

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.035



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 考虑砾石形状的边坡降雨入渗模型试验及数值分析

王浩然<sup>1</sup>, 黄海江<sup>2</sup>, 刘飞禹<sup>2</sup>, 张中杰<sup>1</sup>, 曲垚<sup>1</sup>

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 2. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海 200444)

**摘要:**为了研究降雨条件下砾石形状对含砾花岗岩残积土边坡稳定性及变形破坏特征的影响,通过室内降雨边坡模型试验并结合CFD-DEM数值模拟,对比分析边坡的宏观竖向位移和变形破坏及湿润锋变化,考虑圆砾、卵砾、角砾3种砾石形状,分析位移场与滑动面的发展规律以及细观接触力链、配位数、组构各向异性。结果表明:含圆砾边坡安全系数最小,含角砾边坡安全系数最大;随着降雨时间从0 h增加到3 h,含圆砾、卵砾、角砾3种不同砾石形状的边坡安全系数分别下降40%、33%、32%,受降雨影响的程度从大到小依次为含圆砾、卵砾、角砾边坡;随着砾石长宽比和棱角度的增大,砾石的嵌固咬合作用逐渐增强,对应坡体依次出现圆弧形破坏、齿状弧形破坏、偏移形破坏3种破坏模式;边坡失稳破坏后,含圆砾、卵砾、角砾边坡的强接触力链在分布特征上表现为交织性、弱连续性、不均匀性;随着砾石长宽比和棱角度的增大,含圆砾、卵砾、角砾边坡内部的接触各向异性程度逐渐提高。

**关键词:**降雨入渗;边坡稳定性;花岗岩残积土;砾石形状;位移场;滑动面

中图分类号:P642.22 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)06-0032-11

## Experimental and numerical analysis of rainfall infiltration on slopes considering gravel shape

WANG Haoran<sup>1</sup>, HUANG Haijiang<sup>2</sup>, LIU Feiyu<sup>2</sup>, ZHANG Zhongjie<sup>1</sup>, QU Yao<sup>1</sup>

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, P. R. China;  
2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the influence of gravel shape on the stability and deformation damage characteristics of gravel-bearing granite residual soil slopes under rainfall conditions, the macroscopic vertical displacement and deformation damage of slopes as well as the change of wetting front were comparatively analyzed by carrying out rainfall slope modeling test and combining with the numerical simulation of CFD-DEM to analyze the developmental pattern of displacement field and sliding surface, the fine-scale contact force chain, coordination

收稿日期:2024-12-30

基金项目:国家自然科学基金(52378355)

作者简介:王浩然(1986-),男,博士,高级工程师,主要从事岩土工程研究,E-mail: wanghaoran@sucdri.com。

刘飞禹(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: lfyzju@shu.edu.cn。

Received: 2024-12-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52378355)

Author brief: WANG Haoran (1986-), PhD, senior engineer, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: wanghaoran@sucdri.com.

LIU Feiyu (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: lfyzju@shu.edu.cn.

number, and group structure anisotropy. The results show that: the safety coefficient of slopes containing rounded gravel is the smallest and that of slopes containing angular gravel is the largest. With the increase of precipitation time from 0 to 3 hours, the safety coefficients of slopes containing rounded gravel, pebble gravel and angular gravel decrease by 40%, 33% and 32%, respectively, and the degree of influence by rainfall is in descending order of rounded gravel, pebble gravel and angular gravel slopes. With the increase of the aspect ratio and prism angle, the embedded occlusion effect of gravel is gradually enhanced, and the three damage modes of circular arc damage, toothed arc damage, and offset damage appear in the corresponding slopes in descending order; after the slope's destabilization and failure, the strong contact force chains of the rounded gravel-containing, pebble gravel-containing, and angular gravel-containing slopes are characterized by intertwined, weak continuity, and unevenness distribution; with the increase of the aspect ratio and prism angle of the gravels, the extent of the contact anisotropy of rounded gravel-containing, pebble gravel-containing and angular gravel-containing slopes is gradually increased.

**Keywords:** rainfall infiltration; slope stability; granite residual soil; gravel shape; displacement field; sliding surface

含砾花岗岩残积土边坡的稳定性主要受内在因素(如砾石含量、形状、空间分布等)与外在因素(如降雨、地震、基坑开挖等)共同作用的影响<sup>[1-3]</sup>。与土质边坡和岩质边坡不同,含砾花岗岩残积土具有独特的物质组成和特殊的物理力学性质,且其降雨入渗的作用规律较为复杂,这些因素决定了此类滑坡在形成条件、变形位移特征及破坏滑移规律上具有与其他类型滑坡不同的特点<sup>[4-6]</sup>。

朱彦鹏等<sup>[7]</sup>通过现场大型剪切试验研究了砾石土边坡的剪切特性和稳定性,发现现场剪切试验结果更有利于边坡稳定性分析和加固工程设计。周中等<sup>[8]</sup>通过人工降雨模拟试验和原位综合监测发现,降雨入渗导致的孔隙水压力增加和土体吸水软化是诱发土石混合体边坡失稳的主要原因之一。原位试验能提高边坡稳定性评价的准确性,但需要大量的时间与经济成本投入,且难以对边坡内在的因素进行发掘研究<sup>[9]</sup>。

Hu等<sup>[10]</sup>通过离心模型试验方法研究了不同岩土含量下土石混合坡体在降雨条件下的破坏模式和失稳机制,发现增加岩石含量可以提高土石混合坡体的稳定性,减少侵蚀破坏。Wang等<sup>[11]</sup>通过离心模型试验方法研究了土石混合坡体在表面载荷条件下的破坏行为,发现当土石混合坡体中的块体体积含量超过一定阈值时,坡体的极限承载能力和刚度显著增加。室内模型试验在一定程度上能够弥补原位试验的不足,但同样会受到材料相似性、模型制样误差等的影响<sup>[12]</sup>。

与原位试验和室内模型试验相比,数值模拟具有经济且高效的优势<sup>[13]</sup>。刘顺青等<sup>[14]</sup>提出一种随机生成多边形块石形状的方法,利用有限元研究了随机多边形块石空间分布的影响,发现塑性区扩展存

