6月

2024 年

岩土力学

# 变质岩类顺层边坡破裂迹象及边坡开挖失稳范围研究

Study on the Fracture Signs of Metamorphic Rock Bedding Slope and the Range of Slope Excavation Instability

刘健

(云南南方地勘工程有限公司,云南大理 671000)

摘 要:针对变质岩类顺层边坡的失稳模式及失稳范围研究,对于保障人民生命财产安全是有重要意义和 工程应用价值。以某工业园区石化场地拟开挖的变质岩类顺层边坡为研究对象,对试验段边坡地质环境、岩土 特征进行调查,建立边坡开挖失稳室内相似试验模型,获得边坡失稳破裂迹象及其形成机制。结果表明:以硬 性结构面为主的边坡,节理发育可见迹长3.0~7.0 m 居多,多呈张开状态;边坡变形破坏模式为坡面侵蚀冲刷 和滑移 – 拉裂,其中,滑移 – 拉裂破坏是此类边坡失稳破坏的典型且主要模式;当边坡以缓倾角(30°)开挖边 时,在3~5级边坡失稳范围较大,其裂缝张开宽度及向坡体内部延伸深度均较大,有多级失稳风险。研究成果 可为建立科学、合理的边坡稳定性及失稳范围预测评价方法提供有益支撑。

关键词:变质岩;顺层边坡;破裂迹象;边坡开挖失稳范围

中图分类号: U213.1+3 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0091-06 **DOI**:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.018

#### LIU Jian

(Yunnan Southern Geological Exploration Engineering Co., Ltd., Dali 671000, China) Abstract: The study of the instability mode and range of metamorphic rock bedding slopes is of great significance and engineering application value in ensuring the safety of people's lives and property. Taking the metamorphic rock bedding slope to be excavated at a petrochemical site in a certain industrial park as the research object, the geological environment and geotechnical characteristics of the experimental section slope were investigated, and an indoor similarity test model for slope excavation instability was established to obtain signs of slope instability and fracture and their formation mechanisms. The results show that for slopes with mainly hard structural planes, the visible trace length of joint development is mostly 3.0-7.0 meters, mostly in an open state; The deformation and failure modes of the slope are erosion erosion and sliding tensile cracking on the slope surface; Among them, slip tensile failure is a typical and main mode of instability and failure of such slopes; When the slope is excavated at a gentle inclination angle  $(30^{\circ})$ , the instability range of the 3-5 level slope is large, and the crack opening width and depth extending into the interior of the slope are both large, posing a multi–level instability risk. The research results can provide useful support for establishing scientific and reasonable methods for predicting and evaluating slope stability and instability range. **Keywords**: metamorphic rocks; bedding slope; signs of rupture; slope excavation instability range

0 引言

作者简介:刘健(1985—),男,硕士,高级工程师,研随着 究方向:岩土工程。 大, 收稿日期:2024-02-27

随着基础设施建设,层状岩体施工改造往往伴随着大量的地质问题,其失稳破坏发生率高、规模 大,造成的后果严重。

诸多因素影响顺层岩质边坡自稳性和开挖稳定

## 岩土力学

性。其中,内在因素除边坡形态、岩土体类型和节 理裂隙的发育情况外,还涉及坡体内部的应力状态、 地下水渗流和涨落情况、坡体内软弱夹层的分布和 工程地质特性等<sup>[1-3]</sup>;外因则主要是指施工因素、环 境因素(地震、降雨)等<sup>[4-6]</sup>。目前,针对顺层岩 质边坡的稳定性及开挖方式的研究仍属热点问题。 段彦超<sup>[7]</sup>选取滑坡在不同开挖方式条件下的稳定性 进行了施工模拟分析,形成了一系列开挖施工方案 和施工工艺; 胡英国等<sup>[8]</sup>使用三维 LS-DYNA 仿真云 平台对边坡在爆破开挖条件下的失稳破坏模式进行 了分析,提出了岩体累积损伤分析方法。但是,层 状边坡岩体具有独特的工程地质性质, 层状边坡岩 体结构沿岩层方向的抗剪强度参数较垂直方向要小 得多,呈现明显的各向异性<sup>[9-13]</sup>。对顺层岩质滑坡 的预测评价尤其是边坡失稳模式、稳定性以及失稳 范围等研究仍需开展专项研究。

