



考虑块石形态和颗粒破碎的土石混合料 直剪特性研究

刘良禧^{1,2}, 周航¹, 蒋春勇^{1,3}, 王荣斌², 章文峰⁴

(1. 重庆大学 土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆高速公路集团有限公司, 重庆 401121; 3. 重庆城投基础设施建设有限公司, 重庆 400015; 4. 重庆成渝垫丰武高速公路有限公司, 重庆 401134)

摘要: 土石混合料是一种组分和结构极不均匀的混合介质, 在工程领域具有广泛应用。目前, 针对土石混合料在块石形态、颗粒破碎以及含石量与含水率耦合作用下的力学特性, 仍缺乏系统的深入研究。在考虑块石形态和破碎的基础上, 结合大型室内直剪试验与离散元数值模拟, 系统探究含石量与含水率对其宏观力学特性的影响。结果表明: 1) 随着含石量增大, 抗剪强度 τ 和内摩擦角 φ 也增大; 黏聚力 c 先增大后减小, 在含石量为40%左右时达到峰值; 颗粒破碎指数 B_N^H 逐渐增大, 但增长率逐渐降低。2) 含水率对土石混合料的强度存在明显的劣化作用。随着含水率的增大, 抗剪强度 τ 、内摩擦角 φ 和黏聚力 c 均减小; 在低法向应力下, 含水率对抗剪强度 τ 的抑制效果更加显著; 颗粒破碎指数 B_N^H 随含水率的增加非线性降低。3) 块石的形态和方位主导了强力链的分布与应力集中模式。颗粒破碎易发生于应力集中的块石棱角区域, 颗粒破碎是导致土石混合料宏观强度非线性的内在原因。

关键词: 土石混合料; 离散元法; 直剪试验; 含石量; 含水率; 颗粒破碎

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-19

Study on the direct shear characteristics of soil-rock mixture considering rock block shape and breakage

LIU Liangxi^{1,2}, ZHOU Hang¹, JIANG Chunyong^{1,3}, WANG Rongbing², ZHANG Wenfeng⁴

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Expressway Group Company Limited, Chongqing 401121, P. R. China; 3. Chongqing City Construction Investment (Group) Co., Ltd, Chongqing 400015, P. R. China; 4. Chongqing Chengyu Dianfengwu Expressway Co., Ltd., Chongqing 401134, P. R. China)

Abstract: Soil-rock mixture (S-RM) is a highly heterogeneous medium with wide applications in engineering.

收稿日期: 2025-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(52278330、52027812); 国家重点研发计划(2022YFB2601903)

作者简介: 刘良禧(2000-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: liangxi_liu@qq.com。

周航(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zh4412517@163.com。

Received: 2025-09-04

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52278330, 52027812); National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2601903)

Author brief: LIU Liangxi (2000-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: liangxi_liu@qq.com.

ZHOU Hang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zh4412517@163.com.

However, a systematic and in-depth understanding of its mechanical properties, particularly when considering the effects of rock block morphology, particle breakage, and the coupled influence of rock and water content, remains insufficient. This study systematically investigates the influence of rock content and water content on the macro- and micro-mechanical properties of S-RM by integrating large-scale laboratory direct shear tests with Discrete Element Method (DEM) numerical simulations, while also accounting for rock block morphology and particle breakage. The results indicate that: (1) As the rock content increases, both the shear strength τ and the internal friction angle φ increase. The cohesion c first increases and then decreases, peaking at a rock content of approximately 40%. The particle breakage index B_N^H increases progressively, but at a decelerating rate. (2) Water content has a significant deteriorating effect on the strength of S-RM. With an increase in water content, the shear strength τ , internal friction angle φ , and cohesion c all decrease. Under low normal stress, the inhibitory effect of water content on shear strength τ is more pronounced. The particle breakage index B_N^H decreases non-linearly as water content rises. (3) The morphology and orientation of rock blocks govern the distribution of force chains and the patterns of stress concentration. Particle breakage is prone to occur at the angular corners of rock blocks where stress is concentrated. This particle breakage is identified as the intrinsic mechanism responsible for the non-linear behavior of the macro-scale strength of S-RM.

Keywords: soil-rock mixture; discrete element method; direct shear test; rock content; moisture content; particle breakage

土石混合料 (Soil-Rock Mixture, SRM) 是一种组分和结构极不均匀的混合介质^[1-2]。在中国西南地区,土石混合料分布广泛且易于就地取材,其常被大量用作高填方路堤、土石坝、边坡防护以及场地回填等岩土工程的核心填筑材料。这些工程的规模日益增大,服役环境日趋复杂,其长期稳定性和安全性直接取决于土石混合料的力学特性。因此,深入探究土石混合料在不同影响因素下的剪切变形规律、强度演化规律,对于保障工程的安全运营、优化工程设计和降低建设成本具有至关重要的理论价值与现实意义^[3]。

为揭示土石混合料的力学机理,学者通过现场原位试验、室内试验和数值模拟开展了大量研究。在原位试验研究方面,Liang等^[4]发现,土石混合料在浸水后块石与黏土膜之间的摩擦阻力急剧下降,导致抗剪强度显著下降;Zhang等^[5]发现,块石和土的混合改变了试样的变形行为,块石的存在使得土石混合体的变形模量和内摩擦角大于土样,同时降低了土样的黏结力;李晓等^[6]发现,土石混合体具有典型的尺寸效应,试样尺寸大小将影响破裂面的发展。在室内试验研究方面,唐建一等^[7]发现,土石混合体抗剪强度受到土石混合体孔隙比的影响,且随含石量的增加,土石混合体中的结构形式及主导颗粒也相应的发生变化,存在一个最佳的含石量,使得土石混合体的抗剪强度最大;刘新荣等^[8]发现,含水率改变了颗粒间的有效接触力和接触状态,进而改变了剪切时颗粒的破碎程度,最终导致不同破坏模式的出现;吴帅峰等^[9]发现,良好级配的土石混合

料抗剪强度最高,均匀级配的抗剪强度随着粒径的减小而依次降低,缺失中间粒径级配混合料抗剪强度随含石量增大而增大。同时,研究表明^[10-12],剪切过程中的颗粒破碎对土石混合料的剪切特性将产生显著的影响,破碎程度随含石量和法向应力的增大而增大,且颗粒破碎是造成土石混合料强度非线性特征的直接原因。

系统地研究各类因素对土石混合料剪切特性的影响规律已吸引了广泛的学术关注,但材料本身的复杂性使得这一研究的推进充满了挑战。近年来,离散元法 (Discrete Element Method, DEM) 已成为分析土石混合料变形破坏的重要数值工具,基于该理论的颗粒离散元法 (PFC2D、PFC3D 等) 的应用尤为广泛。通过追踪每个独立颗粒的运动和相互作用来模拟材料整体的力学响应,能够天然地处理颗粒间的大位移、旋转和分离,从而在揭示剪切带形成、力链演化、颗粒重排列等细观机理方面展现出优势^[13-15]。但现有研究^[16-18]将块石颗粒简化成圆形或分组划分的多边形,这种简化忽略了真实块石的棱角性和不规则形态,而块石的棱角是其提供嵌锁作用、抵抗剪切滑动的关键。现有研究^[19-21]还忽略了块石颗粒的破碎行为,颗粒破碎不仅是重要的能量耗散机制,还会导致材料级配发生改变,进而影响其后续的强度和变形特性。

笔者在考虑块石形态和破碎的基础上,结合大型室内直剪试验与离散元数值模拟,系统探究含石量与含水率对其宏细观力学特性的影响。基于现场块石的形态统计特征,运用蒙特卡罗方法和图像

处理技术,开发了一套能够随机生成符合统计规律的非规则多边形块石的算法。利用室内大型直剪试验与数值模拟相互验证,深入探究含石量、含水率对土石混合料宏观抗剪强度和细观结构演化的影响规律。对不同工况下块石的破碎程度进行了量化分析,揭示了含石量、含水率与颗粒破碎之间内在的联系及其对宏观力学行为的反馈机制。

1 室内大型直剪试验

1.1 试验设备

为实现室内试验和模拟实验相互对照验证,进行了考虑含石量、含水率、块石破碎程度的室内大型直剪试验。室内大型直剪试验采用的试验仪器为四川大学华西岩土所研制的 ZY50-2G 大型粗粒土直剪压缩仪,如图 1 所示,该仪器主要由上下剪切盒、竖向加载装置、竖向数据采集系统、水平加载装置、水平数据采集系统和刚性反力框架构成。试样为长 300 mm、宽 300 mm、高 400 mm 的长方体,剪切面积为 0.09 m²。筛分试验采用的仪器为上虞仪器制造厂生产的 ZBSX-92A 型振筛机。



图 1 ZY50-2G 型大型粗粒土直剪、压缩试验机
Fig.1 ZY50-2G large-scale direct shear and consolidation testing machine for coarse-grained soils

1.2 试验材料

土石混合料试样取自重庆市九龙坡区李家沱大桥复线工程某高填方边坡,土石混合料主要由粉质黏土和砂岩块石组成。烘干后经过室内筛分试验得到的样本结果如图 2 所示。粉质黏土的比重为 2.68,液限为 33.4%,塑限为 16.8%。砂岩属于中风化砂岩,砂岩块石密度为 2490kg/m³。含石量是石块质量占土石混合料质量的百分比,场地土石混合料含石量为 38.33%,天然含水率为 7.7%。天然级配曲线的不均匀系数 $C_u=27.78$,曲率系数 $C_c=1.3$,满足 $C_u \geq 5$ 和 $1 \leq C_c \leq 3$ 的条件,属于级配良好

的土。目前大多数的文献^[2,7-8]都采用 5mm 来作为土石混合料中“土”和“石”的明确粒径分界线,因此,将 5mm 粒径以上的颗粒定义为石头,其余为土体。



图 2 试样筛分结果图(单位:mm)
Fig.2 Sieve analysis results plot (unit: mm)

1.3 试验方案

为了系统研究含石量和含水率在工程实际波动范围内的影响,以天然状态为中心(R2W2),分别设置了低于和高于天然状态含石量(23.33%和 53.33%)与含水率(5.7%和 9.7%)。该范围覆盖了工程中可能遇到的从偏干到偏湿、从土体主导到骨架主导的典型工况,具有较强的工程代表性。试验设计了 3 种含石量和 3 种含水率,分别在 200、400、600、800 kPa 竖向荷载下进行试验,共计 36 组。试验设计如表 1 所示。

表 1 大型直剪试验设计表			
Table 1 Design specifications for large-scale direct shear testing			
序号	试验编号	含石量/%	含水率/%
1	R1W1	23.33	5.7
2	R1W2	23.33	7.7
3	R1W3	23.33	9.7
4	R2W1	38.33	5.7
5	R2W2	38.33	7.7
6	R2W3	38.33	9.7
7	R3W1	53.33	5.7
8	R3W2	53.33	7.7
9	R3W3	53.33	9.7

在配置不同含石量时,保持各组分的相对百分比不变,仅改变 5mm 粒径以上块石的含量。不同含石量的级配曲线如图 3 所示,其中含石量 38.33%即为天然级配曲线。

根据《土工试验方法标准》^[22],剪切时固定上剪切盒,水平推动下剪切盒,设定剪切速率为 5mm/min,当水平荷载读数达到稳定,或者显著后退时,表示试样已经完成剪切。若水平荷载的读数持续

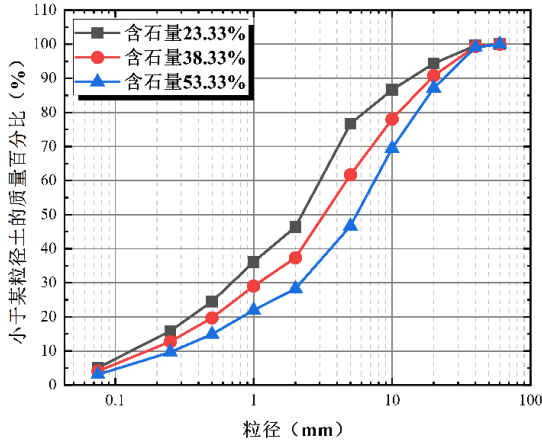


图3 不同含石量试样的级配曲线

Fig.3 Gradation curves for specimens with varying rock content

增加,则剪切变形达到 60 mm 或者达到试样等效直径的 1/15~1/10 为止。

为了定量分析土石混合料剪切破坏后的块石破碎情况,在剪切完成后,取出上下剪切盒分界面上 100 mm 和以下 100 mm 的土石混合料,如图 4 所示,烘干后通过振筛机统计剪切后的颗粒级配变化。

