

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.04.005

基于非线性 Barton – Bandis 准则的 岩质边坡可靠度研究

罗伟^{1,2}, 荣耀², 刘安³, 耿大新¹, 曾润忠¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省交通科学研究所, 江西 南昌 330200;
3. 江西交通咨询有限公司, 江西 南昌 330008)

摘要: 岩质边坡稳定性分析是岩土工程研究领域的热点问题之一, 采用线性 Mohr – Coulomb 破坏准则和确定性分析方法研究岩质边坡稳定性存在一定的局限性。基于 Hoek 和 Bray 提出的典型平面岩质边坡破坏模式, 采用 Barton – Bandis 非线性破坏准则, 考虑岩质边坡滑动过程静力平衡条件, 推导出岩质边坡安全系数表达式, 并结合可靠度理论, 通过 MATLAB 编程优化计算得到岩质边坡可靠度指标。算例分析结果表明: 可靠度理论与数值模拟的计算结果吻合良好, 证明本研究方法的可行性和有效性; Barton – Bandis 非线性破坏准则中摩擦角 φ_b 、结构面粗糙系数 JRC 和结构面有效抗压系数 JCS 对岩质边坡稳定性有着显著影响, 且岩质边坡稳定性随着 φ_b , JRC 和 JCS 的增加而提升; 随机变量参数 φ_b , JRC 和 JCS 对岩质边坡稳定性影响程度不一, 其中 φ_b 和 JRC 对岩质边坡稳定性的影响较为显著, 而 JCS 对岩质边坡稳定性的影响相对较小; 岩质边坡稳定性随着 φ_b , JRC 和 JCS 变异系数的增加而降低; 后缘裂缝地下水位上升, 岩质边坡的失效概率显著增大, 坡体内部应该设置完善的排水系统。

关键词: 道路工程; 边坡稳定性; 可靠度理论; 岩质边坡; Barton – Bandis 准则

中图分类号: U418.5+2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2020) 04-0032-05

Study on Reliability of Rock Slope Based on Nonlinear Barton – Bandis Criterion

LUO Wei^{1,2}, RONG Yao², LIU An³, GENG Da-xin¹, ZENG Run-zhong¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;
2. Jiangxi Transportation Institute, Nanchang Jiangxi 330200, China; 3. Jiangxi Transportation Consulting Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330008, China)

Abstract: The analysis on stability of rock slope is one of the hottest topics in the research of geotechnical engineering. It is sure that limitations exist in the research by using linear Mohr – Coulomb failure criterion and deterministic analysis method. Based on the failure mode of typical planar rock slope proposed by Hoek and Bray, by adopting Barton – Bandis nonlinear failure criterion and considering the static equilibrium condition of sliding process of rock slope, the expression of safety factor of rock slope is derived. Combining with reliability theory, the reliability indicator of rock slope is obtained through MATLAB programming optimization. The example analysis result indicates that the result of reliability theory is in good agreement with that of numerical simulation, which proves the feasibility and effectiveness of the proposed method; In the Barton – Bandis nonlinear failure criterion, friction angle φ_b , structural plane roughness coefficient JRC and structural plane effective compression coefficient JCS have significant influences on the stability of rock

收稿日期: 2018-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078359); 江西省交通运输厅科技项目 (2016C0007; 2016C0058); 江西省青年科学基金项目 (20171BAB216048); 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室项目 (20161BCD40010)

作者简介: 罗伟 (1986-), 男, 江西东乡人, 博士. (luoweisu@126.com)

slope, and the slope stability increases with φ_b , JRC and JCS ; These 3 random variable parameters affect the stability of rock slope differently, among them, the influences of φ_b and JRC on the slope stability are more significant, while JCS has relatively less influence on it; The stability of rock slope decreases with the increase of φ_b , JRC and JCS ; The failure probability of rock slope increases significantly with the rise of groundwater level in the trailing edge crack, thus, a refined drainage system should be set up inside the slope.

