

基于 PFC2D 的土石混合体直剪试验模拟

邱建强^{1,2}, 闫龙^{1,2*}, 张博³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了建立不同含石量土石混合体细观参数的高效标定方法, 提升直剪试验离散元模拟的准确性, 基于 PFC2D 程序, 结合 Python 编程实现蒙特卡洛随机块石生成, 构建了土石混合体数值试样。采用 cluster 颗粒集合体模拟不规则块石, 系统开展了块石与土体细观参数的标定研究, 提出了基于单轴拉伸、单轴压缩、双轴压缩与直剪试验的细观参数分级标定流程, 探究了含石量对土石混合体抗剪强度特性的影响。结果表明, 随着含石量的增大, 土石混合体的黏聚力先增大后减小, 在含石量为 60% 时达到峰值; 内摩擦角则持续上升。研究明确了接触模型中关键细观参数对宏观力学行为的影响规律, 模拟得到的内摩擦角、黏聚力与现场原位试验结果十分接近。

关键词: 土石混合体; 直剪试验; 颗粒流模型; 细观参数; 含石量

中图分类号: TU42

文献标识码: A

Simulation of Direct Shear Test of Soil-Rock Mixture Based on PFC2D

QIU Jianqiang^{1,2}, YAN Long^{1,2*}, ZHANG Bo³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: In order to establish an efficient calibration method for the microscopic parameters of soil-rock mixtures with different rock contents and improve the accuracy of the discrete element simulation of direct shear tests, numerical model samples of soil-rock mixtures were constructed based on the particle flow code in 2 dimensions (PFC2D) and Python programming to realize Monte Carlo random generation of rock blocks. A cluster particle aggregate was used to simulate irregular rock blocks, and a systematic study was conducted on the calibration of microscopic parameters between rock blocks and soil particles. A microscopic parameter grading calibration process based on uniaxial tension, uniaxial compression, biaxial compression, and direct shear tests was proposed. The influence of rock content on the shear strength characteristics of soil-rock mixtures was investigated. The results show that with increasing rock content, the cohesion of the soil-rock mixture initially rises and subsequently declines, peaking at 60% rock content, while the internal friction angle increases monotonically. The study has clarified the influence of key microscopic parameters in the contact model on macroscopic mechanical behavior, and the simulated internal friction angles and cohesion values are very close to the results of in-situ tests.

Key words: soil-rock mixture; direct shear test; particle flow model; microscopic parameters; rock content

我国青藏高原地区存在许多深切河谷的冰水堆积体边坡。冰水堆积体由基质软土和填充硬石构成, 块石分布随机且极不均匀, 基质软土因长期地质

作用具有一定的黏结性^[1-2]。这种土石混合体 (Soil-Rock Mixture, SRM) 的力学行为复杂^[3], 受含石量^[4]、颗粒级配^[5-6]、胶结程度等因素的影响显著。

收稿日期: 2026-01-19 修回日期: 2026-03-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (52109122); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (B240201050)

第一作者: 邱建强 (2001—), 男, 江西永丰人, 硕士研究生, 从事土石混合体数值模拟方面的研究。

* 通信作者: 闫龙 (1988—), 男, 宁夏西吉人, 博士, 副教授, 从事岩石力学及防灾减灾方面的研究。

原位试验可评估自然状态下岩土材料的剪切性能,但存在操作难度大、成本高和试验条件难控制等局限^[7-8]。为应对以上局限,部分学者开展了室内试验模拟 SRM 的失效模式^[9]。目前,常用的 SRM 剪切性能研究方法包括三轴试验和直剪试验。三轴试验可模拟不同应力路径,获取变形模量、泊松比和抗剪强度等力学参数,实用性强,但试验周期长、操作复杂^[10];直剪试验更易操作、周期短,可弥补三轴试验不足^[11-12]。在数值模拟方面,以有限元法^[13]和有限差分法^[14-15]为代表的连续介质方法能够高效率模拟 SRM 力学性能,但在处理土石接触界面的非线性问题、模拟真实岩块的形状方面存在局限,离散元法可有效解决以上问题^[16]。二维颗粒流代码(Particle Flow Code in 2 Dimensions, PFC2D)作为典型离散元法,已成为探索 SRM 剪切强度和变形特性的重要手段^[17-18],其计算结果可补充微观剪切行为。离散元数值模型的精度受岩块形状、加载方式和边界条件的影响显著,提高精度有助于更真实地反映岩体力学行为,但会降低模型计算效率。颗粒接触模型及接触细观参数是进行 PFC2D 数值试验的关键,细观参数标定工作较为繁琐^[19-21]。总之,利用 PFC2D 模拟直剪试验的效率和准确性均有待提升。

