

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2016.05.038

# 土力学课程有限元软件的优化与应用

商翔宇,刘崇梁,郝飞,赵光思

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院,江苏徐州 221116)

**摘要:**为了弥补当前土力学课程实践教学环节的不足,在前期开发的土力学教学有限元仿真软件基础上,新增三个计算模块,使得该软件涵盖了平板载荷试验、三轴试验、恒定渗流、简单边坡稳定性和挡墙土压力分析等土力学课程中所有重要问题的分析。另外,在每个仿真模块中添加了关于该模块的土力学原理、有限元基本理论和实现方法,以及模型计算参数的含义与经验取值范围的介绍,提高了软件的易用性。优化后的软件涵盖内容全面,具有更好的容错性和易用性,能够服务于土力学课程的本科教学,达到以“虚”补“实”,激发学生学习兴趣和提高学生能力的目的。

**关键词:**土力学;有限元仿真;课程教学

**中图分类号:**G642.0;TU43

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2909(2016)05-0164-05

土力学是高校土木工程专业的核心课程之一,也是地质工程、工程力学等本科专业的必修课程,其具有理论与实践并重的显著特点<sup>[1]</sup>。然而,一方面由于实验室条件和教学资源的制约,当下的高校教学无法开展土力学课程教学中诸如现场浅层平板载荷实验和三轴剪切实验等重要土力学实验,难以达到预期理想的教学效果。另一方面,由于恒定渗流、边坡稳定以及土压力问题等经典土力学问题往往是授课重点,但由于这些问题涉及到的模型假设众多,公式推导和计算方法复杂,严重降低了学生的学习兴趣。近年来,将计算机数值仿真技术引入到教学中<sup>[2-3]</sup>,改变了传统的教学模式,丰富了传统的教学方式,成为当前的教学改革方向。

迄今为止,如 Ansys、Abaqus 等可用于有限元仿真模拟的大型商用软件较多。这些软件,除了需要购买知识产权费用外,还因功能强大,要求使用者具有系统的力学基础和有限元知识才能掌握;另一方面这些软件对计算机的硬件要求较高,因此并不适用于本科教学。鉴于此,本文第一作者在美国 Smith 和 Griffiths 教授提供的开源简易有限元代码基础上<sup>[4]</sup>,基于 Visual Fortran 的集成编译环境<sup>[5]</sup>,开发了能够初步满足人机互动及可视化教学要求的土力学课程有限元软件 1.0 版本,并取得了一定的令人满意的教学效果<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2015-12-21

基金项目:2013 年度住房和城乡建设部“土木工程专业卓越计划专项”;中国矿业大学教学改革项目(2014SY02)。

作者简介:商翔宇(1977-),男,中国矿业大学力学与建筑工程学院副教授,博士,主要从事土力学教学与研究,(E-mail)xyshang@cumt.edu.cn。

但是随着该软件在教学中的应用,发现其仅能对平板荷载试验、三轴剪切试验进行模拟分析,无法满足对其他诸如渗流、土压力和边坡稳定等重要经典土力学问题的分析。学生在对计算参数的选择以及相应理论知识的深入了解方面均存在一定困难。此外,已开发的土力学课程有限元软件 1.0 还存在譬如程序只能向前不能后退、无法让用户在使用过程中改变参数等问题,以及由于不同计算模块合成时出现的某些数据类型错误和软件界面乱码等问题,这些都影响了该软件的应用。

针对上述不足,笔者在前述开发的软件 1.0 版本基础上,增加了土力学中重要的恒定渗流分析、边坡稳定分析以及土压力分析三个计算模块,使得新软件 2.0 分析模块涵盖了土力学课程本科教学的所有重要内容,并在计算模块中增加了对计算模型的背景知识、计算参数的物理意义与经验取值范围,以提高程序的易用性。此外,笔者更正了原有程序中的错误,以提高其容错性,并提供更为完善的人机交互功能。所开发的优化后的土力学课程有限元仿真软件 2.0 能够更好地进行土力学课程主要实践内容的仿真模拟,使该课程的教学内容得到了进一步丰富,达到了以“虚”(虚拟仿真)补“实”(工程实践和试验)的预期教学效果。

### 一、软件的优化内容

如前所述,本研究所开发的软件 2.0 主要在软件 1.0 基础上<sup>[6]</sup>,新增三个计算模块,增加了必要的背景知识和参数选择推荐,并修正了部分错误。限于篇幅,本文主要对前面两个主要优化工作进行介绍。

