

考虑颗粒形态的滑坡体运移特征研究

韩长玉, 陈文超, 张敏, 金莉, 王, 杨振兴

Migration characteristics of landslide considering particle morphology

HAN Changyu, CHEN Wenchao, ZHANG Min, JIN Li, WANG Zhe, and YANG Zhenxing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202310021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141-150

滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow

张志东, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 49-59

基于Green-Ampt模型的多层结构边坡降雨入渗改进计算方法及稳定性影响研究

Rainfall infiltration process of multi-layer slope based on improved Green-Ampt model stability analysis

宋宜祥, 尹子航, 黄达 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 162-170

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价

Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway

周洪福, 冯治国, 石胜伟, 王保弟, 徐如阁, 冉涛 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 112-119



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202310021

韩长玉, 陈文超, 张敏, 等. 考虑颗粒形态的滑坡体运移特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 234-244.
HAN Changyu, CHEN Wenchao, ZHANG Min, et al. Migration characteristics of landslide considering particle morphology[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 234-244.

考虑颗粒形态的滑坡体运移特征研究

韩长玉¹, 陈文超¹, 张敏¹, 金莉², 王喆², 杨振兴³

(1. 河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004; 2. 丽水学院工学院, 浙江 丽水 323000;
3. 中铁隧道局集团有限公司盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要: 岩土材料的颗粒形态对评估边坡稳定性和滑坡运移范围的准确性至关重要, 但目前颗粒形态对大尺度边坡相关问题的影响研究尚不明确。为探究颗粒形态与边坡稳定性及滑坡体运移特征的关系, 基于实际工程滑坡, 采用颗粒离散单元法, 构建不同颗粒形态构成的二维边坡。使用球形度和棱角度两个颗粒形态参数分别反映颗粒的整体轮廓特征和棱角数目, 研究粒径缩放和颗粒形态对边坡稳定系数的影响。通过强度折减法使边坡破坏, 进一步分析滑坡体的运移特征。研究表明: 对于工程尺度滑坡, 粒径缩放对边坡稳定系数预测有一定的影响阈值; 颗粒球形度与边坡稳定系数成反比, 棱角度与边坡稳定系数成正比, 且颗粒球形度与滑坡体的平均滑动速率成正比; 滑坡体运移范围受颗粒形态影响, 颗粒球形度越高, 运移范围越大。研究结果进一步揭示, 颗粒形态导致的能量耗散特征差异, 是滑坡体运移距离与堆积状态变化的主要内因。该研究可为滑坡致灾范围预测和防灾减灾工程提供参考。

关键词: 边坡; 数值模拟; 颗粒形态; 稳定系数; 运移特征

中图分类号: TU43; P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0234-11

Migration characteristics of landslide considering particle morphology

HAN Changyu¹, CHEN Wenchao¹, ZHANG Min¹, JIN Li², WANG Zhe², YANG Zhenxing³

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China;
2. School of Engineering, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000, China; 3. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, China Railway Tunnel Group Co. Ltd., Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Considering the particle morphology of geotechnical materials is essential for accurately assessing slope stability and predicting landslide migration. However, the influence of particle morphology on large-scale slope stability and landslide dynamics remains unclear. To reveal the impact of particle morphology on slope stability and landslide migration characteristics, a two-dimensional slopes of varied particle morphology were constructed using the particle discrete unit method, based on real-world engineering landslide. Two particle morphology parameters, sphericity and angularity, were used to characterize the overall contour characteristics and number of edges of the particles, respectively, and the effects of particle size scaling and particle morphology on the slope

收稿日期: 2023-10-23; 修订日期: 2024-04-02

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42307243); 河南省科技攻关项目(232102321102); 河南省教育厅项目(16A560002); 浙江省科技计划项目(2023SJC02); 河南省高等学校重点科研项目(25B560010)

第一作者: 韩长玉(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: 897563866@qq.com

通讯作者: 张敏(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事复杂工程条件下边坡失稳机理。E-mail: minzhang@henu.edu.cn

stability coefficient were investigated. With the slope damaged by intensity reduction, the migration characteristics of the landslide body were further analyzed. The results show that, in respect of engineering scale landslide, particle size scaling presents a threshold of impact on slope safety factor prediction. Particle sphericity is inversely proportional to slope safety factor, whereas angularity is proportional to slope safety factor, and particle spherical degree is proportional to the average sliding velocity of landslide. The migration area of landslide is affected by the morphology of particles, with a higher sphericity of particles leading to a larger migration area. The difference in energy dissipation characteristics caused by particle morphology is the main internal cause of the change of landslide migration scope and accumulation state. This study can provide basic information for landslide disaster scope prediction and disaster prevention and mitigation engineering.

Keywords: slope; numerical simulation; particle morphology; stability factor; migration characteristic

边坡稳定性及滑坡体运移范围预测是应急防灾领域长期关注的工程问题,特别是滑坡体运移范围预测^[1],由于影响因素较多且地质情况复杂,是目前亟待解决的重要难题。针对流动性较高的如碎屑流滑坡等,因体量大和致灾范围广等特点,灾害发生所造成的损失往往难以估量。学者们对碎屑流滑坡灾害进行了深入研究,目前滑坡致灾预测模型已有所发展,常用的预测模型有统计回归预测模型^[2-3]、理论计算预测模型^[4-5]和数值模拟预测模型^[6-8]。

根据已有研究成果^[9],滑坡体流动机制较为复杂,与颗粒的形态、尺寸均有联系。室内物理模型试验是研究边坡稳定性与滑坡体流动范围的重要手段。Manzella 等^[10]使用砾石和砖块开展室内模型试验,发现颗粒形态对滑坡体的运动距离有重要影响。Yang 等^[11]为探究岩崩时滑体前端速率的影响因素,使用鹅卵石、砾石与立方体块进行室内滑槽试验,发现滑体前端速率对颗粒特征十分敏感,鹅卵石速率最大,是因为鹅卵石颗粒的高圆度使其更容易碰撞和滚动,从而减小摩擦耗散。龙艳梅等^[12]使用不同粒径组的石英砂进行碎屑流物理模型试验,发现碎屑流运动特征与颗粒粒径呈显著的相关性,滑动速率随粒径减小或细颗粒含量增加呈减小趋势,颗粒运动形式由“滑动”向“流动”转变。雷先顺等^[13]使用形状不规则的碎石和较规则的砂作为试验土料,展开无黏性土堆积体的斜板试验,发现颗粒粒径和形态对滑坡结束后的冲程、堆积面积影响明显,对堆积宽度影响较小。然而,由于物理模型试验成本较高,且在颗粒层面进行试验的难度较大,有必要采用更经济便捷的方法开展相关研究。

