

不同降雨入渗条件下滑坡稳定性数值模拟研究

李雯, 林伟耀

华北水利水电大学, 地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月24日; 发布日期: 2026年3月6日

摘要

为系统揭示降雨条件下滑坡体内部渗流场演化特征及其对边坡整体稳定性的影响机制, 以某滑坡2-2剖面为研究对象, 基于GeoStudio软件平台, 构建二维滑坡数值模型, 分别模拟连绵细雨与暴雨两种典型降雨工况下滑坡体孔隙水压力、总水头分布及安全系数的时变响应规律。研究表明: 降雨入渗显著改变滑坡体内部瞬态渗流场分布特征, 导致孔隙水压力逐步累积并引起安全系数下降; 在连绵细雨工况下, 渗流影响主要局限于滑体表层, 对整体稳定性影响有限, 而暴雨工况下滑坡体迅速进入低安全系数状态, 存在明显失稳风险。研究成果可为类似降雨诱发滑坡的稳定性评价及灾害防治提供定量参考。

关键词

降雨入渗, 滑坡稳定性, 瞬态渗流, 孔隙水压力, GeoStudio数值模拟

Numerical Simulation Study of Slope Stability under Different Rainfall Infiltration Conditions

Wen Li, Weiyao Lin

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: January 28, 2026; accepted: February 24, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

To systematically reveal the evolution characteristics of the internal seepage field within a landslide body under rainfall conditions and its influence mechanism on the overall slope stability, a two-dimensional numerical model of the landslide was constructed using the GeoStudio software platform, taking the 2-2 profile of a specific landslide as the study object. The model simulated the

time-varying response patterns of pore water pressure, total hydraulic head distribution, and safety factor under two typical rainfall scenarios: continuous light rain and heavy rain. Results indicate that rainfall infiltration significantly alters the transient seepage field distribution within the landslide body, leading to gradual accumulation of pore water pressure and a corresponding decrease in the safety factor. Under steady drizzle conditions, seepage effects are primarily confined to the surface layer of the landslide body, exerting limited influence on overall stability. In contrast, under torrential rain conditions, the landslide body rapidly enters a state of low safety factor, presenting a significant risk of instability. These findings provide quantitative references for stability assessment and disaster prevention of rainfall-induced landslides.

Keywords

Rainfall Infiltration, Landslide Stability, Transient Seepage, Pore Water Pressure, GeoStudio Numerical Simulation

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

降雨诱发滑坡是山区地质灾害中最为常见且破坏性较强的一类, 其发生发展过程往往伴随着复杂的渗流-力学耦合作用[1]-[3]。在持续或强降雨条件下, 地表雨水入渗改变坡体内部原有地下水动力条件, 引起孔隙水压力升高、有效应力降低, 从而削弱岩土体抗剪强度, 最终导致边坡失稳破坏。大量工程实例表明, 降雨强度、持续时间及入渗深度是控制滑坡稳定性演化的关键因素[2] [4] [5]。

某滑坡位于复杂地质与水文环境区, 滑坡体规模较大、结构复杂, 在强降雨条件下具有明显的失稳潜势。针对该滑坡开展降雨工况下的稳定性数值模拟研究, 不仅有助于揭示其失稳机理, 而且对区域滑坡灾害防治与风险评估具有重要工程意义。

本文以某滑坡 2-2 剖面为研究对象, 基于 GeoStudio 软件中 SLOPE/W 与 SEEP/W 模块, 建立渗流-稳定性耦合分析模型, 对连绵细雨及暴雨两种典型降雨情景下滑坡体的安全系数演化、孔隙水压力分布及渗流特征进行系统分析, 旨在定量评估不同降雨条件对滑坡稳定性的影响程度。

2. 数值计算工况与参数选取

2.1. 研究工况设置

本文以某滑坡 2-2 剖面为研究对象, 基于 GeoStudio 软件中 SLOPE/W 与 SEEP/W 模块, 建立降雨条件下渗流-稳定性耦合分析模型[6] [7], 用于模拟不同降雨工况下滑坡体稳定性演化特征。选取降雨持续时间为 0~4 h, 分别模拟连绵细雨工况与暴雨工况下某滑坡 2-2 剖面的稳定性变化过程。通过对比两种降雨强度条件下滑坡体内部渗流场与安全系数的演化特征, 分析降雨强度差异对滑坡稳定性的影响规律。

2.2. 连绵细雨工况参数

在连绵细雨工况下, 滑坡体土体处于天然状态, 其物理力学参数选取为:

天然重度 $\gamma = 19.4 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 8 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 10.67^\circ$ 。如图 1 所示:

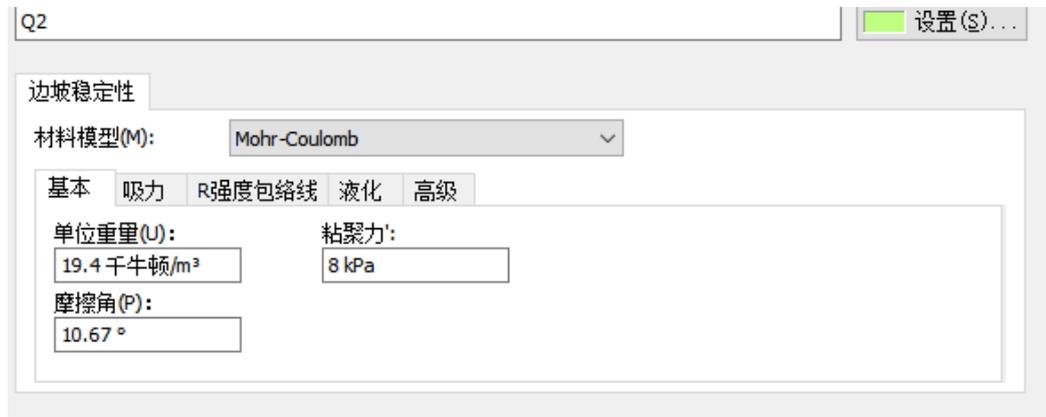


Figure 1. Physical and mechanical parameters under continuous light rain condition
图 1. 连绵细雨工况下物理力学参数

降雨强度随时间变化, 采用函数形式进行描述, 以反映连绵细雨条件下降雨过程的连续性和相对平缓特征。降雨时间及强度采用的函数如图 2 所示:

