

基于有限元模拟法的某边坡稳定性分析

唐黔^{1,2}, 肖康³

¹湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南 长沙

²中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

³桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年5月9日; 录用日期: 2026年6月1日; 发布日期: 2026年6月11日

摘要

以桂林市平乐县凤凰山滑坡为研究对象, 在分析其工程地质条件与变形特征的基础上, 采用ABAQUS有限元软件结合强度折减法, 对四个典型剖面在天然与暴雨饱和工况下的稳定性开展数值模拟。结果表明, 滑坡稳定性主要受顺向坡结构、软弱结构面、构造裂隙及坡脚开挖等因素控制。天然工况下, 各剖面稳定系数介于1.01055~1.03446之间, 整体处于欠稳定状态; 暴雨工况下, 稳定系数降至0.79616~0.87147, 整体处于不稳定状态。研究认为, 降雨是滑坡失稳的关键诱因, 有限元模拟可较好地反映滑坡的变形破坏机制与稳定性变化规律。

关键词

滑坡, 有限元法, 稳定性分析, 强度折减

A Slope Stability Analysis Based on Finite Element Simulation Method

Qian Tang^{1,2}, Kang Xiao³

¹Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan Province, Changsha Hunan

²School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

³School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi

Received: May 9, 2026; accepted: June 1, 2026; published: June 11, 2026

Abstract

Taking the landslide in Fenghuang Mountain, Pingle County, Guilin City, as the research object, based on the analysis of its engineering geological conditions and deformation characteristics,

文章引用: 唐黔, 肖康. 基于有限元模拟法的某边坡稳定性分析[J]. 土木工程, 2026, 15(6): 25-33.

DOI: 10.12677/hjce.2026.156151

numerical simulations of the stability of four typical profiles under natural and rainstorm-saturated conditions were carried out using the finite element software ABAQUS combined with the strength reduction method. The results indicate that the stability of the landslide is mainly controlled by factors such as the consequent slope structure, weak structural planes, tectonic fractures, and toe excavation. Under natural conditions, the stability coefficients of the profiles range from 1.01055 to 1.03446, indicating an overall unstable state. Under rainstorm conditions, the stability coefficients decrease to between 0.79616 and 0.87147, indicating an overall unstable state. The study suggests that rainfall is a key trigger for landslide instability, and the finite element simulation effectively reflects the deformation and failure mechanisms as well as the stability variation patterns of the landslide.

