

岩体稳定性评价的单元安全系数法及其影响因素分析

舒谷生¹, 彭文祥², 何忠明³, 钟正强²

1. 湖南城市学院力学教研室, 湖南益阳 413000
2. 中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083
3. 长沙理工大学交通运输工程学院, 长沙 410174

摘要 岩体稳定性评价是岩体工程设计和施工的重要内容, 为了探讨岩体各部位的安全情况, 引入单元安全系数 K_e 来评价岩体的微观稳定性, 它能定量评价岩体在应力作用下的稳定状况; 通过理论分析, 推导了单元安全系数公式, 然后, 利用算例研究, 探讨了单元安全系数的影响因素。研究表明: ① 随抗剪强度参数、黏结力 c 、内摩擦角 ϕ 的增大, 单元安全系数 K_e 逐渐增大; K_e 与抗剪强度参数间符合显著线性关系; K_e 随 c 变化的梯度明显大于 K_e 随 ϕ 变化的梯度, 黏结力对单元安全系数的影响大于内摩擦角对单元安全系数的影响; ② 最小主应力增大引起单元安全系数增大, 最大主应力增大引起单元安全系数减小, 符合实际情况, 并且二者与单元安全系数的关系均呈现指数关系特征。

关键词 岩体; 稳定性; 单元安全系数

中图分类号 TU457

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)16-0066-03

Element Safety Factor in Rock Stability Estimation and Its Influential Factors

SHU Gusheng¹, PENG Wenxiang², HE Zhongming³, ZHONG Zhengqiang²

1. Department of Mechanics, Hunan University of City, Yiyang 413000, Hunan Province, China
2. College of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
3. Department of Communications and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

Abstract Stability evaluation is an important part in the rock engineering design and construction. In order to study the safety of each part of the rock mass, the element safety factor K_e is proposed to estimate the micro-stability of the rock mass. The element safety factor can reflect the stability state of the rock mass under the earth

stress. A formula for the element safety factor is derived by a theoretical analysis, and the influential factors for the element safety factor are studied in selected cases, which show that, (1) with the increase of shear strength, cohesion c and friction angle ϕ , the element safety factor K_e increases in a linear relation between K_e and the shear strength, and with the increase rate of K_e with respect to cohesion c greater than that with respect to friction angle, so the cohesion has a larger effect on the element safety factor than that of friction angle; (2) the increase of the minimum principal stress will lead to the increase of the element safety factor, while the increase of the maximum principal stress will lead to the decrease of the element safety factor, which is in accordance with the real situation, and they are both in an exponential relation.

Keywords rock mass; stability; element safety factor

0 引言

岩体稳定性评价是岩体工程设计和施工的重要内容^[1-2], 目前一般采用围岩稳定性分类分区方法^[3]、基于变形的临界应变或位移判别方法^[4]、岩体整体稳定性的强度折减法^[5-6]等, 这些方法主要针对宏观岩体稳定性进行评价, 无法反映岩体各部位的安全情况, 因此, 一些学者引入单元安全系数的概

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: 舒谷生, 副教授, 研究方向为岩土工程、工程力学, 电子信箱: shugusheng@126.com

念,以此分析岩体各个单元的的稳定程度,例如, Hoek 等^[7]率先把点安全系数的概念引入到边坡稳定分析中,其定义点安全系数为所考查的潜在滑移面上的一点所能调动的最大剪切强度与该点可能出现的有效剪应力之比;张传庆等^[8-9]通过分析 Mohr-Coulomb 准则在主应力空间中非屈服应力点和屈服面的关系,定义了屈服接近度指标,并建立了屈服接近度求解函数,对围岩中非塑性区的危险程度进行了定量研究;沈可等^[10]分析了与三维有限元计算相配套的抗滑稳定计算方法,推导出基于 Mohr-Coulomb 准则的空间点抗剪最小安全系数公式。但这些方法主要探讨了单元安全系数在岩体评价中的应用,较少探讨单元安全系数的影响因素。本文推导了单元安全系数,通过算例分析,研究了岩体抗剪强度参数及地应力对于单元安全系数的影响,为工程实践提供参考。

1 单元安全系数

单元安全系数 K_e 是一个评价复杂应力状态下单元稳定性程度的指标,能够定量评价单元接近塑性屈服的程度,能直观反映岩体在应力作用下的稳定状况,它与岩体强度、应力和强度准则有直接关系。当 $K_e > 1$,表示单元未破坏(屈服面内部); $K_e < 1$,表示单元已破坏(屈服面外部); $K_e = 1$,表示临界状态(屈服面上部)。根据岩体抗剪安全系数的定义,结合 Mohr-Coulomb 强度理论^[11],推导相应的单元安全系数公式。

