

# 半弹簧接触模型及其在边坡破坏计算中的应用<sup>1)</sup>

冯 春<sup>2)</sup> 李世海 刘晓宇

(中国科学院力学研究所环境力学重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 提出了一种用于判断、描述三维离散块体的接触状态, 计算块体间接触力的半弹簧接触模型。该模型将一对接触块体分为母块体及子块体, 半弹簧位于母块体上, 由母块体各节点缩进至各母面内形成, 目标面位于子块体上。该模型根据半弹簧与目标面的几何关系直接计算接触力, 无需耗费大量时间判断两个块体的接触类型及计算两个块体的接触面积。该模型可以解决准三维条件下地质体渐进破坏的计算, 将该模型应用于边坡渐进破坏分析, 计算结果与实际情况相符。

**关键词** 块体离散元, CDEM, 接触探测, 半弹簧, 边坡

中图分类号: O332 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)01-0184-09

## 引 言

地质体具有非连续、非均匀、流固耦合及未知当前状态等特性。地质体的这些复杂特性, 对准确模拟工程地质灾害发生、发展等演化过程提出了挑战。基于连续介质力学的离散元方法 (continuum-based discrete element method, CDEM) 在模拟地质体渐进破坏方面具有一定的优势, 该方法将有限元及离散元进行耦合, 在块体内部进行有限元计算, 在块体边界进行离散元计算, 不仅可以模拟地质体连续状态下及非连续状态下的变形、运动特性, 更可以实现地质体由连续体到非连续体的渐进破坏过程<sup>[1-5]</sup>。

传统的 CDEM 以面-面接触模型为基础, 无法对点-面、点-棱、点-点等接触进行准确刻画。此外, 传统的 CDEM 以小变形假设为基础, 没有考虑块体出现大位移后接触状态的改变, 无法准确模拟地质体的运动性破坏特征。

三维块体的接触类型较为复杂, 包括点-点、点-棱、点-面、棱-棱、棱-面、面-面等 6 种。目前, 三维块体接触类型的判断主要包括直接法、公共面法、倾入边法及切割体法等 4 种。

直接法通过解析几何的方式直接判断两个块体的接触状态<sup>[6]</sup>。该方法需要对两个块体的点、棱、面进行多重循环判断, 以确定两个六面体块体的接触

类型为例, 直接法共需进行 676 次判断。直接法虽然不会出现漏判现象, 但计算工作量大, 一般较少采用。许多学者对直接法进行了改进, 从而在一定程度上提高了计算效率。Wu 等<sup>[7]</sup> 提出了 Vertex-Face 简化检索方法, Yeung 等<sup>[8]</sup> 及 Wu<sup>[9]</sup> 发展了棱-棱接触探测方法。Jiang 等<sup>[10]</sup> 提出了 Point-Face 接触模型, 将有面参与的 3 种接触类型 (点-面、棱-面、面-面) 统一用 Point-Face 接触类型描述; Beyabaniaki 等<sup>[11]</sup> 提出了更全面的 Point-Face 接触模型, 该模型以两个块体的几何信息为基础, 将三维块体间的 6 种接触类型全部用 Point-Face 接触类型进行描述。

Cundall 等<sup>[12]</sup> 提出的公共面法 (common plane method), 是目前各类三维块体离散元程序普遍采用的一种方法<sup>[13-15]</sup>。该方法通过平移、旋转公共面, 寻找公共面两侧块体顶点与公共面接触的个数, 从而进行接触类型的确定。公共面法将块体接触类型的判断转化为块体与公共面之间接触状态的判断, 较大地减少了接触类型判别次数, 以判断两个六面体块体的接触类型为例, 公共面法仅需判断 16 次。

公共面法节省了因判定接触类型、多次重复循环产生的时间, 但却因旋转、平移公共面时需要多次试算, 在一定程度上减弱了该方法的优势。罗海宁等<sup>[16]</sup> 提出了改进的公共面法, 该方法将公共面

2010-02-02 收到第 1 稿, 2010-05-21 收到修改稿。

1) 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2010CB731506), 国家自然科学基金重点项目 (10632100) 和中国科学院重要方向性项目 (KJCX2-YW-L01) 资助。

2) E-mail: fengchun@imech.ac.cn

法与直接法相结合, 通过优化公共面的初始法向向量, 使接触状态由面参与(面-面、棱-面、点-面)时的检索效率有很大提高。以确定两个六面体块体的公共面为例, 传统的公共面法共需进行 800 次的计算, 而改进的公共面法仅需计算 48 次。值得注意的是, 该方法只有在有面参与的情况下有效, 无法提高点-点、点-棱的检索效率。

公共面法的检索效率较直接法有了较大提高, 但公共面的正确选取, 公共面旋转时的迭代误差, 公共面的唯一性及点-点、点-棱公共面的确定等问题, 依然需要进一步讨论<sup>[17-18]</sup>。

侵入边法由陈文胜等<sup>[17]</sup>提出, 该方法基于一个简单的认识, 即两个块体接触的充要条件是两个块体的交集非空。侵入边法将侵入边的性质(侵入边的类型、原始节点的数量等)与接触类型建立映射关系, 其实质是将待判断的两个块体所占空间扩大给定范围后再互相切割求非空点集。该方法的优点在于可以充分反映块体局部几何形状的特征, 根据两个块体上参与接触的真实局部元素确定接触类型。但侵入边的性质与接触类型之间的映射关系并不总具有唯一性, 文献<sup>[18]</sup>便给出了一种接触状态是侵入边法无法描述的。