在绕石、分流和包含3种模式。Peng等<sup>[15]</sup>采用改进的二维DDA-SPH(离散变形分析-平滑粒子流体动力学)方法研究了具有不同形状块石的土石混合物边坡的力学性能,发现土石混合体边坡的变形随着块石圆度的增加而增加。Lu等<sup>[16]</sup>考虑了块石形状及含量对土石混合体边坡稳定性的影响,研究表明,块石的棱角性和长宽比有利于边坡的稳定性。Hu等<sup>[17]</sup>采用离散元方法研究了块石形状与含量对土石混合体边坡承载能力及细观破坏的演变机制,发现岩石在剪切带中的行为对边坡的破坏模式有重要作用。黄献文等<sup>[18]</sup>结合有限元极限分析软件Optum G2和物理模型试验,基于原始块石形状研究了土石接触面强度对土石混合体边坡稳定性的影响。Yu等<sup>[19]</sup>利用有限元软件建立了流固耦合滑坡数值模型,结果表明,与长期小暴雨相比,短期暴雨危害更大,边坡更容易发生失稳和破坏。

综上,众多学者采用不同方式对此类边坡进行了大量研究,但缺乏从宏、细观相结合的角度对内外因素共同作用下边坡的稳定性与破坏机理的研究。笔者综合降雨与砾石形状两种影响因素,利用室内模型试验与数值分析相结合的方法,对于模型试验中的宏观现象,从微观角度分析其变形破坏机理。

## 1 模型试验概况及数值模型的建立

### 1.1 室内模型试验概况

#### 1.1.1 模型构建及试验材料

模型试验在尺寸为100 cm×50 cm×50 cm(长×宽×高)的模型箱内进行,如图1所示,模型箱的四面采用2 cm厚透明高强度玻璃,以便观察含砾花岗岩残积土体的渗水及沉降。对模型箱内部表

面进行光滑处理,减少试验过程中模型箱边界与试验材料所产生摩擦的影响。降雨过程通过定制降雨板实现,降雨具有雾化效果,确保水滴在落下前达到较低的终端速度,以避免较大水滴或形成水柱对模型造成破坏。

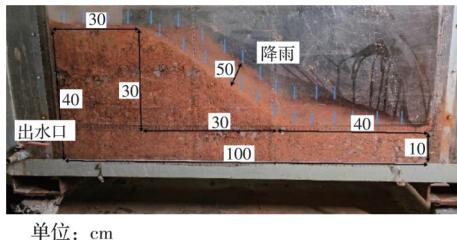


图 1 室内模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the indoor model test

采用由中风化花岗岩和黏性土组成的含砾花岗岩残积土体进行试验,以 5 mm 作为含砾花岗岩残积土体中土和砾石的粒径界限<sup>[20-21]</sup>。图 2 为土样的级配曲线,为了能够有效地研究砾石形状效应对边坡稳定性的影响,避免砾石尺寸过大对边坡稳定性带来的较大影响<sup>[4,22]</sup>,试验砾石选取的最大尺寸控制在边坡高度的 0.1 倍。采用圆砾与角砾两种不同形状的砾石颗粒进行试验。圆砾由角砾经过打磨机打磨而成,对打磨后的圆砾重新进行筛分配比后组成与角砾相同的级配土体,进行室内模型箱试验。打磨后的砾石为无尖锐棱角的圆砾,对应自然界中受流水侵蚀冲刷后形成的光滑卵石,而角砾对应爆破后所形成的棱角分明、形态各异的砾石形状,能够在一定程度上反映不同工程实际中的两种工况。角砾与打磨后的光滑卵砾如图 3 所示。

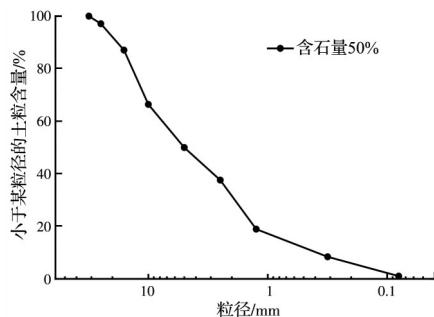


图 2 试样级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of the sample

### 1.1.2 试验方案

边坡模型采用混合均匀后符合图 2 级配的含砾花岗岩残积土,按分层填筑、碾压击实的方式制作。每层厚约 5 cm,控制每层土体的总击实数相同,以减少压实误差对边坡稳定性的影响。试验过程中,计算并称量每层填土的重量,按所计算重量填入模型箱后夯实,对上下层接触面进行适当的刮毛。在



(a) 角砾 (b) 卵砾

图 3 角砾与卵砾

Fig. 3 Angular gravel and pebble gravel

分层填筑过程中埋入传感器,主要包括含水率传感器、土压力传感器和位移传感器,传感器埋置的位置如图 4 所示。

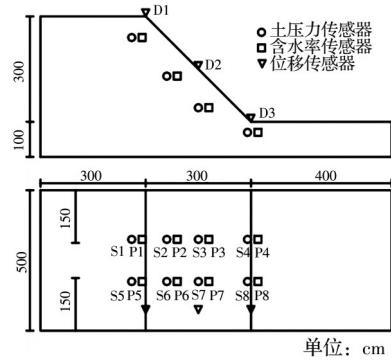


图 4 传感器埋置图

Fig. 4 Sensor embedding diagram

为研究外因(降雨)与内因(颗粒形状)共同作用下含砾花岗岩残积土边坡失稳特性的影响,以降雨时长和砾石形状两种因素为变量,分别采用含角砾、卵砾两种形状的含砾花岗岩残积土构建室内模型,试验过程中保持降雨强度大小为 120 mL/h。

### 1.2 数值模型的砾石生成及边坡构建

#### 1.2.1 不同形状砾石生成方法

岩土材料的形状指标包括棱角度、磨圆度、圆度、长宽比、凹凸度等<sup>[23-24]</sup>。含砾花岗岩残积土的物理力学性质受所含砾石形状的影响不可忽视。因此,以长宽比和棱角度作为砾石形状评价指标。长宽比  $\alpha$  与棱角度  $R_s$  分别采用式(1)、式(2)计算。

$$\alpha = \frac{L}{B} \quad (1)$$

式中: $L$  为等效椭圆长轴长; $B$  为等效椭圆短轴长。

$$R_s = \frac{L_2}{L_1} \quad (2)$$

式中: $L_1$  为磨圆前的外轮廓长; $L_2$  为磨圆后外轮廓长; $R_s$  越小表示磨圆程度越高。

参考 Hu 等<sup>[17]</sup>提出的随机多边形块体的生成方法,生成多边形角砾模板。如图 5(a)所示,1~8 为砾石形状的控制点。基于已生成的具有明显棱角