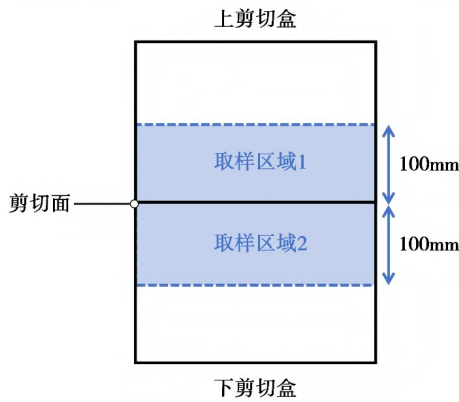


图4 剪切后取样区域示意图

Fig.4 Schematic diagram of the sampling area after shearing

2 考虑颗粒破碎的离散元模型建立

2.1 基于块石真实形态的随机多边形生成

离散元方法通常将颗粒形状设置为二维圆盘或者三维球体,这种简化方式虽然能提高计算效率,但是过于理想化。圆形和球体的轮廓特性,表面光滑且处处凸起,颗粒间无法互相咬合,只能依靠摩擦力抵抗滑动,容易发生滚动和相对滑动,导致混合料堆积体较为松散,且抗剪能力较弱。因此真实的块石形态对土石混合料的力学特性具有显著的影响,颗粒形状特征的合理考虑也与工程实际应用有着紧密的联系。在离散元的模型建立中,应

当充分考虑块石颗粒的形状特征,生成接近实际块石形状的颗粒。将基于现场块石形态统计构建符合地质特征的多边形块石库。

蒙特卡罗方法是一种基于随机采样和概率统计的数值计算方法,其核心是通过生成大量随机样本,利用统计学规律逼近问题的解。通过蒙特卡罗方法统计现场块石的分布规律,实现块石形态的定量化表征。然后利用 MATLAB 对采集到的块石进行图像处理,分析块石的形状特征,再结合统计规律随机生成颗粒的外部轮廓,获得符合块石实际形状特征的骨架信息。将信息通过 .dxf 文件的形式导入 PFC 中。

不规则颗粒生成的流程如下:

1) 选取试样采集区 3 个典型的断槽面,对其中的典型块石的方位角进行统计分析,结果如图 5 所示。对统计结果分析发现,块石的方位角基本关于 0° 对称,且大致服从正态分布。取大于 0° 部分的样本用 C 表示,对 C 进行假设检验可知, C 服从均值 $m = 56.4$, 标准差 $s = 15.71$ 的正态分布,正态分布函数为

$$f(x) = \frac{1}{15.71\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-56.4)^2}{2 \times 15.71^2}} \quad (1)$$

令 $Z = \frac{X - 56.4}{15.71}$, 则 Z 服从标准正态分布。

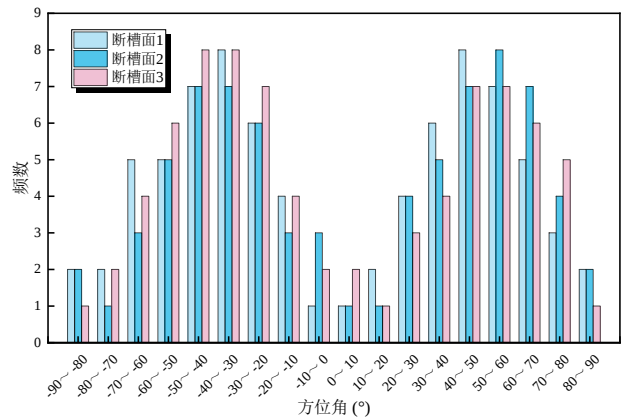


图5 现场块石方位角统计

Fig.5 Field measurement plot of rock orientation statistics

2) 从采集的土石混合料中随机选取 50 个块石进行拍照,然后利用 Adobe Photoshop 对照片进行去噪预处理。对去噪后的照片用 MATLAB 对图像进行灰度化处理和二值化处理。对二值化处理后的图像用 MATLAB 自编代码进行自动化分析,首先进行联通区域分析减少噪声干扰,通过顶点简化进行多边形边数的估算,顶点简化的程度可以动态调整,以此来确定多边形的边数。处理流程如图 6 所示。通过自动化分析 50 个块石的形状特征,确定出块石的平均边数为 11 边形,短轴与长轴之比平均

为 0.79。

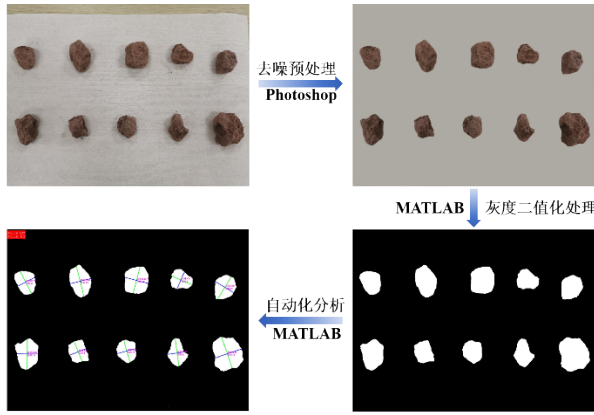


图 6 块石图像处理分析过程

Fig.6 Rock image processing and analysis procedures

3)在 MATLAB 中编写随机生成不规则多边形的代码。首先根据前文蒙特卡罗方法获得的块石方位角正态分布,随机生成一个满足该分布且大小范围在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 中的块石方位角,方位角依据前文统计规律按式(2)生成。

$$\alpha = 15.71 \times \text{randn} + 56.4 \quad (2)$$

在 MATLAB 中 randn 是随机生成满足标准正态分布的函数,rand(1)是随机生成满足 $[0,1]$ 均匀分布的函数。故需要删除式(2)中生成的小于 0° 大于 90° 的结果,同时利用 rand(1)函数来保证 α 关于 0° 对称,当 rand(1) ≥ 0.5 时结果取 α ,否则取其相反数。

确定块石方位角 α 后,由于块石的平均边数为 11,块石的外部轮廓大致近似为椭圆,短轴与长轴之比为 0.79。考虑到 PFC 运行效率和计算机性能的综合影响,设置多边形边数 N 的范围为 $[10, 13]$,多边形边数通过式(3)计算。

$$N = \text{randi}(4) + 9 \quad (3)$$

令块石长轴长度 $L=1$,基圆半径 $R=0.5$ 。则长轴顶点的坐标为 $A(0.5\cos\alpha, 0.395\sin\alpha)$, $B(-0.5\cos\alpha, -0.395\sin\alpha)$ 。以长轴为基准,将多边形分成顶点数 N_1 和 N_2 的两部分,同时应当注意避免一侧点过少,一侧点过多的情况,这不符合实际块石的形状特征,故设置一侧至少有 2 个顶点。两边的顶点数通过式(4)计算。

$$\begin{cases} N_1 = 2 + \text{floor}[(N-5) \times \text{rand}(1)] \\ N_2 = N - N_1 - 2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \beta_i = \pi + \alpha + (i-1) \left[\pi / (N_2 + 1) \right] + [0.2\text{rand}(1) - 0.1] \\ R_i = R \times [0.8 + 0.2 \times \text{rand}(1)] \\ X_i = R_i \times \cos(\beta_i) \\ Y_i = 0.79 \times R_i \times \sin(\beta_i) \end{cases} \quad (6)$$

通过上述方式实现符合真实块石形状

的随机多边形。

分别将长轴的顶点 A 、 B 以圆心 O 为旋转中心,逆时针多次转动随机角度,并取随机系数乘以基圆半径作为该点的半径,以此在长轴两侧依次生成多边形的顶点坐标,如图 7 所示。在设置转动随机角度的时候取该侧顶点均分角度加随机扰动的形式,该点距离圆心的最小值设置为 $R_{\min}=0.8R$ 。

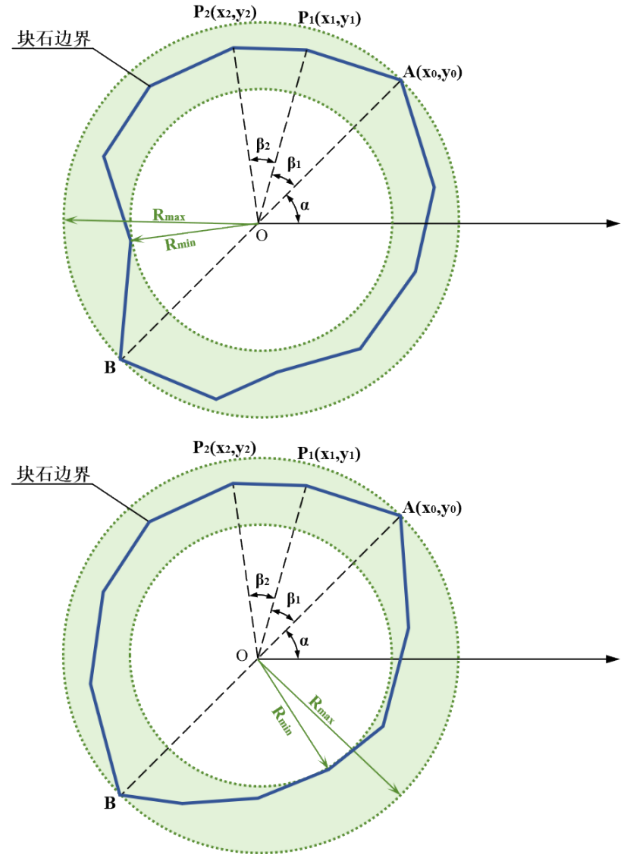


图 7 凹凸多边形生成示意图

Fig.7 Schematic diagram of concave-convex block generation

N_1 侧顶点的坐标通过式(5)计算。

$$\begin{cases} \beta_i = \alpha + (i-1) \left[\pi / (N_1 + 1) \right] + [0.2\text{rand}(1) - 0.1] \\ R_i = R \times [0.8 + 0.2 \times \text{rand}(1)] \\ X_i = R_i \times \cos(\beta_i) \\ Y_i = 0.79 \times R_i \times \sin(\beta_i) \end{cases} \quad (5)$$

N_2 侧顶点的坐标通过式(6)计算。

$$\begin{cases} \beta_i = \pi + \alpha + (i-1) \left[\pi / (N_2 + 1) \right] + [0.2\text{rand}(1) - 0.1] \\ R_i = R \times [0.8 + 0.2 \times \text{rand}(1)] \\ X_i = R_i \times \cos(\beta_i) \\ Y_i = 0.79 \times R_i \times \sin(\beta_i) \end{cases} \quad (6)$$

多边形的生成。

2.2 试样生成与伺服机制

首先将 MATLAB 生成的 20 个随机多边形 .dxf 文件导入 PFC 中生成异形墙体,再向墙体范围内填充 ball 颗粒,如图 8 所示。在填充颗粒时,颗粒越多越能模拟出真实块体的形状以及破碎情况,但考虑到计算机性能和计算效率的影响,设定单个块石由 200~250 个颗粒组成。同时保证颗粒的孔隙率基本与砂岩的孔隙率一致(10%~25%),以免模拟失真。

