

金沙江上游贡扎村岩质滑坡发育特征及演化成因分析*

郭明珠, 刘晃*, 王欢欢, 邹玉, 马可

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 以金沙江上游贡扎村滑坡为研究对象, 对滑坡滑床及堆积体进行现场调查, 研究表明: ①该区滑坡主要受岩层层面和两组共轭节理控制, 岩层倾向与坡向相反, 属于反倾边坡; 堆积体内块石体积较大、形状规整, 大部分保留母岩产状, 在物质组成和结构上与滑床基岩存在较高相似性, 判断贡扎滑坡为整体倾倒滑坡。②滑坡规模巨大, 堆积体体积约 $4.5 \times 10^7 \text{ m}^3$, 结合川藏地区金沙江流域地震活动特点, 推测造成边坡大规模倾倒的主要原因是地震作用。③根据两级堆积体分布特点和滑坡后壁结构面发育特点, 认为滑坡变形分为4个阶段: 坡脚岩土体滑移、陡倾面拉裂、板梁弯曲折断和碎屑岩块堆积。地震是诱发滑坡的重要因素, 坡内单一的岩性和岩层密集的节理是发生倾倒的内部原因, 坡脚处岩土体滑移是倾倒发生的必要条件。

关键词: 金沙江上游; 反倾岩质滑坡; 倾倒破坏; 地震作用

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2021)02-0242-09

0 引言

青藏高原东南的金沙江流域, 在地形地貌上横跨青藏高原东南的川藏高山峡谷区与藏北高原区。该区活动断裂发育, 地震活动频繁, 地壳抬升强烈, 冻融作用剧烈, 地质灾害频发(邓建辉等, 2019; 王盈等, 2019)。流域内典型的滑坡灾害有白格滑坡(张永双等, 2020)、必油照滑坡(张旭等, 2019)、茂顶河段滑坡(周鑫, 2019)等。这些灾害时刻威胁着在建的川藏铁路、青藏高原公路、桥梁隧道和工业民用建筑等国家重大工程的安全建设。

在众多不同类型滑坡中, 倾倒型岩质滑坡是最常见的种类(张倬元, 1994), 国内学者对此已做深入研究。如王飞等(2018)、邹丽芳等(2009)、张亮华等(2017)和谭儒蛟等(2009)详细研究反倾滑坡的时空演化和破坏机理; 邱俊

等(2019)总结大量倾倒实例, 对比分析顺倾、反倾变形的形成条件和发育规模; 谢良甫等(2019)运用 SARMA 法演算反倾斜坡的安全系数, 得到水位上涨加剧、反倾斜坡变形, 但不影响演化方向的结论; 刘海军等(2017)推导出倾倒折断破坏深度的临界公式, 证明层面倾角在 $50^\circ \sim 70^\circ$ 易发生倾倒破坏; 赵华等(2018)用开挖模拟河谷下切作用得到突破稳态蠕变上限值 α_i , 作为边坡失稳预警判据; 吴昊等(2018)通过4组离心模型试验, 得到岩质倾倒变形发生在潜在破裂面以上, 坡趾有抗倾倒作用的结论。

目前对于反倾滑坡的研究, 多集中在斜坡变形的演化过程、机理和发育特征等方面。大多学者的研究成果是基于前人对滑坡的详细调查和资料整理, 也有学者以理想化模型为实验对象, 但因很难找到与之匹配的真实原型, 研究结果无法发挥应有的实际工程价值。本文旨在提供一个真实的大规模反倾滑坡原型, 以贡扎村反倾岩质滑

* 收稿日期: 2020-07-08.

基金项目: 青藏高原重大滑坡孕育的内外动力条件及其耦合作用机制“强震作用下斜坡岩体结构动力学响应特征”(2018YFC1505001)资助.

第一作者简介: 郭明珠(1963-), 教授, 博士, 主要研究方向为防灾减灾工程与防护工程.

E-mail: gmz@bjut.edu.cn.

♣ **通讯作者简介:** 刘晃(1996-), 硕士, 主要研究方向为防灾减灾工程与防护工程.

E-mail: Liu Huang@emails.bjut.edu.cn.

坡为研究对象，通过收集堆积体钻孔资料和现场勘测，总结滑坡和堆积体特征，分析滑坡形成的主要原因，为边坡减震研究和防灾减灾工程提供参照。

1 贡扎滑坡的工程地质条件

贡扎滑坡位于金沙江上游右岸，西藏自治区昌都地区芒康县索多西乡贡扎村，地理坐标为（99°3′2″N，29°28′42″E），向南5 km是苏洼龙坝址。滑坡

区域属于典型的高山峡谷地貌，区内山峰陡峻，地形起伏很大，河谷相对高差达400~600 m。研究区地形切割强烈，两岸山体坡度45°~70°，切割深度500~800 m，总体呈“V”字型谷。

