文章编号:1005-0930(2024)01-0072-013 中图分类号:P642.22 文献标识码:A doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.01.005

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

李剑平, 蒋水华, 黄发明, 黄劲松

(南昌大学工程建设学院,江西南昌 330031)

摘要:合理评估降雨作用下边坡破坏特征是滑坡灾害防控及预警的重要前提.为 了揭示土体渗透系数空间变异性对降雨作用下边坡大变形破坏特征的影响规 律,综合利用极限平衡方法计算效率高和物质点法可模拟边坡大变形的优势, 提出了随机极限平衡-物质点耦合分析方法(RLE-MPM),并开发了 MATLAB-HYDRUS-Anura 3D 这 3 个软件的接口实现程序.首先,利用 HYDRUS 模拟边坡 降雨入渗过程,得到每个土层单元的含水率及孔隙水压力分布特征;其次,采用 局部抗剪强度法更新每个物质点的等效抗剪强度及重度;最后,利用随机物质点 法(RMPM)进行降雨作用下边坡大变形破坏概率计算、破坏模式识别及大变形 破坏特征评估.研究结果表明:RLE-MPM 方法可模拟日本 Tokai-Hokuriku 降雨 型滑坡水-力耦合过程,模拟得到的滑坡最终堆积形态与现场调查结果基本一 致.相较于 RMPM, RLE-MPM 方法计算边坡失效概率的效率更高,并且能够有效 识别降雨作用下 3 种边坡破坏模式,即完全破坏模式、剪切带破坏模式、渐进式 破坏模式.此外,降雨历时对非均质边坡大变形破坏模式及其特征均具有重要的 影响.

关键词:降雨诱发滑坡;边坡失稳;空间变异性;大变形;破坏模式;破坏特征

滑坡是国内外最主要的地质灾害之一^[1],不仅会严重影响基础设施的安全运营,而 且会威胁坡下居民的生命和财产安全^[2-3].降雨被普遍认为是诱发滑坡灾害的主要因素, 因此降雨诱发滑坡风险评估引起了人们的广泛关注,并且取得了一系列研究成果^[48].目 前大多学者采用随机极限平衡方法或随机有限元方法进行降雨人渗边坡的稳定性分 析^[5-8].一方面,随机极限平衡方法虽然计算效率高,但是其预先假定的滑动面位置及形状 对于非均质边坡并不适用.相比之下,随机有限元方法能自动搜索滑动面和考虑岩土体应

收稿日期:2023-07-03;修订日期:2023-09-04

作者简介:李剑平(1996—),男,博士研究生.E-mail:787562874@qq.com

通信作者:蒋水华(1987—),男,博士,教授,博士生导师.E-mail:sjiangaa@ncu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金项目(52222905);国家自然科学基金项目(52179103,42272326);江西 省自然科学基金项目(20224ACB204019,20232ACB204031)

力-应变关系等,但也只能考虑边坡启滑阶段这一极限状态,难以进行边坡大变形分析.另一方面,目前大多研究基于边坡启滑阶段进行失效概率计算,单一的失效概率并不能为滑坡风险评估提供直观的依据,边坡大变形破坏特征与失效概率同样重要.如何在模拟降雨作用下边坡大变形破坏过程的基础上定量评估边坡大变形破坏特征仍是一个具有挑战性的课题^[4].

受地质沉积和后沉积作用,岩土材料参数空间分布的不均匀性已经被广泛接受^[9].如 土体渗透系数空间变异性会明显影响降雨入渗过程中湿润锋的推进和边坡孔隙水压力及 含水率分布^[10],进而最终影响边坡大变形破坏特征.为考虑岩土体参数空间分布不均匀 性的影响,目前物质点法已在蒙特卡洛模拟框架下与随机场理论相结合,发展为考虑岩土 体参数空间变异性的随机物质点法^[11].近年来,随机物质点法逐步在降雨作用下边坡大 变形过程模拟中得到应用.如Wang等^[12]以坡面上的零孔隙压力作为降雨边界,利用单项 物质点法模拟降雨诱发滑坡的整个破坏过程.Liu 等^[13]采用物质点法模拟边坡从降雨触 发到土体破坏的全过程.然而,降雨入渗分析不能简单地将降雨边界作为流量边界或压力 水头边界作用于边坡上来进行处理.当降雨强度大于饱和渗透系数时,坡面会出现积水或 径流,然而目前随机物质点法不能反映边坡降雨边界的动态变化过程.为采用随机物质点 法客观评估降雨作用下边坡大变形破坏特征,迫切需要模拟降雨边界和不透水基岩边界, 分析非饱和边坡的降雨入渗过程,并提高计算效率,进而获得边坡土体基质吸力和孔隙水 压力分布等特征.

