

磨里滑坡滑体总体具中部较厚,后部、前部较薄的特点(图 4、图 5),依据钻孔岩芯及孔内测斜仪判定,滑动面在纵向上后部深至 35 ~ 64.8 m,中部深至 62 ~ 73 m 处,前缘深至 32 m 处(图 6)。

### 2.2.1 滑体特征

滑体具有明显的分层特征,垂向上自上而下大致可分为 3 层。上部为黄褐色碎石土,成分以灰岩碎石和块石为主,局部夹杂粒径大于 0.5 m 的漂砾。土体松散,泥土充填,岩芯呈块状,干燥一稍湿,钻探过程中严重塌孔和漏浆。中部为

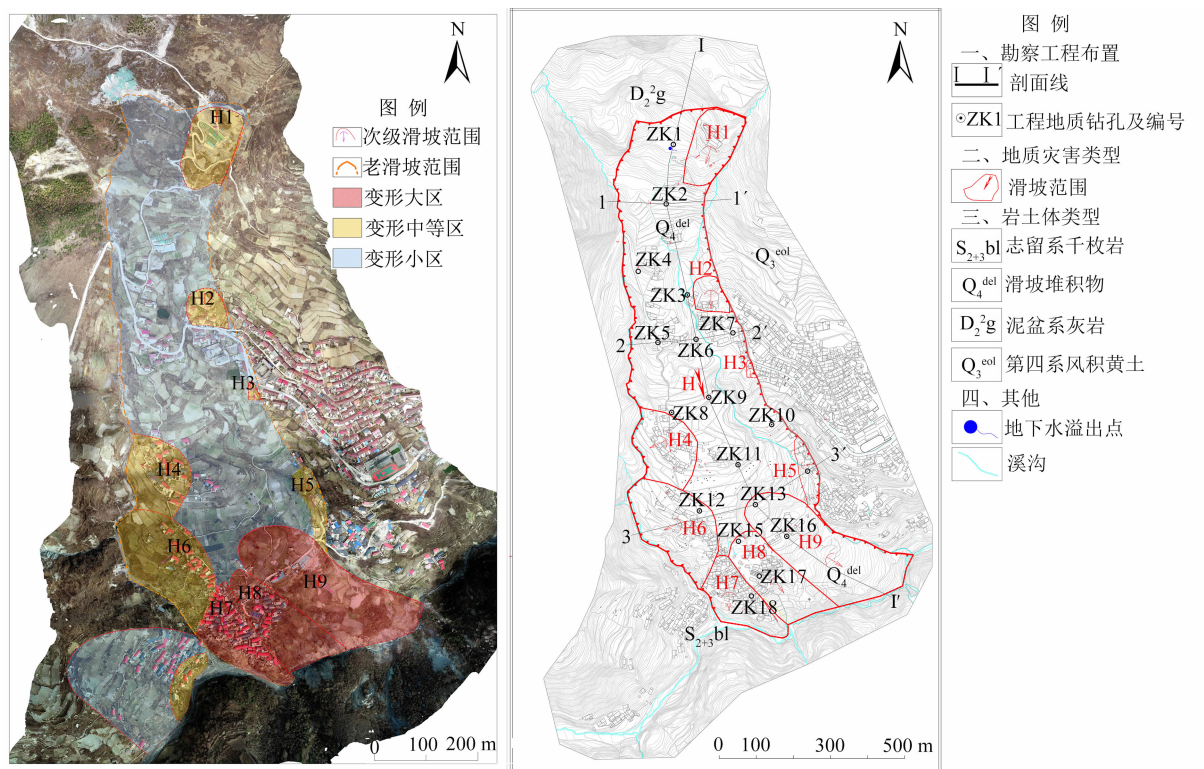


图3 磨里滑坡平面图:(a)影像图;(b)地形图

Fig. 3 Overview of Moli landslide: (a) image map; (b) topographic map



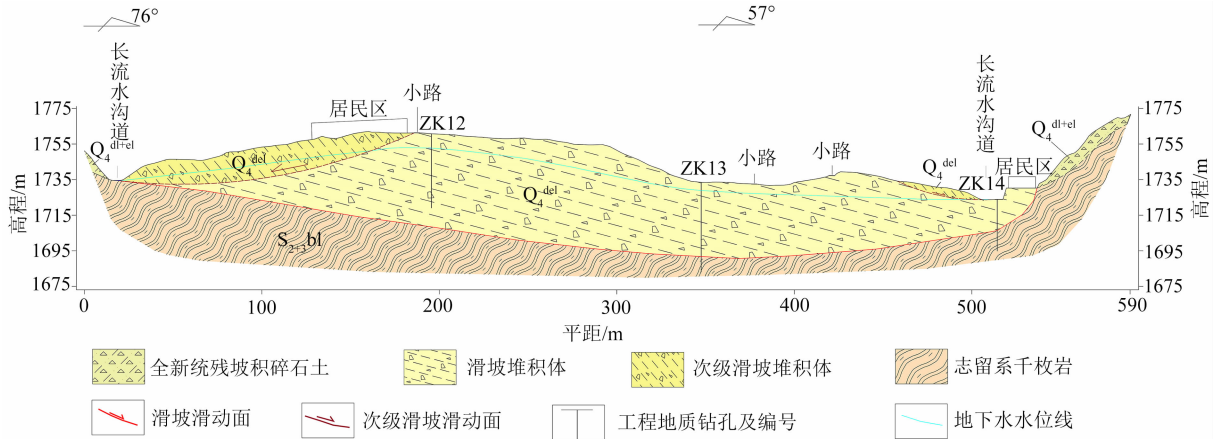


图 4 磨里滑坡横向地质剖面图(3-3')

Fig. 4 Transverse geological profile of Moli landslide(3-3')

