

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.14

岩质边坡稳定性快速评估系统的构建及其应用

贺小黑^{1,2}

- (1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对目前缺乏快速定量评价边坡稳定性方法问题,采用FLAC强度折减法计算了24个不同坡高、不同坡角、不同岩体质量级别边坡的稳定性系数,根据计算结果绘制了稳定性系数等值线图,该稳定性系数等值线图即为要构建的边坡稳定性系数查询系统,利用该查询系统,可以在已知坡高、坡角、岩体质量级别等条件下快速地查询到边坡稳定性系数,进而对边坡的稳定程度做出评价,实现了合理地定量快速评价边坡稳定性的目标。将该稳定性系数查询系统应用到一些边坡稳定性评价实例中,结果表明:用稳定性系数查询系统评价的边坡稳定性与其他学者用复杂评价方法评价的结果基本一致,这说明用本文提出的边坡稳定性系数查询系统进行稳定性评价是可行的。

关键词: 岩质边坡;稳定性系数;FLAC强度折减法;岩体质量级别;查询系统

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0105-08

Construction of a rapid evaluation system for rock slope stability and its application

HE Xiaohei^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2. School of Water Resources & Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: In view of the lack of fast quantitative evaluation method for slope stability at present, the FLAC strength reduction method was used to calculate the stability coefficient of 24 slopes with different slope heights, slope angles and rock mass quality grades. Based on the calculation results, the contour map of stability coefficient was drawn, which was the inquiry system of slope stability coefficient to be constructed. Then, the slope stability coefficient can quickly be inquired using the inquiry system under the condition of known slope height, slope angle and rock mass quality grade to evaluate the slope stability. This method will achieve the goal of rational quantitative and rapid evaluation of slope stability. The results of some slope stability evaluation cases using the slope stability coefficient inquiry system showed that the slope stability evaluated by the inquiry system is basically consistent with that evaluated by scholars using complex evaluation methods, indicating that it is feasible to use the slope stability coefficient inquiry system to evaluate slope stability.

Keywords: rock slope; stability coefficient; FLAC strength reduction method; rock mass quality grade; inquiry system

0 引言

在野外调查地质灾害时,会遇到许多不同类型的

边坡,比如坡高不同、坡角不同,岩土体力学参数不同等,由于地质灾害调查项目有时间限制,没有必要也不可能对所有野外边坡进行调查描述和评价,因此,地质

收稿日期: 2019-01-14; 修订日期: 2019-02-14

基金项目: 东华理工大学博士启动基金项目(DHBK2017139);东华理工大学实验技术开发项目:地质灾害评价虚拟仿真实验模块的开发

第一作者: 贺小黑(1984-),男,湖北大冶人,博士研究生,讲师,主要从事地质灾害及岩土体稳定性等方面的研究。E-mail: 307986245@qq.com

工作者通常会有选择性地选取稳定性相对较差的边坡来定点进行重点调查描述,这就需要调查人员在野外现场快速有效地判断边坡的稳定性,而目前地质工作者在野外调查地质灾害时通常仅根据自身的经验来定性地判断边坡的稳定性,这种仅依靠经验的定性方法没有统一的参考标准和依据,不同的人可能得出不同的结论。

野外调查工作结束后,转入室内资料整理和分析阶段,这时就需要开展区域的斜坡稳定性分区评价,并根据不同区段斜坡的稳定程度,绘制调查区内的斜坡稳定性分区图,特别是对有可能发生高速滑坡的水库岸坡而言,开展系统的水库区岸坡稳定性评价是必不可少的工作。目前对单体斜坡进行稳定性评价的方法有:(1)定性分析方法;(2)定量分析方法(如极限平衡法、数值分析法等);(3)物理模型方法;(4)现场监测分析法;(5)神经网络、模糊理论、灰色系统理论等新学科理论的评价方法等^[1]。在这五种方法中,第一种方法(即定性的方法)不需要大量的计算和观测资料,是一种快速的斜坡稳定性评价方法;后面四种方法均需要详细的分析计算或需要长时间的监测才能做出评价,尽管评价结果较可靠,但需要花较多时间,速度较慢。

由于区域上斜坡稳定性分区评价所涉及的斜坡数量较多,如果项目有时间限制,就不可能对每一个斜坡都开展详细的研究或监测。因此,目前在斜坡稳定性分区时,地质工作者多采用定性的方法来评价区域上各段斜坡的稳定性。

定性分析方法主要是通过工程地质调查、勘察,对影响岸坡稳定性的主要因素、可能的变形破坏方式及失稳的力学机制等进行分析,对已变形地质体的成因及其演化史进行分析,从而给出被评价岸坡的一个稳定性状况及其可能发展趋势,来定性的说明和解释。其优点是能综合考虑影响岸坡稳定性的多种因素(如斜坡结构、地质构造、人类工程活动等),快速地对岸坡的稳定状况及其发展趋势作出评价^[2]。然而,该定性分析方法所得到的结果具有受人为主观影响较大的缺点。所以就需要有一种定量且快速的评价方法来弥补定性方法的不足。

