

DOI: 10.11779/CJGE201611016

非连续变形分析方法 (DDA) 剪切机制研究

龚文俊^{1, 2, 3}, 王运生³, 罗永红³

(1. 北京航空航天大学土木工程系, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 00048;

3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 以倾斜板上的块体稳定对象, 针对摩擦性材料, 对 DDA 剪切机制开展了研究工作。研究表明, 即使当接触面摩擦强度略大于临界摩擦角 φ_{cr} 时, 在一个边边接触中常会出现锁定与滑动两种不同的状态。在后续计算过程中, 由于这种状态会受到阻止, 会有不合理的能量产生。这种能量有可能会产生导致块体难以稳定。DDA 可以需要选择适当的接触刚度来控制这种能量的量级, 并最终使块体理论临界摩擦角 φ_{cr} 附近稳定。进一步研究表明, 出现这一结果主要是由于单独对边边接触上的两个角边接触进行抗剪分析。基于此, 提出一种新的改进方法, 将边边接触中的两个角边接触进行共剪分析, 即将两个角边接触上的剪切力之和与摩擦阻力之和进行分析。测试结果表明, 该方法不会受到罚弹簧值和块体弹模的影响。所分析的临界摩擦角与理论值非常接近。

关键词: DDA; 临界摩擦角; 罚弹簧; 共剪分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)11-2059-10

作者简介: 龚文俊(1985-), 男, 博士, 主要从事岩质边坡动力响应研究工作。E-mail: gwj6641118@163.com。

Investigating shear mechanics of discontinuous deformation analysis

GONG Wen-jun^{1, 2, 3}, WANG Yun-sheng³, LUO Yong-hong³

(1. Department of Civil Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, China

Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100048, China; 3. State Key laboratory of Geohazard Prevention and

Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Using a classical case, a block on an incline, shear mechanics of discontinuous deformation analysis (DDA) for frictional interface is especially investigated. The results reveal that two contact states are commonly emerged in one edge-to-edge contact, even when the frictional angel is slightly above the theoretical critical friction angle φ_{cr} . Owing to that the state of the block will be prevented in the following processes, unreasonable energy will be inevitably produced, which will also make the block hard to get steady. When the Young's modulus of the block is fixed, carefully selecting a penalty value is required for DDA to stabilize the block when the friction angle is slightly above φ_{cr} . A further investigation reveals the main cause is that individually analyzing the two vertex-to-edge contacts in one edge-to-edge contact. Instead individually analyzing the two contacts in one edge-to-edge contact, this study introduces an edge-to-edge treatment to overcome the deficiency of the original DDA. The test results indicate that the new improved DDA can handle well shear problems with high accuracy, and the penalty value and Young's modulus of the block have little influence on its accuracy.

Key words: DDA; critical friction angle; penalty value; edge-to-edge treatment

0 引言

数值模拟方法, 如连续方法和离散方法, 常被用来对节理岩体进行力学分析。由于能够精确的反应出完整岩质块体应力分布和变形行为, 连续方法 (FEM 和 FDM) 早期常被用来对岩质块体进行力学分析。然而节理岩体, 其力学属性常由沿结构面的位移所控制^[1]。连续方法在这一领域应用范围极为有限^[2]。相比之下, 非连续方法, 如离散单元法 (UDEEC) 和非连续变形分析 (DDA), 是能够非常有效地处理结构面问题的

数值方法。

离散单元法是一种显示算法。相比之下, DDA 是一种隐式算法, 并因此克服了离散单元法的两个不足运动过程的数值方法^[3], 在岩土工程领域得到了大量的应用^[4-5]。DDA 能否精确判断结构面上的接触力对于其能否精确反映岩体的力学性质极为关键。为了避

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目 (成都理工大学) (SKLGP2014K012)

收稿日期: 2015-09-23

免原 DDA 程序中罚弹簧和“开—闭迭代”对接触计算的影响,Zheng 等^[6]将互补算法引入 DDA 中,并进一步改进和完善力的算法^[7-8]。Doolin 等^[9]通过系统的研究工作,研究表明只要罚弹簧取值在一个合理的范围内,其所得出的接触力是能够满足精度要求的。对比分析倾斜台上块体在动载、静载情况下的运动状态,认为 DDA 能够精确处理接触面的力学问题^[9-12]。然而所有这些工作并没有对 DDA 处理结构面临界破坏的精确性进行过验证。Yeung^[13]仅仅对静态 DDA,即每个计算步之初速度为零,分析临界状态的精确性进行了验证工作,然而更有意义的动态 DDA 分析却并没有得到验证。Maclaughlin^[10]验证了动态 DDA 能够精确分析出摩擦性结构面的临界状态,然而这一结论却无法对 DDA 在处理黏性结构面时,出现较大误差做出合理的解释^[14-16]。由于对 DDA 处理结构面的力学机制研究不足,在提高 DDA 处理黏性结构面力学精度方面,不同学者提出了不同的改进方式。而这些方法是否合理也需要做进一步的验证工作。

基于此,本文以摩擦性接触面为例,对 DDA 的剪切机制进行深入研究,揭示其基本原理,并试探性地提出一种合理的处理抗剪破坏的方法,以期日后实现 DDA 更精准地处理包括黏性结构面在内的剪切破坏提供科学的依据。本文将将以倾斜台上块体的剪切破坏为例进行相关研究工作。

1 非连续变形分析 (DDA)

在处理岩质工程问题在,DDA 将其表达为离散块体的组合。该方法与 FEM 一样,将位移视为未知量,并通过解平衡方程来得到位移。方程是基于考虑块体运动和相互作用的动力平衡建立的。每个块体的位移方程是二维情况下位移的一阶近似:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0)/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_0 & v_0 & r_0 & \varepsilon_x & \varepsilon_y & \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 (x, y) 为块体内部任意点为位置坐标; (u, v) 为点 (x, y) 的位移; (x_0, y_0) 为块体重心的位置坐标; (u_0, v_0) 是重心 (x_0, y_0) 的刚体位移; r_0 是块体绕转动中心 (x_0, y_0) 的转动角,是用弧度给出的; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 和 r_{xy} 分别为块体的法向和切向应变。

表 1 块体材料参数和 DDA 计算参数

Table 1 Physical parameters of block on incline and parameters for DDA									
块体材料参数						DDA 计算参数			
重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa	张强度 /MPa	罚弹簧 /(MN·m ⁻¹)	时间步/s	最大允许位移比	动力控制系数
0.1	200	0.25	30	35	20	1×10 ⁴	0.04	0.005	1

