颗粒流数值模拟分析技术应用于土力学教学改革与探析

农珍珍，刘 倩，高俊亮

（江苏科技大学 船舶与海洋工程学院 江苏 镇江 212003）

摘要：在新工科建设背景下，高校教学应及时引入先进的教学方法，改变传统单一的课堂讲授教学模式。土力学是研究土体的渗流、强度及变形等特性的学科，土体的碎散性和三相组成使其在变形、强度等力学性质上都与连续固体介质有本质的区别。颗粒流数值模拟分析技术基于非连续介质分析方法，在研究非连续介质力学问题上应用广泛。通过项目式教学法将颗粒流数值模拟分析技术引入土力学教学中，可有助于学生对土力学课程内容的理解，激发学生的学习兴趣和研究能力。

关键词：土力学；颗粒流数值模拟；项目式教学

教育部于2017年2月正式启动了“新工科”建设计划，以新理念、新结构、新模式、新标准和新体系为标志的“新工科”战略迅速发展为各高校全面深化工程教育改革的理论研究与应用实践[1]。在此背景下，高校人才培养应及时引进新的教学方法，培养学生“学以致用”的能力，提高学生的综合能力，使学生具有满足当前社会发展对人才的需求能力。

项目式教学（Project-Based Learning, PBL）是一种以学生为中心的教学方法，这种教学方法立足于学习者的兴趣与需要，设计有目的的活动，强调学生的主动参与、合作、批判性思维和问题解决技能的发展，促进学生对复杂问题的深入理解[2-3]。在项目式教学中融入CDIO理念，即通过构思（Conceive）一个工程项目的想法，然后设计（Design）出解决方案，接着实施（Implement）这个方案，并最终运行（Operate）所构建的系统[4]。在此过程中，教师提供必要的资源、工具和指导，学生通过参与完成项目模拟真实的工程问题，能够更好地理解工程知识的实用性。

一、“土力学”学科特点及现状

土力学是为了研究土的渗流、应力变形、强度和稳定性，以及与其有关的工程问题所建立的一门学科，是岩土工程中的基础学科和基本理论部分[5]。土的碎散性和土-气-水三相组成特性使其在变形、强度等力学性质上与连续固体介质有根本的不同内在机制，土力学理论体系是建立在材料力学、弹性力学、塑性力学等连续介质力学理论体系的基础上，与碎散性工程性质相结合而衍生出来的一门“伪力学”理论体系。基于土性质的复杂性，作为天然材料的不确定性和对环境的高度敏感性，导致了土力学学科中基本概念多、理想化和假设条件多、与实际偏常态化[6]。

土力学本科教学以教师通过课堂讲授土力学经典理论知识为主，部分基础课内实验为辅的传统教学模式，在教学方法上枯燥单一，无法激发学生学习的主动性和自主思考能力。而且，土力学的知识体系很多基于工程性经验而提出的，晦涩难懂，并且涉及到土-气-水三相组成特性的理解，对于没有工程经验的学生而言，只通过课堂上理论知识的学习和简单的实验操作无法达到对课程的理解和知识的吸收。

颗粒流数值模拟分析是一种基于非连续介质分析方法的颗粒离散元分析方法，它通过计算机数值计算和图像显示的方法，可不受变形量控制、方便地处理非连续介质力学问题，体现多相介质的不同物理关系，可有效地模拟介质的开裂、分离等非连续现象，可反映机理、过程、结果，从而达到揭示复杂条件下微、细观介质的累计损伤与破坏机理的目的[7]。基于岩土工程领域研究堆石坝、砂垫层、抛石路基等散体介质非线性材料的事实，结合土力学基础理论知识，通过颗粒流数值模拟分析将土体内部颗粒之间的接触关系可视化，从细观结构机理解释土体的宏观力学特性，可以取得较好的教学效果，加深学生对土力学基本理论知识的理解和吸收。本文以土力学教学为例，基于项目式教学和CDIO理念融合，探讨颗粒流数值模拟分析技术在土力学教学中的应用，对“新工科”建设背景下具有重要意义。

二、课程目标设定

土力学是土木工程专业的一门重要专业基础课，也是港口航道与海岸工程专业等相关专业的一门重要的学科基础必修课程。通过本课程的教学，使学生系统地掌握土的物理性质、土体渗透性以及土的强度与变形特性，掌握土体稳定分析原理与方法，掌握浅基础与桩基础的设计计算方法，能够分析复杂工程实例中土工结构相关问题，能够提出特定工程问题的解决方案，能够设计满足特定工程需求的土工结构，初步具备解决复杂土工问题的能力和创新素质。通过本课程的学习，学生应取得如下学习成果：

