

降雨诱发滑坡全过程流固耦合模拟与滑坡时机研究

龚涛^{1, 2, 3, 4}, 何荣昊⁵, 何川¹, 王伟琦⁶, 钱江澎^{2, 3, 4}, 田浩⁵, 张继^{2, 3, 4},
彭军⁵, 赵军海^{2, 3}, 田波⁵, 吴宁安^{2, 3, 4}, 罗思远^{2, 3, 4}

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 四川省第一地质大队, 四川 成都 610071; 3. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 610071; 4. 自然资源部西部地区地质灾害防控与生态修复技术创新中心, 四川 成都 610071; 5. 中国石油西南油气田分公司川中油气矿, 四川 遂宁 629018; 6. 中国石油西南油气田分公司川西北气矿, 四川 绵阳 621799)

摘要: 针对滑坡监测预警虚警率较高的问题, 为探索更有效的降雨滑坡预测预警方法, 采用理论分析、现场调查、室内测试和数值模拟的方法, 从诱发滑坡的关键因素(水)出发, 基于对降雨诱发滑坡全过程的分析, 考虑降雨入渗边界、非饱和渗流、饱和渗流、岩土体软化和稳定系数计算, 研发了降雨入渗岩土体软化与稳定性动态计算算法, 并利用FLAC^{3D}内置FISH编程语言完成了程序开发; 然后, 通过案例研究, 从降雨诱发滑坡过程中的孔隙水压、饱和度、含水率、黏聚力、内摩擦角、最大剪应变增量与稳定系数, 以及滑坡位置与范围等方面, 对开发的算法与程序进行了检验; 最后, 从位于地表、滑面和滑床3个代表性部位的测点的含水率、位移、应力、孔隙水压、力学参数与稳定系数的关系, 及其在滑坡预测中的适用性进行了分析和讨论。研究发现, 潜在滑面中部的含水率达到峰值时, 该处黏聚力、内摩擦角降至谷值, 此时坡体稳定系数为1.000, 预示可能达到滑坡时机, 进而提出了一种基于潜在滑面中部含水率监测辅以雨量和地表位移互验的滑坡监测预警新方法, 并通过理论和数值模拟论证了其可行性。研究成果为降雨型滑坡研究提供了新的数值分析平台, 为滑坡精准预测预警做了有益探索。

关键词: 边坡工程; 降雨; 流固耦合; 含水率; 稳定性; 滑坡时机

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)10-2608-14

Fluid-solid coupled modeling of the entire process of rainfall-induced landslides and study of landslide timing

GONG Tao^{1, 2, 3, 4}, HE Ronghao⁵, HE Chuan¹, WANG Weiqi⁶, QIAN Jiangpeng^{2, 3, 4}, TIAN Hao⁵, ZHANG Ji^{2, 3, 4},
PENG Jun⁵, ZHAO Junhai^{2, 3}, TIAN Bo⁵, WU Ning'an^{2, 3, 4}, LUO Siyuan^{2, 3, 4}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. The 1st Geological Brigade of Sichuan, Chengdu, Sichuan 610071, China; 3. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610071, China; 4. Technology Innovation Center for Geological Disaster Prevention and Ecological Restoration in Western China, MNR, Chengdu, Sichuan 610071, China; 5. Central Sichuan Oil & Gas Distract, PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Suining, Sichuan 629018, China; 6. Northwest Sichuan Gas Distract, PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Mianyang, Sichuan 621799, China)

Abstract: To address the high false-alarm rate in landslide monitoring and early warning systems, this study aimed

收稿日期: 2025-04-03; **修回日期:** 2025-06-28

基金项目: 四川省重大科技专项项目(2023ZDZX0008); 中国石油西南油气田分公司科学研究与技术开发项目(20230305-08); 四川省地质矿产勘查开发局成都地质科创中心建设项目(SCDZ-KCPT202301)

Supported by the Major Science and Technology Project of Sichuan Province (Grant No. 2023ZDZX0008), Scientific Research and Technological Development Project of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company (Grant No. 20230305-08) and Construction Project of Chengdu Geological Science and Technology Innovation Center of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources (Grant No. SCDZ-KCPT202301)

作者简介: 龚涛(1992-), 男, 博士后, 2020年毕业于重庆大学矿业工程专业, 现任高级工程师, 主要从事地质灾害防治与应用数值仿真技术方面的研究工作。E-mail: gongtaoyx@163.com。通讯作者: 何川(1964-), 男, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: Chuanhe21@163.com

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2025.0211

to explore more effective methods for rainfall-induced landslide prediction and early warning. By integrating theoretical analysis, field investigations, laboratory testing, and numerical simulation, a dynamic computational algorithm for rock-soil mass softening and stability under rainfall infiltration was developed, focusing on water—the critical factor triggering landslides. This algorithm was established based on a comprehensive analysis of the entire process of rainfall-induced landslides, incorporating considerations of rainfall infiltration boundaries, unsaturated seepage, saturated seepage, rock-soil mass softening, and stability coefficient calculation. The corresponding program was further implemented using FLAC^{3D}'s built-in FISH programming language. Subsequently, through a case study, the developed algorithm and program were validated through analysing pore water pressure, saturation, moisture content, cohesion, internal friction angle, maximum shear strain increment, stability coefficient, landslide location, and extent during rainfall-induced slope failure. Finally, the relationships between monitored data (moisture content, displacement, stress, pore water pressure, and mechanical properties) at three representative locations (ground surface, slip surface, and slip bed) and the stability coefficients, along with their applicability in landslide prediction, were analysed and discussed. The research found that when the moisture content in the middle of the potential sliding surface reaches its peak, the cohesion and internal friction angle at this location drop to the trough value. At this point, the slope stability coefficient reached 1.000, indicating the timing of the landslide. Based on this finding, a new landslide monitoring and early warning method was proposed. This method focuses on monitoring the moisture content in the middle of the potential sliding surface, supplemented by cross-verification through rainfall and surface displacement data. Its feasibility was demonstrated through theoretical analysis and numerical simulations. This research provided a new numerical analysis platform for the study of rain-induced landslides and made beneficial explorations for the precise prediction and early warning of landslides.

Key words: slope engineering; rainfall; fluid-solid coupling; water content; stability; landslide timing

1 引言

滑坡是国内外最主要的地质灾害之一^[1], 甚至为仅次于地震的第二大自然灾害, 全球每年因滑坡灾害造成巨大的经济损失和人员伤亡。降雨普遍被认为是诱发滑坡的关键因素, 90%的滑坡与降雨直接或间接相关^[2]。例如 2025 年 2 月 8 日, 因前期持续降雨, 四川省宜宾市筠连县沐爱镇金坪村 2 组突发山体滑坡, 10 人遇难、19 人失联、2 人受伤; 2024 年 7 月 28 日, 因山洪引发湖南省衡阳市南岳区寿岳乡岳林村山体滑坡, 15 人遇难、6 人受伤; 2024 年 1 月 22 日, 因持续雨雪, 云南省昭通市镇雄县塘房镇凉水村发生山体滑坡, 44 人遇难。这些事例昭示着降雨滑坡研究具有非常重大的现实价值和意义, 且仍需深入研究。

降雨诱发滑坡早已引起学者们的广泛关注, 并取得了一系列研究成果^[3-7]。在内容上, 研究了降雨滑坡的稳定性^[8-10]、危险性^[11-12]、易发性^[13]、发生概率^[14-15]及监测预警等。在监测预警方面, 根据滑坡与降雨量的定量关系, 形成了经验统计法和预警分析法的降雨滑坡预测方法。前者主要通过分析诱发滑坡发生的降雨事件特征(降雨量、降雨强度和持

续时间)与滑坡的时空联系, 获得诱发滑坡的降雨阈值, 建立基于降雨特征的滑坡监测体系并判断滑坡发生概率^[16]。该方法简便易行但只适用于特定区域, 不同区域间经验模型差异较大^[16-17], 且通过简单的函数关系描述降雨与滑坡之间的关系^[18], 未充分考虑影响滑坡的地质、地貌等条件, 导致滑坡预报的准确性和可靠性降低^[19]。后者通过现场或遥感监测^[20-21]、室内物理模型试验^[22-25]、数值模拟^[26-27]或其综合, 以特定条件下坡体变形情况与降雨的对应关系, 构建预警判据以实现滑坡预警^[28]。随着传感器技术的快速发展, 现场监测法成为防范滑坡灾害的重要手段, 但单纯的现场监测缺乏对滑坡孕灾环境和机制的深层分析, 实质上将滑坡隐患当作“黑箱子”, 侧重对输出的监测数据的分析。室内物理模型试验法可直观模拟滑坡失稳演化过程, 间接建立滑坡预测判据, 但滑坡动力学模拟具有明显的尺度效应和时间效应, 物理模型与现场实际的相似性(包括岩性、地层分布、物理力学参数、边界条件等)和可靠性仍面临极大挑战。数值模拟法具有直观、高效的特点, 便于反演现场复杂地质条件和开展大量重复性、敏感性试验, 因而成为常用研究方法之一^[29-30]。通过建立地质模型直观模拟滑坡失稳演化过程, 实现复杂地质条件及不同边界条件下滑坡渗流和稳定

性分析, 构建滑坡预测判据, 进而预测滑坡的发生。在信息化、数字化和智能化发展趋势下, 数值模拟用于滑坡预测研究将更为广泛。但当前多数模拟分析仍采用二维剖面模拟, 难以真实反映滑坡的三维空间特征, 也未充分考虑降雨入渗、流固耦合及岩土体力学参数动态软化过程等关键因素, 制约了降雨诱发滑坡精准预测预警的实现。

