

# 基于 FLAC-3D 的强度折减法判据的研究

陈 冉 刘 飞

(北京建筑工程学院, 北京 100044)

**【摘 要】** 运用 FLAC-3D 软件对一简单边坡进行了稳定性分析。分别利用计算收敛判据、塑性区贯通判据、有效剪应变增量判据和特征点位移突变判据求出边坡安全系数, 并加以对比分析。着重对特征点突变判据进行研究分析, 分析发现: 监测坡顶和坡面中点位移比监测坡脚处位移更有效; 仅从位移大小的突变作为判据标准不够严谨, 提出一种通过观察特征点位移与折减系数相关曲线的斜率变化来确定安全系数, 斜率突变处对应的折减系数即为安全系数。

**【关键词】** FLAC-3D; 安全系数; 特征点位移突变判据; 斜率突变

**【中图分类号】** TU 43; TU 45

**【文献标识码】** A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2013. 01. 009

## Analysis of Strength Reduction Method Criterion on FLAC-3D

Chen Ran Liu Fei

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**【Abstract】** FLAC-3D is used to analyze a simple slope. The comparative analysis of the safety factors which were calculating by convergence criterion, plastic zone criterion, effective shear strain increment criterion and displacement mutation criterion. By the selection of the 'feature points' and 'mutations criterion' for analysis, The top of the hill and the slope midpoint of displacement monitoring is more effective than detecting the foot of the slope at the displacement; mutations only from the displacement size as a criterion standard is not stringent enough, and propose a feature point by observing the displacement reduction factor curve slope changes determine the safety factor, the slope of the mutation at the corresponding reduction factor is the safety factor.

**【Key words】** FLAC-3D; safety factor; criterion of displacement of feature points; slope mutation

### 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。安全系数是评价边坡稳定性的一个重要指标。目前求解边坡稳定性安全系数的主要方法有传统极限方法和数值分析方法两大类。传统极限方法主要是建立在极限平衡理论上, 分析时不考虑土体内部的应力应变关系, 通常需要人为假定滑裂面的形状和位置, 进而利用极限平衡理论求出边坡的安全系数。而数值分析方法在满足力的平衡条件的基础上, 考虑了土体内部应力应变关系, 且无需事先假定滑裂面就可以确定边坡相应的安全系数以及相应潜在滑裂面的形状和位置。强度折减法就是边坡稳定性分析中的一种常用的数值分析方法, 许多学者都对其进行了深入地研究<sup>[1-3]</sup>。

强度折减法破坏判据的选择直接关系到安全系数的求解精度, 目前常用的一些失稳判据<sup>[4-5]</sup>主要有: 计算收敛判据、塑性区贯通判据、有效剪应变增量判

据、特征点位移突变判据, 不同的判据确定出的安全系数有可能不同。本文基于三维显式有限差分软件 FLAC-3D 对一简单均质边坡进行稳定性分析, 求出各种判据下的安全系数并加以对比分析。针对特征点位移突变判据, 提出一种通过判断特征点位移与折减系数相关曲线的斜率突变来确定安全系数, 即曲线斜率突变处所对应的折减系数就是安全系数。

### 1 基本原理

#### 1.1 安全系数

传统的边坡稳定极限平衡方法是采用 Mohr-Coulomb 屈服准则, 其安全系数  $F_s$  可以定义为沿滑动面的抗剪强度与实际抗剪强度之比, 即:

$$F_s = \frac{\int_0^l (c + \sigma_n \tan \varphi) dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (1)$$

将(1)式同除以  $F_s$  得:

$$1 = \frac{\int_0^l \left( \frac{c}{F_s} + \frac{\sigma_n \tan \varphi}{F_s} \right) dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (2)$$

### 1.2 强度折减法

强度折减是强度折减法的核心,其原理<sup>[6]</sup>是将边坡土体的材料参数粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  进行折减,即同除以一个折减系数,得到新的粘聚力  $c'$  和内摩擦角  $\varphi'$ 。即:

$$c' = \frac{c}{F} \quad (3)$$

$$\tan \varphi' = \frac{\tan \varphi}{F} \quad (4)$$

将折减后的参数  $c'$ 、 $\varphi'$  作为新的土体参数重新进行数值分析,逐次加大折减系数,直至计算出现不收敛,此时所对应的即认为是边坡的安全系数  $F_s$ 。对比式(2)、式(3)、式(4)可以看出强度折减法在本质上与传统方法是一致的,这就奠定了强度折减法的理论基础。