以某工业园区内石化场地拟开挖的变质岩类顺 层边坡为研究对象,对试验段边坡地质环境、岩土 特征进行调查,通过三维电镜扫描技术试验解译长 大结构面和节理裂隙发育规律,对失稳破坏规律进 行分析研究,然后基于现代工程地质力学理论和相 似模拟原理,对边坡拟开挖形态的变形特征及失稳 范围进行物理试验模拟研究,探求边坡失稳迹象及 其形成机制。

#### 1 工程地质概况

研究区属于上扬子陆块内,构造单元上属于黔 中隆起的一部分,区域上受到毕节-金沙构造带和 遵义断裂两侧的挤压应力作用,整体位于后寨背斜 的北西翼。

试验段开挖边坡位于场区西南位置,边坡原始 地形为条形上坡,坡脚呈扇形,山坡坡度为15°~20°, 属于斜顺向坡。整个边坡高度为90 m。坡向为正北, 坡脚东西方向长176.6 m。岩层产状为360°~30° ∠25°~45°。如图1所示。

边坡岩体为三叠系中统关岭组第三段(T<sub>2g</sub>)强风化层状白云岩,厚度为5~1.0m不等,岩体局部 泥化严重,裂隙发育,尤其是长大裂隙雨水下渗侵 蚀严重,多有细小溶蚀痕迹,填充黄色或褐黄色泥 质夹层;三叠系中统关岭组第三段(T<sub>2g</sub>)中风化层 状白云岩,夹白云质灰岩,部分岩层夹杂黑色角砾 岩。该层出露厚度较大,部分岩体,含少量白云石、 黏土矿物,主要矿物成分为方解石,风化裂隙发育。 岩体质量以Ⅲ、Ⅳ级为主。岩土体参数见表1。



图 1 边坡试验段 Fig. 1 Slope test section 表 1 岩土体物理力学参数

Table 1	Physical and	mechanical	parameters	of rocks
I able I	i nysicui unu	meenumeu	purumeters	or rocks

岩性	风化	组数	比重 <i>G</i> s	抗压强度/MPa		软化	弾性 西号 F	泊松比
				干	温	示奴 K <sub>R</sub>	候里 L /GPa	μ
百二些	中风化	5	2.63	91.6	69.2	0.76	40.3	0.2
日ム石	强风化	8	2.63	75	56.9	0.7	34.6	0.25

研究段边坡主要存在泥化软弱夹层问题和陡倾 结构面问题。场区主要以关岭组碳酸盐岩地层为主, 地层中缓倾顺层的软弱夹层极度发育,夹层物质主 要有白色黏土矿物、砖红色和黄色泥质、黑色碳化 泥质;与此同时,边坡中还极度发育两组近垂直的 陡倾结构面,由于场区开挖原始地形大多三面临空, 因此,开挖之后,不同方向开挖的边坡也容易发生 不同破坏模式。如图2所示。

#### 2 边坡变形破坏特征

开挖边坡失稳破坏主要是两种: 坡面侵蚀冲刷 和滑移-拉裂。

#### 2.1 坡面侵蚀冲刷

坡面侵蚀冲刷主要发生在断层 f1 附近,从1~5 级边坡均存在冲刷沟壑(见图3),坡表冲刷物质堆 积于马道上,形成扇形或长条扇形堆积体。冲刷宽 度 50~120 cm,最大深度 110 cm。形成原因:①破 碎松散的岩体:由于地质构造挤压、剪切错动等作 用,断层附近边坡岩体层状碎裂,局部散体结构, 长期的雨水下渗导致岩体风化严重,岩体节理发育 密集且节理面多有填充,整体来说,岩体结构松散, 岩体之间相互黏结力损失;②岩体碎裂:边坡开挖