王健全等<sup>[18]</sup>提出的切割体法以侵入边法为基础, 并融合了公共面法的优势, 是鲁棒性(robust)较好的一种块体接触类型识别方法。该方法通过接触建立距离及最大嵌入深度两个几何量, 将接触范围分为面控区、边控区及点控区等 3 个部分, 将面分为外墙面、完全分隔面及切割面等 3 种, 并用切割面对边进行切割, 得到两个块体接触时的公共部分(切割体), 给出了切割体形态与几何元素之间的 16 种映射关系。但某些切割体形态与几何元素之间的映射关系并不唯一, 需要通过接触范围及两个块体的相对位置来确定具体的接触类型, 这在某种程度上削弱了切割体法的优势。

上述 4 种接触类型的识别方法, 前两者以几何识别为主, 后两者以拓扑检索为主。但接触类型识别的最终目的是为了正确计算块体间的接触力, 以这 4 种识别方法为基础的接触力计算, 均需经历以下 4 个步骤: (1) 判别两个块体的接触状态(是否接触); (2) 确定接触类型(点-点、点-棱、点-面等); (3) 根据接触类型计算接触面积; (4) 给出接触面上的法向及切向接触力。每个步骤均需耗费大量的计算时间, 因此, 提出一种高效的接触模型, 简化接触力计算步骤, 是三维块体接触计算方面的发展重点。

## 1 半弹簧接触模型

### 1.1 模型中的若干概念

- (1) 母块体: 半弹簧所在的块体。
- (2) 子块体: 目标面所在的块体。
- (3) 母面: 半弹簧所在的面。
- (4) 目标面: 与半弹簧产生接触的面。
- (5) 主链表: 由所有的半弹簧结构体组成, 进行接触力计算时, 以此链表为基础进行循环。
- (6) 半弹簧: 一种用来进行接触判断、具有特征面积的点。由母块体顶点缩进至各母面内形成, 以 8 节点六面体为例, 共形成 24 个半弹簧(如图 1), 半弹簧的缩进距离(图 1 中箭头所指距离)一般为对应顶点到该母面面心距离的 1%~10%(本文取 8%)。由于弹簧力的计算不仅依赖于半弹簧所在节点的位移, 也依赖于对应目标面的位移。当且仅当半弹簧找到目标面, 并建立联系后, 方能组成完整的弹簧系统, 故将其称之为“半”弹簧。

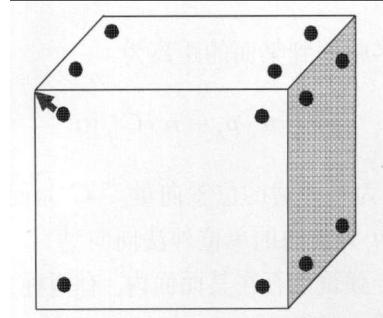


图 1 半弹簧示意

Fig.1 Semi-spring

### 1.2 模型的基本思路

传统接触模型中的点一般指块体顶点, 被多个面公用, 无面积。为了计算块体间的接触力, 必须先确定接触类型, 进而计算接触面积, 最后计算接触力。对于有点、棱参与的接触类型, 接触面积的计算较为复杂, 一般给一个小量, 如块体面积的 1%<sup>[19]</sup>。对于仅有面参与的接触类型, 传统的接触模型需根据两个接触面的叠合部分计算接触面积。

半弹簧接触模型的基本想法是不判别块体的接触类型, 不计算块体的接触面积, 直接计算接触力。该模型以半弹簧为主链表, 寻找目标面。只要半弹簧位于目标面内或者边界上, 便可直接建立接触关系, 计算相应的插值系数。由于半弹簧具有各自的特征面积(半弹簧所在母面的面积 / 母面内的半弹簧总数), 进行接触力计算时, 无需重新计算母子块体间的接触面积, 从而简化了计算。

### 1.3 目标面的检索

寻找目标面时，对主链表进行循环，若半弹簧所在位置到某面的距离小于限定值（一般取半弹簧缩进的最小距离）且此半弹簧在该面内，将该面设为此半弹簧的目标面，该面的法向即为半弹簧的法向（图 2）。

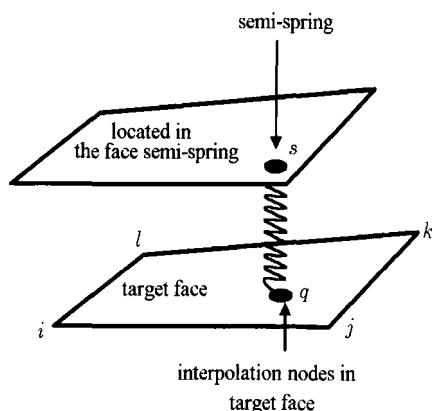


图 2 接触对的寻找

Fig.2 Contact detecting

计算半弹簧到某面的距离为

$$d = |\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}_s - \mathbf{n} \cdot \mathbf{C}| / |\mathbf{n}| \quad (1)$$

其中， $\mathbf{p}_s$  为半弹簧的位置向量， $\mathbf{C}$  为面心点的位置向量， $\mathbf{n}$  为该面的单位外法向向量

判断半弹簧是否在某面内，有两种方法。第 1 种方法如式 (2) 所示

$$J_{ijk} = (\mathbf{V}_{si} \times \mathbf{V}_{sj}) \cdot (\mathbf{V}_{sj} \times \mathbf{V}_{sk}) \quad (2)$$

其中， $i, j, k$  为某面的节点坐标，顺时针方向布置， $\mathbf{V}_{si}$  表示节点  $i$  与半弹簧  $s$  的相对位置向量，如果半弹簧在该面内，则所有的  $J_{ijk} = 1$ 。

