

文章编号:1673-2049(2011)04-0039-04

# 岩体非线性特征描述的数值实现及其试验验证

钟 正 强

(长沙理工大学 土木与建筑学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为了采用 Hoek-Brown 非线性准则描述岩体特征,提出了 Hoek-Brown 非线性破坏准则的数值实现方法,并对岩体进行了三轴压缩试验的数值模拟,验证了数值计算方法的可靠性,分析了非线性破坏准则中各参数对剪切强度参数的影响。结果表明:通过理论推导可确定 Mohr-Coulomb 准则中的剪切强度参数与 Hoek-Brown 准则参数之间的关系;随着地质强度指标  $G_{SI}$  的增大,岩体的剪切强度参数  $c$  和  $\varphi$  均不断增大,粘结力较内摩擦角对岩体地质强度指标的变化更加敏感;二者随完整岩石的岩体常数  $m_i$  的变化幅度均不大,地质强度指标  $G_{SI}$  对岩体强度的影响大于  $m_i$ 。

**关键词:**岩体;Hoek-Brown 准则;非线性破坏准则;粘结力;内摩擦角

**中图分类号:**TU457 **文献标志码:**A

## Numerical Realization and Its Test Validation for Nonlinear Characteristic of Rock Mass

ZHONG Zheng-qiang

(School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology,  
Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** In order to describe the characteristics of rock mass based on the nonlinear failure criterion Hoek-Brown criterion, the numerical realization method for the nonlinear failure criterion Hoek-Brown criterion was proposed. The numerical simulation of the tri-axial compressive test for rock mass was carried out, and the reliability of numerical calculation method was validated. The influences of each parameter in the nonlinear failure criterion on the shear strength parameters were analyzed. Results show that the relations between the shear strength parameters of Mohr-Coulomb criterion and Hoek-Brown criterion parameters can be determined by the theoretical derivation; with the increase of geological strength index  $G_{SI}$ , the shear strength parameters  $c$  and  $\varphi$  of rock mass increase gradually, and the effect of cohesion to the geological strength index of rock mass is more sensitive to that of friction angle; but their variations with rock mass parameter of integrity rock  $m_i$  are not large, and the geological strength index  $G_{SI}$  has larger impact on the strength of rock mass than  $m_i$ .

**Key words:** rock mass; Hoek-Brown criterion; nonlinear failure criterion; cohesion; friction angle

## 0 引 言

目前,对于岩体强度特征描述的研究大部分采

用的是 Mohr-Coulomb 线性准则<sup>[1-3]</sup>,大部分软件也都基于 Mohr-Coulomb 准则,该准则采用粘结力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  来表征岩体的强度;但一些研究表明,

收稿日期:2011-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(50878212)

作者简介:钟正强(1968-),男,湖南长沙人,副教授,工学博士,E-mail:zzq6010@sina.com。

Mohr-Coulomb 准则对岩体强度的描述有一定局限性<sup>[4-5]</sup>,如不能解释低应力区对岩体的影响而只能反映岩体的线性破坏特征等。因此,Hoek 和 Brown 在对大量岩石抛物线型破坏包络线的系统研究后提出了 Hoek-Brown 经验破坏准则<sup>[6]</sup>,该准则能反映岩体的固有特点和非线性破坏特征以及岩石强度、结构面组数、所处应力状态对岩体强度的影响。但为了能够在数值计算软件中进行计算,并在实际工程中直观确定岩体的剪切强度参数,需要将 Hoek-Brown 参数转换为 Mohr-Coulomb 参数,即剪切强度参数  $c$  和  $\varphi$ 。因此,本文中笔者首先提出了 Hoek-Brown 非线性破坏准则的数值实现方法以及实施过程,并对岩体进行了单轴压缩试验和三轴压缩试验的数值模拟,验证了数值计算方法的可靠性;分析了非线性破坏准则中各参数对剪切强度参数的影响,为工程实践和科学研究提供参考。

## 1 Hoek-Brown 非线性准则

岩石破坏判据除了适用于结构完整且各向同性的均质岩石外,还应适用于碎裂岩体及各向异性的非均质岩体等<sup>[7-8]</sup>,在对大量岩石抛物线型破坏包络线的系统研究后,Hoek 和 Brown 提出了 Hoek-Brown 经验破坏准则,其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b \sigma_{ci} \sigma_3 + s \sigma_{ci}^2)^a \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$  为岩体破坏时的最大主应力; $\sigma_3$  为作用在岩体上的最小主应力; $\sigma_{ci}$  为完整岩石单轴抗压强度; $m_b$  为岩体常数,与完整岩石的岩体常数  $m_i$  有关; $s$ ,  $a$  为取决于岩体特性的系数。