随着计算机技术的发展,数值计算方法逐渐成为研究边坡失稳特征的重要工具^[14-16]。岩土体在宏观

上表现为相对连续体,而在微观上是由颗粒、孔隙等组成的离散体,因此,以滑坡体为简化对象,目前主要分为连续体^[17]、离散体^[18]和连续-离散体^[19]3类假设和简化方法。将滑坡体视为连续体,难以分析分离性或脱离式的大变形问题,更适用于边坡失稳模式判别研究,对于滑坡运移范围的研究,有很大局限性。将滑坡体视为完全的离散体,可以分析滑坡的多种影响因素,尤其是可以充分研究滑坡体材料颗粒性对滑坡运移结果的影响。连续-离散耦合法将滑坡体视为宏观连续局部离散,能够在获得整体认识的同时,针对重点局部位置进行深入研究。后两种方法中,目前主要以球形颗粒模拟滑坡体^[20],可能降低对滑坡运移范围预测的准确性。有少数学者已经开展了多颗粒形态的相关研究。如Banton等^[21]通过离散元法,使用3种颗粒进行斜槽试验,发现不规则颗粒因为具有更高的配位数,颗粒整体滑动距离小于球形颗粒。不规则颗粒下滑时克服摩擦做功所耗散的能量更多,而圆形颗粒由于阻力小,能量耗散慢,堆积形态更分散,范围更广。Mead等^[22]使用斜槽试验对岩崩的材料性质与堆积状态的关系进行研究,发现颗粒形态对堆积体位置有较大影响,球形颗粒的抗剪性能低于非球形颗粒,所以滑坡的能量耗散率降低,导致球形颗粒组成的滑坡体具有更大的滑动距离与堆积宽度。Zhang等^[23]研究颗粒形态、粒径和级配对岩崩动力学响应的影响,结果表明滑坡体的动力学行为受颗粒形态影响极大,颗粒的不规则程度越高,颗粒转动阻力越大,颗粒运动距离越短。

上述研究表明,颗粒形态对滑坡体流动方式及运移范围的影响不容忽视。但现有相关研究将重点放在了滑槽试验上,很少从工程尺度考虑颗粒形态的影响。基于实际的工程滑坡,将滑坡体视为离散体,考

虑球形度与棱角度两种颗粒形态评价指标,建立边坡数值模型,通过强度折减法对边坡相关参数进行折减,研究粒径缩放和颗粒形态对边坡稳定系数的影响规律,监测分析边坡失稳过程和运动过程,揭示颗粒形态对边坡破坏特征、滑坡体堆积状态和运移范围的影响规律。

1 颗粒形态评价与颗粒生成

1.1 颗粒形态评价

关于颗粒形态对边坡稳定系数、边坡破坏后滑坡运动特征的影响规律的研究,重点是如何定义用于描述颗粒形态的形态参数。现有多种对颗粒形态参数的定义,如刘清秉等^[24]从整体轮廓系数、扁平度、球形度 3 个层次对颗粒形态加以描述;Hentschel 等^[25]从二维图像分析中获得长宽比、形状系数、球度和凹凸度来测量评价颗粒的二维形态因子。在工程中,通常会用一个或者多个参数从不同层次共同描述颗粒外貌,其中,球形度作为颗粒形态的综合评价参数,被广泛用于粒子总体形态的评估。

Wadell^[26-27]在 1932 年提出球形度的概念,认为二维球形度是与平面图形面积相同圆的周长和粒子实际周长之比。Altuhafi 等^[28]根据球形度概念进行简单的变形:

$$S_p = 2\sqrt{\pi A}/P \quad (1)$$

式中: S_p ——球形度;

A ——粒子投影面积;

P ——粒子投影周长。

棱角度是描述粒子表面棱角数目及突出程度的参数,Zhao 等^[29]将棱角度定义为粒子的凸面轮廓周长与粒子等效椭圆的周长之比的平方(等效椭圆指与粒子最大投影长度为长轴且与粒子面积相等的标准椭圆形):

$$A_g = (P_c/P_e)^2 \quad (2)$$

式中: A_g ——棱角度;

P_c ——粒子的凸面轮廓周长;

P_e ——粒子等效椭圆的周长。

1.2 颗粒生成

图 1 为 5 种典型颗粒示意图,表 1 是根据式(1)与式(2)得到的相关颗粒形态系数。颗粒的生成方法为:圆形颗粒直接使用程序内置命令生成;异形颗粒使用 Rhino 完成绘制后导出,通过相关命令导入模拟软件后生成指定大小的颗粒。

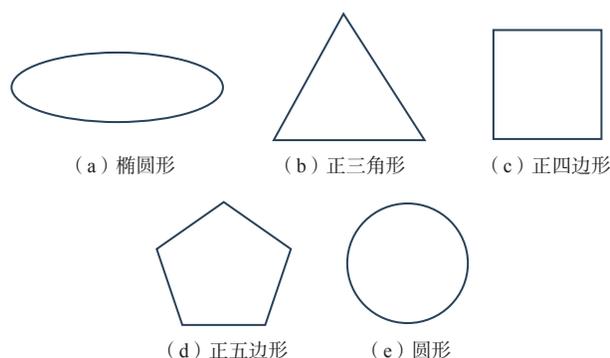


图 1 5 种典型颗粒形态示意图及相关参数

Fig. 1 Schematic diagram of five typical particle morphologies and related parameters

表 1 5 种典型颗粒形态系数统计表
Table 1 Statistical values of 5 typical particle morphology coefficients

颗粒形态	球形度	棱角度
圆形	1.000	1.000
正五边形	0.930	1.143
正四边形	0.886	1.181
正三角形	0.778	1.454
椭圆形	0.646	1.000

2 强度折减法与数值模型建立

2.1 强度折减法与失稳判据

有限元计算方法中的强度折减法,就是按比例同时折减岩土体的黏聚力(c)和内摩擦角(φ),直至边坡发生破坏,此时的折减比例就是边坡的稳定系数^[30]。周健等^[31]将强度折减法引入到颗粒流软件中,得到与有限元软件的强度折减法相似的结果,稳定系数(F_s)可定义为:

$$F_s = f/f_c = pb/pb_c \quad (3)$$

式中: f ——实际状态下的土颗粒间摩擦系数;

f_c ——临界破坏状态时土颗粒间的摩擦系数;

pb ——实际状态下的土颗粒间黏结强度;

pb_c ——临界破坏状态时土颗粒间的黏结强度。

离散元法的边坡失稳判据主要有:边坡特征点发生位移突变、程序迭代计算不收敛和颗粒裂纹贯通^[32-34]。通过边坡中的特征颗粒位移值来确定稳定系数较为合理,在边坡内部关键位置设置特征颗粒,监测不同折减系数下的特征颗粒平均位移值,从而对边坡整体做近似研究。当折减系数在稳定系数范围内时,边坡的特征颗粒位移值很小,且计算迭代很快收敛,边坡基本未发生形变,处于稳定状态;但当折减系数大于稳定系数时,特征颗粒平均位移值会发生突变,且边

