

文章编号: 1674-599X(2020)03-0001-07

基于经验强度准则的岩体力学参数敏感性分析

张永杰¹, 马文琪¹, 罗伟庭², 蒋莉斌², 岳强²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 岩体力学参数的选取, 对岩体工程稳定性分析至关重要, 基于 Hoek-Brown 强度准则的岩体力学参数取值, 受岩体工程地质特性主观判断的影响。本研究采用节理特征系数与岩块体积数等参数, 对地质强度指标进行取值量化。利用 Hoek-Brown 强度准则, 获得等效岩体抗剪强度参数的计算方法, 并基于边坡分析, 探讨了不同岩性时, 节理起伏系数、蚀变系数及粗糙系数等因素对岩体抗剪强度参数的影响规律。以某工程案例分析了各因素对岩质边坡安全系数的影响规律。研究结果表明: 当节理蚀变系数为 4~8、节理组间夹角为 60°~80°、节理起伏系数为 2~3 m、节理粗糙系数为 2~3 cm 和节理平均间距为 900~1 000 mm 时, 节理参数的变化对黏聚力及内摩擦角的影响较小。当地质强度指标 > 70 或扰动系数为 0.6~1 时, 其对岩体力学参数取值及岩质边坡稳定性分析结果影响较大。应增加各因素的测试范围, 获取更多测试数据, 减少分析误差。

关键词: 岩体力学参数; Hoek-Brown 强度准则; 地质强度指标; 岩质边坡安全系数

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.001

Sensitivity analysis of mechanical parameters of rock mass based on empirical strength criterion

ZHANG Yong-jie¹, MA Wen-qi¹, LUO Wei-ting², JIANG Li-bin², YUE Qiang²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China Construction Fifth Engineering Cooperation Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: The selection of mechanical parameters is very important for the stability analysis of rock mass engineering. The value of mechanical parameters of rock mass based on Hoek-Brown strength criterion is affected by the subjective judgment to rock mass engineering geological characteristics. In this study, several parameters such as joint characteristic coefficients and block volume numbers are used to quantify the geological strength index, and the calculation method for the equivalent shear strength parameters of rock mass is obtained by using Hoek-Brown strength criterion. Based on slope analysis, the influences of joint parameters, such as fluctuation coefficient, alteration coefficient and roughness coefficient, on the shear strength parameters at different lithologies are discussed. An engineering case is used to analyze the effects of various factors on the factor of safety of rock slope. The results show that, when the joint alteration coefficient is between 4 and 8, the joint angle between 60° and 80°, the alteration coefficient of joint between 2 m and 3 m, the joint roughness coefficient between 2 cm and 3 cm, the average joint spacing value between 900 mm and 1000 mm, the variation of joint parameters has little effect on cohesion or internal friction angle. When the geological strength index exceeds 70 or the disturbance coefficient ranges between 0.6 and 1, they have a great impact on the mechanical parameters of rock mass and stability analysis results of rock slope. The range of parameters should be increased to obtain more test data and reduce analysis errors.

收稿日期: 2020-02-12

基金项目: 中建五局科技研发项目(2802-17-Z-044, 2802-17-Z-045); 中建股份科技研发计划资助(CSCEC-2019-Z-19)

作者简介: 张永杰(1981-), 男, 长沙理工大学副教授, 博士。

Key words: mechanical parameters of rock mass; Hoek-Brown strength criterion; geological strength index; rock slope safety factor

