

文章编号: 1000-7598 (2009) 06-1775-07

基于矢量和分析方法的边坡滑面搜索

郭明伟, 李春光, 葛修润, 王水林, 吕颖慧

(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: 基于力是矢量这个基本概念, 给出了边坡矢量和法安全系数的矢量表达式。在边坡荷载已知的情况下, 运用有限元法计算得到边坡真实的应力分布状态, 使用矢量和法安全系数并采用优化算法中的直接法搜索边坡的临界滑面。计算结果表明, 使用矢量和分析法搜索得到的临界滑面位置与极限平衡法得到的滑面位置基本吻合, 且安全系数相对误差最大为 2.09%, 验证了该方法在边坡稳定分析中的合理性与可靠性。矢量和分析与基于强度储备安全系数的分析方法不同, 具有明确的物理和力学意义, 且不需引入过多假设, 公式简洁, 易于进行三维边坡稳定分析, 不需进行迭代计算, 可在工程实际中得到广泛的运用。

关 键 词: 矢量和分析法; 滑面搜索; 极限平衡法; 边坡稳定性分析

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Searching potential slip surface of slopes based on the vector sum analysis method

GUO Ming-wei, LI Chun-guang, GE Xiu-run, WANG Shui-lin, LÜ Ying-hui

(State Key Laboratory of Rock & Soil Mechanics, Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the vector characteristics of forces, the vector expression of the safety factor in the vector sum analysis method (VSAM) is presented. In a slope with certain conditions, after determining the stress distribution with FEM, the critical slip surface can be searched with VSAM and the direct method in optimization algorithm. The calculated results show that the locations of the critical slip surfaces are in good agreement with the ones with Morgenstern—Price (M-P) limit equilibrium method, and the maximum relative error is only 2.09 percents between the safety factor obtained by VSAM and that by M-P method in calculated examples, which proves that VSAM is reasonable and reliable. At present, the methods with the safety factor of strength reserve are widely used in slope engineering; however, VSAM is different from the methods above. VSAM is clear in physics; the formula and its calculating process are very simple; and it will be easy to be applied in 3-D slope stability analysis. So VSAM can be widely used in practice.

Key words: vector sum analysis method; slip surface search; limit equilibrium method; slope stability analysis

1 引 言

目前边坡稳定性分析最常用的方法为极限平衡法和有限元分析方法。自 1927 年 Fellenius 提出边坡稳定分析的早期条分法, 经过 80 年的发展, 极限平衡分析法已取得长足的进步^[1], 该方法的基本特点是, 只考虑静力平衡条件和 Mohr-Coulomb 破坏准则, 也就是通过分析边坡在破坏那一时刻的力的平衡来求得问题的解, 但在大多数情况下, 问题是静不定的。极限平衡法通过引入不同的简化假设而使问题静定可解, 从而形成了不同的方法, 如: 瑞典

法、Bishop 法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Sarma 法等。这些方法都是通过围绕对条块划分的方式, 对条块界面上作用力的大小、方向、作用点等种种不同的假设而形成的, 各种方法具体的假设条件可参阅文献[2]。有限元分析法是基于边坡有限元变形分析和强度储备安全系数的稳定性分析方法, 其对应的安全系数有 2 种不同的求解方法: ①强度折减法; 强度折减安全系数是对岩土体的强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 因数按同一系数 F 进行折减, 一般地以有限元计算分析不收敛作为判据, 这时的折减系数 F 即为边坡的稳定安全系数^[3]。②

收稿日期: 2008-09-19

第一作者简介: 郭明伟, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学稳定性分析方面的研究。E-mail: guomingwei2001@163.com

安全系数定义为沿滑面各点抗滑力与下滑力积分的代数和比值。极限平衡分析方法与有限元分析方法都是基于强度储备概念上的稳定性分析方法,差别只是内力计算方法不同,很显然有限元在内力计算时较极限平衡方法更为准确。