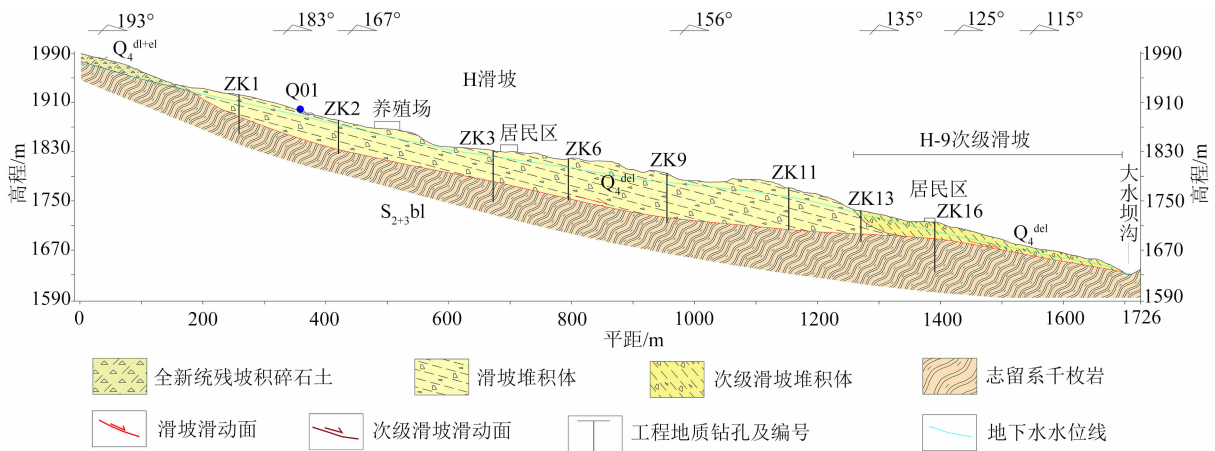


图 5 磨里滑坡主滑方向地质剖面图(I-I')

Fig. 5 Geological profile of main sliding direction of Moli landslide(I-I')

灰黑色风化千枚岩碎屑,局部夹杂粒径 2~5 cm 的炭质板岩。土体含水量较高,软塑,强度较低,手搓呈粉末状或泥状。岩芯呈短柱状,钻探过程中缩径严重。下部在纵向上具明显分带特征,滑体中后部主要为灰岩强风化层,岩体强度低,手掰易碎,滑体中部及下部为灰黑色千枚岩、板岩碎屑,稍湿一湿,手搓呈粉末状(图 7)。

#### 2.2.2 滑带土特征

滑带土在纵向上前后稍有差异。后部为厚度约 0.5 m 灰黑色含砾黏土,可见擦痕,与水平方向夹角约 15°(图 8a);中部主要为厚度约 0.8 m 黄褐色含砾黏土,压密作用明显,未发现明显擦痕(图 8b);前部为厚度约 0.6 m 灰黑色含砾黏土,可见擦痕,与水平方向夹角约 8°(图 8c)。滑带土厚度呈现出后部和前缘较薄,中部较厚的特点。

#### 2.2.3 滑床特征

据钻孔揭露,滑床上部岩性为老滑坡堆积土,成分主要为灰褐色千枚岩碎屑和灰岩碎块石,厚度为 5~20 m。下部为志留系千枚岩,局部夹杂灰黑色炭质板岩碎屑,结构较密实(图 9)。

#### 2.2.4 剪出口特征

滑坡剪出口高程为 1676~1681 m,高出大水坝河 26~32 m。滑坡东侧从基岩接触面剪出,滑床为浅灰色灰岩,滑体物质为黄褐色碎石土,局部夹杂灰黑色炭质板岩碎屑(图 10)。滑带土厚度为 0.3~0.4 m,成分为灰黑色含砾黏土,含细颗粒角砾,软塑状,含水量高。滑面上可见明显擦痕。滑坡西侧从坡脚剪出,导致前缘局部发生滑塌,坡体房屋侧墙垮塌,坡脚排导堤挤压变形。



