

# 岩石地下工程数字教学平台建设

陈建峰<sup>1,2</sup>, 陈宝成<sup>1</sup>, 石振明<sup>1,2</sup>, 沈明荣<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 地质灾害防控协同创新中心, 四川 成都 610059)

**摘要:**文章采用有限差分程序 FLAC 及科学计算软件 Mathematica 建立岩石地下工程数字教学平台。通过 FLAC 数值模拟, 形象和直观地展现围岩中二次应力分布及规律, 并解释了新奥法初期支护的原理; 采用 Mathematica 对理论解析解进行可视化处理, 形象展现围岩力学参数对二次应力分布的影响。该平台对于提高学生学习兴趣、加深理论知识理解和拓展数值分析能力具有重要意义。

**关键词:**教学改革; 地下工程; 岩石; 数字教学平台; 数值模拟

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 1005-2909(2014)06-0142-04

## 一、岩石地下工程教学现状

岩石力学是地质工程、采矿工程、水利工程、交通土建工程等专业, 以及土木工程专业岩土和地下建筑课群组本科生必修的专业基础课程之一, 主要研究解决工程岩体在各种力场作用下变形破坏规律以及强度和稳定性问题, 在工程实践中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>, 其中地下工程是岩石力学的一个重要应用方向, 如公路和铁路隧道、地下厂房等。

建造地下工程时会遇到各种岩石力学问题, 如岩体的二次应力分布、围岩压力的计算、开挖后围岩的稳定性评价等问题。如何有效地理解掌握这些理论知识, 是岩石地下工程教学环节中极为关键的部分<sup>[2]</sup>。

然而传统的教学方法存在以下不足之处。

(1) 传统教学方法以书本为依托, 主要采用理论公式推导, 最终采用公式形式及少量图表进行展示, 教学形式枯燥, 不能给学生留下直观形象的印象。

(2) 传统教学方法中, 对于复杂的岩石地下工程问题, 理论公式参数较多, 很难分辨每个参数对结果的具体影响程度。

(3) 传统教学方法中, 受书本篇幅及侧重点限制, 较少加入实际工程和数值模拟的数据及结果, 不利于理论与实际应用的结合。

数字教学平台是计算机虚拟仿真技术的一种应用方式, 它是指以计算机为依托, 采用仿真模拟技术模拟真实事件, 同时可以对理论公式进行参数分析并进行直观展示的平台, 目前已经被广泛应用到军事、工业、教育等行业<sup>[3-4]</sup>。数字教学平台作为一种辅助教学手段, 具有形象生动、方便灵活、深入浅出等特点, 能够增加学生的学习兴趣, 提高教学效果<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2014-08-03

基金项目: 教育部专业综合改革试点项目(教高函[2013]2号)

作者简介: 陈建峰(1972-), 男, 同济大学地下建筑与工程系教授, 工学博士, 主要从事地质工程专业的教学与研究, (E-mail) jf\_chen@tongji.edu.cn。

文章开发建设岩石地下工程数字教学平台,形象和直观地展现岩石地下工程建造过程中围岩内部应力应变变化,分析不同岩体参数、应力条件等对围岩二次应力状态的影响,并可实时显示或制成动画。本平台和传统教学方法相结合,进行优势互补,可提高学生的学习兴趣,以达到更好的教学效果。

## 二、岩石地下工程数字教学平台的搭建

### (一) 程序选用

FLAC 软件是由美国 ITASCA 公司开发的一种有限差分程序,特别适合岩土工程问题的数值模拟<sup>[5]</sup>。软件内置多种岩土本构模型,以适应不同工程的需要,其中摩尔-库伦模型是最常用的岩土本构模型。FLAC 软件可分为 2D 和 3D 两种,其中 FLAC 2D 采用界面化操作,并自动生成可执行代码,方便对照理解和修改,同时文中岩石地下工程问题系平面应力、应变问题,因此选用 FLAC 2D 作为数值模拟软件。

Mathematica 是一款科学计算软件,很好地结合了数值和符号计算引擎、图形系统、编程语言、文本系统和与其他应用程序的高级链接,在大学教学中有着广泛的应用<sup>[6]</sup>。Mathematica 通过简单的编程就能容易地实现岩石力学公式图形化,并通过调整公式参数,便可实时观察结果的变化,给学生留下形象直观的印象。其帮助文件功能强大,使用方便,便于学生学习使用,同时也可以应用到其他学科,提高学生数学功底。

