

天然和暴雨条件下的物质点滑坡变形机制分析

艾国栋¹, 李云青¹, 资丽君¹, 梁昌奇^{*2,3,4}

(1. 湖南省矿产资源调查所, 湖南 郴州 423000;

2. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083;

3. 湖南省有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083;

4. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:为准确评估边坡失稳后对滑动路径上建筑物及人们生命财产的威胁程度, 本文以郴州某滑坡为例, 利用物质点法, 分别模拟了天然和暴雨两种工况下该边坡在开挖后的大变形破坏机制, 并计算了其滑动距离, 并将结果与传统有限元分析进行了对比。结果表明: (1) 开挖前, 该边坡在天然工况下处于基本稳定状态, 在暴雨工况下处于失稳状态, 而开挖后, 该边坡在两种工况下都处于失稳状态; (2) 开挖后该滑坡的滑动距离显著增大, 在天然工况和暴雨工况下的滑动距离分别为 20.11 和 24.12 m; (3) 对比稳定性分析和大变形分析结果可知, 开挖和降雨是该边坡失稳的两种主要因素, 计算边坡失稳后的滑动距离可为评估其对滑动路径上建筑物的威胁程度提供理论参考, 对提高边坡安全性防护有重要意义。

关键词:边坡失稳; 大变形分析; 物质点法; 滑坡; 滑动距离

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)05-0023-06

Analysis of deformation mechanism of landslide under natural and rainstorm conditions based on material point method

AI Guodong¹, LI Yunqing¹, ZI Lijun¹, LIANG Changqi^{*2,3,4}

(1. Mineral Resources Investigation Institute of Hunan Province, Chenzhou Hunan 423000, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;

3. Hunan Key Laboratory of Nonferrous Resources and Geological Disaster Exploration, Changsha Hunan 410083, China;

4. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the threat to buildings and people's lives and properties in the run-out path after slope failure, this paper takes a landslide in Chenzhou as an example, simulates the failure mechanism of large deformation under natural and rainstorm conditions after excavation of this slope based on the material point method, calculates the run-out distance, and compares the results with the finite element method. The results show that: (1) Before excavation, the slope is basically stable under natural condition and unstable under rainstorm condition, while after excavation, the slope is unstable under both conditions; (2) The sliding distance of the landslide increases significantly after excavation, and the sliding distance under natural conditions and rainstorm conditions is 20.11 and 24.12m respectively; (3) By comparing the results of stability and large deformation analysis, it can be seen that

收稿日期: 2023-03-10; **修回日期:** 2023-06-10 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2023.05.004

基金项目: 湖南省地质院科学项目“湖南省典型地灾成因及早期识别监测预警和防治工程应用研究”(编号: HNGSTP202106); 湖南省安全生产预防及应急专项资金项目“强降雨诱发地质灾害链预测预警模式研究”(编号: 2021YJ009)

第一作者: 艾国栋, 男, 汉族, 1972年生, 高级工程师, 博士, 地质工程专业, 主要从事矿产地质勘查研究工作, 湖南省郴州市北湖区南岭大道1150-4号, lubing168@126.com。

通信作者: 梁昌奇, 男, 汉族, 1998年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事边坡数值模拟与大变形分析的研究工作, 长沙市岳麓区麓山南路932号, changqiliang@csu.edu.cn。

引用格式: 艾国栋, 李云青, 资丽君, 等. 天然和暴雨条件下的物质点滑坡变形机制分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 23-28.

AI Guodong, LI Yunqing, ZI Lijun, et al. Analysis of deformation mechanism of landslide under natural and rainstorm conditions based on material point method[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 23-28.

excavation and rainfall are the two main factors causing slope instability. Calculating the sliding distance after slope instability can provide theoretical reference for evaluating the threat to buildings on the sliding path, and is of great significance for improving slope safety protection.

