

软弱岩石峰后应变软化力学特性研究

陆银龙^{1,2}, 王连国^{1,2}, 杨 峰^{1,2}, 李玉杰^{1,2}, 陈海敏^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 软弱岩石给采矿工程中巷道支护和维护带来一系列棘手的问题, 深入研究软弱岩石受力变形、破坏的机制和规律, 对于保证巷道围岩的安全和稳定具有十分重要的意义。通过对软弱泥岩进行常规三轴压缩试验, 得到不同围压下的全应力 - 应变关系曲线, 然后依据峰后岩石任意一点应力状态均满足 Mohr-Coulomb 极限破坏条件的假设, 建立以广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 两个状态参数来表征的软弱岩石后继屈服面模型。在此基础上, 利用试验数据绘制岩石峰后不同软化状态时的几组莫尔应力圆, 通过“切线法”得出莫尔强度包络线的拟合方程, 进而确定出不同围压条件下的 \bar{c} 和 $\bar{\varphi}$ 值, 并借助 Matlab 软件对广义黏聚力 \bar{c} 、广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 与等效塑性剪切应变、围压之间的关系进行最小二乘曲面拟合, 得出软弱岩石峰后力学参数的软化规律, 结果表明: 随着围压的增加, 广义黏聚力 \bar{c} 值呈快速增加的趋势, 而广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 值则显著减小; 广义黏聚力 \bar{c} 受岩石软化程度的影响也十分明显, 从岩石峰值状态到残余状态 \bar{c} 值迅速降低, 平均降低 53.88%, 而广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 值在该软化过程中则基本保持稳定。最后, 将得到的广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 的拟合方程嵌入到 FLAC 内置应变软化本构关系中, 并利用 FLAC^{3D} 软件对模型的正确性进行数值模拟验证, 结果表明数值模拟曲线与试验曲线比较吻合。

关键词: 岩石力学; 软弱岩石; 后继屈服面; 峰后应变软化; 广义黏聚力; 广义内摩擦角; 软化状态; 围压

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)03 - 0640 - 09

POST-PEAK STRAIN SOFTENING MECHANICAL PROPERTIES OF WEAK ROCK

LU Yinlong^{1,2}, WANG Lianguo^{1,2}, YANG Feng^{1,2}, LI Yujie^{1,2}, CHEN Haimin^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Weak rock brings about a series of difficult issues to tunnel support and maintenance in mining engineering. Further study of the mechanism and law of weak rock deformation and breakage has great significance to the safety and stability of the tunnel wall rock. Based on the conventional triaxial compression test of weak mudstone, complete stress-strain curves under different confining pressures are obtained. Then based on the assumption that the stress state at a point satisfies Mohr-Coulomb critical failure criterion, building the weak rock subsequent yielding plane model characterized by generalized cohesion \bar{c} and generalized internal friction angle $\bar{\varphi}$ using the test data, several Mohr's stress circles of post-peak rock at different softening conditions are drawn; then using tangent method to build the fitting equation of Mohr's strength envelope curve, \bar{c} and $\bar{\varphi}$ under different confining pressures could be determined. And by means of Matlab software, the relationship between generalized cohesion \bar{c} , generalized internal friction angle $\bar{\varphi}$, equivalent plastic shear strain and

收稿日期: 2009 - 06 - 17; **修回日期:** 2009 - 08 - 09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874103); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2008135); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB202210)

作者简介: 陆银龙(1985 -), 男, 2008 年毕业于中国矿业大学工程力学专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石力学、矿山工程力学及采矿工程等方面的研究工作。E-mail: luyinlong@cumt.edu.cn

confining pressure are fitted by using least square surface. Through the relationship, the post-peak mechanical parameters softening law of weak rock can be obtained. The results show that with the increase of confining pressure, generalized cohesion \bar{c} shows a rapid increase trend; but generalized internal friction angle $\bar{\varphi}$ decreases significantly; and the influence that the softening condition brings to the generalized cohesion \bar{c} is evident; the generalized cohesion \bar{c} has a rapid decrease when the stress state changes from the peak value state to the residual state; the average of the decrease is 53.88%, while generalized internal friction angle $\bar{\varphi}$ almost maintains stable during the change of the softening condition. At last, the fitting equations of generalized cohesion \bar{c} and generalized internal friction angle $\bar{\varphi}$ are embedded into the strain softening constitutive relation of the fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions(FLAC^{3D}); and using FLAC^{3D} software, numerical verification is made to the model. The results show that the numerical simulation curves agree well with the test curves comparatively.

Key words: rock mechanics; weak rock; subsequent yielding plane; post-peak strain softening; generalized cohesion; generalized internal friction angle; softening state; confining pressure

1 引言

软弱岩石通常具有密度小, 孔隙裂隙度高, 软化系数大, 岩石强度低, 塑性变形大等特征^[1~3], 尤其是在有地下水活动或风化作用强烈的地区, 这类岩石的物理力学性能会变的更加恶劣。采矿工程中, 当在软弱岩体中开挖巷道以后, 由于应力重新分布, 围岩将产生显著的塑性变形, 巷道变形量可达数百甚至数千毫米以上, 支护结构遭到严重的破坏, 这给巷道支护设计、施工工艺带来了一系列棘手的问题。因此, 进一步深化对软弱岩石物理力学特性的认识, 掌握岩石受力变形、破坏机制和规律, 进而选择正确的开挖方案、施工方法和支护方案, 对于保证煤矿巷道围岩的安全和稳定具有十分重要的意义。

