

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.02.033

基于离散元的边坡矢量和稳定分析方法研究

沈华章, 郭明伟, 王水林, 葛修润

(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)

摘 要: 基于离散元方法对获取的块体单元、节理的应力场处理后得到坡体整体应力场, 结合矢量和法安全系数的定义提出了一种边坡稳定性分析方法即 VSM-UDEC 法。首先通过滑块试验验证了多种情况下 UDEC 接触应力计算和单元应力的精确性, 结果表明, UDEC 接触应力和块体单元应力的精确程度很高(接触应力相对误差基本低于 0.2%), 能够满足矢量和安全系数计算要求。采用 VSM-UDEC 法分别对直线型滑面和圆弧型滑面算例进行了分析, 并与相应的理论解和严格极限平衡法(Morgenstern-Price 法)进行了对比。结果表明, 对于直线型滑面 VSM-UDEC 法安全系数与理论解几乎相同, 而对于圆弧型滑面该方法与极限平衡法结果基本一致。最后将 VSM-UDEC 法运用到锦屏 I 级水电站左岸边坡工程实例中, 结果表明, 假设块体为刚体时 VSM-UDEC 法安全系数与极限平衡法(Sarma 法、Morgenstern-Price 法)结果吻合较好, 此外, VSM-UDEC 法能够考虑坡体内结构面对稳定性的影响, 较极限平衡法更能反映边坡的变形分布情况。鉴于 UDEC 在模拟边坡破坏方面优点较多且矢量和法安全系数物理意义明确, VSM-UDEC 法有望在边坡稳定性分析中有较好的应用前景。

关键词: 矢量和法; 离散元法; 安全系数; 边坡稳定性;

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 02 - 0592 - 09

Vector sum method for slope stability analysis based on discrete elements

SHEN Hua-zhang, GUO Ming-wei, WANG Shui-lin, GE Xiu-run

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

Abstract: Based on the whole slope stress field obtained from block element and the joint stress field calculated by distinct element method, combining with the definition of vector sum method (VSM), a new slope stability analysis method is proposed, namely VSM-universal distinct element code (VSM-UDEC) method. Firstly, the accuracy of contact stress and element stress calculated by UDEC under various conditions is verified by the slider test. It is shown that the contact stress and element stress fields have high precision (i.e., the relative error of contact stress is less than 0.2%), which satisfies the condition of safety factor calculation. Numerical simulations of a linear sliding surface and a circular sliding surface are analyzed by the VSM-UDEC method. Numerical results are compared with the solutions by the corresponding theory and the rigorous limit equilibrium method (Morgenstern-Price method). It is indicated that the safety factor obtained by the VSM-UDEC method is almost identical with that by the theoretical solution in the case of linear sliding surface, and is consistent with that by the limit equilibrium method in the case of circular sliding surface. Finally, the VSM-UDEC method is applied to analyze the stability of the left bank slope of the Jinping-I Hydropower Station. The results demonstrate that the safety factor by the VSM-UDEC method is good agreement with that by the limit equilibrium methods (Sarma method, Morgenstern-Price method) when blocks are regarded as rigid. Moreover, the VSM-UDEC method can be considered as the effect of the structural surface in the slope body on the slope stability, and thus it has more advantages than the limit equilibrium method to reflect the actual stability and deformation distribution situation of the slope. UDEC software has good applications of simulating slope failure process and VSM has the clear physical significance of safety factor, and therefore, the VSM-UDEC method may have good prospects of applications in the slope stability analysis.

Keywords: vector sum method; distinct element method; safety factor; slope stability

收稿日期: 2015-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51179185, No. 41472289, No. 41302236); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目 (No. 2014CB047100)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51179185, 41472289 and 41302236) and the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB047100).

第一作者简介: 沈华章, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事应变软化和边坡稳定性方面的研究。E-mail: scott918@163.com

1 引言

随着国民经济的发展,以及西部大开发战略的实施,各种工程所面临的岩土环境越来越复杂,工程实践中出现的有关岩土方面的问题也不断增多。其中边坡的稳定与安全是岩土工程研究领域中的一个重要课题,目前边坡的稳定性分析方法主要有极限平衡法、强度折减法、极限分析法等,这些方法特别是极限平衡法在实际工程中得到了大量的应用。

边坡在形成过程中经历了构造应力、风化剥蚀、雨水冲刷等作用,坡体材料性质复杂。同时坡体内存在着或多或少的节理、裂隙、断层、软弱夹层等,它们的存在直接影响到边坡的稳定。考虑到上述种种情况,边坡稳定性分析方法需要具备:准确反映坡体材料性质的本构关系;准确反映坡体中节理、裂隙等性质的节理本构关系;满足全部的平衡方程和边界条件;合理的安全系数定义,能真实地反映边坡稳定性。目前,用于研究考虑接触的多个块体构成边坡的数值方法有有限元法(FEM、XFEM)^[1-2]、离散元法(DEM)^[3-4]、流形元法(NMM)^[5-6]、不连续变形分析(DDA)^[6-7]。有限元法虽应用广泛,但不能考虑块体完全脱离、旋转等情况。NMM和DDA作为新兴的数值方法,具有一定的优势,但其材料、节理的本构关系较少,另外DDA通常假定整个块体为常应变块体,其应力场与坡体实际应力场不同。离散元软件中UDEEC^[8](universal distinct element code)软件除具有离散元法的优点之外还包含丰富的材料本构关系和接触本构关系,基本具备上述边坡稳定性分析方法要求中的前三点,在实际工程中得到了较为广泛的应用。

