

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222542

台风暴雨诱发边坡破坏机理与动力演进过程研究

江健宏¹, 边宏光², 宁 潇¹, 李莉莉¹, 张玉玉³

(1. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002)

摘要: 为分析台风暴雨诱发边坡破坏机理, 基于4个台风期间实测降雨资料, 针对福建某边坡遭遇台风暴雨时的安全状态开展数值模拟, 以分析台风暴雨诱发边坡破坏及演进传播机制。对于失稳前的边坡, 基于有限元法采用蒙特卡罗法计算边坡实时失效概率、可靠性指数, 并揭示边坡渗流场及塑性区的瞬时变化特征。对于失稳后的边坡, 基于光滑粒子流体动力学方法, 采用基于Drucker-Prager准则的Herschel-Bulkley-Papanastasiou(HBP)流变模型计算其失稳后大变形行为, 进而从滑动速度和堆积特征等方面分析滑坡动力灾变过程。结果表明, 降雨是诱发边坡失稳的关键因素, 边坡发生失稳后, 其前缘滑动速度可达到15 m/s。研究结果可为极端条件下边坡工程的安全预警和防灾减灾提供借鉴。

关键词: 台风暴雨; 边坡破坏; 蒙特卡罗; 动力灾变; HBP流变模型

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0165-04

1 引言

台风是一种常见气象灾害, 其发生常伴随强降雨。台风暴雨影响区域内常发生滑坡、泥石流等严重次生地质灾害, 严重威胁附近居民生命及财产安全^[1]。有效防治台风暴雨导致的滑坡及泥石流等灾害的前提是正确认识其失稳和淤积等动态过程, 这涉及滑坡触发机制、动态演进及最终堆积形态等重要问题^[2]。对此, 已有较多研究成果。近年来, 无网格方法如离散元法(DEM)、非连续变形分析(DDA)、光滑粒子流体动力学(SPH)等计算方法逐渐应用于边坡大变形问题中, 如唐宇峰等^[3]提出了一种基于SPH方法边坡位移变化失稳判定方法, 其结果与极限平衡法及有限元法较为接近; 张卫杰等^[4]基于非牛顿流体理论和等效黏度概念提出了适用于土体大变形流滑分析的SPH仿真模型。此类无网格方法在滑坡触发及演进传播方面的研究仍在不断发展。鉴此, 本文基于福建省台风期间实测降雨数据, 采用有限元法计算边坡渗流场及塑性区的瞬时变化特征, 结合蒙特卡罗方法计算边坡实时失效概率、可靠性指数, 揭示台风暴雨工况下滑坡的触发机制; 对于失稳后边坡, 基于SPH方法, 采用基于Drucker-

Prager准则的Herschel-Bulkley-Papanastasiou流变(HBP)模型描述其失稳后的运动特性, 进而从滑动速度和堆积特征方面研究滑坡传播过程, 以为极端条件下边坡工程的预警和防灾减灾提供参考。

2 计算理论

2.1 非饱和和渗流分析理论

基于非饱和土达西定律及多孔介质渗流连续方程, 以压力水头表示的饱和-非饱和微分方程^[5]为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mathbf{k}_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + \mathbf{k}_{i3} k_r(h_c) \right] + Q^* = [C(h_c) + S_s \theta / n] \partial h_c / \partial t \quad (1)$$

式中, \mathbf{k}_{ij}^s 为饱和渗透张量; k_r 为相对透水率; h_c 为压力水头; \mathbf{k}_{i3} 为 z 方向的饱和渗透矢量; Q^* 为源汇项; $C(h_c)$ 为容水度; θ 为体积含水率; S_s 为单位贮水量; n 为孔隙率。

2.2 蒙特卡罗计算理论

对边坡土体参数重度、摩擦角及粘聚力进行随机抽样, 计算出稳定系数 F , 计算过程中抽样总次数为 M , $F < 1$ 的次数即为失效次数 N , 因此可得失效概率 $P_f^{[6]}$ 为:

收稿日期: 2022-12-06, 修回日期: 2023-02-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFE0194300)

作者简介: 江健宏(1986-), 男, 高级工程师, 研究方向为道路工程设计, E-mail: SDEng_bit@163.com

$$P_f = M/N \tag{2}$$

均值 μ_F 及标准差 σ_F 分别为:

$$\mu_F = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_j \tag{3}$$

$$\sigma_F = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (F_j - \mu_f)^2 \right]^{1/2} \tag{4}$$

