

基于矢量和方法的边坡稳定性分析中整体下滑趋势方向的探讨

郭明伟¹, 葛修润¹, 李春光¹, 王水林¹, 刘艳章²

(1. 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, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 矢量和分析方法是基于力是矢量这一基本概念的分析方法, 其关键在于确定边坡真实应力分布状态及整体下滑趋势方向。在边坡一定的受力条件下, 利用有限元方法得到边坡应力分布状态后, 不同定义的下滑趋势方向就可以得到不同的边坡滑面位置及其对应的矢量和法安全系数, 通过分析, 提出了3种确定整体下滑趋势方向的方法并分别对固定滑面、非固定滑面及均质边坡圆弧滑面的搜索等进行了探讨, 计算结果表明: 由潜在滑面各点极限抗滑能力确定的边坡整体下滑趋势方向在临界滑面位置的搜索方面是合理的。最后给出了边坡矢量和分析方法平面问题与三维问题安全系数的统一表达式, 公式简洁, 容易编制程序并容易被工程技术人员掌握和应用。因此该方法在工程实践中有望得到广泛的应用。

关键词: 边坡稳定性; 矢量和分析方法; 极限平衡分析法; 整体下滑趋势方向

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2009)04-0577-07

作者简介: 郭明伟(1981-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事岩土工程稳定性分析方面的研究。E-mail: guomingwei2001@163.com。

Study on potential sliding direction in slope stability analysis based on vector sum method

GUO Ming-wei¹, GE Xiu-run¹, LI Chun-guang¹, WANG Shui-lin¹, LIU Yan-zhang²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Based on the fact that forces are vectors, the key problems of the vector sum method are the state of real stress distribution and potential sliding direction of slopes. In a slope under certain conditions, after the determination of stress distribution by FEM, different safety factors can be obtained by the vector sum method with different potential sliding directions of the slope. Three definitions of the potential sliding direction of the slope are put forward, and then the fixed circular slip surfaces, non-fixed circular slip surfaces and circular slip surface searching are discussed respectively. It is shown that the potential sliding direction defined by anti-sliding capacity of the potential slip surface is the most reasonable of the three. Finally unified formula about the VF in 2D and 3D problems is presented. Its calculating process is very simple and it is very easy to be applied in practical engineering problems. So the vector sum method can be widely used in practice.

Key words: slope stability; vector sum method; limit equilibrium method; potential sliding direction

0 引言

边坡稳定分析是一个相对“古老”, 但又十分重要的工程和学术课题。边坡稳定性分析方法都是在对“潜在”滑动体和“潜在”滑动面进行受力分析的基础上定义和求解稳定性安全系数的, 根据安全系数大小来判定其稳定程度, 文献[1]很好的总结了截止于1996年前25 a间极限平衡方法和有限元方法在边坡稳定分析

中的应用。评估边坡是否稳定通常最直接的方式就是看它的安全系数及滑面位置, 目前最常用的两种边坡稳定分析方法分别是基于超载安全系数的稳定分析方法和基于强度储备安全系数的稳定分析方法。超载安全系数是将边坡作为一个计算体系, 如果将其外载增

大 F 倍时,体系即将失稳,则此时 F 即为超载安全系数,我国边坡工程设计中常用的传递系数法以及边坡的极限分析方法就是基于超载安全系数定义的分析方法;强度折减安全系数是将其材料的强度减小 F 倍时,体系失稳,则此强度减小的倍数 F 即为强度折减安全系数,边坡稳定分析的极限平衡条分法和有限元强度折减法就是基于此安全系数定义的分析方法^[2-4]。