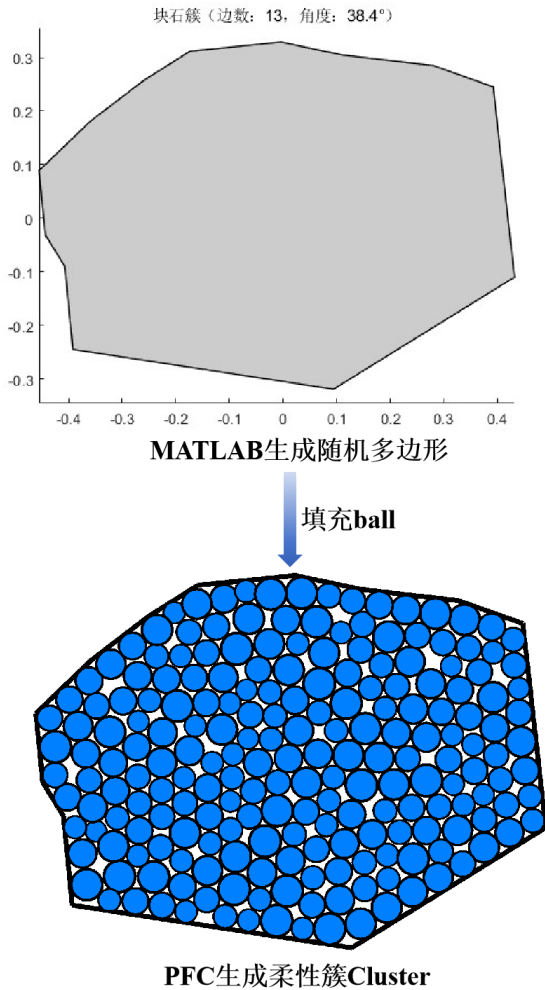


图 8 块石生成示意图

Fig.8 Schematic diagram of rock generation

通过 PFC 中的墙体 wall 功能来模拟剪切盒,对照室内大型直剪试验,将剪切盒的尺寸设定为 300 mm×400 mm 的矩形,上下剪切盒的高度分别为 200 mm。

考虑到颗粒数目随颗粒半径的减小呈指数级增长,由于计算机性能的限制,综合平衡性能和计算精度的需求,参考已有研究成果^[14-15],在模拟试验中设定 ball 颗粒的最小粒径为 1mm。成样时,在剪切盒中按照对应的颗粒级配来成样,粒径 5mm 以上

的石块先用圆形颗粒替代,如图 9 所示。

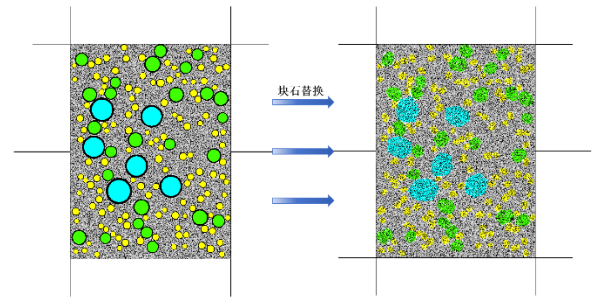


图 9 土石混合料生成示意图

Fig.9 Schematic diagram of synthetic soil-rock mixture generation

PFC 内置的 command 命令流并无直接生成柔性簇 cluster 的方法,只能先生成刚性簇 clump,再将其转换为柔性簇 cluster。在初始试样稳定后,随机调用已经生成好的模板替换掉试样中粒径大于或等于 5mm 的颗粒,在替换时按照等面积的原则进行替换。替换完成后,将组成 clump 的 pebble 转换为 ball,完成刚性簇到柔性簇的转换,局部放大后如图 10 所示。

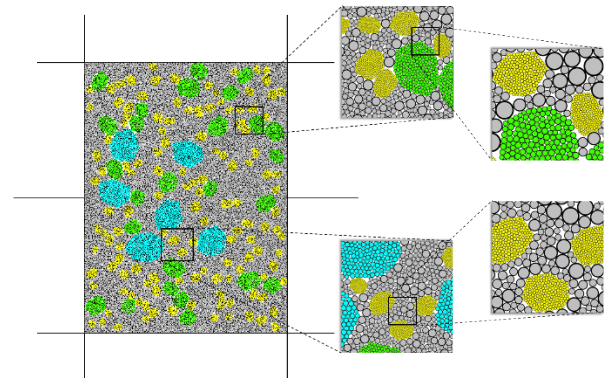


图 10 土石混合料局部放大示意图

Fig.10 Close-up schematic of soil-rock mixture microstructure

PFC 通过赋予 wall 速度的方式来间接实现加载功能。而合理的墙体速度是保证模拟试验准确性的关键所在,因此引入一个伺服系数 g 来控制墙体速度, g 是一个随墙体当前状态不断变化调整的量。

墙体的速度通过式(7)计算。

$$v_w = g \times (\sigma_w - \sigma_t) \quad (7)$$

式中: σ_w 为当前墙体所受应力; σ_t 为目标应力。

墙体当前所受应力 σ_w 通过式(8)计算。

$$\sigma_w = \frac{\sum F_w}{N_b A} \quad (8)$$

式中: F_w 为单个颗粒与墙体的接触力; N_b 为颗粒的

数目; A 为墙体的长度。

在式(7)中的 g 是一个与墙体接触力、接触刚度、重叠量和时步有关的量。计算伺服系数 g 的基本思路是,通过计算墙体当前接触力与目标力的差值,除以当前接触刚度总和 K ,得到目标重叠量。再用目标重叠量除以全局时步 S_t ,即可得到当前状态的墙体速度 V_w 。接触刚度总和 K 通过式(9)计算。

$$K = \sum_{n=1}^{N_b} k_n \quad (9)$$

式中: N_b 为颗粒的数目; k_n 为对应的接触刚度。当前状态的墙体速度由式(10)计算。

$$v_w = \frac{A \times (\sigma_w - \sigma_t)}{K \times S_t} \quad (10)$$

将式(7)与式(10)对比可得初始伺服系数 g_0 的计算式

$$g_0 = \frac{A}{K \times S_t} \quad (11)$$

为了让墙体速度变化更加平滑,避免墙体速度变化过大,导致荷载不稳定,引入一个安全系数 ξ ,由此最终确定伺服系数 g 由式(12)计算。

$$g = \frac{\xi \times A}{K \times S_t} \quad (12)$$

综上所述,在每一个计算步以内,墙体的伺服速度由式(7)计算,其中的伺服系数 g 由式(12)计算。

2.3 接触模型与破碎准则

在 PFC 离散元中,接触模型是模拟颗粒之间力学响应的核心模块。接触模型主要分为 4 大类:基于线性的模型、非线性弹性模型、专用界面模型和蠕变模型。

接触黏结模型(CB 模型)是基于理想点接触的假设,在颗粒接触点建立虚拟黏结,可以抵抗法向拉应力和切向剪应力,但是无法传递弯矩,如图 11 所示。当接触力超过预设的黏结强度时,黏结立即断裂,断裂后的颗粒之间接触退化为线性接触模型。

平行黏结模型(PB 模型)通过在接触区域建立有限尺寸的黏结圆盘,黏结区域的尺寸与接触颗粒的半径有关。当接触力超过预设的黏结强度时,黏结立即断裂,断裂后的颗粒之间接触退化为线性接触模型。该接触不仅能传递力,还可以抵抗弯矩和扭矩,如图 12 所示。

在土石混合料中,接触类型分为土-土、土-石、石头内部颗粒、石-石、土-墙和石-墙 6 种类型。为了更能真实反应土石混合料的力学特性,对于不同材料赋予不同的接触类型和接触参数。土-土之间都

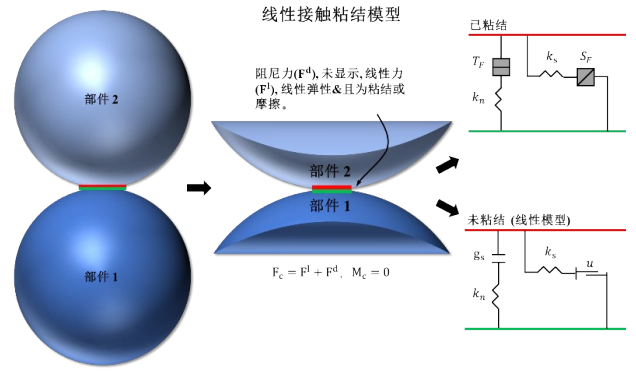


图 11 线性接触黏结模型(CB 模型)示意图

Fig.11 Schematic diagram of the linear contact bond model

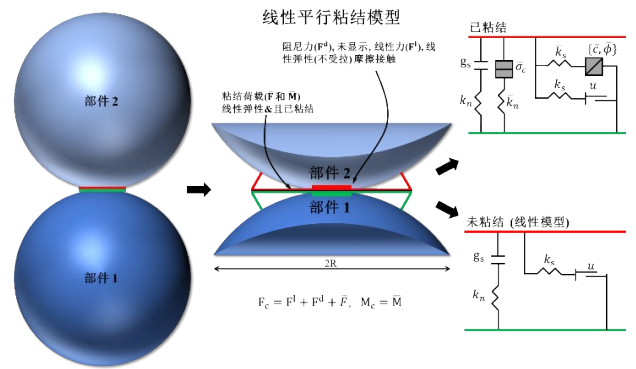


图 12 线性平行黏结模型(PB 模型)示意图

Fig.12 Schematic diagram of the linear parallel bond model

是点接触,具有较弱的抵抗剪切应力和拉应力的能力,因此选用接触黏结模型;土-石之间同样为点接触,但是黏结强度弱于土颗粒之间,因此选用接触黏结模型,但是强度为土颗粒之间的一半;石头内部颗粒之间具有一定的刚性,能够抵抗弯矩的作用,因此选用平行黏结模型;石-石之间没有黏结,且为刚性接触,因此选用线性接触模型;材料和墙体之间的接触均为线性接触模型。

为了更准确地描述颗粒的破碎程度随含石量、含水率和法向压力的变化情况,需要对块石的破碎情况进行量化。目前大多数研究对于颗粒破碎的描述,均需要绘制颗粒级配曲线(PSD 曲线)来确定破碎指数。这增加了量化分析的复杂性且存在精度上的限制,不利于研究者使用。

Xiao 等^[23]基于 Hardin 破碎准则和 Einav 破碎准则提出了一种不需要复杂计算的新型颗粒破碎指数 B_N^* (其中上标*可以替换为 H 或 E),该指标不需要积分面积,无需构建颗粒级配曲线,可以由试验前后的筛分结果直接获得,且与粒度坐标轴无关。该新型颗粒破碎指数 B_N^* 可以分成两类:1) 基于 Hardin 破碎准则并舍弃了 0.074 mm 下限的 B_N^H 型指数;2) 基于 Einav 破碎准则并引入已知分形维数的

B_N^E 型指数。 B_N^* 由式(13)或式(14)计算。

$$B_N^* = (M_n - M_i) / (M_f - M_i) \quad (13)$$

$$B_N^* = \left(\sum_{k=0}^n p_k^n - \sum_{k=0}^n p_k^i \right) / \left(\sum_{k=0}^n p_k^f - \sum_{k=0}^n p_k^i \right) \quad (14)$$

式中 p_k^i 、 p_k^n 、 p_k^f 分别为初始状态、当前状态和最终状态下,某一粒径的累计筛下质量百分比。 M_i 、 M_n 、 M_f 分别为初始状态、当前状态和最终状态下 p_k^i 、 p_k^n 、 p_k^f 的总和。值得注意的是,对于所有的粒径, B_N^H 的颗粒百分比 p_k^f 为 100%, 而 B_N^E 的比 p_k^f 可以根据材料的已知分形维数计算得出, p_k^f 由式(15)计算。

$$p_k^f = F^f(D_i) = (D_i/D_M)^{3-\varphi} \quad (15)$$

式中: φ 为分形维数。

采用 B_N^H 作为土石混合料的破碎指标, 因为颗粒密度相同, 可以在 PFC 中通过检测破碎后的颗粒面积取其等效直径作为破碎后颗粒的粒径。

3 模型参数标定

离散元模拟的可靠性高度依赖于细观参数的物理真实性。由于岩土材料的力学响应本质上是多尺度耦合的过程, 宏观的力学行为(如剪切强度、体积变形等)并无直接对应的单一细观参数, 需要通过系统标定来建立跨尺度的映射关系。例如细观参数(如接触刚度、摩擦系数等)没有直接的物理测量手段, 需要通过逆向分析将实验室中测得的宏观特性(如弹性模量、内摩擦角等)转化为细观尺度参数。