优化后的程序 2.0 的启动页面如图 1 所示,程序主界面中的菜单有平板荷载试验、三轴剪切试验、恒定渗流分析、边坡稳定分析、被动土压力分析、小工具、说明等七个部分。

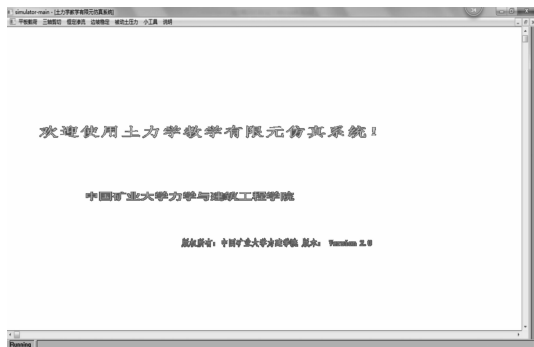


图 1 程序 2.0 版本的软件启动界面

### (一) 提高程序易用性

为了降低本科学生使用本软件的知识门槛,达到激发学生学习的兴趣,软件的 2.0 版本增加各个计算模型的分析简介、参数取值参考,并对有限元软件使用进行必要的介绍,以便于学生们学习和使用。所添加内容主要包括如下三个部分。

#### 1. 计算模型分析简介

对平板荷载试验、三轴剪切试验、恒定渗流、边坡稳定性和被动土压力五个土力学中的经典试验进行了必要总结。主要介绍了相应的实验目的和室内或原位试验方法,并对相应的土力学计算理论和方法进行了简要的描述。对于仿真试验,以浅层平板荷载试验为例,本软件简要说明了实验目的,然后阐述了其原位试验方法,可使学生在使用本软件的同时再次复习书本知识,达到温故而知新的目的。对于仿真分析,如恒定渗流分析,本模块首先定义恒定渗流,再介绍常用的计算理论与经验算法,以便学生提前预知恒定渗流仿真分析模块所能实现的功能。

#### 2. 计算参数的取值建议

软件 2.0 为用户嵌入的“参数含意与取值”这一选项卡,学生可以随时查看各个模块中涉及的各项计算模型参数的含义和取值范围。其中的土性参数,参照《工程地质手册》按照砂土、粉土、粉质黏土和一般黏土分类给出了相应的经验取值范围,或者提供了可参考的经验计算公式。因学生缺乏实践经历,对土性参数理解不到位,其数据选取更加不明确,使得仿真试验或分析结果不具有实际意义。藉于此部分计算参数的取值建议,为普遍缺乏有限元计算经验的本科学生提供了可靠借鉴。

#### 3. 有限元介绍

为使本科学生了解本程序设计思路与算法,加深对仿真试验和分析的认识,同时深入浅出地给部分本科学生提供一个初步了解有限元思想的入口,程序 2.0 版本增加了对有限元相关知识的简单介绍,主要包括对有限元基本思路以及相应模块有限元实现方法的介绍。通过对有限元的介绍,使本科学生初步理解有限元思想,并进一步提高深入学习的兴趣。也使得学生对有限元思想及其运用有初步认识,破除了其今后学习如 ABAQUS、PLAXIS 等大型通用软件时因不理解有限元理论而形成的心理障碍。

