

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2021.06.022

欢迎按以下格式引用:唐洪祥,郭莹,郑尔发,等.土体力学性质研究的三轴虚拟仿真试验开发[J].高等建筑教育,2021,30(6):151-158.

土体力学性质研究的三轴 虚拟仿真试验开发

唐洪祥¹,郭莹¹,郑尔发¹,宋瑞¹,王瑞雪²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点试验室;2. 慕乐网络科技(大连)有限公司,辽宁 大连 116024)

摘要:三轴剪切试验是研究土体力学性质的重要试验,在土力学试验中处于核心地位。但是,三轴剪切试验制样困难、操作过程复杂、试验周期长,初学者在短时间内很难掌握基本的试验技能,为此,开发并利用三轴虚拟仿真试验开展教学工作显得尤为重要。开发的三轴虚拟仿真试验包含了虚拟试验操作和电子报告两个部分,学生可以在移动端熟悉三轴剪切试验仪器结构以及试验操作过程,延伸试验教学时间和空间,在低成本、低消耗、无安全隐患的前提下,提升试验教学质量和水平,激发学生的学习积极性。为通过三轴虚拟仿真试验得到较真实的土体力学性质和参数,将砂土力学和本构参数的大数据预测功能融入三轴虚拟仿真试验中,学生不仅熟悉了试验操作过程,还可以深入理解土体的力学特性与物理性质的关联性,促进创新创造性能力的综合培养。将三轴虚拟仿真试验用于本科生土力学、研究生岩土工程试验这两门课程,取得了较好的教学效果。

关键词:三轴剪切试验;虚拟仿真;大数据;砂土;黏土;力学性质

中图分类号:G642;TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2021)06-0151-09

土力学是土木工程及其相关专业教学中非常重要的一门专业基础课,是研究土的物理性质以及在荷载作用下土体应力应变和强度规律,从而解决工程中土体变形和稳定问题的一门学科^[1]。土力学试验是了解土体的力学性质以及获取工程设计参数中非常关键的一个环节,通过亲自动手操作土力学试验,可以加深学生对土体的物理性质及应力应变特性、强度特性等力学行为的理解。理论与试验结合,可以加深学生对土体力学性质的感性认识,同时还可以加强学生们动手实践能力,激发学生对土力学的兴趣,促进学生创新应用能力和综合素质的提高^[2-4]。在土力学的试验教学中,三轴剪切试验是测定土体的应力应变关系和强度参数的一种最为常用的室内试验方法,在研究土体的本构模型、获得土体的变形特性方面具有很大的优势。三轴剪切试验能够克服直接剪切

修回日期:2021-08-18

基金项目:国家本科教学质量工程项目资助

作者简介:唐洪祥(1973—),男,大连理工大学土木工程学院教授,博士生导师,主要从事岩土工程数值分析及教学研究,(E-mail) tanghx@dlut.edu.cn。

试验不能控制排水、不能测孔隙水压力以及剪切面固定的缺点,同时融合了土力学中的固结理论、强度理论以及有效应力原理等多个重要概念,可以进行不同应力路径下的试验,从而模拟不同的加载工况,是理解土体力学性质的关键性试验,每一位学习土力学的学生都需要了解和掌握^[5]。

三轴剪切试验按照排水条件可分为不固结不排水、固结排水以及固结不排水试验,按照不同的应力路径可分为静水压缩(HC)、常规三轴压缩(CTC)、常规三轴伸长(CTE)、平均主应力 p 为常数的三轴压缩(TC)和三轴伸长(TE)、减压三轴试验(RTC)、轴向减载三轴伸长(RTE)、三轴等比(PL)共7种不同应力路径的试验^[6]。在试验中主要用到的设备是应变控制式三轴仪、应力控制式三轴仪以及全自动多功能三轴仪等。

