

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3607-08

泥岩弹塑性损伤本构模型及其参数辨识

贾善坡^{1,2}, 陈卫忠¹, 于洪丹¹, 李香玲³

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.长江大学城市建设学院, 荆州 434023;
3.Euridice, SCK-CEN, 国家核能研究中心, 比利时 摩尔 2400)

摘 要: 以连续介质力学和不可逆热力学为基础, 将损伤引入到修正的 Mohr-Coulomb 准则中, 建立了泥岩弹塑性损伤本构模型反映泥岩软化硬化行为, 通过构建损伤势函数导出了泥岩的损伤演化方程, 编制了泥岩弹塑性损伤本构模型及其参数反演程序。并根据非排水条件下泥岩三轴试验结果, 采用多目标函数优化反分析法获得了泥岩本构模型参数。研究成果表明, 所提出的弹塑性损伤本构模型能有效地描述泥岩在不同应力状态下的力学特性。

关 键 词: 泥岩; Mohr-Coulomb 模型; 损伤; 本构模型; 参数辨识

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Parameter identification of new elastoplastic damage constitutive model for claystone

JIA Shan-po^{1,2}, CHEN Wei-zhong¹, YU Hong-dan¹, LI Xiang-ling³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;
3. Euridice, SCK-CEN, Belgian Nuclear Research Centre, Mol 2400, Belgium)

Abstract: In order to depict the hardening and softening behaviours of clay, a new elastoplastic damage model with Mohr-Coulomb criterion is presented in the framework of the irreversible thermodynamics and nonlinear continuum mechanics. Furthermore, damage evolution equation is suggested based on the defined damage potential. Based on the developed numerical code, parameters for Boom clay elastoplastic damage model are obtained according to undrained triaxial consolidation tests by back analysis. The numerical simulation under various stress states shows that the proposed model is able to effectively depict the main features of mechanical behaviors of Boom clay.

Key words: claystone; Mohr-Coulomb criterion; damage; constitutive model; parameter identification

1 引 言

软岩是工程性质明显区别于硬质岩体和软弱土体的岩土介质, 尤其是在水环境的作用下, 软岩的物理力学特性会发生显著的变化。对复杂多变的软岩工程, 实施合理有效的工程控制, 必须突破现有的岩体力学和土力学的学科框架, 研究软岩的工程力学特征, 构建能够考虑水化作用的本构关系^[1]。

Robinet 针对饱和黏土岩的非线性膨胀问题建立了热弹塑性模型, 并采用两类塑性准则描述黏土岩的力学行为^[2]; Chiarelli 对泥岩进行了三轴压缩试验, 指出塑性变形和各向异性损伤是相互耦合的,

对矿物结构和含水率对泥岩力学性质的影响也进行了研究, 并在此基础上建立了用于描述泥岩的弹塑性损伤模型, 采用数值分析方法对试验结果进行了验证^[3]。Philippe Kolmayer 建立了描述泥岩峰后效应、脆性断裂、软化以及膨胀效应的损伤本构模型, 并给出了模型的实现方法及数值算例^[4]。Nathalie Conil 在研究泥岩物理性质和力学性质的基础上, 应用应变等效原理研究了塑性与损伤的耦合效应, 引入了热动力势能描述泥岩的非线性行为^[5]。Conil 根据泥岩的试验结果, 针对材料力学性质的降低建立了各向异性孔隙塑性模型, 采用 Drucker-Prager 屈服准则, 损伤以二阶张量的形式表述, 用于描述损伤

收稿日期: 2009-07-15

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目 (No. 50720135906); 国家自然科学基金面上项目 (No. 40772184); 863 项目 (No. 2007AA11Z108) 赞助。
第一作者简介: 贾善坡, 男, 1980 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程、地下工程及工程力学方面的研究工作。E-mail: jiashanporsm@163.com

对水-力耦合的影响，并给出了数值算例进行验证^[6]。Chun-liang Zhang 对用于储存核废料围岩的硬黏土进行了热-水-力三场耦合试验，指出 THM 三场耦合试验非常复杂，伴随着遇水膨胀、热膨胀、热效应影响岩石的变形和强度以及裂隙的自愈合现象，认为孔隙水的吸附效应在 THM 耦合中起主导作用^[7]。Jia 基于试验和细观力学机理，以孔隙塑性和连续介质损伤力学理论建立了在饱和和非饱和条件下泥岩的弹塑性损伤模型，并通过数值模拟对试验结果进行了验证^[8]。Abou-Chakra Guery 基于试验结果对泥岩的弹塑性损伤本构问题进行探讨，并与室内三轴试验进行了对比，证实了模型的有效性^[9]。

泥岩由于其低渗透性、良好的蠕变性和遇水损伤自修复的特性，被认为是储存核废料的备选场地之一^[10-11]。本文以 Boom Clay 泥岩为研究对象，根据非排水条件下泥岩三轴试验结果，在弹塑性力学和不可逆热力学的基础上，建立了泥岩弹塑性损伤本构模型，导出了损伤演化方程，编制了弹塑性损伤本构模型及其参数反演程序，采用优化反分析法获得了泥岩本构模型参数。

