

文章编号: 1000-7598 (2013) 02-0404-07

考虑硬化软化和剪胀特性的绿泥石片岩力学模型

李 震¹, 周 辉², 宋雨泽³, 张传庆², 胡其志¹

(1.湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430068;

2.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; 3.国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘 要: 绿泥石片岩是一种典型的软岩, 开挖过程中出现的围岩大变形和塌方对工程安全危害极大。为了深入研究绿泥石片岩的力学特征并建立其合理的力学模型, 首先进行了不同围压下的三轴压缩试验, 并考虑应力状态对塑性演化的影响, 定义了新的内变量; 分析了凝聚力和内摩擦角随内变量的演化规律, 结果表明, 凝聚力先近似呈线性减小, 而后近似呈抛物线递减至残余破坏; 而内摩擦角一直近似呈抛物线递增; 研究了绿泥石片岩的剪胀特性, 分析了剪胀角随内变量演化规律, 结果表明, 剪胀角与内摩擦角呈相反的演化趋势。考虑硬化、软化和剪胀特性, 建立了绿泥石片岩的力学模型, 对室内三轴压缩试验结果的模拟分析表明, 该力学模型可以较好地描述绿泥石片岩的硬化、软化规律和剪胀等性质, 为工程安全性分析提供了基本的力学模型, 对于类似软岩力学性质的研究也具有重要的参考意义。

关键词: 绿泥石片岩; 应变硬化软化; 剪胀; 力学模型; 广义正交流动法则

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Mechanical model of chlorite schist considering hardening-softening and dilatancy characteristics

LI Zhen¹, ZHOU Hui², SONG Yu-ze³, ZHANG Chuan-qing², HU Qi-zhi¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

3. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: Chlorite schist is a kind of soft rocks, and its large deformation and collapse due to excavation are greatly harmful to engineering safety. In order to investigate the mechanical property of chlorite schist, triaxial compression test is conducted and a new internal variable is defined considering the influence of stress state on plasticity evolution. According to test results, evolution characteristics of cohesion and friction angle are that the cohesion decreases firstly approximately linearly and then parabolically, but friction angle always decreases approximately parabolically. Meanwhile, based on test data, evolution of dilatancy angle is opposite to that of friction angle. Finally, mechanical model of chlorite schist is proposed considering hardening-softening and dilatancy characteristics; and then it is applied to simulate the triaxial test; the result shows a good agreement with the test data. Effort of this paper offers a rational mechanical model for engineering safety estimation and an important reference for the mechanical investigation of other similar soft rocks.

Key words: chlorite schist; strain-hardening and softening; dilatancy characteristics; mechanical model; generalized normality rule

1 引 言

绿泥石片岩是一种以绿泥石为主要矿物成分、具有片理构造的变质岩, 该岩石强度低, 易破碎, 且遇水软化和崩解, 属于典型的软弱岩石^[1], 对于工程安全的影响极大。锦屏 II 水电站绿泥石片岩洞段施工中出现了围岩大变形、塌方、支护结构损坏

等情况, 且隧洞开挖变形稳定后的径缩现象非常明显^[2], 严重威胁了施工安全, 增大了施工和支护技术难度。因此, 深入研究绿泥石片岩的力学特征, 并在此基础上建立合理的力学模型, 对于科学分析和评价工程安全性具有重要的意义。

近年来, 一些学者们针对绿泥石片岩开展了一系列有意义的研究, 关注的焦点主要集中在绿泥石

收稿日期: 2011-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2010CB732006); 国家自然科学基金 (No. 50979104, No. 41172288); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. KZCX2-EW-QN115)。

第一作者简介: 李震, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石力学试验与理论模型的研究工作。E-mail: artherzhen@163.com

通讯作者简介: 周辉, 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值模拟与工程安全性分析方面的研究。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

片岩的水理特性和流变特性^[1,3-4]。然而，工程实践表明，绿泥石片岩洞段开挖后即发生围岩大变形甚至塌方，围岩中即时产生的破裂结构很大程度上决定了其后续的水理特性和长期力学行为。因此，研究绿泥石片岩的短期力学性质并建立其合理的弹塑性力学模型是进行工程安全性分析的一个重要前提。

