

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.012



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



围岩硬化-软化变形特征的弹塑性损伤-渗流模型

程学昌¹, 刘晓斌², 康彭辉², 韦韬³, 吴文军², 卢梓恒²

(1. 广州地铁集团有限公司, 广州 510335; 2. 广州市盛通建设工程质量检测有限公司, 广州 510075;
3. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025)

摘要:为阐明地下工程开挖过程中围岩的非线性力学响应与渗流演化机制,基于热力学内变量理论建立一个统一的硬化-软化弹塑性损伤-渗流耦合数值模型。模型采用 Logistics 函数重构损伤演化方程,以更准确地描述损伤的萌生、加速扩展与饱和过程;引入双曲函数硬化律来刻画屈服面在峰前阶段的扩展与峰后阶段的收缩行为;并结合能同时反映孔隙压密效应与裂隙扩展诱导渗透性增强的各向异性渗透率模型。基于该模型对 FLAC3D 平台进行二次开发,利用室内应力-应变及渗透率实验数据验证了其可靠性。在此基础上,结合某地下工程掘进算例,系统分析开挖卸荷引发的围岩响应;揭示围岩拱形沉降与水平位移汇聚的变形模式;阐明渗透率在空间上的三维重构特征,即在采空区邻近区域呈现各向异性显著增强,而在其他区域则受压缩主导。结果表明,模型能较为精确地模拟岩体从弹性变形、硬化强化到软化破坏全过程的力学行为及其与渗流的耦合效应。

关键词:弹塑性损伤;硬化-软化屈服;渗流耦合;数值模型

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Elastoplastic damage model with hardening-softening deformation behavior and seepage for surrounding rock

CHENG Xuechang¹, LIU Xiaobin², KANG Penghui², WEI Tao³, WU Wenjun²,
LU Ziheng²

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510335, P. R. China; 2. Guangzhou Shengtong Construction Engineering Quality Testing Co., Ltd., Guangzhou 510075, P. R. China; 3. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, P. R. China)

Abstract: To elucidate the nonlinear mechanical response and seepage evolution mechanism of surrounding rock during underground excavation, a unified hardening-softening elastoplastic damage-seepage coupled numerical model was established based on the thermodynamic internal variable theory. This model employs a Logistics function to reconstruct the damage evolution equation, enabling a more accurate description of the initiation, accelerated propagation, and saturation stages of damage. A hyperbolic hardening law is introduced to characterize the expansion of the yield surface in the pre-peak hardening stage and its contraction in the post-peak softening stage. Furthermore, an anisotropic permeability model is integrated to simultaneously capture the

收稿日期: 2025-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(52004072)

作者简介: 程学昌(1985-), 高级工程师, 主要从事岩土工程与隧道研究, E-mail: clwang3@gzu.edu.cn。

Received: 2025-10-12

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52004072)

Author brief: CHENG Xuechang (1985-), senior engineer, main research interests: geotechnical engineering and tunnel engineering, E-mail: clwang3@gzu.edu.cn.

dual effects of pore compaction and fracture-induced permeability enhancement. The model was implemented via secondary development within the FLAC3D platform, and its reliability was validated against experimental data for stress-strain behavior and permeability. Subsequently, by applying the model to a case study of underground tunnel driving, the excavation-induced responses of the surrounding rock were systematically analyzed: the deformation patterns of arch-shaped subsidence and horizontal convergence were revealed, and the three-dimensional reconstruction characteristics of permeability in space were elucidated, showing significant anisotropic enhancement near the excavation zone while being dominated by compression in other areas. The results demonstrate that the proposed model can accurately simulate the complete process of rock behavior, from elastic deformation and hardening to softening failure, along with its coupled effects with seepage.

Keywords: elasto-plastic damage; hardening-softening yield; seepage coupling; numerical model

随着地下空间开发与利用的不断深入,地下工程规模日益增大,岩体在开挖扰动作用下所表现出的力学响应与渗流行为逐渐成为工程安全与稳定性研究的核心问题^[1-3]。岩体作为一种典型的非均质、非线性介质,其宏观力学性能受控于微观裂隙与孔隙结构,并在外部应力与地下水压力的共同作用下呈现出复杂的损伤-渗流耦合特性^[4]。尤其是在隧道、地下矿山及储能工程中,围岩在峰前经历应力硬化,在峰后进入应变软化阶段,伴随裂隙网络扩展和渗透性重构,这一过程不仅影响围岩稳定性,还直接关系到渗流通道演化与灾害发生机制。

随着深部地下工程向水文地质复杂区域拓展,渗流场与应力场的耦合效应成为关键控制因素。学者针对开挖引起的围岩渗流-力学响应开展了系列研究。Detournay等^[5]基于Biot多孔介质理论建立了非静水应力场中垂直钻孔的孔隙弹性解析模型;Wang等^[6]提出圆形巷道穿越饱和介质时的孔隙压力梯度对塑性区范围的影响机制;Wang等^[7]系统研究了孔隙水压力变化、施工时序及支护-围岩相互作用对隧道力学行为的影响,并推导了饱和弹性多孔介质中深埋压力隧道的Terzaghi有效应力原理解析解;Li等^[8]等通过共形映射技术构建了半无限含水层中衬砌隧道地下水入渗的半解析解;Xu等^[9]等将渗流力学与传统复变函数法相结合,建立了渗流-弹性平面应变问题的显式解析解;Lu等^[10]等采用复变函数映射方法探讨了重力场作用下弹性岩体中水工隧道的应力位移场特征。近年来,相场法被快速拓展至饱和裂隙岩体。Yu等^[11]针对法国Bure地下实验室开挖损伤区,建立了双损伤变量(拉/剪)相场-渗流耦合模型,再现了拉裂缝与剪裂缝的异步演化。在离散-连续耦合方面,Nomura等^[12]基于三维孔隙级流动模拟(NSFT),提出“渗透率折减比”统一表征Darcy-非Darcy过渡,为宏观损伤-渗流模型提供了微观机理参数,可直接嵌入连续损伤本构,弥补传统Forchheimer经验系数对裂隙网络几

何不敏感的缺陷。

现有研究中,解析型损伤-渗流耦合模型大多基于线弹性软化假设,难以准确描述裂隙扩展的非线性阈值效应和损伤局部化特征,且多数渗透率模型仍局限于各向同性假设,未能全面反映裂隙发育对渗流通道重构的影响。此外,传统损伤演化方程受限于预设的数学形式,难以兼顾萌生、加速与阶段的非线性特征。笔者在热力学内变量理论框架下,提出一种统一硬化-软化弹塑损伤-渗流耦合数值模型。该模型引入Logistics函数重构损伤演化规律,采用双曲函数硬化律与损伤软化机制相结合的统一屈服函数,并建立了考虑压密效应与裂隙扩展的各向异性渗透率模型。在FLAC3D平台上完成了模型的二次开发与实验验证,并结合实际地下工程掘进算例,系统揭示了围岩在开挖扰动下的力学-渗流耦合演化规律。

