

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2022.04.023

欢迎按以下格式引用:边亚东,尹松,李新明,等.土的力学性质环境效应虚拟仿真实验设计与实现[J].高等建筑教育,2022,31(4):177-183.

土的力学性质环境效应 虚拟仿真实验设计与实现

边亚东,尹松,李新明,陈雨婷,王凯

(中原工学院 建筑工程学院;河南省环境岩土工程与地下工程灾害控制工程研究中心,河南 郑州 450007)

摘要:基于虚拟仿真技术手段,开发了复杂环境作用下土的力学性质虚拟仿真实验系统。系统可通过虚拟仿真实验装置实现土样反复增湿-脱湿、低温-高温的干湿循环和冻融循环,模拟炎热多雨和酷暑严寒复杂环境气候对土体力学性状的影响,实现对经历复杂环境作用土样的固结、直剪及三轴试验,测试土的强度及变形特性。虚拟试验操作过程与实体试验基本相同,试验环境相似,互动感受逼真。学生可在虚拟环境中直观体验土样的环境模拟及力学试验过程,克服了实体试验中难实现、成本高昂、受时空限制等困难,在课堂教学时间内学习和认知复杂环境作用对土体力学性状的影响。

关键词:虚拟仿真;复杂环境;干湿循环;三轴试验;直剪试验;固结试验

中图分类号:G642.42 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2022)04-0177-07

土力学是土木工程及其相关专业核心课程,在现代工程建设事业中占有重要的地位。土工测试作为土力学课程教学中的重要实践环节,不仅可巩固学生所学理论知识,加深其对土体工程性状的理解,而且是学生学习科学实验方法和培养实验技能的重要实践途径^[1-2]。

炎热多雨和酷暑严寒等剧烈环境作用会使土的力学性能极速衰减,工程设计及施工中如采用的参数不当,极易引发工程事故^[3-4]。土工实验教学中,应引导学生认识环境气候对于土体力学性能的影响,结合区域环境气候条件对各类土的力学性能衰变规律进行试验研究^[5-7]。而我国疆土面积广阔,土类分布复杂,且跨区域取样成本高昂,难以实现各类土样的采集与环境模拟实验^[8-10]。此外,土样的环境作用模拟(干湿或冻融循环)周期长达数月甚至数年^[11-12],学生难以在有限的实验课时内全面了解复杂环境作用对不同类别土体力学性质的影响规律。加之经历环境作用的土样

修回日期:2021-01-15

基金项目:中国纺织工业联合会高等教育教学改革研究项目(2021BKJGLX516);教育部产学合作协同育人项目(202102510021);河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2020GGJS136、2019GGJS142);中原工学院研究生教育教学改革研究项目(JG202004)

作者简介:边亚东(1975—),男,中原工学院建筑工程学院教授,博士,主要从事边坡工程与支撑结构相关教学及研究,(E-mail)414484262@qq.com;(通信作者)尹松(1987—),男,中原工学院建筑工程学院副教授,博士,主要从事特殊土力学及其工程特性教学及研究,(E-mail)flysong@126.com。

极易扰动,力学性能测试时存在试样安装困难、试样酥化、实验结果离散性大等问题^[13]。缺乏实操经验的操作者甚至会出现操作不当导致试验失败。

为了使学生在有限的实验课时内,深入了解复杂环境作用对土体力学性质的影响规律,还原真实实验的教学要求、实验原理、操作环境及互动感受,针对现实条件下难实现、成本高昂、受时空限制的试验内容,坚持科研促教育的原则,基于国内外前沿文献数据建立成果数据库,试验结果能够体现环境变化对于试验结果的差异,以中原工学院建筑工程学院河南省力学与工程结构虚拟仿真实验教学中心为依托,坚持“能实不虚,虚实结合”的基本原则,深度融合虚拟仿真与实际教学方法的特征优势,开发和构建了复杂环境下土的力学性质虚拟仿真实验系统。

一、虚拟仿真实验设计

(一) 实验原理

土由“固、液、气”三相体系构成,在经历环境作用后,三相体系比例发生复杂转变,微观结构不断调整,宏观表现为土的强度及变形特征改变,且表现形式因土类差异区别明显^[14]。

通过固结压缩、直接剪切及三轴剪切试验方法对不同干湿及冻融循环次数的土样进行力学性能测试,可获得土的强度及变形参数变化规律。其中,固结试验和直剪试验仪器原型为土工试验标准仪器,虚拟试验操作不受仪器厂家及型号限制;三轴试验仪器原型为南京土壤仪器厂有限公司生产的TSZ系列全自动三轴仪。虚拟试验仪器与原型仪器均可完成土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)试验过程。实验原理如图1所示。

