

文章编号: 1006-4362(2023)03-0001-07

陕西某顺层岩质边坡滑坡形成机理及破坏边界研究

冯磊¹, 荀鹏², 颜英军¹, 马飞朋¹

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘要: 为研究探讨顺层岩质边坡的形成机理和破坏机制, 以陕西某拟建抽蓄电站下库区一处顺层滑坡为例, 通过对现场的详细勘查, 分析了坡体的结构与变形特征, 并对滑坡的形成机制与滑坡破坏边界的确定进行了深入讨论与研究。分析结果表明, 斜坡因公路修建坡脚开挖, 具备了沿层面滑动的临空条件, 随后强降雨导致中下段发生滑移-拉裂式破坏, 其整体破坏边界明确。通过对局部破坏边界的进一步研究, 发现滑坡整体上未完全破坏, 岩层结构面, 下游侧一组长大结构面和反倾坡内层面分别构成了残留坡体的底滑面, 下游侧滑面和后缘分离面, 该部分的坡体仍有失稳的可能性。该研究对于滑坡稳定性的进一步确定和灾害的有效治理有重要意义。

关键词: 顺层边坡; 破坏机理; 破坏边界; 稳定性分析

中图分类号: P642.22; P642; X4 **文献标识码:** A

STUDY ON THE FORMATION MECHANISM AND FAILURE BOUNDARY OF A STRATIFIED ROCK SLOPE LANDSLIDE IN SHAANXI PROVINCE

FENG Lei¹, XUN Peng², YAN Ying-jun¹, MA Fei-peng¹(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China;
2. College of Environment & Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to study and explore the formation and failure mechanisms of bedding rock slopes, a bedding landslide in the lower reservoir area of a proposed pumping and storage power station in Shaanxi was taken as an example. Through detailed on-site investigation, the structure and deformation characteristics of the slope were analyzed, and the formation mechanism of the landslide and the determination of the landslide failure boundary were discussed and studied in depth. The analysis results showed that the slope, due to excavation at the foot of the road construction slope, had the free space conditions for sliding along the bedding plane, and the following heavy rainfall caused sliding tensile failure in the middle and lower sections with a clear overall failure boundary. Through further research on the local failure boundary, it was found that the landslide was not completely damaged as a whole. The rock layer structural plane, a large structural plane on the downstream side, and the inner layer of the anti inclined slope formed the bottom sliding surface of the residual slope, the downstream sliding surface, and the rear edge separation surface, respectively. There is still a possibility of instability in this part of the slope. This study is of great significance for the further determination of landslide stability and effective management of disasters.

Key words: bedding slope; destruction mechanism; destroy boundaries; stability analysis

岩质边坡的顺层滑动失稳是山区中较为典型且常见的灾害类型,多由于人为工程^[1]或自然活动因素影响^[2]。在实际工程中,常将开挖坡面和岩层面两者走向夹角小于 30° 且倾向大体一致的边坡定义为顺层边坡^[3]。本文以陕西某抽水蓄能电站下库区一处顺层滑坡作为研究对象,以现场的详细调查为基础,对山区顺向滑坡的形成机理及破坏边界的确定开展相关工作并展开探讨,研究顺层岩质滑坡的形成的内在因素,并对滑坡破坏边界的确定进行深入探讨,对于滑坡稳定性的进一步研究有重要意义,并为山区建设过程中防灾减灾工作提供相关的理论技术支持,同时为抽蓄电站坝址区布置方案的优化、下水库工程边坡设计及加固措施提供可靠的地质依据^[4]。

1 滑坡特征

滑坡位于泄洪出口下游东南侧,距临近坝址约 700 m,滑坡总占地面积约 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,方量约有 $48.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由于近期强降雨导致国道 G242 局部路段内侧发生顺层滑移破坏(图 1),现阶段滑坡后缘已发生拉裂变形,整体不稳定,在不利等工况下,存在失稳的可能,进一步造成堵河现象。



图 1 滑坡区全景

1.1 无人机航拍解译结构面特征

随着科技水平的不断发展,人们将新的技术手段用于对地质体的调查、研究,可以获得对复杂地质体更加准确的评价结果^[5]。将无人机航拍技术运用到复杂的环境中去,获取坡体表面三维点云数据,通过对这些数据的适当处理、分析,可以获取与坡体有关的重要信息数据^[6]。这些点云数据中包含结构面的空间分布特征信息、地形变化信息、地质体的几何尺寸信息等地质调查工作所要求获取的重要资料。对于岩土、地质工程而言,调查人员往往会遇到难以企及的高陡边坡,这项技术可以帮助我们便捷地获

