

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.01.031

# 《岩土工程数值分析》教学案例库建设与实践

张西文, 谢群, 杨涛春, 刘俊岩, 刘燕

(济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022)

**摘要:** 研究生课程《岩土工程数值分析》具有知识面广、难度大、学习枯燥等特点, 如何进行科学地教与学需要进行研究。通过课程教学实践, 总结提炼了岩土边坡、地基沉降、基坑开挖、地铁隧道等 10 个典型的教学案例并进行深入挖掘和加工, 建立了本课程的教学案例库, 综合培养学生对理正岩土、FLAC<sup>3D</sup> 和 MIDAS/GTS 等常用数值分析软件的理解和应用。课后通过调查问卷对授课学生进行跟踪和教学反馈, 调查结果表明学生初识软件时存在迷茫和感觉较难的现象, 经过案例的学习、课后自学及大作业的训练, 对岩土工程领域的数值计算有了初步的掌握, 对常用软件实现了轻松入门, 能够对岩土工程常见问题进行建模分析, 为今后的科研工作开展和岩土工程设计奠定了良好的基础。

**关键词:** 岩土工程数值分析; 教学案例库; 研究生教育; 调查反馈

中图分类号: G642.0

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)01-0199-04

## Construction and Practice of Teaching Cases Library of Numerical Analysis of Geotechnical Engineering

ZHANG Xiwen, XIE Qun, YANG Taochun, LIU Junyan, LIU Yan

(School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China)

**Abstract:** The postgraduate course numerical analysis of geotechnical engineering is characterized by a wide range of knowledge, great difficulty and boring learning, so how to teach and learn scientifically is an important issue which needs to be analyzed. According to the teaching practice of this course, 10 typical teaching cases of rock and soil slope, foundation settlement, foundation pit excavation, subway tunnel etc. were deeply excavated and processed. The teaching cases library of this course were summarized and established, which can comprehensively develop students' understanding and application of numerical analysis software such as Lizhe Yantu, FLAC<sup>3D</sup> and MIDAS/GTS. The teaching-learning feedback was carried out by the form of the questionnaire. It is found that students are confused and feel more difficult when they first learn these software. Through case study, after-school self-study and job training, the students can preliminarily master the basic numerical methods in geotechnical engineering and carry on the modeling analysis to the common problems in geotechnical engineering. For the student's future research and design work in geotechnical engineering, this teaching library can lay a good foundation.

**Keywords:** numerical analysis of geotechnical engineering; teaching cases; postgraduate education; survey feedback

《土力学》是研究土的物理力学性质, 解决工程中土体受荷载作用下的强度、变形和稳定性问题的一门学科。经过近几个世纪的发展, 形成了现代

《土力学》的四个分支:《理论土力学》、《应用土力学》、《试验土力学》和《计算土力学》。《土力学》讲究“从实践中来, 到实践中去”, 是理论加经验, 实用

收稿日期: 2021-06-24

修稿日期: 2021-07-20

基金项目: 山东省专业学位研究生教育课程教学案例库项目 (SDYAL19042; SDYAL20124; SDYAL17039); 济南大学校级研究生精品课程项目 (YJPK19005; YJPK20007); 济南大学研究生教学改革研究项目 (JDYY1909); 教育部产学合作协同育人项目 (201701074007)

作者简介: 张西文 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方向的教学和科研工作。E-mail: cea\_zhangxw@ujn.edu.cn

性和实践性都非常强的一门课程。随着计算机技术、土体本构理论、有限单元法等理论的快速发展,《计算土力学》已经变成研究生开展学术研究不可或缺的重要手段。数值模拟成为解决岩土工程问题不可替代的手段和工具,数值计算能力的培养是研究生教育教学过程中的一个重要方面<sup>[1]</sup>。很多高校将《岩土工程数值分析》这门课程作为必修课程为研究生开设,引导学生运用所学《土力学》知识,通过计算机软件解决工程问题。常用的数值分析方法有有限单元法、有限差分法、边界单元法等<sup>[2-3]</sup>,常用的数值计算软件有 ABAQUS、FLAC<sup>3D</sup>、ANSYS、MIDAS 等。其中 FLAC<sup>3D</sup>作为有限差分法的代表软件在岩土工程广泛应用,ABAQUS 和 MIDAS/GTS 作为有限单元法软件在岩土工程中应用广泛<sup>[4-5]</sup>。秦鹏飞等<sup>[6]</sup>对 PFC、FLAC、PLAXIS、GeoStudio 等岩土分析软件进行了对比和探讨。

