

基于正交试验的边坡安全系数影响因素敏感性分析

扈家乐¹, 胡洋^{1,2}, 姜玮^{1,2}, 解建³, 夏胡斌¹

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²国家煤矿水害防治工程技术研究中心(宿州学院), 安徽 宿州

³安徽恒源煤电集团股份有限公司五沟煤矿, 安徽 淮北

收稿日期: 2024年4月1日; 录用日期: 2024年4月21日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

为了研究边坡安全系数的影响因素, 考虑边坡土体粘聚力、内摩擦角、体积模量、密度、抗拉强度及边坡倾角, 采用FLAC^{3D}有限差分软件计算边坡安全系数, 在分析模型网格疏密程度对计算结果影响规律的基础上, 运用正交试验法对计算结果分析, 研究影响边坡安全系数的各因素敏感性。研究表明, 内聚力、内摩擦角、密度及边坡倾角对边坡安全系数的影响非常显著, 敏感性影响程度从大到小依次为: 内聚力、内摩擦角、密度、边坡倾角, 且内聚力、内摩擦角与安全系数成正相关, 边坡倾角、密度与安全系数成负相关; 体积模量与抗拉强度对边坡安全系数的影响不显著。经过全长锚固支护后的边坡安全系数从0.96提高到1.22, 锚杆支护在提高边坡稳定性方面有较好的效果。

关键词

边坡稳定, 安全系数, 正交试验, 敏感性分析, 锚杆支护

Sensitivity Analysis of Influencing Factors of Slope Safety Factor Based on Orthogonal Test

Jiale Hu¹, Yang Hu^{1,2}, Wei Jiang^{1,2}, Jian Xie³, Hubin Xia¹

¹School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²National Coal Mine Water Hazard Prevention Engineering Technology Research Center (Suzhou University), Suzhou Anhui

³Wugou Coal Mine, Anhui Hengyuan Coal Power Group Co., Ltd., Huaibei Anhui

Received: Apr. 1st, 2024; accepted: Apr. 21st, 2024; published: Apr. 30th, 2024

文章引用: 扈家乐, 胡洋, 姜玮, 解建, 夏胡斌. 基于正交试验的边坡安全系数影响因素敏感性分析[J]. 土木工程, 2024, 13(4): 490-499. DOI: 10.12677/hjce.2024.134054

Abstract

In order to study the influencing factors of slope safety factor, considering the cohesive force of soil mass, internal friction angle, volume modulus, density, tensile strength and slope inclination, FLAC^{3D} finite difference software was used to calculate the slope safety factor. On the basis of analyzing the influence law of model mesh density on the calculation results, orthogonal test method was used to analyze the calculation results. The sensitivity of factors affecting the safety factor of slope is studied. The results show that cohesion, internal friction angle, density and slope inclination have significant effects on slope safety factor, and the degree of sensitivity is as follows from large to small: cohesion, internal friction angle, density and slope inclination, and cohesion and internal friction angle are positively correlated with safety factor, while slope inclination and density are negatively correlated with safety factor. The influence of volume modulus and tensile strength on slope safety factor is not significant. The safety factor of the slope increased from 0.96 to 1.22 after the full length anchorage support, and the bolt support has a good effect on improving the stability of the slope.

Keywords

Slope Stability, Safety Factor, Orthogonal Test, Sensitivity Analysis, Bolt Support

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

边坡稳定性是指边坡在重力或其他外力作用下保持稳定的能力。边坡的稳定性除与边坡的几何构造、岩土体物理力学性质(内聚力、内摩擦角、密度、弹性模量等)等内部因素直接相关[1] [2] [3]外,还与地震、降雨、爆破振动等外部因素密切相关。为探究各因素对边坡稳定性的影响规律,近年来,国内外众多学者采用不同的研究手段,围绕外因素扰动条件下边坡失稳机理、各因素对边坡稳定性影响程度等方面进行了深入的研究,并取得了大量卓有成效的研究成果[4] [5] [6] [7]。王建洪[8]等分析了单值及双值降雨条件下堆积体边坡失稳力学机理;张昊[9]等采用强度折减算法,分析了边坡黏聚力 c 、内摩擦角 φ 对安全系数及滑动面位置的影响规律;徐宏[10]等运用正交试验的研究手段,分析了不同因素对边坡稳定性的影响程度;黄盛锋[11]等基于灰色关联度法开展了不同因素对边坡安全系数敏感性大小排序;董洁华[12]通过建立 ABAQUS 数值计算模型,运用强度折减法对各因素条件下的安全系数值进行数值计算,结果表明:内聚力对边坡稳定性的影响最大,其次是内摩擦角和重度,弹性模量的影响程度最小。本文基于正交试验,运用 FLAC^{3D} 软件建立边坡数值模型,通过方差分析,开展不同因素对边坡安全系数影响的显著性与敏感性研究,得出不同因素对边坡稳定性的影响程度与规律,并评价了特定工况条件下,锚杆支护对边坡安全系数的提升效果。