这两种稳定分析方法中的安全系数都是基于边坡失稳时的应力状态而得到的。极限平衡法安全系数是沿滑动面对力积分的代数和求解,对于圆弧及直线型边坡滑面,安全系数是根据力矩平衡而得到的,物理意义明确,而对于非圆弧或直线型滑面,安全系数表达式就没有明确的力学或物理意义。在超载分析时,增大不同的荷载(大小和方向),得到的边坡安全系数是不同的,其概念是不明确的;强度折减安全系数大多数是对岩土体的强度参数黏聚力 c 和摩擦系数 $\tan\varphi$ 按同一系数进行折减^[5],这与岩土体的实际强度特性有较大差别。这两种分析方法都是对现有应力状态的人为假定,在此基础上计算的安全系数并不能真正地反映边坡在现实状态下的安全性,因此,这两类安全系数定义的物理或力学意义会受到一些学者的质疑^[6-7]。文献[8,9]从边坡滑动问题的基本力学概念出发,基于矢量法的思想提出了矢量和的分析方法。矢量和法安全系数的求解关键在于边坡真实应力状态和整体下滑趋势的确定,本文对矢量和的分析方法中的整体下滑趋势方向进行了研究,分析了3种不同的确定方法并分别对固定滑面、非固定滑面和圆弧滑面的搜索方面等进行了探讨,结果表明由潜在滑面各点极限抗滑能力确定的整体下滑趋势在边坡滑面的搜索方面较其他方法具有明显的合理性。最后给出了在此整体下滑趋势方向上,边坡平面问题与三维问题安全系数的统一矢量表达式,公式简洁,不需迭代计算,容易编制程序并被工程技术人员掌握和应用,因此该方法在工程实践中有望得到广泛的应用。

1 边坡平面问题的矢量和的分析方法

从边坡滑动问题的基本力学概念出发,边坡潜在滑面上各点抗滑力和下滑力均是矢量,因此边坡稳定性安全系数就应以力的矢量比来定义。安全系数最原始的定义为潜在滑动面上总的抗滑能力 R 与总的下滑能力 T 的一种比值,即

$$K = \frac{R}{T} \quad (1)$$

矢量和的分析方法对于潜在滑面上总的抗滑能力与下滑能力都是基于力的矢量求和基础上,其所求得的安全系数定义为矢量和法安全系数。因此最经典抗滑

稳定安全系数 K 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^[2-3]。这样的定义是非常直观和朴实的。

1.1 矢量和法安全系数的基本表达式

边坡矢量和法安全系数是基于以下几点假设的:

(1)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可以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)潜在滑动面上岩土体的强度特性服从摩尔—库仑强度准则。在应力分布已知时,岩土体的抗剪强度由下式(2)确定。

$$\tau_f = c + \sigma_n \times \tan\varphi \quad (2)$$

(4)以边坡与坝基的整体抗滑稳定性为研究目的,安全系数的投影方向 θ 由边坡的整体下滑趋势方向确定,见图1。

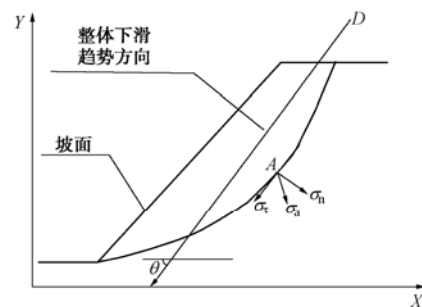


图1 矢量和法安全系数求解示意图

Fig. 1 Solution of safety factor based on vector sum method

图1中 σ_s 对应为潜在滑面上 A 点的应力矢量; σ_τ 和 σ_n 分别为剪应力、法向应力。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示为潜在滑面上总抗滑能力 R (与极限下滑能力大小相等,方向相反)与总下滑力 T 的比值。

$$T = \int_s (\sigma_s \cdot D) ds \quad (3)$$

$$R = \int_s \sigma_s' \cdot (-D) ds \quad (4)$$

其中 $\sigma_s = \sigma \cdot n \quad (5)$

$$\sigma_n = (\sigma_s \cdot n)n \quad (6)$$

$$\sigma_\tau = \sigma_s - \sigma_n \quad (7)$$

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

$$\sigma_n' = -\sigma_n \quad (8)$$

最大抗剪力:

$$\sigma_\tau' = -(c - \sigma_n \tan\varphi)D_\tau \quad (9)$$

式中, D_τ 为潜在滑面 s 上任一点下滑剪力方向,见图

2.

主控下滑方向 (见图 2):

