

DOI: 10.11779/CJGE202108009

含石率对土石混合体—基岩界面剪切力学特性的影响

杨忠平^{1,2,3}, 李进^{1,2,3}, 蒋源文^{1,2,3}, 胡元鑫⁴, 赵亚龙^{1,2,3}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400045; 3. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆), 重庆 400045; 4. 渝武机场建设指挥部, 重庆 401120)

摘要: 土石混合体与基岩接触界面是高填方边坡和天然斜坡失稳不容忽视的潜在滑移面。通过室内大型直剪试验和离散元数值模拟探究了含石率对土石混合体—基岩界面剪切力学特性的影响及接触面剪切破坏机理。结果表明: 土石混合体—基岩界面的剪应力—剪切位移曲线随法向压力的增大有由应变软化向应变硬化转变的趋势; 剪应力—剪切位移曲线出现“V型跳跃”主要与颗粒破碎、转动和翻越有关; 土石混合体—基岩界面抗剪强度和抗剪强度指标随含石率的增加先增大后减小, 存在着最优含石率, 但内摩擦角 φ 变化不大, 在 38° 左右波动; 剪切带的分布和形态受含石率和法向压力影响显著, 法向压力和含石率越高, 剪切带就越厚; 剪切带内的块石破坏表现为表面研磨、局部破碎和完全破碎3种模式; 法向压力和含石率都是影响相对破碎率 B_r 的主要原因, 表现为随着含石率和法向压力的增加, 块石相对破碎率不断增加。

关键词: 土石混合体; 含石率; 基岩界面; 剪切特性

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)08-1443-10

作者简介: 杨忠平(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土与边坡稳定性方面的教学与研究工作。

E-mail: yang-zhp@163.com.

Influences of stone content on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface

YANG Zhong-ping^{1,2,3}, LI Jin^{1,2,3}, JIANG Yuan-wen^{1,2,3}, HU Yuan-xin⁴, ZHAO Ya-long^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. National Joint Engineering Research Center for Prevention and Control of Environmental Geological Hazards in the TGR Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Headquarters of Chongqing Yuwu Airport, Chongqing 401120, China)

Abstract: The contact interface between the soil-rock mixture and the bedrock is often a potential slip surface that cannot be ignored for the instability of highly-filled slopes and natural slopes. Through the large-scale direct shear tests in the laboratory and the numerical simulations using the discrete element software, the influences of stone content on the shear mechanical properties of the soil-rock mixture-bedrock interface and the shear failure mechanism of the contact surface are investigated. The results show that the shear stress-shear displacement curve of the soil-rock mixture-bedrock interface changes from strain softening to strain hardening with the increase of normal pressure. The "V-shaped jump" in the shear stress-shear displacement curve is mainly related to particle breakage, rotation and overturning. The shear strength and shear strength indexes of the soil-rock mixture-bedrock interface increase first and then decrease with the increase of rock content, and there is an optimal stone content to maximize the shear strength, but the internal friction angle φ does not change significantly and fluctuates around 38° . The distribution and morphology of the shear zone are significantly affected by the stone content and normal pressure. The higher the normal pressure and rock content, the thicker the shear zone. The failure of the block stones in the shear band can be divided into three modes: surface grinding, partial crushing and complete crushing. The normal pressure and stone content are the reasons that affect the relative crushing rate B_r . The specific performance is that with the increase of the stone content and normal pressure, the relative crushing rate of block stones increases continuously.

Key words: soil-rock mixture; stone content; bedrock interface; shear characteristic

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504802); 国家自然科学基金项目(41772306); 中央高校基本科研业务费项目(2019CDXYTM0032)

收稿日期: 2020-12-25

0 引言

中国西南地区分布着大量山地和丘陵,在进行基础设施建设过程中,因受天然地形限制,高挖低填是常用的场地处理措施,从而形成了众多的高填方边坡。近年来,高填方边坡失稳已屡有发生,如秦巴山区紫阳县滑坡^[1]、陕西岚皋祖师庙滑坡^[2]等天然土石混合体斜坡滑坡,宜昌魏家湾滑坡^[3]、攀枝花机场滑坡^[4]等人工土石混合体边坡滑坡。这些滑坡滑面大多为土石混合体与下伏基岩接触界面,滑坡的破坏模式不仅由土石混合体本身的特性决定,更取决于下伏基岩产状、土石混合体与基岩接触面抗剪强度等^[5]。可见,土石混合体与下伏基岩的接触界面常常是高填方边坡和天然斜坡失稳不容忽视的潜在滑移面。

土石混合体-基岩界面的抗剪强度是控制坡体稳定性的重要参数之一,也是工程设计的重要参数。土石混合体-基岩界面和岩体结构面在本质上都属于接触界面,目前对岩体结构面的剪切特性已有较多研究,为土石混合体-基岩接触面的研究提供参考和借鉴。近年来的研究表明,结构面的综合抗剪强度参数随着结构面爬坡角的增大而增大^[6],同时结构面强度特征和破坏机制还受起伏高度、剪切速率和法向压力影响^[7]; Babanouri 等^[8]研究并总结了结构面在剪切峰值前后节理表面轮廓的破坏形式以及节理粗糙度的变化规律;而 Kana 等^[9]的研究表明,粗糙度是控制节理剪切力学特性的决定因素之一。

土-岩接触界面的抗剪强度不仅与接触面的性质(如粗糙度^[10]、接触面形状^[12]等)有直接关系,而且受两侧岩土体性质影响。很多学者通过开展室内试验和利用数值模拟研究了土石混合体的力学性质,结果表明母岩性质^[13]、颗粒级配^[14]、含水率^[15]、块石尺寸^[17]、块石空间分布^[18]和含石率^[19]等是影响土石混合体力学特性的主要因素。其中含石率是土石混合体结构性最直接的表现指标之一^[20],“块石”的存在影响甚至控制着堆积体(或填方体)变形破坏机制及宏观力学特性。因此,开展土石混合体含石率对台阶式放坡条件下土石混合体与基岩接触界面抗剪强度的研究具有工程参考价值^[21],鉴于此,依托武隆仙女山机场工程,通过室内大型直剪试验和离散元数值模拟,探讨不同含石率对土石混合体-基岩接触界面的抗剪强度特征的影响,并揭示剪切破坏作用机理,研究成果可供堆积体斜坡稳定性评价和土石混合体填方体设计参考。