这些参数均可表述为地质强度指标  $G_{SI}$  的函数,具体形式如下

$$m_b = m_i e^{(G_{SI}-100)/(28-14D)} \quad (2)$$

$$s = e^{(G_{SI}-100)/(9-3D)} \quad (3)$$

$$a = 1/2 + (e^{-G_{SI}/15} - e^{-20/3})/6 \quad (4)$$

式中: $D$  为岩体弱化因子,与岩体的开挖方式及扰动程度有关,取值为  $0 \sim 1$ ,  $0$  代表未扰动状态。

通过对比 Hoek-Brown 准则和 Mohr-Coulomb 准则,并采用拟合技术,可得到二者参数之间的关系为

$$\varphi = \arcsin \frac{f_b f_c}{2f_a + f_b f_c} \quad (5)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} f_c [s(1+2a) + (1-a)m_b \sigma_{3n}]}{f_a \sqrt{1 + f_b f_c / f_a}} \quad (6)$$

式中: $f_a = (1+a)(2+a)$ ;  $f_b = 6am_b$ ;  $f_c = (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}$ ;  $\sigma_{3n}$  为法向应力,  $\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3\max}}{\sigma_{ci}}$ ;  $\sigma_{3\max}$  为最大围

岩压力,  $\sigma_{3\max} = 0.72 \sigma_{cm} \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$ ,  $\gamma$  为岩体重度,  $H$  为边坡高度,  $\sigma_{cm}$  为岩体强度,  $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} [m_b + 4s - a(m_b - 8s)(m_b/4 + s)^{a-1}] / [2(1+a)(2+a)]$ 。

## 2 数值实现

在数值计算过程中,首先采用弹性增量理论,计算应力和变形的增量表达式<sup>[9]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= \alpha_1 \Delta \epsilon_1^e + \alpha_2 (\Delta \epsilon_2^e + \Delta \epsilon_3^e) \\ \Delta \sigma_2 &= \alpha_1 \Delta \epsilon_2^e + \alpha_2 (\Delta \epsilon_1^e + \Delta \epsilon_3^e) \\ \Delta \sigma_3 &= \alpha_1 \Delta \epsilon_3^e + \alpha_2 (\Delta \epsilon_1^e + \Delta \epsilon_2^e) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $\alpha_1 = K + 4G/3$ ;  $\alpha_2 = K - 2G/3$ ,  $K$  为体积模量,  $G$  为剪切模量;  $\Delta \epsilon_i^e$  为  $i$  方向的弹性应变增量,  $i = 1, 2, 3$  分别表示 3 个主应力方向;  $\Delta \sigma_i$  为  $i$  方向上的应力增量。

由弹性增量理论可得估算应力分量  $\sigma_i^1$

$$\sigma_i^1 = \sigma_i^0 + \Delta \sigma_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

式中: $\sigma_i^0$  为初始应力。

根据塑性状态下的应变增量、弹性应变增量和塑性应变增量之和,推导出了新的应力分量  $\sigma_1^N, \sigma_2^N, \sigma_3^N$  分别为

$$\sigma_1^N - \sigma_1^0 = \alpha_1 (\Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_1^p) + \alpha_2 (\Delta \epsilon_2 + \Delta \epsilon_3 - \Delta \epsilon_3^p) \quad (9)$$

$$\sigma_2^N - \sigma_2^0 = \alpha_1 \Delta \epsilon_2 + \alpha_2 (\Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_1^p + \Delta \epsilon_3 - \Delta \epsilon_3^p) \quad (10)$$

$$\sigma_3^N - \sigma_3^0 = \alpha_1 (\Delta \epsilon_3 - \Delta \epsilon_3^p) + \alpha_2 (\Delta \epsilon_1 + \Delta \epsilon_2 - \Delta \epsilon_1^p) \quad (11)$$

式中: $\Delta \epsilon_i$  为  $i$  方向上的应变增量;  $\Delta \epsilon_i^p$  为  $i$  方向上的塑性应变增量。

联立式(7)~(11)得

$$\sigma_1^N = \sigma_1^1 - \alpha_1 \Delta \epsilon_1^p - \alpha_2 \Delta \epsilon_3^p \quad (12)$$

$$\sigma_2^N = \sigma_2^1 - \alpha_2 (\Delta \epsilon_1^p + \Delta \epsilon_3^p) \quad (13)$$

$$\sigma_3^N = \sigma_3^1 - \alpha_1 \Delta \epsilon_3^p - \alpha_2 \Delta \epsilon_1^p \quad (14)$$