Keywords

Landslide, Finite Element Method, Stability Analysis, Strength Reduction

Copyright © 2026 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. 引言

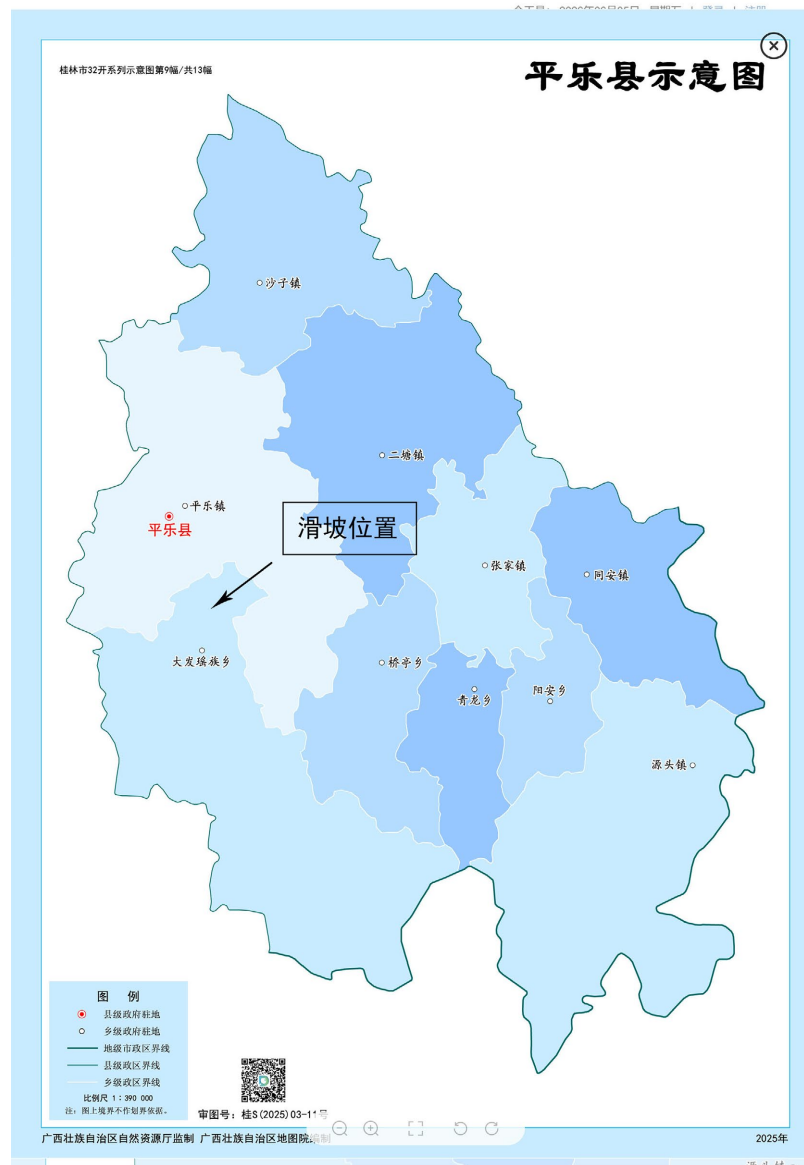
滑坡是山区常见的地质灾害类型,其形成受地形地貌、地层岩性、地质构造、水文条件及人类工程活动等多因素共同制约。近年来,随着数值模拟技术的不断发展,滑坡稳定性研究逐步向精细化、量化方向推进。张逸超等[1]采用物质点法分析了土质边坡失稳过程,揭示了摩擦角、弹性模量等参数对运动距离的影响;岳霞等[2]结合现场调查与数值模拟,探讨了争岗滑坡的成灾机制与动力响应;刘定霞等[3]利用 InSAR-GNSS-FLAC^{3D} 方法研究了重金组滑坡的变形演化规律,指出极端降雨是滑面贯通的重要条件。此外,高小霞等[4]、石浩等[5]从降雨渗流角度分析了边坡稳定性变化;邢珂等[6]将无人机与 LiDAR 技术结合,实现了高植被覆盖区滑坡的精细识别;朱志明等[7]和王海明等[8]分别针对顺层岩质滑坡与接触面滑坡开展了暴雨条件下的稳定性研究;李如仁等[9]验证了降雨对边坡变形的控制作用;丁梓逸等[10]则分析了地震荷载对边坡稳定性的影响。尽管已有研究在滑坡监测与失稳机理方面取得了丰富成果,但对于受顺向坡结构、软弱夹层、人工切坡与暴雨共同作用的岩土混合滑坡,仍需结合具体工程地质条件开展深入分析。

桂林市平乐县凤凰山滑坡具有典型的顺向坡结构,岩体破碎、裂隙发育,坡脚开挖明显,受降雨影响显著。本文以此为对象,基于地质条件与变形特征分析,采用 ABAQUS 有限元软件对天然与暴雨工况下四个典型剖面的稳定性进行模拟,揭示其变形破坏机制与稳定性变化规律,为类似滑坡的防治提供参考。

2. 工程概况

2.1. 地理位置及气象水文

凤凰山滑坡位于桂林市平乐县(图 1),地理坐标东经 110°38'16"、北纬 24°37'53"。该区域属亚热带季风气候,年均气温 19.9℃,年均降雨量 1563.8 mm,雨季集中于 4~8 月,占全年降雨量的 67%。强降雨是区内地质灾害的主要诱发因素,雨水对坡面产生冲刷、软化作用,并沿裂隙入渗,降低软弱结构面的抗剪强度。



注：该图基于广西标准地图服务平台网站(<https://www.gismap.com.cn/webmap/index>)下载的审图号为桂 S(2025)03-11 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Geographic location of the Fenghuangshan landslide in Pingle County, Guilin City

