

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2023.04.015

欢迎按以下格式引用:戴北冰,赵红芬,常丹,等.“虚实结合”在土力学教学中的探索与实践[J].高等建筑教育,2023,32(4):112-119.

# “虚实结合”在土力学教学中的探索与实践

戴北冰,赵红芬,常丹,刘建坤,林凯荣

(中山大学土木工程学院,广东珠海 519082)

**摘要:**土力学是一门实践性学科。传统课堂理论教学存在知识点繁多、内容体系复杂、与实际脱节等问题,而实验教学也有课时、场地、设备等时间、空间和资源等方面的限制和约束,导致整体教学效果欠佳。中山大学土力学教学团队秉持“虚实结合”的教学理念和方法,开展土力学教学改革探索。一方面,在课堂理论教学中引入实体教学模型,强化学生对理论模型、抽象概念以及工程实际的理解和认识;另一方面,通过虚拟现实技术建设仿真实验平台,克服传统实验教学的时空局限性和资源约束。基于“虚实结合”的教学手段,可激发学生学习的主动性和积极性,培养学生的创新思维,提升土力学课程的教学质量和效果。

**关键词:**土力学;虚实结合;实体模型;虚拟仿真

中图分类号:G642.0

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2023)04-0112-08

## 一、土力学课程教学现状

### (一) 土力学课程特点

土力学是一门以土这种天然材料为研究对象,研究土的基本力学性质,如渗透、强度、变形、稳定性等,及其工程应用的学科,是力学的一个重要分支,属于工程力学范畴,具有很强的理论性、实践性和应用性等特点。土力学课程是一门土木工程、勘查技术与工程、地质工程等专业学生必修的专业基础课,也是一门知识面广,理论、技术与实践结合紧密的课程。在土木工程专业课程体系中,土力学是一门承上启下的重要专业课程。该课程的学习需要上承高等数学、理论力学、材料力学等数学和力学课程,也是基础工程、基坑工程、边坡工程、地基处理等后续专业课程学习的重要基础。通过该课程的学习,学生需要熟悉了解土的基本物理力学性质、掌握土力学的基本理论和一般土工实验方法,学会综合运用土力学的基本原理、概念和方法解决实际工程中有关土体强度、变形和稳

修回日期:2021-08-17

基金项目:教育部第二批新工科研究与实践项目(E-TMJZSLHY20202140);中山大学本科教学质量与教学改革工程项目(202193-797)

作者简介:戴北冰(1980—),男,中山大学土木工程学院副教授,博士,主要从事岩土工程研究,(E-mail)daibb@mail.sysu.edu.cn;(通信作者)赵红芬(1984—),女,中山大学土木工程学院副教授,博士,主要从事岩土工程研究,(E-mail)zhaohf7@mail.sysu.edu.cn。

定性等问题。土力学及课程具有如下特点<sup>[1-2]</sup>。

(1)研究对象比较复杂。土是一种天然材料,具有三相性、非连续性、结构性等有别于一般连续介质的独特性质,其赋存状态还受到时空分布、荷载条件、温度以及其他外界因素的影响。因而,土的物理力学性质十分复杂,一般难以得到精确描述和准确预测。

(2)课程内容知识点多。土力学课程内容一般可分为基础和专题两大部分。基础部分主要介绍土的基本物理力学性质,包括土的基本物理性质与工程分类、土的渗透性、土和地基中的应力及分布、土的变形及地基沉降计算、土的抗剪强度。专题部分则主要介绍经典土力学实际问题,包括地基承载力、挡土墙土压力、边坡稳定性、地基处理等。内容丰富、布局严谨,但知识点比较多,在有限的时间内教好学好存在一定的难度。

(3)学科交叉性强。土力学知识面广,涉及多个学科知识背景,学科交叉性强。作为一门特殊的力学课程,土力学与高等数学、理论力学、材料力学、弹性力学、流体力学等数学力学课程联系紧密,也需要有土质学、工程地质学、建筑材料等课程作铺垫和支撑。此外,作为一门实践性强的学科,土力学还涉及工程设计原理、方法和规范等方面的知识内容。

