

# DDA 法计算边坡安全系数的黏聚力影响分析

马永政<sup>1</sup>, 郑 宏<sup>2</sup>, 朱合华<sup>1</sup>, 蔡永昌<sup>1</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 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:** 在应考虑黏聚力作用的场合下, DDA 法按强度折减技术或其它方法给出的安全系数比传统分析方法如极限平衡法明显偏低。即使采用改变块体划分方式、提高内力场分析精度、增加接触点等方法, 也均不能提高安全系数。通过分析 DDA 接触模型发现, 造成这一结果的根本原因在于 DDA 在处理界面黏聚力  $c$  时采用了与传统分析方法刚塑性模型完全不同的方式。刚塑性模型认为  $c$  是常数。而 DDA 认为一旦界面发生过滑移后  $c$  便为零, 而是否滑移的判断完全依赖于接触力计算的准确性, 接触力不准确导致发生滑移的不正确判断, 使得  $c$  被不合理地消除, 而 DDA 法采用的罚法接触处理以及动力迭代模式是很难保证准确获取接触力的。为此尝试为 DDA 法引入刚塑性模型, 补偿接触点在滑面上的黏聚力作用, 数值实验表明可明显提高 DDA 安全系数值, 而与传统方法有较好的可比性, 该建议措施对于 DDA 正确地进行边坡稳定性安全系数评估是有意义的。

**关键词:** DDA; 边坡稳定性; 黏聚力; 安全系数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1088-07

**作者简介:** 马永政(1975-), 男, 博士后, 主要从事岩土工程数值仿真分析工作。E-mail: xyz\_kent@yahoo.com.cn。

## Effect of cohesion on evaluating slope stability factor of safety by DDA method

MA Yong-zheng<sup>1</sup>, ZHENG Hong<sup>2</sup>, ZHU He-hua<sup>1</sup>, CAI Yong-chang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.

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

**Abstract:** When cohesion needs to be considered in many cases, the factor of safety by the DDA using the strength reduction techniques is considerably underestimated compared with the traditional numerical methods such as the limit equilibrium methods. Some suggestions to improve the solutions are proved to be useless by numerical tests, such as changing the way of meshing blocks, improving the solution of block stress fields by alternative approximation techniques and raising the number of contact points on the boundaries. Through investigating the DDA contact model, it is found that the possible reason for the above phenomenon may be that the DDA deals with cohesion in a way quite different from the rigid plastic model adopted by the traditional limit equilibrium methods. The rigid plastic model regards cohesion as a constant, while the DDA takes the cohesion as zero once the slipping between the blocks boundaries occurs. But judging the occurrence of the slipping fully depends on the accuracy of normal and shear contact forces. If the contact forces are inaccurately evaluated, a falsely judged slipping state leads to the corresponding cohesion to be improperly eliminated. But the penalty method by the DDA for the contact analysis and the dynamic iteration computation are very hard to ensure the exact solution of contact forces. Based on this point, the rigid plastic model is used by the DDA to compensate for possible wrong loss of cohesion. Numerical tests prove the values of the factor of safety can be obviously raised, and they are even comparable with those by the traditional methods. This proves the suggestion of applying the rigid plastic model into the DDA is of significance while evaluating the slope stability factor of safety.

**Key words:** DDA; slope stability; cohesion; factor of safety

## 0 引 言

近年来, 有限元(或 FLAC)强度折减技术在边坡稳定性分析方面的研究应用成为一个新热点<sup>[1-3]</sup>。然而, 由于传统的有限元法基于连续介质力学理论, 且

其所包含的屈服准则如 Mohr-Coulomb 准则或 Drucker

基金项目: 国家自然科学基金项目(90715028)