由此,文章选择 FLAC 进行数值模拟,采用 Mathematica 进行理论公式分析,以此建立岩石地下工程数字教学平台。

### (二) FLAC 模型建立

文章主要研究圆形洞室岩石开挖引起的围岩应力重分布、稳定性等问题。由于所模拟圆形洞室为对称问题,为加快计算效率,取原模型的 1/4 进行 FLAC 建模,如图 1 所示。圆形洞室开挖半径  $r_a = 1\text{m}$ ,考虑边界效应问题,取边界为 10 倍洞室半径大小<sup>[7]</sup>,即模拟区域取  $10\text{m} \times 10\text{m}$  范围。模型采用 Build - Grid 命令划分为  $100 \times 100$  的矩形网格,再采用 Alter - Shape 命令将网格修改成洞室、围岩两部分。模型左边界约束 X 方向位移,下边界约束 Y 方向位移,上边界施加垂直向初始地应力  $P_0$ ,右边界施加水平向初始地应力  $\lambda P_0$  ( $\lambda$  为侧压力系数)。模型先生成初始应力,平衡后再进行洞室开挖。

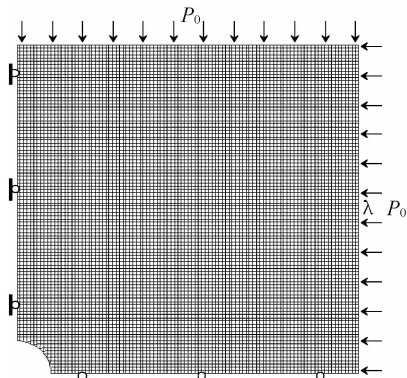


图 1 圆形洞室 FLAC 模型

### (三) 深埋圆形洞室弹性分布的二次应力状态

#### 1. 侧压力系数 $\lambda = 1$ 情况

此时围岩中初始应力  $P_0$  在各个方向相等,即为静水压力状态。根据静力平衡方程、几何方程和物理方程,可以求得深埋圆形洞室围岩的切向和径向应力解析解为:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta} = p_0 \left( 1 + \frac{r_a^2}{r^2} \right) \\ \sigma_r = p_0 \left( 1 - \frac{r_a^2}{r^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{\theta}$ 、 $\sigma_r$  为极坐标下的切向应力和径向应力;  $r_a$  为洞室半径;  $r$  为径向距离;  $P_0$  为初始应力。

采用上述建立的 FLAC 模型和内置的弹性本构模型同样可以计算深埋圆形洞室围岩切向和径向应力分布,计算参数取值如下:侧压力系数  $\lambda = 1$ ,初始应力  $p_0 = -100\text{MPa}$ ,体积模量  $K = 6.7\text{GPa}$ ,剪切模量  $G = 4.0\text{GPa}$ 。洞室开挖后围岩的二次应力状态如图 2 所示,最大、最小主应力分布对应  $\sigma_{\theta}$  和  $\sigma_r$ 。从图中可以直观地发现应力呈环状分布,在同一个圆环上的应力是相等的,  $\sigma_{\theta}$  和  $\sigma_r$  大小与径向距离  $r$  有关,而与径向夹角  $\theta$  无关。洞室开挖后  $\sigma_{\theta}$  随着  $r$  的增大呈现减小趋势,  $\sigma_r$  随着  $r$  的增大呈现增大趋势,二者最终均趋近初始应力状态,这与理论公式反映的规律一致。由于大脑对图形及颜色信息处理能力强,因此数值模拟能够增强学生对理论公式的理解,加深记忆。

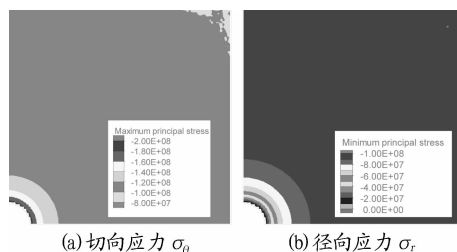


图 2 弹性状态二次应力分布

通过采用 FLAC 的内置 FISH 语言进行编程导出围岩内应力比  $\sigma_\theta/p_0$ 、 $\sigma_r/p_0$  随径向距离变化  $r/r_a$  的曲线图,并与理论解析解进行对比,如图 3 所示。由图可见,数值模拟结果与理论解析解基本一致,从图中可知切向正应力  $\sigma_\theta$  在洞壁处最大为  $2p_0$ ,其随径向距离  $r$  的增大而减小,并趋于  $p_0$ ;径向正应力  $\sigma_r$  在洞壁处最小为 0,其随径向距离  $r$  的增大而增大,并趋于  $p_0$ 。这个结果证明了数值模拟结果的可信性以及采用 FLAC 进行课堂辅助教学的可行性。

