

云南金平某矿山滑坡成因机制与稳定性分析

严优, 刘润中, 张超, 郑吉云, 刘珍

(云南地质工程第二勘察院有限公司, 昆明 650218)

摘要: 受连续强降雨影响, 2022年8月金平某矿山斜坡道硐口上方斜坡发生突发性滑坡, 造成斜坡中部道路损坏, 掩埋斜坡道硐口。通过灾后地面调查、地质测量、无人机正射投影、钻探和浅井等方法对滑坡进行了现场地质勘查, 查明了本次滑坡的成因机制及变形特征。灾害成因: 原始斜坡具备滑坡形成的地形条件, 滑坡形成的主因是工程切坡, 其它因素有地质条件、地震和降雨等, 激发因素是降雨。滑坡的变形过程为: 斜坡中部道路切坡, 形成高陡临空面→地表水冲刷及长期入渗浸润降低坡体强度并增加坡体重量, 滑坡后部产生向前的蠕动变形, 坡体逐步牵引致使后缘拉裂→地表水长期入渗潜蚀软化软弱层, 后缘优势结构面受水力影响, 产生“水垫效应”形成推移驱动平台, 上部坡体在自重作用下产生滑动→滑体冲击、刮铲道路及下部斜坡, 掩埋斜坡道硐口, 据此分析, 滑坡形成机制为牵引-推移式变形。通过室内试验结合滑面反算确定滑带土物理力学指标, 基于传递系数法对滑坡进行了稳定性计算, 结果表明, 该滑坡仍有失稳风险, 需要进一步加固处理。

关键词: 复合式滑坡; 强降雨; 人类工程活动; 成因机制; 稳定性分析

中图分类号: P642.22; TD167; X4 **文献标识码:** A

ANALYSIS OF THE ORIGIN MECHANISM AND STABILITY OF A LANDSLIDE IN A MINE IN JINPING, YUNNAN PROVINCE

YAN You, LIU Run-zhong, ZHANG Chao, ZHENG Ji-yun, LIU Zhen

(Yunnan Geological Engineering Second Survey Institute Co., LTD., Kunming 650218, China)

Abstract: Affected by continuous heavy rainfall, a sudden landslide occurred on the slope above the slope tunnel entrance of a mine in Jinping in August 2022, causing damage to the road in the middle of the slope and burying the slope tunnel entrance. Through post-disaster ground survey, geological survey, orthopo projection, drilling and shallow wells on the landslide geological exploration, find out the cause mechanism of the landslide and the deformation characteristics, causes of disasters: the original slope with landslide formation conditions, the landslide is engineering cutting slope, other factors have geological conditions, earthquake and rainfall, etc., excitation factors is rainfall. Landslide deformation process: the central slope road cutting slope, forming high steep air surface surface water erosion and long-term infiltration reduce slope body strength and increase the slope weight of landslide backward forward peristalsis deformation, slope body gradually traction causes the surface water long-term infiltration soften soft layer, rear edge advantage structure is affected by hydraulic, produce “water cushion effect” formation push drive platform, under the weight of upper slope sliding body impact, scraper road and lower slope, buried slope adit, according to the analysis, landslide formation mechanism for traction~pass-type deformation. The physical and mechanical indexes of sliding belt soil were

determined by indoor test and reverse calculation of sliding surface, and the stability of the landslide was calculated based on the transfer coefficient method. The results show that the landslide still has the risk of instability and needs further reinforcement and treatment.

Key words: compound landslide; heavy rainfall; human engineering activities; genetic mechanism; stability analysis

2022年8月,云南省金平县某矿山斜坡道硐口上方发生滑坡地质灾害,滑坡体长约95 m、宽约52 m、厚2~5 m、滑向 270° ,滑坡体约 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑动距离约30~50 m,为小型中层岩质滑坡。本次滑坡造成斜坡中部进场道路截断、斜坡道硐口掩埋,并在滑坡后缘建筑物、坡面及侧壁产生大量张拉裂缝、坍塌,影响竖井工业平台和斜坡道的正常使用,对矿区人员的生命安全构成威胁。

