

文章编号:1674-2869(2012)04-0019-03

有限差分强度折减法求解边坡安全系数

夏世友¹, 张电吉¹, 夏亮², 曾梦秋¹, 王立光¹

(1. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉市城乡建设委员会, 湖北 武汉 430015)

摘要:为了准确地分析边坡的稳定性,根据有限差分强度折减法原理,运用弹塑性理论及相关理论构建求解边坡稳定性安全系数的迭代步骤模型.边坡失稳的判据主要是联合采用塑性区贯通性和速度矢量图来判断,并结合实例进行了分析.研究表明:有限差分强度折减法不仅可以准确得到边坡安全系数而且可以描绘出边坡的变形过程及其滑动面形状.

关键词:边坡安全系数;稳定性;强度折减法;三维快速拉格朗日法;数值模拟

中图分类号:TU457

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.04.005

0 引言

崩塌、滑坡和泥石流是山体在众多因素作用下变形、失稳而给人类造成生命财产损失的地质现象.滑坡地质灾害虽然不像地震灾害那样集中和强烈,但因其分布面比较广、发生次数频繁、影响时间长,所以灾害的累计损失也比较大.当前面临着严峻的地质灾害形势以及大量灾害治理资金的投入,使得边坡稳定性分析成为地质灾害治理过程中的紧迫问题.许多学者在边坡稳定性分析这个问题上,都提出了有效的方法,比如基于应力场和位移场的容重增加法、强度储备法、能量法及各种搜索滑面的边坡稳定性评价方法^[1-3],但这些方法大多数都比较复杂,不易被工程人员所掌握.而本文中所提到的强度折减法较为简单,并且计算结果精度比较高,可以作为工程人员在处理边坡稳定性问题时的首选之法.

1 强度折减法的理论背景

三维快速拉格朗日法(Fast Lagrangian Analysis of Continua)是由美国 Itasca 咨询公司研发推出的连续性介质力学分析软件,简称 FLAC/FLAC^{3D}.其理论基础是数值分析方法中的显式有限差分法,在模拟岩土或者其他材料的三维力学特性时运用比较多.

显式有限差分方法在数值计算中不需要像有限单元法那样将每个单元组装成庞大的总刚度矩阵,其突出特点是计算速度快,存储量小,不存在计算收敛性问题.目前,在连续性介质力学问题的范畴内,显式有限差分法已经被证明具有与有限单元法同样准确的计算结果^[4].而且这个方法能够很好地模拟岩土材料在达到强度极限或屈服极限时发生塑性流动的力学行为.FLAC 和 ANSYS 等多场耦合有限元软件相比较,在分析渐进破坏、失稳和模拟大变形等问题上有明显的优势,原因在于该软件提供了各种可用于岩土体和支护体系的本构模型和结构单元,这些更加突出了 FLAC 的“专业性”,因此在国际岩体工程界该软件享有盛誉^[5].

强度折减法理论是由 Duncan 提出的.该理论已经有比较长的历史,在 20 世纪 80 年代国外就已经开始应用,但是因为力学尚处于起步阶段和缺乏相应的失稳判据,一直以来在岩土工程界并没有得到广泛应用.随着计算机性能的逐渐改善提高以及其他成熟商用软件的推出,强度折减法受制于计算程序和计算精度的局面得到了根本性改变.20 世纪 90 年代末重新成为岩土工程数值模拟研究的一个热点.

2 强度折减法的基本原理

强度折减法中的边坡稳定的安全系数定义^[6]

收稿日期:2012-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51054005)

作者简介:夏世友(1985-),男,湖北武汉人,硕士研究生.研究方向:岩土体边坡稳定性监测分析及地下岩体工程.

指导老师:张电吉,男,教授,博士,博士研究生导师.研究方向:岩土体边坡稳定性监测分析、岩土工程爆破动力学地下岩体工程.

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的剪切强度的比值.强度折减法的要点是利用公式(1)和(2)来调整岩土体的强度指标 C 和 Φ (式中, C_f 为折减后的粘聚力, Φ_f 为折减后的摩擦力, F_{trial} 为折减系数), 然后对边坡稳定性系数进行数值分析, 不断地增大折减系数, 反复计算, 直至达到临界破坏状态, 此时所得的折减系数即为安全系数 F_s .

$$C_f = \frac{C}{F_{\text{trial}}} \quad (1)$$

$$\Phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \Phi}{F_{\text{trial}}} \right) \quad (2)$$

3 强度折减法分析边坡稳定性的步骤

根据边坡稳定性安全系数的定义, 运用弹塑性理论及 FLAC^{3D} 这个软件求解边坡稳定性安全系数的迭代步骤如图 1.