Mohr-Coulomb 强度理论认为,岩体的抗剪强度与作用在岩体上的应力场有关,当岩体中破坏面上的剪应力超过其抗剪强度时,岩体出现剪切破坏。根据图 1 所示任意斜面上应力分量变换关系,作用于该面上的法向及切向应力分别为

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (2)$$

式中, σ_1, σ_3 为单元的最大、最小主应力; α 为剪切面与最小主平面的夹角。

假设该面上的抗剪强度 τ_c , 按 Mohr-Coulomb 强度理论有

$$\begin{aligned} \tau_c &= \sigma \tan \phi + c \\ &= \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \right) \tan \phi + c \end{aligned} \quad (3)$$

式中, c, ϕ 为岩体的黏结力和内摩擦角。

根据单元安全系数 K_e 的定义,可得表达式

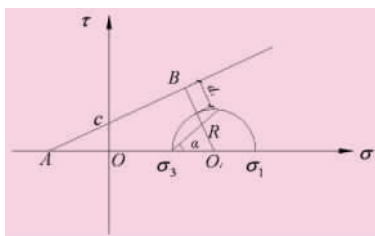


图 1 单元应力状态的 Mohr 圆

Fig. 1 Mohr circle for the stress state of the element

$$K_e = \frac{\tau_c}{\tau} = \frac{\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \right) \tan \phi + c}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,面的抗剪安全系数与面的方向角 α 有关,说明经过同一点的不同平面,其对应的抗剪安全系数不同。因此,抗剪安全系数最小的面即为危险破坏面,可通过求最小值的方法求得其位置 α ,即令 $dK_e/d\alpha = 0$,简化后得

$$\alpha = \arccos \left[- \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \cdot \cot \phi} \right] \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),可得 K_e 的计算公式为

$$K_e = \frac{c \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \quad (6)$$

2 影响因素分析

2.1 抗剪强度参数的影响分析

假设某岩体质点受到的最大主应力为 $\sigma_1 = 2.0$ MPa,最小主应力为 $\sigma_3 = 0.5$ MPa,分别改变该质点的抗剪强度参数,首先固定内摩擦角为 25° 时,黏结力 c 变化于区间 $[0.1, 0.9]$ MPa,变化梯度为 0.2 MPa;然后,固定黏结力 c 为 0.5 MPa 时,内摩擦角 ϕ 变化于区间 $[21^\circ, 30^\circ]$,变化梯度为 2° ,得到抗剪强度参数与单元安全系数的关系(表 1)。从表 1 可以看出,随抗剪强度参数 c 和 ϕ 的增大, K_e 逐渐增大;并且 K_e 与抗剪强度参数之间符合显著的线性关系,拟合方程分别为

$$K_e = 0.70436 + 1.20841c \quad (7)$$

$$K_e = 0.77119 + 0.02143\phi \quad (8)$$

得到的拟合相关系数分别为 0.999 8 和 0.997 6。 K_e 随 c 的变化梯度为 1.208 41,明显大于 K_e 随 ϕ 的变化梯度 0.02143,说明黏结力对单元安全系数的影响大于内摩擦角对于单元安全系数的影响。

表 1 抗剪强度参数与单元安全系数的关系

Table 1 Relationship between element safety factor and shear strength parameters

方案	黏结力 c /MPa	单元安全 系数 K_e	内摩擦角 $\phi/(^\circ)$	单元安全 系数 K_e
1	0.1	0.825 2	21	1.219 7
2	0.3	1.066 89	23	1.264 9
3	0.5	1.308 57	25	1.308 6
4	0.7	1.550 25	27	1.350 7
5	0.9	1.791 93	29	1.391 1

2.2 地应力的影响

为进一步研究单元应力对单元安全系数的影响,首先固定内摩擦角为 25° ,黏结力 c 为 0.5 MPa, $\sigma_1 = 2.0$ MPa,变化 σ_3 于区间 $[0.3, 1.7]$ MPa,变化梯度为 0.2 MPa,得到图 2。可以看

出,随着最小主应力增大,单元的安全系数不断增大,这是由于此时单元受到的围压逐渐增大,根据图 1 所示,即 σ_3 越来越靠近 σ_1 , Mohr 圆逐渐减小,逐渐远离破坏包络线,从而抑制了岩体的剪切破坏,使岩体的稳定性得到提高;但这种提高程度并非符合线性特征,而是呈现非线性特征。为了进一步探讨二者的关系,对该曲线进行拟合,得到拟合方程为

$$K_e = e^{a+b\sigma_3} \quad (9)$$

拟合参数 $a=-1.60299, b=1.9461$, 拟合相关系数 0.97157, 说明二者符合显著的指数关系,即随着 σ_3 的增大, K_e 随 σ_3 的变化梯度越来越大,符合实际情况。

