

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0371-08

基于最大剪应变增量的边坡潜在滑动面搜索

李 剑, 陈善雄, 余 飞

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 滑动面位置和形状的判断是影响边坡地基稳定性分析合理性的主要因素, 合理地确定滑动面的位置和形状是边坡地基稳定性分析首先要解决的问题。由岩土工程常用的 Mohr-Coulomb 度理论可知, 岩土体破坏是由于某一面上的剪应力达到了岩土体的剪切强度, 此时剪切面上必然发生较大的剪切变形, 因此可以通过搜索最大剪应变增量的位置来确定边坡滑动面。基于以上思路, 综合运用有限差分软件 FLAC^{3D} 和曲线拟合技术, 提出基于最大剪应变增量确定边坡地基潜在滑动面的方法。首先, 利用有限差分软件 FLAC^{3D} 计算极限状态时边坡内的应力、应变, 在计算剖面中设置一系列的垂线, 利用 FISH 语言编制程序搜索垂线上剪应变增量最大位置的坐标, 以获得滑动面上的离散点坐标。然后, 通过最小二乘的方法对离散点进行曲线拟合, 得到滑动面的形状和位置。通过与极限平衡法的对比分析, 验证文中方法的合理性。文中方法的判断标准物理意义明确, 简便实用, 且克服了对网格的依赖性。

关 键 词: 最大剪应变增量; 滑动面搜索; FLAC^{3D}; 曲线拟合

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

A method for searching potential failure surface of slope based on maximum shear strain increment

LI Jian, CHEN Shan-xiong, YU Fei

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: A main factor affecting the rationality of the sloped foundation stability analysis is to determine the position and shape of the sliding surface. Therefore the first problem of the sloped foundation stability analysis to be solved is to reasonably determining the position and shape of the sliding surface. The Mohr-Coulomb yield criterion, commonly used in the geotechnical engineering, shows that the failure of the rock and soil mass is due to the reach of the shear stress on someone surface to its shear strength, when there must occur a large shear deformation on the shear plane. Therefore, the sliding surface can be determined through searching the positions where have the largest shear strain increment. Based on the ideas above, comprehensively using the finite difference software-FALC^{3D} and the curve fitting technique, the paper proposes a method, based on the largest shear strain increment, to determine the potential sliding surface. Its specific processes steps are that: firstly, the stress and strain in the slope are calculated by using the finite difference software-FALC^{3D}; then a series of vertical line would be set in the calculating section, and then the discrete coordinates of the sliding surface, where the shear strain is largest on the vertical line, would be found through programming FISH program. Then the position and shape of the sliding surface can be obtained through carrying out the curve fitting of the discrete points by using the least squares method. The rationality of the proposed method is verified through comparatively analysing the limit equilibrium method. The method has a criterion with clear physical significance and is simple, convinient and practical for application and also overcomes the dependence of the calculating grid.

Key words: maximum shear strain increment; failure surface searching; FLAC^{3D}; curve fitting

1 引 言

边坡的稳定性分析是从极限平衡法发展而来,

而极限平衡法就是要确定滑动面的位置和形状, 如何合理地确定滑动面的位置和形状是边坡稳定性分析的重中之重, 具有控制性的作用。随着边坡稳定

收稿日期: 2012-08-15

基金项目: 十二五国家科技支撑计划课题强膨胀土(岩)渠道处理技术项目资助(No.2011BAB10B02)。

第一作者简介: 李剑, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事土体本构及稳定性理论方向的研究。E-mail: lijianwelcome@163.com

通讯作者: 陈善雄, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土力学及工程稳定性理论研究。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