通过野外调查发现,该滑坡为复合式滑坡,众多学者对于该类滑坡进行了大量的研究工作,主要侧重于自然因素对其成因机制的研究。如舟曲江顶崖大型滑坡,成因主要是连续强降雨、江水冲刷坡脚,变形机制为滑坡中后部以推移式变形为主,坡面临江前缘以牵引式滑塌为主^[1];四川省甘洛县山体滑坡,成因主要为强降雨和泥石流,破坏机制主要是河谷下切应力释放,岩体产生一系列浅表生时效变形,岩体破裂松动,侧缘冲沟泥石流削弱坡体侧壁的支撑力,最终导致在持续强降雨作用下滑源区岩土体趋于饱和,剪切滑移面完全贯通^[2];都江堰市五里坡高位滑坡,成因主要是降雨、地层结构和地形条件,破坏机制为降雨作用下,裂缝开始扩张,动静水压力联合作用下滑体沿软弱层滑动,前缘临空崩落,滑坡产生加速变形^[3]。可见自然因素对此类滑坡的形成影响极大。

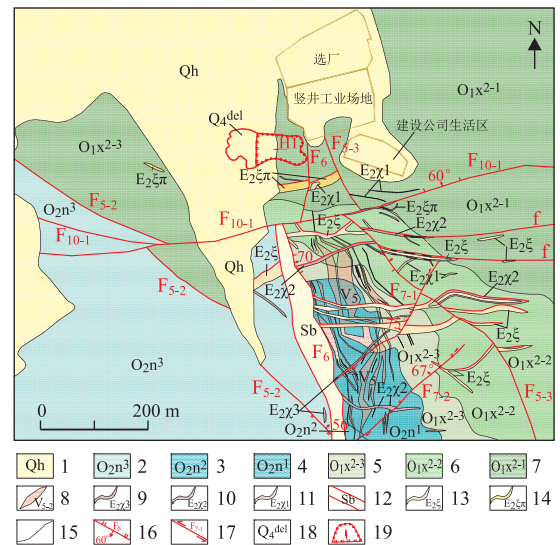
本文所述滑坡形成的主因为工程切坡,其他因素为地质、地震和降雨等,激发因素是降雨,不同于其他复合式滑坡的成因,该滑坡属于典型的内外营力相互作用下形成的复合式滑坡。滑坡产生变形破坏的主要原因是斜坡中部道路切坡,上部次级坡体坡脚稳定性关键块体局部弱化、缺失,导致上部坡体产生牵引变形,连续强降雨使优势结构面形成推移驱动平台,使滑体软弱带发生滑移破坏,产生的巨大冲击力使下部道路及坡体产生刮铲,最终掩埋斜坡道硐口。

1 滑坡区地质环境条件

研究区属热带湿风无寒地区,雨量充沛,干湿季节分明,每年5月至10月为雨季,降雨集中,多大雨和暴雨,占全年降雨量的79%,多年平均降雨量

2 154.62 mm,年平均降水天数188 d。全年暴雨主要集中于6~8月,日降雨 $\geq 50 \text{ mm/d}$ 平均7.5次/a。

区域上属滇西横断山纵谷区的东南延伸部分,构造、侵蚀山地,主要山脉、河流呈北西至南东走向,地势总体上北西高、南东低。地质构造复杂多变,区内多组断裂发育,滑源区、滑坡扩展区分别靠近东西向、南北向两条断层,滑坡位于矿山斜坡道硐口上方,岩性主要为上覆第四系全新统含碎石粉质黏土、碎石土(Q_4^{el+dl})、下伏奥陶系下统向阳组二段(O_1x^2)灰白色-黄褐色薄层状-中厚层状泥质粉砂岩(图1)。



1. 第四系残坡积人工堆积物;2. 奥陶系中统南板河组三段;3. 奥陶系中统南板河组二段;4. 奥陶系中统南板河组一段;5. 奥陶系下统向阳组二段第三亚段;6. 奥陶系下统向阳组二段第二亚段;7. 奥陶系下统向阳组二段第一亚段;8. 矿体及编号;9. 煌斑岩:黑云辉石云煌岩;10. 煌斑岩:辉石云斜煌岩;11. 煌斑岩:云斜煌岩;12. 碎裂岩带;13. 正长岩:黑云花岗岩闪长岩;14. 正长岩:黑云角闪正长斑岩二长斑岩;15. 地质界线;16. 实测逆断层及编号;17. 实测平移断层及编号;18. 第四系滑坡堆积物;19. 滑坡位置及界