与钢材等塑性材料相比, 软弱岩石在应力达到峰值强度之后, 随着变形的继续增加, 其强度迅速降到一个较小的水平, 这种由于变形引起的岩石材料性能劣化的现象称为“应变软化”。长期以来, 岩石的塑性应变软化特性吸引了广大岩石力学工作者的极大兴趣和重视, 得出了较多有益的结论。从总体研究思路来看, 这些研究大致可以分为两类: 一类是从岩石裂隙扩展贯通的微观角度, 通过现场测试和室内试验相结合的方法, 研究岩石在峰值强度以后产生应变软化特性的本质机制, 他们认为岩石的塑性应变软化不是岩石自身的性质, 而是岩石破坏块体和贯穿裂隙间的结构特性, 软化阶段的变形

在岩石内部不是均匀的, 主要发生在剪切带内, 出现明显的应变局部化^[4~10], 这类研究对于探索岩石内在的变形破坏机制具有极其重要的意义, 但其成果无法真正运用到工程实践中; 另一类研究是基于岩石应变软化的宏观效应, 根据岩石应变软化的平均化和分布化假设, 利用完备的连续介质力学理论建立多种岩石塑性应变软化连续力学模型来描述岩石应变软化力学特性, 如日本学者川本眺万^[11]提出直线形式的塑性应变软化模型, 在岩土工程中得到广泛的应用; P. Zdenek 和 F. Bazant^[12]提出了指数形式的塑性应变软化模型, 建立了等效应力与等效塑性应变之间的关系; 李 晓^[13]基于岩石常规与非常规试验, 提出“数据本构”的概念, 建立了一种由幂函数与指数函数混合形式的岩石塑性软化模型; 另外, 张 帆等^[14]对三峡花岗岩进行了常规三轴压缩试验, 并基于弹塑性理论, 根据试验数据拟合屈服面, 研究花岗岩强度参数与峰后应变软化参数的关系, 建立了花岗岩的峰后应变软化模型; 杨超等^[15]运用 Hoek 提出的由主应力圆包络线确定黏聚力和内摩擦角等效数值的方法和曲线拟合的方法, 研究了围压对软岩峰后软化特性的影响以及软岩峰后宏观物性参数的应变软化规律。这些研究在很大程度上加深了人们对岩石塑性应变软化特性的认识^[16~18], 其成果都具有十分重要的工程应用价值, 然而这些研究也存在不少问题, 主要表现在 2 个方面: 一是由于对岩石峰后力学参数的真实软化规律做了很多简化与假设, 导致其结果与实际严重偏离; 二是没有考虑围压对峰后岩石力学参数的影

响, 凭借经验或者其他方法来选择的岩石力学参数往往具有很大的局限性和不合理性。

本文在前人研究的基础上, 基于软弱泥岩常规三轴压缩试验全应力 - 应变曲线, 依据峰后岩石任意一点应力状态均满足 Mohr-Coulomb 极限破坏条件的假设, 利用试验数据绘制岩石峰后不同软化状态时的莫尔应力圆来确定莫尔强度包络线, 进而确定出不同围压条件下的广义黏聚力和广义内摩擦角的数值, 然后利用最小二乘法对广义黏聚力、广义内摩擦角与等效塑性剪切应变、围压之间的关系进行曲面拟合, 得出软弱岩石峰后力学参数的软化规律。最后, 通过将广义黏聚力和广义内摩擦角的拟合方程嵌入 FLAC 内置应变软化本构关系中, 利用 FLAC^{3D} 软件对模型的正确性与合理性进行数值模拟验证。

2 软弱泥岩的三轴压缩试验

试验所用岩块取自山西霍州煤电集团公司辛置煤矿 2#煤层顶板, 岩石属于新生界第三系含炭泥岩, 所取岩块呈灰黑色, 质地均匀, 遇水容易膨胀。三轴压缩试验的岩石试件按照国际岩石力学学会建议方法和岩石力学试件规范, 从现场采集未风化、未受过大气振动的泥岩块中钻取, 加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱体标准试件, 如图 1 所示。



图 1 软弱泥岩三轴压缩试验试件

Fig.1 Triaxial compression test samples of weak mudstone

岩石三轴压缩试验是在中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的 MTS815 岩石力学试验系统(见图 2)上进行。该试验系统配备轴压、围压和孔隙水压 3 套独立的闭环伺服控制系统, 具备载荷、冲程和应变 3 种控制方式, 具有自动化程度高、试验精度高和数据处理快捷等优点, 是较为理想的岩石力学试验设备。



图 2 岩石力学试验系统 MTS815

Fig.2 Rock mechanics testing system MTS815

试验中首先对试件施加静水压力至设定的围压值, 然后保持围压不变, 以等变速率的方式施加轴向位移直至试验结束。试验加载的应变率设置为 $\epsilon = 1.6 \times 10^{-5} s^{-1}$, 围压值分别设置为 0, 5, 10, 20, 30 和 40 MPa。整个试验过程由计算机每隔 0.25 s 自动采集一组数据, 每组数据包括轴向应力 σ_1 、轴向应变 ϵ_1 、环向应变 ϵ_3 及围压 σ_3 等。通过对数十个岩石试件进行反复试验, 得到了有代表性的软弱泥岩三轴压缩试验全应力 - 应变试验曲线, 如图 3 所示。