性分析理论的发展。目前滑动面确定的方法也经过长足地发展,可以从极限平衡理论、滑移线场法、极限分析、数值方法和变分法5种方法考虑。

传统的极限平衡法通常假定边坡滑动面的形状,如挡土墙填土的滑动面是直线型; Bishop 和瑞典等条分法中将边坡的滑动面假设成圆弧型等。在极限分析中,通常将滑动面假设成直线与对数螺旋线的组合型式,这样确定的滑动面均具有一定的主观性,可能与真实情况有所出入,甚至差别很大。近年来,由极限平衡理论发展而来的滑动面确定方法从预先假定滑动面发展到基于条分法理论的滑动面搜索算法,搜索算法包括数学规划法和智能方法,李亮等^[1]、邓东平等^[2-3]在常规极限平衡法条分法的瑞典法和 Bishop 法以及不平衡推力传递法的条件力假定的基础上,通过定义余力矩,利用优化算法实现了临界滑动面的一种思路。李宏波^[4]、李同录等^[5]研究了确定均匀、简单土坡最危险滑移面的方法。智能算法包括遗传算法、神经网络等,高玮等^[6]提出了一种效率更高的仿生算法以确定任意滑动面搜索的新思路。文献[7-10]均采用智能算法,给出了比较好的滑动面位置和形状。常规的滑移线场法也是预先假设滑移线及滑移面的方法计算地基承载力,如张国祥等^[10]提出了潜在滑移线理论;朱以文等^[11]在滑移线及潜在滑移线理论的基础上结合有限元的方法,提出了一套搜索边坡滑动面的方法。

随着计算机技术的发展,有限元方法得到广泛的应用,除了前面提及的滑移线与有限元结合确定滑移面的方法外,许多学者也发展了一套单纯使用有限元方法确定边坡滑移面的方法,如赵尚毅等^[12]提出利用有限元强度折减法,求边坡安全系数及滑动面的方法;郑宏等^[13]、孙冠华等^[14-15]提出了基于等效塑性应变的边坡滑动面搜索方法;荆志东等^[16]提出了基于应力影响系数法的边坡滑动面的确定方法。另外,一些学者也利用变分法的基本原理,提出了一套通过变分得出滑动面形状的方法。

结合强度折减法的有限差分法或有限单元法是边坡稳定性分析的主要数值分析方法之一。通过同时降低边坡岩土体的强度参数使边坡处于极限状态,此时对应的折减系数即为安全系数,再结合最大剪应变增量的原则即可搜索确定极限状态时的滑动面。

2 基于最大剪应变增量搜索边坡潜在滑动面方法的原理及分析方法

本文所述的方法是建立在强度折减法理论基础上的,一种搜索极限状态时边坡内潜在滑动面的新方法,具体计算软件采用有限差分程序 FLAC^{3D}。

FLAC^{3D} 模拟塑性破坏和塑性流动采用的是混合离散法,比有限元法中通常采用的离散集成法更为准确、合理。即使模拟的系统是静态的,仍采用了动态运动方程,使得 FLAC^{3D} 在模拟物理上的不稳定过程不存在数值上的障碍,且采用运动方程更能准确反映真实情况,因此 FLAC^{3D} 在岩土工程中应用较为广泛。

结合强度折减法,采用 FLAC^{3D} 计算极限状态边坡内的状态时发现极限状态时边坡内部会出现一条从坡脚贯穿至坡顶的塑性破坏滑动面。从塑性破坏滑动面的计算结果看,尽管可以大致了解滑动面的大致范围,但却无法给出准确的滑动面的位置,需要进一步按一定标准判别。文献[17]建议采用位移增量等值线来确定临界滑动面,Griffiths 等^[18]使用非关联法则时发现在变形后的网格会出现一条明显的畸变带。由弹塑性力学理论及 Mohr-Coulomb 强度理论可知,岩土体的破坏是由于其内部的某一面上的剪应力超过其所能承受的极限剪应力而发生破坏,必然伴随发生较大的剪切变形。FLAC^{3D} 中剪应变增量是一个关于节点位移有关的物理量,采用 FLAC^{3D} 计算的剪切破坏面上必然发生较大的剪应变增量。鉴于剪应变增量是与位移相关的物理量,选最大剪应变增量的位置作为确定滑动面的标准,具有物理意义明确和与众多学者研究结论一致的优点,因此可以认为滑动面是由垂线方向上剪应变增量最大的位置连接而成。基于以上分析,本文通过搜索极限状态时垂直方向上剪应变增量最大的位置来确定潜在滑动面的方法,结合一个算例说明该方法的原理和具体实施步骤。

2.1 有限差分强度折减法简介

传统的边坡稳定极限平衡方法对安全系数的定义为沿滑动面的抗剪强度与滑动面上实际的剪应力的比值:

$$F = \int_0^l (c + \sigma \tan \varphi) dl / \int_0^l \tau dl \quad (1)$$

式中: F 为安全系数; c 为黏聚力; σ 为正应力; φ 为内摩擦角; τ 为剪应力; l 为滑动面水平宽度。

将式(1)两边同除以安全系数 F 后,则式(1)