3.1 块石内部参数标定

在块石内部参数包括岩石本身的强度和刚度。首先通过室内单轴压缩试验获取岩石的弹性模量和峰值抗压强度, 然后在离散元中建模进行 1:1 模拟, 用实验室中测得的应力-应变曲线作为标靶, 反推出块石内部的接触参数。

PFC 中单轴压缩的模型尺寸高×直径为 100 mm×50 mm, 颗粒之间的接触模型采用平行黏结模型。试验中, 下墙固定, 上墙缓慢下压, 在强度变为峰值强度的 80% 时停止加载, 参数标定结果如图 13 和表 2 所示。

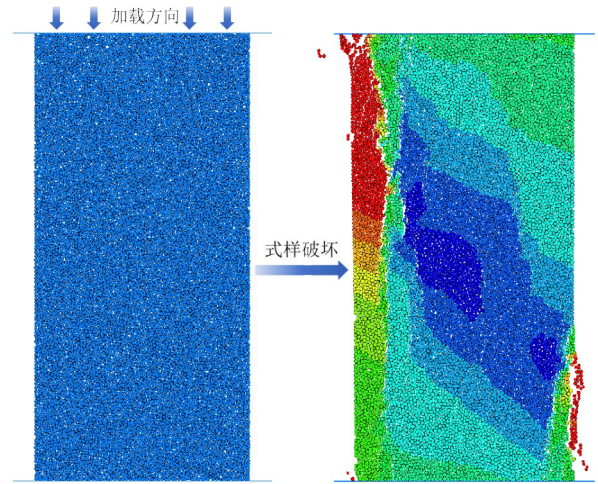
表 2 PFC2D 单轴压缩试验参数表

Table 2 PFC2D uniaxial compression simulation parameter summary

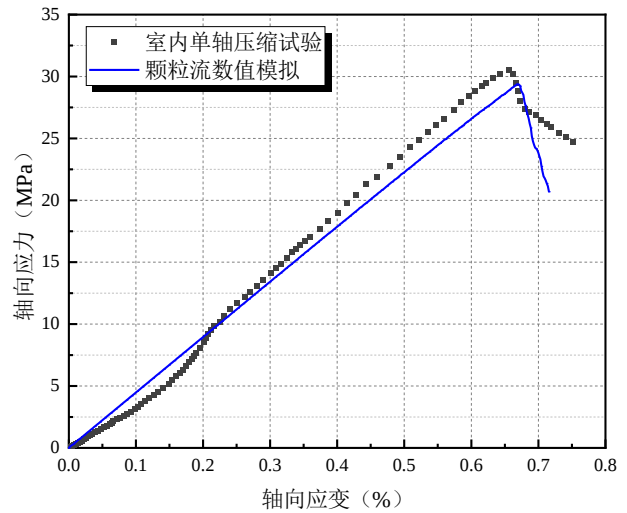
颗粒密度 ρ / (kg/m ³)	阻尼系数 c	摩擦系数 μ	颗粒弹性模量 E /Pa	颗粒法切向刚 度比 k_n/k_s	平行黏结法向 强度 σ_c /kPa	平行黏结切向 强度 σ_t /kPa	平行黏结内摩 擦角 φ /(°)	平行黏结法切 向刚度比 k_n/k_s
2.4×10^3	0.7	0.5	1.95×10^8	1.2	4.8×10^3	2.9×10^4	38.7	1.2

3.3 土石混合料间参数标定

在确定块石间及土颗粒间接触参数的基础上, 针对 3 种含石量和 3 种含水率的组合工况, 共进行



(a) 单轴压缩示意图



(b) 单轴压缩应力-应变图

图 13 单轴压缩参数标定结果图

Fig.13 Calibration and validation results for uniaxial compression simulation parameters

3.2 土颗粒间参数标定

在土体颗粒之间的主要参数包括本身的刚度、黏结强度和摩擦系数, 摩擦特性为土颗粒之间接触的核心。通过纯土的大型直剪试验来标定土颗粒之间的接触参数, 参数标定结果如图 14 和表 3 所示。

了 9 组土石混合料的参数标定。其中, 含石量的差异通过调整颗粒级配实现, 而无需改变接触参数; 含水率的差异则需通过调整接触参数(如黏聚力、

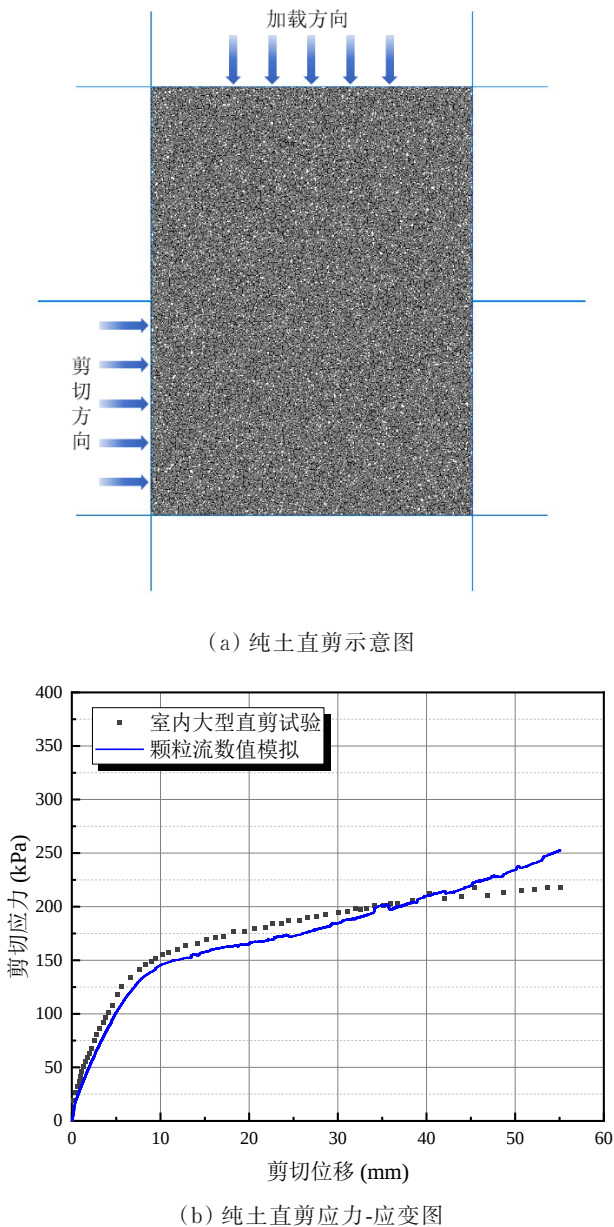


图 14 室内大型直剪试验(纯土)参数标定结果图

Fig.14 Calibration and validation results for large-scale direct shear simulation parameters (pure soil specimens)

法向抗剪强度和切向抗剪强度等)来体现。首先以 R2W2 为基准,在 400 kPa 竖向荷载下进行颗粒流数值模拟的参数标定。其余含水率试样的接触参数则在此基准参数的基础上进一步调整获得。

对主要的接触参数进行敏感性分析,得到在不同数量级下参数的敏感程度。然后通过对比数值

模拟获得的剪切应力-剪切位移关系曲线及剪切后颗粒级配曲线与室内大型直剪试验结果,对接触参数进行了反复调整,最终实现良好的拟合效果,参数标定结果如图 15 和表 4 所示。图 15 为数值模拟与试验结果的对比曲线。由图 15 可见两者吻合度较高,表明选定的接触参数能有效表征土石混合体的剪切力学特性、强度特征及块石破碎行为。因此,基于此套参数开展颗粒流数值模拟合理可行。

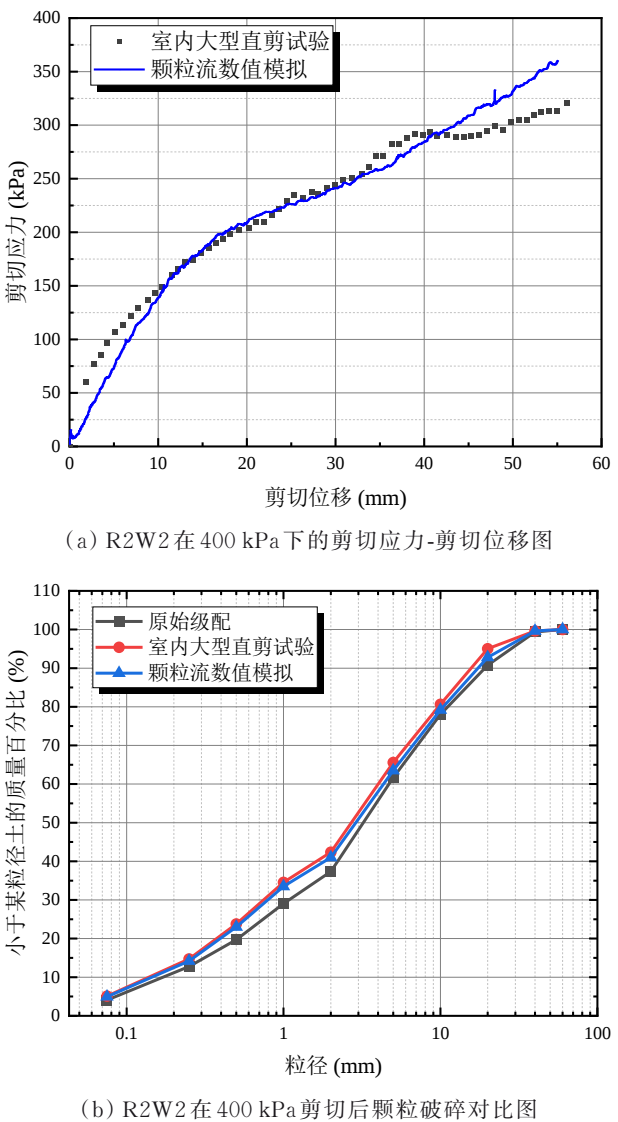


图 15 室内大型直剪试验参数标定结果图

Fig.15 Calibration and validation results for large-scale direct shear simulation parameters

表 3 PFC2D 大型直剪试验(纯土)参数表

Table 3 PFC2D Large-Scale Direct Shear Simulation Parameter Summary (Pure Soil Specimens)

颗粒密度 $\rho/$ (kg/m^3)	阻尼系数 c	摩擦系数 μ	颗粒弹性模量 E/Pa	颗粒法切向刚度 比 k_n/k_s	接触黏结法向强 度 σ_c/kPa	接触黏结切向强 度 σ_t/kPa	接触黏结法切向刚 度比 k_n/k_s
2.4×10^3	0.7	0.5	6×10^6	1.2	1.5×10	2.7×10^2	5

表 4 PFC2D 大型直剪试验参数标定结果

Table 4 PFC2D large-scale direct shear simulation parameter summary

土颗粒密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	土颗粒摩擦系数 μ	土颗粒弹性模量 E/Pa	接触黏结法向强度 σ_c/kPa	接触黏结切向强度 σ_t/kPa	接触黏结法切向刚度 比 k_n/k_s	块石颗粒密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
2.4×10^3	0.5	6×10^6	1.5×10	2.7×10^2	5	2.4×10^3
块石摩擦系数 μ	块石颗粒弹性模量 E/Pa	平行黏结法向强度 σ_c/kPa	平行黏结切向强度 σ_t/kPa	平行黏结内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	平行黏结法切向刚度比 k_n/k_s	
0.5	1.95×10^8	4.8×10^3	4×10^2	38.7	1.2	