(4)实践性强。土力学主要研究土体在不同受荷情况下的力学性质,看土体强度是否足够、变形量是否满足要求、土体或土工建筑物是否稳定,如经典的地基承载力、土压力和边坡稳定性等问题。本质上,关注的这些问题都源于实际工程需求,如何在经济合理的范围内保证地基基础工程和建(构)筑物的安全是首要解决的问题。因此,土力学的知识构架和理论体系是以实际工程需求为出发点,为解决建(构)筑物在地面以下或与土相互作用的稳定安全问题而建立的。

(5)经验性强。土是一种三相、非连续介质,受时空分布的影响其性质具有很强的变异性,因此,土力学中基于理想数学力学模型建立的理论很难周全考虑土这种材料的复杂性、特殊性及工程的实际情况。根据理论推导模型提出研究假设,使用经验系数对理论计算公式进行修正,或直接使用经验公式。另外,基于工程设计原则,一般采用安全系数来保证实际工程有足够安全额度,而安全级别的界定和系数数值大小的确定都需要凭借一定的经验。

(6)应用性广。土力学的应用极其广泛,建筑、桥梁、隧道等工程领域都离不开土力学。除了土木工程领域,地质、材料等领域也有土力学的应用。例如,有效应力原理和非饱和土力学相关理论在地质、石油、化工等涉及多孔介质的领域都有应用和拓展。

## (二) 理论教学的困难与不足

当前,土力学课程课堂理论教学方面存在的困难主要有以下几点。

(1)授课形式单调。在传统课堂理论教学中,教师仍采用多媒体结合板书的教学方法。然而,土力学知识点复杂且枯燥,很难通过多媒体形象地展示土力学中的理论框架,如土的渗流定律和流网的基本性质等。土力学课程中相关理论的公式推导较为繁琐,且大部分基于一系列的假设条件和半经验半理论的方法,学生在课堂上的学习效率不高、学习效果较差,很难通过课堂掌握课程的基本理论体系。

(2)内容体系复杂。与其他力学学科相比,土力学的基本理论体系还不够成熟完善,各个章节的内容之间相对独立,知识点琐碎,公式较多,逻辑系统性和依赖关系不强<sup>[3]</sup>。学生在学习后面章节时,很容易忘记前序章节的内容,学习效果不好。同时,土力学学科知识体系复杂,涉及的先修课程较多且大多属于比较难学的专业课程,如材料力学、理论力学等。若先修课程掌握不扎实,学习土力学课程时则发现难度较大<sup>[4]</sup>,影响课程的教学和学习质量。

(3)课堂教学与工程实践脱钩。土力学课程具有很强的实践性和应用性,通过学习相关的工程实践和工程案例,学生可以更好地理解土力学的基本概念、基本理论及应用。而目前教师在课堂上

大部分时间需讲授土力学的基础理论,涉及的工程实践内容较少,不能很好地将基本理论与工程实际问题相结合,导致土力学课程与岩土工程实践严重脱节。

### (三) 实验教学的困难与不足

在大部分高校的土力学实验教学中,由于多种影响因素的存在,其教学效果欠佳,主要体现在以下两个方面:

(1)实验课时偏少。目前,土力学实验基本上都安排在理论课程中,由于理论课内容较多且复杂,实验课时偏少,大多集中在8~12课时左右,很难在有限时间内充分开展实验教学,导致学生对部分实验内容掌握不全面。同时,实验教学在整个土力学课程成绩中占比不高,学生对实验课不够重视。

(2)学生参与度不够。由于实验设备少而学生人数多,实验教学基本都是分组进行的,每组人数较多,例如,土力学中的三轴实验,安排5~8人一组,部分学生不能参与实验操作,甚至有些情况下,教师只进行演示实验,学生课下处理数据和提交实验报告,参与度不够,教学效果较差。教师也不能准确评估学生的实验掌握情况。同时,有些高校相关实验设备陈旧老化,损坏较多,影响教学实验的进程。

