节理化岩质边坡随机结构面有限元和离散元耦合计算方法研究

刘天苹，李世海，刘晓宇
(中国科学院 力学研究所，北京 100190)

摘要：针对节理化岩质边坡节理面发育的特点，在连续－非连续离散单元法的基础上，自主编程实现随机结构面网格的有限元和离散元耦合计算模型。与有限元计算对比：弹性阶段计算结果基本一致，验证弹性阶段计算的有效性。与极限平衡法对比：在假定滑面各点同时达到承载极限的条件下，通过滑面平均应力得到与极限平衡法相差甚微的安全系数，再次验证应力计算的有效性，同时证明极限平衡法对应的是坡体的平均应力状态；由于计算模拟的是边坡破坏演化过程，在不采用极限平衡原理的条件下，即使是极限平衡判断稳定的边坡，也可能得到发生渐进破坏导致失稳的计算结果。模拟分析 2001 年发生的武隆滑坡，得到的结果与实际滑坡演化过程相吻合。坡体渐进破坏的计算结果表明，坡体内部裂缝的发生、发展与滑坡演化密切相关，模拟跟踪重点边坡内部破坏演化过程，有助于提前采取及时、适当的支护等措施，避免灾难的发生。

关键词：边坡工程；节理化岩质边坡；随机结构面；渐进破坏；有限元离散元耦合；连续－非连续离散单元法；武隆滑坡
中图分类号：P 642.22 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2014)增 1－3114－09

STUDY OF DEM AND FEM COMBINATION METHOD FOR STOCHASTIC STRUCTURAL PLANE IN JOINTED ROCK SLOPE

LIU Tianping，LI Shihai，LIU Xiaoyu
(*Institute of Mechanics*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100190，*China*)

Abstract：According to the joint distributing character of jointed rock slope，a numerical method of combined distinct element method/finite element method(DEM/FEM) for stochastic structural plane is presented based on continuum-discontinuum element method(CDEM). Compared with the elastic results of FEM，the method is indicated to be credible. Assuming all the points on the potential sliding surface are in the critical failure status simultaneously，there is almost no difference between the value of safety factor calculated by the method and limit equilibrium method(LEM)，which proves stress result of the method is credible once again. And it is also concluded that LEM shows the mean stress state，while the method aims to simulate the progress failure of slope. The slope may become instable caused by progressive failure which is concluded to be stable by LEM when the method is used without hypothesis of LEM. Wulong landslide is simulated and the consistent phenomenon with the real failure progress is got. The failure progress of the Wulong landslide shows that the development of cracks inside the slope is very important to analyse the stability of slope. Tracking and analyzing the failure progress of important slopes are helpful in taking proper supporting measures in advance to avoid disasters.

Key words：slope engineering；jointed rock slope；stochastic structural plane；progressive failure；combined distinct element method/finite element method(DEM/FEM)；continuum-discontinuum element method(CDEM)；Wulong landslide

收稿日期：2012－01－09；**修回日期：**2013－09－09
基金项目：国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731505)；国家自然科学基金资助项目(11002146)
作者简介：刘天苹(1981－)，女，2004年毕业于中国矿业大学(北京)土木工程专业，现为博士研究生、助理研究员，主要从事岩土工程实验及数值模拟等方面的研究工作。E-mail：liutp@imech.ac.cn

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　引　言

节理化岩质边坡大量存在于人们居住区域及道路边坡中，由于其节理发育，岩体完整性及稳定性通常较低，严重威胁着人民的生命财产安全。因此，分析节理化岩质边坡的稳定性极为重要。现在最常用的边坡稳定性分析极限平衡法[1-3]、有限元强度折减法[4-5]，都是基于等效连续介质的概念，对于土质边坡已经取得了较好的分析效果。但是，对于含有大量不同构造、产状和特性的不连续结构面的节理化岩质边坡，这些方法不适用。

离散元法是 P. A. Cundall[6]于70年代提出的描述节理岩体以及非连续介质力学行为的有效数值方法。王泳嘉[7]于1986年首次向我国岩石力学与工程界介绍了离散元法，1991年王泳嘉与邢纪波[8]合编了《离散单元法及其在岩土力学中的应用》一书，系统地介绍离散单元法。经过30多年，离散单元法从刚性元到可变形元，从二维到三维计算，得到了广泛的发展和应用[9-11]。国内外很多学者结合有限元与离散元各自的特点，在其耦合算法上也取得了较大进展[12-14]。其中S. H. Li等[15-18]发展了连续－非连续离散单元法(CDEM)，该方法将节理岩体视为由块体和节理面组成，块体内部采用连续介质的方法计算块体的变形和节点力，在节理面上可以分开产生大位移、大变形。这种方法非常易于描述裂缝的发育、发展，适合计算滑坡体渐进破坏过程。

本文在连续－非连续离散单元法的基础上，针对节理化岩质边坡的不连续结构面的分布特征，自主编程实现了随机结构面的有限元和离散元耦合计算。对比有限元计算结果，证实了程序计算弹性结果的有效性；对比极限平衡法，分析其与极限平衡的不同；模拟分析武隆滑坡，得到了符合实际的坡体渐进破坏现象。

2　随机结构面模型的建立

节理化岩质边坡的节理面是复杂而有序的(见图 1)，常规六面体单元难以模拟其复杂性，而复杂的四面体单元又难以模拟其有序性。将有序的六面体单元节点位置在一定范围内加以随机，

