

夹层泥化粗粒土三轴试验的颗粒流模拟

李鑫,肖拥军*,王栋,陈余生

(湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为探讨三峡库区软弱夹层泥化形成粗粒土的力学特性,特别是其黏聚力和内摩擦角的变化规律,采用颗粒流软件 PFC3D(Particle Flow Code 3D)对泥化粗粒土进行三轴模拟试验分析,以球形颗粒作为基础单元,针对 1 mm 以下的细颗粒采用等质量替换的方法,适当减少颗粒数量以提高计算效率.当分维数为 2.312 时,随着球形颗粒最大粒径从 20 mm 降低到 10 mm 和 5 mm,模拟试样的黏聚力和内摩擦角均有所减小.设置由 4 个球形颗粒组成的近四面体颗粒簇时,得到的模拟粗粒土试样黏聚力明显高于球形颗粒的试验结果,同时内摩擦角也有显著增加.随着泥化粗粒土分维数的增大,模拟试样的黏聚力显著增加,而内摩擦角则有所减小.此外,在四面体颗粒模型中考虑夹层泥化粗粒土中细颗粒的流失时,发现抗剪强度随着细颗粒流失量的增加而降低.研究结果表明,泥化粗粒土的力学性质与颗粒形态及其分维数密切相关,颗粒形态的调整和细颗粒的流失对抗剪强度有显著影响.该研究可为滑坡的防治提供理论依据和参考.

关键词:软弱夹层;泥化粗粒土;颗粒流模拟;抗剪强度

中图分类号:P642

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)01-0057-06

Particle Flow Simulation of Triaxial Shear Test of Coarse Grained Soil Formed by the Argillization of Weak Interlayers

LI Xin, XIAO Yongjun, WANG Dong, CHEN Yusheng

(School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of coarse-grained soil formed by the mudification of weak interlayers in the Three Gorges Reservoir Area, particularly focusing on the variations in its cohesion and internal friction angle, the particle flow software PFC3D (Particle Flow Code 3D) is employed to conduct triaxial simulation tests on mudified coarse-grained soil, using spherical particles as the basic unit. For fine particles smaller than 1 mm, an equal-mass replacement method is utilized to reduce the number of particles appropriately to improve computational efficiency. When the fractal dimension is 2.312, as the maximum diameter of the spherical particles decreases from 20 mm to 10 mm and 5 mm, both the cohesion and internal friction angle of the simulated samples decrease. When using a nearly tetrahedral particle cluster composed of four spherical particles, the cohesion of the simulated coarse-grained soil sample is significantly higher than the results obtained with spherical particles, while the internal friction angle also notably increases. As the fractal dimension of the mudified coarse-grained soil increases, the cohesion of the simulated samples significantly increases, whereas the internal friction angle decreases. Additionally, when considering the loss of fine particles within the interlayer of mudified coarse-grained soil in the tetrahedral particle model, it is found that the shear strength decreases with the increase in the amount of fine particle loss. The research findings indicate that the mechanical properties of mudified coarse-grained soil are closely related to particle shape and its fractal dimension, and adjustments in particle shape and the loss of fine particles have a significant impact over shear strength. The research can

收稿日期:2023-07-08

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4298)

*通信作者, E-mail: yongjunxiao2002@126.com

provide theoretical support and reference for prevention and control of landslide.