利用单纯形积分方法,DDA 在势能变分基础上能够得到刚度矩阵,惯性力和力矢量的解析解。

DDA 块体中相互作用是靠接触来实现的,接触需满足“无张拉无嵌入”原则。接触是通过在法向和切向应用刚性弹簧或在滑动方向应用摩擦力来实现的。如果块体间无张拉和相互滑动,则在接触中施加法向和切向弹簧来将其锁定。如果块体处于分离或张拉状态,锁定弹簧将被去除。DDA 接触一般有 3 种状态,即张开、滑动和锁定,在程序中分别用数字 0, 1, 2 表示。DDA 中块体之间的接触判断是通过开闭迭代来实现的。

DDA 中共有 3 种接触方式,如图 1 所示。

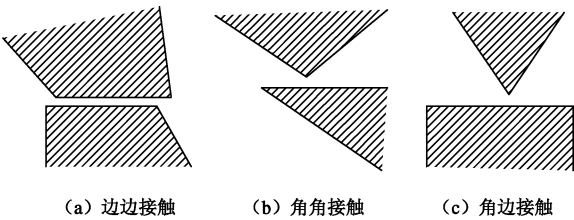


图 1 二维 DDA 的三轴接触方式
Fig. 1 Three contact types in 2D-DDA

2 对 DDA 的临界剪切破坏进行测试

2.1 计算方案

本文将采用一个简单的例子进行测试工作,即倾斜板上块体的临界剪切破坏进行分析。如图 2 所示。

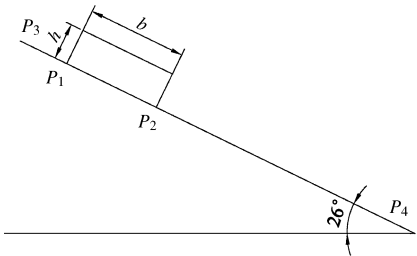


图 2 计算案例:块体靠在 26° 的倾斜台上
Fig. 2 A single block on a plane inclined at 26°

该台面倾斜角度为 26°,选取 3 种不同尺寸的块体。这些块体宽度尺寸固定 $b=8.0\text{ cm}$,高度 h 分别为 5, 7.9, 10 cm。为简便,本文将其分别标记为①、②、③号块体。

块体与倾斜台接触面为摩擦接触,无黏聚力。材料参数和 DDA 计算参数见表 1。

在处理边边接触问题时, DDA 通常用两个角边接触来等效代替。边边接触上的作用力则按一定规律集中分布到两个角边接触上^[13]。当接触面上的摩擦角 φ 小于倾斜台倾角 a 时, 上、下角边接触所分法向力 N_U 和 N_L 分别为

$$N_U = W \cos a \left(\frac{1}{2} - \frac{h}{2b} \tan \varphi \right), \quad (2)$$

$$N_L = W \cos a \left(\frac{1}{2} + \frac{h}{2b} \tan \varphi \right). \quad (3)$$

当接触面上的摩擦角 φ 大于倾斜台倾角 a 时, 上、下接触上的法向力 N_U 和 N_L 分别为

$$N_U = W \left(\frac{1}{2} \cos a - \frac{h}{2b} \sin a \right), \quad (4)$$

$$N_L = W \left(\frac{1}{2} \cos a + \frac{h}{2b} \sin a \right). \quad (5)$$

式中, W 是块体的重量。DDA 中结构面破坏采用莫尔库仑强度准则, 即

$$f_s > cl/2 + f_n \tan \varphi, \quad (6)$$

式中, l 为接触面的长度, c 为黏聚力, f_n 和 f_s 分别为法向力和剪切力。

值得关注的是, DDA 判断接触面抗剪破坏时, 是上、下两个接触单独进行判断。

2.2 计算测试

本文通过不断改变摩擦角的方式, 来确定 DDA 计算模型稳定所需的临界摩擦角。计算结果为: ①、②、③号块体所需的临界摩擦角 φ_{cri} 分别为 29° , 30° , 29° , 与相对应理论所需的摩擦角 26° 相比都偏大。本文进行了 3 种不同摩擦角情况下的 DDA 的计算过程对比分析。一种是 24° 情况 (低于理论临界值), 这一情况计算结果和过程已经被大多数学者验证是正确的^[9-13]。一种是 27° (高于理论临界值, 低于 DDA 所需临界值), 而另一种就是 DDA 临界值 φ_{cri} 。以①号块体计算过程为例, 图 3~5 分别为摩擦角为 24° , 27° , 29° 情况下的计算过程。(图中 F_N , F_S 分布为边边接触上的法向力和切向力, 即两个角边接触上法向力之和, 切向力之和。 η 为上、下接触状态只差。共有 -1, -2, 0, 1, 2 五种取值情况, 其中 0 为上、下接触状态相同情况)。

与摩擦角为 24° 和 29° 时不同, 当摩擦角为 27° 时, 上、下接触上的剪切力和法向力都出现明显的振荡。边边上的法向力 F_N 和切向力 F_S 也发生了明显的振荡, 即导致边边接触上力的错误判断。值得关注的是每次剪切力振荡发生时, 块体的惯性力也会出现异常的跳动。而这也意味着在振荡过程中有大量的不合理能量产生, 这一能量似乎不易散去, 块体不断地挪