图 1　节理化岩质边坡

Fig.1　Jointed rock slope

形成随机结构面模型(见图 2)，能很好地模拟节理复杂有序的特性。

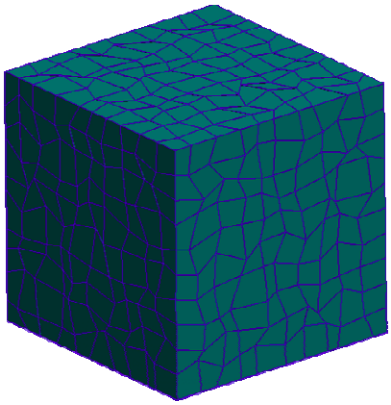


图 2　随机结构面网格模型

Fig.2　Mesh model of stochastic structural plane

3　模型计算的基本原理

3.1　基本假设

将岩体视为非连续可变形单元组成，单元之间通过虚拟弹簧传递相互作用力，有如下假设：

(1) 单元视为弹性体。

(2) 单元之间的作用力通过法向和切向弹簧来承担，用法向及切向力表示，分别与法向和切向位移成正比关系。

(3) 破坏、滑移都发生在接触面上，用拉伸破坏与莫尔－库仑相结合的复合准则判断是否破坏，由界面破坏实现计算的非线性，单元本身只变形不破坏。

3.2　控制方程

本文采用动态松弛法，以牛顿第二定律为理论基础，将静力学问题转化为动力学问题求解：从承载前无内力的初始状态出发，仿效结构或构

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

件在临界阻尼下的瞬时振动历程，推算其在振动湮灭时的状态，得出所期望的分析结果。

单元在力学上被看作连续的、各向同性的线弹性体，其力学特性由三维弹性动力学基本微分方程来描述，即

平衡方程：

$$\sigma_{ij,\ j}+f_i-\rho u_{i,\ tt}-\mu u_{i,\ t}=0 \tag{1}$$

几何方程：

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}(u_{i,\ j}+u_{j,\ i}) \tag{2}$$

物理方程：

$$\sigma_{ij}=\lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk}+2G\varepsilon_{ij} \tag{3}$$

位移边界条件：

$$u_i=\bar{u}_i \tag{4}$$

力边界条件：

$$\sigma_{ij}n_j=T_i \tag{5}$$

初始条件：

$$u_i(x,\ y,\ z,\ 0)=u_i(x,\ y,\ z) \tag{6}$$

$$u_{i,\ t}(x,\ y,\ z,\ 0)=u_{i,t}(x,\ y,\ z) \tag{7}$$

式中：σ_{ij}，ε_{ij}，f_i，u_i 和 T_i 分别为应力、应变、体积力、位移和面积力；ρ，μ 分别为质量密度和阻尼系数；λ，G 分别为拉梅常数和剪切模量；n_j 为表面外法线的方向余弦；δ_{ij} 为 Kronecker delta 符号。

利用弹性力学变分原理，联立式(1)～(7)，可以推导出单元运动方程作为计算的控制方程：

$$[\boldsymbol{M}]\{\ddot{\boldsymbol{u}}(t)\}+[\boldsymbol{C}]\{\dot{\boldsymbol{u}}(t)\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{u}(t)\}=\{\boldsymbol{Q}(t)\} \tag{8}$$

式中：$\{\ddot{\boldsymbol{u}}(t)\}$，$\{\dot{\boldsymbol{u}}(t)\}$，$\{\boldsymbol{u}(t)\}$ 和 $\{\boldsymbol{Q}(t)\}$ 分别为单元内所有节点的加速度列阵、速度列阵、位移列阵和节点荷载列阵；$[\boldsymbol{M}]$，$[\boldsymbol{C}]$ 和 $[\boldsymbol{K}]$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

3.3 控制方程的求解

求解控制方程是本程序的计算核心，每个时步内的计算分为 2 个部分，第 1 步循环每个可变形单元，完成相应的连续变形计算；第 2 步计算接触面上的力。

(1) 可变形单元内部的计算

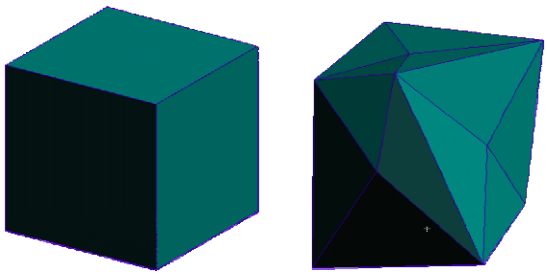
由于结构面的随机形状，必然导致单元为不规则的多面体(见图 3)，不能直接计算多面体的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵。同时，节点位置随机后，原来在 1 个面上的点也可能不在 1 个平面上。本文将原来在 1 个面上的点的坐标取平均，得到面心或等效面心。通过每个面的面心(或等效面心)及面上的任 1 条棱上的 2 个点以及体心共 4 个点构成 1 个四面体，任意一个多面体都可以看成是这样的一系列的四面体组成，而四面体的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵可以直接算得，由此就可以间接获得不规则多面体的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵，即式(8)中的：

$$[\boldsymbol{M}]=\sum_e[\boldsymbol{M}^e] \tag{9}$$

$$[\boldsymbol{C}]=\sum_e[\boldsymbol{C}^e] \tag{10}$$

$$[\boldsymbol{K}]=\sum_e[\boldsymbol{K}^e] \tag{11}$$

式中：$[\boldsymbol{M}^e]$，$[\boldsymbol{C}^e]$ 和 $[\boldsymbol{K}^e]$ 分别为四面体单元的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。