特性的角砾模板来生成卵砾模板。具体操作为:基于角砾的控制点,通过第三方软件的点曲线工具生成具有一定长宽比但没有棱角特性的卵砾模板,并计算棱角度,如图5(b)所示。图6为真实砾石与模板样例的对比图,根据上述方法生成的颗粒在一定程度上能够反映颗粒的真实形态。最后生成圆形砾石模板,生成3种形态不同的颗粒,利用角砾与卵砾之间的棱角度差异、卵砾与圆砾之间的长宽比差异来进行相应研究。

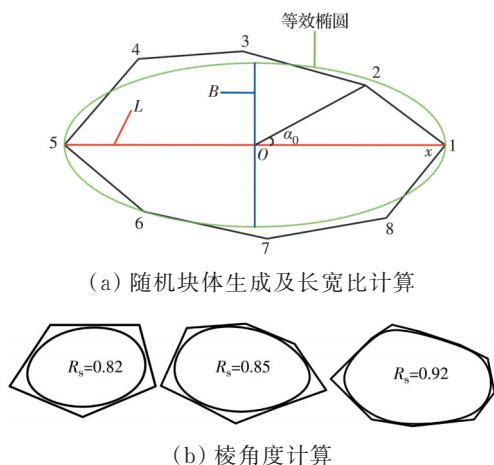


图5 随机块体生成及计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of randomized block generation and computation

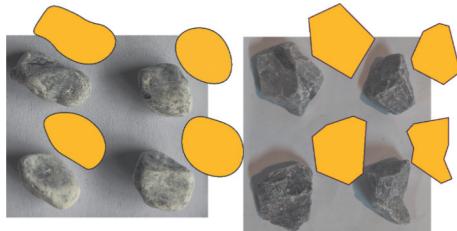


图6 图像与试样对比图

Fig. 6 Comparison of image and specimen

### 1.2.2 数值模型边坡构建

在建立砾石形状离散模型数据库后,以5 mm作为土和砾石的粒径界限,采用颗粒原位替换法进

行边坡模型的构建,建模过程如下:

1)根据边坡模型尺寸建立约束墙体,采用图7所示的颗粒粒径级配曲线,按随机空间分布生成由Ball单元颗粒组成的边坡模型。

2)赋予模型细观参数进行平衡求解,消除颗粒间的重叠,使颗粒在坡体内部均匀分布。

3)颗粒平衡后,通过FISH语言编程将粒径大于或等于5 mm的Ball单元替换为Rblock单元。根据已有的砾石模板,将Ball单元替换为相同位置和面积大小的Rblock单元。所替换Rblock单元的长轴倾角随机分布在0°~180°之间,并重新进行模型平衡求解。在消除多余约束墙体后,进行再平衡。根据砾石形状的不同,创建含圆砾、卵砾和角砾3类边坡的数值模型。

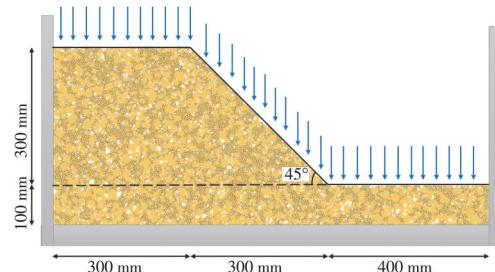


图7 边坡数值模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of slope model

### 1.3 细观参数选取

基于室内直剪试验,建立相同尺寸的离散元模型,并通过不断调整颗粒的细观参数,使模拟结果与室内试验结果相吻合。图8为含砾花岗岩残积土在法向静荷载作用下的剪切应力-剪切位移曲线对比,其中数值模拟结果与室内试验结果吻合较好<sup>[25]</sup>。此时,颗粒的细观参数能够较好地描述含砾花岗岩残积土的细观特征,证明所采用的细观颗粒参数能够有效反映含砾花岗岩残积土的宏观力学特性。砾石采用滚动阻力线性模型,土体采用平行胶结模型。通过“试错法”标定的含砾花岗岩残积土细观参数如表1所示。

表1 含砾花岗岩残积土颗粒细观参数取值

Table 1 Microscopic parameter values of gravel-bearing granite residual soil particles

材料	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	有效模量/MPa	刚度比	摩擦系数	滚动摩擦系数	平行黏结有效模型/MPa	平行刚度比	平行向强度/kPa	平行聚力/kPa	平行擦角/(°)	半径乘子
土	2 310	10	1.5	0.50		10	1.5	20.4	20.2	15	1
石	2 750	100	1.5	0.55	0.40						

## 2 室内模型试验及数值模拟结果分析

### 2.1 降雨入渗结果对比验证

利用Python脚本功能和离散元软件中的CFD

模块,实现双向流固耦合模拟。通过将模型试验与数值模型在相同时刻的湿润锋前进方向及最终湿润锋范围进行对比,验证了数值模拟降雨入渗的合理性。如图9所示,以砾石空间随机分布所建立的

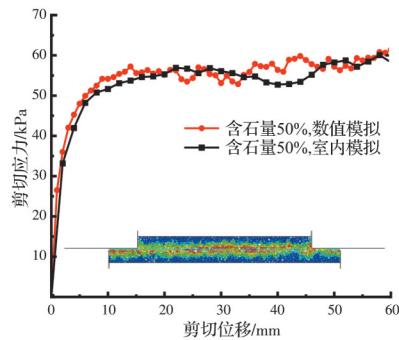


图 8 法向静荷载下室内试验与数值模拟结果曲线对比

Fig. 8 Comparison of indoor test and numerical simulation results under normal static loading

