

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.06

云南永善县上坝老滑坡复活机制及新滑坡稳定性分析

张彦锋^{1,2,3}, 铁永波³, 白永健³, 左林勇⁴

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 4. 四川川核地质工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘要:通过对永善县上坝老滑坡的地质环境条件的系统调查研究,分析了滑坡地层特征、滑带特征及变形特征,并对老滑坡复活机制进行了深入探究,在此基础上对新滑坡进行了稳定性评价。综合研究表明:(1)上坝滑坡为一个特大型的多级牵引式老滑坡,具有多期、多次逐级后退演化的变形特征;(2)老滑坡和新滑坡存在两类控滑带,即老滑坡的泥页岩软弱夹层滑带,新滑坡的表层松散碎石土与下伏似层状泥页岩接触带滑带;(3)地层岩性是老滑坡复活的核心影响因素,库区水位骤降是老滑坡复活的直接影响因素,降雨及其它条件对老滑坡复活有一定的影响;(4)稳定性结果分析表明,新滑坡目前处于基本稳定状态,受库区水位骤降影响,稳定性急剧下降。

关键词:上坝老滑坡;变形特征;稳定性;复活机制

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2020)03-0041-09

Reactivation mechanism of the old landslide and stability analysis of the new landslide in Shangba, Yongshan County of Yunnan Province

ZHANG Yanfeng^{1,2,3}, TIE Yongbo³, BAI Yongjian³, ZUO Linyong⁴

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 4. Sichuan Chuan Nuclear Geological Engineering Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: Based on the systematic investigation and study of the geological environmental conditions of the old landslide in Shangba, Yongshan County, the characteristics of the strata, slip zone and deformation of the landslide are analyzed, and the revival mechanism of the old landslide is deeply explored. On this basis, the stability of the new landslide is evaluated. The comprehensive study shows that: (1) The Shangba Landslide is an extra-large multi-stage traction-type old landslide, which has the deformation characteristics of multi-stage and multiple step-by-step regression evolution; (2) There are two types of sliding belts in the old landslide and the new landslide, namely the weak interlayer slide belt of the mud and shale of the old landslide; (3) Strata lithology is the core influencing factor of the resurrection of the old landslide. The sudden drop of water level in the reservoir area is the direct influencing factor of the resurgence of the old landslide. Rainfall and other conditions have a certain effect on the resurgence of the old landslide; (4) The analysis of the stability results show that the new landslide is currently in a basically stable state, which is affected by the sudden drop in water level in the reservoir area, and the stability has declined sharply.

Keywords: Shangba old landslide; deformation feature; stability; resurrection mechanism

收稿日期: 2019-09-03; 修订日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目: 循环冻融作用下冰碛土的碎化效应及其对泥石流启动的影响试验研究(41772324); 中国地质调查局公益性地质调查项目: 乌蒙山区北部城镇地质灾害调查(DD20160274)

第一作者: 张彦锋(1992-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害研究。E-mail: 2574397278@qq.com

0 引言

金沙江流域位于青藏高原东南缘,是长江上游最大支流,区内地质环境差,山高坡陡,地形变化大,多为高山峡谷,地质构造活动强烈,地质灾害频发^[1]。区内地质灾害多具有类型多、成因机制复杂、突发性强、变形破坏发展趋势难以预测、失稳后破坏性大等特点^[2-4]。为此开展该流域地质灾害研究,对该区域的地质灾害预报及防治、人民生命财产保护以及经济发展等都有重要的科学支撑^[5-7]。

滑坡复活机制是近几年滑坡研究热点之一。滑坡复活是在滑坡内在因素(物质条件、结构条件)控制作用下,通过降雨、地震、人类活动等外在因素诱发形成^[8-10]。目前关于滑坡复活机制的研究主要集中在滑坡变形特征以及诱发因素的研究^[11]。根据滑坡复活变形特征,将滑坡复活形式分为渐变型、稳定型和突变型,而大型滑坡的复活形式多为渐变型^[12]。而关于诱导滑坡复活的外界因素,学者们普遍认为降雨、地震和人类工程活动是诱发滑坡复活的主要因素。长时间的降雨或短时暴雨,地表水通过裂缝、溶洞等途径入渗到滑坡体,使滑坡体岩土体饱和,降低了岩土体的物理力学性质,增加了滑坡体重量,导致下滑力增大,同时地表水的渗入增加了裂缝的水压力,导致滑坡体变形,进而诱发滑坡体复活^[13]。人工开挖对滑坡的复活也起着重要作用,开挖坡脚过程减小了抗滑力,同时使得坡肩和坡脚应力集中,坡顶出现拉裂缝,坡脚挤压破坏,破题后缘形成多条近似平行的拉裂缝逐渐贯通,加速滑坡的复活^[14]。一些学者发现滑坡在天然状态下处于稳定状态,而在地震后出现了复活现象,研究认为地震对滑坡的复活起到促进作用主要表现在:地震造成岩土体结构松散,形成拉裂缝,为降雨入渗提供了有利的通道,对处于复活蠕变的滑坡起到了加剧变形的作用^[15]。

上坝滑坡位于金沙江溪洛渡水电站库区右岸斜坡上,为特大型老滑坡。2014 年 4 月老滑坡前缘受到降雨及库区水位变化等因素的影响发生局部复活,形成新滑坡,造成大量农田及房屋受损,且该滑坡在暴雨等条件下还有可能进一步滑动,大量滑体滑入金沙江将对下游的电站造成威胁,引起了高度重视。基于此,本文对该老滑坡的复活机制及新滑坡的稳定性展开研究。