虽然已有通过位移、应力、地表水分、牛顿力^[31]、声发射^[20]等进行滑坡预测预警, 但仍存在虚警率较高^[32]的问题, 仍需深入探索。前述测项内容可归为“果”, 何不直接向“因”探索精准监测之法? 在诱发滑坡的众多因素中, 从量和概率而论, 水是直接诱发滑坡的关键, 无论是雨水下渗、地下水位上升还是冰雪融化。因此多见降雨、库水变幅和热融等诱发滑坡, 而此中又以降雨诱发滑坡最为常见。

鉴于此, 本文旨在开展降雨诱发滑坡全过程流固耦合模拟与滑坡时机研究。基于高精度三维地质建模, 综合考虑非饱和-饱和渗流过程中降雨入渗效应及岩土体物理力学参数动态软化特性, 通过 FLAC^{3D} 平台的二次开发与流固耦合数值仿真, 实现降雨滑坡全过程流固耦合模拟, 探索滑坡失稳启滑时机, 以期攻克滑坡发生时机预测的科学难题。本文不仅可为降雨型滑坡研究提供新的数值分析平台, 还将为滑坡精准预测预警做出有益探索。

2 降雨入渗岩土体软化与稳定性计算理论

2.1 渗流控制方程

根据水体质量守恒, 降雨入渗过程中发生的非饱和-饱和渗流控制方程可表示^[33]为

$$[c(h) + \beta s_s] \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] \quad (1)$$

式中: h 为水头; $c(h)$ 为容水度, 即岩土完全饱水时所能容纳的最大水体积与岩土总体积的比值, 通常等于孔隙度; β 为饱和相关参数, 非饱和区取 0, 饱和区取 1; s_s 为单位储水系数, 非饱和区取 0, 饱和区为常数; t 为时间变量; k_{ij}^s 为饱和渗透张量; $k_r(h)$ 为相对渗透系数; x_i, x_j 为坐标。

2.2 入渗边界

天然条件下, 地表岩土体通常处于非饱和状态, 随着降雨入渗过程的发展, 原非饱和区可能发生饱和或仍处于非饱和状态, 具体取决于入渗量、岩土体渗透系数等。当某一时刻地表岩土体饱和时, 此

刻降雨表现为地表径流, 反之则表现为下渗。朱伟等^[34-35]的土柱降雨入渗试验表明, 降雨入渗边界需结合地表径流情况来确定, 是一个随降雨入渗过程不断发展变化的动态边界。当地表未出现径流时, 此时降雨全部入渗, 其边界流量满足:

$$\left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] n_i |_{\Gamma} = p \quad (2)$$

式中: n_i 为坡面法线向量, p 为降雨强度。

边界水头满足:

$$h \leq 0 \quad (3)$$

当地表出现径流时, 降雨不能全部入渗, 未入渗部分在地表形成径流。对于滑坡研究时, 坡面通常存在一定坡度, 故假设无积水, 则边界水头可表示为

$$h = 0 \quad (4)$$

边界流量应满足:

$$\left[k_{ij}^s k_r(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] n_i |_{\Gamma} < p \quad (5)$$

2.3 非饱和渗流

非饱和和岩土体中存在基质吸力, 是反映非饱和土特征的重要参数之一, 可用以反映非饱和岩土体的入渗能力^[36], 其值与含水量或饱和度有关, 常用土水特征曲线表征。根据 Van Genuchten 模型^[37]表征的土-水特征曲线, 岩土体体积含水率与基质吸力之间的函数关系为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\psi/a)^{n'}]^{m'}} \quad (6)$$

式中: θ 为体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; ψ 为基质吸力, $\psi = u_a - u_w$, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力; a, n', m' 均为相关拟合参数, a 为土水特征曲线由饱和状态进入非饱和状态时拐点所对应的基质吸力, 一般土体 a 取值 100, 为岩体时 $a = 10$ ^[36]; n' 为土-水特征曲线拐点处的斜率, 表示初始进气阶段含水率的变化率; m' 为与土体残余含水率对应的土性参数, $m' = 1 - 1/n'$ ^[27, 38]。

结合岩土体体积含水率与饱和度的关系:

$$\theta = ns \quad (7)$$

式中: n 为孔隙率; s 为岩土体饱和度, 饱和时 $\theta_s = n$ 。因此得到岩土体饱和度与基质吸力的关系式:

$$s = s_r + \frac{1 - s_r}{[1 + (\psi/a)^{n'}]^{m'}} \quad (8)$$

式中: s_r 为残余饱和度。当 $s_r = 0$ 时, 有

$$s = \frac{1}{[1 + (\psi/a)^{n'}]^{m'}} \quad (9)$$

非饱和土中, 基质吸力与抗剪强度密切相关, 可采用 D. G. Fredlund 和 N. R. Morgenstern^[39] 双应力变量公式表示:

$$\tau = c_e + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi_e + \psi \tan \varphi_b \quad (10)$$

式中: c_e 为有效黏聚力, σ_n 为法向总应力, φ_e 为有效内摩擦角, φ_b 为吸力内摩擦角。

基质吸力使土颗粒间产生毛细管力和胶结作用, 起到增加黏聚力的作用。该部分基质吸力引起的黏聚力 c_ψ 可表示为

$$c_\psi = c_e + \psi \tan \varphi_b \quad (11)$$

基质吸力对内摩擦角影响较小, 在高吸力时(如干燥状态)可能因胶结作用增强而使内摩擦角有所提高。因此, 干燥或旱季基质吸力高, 滑坡相对不易发生; 反之, 根据式(9), 潮湿或雨季岩土体的含水量增大, 饱和度升高, 基质吸力绝对值减小, 根据式(10), 抗剪强度降低, 因而相对易发生滑坡。

将 Van Gennuchten 模型代入 N. T. Burdine 等^[40-41] 提出的统计传导率模型中可得到非饱和状态下基质吸力与相对渗透系数 k_r 的关系式:

$$k_r = \frac{\{1 - (\psi/a)^{n'-1} [1 + (\psi/a)^{n'}]^{-m'}\}^2}{[1 + (\psi/a)^{n'}]^{m'/2}} \quad (12)$$

式(12)可以用饱和度表示^[42]为

$$k_r = s^{1/2} [1 - (1 - s^{1/m'})^{m'}]^2 \quad (13)$$

再根据渗透系数与相对渗透系数的关系:

$$k = k_r k_s \quad (14)$$

式中: k_s 为岩土体饱和渗透系数。

从而得到非饱和状态下岩土体渗透系数与饱和度的关系式:

$$k = k_s s^{1/2} [1 - (1 - s^{1/m'})^{m'}]^2 \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 随着岩土体饱和度逐渐增大, 渗透系数随之增大。当基质吸力为 0 时, 饱和度为 1, 此时渗透系数达到最大。

2.4 饱和渗流

在流固耦合过程中, 岩土体的渗透系数与岩土体的孔隙率、应力、应变状态有关。根据贾善坡^[43] 的推导, 渗透系数随岩土体受力过程中发生的体积应变按下式进行演化:

$$k = k_0 \left[\frac{1}{n_0} (1 + \varepsilon_v)^3 - \frac{1 - n_0}{n_0} (1 + \varepsilon_v)^{-1/3} \right]^3 \quad (16)$$

式中: k_0 为初始渗透率, n_0 为初始孔隙率, ε_v 为体积应变。

2.5 岩土体软化

软化作用是指由于水的活动使岩土体强度降低的作用, 是岩土体的普遍特性。降雨入渗和地下水活动使岩土体在不同区域的含水率发生变化, 而不同的含水率对应不同的软化程度和不同的岩土体强度。以莫尔-库仑本构模型参数为例, 不同含水率下的岩土体物理力学参数可表示为

$$\left. \begin{aligned} E' &= f(E, w) \\ \nu' &= g(\nu, w) \\ c' &= h(c, w) \\ \varphi' &= i(\varphi, w) \\ \sigma'_t &= j(\sigma_t, w) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: $E, \nu, c, \varphi, \sigma_t$ 分别为干燥条件下的弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、抗拉强度; $E', \nu', c', \varphi', \sigma'_t$ 分别为遇水软化后的弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、抗拉强度。等号右边为与含水率和干燥条件下的参数有关的软化表达式, 其具体表达式因不同地方不同岩层而异, 需由具体研究区岩土力学试验确定。

2.6 稳定系数

国际通用岩土工程专业分析软件如 FLAC^{3D} 等采用强度折减法进行斜坡稳定系数求解, 无需假设滑面位置, 根据模型自身力学行为特性推断潜在滑面并计算出稳定系数, 较之极限平衡法计算结果更为直观可靠^[44]。其实现是通过不断增加折减系数折减岩土体与结构面的强度参数使之达到极限平衡状态, 此时对应的折减系数即为稳定系数, 表达式为

$$c_F = c / F_{\text{trial}} \quad (18)$$

$$\varphi_F = \arctan(\tan \varphi / F_{\text{trial}}) \quad (19)$$

式中: c_F 为折减后的黏聚力, φ_F 为折减后的内摩擦角, F_{trial} 为折减系数。

3 降雨入渗岩土体软化与稳定性动态计算算法及其数值实现

基于前述降雨入渗岩土体软化与稳定性计算的理论分析, 本文基于国际通用岩土工程专业分析软件 FLAC^{3D} 内置 FISH 语言开发了实现降雨入渗岩土体软化与稳定性动态计算的数值算法。该算法的