2. 计算原理与数值建模

2.1. 强度折减法原理

强度折减法中边坡稳定的安全系数定义为:使边坡刚好达到临界破坏状态时,对岩土体的抗剪强度

进行折减的程度，即定义安全系数为岩土体的实际抗剪强度与临界破坏时的折减后剪切强度的比值。强度折减法即采用式(1)、(2)来调整岩土体的强度指标 c 和 φ

$$C_F = C/F_{\text{trial}} \tag{1}$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}[(\tan \varphi)/F_{\text{trial}}] \tag{2}$$

式中： c ——折减前的粘结力，(Pa)；

φ ——折减前的摩擦角，(°)；

c_F ——折减后的粘结力，(Pa)；

φ_F ——折减后的摩擦角，(°)；

F_{trial} ——折减系数。

然后对边坡稳定性进行数值分析，不断地增加折减系数，反复计算，直至边坡发生临界破坏状态，此时得到的折减系数 F_{trial} 即为安全系数 F_S 。

2.2. 数值计算模型

假设边坡模型为各向同性的均质弹塑性材料，在求解安全系数中以最大不平衡力比作为计算终止标准，即最大不平衡力比 $R \leq 10^{-5}$ 即达到数值计算平衡状态。模型采用摩尔-库伦本构模型，上表面为自由边界，底部为固定位移边界，(对 x 、 y 、 z 三个方向进行位移约束)，模型的四周为法向位移约束(按照其所处位置分别对 x 、 y 两个方向进行位移约束)。

数值模型中网格划分采用六面体网格(图 1 所示)，笔者在对边坡安全系数的数值计算过程中发现，网格的疏密程度对计算结果具有一定的影响，故对边坡安全系数影响因素的敏感性分析前，首先进行了网格疏密程度对安全系数计算结果的影响规律分析。模型的网格数量按照基础网格数量划分(238 个)、加密一倍网格数量(476 个)、稀疏一倍网格数量(119 个)三种进行选取，数值模型大小保持一致，所选取的边坡体物理力学参数如表 1 所示。

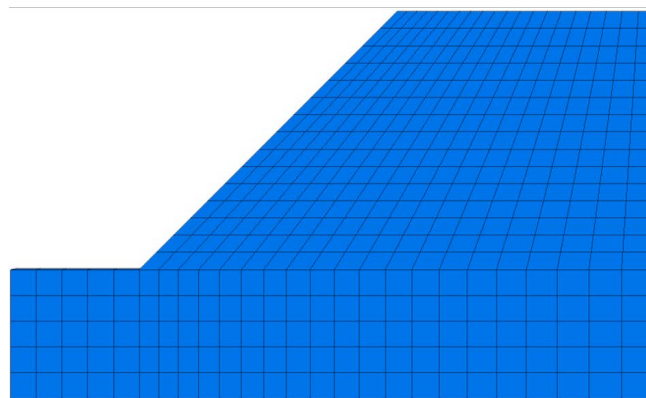


Figure 1. Numerical model meshing

图 1. 数值模型网格划分

Table 1. Physical and mechanical parameters of slope body

表 1. 边坡体物理力学参数

黏聚力/Pa	体积模量/ m^3	抗拉强度/Pa	边坡倾角/(°)	内摩擦角/(°)	密度/(kg/m^3)	抗剪强度/Pa
12000.0	$1.0e^8$	$1.0e^8$	45	20	2000	$3.0e^7$