第 2 种方法首先将某面各边用参数方程表示（如式 (3)），在各边上寻找与半弹簧  $s$  最近的点（垂足），式 (4) 给出了垂足点  $t_{ij}$  的取值，如果半弹簧在该面内，则所有的  $0 \leq t_{ij} \leq 1$ 。

$$\left. \begin{array}{l} x = x_i + (x_j - x_i)t_{ij} \\ y = y_i + (y_j - y_i)t_{ij}, \quad 0 \leq t_{ij} \leq 1 \\ z = z_i + (z_j - z_i)t_{ij} \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$t_{ij} = \mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{V}_{is} / |\mathbf{V}_{ij}|^2 \quad (4)$$

为防止块体嵌入，一旦发现半弹簧在子块体内部，立即在该块体中搜寻离半弹簧最近的面，并将该面设定为目标面。式 (5) 给出了判断半弹簧嵌入

子块体内部的计算公式，其中  $\mathbf{V}_{si}$  为块体内第  $i$  个面的面心与半弹簧点的相对位置向量，如果半弹簧在块体内部，则所有面的  $J_{Ci} > 0$ 。

$$JC_i = \mathbf{V}_{si} \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

### 1.4 插值系数计算

确定目标面后，需寻找目标面上的插值点，并计算相应的插值系数。对于目标面为三角形的情况，各节点的插值系数如式 (6) 所示， $\Delta_{sjk}$  为三角形  $sjk$  的面积， $\Delta_{ijk}$  为三角形  $ijk$  的面积。

$$N_i = \Delta_{sjk} / \Delta_{ijk} \quad (6)$$

对于目标面为四边形的情况，首先求取各节点的相对位置向量  $\mathbf{P}_m$ （式 (7)），其中  $\mathbf{P}_{oi}$ ， $\mathbf{C}$  分别为各节点及面心的位置向量；将相对位置向量  $\mathbf{P}_{ni}$  转换至该面局部坐标系，形成向量  $\mathbf{P}'_{ni}$ （式 8），其中  $\mathbf{s}_1$  及  $\mathbf{s}_2$  是该面的两个单位切向量；根据式 (7) 和式 (8) 计算相对于面局部坐标系的半弹簧相对位置向量  $\mathbf{S}$ ；根据等参变换求取  $\mathbf{S}$  在标准矩形块体中的位置  $(\xi_s, \eta_s)$ ，并利用式 (9) 计算各节点的插值系数。

$$\mathbf{P}_{ni} = \mathbf{P}_{oi} - \mathbf{C} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}'_{ni} = (\mathbf{P}_{ni} \cdot \mathbf{s}_1, \mathbf{P}_{ni} \cdot \mathbf{s}_2, \mathbf{P}_{ni} \cdot \mathbf{n}) \quad (8)$$

$$N_i = (1 + \xi_i \xi_s)(1 + \eta_i \eta_s) / 4 \quad (9)$$

### 1.5 真实半弹簧的确定

为了解决同一顶点衍生出的若干半弹簧同时接触同一个面时产生的点-面接触总刚度增大的问题，选取半弹簧外法向与目标面外法向点积最小的半弹簧作为真实半弹簧，仅该半弹簧参与接触计算。如图 3， $S_1, S_2$  是源自块体  $E_1$  同一顶点的两根半弹

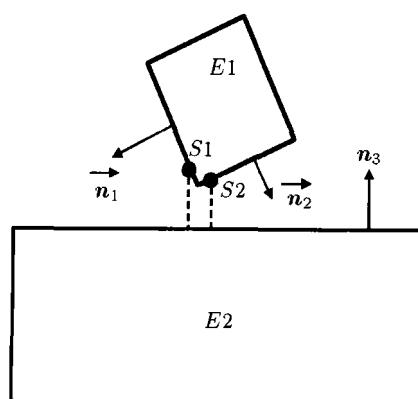


图 3 真实半弹簧选取示意

Fig.3 Selection of real semi-spring

簧,  $n_1, n_2$  为  $S1, S2$  所在面的单位外法向量,  $n_3$  为目标面的单位外法向量, 当  $S1, S2$  同时与  $E2$  的同一个面接触, 由于  $n_2 \cdot n_3 < n_1 \cdot n_3$ , 选取  $S2$  为真实半弹簧.

### 1.6 半弹簧的面积修正

如果各块体的网格连续, 则在初始计算时, 面上的节点既是半弹簧点又是插值点(如图4), 两个位置重合的节点由两根弹簧并联连接, 原来4根弹簧承担的力, 现在由8根弹簧承担, 每根弹簧承受的力减小为原来的一半, 因此半弹簧的真实面积也应是半弹簧对应节点面积的一半.

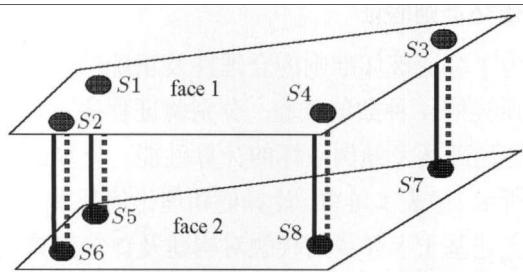


图4 半弹簧点与插值点重合

Fig.4 Superposition of semi-spring node and interpolated node

### 1.7 弹簧力的计算公式

半弹簧的法向及切向弹簧力计算如式(10)所示, 其中  $F_n^j$  和  $F_s^j$  表示第  $j$  根半弹簧的法向及切向力,  $K_n^j$  和  $K_s^j$  表示第  $j$  根半弹簧的法向及切向刚度,  $\Delta d_n^j$  及  $\Delta d_s^j$  表示第  $j$  根半弹簧的法向及切向位移.

$$\left. \begin{array}{l} F_n^j = -K_n^j \times \Delta d_n^j \\ F_s^j = -K_s^j \times \Delta d_s^j \end{array} \right\} \quad (10)$$

进行破坏计算时, 采用 Mohr-Coulomb 准则对式(10)中的弹簧力进行修正, 如式(11), 其中  $T$  为抗拉强度,  $\phi$  为内摩擦角,  $C$  为黏聚力.

