

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2023.06.008

欢迎按以下格式引用:顾晓强,刘文倩,王琛,等.新工科背景下岩土工程本研协同的实践型教学:以微型三轴仪的研发为例[J].高等建筑教育,2023,32(6):61-68.

新工科背景下岩土工程本研协同的实践型教学:以微型三轴仪的研发为例

顾晓强^{a,b},刘文倩^a,王琛^{a,b},刘芳^{a,b},康臻^a

(同济大学 a.土木工程学院;b.岩土及地下工程教育部重点实验室,上海 200092)

摘要:技术的飞速发展和产业的不断变革为工程教育的改革提出了新的要求和挑战,也促进了新工科建设理念的生成。在土木工程领域人才的全过程培养进程中,教学与实践的有机结合可以实现激发学生创新思维、提升工程实践能力和培养专业综合素养。针对土力学课程教学中关于土工测试环节存在的问题,组织相关科研方向的研究生和正在学习该知识点的本科生,自主研发了一套微型三轴仪作为随堂教具并运用于教学实践,旨在优化教学模式、加强课堂互动。微型三轴仪体积小、重量轻、便于携带,可模拟实际三轴仪的固结、剪切和控制排水条件等功能,有助于学生掌握不同类型常规三轴压缩试验的关键操作步骤,直观地体会有效应力决定土的强度和变形特性,激发学生学习的积极性,培养综合实践能力,提升课堂教学效果。基于理论知识掌握与实践能力提升的导向,对岩土工程教育过程中的理论和实验教学改革进行了探索与实践。以教学促进实践,以开发促进研究,打通了不同阶段的专业知识衔接,通过仪器研制和课堂反馈夯实专业理论知识,构建了本研学生协同联动的实践型教学模式,探讨了微型设备类教具在研发过程中的难点,实现了专业能力高、创新思维强的人才培养。

关键词:新工科;土力学;微型三轴仪;实践创新;有效应力原理

中图分类号:TU41;G484

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2023)06-0061-08

当今社会正处于技术飞速发展、产业不断变革的时代,充满了机遇与挑战,为高等院校的人才培养提出了更高要求。为了主动迎接这一轮科技革命及随之而来的产业升级,教育部积极推进新工科建设工作,先后形成了“复旦共识”“天大行动”和“北京指南”^[1-3],致力于探索能够领跑全球工程教育的中国模式、中国经验和中国方案,助力强国建设,打造世界工程创新中心和人才高地。我

修回日期:2022-12-22

基金项目:同济大学第十五期实验教学改革专项基金项目

作者简介:顾晓强(1981—),男,同济大学土木工程学院教授,博士,主要从事土的基本特性、土动力学等方向研究,(E-mail)guxiaoqiang@tongji.edu.cn;(通信作者)王琛(1989—),男,同济大学土木工程学院助理教授,博士,主要从事岩土工程、基础工程等方向研究,(E-mail)ewang33@tongji.edu.cn。

国现阶段高等教育阶段的人才培养体系中,本科教育是基础,研究生教育是发展,二者应主动与新工科建设的要求相结合,在坚持守正创新的同时更要注重实践运用。传统工科应在此基础上借鉴新兴学科的技术优势,在学科间形成交叉融合、共同发展的局面。

随着土木工程领域的不断发展和创新,行业对于科技人员的专业知识和创新实践能力要求越来越高,各高校积极实施“卓越工程师培养计划”,强调将课程教学链与实践培养链有机融合,注重对学生创新实践能力的培养^[4-6]。试验是土木工程学科课程中极其重要的教学环节,为加深理解、巩固能力,虚拟试验教学平台也被陆续引入课堂,并取得了一定的效果^[7-9]。土力学是土木工程学科的核心专业基础课,由于土体的复杂性和独特性,土工试验是土力学不可或缺的重要组成部分,土工试验不仅是认识和揭示土的性质、发展和验证理论模型的可靠方法,也是确定具体设计参数的有效手段。目前,土力学基本采用课堂理论教学为主、实验课教学为辅的模式,尽管在课堂中利用PPT等多媒体形式对试验内容进行展示,但对学生有效掌握相关土力学原理仍构成极大的挑战^[10-13]。此外,土工试验在研究生熟练运用土工试验设备、深入分析室内测试结果、准确把握岩土力学规律等科研工作过程中发挥着重要作用,是开展岩土方向科研创新工作的主要方面。因此,本科和研究生阶段对该试验的基础知识、设备原理、理论内涵均应有不同程度的掌握,高校教师也应对这部分内容的重要程度、教授方式、实际效果有充分的认识。

