

低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理

冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 吴钟腾, 白慧林

Characteristics and mechanism of landslide-debris flow chain disaster in low mountain and hilly terrain

FENG Wenkai, JIA Bangzhong, WU Yiyang, WU Zhongteng, and BAI Huilin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-05>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析

Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall

胡华, 吴轩, 张越 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 92-97

四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理

Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province

张绍科, 胡卸文, 王严, 金涛, 杨瀛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 79-85

喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险

Study on the development characteristics of post-fire debris flow and its early warning risk aversion in Zhongba Village, Xide County

殷万清, 金涛, 胡卸文, 曹希超, 杨相斌, 黄健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 61-69

甘肃肃南县长达坂沟泥石流成灾机理和防治措施建议

\${suggestArticle.titleEn}

庞伟军, 常刚, 苟海瑞, 张乾翼 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(2): 29-34

2004—2018年北京市突发地质灾害时空分布特点和监测预警状况

Temporal-spatial distribution and monitoring and early warning of sudden geological disasters in Beijing during the period of 2004 to 2018

程素珍, 路璐, 翟淑花, 张长敏, 郝春燕, 任凯珍 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 38-46

新疆伊宁县克孜勒赛滑坡成灾机理和动力学特征

\${suggestArticle.titleEn}

杨龙伟, 魏云杰, 朱赛楠, 王文沛, 邵海, 高杨 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(3): 18-24



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-05

冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 等. 低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 35-44.

FENG Wenkai, JIA Bangzhong, WU Yiyong, *et al.* Characteristics and mechanism of landslide-debris flow chain disaster in low mountain and hilly terrain[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 35-44.

低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害 特征与成灾机理

冯文凯^{1,2,3}, 贾邦中⁴, 吴义鹰⁴, 吴钟腾^{2,3}, 白慧林¹

- (1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 4. 广东省有色矿山地地质灾害防治中心, 广东 广州 510062)

摘要: 2019年6月10—13日, 龙川县发生持续强降雨, 导致全县境内发生大量滑坡、泥石流灾害, 贝岭镇米贝村是三个重灾区之一。本文以贝岭镇米贝村6号沟发生的滑坡-泥石流链生灾害为研究对象, 在野外精细化调查测量基础上, 结合数值模拟分析与计算, 对链生灾害特征与成灾机理展开研究。研究发现: ①6号沟内共发育7处浅层土质小型滑坡, 仅3号滑坡体与部分6号滑坡体转化为泥石流, 构成泥石流主要物源, 其余滑坡未构成持续性影响; ②持续降雨下渗, 坡体由非饱和向饱和状态转变, 坡表形成连续饱和区, 孔隙水压力的增加与孔隙水的软化促使土体强度降低, 加之坡体饱和和自重的增大, 斜坡发生浅表层失稳破坏; ③降雨的持续下渗与支沟沟源“漏斗状”地形下的地表汇水快速增大滑坡松散堆积体内的含水率, 促使其物理性质发生变化, 在重力势能下呈流态启动、运动转化为泥石流。降雨结构影响滑坡-泥石流链生过程, 前期降雨引发滑坡、后期降雨启动形成泥石流, 滑坡与泥石流的发生表现出阶段性特征。研究成果有助于指导当地政府进一步开展滑坡-泥石流链生灾害的防灾减灾工作, 也为该地区未来区域预警研究工作提供理论支撑。

关键词: 强降雨; 花岗岩残积土; 链生灾害; 成灾机理

中图分类号: P642.2 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2022)01-0035-10

Characteristics and mechanism of landslide-debris flow chain disaster in low mountain and hilly terrain

FENG Wenkai^{1,2,3}, JIA Bangzhong⁴, WU Yiyong⁴, WU Zhongteng^{2,3}, BAI Huilin¹

- (1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention, Fuzhou, Fujian 350002, China; 4. Nonferrous Mine Geological Disaster Prevention Center of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510062, China)

Abstract: From June 10 to 13, 2019, continuous heavy rainfall occurred in Longchuan County, resulting in a large number of

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2022-01-26 投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金(41977252; U2005205); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190637); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主探索课题(SKLG2020Z001); 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室)开放基金(FJKLGH2021K006)

第一作者: 冯文凯(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与地质工程教学与科研工作。E-mail: fengwenkai@cudt.cn

landslides and debris flows in the county. Mibei village is one of the three hardest hit areas. Taking the landslide debris flow chain disaster in Mibei village No.6 gully of Beiling town as the research object, this paper studies the characteristics and disaster mechanism of chain disaster on the basis of field fine investigation and measurement, combined with numerical simulation analysis and calculation. It is found that: ①there are 7 soil landslides in the No.6 gully. Only NO.3 landslide mass and part of NO.6 landslide mass are transformed into debris flow, which constitutes the main material source of debris flow, and the other landslides do not constitute a sustainable impact; ②With continuous rainfall infiltration, the slope body changes from unsaturated to saturated state, and a continuous saturated zone is formed on the slope surface. The increase of pore water pressure and the softening of pore water reduce the strength of soil. In addition, the increase of saturated weight of slope body leads to the instability and failure of shallow surface layer of slope; ③The continuous infiltration of rainfall and the surface catchment under the "funnel" terrain of the branch gully source rapidly increase the water content in the loose accumulation of the landslide, promote the change of its physical properties, start and move in a flow state under the gravitational potential energy, and transform it into debris flow. The rainfall structure affects the chain process of landslide debris flow. The landslide is caused by early rainfall and the debris flow is formed by later rainfall. The occurrence of landslide and debris flow shows phased characteristics. The research results are helpful to guide the local government to further carry out the disaster prevention and reduction of landslide debris flow chain disasters, and also provide theoretical support for the future regional early warning research in this area.