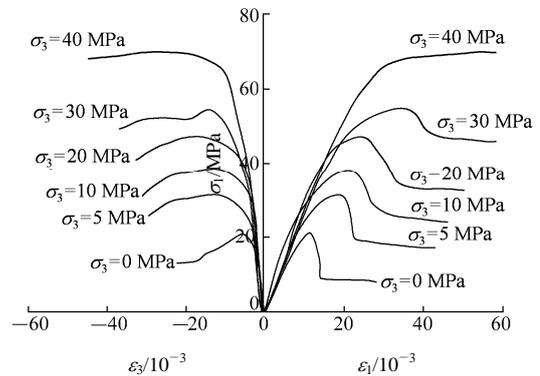


图 3 不同围压下软弱泥岩三轴压缩试验全应力 - 应变曲线

Fig.3 Triaxial compression complete stress-strain curves of weak mudstone under different confining pressures

从图 3 中可以看出, 在单轴或围压较小的条件下(如 $\sigma_3 \leq 30$ MPa), 岩石受压达到峰值强度之后, 随着变形量的继续增加, 其强度逐渐降低, 当降低到一定程度达到残余强度后, 再继续变形, 岩石维持着残余强度不变, 岩石应变软化阶段和残余阶段对围压有很强的敏感性, 并且围压越小, 相同的围压增量所产生的影响就越大; 随着围压的增大(如 $\sigma_3 > 30$ MPa), 岩石从脆性转为延性, 岩石塑性应变软化的特性逐渐减弱, 峰值强度与残余强度之间的差距逐渐缩小, 而逐渐表现出理想塑性特征。对

于软岩巷道支护等岩体工程来讲, 巷道围岩所受到的围压一般都远远低于岩石脆性转化为延性的临界围压, 因此, 岩石破裂后的应变软化是巷道围岩的主要变形特征。由于岩石具有应变软化特性, 即岩石在达到峰值强度以后并不完全丧失承载能力, 巷道维护可以进一步降低维护标准, 所以认识岩石应变软化特性对于工程经济十分有利。

另外, 从图 3 中还可以看出, 在应力 - 应变曲线峰值之前, 岩石处于弹塑性状态, 具有应变硬化的特性, 为了便于分析岩石峰后应变软化特性, 本文将该应变硬化阶段简化为弹性段的外延, 即认为岩石在峰值前处于弹性变形状态, 其弹性常数可以利用峰值应力点的割线模量来表示。经过计算, 得出该软弱泥岩试件的弹性模量 $\bar{E} = 1.835 \text{ GPa}$, 泊松比 $\bar{\mu} = 0.325$ 。

3 软弱岩石应变软化力学特性研究

3.1 应变软化力学模型

依据软弱泥岩三轴压缩试验结果, 考虑峰后软化特性是影响软弱岩石变形、破坏的主要因素, 将软弱泥岩三轴压缩试验全应力 - 应变曲线(见图 3)简化为如图 4 所示的理想曲线形式。其中 $oa_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为岩石峰前弹性变形阶段, $a_i b_i$ 为岩石峰后应变软化阶段, $b_i c_i$ 为岩石残余阶段, oA 为峰值应力点割线, l 为卸载路径。

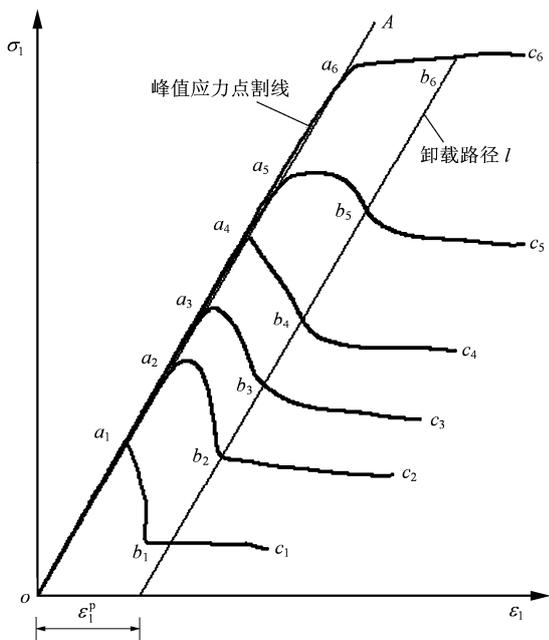


图 4 软弱泥岩峰后应变软化简化模型

Fig.4 Post-peak strain softening simplified model of weak mudstone

假设岩石在峰后应变软化阶段任意一点的应力状态 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 均处于强度破坏的临界状态, 并满足 Mohr-Coulomb 强度准则:

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: c, φ 分别为岩石黏聚力和内摩擦角。

同时, 为了研究问题的方便, 假设岩石峰后卸载过程是线弹性的, 则有 $l // oA$, 于是, 在不同的围压下沿着相同的卸载路径 l 将产生相同的塑性变形。若以等效塑性剪切应变 ε^{ps} 来表示该变形, 则在不计中间主应力 σ_2 的影响下, ε^{ps} 可表示为

$$\varepsilon^{ps} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1^p - \varepsilon_m^p)^2 + (\varepsilon_m^p)^2 + (\varepsilon_3^p - \varepsilon_m^p)^2} \quad (2a)$$

其中,

$$\varepsilon_m^p = \frac{1}{3}(\varepsilon_1^p + \varepsilon_3^p) \quad (2b)$$

式中: $\varepsilon_1^p, \varepsilon_3^p$ 均为塑性主应变分量。

3.2 峰后岩石后继屈服面模型

根据现有的塑性力学理论可知, 如果材料是理想塑性的, 则初始屈服面是固定不变的, 应力状态不能落在屈服曲面之外; 但是对于岩石材料, 随着塑性发展, 由于岩石破碎程度不同, 处于峰值状态和残余状态的岩石屈服面是不相同的, 即后继屈服面^[19]一般不同于初始屈服面。岩石后继屈服面不只是与瞬时应力状态有关, 而且与塑性变形的历史有关。若将岩石看成各向同性材料, 并以等效塑性剪切应变 ε^{ps} 作为记录岩石材料塑性加载历史的参数, 则峰后岩石后继屈服面可以表示为

$$\phi(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \varepsilon^{ps}) = 0 \quad (3)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为 3 个方向的主应力。