岩体抗剪强度参数是岩体稳定性评价的重要力学参数之一,其测定与取值将直接决定工程评价结果的有效性^[1]。由于工程地质条件、试验误差等不确定因素的制约,导致岩体力学参数测定值具有很大的离散性^[2]。经验估算法应用于实际工程也取得了良好的效果。苏永华^[3]等人提出了表征岩石风化状况的定量指标,对地质强度指标(Geological Strength Index, 简称为 *GSI*)取值进行量化,确定公路隧道围岩的力学参数。武雄^[4]等人通过对节理岩体的连通程度和空间产状的宏观判断,建立了工程岩体强度法(Geology, Mechanics and Engineering Method, 简称为 *GMEM*)。张永杰^[5]等人基于岩体力学参数取值的随机性与模糊性,运用 *GSI* 取值系统与区间理论,对 Hoek-Brown 强度准则进行优化改进,能更好地反映岩体破坏的非线性特征。於汝山^[6]等人提出岩体完整性系数的定量指标,对 *GSI* 取值中的岩体结构面进行量化描述。杨欢^[7]运用 Geo-Slope 极限平衡软件,分析了 *GSI* 等参数对岩质边坡安全系数的影响程度,并优化了锚索加固边坡的措施。王新刚^[8]等人通过改进 *GSI* 量化取值,从而保证岩体力学参数定量化取值的合理性。黄阜^[9]等人以长沙地铁二号线为工程背景,利用有限差分软件,分析了盾构隧道开挖面安全系数、支护力及 Hoek-Brown 强度准则参数的关系。这些研究主要集中在地质强度指标的量化、修正及应用,而针对岩体基础地质力学参数对岩体工程稳定性影响方面研究鲜见。因此,本研究基于岩体 *GSI* 取值量化方法,拟对岩体力学参数的影响因素进行敏感性分析,并分析各因素对岩质边坡安全系数的影响规律。

1 基于 *GSI* 的岩体抗剪强度确定方法

Hoek 等人经过试验研究,建立了基于 *GSI* 的 Hoek-Brown 强度准则^[10],其表达式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

$$\text{其中, } m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right);$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right); \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}\right)。$$

式中: σ_1, σ_3 分别为岩体破坏时最大、最小主应力, MPa; σ_c 为岩石的单轴抗压强度, MPa; m_i 为反映岩石软硬程度的材料参数,取值范围为 5~40; D 为节理岩体扰动系数^[2]; a 为与岩体特性相关的参数; m_b 为无量纲常数。

通过对 Hoek-Brown 强度准则进行最佳拟合,可得到岩体等效的黏聚力 c 与内摩擦角值 φ ^[10]:

$$c = \frac{\sigma_c \left[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n} \right] (s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (2)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (3)$$

其中: $\sigma_{3n} = \sigma_{3\max} / \sigma_c$ 。

侧限应力的上限值 $\sigma_{3\max}$ 可由式(4), (5)确定^[10]:

1) 深埋隧道侧限应力的上限值:

$$\sigma_{3\max_1} = 0.47(\sigma_{cm} / \gamma H)^{-0.94} \cdot \sigma_{cm} \quad (4)$$

2) 岩质边坡侧限应力的上限值:

$$\sigma_{3\max_2} = 0.72(\sigma_{cm} / \gamma H)^{-0.91} \cdot \sigma_{cm} \quad (5)$$

式中: γ 为岩体重度, kN/m³; H 为岩质边坡高度或隧道埋深, m; σ_{cm} 为岩体抗压强度, MPa。

岩体抗压强度可通过 Mohr-Coulomb 强度准则确定^[10],其计算式为:

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

2 岩体 *GSI* 取值量化指标的确定

在岩体力学中,节理特征系数 J_c 可通过节理起伏系数 J_w 、节理粗糙系数 J_s 及节理蚀变系数 J_a 来确定^[11]。其表达式为:

$$J_c = \frac{J_w J_s}{J_a} \tag{7}$$

对于 3 组或 3 组以上的连续节理所切割成的岩块, 其体积数计算式为^[13]:

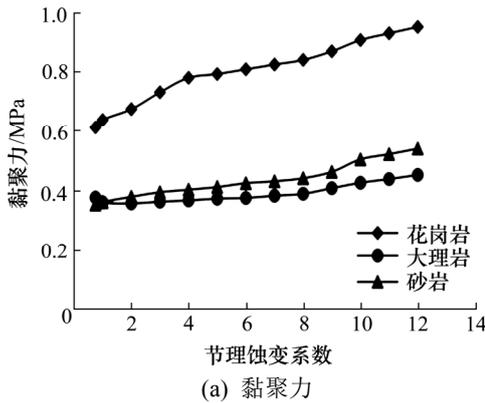
$$V_b = \frac{S_1 S_2 S_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3} \tag{8}$$