Keywords: heavy rainfall; granite residual soil; chain disaster; disaster mechanism

0 引言

受台风气象或极端强降雨天气影响,极易发生降雨型滑坡、泥石流等地质灾害,且表现出群发性特征^[1-3]。在强降雨作用下,坡体渗流场^[4-5]、土体物理力学性质^[6-7]逐渐发生变化,斜坡稳定性降低,直至失稳^[8]。对于一般降雨型滑坡而言,坡体失稳破坏后,滑体呈松散堆积状态,在地形环境的控制下堆积在坡脚或发生不同距离的运动,运动中的滑体表现为非饱和的松散状态,表现出碎屑流或散体流特征^[9-10]。对于沟道内的滑坡堆积物而言,沟道地形因素与持续降雨作用形成地表汇流,地表径流与地表松散堆积物的混合运动则逐渐演化为泥石流灾害。这种由滑坡转化为泥石流的链生灾害往往影响范围更大,破坏性更强^[11]。

2019年6月10—13日,龙川县持续强降雨,导致全县发生大量滑坡、泥石流灾害,形成多个重灾区,贝岭镇米贝村是重灾区之一。米贝村道路、房屋、农田被堆积物严重淤堵。在对米贝村详细调查后,发现滑坡堆积物主要公布在沟道两侧斜坡上或沟道中,部分滑坡堆积物在持续降雨作用下变成了泥石流物源,进而发展成滑坡-泥石流链生灾害。为进一步研究该地区滑坡-泥石流链生灾害,文章选取米贝村最典型的6号沟作为研究对象,在灾后精细化调查基础上,结合数值分析与计算对滑坡-泥石流链生机理展开研究,研究成果对地方

链生灾害防治工作具有重要作用。

1 地质环境特征

该区域属于低山丘陵地貌,米贝村海拔183~609 m,山体浑圆,少见棱角状,山体斜坡以直线型为主,坡度变化差异大,由山区向山间平地逐渐减缓。区内基岩地层为下古生代(Pz₁)混合花岗岩,呈暗灰色,长期风化形成全风化层、中强风化层结构,主要出露于沟底或局部陡坎处;上覆第四系覆盖层以花岗岩深度风化残积土为主,在区内广泛分布,厚度在2~8 m,土体呈黄褐色、浅红棕色,中密-密实,天然密度为1.6~1.75 g/cm³,干密度约1.32~1.45 g/cm³,渗透系数处于10⁻³ cm/s量级,属于中等渗透性。残积土土质较纯净,以小于2 mm的细粒组分为主,占比可达85%以上,局部夹杂少量风化残留花岗岩团块或者山顶基岩崩落块石。花岗岩残积土特征见图1。

区内地质构造简单,无断层通过,地震烈度为Ⅵ度区,地震加速度0.05 g。整个米贝村植被覆盖率较高,可达90%以上,以毛竹、乔木为主,加之灌木、草本植物,形成混合生长结构。居民点主要沿米贝河分布,人类工程活动以耕种为主,在X158县道沿线有开挖,造成斜坡形成不同高度的临空断面。在山区内,人类工程活动较弱,无大型工程设施或道路,当地村民对整个生态环境影响小。



图1 花岗岩残积土特征

Fig. 1 Characteristics of granite residual soil

此次研究选择6号沟作为研究对象,该季节性冲沟位于米贝村村委会西侧约200 m处,与米贝河近于垂直相交。6号沟沟口高程为272 m,山顶高程为450 m,高差达178 m,流域面积为0.127 km²,由主沟加一条支沟组成,在平面上形成“Y”字型特征。主沟流向为35°~42°,无较大转折变化,长度约568 m,沟道中部较宽阔,宽度可达30~35 m,呈现“U”型断面,靠近沟源斜坡区与沟口处沟道缩小,整体纵坡降约为185.4‰;支沟流向呈现大角度拐弯,与主沟近垂直相交,沟道相对狭小,宽度仅8~12 m,纵坡降高达306.5‰,与主沟形成垂直交汇。在主沟与支沟交汇处地形开阔,沟道地形坡度较缓,且地下水丰富,被当地居民开垦为耕地、稻田。据当地村民反映,该冲沟在近几十年未发生过泥石流灾害,雨季沟内地表汇水流量增大,旱季几乎无地表水。由于早期地表水搬运堆积,在沟口处可见沉积形成的冲积层,土质细腻,固结密实度高,在此次灾害中未启动形成泥石流物源(图2)。



图2 早期流水搬运沉积物特征

Fig. 2 Characteristics of early sediments

2 滑坡变形破坏特征

2019年6月10—13日在强降雨影响下,米贝村发育大量滑坡、泥石流灾害,滑坡、泥石流堆积物不仅造成部分房屋道路损毁,大量的松散流体物质对道路交通、农田耕地的淤积影响更为突出,给灾后的应急抢险

造成较大阻力。通过野外调查结果发现,区内滑坡与泥石流灾害存在一定联系,以链生灾害形式呈现是此次灾区最显著的特征,其中6号沟内滑坡-泥石流链生特征最为典型,完全转化为泥石流的滑坡、部分转化为泥石流的滑坡以及相对独立的滑坡灾害均有出现。

结合无人机航摄与地面精细化调查,6号沟内共发育7处滑坡(1号~7号),主沟源区发育2处滑坡(1号、2号),主沟沟道区发育4处滑坡(4号、5号、6号、7号),支沟源区发育1处滑坡(3号),各滑坡分布位置见图3。从调查结果可知,3号滑坡形成泥石流主要物源,3号滑坡堆积体前缘部分物质形成泥石流物源,其余滑坡呈现独立状态,未进一步发展加剧泥石流灾害规模。