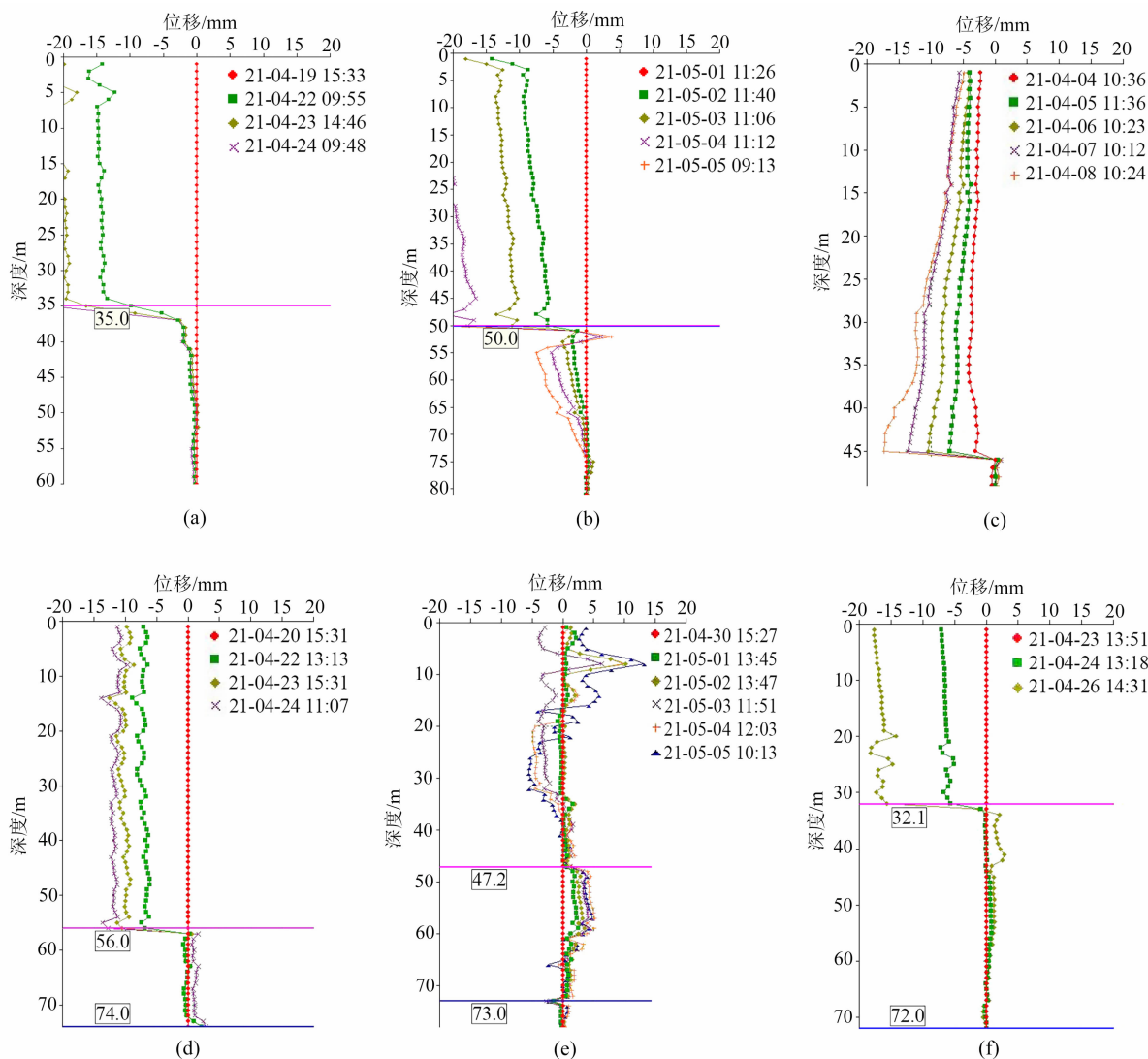


图6 滑坡深部位移监测成果曲线图:(a) ZK1;(b) ZK2;(c) ZK4;(d) ZK8;(e) ZK9;(f) ZK16

Fig. 6 Curve diagram of the displacement monitoring results in the deep part of the landslide;

(a) ZK1;(b) ZK2;(c) ZK4;(d) ZK8;(e) ZK9;(f) ZK16



图7 滑体岩芯特征

Fig. 7 Characteristics of borehole of sliding mass

### 3 滑坡变形特征

磨里滑坡在前期均未发现整体变形迹象。2020年8月14—17日遭受强降雨之后,滑坡发生复合式变形。其主要特征是,滑坡前缘变形剧烈,出现6个小型次级滑坡(H4~H9),导致上部的房屋强烈变形甚至倒塌;滑坡后缘出现明显的拉张裂缝,并产生了养殖场小型次级滑坡(H1);滑坡东侧变形也较明显,长约1.5 km的剪切裂缝基本贯通,道路、房屋变形迹象明显,并沿侧边界发育2处小型次级滑坡(H2、H3);滑坡西侧中上部变形也较明显,侧缘出

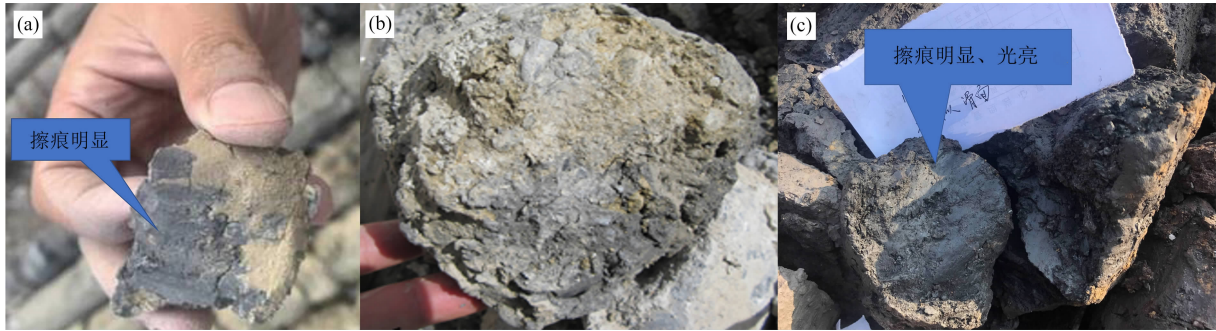


图 8 滑带土照片:(a)后部;(b)中部;(c)前部

Fig. 8 Photos of sliding zone: (a) the rear; (b) the middle part; (c) the front part



图 9 滑床岩性特征

Fig. 9 Characteristics of borehole of sliding bed

现剪切裂缝,桥梁被破坏;滑坡中部房屋未见明显变形迹象。总体变形呈现出前缘变形剧烈,房屋倒塌损毁严重;滑坡上部变形迹象明显,多处房屋开裂,道路错断;滑坡中部变形迹象不明显的特点(图 11)。

采用 InSAR 技术对滑坡历史动态变形特征进行分析,发现滑坡前缘垭口长期处于活动状态,2020 年 9 月以后,开始剧烈运动,沿斜坡向下快速移动,变形速率达 100 mm/a。滑坡下部基本处于稳定状态,自 2020 年雨季过后,在当年 11 月开始剧烈变形,变形速率达 140 mm/a。滑坡中部在 2019 年 8 月之前基本处于稳定状态,之后进入持续变形阶段,变形速率达 60 mm/a(图 12)。

通过 7 台位移监测仪显示,位移最大的是滑坡中下部的 GNSS7,累计位移是 259 mm,滑坡中上部



图 10 磨里滑坡剪出口

Fig. 10 Shear outlet of Moli landslide



图 11 承灾体破坏特征:(a)道路鼓胀;

(b)房屋破坏;(c)房屋开裂;(d)墙体开裂

Fig. 11 damage characteristics of disaster bearing body:

(a) road bulging; (b) house destruction;