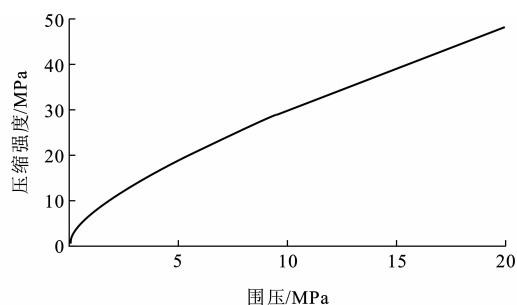
对于位于屈服面上的应力点,满足屈服函数  $f$

$$f = \sigma_1^N - \sigma_3^N - \sigma_{ci} (m_i \frac{\sigma_3^N}{\sigma_{ci}} + s)^a = 0 \quad (15)$$

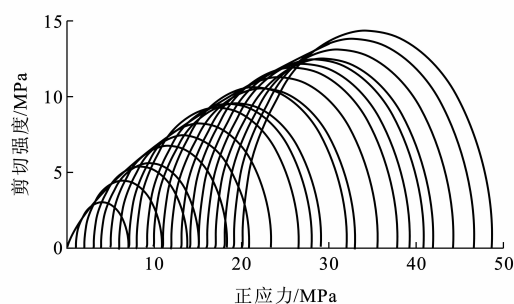
## 3 试验验证

### 3.1 模型参数的建立

根据第 2 节中对于数据的拟合方法,通过试验数据的拟合(图 1),得到 Hoek-Brown 准则参数为:  $D = 0.1$ ,  $m_i = 49.935$ ,  $G_{SI} = 40.23$ ,  $\sigma_{ci} = 7.0$  MPa,  $m_b = 5.279$ ,  $s = 0.0010$ ,  $a = 0.511$ , 变形模量  $E_m = 1.432$  GPa, 岩体重度  $\gamma = 24.0$  kN  $\cdot$  m<sup>-3</sup>; 等效 Mohr-Coulomb 准则参数: 粘结力  $c = 2.472$  MPa, 内摩擦角  $\varphi = 21.19^\circ$ 。



(a) 主应力形式



(b) 剪切应力形式

图 1 试验数据的拟合曲线

Fig. 1 Fitting Curves for Test Data

### 3.2 数值方法的试验验证

作为著名的岩体强度准则,各国学者对 Hoek-Brown 准则的研究和讨论甚多<sup>[10-13]</sup>,把它与经典强度理论结合进行深入研讨,对加深该准则及其参数物理学意义的理解无疑意义重大。本文中建立的数值计算模型(图 2)高为 10 cm,直径为 5 cm。模型单位数为 5 120,节点数为 5 397。边界条件为:底部固定约束,在试样周围施加围压,试样上部施加位移荷载,每步荷载大小为 0.01 mm。不同围压情况下,试样的压缩强度如图 3 所示。从图 3 可以看出:试验数据随着围压的变化呈现出非线性特征,当围压为 8~15 MPa 时, Mohr-Coulomb 准则和试验数据拟合较好,但当围压小于 8 MPa 以及大于 15 MPa 时,二者之间的差别较大;而 Hoek-Brown 准则能体现试样压缩强度随围压变化的非线性特征,其与试验数据之间差别小于 Mohr-Coulomb 准则和试验数据之间的差别,从而验证了 Hoek-Brown 数值计算方法的可靠性。

### 3.3 参数影响分析

假设某岩体完整岩石的单轴压缩强度  $\sigma_{ci} = 85.0$  MPa,  $m_b = 1.40$ ,  $s = 0.0022$ ,  $a = 0.5$ , 根据式 (5), (6), 可得到待定系数  $A = 0.50$ ,  $\varphi = 30.12^\circ$ ,  $c = 3.27$  MPa。为进一步得到  $G_{SI}$ ,  $m_i$  对粘结力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的影响, 分别在区间  $[10, 90]$  内改变  $G_{SI}$ , 在区间  $[5, 30]$  内改变  $m_i$ , 得到粘结力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$

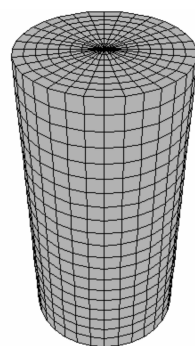


图 2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical Calculation Model

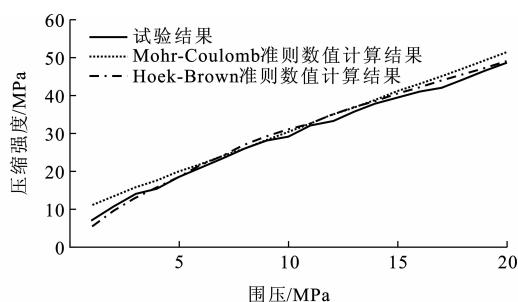
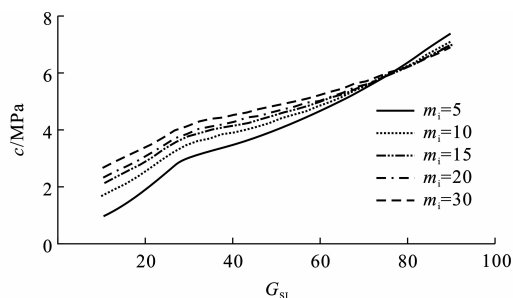