收稿日期: 2008-04-03

准则等,只适合模拟压剪型破坏,因此,除非对拉损型破坏做特殊处理,否则常规的有限元程序就只能被用来模拟边坡的滑移型破坏。

DDA<sup>[4]</sup>是一种基于严格运动学理论的新型数值方法,可模拟块体平动、转动及变形等,因此除了能够模拟一般的滑移型失稳破坏外,还可模拟象倾倒、崩塌等多种破坏类型的边坡失稳。Hoek 等<sup>[5]</sup>用 DDA 法对比验证了 Goodman-Bray 方法的算例结果,表明 DDA 法可有效确定倾倒边坡的变形失稳模式并在一定意义上确定其安全储备;Yeung<sup>[6]</sup>、孙东亚等<sup>[7]</sup>验证了滑面上块体滑动和倾倒破坏的形式。MacLaughlin 等<sup>[8]</sup>的研究表明,不考虑节理面黏聚力影响的情况下 DDA 边坡稳定性分析结果对比解析解或传统分析方法比较一致,其中包括圆弧形破坏、平面破坏及其它破坏模式的数值结果具有很好的精度,误差均在 5%以内,而且计算表明滑面上条块划分方式对计算结果影响不大。陈光齐<sup>[9]</sup>等研究滚石坠落问题时,对线形位移模式可能导致的体积虚假膨胀进行修正。OHNISHI 等<sup>[10]</sup>采用 DDA 法对滑坡问题进行了系列研究。总之,DDA 法作为一种采用块体模型的非连续性方法,是比连续性方法更适合于模拟边坡各种失稳破坏模式的。

## 1 DDA 安全系数定义的探讨

理论上,DDA 法不仅能模拟各种破坏模式,还应该能计算出合理的边坡安全系数,从而可望比目前应用广泛的针对超静定结构体模型的极限平衡分析法更有优势。DDA 法定义安全系数的方法主要有:①计算所谓极限摩擦角,即不断减少内摩擦角,取得能使滑动体保持临界稳定的最小内摩擦角,如沈振中等<sup>[11]</sup>、SHI<sup>[12]</sup>的研究;②按罚弹簧刚度和嵌入位移量计算接触力,以此计算抗滑力与下滑力的比值,如张国新等<sup>[13]</sup>、WU 等<sup>[14]</sup>的研究。第①类方法通过减少内摩擦角值以获取极限摩擦角,与有限元法等利用强度折减技术获取临界状态原理上是一致的,只是没有考虑对黏聚力的处理。第②类方法利用抗滑接触力与下滑接触力相比求安全系数,这与极限平衡法的做法类似,而且有动力迭代全过程分析,明显区别于静力学的极限平衡法。但计算表明:考虑黏聚力作用时 DDA 无论按哪类方法给出的安全系数都小于传统方法分析结果。例如邬<sup>[14]</sup>采用第②类安全系数定义方法计算同时考虑了  $c$  和  $\phi$  影响,发现对比极限平衡法偏低,认为是滑移块体接触不充分,通过施加锚杆将滑移块体固定在滑面上以提高安全储备值。但总的说,一直以来尚未见文献对这一现象做理论上深入分析解释以及提出解决办法。

本文认为定义临界状态的极限摩擦角类似于材料强度折减技术的思想,因此探讨就按强度折减法对  $c$

和  $\phi$  同时进行折减处理,以计算 DDA 安全系数。首先研究采用改变块体划分方式、提高内力场分析精度、增加接触点等方法,表明均不能提高安全系数。而通过分析 DDA 接触模型发现导致安全系数偏低的主要原因在于 DDA 是动力迭代分析方法,块体间本来存在冲击力影响,一旦发现界面出现过滑移,在随后的迭代计算中就将  $c$  值取为零。尽管这样处理表面上看来反映滑动摩擦特性这一真实的界面力学行为,但由于滑移状态的确定完全依赖于接触力计算的准确性,实际上接触力是难达到理想计算精度的,这会导致并不正确的滑移判断使得  $c$  被不合理地消除,从而滑面上  $c$  值阻力作用迅速消减。而经典的极限平衡法所采用的刚塑性模型或有限元-强度折减中所采用的理想弹塑性模型均假定不管界面是否出项过滑动, $c$  均为常量。在令  $c$  值保持不变并对 DDA 的相应部分略作修改后,安全系数值可大幅提高,仅比经典的极限平衡法略低。