核心由流固耦合计算模块、软化计算模块和稳定系数计算模块组成,通过不断的遍历、判断、调用和循环计算实现预期功能,其执行流程如图 1 所示。

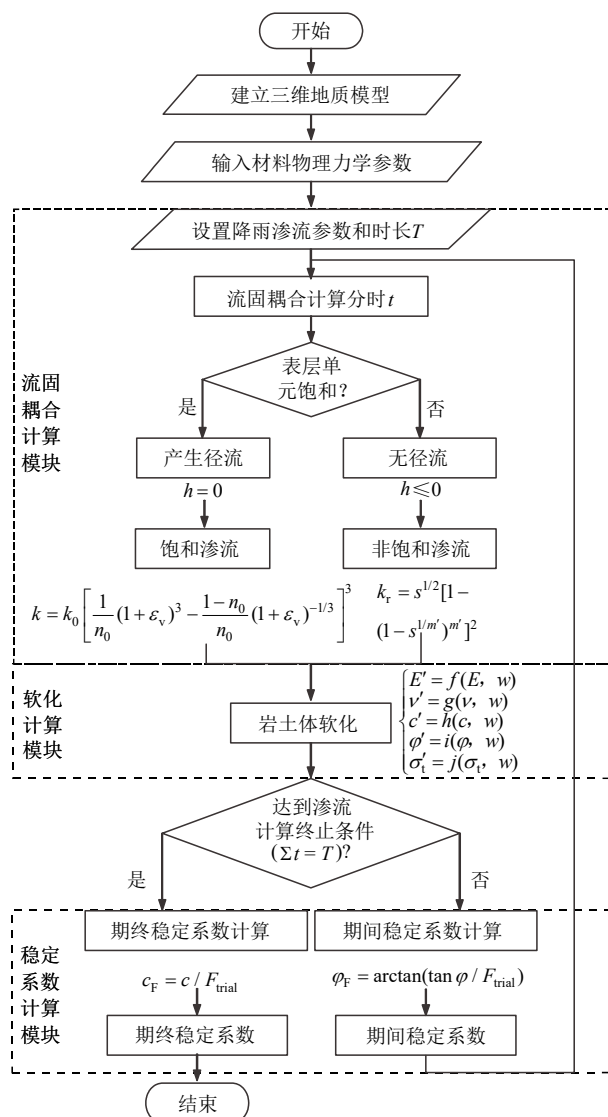


图 1 降雨入渗岩土体软化与稳定性动态计算算法流程

Fig.1 Algorithm flowchart for dynamic calculation of softening and stability of rock-soil mass under rainfall infiltration

首先,通过在研究区采集地表地形数据,结合钻探获取的地下岩层信息,建立地上地下一体化三维地质模型,载入至数值模拟软件。将现场钻探获取的岩芯在天然状态下的物理力学参数和其他材料参数作为初始强度参数,为模型中相应地层和材料赋值,并赋予渗透系数、孔隙率等初始渗流参数,并设置降雨强度、降雨时长或计算时长。然后,以时长 t 为间隔进行流固耦合计算,当表层单元饱和时,单元降雨量大于单元储水量而产生地表径流,渗入地下部分的水量进行饱和渗流。当表层单元处

于非饱和状态时,单元降雨量小于单元储水量而无地表径流产生,此时渗入地下部分的水量进行非饱和和渗流。降雨渗入地下岩土体后,根据岩土体的含水率或饱和度不同而发生不同程度的软化(软化规律由钻探获取的岩芯测取岩土试件在不同含水率下的物理力学参数而建立),致使岩土体物理力学参数降低,进而稳定性降低——运用强度折减法可计算此刻岩土体的期间稳定系数(即整个模拟计算期间某一时刻的稳定系数)。如此循环往复进行降雨入渗流固耦合和岩土体软化计算,直至达到设置的期终时长 T 。此后,可进行期终稳定系数计算,得到目标时刻的稳定系数,指导防灾预警。

4 算法响应检验与数值模拟分析

4.1 研究区概况

为开展某科技项目需要,选择四川省遂宁市安居区某油气井站边坡作为案例研究区(见图 2)。该区地表主要由第四系全新统残坡积层(Q_4^{el+dl})组成,下伏基岩为侏罗系上统遂宁组(J_3s)泥岩(见图 3)。边坡为人工开挖形成的两级人工边坡,第一级边坡高 4 m,马道宽 0.8 m,第二级边坡高 11 m,总高 15 m。采用素喷混凝土护坡,坡顶为截水沟,其后为林地。前部井站建成后井站外恢复为耕地。2023 年 8 月 3 日,受连续强降雨影响,井站边坡发生长约 20 m、宽约 32 m、高约 17.7 m 的滑坡,滑坡后缘边界位于坡顶截水沟之上,裂缝宽约 0.6 m、深逾 5 m,主滑方向 251° ,滑体平均厚约 5 m,滑坡面积约 437 m^2 ,方量约 $2\,200 \text{ m}^3$,属小型滑坡。滑体物质组成主要



图 2 四川省遂宁市安居区某油气井站边坡研究现场

Fig.2 Field research site of slope at a certain oil and gas well station in Anju District, Suining City, Sichuan Province

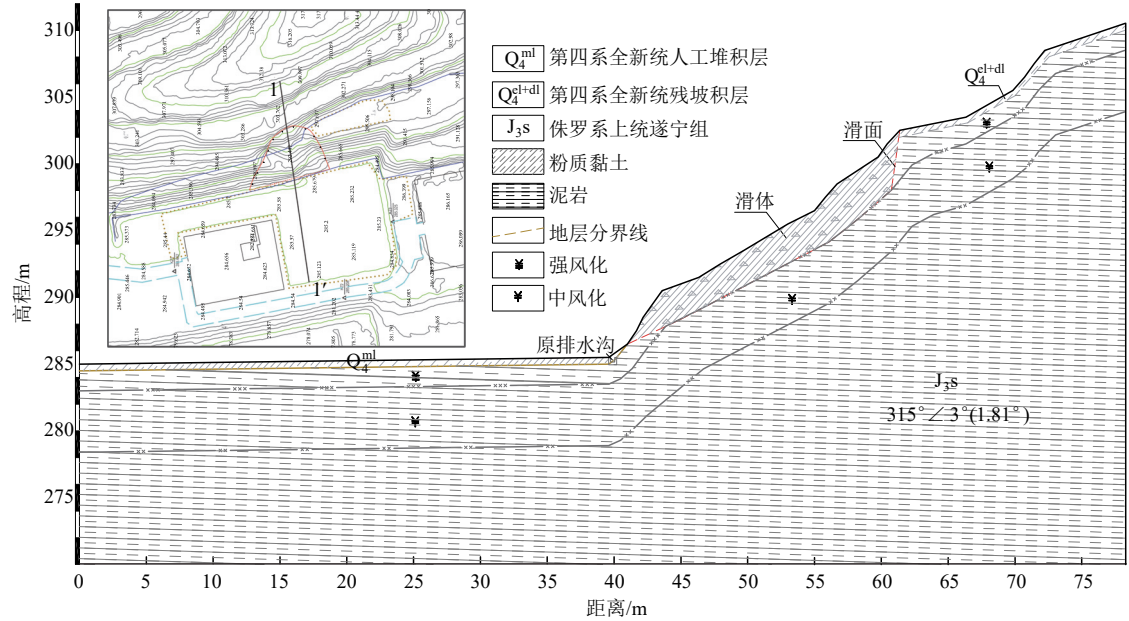


图 3 研究现场的工程地质剖面图

Fig.3 The engineering geological profile of the research site

为残坡积层和强风化泥岩，滑床为中风化泥岩，产状 $315^{\circ} \angle 3^{\circ}$ ，缓倾坡内。滑坡主要原因为泥岩性软，易风化，加之原坡面转角阳角(见图 4(a))处两面临空的不利地形，使得连续强降雨作用下水渗入强风化泥岩并将其软化，而在中风化泥岩中渗透性降低，从而在原坡面转角阳角处强风化与中风化界面发生滑坡。

4.2 现场数据获取

通过机载 LiDAR 作业扫描地表获取地面点云，然后剔除植被生成地表地形。通过现场多孔钻探获取地下岩层信息，结合原边坡施工图设计，建立并还原了研究区滑坡前地上地下一体化三维地质模型。同时，钻探获取的岩芯为岩土体物理力学参数

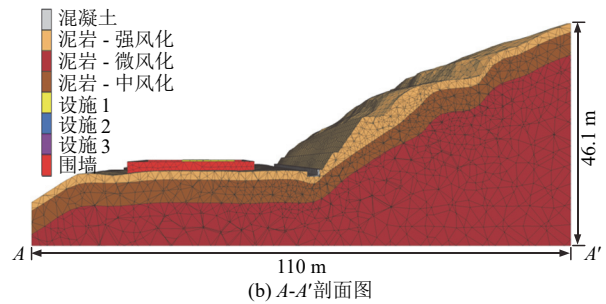


图 4 研究现场滑坡前数值模拟几何模型

Fig.4 Geometric model of numerical simulation for the field research site before landslide

测试提供了试样。地下水位测量为后续研究提供了水文数据(见图 5)。

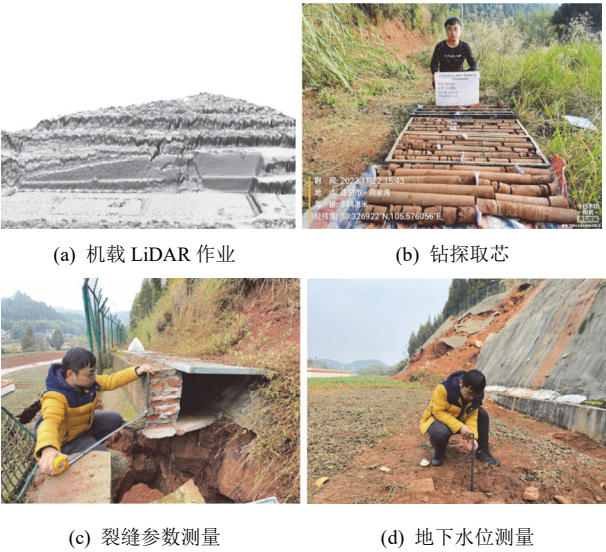
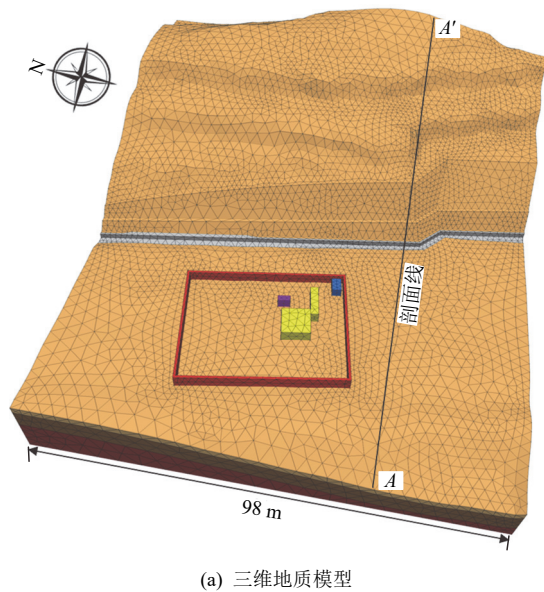