边坡临界稳定性系数为 μ' , 可靠性指数 β' 及失效概率 P_f 可分别定义为:

$$\beta' = (\mu_{F'} - \mu') / \sigma_{F'} \tag{5}$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \tag{6}$$

2.3 SPH 基本理论

采用光滑粒子流体动力学(SPH)方法模拟边坡失稳后的动力过程,其连续性方程^[7]为:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (v_i^\alpha - v_j^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x^\alpha} \tag{7}$$

动量方程为:

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_j^{\alpha\beta} + \sigma_j^{\beta\alpha}}{\rho_i \rho_j} + T_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x^\beta} + g_i^\alpha \tag{8}$$

式中, ρ 为粒子密度; m 为粒子质量; v 为粒子速度; W 为核函数; x 为粒子位移矢量; T_{ij} 为人工粘性项; g 为重力加速度; 上标 α, β 均表示坐标方向; 下标 i, j 均表示粒子编号。

2.4 HBP 流变模型

采用 HBP 模型对失稳后滑坡的流变特性进行建模, HBP 模型及其等效黏性系数^[7]表示为:

$$\tau_{ij} = \tau_y [1 - e^{-m\gamma}] + 2\mu (\epsilon^{\alpha\beta})^n \tag{9}$$

$$\mu_{\text{eff}} = [1 - e^{-m\gamma}] |\tau_y| / \gamma_0 + 2\mu \gamma_0^{n-1} \tag{10}$$

式中, τ_{ij} 为剪应力张量; τ_y 为屈服应力; m 为系数, 控制应力的指数增长; μ 为表观动态黏度; ϵ 为应变率张量; α, β 均为坐标分量; n 为幂律指数, 可以模拟剪切变稀或剪切增稠行为; μ_{eff} 为等效粘性系数; γ_0 为剪切应变率。

当 $m=0$ 和 $n=1$ 时, 模型简化为牛顿模型, 而当 $m \rightarrow \infty$ 和 $n=1$ 时, 模型简化为 Bingham 模型, 取 $m=100, n=1$ ^[7]。

3 暴雨诱发边坡破坏数值模拟

3.1 模型与边界条件

以福建省泉州市某边坡为例进行分析, 该区域属典型的台风暴雨影响区域, 台风登陆次数多, 降雨量大且集中, 滑坡具有数量多、分布广、规模小等特点, 其主要发育类型为土质滑坡, 研究所选边坡高约 65 m, 宽约 140 m, 2016 年 9 月梅兰蒂台风过后, 边坡变形最为明显, 目前边坡整体处于欠稳定状态。结合该边坡地层结构及其工程勘察

报告, 采用 GeoStudio 软件建立边坡的有限元模型和材料分区见图 1(a)。边坡可分为三层, 层①为素填土层, 层②为坡积砂质粘土, 层③为全风化基岩。根据地质调查结果, 边坡内存在地下水, 初始渗流场见图 1(b)。有限元模型网格划分为 2 917 个节点, 2 805 个单元。

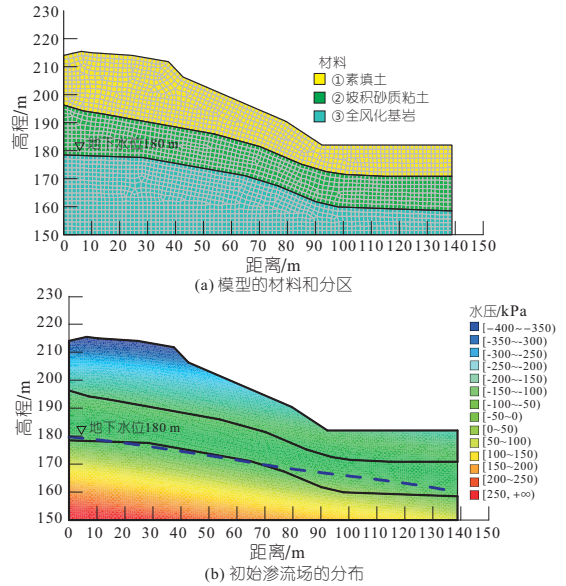


图 1 有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of finite element model

