doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.2-3.023

甘肃临夏盆地韩集北山滑坡群致灾特征与稳定性 评价

汪美华¹,李勇^{2*},裴叶青³ WANG Meihua¹, LI Yong^{2*}, PEI Yeqing³

1.中国地质环境监测院,北京 100081;

2.中国建筑第二工程局有限公司,北京 100160;

3.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083

1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

2. China Construction Second Engineering Bureau LTD., Beijing 100160, China;

3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

摘要:2018年8月24日,甘肃省临夏县韩集镇北山出现明显裂缝、局部下滑并形成滑坡群,紧邻坡脚和坡体上的房屋、基础设施遭到破坏。滑坡群在降雨、地震等影响下存在继续滑动的可能,对集镇和省道交通安全具有潜在威胁,因此开展滑坡群稳定性评价十分迫切。采用野外调查、极限平衡分析和有限元数值模拟方法,对北山滑坡群的各次级滑坡稳定性进行了系统评价,认为连续降雨或强降雨是造成北山出现大面积变形和形成多个次级滑坡的主要诱发因素,滑坡区地形、坡体结构和不合理的人类工程活动为滑坡的形成创造了条件。应用 GeoStudio 软件对滑坡群不同块体进行定量稳定性评价,结果表明:在自重工况下,滑坡群稳定性较好;在降雨工况下,除 H10 滑坡外,其余次级滑坡均可能进一步失稳破坏;若区内受到超越其地震基本烈度的地震作用,滑坡群稳定系数将迅速降低,各次级滑坡均可能出现快速失稳现象。根据滑坡群不同次级滑坡的变形特点和成灾模式,建议有针对性地采取坡脚挡土墙、削坡减载、锚杆框架、截排水渠、吊沟及排水抗滑设计等综合治理措施。 为保证滑坡影响范围内的居民、建筑及交通安全,应加强滑坡群风险管控,在滑坡治理前需加强监测预警,动态掌握滑体的稳定状态。

关键词:临夏盆地;北山滑坡群;致灾特征;稳定性评价;成灾机制;强降雨 中图分类号:P642.22 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2023)02/03-0460-09

Wang M H, Li Y, Pei Y Q. Disaster characteristics and stability evaluation of the Hanjin Beishan landslide group in Linxia Basin, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3):460–468

Abstract: On August 24, 2018, obvious cracks appeared in Beishan mountain, Hanji Town, Linxia County, Gansu Province, part of the mountain slide in different direction and landslide group formed. It is very urgent to carry out stability evaluation of the landslide groups. Field geological survey, limit equilibrium analysis and finite element numerical simulation were used to systematically evaluate the stability of each secondary landslide in Beishan landslide group. The results show that: ① Continuous rainfall or heavy rainfall was the main inducing factor that caused such a large area of deformation and the formation of multiple secondary landslides. The topography of the landslide area, the structure of the slope body and the unreasonable human engineering activities creat conditions for the formation of landslide. ②According to the quantitative stability evaluation of different blocks of the landslide group, under the self-weight condition, the landslide group is in a better stable state. Under the rainfall condition, except for the H10 landslide, the rest of the secondary landslides.

资助项目:国家自然科学基金重点项目《青藏高原东缘古滑坡复活机理与早期识别研究》(1批准号:41731287)

收稿日期:2022-06-29;修订日期:2022-09-21

作者简介:汪美华(1978-),女,硕士,高级工程师,从事环境地质研究及期刊编辑出版工作。E-mail:wangmeihua@mail.cgs.gov.cn

^{*}通信作者:李勇(1997-),男,硕士,从事工程建设方面研究。E-mail:85940495@qq.com

will be further destabilized. If the area is subjected to an earthquake that exceeds its basic seismic intensity, the stability coefficient of the landslide group will decrease rapidly. All secondary landslides will experience rapid instability. ③ According to the deformation characteristics and disaster patterns of different secondary landslides in the landslide group, it is recommended to take targeted management measures such as retaining walls at the slope foot, slope cutting and load reduction, anchor frames, intercepting and draining channels, hanging ditches drainage anti-skid design. In order to ensure the safety of residents, buildings and traffic within the affected area of landslides, it is recommended to further strengthen the risk management and control of landslide groups, strengthen monitoring and early warning before landslide treatment, and dynamically grasp the stability of landslide groups.

