

基于理正软件研究工程边坡的稳定性

祝绍猛*, 姚多喜

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南
Email: *13856508101@163.com

收稿日期: 2021年6月18日; 录用日期: 2021年7月2日; 发布日期: 2021年7月21日

摘要

在城市的发展中, 有限的城市空间要求必须发展地下空间, 在工程建设中不可避免的会遇到深基坑的开挖, 所以在施工过程中基坑开挖放坡后边坡的稳定性是十分重要的安全问题。本文通过控制变量法并采用理正岩土边坡稳定性分析系统对影响边坡稳定性的四种因素进行数值计算, 并对其进行敏感性分析, 从而找到边坡失稳的敏感性因素, 为项目工程的质量安全提供重要的理论支撑。

关键词

工程边坡, 稳定性系数, 理正岩土边坡软件, 基坑安全

Research on the Stability of Engineering Slope Based on Lizheng Software

Shaomeng Zhu*, Duoxi Yao

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui
Email: *13856508101@163.com

Received: Jun. 18th, 2021; accepted: Jul. 2nd, 2021; published: Jul. 21st, 2021

Abstract

In the development of the city, the limited urban space requires the development of underground space. In the construction of the project, the excavation of deep foundation pits will inevitably be encountered. Therefore, the stability of the slope after the excavation of the foundation pit during the construction process is a very important safety issue. This paper uses the method of con-

*通讯作者。

controlled variables and the Lizheng rock-soil slope stability analysis system to numerically calculate the four factors that affect the stability of the slope, and conduct sensitivity analysis on them, so as to find the sensitive factors of slope instability. Provide important theoretical support for the quality and safety of project engineering.

Keywords

Engineering Slope, Stability Coefficient, Lizheng Rock-Soil Slope Software, Foundation Pit Safety

Copyright © 2021 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

城市的逐步发展往往离不开基础工程的建设,随着中国经济社会的不断发展,在城市化的发展背景下,城市用地紧缺的问题日益显著,因此为解决城市发展与土地资源供应不足的矛盾,如今城市基础设施建设逐渐向地下发展,越来越多的城市在发展地下轨道、综合水电的地下综合管廊、举足轻重的地下防空设施以及便利交通的下穿工程,因此在地下空间的开发中,深基坑的开挖和边坡的支护工程占据举足轻重的地位,它们的施工质量是直接影响整个工程的安全和品质。张志发[1]利用理正岩土与 ABAQUS 分析计算对高速公路路堤稳定性进行分析与优化设计;朱博良[2]通过建立相似模型来对黄土边坡稳定性系数随坡度的变化规律进行研究;孔晓辉[3]使用 FLAC3D 中的自主模型对深路堑边坡设计及稳定性分析作出对应研究。但是对于边坡稳定性的分析[4]大家都作出不同的理解与研究,极少会利用安全稳定性系数去寻找合适的解决措施。本文通过理正岩土软件进行边坡稳定性系数的计算,在归类分析各类因素对边坡稳定性系数的变化规律,从而找到边坡失稳的敏感因素。进而对深基坑开挖工程以及边坡稳定性监测提供相关理论指导。

2. 基本理论

目前,在实际生活中,边坡稳定性系数的计算方法有很多,常见的有条分法、传递系数法、递推法、毕肖普法、有限元法、剩余推力法等等,但是总的来说可以分为两类,一类是以弹塑性理论为基础的数值计算方法,另一类是以极限平衡理论为基础的条分法。根据《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2002)规定:土质边坡和较大规模的碎裂结构岩质边坡宜采用圆弧滑动法计算稳定性系数,因此,本文选择条分法来对边坡进行稳定性计算。

条分法以极限平衡理论为基础,由瑞典人彼得森(K.E. Petterson)在 1916 年提出,在 20 世纪 40 年代由费伦纽斯(W. Fellenius) [5]和泰勒(D.W. Taylor)等人的不断改进,直到 1954 年简布(N. Janbu)提出了普遍条法的基本原理,在 1955 年毕肖普明确了土坡稳定性安全系数,直至今日,工程界仍普遍采用此方法边坡稳定性系数的计算[6]。

经过多年工程实践,对瑞典条分法已积累了大量的经验。用该法计算的安全系数一般比其他较严格的方法低 10%~20%;在滑动面圆弧半径较大并且孔隙水压力较大时,安全系数计算值估计会比其他较严格的方法小一半。因此,这种方法是偏于安全的。