(a) 随机前 1 个六面体单元　　(b) 随机后 1 个多面体单元

图 3　单元形状

Fig.3　Element shape

先由刚度矩阵和节点位移求出弹性力，再由阻尼矩阵和节点速度求出阻尼力，最后叠加上外力用直接积分法求解式(8)的控制方程。具体计算方程为：

求变形力：

$$\begin{bmatrix} K_{1,\ 1} & K_{1,\ 2} & \cdots & K_{1,\ n} \\ K_{2,\ 1} & K_{2,\ 2} & \cdots & K_{2,\ n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n,\ 1} & K_{n,\ 2} & \cdots & K_{n,\ n} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \tag{12}$$

求阻尼力：

$$\begin{bmatrix} C_{1,\ 1} & C_{1,\ 2} & \cdots & C_{1,\ n} \\ C_{2,\ 1} & C_{2,\ 2} & \cdots & C_{2,\ n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n,\ 1} & C_{n,\ 2} & \cdots & C_{n,\ n} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f_1' \\ f_2' \\ \vdots \\ f_n' \end{bmatrix} \tag{13}$$

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

叠加上外力用直接积分法求解运动方程：

$$\left.\begin{aligned} a_i &= (f_i + f_i' + f_i^{外})/m_i \\ v_i &= v_i^{t-1} + a_i t \\ u_i &= u_i^{t-1} + v_i t \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

式中：a_i，m_i，v_i 和 u_i 分别为单元节点的加速度、质量、速度和位移；t 为时间步长；$f_i^{外}$ 为包括边界面上的力和接触面上弹簧的力。

(2) 相邻单元间作用

相邻单元之间有接触面，单元之间接触力的传递通过连接于相邻单元对应节点间的法向及切向弹簧来实现。

当结构面没有破坏，接触力和接触相对位移关系为

$$\left.\begin{aligned} F_n &= -K_n \Delta u_n \\ F_s &= -K_s \Delta u_s \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

式中：F_n 和 F_s 分别为法向和切向弹簧力；Δu_n 和 Δu_s 分别为相对位移的法向和切向分量；K_n 和 K_s 分别为接触法向和切向弹簧的刚度，由下式确定：

$$\left.\begin{aligned} K_n &= EA/L \\ F_s &= GA/L \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

式中：E 为结构面的弹性模量，G 为剪切模量，A 为该点所代表的接触面积，L 为结构面的等效厚度。

同时，结构面上采用拉伸破坏与莫尔－库仑相结合的复合准则，当满足拉伸破坏准则 $F_n \geq TA$ (T 为抗拉强度)时，存在：

$$\left.\begin{aligned} F_n &= 0 \\ F_s &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

当满足莫尔－库仑准则 $F_s > F_n \tan\phi + cA$ 时，存在：

$$\left.\begin{aligned} F_n &= -K_n \Delta u_n \\ F_s &= F_n \tan\phi \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

式中：c 为黏聚力，ϕ 为内摩擦角。

相邻 2 个单元间的接触在节点位置随机之前是 1 个平面，随机之后 2 个单元的接触可能不在 1 个平面内，则需要看作几个接触平面计算。

3.4 计算步骤

动态松弛法计算静力问题的时候，能量收敛前力和位移是波动的，力和位移解是一个中间量，不具有实际意义，直到能量收敛，才能得到坡体力和位移的分布，而破坏准则必须在能量收敛以后才能加入。

具体的模拟分析计算步骤(见图 4)如下：

(1) 用 ANSYS 或 PATRAN 建立初步几何模型及网格，导出模型及网格数据。

(2) 用程序完成节点位置的随机和网格的调整，读入模型的材料参数。

(3) 给出各单元节点的边界条件和初始速度、位移。

(4) 由单元内变形力和阻尼力，求出各点所受的单元内力。

(5) 由边界条件和接触面上的力，求出各点所受外力。

(6) 由式(14)求出单元各质点的加速度、速度、位移。

(7) 循环(4)～(6)步，直到能量收敛。

(8) 加入破坏判断准则，继续循环(4)～(6)步计算，直至满足计算要求。

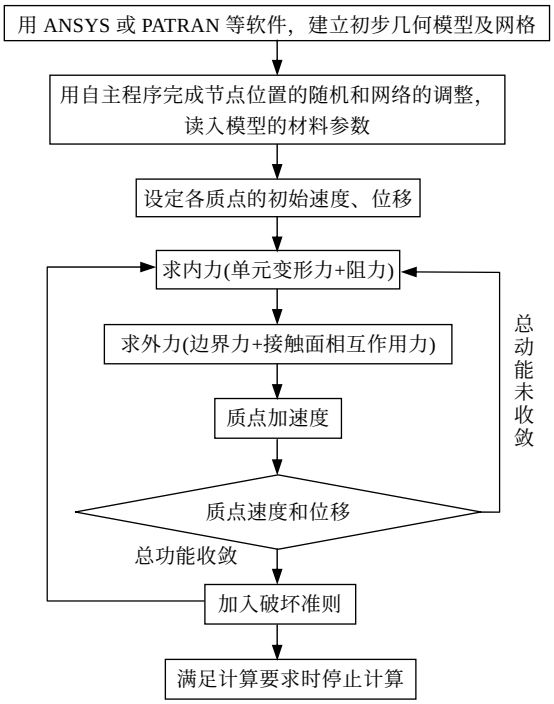


图4　计算步骤

Fig.4　Calculation step

4　计算结果与其他方法的比较

采用本文方法计算，当不引入界面破坏时，

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可以得到研究对象的弹性应力与位移场；当引入界面破坏，可以得到破坏发生、发展状态。