为进一步分析滑坡-泥石流链生灾害特征,此处对各滑坡灾害变形发展特征进行阐述:

①1号滑坡:位于主沟源区,平面呈长条状,延伸至坡脚,滑动方向26°。滑坡长约79 m,宽约18.5 m,平均厚度约1.8 m,总体积约2 630 m³。整个滑坡体几乎由花岗岩残积土组成,滑动面沿基覆界面发展,滑坡松散物质主要堆积于斜坡坡脚以及沟道内,未转化为泥石流。

②2号滑坡:位于主沟源区斜坡顶部,呈不规则条状,滑动方向341°。滑坡长约55 m,平均宽度12.6 m,平均厚度约1.6 m,总体积1 100 m³,滑坡体为花岗岩残积土。由于滑坡所处位置高,重力势能大,降雨启动后向坡脚运动,沿途进行侵蚀破坏,形成细小沟槽。该滑坡失稳运动过程中,土体结构严重解体呈现散乱状态,失稳后未转化为泥石流。

③3号滑坡:位于支沟源区斜坡顶部,受地形环境限制,其破坏呈现扇形特征,主滑方向为41°,由斜坡顶部至沟道处逐渐缩小。滑坡长约107 m,平均宽度52.6 m,厚度1.5~2 m,总体积约10 000 m³。滑坡失稳后在后缘形成0.8~1.2 m的陡坎,滑床大面积出露,局部可见下伏基岩,整个滑坡体主要由花岗岩残积土组成,滑动面局部切入风化层,导致滑坡松散物质内夹杂花岗岩块碎石。由于滑坡所处地势高,失稳后呈现持续运动状态,对沟道两侧植被造成强烈破坏,大量滑坡物质转化为泥石流,仅少部分滑坡松散物质残留于滑坡前缘沟道内,或堆覆于斜坡两侧。滑坡变形破坏局部特征见图4。

④4号滑坡:位于主沟沟道左侧斜坡坡脚,滑坡呈三角状。长约18 m,平均宽度约16 m,滑体上薄下厚,最大厚度约2 m,总体积不足500 m³。该滑坡受降雨入渗与坡脚地表水侵蚀冲刷双重作用影响而发生失稳破

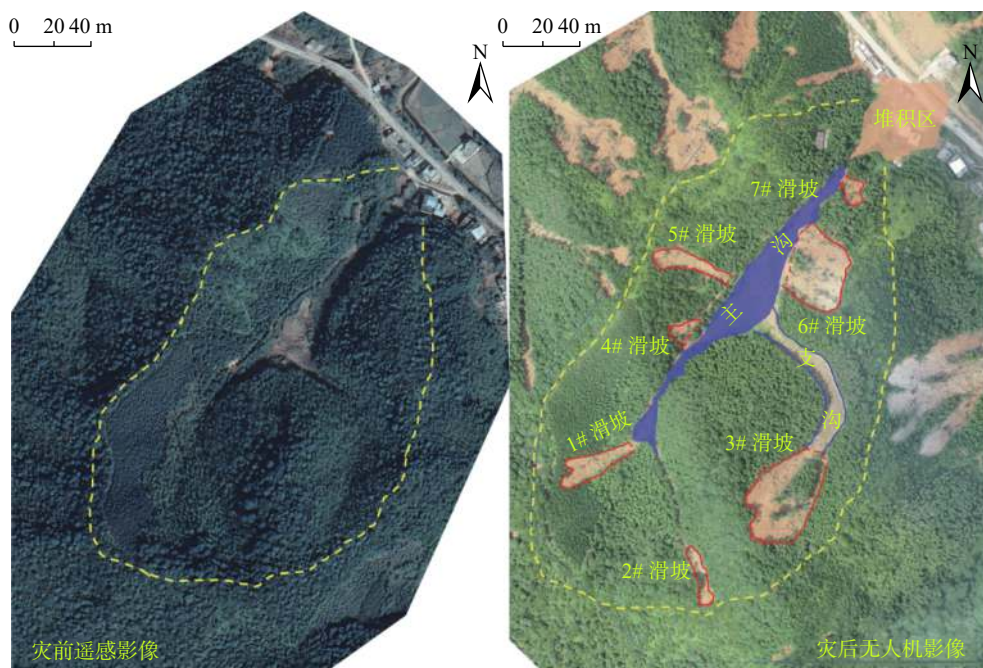


图 3 沟道内滑坡灾害分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of landslide disaster in gully



图 4 3号滑坡局部变形破坏特征

Fig. 4 Deformation and failure characteristics of No.3 landslide

坏,破坏后堆积于沟道内,未造成沟道堵塞,改变地表水流向,最终未转化为泥石流。

⑤ 5号滑坡:位于主沟沟道左侧斜坡,正对支沟沟口,其平面呈舌状,滑动方向为 112°。滑坡由斜坡顶部延伸至坡脚,长约 76.8 m,宽约 13.4 m,厚度约 2.3 m,总体积约 2 370 m³。由于坡脚为早期土地开垦形成的多级台坎,高度为 1.2~1.8 m,滑坡松散物质沿台坎运动而导致能量极大消散,最终也沿台坎分级堆积,加之坡脚大型乔木阻挡,滑坡体尚未完全运动进入主沟沟道