另外,岩土工程涉及的领域较多,如建筑工程中的基坑开挖<sup>[7]</sup>、地基沉降、基础工程等,水利工程中的大坝稳定性<sup>[8]</sup>、土体渗流,隧道工程中的隧道掘进<sup>[9]</sup>、矿山工程、地震工程<sup>[10]</sup>等,数值计算是当前岩土工程问题分析的重要方法之一<sup>[11]</sup>。传统的理论讲授侧重于土的应力应变、强度稳定性等,知识略显枯燥乏味,且不能与实际工程相联系。朱术云等<sup>[12]</sup>、张玉等<sup>[13]</sup>在岩土工程课程中采用了实例教学法,较好地提高了学生学习的积极性。李宁等<sup>[14]</sup>提出了《岩土工程数值分析》学习应用的四个层次,对教学和科研具有重要指导意义。周建<sup>[15]</sup>指出了研究生论文数值计算中存在基准测试、模型理解和问题分析三个问题,因此在教学中也应避免这三类问题的出现,建立教学案例,深入工程问题的分析。

在研究生教学中不断创新和改进,采用了教学案例、学生 PPT 授课、大作业展示、角色转换、在线课堂等多种形式,教学质量和效果明显提升。本文重点介绍针对《岩土工程数值分析》所建立的教学案例库及其实践和应用,案例库包含 10 个典型岩土工程相关的工程案例,帮助学生理解数值计算的相关理论,提高学生分析解决问题的能力。课后,通过“问卷星”在线问卷调查的方法调研了学生的学习效果和对软件的掌握情况。

## 1 《岩土工程数值分析》课程特点与教学内容

与本课程相关的先期课程有《土力学》、《弹性

力学》、《塑性力学》、《有限单元法》等,涉及的数值计算理论、计算软件和参考教材五花八门,是一门难度较大且非常综合性的课程。如果只是从理论上进行教学,学生会因为听不懂感到枯燥乏味。根据济南大学岩土工程方向研究生的学习能力和研究方向,制定了《岩土工程数值分析》课程的培养方案和授课计划,目的是解决实际岩土工程问题,本课程的教学内容及精选 10 个典型案例如表 1 所示。

表 1 《岩土工程数值分析》教学内容与案例库

授课章节	教学案例
第一章 岩土数值计算方法简介	—
第二章 极限平衡分析的基本理论	案例一:公路路基边坡稳定性分析 案例二:某实际滑坡体案例分析
第三章 土的应力应变关系	—
第四章 有限差分法与 FLAC	案例三:地基沉降变形分析 案例四:基坑开挖土体变形分析 案例五:强度折减法在边坡稳定性分析中的应用 案例六:土石坝渗流分析
第五章 有限单元法及应用	案例七:地铁隧道开挖对周边建筑的影响 案例八:MIDAS/GTS 在边坡稳定分析中的应用 案例九:基坑工程可回收锚杆分析
第六章 土动力学与地震工程	案例十:地下隧道地震响应分析

## 2 案例库建设内容与教学实践

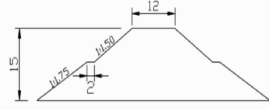
根据专业培养方案和本课程的教学目标,对十个典型案例进行深入挖掘和教学设计。每个案例制作一个案例卡片如图 1 所示,从案例背景资料、模型尺寸、学习要点、模型源文件等方面对案例进行详细介绍。通过课堂教学及学生课后实践,可以对岩土工程领域的具体工程问题进行数值分析。

## 3 研究生学习效果调查与分析

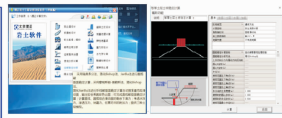
通过“问卷星”对近三年学习该课程的研究生同学发放了调查问卷,收集到样本 42 份,其中研一的问卷 24 份,研二的问卷 8 份,研三的问卷 10 份。图 2 为该课程难度的调查结果,从年级上分析研三的学生再回过头看这门课程时 100% 认为该课程是中等难度,说明学生随着研究的深入,对本课程的理解和掌握更加深了。