变为

$$1 = \int_0^l (c/F + \sigma \tan \varphi / F) dl / \int_0^l \tau dl \quad (2)$$

式(2)右侧值为 1 时,表明此时边坡处于极限平衡状态。

式(2)的意义表明,在滑动面上任意位置上的剪应力达到了其抗剪强度,滑动面上岩土体任意一点均处于塑性破坏的临界状态。

有限差分强度折减法对安全系数定义的思想与传统的边坡稳定极限平衡方法相同,同时折减黏聚力和内摩擦角使得边坡强度降低,取边坡极限状态时的折减系数为安全系数,此时材料的强度参数可用式(3)表示。

$$\left. \begin{aligned} c_f &= c / F \\ \tan \varphi_f &= \tan \varphi / F \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: c_f 为折减后黏聚力; φ_f 为折减后内摩擦角。

用有限差分强度折减法求解安全系数时,要经过一系列的试算,将强度参数折减一个系数,直至找到能使模型处于极限平衡状态的安全系数(边坡的安全系数),即

$$\left. \begin{aligned} c_i &= c / F_i \\ \tan \varphi_i &= \tan \varphi / F_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: F_i 为试算的强度折减系数。当某一 F_i 使得模型处于极限平衡状态时,此 F_i 即为安全系数 F 。

有限差分强度折减法与传统的边坡稳定极限平衡方法又不同,主要表现在两方面:一方面是有限差分强度折减法事先没有假设滑动面的形态,在极限状态时边坡内的塑性区并不是一条线,而是一片区域,如图 1 所示,正是基于此原因,才需要按一定标准对滑动面的形态进行判断。另一方面是对极限状态的定义,传统极限平衡方法预先假设了滑动面,根据对极限状态的定义,当边坡内滑动面上的剪应力达到边坡岩土体的抗剪强度时,整个边坡处于极限平衡状态;而有限差分强度折减法并没有预先假设边坡滑动面,其对极限状态也有多种判别标准^[19]:(1) 将计算恰好可以收敛作为判断边坡极限

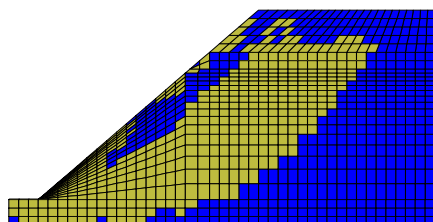


图 1 极限状态下边坡内塑性区
Fig.1 The plastic area at limit state

平衡的条件;(2) 将塑性区恰贯通作为边坡极限平衡的条件;(3) 在边坡内设置一系列监测点,将某些监测点将要出现大位移作为边坡极限平衡的条件。

2.2 分析方法

应用有限差分强度折减法进行计算时,需要明确 2 个关键问题:(1) 极限平衡状态的判定标准;(2) 滑动面位置的判定标准。只有这两个关键问题解决后才可确定滑动面的形态。

2.2.1 极限平衡状态的判别标准

根据章节 2.1 论述可知,有限差分强度折减法对于极限状态的判别标准有多种,但根据许多学者的研究^[12-13, 17]可知,尽管标准有多种,但其结果的差别却是微小的。作为有限差分法判断停止计算最常用的方法,计算是否收敛是判断边坡是否处于极限平衡状态的最主要的方法。因此,从实用的角度考虑,选用计算是否刚好收敛作为极限平衡状态的判据更为合理,故极限状态选计算恰好可以平衡为准。

结合强度折减法进行边坡稳定性计算时,FLAC^{3D} 通过最大不平衡力与典型内力的比率 f ($<10^{-3}$) 确定模型是否收敛,具体执行过程是:

(1) 将黏聚力 c 调整到很大,计算一个模型可以平衡的典型计算步数 N_r 。

(2) 对强度参数进行折减,执行 N_r 步后判断 f 是否小于 10^{-3} 。

如果 f 小于 10^{-3} ,则模型可以平衡,增大折减系数,重复步骤;不满足条件,则进行执行;如果 f 大于 10^{-3} ,再进行 N_r 步计算,判断 f 是否小于 10^{-3} ,如果 f 小于 10^{-3} ,则模型平衡,增大折减系数,重复(2);不满足执行。