Key words: slope instability; large deformation analysis; material point method; landslide; sliding distance

0 引言

边坡失稳产生滑坡是一个典型的岩土工程大变形问题^[1],其造成的破坏后果通常取决于边坡失稳后滑坡的运动速度、滑动距离和堆积形态等^[2-5]。滑坡通常具有突发性、滑速快和动能大等特点^[6],严重威胁着其影响范围内的建筑物和人民生命财产安全,如发生在我国的洒勒山滑坡^[7]和深圳渣土场滑坡^[8-9],造成了严重的经济损失和不良社会影响。特别是对于体积超过 10^5 万方的滑坡,在重力势能的作用下,其滑动距离通常可达其坡高的10倍以上^[10-11],超过数公里,因而影响范围巨大。因此,为准确定量评估边坡风险,科学合理地分析边坡失稳后的状态,即预测滑体的运动范围和堆积过程,对实际滑坡防灾减灾,具有十分重要的理论和现实意义^[12-13]。

传统的边坡稳定性分析方法如极限平衡法和有限元法只能求解边坡破坏前的状态,不能有效处理滑坡大变形问题。物质点法在每个计算时间步都采用规则的背景网格,计算时网格不会扭曲变形,是求解与材料变形有关问题的有效方法,近年来在岩土工程领域中得到了广泛的应用。例如,王双等^[14]采用物质点强度折减法研究了边坡失稳后对滑动路径上建筑物的影响程度,并通过算例验证了MPM预测失稳后滑坡堆积形态和滑动距离的能力;孙玉进等^[15]利用物质点法计算大变形的优势模拟了某高边坡从开始变形滑动到稳定的全过程,证明该方法可以较好地再现边坡滑动全过程;Zhao等^[16]将物质点法应用于流体力学模型,模拟了不同纵横比条件下的溃坝流动问题,验证了物质点法的准确性和稳定性;Troncone等^[17]用物质点法分析了1986年发生在意大利南部的森尼斯滑坡的破坏过程;Yerro等^[18]采用物质点法模拟了华盛顿奥索镇滑坡的滑动过程;Xu等^[19]使用物质点法、DP本构模型和流变关系,结合ArcGIS软件对中国红石岩滑坡进行了数值模拟;Conte等^[20]用物质点法对1986年发生在意大利南部Senise滑坡的径流过程进行了二维分析;Coelho等^[21]和Dong等^[22]使用物质点法研究了刚性基础上的滑坡流动问题,并用物质点法和深度平均法对海

底滑坡的实际滑动过程进行了反演分析,再现了从陡坡到中等坡度的滑坡滑动过程;Li等^[23]使用物质点法对王家岩滑坡破坏后的滑动过程进行了数值模拟;Huang等^[24]使采用物质点法和DP本构模型对粘性土坡和无粘性土坡的大变形破坏过程进行了数值分析。

上述研究证明了物质点法在模拟边坡滑坡大变形方面具有较强可行性,但鲜有研究从工程实际出发,研究不同工况下的边坡大变形机制。为此,本文以湖南省郴州市某滑坡为例,基于物质点法分析该边坡开挖前后在天然工况和暴雨工况下的大变形特征,并与传统边坡稳定性分析方法作对比。

1 物质点法

物质点法是1994年Sulsky等^[25]提出的一种用于计算大变形问题的数值计算方法。其基本原理是将连续体离散成一系列质点,每个质点代表一块区域并携带了该区域的所有物质信息,如:质量、密度、速度、加速度、应力、应变等,而网格在空间中固定,不携带任何参数,仅用于动量方程的求解和空间导数的计算。该方法具有拉格朗日质点和欧拉网格的双重优势,通过背景网格与物质点间的交替映射完成数值计算,在每个时间步都采用未变形的背景网格,避免了因网格畸变和单元扭曲带来的数值求解困难,可以很好的解决与边坡大变形有关的问题。

物质点法在每个时间步内的计算可分为3个阶段,即初始化阶段、拉格朗日计算阶段和映射阶段^[26](如图1所示)。在初始化阶段,物质点携带的所有物质信息通过线性形函数被映射到背景网格上,为拉格朗日计算阶段做准备;在拉格朗日计算阶段,在背景网格上计算动量方程和导数,并通过计算获得新的节点速度、加速度和位移等信息;最后在映射阶段,更新所有物质点状态信息,如物质点的位移、速度等物理量在该时间步计算结束后,背景网格恢复至初始化阶段时的形态,并在下一个时间步重复上述三个阶段的计算。