现有利用UDEEC软件计算坡体安全系数主要是强度折减法^[9],但强度折减法目前还没有统一的边坡破坏失稳判据,强度折减法的应力场不是边坡的实际应力场。目前一种较新的边坡稳定性评价方法——葛修润等^[10-15]提出的矢量和法安全系数由于考虑了边坡滑动破坏的方向性,具有明确的物理意义,日益受到岩土工程科研与工程人员的重视。本文采用UDEEC软件进行计算边坡的应力场,在数值分析的基础上,采用矢量和法安全系数,分析了边坡的稳定情况。

2 基于离散元的边坡矢量和稳定性分析方法

采用离散元软件UDEEC对边坡进行数值模拟,

结合矢量和法安全系数,可以分析边坡的稳定性以及确定滑面位置。下面详细介绍基于离散元的边坡矢量和稳定性分析方法。

2.1 矢量和法安全系数

葛修润等^[10-15]于1983年提出了一种新的抗滑稳定安全系数计算方法——向主要滑出面投影矢量算法,简称矢量和法。矢量和法相对其他稳定性分析法,其安全系数采用滑体的整体下滑方向作为投影方向,具有明确的物理意义;同时矢量和法可以采用有限元等数值方法计算得到的应力场,相比极限平衡法,其平衡条件等可以完全满足;而与强度折减法等相比,其不存在强度折减法失稳判据难以选择及黏聚力与内摩擦系数等比例折减的假设。矢量和法安全系数表达式^[16]为

$$K = \frac{\int (\sigma'_s(-\vec{d})) ds}{\int (\sigma_s \vec{d}) ds} \quad (1)$$

式中: σ'_s 和 σ_s 分别为抗滑应力和下滑应力矢量; \vec{d} 为矢量和法整体下滑趋势方向; ds 为滑面微段长度。

$$\sigma'_s = \sigma_f + \sigma'_n \quad (2)$$

$$\sigma_f = (c - \sigma_n \tan \varphi) \vec{d}_t \quad (3)$$

式中: σ'_n 为滑面法向抗滑力矢量; σ_f 为滑面切向抗滑力矢量; σ_n 为滑体对滑面的正应力,以压为负,当 $\sigma_n > 0$ 时,取 $\sigma_n = 0$; \vec{d}_t 为滑面某处向下的切线方向矢量。

矢量和法整体下滑趋势方向 \vec{d} 由下式^[16-17]得到:

$$\vec{d} = \frac{\int \sigma_\tau ds}{\left\| \int \sigma_\tau ds \right\|} \quad (4)$$

式中: σ_τ 为滑面某处的切应力滑动矢量。

2.2 UDEEC 块体单元应力及接触应力计算原理^[8]

UDEEC是一种基于牛顿第二定律的显式离散元法,主要计算循环如图1所示。其块体分不可变形的刚性块体和可变形块体,对于后者,块体内部被离散成一系列有限差分三角单元,单元均为常应变单元,其精度可能比不上其他方法的高阶单元,但通过增加单元密度可以使计算精度满足要求。实际上,模拟塑性流动时,采用较多低阶单元比少量高阶单元效果更好。对于任一材料本构关系,均通过相同的增量数值算法实现:给出前一时步的应力状态和当前时步总应变增量,由本构关系计算出当前时步的应力增量,得到当前时步的应力状态。

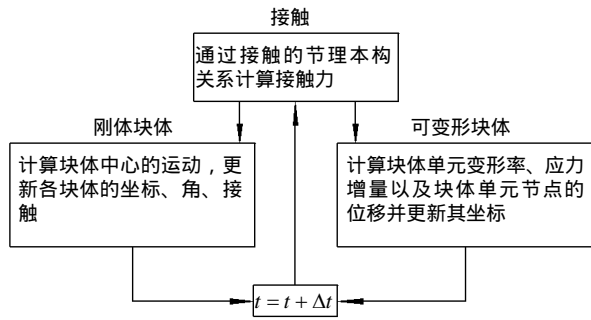


图 1 UDEC 中主要计算循环
Fig.1 Calculation cycles in UDEC software

UDEC 基本接触模型如图 2 所示，共有两类数值接触：角-角接触、角-边接触。为了便于求解接触应力的大小，其将块体的角进行了圆角化，即将块体原来的角替换为某个半径 r 的圆弧。

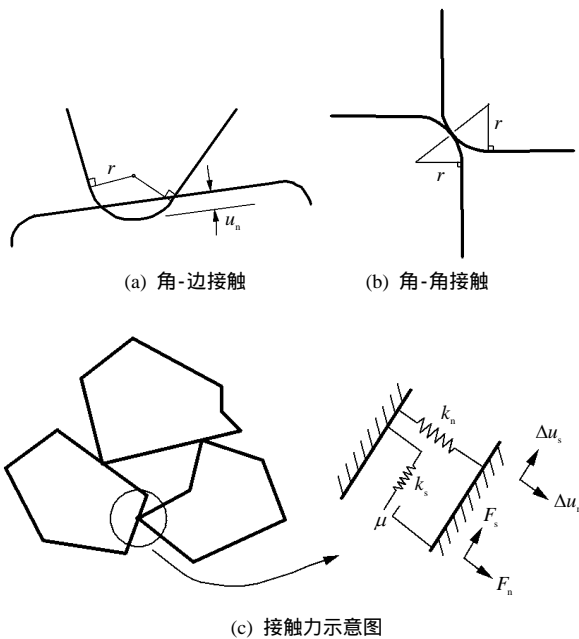


图 2 UDEC 接触示意图
Fig.2 Schematic of contact in UDEC

图 2 中， k_n 、 k_s 分别为接触法向和切向刚度， μ 为接触摩擦系数， u_n 、 u_s 分别为法向、切向位移， F_n 、 F_s 分别为法向、切向接触力。接触力的计算亦通过增量算法求得，如式 (5)~(7) 所示。