式中: V_b 为岩块体积数; γ_i 为节理组间夹角; S_i 为节理平均间距。

参数 $J_w, J_s, J_a, V_b, \gamma_i$ 及 S_i 的取值见参考文献 [10], [12]。

Cai^[14]等人根据大量岩体工程实践, 提出了基于节理特征系数与岩块体积数的方法, 共同量化地质强度指标取值。其计算式为:

$$GSI = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_c + 0.9 \ln V_b}{1 + 0.015 \ln J_c - 0.0253 \ln V_b} \tag{9}$$



3 岩体力学参数影响因素分析

选取实际工程中常见的花岗岩、砂岩及大理岩作为研究的对象, 分别代表岩浆岩、沉积岩及变质岩 3 类岩石。其强度参数的选取根据文献[15], 其具体取值见表 1。在保证其他参数不变的情况下, 将不同基础地质参数, 代入公式(1)~(9)进行计算, 并绘制成图 1~5 的关系曲线。

从图 1 可以看出, 节理蚀变系数的增大, 黏聚

表 1 强度参数取值

| 岩性 | 重度/ (kN·m ⁻³) | 抗压强 度/MPa | 扰动 参数 | 材料 常数 | GSI |
|-----|------------------------------|--------------|----------|----------|-----|
| 花岗岩 | 27.0 | 130 | 0.70 | 28 | 50 |
| 砂岩 | 22.0 | 80 | 0.75 | 17 | 48 |
| 大理岩 | 26.5 | 90 | 0.70 | 10 | 45 |

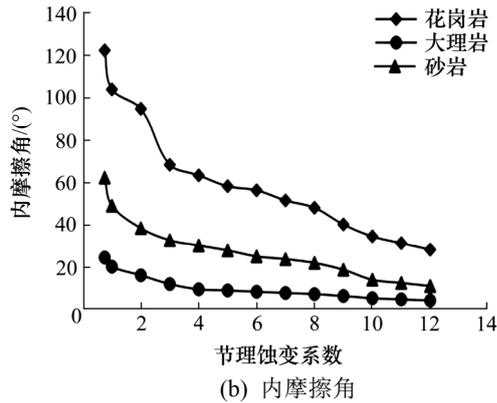


图 1 节理蚀变系数对抗剪强度参数的影响

Fig. 1 Effect of joint alteration coefficient on shear strength parameters

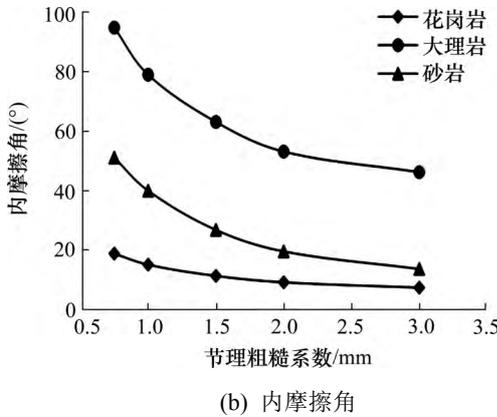
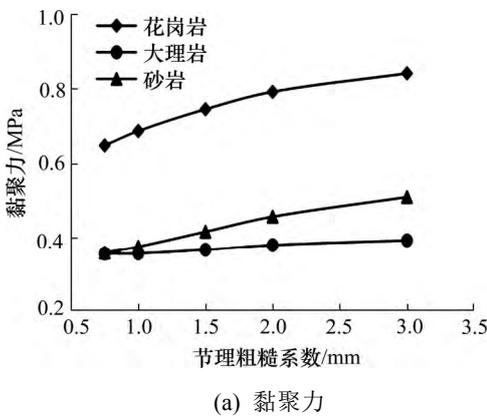