另外,在地震或者暴雨条件下,抢险应急专家通常须要快速地对边坡的稳定性做出准确评价,为救灾抢险提供指导,为人民群众的安全撤离争取时间。用常规的评价边坡稳定性方法(极限平衡法和数值模拟的方法等)进行边坡稳定性评价时,通常需要建模,并需要准确的岩土体力学参数,计算过程较繁琐,从而导致

常规的方法在评价边坡稳定性时有速度慢的缺点,故传统的边坡稳定性评价方法不适合用于应急条件下的边坡稳定性评价。因此,建立适用于野外和应急条件下边坡稳定性的快速评价方法是十分必要的。

在平面上开展斜坡稳定性分区时,如何现场快速定量地评价斜坡稳定性是需要解决的问题。前人在这方面研究得较少。我国铁道、矿山、水电部门提出了一些斜坡极限坡角和坡高的经验数据^[3],为快速评价不同类型斜坡的稳定性提供了支撑,但根据这些极限坡高和坡角经验数据不能对没有达到极限坡高或坡角的斜坡的稳定程度进行评价,也不能对超过极限坡高或坡角的斜坡的欠稳定程度进行评价,且所提出的极限坡角仅指坡高小于 15 m 的斜坡,适用范围有限。

此外,用稳定性系数进行边坡稳定性评价是常见的定量评价方法。求取边坡稳定性系数的方法有很多,常见的方法有极限平衡法、有限元强度折减法等^[4-6]。前人在运用极限平衡法、有限元强度折减法进行研究时多是对单体斜坡进行具体分析^[7-9],但这些方法的分析过程较复杂,且速度慢,达不到斜坡稳定性分区和野外斜坡稳定性分析所需的定量快速的要求。笔者认为建立边坡稳定性系数与坡高、坡角、岩土体力学参数等影响因子之间的关系是实现边坡快速定量评价的途径之一。而前人在这方面所做的研究较少。目前只有少量学者研究了坡高与安全系数之间的关系,坡角与安全系数之间的关系,以及地震加速度系数与安全系数之间的关系,如高玉峰等^[10],计算了不同地震加速度系数,不同坡高的安全系数,分析了安全系数与坡高之间的关系。刘坤伟等^[11]研究了某具体边坡地震和自重两种工况下安全系数与坡角之间的关系。笔者 2013 年进行了地震条件下不同类型的边坡的稳定性研究,计算了不同坡高、不同坡角、不同岩体力学参数和不同地震加速度系数条件下地震边坡的稳定性系数^[12],但研究所用的方法是极限平衡法,极限平衡法要人为划定潜在滑面,所得到的计算结果受人为影响较大,可信程度需要进一步提高,且之前的研究仅计算了地震条件下的稳定性系数,没有对天然条件下边坡的稳定性进行系统分析。

综上所述,目前还没有形成一套能够快速方便地查询边坡稳定性系数,并且适用于任何地方的系统。为了达到定量快速评价边坡稳定性的目标,系统地开展天然边坡的稳定性研究是十分有必要的,本次研究将通过建立稳定性系数与坡高、坡角、岩体力学参数之间的关系,形成一套天然条件下边坡稳定性系数的查

询系统,为合理快速地评价斜坡稳定性提供依据。

1 强度折减法计算稳定性系数原理

在研究边坡稳定性的过程中,因没有已有的滑面作为参考,在极限平衡计算时就会面临选取滑面的困难。随着计算机技术的发展,强度折减法也迅速发展起来,所谓强度折减,就是在理想弹塑性有限元计算中将边坡岩土体抗剪切强度参数逐渐降低直到其达到破坏状态为止,程序可以自动根据弹塑性计算结果得到破坏滑面(塑性应变和位移突变的地带),同时得到边坡的强度储备安全系数 F , F 也就是平时所说的稳定性系数。于是有:

$$c' = c/F \quad (1)$$

$$\tan\varphi' = \tan\varphi/F \quad (2)$$

式中: c' ——折减后的黏聚力/kPa;

c ——初始未折减时的黏聚力/kPa;

F ——稳定性系数;

φ' ——折减后的内摩擦角/(°);

φ ——初始未折减时的内摩擦角/(°)。

有限元强度折减法不需做任何假定,计算模型不仅能满足力的平衡要求,而且满足岩土体的应力应变关系,并且可以对边坡进行非线性弹塑性分析,能比较真实地反映应力应变情况,是一种有效而可靠的方法。