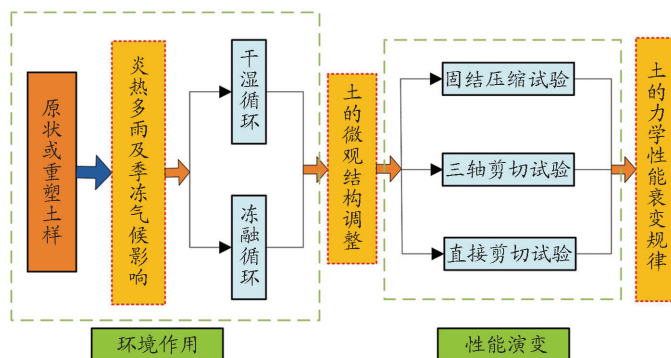


图1 实验原理

(二) 虚拟实验系统的组成

实验系统由7部分构成,第1部分为虚拟土样切削和制备系统;第2部分为土样干湿循环或冻融循环虚拟实验装置;第3部分为数据存储与分析系统;第4部分为土的一维固结压缩虚拟仿真实验系统;第5部分为土的直接剪切虚拟仿真实验系统;第6部分为土的三轴剪切虚拟仿真实验系统;第7部分为后台成绩评定系统。其中,虚拟土样切削和制备系统可根据所考察土体的力学性能制备实验所需土样,由干湿或冻融循环虚拟实验系统对土样进行环境作用模拟,土样经过不同程度的环境作用后,进行力学性能试验。主要仪器设备如图2所示。

(三) 实验设计

虚拟试验过程中根据选择的土体类别及力学测试方法,在虚拟土样制备系统中切削或制备土样。通过在虚拟环境模拟系统中设定增湿含水率、脱湿含水率、烘干温度、冰冻温度及融化温度等

实验条件,实现不同程度的干湿及冻融循环作用。按土工试验测试规程中的操作方法,在虚拟实验系统中开展土的饱和、固结及剪切等试验。为了得到不同程度环境作用下不同类别土的力学性能演变规律,查阅相关文献资料,将已有干湿或冻融循环作用下不同类别土的力学性能特征参数输入虚拟仿真平台数据库,并做到及时更新维护,根据实验者所选择的实验方法和环境作用参数,输出相应试验结果。学生根据试验结果,按照土力学相关理论方法进行数据处理,完成实验报告并上传系统。指导教师和实验室管理教师可在后台登陆系统,查看学生实验报告,给予成绩评定。设计路线如图3所示。



图2 主要仪器设备

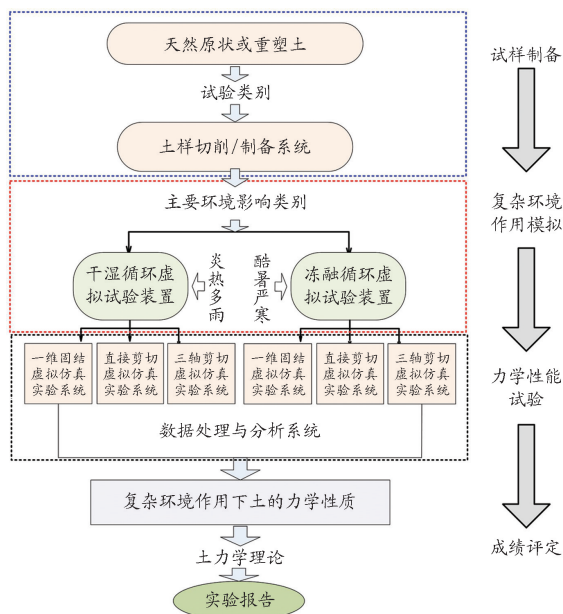


图3 设计路线图

虚拟仿真实验系统可实现土样切削、制备及经历干湿/冻融循环过程的全过程模拟,学生可直观体验三轴、固结及直剪试验过程。虚拟实验与实体实验步骤基本相同,实验环境相似,操作感受逼真。学生在虚拟仿真实验系统中熟练掌握相关实验方法、操作步骤及数据处理与分析方法后,可返回实体实验室进行相关复杂环境下土的力学性质试验,通过虚实结合的方式了解环境作用对土体力学性状的影响,提高学习及科研效率。