数值模型为例, 经过 1 h 的降雨入渗作用后, 室内模型试验结果与数值模拟的湿润锋基本吻合, 验证了数值计算模型的适用性。

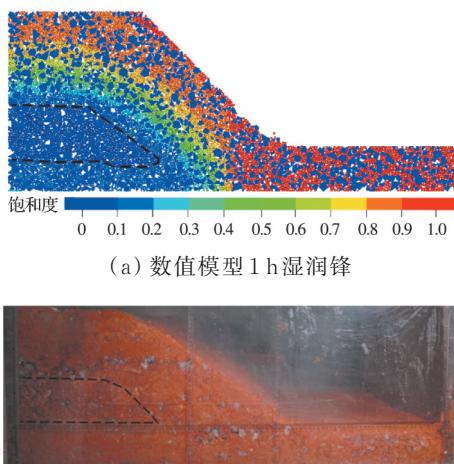


图 9 室内试验及离散元对比图

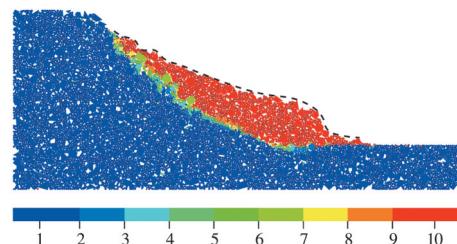
Fig. 9 Comparison of indoor test and discrete element simulation

## 2.2 边坡降雨入渗破坏形式对比分析

在 3 h 的持续暴雨作用下, 数值模型与室内模型边坡最终均发生了滑移垮塌。以含角砾的边坡为例, 在 3 h 时刻室内模型试验过程中所采集的图像和数值模拟的图像如图 10 所示。由图 10 可以看出, 数值模拟和室内模型试验边坡的破坏形式非常相似。边坡均在坡面浅层发生滑移, 并在整体上形成滑移面, 同时, 在坡脚处都出现了凸起的土石堆积体。降雨入渗引发的坡体表面与内部冲刷侵蚀作用以及土体软化导致的细颗粒流失造成了边坡土体骨架的整体破坏, 进而促使边坡失稳。最终, 这一系列因素共同作用导致边坡发展成具有明显滑移面的大规模破坏。

## 2.3 边坡竖向监测位移对比分析

图 11 为含角砾与卵砾边坡随降雨时间在坡顶



(a) 降雨 3 h 数值模拟破坏结果



(b) 降雨 3 h 室内模型破坏结果

图 10 室内试验与数值破坏结果对比图

Fig. 10 Comparison of indoor test and numerical damage results

顶角处的竖向位移监测变化图, 通过 fish 语言在模型试验相同的点位进行竖向位移监测。数值模拟与模型试验的含卵砾边坡竖向位移在 1.0~2.5 h 内逐渐开始增大, 并在 2.5 h 时开始出现快速上升, 此时坡体出现滑移垮塌, 砾石与土体沿坡面滚落与滑移。含角砾边坡的竖向位移曲线在 2.0 h 前较为平缓, 在 2.0~2.5 h 时模型试验段开始出现一定的增大, 在 2.5~3.0 h 时段内边坡开始出现滑移垮塌, 数值模拟与模型试验的竖向位移快速上升。

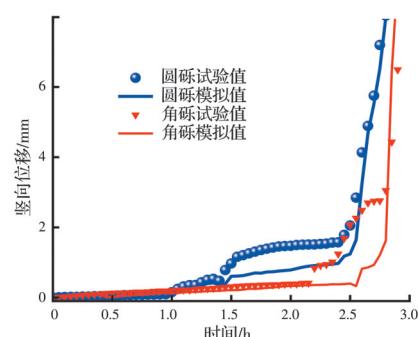


图 11 坡顶顶角处竖向位移变化对比图

Fig. 11 Comparison of changes in vertical displacement at the top corner of the slope

数值模拟与模型试验在坡顶顶角处的竖向位移结果总体匹配较好, 在相同时间区间内, 竖向位移变化趋势基本一致。由于实际试验环境的复杂性以及人为操作存在的误差, 相同时间的数值结果之间存在一定差异, 但差异在合理范围内。因此, 可以认为所建立的数值模型在一定程度上能够反映边坡竖向位移变化的规律。

## 2.4 边坡稳定性离散元分析

采用强度折减法分析边坡稳定性, 从能量的角

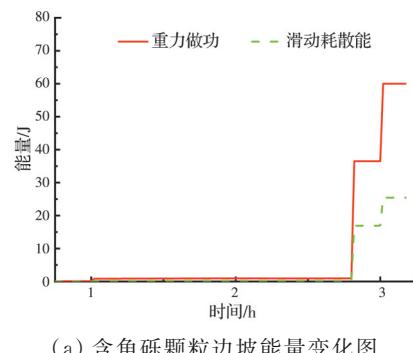
度判别边坡是否发生失稳。在离散元中,强度折减法主要是对颗粒细观摩擦系数和颗粒间黏结强度进行逐步折减,直到刚好使得边坡发生完全破坏时的折减系数即为边坡的安全系数<sup>[26-27]</sup>。安全系数 $F_s$ 定义为

$$F_s = \frac{u_r}{u_r'} = \frac{u_c}{u_c'} = \frac{p_c}{p_c'} \quad (3)$$

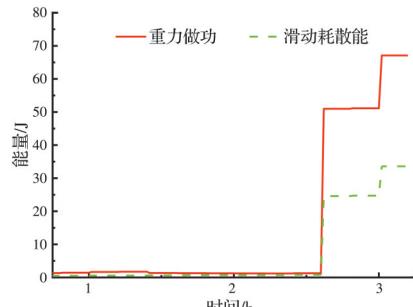
式中: $u_r$ 为原始几何状态下砾石间的摩擦系数; $u_r'$ 为砾石间的折减摩擦系数; $u_c$ 为原始几何状态下黏土颗粒间的摩擦系数; $u_c'$ 为黏土颗粒间的折减摩擦系数; $p_c$ 为原始几何状态下平行黏结的强度; $p_c'$ 为平行黏结的折减强度。

在软件能量分析中,机械能主要分为单元本身的能量(body energy)和代表单元间接触的能量(contact energy),对两类能量中的颗粒进行重力做功能量和滑动耗散能监测,如图12所示。含角砾与卵砾边坡的能量变化图表明,在持续降雨过程中,重力做功与滑动耗散能在某一段时间内迅速增大后趋于稳定,这段时间也是坡体由稳定状态向不稳定状态的演变过程。根据这一变化特征,通过对两种能量的变化监测来判定边坡是否处于稳定状态,进而采用强度折减法评估边坡稳定性。