图1 滑坡区地质简图

2 滑坡特征及稳定性分析

2.1 滑坡特征

滑坡地形上陡下缓,平面形态整体呈“舌”状,坡面形态呈“折线状”(图2、图3),滑坡后缘高程约1 675 m,前缘高程在1 605 m左右,相对高差70 m。

由于上部坡体高陡临空,整个滑体从斜坡中前部斜坡道洞口上方剪出,在其解体过程中,滑体一垮到底,堆积物主要分布于下部坡体和前缘斜坡道洞口。滑坡后缘有大量张拉裂缝、错坎发育,走向垂直于滑向。后壁光滑陡立,可见近平行于滑向的节理面。左侧壁可见斜交于滑向的节理面。浅井、钻探揭露滑带为全风化泥质粉砂岩,差异风化显著,泥质含量高,可塑-软塑状,浸水崩解,强度及变形时间效应明显。

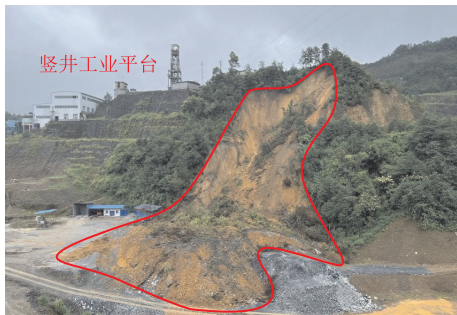
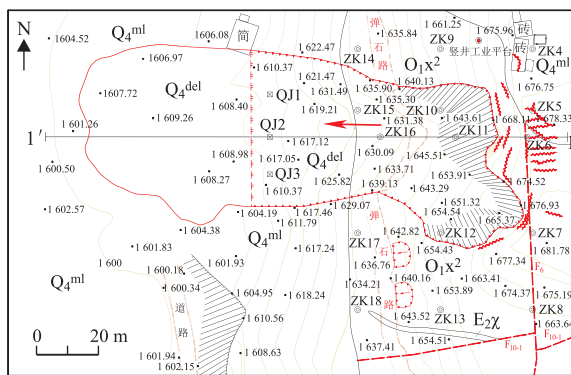


图2 滑坡全貌图



O_1x^2 . 奥陶系下统向阳组; Q_4^{del} . 第四系滑坡堆积层; $E_2\chi$. 煌斑岩脉; Q_4^{ml} . 第四系人工堆积层; 1. 滑坡边界、滑动方向; 2. 剖面线及编号; 3. 地质界线; 4. 钻孔编号; 5. 实测裂缝; 6. 道路; 7. 实测断层及编号

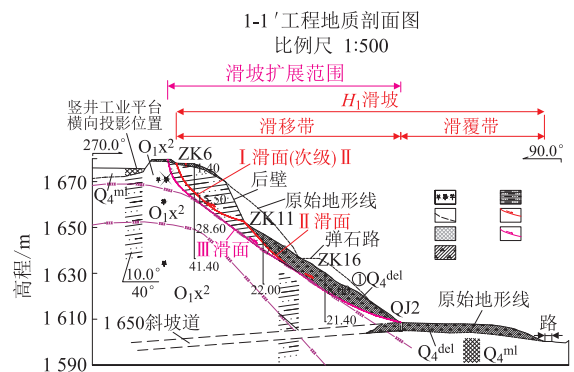
图3 滑坡工程地质平面图

斜坡中部进场弹石路修建于 2015 年,道路边坡未进行坡面防护,距离滑坡后缘约 42 m,从现场走访及调查结果发现,道路建设对滑坡变形破坏影响较大,滑坡发生前此路段曾有滑塌迹象。堆积区前后缘相对高差 44 m,滑坡堆积体主要以碎石土为主、夹少量粉质黏土,松散,湿,次棱角-棱角状,碎石粒径 5~10 cm,含量约 50%~60%,母岩为泥质粉砂岩。堆积面积 $0.35 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。平均厚度约为 3 m,堆积方量约 $1.05 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡扩展区位于滑坡边界外侧(图 2),扩展区面积约为 $1.01 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均厚度 9.5 m,体积约为 $9.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑体滑动

后,扩展区具有明显的侧向坍塌、剪切迹象,由于前端滑体脱落,残余滑体失去牵引力,暂时处于休止状态,现状稳定性较差,岩体破碎松散,野外调查中多次发生碎块石滑落、局部坍塌的现象。