滑坡附近区域发育的断裂主要有：滑坡以东2 km近SN向的区域性金沙江主断裂西支——苏洼龙—王大龙断裂（ Q_{2-3} ）；滑坡西北部的NNE—NE向的最大区域性断裂——巴塘断裂（ Q_4 ）；滑坡区西侧8 km处近SN向偏西40°~70°的西曲河—金州乡断裂（ Q_3 ），断裂活动性特征见表1。

表1 贡扎滑坡附近区域晚更新世断裂活动性特征表

Tab.1 Characteristics of the fault activity in the late pleistocene in the surrounding area of Gongza landslide

断层名称	产状	活动性质	区内长度/km	距离/km	活动时代
苏洼龙—王大龙断裂（ F_1 ）	NNW/SW $\angle 50^\circ \sim 70^\circ$	压性	60	2	Q_{2-3}
红军山、核桃坪—将巴顶断裂里甫—日雨断裂（ F_2 ）	NW 转为 NE	压扭性	63	40	Q_4, Q_{3-4}
巴塘断裂（ F_3 ）	N30°E	扭性	45	18	Q_4
西曲河—金州乡断裂（ F_4 ）	近 NS, W $\angle 40^\circ \sim 70^\circ$	压性	20	10	Q_3

滑坡区内历史上破坏性地震多，地震活动强度大、频率高，强震发震位置主要沿活动断裂带分布（图1），其中1870年巴塘7.3级地震震中，距离滑坡约60 km；1948年理塘7.3级地震震中，距离滑坡140 km，两次地震的震中烈度达到X度。

滑坡区主要出露石英片岩、砂岩以及少量片麻岩和石灰岩等，岩体结构面发育。石英片岩是坡内出露的主要岩性，成层性较好，表面风化强烈。堆积体主要成分为石英片岩夹少量片麻岩，区域岩性变化不大，如图2所示。

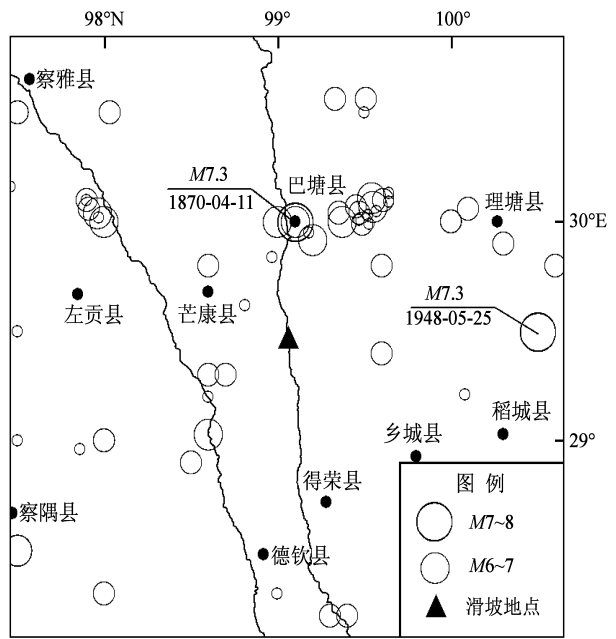


图1 滑坡区周围破坏性地震分布
Fig.1 Destructive earthquakes around the landslide area

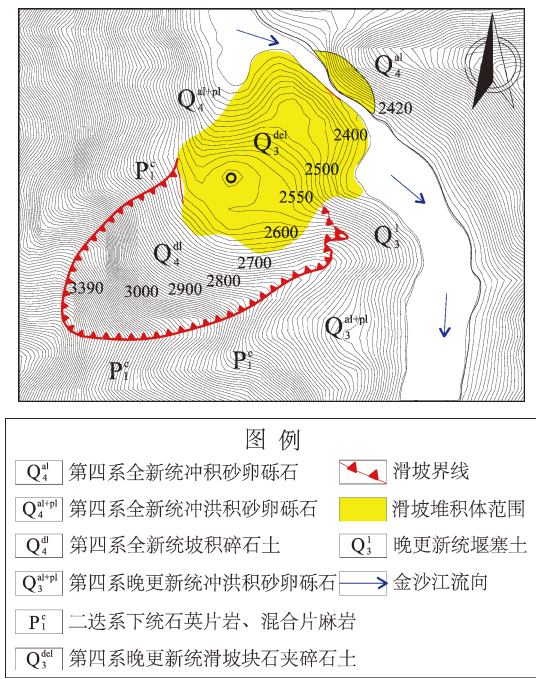


图2 贡扎滑坡平面图
Fig.2 Plan view of the Gongza landslide

2 滑坡的发育特征

2.1 滑坡体结构特征

贡扎滑坡体高度为 720 m, 滑坡后缘高程 3 320 m, 前缘坡趾高程 2 600 m。岩层倾向坡内, 倾角为 $55^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 倾向 $N30^{\circ}E$ 。滑坡后缘最高点至左岸冲击区最高点总长度为 1 802 m, 左右边界最大宽度为 725 m, 如图 3 所示。