一、三轴剪切试验虚拟仿真开发的必要性

学生利用三轴仪进行试验操作可以完整地观察到试样从受力变形直到破坏的整个过程,加深对土体破坏的理解。然而,由于实际试验条件的限制,学生数量多达数百人,而三轴仪却只有寥寥几台,不足以支撑每个同学亲自动手做试验,而且三轴剪切试验操作过程复杂,初学者短期很难掌握基本的试验技能。同时,三轴剪切试验制样困难,容易失败。试样的排水,尤其是黏土试样的三轴排水剪切试验,试验周期长,时间成本大,无法实现每个人动手操作的需求。在实际土力学教学中,除试验仪器有限之外,配备的土力学试验课时也有限,一般学校只会配备应变控制式三轴仪和应力控制式三轴仪,因此,不能模拟复杂应力路径下(主要针对研究生教学)的三轴剪切试验,在教学过程中往往只能采用演示试验的形式进行教学。上述情况就会导致生参与度过少,不能很好地激发学生兴趣,学生也不能很好理解土体破坏过程及其试验原理,实际教学效果会大打折扣。

随着计算机的发展,虚拟仿真技术为当前问题提供了解决途径,虚拟仿真技术以其操作灵活、适用范围大的优势渐渐融入了各个学科的教学过程中^[7]。2017年,教育部也启动了国家级虚拟仿真试验教学项目的建设,到目前为止,国家虚拟仿真试验教学项目共享服务平台上发布的虚拟仿真试验教学项目已有两千余项。虚拟仿真技术运用了数字仿真技术,弥补了传统教学过程中时间、场地、仪器数量等的限制,相对于传统演示试验,能够保证每位学生都能完整地进行试验学习与操作,且能够更加合理地安排试验时间,课后也能随时对试验进行复习。此外,2020年突如其来的新冠疫情使各高校暂停线下教学,开展线上教学,此时三轴虚拟仿真试验的开发就显得尤为重要。基于此,我们建设了土体力学性质研究的三轴虚拟仿真试验平台。

二、三轴虚拟仿真试验开发目标

通过目前我们搭建的线上三轴虚拟仿真试验平台,可以实现土的不固结不排水剪切试验(UU试验)、固结不排水剪切试验(CU试验)以及固结排水剪切试验(CD试验)。学生可以通过虚拟试验平台掌握上述3种三轴剪切试验操作的区别,体会理解固结与否对土体强度的影响。通过不同土体的三轴虚拟仿真试验,可以得到无黏性土与黏性土在不同试验条件下的试验曲线,理解无黏性土与黏性土强度与变形性质的差异。学生可以熟悉三轴试验仪结构以及各部分构件的配合机理,延伸试验教学时间和空间,熟练掌握复杂的试验流程,在低成本、低消耗、无安全隐患的前提下,提升试验教学质量和水平,激发学生的学习积极性,切实锻炼学生的动手能力,促进创新性能力的综合培养。

三、三轴虚拟仿真试验平台的建设情况

(一) 三轴虚拟仿真试验的构建

三轴虚拟仿真试验包含了虚拟试验操作和电子报告两个部分。在虚拟仿真试验操作部分,分为练习和考核两种模式,包含砂土和黏土两种试样。虚拟仿真试验总体分为3个部分,即:样品的制备与安装、样品饱和、三轴剪切试验。虚拟仿真试验的框架结构如图1所示。

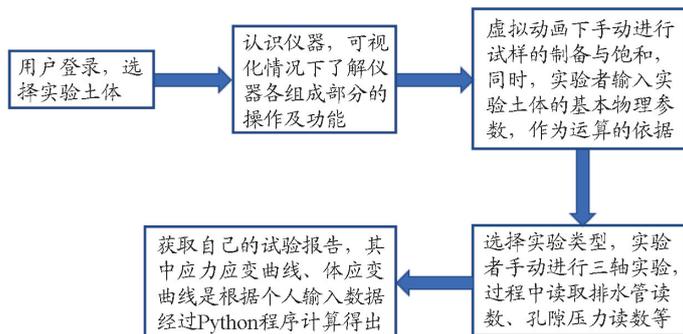


图1 三轴虚拟试验结构框架图

本虚拟仿真试验以移动端为主,兼容PC端。打开虚拟仿真试验应用后,采用微信授权的方式登录软件,选择练习或者考核模式,即可操作虚拟仿真试验。在虚拟仿真试验的仪器认识部分,学生根据点击界面中设备名称按钮可查看到相应的仪器设备,能够使学生更加直观的了解试验中应用的仪器。仪器界面如图2所示。