岩石在应力达到峰值后，在围压较低条件下宏观上表现为应变软化现象。目前对其研究主要集中在两个方面：一是研究峰值后产生应变软化特性的机制，认为软化特性不是岩石自身性质的表现，而是岩石破坏裂隙所表现出的结构性质，岩石应变不是均匀的，表现为应变局部化^[5]；二是基于岩石应变软化的宏观效应，假设材料的变形和应力的分布是均匀的，在经典的弹塑性力学框架之下讨论^[6-7]。而在围压较高的条件下，岩石在应力峰值后宏观上表现为强化现象。工程分析要求能够在同一个力学模型中同时合理反映围岩的强度参数随塑性变形的演化、剪胀特性、围压的影响、硬化和软化特性等，而这些在试验认知和理论上都是一些复杂的问题^[8]。

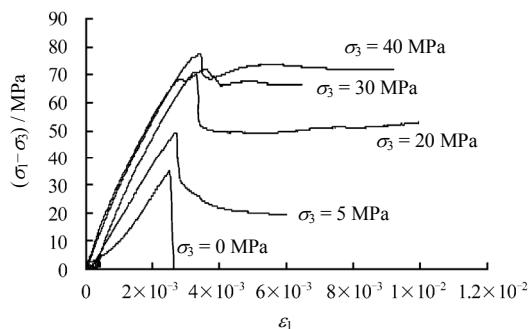
为此，本文将基于锦屏绿泥石片岩的室内力学试验结果，研究其强度参数的演化规律以及剪胀特性及其演化特征，建立考虑绿泥石片岩剪胀特性和硬化、软化的力学模型，并通过室内试验与模拟结果的对比较验证该模型的正确性。

2 绿泥石片岩力学试验结果

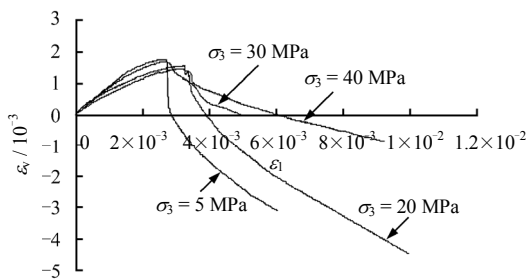
为了分析绿泥石片岩的力学性质，分别在中国科学院武汉岩土力学研究所的 RMT-150C 岩石力学试验机和 MTS815.03 试验机上进行了单轴和三轴压缩试验，试样均为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体标准试样，试验得到的应力-应变曲线、体积应变-轴向应变曲线如图 1 所示。

由图可看出：(1) 岩样变形主要经过初始压密、弹性变形、应变硬化、应变软化 4 个阶段；(2) 弹性阶段近似呈线性，取最大割线模量 E_M 为弹性模量^[9]，经验表明，相对于中硬岩和硬岩，软岩的弹性模量随塑性变化的变化较小，因此，为了后续分析的简便，假设弹性模量和泊松比在整个加载过程中为定值，加载过程中不考虑弹塑性耦合；(3) 随着围压增大，峰值强度逐渐升高，说明绿泥石片岩的强度对围压比较敏感；(4) 峰后曲线形态受围压影响变化较大，随着围压的增大，峰后曲线形态由脆性向延性转变，且围压越大峰后残余应力越大；(5) 体积应变主要分为压缩变形和扩容两个阶段，随着围压增大，扩容程度逐渐相对减小；为了后续

力学模型更方便地描述绿泥石片岩的扩容和剪胀特性，本文取体积应变-轴向应变曲线峰值点为屈服点，从初始屈服点开始岩石出现剪胀现象的趋势^[8]。



(a) 不同围压下绿泥石片岩的应力-应变曲线



(b) 不同围压下绿泥石片岩的体积应变-轴向应变曲线

图 1 绿泥石片岩的试验曲线
Fig.1 Test curves of chlorite schist

3 力学参数演化分析与力学模型

3.1 内变量的定义

由上述试验结果可见，绿泥石片岩的力学性质随塑性变形而变化，且受围压的影响显著。为了反映这一特性，需要修正传统塑性力学中的内变量(一般为塑性应变)的定义，使其包含围压的影响因素。由于所谓的围压只是在常规三轴试验中的一种特殊的应力状态 ($\sigma_2 = \sigma_3$)，而在实际工程围岩中一般不存在这种应力状态。因此，考虑一般性条件，定义内变量 κ 如下：

$$\kappa = \int d\kappa, d\kappa = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} de_{ij}^p de_{ij}^p}}{f\left(\frac{I_1}{\sigma_c}\right)} \quad (1)$$