2.2 滑坡稳定性分析

根据现场地质调查结果,滑坡滑体为含碎石粉质黏土、全-强风化泥质粉砂岩,滑带为强风化薄层状泥质粉砂岩,碎裂状-散体状结构,差异风化显著,经过长期降雨浸泡后呈土状,鉴于斜坡岩体风化破碎,因此采用条分法和传递系数法对该滑坡的稳定性进行计算。滑带土物理力学指标根据室内实验及滑面参数反演取值。计算滑面:滑面 I (后缘次级滑面)、滑面 II、滑面 III (扩展风化界面)(图 4)。



Q_4^{del} . 第四系滑坡堆积层; Q_4^{del+dl} . 第四系残坡积层; O_1x^2 . 奥陶系下统向阳组二段第一亚段; 1. 全、强、中风化符号; 2. 岩性界线; 3. 人工填土; 4. 含碎石粉质黏土; 5. 泥质砂岩; 6. 滑动面及滑向; 7. 潜在扩展滑移面及滑向

图4 滑坡计算剖面图

2.2.1 计算工况及荷载组合

计算工况根据《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509-2020)6.2.3 进行选取组合。滑坡稳定性分析计算工况如下:工况 I:基本荷载;工况 II:基本荷载+降雨荷载;工况 III:基本荷载+地震荷载;工况 IV:基本荷载+降雨荷载+地震荷载。

2.2.2 计算参数

(1) 岩土重度(γ):根据资料收集、土工及岩石试验成果,①碎石土天然重度 γ 取 21.50 kN/m^3 ,饱和重度 γ_{sat} 取 22.00 kN/m^3 。②含碎石粉质黏土天然重度 γ 取 18.80 kN/m^3 ,饱和重度 γ_{sat} 取 19.30 kN/m^3 。③全-强风化泥质砂岩天然重度 γ 取 21.50 kN/m^3 ,饱和重度 γ_{sat} 取 22.00 kN/m^3 。

(2) 抗剪强度指标取值说明:滑面 I、III:工况 I、III 内摩擦角 φ 值取重塑快剪指标($\varphi=15.90^\circ$),内聚力 c 值取反算值($c=35.0 \text{ kPa}$);工况 II、IV 内摩擦角 φ 值取重塑饱和快剪指标($\varphi=14.75^\circ$),内聚

力 c 值取反算值 ($c=30.0$ kPa)。滑面 II: 工况 I、III 取残余剪, $c=19.38$ kPa, $\varphi=13.49^\circ$; 工况 II、IV 取饱和残余剪, $c=15.96$ kPa, $\varphi=11.73^\circ$ 。

(3) 水平地震系数 (K_n): 滑坡处于抗震设防烈度 7 度区, 按规范 K_n 取 0.10。

本文采用基于极限平衡法的传递系数法和条分法计算滑坡的稳定性系数(图 5), 稳定性计算结果见表 1。

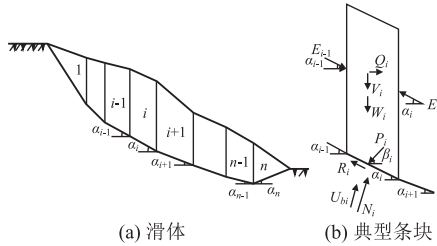


图 5 传递系数法简图(据滑坡防治设计规范, 2020)

滑坡稳定性计算公式:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i+1}^n \Psi_j) + T_n}$$

式中各参数所指代的含义, 详见《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509-2020)。

表 1 稳定性计算结果

计算剖面	计算工况	滑面 I 稳定系数 (f_s)	滑面 II 稳定系数 (f_s)	滑面 III 稳定系数 (f_s)	滑面 I 稳定性评价	滑面 II 稳定性评价	滑面 III 稳定性评价
1-1'	工况 I	1.02	1.03	1.07	欠稳定	欠稳定	基本稳定
	工况 II	0.96	0.98	1.03	不稳定	不稳定	欠稳定
	工况 III	0.99	0.99	1.04	不稳定	不稳定	欠稳定
	工况 IV	0.90	0.93	1.00	不稳定	不稳定	欠稳定

根据稳定性计算结果, 滑坡在工况 I 下呈欠稳定-基本稳定状态, 在工况 II ~ IV 下呈不稳定-欠稳定状态。从计算结果可知滑坡仍存在失稳风险, 需要进一步加固处理。

3 滑坡成因机制分析

3.1 滑坡形成条件分析

根据滑坡特征、变形破坏情况的分析可以得出, 滑坡的形成具有以下几个典型特征。

(1) 有利于滑坡发育的岩性条件。滑坡发生在奥陶系下统向阳组二段 (O_1x^2), 以碎裂状、薄层状结构的泥质砂岩为主, 差异风化显著, 泥质含量高, 浸水崩解, 强度及变形时间效应明显, 在持续降雨作用下, 易被软化甚至泥化, 摩阻力下降, 进而形成滑动面。