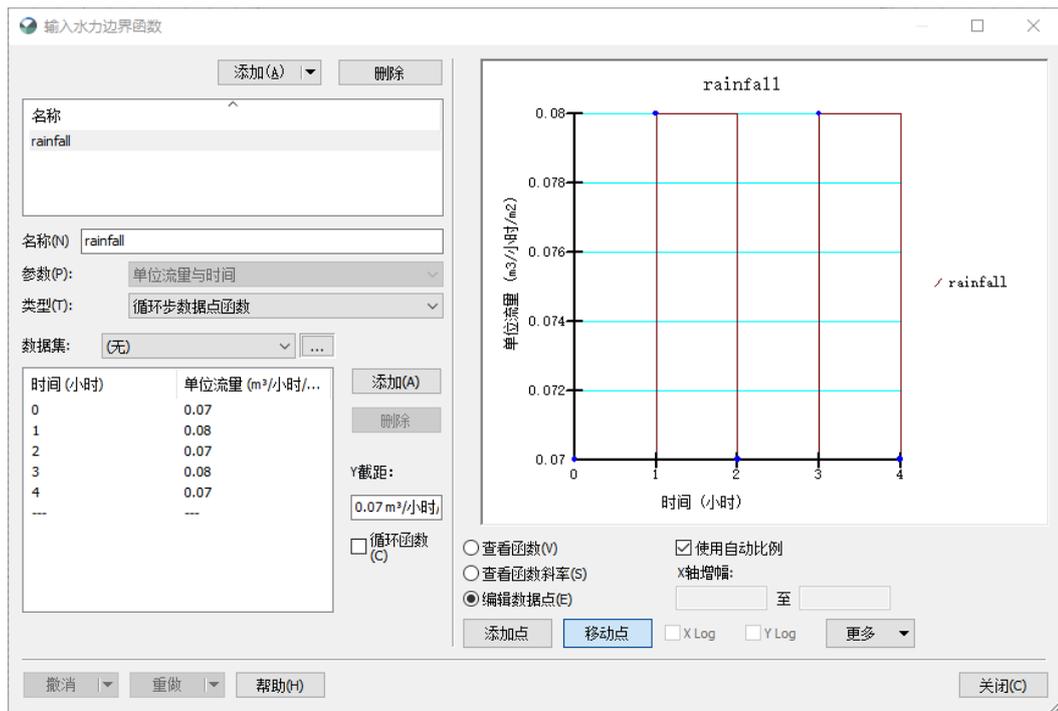


Figure 2. Rainfall function under continuous light rain condition
图 2. 连绵细雨工况下降雨函数

2.3. 暴雨工况参数

在暴雨工况下, 考虑滑坡体趋于饱和状态, 其物理力学参数相应调整为:

饱和重度 $\gamma_{sat} = 20.2 \text{ kN/m}^3$,

黏聚力 $c = 7.7 \text{ kPa}$,

内摩擦角 $\varphi = 9^\circ$ 。如下图 3 所示:

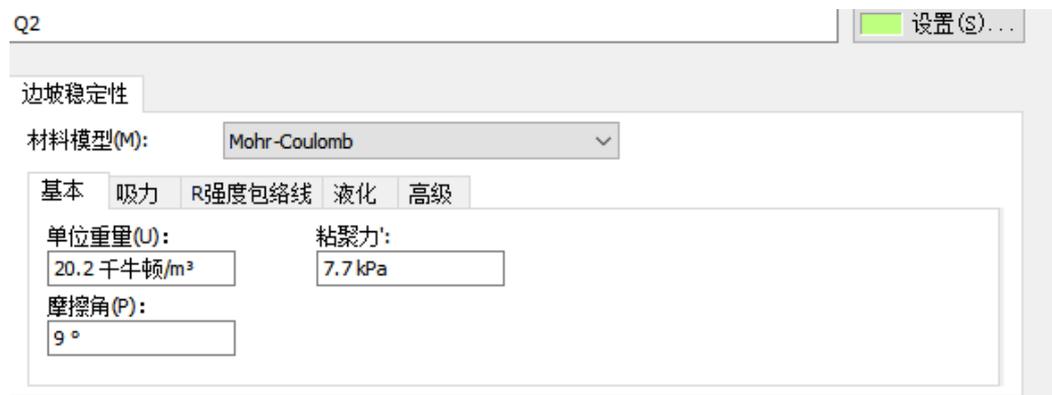


Figure 3. Physical and mechanical parameters under heavy rain condition

图 3. 暴雨工况下物理力学参数

该参数变化反映了强降雨条件下土体吸水软化、强度指标衰减的工程实际情况。暴雨降雨过程同样采用时间函数形式输入，以模拟短时高强度降雨特征。降雨时间及强度采用函数如图 4 所示。

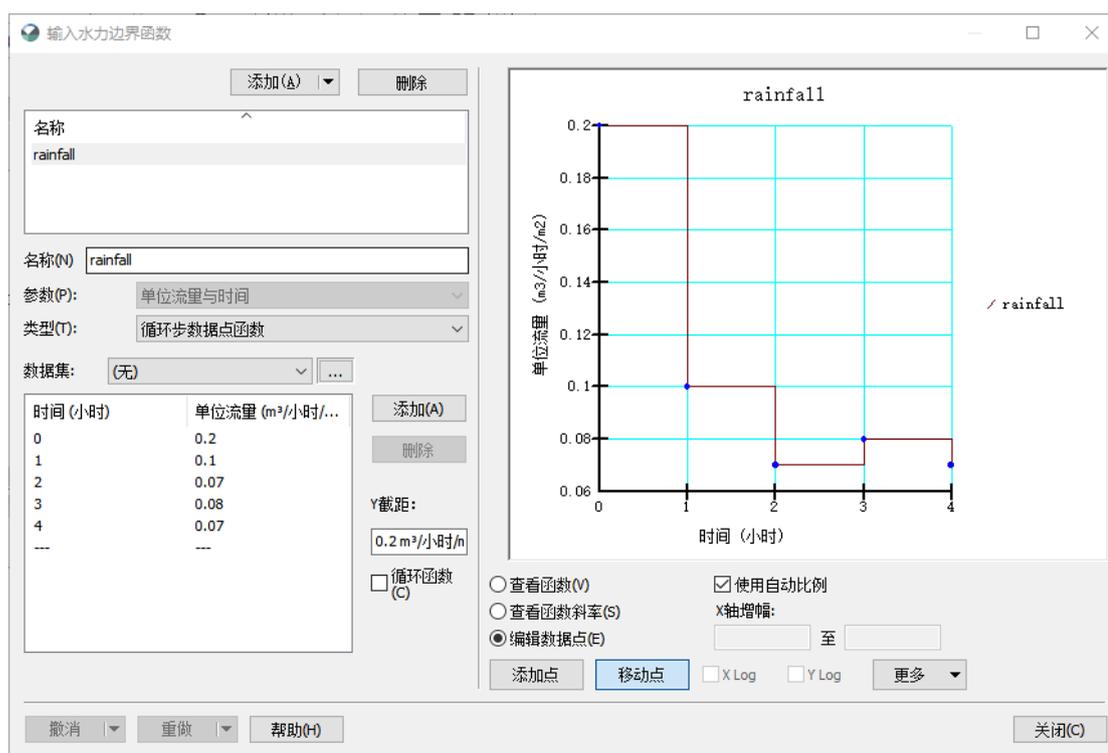


Figure 4. Rainfall function under heavy rain condition

图 4. 暴雨工况下降雨函数

3. 数值模型建立与计算方法

3.1. 二维几何模型建立

以某滑坡 2-2 剖面为基础，构建二维平面应变模型(图 5)。模型几何形态综合考虑滑坡体形态、滑床位置及基岩分布特征，确保计算模型能够合理反映滑坡的真实工程背景。