当 f 大于 10^{-3} 时,则将本次 N_r 步计算中 f 的平均值与上一步 f 平均值进行比较,判断是否不超过 10%,相差不超过 10%时,则认为模型不能平衡,减小折减系数执行(2);相差超过 10%时,则继续进行 N_r 步的循环计算,直至以下 3 个条件之一满足,停止本次 F_i 计算,进入 F_{i+1} 计算:(a) 将本次 N_r 步计算中 f 的平均值与上一步 f 平均值相差不超过 10%,则模型不能平衡,减小折减系数,执行(2);(b) 6 个 N_r 步计算完成后, f 小于 10^{-3} ,则模型平衡,增大折减系数,重复步骤(2);(c) f 小于 10^{-3} ,则模型平衡,增大折减系数,重复步骤(2)。

如此反复,直至模型达到恰好收敛,此时为极限平衡状态。

2.2.2 滑动面位置的确定标准

将边坡离散化由一系列垂线组成，根据前节极限状态的定义，滑动面上的岩土体必然处于塑性状态，因此，凡是进入塑性的单元即为滑动面可能经过的位置。由图 1 可见，在任一垂线上，均有多个单元进入了塑性状态，此时要根据一定判别标准判定滑动面的位置。本文选定最大剪应变增量为判定标准。

FLAC^{3D} 中定义应变增量张量是与节点位移相关的物理量，在一个无限小的时间 dt 内，对于一般的四面体单元，其在 FLAC^{3D} 中的计算公式为

$$\xi_{ij} = -\frac{1}{6V} \sum_{i=1}^4 (u_i^l n_j^{(l)} + u_j^l n_i^{(l)}) S^{(l)}, (i, j = 1 \sim 3) \quad (5)$$

式中： u_i^l 为单元第一个节点 i 方向的位移； $n_j^{(l)}$ 为第一个节点对应的面的法向量； $S^{(l)}$ 为第一个节点对应的面的面积。

从式 (5) 可知，应变增量表示在一个时间步内的位移增量大小，它由单元的节点在 dt 时间内的位移确定。

由岩土工程最常用的 Mohr-Coulomb 强度理论可知，岩土体发生破坏是剪切破坏，破坏面上必然伴随较大的剪切变形，可以认为在边坡处于极限状态时剪应变增量最大的地方相对于其他位置，最容易发生破坏变形，如前所述，这与一些学者的研究结论一致。

基于上述分析，最大剪应变增量具有明确的物理意义，对于离散化的垂线，取剪应变增量最大的位置作为判定滑动面通过的标准是合理可行的。在确定每一条垂线上滑动面经过的位置后，将其连接便得到了滑动面的具体形态。

2.3 滑动面的搜索方法

根据前述分析，通过在边坡模型内部沿水平方向设置一系列垂线，认为垂线上最大剪应变的位置即为滑动面通过的位置。由于 FLAC^{3D} 软件的局限性，单元的所有应力、应变数据均为单元中心点的数据，往往获得的滑动面形态不是光滑的，具有波动的形态，如图 3 所示，这与实际不符，需要进行光滑处理。

采用最小二乘方法的曲线拟合，可对波动的滑动面进行光滑处理，若上述最大剪应变增量的位置坐标为 x_i 和 y_i ，假设拟合曲线的形式：

$$y^*(x) = \sum_{j=0}^n c_j^* \phi_j(x) \quad (6)$$

选取线性无关的基函数组 $\{\phi_j(x), j = 0, 1, \dots, n\}$ ，记

$$\phi_j = (\phi_j(x_0), \phi_j(x_1), \dots, \phi_j(x_m))^T, (j = 0, 1, \dots, n) \quad (7)$$

$$(p - y, p - y) =$$

$$\sum_{i=0}^m [y(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=0}^m \left[\sum_{j=0}^n c_j \phi_j(x_i) - y_i \right]^2 \quad (8)$$

式中：

$$p = (y(x_0), y(x_1), \dots, y(x_m))^T \quad (9)$$

最小二乘原理要求寻找一组 $p^* = \sum_{j=0}^n c_j^* \phi_j$ ，使得

式 (8) 的值最小，即

$$(p^* - y, p^* - y) = \min(p - y, p - y) \quad (10)$$

满足式 (6) 的向量 c^* ，即为拟合曲线公式的系数。 c^* 由式 (11) 求得，即

$$A^T A c^* = A^T y \quad (11)$$

式中：

$$A = [\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n]; y = (y_0, y_1, \dots, y_n)^T \quad (12)$$