瑞典条分法的公式:

$$K = \frac{\sum(Cl + W \cos \theta \tan \varphi)}{\sum W \sin \theta}$$

- K ——整个滑体剩余下滑力计算的安全系数;
- L ——单个土条的滑动面长度(m), $l = b \sec \theta$;
- W ——条块重力(kN), 浸润线以上取重度, 以下取饱和重度;
- θ ——条块的重力线与通过此条块底面中点半径之间的夹角(度);
- $C、\varphi$ ——土的抗剪强度指标, 采用总应力法时, 取总应力指标, 采用有效应力法时, 取有效应力指标。

3. 边坡稳定性分析

如今大多数城市建设都是基于老城区的改造扩建, 由于既有建筑以及老旧地下工程的存在, 基础工程基坑深度较深, 四周均有市政道路或既有建筑, 地下情况较为复杂, 影响边坡稳定性的因素有很多[7]。总所周知, 影响边坡稳定性的因素有很多, 其中主要因素有四个: 坡脚角度、边坡高度、岩(土)体的抗剪强度性指标——内摩擦角和岩(土)体的粘聚力[8]。因此本文采用控制变量法来探究边坡稳定性, 采用北京理正软件设计研究院的理正岩土边坡稳定性分析系统(6.5) [9], 进行理正规化安全系数计算: 通过查阅资料, 假设该边坡为均质土层, 设置土层的重力密度 γ 为 20 kN/m^3 ; 共有坡角 β 、坡高 H 、内摩擦角 Φ_p 和粘聚力 C_p 四个变量, 我们一共进行四次仿真模拟实验, 先分析影响边坡稳定性系数的外部因素, 主要是通过改变边坡坡角 β 、坡高 H ; 再分析影响边坡稳定性系数的内部因素, 改变岩(土)体的抗剪强度性指标——内摩擦角 Φ_p 和岩(土)体的粘聚力 C_p , 并对其数据进行分析得到最小的稳定性系数作为评价的依据。

3.1. 坡脚角度与稳定性系数的关系[10]

我们此次以控制坡脚的角度 β 进行定量分析, 固定边坡高度 H 、重度 γ 与抗剪强度指标, 通过坡脚角度 β 的逐渐增大, 分析边坡稳定性系数的变化。土质信息如表 1。

Table 1. Slope stability check calculation parameters (constant variable)

表 1. 边坡稳定性验算参数(定变量)

定变量	坡高 H/m	重力密度 $\gamma/\text{kN/m}^3$	抗剪强度指标	
			内摩擦角 Φ_p (°)	粘聚力 C_p (kPa)
数据	10	20	30	100

通过理正岩土边坡稳定性分析系统 6.5 计算分析, 计算边坡稳定性系数如下表 2。

Table 2. Slope stability coefficient under different slope angle β

表 2. 不同坡角 β 下的边坡稳定性系数

坡脚 $\beta/^\circ$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
稳定性系数	6.578	5.864	5.291	4.856	4.555	4.299	4.078	3.872	3.678	3.494	3.305	3.141	2.972	2.805

在作图时, 将坡角 β 作为横坐标, 将稳定性系数的大小作为纵坐标, 把数据转化为影响曲线来直观的表现坡角 β 与稳定性系数的关系, 见下图 1。

然后我们对得到的影响曲线进行拟合, 得到坡角 β 与稳定性系数的关系曲线, 见下图 2。

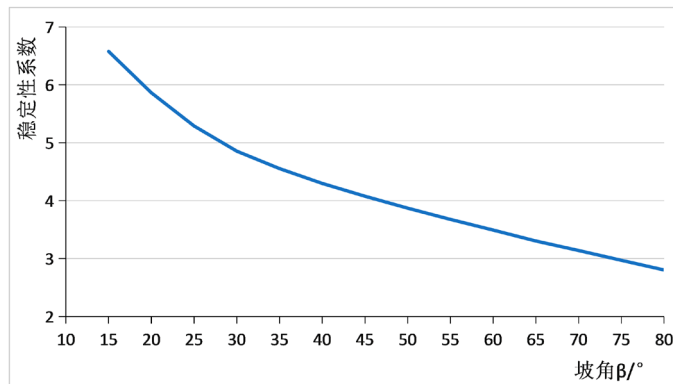


Figure 1. The influence of the change of slope angle β on the stability coefficient
图 1. 坡角 β 的变化对稳定性系数的影响

