

基于Python与FLAC^{3D}模型参数动态迭代的实现

冯亮, 陈星明*, 粟登峰

西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010



摘要:在岩体工程领域,岩石的峰后强度对工程结构的稳定性至关重要。为了精确地描述岩石在峰后阶段的力学行为,提出了基于连续参数动态修正的耦合技术框架。利用Python建立试验数据驱动的实时反向传播算法,通过FLAC^{3D}内嵌接口实现莫尔—库伦本构参数演化函数的多线程动态迭代,突破传统固定参数修正法的精度瓶颈,开发了基于实时数据同化的多参数逆向优化引擎,构建了应变梯度自适应的三维本构场动态迭代模型。研究表明:原始模型的应力水平始终高于实际值,而修正模型的应力模拟值与试验值幅值匹配,高估趋势完全消除。本研究为岩石参数精度缺失的优化提供了新思路,研究成果可为岩土工程设计提供科学依据和指导。

关键词:岩石;单轴压缩;数值模拟;应变软化;动态修正;峰后强度

中图分类号: TU45 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)05-1031-08 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.050

引用格式: 冯亮, 陈星明, 粟登峰. 基于Python与FLAC^{3D}模型参数动态迭代的实现[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(5): 1031-1038. FENG Liang, CHEN Xingming, SU Dengfeng. Dynamic Iterative Implementation of Parameters Based on Python and FLAC^{3D} Models[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(5): 1031-1038.

岩石是采矿、基坑和隧道等各类工程中的常见材料,对于各类工程的稳定性具有重要影响,因此研究其力学行为显得十分必要。岩石是一种非均匀脆性材料,在对其进行应力加载至峰值强度后,岩石材料的强度会迅速降低,但依旧会保有一定强度,这种由于变形引起岩石材料强度降低的现象称为岩石的应变软化(Wang et al, 2020)。为准确模拟岩石的应变软化现象,数值软件通过特定的本构模型(刘志祥等, 2023; Chen et al, 2024)控制岩石力学参数,从而间接控制岩石的变形与破坏。然而,研究人员对岩体的本构关系和变形破坏机理的理解不够透彻,加之输入数值模型的数据参数不够准确,导致模拟结果的可靠性和准确性难以保证(刁心宏等, 1999; 唐春安, 1999),因此构建精确岩石力学参数模型尤为关键。

在数值模拟中,构建真实的岩石应变软化模型

是岩体工程计算分析的关键问题。数值模拟技术被广泛应用于揭示岩石峰后力学行为等方面,其突破主要体现在参数关联模型的构建和数值实现方法的创新上。通过在FLAC^{3D}平台引入动态参数修正机制,实现了岩石本构行为与实验数据的精准映射。首先,建立了黏聚力和内摩擦角等关键参数与塑性应变梯度的非线性耦合方程,揭示了不同岩石在应变软化阶段的动态响应规律(张帆等, 2008; 王卫华等, 2021);其次,提出了广义力学参数框架,通过状态参数重构屈服面模型,显著提升了软弱岩体在复杂围压下的模拟精度(陆银龙等, 2010; 孙闯等, 2015)。同时,基于Voronoi多边形离散模型(裴书锋等, 2024)和预制裂隙试件试验(蒲成志等, 2010; Liu et al, 2016),研究发现矿物接触参数、裂隙倾角与裂隙密度三者共同控制岩石强度劣化路径,在高围压条件下,闭合裂隙更易诱发剪切破坏

收稿日期: 2025-01-09; 修订日期: 2025-05-14

基金项目: 四川省自然科学基金项目“高地应力下裂隙岩体爆破损伤及定向致裂机理”(编号: 2022NSFSC1089)资助

作者简介: 冯亮(2000—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 从事采矿工程技术研究工作。E-mail: 1710015915@qq.com

*通信作者: 陈星明(1972—), 男, 湖南湘乡人, 教授, 硕士生导师, 从事采矿工程技术研究工作。E-mail: 296055063@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