求得向量 c^* 后，拟合函数 $y^*(x)$ 便可求出。

现给出一则边坡算例以阐述滑动面搜索的具体方法，具体工程应用可结合具体边坡参数。此例为均质边坡，边坡几何条件：坡高 23 m，坡比 1:1，边坡向下延伸 3 m，坡脚出向前延伸 3 m。边坡土体参数：弹性模量为 60 MPa，黏聚力为 35 kPa，内摩擦角为 25°。结合强度折减法，利用有限差分软件 FLAC^{3D} 计算边坡内应力及变形。

图 2 为边坡极限状态时边坡内剪应变增量云图及速度矢量图。从图中可以看出，剪应变增量较大的位置速度矢量较大，并出现明显分界。同时，剪应变增量代表了剪应变的发展趋势。

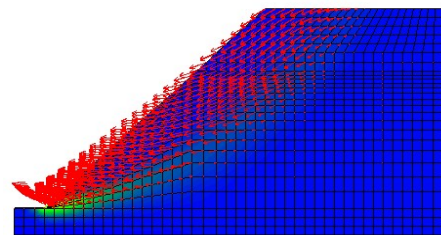


图 2 自然状态下剪应变增量云图及速度矢量
Fig.2 Shear strain increment nephogram and velocity vector under natural conditions

滑动面的具体搜索方法：

第一步，结合强度折减法，利用有限差分软件

FLAC^{3D} 计算边坡内的应力及应变，直至其处于极限平衡状态，检查塑性区是否贯通。

第二步，沿水平方向设置一系列的垂线，利用程序内置的编程语言 FISH 编制程序，搜索垂线上剪应变增量最大位置的坐标 (x_i, y_i) , $(i=1, 2, 3, \dots, n)$, n 为离散点的数目，并保存结果。

由于 FLAC^{3D} 程序只能获取到单元体中心的剪应变增量最大值，通常情况下得到的滑移面是不光滑的（见图 3），此时需要进行光滑处理。

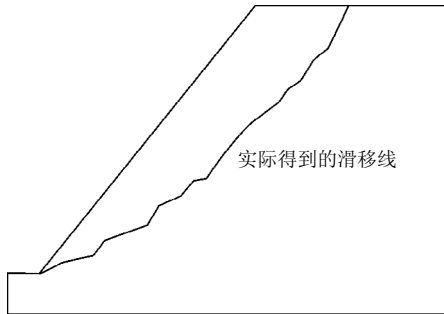


图 3 实际求得的滑移面

Fig.3 The actually obtained slipping surface

第三步，进行光滑处理。采用最小二乘原理进行曲线拟合，曲线拟合后得到的滑移线，如图 4 所示。具体操作步骤和流程见图 5。

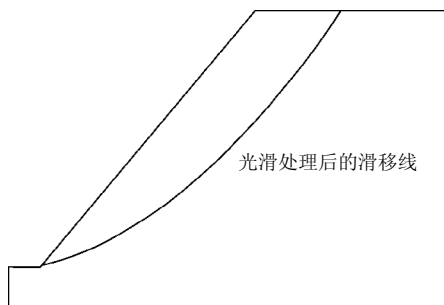


图 4 经光滑处理后的滑移面

Fig.4 Slipping surface after smooth handled

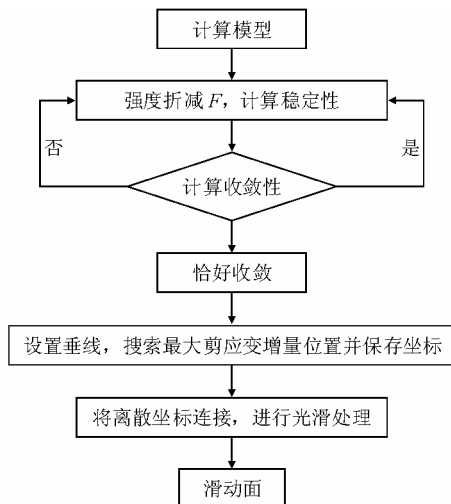


图 5 到滑动面搜索流程图

Fig.5 Flow chart of slipping surface searching

3 与极限平衡法的比较

尽管目前各学者对于滑动面搜索的研究较多，但作为最早发展、应用最广泛的极限平衡法仍然是边坡稳定性分析中最主要的分析方法。选取几种常用的极限平衡分析法来求解滑移面，并与本方法进行比较分析。