## 2 DDA 接触分析模型

DDA 法采用块体间点-面接触类型,接触约束条件的施加可一般简单地采用罚法,也有研究增量拉格朗日元法等<sup>[15]</sup>,本文仍然在传统罚法接触处理的基础上讨论。接触状态包括张开、闭合锁定和滑移 3 种。首先检索块体所有相互接触信息,并计算初始接触状态,中间步的初始接触状态可根据上一步传递过来,也可以直接在本时间步开始时重新计算。对于张开状态不作处理;对于闭合锁定状态则需施加法向弹簧防嵌入发生以及切向弹簧阻止沿滑面的滑移;而滑移状态时则只需施加法向弹簧,另需要施加滑移摩擦阻力。通过接触迭代计算时开合的变化增删两方向上的弹簧,直到收敛到稳定的接触状态。

设  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  均为较小正数,根据所谓最大位移比率(即最大增量位移与整体区域半高长比值)等参数设定, $d_n$  为法向嵌入距离。点-面接触时如果满足  $d_n > \delta_1$ ,则初始接触状态设为张开,否则直接设为锁定,开合迭代过程中接触状态按如下情况调整:①上一迭代步为闭合, $d_n > \delta_2$ ,则为张开,否则保持闭合;②上一步为张开, $d_n > -\delta_3$ ,则为闭合,否则保持张开。

若上述判断为闭合则进一步考虑切向是否滑移。设接触点考虑黏聚力作用的静摩擦阻力为  $f_{R1}$ ,不考虑黏聚力作用的滑动摩擦阻力为  $f_{R2}$ ,法向接触力  $f_n$  及下滑力  $f_s$ ,是否滑移按如下标准判断:①上一步为锁定状态,若静摩擦阻力小于下滑力即  $f_{R1} \leq f_s$  则变为滑动状态,否则保持锁定状态,若接触点处于拉伸状态,可采用  $f_{R2} \leq f_s$ ;②从上一步张开状态到本步嵌入接触,若  $f_{R2} \geq f_s$ ,则施加切向弹簧锁定,否则为滑动状态;③上一步为滑动状态,则只需判断方向如

果和上一步保持一致,则继续保持滑动状态,否则暂时视为锁定状态,下一步进一步判断滑动是否可持续。

静摩擦力  $f_{R1}$  和滑动摩擦力  $f_{R2}$  定义为

$$f_{R1} = f_n \tan \varphi + c_0 l, \quad (1)$$

$$f_{R2} = f_n \tan \varphi, \quad (2)$$

式中,  $f_n$  为接触点法向接触力,  $f_n = K_n d_n$ ,  $\varphi$  为块体边界材料摩擦角,  $c_0$  为单位黏聚力,  $l$  为接触长度,  $f_s$  为切向位移表达的下滑力,  $f_s = K_s d_s$ , 其中  $K_n$  与  $K_s$  为设定的法向和切向罚弹簧刚度, 为足够大值且一般取  $K_s = K_n / 2.5$ , 而  $K_n$  可取被嵌入材料弹性模量的 10~100 倍, 本文取 40 倍模量值。接触点确定当前状态为滑移状态后, 对于非光滑的摩擦材料, 要新施加或保留滑动摩擦阻力, 如图 1 所示从锁定到滑移状态, 取消切向弹簧, 并施加滑动摩擦阻力。如果为拉伸状态, 则施加  $f_{R2}$ , 否则施加保留黏聚力作用的  $f_{R1}$ 。

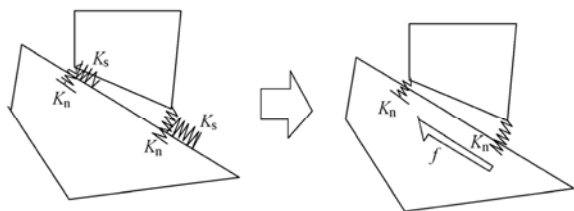


图 1 从锁定到滑移状态的处理

Fig. 1 Treatment of contact states

### 3 稳定性判断准则

关于失稳破坏判据分析, 一般用位移不收敛、局部最大位移准则, 广义剪应变及塑形区贯通可视化准则等作为判据。DDA 是动力分析方法, 能再现局部的或整体渐进破坏的失稳过程, 与极限平衡法、有限元强度折减法等的判断准则具体上应该还是有区别的, 本文建议根据块体参考点的位移和加速度时程收敛与否进行稳定性判断。