图 2 节理粗糙系数对抗剪强度参数的影响

Fig. 2 Effect of joint roughness coefficient on shear strength parameters

力增大而内摩擦角减小。对于花岗岩, 当节理蚀变系数为 2~3 时, 黏聚力增加了 21.9%, 内摩擦角减

小了 27.9%, 各自表现出对参数 J_a 强烈的敏感性。

从图 2 可以看出, 节理粗糙系数的增大, 黏聚

力增大而内摩擦角减小。当节理粗糙系数为1~1.5 cm时,花岗岩的黏聚力增加了8.5%,大理岩的内摩擦角减小了20.1%,各自表现出对参数 J_s 强烈的敏感性。

从图3可以看出,节理起伏系数的增大黏聚力增大,而内摩擦角减小。当节理起伏系数为2.5~3 m时,砂岩的黏聚力增加了10.5%。而当节理起伏系数为1~1.5 m时,大理岩的内摩擦角减小了

15.1%,各自表现出对参数 J_w 强烈的敏感性。

从图4可以看出,节理平均间距的增大,黏聚力增大而内摩擦角减小。当节理平均间距为600~700 mm时,大理岩的黏聚力,增加了5.5%,花岗岩的内摩擦角,减小了14.1%,各自表现出对参数 S 强烈的敏感性。

