

某缓倾顺层红层软岩边坡稳定性及防治效果评价

于 宇¹, 冯 瑞¹, 郑百录², 黄悦恒¹

¹核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都

²四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年6月25日; 录用日期: 2024年7月15日; 发布日期: 2024年7月29日

摘 要

以西南地区某顺层红层软岩边坡为例, 介绍了边坡的岩性特征、形态特征、岩体结构特征、岩体完整程度, 分析了顺层边坡变形破坏模式, 对原始边坡和开挖边坡进行了稳定性分析, 并针对治理措施, 进行了数值模拟计算, 评价治理后边坡的安全状态。

关键词

红层, 顺层边坡, 软岩边坡, 稳定性分析

Evaluation of the Stability, Preventions and Control Effect of a Bedding Low-Angled Red-Bed Soft Rock Slope

Yu Yu¹, Rui Feng¹, Bailu Zheng², Yueheng Huang¹

¹Nuclear Industry Southwest Survey & Design Institute Co., LTD, Chengdu Sichuan

²Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute LTD, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 25th, 2024; accepted: Jul. 15th, 2024; published: Jul. 29th, 2024

Abstract

Take a Bedding Red-Bed Soft rock Slope in southwest China as an example, this essay introduces its lithological characteristics, morphological characteristics, rock mass structure characteristics and rock mass integrity, analyzes the deformation and failure mode of the Bedding slope, as well

文章引用: 于宇, 冯瑞, 郑百录, 黄悦恒. 某缓倾顺层红层软岩边坡稳定性及防治效果评价[J]. 土木工程, 2024, 13(7): 1250-1259. DOI: 10.12677/hjce.2024.137135

as the stability of the original slope and the excavated slope. According to the treatment measures, the numerical simulation calculation was also carried out to evaluate the safety state of the slope after treatment.

Keywords

Red-Bed, Bedding Slope, Soft Rock Slope, Stability Evaluation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

红层在我国主要是指中生代以来即三叠系、侏罗系、白垩系和新生代古近系的湖相、河流相、河湖交替相或是山麓洪积相等陆相碎屑岩，多以夹层互层出现。我国西南地区红层广泛分布，随着工程建设日益加快，山区及库岸红层边坡切坡失稳案例屡见不鲜[1]，据统计，红层滑坡案例中，有众多滑坡属于缓倾顺层滑坡[2]-[5]。对于红层边坡的相关研究较多，也取得了丰富的理论研究成果及工程实践成果[6]。

本文以典型的缓倾顺层红层边坡为研究对象，分析边坡失稳机理，运用公式计算及数值模拟手段，分析边坡稳定性，对边坡防治效果进行评价，优化和指导边坡防治设计。

2. 边坡基本特征

2.1. 边坡岩性特征

边坡多被第四系土层覆盖，在剖面上，边坡上部地层主要为第四系全新统残坡积层(Q_4^{el+dl})及第四系全新统崩滑堆积体($Q_4^{col+del}$)、第四系全新统坡洪积层(Q_4^{dl+pl})，基岩为白垩系下统灌口组下组(K_1g^1)。

覆盖层：含碎石粉质粘土，褐黄色，可塑，韧性较好，干强度较高，稍有光泽，无摇振反应，含碎石、角砾，母岩岩性为泥质粉砂岩，中等风化，粒径一般 0.2~20 cm，均呈棱角状。主要分布于斜坡坡顶及斜坡表层，厚度 0.6 m~10.6 m。斜坡坡脚、沟道附近主要分布坡洪积的含砾粉质粘土，褐黄色、灰红色，多呈可塑状，局部软塑，韧性中等，干强度较高，稍有光泽，无摇振反应，角砾含量约 15%~20%，角砾母岩岩性为泥质粉砂岩、粉砂质泥岩，中等风化，粒径一般 0.2~2 cm，局部夹碎石，最大粒径约 50 cm，均呈棱角状。该层厚度 0.5~3.7 m。

2.2. 边坡形态特征

边坡东西两侧以坡向变化处界，后缘以山脊为界，顺坡向长约 100 m，沿山脊走向宽约 90~100 m，边坡坡向约 8°。自然边坡坡高 42~48 m，边坡坡面呈折线形：坡顶山脊为宽缓平台，坡度 5~10°，中部发育多级台阶，平均坡度约 28~35°，前缘相对较缓，坡度约 20° (图 1)。