2.3. 网格疏密程度对安全系数的影响

不同网格数量条件下所得剪切应变增量及安全系数云图如图 2 所示。由图 2 可知，在数值模型大小及其余条件保持不变的情况下，当模型网格数量为 119、238、476 时，对应安全系数结果分别为：1.07、1.03、1.01，即随着网格数量的增大，所得安全系数结果呈现减小的趋势，误差率分别为：3.7%、1.9%，误差率随着网格数量的增大也呈现不断减小的趋势，因此从该点上看，网格数量越大其所得计算精度越高，但网格数量的增加会大大增加数值计算所用的时间，本实例中当模型网格数量为 119、238、476 时，计算所用时间分别为 1 min、3 min、23 min，因此合理选择网格疏密程度对提高计算效率与减小计算误差意义重大，本算例中按照基础网格数量划分为 238 个与加密一倍网格数量 476 个，所得结果误差仅为 1.9%，而时间多耗费近 10 倍，故在下述计算过程中，数值模型的网格按照基础网格数量模型进行划分。

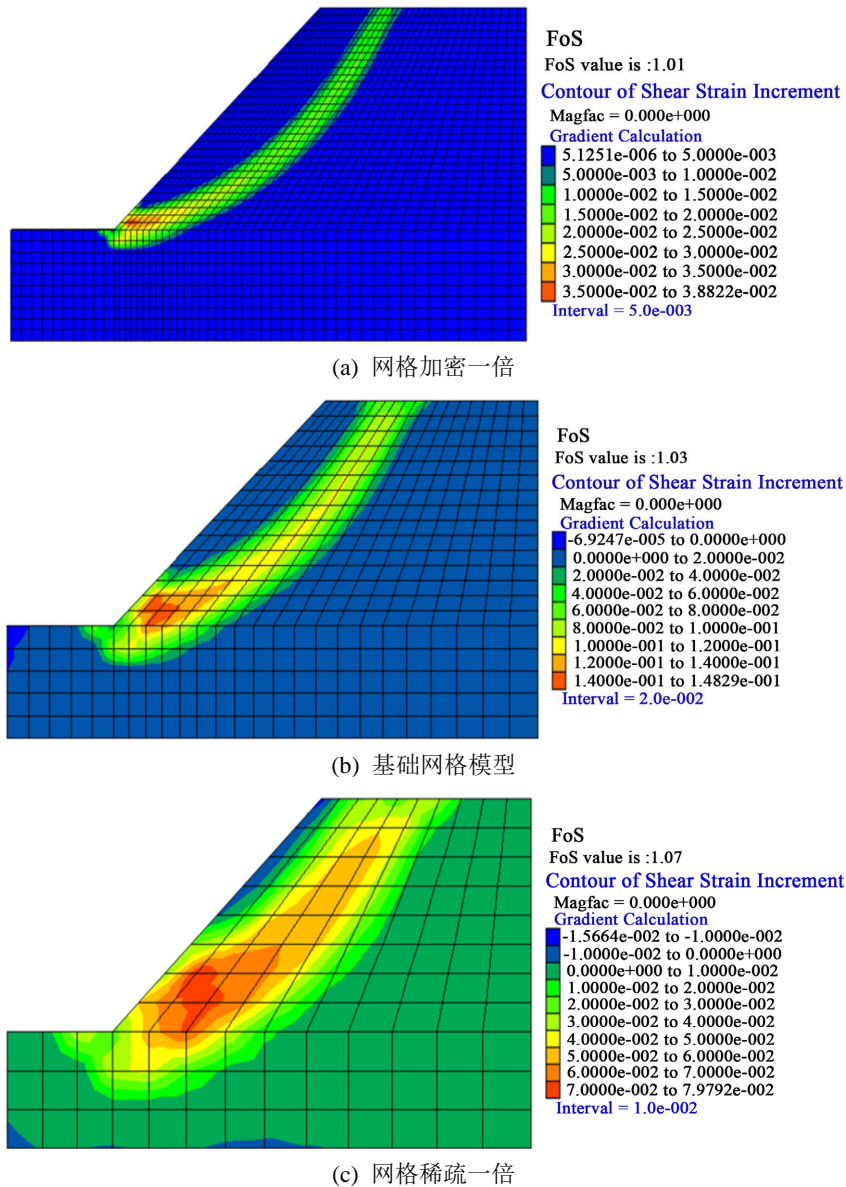


Figure 2. Incremental shear strain versus factor of safety for models with different number of meshes
图 2. 不同网格数量模型剪切应变增量与安全系数