## 2 几种常用的破坏判据

当边坡的局部或整体状态发生突变时,即认为边坡失稳,相应的判定标准即为破坏判据。目前,常用的破坏判据有以下几种:

1) 计算收敛判据<sup>[7]</sup> 计算收敛判据是以数值计算过程中计算是否收敛作为评判标准。在 FLAC-3D 中求安全系数时,单次安全系数的计算过程主要采用这种判据,对于给定的安全系数  $F$ ,通过控制力不平衡比率或已运行的典型时步数来作为计算终止条件。

2) 塑性区贯通判据<sup>[8]</sup> 不同折减系数下,边坡内部塑性区的分布是不同的。以塑性区有效的贯通作为确定安全系数的标准称为塑性区贯通判据。塑性区贯通判据是目前较常用的判据之一。

3) 有效剪应变增量判据 由于土体多发生剪切破坏,所以有效剪应变增量是衡量边坡稳定性的一个重要参数。以边坡内部有效剪应变增量贯通作为边坡失稳的标志,这种判断方法称为有效剪应变增量判据。

4) 特征点位移突变判据 通过观察特征点的位移和折减系数二者的历史相关曲线,以位移突变来判定边坡的失稳即为特征点位移判据。目前常用的特征点有坡顶、坡脚、坡面中点。

## 3 算例计算

文中采用三维有限差分软件 FLAC-3D 对一简单均质边坡进行计算分析。

### 3.1 边坡模型

边坡坡高 10 m,坡角为  $45^\circ$ ,具体几何尺寸见图 1。边坡物理、力学参数指标见表 1。

在 FLAC-3D 里建立边坡模型(见图 2),计算模型采用摩尔库伦模型,经试算,采用图 2 所示边界范围即可满足精度要求,Y 方向只采用一个单元宽度(取 0.5 m),并对模型中所有节点的 Y 向速度进行约束,以便等效地进行平面应变分析<sup>[9]</sup>。

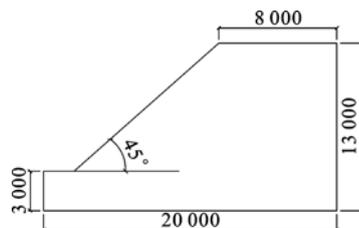


图 1 边坡几何模型(单位:mm)

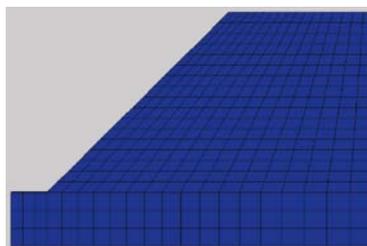


图 2 FLAC-3D 网格模型

表 1 边坡物理、力学参数指标

$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\sigma/\text{MPa}$	$G/\text{MPa}$	$K/\text{MPa}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
12	25	10	30	100	2 000

### 3.2 安全系数求解

运用 FLAC-3D 软件对该边坡进行稳定性分析,求出各种判据下边坡的安全系数。其中计算收敛判据分别采用 FLAC-3D 软件内置程序模块求解和二分法两种方法进行求解。求解结果如下:

#### 1) 计算收敛判据

FLAC-3D 内置的强度折减法(solve fos)求出的安全系数  $F_s=1.190$ 。

采用二分法(颜庆津,2006)求解,为了提高精度,以上下限差值小于 0.001 作为强度折减终止条件,此时对应的上下限的均值即为最终的安全系数。折减后的单次计算如果满足下面两个条件中任一个,即终止本次计算:①运行时步超过 10 000 时步;②力不平衡比率  $R$  小于临界值  $9.8 \times 10^{-6}$ 。经计算,得到安全系数为  $F_s=1.186$ 。