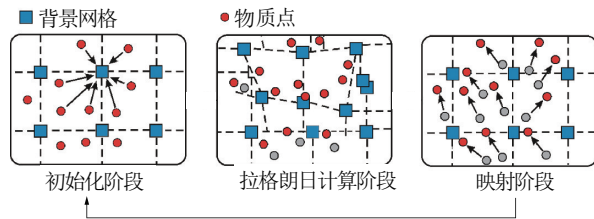


图 1 物质点法计算流程

Fig.1 Calculation process of material point method

2 滑坡基本情况介绍

该滑坡位于郴州市第七完全小学北侧,地貌为剥蚀残丘地貌,总体地势北高南低,地势起伏变化较大。场地内及其周边未见有明显活动的断裂构造通过,且新构造运动不明显,处于相对稳定状态,无地表水系,周边未发现崩塌、泥石流、地下采空区等不良地质作用。地层主要为第四系坡残积成因粉质粘土,二叠系下统当冲组全风化泥页岩以及全-强风化炭质页岩,节理裂隙极发育,具体计算参数见表 1。

表 1 边坡各土层土体参数

Table 1 Soil parameters of each soil layer of slope

土层	粘聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi/(\circ)$		重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$		弹性模量 E/MPa
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	
粉质粘土	15.6	11.9	19.3	14.2	17.7	18.5	24
全风化泥页岩	14.6	11.6	18.9	14.6	17.0	18.0	20
全-强风化炭质页岩	12	10.0	21	18	20.4	21.0	112

该滑坡目前处于蠕滑变形阶段,局部已经处于变形加速阶段。地表水下渗后富集在粉质粘土内部滑动面,水量不断富集、运移,该粉质粘土的抗剪强度不断降低,形成软弱滑带,使粉质粘土层内部产生滑动。该滑坡在天然状态下处于基本稳定状态,但在长期降雨或暴雨时,地表水不断入渗滑体,造成滑体自重增加,滑面抗剪强度降低,可能发生更大的位移,严重威胁滑坡体下方居民生命、财产安全。

因此本文用有限元强度折减法^[27-28]计算了该边坡开挖前后在天然工况和暴雨工况下的稳定性,并用物质点法^[29]计算了开挖前后在天然工况和暴雨工况下的滑动距离,以分析边坡失稳后对滑动路径上建筑物的威胁程度。

3 稳定性分析

利用有限元分析软件 MIDAS GTS NX, 分析该边坡开挖前后在天然工况和暴雨工况下的稳定性。在构建有限元模型时,根据现场实际情况考虑了不同土层材料。同时,边坡模型左右边界在水平方向进行了固定,底边界在水平方向和垂直方向进行了固定。

其中,局部计算结果通过在有限元计算过程中对边坡模型进行全局搜索滑面得到,而整体计算结果通过在搜索滑面时排除前述安全系数小的局部区

域得到。开挖前边坡在天然工况下的计算得到的等效塑性应变云图见图 2。由图 2 可知,该边坡首先在坡脚处形成较小的等效塑性应变贯通区,安全系数为 1.08,随后,在边坡上部产生较大的等效塑性应变贯通区,安全系数为 1.61。表明:边坡整体处于稳定状态,但在坡脚处可能会发生局部破坏。

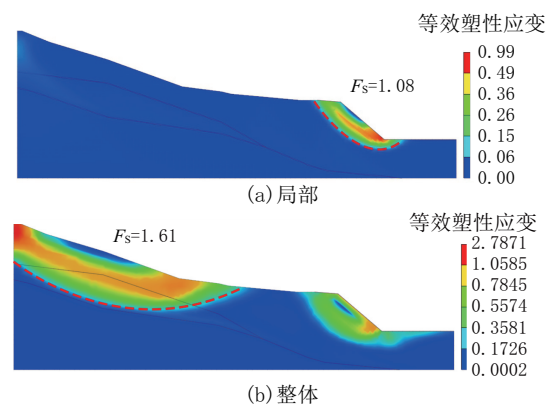


图 2 天然工况下开挖前边坡等效塑性应变云图

Fig.2 Equivalent plastic strain nephogram of slope before excavation under natural condition