3. 边坡稳定性影响因素敏感性分析

3.1. 正交试验设计

正交试验设计常用于分析涉及多因素的材料、结构等,该试验方法已被证明十分有效[13]。在进行多因素多水平分析时,如果每个因素的每个水平都进行互相交互完成全部试验,试验次数较多。并且伴随着试验因素数量的增加,试验次数将会剧增,试验数据的统计分析工作也会变得十分繁重。而正交试验可以选取合理的样本数以达到较好的试验效果。正交试验的工具是正交表,正交表可直观地应用于试验设计。所得出的结果中方差(或极差)越大,则该因素的水平改变对试验结果的影响也就越大。等水平的正交表可以用符号 $L_n(r^m)$ 来表示,其中, L 为正交表代号; r 为因素水平数; n 为需要做的试验次数; m 为正交表纵列数。

3.2. 参数取值

选取黏聚力、内摩擦角、体积模量、边坡倾角、密度以及抗拉强度这 6 个参数作为敏感性因素。参数具体取值如表 2 所示。

Table 2. Level of slope factors
表 2. 边坡因素水平

水平	黏聚力/kPa	体积模量/m ³	抗拉强度/Pa	边坡倾角/(°)	内摩擦角/(°)	密度/(kg/m ³)
1	6.00	1.0e ⁷	0.5e ⁸	38	16	1500
2	12.00	1.0e ⁸	1.0e ⁸	45	20	2000
3	24.00	1.0e ⁹	1.5e ⁸	51	24	2500

3.3. 方差分析结果

选择正交表为 $L_{18}(3^7)$, 坡体稳定性正交试验方案见表 3, 正交试验计算结果见表 4。其中 K_1 、 K_2 、 K_3 分别为任一列上各因素水平为 1、2、3 时各自对应的试验结果之和, $G = \sum_{k=1}^{18} y_k$; C 为校正数, $C = G^2/18$; S_i 为各因素离差平方和, $S_i = (k_1^2 + k_2^2 + k_3^2)/6 - C$; S_T 为总离差平方和, $S_T = \sum_{k=1}^{18} y_k^2 - C$; S_e 为试验误差的离差平方和, $S_e = S_T - S_i$, $i = 1, 2, \dots, 6$ 。由于极差的值看不出显著性, 故引入方差来判断各影响因素的显著性。利用正交设计助手软件, 取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 计算结果见表 4。表中各主控因素的平均偏差平方和与误差的平均偏差平方和之比为 F , 采用 F 检验法将各主控因素的 F 值与 F 表进行对比分析, 进而确定各主控因素对底板破坏深度影响程度大小, 其计算公式为

$$F = \frac{S_i/f_i}{S_e/f_e} \quad (3)$$

式中: S_i ——主控因素偏差平方和;

f_i ——自由度;

S_e ——试验误差偏差平方和;

f_e ——为试验误差自由度。

将表 4 中相应数据代入式中, 可得主控因素的 F 值, 如表 5 所示。

由表 4 所得结果可知: 黏聚力、边坡倾角、内摩擦角、密度对边坡安全系数的影响为非常显著, 体积模量和抗拉强度为不显著。根据敏感性从大到小依次为黏聚力、内摩擦角、密度、边坡倾角、体积模量、抗拉强度。因此在实际施工或治理边坡稳定性方面, 要优先着重分析边坡岩土体的黏聚力大小, 影

响岩土体的黏聚力因素有颗粒组成(土类别)、颗粒大小、颗粒形状、含水量等, 所以对于实际应用中的边坡, 优先选黏聚力大的土类, 最优含水率的选取; 有时仅仅考虑提高岩土体黏聚力, 比较有限, 特别对于自然边坡, 要做好排水措施, 辅助增设人工防护措施, 如增设锚杆、锚索等, 来提高岩土体的黏聚力与内摩擦角等因素, 减少、防范边坡的坍塌。