（1）掌握土的物理性质，能够计算土的物性指标和确定土的分类；

（2）掌握土的渗流理论、变形理论和强度理论，能够分析土的渗透稳定，能够选择合适的压缩性指标计算地基沉降量和土体的固结度，能够计算不同试验方法的土体强度指标并确定其适用的工程问题；

（3）掌握挡土结构物、土坡稳定分析方法，掌握浅基础地基承载力和桩基础承载力计算方法，能够应用土力学基础知识分析土工结构的稳定性；

（4）掌握土的基本物理性质指标的室内试验方法，掌握土的压缩性指标的试验测定方法，掌握土的强度指标的试验测定方法，具备开展常规土工试验的能力，能够对试验结果进行分析，提出供工程设计、施工应用的指标及建议。

新工科教育发展模式下，适应社会发展的教学内容和先进的教学手段必不可少。我国持续发展的基础建设使得工程条件越来越复杂，伴随着计算机技术的飞速发展，颗粒流数值模拟分析方法已经成为岩土工程求解科学问题不可或缺的分析手段。如张家铭等[8]利用颗粒离散元商用软件PFC2D对沉桩过程中钙质砂颗粒破碎情况进行了模拟，从细观角度分析不同桩型的沉桩过程、桩周土体的力学响应、沉桩过程中钙质砂的颗粒破碎现象。

教师将颗粒流数值模拟分析技术应用到土力学基础理论知识的教学中，以应用较广泛的PFC软件为例，教师在教学中对软件的使用方法进行演示，教授学生使用软件的流程：软件的程序编写逻辑是什么，如何编写代码建立模拟模型，如何查看和分析模拟的结果。同时，学生在课后应能主动利用网络资源、数值模拟仿真软件等多种途径自主加强学习和巩固土力学及实验课程的知识应用，在这一过程中加深对土力学理论知识的理解，养成自主学习的能力。如对三轴剪切试验进行数值模拟，可以直观地展现实验过程中土颗粒位置迁移、力链网络变化等试样结构变化，帮助学生从实验背后的细观机理角度理解三轴剪切过程中应力、应变等宏观力学问题。

三、教学手段的选择

土力学课程强调理论与实践相结合，教学中应将先进的教学方法和手段整合到传统的课堂教学模式中，创新教学方法，更新教学手段。通过理论学习、实践运用，课堂讨论、课后复习，使学生获得知识运用能力、实验分析能力和工程设计能力。教师在教学中应当注重工程实例的引入和分析，引导学生独立思考和自主分析，并因材施教，结合课程内容适当安排课后习题和项目实践课题，使学生及时巩固土力学这门课的学习成果。本课程在教学方法上有如下三点建议。

3.1 传统的课堂教授教学

本课程在传统课堂教学中采用多媒体与板书相结合的教学模式。多媒体教学利用PPT软件，将课程内容和与可视化的图片和视频信息结合起来，不仅可以调动学生上课的积极性，同时也可以在有限的课时内有效地进行课堂教学活动。在教学初期引入最新的相关案例，通过案例讲解引出本课程将要讲授的知识点，以便学生对将要讲授的教学内容有直观的认识；在习题课上，通过课堂练习检查学生理论知识的学习效果，回答学生的问题；在实验课上，通过观察学生的实验操作检查学生对实验过程的理解，帮助学生完成实验过程；教师通过课后批改学生的课后作业和实验报告，掌握学生对课程内容的理解程度，及时与学生就课程理解上进行沟通交流。

3.2 基于项目的学习

教师从选取典型的案例，带领学生一步步地利用颗粒流数值模拟分析开展基于项目的学习，在此过程中训练学生的思维能力、项目规划及组织能力、以及问题的解决能力。通过基于项目的模拟分析实际软件应用操作，使学生掌握数值模拟分析的要点，培养对数值模拟分析的学习兴趣。

3.3 课堂外的自主学习

得益于发达的互联网体系，大量的学习资源均可通过网络搜索获取。学生可利用课余时间，利用微课、MOOC、国家虚拟仿真实验教学课程共享平台等网络教学资源自主学习本课程的相关内容和颗粒流数值模拟分析技术，预习复习课堂教学内容，完成课程案例和实践项目等。