边坡是否稳定通常最直接的方式是看它的安全系数是多少,这就涉及到安全系数的定义问题。上述两种稳定性分析方法虽然计算方法不同,但都是基于强度储备基础上的分析方法,其安全系数的定义在本质上是一致的。文献[4]给出了目前在边坡稳定分析中常用安全系数的3种定义,其中定义2为极限平衡法中常用的安全系数定义,即将安全系数定义为强度储备系数,当土体抗剪强度除以安全系数后,边坡将处于临界平衡状态;定义3就是上述所说的有限元分析中安全系数的定义②,并指出“在利用有限元法分析边坡稳定性时基于定义2所算得的安全系数和临界滑面都不同于基于定义3的相应结果,同时利用定义3所求得的结果会表现出一些明显不合理现象”^[4]。有限元强度折减安全系数无论是学术研究或工程分析都得到了广泛的运用,虽然计算结果与极限平衡法得到的相应结果很接近,但这些安全系数的定义都存在如下问题:①安全系数定义的物理意义不很明确;对于圆弧滑面或直线滑面,极限平衡各方法定义的安全系数可以表示为沿滑面抗滑力与下滑力对圆心力矩的比值,但大多数情况下滑面不是圆弧状,而是任意的曲面或折线等,这时的安全系数只表示抗滑力与下滑力代数和的比值,物理意义模糊;③岩土体强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 按同一系数 F 进行折减不合理;同时折减只是人为的假定,这是在人为折减虚拟的状态下对边坡进行稳定性分析,物理意义更加模糊。 c 和 φ 是抗剪强度的2个参数,对于工程中不同类型的边坡,在保持它们稳定性方面有的 c 值起重大作用,有的 c 值不起什么作用而是 φ 起关键作用。另外在折减计算中, φ 的取值是有条件的,郑宏^[5]等已经证明,在对强度参数进行折减的同时必须对泊松比 μ 也要做相应的调整以满足公式(1),这样才能得到合理的分析结果。

$$\sin \varphi \geq 1 - 2\mu \quad (1)$$

④计算需要进行反复迭代,计算工作量大。诚然上述两种分析方法的计算结果,在多数情况下,可以有效地评估边坡的稳定性程度,作者认为,这2种分析方法抓住了大多数边坡破坏的主要矛盾,即剪切破坏。这也是这两种分析方法在边坡稳定性分析

得到广泛应用的根本原因。

由于力的矢量特征,抗滑稳定分析就应该在力的矢量特征上进行稳定性分析,这也是上述2种分析方法中物理或力学意义不明确的根本原因。葛修润等^[6-9]曾对力的矢量和意义下的安全系数进行过探讨,在此基础上本文给出了矢量和法(简称VSAM方法)安全系数的矢量表达式和边坡整体下滑趋势方向的确定方法,并对2个工程算例进行了滑面的搜索。通过VSAM方法的临界滑面与极限平衡M-P法的对比分析表明,使用VSAM方法得到的滑面位置与极限平衡M-P法得到的基本吻合,安全系数相对误差最大值为2.09%,因此,在边坡稳定分析中使用矢量和分析方法是合理并切实可行的,能够给出合理的临界滑面位置及相应的安全系数。

2 边坡矢量和分析方法

最经典抗滑稳定安全系数的概念和定义应该是:坡体在受各种荷载(包括自重)作用条件下,潜在滑动面所能提供的极限抗滑力的“总和”与作用在潜在滑动面上滑动力的“总和”之比。这样的定义是非常直观和朴实的,因为力的矢量特征,当空间滑体沿潜在滑面滑动时,作用在潜在滑面上各部分的滑动力矢量按“矢量和”合成为导致坡体可能发生滑动的力矢,称之为总滑动力矢。同理,把作用在滑面各部分抵抗滑动的力矢,通过“矢量和”形成总抗滑力矢。因为总抗滑力矢与总滑动力矢均为矢量,而矢量之间是无法直接进行相比的,但矢量可以在同一个方向投影,然后进行相比得到一个标量,即抗滑安全系数,这个投影的方向称之为边坡整体下滑趋势方向,这就是矢量和分析方法的基本思想。极限平衡分析方法与有限元强度折减法是基于边坡人为虚拟应力状态下来计算边坡的稳定性,与此不同,矢量和分析方法是在边坡真实应力分布状态和整体下滑趋势方向的基础上来评估边坡的稳定性,其对应的安全系数称之为矢量和法安全系数(简称VF),定义为:在边坡潜在滑动面上,总抗滑力矢在整体下滑趋势方向上投影的代数和与总下滑力矢在此方向上投影代数和的比值^[1]。文献[10]也从摩擦理论和矢量几何出发指出,抗滑安全系数是一个标量,因此,在求抗滑力与滑动力的比值时,必须取它们在同一个方向上的比值。从道理上讲,从边坡的真实状态出发得到的结果应更为合理,也更为直接,由此求得的矢量和法安全系数才有明确的物理和力学意义,矢量和分析方法是一个广义的方法,它既适用于有限元分析也适用于极限平衡条分法。