Key words: road engineering; slope stability; reliability theory; rock slope; Barton - Bandis criterion

0 引言

边坡稳定性分析一直是岩土工程中的一个热点问题, 以往岩质边坡稳定性分析大多采用线性 Mohr - Coulomb (M - C) 破坏准则。然而, 大量的试验及研究表明, 在岩质边坡中往往存在结构面, 且岩体结构面上的破坏特征大都不满足线性 M - C 准则。因此, 越来越多的研究将 Hoek - Brown、Barton - Bandis 等非线性破坏准则应用于岩质边坡稳定性分析^[1-4]。此外, 目前在进行边坡稳定性分析时, 大多采用传统的确定性分析方法, 无法体现岩土工程参数不确定性的影响。为更好地评估边坡稳定性, 国内外学者将可靠度理论拓展运用到边坡稳定性分析之中^[5-12], 取得了良好效果。基于上述考虑, 本研究采用可较好地表征岩体非线性力学性质的 Barton - Bandis 破坏准则, 并结合可靠度理论, 开展岩质边坡稳定性研究及参数分析, 以期对岩质边坡稳定性分析提供有益参考。

1 基于非线性 Barton - Bandis 准则的稳定性分析模型

1.1 非线性 Barton - Bandis 准则

非线性 Barton - Bandis 准则最早是由 Barton 和 Bandis 通过分析大量天然结构面的岩体剪切试验结果后提出的一种破坏模式^[13], 其破坏准则为:

$$\tau = \sigma_n \tan[\varphi_b + JRC \lg(JCS/\sigma_n)], \quad (1)$$

式中, τ 和 σ_n 分别为结构面上的剪应力和正应力; JRC 为结构面粗糙系数; JCS 为结构面有效抗压强度; φ_b 为结构面基本摩擦角。

1.2 稳定性分析模型的构建

本研究参照 Hoek 和 Bray 提出的典型平面滑动岩质边坡的破坏模式^[14], 构建基于非线性 Barton - Bandis 破坏准则的稳定性分析模型 (图 1)。图 1 中的 H 为边坡高度; θ 为滑动面倾角; α 为滑坡面坡角; l 为后缘张裂缝距坡顶的水平距离; Z 和 Z_w 分别为张裂缝深度及水位线高度; V 为坡顶裂缝底部的静水压力; U 为坡体滑面的静水压力; γ_w 为水的容

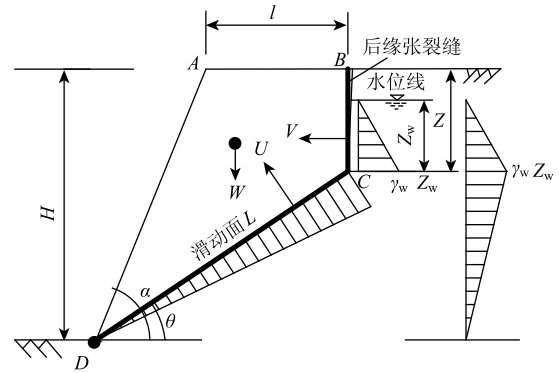


图 1 平面滑动岩质边坡破坏模型

Fig. 1 Plane sliding rock slope failure model

重; L 为滑动面长度。

本研究采用如图 1 所示的水力分布形态, 分析地下水对边坡稳定性的影响, 其静水压力的计算表达式为:

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w Z_w^2, \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w Z_w L, \quad (3)$$

经推导, 得到结构面上的正应力为:

$$\sigma_n = \frac{W \cos \theta - U - V \sin \theta}{L}, \quad (4)$$

式中, W 为滑动体 ABCD 的重力。

在仅考虑岩质边坡滑动过程中的抗滑力和下滑力之间的静力平衡条件下, 可以得到基于非线性 Barton - Bandis 破坏准则的岩质边坡安全系数表达式:

$$F_s = \frac{\text{抗滑力}}{\text{下滑力}} = \frac{\tau L}{W \sin \theta + V \cos \theta} = \frac{\sigma_n \tan[\varphi_b + JRC \lg(JCS/\sigma_n)] L}{W \sin \theta + V \cos \theta}, \quad (5)$$

式中 σ_n 由式 (4) 求得。

2 可靠度理论

可靠度理论是一门迅速发展的新科学, 可靠度

分析方法被誉为近代工程技术的重要发展。边坡的可靠度是指边坡在规定的条件、时间内完成预定功能的概率,即边坡保持稳定性的概率。边坡工程中常用安全系数 F_s 来判定边坡的稳定情况,基于已有研究结果,本研究采用 $F_s \leq 1$ 的失效概率 P_f 作为边坡可靠度的评价指标^[15]:

$$P_f = P(F_s \leq 1) = \int_{-\infty}^1 f(F_s) dF_s. \quad (6)$$

此外,失效概率与可靠度指标 β 之间存在如下关系:

$$P_f = P(F_s < 1) = 1 - \phi(\beta). \quad (7)$$

为了计算边坡的可靠度指标,本研究采用一阶可靠度方法进行求解,其表达式为^[16]:

$$\beta = \min_{x \in F} \sqrt{(\theta - \mu_\theta)^T C_\theta^{-1} (\theta - \mu_\theta)}, \quad (8)$$