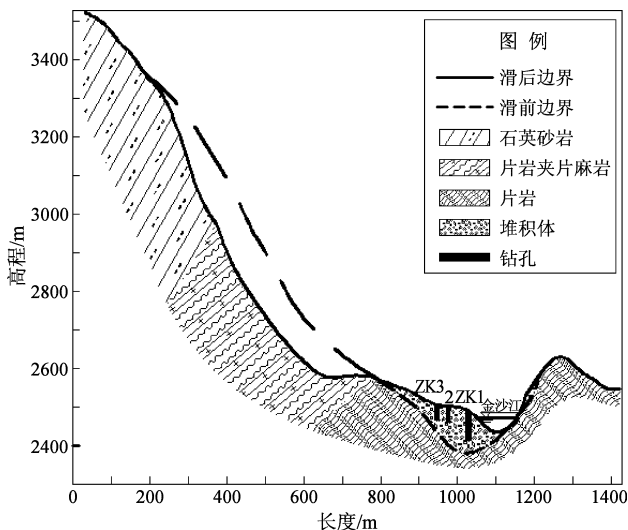


图 3 贡扎滑坡剖面图

Fig. 3 A section of the Gonza landslide

现场调查共获得 3 组控制性岩体结构面, 主要产状如图 4 所示: 1 组倾向 185° , 平均倾角约 78° , 近直立, 为出露的结构面; 2 组倾向 78° , 平均倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 为陡倾的岩层层面; 3 组倾向 355° , 倾角 40° , 节理发育方向大致与坡面平行。如图 5a 所示, 蓝、红色两组为“X”形共轭节理, 粉红色多边形线框为近乎直立的外露结构面。如图 5b 所示, 坡内岩层面发育方向与坡表方向相反, 岩性为红褐色片岩夹片麻岩, 片理面清晰。因此判定岩层面反倾, 倾角范围为 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。

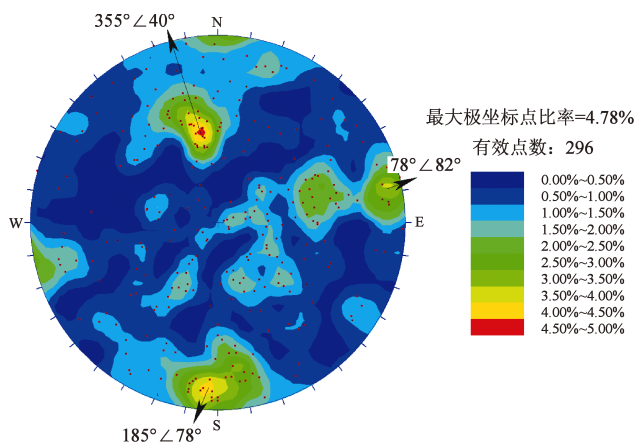


图 4 研究区节理等密度图

Fig. 4 Isometric map of regional joints

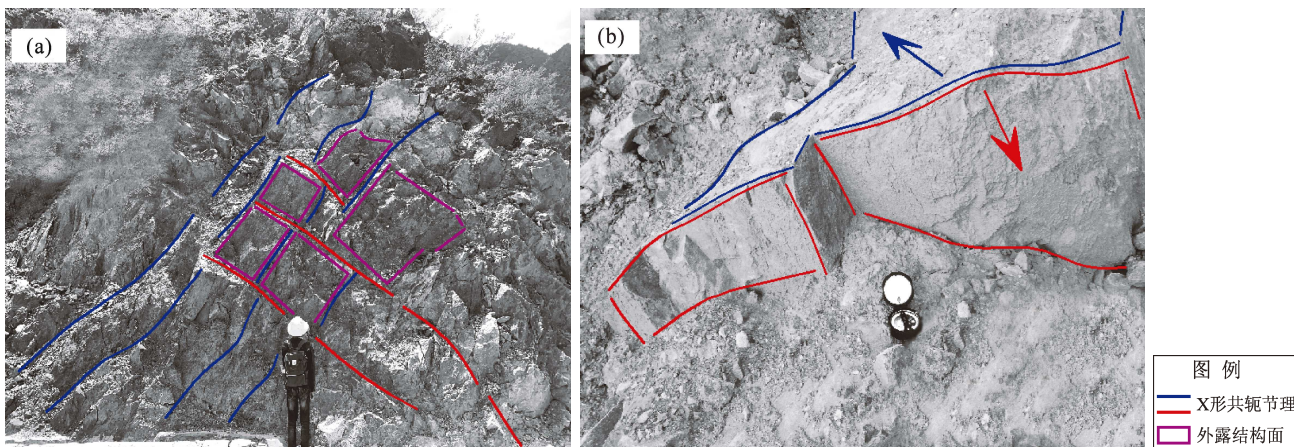


图 5 滑坡边界处 (a) 及坡内 (b) 结构面产状

Fig. 5 Structural planes at the boundary of the landslide (a) and within the slope (b)