1 土石混合体-基岩直剪试验

1.1 工程背景

重庆武隆仙女山机场区位于仙女山山系区域分水岭西侧台地上,地貌类型为岩溶地貌和残坡积堆积层流水切割地貌,属剥蚀溶蚀的中-强烈切割中山区,海拔在 1600~1800 m。因场区地形起伏较大,在平场过程中最大挖方高度 58 m 左右,最大填方高度 65 m 左右,是典型的高填方工程,受放坡条件限制,拟采用台阶式放坡方案(图 1),以提高填方体下伏基岩坡面抗剪强度,提高土石混合体稳定性。

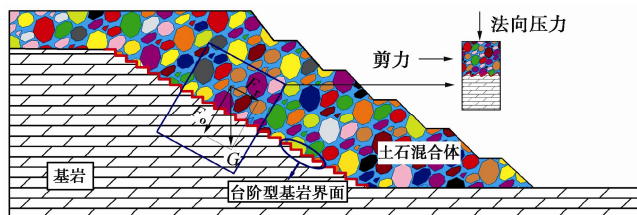


图 1 台阶式放坡方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stepped grading

1.2 试验设备

本次室内大型直剪试验机器采用四川大学华西岩土研究所研制的 ZJ50-2G 大型粗粒土压缩直剪仪(图 2),仪器主要由刚性框架、上下剪切盒、水平加载装置、垂直加载装置、数据采集器等 5 部分组成,上下剪切盒长×宽×高均为 300 mm×300 mm×200 mm,剪切面积 900 cm²。水平荷载和竖向荷载的范围均为 0~700 kN,水平和竖向油缸行程范围为 0~15 cm,剪切速度可在 0.1~5 mm/min 范围内连续调整。直剪仪上共布设 5 个位移传感器,其中 4 个竖直方向和 1 个水平方向,其量程均为 100 mm,精度在 0.3%以内。

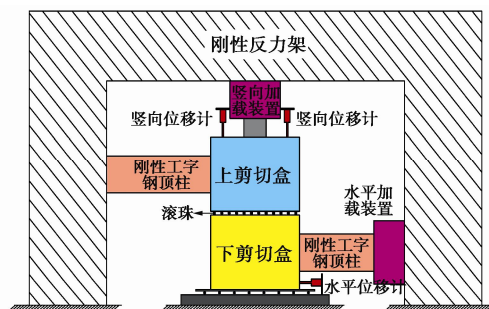


图 2 ZJ50-2G 大型粗粒土压缩直剪仪示意图

Fig. 2 ZJ50-2G large coarse soil compression direct shear apparatus

1.3 试样制备

试验所用土石混合体试样主要采集于场区具有代表性的强夯区域,主要成分包括粉质黏土、黏土以及灰岩碎块石,场地含石量为 70%。试样的有效粒径 d_{10} 为 1.10 mm,中值粒径 d_{30} 为 27.12 mm,限制粒径 d_{60} 为 51.83 mm,不均匀系数 C_u 为 47.12,曲率系数 C_c 为 0.95。受室内试验仪器限制,根据《水电水利工程

粗粒土试验规程》^[22]建议, 试样中最大颗粒粒径不得超过剪切盒边长的 1/5, 因此试验中取最大块石粒径为 25 mm (图 3)。

“土”和“岩石”是相对而言的, 根据文献^[23]建议, 并考虑剪切盒尺寸, 本文选用 5 mm 作为土石混合体中“土”和“岩石”尺寸阈值。



图 3 样本筛分结果

Fig. 3 Sieving results of sample

试验所用基岩取自重庆武隆仙女山机场施工现场, 所处地层为二叠系上统吴家坪组 (P_3w) 地层, 岩性为泥质灰岩。采用 WDAJ-600 型微机控制电液伺服多功能试验机测得岩石单轴抗压强度为 68.09 MPa, 弹性模量为 29.14 GPa, 内摩擦角为 35.67° , 黏聚力为 1433 kPa。台阶状灰岩试件根据现场施工放坡条件设计坡率为 1:1.75 (图 4)。先采用相似级配法将场地原土石级配等比例缩小, 然后保持各块石粒组的相对质量百分数不变的方法设计制备了含石率分别为 35%, 55%, 75% 的土石混合体试样, 级配曲线如图 5 所示。



图 4 加工后的基岩试样

Fig. 4 Processed bedrock sample

1.4 试验方法

将台阶状灰岩试件放入下剪切盒中, 并在缝隙中楔入钢楔, 以避免基岩块石在剪切过程中滑动。按照预先制定好的含石率, 称取所需不同粒径块石组和土的重量, 并先拌和至粗细颗粒分布均匀, 按照 9.32% 的含水率分 3 次加入水后搅拌至试样干湿均匀, 用塑料薄膜包裹, 养护 24 h。采用分层压实法将土石混合体分 3 层进行装样, 每一层土石混合体采用统一的击实锤锤击相同的次数^[26], 并对各层接触面凿毛处理, 防止界面分层。