式中： de_{ij}^p 为塑性应变偏张量，定义为 $de_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^p - \frac{1}{3} \text{tr}(d\epsilon_{ij}^p) I$ ； $\sqrt{\frac{2}{3} de_{ij}^p de_{ij}^p}$ 为等效塑性剪应变增量，记为 $d\gamma^p$ ； $f\left(\frac{I_1}{\sigma_c}\right)$ 为应力张量第 1 不变量 I_1 的函数，引入单轴抗压强度 σ_c 为了无量纲化。

根据式 (1) 定义的内变量, 如果屈服状态相同, 则其内变量相同, 因此, 可以取岩石达到残余强度时的内变量为定值来确定 $f\left(\frac{I_1}{\sigma_c}\right)$ 的表达形式, 具体方法为: 设初始屈服时的内变量为 0, 残余强度时的内变量为 1; 在屈服阶段, 由试验数据中的每一个加载步, 可计算出其弹性应变增量和塑性应变增量, 进而可计算出等效塑性剪应变增量 $d\gamma^p$, 由式 (1) 可得到一个带有待求 $f\left(\frac{I_1}{\sigma_c}\right)$ 形式的 $d\kappa$; 累加求和得到残余强度时的 κ 值, 令其值为 1 即可得 $f\left(\frac{I_1}{\sigma_c}\right)$ 的曲线形态和函数形式。

按照上述方法, 根据绿泥石片岩不同围压下的常规三轴试验结果可得到 $f\left(\frac{I_1}{\sigma_c}\right)$ 的表达式为

$$f\left(\frac{I_1}{\sigma_c}\right) = 0.0015\left(\frac{I_1}{\sigma_c}\right) + 0.0003 \quad (2)$$

由式 (1) 计算不同围压下应力峰值对应的内变量 κ 的值, 发现 κ 约为 0.1, 故取 $\kappa = 0.1$ 作为应力峰值的判定。

3.2 强度参数演化

根据定义的内变量, 利用式 (1) 处理三轴试验结果时, 经过 $d\kappa$ 叠加后, 每个 κ 对应着一组 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 。取受压为正, 莫尔-库仑屈服准则用 σ_1 、 σ_3 的表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

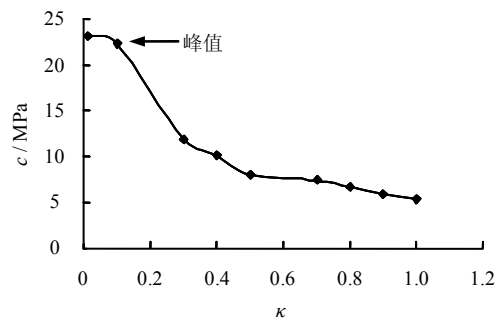
式中: c 和 φ 分别为岩石的凝聚力和内摩擦角。

由式 (3) 知, 只要给定两组 (σ_1, σ_3) 的值, 即可解出一组 (c, φ) 的值。把内变量 κ 从 0 到 1 细分后, 选取最接近 κ 值的两组 (σ_1, σ_3) , 并由式 (3) 计算对应的 (c, φ) , 列于表 1。

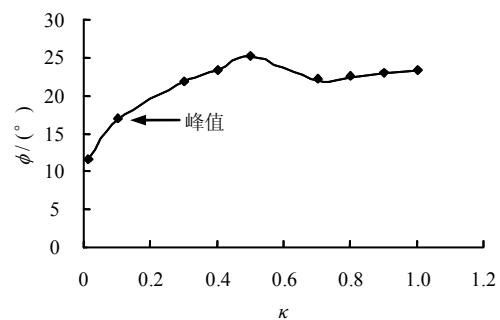
表 1 绿片岩内变量取不同值时的应力状态和强度参数
Table 1 Stress and strength parameters of chlorite schist with different internal variables