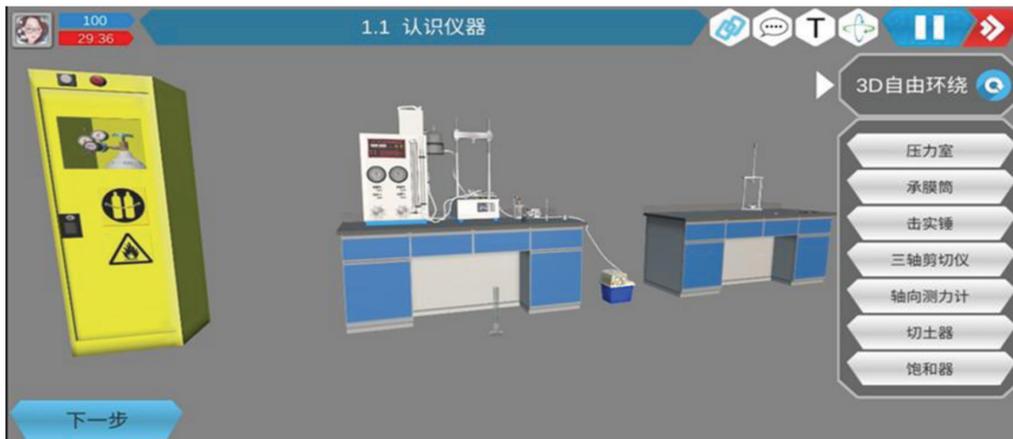


图2 仪器界面

试验内容包含了砂土和黏土两种不同性质试样,学生可以任意选择一种试样进行操作。交互操作采用全三维建模,用Unity 3D软件进行交互,学生可以通过手指点击、拖拽、旋转屏幕中的物体等操作方式来完成试验操作步骤,操作方式更加贴近真实试验操作,进一步使学生熟练掌握三轴剪切试验的操作过程。

在虚拟仿真试验的练习模式中,提供文字提示、语音提示(可以随时开启和关闭)、提示按钮(包含自动提示功能)、操作手册等多项功能,辅助学生学习、练习、操作试验,提高学生的学习效率。学生在操作虚拟仿真试验的过程中填写的数据会在关卡结束后上传到数据库。

电子报告部分,根据老师的不同需求创建不同的电子报告模板。学生提交报告后,系统会根据

学生获得的数据,利用 Python 软件自动进行计算,教师可对比结果给出分数及评语。评阅后的报告会保存为 PDF 版本,方便老师随时调取、审阅,通过分析,可以清楚知道每一位学生对知识点的掌握情况,并适时调整试验的教学重难点。学生根据需求,可以在做过的虚拟仿真试验数据中选择一组上传。

(二) 虚拟仿真试验的操作流程

本虚拟仿真试验的操作全程为可视状态下的手动操作,每一步均需实验者点击相关部位的仪器,目的是增加实验者参与实验的真实性和体验感以及动手操作能力,实验包含了砂土和黏土两种性质的试样,下述操作流程以砂土为例。

(1) 样品的制备与安装。实验者点击砂土试样转移至天平进行测量,根据实验设定的土体密实度,确定所需的土体重量,如图 3 所示。同时,实验者输入不均匀系数、曲率系数、相对密实度、粒径、干密度等土体参数,作为大数据运算程序的基础数据;点击承膜筒,将称量好的砂土试样转移至承膜筒内,用击实锤击实样品,在放置好滤纸和透水石后盖上压力盖,用橡皮筋扎紧,需保证后续加压时真空罩中的水不会进入土体,如图 4 所示。打开排水阀,将真空管连接至排水阀,进行吸负压过程。吸负压过程结束后卸掉承膜筒,关闭排水阀,安装压力室罩。用螺丝将压力室卡好后安装轴向测力计,如图 5 所示。安装轴向测力计时需与压力室活塞对齐,将轴向测力计安装好后,打开压力室排气孔,向压力室内注水。在此操作部分,需要学生掌握承膜筒的安装(注意:橡胶套与成膜筒紧密贴合,无空隙)、压力室的安装(注意:底座砂砾清理干净)、轴向测力计的安装等操作。