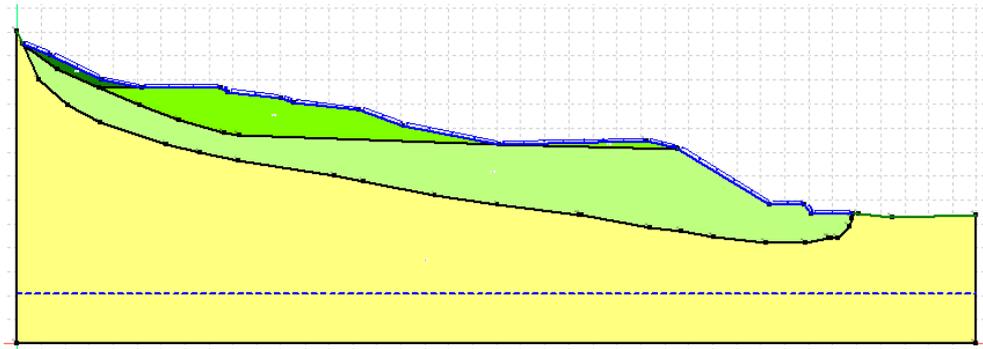


Figure 5. Model of cross-section 2-2 of the landslide

图 5. 某滑坡 2-2 剖面模型图

3.2. 材料模型与参数赋值

在 SLOPE/W 模块中, 滑床设置为不参与滑动的基岩层, 其余滑体分区(Q2、Q3、Q4)均采用摩尔-库仑强度准则进行描述。各分区材料参数根据不同降雨工况分别赋值(图 6), 确保力学响应的合理性。物理力学参数采用对应工况下对应的数据。

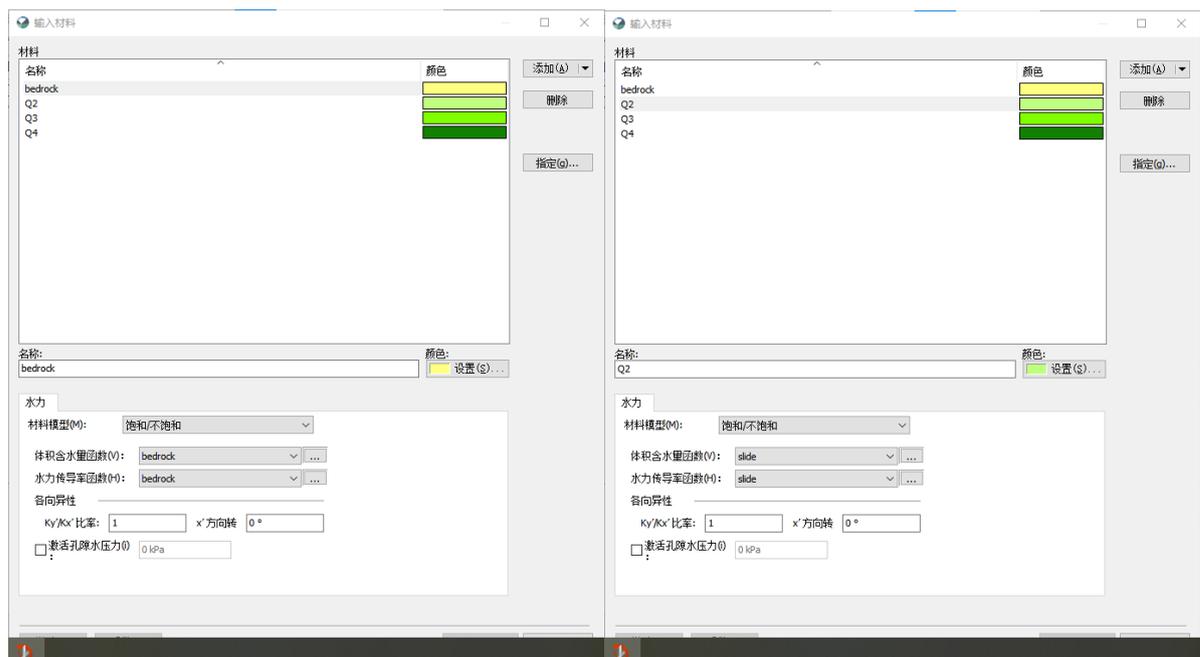


Figure 6. Material parameters

图 6. 材料参数图

在 SEEP/W 模块中, 根据不同地层材料的渗透特性建立相应的渗流参数模型, 用以模拟降雨入渗过程中滑坡体内部瞬态渗流场的演化。

3.3. 边界条件与初始条件

模型两侧设置为水平与竖向位移约束边界, 底部设置为完全约束边界, 以消除刚体位移影响(图 7)。降雨边界条件通过定义降雨强度——时间函数并施加于坡体表面实现。

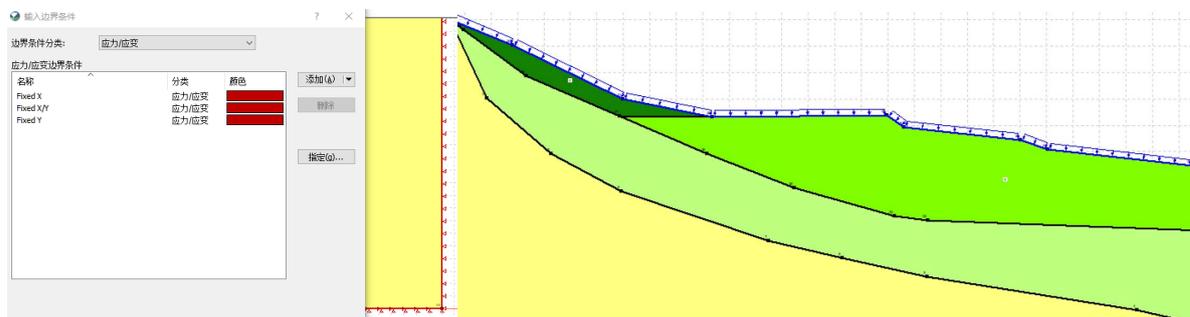


Figure 7. Rainfall boundary condition
图 7. 降雨边界条件

初始地下水位线依据现场调查资料确定, 水位埋深范围为 13.4~28.5 m, 取平均埋深 20.95 m 作为初始水位条件输入模型。建立降雨函数曲线, 绘制降雨边界如图 8:

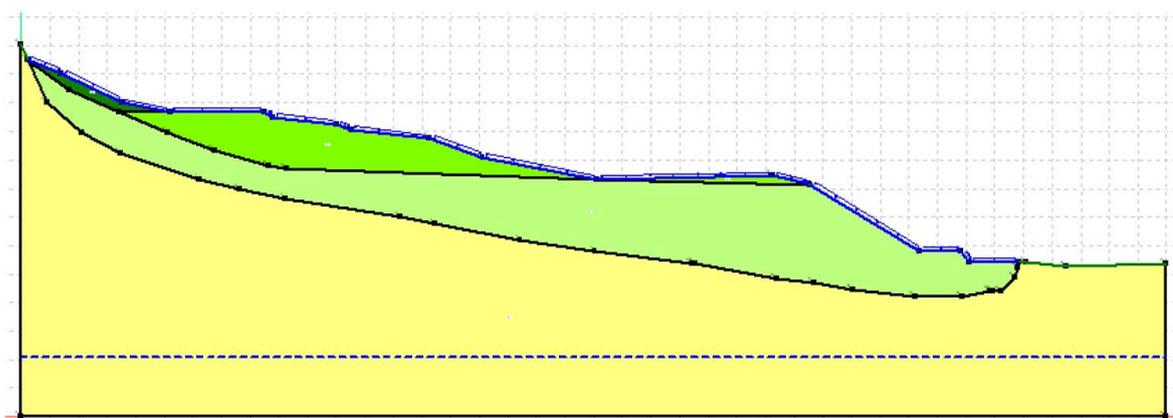


Figure 8. Rainfall boundary condition
图 8. 降雨边界条件

4. 数值模拟结果与分析

取抗滑稳定安全系数(F_{st})为 1.15, $F_s < 1.0$ 为不稳定状态, $1.0 \leq F_s < 1.05$ 为欠稳定状态, $1.05 \leq F_s < F_{st}$ 为基本稳定状态, $F_s > F_{st}$ 为稳定状态, 根据 geostudio 数值模拟结果表明, 连绵细雨与暴雨工况下滑坡体孔隙水压力及安全系数演化特征存在显著差异。在弱降雨条件下, 孔隙水压力随时间缓慢累积, 对滑坡稳定性影响有限; 而在强降雨条件下, 孔隙水压力快速升高并显著削弱滑坡体抗剪强度, 该结果与既有研究结论一致[3][8], 在连绵细雨工况下滑坡处于稳定状态, 而在暴雨工况下滑坡处于不稳定状态。

4.1. 连绵细雨工况下稳定性分析

4.1.1. 安全系数变化特征

计算结果表明, 在 0~4h 连绵细雨条件下, 滑坡安全系数呈现缓慢、近似线性下降趋势。初始安全系数约为 1.166, 随着降雨持续, 安全系数逐步降低, 至 4h 时降至 1.157, 整体仍处于稳定状态, 但已接近基本稳定临界值。

通过 slope 模块获得 0~4 小时降雨下滑坡安全系数变化情况如图 9:

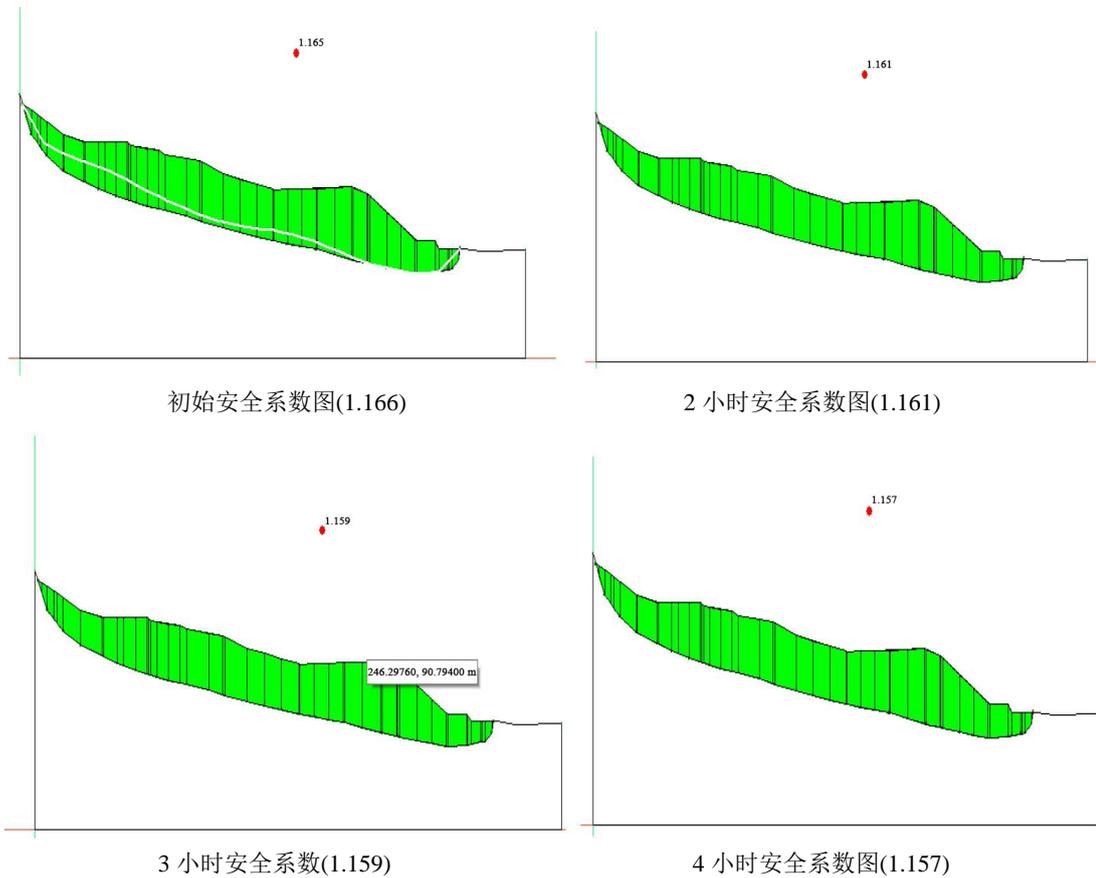


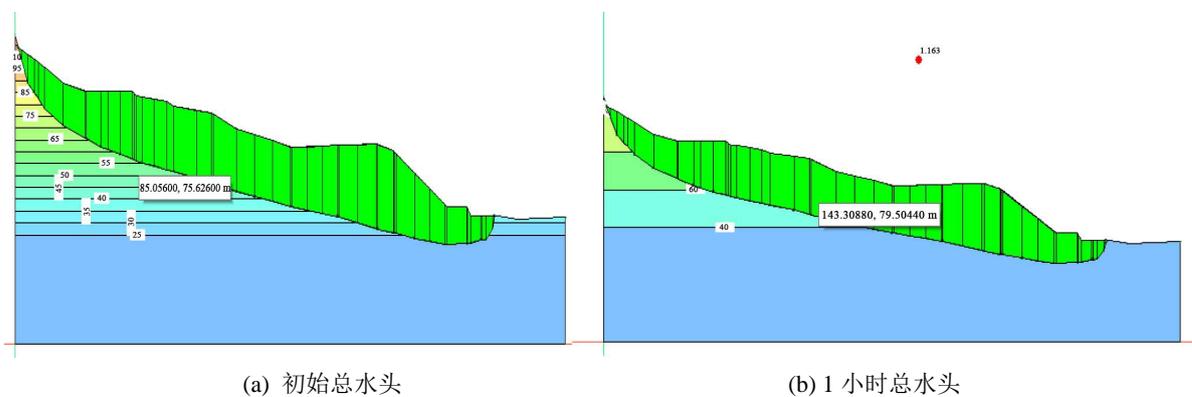
Figure 9. Variation of landslide safety factor
图 9. 滑坡安全系数变化情况

该结果表明, 连绵细雨虽然对滑坡稳定性产生一定削弱作用, 但短时间内尚不足以诱发整体失稳。

4.1.2. 渗流场与孔隙水压力演化

瞬态渗流分析显示, 降雨入渗主要影响滑坡体表层土体, 渗透深度约为 3.8~4.0 m, 未穿透至深部滑动面。孔隙水压力随时间逐步增大, 但变化幅度有限, 最大孔隙水压力约为 730.5 kPa。