2.1 边坡整体下滑趋势方向的确定

对于一个确定的边坡, 其整体下滑趋势方向应是在其临界状态下的下滑趋势方向, 假设这个潜在滑面就是边坡真实的滑移面, 那么此时边坡沿潜在滑面滑动应是一种临界状态, 即在此状态下潜在滑面各点剪应力均达到材料本身应有的最大抗滑能力, 由此可利用潜在滑面各点所能提供的极限抗滑能力来确定边坡的整体下滑趋势方向^[11]。即通过潜在滑面各点极限抗滑剪力沿潜在滑面积分得到的单位方向, 这样才能合理地确定边坡的整体下滑趋势方向。

根据 Mohr-Coulomb 强度破坏准则, 边坡整体下滑趋势方向可由下式确定。

$$\hat{\mathbf{d}} = -\frac{\int_s (c - \sigma_n \tan \varphi) \hat{\mathbf{d}}_r ds}{\int_s (c - \sigma_n \tan \varphi) \hat{\mathbf{d}}_r ds} \quad (2)$$

式中: c 为材料黏聚力; φ 为材料内摩擦角; σ_n 为潜在滑面上任一点的法向应力值; $\hat{\mathbf{d}}_r$ 为滑面上任一点抗滑剪应力单位方向; s 为潜在滑面。

2.2 边坡矢量和法安全系数表达式

矢量和法安全系数表达式是基于以下几点假设:

(1) 以二维问题为研究对象, 边坡或坝基所构成的计算区域为 Ω , 在 Ω 内的潜在滑动面 s 已知。

(2) 边坡计算区域的应力分布状态使用有限元等数值方法计算得到, 其中边界、荷载及材料强度参数由勘察得到。

(3) 滑动面上岩土体的强度特性服从 Mohr-Coulomb 强度准则。在应力分布已知时, 岩土体的抗剪强度由下式确定。

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (3)$$

(4) 边坡整体下滑趋势方向按照式(2)进行确定, 其对应下滑方向角如图1所示。

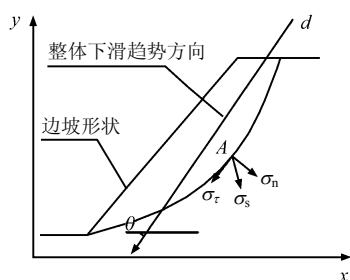


图1 边坡整体下滑趋势方向示意图

Fig.1 Sketch of slip direction of whole slope

如图1所示, σ_s , σ_τ , σ_n 为滑体上 A 点对基岩

的一组作用力, 分别对应为潜在滑面上 A 点的应力矢量、剪应力、法向应力; $\hat{\mathbf{d}}$ 为整体下滑趋势方向; 为潜在滑面; $\hat{\mathbf{n}}$ 为该点切平面的法线, 则:

$$\sigma_s = \sigma \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (4)$$

$$\sigma_n = (\sigma_s \cdot \hat{\mathbf{n}}) \hat{\mathbf{n}} \quad (5)$$

$$\sigma_\tau = \sigma_s - \sigma_n \quad (6)$$

这里, σ 是该点的应力张量;