2 Boom clay 泥岩三轴压缩试验研究

Boom clay 泥岩主要是由黏土矿物组成(30%~70%，平均值为 55%)，非黏土部分主要由石英(25%)和长石组成，其中黏土矿物由伊利石(50%)、蒙脱石(30%)、高岭石(10%)以及伊利石-蒙脱石胶合物组成，基本力学参数如表 1 所示。

表 1 Boom 泥岩基本物理参数试验值
Table 1 Physical parameters of Boom clay

密度 / (g/cm ³)	含水率 / %	塑限 / %	液限 / %	塑性指数 / %
2.026	22~27	23~29	55~80	32~51

对 Boom clay 泥岩进行了非排水各向同性固结试验(简称为 CIU)^[12-13]，在 0.89~5.42 MPa 压力下进行固结，固结程序为：以 0.5 MPa 的载荷增量施加到预定的围压，然后打开阀门进行反压饱和，一旦固结和孔隙压力耗散完成，对试样增加轴向应力进行剪切试验(如图 1)。

根据试验结果将泥岩应力-应变过程分为 4 个阶段(如图 2)，即 OA、AB、BC、CD 4 段：

(1) OA 段，该段的应力-应变曲线基本成直线，为弹性变形阶段，A 的应力称为初始屈服应力 σ_{e0} 。

(2) AB 段，是岩石微裂隙开始产生、扩展的阶

段，称为非线性弹性阶段，主应力差与轴向应变之间基本满足双曲线关系，B 点的应力称为峰值强度 σ_{cu} ，也就是通常意义上的强度。

(3) BC 段，称为应变软化段，在峰值强度之后，随着应变的增加，应力下降，岩石发生应变软化。轴向压力使试件形成破裂面，强度降低，应变增长。C 点的应力称为残余强度 σ_{cr} 。

(4) CD 段，称为塑性流动阶段，随着塑性变形的持续发展，最终强度不再降低，达到破碎、松动的残余强度，这个阶段可以认为是理想的塑性阶段。

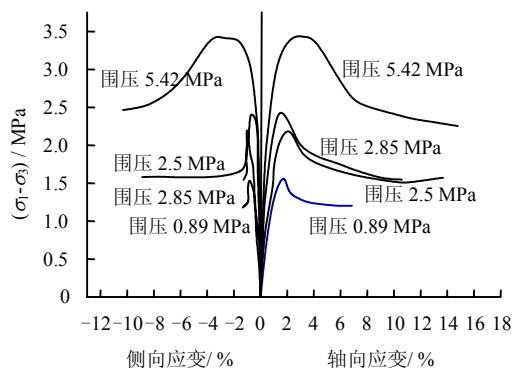


图 1 不同围压下泥岩应力-应变关系曲线
Fig.1 The stress-strain curves of Boom clay under various pressures

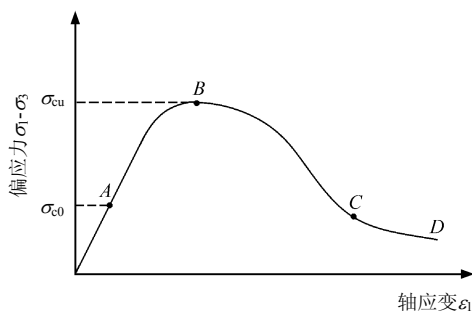


图 2 泥岩应力-应变分段图
Fig.2 The stress-strain curve of Boom clay in different stages

3 Boom clay 弹塑性损伤力学模型

损伤对材料弹塑性的影响体现在对弹性刚度的影响和对加载函数、塑性势函数及软-硬化参数的影响。本文构建弹塑性损伤模型：

(1) 在峰前区域，泥岩残余变形较小，曲线基本上呈非线性弹性形式，采用弹性损伤模型描述其力学行为；

(2) 软化现象开始时，泥岩峰值强度满足 Mohr-Coulomb 强度准则，在损伤的过程中的强度

也满足 Mohr-Coulomb 强度准则；

(3) 泥岩的残余强度准则也满足 Mohr-Coulomb 强度准则。

根据热力学第二定律可知^[14]，损伤的过程实质上是能量耗散过程或不可逆热力学过程。损伤演化方程可以借助损伤耗散势函数得到，在应变空间内定义一个能量指标为

$$\bar{e} = \sqrt{\varepsilon_{ij} D_{ijkl} \varepsilon_{kl}} \quad (1)$$

取损伤势函数为

$$g^d = g^d(\bar{e}, \Omega) = g^d(\bar{e}) - \Omega \quad (2)$$

假定损伤流动与损伤势函数的梯度方向相同，增量损伤变量可以写为

$$\dot{\Omega} = \dot{\mu} \frac{\partial g^d}{\partial \bar{e}} \quad (3)$$

式中 $\dot{\mu} \geq 0$ 表示损伤乘子。

损伤势函数的相容方程为

$$dg^d = \frac{\partial g^d}{\partial \bar{e}} d\bar{e} + \frac{\partial g^d}{\partial \Omega} d\Omega = 0 \quad (4)$$