图 1. 桂林市平乐县凤凰山滑坡地理位置

2.2. 地形地貌及地层岩性

研究区属丘陵谷地地貌，地面高程 80~125 m，自然坡度 20°~30°。坡脚因人类活动形成近乎垂直的切坡。出露地层主要为第四系残积黏土(Q₄^{cl})及泥盆系中统信都组上段(D₂x²)泥灰岩。黏土层厚 5.8~8.5 m，呈硬塑状；下伏基岩为强风化与中风化泥灰岩，其中强风化层破碎严重，遇水易软化，中风化层完整性较好，局部裂隙发育。

2.3. 地质构造及水文地质条件

区域构造上，滑坡位于桂东北凹陷与大瑶山凸起的交界部位，东南侧约 500 m 处发育荔浦 - 平乐压

性断裂。受构造影响, 岩体节理裂隙发育, 主要发育两组节理: 产状 $335^{\circ} \angle 84^{\circ}$ 和 $46^{\circ} \angle 70^{\circ}$, 裂隙宽 2~5 mm, 充填软塑状黏性土。地下水类型以第四系孔隙水与基岩裂隙水为主, 富水性差, 强风化层渗透系数 0.114~0.82 m/d, 中风化层为相对隔水层。

2.4. 滑坡形态特性

滑坡发育于基岩软弱结构面, 滑面产状 $155^{\circ} \angle 18^{\circ}$, 属顺向坡。滑坡前缘高程 85.5 m, 后缘 111 m, 高差 25.5 m, 主滑方向 155° , 平面呈“弓”形, 纵向长约 40 m, 横向宽约 80 m, 面积约 $0.25 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均厚度 8 m, 体积约 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为小型牵引式顺层岩土混合滑坡(图 2)。滑体以强风化泥灰岩为主, 滑带为风化软弱夹层。前缘挡墙因切坡出现拉裂甚至崩塌, 中部平台发育多条横向裂缝, 缝宽 20~150 cm, 可见深度 1~3 m, 消防水池墙体开裂, 地面沉降明显。



Figure 2. Landslide characteristics in the study area
图 2. 研究区滑坡特征

3. 滑坡稳定性分析

3.1. 模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件开展稳定性分析, 坡体材料假定为理想弹塑性, 采用 Mohr-Coulomb 本构模型。根据实际地形, 一级坡比取 1:2.5, 二级坡比取 1:2。模型材料参数如表 1 所示, 计算工况包括天然状态(工况 I)与暴雨饱和状态(工况 II), 安全系数分别取 1.30 与 1.10。具体分类如表 2 所示。

Table 1. Physical and mechanical parameters of slope materials
表 1. 坡体材料物理力学参数

状态	岩土名称	弹性模量 (MPa)	泊松比	天然重度 (kN/m^3)	饱和重度 (kN/m^3)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)
I (天然状态)	滑带土(风化岩软弱夹层)	26.81	0.30	19.2	20.1	18.5	14.2
	滑体土(强风化泥灰岩)	951	0.25	22.0	22.5	39.5	21.5
II (饱和状态)	滑带土(风化岩软弱夹层)	21.74	0.30	22.1	24.2	16.8	13.0
	滑体土(强风化泥灰岩)	901	0.25	23.9	25.2	37.8	20.3

Table 2. Design working conditions
表 2. 设计工况

工况	荷载	安全系数
I (天然状态)	自重	1.30
II (饱和状态)	自重 + 暴雨	1.10

3.2. 稳定性分析

依据《滑坡防治工程勘查规范》(DZ/T0218-2006), 滑坡稳定性分级标准为: $K < 1.00$ 为不稳定, $1.00 \leq K < 1.05$ 为欠稳定, $1.05 \leq K < 1.15$ 为基本稳定, $K \geq 1.15$ 为稳定。为反映滑坡整体稳定性及空间变形差异特征, 沿滑坡主滑方向选取 1-1'、2-2'、3-3'及 4-4'四个典型剖面进行分析。这四个剖面贯穿滑坡前缘、中部及后缘区域, 能够覆盖滑体及主要滑动带的空间分布范围, 同时兼顾坡脚开挖影响、软弱夹层埋深及裂隙发育程度等差异。滑坡剖切线示意图如图 3 所示, 各剖面稳定性系数计算结果见表 3, 各剖面天然状态和暴雨状态下的塑性应变云图如图 4~7 所示。