Key words: Linxia Basin; Beishan landslide group; disaster characteristics; stability evaluation; formation mechanism; heavy rainfall

中国复杂的地质环境决定了地质灾害的多样 性、易发性及其区域变异性,形成了地质灾害点多、 面广、基数大等特点。受极端性、灾害性气象等自 然条件和人类工程建设、资源开发等活动的影响, 地质灾害发生的频率在不断上升(刘传正等, 2022)。中国是世界上滑坡灾害最严重的国家之一 (黄润秋,2007),并以西南、西北的高山峡谷区和高 原区发育多,严重影响山区工程建设和经济活动 (张佳佳等,2021)。甘肃地处黄土高原、青藏高原 和内蒙古高原交汇地带,地形复杂,山脉纵横交错, 海拔相差悬殊,是中国滑坡、泥石流灾害最严重的 省份之一(冯学才等,1991),进入21世纪以来,重 大地质灾害事件更是连续不断,呈现多发、频发的 局面(郭富赟,2021;申怀飞等,2021)。甘肃黑方台 发育了中国最著名的黄土滑坡群,被认为是黄土滑 坡研究的天然试验场(冉林等,2022;方汕澳等, 2021)。滑坡群、古滑坡复活、地震滑坡等研究也已 经成为目前滑坡灾害研究的重要内容(安玉科等, 2020; 闫茂华等, 2020; 田尤等, 2021; 吴瑞安等, 2021;张永双等,2021;李彩虹等,2022;铁永波等, 2022;王伟等,2022)。

正确评价边坡的稳定状况是滑坡防治的关键 (任克峰,2008)。近年,数值模拟技术在滑坡防治 研究领域发挥了重要作用,诸多学者通过 GeoStudio 软件对边坡的失稳机制、稳定性进行了研究。例 如,周伟杰等(2020)基于 GeoStudio 软件的渗流场 计算结果,采用极限平衡法计算了边坡的稳定系 数,指出暴雨易在降雨结束后造成滑坡,而久雨更 可能在降雨过程中造成滑坡。耿清友等(2017)利 用 GeoStudio 研究唐山市某矿山排土场边坡在不同 烈度地震作用下的稳定性,提出当地震波加速度峰 值大于边坡发生滑塌的屈服加速度时,排土场边坡 的稳定性将大幅度降低直至失稳。Gian et al. (2017)通过 GeoStudio 软件针对性研究降雨条件下 的越南南丹滑坡,提出了滑坡早期、中期和临近3个预警级别。Ogbonnaya et al.(2019)对尼日利亚东南部某矿场排土场边坡稳定性进行分析,针对稳定性差的边坡提出了治理建议。

临夏回族自治州位于甘肃省西部,是甘肃地质 灾害综合风险最高的地区之一(裴慧娟等,2017)。 州内的临夏盆地是青藏高原与黄土高原衔接带上 的一个晚新生代断陷盆地,盆地内新近系泥岩十分 发育,地层分布及地质灾害发育特征受青藏高原隆 升影响显著,地质灾害具有面积大、范围广、次数频 繁、群发性、复活性明显等特征(蔡广珍,2015;汪美 华等,2020;窦晓东等,2021)。2018年8月24日, 受连日降雨影响,临夏州临夏县韩集镇北山出现大 面积滑动,在古滑坡基础上形成滑坡群,最大滑移 距离约 20 m, 损坏坡脚 5 户 65 间居民房屋、4 户 33 间商铺和坡面上的韩集镇自来水管道与水塔等民 房及基础设施,因预警及时未造成人员伤亡,但在 不同诱发因素影响下其稳定性如何,需要进一步研 究。本文针对韩集镇北山滑坡群,采用野外地质详 查、极限平衡分析和有限元数值模拟相结合的方 法,使用 GeoStudio 软件模拟天然、地震和暴雨 3 种 工况下的滑坡稳定性,分析该滑坡群的演变机制、 致灾特征及各次级滑坡稳定状态,可为后续滑坡治 理及临夏盆地地质灾害防治工作提供借鉴。

