

DOI: 10.11779/CJGE201707023

基于单轴剪切破坏的岩石 M-C 准则参数反演分析

杨仁树^{1,2}, 陈骏^{*1}, 方士正¹, 侯丽冬^{1,3}, 陈帅志¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 3. 青岛龙昊置业有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 基于岩石单轴压缩试验中出现的不同剪切破坏形式, 应用极限分析法推导出岩石单轴抗压强度与黏聚力及内摩擦角的关系式。结合矿区岩石单轴、三轴试验结果, 验证以岩石 M-C 准则参数计算单轴抗压强度关系式的正确性, 据此关系式获得的结果与试验结果差值在 6%~10% 之间。采用实例进行岩石黏聚力和内摩擦角的反演分析, 以岩石实际单轴剪切破坏形式和试验结果为依据, 两两结合联立计算得到岩石的黏聚力和内摩擦角。实例表明: 基于单轴剪切破坏形式和单轴抗压强度值计算岩石黏聚力和内摩擦角的方法准确, 具有实用价值, 该关系式也揭示了岩石试样破坏类型与岩石力学参数间的内在关系。

关键词: 岩石力学; 单轴抗压强度; 黏聚力; 内摩擦角; 剪切破坏

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)07-1351-06

作者简介: 杨仁树(1963-), 男, 安徽和县人, 教授, 博士, 主要从事爆炸动力学、矿井建设等方面的教学和科研工作。E-mail: yrs@cumtb.edu.cn。

Inversion analysis of M-C criterion parameters of rock based on uniaxial shearing failure

YANG Ren-shu^{1,2}, CHEN Jun¹, FANG Shi-zheng¹, HOU Li-dong^{1,3}, CHEN Shuai-zhi¹

(1. School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. Qingdao LongHao Properties Limited, Qingdao 266000, China)

Abstract: Based on different shear failure modes in rock uniaxial compression tests, the relationship among the uniaxial compressive strength, cohesion and internal friction angle is deduced by using the limit analysis method. According to the uniaxial and triaxial test results of rock, the correctness of the formula for calculating the uniaxial compressive strength based on the M-C criterion parameters is verified. The difference between the results obtained from the formula and the experimental ones is between 6% and 10%. The cohesive force and internal friction angle of rock are calculated by combining the actual uniaxial shear failure modes of rock and the test results. The results show that the proposed method for calculating the cohesion and internal friction angle based on the mode of uniaxial shear failure and the value of uniaxial compressive strength is accurate and practical. The formula also reveals the internal relationship between failure modes of rock and parameters of rock mechanics.

Key words: rock mechanics; uniaxial compressive strength; cohesion; internal friction angle; shear failure

0 引言

Mohr-Coulomb 强度理论在岩石力学中获得了最广泛的应用。M-C 准则可简单描述为: 如果岩石内部某个面上的正应力和剪应力分别为 σ 和 τ , 且满足:

$$\tau = C + \mu\sigma = c + \tan\varphi \cdot \sigma \quad (1)$$

则该面将发生破裂。式中 c 和 φ 分别代表岩石的黏聚力和内摩擦角, 其值可以通过不同围压下岩石试样的强度值拟合得到, 同时 Coulomb 准则给出了岩石破裂角 θ 的计算式 $\theta = \pi/4 + \varphi/2$ 。岩石强度试验中试样多为

剪切破坏形式, 强度与围压大致成线性关系, 且 M-C 准则形式简单应用方便, 因而岩石剪切参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 在力学分析中起了重要作用^[1-2]。

受岩石材料复杂微结构的影响, 岩石力学试验结

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51134025); 国家重点研发计划项目(2016YFC0600903); 高等学校学科创新引智计划“111计划”(B14006)

收稿日期: 2016-10-06

*通讯作者 (E-mail: cj0354@126.com)

果的离散性往往很大。目前获得岩石黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的方法主要是岩石试样的室内三轴试验。使用该方法应该注意的是M-C准则属于剪破坏理论,求解 c , φ 时应当先检查试验后的样品破坏形式是否为剪破坏。试样在外荷载作用下的变形、破坏过程的离散性通常导致需要多组试验结果进行统计分析,得到满足工程要求的参数会花费一定的精力和经费。但是基于剪切破坏形式的M-C准则已经解答了完整岩石何时破坏,如何破坏的问题。通过筛选岩石试样的破坏结果,研究破坏现象与更多参数间的关联性,由已获得参数计算更多参数不失为一种简单高效的办法^[3-4]。