2.3. 边坡岩体结构特征

(1) 层面

边坡岩层产状为 $350^\circ \angle 10^\circ$ ，呈薄~中厚层状，除发育泥化夹层处的岩层层面结合较差外，其余岩层层面为泥质胶结，局部见有铁锰质浸染，为硬性结构面，层面之间结合紧密，可见泥裂、波痕等层面构造。

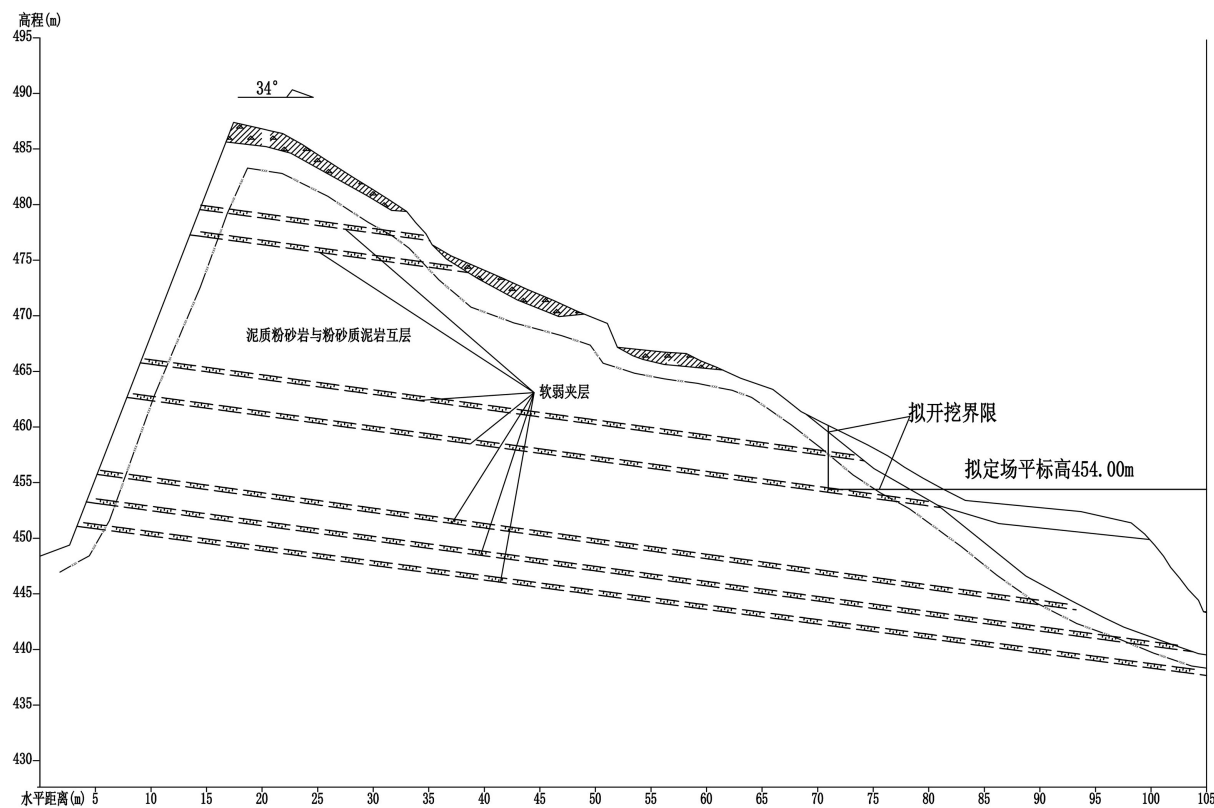


Figure 1. Section diagram of slope profile
图 1. 边坡剖面图

(2) 泥化夹层

该区边坡发育多层泥化夹层，其均位于岩层层面处，多发育在粉砂质泥岩与泥质粉砂岩或细砂岩的不同岩性接触层面上，部分发育在同一岩性层面。

主要由层间构造错动、蠕滑及地下水软化形成。泥化夹层在坡面上呈带状展布，分布连续，厚度为3~8 cm。泥化夹层主要由软塑~可塑状粘土组成，下伏基岩面见擦痕和镜面；泥化夹层主要由黄褐色软塑状粘土及碎屑组成，碎屑粒径一般为0.2~3 cm，呈次棱角状，局部略有磨圆，角砾及碎屑呈定向片状排列(图 2)。