得滑坡的三维空间展布形态等工作所关心信息数据。

对滑坡地表出露结构面进行无人机点云解译并测量,如图 2 所示。

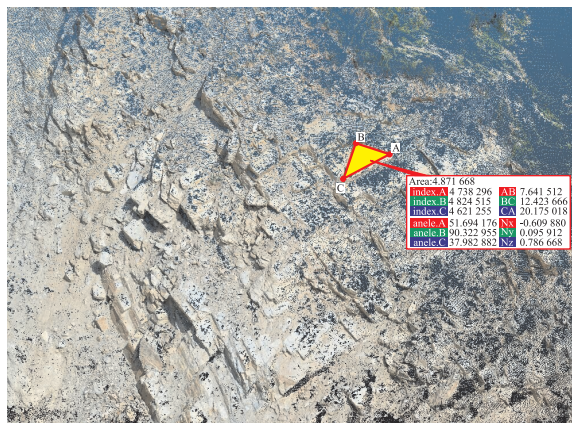


图 2 点云图解译结构面信息

根据无人机航拍点云数据,统计 300 余条结构面倾向、倾角信息等密度图如图 3 所示。优势结构面主要有下列 3 组。

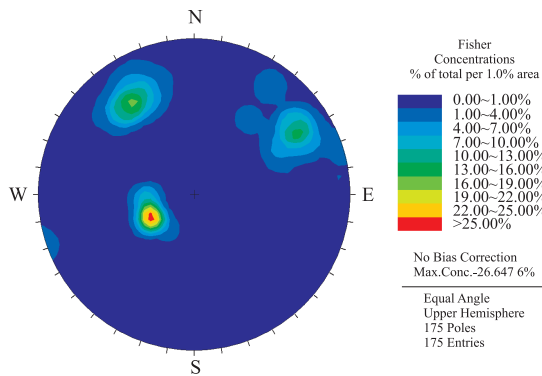


图 3 裂隙等密度图

C1 组: $N10^\circ \sim 53^\circ W / SW \angle 30^\circ \sim 40^\circ$, 最为发育, 为层面裂隙, 优势产状多为 $NW335^\circ SW \angle 34^\circ$ 。

J1 组: $N35^\circ \sim 61^\circ E / NW \angle 65^\circ \sim 79^\circ$, 优势产状 $N51^\circ E / NW \angle 70^\circ$, 是区内最为发育的陡倾裂隙组, 迹长 2~20 m, 主要分布于滑坡下游侧, 切割层面, 为滑坡岩体提供侧边界, 控制局部岩层稳定。

J2 组: $N29^\circ \sim 55^\circ WNE \angle 61^\circ \sim 80^\circ$, 优势产状 $N35^\circ W / NE \angle 75^\circ$, 是区内次为发育的裂隙组, 与裂隙②组合, 切割岩体形成不稳定块体, 岩层失稳解体后较为破碎。

各组主要优势结构面基本特征见表 1。

1.2 坡体结构特征

坡体原始岸坡坡度 $42^\circ \sim 45^\circ$ 左右, 层面倾角略缓于坡脚。根据现场调查, 基岩层面平直光滑, 测量

表1 岩体结构面及特征(滑坡方向 NW290°)

分组	产状	类型	特征
C1	N25°W/SW∠34°	缓倾结构面	平行斜坡,倾向河床偏下游,与滑坡方向小角度相交,硬性结构面为主
J1	N51°E/NW∠70°	中陡倾结构面	与层面正交,硬性结构面为主
J2	N35°W/NE∠75°	层状结构面	与J2正交,硬性结构面为主

层面产状为 N10°~53°W/SW∠30°~40°, 倾坡下游侧, 与临空方向小角度相交。层间主要发育两组长大贯通节理: J1: N35°~61°E/NW∠65°~79°, J2: N35°W/NE∠75°。坡体结构特征见图4。