1 滑坡概况

上坝老滑坡平面形态总体呈“撮箕状”(图 1),纵向上表现为台阶状,存在两级缓台,缓台后部为陡壁,

壁高约 30~50 m,显示了滑坡多期滑动的特征。滑坡体纵向(南北方向)长约 1 100 m,横向宽 450 m,面积约 $4.95 \times 10^5 \text{ m}^2$,滑体厚 35~76.5 m,体积约 $2.76 \times 10^7 \text{ m}^3$,属特大型滑坡。滑坡体前缘高程 580 m,后缘高程 1 000 m,高差 420 m,滑坡纵向平均坡度 20° ,中前部陡,坡度 $23^\circ \sim 25^\circ$,后部缓,坡度 $10^\circ \sim 20^\circ$,主滑方向 340° 。滑坡边界明显,东西两侧各为一条冲沟,构成老滑坡侧边界;后缘以后壁陡崖为界;前缘直抵金沙江溪洛渡库区。



图 1 上坝滑坡全貌图

Fig. 1 The overview of Shangba Landslide

新滑坡平面上呈“圈椅状”,为老滑坡前缘复活的浅层滑坡。主滑方向 340° ,滑坡体纵向(南北方向)长约 450 m,横向宽 300 m,面积约 $1.35 \times 10^5 \text{ m}^2$,滑体厚 8.5~35 m,体积约 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$,属大型滑坡。滑坡东北侧及西南侧边界主要以滑坡剪切错动形成的陡坎为界;后缘以陡壁为界,壁高约 30 m,出露物质主要老滑坡堆积物;前缘直抵金沙江溪洛渡库区。

2 滑坡区的地质环境条件

2.1 地形地貌

滑坡区位于云贵高原川南丘陵延伸地带,构造侵蚀中高山峡谷区,山势陡峻,地形复杂,地势南高北低,山顶海拔 2 200 m,坡脚海拔 600 m,最大相对高差 1 600 m。斜坡后部(海拔 1 100 m 以上)基岩出露,为数百米陡坡,局部为陡壁;滑坡位于斜坡中前部(海拔 1 100~600 m),地形陡缓相间,呈不规则台阶状,滑坡后部缓,坡度 $10^\circ \sim 20^\circ$,中前部陡,坡度约 25° 。

2.2 地质构造

滑坡区位于峨边-金阳断裂、莲峰断裂和马边-盐津隐伏断裂所围限的雷波-永善三角形块体内(图 2),区内地质构造复杂,褶皱和节理裂隙广为发育,其中,石板滩背斜倾伏端部位 SE 翼从滑坡区通过,滑坡区

后缘灰岩陡壁发育一组大裂隙,产状 $N20^{\circ}E/NW \angle 75^{\circ} \sim 80^{\circ}$,延伸数十米,间距 $3 \sim 5 \text{ m}$,局部小于 1 m 。该区域新构造运动强烈,历史上曾发生破坏性地震达 22 次,其中 8 级以上地震 6 次。地震频率高、强度大、波及面广是其主要特征。

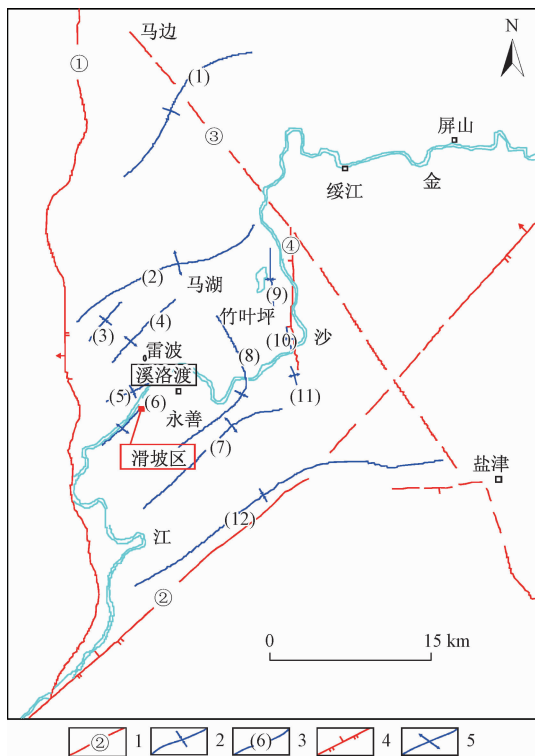


图2 区域地质构造纲要图

Fig. 2 Regional geological structure

1—断裂及编号;2—向斜轴;3—褶皱编号;4—逆断裂;5—背斜轴
①峨边-金阳断裂;②华莹山-莲峰断裂;③马边-盐津隐伏断裂;④翼子坝断层;(1)西宁向斜;(2)城墙岩背斜;(3)锦屏山向;(4)那里沟背斜;(5)五官寨向斜;(6)石板滩背斜;(7)黄泥坡背斜;(8)零落坝向斜;(9)马湖向斜;(10)黄坝坝背斜;(11)长坪穹隆背斜;(12)永盛向斜

2.3 水文条件

滑坡区属中亚热带季风气候区,干湿季节交替明显,年平均降雨量为 650.5 mm ,最大降雨量为 1000 mm ,降水分布不均,降水量总趋势随海拔增加而增多,降雨多集中在每年的 $6 \sim 9$ 月,占全年降水量的 71% 。滑坡区地下水类型主要为松散堆积层孔隙水、基岩裂隙水、碳酸盐岩岩溶裂隙水,补给来源主要是大气降雨,地下水主要在滑坡前缘低洼处以泉和渗流形式排泄。