从图5可以看出,节理组间夹角的增大,黏聚力和内摩擦角均随之减小。当节理组间夹角为

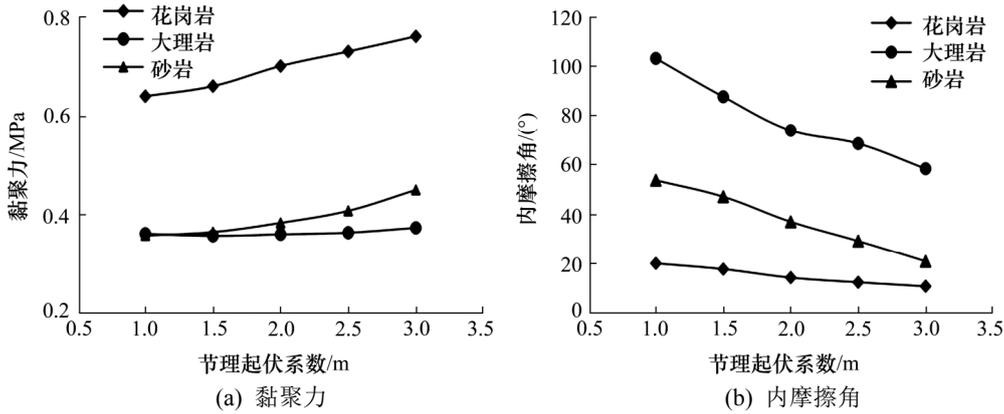


图3 节理起伏系数对抗剪强度参数的影响

Fig. 3 Effect of joint undulation coefficient on shear strength parameters

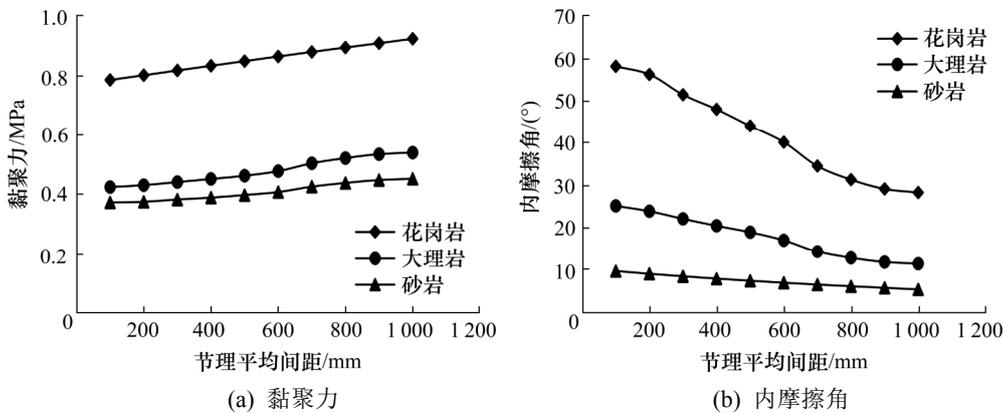


图4 节理平均间距对抗剪强度参数的影响

Fig. 4 Effect of joint average spacing on shear strength parameters

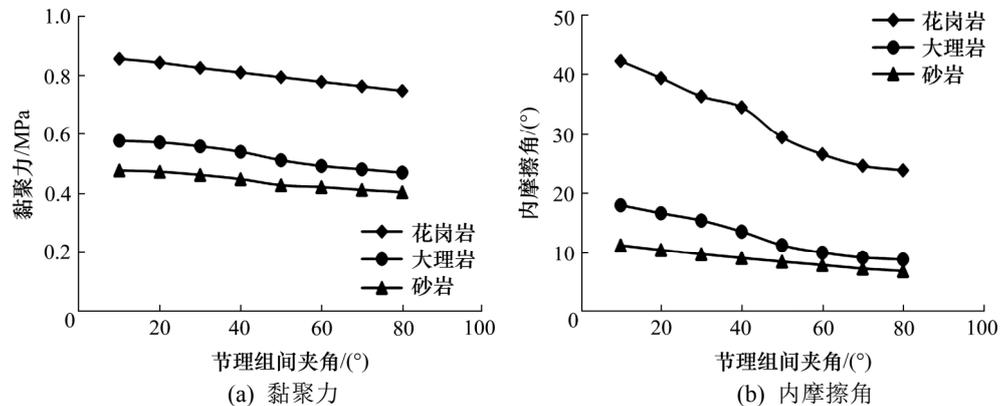


图5 节理组间夹角对抗剪强度参数的影响

Fig. 5 Effect of angle between joint groups on shear strength parameters

40°~50°时, 大理岩的黏聚力, 减小了 5.3%, 花岗岩的内摩擦角, 减小了 14.6%, 各自表现出对参数 γ 强烈的敏感性。

从图 1~5 可以看出, 当节理蚀变系数为 4~8、节理粗糙系数为 2~3 cm、节理起伏系数为 2~3 m、节理平均间距为 900~1000 mm 和节理组间夹角为 60°~80°时, 各地质基础参数对黏聚力或内摩擦角影响较小。表明: 主观因素导致的偏差对岩体力学参数取值影响不大。如果超出该范围, 则应谨慎判断参数取值的大小。

4 工程分析

计算模型采用单层均质岩坡(如图 6 所示), 坡高 12 m, 坡比 1:2, 不考虑地下水作用。该岩质边坡参数: 弹性模量为 550 MPa, 节理起伏系数为 3 m, 泊松比为 0.25, 节理平均间距为 500 mm, 节理组间夹角为 50°, 节理蚀变系数为 4, 容重为 22 kN/m³, 岩石材料参数取 15, 地质强度指标取 55, 岩体扰动参数取 0.5, 节理粗糙系数取 3 cm, 岩石单轴抗压强度取 80 MPa。通过 Rocscience Slide 软件进行计算, 得到边坡安全系数 *FOS* 为 1.845。

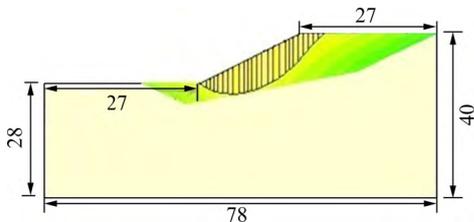
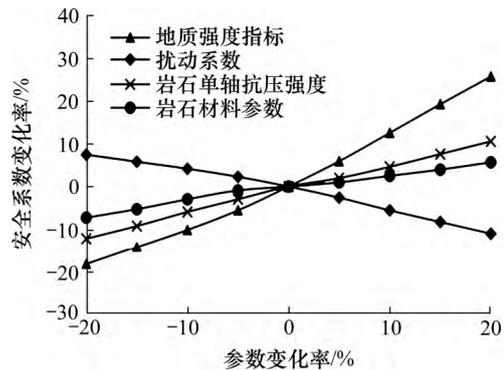


图 6 二维岩质边坡模型(单位: m)