1 概率统计分布和损伤模型

基于统计损伤力学,岩石介观缺陷的随机分布可视概率性损伤演化过程。建模时,将非均质介质离散为统计单元体,并采用Weibull、对数正态等分布函数表征缺陷的随机性;同时结合Hoek-Brown、Drucker-Prager等强度准则确定失效条件。损伤变量由此建立微观缺陷演化与宏观力学响应的联系,形成能反映岩石渐进破坏的细-宏观跨尺度本构模型。其中,分布参数控制损伤累积速率,强度准则参数影响屈服面演化。通过实验反演确定最优参数,能提高模型对峰前硬化与峰后软化等非线性特征的模拟精度。

基于概率统计学理论,连续型随机变量分布为工程材料参数的不确定性建模提供了数学基础。在岩土工程领域,Gaussian分布、Weibull分布与Logistic分布被广泛应用于岩体损伤演化行为的定量描述。Logistic分布在损伤演化建模中具有独特优势:其累积分布函数呈Sigmoid形态,与损伤变量

$D \in [0, 1]$ 的物理约束自然吻合; 概率密度函数尾部厚重, 更能反映损伤局部化带的非均匀扩展; 函数全局可微, 便于构建损伤率方程, 数值稳定性优良。参数 μ 对应损伤演化中点, 可直接由实验曲线拐点标定; γ 控制损伤演化速率, 物理意义明确, 便于反演识别。3 种概率分布从不同维度为岩体损伤本构关系的建立提供了数学工具, 尤其以 Logistic 分布在描述损伤演化路径对称性、数学可微性及参数可测性方面表现突出。

2 岩体统一硬化-软化弹塑性渐进损伤渗流模型

2.1 各向异性损伤本构和渐进损伤演化准则

热力学方法通过引入损伤场变量来量化材料内部微缺陷的严重程度, 并建立相应的演化方程描述其发展过程。该方法能够揭示外载作用下微观缺陷的演变及其导致的宏观力学性能退化规律^[12-13]。在热力学框架中, 损伤被视为能量耗散过程, 通常借助耗散势函数进行描述, 该函数为损伤驱动力的凸函数, 有助于理解损伤演化中的能量转化与耗散机制。基于该理论, Chiarelli 等^[14]提出了含损伤自由能表达式

$$\begin{aligned} \psi^e(\boldsymbol{\epsilon}^e, D) = & \frac{\lambda}{2} (\text{tr} \boldsymbol{\epsilon}^e)^2 + \mu \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}^e \boldsymbol{\epsilon}^e) + a_1 \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}^e) \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}^e D) \\ & + a_2 \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}^e \boldsymbol{\epsilon}^e D) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: a_1 和 a_2 表示弹性张量的损伤退化效应, λ 和 μ 是拉梅系数。考虑孔隙水压的有效应力作用, 本构模型可写为:

$$\boldsymbol{\sigma}^e + \alpha P I = \mathbb{C}(D) : \boldsymbol{\epsilon}^e \quad (2)$$

式中: \mathbb{C} 为四阶损伤弹性张量。

$$\begin{aligned} \mathbb{C}_{ijkl}(D_{ij}) = & \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) + a_1 (\delta_{ij} D_{kl} + \\ & \delta_{kl} D_{ij}) + \frac{1}{2} a_2 (\delta_{ik} D_{jl} + \delta_{il} D_{jk} + \delta_{jl} D_{ik} + \delta_{ik} D_{il}) \end{aligned} \quad (3)$$

根据弹性应变和损伤推导出增量形式的应力-应变关系

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}^e = \mathbb{C}(D) : \Delta \boldsymbol{\epsilon}^e + \Delta \mathbb{C}(D) : \boldsymbol{\epsilon}^e \quad (4)$$

损伤增量 $\Delta \mathbb{C}(D)$ 通过对损伤张量 $\mathbb{C}(D)$ 求偏导得到

$$\Delta \mathbb{C}(D) = \frac{\partial \mathbb{C}(D)}{\partial D} : \Delta D \quad (5)$$

为量化和描述这些微裂缝的大小和方向性, 引入基于拉伸应变的二阶对称损伤张量 D ^[15] 此外, 广义拉伸应变 $\boldsymbol{\epsilon}^+$ 被定义为应变张量的正锥

$$\boldsymbol{\epsilon}^+ = \sum_{i=1}^3 \langle \boldsymbol{\epsilon}_i \rangle \boldsymbol{v}_i \otimes \boldsymbol{v}_i \quad (6)$$

$\boldsymbol{\epsilon}^+$ 是总应变张量的正锥, 是指将其中的拉伸(正)应变分量保留, 同时将压缩(负)应变分量置零后所得的张量。这一概念最初由 Ortiz^[16] 和 Ju^[17] 在其关于谱分解的工作中提出; $\boldsymbol{\epsilon}_i$ 是第 i 主应变, 而 \boldsymbol{v}_i 是对应方向的主向量。 $\langle \cdot \rangle$ 是麦考利括号

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

在热力学本构理论中, 损伤准则的建立须满足热力学共轭力与内变量之间的对偶关系, 其具体函数形式需通过实验标定。脆性岩土材料内部微裂纹一旦发生不可逆扩展, 其主导应变分量必为拉伸。基于此, 拉应变可视为损伤驱动力的有效度量。在 Chiarelli 提出的线性拉应变损伤准则基础上^[14], 引入具有非线性饱和特性的 Logistics 分布函数重构损伤演化规律。该改进模型引入 Logistics 函数的 S 形曲线, 统一描述两个过程: 损伤萌生阶段的非线性加速, 以及饱和阶段的自稳定行为。

$$f_d(\boldsymbol{\epsilon}^+, D) = \frac{D_{\max}}{1 + \exp\left(-\frac{\sqrt{\boldsymbol{\epsilon}^+ : \boldsymbol{\epsilon}^+} - r_0}{r_1}\right)} - \text{tr} D \quad (8)$$

式中: r_0 表征损伤演化速率的极值点对应的临界应变阈值, 对应损伤从加速扩展向渐进饱和转变的临界状态; r_1 为控制损伤演化速率的敏感性参数, 决定非线性演化曲线特征; D_{\max} 为材料损伤状态的上限阈值, 体现微裂纹扩展饱和时的最大损伤程度。图 1 通过参数化分析系统揭示了损伤参数对材料屈服特性与损伤进程的耦合作用机制, 其中屈服面与包络线由损伤准则函数 $f_d(\boldsymbol{\epsilon}^+, D) = 0$ 显式表征。

图 1(a) 定量解析了 r_0 参数对损伤演化规律的控制机理。计算结果表明, 当广义拉应变 $\boldsymbol{\epsilon}^+$ 达到 r_0 定义的临界阈值时, 损伤演化模式由加速扩展向渐进饱和转变, 具体表现为: 在 $\boldsymbol{\epsilon}^+ < r_0$ 阶段, 损伤率随应变单调递增; 当 $\boldsymbol{\epsilon}^+ \geq r_0$ 时, 损伤率呈现渐进收敛特性。相比文献[18]提出的线性损伤模型, 本模型通过引入 D_{\max} 参数实现损伤累积的物理上限约束, 有效克服了线性模型在损伤无限累积方面的理论缺陷, 这与岩石材料三轴压缩实验中观测到的裂纹扩展自抑制现象具有良好一致性。拐点 $\boldsymbol{\epsilon}^+ = r_0$ 明确对应“萌生→加速”临界状态, r_1 仅控制斜率, 与实验拐点直接对标。Weibull 模型无解析拐点, 形状参数需数值微分才能提取拐点, 曲线右尾快速衰减, 易高估饱和和应变。当材料呈现“双阶段”损伤(快速上升+长拖尾)时, Weibull 更具优势; 若实验拐点清晰且关注局部化带宽度稳定性, Logistics 为更优选择。本文岩体三轴出现明显拐点, 故采用 Logistics 模型。