坡各处颗粒开始发生明显位移, 此时边坡失稳, 开始发生滑坡。

2.2 边坡数值模型

根据某地滑坡的地质数据, 建立滑坡前边坡数值模型。在实际工程地质勘察报告基础上, 采用 ball-wall 法^[35] 构建边坡模型, 即将已知的滑坡前、后地表用 wall 代替, 只在滑体处生成颗粒。ball-wall 建模法适用于滑面已知的滑坡模型, 因所需颗粒相对较少, 可大大节省运算时间。建模过程如图 2 所示。

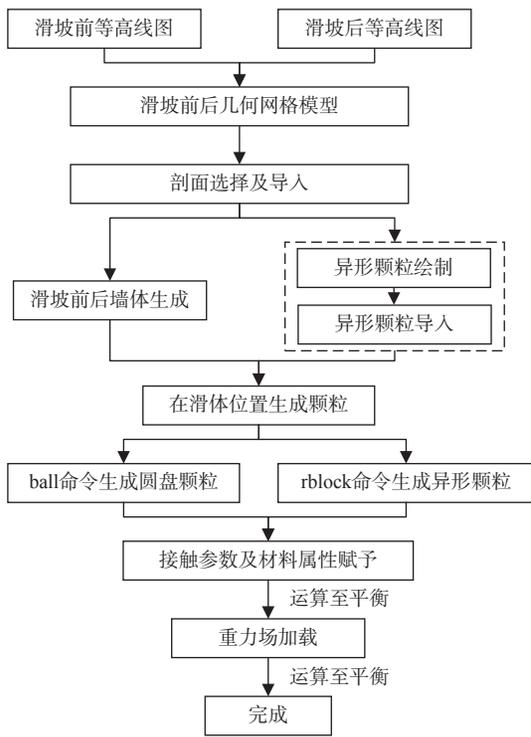


图 2 建模流程图

Fig. 2 Modeling flowchart

该数值模型总长 500 m, 高 149 m, 模型中的边坡区长 308 m, 高 139 m。经勘察, 滑坡堆积体主要构成碎石土和强风化晶屑凝灰岩。碎石土中碎石的粒径一般为 10 ~ 50 mm, 其间主要由粉质黏土充填, 破碎后的强风化晶屑凝灰岩粒径主要为 2 ~ 6 cm。如果使用真实粒径建立模型, 生成颗粒数量会达到千万量级, 但是较少的颗粒数量又会使模型精度降低。通常使用粒径放大法对颗粒的粒径进行适当的放大, 设置粒径比 1.66 生成较为均匀的颗粒^[36]。为选择合适的颗粒粒径, 使用圆形颗粒进行粒径对边坡稳定系数影响对比试验, 结果如图 3 所示。

由图 3 看出, 颗粒粒径对边坡的稳定性有较大的影响: 边坡的稳定系数会随构成边坡的颗粒粒径减小而增大, 但增大趋势在逐渐减小, 最终会到达某个阈

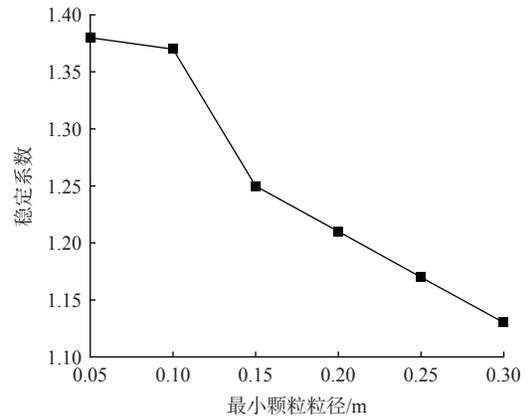


图 3 不同颗粒粒径下边坡稳定系数

Fig. 3 Slope stability factor with different particle sizes

值。综合考虑计算效率、计算精度与最不利情况, 将圆形颗粒的最小粒径选择为 0.2 m, 模型共生成 1.3 万余颗粒, 满足计算要求。将由圆形、正五边形、正四边形、正三角形和椭圆形颗粒构成的边坡数值模型依次编号为工况 1—5。为了更直观的研究边坡破坏过程中的运动特征, 在坡体内设置了 7 个特征颗粒作为监测对象, 进行边坡破坏过程中的速率分析, 模型见图 4。结合相关研究^[37-38] 与地质勘察数据^[39], 经大量试算得到数值模型细观参数, 结果见表 2。

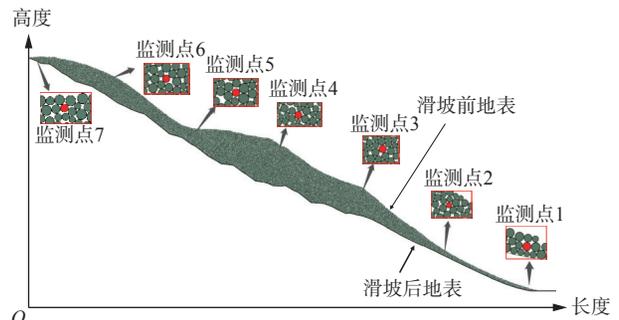


图 4 边坡数值计算模型 (工况 1)

Fig. 4 Numerical slope calculation model (model 1)

表 2 数值模拟的细观参数

Table 2 Microscopic parameters for numerical simulations

类型	细观参数	数值
颗粒属性	颗粒半径比 (R_{max}/R_{min})	1.66
	颗粒密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 950
	线性接触模量 / MPa	15
	法/切向刚度比	1
	摩擦系数	0.325
平行黏结参数	法向黏结强度 / MPa	20
	切向黏结强度 / MPa	10
	抗拉强度 / MPa	0.2
	内聚力 / MPa	0.4

据相关研究, 颗粒形态会影响材料的宏观参数^[40-41], 而宏观参数是影响边坡稳定和滑坡运移特征的重要原因^[42], 所以颗粒形态会影响边坡稳定及滑坡运移特征, 三者的递进关系如图 5 所示。本文基于表 2 微观参数生成数值模型进行颗粒形态对边坡相关问题的影响研究, 颗粒形态改变是导致研究结果差异的本质影响因素。