基岩上对应的 A' 点对于潜在滑面的法向应力为:

$$\sigma_n' = -\sigma_n \quad (7)$$

为方便推导公式, 这里采用弹性力学拉正压负的约定。矢量和法安全系数可表达为:

$$K = \frac{R}{T} \quad (8)$$

其中, 抗滑力和下滑力向整体下滑趋势方向 $\hat{\mathbf{d}}$ 的投影为:

$$T = \int_s (\sigma_s \cdot \hat{\mathbf{d}}) ds \quad (9)$$

$$R = \int_s \sigma_s' \cdot (-\hat{\mathbf{d}}) ds \quad (10)$$

上式中最大抗滑应力矢量

$$\sigma_s' = \sigma_\tau' + \sigma_n' \quad (11)$$

最大抗剪力:

$$\sigma_\tau' = (c - \sigma_n \tan \varphi) \hat{\mathbf{d}}_r \quad (12)$$

3 基于矢量和分析方法的滑面搜索

边坡矢量和分析方法的关键在于边坡真实应力分布状态及整体下滑趋势方向的确定, 其整体下滑趋势方向可由式(2)确定; 边坡应力分布状态可由有限元等数值方法得到。对于一个荷载及边界条件已知的边坡来说, 在滑面形状表达模式的基础上并采用一定的搜索方法, 可以得到边坡的临界滑移面, 即最小安全系数对应的滑面位置。

3.1 有限元单元内任意点应力的确定

近年来随着有限元方法的普及, 有限元数值计算方法已经发展成为一个十分重要的工程计算方法^[12]。有限元方法是通过结构的离散化, 利用变分原理并建立结构的几何与物理方程得到结构的整体刚度矩阵, 从而建立整个结构的平衡方程组为:

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (13)$$

式中: $[K]$ 为整体刚度矩阵; $\{\delta\}$ 为全部节点位移组成的向量; $\{P\}$ 为全部节点荷载组成的向量; $[K]$ 为整体刚度矩阵可通过单元刚度矩阵适当组合得到。

对于简单结构或许可以得到式(13)中的解析解,但大多数情况下得到解析解是不可能的,这时一般通过数值积分的方式得到数值解。而在有限元方法中最常用的数值积分方法是高斯积分法,只有高斯积分点上的解是真实解,而其他任意点上的解都是通过插值的方式得到。

运用有限元求解边坡的应力分布状态,只能得到单元节点上的数值解。基于矢量和分析方法的边坡滑面搜索问题,必须已知边坡内任意点的应力状态才能够进行滑面的搜索,本文通过形函数等参插值的方法来得到单元内任意点的应力状态,如式(14)。

$$\sigma_j^x = \sum_{i=1}^n N_i \sigma_j^i \quad (14)$$

式中: σ_j^x 为单元内 x 点的应力分量; N_i 为单元 i 节点在点 x 处的形状函数; σ_j^i 为单元 i 节点在点 x 处的对应 σ_j^x 的应力分量。

3.2 边坡滑面的表达模式及搜索方法

对于同一个边坡,不同的滑面表达模式搜索得到的边坡临界滑面不同,由于边坡材料的非均质性,一般的临界滑面形状不是单一的曲线或直线等,现有文献中多采用以边坡内点坐标为自变量进行搜索,只要在搜索过程中选取的自变量足够多,就可以表达任意形状的临界滑面。但这会带来搜索效率低下,甚至让人无法接受。考虑到滑面搜索过程中的计算效率问题,本文采用多项式曲线的表达模式进行滑面的搜索,虽然这种表达模式有一定的局限性,如图2中的3种特殊滑面,使用多项式曲线模式均无法搜索到这样的滑面位置,其中滑面①为具有拉裂缝的临界滑面形状;滑面②为折线段形状;滑面③为具有软弱夹层的滑面,中间的直线段就是软弱夹层所在的位置。但对于均质边坡和不含软弱夹层的边坡来说,使用多项式曲线模式在总体形状上也能很好的得到边坡的临界滑移面。