上述部分在程序中的相应见面如图 2 所示。

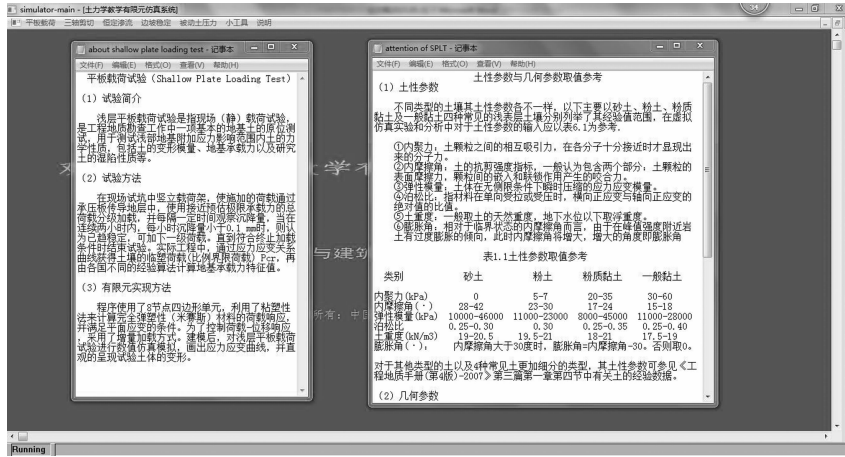


图2 用于提高程序易用性的必要介绍

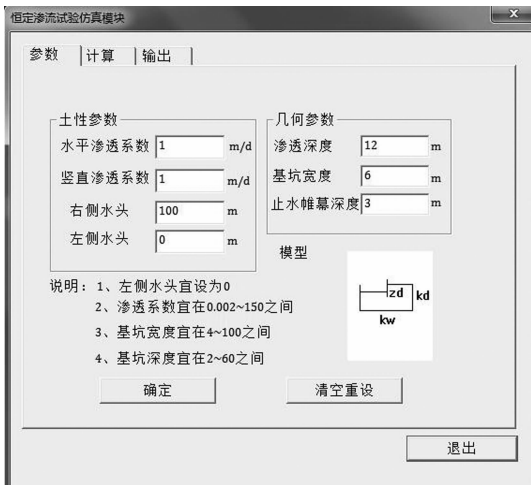
(二) 新增计算模块

软件 2.0 在保留原有软件平板荷载试验和三轴试验两个模块的基础上,新增加了恒定渗流分析、边坡稳定分析、被动土压力分析三个计算板块。如下将简要介绍新增计算模块的具体功能和实现效果。

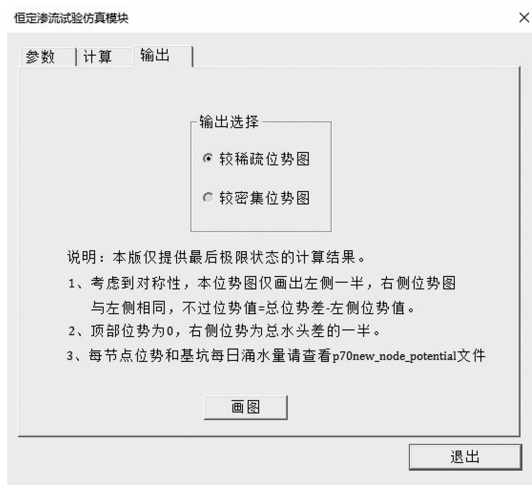
在恒定渗流分析、边坡稳定分析、被动土压力分析三个计算模块中,均可以选择分析简介、参数含义与取值、仿真分析和退出以获得不同的响应。其中,“分析简介”和“参数含义与取值”主要为了给出必要的介绍,在上文已有介绍。“仿真分析”模块为程序的核心模块,点击“仿真分析”按钮后程序将弹出“参数”、“计算”和“输出”三个子选项卡。其中在“参数”对话框中,需要使用者输入需要的土性参数和相关模型几何参数(各参数意义及经验取值可从“参数含义与取值”选项中获得);在“计算”选项卡中,使用者可以选择不同的控制计算误差、计算网格精度和最大迭代次数,考虑使用者对这些参数的合

理选择需要对非线性有限元知识有必要的了解,在程序应用界面中给出了相应的解释和推荐值;在“输出”选项卡中,使用者可根据需要选择输出包含不同数据的计算图形用于后续分析。

以恒定渗流分析为例,进入“恒定渗流”计算模块后,选择仿真分析选项。程序提醒使用者在“参数”对话框中输入必要的物理和模型参数等:水平渗透系数、竖直渗透系数和包括模型的左、右侧水头的边界条件,以及包括渗透深度、基坑宽度和止水帷幕深度在内的模型几何参数。在“计算”对话框中,使用者可选择较粗、中等和较细三种不同精度的计算网格精度。在“输出”对话框中,使用者则可以选择输出计算域内水头势分布图,还可通过打开程序所在文件夹中的相应文件获取每节点位势和基坑每日涌水量。程序中上述相应的参数输入和结果输出界面见图3。