动产生位移。

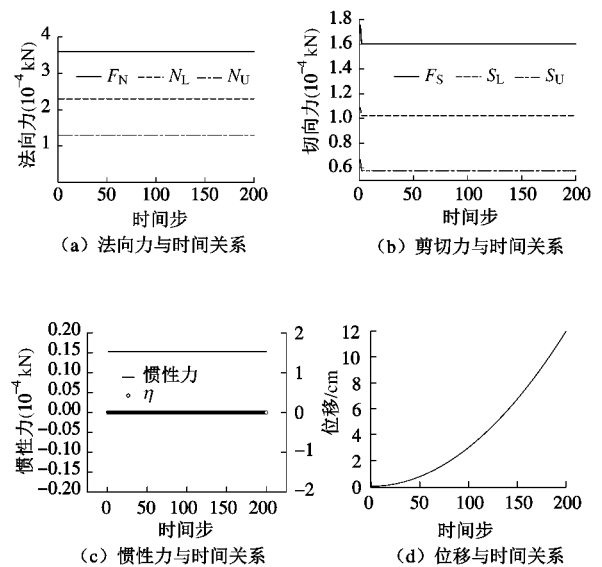
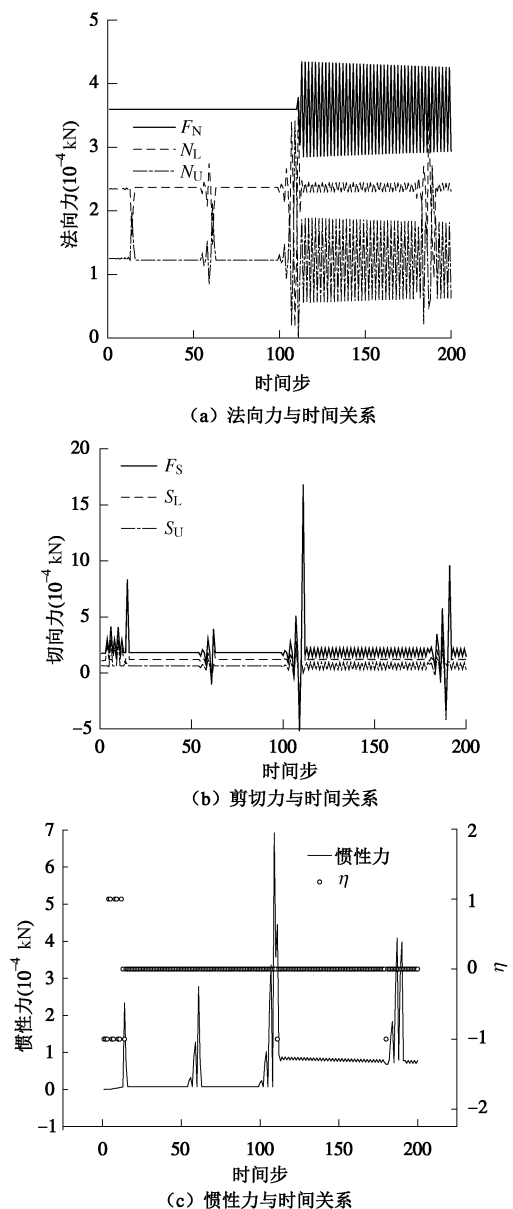


图 3 ①号块体的 DDA 计算过程 ($\varphi = 24^\circ$)

Fig. 3 Calculating processes of DDA for block ① ($\varphi = 24^\circ$)



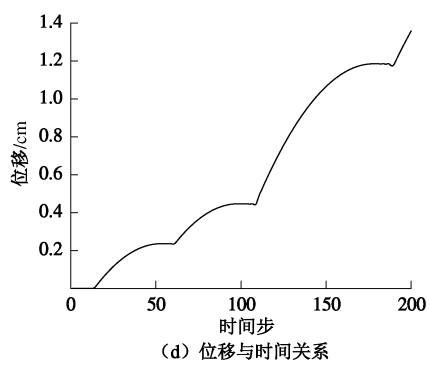
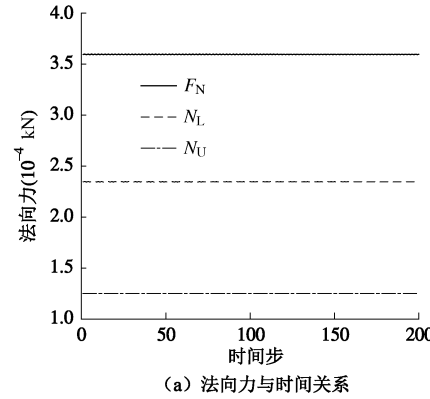


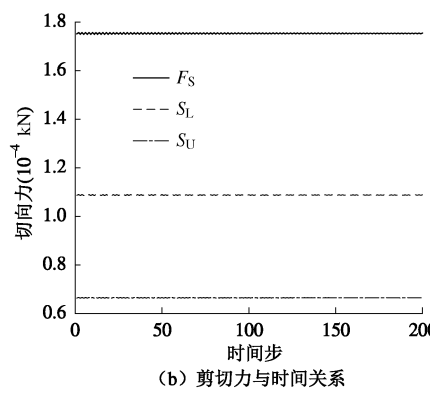
图 4 ①号块体的 DDA 计算过程 ($\varphi = 27^\circ$)

Fig. 4 Calculating processes of DDA for block ① ($\varphi = 27^\circ$)

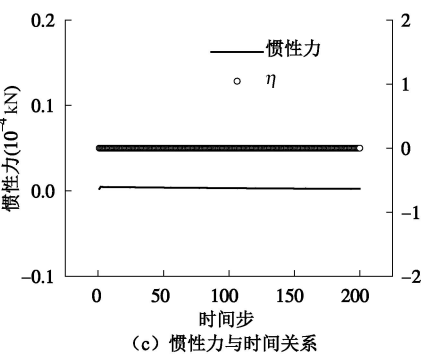
通过观察上、下接触状态之差 η 与惯性力随时间步变化关系时发现,在不合理能量产生之前,计算之初,出现力 η 不为零的现象。一个为锁定状态,一个为滑动状态。



(a) 法向力与时间关系



(b) 剪切力与时间关系



(c) 惯性力与时间关系

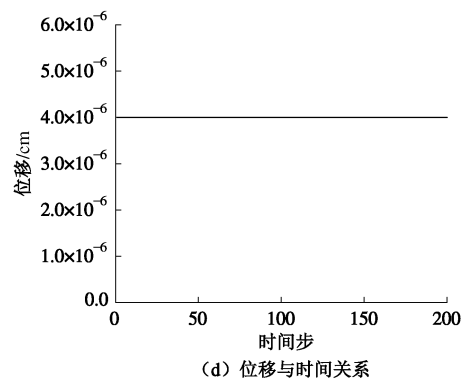
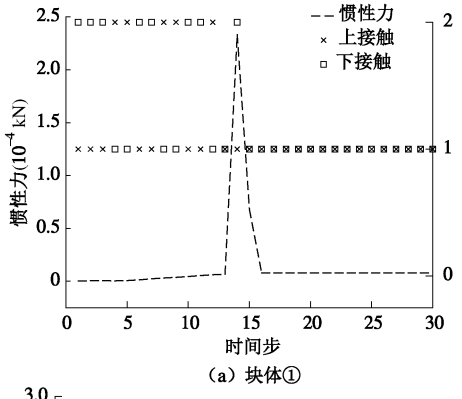


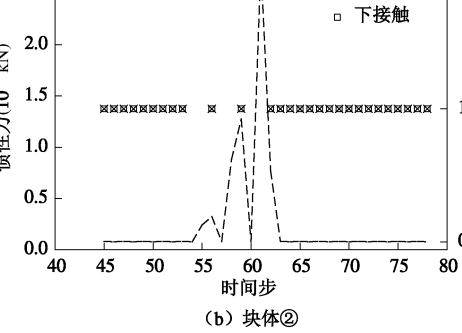
图 5 ①号块体的 DDA 计算过程 ($\varphi = 29^\circ$)

Fig. 5 Calculating processes of DDA for block ① ($\varphi = 29^\circ$)