1 地质背景

1.1 地理位置

北山滑坡区位于甘肃省临夏回族自治州临夏 县韩集镇西侧边缘,省道 S310 北侧(图 1)。滑坡处 于大夏河及大夏河支流老鸦关河左岸,为大夏河高 阶地后缘,受剥蚀侵蚀作用,阶面不完整。地貌上 主要呈现为剥蚀-侵蚀丘陵地貌,山体走向与老鸦 关河流向一致,呈北西—南东向。海拔最高点位于 滑坡区北部的大坡咀顶部,高程 2260 m,最低点位



Fig. 1 Location of the Hanji Beishan landslide group, Gansu Province 1—研究区范围;2—国道、省道、便道;3—省界;4—县(区)界;5—河流

于滑坡区南西部省道 S310 南侧,高程 2120 m,相对 高差 100~150 m。山体较缓,山脊和山峰呈锯齿 形,坡度 15°~35°。坡面沟谷呈深切"V"字形 (图 2)。

1.2 地层与岩性

滑坡区出露的地层主要为第四系全新统滑坡 堆积体、残坡积体,第四系上更新统冲洪积物和新 近系渐新统临夏组泥岩。 第四系全新统(Q₄)成因类型较多, 厚度变化较大。滑坡堆积体(Q₄^{del})由古 滑坡和本次滑坡形成。勘查资料显示, 古滑坡沿临夏组泥岩强、弱风化界面滑 动,堆积体表层为残坡积层、卵石层及强 风化泥岩混杂形成的碎石土,下部为强 风化、中风化泥岩,基本保留了滑动前的 岩性特征,古滑坡堆积体局部覆盖于上 更新统冲洪积卵砾石层上。滑坡堆积体 厚 8~30 m,结构松散,稳定性差。残坡 积物(Q₄^{el-d})广泛分布于勘查区,覆盖 于较大的冲沟两侧,厚度不等,一般小于 3 m,由碎石土组成,结构松散,稳定 性差。

第四系上更新统冲洪积物(Q₃^{d^{-pl}}) 分布于大夏河支流老鸦关河流域沟道及 其阶地上,下部为厚约2m的砾石层,上 部为厚约3m的含砾粉质粘土,结构较 松散。该冲洪积层与下伏渐新统临夏组 不整合接触。

新近系上新统临夏组(N₂l)泥岩呈 褐红色—灰绿色,泥质结构、层状构造,泥质胶结; 浸水易软化,干燥时易发生崩解,构成滑坡群的基 底,层面坡度变化较大。

1.3 水文地质条件

滑坡区降水量年际变化显著,年降水量最大 764 mm,最小 325 mm,年均 639 mm;年内分配不 均,5—9月降水量占全年降水量的 59%,并多以大 雨、暴雨的形式出现,易造成大面积水土流失。



图 2 甘肃韩集北山滑坡群无人机平面遥感影像(H1~H10 为滑坡编号) Fig. 2 UAV planar remote sensing image of the Hanji Beishan landslide group, Gansu Province

地下水主要为松散岩类孔隙水和碎屑岩类孔 隙裂隙水。松散岩类孔隙水包括沟谷潜水和河谷 潜水,其中沟谷潜水主要接受地表水、大气降水入 渗补给;河谷潜水总体顺河径流,以泉的形式排泄 于大夏河。碎屑岩类孔隙裂隙水主要赋存于新近 系上新统临夏组泥岩中,岩体泥质含量高,透水性 差,富水性弱。该类水接受南部山区大气降水补 给,径流缓慢,以泉和地下径流的形式向阶地前缘 和大夏河排泄。

