

# Application Research of High Slope Stability Analysis Based on FLAC3D Strength Reduction Method

Hanxiang Yang

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

**Abstract:** Nowadays, strength reduction method is widely used in slope stability analysis. It can be said to be further into the solution process of pure finite element method. The basic principle and method of this paper on the shear strength reduction method and numerical simulation and assessment of slope stability are introduced, and then based on finite difference analysis software FLAC<sup>3D</sup>, combined with the engineering example of slope stability analysis.

**Keywords:** Strength reduction method; Slope stability; FLAC<sup>3D</sup>

## 基于 FLAC<sup>3D</sup> 的强度折减法在高边坡稳定性分析中的应用研究

杨涵翔

重庆交通大学土木工程学院, 重庆, 中国, 400074

**摘要:** 如今强度折减法在边坡稳定性分析中应用广泛, 可以说是对纯粹的有限单元法在求解过程中的进一步深入。本文首先对强度折减法的基本原理、方法以及数值模拟与边坡稳定的评定依据进行了介绍, 再基于有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>, 结合工程实例对边坡稳定性进行了分析。

**关键词:** 强度折减法; 边坡稳定性; FLAC<sup>3D</sup>

### 1 引言

边坡稳定性分析研究一直以来都是经典土力学的一个研究热点[1~2]。最经典的分析方法是 1927 年弗伦纽斯基于极限平衡理论提出的圆弧条分法, 除此以外还有其他土坡稳定性分析方法数十种, 例如: 极限平衡法、极限分析法和滑移线场法等。目前工程上应用最多的就是极限平衡法, 但传统的极限平衡法却很难确定最危险滑动面以及相应的最小稳定安全系数。而纯粹的数值分析方法例如有限单元法, 虽然能确定出边坡的应力、位移、塑性区, 也无法直接得出最危险滑动面以及相应的最小稳定安全系数。

随着科技的发展, 将强度折减理论与弹塑性有限单元法相结合的强度折减有限元法日趋成熟。强度折减有限元法可以说是对纯粹的有限单元法在求解过程中的进一步深入, 在给定的评定依据的条件下, 通过调整折减系数使塑性区达到全部贯通, 并且等效塑性应变与位移有突变趋势, 此时的边坡即处于临界破坏状态, 相对应的折减系数即为最小稳定安全系数。本

文基于有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup>[3]结合强度折减技术对边坡稳定性进行了分析。

### 2 强度折减法的基本原理与方法

#### 2.1 基本原理

强度折减法<sup>[4~5]</sup>分析边坡稳定性的基本思想是跟传统的极限平衡法保持一致的, 在强度折减法中最关键的一步就是调整强度折减系数来得到最小稳定安全系数。1975 年 Zienkiewicz 等<sup>[6]</sup>提出了强度折减系数的概念, 据此确定的强度储备安全系数相比较 Bishop 法<sup>[7]</sup>运用极限平衡法确定的稳定安全系数在概念上是保持一致的。

强度折减法的基本原理: 将土体的强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值同时除以一个折减系数  $F$ , 得到一组新的强度参数  $c'$ 、 $\varphi'$  值, 其中  $c'$ 、 $\varphi'$  分别由式 (1)、(2) 求得, 而弹性模量  $E$  与泊松比  $\mu$  在假定中为定值, 与  $c$ 、 $\varphi$  值无关。然后将折减后的  $c'$ 、 $\varphi'$  值代入有限元进行试算, 通过不断调整折减系数  $F$  使边坡达到临界破坏状态, 此状态所对应的折减系数  $F$  即为最小稳定

安全系数。

$$c' = \frac{c}{F} \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan \arctan \frac{\tan \varphi}{F} \quad (2)$$

## 2.2 基本方法

在实际工程分析中常采用理想弹塑性模型，例如 Mohr-Coulomb 模型、Drucker-Prager 模型。因为理想弹塑性模型与传统的极限平衡法在计算结果上具有很高的可比性，可以简化处理复杂问题时带来的繁琐。

依据增量理论，土体弹塑性应力应变关系为：

$$\{d\sigma\} = ([D^e] - (1-r)[D^p])\{d\varepsilon\} \quad (3)$$

其中：

$$[D^p] = \frac{[D^e] \frac{\partial g}{\partial \sigma} | \frac{\partial f}{\partial \sigma} [D^e]}{\frac{\partial f}{\partial \sigma} [D^e] \frac{\partial g}{\partial \sigma} |} \quad (4)$$

$$r = \frac{-f_0}{(f_1 - f_0)} \quad (5)$$

上式中： $[D^e]$ —弹性矩阵； $[D^p]$ —塑性矩阵；

$f_0$ —初始应力状态（弹性）对应的屈服函数值；

$f_1$ —试探应力状态（塑性）对应的屈服函数值；

$r$ —当  $r$  为 1 时，使用弹性矩阵；当  $r$  为 0 时，使用完全塑性矩阵；当  $0 < r < 1$  时，使用弹塑性矩阵。

## 3 有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 的数值模拟与边坡稳定的评定依据

### 3.1 屈服准则的选取

决定土边坡稳定性的关键因素是土体的抗剪强度，一旦抗剪强度达到极限破坏时，边坡将不再稳定。边坡稳定性分析中常采用理想弹塑性模型，其中多选用 Mohr-Coulomb 模型，可 Mohr-Coulomb 模型的屈服面多存在尖角。为避免这一问题，在 FLAC<sup>3D</sup> 软件中选用的是扩展的 Mohr-Coulomb 准则，其屈服面连续光滑，具有唯一的塑性流动方向。准则如下：

$$\frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \sqrt{J_2} \left[ \cos \theta_\sigma - \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \right] - c \cos \varphi = 0 \quad (6)$$

