

高性能计算技术在岩石力学课程教学中的应用

李连崇, 梁正召, 马天辉, 张永彬

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:岩石力学是一门实践性很强的课程,工程实例、实验模型和理论模型的结合将直接影响课程的教学效果。介绍了把基于高性能计算技术的软、硬件平台应用于岩石力学教学的情况,拓宽了传统实验教学中的实验对象,实现了对工程实例、实验模型和理论模型的精细数值表征;通过鼓励学生自发设计模型进行数值模拟分析,激发了学生的思维能力和创造性,有利于学生理解和掌握教学内容。在高性能计算机日益普及的形势下,对国内高校岩石力学教学提供了有益的参考。

关键词:岩石力学;教学;高性能计算技术;数值模拟

中图分类号:TU4-4

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2010)01-0126-05

岩石力学是土木工程、水利工程、工程力学、采矿工程等诸多专业的必修课程,是一门与生产实际紧密结合的课程。当前,很多高校培养方案均要求学生深刻理解岩石力学理论,并能够联系实际解释岩石工程失稳、破坏等相关问题^[1-2]。随着计算机技术的发展,利用计算机对岩石的变形与破裂过程进行数值实验,不仅具有通用性强、方便灵活、可重复性等特点,而且可以通过数值实验得到许多在常规实验室实验中难以观测到的重要信息^[3-4]。

普通PC机上的数值实验已不能满足岩石力学教学要求,因为它仅仅能实现对一般实验模型的数值再现。岩石力学是一门实践性很强的课程,只有将工程实例、实验模型和理论模型结合,才能增强教学效果,而对于上述三者的数值模拟,普通的单机串行计算技术已经显得无能为力^[5-6]。在众多教师探索岩石力学教学新方法的时候,高性能计算机及大规模并行计算技术的出现,为教学改革提供了契机。21世纪,大规模并行计算技术已经和理论、实验一样,成为科学研究的一种重要手段^[6]。随着高性能计算机的出现,通过数值模拟,人们能够对物理参数超出现有实验能力与复杂度的各种情况进行研究。可以说,在我们对科学现象的理解和对复杂工程与社会系统的建模等方面,数值模拟正起着越来越重要的作用。

该文以大连理工大学岩石力学教学为例,把基于高性能计算技术的软、硬

收稿日期:2009-12-26

基金项目:国家自然科学基金(50909013, 50804006);国家自然科学基金重大国际合作项目(50820125405)

作者简介:李连崇(1978-),男,大连理工大学土木水利学院讲师,博士,主要从事岩土工程灾害预测与控制方面研究,(E-mail)li_lianchong@163.com。

件平台应用于教学中,实现了对工程实例、实验模型和理论模型的结合,使学生参与教学活动的主动性、创造性大为增强,加深了学生对各个层面知识的理解,推动了岩石力学教学,可望对国内高校岩石力学教学提供有益参考。

一、现代岩石力学特征及传统岩石力学教学的局限性

现代岩石力学已不仅仅限于从固体力学的应力分析原理来处理关于岩体的应力、变形等现象,而是一个从连续介质力学的基本原理(质量守恒、动量守恒和能量守恒)出发,应用连续和非连续孔隙弹性介质力学的基本介质表征概念、模型建立手段以及先进的实验方法、数值解法和计算机技术相结合的更广泛、适用的应用力学学科。经典的岩石力学理论,传统的拉、压、剪等实验是岩石力学的基础,但以它们为基本内容的岩石力学教学已不能完全诠释现代岩石力学的概念,并且束缚了学生的想象和思维,不能满足学生对岩石力学概念理解的需求。

现代岩石力学工程多具有大规模、大埋深的特点,深部工程岩体常处于“三高一扰动”(高应力、高温、高水压和开挖扰动)的状态^[7]。例如中国建设中的锦屏二级水电站引水隧洞长16~19km,最大埋深2 525m;墨脱水电站的引水隧洞设计最大埋深可达4 000m;规划中的南水北调西线工程有多条长50~130km的深部引水隧洞;中国许多金属矿山已进入1 000~2 000m深度开采;国外地下矿产的开采已经进入深部阶段,南非许多开采矿井已进入3 000m以下。传统的岩石力学教学已不能完全帮助学生建立起对这些工程的概念。