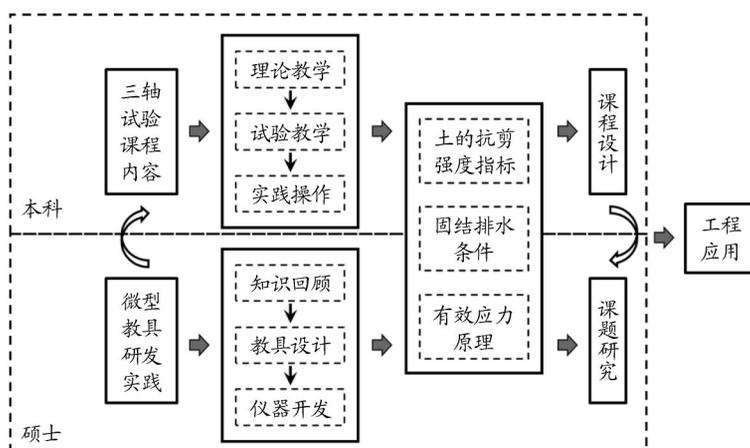


图1 三轴试验实践型教学模式执行框架关系

作为土力学教学中最重要的土工试验之一,常规三轴压缩试验(简称“三轴试验”)内容对学生掌握土的强度理论和有效应力原理至关重要^[14,15]。在土力学课程学习过程中,针对土工试验内容,首先在理论教学环节对试验设备及原理进行介绍,具体操作与实践内容将在试验教学环节完成,并辅以实践操作以便加深理解。然而,实际中所用的三轴仪体积大、重量重、结构复杂、操作繁琐,大多数高校由于设备和场地有限,土力学实验课中三轴试验通常仅作为演示实验,导致学生对该试验的参与感不强,无法有效掌握三轴仪的实验原理及操作方法,导致学生难以直观地理解有效应力与土的强度、变形特性等重要概念。与此同时,笔者在对研究生的指导过程中发现,部分硕士研究生对该试验部分知识的理解还不够深入,对试验设备及其工作原理的认识还有待提升,给其开展科研工作带来一定困难。

对此,笔者组织土工测试相关科研方向的研究生和正在学习三轴试验相关知识的本科生,通过本研结合的实践型教学模式,共同研发了一种手提式微型土工三轴仪教具,以便能够在课堂教学中讲解和演示三轴试验,让学生直观地了解试样制备、加压固结、加载剪切和排水条件控制等过程,更好地理解不固结不排水、固结不排水和固结排水三轴试验的异同。通过对不同有效应力条件下砂

土试样的软硬程度和抗剪强度进行对比,学生能直观地理解有效应力决定土体强度和变形特性这一重要概念,帮助学生更好地理解和掌握有效应力原理^[16,17]。此外,在研发过程中,通过本、硕阶段学生在该知识点的联动互通,明确并厘清了本科生在课程学习中的困难,巩固并提升了研究生对设备及测试过程的认识和理解。如图1所示,以教学环节促进技能实践,以开发应用促进课题研究,打通本科和研究生阶段的专业知识衔接通道,通过仪器研制和课堂反馈夯实专业理论知识,最终形成实践型教学的培养模式。