式中： $I_1$ —应力张量第一不变量；

$J_2$ —应力偏张量第二不变量；

$\theta_\sigma$ —应力罗德角；

$c$ —土体粘聚力；

$\varphi$ —土体内摩擦角。

### 3.2 流动法则的选取

在有限差分计算中，对于采用的流动法则是关联的还是非关联的，取决于剪胀角  $\psi$ ：若  $\psi = \varphi$ ，为关联法则；若  $\psi \neq \varphi$ ，为非关联法则。

Mohr-Coulomb 的塑性势能方程：

$$Q = \sigma_m \sin \psi + \sqrt{J_2} \left( \cos \theta_\sigma - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \psi \right) = \text{常数} \quad (7)$$

式中： $\sigma_m$ —平均应力；

$\psi$ —剪胀角， $0 \leq \psi \leq \varphi$ ，当  $\psi=0$  时无剪胀现象，当  $\psi=\varphi$  时为 Mohr-Coulomb 屈服条件，剪胀现象最明显；

$J_2$ —应力偏张量第二不变量；

$\theta_\sigma$ —应力罗德角。

虽然对于同一类材料来说，相比采用关联流动法则，采用非关联流动法则得到的破坏荷载要小得多。但是非关联流动法则的局限性是存在的，对于剪切现象的减少只能起到一定的作用，计算误差也不可控制。虽然关联流动法则并不适用于土体，剪切屈服面会出现过于明显的剪胀现象，但相比较本文还是采用了关联流动法则，即  $\psi=\varphi$ 。

### 3.3 边坡稳定的评定依据

对于土体边坡的整体失稳破坏的评定可采用塑性区发展情况来评定。采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 可以计算出塑性应变的大小，同时通过软件的结果显示技术（例如：云图、等值线、曲线、列表、动画显示等）来描述塑性区的发展情况。

目前主要的通过有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 对土体边坡稳定的评定依据有：（1）有限差分计算不收敛；（2）塑性区从坡脚到坡顶的贯通；（3）特征点位移具有突变性。

## 4 工程概况与模型建立分析

### 4.1 工程概况

本文基于重庆市某高速公路高边坡路堤实际工程分析，其断面图尺寸如图 1 所示。地基土结构宽 98m，总体高度 40m，路堤填土边坡有三级台阶，自上而下的高度分别是 20m，10m，10m。

### 4.2 模型建立

采用 FLAC<sup>3D</sup> 建立高边坡路堤模型进行数值分析，整个模型的尺寸为 150m×10m×45.4m（其中路堤

纵向宽度  $y=10m$ ），模型断面如图 2 所示（其中 A 组为路堤填土，B 组为地基土）。

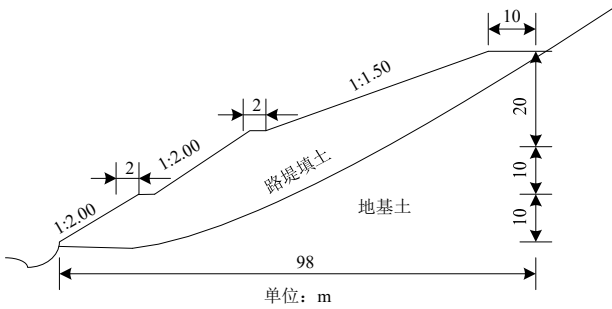


Figure 1. Design Scheme for High Slope Embankment of a Highway in Chongqing  
图 1. 重庆市某高速公路高边坡路堤设计方案

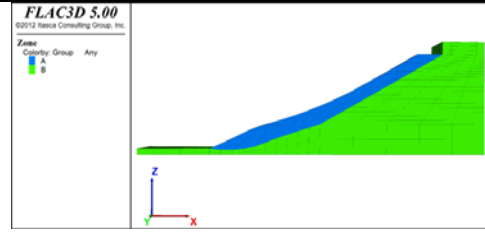


Figure 2. Section Map of High Slope Embankment Model  
图 2. 高边坡路堤模型断面图

本模型土体采用理想弹塑性本构模型，屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则。高边坡路堤模型的材料物理力学参数见表 1。

Table 1. Material Physical and Mechanical Parameters of High Slope Embankment Model  
表 1. 高边坡路堤模型的材料物理力学参数