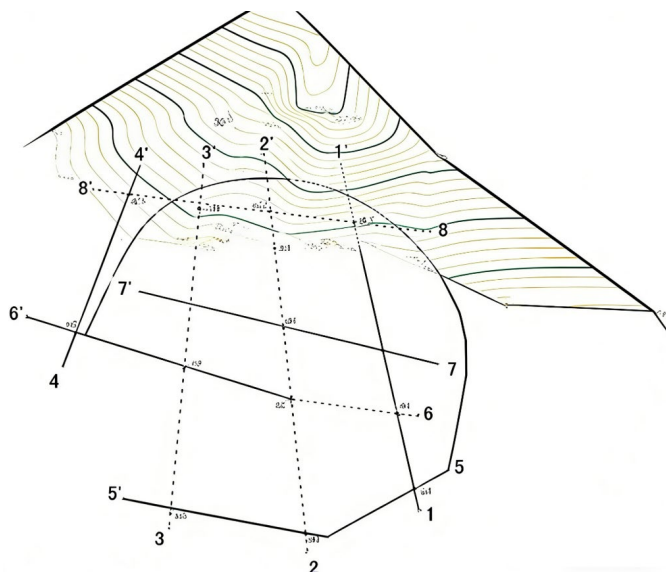
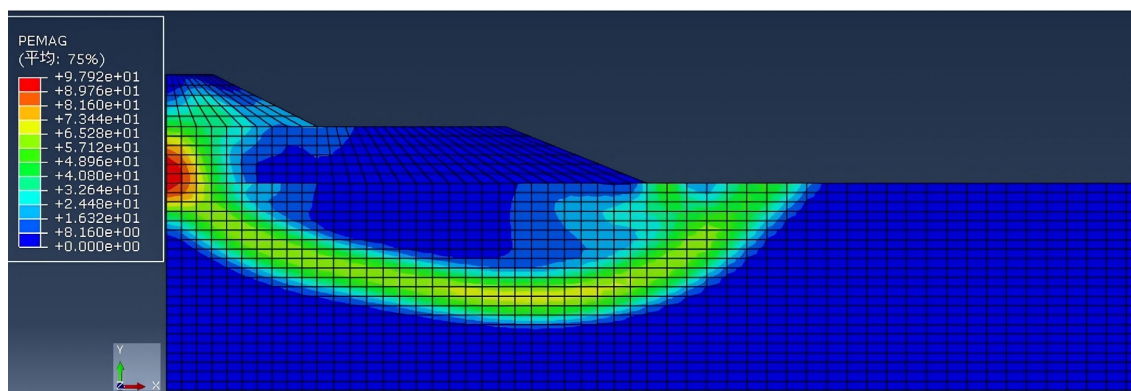
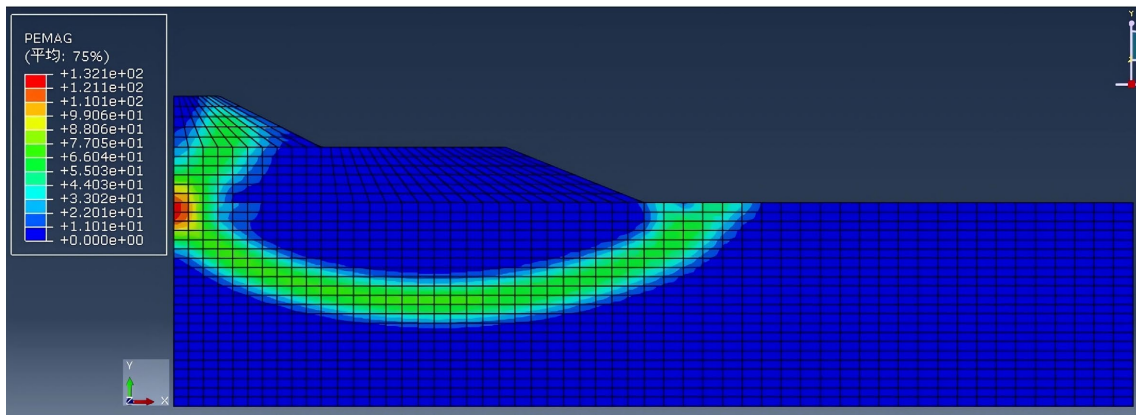