κ	第 1 组		第 2 组		凝聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)
	σ_1 / MPa	σ_3 / MPa	σ_1 / MPa	σ_3 / MPa		
0.012	101.80	30	116.8	40	23.2	11.5
0.100	53.81	5	117.3	40	16.6	16.8
0.300	46.10	5	100.6	30	11.9	21.8
0.400	42.10	5	99.8	30	10.1	23.3
0.500	37.50	5	99.6	30	8.0	25.2
0.700	32.80	5	109.5	40	7.4	21.9
0.800	31.10	5	109.1	40	6.7	22.4
0.900	29.10	5	108.8	40	5.9	22.9
1.000	27.90	5	108.5	40	5.4	23.3

由表 1 做出强度参数随内变量 κ 的变化曲线, 如图 2 所示。



(a) 凝聚力 c 随内变量的变化曲线



(b) 内摩擦角 φ 随内变量的变化曲线

图 2 强度参数与内变量的关系曲线

Fig.2 Relation between strength parameters and internal variable of chlorite schist

由图 2 可以看出, 从初始屈服开始, 内摩擦角近似呈抛物线形式一直增大, 凝聚力在峰值点前近似线性减小, 峰后近似呈抛物线形式减小。在残余强度阶段, 凝聚力和内摩擦角逐渐趋于稳定。

综合以上分析, 设 c 的初值为 c_0 , φ 的初值为 φ_0 。 c 值线性减小, 当到达峰值点 $\kappa = \kappa_t$ 时, $c = c_t$, 而后一直呈抛物线减小至 c_r ; φ 值一直呈抛物线增大至 φ_r 。则强度参数 $c(\kappa)$ 、 $\varphi(\kappa)$ 的表达式取为以下形式:

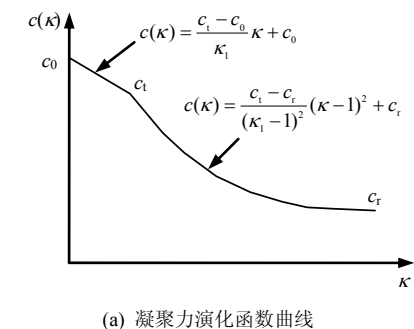
$$\left. \begin{aligned} c(\kappa) &= \frac{c_t - c_0}{\kappa_t} \kappa + c_0 & (0 \leq \kappa \leq \kappa_t) \\ c(\kappa) &= \frac{c_t - c_r}{(\kappa_t - 1)^2} (\kappa - 1)^2 + c_r & (\kappa_t < \kappa \leq 1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\varphi(\kappa) = (\varphi_0 - \varphi_r)(\kappa - 1)^2 + \varphi_r \quad (0 \leq \kappa \leq 1) \quad (5)$$

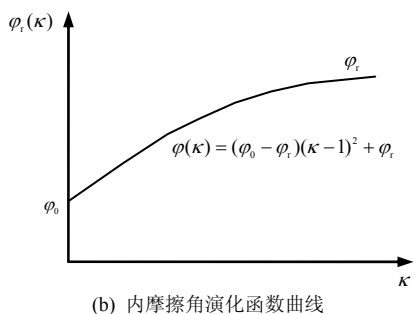
上述两式对应的函数曲线见图 3。

3.3 剪胀特性与流动法则

岩土材料区别于金属材料, 受剪时会产生较为明显的剪胀现象。在经典岩石塑性力学理论中, 描述剪胀的参数应用最广泛的是剪胀角 ψ 。传统方法中, 在处理剪胀角时通常有两种方式: 一种方式是



(a) 凝聚力演化函数曲线



(b) 内摩擦角演化函数曲线

图 3 强度参数演化函数模型

Fig.3 Simplified models of strength parameters function

采用非关联流动法则并令剪胀角等于 0，实际上是忽略了材料的剪胀性；另一种采用关联流动法则并令内摩擦角等于剪胀角且为定值，即采用屈服函数作为塑性势函数，这样往往会导致产生远大于实际情况的剪胀变形。在考虑非关联流动法则选取剪胀角时，仅知道 $\psi < \varphi$ ，取何值尚没有特别严格的理论依据。孔位学等^[10]采用非关联流动法则并取 $\psi = \varphi/2$ 。在常用的数值分析软件（如 FLAC 和 ANSYS 等）中，剪胀角在非线性本构模型中都默认为 0，虽然 FLAC 中的应变软化模型允许用户自定义剪胀角，但没有给出具体的建议。本文采用非关联流动法则以纠正关联流动法则计算中产生的过大的剪胀变形，在塑性势函数选择上将屈服函数中的内摩擦角 φ 代替剪胀角 ψ ，并研究剪胀角随等效塑性剪应变变化的规律。