模式(Sun et al, 2012),而张开裂隙主要控制拉张破坏模式(Eftekhari et al, 2016;王雄等, 2025)。在此背景下,通过改进FLAC^{3D}弹脆性本构与超细网格划分技术,双裂隙岩石破坏模拟精度提升至90%以上(付金伟等, 2012)。三轴压缩试验进一步表明,围压增大能够有效抑制岩石脆性破坏,且残余强度和初始残余应变随围压呈指数增长(唐海燕, 2016;刘冬桥等, 2017),据此建立的损伤本构模型(Chen et al, 2023)通过损伤变量量化了裂隙发展对强度退化的贡献。在理论建模方面,部分学者创新性地引入包含退化角等特征量的新本构方程,定量阐明了围压对峰后脆性退化的影响(于永江等, 2012),以莫尔-库伦准则为框架,采用内摩擦角和黏聚力的应变相关函数构建峰后应力-应变关系(李文婷, 2012),结合位移法解析软化段斜率(陈康等, 2013),最终实现了从理论推导到有限元程序计算的闭环验证(王水林等, 2014; Zhang et al, 2022)。总体而言,关于岩石力学行为的研究范式已从单纯参数调整转向本构方程迭代优化,基于Fish语言的二次开发极大地增强了参数修正系统的自适应性(王嵩等, 2017),使得不同尺度模拟结果与试验数据的匹配误差普遍控制在5%以内(王小平等, 2018)。

然而,现有研究主要采用静态分段参数法(王卫华等, 2021)或单一参数敏感性分析(陆银龙等, 2010),难以实现应变梯度变化下的多参数动态协同优化。而试验数据显示,黏聚力和内摩擦角与剪胀角存在非线性耦合效应,因此需构建多维参数动态场修正模型。本文创新性地利用Python建立试验数据驱动的实时反向传播算法,通过FLAC^{3D}内嵌接口实现莫尔-库伦本构参数演化函数的多线程动态迭代,突破传统固定参数修正法的精度瓶颈,开发了基于实时数据同化的多参数逆向优化引擎,最终获得的应力-位移曲线与试验结果相符,较好地反映了岩石峰后的力学行为。

1 数值软件

1.1 FLAC^{3D}软件

FLAC^{3D}软件具备三维复杂地质建模能力,支持弹性、塑性、流变多相材料模型及参数自定义,通过

显式拉格朗日算法与混合离散技术,高效模拟岩土材料的塑性破坏、流动及接触滑移过程,为岩土工程提供高精度数值分析,因此被广泛用于岩土工程和采矿工程等领域的数值模拟过程中。其中,早期应用主要是简单的地下开挖和边坡稳定性分析,后来扩展至多场耦合分析,再到现在的智能算法结合。本研究基于FLAC^{3D}软件三维力学响应特征与高效解算优势,开展岩石单轴压缩数值模拟研究,精准解析岩石的应变软化与结构破坏特性。

1.2 Python软件

Python是一种高级的编程语言,其语法清晰、简洁且易于学习,采用缩进表示代码块,使得代码结构更加直观。此外,Python不需要预先声明变量类型,增强了灵活性和易用性,无论是初学者还是专业开发者,Python都是完成项目的理想选择,其应用领域极其广泛,包括Web开发、数据科学、人工智能和科学计算等。因此,选择Python作为数据处理和程序循环的工具。

2 多参数逆向优化理论框架

2.1 莫尔-库伦准则

在FLAC^{3D}中,莫尔-库伦准则与内摩擦角、黏聚力以及最大主应力和最小主应力相关,如下为破坏准则,当 $f_s=0$ 时,受力岩石处于临界状态。表示为

$$f_s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\varphi - 2c \sqrt{N_\varphi} \quad (1)$$

式中: σ_1 为最小主应力; σ_3 为最大主应力; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; $N_\varphi = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ 。

2.2 塑形流动法则

在FLAC^{3D}中,莫尔-库伦模型最后计算的应力,是以流动法则为基础,最后经过塑形应力修正得到,修正函数可表示为

$$\sigma_1^N = \sigma_1^I + \lambda^s (\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) \quad (2)$$

$$\lambda^s = \frac{f^s(\sigma_1^I, \sigma_3^I)}{(\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) - (-\alpha_1 N_\psi + \alpha_2) N_\varphi} \quad (3)$$

式中: σ_1^N 为塑形应力修正值; λ^s 为流动法则系数; ψ 为内摩擦角; $N_\psi = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi}$; $\alpha_1 = K + \frac{4}{3}G$; $\alpha_2 = K - \frac{2}{3}G$; K 为体积模量; G 为剪切模量; N_φ 为关于剪胀角的常

数; α_1, α_2 为材料常数。

2.3 公式推导

通过联立式(1)、式(2)和式(3),得到一个关于内摩擦角、黏聚力和剪胀角的多元函数,该函数表示FLAC^{3D}中应力塑形修正后的值,通过对该函数的各元素分别求偏导,最后得出各元素对函数值的影响,以便后续写入程序。计算公式为

$$\sigma_1^N = \sigma_1^1 + \frac{(-\sigma_1 + \sigma_3 N_\varphi - 2c \sqrt{N_\varphi})(\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi)}{(\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) - (-\alpha_1 N_\psi + \alpha_2) N_\varphi} \quad (4)$$