(1) 拉伸破坏:

如果  $-F_n^j \geq T$  ( $F_n^j$  拉为负)

那么  $F_n^j = F_s^j = 0, C = 0, T = 0$       (11a)

(2) 剪切破坏:

如果  $F_s^j \geq F_n^j \times \tan\phi + C$

那么  $F_s^j = F_n^j \times \tan\phi + C, C = 0, T = 0$       (11b)

### 1.8 半弹簧接触模型的适用范围

采用半弹簧进行接触对的建立及更新, 可以实现准三维条件下的块体运动计算. 只要一个节点落

在一个平面内或者落在平面边界上, 就不会发生嵌入现象, 图5中的面-面(面内有节点)、点-面、点-棱、点-点等4种形式均可以计算, 但图6中的面-面(面内无节点)、棱-面、棱-棱等3种情况会发生嵌入.

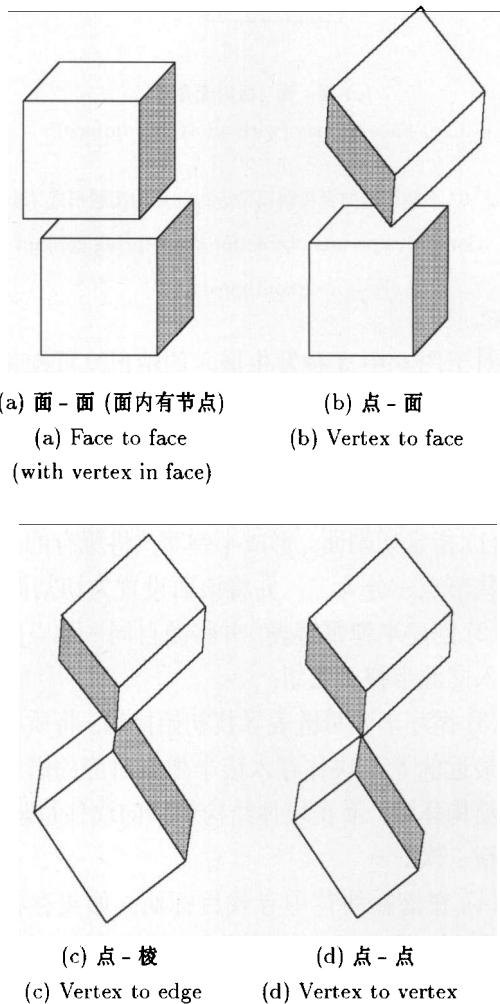


图5 能够用半弹簧接触模型进行计算的接触形式

Fig.5 Contact type suitable for semi-spring contact model

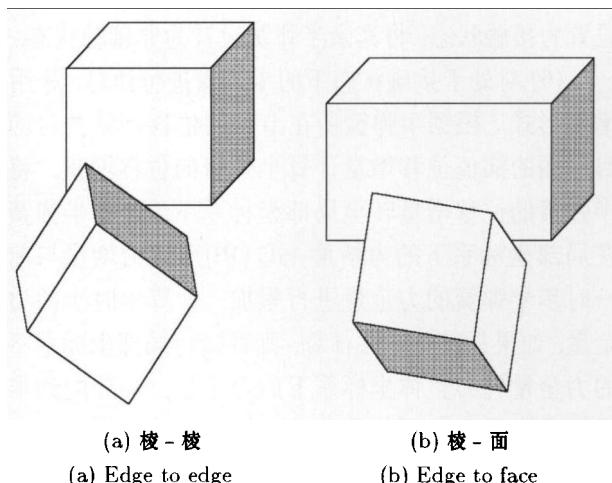
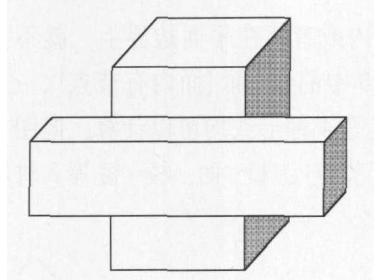


图6 不能用半弹簧接触模型进行计算的接触形式

Fig.6 Contact type unsuitable for semi-spring contact model



(c) 面 - 面 (面内无接点)  
(c) Face to face (without vertex in face)

图 6 不能用半弹簧接触模型进行计算的接触形式 (续)

Fig.6 Contact type unsuitable for semi-spring contact model  
(continued)