常规三轴试验 $\sigma_2 = \sigma_3$ ，其应力点在 Mohr-Coulomb 的 π 平面上相应位置见图 4，它是 <1> 和 <2> 两条棱线的交点，这两条棱线在应力空间中的方程分别为

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \sigma_1 - \sigma_2 N_\varphi - 2c\sqrt{N_\varphi} \\ f_2 &= \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi - 2c\sqrt{N_\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： N_φ 为内摩擦角 φ 的函数，且 $N_\varphi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ 。

把式 (6) 中的内摩擦角 φ 换成剪胀角 ψ ，得到如下塑性势函数：

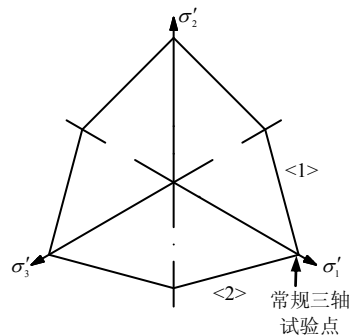


图 4 π 平面上常规三轴试验点对应位置

Fig.4 Stress state of triaxial compression test on π plane

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= \sigma_1 - \sigma_2 N_\psi - 2c\sqrt{N_\psi} \\ g_2 &= \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi - 2c\sqrt{N_\psi} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： N_ψ 为剪胀角 ψ 的函数，且 $N_\psi = (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi)$ 。

设其符合非关联流动法则，则有

$$d\varepsilon^p = d\lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \sigma} + d\lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \sigma} \quad (8)$$

将式 (7) 代入式 (8)，即可得到塑性应变增量的 3 个主应变为

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_1^p &= d\lambda_1 + d\lambda_2 \\ d\varepsilon_2^p &= -d\lambda_1 N_\psi \\ d\varepsilon_3^p &= -d\lambda_2 N_\psi \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将上面 3 式相加得：

$$d\varepsilon_v^p = (d\lambda_1 + d\lambda_2)(1 - N_\psi) \quad (10)$$

由式 (9) 的第 1 式和式 (10) 解得

$$N_\psi = 1 - \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_1^p} \quad (11)$$

可解出剪胀角 ψ 为

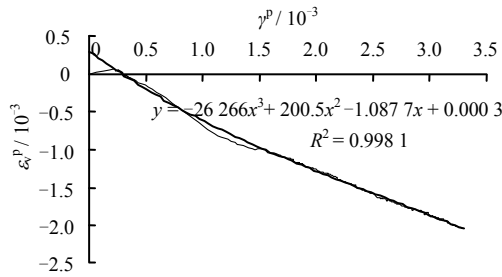
$$\psi = \arcsin \frac{d\varepsilon_v^p}{-2d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_v^p} \quad (12)$$

下面给出剪胀角的具体计算方法。以围压 5 MPa 的试验结果为例，经整理得到塑性体积应变、第 1 塑性主应变与等效塑性剪应变曲线如图 5 所示。

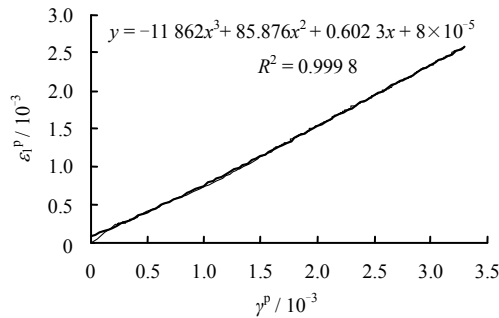
拟合塑性体积应变、第 1 塑性主应变与等效塑性剪应变的曲线得到如下表达式：

$$\varepsilon_v^p = -26\,266(\gamma^p)^3 + 200.5(\gamma^p)^2 - 1.087\,7\gamma^p + 0.000\,3 \quad (13)$$

$$\varepsilon_1^p = -11\,862(\gamma^p)^3 + 85.876(\gamma^p)^2 + 0.602\,3\gamma^p + 8 \times 10^{-5} \quad (14)$$