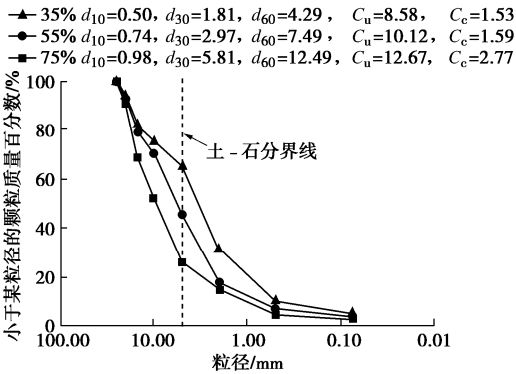


图 5 不同含石率试样的级配曲线

Fig. 5 Grain-siz distribution curves of samples with different stone contents

每组试件分别在 200, 400, 600, 800 kPa 的法向压力作用下以 $0.8 \text{ mm/min}^{[11, 16]}$ 的剪切速率进行土石混合体—基岩接触面剪切试验, 当剪切位移达到 60 mm (试样长度的 20%) 时终止试验。具体方案如表 1 所示。

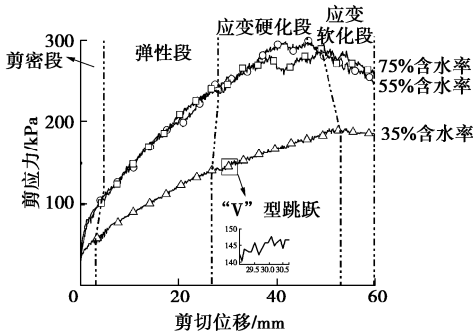
表 1 室内大型直剪试验方案

Table 1 Schemes for large direct shear tests in laboratory				
试验 编号	含石率 /%	含水率 /%	法向压力 /kPa	加载速度 /(mm·min ⁻¹)
1	35	9.32	200, 400, 600, 800	0.8
2	55	9.32	200, 400, 600, 800	0.8
3	75	9.32	200, 400, 600, 800	0.8

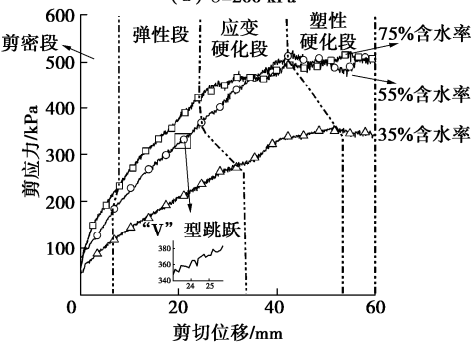
2 试验结果与分析

2.1 剪应力 - 剪切位移曲线分析

通过室内大型直剪试验得到的土石混合体—基岩界面的剪应力 - 剪切位移曲线如图 6 所示。



(a) $\sigma=200 \text{ kPa}$



(b) $\sigma=400 \text{ kPa}$

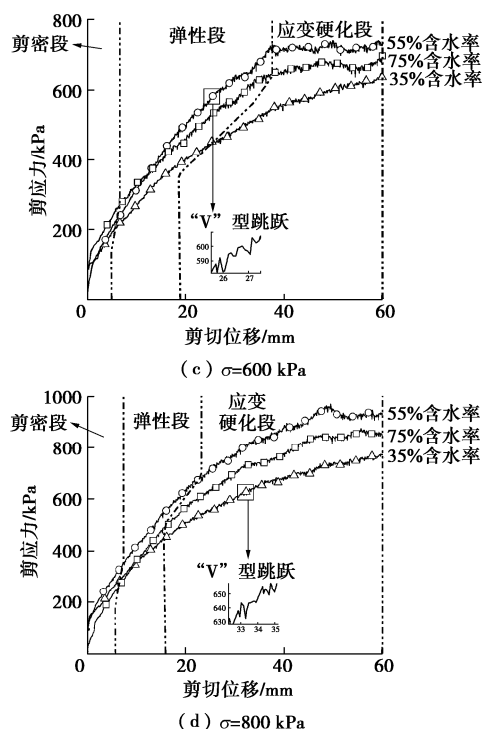


图6 剪应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves

由图6可见,试样在低法向压力(200 kPa)作用下表现为应变软化破坏(图6(a)),具有完整的应力-应变曲线,整个曲线可划分为4个阶段:①剪密段,剪应力快速增加,曲线向上凸起;②弹性段,曲线整体表现为线性增长;③应变硬化段,剪应力虽不断增大,但增长速率逐渐变小;④应变软化段,剪应力随着剪切位移增加呈现下降趋势;在中等法向压力(400 kPa)和在高压法向压力(600, 800 kPa)下,分别表现为塑性应变(图6(b))和应变硬化破坏(图6(c), (d))。同时可见,随法向压力增加,应变软化现象越来越不明显,说明试样在法向压力的作用下有由应变软化向应变硬化转变的趋势。

这一现象与块石在不同法向压力作用下运动形式不同有关。当法向压力较低时,法向压力不足以限制块石的翻越,在剪切过程中,基岩界面附近的块石主要做爬坡、翻转、错动等调整相对位置的运动,块石破碎现象不明显;在高压法向压力的作用下,由于块石间、块石与基岩间的咬合作用增强,块石的运动受到很大限制,块石破碎现象频发,虽然块石的破碎会导致块石间、块石与基岩间因咬合而储存的应变能急剧释放,但是在高压法向压力作用下破碎的块石能够迅速重新咬合并填充于块石之间的孔隙,骨架结构变的更加的密实的同时咬合作用也会加强,因此剪应力会持续上升,整体表现为应变硬化。