采用 GeoStudio 软件对该边坡进行非饱和和渗流计算, 通过饱和和渗透系数及体积含水率拟合土水特征曲线控制非饱和渗流过程计算。降雨的模拟采用等效节点流量法实现, 将降雨转化为节点流量施加在模型上进行计算, 降雨强度通过定义不同单位流量边界函数实现。有限元模型中选择 Megi, Nesat, Meranti, Nibort 台风工况进行模拟计算, 台风期间降雨强度分布见图 2。

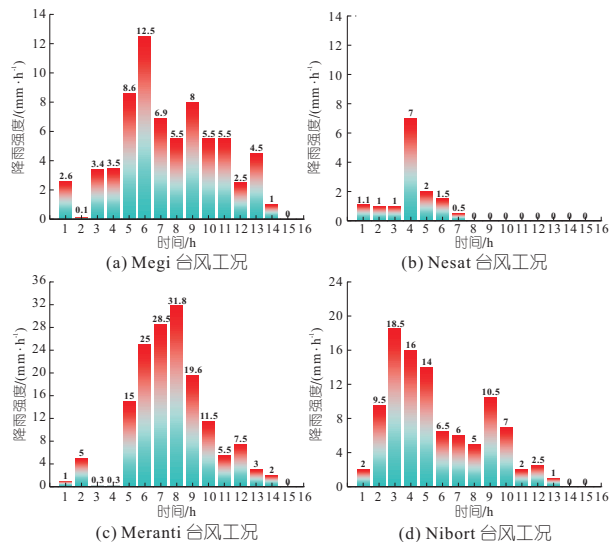


图 2 各台风工况下降雨强度分布

Fig. 2 Rainfall intensity distribution under various typhoon conditions

3.2 地质参数及随机性表征

各层地质参数见表 1,影响滑坡稳定性的相关参数受到多种因素影响,如现场取样、室内试验、数据处理等,而土体粘聚力、内摩擦角和重度等参数通常具有不确定性。考虑到土体参数的空间变异性,假设层①、②、③的土体参数均服从正态分布,蒙特卡罗模拟中标准差为 1,每个台风工况期间参数采样总次数为 4 000 次。层①土体重度、粘聚力和内摩擦角的概率密度分布函数见图 3。

表 1 边坡地质参数平均值

Tab. 1 Average geological parameters of the slope

地层编号	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	内摩擦角/ $^\circ$	粘聚力 /kPa
①	18.0	1.70×10^{-4}	19.0	23.0
②	18.3	1.65×10^{-4}	21.7	28.7
③	20.0	4.25×10^{-5}	25.0	40.0

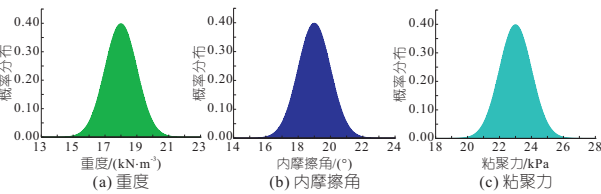


图 3 蒙特卡罗计算中层①处相关参数的抽样分布

Fig. 3 Sampling distribution of relevant parameters at area ① in Monte Carlo calculation

3.3 计算结果分析

3.3.1 可靠性指数及失效概率分析

图 4 为各台风条件下边坡可靠性指数和破坏概率的分布。由图 4 可知,边坡的可靠性指标的变化趋势与破坏概率的变化趋势相反,可靠性指标越高,边坡的破坏概率越低。图 4 中 Megi、Meranti、Nibort 台风工况下边坡的破坏概率均达

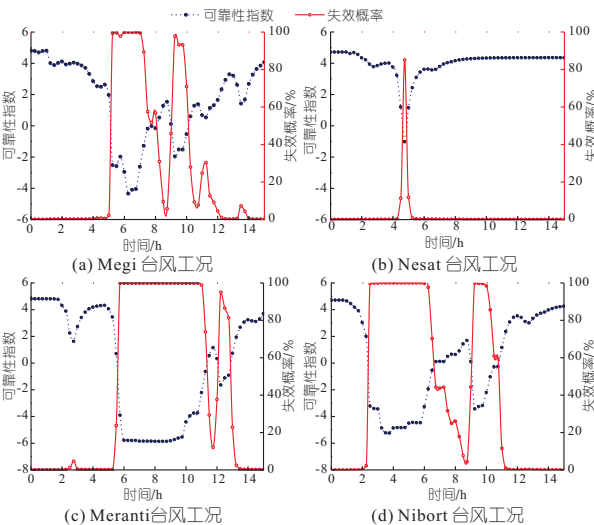


图 4 各台风工况下边坡可靠性指数和破坏概率变化情况

Fig. 4 Changes of slope reliability index and failure probability under various typhoon conditions