3.4 界面参数与其他参数

模型将颗粒与剪切盒墙体的接触设置为线性接触模型,墙体的摩擦系数设置为 0,来消除边界摩擦对剪切过程的干扰,使模拟结果能更纯粹地反映土石混合料本身的内部剪切特性。

直剪模型的整体黏性阻尼系数设定为 0.7 以平衡能量耗散的需求。时步在成样时放大 10 倍,在剪切中的时步通过 PFC 内置的时步计算规则进行自动计算。所有参数赋值均通过控制变量法进行验证,以确保单一参数波动 $\pm 10\%$ 时,剪切强度输出值偏差小于 3%。

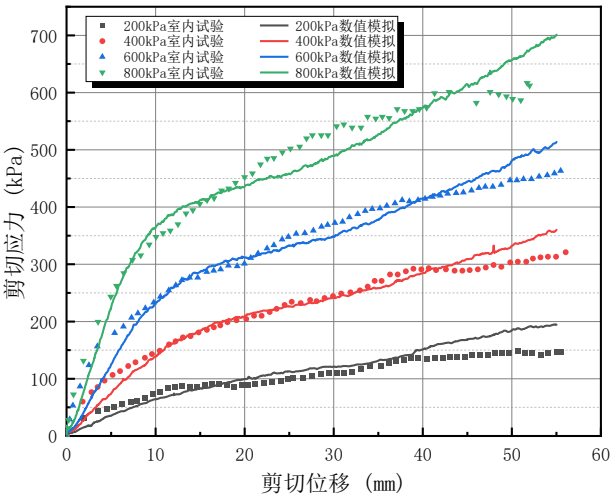
4 模拟结果与分析

4.1 宏观力学行为对比

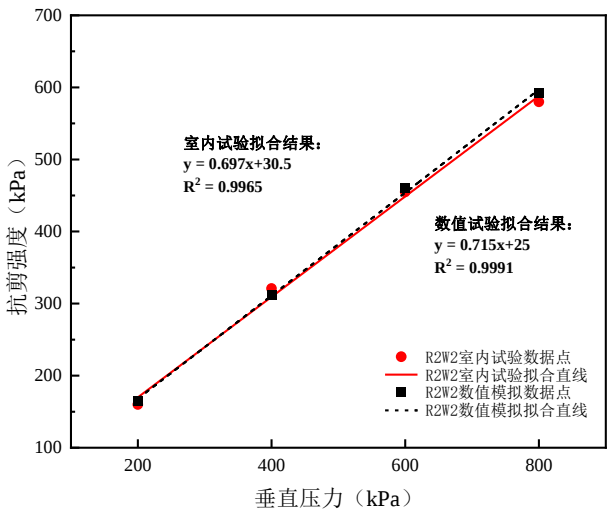
对 9 种土石混合体试样进行大型直剪试验数值模拟,并将模拟得到的剪切应力-位移曲线图与室内结果进行对比。

以含石量 38.33%、含水率 7.7% 的试样为例,其在不同法向应力下的对比曲线如图 16 所示。从图中可以看出,数值模拟的结果在峰值剪切强度、残余强度及应力-位移曲线的整体形态上均与室内结果表现出了良好的一致性。模拟得到的剪切强度与试验值的相对误差基本控制在 5%~8% 范围内,残余强度与试验值的相对误差基本控制在 10% 以内。根据不同法向应力下的峰值剪切强度,绘制了土石混合料在不同含石量下的莫尔-库仑强度包络线,通过线性拟合得到不同条件下的抗剪强度参数,与室内试验结果进行对比可知,模拟得到的内摩擦角和黏聚力与试验结果吻合较好。考虑随机多边形块石及破碎的离散元模型能够较好地复现土石混合料的宏观剪切力学行为。

模型在不同工况下的峰值强度预测误差基本控制在 5% 左右,表明模型具有较好的可靠性,如表 5 所示。误差的来源主要归结为:1)模型简化,尽管采用了不规则多边形,但仍无法完全复现真实块石的三维不规则形态和表面粗糙度;2)材料非均质性,真实土石混合料具有高度的随机性和非均质性,单次室内试验结果本身存在波动,而数值模型



(a) R2W2 剪切应力-剪切位移图



(b) R2W2 摩尔库仑准则拟合结果

图 16 R2W2 数值模拟结果图

Fig.16 Results of R2W2 numerical simulation

则是在一种特定的随机分布下得到的结果;3)参数标定,离散元参数标定是一个多目标优化问题,现有参数是在宏观响应上寻求的最优解,无法在所有细节上都完美匹配;4)试验误差,室内大型直剪试验本身也存在制样、加载控制等环节的系统 and 随机误差。

4.2 含石量对剪切特性的影响

通过对比 3 种不同含石量试样的数值模拟直剪试验结果,分析其对土石混合料剪切特性的影响。

表 5 PFC2D 大型直剪试验相对误差表

Table 5 PFC2D large-scale direct shear simulation relative error summary

试验组号	相对误差/%			
	200 kPa	400 kPa	600 kPa	800 kPa
R1W1	5.5	1.6	2.7	1.5
R1W2	3.4	1.7	3.7	3.6
R1W3	5.7	3.3	1.3	2.9
R2W1	5.3	2.5	3.6	3.6
R2W2	3.1	2.8	1.3	2.1
R2W3	3.2	2.3	2.4	4.0
R3W1	4.2	8.3	3.3	3.2
R3W2	4.6	4.0	1.9	3.8
R3W3	0.6	2.2	0.4	2.3

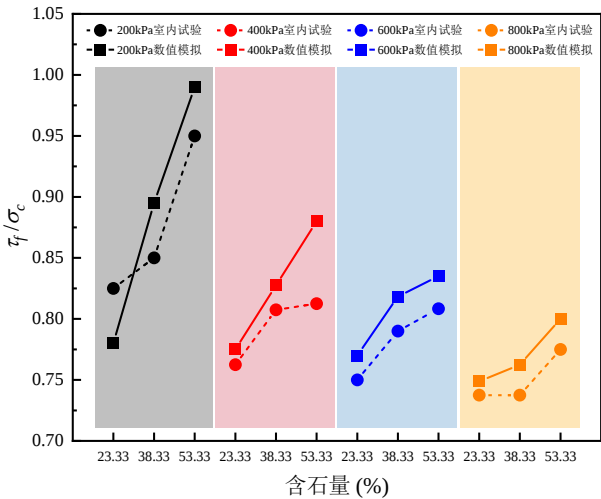
将峰值强度归一化后(图 17)可以看出,土石混合体的峰值抗剪强度与含石量呈正相关关系,随着含石量的增加,其抵抗剪切破坏的能力也相应地增强。这主要归因于块石骨架在剪切过程中的主导作用以及颗粒间的嵌锁效应随含石量的增加而更为显著。

随着法向应力的增大,抗剪强度也会增大,但其增大的幅度与法向应力的增量相比,变得越来越小,法向应力对抗剪强度的相对贡献逐渐降低。这是因为,当法向应力逐渐增大时,会发生颗粒破碎现象。颗粒破碎会改变级配,从而降低材料的有效内摩擦角。内摩擦角的降低意味着,即使法向应力继续增大,其通过摩擦机制对抗剪强度的贡献率也会下降。

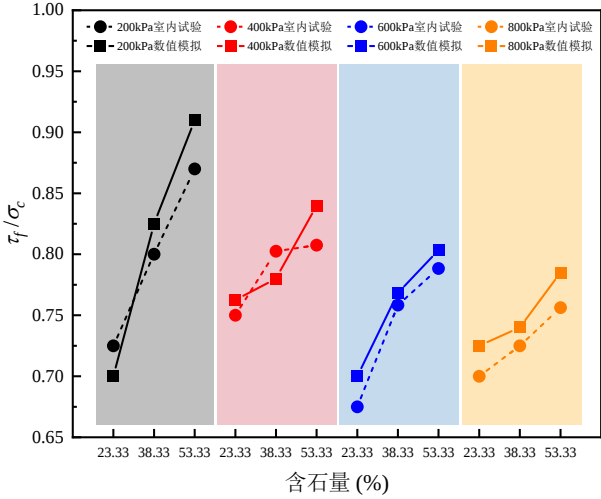
模拟结果表明,含石量的增加对土石混合料的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 产生显著影响(图 18)。随着含石量增加,土石混合料的内摩擦角 φ 呈现增大的趋势,这主要是因为块石含量的增加使得块石更容易形成相互接触的骨架结构^[20],块石的嵌锁作用和摩擦作用成为抵抗剪切的主要机制,从而提高了整体的内摩擦角。

而黏聚力 c 的变化则相对复杂,宏观黏聚力是土体基质的黏聚性、土石界面作用以及块石嵌锁产生的表观黏聚力^[16]的综合体现。

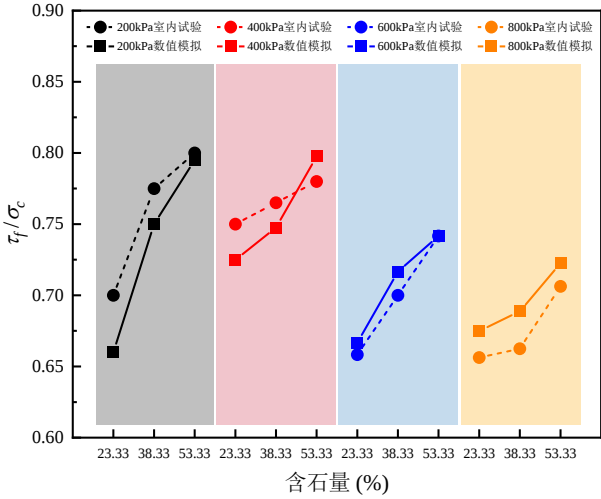
当含石量较低时,混合料的整体力学行为主要由细粒土控制,黏聚力主要来源于土颗粒之间的电引力、范德华力以及毛细管压力^[24]。随着含石量的适度增加,块石开始参与构成土体的骨架。这些粗颗粒的存在,一方面可能通过嵌锁效应和骨架效应使得细颗粒能够更紧密地填充在粗颗粒骨架的孔隙中,增强了颗粒间的胶结作用和咬合作用,从而使整体的黏聚力有所增加。当含石量进一步增加,粗颗粒在混合料中占据主导地位,细粒土不



(a) 含水率 5.7% 下的抗剪强度



(b) 含水率 7.7% 下的抗剪强度

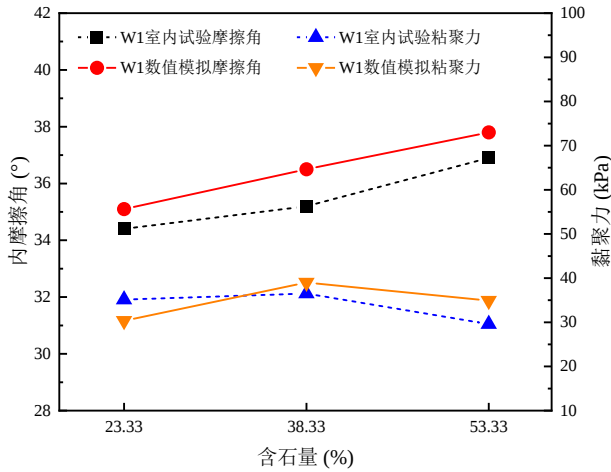


(c) 含水率 9.7% 下的抗剪强度

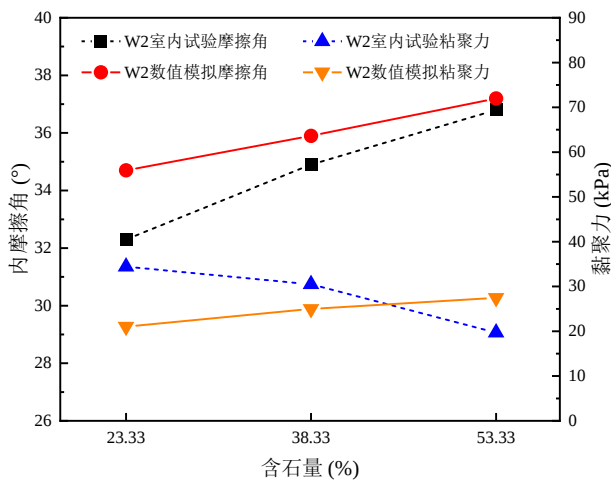
图 17 不同含水率下土石混合料抗剪强度随含石量的变化

Fig.17 Variation in shear strength of soil-rock mixtures with rock content under different moisture contents