Figure 3. Landslide section line
图 3. 滑坡剖切线



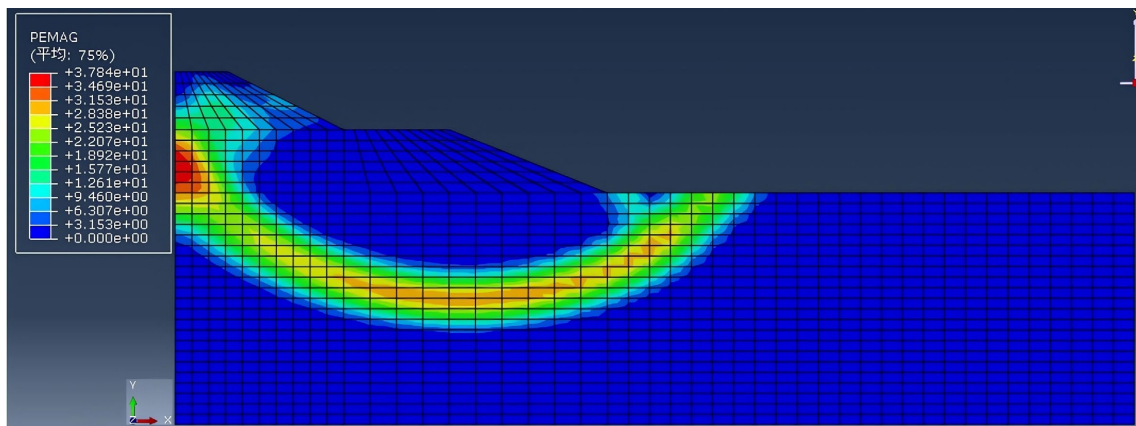
(a) 1-1'剖面工况 I 等效塑性应变云图



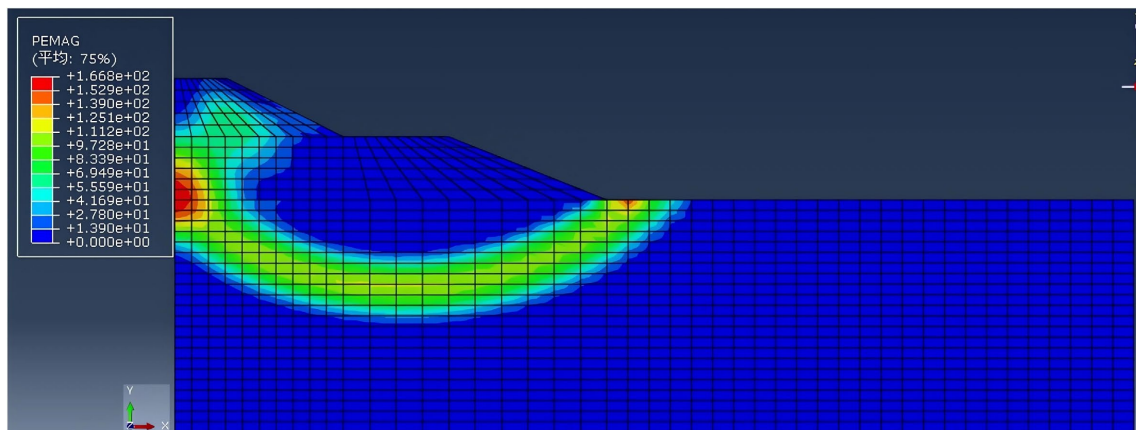
(b) 1-1'剖面工况 II 等效塑性应变云图

Figure 4. Plastic strain cloud maps of section 1-1' under natural and heavy rainfall conditions