由于土石混合物是一种高度非均质材料,从图6

可以看出,曲线总会出现幅度不一的“跳跃”现象,且以“V型跳跃”^[27]为主。这主要是因为,在剪切过程中,块石调整相对位置的运动(如爬坡、翻越等)和破碎现象始终发生。块石发生破碎(图7(a))和块石翻越相邻块石后(图7(b))或者做下坡运动时(图7(c))均会造成曲线下跌,前者是因为块石内部储存的能量得到释放,后者是因为块石继续运动所受阻力减少;曲线上升主要有两个原因:①块石发生破碎之前不断积累能量;②块石翻越相邻块石或者做上坡运动时所受阻力较大,两者都需要外部提供更多的能量。董云等^[28]和邓华锋等^[29]也在直剪试验中观察到曲线“跳跃”现象,认为曲线跳跃与颗粒破碎、转动和翻越有关。在含石率不变时,曲线的最大跳跃幅度总体上随法向压力的增大而增大。例如,当含石率为55%时(图6(c)),200, 400, 600, 800 kPa法向压力下的4条曲线最大跳跃幅度分别为11.1, 20.0, 27.8, 32.2 kPa。这是因为块石之间或者块石与基岩之间的咬合力会随着法向压力的增加而增大,块石难以调整位置的同时块石破碎现象频发,曲线的跳跃幅度随之变大。

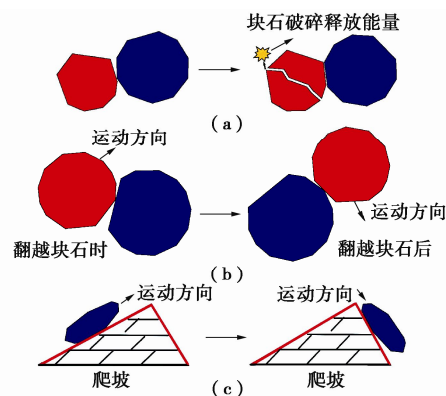


图7 块石运动示意图

Fig. 7 Schematic diagram of block movement

2.2 抗剪强度

根据《水电水利工程粗粒土试验规程》^[22]要求,抗剪强度应取剪应力-剪切位移曲线上的峰值或稳定值;若无明显峰值,则取剪切位移达到试样直径10%处的剪应力作为抗剪强度。

各试样的抗剪强度和法向压力之间的关系如图8所示,在含石率相同的情况下,试样的抗剪强度随着法向压力的增大而增大,近似满足线性关系,利用线性函数进行拟合,拟合效果良好($R^2 > 0.98$),土石混合物-基岩界面的抗剪强度符合莫尔库仑准则。

由图8中抗剪强度包络线可得到土石混合物-基岩界面的内摩擦角 φ 分别为 37.69° , 38.13° , 36.28° ,黏聚力 c 分别为77.50, 163.52, 121.04 kPa。从图8, 9可见,土石混合物-基岩界面抗剪强度和抗

剪强度指标随含石率的变化规律具有一致性, 总体趋势为随着含石率增加, 抗剪强度和抗剪强度指标先增大后减小, 但内摩擦角变化不大, 在 38° 左右波动, 文献[13, 26]中关于土石混合体的研究也发现了类似的规律, 可以合理地推断土石混合体-基岩界面存在一个最优含石率使得抗剪强度能够得到最大程度发挥。

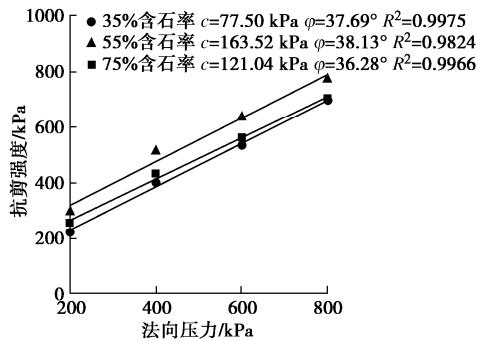


图8 土石混合体-基岩界面抗剪强度包络线

Fig. 8 Shear strength envelopes of soil-rock mixture-bedrock interface

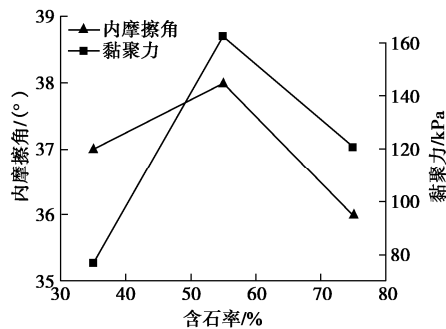


图9 抗剪强度指标和含石率的关系

Fig. 9 Relationship between shear strength index and stone content

土石混合体的孔隙率随着含石率的增加先减小后增大, 存在最小孔隙率^[26]。当含石率处于 35%~55% 时, 试样孔隙率较小, 结构表现为骨架密实结构 (图 10 (a)), 在剪力作用下, 块石与土颗粒之间、块石之间以及块石和基岩之间能够充分接触咬合, 明显增加摩擦力, 使得抗剪强度、黏聚力及内摩擦角都有所提高; 当含石率大于 55% 时, 块石含量明显增多, 由于块石的不规则性导致块石与块石之间出现大量的孔隙, 同时土颗粒相对较少并不能将块石之间的孔隙充分填充, 试样的孔隙率增大, 其结构为骨架孔隙结构 (图 10 (b)), 块石与块石之间存在着大量的点接触, 一定程度上削弱了摩擦力, 在剪切过程中, 块石间接接触处应力集中现象明显, 强度低的块石易发生破碎, 块石破碎时内部能量得到释放, 加上块石之间基本没有黏结强度, 于是抗剪强度、黏聚力和内摩擦角开始下降。

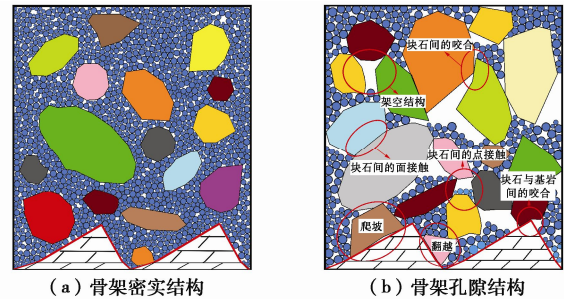


图10 不同含石率试样微观结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of microstructure of samples with different stone contents