针对以上实验教学的缺陷,虽然可通过录制相关的实验教学视频,让学生反复观摩和学习<sup>[5]</sup>,但学生不能在线上进行实际操作,对于实验细节的把握仍达不到较好的效果。

## 二、“虚实结合”教学模式

土力学是一门具有很强理论性、实践性和应用性的学科。然而,由于土力学知识点多,理论教学仍占据主导地位,理论教学课时一般要两三倍于实验和实践课时,但土力学又具有很强的实践性和应用性,单纯采用传统满堂灌的方式,在课堂教学过程中对基本理论假设、抽象概念、公式推导等事无巨细地讲解,不一定会产生预期的教学效果,学生对相关知识点的理解并不会因为教师讲得细而更透彻。因此,在课堂教学过程中需要从实践性和应用性出发,采取合适的教学手段辅助理论教学,提升学生对知识点的理解和运用水平。

本着“虚实结合、以虚补实、以实促教”的原则<sup>[6-7]</sup>,一方面基于虚拟现实技术,建立虚拟仿真实验室,开发土力学常规实验仿真系统,通过开展虚拟仿真实验教学,克服传统实验教学在时间和空间上的限制,帮助缓解在场地、设备等方面的压力,是传统实验教学的重要补充;另一方面,从理论和实践背景出发,开发制作物理实验模型,将理论模型实体化、工程实际微缩化,为课堂理论教学提供直观的辅助教具,促进学生对理论模型和抽象概念的理解,以及对工程实际情况的认识(图1)。

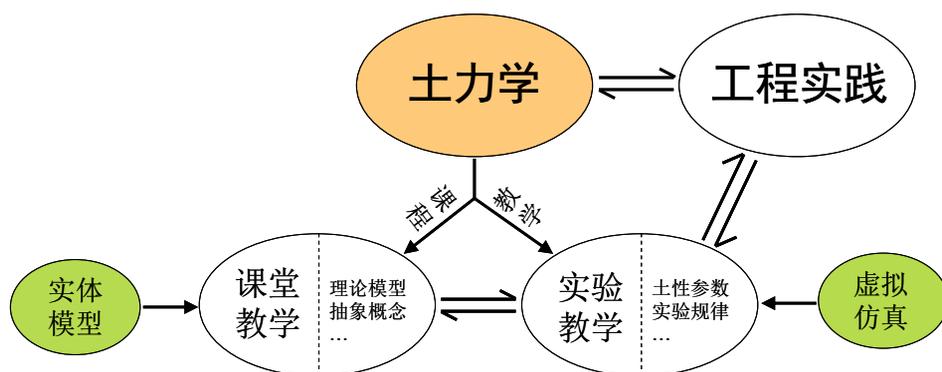


图1 土力学教学模式

### 三、实体模型在理论教学中的应用

针对土力学课程理论性与实践性较强的特点,在课堂教学中引入实体模型实验。物理模型实验比较直观,可定性或定量反映土体的变形特征、失效机理和失效模式等,让学生通过观察描述实验现象并分析原因,提高学生对理论知识的理解和记忆。为此,以边坡稳定性与自然休止角的模型实验和地基承载力为例,介绍物理模型实验在土力学理论教学中的应用。

#### (一) 无黏性土边坡稳定性与自然休止角

无黏性土边坡的稳定性分析是土坡稳定性分析一章中的重要内容。基本分析思路是,针对无黏性土边坡坡面附近的土单元体,根据受力平衡分析建立土体抗剪强度,即内摩擦角 $\varphi$ ,与边坡坡面倾角 $\alpha$ 的关系。如果边坡倾角 $\alpha$ 达到某一极限值,使土中的剪应力达到土体抗剪强度,即该单元体达到极限平衡状态,此时的极限坡面倾角 $\alpha$ 称之为自然休止角。因此,自然休止角是衡量无黏性土边坡稳定性的重要指标,也是表征土体抗剪强度的间接指标。为增强学生对无黏性土边坡稳定性和自然休止角的认识和理解,采用如图2(a)所示的实体模型生成初始的无黏性土堆积体,然后通过侧孔释放颗粒形成无黏性土斜坡,如图2(b)所示,模拟无黏性土边坡的极限平衡状态,阐释自然休止角(图中 $\alpha$ 角)与无黏性土边坡稳定性的关系。这样,以实体模型和物理实验来促进学生对无黏性土边坡稳定性和自然休止角等理论和概念的理解和运用。