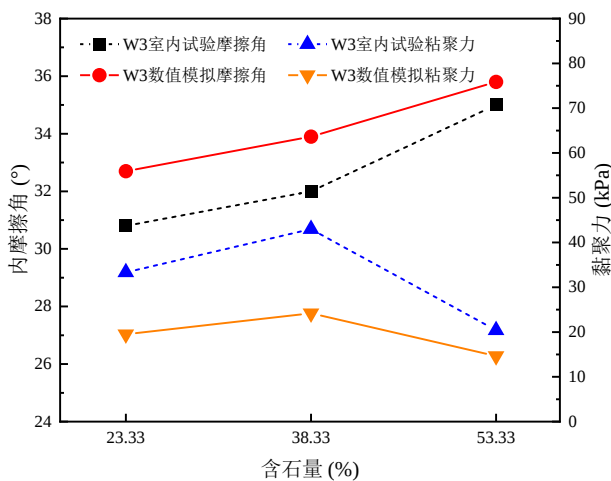
足以完全包裹粗颗粒或者有效填充粗颗粒之间的孔隙,导致颗粒之间的胶结作用减弱。细粒土胶结



(a) 含水率 5.7% 下的抗剪强度指标



(b) 含水率 7.7% 下的抗剪强度指标



(c) 含水率 9.7% 下的抗剪强度指标

图 18 不同含水率下土石混合料抗剪强度指标随含石量的变化

Fig.18 Variation in shear strength parameters of soil-rock mixtures with rock content under different moisture contents

网络被破坏,取而代之的是更多的粗颗粒与粗颗粒之间的直接接触^[16]。由于粗颗粒本身的黏聚力远小于细粒土,因此当粗颗粒含量过高时,混合料的整体

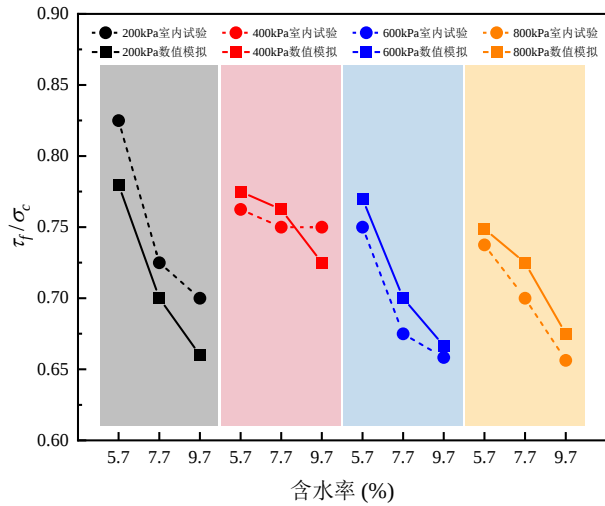
体黏聚力会因为细粒土胶结作用的减弱而呈现下降趋势。

4.3 含水率对剪切特性的影响

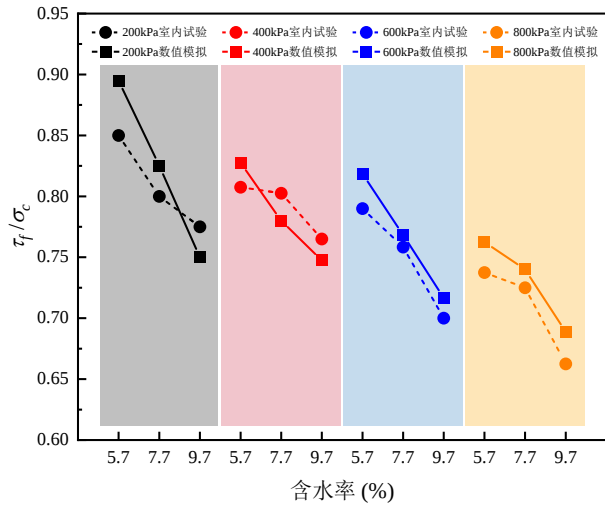
通过对比 3 种不同含水率试样的数值模拟直剪试验结果分析含水率对土石混合料剪切特性的影响。将峰值强度归一化后(图 19),土石混合料的峰值强度随含水率的增加表现出显著的、持续性的降低趋势。抗剪强度与正应力呈现出非线性关系。这主要归因于:首先,水分的增加在土体颗粒及土石界面处起到了润滑作用^[25],有效降低了颗粒间的摩擦系数和咬合作用,从而削弱了材料的内摩擦角;其次,对于土石混合料中的细粒土基质而言,含水率的升高会导致其软化,黏聚力相应减小,使得土体骨架的胶结和约束能力下降;考虑到本试验属于快剪,在剪切过程中孔隙水压力无法消散,含水率的增加导致了更高的孔隙水压力,从而降低了颗粒间的有效应力,进而显著削弱其抗剪能力^[26]。

随着法向应力的增大,含水率对于强度的抑制效果逐渐减弱。这是因为,在低法向应力下,土石混合料的抗剪强度主要依赖于颗粒间的黏聚力、摩擦力以及颗粒间的咬合作用,此时水对黏聚力的削弱作用和润滑作用会显得尤为突出。由于法向应力较小,水更容易渗透到颗粒接触面,显著降低颗粒间的结合强度和摩擦效率。因此,含水率的微小增加就能导致强度的较大下降。而在高法向应力下,土石混合料的强度更多地由颗粒间的机械咬合和颗粒破碎主导。虽然水仍然会产生润滑和降低有效应力的作用,但巨大的外部法向应力会迫使颗粒紧密接触,使得水膜的润滑作用相对减弱,且颗粒间的咬合和摩擦阻力在高应力下变得很大,能够部分抵消水对强度的不利影响。

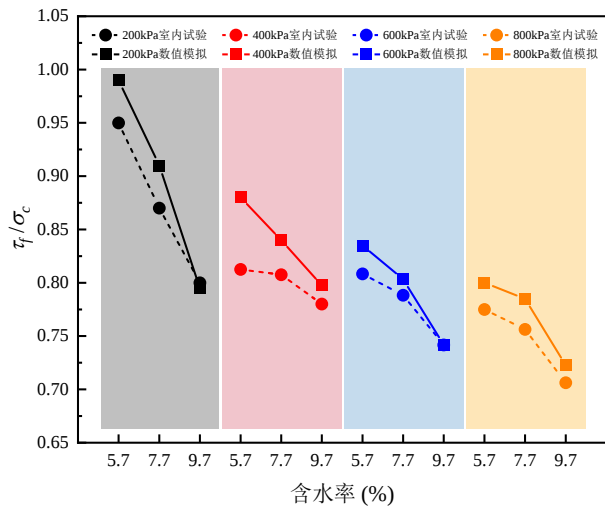
含水率的变化主要通过改变土体基质的力学特性以及土-石界面特性来影响整体的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 。随着含水率增加,内摩擦角 φ 呈减小的趋势(图 20)。这是因为水分的增加在颗粒接触面之间起到了润滑作用,降低了颗粒间的摩擦阻力。同时随着含水率的增加,基质吸力减小,可能导致颗粒间的有效接触应力有所减低,从而影响摩擦性能。而黏聚力 c 总体上随含水率的增加呈现下降趋势,局部存在波动(图 20)。整体下降主要是因为随着含水率增加,土体逐渐趋于饱和,基质吸力减小,导致表观黏聚力显著下降;还因为水分的增加会在颗粒间起到一定的润滑作用,降低了颗粒间相对滑动的阻力。同时,对于具有一定结构性的细粒土基质,水分的浸入可能导致土体结构软化,从而使整体黏聚力下降。



(a) 含石量 23.33% 下的抗剪强度



(b) 含石量 38.33% 下的抗剪强度

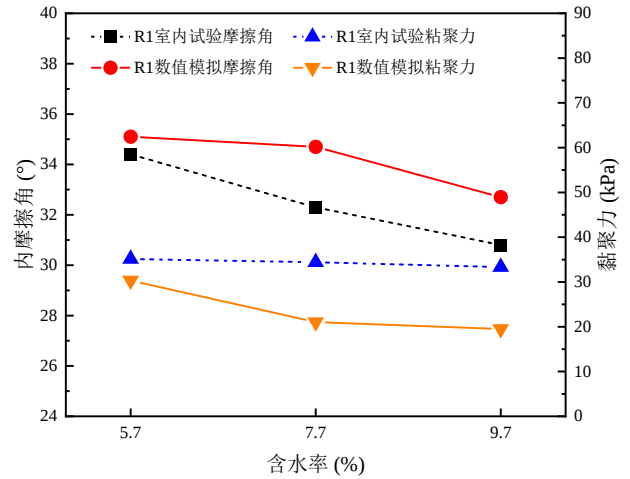


(c) 含石量 53.33% 下的抗剪强度

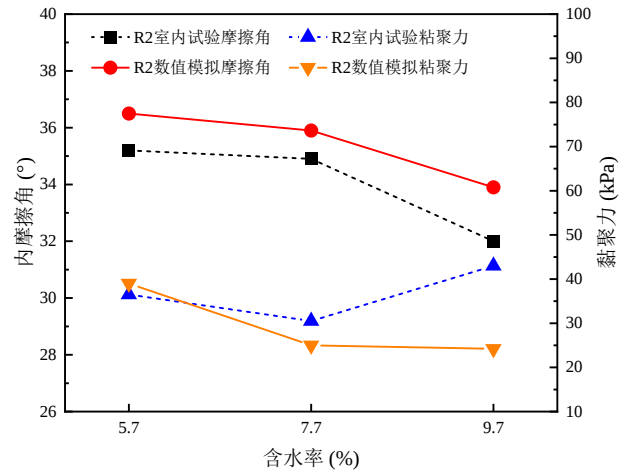
图 19 不同含石量下土石混合料抗剪强度随含水率的变化
Fig.19 Variation in shear strength of soil-rock mixtures with moisture content under different rock contents

4.4 剪切破坏细观结构分析

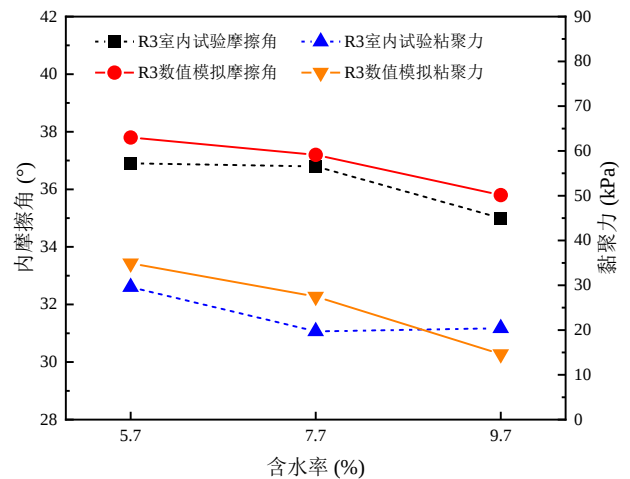
离散元模拟不仅能够复现宏观力学响应,更重



(a) 含石量 23.33% 下的抗剪强度指标



(b) 含石量 38.33% 下的抗剪强度指标



(c) 含石量 53.33% 下的抗剪强度指标

图 20 不同含石量下土石混合料抗剪强度指标随含水率的变化

Fig.20 Variation in shear strength parameters of soil-rock mixtures with moisture content under different rock contents

要的是能够揭示剪切过程中试样内部的细观结构演化规律,包括剪切带的形成、颗粒运动、接触力链分布以及块石破碎等。

在剪切初期,试样内部颗粒的位移分布比较均匀。随着剪切位移的增加,在上下剪切面附近形成了一条比较明显的剪切带,剪切带内的颗粒发生了显著的相对位移和旋转,而剪切带以外的颗粒位移却相对较小。图 21 为 R2W2 在法向应力 400 kPa 条件下剪切完成后的颗粒位移云图。从图中可以看出,在上下剪切面附近形成了一条明显的、颜色显著变化的区域,该区域即为剪切面。剪切带大致沿着预设的剪切面发展。由于土石混合体块石的存在,剪切带并非理想的平面,而是呈现出一定的起伏和不规则形态^[27]。其路径明显受到了大颗粒分布