于是可得到

$$\dot{\mu} = - \frac{\frac{\partial g^d}{\partial \bar{e}} d\bar{e}}{\frac{\partial g^d}{\partial \Omega} d\Omega} \quad (5)$$

最后得到损伤演化方程为

$$\dot{\Omega} = - \frac{\frac{\partial g^d}{\partial \bar{e}} d\bar{e} \frac{\partial g^d}{\partial \bar{e}}}{\frac{\partial g^d}{\partial \Omega} d\Omega} \quad (6)$$

3.1 泥岩弹性损伤模型

由泥岩三轴试验曲线可以看出，在变形初期有一小段为弹性变形，随着轴向载荷的增大，泥岩的变形呈现非线性，曲线的转折点表明损伤的开始，即弹性损伤初始点；而当应力达到峰值时，进入塑性损伤阶段。

表 2 三轴试验弹性损伤初始点对应的应力应变状态

Table 2 The stress and strain data of initial damage point under different confining pressures

围压 / MPa	主应力差 / MPa	轴向应变 / %	侧向应变 / %	能量指标 / MPa ^{1/2}
0.89	1.4930	1.3679	-0.680 8	0.273 2
2.50	1.8918	1.1683	-0.534 9	0.227 4
2.85	2.2468	1.0732	-0.376 1	0.196 8
5.42	2.897 6	1.040 0	-0.369 6	0.191 1

弹性损伤模型中，应变分三部分：即弹性应变 ε_{e0} 、可恢复的损伤应变 ε_{cd} 和不可恢复的损伤应变 ε_{id} 。损伤变量是一个热力学内变量，可应用间接描述法来表征，根据 Lemaitre 的应变等效性假设，弹性模量的变化可以反映岩石损伤的演化，损伤演化过程中的弹性模量变化如图 3 所示， E_0 为无损材料的弹性模量，即初始弹性模量， \bar{E} 为损伤引起的弹性模量。

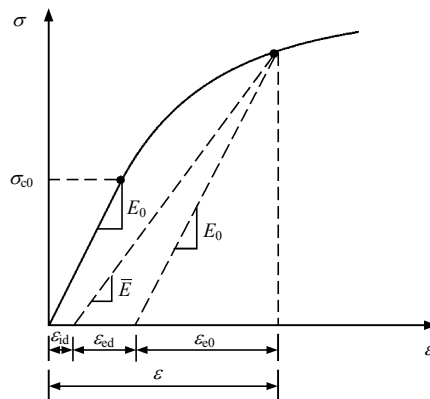


图 3 弹性损伤模型中弹性模量变化
Fig.3 The variation of elastic modulus during elastic damage state

建立如下形式的弹性损伤演化方程：

$$\Omega_e = \beta_1 (\bar{e} - \bar{e}_{0e}) \quad (7)$$

式中： \bar{e} 为能量指标； \bar{e}_{0e} 为弹性损伤初始点对应的能量指标，与围压有关； β_1 为损伤参数。弹性损伤演化曲线示意图如图 4 所示。

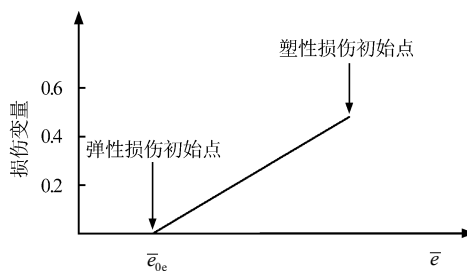


图 4 弹性损伤演化曲线示意图
Fig.4 The evolution curve of elastic damage

3.2 泥岩塑性损伤模型

以应力-应变曲线峰值应力点作为塑性损伤初始点，不同围压下塑性损伤初始点所对应的能量指标如表 3 所示。

塑性变形时，卸载后存在残余变形（图 5），在塑性损伤阶段有效应力为

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{(1-\Omega)} = E_0(\varepsilon - \varepsilon_r) \quad (8)$$

式中： Ω 为总损伤， $\Omega = \Omega_e + \Omega_p$ ； ε_r 为卸载后的残余应变， ε_r 与屈服准则、势函数以及损伤有关，无法通过试验数据直接得到，因此，从试验数据无法直接获得损伤变量 Ω 的演化方程。

表 3 三轴试验塑性损伤初始点对应的应力应变状态
Table 3 The stress-strain data of initial plastic damage point under different confining pressure

围压 / MPa	主应力差 / MPa	轴向应变 / %	侧向应变 / %	能量指标 / MPa ^{1/2}
0.89	1.600 8	1.794 4	-0.862 8	0.354 3
2.50	2.245 7	2.237 2	-0.818 5	0.413 2
2.85	2.463 2	1.661 8	-0.752 2	0.322 3
5.42	3.448 3	2.432 3	-1.649 3	0.553 3