本文基于 PFC2D 建立了 SRM 直剪试验数值模型,利用 Python 语言实现随机块石生成与细观参数分级标定,分析数值与原位试验剪应力-剪切位移曲线差异的原因,揭示了含石量对 SRM 抗剪强度参数的影响规律。该方法有效提升了 PFC2D 模拟效率与精度,可为同类土石混合体离散元模拟提供参考。

1 随机块石模拟方法

1.1 随机块石建模

目前,不规则块石的建模理论已较为成熟。精准模拟实际块石形状及排布主要有 3 种方法:(1)通过 CT 扫描获得块石的三维模型^[15];(2)对现场拍摄的 SRM 图像进行二值化,从而区分块石^[1];(3)利用机器学习中的语义分割直接区分块石^[22]。

本研究基于实际块石统计结果,以蒙特卡洛方法为基础,利用 Python 语言实现随机块石的自动化建模。步骤如下:(1)随机生成包含颗粒粒径范围的基圆;(2)将基圆投入剪切盒内的随机位置;(3)随机生成顶点角度和半径因子,增加不规

则性;(4)基于随机角度和半径因子生成顶点并闭合多边形;(5)判断是否与其他多边形重叠,重叠则删除;(6)检查该组图形总面积是否满足要求。

SRM 通常含有超大粒径块石。为减小尺寸效应,原位直剪试验或室内直剪试验一般要求试样的最大颗粒粒径小于剪切盒尺寸的 1/5,故相关研究提出了缩尺试验方法^[23]。某工程原位直剪试验试样为边长 500 mm 的立方体,因尺寸限制,剔除了超径块石,最终得到数值试样的颗粒级配。本文将 100 mm 作为试样的最大粒径,土石阈值定为 5 mm。为区分块石和土体,本研究将粒径小于 5 mm 的土体用 1.5~2.5 mm 粒径颗粒表示,占比为 37.43%;5~10 mm 粒径的块石用 10 mm 粒径块石模拟,占比为 10.80%;粒径为 10~20 mm、20~40 mm、40~60 mm、60~100 mm 的块石占比分别为 13.83%、16.35%、13.87%和 7.69%。

1.2 随机块石模拟方式选择

PFC2D 内置的可用于模拟随机块石的常见方式有 4 种,具体选择哪种方式需要根据 SRM 的实际情况综合考虑:(1)ball(大颗粒球体),用于模拟形状接近圆的物体,不适用于形状各异的块石^[5];(2)rblock(刚性块体),用于模拟形状规则且绝对刚性的物体,如墙体、模具或形状简单的块体^[21];(3)clump(刚性簇),用于模拟具有固定形状和一定棱角的颗粒,如砂卵石、块石等^[22];(4)cluster(柔性簇),用于模拟可破碎和可变形的颗粒,如混凝土骨料、脆性岩石等。

相较于 clump 和 rblock,cluster 建模难度更小,可直接将导入的 geometry 内部颗粒分组为“rock”,并赋予不同细观参数进行模拟。cluster 更适用于需批量建模、考虑母岩强度效应的工况以及探究含石量和块石级配对试验结果的影响。故本研究采用 cluster 模拟随机块石,当块石间黏结强度足够大时,内部颗粒的相对位移和转动可忽略不计。

数值试验的试样尺寸为 500 mm×500 mm,粒径为 1.5~2.5 mm 的圆形颗粒以 0.15 孔隙率随机分布在剪切盒内,共生成 16 576 个颗粒。将建好的块石几何轮廓以 geometry 形式导入数值模型,将 geometry 内部颗粒分组为“rock”,其余为“soil”。最终生成的数值模型见图 1(b),图中彩色团块代表块石,背景中颜色较浅且分布均匀的区域为土颗粒。