(a) 软弱夹层



(b) 陡倾结构面 图 2 边坡劣化工程地质现象 Fig. 2 Engineering geological phenomenon of slope deterioration



(a) 坡面冲刷沟壑





(c) 沟壑侧壁松散岩体

(b) 沟壑底部破碎岩体 图4 坡面侵蚀冲刷特征 Fig. 4 Characteristics of slope erosion and scouring

2.2 坡体滑移-拉裂

滑移-拉裂失稳:边坡为顺向中-缓倾边坡岩 层面为滑移面,沿着岩体优势节理面形成拉裂缝的 滑移-拉裂失稳边坡体。调查结果显示,试验段边 坡滑移-拉裂失稳部位主要是位于二级边坡0+5~ 0+25段。该失稳部分边坡体东西宽度为20m,剪出 部位位于边坡中下部,距离二级边坡坡脚约6m,后 缘拉裂缝位于边坡马道顶部,南北坡表距离为12.0 m。 该部分岩体呈层状次块状,发育三组结构面:产状为

N36°W/SE70°、N11°E/SE74°以及N355°E/SE78°、间 距一般为1.2 m,呈张开状,填充岩屑。后缘拉裂缝 由三组结构面延伸贯通形成,前缘部位主要是岩层 面剪出。边坡右侧边坡为 N11°E/SE74°结构面的延 伸形成, 左侧滑移边界则由 N36°W/SE70°结构面延 伸形成,深度为0.6~1.3 m,滑面即为层面,较平 整,风化一般,含有泥质填充。失稳部分边坡虽然 范围不大,但是具有继续扩大的迹象,同时也是该 段边坡失稳破坏的典型模式,为评价整体边坡提供

### 岩土力学

过程中,清除边坡表层黏土物质,为雨水下渗提供 了更好的条件,同时爆破施工以及机械开挖使得岩 体进一步碎裂化,为雨水冲刷形成沟壑提供了岩体 结构条件; ③强暴雨汇流: 场区强降雨多在6~9月 的雨季,具有降雨集中且强度大,降雨时间长伴有 雷电的特点。强降雨的集中且时间长在坡表汇流成 小股坡面激流,具有较强的冲刷侵蚀性,尤其是在 坡体结构较为松散部位顺坡而下形成冲刷初步沟壑。 已形成的坡表沟壑更易于汇流,且汇流后沿着既有 沟壑冲刷逐渐形成规模更大的沟壑, 使得坡体失稳 破坏。如图4所示。



图 3 边坡冲刷沟壑 Fig. 3 Slope scouring gully

93

岩土力学

了可靠的参考。破坏模式如图5所示。



#### 3 边坡开挖失稳范围模型试验

#### 3.1 边坡开挖方案

根据拟开挖边坡的场地条件规划,该边坡开挖 方案为:缓坡度分级开挖。设计开挖坡度为30°,每 一级边坡高度为10.0 m,共计9级,设计马道宽度 为2.0 m,坡向为正北,开挖高度为90.0 m,南北向 开挖长176.0 m。如图6所示。



3.2 试验方案

试验采用二维室内框架模型试验,结合实际试验条件和上述原型边坡的工况,建立试验模型的几何相似比为 *C* = 1:60。依据相似比理论的取值原则以及本次模型试验范围确定相似常数,选取 *C<sub>l</sub>* = 60, *C<sub>r</sub>* = 1.0。根据相似判据可以获得其他相关参数的相似比:  $C_{\sigma} = C_{l}C_{r} = 60; C_{l} = 60; C_{\mu} = C_{\varepsilon} = C_{f} = C_{\varphi} = 1;$  $C_{E} = C_{C} = C_{Rl} = C_{RC} = C_{\tau} = 55; (C_{l})^{1/2} = 7.75$ 