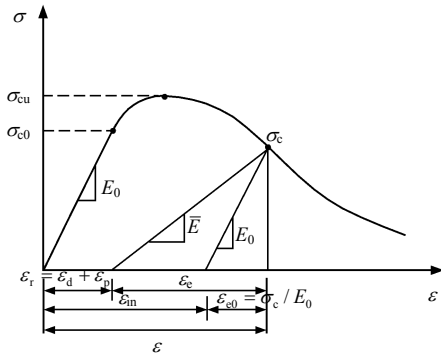


图 5 塑性损伤过程中的弹性模量变化
Fig.5 Variation of elastic modulus during plastic damage developing

建立如下形式的塑性损伤演化方程：

$$\Omega_p = \frac{\bar{e} - \bar{e}_{0p}}{\alpha_2 + \beta_2(\bar{e} - \bar{e}_{0p})} \quad (9)$$

式中： \bar{e}_{0p} 为塑性损伤初始点对应的能量指标； α_2 、 β_2 为损伤参数。塑性损伤演化曲线示意图如图 6 所示。

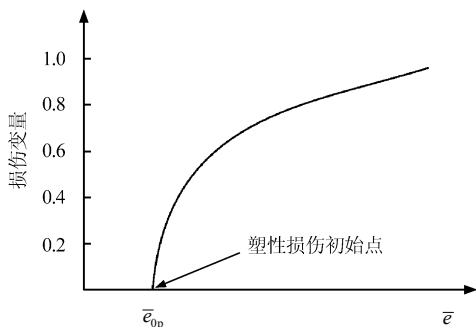


图 6 塑性损伤演化曲线示意图
Fig.6 The evolution curve of plastic damage

损伤时泥岩的弹性模量为

$$\bar{E} = (1-\Omega)E_0 \quad (10)$$

由式 (10) 可知，当损伤变量 Ω 接近 1 时，损伤后的弹性模量 \bar{E} 趋于 0，这与工程实际不符，因为岩石损伤后还具有一定的弹性模量。本文认为泥岩的损伤变量接近临界损伤值时弹性模量为 E_r ，对式 (10) 进行修正，弹性模量与损伤变量之间的关系如图 7 所示，损伤后的弹性模量的表达式为：

$$\begin{cases} \bar{E} = E_0 - \frac{E_0 - E_r}{\Omega_{lim}} \Omega & 0 \leq \Omega \leq \Omega_{lim} \\ \bar{E} = E_r & \Omega_{lim} \leq \Omega \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中： Ω_{lim} 为损伤变量临界值，取为 0.99； E_r 用于表征岩体屈服后的残余弹性模量。

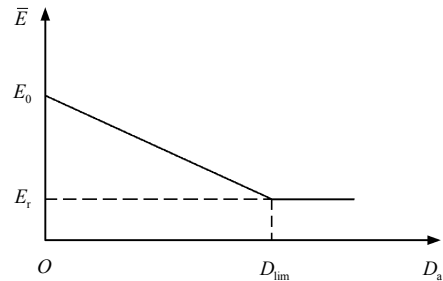


图 7 弹性模量随损伤变量的演化曲线
Fig.7 Evolution curve of elastic modulus vs. total damage variable

本文认为泥岩在损伤过程中内摩擦角不变化，对于黏聚力而言，随着损伤的积累，塑性应变逐渐增大，黏聚力逐渐减小，采用幂函数来描述（如图 8），即：

$$c = c_m - (c_m - c_r)\Omega_p^\eta \quad (12)$$

式中： c_m 为泥岩的最大黏聚力值，对应于室内试验得出的黏聚力； c_r 为岩石明显损伤时的黏结强度，对应于室内试验的残余强度； η 为材料参数， $0 \leq \eta \leq 1$ 。

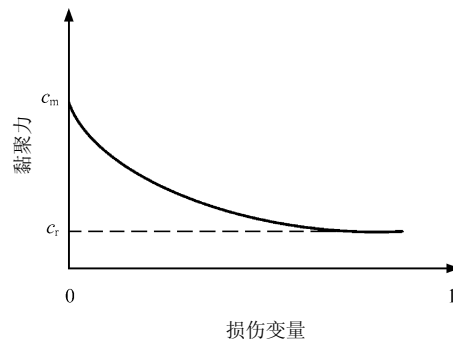


图 8 黏聚力与损伤变量的关系
Fig.8 Relationship between cohesion and damage variable

根据修正 Mohr-Coulomb 屈服准则构建屈服函数和塑性势函数^[1]，以名义应力表示的屈服条件为

$$f^p(\sigma, \Omega) = \frac{I_1}{3} \sin \phi + \sqrt{J_2 K^2(\theta) + (1 - \Omega)^2 m^2 c^2 \cos^2 \phi} - (1 - \Omega) c \cos \phi \quad (13)$$

以名义应力表示的塑性势函数为

$$g^p(\sigma, \Omega) = \frac{I_1}{3} \sin \phi + \sqrt{J_2 K^2(\theta) + (1 - \Omega)^2 m^2 c^2 \cos^2 \phi} \quad (14)$$

式中： c 、 ϕ 、 φ 为分别为黏聚力、内摩擦角和膨胀角； I_1 为应力第一不变量； J_2 为应力偏量第二不变量； θ 为 Lode 角， $K(\theta)$ 表达式为

$$K(\theta) = \begin{cases} (A - B \sin 3\theta), & |\theta| > \theta_T \\ \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \phi \sin \theta, & |\theta| \leq \theta_T \end{cases} \quad (15)$$