根据层状倾倒滑坡类型的划分条件 (刘海军等, 2017), 即坡角 $\beta > 30^{\circ}$ 、岩层倾角 $\beta > 30^{\circ}$ 和坡高 $H > 350$ m 的层状软硬岩边坡, 判断贡扎滑坡为反倾向的层状倾倒滑坡。

2.2 滑坡倾倒特征

2.2.1 堆积体内岩体结构特征

在堆积体现场共测量获取 50 组结构面, 如图 6 所示。经统计得出, 坡内控制节理分为 3

组, 分别为 $310^{\circ} \angle 80^{\circ}$ 、 $356^{\circ} \angle 43^{\circ}$ 和 $93^{\circ} \angle 85^{\circ}$, 与研究区区域性产状相近, 如图 7 所示。堆积体岩性主要为片麻岩, 与滑坡边界和滑床岩性相吻

合。堆积体保留了原坡体发育形式, 出露原岩成分也与原边坡高度相似, 因此认为贡扎滑坡为整体倾倒滑坡。



图 6 堆积体前缘出露原岩 (a) 及原岩原始产状 (b)

Fig. 6 The original rock in the front edge of the deposit (a) and its occurrence (b)

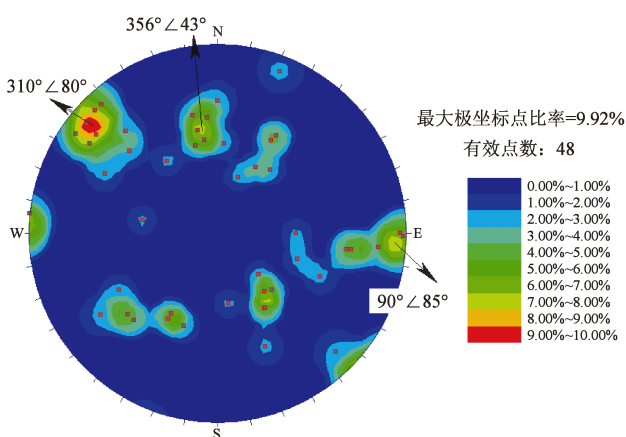


图 7 堆积体原岩节理等密图

Fig. 7 Isometric map of the original rock joints in the accumulation body

2.2.2 堆积体表面岩体特征

调查滑坡堆积体发现, 堆积体上可见大量滚石, 断裂面清晰规整, 且大多与岩体片理面垂直, 如图 8 所示, 平均体积为 10 m^3 , 最大达 30 m^3 。这些滚石分布于堆积体表面, 最远端直达临江断面上部。笔者认为这是原边坡上部倾倒时, 岩层间相互挤压后破碎的产物。

2.2.3 堆积体横截面结构特征

堆积体前缘常年受金沙江强烈侵蚀, 局部已出现多处垮塌, 地表在此明显不连续, 形成平均坡度为 75° 的临空面, 在临空面可见堆积体保留原来的层状岩体结构, 如图 9 所示。这也是岩层整体倾倒的证据。





图 8 堆积体出露原岩

Fig. 8 Raw rocks exposed in the accumulation body

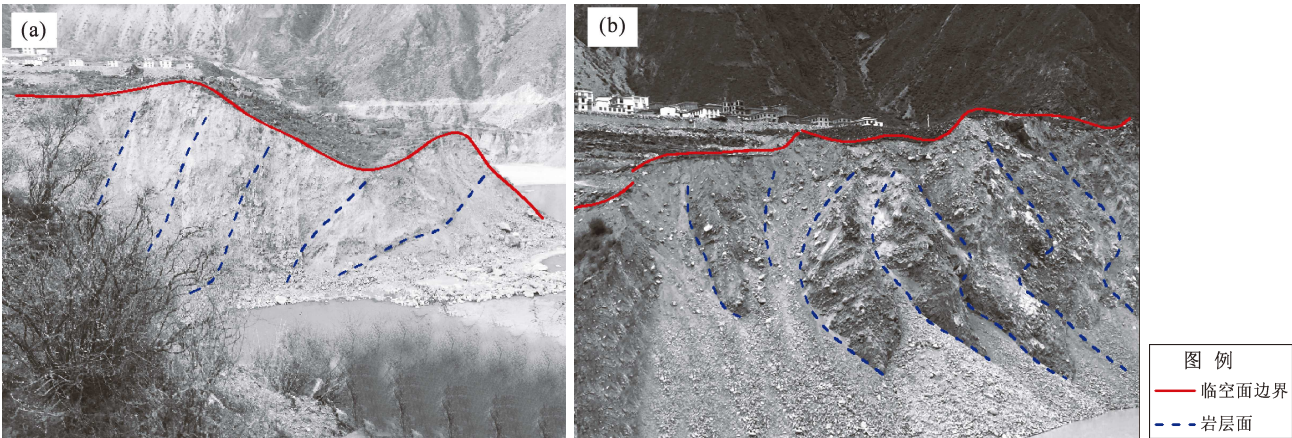


图 9 堆积体临江横截面上游侧 (a) 和下游侧 (b)

