

Mogi-Coulomb 强度准则应用于岩石三轴卸荷破坏试验的研究

李地元, 谢涛, 李夕兵, 王涛

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 针对 Mogi-Coulomb 强度准则是否适用于三轴卸荷试验, 基于已有常规三轴及真三轴的试验数据, 利用 Mogi-Coulomb 强度准则, 对常规三轴卸荷及真三轴卸荷条件下的实验数据进行拟合和分析, 并对拟合得到的相关强度参数和试样的破坏特征进行分析。结果表明, Mogi-Coulomb 强度准则在常规三轴卸荷条件下有着良好的适用性, 而在真三轴卸荷条件下, 虽然线性拟合效果较好, 但拟合参数反映的岩石黏聚力值出现负数的异常情况。分析现有实验测试结果, 可以推测出现参数异常的原因, 应是岩石在真三轴卸荷条件下的破坏模式由剪切型破坏转变为强烈的张拉型岩爆破坏所致。这表明 Mogi-Coulomb 强度准则虽能在一定程度上反映真三轴卸荷的主应力关系, 但其本质仍为基于剪切破坏的强度准则, 存在一定的局限性, 对于张拉为主-剪切共存型的岩爆破坏, 有必要建立一种新的岩石强度准则来反映真三轴卸荷下的岩石本构关系。

关键词 Mogi-Coulomb 强度准则; 三轴卸荷试验; 破坏模式; 岩爆; 数据拟合

中图分类号 TU452

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.014

On the Mogi-Coulomb strength criterion as applied to rock triaxial unloading test

LI Diyuan, XIE Tao, LI Xibing, WANG Tao

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract To testify the Mogi-Coulomb criterion in triaxial unloading test and based on available unloading testing data, the Mogi-Coulomb strength criterion with a linear fitting method was used in the conventional triaxial unloading tests and the true triaxial unloading tests, respectively. A comprehensive comparative analysis was presented for the related strength parameters according to the fitting results and combination of the failure characteristics of rock specimens. The results showed that the Mogi-Coulomb strength criterion has a good applicability to rock samples under conventional triaxial unloading conditions. However, under true triaxial unloading tests, even though the fitting degree is very good, the fitting parameter a is negative which leads to a negative cohesion of rock samples. This is impossible in practice. Since the Mogi-Coulomb strength criterion is based on the assumption that rock fails in shear, it cannot describe the failure of rock under true triaxial unloading conditions in which the failure modes of rocks specimens may change from shear to extensional slabbing or rock burst. Therefore, for combined shear and tensile failure processes of rocks under true triaxial unloading conditions, it is necessary to build a new strength criterion to describe its constitutive relationships, which is important for deep rock mechanics.

Keywords Mogi-Coulomb strength criterion; triaxial unloading test; failure mode; rockburst; data fitting

岩体在三向应力卸荷状态下的强度准则是卸荷岩体力学的核心研究内容之一。深部岩体工程开挖实质就是一个

围岩应力卸荷过程, 卸荷过程中岩石的强度、变形和破坏特征与加载过程是有区别的。因此, 开展岩体卸荷力学的研

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474250); 教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-13-0588)

作者简介: 李地元, 副教授, 研究方向为深部岩石力学和深部硬岩工程, 电子信箱: diyuan.li@csu.edu.cn

引用格式: 李地元, 谢涛, 李夕兵, 等. Mogi-Coulomb 强度准则应用于岩石三轴卸荷破坏试验的研究[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 84-90.

究,建立卸荷条件下的岩石本构模型和强度准则,不仅对揭示岩体的卸荷力学行为及其破坏机制等具有十分重要的理论意义,而且对深部岩体工程施工和支护设计也具有重大的经济效益和很高的实用价值^[1]。

近年来,岩石卸荷变形特性及破坏机制等方面的研究取得了不少成果。如张春生等^[2-5]对锦屏二级水电站大理岩进行了大量的复杂应力路径下的三轴加卸载试验,对其力学性质、板裂化破坏机理、岩爆发生机制及声发射现象等方面进行了一系列的研究与分析。何满潮等^[6]对深部花岗岩岩爆现象做了大量的真三轴卸荷试验研究,揭示了深部岩体的特殊破裂特征及其诱发机制。