Figure 2. Silty interlayer
图 2. 泥化夹层

(3) 节理裂隙

受区域构造应力的作用，区内岩体构造节理十分发育，最为发育的是两组“X”型共轭剪节理。分布于灌口组中等风化岩体内，为剪切节理，产状比较稳定，节理面平直~稍曲，其延长和延伸规模较大。中等风化岩体内的节理面上见有红褐色铁质膜、灰白色钙质膜，一般无充填，局部少量泥质充填，多呈闭合~微张状态(图 3)。



Figure 3. “X” type conjugated shear joints
图 3. “X” 型共轭剪节理

对区内 76 条节理裂隙进行了统计，见图 4、图 5。两组“X”型共轭剪节理分别为：① LX1：产状 $116^{\circ}\sim 153^{\circ}$ ($296^{\circ}\sim 333^{\circ}$) $\angle 70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，发育间距 0.1~0.5 m，裂隙面多平直，较粗糙，多闭合，部分微张且向深部闭合，裂隙沿走向长一般 0.6~5.5 m；② LX2：产状 $199^{\circ}\sim 255^{\circ}$ ($19^{\circ}\sim 53^{\circ}$) $\angle 77^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，发育间距 0.1~0.6 m，裂隙面多平直，较粗糙，多闭合，裂隙沿走向长一般 0.5~6.6 m。LX1 与 LX2 为平面“X”型节理，推测该区最大主应力方向为近东西向，与区域最大主应力方向一致。

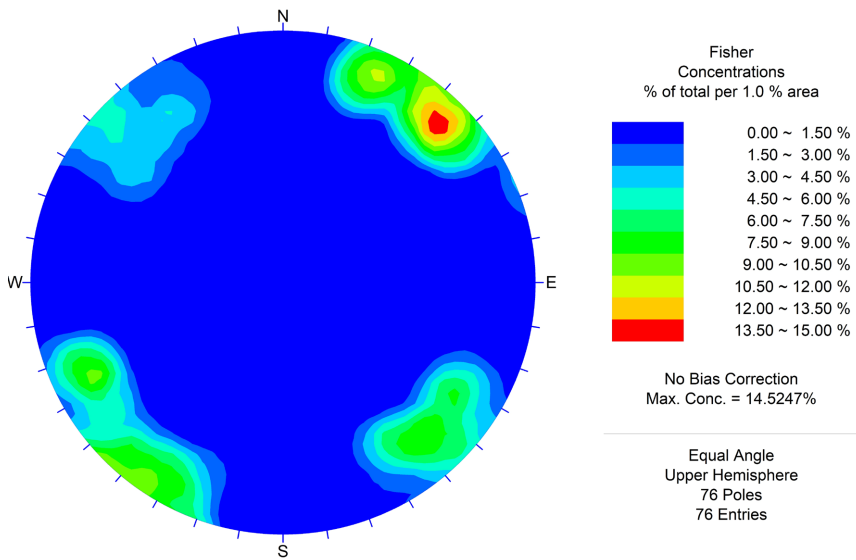


Figure 4. Fractal density map of fissure pole points
图 4. 裂隙极点等密图

除 LX1、LX2 外，还发育其它次要节理，这些节理较为零散。由于以上节理裂隙较为发育，破坏了岩体的完整性，同时成为地下水的良好通道，是破坏边坡稳定性的不利因素。