开挖前边坡在暴雨工况下的塑性应变云图见图 3。与天然工况下的等效塑性应变云图类似,边坡首先在坡脚处形成等效塑性应变贯通区,安全系数为 0.80,随后,在边坡上部形成较大的等效塑性应变贯通区,安全系数为 1.22。表明:在暴雨工况下,边坡

处于不稳定状态。

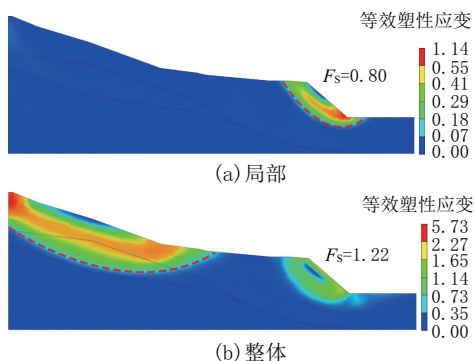


图3 暴雨工况下开挖前边坡等效塑性应变云图
Fig.3 Equivalent plastic strain nephogram of slope before excavation under rainstorm condition

开挖后边坡在天然工况和暴雨工况下的等效塑性应变云图见图4,安全系数分别为0.60和0.50,处于不稳定状态。这是因为开挖使得边坡前缘形成临空面,边坡抗滑力减小,下滑力不变,进而导致边坡失稳^[30]。

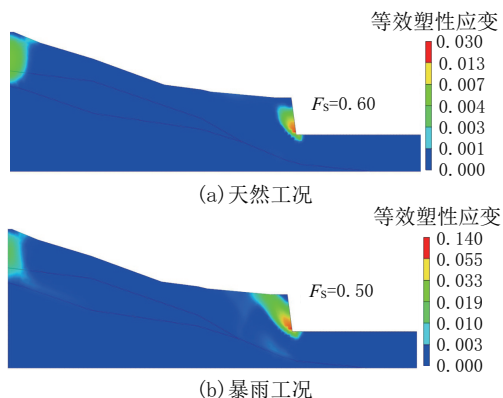


图4 开挖暴雨工况边坡安全系数
Fig.4 Slope safety factor after excavation under rainstorm condition

4 大变形分析

由前面的分析可知,开挖前边坡在暴雨工况下处于基本稳定状态,开挖后处于不稳定状态,因此本节使用物质点法^[31]计算开挖前后边坡在天然工况和暴雨工况下的滑动距离,以分析其对滑动路径上建筑物的威胁程度。

4.1 计算参数

本研究中,边坡长260 m,高87 m,物质点大小为2.0 m,共离散成6668个物质点,如图5所示。为

了简化问题,本研究仅考虑平面应变情况。为了更好的还原边坡现场的真实状态,边坡底部选用固定边界条件以模拟基岩,两侧和前后使用对称边坡边界条件以模拟平面应变状态下土体的各种状态。本次计算选用8节点六面体单元,单元尺寸4 m,采用非关联流动准则和服从Drucker-Prager(DP)屈服准则的弹塑性本构模型。计算时间步长为 0.465×10^{-3} s,总计算时间20 s。

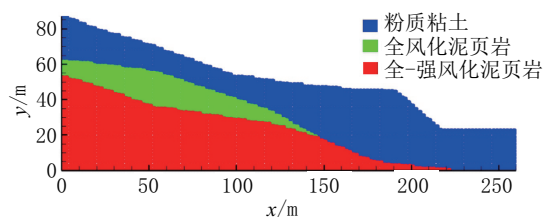


图5 边坡离散示意
Fig.5 Schematic diagram of slope dispersion

4.2 大变形模拟

开挖前边坡在天然和暴雨工况下的滑动距离计算云图如图6所示,开挖后边坡在天然和暴雨工况下的滑动距离计算云图如图7所示。由图6可知,开挖前边坡在天然工况和暴雨工况下的滑动距离分别为1.37和3.75 m。由图7可知,开挖后边坡在天然工况和暴雨工况下的滑动距离分别为20.11和24.12 m。由此可知,开挖会使边坡形成不稳定临空面,使边坡抗滑力减小,稳定性降低;在雨水的长期作用或暴雨情况下,地表水向边坡土体渗透,滑体自重增加,滑面抗剪强度降低,其稳定性进一步降低,失稳时滑动的距离也进一步增大^[32-34];并且,边坡对于在滑动距离范围内的建筑物威胁程度较大,计算结果可为提高边坡安全性防护提供理论参考。