3 滑坡地层及滑带特征

滑坡区内地层结构较为复杂,物质组成种类较

多,地层厚度变化较大(图3),从三维地层效果图中可以看出表层松散覆盖层呈滑坡前部薄、后部厚的特点。

滑坡区内分布地层由新到老主要为第四系全新统滑坡堆积层(Q_4^{del})、第四系全新统崩坡积层($Q_4^{\text{col+dl}}$)、第四系全新统洪积层(Q_4^{pl})、志留系下统龙马溪组(S_1l)和奥陶系巧家组($O_{1-2}q$)(图4)。第四系全新统滑坡堆积层(Q_4^{del})主要为块碎石土,局部夹块石,泥质充填,主要成分多为泥页岩,广泛分布于滑坡范围内;第四系全新统崩坡积层($Q_4^{\text{col+dl}}$)主要为块碎石土,主要成分为玄武岩、灰岩、页岩,主要分布在老滑坡后缘青杠坪平台;第四系全新统洪积(Q_4^{pl}),主要为卵砾石土,卵砾石成分以玄武岩为主,其次为阳新灰岩,主要分布于滑坡后缘平台上;志留系下统龙马溪组(S_1l)主要为黑色泥页岩,呈薄层状,岩层产状 $110^{\circ} \angle 15^{\circ}$;奥陶系巧家组($O_{1-2}q$)主要为生物碎屑灰岩,呈中厚层状;裂隙较发育,岩层产状 $110^{\circ} \angle 15^{\circ}$,在滑坡的形成过程中,滑坡体的剪出口高程、前缘堆积范围及形态往往受该层控制(图4)。

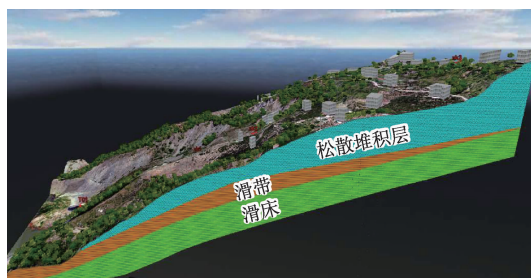


图3 滑坡三维地层侧视图

Fig. 3 Landslide three-dimensional stratum side view

根据钻探和物探揭露上坝老滑坡及新滑坡控滑带主要为两类,分别为老滑坡的泥页岩软弱夹层破碎带(埋深范围 $35 \sim 82 \text{ m}$)和新滑坡表层松散碎石土与下伏似层状泥页岩接触带(埋深范围 $8.6 \sim 21.3 \text{ m}$)(图5),滑带见图6。老滑坡滑带物质主要泥页岩中的泥化夹层,厚度约 $0.4 \sim 0.5 \text{ m}$,泥化夹层岩体破碎,性质较为软弱,具有隔水层的性质,易造成该层附近地下水的富集,并造成其局部泥化的特点。

新滑坡滑带物质主要为滑坡表层松散碎石土与下伏似层状泥页岩接触处的泥页岩角砾夹粉质黏土,厚度约 $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$,稍湿,结构松散,角砾石含量为 $50\% \sim 60\%$,粒径 $0.5 \sim 2 \text{ cm}$,个别角砾表面可见摩擦迹象,滑带内粉质黏土含量明显高于上部滑体,经滑动后揉皱现象明显。

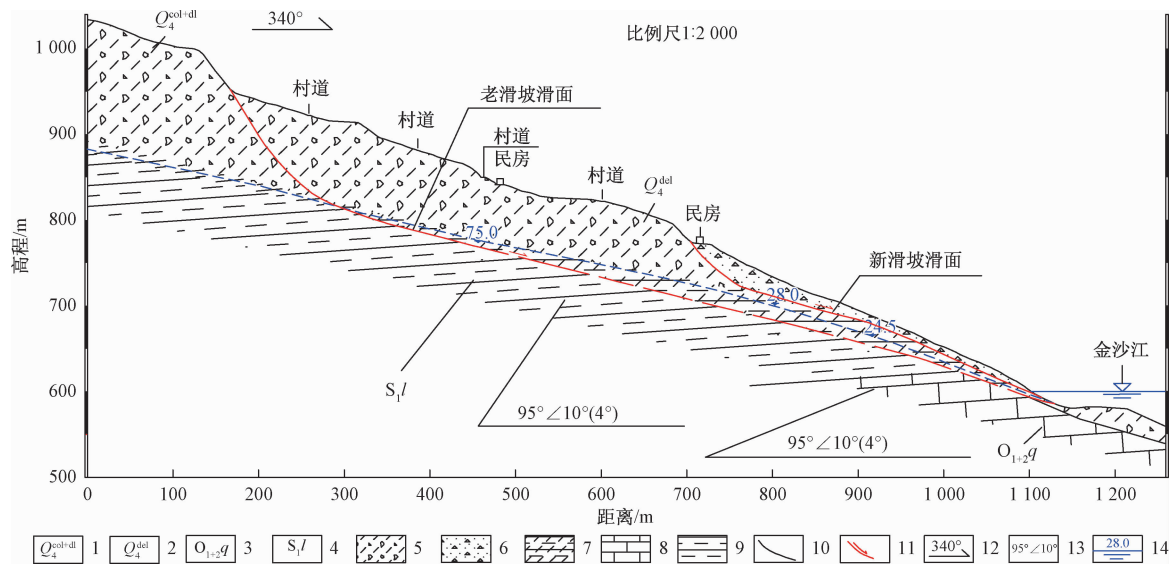


图4 上坝滑坡 A-A' 工程地质剖面图

Fig. 4 Engineering geological map of profile A-A' of Shangba Landslide

1—第四系全新统崩坡积;2—第四系全新统滑坡堆积层;3—奥陶系中下统巧家组;4—志留系下统龙马溪组;5—块碎石土;6—碎石土;
7—泥页岩块石;8—灰岩;9—泥页岩;10—岩层界线;11—滑坡滑面;12—剖面方向;13—岩层产状;14—地下水位