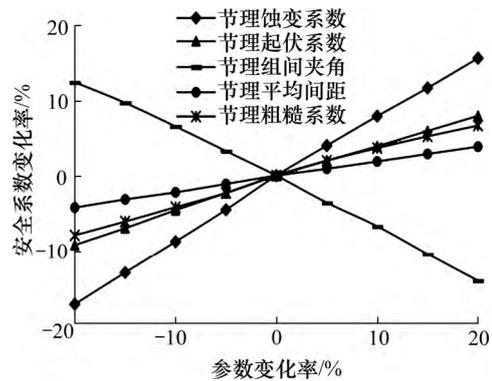
Fig.6 Two-dimensional rock slope model (unit: m)

岩质边坡安全系数与基础地质参数、Hoek-Brown 强度准则参数密切相关。因此, 将计算得到的边坡安全系数作为基准值, 并按±20%, ±15%, ±10%, ±5%的变化率, 改变其中一个参数, 其他参数不变, 按照该方法, 计算岩质边坡安全系数变化率, 如图 7 所示。

从图 7(a)可以看出, 各参数的变化, 岩质边坡安全系数变化率大致呈线性关系。敏感性大小顺序为: 地质强度指标 > 扰动系数 > 岩石单轴抗压强度 > 岩石材料参数。当地质强度指标取值在基准值 ±20%范围内变化时, 边坡安全系数为-19%~27%时, 二者呈显著正相关。由于 *GSI* > 70 或 *D* 为



(a) Hoek-Brown 强度准则参数



(b) 基础地质参数

图 7 参数与边坡安全系数变化关系曲线

Fig.7 Relation curve between parameters and slope safety factor

0.6~1 时, 其对岩体力学参数取值及岩质边坡稳定性分析结果的影响较大^[16-17]。因此, 应增加 *GSI* 与 *D* 的测试范围, 获取更多测试数据, 减少分析误差。

从图 7(b)中可以看出, 基础地质参数对岩质边坡安全系数影响的敏感性大小顺序为: 节理蚀变系数 > 节理组间夹角 > 节理起伏系数 > 节理粗糙系数 > 节理平均间距。以线段的斜率表示敏感性系数的大小, 计算得出当节理蚀变系数为 4~8、节理组间夹角为 60°~80°、节理起伏系数为 2~3 m、节理粗糙系数为 2~3 cm 和节理平均间距为 900~1 000 mm 时, 边坡安全系数则稳定在 ±5%范围内。表明: 主观因素导致的偏差, 对岩质边坡稳定性分析结果的影响较少, 超出该范围时, 则应谨慎判断参数取值的大小。

5 结论

通过对地质强度指标取值的量化, 综合运用敏感性分析及基于 *GSI* 的岩体抗剪强度, 确定方法。对岩体力学参数的影响因素进行了综合性分析, 并

依托某工程分析了各因素对岩质边坡安全系数的影响规律。得出的结论为:

1) 岩质边坡安全系数变化率随着各参数的变化呈线性关系。敏感性大小顺序为:地质强度指标 > 扰动系数 > 岩石单轴抗压强度 > 岩石材料参数。当 $GSI > 70$ 或 D 为 $0.6 \sim 1$ 时,应立足岩体表露特征,对 GSI 取值予以足够重视。在现场实际施工中,应采取对岩质边坡扰动程度较小的施工方案。

2) 基础地质参数中,当节理蚀变系数为 $4 \sim 8$ 、节理组间夹角为 $60^\circ \sim 80^\circ$ 、节理起伏系数为 $2 \sim 3$ m、节理粗糙系数为 $2 \sim 3$ cm 和节理平均间距为 $900 \sim 1\ 000$ mm 时,其对岩体参数取值及边坡稳定性分析结果的影响不大,超出该范围时,则应谨慎判断参数取值的大小。

本研究主要考虑单一参数变化对边坡安全系数的敏感性分析,未考虑不同参数间的交互作用,后续将进一步研究参数存在交互作用时,对边坡安全系数的敏感性分析。

参考文献(References):