令 $\sigma_1^N = H(N_\varphi, N_\psi, c)$,可得剪胀角相关值:

$$\frac{\partial H(N_\varphi, N_\psi, c)}{\partial N_\psi} = \frac{(-\sigma_1 + \sigma_3 N_\varphi - 2c \sqrt{N_\varphi}) \cdot (-2\alpha_2 \cdot N_\varphi)}{[(\alpha_1 - \alpha_2 N_\psi) - (-\alpha_1 N_\psi + \alpha_2) N_\varphi]^2} < 0 (N_\psi > 1) \quad (5)$$

由上式可知,剪胀角与塑形修正值呈负相关关系,即可以通过减小剪胀角来增大塑形修正函数值,或通过增大剪胀角来减小塑形修正函数值。同理可以得出:

$$\frac{\partial H(N_\varphi, N_\psi, c)}{\partial N_\varphi} > 0, \frac{\partial H(N_\varphi, N_\psi, c)}{\partial c} > 0 \quad (6)$$

于是得到内摩擦角与塑形修正函数值呈正相关关系,黏聚力与塑形修正函数值呈正相关关系。以上分析对于岩石力学参数变化规律的推算与前人研究文献(陆银龙等,2010;李文婷,2012)吻合,间接证明了推导过程的可靠性。

由以上分析可知,岩石峰后的强度与剪胀角、内摩擦力和黏聚力密切相关,FLAC^{3D}可通过岩石的本构关系,以多参数逆向优化理论为基础,控制岩石这3个力学参数,从而间接控制岩石的变形与破坏。

3 应变梯度自适应模型实现

3.1 模型构建

本文模拟岩石单轴压缩试验,利用FLAC^{3D}中的Extrusion模块进行建模,先建立平面图形,再添加厚度,形成实体单元。然后,采用实体单元模拟受压岩体,模型尺寸长度为50 mm,宽度为50 mm,高度为100 mm。整个模型有2 000个实体单元,2 541个网格节点,模型结构如图1所示。

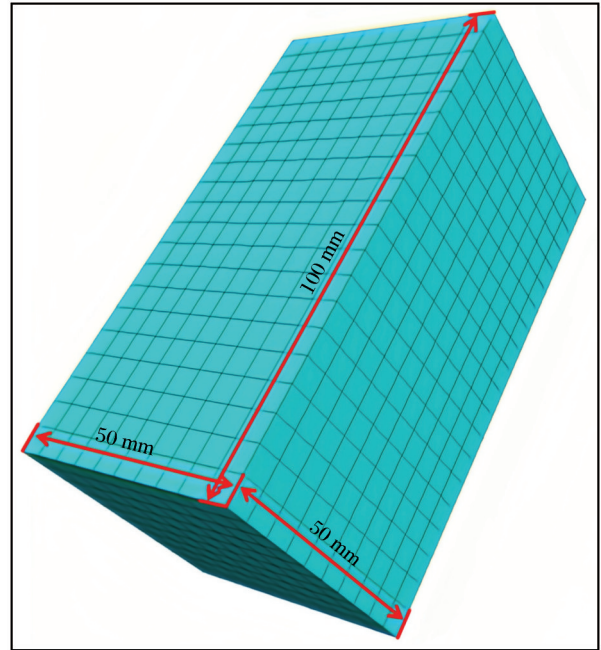


图1 岩石单轴压缩模型图

Fig. 1 Model diagram of rock uniaxial compression

3.2 边界条件的设定

对于模拟单轴压缩试验,只需固定 $z=0$ 平面所有节点 z 向速度,四周不设定约束条件,为自由面,而顶部 $z=100$ 平面设定向下恒定的速率,以模拟试验中的位移加载。

3.3 采用的本构模型与计算参数

由于岩石的结构和力学特征非常复杂,在外力作用下,岩石不仅会发生弹性变形,还会产生塑性变形。为了分析本模型,采取以下假设:(1)连续性:假设岩石为连续的介质,不考虑内部裂缝或缺陷的影响;(2)均质性:假设岩石在整体上具有均匀性,各部分的物理和力学特性相同;(3)各向同性:假设岩石在各个方向上的力学特性相同,不考虑材料的方向效应;(4)忽略构造应力场,不考虑由于地质构造导致的应力场变化,以简化模型分析。本研究采用莫尔—库伦强度准则,这是岩体工程中常用的强度准则,能够有效预测岩石在受力情况下的破坏行为。通过上述假设和准则,可以清晰地分析岩石土体在外力作用下的力学响应。