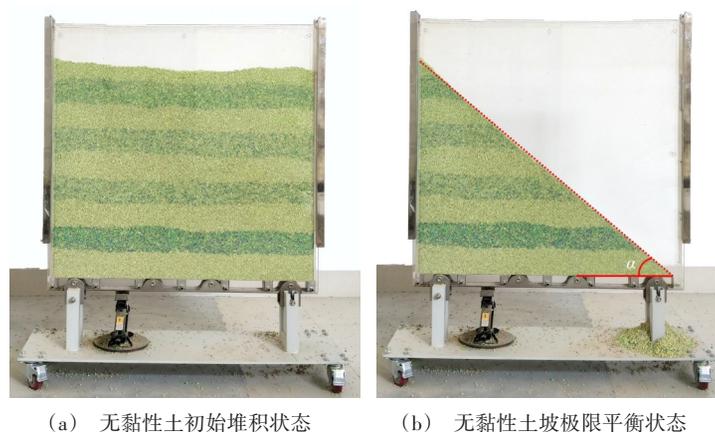


图2 无黏性土边坡分析实体模型

#### (二) 地基承载力破坏模式

地基在建筑物荷载作用下产生附加应力,当地基中某点产生的剪应力超过此点土体的剪切强度时,这点就发生破坏,当足够多的破坏点连在一起形成滑动面时,滑动面以上的土体发生相对滑动,地基丧失稳定性,导致建筑物产生倾倒、塌陷等灾难性破坏。在演示模型实验中(图3),通过千斤顶逐渐施加荷载,让学生形象地观察到塑性变形区先在基础地面边缘处产生,然后逐渐向侧面向下扩展,最终地基土中形成连续的滑动面,并延伸到地表面,土从基础两侧挤出,并造成基础侧面地面隆起,整个地基产生失稳破坏。学生可观察到整体剪切破坏过程中经历的压密阶段、剪切阶段和破坏阶段及其整体剪切破坏的失效模式。

将物理模型实验引入理论教学中,获得了学生的一致好评,证实了实体模型在理论教学中应用的必要性和可行性,这种新型教学模式提高了学生课堂学习的主动性,激发学生的学习兴趣,提高课程教学效果。