1 岩石单轴压缩破坏形式分析

岩石试样的破坏形式是岩石破坏机理最直观的表现和重要特征。完整岩石的静态单轴压缩强度是指导工程岩体稳定分析和工程设计的最基本力学参数。大量的室内岩石试样单轴压缩试验出现的破坏类型,经过归一类比,可以大致分为5个类型^[5]:A类是以张为主的脆性弹射破坏;B类是脆性张剪破坏;C类是楔劈式脆性破坏;D类是以张为主兼有挤压柔性破坏;E类是软岩中的柔性张破坏和剪破坏。根据尤明庆等^[6]、黄达等^[7]关于岩石单轴破坏形式的研究,以剪切破坏形式为主的单轴压缩试验结果可以分为如图1所示的3种形式。

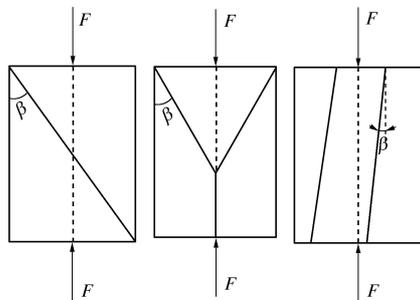


图1 以剪切破坏形式为主的单轴压缩试验结果

Fig. 1 Results of uniaxial compressive tests based on shear failure modes

(1) 岩样破坏为贯穿两端的主剪切破裂面。端面附近有少量局部拉剪裂纹。岩样的最终破坏是沿已有裂隙的方向扩展剪断。

(2) 岩样呈楔劈破坏形式。一侧端面为明显的圆锥破裂面,剩余部分在锥状楔体作用下劈开。随岩样内摩擦角不同,破裂面与水平面夹角不同。试样出现两端同时为圆锥破裂面的情况较少。

(3) 沿轴向的张拉劈裂破坏。在单轴试验的初始阶段,岩样中只有压应力和剪应力,并不存在拉应力,岩样最初的破坏是剪切破坏。在剪胀作用下,岩石内部产生垂直于轴向加载方向的拉应力。岩石的抗

拉强度远远小于抗压强度,张拉破坏随着剪切面的延伸沿轴向扩展。因此沿轴向的张拉劈裂破坏也认为是剪切滑移的宏观表现^[8]。

本文通过分析单轴压缩试验中以剪切破坏为主的3种岩石破坏形式及抗压强度,建立单轴试验结果与M-C准则参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 之间的理论公式。通过获得的参数公式结合多个矿区实际的岩石基本力学参数结果进行反演分析。

2 建立剪切破坏主导的单轴压缩力学模型

岩石强度是指岩石抵抗外力破坏的能力。对于完整岩体,其强度受岩石和微小结构面强度的控制。当岩石试样保持完整时,其强度大致等于岩石强度,如果岩石试样发生破坏或有潜在破坏可能时,其潜在破裂面上的应力处于极限平衡状态。

如果从外荷载对岩石试样做功的角度出发,岩石试样在外荷载下发生剪切变形,只有当外荷载对岩石做的功不小于岩石内部发生剪切变形消耗的功时,这种破坏才会发生。意味着,在单轴压缩试验中如果岩石发生剪切变形破坏时,作用在岩石上的外荷载 F 做的功大于岩石的内部能量耗损 W ,则岩石无法承受该外荷载 F 。那么在理想塑性的假设情况下,该外荷载 F 应不小于岩石的抗压强度。

陈惠发^[9]于1975年发展了以建立虚功方程为核心的极限分析法。其中极限分析上限定理是以一种理想的方式建立材料应力-应变关系,在一个假设的,且满足速度边界条件及应变与速度相容条件的变形模式中,基于小变形假设和虚功原理建立外功率等于所消耗的内功率的等式方程,并通过计算而得到的荷载作为该种破坏形式下的极限荷载上限值,并且此荷载不会小于实际破坏荷载。

当进行岩石强度试验时,所选用的试样必须是完整试样而不包含节理裂隙。国际岩石力学学会(ISRM)对岩石强度试验所使用的试样的形状、尺寸、加载率和湿度等均制定了标准。如岩石单轴抗压强度 σ_c 计算公式为

$$\sigma_c = \frac{P}{A}, \quad (2)$$

式中, P 为达到破坏时的最大轴向压力, A 为试样的横截面积。

以下,针对图1中以剪切破坏主导的单轴压缩试验结果,对 $R=50\text{ mm}$ 、 $h=100\text{ mm}$ 的标准圆柱试样进行分析。首先对于岩石材料的塑性剪切层的能量耗损率 D ,根据陈惠发^[9]已有的推导过程,简单复述如下:

假设剪切层的剪应变率 $\dot{\gamma} = \delta u / t$ 是均匀的, 正应变率 $\dot{\epsilon} = \delta v / t$ 。单位体积的能量耗损率为 $\tau \dot{\gamma} - \sigma \dot{\epsilon}$ (取压缩为正) 该剪切层的体积在数值上等于 t , 得到

$$D = (\tau \dot{\gamma} - \sigma \dot{\epsilon}) \cdot t = \tau \delta u - \sigma \delta v, \quad (3)$$

或

$$D = \delta u (\tau - \sigma \tan \varphi). \quad (4)$$

由于塑性层满足库仑屈服准则 (1), 故而

$$D = c \delta u, \quad (5)$$

该方程表明: 岩石剪切破坏面的单位面积能量耗损率是黏聚力 c 与剪切面的切向速度的简单乘积, 即与层厚 t 无关。

(1) 当岩样破坏为贯穿两端的主剪切破裂面。在三维空间中破裂面为长轴 $a = \sqrt{R^2 + h^2}$ 、短轴 $b = R$ 的椭圆形剪切面。由Coulomb强度准则可知, 在发生剪切变形时, 剪胀作用要求当剪切面切向速度变化为 δu , 界面间的分离速度 $\delta v = \delta u \tan \varphi$, $\varphi \neq 0$ 一定存在。试样破坏的虚速度关系如图2 (a) 所示。

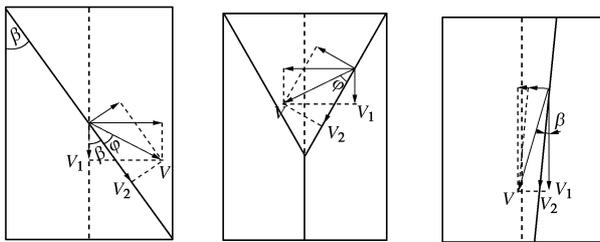


图2 3种破坏形式下的速度关系图

Fig. 2 Velocity profiles of three failure modes

椭圆形破裂面面积:

$$S = \frac{1}{4} \pi a b = \frac{1}{4} \pi R \sqrt{R^2 + h^2}. \quad (6)$$

(2) 当试样破坏为圆锥剪切面和张拉裂缝, 理想条件下岩石破裂面与主应力方向夹角 $\beta = \pi/4 - \varphi/2$ 。三维空间中圆锥剪切面底面半径为 $R/2$, 母线长 $l = 0.5R \tan(\pi/4 + \varphi/2)$ 。试样破坏的虚速度关系如图2 (b) 所示。

圆锥破裂面面积:

$$S = \frac{1}{4} \pi R^2 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right). \quad (7)$$

(3) 当试样破坏为沿轴向的张拉破坏, 在静态加载条件下, 破裂面极少与加载方向完全平行, 一般与加载方向偏斜在 10° 以内, 在计算沿轴向张拉破坏的破裂面面积时本文稍作简化, 认为当仅有一条贯穿裂纹时, 三维空间中该破裂面为 $a = h$, $b = R$ 的矩形面, 且与加载方向夹角等于 10° 。试样破坏的虚速度关系如图2 (c) 所示。

沿轴向张拉破裂面面积:

$$S = a b = h R. \quad (8)$$

最终在剪切破坏主导的不同破裂形式下, 建立外

荷载做功与岩样内部能量损耗率相等的虚功方程。

外荷载对岩样的功率等于外荷载值与沿荷载方向的速度分量:

$$P = F v \cos(\varphi + \beta). \quad (9)$$

岩石的内部能量损耗率由式 (5) 代入岩石破坏面面积可得:

$$P' = c S v \cos \varphi. \quad (10)$$

令外荷载做功等于内部能量损耗率可得:

$$F = \frac{c S \cos \varphi}{\cos(\varphi + \beta)}. \quad (11)$$

联立式 (2)、(11) 可得:

$$\sigma_c = \frac{c S \cos \varphi}{A \cos(\varphi + \beta)}. \quad (12)$$

3 基于 M-C 准则参数计算岩石强度的实例

此前的方法中, 苏承东等^[10]通过对同一试样逐级提高围压的方法, 得到不同围压下试样的强度, 依次回归得到Coulomb强度曲线; 张年学等^[11]的近似方法可用三轴数据计算单块样的抗压与抗拉强度, 以及用三轴试验单试样计算 c , φ 值^[4]。毕竟三轴试验耗时、复杂, 本文采用一组单轴试验通过判断试样的破坏形式即可计算试样的 c , φ 值, 这将大大减轻工作量。首先, 采用多组单、三轴试验结果正演计算这种方法的准确度。