为此,笔者综合利用极限平衡方法计算效率高和物质点法可模拟边坡大变形的优势, 提出随机极限平衡-物质点耦合分析方法(Random Limit Equilibrium and Material Point Method, RLE-MPM),开发了 MATLAB-HYDRUS-Anura 3D 这 3 个软件的接口实现程序,为 降雨作用下边坡大变形破坏特征定量评估提供了技术支撑.同时,调查了降雨历时对边坡 大变形破坏模式及特征的影响规律.

1 降雨作用下边坡大变形破坏模拟: RLE-MPM 方法

RLE-MPM 方法由 3 个模块组成:边坡降雨入渗及稳定性分析、降雨作用下边坡大变 形分析和边坡大变形破坏特征评估.

1.1 边坡降雨入渗及稳定性分析

降雨诱发的滑坡大多以浅层破坏为 主,表现为沿平行于斜坡向下滑动的浅 层滑坡^[14].根据 Yang 等^[15]收集的滑坡 数据可知,80%以上滑坡案例,滑坡土层 厚度为1~5m.对于这种降雨型浅层滑 坡,可利用无限长边坡模型(图1)进行 边坡降雨入渗及稳定性分析^[16].

天然状态下边坡土体材料常处于非 饱和状态,非饱和渗流分析可考虑孔隙 水压力对边坡稳定性的影响,使边坡稳



Fig.1 Diagram of an infinite slope model

定性分析结果更贴近于工程实际.根据 Lu 等^[17]提出的饱和/非饱和条件下统一有效应力 理论,基于莫尔-库仑破坏准则及极限平衡分析,可得到无限长边坡安全系数计算式为

$$FS = \frac{c + (\gamma_t z_w \cos^2 \beta - \sigma_s) \tan \varphi}{\gamma_t z_w \sin \beta \cos \beta}$$
(1)

式中:c为土体黏聚力; φ 为土体内摩擦角; β 为坡角; σ_s 为修正吸力,非饱和状态下($u_w < 0$) $\sigma_s = S_e u_w$,饱和状态下($u_w > 0$) $\sigma_s = u_w$,其中, S_e 为有效含水饱和度, u_w 为孔隙水压力; z_w 为土块垂直深度(图1); γ_t 为土体单元总重度,可由式(2)计算

$$\gamma_t = \gamma_d + \theta \gamma_w \tag{2}$$

式中: γ_d 为土体干重度; γ_w 为水的重度; θ 为土体体积含水率. 为获得边坡孔隙水压力及含水率分布, 通常直接求解 Richards 方程来模拟边坡降雨入渗过程^[5,10], 利用一维流动模型 来模拟边坡垂直入渗过程, 水流在边坡上的一维运动控制方程如下

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial z} - \cos\beta \right) k \right]$$
(3)

式中:H为孔隙水压力水头;k为土体非饱和渗透系数;非饱和土体水力特性参数 θ 和k均是基质吸力的非线性函数.本文选用 van Genuchten 模型^[18-19]表征土水特征曲线,模拟土体含水率 θ 与基质吸力 ψ 之间的函数关系,计算式为

$$S_{e}(\psi) = \frac{\theta - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^{n}\right]^{m}}$$
(4)

式中:ψ为基质吸力,ψ=u_a-u_w,其中 u_a为孔隙气压力,u_a=0;α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;n为土水特征曲线拐点处的斜率,描述初始进气阶段体积含水率的变化;m为与土体残余含水率对应的土性参数,其中 m=1-1/n.采用如下土体渗透系数函数模拟土体渗透系数与基质吸力之间的函数关系^[5]

$$k = k_s S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$$
(5)

在此基础上,采用 HYDRUS 软件对式(3) 所示的 Richards 方程进行数值求解,得到各个土层的含水率及孔隙水压分布,再利用式(1) 计算沿各土层底部(包括不透水层)的安全系数,进而得到整个边坡的安全系数.