目前岩石力学教学主要包括理论、室内实验和现场实习观测。理论学习较为枯燥,多数学生的学习积极性不高;现场实习观测对学生而言是必要的,但由于受到现场条件、人力、物力和财力的限制,这种方法很难在教学中实际操作;室内实验虽直观,但由于有关岩石破裂过程现象的复杂性,以及实验室观测手段、经费等条件限制,通常的岩石力学教学很难通过大量的室内实验向学生直观演示各种岩石变形、破坏的复杂现象。随着高性能计算机的出现,数值模拟成为辅助岩石力学教学的重要手段。但传统的串行计算机模拟也越来越满足不了辅助教学的要求,岩石力学工程规模日益扩大、复杂程度越来越高,特别是涉及的破裂问题是一个从变形、损伤演化

到最终失稳的过程,这个过程对数值模拟而言需要网格重划分、单元消去与再生、节点释放和数据存储管理,串行CPU和内存无力对一个几百万甚至上千自由度规模的计算问题做到精细表征。

可喜的是,高性能计算机及大规模并行计算技术的出现为岩石力学教学的创新提供了一个崭新的平台。目前中国高性能计算技术发展取得巨大成就,中国已成为继美国之后世界上第二个能够研制千万亿次超级计算机的国家,高性能计算技术已经成功应用于航空航天、结构分析、岩土工程设计等方面。现在国内多数高校都购置了高性能计算机,充分利用数值模拟辅助岩石力学教学,使学生综合运用电脑知识、专业知识,以及计算分析方法等综合技术,拓宽学生的思维,开拓学生的视野,提高学生的创新能力。

二、高性能计算技术辅助教学的尝试

基于高性能计算技术,学校对本科生及研究生的岩石力学教学进行了改革,以数值模拟辅助教学,效果显著。

硬件平台采用联想深腾1800集群系统,系统由48个计算结点、1个I/O结点、1个管理结点和6.4TB光纤磁盘阵列组成。每个节点配置2颗Intel Xeon E5430(四核、主频2.66GHz、二级缓存6MB*2)、16GB内存、146G SAS硬盘,并配有Red Hat Linux AS5操作系统。

软件平台采用RFPA3D-Parallel并行分析系统^[8],该分析系统采用高效的并行求解策略,在联想深腾1800集群系统上实现了自由度超千万的有限元计算。

在岩石力学教学中,指导学生利用基于高性能计算技术的软、硬件平台进行学习,为此,需要注意以下几点。

(一) 结合实验,加深对已知现象的解释

实现对岩石力学实验现象的认知,这是对数值模拟辅助教学的最基本要求。例如图1,含圆孔缺陷的岩石破坏特征:裂纹在孔洞周围萌生,之后扩展方向逐渐偏离最大主应力方向,向对角线方向扩展,最终形成沿对角线方向的剪切滑移带,试样主要呈现出剪切破坏特征。但这样的模拟结果只有借助于高性能计算技术才能实现,因为模拟的网格尺寸要小到一定程度才能够反映岩石细观尺度上的特征。这里的数值模拟网格划分为 $120 \times 50 \times 50 = 300\ 000$ 单

元,每个单元尺度为0.2mm,基本上实现了对破坏现象的真实尺度表征。

(二) 结合理论,加强对未知现象的探索

在岩石力学教学中,指导学生利用基于高性能计算技术的软、硬件平台,将所掌握的知识实现可视化,实现对未知现象的虚拟显现。例如图2,巴西圆

盘劈裂实验及数值模拟结果,巴西圆盘劈裂的最终破坏模式在实验中可以观测到,但理论上的破坏过程及破坏过程中的应力场演化是传统岩石力学实验中难以观测到的。借助于数值模拟,学生就可根据实际操作的反馈信息来形成对理论的认识和解决实际问题的方案,实现自我学习及对未知现象的探索。

