

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202006037

川藏公路 102 滑坡后缘平台物质特征 及其形成机制新思考

杨德宏^{1,2}, 武博强³, 黄 勇^{1,2}, 陈兴强^{1,2}

- (1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043;
2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 陕西 西安 710043;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 关于川藏公路 102 滑坡后缘平台物质特征及其形成机制, 已有学者开展了大量研究, 许多学者认为 102 滑坡发育于巨厚层冰碛物和冲洪积物组成的第四系松散堆积平台上, 但支撑该结论的依据稍显不足, 缺少深孔资料和物探成果等证据, 也没有对位于高山深切峡谷区的 102 滑坡前后缘同时存在面积较大的冰碛台提出过疑问。在收集、整理和分析前人关于 102 滑坡研究成果的基础上, 通过分析综合工程物探和 102 隧道勘察、施工期间的成果资料, 对比帕隆藏布主沟内邻近且类似平台上获取的钻探资料, 并与典型冰碛物的特征进行对比分析, 认为该滑坡后缘平台物质主要为冰碛物的可能性较小; 提出了该平台的物质组成为坡积物+冲洪积物+破碎岩质古滑坡体的观点; 而古滑坡体前缘斜坡在地下水、降水、帕隆藏布冲刷以及川藏公路修建等因素的影响下, 其稳定性逐渐降低, 后期在自身重力、爆破振动、机械振动、地震等因素的作用下, 古滑坡被诱发复活, 即 102 滑坡形成。通过进一步研究 102 滑坡后缘平台物质特征及其形成机制, 能够更好地认识藏东南地区的地质历史, 对藏东南地区同类型滑坡的研究和防治工作具有参考意义。

关键词: 川藏公路; 102 滑坡; 冰碛物; 古滑坡; 形成机制

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0133-08

New thoughts on the material characteristics and formation mechanism of the platform at the back edge of the 102 Landslide on the Sichuan—Tibet Highway

YANG Dehong^{1,2}, WU Boqiang³, HUANG Yong^{1,2}, CHEN Xingqiang^{1,2}

- (1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 2. Shaanxi
Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory (FSDI), Xi'an, Shaanxi 710043, China;
3. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The material characteristics and formation mechanism of the platform at the back edge of the Sichuan—Tibet Highway 102 Landslide were examined by many scholars. The 102 Landslide is thought to develop in the Quaternary unconsolidated accumulation platform composed of huge thick moraine and alluvial sediments. On the platform, the basis for supporting the above conclusions is slightly insufficient, and evidence such as deep hole data and geophysical prospecting results are lacking. There is no doubt about the large moraine platform existing at the same time on the front and rear edges of the 102 Landslide located in the deep mountain valley area. Based on the collection, sorting and analysis of previous research results on the 102 Landslide, this

收稿日期: 2020-06-18; 修订日期: 2020-08-29

基金项目: 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-999); 国家重点研发计划重点专项(2018YFC1504904); 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(院科(川藏)19-07, 院科 19-80)

第一作者: 杨德宏(1989-), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事铁路地质勘察工作。E-mail: 631083596@qq.com

paper compares the results obtained from the adjacent and similar platforms in the main ditch of the Parlung Zangbo by analyzing comprehensive engineering geophysical prospecting and the results of the 102 tunnel survey during its construction period. Drilling data and comparative analysis of the characteristics of typical glacial deposits indicate that the platform material at the rear edge of the landslide is mainly moraine. The point of view is proposed that the material compositions of the platform are slope deposits and alluvial sediments plus the broken rock ancient landslide body. The front slope of the ancient landslide body gradually decreases in stability under the influence of such factors as groundwater, rainfall, erosion by the Parlung Zangbo and the construction of the Sichuan—Tibet Highway. Vibration, mechanical vibration, earthquake and other factors induced the resurrection of the ancient landslides, namely, the formation of the 102 Landslide. By further studying the material characteristics and formation mechanism of the platform at the rear edge of the 102 Landslide, we can better understand the geological history of southeastern Tibet, which is of reference significance and economic value for the research and prevention of similar landslides in southeastern Tibet.

Keywords: Sichuan—Tibet Highway; 102 Landslide; moraine; ancient landslide; formation mechanism

藏东南地区发育多处年代较近、严重影响人们生产生活的滑坡。2000年4月9日,西藏波密县易贡藏布札木弄沟发生了特大规模的高速远程滑坡,滑体从高程约5 400 m的山上高速滑下,滑动距离约8 000 m,高差约3 330 m,其滑坡堆积体堵塞了易贡藏布江,形成的堆积体长和宽均约2 500 m,平均厚60 m,最大厚度约100 m,滑体体积在 $2.8 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间,造成约7 km的河道和公路被淹没,4 000余人的生命和财产受到严重威胁^[1]。2018年10月11日,西藏昌都市江达县波罗乡白格村发生特大型库岸岩质滑坡,滑体体积约 $3.165 \times 10^7 \text{ m}^3$,堵塞金沙江形成堰塞湖;2018年11月3日,该滑坡后缘发生二次高位高速滑动破坏,滑体体积约 $2.15 \times 10^6 \text{ m}^3$,再次堵塞金沙江,形成长约270 m、高约60 m的堰塞坝,对甘孜白玉、巴塘、德荣等沿江居民生命财产安全及多级水电站造成极大威胁^[2]。