(1) 弹性计算与有限元比较

为了验证程序弹性计算的有效性，运用本文程序分析计算一个边坡模型，将其弹性位移和应力分布结果与有限元软件(ANSYS)计算进行对比。选取边坡的一个薄层，建立网格模型如图 5 所示，底部全部固定，前后左右法向约束，重力方向竖直向下，材料的弹性模量为 0.3 GPa，泊松比为 0.3，密度 2 100 kg/m^3。

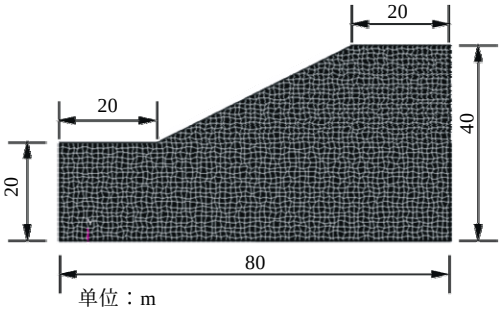


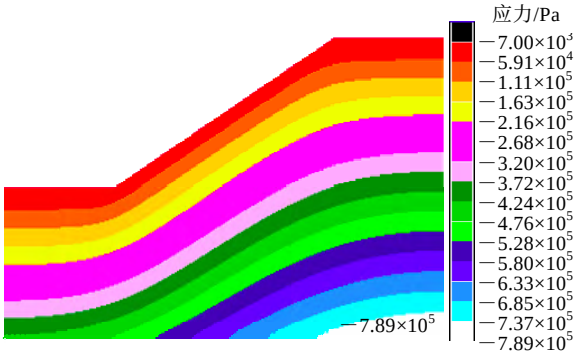
图5　边坡网格模型

Fig.5　Slope mesh model

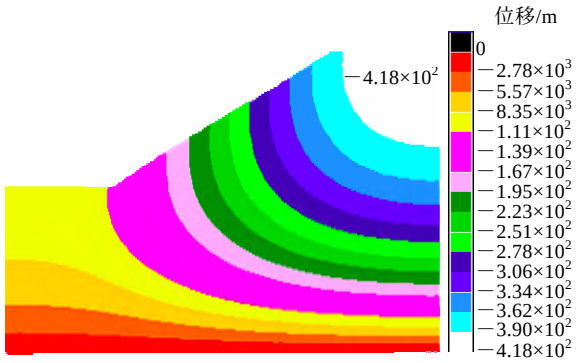
程序及ANSYS计算所得边坡竖直方向的应力位移分别如图 6，7所示。对比结果云图，程序及ANSYS的计算结果基本一致，如竖直方向最大应力，程序及ANSYS结果分别为-7.89×10^5和-7.81×10^5 Pa；竖直方向最大位移程序及ANSYS结果分别为-4.18×10^{-2}和-4.16×10^{-2} m。由此可见，程序弹性计算结果是有效的。

(2) 计算结果与极限平衡法比较

王连捷等[19]用有限元极限平衡法分析边坡的稳定性，该方法是以有限元计算为基础，用有限元计算结果得出的应力，根据极限平衡原理，计算安全系数。运用本程序计算的弹性边坡应力场，按照极限平衡的方法搜索得到滑面，可以得到滑动面上所有点的力的状态。假定滑面上所有点同时达到承载极限，可以计算极限平衡原理下的安全系数。



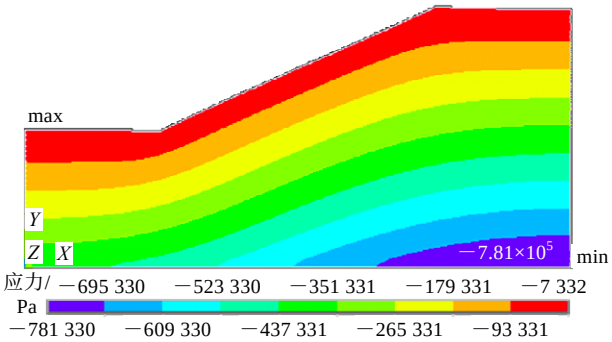
(a) 竖直方向应力云图



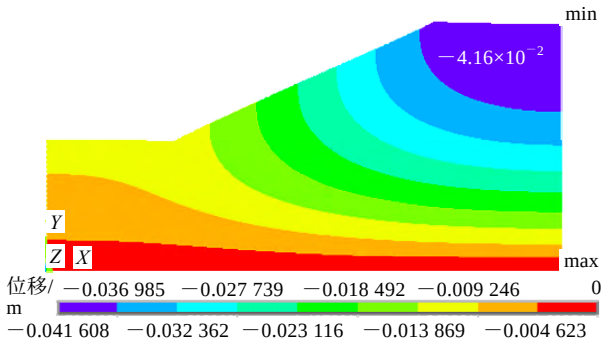
(b) 竖直方向位移云图

图 6　程序弹性计算结果

Fig.6　Numerical results of the method



(a) 竖直方向应力云图



(b) 竖直方向位移云图

图 7　ANSYS计算结果

Fig.7　Numerical results of ANSYS

用极限平衡法搜索得到的滑面切割现有模型，在滑面位置形成一个新的界面，滑面将由一系列单元界面组合而成。单元界面间任意点的力可以投影到以界面为 xoy 平面，界面的法方向为 z 方向的局部坐标系中，得到 f_n，f_{xi}，f_{yi}，其中 f_n 为单元接触力在界面法向分量，f_{xi} 为力在局部坐标系的 x 向分量，f_{yi} 为力在局部坐标系的 y 向分量。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