式(3)表明岩石峰后不同软化状态(以 ε^{ps} 来描述该状态)的屈服面是不相同的。当岩石处于峰值状态 $\varepsilon^{ps} = 0$ 时, 式(3)表示的后继屈服面可以用式(1)来表示; 当岩石处于峰后应变软化阶段的任一状态 $\varepsilon^{ps} = \varepsilon^p$ 时, 根据前面提出的峰后岩石任意一点的应力状态均满足 Mohr-Coulomb 极限破坏条件的假设可知, 岩石后继屈服面仍可以用式(1)来表示, 但是用于描述该状态的特征参量(即黏聚力和内摩擦角)将发生变化, 如图 5 所示。据此, 引入可以反映岩石峰后应变软化特性的 2 个参量, 即广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 来描述 Mohr-Coulomb 屈服面应力水平的高低。

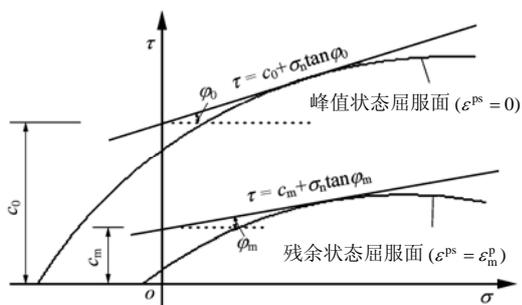


图5 广义黏聚力和广义内摩擦角与后继屈服面的关系
Fig.5 Relation between generalized cohesion, generalized internal friction angle and subsequent yielding plane

广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 均受到围压和塑性变形历史的影响，它们都为 σ_3 和 ε^{ps} 的函数，即 $\bar{c}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})$, $\bar{\varphi}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})$ ，于是利用式(1)可得峰后岩石后继屈服面的形式为

$$\phi = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \bar{\varphi}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})}{1 - \sin \bar{\varphi}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})} + 2\bar{c}(\sigma_3, \varepsilon^{ps}) \sqrt{\frac{1 + \sin \bar{\varphi}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})}{1 - \sin \bar{\varphi}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})}} \quad (4)$$

3.3 广义黏聚力和广义内摩擦角的弱化规律

为进一步研究软弱泥岩的峰后力学特性，需建立广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 与围压 σ_3 和等效塑性剪切应变 ε^{ps} 之间的函数关系。事实上，对于岩石常规三轴压缩试验，从试验中可以得到不同围压 σ_3 下轴向应力 σ_1 对轴向应变 ε_1 和侧向应变 ε_3 的曲线关系。于是，对岩石峰后应变软化阶段，依据弹性卸载的假设，如图6所示，可以得到在相同的卸载路径 l (轴向塑性剪切应变 ε_1^p 和侧向塑性剪切应变 ε_3^p 保持不变，亦即等效塑性剪切应变 ε^{ps} 保持

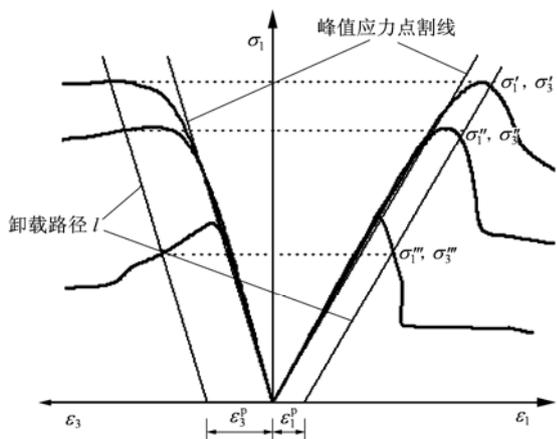


图6 峰后岩石在相同卸载路径下不同极限应力状态
Fig.6 Different critical stress states of post-peak rock under the same unloading path

不变)条件下对应的几组极限应力状态(如 σ_1' , σ_3' , σ_1'' , σ_3'' 和 σ_1''' , σ_3''')。

于是，利用以上得到的在相同等效塑性剪切应变 ε^{ps} 条件下对应的不同极限应力状态，绘制几组莫尔应力圆，进而可以得出该状态下的莫尔强度包络线，即岩石的极限破坏面，如图7所示。以该包络线与各个莫尔应力圆的交点作为不同围压 σ_3 条件下的岩石破坏点，过该点作包络线的外切线，则外切线与 σ 轴的夹角就可作为广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ ，而外切线及其延长线与 τ 轴相交的截距则可作为广义黏聚力 \bar{c} 。若在同一围压 σ_3 条件下存在多个破坏点，则对每个破坏点都采用上述方法求出 \bar{c} 和 $\bar{\varphi}$ 值，然后求其平均值作为该围压条件下的岩石广义黏聚力和广义内摩擦角。