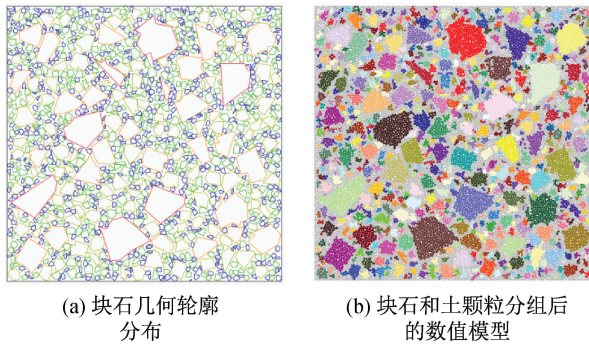


图1 数值模型随机块石模拟

Fig. 1 Random rock block simulation of numerical model

2 块石和土的细观参数选择

2.1 接触本构模型的选取与赋予

颗粒流方法通过接触本构模型模拟材料力学特性,PFC2D 提供 10 种内嵌接触模型,基本接触本构模型有 3 类:(1)接触刚度模型,包括线性模型和赫兹模型,黏聚力较小的砂类土适合采用线性模型^[18];(2)滑动模型;(3)黏结模型,包括接触黏结模型及平行黏结模型,岩石接触研究大多采用平行黏结模型^[19]。

本研究选用线性模型和平行黏结模型。平行黏结模型用于模拟块石颗粒间(石-石)接触;线性模型用于模拟土颗粒间(土-土)、土颗粒与块石颗粒间(土-石)接触及颗粒与墙体间(球-墙)接触,其中,土-土接触和土-石接触赋予的参数相同,球-墙接触赋予的参数与球-球接触不同。涉及的细观参数共 8 个,线性部分包括接触有效模量 e_{mod} 、法向刚度与切向刚度比 k_{ratio} 、摩擦系数 fric ,平行黏结部分包括黏结有效模量 pb_{emod} 、刚度比 $\text{pb}_{\text{kratio}}$ 、法向黏结强度 pb_{ten} 、切向黏结强度 pb_{coh} 。

接触赋予步骤如下:(1)对所有接触均赋予线性模型,并设法向刚度为 $5 \times 10^9 \text{ Pa}$,对模型进行预压,使颗粒接触更充分、紧密;(2)使用“`cmat default`”命令,对“`ball-facet`”赋予球-墙接触参数,对“`ball-ball`”接触赋予土-石接触参数;(3)使用“`cmat add 1`”命令,对“`rock`”颗粒组内的“`ball-ball`”接触赋予石-石接触参数;(4)使用“`cmat add 2`”命令,对“`soil`”颗粒组内的“`ball-ball`”接触赋予土-土接触参数。

2.2 块石颗粒间的细观参数标定

各细观参数对颗粒宏观力学参数均有影响,但影响程度不同。平行黏结模型细观参数标定流程如下:(1)分别模拟单轴拉伸试验、单轴压缩试

验,通过试验应力-应变曲线中的直线段斜率分别标定 pb_{emod} 、 e_{mod} ;(2)模拟双轴压缩试验,取名义应变 1/2 处泊松比标定细观参数刚度比 k_{ratio} 和 $\text{pb}_{\text{kratio}}$;(3)定义法向与切向黏结强度比值为黏结比(取值为 1),通过单轴压缩试验得到的单轴抗压强度标定 pb_{coh} 和 pb_{ten} ;(4)微调细观参数,使宏观参数满足要求。

岩石宏观参数与细观参数间存在非线性、非唯一的映射关系,在给定一组目标宏观力学性能时,可能有多组细观参数组合可复现相近的宏观应力-应变响应,即存在“多解性”问题。当数值模拟结果与试验数据出现偏差时,本文依据以下逻辑调整:(1)若破坏模式与试验不符(如试验呈剪切破坏而模拟呈张拉破碎),需调整法向与切向黏结强度比值;(2)若峰值强度与弹性模量偏低,优先提高法向和切向黏结强度使模拟的峰值强度达到目标值,再调整接触有效模量使弹性模量达到目标值;(3)若脆性特征过强,即峰后曲线软化过快,则需适当降低摩擦系数,以促进微裂纹扩展与能量耗散;(4)每次仅调整对目标响应最敏感的 1~2 个参数,避免耦合干扰降低调试效率。

