

基于非线性破坏准则的岩体剪切强度参数确定方法

钟正强^{1,2}, 彭振斌¹, 彭文祥¹

1. 中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083

2. 长沙理工大学土木与建筑学院, 长沙 410004

摘要 剪切强度预测是岩体稳定性分析的重要内容, 为了采用 Hoek-Brown 非线性准则描述岩体的剪切强度参数, 利用理论推导和数值拟合的方法, 探讨了 Hoek-Brown 参数到 Mohr-Coulomb 参数的转换过程, 并分析了非线性准则中各个参数对于剪切强度参数的影响。结果表明, 通过大量数据拟合回归的方法可确定剪切强度参数与 Hoek-Brown 准则参数之间的关系; 随着地质强度指标 GSI 的增大, 岩体的剪切强度参数 c 和 ϕ 均不断增大, 黏结力较内摩擦角对于岩体地质强度指标的变化更为敏感; 二者随 m_i 的变化幅度均不大, GSI 对于岩体强度的影响大于 m_i 。

关键词 岩体; 剪切强度; 参数确定; 非线性破坏准则

中图分类号 TU821

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)15-0064-03

Determination of the Shear Strength Parameters of Rock Mass Based on Nonlinear Failure Criterion

ZHONG Zhengqiang^{1,2}, PENG Zhenbin¹,
PENG Wenxiang¹

1. School of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2. Department of Architecture and Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China

Abstract The prediction of the shear strength is an important part in the analysis for rock mass stability. The shear strength parameters of the rock mass are described by the Hoek-Brown nonlinear failure criterion in this paper. And a transformation procedure from the Hoek-Brown parameters to the Mohr-Coulomb parameters is proposed. In the transformation procedure, the theoretical analysis and data fitting method are used. The influences of each parameter in the nonlinear failure criterion on the shear strength parameters are analyzed. It is shown that the relationship

between the shear strength parameters and Hoek-Brown criterion parameters can be determined by fitting a large amount of data. With the increase of geological strength index GSI, the shear strength parameters c and ϕ increase gradually. The effect of cohesion on the rock geological strength index is more sensitive to the friction angle. But their variations with the m_i are not that large, which indicates that the GSI has a larger effect on the rock strength than on m_i . The results can give some guidance for the real practice.

Keywords rock mass; shear strength; parameter determination; nonlinear failure criterion

0 引言

强度预测是岩体稳定性分析的重要内容, 目前大部分的研究均采用 Mohr-Coulomb 线性准则描述岩体的破坏^[1-3], 大部分软件也都基于 Mohr-Coulomb 准则。该准则采用黏结力 c 和内摩擦角 ϕ 表征岩体的强度。有研究表明, Mohr-Coulomb 准则对岩体强度的描述有一定局限性^[4-5], 如不能解释低应力区对于岩体的影响、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^[6-8]。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

收稿日期: 2009-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878212)

作者简介: 钟正强, 副教授, 研究方向为隧道稳定性的分析与评价, 电子信箱: zzzqslg@126.com

度参数,需将 Hoek-Brown 参数转换为 Mohr-Coulomb 参数,即剪切强度参数黏结力 c 和内摩擦角 ϕ 。因此,本文首先探讨了基于 Hoek-Brown 准则的岩体剪切强度参数确定方法,然后分析了非线性准则中各个参数对于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。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^[6-11]

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

式中, σ_1 为岩体破坏时的最大主应力; σ_3 为作用在岩体上的最小主应力; σ_{ci} 为完整岩石单轴抗压强度; m_b 岩体常数,与完整岩石的岩体强度指标 m_i 有关; s, a 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 GSI 的函数,具体形式为^[6-11]

$$m_b = m_i e^{[(GSI-100)/(28-14D)]} \quad (2)$$

$$s = e^{[(GSI-100)/(9-3D)]} \quad (3)$$

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

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 0~1, 0 代表未扰动状态。

2 剪切强度参数确定

Mohr-Coulomb 准则可采用正应力 σ_n 和剪应力 τ 的形式表示为

$$\tau = A \sigma_{ci} \left(\frac{\sigma_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)^B \quad (5)$$

