

要素間結合の破壊を考慮した個別要素法による積層体の変形解析

鳥取大学大学院 学生会員○大野 紀之・潮田 顕士
鳥取大学工学部 正会員 西村 強・木山 英郎

1. はじめに

Cundall によって提案された個別要素法 (Distinct Element Method, 以下 DEM と略す) は解析対象を分離した剛体要素の集合体としてモデル化し, 各隣接要素間に弾性バネと粘性ダッシュポットを挿入して, 接触力を求める。そして, 個々の要素の重心に関する運動方程式を陽解法により解く手法である。DEM は要素間に引張力の発生は認めておらず, 要素同士が非接触となったとき上記のバネ-ダッシュポット系は消滅する。

本研究では, このような DEM の特長を残しつつ, 要素間に結合物質が存在する場合を表現し, さらにその結合物質が, せん断もしくは引張により破壊することを解析する DEM プログラム開発を試みた。そして, 本文では, このプログラムを用い, 円形要素によって構成される 2 次元積層体の 2 軸圧縮解析について報告する。

2. 結合物質に生ずる力と破壊

本文では, 要素形状を円形要素として, 以下に解析手順を述べる。図 1 に示すように, 隣接する 2 要素間に結合物質が存在し, 2 要素の変位によって, 法線方向力, 接線方向力および曲げモーメントが生じるとする。

この結合物質に生じる力は,

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{f}_n &= -K_n D \cdot \Delta u_n \\ \Delta \bar{f}_s &= -K_s D \cdot \Delta u_s \quad (\text{圧縮; 正}) \\ \Delta \bar{M}_z &= -K_n I_z \Delta \omega^s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに, K_n, K_s は結合物質の荷重-変位に関する係数であり, I_z は Z 軸 (o 点を通り紙面に直交) に関する断面 2 次モーメントである。また, $D = 2\bar{r}$ であり, $\bar{r}$ は, 2 要素の半径のうち小さいほうの半径に相当する。なお, I_z は次のように求められる。

$$I_z = \frac{2}{3} \bar{r}^3 \cdot 1 \quad (\text{単位奥行き}) \quad (2) \quad \text{また, } \Delta \omega^s = \Delta \omega_j - \Delta \omega_i \text{ である。}$$

したがって, 時刻 t において結合物質に生じる力は,

$$[\bar{f}_n]_t = [\bar{f}_n]_{t-\Delta t} + \Delta \bar{f}_n \quad [\bar{f}_s]_t = [\bar{f}_s]_{t-\Delta t} + \Delta \bar{f}_s \quad [\bar{M}_z]_t = [\bar{M}_z]_{t-\Delta t} + \Delta \bar{M}_z \quad (3)$$

結合物質内に生じる最大引張応力 $\sigma_{\max}$ およびせん断応力 $\tau_{\max}$ は,

$$\sigma_{\max} = \frac{\bar{f}_n}{D} + \frac{|\bar{M}_z| \bar{r}}{I_z} \quad \tau_{\max} = \frac{|\bar{f}_s|}{D} \quad (4)$$

これらの値が, 引張強度 σ_c あるいはせん断強度 τ_c を上回るとき, 結合物質に破壊が生じたと考える。すなわち,

$$\sigma_c < \sigma_{\max} \quad \text{or} \quad \tau_c < \tau_{\max} \quad \text{のとき} \quad \bar{f}_n = 0, \quad \bar{f}_s = 0 \quad (5)$$

とし, 以後, 該当の 2 要素間に発生する力は, 接触に伴う力 (バネ-ダッシュポット系で表現) のみとなる。

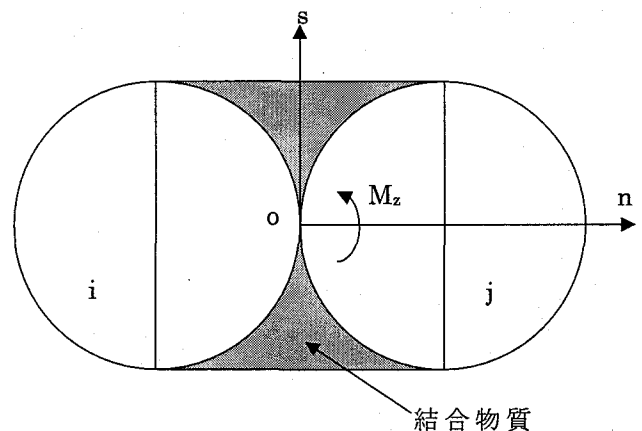


図1 接触する2要素と結合物質のモデル化

3. 解析モデルと解析手順

高さ $2h_0=120\text{cm}$ 、幅 $2w_0=60\text{cm}$ の 2 軸圧縮解析モデルを設定する。円形要素（半径 r ）を最下段に S 個、その上の段に $(S-1)$ 個の順で繰り返し配列した 3 種の配列、 $(S-1)/S=20/21, 22/23, 24/25$ を考える。

解析手順は次の①～④の順である。①解析領域内に等径要素を配置し、重力を作用させて静止状態を得る。②接触点間に結合物質が存在するとして、結合物質を表すバネに初期導入力を作用させて静止状態を得る。③剛板 CD を最上段の要素に接するように配置する。そして、剛板 BC, CD を可動とし、側方からの荷重 P_x と上方からの荷重 P_y を剛板を介して載荷し、静止状態を得る。④ P_x を一定に保ったまま剛板 CD に $-y$ 方向へ変位増分 Δh ($\Delta h/\Delta t=0.1\text{cm/s}$) を与える。なお、解析では対称性を利用して AD, AB 上の要素に、図 2 に示すように変位境界条件を付して、要素数の低減を図った。