(c) house cracking; (d) wall cracking



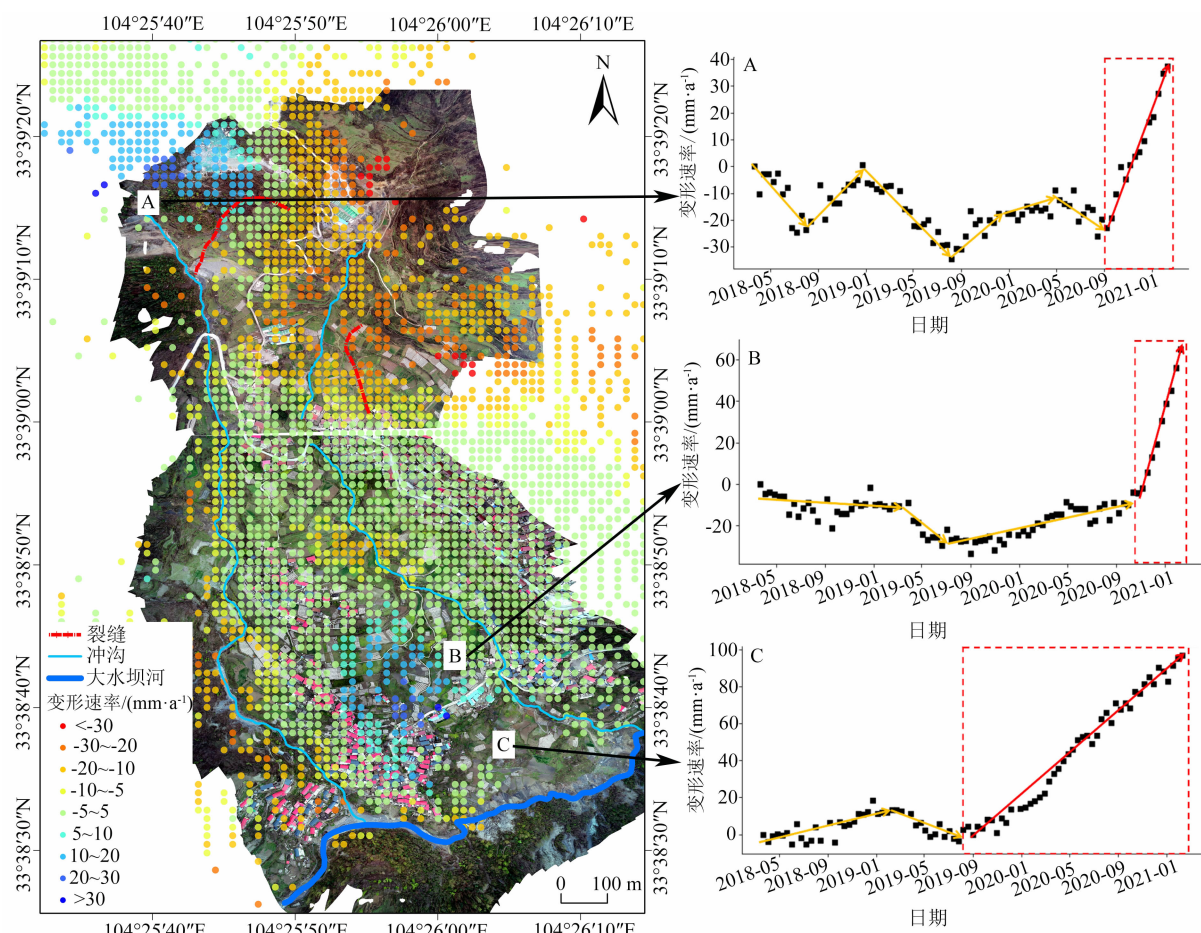


图 12 磨里滑坡 InSAR 监测地表形变速率 (2018 年 4 月—2021 年 1 月)

Fig. 12 Displacement rates of Moli landslide monitored by InSAR technique (April 2018—January 2021)

的 GNSS6, 累计位移是 84.8 mm, 说明滑坡前缘的移动速率大于后部移动速率 (图 13)。滑坡中前部自 2019 年 9 月复活开始变形, 并牵引滑坡整体变形, 最终于 2021 年 2 月发生滑动, 上部建筑物破坏, 造成了严重的经济损失。

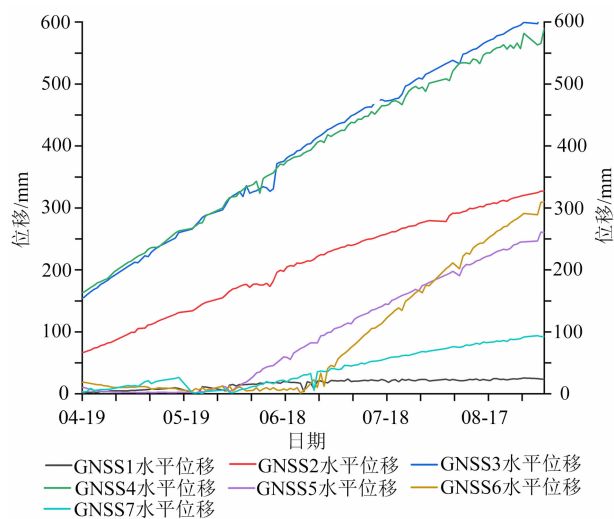
## 4 数值模拟分析

### 4.1 OptumG2 软件计算滑坡稳定性的基本原理

OptumG2 是一款二维有限元极限分析软件, 其计算边坡稳定性安全系数有 2 种方式: 重力乘法法和强度折减法。两种计算方式各有其优点, 总体而言基于强度折减的安全系数比基于重力增大获得的安全系数更保守<sup>[17-21]</sup>。本次计算采用有限元强度折减法, 对磨里滑坡稳定性状态及破坏方式进行数值计算。

### 4.2 滑坡数值模型建立及参数选取

本次计算, 选取磨里滑坡主滑方向 I 号剖面, 岩

图 13 磨里滑坡 GNSS 监测地表形变曲线  
(2021 年 4 月—2021 年 9 月)Fig. 13 Surface deformation curve of Moli landslide by GNSS  
(April 2021—September 2021)



体强度特征采用理想弹塑性本构模型莫尔-库伦 (Mohr-Coulomb) 屈服准则描述,时间范围设置为“长期”,单元类型选为“上限”或“下限”(分别用于计算上限解或下限解),单元数量设置为 20 000,采用自适应网格,初始单元数量设置为 5000,进行 3 次自适应迭代,控制变量选为剪切耗散(图 14)。依据钻探揭露结果,滑带部分为 0.5~0.8 m 软塑状含砾黏土,H9 次级滑坡滑面后端采用软件中剪切裂隙单元进行模拟,各岩土体物理力学指标根据现场调查和相关试验结果选取(表 1)。

4.3 计算结果

天然工况下,滑坡稳定性系数 1.06~1.08,处于基本稳定状态(表 2),最大主应力 3296 kPa,滑坡潜在不稳定块体为滑坡下段次级滑坡 H9,潜在变形位移 37.5 cm~67.2 cm(图 15a~c)。