微调后石-石接触主要细观参数 pb_{emod} 、 e_{mod} 、 pb_{coh} 、 pb_{ten} 取值分别为 1.2×10^{10} 、 3.0×10^9 、 1.5×10^7 、 $1.5 \times 10^7 \text{ Pa}$, k_{ratio} 取值为 3.5。该组参数仅表征单体块石的力学特性,受模型其他细观参数及 SRM 中块石粒径效应的复杂影响,故不能直接作为最终取值。

2.3 土颗粒间细观参数的标定

土颗粒间的细观参数有 3 个,即 e_{mod} 、 k_{ratio} 和 fric ,可通过 SRM 直剪试验标定。其中, e_{mod} 主要影响剪应力-剪切位移曲线近弹性阶段的剪切模量, k_{ratio} 对试验结果影响较小,摩擦系数 fric 主要影响内摩擦角。另外,块石的 pb_{coh} 主要影响剪应力峰值和黏聚力,黏结比主要影响试样的破坏模式。根据现场原位直剪试验得到的 200、400、600 kPa 法向应力下的剪应力-剪切位移曲线和块石细观参数,标定土颗粒的细观参数。为快速标定细观参数,初始细观参数设置如下:平行黏结模型中 e_{mod} 和 pb_{emod} 相同, pb_{ten} 和 pb_{coh} 相同;球-墙接触的 e_{mod} 大于石-石接触。

采用“试错法”不断调整各接触间的细观参数,当数值试验结果与原位试验结果达到最大相似度时完成标定。各接触间的细观参数如表 1 所示。土-土、石-石及球-墙接触被赋予不同的 e_{mod} ,

各接触在试样中的分布见图 2, 图中不同颜色代表不同接触类型的接触有效模量 e_{mod} 。

表 1 PFC 模型细观参数

Tab. 1 Microscopic parameters of PFC model		
类别	参数	参数值
球-墙接触	e_{mod}/Pa	5.0×10^9
	kratio	0.0
	fric	0.0
土-土接触 (土-石接触)	e_{mod}/Pa	2.5×10^8
	kratio	1.5
	fric	0.6
石-石接触	e_{mod}/Pa	3.0×10^9
	kratio	3.5
	fric	0.6
	$\text{pb_}e_{\text{mod}}/\text{Pa}$	3.0×10^9
	pb_kratio	3.5
	$\text{pb_ten}/\text{Pa}$	1.0×10^5
	$\text{pb_coh}/\text{Pa}$	1.0×10^5
	$\text{pb_fa}/(^{\circ})$	60.0

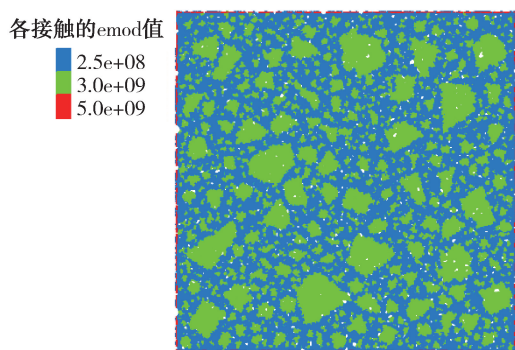


图 2 数值模型中各接触的 e_{mod} 值

Fig. 2 Emod values of each contact in the numerical model

3 试验结果分析

3.1 数值试验与原位试验结果对比

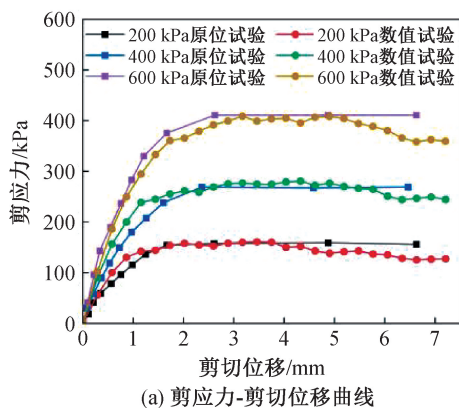
数值试验与原位试验结果对比见图 3。数值

试验和原位试验的剪应力-剪切位移曲线直线段的斜率大致相同, 峰值剪应力和对应的峰值剪切位移基本一致。峰值剪应力-法向应力曲线斜率基本相同。法向应力越大, 颗粒间结合越紧密, 咬合作用越强, 导致剪应力-剪切位移曲线的线弹性段越长, 峰值剪应力及对应的剪切位移也越大。这一规律与其他 SRM 直剪试验离散元模拟结果一致。