然而,在大量卸荷试验开展的基础上,岩石卸荷破坏强度准则方面的发展则相对缓慢。邱士利等^[7]认为,Mohr-Coulomb强度准则能较好地反映岩石在不同卸围压速率下极限承载强度规律;Wu等^[8]则认为,传统的Mohr-Coulomb强度准则不能准确描述岩石应力卸荷破坏的强度特征;吕颖慧等^[9]认为高应力卸荷条件下,Mogi-Coulomb强度准则能很好地反映花岗岩破坏强度特性。张黎明等^[10]对5种强度准则在岩石卸荷破坏的适用性进行了研究,认为Mogi-Coulomb强度准则的回归效果要优于Mohr-Coulomb和Drucker-Prager强度准则;Al-Ajmi等^[11,12]对Mogi-Coulomb和Mohr-Coulomb强度准则进行了大量的真三轴数据拟合,认为Mogi线性强度准则在三轴加载下非常适用,并认为Mogi-Coulomb强度准则是Mohr-Coulomb强度准则在常规三轴下的推广,并得出了两种强度准则参数的联系;Jimenez等^[13]对Mogi真三轴强度准则进行了试验数据拟合研究,认为Mogi-Coulomb强度准则对真三轴加载比较适用。但Mogi-Coulomb强度准则主要是基于岩石三轴加载试验,在三轴卸荷实验条件下是否适用,仍需要探索与讨论。

通过已有常规三轴及真三轴的卸荷试验数据,利用Mogi-Coulomb强度准则对已有试验数据进行拟合分析,讨论Mogi-Coulomb准则在三轴卸荷下的适用性。

1 Mohr-Coulomb 和 Mogi-Coulomb 强度准则的联系

Mohr-Coulomb准则是岩石力学应用最广泛的强度准则,本质为剪切破坏准则。它揭示了岩石在压应力状态下发生剪切破坏的机理,其剪切强度 τ 由黏聚力 c 和正应力 σ 确定^[14]:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中, c 为强度曲线与 τ 轴的截距,称为黏聚力, ϕ 为强度曲线与 σ 轴的夹角,称为内摩擦角。式(1)意味着岩石的抗剪强度与中间主应力无关,因此,也可以写为最大主应力和最小主应力的关系式:

$$\sigma_1 = Q + K\sigma_3 \quad (2)$$

式中, σ_1, σ_3 分别为最大主应力和最小主应力; Q, K 均为岩石强度参数,可以分别用内摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 表示:

$$Q = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

$$K = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

Mohr-Coulomb准则没有考虑中间主应力对岩石强度的影响,因此它只适用于 $\sigma_2 = \sigma_3$ 的特殊情况。尤明庆^[15]也认为,不考虑中间主应力的作用得到的岩石三轴理论强度与试验数据会产生一定误差,得到了广泛的认可。

Mogi^[16]通过对大理岩、白云岩、石灰岩等多种岩石进行大量的三轴压缩试验,试验结果表明中间主应力对岩石强度有显著影响。在Mises准则基础上,Mogi提出了考虑中间主应力的八面体强度准则,其本质仍为剪切破坏准则:

$$\tau_{\text{oct}} = f(\sigma_{m,2}) \quad (4)$$

式中, τ_{oct} , $\sigma_{m,2}$ 分别为八面体剪应力和有效中间主应力, σ_2 为中间主应力,其表达式分别为

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (6)$$

Al-Ajmi等^[11,12]通过对大量三轴试验数据的整理,发现 $f(\sigma_{m,2})$ 的线性函数形式在真三轴压缩试验时拟合效果比较理想,并将Mogi线性强度准则称之为Mogi-Coulomb破坏准则。其表达式为

$$\tau_{\text{oct}} = a + b\sigma_{m,2} \quad (7)$$

式中, a 是Mogi线性准则拟合直线与 τ_{oct} 轴的截距, b 为直线斜率。

在常规三轴压缩试验中, $\sigma_2 = \sigma_3$,式(5)、(7)退化为

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (8)$$

$$\frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) = a + \frac{b}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (9)$$

通过与Mohr-Coulomb准则关系式的对比,可以得到与Mohr-Coulomb强度准则之间的关系:

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3}c \cos \phi \quad (10)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \phi$$

由式(9)也可以得到 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时最大主应力和最小主应力的关系式:

$$\sigma_1 = \frac{a}{\sqrt{2}/3 - b/2} + \frac{b/2 + \sqrt{2}/3}{\sqrt{2}/3 - b/2} \sigma_3 \quad (11)$$

由此可见,Mohr-Coulomb准则可以认为是当 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时Mogi线性准则的推广。

2 基于 Mogi 线性强度准则的三轴卸荷试验数据分析结果

以往对Mogi线性准则的研究都是基于三轴加载试验的,而对三轴卸载试验的分析则较少。下面通过对常规三轴卸

载和真三轴卸载试验方面的试验数据利用 Mogi 线性强度准则进行较为系统的拟合分析,对其在三轴卸荷强度准则的适用性进行探讨。文中对岩石卸围压强度的定义为岩石在其加卸载应力路径下达到破坏时的峰值强度。