暴雨工况下,滑坡稳定性系数 0.91~0.94,滑坡处于不稳定状态(表 2)。依据变形计算结果,滑坡体呈现出典型的牵引式破坏模式,主要为滑坡下

段次级滑坡 H9 首先发生失稳滑动,中上段滑体受牵引影响,以蠕滑变形为主。其中,滑坡上段蠕滑位移大于中段,主要原因为滑坡中段滑面埋深大、角度平缓,起到了一定的阻滑作用。根据位移计算结果,下段次级滑坡 H9 变形位移在 80~106 cm 之间,H9 滑坡滑动后形成的后壁变形位移 2.5~5.0 cm 之间;滑坡上段变形位移 2.5~3.5 cm 之间;中段蠕滑变形位移 0.2~0.5 cm 之间(图 15d~f)。

地震工况下,滑坡稳定性系数 0.83~0.84,处于不稳定状态(表 2)。依据变形计算结果,滑坡体破坏模式兼具推移式、牵引式破坏的特点,滑坡将整体失稳滑动。滑坡滑动时上段滑移距离大于中下段。其中滑坡上段变形位移 66~109 cm,中段变形位移 38~40 cm,下段次级滑坡 H9 变形位移 35~40 cm(图 15g~i)。

数值计算获得的变形特征及破坏模式,与现场调查结果及布置于滑坡体各个部位的位移监测数据均具有较好的一致性。

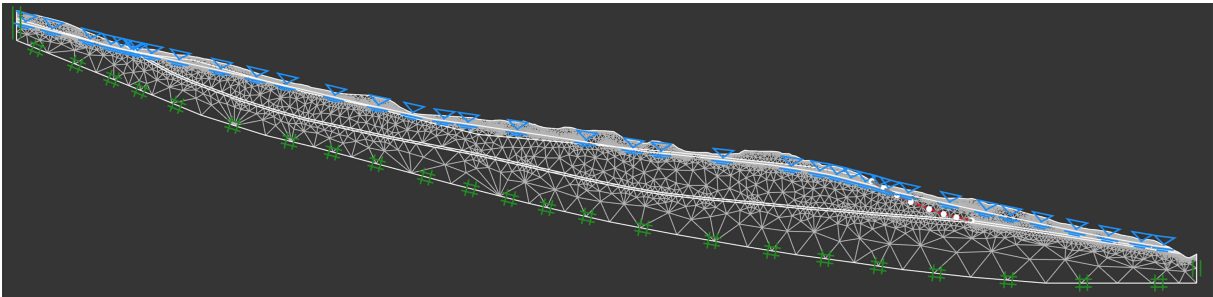


图 14 计算模型及自适应网格划分图

Fig. 14 Calculation model and adaptive meshing diagram

表 1 岩土材料参数选取统计表

Tab. 1 Statistical table for selection of geotechnical material parameters

工况	地层	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\Phi/(^{\circ})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$
天然工况	滑体(碎石土)	20	15	28	15	0.30
	H 滑坡滑带土(含砾黏土)	18	20	16	5	0.25
	H9 次级滑坡滑面	20	10	18	20	0.30
	滑床(千枚岩)	22	20	35	25	0.38
暴雨工况	滑体(碎石土)	21	13	27	13	0.30
	H 滑坡滑带土(含砾黏土)	24	18	15	3	0.25
	H9 次级滑坡滑面	22	8	16	18	0.30
	滑床(千枚岩)	25	18	32	22	0.38
地震工况	地震设防烈度为Ⅷ度,水平地震加速度取 0.2g					

表 2 滑坡体稳定性计算成果表  
Tab.2 Calculation results of landslide stability

滑坡名称	剖面	工况	稳定系数		稳定状态
			下限	上限	
磨里滑坡 (H)	I - I'	工况 1:天然	1.06	1.08	基本稳定
		工况 2:暴雨	0.91	0.94	不稳定
		工况 3:地震	0.83	0.84	不稳定

5 讨论

巨型滑坡灾害一旦发生,往往造成巨大的生命和财产损失。本次研究采用无人机技术、便携式 GNSS 监测技术、深部位移监测技术和数值模拟技术,快速获取了磨里滑坡区的精细地形数据,准确地

界定了滑坡边界、厚度,研究了滑坡的变形破坏模式,进行了滑坡稳定评价。无人机技术获取的高精度地形数据可以精确划定滑坡边界、量取滑坡的几何数据,较以往人工测量效率大大提高。便携式 GNSS 等滑坡形变监测技术的应用,为滑坡变形特征和破坏模式分析提供了更加直观有效的工具。钻孔内深部位移监测,可以辅助判断滑体厚度及滑面埋深,为滑坡地质力学模型的建立提供了基本数据。数值模拟是滑坡危险性定量评价和破坏模式预测的有效方法,本次研究利用 OptumG2 软件中的有限元强度折减法,模拟了滑坡在天然、暴雨和地震工况下的稳定性及变形破坏模式。多种技术手段的应用,提高了滑坡勘察、研究工作效率,满足了滑坡灾害应急处置需求,为后续研究提供了有效的数据。