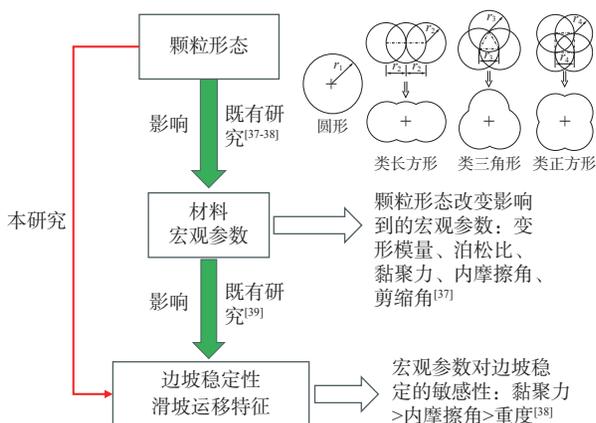


图 5 研究递进关系图
Fig. 5 Research progression diagram

3 数值计算结果分析

3.1 颗粒形态对稳定系数的影响

图 6 为各工况颗粒的球形度与棱角度对应的边坡稳定系数曲线。由图 6 可以看出, 构成边坡的颗粒形态会对边坡稳定性造成影响, 即边坡稳定系数值随着颗粒的球形度增大而减小, 随棱角度的增大而增大。Cleary^[43] 提出, 不规则颗粒之间更大的互锁效应导致的剪切阻力增加会对边坡稳定性产生影响。当颗粒球形度为 1 时, 边坡稳定系数为 1.21, 当颗粒球形度为 0.646 时, 稳定系数为 2.6, 球形度的降低使边坡稳定系数大大提高。由此可推断, 颗粒间的剪切阻力大小受颗粒的球形度影响: 随着球形度的降低, 剪切阻力会不断升高。其次, 剪切阻力的提高增加了颗粒的转动阻力, 使其在重力作用下更容易与其他颗粒形成稳定的拱架结构^[44], 从而提高边坡抵御破坏的能力。且随着球形度的降低, 稳定系数值升高速率加快, 同时颗粒间总接触数量随球形度的降低不断增加, 考虑为颗粒间配位数会随球形度的降低而快速升高, 提高了颗粒间接触数量与接触强度, 进而影响到边坡稳定性。因此, 在进行边坡稳定性分析时只考虑球形颗粒会降低边坡稳定性预测的准确度。

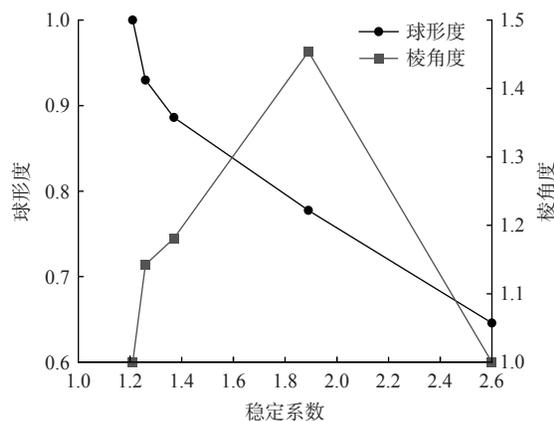


图 6 各工况颗粒球形度、棱角度对应的稳定系数
Fig. 6 Stability factor corresponding to the sphericity and angularity of particles in each working condition

3.2 颗粒形态对滑坡运移特征的影响

3.2.1 边坡破坏特征

使用强度折减法将各工况同比例折减破坏, 观察边坡破坏特征。发现颗粒球形度为 1 (圆形)、0.930 (正五边形)、0.778 (正三角形) 时的边坡破坏特征及破坏形式相似, 以球形度为 1 时的边坡破坏过程为例进行讨论分析。

如图 7 所示, 随着破坏的进行, 张拉裂缝不断向后方发展, 直至在坡顶处生成贯通的张拉裂缝, 颗粒开始不断顺滑面向下滑动。此时坡脚处的土体主要受到后上方土体的推挤作用, 还有小部分来自上方土体的刮削作用。

当边坡颗粒的球形度为 0.886 时, 即颗粒形态为正四边形时, 破坏特征与上述工况破坏特征有所不同。如图 8 所示, 受颗粒形态的影响, 接触滑床的底层颗粒在滑动过程中逐渐形成了规则排列、几乎无空隙的连续土体。所以在后上方土体的推挤作用下, 坡脚处的底层土体先一步形变, 随后带动上部土体向下滑动, 此时滑体前端的底层颗粒位移值大于上部颗粒位移值。随后, 坡底处土体作为滑体前端直接被后方土体沿滑床推出, 未受到上部土体的刮削作用。

颗粒形态为椭圆形时, 颗粒球形度为 0.646, 边坡在滑坡前期时的坡脚处破坏特征与颗粒形态为正四边形时相差较大。边坡滑体在下滑时部分土体在坡脚上方剪出后向下滑动, 其余部分堆积在坡脚土体后上方, 增大坡脚土体的滑动力, 滑体前端的滑动方式从坡脚土体较稳定状态时的缓慢蠕滑到超出坡脚土体支持极限后的快速滑动。图 9 为部分滑体剪出后对坡脚处土体刮削示意图, 可以看出滑体底部颗粒位