2.1 常规三轴卸荷破坏试验数据分析

常规三轴压缩试验中,即 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \geq 0$ 的情况下, Mohr-Coulomb 强度准则被广泛认可。三轴卸载试验中应力路径不尽相同,但总体来讲常规三轴卸荷试验主要有峰前卸荷和峰后卸荷两大卸荷模式。本研究通过两种卸荷模式下

大理岩、灰岩等岩石的试验数据,对 Mogi 线性强度准则与 Mohr-Coulomb 强度准则进行拟合对比分析。

2.1.1 峰前卸荷的数据拟合

峰前卸荷模式是指在岩石轴压达到相应围压下的三轴强度前(一般为峰值强度的 80%~90%),开始卸载围压,直至试样发生卸荷破坏^[17]。根据所统计整理的大理岩^[17]、灰岩^[10]、锦屏大理岩^[18]的三轴卸荷试验数据,分别利用两种强度准则进行线性拟合,得到图 1~图 4 的拟合结果。

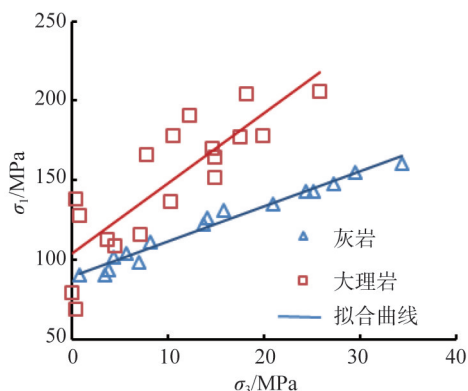


图 1 一种灰岩和大理岩的常规三轴峰前卸荷

Mohr-Coulomb 强度数据拟合

Fig. 1 Mohr-Coulomb strength's data fitting of limestone and marble specimens under the pre-peak conventional triaxial unloading condition

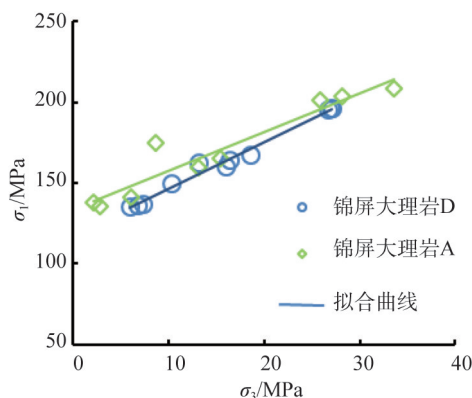


图 2 锦屏大理岩常规三轴峰前卸荷 Mohr-Coulomb 强度数据拟合

Fig. 2 Mohr-Coulomb strength's data fitting of Jinping marbles under the pre-peak conventional triaxial unloading condition

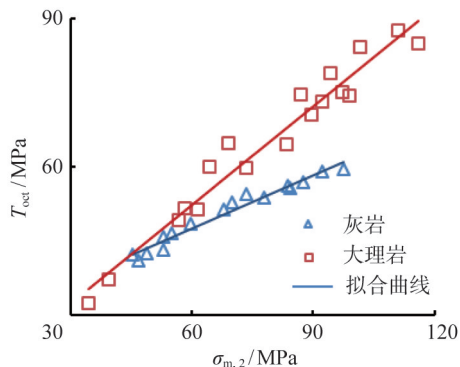


图 3 一种灰岩和大理岩的常规三轴峰前卸荷的

Mogi-Coulomb 强度数据拟合

Fig. 3 Mogi-Coulomb strength's data fitting of limestone and marble specimens under the pre-peak conventional triaxial unloading condition

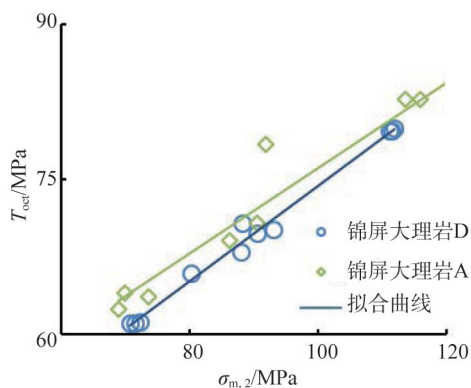


图 4 锦屏大理岩常规三轴峰前卸荷的

Mogi-Coulomb 强度数据拟合

Fig. 4 Mogi-Coulomb strength's data fitting of Jinping marbles under the pre-peak conventional triaxial unloading condition

根据拟合曲线方程得到的参数值,结合式(3)、(10)可以分别得到两种不同强度准则下表 1 中岩样的 c 、 ϕ 值。并引入强度平均偏差 $\bar{\sigma}$, 公式为

$$\bar{\sigma}_m = \sum ABS(\sigma_1 - \sigma^T)/N \quad (12)$$

式中, σ_1 、 σ^T 分别为岩石强度的计算值和试验值, N 为实验数据的组数, $\bar{\sigma}$ 表示岩石卸围压强度的平均偏差。其中 σ_1 可由式(11)得到。