1.2 降雨作用下边坡大变形分析

物质点法(Material point method, MPM)被广泛应用于模拟降雨作用下边坡大变形过 程^[12-13],采用拉格朗日质点和欧拉网格来双重描述离散域,将连续体离散成携带材料信 息的物质点(圆点).在每个时间增量开始时,通过插值函数将信息从物质点映射至网格节 点(方点)(图2(a)).接着,计算背景网格节点力、速度和位置变化(图2(b)).将这些计算得 到的节点信息值映射到物质点上(图2(c)).最后,更新物质点的加速度、速度和位置,丢弃 已变形的背景网格,使用新的背景网格,并根据新背景网格更新物质点分配(图2(d))^[20]. 关于 MPM 的理论介绍详见文献[21].

目前,描述不同物质点降雨入渗引起的边坡基质吸力变化仍是一个难点.按照文献 [3],使用局部抗剪强度方法(Local Shear Strength,LSS)来描述降雨入渗引起的土体各位 置处基质吸力的变化,利用式(6)来描述土体基质吸力变化对非饱和区域抗剪强度的影响



图 2 物质点法计算流程

Fig.2 Flowchart for the implementation of material point method

$$\tau_f = \underbrace{\left[c + (u_a - u_w)\chi \tan\varphi\right]}_{+} + (\sigma_n - u_a)\tan\varphi \tag{6}$$

式中: $X = (S_e - S_r) / (1 - S_r)$ 为有效应力参数,其中, S_r 为残余饱和度; σ_n 为失效面总法向应力; u_a 为孔隙气压力,一般取 $u_a = 0$;c'为非饱和区域土体等效黏聚力.

由式(6)可知,只需将黏聚力更新为等效黏聚力,即可得出降雨引起的土体基质吸力 改变.此外,天然土体物理力学性质存在一定的空间变异性^[12],即边坡土体呈现非均质性. 为有效模拟降雨作用下非均质边坡的随机大变形响应,在蒙特卡洛模拟框架下将 MPM 与随机场理论有机结合,发展为随机物质点法(Random Material Point Method, RMPM).该 方法可以表征岩土体参数空间变异性,模拟边坡大变形破坏过程,分析边坡大变形破坏 特征^[11].

1.3 边坡大变形破坏特征评估

边坡大变形破坏特征评估包括对 滑动距离、滑动体积、堆积高度、滑体峰 值平均速度等指标进行量化计算.图 3 为采用 RLE-MPM 方法计算得到的典型 滑坡最终堆积形态图.滑动距离是指破 坏前的坡脚到破坏后的坡顶之间的水 平距离.滑体体积为滑动土颗粒的总体 积.堆积高度是指变形后处于危险位置 的滑动体堆积的最大纵向高程差.滑体 峰值平均速度是指整个破坏过程中的



最大滑动速度,而每一时刻的滑动速度是所有粒子速度的平均值.这些大变形破坏特征指标均可通过调用 ParaView 软件进行批量提取得到.

综上,笔者给出了降雨诱发边坡大变形破坏特征评估的计算框架(图4),并开发了 MATLAB-HYDRUS-Anura 3D 这3个软件的接口实现程序,具体执行步骤如下.



Fig.4 Framework for evaluating the large deformation failure characteristics of slopes under rainfalls

(1)将边坡沿埋深方向划分为 h/d 个层状随机场单元(h 为无限长边坡深度,d 为随 机场单元土层厚度)(图4),并基于土体饱和渗透系数(k_s)统计信息(包括均值、标准差、 概率分布、自相关函数、波动范围),通过 KL 级数展开方法模拟 N 组 k_s 随机场实现,并保 存在"ks.mat"文件中.