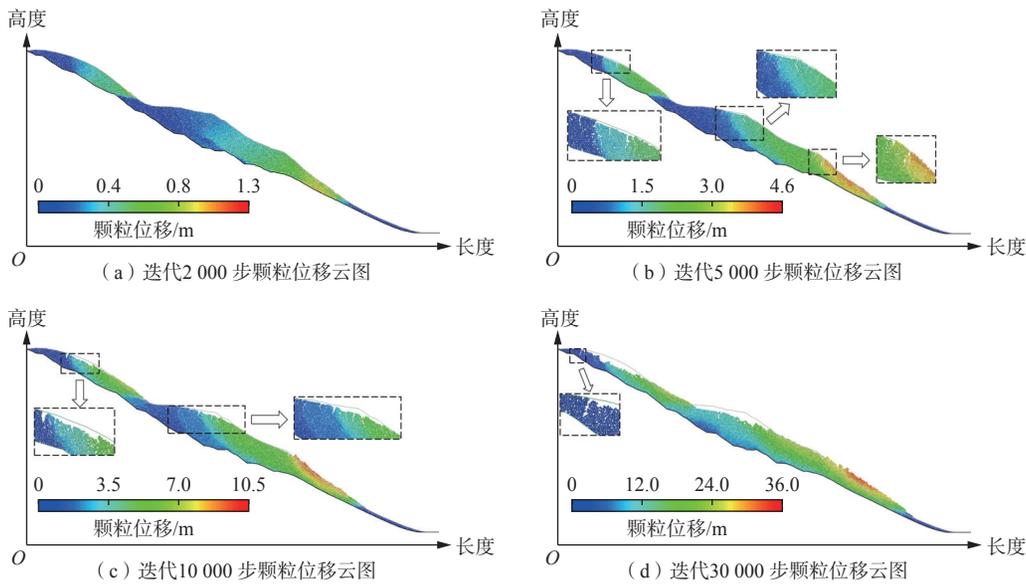


图 7 颗粒球形度为 1 (圆形) 时边坡各阶段颗粒位移云图

Fig. 7 Particle displacement at each stage of the slope when the particle sphericity is 1

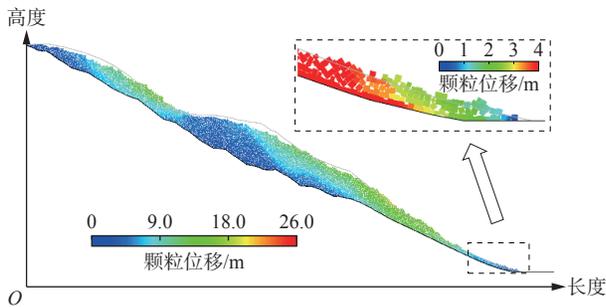


图 8 颗粒球形度为 0.886 (正四边形) 时滑坡前期坡脚处颗粒位移云图

Fig. 8 Particle displacement at the foot of the slope in the early stage of landslide when the particle sphericity is 0.886

移远小于上部颗粒位移值, 此时坡脚处土体同时受到后方土体的推挤作用与上方土体的刮削作用。

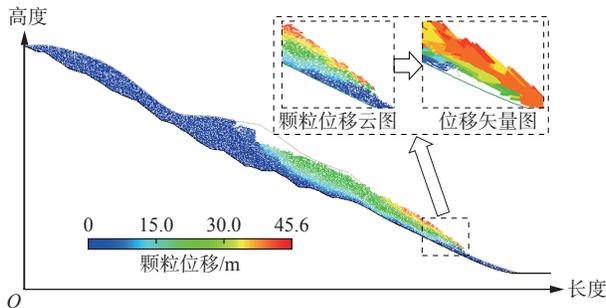


图 9 颗粒球形度为 0.646 (椭圆形) 时滑体前端刮削示意图

Fig. 9 Schematic diagram of scraping the front end of the slip body when the particle sphericity is 0.646

3.2.2 滑坡运动特征

图 10 为各颗粒形态下边坡破坏过程中的特征颗粒平均速率时程曲线, 可近似代表滑体的平均速率变

化特征。由图 10 可知, 颗粒形态会对颗粒平均速率产生影响。从整体上看, 颗粒球形度大, 颗粒平均速率越大。如颗粒球形度为 1 时的工况 1, 其速率时程曲线几乎始终在其余工况之上。由颗粒形态变化引起的破坏特征差异也会对颗粒平均速率产生影响: 颗粒球形度为 0.646 的工况 5 在前 7 s 速率基本为 0, 随后迅速增大, 且峰值速率超越颗粒球形度分别为 0.930, 0.886, 0.778 的工况 2—工况 4, 结果与前文的推断不符。其原因就是工况 5 坡脚处土体较其余工况的特殊破坏模式引起的颗粒滑动速率改变。颗粒形态也会对整个滑坡过程的迭代时长产生影响, 从球形度看: 工况的迭代时长大体随着球形度的降低而减小; 从棱角角度看: 受球形度影响较小的工况 2—工况 4 的迭代时长随颗粒棱角增大而增大。整体而言,

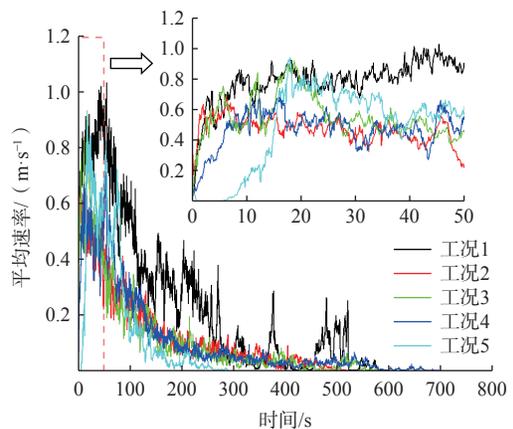


图 10 各工况特征颗粒平均速率时程曲线

Fig. 10 Average velocity time curve in each model

颗粒形态对滑坡的运动速率及破坏后的达到稳定状态的时间有很大影响。

3.2.3 堆积体形态及运移范围

图 11 展示了不同颗粒形态下滑坡体的最终影响范围。结果表明,颗粒形态对滑坡的运动过程影响十分显著。颗粒的球形度越大,滑坡运移范围越大,且颗粒球形度对滑坡体的堆积状态和位置也有重要影响。球形度为 1 时,即圆形颗粒,滑体主要堆积在坡脚处,滑面上滞留颗粒较少。但随着球形度的降低,滑体的堆积位置开始向坡脚处移动,滑面上开始停留

大量颗粒。此现象与 Iverson 等^[45]的滑槽模型试验结果相似:颗粒球形度越高,则滚动距离越远,流动更自由。造成运移范围及堆积体位置差异的原因是:随着球形度的变化,颗粒滑动和滚动对运移范围和堆积形态的影响权重有所改变。对所有工况滑坡结束后的颗粒转动进行统计,其颗粒平均转动量按颗粒球形度从高到低排序依次为 1 130°、277°、273°、303°和 70°,颗粒转动量随球形度的降低而降低,可以证明颗粒形态会影响颗粒的运动形式。所以当颗粒球形度降低,滑体颗粒的运动形式会逐渐由滚动转变为滑动,颗粒运动速率随之降低,从而运动距离变短,造成了不同颗粒形态下滑坡堆积体运动距离与堆积形态差异。