3 接触面剪切机理分析

3.1 数值模型建立

PFC^{2D} 具有计算效率高, 块体由粒子黏结而成可以破裂, 模拟的位移大小没有限制等优点, 所以本文选用 PFC^{2D} 作为数值模拟的工具。采用 PFC^{2D} 中的 Wall 作为剪切盒的边界条件, 参照室内直剪试验的条件, 设置上下剪切盒尺寸高×宽为 200 mm×300 mm (图 11)。采用圆盘单元模拟土石混合体中的土颗粒, 基于蒙特洛法^[30]生成随机多边形块石, 粒径大于等于 5 mm 的块石颗粒级配与室内试验保持一致, 并且设定块石在剪切过程中可以破碎。土颗粒之间、块石与土颗粒之间的接触设置为接触黏结模型, 块石内部颗粒之间则采用平行黏结模型^[31]。平行黏结模型可以传递力和力矩, 并且如果应力超过了相应的黏结强度, 平行黏结就会断裂^[32], 从而保证了块石的可破碎性。由于不能对 Wall 直接施加外力, 只能赋予 Wall 速度来间接地实现施加外力, 为保证剪切顺利进行, 采用伺服原理更新边界墙体的伺服速度, 识别 Wall 与颗粒间的接触数目及作用力, 据此获取下一时步的伺服参数, 再次更新墙体的速度并开始新一轮的伺服, 不断循环上述步骤直到平均接触应力满足规定条件, 以此来保证法向压力在整个剪切过程中的稳定。

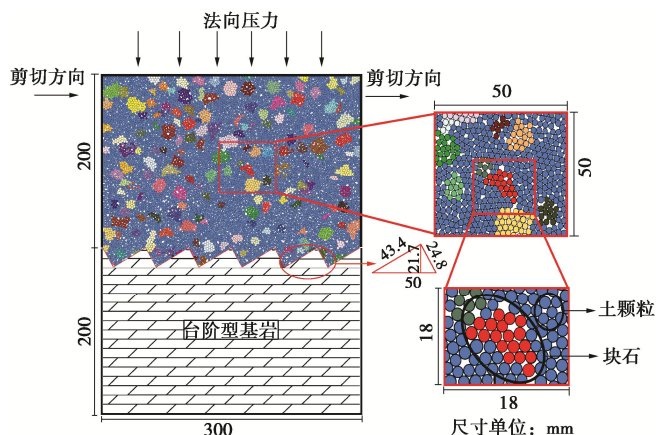


图11 模型示意图

Fig. 11 Model

3.2 数值模拟参数标定

由于目前并没有宏观参数与细观参数之间相互转换的成熟理论，参考文献[33]的建议，采用试错法对细观参数进行标定，通过不断调整细观参数，直到数值模拟结果与室内直剪试验结果最吻合为止。本文根据对 35%含石率试样室内大型直剪试验的标定，获得了不同颗粒之间的细观接触参数（表 2），由图 12 数值模拟和室内直剪试验的对比结果可知，数值试验获得的试样剪应力-剪切位移曲线与室内试验的吻合度较好，细观参数能够满足需求。

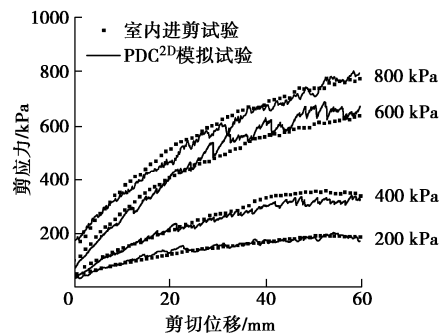


图 12 数值模拟与室内试验的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 12 Shear stress-shear displacement curves of numerical simulations and laboratory tests

表 2 细观参数表

Table 2 Meso-parameters

细观参数	接触类型		
	块石内部	土颗粒间	块石与土颗粒间
接触黏结变形模量/Pa	—	5.0×10^6	5.0×10^6
接触黏结抗拉强度/Pa	—	1.5×10^3	1.0×10^2
接触黏结剪切强度/Pa	—	6.0×10^3	1.0×10^2
平行黏结变形模量/Pa	6.0×10^7	—	—
平行黏结抗拉强度/Pa	3.5×10^5	—	—
平行黏结黏聚力/Pa	2.5×10^5	—	—
平行黏结摩擦角/(°)	25.0	—	—

3.3 含石率和法向压力对剪切带的影响

在 PFC^{2D} 接触模型中，如果颗粒间法向接触力超过法向黏结强度或颗粒间切向接触力超过切向黏结强度，黏结就会断裂，同时微裂隙将产生。为研究剪切带形成的过程，数值模型试验过程中持续监测并记录试样中裂隙的位置。

图 13 给出了试样在不同含石率和法向压力下的裂隙图（图中蓝线代表拉裂隙，而红线代表剪裂隙），根据裂隙的分布密度可粗略确定剪切带外轮廓线（图 13 中虚线），可见剪切带外面的土壤基质和块石几乎未受破坏。

由图 13 可知剪切带形状不规则，表面凹凸不平，

呈波浪状，这与文献[36]研究成果具有一致性。块石的存在是引起剪切带形状凹凸不平的主要原因。在剪切过程中，遇到软弱的块石时，块石会被剪碎；遇到坚硬的块石时会发生绕石现象，从而造成了剪切带形状的不规则。