Table 3. Orthogonal test protocol

表 3. 正交试验方案

试验编号	黏聚力 /kPa	体积模量 /m ³	抗拉强度 /Pa	边坡倾角 /(°)	内摩擦角 /(°)	密度 /(kg/m ³)	空列	安全系数
1	1 (6)	1 (1.0e ⁷)	1 (0.5e ⁸)	1 (38)	1 (16)	1 (1500)	1	0.87
2	1	2 (1.0e ⁸)	2 (1.0e ⁸)	2 (45)	2 (20)	2 (2000)	2	0.78
3	1	3 (1.0e ⁹)	3 (1.5e ⁸)	3 (51)	3 (24)	3 (2500)	3	0.74
4	2 (12)	1	1	2	2	3	3	0.94
5	2	2	2	3	3	1	1	1.19
6	2	3	3	1	1	2	2	1.04
7	3 (24)	1	2	1	3	2	3	1.81
8	3	2	3	2	1	3	1	1.17
9	3	3	1	3	2	1	2	1.61
10	1	1	3	3	2	2	1	0.70
11	1	2	1	1	3	3	2	0.99
12	1	3	2	2	1	1	3	0.76
13	2	1	2	3	1	3	2	0.74
14	2	2	3	1	2	1	3	1.35
15	2	3	1	2	3	2	1	1.16
16	3	1	3	2	3	1	2	1.89
17	3	2	1	3	1	2	3	1.23
18	3	3	2	1	2	3	1	1.47

Table 4. Orthogonal test results

表 4. 正交试验结果

试验编号	黏聚力 /kPa	体积模量 /m ³	抗拉强度 /Pa	边坡倾角 /(°)	内摩擦角 /(°)	密度 /(kg/m ³)	空列	安全系数
K ₁	4.84	6.95	6.80	7.53	5.81	7.67	6.56	
K ₂	6.42	6.71	6.75	6.70	6.85	6.72	7.05	
K ₃	9.18	6.78	6.89	6.21	7.78	6.05	6.83	G = 20.44 G ² = 417.79 C = 23.21
K ₁ ²	23.43	48.30	46.24	56.70	33.76	58.83	43.03	
K ₂ ²	41.22	45.02	45.56	44.89	46.92	45.16	49.70	

续表

K_3^2	84.27	45.97	47.47	38.56	60.53	36.60	46.65	
S_i	1.61	0.005	0.002	0.148	0.324	0.222	0.020	$G = 20.44$
S_T				2.33				$G^2 = 417.79$
S_e				0.02				$C = 23.21$

Table 5. ANOVA table
表 5. 方差分析表

来源	偏差平方和	自由度	均偏差平方和	F	F 临界值	显著性
黏聚力	1.61	2	0.805	178.89	$F_{0.05}(2, 6)$	**
体积模量	0.005	2	0.0025	0.556	$F_{0.05}(2, 6)$	
抗拉强度	0.002	2	0.001	0.222	$F_{0.05}(2, 6)$	
边坡倾角	0.148	2	0.074	16.44	$F_{0.05}(2, 6)$	**
内摩擦角	0.324	2	0.162	36.00	$F_{0.05}(2, 6)$	**
密度	0.222	2	0.111	24.67	$F_{0.05}(2, 6)$	**
误差 e	0.020	2	0.01			
误差	0.027	6	0.0045			

注：① $F_{0.01}(2, 6) = 10.93$; $F_{0.05}(2, 6) = 5.14$; ② 当 $S_i < 2S_e$ 时，可将因素或交互作用的偏差平方和、自由度并入误差的偏差平方和、自由度，记为误差 e^A ，使得误差的偏差平方和、自由度增大，提高了 F 检验的灵敏度；③ $F > F_{0.01}(f_i, f_e)$ ，该因素高度显著，以**表示；④ $F_{0.05}(f_i, f_e) < F < F_{0.01}(f_i, f_e)$ ，该因素显著，以*表示；⑤ $F < F_{0.05}(f_i, f_e)$ ，该因素不显著。

由上述试验结果可得，黏聚力、边坡倾角、内摩擦角、密度这四种影响因素对边坡安全系数的影响非常显著，文章在此进一步讨论这四个影响因素对边坡安全系数变化的影响规律。边坡安全系数随岩土体密度、边坡倾角变化规律分别如图 3、图 4 所示。