图3 土体重量称量

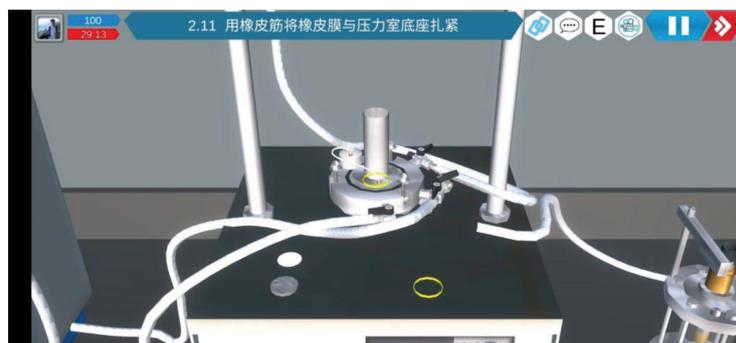


图4 橡皮筋绑扎界面

(2) 样品饱和。点击三轴仪的开关,设定仪器的上升速率,仪器开始上升,当发现测量位移的千分表开始变化时,停止设备上升。打开压力室排气孔和手轮锁紧开关,旋转手轮进行加压排气泡。关闭手轮锁紧开关后开始设置围压,点击仪器启停键,关闭排气孔后旋转调节围压的手轮,开始增

加压力;而后打开孔压阀、进口阀和排水阀;打开二氧化碳气瓶,关闭孔压阀,通入无气水进行饱和操作。操作如图 6 所示。



图 5 安装轴向测力计界面



图 6 通入二氧化碳界面

(3)三轴剪切试验过程。本虚拟仿真试验中包含固结排水剪切和固结不排水剪切两种,学生在进入关卡后任选一种方法进行操作。以固结排水剪切为例,首先设置好围压,记录围压、孔压和排水管的读数,然后打开排水阀开始进行固结操作,当量管读数稳定后记录数据。设定仪器的剪切速率,每隔 1 分钟记录排水管、量力环量表和轴向变形量表的读数。试验需要记录围压为 100 KPa、200 KPa、300 KPa 和 400 KPa 的数据。试验结束后,学生记录的数据自动上传至数据库。学生可以根据实际情况多次反复的进行虚拟仿真试验操作,操作如图 7 所示。



图 7 量力环读数、轴向变形读数、排水管读数界面

(4)试验报告。教师根据不同需求可以创建不同的试验报告模板供学生填写,以本科学生的试验报告为例,学生可在多组试验数据中任意选择一组数据上传,学生根据上传的试验数据,用公式进行计算,画出主应力差与轴向应变图、有效应力比与轴向应变图、体应变与轴向应变图以及固结排水剪切强度包线图。同时,系统根据学生上传的数据,在后台用 Python 软件进行计算,系统能够在教师端自动给出主应力差与轴向应变图、有效应力比与轴向应变图、体应变与轴向应变图以及抗剪强度包线图,教师可以根据系统给出的曲线图与学生画的曲线图进行对比,给出相应的得分。试