$$F_n = F_n - k_n \Delta u_n \quad (5)$$

$$F_s = F_s - k_s \Delta u_s \quad (6)$$

$$F_s = \min \{ \mu F_n, |F_s| \} \text{sgn}(F_s) \quad (7)$$

式 (5)~(7) 是基本的接触力计算公式，为了

使模拟结果更加真实，UDEC 提供了可以修改材料本构、接触本构的 Fish 语言以及利用 C++ 创建新本构的途径。

2.3 基于离散元的边坡矢量和稳定性分析方法

离散元法在计算时允许块体发生有限的位移以及块体旋转、完全脱离等情况，适用于边坡破坏模拟及稳定性分析，矢量和法安全系数物理意义明确、计算结果可靠，因而考虑将离散元与矢量和法结合起来进行边坡稳定性分析，即 VSM-UDEC 法。如式 (1) 所示，矢量和法安全系数的计算需要坡体潜在滑面处的应力场从而进行积分，对于 UDEC 应力场，若高斯点处于块体内部，则可直接使用高斯点所在单元的应力，若高斯点处于接触域时，需要对 UDEC 提供的接触力按式 (8) (9) 换算得到接触域的应力场，若高斯点处于坡体内的空隙中按零应力场处理。

$$\sigma_n = -\frac{N_{\text{contact}}}{L_{\text{contact}}} \quad (8)$$

$$\tau_s = -\frac{S_{\text{contact}}}{L_{\text{contact}}} \quad (9)$$

式中： σ_n 、 τ_s 分别为法向接触应力和切向接触应力； N_{contact} 、 S_{contact} 分别为法向接触力和切向接触力； L_{contact} 为接触域长度；两式中的负号是为了使接触应力与单元应力一样满足拉正压负等规定。经上述处理后，可以获得整个坡体包括节理以及块体单元的应力场，从而能够使用式 (1) 计算坡体的安全系数。由于能够获取整个坡体的应力场，不仅滑面全部处于单元内以及滑面全部处于节理中的边坡安全系数可以计算，也能计算滑面部分处于单元中、部分处于节理中的边坡安全系数。

应力场获取后，岩质边坡滑面通常为已有的节理裂隙破碎带等，土质边坡的滑面则可以通过滑面搜索的方式得到，对于比较复杂的情况，如滑面部分为节理部分处于岩 (土) 体中时，对原有的滑面搜索方法进行修改后也可以搜索得到潜在的滑面位置。基于离散元的边坡矢量和稳定性分析方法流程如图 3 所示。

UDEC 软件具有丰富的材料和节理本构关系，能够模拟多种边坡的变形破坏过程，也能考虑动力载荷 (地震、爆炸等)、水-力耦合、水-力-热耦合等情况，其应力场更接近于坡体的实际应力场，同时矢量和法安全系数有明确的物理意义，能较为准确地反映边坡稳定情况，因而基于离散元的边坡矢量和稳定性分析方法在分析边坡的稳定性方面有良好的应用前景。

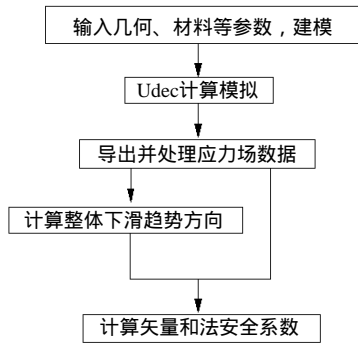


图 3 计算流程图

Fig.3 Flow chart of calculation process

下面先通过滑块试验对接触力计算精度进行检验，再与有限元法对比检验单元应力计算的误差。最后通过具体的算例对该方法进行验证，并与极限平衡法结果进行对比分析。

3 接触力、单元应力精度检验

对于岩土介质边坡，坡体内的节理对边坡的稳定性有明显的影 响，因此，需要对 UDEC 接触力计算的精度进行检查。如图 4 所示，坡角为 α 的斜坡上放置了一个尺寸为 $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的矩形块体，块体和斜坡采用相同的材料参数，如表 1 所示。差分网格如图 5 所示，共 12 426 个差分单元。

由受力分析易知，法向接触力 F_{CN} ，切向接触力 F_{CS} ，滑块位移-时间关系 $s-t$ 分别为

$$F_{CN} = Mg \cos \alpha \quad (10)$$

$$F_{CS} = \min \{ Mg \sin \alpha, c_j L + F_{CN} \tan \varphi_j \} \quad (11)$$

$$s = [(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi_j)g - c_j L / M] t^2 / 2 \quad (12)$$