Fig. 9 The upstream (a) and downstream (b) sides of the riverside cross section of the accumulation body

2.3 地震作用特征

倾倒体的地震作用特征明显, 本文主要从堆积体的规模、倾倒的最大距离和滑床基岩几方面分析地震作用对倾倒体的作用特征。

2.3.1 堆积体的规模

滑坡堆积体后缘高程 2 600 m, 与滑坡坡脚间

存在平坦空缺带。堆积体前缘高程 2 420 m, 下部受金沙江切割形成接近直立的临空面, 断面如图 9 所示。堆积体平均宽度 690 m, 最大宽度 720 m。中国电建集团北京勘测有限公司在贡扎滑坡堆积体设计的 3 个钻孔资料 (图 3、表 2) 显示, 堆积体最高处向下 50 m 为粒径较大的块石和孤石,

表 2 贡扎村滑坡堆积体钻孔资料统计表

Tab. 2 Statistics of the drilling data of the landslide accumulation body in Gonza village

钻孔编号	孔口标高/m	孔深/m	岩性变化深度/m	岩性描述	是否揭穿堆积体
ZK01	2 495	139	120.1	上部为全风化绢云母石英片岩夹混合花岗岩的碎石; 下部为弱风化和新鲜的灰白色石英片岩	是
ZK02	2 490	50	无变化	浅部为黄褐色碎石土夹少量砾石, 成分为片岩和片麻岩; 深部为灰白色卵石混合土, 成分为片岩和片麻岩	否
ZK03	2 555	50	无变化	上部为灰白色卵石混合土、块石和碎石土; 下部为黄褐色弱风化碎块石; 岩性统一为石英片岩	否

最下部以碎石为主，母岩多为变质石英片岩，高处钻孔未击穿堆积体。ZK 钻孔在 120.1 m 处出现明显地岩性变化，下部为新生和弱风化石英片岩，为原始坡面，上部为滑坡崩积物。因此判定堆积体厚度为 120 m 左右。估算堆积体总方量为 4 500 万 m^3 ，体量巨大，属于巨型滑坡。

2.3.2 滑坡倾倒距离

堆积体分布最远处距离坡脚 1 022 m，已经到达金沙江左岸，并覆盖左岸山体，高达 138 m。推

断只有在强烈外力的作用下，才能使堆积体向前长距离移动后堆积到对岸山体。调查滑坡坡脚发现，堆积体后缘与滑坡坡脚之间存在一条水平的平均宽度为 80 m 的空缺带，横跨在滑坡与坡脚之间，如图 10 所示。空缺区域从坡脚至堆积体后缘逐渐抬高，直至堆积体最高点。推测倾倒体越过这条空缺带，被整体抛落到堆积体后缘。这一动作需要极大的初始速度，又因研究区构造运动复杂，固笔者认为地震作用是倾倒发生的主要原因。

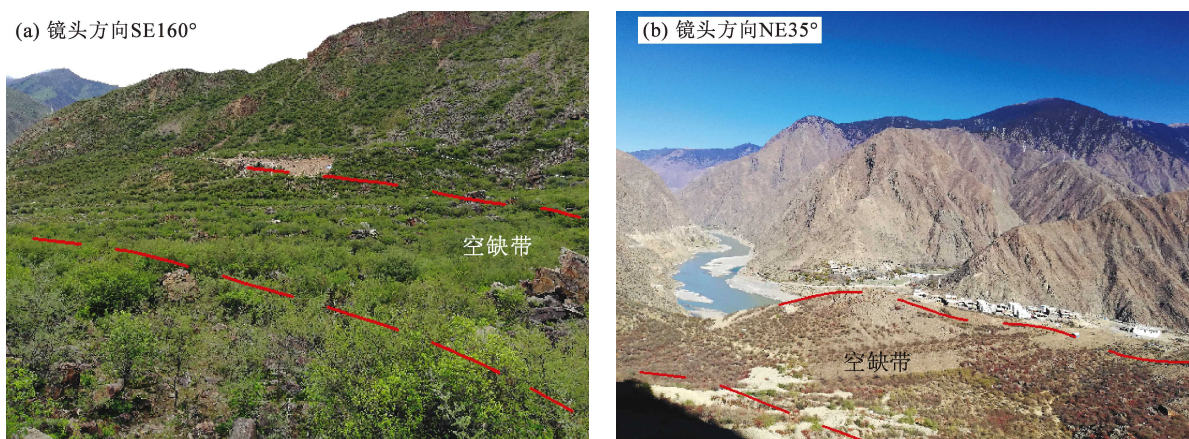


图 10 夏季 (a) 和冬季 (b) 坡脚与堆积体之间的空缺带

Fig. 10 The vacancy zone between the toe of the slope and the accumulation body in Summer (a) and Winter (b)