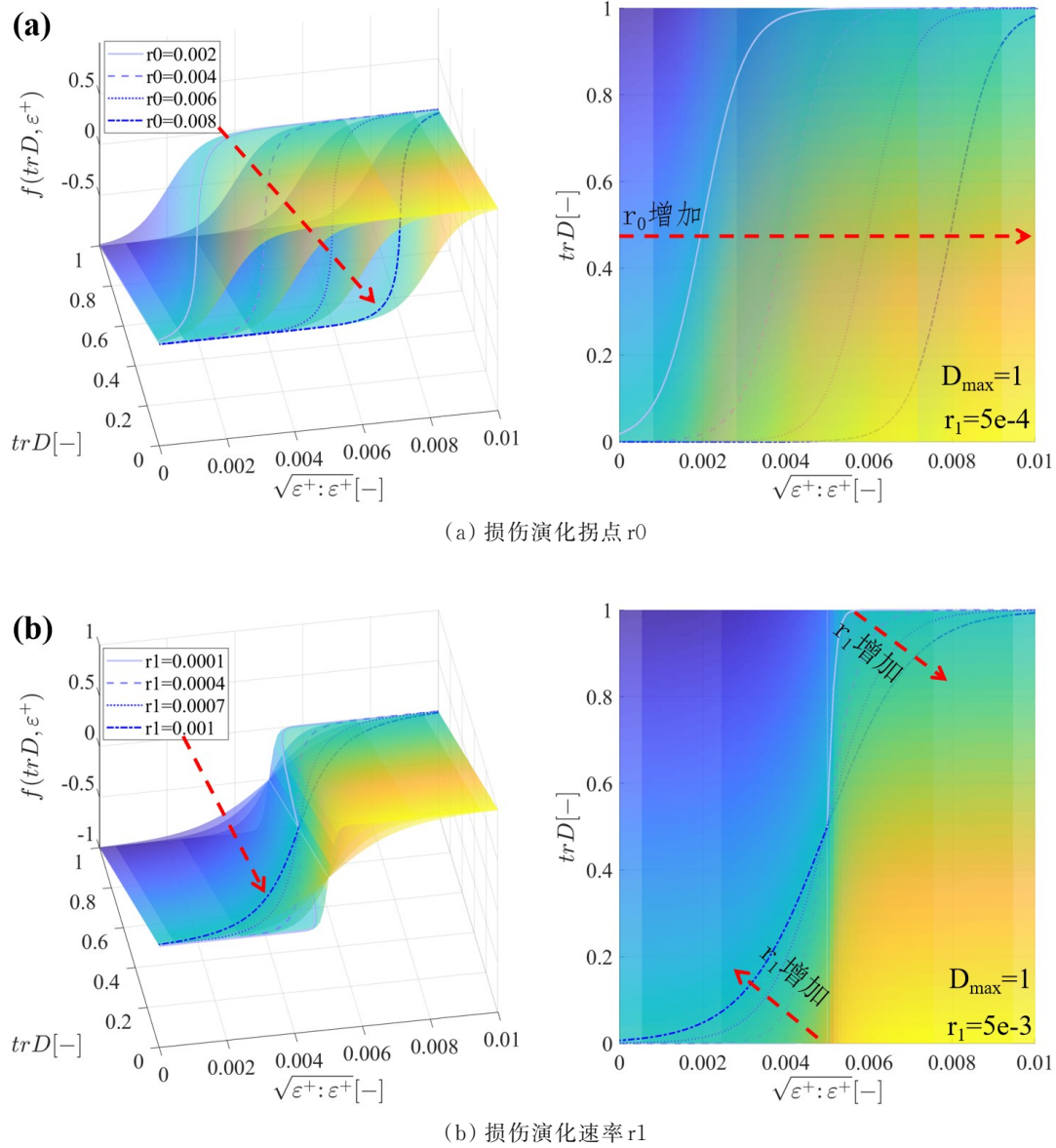


图1 岩石屈服面和损伤包络线

Fig. 1 Rock yield surface and damage envelope

图1(b)揭示了 r_1 参数对损伤演化路径的调制作用。理论分析表明, r_1 参数本质上控制着Logistics函数非线性段的曲率半径,其数值减小将导致损伤演化曲线曲率半径的显著降低。具体而言,当 $r_1 \rightarrow 0$ 时,模型退化为理想弹脆性损伤行为;而 r_1 值增大则使演化曲线趋近于线性响应。这种参数敏感性特征为通过实验数据反演细观损伤机制提供了可辨识的数学基础,特别是在脆-延性转变区的损伤演化预测中展现出独特优势。

为简化计算,假定损伤演化增量 ΔD 与广义拉伸应变 ϵ^+ 共轴的关系被用来表征损伤的演化规律,

如式(9)所示。

$$\Delta D = \frac{D_{\max} \epsilon^+}{r_1 \sqrt{\epsilon^+ : \epsilon^+} \left(1 + \exp \left(-\frac{\sqrt{\epsilon^+ : \epsilon^+} - r_0}{r_1} \right) \right)^2} \cdot \exp \left(-\frac{\sqrt{\epsilon^+ : \epsilon^+} - r_0}{r_1} \right) d\lambda_d \quad (9)$$

根据一致性条件,损伤准则导数应为零。

$$\Delta f_d = \frac{\partial f_d}{\partial \epsilon^+} : \Delta \epsilon^+ + \frac{\partial f_d}{\partial D} : \Delta D = 0 \quad (10)$$

把式(8)带入式(10)可得

$$\Delta f_d = \frac{\partial f_d}{\partial \epsilon^+} : \Delta \epsilon^+ + \frac{\partial f_d}{\partial D} : \frac{D_{\max} \epsilon^+}{r_1 \sqrt{\epsilon^+ : \epsilon^+} \left(1 + \exp \left(-\frac{\sqrt{\epsilon^+ : \epsilon^+} - r_0}{r_1} \right) \right)^2} \exp \left(-\frac{\sqrt{\epsilon^+ : \epsilon^+} - r_0}{r_1} \right) d\lambda_d = 0 \quad (11)$$

在 D 方向对损伤屈服函数求导得

$$\frac{\partial f_d}{\partial D} = I \quad (12)$$

结合式(11)、(12)可以算出损伤乘子,经简化后

$$d\lambda_d = \frac{\epsilon^+ : \Delta \epsilon^+}{\text{tr} \epsilon^+} \quad (13)$$

如果在 REV 中发生塑性变形,则总应变增量由弹性应变和塑性应变组成。

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon^e + \Delta \epsilon^p \quad (14)$$

把式(14)带入式(5),应力增量可重新表示为

$$\Delta \sigma' = C(D) : (\Delta \epsilon - \Delta \epsilon^p) + \Delta C(D) : \epsilon^e \quad (15)$$