图 5 现场获取数据

Fig.5 Data acquisition in the field

将钻探所获岩样按照相关测试需要加工为相应试件,如图6所示,然后制备为天然、干燥和饱和状态的试件。干燥状态的试件采取烘干法制备,于烘箱内 $105\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下烘 24 h,然后静置于干燥器中冷却至室温后进行测试。饱和状态的试件采用真空抽气法制备,于真空饱和容器内 -101.325 kPa 以上气压中持续抽气 6 h,然后在真空状态下缓慢注入去离子水至完全浸没试件,再关闭真空泵在大气压下静置 4 h 后进行测试。参照标准^[45]分别测取试件在天然、干燥和饱和状态下的物理力学参数。研究区不同风化程度的泥岩的物理力学参数随含水率的变化规律如图7所示,密度随含水率增加呈线



图6 部分泥岩试件照片

Fig.6 Partial mudstone specimen images

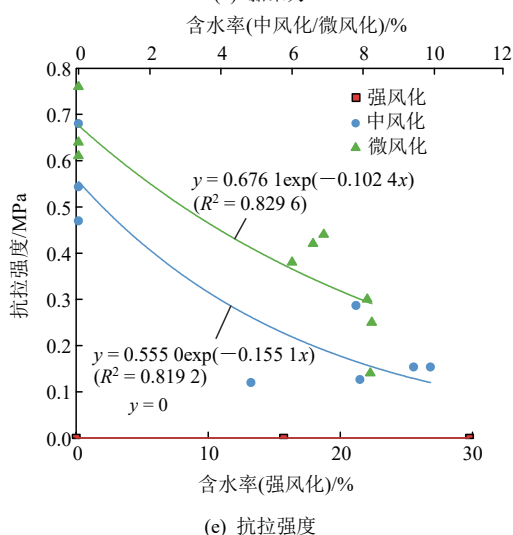
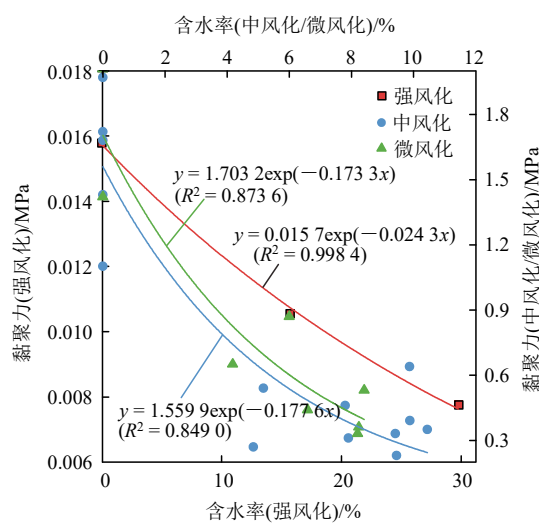
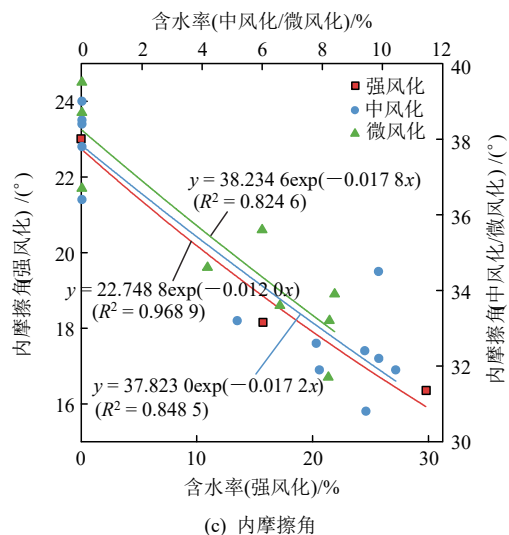
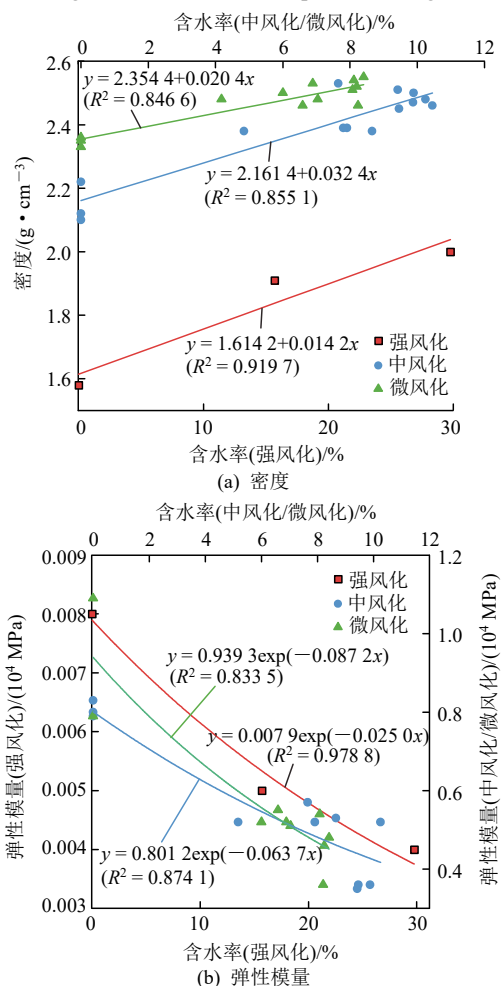


图7 研究区岩体物理力学参数随含水率的变化规律
Fig.7 Physical-mechanical properties of rock mass in the study area and their variation with water content

性增大,弹性模量、内摩擦角、黏聚力和抗拉强度随含水率增加呈指数下降,符合孟生勇等^[9]中力学

强度随含水率升高呈指数下降的规律。

4.3 数值模型建立

根据前述现场数据建立了如图 4 所示数值模拟用几何模型，模型尺寸为 110 m×98 m×46.1 m(长×宽×高)，136 133 个单元，26 706 个节点。因建模范围内均为泥岩，但风化程度不一，因不同风化程度的物理力学参数不同，故以风化程度为所建模型分组，以便后续对应参数赋值。边坡护坡所用素喷混凝土层在滑坡范围内所见厚度不足 2 cm，相对所建模型而言极薄，为防计算中产生畸变，未予建模。模型下边界采用固定边界，四周限制水平位移，上边界采用自由边界，降雨强度按此次滑坡前集中降雨期间平均降雨强度取值。本构模型采用莫尔-库仑本构模型，地层参数按图 7 中天然含水率对应参数取均值，后在流固耦合计算进程中根据含水率变化进行动态更新。强风化、中风化和微风化泥岩的初始孔隙率分别为 0.32，0.18，0.16，渗透系数分别为 1.09×10^{-6} ， 3.31×10^{-8} ， 1.10×10^{-8} cm/s。垂向地应力场按自重应力场生成，水平应力场由岩土体侧压产生。初始平衡后，清除模型中位移、速度和塑性变

形，完成初始反演。

4.4 算法响应检验

根据前述降雨入渗岩土体软化与稳定性动态计算算法实现的降雨入渗过程如表 1 所示。降雨入渗前岩土体处于非饱和状态，存在基质吸力，表现为负的孔隙水压，其总体表现为随着渗流时间的增长和岩土体饱和度的不断升高而减小。正的孔隙水压为流固耦合作用下地下蓄积的具有自由水面的水所受的压力，随着降雨时长的增长而增大。在雨水下渗过程中，在地表与地下水面之间的区域，从上到下其饱和度是由高而低分布的，当下渗的雨水渗入地下水面后地下水位上升，此时饱和度随水位上升而升高。含水率的分布与饱和度的分布一致。上述过程与现实物理过程相符。

岩土体普遍具有软化性，岩土体物理力学参数值与含水率息息相关。随表 1 中含水率的升高，岩体中黏聚力和内摩擦角参数呈现如表 2 所示的相应降低，岩体的最大剪应变增量随之增大，岩体稳定系数(即 factor of safety，其实质只能表征岩土体稳定与否，不能论断是否安全，因此译为“稳定系数”

表 1 降雨入渗过程中岩体孔隙水压、饱和度和含水率的演变
Table 1 Evolution of pore water pressure, saturation and moisture content of rock mass during rainwater infiltration