Keywords: weak interlayer; argillaceous coarse-grained soil; particle flow simulation; shear strength

软弱夹层是指夹在相对坚硬岩层中呈层状或条带状的岩层,在构造作用和地下水作用下发生结构变化,逐渐泥化为含粗颗粒的土体,也可能演变为斜坡滑坡的滑带.肖拥军等^[1]研究发现巴东县白土坡斜坡巴东组第三段发育有贯通性软弱夹层,在构造剪切和地下水的共同作用下进一步泥化为碎石夹泥或黏土夹碎石;郑颖人等^[2]总结发现三峡库区滑坡滑带土中夹有不等量的碎石;江泊洵等^[3]通过CT扫描技术获取三峡库岸原状滑带土的内部颗粒分布,并初步判断其属土-石混合物;叶火炎等^[4]以黄土坡滑坡的滑带土为研究对象,认为颗粒级配分维数对滑带土的强度参数和内部结构有显著的影响.《土工试验方法标准》要求,采用直接剪切试验确定细粒土或砂类土扰动样土体强度参数时,需选取2 mm以下的颗粒制作试验样品^[5].可见室内直接剪切试验分析得到的夹层泥化含砾土强度参数与其实际的强度参数存在一定的差别.《滑坡防治工程勘察规范》也这样处理,当滑带土粗粒含量较高时,若未进行原位大面积直剪试验,粗粒土抗剪强度综合取值时应将室内快剪试验得出的内摩擦角乘以1.15~1.25的增大系数^[6].

大型剪切仪器的应用和发展对粗粒土强度和变形特性的研究提供了理论和技术支持,但对试验设备和样品的条件要求较高.CHOI等^[7]、陈晓斌^[8]使用真三轴仪在不同应力状态下对粗粒土的强度和变形性质开展深入研究,结果表明,围压和轴向总应变对粗粒土的剪胀性有显著的影响;褚福永等^[9]通过粗粒土的大三轴固结排水剪切试验探讨粗粒土剪胀因子与强度特性的关系;杨运林^[10]通过大型直剪试验研究含石量对粗粒土强度参数的影响;胡万雨等^[11]通过对粗粒土的大型直剪试验得出颗粒级配和粒径对粗粒土的破碎率和剪切位移影响很大;吴月旭等^[12]利用大型三轴剪切仪分析不同围压和初始干密度下巴东三中滑坡滑带土的物理力学特性,发现剪切破坏与围压之间存在着密切的关联;王永鑫^[13]利用大型真三轴仪进行多次剪切试验,探究粗粒土在不同围压和主应力条件下的剪胀性和抗剪强度特性,并且结合颗粒筛分实验,发现颗粒破碎会对粗粒土的抗剪强度产生重要影响.

土体是由松散的土颗粒组成的,土体宏观变形是由土颗粒间的位置变化引起的,PFC(Particle Flow Code)颗粒流方法的优点在于能够很好地解决非连续介质的数值模拟问题.刘小清^[14]模拟5种不同级配的粗粒土三轴剪切试验,总结了颗粒级配对粗粒土强度特性的影响;徐永福^[15]模拟研究了粗粒土直剪试验中颗粒破碎和不破碎的剪切强度以及剪胀性;王晓帅等^[16]建立粗粒土的离散元数值模拟模型,结合室内大型直剪试验,揭示了剪切过程中剪切带的形成机理;郑博宁等^[17]基于CT扫描技术,建立含砾滑带土的三轴剪切模型,分析了砾石对滑带土变形和破坏的影响.综上所述,PFC作为一种细观分析方法,可以用来反映泥化粗粒土的细观特征,从而揭示其宏观物理力学特征,这是目前室内试验很难做到的.本文结合分形理论,以不同分维数下的颗粒级配生成颗粒流模型,模拟研究软弱夹层泥化过程中细观力学特性的变化.

1 软弱夹层泥化粗粒土样品特征

三峡库区的滑坡分布特征揭示三叠系中统巴东组为易滑地层,巴东组第三段岩体中发育多层软弱夹层,黄土坡深层滑坡体原岩对应巴东组第三段上部地层,此处软弱夹层发育较密集.为了充分研究黄土坡滑坡滑带的空间分布、成因分析、物质组成以及变形特征,中国地质大学先后进行了钻孔勘察和大型综合野外试验场的建设,通过大型试验隧洞揭露,临江1号滑坡体中存在双层滑带结构,次级滑带靠近临江1号滑坡西部,而主滑带靠近东部.主滑带和次级滑带物质组成均为粉质黏土夹磨圆度较好的碎石、碎屑.在主隧洞和三号支洞揭露的滑床基岩岩层中,软弱夹层普遍发育,以粉质黏土夹碎石、碎石土为主.