验证试样取自张集煤矿西二1煤采区14131首采工作面, 1煤顶板为巨厚层状砂岩, 厚度为17.53~44.72 m, 平均27.9 m, 属于巨厚坚硬顶板。分别在14131工作面轨道顺槽H23点后2.4 m处 (#1钻孔) 和后16.7 m处 (#2钻孔), 以及H22点前41 m处 (#4钻孔) 和前26 m (#5钻孔) 处4个地点各施工一个顶板取芯钻孔。表1所示是4种岩石7组试样的单轴抗压强度 σ_c 、黏聚力 c 及内摩擦角 φ 的试验结果和由 c , φ 值计算得到的岩石单轴强度值汇总表。

由表1中7组试样计算结果看, 采用区分岩石剪切破坏形式的以功率形式表达的岩石力学参数的关系式, 获得的结果与试验直接得到的结果非常接近。通过横向对比表明: 当以单剪切面力学模型计算时, 试样单轴抗压强度略大于试验结果, 两者差值基本在10%附近; 当以圆锥剪切面力学模型计算时, 试样的计算结果略小于试验结果, 两者差值同样处于10%的水平; 当以轴向张拉破坏模型计算时, 部分试样的计算结果差值在10%水平, 部分试样的结果则相差较大, 这是因为文中的计算是统一以一条轴向贯穿破裂面为标准, 实际的试样破坏并不完全只有一条贯穿面, 故两者差距较大。

对每组试样的纵向对比可以发现：对于同一组岩样的抗压强度，总能找到相应的破裂面及计算方式与实际对应：①当试样大多数为图3中单剪切面破坏时，如表1中S4~S7，岩石单轴抗压强度试验值与单剪切面计算值差值在6%以内，而另两种计算方法产生的差值则相对较大。②当试样大多数为图4中锥面破坏时，如表1中S1~S2，岩样强度试验结果与锥面计算结果差值在6%以内，另外两种则相差10%和35%。③当试样呈图5中轴向张拉破坏，S3组的计算结果相对准确。

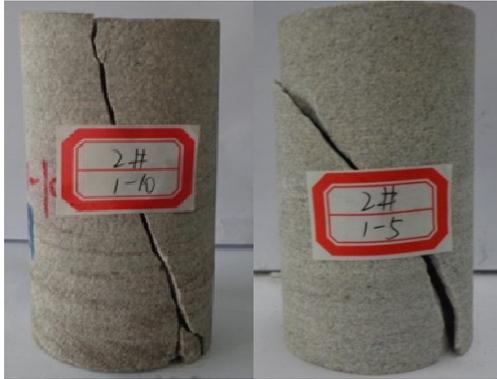


图3 岩样的标准单剪切面破坏形式

Fig. 3 Standard modes of single shear failure of rock specimens

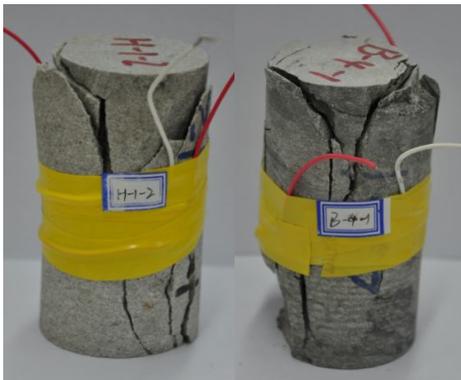


图4 岩样的标准圆锥面破坏形式

Fig. 4 Standard conical failure modes of rock specimens



图5 岩样的标准轴向张拉破坏形式

Fig. 5 Standard modes of axial tensile failure of rock specimens

对于取自同一钻孔，彼此连续的岩样，其单轴破坏方式是相似的，通过单轴试验实现对岩石M-C准则参数的预测，由于岩石试样破裂面的不规则以及其他一些试验中不可控的因素，在合理差值范围内的试验结果，对于岩土工程的实际应用应可以满足要求。