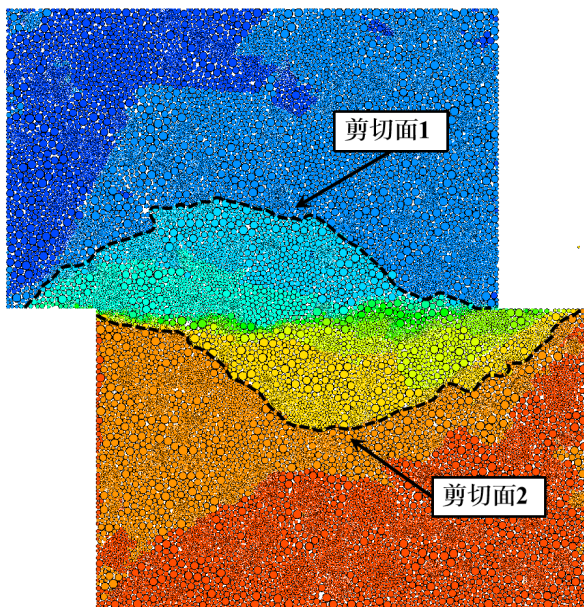
和互锁效应的影响,绕过或切割部分大颗粒,剪切破坏面倾向于沿着剪切强度较低或需要克服较小能量的路径发展。模型还揭示了剪切带的发展模式,当剪切路径遇到长轴垂直于剪切方向的板状块石时,剪切带倾向于绕行;而遇到近圆状块石或长轴平行于剪切方向的块石时,则更易发生应力集中并将其切割导致破碎。

接触力链是表征颗粒间力的传递路径和应力集中情况的重要细观指标。从图 21 中可以看出土石混合料内部接触力链的显著非均匀性。高应力主要通过少数强力链的路径传递。这些强力链构成了主要的承载骨架,承担了大部分的外部剪切力。在剪切带附近,强力链的密度显著高于其他区域,形成了明显的应力集中现象。而块石的形态和方位对剪切带的局部路径有明显的导向作用。当剪切带遇到长轴近似垂直于剪切方向的扁平状块石时,绕过该块石所需能量低于将其剪断的能量,剪切带倾向于沿块石上下表面绕行,导致局部剪切面起伏。而当剪切带遇到长轴近似平行于剪切方向的块石,或近圆状块石时,应力容易在块石两端或与其他颗粒的接触点集中,剪切带更倾向于“切割”该块石,引发其破碎,并沿破碎路径继续发展。这种由块石形态主导的局部路径选择,是导致宏观剪切面不规则和能量耗散复杂的根本原因。块石作为应力传递的节点和骨架,能够将应力传递给周围的土体颗粒,或者与其他块石形成强力链的起点或中继点。同时,块石的存在也可能阻碍力链的持续发展,或者在其周围形成应力较低的区域。

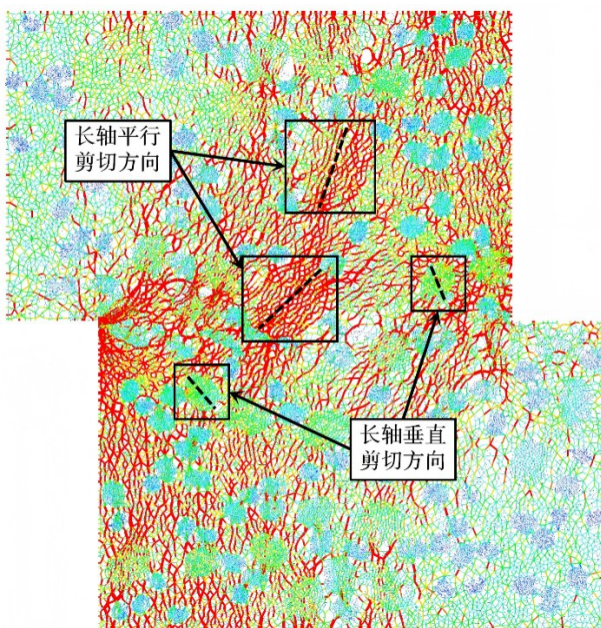
4.5 颗粒破碎分析

颗粒破碎对试样的力学特性具有双重影响。一方面,颗粒破碎是剪切过程中一个重要的能量耗散机制,对峰值强度前的应力增长行为有贡献。另一方面,破碎导致材料级配向更细的方向发展,这会降低颗粒间的有效嵌锁,从而可能是导致高法向应力下强度包络线呈现非线性和内摩擦角降低的内在原因。

模型建立的柔性簇 cluster 能够模拟块石在剪切过程中的破碎行为(图 22)。图 22 展示了在剪切完成后,块石的破碎情况示意图。从模拟结果可以看出,块石破碎主要发生在剪切带内部及边缘区域。从细观尺度观察(图 22),块石的破碎主要表现为两种模式:一是棱角磨损破碎,主要发生在应力高度集中的块石尖锐棱角处,表现为小碎屑的剥落,这是最常见的破碎形式;二是整体张拉剪切断裂,当块石作为强力链的关键节点,承受的拉应力或剪应力超过其强度极限时,会发生贯穿性的断



(a) 颗粒位移云图

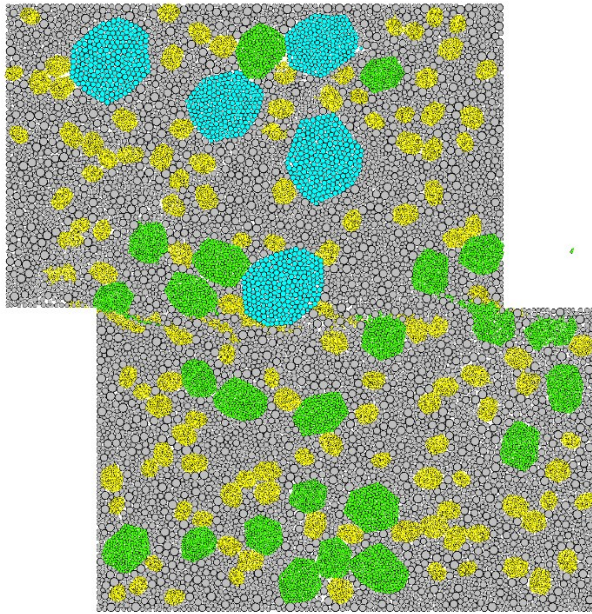


(b) 接触力链图

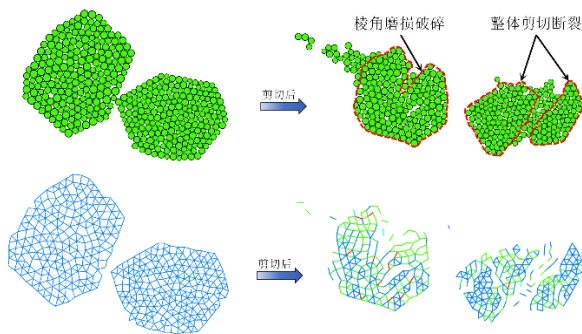
图 21 R2W2 剪切完成结果图

Fig.21 Shear test results of R2W2

裂,将一个大块石分裂为几个小块。



(a) R2W2剪切完成图



(b) 块石破碎情况图

图 22 R2W2剪切破碎结果图

Fig.22 Shear failure results of R2W2

为了定量分析颗粒破碎程度,采用破碎指数 B_N^H 来量化分析(图 23)。在同一法向应力水平下,破碎指数总体上随含石量的增加呈现上升趋势。这主要是因为含石量的增加意味着土体骨架中硬质颗粒的占比提高,颗粒间的接触点增多,在剪切过程中,这些石块颗粒更容易发生相互作用,产生挤压、剪切和研磨,从而导致更高的破碎率。

由图 23(a)~(c)可以看出,在含水率保持不变的条件下,颗粒的破碎指数随着含石量的增加而呈现出显著的增长趋势。在土石混合料中,强度较高的块石构成了主要的承力骨架。随着含石量增加,块石颗粒之间直接接触的概率大幅提升,形成了传递外部荷载的力链。这导致宏观应力在细观层面集中于少数块石的接触点上,形成远超平均应力水平的局部高应力,当该应力超过块石颗粒的强度极限时,便会引发棱角破碎或颗粒断裂。同时,高含

石量意味着颗粒骨架的嵌锁作用更强。在剪切过程中,为克服紧密的嵌锁,颗粒间必须发生更为剧烈的翻转、错动和强制挤压。这种高强度的相对运动加剧了块石颗粒间的相互作用,从而导致了更高的破碎率。同时颗粒破碎程度与含石量之间存在显著的非线性关系,表现为:当含石量从较低水平增加到中等水平时,颗粒破碎指数的增量显著;然而,当含石量从中等水平进一步增加到较高水平时,颗粒破碎指标的增量反而减小。这一现象揭示了颗粒破碎的增长率并非随含石量单调递增,而是在某一含石量区间达到峰值后趋于平缓。这是因为随着含石量的增加,土石混合体内部的力学承载结构发生了由基质主导向骨架主导的转变。

由图 23(d)~(f)可以看出,在含石量保持不变的条件下,颗粒的破碎指数随着含水率的增加呈现出明确的下降趋势。水分子在颗粒接触面附近会形成一层薄薄的水膜,显著降低颗粒间的滑动摩擦系数。在剪应力作用下,颗粒更容易通过相互滑移和滚动来适应变形。同时,润滑作用使得颗粒在受力时能够更高效地进行位置调整和重排列,以形成一个更稳定、应力分布更均匀的结构来共同承担荷载。这种高效的能量耗散与应力重分布方式,避免了局部应力过度集中,从而减少了因应力集中导致的颗粒破碎的发生。颗粒破碎指数随含水率的增加而呈现非线性降低的趋势。

室内试验中观察到的颗粒破碎率高于数值模拟结果,其可能的原因之一是,在剪切试验后,为进行筛分分析,需将取出的含水试样进行烘干和人工捻散,这个过程中可能对一些强度较低或已存在微裂隙的颗粒造成不可避免的二次破碎。

5 结论

为深入揭示土石混合料(SRM)的剪切力学特性,系统开展了考虑块石形状与颗粒破碎的室内大型直剪试验与离散元数值模拟研究。通过对宏观力学响应、细观结构演化及颗粒破碎规律的综合分析,深化了对复杂条件下土石混合料剪切破坏机理的认识。

1)构建了一种能够同时考虑块石真实不规则形态与颗粒破碎效应的离散元模型。通过与大型直剪试验结果的细致对比验证,模拟结果表明该模型在复现土石混合料宏观力学响应和细观破坏过程方面的准确性和优越性,为揭示其复杂力学行为提供了强有力的数值工具。