本试验数据来源于蒲诚等(2018)所做的岩石单轴压缩试验应力—应变曲线,在FLAC^{3D}中采用内置的莫尔—库伦本构模型,岩石力学参数见表1。

表1 岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters

| 参数名称 | 参数值 | 参数名称 | 参数值 |
|----------|------|---------|-----|
| 弹性模量/GPa | 1.4 | 黏聚力/MPa | 2.5 |
| 泊松比 | 0.28 | 剪胀角/(°) | 10 |
| 内摩擦角/(°) | 40 | | |

3.4 模型加载

本研究数值模拟的加载方式采用位移控制法,先将表1中的岩石力学赋予模型,随后在模型的上边界施加荷载,得到应变梯度自适应模型,控制上边界以速度为 $1 \times 10^{-3} \text{mm/step}$ 向下位移,从而模拟单轴压缩试验中的位移加载,试样加载模型如图2所示。

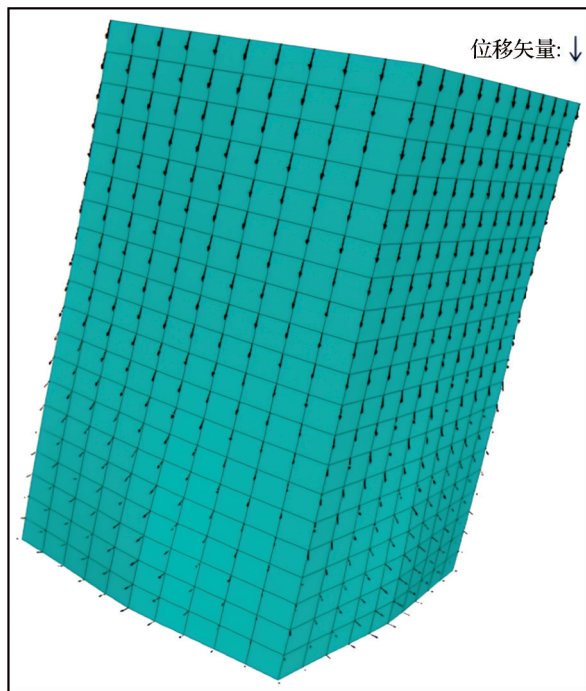


图2 模型矢量加载图

Fig. 2 Vector loading diagram of model

4 实时动态修正算法构建

4.1 Python与FLAC^{3D}的交互

在FLAC^{3D}中已有与Python联合使用的例子,FLAC^{3D}中的Fish语言在Python中是以字符串(string)的形式写入,最后导入FLAC^{3D}中,从而实现Python语言与Fish语言的联合使用。

4.2 修正模型的程序实现

在运行程序前需要对已有试验数据进行提取

并处理。本研究利用Python强大的数据处理能力,将试验数据提取出来,并将数据放入list容器,命名为lines,随后调用FLAC^{3D}关于各参数的内嵌命名,构建实时动态修正算法,最后将整个程序输入FLAC^{3D}内置的Python的平台并运行,实现对模型参数的动态修正。单轴压缩修正模型程序实现过程如图3所示,以运算到第n步为例,对流程图加以说明。

(1)运算到第n步,通过函数s.stress()[2][2]提取此时模型中的应力,且与试验数据lines[a]进行作差,将得到的值进行绝对值处理,如果这个值小于0.01,说明模拟值与实际值相差不大,不用对参数进行修正,则直接进入下一个循环,即 $n=n+10$ 。

(2)如果s.stress()[2][2]与lines[a]二者相差的绝对值大于0.01,说明模拟值与实际值存在较大差异,需要进行参数修正。

(3)如果s.stress()[2][2]>lines[a],则模拟应力值过高,根据前文计算结果,需要增大剪胀角,减小黏聚力和内摩擦角,修正系数为0.01。如果s.stress()[2][2]<lines[a],则模拟应力值过低,此时根据前文计算结果,需要减小剪胀角,增大黏聚力和内摩擦角,修正系数为0.01(修正系数是根据试验数据精度选取,试验数据精度提取到百分位,因此设置为0.01)。进入下一循环,即 $n=n+10$ 。

(4)每10个时步进行一次循环参数,直至规定时步结束。

图3所示流程图的核心是:通过FLAC^{3D}内嵌函数及命令(s.stress()[2][2]),可以提取模型该时步的应力,然后与试验应力相比,最后将该时步的黏聚力、内摩擦角和剪胀角提取出来,且将其分别一一修正,最后再将修正值赋予岩石;利用Python中语法if循环与while循环互相嵌套,重复完成上述过程,表2所示为主要的函数。