图 4. 1-1'剖面天然状态和暴雨状态下的塑性应变云图



(a) 2-2'剖面工况 I 等效塑性应变云图



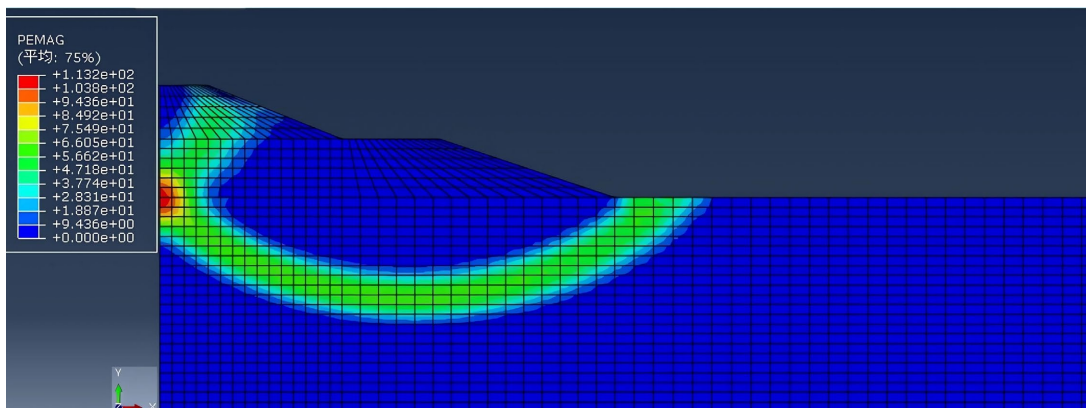
(b) 2-2'剖面工况 II 等效塑性应变云图

Figure 5. Plastic strain cloud maps of section 2-2' under natural and heavy rainfall conditions

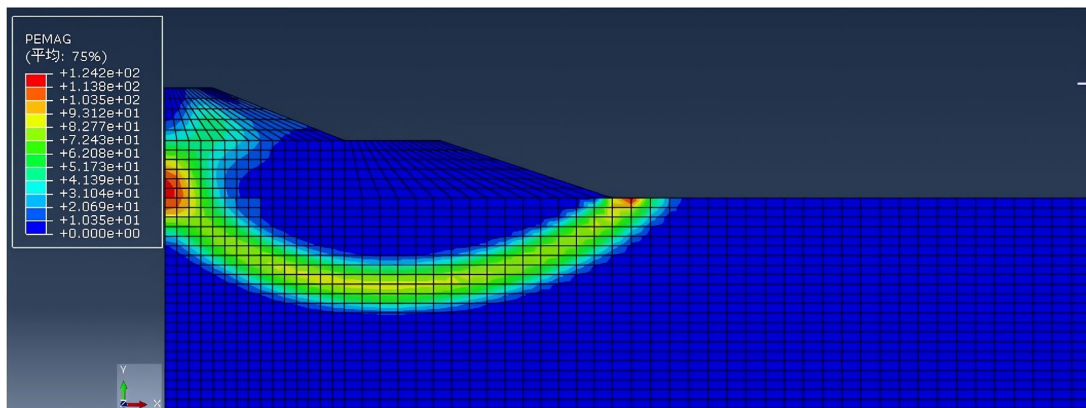
图 5. 2-2'剖面天然状态和暴雨状态下的塑性应变云图

对图 4~7 的塑性应变云图分析可知, 在极限状态下, 塑性区主要沿坡体内部呈带状发育, 并由坡脚逐步向坡顶贯通, 表现出明显的顺层扩展特征。该塑性区分布位置与滑带所在的风化软弱夹层基本一致,

其延伸方向与滑面产状($155^\circ \angle 18^\circ$)具有良好对应关系, 表明滑坡变形破坏受软弱结构面显著控制。在暴雨工况下, 塑性区范围明显扩大, 并沿裂隙发育方向扩展, 反映出降雨入渗导致软弱夹层强度降低, 从而加快塑性区贯通及整体失稳的发展过程。滑坡折减系数及稳定性评价如表 3 所示。计算结果表明, 天然工况下各剖面均处于欠稳定状态, 暴雨工况下均进入不稳定状态。塑性应变云图显示, 极限状态下塑性区由坡脚向坡顶贯通, 最大等效塑性应变位于坡顶下方, 与坡脚高程基本一致。