2.3.3 滑床结构面特征

滑坡后壁及滑床自上而下断裂面清晰，如图 11 所示，滑床整体光滑且无大体积岩土体堆积。如果仅有重力或卸荷作用等因素，那么对于反倾岩质滑坡，滑床上应残留未倾倒的原始

坡体，这与目前贡扎滑坡滑床情况相反。因此滑坡发生时除了有自身卸荷和重力因素外，一定还存在巨大外力使陡倾的岩层完全倾倒。考虑到该区地震活动频繁，笔者认为地震作用也是倾倒发生的主要原因。

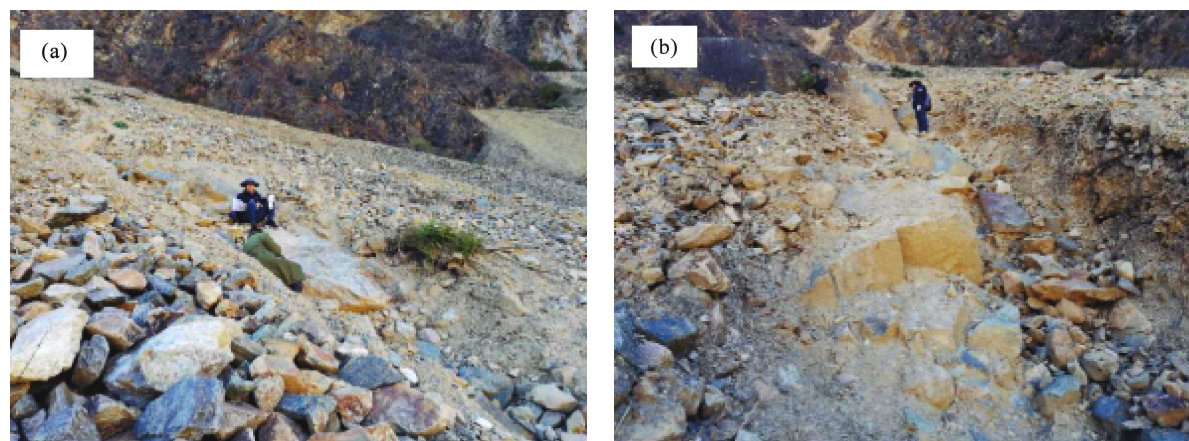


图 11 滑床视倾角 60° (a) 和滑坡后缘的断裂面 (b)

Fig. 11 The apparent inclination angle of the slide bed is 60° (a) and the fracture surface of the trailing edge of the landslide (b)

3 滑坡变形破坏模式

贡扎滑坡的变形破坏方式为先滑移后弯曲—拉裂,主要分为坡脚岩土体滑移、陡倾面拉裂、板梁弯曲折断和碎屑岩块堆积4个阶段,如图12所示。

(1) 坡脚岩土体滑移阶段(图12a)。初始阶段,滑坡区地应力较高,随着边坡自身卸荷和地震力的输入,坡内应力重分布,坡脚处应力集中并超过坡体自身抗剪强度,出现自下而上发育的剪切破坏面。新生成的剪切破坏面向深部扩展,与边坡中部某一反倾的岩层面接触,形成近似“L”形折断,将坡脚的岩土体与原边坡分隔。坡脚岩体沿剪切破坏面向低高程滑移。边坡底部短时间出现“镂空区”,为上部岩层提供倾倒变形空间。滑落的岩土体体量较小,并未堵江,而是形成初级堆积体。

(2) 陡倾面拉裂(图12b)。由于坡脚处“镂空区”的存在,边坡上部反倾的岩层失去底部支

撑,形成悬空的“准倾倒区”。随着地震力的持续输入,陡倾的板状岩体在自重弯矩作用下有向临空方向倾倒的趋势。板梁之间互相错动并伴有拉裂,弯曲体后缘出现拉裂缝,伴有坡缘、坡面局部崩落。由于待倾倒区下部支撑不足,边坡整体欠稳定,因而这一阶段持续时间较短,是板梁弯曲倾倒的准备阶段。

(3) 板梁弯曲折断(图12c)。板梁自下而上根部折断,岩层互相挤压碎裂。上部岩块转动、倾倒,导致崩塌。随板梁弯曲发展,作用于板梁的力矩也随之增大,由于弯曲变形角度很大,最大弯折形成了倾向坡外断续的破裂面,岩层中原有的垂直层面的裂隙随之转为倾向坡外,继续变形主要受这些倾向坡外的破裂面所控制。这一过程显示了累进破坏特征。上部板梁完全断裂后,滑坡后壁形成平行于层面走向的反坡台阶和沟槽。

(4) 碎屑岩块堆积(图12d)。板梁完全断裂并互相挤压形成碎屑和断面规整的岩块,向低高程高速滑动。由于滑坡前缘存在相对较高的阻滑区,大部分下冲的碎屑和岩块碰撞阻滑区后停止