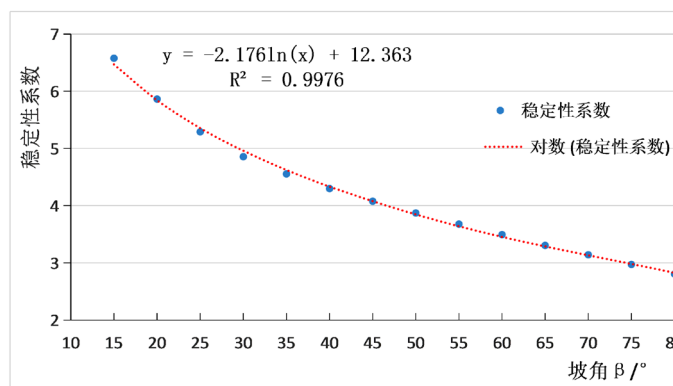


Figure 2. Fitting diagram of slope angle β to stability coefficient
图 2. 坡角 β 对稳定性系数的拟合图

根据上图拟合图我们可以看到, 拟合程度很高, 坡角 β 的影响曲线的拟合度为 0.9976, 得到的关系曲线公式为:

$$y = -2.176 \ln(x) + 12.363$$

我们可以发现坡角在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 范围逐渐增大时, 边坡稳定性系数降低很快; 在坡角在 $35^\circ \sim 80^\circ$ 之间增大时, 边坡稳定性系数呈线性降低, 且其降低速率相较于稳定性系数在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 范围内的变化要小。

通过上拟合图及关系曲线可知: 随着坡角 β 的增大与稳定性系数呈负相关。

3.2. 边坡高度与稳定性系数的关系

在通过阅读的边坡稳定性规律变化的相关文献阅读, 了解到坡高相对于坡角来说是另外一个较为直观的影响因素, 在 3.1 中我们通过控制固定的坡高研究了不同坡角对边坡稳定性安全系数的变化影响, 而这一次我们控制固定的坡角研究来坡高对于安全系数的影响及变化规律。土质信息及定变量如表 3。

Table 3. Slope stability check calculation parameters (constant variable)

表 3. 边坡稳定性验算参数(定变量)

定变量	坡角 $\beta/^\circ$	重力密度 $\gamma/\text{kN/m}^3$	抗剪强度指标	
			内摩擦角 $\Phi_p (^\circ)$	粘聚力 $C_p (\text{kPa})$
数据	60	20	30	100

同样我们通过理正岩土边坡稳定性分析系统 6.5 计算分析, 得到计算结果如下表 4。

Table 4. Slope stability coefficient under different slope heights
表 4. 不同坡高下的边坡稳定性系数

坡高	5	6	7	8	9	10	11	12
稳定性系数	6.054	5.218	4.611	4.145	3.786	3.494	3.251	3.049
坡高	13	14	15	16	17	18	19	20
稳定性系数	2.875	2.726	2.597	2.482	2.379	2.289	2.207	2.132

在作图时, 将坡高 H 作为横坐标, 将稳定性系数的大小作为纵坐标, 我们也将数据转化为关系曲线图来直观的表现坡高与稳定性系数的关系, 见下图 3。

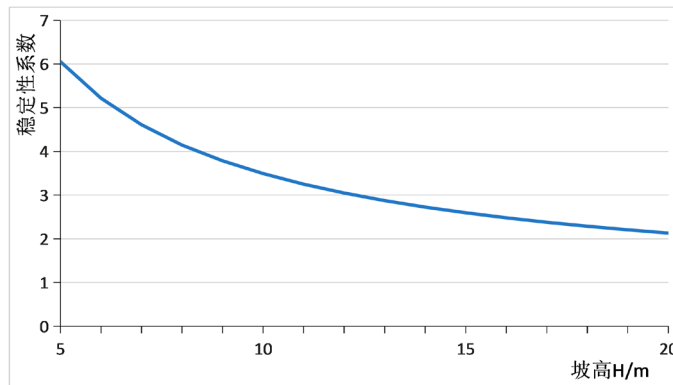


Figure 3. The influence of the change of slope height H on the stability coefficient
图 3. 坡高 H 的变化对稳定性系数的影响