本文研究中的夹层泥化粗粒土取自三峡库区巴东库岸巴东组第三段上部岩体,可对应黄土坡滑坡滑床的软弱夹层.该泥化夹层样大部分颗粒粒径集中在2 mm以上,碎石含量较多,大于2 mm的颗粒质量占80%,且泥化夹层样粒径小于0.075 mm的颗粒仅占土体总质量的0.033%,为碎石土中的砾类土^[18].根据

分维数计算原理,前期研究得到该泥化夹层的颗粒质量-粒径分布分维数为 2.312^[19].

2 颗粒流模型参数标定

PFC3D 以球形颗粒作为基础单元,可以模拟分析颗粒的动态行为和应力状态.本文通过模拟泥化粗粒土的三轴剪切试验分析其抗剪强度.建立离散元颗粒流数值模型时,如果完全按照室内筛分实验得到的颗粒级配生成相同数量的颗粒试样,就会出现细颗粒的建模问题,虽然细颗粒在试样中所占的质量分数小,但其生成的颗粒数量很多,严重影响计算机的运行效率.因此,根据模拟需求选择合理的颗粒生成方法,并尽可能使模拟效果不受影响,一直是学者研究的一个重点.张志华^[20]采用加权平均数法,通过控制颗粒最大最小半径比达到减少颗粒数的目的;尹婕^[21]在模拟中采取适当放大颗粒平均粒径的方法;曹智^[22]提出“等质量逐级替换最细颗粒”的级配修正方法.本文采用等质量替换 1 mm 以下细颗粒的方法,在不影响模拟效果的前提下提高模拟效率.根据三轴剪切试验规范的要求,本文试验中试样直径为最大颗粒粒径的 5 倍,试样高度为试样直径的 2 倍.

本文采用线性接触黏结模型,模型细观控制参数选取颗粒接触模量、颗粒法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s 、接触处的法向黏结强度和切向黏结强度、颗粒摩擦系数.在 PFC 颗粒流模拟中,张志华^[20]得出了颗粒接触模量、颗粒法向刚度和颗粒半径的关系,根据颗粒半径的大小赋予每个颗粒不同的法向刚度 k_n 的取值,法向刚度的取值确定之后,又可结合颗粒接触刚度比 k_n/k_s 来确定颗粒切向刚度 k_s 的取值.

本文基于巴东组软岩碎屑土夹层室内三轴试验的应力-应变曲线和体应变曲线^[23],在 100, 200, 300 kPa 围压下的弹性模量取值分别为 7.7×10^7 , 1.26×10^8 , 1.26×10^8 Pa,孔隙率为 0.2,颗粒间法向接触刚度为 2.4×10^4 Pa,颗粒间切向接触刚度为 2×10^3 Pa,土颗粒密度为 $1850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,模型墙体刚度取颗粒刚度的 100 倍,摩擦系数为 0.7,不断调试模型参数,使室内试验的应力-应变曲线和数值模拟的应力-应变曲线趋于一致(见图 1),并将其峰值强度作为模拟试验的参数取值.