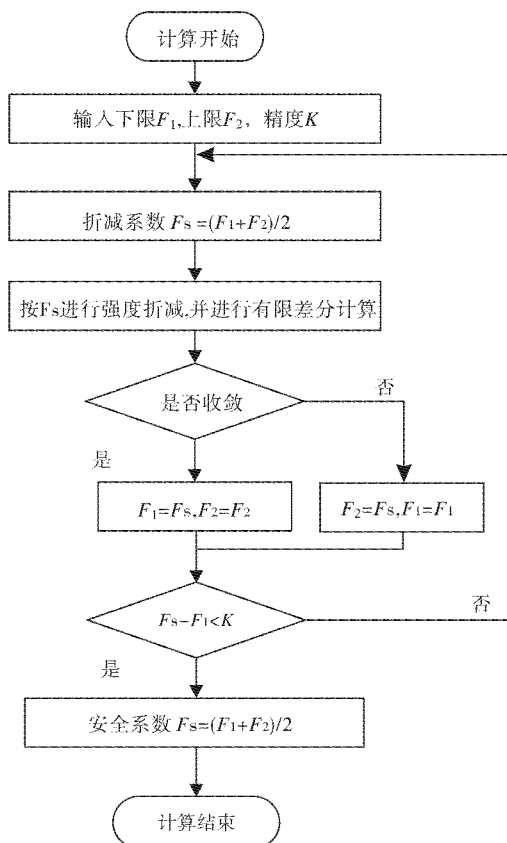


图 1 边坡安全系数的迭代步骤图

Fig. 1 Slope safety factor of iterative steps figure

在采用图 1 迭代求解边坡稳定性安全系数时, 首先, 确定好本构模型、屈服准则、边界条件和材料参数等; 其次, 利用 FISH 语言来编写计算模型的命令流程并建模; 再次, 设定边坡稳定性安全系数的计算精度和上下限值; 最后, 利用软件进行

计算处理从而获得边坡稳定性安全系数和有关变量的等值阴影图.

4 边坡的失稳判据

目前, 判断边坡是否失稳还没有一个统一的标准, 即安全系数求解过程的终止条件不统一. 我们通过归纳总结得出的边坡失稳判据主要有:

a. 以数值分析计算不收敛性作为标准^[7-9].

目前, 国内外学者经常采用数值分析计算结果的收敛性来判定边坡是否发生破坏. 但由于每个人所编写的有限元程序的不同、迭代次数不同以及设置的收敛容许值大小不同, 往往会导致计算的边坡稳定性安全系数有所不同. 此外, 即使得到的数值计算分析结果收敛, 这也不代表边坡一定处于安全状态^[10].

b. 以边坡内某特征点位移的突变为标准^[11]. 通过工程实际经验发现任何边坡的失稳破坏都伴随着一定的位移变化, 当边坡内的某特征点位移发生突变时, 我们就可以认为该边坡处于临界失稳状态. 但是, 该准则受特征点所选位置以及位移容许限值的影响比较大, 所以运用起来不方便.

c. 以塑性区从坡脚至坡顶贯通为标准^[12-13]. 通俗的说法是, 当边坡的塑性应变区从坡脚贯通至坡顶时, 则认为边坡发生了失稳破坏. 但是, 塑性区的贯通并不意味着该区域内的所有塑性破坏点都贯通了, 往往还存在着局部塑性应变发展滞后区域, 这些区域还可能进一步发展. 文献[14]认为: 塑性区的贯通只是边坡破坏的必要条件而不是充分条件, 即在塑性区贯通的同时, 还要参考其他的判据, 比如, 该边坡是否产生了很大的并且无限发展的塑性变形或者是该边坡内某特征点位移是否产生了突变.

综合考虑上面的分析, 可以发现这三种失稳判据都存在一定的局限性. 判据 a、b 受人为因素影响较大, 判据 c 无法单独地判断边坡是否失稳, 因此在下面的算例分析中, 将联合采用塑性区从坡脚贯通至坡顶和速度矢量图来判断边坡是否失稳. 因为当分析的结果中出现贯通的塑性区时, 仅仅能表示该边坡的某些区域已出现了塑性破坏, 但是无法明确地判断边坡是否处于危险状态, 而速度矢量图不仅可以明显地看见贯通的塑性区, 而且可以看见滑动面的外侧区域各网格点的速度明显大于其他区域, 因此可以确定该边坡已经发生了破坏.

5 运用强度折减法计算边坡稳定算例

某均质岩石边坡坡高 12 m, 岩体容重 $\gamma =$

22 kN/m³,黏聚力 $c = 12$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$,坡角 $\beta = 45^\circ$,弹性模量 $E = 6$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$. 该匀质岩石边坡断面图如图2.