案例一：公路路基边坡稳定性分析

某路基高H=15m, 路基宽度b=12m, 内摩擦角为22°, 黏聚力c为20kPa, 填土的重度为17.5kN/m³, 车辆荷载为均布荷载50kPa。采用极限平衡分析方法验证该路基边坡稳定性。



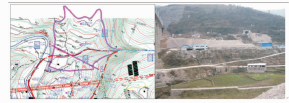
学习要点: 锻炼学时运用理正岩土软件, 运用极限平衡分析方法(直线法、折线法、圆弧滑动法 Bishop法、瑞典条分法等)



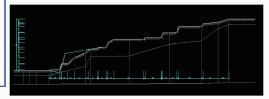
(a) 案例一：公路路基边坡稳定性分析

案例二：某实际滑坡体案例分析

案例简介 该案例为某客运专线龙洞大桥与小高山隧道处, 边坡堆放有渣土, 边坡安全稳定性影响铁路大桥安全运营。分析该滑坡体的稳定性, 及降雨等不利工况下的稳定性。



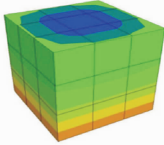
学习要点: 理正岩土软件多个坡面设置、地下水设置、分析方法设置、土层参数设置、结果导出



(b) 案例二：某实际滑坡体案例分析

案例三：地基沉降变形分析

案例简介: 地基沉降变形为岩土工程典型问题。理论上常采用分层总和法计算, 在数值分析上常用有限单元法、有限差分法等进行分析。本案例给出地基土层的参数为密度、体积模量、剪切模量、泊松比等如下图所示。要求分析地基在自重作用和外荷载(100kPa)作用下的沉降变形。



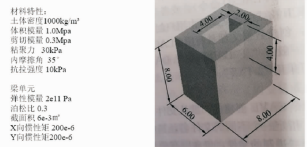
学习要点: 学习使用FLAC3D软件generate、model、fix、set gravity、solve、apply、plot等基本命令。

```
new-gen zone brick size 3 3 3 group 1-
model mesh range group 1
property bulk shear 1e6
material 20000
fx z range 0 1 0 1
fy z range 0 1 0 1
fx y range 0 2 0 1
fy y range 0 2 0 1
history add 1 unbal-
solve
save gdat file
save gdat file
save gdat file
plot mesh 1
```

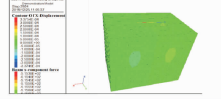
(c) 案例三：地基沉降变形分析

案例四：基坑开挖土体变形分析

基坑工程中土体开挖、支护结构等是典型的岩土工程问题。分析开挖过程中基坑的变形。



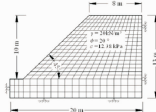
学习要点: 学习使用null单元。在分析中, 将单元设置为空单元, 即代表单元不参与计算, 变成空单元, 实现主体的开挖过程。



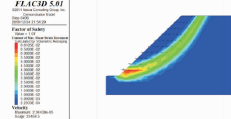
(d) 案例四：基坑开挖土体变形分析

案例五：强度折减法在边坡稳定性分析中的应用

运用强度折减法分析该边坡的安全系数。



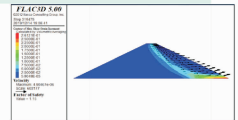
学习要点: (1) 掌握强度折减法的三种判据。(2) 学习使用Flac3d 建模方法(3) 学习FLAC3D中的solve、fos命令



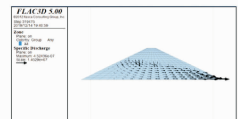
(e) 案例五：强度折减法在边坡稳定性分析中的应用

案例六：土石坝渗流分析

案例简介: 中国的土石坝数量占到大坝总数的93%, 而土坝的渗漏是水库病险的主要因素之一。通过FLAC3D软件模拟土坝模型, 计算在水位上升时土坝内的渗流情况。



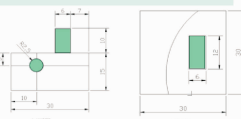
学习要点: (1) 学习流固耦合分析。(2) 学习FLAC3D中的water table、ini pp 和apply pp等命令。