一、明确问题:传统三轴试验教学的局限性

常规三轴压缩试验是一种室内测定土的抗剪强度的重要手段,也是岩土工程本科教学阶段的重点内容。掌握三轴试验相关的知识点对于学生的专业课程理解、工程实践认识及从事相关工作有着深远的影响。测试时通常采用3-4个圆柱形试样,分别设置不同的周围压力,得到土样的抗剪强度,再通过莫尔-库伦破坏准则确定土的抗剪强度参数。试验过程中,土样首先受到设备施加的周围压力 σ_3 ,并使其保持不变,再施加竖向压力并逐渐增大,直至试件受剪破坏。当试件上施加的竖向压应力(也称偏应力)为 $\Delta\sigma_1$ 时,试件上的小主应力即 σ_3 ,大主应力为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_1 \quad (1)$$

根据土的极限平衡条件,达到极限平衡状态时,大主应力与小主应力的关系为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \varphi/2) - 2c \tan(45^\circ - \varphi/2) \quad (3)$$

根据试验在固结和剪切过程中的排水条件,三轴试验可以分为以下三种:(1)不固结不排水剪(UU)试验,即在施加固结围压和偏应力的过程中均不允许排水,孔隙水压力无法消散,可以测得总应力抗剪强度指标 c_u, φ_u ;(2)固结不排水剪(CU)试验,即施加周围压力时允许试样充分排水,在受剪过程中同时测定试样中的孔隙水压力,可以得到土的总应力抗剪强度指标 c_u, φ_u ,以及有效应力抗剪强度指标 c', φ' ;(3)固结排水剪(CD)试验,即施加周围压力和施加偏应力的过程中均将试验的排水阀门打开,使试样中的孔隙水压力充分消散,可以测得有效应力抗剪强度指标 c_d, φ_d 。试验结果可以表示为:

$$\tau_f = c + \sigma \tan\varphi \quad (4)$$

式中, c 为总应力法表示的黏聚力, φ 为总应力法表示的内摩擦角,二者统称为总应力抗剪强度指标。

根据有效应力原理,土中某点的总应力 σ 等于有效应力 σ' 与孔隙水压力 u 之和,即:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (5)$$

因此,试验结果采用有效应力表示时为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan\varphi' \quad (6)$$

可以看出,上述不同过程涉及的概念较多,操作过程存在差别,测试结果表征的物理含义也存在区别,使得在理论教学过程中容易造成学生概念混淆、过程不明和认识模糊。试验中所使用的土工三轴仪主要由压力室、围压加载系统、轴压加载系统、测量系统等部分组成^[14],相比直剪试验、无侧限压缩试验,三轴试验可以严格控制排水条件,在准确测定有效应力抗剪强度指标方面具有显著优势^[18]。然而,基于传统三轴试验仪的教学环节仍存在以下三方面局限^[7]:

(1)三轴仪价格昂贵,占地空间大。高校实验室的三轴仪一般数量有限,且主要用于开展科研工作,难以满足教学过程中众多学生实践操作的需求,且任课教师难以对学生的掌握情况进行考核。

(2) 三轴仪的体积较大、自身较重,不便于携带。教师无法将三轴仪带入土力学理论教学课堂,加上设备结构复杂,导致课堂理论教学与实验教学割裂,教学效果较差。

(3) 三轴试验操作复杂,试验周期长。土力学课程课时有限,学生只能通过教师试验操作演示来进行粗浅的观察和学习,且无法亲自操作三轴仪。教学内容较枯燥,学生学习积极性较低。

以上问题导致了学生无法有效掌握三轴试验的原理、操作及其运行过程,难以理解有效应力原理。课程考核结果表明,学生对三轴试验原理的学习效果较差,不利于对其后续土力学相关的知识学习和科学研究。

二、确定对象:微型土工三轴仪

为提升常规三轴压缩试验的教学效果,使任课教师在土力学理论教学课堂中能较为形象地演示三轴试验过程,笔者针对土力学的教学需要,尝试将传统土工三轴仪进行缩尺和简化,通过指导课题组研究生参与设备研发的实践环节,研制出一款手提式微型土工三轴仪,其基本构造及连接方式如图2所示。该三轴仪的荷载架、底板和活动横梁通过固定螺旋连接,组成反力架。活动横梁中部连接带有外置式数显压力计的活动加载头,外置式数显压力计可读取土样所受的竖向力。底板由手轮控制的蜗轮蜗杆箱固定,通过转动手轮可控制蜗轮蜗杆箱顶杆的升降,可对土样施加轴向荷载。与此同时,外置式数显压力计所显示的力即为土样的偏应力。设备底部活动连接上有样品安装座,土样可放置在样品安装座上,其侧面套有乳胶膜,且上下两端均可放置透水石和滤纸。