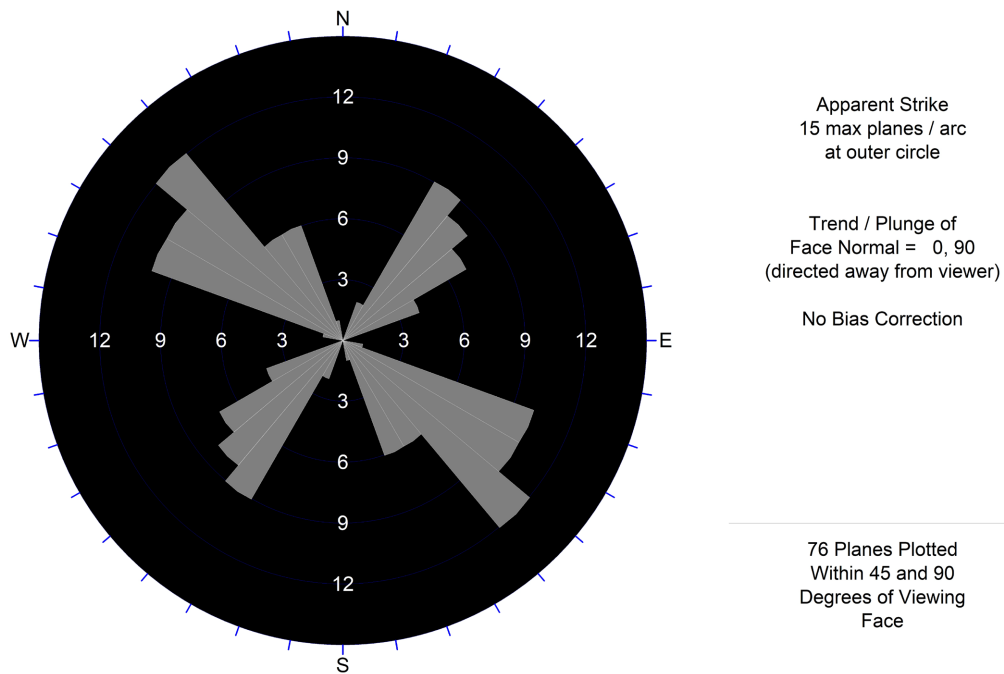


Figure 5. Fracture orientation rose diagram
图 5. 裂隙走向玫瑰花图

3. 边坡岩体完整程度

区内岩性主要为粉砂质泥岩与泥质粉砂岩薄互层，层理、节理发育，结构体类型主要为层状。根据工程地质测绘及钻探结果，边该边坡岩体结构类型主要为层状结构，局部为碎裂结构。

岩体的完整性受岩体结构面发育程度及其组合控制，根据现场工程地质测绘及钻探，该段边坡发育结构面主要为层面、X 型共轭剪节理，强风化岩体岩芯多呈碎块、薄片状，中风化岩体多呈短柱~柱状，少量呈碎块状，裂面多浸染铁锰质。并结合钻孔声波测试及压水试验，综合确定强风化岩体完整性程度为破碎~较破碎，中风化岩体完整性程度为较破碎~较完整。

4. 边坡稳定性分析

4.1. 边坡变形破坏模型

边坡岩层层面外倾，层面间发育泥化夹层及破碎带，陡倾节理发育，其中陡倾节理对边坡的影响主要是切割岩体，构成被切割岩体的侧边界及后缘边界，而边坡的层面和软弱夹层构成岩体的顶底边界，软弱夹层沿层面发育，其产状和岩层产状一致，是最不利结构面；倾向坡外的泥化夹层既构成岩体的底边界，且软弱夹层分布连续，是岩体易于滑动的软弱面。滑动块体大小的由后缘发育的张节理控制。而边坡发育的陡倾裂隙为不稳定岩体脱离母体提供了条件，在边坡蠕变过程中，沿陡倾裂隙追踪发育拉张裂隙，形成边坡破坏的后缘边界。

因此，边坡的陡倾裂隙面及软弱夹层面分别构成了边坡发生破坏的侧边界、后缘边界及底边界，其破坏模式为在边坡蠕变过程中，逐渐形成后缘拉裂，沿软弱夹层发生整体破坏(图 6)。

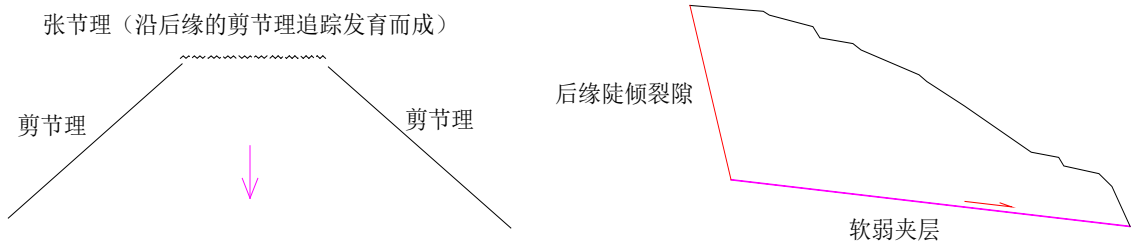


Figure 6. Slope failure mode
图 6. 边坡破坏模式

4.2. 开挖前后边坡稳定性分析

根据边坡变形破坏模式分析，边坡沿泥化夹层发生滑动变形，稳定性分析时，以每一层泥化夹层作为底边界，采用极限平衡法计算潜在滑面稳定性(表 1)。

稳定性计算公式如下式[3] [7]:

$$K_f = \frac{(W(\cos \alpha - A \sin \alpha) - V \sin \alpha - U) \tan \phi + CL}{W(\sin \alpha + A \cos \alpha) + V \cos \alpha}$$