也可采用最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 表示为

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k \sigma_3 \quad (6)$$

其中, σ_{cm} 为岩体的单轴压缩强度, k 为 σ_1 和 σ_3 关系曲线的斜率, σ_{tm} 为岩体的拉伸强度。

另外,黏结力 c 和内摩擦角 ϕ 可以通过下式计算:

$$\sin \phi = \frac{k-1}{k+1} \quad (7)$$

$$c = \frac{\sigma_{cm}(1-\sin \phi)}{2 \cos \phi} \quad (8)$$

由于 Hoek-Brown 非线性准则是经验准则,因此并不存在 Mohr-Coulomb 准则与 Hoek-Brown 准则之间的直接对应关系,但可通过曲线拟合的方式得到二者之间的关系。即利用 Hoek-Brown 准则产生一系列三轴压缩试验的 σ_1 和 σ_3 , 然后通过 Mohr-Coulomb 公式进行拟合,从而得到相应的 σ_{cm} 和 k , 进一步得到黏结力和内摩擦角。

由于岩体破坏面上的正应力 σ_n 和剪应力 τ 可通过下式得到^[12]:

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\partial \sigma_1 / \partial \sigma_3 + 1} \quad (9)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{\partial \sigma_1 / \partial \sigma_3} \quad (10)$$

岩体拉伸强度可通过下式计算得到:

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} (m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s}) \quad (11)$$

为了进行数据拟合,将式(5)定义的 Mohr-Coulomb 公式写为如下形式:

$$Y = \lg A + BX \quad (12)$$

其中, $Y = \lg \left(\frac{\tau}{\sigma_{ci}} \right)$, $X = \lg \left(\frac{\sigma_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)$ 。

根据式(9)~式(11),可以得到一系列 σ_{tm} , σ_n 和 τ , 代入式(12)并进行线性拟合,可得

$$B = \frac{\sum XY - \left(\sum X \sum Y \right) / T}{\sum X^2 - \left(\sum X \right)^2 / T} \quad (13)$$

$$A = 10^{[\sum Y / T - B \sum X / T]} \quad (14)$$

其中, T 是所进行的试验组数。

根据式(5)的 Mohr-Coulomb 表达形式,对于特定的正应力 σ_n ,可得出内摩擦角 ϕ ,

$$\phi_i = \arctan \left[AB \left(\frac{\sigma_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)^{B-1} \right] \quad (15)$$

相应的黏结力 c 为

$$c_i = \tau - \sigma_{ni} \tan \phi_i \quad (16)$$

相应的岩体单轴压缩强度为

$$\sigma_{cm} = \frac{2c_i \cos \phi_i}{1 - \sin \phi_i} \quad (17)$$

3 影响因素分析

假设某岩体完整岩石的单轴压缩强度 $\sigma_{ci} = 85.0$ MPa, $m_i = 1.40$, $s = 0.0022$, $a = 0.5$, 根据上述剪切强度参数的确定方法,可得到 $A = 0.50$, $B = 0.70$, $k = 3.01$, $\phi = 30.12^\circ$, $c = 3.27$ MPa, $\sigma_{tm} = 0.13$ MPa, $\sigma_{cm} = 11.36$ MPa。为进一步得到 GSI, m_i 对于黏结力和内摩擦角的影响,分别改变 GSI 于区间 $[10, 90]$, m_i 于区间 $[5, 30]$, 得到黏结力和内摩擦角的变化规律,如图 1、图 2 所示。可以看出,随着 GSI 的增大,岩体的剪切强度参数 c 和 ϕ 均不断增大,并且 c 随 GSI 变化的曲线斜率不断增大,而 ϕ