到 100%,表明边坡在这些工况下已失稳破坏。在 4 种台风工况下,边坡的可靠性指标和破坏概率与降雨强度有一定的相关性,降雨强度越大,边坡的破坏概率相对越高,其可靠性指数相对越低,边坡所处状态相对越危险。对比 Megi 台风及 Meranti 台风工况下边坡失效概率变化可知,在高强度、长时间降雨条件下,边坡更容易发生失稳,降雨强度是边坡失稳的控制指标。

3.3.2 边坡失稳机理分析

由于台风暴雨工况下边坡破坏规律具有一定相似性,故主要分析 Meranti 台风工况下边坡渗流场的发展特征,以期揭示边坡的渐流破坏机理。Meranti 台风发生期间,边坡失稳发生于高强度降雨时段,图 5 给出了 Meranti 台风工况下不同时间边坡的孔隙水压力变化情况,可观察到明显的水分入渗及湿润锋下移现象。

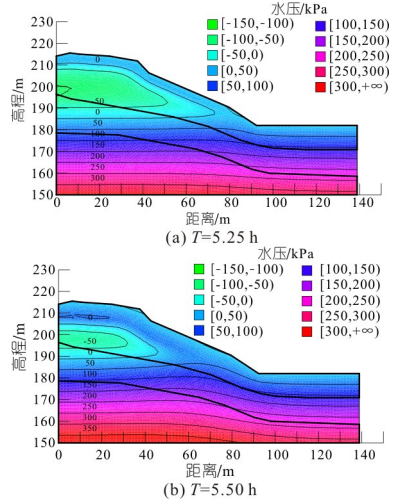


图 5 Meranti 台风工况下边坡渗流场变化

Fig. 5 Variation of the seepage field under Meranti typhoon condition

图 6 为 Meranti 台风工况下不同时刻边坡塑性区变化情况。结合图 4、5 可知,初始阶段降雨直接改变了边坡表层土体的渗流场分布,坡面土

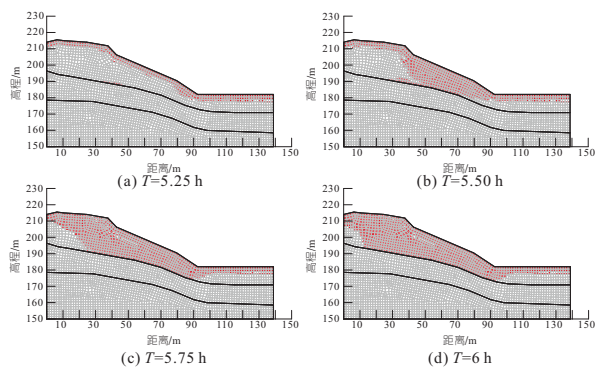


图 6 Meranti 台风工况下边坡塑性区变化

Fig. 6 Change of the plastic zone under Meranti typhoon condition

体在降雨入渗影响下逐渐饱和,土体基质吸力下降,外在表现为土体强度的弱化,导致其最先出现塑性区。随着降雨过程持续,水分不断渗入边坡内部,边坡内部土体饱和区域不断增加,土体强度不断弱化,边坡内部塑性区区域也不断增加,如图6(a)~(d)所示,最终边坡发生失稳,发生滑坡事故。

3.3.3 滑坡动力演变过程

当边坡失稳后,采用 SPH 方法模拟其边坡失稳的动态过程。数值模拟中粒子总数为 225 224 个,计算间隔 $\Delta t = 0.1 \text{ s}$,计算步骤数为 100,总计算时间为 10 s,边坡底部和两侧采用无滑移边界。不同时刻边坡的速度场分布、涡度场分布见图 7、8,其中涡度用于描述流体颗粒的旋转情况,用以反映流体颗粒旋转的剧烈程度。