四、教学反馈与持续改进

基于“新工科”教学体系的要求，学生除了应该掌握土力学课程内容的基本理论知识，也应该掌握利用软件开展数值模拟分析相关问题。为了达到这目标，教师可根据教学内容的不同阶段，采取不同的教学方法，加强与学生的沟通联系，及时掌握学生的学习情况，根据学生对课程内容的掌握程度及时调整教学进度，修改教学进度和教学手法。可采取如下措施进行教学反馈和持续改进：

1. 教学开始前，教师应根据大纲制定授课计划，在第一次上课时将课程教学大纲和授课计划面向全体学生公开，向学生解释本大纲，尤其是课程目标、教学内容和教学进程、考核方法和考核节点，将联系方式和工作时间告知学生，以便其出现问题时及时取得联系。
2. 学生可通过电话、邮件、即时通讯工具（QQ、微信等）以及面谈等多种形式将自身在课程学习中遇到的难点、问题点、以及对课程的思考等反馈给教师，教师应当对学生提出的反馈意见及时地进行相应的调整，灵活应对学生的学习需求。
3. 教师应当采用课堂练习、课后作业等形式，分阶段检查学生的学习效果。每一章节课程结束后，教师应及时批改学生的课后练习和实验报告，针对学生的练习完成情况及时地给出意见，督促学生在后续的课程中改进，并适当调整教学安排。
4. 理论任课教师须与实验指导教师协调配合，全程参与指导每个实验项目的首批次实验。同时，理论教师、实验教师都应主动了解学生就实验项目设置、实验教学内容、实验动手能力培养等所提出的意见和建议，共同对课内实验教学各相关环节做出持续化改进。
5. 教师认真批改学生综合实践项目报告，分析学生计算方法的合理性、计算模型的准确性、设计图纸的正确性、以及项目报告的完整性，从中发现问题点，找出学生课程掌握中的薄弱环节，适当修改课程教学安排，完善学生课程学习中的不足。

教学结束后，学生应及时通过学校网上评教系统，客观公正地评价本次教学活动，为教学质量监控系统提供最直接的数据源；同时，教师应认真分析本次教学活动的课程目标达成情况（尤其是不同评价方法下的不一致情况），在下一轮教学活动中持续改进。教师适当跟踪学生在后续课程学习中以及工作后运用本课程知识解决相关工程问题的能力，关注与本课程相关的社会需求及技术发展，用于本课程的持续改进，适时修订本教学大纲。

五、课程考核体系选择

传统的课程考核体系以考试为主，大多仅仅强调平时作业与期末试卷成绩，忽略了对学生综合能力的考查。在新工科建设背景下，应该积极调动学生的自主学习能力、团队协作能力和积极创新能力；因此，在传统的实验考核和考试考核的基础上，还需要针对项目式教学的评估方法，提出合理的考核体系进行评估。

土力学的基本概念和基础知识是学习颗粒流数值模拟分析技术的重要基础，土力学课程考核由平时考核（30%）、课内实验考核（10%）和期末考试（60%）三部分组成。在考核过程中，注意学生个体差异，可以适当制定个性化评定方式，并适时进行评定。其中平时考核的重点是学生自主学习的意识和成效，主要考查点包括预习复习情况、作业完成情况、课堂表现及出勤情况等。课内实验考核主要考核学生对教学内容的实践操作能力，包括实验准备、实施效果、实验报告等环节。期末考试采用闭卷笔试的形式，时间120分钟，满分100分，试题中包含填空题、简答题和应用计算题，分值大致比例为3:4:3。其中填空题考查学生对土力学课程基本概念的掌握情况；简答题考查学生对土力学基础知识和基本理论的掌握情况；应用计算题考查学生运用所学知识分析问题和解决问题的能力。体量和题型难度应保证学生可在120分钟内完成，并有时间检查。试卷内容应充分支撑课程目标的要求，各教学单元的主要考查知识点如下表1所示。

表1：各教学单元主要考查知识点

|  |  |
| --- | --- |
| 教学单元 | 主要考查知识点 |
| 土及土的物理性质和工程分类 | 土体物理性质指标；无粘性土和粘性土的物理状态；土的击实性 |
| 土的渗透性和渗流问题 | 渗透系数；渗流力；渗透破坏;有效应力原理的应用 |
| 土体中的应力计算 | 自重应力；基底附加应力；地基附加应力 |
| 土的变形特性和地基沉降计算 | 土的压缩指标；土的沉降量；分层总和法；平均固结度 |
| 土的抗剪强度 | 土的抗剪强度理论；直剪和三轴压缩试验；三轴压缩试验中土的特性；砂土的液化 |
| 土压力及土坡稳定分析 | 土压力类型；朗肯土压力理论；库伦土压力理论；土压力计算；非粘性土坡稳定性；圆弧滑动法；瑞典条分法；重度替代法 |
| 浅基础的地基承载力及其设计 | 地基的破坏形式；地基极限承载力；地基容许承载力；地基承载力特征值；基础埋置深度；软弱下卧层承载力验算；不均匀沉降 |