川藏公路波密至通麦段的102滑坡群,是对川藏公路的畅通影响最大、最持久的滑坡。1991—1994年,每年由102滑坡引起的断道天数分别达到了179, 116, 101, 97 d; 1995—2000年,每年的断道天数也达到了50 d以上;严重制约了彼时川藏公路的畅通,造成了巨大的经济损失^[3-5]。

许多学者对102滑坡开展了大量研究,但少有学者从滑坡区的宏观地貌环境去分析其成因,对滑坡后缘平台的成因及其与对岸平台的关系研究较少,未明确滑坡平台上覆冲洪积物的来源等问题,使人们对102滑坡的成因认识尚有不足,未能在滑坡形成早期提出解决其影响川藏公路正常通行的根治方案,导致102滑坡的整治花费了亿元巨资,但仍然出现“治了

滑、滑了治”的恶性循环^[5]。笔者在充分研究前人关于102滑坡资料的基础上,结合2018年10月至2020年1月在该地区开展的现场勘察,发现前人对于102滑坡的认识存在一些不足,通过研究对102滑坡后缘平台物质特征及其形成机制提出了新的认识,以便进一步揭示该滑坡的成因,从而更好地指导该地区同类型滑坡的防治工作。

1 川藏公路102滑坡概况

川藏公路102滑坡群位于西藏东南帕隆藏布下游通麦镇东南侧约6.2 km处(图1)。该区域受印度板块向北俯冲到欧亚板块下部的影响,地形起伏巨大,地质构造复杂,高角度断裂发育,岩体完整性差,地震频繁且震级高,是我国滑坡灾害最发育的地区之一,也是全球范围内出现滑坡灾害最频繁的地区之一^[6]。

102滑坡群在长度约3 km的范围内,共分布有22处滑坡;其中,直接危害川藏公路且规模较大的滑坡有6处,主要分布在第四系松散堆积物覆盖较厚的地段,覆盖层厚度数十米至数百米,主要由第四系残坡积层、冲洪积层、泥石流堆积及冰碛物组成,其形成的高陡边坡稳定性较差。6处滑坡主要分布在帕隆藏布的右岸,也是其冲刷岸,河流长期侵蚀滑坡坡脚^[7]。本文选择102滑坡群中规模最大的2#滑坡(下文简称“102滑坡”),结合滑坡后缘平台及其对岸平台(图2),研究滑坡后缘平台物质特征及其形成机制。

2 滑坡形成机制问题的重新提出

张晓刚等^[7]在分析航片后认为102滑坡发育在一个老滑坡体上,老滑坡体为一厚度较大的第四系松散

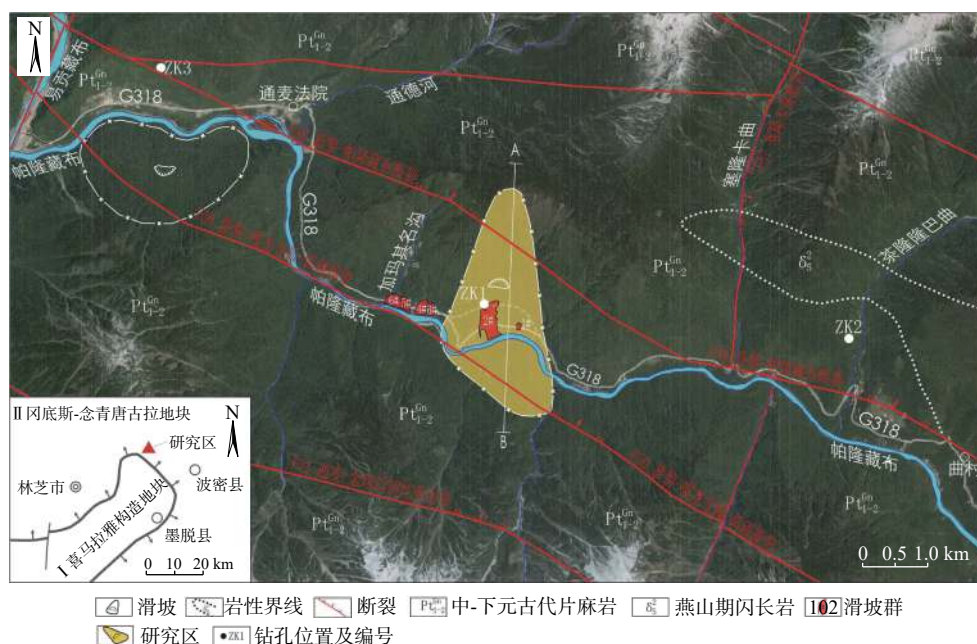


图 1 川藏公路 102 滑坡位置及地质构造简图

Fig. 1 Location and geological structure of the 102 Landslide on the Sichuan-Tibet Highway