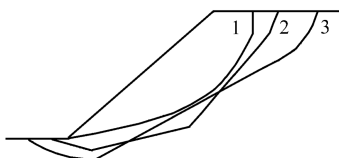


图2 边坡特殊滑面示意图

Fig.2 Sketch for locations of special slip surfaces in slope

岩土工程中的边坡几何形状复杂,材料通常是非均质的,纯解析的变分原理很难进行极值的求解。用最优化方法通过数值方法求解,是一个比较现实

可行的途径。关于确定最小安全系数的最优化方法可参阅文献[2]。本文采用单纯形法进行临界滑面的搜索,因这种方法是局部优化方法^[13]。能否得到边坡的临界滑面与给定的初始滑面有关,如果在搜索过程中,以极限平衡法搜索得到的临界滑面作为搜索的初始滑面,则可以很快得到边坡的临界滑面。算例搜索过程与结果表明,得到的滑面应该为边坡基于矢量和分析方法的临界滑面。

4 算例

为了说明矢量和分析方法的合理性与可靠性,本文给出了2个常用的边坡工程算例,运用该方法进行边坡临界滑面的搜索,并与基于强度储备的极限平衡方法中 Morgenster-Price (M-P)方法搜索得到的圆弧滑面与非圆弧滑面进行对比分析。在边坡有限元计算中均采用关联流动法则。有限元数值计算采用大型有限元软件 ABAQUS 计算得到边坡应力分布状态;基于极限平衡 M-P 法的临界滑面分别采用圆弧滑面与非圆弧滑面进行搜索得到。

4.1 算例1

(1) 材料参数及计算模型

本算例取自文献[14],为一均质边坡,边坡材料参数为黏聚力为 $c=58.86$ kPa, 摩擦角 $\varphi=11.31^\circ$, 重度 $\gamma=19.62$ kN/m³, 弹性模量和泊松比分别为 $E=80$ MPa、 $\nu=0.43$ 。边界条件为底部约束,两侧面法向约束,边坡只受重力作用,边坡模型尺寸如图3所示,有限元模型共划分5307个单元,5424个节点,为了计算结果的准确性,在极限平衡滑面附近进行了网格的加密。

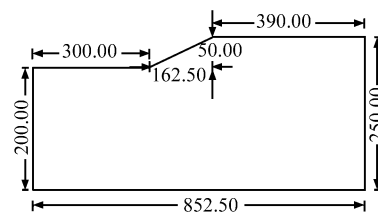


图3 模型尺寸

Fig.3 Model dimension

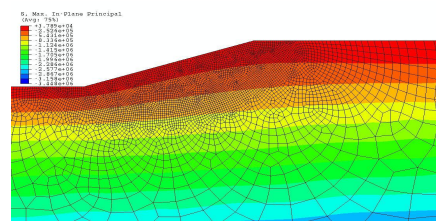


图4 有限元最大主应力等值线图

Fig.4 Contours of finite element maximum principal stress

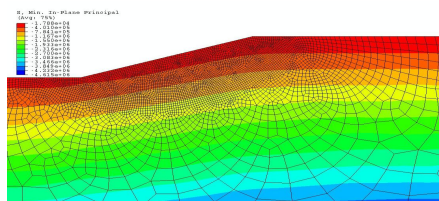


图 5 有限元最小主应力等值线图
Fig.5 Contours of finite element minor principal stress

(2) 采用单纯型法进行临界滑面的搜索, 考虑到优化算法的计算效率问题, 采用 4 次多项式曲线形式拟合边坡的滑面, 基于矢量和分析方法的搜索过程见图(6)。为了更好地进行对比分析, 除给出运用矢量和方法搜索得到的临界滑面位置外, 也给出了基于极限平衡 M-P 方法搜索得到的圆弧与非圆弧滑面, 具体滑面位置见图(7)。

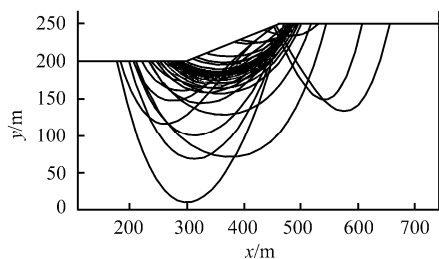
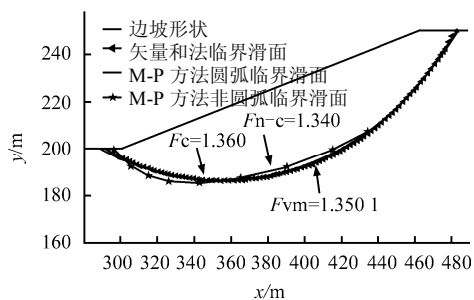