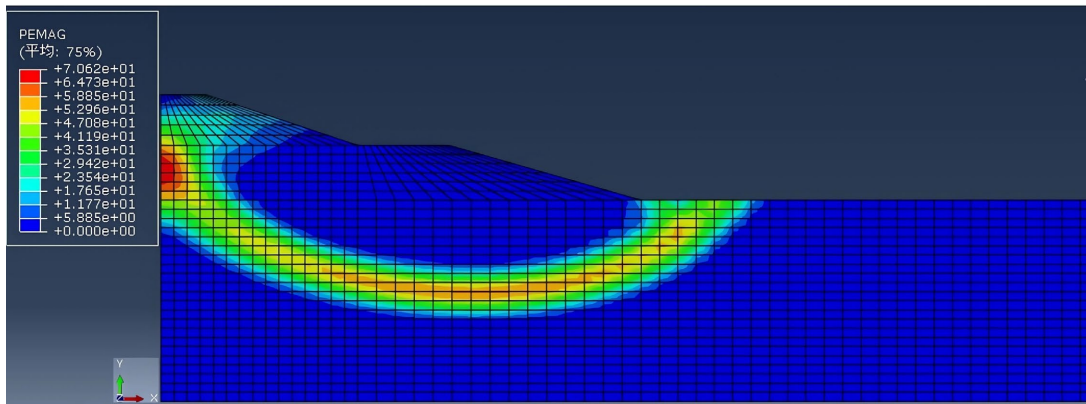
(a) 3-3'剖面工况 I 等效塑性应变云图



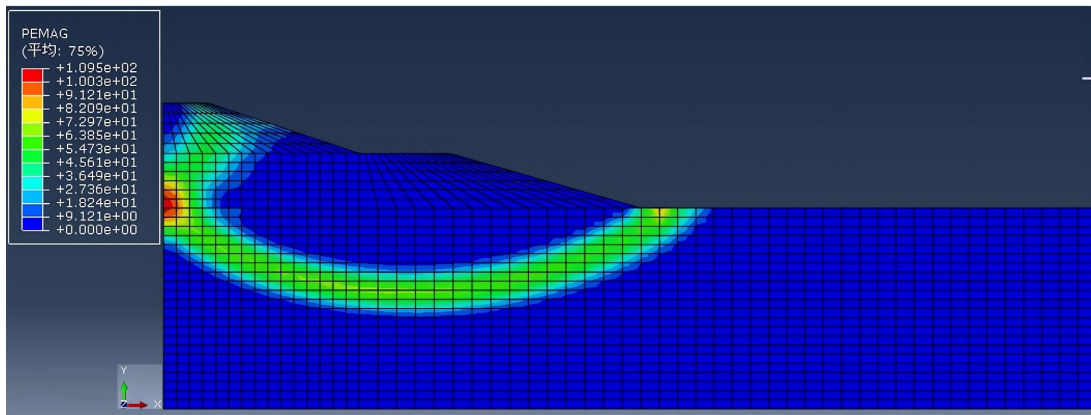
(b) 3-3'剖面工况 II 等效塑性应变云图

Figure 6. Plastic strain cloud maps of section 3-3' under natural and heavy rainfall conditions

图 6. 3-3'剖面天然状态和暴雨状态下的塑性应变云图



(a) 4-4'剖面工况 I 等效塑性应变云图



(b) 4-4'剖面工况 II 等效塑性应变云图

Figure 7. Plastic strain cloud maps of section 4-4' under natural and heavy rainfall conditions**图 7.** 4-4'剖面天然状态和暴雨状态下的塑性应变云图**Table 3.** Reduction coefficients and stability evaluation of the landslide**表 3.** 滑坡折减系数及稳定性评价