内,故不具备转化为泥石流的条件。

⑥ 6号滑坡:位于主沟沟道右侧斜坡,并且靠近支沟沟口,滑坡平面近似于矩形,滑动方向为 308°。滑坡体长约 66.7 m,宽约 63.5 m,滑体厚度约 3.5~5 m,总体积约 1.8×10⁴ m³,是 6号沟内最大的一处滑坡(图 5)。滑坡失稳后,滑坡体进入沟道内,局部堆积于坡体前缘,滑坡运动过程中坡表植被大量破坏,毛竹、乔木枝干纵横分布于堆积体内,局部未完全解体处毛竹歪斜,根部不稳,突兀的残存于斜坡坡脚。在滑坡后缘形成高达 3 m 的陡坎边界,并且局部后缘段具有牵引拉张变形迹象;坡体中上部滑床大面积出露,主要为花岗岩全风化层,未见中强风化基岩。滑坡堆积体前缘发展至主沟沟道中心,由于滑坡方量大,对主沟沟道造成一定程度的堵塞,导致泥石流运动至此对部分前缘堆积物造成侵



图 5 6号滑坡全貌特征

Fig. 5 Overall features of No.6 landslide

蚀, 被携带进入泥石流流体中, 故而该滑坡部分松散物质转化为泥石流。

⑦ 7号滑坡: 位于沟口处, 长约 22.8 m, 宽约 15.2 m, 厚约 1.5 m, 总体积约 520 m³。虽然沟口处沟道变窄, 但由于滑坡规模小, 加之滑坡前缘植被阻挡, 滑坡失稳后仍主要堆积于斜坡上, 前缘部分松散物质沿树木间隙分散堆积, 整个滑坡体物质未进入沟道内, 该滑坡未转化为泥石流。

3 滑坡-泥石流链生过程特征

从现场调查可知, 6号沟内虽然发育多处滑坡灾害, 但并非所有滑坡松散堆积物在持续降雨作用下均转化为泥石流, 仅3号滑坡以及6号滑坡前缘堆积体局部构成泥石流物源。图6展示了支沟沟源斜坡至沟口的链生灾害启动、运动与堆积的纵断面特征, 3号滑坡位

于支沟沟源斜坡顶部, 在强降雨作用下先是形成单纯的坡体失稳破坏, 与其余滑坡灾害相似, 但由于该滑坡体所处的地理位置与主支沟交汇区、沟口形成较大高程差, 巨大的重力势能驱动使其失稳后即表现出持续运动发展趋势, 加之降雨的持续入渗逐渐改变其物理性质, 呈现出流体特征。相同地势下稀性流体所受底边界阻力更小, 则沿沟道快速运动, 对支沟沟道及右侧斜坡造成不同程度侵蚀破坏, 泥石流过后也增大沟道宽度。受泥石流转向的弯道侵蚀作用影响, 支沟右侧斜坡最大侵蚀破坏断面可达 6 m, 断面坡度最大可达 60°, 而左侧斜坡受侵蚀程度较弱, 斜坡坡度在 20° ~ 30°; 同时造成沟道两侧植被发生一致性破坏, 即顺泥石流运动方向发生倾斜或堆积, 未完全破坏植物区还可见泥石流弯道爬高泥线, 最大高度可达 0.3 m。泥石流弯道侵蚀破坏特征见图7。

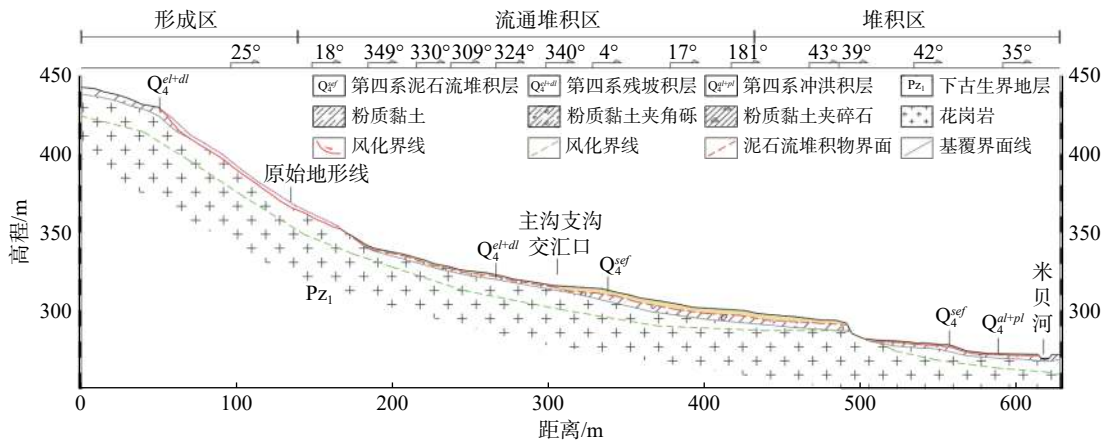


图 6 支沟滑坡-泥石流链生灾害纵断面特征

Fig. 6 Vertical section characteristics of landslide-debris flow chain disaster in branch ditch



图 7 支沟侵蚀破坏特征

Fig. 7 Erosion failure characteristics of branch ditch

当泥石流冲出支沟沟口后, 主沟与支沟交汇处地形

变为开阔, 且沟道地形坡度大幅度减缓, 重力势能作为驱动力减小, 泥石流运动速度逐渐降低, 泥石流由运动侵蚀逐渐向运动堆积转变。泥石流在刚运动出支沟沟口, 由于其保持一定的动能, 垂向运动撞击至主沟左侧斜坡, 也会使其能量造成损失, 在主沟左侧形成的最大冲起高度达 0.48 m, 成灾初期泥线特征较为清晰。在损失部分动能后, 部分泥石流物质堆积于交汇区, 与早期沉积物形成鲜明界线, 堆积厚度达 0.3 ~ 0.5 m(图8), 造成耕地、地表水管被严重掩埋, 部分输水管破裂而无法供水。持续运动的流体物质在流经 6号滑坡堆积区时, 对堆积前缘的松散物质造成刮铲侵蚀, 携带搬运往沟口进一步发展。由于此时泥石流搬运能力减弱, 6号滑坡大部分松散堆积物仍保留于原地, 在堆积体表部有流水冲刷痕迹, 并且前缘堆积区受泥石流侵蚀搬运影响, 前