#### 2) 塑性区贯通判据

不同折减系数下边坡内部塑性区分布见图 3。

由图 3 可知,当折减系数  $F$  为 1.165 时,塑性区贯通,且形成明显有一定宽度的圆弧形塑性区贯通面。

所以,确定安全系数为  $F_s = 1.165$ 。

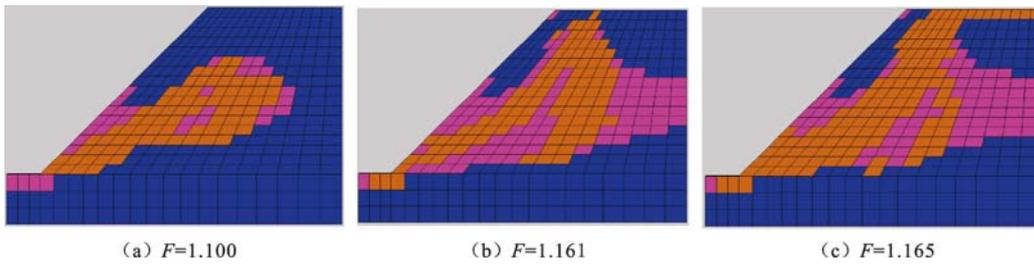


图 3 不同折减系数下边坡内部塑性区分布图

3)有效剪应变增量判据

不同折减系数下边坡内部的广义剪应变增量分布见图 4。由图 4 可知,当折减系数为 1.171 时,边

坡内部形成了明显连续的广义剪应变贯通面,认为此时的折减系数即为安全系数  $F_s = 1.171$ 。

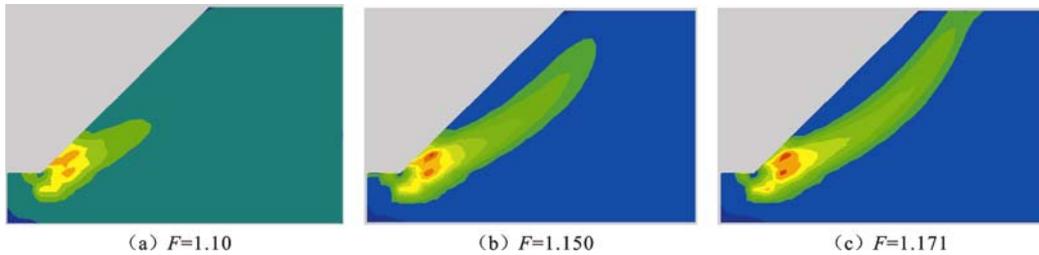


图 4 不同折减系数下边坡内部有效剪应变增量分布图

4)特征点位移突变判据

传统的特征点位移判据<sup>[10]</sup>是通过监测出各折减系数对应的位移,将这些位移点连成折线,位移大小突然增大处对应的折减系数定义为安全系数。

本文提出一种通过观察折减系数与特征点位移关系曲线斜率的变化来确定安全系数,曲线斜率突变处所对应的折减系数即为安全系数。本算例监测坡顶、坡面中点、坡脚的 X 及 Z 向位移,绘

制出位移大小与折减系数的相关曲线,不能严格地说是连续曲线,因为折减系数的间隔做不到无穷小,0.001 的安全系数间隔足以保证求解精度。通过观察相关线,从图 5 中可以明显看出:坡顶和坡面中点的关系曲线有明显的斜率突变,而坡脚处的关系曲线则不明显;在斜率突变点所对应的折减系数即可认为是安全系数。由图 5 可以确定安全系数为  $F_s = 1.186$ 。

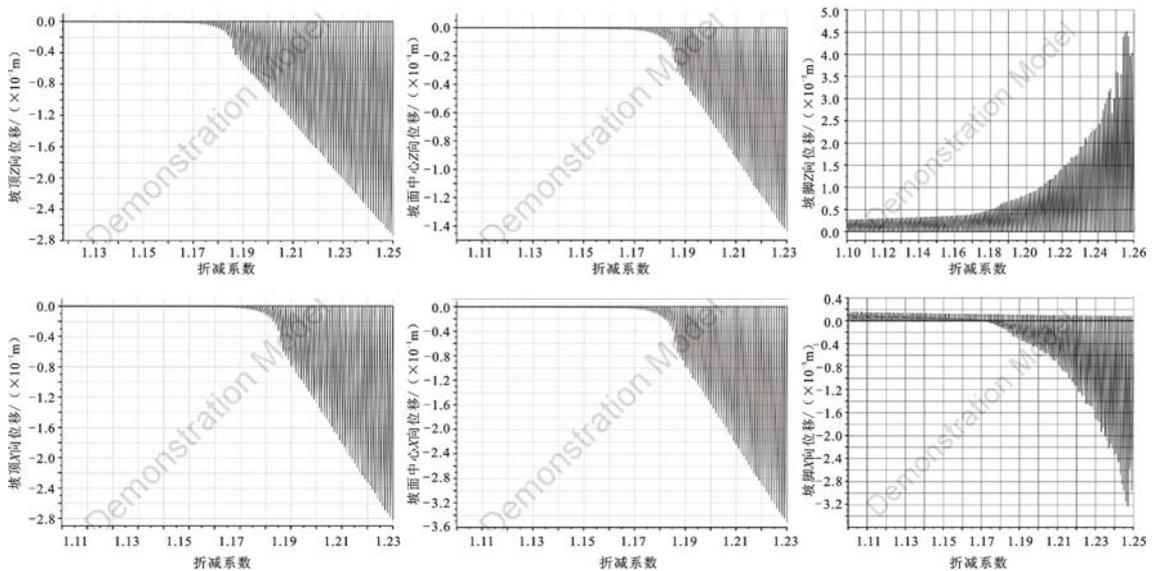


图 5 折减系数与特征点位移相关曲线(一)