该方法克服了传统极限平衡法中将土条假设为刚体,无法考虑变形对边坡稳定影响的缺点,适用于任意复杂的边界条件,不需要搜索最危险滑动面,不必假设土条间的作用力和破坏面的位置和形状,故能处理复杂的几何轮廓和边界条件。该方法把有限元、有限差分方法和传统的安全系数有机地联系起来。不仅可了解斜坡随抗剪强度降低而呈现的渐进失稳过程,还可得到极限状态下边坡的失效形式。正是由于强度折减法有诸多的优点,该方法在边坡稳定性分析方面得到了广泛的应用^[13-14]。

由于相对于极限平衡法,用强度折减法获取斜坡稳定性系数的做法具有不需要假定滑动面位置等优点,故本次研究使用 FLAC^{3D} 软件来开展斜坡强度折减研究,目的是获取稳定性系数,FLAC^{3D} 软件内附有强大的 Fish 语言,可通过编程实现强度折减法的编辑和修改^[15-16]。

2 计算模型及材料参数的选取

取斜坡坡高 $H = 50 \text{ m}$ 、 100 m 、 200 m 、 300 m ;坡角 $\alpha = 15^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 。以坡高 100 m ,坡角 45° 为例,用 CAD 绘制的边坡模型见图 1,用 FLAC 软件建的边坡模型见图 2。

根据工程岩体分级标准 GB 50218—94^[17] 表 C.

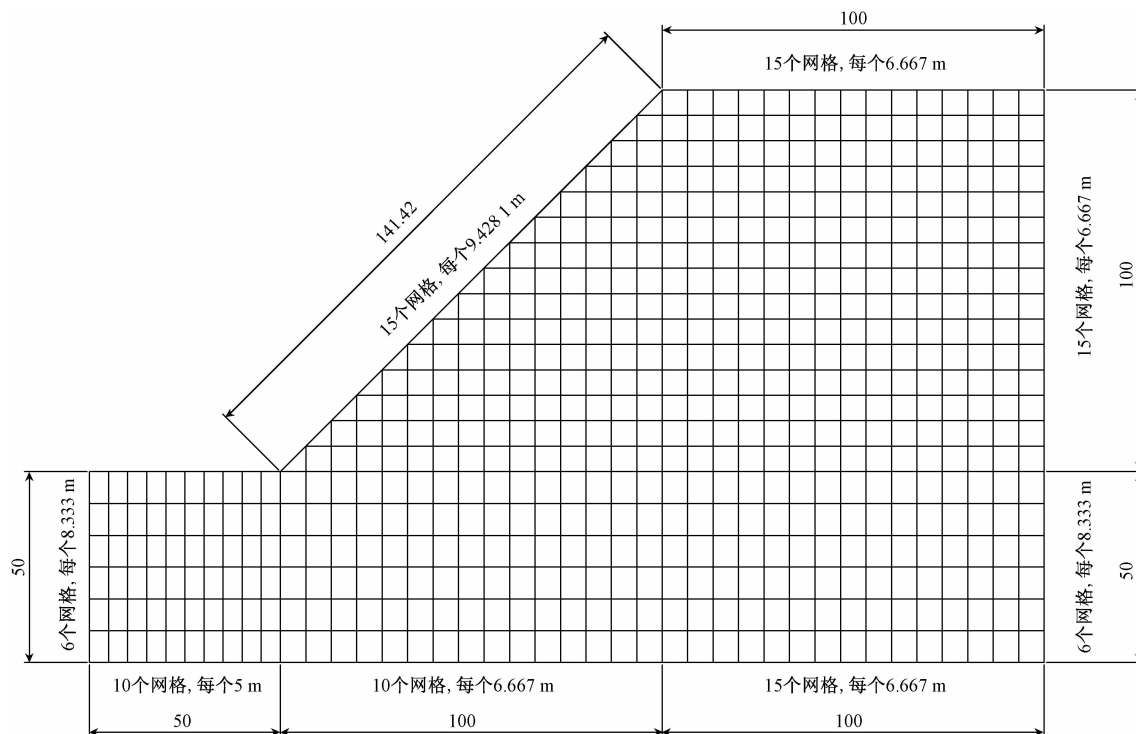


图1 用CAD绘制的边坡模型

Fig.1 Slope model from CAD software

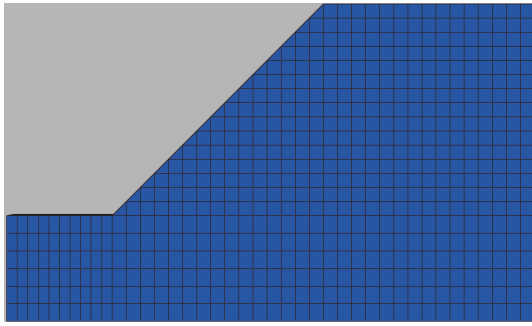


图2 用FLAC建的边坡模型
Fig.2 Slope model from FLAC

0.1,斜坡岩体物理力学参数的取值见表1。

表1 不同质量级别岩体的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass with different quality levels