缘边界形态呈现出向泥石流运动方向倾斜的发展趋势。泥石流运动过后,滑坡左侧边界区松散堆积物明显减少,而右侧边界以及边界下游区堆积物增多,分布范围增大。



图 8 探槽揭露泥石流堆积物特征
Fig. 8 Characteristics of debris flow deposits exposed by exploratory trench

当泥石流运动出沟口后,保留一定动能的稀性流体对近沟口处房屋造成正对方向的冲击作用,造成多处土坯房严重变形开裂甚至垮塌破坏(图 9)。由于沟口地形更为开阔,且地形坡度减缓至水平,失去驱动力与边界约束的泥石流呈现扇形发展堆积,房前屋后被大量泥石流物质充填,最大堆积厚度可达 1.2 m(图 10),多户居民房屋 1 楼被堆填后无法正常生活生产,甚至生命安全受到影响。此外,部分泥石流物质流入米贝河甚至河流对岸,造成米贝河河道严重淤积,沿河流分布的村道更是被严重堵塞。



图 9 房屋变形破坏特征
Fig. 9 Deformation and failure characteristics of building

4 滑坡降雨启滑机理

当降雨强度远大于覆盖层渗透系数时,强降雨影响



图 10 破坏房屋与淤积泥线
Fig. 10 Destruction of houses and siltation mud line

深度往往限于浅表层,大量雨水转为地表水。在不同降雨阶段,不同深度土层含水率增长速率与趋势也存在差异,强降雨引起的浅表层快速饱和而转为地表水的情况会影响湿润锋发展速率^[12-13],而在坡表饱和区内的渗流作用对坡体稳定性非常不利^[14]。随着降雨的持续影响,降雨由垂直入渗向深部竖向发展,逐渐转入入渗后顺斜坡向坡脚矢量运动,地下水渗流方向因斜坡浅表层饱和度的增大而动态变化^[15]。

4.1 模型构建

为进一步研究滑坡-泥石流链生灾害机理,首先对堆积链生过程的初始阶段展开分析,即降雨影响下滑坡的形成机理。本文采用 Geo-Studio 软件中 seep/w 模块模拟降雨条件下斜坡渗流场发展特征,同时耦合 slope 分析稳定性发展趋势。计算模型采用 3 号滑坡前原始斜坡进行构建,原始斜坡结构由花岗岩残积土、全风化层、中强风化层组成(图 11),残积土层、全风化层渗透系数取自于现场单环渗透试验,分别为 3.5×10^{-3} cm/s、 2.4×10^{-4} cm/s。计算模型见图 12,该模型中材

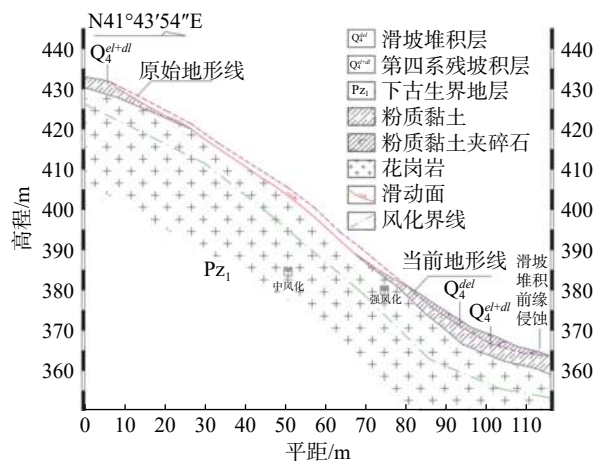


图 11 3 号滑坡工程地质剖面图
Fig. 11 Engineering geological profile of No.3 landslide

料土水特征曲线采用软件内置材料;降雨边界条件以贝岭镇气象监测站降雨监测数据为依据,忽略实际降雨结构,假定为均匀降雨,同时考虑真实累计有效降雨量,故设定单位流量边界,降雨强度设置为 53 mm/d,降雨持续时间为 2 d,模拟条件贴近降雨环境。