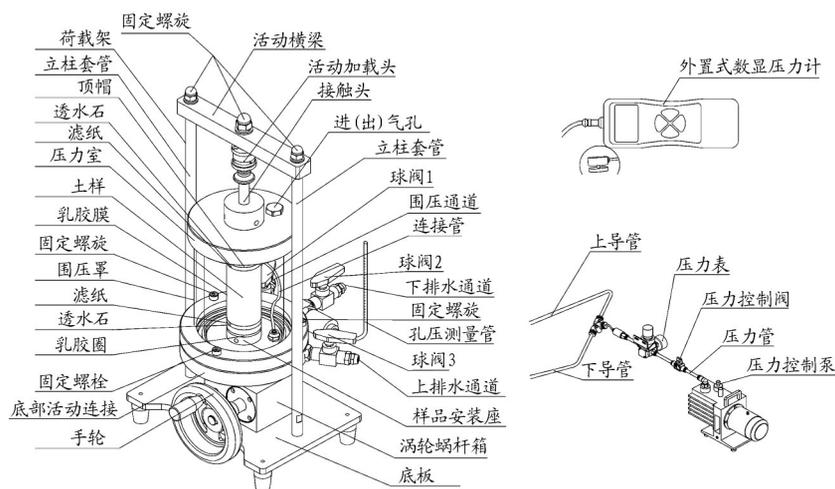


图2 手提式微型土工三轴仪教具的基本构造

蜗轮蜗杆箱和活动加载头之间为压力室(图3)。压力室由围压罩和底部活动连接组成,底部活动连接外侧设有连接样品安装座的下排水通道和带刻度的孔压测量管,其水压值能够实时显示土样内的孔隙水压力。底部活动连接上安装有3个球阀,其中球阀1控制围压的开关,球阀2控制下排水通道和孔压量测管的开关,球阀3控制上排水通道的开关,通过对球阀1、2、3的不同组合,可以控制土样固结和剪切时的排水条件。压力控制泵(图2右侧)配置有压力表、压力控制阀和压力管,通过导管与土样室连通,可以控制作用在试样上的围压。同时,也可以通过真空泵抽气对试样施加负压,即有效围压。该微型土工三轴仪能够实现传统土工三轴仪的基本功能,操作步骤也与传统土工三轴仪基本一致,可模拟施加0~80 kPa围压条件的土工三轴试验,孔隙水压力传感器量程为1.0 MPa,荷载传感器量程为1 kN,可以满足教学展示各环节的需求。图4为研发的手提式微型土工三

轴仪实物图,并将该仪器命名为TJ-MTX-1型微型土工三轴仪(以下简称TJ-MTX-1三轴仪)。该装置高35 cm,重5 kg左右,可放入手提箱中,用于开展直径约38 mm、高约76 mm土样的模拟试验,教师可方便携带进教室开展课堂教学与演示。