$$D_c = \int_s \sigma_\tau ds, \quad (10)$$

则矢量和法安全系数可以表达为

$$K = \frac{R}{T}. \quad (11)$$

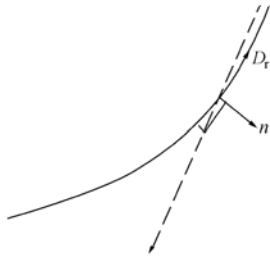


图 2 潜在滑面上任一点抗滑剪力方向

Fig. 2 The direction of anti-sliding shear stress at any point

1.2 确定边坡整体下滑趋势方向的三种方法

对于矢量和分析方法, 不同定义的整体下滑趋势方向得到的边坡矢量和安全系数及滑面位置是不同的。通过分析, 对以下 3 种确定边坡整体下滑趋势方向的方法进行了讨论。

(1) 矢量和分析方法是基于边坡真实应力分布状态的分析方法, 因此通过潜在滑面各点真实剪应力合力矢的单位方向来定义边坡的整体下滑趋势方向, 即

$$D = \int_s \sigma_\tau ds. \quad (12)$$

(2) 对于任一边坡潜在滑面, 其整体下滑趋势方向应是在其临界状态下的下滑趋势, 如果这个潜在滑面就是边坡真实的临界滑面, 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最大抗滑能力, 在潜在滑面上, 任一点都存在局部下滑趋势方向上的极限下滑力, 我们基于“静摩擦力的方向总与物体间相对滑动趋势的方向相反”的原理, 定义所有极限下滑力的合力矢方向为整体下滑趋势方向, 可表达为

$$D = \int_s (c - \sigma_n \tan \varphi) D_r ds. \quad (13)$$

(3) 通过边坡潜在滑面剪出点指向剪入点的矢量方向确定。

$$D = X_n - X_0, \quad (14)$$

其中, X_n, X_0 为潜在滑面剪出点与剪入点的位置矢量。

为了叙述的方便, 将上述 3 种确定边坡整体下滑方向的方法依次称为方法 1、方法 2、方法 3。

2 算例分析

为了得到确定边坡整体下滑趋势方向的合理方法, 通过 3 个代表性算例分别使用极限平衡法和矢量

和分析方法进行对比分析, 极限平衡圆弧滑面位置由极限平衡法搜索得到, 边坡真实应力分布状态由大型有限元软件 ABAQUS 计算得到。其中算例 1 和算例 2 是文献[10, 11]的算例, 分别为均质土和两层土; 算例 3 为澳大利亚标准考题第一题中的 EX1(C)^[2-3, 12]。

2.1 固定滑面位置的矢量和分析方法

在下述算例中采用由边坡工程中应用最广泛的极限平衡法搜索得到的圆弧滑面位置, 运用矢量和分析方法进行相应的计算。

(1) 算例 1: 均质土边坡

a) 材料参数及计算模型

边坡材料参数为黏聚力为 $c = 58.86 \text{ kPa}$, 摩擦角 $\varphi = 11.31^\circ$, 重度 $\gamma = 19.62 \text{ kN/m}^3$, 弹性模量和泊松比分别为 $E = 80 \text{ MPa}$ 、 $\nu = 0.43$, 在有限元数值计算中采用关联流动法则。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。

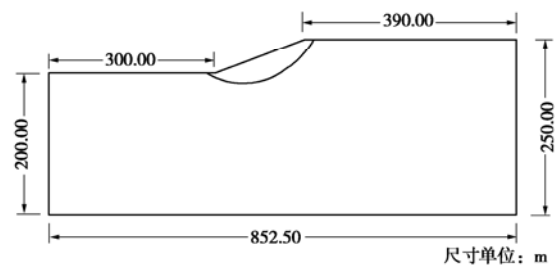


图 3 模型尺寸及滑面位置

Fig. 3 Size of the model and the location of slip surface in Example 1

b) 运用 1.2 中 3 种方法确定边坡整体下滑趋势方向进而分别使用极限平衡分析与矢量和分析方法对这一均质边坡进行对比分析, 极限平衡分析法给出了常用的 Morgenstern—Price 法与 Bishop 法计算结果, 如表 1 所示。

表 1 不同计算方法得到的安全系数

Table 1 Safety factors by different methods in Example 1

计算项目	矢量和分析法			极限平衡方法	
	方法 1	方法 2	方法 3	BISHOP 方法	M-P 方法
安全系数	1.3513	1.3508	1.3320	1.3610	1.3600
方向角 / (°)	13.8	13.8	14.6		