1.4 工程地质条件

新近系强风化泥岩一般厚 7.5~11.0 m,以粘粒 为主,颗粒很细,具弱膨胀性和软化性,工程地质性 质较差;中等风化的泥岩岩心多呈短柱状,致密,强 度稍高,节理、裂隙不发育。对钻孔取得的岩土样 品进行室内测试,得到泥岩主要物理力学指标如 下:容重 2.15~2.46 g/cm³,饱和抗压强度 1.42~2.24 MPa,软化系数 0.15~0.24,内摩擦角 24.70°~ 35.75°,粘聚力 254.90~425.11 kPa。承载力特征值 f_{ak} = 420~550 kPa。滑坡堆积体(Q_4^{del})及残坡积物 (Q_4^{el-dl})呈硬塑—可塑状态,稍湿,土质混杂。

1.5 地质构造与地震

滑坡群在构造上所处位置为祁吕贺兰山字型构造体系弧型褶带的西翼外侧和河西系的复合部位,褶皱、断裂构造不发育。据《中国地震动参数区划图》(高孟 潭等,2015)和《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) (2016版)(中国建筑科学研究院,2016),滑坡区抗震 设防烈度为WI度,50年超越概率10%的地震动峰值 加速度为0.10g,地震动反应普特征周期为0.45 s。

2 韩集北山滑坡群发育特征与成因

2.1 滑坡平面特征

现场调查、勘查和访问均未确定韩集镇古滑坡 的形成时间。韩集镇古滑坡的前缘为 S310 省道,后 缘顶部为大坡咀。滑坡平面呈矩形,坡面因人工耕 植改造开挖形成多级旱地梯田,在降水冲刷下切作 用下,坡面发育多条"V"字形冲沟。临夏组泥岩未 出露。滑坡堆积体结构零乱,老滑坡壁陡直,滑坡 壁底部有泉水长年流淌。综合滑坡区阶地地貌和大 夏河发育情况,推断韩集镇古滑坡为一大型岩质古滑 坡,主要威胁 S310 省道及滑坡前缘韩集镇老城区。

受 2018 年 8 月强降雨影响,古滑坡堆积体发生 变形,形成北山滑坡群。根据变形量和变形趋势将 滑坡群划分为 10 处次级滑坡,从东到西依次为 H1—H10(图 2、图 3),其中 H3、H4、H5、H6 滑坡已 发生滑动,滑移距离 5~15 m 不等;H1、H2、H7、H8、 H9、H10 滑坡未发生整体变形。滑坡群周界较为明 显,前缘以 S310 公路为界,两侧以冲沟为界,后缘接 近山梁顶部。滑坡群坡面长 100~415 m,宽约 1500 m,滑体厚 6~18 m,面积 40×10⁴m²,总体积 447.59× 10⁴m³。滑坡主滑方向近南北向,坡面呈多级宽缓 台阶分布,局部次级滑坡体相互叠置与嵌套,坡度 10°~20°。滑坡群各次级滑坡特征见表 1。

由于多级滑动且变形不均一,滑坡发生后在滑 坡壁下方形成大量洼地,其中最大的一处洼地宽约 50 m,深2~6 m,长约100 m。滑坡中部出现多处圈 椅状下座平台,平台集中分布区有8~10 级,高差



图 3 甘肃韩集北山滑坡群平面图 Fig. 3 General view of Hanji Beishan landslide group, Gansu Province

	表1	滑坡群基本特征
Table 1	Plane genera	l characteristics of landslide group

			-				
滑坡编号	长/m	窗/m	厚/m	休和/10 ⁴ m ³	却樟	亦形模式	宏观判断
旧极端了	K) III	nn ريور)] -/ III	₩₩₩ 10 III	凡快	又历伏式	稳定状态
H1	170	85	6	8.67	小型	牵引式	欠稳定
H2	115	130	6	8.97	小型	推移式	基本稳定
H3	140	255	10	35.7	中型	推移式	不稳定
H4	255	415	18	190.5	大型	推移式	不稳定
H5	95	335	12	38.2	中型	推移式	基本稳定
H6	145	315	14	63.95	中型	推移式	基本稳定
H7	130	250	8	26.0	中型	推移式	基本稳定
H8	235	200	6	28.2	中型	牵引式	基本稳定
H9	145	215	8	24.9	中型	推移式	基本稳定
H10	165	195	7	22.5	中型	推移式	基本稳定