图 11 所揭示的滑坡体运动结果,与滑坡体启动和运动过程的能量耗散和转换有关。图 12 为各工况滑坡能量转化曲线,其所涉及的能量转化主要有重力势能转换为动能、黏结应变能、滑移能(由摩擦耗散的能量)和黏滞阻尼能(由碰撞耗散的能量),滑移能和黏滞阻尼能是能量耗散主要方式。由图可知,滑动引起的摩擦耗散相对于碰撞引起的黏性耗散起主导作用,且随颗粒球形度的降低,摩擦引起的耗散权重逐渐增加。当边坡颗粒球形度为 1(圆形)时,滑移能消耗能量占比约为 73.76%,滑体滑动距离最长,而当边坡颗粒球形度为 0.646(椭圆形)时,滑移能与重力势能之比为 94.77%,滑动距离最短。能量转换结果与前文分析的低球形度的颗粒更倾向于滑动,增大了摩擦耗散从而减小颗粒运动距离的结论相符。所以,颗粒形态的改变造成的滑坡能量转换与耗散的改变是运移范围及堆积差异的首要影响因子。

4 讨论

颗粒形态会对边坡稳定及滑坡体运移特征产生影响。对于边坡稳定性研究,由于非球形颗粒构成的材料具有更高的抗剪强度^[40-41, 43],从而使异形颗粒边坡工况具有更大的稳定系数。既有研究中^[10, 21-23, 43]的斜槽试验说明了较非球形颗粒来说,球形颗粒具有更大的滑动距离,与本研究数值模拟结果基本一致。其影响机制也较为复杂,包括改变颗粒运动状态,提高滑动速率和能量耗散率等。

颗粒形态会改变材料的宏观参数,本文直接研究了颗粒形态对大尺度边坡的影响,后续应将宏观参数指标作为微观和工程尺度的过渡性研究。另外,造成边坡破坏的原因较多,未来将进一步开展降雨、地震及人工切坡等外界因素作用下颗粒形态对滑坡运移