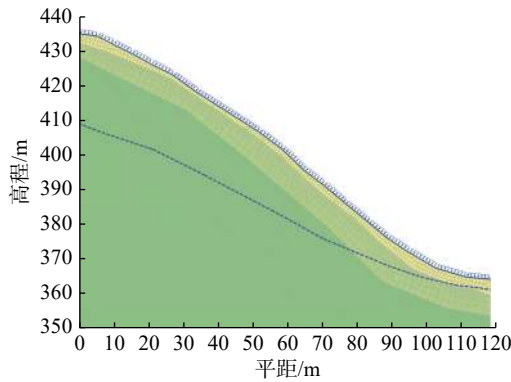


图 12 计算模型

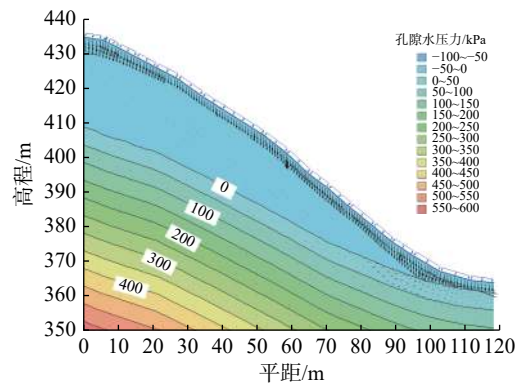
Fig. 12 Computational model

4.2 渗流场特征

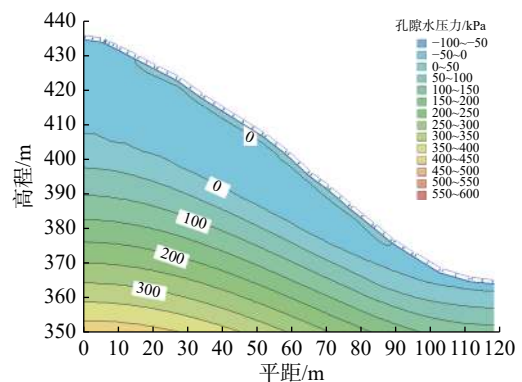
数值分析结果见图 13,其中数字表示孔隙水压力(单位为 kPa),降雨入渗影响的斜坡渗流场变化特征表现出阶段性特征。在降雨初期斜坡土体处于非饱和状态,降雨下渗促使土体含水率不断增大,土体由非饱和逐渐向饱和状态转变,坡体内未形成饱和区,降雨下渗以垂直运动为主,对坡表土壤层进行持续补给,见图 13(a)。当降雨发展一段时间后,降雨的持续入渗使坡表含水率逐渐增大至饱和状态,并且形成零星暂态饱和区,随着各点饱和区范围的不断扩大,坡表饱和范围逐渐连接成一体,形成浅表层饱和带,具有稳定的降雨下渗、地表水转化、地下水渗流的转换关系,见图 13(b)。降雨至 40 h 时,坡表饱和区范围不断扩大、加深,主要集中在残积土层内,局部进入全风化层,并且饱和区内孔隙水压力受降雨入渗以及地下水渗流影响呈现出增大趋势,相应的减弱了土体颗粒间有效应力,成为斜坡失稳的关键,见图 13(c)。

4.3 滑坡启动机理分析

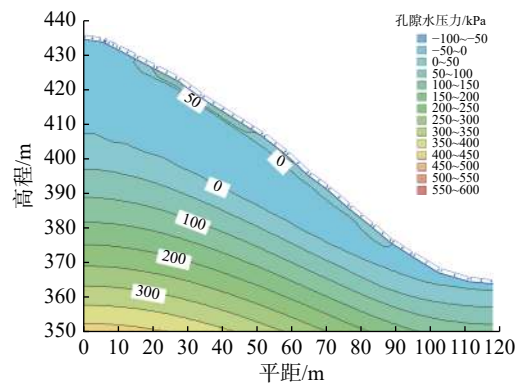
在渗流分析基础上,对不同时间节点坡体稳定性进行计算,计算结果见图 14。降雨初期阶段,坡体呈现非饱和状态,土体抗剪强度高,足以维持斜坡整体稳定,在这个过程中降雨入渗坡体影响程度小,稳定性系数表现为缓慢下降趋势,并且一直处于稳定状态。降雨的持续下渗使坡体浅表层逐渐饱和,一方面,降雨入渗后提高土体含水率,导致高含水率土体抗剪强度持续衰弱化,抗滑阻力降低,另一方面,降雨入渗增大坡体自重,



(a) 降雨 8 h 渗流场特征



(b) 降雨 24 h 渗流场特征



(c) 降雨 40 h 渗流场特征

图 13 不同降雨阶段模型渗流场变化特征

Fig. 13 Variation characteristics of model seepage field in different rainfall stages

增加斜坡下滑分力,综合影响下斜坡稳定性系数开始快速降低,但处于基本稳定状态。对于实际边坡而言,这一阶段极可能会开始出现小的拉裂纹等变形迹象,一旦裂纹形成,有利于降雨的进一步下渗。随着降雨的持续作用,坡体含水率进一步增高,饱和区的形成使坡体浅表层抗剪强度衰减至最低点,在坡体饱和和自重作用下则会出现蠕滑变形,早期形成的拉裂纹进一步扩大发展,加长、加宽、加深,更加速了降雨下渗,故而这一阶段稳定性系数呈现出陡降特征,坡体处于欠稳定状态,并且

向失稳破坏加速发展。

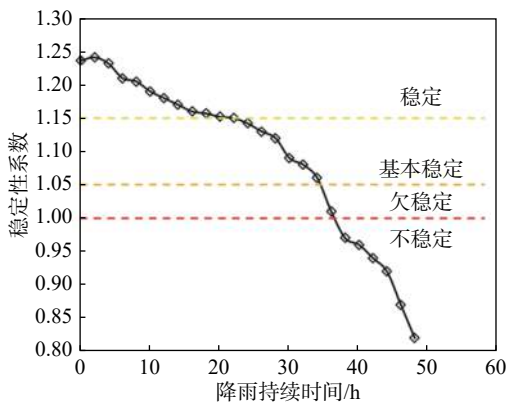


图 14 坡体稳定性系数随降雨时间变化趋势

Fig. 14 Variation trend of slope stability coefficient with rainfall time

从斜坡实际结构特征出发, 3 号滑坡所处的地形呈现为“漏斗状”特征, 有利于降雨过程中的地表水汇流, 降雨下渗与地表水作用会加剧坡体浅表层持水饱和, 饱和区土体抗剪强度的衰减极大程度减弱了抗滑阻力, 加之沟源斜坡区坡度大, 重力下滑分力大, 在自重作用下逐渐演化发展为滑坡成为可能。从斜坡在降雨入渗过程中渗流场变化来看, 降雨入渗的阶段特征较为突出, 前期入渗至后期饱和区的形成无疑是滑坡失稳的关键, 持续的强降雨作用是发生滑坡灾害的诱发因素, 斜坡结构与地形环境则是滑坡发生于此的内在条件。