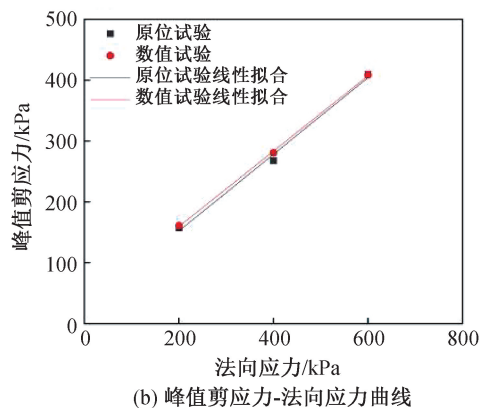
数值试验和原位试验结果差异主要体现在: (1) 受离散元模型中颗粒接触的非连续性与动态演化特性影响, 数值试验剪应力-剪切位移曲线峰后出现波动; (2) 数值试样在峰后接触失效, 结构失稳导致剪应力-剪切位移曲线呈下降趋势, 而原位试验因介质连续性可维持残余强度, 曲线趋于平缓; (3) 数值试验曲线直线段斜率显著大于原位试验, 且不同法向应力下斜率差异更小。这是因为 PFC2D 模型是对 SRM 细观颗粒力学行为的简化表征, 数值试样的最小颗粒粒径为 1.5 mm, 难以完全复现原位试验中复杂的地质赋存条件与结构特征; 数值试验的边界更规则且加载更均匀, 而原位试验中土体边界不规则及加载过程中应力、应变非均匀分布, 使原位试验的变形阻力更复杂; 数值模拟中对颗粒接触参数的设定是理想化的, 与原位试验 SRM 的力学参数存在偏差。

3.2 含石量对土石混合体抗剪强度的影响

含石量是影响 SRM 抗剪强度特性的最主要因素^[3-4]。统计发现, 冰水堆积体中粒径大于 5 mm 的颗粒占比范围为 50%~85%^[24]。为探究含石量对 SRM 抗剪强度的影响, 本文拟生成含石量为 40%、50%、60%、70%、80% 的数值试样(图 4), 开展直剪试验模拟研究。试样黏聚力及内摩擦角的对比见图 5。