3.1 滑动面形态对比

利用极限平衡分析软件 Slide 对同一算例（均质边坡，坡高 23 m，坡比 1：1，黏聚力为 35 kPa，内摩擦角为 25°）进行分析，滑移面的搜索方法是自动精细搜索，如图 6 所示。从计算结果可知，极限平衡法与有限差分强度折减法所得出的安全系数相差不大，但所得到的滑动面却不同，极限平衡法得到的滑动面曲率较大。

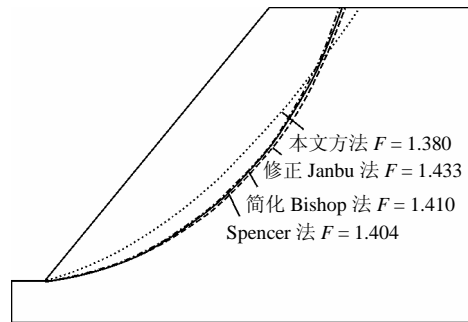


图 6 本文方法与极限平衡法比较

Fig.6 Comparison between this method and limit equilibrium methods

造成这种结果的原因可从两方面讨论：（1）极限状态的定义及安全系数的求解；（2）是否对滑动面的形态进行预先假设。

（1）极限状态的定义及安全系数的求解

极限平衡法预先假设边坡处于极限状态，将滑动范围内的土体进行条分，并定义安全系数，从静力、力矩平衡及破坏强度准则等条件出发进行稳定性分析，而有限差分强度折减法是对边坡岩土体的强度参数（黏聚力和内摩擦角）进行折减，运用弹塑性力学及有限差分的方法计算边坡内的应力、应变，判断边坡岩土体是否处于塑性破坏极限状态，将极限状态时的折减系数作为安全系数。虽然极限平衡法直接跳过了边坡的弹塑性分析。但是，由弹塑性力学理论可知，进行边坡弹塑性分析时边坡内部的应力及外力也必须满足静力平衡条件，因此两者所得到的安全系数也应大致相同。

（2）是否预先设定滑动面的形态

极限平衡法预先假设了边坡滑动面是圆弧形，

无论何种滑动面搜索方法均是在此假设的基础上进行。有限差分强度折减法并不对滑动面的形态进行预先假设,而是从弹塑性力学理论出发,计算边坡内的应力、应变,判断边坡内岩土体是否处于塑性破坏状态,认为滑动面上必然伴随较大的剪应变增量,并由此确定滑动面的形态。因此,后者概念明确,更能反映真实的滑动面形态。

3.2 最小安全系数对比

利用极限平衡分析软件 Slide 采用多种条分法,计算在本文滑动面条件下的安全系数。具体方法是,在文本确定的滑动面上取关键点坐标 (x_i, y_i) ,将这些坐标作为控制 Slide 程序搜索滑动面的条件,使之通过这些关键点,当 $i \rightarrow \infty$ 时, Slide 获得的滑动面即为本文确定的滑动面。将各种方法算得的安全系数与本文计算结果进行对比,见表 1。由表可见,本文求解的滑动面形态下,不同方法之间得出的安全系数略有差别,对于极限平衡法来讲,造成差别的原因在于不同的方法所满足的条件是不同的,例如, Bishop 法只考虑了垂直力的平衡以及力矩平衡,但 Spencer 法及 Morgensten-Price 法考虑了全部的平衡条件等。平衡条件的放宽也就造成了安全系数较大的结果。另外,不同方法对条块正应力的求解方法不同,也会造成差异。但总体来说,无论使用哪种极限平衡方法,其是满足较多的平衡条件的,差异也是较小的。

表 1 本文方法与极限平衡法安全系数对比
Table 1 Comparison of safety factors by this method and several limit equilibrium methods

本文方法	Bishop 法	Fellenius 法	修正 Janbu 法	Spencer 法	Morgensten-Price 法
1.38	1.436	1.399	1.446	1.404	1.403

与本文方法比较可以看出,极限平衡方法计算的安全系数与有限差分强度折减法求得的安全系数差别也较小,最大不超过 5%。但本文的安全系数最小,更偏于工程安全。造成这种差别的原因在于,极限平衡法虽然满足力和力矩的平衡条件,但其跳过了边坡中应力应变的关系,也没有考虑边坡土体的强度条件,因此无法给出位移的信息,而判别边坡失稳的条件中,最重要的即是发生较大位移。另一方面,极限平衡法所得出的滑动面是以假设为前提的,对实际工程来讲,这个滑动面是值得探讨的。