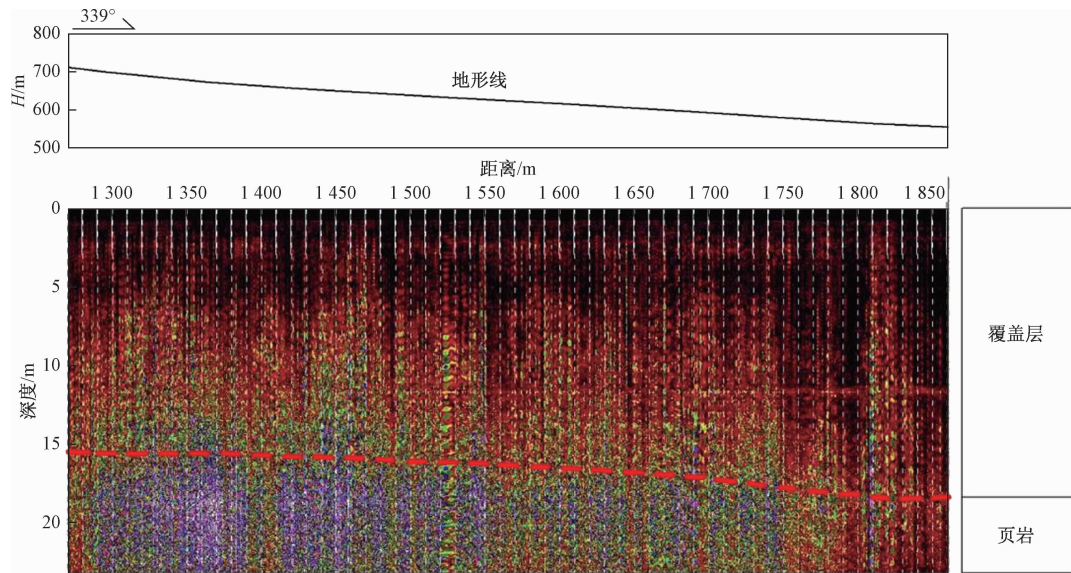


图5 地质雷达探测滑带位置图

Fig. 5 Geological radar detection slide belt position map

4 滑坡变形特征

据现场调查及综合分析,上坝老滑坡为一个覆盖层内部多级、多期次变形形成的一个复合体^[16-18]。该滑坡变形由前到后逐级牵引,变形逐渐变弱,在滑坡体上产生裂缝、滑塌及房屋破坏,地貌上形成多级台阶状。据地表变形程度将滑坡分为强烈变形区和弱变形区。

强烈变形区位于老滑坡前缘即新滑坡区,该新滑

坡形成于2014年,造成两侧错动形成陡坎,后缘形成陡壁,滑坡体上8栋民房损毁,农田出现10条裂缝,2条为剪切裂缝,其余均为拉张裂缝,滑塌4处(HT1、HT2、HT3和HT4)(图7),之后变形破坏速度有所减缓,但地表及房屋开裂现象仍存在,目前处于持续蠕滑变形状态。弱变形区位于老滑坡中后部,其变形主要表现为房屋裂缝及两处滑塌体(HT5和HT6)。裂缝及滑塌体特征见表1、表2。

表 1 裂缝特征统计表

Table 1 Statistics of fracture characteristics

裂缝编号	裂缝位置	裂缝类别	裂缝特征
L1	滑坡前部滑塌体 1 后缘	拉张裂缝	裂缝沿伸长度近 24 m,弧形延伸,裂缝张开宽度约 3 cm,下错约 35 cm,走向约 NW75°,为前缘土体滑塌引起。
L2	滑坡前部滑塌体 3 后缘	拉张裂缝	裂缝沿伸长度近 15 m,裂缝张开宽度约 3~5 cm,下错约 20 cm,走向 NW90°,为前缘土体滑塌引起。
L3	滑坡中后部脐橙地	拉张裂缝	裂缝沿伸长度近 20 m,宽约 2 cm,下错约 30~50 cm,走向约 NE80°,为滑坡下错所引起,目前局部已被掩埋。
L4	滑坡西南侧边界荒地	剪切裂缝	裂缝延伸长度约 35 m,宽约 3~8 cm,下错约 50~150 cm,走向约 NW20°,为滑坡下错侧向剪切引起。
L5	滑坡中后部荒地	拉张裂缝	裂缝延伸长度约 17 m,裂缝张开宽度约 20~30 cm,走向约 NE70°,为滑坡下错所引起,目前局部已被掩埋。
L6	滑坡东北侧边界荒地	剪切裂缝	裂缝延伸长度约 25 m,宽约 10~20 cm,走向约 NW20°,为滑坡下错侧向剪切引起,目前局部已被掩埋。
L7	滑坡后缘东北侧	拉张裂缝	裂缝延伸长度约 15 m,裂缝张开宽度约 20~30 cm,走向约 NE25°,为滑坡下错所引起,目前局部已被掩埋。
L8	滑坡后缘中部	拉张裂缝	裂缝延伸长度约 23 m,裂缝张开宽度约 5~10 cm,走向约 NE55°,为滑坡下错所引起,目前局部已被掩埋。
L9	滑坡中后部蓄水池	拉张裂缝	裂缝延伸长度约 9.5 m,裂缝张开宽度约 5~20 cm,走向约 NE65°,为滑坡下错所引起,水池已被拉裂破坏。
L10	滑坡后缘西南侧房屋	拉张裂缝	裂缝延伸长度约 18.5 m,裂缝张开宽度约 1~3 cm,走向约 NE70°,为滑坡下错所引起。