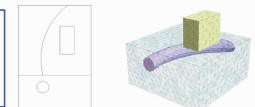
(f) 案例六：土石坝渗流分析

案例七：地铁隧道开挖对周边建筑的影响

随着城市建设的需要, 一般地铁隧道修建在城市的繁华区域, 周边环境复杂, 有很多的周边临建筑物, 隧道的开挖对周围的建筑物势必造成影响。



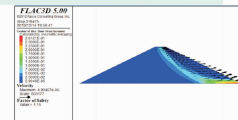
学习要点: (1) 学习使用MIDAS/GTS软件。(2) 二维线框生成三维实体模型(3) 学习隧道开挖模拟



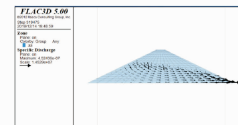
(g) 案例七：地铁隧道开挖对周边建筑的影响

案例八：土石坝渗流分析

案例简介: 中国的土石坝数量占到大坝总数的93%, 而土坝的渗漏是水库病险的主要因素之一。通过FLAC3D软件模拟土坝模型, 计算在水位上升时土坝内的渗流情况。



学习要点: (1) 学习流固耦合分析。(2) 学习FLAC3D中的water table、ini pp 和apply pp等命令。



(h) 案例八：FLAC3D在土石坝渗流分析中的应用

案例九：基坑工程可回收锚杆分析

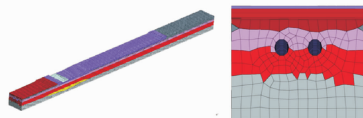
(1) 案例简介: 可回收锚杆(索)技术极大地解决了传统锚杆(索)不能回收利用、资源浪费, 占用地下空间等一系列缺点, 但在开发、设计和应用中仍存在较多的工程问题。以实际工程为例, 对可回收锚杆的开挖施加和回填回收的全过程进行数值模拟分析。对济南市某基坑工程模拟, 基坑模型尺寸、基坑开挖深度、基坑土层与围护结构的位置关系和土层参数简化如图18、图19所示。分析开挖施工和锚杆回收的过程对整个基坑锚杆支护体系的工作性状影响。

Table with 4 columns: 土层名称, 厚度, 容重, 内摩擦角, 黏聚力. It lists soil layers 1 through 4 with their respective parameters.

(i) 案例九：基坑工程可回收锚杆分析

案例十：地下隧道地震响应分析

(1) 案例简介: 本案例模型来源于某隧道工程, 具体模型图如下图所示, 隧道全长3 890 m, 外径为15.2 m, 内径13.9 m, 管片厚度650 mm, 为长大型水下隧道。根据盾构隧道与地层的位置关系, 隧道穿越了粉质黏土层和黏土层, 隧道上部位于粉质黏土层, 下部位于黏土层, 土层采用摩尔-库伦本构模型, 分析模型尺寸为X×Y×Z=141.6 m×251.6 m×98.83 m, 模型节点数42 265个, 单元数196 485个, 模型边界采用自由场边界。



(j) 案例十：地下隧道地震响应分析

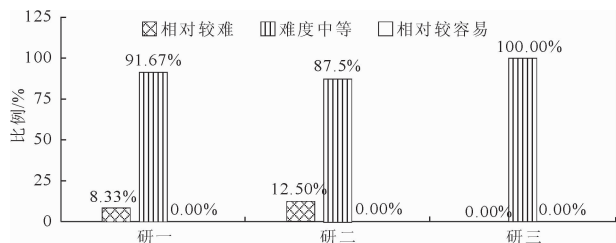


图 2 对本课程难度的调查问卷结果

图 3 表示了研究生对本课程案例的调查结果,整体上 92.5% 的同学认为该课程难度中等,7.5% 的同学认为该课程相对较难,说明本课程的理论及案例教学相对是难易适中,绝大多数的同学能够从案例教学中学到专业知识,对自己的研究有所帮助。

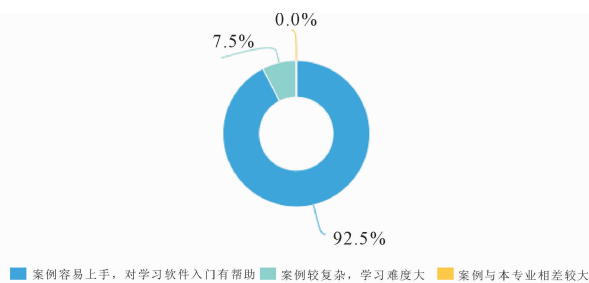


图 3 对本课程案例的调查问卷结果

调研研究生同学对 MIDAS/GTS、FLAC<sup>3D</sup>和理正岩土三款软件的掌握情况如图 4 所示,可见对 MIDAS/GTS 的掌握情况最好,92.5% 的同学基本能掌