材料属性	弹性模量 E(MPa)	粘聚力 c(KPa)	内摩擦角 $\phi$ (°)	容重 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	泊松比 $\mu$
路堤填土	30.0	22.5	18.5	2000	0.33
地基土	10.5	18.5	32.5	1800	0.33

模型左右边界分别取 30m 和 22m，定义边界位移条件：（1）在  $x=-30m$  和  $120m$  处采用水平约束，约束其水平方向上的位移；（2）因主要研究  $x-z$  平面的应变变化，即在模型  $y$  方向上约束其整个位移；（3）因基底为基岩，即  $x-y$  平面 ( $z=0m$ ) 采用固定约束。

### 4.3 结果分析

通过 FLAC3D 软件计算当特征阶数达到 13833 时计算收敛，采用关联流动法则（即  $\psi = \phi$ ）对高边坡路堤进行分析，以此分析得出高边坡路堤临界失稳状态下的折减系数  $F$  为 1.38，此折减系数即为边坡的稳定性安全系数。图 3 为高边坡路堤临界状态下的最大剪应变增量云图，从图中可以看出出现了一个明显的塑性贯通区，即高边坡路堤存在一个潜在的边坡滑移面且滑移面上的最大剪应变增量可达到 8.4821。

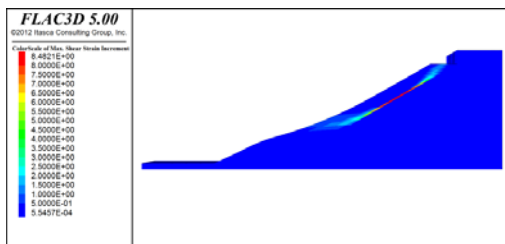


Figure 3. The Maximum Shear Strain Increment Cloud Chart of High Slope Embankment Under Critical Condition  
图 3. 高边坡路堤临界状态下的最大剪应变增量云图

图 4 为高边坡路堤临界状态下的水平位移云图，可以看出水平位移为  $-0.5m$  的等值线将高边坡路堤分为左右两个部分。通过查看模型水平速度矢量显示结果发现滑移面左侧路堤填土的速度明显大于右侧，说明左侧填土部分相对较右侧会发生明显的滑移且左侧填土部分的最大水平位移可达到  $-5.0348m$ 。

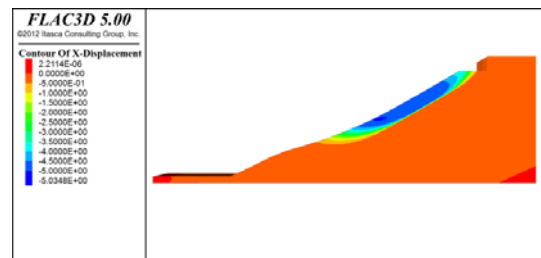


Figure 4. Horizontal Displacement Cloud Map for Critical Condition of High Slope Embankment  
图 4. 高边坡路堤临界状态下的水平位移云图

## 5 总结

基于有限差分软件 FLAC3D 的强度折减法分析高边坡路堤边坡稳定性问题, 采用了关联流动法则可分析得出高边坡路堤临界失稳状态下的折减系数  $F$  为 1.38, 此折减系数即为边坡的稳定性安全系数, 且能从最大剪应变增量云图中可以看出出现了一个明显的塑性贯通区。

可以通过水平位移为 -0.5m 的等值线将高边坡路堤分为左右两个部分, 以准确确定路堤边坡的潜在滑移面位置。通过查看模型水平速度矢量显示结果发现滑移面左侧路堤填土的速度明显大于右侧, 说明左侧填土部分相对较右侧会发生明显的滑移。

总体来讲, 当高边坡路堤边坡安全系数较小时, 边坡滑移主要以浅层局部滑移为主, 随着安全系数的增大, 滑移逐渐向边坡深部发展且贯通面会逐渐扩大

到从坡脚到坡顶的贯通。

## References (参考文献)

- [1] 黄昌乾, 丁恩保. 边坡工程常用稳定性分析方法[J]. 水电站设计, 1999(01): 54-59.
- [2] 陈新民, 罗国煜. 基于经验的边坡稳定性灰色系统分析与评价[J]. 岩土工程学报, 1999(05): 638-641.
- [3] 梁利红. 浅谈 FLAC3D 在边坡工程中的应用[J]. 科技资讯, 2009(27): 37-38.
- [4] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 许强. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(02): 243-256.
- [5] 刘娉慧, 房后国, 黄志全, 刘焯. FLAC 强度折减法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2007(05): 52-54+58.
- [6] Wlodarkiewicz A, Rowińska J, Zienkiewicz J. [Odontogenic keratinizing cysts]. [J]. Czasopismo Stomatologiczne, 1975, 28(5).
- [7] Kyo Hoon Park, Sung Youn Lee, Eun Ha Jeong, Aeli Ryu, Kyung Joon Oh, Shi Nae Kim. Bishop score and cervical length at 33-35 weeks of gestation and the risk of intrapartum cesarean delivery of twins[J]. Journal of Perinatal Medicine, 2012, 40(4).