表 2 滑塌体特征统计表

Table 2 Characteristic statistics of landslides

编号	位置及分布高程/m	已滑塌规模	滑塌方向/(°)	残留体变形特征
HT1	位于老滑坡前缘东北侧金沙江边陡坡,分布高程 580~600 m	斜长 40 m,横宽 75 m,平均厚 6 m,体积 18 000 m ³	355°	后缘发育拉裂缝 L1,滑塌体后部为陡壁,坡面残留块石及块碎石土,结构松散,现处于欠稳定状态,在降雨、库区蓄水影响下可能进一步滑塌。
HT2	位于新滑坡前缘金沙江边陡坡,分布高程 590~615 m	斜长 45 m,横宽 40 m,平均厚 5 m,体积 9 000 m ³	350°	后缘无裂缝发育,坡面残留块石及碎石土,呈锥状堆积于坡脚,现处于基本欠状态,在降雨、库区蓄水影响下可能进一步滑塌。
HT3	位于老滑坡前缘西南侧金沙江边陡坡,分布高程 585~620 m	斜长 55 m,横宽 30 m,平均厚 6 m,体积 9 900 m ³	350°	后缘发育拉裂缝 L2,坡面残留块石及块碎石土,结构松散,现处于欠稳定状态,在降雨、库区蓄水影响下可能进一步滑塌。
HT4	位于老滑坡后部第二级陡坎,分布高程 880~900 m	斜长 25 m,横宽 20 m,平均厚 3 m,体积 1 500 m ³	343°	后缘无裂缝发育,坡面残留体较少,垮塌物为浅表层块石及碎石土,现处于基本稳定状态。
HT5	位于老滑坡后部第一级陡坎,分布高程 960~990 m	斜长 40 m,横宽 12 m,平均厚 2 m,体积 960 m ³	292°	后缘无裂缝发育,坡面残留体较少,垮塌物为浅表层碎石土,现处于基本稳定状态。



(a) 老滑坡滑带泥化夹层滑带特征



(b) 新滑坡滑带角砾土滑带特征

图 6 老滑坡及新滑坡滑带

Fig. 6 Old landslide and new landslide slide belt

5 老滑坡复活机制分析

5.1 地层岩性对老滑坡复活的影响

地层岩性常常是触发滑坡等地质灾害的重要因素^[19]。滑坡体物质主要由第四系洪积物、崩坡积物、滑坡堆积物及泥页岩组成,上覆第四系堆积物结构松散~稍密,经地表水常年入渗软化后,物理力学性质差,为易饱水、易软化的易滑土体,大量的松散堆积物为滑坡发展提供了潜在的滑体。下伏泥页岩为老滑坡滑带,岩体破碎,黏聚力及抗剪强度低,物理力学性质差,其中泥岩夹层亲水性强,遇水易软化和崩解。土体与岩体的接触面为滑坡的发生提供了潜在的滑面。因此,地层岩性是老滑坡复活的核心影响因素。

5.2 库区水位对老滑坡复活的影响

库区水位周期性涨落,对库岸滑坡的复活有重要的影响。滑坡区位于金沙江溪洛渡库区,每年雨季快要结束时蓄水,正常蓄水位 600 m,每年 12 月至次年 5 月底开始放水,水位降至死水位 540 m。水库蓄水后,该滑坡体坡脚处于浸泡之中,土体容重增大,抗剪强度