然后我们对得到的影响曲线进行拟合, 得到坡高 H 与稳定性系数的关系曲线, 见下图 4。

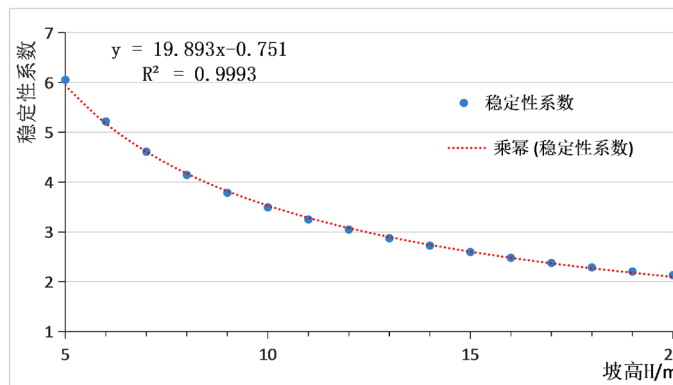


Figure 4. Fitting diagram of slope height H to stability coefficient
图 4. 坡高 H 对稳定性系数的拟合图

根据上图拟合图我们可以看到, 拟合程度很高, 坡高 H 的影响曲线的拟合度为 0.9993, 得到的关系曲线公式为:

$$y = 19.893x^{-0.751}$$

由上坡高与边坡稳定性系数的折线图, 我们可以明显的看到在坡角为 60° 时, 随着坡高的增大稳定性系

数有明显变化。在坡高 H 在 4 m 到 7 m 增大时, 边坡稳定性系数下降的很快; 在 7 m 增大到 12 m 的过程中, 可以看见稳定性系数下降速率缓慢放缓, 稳定性系数逐渐趋于平缓; 在坡高由 13 m 增大到 20 m 的过程中, 稳定性系数的下降速率约为 0.1, 可近似看为水平, 此阶段坡高的增加对稳定性系数的影响很小。

综上所述, 通过上拟合图及关系曲线可知: 随着坡高 H 增大与稳定性系数呈负相关。

3.3. 岩(土)体抗剪强度指标与稳定性系数的关系

在 3.1 和 3.2 中我们讨论了边坡坡面形状对稳定性系数的影响, 但是通过相关文献的阅读, 得知边坡稳定性不仅仅与坡面形状有关, 还与边坡土质的抗剪强度指标有关, 因此接下来我们分别通过控制岩(土)体的内摩擦角 Φ_p 和粘聚力 C_p 来探讨稳定性系数的变化规律。

3.3.1. 内摩擦角 Φ_p

首先, 我们设计一边坡模型, 固定坡角 β 为 60° , 固定坡高 H 为 10 m, 边坡土质信息固定粘聚力 C_p 为 100 kPa。通过改变理正岩土边坡稳定性分析系统里岩(土)体中土层内摩擦角 Φ_p 的大小模拟不同土质构成的边坡。边坡具体参数如下表 5。

Table 5. Slope stability check calculation parameters (constant variable)

表 5. 边坡稳定性验算参数(定变量)

定变量	坡角 $\beta/^\circ$	坡高 H/m	重力密度 $\gamma/kN/m^3$	抗剪强度指标	
				粘聚力 C_p (kPa)	
数据	60	10	20	100	

通过理正岩土边坡稳定性分析系统 6.5 计算分析, 得到计算结果如下表 6。

Table 6. Lizheng rock-soil slope stability calculation and analysis results

表 6. 理正岩土边坡稳定性计算分析结果

内摩擦角	15	20	25	30	35	40	45
稳定性系数	3.049	3.191	3.337	3.494	3.658	3.835	4.038

在作图时, 将内摩擦角 Φ_p 作为横坐标, 将稳定性系数的大小作为纵坐标, 我们也将数据转化为关系曲线图来直观的表现内摩擦角 Φ_p 与稳定性系数的关系, 见下图 5。