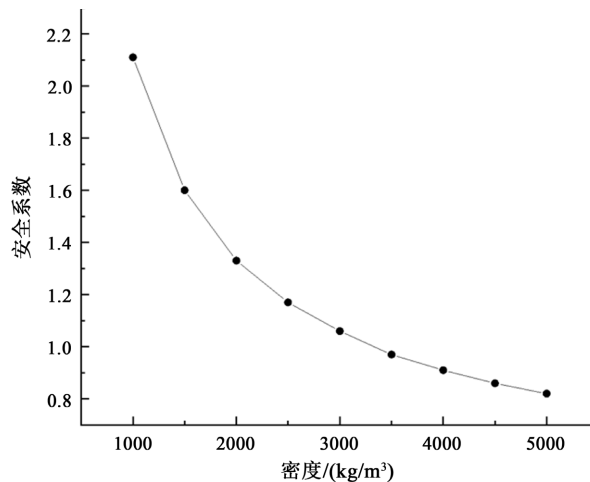


Figure 3. Relationship between the slope safety factor and the density of the soil and rock mass
图 3. 边坡安全系数与岩土体密度关系

由图 3 可知, 在其余条件保持不变的前提下, 当岩土体的密度为 1000 kg/m^3 时, 所得边坡安全系数为 2.11; 当岩土体的密度取值为 1500 kg/m^3 , 求得边坡安全系数为 1.60; 当密度取值为 2000 kg/m^3 时, 求得边坡安全系数为 1.33, 随着密度的不断增大, 边坡安全系数在不断减小, 且减小率不断减小, 以上结果表明岩土体密度与边坡安全系数成负相关关系, 且当岩土体密度增大到一定程度后, 这种负相关关系逐渐降低。

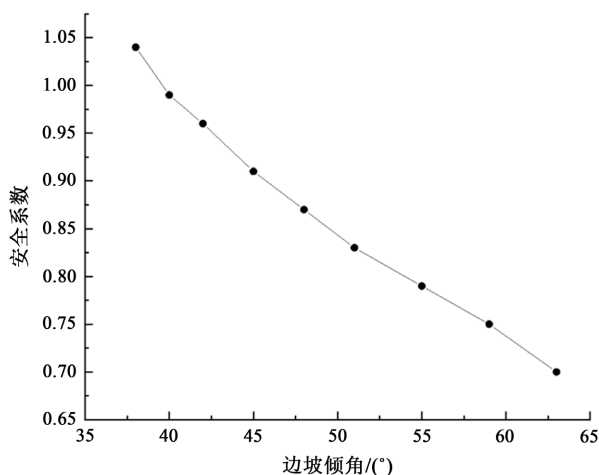


Figure 4. Relationship between slope safety factor and slope inclination angle
图 4. 边坡安全系数与边坡倾角关系

由图 4 可知, 在其余条件保持不变的情况下, 当边坡倾角为 38° 时, 求得安全系数为 1.04; 当边坡倾角为 40° 时, 安全系数为 0.99; 当边坡倾角为 42° 时, 安全系数为 0.96。即随着边坡倾角的增大, 安全系数不断减小, 边坡倾角与安全系数近似呈现线性负相关关系, 边坡倾角越大, 安全系数越小, 即边坡越缓, 边坡稳定性越强。

内聚力、内摩擦角作为土体抗剪强度中两个重要参数, 其对边坡安全系数的影响规律如图 5 所示。

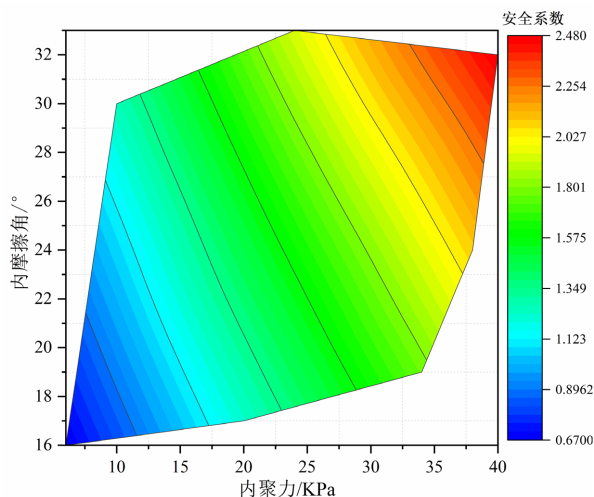


Figure 5. Relationship between slope safety factor and cohesion and angle of internal friction
图 5. 边坡安全系数与内聚力、内摩擦角关系