(2) 算例 2: 双层土边坡

a) 材料参数及计算模型

该算例包含双层土, 其材料参数如表 2 所示, 边坡形状及极限平衡滑面位置分别见图 4 和图 5, 有限元计算的边界条件同算例 1。

表2 算例2 边坡材料参数

Table 2 Parameters for soils in Example 2

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

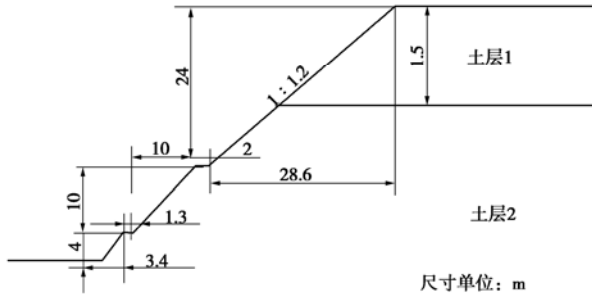


图4 双层土坡模型尺寸^[3-4]

Fig. 4 Size of the model in Example 2

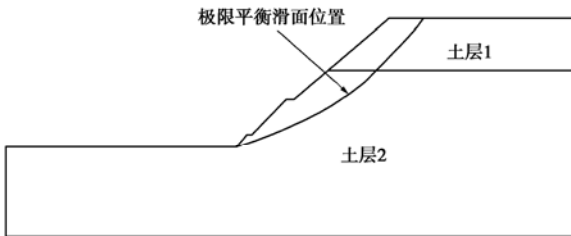


图5 双层土坡极限平衡滑面位置

Fig. 5 The slip surface by limit equilibrium method in Example 2

b) 计算结果

使用与算例1同样的方法进行对比分析, 其结果如表3所示。

表3 不同方法得到的边坡安全系数

Table 3 Safety factors with different methods in Example 2

计算项目	矢量和分析法			极限平衡方法	
	方法1	方法2	方法3	BISHOP方法	M-P方法
安全系数	1.4387	1.4324	1.4168	1.3980	1.4040
方向角 ($^{\circ}$)	32.8	33.4	34.9		

(3) 算例3: 三层土边坡

a) 材料参数及计算模型

材料参数如表4所示, 边坡形状及极限平衡法搜索的圆弧滑面位置见图6。

表4 EX1(C)材料参数

Table 4 Material parameters in Example 3

土层	重度 ($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力 (kPa)	摩擦角 ($^{\circ}$)	弹性模 量/kPa	泊松比
#1	19.5	0.0	38.0	1.0×10^4	0.25
#2	19.5	5.3	23.0	1.0×10^4	0.25
#3	19.5	7.2	20.0	1.0×10^4	0.25

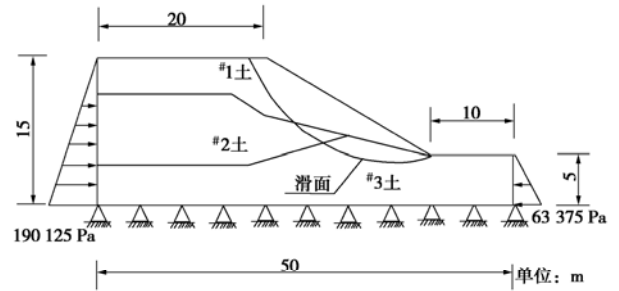


图6 三层土边坡计算模型^[1-2]

Fig. 6 Calculating model in Example 3

b) 计算结果

计算方法同算例1和算例2, 计算结果如表5。

表5 不同方法得到的安全系数

Table 5 Safety factors with different methods in Example 3

计算项目	矢量和分析法			极限平衡方法	
	方法1	方法2	方法3	BISHOP方法	M-P方法
安全系数	1.404	1.3655	1.3569	1.4020	1.3730
方向角 ($^{\circ}$)	22.0	24.4	25.1		

2.2 非固定滑面位置的矢量和分析方法

为了更好地对比分析1.2中3种方法在矢量和分析方法中的合理性, 对算例1固定滑面剪入点和剪出点, 改变圆弧滑面的半径, 随着半径的减小, 得到一组由最浅至最深的滑面, 如图7所示。由于极限平衡法在工程设计和治理中运用最广泛, 且在土质边坡中由此得到的滑面位置与实际比较符合, 认为由极限平衡法得到的圆弧滑面位置是边坡临界滑面位置。对这组滑面运用1.2中的3种方法分别进行计算分析, 得到矢量和安全系数的变化规律及安全系数极小值对应的滑面位置。

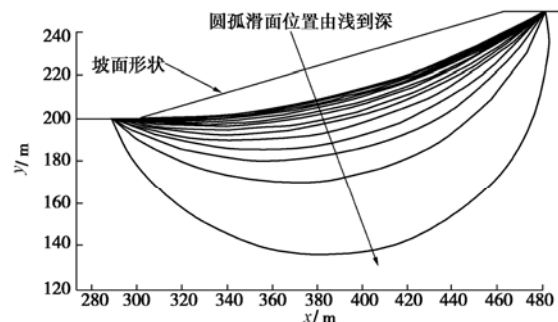


图7 固定两端点的不同滑面位置(单位: m)