验报告如图8所示。

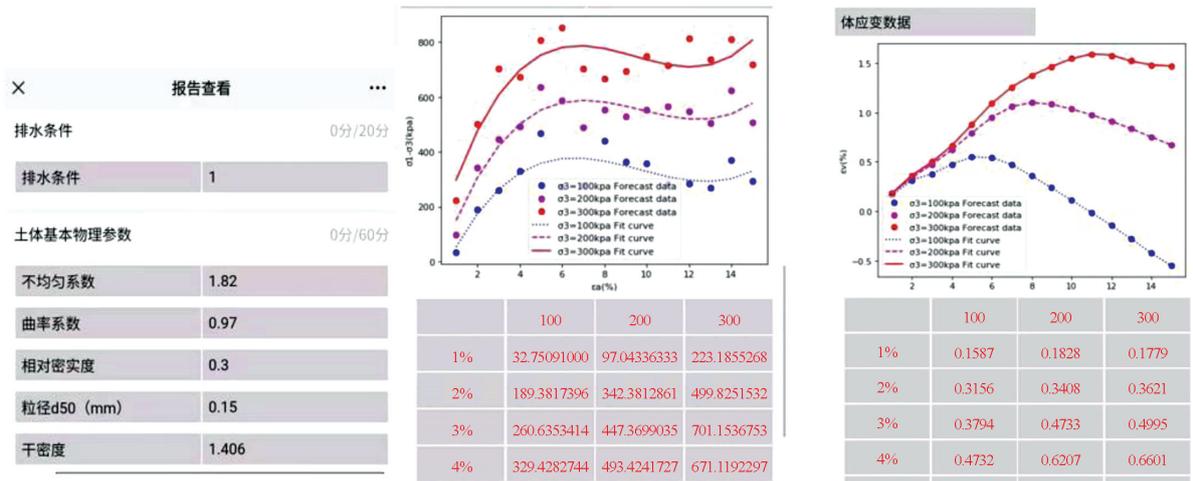


图8 试验报告界面

四、大数据预测功能的开发及最新进展

经过团队成员的不断努力,土体力学性质研究的三轴虚拟仿真试验现在可以设计和模拟不同种类的土体在不同固结和排水条件下的试验,从而得到相应条件下土体强度、变形等力学性质参数。

为了通过三轴虚拟仿真试验得到较真实的土体力学性质和参数,近两年,三轴虚拟仿真试验项目团队通过研究,将土体力学和本构参数的大数据预测功能融入三轴虚拟仿真试验中。其中,在进行砂土常规三轴剪切试验时,将经过数百个数据组训练、拟合的神经网络等机器学习算法程序嵌入到虚拟试验平台中,试验操作者只需将平均粒径、相对密实度、不均匀系数、曲率系数、干密度等基本物理参数以及围压、排水条件输入,便可以得到经过大数据分析、运算后的应力应变曲线、体应变曲线,也就是三轴剪切试验的输出结果。通过大数据分析运算得出的结果与传统三轴剪切试验得出的结果相比,具有以下几点优势:(1)基于大数据的模拟,可以部分排除土体试样在运输、制作过程中遭受扰动而对土体的原始状态产生的影响,得到的试验结果较为真实可信;(2)在试验操作过程中,由于试验人员部分主观动作,同一组试验由不同的试验人员进行操作,可能会得到不同的结果,人为因素对试验结果影响不可避免。通过大数据分析,可以部分避免人为因素对试验结果的影响;(3)试验室三轴剪切试验基于个别小试样,得到的岩土参数具有一定的随机性和离散性,而经大数据分析得到的三轴剪切试验结果具有一定的代表性;(4)三轴剪切试验设备相对复杂,重塑试样的制作较为繁琐,操作技术要求高,而使用大数据分析只需将基本物理参数输入以及确定围压、排水条件等因素即可,具有操作简便、效率高等特点;(5)可以实现不同初始物理性质参数对力学性质影响的仿真模拟,学生不仅熟悉了试验操作过程,还可以深入理解土体的力学特性与物理性质的关联性。目前这部分针对砂土三轴剪切试验的研制已调试完成,已进入教学使用阶段。

下一步考虑将黏土试样试验的大数据分析结果用于三轴虚拟仿真试验中,并考虑不同加卸载应力路径和工况下的组合,实现多种应力路径模拟,模拟土体试样在加压及减压情况下的三轴压缩/伸长、各向等压、等比加载等不同应力路径下的反应,进而反映不同工况下土体受力变形破坏的机理,探究上述各因素对土体力学性质的影响。

五、使用情况:本科生和研究生教学

土体力学性质研究的三轴虚拟仿真试验现已广泛应用于教学中。使用者登录国家虚拟仿真试验教学平台,搜索土体力学性质研究的三轴虚拟仿真试验,进行身份注册,便可以进行虚拟试验。试验平台不对使用者身份进行限制,对所有人员开放,并且在平台设有答疑环节等辅助学习功能。目前,将三轴虚拟仿真试验用于一线教学,本科生土力学课程、研究生岩土工程试验这两门课程均有所涉及。在本科生土力学课程中,笔者将线上虚拟仿真试验与线下试验室试验相结合,要求所有学生独立进行线上虚拟仿真试验,加强学生对试验过程的了解,为学生进行线下三轴剪切试验的演示,按试验操作步骤讲解每一步的操作目的和注意要点,并和学生现场讨论及答疑,试验现场氛围活跃,取得了较好的教学效果。线上线下试验初步完成后,学生可对整个三轴剪切试验原理及过程充分理解,接下来学生在设定的围压、排水条件、平均粒径、密实度、不均匀系数、曲率系数、干密度等(这里针对砂土)参数下通过三轴虚拟仿真试验得到应力应变曲线,并以此得到试样破坏时的应力莫尔圆,进一步根据极限平衡原理整理得到砂土的强度参数。