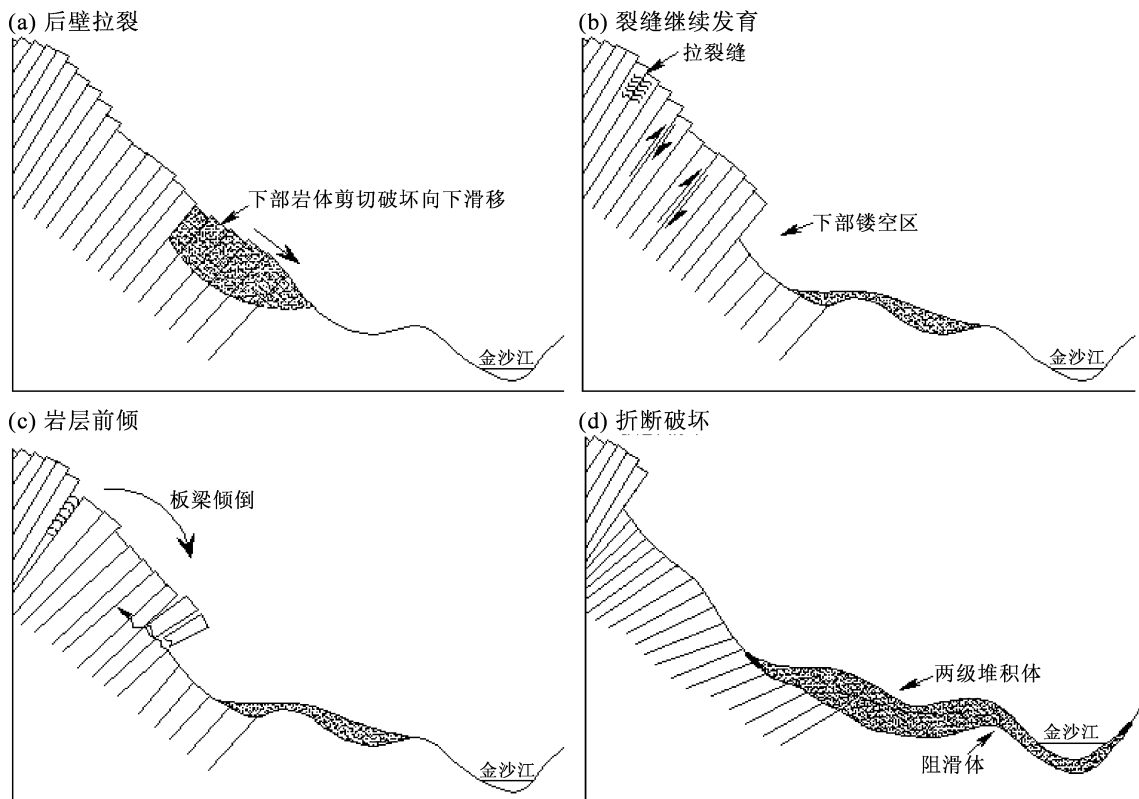


图12 贡扎滑坡滑动过程示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the sliding process of the Gongza landslide

滑动,沉积于初级堆积体上形成两级堆积体。剩余部分岩土体由于动能未完全消散,冲至金沙江内和对岸山体,造成堵江。至此滑坡滑动全过程完成。

4 结论

本文通过对贡扎滑坡及周边区域的调查,分析了实测数据和堆积体钻孔信息,得出以下主要结论:

(1) 贡扎滑坡为反倾滑坡,具有变形规模大、影响范围广和变形程度剧烈的特点;滑坡区主要受3组节理控制,倾向分别为 $355^{\circ}\angle 40^{\circ}$ 、 $78^{\circ}\angle 82^{\circ}$ 和 $185^{\circ}\angle 78^{\circ}$,岩层表现为反倾向。从堆积体侧表面和临江断面出露原岩结构特征、堆积体表面出露有拉裂痕迹的块石、堆积体的上表面几乎被大体积滚石覆盖、堆积体到达金沙江左岸等,判定贡扎滑坡是倾倒滑坡。

(2) 地震作用是倾倒的主要原因。滑坡规模巨大,产生的堆积体方量为 $4\,500\text{万}\text{m}^3$,造成金沙江堵江;滑坡堆积体距坡脚最远达 $1\,022\text{m}$,达到金沙江左岸并覆盖左岸部分山体;堆积体后缘与滑坡坡脚之间存在一条平均宽度为 80m 的平整空缺带;滑床基岩自上而下清晰可见,滑床后缘顶部到坡脚光滑,无堆积物。这些现象都说明滑坡的发生需要强大外力,考虑到该区地震活动频繁,认为地震作用是倾倒发生的主要原因。