图 3 数值计算结果与试验结果的比较

Fig. 3 Comparisons for Numerical Calculation

### Results and Test Results

的变化规律,如图 4,5 所示。从图 4,5 可以看出:随着地质强度指标  $G_{SI}$  的增大,岩体的剪切强度参数  $c$  和  $\varphi$  均不断增大,并且  $c$  随  $G_{SI}$  变化曲线的斜率不断增大,而  $\varphi$  随  $G_{SI}$  变化曲线的斜率却不断减小,说明粘结力  $c$  较内摩擦角  $\varphi$  对岩体地质强度指标的变化更加敏感;而二者随  $m_i$  的变化幅度均不大,可见,地质强度指标  $G_{SI}$  对岩体强度的影响大于  $m_i$ 。

图 4 不同  $G_{SI}$  和  $m_i$  对应的粘结力Fig. 4 Cohesions for Different  $G_{SI}$  and  $m_i$ 

## 4 结 语

(1)提出了 Hoek-Brown 非线性破坏准则的数值实现方法,并对岩体进行了三轴压缩试验的数值模拟,验证了数值计算方法的可靠性。

(2)随着地质强度指标  $G_{SI}$  的增大,岩体的剪切

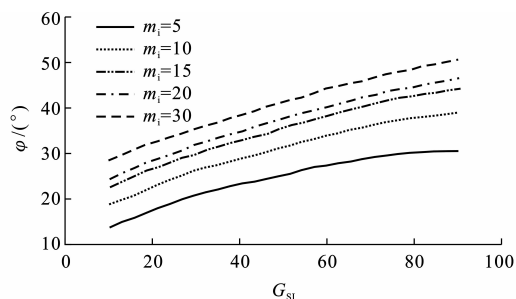


图5 不同  $G_{SI}$  和  $m_i$  对应的内摩擦角

Fig. 5 Friction Angles for Different  $G_{SI}$  and  $m_i$

强度参数  $c$  和  $\varphi$  均不断增大, 粘结力  $c$  较内摩擦角  $\varphi$  对岩体地质强度指标的变化更加敏感; 二者随  $m_i$  的变化幅度均不大, 地质强度指标  $G_{SI}$  对岩体强度的影响大于  $m_i$ 。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] FRALDI M, GUARRACINO F. Limit Analysis of Collapse Mechanisms in Cavities and Tunnels According to the Hoek-Brown Failure Criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 665-673.
- [2] PAN P Z, FENG X T, HUDSON J A. Study of Failure and Scale Effects in Rocks Under Uniaxial Compression Using 3D Cellular Automata[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 674-685.
- [3] JAISWAL A, SHRIVASTVA B K. Numerical Simulation of Coal Pillar Strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 779-788.
- [4] 宋建波, 刘唐生, 于远忠. Hoek-Brown 准则在主应力平面表示形式的讨论[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 86-87, 113.  
SONG Jian-bo, LIU Tang-sheng, YU Yuan-zhong. Discussion of Hoek-Brown Strength Criterion Expressed with Principal Stress Plane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 86-87, 113.
- [5] 巫德斌, 徐卫亚. 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 89-93.
- WU De-bin, XU Wei-ya. Hoek-Brown Criterion-based Study on Mechanical Parameters of Excavated Slope Rock Masses[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(1): 89-93.
- [6] HOEK E, BROWN E T. Practical Estimates of Rock Mass Strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 34(8): 1165-1186.
- [7] 林杭, 曹平, 赵延林, 等. 强度折减法在 Hoek-Brown 准则中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1219-1224.  
LIN Hang, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. Application of Strength Reduction Method in Hoek-Brown Criterion[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(6): 1219-1224.
- [8] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 基于广义 Hoek-Brown 准则的边坡安全系数间接解法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1147-1151.  
LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, et al. The Indirect Calculation Method for the Safety Factor of Slope Based on Generalized Hoek-Brown Criterion[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1147-1151.
- [9] Itasca Consulting Group. Theory and Background [R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2002.
- [10] YANG X L, LI L, YIN J H. Stability Analysis of Rock Slopes with a Modified Hoek-Brown Failure Criterion[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(2): 181-190.
- [11] YANG X L, YIN J H. Slope Stability Analysis with Nonlinear Failure Criterion[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(3): 267-273.
- [12] PANTELIDIS L. Rock Slope Stability Assessment Through Rock Mass Classification Systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 315-325.
- [13] ALIREZA B, LANRU J. Stress Effects on Permeability in a Fractured Rock Mass with Correlated Fracture Length and Aperture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1320-1334.