5 单轴压缩数值试验分析

利用Python建立试验数据驱动的实时反向传播算法,将单轴压缩修正模型程序嵌入到FLAC^{3D}内置的本构模型中,实现莫尔—库伦本构参数的多线程动态反馈迭代。

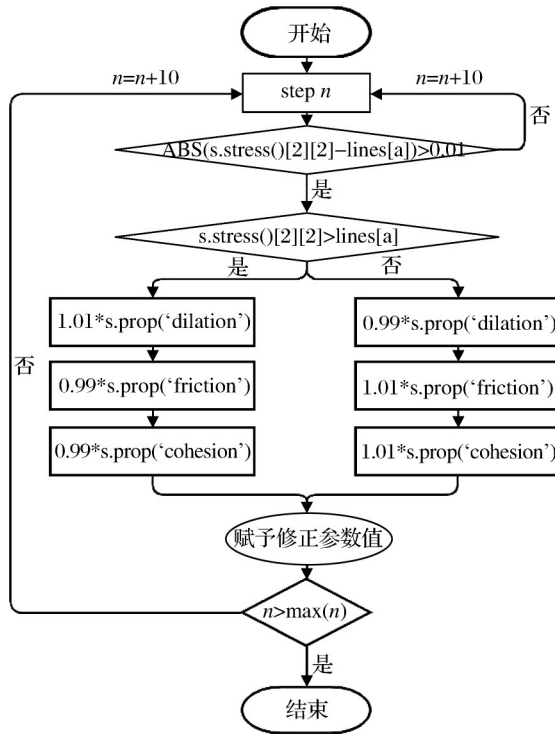


图3 单轴压缩修正模型程序实现流程

Fig. 3 Implementation flow of uniaxial compression correction model program

表2 部分内嵌函数与命令

Table 2 Partially embedded functions and commands

| 名称 | 用途 |
|--------------------|------------|
| s=it.zone.find() | 获得指定id号的单元 |
| s.prop('dilation') | 获得单元剪胀角 |
| s.prop('friction') | 获得单元内摩擦角 |
| s.prop('cohesion') | 获得单元黏聚力 |

5.1 时步应力分析

通过FLAC^{3D}内嵌命令,提取修正模型各时步瞬时应力,具体数据见表3。

由表3可知,在各时步修正模型的相对误差均小于原模型。尤其当时步为 2×10^3 时,原模型的相对误差达到138.4%,而修正模型的相对误差仅为2.8%,后者较前者精度提升了49.4倍。此外,原模型平均误差为84.18%,而修正模型为3.89%,后者较前者精度提升了21.6倍,说明该修正模型较好地调整了岩石的力学参数,更好地描述了岩石峰后的力学行为。

表3 时步瞬时应力

Table 3 Instantaneous stress at time step

| 时步 | 原模型 应力/MPa ($\times 10^3$) | 修正模型 应力/MPa | 实验应 力/MPa | 原模型相 对误差/% | 修正模型相 对误差/% |
|------|------------------------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|
| 1.20 | 11.90 | 8.51 | 8.88 | 34.01 | 4.19 |
| 1.40 | 11.70 | 7.86 | 7.39 | 58.32 | 6.40 |
| 1.60 | 11.00 | 6.56 | 6.50 | 69.23 | 1.00 |
| 1.80 | 11.60 | 4.98 | 5.25 | 120.95 | 5.08 |
| 2.00 | 11.30 | 4.61 | 4.74 | 138.40 | 2.80 |
| 平均误差 | | | | 84.18 | 3.89 |

5.2 应力—位移曲线分析

岩石试件在单轴压缩荷载下的变形全过程可通过图4中的试验曲线表示。根据全应力—位移曲线,岩石的变形可划分为4个阶段。(1)裂隙压密阶段:试件内部的裂隙逐渐闭合,岩石被逐渐压密,表现为早期非线性变形,应力—位移曲线呈上凹型。(2)弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段:试件处于弹性变化阶段,岩石展现出线性弹性特性,应力与应变成正比,符合胡克定律,应力—应变曲线呈近似直线。(3)非稳定破裂发展阶段:岩石从弹性转向塑性的关键点,岩石承载能力达到最大值,出现非稳定裂隙,并逐渐扩展。(4)破裂后阶段:岩块承载力达到峰值强度后,其内部结构遭到破坏,但试件基本保持整体状。到本阶段,裂隙快速发展,交叉且相互联合形成宏观断裂面。此后,岩块变形主要表现为沿宏观断裂面的块体滑移,试件承载力随变形的增大而迅速下降,但并不会降至0,说明破裂的岩石仍有一定的承载力。