剖面编号	工况组合	荷载组合内容	折减系数	稳定性评价
1-1'	工况 I	天然状态	1.02889	欠稳定
	工况 II	暴雨状态	0.83047	不稳定
2-2'	工况 I	天然状态	1.01055	欠稳定
	工况 II	暴雨状态	0.85293	不稳定
3-3'	工况 I	天然状态	1.03446	欠稳定
	工况 II	暴雨状态	0.79616	不稳定
4-4'	工况 I	天然状态	1.03257	欠稳定
	工况 II	暴雨状态	0.87147	不稳定

4. 结论

(1) 凤凰山滑坡受顺向坡结构控制明显, 滑带主要发育于风化泥灰岩软弱夹层中, 其空间展布与滑面产状($155^\circ \angle 18^\circ$)一致, 是控制滑坡稳定性的关键结构因素。

(2) 天然工况下, 各剖面稳定系数均低于 1.05, 表明坡体已具备潜在失稳条件; 暴雨工况下, 稳定系数降至 1.0 以下, 整体处于不稳定状态, 降雨对边坡稳定性具有显著劣化作用。

(3) 有限元强度折减法能够较好地反映滑坡的变形破坏过程与稳定性变化规律, 计算结果与现场变形特征吻合良好。

5. 讨论

(1) 本文采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型对滑坡进行数值模拟, 该模型虽能够较好反映岩土体的基本强度特性, 但未考虑应变软化、结构性损伤及非线性渗流等复杂行为。此外, 模型中滑带土及滑体参数主要基于室内试验与经验取值, 存在一定离散性与不确定性, 尤其在暴雨入渗条件下, 强度参数随含水率变化的动态演化过程未被充分刻画。因此, 计算结果在一定程度上仍具有理想化特征。

(2) 与现有的顺层岩质滑坡研究成果[7][8]相比, 本研究所得滑坡破坏模式同样表现为沿软弱结构面

剪切滑动并伴随上部拉裂的发展过程, 验证了顺向坡结构对滑坡稳定性的主控作用。同时, 本研究进一步结合有限元强度折减法, 从塑性区演化角度揭示了滑坡由局部破坏向整体贯通发展的过程, 相较于传统极限平衡方法, 本文方法能够更直观反映滑坡内部应变演化及破坏路径, 但在计算效率与参数依赖上仍存在一定局限的局限性。

参考文献

- [1] 张逸超, 刘欣, 吴凤元, 等. 基于物质点法的土质边坡失稳与运动全过程模拟[J/OL]. 人民长江: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20260321.1411.002>, 2026-03-23.
- [2] 岳霞, 戴福初, 程伟, 等. GS 坝址下游争岗滑坡的稳定性分析及运动过程预测[J/OL]. 工程科学与技术: 1-19. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20251215.1615.002>, 2026-03-23.
- [3] 刘定霞, 陈喆, 刘明明, 等. 澜沧江上游重金组滑坡变形特征与稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(34): 14564-14575.
- [4] 高小霞, 查文华, 齐新炬, 等. 不同降雨条件下非饱和土滑坡三维渗流变形及稳定性数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(20): 8445-8454.
- [5] 石浩, 李远耀, 许艺林, 等. 不同类型暴雨下堆积层滑坡渗流特征与稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 222-233.
- [6] 邢珂, 窦杰, 陈能成, 等. 基于光学-LiDAR 协同遥感及三维精细建模的滑坡特征解译与稳定性评价[J]. 自然灾害学报, 2025, 34(3): 119-132.
- [7] 朱志明, 欧阳继胜, 张子龙, 等. 缓倾顺层岩质滑坡机理研究——以广元市苍溪县中梁村滑坡为例[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(1): 233-243.
- [8] 王海明, 朱殿之, 丁玉涛, 等. 强降雨作用下黄土-泥岩接触面滑坡模型试验及稳定性研究[J]. 地震工程学报, 2025, 47(2): 361-369+392.
- [9] 李如仁, 李梦晨, 葛永权. InSAR 与数值模拟协同的排土场边坡稳定性分析及形变预测研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(6): 217-227.
- [10] 丁梓逸, 王宇栋, 吴兴贵, 等. 基于 ANSYS 有限元强度折减法的土质滑坡地震响应特性研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 576-582.