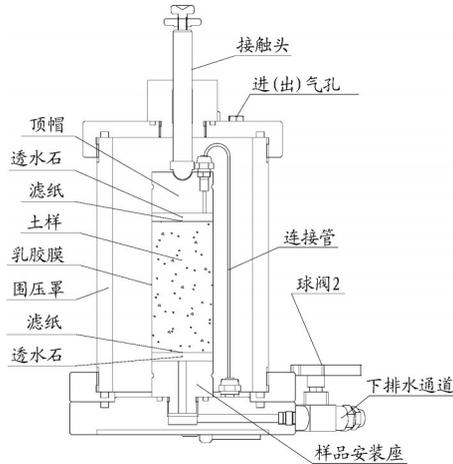


图3 压力室的剖面结构示意图

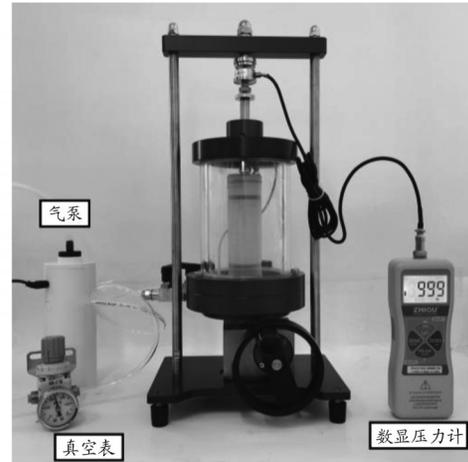


图4 手提式微型土工三轴仪实物图

三、研发实践:攻克微型化设备的技术难点

在教具微型化设计的过程中存在诸多难题,既要完成传统三轴仪的大幅缩放,又应保留其完备的试验和演示功能。从事岩土工程测试方向的硕士研究生在回顾本科知识点的基础上,结合自身开展测试研究的经验,确定了以压力室作为主要的研发对象。在设备开发过程中,研究生与本科生保持密切沟通,确保对微型三轴仪的各环节展示清晰易懂,同时也强化了本科生对设备细节、测试原理的认识。最终开发完成的三轴仪可开展三轴不固结不排水(UU)、固结不排水(CU)、固结排水(CD)等试验的模拟演示。以固结排水试验为例,该装置使用的主要操作步骤如下:

(1)土样制备。将土样套好橡皮膜、橡皮圈等部件,打开压力室并放置土样、透水石、滤纸,完成装样过程。

(2)施加围压,固结排水。打开球阀1,向压力室充入压缩气体或液体,打开压力控制泵对土样施加围压,同时打开球阀2和3,即土样固结排水过程(若关闭球阀2和3,即可模拟不排水条件)。

(3)施加轴压。土样固结完成后,缓慢转动手轮,抬升底座,对试样施加轴压。其中,外置式数显压力计所显示的力,则为土样的偏应力。

(4)改变围压。调整施加的围压值,重复上述步骤(1)~(3),即可得到不同围压下土样破坏时所施加的最大竖向轴力值。

(5)绘制曲线。根据不同围压值对应的最大偏应力,绘制莫尔应力圆曲线,可得到土的抗剪强度指标。

特别要指出的是:在课程教学环节中借助TJ-MTX-1三轴仪在课程教学环节中还可以让学生直观地感受有效应力原理的重要意义,即有效应力决定了土体的强度和变形特性。具体实施过程为:

(1)采用砂土试样,关闭球阀2,利用微型真空泵通过球阀3向试样分阶段施加负压(即有效应力)10 kPa、40 kPa和80 kPa。

(2)学生可用手指感受不同有效应力下试样的软硬程度(试样的软硬程度可定性反映土样的

强度和模量大小),学生可切身体会到有效应力对土体强度和变形特性的作用。

(3)进一步开展不用有效应力作用下的固结排水三轴试验,以真实展示三轴试验中试样的破坏面和不同有效应力下的抗剪强度。

四、教学实践:回归土力学教学的课程需求

经过课堂实验演示,微型土工三轴仪能完整模拟土工三轴试验中制样、固结、剪切等关键步骤,并让学生直接动手模拟不同类型的三轴试验。对班级52名学生进行课堂效果问卷调查,具体分析结果见图5。从问卷结果及与学生交流中不难发现,多数学生认为对三轴试验和有效应力原理内容学习存在难度。相比传统课堂教学中采用PPT、板书等手段,结合微型三轴仪,则对学生该部分内容的理解和学习效果提升有很大帮助。课堂氛围提升方面,该教学环节不仅活跃了课堂气氛,还提升了土力学三轴试验的课堂教学效果。在参与教学设备的研发环节,能够让本科阶段学生认识到该知识点在工程实践和科学研究中的重要性,并与研究生建立了较好的交流平台,对自身的学习和以后职业发展规划有了更深理解。学生通过积极参与教学型实践活动,普遍对类似教具的研发及教学环节充满期待,对本科阶段教学及学生兴趣培养起到了良好启发作用。