2.2 统一硬化-软化屈服函数

在弹塑性理论框架下,基于 Mohr-Coulomb (MC) 屈服准则构建了能模拟围岩三轴压缩下先硬化后软化行为的本构模型。该模型通过引入一个与塑性应变及损伤因子相关的修正因子 η 来动态修正剪切屈服函数,从而表征屈服面的演化。模型初始屈服面由 MC 准则定义,峰前硬化阶段通过一双曲线函数使屈服面扩张至峰值强度;当应力超越峰值后,模型进入软化阶段,屈服面随之收缩直至达到残余强度状态。该构建方法明确了硬化与软化过程中的屈服面与破坏面之间的动态关系,实现了对材料从弹性变形、硬化强化到损伤软化全过程的理论描述。

岩体渐进破坏应力应变曲线表现出明显的硬化和软化特征。Kondner 根据大量三轴应力应变关系曲线,对应变硬化型应力应变关系用双曲线方程近似描述^[15]

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_a}{a + b\epsilon_a} \quad (16)$$

式中:参数 a 和 b 为试验拟合参数,需通过试验数据标定。该模型虽能通过双曲线衰减函数有效描述土体屈服后的非线性硬化行为,但无法反映峰值强度后的应变软化现象。

Mazars 损伤模型则通过损伤因子的渐进折减,成功表征了材料的峰后软化行为。基于此,提出一种耦合双曲线硬化与损伤软化机制的屈服面演化模型。该模型引入损伤变量动态描述屈服面的连续收缩过程:当损伤变量增长至临界值 D_{\max} 时,屈服面由初始状态逐步过渡至残余屈服面。建立的屈服面演化函数可表述为双曲线硬化规律与损伤软化效应共同作用的解析形式

$$\eta(k_m) = (1 - \text{tr}D)^R \left[1 + (\eta_m - 1) \frac{k_m}{b_1 + k_m} \right] \quad (17)$$

修正因子受损伤张量的迹 $\text{tr}D$ 与等效塑性应变 k_m 构成的拮抗作用机制调控。其中, $(1 - \text{tr}D)^R$ 表征损伤累积对材料承载能力的弱化效应,指数参数 R 通过调节损伤相关项的曲率,取峰后软化段斜率线斜率,将 R 作为自由变量。以“软化模量误差最小”为目标函数,采用非线性最小二乘反演,得到最优 R 值。等效塑性应变 k_m 定义为

$$k_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1^p - \epsilon_m^p)^2 + (\epsilon_m^p)^2 + (\epsilon_3^p - \epsilon_m^p)^2} \quad (18)$$

式中: ϵ_1^p 、 ϵ_3^p 为对应于最大和最小主应力方向对应的塑性主应变, $\epsilon_m^p = \frac{1}{3}(\epsilon_1^p + \epsilon_3^p)$ 。特别值得注意的是,缩放参数 $\eta_m > 1$ 控制硬化阶段屈服面扩张的极限位置,当 $\eta_m = 1$ 时,系统退化为无峰前硬化的理想弹塑性模型(图 2(a))。进一步分析表明,参数 R 与损伤软化速率呈显著相关性,其增大将导致屈服面收缩加速,表现为材料脆性响应增强(图 2(b))。当 $R = 1$ 时,损伤软化退化为线性演化模式。

考虑软化/硬化修正因子 η 的 MC 则用来判断砂岩的剪切失效行为,同样的处理方法用在最大拉伸失效准则来处理砂岩拉伸失效行为。

$$f_m^s(\sigma, \epsilon_p, D) = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi \eta + 2c \sqrt{N_\varphi} \eta \quad (19)$$

$$f_m^t(\sigma) = \sigma_3 - \sigma^t \eta \quad (20)$$

塑性增量可通过求解式(21)得到。

$$\Delta \epsilon^p = d\lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma} \quad (21)$$

式中: g_p 是非相关流动势函数,剪切破坏和拉伸破坏的形式分别为

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi \eta \quad (22)$$

$$g^t(\sigma) = \sigma_3 \quad (23)$$

塑性演化的相应加卸载条件为

$$f_p \leq 0, d\lambda_p \leq 0, d\lambda_p f_p = 0 \quad (24)$$

由于损伤是根据已知的总应变张量确定的,只剩下塑性应变和应力未知。同样,考虑一致性条件,破坏准则对塑性应变和应力的导数应为零。

$$\Delta f_p = \frac{\partial f_p}{\partial \sigma} : \Delta \sigma + \frac{\partial f_p}{\partial \eta} \Delta \eta = 0 \quad (25)$$

$$\Delta \eta = \frac{\partial \eta}{\partial \epsilon^p} : \Delta \epsilon^p \quad (26)$$

塑性乘子可进一步表示为

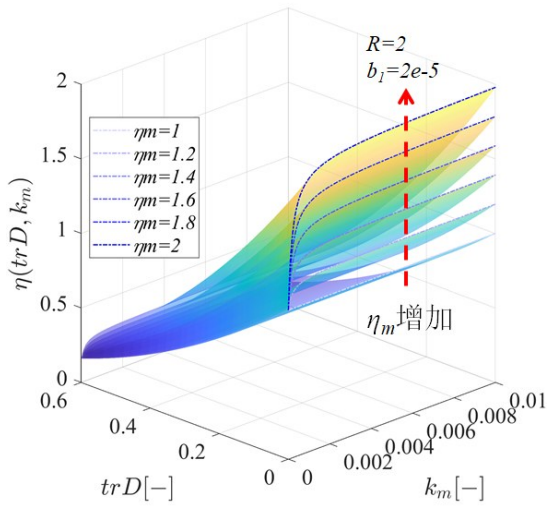
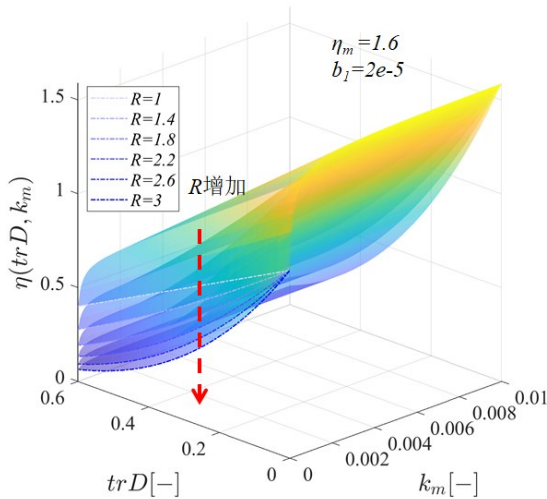
(a) 塑性变形 k_m (b) 损伤 trD

图2 硬化/软化修正因子与塑性变形和损伤的相关性

Fig. 2 Correlation of hardening/softening parameters with the plastic deformation and the damage

$$d\lambda_p = \frac{\frac{\partial f_p}{\partial \sigma} : [\mathbb{C}(D) : \Delta \epsilon + \Delta \mathbb{C}(D) : \epsilon^e]}{\frac{\partial f_p}{\partial \sigma} : \mathbb{C}(D) : \frac{\partial g}{\partial \sigma} - \frac{\partial f_p}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial \epsilon^p} : \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)} \quad (27)$$