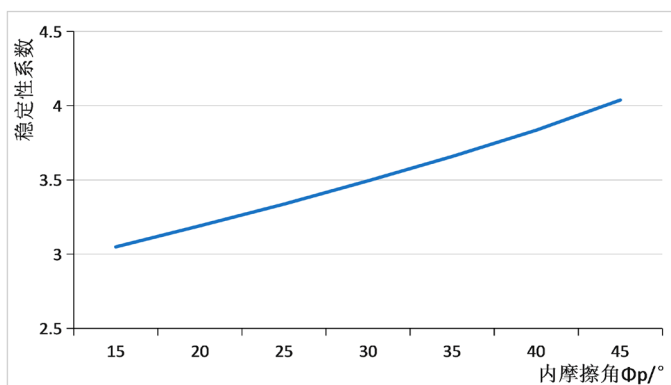


Figure 5. The influence of the change of the internal friction angle Φ_p on the stability coefficient

图 5. 内摩擦角 Φ_p 变化对稳定性系数的影响

然后我们对得到的影响曲线进行拟合, 得到内摩擦角 Φ_p 与稳定性系数的关系曲线, 见下图 6。

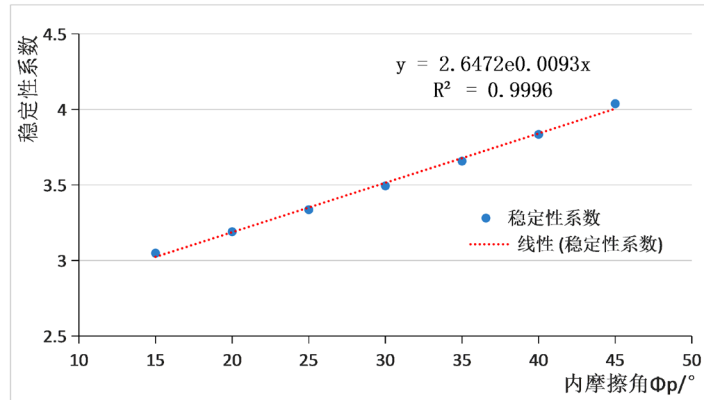


Figure 6. The fitting diagram of the internal friction angle Φ_p to the stability coefficient
图 6. 内摩擦角 Φ_p 对稳定性系数的拟合图

根据上图拟合图我们可以看到, 拟合程度很高, 内摩擦角 Φ_p 的影响曲线的拟合度为 0.9996, 得到的关系曲线公式为:

$$y = 2.6472e^{0.0093x}$$

通过上拟合图及关系曲线可知: 内摩擦 Φ_p 与稳定性系数呈正相关。

3.3.2. 粘聚力 C_p

这次我们将岩土的内摩擦角作为定变量, 设计一边坡模型, 依旧固定坡角 β 为 60° , 固定坡高 H 为 10 m, 内摩擦角设为 30° 。改变理正岩土中岩(土)体中土层粘聚力 C_p 的大小模拟不同土质构成的边坡。边坡具体参数如下表 7。

Table 7. Slope parameters

表 7. 边坡参数

定变量	坡角 $\beta/^\circ$	坡高 H/m	重力密度 $\gamma/kN/m^3$	抗剪强度指标	
				内摩擦角 $\Phi_p(^\circ)$	
数据	60	10	20	30	

通过理正岩土边坡稳定性分析系统 6.5 计算分析, 得到计算结果如下表 8。

Table 8. Calculation and analysis results of slope stability

表 8. 边坡稳定性计算分析结果

粘聚力	20	30	40	50	60	70	80	90	100
稳定性系数	1.212	1.528	1.824	2.115	2.394	2.672	2.948	3.224	3.494

在作图时, 将粘聚力 C_p 作为横坐标, 将稳定性系数的大小作为纵坐标, 我们也将数据转化为关系曲线图来直观的表现粘聚力 C_p 与稳定性系数的关系, 见下图 7。

然后我们对得到的影响曲线进行拟合, 得到粘聚力 C_p 与稳定性系数的关系曲线, 见下图 8。

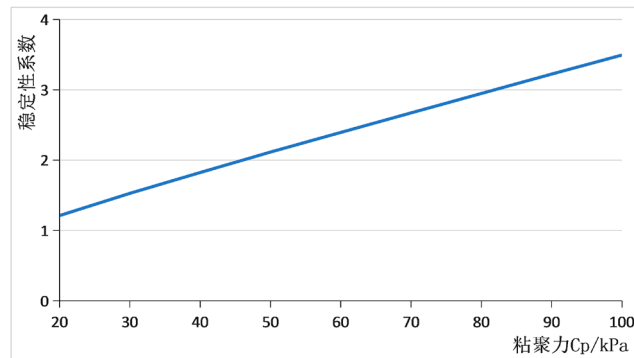


Figure 7. The influence of the change of cohesion C_p on the stability coefficient
图 7. 粘聚力 C_p 变化对稳定性系数的影响