二、虚拟仿真实验过程

(一) 准备工作

教师带领学生在实体土工实验室中熟悉岩土力学实验室环境,讲解实验背景及内容,知晓相关仪器设备放置位置。学生熟悉各部分实体实验系统的使用功能和特性,了解实验仪器的工作原理及测定参数,掌握各实验系统实验目的和操作方法。

(二) 试验过程

学生完成前期准备工作后,可进入虚拟实验系统进行复杂环境作用下土的力学性能实验,试验过程主要分为复杂环境模拟和力学性能试验两部分。

1. 复杂环境作用模拟

(1)在虚拟试样切削/制备系统中,通过鼠标点击选择需要进行的力学试验类别,包括固结、直剪和三轴剪切试验,选择适当的切削工具及试样尺寸,完成土样的切削或制备,如图4所示。(2)通过鼠标点击启动环境模拟系统,在系统中输入主要环境影响因素(干湿循环或者冻融循环),根据系统提示,设定干湿或冻融循环温度、湿度、持续时间及循环次数。(3)输入土的基本物理性质指标,如含水率、干密度、土样类别。系统开始对试样进行干湿或冻融循环作用,观察环境模拟系统中的参数显示窗,环境模拟作用完成后系统自动停止工作。

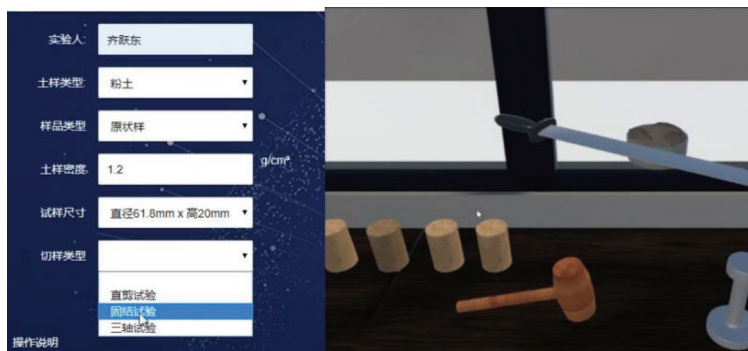


图4 土样制备

2. 力学性能试验模拟

土样经过环境作用(干湿或冻融循环)后,即完成复杂环境作用模拟步骤后,根据所选择的力学性能测试类别进行试验操作。

(1) 固结试验。

①将附带环刀试样安放于压缩容器护环内,并在容器内按顺序放上底板、湿润滤纸及透水石,随后放入加压的导环和传压板,如图5所示。②将安装好试样的压缩容器放于加压台中央,将传压钢珠与加压横梁凹穴相连,随后安装测量百分表。③为保证压缩容器各部件接触良好,施加预压荷重1 kPa,各部件稳定后调整百分表读数至零处。④进行加压观测,在虚拟系统中选择相应荷载等级,荷重等级一般为25~1 600 kPa。根据系统提示选择试样饱和状态,系统根据试样饱和状态给出容器注满水或湿棉纱围住加压盖板四周两种动画反馈。⑤压缩稳定标准规定为每级荷重下压缩24小时,通过界面选择相应固结时间即可,然后点击鼠标施加第二级荷重,依次逐级加荷至试验结束。⑥试验结束后点击确定按钮,取出试样,对设备进行拆卸操作。

(2) 直剪试验。

① 根据试验方案,通过鼠标选择是否对试样进行饱和。② 利用鼠标交互方式,对准上下剪切盒,插上销钉,将土样放入盒内。③ 试样装好后,鼠标点击上盒前端与测力计接触,顺次加上加压盖、钢珠、加压架,如图 6 所示。④ 根据试验设计,选择是否施加固结应力,如需固结,通过鼠标点击选取施加的垂直固结压力并进行稳压维持;如无需固结可直接跳过该步骤。⑤ 通过鼠标点击拾取,施加垂直固结压力 10~400 kPa 后拔去销钉,将百分表调零,开动秒表,设定试验速率后剪切土样。⑥ 剪切结束后,通过鼠标点击去除垂直压力,取出土样,相同方法重新安装试样,进行下一级竖向荷载剪切试验,重复试验过程直至完成各级竖向荷载剪切试验。