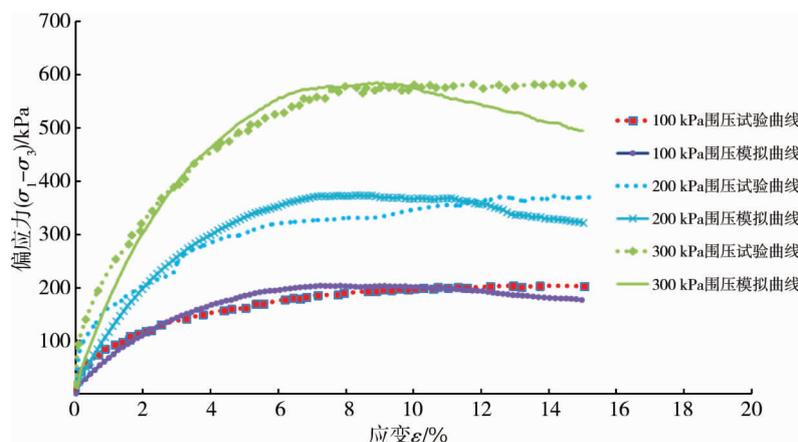


图 1 不同围压下室内试验与数值模拟试验的应力-应变曲线

3 颗粒流模拟对比分析

3.1 球形颗粒的泥化粗粒土颗粒流模拟

为了研究颗粒最大粒径变化对泥化粗粒土强度的影响,试验中选取最大粒径为 20, 10, 5 mm 的颗粒,生成分维数为 2.312 的颗粒料模型.将颗粒最小粒径固定为 1 mm,并将小于最小粒径的颗粒修正后,得到模型最终的颗粒级配,生成的最大粒径为 20, 10, 5 mm 的颗粒料模型如图 2 所示,试样直径为最大颗粒粒径的 5 倍.

粗粒土按分维数为 2.312 和最大粒径为 20, 10, 5 mm 控制下的颗粒级配生成颗粒料模型,最终模拟得到最大粒径为 20, 10, 5 mm 的颗粒料在不同围压下的应力-应变曲线,如图 3 所示.从图 3 可以看

出,泥化粗粒土的应力-应变曲线呈现应变软化特征.在相同围压下,泥化粗粒土最大粒径减小会导致其峰值强度降低.