图13为含圆砾、卵砾和角砾边坡在不同降雨时刻的安全系数计算值。随着降雨时间的增加,安全系数逐渐下降。随着降雨时间的增加,含圆砾边坡



(a) 含角砾颗粒边坡能量变化图



(b) 含卵砾颗粒边坡能量变化图

图12 边坡能量变化图

Fig. 12 Diagram of slope energy changes

首先发生滑移失稳,且安全系数由大到小始终呈含角砾、卵砾、圆砾的顺序。含圆砾边坡的安全系数在3 h降雨时间内变化最大,从1.25降至0.75,下降了40%,受降雨作用影响最为显著;含卵砾和角砾边坡的安全系数依次下降了0.45和0.44,降幅分别为33%与32%。砾石的棱角特性和适当的长宽比能够有效提高边坡稳定性、增强土石之间的空间互锁能力,从而减小降雨作用对边坡稳定性的影响。

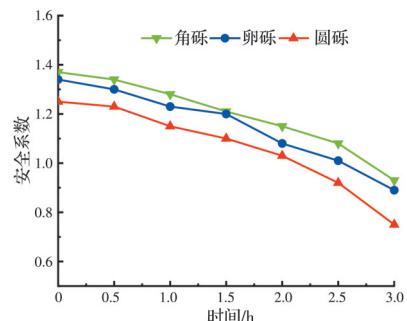


图13 不同降雨时间边坡的安全系数变化图

Fig. 13 Variation of factor of safety for slopes with different rainfall durations

### 3 边坡宏细观变形机理分析

#### 3.1 砾石形状对边坡变形的影响

##### 3.1.1 边坡位移场分析

采用准静态的边坡位移场对边坡模型中颗粒位移量进行归一化处理,以颗粒平均位移 $S$ 为基准,将位移场划分为10等份来对颗粒进行着色。处理后的位移场能够更有效地地区分位移量,以确定滑动面的形状和位置。图14为降雨入渗作用下不同砾石形状含砾花岗岩残积土边坡失稳后的位移场。含具有明显棱角度的角砾边坡所形成的滑动带同样具有棱角的特性;光滑磨圆的卵砾所组成的边坡滑动带则具有一定的凹凸性;圆形砾石所组成的边坡滑动带则是一个光滑的圆弧形,与均匀土质边坡所形成的滑动面形状类似。同时,砾石形状的不同导致滑动面的演变与发展有所不同,这也直接影响了边坡的稳定性。在不改变砾石含量、降雨条件、边坡形状等因素的情况下,含角砾、卵砾和圆砾边坡的稳定性依次递减。这是因为相比圆砾,具有明显棱角的角砾以及长宽比较大的卵砾具有更强的嵌固和咬合作用,这一作用同样改变了滑动面的演化过程,进而增强了边坡的稳定性。

##### 3.1.2 滑动面演变发展的破坏模式

如图15所示,结合砾石的分布位置、形状以及滑动面的发展路径,对含不同形状砾石边坡滑动带

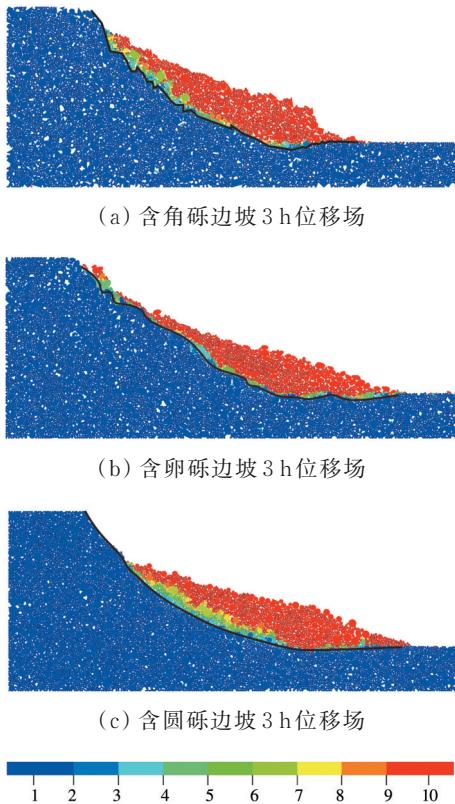


图 14 含不同砾石形状边坡位移场

Fig. 14 Displacement field of slopes with different gravel shapes

进行对比分析,可以总结出 3 种破坏模式。对于没有明显棱角度且长宽比一致的圆砾组成的边坡,由于砾石与其他颗粒之间的咬合作用较弱,颗粒形状较统一,所形成的滑动面可视为等效均质连续体边坡破坏模式;含角砾边坡的滑动面与含圆砾边坡整体外轮廓一致,形成了具有锯齿状的弧形滑动面,这与角砾的棱角度密切相关。显著的棱角度使得角砾具有较强的咬合力,形成围绕潜在滑动面波动的破坏模式;对于含卵砾边坡,由于砾石具有一定的长宽比,故随着棱角度的减小,砾石的不规则形状与土体之间组成局部稳定结构,滑动面偏离潜在滑动面,形成新的滑动面。根据上述颗粒形状对滑动面的发展模式及演变规律的影响,总结出如图 16 所示的 3 种破坏模式:圆弧形破坏、齿状弧形破坏、偏移形破坏。

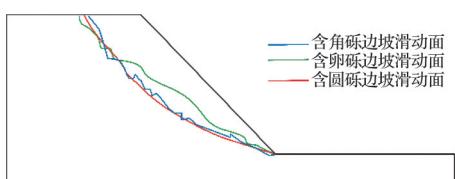


图 15 含不同砾石形状边坡滑动面对比图

Fig. 15 Comparison of sliding surfaces for slopes with different gravel shapes

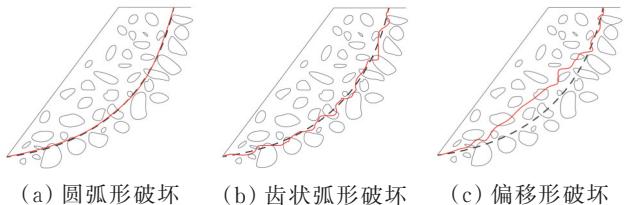


图 16 砾石形状引起的 3 种破坏模式

Fig. 16 3 damage patterns caused by gravel shape

### 3.1.3 砾石对滑动面的影响机制

如图 17 所示,砾石对滑动面存在两种影响方式:一种是单颗粒作用,由于单颗粒砾石与土体或砾石与砾石之间的相互咬合作用,造成滑动带的凸起或凹陷,受单颗粒的棱角度影响显著;另一种是多砾石共同作用下,受不规则形状的影响,局部区域内的砾石与土体间形成稳定结构,导致滑动面偏离潜在滑动面,进而沿较为薄弱的剪切面发生滑移。砾石的棱角度和长宽比对稳定结构的形成有重要影响。