图 6 基于矢量和分析方法的搜索过程
Fig.6 Process of searching the critical slip surface with VSAM



注: F_c 代表使用 M-P 方法搜索得到的圆弧临界滑面对应的安全系数;
 F_{n-c} 代表使用 M-P 方法搜索得到的非圆弧临界滑面对应的安全系数;
 F_{vm} 代表使用矢量和分析方法(VSAM 方法)搜索得到的多项式曲线临界滑面对应的安全系数。

图 7 使用 M-P 方法与矢量和方法得到的临界滑面位置
Fig.7 Location of critical slip surface obtained by M-P method and VSAM

4.2 算例 2

(1) 材料参数及计算模型

该算例取自文献[14-15], 为一典型的公路边坡, 其材料参数如表(2)所示, 边坡形状模型尺寸见图(8), 有限元计算的边界条件同算例(1)。

表 1 算例 2 边坡材料参数

土层	重度 (kN/m^3)	黏聚力 (kPa)	摩擦角 ($^\circ$)	弹性模量 (MPa)	泊松比
1	24.0	34.0	26	2×10^4	0.35
2	25.0	39.0	35	5×10^4	0.30

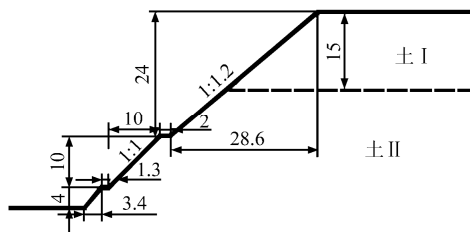


图 8 双层土坡模型尺寸^[12-13] (单位: m)
Fig.8 Model dimension (unit: m)

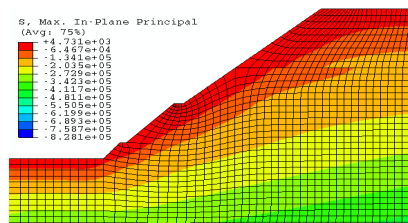


图 9 有限元最大主应力等值线图
Fig.9 Contours of finite element maximum principal stress

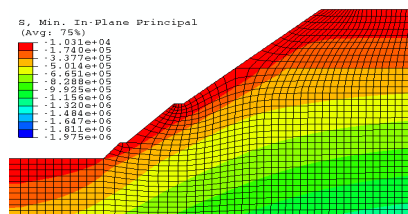


图 10 有限元最小主应力等值线图
Fig.10 Contours of finite element minimum principal stress

(2) 搜索方法同算例(1), 基于矢量和分析方法的搜索过程见图 11。为了对比分析, 分别给出了采用矢量和法搜索得到的临界滑面和极限平衡 M-P 方法搜索得到的圆弧滑面及非圆弧临界滑面位置, 见图 12。