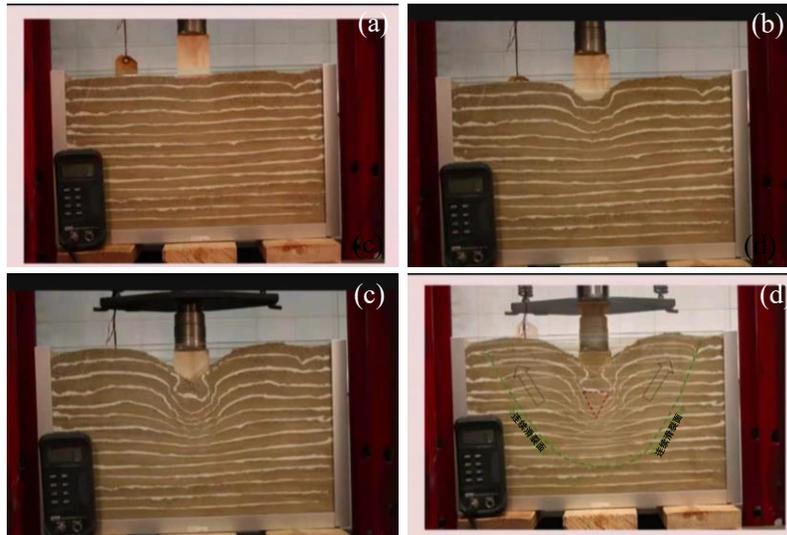


图3 地基承载力破坏模式演示过程

#### 四、虚拟现实在实验教学中的应用

中山大学土木工程学院实验中心设立了虚拟仿真实验室,并进行了一系列教学实验的仿真建设。下面以土工三轴实验为例,介绍虚拟仿真实验平台的研发和应用。

三轴实验虚拟仿真系统由实验介绍、仪器介绍、实验过程和考试评测几部分组成(图4)。实验介绍是对三轴实验的概念、原理及应用进行概述,通过该部分学生可以回顾土力学课程理论部分的内容,对土体抗剪强度有更深刻的认识。仪器介绍部分是对三轴仪各个部件进行说明,可在实验前了解各个部件的主要用途。考试评测是测评学生对三轴实验的原理、设备和整个实验流程的把握情况,可作为课程实验评分的依据。



图4 三轴实验虚拟仿真系统界面

三轴实验虚拟仿真系统的整个实验流程包括试样制取与饱和、试样安装、固结与剪切实验操作和数据处理等内容。

##### 1. 试样制取与饱和

该实验系统以重塑土试样为例对三轴实验的制样过程进行说明,如图5(a)所示。试样的剪切强度、变形与其干密度、含水率、各向异性紧密相关,受制样过程的影响较大。根据试样的密度和制样含水率要求,分别称取一定质量拌合后的土样在三瓣膜内分层击实,每层击至预定高度后刮毛。

学生点击相应的小工具,就可完成拌合土样、安装三瓣膜、锤击等操作。击完最后一层后,称取试样质量,并测得其高度。将制备好的试样放入饱和罐内,抽真空饱和,如图5(b)所示。对不同类型的土体,分别设置静置时间,保证试样达到预定饱和度。

## 2. 试样安装

待试样饱和完成后,通过点击橡皮膜、承膜筒、吸气球等小工具,将试样放入。然后分别点击透水石、滤纸,将其放入三轴仪底座上,如图5(c)所示,再放上土样和滤纸、透水石。将橡皮膜扎紧且各部件接触稳定后,点击压力室将其置于底座之上,并拧紧螺母。通过点击阀门,往压力室中注水,并在水满之后,将压力室上部的螺母拧紧。试样安装完成后,可进行下一步的固结和剪切操作。

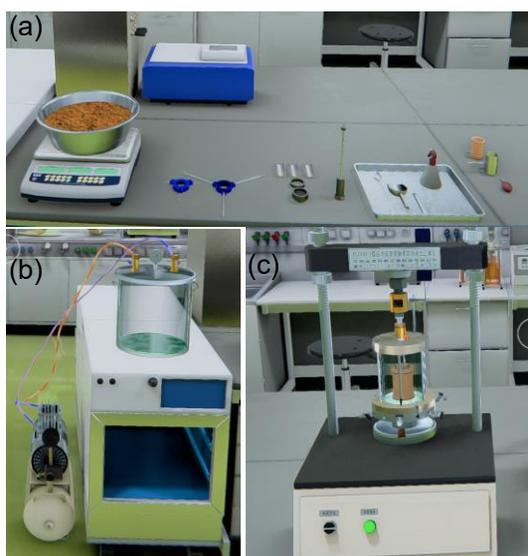


图5 三轴实验试样制备、饱和和安装

## 3. 实验过程

待试样安装完成后,选择实验类型(3种),设置固结围压、剪切速率,开始三轴剪切实验。根据选取实验类型的不同,可以输出位移、排水体积、超静孔隙水压力等的变化情况(图6),同时系统可自动给出相应的变化曲线,如应力应变曲线、体变曲线和超静孔隙水压力时程曲线。根据实验输出结果,学生可在平台上通过处理数据得到抗剪强度参数。