取 $\theta_T = 25^\circ$ ，式中：

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{3} \cos \theta_T \left(3 + \tan \theta_T \tan 3\theta_T + \frac{1}{\sqrt{3}} \text{sign}(\theta) (\tan 3\theta_T - 3 \tan \theta_T) \sin \phi \right) \\ B &= \frac{1}{3 \cos 3\theta_T} \left(\text{sign}(\theta) \sin \theta_T + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \phi \cos \theta_T \right) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

4 泥岩弹塑性损伤参数反演分析

要获得泥岩弹塑性损伤本构模型参数，比较适用的方法是采用优化反演方法。泥岩损伤本构模型的未知参数主要为：损伤参数 β_1 、 α_2 和 β_2 ；黏聚力 c 演化方程中的 c_r 和 η ；泥岩的膨胀角 φ 以及残余弹性模量 E_r ，共有未知参数 7 个。

4.1 损伤参数反演模型

本文开发了一个用于 3 维本构验证的数值反演程序，其原理可以描述为：给定轴向应变载荷的加载历史 $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{11}(t)$ 和定常围压 $\sigma_{22} = \sigma_{33}$ ，根据施加的轴向应变载荷增量以及应力应变历史，按照上述的弹塑性损伤本构，迭代计算轴向应力增量以及侧向应变增量。

泥岩所受到的应力 σ_{ij} 和应变 ε_{ij} 均是变量 $(\beta_1, \alpha_2, \beta_2, c_r, \eta, E_r, \varphi)$ 的函数，即

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(\beta_1, \alpha_2, \beta_2, c_r, \eta, E_r, \varphi) \\ \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(\beta_1, \alpha_2, \beta_2, c_r, \eta, E_r, \varphi) \end{cases} \quad (17)$$

若变量 $(\beta_1, \alpha_2, \beta_2, c_r, \eta, E_r, \varphi)$ 发生变化，那么将会导致泥岩的应力和应变发生改变。

正演计算中采用的是位移加载方式，数值计算结果和试验结果中的应力值差别和侧向应变值差别被用作最小二乘法，联合反演模型为^[15]

$$(1 - \chi)\Psi_1 + \chi\Psi_2 \rightarrow \min \quad (18)$$

式中： Ψ_1 、 Ψ_2 分别为应力数据、侧向应变数据构成的目标函数；当 $\chi = 1$ 时，则完全拟合了第二种物理量，当 $\chi = 0$ 时，则完全拟合了第一种物理量。

由应力数据构成的目标函数的表达式为

$$\Psi_1(\beta_1, \alpha_2, \beta_2, c_r, \eta, E_r, \varphi) = \sum_{k=1}^n (\sigma_{ij}^{ck} - \sigma_{ij}^{mk})^2 \quad (19)$$

式中： σ_{ij}^m 为不同轴向应变所对应的试验值； σ_{ij}^c 为相应的有限元计算值； n 为参与反演的试验值个数。

由侧向应变数据构成的目标函数的表达式为

$$\Psi_2(\beta_1, \alpha_2, \beta_2, c_r, \eta, E_r, \varphi) = \sum_{k=1}^m (\varepsilon_{ij}^{ck} - \varepsilon_{ij}^{mk})^2 \quad (20)$$

式中： ε_{ij}^m 为不同轴向应变所对应的试验值； ε_{ij}^c 为相应的有限元计算值； m 为参与反演的试验值个数。

4.2 有限元模型

比利时泥岩的基本力学参数： $E_0 = 300 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.125$ ， $c_m = 0.3 \text{ MPa}$ ， $\phi = 18^\circ$ ；孔隙度为 0.39，渗透系数为 $3 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ ，孔隙水体积模量为 2 GPa。

进行非排水压缩试验进行数值模拟，采用直径为 38 mm、高度为 76 mm 的三轴试样，按照位移控制方式进行加载。底面约束轴向自由度，整个试件四周处于不排水状态，计算模型如图 9 所示。在剪切之前，按照试验过程施加相等的围压和反压，建立初始平衡状态；然后在试样顶部按照位移控制施加竖向荷载，直至试样达到破坏。

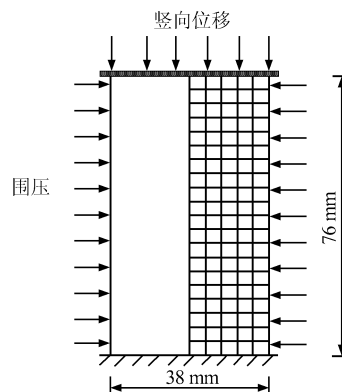


图 9 有限元分析模型

Fig.9 Finite element model for back analysis

4.3 反演结果分析

按照本文提出的反演方法和思路,对损伤参数进行了反演分析,反演程序的收敛容许误差为 $eps = 5\%$,待反演参数的初值及范围设定如表 4 所示,待反演参数的反演结果如表 4 所示。