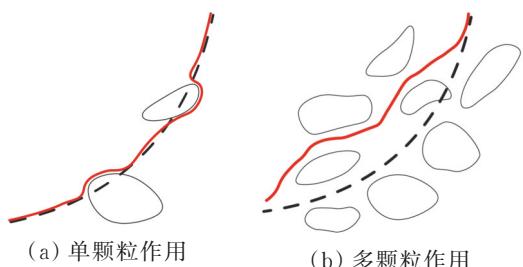


图 17 砾石形状对滑动面形状的影响

Fig. 17 Effect of gravel shape on the shape of the sliding surface

### 3.2 接触力链及配位数分析

土体颗粒间接触力大于平均值的为强接触,反之为弱接触<sup>[28]</sup>。为了更好地观察坡体内部的强接触力链分布,以平均接触力为基准对接触力链进行着色,进而观察边坡失稳后强接触力链的分布情况,如图 18 所示。对于含角砾边坡,内部的强接触力链交织性更强,靠近坡面方向的强接触力链更多,且近似平行于坡面;含卵砾边坡内部的强接触力链连续性较差,连续且大小均匀的强接触力链较少,且分布不均匀;含圆砾边坡内部左部的强接触力链主要呈竖直分布,且靠近坡面的强接触力链稀疏。综上,具有明显棱角特性的角砾具有较强的咬合作用,使得砾石与土体之间具备更好的传力特性,延长了砾石-土颗粒之间的弱接触面;相比圆砾,长宽比较大的卵砾具有更强的抗滑特性和抗转动特性,外加一定的咬合能力。尽管当前含砾量不足以形

成完整的砾石骨架,但卵砾仍能使土体与砾石共同形成承力体系,从而更好地共同承担外力。

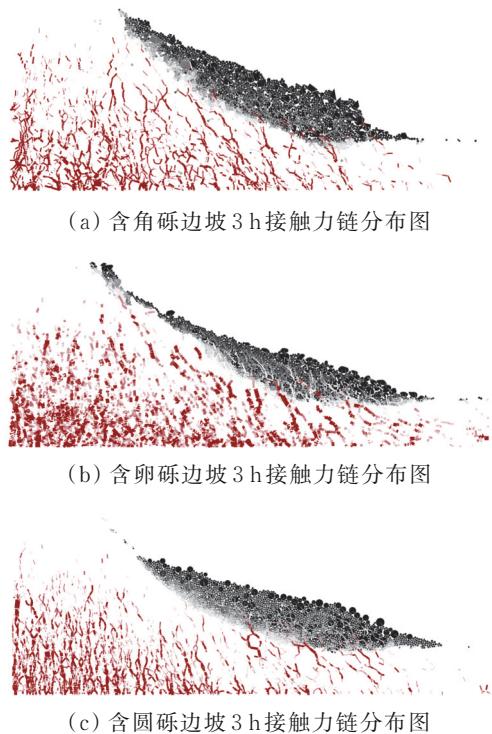


图18 含不同形状砾石土边坡接触力链分布图  
Fig. 18 Distribution of contact force chains on soil slopes with different gravel shapes

颗粒的配位数与颗粒形状、大小分布等因素密切相关。非球形颗粒(如片状、棱角形状等)会影响配位数的分布,从而导致材料的强度和稳定性不均匀。配位数的变化在一定程度上反映了坡体结构的稳定性,在配位数快速下降的时间段内,坡体容易出现较大的变形或破坏。

图19为含不同形状砾石边坡在不同降雨时刻的配位数变化。由图19可知,在0~3 h时间段内,含角砾边坡的配位数大于含卵砾边坡,含卵砾边坡的配位数大于含圆砾边坡。随着降雨入渗时间的增加,含圆砾、卵砾、角砾边坡的配位数逐渐下降,在2~3 h时出现快速下降,分别下降0.41、0.31、0.25。含卵砾边坡在降雨1 h前后出现配位数快速下降,但边坡未出现明显失稳滑移。这主要是降雨入渗作用导致局部小范围变形,颗粒间松散,进而使配位数下降。

### 3.3 组构分析

为了深入揭示降雨作用下含砾花岗岩残积土边坡的细观变形破坏机制,对含3种不同形状砾石的坡体进行细观数学分析,通过提取降雨过程中两个关键时刻坡体的法向接触力与切向接触力数据,

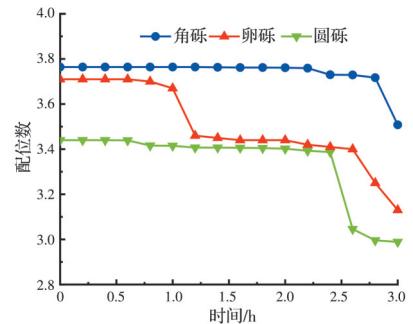


图19 不同形状砾石配位数变化图

Fig. 19 Plot of variation in coordination number of gravels with different shapes

采用颗粒间接触分布函数(式(4))进行拟合分析,考察法向与切向接触力的各向异性随降雨过程的演化规律。

$$\begin{aligned} f_n(\theta) &= f_0 [1 + a_n \cos 2(\theta - \theta_n)] \\ f_t(\theta) &= -f_0 a_t \sin 2(\theta - \theta_t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $f_n(\theta)$ 为接触法向落在该角度区间的所有颗粒接触点处的法向接触力平均值; $f_t(\theta)$ 为接触法向落在该角度区间的所有颗粒接触点处的切向接触力平均值; $f_0$ 为所有接触点的平均法向接触力; $\theta_n$ 与 $\theta_t$ 分别为法向接触力、切向接触力各向异性的主方向(与水平线的夹角); $a_n$ 和 $a_t$ 分别为各向异性系数,表征法向接触力、切向接触力各向异性程度。