(a) 塑性体积应变与等效塑性剪应变关系图



(b) 第1塑性主应变与等效塑性剪应变关系

图5 两种塑性应变与等效剪应变关系

Fig.5 Relations between two plastic strains and equivalent plastic shear strains

对式(13)和(14)取微分,分别得到:

$$d\varepsilon_v^p = [-78.798(\gamma^p)^2 + 401\gamma^p - 1.0877]d\gamma^p \quad (15)$$

$$d\varepsilon_1^p = [-35.586(\gamma^p)^2 + 171.752\gamma^p + 0.6023]d\gamma^p \quad (16)$$

把式(15)和(16)代入到式(12),可得到剪胀角用等效塑性剪应变表示的函数表达式为

$$\psi = \arcsin \frac{-78.798(\gamma^p)^2 + 401\gamma^p - 1.0877}{-7.626(\gamma^p)^2 + 57.496\gamma^p - 2.2923} \quad (17)$$

这样,即可通过计算不同的等效塑性剪应变求出剪胀角。由式(1)可以得到等效塑性剪应变与内变量的对应关系,进行插值可以求出不同内变量对应的剪胀角。同理可求得其他围压下不同内变量下的剪胀角值(见表2)。

由表1、2可得到摩擦角和不同围压下剪胀角的演化曲线(如图6所示)。

从图6可以看出,剪胀角随着内变量的增大而减小。这是由于剪切破坏时,上部凸台会被部分剪断或磨平,则后续剪切破坏中凸台向上移动的分量会减小,剪胀角减小(如图7所示)。另外,还注意到剪胀角对围压比较敏感,这是由于高围压时岩石裂隙会紧密闭合,上部凸台对下部凸台的剪断作用随着围压的增大而增强,由图7可知,剪断作用越

强,向上移动的法向位移分量越小,所以剪胀角随围压增大而减小。

表2 不同内变量和围压下的剪胀角(单位:°)

Table 2 Dilatancy angle with different internal variables and confining pressures (unit: °)

内变量	σ ₃ / MPa		
	5	30	40
0.1	25.06	18.18	17.50
0.2	22.59	16.96	15.09
0.3	20.20	14.25	13.22
0.4	18.38	12.20	11.80
0.5	17.02	11.82	10.94
0.6	15.94	11.70	10.41
0.7	15.38	11.20	10.30
0.8	15.28	11.14	10.53
0.9	15.67	10.97	11.06
1.0	16.58	10.85	11.96

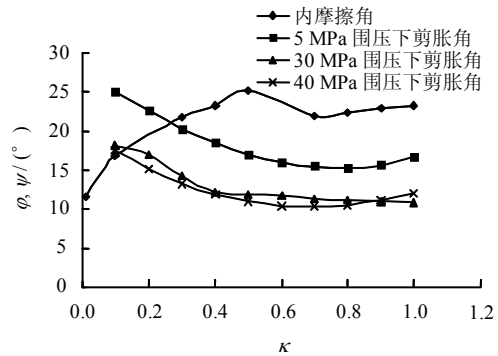


图6 剪胀角与内摩擦角的演化

Fig.6 Evolutions of dilatancy angle and friction angle with internal variable

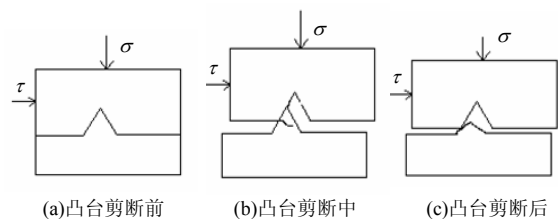


图7 剪切摩擦过程示意图

Fig.7 Progress of shearing friction

从图6中可以看出,绿泥石片岩的内摩擦角与剪胀角演化趋势相反,应采用非关联流动法则。当内摩擦角趋于平缓时,剪胀角也趋于平缓。由上述分析可归纳出剪胀角随内变量变化的函数ψ(κ)为

$$\psi(\kappa) = (\varphi_r - \varphi_0)(\kappa - 1)^2 + \varphi_0 \quad (0 \leq \kappa \leq 1) \quad (18)$$