0.5~6.0 m。滑体中上部多处发育拉张裂缝,长 20~ 100 m,宽 0.5~2.0 m,深 2~15 m。地下水以泉的形 式在多处低洼地带渗出,滑坡堆积体长期处于饱和 状态。滑坡前缘最大滑移距离约 20 m,若继续滑动 威胁人数约1000人以上,威胁资产上亿元,险情为 特大型(图4)。

2.2 滑坡结构特征

2.2.1 滑体

滑坡群为韩集古滑坡堆积体层内复活。由于 透水性存在差异,古滑坡堆积体沿弱风化泥岩接触

面滑动。滑体为古滑坡碎石堆积体,结构混杂。有 H3、H4、H5、H6四个次级滑坡发生整体滑动,滑体 夹杂有老滑坡堆积粉质粘土、扰动强风化泥岩,滑 体表层富含植物根系;未整体滑动的 H1、H2、H7、 H8、H9、H10六个次级滑坡,滑体基本保留了古滑 坡堆积体的特征,表层为古滑坡碎石堆积体,下部 为强、中风化泥岩。

2.2.2 滑带

据钻孔揭露,滑带位于临夏组泥岩强弱风化层 接触界面,纵向上总体呈折线形,滑带土主要为碎



图 4 滑坡变形及其影响破坏 图 4 Deformation and destruction of the landslide a—后缘洼地及积水;b—坡体裂缝;c—阻断 S310 省道;d—损坏民房 石土,局部夹粉质粘土。由于古滑坡堆积体局部覆 盖于上更新统冲洪积卵砾石层上,因此滑带局部位 于老鸦关河阶地冲洪积卵砾石及老滑坡堆积体接 触带,此位置因临夏组泥岩透水性差而富集地下 水,成为滑坡基座(图5)。

2.3 滑坡成因分析

由于滑坡为老滑坡堆积体的层内滑动,主滑面 (带)的形成方式为剪切破坏,滑坡变形破坏的地质 力学模式除 H1、H8 为牵引式外,其余均为推移式 (表1)。地质条件、强震、降雨、人类工程活动等是 诱发滑坡的主要因素。

2.3.1 地形

滑坡处于老鸦关河高阶地后缘及侵蚀剥蚀中 低山前缘交互地带,滑坡群东部后缘存在明显的老 滑坡后壁。本次滑动大部分为老滑坡体的复活,地 形地貌保留了老滑坡堆积地形特征,后部是较陡的 滑坡后壁,高数米至十数米不等,坡度约25°,其下 即为宽十数米至三十余米缓坡平台或反坡洼地,中 下部发育较多的鼓包或垄岗地,下部多为缓坡地 形,上陡、中平、下缓的地形不利于水体排泄,强降 雨造成大量地表水汇聚。调查时发现,坡面存在大 量的积水洼地和地下水溢出带,说明地形非常不利 于地表水和地下水的排出。斜坡坡脚由于切坡建 房及公路切坡形成临空面,导致坡脚失去有效阻滑 体。上陡、中平、下缓的坡面地形,较大的坡脚临空 面,是形成滑坡的有利地形条件。

2.3.2 坡体结构

滑坡群滑体为老滑坡堆积体,具有结构疏松、不 均匀的特点,透水性差异大,不同地段土体含水率变 化较大,土体工程力学性质差,特别是含水量较大时 为软塑状,抗滑力很低,易于产生滑动。滑床为新近 系泥岩,透水性差,是相对隔水层,地下水在新近系泥



岩以上形成饱和带,大大降低了土体的抗剪能力。 2.3.3 降雨

2018年7月和8月,临夏全州降雨量偏多。7 月全州降雨量为105~194 mm。8月经历了5次明 显降雨过程(图6),滑坡区累计降雨量302 mm,其 中滑坡发生前累计降雨量265 mm,特别是8月 20—22日3天累计降雨量66 mm。累计降雨量及 降雨强度在本地区是非常罕见的。多次降雨使韩 集镇北山老滑坡堆积体处于饱和状态。特别是滑 坡后缘泉水出水量增加,泉水沿老滑坡堆积体裂缝 入渗,增加了坡体的自重,也降低了斜坡土体强度。 因此,连续降雨及强降雨是韩集镇滑坡的主要诱发 因素。