2)含石量是影响土石混合料剪切特性的主导因素,抗剪强度与内摩擦角随含石量增加而显著提

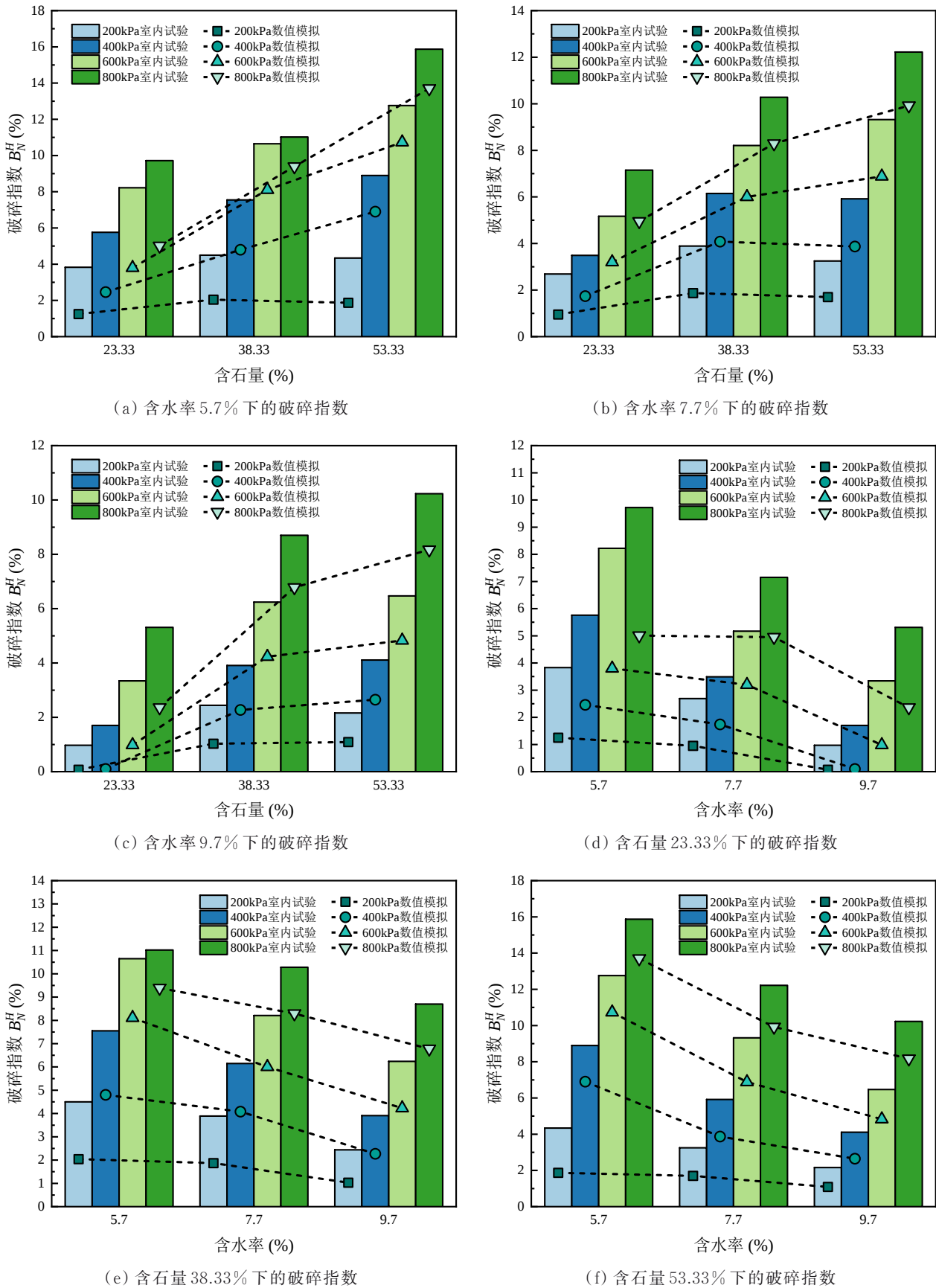


图 23 破碎指数随含石量和含水率变化结果图

Fig.23 Variation of breakage index with rock content and moisture content

高,而黏聚力则随含石量的增加先增加后减小,在含石量 40% 左右时达到峰值。在含石量低于 40%

时,强度由土体基质主导;高于 40% 后,块石骨架效应凸显,破坏机制转变为块石间的滑移、转动与

破碎。

3)含水率对土石混合料强度存在明显的劣化规律。抗剪强度、内摩擦角和黏聚力均随含水率的增加而降低,颗粒破碎指数随含水率的增加而呈现非线性降低的趋势。随着法向应力的增大,含水率对于强度的抑制效果逐渐减弱。在低法向应力下,土石混合料的抗剪强度主要依赖于颗粒间的黏聚力、摩擦力以及颗粒间的咬合作用,水对黏聚力的削弱作用和润滑作用会显得尤为突出。

4)研究从细观力学角度揭示了剪切带的发展依赖于块石的局部形态与方位,颗粒破碎主要发生在强力链的应力集中点,特别是块石的棱角区域。研究结果表明,块石形态是控制局部破坏路径和宏观强度的关键,凸显了在数值模拟中采用高保真形态建模的重要性。

6 研究展望

本文虽然取得了一些有益的结论,但仍存在一些不足和值得深入研究的方面:

1)三维效应:本文基于二维模型进行研究,未来可发展考虑真实三维形态和破碎的三维离散元模型,以更真实地模拟空间嵌锁效应。

2)水力耦合:本文将含水率的影响等效为参数调整,未来可引入流固耦合或基于基质吸力的接触模型,更深入地揭示水对土石混合料力学行为的作用机理,特别是考虑饱和状态下的孔隙水压力效应。

3)动力与循环荷载:实际工程中土石混合料常承受地震、交通等动力或循环荷载,其在该条件下的疲劳、变形和破碎特性是未来研究的重要方向。

4)级配与尺寸效应:可进一步系统研究更宽的级配范围、最大粒径等对土石混合料力学特性及尺寸效应的影响。

参考文献

- [1] 徐文杰,胡瑞林.土石混合体概念、分类及意义[J].水文地质工程地质,2009,36(4):50-56,70.
XU W J, HU R L. Conception, classification and significations of soil-rock mixture [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 50-56, 70. (in Chinese)
- [2] 钟祖良,涂义亮,何晓勇,等.土石混合体物理指标及强度特性研究进展[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):1135-1144.
ZHONG Z L, TU Y L, HE X Y, et al. Research progress on physical index and strength characteristics of bimsoils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1135-1144. (in Chinese)
- [3] 李鹏,苏生瑞,马驰,等.堆积层-基岩接触面滑坡的形成机理:以祖师庙滑坡为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(5):1471-1479.
LI P, SU S R, MA C, et al. Formation mechanism of landslides with accumulation layer-bedrock contact surface: Taking Zushimiao landslide as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(5): 1471-1479. (in Chinese)
- [4] LIANG S H, XIAO X L, FENG D L. Study on large-scale direct shear test on soil-rock mixture in an immersion state under water [J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(2): 04022294.
- [5] ZHANG Z L, XU W J, XIA W, et al. Large-scale in situ test for mechanical characterization of soil-rock mixture used in an embankment dam [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 317-322.
- [6] 李晓,廖秋林,赫建明,等.土石混合体力学特性的原位试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(12):2377-2384.
LI X, LIAO Q L, HE J M, et al. Study on in situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2377-2384. (in Chinese)
- [7] 唐建一,徐东升,刘华北.含石量对土石混合体剪切特性的影响[J].岩土力学,2018,39(1):93-102.
TANG J Y, XU D S, LIU H B. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 93-102. (in Chinese)
- [8] 刘新荣,涂义亮,王鹏,等.基于大型直剪试验的土石混合体颗粒破碎特征研究[J].岩土工程学报,2017,39(8):1425-1434.
LIU X R, TU Y L, WANG P, et al. Particle breakage of soil-rock aggregate based on large-scale direct shear tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1425-1434. (in Chinese)
- [9] 吴帅峰,蔡红,魏迎奇,等.土石混合料剪切机理及抗剪强度分量特性研究[J].岩土工程学报,2019,41(增刊2):230-234.
WU S F, CAI H, WEI Y Q, et al. Study on shear mechanism and shear strength component characteristics of earth-rock mixture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 2): 230-234.
- [10] 涂义亮,刘新荣,任青阳,等.含石量和颗粒破碎对土石混合料强度的影响研究[J].岩土力学,2020,41(12):3919-3928.
TU Y L, LIU X R, REN Q Y, et al. Effects of rock contents and particle breakage on strength characteristics of soil-rock aggregate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3919-3928. (in Chinese)

- [11] 雷晓丹, 杨忠平, 张晓景, 等. 土石混合料剪切特性及块石破碎特征[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 899-908, 916.
LEI X D, YANG Z P, ZHANG X J, et al. Shear properties and rock block breakage characteristics of soil-rock mixtures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (3): 899-908, 916. (in Chinese)
- [12] LIS Q, YANG Z P, TIAN X, et al. Influencing factors of scale effects in large-scale direct shear tests of soil-rock mixtures based on particle breakage [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31: 100677.
- [13] AN N, WANG G Q, WANG D, et al. DEM parameter calibration based on multi-objective Bayesian optimization and prior physical information [J]. Acta Geotechnica, 2025, 20(3): 1379-1401.
- [14] 杨忠平, 雷晓丹, 王雷, 等. 含石量对土石混合体剪切特性影响的颗粒离散元数值研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1035-1045.
YANG Z P, LEI X D, WANG L, et al. Impact of stone content to shear properties of soil-rock mixture using particle flow code simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1035-1045. (in Chinese)
- [15] 杨忠平, 田鑫, 雷晓丹, 等. 土石混合料剪切特性影响因素的离散元数值研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28 (1): 39-50.
YANG Z P, TIAN X, LEI X D, et al. Particle discrete element numerical study on factors of shear strength characteristics for soil-rock mixture [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 39-50. (in Chinese)
- [16] 杨忠平, 李进, 蒋源文, 等. 含石率对土石混合体-基岩界面剪切力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (8): 1443-1452.
YANG Z P, LI J, JIANG Y W, et al. Influences of stone content on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1443-1452. (in Chinese)
- [17] 肖建章, 马妍祎, 周杰, 等. 基于 PFC^{2D} 的土石混合料剪切强度数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊2): 123-128.
XIAO J Z, MA Y Y, ZHOU J, et al. Numerical simulation analysis of shear strength of earth-rock mixture based on PFC^{2D} [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup 2): 123-128.
- [18] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 不同围压加载方式下土石混合体变形破坏机制颗粒流模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2051-2060.
ZHANG Q, WANG X G, ZHAO Y F, et al. Particle flow modelling of deformation and failure mechanism of soil-rock mixture under different loading modes of confining pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2051-2060. (in Chinese)
- [19] 徐文杰, 王识. 基于真实块石形态的土石混合体细观力学三维数值直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2152-2160.
XU W J, WANG S. Meso-mechanics of soil-rock mixture with real shape of rock blocks based on 3D numerical direct shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2152-2160. (in Chinese)
- [20] 金磊, 曾亚武. 土石混合体宏细观力学特性和变形破坏机制的三维离散元精细模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1540-1550.
JIN L, ZENG Y W. Refined simulation for macro- and meso-mechanical properties and failure mechanism of soil-rock mixture by 3D DEM [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1540-1550. (in Chinese)
- [21] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 基于围压柔性加载的土石混合体大型三轴试验离散元模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1545-1554.
ZHANG Q, WANG X G, ZHAO Y F, et al. Discrete element simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixtures based on flexible loading of confining pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1545-1554. (in Chinese)
- [22] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [23] XIAO Y, WANG C G, WU H R, et al. New simple breakage index for crushable granular soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(8): 04021136.
- [24] 张修军, 季思同, 戴文杰. 含石量与含水率对土石混合体抗剪特性研究综述[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29 (6): 43-47.
ZHANG X J, JI S T, DAI W J. Summarization on shear strength of soil-rock mixture with rock content and water content [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2022, 29(6): 43-47. (in Chinese)
- [25] 刘龙旗, 毛雪松, 肖亚军, 等. 含水率对坡积体路基填料剪切特性影响试验研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33 (9): 126-135.
LIU L Q, MAO X S, XIAO Y J, et al. Effect of water content on shear characteristics of landslide deposit subgrade fillers [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(9): 126-135. (in Chinese)
- [26] 薛亚东, 岳磊, 李硕标. 含水率对土石混合体力学特性影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 21-29.
XUE Y D, YUE L, LI S B. Experimental study on mechanical properties of soilrock mixture containing

water [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 21-29. (in Chinese)

[27] 刘新荣, 涂义亮, 王林枫, 等. 土石混合体的剪切面分形特征及强度产生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2260-2274.

LIU X R, TU Y L, WANG L F, et al. Fractal

characteristics of shear failure surface and mechanism of strength generation of soil-rock aggregate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (9): 2260-2274. (in Chinese)

(编辑 XXX)