按照极限平衡原理，每个单元界面上有：

$$f_{抗滑i} = f_n \tan\varphi + cA_i \tag{19}$$

$$f_{下滑i} = \sqrt{f_{xi}^{\ 2} + f_{yi}^{\ 2}} \tag{20}$$

式中：$f_{抗滑i}$ 为节点最大的静摩擦力，φ 为内摩擦角，c 为黏聚力，A_i 为节点在接触面上对应的面积，$f_{下滑i}$ 为单元接触力在接触面上力的分量。

滑面上安全系数 K 为界面上所有点的共同作用结果，计算如下：

$$K = \frac{\sum f_{抗滑i}}{\sum f_{下滑i}} \tag{21}$$

计算图 5 的边坡模型，取 c =16 kPa，φ = 18 °。运用极限平衡软件计算，得到安全系数为 1.084，最危险的滑移面如图 8 中弧线所示。

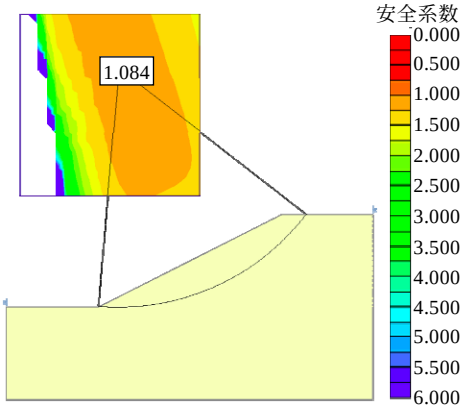


图 8　极限平衡法结果

Fig.8　Numerical results of LEM

选取相同的滑动面，按照式(21)计算滑面上安全系数有 K =1.086，与极限平衡法得到的安全系数仅相差 0.2%。可见当采用与极限平衡相同的安全系数取法时，其结果与极限平衡法并无差异。

值得探讨的是，式(21)是按照滑面上所有点同时达到承载极限来求得的，实际上坡体各部分是分别承担重力作用，可能会发生先后破坏，即使有滑面存在，滑面上各点 i 均应存在一个点对应的安全系数 K_i ：

$$K_i = \frac{f_{抗滑i}}{f_{下滑i}} \tag{22}$$

为了与极限平衡法比较，本文调整计算程序不进行破坏判断，而计算得到滑面上各点的安全系数 K_i 如图 9 所示。图中上方为边坡模型，下方横轴为各点在坐标系中 X 方向位置坐标，纵轴为安全系数 K_i 值，可见 K_i 沿滑面非均匀分布，大致可分为 4 段：在靠近剪出口的 ab 段 K_i<0，后方 bc 段 K_i>0，cd 段 K_i<0，de 段 K_i>0。此时，K_i 无法判定边坡的稳定性，极限平衡法中平均意义的安全系数 K 也无法判定边坡的稳定性。

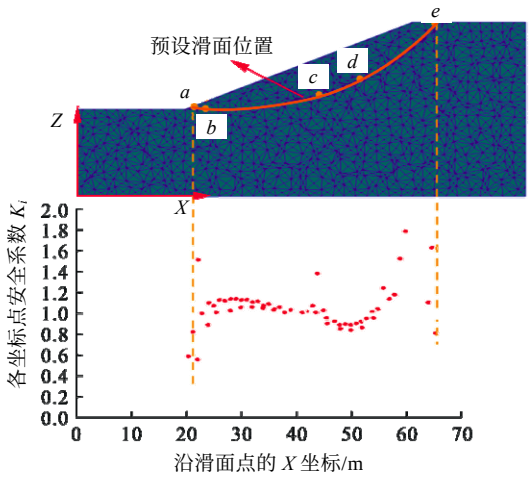
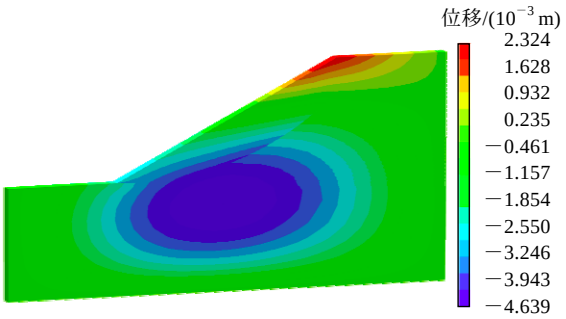