#### (1) 块体参考点位移时程收敛

参考点可取块体的形心, 也可取块体任意位置如某顶点, 本文建议直接取块体形心。形心位移增量的一次模量见下式, 其中位移  $u_0$  和  $v_0$  为刚体运动量, 对于其他参考点位置, 可以考虑增加转动量  $r_0$ 。人为设定阈值  $\varepsilon$ , 若  $\|\Delta u\| < \varepsilon$  则表示收敛, 否则总的位移分量  $u_x$  或  $u_y$  大于人为设定阈值  $\varepsilon_{\max}$  视为破坏。

$$\|\Delta u\| = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}. \quad (3)$$

#### (2) 块体参考点加速度时程趋 0

由于 DDA 迭代计算过程中会累计很小变形, 导致按准则 (1) 有时似乎很难收敛, 甚至出现迭代步次过多使得累计的总位移分量仍可能大于设定阈值  $\varepsilon_{\max}$ , 但是系统本身可能是稳定的。因此必须检查块

体是否有明显的惯性阻尼, 可以根据加速度模量趋 0 进行判断。对于线性位移模式的 DDA, 计算时可只考虑刚体运动加速度, 忽略变形加速率影响, 即

$$\|a\| = \sqrt{\ddot{u}_0^2 + \ddot{v}_0^2 + \ddot{r}_0^2}. \quad (4)$$

由于 DDA 时间步积分时采用匀加速度假设, 可由分量速度的增量及时间步长直接获得各分量加速度即  $a_i = \Delta v_i / \Delta t$ 。人为设定阈值  $\varepsilon'$ , 若  $\|a\| < \varepsilon'$  则表示收敛。

理论上讲应根据上述原则分析所有块体是否稳定, 但实际上整体分析时选代表性的一个或多个块体就可以, 局部分析时则直接取局部关键块体。

## 4 黏聚力影响分析

当考虑黏聚力时, 以下数值试验表明, DDA 所给出的强度折减安全系数比传统方法是偏低的。

### 4.1 简单的滑块体稳定分析

如图 2 示, 滑块 A 为边长 0.4 m 的等腰直角三角形, 滑面坡角  $45^\circ$ , 假设有任意足够长度, 重度  $\gamma$  为  $2.8 \text{ N/m}^3$ , DDA 法计算得到的极限摩擦角约为  $45.1^\circ$ , 与理论解很近似。而考虑黏聚力作用, 若取接触边节理材料摩擦角  $30^\circ$ , 黏聚力约为 0.12 N 的临界状态, 计算表明对两材料参数折减为 0.87 后保持稳定, 对应的极限摩擦角  $33.6^\circ$ , 对应黏聚力约为 0.14 N, 小于实际的安全系数解析值 1.0。

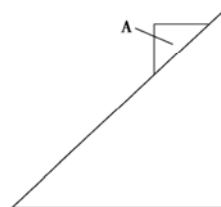


图 2 DDA 滑块系统模型

Fig. 2 DDA sliding block model

### 4.2 极限稳定的潜在圆弧型破坏边坡的分析

边坡高 10 m, 坡面角  $\alpha=45^\circ$ , 边坡材料黏聚力  $c=12.38 \text{ kPa}$ , 摩擦角  $\varphi=20^\circ$ , 重度  $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ , 弹性模量 10 MPa, 泊松比  $\mu=0.35$ , 此例按弹塑性有限元法计算的安全系数为 1.0 (参见文献[3])。DDA 按如下块体模型计算, 见图 3。