4 M-C 准则参数反演分析的实例

在单轴、三轴试验结果已知情况下，前文对单轴剪切破坏形式主导下的岩石黏聚力 c 和内摩擦角 φ 以及岩石单轴抗压强度间建立了关系式。如果仅有单轴试验过程和结果的话，要获得岩石的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 可通过反演分析得到。因此，为验证反演计算公式的准确性，在实验室对贾郭煤矿钻孔岩芯进行了岩石单轴抗压强度试验。本次试验的岩芯取自山西省沁源县贾郭煤矿不同层位钻孔，包含了#1煤层至#9、#10、#11煤层不同层位的煤、岩，采深大致从-50~-300 m。

按照《工程岩体试验方法标准GB/T50266—99》的要求，在实验室将本批共6箱岩芯加工成了50 mm×100 mm的圆柱形标准试样共62个，包含了泥岩、细

表1 单、三轴试验结果与本文计算结果的比较

Table 1 Comparison between experimental and calculated results

岩石种类	力学参数试验结果			本文计算结果					
	c	$\varphi / (^\circ)$	σ_c	σ_{c1}	$\Delta_1 / \%$	σ_{c2}	$\Delta_2 / \%$	σ_{c3}	$\Delta_3 / \%$
细砂岩S1	18.75	48.60	99.12	108.25	9.20	92.83	-6.30	60.63	-38.80
#1钻孔 细砂岩(含泥质包体)S2	19.47	47.13	92.84	105.47	13.60	92.32	-0.50	62.18	-33.00
泥质粉砂岩S3	19.30	14.00	48.65	55.12	13.30	38.93	-20.00	52.23	7.30
细砂岩S4	31.96	27.72	101.44	108.36	6.80	90.55	-10.70	91.13	-10.20
#2钻孔 泥质粉砂岩S5	9.80	28.66	31.62	33.71	6.60	28.43	-10.10	28.06	-11.30
中粗砂岩S6	11.72	44.71	56.48	58.00	2.60	51.86	-8.20	36.73	-35.00
#5钻孔 细砂岩S7	26.52	37.59	107.18	107.18	0.50	96.69	-9.70	79.0	-25.90

注：* Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 为计算值与试验值的差值 $\Delta\sigma_{c1}$, $\Delta\sigma_{c2}$, $\Delta\sigma_{c3}$ 与试验值 σ_c 的百分比。

表 2 中粒砂岩 M-C 准则参数反演结果

Table 2 Inversion results of M-C criterion parameters of medium grain sandstone

破坏形式	R /m	h /m	σ _c /MPa	①+②		②+③		①+③	
				c /MPa	φ /(^o)	c /MPa	φ /(^o)	c /MPa	φ /(^o)
①	0.05	0.1	95.8	32.09	18.02	—	—	—	—
②			71.5			—	—	—	—
③			85			—	—	30.80	19.68

粒砂岩、中粒砂岩、粉砂岩、石灰岩以及含铝泥岩 6 种不同岩性样品。采用长春生产的 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机, 在常温下进行试验, 加载方式为轴向位移控制加载, 加载速率 φ 50 mm×100 mm 试件 0.07 mm/min。由于篇幅所限本文以 #5 底板中粒砂岩为典型进行计算。

对单轴压缩破坏试样分类并结合获得的单轴压缩结果 (见表 2) 进行分析, #5 底板中粒砂岩的破坏涵盖了以剪切破坏为主的 3 种形式, 如图 6 所示。为获得中粒砂岩 c, φ 值, 需对 3 种破坏形式中任意两种进行联立计算。结合 MATLAB 数值软件进行计算, 所得结果见表 2 所示。



(a) 单剪面破坏形式 (b) 锥面破坏形式 (c) 轴向张拉破坏形式

图 6 中粒砂岩单轴压缩破坏结果

Fig. 6 Results of uniaxial compression failure of medium grain sandstone

由表可见, 中粒砂岩的黏聚力在 30~32 MPa 之间, 内摩擦角在 18°~22° 范围内。采用不同破坏形式计算得到的岩石剪切参数变化不大, 说明只要与岩样真实的破坏形式对应, 采用式 (12) 获得的岩石黏聚力和内摩擦角是准确可靠的。在进行岩石剪切参数反演分析时, 除个别试样破坏形式不可靠需剔除外, 其余试样几乎都可以用作计算, 单轴试样越多越能确定岩石 c, φ 的准确值。表 1, 2 的计算结果可以证明用前文所述的基于剪切破坏形式计算岩石 M-C 准则参数的方法是可信的。