- [1] Hui L, Hong T. Analysis and process control of the deformation for deep excavation in soft clay[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 11(9): 1339–1345.
- [2] 张永杰. 基于不确定性理论的隧道围岩稳定性及风险分析研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010. (ZHANG Yong-jie. Research on stability and risk analysis of tunnel surrounding rock based on uncertainty theory[D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese))
- [3] 苏永华, 封立志, 李志勇, 等. Hoek-Brown 准则中确定地质强度指标因素的量化[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 679–686. (SU Yong-hua, FENG Li-zhi, LI Zhi-yong, et al. Quantification of elements for geological strength index in Hoek-Brown criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 679–686. (in Chinese))
- [4] 武雄, 贾志欣, 陈祖煜, 等. 工程岩体抗剪强度确定综合方法-GMEM 研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 245–251. (WU Xiong, JIA Zhi-xin, CHEN Zu-yu, et al. Research of a synthetical method GMEM on ascertaining shear strength for engineering rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 245–251. (in Chinese))
- [5] 张永杰, 曹文贵, 赵明华, 等. 基于地质强度指标与区间理论的岩体抗剪强度确定方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2446–2452. (ZHANG Yong-jie, CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, et al. Method for determining rock mass shear strength based on interval theory and geological strength index[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2446–2452. (in Chinese))
- [6] 於汝山, 杨宜, 许冬丽. Hoek-Brown 强度准则在深部岩体力学参数估算中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 123–127. (YU Ru-shan, YANG Yi, XU Dong-li. Study on the application of Hoek-Brown strength criterion in estimating mechanics parameters of deep rock mass[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2018, 35(1): 123–127. (in Chinese))
- [7] 杨欢. 基于 Geo-Slope 的岩质边坡稳定性参数敏感性分析[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 289–294. (YANG Huan. Parametric sensitivity analysis of rock slope stability based on Geo-Slope[J]. Highway Engineering, 2018, 43(5): 289–294. (in Chinese))
- [8] 王新刚, 胡斌, 王家鼎, 等. 基于 GSI 的 Hoek-Brown 强度准则量化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 3805–3813. (WANG Xin-gang, HU Bing, WANG Jia-ding, et al. Quantitative study of Hoek-Brown strength criterion based on GSI[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 3805–3813. (in Chinese))
- [9] 黄阜, 张芝齐, 王芬, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的隧道开挖面安全系数模拟[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 33–40. (HUANG Fu, ZHANG Zhi-qi, WANG Fen, et al. Numerical simulation study on safety factor for a tunnel face subjected to Hoek-Brown criterion[J]. Transportation Science and Engineering, 2018, 34(1): 33–40. (in Chinese))
- [10] Hoek E, Carranza-Torres C T. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, 2002, 6: 267–273.
- [11] Yang X L. Three-dimensional failure mechanism of a rectangular cavity in a Hoek-Brown rock medium[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2003, 61: 189–195.
- [12] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and

- Mining Sciences,1997,34(8):1165-1186.
- [13] Cai M,Kaiser P K.Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2004,41(1):3-19.
- [14] Cai M,Kaiser P K.Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system [J].International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2007(44): 247-265.
- [15] 陈祖煜,汪小刚.岩质边坡稳定分析-原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2005,54-122.(CHENG Zu-yu,WANG Xiao-gang.Rock slope stability analysis-Principle·Method·Program[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2005, 54-122. (in Chinese))
- [16] 谭绍富,邓小钊.广义 Hoek-Brown 准则参数对岩体强度影响的敏感性研究[J].中外公路,2013,33(2):228-232. (TAN Shao-fu,DENG Xiao-zhao.Sensitivity study of influence of generalized Hoek-Brown criterion parameters on rock mass strength[J].Chinese and Foreign Highways, 2013,33(2):228-232.(in Chinese))
- [17] 田茂霖. Hoek-Brown 强度准则的参数取值研究及其工程应用[D].山东科技大学, 2017.(TIAN Mao-ling.Study on parameter value of Hoek-Brown strength criterion and its engineering application[D].Shandong University of Science and Technology,2017.(in Chinese))