由稳定性分析可知,在天然状态下,开挖前边坡的整体稳定性系数为1.61,坡脚的局部稳定性系数为1.08,表明:边坡不会滑动,坡脚处于基本稳定状态。由大变形分析结果可知,天然状态下边坡滑动距离为1.37 m,这是因为在本次计算中视土体在空间上为各项同性,且土体是经过室内试验测试获得的,在测试前土体性质已经扰动,原有性质发生了改变,所以安全系数计算结果存在一定的误差。开挖前暴雨工况和开挖后边坡安全系数均 <1 ,所以边坡会发生滑动。需要说明的是,由于本文进行的有限元模拟假定土体发生小变形,因此该方法不用于计

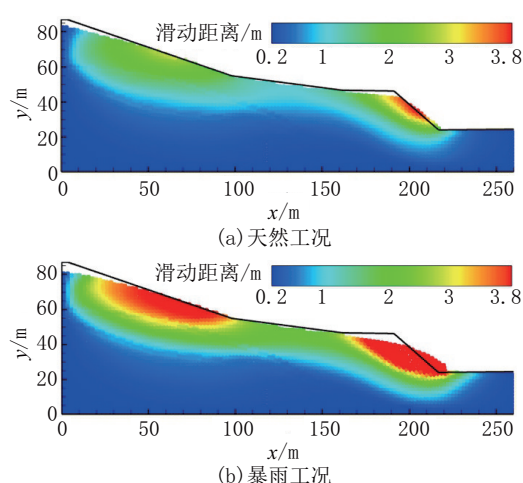


图6 开挖前边坡滑动距离云图
Fig.6 Contour plot of slope sliding distance before excavation

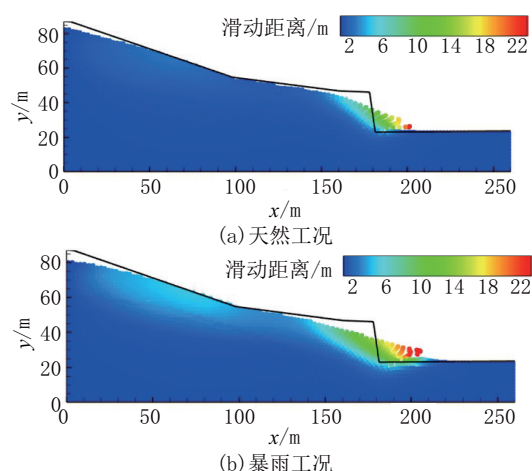


图7 开挖后边坡滑动距离云图
Fig.7 Contour plot of slope sliding distance after excavation

算滑坡的大变形过程,而用于进行边坡的初始破坏阶段安全系数的计算。在物质点法计算过程中,物质点法可以计算土体的大变形过程,从而用于本文边坡滑动过程的模拟。

5 结论

(1)开挖前边坡在天然工况下的整体安全系数为1.61,处于稳定状态,局部安全系数为1.08,处于基本稳定状态;在暴雨工况下的整体安全系数1.22,处于基本稳定状态,局部安全系数为0.80,处于失稳状态。表明:在天然工况下,该边坡处于基本稳定状态,在暴雨工况下,该边坡处于失稳状态。

(2)开挖后边坡在天然工况和暴雨工况下的安全系数分别为0.60和0.50,处于失稳状态,且失稳后的滑动距离分别为20.11和24.12 m。表明:开挖和降雨对边坡滑动距离有显著影响,使失稳后的边坡滑动距离增大。