式中, θ 为不确定的随机变量; μ_θ 为随机变量 θ 的均值; C_θ 为协方差矩阵。

利用一阶可靠度方法计算可靠度指标时,以 $F_s = 1$ 为约束,运用 MATLAB 强大的优化处理功能,通过编程可快速有效地获取边坡的可靠度指标。

3 算例分析

某石灰石矿区位于横阳山盆地之南部边缘,周围群山环绕^[17]。根据实地测量、理论分析确定该露天边坡稳定性分析模型如图 1 所示,其基本几何参数为: $H = 15$ m, $Z = 5$ m, $\theta = 37^\circ$, $\alpha = 70^\circ$ 。边坡可靠度分析采用非线性 Barton-Bandis 破坏准则,相关参数取值参考文献 [1]: $\gamma = 25$ kN/m³, $\varphi_b = 32^\circ$, $JCS = 24.4$ MPa, $JRC = 9$ 。分析过程中将 JCS , JRC 和 φ_b 视作随机变量,服从正态分布,并考虑其不确定性对边坡稳定性分析的影响。

表 1 随机变量参数

Tab. 1 Random variable parameters

随机变量	分布类型	均值	变异系数 (COV)
JCS/MPa	正态分布	24.4	0.3
JRC	正态分布	9	0.2
$\varphi_b/(\circ)$	正态分布	32	0.2

根据上述数据,采用 MATLAB 编制一阶可靠度求解程序计算得到可靠度指标 $\beta = 2.10$,失效概率 $P_f = 0.018$ 。由此可得,该岩质边坡失效概率较小,具有足够的稳定性。

同时,为验证计算结果的准确性,采用内含 Barton-Bandis 破坏准则计算程序的软件 UDEC^[18] 对该岩质边坡进行模拟计算。模型建立过程中,左右

边界固定水平位移,底部边界固定竖向位移。通过分析计算,得到其位移变化如图 2 所示,坡趾变形大于坡顶变形。其中,采用 UDEC 计算得到的基于 Barton-Bandis 破坏准则边坡安全系数 $F_s = 1.53$,采用本研究式 (5) 计算得到的边坡安全系数 $F_s = 1.5378$,二者吻合良好,验证了本研究计算方法的可行性和有效性。

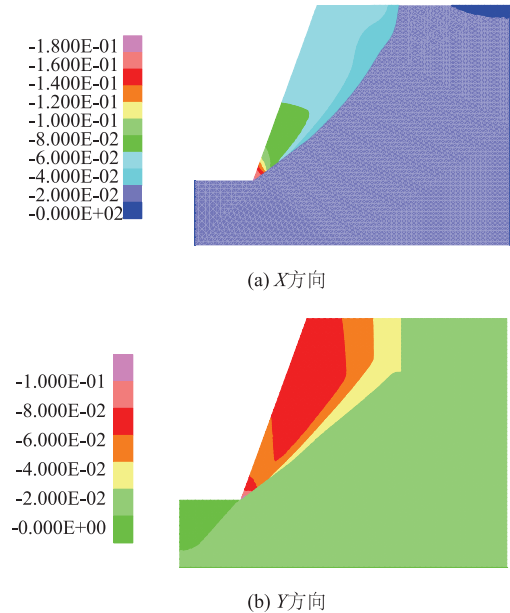


图 2 边坡变形分布 (单位: m)

Fig. 2 Distribution of slope deformation (unit: m)

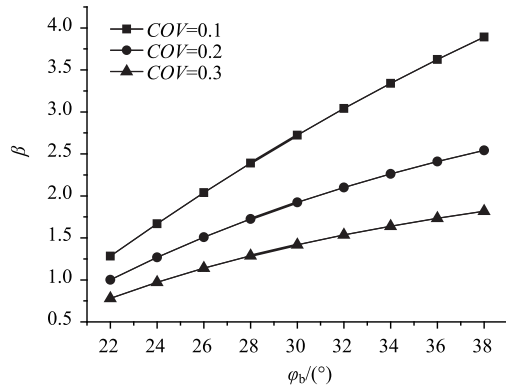
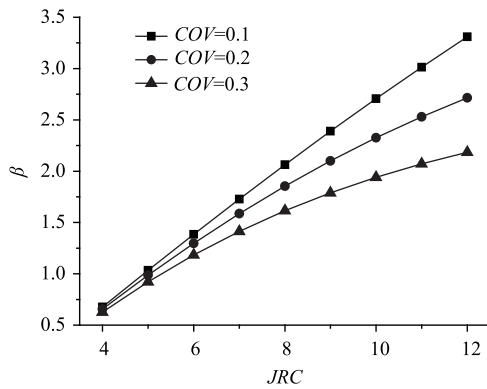
3.1 随机变量对边坡稳定性的影响