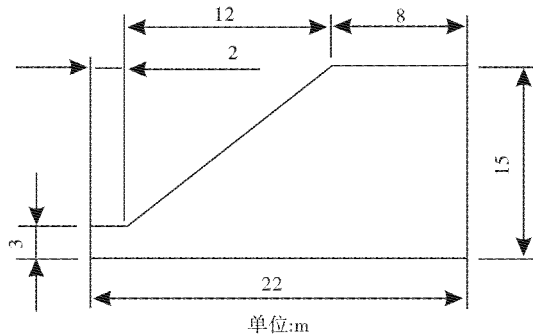


图2 匀质岩石边坡断面图

Fig. 2 Homogeneous rock slope section in figure

利用 FLAC^{3D} 软件计算,在计算中,**a.** 建立的计算模型按下列要求进行:将所使用的坐标系的垂直方向定为 Y 向,水平方向定为 X 方向,本构模型选用 Mohr - Coulomb 本构模型;**b.** 计算边界条件设置如下:边坡的左边界和右边界作为 X 方向的约束,即横向位移;底部边界作为 Z 方向的约束,即纵向位移;整体约束 Y 方向,即平面法线方向位移. 材料参数值按算例所给值设置;边坡稳定性安全系数的上、下限值各设置定为 2 和 0,计算精确度设定为 0.000 1;同时,在数值计算过程中只考虑土体自身重力作用,计算结果如图 3.

从图 3 中可以明显看到塑性贯通区域,即坡体的潜在滑动面;同时该速度矢量图也有力地证明了该边坡外侧区域已明显出现了滑动,即坡体发生了失稳破坏,此时的安全系数 $F_s = 1.008 71$,因为滑动面外侧区域各网格点的速度明显大于其他区域.

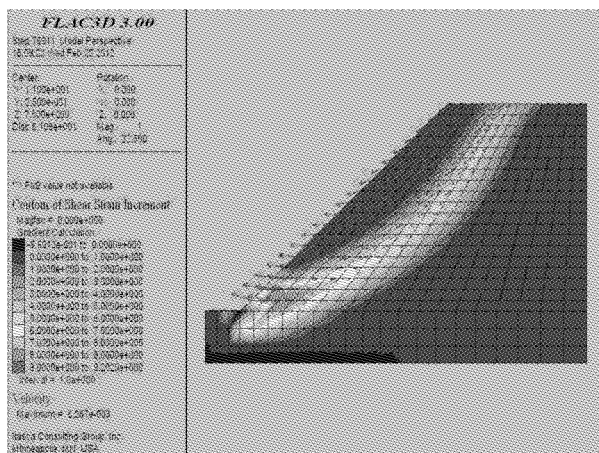


图3 剪切应变增量云图及速度矢量图

Fig. 3 Shear strain increment imageryes and velocity vector

6 结 语

综上所述,笔者发现在分析边坡稳定时,运用以强度折减法作为理论基础的显式拉格朗日有限差分法,具有以下优点:**a.** 计算简单方便、结果可靠;**b.** 避免了极限平衡法需要事先假设滑动面以及人为假定等不足;**c.** 将强度折减法原理和 FLAC^{3D} 相结合,形象的描绘出了边坡的变形过程及其滑动面形状.

参考文献:

- [1] 徐卫亚,周家文,邓俊晔,等. 基于 Dijkstra 算法的边坡极限平衡有限元分析[J]. 岩土工程学报,2007,29(8):1159-1172.
- [2] 郑宏,李春光,李焯芬,等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报,2002,24(5):626-628.
- [3] 郑宏,刘德富,罗先启. 基于变形分析的边坡潜在滑面的确定[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(5):092716.
- [4] 陈小康. 露天坑下残矿回收安全控制技术研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [5] 黄贯虹,方刚. 系统工程方法与应用[M]. 广州:暨南大学出版社,2005.
- [6] 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,2009:260-261.
- [7] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [8] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. Geotechnique, 1999, 49(3):387-403.
- [9] 林杭,曹平,赵延林,等. 强度折减法在 Hoek - Brown 准则中的应用[J]. 中南大学学报:自然科学版,2007,38(6):1219-1224.
- [10] 董璞,刘金龙,李亮辉. 强度折减有限元法分析边坡稳定性的精度探讨[J]. 四川建筑科学研究,2009,35(2):146-150.
- [11] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报,1997,19(2):1-7.
- [12] 郑宏,李春光,李焯芬. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报,2002,24(5):626-628.
- [13] 栾茂田,武亚军,年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.
- [14] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳. 极限分析有限元法讲座 - II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学,2005,26(2):332-336.

(下转第 26 页)