(a) 剪应力-剪切位移曲线



(b) 峰值剪应力-法向应力曲线

图 3 数值试验及原位试验试验结果对比

Fig. 3 Comparison of numerical and in-situ test results

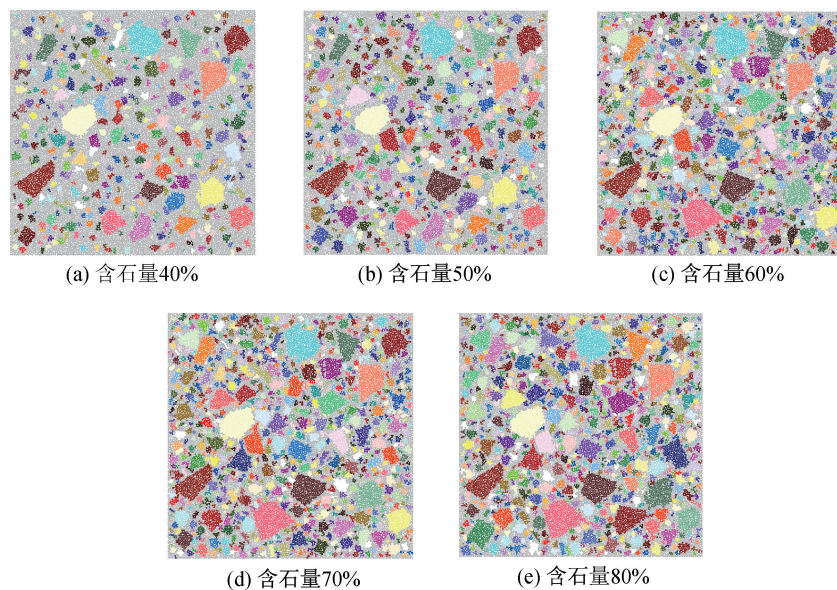


图4 不同含石量的数值试样

Fig. 4 Numerical model samples with different rock contents

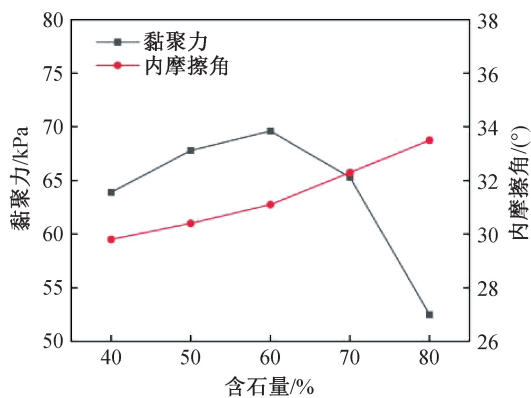


图5 含石量对抗剪强度指标的影响

Fig. 5 Influence of rock content on shear strength characteristics

由图5可以看出,含石量可显著影响SRM力学性能。黏聚力随含石量的增大先增大后减小,当含石量为60%时达到峰值。这是因为当含石量较低($\leq 60\%$)时,块石在土体中形成“骨架-填充”结构,块石间的嵌锁作用与颗粒间接触的强化效应共同提升了黏聚力;当含石量过高($\geq 60\%$)时,土体中块石过度密集,颗粒间有效接触面积减小,局部应力集中加剧,而力学特性受颗粒间摩擦特性影响,导致黏聚力衰减^[6]。

内摩擦角随含石量的增大呈持续上升趋势,当含石量由60%增至80%时,增幅更显著。这是由于含石量增大时,块石在剪切过程中的“嵌挤-咬合”作用愈发显著,粗颗粒间的机械联锁效应不断增强,有效提升了土体抵抗剪切变形的能力,内摩擦角持续增大^[3]。

本研究数值试验得到的含石量对SRM抗剪强度的影响规律,与现有室内试验和原位试验的结论基本一致^[5],验证了本文基于PFC2D建立的数值模型的可靠性。但受数值模型理想化假设的影响,本研究结果与现有试验存在定量和局部特征差异:(1)抗剪强度参数定量值偏低;(2)含石量对内摩擦角的影响呈更显著的线性规律;(3)细观响应更简单,未出现块石破碎等复杂行为。此类差异源于数值模型简化假设与土体实际特征的本质区别,这也是离散元模拟的共性问题。

4 结论

基于PFC2D程序,本文开展了土石混合体原位直剪试验细观参数标定,针对随机块石的模拟、接触模型的选取与接触的赋予、细观参数的初始赋值、细观参数的微调提出了相应的处理方法,并探究了不同含石量对土石混合体抗剪强度参数的影响,得出主要结论如下:

1) 采用cluster颗粒集合体模拟不规则块石,结合Python语言实现蒙特卡洛随机投放,可高效构建贴合冰水堆积体颗粒级配的土石混合体数值试样,满足多组试样批量建模与力学特性对比分析需求。

2) 本文建立了细观参数分级标定流程,明确了不同接触模型的选取与参数赋值原则,提出了细观参数标定调整的方法,模拟所得的抗剪强度参数与原位试验结果较为吻合,验证了该流程的有效性。

3)随着含石量的增大,土石混合体的黏聚力先增大后减小,当含石量为 60%时达到峰值,内摩擦角则持续上升。

参考文献:

- [1] 石崇,王盛年,刘琳,等. 基于数字图像分析的冰水堆积体结构建模与力学参数研究[J]. 岩土力学,2012,33(11):3393-3399.
Shi Chong, Wang Shengnian, Liu Lin, et al. Structure modeling and mechanical parameters research of outwash deposits based on digital image analysis[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(11):3393-3399.
- [2] 涂国祥,黄润秋,邓辉,等. 某巨型冰水堆积体强度特性大型常规三轴试验[J]. 山地学报,2010,28(2):147-153.
Tu Guoxiang, Huang Runqiu, Deng Hui, et al. Study on the strength and deformation behavior of a huge outwash deposits based on large-scale triaxial tests[J]. Journal of Mountain Science,2010,28(2):147-153.
- [3] 赵明华,刘建军,罗宏,等. 土石混填体抗剪强度特性及影响因素的试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(4):965-972.
Zhao Minghua, Liu Jianjun, Luo Hong, et al. Experimental studies of shear strength characteristics and influencing factors of soil-rock aggregate mixture[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(4):965-972.
- [4] 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 Zhongping, Lei Xiaodan, 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.
- [5] 罗亚琼,张超,马婷婷. 考虑含石量与颗粒级配特征影响的土石混合体抗剪强度特性研究[J]. 公路,2022,67(12):47-53.
Luo Yaqiong, Zhang Chao, Ma Tingting. Research on shear strength characteristics of soil-rock mixture considering the influence of rock content and particle gradation[J]. Highway,2022,67(12):47-53.
- [6] 王涛,朱俊高,刘斯宏. 不同细料含量土石混合料塑性行为离散元模拟[J]. 力学学报,2022,54(4):1075-1084.
Wang Tao, Zhu Jungao, Liu Sihong. Dem simulation on plasticity behavior of soil-rock mixtures with different fine contents[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2022,54(4):1075-1084.
- [7] Zhang Zhenping, Sheng Qian, Fu Xiaodong, et al. An approach to predicting the shear strength of soil-rock mixture based on rock block proportion[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2020,79(5):2423-2437.
- [8] Gao Wei, Iqbal J, Hu Ruilin. Investigation of geomechanical characterization and size effect of soil-rock mixture:a case study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2021,80(8):6263-6274.
- [9] Zhou Zhong, Xing Kai, Yang Hao, et al. Damage mechanism of soil-rock mixture after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Central South University,2019,26(1):13-24.
- [10] Yao Yongsheng, Li Jue, Ni Junjun, et al. Effects of gravel content and shape on shear behaviour of soil-rock mixture:experiment and DEM modelling[J]. Computers and Geotechnics,2022,141:104476.
- [11] Dang Wengang, Konietzky H, Frühwirt T. Rotation and stress changes on a plane joint during direct shear tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2016,89:129-135.
- [12] Tu Yiliang, Ren Siyu, Li Lushan, et al. Comparative analysis on shear mechanical properties of soil-rock mixture under direct shear and simple shear tests[J]. Construction and Building Materials,2024,444:137830.
- [13] Zhang Yusen, Zheng Hong, Lin Shan. Preserved structure modeling of soil-rock mixtures and physical cover generation based on finite element meshes[J]. Engineering Geology,2023,323:107225.
- [14] Zhao Lianheng, Huang Dongliang, Zhang Shuaihao, et al. A new method for constructing finite difference model of soil-rock mixture slope and its stability analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,138:104605.
- [15] Li Changsheng, Zhang Dan, Du Shasha, et al. Computed tomography based numerical simulation for triaxial test of soil-rock mixture[J]. Computers and Geotechnics,2016,73:179-188.
- [16] Xu Wenjie, Wang Shi, Zhang Haiyang, et al. Discrete element modelling of a soil-rock mixture used in an embankment dam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2016,86:141-156.
- [17] Gao Wenwei, Yang Hairong, Hu Ruilin. Soil-rock mixture slope stability analysis by microtremor survey and discrete element method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2022,81(3):121.
- [18] 任明辉,赵光思,浦海,等. 无黏性松散土石混合体剪切特性的结构效应及强度模型构建[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(7):1707-1721.
Ren Minghui, Zhao Guangsi, Pu Hai, et al. Structural effects of shearing properties of loose cohesionless soil-rock mixture and development of strength model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(7):1707-1721.
- [19] 郝保钦,张昌锁,王晨龙,等. 岩石 PFC2D 模型细观参数确定方法研究[J]. 煤炭科学技术,2022,50(4):132-141.
Hao Baoqin, Zhang Changsuo, Wang Chenlong, et al. Study on determination micro-parameters of rock PFC2D