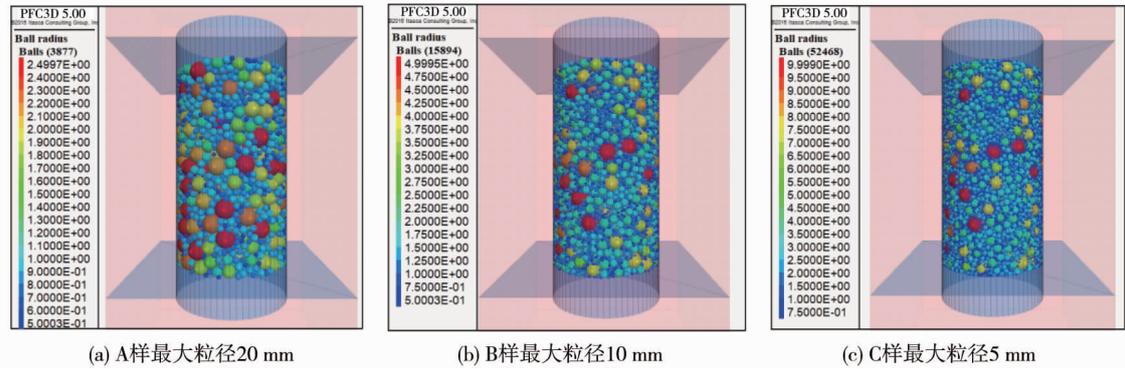


图 2 不同最大粒径颗粒料模型

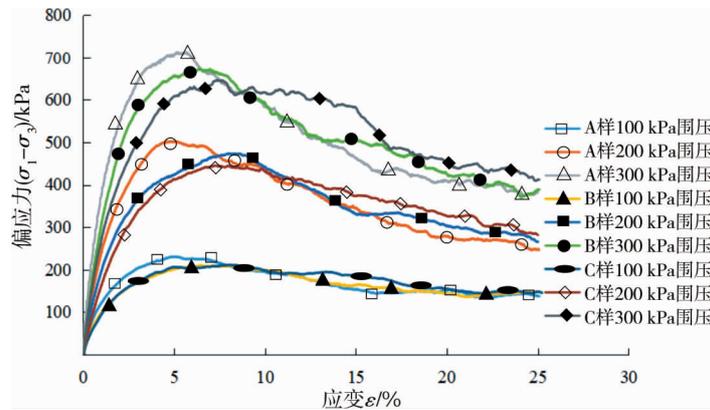


图 3 最大粒径变化时球形颗粒料的应力-应变曲线

模拟分析最大粒径 20,10,5 mm 且分维数为 2.312 的粗粒土颗粒料三轴剪切应力-应变关系,得到泥化粗粒土颗粒最大粒径变化时的三轴剪切试验强度参数(见图 4),结果表明泥化粗粒土分维数一定时,随着颗粒最大粒径减小,其黏聚力和内摩擦角也逐渐减小.

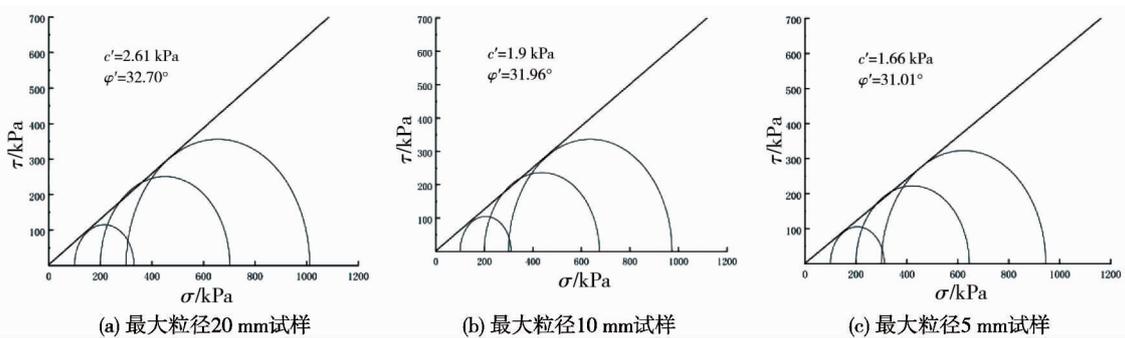


图 4 最大粒径变化下的球形颗粒料三轴模拟的应力摩尔圆关系

3.2 泥化粗粒土颗粒流模拟

3.2.1 泥化粗粒土颗粒形状分析

泥化夹层的颗粒形状是其重要的特征参数之一.对泥化夹层样品各粒径范围的颗粒形状分析发现,其粗颗粒几何形状都以近四面体为主,如图 5 所示.为了简化模拟且使模拟颗粒接近实际颗粒形状,模拟时 PFC 基础颗粒设定为由 4 个球形颗粒组成的近四面体颗粒簇,基础颗粒模型如图 6 所示.



图 5 泥化粗粒土 10~20 mm 颗粒形状

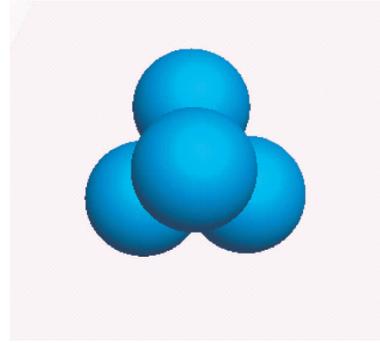


图 6 泥化粗粒土仿真基础颗粒模型俯视图

3.2.2 考虑颗粒形状和分维数变化的颗粒流模拟

将泥化粗粒土颗粒级配修正后,按级配生成粒径为 1~20 mm 的球形颗粒料模型,通过编程获取每个球形颗粒的球心位置和粒径信息.对粒径大于 2 mm 的颗粒,在原位置生成等体积的随机角度的仿真颗粒簇;对粒径为 1~2 mm 的细颗粒,在原位置生成等体积的球形颗粒;最后把原来的球形颗粒料删除.赋予每个基础颗粒强度参数,利用围压伺服得到各向同性的泥化粗粒土仿真颗粒料模型.为了方便对比研究,分别生成分维数为 2.312 和 2.435^[23]两种仿真颗粒料模型,如图 7 所示.