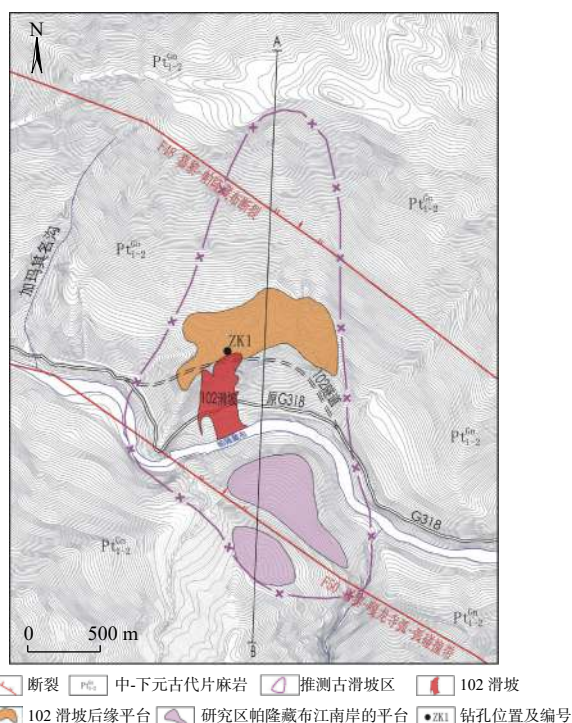


图 2 102 滑坡工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological plan map of the 102 Landslide

堆积体; 王培高等^[3]认为 102 滑坡附近的冰碛物出露于海拔 2 120 ~ 2 350 m 之间的陡坡中下部, 冲洪积物分布于海拔 2 340 ~ 2 500 m 之间的陡坡上部; 廖秋林等^[4]认为 102 滑坡发育于古冰碛物和冲洪积物组成的第四系巨厚层松散堆积体中, 且其厚度分别为 256.41,

182.61 m; 李同录等^[8]认为 102 滑坡的滑体主要由古冰碛物和冲洪积物组成, 且滑床地层主要为第四系上更新统冰期形成的古冰碛物和间冰期形成的冲洪积物; 祝介旺等^[5]认为 102 滑坡是由古冰碛物和松散冲洪积物所构成的古滑坡体的复活, 古冰碛物和冲洪积物的分布海拔和厚度与王培高等^[3]和廖秋林等^[4]的观点一致。上述学者对 102 滑坡的认识基本相同, 即该滑坡发育于巨厚层冰碛物和冲洪积物组成的第四系松散堆积体上(图 3)。但是, 支撑上述观点的依据稍显不足, 如缺少深孔资料、物探成果等^[9]; 上述研究主要针对 1991 年开始滑动的斜坡体进行, 并没有对位于高山深切峡谷区的 102 滑坡前后缘同时存在面积较大的冰碛台提出过疑问。

首先, 曾庆利等^[9]认为前人对于冲洪积物和古冰碛物的厚度论述, 主要依据吕儒仁等^[10]公开的 2 个深度分别为 50.81, 100.76 m 的钻孔资料确定, 其判断是一种推测; 其次, 根据秦斌^[11]在 102 隧道施工期间获取的隧道掌子面照片可知, 图 3 中 102 隧道位置附近的隧道围岩为中-弱风化基岩(图 4), 岩质较硬, 与前人的推测相悖。

相较于其他学者, 曾庆利等^[9]在分析 102 滑坡的形成机制时, 根据现场调查结果, 综合考虑了滑坡后缘平台等微地貌, 认为该滑坡附近存在一海拔在 2 330 ~ 2 370 m、坡度较缓的岩质基座, 而根据中铁二局第五工程有限公司编制的隧道地质纵断面可知, 沿 102 隧

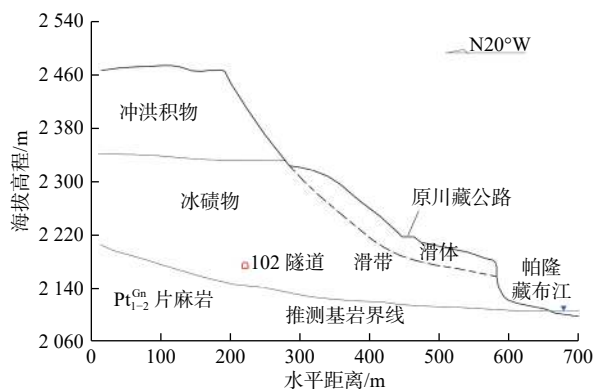


图 3 102 滑坡断面示意图 (据文献 [5] 修编)

Fig. 3 Schematic diagram of the 102 Landslide section (modified from Ref. [5])