5 滑坡-泥石流链生机理

课题组在灾后收集整理了贝岭镇小时降雨监测数据(图 15), 此次降雨过程中出现多个小时降雨峰值, 最大小时降雨量为 48.4 mm, 出现在 6 月 11 日, 并且降雨结构表现出降雨期、雨停期相间的特征。据沟口居民反映, 6 号沟内滑坡主要发生在第一轮持续降雨过程后, 当地村民在雨停阶段进入沟内进行了滑坡情况观察, 3 号滑坡在失稳后由于缺乏持续的降雨汇水, 并未

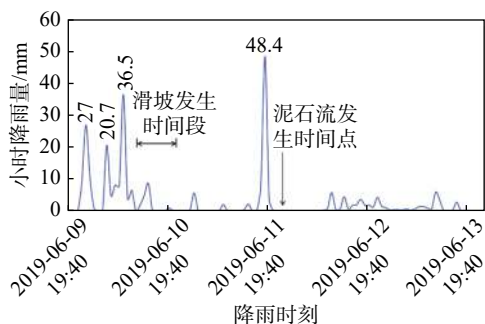


图 15 小时降雨量

Fig. 15 Hourly rainfall

立即转化为泥石流灾害, 而是在 6 月 11 日的小时降雨峰值出现后发生, 可见这类滑坡-泥石流链生灾害对于持续降雨量的需求较为突出。因此轮降雨结构的影响, 滑坡发生至转化为泥石流具有明显的时间差, 若无之后的再次强降雨作用, 则发生滑坡-泥石流链生灾害的可能性很小。

为进一步解释滑坡失稳后转化为泥石流的动力过程, 对泥石流运动不同沟道位置处流速进行计算。其中, 泥石流流体密度采用经验公式计算:

$$\gamma_c = \frac{1}{1 - 0.0334A I_c^{0.39}} \quad (1)$$

式中: γ_c ——泥石流流体密度/($t \cdot m^{-3}$);

A ——坍方程度系数, 取 1.0;

I_c ——坍方区平均坡度/‰, 取 420。

计算得出泥石流流体密度为 1.513 t/m^3 , 属于稀性泥石流。

泥石流流速计算采用铁道科学研究院西南科学研究所提出的流速改进公式, 计算式如下:

$$V_c = \frac{1}{[\gamma_H \phi + 1]^2} m_c R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: V_c ——泥石流流速/($m \cdot s^{-1}$);

γ_H ——泥石流中固体颗粒容重/($t \cdot m^{-3}$), 按经验值取 2.65;

ϕ ——泥沙修正数, 采用式(3)计算;

m_c ——巴克诺夫糙率系数, 取 6.6;

R ——水力半径/m, 一般可用平均泥深 H 代替;

I ——泥流水力梯度/‰, 一般可用沟床纵坡代替。

$$\phi = \frac{\gamma_c - 1}{\gamma_H - \gamma_c} \quad (3)$$

不同位置处泥石流流速计算结果见图 16。滑坡失稳后, 降雨下渗至松散堆积体内部, 改变松散土体物理性质, 逐渐呈现流体特征, 在重力势能作用下持续运动, 逐渐演化成泥石流灾害。受重力势能驱动, 泥石流流体由形成至最终堆积于沟口, 其流速呈现出先增大后减小的发展趋势。在支沟沟道内, 较大沟道纵坡降促使其呈现持续加速运动特征, 最大速度可达 3.5 m/s, 至支沟沟口处, 地形变开阔, 边界约束能力减弱, 加之泥石流流体在正对面斜坡的冲击过程, 导致流体快速降低, 再次转变沿主沟道流向时, 流速已经降至 2.17 m/s。可见, 沟道地形的变化不仅为泥石流运动提供动力, 同时也会造成阻力, 不同阶段下地形的作用程度决定泥石流的运动发展状态。

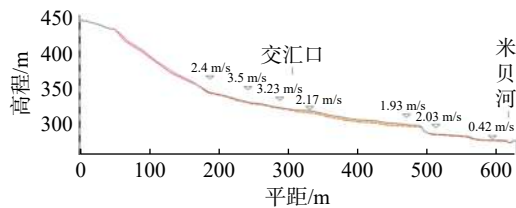


图 16 不同沟道位置处泥石流流速特征

Fig. 16 Velocity characteristics of debris flow at different gully locations

分析可知,3号滑坡所处的地理位置本身具有较大的势能,这成为滑坡失稳破坏以及后期演化发展为泥石流的主要驱动力。在滑坡失稳初期,滑坡松散堆积体含水率值尚不足以使其呈现流动状态,故而滑坡发生后主要堆积于沟道内,后期再次出现的降雨高峰成为链生灾害的关键。持续的强降雨使滑坡体含水率进一步增大,加之滑坡区“漏斗状”地形环境的汇水作用,促使地表径流增大,高含水率的松散物质随大流量地表水运动,并逐渐相互混杂在一起而形成泥石流灾害。泥石流形成之后,地形的影响更为显著,支沟沟道侵蚀、主沟内堆积与侵蚀、沟口堆积等过程现象均源于泥石流路径中地形环境的变化。