Fig. 7 Different slip surfaces with two fixed points in Example 1

3种不同方法得到的矢量和安全系数随这组圆弧滑面的变化规律见图8; 整体下滑趋势方向角变化规律见图9; 由方法2、方法3在这组圆弧滑面中得到的安全系数极小值对应的滑面位置与极限平衡滑面位置

见图 10 所示。

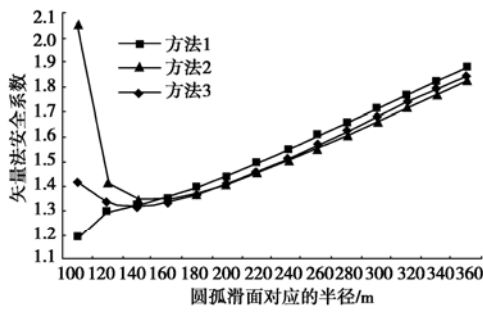


图 8 由方法 1、方法 2、方法 3 得到的矢量和法安全系数变化规律

Fig. 8 Variation of safety factors with three methods

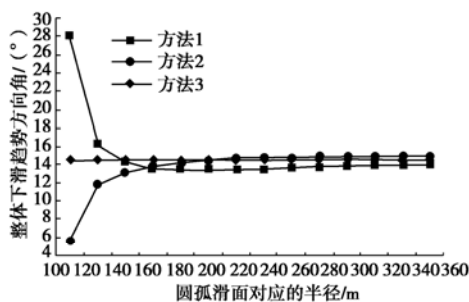


图 9 由方法 1、方法 2、方法 3 得到的滑面整体下滑趋势方向角变化规律

Fig. 9 Variation of potential sliding directions with three methods

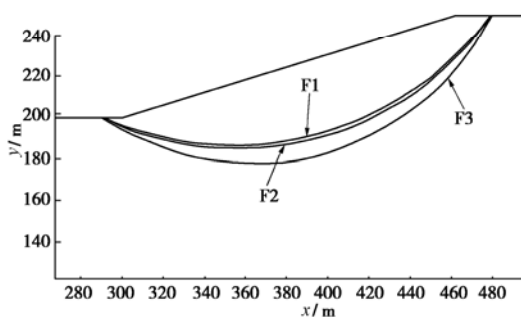


图 10 方法 2、方法 3 安全系数极小值点对应的滑面与极限平衡滑面位置图

Fig. 10 Locations of critical slip surfaces with LEM and vector sum method

注：其中 F1 为极限平衡滑面；F2 为方法 2 得到的安全系数极小值对应的圆弧滑面；F3 为方法 3 对应的圆弧滑面。

2.3 基于矢量和方法的圆弧滑面搜索

为了更好地比较方法 2 和方法 3 在滑面搜索中的合理性，对算例 1 均质边坡进行了圆弧临界滑面的搜索，为了提高搜索效率，采用单纯形法优化算法，并以极限平衡临界滑面作为搜索的初始滑面，方法 2 和方法 3 搜索得到的圆弧临界滑面位置，如图 11 所示，其对应的矢量和安全系数分别为 1.3475, 1.306, 与极限平衡 M-P 方法得到的安全系数相对误差分别为

-0.92%, -3.97%。其中 F1 为极限平衡滑面；F2 为方法 2 搜索得到的圆弧临界滑面；F3 为方法 3 搜索得到的滑面。

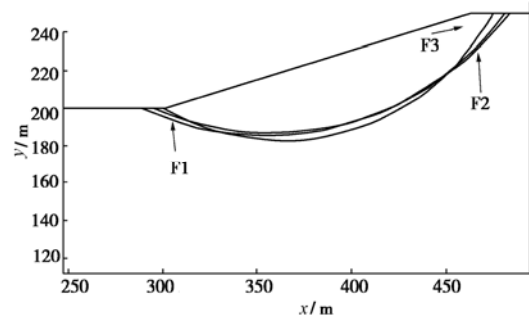


图 11 由方法 2、方法 3 搜索得到的临界滑面与极限平衡滑面位置图

Fig. 11 Locations of critical slip surfaces obtained by LEM and vector sum method in Example 1