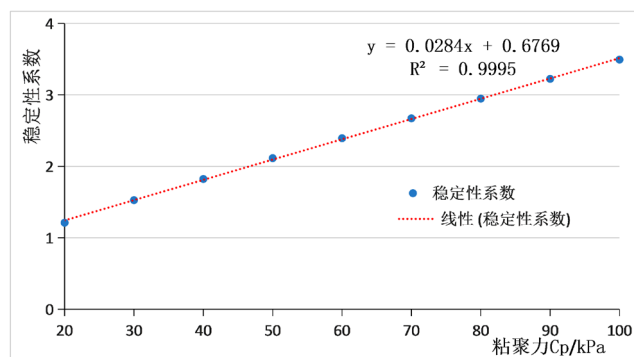


Figure 8. Cohesion C_p vs. stability coefficient fitting diagram
图 8. 粘聚力 C_p 对稳定性系数的拟合图

根据上图拟合图我们可以看到, 拟合程度很高, 粘聚力 C_p 的影响曲线的拟合度为 0.9995, 得到的关系曲线公式为:

$$y = 0.0284x + 0.6769$$

3.3.3. 内摩擦角与粘聚力对边坡稳定性系数的影响

我们将粘聚力 C_p 和内摩擦角 Φ_p 综合考虑, 在作图时横坐标只考虑数值的大小, 忽略粘聚力 C_p 和内摩擦角 Φ_p 的单位, 纵坐标为稳定性系数。

得到粘聚力 C_p 和内摩擦角 Φ_p 的变化对稳定性系数的影响曲线, 见下图 9。

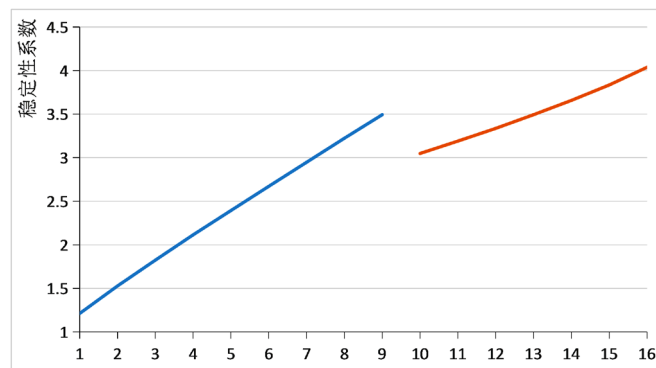


Figure 9. The influence of cohesion C_p and internal friction angle Φ_p on the stability coefficient
图 9. 粘聚力 C_p 和内摩擦角 Φ_p 变化对稳定性系数的影响

然后我们对得到的影响曲线进行拟合, 得到粘聚力 C_p 和内摩擦角 Φ_p 与稳定性系数的关系曲线, 见下图 10。

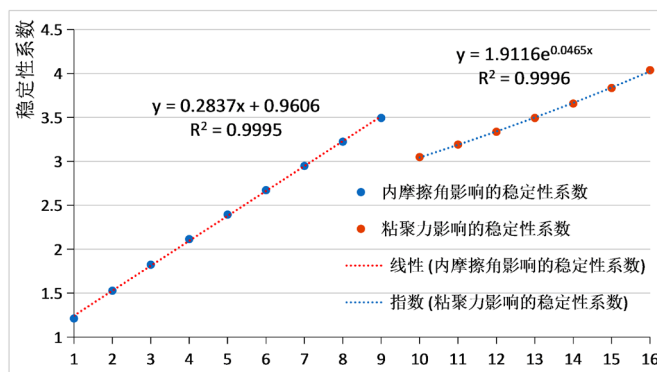


Figure 10. Cohesion force C_p and internal friction angle Φ_p fitting diagram to the stability coefficient
图 10. 粘聚力 C_p 和内摩擦角 Φ_p 对稳定性系数的拟合图