根据图 5 可知, 当内聚力为 6 Pa、内摩擦角取值为 16° 时, 边坡安全系数为 0.67; 当黏聚力取值为 8

Pa, 内摩擦角取值为 17° 时, 边坡安全系数为 0.79; 当黏聚力取值为 10 Pa, 内摩擦角取值为 18° 时, 边坡安全系数为 0.89, 即随着黏聚力与内摩擦角的不断增大, 边坡安全系数也不断增大, 即边坡岩土体的内聚力、内摩擦角与边坡安全系数成正相关关系。在其余条件保持不变的情况下, 岩土体的内聚力、内摩擦角越大, 边坡安全系数越大, 边坡越稳定。

3. 锚杆支护效果分析

工程实践表明[14], 用锚杆支护边坡具有安全、施工方便、经济适用、扰动小、加固效果好等优点, 而且抗震性能好。岩土工程中常用的支护方法分为全锚法和端锚法, 它们的区别在于锚杆的设置方式和作用范围。其中全锚法是指在需要支护的岩土体中采用连续布设的锚杆, 从支护区域延伸到岩土体的深部, 以增强岩土体的整体稳定性。端锚法是指在支护区域的边缘附近设置锚杆, 通过固定边缘部分的岩土体来实现支护作用。的来说, 全锚法适用于需要对整体岩土体进行加固和稳定的工程, 而端锚法更适用于局部区域的支护和加固。考虑到文章是采用 FLAC^{3D} 软件进行锚杆支护效果分析, 且在软件中一般将边坡模型视为一个整体进行赋参、计算, 因此采用全锚法进行锚杆支护效果分析更为合理。

采用全锚法锚杆支护加固边坡, 边坡倾角为 45° , 锚杆杆体采用直径为 8 mm 的钢筋, 锚杆长度为取 4 m, 锚杆间距为 1 m, 锚固剂单位长度上的刚度为 $1.0e^8$, 锚固剂单位长度上的黏聚力为 $10e^6$ Pa。锚杆支护前后边坡剪切应变增量与安全系数如图 6 所示。由图 6 可知, 天然边坡在未支护状态时安全系数为 0.96, 经过全锚支护后的安全系数提高至 1.22, 通过全锚支护边坡得到了加固。