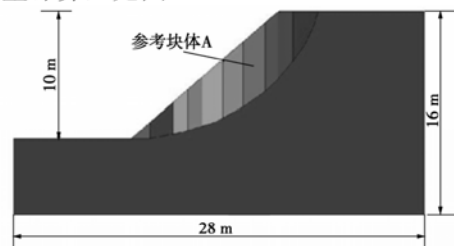


图 3 圆弧型破坏边坡的 DDA 块体模型

Fig. 3 DDA block model for the circular sliding slope

参考块体 A 形心的 x 方向位移时程和加速度时程

如图 4 所示, 可看出  $F_s=0.69$  时, 个别时步上加速度大可能是迭代计算过程接触调整引起的, 但是加速度时程总体上是接近 0 的。而  $F_s=0.7$  时加速度总体上要略大于 0, 表示块体是不太稳定的, 而  $F_s=0.75$  时, 加速度总体上明显大于 0, 块体系统迅速失稳下滑。

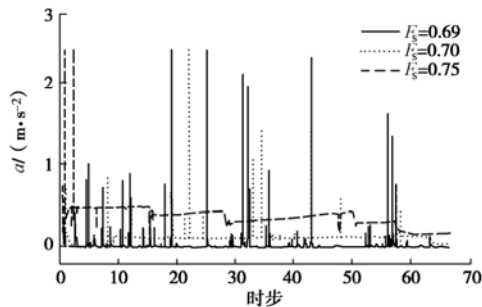


图 4 加速度时程曲线

Fig. 4 Curves of acceleration vs. time

从  $x$  方向位移时程图 5 可看出,  $F_s=0.69$  时, 总位移  $x$  方向分量变化很小, 基本上处于收敛, 而  $F_s=0.7$  时, 累计位移大于 0.15 m, 应视为已发生滑移, 而  $F_s=0.75$  时, 则发生明显的大滑移。

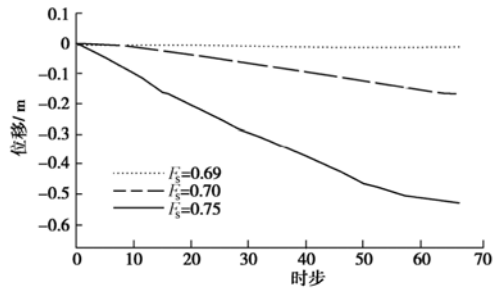


图 5  $x$  方向位移时程曲线

Fig. 5 Curves of  $x$ -displacement vs. time

根据上述分析, 安全系数  $F_s$  可定为 0.69, 即对应极限摩擦角和黏聚力分别为  $27.81^\circ$  和 17.9 kPa, 因此 DDA 方法所给出的安全系数明显偏小,  $F_s>0.69$  时, 失稳破坏计算结果可见图 6。

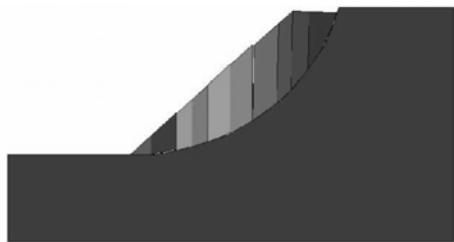


图 6 圆弧形失稳破坏分析结果

Fig. 6 DDA solution of the slope circular sliding

通过在块体上布置插值点 (计算模型见图 7), 按无网格位移函数计算块体应力场<sup>[16]</sup>, 块体边界上布置的接触点更多, 但得到的安全系数仍然偏低, 仅为 0.61。表明提高块体内力场计算精度、在块体边界上多布置接触点并不能提高安全系数计算值。另外采用不同的块体划分方式也不能改善安全系数计算结果,

在此不一一举例。

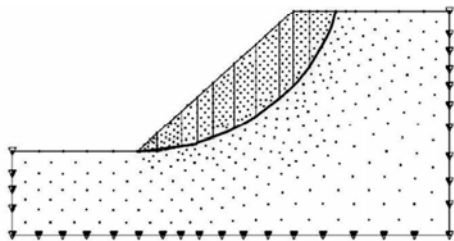


图 7 布置无网格节点的 DDA 块体模型

Fig. 7 DDA block model with meshfree nodal distribution

无网格 DDA 法计算得到的整体下滑后块体变形场及位移变化结果见图 8。

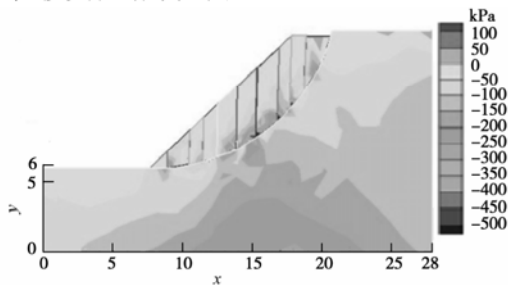


图 8 无网格 DDA 法分析结果 (包括最大主应力场)