握软件的使用,但是对 FLAC<sup>3D</sup>的掌握情况较差,仅有 57.14% 的同学掌握。根据研究生对几款常用数值软件的难易程度排序(如图 5 所示),可见 MIDAS/GTS 在四款软件中最容易学习的,所以,对 MIDAS/GTS 的掌握情况最好。

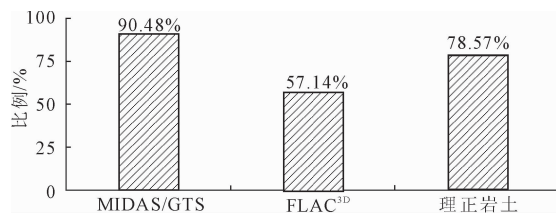


图 4 对三款软件的掌握情况

选项	平均综合得分	比例
ABAQUS	2.88	
ANSYS	2.74	
FLAC <sup>3D</sup>	2.69	
MIDAS/GTS	1.50	

图 5 常用数值软件的难度系数排序

对本课程的 10 个典型案例进行调研,图 6 分析了学生认为应重点学习的案例。其中排名前三的案例为:地基沉降变形分析、基坑开挖土体变形分析、地铁隧道开挖对周边建筑的影响,与本校研究生的主要研究方向基本一致。通过本次调研对本课程的持续改进具有重要意义,根据学生的学习特点及研究方向,对案例库进行不断优化,教学中注重难点层次分明。

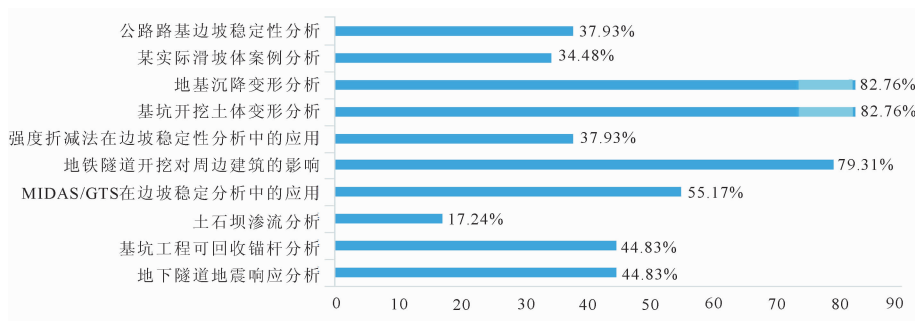


图 6 10 个教学案例重点学习调查结果

## 4 总结

依托济南大学研究生课程《岩土工程数值计算》,对研究生教学案例库的建设背景及建设过程进行了总结。根据岩土工程领域常用数值分析基本原理及相关的应用软件,重点学习了理正岩土、Flac<sup>3D</sup>和 MIDAS/GTS 的理论和应用。建立了 10 个典型的岩土工程教学案例库,案例库的特色为:(1) 理论实践相结合;(2) 带领学生亲自操作演练,课堂

理论学习的同时学会建模技能;(3) 涉及工程问题范围广,深入浅出。通过对不同年级研究生的跟踪调查分析,教学中的案例库得到了学生的认可,学生在学习中学到了专业知识和软件使用技能,较好的掌握了岩土工程领域的相关数值计算方法。因此,在理论讲授的基础上,建立一系列数值分析案例库,对该课程的教学实施及学生的学习效果具有重要的意义。

(下转第 206 页)

问题的能力,培养多学科交叉发展的毕业生综合能力。本文以西安建筑科技大学城市地下空间工程专业毕业设计为例,基于黄土地区的特殊工程背景,探讨了毕业设计初步的教学改革,从选题、开题、过程考核到答辩等方面分析了本专业的做法,为类似高校本科毕业设计(论文)工作提供经验和借鉴。