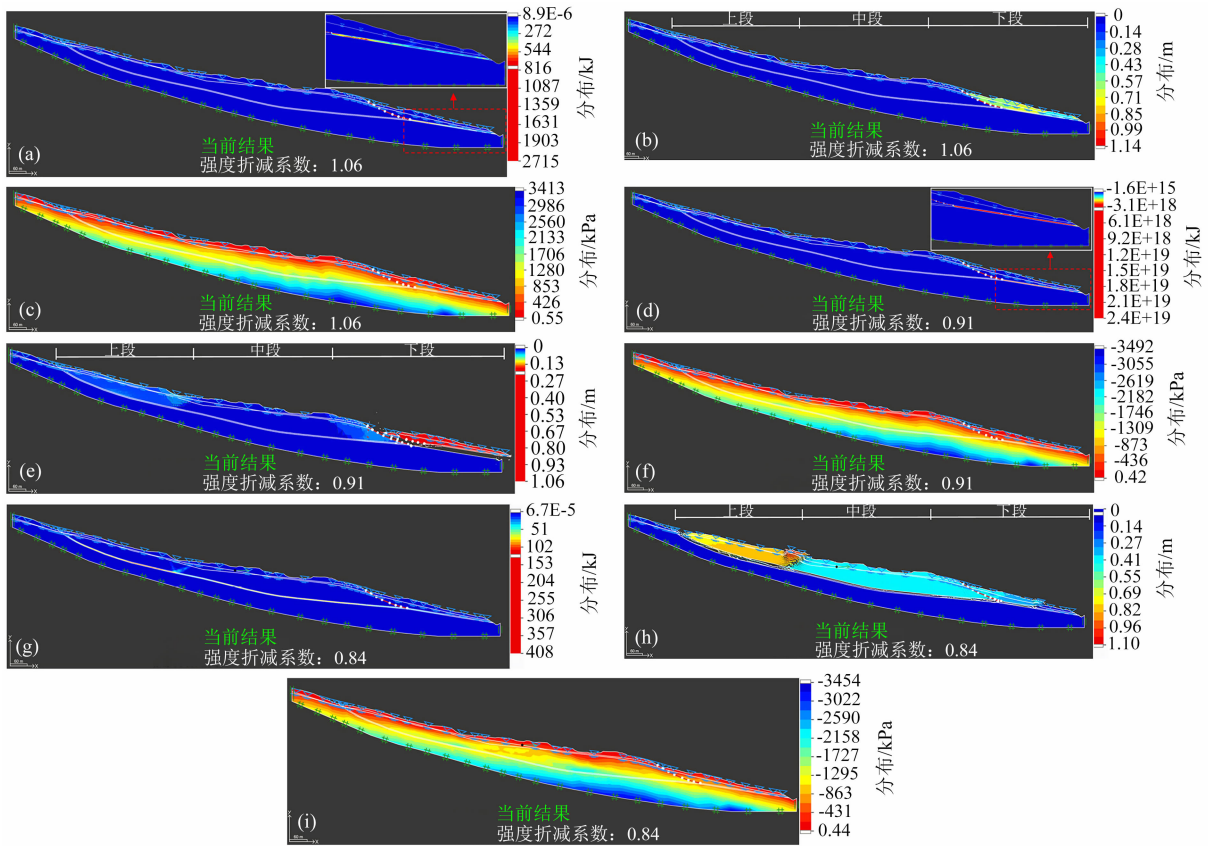


图 15 滑坡稳定性及破坏模式数值计算结果:(a)天然工况剪切耗散图;(b)天然工况潜在变形云图;(c)天然工况最大主应力分布图;(d)暴雨工况剪切耗散图;(e)暴雨工况综合位移及破坏变形云图;(f)暴雨工况最大主应力分布图;(g)地震工况剪切耗散云图;(h)地震工况综合位移及破坏变形云图;(i)地震工况最大主应力分布图

Fig.15 numerical simulation results of landslide stability and failure mode;

(a) shear dissipation diagram under natural conditions; (b) potential deformation diagram under natural conditions; (c) distribution diagram of maximum principal stress under natural conditions; (d) shear dissipation diagram under rainstorm conditions; (e) comprehensive displacement and failure deformation diagram under rainstorm conditions; (f) distribution diagram of maximum principal stress under rainstorm conditions; (g) shear dissipation diagram under seismic conditions; (h) comprehensive displacement and failure deformation diagram under seismic conditions; (i) distribution diagram of maximum principal stress under seismic conditions

实地调查和勘察揭示,黑松坪—三角坪断裂形成的槽状地形控制了磨里滑坡的发育形态和结构组成。滑坡基本沿着断裂带形成的洼地分布,滑体为千枚岩、板岩碎屑组成,滑带土为含砾黑色黏土。由于断裂带裂隙水发育,滑坡体赋存了较为丰富的地下水,成为滑坡形成的主要因素。滑坡的变形也具有多级分块特征。通过对比坪定—化马断裂带典型滑坡,无论从发育环境、形态特征、物质组成、水文地质条件和变形特征等方面,磨里滑坡都与之具有高度相似性<sup>[22-25]</sup>。但磨里滑坡也有其独特性,其滑床坡度平均为 $12^{\circ}$ 左右,属低角度滑坡。低角度巨型滑坡复活往往在强震条件下引发,磨里滑坡发生时周边地区并无强震发生,只是在连续4年降雨偏多的条件下复活滑动,这种现象需要防灾减灾部门高度重视。数值模拟表明,滑坡的破坏模式以整体的失稳变形或滑动为主,不同工况下滑坡各部位变形特征及破坏模式均不相同,其暴雨工况下滑坡变形破坏模式模拟结果与现场调查、监测数据反映的变形特征相一致。通过该滑坡特征的剖析研究,可为后续黑松坪—三角坪断裂带控制的滑坡研究提供参考。

舟曲是我国巨型滑坡较为集中的区域,历史灾害严重,近年来有加剧活动之势。Zhang<sup>[26]</sup>发现舟曲县城周边坪定—化马断裂带有数十处巨型滑坡处于活动状态,且在汶川地震后活动性加强。近年来,极端降雨和地震引发的巨型滑坡复活灾害在舟曲时有发生,如:江顶崖滑坡、牙豁口滑坡等。滑坡灾害严重制约当地社会经济发展,使得舟曲成为全国地质灾害风险防控的重点区域。尽管已有学者通过多源遥感对地观测技术已经对白龙江中游活动滑坡进行了监测和识别<sup>[27-28]</sup>,但是主要集中于北部坪定—化马断裂带控制的滑坡。受遥感几何畸变、时空失相干等影响,并未详细摸清区内处于活动状态的巨型滑坡。对于南部黑松坪—三角坪断裂带控制的巨型滑坡研究投入更少。此外,多年来滑坡复活机制研究主要集中于个体滑坡,由于巨型滑坡结构复杂,滑坡复活破坏规律尚不明晰,需要补充大量新近滑坡案例,探明滑坡复活破坏过程,揭示极端降雨下滑坡运动变化趋势,为此类灾害预测预报和监测预警提供科学依据。本研究综合运用多种技术手段,建立了巨型滑坡应急调查和研究的技术方法模式,由表及里、由浅入深的认识了滑坡的发育特征和破