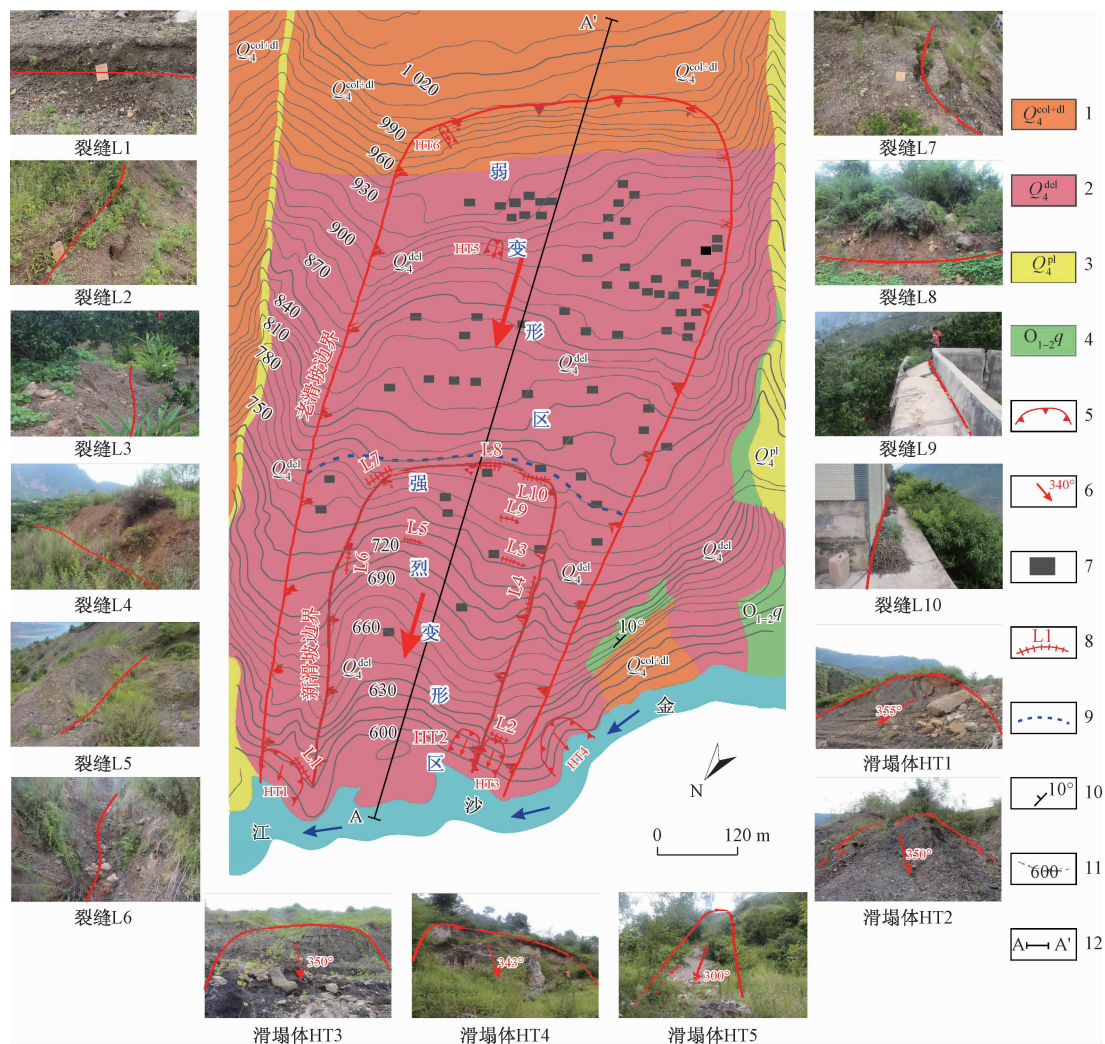


图7 滑坡区工程地质平面图

Fig. 7 The engineering geological plan sketch of landslide area

1—第四系全新统崩坡积堆积;2—第四系全新统滑坡堆积;3—第四系全新统洪积堆积;4—奥陶系巧家组;5—滑坡边界;
6—滑动方向;7—房屋;8—裂缝及编号;9—变形分区界线;10—岩层产状;11—等高线;12—剖面线

指标降低;库区水位降低时,滑体内水位下降速度滞后于滑体外库区水位下降速度,高、低水位之间的水体将会产生向坡外渗透的渗透水动力作用,导致滑体向下滑动^[14]。据访调查发现走,每年的2—4月滑坡变形最为强烈,老滑坡前缘于2014年4月复活,此时间段库区水位下降速度最快。因此,滑坡变形与水位骤降直接相关,是老滑坡复活的直接触发因素。

5.3 降雨对老滑坡复活的影响

降雨对触发滑坡等地质灾害有重要影响^[20-21]。滑坡区地下水补给来源主要为降雨及农田灌溉,降雨产生的地表径流除蒸发外,大部分慢慢的人渗到斜坡体,成为影响老滑坡复活的因素之一。根据2011—2015年研究区降雨资料统计显示(表3),降雨主要集中在每年6—9月份,2011—2013年全年降雨量呈上

升趋势,2013年降雨量达到最大(1 201.6 mm)。老滑坡于2014年4月份前缘复活,但滑前3个月降雨量极少。由此可以看出,降雨是老滑坡复活的影响因素之一,但不是本次滑坡的直接触发因素。

5.4 人类工程活动及其他条件对老滑坡复活的影响

据现场走访调查,在老滑坡复活前,斜坡体上新建有大量的民房,建筑物类型多为二层以上楼房,大部分位于新滑坡的后缘部位。据当地村民介绍,随着民房的修建,农田及民房变形现象越来越严重,说明加载效应是十分明显。因此,建筑物加载是老滑坡复活的影响因素之一。

地震、地质构造对老滑坡复活也有影响。研究区处于Ⅶ度地震区,地震引起滑坡体振动,坡体受到反复冲击,坡体软弱层锁合松动,抗剪强度降低或完全失去

结构强度,使老滑坡稳定性降低。研究区位于石板滩背斜南东翼,滑坡所在区域基岩为缓倾单斜岩层,受到构造挤压作用,加上前缘临空,构造裂隙和卸荷裂隙发育,使得老滑坡易于复活。

表 3 研究区 2011—2015 年降雨情况统计表 (mm)
Table 3 Statistical table of rainfall in the research area from 2011 to 2015 (mm)

月份 年份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
2011	29.8	5.5	23.8	9.6	57.8	92.1	97.7	82.7	22.6	24.8	20.8	9.8	477.0
2012	19.2	7.2	17.4	16.6	43.6	129.8	224.5	185.6	173.2	39.3	3.6	3.3	863.3
2013	2.0	2.2	67.5	78.7	107.4	215.1	289.0	233.0	141.8	50.6	3.4	10.9	1 201.6
2014	6.0	13.0	37.5	38.5	90.4	77.6	110.0	272.3	105.7	61.8	6.4	10.9	830.1
2015	17.8	3.3	15.2	60.5	135.5	114.1	159.4	257.5	150.1	56.4	6.4	7.9	984.1

6 滑坡稳定性分析

结合岩土体物理力学参数试验结果及反演分析,给出滑坡体各岩土体相关物理力学参数(表 4)。

表 4 滑坡体岩土体物理力学参数表
Table 4 Table of physical and mechanical parameters of landslide rock and soil