如图20所示,各向异性方向利用箭头指向,接触各向异性分布拟合函数以 $10^\circ$ 为一个区间统计量。由图20可知,通过法向接触力与切向接触力的各向异性系数 $a_n$ 和 $a_t$ ,将颗粒形状对组构异性的影响量化分析。对于初始状态的含圆砾、卵砾、圆砾边坡,其法向接触各向异性系数 $a_n$ 值分别为0.73、0.70、0.59,随着降雨时间的增加,导致边坡失稳滑移后 $a_n$ 值分别减小为0.69、0.41、0.39。结合切向接触各向异性系数可以看出,边坡的整体接触各向异性由大到小依次为含角砾、卵砾、圆砾边坡,砾石形状对边坡内部接触各向异性具有显著影响。棱角度和合适的长宽比能够增大坡体内部的各向异性,有助于增大坡体内部土石之间的空间互锁能力,从而影响土石之间的传力特性,有利于坡体骨架的形成,增强边坡的稳定性。

初始状态边坡接触各向异性的主方向接近 $90^\circ$ 垂直方向,随着降雨时间的增加,边坡失稳后,坡体内部的法向和切向接触各向异性主方向均向左发生不同程度的偏转,这是由于坡体垮塌后土体形成了新的稳定接触,改变了边坡内部的原有结构。

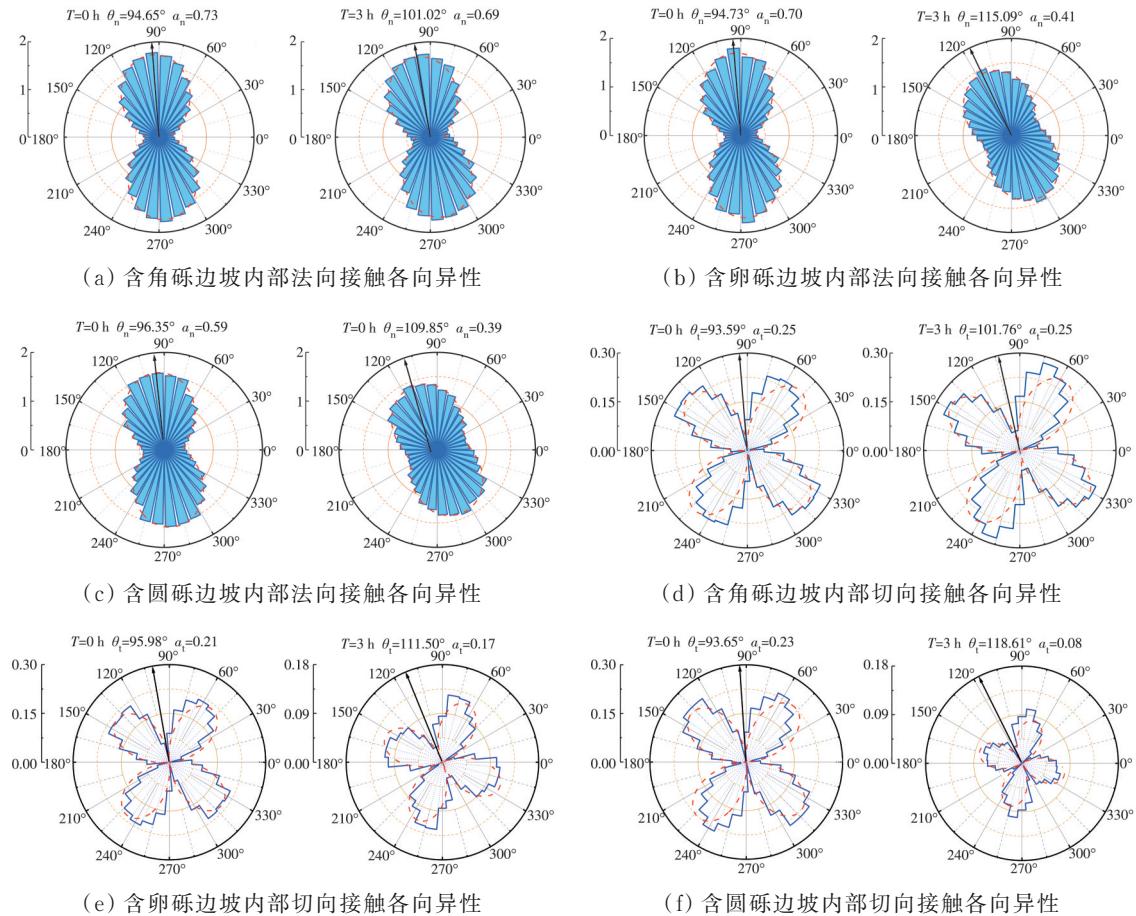


图 20 含不同形状砾石接触组构分布

Fig. 20 Distribution of gravel contact configurations with different shapes

## 4 结论

对降雨入渗作用下含不同形状砾石的花岗岩残积土边坡进行了模型试验及离散元数值模拟研究, 主要结论如下:

1) 随着砾石的棱角度与长宽比的增大, 由圆砾、卵砾到角砾, 含砾花岗岩残积土边坡的安全系数依次增大。

2) 边坡安全系数随降雨时间增加而减小, 降雨对含圆砾、卵砾、角砾边坡的稳定性影响程度依次减小。

3) 随着降雨时间的增加, 滑动面演变发展受砾石形状效应的影响, 含圆砾、角砾、卵砾的边坡最终失稳破坏形成圆弧形破坏、齿状弧形破坏、偏移形破坏3种模式。

4) 砾石形状对边坡内部的强接触力链分布形态具有不同的影响, 含角砾、卵砾、圆砾边坡失稳后内部的强接触力链分别具有交织性、弱连续性、不均匀性。

5) 降雨导致坡体失稳后, 边坡内部的接触各向异性程度降低; 随着棱角度和长宽比的增加, 由圆砾、卵砾到角砾, 边坡内部的接触各向异性逐渐提升。

## 参考文献

- [1] LI C, ZHANG R T, ZHU J B, et al. Model test study on response of weathered rock slope to rainfall infiltration under different conditions [J]. Journal of Earth Science, 2024, 35(4): 1316-1333.
- [2] 杨世豪, 苏立君, 张崇磊, 等. 强降雨作用下昔格达边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 19-27.  
YANG S H, SU L J, ZHANG C L, et al. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 19-27. (in Chinese)
- [3] 高文伟, 高玮, 胡瑞林, 等. 块石空间定向性对土石混合体力学性质的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 89-97.  
GAO W W, GAO W, HU R L, et al. Effects of rock block orientation on the mechanical characteristics of rock and soil aggregate [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 89-97. (in Chinese)
- [4] 黄献文, 刘顺青, 周爱兆, 等. 基于较大块石分布位置的土石混合边坡稳定性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(1): 63-71.  
HUANG X W, LIU S Q, ZHOU A Z, et al. Study on