(3)物质点法在计算边坡在不同工况下的滑动距离的同时,还可以评估边坡失稳对滑动路径上建筑物的威胁程度,对提高边坡安全性防护具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 李底林,赵容鸣,彭府华,等.基于强度折减法的高陡边坡滑坡治理稳定性分析[J].建筑科学与工程学报,2020,37(1):120-126.
LI Dilin, ZHAO Rongming, PENG Fuhua, et al. Stability analysis of landslide control on high land slope based on intensity reduction method [J]. Journal of Building Science and Engineering, 2020,37(1):120-126.
- [2] 松林,王薇,邓小虎,等.三峡库区典型滑坡地球物理实测及其意义:以万州区四方碑滑坡为例[J].地球科学,2019,44(9):3135-3146.
SONG Lin, WANG Wei, Deng Xiaohu, et al. Geophysical measurement of typical landslides in Three Gorges reservoir area and its significance: A case study of Sifangbei Landslide in Wanzhou District [J]. Earth Science, 2019,44(9):3135-3146.
- [3] Zhang S, Yang H, Wei F, et al. A model of debris flow forecast based on the water-soil coupling mechanism [J]. Journal of Earth Science, 2014,25(4):757-763.
- [4] 刘文红,李同录,李萍.条形荷载下不排水土坡破坏模式判定及极限承载力估算[J].工程地质学报,2016,24(2):197-203.
LIU Wenhong, LI Tonglu, LI Ping. Determination of failure mode and ultimate bearing capacity estimation of undrained soil slope under strip load [J]. Journal of Engineering Geology, 2016,24(2):197-203.
- [5] 苏永华,李帅,方砚兵,等.基于上限分析的边坡稳定可靠性评估[J].工程地质学报,2019,27(2):451-458.
SU Yonghua, LI Shuai, FANG Yanbing, et al. Stability and reliability evaluation of slope based on upper limit analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2019,27(2):451-458.
- [6] Hunter G, Fell R. Travel distance angle for "Rapid" Landslides in constructed and natural soil slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003,40(6):1123-1141.
- [7] Kang C, Zhang F, Pan F, et al. Characteristics and dynamic runoff analyses of 1983 Saleshan Landslide [J]. Engineering Geology, 2018,243:181-195.
- [8] Yin Y, Li B, Wang W, et al. Mechanism of the December 2015 Catastrophic Landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [J]. Engineering Geology, 2016,2(2):230-249.
- [9] 孙玉进,宋二祥."12·20"深圳滑坡动态模拟[J].岩土工程学报,2018,40(3):441-448.