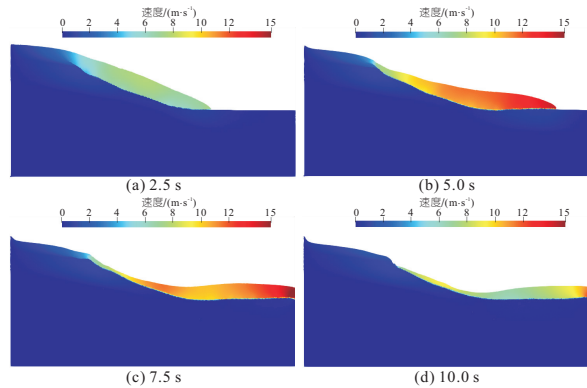


图 7 不同时刻滑坡演变速度场变化

Fig. 7 Velocity field of landslide evolution at different times

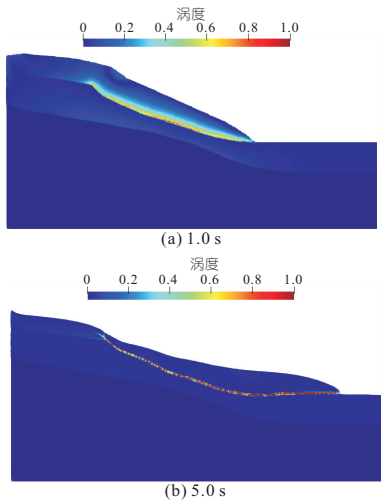


图 8 不同时刻滑坡演变涡度场变化

Fig. 8 Vorticity field of landslide evolution at different times

当强降雨作用下边坡发生失稳演变为滑坡时,实际在台风暴雨工况下,此时边坡表层土体已经完全饱和,同时表现出类似流体的运动性质,采用 HBP 本构模型描述其流变特性;2.5 s 时,滑坡逐渐发生整体滑动;5.0 s 时,滑坡前缘开始向下游演进并侵蚀沿途土体,滑坡前缘最大运动速度达 15 m/s;7.5~10.0 s 时,滑坡前缘土体继续向

下游运动,部分滑坡后缘土体堆积在斜坡面上,此时可观察到滑坡最终的堆积形态特征,如图 7(d)所示。由图 8 滑坡涡度场变化情况可知,滑坡表层土体的涡度发生明显变化,初始涡度约为 1。5.0 s 时,滑坡前缘最大滑动速度已经达到 15 m/s。滑坡材料交界面处土体涡度值最大值已经超过 10,这表明滑坡演进传播的过程越剧烈,边坡土体受侵蚀作用相对越严重。

4 结论

a. 降雨是诱发滑坡失稳的关键性因素,高强度、长历时降雨下边坡更易发生失稳。边坡的可靠性指数及失效概率与各台风工况下的降雨强度有一定关联性。降雨强度越大,边坡的失效概率相对越高,其可靠性指数越低,边坡所处状态越危险。

b. 强降雨作用下边坡发生失稳流滑过程中,边坡浅层土体已表现出类似流体的性质,滑坡前缘滑动速度最大可达到 15 m/s,且滑坡演进传播的过程越剧烈,边坡土体受侵蚀作用相对越严重。

c. FEM 方法适用于边坡未失稳前的模拟,以揭示滑坡的触发机制,SPH 方法适用于边坡失稳后发生大变形的模拟,描述其演进及传播过程。将 FEM 与 SPH 方法结合可模拟边坡失稳破坏的灾变全过程。

参考文献:

- [1] 韩帅,刘明军,伍剑波,等. 东南沿海台风暴雨型单体斜坡灾害风险评价——以秦顺仕阳北坡为例[J]. 地质力学学报,2022,28(4):583-595.
- [2] 韩征,粟滨,李艳鸽,等. 基于 HBP 本构模型的泥石流动力过程 SPH 数值模拟[J]. 岩土力学,2019,40(增刊 1):477-485,510.
- [3] 唐宇峰,施富强,廖学燕. 基于 SPH 的边坡稳定性计算中失稳判据研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(5):904-908.
- [4] 张卫杰,郑虎,王占彬,等. 基于三维并行 SPH 模型的土体流滑特性研究[J]. 工程地质学报,2018,26(5):1279-1284.
- [5] 达明昌,焦洁,苏正洋. 库水位变动及降雨共同作用下心墙坝坝坡稳定性研究[J]. 水电能源科学,2020,38(12):90-93,5.
- [6] 林呀. 基于极限平衡及蒙特卡罗法的含软弱夹层边坡降雨失效概率研究[J]. 水电能源科学,2019,37(12):103-107.
- [7] 王东坡,瞿华南,沈伟,等. 考虑坝后淤积的泥石流冲击拦挡坝动力响应研究[J]. 工程科学与技术,2021,53(2):1-9.