对于图 6 中 3 种发生嵌入的情况，可构建半棱模型，基本方法与构建半弹簧模型所采用的方法相同，半棱模型将另文论述。

### 1.9 计算流程

(1) 指定切割面，形成半弹簧，将原有的公共面及公共节点一分为二，并将该面设置为切割面。

(2) 创建半弹簧链表，并将源自同一顶点的半弹簧存入同源半弹簧数组。

(3) 循环半弹簧链表寻找初始接触，将质心离半弹簧最近的 8 个块体存入该半弹簧对应的潜在接触块体结构体中，潜在块体结构体中的块体每隔 1000 步更新一次。

(4) 在潜在块体中寻找目标面，如果存在目标面，将半弹簧设置为接触状态，计算插值系数，存入相应的数组，并将子块体、目标面存入半弹簧结构体中。

(5) 寻找同源半弹簧数组中具有同一目标面的半弹簧，并根据第 1.5 节确定真实半弹簧，将该半弹簧设置为接触状态，将其余半弹簧设置为非接触状态。

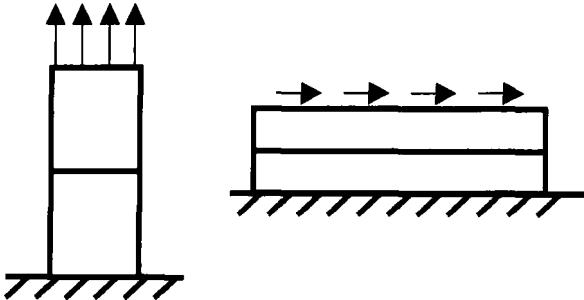
(6) 对处于接触状态下的半弹簧进行计算，采用增量形式，根据半弹簧所在节点的位移增量及对应目标面的插值位移增量计算半弹簧的位移增量，将半弹簧的位移增量转至局部坐标系下，计算半弹簧在局部坐标系下的力增量 (式 (10))，该力增量与前一时步半弹簧的力全量进行累加，计算本时步的力全量；如果只进行弹性计算，则直接将局部坐标系下的力全量转为整体坐标系下的力全量，并分配到半弹簧本点及目标面的各节点；如果进行破坏计算，则需根据式 (11) 进行力全量的修正，而后转换坐标系并进行力的分配。

(7) 如果半弹簧对应的接触对出现破坏，且该半弹簧的位移超过了限定值 (一般为半弹簧缩进距离的 1/2)，将半弹簧设置为非接触状态，进行接触的重新寻找；如果该半弹簧仍在原来的目标面内，则只更新插值系数，并将此半弹簧设置为接触状态；如果不在此，则从潜在接触块体中寻找子块体及目标面，如果存在这样的目标面，更新此半弹簧的目标块体及目标面，计算插值系数，并将半弹簧设置为接触状态。

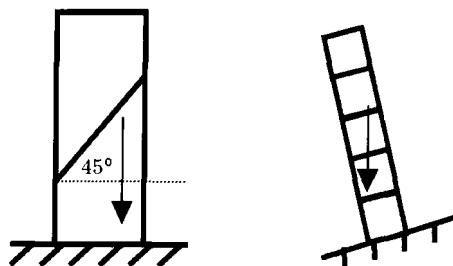
## 2 典型边坡的渐进破坏计算

### 2.1 破坏准则验证

为了验证破坏准则的合理性及正确性，设计了图 7 所述的 4 种数值试验，分别验证程序对拉伸破坏、剪切破坏及倾倒破坏的计算性能。计算结果如表 1 所示。由表 1 可得，计算值和理论值基本一致，表明上述基于半弹簧的接触对构建及计算方式是合理有效的。



(a) 验算抗拉强度 (b) 验算黏聚力  
(a) Tensile strength checking (b) Cohesion checking



(c) 验算内摩擦角 (d) 验算倾倒角度  
(c) Friction angle checking (d) Collapse angle checking

图 7 破坏准则的验证算例

Fig.7 Numerical cases for verification the failure criteria

表 1 破坏算例统计

Table 1 Statistics of numerical cases

Test type	Tensile strength	Cohesion	Friction angle	Collapse angle
load type	uniform vertical tensile stress/kPa	uniform horizontal shear stress/kPa	gravity	gravity
strength index	$T = 10$	$C = 30$	$C = 0, T = 0$	$\phi = 26^\circ, C = 0, T = 0$
theoretical value when failure occurs	$\sigma_t = 10$	$\sigma_s = 30$	$\phi = 45^\circ$	$\theta = 14.036^\circ$
numerical value when failure occurs	$\sigma_t = 10.001$	$\sigma_s = 29.6$	$\phi = 49.999^\circ$	$\theta = 14.04^\circ$

## 2.2 混合块体边坡的破坏

对文献 [20] 中含节理混合块体边坡破坏的物理模型实验进行数值模拟, 建立图 8 所示的数值模型, 该模型中的 3 种块体尺寸分别为  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ ,  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ,  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 。根据文献 [20] 的结果, 边坡破坏时的抬升角度为

$19.5^\circ \sim 21.8^\circ$ , 采用本文所述方法进行数值计算, 边坡出现破坏时的抬升角度为  $20.9^\circ$ , 边坡的渐进破坏过程如图 9~图 13 所示。边坡破坏时的抬升角度和边坡各计算时步的破坏状态与文献 [20] 的实验结果基本一致, 表明本文方法用于计算离散体的渐进破坏过程是可行的。