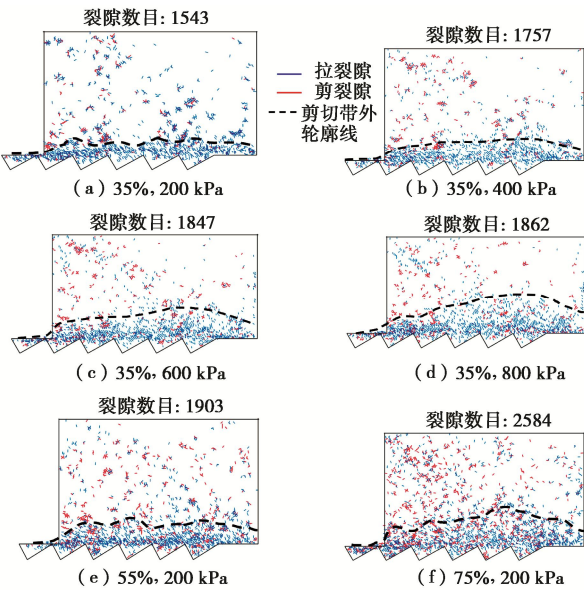


图 13 不同含石率和法向压力下的裂隙图

Fig. 13 Fractures under different stone contents and normal pressures

法向压力和含石率都会影响剪切带的形态和分布，裂隙数量（图 13）和剪切带的厚度（图 14）随着法向压力和含石率的增大而不断增加。剪切带的起伏程度受法向压力和含石率影响明显：法向压力越大（图 14（a）），含石率（图 14（b））越高，剪切带的起伏程度就越大。这与块石的受力和运动状态受到法向压力和含石率影响关系密切，块石与块石、块石与土颗粒和块石与基岩之间的接触数目和接触面积都会随着法向压力和含石率的提高而增加，块石运动受到的阻力大，难以发生调整相对位置的运动，发生块石破碎现象频繁，在剪切过程中产生的裂隙就会增多；当块石在翻越相邻块石或台阶时由于大粒径的块石数目增多，块石翻越时的竖向位移会随之增加，从而导致剪切带的厚度增加，起伏程度增大。

3.4 含石率和法向压力对块石破碎的影响

根据室内大型直剪试验中块石的破碎形态将块石的破坏分为表面研磨、局部破碎和完全破碎^[39]3 种破坏模式。块石的破坏模式取决于块石滑动和破碎所需要的应力水平的相对高低。如果在剪切过程中，作用在块石上的应力达到或超过了其抗剪强度，块石就会发生破碎，否则块石仅发生滑动和翻转，在发生滑动和翻转时在相邻块石表面留下擦痕，局部破碎破坏形式介于以上两者之间。

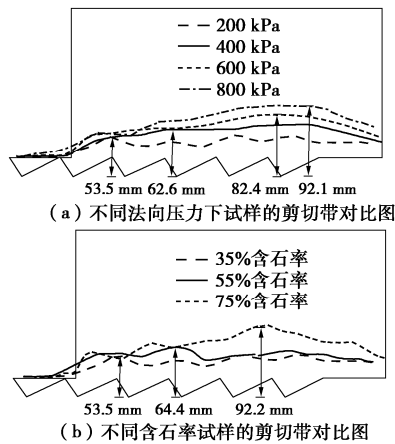


图 14 剪切带对比图

Fig. 14 Comparison of shear bands

数值模拟中块石的破坏模式用块石内部颗粒之间的接触键的断裂程度来表示, 当块石内部的接触键几乎完全断裂时, 块石完全破碎 (图 15 (b)); 图 15 (c) 中块石破碎较严重, 局部完全破碎; 当块石内部的接触键主体保存完整, 仅有表面棱角位置的颗粒接触键发生断裂时, 则表明块石表面发生了轻微的磨损 (图 15 (d))。

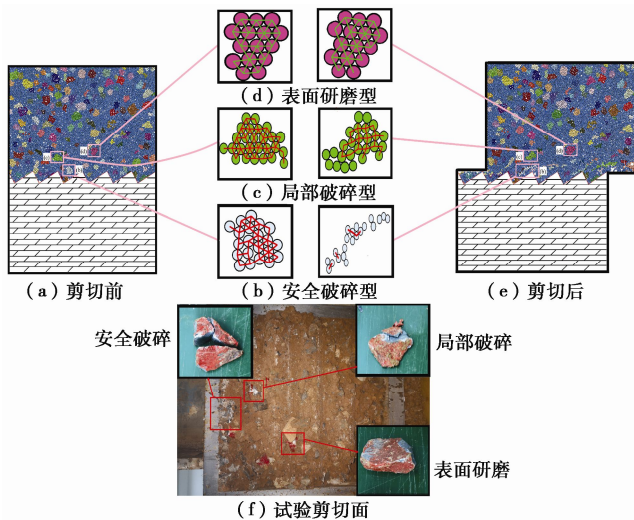


图 15 块石破碎示意图

Fig. 15 Schematic diagram of broken stone

本文选用 Hardin^[40]颗粒破碎率 B_r 作为块石破碎的度量指标, 对 PFC^{2D} 二次开发统计剪切后模型的颗粒级配, 计算不同含石率试样的相对破碎率 B_r 。从图 16 中可见: 法向压力和含石率都是影响相对破碎率 B_r 的原因, 具体表现为随着含石率和法向压力的增加, 块石相对破碎率不断增加。

块石破碎与块石的数目、块石的空间分布、块石所处的应力状态、块石间的接触数目和接触面积等都有关系^[41]。随着法向压力的增加, 试样被压的更加密实, 孔隙率降低, 块石之间由原来的点接触变成了面

接触, 咬合作用更加明显, 在剪切过程中, 块石的运动受到了很大限制, 难以调整自身位置, 块石破碎现象频发, 块石相对破碎率会随之增加; 当土石混合体含石率较低时, 块石随机分布在土壤基质之中, 上方土石混合体中的块石、基岩台阶凹槽里的块石及基岩三者之间并没有形成大量接触, 在剪切过程中块石主要在土壤基质和基岩台阶凹槽中做翻动、爬坡等调整相对位置的运动, 块石与块石之间的挤压运动较少, 块石破碎现象较少; 当土石混合体含石率较高时, 块石之间及块石与基岩之间构成了试样的骨架, 土颗粒填充于间隙之中, 试样的力学特性主要由块石控制^[23], 块石由于与其他块石或基岩之间存在闭锁、咬合等现象, 使得爬坡、翻转、错动等更不容易发生, 应力集中更加明显, 块石在高应力水平下容易发生破碎^[42], 因此块石相对破碎率随之提高。