2.4 计算结果分析

(1) 3 个算例中，基于极限平衡圆弧滑面位置，采用上述 3 种方法分别得到的矢量和法安全系数与极限平衡方法得到的安全系数是一致的。与极限平衡 M-P 方法相比，定义相对误差如式 (15) 所示。其中 F_{vsm} , F_{m-p} 分别表示为矢量和安全系数和极限平衡 M-P 方法安全系数。

$$r = \frac{F_{vsm} - F_{m-p}}{F_{m-p}} \quad (15)$$

3 种方法在这些算例中最大的相对误差为 2.47%，最小的为 -0.55%，如表 6 所示。因此对于边坡极限平衡临界滑面由 1.2 中 3 种方法确定的边坡整体下滑趋势都可以合理的给出边坡的稳定性程度。

表 6 算例中矢量和法与 M-P 方法安全系数的相对比值

Table 6 Relative errors of safety factors obtained by vector

sum method and M-P method

算例	方法 1	方法 2	方法 3
算例 1	-0.64%	-0.67%	-2.06%
算例 2	2.47%	2.02%	0.91%
算例 3	2.26%	-0.55%	-1.17%

(2) 由 2.1 中的计算结果可以看出，对于极限平衡的固定滑面，由方法 1 得到的矢量和法安全系数最大；方法 3 最小；方法 2 介于两者之间。算例 1 和算例 3 中，3 种方法得到的矢量和法安全系数均小于极限平衡安全系数，而算例 2 则均稍大于极限平衡安全系数。

(3) 采用极限平衡滑面位置，3 个算例中使用上述 3 种方法得到的边坡整体下滑趋势方向也基本一致，由表 1、表 3、表 5 可知，算例 1 中整体下滑方向角相对最大差值为 0.86°；算例 2 中为 2.03°；算例 3 中为 3.11°。对于不同算例，3 种方法得到的整体下

滑方向角也有其一定的规律性,即由方法1得到的整体下滑趋势方向角最小,方法3最大,方法2介于两者之间。

(4)对于算例1均质边坡中的不同圆弧滑面,随圆弧半径逐渐变大,滑面位置由深到浅,如图7所示。由图8可知,方法1得到的矢量和法安全系数随滑面由深到浅表现出逐渐增大的变化规律,且矢量和法安全系数没有出现极小值;方法2和方法3得到的矢量和法安全系数则表现出先减小后增大的变化规律,且矢量和法安全系数都出现了极小值。只有出现全局极小值,在边坡滑面搜索中才能得到临界滑裂面,由方法1得到的最小安全系数对应的圆弧滑面位置位于边坡深部,这明显不符合实际,因此采用方法1得到的整体下滑趋势方向在滑面搜索中是不合适的,而方法2和方法3则较方法1在滑面搜索中具有相对的合理性。

(5)对于均质边坡,图9给出了3种方法得到的整体下滑趋势随圆弧滑面位置由深到浅的变化规律,由方法1得到整体下滑方向角逐渐增大,且随着滑面位置变浅其整体下滑方向角趋于一个稳定值,方法2表现为逐渐减小,同样随着滑面位置变浅其整体下滑方向角趋于一个稳定值,且这个稳定值大于由方法1得到的趋势稳定值,方法3由于剪入点和剪出点不变,所以整体下滑趋势方向不变,这个方向位于由方法1和方法2得到的稳定下滑方向角之间。

(6)对于图7中不同的圆弧滑面,方法2和方法3得到的安全系数极小值分别为1.353,1.325。其对应的圆弧滑面位置如图10所示。从对应的矢量和安全系数与滑面位置两方面可以看出,方法2较方法3在边坡滑面位置的搜索中与极限平衡临界滑面更为接近。由图11可知,采用方法2搜索得到的圆弧临界滑面位置F2与极限平衡滑面位置F1基本一致,在滑面剪入点处两临界滑面破坏点重合,不同的是剪出点F2较F1更接近于边坡的坡脚。而由方法3搜索得到的滑面剪入点和剪出点都较F1接近于边坡的坡顶和坡脚,在滑面的中间滑面与边坡坡面的相对深度较F1大。由此可以认为由方法2确定的边坡整体下滑趋势方向角能够合理的确定边坡的稳定性程度。