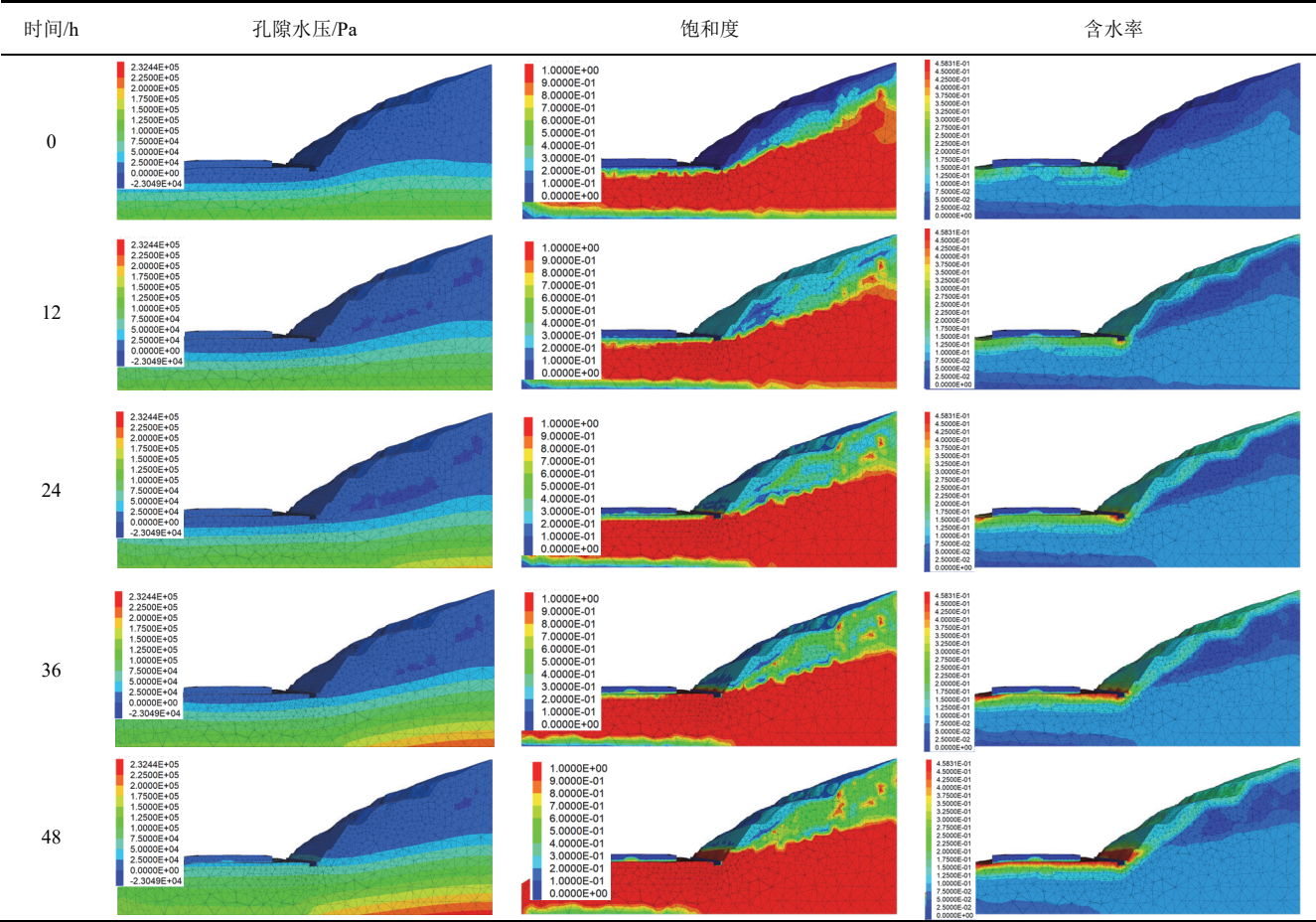
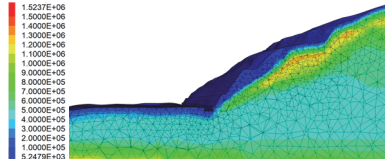
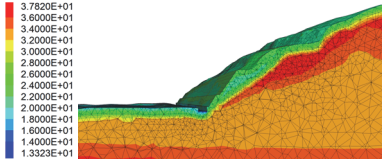
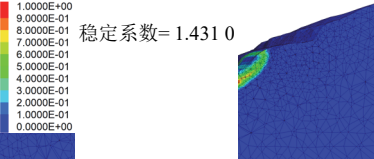
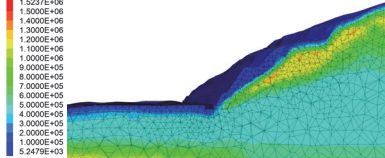
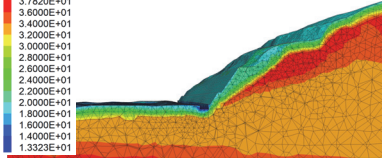
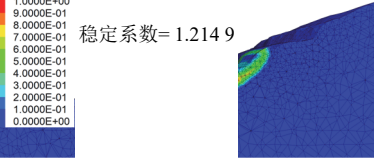
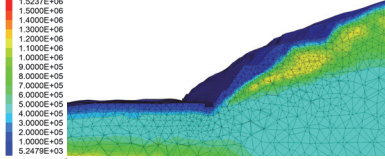
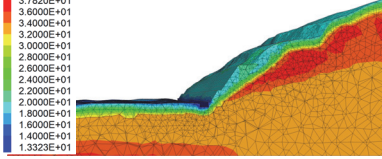
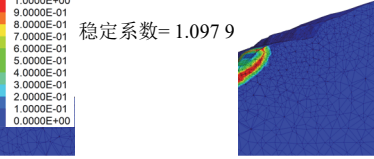
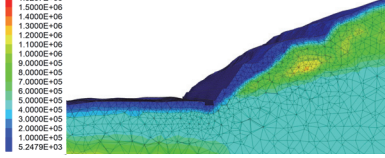
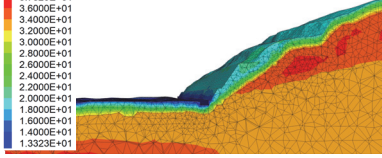
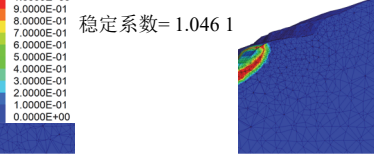
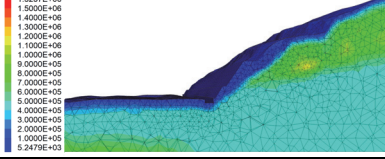
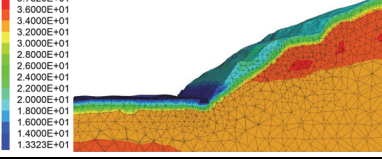
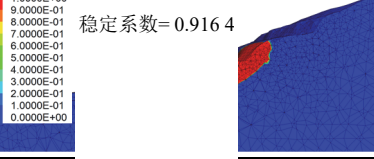


表 2 降雨入渗过程中岩体黏聚力、内摩擦角、最大剪应变增量与稳定系数的演变

Table 2 Evolution of cohesion, internal friction angle, maximum shear strain increment and stability coefficient of rock mass during rainfall infiltration process

时间/h	黏聚力/Pa	内摩擦角/(°)	最大剪应变增量与稳定系数
0			 稳定系数= 1.431 0
12			 稳定系数= 1.214 9
24			 稳定系数= 1.097 9
36			 稳定系数= 1.046 1
48			 稳定系数= 0.916 4

更妥)亦随之降低,直至滑坡发生。该过程亦与现实物理过程相符,表明了所研发算法的合理性和有效性。

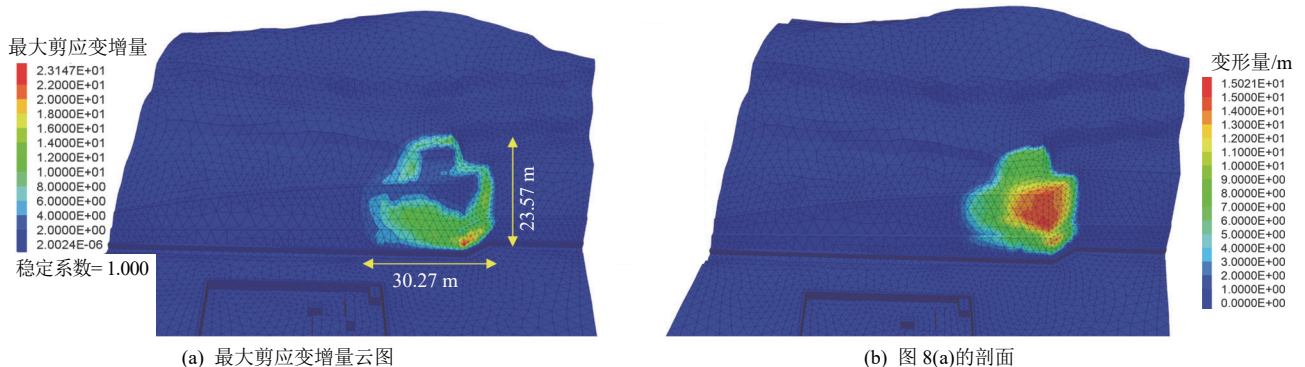
临滑时,稳定系数 = 1.000,潜在滑坡范围如图 8 所示,潜在滑坡位置与图 2 实际滑坡位置基本一致,潜在滑坡范围斜长 23.57 m,潜在滑坡宽度 30.27 m,潜在滑坡深度 6.18 m,最大位移 15.02 m,与前述现场实际情况相当。而且图 8 还揭示了潜在滑移面位于第 1 层与第 2 层岩层的交界面,与现场勘察“滑床为中风化泥岩(模型中第二层岩层)”的结论相符,证明了本算法的稳定性和可靠性。进而在潜在滑坡范围中部的地表和地下岩层交界面分别布设了 P1,

P2 和 P3 三个监测点,如图

5 结果与讨论

5.1 含水率 - 稳定系数分析

P1, P2 和 P3 监测点获取的岩层含水率如图 9 所示。因 P1 监测点位于地表,因此 P1 处含水率在开始发生降雨入渗时便线性升高,而雨水逐渐下渗,直到渗入至该层底部,即该层岩层“导通”时,含水率达到最大值,然后基本维持在该值左右。此后,雨水开始渗入第 2 层岩层,由于第 2 层岩层渗透系