(3) 倾倒全过程分为4个阶段。边坡的变形破坏方式为先滑移后弯曲—拉裂。变形初始阶段,随地震力输入,坡脚岩体首先发生剪切破坏和滑移,形成初级堆积体,为上部岩层倾倒提供空间。陡倾的板状岩体有向临空方向倾倒的趋势,板梁之间互相错动拉裂,弯曲体后缘出现拉裂缝。随后,板梁自下而上根部折断,岩层互相挤压碎裂,上部岩块转动、倾倒,导致崩塌。板梁完全断裂后,滑坡后壁形成平行于层面走向的反坡台阶和

沟槽。最终,板梁根部断裂,岩层间相互挤压形成碎屑和岩块,一部分沉积于初级堆积体之上形成两级堆积体,剩余部分岩土体由于动能未完全消散,冲至金沙江内和对岸山体,造成堵江。

感谢中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司提供贡扎滑坡堆积体(岗达堆积体)的勘探资料和体积估算。

参考文献:

- 邓建辉,戴福初,文宝萍,等. 2019. 青藏高原重大滑坡动力灾变与风险防控关键技术研究[J]. 工程科学与技术,51(5):1-8.
- 刘海军,巨能攀,赵建军,等. 2017. 层状岩质边坡倾倒变形破坏特征研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),40(6):793-798.
- 邱俊,任光明,吴龙科. 2016. 金沙江某水电站左坝肩岩体双面倾倒形成机制[J]. 山地学报,34(1):77-83.
- 谭儒蛟,杨旭朝,胡瑞林. 2009. 反倾岩体边坡变形机制与稳定性评价研究综述[J]. 岩土力学,30(S2):479-484,523.
- 王飞,唐辉明,章广成,等. 2018. 雅砻江上游深层倾倒地发育特征及形成演化机制[J]. 山地学报,36(3):411-421.
- 王盈,金家梁,袁仁茂. 2019. 藏东南地区地质灾害空间分布及影响因素分析[J]. 地震研究,42(3):428-437.
- 吴昊,赵维,年廷凯,等. 2018. 反倾层状岩质边坡倾倒破坏的离心模型试验研究[J]. 水利学报,49(2):223-231.
- 谢良甫,张佳琪,谭顺利,等. 2019. 基于稳定性演化路径的反倾斜坡变形演化特征研究[J]. 水力发电,45(3):45-49.
- 张亮华,谢良甫,李兴明. 2017. 反倾层状岩质边坡倾倒变形时空演化特征研究[J]. 长江科学院院报,34(11):112-115,120.
- 张旭,周绍武,龚维强,等. 2019. 金沙江乌东德库区必油照滑坡稳定性分析[J]. 人民长江,50(1):124-129.
- 张永双,巴仁基,任三绍,等. 2020. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质,47(6):1637-1645.
- 张倬元. 1994. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社.
- 赵华,李文龙,卫俊杰,等. 2018. 反倾边坡倾倒变形演化过程的模型试验研究[J]. 工程地质学报,26(3):749-757.
- 周鑫. 2019. 金沙江上游茂顶河段滑坡成因机制及敏感性研究[D]. 长春:吉林大学.
- 邹丽芳,徐卫亚,宁宇. 2009. 反倾层状岩质边坡倾倒变形破坏机理综述[J]. 长江科学院院报,26(5):25-30.

Analysis of Causes and the Development Characteristics of the Rock Landslide in Gonza Village, the Upper Jinsha River

GUO Mingzhu, LIU Huang, WANG Huanhuan, ZOU Yu, MA Ke

(*College of Civil Engineering and Architecture, Beijing University of Technology, Beijing 100084, China*)

Abstract

In this paper, we conduct a field investigation of the slide bed and the accumulation body of a landslide in Gonza village in the upper Jinsha River, Tibet and find that the landslide is mainly controlled by the rock layer and two sets of conjugate joints. The dip direction of the rock layer is opposite to the sliding direction, and the slope is anti-inclined. The blocks of the deposit body are large and regular-shaped, and most of them still retain the occurrence of the parent rock. And the composition and structure of the deposit rock are highly-similar with those of the rock of the slide bed. All these suggest that the Gonza landslide is a holistic toppling landslide. The landslide is in huge scale, with a volume of about $4.5 \times 10^7 \text{ m}^3$. In the light of the characteristics of seismic activities in the Jinsha River basin, we speculate that the main reason for the large-scale toppling of the slope is earthquake effect. According to the distribution of the two-stage accumulation bodies and the characteristics of the development of the structural surface on the back wall, we conclude that the landslide deformation consists of four stages: slope toe sliding, steeply-inclined surface cracking, cantilever beam bending and breaking, and clastic rock accumulating. Earthquakes serve as an important factor in inducing landslides. The single lithology and dense joints in the rock layers make up intrinsic factors causing toppling, while the toe slippage is a necessary condition.

Keywords: upper reaches of the Jinsha River; anti-dipping rock landslide; toppling deformation; earthquake effect