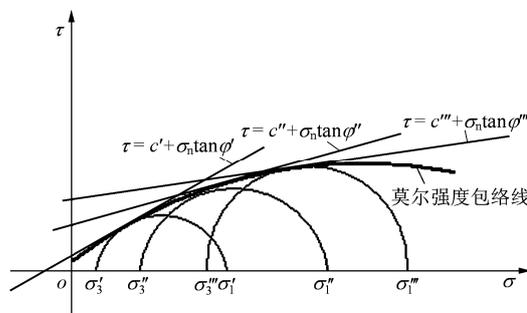


图7 莫尔强度包络线
Fig.7 Mohr's strength envelope

为提高利用莫尔强度包络线确定岩石峰后 \bar{c} 和 $\bar{\varphi}$ 值的精度，莫尔强度包络线可以通过“切线法”获得，即首先确定每2个莫尔应力圆之间的公切线及切点，求出所有切点坐标后再利用最小二乘拟合法对包络线方程进行拟合。根据拟合的莫尔强度包络线方程，通过求导等运算即可以精确地获得该状态下岩石峰后广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 的值。图8给出了利用该方法得出岩石处于峰值状态

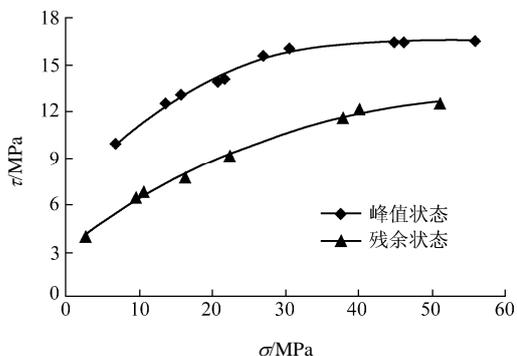


图8 莫尔强度包络线的拟合曲线
Fig.8 Fitting curves of Mohr's strength envelope

($\varepsilon^{ps} = 0$)及残余状态($\varepsilon^{ps} = 23.82 \times 10^{-3}$)时的莫尔强度包络线的拟合曲线, 可以看出这些包络线呈抛物线形状。

利用岩石在峰后不同软化状态时的莫尔强度包络线, 可以很容易地得出不同等效塑性剪切应变 ε^{ps} 和不同围压 σ_3 条件下的岩石广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 。表 1, 2 分别给出了在岩石从峰值状态到残余状态过程中采集的 7 组不同应变软化状态时的 \bar{c} 和 $\bar{\varphi}$ 值。

表 1 不同塑性剪切应变和不同围压下的广义黏聚力

Table 1 Generalized cohesion under different plastic shear strains and confining pressures

$\varepsilon^{ps}/10^{-3}$	\bar{c}/MPa					
	$\sigma_3 = 0$ MPa	$\sigma_3 = 5$ MPa	$\sigma_3 = 10$ MPa	$\sigma_3 = 20$ MPa	$\sigma_3 = 30$ MPa	$\sigma_3 = 40$ MPa
0.00	7.03	8.35	9.88	11.87	15.59	16.26
2.06	6.14	7.37	8.77	10.08	13.15	13.83
8.92	4.42	5.74	7.40	9.17	12.84	13.47
15.98	3.95	4.67	5.79	7.32	10.92	12.97
19.65	2.89	3.44	4.39	5.63	8.84	10.50
20.76	3.31	3.65	4.22	4.99	7.90	10.62
23.82	3.06	3.36	3.88	4.67	7.68	10.58

表 2 不同塑性剪切应变和不同围压下的广义内摩擦角

Table 2 Generalized internal friction angles under different plastic shear strains and confining pressures

$\varepsilon^{ps}/10^{-3}$	$\bar{\varphi}/(^{\circ})$					
	$\sigma_3 = 0$ MPa	$\sigma_3 = 5$ MPa	$\sigma_3 = 10$ MPa	$\sigma_3 = 20$ MPa	$\sigma_3 = 30$ MPa	$\sigma_3 = 40$ MPa
0.00	22.59	16.37	11.74	7.32	1.38	0.58
2.06	23.49	17.04	12.78	9.86	4.87	4.07
8.92	26.52	18.53	13.00	8.76	2.47	1.65
15.98	23.40	17.76	13.46	9.52	3.16	0.59
19.65	22.12	17.70	13.86	10.42	4.53	2.41
20.76	17.97	15.19	12.88	10.69	5.37	1.93
23.82	18.49	16.02	13.85	11.54	5.97	2.29

图 9 给出了岩石峰后不同软化状态时广义黏聚力 \bar{c} 、广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 与围压 σ_3 之间的关系(图中“ 0.00×10^{-3} , $\bar{\varphi}$ ”表示 $\varepsilon^{ps} = 0$ 状态下的 $\bar{\varphi}$, 其余

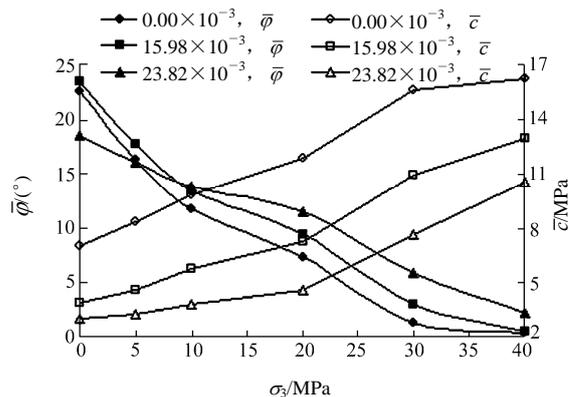


图 9 不同软化状态下 \bar{c} , $\bar{\varphi}$ 值与围压的关系

Fig.9 Relationship between \bar{c} , $\bar{\varphi}$ and confining pressure under different softening conditions