总水头及孔隙水压力变化情况: 设定降雨边界条件, 计算 1~4 小时渗流场中的总水头。不同时间下瞬态渗流场的总水头变化见总水头变化图(图 10):



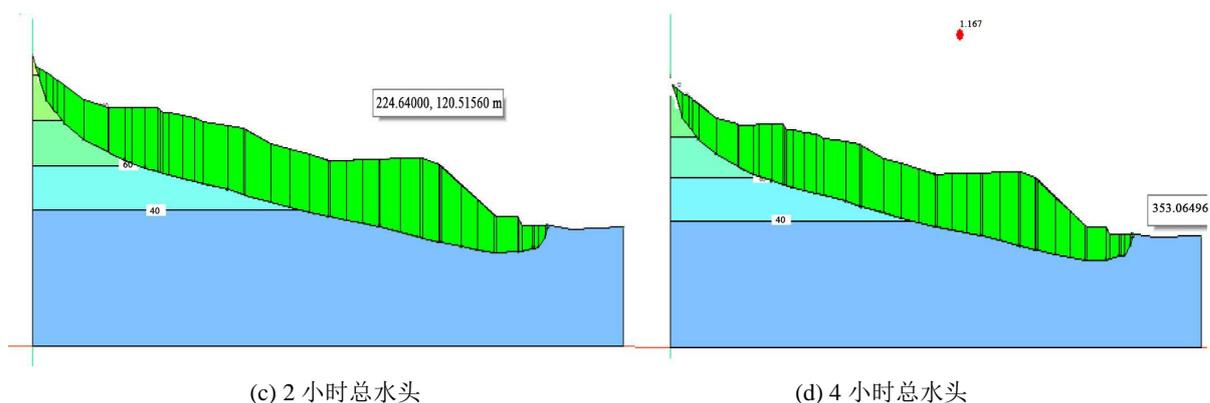


Figure 10. Variation of total hydraulic head
图 10. 总水头变化图

最大孔隙压力: 730.5 kpa; 最小孔隙压力为: -205.46 kpa。通过渗流分析模块得到 0~4 小时区间连续细雨工况下滑坡的孔隙水压力变化情况图如下图 11:

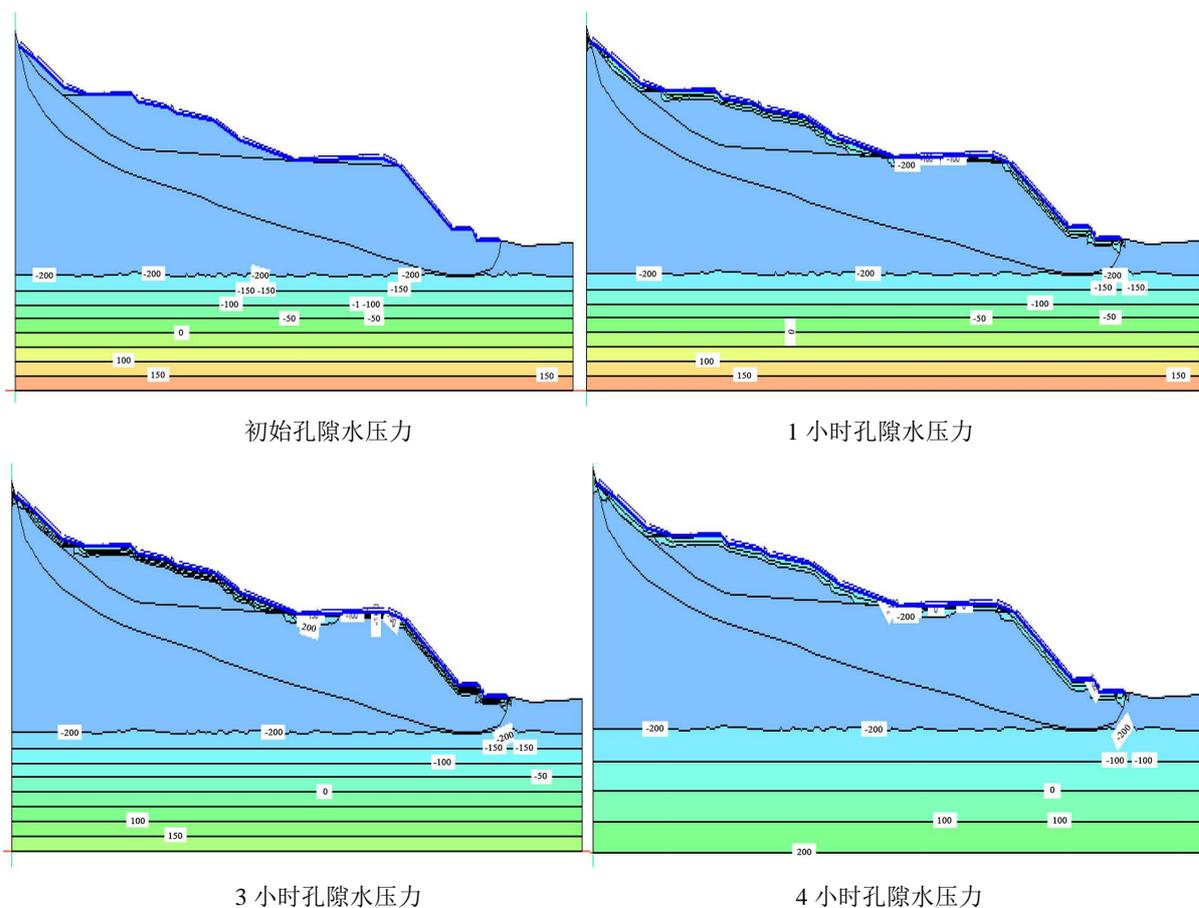


Figure 11. Variation of pore water pressure
图 11. 孔隙水压力变化情况图

总体来看, 连绵细雨条件下瞬态渗流对滑坡稳定性的影响相对较小, 主要表现为表层土体含水状态

变化。

4.2. 暴雨工况下稳定性分析

4.2.1. 安全系数变化特征

暴雨工况下, 滑坡初始安全系数仅为 0.988, 已处于不稳定状态。随着强降雨的持续, 安全系数快速下降, 4 h 时降至 0.978, 表明滑坡体在短时间强降雨条件下具有显著失稳风险。

通过 slope 模块获得 0~4 小时降雨下滑坡安全系数变化情况, 如图 12:

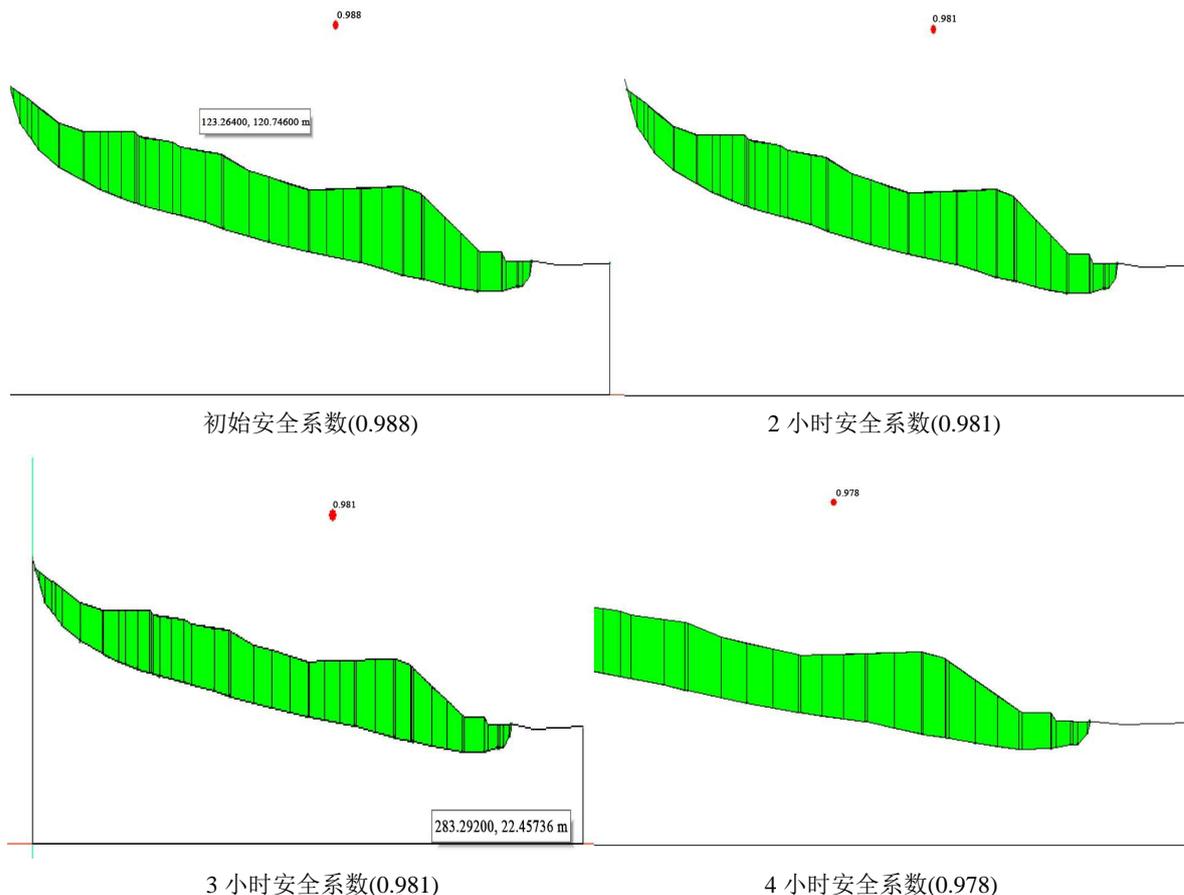


Figure 12. Variation of landslide safety factor

图 12. 滑坡安全系数变化情况

安全系数变化曲线显示, 降雨初期下降速率较大, 后期随着降雨强度减小, 下降速率有所放缓, 但整体仍处于不稳定区间。

4.2.2. 渗流场与孔隙水压力演化

暴雨条件下, 降雨入渗速率显著提高, 渗透深度增至 3.4~4.8 m。孔隙水压力迅速累积, 最大值达到 1838.3 kPa, 远高于连绵细雨工况。

总水头及孔隙水压力变化情况:

设定降雨边界条件, 计算 1~4 小时渗流场中的总水头。不同时间下瞬态渗流场的总水头变化见图 13:

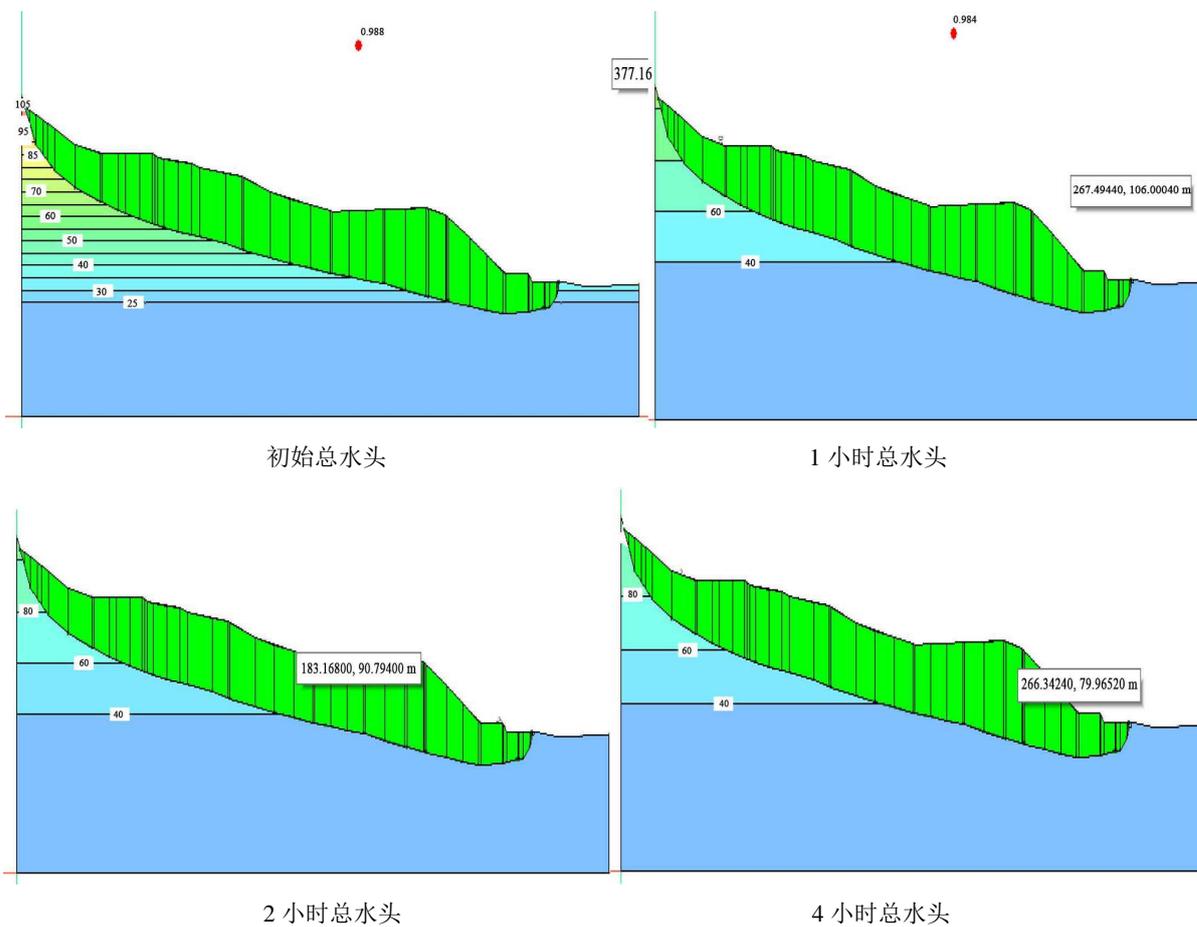
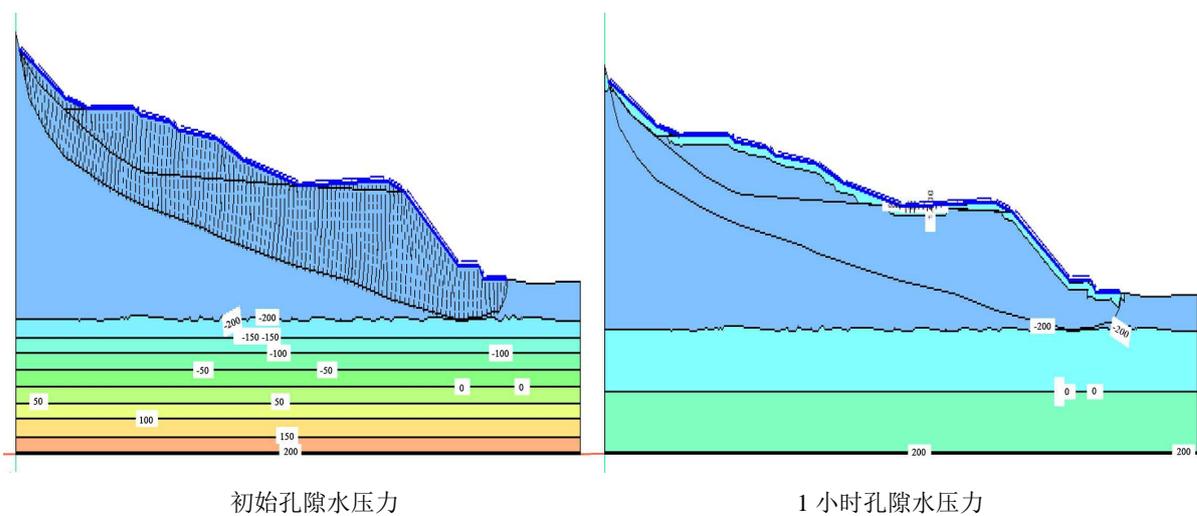