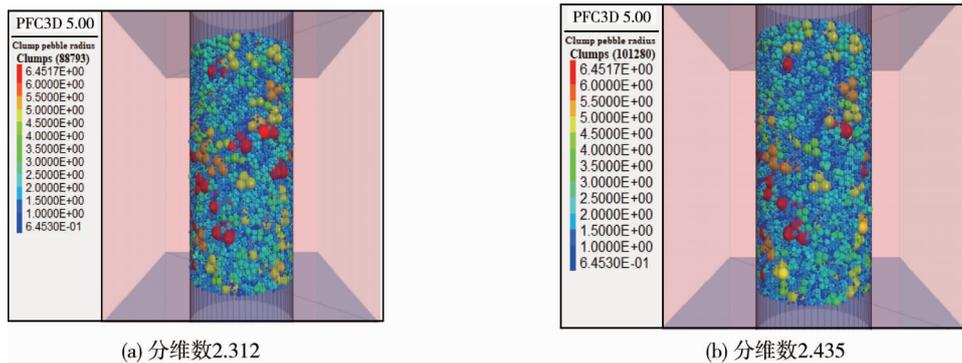


图 7 不同分维数的泥化粗粒土仿真颗粒料模型

将生成的最大粒径 20 mm 泥化粗粒土仿真颗粒料模型分别在 100,200,300 kPa 围压下进行三轴剪切模拟试验,得到分维数为 2.312 和 2.435 的泥化粗粒土仿真颗粒料的三轴剪切试验强度参数.将球形颗粒料和不同分维数的四面体仿真颗粒料的抗剪强度对比分析(表 1),可以看出,四面体仿真颗粒料的抗剪强度比球形颗粒料有所增加.随着分维数增大,泥化粗粒土的黏聚力增加较多,而摩擦角有所减小.

表 1 泥化粗粒土颗粒流模拟抗剪强度参数

| 粗粒土颗粒类型 | 黏聚力 c /kPa | 内摩擦角 φ /($^{\circ}$) |
|------------------|--------------|--------------------------------|
| 分维数 2.312 球形颗粒料 | 2.61 | 32.70 |
| 分维数 2.312 四面体颗粒料 | 3.01 | 39.90 |
| 分维数 2.435 四面体颗粒料 | 37.00 | 31.72 |

3.3 考虑细颗粒流失的颗粒流模拟

在软弱夹层泥化过程或工程扰动中,由于地下水的冲蚀,泥化夹层中一些细颗粒会随着地下水流失,因此,在泥化夹层内部可能存在少数孔隙.

为了研究泥化粗粒土泥化过程中地下水冲蚀对其强度的影响,取分维数为 2.312、最大粒径为 20 mm、最小粒径为 1 mm 的颗粒,按泥化粗粒土颗粒级配生成仿真四面体颗粒料模型,分别按 5%和 10%的比例剔除颗粒料中 1~2 mm 细颗粒,得到细颗粒流失后的颗粒料模型.将所得模型分别在 100,200,300 kPa 围压下进行三轴剪切模拟试验,根据总应力强度包线求得不同模拟样品的黏聚力和摩擦角,如表 2 所示.在剔除 1~2 mm 细

颗粒的0%,5%,10%的过程中,泥化夹层仿真颗粒料模型的内摩擦角依次减小 0.41° , 0.31° ;黏聚力依次减小0.17,0.05 kPa.因此可以得出,在泥化夹层中细颗粒被地下水冲蚀的过程中,其抗剪强度会逐渐降低.