Fig. 8 Solution by meshfree DDA method (including major principal stress fields)

## 5 修正处理及算例分析

基于前述分析, 本文建议在 DDA 程序中在滑移状态施加摩擦力作用时, 令  $f_{R2} = f_{R1}$  以充分考虑黏聚力的影响。也就是说与极限平衡法或有限元强度折减法类似, 采用完全的刚塑性模型代替原来的  $c$  值为零的处理。

重新计算 4.2 节题例, 安全系数大幅度地提高为 0.92 (比精确值 1.0 低 8%), 笔者认为这是可以得到解释的。我们知道 DDA 能够较真实地反映出边坡的渐进失稳过程, 在这个过程中首先滑动的那些块体势必会对那些尚未滑动或速度较慢的块体以冲击力, 这种冲击力是无法在准静态的有限元法或极限平衡法中得以模拟的, 因此 DDA 给出的安全系数要低于极限平衡法。

再以一具体工程算例为参考, 沙沟溪西居民点高切坡是三峡库区湖北省高切坡防护工程第六标段巴东 I 标段高切坡的一处, 高切坡内无断层通过, 其主要的构造为裂隙, 极其发育, 岩体受裂隙的影响极破碎, 呈块状或碎块状, 碎裂结构, 其一典型剖面见图 9, 下层为中等风化泥质粉砂岩, 上层为强风化泥质粉砂岩, 以图示左下角为坐标原点, 层间序点坐标位置如 (229.90, 16.83; 180.83, 16.83; 165.87, 18.03; 146.92, 20.05; 128.14, 24.43; 111.47, 33.61; 95.46, 43.64; 80.56, 55.50; 65.65, 67.79; 51.09, 79.82; 36.20, 92.39; 22.08, 103.77; 17.82,

107.78; 8.08,116.97; 0.0, 124.86), 切坡外轮廓线主要序  
点坐标 (0.0,153.0; 46.0,118.39; 59.0,97.62; 60.27,82.22;  
117.24,52.0; 117.24,34.0; 170.0,33.0; 171.5, 24.5; 179.5,  
24.5; 180.83, 16.83), 各岩层材料参数见表 1。

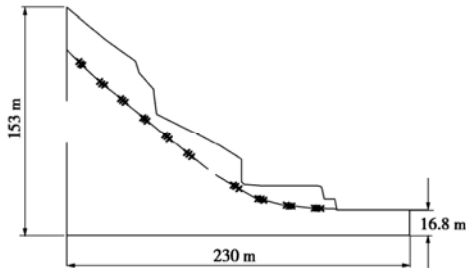


图 9 沙沟溪西居民点高切坡示意图

Fig. 9 High-cut slope at the residential area of western Shagouxi

表 1 主要岩层材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters for rockmass layers

| 名称            | 重度<br>/(kN·m <sup>-3</sup> ) |    | 黏聚力/kPa |      | 内摩擦角/(°) |      |
|---------------|------------------------------|----|---------|------|----------|------|
|               | 天然                           | 饱和 | 天然      | 饱和   | 天然       | 饱和   |
| 强风化泥质<br>粉砂岩  | 22                           | 23 | 28      | 25.2 | 25       | 22.5 |
| 中等风化泥<br>质粉砂岩 | 23                           | 24 | 800     | 720  | 35       | 31.5 |

注:表中数据参考湖北省鄂西地质勘察院《三峡库区湖北省巴东县沙沟溪居民点高切坡工程地质勘察报告》。

建立 DDA 块体模型时,下层岩体视为单一块体,而上层岩体由于破碎程度严重,拟以假想的两组节理(分别为垂直方向和倾斜 135°方向)进行切割得到离散块体模型见图 10 所示。