通过以上分析粘聚力 C_p 和内摩擦角 Φ_p 对稳定性系数进行拟合得到的曲线, 求出粘聚力 C_p 和稳定性系数的关系曲线以及内摩擦角 Φ_p 和稳定性系数的关系曲线, 我们可以发现粘聚力 C_p 的改变对稳定性系数的影响比内摩擦角 Φ_p 的改变对稳定性系数的影响要大。也就是说粘聚力的变化对边坡稳定性的影响更大。因此在项目工程上, 为预防边坡失稳事故的发生, 需关注土体粘聚力的变化, 时刻注意粘聚力的变化对边坡稳定性的影响, 这是重点工作。

4. 结论与分析

本次主要通过理正岩土软件中边坡稳定分析系统对边坡进行稳定性计算, 分析了对边坡有较大影响的四种因素对边坡稳定性的影响。由于条件限制, 我们不可能通过实地实验直观的研究滑坡破坏形式来进行稳定性分析, 所以我们只能通过软件计算出稳定性系数来反映边坡的稳定性[11]。从上述分析中可以发现, 影响边坡稳定性的因素中, 边坡的坡型对稳定性系数影响的敏感性更大, 其中坡角的大小是影响稳定性的重要因素。坡角 β 和坡高 H 属于滑坡产生的外因, 而内摩擦角 Φ_p 和粘聚力 C_p 是岩(土)体抗剪强度指标属于滑坡形成的内因。

1) 滑坡形成的外因:

坡角与边坡稳定性系数的关系曲线呈对数函数形式。在坡角较小时, 坡角的变化会引起稳定性的急剧降低, 坡度越大坡角对稳定性系数的影响越来越小, 但是坡角越大边坡越不稳定性。因此在实际工程中, 放坡角度在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间最为适宜。

坡高与边坡稳定性关系曲线呈幂函数的形式。通过拟合曲线我们可以发现在坡高较小时, 坡高的变化会引起稳定性系数的急剧下降。

2) 滑坡形成的内因:

内摩擦角与边坡稳定性系数的关系曲线呈指数函数形式; 粘聚力与边坡稳定性系数的关系呈线性关系。在二者的拟合曲线中, 粘聚力的变化对滑坡稳定性的影响更大。因此, 在实际工程中我们应该重点关注岩土体粘聚力的变化, 为项目工程的质量安全提供重要的数据支撑。

边坡失稳一直是项目施工中重点防治问题, 防治问题漫长而艰巨, 在未来很长一段时期里, 边坡稳定都会是工程项目的重点关注对象。按照我国的有关规定, 做好每一步, 促使我们在工程安全上做出自己力所能及的贡献。

参考文献

- [1] 张志发. 荣乌高速公路某路堤高边坡稳定分析及优化设计[J]. 山西建筑, 2014, 40(4): 142-143.
- [2] 朱博良, 王延寿, 王俊卿. 黄土边坡稳定性系数随坡度的变化规律研究[J]. 中国水土保持, 2020(8): 42-43.
- [3] 孔晓辉, 谷明. 深路堑边坡设计及稳定性分析[J]. 四川建材, 2019, 45(11): 148-149.
- [4] 王林飞, 蒲应举. 基于北京理正岩土软件对边坡稳定性验算分析[J]. 价值工程, 2014, 33(30): 140-141.
- [5] 宋杨. 西南某工程边坡支护方案案例分析及理正计算可靠性分析[J]. 四川地质学报, 2019, 39(4): 622-628.
- [6] 杜时贵. 大型露天矿山边坡稳定性等精度评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1301-1331.
- [7] 曾勇胜. 工民建深基坑开挖与边坡支护施工技术探讨[J]. 智能城市, 2021, 7(4): 154-155.
- [8] 方绍燕. 粘聚力和内摩擦角与边坡稳定系数的指数关系[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [9] 王杨兴, 丘志杨. 基于 Midas 和理正软件的市政或公路工程施工中边坡稳定性分析[J]. 价值工程, 2020, 39(5): 213-215.
- [10] 臧泽光, 刘记帅, 王强, 刘阳. 不同放坡开挖工况下基坑边坡稳定性对比研究[J]. 隧道与轨道交通, 2021(S1): 122-124.
- [11] 胡巍. 市政工程中深基坑开挖过程水平位移影响数值研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(6): 89-91.