- SUN Yujin, SONG Erxiang. "12·20" Shenzhen landslide dynamic simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 441-448.
- [10] Cleary P W, Campbell C S. Self-lubrication for long runout landslides: examination by computer simulation[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 1993, 98(B12): 21911-21924.
- [11] Johnson, Brondon C, Campbell, et al. The reduction of friction in long runout landslides as an emergent phenomenon[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(5): 881-889.
- [12] Yang C M, Yu W L, Dong J J, et al. Initiation, movement, and run-out of the Giant Tsaoiling Landslide—What can we learn from a simple rigid block model and a velocity-displacement dependent friction law?[J]. Engineering Geology, 2014, 182: 158-181.
- [13] Tsukamoto Y, Ishihara K, Kobari Y. Evaluation of run-out distances of slope failures during 2004 Niigata-Ken Chuetsu earthquake[J]. Soils and Foundations, 2006, 46(6): 713-725.
- [14] 王双, 李小春, 石露, 等. 物质点强度折减法及其在边坡中的应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2672-2678.
- WANG Shuang, LI Xiaochun, SHI Lu, et al. Material point strength reduction method and its application to slope engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2672-2678.
- [15] 孙玉进, 宋二祥. 大位移滑坡形态的物质点法模拟[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1218-1225.
- SUN Yujin, SONG Erxiang. Material point method simulation of large displacement landslide morphology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1218-1225.
- [16] Zhao X, Liang D, Martinelli M. Numerical simulations of dam-break floods with MPM[J]. Procedia Engineering, 2017, 175: 133-140.
- [17] Troncone A, Conte E, Pugliese L. Back-analysis of the post-failure stage of a landslide using the material point method[C]. Cham: Proceedings of the Springer International Publishing, 2020: 265-272.
- [18] Yerro A, Soga K, Bray J. Runout evaluation of Oso Landslide with the material point method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(9): 1304-1317.
- [19] Xu X R, Jin F, Sun Q C, et al. Three-dimensional material point method modeling of runout behavior of the Hongshiyuan Landslide[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(9): 1318-1337.
- [20] Conte E, Pugliese L, Troncone A. Post-failure stage simulation of a landslide using the material point method[J]. Engineering Geology, 2019, 253: 149-159.
- [21] Coelho B Z, Rohe A, Soga K. Poroelastic solid flow with material point method[J]. Procedia Engineering, 2017, 175: 316-323.
- [22] Dong Y, Wang D, Randolph M F. Runout of Submarine Landslide simulated with material point method[J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 29(3): 438-444.
- [23] Li X, Wu Y, He S, et al. Application of the material point method to simulate the post-failure runout processes of the Wangjiayan Landslide[J]. Engineering Geology, 2016, 212: 1-9.
- [24] Huang P, Li S I, Guo H, et al. Large deformation failure analysis of the soil slope based on the material point method[J]. Computational Geosciences, 2015, 19(4): 951-963.
- [25] Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A particle method for history-dependent materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1994, 118(1): 179-196.
- [26] 邹家强, 张巍, 刘爱华. 物质点法在椭圆骨料混凝土损伤模拟中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(7): 174-178.
- ZOU Jiaqiang, ZHANG Wei, LIU Aihua. Application of material point method in damage simulation of elliptical aggregate concrete[J]. Yangtze River, 2019, 50(7): 174-178.
- [27] 史卜涛, 张云, 张巍. 边坡稳定性分析的物质点强度折减法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1678-1684.
- SHI Butao, ZHANG Yun, ZHANG Wei. Material point strength reduction method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1678-1684.
- [28] 曾一芳, 王鹏, 明俊男, 等. 基于拉剪强度同等折减法的滑坡稳定性分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(2): 84-88.
- ZENG Yifang, WANG Peng, MING Junnan, et al. Stability analysis of landslide based on tensile shear strength equivalent reduction method[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunnelling), 2018, 45(2): 84-88.
- [29] 张雄, 廉艳平, 杨鹏飞, 等. 冲击爆炸问题的三维物质点法数值仿真[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(4): 29-37.
- ZHANG Xiong, LIAN Yanping, YANG Pengfei, et al. Numerical simulation of three-dimensional material point method for impact and explosion problem[J]. Computer Aided Engineering, 2011, 20(4): 29-37.
- [30] Troncone A, Pugliese L, Conte E. Run-out simulation of a landslide triggered by an increase in the groundwater level using the material point method[J]. Water, 2020, 12(10): 2817.
- [31] Zhang X, Chen Z, Liu Y. The Material Point Method: A Continuum-Based Particle Method for Extreme Loading Cases[M]. London United Kingdom: Elsevier Inc, 2016.
- [32] 李远宁, 潘勇, 冯晓亮, 等. 三峡库岸滑坡变形特征及影响因素分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(8): 127-131.
- LI Yuanning, PAN Yong, FENG Xiaoliang, et al. Analysis of deformation characteristics and influencing factors of landslide on the bank of Three Gorges Reservoir[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunnelling), 2018, 45(8): 127-131.
- [33] 文豪, 陈国庆, 李红, 等. 考虑降雨滑坡多级滑动的改进传递系数法研究[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 162-168.
- WEN Hao, CHEN Guoqing, LI Hong, et al. Study on improved transfer coefficient method considering multi-stage sliding of rainfall landslide[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 162-168.
- [34] 卢永兴, 陈剑, 霍志涛, 等. 降雨与开挖作用下黄土滑坡失稳过程分析: 以关中地区长武县杨厂村老庙滑坡为例[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 95-104.
- LU Yongxing, CHEN Jian, HUO Zhitao, et al. Analysis of instability process of the loess landslides under rainfall and excavation actions: A case study of Laomiao landslide at Yangchang Village in Changwu County, Guanzhong area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 95-104.

(编辑 王文)