图 10 给出了数值计算得到的应力-应变曲线与试验结果应力-应变曲线的对比,可以看出,反演曲线与试验曲线在峰值前区和峰值后区吻合较好,由此可见,本文所建立的损伤模型及反演方法是有效的。

从表 5 中的反演结果可以发现,泥岩的膨胀角较小,随着围压的增大有减小的趋势,在围压为 2.85~5.42 MPa 时,膨胀角介于 $0.8^\circ \sim 0.92^\circ$ 之间;泥岩的残余弹性模量介于 66~117 MPa 之间;泥岩的残余黏聚力约为 50 kPa,黏聚力衰减系数 η 约为 0.6;而损伤参数没有较好的规律。

泥岩的塑性损伤占主导作用,而弹性损伤较小,图 11 给出了数值计算得到的塑性损伤值随轴向应变的演化曲线,可以看出,损伤值随应变的增加而逐渐增大,并且增加速率逐渐趋近平缓。

表 4 待反演参数的初值及反演范围设定

Table 4 The initial values and scope of unknown parameters for inverse problem

参数	β_1	α_2	β_2	c_r / kPa	η	E_r / MPa	φ / ($^\circ$)
初值	2.0	1.2	1.45	110	0.4	100	6
范围	0.0~4.0	0.2~2.2	0.95~2.0	30~200	0.1~0.7	30~200	0~18

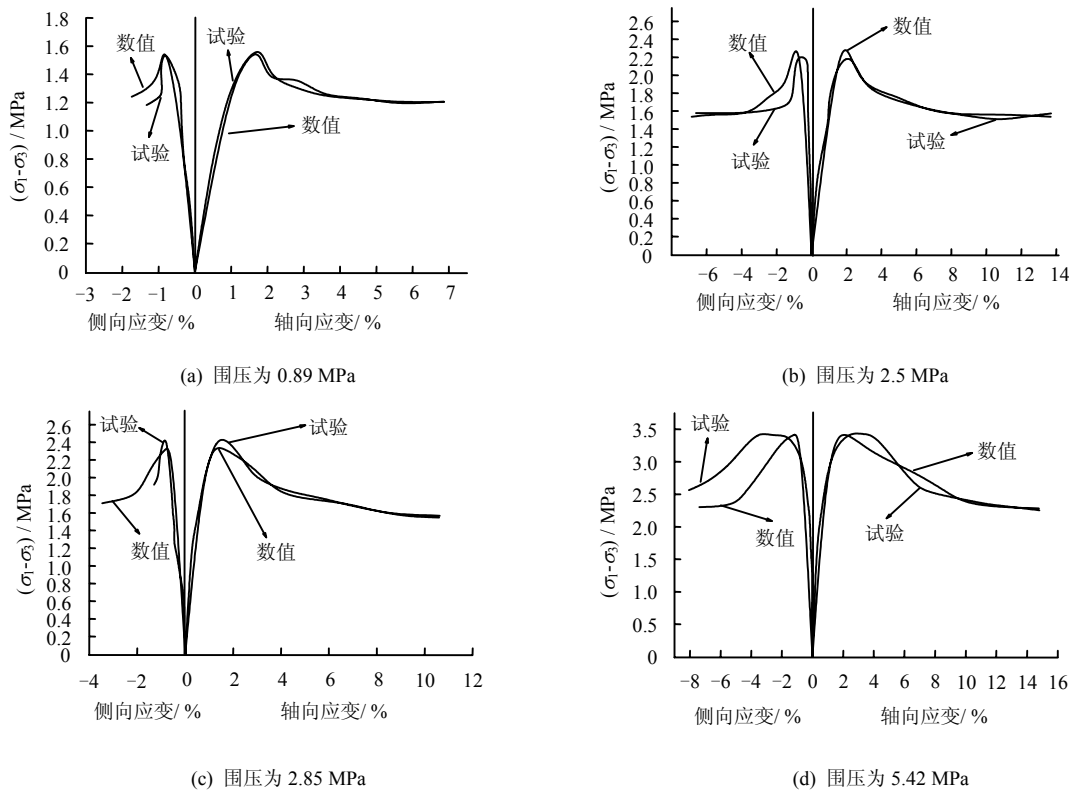


图 10 不同围压下试验曲线与泥岩弹塑性损伤模型曲线的比较

Fig.10 Comparison between stress-strain curve experimentally obtained and the one numerically obtained by back analysis for the confining pressure

表 5 不同围压下未知参数的反演结果

Table 5 The results of unknown parameters by back analysis method under different confining pressures

围压	β_1	α_2	β_2	c_r / kPa	η	E_r / MPa	φ / ($^\circ$)
0.89	1.380 8	0.568 6	0.989 6	58.132 0	0.608 3	77.417 7	7.289 9
2.5	0.859 8	0.582 6	1.243 0	97.945 9	0.404 2	95.593 4	2.501 4
2.85	0.939 2	1.190 4	1.885 7	44.399 4	0.693 2	66.269 8	0.804 3
5.42	0.589 8	2.008 1	0.950 9	49.007 9	0.699 7	117.195 8	0.921 2