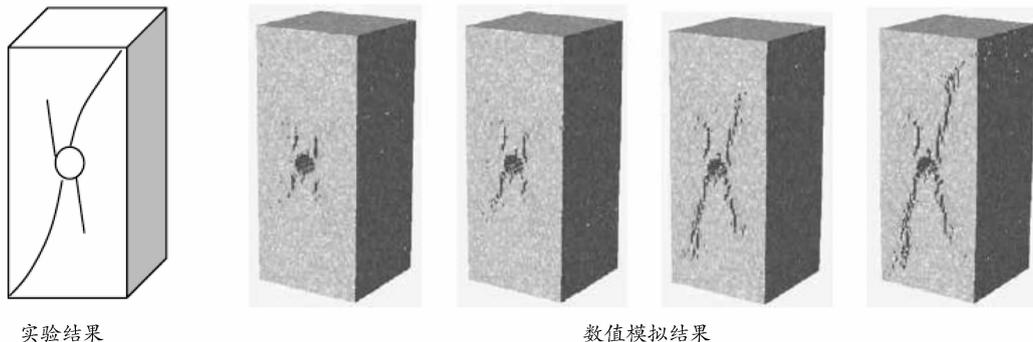


图1 含圆孔缺陷的岩石试样的真三维破坏过程

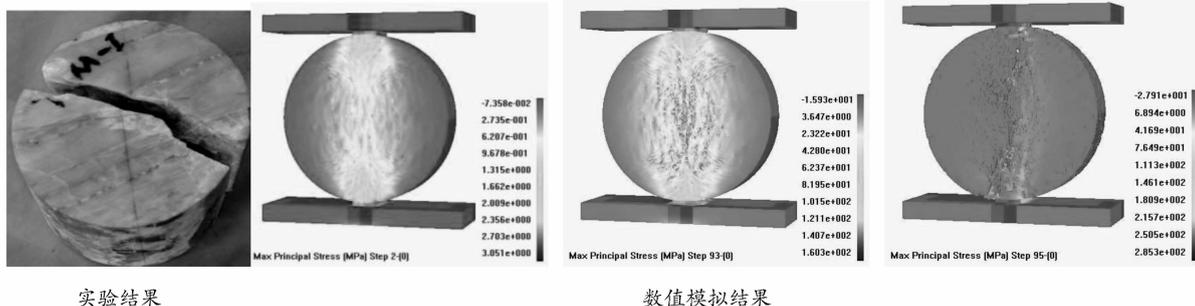


图2 巴西圆盘劈裂实验与模拟

(三) 结合工程,激发学生的学习兴趣 and 主动性

传统的岩石力学理论教学较为枯燥,多数学生的兴趣不高、主动性不强。基于高性能计算技术的数值模拟相对于理论教学而言,具有直观性、设计性、综合性、创新性等特点,可以加深学生对复杂的工程岩体力学性质的感性认识。例如,图3的水力压裂是测量深部地应力及油气开采工程中常用手段,在复杂的地应力条件下,可能会出现不同的压裂模式(如图4所示)。这样复杂的岩石力学工程是不可能到现场观测得到的,即使用数值模拟,普通的PC机也难以完成,因为压裂裂缝多处于深部几千米,裂缝最大半径可达几百米,只有采用高性能计算技术才能实现对这种水力压裂裂缝的真实尺度表征。图5是水力压裂过程的数值模拟。这种形象直观的交互式学习环境,以及图文并茂的丰富信息,在一定程度上使过去枯燥无味的教学变得灵活生动,激发了学生的学习兴趣 and 主动性,进而能更多地获取关于岩石力学理论、实验规律与工程实际现

象内在联系的知识。

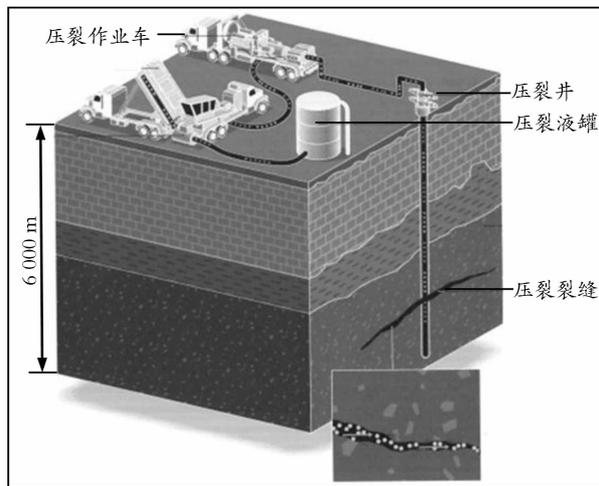


图3 水力压裂工艺示意图

三、教学模式探讨

在岩石力学教学中,辅助以基于高性能计算技术的软、硬件平台进行教学,学生更容易理解和掌握岩石力学中的基本概念。岩石力学是一门实践性很强的课程,实验已经不能仅仅局限于传统的室内实