2.3 基于各向异性损伤的渗透率模型

岩体渗透性主要受压应力与损伤缺陷的共同影响:压应力增大使孔隙与裂隙压实,渗透率降低;而损伤发展(基于拉伸应变的宏观破裂)则会增强渗透性。将立方渗流定律引入损伤渗透率模型,以表征流体在岩石裂隙系统中的渗流行为。

$$K_D = K_0 c_2 (trD)^3 \quad (28)$$

$$f_{es} = c_1 + (1 - c_1) \exp(-\gamma \langle -\sigma_m \rangle) \quad (29)$$

式(29)为基于损伤构建的立方定律渗透率模型,其中 K_D 为损伤引起的增量渗透率, K_0 为初始渗

透率, c_1 为拟合参数。式(30)给出了一个弱化参数 f_{es} 来描述压应力对渗透率的影响。其中 σ_m 为平均主应力, c_1 为压缩下限,代表在压应力条件下裂隙闭合度下限(残余流动通道); γ 为裂隙面抗压刚度系数,表示压缩难易度的曲率; c_2 为损伤诱导渗透率放大系数。压缩与损伤联合作用下各向异性渗透率的演化可表示为

$$K = [c_1 + (1 - c_1) \exp(-\gamma \langle -\sigma_m \rangle)] K_0 [1 + c_2 (trD)^3] \quad (30)$$

岩体开挖卸荷会形成拉张复合应力场,诱发围岩损伤区发育,其中的裂纹扩展呈现出优势方位分布。基于连续介质力学,裂纹网络可采用离散圆盘模型表征。为描述裂纹系统的各向异性,建立以 z 轴为对称基准的球坐标系:裂隙面法向量 n 的空间方位由极角 φ (与对称轴夹角) 和方位角 θ (绕轴旋转角) 共同确定。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi E(\theta) \sin \theta d\theta d\phi = 1 \quad (31)$$

$E(\theta)$ 是裂隙的概率密度函数,在单位球面上的积分为 1。裂纹的走向与加载类型有很强的相关性。根据 Tikhomirov 等^[19] 的研究,代表由压缩或拉伸荷载引起的岩体裂纹统计特征的密度函数分别为

$$\text{压缩: } E(\theta) = \frac{3}{8\pi} \sin^2(\theta) \quad (32)$$

$$\text{拉伸: } E(\theta) = \frac{3}{4\pi} \cos^2(\theta) \quad (33)$$

Maleki 等^[13] 在此基础上利用径向平面中的椭球体解释了不同加载类型的归一化渗透率分布。从裂缝密度分布来看,压缩诱导的最大渗透率在垂直方向上,而拉伸诱导的最大渗透率在水平方向被测量到。本文中,初始渗透率被认为是各向同性的,借助线性插值的方法来解释由拉伸和压缩组合导致的各向异性渗透增长。

$$K_D = \frac{K_D}{trD} \{ [\alpha_c (d_1 - d_2) + 2\alpha_c (d_2 - d_3) + d_3] \delta + (d_1 - d_2)(1 - 3\alpha_c) e_1 \otimes e_1 + 2(d_2 - d_3)(1 - 3\alpha_c) e_3 \otimes e_3 \} \quad (34)$$

最后,渗透率张量可以用式(35)表示

$$K = f_{es} (K_D + K_0 I) \quad (35)$$

3 塑性损伤(硬)软化的本构模型二次开发

3.1 应变损伤本构模型二次开发

FLAC3D 的统一架构确保了自定义本构模型

在灵活扩展的同时,无损于计算效率。采用 FLAC3D 进行应变损伤本构模型二次开发,开发流

程如图 3 所示。在摩尔库伦模型基础之上,对弹塑性损伤本构模型开发,保留了摩尔库伦所有参数。

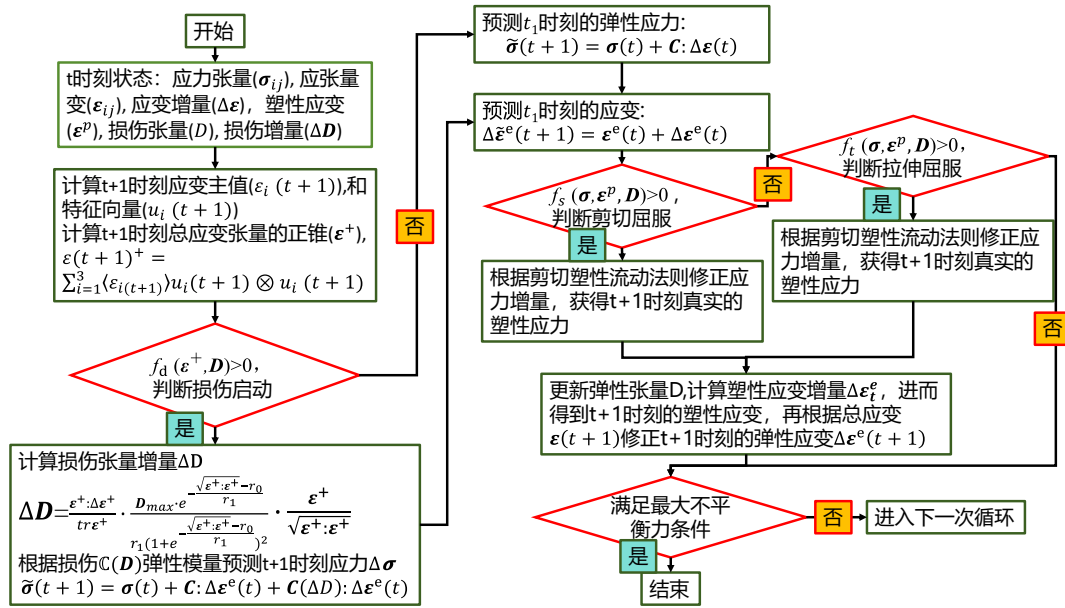


图 3 FLAC3D 损伤本构二次开发流程

Fig. 3 FLAC3D secondary development flowchart for damage constitutive model

3.2 模型标定与试验验证

通过岩石完整的应力-应变和损伤演化数据进行模型校准。 η_m 由起裂应力和峰值应力确定,在达到起裂应力之前应力应变曲线表现出线性特征,峰值点代表塑性面最高的位置, η_m 表示塑性面硬化,后继屈服面和初始屈服面的位置比例关系。 r_0 、 D_{max} 由损伤演化曲线确定,前者为损伤曲线中心对应的拉伸应变,后者为最大损伤值。由于考虑了不同方向的损伤,模型中的损伤演化曲线由3个特征值方向的损伤平均而来,因此 D_{max} 可以大于1。另外, r_1 也由应变损伤曲线的变化速率决定。而剩下的塑性参数 b_1 、 R 和损伤参数 a_1 、 a_2 由实测应力应变曲线和模拟应力应变曲线匹配获得。渗透率函数涉及的参数 c_1 、 c_2 和 γ 由力学-渗流耦合实验。 K_0 是岩石的初始渗透率, c_1 由测试中的最低渗透率确定。 γ 渗透率曲线前部分的下降段决定,反映岩石抵抗应力压缩的能力。 c_2 是渗透率曲线后半段的曲线拟合得到。

选用标准红砂岩试件($\varphi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$),在岩石全应力多场耦合三轴实验系统中开展试验。围压设置为10 MPa,渗透压差固定为2 MPa。轴向与环向变形分别通过LVDT和应变计采集,关键力学阶段均进行渗透率测试。图4为实验结果与模型对比图。从模拟结果来看,轴向应力应变具有较好的一致性,试验的早期阶段,受到压缩应力的影响渗透系数呈下降趋势。在达到初始屈服点以后,渗透系数开始上升并在软化阶段出现拐点并区域稳