级别	岩体密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/(^{\circ})$	变形模量 E/GPa	泊松比 μ
I	2 800	2 500	65	35	0.15
II	2 700	2 000	60	30	0.20
III	2 600	1 500	50	20	0.25
IV	2 400	700	39	6	0.30
V	2 000	160	23	1	0.40

3 计算结果

用FLAC^{3D}强度折减法计算不同坡高、不同坡角、不同岩体物理力学参数的斜坡的稳定性系数。以坡高100 m,坡角45°的斜坡为例,当岩体强度折减到1.29

时,斜坡处于临界状态,该状态时剪应变增量如图3所示,1.29即为该边坡的稳定性系数。

由坡高50 m、100 m、200 m、300 m和坡角15°、30°、45°、60°、75°、90°组建的24个边坡模型的稳定性系数计算结果见表2。由表2可知,随着坡高的增大,稳定性系数逐渐减小;随着坡角的增大,稳定性系数

表2 计算得到的不同类型斜坡稳定性系数

Table 2 Stability coefficients of different types of slopes

坡高/m	坡角/ (°)	稳定性系数				
		I级	II级	III级	IV级	V级
50	15	26.13	21.50	15.85	9.13	3.53
50	30	18.71	15.38	11.47	6.48	2.38
50	45	15.56	12.81	9.6	5.33	1.88
50	60	12.98	10.68	8.02	4.41	1.53
50	75	10.57	8.69	6.56	3.6	1.24
50	90	7.66	6.29	4.73	2.6	0.93
100	15	18.41	15.03	10.92	6.56	2.76
100	30	12.34	10.13	7.44	4.34	1.71
100	45	9.77	8.02	5.94	3.4	1.29
100	60	7.88	6.48	4.81	2.74	1.02
100	75	6.29	5.16	3.84	2.17	0.80
100	90	4.53	3.71	2.74	1.58	0.59
200	15	14.80	12.04	8.6	5.35	2.38
200	30	8.84	7.22	5.23	3.15	1.33
200	45	6.67	5.47	3.98	2.35	0.96
200	60	5.33	4.36	3.20	1.87	0.74
200	75	4.23	3.47	2.54	1.49	0.58
200	90	2.92	2.39	1.74	1.03	0.40
300	15	13.45	10.95	7.79	4.92	2.25
300	30	7.52	6.13	4.41	2.71	1.18
300	45	5.53	4.51	3.27	1.96	0.83
300	60	4.30	3.51	2.54	1.53	0.62
300	75	3.34	2.73	1.98	1.18	0.47
300	90	2.16	1.78	1.31	0.77	0.30

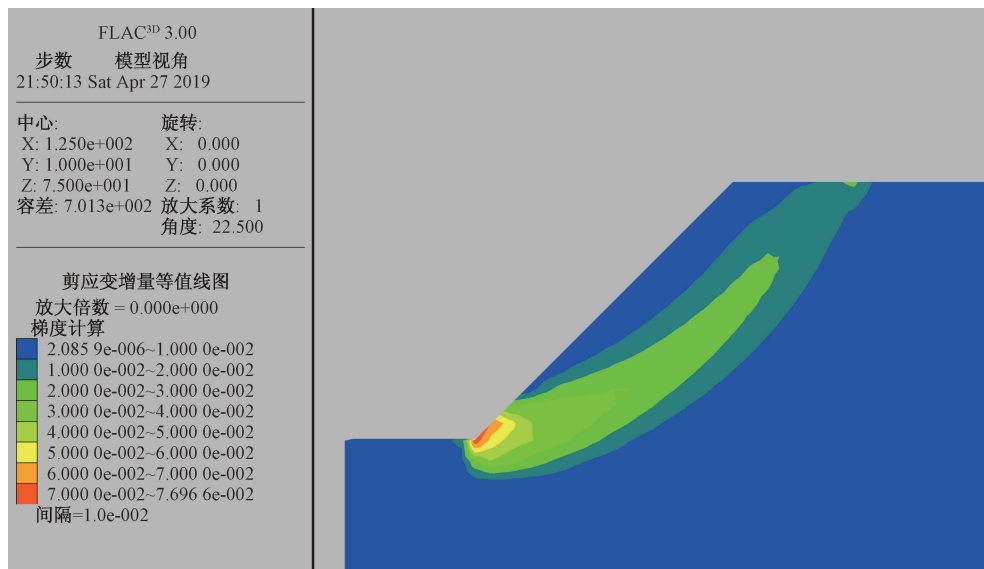


图3 临界状态时边坡内剪应变增量带等值线图

Fig.3 Contour map of shear strain increment of slope under critical state

逐渐减小;随着岩体质量逐渐变差,稳定性系数逐渐减小。

4 边坡稳定性快速评估系统的构建

根据表 2 的计算结果,以坡高为横坐标,坡角为纵坐标分别绘制了这五级岩体的稳定性系数等值线图(图 4~图 8)。通过图 4~图 8 所示的稳定性系数等值线图可知,随着岩体质量变得越来越差,稳定性系数