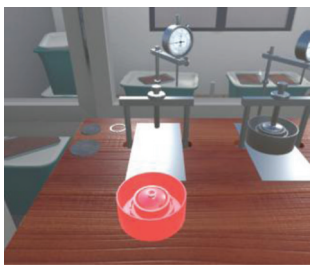


图 5 固结试样安装

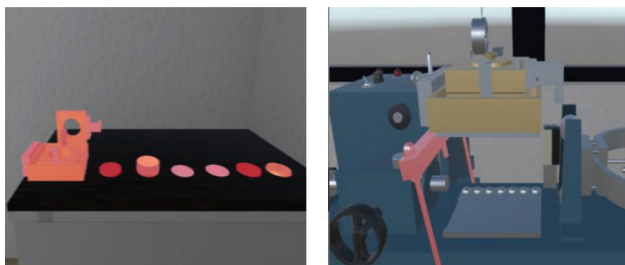


图 6 直剪试验装样

(3) 三轴剪切试验。

三轴试验仪器生产厂家及型号较多,TSZ 系列全自动三轴仪具有操作简便、控制精确且稳定性强等特点,是目前土力学实验教学及工程应用中最为主要的土体三轴剪切试验设备。为便于学生与后续工程实验工作展开有效对接,以 TSZ 全自动三轴仪标准操作方法为例进行典型示范和虚拟仿真。



图 7 三轴剪切试验试样安装

① 向外水舱注入适量的蒸馏水,然后将水吸入内水舱中。② 初始化压力室高度至最低,排除各管道中残存的气体。③ 按照规范标准将滤纸条贴在试样上。④ 将橡皮膜套在承膜筒内壁上,并套上橡皮筋,注意要使用吸力球抽空橡皮膜空隙中的气体。⑤ 按照顺序,在试样上下分别放上滤纸和透水石。⑥ 将组合好的承膜筒与试样放入压力室底座中心,将橡皮膜上下部分别上翻后取出承膜筒,安装制样圆模及固定铜环,并将橡皮膜两端与底座、试样帽分别扎紧,如图 7。⑦ 取下制样圆模及固定铜环,装上压力罩。旋转压力室底座固定压力罩。⑧ 向压力室内注水至溢出,拧上压力罩上面的排气口螺丝。⑨ 升起压力室使压力罩上端凹槽与仪器上方传感器接触。⑩ 打开虚拟电脑软件,开始三轴试验剪切过程。⑪ 根据软件提示,选择是否对试样进行反压饱和,如选择“是”,设置固结及反压参数;如选择“否”则直接进行下一步。⑫ 根据系统软件提示,选择是否需要对试样进行固结,如选择“是”,设置固结围压,系统提示固结完成后进行下一步;如选择“否”则直接进行下一

步。⑬根据系统软件提示,设定剪切围压。⑭选择试验剪切条件,排水剪切或不排水剪切,随后开始剪切试验。⑮达到终止剪切条件后结束试验,排除围压仓内的水,拆卸仓罩,拆除试样。⑯导出试验数据后关闭应用软件,关闭计算机。需要说明的是导出试验数据结果由所建立的国内外文献调研数据库所决定,数据结果根据试验条件差异有所不同,数据库会根据前沿探索和研究文献及时更新。完成试验后所导出的试验数据结果会根据试验过程中的环境模拟参数和实验条件差异而改变。

3. 实验成绩评定

学生在完成相应复杂环境作用下土的力学性能实验后,可在完成界面中下载实验结果。根据课堂所学土力学理论对实验数据进行处理,给出土的相关力学参数,完成试验报告并上传系统。

指导教师和实验室管理教师可在后台登陆系统,根据学生所选的环境模拟条件及力学实验类别,对学生的操作要点和参数设置进行考评,按照任务书要求对其实验报告进行综合实验成绩评定。

三、虚拟仿真实验系统的特色及优势

(一) 特色

(1)积极探索土力学实践课程虚实结合的教学模式,提升实验教学效果。构建土样力学性能全过程虚拟仿真实验环境可有效巩固课堂教学中的理论知识,增强学生的实践和创新能力。

(2)突破现场取样的时空限制,实现复杂环境作用下土体力学性质的多元化模拟。虚拟实验系统通过建立既有实验结果的数据管理系统,可实现不同类别土样、不同气候条件、不同测试方法的多元化模拟。

(3)缩短实验周期,提高教学及科研效率。实体实验环境模拟周期长达数月、试验操作难度大、实验过程不可逆,虚拟仿真实验使学生在可逆的程序中反复训练掌握土体力学测试方法与技能,避免了实体实验中因错误操作而导致实验失败。