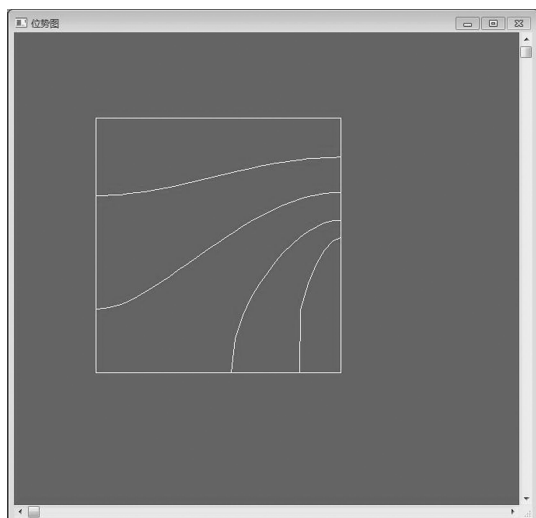
(a) 参数输入界面



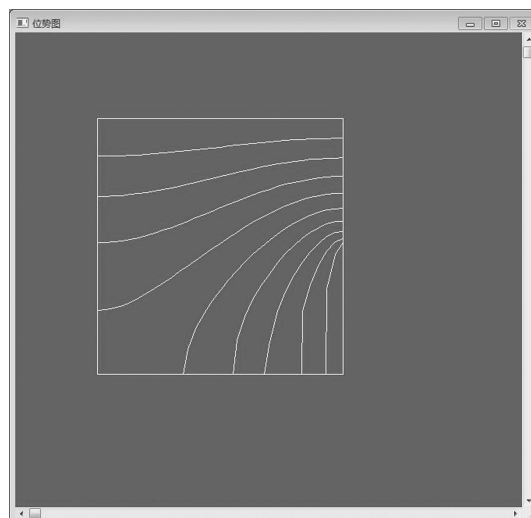
(b) 结果输出界面

图3 恒定渗流分析模块交互界面

根据输入的土体参数,经过计算,可以选择较稀疏或密集的水位势图,根据不同选项得到如图 4 所示的两种仿真分析图。



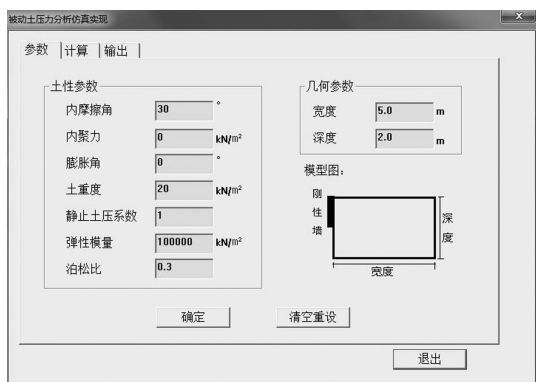
(a) 较粗的水位势图



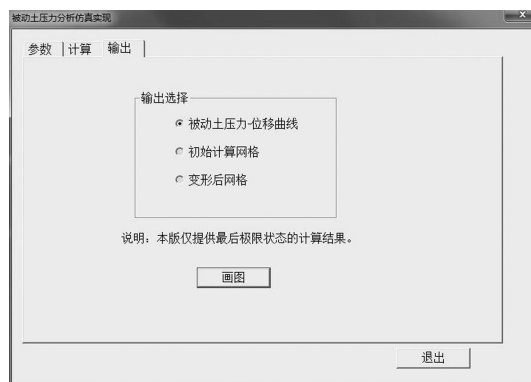
(b) 细化的水位势图

图 4 恒定渗流分析仿真效果图

图 5 和图 6 分别给出另外两个计算模块的参数输入界面和计算结果输出界面,由于其界面上信息具有自明性,不再赘述。

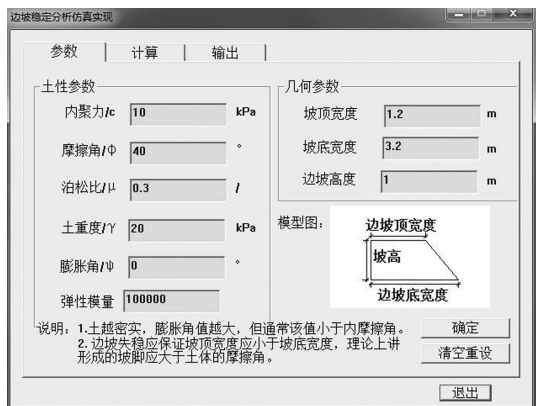


(a) 参数输入界面

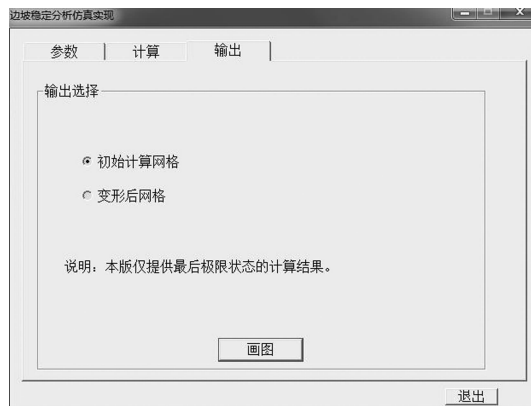


(b) 结果输出界面

图 5 土压力分析模块交互界面



(a) 参数输入界面



(b) 结果输出界面

图 6 简单边坡分析模块交互界面

## 二、软件应用

本文所开发的软件代码开源,免安装、文件小且

易操作,能较好地满足本科土力学实验模拟、课堂教学和高阶学习。在软件 1.0 基础上,新增了三个计

算模块,并增强了软件的易用性和容错性。实践表明,改进后的软件2.0可以达到如下三点应用目标。

### (一) 虚拟实验模拟

浅层平板载荷试验作为地质勘查中最常使用的原位试验方法,用于测量土的变形模量、地基极限承载力等重要的土力学性质,而挡土墙土压力问题和边坡稳定性问题均是经典的土力学问题。除此之外,渗流问题也是土力学的重点教学内容之一。在目前土力学课程教学中,尚难以普遍展开上述问题的试验;即便少数学校能够有条件进行该类实验,但由于试验影响因素较多,投入较多,难以保证实验效果。而本文开发的土力学有限元仿真软件2.0可实现对上述经典土力学问题试验的仿真模拟,以数值模拟的方式弥补目前上述的土力学实践环节的不足。

### (二) 改善教学效果

土力学课程教学中,恒定渗流分析、边坡稳定分析以及土压力的计算往往是授课重点,但由于这三个土力学问题涉及到的模型假设多,计算方法复杂,严重降低了学生的学习兴趣和课堂参与度。本软件可以作为课堂教学的补充,以被动土压力计算为例,教师课堂上可为学生讲解经典的朗肯土压力理论和摩尔库伦理论,介绍其计算方法,并在课堂上演示本软件的操作使用,通过输出被动土压力一位移曲线,帮助学生理解土压力的分析过程,并通过计算后的变形网格让学生直观地感受被动土压力对土体的影响。

### (三) 高阶学习辅助

本文开发的土力学仿真软件2.0版本具有较好的易用性,这进一步激发了本科学生的学习兴趣,加深学生对基本土力学理论知识的理解。通过系统变换土性参数和试验条件,利用该软件的模拟结果,可

以与书本上的相应经典土力学计算理论结果进行对比,通过这些对比可以研究相应理论中的简化假设的影响。与此同时,可以引导学生在土力学及其相关知识上进行更高阶的学习。

### 三、结语

在前期开发的土力学本科教学有限元软件1.0的基础上,笔者开发的软件2.0版本新增了恒定渗流等三个计算模块,使之能够分析目前土力学课程所有重要的、实践性很强但又无法在本科教学实现的经典问题。另外,本研究还补充了模型计算参数含义与推荐取值范围的必要介绍,提高了软件的易用性。目前的软件能够为当前土力学课程教学提供虚拟的实践资源,弥补了课堂实践教学环节的不足,能更好地激发了学生的学习兴趣。实践表明,该程序能够作为本科土力学课堂教学的有益补充,以及高阶学习的辅助工具,可以提高学生对课程知识的掌握程度,达到预期的教学效果。