- the stability of soil-rock slopes based on the distributional location of the larger rocks [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 63-71. (in Chinese)
- [5] 高玉峰, 王玉杰, 张飞, 等. 边坡工程与堤坝工程研究进展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(8): 97-118.  
GAO Y F, WANG Y J, ZHANG F, et al. State-of-the-art review on slope and embankment dams [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(8): 97-118. (in Chinese)
- [6] TU Y L, DENG X G, WANG X C, et al. Shear mechanical properties of the interphase between the S-RM and benched bedrock using the FDM-DEM [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 167: 106105.
- [7] 朱彦鹏, 张强, 马天忠, 等. 舟曲某千枚岩与砾石土质高边坡现场剪切试验及稳定性分析研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(3): 404-410.  
ZHU Y P, ZHANG Q, MA T Z, et al. Field shearing test and stability analysis of a Zhouqu phyllite and gravel soil high slope [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3): 404-410. (in Chinese)
- [8] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1391-1396.  
ZHOU Z, FU H L, LIU B C, et al. Artificial rainfall tests on a well-instrumented soil-rock-mixture slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1391-1396. (in Chinese)
- [9] HUANG D, GU D M. Influence of filling-drawdown cycles of the Three Gorges Reservoir on deformation and failure behaviors of anacinal rock slopes in the Wu Gorge [J]. Geomorphology, 2017, 295: 489-506.
- [10] HU J B, WENG X L, YANG L X, et al. Centrifugal modeling test on failure characteristics of soil-rock mixture slope under rainfall [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106775.
- [11] WANG T, ZHANG G. Failure behavior of soil-rock mixture slopes based on centrifuge model test [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(8): 1928-1942.
- [12] HUANG X W, YAO Z S, WANG W, et al. Stability analysis of soil-rock slope (SRS) with an improved stochastic method and physical models [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(18): 649.
- [13] ZHAO L H, QIAO N, HUANG D L, et al. Numerical investigation of the failure mechanisms of soil-rock mixture slopes by material point method [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 150: 104898.
- [14] 刘顺青, 黄献文, 周爱兆, 等. 基于随机块石模型的土石混合边坡稳定性分析方法研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊1): 350-358.  
LIU S Q, HUANG X W, ZHOU A Z, et al. A stability analysis method of soil-rock slope based on random block stone model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup 1): 350-358. (in Chinese)
- [15] PENG X Y, LIU J F, CHENG X, et al. Dynamic modelling of soil-rock-mixture slopes using the coupled DDA-SPH method [J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106772.
- [16] LU Y, TAN Y, LI X. Stability analyses on slopes of clay-rock mixtures using discrete element method [J]. Engineering Geology, 2018, 244: 116-124.
- [17] HU Y Y, LU Y. Study on soil-rock slope instability at mesoscopic scale using discrete element method [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 157: 105268.
- [18] 黄献文, 姚直书, 王伟, 等. 考虑块石长轴倾角和土石接触面的土石混合体边坡稳定性分析[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 47-59.  
HUANG X W, YAO Z S, WANG W, et al. Stability analysis of the soil-rock slope considering long axis inclination and soil-rock interface [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 47-59. (in Chinese)
- [19] YU P, LIU H H, YU H B, et al. Study on fluid-solid coupling numerical simulation and early warning of weathered granite landslides induced by extreme rainfall [J]. Sustainability, 2023, 15(15): 11738.
- [20] 董云, 柴贺军. 土石混合料的工程综合分类法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 179-184.  
DONG Y, CHAI H J. Study on engineering synthetical classification of rock-soil aggregate mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 179-184. (in Chinese)
- [21] 刘飞禹, 孔剑捷, 姚嘉敏. 含石量和压实度对格栅-土石混合体界面剪切特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 903-911.  
LIU F Y, KONG J J, YAO J M. Effects of rock content and degree of compaction on interface shear characteristics of geogrid-soil-rock mixture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 903-911. (in Chinese)
- [22] LIU S Q, HUANG X W, ZHOU A Z, et al. Soil-rock slope stability analysis by considering the nonuniformity of rocks [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018(1): 3121604.
- [23] 张家发, 叶加兵, 陈劲松, 等. 碎石颗粒形状测量与评定的初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 343-349.  
ZHANG J F, YE J B, CHEN J S, et al. A preliminary study of measurement and evaluation of breakstone grain shape [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 343-349. (in Chinese)
- [24] FAN M, SU D, CHEN X S. Systematic investigation into the role of particle multi-level morphology in determining the shear behavior of granular materials via DEM simulation [J]. Computers and Geotechnics,

- 2024, 170: 106298.
- [25] 张敏超, 刘新荣, 王鹏, 等. 不同含石量下泥岩土石混合体剪切特性及细观破坏机制[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 17-26.  
ZHANG M C, LIU X R, WANG P, et al. Shear properties and failure meso-mechanism of soil-rock mixture composed of mudstone under different rock block proportions [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 17-26. (in Chinese)
- [26] 金磊, 曾亚武, 程涛, 等. 土石混合体边坡稳定性的三维颗粒离散元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 41-50.  
JIN L, ZENG Y W, CHENG T, et al. Stability analysis of soil-rock mixture slope based on 3-D DEM [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 41-50. (in Chinese)
- [27] 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 J, WANG J Q, ZENG Y, 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)
- [28] 刘全雷, 邓刚, 李维朝, 等. 不同细粒含量与间断比下不连续级配砂砾土渗蚀的CFD-DEM数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(7): 2677-2689.  
LIU L L, DENG G, LI W C, et al. Numerical simulations of erosion of gap-graded sandy gravel soil with different fines contents and gap ratios using CFD-DEM [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(7): 2677-2689. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)