表1 4种岩样强度准则拟合结果及 c 、 ϕ 值Table 1 Strength criteria's fitting results and values of c , ϕ of four kinds of rock samples

岩样类别	a/MPa	b	Q/MPa	K	R^2		c		$\phi/(\circ)$		$\bar{\sigma}/\text{MPa}$	
					Mohr	Mogi	Mohr	Mogi	Mohr	Mogi	Mohr	Mogi
灰岩 ^[10]	25.85	0.36	89.44	2.20	0.97	0.96	30.15	29.67	22.02	22.45	3.20	3.21
大理岩 ^[17]	12.18	0.70	103.88	4.41	0.71	0.96	24.73	19.29	39.07	47.94	16.99	27.03
锦屏大理岩D ^[18]	28.31	0.46	118.18	2.88	0.98	0.99	34.82	34.40	28.98	29.20	2.16	2.12
锦屏大理岩A ^[18]	34.58	0.41	133.58	2.40	0.91	0.92	43.11	40.73	24.32	25.78	6.45	5.95

2.1.2 峰后卸荷的数据拟合

峰后卸荷模式是指在岩石轴压超过相应围压下的三轴强度后(一般略高于峰值强度)开始卸载围压,直至试样发生最终破坏^[17]。根据文献[17]、[18]所统计整理的试验数据分别

利用两种强度准则进行线性拟合,得到图5和图6的拟合结果。根据拟合曲线方程得到的参数值,结合式(3)、(10)和(12)可以分别得到两种不同强度准则下表2中岩样的 c 、 ϕ 值及强度平均偏差 $\bar{\sigma}$ 。

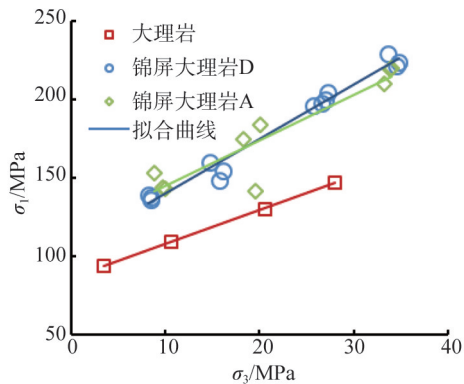


图5 锦屏大理岩常规三轴峰后卸荷的Mohr-Coulomb强度数据拟合

Fig. 5 Mohr-Coulomb strength's data fitting of Jinping marbles under the post-peak conventional triaxial unloading condition

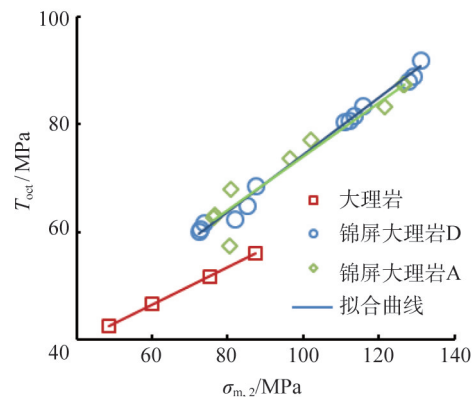


图6 锦屏大理岩常规三轴峰后卸荷的Mogi-Coulomb强度数据拟合

Fig. 6 Mogi-Coulomb strength's data fitting of Jinping marbles under the post-peak conventional triaxial unloading condition

表2 3种岩样强度准则拟合的结果及 c 、 ϕ 值Table 2 Strength criteria's fitting results and values of c , ϕ of four kinds of rock samples

岩样类别	a/MPa	b	Q/MPa	K	R^2		c		$\phi/(\circ)$		$\bar{\sigma}/\text{MPa}$	
					Mohr	Mogi	Mohr	Mogi	Mohr	Mogi	Mohr	Mogi
大理岩 ^[17]	25.71	0.35	86.13	2.16	0.99	0.99	29.30	29.37	21.54	21.79	0.33	0.97
锦屏大理岩D ^[18]	21.66	0.53	105.44	3.47	0.98	0.99	28.30	27.78	33.54	34.20	4.02	4.14
锦屏大理岩A ^[18]	23.80	0.50	115.81	2.91	0.85	0.93	33.94	29.78	29.24	32.03	8.07	8.97