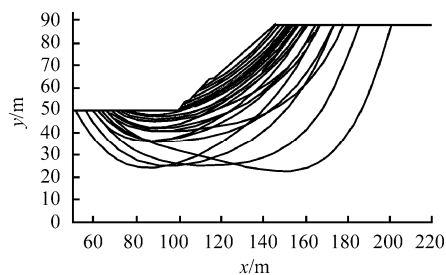


图 11 基于矢量和分析方法的搜索过程
Fig.11 Process of searching critical slip surface with VSAM

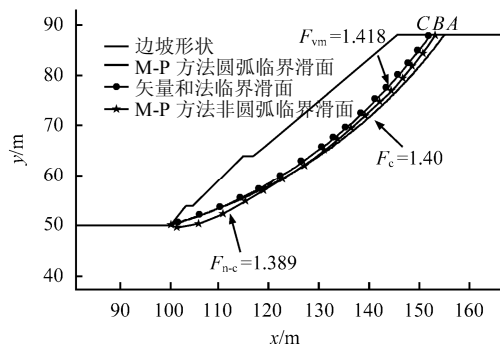


图 12 使用 M-P 方法与矢量和法(VSAM)得到的临界滑面位置

Fig.12 Location of critical slip surfaces obtained by M-P method and VSAM

4.3 结果分析

为了叙述的方便,使用滑面 1、滑面 2、滑面 3 分别代表 M-P 方法搜索得到的圆弧滑面、非圆弧滑面及使用矢量和法搜索得到的曲线滑面。

(1) 由图 6、图 7 可以看出,以滑面 1 为初始滑面,使用局部优化算法单纯形法,也能够近似得到边坡最小安全系数对应的临界滑面。因此在滑面假设的前提下,算例中基于矢量和法搜索得到的连续曲线临界滑面,应该是边坡的临界滑面。

(2) 算例 1 中滑面 1、滑面 2、滑面 3 对应的安全系数依次为 $F_c=1.360$, $F_{n-c}=1.340$, $F_{vs}=1.3501$, 见图 7。矢量和法搜索得到的安全系数 F_{vs} 与极限平衡 M-P 方法得到的安全系数 F_c 、 F_{n-c} 相对误差分别为 -0.66%, 0.75%, 不足 1%。因此,对于均质边坡,通过两种方法的对比分析可知,矢量和法不仅给出符合实际的临界滑面位置。而且其对应的安全系数也是合理的。

(3) 图 7 给出了算例 1 使用这 2 种方法搜索得到的临界滑面,3 个临界滑面位置基本上完全吻合,其中临界的破顶剪入点一致,而稍微不同的是,在坡脚的剪出点不同,按照与坡脚距离从近到远依次为滑面 2、滑面 3、滑面 1,距离依次为 3.82 m、7.36 m、11.19 m。滑面 3 大致位于滑面 1 与滑面 2 的之间,即矢量和法搜索得到的滑面位于 M-P 方法得到的滑面之间。由于算例 1 为均质边坡,实践证明,其临界滑面位置应该近似为圆弧状,图 5 也表明滑面 3 位置从剪入、剪出点及滑面的深度都与圆弧滑面 1 很吻合。

(4) 由算例 2 的计算结果知,滑面 1、滑面 2、滑面 3 对应的安全系数依次为 $F_c=1.40$, $F_{n-c}=1.389$, $F_{vs}=1.418$, 见图 12。矢量和法搜索得到的安全系数 F_{vs} 与极限平衡 M-P 方法得到的安全

系数 F_c 、 F_{n-c} 相对误差分别为 1.29%, 2.09%, 且矢量和法对应的安全系数大于极限平衡 M-P 法得到的安全系数,最大相对误差只有 2.09%,因此,对于双层土边坡,矢量和法能够给出合理的安全系数,来评估一个边坡的稳定性程度。

(5) 在算例 2 中,图 12 给出了搜索得到的 3 种临界滑面,3 种滑面剪出点相同,都位于坡脚,不同的是 3 种滑面剪入点不同,按照与坡顶距离从近到远依次为滑面 3、滑面 2、滑面 1,距离依次为 6.55 m、7.43 m、9.30 m,图 12 中各剪入点距离分别是 $CB=0.88$ m, $AB=1.87$ m。对于非均质材料边坡,实践证明这种边坡的临界滑面一般为非圆弧形,矢量和法搜索的滑面 3 与滑面 2 即 M-P 方法非圆弧滑面吻合的更好一些,限于滑面的假定,搜索过程只能在多项式所表示的曲线空间中进行,但搜索得到的临界滑面在总体上也能很好地逼近于边坡实际临界滑面。

(6) 由上述分析可知,运用矢量和法进行分析边坡的稳定性分析,不仅可以给出边坡合理的安全系数即矢量和法安全系数;而且搜索得到的边坡最小安全系数滑面与极限平衡 M-P 法得到的临界滑面吻合得较好,这也说明了矢量和法的合理性和可靠性。