定,除了局部曲率不能较好地表征,整体的规律比较符合。

对实测曲线与模拟曲线进行整体与分段评估,采用均方误差MSE统一衡量应力-应变与渗透率演化误差,3组数据曲线MSE区间3.23~30(单位:MPa²);峰前($\epsilon \leq 1\%$)MSE $\approx 3.2 \sim 5.1$,峰后($\epsilon > 1\%$)MSE $\approx 18 \sim 30$,符合损伤局部化阶段误差增大预期。软化段对应裂隙局部化,实测曲线对初始缺陷敏感。渗透率突升受单一损伤变量平均化描述,未能完全捕捉优势裂隙的离散特征。

4 某地下工程掘进围岩变形损伤渗流特性

为模拟某地下工程掘进过程,建立了尺寸为600 m \times 500 m \times 180 m的三维地质模型,共计划分144 000个六面体单元与152 846个节点。模型 x 、 y 方向分别对应工作面走向与倾向,埋深设定为125 m。边界条件设置为上边界自由,其余各面为法向位移约束。采用分步开挖方式模拟推进过程,每步开挖进尺10 m,累计推进200 m。

图5展示了沿 x 方向150 m处垂直剖面的应力分布云图。垂直应力分布可划分为3个典型区域:原岩应力区(工作面90 m以远)、应力集中区(工作面前方0~90 m范围)以及采空区卸压区。应力集中系数最大达4.1。水平应力分析表明,开挖引起掌子面附近岩体应力释放,局部由压应力转为拉应

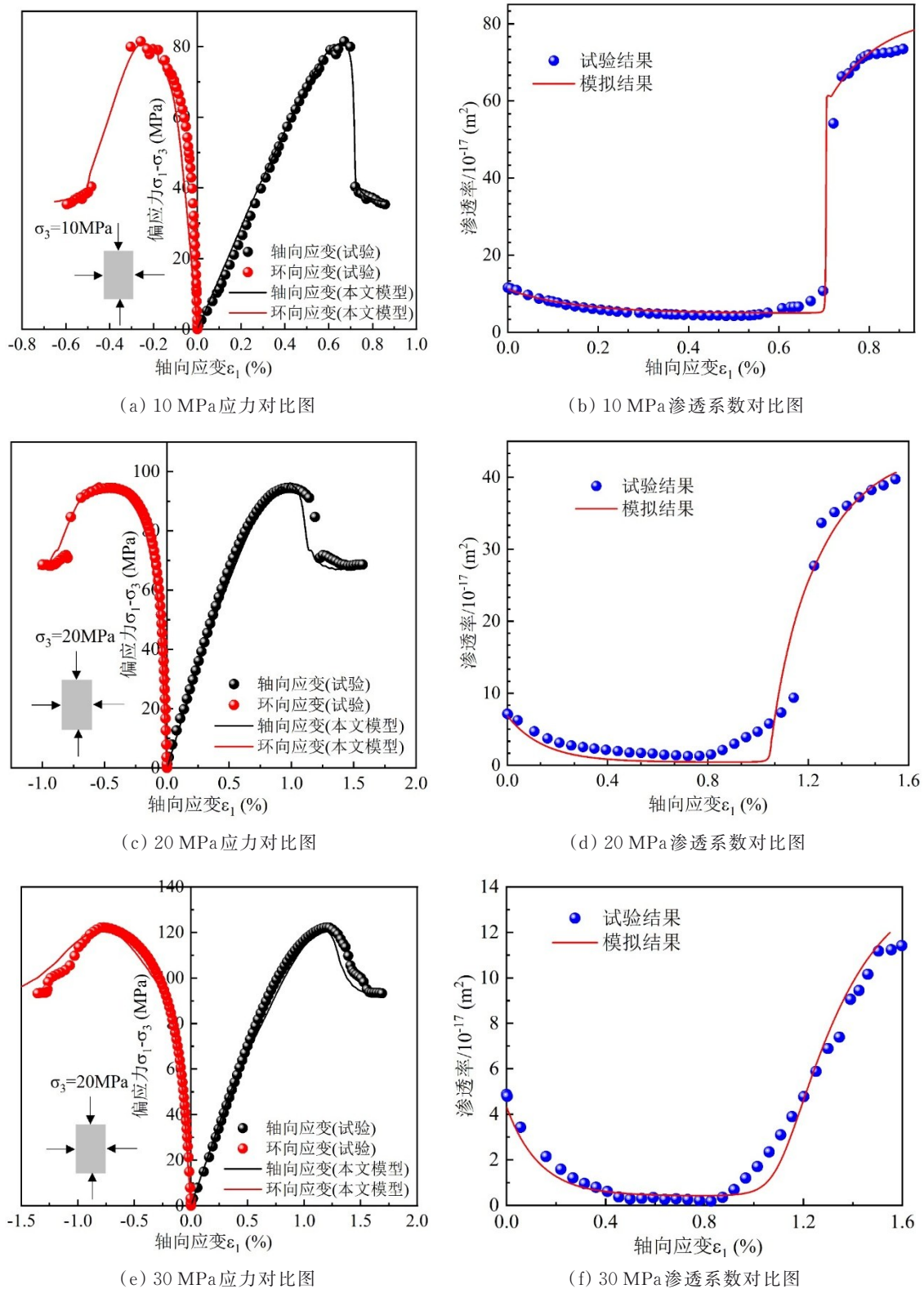


图4 实验结果与模型对比图

Fig. 4 Comparison between experimental results and model predictions

力状态。此外,在地表以下约 60 m 范围内亦观测到明显拉应力区(图 5(b))。该现象可归因于开挖引起的上覆岩层弯矩效应,导致岩层上部受压、下部受拉的典型力学响应。

卸荷效应引发围岩体系产生系列变形破坏响

应,具体表现为采空区上覆岩层可能产生冒落、破裂及沉降等地质现象。提取 $y=250$ m 剖面位移云图进行定量分析,图 5(c)所示垂直位移云图呈现以 $x=100$ m 轴线为对称轴的拱形分布特征,最大位移值位于轴线处。随着距轴线距离增大,位移量呈梯