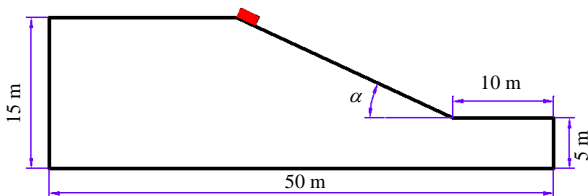


图 4 接触力检验模型

Fig.4 Validation model of contact force

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

ρ / (kg/m ³)	E / GPa	c_j / kPa	φ_j / (°)	k_n / MPa	k_s / MPa
2 612.24	2	0	0	10^5	10^5

注： ρ 为密度， E 为弹性模量。

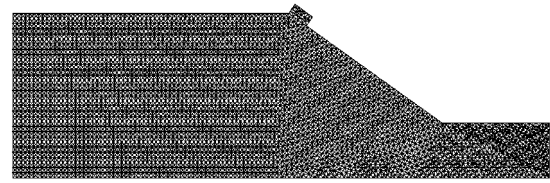


图 5 差分网格分布

Fig.5 Distribution of difference meshes

式中： M 为滑块质量； g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 ； L 为条块间接触（域）长度， $L=2\text{ m}$ ； t 为时间（s）； s 为滑块位移（m）； c_j 为接触黏聚力（kPa）； φ_j 为接触内摩擦角（°）。

滑块位移随时间的变化直接受接触力的影响，若接触力的精度不高，数值模拟得到的位移将与理论解有很大的差别，因此，通过计算某一时刻滑块的位移并与位移理论解比较，以检验接触力的计算精度。

首先计算块体间无黏聚力和摩擦作用的情况， $\alpha = 15^\circ \sim 70^\circ$ ，共取 12 个角度值，计算滑块不同时刻位移，与式（12）理论解作对比，相对误差如表 2 所示。

表 2 不同坡角位移相对误差表 ($c_j=0, \varphi_j=0$) (单位：%)
Table 2 Relative errors of displacements with different slope angles ($c_j=0, \varphi_j=0$) (unit: %)

α / (°)	$t=0.2\text{ s}$	$t=0.4\text{ s}$	$t=0.6\text{ s}$	$t=0.8\text{ s}$	$t=1.0\text{ s}$
15	-0.01	0.07	-0.02	0.00	0.00
20	0.10	0.06	0.05	0.01	0.01
25	-0.04	0.06	-0.03	0.02	0.03
30	0.11	0.11	0.02	0.00	0.01
35	0.44	0.12	0.00	0.04	0.02
40	-0.31	0.01	0.03	0.00	0.01
45	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00
50	-0.20	-0.02	0.01	-0.01	0.00
55	0.19	0.18	0.03	0.03	0.03
60	-0.23	-0.04	-0.03	0.00	-0.01
65	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01
70	-0.05	-0.03	-0.03	0.00	0.00

从表 2 中可以看出，接触面上无黏聚力和摩擦作用时，位移的相对误差很小，在 0.5% 以内，绝大部分低于 0.1%，说明该情况下接触力计算的精确性非常高，与理论解的差异可以忽略。

实际中岩土体节理面上的内摩擦角一般不为 0，块体间不是自由滑动。令表 1 中接触内摩擦角 φ_j 取 10° ，可以计算块体间有摩擦作用时的接触力的精度，坡角 α 取值同上。计算滑块不同时刻的位移，同样与式（12）的理论解对比，相对误差如表 3 所示。

从表3中可以看出,接触面上有摩擦作用时,最大相对误差在1.5%以内,相对误差总体上在0.2%以内。说明内摩擦角不为0时,接触力计算的精度也非常高,与理论解之间的误差很小。

表3 不同坡角位移相对误差表($c_J=0, \varphi_J=10^\circ$)(单位:%)
Table 3 Relative errors of displacements with different slope angles ($c_J=0, \varphi_J=10^\circ$) (unit: %)

α /($^\circ$)	$t=0.2\text{ s}$	$t=0.4\text{ s}$	$t=0.6\text{ s}$	$t=0.8\text{ s}$	$t=1.0\text{ s}$
15	1.32	0.10	0.30	0.21	0.22
20	1.49	0.03	0.30	0.05	0.03
25	-0.99	-0.11	0.07	0.04	0.01
30	-0.01	0.03	0.12	0.09	0.01
35	-0.06	0.11	0.08	0.04	0.02
40	-0.14	0.05	0.02	0.00	0.00
45	-0.93	0.04	-0.07	-0.04	0.00
50	-0.09	0.01	-0.01	0.01	0.01
55	0.56	0.14	0.05	0.03	0.02
60	-0.12	-0.01	0.04	0.00	-0.01
65	0.18	-0.04	0.01	-0.01	0.00
70	0.01	0.03	-0.03	-0.02	0.00

对于块体间无滑动的情况,节理面上可能会同时有黏聚力和摩擦作用。令表1中接触黏聚力 c_J 取300 kPa,接触内摩擦角 φ_J 取 15° ,可以计算块体间有黏聚力和摩擦力作用时的接触力的精度,坡角 $\alpha=15^\circ\sim 60^\circ$,共取10组角度值。由于块体间没有相对位移,则式(10)~(11)可以作为法向接触力、切向接触力的理论解。计算不同坡角 α 时的接触力,并与理论解对比,结果如表4所示。

表4 不同坡角接触力计算结果($c_J=300\text{ kPa}, \varphi_J=15^\circ$)
Table 4 Calculation results of contact forces with different slope angles ($c_J=300\text{ kPa}, \varphi_J=15^\circ$)