2.2 对真三轴卸荷破坏试验的适用性

真三轴压缩试验一般采用长方体或立方体试样,具有两个加载面,加载应力满足 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \geq 0$,可以考虑中间主应力对岩石三轴强度的影响。以Mogi等^[16]为代表的岩石真三轴试验研究的先行者,他们所建立的岩石真三轴强度准则大多是基于岩石真三轴加载试验,而这些准则是否适用于真

三轴卸荷的情况,缺少相关讨论和分析。本研究利用已有学者开展的真三轴卸载试验数据,并对其进行了真三轴Mogi强度拟合分析,以检验Mogi-Coulomb强度准则在真三轴卸荷条件下的适用性。

真三轴卸荷试验主要用来模拟深部岩体开挖卸荷导致的岩爆现象,这些现象的发生过程基本都伴随着某个方向地

应力的突然卸载(如钻爆开挖)或者缓慢卸载(如机械开挖),根据现有文献研究情况,本研究主要将真三轴卸荷试验分为瞬态卸荷与稳态卸荷两种模式。

2.2.1 瞬态卸荷

瞬态卸荷通常用于模拟高应力岩石的岩爆现象。何满潮^[19]、向天兵^[20]、杜坤^[21]、陈景涛^[22]、苗金丽^[23]等做了大量真三轴卸荷岩爆方面的试验,并取得了一定的研究成果,但都没有对这种应力路径下的岩石真三轴强度准则做系统研究。本文对这一特殊卸载路径下 Mogi-Coulomb 强度准则的适应性进行数据分析。

根据所统计整理的花岗岩 A^[19]、花岗岩 B^[21]、花岗岩 C^[22]、花岗岩 D^[22]、灰岩^[20]、红砂岩^[21]的真三轴卸荷试验数据分别对 Mogi 线性强度准则进行线性拟合,得到图 7、图 8、图 9 和图 10 的拟合结果。

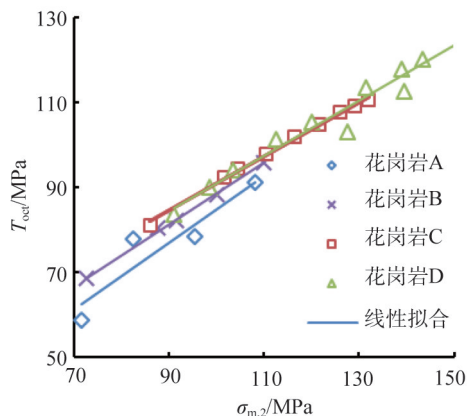


图 7 4 类花岗岩真三轴卸荷岩爆 Mogi-Coulomb 强度准则数据拟合

Fig. 7 Mogi-Coulomb strength's data fitting of four kinds of granites under the true triaxial unloading rock burst condition

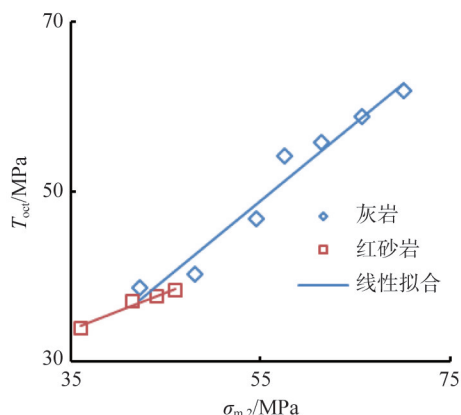


图 8 灰岩、红砂岩真三轴卸荷加载岩爆 Mogi-Coulomb 强度准则数据拟合

Fig. 8 Mogi-Coulomb strength's data fitting of limestone and red-sandstone under the true triaxial unloading and loading rock burst condition

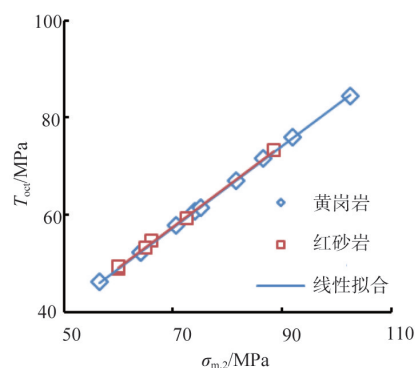


图 9 花岗岩、砂岩真三轴卸载岩爆 Mogi-Coulomb 强度准则数据拟合

Fig. 9 Mogi-Coulomb strength's data fitting of granite and sandstone under the true triaxial unloading rock burst condition

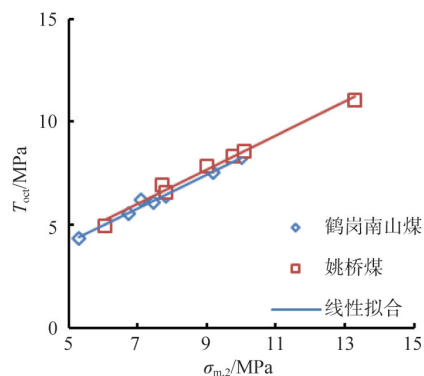


图 10 2 种煤岩真三轴卸载岩爆 Mogi-Coulomb 强度准则数据拟合

Fig.10 Mogi-Coulomb strength's data fitting of two kinds of coals under the true triaxial unloading rock burst condition