(2) 地质构造对滑坡区岩体的强烈破坏。受东

西、南北向断层挤压、拉张构造应力的影响, 岩体变形强烈, 裂隙较发育, 岩体松散破碎, 完整性差, 裂隙面为风化作用及地表水入渗提供了有利通道, 滑源区岩体差异风化显著, 岩体抗剪能力弱。

(3) 研究区新构造运动强烈, 主要表现为大幅度间歇性断块上升运动, 金平县地震活动较为频繁, 但以小地震及微地震为主, 破坏性地震极少, 但仍对斜坡岩体稳定性存在一定影响。

(4) 滑坡发育多组软弱结构面。通过野外调查, 滑坡区泥质粉砂岩共有 4 组节理发育, 产状分别为 $184^\circ \angle 87^\circ$, $272^\circ \angle 46^\circ$, $28^\circ \angle 33^\circ$, $67^\circ \angle 32^\circ$, 其中产状 $272^\circ \angle 46^\circ$ 的节理倾向近平行于滑向, 为滑坡失稳的优势结构面。软弱结构面为降雨入渗提供了良好的导水通道, 雨水软化坡体的同时, 在后缘优势节理面上产生对滑体的扬压力(或静水压力), 使其产生推移驱动平台的作用。

(5) 人类工程活动改变了原有的应力状态。受进场道路切坡的影响, 斜坡上部形成高陡临空面, 造成斜坡后缘拉裂及浅表层牵引破坏。通过现场走访道路上方边坡曾发生过一定规模的坍塌, 使上部坡体前缘支持力下降, 促使上部坡体下部产生牵引滑移。

(6) 连续性强降雨是此次滑坡的诱发因素。金平县多年的年平均降雨量为 2 306.7 mm 左右(据金平县气象站), 而 2022 年 7 月底至 9 月中旬, 受台风影响, 40 余 d 的累计降雨量约占全年累计降雨量的近 1/3, 地表水沿结构面进入斜坡, 软化斜坡内岩体软弱层, 促使滑面形成, 导致斜坡岩体沿滑带失稳下滑。

3.2 滑坡变形破坏机制分析

在滑坡野外调查的基础上, 通过对滑坡的形成条件和特点进行分析, 该滑坡的变形破坏过程为: 斜坡中部道路切坡, 形成高陡临空面, 岩土体碎裂结构面发育, 地表水冲刷及长期入渗浸润降低坡体强度并增加坡体重量, 滑坡后部产生向前的蠕动变形, 坡体逐步牵引致后缘拉裂, 地表水长期入渗潜蚀使滑面贯通, 在斜坡自重推移作用下产生滑动, 建立滑坡破坏模型, 如图 6 所示。

(1) 岩土体松散破碎。滑坡处于滇西横断山纵谷区的东南延伸部分, 地质构造复杂, 自晚第三纪以来抬升幅度很大, 大面积持续上升的同时伴有断块差异运动。河溪溯源侵蚀不断进行, 地形切割强烈, 斜坡应力调整, 岩体向临空面产生脆性回弹, 使岩体产生一系列卸荷裂隙和变形破坏, 加之风化作用、道

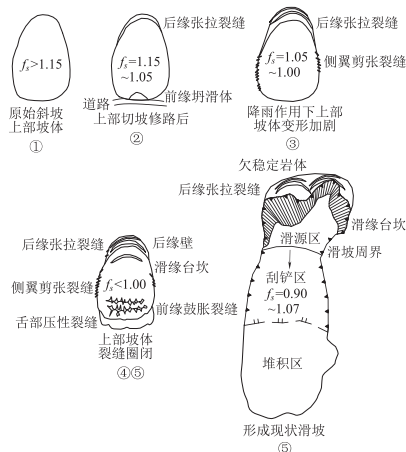


图6 滑坡变形破坏模型

路施工及集中性强降雨等因素的影响,斜坡浅层岩体破碎松动,为滑坡的变形破坏奠定了基础。

(2) 中部道路的切坡建设,高陡临空面的形成。斜坡中部进场道路的建设,在斜坡体上方形成了高陡临空面,正常情况下边坡变形能力有限,但多年降雨导致边坡坡脚发生一系列坍塌,对临空面及坡体产生了进一步的浅表生弱化改造。