(2)将随机场实现值分别赋值给对应的土层,利用 HYDRUS 软件计算不同降雨历时 t 边坡含水率及孔隙水压力分布,分别另存为名为"Moisture.mat"和"Pore.mat"的文件.对于 每一组随机场参数输入,利用式(1)计算滑动面经过 h/d 个层状随机场单元底部的安全 系数,从中找出最小安全系数作为边坡安全系数 FS,保存在"FS.mat"文件中.

Vol.32

(3)将"Moisture.mat""Pore.mat"和"FS.mat"文件组合成 2N+1 行的矩阵数据,并运用 MATLAB 函数 sortrows 对安全系数由小到大进行排序.根据安全系数排序结果,将对应的 含水率及孔隙水压力分布分别代入式(6)和式(2),分别更新土体抗剪强度及重度.并借助 Anura 3D 的 GOM 文件^[20]将等效抗剪强度及重度赋值给不同土层对应的物质点.

(4)调用 Anura 3D 软件内核进行边坡大变形批量处理计算,计算结束后提取边坡始 末状态的物质点坐标,计算边坡最大相对位移值.根据文献[22],如最大相对位移大于 1m,则可认为边坡发生大变形破坏.若连续出现未发生大变形破坏的样本数占已发生破 坏的样本数的 10%,则认为计算收敛^[22].

(5)调用 ParaView 软件批量提取边坡大变形破坏特征指标,并进行统计分析.

2 算例分析

2.1 日本 Tokai-Hokuriku 高速公路滑坡案例验证

首先采用日本 Tokai-Hokuriku 高速公路发生的降雨型滑坡案例^[23-24]验证 RLE-MPM 方法的有效性.该边坡由两部分土层组成,上部浅层土体为完全风化岩体,下部基岩以风 化岩为主,初始地下水位为60m,详细地质剖面图见文献[23].图 5 展示了该边坡模型尺 寸及网格划分情况,边坡上、下部网格尺寸分别为 2m 和 5m,整个边坡模型共剖分了 3 232 个三角形网格、1 759 个节点及 3 232 个平面应变物质点.边坡两侧采用滚轮边界, 水平位移为0,底部采用铰链边界,水平和垂直位移均为0.另外,选用 van Genuchten 模型 描述边坡土水特征曲线,土体参数取值如表1 所示.



图 5 边坡大变形破坏后堆积形态模拟结果与实测结果的对比

Fig.5 Comparison of simulated and measured accumulation patterns after slope large deformation failure

表 1 Tokai-Hokuriku 高速公路边坡土体参数取值

Table 1 Values of soil parameters for the Tokai-Hokuriku highway slope

参数	$k_s/(m/s)$	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	<i>E/</i> MPa	v	c∕kPa	$\varphi/(\circ)$	θ_s	θ_r	α∕kPa ⁻¹	n
完全风化岩	4.8×10^{-5}	1 800	1 000	0.35	30	30	0.5	0.078	0.052	1.246
风化岩	2.2×10^{-5}	2 100	8 000	0.3	780	43	0.5	0.078	0.052	1.246



图 6 边坡破坏时压力水头分布 Fig.6 Distribution of pressure head during slope failure

根据 Chen 等^[23]给出的 1999 年9月14日至9月22日(滑坡发 生时)的降雨强度-历时数据,利用 HYDRUS 2D 软件对该边坡进行降 雨入渗分析,计算结果如图 6 所示. 由图 6 可知,持续 9d 的降雨使得边 坡上部完全风化岩体的基质吸力明 显降低.接着,提取所有节点的孔隙 水压力和含水率.由于降雨入渗分 析的有限元网格与后续大变形分析

的物质点网格不同,故采用双调和样条插值法^[23,25]将孔隙水压力和含水率重新映射至物质点,进而采用局部抗剪强度方法更新每个物质点的等效抗剪强度及重度.最后,利用物质点法进行滑坡全过程模拟,其中,选用带软化的摩尔-库仑模型模拟土体性质,残余抗剪强度取峰值抗剪强度的 25%^[23],时间步长取 7.5×10⁻⁴s.将计算时间为 *t* = 20s 滑坡停止时的最终堆积形态与 Chen 等^[23]计算时间为 15s 的计算结果及 Llano-Serna 等^[24]计算时间为 17s 的计算结果进行比较(图 5).由图 5 可知,这三者模拟得到的滑坡最终堆积形态相差不大,并且与现场调查的实测结果^[24]一致,说明了提出方法的有效性.