图 9　各点安全系数

Fig.9　Safety factors of each point

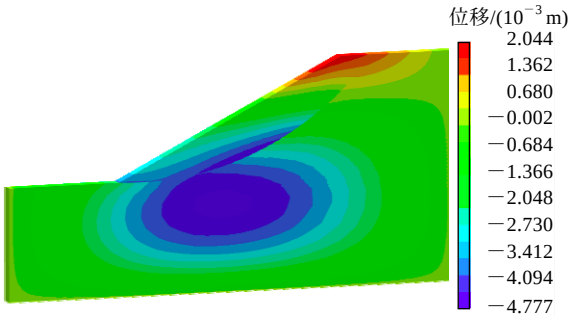
本文计算方法在实际的边坡稳定性分析中，不按式(21)或(22)计算安全系数，而是通过界面拉伸破坏与莫尔－库仑相结合的复合准则判断是否进入非线性计算，满足破坏准则的点在界面上的力将由式(15)转为式(17)或(18)非线性计算，迭代过程中实现边坡各位置应力的转移重分配。破坏可能终止于内部，边坡最后保持稳定，也可能发生从局部破坏到整体失稳。

对于图 5 计算模型，采用相同强度参数，在滑面上进行破坏判断，可以得到边坡渐进破坏的过程如图 10。参照图 9 中滑面分为 ab，bc，cd，de 共 4 段，图 10(a)中滑坡初期在滑面上 ab，cd 段位移不连续表明发生破坏，bc，de 段位移连续

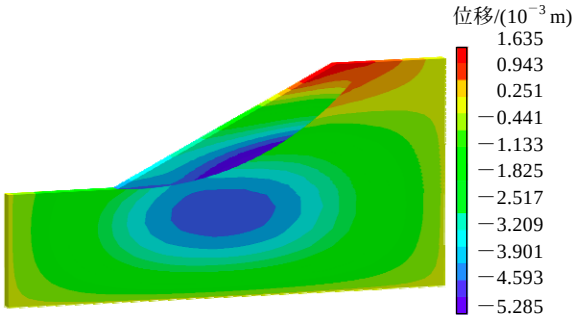


(a) 初期水平方向

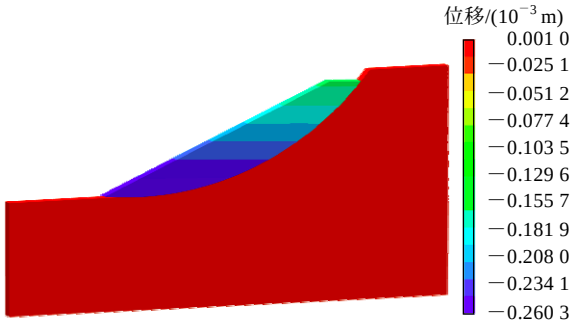
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(b) 渐进扩展初期水平方向



(c) 渐进扩展后期水平方向



(d) 滑动后水平方向

图10　滑坡渐进破坏过程位移云图

Fig.10　Displacement contours of landslide progressive failure

表明没有破坏，这与式(22)计算得到的安全系数 *ab*，*cd* 段小于 0，*bc*，*de* 段大于 0 吻合。图 10(b)和(c)中随着应力转移，位移不连续位置在 *bc*，*de* 段逐渐扩展增多。最终边坡发生整体滑动如图 10(d)所示。

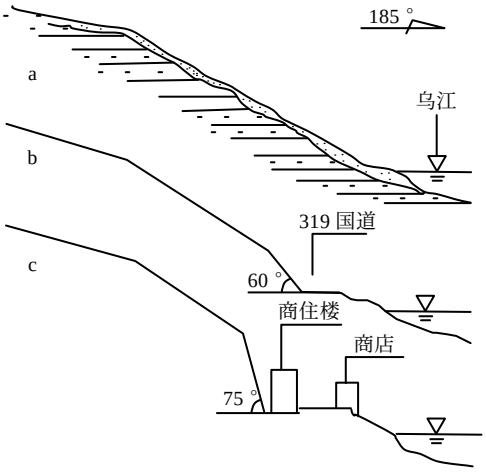
可见，极限平衡法反映的是坡体的平均应力状态，对应 1 个平均意义的判断；本方法能反映边坡各处的应力状态，分析力的转移重分配，模拟边坡的渐进破坏，对应的是边坡渐进破坏演化过程。

5　典型实际节理化岩质边坡的模拟

2001 年 5 月 1 目，重庆市武隆滑坡给国家和人民带来了巨大的灾难。该滑坡属缓倾角切向坡，岩层产状为：SE130 °∠11 °，先后被与斜坡近平行的陡倾裂隙及与斜坡近于直交的裂隙两组节理切割，呈层状破碎岩体，形成大小不等的分离块体，最大体积达 10 m^3 [20]，如图 11 所示。经过多次开挖，边坡地形[21]如图 12 所示。

图 11　滑坡后的坡体

Fig.11　Slope after land sliding



a—319 国道修建前原始地形与地层结构；b—319 国道修建后地形；c—319 商住楼修改后地形

图 12　武隆滑坡区斜坡演化示意图

Fig.12　Sketch of evolvement at Wulong landslide region

此次滑坡分 3 个主要阶段[21]：(1) 2000 年底，边坡的下端出现鼓张裂隙，斜坡出现明显变形；(2) 2001 年 4 月，开挖坡体变形加剧，出现鼓出和多处开裂变形，并经常掉块；(3) 4 月 30 日下整天雨，5 月 1 日滑坡发生。

根据岩层节理方向及开挖坡体地形特点[20]，建立一组倾角 11 °的节理，被与斜坡近平行的陡倾裂隙节理切割的单层网格模型，并将网格节点在一定范围内随机调整位置，得到计算网格见图 13。依据常规参数及王成华等[21-22]的研究成果，地表附