图4 坡体结构特征

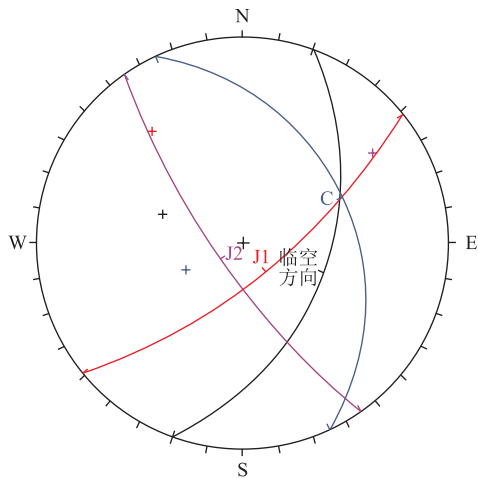


图5 优势结构面赤平投影图

详细分析优势结构面及坡面赤平投影图(图5), 由于层面倾角略缓于坡脚, 并且坡脚开挖, 使得坡体具有沿层面滑动的临空条件, 层面与坡面组合形成不稳定结构。节理J1、节理J2与层面单独形成的块体也属于不稳定结构。

综上所述, 滑坡发生滑移-拉裂式破坏, 是一个由中厚层状板岩及泥灰岩组成的斜顺向坡。

1.3 滑坡物质组成特征

滑坡岩性除板岩外, 还发育晚泥盆统星红铺组(D3X2、D3X3)和燕山期岩浆爆破成的角砾状灰岩(T-bj), 岩性泥灰岩为主, 间夹钙质粉砂岩, 青灰色。

滑坡后缘及下游侧以泥灰岩为主, 中厚层状结构, 坡体中下部为崩坡积物, 上游侧边界基岩为千枚岩, 对滑坡的滑动及方向有重要的控制作用。滑坡后缘及滑坡两侧边界出露的基岩比较多, 中上部光面即为基岩的层面, 上游岩性分界线及环形拉裂缝为滑坡边界。滑坡主要为滑坡堆积体和滑坡物质组成。

1.4 滑坡变形特征

1.4.1 后缘处变形特征

滑坡后缘位于斜坡顶部山脊处, 此处为斜坡陡缓交界的部位, 重力作用相对较为强烈, 后缘岩体较为松动。后缘基岩沿 NW291°SW∠75°拉裂, 泥灰岩解体, 拉裂缝宽度 0.8~1.2 m, 深度在 2~3 m, 见图6。顶部平台形成两条主要拉裂缝, 最外侧距离滑坡边缘较短, 长度 10 m, 拉裂缝岩体十分破碎, 地表可见碎块石, 见图7。



图6 后缘泥灰岩岩块



图7 后缘平台拉裂缝特征

滑坡后缘拉裂缝向下游侧延伸并逐步贯通至坡体下部, 形成环状拉裂缝。拉裂缝的走向总体上与滑坡的滑动方向相垂直, 约为 130°~210°, 具有明显的错陷变形迹象, 最大错陷深度 2.5 m, 拉裂缝张开 30~50 cm, 沿山脊线呈弯曲状延伸, 连续性完整, 长度达 120 m, 见图8。



图8 环形拉裂缝特征



图10 上游侧边界变形特征

1.4.2 下游侧变形特征

滑坡下游侧发育长大贯通节理:J1:NE35°~61°NW∠65°~79°,与层面正交,为层面提供下游侧分离面。裂隙密集发育,且结构面多张开,张开度可达到1~4 cm左右,平直粗糙、泥质或岩屑充填。滑坡出露基岩为强风化岩体,受节理的影响,岩体松动,岩体质量相对较差,且在斜坡陡缓交界处的作用更为明显。受滑坡影响,浅表部形成危石,在不利工况下,浅表层易发生掉块现象。岩层顺层面临空条件较好,仍然具有顺层面滑动的可能,见图9。