根据拟合曲线方程得到的参数值,结合式(10)可以得到 Mogi-Coulomb 强度准则下表 3 中岩样的 c 、 ϕ 值及八面体剪

表 3 6 种岩石真三轴卸荷加载下的 Mogi-Coulomb 强度准则数据拟合结果及 c 、 ϕ 值

Table 3 Mogi-Coulomb strength criteria's fitting results and values of c , ϕ of six kinds of rock samples under true triaxial unloading and loading tests

岩样类别	a/MPa	b	R^2	c/MPa	$\phi/(\circ)$	$\bar{\tau}/\text{MPa}$
花岗岩 A ^[19]	5.63	0.79	0.87	10.94	56.92	3.33
花岗岩 B ^[21]	25.6	0.65	0.96	37.49	43.58	2.73
花岗岩 C ^[22]	27.39	0.64	0.99	39.56	42.75	2.50
花岗岩 D ^[22]	16.4	0.72	0.99	26.94	49.79	0.58
灰岩 ^[20]	-1.29	0.91	0.96	-5.23	74.84	1.52
红砂岩 ^[21]	18.26	0.44	0.99	21.90	27.82	0.21
花岗岩 ^[23]	-1.39	0.84	0.99	-3.25	62.99	0.12
细砂岩 ^[23]	-0.99	0.84	0.99	-2.31	62.99	0.27
鹤岗南山煤 ^[23]	-0.15	0.85	0.99	-0.37	64.36	0.11
姚桥煤 ^[23]	0.35	0.81	0.99	0.73	59.22	0.18

应力强度平均偏差 $\bar{\tau}$, 公式为:

$$\bar{\tau} = \sum ABS(\tau_{oct} - \tau_{oct}^T) / N \quad (13)$$

式中, τ_{oct} , τ_{oct}^T 分别为强度的计算值和试验值, N 为实验数据的组数, $\bar{\tau}$ 为八面体剪应力强度平均偏差。

2.2.2 稳态卸荷

稳态卸荷是指在三向应力状态下, 按一定卸载速率卸荷一个或两个水平方向的应力, 使试样达到破坏。这种卸荷过程在现实工程中相对较少, 其中周火明等^[24]对大理岩在这种卸荷模式下进行了真三轴强度参数的研究, 本研究对其试验数据进行 Mogi 线性强度准则数据拟合, 拟合结果如图 11 和表 4 所示。

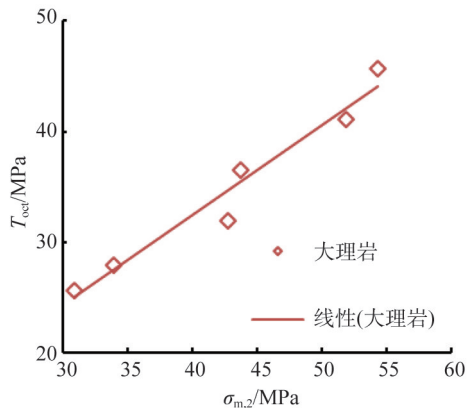


图 11 大理岩真三轴稳态卸荷 Mogi-Coulomb 强度准则数据拟合

Fig. 11 Mogi-Coulomb strength's data fitting of marble under the true triaxial stable unloading condition

表 4 大理岩稳态卸荷下 Mogi-Coulomb 强度准则拟合结果及 c 、 ϕ 值

Table 4 Mogi-Coulomb strength criteria's fitting results and values of c , ϕ of marble under true triaxial stable unloading condition

岩样类别	a/MPa	b	R^2	c/MPa	$\phi/(\circ)$	$\bar{\tau}/\text{MPa}$
大理岩 ^[24]	-0.09	0.81	0.96	-0.19	59.22	1.24

3 讨论

3.1 Mogi-Coulomb 准则对常规三轴卸荷试验的适用性分析

由图 1~图 6 的线性拟合曲线可以发现, 在常规三轴试验中, Mohr 与 Mogi 线性强度准则在峰前卸荷及峰后卸荷的拟合曲线与试验数据吻合较好。由表 1 和表 2 的 R^2 值来看, 峰前卸荷 Mogi 线性拟合的均值为 0.96, 而 Mohr 线性拟合的均值为 0.89; 峰后卸荷 Mogi 线性拟合的均值为 0.97, Mohr 线性拟合的均值为 0.94, 可以认为 Mogi 线性强度的拟合度相对 Mohr-Coulomb 线性强度准则更高。从表 1 和表 2 中的 c 、 ϕ 值比较, 在两类卸荷模式下, 两种强度准则下的 c 、 ϕ 值相近, 基本上偏差在 6% 以内, 只有峰前卸荷时大理岩^[17] c 、 ϕ 值偏差较大, 分别