式中: W ——滑坡体自重与建筑等地面荷载之和(KN/m);

C ——滑面粘聚力标准值(kPa);

ϕ ——滑面内摩擦角标准值(°);

A ——水平地震影响系数;

V ——后缘裂隙静水压力; $V = \frac{1}{2} \gamma_w H^2$;

U ——滑面扬压力; $U = \frac{1}{2} \gamma_w LH$;

L ——滑面长度;

α ——滑面倾角。

Table 1. Results of stability calculation
表 1. 稳定性计算成果

| 潜在滑面 | 工况 | 荷载组合 | 自然边坡 | | 开挖边坡 | |
|--------|----|------|-------|------|-------|------|
| | | | 稳定性系数 | 稳定性 | 稳定性系数 | 稳定性 |
| 沿泥化夹层① | 1 | 天然 | 1.74 | 稳定 | 1.74 | 稳定 |
| | 2 | 暴雨 | 1.32 | 基本稳定 | 1.32 | 基本稳定 |
| | 3 | 地震 | 1.17 | 基本稳定 | 1.17 | 基本稳定 |
| 沿泥化夹层② | 1 | 天然 | 1.61 | 稳定 | 1.61 | 稳定 |
| | 2 | 暴雨 | 1.36 | 稳定 | 1.36 | 稳定 |
| | 3 | 地震 | 1.22 | 基本稳定 | 1.22 | 基本稳定 |
| 沿泥化夹层③ | 1 | 天然 | 1.53 | 稳定 | 1.26 | 基本稳定 |
| | 2 | 暴雨 | 1.3 | 基本稳定 | 0.98 | 不稳定 |
| | 3 | 地震 | 1.13 | 基本稳定 | 1 | 欠稳定 |
| 沿泥化夹层④ | 1 | 天然 | 1.36 | 稳定 | 1.28 | 基本稳定 |
| | 2 | 暴雨 | 1.22 | 基本稳定 | 0.89 | 不稳定 |
| | 3 | 地震 | 1.09 | 基本稳定 | 1.03 | 欠稳定 |

根据计算成果可知,在边坡未开挖自然状态下,边坡处于基本稳定~稳定状态,由于边坡开挖,坡体中部~坡顶未受影响,坡脚附近由于开挖切脚,坡脚附近两条泥化夹层控制的边坡稳定性急剧降低,处于不稳定~基本稳定状态。