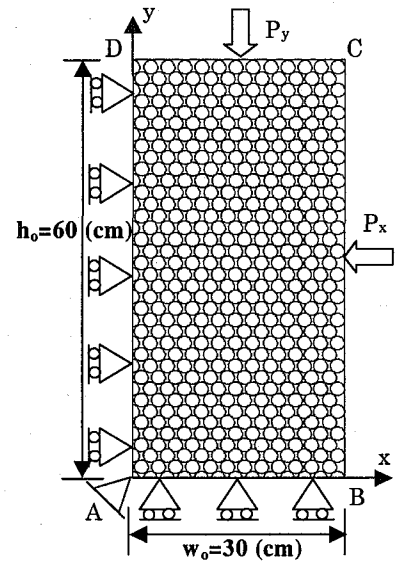


図 2 解析モデル

解析では、要素について、密度 2.65g/cm^3 、半径 $r=1\text{cm}$ 、表面摩擦角 30° とし、結合物質について、 $Kn=Ks=1.0 \times 10^8 \text{ dyne/cm}$ 、 $\tau_c=1.0 \times 10^6 \text{ dyne/cm}^2$ 、 $\sigma_c=0.3 \times 10^6 \text{ dyne/cm}^2$ とした。さらに、接触時のバネ係数は、 $Kn=Ks=1.0 \times 10^8 \text{ dyne/cm}$ 、 $\Delta t=1.0 \times 10^{-5} \text{ sec}$ とした。次節の解析結果の説明では、接触法線方向と x 軸方向のなす角を α と表記している。

4. 解析結果と考察

図 3 に 24/25 配列のときの荷重－変位曲線を例として示す。なお、この図の DEM+B は DEM に結合物質を導入したものである。また、 p_y, p_x は $p_y=P_y/w_0, p_x=P_x/h_0$ であり、 N は 3. の③の状態における解析モデル内の総接触点数を表し、 N_s, N_t はそれぞれ $\sigma_c < \sigma_{\max}$ となるか、あるいは、 $\tau_c < \tau_{\max}$ となり、破壊に至ったとした接点数を表している。この図から、剛板 CD の変位が大きくなるに従い、 p_y/p_x が上昇し、ピーク荷重 ($\Delta h/h_0=0.018$) に到達した後、 p_y/p_x は低下している。これに対応して、 N_s/N が増加していることも分かる。また、DEM より DEM+B の方が強度が大きいことが確認できる。

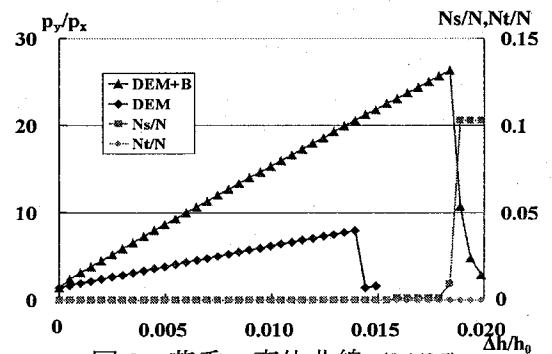
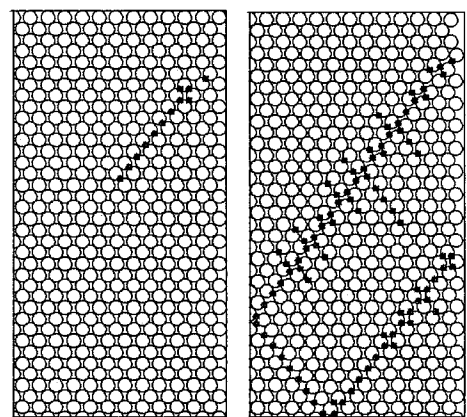


図 3 荷重－変位曲線 (24/25)



(a) $\Delta h/h_0=0.018$ (b) $\Delta h/h_0=0.020$

図 4 破壊点図 (24/25)

図 4(a) にピーク荷重時、(b) にそれよりさらに変位を増加させたとき ($\Delta h/h_0=0.020$) の破壊点の分布を示す。この図より、(a) 図に比べ (b) 図では、破壊点の数が増加し、破壊点が直線状に並んでいることが分かる。

図 5 は各配列の p_y/p_x の最大値を示している。ここで、本解析で用いた円形要素の規則配列では $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ となることに図 5 の横軸は対応している。この図より、3 つの配列では、 α が大きくなるにつれ強度が増し、DEM より DEM+B の方が強度の発現が大きいことが分かる。

参考文献: D.O. Potyondy, P.A. Cundall / International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, pp.1332-1338, (2004)

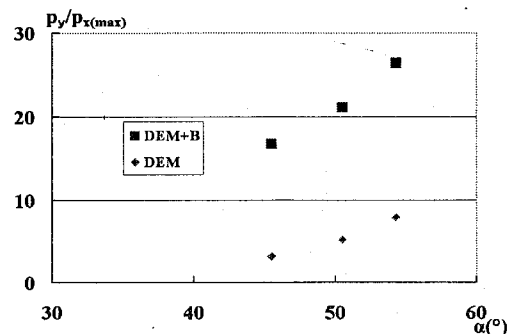


図 5 要素接触角と $p_y/p_{x(\max)}$ の関係