Figure 13. Variation of total hydraulic head
图 13. 总水头变化图

最大孔隙压力: 1838.3 kpa; 最小孔隙压力为: -205.95 kpa。通过渗流分析模块得到 0~4 小时区间暴雨工况下滑坡的孔隙水压力变化情况如图 14:



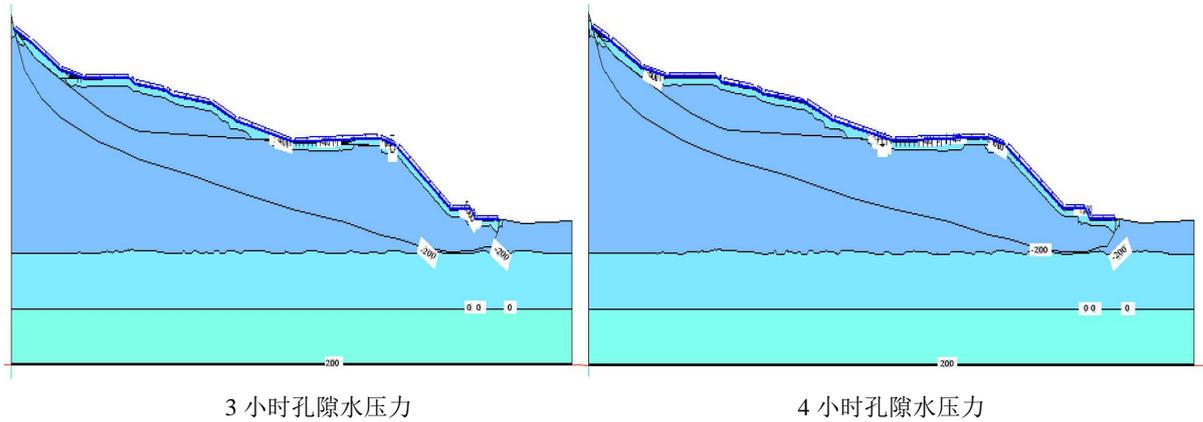


Figure 14. Variation of pore water pressure
图 14. 孔隙水压力变化情况图

孔隙水压力的快速增长导致滑坡体有效应力显著降低，是安全系数迅速下降的主要控制因素。

5. 讨论

5.1. 降雨强度对滑坡稳定性演化机制的控制作用

数值模拟结果表明，降雨强度在控制某滑坡 2-2 剖面稳定性演化过程中起主导作用。连绵细雨与暴雨两种工况下，滑坡体安全系数均呈下降趋势，但其变化速率与失稳模式存在显著差异。连绵细雨条件下，安全系数随时间缓慢衰减，表现为典型的渐进性削弱过程(图 15)；而暴雨工况下，安全系数在短时间内迅速下降并长期维持在不稳定区间，反映出突发性失稳风险(图 16)。