坡角 α /($^\circ$)	法向接触力 F_N			切向接触力 F_S		
	理论解 /N	UDEC解 /N	相对误差 /%	理论解 /N	UDEC解 /N	相对误差 /%
15	49 458	49 452.0	0.012 1	13 252	13 258.0	-0.045 3
20	48 115	48 114.0	-0.002 1	17 512	17 511.0	-0.005 7
25	46 406	46 403.0	-0.006 5	21 639	21 638.1	-0.004 2
30	44 343	44 339.0	-0.009 0	25 602	25 599.0	-0.011 7
35	41 943	41 941.0	-0.004 8	29 369	29 366.0	-0.010 2
40	39 224	39 224.0	0.000 0	32 913	32 911.0	-0.006 1
45	36 206	36 205.5	-0.001 4	36 206	36 205.0	-0.002 8
50	32 913	32 909.2	-0.011 5	39 224	39 218.0	-0.015 3
55	29 369	29 367.7	-0.004 4	41 943	41 940.0	-0.007 2
60	25 602	25 599.2	-0.010 9	44 343	44 340.9	-0.004 7

表4中,接触力计算结果与理论解的最大相对误差为0.045 3%,相对误差基本上均小于0.01%,

表明对于未发生滑动黏聚力和内摩擦角不为0的块体间接触力计算精度非常高。实际边坡中这类接触的块体比较多,由于边坡抗滑稳定安全系数直接由力计算得到,精度高的接触力计算结果能直接提高安全系数的准确性。

上面通过滑块试验对接触力计算的精确程度进行了检验,结果表明,接触力计算结果精度很高,与理论解差别极小。对于滑面位于块体内部时,滑面上高斯积分点处的应力则为其所在的单元应力,安全系数的计算受到单元应力精确程度的影响。下面对单元应力的精度进行检验。

用于检验单元应力的模型如图6所示,图中给出了计算所需的材料参数。ABAQUS软件作为一种在岩土工程中应用广泛的有限元软件,其应力计算结果精确性高。故选ABAQUS应力场作为比较对象,通过计算指定滑面(如图6所示)的矢量和安全系数来比较UDEC单元应力与ABAQUS单元应力的差异,结果见表5。

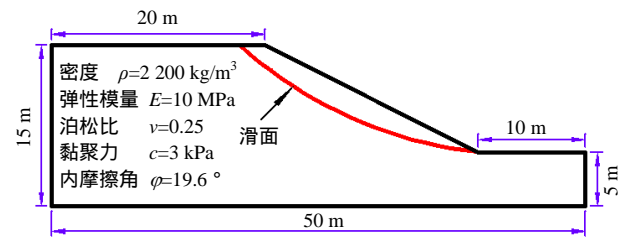


图6 单元应力检验模型
Fig.6 validation model of element stress

由表5可知,在单元数(204)比较少时,UDEC与ABAQUS分别得到的矢量和安全系数有一定的差别,随着单元数的增加,二者的差别减小,单元数为810时,二者的差别小于0.05,单元数为3273时,二者的差别不大于0.014,最终单元数不算特别多时二者的差别小于0.01。表6中,矢量和法整体下滑趋势方向方面,在单元数比较少时二者的差别就已经很小,随着单元数的增加进一步减小。以上分析表明,在单元数不多时UDEC应力场就可以满足矢量和法安全系数计算的精度要求。

4 算例验证

本节对直线形滑面、圆弧形滑面边坡的安全系数进行了验证。

4.1 直线型滑面算例

直线型滑面计算模型如图7所示。材料参数见表7。

表 5 两种方法的矢量和安全系数

Table 5 Vector sum safety factors of two methods

单元数	弹性应力场安全系数				塑性应力场安全系数			
	ABAQUS	UDEC	绝对误差	相对误差/%	ABAQUS	UDEC	绝对误差	相对误差/%
204	1.151 80	1.005 7	-0.146 10	-12.684 5	1.062 1	1.102 1	0.040 0	3.766 1
810	1.061 40	1.019 6	-0.041 80	-3.938 2	1.028 0	1.074 4	0.046 4	4.513 6
3 273	1.011 51	1.017 3	0.005 79	0.572 4	1.036 8	1.050 8	0.014 0	1.350 3
13 044	1.021 40	1.011 6	-0.009 80	-0.959 5	1.036 5	1.029 8	-0.006 7	-0.646 4

表 6 两种方法的矢量和整体下滑趋势方向

Table 6 Vector sum overall decline directions of two methods

单元数	弹性应力场下滑趋势方向				塑性应力场下滑趋势方向			
	ABAQUS/(°)	UDEC/(°)	绝对误差/(°)	相对误差/%	ABAQUS/(°)	UDEC/(°)	绝对误差/(°)	相对误差/%
204	-22.755 0	-23.348 2	-0.593 2	2.6069	-22.784 3	-23.356 8	-0.572 5	2.512 7
810	-23.877 6	-23.831 5	0.046 1	-0.1931	-23.839 3	-23.789 4	0.049 9	-0.209 3
3 273	-24.303 5	-24.119 1	0.184 4	-0.7587	-24.284 5	-24.092 3	0.192 2	-0.791 5
13 044	-24.193 0	-24.157 6	0.035 4	-0.1463	-24.168 2	-24.110 0	0.058 2	-0.240 8