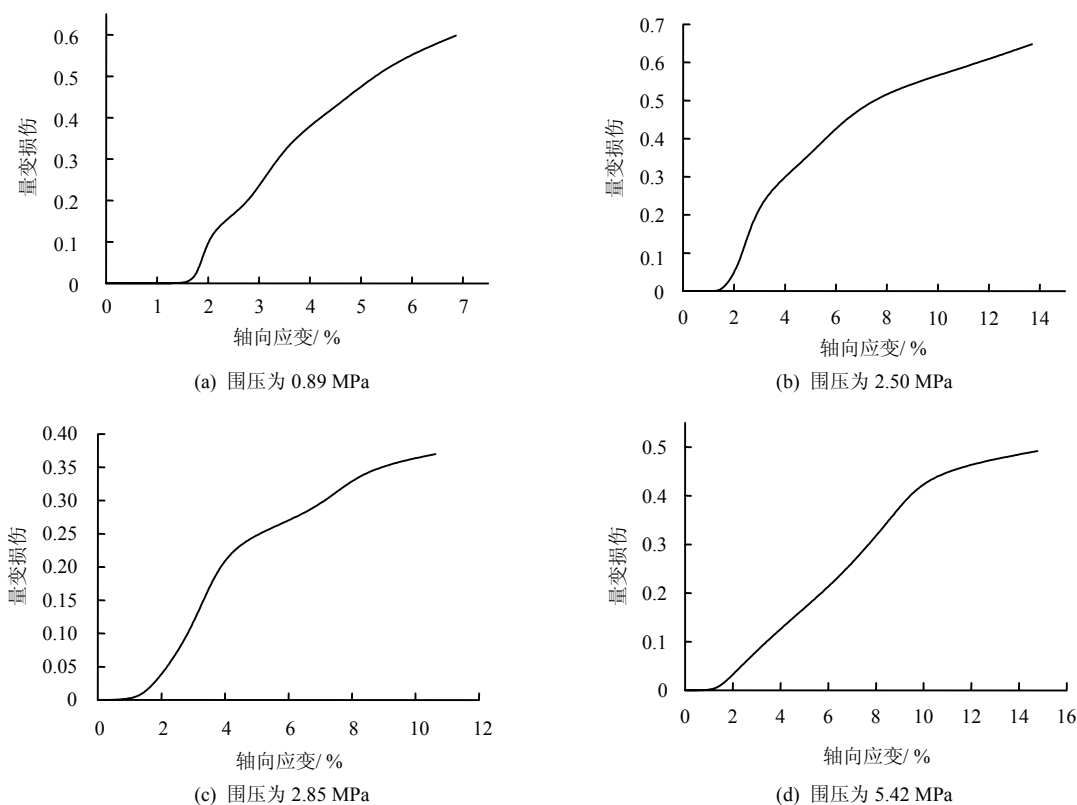


图 11 不同围压下塑性损伤随轴应变的演化曲线
 Fig.11 Damage variable vs axial strain for the confining pressure

4.4 参数的确定

泥岩的损伤参数与围压有关，不同围压下的取值是不同的。通过表 5 分析可知，泥岩的膨胀角较小，远小于内摩擦角，取其平均值作为泥岩的膨胀角，平均值为 2.88° ；随着围压的增大，泥岩的残余弹性模量逐渐增大，但围压为 2.85 MPa 时出现异常，取其平均值作为泥岩的残余弹性模量，平均值为 89.12 MPa；同样，残余黏聚力平均值为 62.37 kPa，黏聚力衰减系数 η 平均值为 0.6。

塑性损伤变量与能量指标的关系曲线如图 12 所示，随着能量指标的增大，损伤也逐渐增大，并逐渐趋于稳定。在围压为 0.89~2.85 MPa 时，随着能量指标的增大，高围压下损伤增大的幅度较低；而对于围压为 5.42 MPa 的情况，当能量指标大于 $1.7 \text{ MPa}^{1/2}$ 时损伤演化曲线介于围压为 2.5 MPa 和围压为 2.85 MPa 的曲线之间。

采用 Levenberg-Marquardt 优化方法获得综合的损伤参数为：初始塑性损伤对应的能量指标 $\bar{\epsilon}_{0p} = 0.3619 \text{ MPa}^{1/2}$ ，损伤参数 $\alpha_2 = 0.9604$ ， $\beta_2 = 1.2333$ 。

不同围压下弹性损伤的演化曲线如图 13 所示，可以发现，围压为 2.5 MPa 时的损伤演化方程具有代表性，该曲线处于中间，因此，可以确定出弹性损伤参数的取值为：初始弹性损伤对应的能量指标 $\bar{\epsilon}_{0e} = 0.2274 \text{ MPa}^{1/2}$ ，损伤参数 $\beta_1 = 0.8598$ 。