图 4 滑坡下方 102 隧道掌子面照片^[11]Fig. 4 Photos of the face of the 102 tunnel below the landslide^[11]

道中线剖面揭示的基岩面海拔为 2 310 ~ 2 360 m^[12], 二者观点相近。但是, 曾庆利等^[9]认为, 岩质基座的成因是由于冰川作用下的“U”型谷嵌套河流下切侵蚀作用下的“V”型谷, 滑坡南北两侧的平台是冰川退化后残留的侧碛和中碛地貌, 笔者认为, 在高山深切峡谷区强烈的剥蚀作用下, 在同一地点地质体发生上述叠加变化, 依然保留较完整的可能性较小。

综上所述, 本文在前人研究成果的基础上, 结合 2018 年 10 月—2020 年 1 月开展的现场勘察工作, 分析了研究区同类型微地貌的地质特征, 对 102 滑坡后缘平台物质特征及其形成机制进行了新的思考。

3 102 滑坡后缘平台物质特征分析

3.1 综合工程物探揭示的地层特征

武斌等^[13]在 2005 年采用浅层地震反射波法、浅

层初至折射波法、瞬态瑞雷面波勘探法、直流对称四级电测深法、联合剖面法及高密度电测深法相结合的综合工程物探方法对 102 滑坡后缘平台地层进行了揭示, 其考虑了地质体的弹性和电性性质, 避免了单一物探技术的多解性问题。

根据综合工程物探成果资料, 102 滑坡后缘平台的第四系松散堆积块石土、冰碛碎石土及冲洪积碎石土的厚度为 60 ~ 72 m, 其下部为花岗片麻岩 (图 5)。

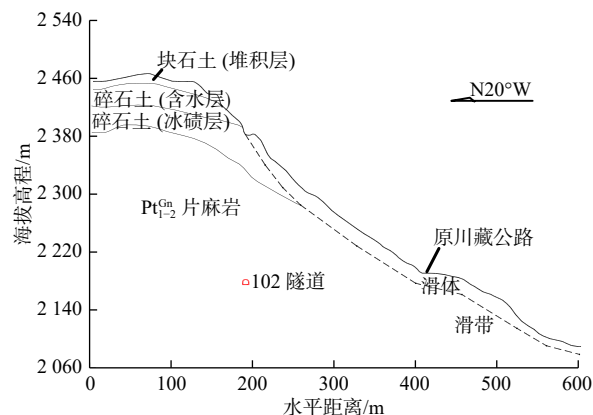


图 5 102 隧道综合物探剖面图 (据文献 [13] 修编)

Fig. 5 102 tunnel integrated geophysical section (modified from Ref. [13])

3.2 102 隧道勘察、施工揭示的地层特征

102 隧道地质纵断面和勘察深孔 ZK1 的资料显示, 在该滑坡附近的地面线高程约 2 440 m, 基岩面高程约 2 362 m^[12], 因此, 穿过滑坡段隧道的上覆第四系松散层厚度约 78 m, 与综合工程物探揭示的覆盖层厚度接近; 其中, 冲洪积碎石土厚度约 23 m, 冰碛碎石土厚度约 55 m。由于 55 m 厚的冰碛物不足以代表高约 400 m 的 102 滑坡后缘平台, 且根据钻孔 ZK3 的岩芯鉴定经验, 全风化或强风化岩石与冰碛物在野外鉴定时易混淆, 因此, 笔者推测钻孔 ZK1 中 55 m 厚的冰碛物可能是全风化岩石夹强风化岩石。

102 隧道下穿 102 滑坡后缘平台, 根据秦斌在 102 隧道施工期间获取的隧道掌子面照片可知, 该隧道整体走行于基岩中^[11]; 根据中铁二局第五工程有限公司编制的 102 隧道土建工程竣工图报告, 判断该隧道围岩整体以 V 级围岩为主, 局部 IV 级围岩, 且隧道正常涌水量为 50 485.19 m³/d^[12]; 综上所述, 滑坡后缘平台内的岩体节理裂隙很发育。

3.3 滑坡附近类似平台勘察揭示的地层特征

102 滑坡后缘平台所在的帕隆藏布流域中, 以其为中心的 6 km 范围内存在多处类似平台, 若按照前人

关于该滑坡的观点,将滑坡后缘平台内的地质体考虑为以冰碛物为主^[3-5,9],则按照冰碛物的成因和分布特点,研究区类似平台内的地质体物质也应以冰碛物为主,或可见大量冰碛物。然而,笔者通过对 2 个邻近且类似平台的地质体特征进行分析后发现,该推测可能性较小。

在平台上游约 6 km 处的帕隆藏布右岸,分布有一处地面高程约 2 550 m 的平台,其高程略高于 102 滑坡后缘平台;根据垂直贯穿于平台、深度约 145 m、孔底接近谷底的钻孔 ZK2 显示,0~128 m 的地层以砂土为主,砂土含量大于 85%,仅含少量卵石、圆砾(图 6),下部为较纯净的片麻岩,与冰碛物大小混杂、缺乏分选性的特征相差甚远。