图例意义类似), 可以看出, 围压 σ_3 对 \bar{c} 和 $\bar{\varphi}$ 值有明显影响, 随着围压 σ_3 的增加, \bar{c} 值呈快速增加的趋势, 而 $\bar{\varphi}$ 值则显著减小。此外, \bar{c} 值受岩石软化程度的影响也十分明显, 从岩石的峰值状态($\varepsilon^{ps} = 0$)到残余状态($\varepsilon^{ps} = 23.82 \times 10^{-3}$), \bar{c} 值迅速降低, 平均降低了 53.88%; 而 $\bar{\varphi}$ 值在该软化过程中则基本保持稳定, 受岩石软化程度的影响较小。

为建立广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 与围压 σ_3 和等效塑性剪切应变 ε^{ps} 之间的函数关系, 根据表 1, 2 中的数据, 利用 Matlab 软件对 $\bar{c}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})$, $\bar{\varphi}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})$ 函数进行最小二乘曲面拟合。经过尝试, 当分别选择 σ_3 和 ε^{ps} 的 3 次多项式时, 曲面拟合取得了较好的效果, 如图 10 所示。 $\bar{c}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})$ 和 $\bar{\varphi}(\sigma_3, \varepsilon^{ps})$ 的拟合函数关系为

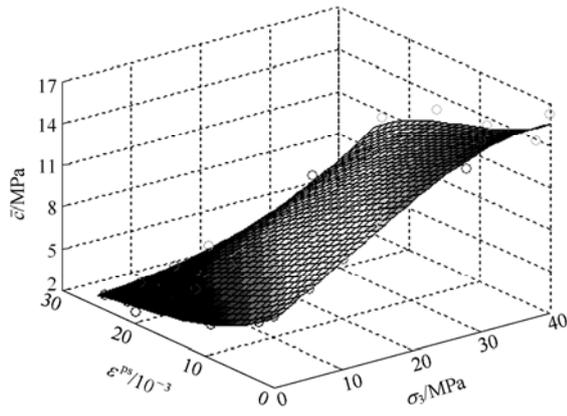
$$\bar{c} = X \begin{bmatrix} 0.000 & 0 & -0.000 & 0 & 0.000 & 0 & -0.000 & 1 \\ -0.000 & 0 & 0.000 & 1 & -0.000 & 6 & 0.004 & 9 \\ 0.000 & 0 & -0.002 & 1 & 0.016 & 7 & 0.246 & 6 \\ -0.000 & 3 & 0.016 & 2 & -0.403 & 1 & 6.932 & 5 \end{bmatrix} Y \tag{5}$$

$$\bar{\varphi} = X \begin{bmatrix} -0.000 & 0 & 0.000 & 0 & -0.000 & 1 & -0.000 & 2 \\ 0.000 & 0 & -0.000 & 5 & 0.005 & 2 & 0.025 & 7 \\ -0.000 & 2 & 0.010 & 5 & -0.124 & 5 & -1.276 & 6 \\ 0.001 & 5 & -0.091 & 0 & 1.145 & 7 & 22.102 & 1 \end{bmatrix} Y \tag{6}$$

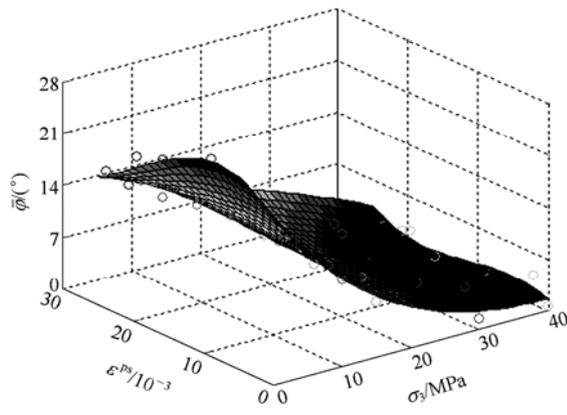
其中,

$$X = \{(\sigma_3)^3 \quad (\sigma_3)^2 \quad (\sigma_3)^1 \quad (\sigma_3)^0\}$$

$$Y = \{(\varepsilon^{ps})^3 \quad (\varepsilon^{ps})^2 \quad (\varepsilon^{ps})^1 \quad (\varepsilon^{ps})^0\}^T$$



(a) 广义黏聚力 \bar{c} 拟合曲面



(b) 广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 拟合曲面

图 10 \bar{c} 和 $\bar{\varphi}$ 拟合曲面

Fig.10 Fitting surfaces of \bar{c} and $\bar{\varphi}$

4 软弱岩石应变软化模型的数值验证

4.1 基于 Fish 的应变软化模型的实现

有限差分软件 FLAC 是美国 ITASCA 咨询集团公司开发研制的一种用拉格朗日有限差分原理, 以牛顿第二定律为基础, 采用显式有限差分算法的数值计算软件。在 FLAC 中, 用户可以借助 Fish 语言编写自己的功能函数, 增加研究问题所需要的材料模型, 进而扩展其应用功能^[20~23]。

FLAC 内置应变软化模型是基于 Mohr-Coulomb 屈服准则建立起来的, 它认为岩石黏聚力、内摩擦角等力学参数在岩石发生屈服破坏以后并不保持恒定不变, 岩石一旦屈服以后, 黏聚力和内摩擦角均随着等效剪切塑性应变的增大而呈分段线性关系弱化。但在该模型中, 没有考虑围压对岩石力学参数的影响, 往往计算结果与实际不相符合。因此, 本文在 FLAC 内置应变软化模型的基础上, 利用 Fish

语言进行编程, 考虑软弱岩石峰后的广义黏聚力和广义内摩擦角按照式(5), (6)的规律进行弱化, 对 FLAC 应变软化模型进行了修正, 建立了能够正确反映软弱岩石峰后力学特性的本构模型, 该模型与 FLAC 内置的本构模型一样, 但是运算效率要比内置的本构模型低。