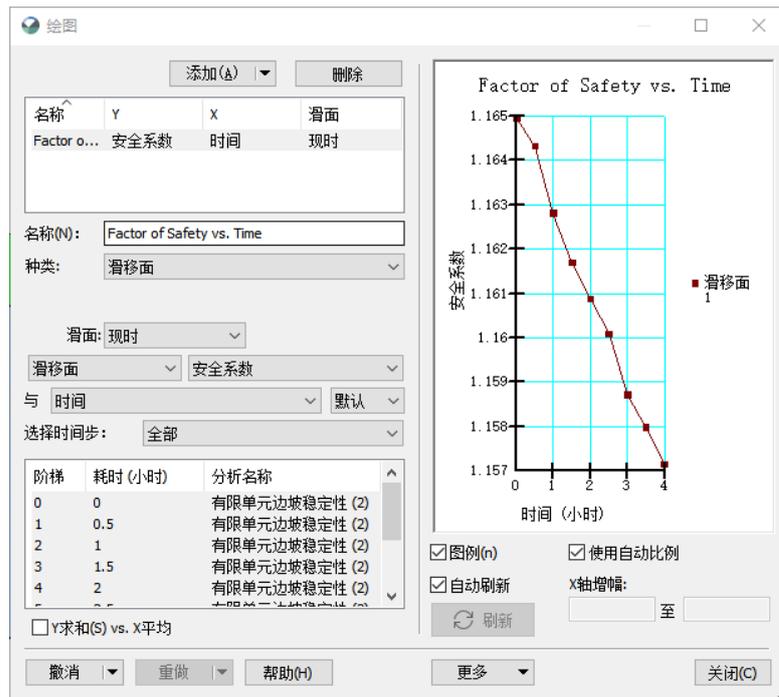


Figure 15. Safety factor under continuous light rain condition
图 15. 连绵细雨工况安全系数

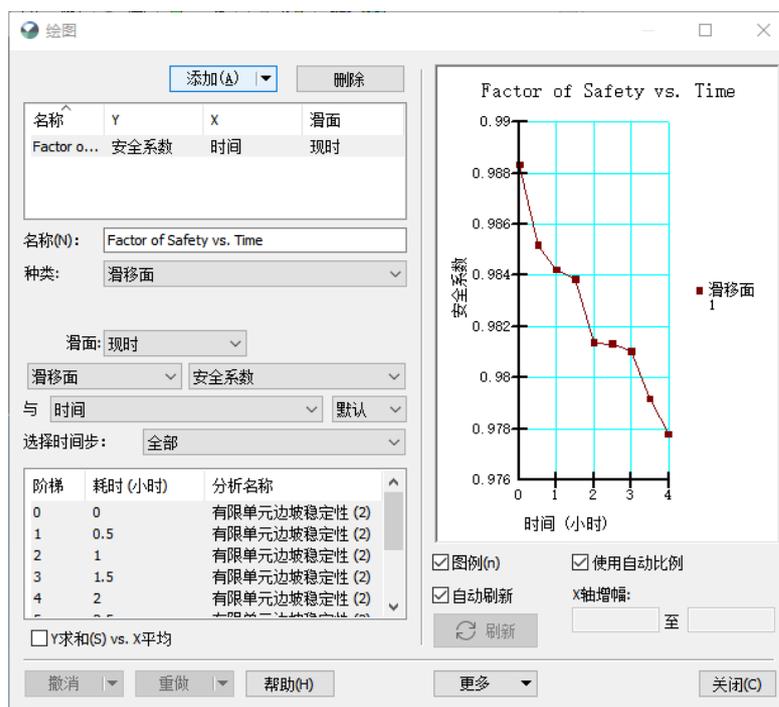


Figure 16. Safety factor under heavy rain condition
图 16. 暴雨工况下安全系数

这一差异本质上源于降雨强度对坡体内部渗流场重构速率的控制作用。弱降雨条件下，雨水入渗速率相对较低，坡体内部尚能通过渗流排泄与储水调节维持水力平衡；而在强降雨条件下，雨水入渗速率远大于坡体排水能力，导致地下水位迅速抬升，孔隙水压力在短时间内大量累积，从而显著削弱滑坡体抗剪强度。

5.2. 孔隙水压力在滑坡失稳过程中的主控作用

渗流 - 稳定性耦合分析结果表明，孔隙水压力的快速增长是滑坡短时间失稳的直接触发机制之一[1][2][9]。即使降雨入渗深度尚未贯通至深部滑动面，瞬态渗流过程本身仍可通过孔隙水压力重构显著削弱坡体整体稳定性[4][10]。

从渗流 - 稳定性耦合分析结果可以看出，孔隙水压力的时空演化是导致滑坡稳定性变化的直接控制因素。在连绵细雨工况下，孔隙水压力主要集中于坡体表层，且随深度迅速衰减，未在潜在滑动带附近形成显著高压区，因此对整体稳定性影响有限。

相比之下，暴雨工况下孔隙水压力不仅增长幅度大，而且增长速率快，在坡体浅层至中深层范围内均形成连续的高孔压分布区。这种孔压快速累积直接导致滑坡体有效应力显著降低，使得摩尔 - 库仑强度准则中由法向应力控制的抗剪强度项大幅衰减，从而引发整体安全系数的快速下降。

该结果与已有关于降雨诱发滑坡的研究结论具有良好一致性，即孔隙水压力的快速增长往往是滑坡短时间失稳的直接触发机制，而非单纯由自重增加所导致。

5.3. 瞬态渗流特征与滑动面响应关系分析

值得注意的是，在两种降雨工况下，数值模拟结果均显示降雨入渗尚未完全贯通至基岩层或深部滑动面位置。这一现象表明，某滑坡 2-2 剖面在研究时段内的失稳趋势，并非由深部承压水突增直接引起，

而主要受控于滑坡体内部非饱和 - 近饱和区间的瞬态渗流响应。

在连绵细雨条件下, 渗流影响范围受限, 滑坡体内部水力梯度变化较小; 而在暴雨条件下, 尽管渗流深度有限, 但由于渗流场重构速度快, 仍然能够在短时间内形成不利的孔压分布状态。这说明, 即使降雨未直接作用于滑动面, 快速变化的瞬态渗流过程本身就足以显著削弱坡体整体稳定性。

6. 结论

(1) 基于 GeoStudio 平台构建了某滑坡 2-2 剖面的瞬态渗流 - 稳定性耦合数值模型, 实现了不同降雨强度条件下滑坡安全系数与孔隙水压力的时序联动分析, 为降雨型滑坡稳定性评价提供了可行的数值分析方法。

(2) 数值结果表明, 连绵细雨工况下滑坡安全系数随降雨时间呈缓慢下降趋势, 短时间内仍处于稳定状态, 表明弱降雨主要通过累积效应逐步削弱滑坡稳定性, 而难以在短期内诱发整体失稳。

(3) 在暴雨工况下, 滑坡安全系数迅速降至 1.0 以下并持续处于不稳定区间, 说明短时强降雨可在较短时间内显著降低滑坡抗滑能力, 是诱发某滑坡整体滑动破坏的关键外部触发因素。

(4) 孔隙水压力的快速累积被识别为控制滑坡稳定性演化的主导水力因素。强降雨条件下孔隙水压力增长速率显著提高, 直接导致滑坡体有效应力降低和抗剪强度衰减, 从而引发安全系数的快速下降。

(5) 研究表明, 即使降雨入渗深度尚未完全贯通至深部滑动面, 瞬态渗流过程本身仍可通过快速抬升孔隙水压力显著削弱坡体整体稳定性, 强调了在滑坡稳定性分析中考虑降雨时序效应的必要性。

(6) 在极端降雨条件下, 即便后期降雨强度减小, 滑坡体仍可能长期维持在不稳定状态, 因此强降雨及其后续阶段均应作为滑坡监测与防治的重点时段。

(7) 基于模拟结果, 建议针对该滑坡开展进一步的临界降雨阈值研究, 结合安全系数响应曲线, 可初步推断日降雨量超过 80 mm 且持续时间大于 2 小时的条件可能触发滑坡不稳定状态, 此阈值可为区域预警提供参考。

(8) 为提升该滑坡的长期稳定性, 建议在滑坡体中后部布置深度不小于 5 m 的竖向排水孔, 以加速表层入渗水排泄, 减少孔隙水压力累积。同时, 可在坡顶设置截水沟, 减少地表径流入渗。

(9) 后续研究可结合更多降雨情景与土体参数敏感性分析, 进一步优化治理方案, 并为类似地质条件下的滑坡防治提供设计依据。

参考文献

- [1] Iverson, R.M. (2000) Landslide Triggering by Rain Infiltration. *Water Resources Research*, **36**, 1897-1910. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- [2] Rahardjo, H., et al. (2007) Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes under Rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**, 1532-1543. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:12\(1532\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1532))
- [3] Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993) *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- [4] Ng, C.W.W. and Shi, Q. (1998) Stability of Unsaturated Soil Slopes under Transient Seepage. *Computers and Geotechnics*, **22**, 1-28. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(97\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(97)00036-0)
- [5] 王思敬, 张先伟. 降雨诱发滑坡机理研究进展[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 193-201.
- [6] Geo-Slope International Ltd (2018) *GeoStudio User's Guide*. Calgary.
- [7] Duncan, J.M. and Wright, S.G. (2014) *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- [8] 李同录, 等. 强降雨条件下滑坡渗流-稳定性耦合分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 673-681.
- [9] 陈祖煜. 边坡稳定分析方法[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [10] 王述红, 何坚, 杨天娇. 考虑降雨入渗的边坡稳定性数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(8): 1196-1200.