2.2 无限长边坡破坏模式特征分析

以无限长边坡模型(图1)进一步说明 RLE-MPM 方法的有效性.坡深 h 为 2m、坡角 β 为 40°,初始基质吸力为 20kPa.根据 Griffiths 等^[26]建议,取模型中坡长与土层厚度之比 (L/h)为 15,以确保计算结果不受边界干扰.边坡两侧采用滚轮作为边界,水平位移为 0,底部采用铰链作为边界,水平和垂直位移均为 0,并且底部为不透水基岩边界.坡面为降雨 人渗边界,取均匀降雨强度 R=1.08cm/h,等于土体饱和渗透系数 k_s .采用 HYDRUS 软件 进行边坡降雨入渗分析,选用 van Genuchten 模型描述边坡土水特征曲线.根据文献[5],获得土体参数取值(表 2).

表 2 无限长边坡土体参数取值

Table 2 Values of soil parameters for the infinite slo
--

参数	$k_s/(m/s)$	$\gamma_d/(\mathrm{kN/m^3})$	c∕kPa	φ/(°)	θ_s	θ_r	α/kPa^{-1}	n
取值	3×10^{-6}	16	5	32	0.358	3.58×10^{-4}	0.149	1.289

利用物质点强度折减法对该边坡进行稳定性分析,采用摩尔-库仑本构模型和非关联 流动规则模拟土体性质,弹性模量为 100MPa,泊松比为 0.3,根据塑性应变贯通判据确定 边坡安全系数^[27].边坡模型共离散了 18 800 个三角形单元、9 933 个网格节点及 18 800 个 平面应变物质点.边坡物质点模拟的时间步长为 7.5×10⁻⁴s,总模拟时间为 20s,其中包括 0.5s 的自重平衡过程.计算的边坡安全系数为 1.492,与极限平衡方法计算的安全系数 1.498 吻合^[5],说明了该无限长边坡物质点模型的有效性.

为保证考虑土体饱和渗透系数空间变异性边坡可靠度的计算精度,根据文献[28],

将无限长边坡(图1)沿垂直方向划分为40个土层,每个土层深度 d=0.05m,选取指数型 自相关函数模拟饱和渗透系数的空间自相关性.根据文献[5]可知,土体参数垂直自相关 距离(l_e)一般取 0.5~16m.以降雨历时 18h、COV_{ks}=0.5、l_e=0.5m 为例,采用 KL 级数展开 方法生成 5 000 次土体饱和渗透系数随机场实现.先采用随机极限平衡方法计算所有随 机场实现对应的安全系数,再按照安全系数由小到大排序,依次选取对应的随机场样本, 再采用物质点方法进行分析,并判断边坡是否发生大变形破坏.最后,提取物质点法分析 得到的所有随机场样本对应的最大相对位移,发现大部分随机场样本对应的最大相对 位移均小于 1m,只有 71 个样本对应的最大相对位移在 15~31m,表明相应的边坡发生了 大变形破坏.因此,以最大相对位移为 1m 作为量化标准,计算的边坡大变形破坏概率为 71/5 000=0.0142.需要指出的是,RLE-MPM 方法计算效率高,只需分析 260 个样本即可 筛选出所有大变形破坏样本.相比之下,采用传统随机物质点法则需要计算 5 000 组随机 场实现,计算量很大.

由于土体饱和渗透系数空间变异性 造成不同降雨历时下土体孔隙水压力和 含水率存在时空差异,导致边坡会发生多 种不同形式的破坏.对降雨历时 18h、参数 统计特征 COV_k=0.5 和 *l*=0.5m 条件下 71 个边坡大变形破坏样本进行统计分析. 采用 K-means 聚类方法并基于滑体峰值平 均速度对边坡破坏模式进行分类,利用误 差平方和(Sum of Squared Errors,SSE)^[29] 确定了最佳的分类数目为 3,分类结果如 图 7 所示.由图 7 可知,将滑体峰值平均速 度阈值定为 4.00m/s 和 1.25m/s,可以很 好地区分边坡的 3 类破坏模式.将滑体峰 值平均速度大于 4m/s 定为第 1 类破坏模



图 7 基于 K-means 聚类方法的边坡破坏模式分类 Fig.7 Classification of slope failure modes using the K-means clustering algorithm

式,将滑体峰值平均速度大于1.25m/s 而小于4m/s 定为第2类破坏模式,将滑体峰值平均速度大于0 而小于1.25m/s 定为第3类破坏模式.