的变化范围也在逐渐减小。

图 4~图 8 所示的这五级岩体的稳定性系数等值线图就是笔者构建的岩质边坡稳定性系数查询系统。通过运用插值的方法,就能方便地在图 4~图 8 中查询到不同坡高、不同坡角和不同质量级别岩体的斜坡稳定性系数,因此,地质工作者在确定了边坡岩体质量级别、坡高、坡角后,就能方便快速地对边坡的稳定性做出定量评价。

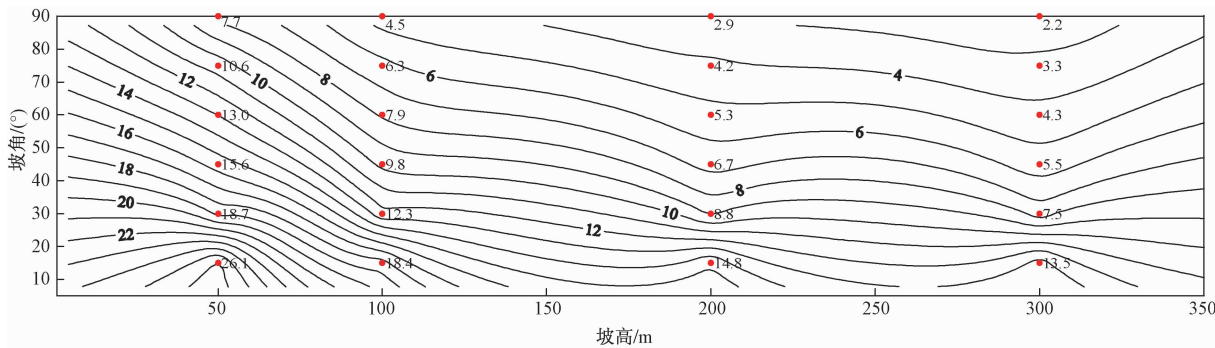


图 4 由 I 级岩体组成的斜坡的稳定性系数等值线图

Fig. 4 Contour map of slope stability coefficient composed of Grade I rock mass

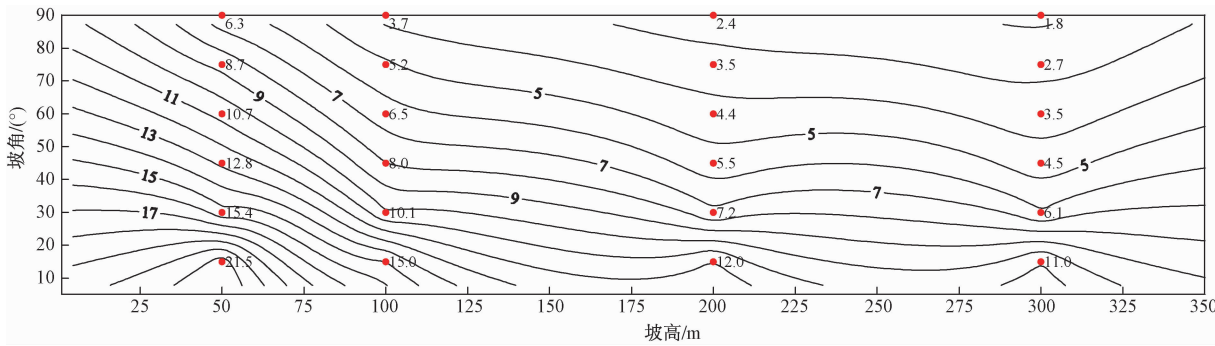


图 5 由 II 级岩体组成的斜坡的稳定性系数等值线图

Fig. 5 Contour map of slope stability coefficient composed of Grade II rock mass

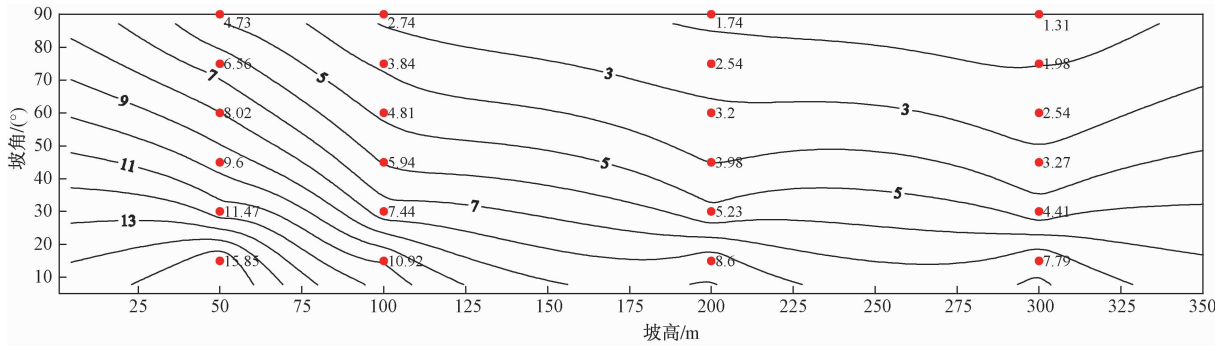


图 6 由 III 级岩体组成的斜坡的稳定性系数等值线图

Fig. 6 Contour map of slope stability coefficient composed of Grade III rock mass