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

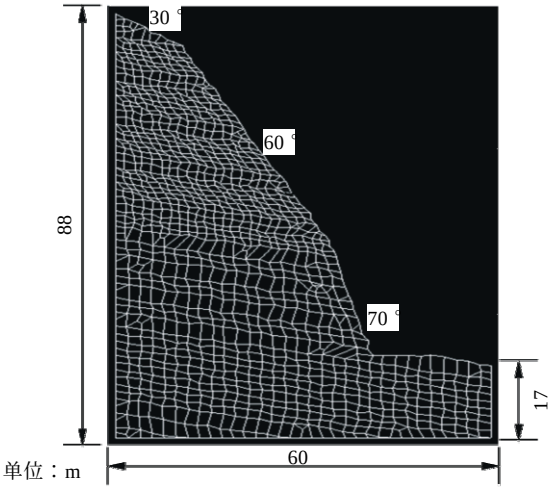
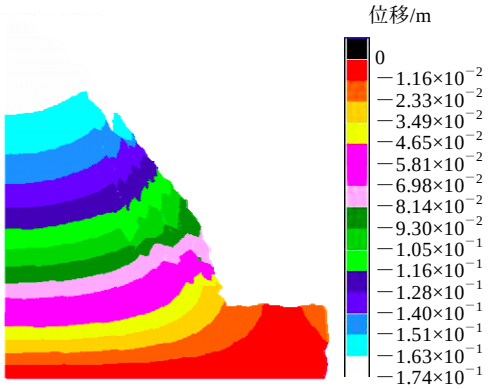


图 13　武隆滑坡计算网格模型图

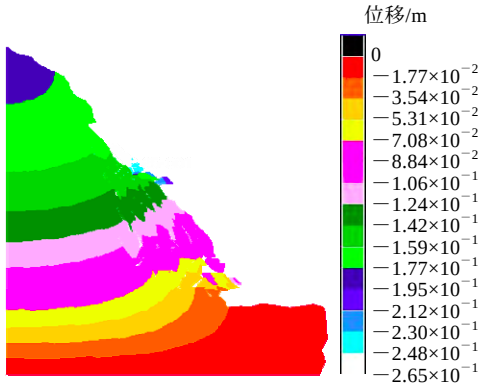
Fig.13　Mesh model of Wulong landslide

近的坡体参数取 c = 24 kPa，φ = 30 °，弹性模量 0.3 GPa，泊松比为 0.3，密度 2 100 kg/m^3。由于风化程度不同，靠近固定边界的坡体内部强度略高于地表。计算边界条件：底部全部固定，前后、左右均法向约束，重力方向竖直向下。

图 14 为计算得到边坡渐近破坏过程中竖直方向位移云图。



(a) 计算破坏初期



(b) 计算破坏后期

图 14　武隆边坡渐进破坏过程位移云图

Fig.14　Displacement contours of Wulong landslide during progressive failure

计算结果与滑坡 3 个阶段对比：图 14(a)坡体下端出现裂隙，坡体变形明显，对应滑坡演化的第 1 阶段；图 14(b)坡体变形加剧，出现鼓出和开裂变形，并有块体掉下，对应滑坡演化的第 2 阶段，并且这时通过观察坡体内部的裂缝，可见滑坡已经处于滑动的初始状态，随时可能发生大规模滑动。一旦加入雨水作用，大规模滑坡必然发生。

由此可见，本程序可以模拟分析滑坡渐进演化的过程。从内部分析滑坡的状态，有助于认知滑坡发生的可能性，可以提醒人们在滑坡发生前及时采取边坡支护、人员撤离等相应措施，避免滑坡的发生，或减少滑坡给人民生命财产带来的损失。

6　结　论

本文针对节理化岩质边坡的不连续结构面的分布特征，在连续－非连续离散单元法的基础上，实现了随机结构面的有限元和离散元耦合计算，计算对比了有限元法、极限平衡法，并模拟了典型实际滑坡。主要结论如下：

(1) 节理化岩质边坡结构具有复杂有序的特性，常规的有限元和极限平衡法分析其稳定性具有局限性，本文的网格及计算模型适合分析其特性。

(2) 本文计算方法弹性计算结果具有较高的精确度，与有限元的结果基本一致；不同的是本方法不仅可以计算弹性结果，还可以计算裂缝发生、发展状态。

(3) 在本文方法的基础上，如果沿用极限平衡原理，发展基于此方法的极限平衡，可以得到与极限平衡法一致的安全系数，证明极限平衡法对应的是坡体的平均应力状态；此外，本文计算方法可以得到坡体各位置的真实应力状态，分析力的转移重分配，模拟坡体渐进破坏的过程。

(4) 应用本文方法，分析武隆滑坡得到的结果与实际演化过程吻合。从演化初期计算结果就可以看见坡体内部大量的裂缝，预示滑坡有可能发生。可见，对于这样的坡体，需要跟踪坡体内部破坏演化过程，有助于提醒人们提前采取及时、适当的支护等措施，避免灾难的发生。

由于程序还没有加入流固耦合的作用，在大量

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

块体接触更新方面也有待完善，暂时不能给出滑坡发展的全过程，这也将是今后的一项重要工作。

参考文献(References)：

[1] 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，2003：16 – 20.(CHEN Zuyu. Stability analysis of soil slopes—theory，methods and programs[M]. Bejing：China Water Power Press，2003：16 – 20.(in Chinese))

[2] 陈祖煜，弥宏亮，汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]，岩土工程学报，2001，23(5)：525 – 529.(CHEN Zuyu，MI Hongliang，WANG Xiaogang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2001，23(5)：525 – 529.(in Chinese))

[3] CHENG Y M，LANSIVAARA T，WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods[J]. Computers and Geotechnics，2007，34(3)：137 – 150.