将上、下接触状态与惯性力跳动进行比对时发现 (图 6),当惯性力振荡强烈时,上、下接触状态在锁定和滑动之间交替变换。上、下接触可能处于不同状态 (图 6 (a)),也可能处于相同状态 (图 6 (b))。



(a) 块体①



(b) 块体②

图 6 上、下接触状态与惯性力跳动之间的关系
Fig. 6 Relation between oscillation of jump of inertia force and upper and lower contact states

对比分析可以做出如下推断,由于初始步处于滑动状态的接触在计算过程中受阻,导致不合理能量的产生。而这一能量的产生将致使处于锁定状态的接触剪切破坏。在后续计算过程中,两个角边接触在锁定与滑动状态之间交替变换。这一变换又会增加不合理的能量,致使能量不易散去,块体将不停地运动。

因此,DDA 初始步接触状态判断极为关键。

Doolling 等^[9]研究表明,接触刚度对 DDA 的计算

精度具有一定的影响。本文设计了两种计算方案来对其影响进行测试, 以块体①为例。

计算方案一: 在界面摩擦角为 27° 情况下, 选择 3 种不同的接触刚度, 1×10^3 , 2×10^3 , 5×10^3 MN/m。其计算结果如图 7 所示。

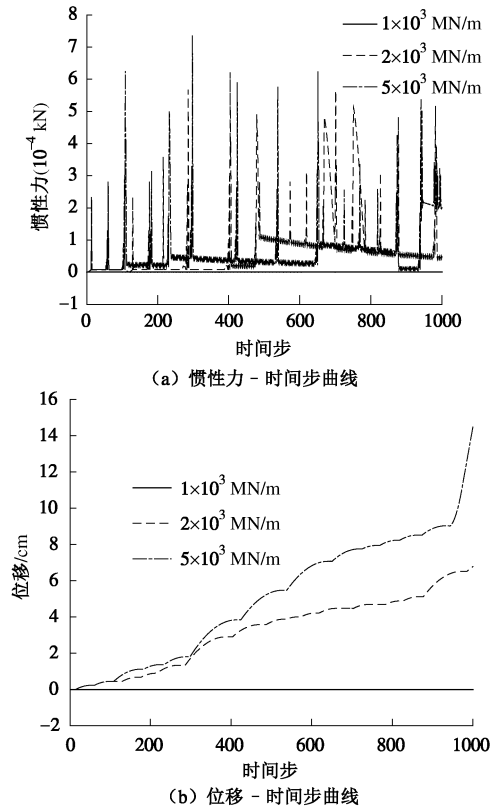


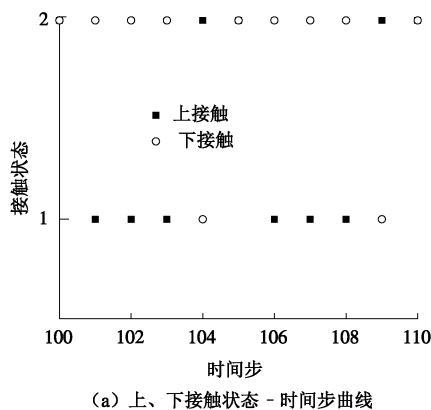
图 7 不同弹簧刚度情况下 DDA 计算结果

Fig. 7 Calculating processes of DDA for different penalty values

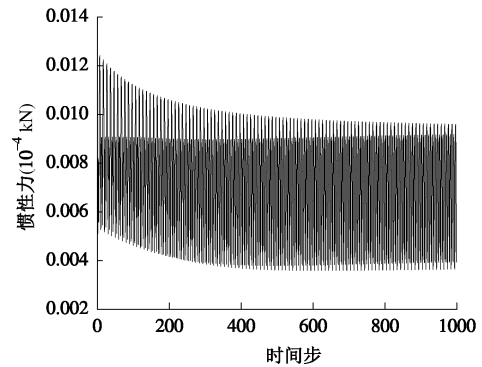
从图 8 可以看出, 当罚弹簧值为 1×10^3 时, 块体基本是处于稳定的, 其滑移量与其他刚度情况下的滑移量可以区分开。这一结果与 Maclaughlin^[10]给出的结果是吻合的。

同样将罚值为 1×10^3 情况下, 上、下接触状态与惯性力进行比对。

计算结果表明, 其上、下接触状态任然在不断的交替变化, 惯性力在不停的跳动。由于惯性力跳动范围极小, 块体蠕动位移小。



(a) 上、下接触状态 - 时间步曲线

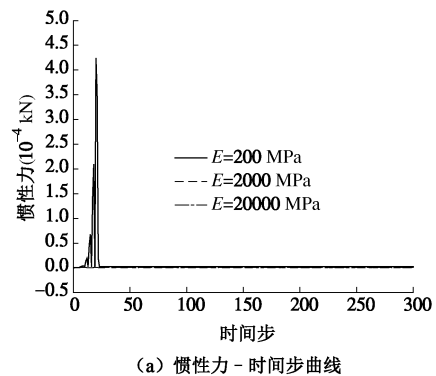


(b) 惯性力 - 时间步曲线

图 8 罚值为 1×10^3 情况下计算过程

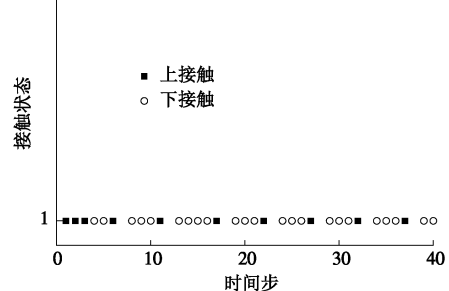
Fig. 8 Computing processes for the case using penalty value 1×10^3 MN/m

计算方案二: 接触刚度 1×10^3 MN/m, 给定摩擦角度 26.3° 。选择 3 种不同的块体刚度进行计算比对, 200, 2000, 20000 MPa。计算结果如图 9 所示。

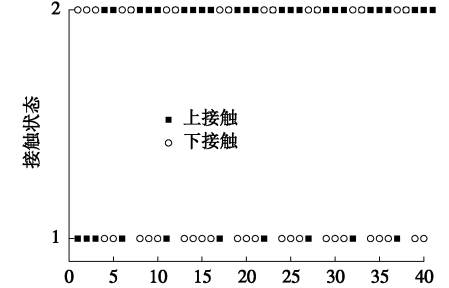


(a) 惯性力 - 时间步曲线

(b) 上、下接触状态 ($E=2000$ MPa)



(c) 上、下接触状态 ($E=20000$ MPa)



(c) 上、下接触状态 ($E=20000$ MPa)