5 结 论

(1) 矢量和法是一种新的边坡稳定性分析方法^[16]。不同于目前广泛使用的极限平衡条分法及有限元强度折减法,它是建立在边坡真实应力状态和整体下滑趋势方向上的分析方法,对于任意形状的边坡滑面,其物理和力学意义明确、公式简洁、不需迭代计算,只需进行一次非线性数值计算就可得到任意滑面的安全系数;同时它也是一个广义的概念,既可以适用于极限平衡条分法,也适用于边坡有限元分析。

(2) 给出了矢量和法中边坡整体下滑趋势方向的确定方法。通过潜在滑面各点极限抗剪应力沿滑面积分得到的单位方向的反方向即为边坡的整体下滑趋势方向。

(3) 通过矢量和法与极限平衡 M-P 法得到的临界滑面对比分析表明,采用矢量和法安全系数搜索边坡的临界滑面,与极限平衡法得到的滑面位置及深度基本吻合,且矢量和法安全系数与极限平衡 M-P 法安全系数接近,最大相对误差只有 2.09%,均质边坡仅为 0.75%。

(4) 基于矢量和法的边坡稳定分析不仅能

够得到边坡合理的安全系数, 而且也能给出符合实际的临界滑面位置, 说明了矢量和分析方法在边坡稳定性分析中的合理性与可靠性。

参考文献

- [1] 葛修润. 岩石疲劳破坏的变形控制律、岩土力学试验的实时 X 射线 CT 扫描和边坡坝基抗滑稳定分析的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 1—20.
GE Xiu-run. Deformation control law of rock fatigue failure, real-time X-ray CT scan of geotechnical testing, and new method of stability analysis of slopes and dam foundations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(1): 1—20.
- [2] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 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.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3381—3388.
- [4] 郑宏, 田斌, 刘德富, 等. 关于有限元边坡稳定性分析中安全系数的定义问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2225—2230.
ZHENG Hong, TIAN Bin, LIU De-fu, et al. On definitions of safety factor of slope stability analysis with finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(13): 2225—2230.
- [5] 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.
ZHENG Hong, LI Chun-guang, LEE Chao-feng, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 626—628.
- [6] 葛修润. 用 PC 型微机对岩体工程课题进行有限元分析[C]// 第一届全国计算岩土力学研讨会论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 1987: 74—85.
- [7] GE X R, FENG D X, GU X R, et al. Stability and deformation analysis of complex rock foundations of several large dams and hydropower stations in China[C]// Proceedings of International Workshop on Rock Foundation. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 243—248.
- [8] 丰定祥, 吴家秀, 葛修润. 边坡稳定性分析中几个问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 1—9.
FENG Ding-xiang, WU Jia-xiu, GE Xiu-run. Some problems of slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(3): 1—9.
- [9] 刘艳章, 葛修润, 李春光, 等. 基于矢量法安全系数的边坡与坝基稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 26(10): 2130—2140.
LIU Yan-zhang, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Stability analysis of slope and foundation based on vector method safety factor[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 2130—2140.
- [10] 邵国建, 卓家寿, 章青. 岩体稳定性分析与评价准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 691—696.
SHAO Guo-jian, ZHUO Jia-shou, ZHANG Qing. Research on analysis method and criterion of rock mass stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 691—696.
- [11] 郭明伟, 葛修润, 李春光, 等. 关于矢量和分析方法中整体下滑趋势方向的研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 577—583.
GUO Ming-wei, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Study on potential sliding in slope stability analysis based on vector sum method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(4): 577—583.
- [12] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [13] 栗塔山, 彭维杰, 周作益, 等. 最优化计算原理与算法程序设计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [14] ZHENG H, LIU D F, LI C G. Slope stability analysis based on elasto-plastic finite element method[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2005, 64(14): 1871—1888.
- [15] 孙冠华, 郑宏, 李春光. 基于等效塑性应变的边坡滑面搜索[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1159—1163.
SUN Guan-hua, ZHENG Hong, LI Chun-guang. Searching critical slip surface of slopes based on equivalent plastic strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1159—1163.
- [16] 刘艳章. 边坡与坝基抗滑稳定的矢量和分析法研究, 中国科学院研究生院[博士学位论文 D]. 2007.