2.3.4 人类工程活动

公路修建在坡体前缘,开挖形成高陡临空面, 改变了原坡体的自然地貌形态,破坏了稳定状态。 坡体上大面积分布耕地,土体松散易于降水入渗, 且排水设施不完善,经常发生陡坎倾倒,地垄塌陷 等现象。人类工程活动是该滑坡滑动的另一重要 诱因。

3 滑坡稳定性分析

据现场调查和勘查,H3、H4、H5、H6 滑坡滑移 后在枯水期处于基本稳定状态与欠稳定临界状态, H1、H2、H7、H8、H9、H10 滑坡处于基本稳定状态。 然而,滑坡群各次级滑坡坡体上发育多条裂缝,存 在多处积水洼地,坡体长期处于饱和状态。在降 雨、地震等不利因素的作用下,滑坡群变形将会进

一步加大,若不及时采取有效的治理措施,各次级 滑坡均存在进一步滑动的可能性。

3.1 模型建立与参数取值

在定性分析各次级滑坡稳定性的基础上,采用 GeoStudio软件对该滑坡群的次级滑坡在持续降雨、 地震等影响下的发展趋势进行定量计算。数值模 型中采用的物理力学参数见表 2—表 4。

	表 2	滑坡土体	本重度证	t验	值	
Table 2	Soil w	veight test	values	of 1	the	landslide

	8		
米団	天然重度/	干燥重度/	饱和重度/
矢加	$(kN \cdot m^{-3})$	$(kN \cdot m^{-3})$	$(kN \cdot m^{-3})$
滑坡堆积体	17.9	14.8	18.8
滑床	20.12	17.35	22.17
滑带	18.7	15.0	19.0

Table 3 Shear strength parameters of soil in slip zone								
岩性		自重工况		暴雨工况		地震工况		
		粘聚力/kPa	内摩擦角/。	粘聚力/kPa	内摩擦角/。	粘聚力 /kPa	内摩擦角/°	
试验值	强风化泥岩	50.3	33.42	20.1	34.43	50.3	33.42	
经验值	碎石土	12.5	32.6	9.6	33.8	12.5	32.6	
综合取值	滑带土	17.2	22.6	10.2	18.8	17.2	20.6	

表 3 滑带土体抗剪强度参数 able 3 Shear strength parameters of soil in slip zone

表 4 新近系泥岩物理力学参数

Table 4	Physical an	d mechanical	parameters	of Neogene	mudstone
---------	-------------	--------------	------------	------------	----------

泥岩参数	天然重度	饱和重度	天然抗压	饱和抗压	抗拉强度	粘聚力	内摩擦角	承载力特征	基底摩擦	水平抗力系数
	$/(kN \cdot m^{-3})$	$/(kN \cdot m^{-3})$	强度/MPa	强度/MPa	/MPa	∕kPa	/°	值/MPa	系数	$/(MN \cdot m^{-3})$
取值	20.17	22.24	1.44	0.52	0.39	50.3	33.42	0.55	0.4	80

根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32964—2016),韩集镇滑坡群威胁人数大于1000 人,因此该滑坡的防治等级设定为 I级;滑坡在自 重状态下的抗滑稳定系数取1.30,暴雨状态的抗滑 稳定安全系数取1.15,地震状态下取1.10。其相关 评价标准见表5。

3.2 模拟计算结果分析

将 10 个次级滑坡的土体物理力学参数代入 GeoStudio 进行数值模拟分析,得到 3 种工况下各次 级滑坡的稳定系数(F_s)和稳定状态,具体见表 6。 受篇幅所限,仅列出 H3、H4、H5、H6 四个典型滑坡 在暴雨和地震工况下的稳定性模拟图(图 7)。

(1)在自重工况条件下,滑坡群 10 个次级滑坡 中 H9 处于稳定状态,H10 处于基本稳定状态,H1、 H2、H4、H5、H7 和 H8 处于欠稳定状态,H3 和 H6 处于不稳定状态,滑坡群整体稳定性差。考虑到滑 坡之间的彼此叠套关系,若关键次级滑坡块体失稳 破坏,将不可避免牵引其他次级滑坡蠕滑变形。