[4] 赵尚毅，郑颖人，时卫民，等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报，2002，24(3)：343 – 346.(ZHAO Shangyi，ZHENG Yingren，SHI Weimin，et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2002，24(3)：343 – 346.(in Chinese))

[5] DAWSON E M，ROTH W H，DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique，1999，49(6)：835 – 840.

[6] CUNDALL P A. The measurement and analysis of acceleration in rock slopes[Ph. D. Thesis][D]. London：University of London，1971.

[7] 王泳嘉. 离散单元法—一种适用于节理岩石力学分析的数值方法[C]// 第一届全国岩石力学数值计算及模型试验讨论会论文集. 吉安：西南交通大学出版社，1986：32 – 37.(WANG Yongjia. Discrete element method—one numerical methods for the analysis of jointed rock mechanics[C]// Proceedings of the first national rock mechanics numerical calculation and model test symposium. Ji′an：Southwest Jiaotong University Press，1986：32 – 37.(in Chinese))

[8] 王泳嘉，邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳：东北工学院出版社，1991：2 – 143.(WANG Yongjia，XING Jibo. Distinct element method and its applications to geotechnical engineering[M]. Shenyang：Northeast University of Technology Press，1991：2 – 143.(in Chinese))

[9] ESAKI T，JIANG Y，BHATTARAI T N，et al. Stability analysis and reinforcement system design in a progressively failed steep rock slope by the distinct element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，1998，35(4/5)：664 – 666.

[10] AN G F，YIN K L，TANG H M. Discrete element analysis of Huangtupo landslide[J]. Journal of China University of Geosciences，2002，13(1)：83 – 85.

[11] 王卫华，李夕兵. 离散元法及其在岩土工程中的应用综述[J]. 岩土工程技术，2005，19(4)：177 – 181.(WANG Weihua，LI Xibin. A review on fundamentals of distinct element method and its application in geotechnical engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique，2005，19(4)：177 – 181.(in Chinese)).

[12] MOHAMMADI S，OWEN D R J，PERIC D. A combined finite/discrete element algorithm for delamination analysis of composites[J]. Finite Elements in Analysis and Design，1998，28(4)：321 – 336.

[13] LATHAM J P，MUNJIZA A，GARCIA X，et al. Three-dimensional particle shape acquisition and use of shape library for DEM and FEM/DEM simulation[J]. Minerals Engineering，2008，21(11)：797 – 805.

[14] MORRIS J P，RUBIN M B，BLOCK G I，et al. Simulations of fracture and fragmentation of geologic materials using combined FEM/DEM analysis[J]. International Journal of Impact Engineering，2006，33(1)：463 – 473.

[15] LI S H，ZHAO M H，WANG Y N，et a1. A continuum-based discrete element method for continuous deformation and failure process[C]// WCCM VI in Conjunction with APCOM′04. Beijing：[s.n.]，2004：77.

[16] 李世海，刘天苹，刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(增 2)：3 309 – 3 324.(LI Shihai，LIU Tianping，LIU Xiaoyu. Analysis method for landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2009，28(Supp.2)：3 309 – 3 324.(in Chinese))

[17] 冯 春，李世海，刘晓宇. 半弹簧接触模型及其在边坡破坏计算中的应用[J]. 力学学报，2011，43(1)：184 – 192.(FENG Chun，LI Shihai，LIU Xiaoyu. Semi-spring contact model and its application to failure simulation of slope[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2011，43(1)：184 – 192.(in Chinese))

[18] 魏怀鹏，易大可，李世海，等. 基于连续介质模型的离散元方法中弹簧性质研究[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(6)：1 159 – 1 169.(WEI Huaipeng，YI Dake，LI Shihai，et al. Study of spring properties of continuum-based discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2006，25(6)：1 159 – 1 169.(in Chinese))

[19] 王连捷，周春景，吴珍汉，等. 用有限元极限平衡法分析边坡的稳定性[J]. 中国地质，2008，35(5)：1 031 – 1 036.(WANG Lianjie，ZHOU Chunjing，WU Zhenhan，et al. Slope stability analysis by the limit equilibrium method based on the finite element method[J]. Geology in China，2008，35(5)：1 031 – 1 036.(in Chinese))

[20] 殷跃平. 重庆武隆“5.1”滑坡简介[J]. 中国地质灾害与防治学报，2001，12(2)：98 – 98.(YIN Yaoping. Introduction of Chongqing Wulong“5.1”landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2001，12(2)：98 – 98.(in Chinese))

[21] 王成华，陈永波. 武隆滑坡形成机理与成灾分析[J]. 自然灾害学报，2002，11(1)：108 – 112.(WANG Chenghua，CHENG Yongbo. Mechanism and cause of disaster of Wulong landslide[J]. Journal of Natural Disasters，2002，11(1)：108 – 112.(in Chinese))

[22] 李光辉. 武隆滑坡特征与稳定性分析[J]. 路基工程，2007，133(4)：172 – 174.(LI Guanghui. The character and stability analysis of Wulong landslide[J]. Subgrade Engineering，2007，133(4)：172 – 174. (in Chinese))

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net