### 参考文献:

- [1] 唐礼忠. 城市地下空间工程专业新专业的设置与建设[J]. 理工高教研究, 2002, 21(5): 88-90.
- [2] 蒋雅君, 周晓军, 晏启祥, 等. 城市地下空间工程专业建设概况与发展展望[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(5): 17-24.
- [3] 陈剑, 宫莹. 城市地下空间工程专业课程体系建设研究与实践[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(2): 25-27.
- [4] 靳军伟, 李明宇, 李光. 城市地下空间工程专业计算机辅助设计教学研究[J]. 教育教学论坛, 2020, 13(3): 288-289.
- [5] 唐东旗, 王跃东, 李栋栋, 等. 城市地下空间工程实践教学平台创新[J]. 实验室科学, 2020, 23(1): 211-213.
- [6] 张胜, 黎永索, 李柏, 等. 基于学科竞赛的城市地下空间工程专业实践教学改革创新研究[J]. 教育现代化, 2019, 6(65): 25-26, 36.
- [7] 李顺群, 柴寿喜, 刘举, 等. 城市地下空间工程专业毕业设计(论文)改革与实践[J]. 高教学刊, 2020(19): 133-135.
- [8] 慕焕东, 李荣建, 王松鹤, 等. 等我国城市地下空间工程专业分布格局及其行业特点分析[J]. 教学研究, 2017, 40(1): 68-71.
- [9] 齐昌广, 刘干斌, 郑荣跃. 基于 CDIO 的宁波大学岩土工程专业本科生毕业设计改革初探[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(4): 115-119.
- [10] 高强, 于文龙. 黄土地区某地铁区间隧道设计难点分析与探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 212-217.
- [11] 严健, 晏启祥, 富海鹰, 等. 工程教育认证背景下城市地下空间工程专业培养方案构建[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(6): 80-87.
- [12] 刘勇健. 基于协同育人理念的城市地下空间工程实践教学体系探索——以广东工业大学为例[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(2): 152-157.
- [13] 徐杨, 孙萍, 孙雪. 应用型本科高校城市地下空间工程专业毕业设计环节的创新与实践[J]. 教育教学论坛, 2019(35): 147-148.
- [14] 蔡燕燕, 刘士雨, 涂兵雄. 城市地下空间工程专业本科毕业设计的共性问题及教改探索——以华侨大学为例[J]. 教育教学论坛, 2018(10): 107-108.
- [15] 李宁, 杨卿. 西部水利与土木建设中的岩土工程问题[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 1-8.
- [16] 曲宏略, 刘磊, 刘颖, 等. 提高城市地下空间工程专业本科毕业论文(设计)质量的探讨[J]. 教育教学论坛, 2017(11): 130-131.

(上接第 202 页)

### 参考文献:

- [1] 杨文东. 提高岩土工程研究生数值计算能力的探讨[J]. 教育教学论坛, 2013(12): 175-177.
- [2] 黄平, 李小超. 数值计算在岩土工程中的应用[J]. 电力勘测设计, 2015(S1): 144-149.
- [3] 吴昌将, 包华, 吴坤, 等. 数值计算在土力学课程教学中的应用研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(22): 173-175.
- [4] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 2010.
- [5] 李治. Midas/GTS 在岩土工程中应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [6] 秦鹏飞, 赫亚勋. 土工常用数值计算软件探析[J]. 河南城建学院学报, 2018, 27(1): 62-67, 85.
- [7] 严佳捷, 樊秀峰, 吴振祥. 淤泥深基坑开挖下土体的变形特征[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 61-65.
- [8] 赵飞, 范书立. 马马崖水电站溢流坝段三维深层抗滑稳定分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(5): 204-208.
- [9] 许有俊. 数值模拟方法在地下结构工程教学中的应用[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2016, 30(1): 162-165.
- [10] 苏惠, 贾良, 严松宏, 等. 隧道洞口段结构地震响应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2): 156-158.
- [11] 余婷. 岩土工程有限元方法的应用问题新探[J]. 西部资源, 2021(2): 67-68, 71.
- [12] 朱术云, 李小琴, 朴春德, 等. 实例教学法在“岩土工程数值分析”课程中的应用探讨[J]. 中国地质教育, 2015, 24(4): 111-113.
- [13] 张玉, 李宝平, 刘瑾, 等. 案例教学在土力学与地基基础课程中的应用探讨[J]. 高教学刊, 2020(1): 116-118.
- [14] 李宁, 杨敏, 李国锋. 再论岩土工程有限元方法的应用问题[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1140-1148, 1157.
- [15] 周建. 岩土工程专业研究生论文存在的问题探讨[J]. 高等建筑教育, 2009, 18(2): 117-120.