图 9 不同块体弹模情况下 DDA 计算过程

Fig. 9 Calculating processes of DDA for blocks with different Young's moduli

从其计算结果不难发现, 相同罚弹簧情况下, 当 $E=2000$, 20000 MPa 时, 块体惯性力没有明显的振荡,

基本处于稳定状态。这与理论结果是一致的。而当 $E=200\text{ MPa}$ 时, 惯性力振荡非常明显。然而, 即使惯性力振动不明显, 其上、下接触状态任然在不断的交替变化。

通过以上分析表明, 在块体弹模一定的情况下, DDA 的计算精度容易受接触刚度的影响。DDA 可以通过调节接触刚度来控制不合理能量的量级, 从而实现滑移量级的控制, 使其在理论强度附近能够近似稳定。然而实际上其上、下接触状态还是在不断的交替变换。

本文于此对初步接触上的作用力进行分析, 以期揭示出现两种接触状态的原因。其计算结果如表 2~4。其中表 2 中与理论摩擦角误差为 DDA 接触上所需临界摩擦角 $\varphi_{D_{\text{cri}}}$ 与理论接触面上力学所需临界摩擦角 $\varphi_{T_{\text{cri}}}$ 之间的误差。具体计算方式为

$$\rho=\frac{\varphi_{D_{\text{cri}}}-\varphi_{T_{\text{cri}}}}{\varphi_{T_{\text{cri}}}}\times 100\% \quad。$$

(7)

表 2 计算块体与倾斜板上、下接触上的力

Table 2 Force distributed on upper and lower contacts between computing block and incline

块体编号	接触方式	法向力 /(10 ⁻⁴ kN)	切向力 /(10 ⁻⁴ kN)	与理论摩擦角误差/%
①	上接触	1.249	0.664	-7.70
	下接触	2.344	1.087	4.20
	边边接触	3.594	1.752	0.07
②	上接触	1.474	0.872	-17.70
	下接触	4.200	1.891	6.80
	边边接触	5.674	2.673	0.15
③	上接触	1.403	0.951	-31.2
	下接触	5.831	2.569	8.50
	边边接触	7.234	3.520	0.23

表 3 不同罚值情况下上、下接触上的力(块体①, $\varphi=27^\circ$)

Table 3 Force distributed on upper and lower contacts for different penalty values (block 1, $\varphi=27^\circ$)

弹簧罚值 /(MN·m ⁻¹)	接触方式	法向力 /(10 ⁻⁴ kN)	切向力 /(10 ⁻⁴ kN)
1×10 ³	上接触	1.249	0.737
	下接触	2.344	1.013
	边边接触	3.592	1.750
2×10 ³	上接触	1.249	0.704
	下接触	2.343	1.046
	边边接触	3.592	1.750
5×10 ³	上接触	1.249	0.676
	下接触	2.343	1.075
	边边接触	3.592	1.751

从表 2 中可以看出, 在 DDA 计算过程中, 上、下接触所需的临界摩擦角 $\varphi_{D_{\text{cri}}}$ 较理论值都有偏差。具体表现为上接触 $\varphi_{D_{\text{cri}}}$ 较理论值偏大, 而下接触 $\varphi_{D_{\text{cri}}}$ 较理论值偏小。值得注意的是, 将两者进行和处理, 即

$$\varphi_{\text{cri}}=\arctan\left(\frac{F_{\text{S}}}{F_{\text{N}}}\right) \quad。$$

(8)

其临界摩擦角 φ_{cri} 与理论值 $\varphi_{T_{\text{cri}}}$ 极为接近。通过对

比表 3, 4 可以发现, 上、下接触上的法向力不会随接触刚度和块体刚度变化, 其值与理论值(上接触为 1.249, 下接触为 2.345)吻合。相比之下, 上、下接触上的剪切力却随接触刚度和块体刚度的变化而变化。可以得出, 上、下接触两种状态主要是剪切力与法向力分布不一致所致。

表 4 不同块体弹模情况下上、下接触上的力(块体①, $\varphi=26.3^\circ$)

Table 4 Force distributed on upper and lower contacts for blocks with different Young's modulus (block 1, $\varphi=26.3^\circ$)

弹簧罚值 /MPa	接触	法向力 /(10 ⁻⁴ kN)	切向力 /(10 ⁻⁴ kN)
200	上接触	1.249	0.737
	下接触	2.344	1.013
	边边接触	3.592	1.750
2000	上接触	1.249	0.844
	下接触	2.343	0.907
	边边接触	3.592	1.751
20000	上接触	1.249	0.872
	下接触	2.343	0.879
	边边接触	3.592	1.751

3 DDA 算法改进及测试

3.1 DDA 算法改进

以上研究表明, 由于法向力和切向力在上、下接触上的分布不一致, 致使上、下接触出现不一致的接触状态判断, 并最终导致不合理现象发生。

DDA 需要选择合理的接触刚度来控制不合理能量的量级, 使其在理论强度值附近近似稳定。然而经过研究表明, 即使控制了不合理的位移量, 其上、下接触的状态还是可能在不断地变化, 即锁定状态与滑动状态之间变化。当采用 DDA 进行黏性结构面抗剪破坏分析时, 由于接触一旦从锁定变为滑动状态, 接触上的黏聚力将会失去, 其计算精度将难以保证^[14-16]。提出一种合理解决接触状态不一致的方法, 将有可能为日后解决黏性材料剪切破坏问题通过技术支持。

通过研究表明, 接触刚度和块体刚度只是影响到了剪切力在上、下接触上的分配比, 接触界面上的剪切 F_{S} 却始终是保持不变的, 并与理论剪切力保持在一定的精度范围内。

因此, 对于 DDA 处理接触界面抗剪破坏问题, 本文提出一种新的判断方法, 即共剪判断:

$$\begin{cases} F_{\text{S}}>F_{\text{N}}\tan\varphi+cl & (\text{滑动}) \\ F_{\text{S}}\leq F_{\text{N}}\tan\varphi+cl & (\text{锁定}) \end{cases} \quad。$$

(9)

共剪判断方法步骤在 DDA 程序中按图 10 进行。

3.2 计算测试

首先, 采用改进的 DDA 对倾斜台上块体①、②和③稳定所需临界摩擦角进行分析, 其结果分别为

26.1° , 26.1° , 和 26.2° 。这一结果与理论临界摩擦角 ($\varphi_{T_{\text{crit}}}$) 26° 极为接近。图 11 为块体①的计算过程。