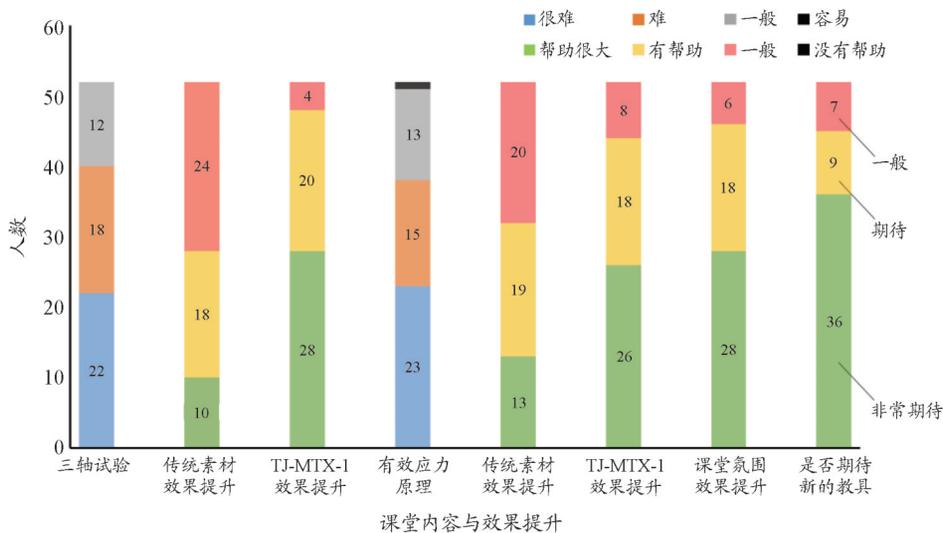


图5 微型土工三轴仪对课堂教学效果

五、结语

针对土力学课程中关于土工测试这一重要环节存在的问题,自主研发了微型三轴仪,开展了本研协同的实践型教学活动。从多个角度联动了土力学关于三轴试验这部分内容的教学、试验与实践环节,优化了教学模式、加强了课堂互动,让学生更好地掌握三轴试验的测试方法和流程,更加直观形象地理解有效应力原理,加深了对土力学课程内涵的理解。从试验效果来看,TJ-MTX-1三轴仪设计合理,能很好地实现不固结不排水(UU)、固结不排水(CU)、固结排水(CD)三轴试验的模拟演示,可应用于土力学课程中三轴试验相关的教学工作。与传统土工三轴仪相比,TJ-MTX-1三轴仪体积小、重量轻、操作简便,可方便携带进入教室,配合课堂三轴试验的教学,能直观模拟和演示各类三轴试验,使学生能够现场了解三轴试验的原理及过程,提升学生课堂参与感和动手实践能力。该三轴仪能让学生亲身感受到不同有效应力条件下土样的软硬程度,直观体会有效应力对土

的强度和变形特性的影响,加强学生对有效应力原理的掌握和理解,有效地提升了课堂教学效果。未来将进一步针对课程教学中存在的问题,持续开发一系列土工教学仪器,加强理论学习与试验实践之间的密切联系,以加深理论与实践培养、提升学生综合素质为目标,满足新工科建设的培养要求,为卓越工程师的培养打下良好基础。

参考文献:

- [1] 孙峻. “新工科”土木工程人才创新能力培养[J]. 高等建筑教育, 2018, 27(2): 5-9.
- [2] 林峰, 顾祥林, 何敏娟. 现代土木工程特点与土木工程专业人才的培养模式[J]. 高等建筑教育, 2006(1): 26-28.
- [3] 陆国栋, 李拓宇. 新工科建设与发展的路径思考[J]. 高等工程教育研究, 2017(3): 20-26.
- [4] 陈以一. 协同性、开放式、立体化的卓越工程师教育培养体系的构建[J]. 高等工程教育研究, 2013(6): 62-67.
- [5] 傅旭东, 徐礼华, 杜新喜, 等. 土木工程卓越工程师培养方案探索与实践[J]. 高等建筑教育, 2014, 23(3): 17-21.
- [6] 梁发云, 王琛, 钱建固. 岩土工程全过程课程设计教学改革探索与实践[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(6): 70-76.
- [7] 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.
- [8] 李君茜, 沈超, 李卫超, 等. 基于CFD的局部水头损失虚拟仿真实验[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(2): 164-167, 269.
- [9] 沈超, 王琛, 付小莉, 等. “新工科”背景下港航专业实验教学仿真的探索与实践——以“桩基冲刷实验”为例[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(2): 122-126.
- [10] 梁发云, 邓航, 姚笑青, 等. 模拟分层饱和土渗流固结的教学实验装置研制[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(4): 78-81.
- [11] 李广信, 吕禾, 张建红. 土力学课程中的实践教学[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(12): 13-14, 23.
- [12] 杨期君, 陈秋南, 贺建清, 等. 应用型本科院校土力学课程教学实践反思与改革探索[J]. 当代教育理论与实践, 2018, 10(4): 44-47.
- [13] 金亮星, 郑国勇. 基于土木工程专业创新型人才培养的土力学课程教学改革与实践[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(2): 53-57.
- [14] 高磊, 龚云皓, 宋涵韬. 土力学实验教学中存在的问题与改革建议[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(7): 200-202, 206.
- [15] 余明东. 基于工程应用的土力学课程教学改革与实践[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(5): 56-59.
- [16] 钱建固, 袁聚云, 赵春风. 土质学与土力学[M]. 5版. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [17] 袁聚云, 张陈蓉, 钱建固. 土工试验指导书[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [18] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

Undergraduate-graduate collaboration based practical teaching in geotechnical engineering under emerging engineering background: a case study of developing miniature triaxial apparatus

GU Xiaoqiang^{a,b}, LIU Wenqian^a, WANG Chen^{a,b}, LIU Fang^{a,b}, KANG Zhen^a

(a. College of Civil Engineering ; b. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The rapid development of technology and the continuous transformation of industry have put forward new requirements and challenges for the reform of engineering education, while the concept of emerging engineering construction has been proposed. Especially in the whole process of talent cultivation in the field of civil engineering, the combination of teaching and practice can stimulate innovative thinking, improve engineering practice ability, and cultivate professional comprehensive quality of students. Aiming at the problems in geotechnical testing, which is a part of the course of soil mechanics, a portable miniature soil triaxial apparatus is developed and applied in the class in order to optimize teaching mode, strengthen

classroom interaction by organizing graduate students of relevant scientific research direction and undergraduate students who are learning this knowledge points. Due to the small size, light weight and portability of the triaxial apparatus, as well as it can simulate the consolidation, shearing and drainage control functions of an actual triaxial apparatus, using it in the theoretical course is helpful for students to master the key operation steps of different types of triaxial tests. Students can better master the testing method and process of the triaxial test, understand the effective stress principle more intuitively and vividly, and enhance the knowledge related in the course of soil mechanics. Intuitively understanding the important principle that effective stress determines the strength and deformation characteristics of soil can stimulate the learning enthusiasm of students, improve their comprehensive practical ability, and effectively improve the teaching effect of related content in soil mechanics courses. Based on the purpose of learning the theoretical knowledge and improving practical ability, the reform of theory classroom and experiment teaching in the course of geotechnical engineering is explored and practiced. While the teaching promotes the practice, the development of this equipment promotes research. It can be a good method to build the bridge between knowledge in different stages. Through the equipment development and classroom feedback, the professional theoretical knowledge can be strengthened. Meanwhile, by constructing the practical teaching mode of undergraduate-graduate collaboration, and discussing the difficulties in the research and development of teaching AIDS of micro equipment, the professional talents with high professional ability and strong innovative thinking can be cultivated.

Key words: emerging engineering; soil mechanics; miniature triaxial apparatus; innovation in practice; principle of effective stress

(责任编辑 崔守奎)