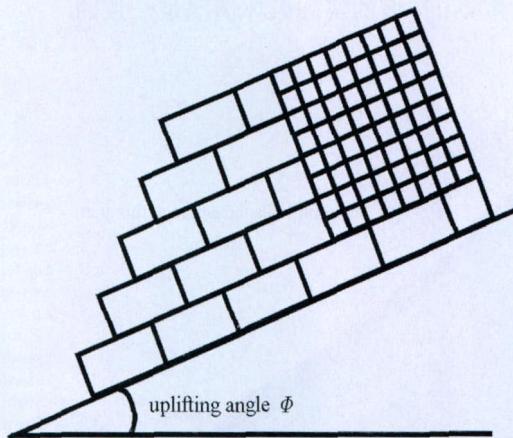


图 8 混合块体边坡数值模型

Fig.8 Numerical model of mixed block slope

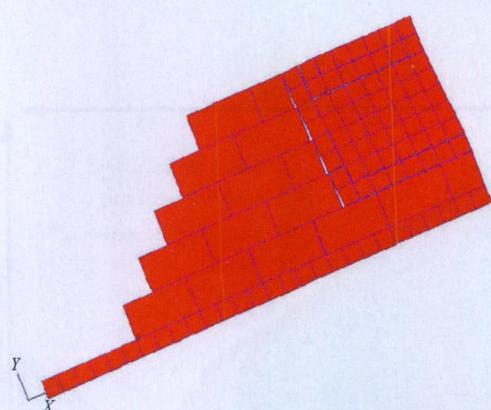


图 9 50 万步时块体的运动情况

Fig.9 Movement of blocks at step 500 000

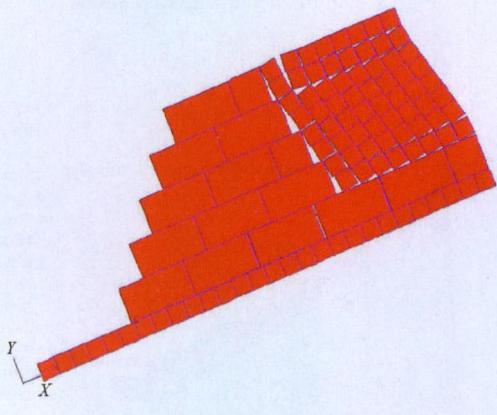


图 10 100 万步时块体的运动情况

Fig.10 Movement of blocks at step 1 000 000

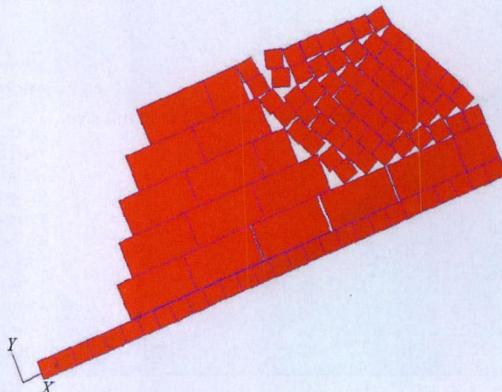


图 11 150 万步时块体的运动情况

Fig.11 Movement of blocks at step 1 500 000

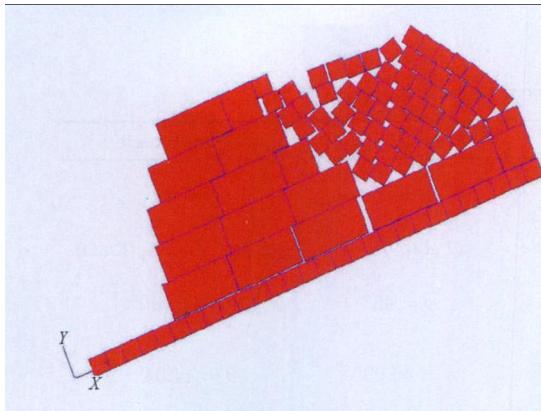


图 12 200 万步时块体的运动情况

Fig.12 Movement of blocks at step 2 000 000

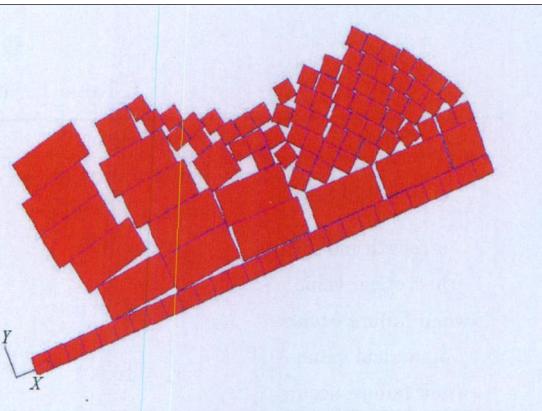


图 13 240 万步时块体的运动情况

Fig.13 Movement of blocks at step 2 400 000

### 2.3 唐家山顺层岩质边坡破坏过程的模拟

汶川地震后，距北川县城上游 3.2 km 处的唐家山发生了特大型滑坡，滑坡冲入河谷，堵塞湔江河道，形成唐家山堰塞湖。本文采用半弹簧接触模型，对唐家山顺层岩质边坡的渐进破坏过程进行了数值

模拟，建立如图 14 所示的数值模型，各计算时步下此边坡的破坏状态如图 15~图 20 所示。由图可得，随着计算时步的增加，顺层岩块沿着软弱结构面逐渐下滑，并最终大量聚集于湔江河道，形成堰塞坝，这与唐家山边坡的实际破坏情况是一致的。