(二) 优势

该虚拟仿真实验系统具有界面感受逼真、操作性强、知识系统性强等优势,可使学生深入浸入虚拟实验系统;通过数据库的数字反馈,在软件界面中以启发方式建议正确的操作步骤或参数设置;通过人机的交互式沟通,合理设置实验条件并对数据进行处理;通过各实验小组的团队合作,完成复杂环境对土样力学性能劣化规律的学习与分析,真正做到了浸入、启发、交互及团队教学方式的深度融合。

四、结语

复杂环境作用下土的力学性质实体实验过程中存在跨区域取样困难、周期长、费用高昂、试验难度大且存在一定危险性的问题,在有限的课堂教学时间内难以实现。充分利用信息化教学手段,坚持“虚实结合,能实不虚”的基本原则,深度融合虚拟仿真与实体教学方法的特征优势,坚持科研促教的原则,基于国内外前沿文献数据建立成果数据库,试验结果能够体现环境变化对于试验结果的差异,开发了复杂环境作用下土的力学性质虚拟仿真实验系统。学生可突破时间和空间限制,在虚拟环境中完成土样长达数月的环境作用模拟和相关力学性能实验,并提交实验报告。为学生认

知复杂环境作用下土的力学性能,熟悉土力学基本试验原理及操作过程提供了技术平台。虚拟实验系统可激发和提高学生的科技创新积极性,助力提高实验教学及创新人才培养质量。

参考文献:

- [1] 马少鹏,水小平,马沁巍,等. 力学虚拟实验系统及其在实验力学教学中的作用[J]. 力学与实践, 2012, 34(3): 65-67.
- [2] 高亚峰. 室内环境虚拟交互式设计系统的研发与实现[J]. 现代电子技术, 2019, 42(8): 164-167.
- [3] 尹松,孔令伟,张先伟. 炎热多雨气候影响下残积土小应变刚度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 743-751.
- [4] 陈涛,毕贵权,陈国良,等. 冻融循环对黏质粗粒土单轴抗压性能影响的试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 587-594.
- [5] 任伟杰,李春林,宋维源. 结构力学虚拟仿真实验教学研究[J]. 力学与实践, 2015, 37(2): 257-262.
- [6] 惠存,边亚东. 垃圾土室内沉降虚拟仿真实验教学探索[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(10): 135-138, 143.
- [7] 庞瑞,王璐,陈桂香,等. 土木建筑虚拟仿真实验教学中心建设与实践[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(6): 107-115.
- [8] 刘文卓,孔亮,袁庆盟,等. 含气土三轴试样制备的新方法[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(4): 63-67.
- [9] 徐伟杰,徐明,郭彤,等. “金课”背景下土木类虚拟仿真实验教学发展趋势——基于2018年国家虚拟仿真实验教学项目共享平台公示数据[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(1): 74-85.
- [10] 李明辉,陈富荣,张笑蓉,等. 皖西大别山区富锌土壤分布特征及成因分析[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(3): 235-240.
- [11] 蔡正银,陈皓,黄英豪,等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 1977-1982.
- [12] 时伟,张亮,杨忠年,等. 冻融循环条件下膨胀土力学特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 480-485.
- [13] 梁斌. 土的性质量测技术及土工试验仪器的发展[J]. 实验教学与仪器, 2001(10): 35-36.
- [14] 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.

Design and realization of virtual simulation experiment system for soil mechanical properties in complex environment

BIAN Yadong, YIN Song, LI Xinming, CHEN Yuting, WANG Kai

(School of Civil Engineering and Architecture; Research Center of Environmental Geotechnical Engineering and Underground Engineering Disaster Control Engineering of Henan Province, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, P. R. China)

Abstract: Based on virtual simulation technology, a virtual simulation experiment system of soil mechanical properties under complex environment is developed. The system can realize the repeated dry wet cycle and freeze-thaw cycle of soil samples through the virtual simulation experiment device. The influence of hot summer and rainy, heat and cold on the mechanical properties of soil can be simulated. The consolidation, direct shear and triaxial tests are carried out to test the strength and deformation characteristics of soil samples under complex environment. The operation process of virtual test was similar to that of real test. The interactive feeling was lifelike. Students can intuitively experience the process of environmental simulation and mechanical test of soil samples and overcome the difficulties of hard realization, high cost and limited by time and space. Students could understand the effect of complex environment on soil mechanical properties in limited classroom teaching time.

Key words: virtual simulation; complex environment; dry-wet cycle; triaxial test; direct shear test; consolidation test

(责任编辑 梁远华)