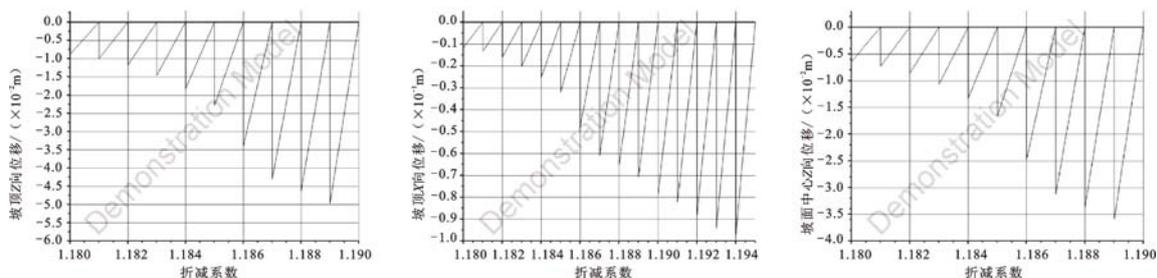


图5 折减系数与特征点位移相关曲线(二)

#### 4 对比分析

这里以FLAC-3D内置的强度折减法程序模块求出的安全系数为标准即 $F_s = 1.190$ ,对比分析这几种判据的优劣。采用二分法求得的安全系数 $F_s = 1.186$ 与内置的强度折减法程序模块的求解结果十分接近,在达到一定精度的同时,二分法大大缩短了求解时间,是一种较好的求解方法。塑性区贯通与有效剪应变增量判据在实质上可以归纳为同一种判据,只不过表现形式不同,这里从图3和图4中可以看出,两者都是以相应区域有效贯通为标准来确定安全系数,两者判别结果很接近,相比计算收敛判据,这两种判据结果偏于保守,这是因为塑性区贯通时边坡不一定发生局部或整体状态突变。特征点位移突变判据所判别的结果 $F_s = 1.186$ 也与标准很接近,这表明,通过斜率突变来确定安全系数是可行的。

#### 5 结论

本文通过对一简单土质边坡进行各种判据下安全系数对比分析,并针对特征点位移突变判据进行探究,算例计算表明:

1)基于FLAC-3D软件强度折减法内置程序求解的安全系数为1.190。二分法计算收敛判据结果与内置的强度折减法程序模块结果十分接近。塑性区与有效剪应变增量判据比较保守,特征点位移判据求解结果更接近计算收敛判据结果。

2)绘制的特征点位移与折减系数相关曲线表明,坡顶和坡面中点的位移折减系数相关曲线斜率变化明显,比坡脚更适合作为特征点。

3)本文提出一种通过观察关系相关曲线斜率变

化来确定安全系数。该法较传统的特征点位移判据更有优势:①斜率的变化比大小突变更能反映边坡内部的突变;②大大提高了安全系数的精度。本算例证实了该法具有一定的可行性。

#### 参考文献

- [1] 郑颖人,赵尚毅.用有限元法求边坡稳定安全系数[J].公路交通技术,2002;1-9.
- [2] 陈星,李建林.基于ADINA、ANSYS、FLAC的强度折减法[J].水文地质工程,2010,37(3):1-5.
- [3] 连锁营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):1-5.
- [4] 栾茂田,武亚军,年廷凯.强度折减有限元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.
- [5] 王少华,赵宗勇,郭靖,等.基于FLAC<sup>3D</sup>强度折减法的三种收敛判据的比较分析[J].现代矿业,2011,2(2):1-3.
- [6] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.
- [7] 林小谷,宗全兵.基于M-C准则的强度折减法分析边坡稳定性研究[J].岩土工程技术,2006,20(1):1-5.
- [8] 徐卫亚,肖武.基于强度折减和重度增加的边坡破坏判据研究[J].岩土力学,2007,28(3):505-511.
- [9] 陈育民,徐鼎强.FLAC/FLAC3D基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009:261-265.
- [10] 关立军.基于强度折减的土坡稳定分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2003.

收稿日期:2012-10-25