达到了 28% 和 18%。从 R^2 值可以看出, 上述误差是因为 Mohr-Coulomb 线性强度准则对该大理岩岩样的试验数据拟合情况相对较差造成的, 而 Mogi 线性强度准则的拟合度明显优于 Mohr-Coulomb 线性强度准则。但从强度平均偏差 $\bar{\sigma}$ 来看, Mogi 线性准则比 Mohr-Coulomb 准则预测试验结果的效果相当。

通过以上分析, 可以认为 Mogi 线性强度准则基本适用于常规三轴卸荷试验情况, 与工程上广泛应用的 Mohr-Coulomb 强度准则具有较好的可比性。

3.2 Mogi-Coulomb 准则对真三轴卸荷试验的适用性分析

真三轴卸荷试验, 即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \geq 0$ 的情况下, 考虑了中间主应力对岩石破坏的影响, 因此 Mohr-Coulomb 强度准则在这里不再适用。本研究主要对瞬态卸荷和稳态卸荷这两类卸荷模式下的试验数据进行了 Mogi-Coulomb 强度准则的拟合分析。

从图 7~图 11 的拟合直线来看, Mogi-Coulomb 强度准则对真三轴卸荷试验的拟合结果是比较好的, 从 R^2 值更容易体现出来, 均值为 0.97。强度平均偏差 $\bar{\tau}$ 呈现出一定的 R^2 值线性相关性, 比较稳定。从表 3 和表 4 来看, 两类卸荷方式下, Mogi-Coulomb 强度准则拟合参数 a 均出现了负值, 导致按此方法得到的黏聚力 c 也对应地出现了负值, 这与实际是不相符的。上述这种情况主要出现在瞬态卸荷岩爆试验的数据拟合当中, 出现这种特殊现象, 可能由以下一些因素造成: 1) Mogi-Coulomb 强度准则本质上为剪切强度准则, 对真三轴卸荷下发生的以张拉型破坏为主的岩爆现象不再适用, 导致利用该准则进行数据拟合时出现了数据结果异常; 2) 试验数据采集偏差所导致, 特别是在岩爆试验过程中, 岩爆现象往往有瞬时岩爆、标准岩爆和滞后岩爆三种类型, 实际上很难监测到岩石发生破坏时三个主应力方向的应力准确值。分析数据原文中岩石的破坏特征, 其中灰岩^[20] 破坏形式以竖向劈裂破坏为主, 破裂面较为粗糙, 且垂直于卸荷方向, 为张性破坏; 苗金丽^[23] 中的花岗岩、砂岩及煤岩的破坏形式非常复杂, 部分岩样有着剪切破坏的典型特征, 而大部分岩样为强烈的张拉弹射破坏, 这从一定程度上证实了因素 1 的可能性。

从表 3~表 6 中的 c 值来看, 出现的负值都非常接近于零, 不排除上述的第 2 个因素起作用, 但总的来看, 第 1 个因素是导致这种现象的主要因素, 而这也表明真三轴卸荷试验条件下基于八面体剪切破坏的 Mogi-Coulomb 强度准则存在一定的局限性, 高应力下的岩体卸荷破坏准则还有待深入研究。

4 结论

从理论计算、数据拟合分析, 结合试验结果探讨等方面, 研究了 Mogi-Coulomb 强度准则在岩石三轴卸荷破坏试验的适用性。

1) 常规三轴卸荷试验下, Mogi 线性强度准则的拟合结果与 Mohr-Coulomb 线性强度准则的拟合结果十分相近, 并且两种强度准则得到的 c 、 ϕ 值偏差较小。可以认为 Mogi-

Coulomb线性强度准则在常规三轴条件下有良好的适用性。

2) Mohr-Coulomb强度准则和Mogi-Coulomb强度准则均是基于岩石发生剪切破坏而建立起来的准则,在应用到工程实践时,尤其是应用到高地应力硬岩开挖卸荷工程中,往往会出现和实际工程不一致的情况,如不能合理的解释深部岩石板裂破坏、分区破裂化等现象^[25]。

本研究分析结论在一定程度上验证了上述观点。可见,Mogi-Coulomb准则对真三轴卸荷破坏的适用性存在一定的局限性,需要建立一种新的剪切-张拉复合型强度准则来反映真三轴卸荷岩石破坏的应力路径和强度变化关系。

参考文献(References)