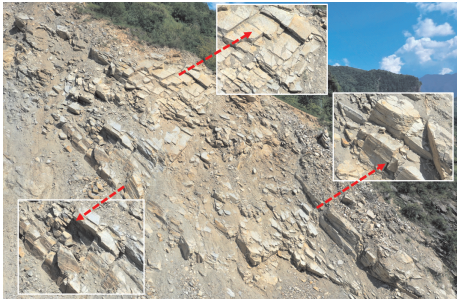


图9 结构面拉张变形特征

1.4.3 上游侧变形特征

滑坡上游侧边界即为泥灰岩与千枚岩岩性交汇处。上游侧边界呈弧形展布,延伸长度约100 m,沿高程向下直至河谷处,向上与滑坡后缘基岩相接。滑坡上游侧出露基岩即为滑坡的滑移面,出露的岩体属中-强风化岩体。上游侧分界线表面明显可见顺滑动方向的擦痕,大量的碎石土、角砾土沿滑坡侧壁被雨水冲刷携带至坡脚堆积,见图10。

2 滑坡形成机理及破坏模式分析

2.1 成因机制分析

滑坡边坡整体为斜顺向坡,边坡层面(NW335°SW∠34°)及顺坡向陡倾裂隙构成的滑移面倾向偏下游侧,与边坡最大临空方向290°斜交,且层面倾角小于边坡坡角(42°~45°),加上边坡前缘因公路修建,开挖高度在5~15 m,创造了较好的滑移空

间,边坡坡型顺河向齐整,虽无天然冲沟构成边界,但具有明显的岩性分界和良好的临空条件。该边坡具备发生破坏的地形条件、结构条件和临空条件。

首先,层状斜坡是孕育滑坡的坡体结构条件,斜坡岩体缓倾坡外,坡体结构为中厚层状泥灰岩顺向坡,岩层倾角缓于地表坡度,陡坡地形为斜坡滑体的分离、解体提供了位移空间。滑坡上部岩层受力较弱,表现为破碎仍保留层状结构,而下部岩体应力分布较为集中,加之在裂隙切割等作用下,岩层解体分离。上游侧千枚岩提供了较好的侧缘边界,上游侧千枚岩岩性较软,构成了坡体强度低的侧缘边界,在斜坡应力作用下,导致上游侧斜坡沿弱面产生大的剪切变形,最终破坏。滑坡侧缘陡壁底部为泥灰岩,陡壁为千枚岩,覆盖层为碎石土,软硬岩体相交边界具有很好的侧缘分离条件。下游侧陡倾结构面提供了另一处侧源边界,滑坡下游侧分离面为节理J1,大量的长大正交节理起到了分离岩层的作用,相反长大结构面的的贯通和发展制约着边坡的变形迹象,也在一定程度上说明了本次变形发生在中下部,斜坡并未发生整体的破坏。另外调查发现发育有中陡倾角结构面、倾坡内的结构面,岩层受到两组优势节理以及后缘节理带分割,形成大小不一的块体,易发生崩塌、滑塌。岸坡岩体受裂隙切割影响,总体较破碎,岩体向垂河向解体。最后,公路开挖扰动坡脚改变临空条件,滑坡历史变形迹象揭露,岩层沿层面开挖坡脚滑移,滑体重力的作用使得岩体中滑面贯通,中上部高位滑体失去支撑,在重力主导作用下,沿层面向临空方向发生滑动,滑坡整体发生滑移-拉裂式破坏(图11)。

该滑坡临空条件好,边界分布明确,整体上并未完全破坏,是一个解体不彻底的滑坡。

2.2 破坏模式分析

2.2.1 平面滑动破坏模式

平面滑动破坏主要是沿着岩层软弱面如节理、破碎带、断层错动带、层面等发生滑动。该滑坡破坏

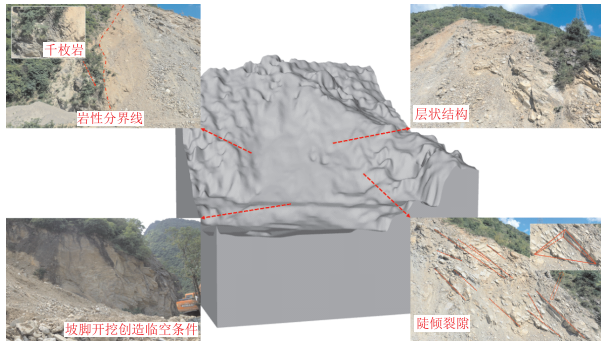


图 11 滑坡后的三维地形

机理为层面结构面的抗剪强度不足以提供相应的反力,从而导致岩层不稳定发生滑动破坏。该边坡具备产生滑动的必要条件:岩层层面的倾角小于边坡坡脚,在降雨或者坡脚开挖条件下层面结构面力学性质降低且前缘出现临空面,沿着临空面产生平面破坏,破坏模式示意如图 12 所示。