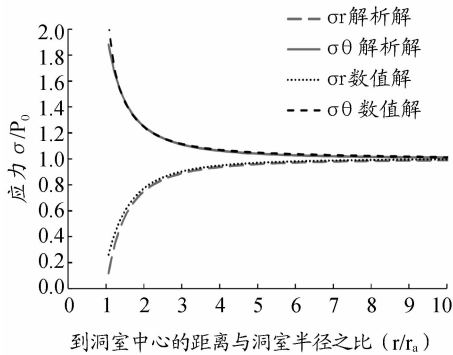


图 3 弹性状态应力随径向距离变化曲线图

### 2. 侧压力系数 $\lambda \neq 1$ 情况

通过叠加原理可以求得围岩中二次应力的弹性力学解析解。在  $r = r_a$  时(即洞壁处)的切向和径向应力解析解为:

$$\begin{cases} \sigma_\theta = p_0 [(1 + 2\cos 2\theta) + \lambda(1 - 2\cos 2\theta)] \\ \sigma_r = 0 \end{cases} \quad (2)$$

令  $K = (1 + 2\cos 2\theta) + \lambda(1 - 2\cos 2\theta)$ , 则  $\sigma_\theta = Kp_0$ , 其中  $K$  称为开挖后围岩总应力集中系数。从总应力集中系数公式可知  $K$  与  $\theta$  角及侧压力系数  $\lambda$  有关,但很难理解这两个因素对  $K$  会产生什么影响,教材中为便于学生理解给出几个特定的  $\lambda$  值的  $K$  分布曲线,但是难以表现  $\lambda$  变化对  $K$  影响的动态变化过程。

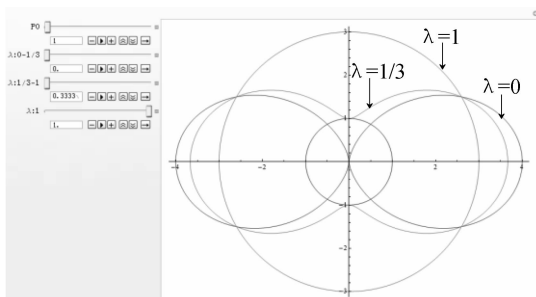


图 4 洞壁总应力集中系数可视化界面

文章采用 Mathematica 对公式(2)进行解析,输

入公式并通过简单的命令便可绘出如图 4 所示洞壁总应力集中系数变化图,其中曲线上的点沿  $\theta$  方向到半径为 1 的圆的距离总应力集中系数值。可以通过左侧滑块及输入框动态调节一个或多个参数,直接观察图形的变化,使学生更加清晰明了地理解公式中参数变化对  $K$  值的影响。

### (四) 深埋圆形洞室弹塑性分布的二次应力状态

侧压力系数  $\lambda = 1$  时,由弹塑性理论可求得深埋圆形洞室围岩的二次应力分为塑性区应力和弹性区应力两种状态。

塑性区应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta p} = \frac{\sigma_c}{\xi - 1} \left[ \xi \left( \frac{r}{r_a} \right)^{\xi - 1} - 1 \right] \\ \sigma_{r p} = \frac{\sigma_c}{\xi - 1} \left[ \left( \frac{r}{r_a} \right)^{\xi - 1} - 1 \right] \end{cases} \quad (3)$$

塑性区以外的弹性区应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta e} = p_0 \left( 1 + \frac{R_p^2}{r^2} \right) - \sigma_{R0} \frac{R_p^2}{r^2} \\ \sigma_{r e} = p_0 \left( 1 - \frac{R_p^2}{r^2} \right) + \sigma_{R0} \frac{R_p^2}{r^2} \end{cases} \quad (4)$$

塑性区半径为:

$$R_p = r_a \left[ \frac{2p_0(\xi - 1) + 2\sigma_c}{\sigma_c(\xi + 1)} \right]^{\frac{1}{\xi - 1}} \quad (5)$$

式中,  $\xi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ ,  $\varphi$  为内摩擦角;  $\sigma_c$  为岩石