(3) 斜坡上部坡体产生牵引变形,坡面裂缝的形成。由于上部坡体在持续性强降雨的作用下,坡脚支持力进一步下降,抗滑力减小,导致上部坡体后缘出现近似平行于滑坡走向的拉裂缝,为降雨入渗提供了有利通道。

(4) 地表水长期入渗潜蚀使剪切滑移面完全贯通,在斜坡自重推移作用下上部滑体冲击、刮铲道路及下部斜坡产生整体滑动,滑移后坡面高陡临空,不断向后缘及两侧扩展,规模不断扩大。

4 结论

(1) 结合调查走访及滑坡残余部分岩土体变形情况表明,滑坡的滑动是下部带动上部,再由上部推动下部的过程,同时具有牵引式和推移式滑坡的特点。整体可分为滑源区、刮铲区和堆积区3个部分,滑坡体积约 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑动距离约 30~50 m,为小型中层岩质滑坡。

(2) 滑坡位于滇西横断山纵谷区的东南延伸部分,在断层挤压、断块间歇性上升的影响下,河溪溯源侵蚀不断进行,地形切割强烈,加之风化作用、道路施工及短期强降雨等因素的长期作用使得斜坡岩体结构松散破碎,地表水长期入渗潜蚀使剪切滑移

面完全贯通,在斜坡自重推移作用下上部滑体冲击、刮铲道路及下部斜坡产生整体滑动,滑移后坡面高陡临空,不断向后缘及两侧扩展,规模不断扩大。

(3) 除自然因素外,道路切坡是激发本次滑坡的主要原因。切坡形成高陡临空面,且未进行坡面防护工程,在短期强降雨情况下,切坡对斜坡岩土体的扰动极易引发斜坡坡体产生变形,导致前缘牵引、后缘拉裂,为复合式滑坡的形成奠定了基础。

(4) 通过室内实验结合反算的方法确定滑带土物理力学指标,采用传递系数法对滑坡破坏后期进行了稳定性计算,结果表明,该滑坡仍有失稳风险,需要进一步加固处理。

参考文献

- [1] 张卫雄,丁保艳,张文纶,等.舟曲江顶崖大型滑坡成因及破坏机制分析[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(4):713-722.
- [2] 郑琅,张欣,王立娟,等.四川省甘洛县山体滑坡应急调查与成因机制分析[J]. 人民长江,2022,53(8):117-122.
- [3] 都江堰市五里坡高位滑坡-碎屑流成因机制分析[J]. 岩石力学,2016,37(增刊2):493-501.
- [4] 卢应发,刘德富,石峻峰.推移式滑坡渐进破坏机制及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(2):333-345.
- [5] 谭福林,胡新丽,张玉明,等.不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J]. 岩土力学,2016,33(增刊2):597-606.
- [6] 曾程,张泽辉,杨宏丽,等.基于边坡渐进破坏特征对传统极限平衡法几点假设的合理分析[J]. 岩土力学,2012,33(增刊1):146-150.
- [7] 宋东日,任伟中,沈波,等.牵引式滑坡的破坏机制及其加固措施探讨——以某高速公路牵引式滑坡为例[J]. 岩土力学,2013,34(12):3587-3593.
- [8] 周跃峰,龚壁卫,胡波,等.牵引式滑坡演化模式研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(10):1855-1862.
- [9] 雍睿,胡新丽,唐辉明,等.推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学,2013,34(10):3018-3027.
- [10] 温铭生,方志伟,王阳谷.都江堰市五里坡特大滑坡灾害特征与致灾成因[J]. 现代地质,2015,29(2):448-453.
- [11] 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):433-454.
- [12] 杨为民,黄晓,张春山,等.白龙江流域坪定-化马断裂带滑坡特征及其形成演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2014,44(2):574-583.
- [13] 杨龙伟,魏云杰,朱赛楠,等.新疆伊宁县克孜勒赛滑坡成灾机理和动力学特征[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(3):18-24.
- [14] 刘才华,徐健,曹传林,等.岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3529-3533.

作者简介: 严优(1996—),男,硕士,助理工程师,主要从事工程地质与地质灾害方面的研究工作。E-mail:2893515531@qq.com

通讯作者: 刘润中(1992—),男,本科,工程师,主要从事工程地质与地质灾害方面的研究工作。E-mail:1522951823@qq.com