综合而言,滑坡-泥石流链生灾害需要几个条件,即地形、强降雨、岩土体性质,降雨是链生灾害的诱发因素,地形则为泥石流的启动、运动提供动能,而岩土体性质影响降雨作用下斜坡稳定性发展趋势,决定泥石流物源程度。需要说明的是,此次的强降雨并非为一次性爆发,而是具有阶段峰值,使滑坡与泥石流的形成过程也表现出阶段性,从完整时间链上属于滑坡-泥石流链生灾害。当降雨为短期内持续完成,则滑坡发生后快速形成泥石流灾害,与本文介绍的这类链生灾害形成本质的区别。综上,6号沟滑坡-泥石流链生灾害是由前期降雨引发滑坡,后期降雨转化为泥石流,地形控制运动发展过程,最终呈现出各阶段具有密切联系的完整链生过程。

6 结论

文章基于野外详细调查与无人机航摄影像,通过数值分析与计算,对6号沟滑坡-泥石流链生灾害成灾特征与机理展开深入研究,得出以下主要结论:

(1)6号沟内共发育7处滑坡,均为浅层土质滑坡,滑体主要由花岗岩残积土构成。3号滑体与部分6号滑体转化为泥石流,其余滑坡独立存在,未构成持续性影响。

(2)链生灾害中滑坡松散物质是泥石流主要物源,降雨持续作用下,斜坡浅表层由非饱和和向饱和状态转

变,在坡表面形成连续饱和区,孔隙水压力的增加减小粒间有效应力。饱水土体抗剪强度的下降与坡体自重的增加导致斜坡发生失稳破坏。滑坡稳定性发展与降雨持续时间呈现出规律性特征。

(3)支沟沟源区“漏斗状”地形有助于地表汇水,降雨的持续下渗补给与地表汇水使滑坡松散堆积物物理性质变化,在重力势能下启动、运动转化为泥石流灾害。沟道流向的变化控制着泥石流的运动与堆积,其流速整体呈现出先增大后减小的发展趋势。受降雨结构影响,滑坡与泥石流的发生表现出阶段性,前期降雨引发滑坡、后期降雨启动形成泥石流,进而形成完整的链生过程。

参考文献 (References) :

- [1] 刘艳辉,温铭生,苏永超,等.台风暴雨型地质灾害时空特征及预警效果分析[J].水文地质工程地质,2016,43(5):119-126. [LIU Yanhui, WEN Mingsheng, SU Yongchao, et al. Characteristics of geo-hazards induced by typhoon rainstorm and evaluation of geo-hazards early warning [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 119-126. (in Chinese with English abstract)]
- [2] YANG H J, YANG T Q, ZHANG S J, et al. Rainfall-induced landslides and debris flows in Mengdong Town, Yunnan Province, China [J]. Landslides, 2020, 17(4): 931-941.
- [3] BAI H L, FENG W K, YI X Y, et al. Group-occurring landslides and debris flows caused by the continuous heavy rainfall in June 2019 in Mibeier Village, Longchuan County, Guangdong Province, China [J]. Natural Hazards, 2021, 108(3): 3181-3201.
- [4] LIU W P, WAN S F, LUO X Y, et al. Experimental study of suffusion characteristics within granite residual soil controlling inflow velocity [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(22): 1-8.
- [5] 刘礼领,殷坤龙.暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J].岩土力学,2008,29(4):1061-1066. [LIU Liling, YIN Kunlong. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1061-1066. (in Chinese with English abstract)]
- [6] LIU W P, SONG X Q, HUANG F M, et al. Experimental study on the disintegration of granite residual soil under the combined influence of wetting-drying cycles and acid rain [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 1912-1927.
- [7] 安然,孔令伟,黎澄生,等.炎热多雨气候下花岗岩残积土的强度衰减与微结构损伤规律[J].岩石力学与工程学报,2020,39(9):1902-1911. [AN Ran, KONG Lingwei, LI Chengsheng, et al. Strength attenuation and microstructure damage of granite residual soils under hot and rainy

- weather [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1902 – 1911. (in Chinese with English abstract)
- [8] 闫金凯, 黄俊宝, 李海龙, 等. 台风暴雨型浅层滑坡失稳机理研究 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 481 – 491. [YAN Jinkai, HUANG Junbao, LI Hailong, et al. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4): 481 – 491. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 胡华, 吴轩, 张越. 基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 92 – 97. [HUHua, WUXuan, ZHANG Yue. Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 92 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 龙艳梅, 宋章, 王玉峰, 等. 基于物理模型试验的碎屑流流态化运动特征分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 126 – 136. [LONG Yanmei, SONG Zhang, WANG Yufeng, et al. An analysis of flow-like motion of avalanches based on physical modeling experiments [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 126 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 崔鹏, 郭剑. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 5 – 18. [CUI Peng, GUO Jian. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 5 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 简文彬, 黄聪惠, 罗阳华, 等. 降雨入渗下非饱和坡残积土湿润锋运移试验研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1123 – 1133. [JIAN Wenbin, HUANG Conghui, LUO Yanghua, et al. Experimental study on wetting front migration induced by rainfall infiltration in unsaturated eluvial and residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1123 – 1133. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 郭智辉, 简文彬, 刘青灵, 等. 基于现场原型试验的斜坡降雨入渗分析及入渗模型研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1635 – 1647. [GUO Zhihui, JIAN Wenbin, LIU Qingling, et al. Rainfall infiltration analysis and infiltration model of slope based on in-situ tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1635 – 1647. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 方雪晶, 王浩, 龚匡周, 等. 渗流作用下花岗岩类土质路堑边坡稳定性分析 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 515 – 520. [FANG Xuejing, WANG Hao, GONG Kuangzhou, et al. Analysis on the granitoid soil cut slopes stability under the action of seepage [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2012, 40(4): 515 – 520. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 丁少林. 福建省台风降雨型滑坡渗流场规律及流—固耦合分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016. [DING Shaolin. Seepage characteristics and fluid-solid couple analysis of typhoon precipitation-induced land slide in Fujian Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract)]