类型	重度/(kN·m ⁻³)		黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
碎石土	18.90	19.60	20.91	16.67	24.36	21.99
角砾土	19.10	19.60	19.73	16.17	24.67	23.10
泥化夹层	17.00	18.80	27.37	22.63	23.73	22.63

6.1 稳定性评价方法

综合地面调查及勘察结果分析,新滑坡滑面呈折线型,故采用基于极限平衡理论的折线型滑动法(传递系数法)对新滑坡进行稳定性计算。计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n}$$
$$R_i = [W_i \cos \alpha_i - AW_i \sin \beta_i - P_{wi} \sin(\alpha_i -$$

$$\beta_i)] \tan \varphi_i + C_i L_i$$
$$T_i = W_i \sin \alpha_i + AW_i \cos \alpha_i + P_{wi} \cos(\alpha_i - \beta_i)$$
$$\psi_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \operatorname{tg} \varphi_{i+1}$$

式中: K ——稳定系数;
 W_i ——第 i 条块的重量/(kN·m⁻¹);
 α_i ——第 i 条块滑面倾角;
 β_i ——第 i 条块地下水流倾角/(°);
 A ——地震加速度/ g ;
 P_{wi} ——第 i 条块的地下水渗透压力/(kN·m⁻¹);
 φ_i ——第 i 条块滑面内摩擦角/(°);
 C_i ——第 i 条块滑面内聚力/kPa;
 L_i ——第 i 条滑面长度/ m 。

6.2 稳定性计算模型及评价工况确定

根据滑坡变形特征及地形地貌特征,选取 A-A' 作为新滑坡最不利稳定性的剖面进行稳定性计算及条块的划分(图 8)。考虑到新滑坡可能遭遇最不利情况,依据《滑坡防治工程设计与施工技术规范》DZ/T 0219—2006,分别考虑滑坡库水位骤降时选取自重+地下水工况组合,处于正常蓄水位(600 m)时选取自重+地下水、自重+暴雨+地下水、自重+地震+地下水三种工况进行稳定性计算。

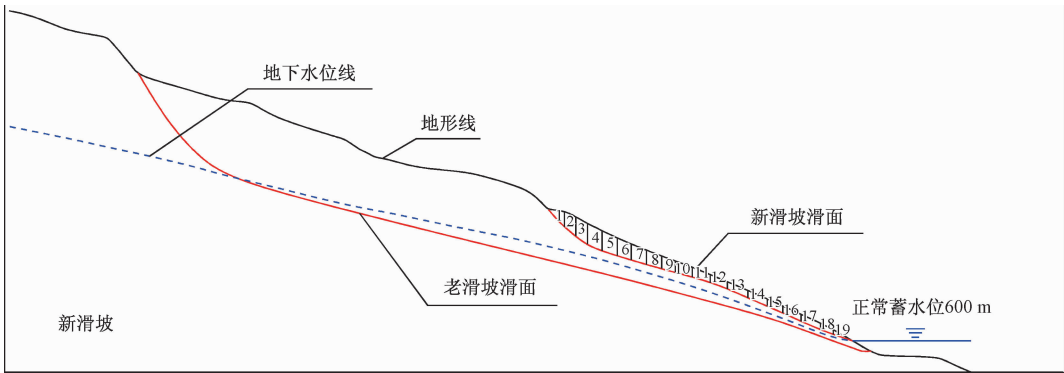


图 8 A-A'剖面新老滑坡滑体稳定性计算条块划分图
Fig. 8 The block division of new landslide stability calculation in A-A' section

6.3 稳定性计算结果及分析

通过对新滑坡各种工况条件下稳定性计算及结果分析表明,新滑坡在正常蓄水位(600 m)情况下,天然工况下处于基本稳定状态,暴雨工况和地震工况处于欠稳定状态;在水位骤降(600 m 降至 540 m)情况下,天然工况处于欠稳定状态(表 5)。说明受暴雨、地震和库区水位变动等不利因素的影响,老滑坡体前缘新滑坡体有进一步发生大规模滑动的可能。

表 5 滑坡稳定性计算结果表

Table 1 Stability calculation result statistics table

水位	滑坡及剖面	工况	稳定性系数	稳定状态
正常蓄水位 (600 m)	A-A' (新滑坡)	自重+地下水	1.077	基本稳定
		自重+暴雨+地下水	1.012	欠稳定
		自重+地震+地下水	1.026	欠稳定
水位骤降(600 m 降至 540 m)	A-A' (新滑坡)	自重+地下水	1.048	欠稳定

7 结论

(1)上坝滑坡为一特大型牵引式土质老滑坡,为地质历史时期形成的多期,多级变形复合体,其变形强烈部位主要分布于老滑坡前缘,受库区水位骤降的影响,稳定性急剧下降。

(2)根据钻孔及地质雷达探测资料揭示,新滑坡不是沿着老滑坡滑带滑动,即老滑坡和新滑坡存在两类控滑带,老滑坡的泥页岩软弱夹层破碎带(埋深范围 35~82 m)和新滑坡表层松散碎石土与下伏似层状泥页岩接触带(埋深范围 8.6~21.3 m)。

(3)通过对上坝老滑坡复活机制的分析表明,老滑坡前缘复活是地层岩性、库区水位骤降、降雨及建筑物加载叠加影响形成,其中地层岩性是老滑坡复活的核心影响因素,库区水位骤降是老滑坡复活的直接触发因素。

参考文献:

- [1] 白永健,王运生,葛华,等.金沙江深切河谷百胜滑坡演化过程及成因机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(6): 1680-1688. [BAI Y J, WANG Y S, GE H, et al. Formation evolution and genetic mechanism of baisheng landslide in the deep-incised valley of Jinsha river[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(6): 1680-1688. (in Chinese)]
- [2] 明庆忠,潘保田,苏怀,等.金沙江河谷——水系演化的崩滑外动力作用研究[J]. 云南师范大学学