式中: C 为应力相似常数;  $C_l$ 为几何相似常数;  $C_r$ 为 重度相似常数;  $C_\mu$ 为泊松比相似常数;  $C_s$ 为应变相 似常数;  $C_f$ 为摩擦系数相似常数;  $C_g$ 为摩擦角相似 常数;  $C_E$ 为弹性模量相似常数;  $C_c$ 为凝聚力相似常 数;  $C_R$ 为抗拉强度相似常数;  $C_R$ с抗压强度相似常 数;  $C_7$ 为抗剪强度相似常数。

边坡模型采用具有一定厚度的试验块体搭建。 试块采用预制模具压制而成,主要材料为不同粒径 石英砂、石膏、水泥和水,按一定比例制成。根据 晶质白云岩、白云质灰岩的参数不同,采用的试验 材料不同。试验材料的重量配比见表2。

根据边坡坡体结构特征、岩体力学特性和模型 试验的要求,考虑岩层厚度的差异性,采用3种不同 厚度试块来模拟不同厚度的岩体,尺寸分别为: 15 cm×10 cm×3 cm; 15 cm×10 cm×2 cm; 15 cm× 10 cm×1 cm。层间夹层相似材料要具有强度低,遇 水易软化等特点。采取高岭土掺加部分细颗粒河沙 作为试验相似材料,其性状满足试验要求。

表 2 试验材料重量类比 (无量纲) Table 2 Test material weight analogy

模拟试块	重石晶粉	石英砂	石膏	水
晶质白云岩	0.37	0. 445	0.102	0.015
白云质灰岩	0.42	0.456	0.091	0.017

3.3 模型搭建及监测

试验模型箱内框长 2.5 m,高 2.4 m,宽 0.6 m, 前无遮挡后有挡板,模块养护好之后,按照原始拟 开挖边坡的坡型、坡体结构进行搭建。首先,在模 型底部采用混凝土砖块搭建前低后高,坡度为 25°的 斜坡作为基础,形成原始边坡倾斜岩层,然后依次 铺设试块。在铺设过程中每一组分界面铺设软弱夹 层相似材料。由于受搭建模型技术限制,软弱夹层 厚度设置为 0.1~0.5 cm,尽量做到平整。不设置软 弱夹层试块层间采用细沙、滑石粉混合物抹平。节 理裂隙以同一层模块之间不黏结来进行模拟。试验 模型搭建完成以后需要静置 6 h 以上,待模型整体趋 于稳定状态后,按照设计方案进行开挖。

试验前根据相似计算尺寸,标示拟开挖坡型线, 由上至下依次开挖。每开挖一级后,布置的拉线式 位移监测计分别在 30 min、1 h、2 h、4 h、8 h 进行 读数,直至监测数据稳定,再进行下一级开挖。

按几何相似比换算开挖线的尺寸并标示在模型 边坡上。试验边坡每级高 16.67 cm,共计 150 cm/9 级,开挖设计坡度为 30°。试验模型侧面涂擦白色薄 层石膏(对边坡变形失稳影响微小,可以忽略不 计),标识 10.0 cm 方格网,以便监测记录变形特征 及范围。同时,设置拉线式位移监测计,监测点设 置于开挖线下方。