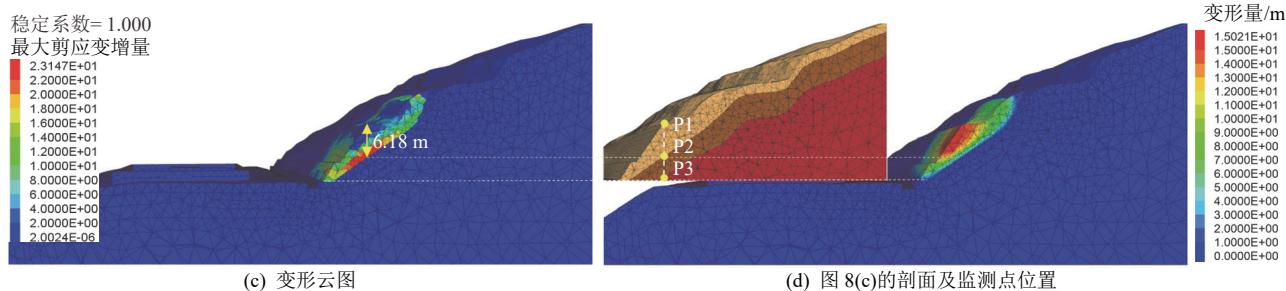


图 8 临滑时潜在滑坡范围

Fig.8 Potential landslide range when approaching sliding

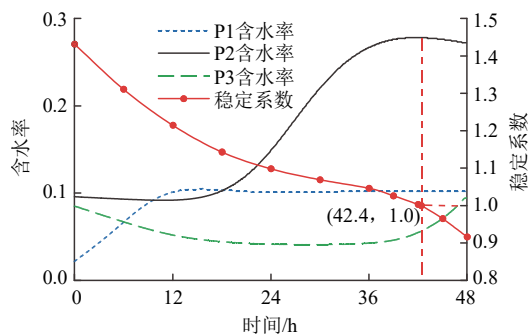


图 9 岩层含水率与稳定系数随时间变化曲线

Fig.9 Curves of moisture content and stability coefficient of rock strata varying with time

数比第 1 层岩层小, 因此向下渗流过程受阻, 水分在第 1 层岩层底部蓄积(易造成更大程度的岩土体软化, 从而为滑面的形成创造条件), 如图 10 所示, 因此 P2 处含水率从此明显上升, 也同样经过了一个几乎线性升高的阶段, 随后升势渐缓, 在 42.4 h 时达到峰值, 此后逐渐降低。P3 位于潜在滑面以下, 且距离液面较近, 因此变化较小, 其变化主要由降雨过程中地下水位波动引起。以上过程与实际过程相符, 再次印证了本数值模拟方法的合理性和有效性。

饱和度

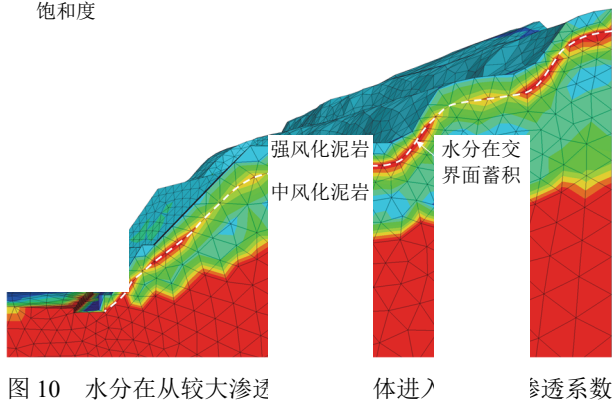


图 10 水分在从较大渗透的岩体的交界面蓄积
Fig.10 Water accumulation at interface from rock mass with larger permeability coefficient to rock mass with smaller permeability coefficient

图 9 还展现出降雨过程中边坡稳定性随降雨入渗时长的增长而单调降低, 在降低速率方面, 表现

为先快、再慢(在稳定系数为 1 的前后一段时间内)、后快的规律。同时, 揭示了 P2 处(潜在滑面中部)含水率达到峰值时边坡失稳的现象。这为滑坡监测提供了一种新的思路, 即可在潜在滑面中部布设含水率监测仪, 通过监测含水率值或其变化速率来预测滑坡时机。虽然当前已有监测土壤含水率进行滑坡预测的实践, 但布设的位置与本文建议的位置完全不同, 几乎均布置在距地表仅几十厘米处。例如在龙门山断裂带上地质灾害多发的某县部署了监测地下 40 cm 处含水率的监测设备, 每逢较强降雨, 监测设备均触发预警, 但多年来该县并未发生滑坡。

5.2 位移分析

位移监测在滑坡监测中极为普遍, 本文在 P1, P2 和 P3 处分别进行了位移监测, 监测结果如图 11 所示。P1 位于地表, 滑坡前期位移无明显变化, 在临滑前一段时间位移明显加速增大, 直到临滑

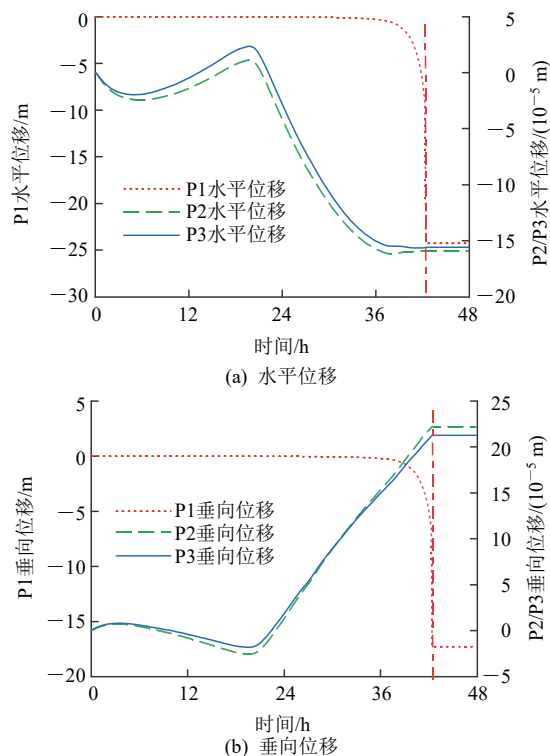


图 11 P1, P2 和 P3 监测点的位移监测数据

Fig.11 Monitored displacement data of P1, P2 and P3

(42.4 h)时位移陡增。这表明正如实践所知,通过地表位移或其变化速率进行滑坡预警是可行的。但是也存在位移明显增大后不再明显变形,进而造成虚警的问题。P2 位于滑面处,在临滑前较长一段时间内其位移有非常微弱的增加,难以指导监测预警,位于滑床内的 P3 处亦是如此,意味着直接通过深部绝对位移监测恐难以有效进行滑坡滑前预警。

5.3 应力分析

P1, P2 和 P3 处应力监测数据如图 12 所示。P1, P3 分别位于地表和滑床内,其应力变化无显著规律。P2 位于滑面,随着降雨入渗的持续,该处应力变化规律为缓升→加快升高→缓升→速降→基本稳定。缓升→加快升高→缓升过程应为滑坡推力所致。速降过程大约始于 38 h 时,此时正是地表位移陡增阶段,应为地表变形卸压所致。虽然潜在滑坡范围中部滑面处应力具有可指导监测预警的特征,但实践中并未将应力计布设在该处,且与其监测该处应力,不如监测地表位移,所以通过应力监测进行滑坡滑前预警仍面临较大挑战。

5.4 孔隙水压分析

P1, P2 测点位于非饱和区(P1, P2 孔隙水压曲线基本重叠),其孔隙水压为负,即所谓基质吸力。虽然根据式(9)和(10)可知连续降雨条件下岩土体含水率升高而基质吸力降低,导致非饱和岩土体抗剪强度降低,进而影响坡体稳定性,但该作用较为微

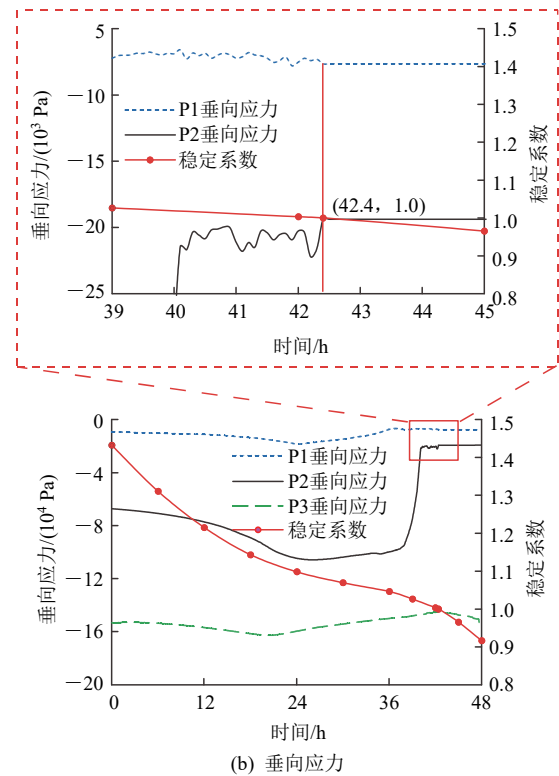


图 12 P1, P2 和 P3 监测点的应力监测数据

Fig.12 Monitored stress data of P1, P2 and P3

弱。P3 测点原处于饱和区,在渗流过程中因水分流出而水压降低,后因后方补给又不断升高。因其位于滑床内,与坡体稳定系数无明显相关性,如图 13 所示。表明通过孔隙水压监测尚难以对滑坡进行有效的预测预警。