- 2017(9):72-76.
- [3] 李谷涵. 基于水动力仿真模拟的梯级泵站群明渠输水系统优化调度研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
- [4] 王硕. 河道测量数据采集与处理技术研究及应用[D]. 青岛:山东科技大学, 2018.
- [5] ZILIANI M C, CHOSTINE R, AIT-EL-FOUIH B, et al. Enhanced flood forecasting through ensemble data assimilation and joint state-parameter estimation[J]. *Journal of hydrology*, 2019, 577: 15.
- [6] 李漫漫, 石朋, 尚艳丽, 等. 基于集合卡尔曼滤波的
新安江模型状态变量实时修正方法 [J]. *河海大学学报(自然科学版)* 2019, 47(3): 209-214
- [7] 张成, 傅旭东, 王光谦. 复杂内边界长距离输水明渠的一维非恒定流数学模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 2007(6): 16-20.
- [8] MU J, ZHANG X. Real-time flood forecasting with 1-D unsteady flow model[J]. *Journal of hydrodynamics*, 2007, 19(2): 150-154.
- [9] 王船海, 李光炽, 向小华, 等. 实用河网水流计算[M]. 南京:河海大学出版社, 2012.

Inversion Study of the Shape of River Cross-sections in Ungauged Regions Based on EnKF Method

HAN Zhong-kai¹, LIU Xian-wei², QIN Lin², QIN Yu-feng³, LU Ze-feng⁴

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China; 2. Dezhou Water Resources Bureau, Dezhou 253000, China; 3. Yucheng Water Resources Bureau, Yucheng 251200, China; 4. Shandong Province Water Transfer Project Operation and Maintenance Center Pingdu Management Station, Pingdu 266700, China)

Abstract: Aiming at the falling into locally optimal solution shortcomings of optimization algorithm and probability density method for inversion of river cross-sections in ungauged regions, this paper proposed a combination of Ensemble Kalman Filter (EnKF) method and particle swarm optimization algorithm (PSO). The PSO was used to initialize the missing section to form a trapezoidal initial section. Then the EnKF was used to correct the initial section, and the proposed method was verified by the ideal case. The results show that the R^2 and N_{NSE} of the model are higher than 0.99, and the relative mean square error is less than 0.04. Considering the observation errors in the engineering practice, the observation errors of 0.1%, 1%, 5% and 10% were selected to evaluate the hydrodynamic simulation errors of the missing section, the PSO initial section and the corrected section by the EnKF method. It is found that the errors are normally distributed with the selected errors, but the overall distribution is normal with different errors. But the EnKF method can maintain a high simulation accuracy with different observation errors, the R^2 is higher than 0.98, the relative mean square deviation (RMSD) is less than 0.06 m, and the N_{NSE} is higher than 0.98. Thus, the proposed method has a high feasibility.

Key words: ungauged regions; Ensemble Kalman Filter; parameter inversion; particle swarm optimization algorithm

(上接第 168 页)

Failure Mechanism and Dynamic Evolution of Typhoon Rainstorm Induced Slopes

JIANG Jian-hong¹, BIAN Hong-guang², NING Xiao¹, LI Li-li¹, ZHANG Yu-yu³

(1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China;
2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Manacement, Wuhan University, Wuhan
430072, China; 3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China)

Abstract: Aiming at analyzing the mechanism of slope failure and evolution propagation induced by typhoon and rainstorm, a numerical simulation of the safety state of a slope was carried out based on the measured rainfall data during various typhoons in Fujian Province of China. For the slope before instability, Monte Carlo method was used to calculate the real-time failure probability and reliability index and reveal the transient change characteristics of the seepage field and plastic zone of the slope. For the slope after instability, Herschel-Bulkley-Papanastasiou (HBP) model was used to describe the rheological characteristics of the slope using the SPH method. The propagation process of landslides was analyzed in terms of velocity and accumulation characteristics. The results show that the rainfall is the key factor to induce slope instability. When the slope failure occurs, the sliding speed of the leading edge can reach 15 m/s. This study provides a reference for the early warning and disaster prevention and mitigation of slope engineering under extreme conditions.

Key words: typhoon and rainstorm; slope failure; Monte-Carlo; dynamic catastrophe; HBP rheological model