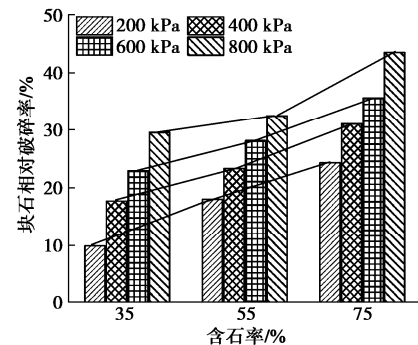


图 16 块石相对破碎与含石率关系

Fig. 16 Relationship between relative fragmentation of stone and stone content

4 结 论

通过室内大型直剪试验和离散元数值模拟探讨了含石率对土石混合体-基岩界面剪切力学特性的影响以及接触面剪切破坏机理, 得到以下 3 点结论。

(1) 在相同法向压力作用下, 不同含石率试样破坏模式保持一致, 在低法向压力作用下, 剪应力-剪切位移曲线表现为应变软化特征, 而在高法向压力作用下, 表现为应变硬化特征, 说明土石混合体-基岩界面的剪应力-剪切位移曲线随法向压力的增大有由应变软化向应变硬化转变的趋势。不论含石率和法向压力多大, 曲线总是出现幅度不一的“V 型跳跃”现象, 主要与颗粒破碎、转动和翻越有关, 且“V 型跳跃”的幅度随着法向压力的增加而增加。

(2) 采用莫尔-库仑准则对土石混合体-基岩界面的抗剪强度进行了线性拟合, 结果表明: 含石率对土石混合体-基岩界面抗剪强度和抗剪强度指标 (c , φ) 的影响具有一致性, 总体趋势为随着含石率增加, 抗

剪强度和抗剪强度指标 (c , φ) 先增大后减小, 存在着最优含石率, 但内摩擦角 φ 变化不大, 在 38° 左右波动。

(3) 通过数值模拟探讨了含石率对土石混合体-基岩界面剪切破坏机理。结果表明: 剪切带呈波浪状, 含石率和法向压力对剪切带的分布和形态有显著影响, 含石率和法向压力越高, 剪切带就越厚; 剪切带内的块石破坏可以分为表面研磨、局部破碎和完全破碎 3 种模式; 含石率和法向压力都是影响相对破碎率 B_r 的原因, 具体表现为随着含石率和法向压力的增加, 块石相对破碎率不断增加。

参考文献:

- [1] 熊 炜. 秦巴山区软弱变质岩浅表层滑坡成因机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2012. (XIONG Wei. Study on the Cause Mechanism of Shallow Landslide of Weak Metamorphic Rock in the Qin-ba Mountainous Region[D]. Xi'an: Changan University, 2012. (in Chinese))
- [2] 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 Peng, SU Sheng-rui, MA Chi, 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))
- [3] 常德龙, 王孔伟, 李春波, 等. 宜昌城区魏家湾滑坡发育特征及稳定性评价[J]. 人民长江, 2016, 47(17): 48 - 52. (CHANG De-long, WANG Kong-wei, LI Chun-bo, et al. Development characteristics and stability evaluation of Weijiawan Landslide in Yichang urban area[J]. Yangtze River, 2016, 47(17): 48 - 52. (in Chinese))
- [4] 余绍维, 黄经秋. 攀枝花民用机场场区高填方边坡稳定性研究[J]. 有色矿山, 1999, 28(5): 45 - 49. (YU Shao-wei, HUANG Jing-qiu. Research on stability of high fill slope of Panzhihua airport[J]. Nonferrous Mines, 1999, 28(5): 45 - 49. (in Chinese))
- [5] 乌云飞. 秦巴山区土石混合体滑坡变形破坏机理研究: 以紫阳县滑坡为例[D]. 西安: 长安大学, 2012. (WU Yun-fei. Study on Deformation and Failure Mechanism of landslide of the Soil-Rock Mixture in the Qin-Ba Mountain Region —A Case Study of Landslide in Ziyang County[D]. Xi'an: Changan University, 2012. (in Chinese))
- [6] 沈明荣, 张清照. 规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 713 - 719. (SHEN Ming-rong, ZHANG Qing-zhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 713 - 719. (in Chinese))
- [7] 周 辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 结构面剪切破坏特性及其在滑移型岩爆研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1729 - 1738. (ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Characteristics of shear failure of structural plane and slip rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1729 - 1738. (in Chinese))
- [8] BABANOURI N, KARIMI NASAB S. Modeling spatial structure of rock fracture surfaces before and after shear test: a method for estimating morphology of damaged zones[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2015, 48(3): 1051 - 1065.
- [9] KANA D D, FOX D J, HSIUNG S M. Interlock/friction model for dynamic shear response in natural jointed rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1996, 33(4): 371 - 386.
- [10] 徐鼎平, 冯夏庭, 崔玉军, 等. 白鹤滩水电站层间错动带的剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2692 - 2703. (XU Ding-ping, FENG Xia-ting, CUI Yu-jun, et al. Shear behaviors of interlayer staggered zone at Baihetan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2692 - 2703. (in Chinese))
- [11] 杨忠平, 蒋源文, 李诗琪, 等. 土石混合体-基岩界面剪切力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1947 - 1954. (YANG Zhong-ping, JIANG Yuan-wen, LI Shi-qi, et al. Experimental study on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1947 - 1954. (in Chinese))
- [12] 艾英钵, 徐阳阳, 邱维邦. 土石混合料与岩石接触面强度特性模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 450 - 458. (AI Ying-bo, XU Yang-yang, QIU Wei-bang. Experimental study of strength behavior of gravel and rock interface[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 450 - 458. (in Chinese))
- [13] 董 云. 土石混合料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1269 - 1274. (DONG Yun. Experimental study on intensity character of rock-soil aggregate mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1269 - 1274. (in Chinese))