4.2 模型正确性的数值验证

为验证以上建立模型的正确性与合理性, 将修正后的应变软化模型嵌入到 FLAC 程序中, 并利用 FLAC^{3D} 软件对节 3 的软弱泥岩三轴压缩试验进行数值模拟。考虑到模型材料的各向同性, 同时为了便于分析, 本文采用仅含有一个单元的立方体模型来模拟实验室三轴压缩试验的岩石试件, 如图 11 所示。

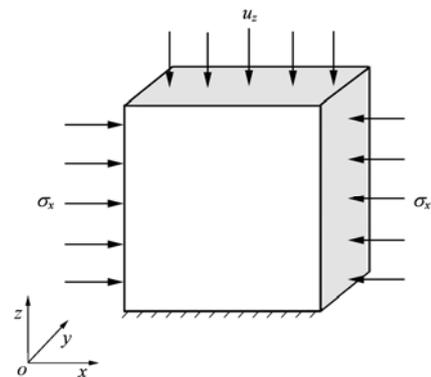


图 11 软弱泥岩三轴压缩试验的数值模型

Fig.11 Numerical model of weak mudstone triaxial compression test

模型的下表面设为 z 方向的位移约束边界, 前后、左右表面分别设为沿 y 方向和 x 方向的应力边界, 用于模拟围压, 且有 $\sigma_x = \sigma_y$ 。模型的整个加载过程采用轴向位移控制方式, 即通过在模型的上表面施加恒定的 z 方向变形速度 u_z 来实现。

根据以上建立的数值模型, 分别对围压为 $\sigma_x = \sigma_y = 0, 5, 10, 20$ 和 30 MPa 五种情况进行了数值模拟, 得到了模型的全应力 - 应变关系曲线, 如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 在岩石全应力 - 应变关系曲线峰值前, 模拟曲线与试验曲线峰值应力点的割线相吻合, 这符合前面将峰前岩石应力 - 应变关系曲线简化为弹性的假设; 当岩石达到峰值强度以后, 不同围压下的模拟曲线变化趋势与试验曲线基本一致, 特别是当岩石处于残余状态时, 模拟曲线与试验曲线吻合较好, 这证明了本文建立

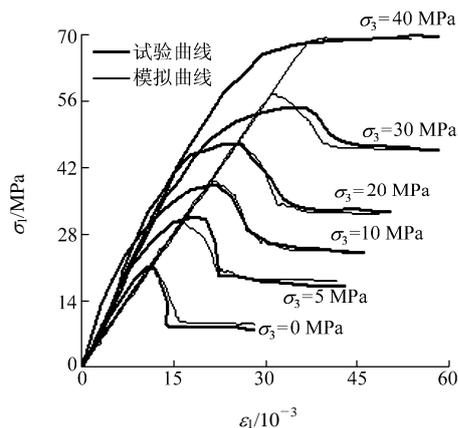


图 12 软弱泥岩三轴压缩试验曲线与数值模拟曲线对比

Fig.12 Comparison between weak mudstone triaxial compression test curves and numerical simulation curves

的峰后应变软化模型可以较好地描述软弱泥岩的峰后力学特性。

5 结 论

本文根据软弱泥岩常规三轴压缩试验全应力 - 应变曲线, 对软弱岩石的峰后应变软化力学特性进行了研究, 得到以下结论:

(1) 通过软弱泥岩的常规三轴压缩试验, 得出了不同围压下岩石全应力 - 应变关系曲线。试验结果表明, 在低围压的作用下, 软弱岩石呈脆性, 表现出明显的塑性应变软化特性, 应变软化阶段和残余阶段对围压有很强的敏感性; 在高围压作用下, 软弱岩石从脆性转为延性, 岩石塑性应变软化特性逐渐减弱, 岩石峰值强度与残余强度之间的差距逐渐缩小, 逐渐表现出理想塑性特征。

(2) 基于塑性力学理论, 根据峰后岩石任意一点应力状态均满足 Mohr-Coulomb 极限破坏条件的假设, 建立了以广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 两个状态参数来表征的软弱岩石后继屈服面模型。

(3) 利用试验数据绘制了软弱岩石峰后不同软化状态时的莫尔应力圆, 得出了莫尔强度包络线方程, 确定出了不同围压条件下的广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 值, 并利用最小二乘曲面拟合法得出了等效塑性剪切应变与围压影响下的广义黏聚力和广义内摩擦角的拟合方程。

(4) 软弱岩石峰后力学参数软化规律表明: 随

着围压的增加, 广义黏聚力 \bar{c} 值呈快速增加的趋势, 而广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 值则显著减小; 广义黏聚力 \bar{c} 受岩石软化程度的影响也十分明显, 从岩石峰值状态到残余状态 \bar{c} 值迅速降低, 平均降低了 53.88%, 而广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 值在该过程中则基本保持稳定。

(5) 针对 FLAC 内置的应变软化模型的局限性, 利用 Fish 语言编程, 将广义黏聚力 \bar{c} 和广义内摩擦角 $\bar{\varphi}$ 的拟合方程嵌入到该本构关系中, 并利用 FLAC^{3D} 软件对模型的正确性进行数值模拟验证, 结果表明数值模拟曲线与试验曲线在峰后段比较吻合, 这说明了本文建立的应变软化模型能够准确地描述软弱岩石的峰后力学特性。

参考文献(References):