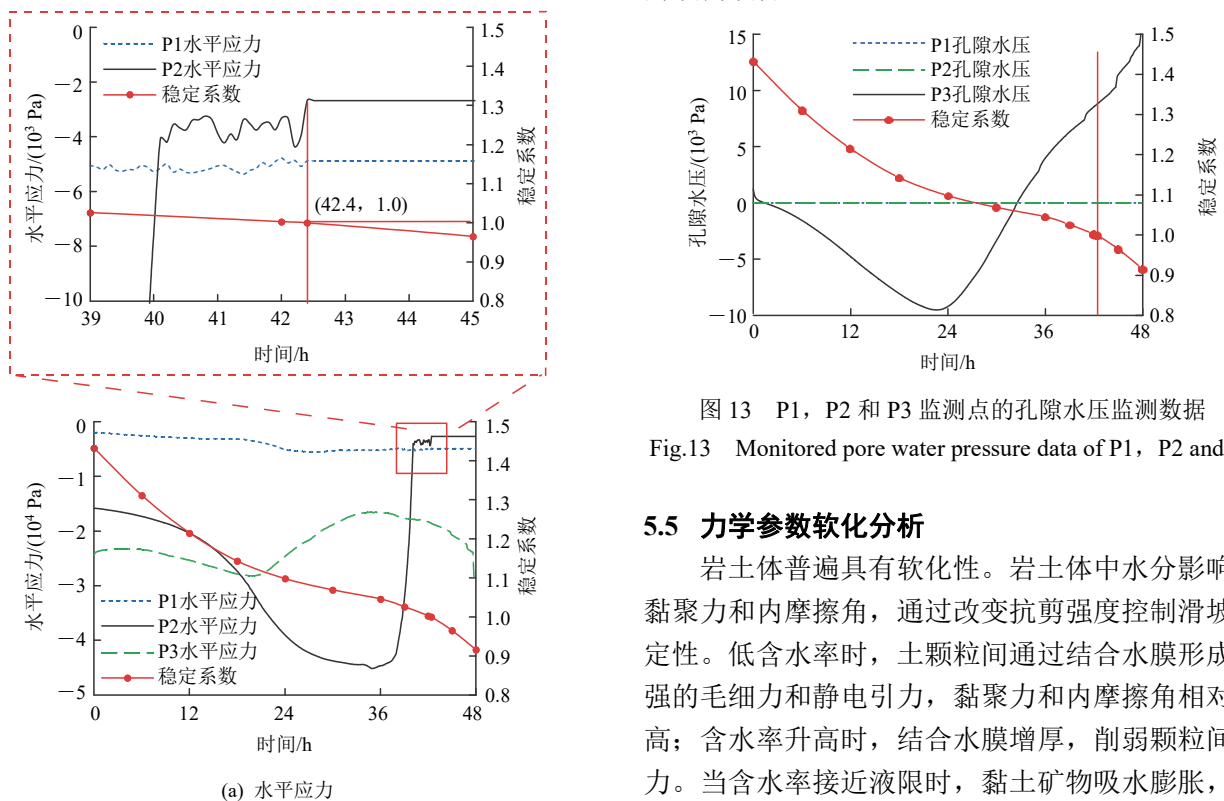


图 13 P1, P2 和 P3 监测点的孔隙水压监测数据

Fig.13 Monitored pore water pressure data of P1, P2 and P3

5.5 力学参数软化分析

岩土体普遍具有软化性。岩土体中水分影响其黏聚力和内摩擦角,通过改变抗剪强度控制滑坡稳定性。低含水率时,土颗粒间通过结合水膜形成较强的毛细力和静电引力,黏聚力和内摩擦角相对较高;含水率升高时,结合水膜增厚,削弱颗粒间引力。当含水率接近液限时,黏土矿物吸水膨胀,将

进一步破坏土颗粒间的结构连接, 并且渗流过程中可能存在溶蚀和潜蚀作用, 从多方面导致黏聚力下降。含水率升高会润滑土颗粒接触面, 降低滑动摩擦阻力, 从而使内摩擦角减小。黏聚力和内摩擦角普遍被认为是决定滑坡稳定性的2个关键性力学参数, 因此本文监测了P1, P2处岩土体的黏聚力、内摩擦角随含水率的变化过程, 如图14, 15所示。图中清晰可见含水率与黏聚力、内摩擦角呈显著的负相关关系, 即随着含水率的升高, 黏聚力、内摩擦角降低。当潜在滑面中部P2处含水率达到峰值时, 岩土体的黏聚力、内摩擦角降至足以引起滑坡的谷值, 从而发生滑坡。

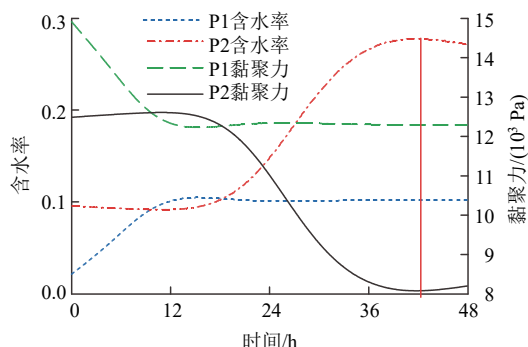


图14 P1, P2处岩土体的含水率与黏聚力随时间变化的曲线

Fig.14 Curves of water content and cohesion with time of P1 and P2

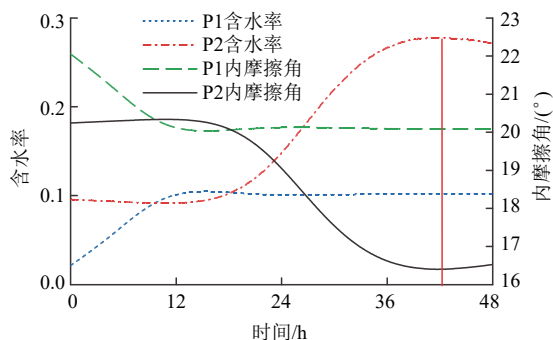


图15 P1, P2处岩土体的含水率与内摩擦角随时间变化的曲线

Fig.15 Curves of water content and internal friction angle with time of P1 and P2

黏聚力和内摩擦角是影响滑坡的关键因素, 理论上, 实时监测黏聚力和内摩擦角就可以有效地进行滑坡预测预警, 但实际上不具操作性。然而, 正如图14, 15所示, 岩土体的黏聚力、内摩擦角与含水率密切相关, 因此, 可通过实时监测含水率, 并依据含水率与黏聚力、内摩擦角的关系模型, 间接实时获取岩土体黏聚力和内摩擦角数值, 进而实现实时滑坡预警。

基于以上研究, 提出一种基于潜在滑面中部含

水率监测, 辅以雨量和地表位移互验的滑坡监测预警方法(其中暗含许强^[32]指出的三大关键指标——地下水位、雨量和变形)供同行参考, 即通过全过程流固耦合模拟计算出潜在滑面、钻孔至潜在滑面中部埋设含水率监测仪, 同时测取钻孔获取的岩芯的物理力学参数, 建立其与含水率的关系模型, 将该模型植入流固耦合模拟计算中, 得到含水率-稳定系数关系曲线, 指导设定含水率监测仪的滑坡预警阈值, 并在监测预警过程中辅以雨量和地表位移监测进行互验, 以降低虚警率、提高预测精准度。

6 结 论

本文基于对降雨诱发滑坡的全过程分析, 考虑降雨入渗边界、非饱和渗流、饱和渗流、岩土体软化和稳定系数计算, 研发了一套降雨入渗岩土体软化与稳定性动态计算算法, 利用FLAC^{3D}内置FISH编程语言对其进行了程序开发。得出的主要结论如下:

(1) 通过案例研究, 从降雨诱发滑坡过程中的孔隙水压、饱和度、含水率、黏聚力、内摩擦角、最大剪应变增量与稳定系数, 以及滑坡位置与范围等方面, 验证了所开发算法与程序的合理性和有效性, 为降雨滑坡研究提供了新的数值分析平台。

(2) 探讨了地表、滑面和滑床3个代表性部位测点的含水率、位移、应力、孔隙水压、力学参数与坡体稳定系数的关系, 及其监测预警适用性。地表位移具有明显的变化特征, 适宜用于滑前监测预警; 应力、孔隙水压用于滑前监测预警仍面临重大挑战。位于滑面中部的测点的含水率与黏聚力、内摩擦角和坡体稳定系数具有明显的相关性, 当其含水率达到峰值时, 该处黏聚力、内摩擦角降至谷值, 此时坡体稳定系数为1.000, 预示可能达到滑坡临界状态。

(3) 针对诱发滑坡的关键因素, 提出了一种基于潜在滑面中部含水率监测辅以雨量和地表位移互验的滑坡监测预警方法, 通过理论和数值模拟论证了其可行性。该方法适用于含水敏性地层的斜坡, 对含水率传感器的精度和安装要求较高。笔者团队将在后续研究和实践中不断检验和完善该方法, 以期降雨滑坡精准预测预警做出贡献。

参考文献(References):

- [1] CUI Q, ZHANG L, CHEN X, et al. Quantitative risk assessment of landslides with direct simulation of pre-failure to post-failure behaviors[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17: 4 497 - 4 514.