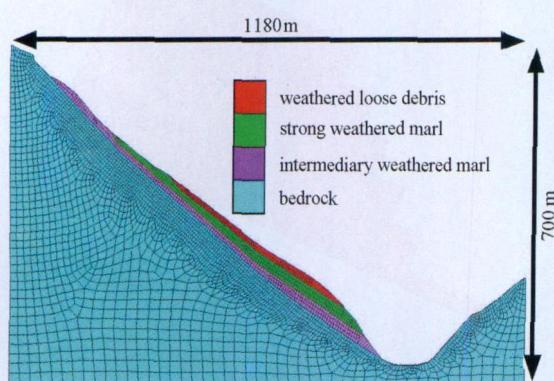


图 14 唐家山顺层岩质边坡数值模型

Fig.14 Numerical model of bedding rock slope in Tangjiashan

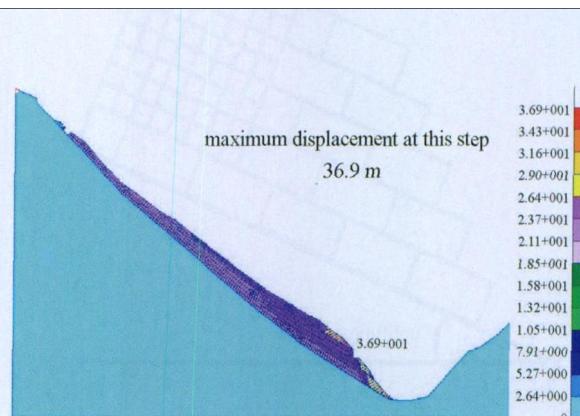


图 15 5 万步时边坡的破坏情况

Fig.15 Failure of slope at step 50 000

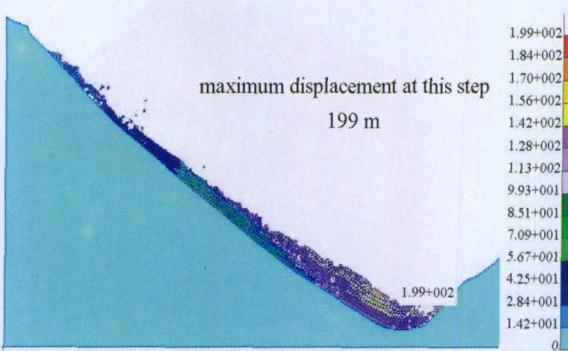


图 16 10 万步时边坡的破坏情况

Fig.16 Failure of slope at step 100 000

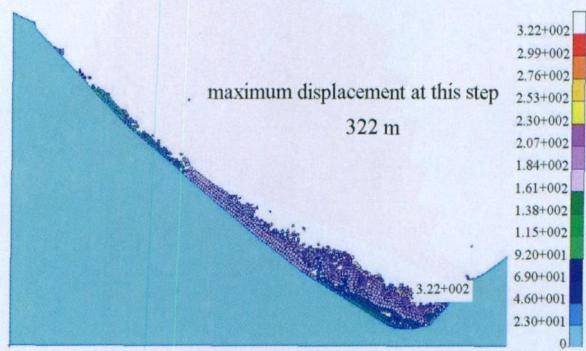


图 17 15 万步时边坡的破坏情况

Fig.17 Failure of slope at step 150 000

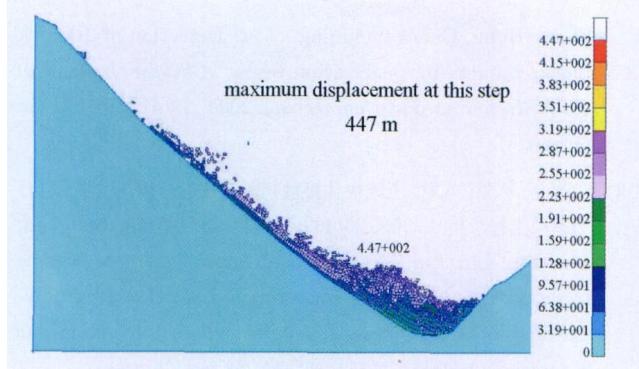


图 18 20万步时边坡的破坏情况

Fig.18 Failure of slope at step 200 000

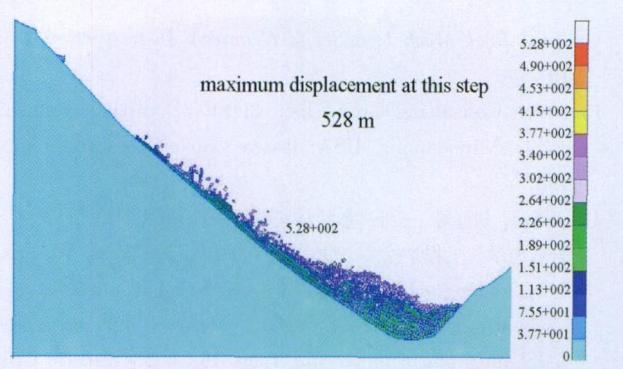


图 19 25万步时边坡的破坏情况

Fig.19 Failure of slope at step 250 000

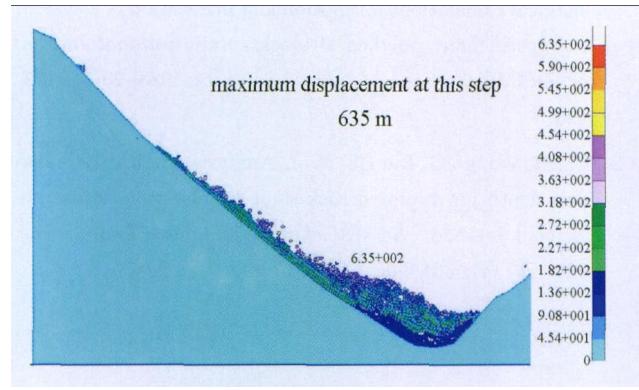


图 20 30万步时边坡的破坏情况

Fig.20 Failure of slope at step 300 000

### 3 结 论

半弹簧接触模型将各块体间复杂接触状态的判断转化为半弹簧与目标面之间几何状态的判断。块体间的接触力可直接根据半弹簧与目标面之间的相对位移确定，无需了解母块体与子块体之间具体的接触类型。由于半弹簧具有各自的特征面积，进行接触面破坏状态的判断时，无需重新计算母子块体间的接触面积。与传统的接触模型相比，半弹簧接触模型由于不用耗费大量的计算时间进行接触类型的判断及接触面积的计算，因此简化了计算过程，提高了计算效率。