表2 细颗粒不同比例流失的颗粒料抗剪强度参数

| 1~2 mm 细颗粒流失比例/% | 黏聚力 c /kPa | 内摩擦角 φ /($^{\circ}$) |
|------------------|--------------|--------------------------------|
| 0 | 3.01 | 39.90 |
| 5 | 2.84 | 39.49 |
| 10 | 2.79 | 39.18 |

4 结论

1) 当颗粒分维数一定时,随着颗粒最大粒径减小,夹层泥化粗粒土颗粒流模拟试样的黏聚力和内摩擦角有所减小.

2) 模拟结果表明颗粒形状也是粗粒土抗剪强度的影响因素之一.

3) 夹层泥化粗粒土颗粒流模拟试样的抗剪强度会随细颗粒流失量增加而有所降低.

参考文献:

- [1] 肖拥军,殷坤龙,柴波.含软弱夹层库岸滑坡滑带发育特征研究[J].工程地质学报,2011,19(1):65-69.
- [2] 郑颖人,时卫民,唐伯明.重庆三峡库区滑坡勘察工作中的一些问题[J].重庆建筑,2003,2(1):6-10.
- [3] 江洵,项伟,张雪杨.基于CT扫描和仿真试验研究黄土坡滑坡原状滑带土力学参数[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):1025-1033.
- [4] 叶火炎,鲁莎.考虑颗粒级配影响的滑带土宏观力学和微观结构特性研究[J].安全与环境工程,2018,25(3):34-40.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.土工试验方法标准:GB/T 50213—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [6] 全国国土资源标准化技术委员会.滑坡防治工程勘察规范:GB/T 32864—2016[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [7] CHOI C, ARDUINO P, HARNEY M D. Development of a true triaxial apparatus for sands and gravels[J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, 31(1):32-44.
- [8] 陈晓斌.红砂岩粗粒土剪胀效应大型三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):3145-3149.
- [9] 褚福永,朱俊高,王观琪,等.粗粒土变形与强度特性大三轴试验研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2011,42(4):572-578.
- [10] 杨运林.粗粒土大直剪试验研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [11] 胡万雨,覃燕林,刘恩龙,等.粗粒土颗粒破碎大型直剪试验研究[J].南水北调与水利科技,2013,11(2):31-33.
- [12] 吴月旭,林彤,杨闯.不同条件下巴东三中滑坡滑带土大型三轴试验分析[J].地质科技情报,2017,36(3):225-229.
- [13] 王永鑫.基于大型真三轴试验的粗粒土力学特性研究[D].西安:西安理工大学,2020.
- [14] 刘小清.颗粒级配对路基粗粒土填料力学特性影响的离散元模拟研究[D].湘潭:湘潭大学,2016.
- [15] 徐永福.基于颗粒破碎的粗粒土剪切强度的模拟分析[J].工程地质学报,2018,26(6):1409-1414.
- [16] 王晓帅,王子寒,景晓昆,等.粗粒土大型直剪试验宏观细观研究与离散元模拟[J].深圳大学学报(理工版),2020,37(3):279-286.
- [17] 郑博宁,丁大勇,张丹,等.含砾滑带土三维颗粒流模型建模方法研究[J].工程地质学报,2019,27(3):569-576.
- [18] 肖拥军,王栋,杨仙.基于分级颗粒成分分析的软弱夹层泥化机制[J].矿业工程研究,2022,37(3):56-60.
- [19] 肖拥军,王栋,杨仙.基于分维数变化的泥化夹层颗粒级配预测[J].西部探矿工程,2022,34(8):9-12.
- [20] 张志华.基于PFC3D的粗粒土三轴试验细观数值模拟[D].宜昌:三峡大学,2015.
- [21] 尹婕.细粒含量及颗粒形状对砂土剪切性能的影响研究[D].扬州:扬州大学,2021.
- [22] 曹智.砂泥岩及其颗粒料力学特性PFC模拟方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [23] 祝艳波.宜巴高速公路巴东组软岩碎屑土夹层的非饱和特性研究[D].武汉:中国地质大学,2014.