单轴抗压强度,  $\sigma_c = c \frac{2\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ ,  $c$  为内聚力;  $R_p$  为围岩塑性区半径;  $\sigma_{r p}$ 、 $\sigma_{\theta p}$  为围岩塑性区内任一点的径向应力和切向应力;  $\sigma_{r e}$ 、 $\sigma_{\theta e}$  为围岩弹性区内任一点的径向应力和切向应力。

采用 FLAC 模型和内置摩尔-库伦理想弹塑性本构模型计算弹、塑性区二次应力分布,计算参数取值如下:  $\lambda = 1$ ,  $p_0 = -100\text{MPa}$ ,  $K = 6.7\text{GPa}$ ,  $G = 4.0\text{GPa}$ ,  $c = 3.45\text{MPa}$ ,  $\varphi = 30^\circ$ 。计算的二次应力状态如图 5 所示,从图中可以直观发现应力呈环状分布。从图 6 可以看出,数值模拟结果与理论公式推导结果的规律一致。洞室开挖后,当  $r < R_p$  时,  $\sigma_\theta$  随着  $r$  的增大而增大;当  $r > R_p$  时,  $\sigma_\theta$  随着  $r$  的增大而减小,并趋于初始应力状态;  $\sigma_r$  随着  $r$  的增大呈现增大趋势,最终均趋近初始应力状态。

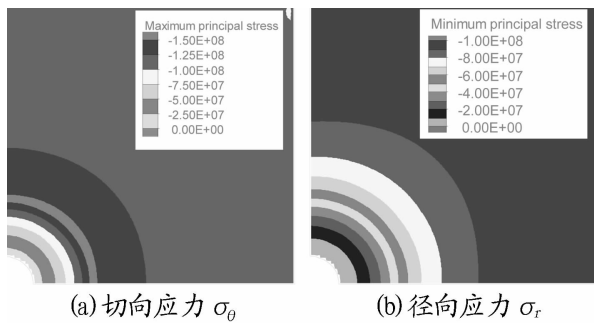


图5 弹塑性状态二次应力分布

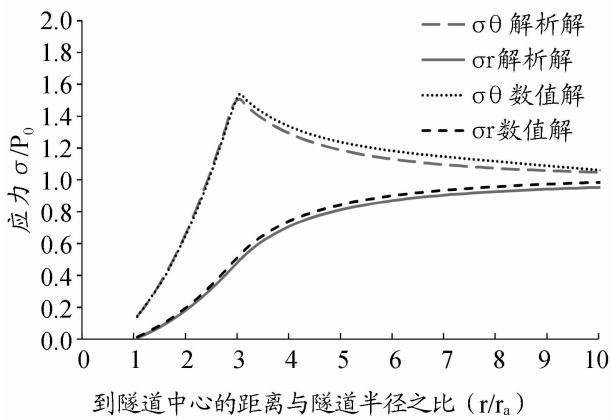


图6 弹塑性状态应力随径向距离变化曲线图

采用 Mathematica 编写公式(4)和(5),并用绘图功能生成如图7所示的可视化界面,这样可以得到不同岩体力学参数下围岩弹、塑性区二次应力分布,并可得到塑性区半径  $R_p$ 。

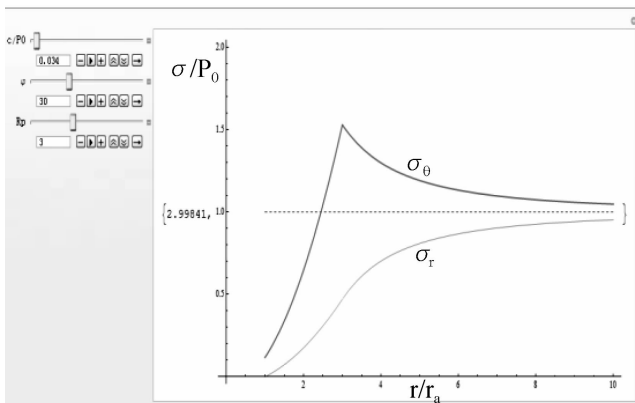


图7 弹塑性状态应力可视化界面

(五)深埋圆形洞室新奥法施工的FLAC模拟

新奥法强调要对围岩尽早进行喷射混凝土初期支护,这样可保证围岩压力随初期支护刚度的逐步增大而降低,最后达到平衡状态。文章采用FLAC对新奥法施工进行模拟,为了便于分析,将支护结构的作用抽象为支护力,并沿圆形洞室洞壁均匀分布。通过控制支护力增加速率来模拟支护刚度和支护时