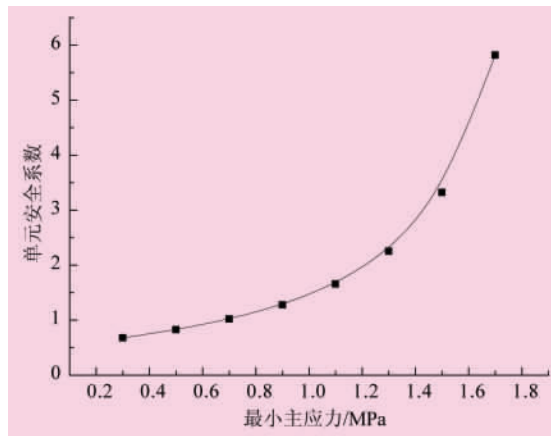


图 2 单元安全系数与最小主应力的关系

Fig. 2 Relationship between element safety factor and the minimum principal stress

然后,固定内摩擦角为 25° , 黏结力 c 为 0.5 MPa, $\sigma_3 = 0.5$ MPa, 变化 σ_1 于区间 $[0.8, 2.2]$ MPa, 变化梯度为 0.2 MPa, 得到图 3。从图 3 可以看出,随着最大主应力的增大,单元的安全系数不断减小,根据图 1 所示,增大 σ_1 时, σ_1 越来越远离 σ_3 ,

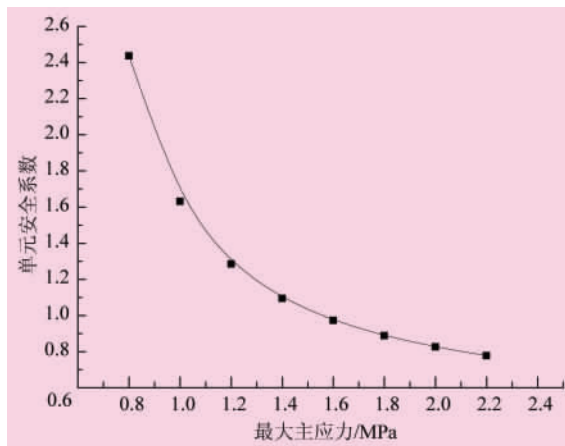


图 3 单元安全系数与最大主应力的关系

Fig. 3 Relationship between element safety factor and the maximum principal stress

Mohr 圆逐渐增大,逐渐靠近破坏包络线,应力偏差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 逐渐增大,从而增加了岩体剪切破坏的可能性,使岩体的稳定性降低;并且二者的关系符合非线性特征,对该曲线进行拟合,得到拟合方程为

$$K_e = e^{a+b\sigma_1} \quad (10)$$

拟合参数 $a=1.54111, b=-0.95386$, 拟合相关系数 0.90049, 说明二者符合显著的指数关系,即随着 σ_1 的增大, K_e 随 σ_1 的变化梯度越来越小,符合实际情况。

3 结论

1) 分析推导了单元安全系数公式,并探讨了单元安全系数的影响因素。

2) 随着抗剪强度参数 c, ϕ 的增大, K_e 逐渐增大; K_e 与抗剪强度参数间符合显著的线性关系; K_e 随 c 变化的梯度明显大于 K_e 随 ϕ 变化的梯度,黏结力对单元安全系数的影响大于内摩擦角对单元安全系数的影响。

3) 最小主应力增大引起单元安全系数增大,最大主应力增大引起单元安全系数减小,二者与单元安全系数的关系均呈现指数关系特征。

参考文献 (References)

- [1] Franciss F O. Weak rock tunnelling [M]. Boston: A A Balkema Press, 1997.
- [2] Merifield R S, Lyamin A V, Sloan S W. Limit analysis solutions for the bearing capacity of rock masses using the generalised Hoek-Brown yield criterion[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2006, 43(6): 920-937.
- [3] Hoek E, Bray J. Rock slope engineering[M]. London: Institute of Mineral and Metallurgy, 1981.
- [4] Egger P. Design and construction aspects of deep tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(4): 403-408.
- [5] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387-403.
- [6] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835-840.
- [7] Hoek E. Rock engineering [M]. North Vancouver: Evert Hoek Consulting Engineer Inc, 2002.
- [8] 周辉, 张传庆, 冯夏庭, 等. 隧道及地下工程围岩的屈服接近度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3083-3087.
Zhou Hui, Zhang Chuanqing, Feng Xiating, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3083-3087.
- [9] 张传庆, 周辉, 冯夏庭. 基于破坏接近度的岩土工程稳定性评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 888-894.
Zhang Chuanqing, Zhou Hui, Feng Xiating. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 888-894.
- [10] 沈可, 张仲卿. 三维抗滑稳定分析中的点安全系数法 [J]. 人民珠江, 2003(2): 21-22.
Shen Ke, Zhang Zhongqing. *Pearl River*, 2003(2): 21-22.
- [11] Ucar R. Determination of shear failure envelope in rock masses [J]. *J Geotech Eng*, 1986, 12(3): 303-315.

(责任编辑 岳臣)