虚拟仿真技术可以一定程度上缓解实验效率低、仪器设备可能受损、实验经费不足等问题。学生可以通过网络平台随时随地访问,提高实验学习的时间和空间利用率<sup>[8-10]</sup>。在一些特殊时期,如新冠疫情流行期间,学生可以通过仿真平台深入学习土工实验的原理和操作等内容,避免学生聚集在实验室带来的一些风险。

通过仿真实验,学生操作整个流程,加深对实验原理和步骤的理解,提高学习的主动性。学习虚拟仿真实验后再去实验室进行实际操作,对仪器设备和实验流程认识更加清晰。同时,虚拟仿真实验还可通过添加一定的试题来考查学生对实验的掌握情况,在一定程度上避免完成实验报告时的抄袭现象,更好地检验学生的学习效果。

## 五、教学效果与评价

为评估“虚实结合”的教学效果,同时了解学生对虚拟实验教学系统的学习体验、意见和建议,笔者针对虚拟三轴实验设计了调查问卷,问卷内容如图7所示。客观选择题主要用于了解学生对实验原理的掌握程度,开放问题则主要了解学生对“虚实结合”教学模式的意见和评价。问卷调查在

学生实际操作三轴实验前进行。共发放问卷50份,回收问卷48份,其中有效问卷45份。

序列	时间	轴向荷载(kN)	孔隙气压(kpa)	孔隙水压(kpa)	S1(kpa)	S2(kpa)	轴向位移	Sv1(cm3)	Sv2(cm3)	排
1	2020/10/14 10:56:34	0.00	0	16	3	299	-0.00	0.09	0.21	0.2
2	2020/10/14 10:56:44	0.23	0	16	3	299	0.10	0.10	0.22	0.2
3	2020/10/14 10:56:54	0.35	0	17	3	299	0.22	0.11	0.23	0.2
4	2020/10/14 10:57:04	0.45	0	17	3	299	0.36	0.10	0.26	0.2
5	2020/10/14 10:57:14	0.54	0	18	3	299	0.50	0.09	0.26	0.2
6	2020/10/14 10:57:24	0.62	0	19	3	299	0.63	0.09	0.27	0.2
7	2020/10/14 10:57:34	0.69	0	19	3	299	0.77	0.12	0.28	0.2
8	2020/10/14 10:57:44	0.75	0	20	3	299	0.91	0.14	0.28	0.2
9	2020/10/14 10:57:54	0.80	0	21	3	299	1.05	0.15	0.28	0.2
10	2020/10/14 10:58:04	0.84	0	21	3	299	1.19	0.16	0.29	0.2

图6 实验过程中数据输出表格

#### 问卷调查

1. 三轴试验的抗剪强度包线为:

- A、一个莫尔圆的切线      B、不同试验破坏点所拟合的斜线  
C、一组莫尔圆的公切线      D、不同试验破坏点所连的折线

2. 某土样内摩擦角为 $\varphi$ , 对其进行三轴压缩试验, 其破坏面与大主应力方向夹角为:

- A、 $45^\circ + \varphi/2$       B、 $45^\circ - \varphi/2$       C、 $45^\circ + \varphi$       D、 $45^\circ$

3. 三轴试验装样过程种, 以下物品自上而下的顺序为:

- A、透水石、滤纸、土样、滤纸、透水石  
B、滤纸、透水石、土样、滤纸、透水石  
C、滤纸、透水石、土样、透水石、滤纸  
D、透水石、滤纸、土样、透水石、滤纸

4. 对饱和土进行固结不排水试验, 在剪切阶段以下阀门处于关闭状态的是:

- A、围压阀门      B、排水体变阀门      C、孔隙水压力阀门

5. 请问你对虚拟现实技术在土力学实验中的应用及其效果的满意程度如何?

- A、非常满意      B、满意      C、一般满意      D、不满意

开放问题:

1. 请问你是否了解“虚实结合”的教学模式? 你对于采用虚拟现实技术对土力学实验进行辅助教学或利用物理实验模型来丰富提升课堂理论教学, 是否有什么意见或者建议?