### 参考文献:

- [1] 东南大学,浙江大学,湖南大学,等. 土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 王常明,王清,范建华,等. 计算机仿真在土力学实验教学中的应用[J]. 高等建筑教育,2005,14(4):96-98.
- [3] 张昭,郭呈周,肖昭然. 基于修正剑桥模型的三轴试验仿真模拟[J]. 岩土力学,2007,28(9):1949-1953.
- [4] Smith I. M., Griffiths D. V. 有限元方法编程[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [5] 唐章宏,薛赛男,冯峰,等. Visual Fortran 程序设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2000.
- [6] 商翔宇,郑秀忠,梁恒昌. 土力学本科教学有限元仿真软件的开发与应用[J]. 高等建筑教育,2014(23):136-139.

## Optimization and application of finite element code for soil mechanics course

SHANG Xiangyu, LIU Chongliang, HAO Fei, ZHAO Guangsi

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, P. R. China)

**Abstract:** To make up for the current lack of practical part in the course of Soil Mechanics, based on the previous finite element code developed by the author, we add three new calculation modules so that the new software covers all the typical topics including the plate loading test, triaxial tests, constant seepage, simple slope stability and pressure on retaining wall earth. In addition, in order to improve the ease of use of the developed code, the summary of corresponding soil mechanical theories, the implementation of finite element method, the physical meaning of required calculating parameters and their range in practice are added into each computing module. The new code has a complete coverage of basics in soil mechanics and has good abilities of fault tolerance and ease of use. The software developed in this study enriches the practical teaching resources for soil mechanics and stimulates the learning interest and ability of undergraduate students.

**Keywords:** soil mechanics; finite element simulation; course teaching

(编辑 王 宣)