原模型的力学参数为定值,采用FLAC^{3D}中内置的莫尔—库伦本构模型。由图4(a)可知,修正模型模拟曲线与原模型模拟曲线在峰值前的曲线基本一致,但是峰后曲线相差较大。原模型在达到峰值强度后,其应力—应变曲线未能反映岩石内部损伤扩展与应力下降的趋势,而是持续维持峰值强度水平。这主要是由于模型中的关键岩石参数(如剪胀角、内摩擦角和黏聚力)在峰值后阶段未发生相应演化,仍保持为初始定值,从而导致模拟结果与岩石单轴试验中观察到的峰后应变软化行为存在显著差异,难以符合实际岩石的力学响应。因此,有必要对该本构模型进行合理修正。

修正模型是以FLAC^{3D}中内置的莫尔—库伦本

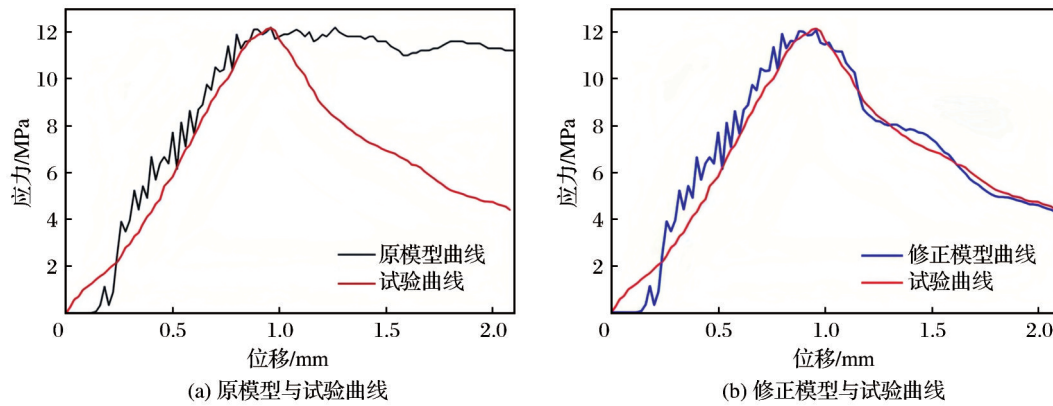


图4 不同模型的应力—位移曲线

Fig. 4 Stress-displacement curves of different models

构模型为基础,利用Python将多参数逆向优化理论写入程序,对岩石峰后的力学参数进行动态调整,从而实现对原本构模型的修正。由图4(b)可知,经过程序修正的模型,岩石峰后的应力随位移的增加而逐渐降低,且峰后应力—位移曲线与试验曲线基本一致,较为准确地还原了单轴压缩试验应力—位移曲线,较好地描述单轴压缩条件下岩石峰后力学特性。峰后曲线的相似性表明,岩石在破坏后的残余强度和应变软化等行为得到合理反映。通过精准模拟岩石峰后力学行为,可以在确保工程安全的情况下,充分利用岩石的峰后强度,从而创造更多价值,也可以进行风险评估,为工程决策提供科学依据,降低灾害的发生概率。

6 结论

(1)创新性地提出利用Python建立试验数据驱动的实时反向传播算法,通过FLAC^{3D}内嵌接口实现莫尔—库伦本构参数的多线程动态反馈迭代,得到模拟曲线与试验曲线较为吻合,高估趋势完全消除。

(2)以FLAC^{3D}内置的莫尔—库伦本构模型为基础,结合Python进行程序开发,较为准确地修正了岩石的力学参数,且易于实现,能够广泛应用在工程实践中。

(3)提出了一种岩石力学参数优化方法,准确再现了岩体峰后阶段的力学行为演化过程,为岩石关键参数精度缺失的优化提供了新的思路。

参考文献 (References):

Chen K, Cudmani R, Olarte A A P, 2024. Validation of a damage

constitutive model based on logistic model dedicated to the mechanical behavior of the rock [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 10(1): 15.

Chen Y F, Lin H, Xie S J, et al, 2023. Fracture closure empirical model and theoretical damage model of rock under compression [J]. *Materials*, 16(2): 589.

Eftekhari M, Baghbanan A, Hashemolhosseini H, 2016. Crack propagation in rock specimen under compressive loading using extended finite element method [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2): 145.

Liu X W, Liu Q S, Huang S B, et al, 2016. Fracture propagation characteristic and micromechanism of rock-like specimens under uniaxial and biaxial compression [J]. *Shock and Vibration*, 2016(1): 6018291.

Sun Y Z, Zhai X X, Liu J M, 2012. Analysis of failure mode and propagation for crack in uniaxial compression [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 166/167/168/169: 2929-2932.