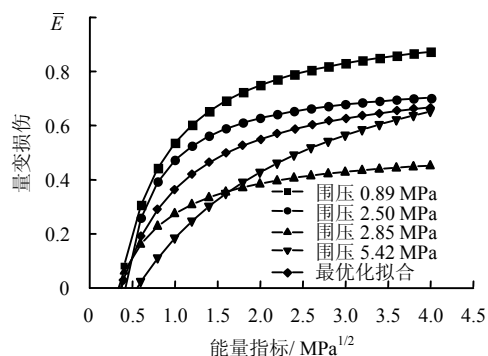


图 12 不同围压下塑性损伤演化方程的拟合曲线
 Fig.12 Fitting curves for plastic damage evolution under different confining pressures

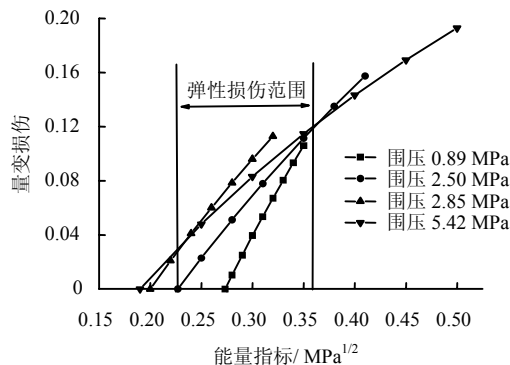


图 13 弹性损伤演化的取值范围
 Fig.13 Fitting curve for elastic damage evolution under different confining pressures

5 结 语

本文对泥岩的本构模型开展了研究,采用弹塑性损伤模型描述泥岩的硬化行为,将损伤引入到修正的 Mohr-Coulomb 准则中,建立了泥岩弹塑性损伤本构模型,导出了泥岩的损伤演化方程;基于比利时泥岩三轴压缩试验结果,将试验应力-应变曲线与数值计算所得的应力-应变曲线的差别作为目标函数,采用有限元优化法研究了用于损伤本构模型参数的辨识问题,反演了本构参数,结果表明,所采用的反分析计算格式稳定,可以较准确地拟合试验曲线,通过反演所获得的参数可为进一步研究隧道施工过程中水-力-损伤耦合特性问题提供基础。

参 考 文 献

- [1] 贾善坡. Boom Clay 泥岩渗流应力损伤耦合流变模型、参数反演与工程应用[博士论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [2] ROBINET J C, RAHBAOUI A, PLAS F, et al. A constitutive thermomechanical model for saturated clays[J]. **Engineering Geology**, 1996, 41: 145—169.
- [3] CHIARELLI A S, SHAO A J F, HOTEIT N. Modeling of elastoplastic damage behavior of a claystone[J]. **International Journal of Plasticity**, 2003, 19: 23—45.
- [4] KOLMAYER P, FERNANDES R, CHAVANT C. Numerical implementation of a new rheological law for argillites[J]. **Applied Clay Science**, 2004, 26: 499—510.
- [5] CONIL N, DJERAN-MAIGRE I, CABRILLAC R, et al. Thermodynamics modelling of plasticity and damage of argillite[J]. **C. R. Mecanique**, 2004, 332: 841—848.
- [6] CONIL N, DJERAN-MAIGRE I, CABRILLAC R, et al. Poroplastic damage model for claystones[J]. **Applied Clay Science**, 2004, 26: 473—487.
- [7] ZHANG Chun-liang, ROTHFUCHS T. Experimental study of the thermo-hydro-mechanical behaviour of indurated clays[J]. **Physics and Chemistry of the Earth**, 2007, 32: 957—965.
- [8] JIA Y, SONG X C, DUVEAU G, et al. Elastoplastic damage modelling of argillite in partially saturated condition and application[J]. **Physics and Chemistry of the Earth**, 2007, 32: 656—666.
- [9] ABOU-CHAKRA G A, CORMERY F, SHAO J F, et al. A micromechanical model of elastoplastic and damage behavior of a cohesive geomaterial[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2008, 45: 1406—1429.
- [10] 贾善坡, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 泥岩大变形隧道盾构施工工法的围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3897—3903.
JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, YU Hong-dan, et al. Research on surrounding rock stability of mudstone large-deformation tunnel excavation by shield construction method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp. 2): 3897—3903.
- [11] 贾善坡, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 泥岩隧道施工过程中渗流场与应力场全耦合损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 19—26.
JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, YU Hong-dan, et al. Research on seepage-stress coupling damage model of Boom clay during tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 19—26.
- [12] BASTIAENS W, BERNIER F, BUYENS M, et al. The connecting gallery—the extension of the HADES underground research facility at Mol, Belgium[R]. Mol: EIG Euridice, 2003.
- [13] BERNIER F, LI Xiang-ling, BASTIAENS W, et al. Fractures and self-healing within the excavation disturbed zone in clays[R]. Mol: EIG Euridice, 2004.
- [14] 沈新普, 鲍文博, 沈国晓. 混凝土断裂与损伤[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [15] 贾善坡, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 大岗山水电站地下厂房区初始地应力场 Nelder-Mead 优化反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2341—2349.
JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. Nelder-Mead algorithm for inversion analysis of in-situ stress field of underground powerhouse area of Dagangshan Hydropower Station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2341—2349.