为分析各个随机变量对岩质边坡稳定性的影响,通过改变各个随机变量取值计算相应的可靠度指标。同时,分别将各随机变量的变异系数 COV 取值设为 0.1, 0.2, 0.3, 分析随机变量参数的不确定性对边坡稳定性的影响。经计算,其可靠度指标 β 如图 3 所示。

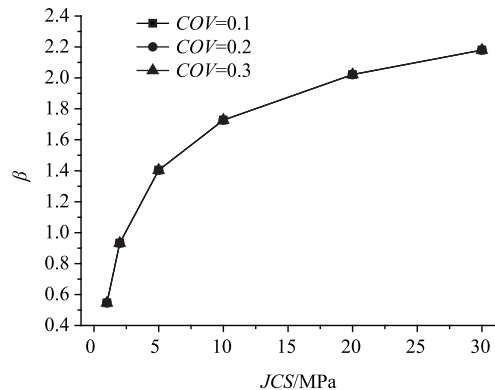
从图 3 可以看出, φ_b , JRC 和 JCS 的增加,均会导致边坡可靠度指标 β 的增加,表明增大 φ_b , JRC 和 JCS 可使岩质边坡趋于稳定。同时,随着变异系数的增加,可靠度指标 β 呈现不同程度的降低,即变量不确定性对边坡稳定性影响的敏感性不一,其中 φ_b 和 JRC 不确定性对边坡稳定性的影响显著, JCS 影响相对较小。

3.2 地下水位对边坡稳定性的影响

为分析地下水水位变化对该岩质边坡稳定性的影响,本研究通过改变图 1 所示的张裂缝中地下水位高度 Z_w ,其他参数的取值不变,计算结果见图 4。

(a) φ_b 对边坡可靠度的影响

(b) JRC对边坡可靠度的影响



(c) JCS对边坡可靠度的影响

图3 随机变量对边坡可靠度的影响

Fig. 3 Influence of variables on reliability of slope

由图4可知,地下水位的增加会导致边坡的可靠度指标显著降低,当后缘张裂缝中地下水位高度从1 m增加到5 m时,失效概率增加了7倍多,可见地下水水位的升高将大幅降低边坡的稳定性。

4 结论

本研究基于典型平面滑动岩质边坡破坏模型,结合可靠度理论与 Barton-Bandis 非线性破坏准则,开展了岩质边坡可靠度分析研究,得到以下结论:

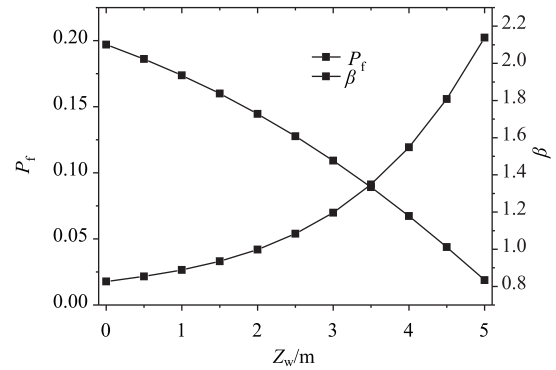


图4 地下水对边坡可靠度的影响

Fig. 4 Influence of groundwater on reliability of slope

(1) 非线性 Barton-Bandis 破坏准则的主要变量 φ_b , JRC 和 JCS 对岩质边坡稳定性有着显著影响,且岩质边坡稳定性随着 φ_b , JRC 和 JCS 的增加而提升。

(2) 随着随机变量参数 φ_b , JRC 和 JCS 变异系数的增加,岩质边坡稳定性有所降低,各参数敏感性差异较大,其中 φ_b 和 JRC 的影响较为显著, JCS 的影响较弱。

(3) 地下水变化对边坡稳定性的影响较大,随着后缘裂缝地下水位的升高,岩质边坡的失效概率成倍增大,有必要设置完善的坡体内部排水系统。

参考文献:

References:

- [1] 罗强,赵炼恒,李亮,等. 基于 Barton-Bandis 准则的锚固边坡稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (5): 1351 - 1359.
LUO Qiang, ZHAO Lian-heng, LI Liang, et al. Stability Analysis of Anchored Rock Slope Based on Barton-Bandis Failure Criterion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (5): 1351 - 1359.
- [2] ZUO J P, LIU H H, LI H T. A Theoretical Derivation of the Hoek-Brown Failure Criterion for Rock Materials [J]. Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering, 2015, 42 (4): 361 - 366.
- [3] 罗伟,李亮,赵炼恒,等. 临河岩石边坡抗滑稳定性分析 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (8): 23 - 28, 42.
LUO Wei, LI Liang, ZHAO Lian-heng, et al. Study on Anti-slide Stability of Rock Slope along River [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30 (8): 23 - 28, 42.
- [4] 李永红,彭振斌,钟正强,等. 基于 Barton-Bandis 非线性破坏准则的岩体强度预测 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40 (5): 1388 - 1391.

- LI Yong-hong, PENG Zhen-bin, ZHONG Zheng-qiang, et al. Strength Prediction for Rock Mass Based on Barton-Bandis Nonlinear Failure Criterion [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2009, 40 (5): 1388 - 1391.
- [5] 孙超伟, 柴军瑞, 许增光, 等. 基于 Hoek-Brown 强度折减法的边坡稳定性图表法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (4): 838 - 851.
- SUN Chao-wei, CHAI Jun-rui, XU Zeng-guang, et al. Stability Charts for Rock Slopes Based on the Method of Reduction of Hoek-Brown Strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (4): 838 - 851.
- [6] 唐高朋, 李亮, 赵炼恒, 等. 非线性破坏准则下边坡稳定性极限分析斜条分法 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (7): 2063 - 2072.
- TANG Gao-peng, LI Liang, ZHAO Lian-heng, et al. Inclined Slices Method for Limit Analysis of Slope Stability with Nonlinear Failure Criterion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (7): 2063 - 2072.
- [7] 周建普, 李献民, 王永和. 粘土边坡可靠性分析方法研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2002, 29 (5): 92 - 97, 103.
- ZHOU Jian-pu, LI Xian-min, WANG Yong-he. Research for Method of Reliability Analysis for Clayey Soil Slope [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2002, 29 (5): 92 - 97, 103.
- [8] BARTON N, CHOUHEY V. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice [J]. Rock Mechanics, 1977, 10 (1): 1 - 54.
- [9] 罗正东, 苏永华, 付雄, 等. 基于逆可靠度方法的边坡稳定性分析 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (3): 43 - 48.
- LUO Zheng-dong, SU Yong-hua, FU Xiong, et al. Analysis of Slope Stability Based on Inverse Reliability Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (3): 43 - 48.
- [10] 李早, 赵树德. 基于可靠性理论的岩土工程反分析设计 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38 (2): 159 - 162, 177.
- LI Zao, ZHAO Shu-de. Inverse Analysis Design in Geotechnical Engineering Based on the Reliability Theory [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2006, 38 (2): 159 - 162, 177.
- [11] 李典庆, 周创兵, 胡冉. 基于 n 维等效方法的岩质边坡楔体稳定体系可靠度分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (7): 1415 - 1424.
- LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, HU Ran. System Reliability Analysis of Rock Slope Wedge Stability Based on N-dimensional Equivalent Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (7): 1415 - 1424.
- [12] LI D Q, JIANG S H, CHEN Y F, et al. System Reliability Analysis of Rock Slope Stability Involving Correlated Failure Modes [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15 (8): 1349 - 1359.
- [13] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22 (3): 121 - 140.
- [14] HOEK E, BRAY J W. Rock Slope Engineering [M]. 3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
- [15] 孙立川, 王红贤, 周念清, 等. 可靠度理论在岩质边坡楔形体破坏反分析中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (增 1): 2660 - 2667.
- SUN Li-chuan, WANG Hong-xian, ZHOU Nian-qing, et al. Application of Reliability Theory to Back Analysis of Rocky Slope Wedge Failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (S1): 2660 - 2667.
- [16] LOW B K. Reliability Analysis of Rock Slopes Involving Correlated Nonnormals [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44 (6): 922 - 935.
- [17] 曾晟. 平面破坏型岩质边坡稳定可靠度研究及其应用 [D]. 衡阳: 南华大学, 2005.
- ZENG Sheng. Reliability Analysis of Plane-failure Rock Slope and Application [D]. Hengyang: University of South China, 2005.
- [18] CHOI S O, CHUNG S K. Stability Analysis of Jointed Rock Slopes with the Barton-Bandis Constitutive Model in UDEC [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41 (S1): 581 - 586.