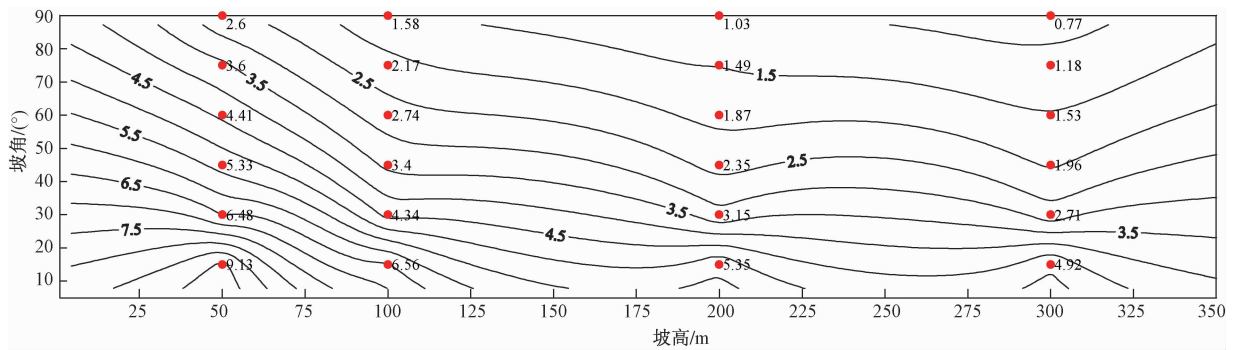


图 7 由 IV 级岩体组成的斜坡的稳定性系数等值线图

Fig. 7 Contour map of slope stability coefficient composed of Grade IV rock mass

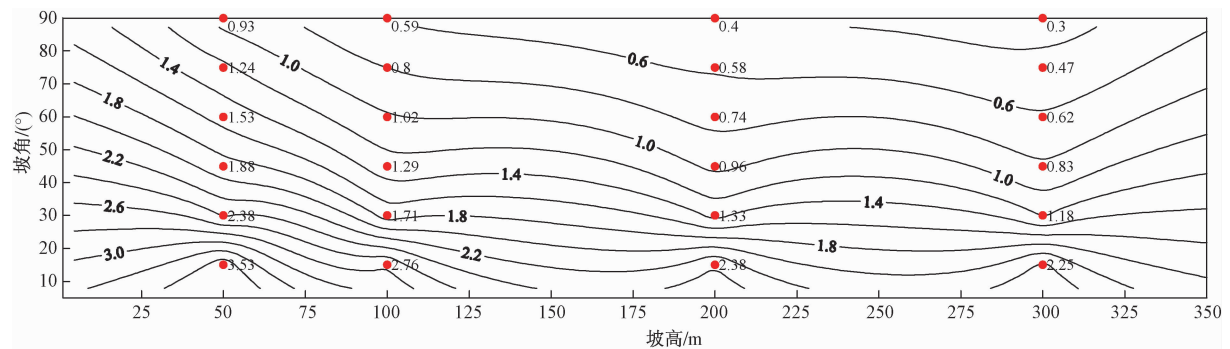


图 8 由 V 级岩体组成的斜坡的稳定性系数等值线图

Fig. 8 Contour map of slope stability coefficient composed of Grade V rock mass

5 实例应用

将研究得出的稳定性系数查询系统应用到一些边坡实例的稳定性评价中,这些实例均来自于已发表的文章,由实例应用结果(表 3)可知,用本文提出的能方便快速地定量评价斜坡稳定性的稳定性系数查询系统评价的边坡稳定性与其他学者用极限平衡法、数值分析法等复杂评价方法所得到的结果一致,且有时稳定性系数的值也相差不大。

6 结论

采用 FLAC 强度折减法计算了 24 个不同坡高、不同坡角、不同岩体质量级别边坡的稳定性系数,根据计算结果绘制了稳定性系数等值线图,以该稳定性系数等值线图作为边坡稳定性系数查询系统,实现了合理地定量快速评价边坡稳定性的目标,将该稳定性系数查询系统应用到一些边坡实例的稳定性评价中,取得了较好的效果。研究得出结论有:

(1)随着坡高的增大,稳定性系数逐渐减小;随着坡角的增大,稳定性系数逐渐减小;随着岩体质量逐渐变差,稳定性系数逐渐减小。

表 3 用稳定性查询系统评价边坡实例稳定性的结果

Table 3 Stability evaluation results of practical slope

边坡名称	岩性	岩体质量级别	坡高/m	坡角/前人的稳定性评价	本文的稳定性评价
遮坎采场边坡 ^[18]	砂质板岩	II	207	54 稳定	稳定(4.80)
	泥质板岩	III	110	54 局部稳定	稳定(4.76)
新疆铜矿边坡 ^[19]	变质砂岩	IV	345	48 局部稳定	稳定(2.47)
云南露天矿边坡 ^[20]	云母片岩	V	208	44 1.10	1.01
	云母片岩	V	188	41 1.14	1.16
水电站隧洞边坡 ^[21]	全强风化花岗岩	V	58	40 2.20	2.00
人工岩质边坡 ^[22]	强中风化花岗岩	V	17	60 2.19	1.94
六安岩质边坡 ^[23]	花岗岩	V	180	35 1.37	1.50

(2)随着岩体质量变得越来越差,稳定性系数的变化范围也在逐渐减小。

(3)用本文提出的能方便快速地定量评价斜坡稳定性的稳定性系数查询系统评价的边坡稳定性与其他学者用极限平衡法、数值分析法等复杂且较慢的评价方法评价所得到的结果基本一致,且有时稳定性系数的值也相差不大,这说明用本文提出的边坡稳定性系数查询系统进行稳定性评价是可行的。

(4)该斜坡稳定性系数查询系统存在很多缺陷,比如:①仅考虑了坡高、坡角,岩体物理力学参数对稳定性的影响,没有考虑斜坡结构、地质构造、岩土组合、人类工程活动等因素的影响。②计算所用的岩体力学参数是根据规范人为确定的,参数取值存在一定主观性。③仅能对坡高小于350 m的岩质斜坡的稳定性做出评价,不能对坡高大于350 m的斜坡,或土质斜坡做出稳定性评价。因此,需要开展更多研究来完善这些不足。

参考文献:

- [1] 伍保祥.金沙江上游波罗水电站库区滑坡发育规律及岸坡稳定性风险分析[D].成都:成都理工大学,2008.
WU Baoxiang. Development principle of landslide and stability risk analysis of slope of reservoir bank of Boluo hydroelectric power station in Jinsha River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [2] 李功伯,谢建清.滑坡稳定性分析与工程治理[M].北京:地震出版社,1997.
LI Gongbo, XIE Jianqing. Stability analysis and engineering control of landslide [M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [3] 唐辉明.工程地质学基础[M].北京:化学工业出版社,2008.
TANG Huiming. Principles of engineering geology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [4] 叶海林,黄润秋,郑颖人,等.地震作用下边坡稳定性安全评价的研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(6):1248-1257.
YE Hailin, HUANG Runqiu, ZHENG Yingren, et al. The study of safety evaluation on slope seismic stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1248-1257.
- [5] 刘汉龙,费康,高玉峰.边坡地震稳定性时程分析方法[J].岩土力学,2003,24(4):553-556.
LIU Hanlong, FEI Kang, GAO Yufeng. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 553-556.
- [6] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝.用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J].中国工程科学,2002,4(10):57-61.
ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, ZHANG Luyu. Slope stability analysis by strength reduction FEM [J]. Engineering Science, 2002, 4(10): 57-61.
- [7] 晓凡.不同地震烈度下边坡稳定性计算实例[J].东北地震研究,1999,15(1):59-64.
XIAO Fan. An example to compute stability of edge hillside under various seismic intensity [J]. Seismological Research of Northeast China, 1999, 15(1): 59-64.
- [8] 何专,姚令侃.地震和暴雨工况下边(滑)坡稳定性分析方法评价[J].水土保持通报,2009,29(3):178-182.
HE Zhuan, YAO Lingkan. Assessment on methods of analyzing slope(landslide) stability under earthquake and rainstorm [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(3): 178-182.
- [9] 梁力,王伟,李明.某露天矿岩质高边坡地震动力响应及稳定性分析[J].金属矿山,2008(8):21-25.
LIANG Li, WANG Wei, LI Ming. Analysis of the seismic dynamic response and stability of the high rocky slope at an opencast mine [J]. Metal Mine, 2008(8): 21-25.
- [10] 高玉峰,范昭平,吴勇信.基于Bishop条分法的多点多向地震作用下边坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2010,30(2):117-122.
GAO Yufeng, FAN Zhaoping, WU Yongxin. Stability of slope under multi-point and multi-direction seismic motion based on Bishop method [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(2): 117-122.
- [11] 刘坤伟,赵冬,蔡庆娥,等.杨青林高边坡地震稳定性分析及治理方案研究[J].中国水运,2010,10(1):142-143.
LIU Kunwei, ZHAO Dong, CAI Qinge, et al. Study on seismic stability analysis and treatment scheme of Yangqinglin high slope [J]. China Water Transport, 2010, 10(1): 142-143.
- [12] 贺小黑,王思敬.地震条件下不同类型边坡的稳定性研究[J].化工矿地质,2014,36(2):105-111.
HE Xiaohei, WANG Sijing. Study on stability of different types of slopes under seismic condition [J]. Geology of Chemical Minerals, 2014, 36(2): 105-111.
- [13] 黄火林.基于强度折减的快速拉格朗日差分法在边坡工程中的应用[D].北京:中国地质大学,2007.
HUANG Huolin. Application of fast Lagrangian analysis for continuum based on strength reduction to slope engineering [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [14] 王倩.基于强度折减的坝坡稳定性分析方法的研究[D].大连:大连理工大学,2006.
WANG Qian. Research on the stability of dam slope based on shear strength reduction [D]. Dalian: Dalian