验,工程实例、实验模型和理论模型都应该采用数值模拟给学生以感性的认识,如图6,笔者总结了利用基于高性能计算技术的软、硬件平台实施辅助教学的各个环节。在教学模式的实施中,有两个环节取得了很好的教学效果。

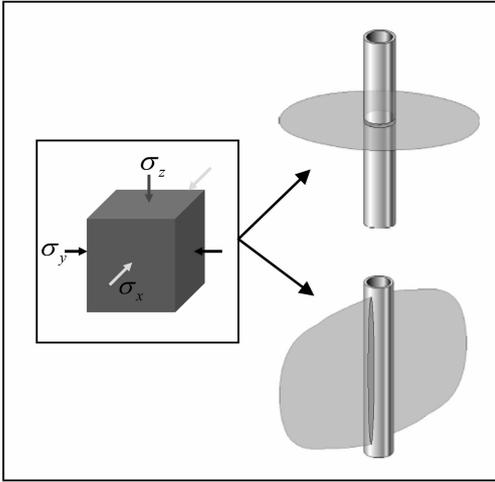
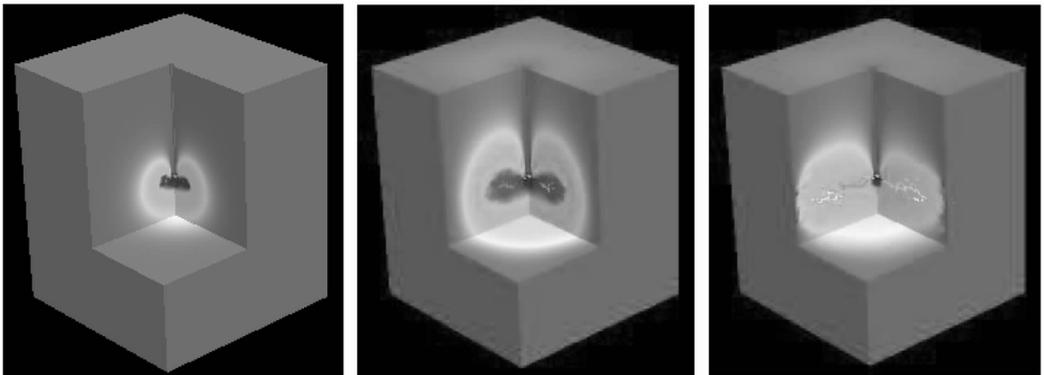


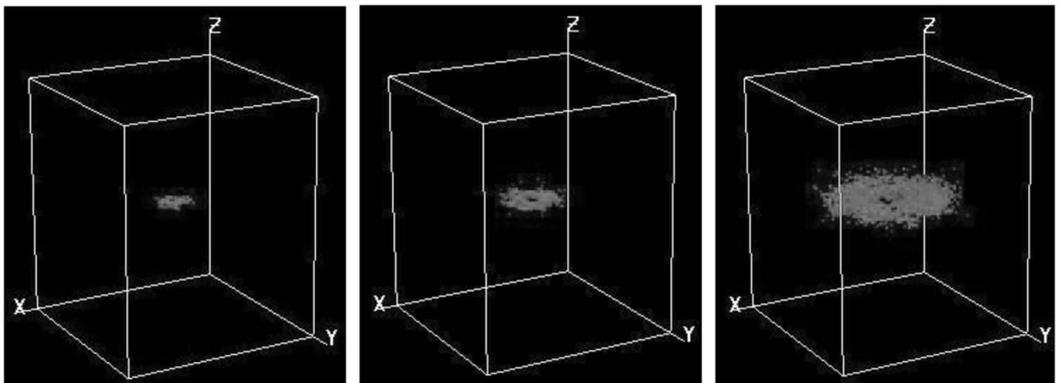
图4 不同应力状态下水力压裂裂缝模式

(一) 数值模型的建模阶段

目前受控于招生数量、师资力量以及仪器设备数量的影响,在传统实验教学模式中,实验内容、所需仪器设备材料以及实验过程多数都由教师规定。首先,实验前,教师根据实验内容准备好实验器材、调试好仪器设备,排除可能出现的问题和障碍;然后,教师讲解实验原理、操作步骤,并进行示范操作,学生则按部就班地进行操作完成实验。这种模式严重地束缚了学生的思维,很难体会到实验的真正内涵。而通过高性能计算机模拟建模,首先拓宽了原有的实验对象,从复杂的岩石工程实例到抽象的理论问题都可以成为实验对象;其次最大限度地激发了学生的创造性,建立起数值模型,进而进行模拟分析,学生能真正地收获实验失败的经验 and 享受成功的喜悦。