报(自然科学版), 2013, 33(5): 1-8. [MING Q Z, PAN B T, SU H, et al. Study on the collapsing and landsliding external dynamic effect of the valley and drainage evolution of Jinsha river[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2013, 33(5): 1-8. (in Chinese)]

- [3] 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 L C, WEN M S, FENG Z, 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)]
- [4] 王启国. 汉江孤山航电枢纽工程区近坝滑坡稳定性分析及防治工程建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 41-51. [WANG Q G. Stability of near-dam landslides and engineering countermeasures on Gushan marine power station project[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 41-51. (in Chinese)]
- [5] 谭福林,胡新丽,张玉明,等.考虑渐进破坏过程的滑坡推力计算方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 193-202. [TAN F L, HU X L, ZHANG Y M, et al. Calculation method of landslide thrust considering progressive failure process[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(1): 193-202. (in Chinese)]
- [6] ZHAO Y, XU M, GUO J, et al. Accumulation characteristics, mechanism, and identification of an ancient translational landslide in China[J]. Landslides, 2015, 12(6): 1119-1130.
- [7] 宋磊,左三胜,丁军,等.四川都江堰红梅村滑坡复活成因与机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 34-37. [SONG L, ZUO S S, DING J, et al. Causes and mechanism analysis of Hongmei village landslide, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 34-37. (in Chinese)]
- [8] ILIC O, BERMEL P, CHEN G, et al. Tailoring high-temperature radiation and the resurrection of the incandescent source[J]. Nature Nanotechnology, 2016, 11(4): 320-324.
- [9] HAEUSSLER P J, SURVEY U S G, PARSONS T, et al. A Synthesis of Characteristics of Submarine Landslides Generated by the 1964 Great Alaska Earthquake in Six Fjords[C]// Gsa Meeting in Denver, 2015.

- [10] 白永健, 李明辉, 王东辉, 等. 金沙江中游巴塘县地质灾害发育特征及成灾规律分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 103–109. [BAI Y J, LI M H, WANG D H, et al. Characteristics and disastrous rule research of geohazards in Batang County, the middle reaches of Jinsha river[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 103–109. (in Chinese)]
- [11] 郝彦鹏. 北川县笄箕窝滑坡复活机制及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015. [HAO Y P. Study on revival formation mechanism and stability of shaojiwo landslide in Yuli town of Beichuan County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)]
- [12] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状 & 问题[J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1078–1082. [HUANG R Q, XIANG X Q, JU N P. Assessment of China's regional geohazards: present situation and problems [J]. Regional Geology of China, 2004, 23(11): 1078–1082. (in Chinese)]
- [13] 曾宇桐, 乔良, 曾润强, 等. 人工降雨条件下坡积层斜坡入渗与地表径流监测[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 659–665. [ZENG Y T, QIAO L, ZENG R Q, et al. Infiltration and surface runoff monitoring of colluvial slopes under artificial rainfall conditions [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(5): 659–665. (in Chinese)]
- [14] 陈春利, 贺凯, 李同录. 坡脚开挖诱发古滑坡复活的机制分析[J]. 西北地质, 2014, 47(1): 255–260. [CHEN C L, HE K, LI T L. Research on the mechanism of the ancient landslide resurrection triggered by slope toe excavation [J]. Northwestern Geology, 2014, 47(1): 255–260. (in Chinese)]
- [15] 杜飞, 任光明, 夏敏, 等. 地震作用诱发老滑坡复活机制的数值模拟[J]. 山地学报, 2015, 33(2): 233–239. [DU F, REN G M, XIA M, et al. Numerical simulation of occurrence mechanism of old landslide under earthquake loading [J]. Mountain Research, 2015, 33(2): 233–239. (in Chinese)]
- [16] 李明辉, 郑万模, 石胜伟, 等. 丹巴县甲居滑坡复活机制及其稳定性分析[J]. 山地学报, 2008, 26(5): 577–582. [LI M H, ZHENG W M, SHI S W, et al. The revival mechanism and stability analysis to Jiaju landslide of Danba County in Sichuan Province [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(5): 577–582. (in Chinese)]
- [17] 许强, 魏勇, 彭大雷, 等. 涪阳南塬蒋刘4#滑坡特征及成因机制[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 123–130. [XU Q, WEI Y, PENG D L, et al. Characteristics and failure mechanism of the Jiangliu 4 # landslide in the southern tableland in Jingyang County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 123–130. (in Chinese)]
- [18] 廖红建, 盛谦, 高石夯, 等. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3454–3458. [LIAO H J, SHENG Q, GAO S H, et al. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3454–3458. (in Chinese)]
- [19] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. [ZHANG Z Y, WANG S T, WANG L S. Principles of engineering geological analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese)]
- [20] 白永健, 郑万模, 李明辉, 等. 川藏公路茶树山滑坡特征及成因机制分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 862–866. [BAI Y J, ZHENG W M, LI M H, et al. Characteristics and formation mechanism of Cha-Shu-Shan landslide on Sichuan-Tibet highway [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 862–866. (in Chinese)]
- [21] 谢正团, 郭富赞, 孟兴民, 等. 天水市北山王家半坡滑坡形成机制[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(1): 31–36. [XIE Z T, GUO F Y, MENG X M, et al. Causes and mechanism of wangjiabanpo landslide in north mountain of Tianshui City [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2016, 52(1): 31–36. (in Chinese)]