从图 11 中可以看出, 由于采用了共剪判断, 不会产生不合理的能量, 没有过多的位移产生, 因此 26.1° 就稳定下来。

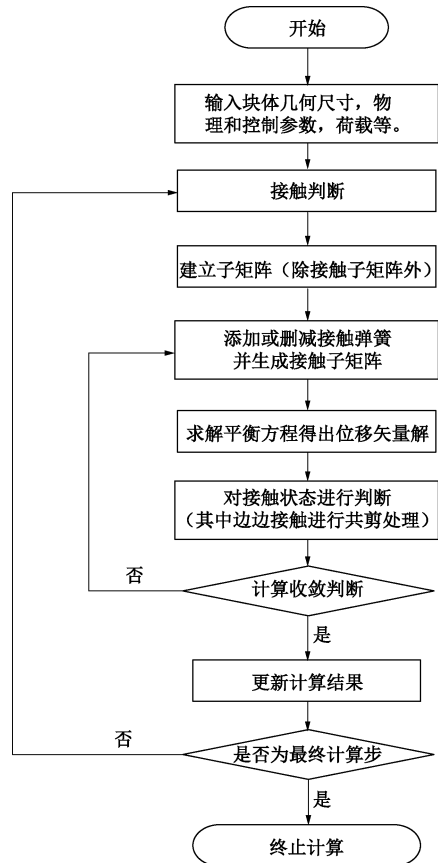


图 10 改进 DDA 算法计算流程图

Fig. 10 Flow chart of procedures used in improved DDA code

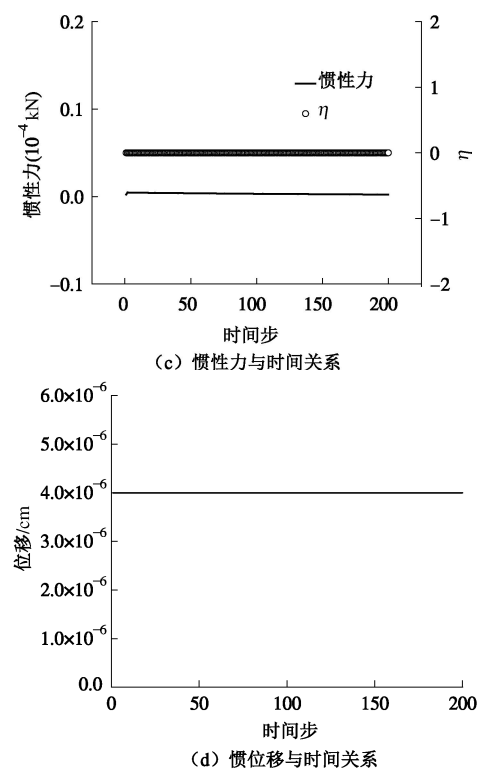
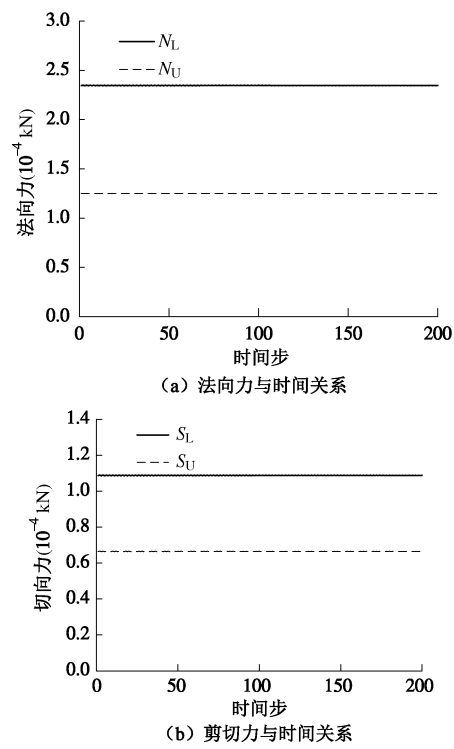


图 11 改进的 DDA 对①号块体计算过程 ($\varphi = 26.1^\circ$)

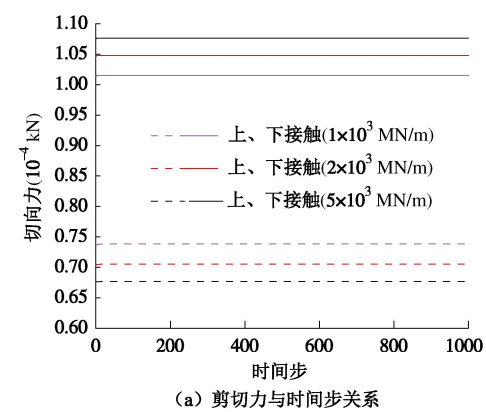
Fig. 11 Calculating processes for block ① using improved DDA ($\varphi = 26.1^\circ$)

图 12 为用共剪方法对不同接触刚度情况下的计算结果。

从图 12 看出, 由于采用共剪处理方法, 不会受到由于罚弹簧变化而导致剪切分配比变化的影响。从图 12 (b) 中看出, 原 DDA 程序由于接触状态一直在变化, 所以其一直在蠕动, 位移不断在增长。而改进的 DDA 由于没有接触状态的变化 (图 12 (c)), 位移初始就稳定了下来。

图 13 为用共剪方法对不同块体弹模情况下的计算结果。

从图 13 看出, 由于采用共剪处理方法, 不会受到由于块体弹模变化而导致剪切分配比变化的影响。从图 13 (b) 中看出, 原 DDA 程序由于接触状态一直在变化, 所以其一直在蠕动, 位移不断在增长 (弹模为



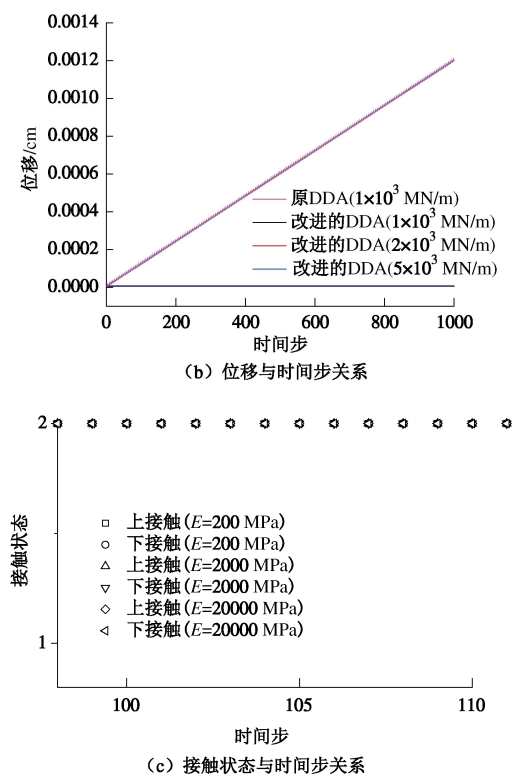


图 12 改进的 DDA 对①号块体计算过程（不同接触刚度， $\varphi = 27^\circ$ ）

Fig. 12 Calculating processes for block ① using improved DDA (different penalty values, $\varphi = 27^\circ$)