- [2] 自然资源部. 全国地质灾害通报[R]. 北京: 中国地质环境监测院, 2023.(Ministry of Natural Resources. National geological disaster Bulletin[R]. Beijing: China Geological Environment Monitoring Institute, 2023.(in Chinese))
- [3] CHEN X. Modelling rainfall-induced landslides from initiation of instability to post-failure[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 129(3): 103877.
- [4] CHO S E. Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability[J]. *Engineering Geology*, 2014, 171: 11 – 20.
- [5] CAI J S, YE H T C J, YAN E C, et al. Uncertainty of rainfall-induced landslides considering spatial variability of parameters[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 87: 149 – 162.
- [6] YUAN J, PAPAIOANNOU L, STRAUB D. Probabilistic failure analysis of infinite slopes under random rainfall processes and spatially variable soil[J]. *Georisk*, 2019, 13(1): 20 – 33.
- [7] LE T M H, SANCHEZ M, GALLIPOLI D, et al. Probabilistic study of rainfall-triggered instabilities in randomly heterogeneous unsaturated finite slopes[J]. *Transport in Porous Media*, 2019, 126(1): 199 – 222.
- [8] 刘佳意, 陈春利, 付昱凯, 等. 降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与稳定性预测模型[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(2): 183 – 191. (LIU Jiayi, CHEN Chunli, FU Yukai, et al. Mechanism of rainfall-induced shallow landslide and stability prediction model[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2024, 51(2): 183 – 191.(in Chinese))
- [9] 孟生勇, 江兴元, 杨义, 等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(1): 104 – 112.(MENG Shengyong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2023, 50(1): 104 – 112.(in Chinese))
- [10] 刘红军, 武闻禹, 耿林, 等. 全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨关系分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(2): 322 – 332.(LIU Hongjun, WU Wenyu, GENG Lin, et al. Analysis of the relationship between stability of fully weathered granite landslides and rainfall[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(2): 322 – 332.(in Chinese))
- [11] 刘东燕, 薛凯喜, 李东升, 等. 极端降雨诱发滑坡灾害危险性模糊综合评判[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(4): 93 – 99.(LIU Dongyan, XUE Kaixi, LI Dongsheng, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on landslides risk assessment induced by extreme rainfall[J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2011, 33(4): 93 – 99.(in Chinese))
- [12] 郭子正, 何俊, 黄达, 等. 降雨诱发浅层滑坡危险性的快速评估模型及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(5): 1 188 – 1 201.(GUO Zizheng, HE Jun, HUANG Da, et al. Fast assessment model for rainfall-induced shallow landslide hazard and application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(5): 1 188 – 1 201.(in Chinese))
- [13] 姬建, 崔红志, 佟斌, 等. 基于物理过程不确定性的降雨诱发浅层滑坡易发性快速区划: GIS-FORM 技术开发与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(4): 838 – 850.(JI Jian, CUI Hongzhi, TONG Bin, et al. Fast zoning of rainfall-induced shallow landslide susceptibility based on physical process uncertainty: development and application of GIS-FORM[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(4): 838 – 850.(in Chinese))
- [14] 赵晓铭, 李锦辉. 降雨诱发滑坡的实时概率分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(增 2): 1 690 – 1 694.(ZHAO Xiaoming, LI Jinhui. Real-time probability analysis of rainfall-induced landslide[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(Supp.2): 1 690 – 1 694.(in Chinese))
- [15] 宋宇飞, 曹琰波, 范文, 等. 基于贝叶斯方法的降雨诱发滑坡概率型预警模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(3): 558 – 574.(SONG Yufei, CAO Yanbo, FAN Wen, et al. Probabilistic early warning model for rainfall-induced landslides based on Bayesian approach[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 558 – 574.(in Chinese))
- [16] GUZZETTIF, PERUCCACCIS, ROSSIM, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern europe[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, 98(3): 239 – 267.
- [17] BRUNETTIM T, PERUCCACCIS, ROSSIM, et al. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(3): 447 – 458.
- [18] GUZZETTIF, PERUCCACCIS, ROSSIM, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update[J]. *Landslides*, 2008, 5: 3 – 17.
- [19] BACCHINI M, ZANNONI A. Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy)[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, 3(1/2): 71 – 79.
- [20] 邓李政, 袁宏永, 陈建国, 等. 基于声发射监测的滑坡深部变形量化方法[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2024, 64(11): 1 849 – 1 859. (DENG Lizheng, YUAN Hongyong, CHEN Jianguo, et al. Quantitative methods for landslide subsurface deformation based on acoustic emission monitoring[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2024, 64(11): 1 849 – 1 859.(in Chinese))
- [21] 文海家, 宋宸昊, 向学坤, 等. 强降雨诱发滑坡群识别的光学遥感变化检测方法[J]. *测绘科学*, 2022, 47(5): 193 – 202.(WEN Haijia, SONG Chenhao, XIANG Xuekun, et al. Optical remote sensing change detection method for the identification of landslide clusters induced by heavy rainfall[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(5): 193 – 202.(in Chinese))
- [22] 刘鹏, 吕庆, 吴俊宇, 等. 暴雨诱发浅层滑坡启滑机理模型试验研究[J]. *工程地质学报*, 2025, 33(2): 531 – 540.(LIU Peng, LU Qing, WU Junyu, et al. A flume model test to investigate initiation mechanisms of rainstorm-induced shallow landslides[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, 33(2): 531 – 540.(in Chinese))
- [23] 刘洪华, 武闻禹, 王志朋, 等. 基于大型物理模型试验的强降雨诱发全风化花岗岩滑坡失稳分析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(27): 11 530 – 11 539.(LIU Honghua, WU Wenyu, WANG Zhipeng, et al. Analysis of landslide instability of weathered granite induced by heavy rainfall based on large-scale physical model test[J]. *Science Technology*

- and Engineering, 2023, 23(27): 11 530 – 11 539.(in Chinese))
- [24] 杜强, 周健. 基于离心模型试验的降雨诱发滑坡宏观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增1): 50 – 54.(DU Qiang, ZHOU Jian. Centrifugal model tests on slope failure induced by rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Supp.1): 50 – 54.(in Chinese))
- [25] 王斌, 李洁涛, 王佳俊, 等. 强降雨诱发堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增1): 234 – 248.(WANG Bin, LI Jietao, WANG Jiajun, et al. Model tests on accumulation landslides induced by extreme rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(Supp.1): 234 – 248.(in Chinese))
- [26] 张伟, 晏飞, 王兆丰, 等. 基于物质点和深度积分耦合模型的滑坡数值分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(8): 2 515 – 2 526.(ZHANG Wei, YAN Fei, WANG Zhaofeng, et al. Numerical analysis of landslides based on coupling model of material point method and depth integral[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(8): 2 515 – 2 526.(in Chinese))
- [27] 李剑平, 蒋水华, 黄发明, 等. 考虑渗透系数空间变异性的降雨作用下边坡大变形破坏特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(1): 72 – 84.(LI Jianping, JIANG Shuihua, HUANG Faming, et al. Investigation of large deformation failure characteristics of slopes under rainfalls considering spatial variability of hydraulic conductivity[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(1): 72 – 84.(in Chinese))
- [28] GIANNECCHINI R, GALANTI Y, D'AMATO AVANZI G. Critical rainfall thresholds for triggering shallow landslides in the Serchio River Valley(Tuscany, Italy)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(3): 829 – 842.
- [29] 夏彬伟, 龚涛, 于斌, 等. 长壁开采全过程采场矿压数值模拟方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2 235 – 2 244.(XIA Binwei, GONG Tao, YU Bin, et al. Numerical simulation method for stope underground pressure in whole process of longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2 235 – 2 244.(in Chinese))
- [30] LIU W, HE S M. Comprehensive modeling of runoff-generated debris flow from formation to propagation in a catchment[J]. Landslides, 2020, 17(4): 1 529 – 1 544.
- [31] 何满潮, 任树林, 陶志刚. 滑坡地质灾害牛顿力远程监测预警系统及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2 161 – 2 172.(HE Manchao, REN Shulin, TAO Zhigang. Remote monitoring and forecasting system of Newton force for landslide geological hazards and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2 161 – 2 172.(in Chinese))
- [32] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360 – 374.(XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: Consideration to practical issues[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360 – 374.(in Chinese))
- [33] NEUMAN S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99(12): 2 233 – 2 250.
- [34] 朱伟, 程南军, 陈学东, 等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 235 – 240.(ZHU Wei, CHENG Nanjun, CHEN Xuedong, et al. Some fundamental problems of unsaturated seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 235 – 240.(in Chinese))
- [35] 陈学东. 浅层非饱和带降雨入渗规律的试验与数值研究[硕士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2005.(CHEN Xuedong. Rainfall infiltration pattern in the vadose zone[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2005.(in Chinese))
- [36] 王青友. 基于FLAC3D二次开发降雨入渗诱发非饱和黄土边坡破坏规律数值模拟研究[硕士学位论文][D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.(WANG Qingyou. Numerical simulation study on the catastrophic law of loess slopes under rainfall infiltration based on the secondary development of FLAC3D[M. S. Thesis][D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.(in Chinese))
- [37] VANGENUCHTEN M T H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 – 898.
- [38] 王晨兴. 斜坡地下水对降雨序列的响应及降雨滑坡稳定性预测[博士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2023.(WANG Chenxing. Groundwater response of slope to rainfall sequence and stability prediction of landslides induced by rainfall[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.(in Chinese))
- [39] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1977, 103(5): 447 – 466.
- [40] BURDINE N T. Relative permeability calculations from pore size distribution data[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1953, 98(3): 71 – 78.
- [41] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: Generalized macroscopic approach[J]. Water Resources Research, 1978, 14(2): 325 – 334.
- [42] 丁少林. 福建省台风降雨型滑坡渗流场规律及流-固耦合分析[硕士学位论文][D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.(DING Shaolin. Seepage characteristics and fluid-solid couple analysis of typhoon precipitation-induced landslide in Fujian Province[M. S. Thesis][D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.(in Chinese))
- [43] 贾善坡. Boom Clay 泥岩渗流应力损伤耦合流变模型、参数反演与工程应用[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.(JIA Shanpo. Hydro-mechanical coupled creep damage constitutive model of Boom Clay, back analysis of model parameters and its engineering application[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.(in Chinese))
- [44] 罗忠行, 雷宏权. 基于FLAC^{3D}的米贝复式滑坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 52 – 62.(LUO Zhongxing, LEI Hongquan. Study on Mibei Landslide analysis based on FLAC^{3D}[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 52 – 62.(in Chinese))
- [45] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50266—2013 Standard for test methods of engineering rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.(in Chinese))