- model[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 132-141.
- [20] 陈鹏宇,孔莹,余宏明. 岩石单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数标定研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1240-1249.
- Chen Pengyu, Kong Ying, Yu Hongming. Research on the calibration method of microparameters of a uniaxial compression PFC^{2D} model for rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1240-1249.
- [21] 曹雪山,赖喜阳,额力素,等. PFC2D 中平行粘结参数对直剪强度参数的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019, 36(3): 16-20.
- Cao Xueshan, Lai Xiyang, E Lisu, et al. Study on the influence of parallel bond parameters in PFC2D on the direct shear strength parameters[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 36(3): 16-20.
- [22] 张新松,李长圣,钟军,等. 基于神经网络的土石混合体 CT 图像分割及三维重建[J]. 工程地质学报, 2025, 33(3): 1230-1239.
- Zhang Xinsong, Li Changsheng, Zhong Jun, et al. CT image segmentation and 3D reconstruction of soilrock mixture based on neural network[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(3): 1230-1239.
- [23] 傅华,韩华强,凌华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2645-2649.
- Fu Hua, Han Huaqiang, Ling Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory tests on rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2645-2649.
- [24] 王有林,赵志祥,许晓霞,等. 西藏某水电站坝前大型冰水堆积体稳定性研究[J]. 西北水电, 2021(6): 38-43.
- Wang Youlin, Zhao Zhixiang, Xu Xiaoxia, et al. Study on the stability of a large outwash deposits in front of a power station dam in Tibet[J]. Northwest Hydropower, 2021(6): 38-43.
- (责任编辑 张爱丽)
-
- (上接第 63 页)
- [18] 丁瑶,田砾,刘孝华,等. 氯离子环境下混凝土裂缝的自愈合行为及对氯离子传输的抑制作用[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2025, 42(6): 21-28.
- Ding Yao, Tian Li, Liu Xiaohua, et al. The self-healing behavior of concrete cracks under chloride ion environment and its impact on the inhibitory effect of chloride ion transport[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2025, 42(6): 21-28.
- [19] 张腾腾,王传林,张宇轩,等. 粉煤灰掺量对海水海砂高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1677-1688.
- Zhang Tengting, Wang Chuanlin, Zhang Yuxuan, et al. Effect of fly ash content on performance of high performance concrete with seawater and sea sand[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5): 1677-1688.
- [20] 王鹏刚,莫芮,隋晓萌,等. 混凝土中氯盐-硫酸盐耦合侵蚀的化学-损伤-传输模型研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 512-521.
- Wang Penggang, Mo Rui, Sui Xiaomeng, et al. Chemo-damage-transport model of combined chloride-sulfate attack in concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(2): 512-521.
- [21] 郭丽萍,费香鹏,曹园章,等. 氯离子与硫酸根离子在水化硅酸钙表面竞争吸附的分子动力学研究[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8034-8041.
- Guo Liping, Fei Xiangpeng, Cao Yuanzhang, et al. Molecular kinetics of competitive adsorption of chloride and sulphate ions on C—S—H surface[J]. Materials Reports, 2021, 35(8): 8034-8041.
- [22] Wang Penggang, Mo Rui, Zhou Xiangming, et al. A chemo-thermo-damage-transport model for concrete subjected to combined chloride-sulfate attack considering the effect of calcium leaching[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306: 124918.
- [23] 董瑞鑫,申向东,薛慧君,等. 干湿循环与风沙吹蚀作用下风积沙混凝土的抗硫酸盐耐久性[J]. 材料导报, 2020, 34(20): 20053-20060.
- Dong Ruixin, Shen Xiangdong, Xue Huijun, et al. Sulfate durability of aeolian sand concrete under dry-wet cycles and sand blowing[J]. Materials Reports, 2020, 34(20): 20053-20060.
- [24] 余亮,傅平丰,邓威,等. 联合活化多元辅助胶凝材料对蒸养混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3059-3067.
- She Liang, Fu Pingfeng, Deng Wei, et al. Effect of combined activation multiple supplementary cementitious material on performance of steamed concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(9): 3059-3067.
- [25] 马东,王成生,周建国,等. 粉煤灰掺量对 HDCC 力学及收缩性能的试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 60-66.
- Ma Dong, Wang Chengsheng, Zhou Jianguo, et al. Experimental study on the effect of fly ash content on the mechanical and shrinkage properties of HDCC[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(4): 60-66.
- (责任编辑 张爱丽)