本节依据绿泥石片岩的常规三轴试验,建立了考虑其硬化、软化和剪胀特性的力学模型,涉及的主要待定参数见表3,表中的参数均可以通过常规

试验来确定。

表 3 力学模型中的参数
Table 3 Parameters in mechanical model of chlorite schist

参数类型	待定参数
塑性内变量	函数 f 中的参数 a 和 b
	峰值点塑性内变量 κ_1
弹性参数	弹性模量 E
	泊松比 μ
	单轴抗压强度 σ_c
强度参数	凝聚力初值 c_0
	峰值点凝聚力 c_1
	凝聚力残余值 c_r
	内摩擦角初值 φ_0
	内摩擦角残余值 φ_r

4 模型的数值验证

为了验证本文所建立的力学模型，采用不同围压下绿泥石片岩的三轴试验结果与模型数值模拟的数据进行比较。具体方法为：由初始屈服函数求出

初始屈服点的主应力，此时等效塑性剪应变为 0，内变量为 0，用广义虎克定律求出此时的弹性应变；给定一个加载步，设内变量增量为 $d\kappa$ ，可由式 (1) 计算出等效塑性剪应变增量；由此时的塑性内变量 κ 可求出内摩擦角、凝聚力、剪胀角，即得到后继屈服函数，可由式 (3) 求出主应力，就可计算出弹性应变增量；由非关联流动法则推导出的式 (9) 代入等效塑性剪应变增量表达式，即可求出塑性应变增量。如此不断给出加载步，即可计算出不同围压下的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ -轴向应变曲线和体积应变-轴向应变曲线 (数值计算结果如图 8 所示)。由于在模型中对力学参数的演化函数做了分段简化 (如图 3)，故曲线并不十分平滑，但无论从定性还是定量上，本文的模型都能够反映绿泥石片岩由低围压下的脆性破坏到高围压下的延性破坏的转换过程和岩石的剪胀性质、峰值前的硬化和峰值后的软化等力学特征。模型中主要的参数取值如表 4 所列 (由绿泥石片岩的常规三轴试验确定)。

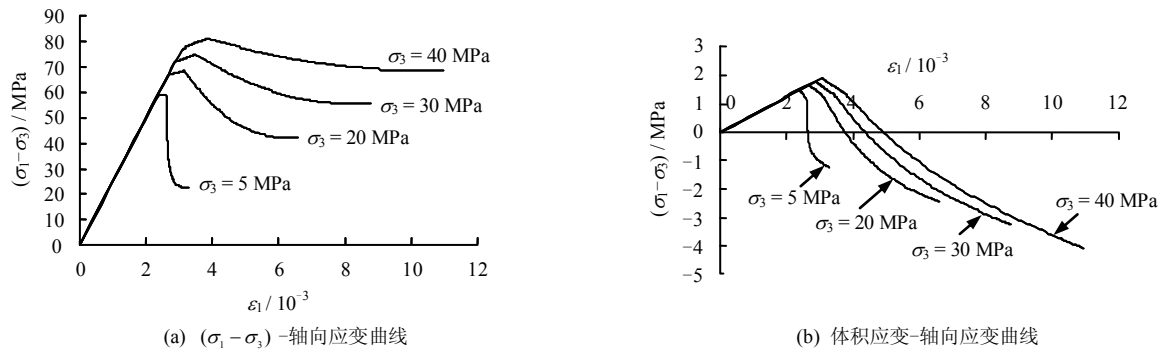


图 8 力学模型的数值模拟结果
Fig.8 Numerical simulation of mechanical model

表 4 力学模型参数的取值
Table 4 Parameter values in the mechanical model of chlorite schist

σ_c	E	M	c_0	c_1	c_r	φ_0	φ_r	κ_1
/MPa	/GPa		/MPa	/MPa	/MPa	/ (°)	/ (°)	
35.51	25	0.19	23.2	22.0	5.39	11.54	23.26	0.1

表中函数 $f = 0.001 5I_1 / \sigma_c + 0.000 3$

5 结论与讨论

(1) 本文首先定义了一个考虑应力状态的内变量，可以考虑应力状态对塑性演化的影响，其中，内变量中引入应力张量第 1 不变量更具一般性。

(2) 以 Mohr-Coulomb 准则为基础，根据试验结果计算得到了不同内变量对应的凝聚力 c 值和内摩擦角 φ 值，获得了凝聚力和内摩擦角随内变量的演化规律。