200 MPa 情况下，由于位移量较大就没有在图中显示）。而改进的 DDA 由于没有接触状态的变化（图 13（c）），位移初始就稳定了下来。

其次，对一边坡进行稳定分析。该边坡长 300 m，高 10 m。如图 14 所示。

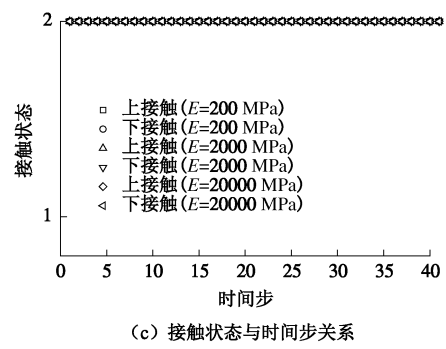
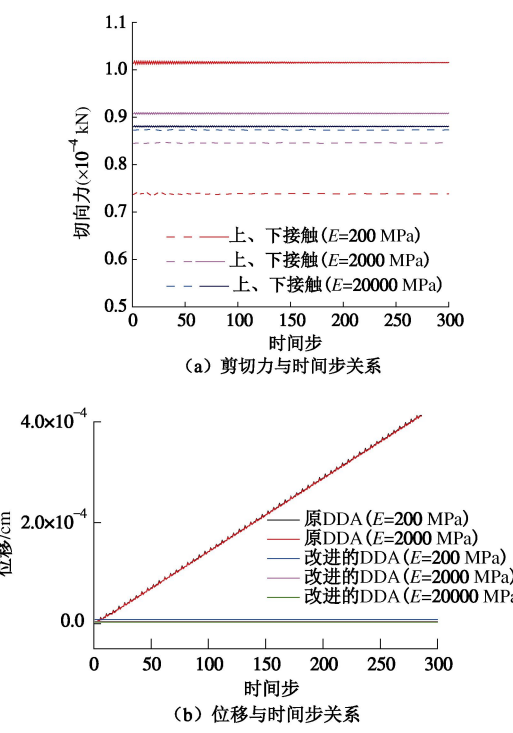


图 13 改进的 DDA 对①号块体计算过程（不同块体弹性模量， $\varphi = 26.3^\circ$ ）

Fig. 13 Calculating processes for block ① using improved DDA (different Young's moduli, $\varphi = 26.3^\circ$)

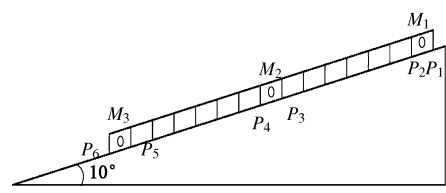


图 14 计算边坡模型

Fig. 14 Calculating slope model

该边坡倾角为 10° ，上部滑体被均匀分为 15 个块体，即，每个块体长 20 m。在计算模型中，顶部、中部及底部块体，即块体 M_1 ， M_2 和 M_3 ，各设置一个监测点。其物理块体材料为重度为 20 kN/m^3 ，弹性模量为 $2 \times 10^4 \text{ kPa}$ ，泊松比为 0.2，黏聚力为 0 kPa，摩擦角为 13° ，DDA 计算参数为时间步为 0.01 s，最大允许位移比为 0.01，动力控制系数为 1。

本文以摩擦角 $\varphi = 13^\circ$ 为例进行计算。该摩擦角接近边坡稳定所需的临界摩擦角 φ_{cri} 。选取两种接触刚度， 8×10^5 ， $8 \times 10^6 \text{ kN/m}$ ，进行比对分析。

考虑到计算初步，由于突然施加重力会产生对模型计算有影响的速度和加速度。为了使模型分析更为精确，本文在正式计算之前，在一定的计算步数内（本例选取步数为 500），采用静态 DDA 分析方法，以此来消除由于突加重力的影响。同时，在这一过程中，给予接触面高强度参数，以保证接触块体之间不会由于突加重力而产生运动。当正式计算时，给予接触面真实强度参数^[10]。

图 15，16 分别为由原 DDA 方法和改进的 DDA 方法计算得出的结果。从图中可以看出，原 DDA 在 $\varphi = 13^\circ$ 情况下，块体的接触状态一直在锁定和滑动之间交替变化。由于接触状态交替变化产生不合理的能量，导致块体不断的滑动。其滑移量也受到接触刚度的影响。而由改进的 DDA 得出的结果，在 $\varphi = 13^\circ$ 情况下，块体接触状态一直处于锁定状态。块体滑动会趋于稳定。