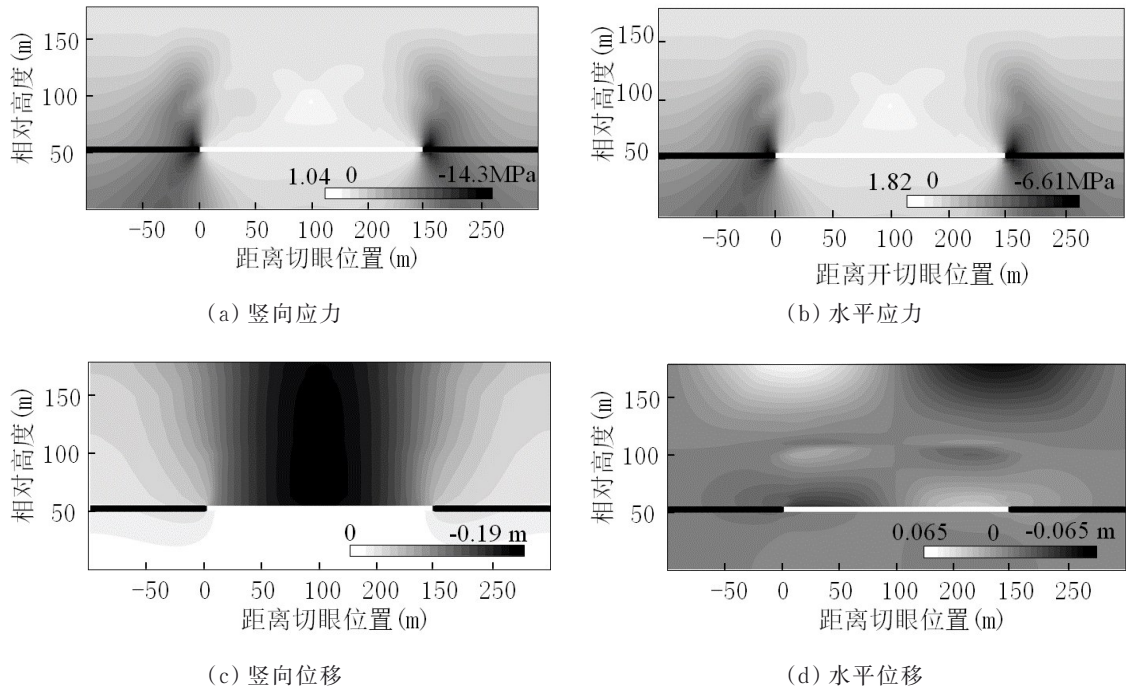


图 5 推进 150 m 时围岩应力场、位移场分布

Fig. 5 Stress and displacement field distribution of surrounding rock when working face advances 150 m

度递减趋势,特别是在靠近护巷煤柱区域位移显著衰减,表明护巷煤柱有效抑制了上覆岩层变形。在弯矩作用下,岩层水平位移呈现地表向采空中心汇聚、采空区顶板向两侧发散的典型运动模式(图5(d))。

建立的损伤模型基于岩体正应变 ϵ^+ 演化规律构建,该参数一定程度上表征岩体破坏过程中裂隙拉张开破坏。模型破坏机理反映采动岩层破坏特征,其破坏形态主要呈现双重结构(图6):地表表现为中央沉降与边缘张拉破坏复合模式;采空区顶板形成冒落带与导水裂隙带协同发育特征。

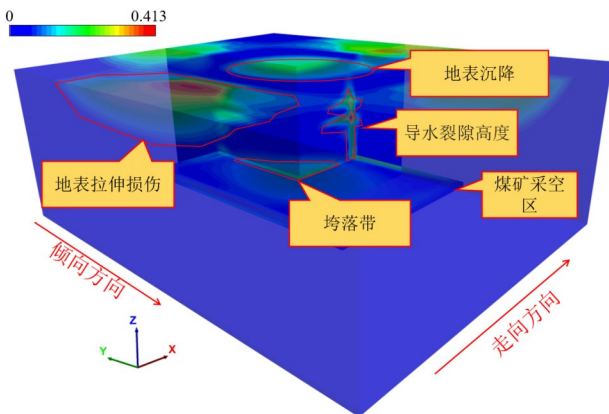


图 6 巷道开挖损伤空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of excavation damage in tunnels

如图 7 所示,采掘活动导致的岩体渗透率空间重构具有显著分区特征:采空区上覆浅部岩层、护巷煤柱及深部未扰动岩体因压缩致密化形成渗透

率衰减区,并呈现各向同性;地表沉降区的张拉裂隙使其成为渗透率增强区;而采空区邻近顶底板则构成渗透率强化区,其值随距离减小呈指数增长,且该损伤区渗透性表现出强烈的各向异性,顶板最大与最小主渗透率比值达 2.13,印证了采动裂隙沿最大主应力方向优势扩展的力学机制。

图 8 为长壁采煤顶板岩层变形破坏特征分区。

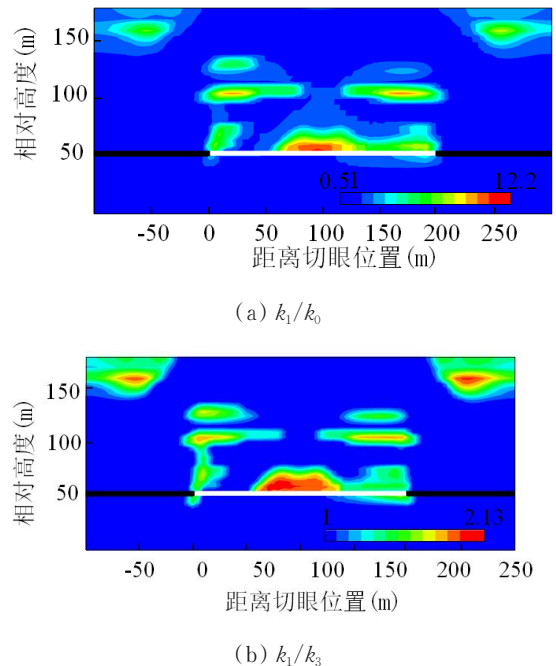


图 7 工作面推进 150 m 时围岩渗透系数等值线图

Fig. 7 Contour map of permeability coefficient in surrounding rock at a working face advance of 150 m

掘进过程中岩层应力与损伤的协同演化可划分为3个典型区域:原始应力区(A区)受采动扰动影响微弱,基本保持原岩应力状态;应力集中区(B区)的围岩应力呈周期性波动,支承压力随工作面推进持续累积,最大应力集中系数达2.3~3.1;卸压冒落区(C区)则经历“压缩储能-卸压破坏”的力学过程转换,以顶板上方10 m岩层为例,卸压后拉应力稳定在0.3 MPa左右(图9(a)),且不随工作面推进而变化。

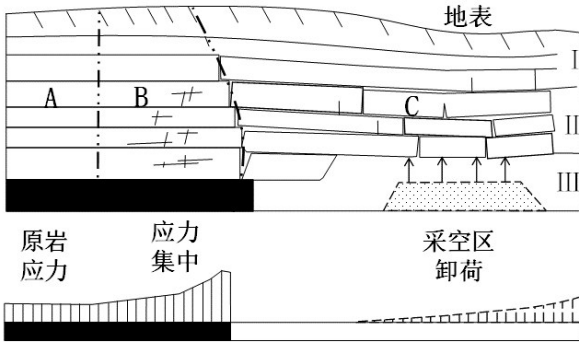


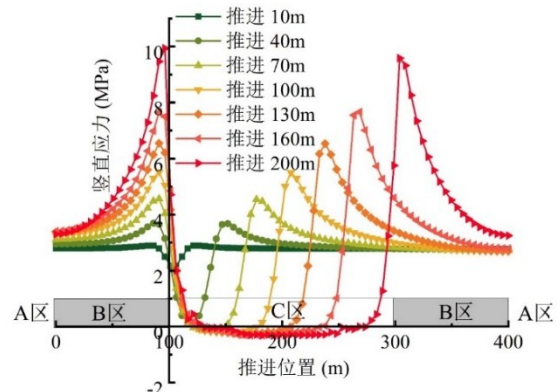
图8 长壁采煤顶板岩层变形破坏特征分区

Fig. 8 Zoning of deformation and failure characteristics in longwall mining roof strata