对比观察这3类边坡破坏模式的破坏特征可知:第1类破坏模式为完全破坏模式(图8), 该破坏模式在边坡不透水层处形成滞水平台,坡内有正孔隙水压力发展,导致等效黏聚力 降低.其边坡破坏过程发展最快,滑动速度和滑体体积最大;第2类破坏模式为剪切带破 坏模式(图9),由于湿润锋抵达边坡某一土层,边坡沿土层软弱带发生贯通并逐步向连通 性的滑动发展;第3类破坏模式为渐进破坏模式(图10),由于土体自重的增加、软弱面的 存在及应力分布不均匀,边坡某一部分出现缓慢变形,首先坡顶出现张开裂缝,应力向下 传递,再向下缓慢发生变形,出现蠕滑现象.需要说明的是,由于重点研究历时为*t*的降雨 作用下边坡大变形破坏过程,故没有考虑降雨入渗重分布作用,因此降雨历时*t*与 MPM 中的计算时间是相互独立的,即历时为*t*的降雨发生之后再采用 MPM 方法进行边坡大变 形破坏分析.

79





Fig.8 Typical evolution process of complete failure mode at the 4th and 7th seconds



图 9 第 8 秒和第 12 秒时典型沿剪切带破坏模式的演化过程

Fig.9 Typical evolution process of shear failure mode at the 8th and 12th seconds



图 10 第 16 秒和第 24 秒时典型渐进式破坏模式的演化过程 Fig.10 Typical evolution process of progressive failure mode at the 16th and 24th seconds

为了进一步说明土体饱和渗透系数空间变异性与降雨入渗相互作用对边坡大变形破 坏特征的影响,采用 RLE-MPM 方法调查了降雨历时对非均质边坡大变形破坏模式和特 征指标的影响.图 11 所示为边坡大变形破坏特征指标的均值和标准差随降雨历时的变化 关系曲线.图 12 所示为不同边坡破坏模式数量及占比随降雨历时的变化关系曲线,变异 系数和垂直自相关距离分别取 COV_k=0.5, *l*=0.5m.由图 11 可知,边坡大变形破坏特征 (滑动距离、滑坡体堆积高度、滑体峰值平均速度和体积)的均值都随着降雨历时的增加 而增大,并且在降雨后期趋于稳定.相比之下,标准差则随着降雨历时的增加而呈现先增 大后减小的趋势.这表明在降雨中期边坡大变形破坏特征指标受饱和渗透系数空间变异 性的影响大,具有很强的不确定性,到降雨后期,边坡大变形破坏特征的不确定性降低.从 不同边坡破坏模式数量及占比随着降雨历时的变化规律(图 12)解释这一现象.由图 12



图 11 边坡大变形破坏特征指标随降雨历时变化

Fig.11 Variation of the slope large deformation failure characteristics indices with the rainfall duration



图 12 边坡破坏模式及占比随降雨历时的变化关系 Fig.12 Histograms and proportions of three kinds of slope failure modes for different rainfall durations

可知,在降雨历时18h和19h之前,边坡失稳主要是渐进式破坏模式和沿剪切带破坏模式.随着降雨的持续(降雨历时19h之后),边坡完全破坏模式数量及占比逐渐增加,因而 边坡大变形破坏特征的不确定性逐渐增加.最后,不同破坏模式数目及占比趋于稳定,进 而边坡大变形破坏特征的不确定性减小.