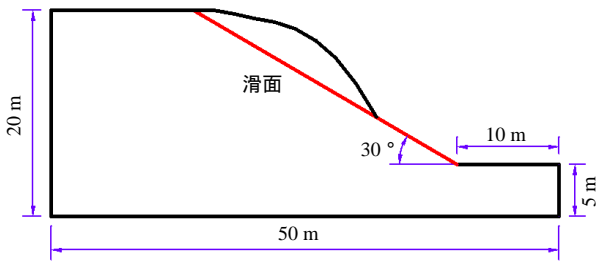


图 7 直线型滑面计算模型

Fig.7 Calculation model of a linear sliding surface slope

表 7 直线型滑面模型材料参数

Table 7 Material parameters of a linear sliding surface slope

材料名称	ρ /(kg/m ³)	E /GPa	c_j /kPa	ϕ_j /(°)	k_n /GPa	k_s /GPa
坡体	2 700	10				
节理			0 ~ 100	15 ~ 50	100	100

由受力分析易知，该直线型滑坡安全系数理论解 K_{theory} 为

$$K_{theory} = \frac{R}{T} = \frac{\tan \phi_j}{\tan \alpha} + \frac{c_j L}{Mg \sin \alpha} \quad (13)$$

式中： R 、 T 分别为抗滑力与下滑力大小。

计算了坡体为刚体、弹性体时的 VSM-UDEC 法安全系数。作为对比，这里也计算了极限平衡法中 Morgenstern-Price 法 (M-P 法) 的安全系数。具体计算了黏聚力为 0 不同节理内摩擦角的安全系数和节理内摩擦角为 $\phi_j = 20^\circ$ 时不同黏聚力的安全系数，各方法计算结果见表 8、9。

由表 8、9 可知，UDEC 刚体解与理论解几乎完全相同，误差小于 0.000 1。这是由于理论解在推导时不能考虑块体的弹性变形以及接触面的变形，隐

表 8 不同节理内摩擦角下各方法计算结果对比 ($c_j=0$)

Table 8 Results comparisons of different methods with various joint friction angles ($c_j=0$)

ϕ_j /(°)	K_{theory}	矢量和安全系数		M-P 法 安全系数	整体下滑趋势方向/(°)	
		UDEC 刚体解	UDEC 弹性解		UDEC 刚体解	UDEC 弹性解
15	0.464 1	0.464 1	0.464 5	0.463	-30	-29.994 2
20	0.630 4	0.630 4	0.631 0	0.629	-30	-29.994 2
25	0.807 7	0.807 7	0.808 4	0.806	-30	-29.994 2
30	1.000 0	1.000 0	1.001 5	0.998	-30	-29.994 7
35	1.212 8	1.212 8	1.214 6	1.210	-30	-29.994 7
40	1.453 4	1.453 3	1.454 1	1.450	-30	-29.993 6
45	1.732 1	1.732 0	1.732 9	1.729	-30	-29.993 6
50	2.064 2	2.064 2	2.066 4	2.060	-30	-29.993 9
55	2.473 6	2.473 6	2.477 4	2.468	-30	-29.993 6
60	3.000 0	3.000 0	3.004 1	2.994	-30	-29.994 1

表 9 不同节理黏聚力下各方法计算结果对比 ($\phi_j=20^\circ$)

Table 9 Results comparison of different methods with various joint cohesive forces ($\phi_j=20^\circ$)

c_j /kPa	K_{theory}	矢量和安全系数		M-P 法 安全系数	整体下滑趋势方向/(°)	
		UDEC 刚体解	UDEC 弹性解		UDEC 刚体解	UDEC 弹性解
0	0.630 4	0.630 4	0.631 4	0.629	-30	-29.993 5
10	0.972 9	0.972 9	0.974 2	0.970	-30	-29.995 1
20	1.315 3	1.315 4	1.316 9	1.310	-30	-29.995 9
30	1.657 8	1.657 8	1.659 5	1.650	-30	-29.996 3
40	2.000 3	2.000 3	2.002 2	1.986	-30	-29.996 6
50	2.342 7	2.342 8	2.344 9	2.325	-30	-29.996 8
60	2.685 2	2.685 2	2.687 6	2.673	-30	-29.997 0
70	3.027 7	3.027 7	3.030 2	3.013	-30	-29.997 1
80	3.370 1	3.370 2	3.372 9	3.354	-30	-29.997 2
90	3.712 6	3.712 7	3.715 6	3.694	-30	-29.997 3
100	4.055 1	4.055 1	4.058 2	4.035	-30	-29.997 4

含着块体为刚体的假设。考虑到本算例中块体和接触面的刚度都很大，可以将块体近似为刚体，因而理论解作为对比依据仍然是有意义的。UDEEC 弹性解与理论解差别也非常小，不超过 0.005，矢量和法的整体下滑趋势方向也与实际滑面的角度基本一致。另外，M-P 法的计算结果与理论解差别不超过 0.02，表明缺少理论解时，将 M-P 法的结果作为对比依据也是可接受的。

4.2 圆弧型滑面算例

圆弧型滑面计算模型如图 8 所示，滑面处于一圆弧型节理中，位置为图中所示圆弧，坡体材料参数见表 10。对于滑面全部处于单元内的情况，上一节已经在单元应力检验中进行了计算并与 ABAQUS 矢量和安全系数进行了对比，这里不再重复验证。