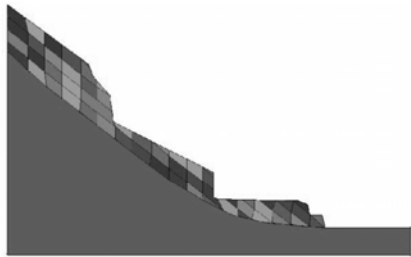


图 10 高切坡 DDA 模型

Fig. 10 DDA model for high-cut slope

界面摩擦角取两岩层材料的均值,黏聚力取较低的强风化泥质粉。计算发生滑移后的块体位形见图 11,安全系数计算结果见表 2。可见调整后的安全系数有明显的提高,已经能够和极限平衡法的计算结果相比拟,但仍比严格的 M-P 法低。

表 2 安全系数计算结果对比

Table 2 Results of safety factor by different numerical methods

| 工况 | Bishop<br>法 | Janbu 法 | M-P 法 | 原<br>DDA | 修正后<br>DDA |
|----|-------------|---------|-------|----------|------------|
| 天然 | 1.454       | 1.217   | 1.317 | 0.71     | 1.23       |
| 暴雨 | 1.273       | 1.066   | 1.151 | 0.63     | 1.12       |

注:天然和暴雨工况条件分别取表 1 中岩层材料天然或饱和条件下对应的

岩层材料参数。

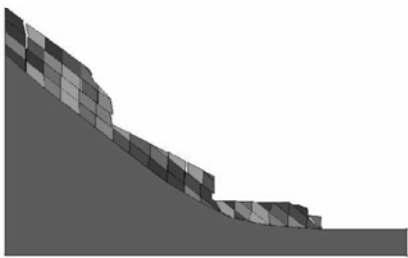


图 11 DDA 坡体滑移破坏分析结果

Fig. 11 DDA solution for the slope sliding phenomenon

## 6 讨 论

(1) DDA 法和其他离散元法一样,提供复杂块体系统中任意接触块体间准确的法向和切向力结果实际上是颇为困难的,特别对一般采用的罚法而言,其弹簧参数的选取易显著影响接触力分析结果(可参考文献[10])。因此尽管该方法是基于严格的莫尔-库仑强度理论分析判断块体界面破坏的,但往往缺乏正确的法向切向接触力这一基本前提条件。这是本文建议用刚塑性模型代替  $c$  值跌落模型的依据所在。其他改进的接触算法能否更理想地计算出接触力,对于安全系数计算的影响如何,尚值得进一步探讨。

(2) DDA 法是一种动力迭代分析方法,对于准静力问题也适应。在动力迭代积累接触力以平衡惯性力作用的过程中,块体间相互冲撞会产生小的位移变化,而这可能只是一种数值误差,但累计足够多的迭代步由量变到质变,可能导致块体系统较大的位移变化形成形式上的失稳破坏。曾有专家建议消除这种接触力未发展足够之前,迭代过程产生的小位移,但究竟是否应该消除以及如何处理尚值得探讨。

(3) 在发展更有效的接触分析算法,能获取正确的法向切向接触力的前提下,可进一步考虑采用比刚塑性模型或  $c$  值完全取零更合理的跌落软化模型,以等效局部界面破坏特性,以及反映实际的非脆性界面破坏特性。具体处理办法也需要研究讨论。

## 7 结 语

DDA 法作为一种动力迭代分析方法,模拟边坡失稳破坏的各种模式是合适方便的。DDA 法计算边坡安全系数的方法目前主要有计算临界摩擦角的方法以及通过抗滑接触力与下滑接触力相比的方法,前者原理上类似于强度折减技术。忽略黏聚力影响时,DDA 所给出的安全系数结果理想,与解析解或传统分析方法比较一致;但当考虑黏聚力作用时,所给出的安全系数则明显偏低。