间对围岩应力重分布的影响。FLAC模拟采用摩尔-库伦弹塑性本构模型,围岩力学参数同上,在洞室洞壁分步施加20MPa的支护力,如图8所示,其中 $\sigma_{\theta\_0}$ 表示支护力在0step内施加完成,即开挖完立即施加; $\sigma_{\theta\_2}$ 表示支护力在2000step内施加完成,其余类似。

如图8所示,随着支护力完成速率的减慢,围岩中的切向应力 $\sigma_{\theta}$ 的峰值先降低后增加,说明当洞室开挖完成后立即施加刚度较大的支护结构(对应 $\sigma_{\theta\_0}$ ),围岩中应力较大;当洞室开挖后施加刚度很小的支护结构时(对应 $\sigma_{\theta\_20}$ ),塑性区范围扩大,塑性松动压力增加,围岩中应力逐渐加大,围岩容易松动脱离发生破坏。由此,可使学生很好地理解洞室开挖后支护的作用时间和刚度对围岩的应力状态影响很大,同时这两个因素也是新奥法施工的关键。

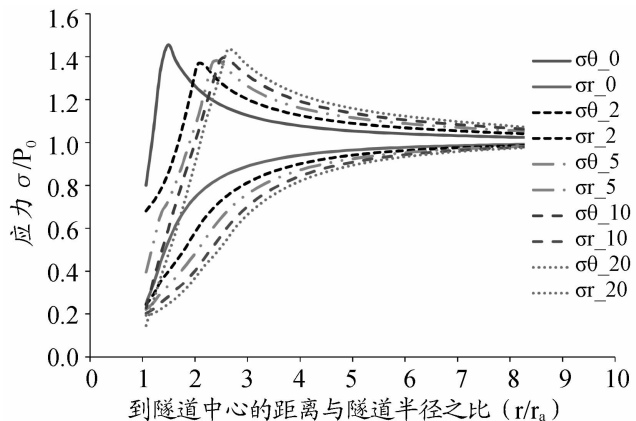


图8 不同支护情况下弹塑性状态应力分布

三、结语

文章通过有限差分程序FLAC和科学计算软件Mathematica建立了岩石地下工程数字教学辅助平台,弥补了岩石力学传统教学的不足。该平台通过实时模拟和可视化处理方式展现了岩石地下工程开挖引起的二次应力分布,以及围岩力学参数对二次应力分布的影响,并探讨了新奥法施工中支护时间和刚度对围岩压力的影响。该平台丰富了教学形式,这对提高学生兴趣、加深理论知识理解和拓展数值分析能力具有重要意义。

参考文献:

[1]沈明荣,陈建峰.岩石力学[M].上海:同济大学出版社,2006.  
 [2]陈建峰,许铁欧,俞松波,沈明荣.岩石三轴压缩强度实验

- 教学改革研究[J]. 高等建筑教育, 2012, 21(1):103-106. 北京: 水利水电出版社, 2009.
- [3]王子才. 仿真技术发展及应用[J]. 中国工程科学, 2003 (2): 40-44. [6]刘兴元,何宜军. Mathematica 软件的绘图功能在高等数学教学中应用示例[J]. 邵阳学院学报:自然科学版, 2008 (4): 41-44.
- [4]王海,李波. 虚拟仿真技术在职业教育实践性教学环节中的应用[J]. 中国职业技术教育, 2011, 14: 48-51. [7]王宏辉,张仙义. 基于 FLAC 3D 的圆形隧道应力位移的数值模拟与分析[J]. 工程建设与设计, 2008, 02: 73-78.
- [5]陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC 3D 基础与工程实例[M].

## Digital teaching platform for rock underground engineering

CHEN Jianfeng<sup>1,2</sup>, CHEN Baocheng<sup>1</sup>, SHI Zhenming<sup>1,2</sup>, SHEN Mingrong<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

2. Collaborative Innovation Center of Geohazard Prevention, Chengdu 610059, P. R. China)

**Abstract:** A digital teaching platform for rock underground engineering was constructed using Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) and Mathematica software. Through FLAC modeling, the stress redistribution in surrounding rock after tunneling can be directly perceived, and the principle of the primary supporting of New Austrian Tunnelling Method can be explained visually. Through visually processing the theoretical formula for underground engineering using Mathematica, the influence of rock mechanical parameters on the stress redistribution can be understood easily. The results are important for undergraduates to enhance the interests in learning, improve the understanding of the theory, and develop the knowledge of numerical analysis.

**Keywords:** teaching reform; underground engineering; rock; digital teaching platform; numerical simulation

(编辑 胡 玥)