4.3. 治理效果分析

针对开挖对边坡造成了影响,边坡进行了相应的支护设计,设计采用坡脚抗滑桩 + 格构锚索 + 截排水措施,设计剖面见图 7。

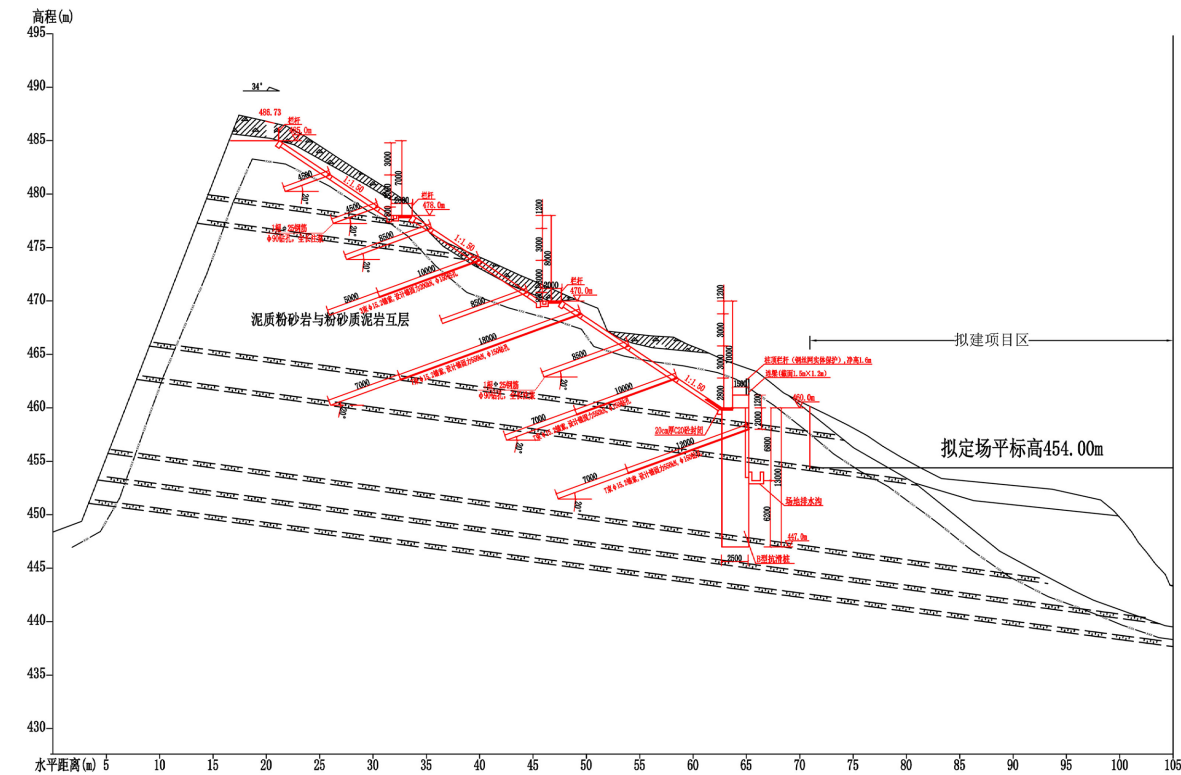


Figure 7. Slope support design drawings
图 7. 边坡支护设计图

支护效果的评价采用 MIDAS/GTSNX 软件,建立边坡分析的有限元模型,利用 GTXNX 有限元提供的 SRM (强度折减法)计算分析支护后边坡的安全系数,并得到其安全系数对应的等效塑性区(潜在滑面),分别计算天然、暴雨以及地震工况。

根据边坡的工程地质条件、坡体结构等特征,边坡的高度、坡度,建立数值计算模型,如图 8 所示;其支护结构如图 9 所示。模型总长约为 125 m,模型总高度约为 58 m,边坡高度约为 28 m。

通过计算可以得出各工况安全系数如下表 2 所示,计算云图如下图 10~12 所示。

Table 2. Stability calculation results table
表 2. 稳定性计算结果表

| 计算工况 | 稳定性系数 | 稳定性评价 |
|------|-------|-------|
| 天然工况 | 1.85 | 稳定 |
| 地震工况 | 1.72 | 稳定 |
| 暴雨工况 | 1.53 | 稳定 |