图7 问卷调查样本

五道选择题中,除第二道正确率为93.3%外,其他正确率均为100%。可以看出,90%以上的学生通过虚拟实验,对实验方法、实验原理、实验步骤和数据处理等方面有较好的理解。第二题得分率稍低,主要因为该题考核的知识点是关于剪切原理方面的,而目前在虚拟实验过程中并不能直观观察到试样变形和最终破坏的形态,导致学生对该知识点的掌握稍有欠缺。80%的学生认为虚拟现实技术,可以帮助预习实验,更好地理解实验原理和操作流程。部分学生针对现有的操作系统提出了优化建议:(1)在系统中进一步补充一些实验指引和说明;(2)实验数据和直观实验曲线相结合,以便更好地理解实验结果。总体来说,虚拟仿真实验有利于学生对实验原理和操作的理解,方便学生进行实际实验操作和掌握知识原理。

## 六、结语

基于“虚实结合、以虚补实、以实促教”的教学理念和原则,积极探索土力学理论教学和实验教学改革方法。“虚实结合”理念中的“虚”和“实”有更为广泛的含义。一方面,通过“虚拟现实”的技术手段来建设“土力学实验”的仿真平台,将实验操作、实验设备、实验现象观察等通过仿真技术形象化、生动化和趣味化,摆脱传统实验教学在时间、空间和设备资源等方面的限制和束缚;另一方面,“虚”也指“理论概念、模型的抽象和复杂”,将抽象化和公式化的理论知识附着于“实体教学模型”,强化学生对理论知识和工程实际的认识和理解,提升学生的创新实践能力。“虚实结合”教学理念和方法为培养理论知识扎实、创新实践能力强、综合素质高的复合型土木工程人才提供了有力保障。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 徐慧,王灏霏. 新工科背景下“土力学与地基基础”课程教学改革实践[J]. 安徽建筑,2021,28(2):128-129.
- [3] 赵成刚,白冰. 土力学原理[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2019.
- [4] 吴珺华. “互联网+”背景下交通工程专业土力学教改探讨[J]. 教育教学论坛,2020(51):193-195.
- [5] 何建新,刘亮,杨海华. 土力学课程教学目标与教学组织的探索[J]. 教育教学论坛,2020(45):251-252.
- [6] 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.
- [7] 王培涛,任奋华,蔡美峰. 基于虚拟现实和3D打印技术的“虚实结合”教学模式在岩土工程课程中的应用探索[J]. 高等建筑教育,2020,29(1):156-161.
- [8] 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.
- [9] 毕晓茜. 虚拟仿真技术在土木工程类本科实验教学中的应用[J]. 当代教育实践与教学研究,2015(7):15-16.
- [10] 王淑婧,贺行洋,邹贻权,等. 土建类虚拟仿真实验教学资源持续建设与实践[J]. 高等建筑教育,2018,27(5): 159-165.

## Exploration and practice of virtual-actual combination in the teaching of soil mechanics

DAI Beibing, ZHAO Hongfen, CHANG Dan, LIU Jiankun, LIN Kairong

(School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** Soil mechanics is a practice-oriented subject. There are a number of tricky problems for the conventional classroom theory teaching, including the diverse knowledge points, complicated content system and disjunction between theory and practice, and the experiment teaching is also constrained by the factors of time, space and resources (e.g. teaching hours, site and equipment), which lead to an overall poor teaching effect. Enlightened by the principle of virtual-actual combination, the soil mechanics teaching team at Sun Yat-sen University carry out the teaching reformation exploration. On the one hand, we introduce the physical model into the theory teaching, which helps promote students' comprehension and recognition of the theoretical model, abstract concept and engineering practice. On the other hand, we construct the simulation platform with the use of virtual reality technology, which helps overcome the limitation of time, space and resources in traditional experiment teaching. The virtual-actual combination based teaching means is able to aid in stimulating students' initiative and enthusiasm for learning, cultivation of their innovative thoughts, promotion of the teaching quality and effectiveness of soil mechanics.

**Key words:** soil mechanics; virtual-actual combination; physical model; virtual reality

(责任编辑 周沫)