表 5 滑坡稳定性评价标准

Table 5 Evaluation criteria for landslide stability

稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
稳定系数	K<1.0	$1.0 \le K \le 1.05$	$1.05 \le K \le 1.15$	<i>K</i> ≥1.15

(2)在降雨工况下,除 H10 滑坡处于欠稳定状态外,其余次级滑坡均为不稳定状态。在降雨条件下,滑坡群稳定性系数整体降低,进一步增加了滑坡整体滑移的可能性。临夏县境内每年主汛期强降雨及连续降雨多发,降水量约占全年降水量的 60%,

表 6 各次级滑坡在不同工况下的稳定系数

 Table 6
 Stability coefficient of each secondary landslide under different working conditions

滑坡编号	自重工况		暴雨	工况	地震工况	
	稳定系数		稳定系数	稳定状态	稳定系数	稳定状态
H1	1.012	欠稳定	0.766	不稳定	0.738	不稳定
H2	1.008	欠稳定	0.720	不稳定	0.821	不稳定
H3	0.782	不稳定	0.680	不稳定	0.642	不稳定
H4	1.010	欠稳定	0.724	不稳定	0.620	不稳定
H5	1.001	欠稳定	0.712	不稳定	0.638	不稳定
H6	0.911	不稳定	0.608	不稳定	0.586	不稳定
H7	1.011	欠稳定	0.462	不稳定	0.558	不稳定
H8	1.011	欠稳定	0.932	不稳定	0.910	不稳定
H9	1.332	稳定	0.872	不稳定	0.922	不稳定
H10	1.090	基本稳定	1.001	欠稳定	0.681	不稳定

Fig. 7 Simulation results of typical secondary landslide stability factor under rainstorm and earthquake conditions

特别是滑体结构零乱、透水性强,工程治理时应优 先采用具有内部排水功能的抗滑措施。

(3)在地震工况下,所有次级滑坡均处于不稳 定状态,若区内受到超越其地震基本烈度的地震作 用,韩集滑坡群其余各次级滑坡均将失稳滑移,其 中H1、H3、H4、H5、H6、H7和H10稳定系数迅速 下降。由于滑坡堆积体的地层结构及地下水的润 滑作用,地震是该滑坡群稳定状态的重要影响 因素。

4 结论及建议

本文根据韩集镇北山滑坡群的发育及变形特

征,定性分析了滑坡的成因机理,并考虑降雨和地 震因素,采用 GeoStudio 软件对滑坡的发展趋势进 行了定量计算,主要研究结论如下。

(1)韩集滑坡群为特大型滑坡,连续降雨或强 降雨是造成各次级滑坡滑动的主要诱发因素,滑坡 区地形、坡体结构和人类工程活动加剧了各滑坡的 变形。

(2)滑坡群不同块体的定量稳定性评价数值模 拟计算表明:在自重工况下,滑坡群稳定状态较好; 在降雨工况下,除 H10 滑坡外,其余次级滑坡均将 进一步失稳破坏;若区内受到超越其地震基本烈度 的地震作用,滑坡群稳定系数快速降低,各次级滑 坡均将出现快速失稳现象。

(3)结合野外调查与数值模拟,由于滑坡群不 同分区在降雨和地震工况下稳定系数有较大差异, 同时考虑到滑体厚度不同,滑坡间的叠套关联性, 建议针对北山滑坡群不同区块的变形特点和成灾 模式,在缓坡位置采取削方减载及抗滑支挡措施, 在陡坡及变形强烈位置采用多级抗滑桩、坡脚挡土 墙、削坡减载、截排水渠、吊沟等综合治理措施,优 先考虑采用排水抗滑设计。

(4)建议加强滑坡群的风险管控,尤其在雨季 和持续降水时段,必须加强对坡体变形、拉裂缝位 移的监测,派专人守护现场,同时加强对前缘、陡 坎、后壁、裂缝等情况的巡查,发现异常及时通知当 地居民、行人紧急避险;防治工程施工过程中应加 强滑坡体的变形监测,以保证施工安全。