坏模式,揭示了强降雨诱发该滑坡加速运动的变形模式,解释了以牵引式为主复活破坏过程,并发现滑坡整体仍处于不稳定状态。以上研究结果表明该滑坡整体工程治理难度极大,避险搬迁是滑坡灾害风险防控的唯一途径。在开展本研究的过程中,对磨里滑坡的防治对策以专题研究报告的形式提交舟曲县人民政府,报告中提出的避险搬迁等防治措施已被当地政府采纳和实施,取得了良好的防灾减灾效益。本研究可为类似地区巨型滑坡复活破坏机制研究、应急处置及风险防控提供技术方法参考。

## 6 结论

本文以舟曲磨里滑坡为例,分析研究了滑坡的基本特征和变形破坏模式。具体结论如下:

(1)磨里滑坡长度1500 m,宽度平均约385 m,厚度32~73 m,体积达 $2.12 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,为巨型超深层堆积层滑坡。滑坡形态、结构清晰,滑体由破碎千枚岩组成,滑带以碳质含砾黏土为主,滑床为千枚岩和碳质板岩组成。在舟曲南部具有典型性。

(2)本次磨里滑坡复活滑动主要由强降雨引发,其下段首先产生次级滑动,中上段受牵引影响,产生蠕滑变形。变形监测结果显示,滑坡下段的移动速率大于中上段移动速率。综合宏观变形和监测结果,表明该滑坡本次复活滑动力学特征为牵引式滑动。

(3)数值计算结果表明,在天然工况下,滑坡体处于基本稳定状态,潜在不稳定块体为滑坡下段次级滑坡H9;暴雨工况下,滑坡处于不稳定状态,滑坡体破坏模式主要为滑坡下段次级滑坡H9首先发生失稳滑动,中上段滑体受牵引影响,以蠕滑变形为主;地震工况下,滑坡处于不稳定状态,破坏模式以滑坡整体的失稳滑动为主。数值计算结果与现场调查、勘察及监测数据具有较好的一致性。

研究结果表明该滑坡规模宏大,不具备工程治理条件,建议对受磨里滑坡威胁的民众尽快采取避险搬迁措施。该防治措施已被当地政府采纳和实施,取得了良好的防灾减灾效益。

## 参考文献(References)

[1] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石



- 力学与工程学报, 2007, **36**(3): 433 – 454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslide and their sliding mechanisms China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **36**(3): 433 – 454]
- [2] 陈明, 王运生, 梁瑞锋, 等. 白龙江流域大型滑坡发育分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(2): 325 – 333. [CHEN Ming, WANG Yunsheng, LIANG Ruifeng, et al. Research on development and distribution rules of large-scale landslides in Bailongjiang river basin [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(2): 325 – 333] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-037
- [3] QI Tianjun, ZHAO Yan, MENG Xingmin, et al. Distribution and characteristics of large landslides in a fault zone: A case study of the NE Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geomorphology, 2021, **379**: 107592.
- [4] 余志山. 泄流坡滑坡灾害损失预测及成灾方式研究[J]. 甘肃科技, 2007, **23**(12): 72 – 76. [YU Zhishan. Study on disaster loss prediction and mode of Xieliupo landslide [J]. Gansu Science and Technology, 2007, **23**(12): 72 – 76]
- [5] 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] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2013.03.006
- [6] 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] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.05.02
- [7] 刘秋强, 杜岩, 郭富赞, 等. 青藏高原东端甘肃舟曲牙豁口滑坡复活机理研究[J]. 灾害学, 2021, **36**(2): 113 – 117. [LIU Qiuqiang, DU Yan, GUO Fuzan, et al. Study on the reactivation mechanism of Yahuokou landslide at the eastern end of Qinghai-Tibet Plateau, Zhouqu county, Gansu province, China [J]. Journal of Catastrophology, 2021, **36**(2): 113 – 117] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.019
- [8] 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] DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2019.01.20
- [9] 乔建平, 吴彩燕, 李秀珍, 等. 四川省宣汉县天台乡特大型滑坡分析[J]. 山地学报, 2005, **23**(4): 458 – 461. [QIAO Jianping, WU Caiyan, LI Xiuzhen, et al. Analysis on super large-scale landslide in Tiantai, Xuanhan, Sichuan [J]. Mountain Research, 2005, **23**(4): 458 – 461] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2005.04.013
- [10] 孔纪名, 田述军, 阿发友, 等. 贵州关岭“6.28”特大滑坡特征和成因[J]. 山地学报, 2010, **28**(6): 725 – 731. [KONG Jiming, TIAN Shujun, A Fayou, et al. Guizhou Guanling landslide formation mechanism and its characteristics [J]. Mountain Research, 2010, **28**(6): 725 – 731] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2010.06.011
- [11] 冯文凯, 张国强, 白慧林, 等. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析[J]. 工程地质学报, 2019, **27**(2): 415 – 425. [FENG Wenkai, ZHANG Guoqiang, BAI Huilin, et al. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge Baige landslide in Jinsha River on October 11, 2018 [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, **27**(2): 415 – 425] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-392
- [12] 郭长宝, 吴瑞安, 李雪, 等. 川西日扎潜在巨型岩质滑坡发育特征与形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(4): 772 – 783. [GUO Changbao, WU Rui'an, LI Xue, et al. Development characteristic and formation mechanism of the Rizha potential giant rock landslide, western Sichuan province, China [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(4): 772 – 783] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-110
- [13] 崔圣华, 裴向军, 黄润秋, 等. 强震过程滑带超孔隙水压力效应研究: 大光包滑坡启动机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(3): 522 – 539. [CUI Shenghua, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Excess interstitial water pressure within sliding zone induced by strong seismic shaking: An initiation model of the Daguangbao landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(3): 522 – 539] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0884
- [14] 何坤, 胡卸文, 马国涛, 等. 四川省盐源玻璃村特大型玄武岩古滑坡复活机制[J]. 岩土力学, 2020, **41**(10): 3443 – 3455. [HE Kun, HU Xiewen, MA Guotao, et al. The reactivated mechanism of Boli village giant ancient basalt landslide in Yanyuan, Sichuan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(10): 3443 – 3455] DOI: 10.16285/j.rsm.2019.2168
- [15] 张彦锋, 铁永波, 白永健, 等. 云南永善县上坝老滑坡复活机制及新滑坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, **31**(3): 41 – 49. [ZHANG Yanfeng, TIE Yongbo, BAI Yongjian, et al. Reactivation mechanism of old landslide and stability analysis of the new landslide in Shangba, Yongshan county of Yunnan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, **31**(3): 41 – 49] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.06
- [16] 赵永辉. 雅鲁藏布江流域嘎贡沟巨型滑坡变形破坏模式及演化过程研究[J]. 防灾科技学院学报, 2019, **21**(4): 1 – 7. [ZHAO Yonghui. Deformation and failure model and evolution process of giant landslides in Gagong valley in the Yarlung Zangbo