3.4 试验结果分析

边坡开挖过程变形失稳演化。第1~3级边坡开 挖后,边坡位移小,主要集中在浅表部位;4~6级 边坡的开挖,整体位移变形幅度变大;在开挖3~4 级坡面部位变形幅度最大,裂缝明显,位移距离为 0.18 mm, 换算原始场地边坡为 13.6 mm, 垂直坡面 最大距离为10.8 cm, 换算原始边坡为6.48 m; 7~9 级边坡开挖后,在4~6级坡表出现明显沿层面滑移 失稳, 坡体裂缝增加且宽度增大; 对开挖试验边坡 进行模拟降雨试验。采用人工喷洒方式,对开挖边 坡模拟降雨。边坡首先从6级边坡坡脚开始顺层向下 滑移, 层间发生由下向上相对错动位移, 竖向拉裂 缝由表及里,由上及下依次发展至最终失稳破坏。 开挖顺层边坡变形失稳范围是有限的,在实际工程 边坡中,当位于坡体内部某一点的位移值小于某一 特定值时,则可判定该点以内(位移小于特定值) 的部分是稳定状态。因此, 位移安全阈值的确定需 要结合边坡开挖失稳过程进行动态分析,基于大量 工程实践和经验准则确定采用位移α=5.0 mm 为阈 值,故借鉴参考这一阈值。边坡变形失稳主要是沿 着层面滑移,故建立坡体内的坐标系 XOY。确定坡 体内在 OX 方向位移为  $\alpha$  = 5.0 mm 的 A 点并标示, 沿坡面平移坐标系 XOY 沿开挖坡面以此类推,可以 得到坡体内部多个沿层面位移为  $\alpha = 5.0$  mm 的点, 依次连接点得到一条光滑曲线,即为预测评价的失 稳范围。在边坡位移监测点中间区采用线性数值插 分方法计算坡体位移。故根据上述位移监测成果 (见图7), 按照阈值  $\alpha$  = 5.0 mm 绘制试验模型边坡 失稳范围,如图8所示。

通过对模型边坡进行开挖、降雨试验至变形破 坏整个演化过程的分析,可以得出以下几点结论: 边坡以缓倾角(30°)开挖,在3~5级边坡失稳范 岩土力学

围较大,其裂缝张开宽度及向坡体内部延伸深度均 较大,但边坡整体稳定性较好;缓倾角开挖边坡变 形失稳模式为滑移-拉裂,由下及上,由表及里牵 引式渐进失稳演化机制,尤其是在边坡降雨后,层 间软弱夹层软化,强度降低表现最为突出、明显; 岩层缓倾角 (25°),缓坡度开挖 (30°)的含多层软 弱夹层的顺层岩质边坡,其变形破坏范围深度为 15.0~35.0 m,且易于形成多级失稳坡体。



#### 4 结论

本文依托某变质岩类顺层边坡背景,通过调 查获得了试验场地地质特征,并通过室内试验分 析了变质岩类顺层边坡失稳迹象和机制。得到以 下结论:

(1)变质岩类顺层边坡变形破坏模式为坡面侵 蚀冲刷和滑移-拉裂。其中,滑移-拉裂破坏此类 边坡失稳破坏的典型且主要模式。

(2)缓倾角(30°)开挖边坡变形失稳模式以滑移-拉裂为主,在3~5级边坡失稳范围较大,其裂缝张开宽度及向坡体内部延伸深度均较大,有多级失稳风险。

95

# 岩土力学

#### 参考文献

- [1] 曾胜,李振存,韦慧,等.降雨渗流及干湿循环作用下红砂岩 顺层边坡稳定性分析 [J]. 岩土力学,2013,34 (6):1536-1540.
- [2] 李得建, 贾文韬, 程肖, 等. 阶梯状滑动断续节理顺层边坡稳 定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (11): 2125-2134.
- [3] 邓华锋,齐豫,李建林,等.水-岩作用下断续节理砂岩力学 特性劣化机理 [J]. 岩土工程学报,2021,43 (4):634-643.
- [4] 朱雷,黄润秋,严明,等. 基于裂纹扩展模式的岩质斜坡阶梯 状滑移破裂机制研究 [J]. 岩土工程学报,2017,39 (7): 1216-1224.
- [5] 许宝田,钱七虎,阎长虹,等. 多层软弱夹层边坡岩体稳定性及加固分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2009,28 (增刊2): 3959-3964.
- [6] 穆成林,裴向军,王睿,等.基于物理模型试验的含多层软弱 夹层顺层开挖高边坡变形破坏特征分析 [J].中国地质灾害与 防治学报,2022,33 (3):61-67.