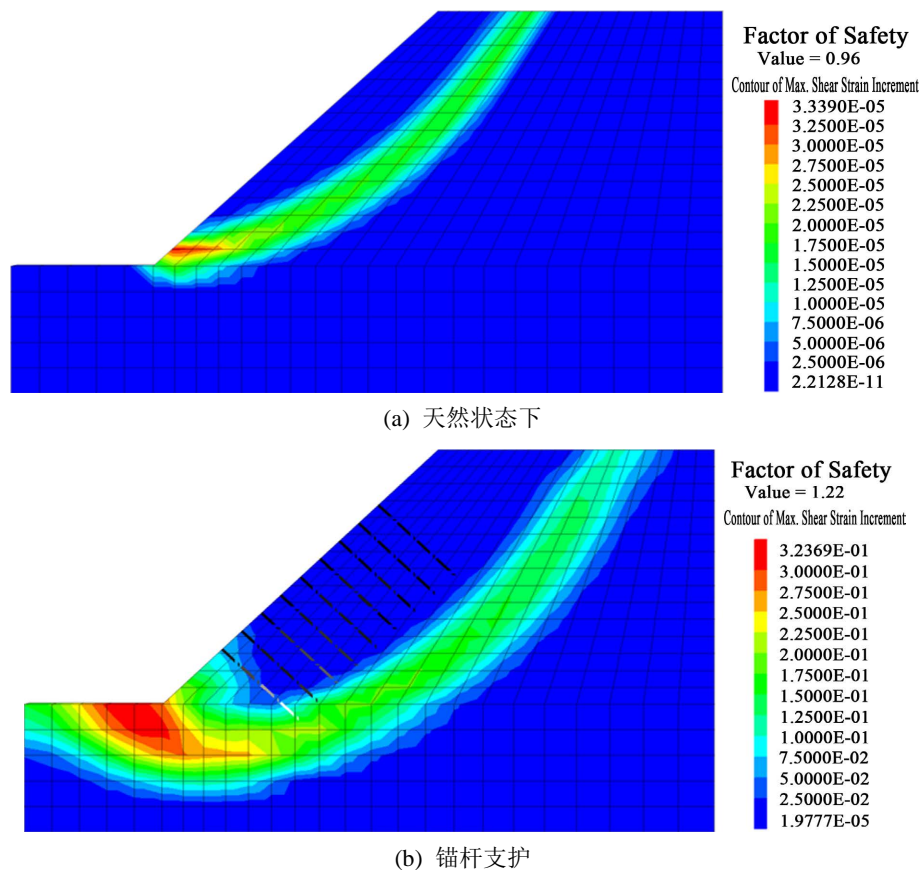


Figure 6. Shear strain increment and safety factor of slope before and after anchor support
图 6. 锚杆支护前后边坡剪切应变增量及安全系数

4. 结论

(1) 网格疏密程度对边坡安全系数数值计算结果有着较大影响, 基于 FLAC 计算边坡安全系数需要根据实际情况合理选择网格疏密程度。

(2) 边坡安全系数影响因素敏感性从大到小依次为黏聚力、内摩擦角、密度、边坡倾角、体积模量、抗拉强度。

(3) 黏聚力、内摩擦角、密度、边坡倾角对边坡安全系数的影响为非常显著, 体积模量与抗拉强度为不显著。黏聚力与内摩擦角和边坡安全系数成正相关, 密度与边坡倾角和边坡安全系数成负相关。

(4) 天然状态下的边坡经过锚杆支护后安全系数从 0.96 增加到 1.22, 锚杆支护在提高边坡稳定性方面有较好的效果。

基金项目

宿州学院博士启动金项目(2021BSK014); 宿州学院博士后启动金项目(2022BSH003); 宿州学院校级重点项目(2021yzd04); 安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202110379198)。

参考文献

- [1] 马毓婷, 陈俊智, 任春芳, 等. 露天矿岩体力学参数对终了边坡稳定性影响敏感性数值模拟[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(4): 95-101.
- [2] 邓文学, 杨天鸿, 南世卿, 等. 司家营铁矿东帮边坡岩体力学参数确定及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2016(3): 15-19.
- [3] 李志辉, 杨小彬, 原文杰, 等. 考虑石块度及分布的人工土石混合边坡稳定性分析[J/OL]. 金属矿山: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20211118.2010.002.html>, 2022-09-03.
- [4] 田刚. 非饱和土边坡稳定性影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022. <https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2022.000425>
- [5] 臧浩, 陈鹏, 赵盾, 等. 基于 3DEC 的岩质边坡安全系数影响因素敏感性研究[J]. 山东国土资源, 2021, 37(8): 71-77.
- [6] 王一冰, 朱宝强, 周成, 等. 坡面降雨和坡脚浸泡对土坡影响的模型试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2): 21-26, 32.
- [7] 田海, 孔令伟, 李波. 降雨条件下松散堆积体边坡稳定性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3180-3186.
- [8] 王建洪, 田明, 邹云丽, 等. 云南地区降雨诱发堆积体边坡失稳的力学机理研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 204-208+227.
- [9] 张昊, 余巍伟, 林杭, 等. 不同安全系数对应的边坡滑动面位置分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 449-452.
- [10] 徐宏, 夏琼, 王旭. 边坡安全系数影响因素敏感性分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(8): 98-101.
- [11] 黄盛锋, 陈志波, 郑道哲. 基于灰色关联度法和强度折减法的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 35-40. <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.05>
- [12] 董杰华, 黄浩, 徐中来, 等. 基于 ABAQUS 的坡地边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 煤炭技术, 2021, 40(1): 62-65. <https://doi.org/10.13301/j.cnki.ct.2021.01.017>
- [13] Zou, G.L., Xu, J. and Wu, C. (2017) Evaluation of Factors That Affect Rutting Resistance of Asphalt Mixes by Orthogonal Experiment Design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **10**, 282-288. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.008>
- [14] 杨石磊, 郑帅恒, 刘思民, 等. 基于 FLAC3D 对秘鲁某边坡锚杆支护优化设计分析[J]. 中国水运, 2023(5): 91-93. <https://doi.org/10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.05.032>