(3) 考虑非关联流动法则，求出了不同内变量对应的剪胀角 ψ ，结果表明，剪胀角随内变量的增大而逐渐减小并趋于平稳，而围压越大，剪胀角越小。

(4) 利用所提出的力学模型对绿泥石片岩三轴压缩试验结果进行了模拟分析，通过对比试验结果发现，该模型可以较好地反映绿泥石片岩的主要力学特性。

本文力学模型的主要参数演化规律是从试验数据处理获得，参数易于获取。抽象出的强度参数演化函数为非线性函数，与试验曲线较为接近，可以较好地反映绿泥石片岩的硬化、软化和剪胀特性。本文的力学模型是在具有软弱性质的绿泥石片岩试验基础上建立的，可以适用于具有类似性质的软弱岩石。

参 考 文 献

- [1] 周辉, 杨鑫, 胡其志, 等. 绿泥石片岩遇水软化的强度试验及机理研究[J]. 土工基础, 2011, 25(1): 45—48.
ZHOU Hui, YANG Xin, HU Qi-zhi, et al. Strength test and mechanism of softening of chlorite schist[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2011, 25(1): 45—48.
- [2] 吕品. 锦屏水电站绿片岩段扩挖及落底开挖稳定研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [3] 石振明, 张力. 锦屏绿片岩分级卸荷流变规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 756—762.
SHI Zhen-ming, ZHANG Li. Study on rheological rules of chlorite schist in Jinping hydropower station under condition of step unloading[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2010, 6(4): 756—762.
- [4] 熊良宵, 杨林德, 张尧. 绿片岩多轴受压应力松弛试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1158—1165.
XIONG Liang-xiao, YANG Lin-de, ZHANG Yao. Stress relaxation tests on green schist specimens under multi-axial compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(8): 1158—1165.
- [5] FRANTZISKONIS G, DESAI C S. Constitutive model with strain softening[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1987, 23(6): 733—750.
- [6] 卢云德, 葛修润, 蒋宇, 等. 大理岩常规三轴压缩全过程试验和本构方程的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2489—2493.
LU Yun-de, GE Xiu-run, JIANG Yu, et al. Study on conventional triaxial compression test of complete process for marble and its constitutive equation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(15): 2489—2493.
- [7] 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(增刊 1): 2651—2655.
ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Ze-qi, et al. Study on post-peak mechanical behaviour and strain-softening model of Three Gorges granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2651—2655.
- [8] 郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [9] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [10] 孔位学, 芮勇勤, 董宝弟. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. 岩土力学, 2009, (11): 3278—3282.
KONG Wei-xue, RUI Yong-qin, DONG Bao-di. Determination of dilatancy angle for geomaterials under non-associated flow rule[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, (11): 3278—3282.
- [11] 方玉树. 边坡稳定性分析条分法条间力合理性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 80—86.
FANG Yu-shu. Rationality of inter-slice forces of slices method for slope stability analysis[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2008, 19(2): 80—86.
- [12] RONG Fan, CHEN Li, YU Yan-xin, et al. Study on slope reliability method response surface method based on morgenstern-price method[J]. **Global Geology**, 2009, 12(3): 179—182.
- [13] 王殉. 边坡稳定性分析及治理软件 Slide CAD 的开发与工程应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [14] HU Hui, DONG Mei, YAO Lei-hua. Study of safety factor based on the non-differential form of Morgenstern-Price method[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture Technology (Natural Science Edition)**, 2008, 40(2): 201—206.
- [15] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. Excel 在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(6): 304—308.
DENG Dong-ping, LI Liang, ZHAO Lian-heng. The application of Excel in slope stability analysis[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2009, 23(6): 304—308.
- [16] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 基于 Janbu 法的边坡整体稳定性滑动面搜索新方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 891—898.
DENG Dong-ping, LI Liang, ZHAO Lian-heng. A new method of sliding surface searching for general stability of slope based on Janbu method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 891—898.
- [17] Rocscience Inc. Slide verification manual[R]. Toronto: Rocscience Inc., 2003.

上接第 380 页