- [7] 段彦超.不同开挖方式条件下滑坡体的稳定性评价研究 [D]. 中国海洋大学,2003.
- [8] 胡英国,卢文波,金旭浩,等. 岩石高边坡开挖爆破动力损伤的数值仿真 [J]. 岩石力学与工程学报,2012 (11):2204-2213.
- [9] 刘新荣,许彬,刘永权,等.频发微小地震下顺层岩质边坡累 积损伤及稳定性分析 [J].岩土工程学报,2020,42 (4): 632-641.
- [10] 龙建辉, 任杰, 曾凡桂, 等. 双软弱夹层岩质滑坡的滑动模式 及变形规律 [J]. 煤炭学报, 2019, 44 (10): 3031-3040.
- [11] 黄达,马吴,石林.反倾层状岩质边坡倾倒变形机理与影响因素的离散元模拟[J].吉林大学学报:地球科学版,2021,51
  (6):1770-1782.
- [12] 李彦奇,黄达,孟秋杰.基于离心机和数值模拟的软硬互层反 倾层状岩质边坡变形特征分析 [J].水文地质工程地质, 2021,48 (4):141-150.
- [13] 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.

endere a contraction of the cont

(上接第90页)

且其对应不同状态条件下的信息量介于 -0.5983 ~ 0.4051,其中,[0~300 m)状态对应的易发程度相对最高;[4000~6000 m)状态对应的易发程度相对最低。

(5) 地层岩性因子。在不同地层岩性条件下, "黄土类斜坡"对应的信息量为 0.5286, "黏性土类 斜坡"对应的信息量为 -0.2456, "碎石类斜坡"对 应的信息量为 -0.2984, 以"黄土类斜坡"的易发 程度相对最高。

#### 5 结论

通过确定性系数法及信息量模型的地质灾害敏 感因子分析及易发性评价,主要得出以下结论:

(1) 渑池县县域内地质灾害孕灾因子主要包括 地貌因子、高程因子、坡度因子、地质构造因子及 地层岩性因子,并通过敏感性分析,得出5类因子的 敏感性由强至弱排序为高程因子、坡度因子、地质 构造因子、地貌因子、地层岩性因子。

(2) 通过易发程度分析,得出5类孕灾因子或 其状态的易发程度信息量存在较大差异,按照总信 息量计算结果,得出5类因子或其状态对引发灾害的 贡献程度排序依次为地层岩性因子、地质构造因子、 高程因子、地貌因子和坡度因子。

#### 参考文献

- [1] 刘铁铭, 郭有金, 刘艳领. 基于聚类算法优化样本的地质灾害 易发性评价 [J]. 人民长江, 2023, 54 (3): 117-124.
- [2] 郑景莹,谈树成,王超,等. 基于 CF PCCs 模型的维西县滑 坡致灾因子敏感性分析 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023,45(2):369-378.
- [3] 刘阳,尚慧,占惠珠,等.评价单元对地质灾害易发性评价的影响[J].科学技术与工程,2022,22 (35):15536-15545.
- [4] 李霞,宿星,张满银,等.基于证据权法与多源数据的陇中生态脆弱区滑坡敏感性评价——以天水市为例 [J].冰川冻土,2023,45 (1):67-79.
- [5] 薛永安, 邹友峰, 张文志, 等. 基于 SVM 的地下采煤区沉陷灾 害发育敏感性分区研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50 (10): 108-118.
- [6] 徐奎,潘昊,宾零陵,等.基于强化学习的海南岛山洪灾害易发 性评估[J].水资源保护,2023,39 (2):95-100.