(1) 当发生图 6 (a) 所示单剪面破坏时, 试样的单轴抗压强度计算公式为

$$\sigma_c = \frac{cS \cos \varphi}{A \cos(\varphi + \beta)} = \frac{c \frac{1}{4} \pi R \sqrt{R^2 + h^2} \cos \varphi}{\frac{1}{4} \pi R^2 \cos(\varphi + 26.56^\circ)} = \frac{\sqrt{5} c \cos \varphi}{\cos(\varphi + 26.56^\circ)} \quad (13)$$

(2) 当发生图 6 (b) 所示锥面破坏时, 试样的单轴抗压强度计算公式为

$$\sigma_c = \frac{cS \cos \varphi}{A \cos(\varphi + \beta)} = \frac{c \frac{1}{4} \pi R^2 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cos \varphi}{\frac{1}{4} \pi R^2 \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cos \varphi}{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (14)$$

(3) 当发生图 6 (c) 所示张拉破坏时, 试样的单轴抗压强度计算公式为

$$\sigma_c = \frac{cS \cos \varphi}{A \cos(\varphi + \beta)} = \frac{cRh \cos \varphi}{\frac{1}{4} \pi R^2 \cos(\varphi + 10^\circ)} = \frac{8c \cos \varphi}{\pi \cos(\varphi + 10^\circ)} \quad (15)$$

5 结 语

黏聚力和内摩擦角是最常见的岩石力学参数, 并且通过岩石的三轴压缩试验可以获得。诸多的研究证明岩石的力学性质与变形破坏行为之间有着内在的联系。本文基于岩石单轴剪切破坏形式建立了岩石黏聚力与内摩擦角和单轴抗压强度之间的关系式。通过区分岩石单轴剪切破坏形式, 考虑岩石在发生剪切破坏时外荷载对岩石做功一定不小于岩石内部发生的能量损耗, 得到了以速率形式表达的岩石功率平衡的关系式 (式 (12)) 在已知岩石单轴抗压强度的条件下, 对岩石黏聚力 c 和内摩擦角 φ 进行反演分析。在多组岩石试样的验证下, 证实采用上述公式计算得到的参数值与三轴试验实测的结果差值在 10% 以内, 说明在岩石单轴剪切破坏形式主导下的岩石 M-C 准则参数的计算方法是正确的, 也说明岩石更多参数间的内在关系值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 席道瑛, 徐松林. 岩石物理学基础[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012. (XI Dao-ying, XU Song-lin. Foundations of rock physics[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese))
- [2] 尤明庆. 完整岩石的强度和强度准则[J]. 复旦学报(自然科学版), 2013, 52(5): 569 - 582. (YOU Ming-qing. Strength and strength criteria for intact rocks[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2013, 52(5): 569 - 582. (in Chinese))
- [3] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [4] 张年学, 盛祝平, 李 晓, 等. 岩石泊松比与内摩擦角的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2599 - 2609. (ZHANG Nian-xue, SHENG Zhu-ping, LI Xiao, et al. Study of relationship between Poisson's ratio and angle of internal friction for rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2599 - 2609. (in Chinese))
- [5] 郭 志. 实用岩体力学[M]. 北京: 地震出版社, 1996. (GUO Zhi. Rock mass mechanics[M]. Beijing: Seismological Press, 1996. (in Chinese))
- [6] 尤明庆, 华安增. 岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 292 - 296. (YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Fracture of rock specimen and decrement of bearing capacity in uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechnaics and Engineering, 1998, 17(3): 292 - 296. (in Chinese))
- [7] 黄 达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245 - 255. (HUANG Da, HUANG Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 245 - 255. (in Chinese))
- [8] 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程[M]. 北京: 地质出版社, 2000. (YOU Ming-qing. Strength and failure process of rock specimen[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000. (in Chinese))
- [9] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975.
- [10] 苏承东, 尤明庆. 单一试样确定大理岩和砂岩强度参数的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3055 - 3058. (SU Cheng-dong, YOU Ming-qing. Determination method of strength parameters for sandstone and marble with one specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3055 - 3058. (in Chinese))
- [11] 张年学, 李守定, 李 晓. 用岩块抗剪强度估算抗压与抗拉强度的方法[C]// 第 3 届全国岩土工程与工程学术大会会议. 成都: 四川科学技术出版社, 2009. (ZHANG Nian-xue, LI Shou-ding, LI Xiao. New method for estimating compressive and tensile strengths using the shear strength of a rock block[C]// Proceedings of the 3rd National Conference of Geo-Engineering. Chengdu: Sichun Science and Technology Press, 2009. (in Chinese))