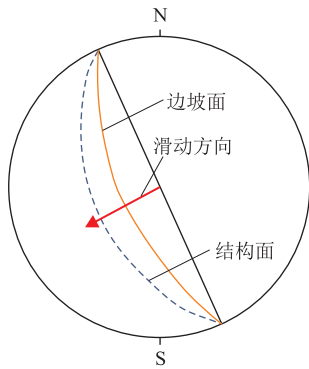


图 12 平面破坏模式示意图

2.2.2 楔形体破坏模式

在滑坡中,受到两条相交节理切割而形成的块体被称为楔形体。由于块体滑动需沿着结构面相交棱线处运动,滑动方向的倾角需要小于斜坡的坡脚,见图 13。

2.2.3 滑坡潜在破坏方式

滑坡将来在暴雨、地震及河流侵蚀等工况下,有局部解体、垮塌的可能。其破坏方式有 3 种:

- ① 滑坡堆积体表部的碎、块石垮塌、滑移进一步造成坡体临空条件。
- ② 坡体中上部,陡倾结构面切割层面向垂河方向或顺层向滑移的局部破坏。
- ③ 沿环形拉裂缝发生整体破坏。

3 滑坡破坏边界的确定

3.1 层面确定底部破坏边界

根据现场测量岩层和拉裂面的倾角和倾向来判

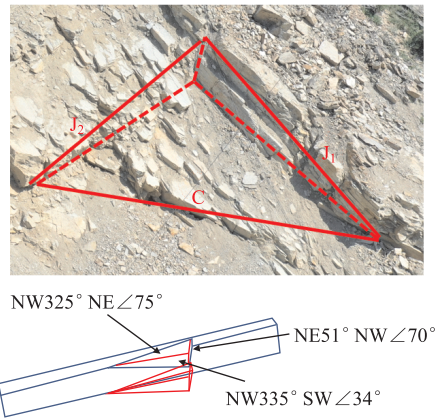


图 13 楔形破坏模式三维示意图

断滑体底界深度,滑坡正常基岩的岩层倾角在 34°左右,平均厚度 40 cm,后缘拉裂缝揭露产状为 NW291°SW∠75°,确定底部破坏边界主要有以下步骤:

- ① 依据最新无人机航拍测量的地形结果与原始地形线比较分析,确定碎石土分布厚度。
- ② 根据坡脚破坏边界以及岩层的倾角,确定底部滑移岩层边界。
- ③ 根据环形拉裂面位置以及后缘拉裂面的倾角,滑动走向与底部岩层组合,确定顶部滑移破坏边界。

根据上述步骤绘制滑坡 C-I-I'剖面底部破坏边界,见图 14。

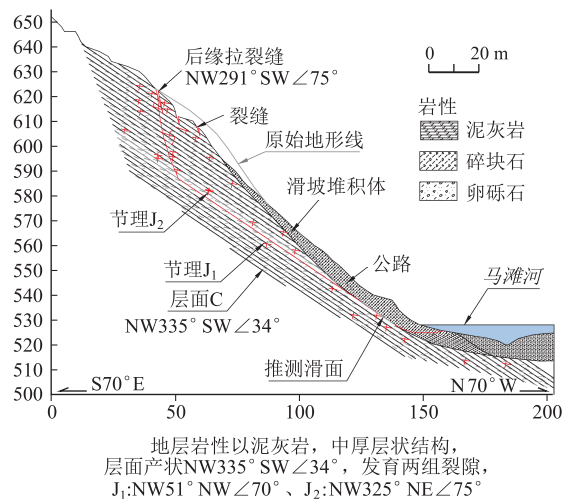


图 14 I-I'剖面

3.2 陡倾结构面确定局部破坏边界

岩体边坡局部破坏边界的确定是以长大结构面(包括断层、弱面和规模大的硬性结构面)的准确空间定位作为依据和先决条件。根据长大结构面的空间产出状态确定块体的分布位置、形状和规模,分析

其破坏方式,并依据结构面的性状和强度参数计算岩体在不同工况下的稳定性。本次研究过程及方法如下:

① 利用无人机航拍技术获得了边坡各部位地形的真三维数据,在此基础上利用开发的软件建立边坡地形的空间真三维模型。

② 利用点云数据测量得到的结构面要素,以真实迹长及根据延伸状态和趋势推测的长度为直径,建立结构面空间展布的圆盘方程。

③ 利用研究者开发的软件将长大结构面植入边坡地形空间真三维模型,建立边坡长大结构面空间定位模型,如图 15 所示。

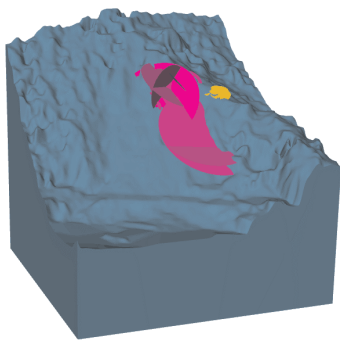


图 15 三维圆盘模型

通过对边坡下游侧陡倾结构面进行三维建模,获得工程边坡不同部位、不同剖面方向上内部结构面的展布特征,并与层面进行组合,分析形成块体的可能性。为了便于观察,边坡中仅展示贯入坡体部分的控制性长大结构面以及软弱结构面,得出边坡立面中结构面空间展布图。

边坡中上部发育的 NE/NW 走向中倾坡内硬性结构面 J1 和 J2,与岩层层面组合,若组合边界未贯通,则以岩桥考虑,II-II'剖面见图 16。

3.3 滑坡底部破坏边界分析

根据滑坡可能运动的方向和破坏方式,分别沿垂河向以及顺层向布置剖面,基于上述方法绘制 3 条剖面,坡面布置位置见图 17,III-III'剖面见图 18。

I-I'、II-II'、III-III'剖面揭露的滑坡堆积位于原始公路位置堆积体厚度最大,滑坡底部破坏边界厚度变化较大,I-I'、II-II'剖面最大滑坡深度 20~22 m,III-III'最大滑坡厚度 13~15 m。