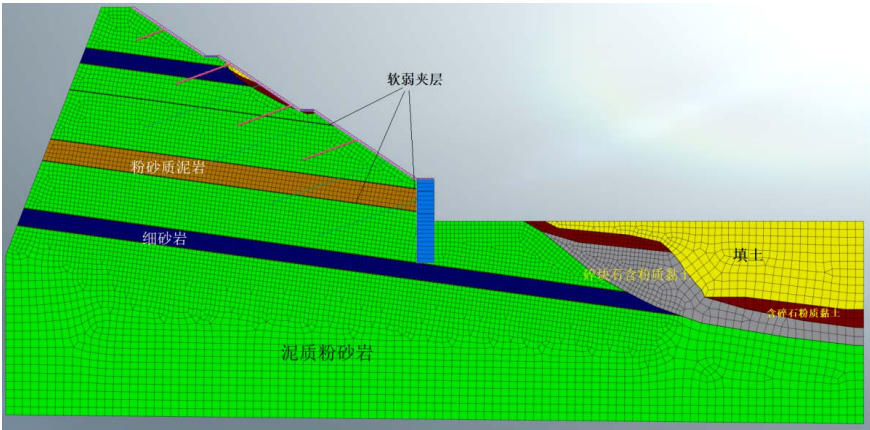


Figure 8. Slope model diagram
图 8. 边坡模型图

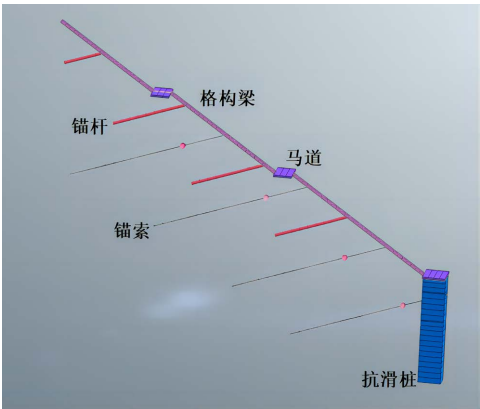


Figure 9. Slope support structure diagram
图 9. 边坡支护结构图

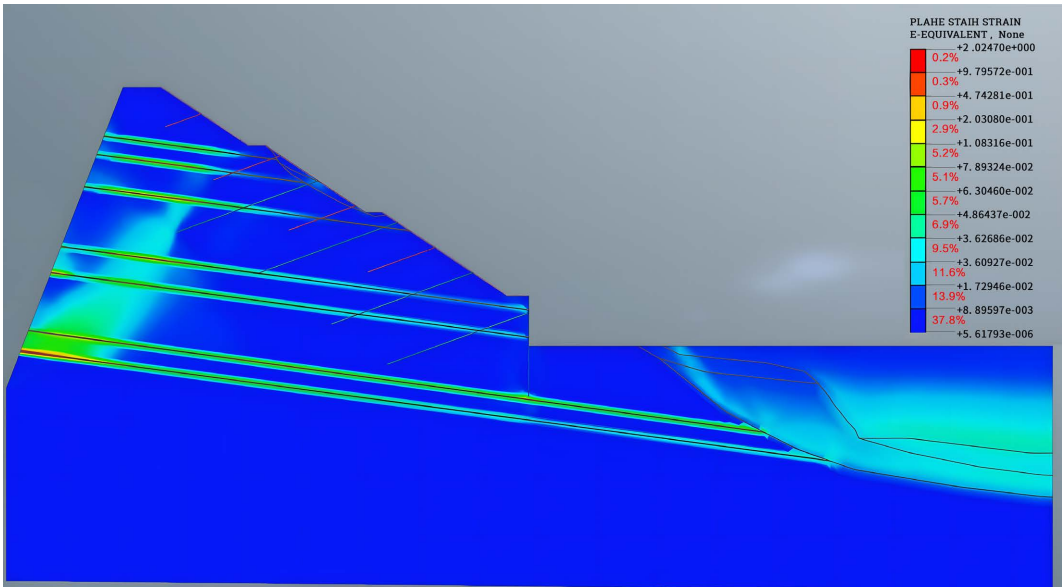


Figure 10. Natural operating condition stability calculation of plastic zone contour plot
图 10. 天然工况稳定性计算塑性区云图

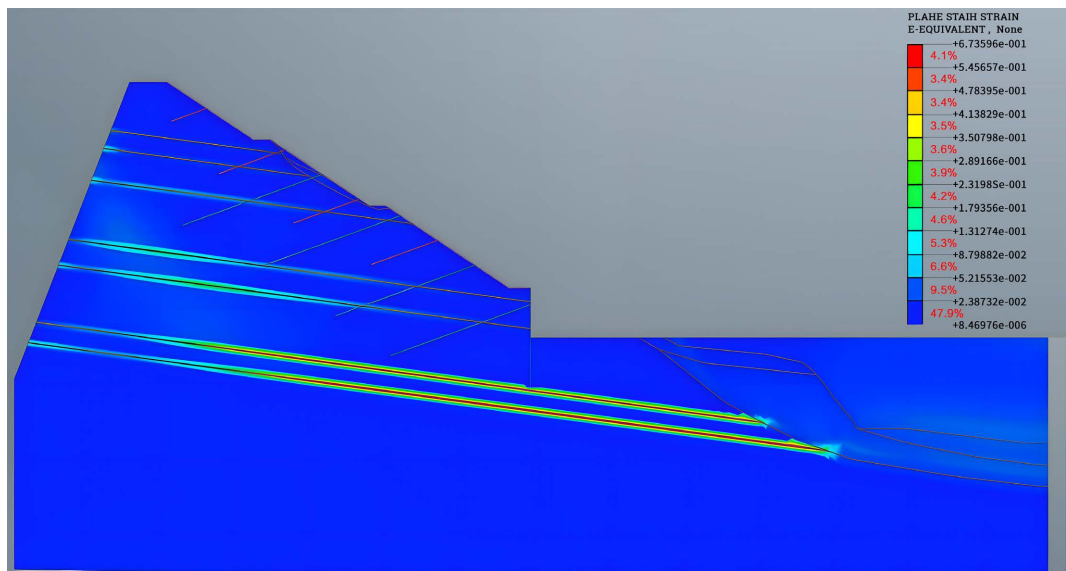


Figure 11. Seismic condition stability calculation plastic zone contour map
图 11. 地震工况稳定性计算塑性区云图