该模型是对 CDEM 数值方法的有效改进，解决了传统 CDEM 方法计算块体大位移时出现的虚假接触等问题；采用该模型可以实现准三维条件下的块体运动计算。本文将该模型应用于边坡渐进破坏的计算，验证了该方法的可行性和计算精度。

### 参 考 文 献

- Li SH, Liu XY, Liu TP, et al. Continuum-based discrete element method and its applications. In: DEM'08, Beijing, 2008. 147-170
- Li SH, Zhao MH, Wang YN, et al. A continuum-based discrete element method for continuous deformation and
- failure process. In: WCCM VI in Conjunction with APCOM'04, Beijing, 2004. 77
- Wang YN, Zhao MH, Li SH, et al. Stochastic structural model of rock and soil aggregates by continuum-based discrete element method. *Science in China Series E-Engineering & Materials Science*, 2005, 48 (Suppl): 95-106
- Li SH, Zhao MH, Wang YN, et al. A new numerical method for DEM-block and particle model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41 (s1): 436-436
- 李世海, 汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (21): 3642-3651 (Li Shihai, Wang Yuannian. Selection study of computational parameters for dem in geomechanics. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23 (21): 3642-3651 (in Chinese))
- Lanru J, Ove S. Fundamentals of discrete element methods for rock engineering theory and applications. Holland: Elsevier, 2007
- Wu JH, Juang CH, Lin HM. Vertex-to-face contact searching algorithm for three-dimensional frictionless contact problems. *Int J Numer Methods Eng*, 2005, 63(6): 876-897
- Yeung MR, Jiang QH, Sun N. A model of edge-to-edge contact for three-dimensional discontinuous deformation analysis. *Comput Geotech*, 2007, 34(3): 175-186
- Wu JH. New edge-to-edge contact calculating algorithm in three dimensional discrete numerical analysis. *Adv Eng Software*, 2008, 39(1): 15-24
- Jiang QH, Yeung MR. A model of point-to-face contact for three-dimensional discontinuous deformation analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2004, 37(2): 95-116
- Beyabanak SAR, Mikola RG, Hatami K. Three-dimensional discontinuous deformation analysis (3-D DDA) using a new contact resolution algorithm. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35: 346-356
- Cundall PA. Formulation of a three-dimensional distinct element model Part I. a scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks.

- Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1988, 25(3): 107-116
- 13 Itasca Consulting Group Inc. 3DEC-3D distinct element code. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Inc., 1987
- 14 王泳嘉, 刘连峰. 三维离散块体法软件系统 TRUDEC 的研制. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 201-210 (Wang Yongjia, Liu Lianfeng. Formulation of a three-dimensional discrete element model-TRUDEC system. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(3): 201-210 (in Chinese))
- 15 Liu J, Kong X, Lin G. Formulation of the three-dimensional discontinuous deformation analysis method. *Acta Mech Sinica*, 2004, 20(3): 270-282
- 16 罗海宁, 焦玉勇. 对三维离散单元法中块体接触判断算法的改进. 岩土力学, 1999, 20(2): 37-40 (Luo Haining, Jiao Yuyong. Improvement of contact judgment algorithm in 3D DEM. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(2): 37-40 (in Chinese))
- 17 陈文胜, 郑宏, 郑榕明等. 岩石块体三维接触判断的侵入边法. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 565-571 (Chen Wensheng,
- Zheng Hong, Cheng Yunming, et al. Detection of 3D rock block contacts by penetration edges. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 565-571 (in Chinese))
- 18 王建全, 林皋, 刘君. 三维块体接触判断方法的分析与改进. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2247-2257 (Wang Jianquan, Lin Gao, Liu Jun. Analysis and improvement of scheme to detect contacts in system composed of 3D convex polyhedral blocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(11): 2247-2257 (in Chinese))
- 19 Hart R, Cundall P A, Lemos J. Formulation of a three-dimensional distinct element method model—part II: mechanical calculations for motion and interaction of a system composed many polyhedral blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1988, 25(3): 117-125
- 20 Li SH, Wang JG, Liu BS, et al. Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope by face-to-face discrete element method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40 (4): 331-348

(责任编辑: 周冬冬)

## SEMI-SPRING CONTACT MODEL AND ITS APPLICATION TO FAILURE SIMULATION OF SLOPE<sup>1)</sup>

Feng Chun<sup>2)</sup> Li Shihai Liu Xiaoyu

(Key Laboratory of Environmental Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** The main purpose of semi-spring contact model is to judge and describe the contact status, and then to calculate the contact force between blocks. Contact blocks are divided into mother block and son block. Semi-spring is located in mother block, and formed by indenting the vertex of block to mother face, while target face lies in the son block. According to the geometry relationship between semi-spring and target face, the contact force could be obtained directly. There is no need to waste a mount of time to judge the contact type and calculate contact area between two blocks. The model could calculate the progressive failure of geological body under the conditions of quasi-three-dimension, and some numerical cases about slope failure are shown to proof its accuracy and reliability.

**Key words** block distinct element method, CDEM, contact detecting, semi-spring, slope

Received 2 February 2010, revised 21 May 2010.

1) The project supported by the National Basic Research Program of China (2010CB731506), the National Natural Science Foundation of China (10632100) and the Key Orientation Program of Chinese Academy of Science (KJCX2-YW-L01).

2) E-mail: fengchun@imech.ac.cn