图 6 ZK2 钻孔 45~50 m 砂土岩芯照片

Fig. 6 Photo of the sand cores at depth of 45-50 m in borehole ZK2

在平台下游约 6 km 处的帕隆藏布右岸,分布有一处地面高程约 2 470 m 的平台,其高程与 102 滑坡后缘平台相近;根据贯穿于平台的、深度约 340 m、孔底接近谷底的钻孔 ZK3 显示,0~187 m 的地层以全风化岩石为主,夹强风化岩石,局部夹少量砂或黏性土(图 7),下部为较纯净的片麻岩岩芯,与冰碛物大小混杂、富含黏土或砂的特征相差较大。



图 7 ZK3 钻孔 52~57 m 的岩芯照片

Fig. 7 Photo of the cores at depth of 52-57 m in borehole ZK3

3.4 与典型冰碛物特征对比分析

由于老冰期的冰碛物平均海拔整体低于新冰期的冰碛物^[14],若将 102 滑坡后缘平台考虑为冰碛台,则其形成时期应该早于海拔较高的波密桃花沟内的冰碛物,其密实程度、胶结程度及直立性等应好于后者;然而,桃花沟内广泛分布的冰碛物整体表现为密度大、有胶结、直立性好等特点,这与前人普遍认为 102

滑坡体及其后缘平台的地质体为松散堆积体^[9]的观点相悖,因此,也佐证了滑坡区分布的第四系松散堆积体为冰碛物的可能性较小。

通过上述分析研究,笔者发现:(1)由综合工程物探的成果资料和 102 隧道勘察、施工期间的成果资料可知,102 滑坡后缘平台的冰碛物厚度约 55 m,该厚度不足以代表高约 400 m 的 102 滑坡后缘平台,且已基本确定了平台下部厚约 300 m 的地质体为岩体;(2)根据帕隆藏布主沟内邻近且类似平台上获取的钻探资料,其地层特性与冰碛物大小混杂、缺乏分选性、富含黏土的特性相差甚远,其为冰碛台的可能性较小,也佐证了古乡至通脉段帕隆藏布主沟内,地面海拔在 2 470~2 550 m 的平台为冰碛台的可能性较小;(3)102 滑坡后缘平台的海拔与其上游波密县桃花沟内的海拔高差大于 300 m,但前者出露地层的密实程度、胶结程度、直立性等远不如后者沟内典型的冰碛物,也佐证了该平台为冰碛台的可能性较低。综上分析,笔者认为 102 滑坡后缘平台是冰碛台的可能性较小。

4 102 滑坡形成机制新思考

判定 102 滑坡后缘平台是冰碛台的可能性较小后,为了更合理地解释该平台和 102 滑坡的成因,笔者对 102 滑坡的形成机制提出了新的观点。

4.1 滑坡区地质背景

滑坡区位于藏东南高山深切峡谷内的帕隆藏布右岸,河谷呈“V”型,最高海拔约 5 050 m,最低海拔约 2 100 m,高差达 2 950 m。地层岩性主要为中-下元古界念青唐古拉岩群片麻岩($\text{Pt}_{1-2}^{\text{Gn}}$),局部夹花岗岩、闪长岩、云母片岩、绿帘石岩等,斜坡和沟谷内分布有第四系松散堆积层。滑坡区涉及的断裂主要包括 F48 嘉黎—帕隆藏布走滑正断裂和 F50 嘉黎—嘎龙寺弧-弧碰撞带,二者均为高角度倾北断裂。地表水主要为冲沟水,沿平台东西两侧汇入帕隆藏布;地下水按含水介质分为第四系松散孔隙水、基岩裂隙水及构造裂隙水;根据波密县通麦小集镇气象资料,滑坡区多年平均降水量约 1 276.0 mm,年降水量在 846.3~1 514.7 mm 之间,年平均降雨天数高达 215 d,在 2016 年出现了一次连续 41 d 的降水过程,充沛的降雨是地表水和地下水的重要补给来源。

4.2 102 滑坡形成机制分析

通过分析滑坡区地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质等特征,综合考虑附近其他平台的发育特点,笔者认为 102 滑坡发育于古滑坡残留堆积体的

前缘,与祝介旺等^[5]的观点一致,但不同点在于祝介旺等认为古滑坡体主要由冰碛物和冲洪积物组成,而笔者根据前文的分析,认为古滑坡体主要由坡积物、冲洪积物及破碎岩体组成。将 102 滑坡的形成机制分 4 个阶段详述如下。