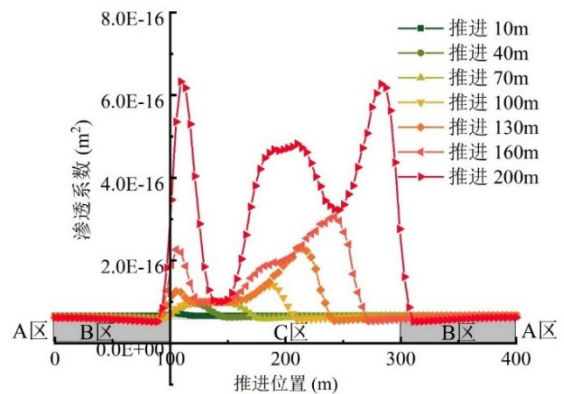
数值模拟与工程实践的对比分析表明:受垮落矸石碎胀支撑作用的影响,实际工程中顶板应力存在“升高-降低-恢复”三阶段演化特征。建立的连续介质模型虽未完全再现应力恢复阶段特性,但准确刻画了前两个阶段的力学响应过程,其根本原因在于模型未考虑垮落矸石离散介质特性对围岩的二次支撑效应。模型适用于掘进初期小范围内围岩损伤-渗流快速耦合分析。

图9(b)揭示了顶板上方10 m岩层渗透率变化系数的动态演化特征。基于应力-渗流耦合机制,可划分为3个典型响应区:稳定渗透区(A区),受采动应力扰动微弱,渗透率全程保持初始量级,变异系数小于5%;压密降渗区(B区),应力集中引发的体积压密效应主导渗透特性,渗透率随工作面推进逐步衰减的规律;裂隙增渗区(B-C过渡带),此区域覆岩受到岩层自重应力下沉牵引,形成高度拉伸破坏,导致渗透率突增,增后随距工作面距离增加逐步衰减。另外,工作面推进方向的反复加卸载作用导致岩体损伤累积显著。

模型揭示的损伤-渗透率“阈值跃迁”与自稳定各向异性比为现场超前探水及“让压-疏水”时机提供了定量依据;连续框架下预测的损伤区范围与实测导水裂隙带高度接近,验证了短期开挖-渗流耦合分析的可靠性,而长期稳定性预测仍需在后继工作中引入垮落矸石碎胀支撑效应进一步扩展。



(a) 顶板应力



(b) 渗透系数

图9 工作面推进煤层顶板应力和渗透系数演化

Fig. 9 Evolution of stress and permeability coefficient in the coal seam roof during working face advance

5 结论

基于热力学内变量理论,构建了统一硬化-软化弹塑损伤-渗流耦合数值模型,并在FLAC3D平台实现了二次开发与验证。主要结论如下:

- 1)提出了基于Logistics函数的非线性损伤演化方程,能够合理描述裂隙萌生-加速扩展-渐进饱和的全过程,克服了传统线性模型在损伤无限累积方面的不足。
- 2)构建了耦合双曲线硬化与损伤软化机制的统一屈服函数,有效表征了岩体从弹性变形、峰前硬化到峰后软化的渐进破坏特征。
- 3)建立了考虑压密与损伤效应的各向异性渗透率模型,揭示了孔隙压实与裂隙扩展对渗流通道重构的双重机制。
- 4)通过数值模拟和实验对比验证了模型的可靠性,并在地下工程算例中揭示了掘进卸荷引发的围岩应力集中、拱形沉降、水平汇聚以及渗透率三维重构特征。

参考文献

- [1] 陈东祺,刘伟韬,刘玉本,等.考虑电场特性的非饱和岩石渗流-应力-损伤耦合模型及数值模拟研究[J/OL].中南大学学报(自然科学版).<https://link.cnki.net/urlid/43.1426.N.20250818.2330.002>.
Chen D Q, Liu W T, LIU Y B, et al. Study on unsaturated rock seepage-stress-damage coupled model considering electric field characteristics and numerical simulation [J/OL]. Journal of Central South University (Science and Technology). <https://link.cnki.net/urlid/43.1426.N.20250818.2330.002>. (in Chinese)
- [2] 郭伟,王明洋,李杰,等.深部硐室塑性区围岩软化特性分析[J/OL].岩土工程学报.<https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250918.1931.006>.
Guo W, Wang M Y, Li J, et al. Analysis of softening characteristics of surrounding rock in plastic zone of deep chamber [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250918.1931.006>. (in Chinese)
- [3] 陈昊祥,王明洋,燕发源,等.深部巷道围岩塑性区演化的理论模型与实测对比研究[J].岩土工程学报,2022,44(10):1855-1863.
Chen H X, Wang M Y, Yan F Y, et al. Theoretical model for evolution of plastic zone of rock mass around deep tunnels and its comparison with in-situ observation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(10): 1855-1863. (in Chinese)
- [4] 王明洋,徐天涵,邓树新,等.深部硐室长期稳定性的两个力学问题[J].爆炸与冲击,2021,41(7):1-15.
Wang M Y, Xu T H, Deng S X, et al. Mechanical problems for the long-term stability of rocks surrounding deep level underground tunnels [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(7): 1-15. (in Chinese)
- [5] Detournay E, Cheng A H. Poroelastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25(3): 171-182.
- [6] Wang Y. The effect of a nonlinear Mohr-Coulomb criterion on the stresses and plastic deformation near a circular opening in a poorly consolidated permeable medium [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1996, 33(2): 197-203.
- [7] Wang Z, Rutqvist J, Wang Y, et al. Effect of Stress on Flow and Transport in Fractured Rock Masses Using a Modified Crack Tensor Theory [J]. Structural Longevity, 2012, 7(2): 105-116.
- [8] Li P F, Wang F, Long Y Y, et al. Investigation of steady water inflow into a subsea grouted tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 92-102.
- [9] Xu C J, Liang L J, Chen Q Z. Explicit analytical solutions for surrounding rock stress of a shallow buried tunnel considering seepage effect [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018, 22(sup1): s149-s163.
- [10] Lu A Z, Cai H, Wang S J. A new analytical approach for a shallow circular hydraulic tunnel [J]. Meccanica, 2019, 54(1/2): 223-238.
- [11] Yu Z, Shao J F, Duveau G, et al. Numerical modeling of deformation and damage around underground excavation by phase-field method with hydromechanical coupling [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 138: 104369.
- [12] Nomura R, Itto R, Takase S, et al. Unified permeability modeling for transitional darcy/non-darcy flow based on 3D pore-level numerical flow tests [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2026, 50(1): 162-177.
- [13] Maleki K, Pouya A. Numerical simulation of damage-Permeability relationship in brittle geomaterials [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(5): 619-628.
- [14] Chiarelli A S, Shao J F, Hoteit N. Modeling of elastoplastic damage behavior of a claystone [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19(1): 23-45.
- [15] Chiarelli A S, Shao J F, Hoteit N. Modeling of elastoplastic damage behavior of a claystone [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19(1): 23-45.
- [16] Ortiz M. A constitutive theory for the inelastic behavior of concrete [J]. Mechanics of Materials, 1985, 4(1): 67-93.
- [17] Ju J W. On energy-based coupled elastoplastic damage theories: Constitutive modeling and computational aspects [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(7): 803-833.
- [18] Kondner R L. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(1): 115-143.
- [19] Tikhomirov D, Niekamp R, Stein E. On three-dimensional microcrack density distribution [J]. Zamm, 2001, 81(1): 3-16.