- [1] 杨新安, 黄宏伟, 张 禹. 软弱岩体分类及其变形规律的研究[J]. 上海铁道大学学报(自然科学版), 1997, 18(4): 113 - 118.(YANG Xin'an, HUANG Hongwei, ZHANG Yu. Soft rock classification and soft rock tunnel deformation[J]. Journal of Shanghai Tiedao University (Natural Science), 1997, 18(4): 113 - 118.(in Chinese))
- [2] 陈成宗, 王石春, 陈光中. 软弱岩体中铁路隧道围岩稳定性及其控制[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 57 - 66.(CHEN Chengzong, WANG Shichun, CHEN Guangzhong. The stability of surrounding rock and its control of railway tunnel in weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 57 - 66.(in Chinese))
- [3] 林崇德, 牛锡倬. 软弱岩体中巷道围岩的特性及其支护特点[J]. 煤炭学报, 1988, (1): 23 - 31.(LIN Chongde, NIU Xizhuo. Characteristics of soft rock mass surrounding a tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 1988, (1): 23 - 31.(in Chinese))
- [4] 周思孟. 刚性试验机及其在岩石力学中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(2): 125 - 138.(ZHOU Simeng. Applications of stiff testing machine in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(2): 125 - 138.(in Chinese))
- [5] FRANTZISKONIS G, DESAI C S. Constitutive model with strain softening[J]. International Journal of Solids and Structures, 1987, 23(6): 733 - 750.
- [6] VARDOULAKIS I. Shear band inclination and shear modulus of sand in biaxial tests[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1980, 4(1): 103 - 119.
- [7] VERMEER P A. The orientation of shear bands in biaxial tests[J]. Geotechnique, 1990, 40(2): 223 - 236.

- [8] 王学滨, 潘一山, 盛 谦, 等. 岩体假三轴压缩及变形局部化剪切带数值模拟[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 323 - 326.(WANG Xuebin, PAN Yishan, SHENG Qian, et al. Simulation of triaxial compression and localization of deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 323 - 326.(in Chinese))
- [9] 王学滨, 潘一山, 盛 谦, 等. 平面应变岩样局部化变形场数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 521 - 524.(WANG Xuebin, PAN Yishan, SHENG Qian, et al. Numerical simulation of localized deformation field for rock in plane strain state[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 521 - 524.(in Chinese))
- [10] ERICKUM S G, STRAYER L M, SUPPE J. Initiation and reactivation of faults during movement over a thrust-fault ramp: numerical mechanical models[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23(5): 11 - 23.
- [11] 川本眺万. 岩体开挖的应变软化分析[C]// 土木学会论文集. [S. l.]: [s. n.], 1981: 107 - 117.(TOSHIKAZU K. An analysis of excavation in strain-softening rock mass[C]// Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. [S. l.]: [s. n.], 1981: 107 - 117.(in Chinese))
- [12] ZDENEK P, BAZANT F. Continuum theory for strain-softening[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(12): 1 666 - 1 692.
- [13] 李 晓. 岩石峰后力学特性及其损伤软化模型的研究与应用[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 1995.(LI Xiao. Study of the post-failure behavior and damage softening model of rock and its application[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1995.(in Chinese))
- [14] 张 帆, 盛 谦, 朱泽奇, 等. 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, 2008, 27(增 1): 2 651 - 2 655. (ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study of post-peak mechanical behavior and strain-softening model of Three Gorges granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2 651 - 2 655.(in Chinese))
- [15] 杨 超, 崔新明, 徐水平. 软岩应变软化数值模型的建立与研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 695 - 697, 701.(YANG Chao, CUI Xinming, XU Shuiping. Establishment and study of strain softening numerical constitutive model for soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 695 - 697, 701.(in Chinese))
- [16] 周家文, 徐卫亚, 李明卫, 等. 岩石应变软化模型在深埋隧洞数值分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1 116 - 1 127. (ZHOU Jiawen, XU Weiya, LI Mingwei, et al. Application of rock strain softening model to numerical analysis of deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1 116 - 1 127.(in Chinese))
- [17] 任 放, 盛 谦. 弹脆塑性理论与三峡工程船闸开挖数值模拟[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 6 - 8, 14.(REN Fang, SHENG Qian. Elastic brittle plastic theory and numerical simulation of excavation for permanent lock of TGP[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 6 - 8, 14.(in Chinese))
- [18] 王 兵, 陈焱昭, 张金荣. 考虑岩石应变软化特性隧道的弹 - 塑性分析[J]. 铁道学报, 1992, (2): 86 - 95.(WANG Bing, CHEN Zhizhao, ZHANG Jinrong. An elastoplastic analysis of a tunnel in consideration of the strain softening behavior of rock[J]. Journal of the China Railway Society, 1992, (2): 86 - 95.(in Chinese))
- [19] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(ZHENG Yingren, SHEN Zhujiang, GONG Xiaonan. Geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [20] 刘 波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.(LIU Bo, HAN Yanhui. Theory, examples and application guides of FLAC[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.(in Chinese))
- [21] Itasca Consulting Group Inc.. FLAC^{3D}(Version 2.1) users manual[R]. [S. l.]: Itasca Consulting Group Inc., 2003.
- [22] 周 斌, 张可能, 柳群义. 考虑应变软化特征的层状岩体三轴压缩数值试验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(3): 828 - 832. (ZHOU Bin, ZHANG Keneng, LIU Qunyi. Numerical test analysis for stratified rock mass under triaxial compression considering strain softening characteristic[J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2009, 40(3): 828 - 832.(in Chinese))
- [23] 胡 军, 朱巨建. 应变软化模型在 FLAC^{3D} 二次开发中的应用[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 120 - 123.(HU Jun, ZHU Jujian. Development and implementation of strain-softening soil model in secondary development of FLAC^{3D}[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(3): 120 - 123.(in Chinese))