4 结论

(1) 该滑坡是一个由中厚层状板岩及泥灰岩组成的斜顺向坡,边坡层面与边坡临空方向斜交;因公路修建导致斜坡下部坡脚开挖,使斜坡具备了沿层

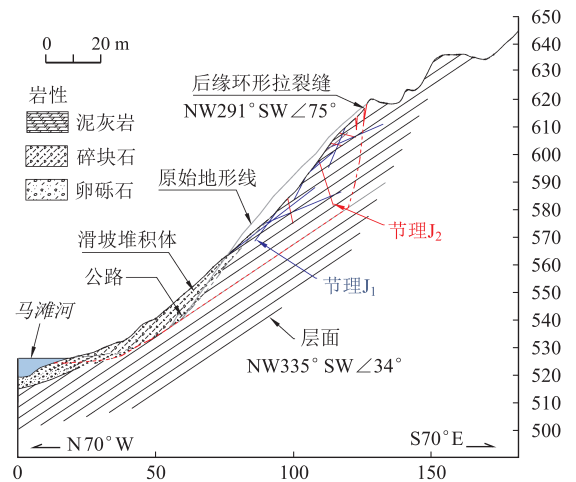


图 16 II-II'剖面

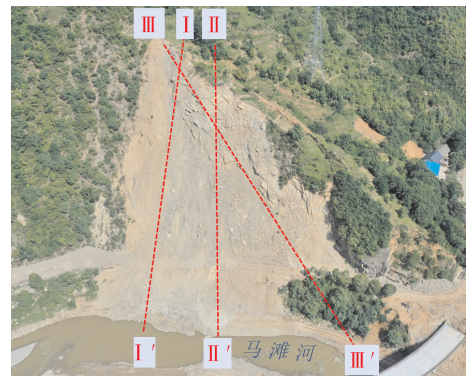


图 17 剖面布置位置

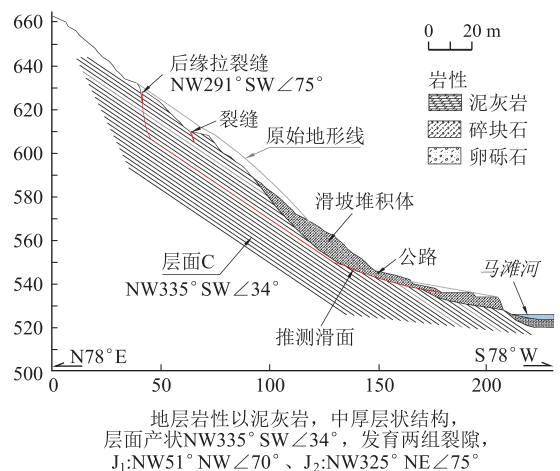


图 18 III-III'剖面

面滑动的临空条件,随后强降雨导致中下段发生滑移-拉裂式破坏。

(2) 边坡变形由环形拉裂缝及下游侧陡倾结构面控制。对其变形破坏特征分析表明,下游侧未解体岩体,岩层结构面 C1 构成滑体的底滑面,J1 组结构面(N35°~61°E/NW 65°~79°)长大结构面构成

滑体的下游侧滑面, J2 组结构面($N35^{\circ}W/NE/75^{\circ}$)反倾坡内层面构成滑体的后缘分离面。该滑坡整体上未完全破坏, 仍有部分欠稳定的坡体残留。

(3) 滑坡因公路修建, 开挖高度在 5~15 m, 创造了较好的临空条件; 上游侧千枚岩岩性较软, 构成了坡体强度低的侧缘边界; 下游侧陡倾长大结构面($N51^{\circ}E/NW/70^{\circ}$)的贯通和发展制约着边坡的变形迹象, 为斜坡提供了下游侧分离边界; 陡坡地形为斜坡滑体的分离、解体提供了位移空间, 其破坏边界分布明确; 后缘破坏边界距河道高差 105 m, 且地形较陡, 滑坡失稳后, 将有较大的运动距离。

(4) 通过对滑坡形成机理及破坏边界确定的研究, 可认为该滑坡的整体性较差, 未完全解体, 暴雨、地震工况下有失稳可能性较大, 建议在施工时对滑坡进行削坡挖除, 或进行喷锚治理。

参考文献

- [1] 黄润秋, 赵建军, 巨能攀, 等. 汤屯高速公路顺层岩质边坡变形机制分析及治理对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 239-246.
- [2] 吴坤. 渝湘高速公路某顺层滑坡渐进破坏机理及防治措施研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(5): 13-16.
- [3] 李安洪, 周德培, 冯君, 等. 顺层岩质边坡稳定性分析与支挡防护设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [4] 廖德武, 程娟. 软弱夹层顺层岩质滑坡形成机制及稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(2): 8-13.
- [5] 陈昌富, 何旷宇, 余加勇, 等. 基于无人机贴近摄影的高陡边坡结构面识别[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(01): 145-154.
- [6] 黄润秋. 岩石高边坡稳定性工程地质分析[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 8-10.

作者简介: 冯磊(1980—), 男, 高级工程师, 专业: 工程地质, 研究方向: 主要从事水利水电项目工程地质与水文地质研究及应用工作。
E-mail: 175530900@qq.com

《地质灾害与环境保护》征订启事

本刊主管单位: 四川省教育厅; 主办单位: 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。学术性期刊, 季刊。1990 年创刊, 国内外公开发行。大 16 开, 每期 112 页, 约 22 万字。欢迎订阅。

定价: 2008~2023 年每期定价 15 元, 全年 4 期, 年定价 60 元; 2005~2007 年每期定价 10 元, 全年 4 期, 年定价 40 元; 1991~2004 年过刊每套定价 154 元(包括: 总第 3 期~总 28, 30~53 期, 计 42 册); 也可分年分期选订: 1991~1993 年, 半年刊, 每册定价 1.00 元; 1994~1997 年, 季刊, 每册定价 2.00 元; 1998~1999 年, 季刊, 每册定价 3.00 元; 2000~2001 年, 季刊, 每册定价 4.00 元; 2002~2004 年, 季刊, 每册定价 5.00 元。

订阅办法

1. 2000 年起开始邮发, 邮发代号 62-140, 可在全国各地邮局订阅。
2. 本刊已参加“全国非邮发报刊联合征订”, 代号 5314 号。
3. 向本刊编辑部订阅: 请用邮局汇款。收款单位: 《地质灾害与环境保护》编辑部。
地址: 成都市成华区二仙桥东三路 1 号 成都理工大学; 邮政编码: 610059。
编辑部联系电话: (028)84078481。

《地质灾害与环境保护》编辑部

2023 年 9 月 25 日