Wang Z H, Wang J C, Yang S L, et al, 2020. Failure behaviour and acoustic emission characteristics of different rocks under uniaxial compression [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 17(1): 76-88.

Zhang Y T, Luo H W, Chen P S, et al, 2022. Mechanical properties and binary-medium-based constitutive model for coral-reef limestone samples subjected to uniaxial loading [J]. *Sustainability*, 14(19): 12193.

陈康, 赵光明, 孟祥瑞, 2013. 岩石剪切带单轴压缩应变软化影响因素研究 [J]. *煤矿安全*, 44(3): 29-32. Chen Kang, Zhao Guangming, Meng Xiangrui, 2013. Influence factors research on uniaxial compression strain softening in rock shear zone [J]. *Safety in Coal Mines*, 44(3): 29-32.

- 刁心宏,冯夏庭,杨成祥,1999.岩石工程中数值模拟的关键问题及其发展[J].金属矿山,28(6):5-7.Diao Xinhong, Feng Xiating, Yang Chengxiang, 1999.Key problems and development of numerical simulation in rock engineering [J].Metal Mine,28(6):5-7.
- 付金伟,朱维申,王向刚,等,2012.节理岩体裂隙扩展过程一种新改进的弹脆性模拟方法及应用[J].岩石力学与工程学报,31(10):2088-2095.Fu Jinwei, Zhu Weishen, Wang Xianggang, et al, 2012. An improved elastic-brittle simulation method of crack propagation process in jointed rock mass and its application [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(10):2088-2095.
- 李文婷,2012.岩石峰后应变软化本构方程及数值模拟方法研究[D].济南:山东大学.Li Wenting, 2012.The study on post-peak strain softening constitutive equation and numerical simulation of rock [D].Jinan:Shandong University.
- 刘冬桥,王焯,张晓云,2017.岩石应变软化变形特性及损伤本构模型研究[J].岩土力学,38(10):2901-2908.Liu Dongqiao, Wang Zhuo, Zhang Xiaoyun, 2017.Characteristics of strain softening of rocks and its damage constitutive model [J].Rock and Soil Mechanics, 38(10):2901-2908.
- 刘志祥,晏孟洋,张双侠,等,2023.考虑岩石微缺陷影响的损伤本构模型[J].黄金科学技术,31(3):507-515.Liu Zhixiang, Yan Mengyang, Zhang Shuangxia, et al, 2023. Damage constitutive model considering the effect of rock microdefects [J]. Gold Science and Technology, 31(3):507-515.
- 陆银龙,王连国,杨峰,等,2010.软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,29(3):640-648. Lu Yinlong, Wang Lianguo, Yang Feng, et al, 2010. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(3):640-648.
- 裴书锋,郝文锋,王营利,等,2024.双江口水电站花岗岩单轴压缩微观破坏机制研究[J].西北水电,(4):62-68.Pei Shufeng, Hao Wenfeng, Wang Yingli, et al, 2024. Study on micro failure mechanism of granite under uniaxial compression [J].Northwest Hydropower, (4):62-68.
- 蒲成志,曹平,赵延林,等,2010.单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J].岩土力学,31(11):3661-3666.Pu Chengzhi, Cao Ping, Zhao Yanlin, et al, 2010. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 31(11):3661-3666.
- 蒲诚,陈蕴生,周冲,等,2018.岩石室内单轴压缩试验位移加载速率的研究[J].水利与建筑工程学报,16(3):161-164.Pu Cheng, Chen Yunsheng, Zhou Chong, et al, 2018. Displacement loading rate of rock-like specimen under uniaxial compress test [J].Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 16(3):161-164.
- 孙闯,张树光,贾宝新,等,2015.花岗岩峰后力学特性试验与模型研究[J].岩土工程学报,37(5):847-852.Sun Chuang, Zhang Shuguang, Jia Baoxin, et al, 2015. Physical and numerical model tests on post-peak mechanical properties of granite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 37(5):847-852.
- 唐春安,1999.岩石破裂过程数值模拟方法发展的若干问题 [C]//中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会第二届学术大会论文集.北京:中国岩石力学与工程学会. Tang Chun'an, 1999. Some problems in the development of numerical simulation methods for rock fracture process [C]//Proceedings of the Second Academic Conference of Soft Rock Engineering Committee of China Society of Rock Mechanics and Engineering. Beijing: China Society of Rock Mechanics and Engineering.
- 唐海燕,2016.深部灰岩力学性质及残余强度试验研究[J].金属矿山,47(8):43-47.Tang Haiyan, 2016. Experimental studies on rock properties and residual strength of deep limestone [J].Metal Mine,47(8):43-47.
- 王水林,郑宏,刘泉声,等,2014.应变软化岩体分析原理及其应用[J].岩土力学,35(3):609-622,630.Wang Shuilin, Zheng Hong, Liu Quansheng, et al, 2014. Principle of analysis of strain-softening rock mass and its application [J].Rock and Soil Mechanics, 35(3):609-622, 630.
- 王嵩,左双英,曲传奇,等,2017.基于单轴压缩试验的岩石损伤力学参数修正及数值模拟[J].贵州大学学报(自然科学版),34(2):109-114.Wang Song, Zuo Shuangying, Qu Chuanqi, et al, 2017. Correction of damaged mechanic parameter and numerical simulation on uniaxial compression test [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 34(2):109-114.
- 王卫华,王永强,张恒根,2021.岩石峰后应变软化模型的构建与验证[J].地下空间与工程学报,17(增刊2):546-551,608.Wang Weihua, Wang Yongqiang, Zhang Henggen, 2021. Construction and verification of post-peak strain softening model of rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 17(Suppl.2):546-551,608.
- 王小平,姜天洪,2018.基于FLAC^{3D}的页岩单轴压缩数值模拟研究[J].山东交通科技,(6):99-101.Wang Xiaoping, Jiang Tianhong, 2018. Numerical simulation of shale uniax-