在研究生岩土工程试验课程中,学生不仅仅要得到土体的强度参数,还需要推导土体本构模型如邓肯—张模型参数。因此,在研究生进行三轴虚拟仿真试验时,要求通过试验不仅得到应力应变数据,而且要得到体应变数据。在输入上述设定试验条件后,学生通过三轴虚拟仿真试验需要获取经过大数据分析、计算得到的应力应变和体应变数据,以此可以整理得到土的本构模型参数。由此可见,基于大数据分析的三轴虚拟仿真试验,提高了试验的真实性和效率,保证了数据的多样性和代表性,便于更好地把握和理解土体的力学性质。

六、结语

经过三轴虚拟仿真试验项目团队成员的不断探索,土体力学性质研究的三轴虚拟仿真试验现在不仅可以模拟三轴试验操作过程,还可以设计和模拟不同种类的土体在不同固结条件下(未来还将考虑不同加卸载应力路径和工况)的组合试验,从而探究各因素对土体强度、变形等力学性质的影响。其中,在砂土三轴剪切试验中只需输入土体的基本物理参数、围压以及确定排水条件,便可以得到经大数据运算的应力应变曲线和体应变曲线。今后将继续收集包括黏土试样考虑不同加卸载应力路径和工况下的三轴剪切试验数据,编写大数据运算程序,进一步完善三轴虚拟仿真试验。在后疫情时代,土体力学性质研究的三轴虚拟仿真试验由于其试验过程的可视性、方便操作性、高效性,所得数据的代表性及多样性,有望在教学,乃至有关科研、工程试验等领域得到进一步应用。

参考文献:

- [1] 郭莹,王忠涛,唐洪祥.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 刘艳,郭恒宁,徐明,等.基于虚拟仿真等方法的土力学实验教学改革[J].实验室科学,2017,20(3):105-107.
- [3] 曹培,张陈蓉,钱建固.土力学虚拟三轴实验教学平台的开发及应用[J].实验技术与管理,2021,38(1):127-130.
- [4] 刘海波,沈晶,王革思,等.工程教育视域下的虚拟仿真实验教学资源平台建设[J].实验技术与管理,2019,36(12):19-22,35.
- [5] 唐洪祥,郭莹.土力学试验教程[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [6] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 陈剑为,田君华,陈曦,等.土力学虚拟仿真实验模块的开发与建设[J].高等建筑教育,2018,27(6):155-160.

Development of triaxial virtual simulation experiment for the study of soil mechanical properties

TANG Hongxiang¹, GUO Ying¹, ZHENG Erfa¹, SONG Rui¹, WANG Ruixue²

(1. *The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology;*

2. *Mule Network Technology (Dalian) Co., Ltd, Dalian 116024, P. R. China)*

Abstract: Triaxial test is an important test to study the mechanical properties of soil, and it plays a key role in soil mechanics test. However, it is difficult for beginners to master the basic testing skills in a short time due to the difficulty of sample preparation, complex operation process and long test cycle of triaxial test. Therefore, it is particularly important to develop and use triaxial virtual simulation test to carry out teaching work. The developed triaxial virtual simulation experiment includes two parts: virtual experiment operation and electronic report. Students can be familiar with the structure and operation process of triaxial experiment instrument on the mobile terminal, extend the time and space of experiment teaching, improve the quality and level of experiment teaching and stimulate students' learning enthusiasm under the premise of low cost, low consumption and no potential safety hazard. In order to obtain more real soil mechanical properties and parameters through virtual triaxial test simulation, the big data prediction function of mechanics and constitutive parameters of sand is integrated into the triaxial virtual simulation test. Students are familiar with the test operation process, and can deeply understand the correlation between mechanical properties and physical properties of soil, so the two courses of soil mechanics for undergraduates and geotechnical engineering test for postgraduates, and good teaching effect is achieved.

Key words: triaxial test; virtual simulation; big data; sand; clay; mechanical property

(责任编辑 胡 玥)