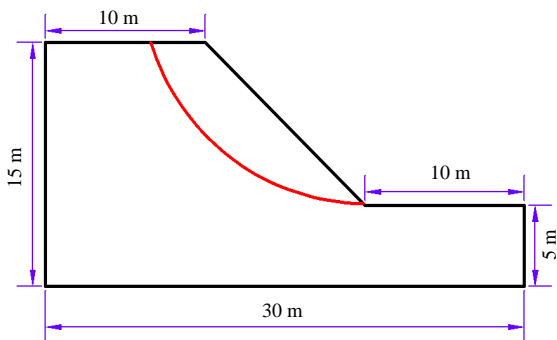


图 8 圆弧型滑面计算模型
Fig.8 Calculation model of a circular sliding surface slope

表 10 圆弧型滑面模型材料参数
Table 10 Material parameters of slope with a circular sliding surface

材料名称	ρ / (kg/m ³)	E / GPa	c_j / kPa	ϕ_j / (°)	k_n / GPa	k_s / GPa
坡体	2 700	10				
节理 1			40	10	100	100
节理 2			30	20	100	100

圆弧型滑面安全系数无理论解，由上面直线型滑面结果可知，选用极限平衡法中 M-P 法作为对比是可行的。计算结果见表 11，VSM- UDEEC 法安全系数和 M-P 法安全系数基本吻合。

表 11 不同节理条件 VSM-UDEEC 与 M-P 法结果对比
Table 11 Results comparison between VSM-UDEEC method and M-P method under different joint conditions

节理	安全系数		VSM-UDEEC 法整体下滑趋势方向/(°)
	M-P 法	VSM-UDEEC 法	
1	1.322	1.318 5	-35.374 9
2	1.364	1.369 3	-34.267 5

5 工程案例

锦屏一级水电站^[18]位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内，是雅砻江干流水能资源最富集的中、下游河段 5 个梯级水电开发的第 1 级。坝址位于普斯罗沟与手爬沟间 1.5 km 长的河段上。拦河大坝为混凝土双曲拱坝，坝高为 305 m，水库库容为 77.6 亿 m³，电站装机容量为 3 600 MW，年发电量为 166.2 亿 kW·h。

坝区两岸山体雄厚，谷坡陡峻，基岩裸露，相对高差千余米，为典型的深切 V 型谷。岩层走向与河流流向基本一致，左岸为反向坡、右岸为顺向坡。左岸无大的深切冲沟，1 820~1 900 m 高程以下大理岩出露段，地形完整，坡度 55°~70°；以上砂板岩出露段坡度 40°~50°，地形完整性较差，呈山梁与浅沟相间的微地貌特征。锦屏一级水电站工程规模巨大，开挖边坡最高达 200~300 m。其复杂的地质条件在全球水电站工程中仍属罕见，坝址区断层、层间挤压错动带、节理裂隙等构造结构面发育，特别是坝区左岸坡体内存在的深部裂缝，走向与岸坡近于平行，陡倾坡外，松弛张开显著，对边坡稳定不利。

基于已有的坝肩左岸边坡材料参数，这里选取了一个模拟左岸高程 1 885 m 以下的潜在滑坡的典型断面，如图 9 所示，共有块体 43 个，各块体材料号（图 9 中标注在块体中）材料参数如表 12 所示。节理切向法向刚度取节理两侧块体弹模最小值的 100 倍，强度参数取两侧块体中的最小值，断层处强度参数为：接触内摩擦角取 16.7°，接触黏聚力取 20 kPa。滑面位置如图 9 中所示，滑面部分位于单元内，部分处于节理断层中。

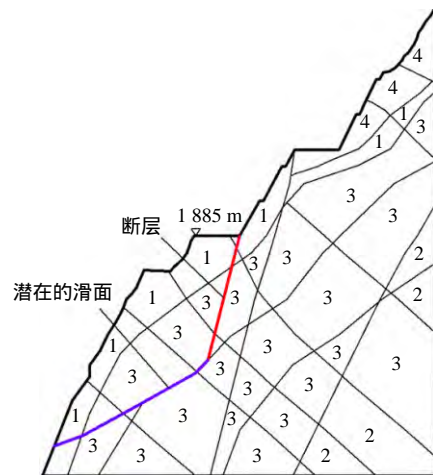


图 9 锦屏 I 级水电站左岸边坡计算模型
Fig.9 Sliding model of the left bank slope of the Jinping-I Hydropower Station

表 12 块体材料参数
Table 12 Material parameters of blocks

材料编号	ρ /(kg/m ³)	E /GPa	c /kPa	φ /(°)	ν
1	2 750	10	800	38.7	0.30
2	2 830	30	1 333	51.0	0.25
3	2 800	15	1 000	45.6	0.25
4	2 750	4	533	27.0	0.35

计算结果见表 13 中节理 1 对应的安全系数 表中也给出了采用 M-P 法计算得到的安全系数以及改进 Sarma 法得到的安全系数。表 13 中改进 Sarma 法与 M-P 法结果非常接近，而 VSM-UDEC 法安全系数明显小于前两者。经过分析发现，断层上方的岩土体存在一定的变形，其对断层下方的潜在滑体有一定的推力，导致下滑力增加，安全系数降低，而传统极限平衡法的刚体假定无法考虑到这一点，因而其计算的安全系数更高一些。当将断层上方岩土体变形参数提高 100 倍、接触黏聚力提高 10 倍以后，断层上方岩土体近似为完整的刚体，安全系数计算结果如表 13 中节理 2 对应的安全系数，VSM-UDEC 法安全系数与修正 Sarma 法以及 M-P 法安全系数比较吻合，验证了上面的分析，表明假设条件相同时，VSM-UDEC 安全系数与传统极限平衡法安全系数差异较小。