尽管极限平衡法与有限差分强度折减法之间计

算安全系数的方法不同,但其都是以严格的土力学理论为基础的,因而所得出的安全系数略有差别,但差别较小,这也从另一方面说明本文求滑动面方法的合理性。从工程安全性的角度讲,对于边坡稳定性的评价应当慎重。

4 网格密度对滑动面形态的影响

强度折减法基于数值技术,而数值模拟技术依赖网格的疏密度。若不采用光滑处理技术,本文求解的滑动面并不是光滑的,是由于 FLAC^{3D} 软件只能获取单元中心数据的缺陷性造成。当网格密度无限增大后,通过搜索垂线上最大剪应变增量的位置,所得的滑动面应是趋于光滑的,但这样势必造成计算成本增加,不利于应用。因此,讨论本文求解滑动面方法对网格密度的影响是有意义的。

图 7、8 分别为不同密度的边坡网格分布图。在相同的边坡尺寸条件下,图 7 网格的密度约是图 8 的 4 倍。图 9 为不同网格密度条件下的滑动面及安全系数。由图可以看出,在网格加密 4 倍的情况下,边坡的安全系数略有减小,滑移面略向边坡方向收缩,但变化甚小。但从计算时间上讲,网格较密模型计算所用时间却约是网格较稀模型的 15 倍,说明基于强度折减法的有限差分法求解安全系数和基于最大剪应变增量求解滑动面的方法对网格密度的依赖很小,一味地增加网格密度既耗费时间,又不经济。

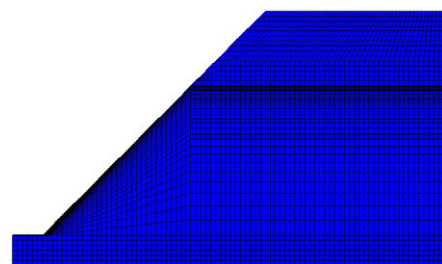


图 7 较密网格分布图(3 667 个网格)
Fig.7 The fine mesh figure(3 667 elements)

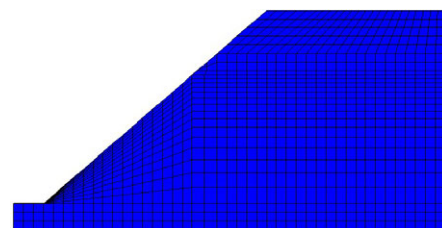


图 8 较稀网格分布图(919 个)
Fig.8 The coarse mesh figure(919 elements)

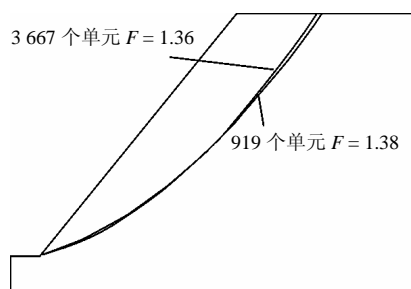


图 9 不同网格密度条件下的滑动面
Fig.9 Failure surface under different conditions of mesh density

5 结 语

通过运用有限差分计算软件和最小二乘曲线拟合技术, 本文提出了一种基于最大剪应变增量确定边坡滑动面的新方法。与边坡分析中最常用的极限平衡法进行了对比分析。结果表明采用该方法求解滑动面是合理的, 对滑动面的判断标准物理意义明确, 简便实用, 且克服了对网格的依赖性。