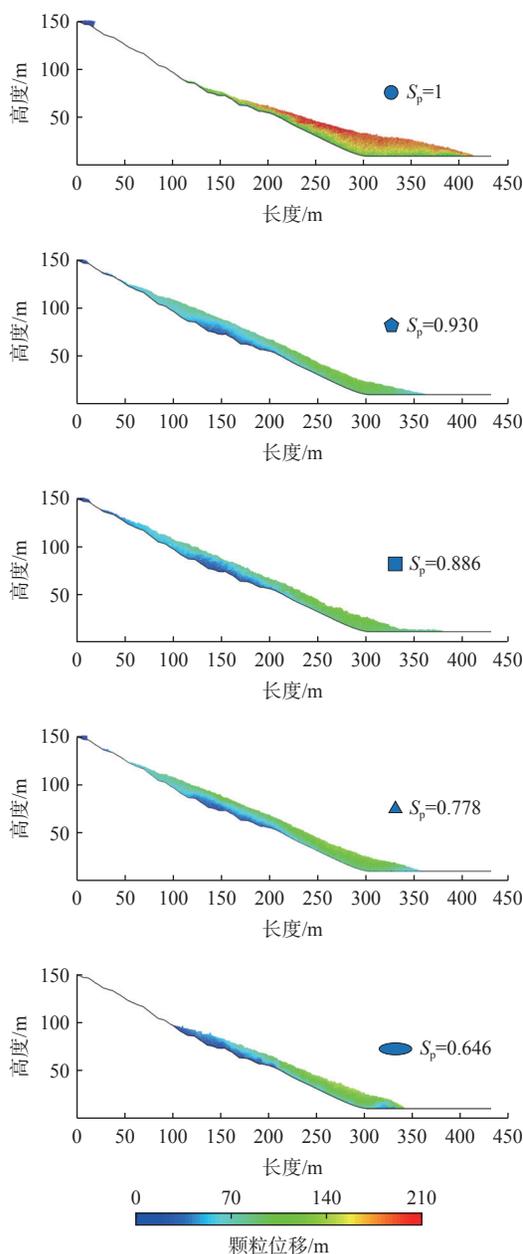


图 11 各球形度颗粒边坡滑坡后颗粒位移图

Fig. 11 Particle displacement after landslide slope of each particle sphericity

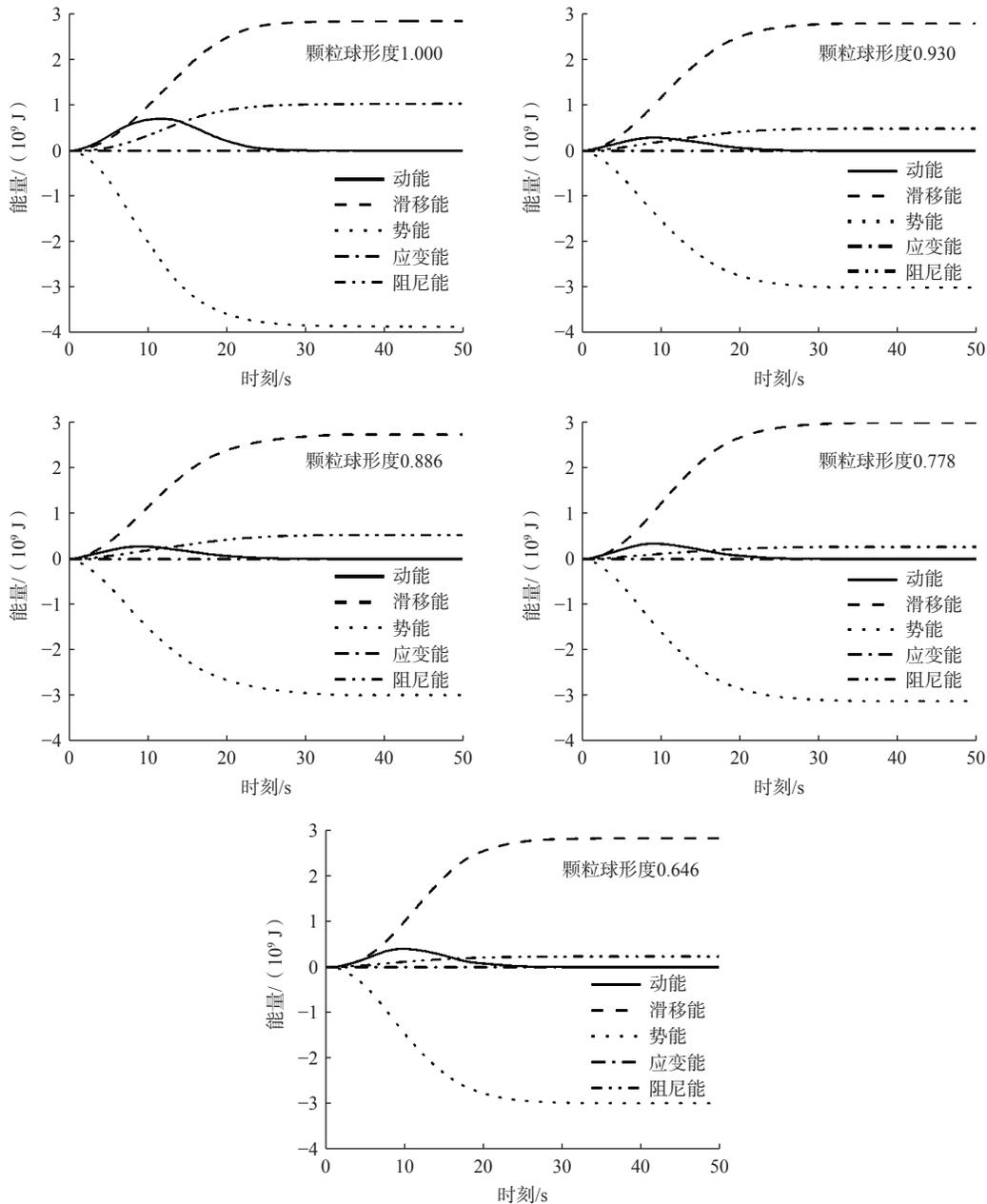


图 12 各球形度边坡对应的滑坡能量转化曲线

Fig. 12 Landslide energy conversion curve corresponding to each sphericity slope

特征的影响研究,并考虑更多的颗粒形态,提供更为广泛的研究成果。

5 结论

以某滑坡真实地形空间分布形态为依据,选择典型剖面并引入形态颗粒与描述参数生成不同形态颗粒构成的边坡数值模型。通过使用强度折减法,探究颗粒形态对边坡稳定性及边坡破坏后滑坡体运移特征影响。主要获得如下结论:

(1) 边坡的稳定性受颗粒粒径的影响: 粒径在一

定范围内时,边坡稳定系数随粒径的减小而增大,然后缓慢增长至阈值。

(2) 边坡稳定系数与构成边坡的颗粒球形度成负相关,与棱角度成正相关: 颗粒球形度越小,边坡稳定系数越大; 颗粒棱角度越高,边坡越不容易被破坏。

(3) 颗粒形态会对边坡的破坏特征和边坡破坏时的颗粒平均速率产生影响: 颗粒的球形度越大,滑动速率就越大; 颗粒的棱角度越大,滑动速率越小; 颗粒的滑动速率同时受由颗粒形态不同导致的破坏特征差异的影响。

(4) 滑坡体的运移距离与颗粒的球形度基本成正比相关。颗粒球形度越大, 滑体运动范围越大, 滑面上停留颗粒减少。由于颗粒形态的改变导致能量耗散方式的改变是其运移距离与堆积方式改变的首要影响因素。

参考文献 (References) :

- [1] 殷跃平, 高少华. 高位远程地质灾害研究: 回顾与展望 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 1 – 18. [YIN Yueping, GAO Shaohua. Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 1 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [2] GUO Deping, HAMADA M, HE Chuan, et al. An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earthquake area[J]. *Landslides*, 2014, 11(2): 281 – 291.
- [3] 王震宇, 孟陆波. 滑坡预报的多元回归分析方法 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 21 – 23. [WANG Zhenyu, MENG Lubo. The multivariate regression analysis method for landslide prediction[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(3): 21 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 唐然, 许强, 吴斌, 等. 平推式滑坡运动距离计算模型 [J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1009 – 1019. [TANG Ran, XU Qiang, WU Bin, et al. Method of sliding distance calculation for translational landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 1009 – 1019. (in Chinese with English abstract)]
- [5] SU Xing, WEI Wanhong, YE Weilin, et al. Predicting landslide sliding distance based on energy dissipation and mass point kinematics[J]. *Natural Hazards*, 2019, 96(3): 1367 – 1385.
- [6] MAO Jia, LIU Xunnan, ZHANG Chong, et al. Runout prediction and deposit characteristics investigation by the distance potential-based discrete element method: The 2018 Baige landslides, Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 2021, 18(1): 235 – 249.
- [7] 王高峰, 李浩, 田运涛, 等. 甘肃省白龙江流域典型高位堆积层滑坡成因机制研究及其危险性预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(4): 1003 – 1018. [WANG Gaofeng, LI Hao, TIAN Yuntao, et al. Study on the formation mechanism and risk prediction of high-level accumulation landslides in Bailongjiang River Basin, Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(4): 1003 – 1018. (in Chinese with English abstract)]
- [8] WANG Jian, HU Xinli, ZHENG Hongchao, et al. Energy transfer mechanisms of mobility alteration in landslide-debris flows controlled by entrainment and runout-path terrain: A case study[J]. *Landslides*, 2024, 21(6): 1189 – 1206.
- [9] 岳中琦. 梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 1 – 12. [YUE Zhongqi. Study on the instability condition and landslide mechanism of subgrade slope in Mei–Da Expressway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 1 – 12.(in Chinese with English abstract)]
- [10] MANZELLA I, LABIOUSE V. Flow experiments with gravel and blocks at small scale to investigate parameters and mechanisms involved in rock avalanches[J]. *Engineering Geology*, 2009, 109(1/2): 146 – 158.
- [11] YANG Qingqing, CAI Fei, UGAI K, et al. Some factors affecting mass-front velocity of rapid dry granular flows in a large flume[J]. *Engineering Geology*, 2011, 122(3/4): 249 – 260.
- [12] 龙艳梅, 宋章, 王玉峰, 等. 基于物理模型试验的碎屑流流态化运动特征分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 126 – 136. [LONG Yanmei, SONG Zhang, WANG Yufeng, et al. An analysis of flow-like motion of avalanches based on physical modeling experiments[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 126 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 雷先顺, 谢沃, 卢坤林, 等. 无黏性土滑动和堆积特性的模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 226 – 236. [LEI Xianshun, XIE Wo, LU Kunlin, et al. Model tests of sliding and accumulation characteristics of cohesionless soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 226 – 236. (in Chinese with English abstract)]
- [14] HAN Changyu, WANG Jianhua, XIA Xiaohe, et al. Limit analysis for local and overall stability of a slurry trench in cohesive soil[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 15(5): 06014026.
- [15] HAN Changyu, CHEN Jinjian, XIA Xiaohe, et al. Three-dimensional stability analysis of anisotropic and non-homogeneous slopes using limit analysis[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(3): 1142 – 1147.