表 13 锦屏 I 级水电站左岸边坡安全系数计算结果
Table 13 Safety factors of the left bank slope of the Jinping-I Hydropower Station

节理	安全系数			VSM-UDEC 法
	修正 Sarma 法	M-P 法	VSM-UDEC 法	整体下滑趋势方向 / (°)
1	2.78	2.779	2.42	-40.55
2	2.78	2.779	2.70	-30.28

该滑坡岩体节理复杂，坡体被节理切割成 43 个块体，材料多样，是水利工程中的一种典型边坡。UDEC 能够合理地模拟该类边坡的变形等状态，应力场接近坡体实际应力场，VSM-UDEC 安全系数在块体数较多时仍能得到较好的结果，在实际工程中 VSM-UDEC 安全系数能够考虑坡体变形对边坡稳定性的影响，这是传统极限平衡法做不到的。另外考虑到 UDEC 软件能够模拟水-力耦合、地震、爆破等各种复杂的工况，因此，VSM-UDEC 法应该有较好的应用前景。

6 结 论

(1) 采用离散元方法，在正确获取块体接触应力与单元应力分布之后，提出了基于离散元的边坡

矢量和稳定性分析方法即 VSM-UDEC 法。

(2) 通过理论解及有限元计算结果详细检验了多种情况下 UDEC 接触力及单元应力的计算精度，结果表明，采用离散元计算的接触力及单元应力计算精度较高，接触力相对误差基本上小于 0.2%。

(3) 分别对直线型和圆弧型滑面算例进行了计算，并与相应的理论解及 Morgenstern-Price 法进行了对比，验证了 VSM-UDEC 方法计算安全系数的合理性和准确性。

(4) 利用 VSM-UDEC 法分析了锦屏-级水电站左岸边坡稳定性。结果表明，VSM-UDEC 法较传统极限平衡法能够考虑坡体结构面与变形对潜在滑坡稳定性的影响。

参 考 文 献

- [1] ZIENKIEWICZ O C. The finite element method in engineering science[M]. New York: McGraw-Hill, 1971.
- [2] MOES N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. *International Journal for Numerical Method in Engineering*, 1999, 46: 131 - 150.
- [3] POPE G G. A Discrete element method for analysis of plane elasto-plastic stress problems[J]. *Aeronautical Quarterly*, 1966, 17(1): 83 - 104.
- [4] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]//Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics. Nancy, France: [s. n.], 1971.
- [5] SHI Gen-hua. Manifold method of material analysis[C]//Transactions of the Ninth Army Conference on Applied Mathematics and Computing. Minneapolis, USA: [s. n.], 1991: 51 - 76
- [6] SHI Gen-hua. Manifold method[C]// Proceedings of the First International Forum on DDA and Simulations of Discontinuous Media. Berkeley, California, USA: [s. n.], 1996
- [7] LIN C T, AMADEI B, JUNG J, et al. Extensions of discontinuous deformation analysis for jointed rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(7): 671 - 694.
- [8] Itasca Consulting Group, Inc. UDEC: Universal distinct element code theory and background[M]. Minneapolis,

- USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [9] 雷远见, 王水林. 基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1693 - 1698.
LEI Yuan-jian, WANG Shui-lin. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction method based on UDEC[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1693 - 1698.
- [10] GE X R, LI J, GE X R. Analysis of stability against sliding of a gravity dam by means of microcomputer[C]// Proceedings of International Conference on Education, Practice and Promotion of Computational Methods in Engineering Using Small Computers. Guangzhou: [s. n.], 1987: 474 - 477.
- [11] 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. 成都: 西南交通大学出版社, 1987.
GE Xiu-run. The finite element analysis for the subject of rock mass engineering using the personal computer[C]// Proceedings of the Symposium on Computational Rock and Soil Mechanics. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1987.
- [12] 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.
- [13] GE Xiu-run. The vector sum method: A new approach to calculating the safety factor of stability against sliding for slope engineering and dam foundation problems[C]// Proceedings of the International Symposium on Geo-Environmental Engineering. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009.
- [14] 葛修润. 抗滑稳定分析新方法——矢量和分析法的基
本原理及其应用[C]//岩石力学与工程的创新和实践: 第十一次全国岩石力学与工程学术大会. 武汉: 湖北省科学技术出版社, 2010.
GE Xiu-run. A new method for anti-sliding stability analysis—basic principal of vector sum analysis method and its application[C]//Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, Proceedings of the 11th National Conference on Rock Mechanics and Engineering. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2010.
- [15] GE Xiu-run. Vector sum method: A new method for anti-sliding stability analysis[C]//Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. England: Taylor & Francis Group, 2011.
- [16] 郭明伟. 边坡与坝基抗滑稳定矢量和分析法的研究及工程应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.
GUO Ming-wei. Study on the vector sum analysis method of slope and dam foundation stability against sliding and its engineering application[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [17] 郭明伟, 葛修润, 李春光, 等. 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[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 direction in slope stability analysis based on vector sum method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(4): 577 - 583.
- [18] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 雅砻江锦屏一级水电站坝址区工程边坡地质边界条件及可能失稳模式研究[R]. 成都: 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 2005.
Chengdu Engineering Corporation Limited. The engineering slopes geological conditions and potential landslide mode of the dam area of Jinping first stage water power station on the Yalong River[R]. Chengdu: Chengdu Engineering Corporation Limited, 2005.