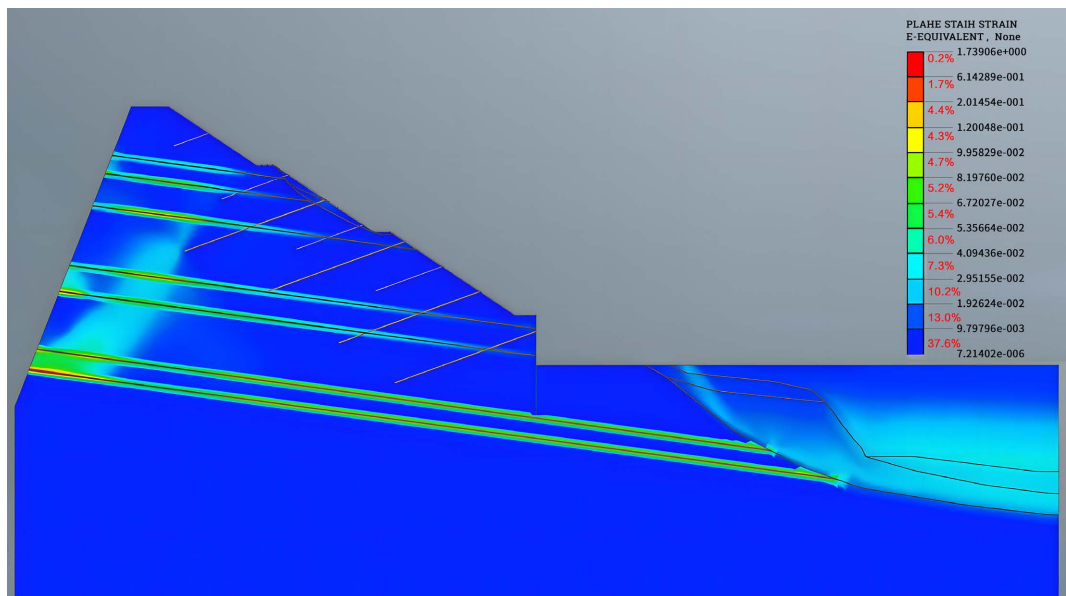


Figure 12. Stability calculation of the plastic zone cloud map of the rainstorm condition
图 12. 暴雨工况稳定性计算塑性区云图

由计算结果和成果云图可知，支护后的边坡各工况下均处于稳定状态，主要的塑性区依然是沿泥化夹层逐渐发展，由于支护措施的支挡，边坡是安全的。

运用数值模拟手段对支护后边坡进行效果评价，较直观的看到边坡稳定性情况及易发生变形破坏的区域，也能有效指导和优化设计。

5. 结语

- 1、控制缓倾顺层红层软岩边坡稳定性的主要因素是层间泥化夹层与后缘陡倾结构面的组合。
- 2、在勘察过程中应注意查明层间泥化夹层的分布，在稳定性评价中以泥化夹层作为主控面进行计算。

- 3、数值模拟能有较直观的反应支护后边坡稳定性状态及易出现塑性变形的区域。
- 4、运用数值模拟分析边坡稳定性既是验证也有有效指导和优化设计。

参考文献

- [1] 程强, 寇小兵, 黄绍祺, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004(1): 34-40.
- [2] 杨皓然. 缓倾顺层红层软岩切坡失稳机制及预控措施研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [3] 骆银辉, 朱春林, 李俊东. 云南红层边坡变形破坏机制及其危害防治研究[J]. 岩土力学, 2003(5): 836-839.
- [4] 程强. 红层软岩开挖边坡致灾机理及防治技术研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [5] 史文兵, 李洪建, 曾臻, 等. 平缓反倾红层边坡变形破坏机制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 881-888
- [6] 孙军杰, 王兰民, 龙鹏伟 等. 地震与降雨耦合作用下区域滑坡灾害评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 752-760.
- [7] 张倬元. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2016.