致谢: 本文得到了中国科学院武汉岩土力学研究所与湖北省电力勘测设计院合作科技项目—山岭重丘区输电线路工程斜坡塔基稳定性及设计方法研究的支持。

参 考 文 献

- [1] 李亮, 董彦飞, 宁娜娜, 等. 基于余力矩的边坡临界滑动场方法及应用[J]. 青岛理工大学学报, 2011, 32(1): 1—7.
LI Liang, DONG Yan-fei, NING Na-na, et al. The critical slip field method with residual moment and its application[J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2011, 32(1): 1—7.
- [2] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 基于 Janbu 法的边坡整体稳定性滑动面搜索新方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 891—898.
DENG Dong-ping, LI Liang, ZHAO Lian-heng. A new method of sliding surface searching for general stability of slope based on Janbu method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011 32(3): 891—898.
- [3] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 一种三维均质土坡滑动面搜索的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3719—3727.
DENG Dong-ping, LI Liang, ZHAO Lian-heng. A new method for searching sliding surface of three-dimensional homogeneous soil slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Supp.2): 3719—3727.
- [4] 李宏波. 直线滑动面法分析路基边坡稳定性的探讨[J]. 路基工程. 2010, 28(6): 37—38.
LI Hong-bo. Discussion on subgrade slope stability using linear sliding surface method[J]. *Subgrade Engineering*, 2010, 28(6): 37—38.
- [5] 李同录, 邓宏科, 李萍, 等. 搜索简单土坡潜在滑动面的一种新方法[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(3): 56—59.
LI Tong-lu, DENG Hong-ke, LI Ping, et al. A new method for quick searching potential sliding surface of the simple earth slope[J]. *Journal of Chang'an University(Earth Science Edition)*, 2003, 25(3): 56—59.
- [6] 高玮, 冯夏庭. 基于仿生算法的滑坡危险滑动面反演(1): 滑动面搜索[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2237—2241.
GAO Wei, FENG Xia-ting. Back analysis of critical failure surface of slope based on bionics algorithm (1): location of critical failure surface[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(13): 2237—2241.
- [7] MCCLINTOCK F A. A criterion for ductile fracture by the growth of holes[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35(3): 363—373.
- [8] RICE J R, TRACEY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress elds[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969, 17: 201—217.
- [9] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. *Journal of Engineering Material and Technology*, 1977, 99(1): 2—15.
- [10] 张国祥, 刘宝琛. 潜在滑移线理论及浅基承载力分析[J]. 长沙铁道学院学报, 1997, 15(2): 95—99.
ZHANG Guo-xiang, LIU Bao-chen. Potential sliding curve theory and analysis of ground bearing capacity[J]. *Journal of Changsha Railway University*, 1997, 15(2): 95—99.
- [11] 朱以文, 吴春秋, 蔡元奇. 基于滑移线理论的边坡滑裂面确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2609—2616.
ZHU Yi-wen, WU Chun-qiu, CAI Yuan-qi. Determination of slip surface in slope based on theory of slip line field[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2609—2616.
- [12] 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.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(3): 343—346.
- [13] ZHENG H, SUN G, LIU D. A practical procedure for searching critical slip surfaces of slopes based on the strength reduction technique[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(1-2): 1—5.
- [14] 孙冠华. 三维边坡及坝基抗滑稳定性分析的若干问题研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [15] 孙冠华, 郑宏, 李春光. 基于等效塑性应变的三维边坡滑面搜索[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 627—632.
SUN Guan-hua, ZHENG Hong, LI Chun-guang. Searching critical slip surface of three-dimensional slopes based on equivalent plastic strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 627—632.
- [16] 荆志东, 王春雷, 谢强. 基于应力影响系数法的高边坡临界滑动面研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 109—115.
- JING Zhi-dong, WANG Chun-lei, XIE Qiang. Determination of critical slip surface of high-steep slope based on theory of the stress effect coefficient[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(1): 109—115.
- [17] 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.
SONG Er-xiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(2): 1—7.
- [18] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [19] 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.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 332—336

上接第 370 页

- [8] 范留明, 李宁. 软弱夹层的透射模型及其隔震特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2456—2461.
FAN Liu-ming, LI Ning. Transmission model of weak intercalation and its vibration isolation properties[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(14): 2456—2461.
- [9] 范留明, 闫娜, 李宁. 薄弹性软弱夹层的动力响应模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 88—91.
FAN Liu-ming, YAN Na, LI Ning. Dynamic response model for thin soft interlayer considering interbedded reflecting waves[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 88—91.
- [10] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1973, 99(5): 421—417.
- [11] Itasca Consulting Group. UDEC (universal distinct element code) user's manual (version 3.0)[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 1996.
- [12] 言志信, 郭斌, 贺香, 等. 多级边坡平台宽度对边坡地震动力响应及破坏机制的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 352—357.
YAN Zhi-xin, GUO Bin, HE Xiang, et al. Study of effect of platform width on dynamic response and failure mechanism of stepped slopes under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.2): 352—357.
- [13] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.