本文分析表明,造成这一结果的可能的的主要原因之一是 DDA 并没有采用传统分析方法所利用的刚塑

性模型, 后者将  $c$  值一直保持常量, 而 DDA 则将所有出现过滑移的界面的  $c$  值均取为零, 表面上是正确的界面力学行为, 但实际上通过接触力判断滑移状态并不一定准确以及块体间动力冲击的影响, 这可能严重低估  $c$  的作用。因此建议在 DDA 中引入刚塑性模型, 即令  $c$  在整个滑移过程中均保持不变, 这样安全系数计算值可以更为合理。在应用 DDA 法计算边坡稳定性安全系数时建议考虑利用该处理办法。

### 参考文献:

- [1] 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 Chuo-fen, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 626 - 628. (in Chinese))
- [2] 郑颖人, 赵尚毅, 宋雅坤. 有限元强度折减法研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2005, 3: 1 - 6. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, SONG Ya-kun. Advance of study on the strength reduction finite element method[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2005, 3: 1 - 6. (in Chinese))
- [3] ZHENG H, LIU D F, LI C G. Slope stability analysis based on elasto-plastic finite element method[J]. International Journal of Numeric Method of Engineering, 2005, 64(14): 171 - 188.
- [4] SHI Gen-hua. Discontinuous deformation analysis—a new numerical model for the statics and dynamics of block systems[D]. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California, 1988.
- [5] HOEK E, BRAY J W. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1983: 183 - 193. (HOEK E. BRAY J W. Rock slope engineering[M]. LU Shi-zong, trans. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983: 183 - 193. (in Chinese))
- [6] YEUNG M R. Application of Shi's discontinuous deformation analysis to the study of rock behavior[D]. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California, 1991.
- [7] 孙东亚, 彭一江, 王兴珍. DDA 数值方法在岩质边坡倾倒破坏分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 39 - 42. (SUN Dong-ya, PENG Yi-jiang, WANG Xing-zhen. Application of DDA method in stability analysis of topple rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 39 - 42. (in Chinese))
- [8] MACLAUGHLIN M, SITAR N, D. DOOLIN, T. Abbot Investigation of slope-stability kinematics using discontinuous deformation analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38: 753 - 762.
- [9] 陈光齐. 利用改进的 DDA 进行边坡上落石运动的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 926 - 931. (CHEN Guang-qi. Numerical modelling of rock fall using extended DDA[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 926 - 931. (in Chinese))
- [10] OHNISHI Y, NISHIYAMA S. Recent insights of analyses using discontinuous methods in rock engineering in Japan[C]// Proceedings of 8th International Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulations of Discontinuous Media, China, 2007: 15 - 26.
- [11] 沈振中, 大西有三. 基于非连续变形分析的水库岩体边坡稳定分析方法[J]. 2004(3): 117 - 123. (SHEN Zhen-zhong, OHNISHI Y. Stability analysis method for reservoir rock slope based on discontinuous deformation analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 117 - 122. (in Chinese))
- [12] SHI G H. Applications of discontinuous deformation analysis (DDA) to rock stability analysis[C]// Proceedings of 8th International Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulations of Discontinuous Media, China, 2007: 1 - 14.
- [13] 张国新, 武晓峰. 裂隙渗流对岩石边坡稳定的影响——渗流、变形耦合作用的 DDA 法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1269 - 1275. (ZHANG Guo-xin, WU Xiao-feng. Influence of seepage on the stability of rock slope-coupling of seepage and deformation by DDA method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1269 - 1275. (in Chinese))
- [14] WU Ai-qing, LI Ding-xiu, LU bo. Validation for rock stability kinematics and its application to rock slope stability evaluation using discontinuous deformation analysis[C]// Proceedings of 8th International Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulations of Discontinuous Media, China, 2007: 27 - 31.
- [15] AMADEI B, LIN Chihsen—Jerry Dwyer. Recent extensions to the DDA method[C]// Proceedings of 1st International Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulations of Discontinuous Media. Albuquerque: TSI Press, 1996: 1 - 30.
- [16] 马永政, 郑宏, 李春光. 应用自然邻接点插值法的块体非连续变形分析[J]. 岩土力学, 2008, 19(1): 1 - 6. (MA Yong-zheng, ZHENG Hong, LI Chun-guang. Applying natural neighbor interpolation to discontinuous deformation analysis of block system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 19(1): 1 - 6. (in Chinese))