(a) 压裂过程中的裂缝扩展及孔隙压分布



(b) 压裂裂缝的空间定位

图5 水力压裂裂缝扩展模式的数值模拟结果

(二) 对未知现象的探索阶段

采用高性能计算技术得到的模拟结果可再现实际实验模型、工程岩体损伤演化过程中的全部信息,

借以分析实际工程出现问题的内在原因及机理,实现理论与实践的有机结合,这在传统的教学方法中是无法办到的。另外学生在完成实验的过程中可以

就所遇到的问题同老师、同学互相交流与讨论,实现教与学的互动,最终学生达到了对知识的真正消化吸收。并且,这个过程使学生综合运用电脑知识、专

业知识以及计算分析方法等综合技术,激发了学生的学习兴趣,开拓了学生的视野,提高了学生的创新能力。

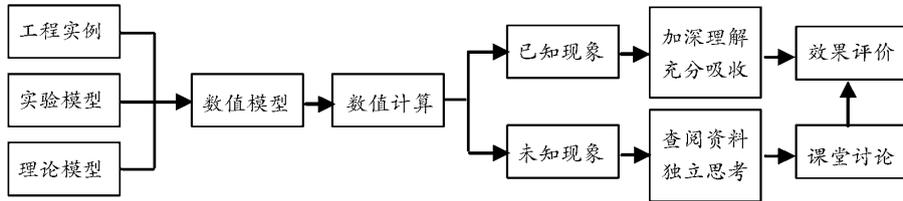


图6 高性能计算技术辅助教学的各个环节

四、结语

笔者提出把基于高性能计算技术的软、硬件平台应用于岩石力学教学,并鼓励学生自发设计模型进行数值模拟分析,实现对工程实例、实验模型和理论模型的精细数值表征和有机融合,以加深学生对岩石力学相关知识点的理解,从而推动岩石力学教学,虽然该手段不能完全取代室内实验、现场观测,却是对完善传统教学方式的一种尝试。用该手段辅助教学,不但有助于学生对基础知识的理解,而且有利于学生创新能力的培养。

参考文献:

- [1] 黄明奎. 岩石力学课程数值实验教学探索[J]. 高等建筑教育,2009,18(4):129-132.
- [2] 陈永贵,王桂尧,黄生文,等. 土木工程专业岩土工程实践性教学改革思考[J]. 高等建筑教育,2009,18(3):

104-107.

- [3] 王述红,唐春安,朱万成,等. 数值试验在岩石力学实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理,2003,20(6):140-143.
- [4] 唐春安,王述红,傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [5] 张友良,冯夏庭,茹忠亮. 基于区域分解算法的岩土大规模高性能并行有限元系统研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3636-3641.
- [6] 张晓欣. 美国科学基金委蓝带工作组报告:基于仿真的工程科学[J]. 高性能计算发展与应用,2007,18(1):4-12.
- [7] 井兰如,冯夏庭. 放射性废料地质处置中的主要岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(4):833-841.
- [8] 梁正召. 三维条件下的岩石破裂过程分析及其数值试验方法研究[D]. 沈阳:东北大学博士学位论文,2005.

Practice in improving the teaching quality of rock mechanics major with high-performance computing technique

LI Lian-chong, LIANG Zheng-zhao, MA Tian-hui, ZHANG Yong-bin

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The course of rock mechanic is an engineering subject with very strong practicality; the combination of rock engineering, experimental model and theoretical model has considerable effects on its teaching quality. The achievement of high-performance computing technique based on soft and hard platform is employed in teaching rock mechanics. The rock engineering, experimental model and theoretical model are numerically investigated subtly. We encouraged students to design the numerical model and conduct the numerical study, which effectively help students to understand the elementary knowledge, foster their creativity, develop their basic research capacity, and expand their thinking extension and depth. With the popularization of high-performance computers, the investigation can provide significantly meaningful guides for the teaching of rock mechanics course in practice.

Keywords: rock mechanics; teaching; high-performance computing technique; numerical simulation