3 结论

为定量评估降雨作用下边坡大变形破坏特征,笔者提出考虑土体饱和渗透系数空间 变异性的 RLE-MPM 方法,并开发了 MATLAB-HYDRUS-Anura3D 这 3 个软件的接口实现 程序.分别以实际公路滑坡案例和无限长边坡模型为例,验证了方法的有效性,并调查了 降雨历时对边坡大变形破坏特征的影响规律,得出主要结论如下;

(1) RLE-MPM 方法不仅可以考虑土体应力-应变关系,模拟滑坡水力-大变形耦合过程,而且可以综合利用极限平衡计算效率高和物质点法可模拟边坡大变形的优势,实现了 对降雨作用下边坡大变形破坏特征的定量评估.相比于 RMPM, RLE-MPM 方法计算边坡 失效概率的效率更高;

(2) RLE-MPM 方法可基于滑体峰值平均速度和 K-means 聚类方法有效识别边坡 3 种破坏模式:完全破坏模式、剪切带破坏模式、渐进式破坏模式.完全破坏模式是由于在边坡不透水层处形成滞水平台,其破坏过程发展最快,滑动速度和滑体体积最大.剪切带破坏模式是由于湿润锋抵达某一土层,边坡体沿土层软弱带发生贯通.渐进式破坏模式是由于 土体自重的增加、软弱面的存在及应力分布不均匀,边坡向下缓慢发生变形;

(3)边坡大变形破坏特征指标的均值随降雨历时增加而增大,在降雨后期趋于稳定, 而标准差在降雨历时增加初期呈先增大后减小的变化趋势.在降雨中期,边坡大变形破坏 特征受饱和渗透系数空间变异性的影响较大,具有较强的不确定性;

(4) 仅研究了土体饱和渗透系数空间变异性对降雨作用下非均质边坡大变形破坏特征的影响,关于土体水力参数和抗剪强度参数等空间变异性和降雨入渗相互作用对边坡大变形破坏特征的影响,需要进一步研究.

参考文献

- [1] Cui Q,Zhang L,Chen X, et al.Quantitative risk assessment of landslides with direct simulation of pre-failure to postfailure behaviors[J].Acta Geotechnica, 2022, 17:4497-4514
- [2] Ali R, Kuriqi A, Kisi O. Human—environment natural disasters interconnection in China: A review [J]. Climate, 2020, 8 (4):48
- [3] Zhu Y, Ishikawa T, Zhang Y, et al. A FEM-MPM hybrid coupled framework based on local shear strength method for simulating rainfall/runoff-induced landslide runout[J].Landslides,2022,19:2021-2032
- [4] Chen X, Zhang L, Zhang L, et al. Modelling rainfall-induced landslides from initiation of instability to post-failure [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 129:103877
- [5] Cho S E.Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability [J]. Engineering Geology, 2014, 171:11-20
- [6] Cai J S, Yeh 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
- [7] Yuan J, Papaioannou I, Straub D. Probabilistic failure analysis of infinite slopes under random rainfall processes and spatially variable soil[J]. Georisk, 2019, 13(1): 20-33
- [8] 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
- [9] Jiang S H, Huang J, Griffiths D V, et al. Advances in reliability and risk analyses of slopes in spatially variable soils: A state-of-the-art review [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141:104498

- [10] Liao W, Ji J.Time-dependent reliability analysis of rainfall-induced shallow landslides considering spatial variability of soil permeability [J].Computers and Geotechnics, 2021, 129:103903
- [11] Wang B, Hicks M A, Vardon P J. Slope failure analysis using the random material point method [J]. Géotechnique Letters, 2016, 6(2):1-6
- [12] Wang B, Vardon P J, Hicks M A. Rainfall-induced slope collapse with coupled material point method [J]. Engineering Geology, 2018, 239:1-12
- [13] Liu X, Wang Y.Probabilistic simulation of entire process of rainfall-induced landslides using random finite element and material point methods with hydro-mechanical coupling[J].Computers and Geotechnics, 2021, 132;103989
- [14] Wu L Z, Selvadurai A P S, Zhang L M, et al. Poro-mechanical coupling influences on potential for rainfall-induced shallow landslides in unsaturated soils[J]. Advances in water resources, 2016,98:114-121
- [15] Yang K H, Nguyen T S, Rahardjo H, et al. Deformation characteristics of unstable shallow slopes triggered by rainfall infiltration [J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(1):317-344
- [16] Cho S E, Lee S R. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(9):756-763
- [17] Lu N, Godt J.Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions [J].Water Resources Research, 2008, 44(11); W11404
- [18] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898
- [19] 王林,李典庆,曹子君,等.基于贝叶斯理论的土水特征曲线模型选择与参数识别方法[J].应用基础与工程科 学学报,2019,27(6):1269-1284