参考文献

- Gian Q A, Tran D T, Nguyen D C, et al. Design and implementation of site-specific rainfall-induced landslide early warning and monitoring system: A case study at Nam Dan landslide (Vietnam) [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2017, 28(2): 15-32.
- Ogbonnaya I, Chidinma C.Slope stability analysis of mine waste dumps at a mine site in Southeastern Nigeria[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(4): 20–35.
- 安玉科,樊江,马胜午,等.堆积阶地古老滑坡识别方法及其在线状工 程地质勘察中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(6): 1787-1794.
- 蔡广珍,杨子和,王东平,等.甘肃临夏州地质灾害成因分析及防御对 策[J].农业灾害研究,2015,5(4):32-35.
- 窦晓东,张泽林.甘肃舟曲垭豁口滑坡复活机理及成因探讨[J].中国 地质灾害与防治学报,2021,32(2):9-18.
- 方汕澳,许强,修德皓,等.基于斜率模型的突发型黄土滑坡失稳时间 预测[J].水文地质工程地质,2021,48(4):169-179.
- 冯学才,王家鼎.甘肃省滑坡泥石流灾害及其减灾对策[J].灾害学, 1991,6(4):43-46.
- 耿清友,康志强,张雪岩,等.地震作用下某矿山排土场边坡稳定性分

析[J].化工矿物与加工,2017,46(12):50-52.

- 高孟潭, 陈国星, 谢富仁, 等. 中国地震动参数区划图 (GB18306—2015) [S]. 中国标准出版社, 2015.
- 郭富赟.甘肃地质灾害风险管理思考[J].甘肃地质,2021,30(1): 16-22.
- 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,2007,26(3):433-453.
- 李彩虹,李雪,郭长宝,等.青藏高原东部鲜水河断裂带地震滑坡危险 性评价[J].地质通报,2022,41(8):1473-1486.
- 刘传正,沈伟志,黄帅.中国地质灾害预防应对战略思考[J].灾害学, 2022,37(3):1-4.
- 表惠娟,陈晋,李雯,等.甘肃省地质灾害风险评估[J].灾害学,2017,32 (2):97-102.
- 冉林,马鹏辉,彭建兵,等.甘肃黑方台"10 5"黄土滑坡启动及运动特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(6):1-9.
- 任克峰.边坡稳定性评估方法及应用[D].宁夏大学硕士学位论 文,2008.
- 申怀飞,董雨,杨梅,等.基于 AHP 与信息量法的甘肃省滑坡易发性评估[J].水土保持研究,2021,28(6):412-419.
- 田尤,陈龙,黄海,等.西藏澜沧江流域察雅县城滑坡群成因及现状稳 定性[J].地质通报,2021,40(12):2034-2042.
- 铁永波,张宪政,卢佳燕,等.四川省泸定县 Ms6.8 级地震地质灾害发 育规律与减灾对策[J].水文地质工程地质,2022,49(6):1-12.
- 王伟,王卫,戴雄辉.四川美姑拉马阿觉滑坡复活特征与影响因素分析[]].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):9-17.
- 汪美华,赵慧,倪天翔,等.基于不连续布局优化法的那勒寺古滑坡稳 定性分析[J].西北地质,2020,53(1):234-242.
- 吴瑞安,马海善,张俊才,等.金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析[J].水文地质工程地质,2021,48(5):120-128.
- 闫茂华,魏云杰,李亚民,等.云南德钦日因卡滑坡孕灾背景及形成机 理[J].地质通报,2020,39(12):1971-1980.
- 张佳佳,田尤,陈龙,等.澜沧江昌都段滑坡发育特征及形成机制[J].地 质通报,2021,40(12):2024-2033.
- 张永双,刘筱怡,吴瑞安,等.青藏高原东缘深切河谷区古滑坡:判识、 特征、时代与演化.[J].地学前缘,2021,28(2):94-105.
- 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规(B50011—2016)[S].北京:建 筑工业出版社,2016.
- 周伟杰,徐卫亚,王如宾,等.暴雨及久雨作用下东岭信滑坡堆积体的渗流 特性及稳定性分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2020,42(2):28-33.