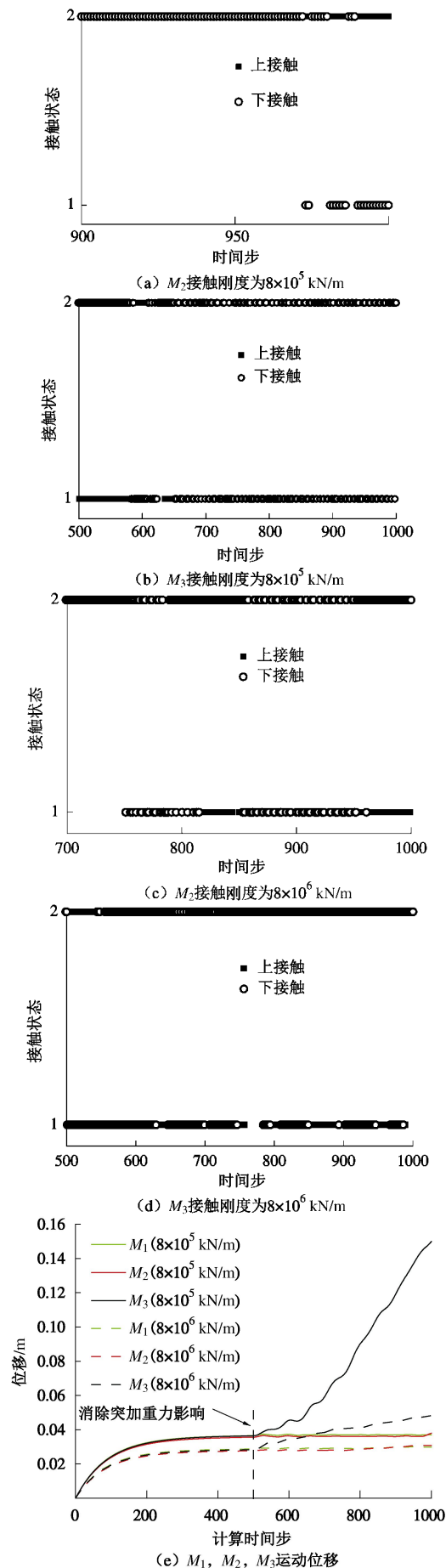


图 15 原 DDA 对边坡计算过程

Fig. 15 Calculating processes of slope using original DDA

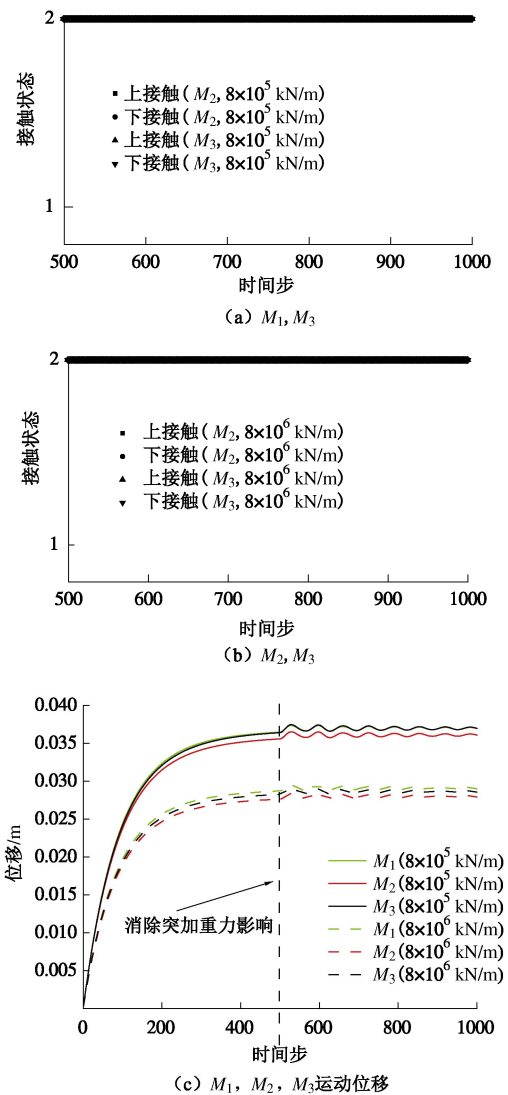


图 16 改进的 DDA 对边坡计算过程

Fig. 16 Calculating processes of slope using improved DDA

4 结论与建议

本文以摩擦性接触面为例, 对 DDA 的剪切机制开展了相应的研究工作。研究表明, DDA 计算所需临界强度较理论值偏高。这一结果的出现主要是由两个角边接触上的法向力与剪切力分布不一致所致。

相对于摩擦性材料, DDA 可以通过控制接触刚度来控制其滑移量级, 使其在理论强度值附近稳定。即便处于稳定状态, 其接触状态任然在滑动与锁定之间不断的交替变换。

与摩擦性结构面不同, DDA 分析过程中, 一旦出现滑动状态, 黏聚力将会去除。即, 当接触面中出现锁定与滑动两种不同的状态时, 处于滑动状态的角边接触将会失去黏聚力, 这一部分黏聚力相当于边边接触黏结强度的一半。而这也可能是 DDA 在处理黏性结构面剪切问题出现误差的原因。

通过进一步研究发现, 剪切力只是分配到两个接

触上的量会随罚弹簧值和块体弹模变化,两者之和与理论值也是极为接近的。为此本文试探性地提出了共剪的处理方法。其结果表明,这一处理方法避免了一个边边接触出现两种不同状态的情况出现。能够精确地分析接触面的临界强度。同时,这一处理方法不会受到接触刚度变化的影响。而这一方法能否合理地改进 DDA 处理黏性结构面问题,可以做进一步研究工作。

参考文献:

- [1] SITAR N S, MACLAUGHLIN M M, DOOLIN D M. Influence of kinematics on landslide mobility and failure mode[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(6): 716 - 728.
- [2] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, **40**(3): 283 - 353.
- [3] CHENG Y M. Advancements and improvement in discontinuous deformation analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, **22**(2): 153 - 163.
- [4] MACLAUGHLIN M M, DOOLIN D M. Review of validation of the discontinuous deformation analysis (DDA) method[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, **30**: 271 - 305.
- [5] CHEN Z Y, GONG W J, MA G W, et al. Comparisons between centrifuge and numerical modeling results for slope toppling failure[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, **58**(9): 1497 - 1508.
- [6] ZHENG H, JIANG W. Discontinuous deformation analysis based on complementary theory[J]. *Sci China ser E-Tech Sci*, 2009, **52**(9): 2547 - 2554.
- [7] ZHENG H, LI X K. Mixed linear complementarity formulation of discontinuous deformation analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, **75**(1): 23 - 32.
- [8] LI X K, ZHENG H. Condensed form of complementarity formulation for discontinuous deformation analysis[J]. *Sci China ser E-Tech Sci*, 2015, **58**(9): 1509 - 1519.
- [9] DOOLIN D M, SITAR N. Displacement accuracy of discontinuous deformation analysis method applied to sliding block[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, **128**(11): 1158 - 1168.
- [10] MACLAUGHLIN M M. Discontinuous deformation analysis of the kinematics of landslides[D]. Berkeley: University of California, 1997.
- [11] HATZOR Y H, FEINTUCH A. The validity of dynamic block displacement prediction using DDA[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, **38**(4): 599 - 606.
- [12] TSESARKY M, HATZOR Y H, SITAR N. Dynamic displacement of a block on an inclined plane: Analytical, experimental and DDA results[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, **38**(2): 153 - 167.
- [13] YEUNG M C R. Application of Shi's discontinuous deformation analysis to the study of rock behavior[D]. Berkeley: University of California, 1991.
- [14] WANG L Z, JIANG H Y, YANG Z X, et al. Development of discontinuous deformation analysis with displacement-dependent interface shear strength[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, **47**: 91 - 101.
- [15] ZHANG Y B, XU Q, CHENG G Q, et al. Extension of discontinuous deformation analysis and application in cohesive-friction slope analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, **70**: 533 - 545.
- [16] 马永政, 郑宏, 朱合华, 等. DDA 法计算边坡安全系数的黏聚力影响分析[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(7): 1088 - 1093. (MA Yong-zhegn, ZHENG Hong, ZHU He-hua, et al. Effect of cohesion on evaluating slope stability factor of safety by DDA method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(7): 1088 - 1093. (in Chinese))