4.2.1 古滑坡的孕育阶段

原始斜坡地形陡峻,坡顶与坡脚之间的高差达 1 500 m,斜坡体自身具有巨大的重力势能;斜坡坡脚为帕隆藏布的冲刷岸,由于流域水量丰富、水流湍急,对岸坡具有强烈的冲刷、侵蚀作用,从而在斜坡坡脚形成临空面;斜坡体内发育的 F48 嘉黎—帕隆藏布走滑正断裂为全新世活动断裂,频繁的地震作用使斜坡岩体内部节理裂隙发育;斜坡位于高原高山区,强烈的冰雪冻融交替作用对斜坡岩体稳定性变差起到一定促进作用;在上述因素的共同作用下,斜坡坡脚出现集中剪切应力,坡体内出现不连续的节理裂隙,部分裂缝延伸至斜坡表面,原始斜坡的整体稳定性变差(图 8)。

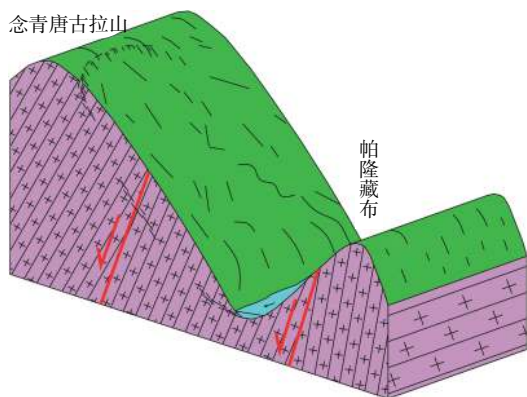


图 8 原始斜坡岩体内裂缝发育示意图
Fig. 8 Schematic diagram of crack development in the original slope rock body

4.2.2 古滑坡堵江形成堰塞湖阶段

在斜坡体内节理裂隙的发育过程中,地震等内动力地质作用加速节理裂隙规模的变大。在这个过程中,由于拟滑斜坡体与基岩山体的连接面越来越小,其抗滑力不断减小,当抗滑力接近下滑力时,在地震等因素的触发作用下^[15],坡体内的临界锁固段被剪断,拟滑斜坡体与基岩山体分离、失稳,古滑坡形成。当古滑坡堆积体前部抵达帕隆藏布南岸斜坡后,将会受其阻挡、挤压;由于大高差环境下的重力势能给滑体提供了充足的动能,其还具有一定的速度,古滑坡堆积体将进行爬坡运动,随着其速度降为零,古滑坡堆积体最终稳定下来堵塞帕隆藏布形成堰塞湖(图 9)。

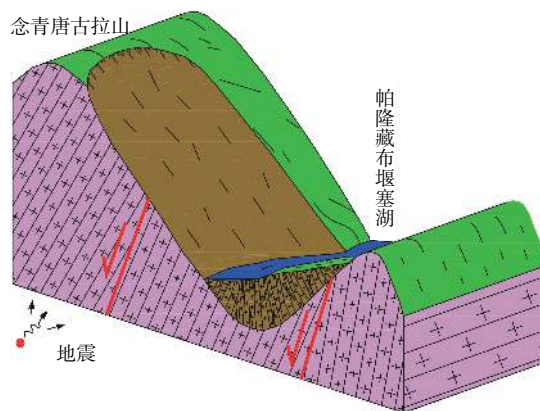


图 9 原始斜坡失稳堵江形成堰塞湖
Fig. 9 Original slope failure blocking the river to form a barrier lake

由于古滑坡堆积体前缘到达帕隆藏布南岸后,其前缘表现为爬坡运动,后缘表现为俯冲运动,最终导致了古滑坡堆积体呈现南岸高、北岸低的特征(图 9);堰塞湖中汇聚的江水漫过古滑坡堆积体,在海拔较低的古滑坡堆积体北侧(即 102 滑坡后缘平台上方区域)形成泄流槽,此过程将在古滑坡堆积体上沉积一定厚度的冲洪积物,这与角不弄古滑坡堆积体上部覆盖有冲洪积物的特征一致^[15],印证了 102 滑坡后缘平台上覆冲洪积层的来源。

4.2.3 堰塞湖消退至新河道形成阶段

随着时间的推移,在帕隆藏布强烈的下切、侵蚀作用下,位于泄流槽低洼部位的古滑坡堆积体物质被不断带走,其逐渐被切割为南北两个残留的堆积平台,当下切深度到达堰塞湖湖底高程时,堰塞湖消亡,帕隆藏布的新河道形成(图 10),残留的堆积平台也逐渐趋于相对稳定的状态。由于古滑床岩体破碎,大量的松散岩石、碎屑等持续从基岩山体剥落滚下,堆积

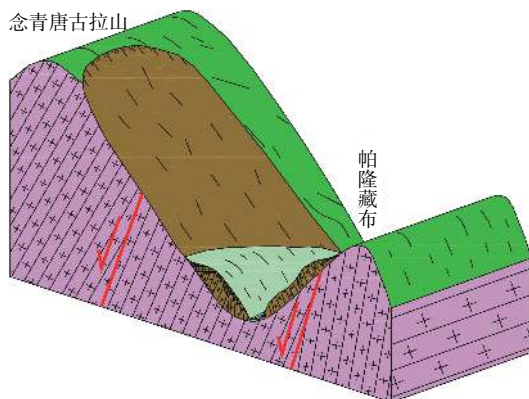


图 10 帕隆藏布分割滑坡堆积体示意图
Fig. 10 Schematic diagram of the Parlun Zangbo partition landslide accumulation body