- ial compression based on FLAC^{3D} [J]. Shandong Jiaotong Keji, (6):99-101.
- 王雄, 刘小宇, 袁超, 等, 2025. 裂隙类型和倾角影响下红砂岩损伤破裂机理研究[J]. 金属矿山, 54(7):33-42. Wang Xiong, Liu Xiaoyu, Yuan Chao, et al, 2025. Study on the damage and rupture mechanism of red sandstone under the influence of fracture type and dip angle[J]. Metal Mine, 54(7):33-42.
- 于永江, 张春会, 王来贵, 2012. 基于退化角的岩石峰后应变软化模型[J]. 煤炭学报, 37(3):402-406. Yu Yongjiang, Zhang Chunhui, Wang Laigui, 2012. Post-peak strain softening model of rock based on degradation angle[J]. Journal of China Coal Society, 37(3):402-406.
- 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 等, 2008. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 27(增刊1):2651-2655. Zhang Fan, Sheng Qian, Zhu Zeqi, et al, 2008. Study on post-peak mechanical behaviour and strain-softening model of Three Gorges granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(Suppl. 1):2651-2655.

Dynamic Iterative Implementation of Parameters Based on Python and FLAC^{3D} Models

FENG Liang, CHEN Xingming, SU Dengfeng

School of Environmental and Resource Sciences, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China

Abstract: In the field of rock mass engineering, the precise simulation of the post-peak mechanical behavior of rocks is essential for ensuring engineering safety and for the prevention and management of disasters. To overcome the limitations associated with fixed parameter approaches in conventional Mohr-Coulomb models for simulating post-peak failure stages, this study introduces an innovative experimental data-driven multi-parameter dynamic collaborative correction method. Initially, by integrating Python with the FLAC^{3D} platform, we developed a real-time backpropagation algorithm alongside a three-dimensional constitutive field dynamic iteration model. This framework facilitates the multi-threaded collaborative optimization of parameters, including cohesion, internal friction angle, and dilatancy angle, via embedded interfaces. Subsequently, utilizing strain gradient adaptive theory, we devised a real-time data assimilation engine capable of dynamically adjusting constitutive parameters through cyclic correction mechanisms. This approach effectively addresses the modeling challenges posed by the nonlinear coupling effects inherent in traditional static segmentation methods, which exhibit errors exceeding 15%. During the validation process, a numerical model for uniaxial compression, with dimensions of 50 mm×50 mm×100 mm and comprising 2 541 mesh elements, was utilized. A Python script was employed to dynamically invoke the `s.stress()` function in FLAC^{3D}, allowing for the extraction of stress fields. This process initiated multi-parameter collaborative corrections whenever the experimental data surpassed a deviation threshold of $\Delta\sigma=0.01$ MPa. The experimental findings demonstrate that the dynamically corrected model effectively captured the post-peak strain-softening behavior of the rock. The stress levels predicted by the original model consistently exceeded the actual values, whereas the stress simulations from the corrected model aligned closely with the experimental values, thereby completely mitigating the trend of overestimation. This study offers novel insights into optimizing the accuracy of rock parameter estimation and provides a scientific basis and guidance for geotechnical engineering design.

Key words: rock; uniaxial compression; numerical simulation; strain softening; dynamic correction; post-peak intensity