- [1] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
Li Jianlin. Unloading rock mass mechanics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [2] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1999-2009.
Zhang Chunsheng, Chen Xiangrong, Hou Jing, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1999-2009.
- [3] 李新平, 肖桃李, 汪斌, 等. 锦屏二级水电站大理岩不同应力路径下加卸载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 882-889.
Li Xinping, Xiao Taoli, Wang Bin, et al. Experimental study of Jinping II hydropower station marble under loading and unloading stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 882-889.
- [4] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 锦屏二级水电站大理岩复杂加卸载应力路径力学特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2287-2294.
Liu Lipeng, Wang Xiaogang, Jia Zhixin. Experiment study of marble mechanical properties of Jinping II hydropower station under complex loading and unloading conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2287-2294.
- [5] 孙卓恒, 侯哲生, 张爱萍. 锦屏二级水电站大理岩拉张型破裂化破坏研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(2): 24-27.
Sun Zhuoheng, Hou Zhesheng, Zhang Aiping. Research on tensile slabbing failure of marble at Jinping II hydropower station[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(2): 24-27.
- [6] 何满潮, 赵菲, 杜帅, 等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2737-2747.
He Manchao, Zhao Fei, Du Shuai, et al. Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2737-2747.
- [7] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807-1817.
Qiu Shili, Feng Xiating, Zhang Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1807-1817.
- [8] Wu F, Liu T, Liu J, et al. Excavation unloading destruction phenomena in rock dam foundations[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(2): 257-262.
- [9] 吕颖慧, 刘泉声, 胡云华. 基于花岗岩卸荷试验的损伤变形特征及其强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2096-2103.
Lü Yinghui, Liu Quansheng, Hu Yunhua. Damage deformation characteristics and its strength criterion based on unloading experiments of granites[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2096-2103.
- [10] 张黎明, 王在泉, 石磊. 硬质岩石卸荷破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2012-2018.
Zhang Liming, Wang Zaiquan, Shi Lei. Experimental study of hard rock failure characteristic under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2012-

2018.

- [11] Al-Ajmi A M, Zimmerman R W. Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(3): 431-439.
- [12] Al-Ajmi A M, Zimmerman R W. Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(8): 1200-1211.
- [13] Jimenez R, Ma X. A note on the strength symmetry imposed by Mogi's true-triaxial criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 64(Complete): 17-21.
- [14] 尤明庆. 统一强度理论应用于岩石的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 258-265.
You Mingqing. Discussion on the unified strength theories for rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2013, 32(2): 258-265.
- [15] 尤明庆. 统一强度理论的试验数据拟合及评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2193-2204.
You Mingqing. Fitting and evaluation of test data using unified strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2193-2204.
- [16] Mogi K. Experimental rock mechanics[M]. London: CRC Press, 2007.
- [17] 石磊. 不同加卸荷条件下大理岩力学及声发射特性试验及理论研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
Shi Lei. Experimental and theoretical research of mechanical and acoustic emission characteristics of marble under different loading and unloading conditions[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2011.
- [18] 刘豆豆. 高地应力下岩石卸载破坏机理及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
Liu Doudou. Research on unloading failure mechanism of rock under high stress and its application[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [19] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865-876.
He Manchao, Miao Jinli, Li Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865-876.
- [20] 向天兵, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 开挖与支护应力路径下硬岩破坏过程的真三轴与声发射试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 27(增1): 500-507.
Xiang Tianbing, Feng Xiating, Chen Bingrui, et al. True triaxial and acoustic emission experimental study of failure process of hard rock under excavating and supporting stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 27(Suppl 1): 500-507.
- [21] 杜坤. 真三轴卸载下深部岩体破裂特性及诱发岩爆机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
Du Kun. Study on the failure characteristics of deep rock and the mechanism of strainburst under true triaxial unloading condition[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [22] 陈景涛. 高地应力下硬岩本构模型的研究和应用 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
Chen Jingtao. Study on constitutive model for hard rock under high geostress condition and its applications in engineering[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [23] 苗金丽. 岩爆的能量特征实验分析[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
Miao Jinli. Experimental analysis on the energy characteristics of rockburst[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2009.
- [24] 周火明, 单治钢, 李维树, 等. 深埋隧洞大理岩卸载路径真三轴强度参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1524-1529.
Zhou Huoming, Shan Zhigang, Li Weishu, et al. Study of true triaxial strength parameters in unloading path of marbles in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1524-1529.
- [25] 李地元. 高应力硬岩脆性板裂破坏和应变型岩爆机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
Li Diyuan. Study on the spalling failure of hard rock and the mechanism of strainburst under high *in-situ* stresses[D]. Changsha: Central South University, 2010.

(责任编辑 吴晓丽)