在北侧残留的古滑坡堆积平台上,覆盖平台上部沉积的冲洪积物,最终形成了坡积物+冲洪积物+破碎岩质古滑坡的堆积平台。

古滑坡堆积体被帕隆藏布江下切、侵蚀的过程,可看作河流阶地的形成过程,因此,会在残留的古滑坡堆积平台斜坡上沉积大量的冲洪积砂土、碎石土等,这与角不弄古滑坡堆积体前缘发育有砂土夹碎石土的特征一致^[15],印证了 102 滑坡体包含砂土和碎石土的原因。

4.2.4 人类工程活动诱发古滑坡复活阶段

川藏公路作为早期连接西藏和内地的交通要道,是最早一批开工建设的工程。在丰富的地下水和充沛的降雨作用下,102 滑坡区的第四系松散堆积体强度降低,加之帕隆藏布对其岸坡的强烈冲刷,其稳定性进一步降低;当依山而建的川藏公路从其坡面经过时,由于人工开挖在斜坡前部形成高陡的临空面,斜坡的抗滑力逐渐减小,斜坡的稳定性变差;后期在自身重力、爆破振动、机械振动、地震等因素的共同作用下,其斜坡稳定性持续降低,当下滑力大于抗滑力时,斜坡最终失稳下滑,102 滑坡形成(图 11)。

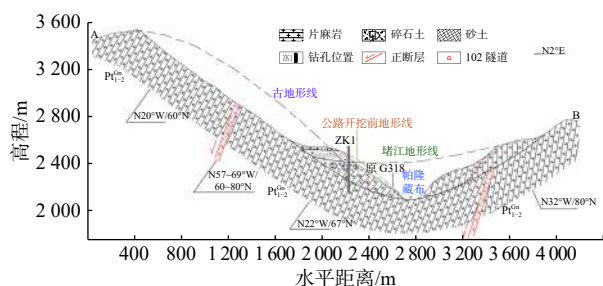


图 11 102 滑坡区工程地质断面图

Fig. 11 Engineering geological section of the 102 Landslide area

5 进一步研究 102 滑坡的意义

前人研究均认为 102 滑坡后缘平台是冰碛物和冲洪积物组成的冰碛台,而 102 滑坡是由于冰碛台斜坡失稳形成的,其滑体物质主要为冰碛物。笔者在前人研究的基础上,通过整理、分析既有资料,结合现场勘察等手段,提出了 102 滑坡后缘平台的物质组成为坡积物+冲洪积物+破碎岩质古滑坡体的观点,102 滑坡则是古滑坡残留堆积体的复活。笔者认为,上述两种观点都有一定的证据支撑,但也均有不足之处,不同的观点对于分析评价 102 滑坡的稳定性和发展趋势还存在较大差异,因此,102 滑坡后缘平台物质特征及其形成机制仍具有进一步研究的意义。

目前,研究区的川藏公路已改建 102 隧道从 102 滑坡下方穿过,根据笔者的分析,该隧道走行于基岩山体中,仅进出口段走行于古滑坡的滑动带附近,由于古滑坡体现阶段整体处于稳定状态,因此,对隧道的安全运营影响较小或不影响。

祝介旺等^[5]指出,在 102 隧道方案实施之前,102 滑坡的整治共投入了 1.134 亿元,且效果不佳,没能从根本上解决滑坡灾害带来的问题,造成了巨大的经济损失。笔者认为如果在整治初期就提出 102 滑坡是古滑坡残留堆积体复活的观点,会较早地采用隧道方案避让滑坡,而该方案既能节约由于早期认识不足而浪费的整治经费,又能快速、精准、安全、长久地解决 102 滑坡带来的经济损失。

102 滑坡所在的藏东南地区广泛分布着冰碛丘陵、侧碛堤、终碛堤、鼓丘等冰碛地貌;然而,在藏东南高山深切峡谷区,地质构造发育,强震频发,同样分布着许多规模不等的古(老)滑坡,有的还保留着较明显的滑坡特征,有的则不具备典型的滑坡要素;能否正确区分冰碛地貌和滑坡地貌,将直接关系到其防治措施的选择,也影响着该地区各类工程的勘察、设计、施工及运营安全。

6 结论

(1)通过研究,认为 102 滑坡后缘平台是冰碛台的可能性较小,初步提出了该平台的物质组成为坡积物+冲洪积物+破碎岩质古滑坡体的观点。

(2)残留古滑坡体前缘斜坡在地下水、降雨、帕隆藏布冲刷以及川藏公路修建等因素的影响下,其稳定性逐渐降低,后期在自身重力、爆破振动、机械振动、地震等因素的作用下,古滑坡被诱发复活,即 102 滑坡形成。