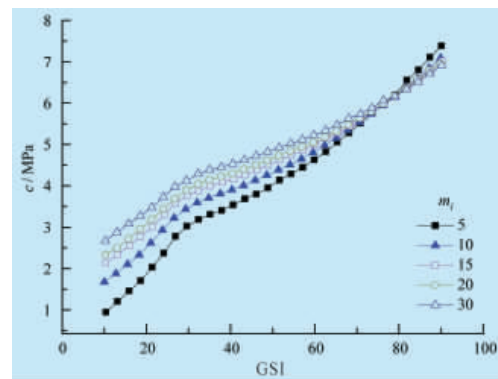
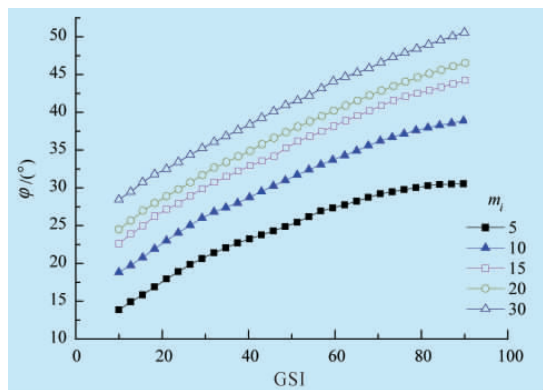


图 1 不同 GSI 和 m_i 对应的黏结力

Fig. 1 Cohesion for different GSI and m_i

图2 不同 GSI 和 m_i 对应的内摩擦角Fig. 2 Friction angle for different GSI and m_i

随 GSI 变化的曲线斜率不断减小,说明黏结力较内摩擦角对于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 GSI 对于岩体强度的影响大于 m_i 。

4 结论

1) 通过大量数据拟合回归的方法可确定剪切强度参数与 Hoek-Brown 准则参数之间的关系,并得到了相应的关系方程。

2) 随着地质强度指标 GSI 的增大,岩体的剪切强度参数 c 和 ϕ 均不断增大,黏结力较内摩擦角对于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 GSI 对于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 Pengzhi, Feng Xiating, 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, Shrivastava 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): 86-113.

Song Jianbo, Liu Tangsheng, Yu Yuanzhong. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(1):86-113.

- [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*, 2005, 33(1): 89-93.

Wu Debin, Xu Weiya. *Journal of Hohai University*, 2005, 33(1): 89-93.

- [6] Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion, 2002 Edition [C]//Proc NARMS-TAC Conference. Toronto, 2002, 1: 267-273.

- [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 Yanlin, et al. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2007, 38(6): 1219-1224.

- [8] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1997, 34(8): 1165-1186.

- [9] 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.

- [10] Priest S D. Determination of Shear Strength and Three-dimensional Yield Strength for the Hoek-Brown Criterion [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, 38(4): 299-327.

- [11] Baghbanan A, Jing L. 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.

- [12] Hoek E, Bray J. *Rock slope engineering* [M]. London: Institute of Mineral and Metallurgy, 1981.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“2009 年度全国复合材料力学研讨会”征文

中国复合材料学会、中国力学学会定于 2009 年 10 月 16-20 日在长沙市举办“2009 年度全国复合材料力学研讨会”。本届会议由中国复合材料学会和中国力学学会联合主办,由中国复合材料学会复合材料力学专业委员会,中国力学学会固体力学专业委员会,复合材料设计、应用与评价专业委员会和湖南大学机械与运载工程学院承办。目的是增进复合材料力学相关领域专家学者之间的沟通了解,促进学术交流与合作,从而推动我国复合材料力学的发展,实现研究成果的产业化。会议论文截止日期为 2009 年 8 月 15 日。

联系方式:长沙市湖南大学机械与运载工程学院(410082) 刘桂萍,韩旭;电话:13874895646;电子信箱:ji_pi@126.com。