Wang Lin, Li Dianqing, Cao Zijun, et al. Model selection and parameter identification method for soil-water characteristic curve based on Bayesian theory[J].Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(6):1269-1284

- [20] Anura 3D MPM Research Community. Anura3D Version 2022 Source Code, 2022, www.anura3d.com
- [21] Sulsky D, Schreyer H L. Axisymmetric form of the material point method with applications to upsetting and Taylor impact problems [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139(1-4):409-429
- [22] Liu X, Wang Y, Li D Q. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111:301-312
- [23] Chen X, Zhang L, Zhang L, et al. Modelling rainfall-induced landslides from initiation of instability to post-failure [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 129:103877
- [24] Llano-Serna M A, Farias MM, Pedroso D M. An assessment of the material point method for modelling large scale run-out processes in landslides [J]. Landslides, 2016, 13:1057-1066
- [25] Sandwell D T. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data [J]. Geophysical Research Letters, 1987, 14(2):139-142
- [26] Griffiths D V, Huang J, Dewolfe G F.Numerical and analytical observations on long and infinite slopes [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(5);569-585
- [27] 蒋先平,张 鹏,卢艺伟,等.物质点强度折减法边坡失稳判据选择方法[J].地质科技通报,2022,41(2):113-122 Jiang Xianping,Zhang Peng,Lu Yiwei, et al.Selection method for instability criterion of slope based on material point strength reduction method[J].Bulletin of Geological Science and Technology,2022,41(2):113-122
- [28] Cai J S, Yeh T C J, Yan E C, et al.Importance of variability in initial soil moisture and rainfalls on slope stability [J]. Journal of Hydrology, 2019, 571:265-278
- [29] 华辉有,陈启买,刘海,等.一种融合 Kmeans 和 KNN 的网络入侵检测算法[J].计算机科学,2016,43(3):158-162

Hua Huiyou, Chen Qimai, Liu Hai, et al. A network intrusion detection algorithm that combinesKmeans and KNN[J]. Computer Science, 2016, 43(3):158-162

Investigation of Large Deformation Failure Characteristics of Slopes Under Rainfalls Considering Spatial Variability of Hydraulic Conductivity

LI Jianping, JIANG Shuihua, HUANG Faming, HUANG Jinsong

(School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract

Assessing the failure characteristics of slopes under rainfall is an essential prerequisite for preventing and early warning of landslide hazards. To reveal the impact of the spatial variability of hydraulic conductivity on the large deformation characteristics of slopes under rainfalls, the study proposes a coupling method of the random limit equilibrium and material point method (RLE-MPM) by making use of the high computational efficiency of limit equilibrium method and the capability of the material point method to simulate large deformation. An interface program for the implementation of MATLAB-HYDRUS-Anura 3D software is developed. First, the rainfall infiltration process of the slope is modeled using HYDRUS to obtain the distribution of water content and pore water pressure for each soil layer. Then, the local shear strength method (LSS) is used to update the equivalent shear strength and gravity for each material point. Finally, the random material point method (RMPM) is adopted to calculate the probability of slope failure, identify slope failure modes, and evaluate the large deformation failure characteristics of slopes under rainfalls. The proposed RLE-MPM can simulate the hydraulic-large deformation coupling process in the rainfall-induced landslides in Tokai-Hokuriku, Japan and the obtained final landslide accumulation pattern is generally consistent with the field investigations. Compared to RMPM, the proposed RLE-MPM has higher efficiency in calculating the probability of slope failure, and can effectively identify three kinds of failure modes of the slope under rainfalls, namely the complete failure mode, shear failure mode, and progressive failure mode. Additionally, the rainfall duration can greatly affect the large deformation failure modes and characteristics of the heterogeneous slope.

Keywords: rainfall-induced landslide; slope failure; spatial variability; large deformation; failure modes; failure characteristic analysis