(3)进一步研究 102 滑坡后缘平台物质特征及其形成机制,能够更好地认识藏东南地区的地质历史,对藏东南地区同类型滑坡的研究和防治工作具有参考意义和经济价值。

参考文献 (References):

- [1] 殷跃平. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 8-11. [YIN Yueping. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 27(4): 8-11. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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 Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, 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 with English abstract)]
- [3] 王培高, 张华. 川藏公路102滑坡群形成机制及其稳定性分析[J]. 公路, 2001(12): 7 - 11. [WANG Peigao, ZHANG Hua. Formation mechanism and stability analysis of the 102 landslide group on Sichuan—Tibet Highway[J]. Highway, 2001(12): 7 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 廖秋林, 李晓, 李守定, 等. 水岩作用对川藏公路102滑坡形成与演化的影响[J]. 工程地质学报, 2003, 11(4): 390 - 395. [LIAO Qiulin, LI Xiao, LI Shouding, et al. The effect of water-rock interaction on the development and evolvement of the landslide 102 on the Chuanzang highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(4): 390 - 395. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 祝介旺, 苏天明, 张路青, 等. 川藏公路102滑坡失稳因素与治理方案研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 43 - 47. [ZHU Jiewang, SU Tianming, ZHANG Luqing, et al. Studies of factors influencing the stability of No.102 landslide and controlling scheme at the Sichuan—Tebit highway[J]. Hydrogeological & Engineering Geology, 2010, 37(3): 43 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨德宏. 川藏铁路昌都至林芝段主要工程地质问题分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(9): 16 - 22. [YANG Dehong. Analysis of main engineering geological problems in Changdu to Linzhi section of Sichuan—Tibet railway[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(9): 16 - 22. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张晓刚, 王成华, 孔纪名, 等. 川藏公路“102”滑坡群的基本特征[J]. 山地研究, 1998, 16(2): 151 - 155. [ZHANG Xiaogang, WANG Chenghua, KONG Jiming, et al. Analysis on characteristics of “102” landslide group in Sichuan—Tibet Road[J]. Mountain Research, 1998, 16(2): 151 - 155. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李同录, 赵剑丽, 李萍. 川藏公路102滑坡群2#滑坡发育特征及稳定性分析[J]. 灾害学, 2003, 18(4): 41 - 46. [LI Tonglu, ZHAO Jianli, LI Ping. Analysis on the characteristics and stability of the No. 2 landslide of 102 landslide group on Sichuan—Tibet Highway[J]. Journal of Catastrophology, 2003, 18(4): 41 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 曾庆利, 杨志法, 尚彦军, 等. 川藏公路102滑坡群地段基覆界面问题研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 1 - 6. [ZENG Qingli, YANG Zhifa, SHANG Yanjun, et al. Study on discontinuity between bedrock and Quaternary covers in No.102 landslide group section of Sichuan—Tibet highway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 1 - 6. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 吕儒仁, 李德基, 谭万沛, 等. 山地灾害与山地环境[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001: 157-182. [LYU Ruren, LI Deji, TAN Wanpei, et al. Mountain disasters and mountain environment [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001: 157-182. (in Chinese)]
- [11] 秦斌. 川藏公路102隧道复杂地质环境围岩超前预报与开挖方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014. [QIN Bin. The study of the Sichuan—Tibet Highway 102 tunnel complex geological environment surrounding rock's advanced forecast and excavation method [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 中铁二局第五工程有限公司. 国道318线川藏公路(西藏境)“102”滑坡群整治工程102隧道土建工程竣工图报告[R]. 成都: 中铁二局第五工程有限公司, 2015. [Fifth Engineering Company CREGC. Report on civil engineering of tunnel 102 of “102” landslide group treatment project of Sichuan Tibet highway (Tibet) on National Highway 318[R]. Chengdu: Fifth Engineering Company CREGC, 2015. (in Chinese)]
- [13] 武斌, 曾校丰. 综合工程物探技术在川藏公路102大型滑坡勘察中的应用[J]. 四川地质学报, 2005, 25(1): 61 - 64. [WU Bin, ZENG Xiaofeng. The application of comprehensive geophysical exploration technique to the exploration of No. 102 large landslides on the Sichuan—Xizang Highway[J]. Acta Geologica Sichuan, 2005, 25(1): 61 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 马泽平. 川藏交通廊道冰碛物工程性质研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013. [MA Zeping. Study on engineering properties of the moraine in Sichuan—Tibet transportation Corridor [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨德宏, 陈兴强, 黄勇, 等. 雅江缝合带角不弄巨型古滑坡发育特征及形成机制研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(3): 34 - 40. [YANG Dehong, CHEN Xingqiang, HUANG Yong, et al. Study on the development characteristics and formation mechanism of the Jiabunong giant ancient landslide in Yajiang suture zone[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(3): 34 - 40. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华