- University of Technology, 2006.
- [15] 薛雷, 孙强, 秦四清, 等. 非均质边坡强度折减法折减范围研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 275 – 280.
- XUE Lei, SUN Qiang, QIN Siqing, et al. Scope of strength reduction for inhomogeneous slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 275 – 280.
- [16] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- CHEN Yumin, XU Dingping. Basic knowledge and engineering examples of FLAC/FLAC^{3D} [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.
- [17] 中华人民共和国水利部. 工程岩体分级标准: GB 50218—94 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
- Ministry of Water Resources. Classification standard of engineering rock mass: JGJ 50218—94 [S]. Beijing: China Planning Press, 1995.
- [18] 伍波. 云南省盈江县遮坎大理岩矿采场边坡岩体质量评价及稳定性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- WU Bo. Study on quality evaluation of rock mass and stability analysis of slope slopes of marble mine in Yunnan Yingjiang County [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [19] 张新光. 新疆东戈壁钼矿露天坑边坡岩体质量评价与稳定性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- ZHANG Xinguang. Rock mass quality evaluation and stability analysis of open-pit slope for Xinjiang East Gobi molybdenum mine [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [20] 杨帆. 云南某露天矿采场边坡岩体力学参数确定及稳定性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- YANG Fan. Study on determination of mechanical parameters of rock mass and stability analysis of slope in an open-pit mine in Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.
- [21] 张社荣, 彭敏瑞, 董绍尧. 岩质边坡稳定性分析方法及工程应用[J]. 中国农村水利水电, 2007(4): 94 – 96.
- ZHANG Sherong, PENG Minrui, DONG Shaoyao. Stability analysis method of rock slope and its engineering application [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(4): 94 – 96.
- [22] 阎寒, 杜海涛, 徐宝儒, 等. 基于强度折减法的人工岩质边坡稳定性分析[J]. 电力勘测设计, 2013, 4(2): 12 – 16.
- YAN Han, DU Haitao, XU Baoru, et al. Stability analysis on artificial rock mass slope based on using strength reduction method [J]. Electric Power Survey & Design, 2013, 4(2): 12 – 16.
- [23] 何欣达. 基于强度折减法的岩质边坡稳定性分析及加固方案设计[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2017.
- HE Xinda. Stability analysis and support design of rock slope based on strength reduction method [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2017.

(上接第 104 页)

- JIE Jiang, WEI Fengying, WANG Shuang, et al. Report on the evaluation of land subsidence in the Pearl River Delta region [R]. Zhanjiang: The Fourth Geological Team of Guangdong Geological Bureau, 2015: 261 – 303.
- [8] 谢荣安, 郑健生, 周元华, 等. 珠江三角洲及周边地区地面沉降地质灾害监测成果报告[R]. 广州: 广东省地质测绘院, 2014: 106 – 184.
- XIE Rongan, ZHENG Jiansheng, ZHOU Yuanhua, et al. Report on the results of geological disaster monitoring of land subsidence in the Pearl River Delta and surrounding areas [R]. Guangzhou: Guangdong Geological Surveying and Mapping Institute, 2014: 106 – 184.
- [9] 王双, 严学新, 揭江, 等. 珠三角平原区软土分布与地面沉降相关性分析[J]. 上海国土资源, 2019, 40(2): 75 – 79.
- WANG Shuang, YAN Xuexin, JIE Jiang, et al. Analysis of the correlation between soft soil distribution and land subsidence in the Pearl River Delta plain [J]. Land and Resources of Shanghai, 2019, 40(2): 75 – 79.
- [10] 高文森, 潘伟. 大学数学—随机数学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 211 – 237.
- GAO Wensen, PAN Wei. University mathematics—random mathematics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 211 – 237.