- River Basin [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2019, **21**(4):1-7]
- [17] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996. [YANG Linde. Inversion theory and engineering practice of engineering problems on rock [M]. Beijing: Science Press, 1996]
- [18] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(3): 343-346. [ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 343-346]
- [19] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(2): 4-10. [SONG Erxiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(2): 4-10]
- [20] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 407-411. [LIAN Zhenying, HAN Guocheng, KONG Xianjing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 407-411]
- [21] 彭文哲, 赵明华, 肖尧, 等. 抗滑桩加固边坡的稳定性分析及最优桩位的确定[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, **47**(5): 23-30. [PENG Wenzhe, ZHAO Minghua, XIAO Yao, et al. Stability analysis of anti-slide pile reinforced slope and determination of optimal pile position [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, **47**(5): 23-30] DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2020.05.003
- [22] 蒋树, 文宝萍, 赵成, 等. 甘肃舟曲泄流坡滑坡活动机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, **24**(3): 5-11. [JIANG Shu, WEN Baoping, ZHAO Cheng, et al. Creep mechanism analysis of Xieliupo landslide in Zhouqu county of Gansu province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, **24**(3): 5-11] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.03.013
- [23] 黄晓, 杨为民, 张春山, 等. 甘肃南部坪定—化马断裂带锁儿头滑坡成因机制[J]. 地质通报, 2013, **32**(12): 1936-1942. [HUANG Xiao, YANG Weimin, ZHANG Chunshan, et al. The formation mechanism of Suoertou landslide in Pingding-Huama fault zone, southern Gansu [J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(12): 1936-1942]
- [24] 李媛茜, 张毅, 孟兴民, 等. 活动构造断裂带巨型滑坡活动特性研究——以白龙江流域大小湾滑坡为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, **57**(3): 360-368. [LI Yuanxi, ZHANG Yi, MENG Xingmin, et al. Analysis the activity characteristics of the giant landslide in active tectonic fault zone: A case study of Daxiaowan landslide in Bailong River Basin [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2021, **57**(3): 360-368] DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2021.03.011
- [25] ZHANG Yi, MENG Xingmin, CHEN Guan, et al. Detection of geohazards in the Bailong River Basin using synthetic aperture radar interferometry [J]. Landslides, 2016, **13**(5): 1273-1284. DOI: 10.1007/s10346-015-0660-8
- [26] ZHANG Yi, MENG Xingmin, JORDON C, et al. Investigating slow-moving landslides in the Zhouqu region of China using InSAR time series [J]. Landslides, 2018, **15**(7): 1299-1315. DOI: 10.1007/s10346-018-0954-8
- [27] CHEN Zhong, ZHANG Yifei, OUYANG Chao, et al. Automated landslides detection for mountain cities using multi-temporal remote sensing imagery [J]. Sensors, 2018, **18**(3): 821-838. DOI: 10.3390/s18030821
- [28] SUN Qian, HU Jun, ZHANG Lei, et al. Towards slow-moving landslide monitoring by integrating multi-sensor InSAR time series datasets: The Zhouqu case study, China [J]. Remote Sensing, 2016(8): 908-923. DOI: 10.3390/rs8110908

## Characteristics and Failure Mode of Giant Moli Landslide in Zhouqu County, Gansu Province, China

GUO Fuyun<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, WU Zhengjun<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>, MENG Xingmin<sup>3</sup>, SHI Pengqing<sup>1</sup>

(1. Institute of Geo-environmental Monitoring of Gansu Province, Lanzhou 730000, China;

2. The third geological and Mineral Exploration Institute of Gansu geological exploration and Development Bureau,

Lanzhou 730000, China; 3. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Zhouqu is one of the counties with the most serious landslide disasters in China. Moli landslide, located on the left bank of the upper reaches of the Dashuiba River, the first tributary of the Bailong River, is a typical giant landslide in a fault zone. This unstable landslide is seriously threatening households and properties in Guoye

town, Zhouqu, China. In this study, UAV mapping, field investigation, deformation monitoring and numerical simulation were applied to analyze the development characteristics, deformation trend and failure mechanism of the Moli landslide. The results showed that: (1) Moli landslide has a clear shape and structure. Its planar shape is a long strip with a length of 1500 m, an average width of 385 m, a thickness of 32 ~ 73 m, and a volume of  $2.12 \times 10^7 \text{ m}^3$ . The material of the landslide was composed of broken phyllite. This landslide was a giant ultra-deep accumulation landslide, which is a typical kind of landslides in south of Zhouqu. (2) The reactivation of the landslide was mainly triggered by heavy rainfall. The lower section of the landslide slid first, and the middle and upper sections crept and deformed under the effect of traction. The movement rate of the lower part was greater than that of the middle and upper parts. The sliding mechanism was a typical traction sliding. (3) The numerical simulation results illustrated that the landslide under different engineering conditions varied from unstable to basically stable, and the failure mode of the landslide under adverse engineering conditions was dominated by the overall instability deformation or sliding. Considering the large scale of the landslide and the lack of basic conditions for engineering constructions, it is suggested that residents threatened by the Moli landslide should be relocated in time. The suggestions have been adopted and implemented by the local government and achieved the benefits of geohazard mitigation. This study could be able to provide a technical and methodological reference for the research on the landslide reactive failure mechanism, emergency response and risk prevention and control in similar areas.

**Key words:** Zhouqu; giant landslide; failure mode; prevention and control measure