针对项目式教学，教师在教学阶段可以演示颗粒流数值模拟软件，并安排学生在课后还原课堂上的演示案例，让学生熟悉颗粒流数值模拟的分析方法和流程。在课程教学过程中布置简单的数值模拟案例，以此培养学生的收集资料、自主学习能力。课程考核可采用分组形式，多个学生组成一个项目团队，以自主选题额定方式，利用颗粒流数值模拟分析软件共同完成项目模拟分析并形成项目分析报告。组内学生在报告中体现选题背景、资料查阅情况、数值模拟分析过程、结果分析、小组成员分工情况等内容，教师通过审阅报告质量、成员贡献度等情况进行评价。

六、总结

在国家大力开展新工科建设的背景下，高等院校人才培养应紧跟社会对人才的发展需求。土力学是土木工程专业及港口航道与海岸工程专业一门重要的学科基础必修课程，以工程应用为导向，通过课堂讲授和实验教学环节为基础，引入项目式教学方法，以学生为中心，通过利用颗粒流数值模拟分析技术应用于课程教学活动中，加深学生对土力学基础理论知识的理解，掌握颗粒流数值模拟分析的基本思路和方法，有利于提高学生的自主学习能力和研究能力，初步具备解决复杂土工问题的能力和创新素质，以适应当前社会对相关专业人才的需求。

**基金项目**：教育部产学合作协同育人项目“思政元素融入海洋工程专业课程建设-以《海洋工程流体力学》为例”（项目编号：221001616061842）；江苏省高等教育教改研究重点课题“新工科背景下基于OBE理念的海洋工程类专业本科生创新能力培养体系构建与实践” （项目编号：2023JSJG058）。

**第一作者简介：**农珍珍（1987-），女（壮族），广西百色人，博士，助理研究员（通讯作者），研究方向：砂土液化及软土地基力学特性。

**参考文献：**

1. 顾佩华. 新工科与新范式：概念、框架和实施路径[J]. 高等工程教育研究, 2017(6): 1-13.
2. 王海, 赵东梅. 项目式学习：走向知识的新建构[J]. 教学考试, 2022,(37): 9-13.
3. 樊秀娣, 阮文洁. 项目化学习让学生成为学习的主人[N]. 光明日报, 2023.
4. 徐梦溪, 吴晓彤. CDIO方法：高等工程教育改革与新发展[J]. 2022, 12(3): 606-613.
5. 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学（第三版）[B]. 北京：清华大学出版社, 2022.
6. 曾玲玲, 王月娇, 卞夏, 史吏. “土力学”科教融合课程建设探讨[J]. 教育教学论坛, 2023(52): 92-96.
7. 石崇, 张强, 王胜年. 颗粒流（PFC5.0）数值模拟技术及应用[B]. 中国建筑工业出版社, 2018.
8. 张家铭, 邵晓泉, 王霄龙, 胡舫瑞, 左鸿鹏. 沉桩过程中钙质砂颗粒破碎特性模拟研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 272-278.

**Application of Particle Flow Numerical Simulation Analysis Technology in the Reform and Exploration of Soil Mechanics Teaching**

NONG Zhen-zhen, LIU Qian, GAO Jun-liang

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, 212003)

**Abstract:** Under the background of new engineering construction, universities should timely introduce advanced teaching methods to change the traditional single-mode classroom lecture teaching model. Soil mechanics is a discipline that studies the seepage, strength, and deformation characteristics of soil. The fragmentation and tri-phase composition of soil mass give it an essential difference in mechanical properties such as deformation and strength compared to continuous solid media. The particle flow numerical simulation analysis technique is based on the analysis method of discontinuous media and is widely used in the study on discontinuous medium mechanics problems. The introduction of particle flow numerical simulation analysis technology into soil mechanics teaching through project-based teaching method can help students to understand the content of soil mechanics course and stimulate their learning interest and research ability.

**Keywords:** soil mechanics; particle flow code numerical simulation; project-based teaching