- [16] HAN Changyu, HAO Yidan, LIU Kun, et al. Analysis of influencing factors of rainfall infiltration slope sensitivity based on grey relational analysis[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2025, 34(1): 671 – 679.
- [17] 汪华斌, 李建梅, 金怡轩, 等. 降雨诱发边坡破坏数值模拟两个关键问题的解决方法[J]. *岩土力学*, 2019, 40(2): 777 – 784. [WANG Huabin, LI Jianmei, JIN Yixuan, et al. The numerical methods for two key problems in rainfall-induced slope failure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 777 – 784. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张恩铭, 程谦恭, 林棋文, 等. 岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 125 – 135. [ZHANG Enming, CHENG Qiangong, LIN Qiwen, et al. A study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 125 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陶志刚, 张海江, 尹利洁, 等. 基于FDEM的戒台寺古滑体开裂破坏过程数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(3): 105 – 112. [TAO Zhigang, ZHANG Haijiang, YIN Lijie, et al. Numerical modeling of cracking for the Jietai Temple ancient landslide with the combined finite-discrete element method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(3): 105 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张家勇, 邹银先, 杨大山. 基于PFC3D的鱼鳅坡滑坡运动过程分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(4): 33 – 39. [ZHANG Jiayong, ZOU Yinxian, YANG Dashan. Analysis of Yuqiupo landslide motion process based on PFC3D[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(4): 33 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [21] BANTON J, VILLARD P, JONGMANS D, et al. Two-dimensional discrete element models of debris avalanches: Parameterization and the reproducibility of experimental results[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, 114: F04013.
- [22] MEAD S R, CLEARY P W. Validation of DEM prediction for granular avalanches on irregular terrain[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(9): 1724 – 1742.
- [23] ZHANG Yulong, SHAO Jianfu, LIU Zaobao, et al. Numerical study on the dynamic behavior of rock avalanche: Influence of cluster shape, size and gradation[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(1): 299 – 318.
- [24] 刘清秉, 项伟, BUDHU M, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊 1): 190 – 197. [LIU Qingbing, XIANG Wei, BUDHU M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Sup1): 190 – 197. (in Chinese with English abstract)]
- [25] HENTSCHEL M L, PAGE N W. Selection of descriptors for particle shape characterization[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2003, 20(1): 25 – 38.
- [26] WADELL H. Volume, shape, and roundness of rock particles[J]. *The Journal of Geology*, 1932, 40(5): 443 – 451.
- [27] WADELL H. Sphericity and roundness of rock particles[J]. *The Journal of Geology*, 1933, 41(3): 310 – 331.
- [28] ALTUHAFI F, O'SULLIVAN C, CAVARRETTA I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(8): 1290 – 1307.
- [29] ZHAO Yu, DUAN Yihang, ZHU Lingli, et al. Characterization of coarse aggregate morphology and its effect on rheological and mechanical properties of fresh concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 286: 122940.
- [30] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. *岩土工程学报*, 2002(3): 343 – 346. [ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Finding the stability safety factor of slope by finite element strength reduction method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002(3): 343 – 346. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 周健, 王家全, 曾远, 等. 颗粒流强度折减法和重力增加法的边坡安全系数研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(6): 1549 – 1554. [ZHOU Jian, WANG Jiaquan, ZENG Yuan, et al. Slope safety factor by methods of particle flow code strength reduction and gravity increase[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1549 – 1554. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 陈晓, 石崇, 杨俊雄. 土石混合体边坡微观特征对滑面形成影响研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(4): 813 – 821. [CHEN Xiao, SHI Chong, YANG Junxiong. Effect of micro characteristics of soil-rock mixture slope on formation of sliding surface[J]. *Journal of Engineering*

- Geology, 2020, 28(4): 813 - 821. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 王培涛, 杨天鸿, 朱立凯, 等. 基于 PFC2D 岩质边坡稳定性分析的强度折减法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 127 - 130. [WANG Peitao, YANG Tianhong, ZHU Likai, et al. Strength reduction method for rock slope stability analysis based on PFC2D[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2013, 34(1): 127 - 130. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 汪儒鸿, 周海清, 彭国园. 土体结构性对突发性边坡失稳的控制作用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 20 - 25. [WANG Ruhong, ZHOU Haiqing, PENG Guoyuan. Analysis of the sudden slope instability controlled by the soil structure[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 20 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 曹文, 李维朝, 唐斌, 等. PFC 滑坡模拟二、三维建模方法研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 455 - 462. [CAO Wen, LI Weichao, TANG Bin, et al. PFC study on building of 2d and 3d landslide models[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 455 - 462. (in Chinese with English abstract)]
- [36] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329 - 1364.
- [37] 胡新丽, 唐辉明, 李长冬, 等. 基于参数反演的保扎滑坡变形破坏机理研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 795 - 801. [HU Xinli, TANG Huiming, LI Changdong, et al. Deformation mechanism of Baozha landslide with parametric back analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 795 - 801. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 屈昊. 陕西西镇高速公路杨家河滑坡稳定性评价及失稳过程分析 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020. [QU Hao. The stable evaluation of the stability of and the analysis of instability on Yangjiahe Landslide beside the highway of Xizhen, Shaanxi Province[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 浙江省第七地质大队. 丽水市莲都区雅溪镇里东村滑坡勘察报告 [R]. 丽水: 浙江省第七地质大队, 2016. [The Seventh Geological Brigade of Zhejiang Province. Landslide investigation report of Lidong Village, Yaxi Town, Liandu District, Lishui City[R]. Lishui: The Seventh Geological Brigade of Zhejiang Province, 2016. (in Chinese)]
- [40] 张翀, 舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1281 - 1286. [ZHANG Chong, SHU Ganping. Effect of particle shape on biaxial tests simulated by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1281 - 1286. (in Chinese with English abstract)]
- [41] WU Mengmeng, XIONG Linghong, WANG Jianfeng. DEM study on effect of particle roundness on biaxial shearing of sand[J]. *Underground Space*, 2021, 6(6): 678 - 694.
- [42] 张旭辉, 龚晓南, 徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36 - 39. [ZHANG Xuhui, GONG Xiaonan, XU Riqing. Orthogonality analysis method of sensibility on factor of slope stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 36 - 39. (in Chinese with English abstract)]
- [43] CLEARY P W. Industrial particle flow modelling using discrete element method[J]. *Engineering Computations*, 2009, 26(6): 698 - 743.
- [44] 孔亮, 彭仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2112 - 2119. [KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2112 - 2119. (in Chinese with English abstract)]
- [45] IVERSON R M, LOGAN M, DENLINGER R P. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2004, 109(F1): F01015.

编辑: 王支农