3 边坡矢量和安全系数的统一表达式

由第三节分析可知,边坡矢量和分析方法中由潜在滑面各点极限抗滑能力确定的整体下滑趋势方向不仅在固定滑面位置计算的矢量和法安全系数与极限平衡M-P方法得到的安全系数一致,并且在非固定滑面中其安全系数极小值对应的滑面位置与极限平衡法搜

索得到的滑面位置完全一致,如图11所示,圆弧滑面搜索得到的滑面位置及安全系数也说明了这点。至此矢量和分析方法中的关键问题得到解决,即整体下滑趋势方向由潜在滑面各点极限抗滑能力确定并且由此计算的矢量和法安全系数及对应的滑面位置都能合理的评估边坡的稳定性问题。

对于边坡平面问题及三维问题矢量和安全系数的统一表达式可以由式(16)确定。

$$k = \frac{\int \sigma_s' ds \cdot (-D)}{\int \sigma_s ds \cdot D}, \quad (16)$$

其中,公式中各符号代表的含义与上述相同, s 对于不同的问题有不同的含义,对于平面问题,代表滑面曲线段;对于三维问题,代表潜在滑动面中的曲面。

4 结 语

边坡矢量和分析方法中的安全系数求解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,文献中[2,3]详细的介绍了这种方法,利用边坡真实应力分布状态确定其整体下滑趋势方向,并给出了基于极限平衡滑面矢量和分析方法的计算结果及对比分析。本文是在此基础上对边坡整体下滑趋势方向做进一步的研究,从而为使用该方法的滑面搜索问题提供坚实的理论基础,限于本文篇幅,基于矢量和分析方法的边坡滑面搜索问题,作者将另文给出。

(1)通过分析提出了3种确定边坡整体下滑趋势方向的方法,即①由边坡潜在滑面真实应力分布状态确定;②通过潜在滑面各点极限抗滑能力确定;③潜在滑面剪出点指向剪入点的方向。通过3个典型算例,即分别代表了均质土、双层土、三层土,对提出的3种确定方法进行了详细的计算分析,计算结果表明对于边坡固定极限平衡滑面3种方法都可以给出合理的安全系数,并与极限平衡法安全系数基本一致。

(2)通过均质边坡算例,对于提出的3种方法分别采用极限平衡滑面、非固定圆弧滑面及圆弧滑面的搜索等方面进行了详细的探讨,得出在矢量和分析方法中由潜在滑面上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能够合理的评估边坡的稳定性程度。从理论上讲,边坡沿潜在滑面滑动应处于一种临界状态,即在此状态下潜在滑面各点剪应力均达到最大抗滑能力,所以由此计算得到的边坡整体下滑趋势方向才能合理的说明边坡的稳定性状态,计算结果也表明了这点。

(3)给出了边坡平面和三维问题矢量和法安全系数的统一表达式,其中边坡整体下滑趋势方向由潜在滑面各点极限抗滑能力确定,见公式(16)。该公式简

洁,不需迭代计算,容易编制程序并被工程技术人员掌握和应用。

(4) 边坡矢量和分析方法是一种新的边坡稳定性分析方法,它是基于边坡真实应力分布和边坡整体下滑趋势方向上的稳定性分析方法,不仅能真实地反应边坡的稳定性状态,也在理论上体现了力是矢量这一基本概念,其力学或物理意义明确。希望以此能引起更多学者的关注和研究,进而服务于我国的工程建设。

参考文献:

- [1] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1996, **122**(7): 577 - 596.
- [2] 刘艳章. 边坡与坝基抗滑稳定的矢量和分析法研究[D]. 北京: 中国科学院, 2007. (LIU Yan-zhang. Vector sum analysis method of slope and dam foundation stability against sliding[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))
- [3] 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 and Engineering*, 2008, **30**(1): 1 - 20. (in Chinese))
- [4] 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 dam foundation based on vector method safety factor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **26**(10): 2130 - 2140. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 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. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 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]// YOSHINAKA R, KIKUCHI K, ed. *Rock Foundation: Proceedings of International Workshop on Rock Foundation*. Rotterdam: A A Balkema, 1995: 243 - 248.
- [9] 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. (GE Xiu-run. Finite element analysis of rock mass engineering by PC micro computer[C]// *Proceedings of the 1st National Symposium on Computational Rock and Soil Mechanics*. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1987: 74 - 85. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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. (CHEN Zu-yu. *Stability analysis of soil slopes—theory, methods and programs*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))