- [14] 舒志乐. 土石混合体微结构分析及物理力学特性研究[D]. 成都: 西华大学, 2007. (SHU Zhi-le. Study on Microstructure and Mechanical Characteristics of the Earth-Rock Aggregate[D]. Chengdu: Xihua University, 2007. (in Chinese))
- [15] 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 Ya-dong, YUE Lei, LI Shuo-biao. Experimental study on mechanical properties of soil-rock mixture containing water[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(1): 21 - 29. (in Chinese))
- [16] 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 Xin-rong, TU Yi-liang, WANG Peng, 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))
- [17] 欧阳振华, 李世海, 戴志胜. 块石对土石混合体力学性能的影响研究[J]. 实验力学, 2010, **25**(1): 61 - 67. (OUYANG Zhen-hua, LI Shi-hai, DAI Zhi-sheng. On the influence factors of mechanical properties for soil-rock mixture[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, **25**(1): 61 - 67. (in Chinese))
- [18] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 土石混合体三维细观结构随机重构及其力学特性颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 60 - 69. (ZHANG Qiang, WANG Xiao-gang, ZHAO Yu-fei, et al. 3D random reconstruction of meso-structure for soil-rock mixture and numerical simulation of its mechanical characteristics by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 60 - 69. (in Chinese))
- [19] 胡峰, 李志清, 胡瑞林, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体剪切带变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(3): 766 - 778. (HU Feng, LI Zhi-qing, HU Rui-lin, et al. Research on the deformation characteristics of shear band of soil-rock mixture based on large scale direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(3): 766 - 778. (in Chinese))
- [20] 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 Zhong-ping, LEI Xiao-dan, WANG Lei, 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))
- [21] CEN D F, HUANG D, REN F. Shear deformation and strength of the interphase between the soil-rock mixture and the benched bedrock slope surface[J]. Acta Geotechnica, 2017, **12**(2): 391 - 413.
- [22] 水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006[S]. 2006. (Code for Coarse -Graied Soil Tests for Hydropower and Water Conservancy Engineering: DL/T 5356—2006[S]. 2006. (in Chinese))
- [23] 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 Wen-jie, HU Rui-lin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, **36**(4): 50 - 56, 70. (in Chinese))
- [24] MEDLEY E, LINDQUIST E S. The engineering significance of the scale-independence of some Franciscan melanges in California, USA[M]// DAEMEN J K, SCHULTZ R A ed. Proceeding of the 35th US Rock Mechanics Symposium. Rotterdam: A A Balkema, 1995: 907 - 914.
- [25] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 48 - 51, 57. (WEI Hou-zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 48 - 51, 57. (in Chinese))
- [26] 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 Jian-yi, XU Dong-sheng, LIU Hua-bei. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(1): 93 - 102. (in Chinese))
- [27] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(5): 996 - 1007. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi, et al. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 996 - 1007. (in Chinese))
- [28] 董云, 柴贺军, 杨慧丽. 土石混填路基原位直剪与室内大型直剪试验比较[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2): 235 - 238. (DONG Yun, CHAI He-jun, YANG Hui-li. Comparison of shear test in site and lab large-scale shear test for rock-soil aggregate of roadbed[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(2): 235 - 238. (in Chinese))

- [29] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 4065 - 4072. (DENG Hua-feng, YUAN Xian-fan, LI Jian-lin, et al. Research on failure characteristics and determination method for shear strength of earth-rock aggregate in direct shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 4065 - 4072. (in Chinese))
- [30] 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 Zhong-ping, TIAN Xin, LEI Xiao-dan, 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))
- [31] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, **44**(7): 997 - 1010.
- [32] Itasca Consulting Group Inc. Particle Flow Code in 2 Dimensions (PFC^{2D}) Version 5.0[CP]. Minneapolis: Itasca Consulting Inc, 2018.
- [33] ZHANG S R, SUN B, WANG C, et al. Influence of intermediate principal stress on failure mechanism of hard rock with a pre-existing circular opening[J]. Journal of Central South University, 2014, **21**(4): 1571 - 1582.
- [34] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(4): 550 - 564.
- [35] 张社荣, 孙博, 王超, 等. 双轴压缩试验下岩石裂纹扩展的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3083 - 3091. (ZHANG She-rong, SUN Bo, WANG Chao, et al. Discrete element analysis of crack propagation in rocks under biaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3083 - 3091. (in Chinese))
- [36] 贾学明, 柴贺军, 郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2695 - 2703. (JIA Xue-ming, CHAI He-jun, ZHENG Ying-ren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2695 - 2703. (in Chinese))
- [37] 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 Xin-rong, TU Yi-liang, WANG Lin-feng, 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))
- [38] 董云, 柴贺军. 土石混合料剪切面分形特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(5): 1015 - 1020. (DONG Yun, CHAI He-jun. Experimental study on fractal character of shear surface of rock-soil aggregate mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(5): 1015 - 1020. (in Chinese))
- [39] 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 Yi-liang, LIU Xin-rong, REN Qing-yang, 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))
- [40] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177 - 1192.
- [41] 雷晓丹. 土石混合料剪切特性及块石破碎特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018. (LEI Xiao-dan. Study on Shear Properties and Rock Block Breakage Characteristics of Soil-Rock Mixtures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese))
- [42] 刘汉龙, 孙逸飞, 杨贵, 等. 粗粒料颗粒破碎特性研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, **40**(4): 361 - 369. (LIU Han-long, SUN Yi-fei, YANG Gui, et al. A review of particle breakage characteristics of coarse aggregates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, **40**(4): 361 - 369. (in Chinese))