

# 間隙水連成型個別要素法の基本と拡張

木山英郎\*・西村 強\*\*・藤村 尚\*\*\*

地盤や岩盤の安定性や、変形・崩壊の問題を考える時、間隙水の圧力や移動による応力と変形を無視できないであろう。本研究では、粒子間の間隙が水で飽和されている場合を想定し、粒子間接触力のみを個別要素法(DEM)に、間隙水の移動と水圧の作用を連成させた間隙水連成型DEMの一般的な定式化を行った。圧密と繰返し荷重下の挙動に焦点を合わせて、間隙水連成型DEMの基本的事項と解析例を示している。

**Key Words** : DEM, pore water, consolidation, liquefaction

## 1. 緒 言

個別要素法(以下、DEMと略す)<sup>1)</sup>は、地盤や亀裂性岩盤のように粒子あるいは岩盤ブロックの集合体に対し、力の伝達を粒子と粒子の接触点に挿入した弾性ばねと粘性ダッシュポットによって任なっている。ところが、実際の地盤や岩盤の安定性や、変形・崩壊の問題を考える時、間隙水の圧力や移動による応力と変形を無視できないであろう。

そこで、本報では、粒子間の間隙が水で飽和されている場合を想定し、粒子間接触力のみをDEMに間隙水の移動と水圧の作用を連成させた間隙水連成型DEMの基本的な定式化を行う。その際、間隙水圧を要素剛性に比例する粒子間接触力と対比できるように、間隙水の体積弾性率が導入される。この意味で間隙水は圧縮性となるが、粒子集合体を作る構造骨格に比しての実用上の圧縮・非圧縮性の評価は別問題であることに注意を要する。

実際、粒子集合体の作る剛な構造骨格に対し、一部粒子の剛性を低減することにより柔な構造骨格を作る時、モデル全体の変形に占める間隙水の圧縮量は微々たるもので、実用上、非圧縮性とみなし得る。間隙水連成型DEMに剛性減要素を導入することによって、応力履歴と高間隙率・柔構造骨格を表現することが後半の主題となる。

さて、次章2.で述べる間隙水連成型DEMの定式化と圧密試験への適用については、既に昭和61年の土質工学会並びに土木学会年次大会で基本的事項を報告した<sup>2), 3)</sup>。この手法は、その後、伯野らによって砂地盤の液状化現

象の大容量解析に用いられている<sup>4)</sup>。一方、著者らは、最近、この手法を透水試験や浸透流の問題に適用できるように検討を進めている<sup>5), 6)</sup>。このように、間隙水連成型DEMは、地盤の圧密、浸透流、液状化などを統一して論じ得る数値解析法の可能性を有している。本報では、圧密と繰返し荷重下の挙動に焦点を合わせて、間隙水連成型DEMの基本的事項と拡張について現状を取りまとめおくことにした。

## 2. 間隙水挙動とDEM定式化

間隙水の流動をモデル化するに際し、水は圧縮性流体であり、間隙間の流れの基礎式としてダルシー則が成立している。DEMの基本的な解析手順に従い、流量、間隙水圧等の諸量が要素の挙動と連成して時間増分毎に逐次計算されるよう配慮している。

Fig.1は、土粒子の一つ一つをDEMの円形要素に対応させて、その間隙を水で満たした圧縮供試体の解析モデルを示す。要素は半径 $r=1\text{cm}$ の円形単粒度とし、使い慣れた1要素4接点の規則配列を用いる。Fig.2には集合体の一構成単位となる4要素とこれらによって作られる間隙 $Q$ 、それに隣接する間隙 $m_1 \sim m_4$ を示している。これらの間隙が水で飽和されているとして、以下に計算手順の概略を記す。静水圧成分は水頭勾配になんら寄与しないから、過剰間隙水圧成分のみを用いている。

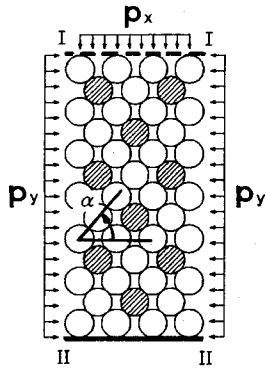
時刻 $t$ ・ $\Delta t$ においてそれぞれ体積 $V_q$ 、 $V_{m_1} \sim V_{m_4}$ 、過剰間隙水圧 $u_q$ 、 $u_{m_1} \sim u_{m_4}$ の状態にあるとする。Fig.3に示すように、微小時間 $\Delta t$ 間に $V_q$ (2次元解析であるので実際は面積)が $V_q' (=V_q - \Delta V_q)$ に変化し、また、この間の流出量が $\Delta q_q$ 、過剰間隙水圧増分 $\Delta u_q$ による間隙水の体積変化量(圧縮が正)が $\Delta V_{wq}$ であるとする。

ダルシー則が成立するとすると、間隙 $Q$ と隣接した間隙間の $\Delta t$ 時間の流出入量を間隙 $Q$ について次式で与えることができる。

\*正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科  
(〒680 鳥取市湖山町南4-101)

\*\*正会員 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科

\*\*\*正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科



I I : vertical pressure  $p_x$  on a rigid plate (drained)  
 I ~ II : lateral liquid pressure  $p_y$  over gum sleeve (undrained)  
 II II : fixed plate (undrained)

Fig.1 A model of consolidation test for DEM analysis:  
 The model is 10cm x 20cm in initial state of an assembly of circular elements of 1cm in radius  $r$  and  $50^\circ$  in their contact angle  $\alpha$ , subjected to isotropic consolidation tests  $p_x = p_y = p$

$$\Delta q_e = - \sum_i \frac{(u_{m_i} - u_e)}{L_{e_m} \gamma_w} \kappa_e S_{e_m} \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\Sigma$ は間隙  $l$  に隣接する間隙  $m_1 \sim m_4$  に関する総和を表し、 $L_{e_m}$ は  $l \sim m$ 間の流路長、 $S_{e_m}$ はその流路断面積を表している。 $\kappa_e$ は要素間流路の透水係数、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量である。Fig.4に示しているように、この手法では、 $S_{e_m}$ については、接触2要素の中心間距離  $S_{ij}$ を、流路長には要素直径  $2r$ を基準値として次式のように与えられると仮定する。

$$L_{e_m} = 2r \times \frac{2r}{S_{ij}} \dots \dots \dots (2)$$

構造骨格に作用する拘束圧が高くなれば、当然、要素中心間距離は小さくなり、それに対応して流路長も長くなる。したがって、このように仮定すれば、拘束圧の差異によって集合体として示す透水係数(巨視的透水係数)が変化するようなことも表現できると考えられる。

このとき、間隙  $l$  からの流出量を示す式(1)は、次式となる。

$$\Delta q_e = - \sum_i \frac{(u_{m_i} - u_e)}{\gamma_w} \kappa_e \left( \frac{S_{ij}}{2r} \right)^2 \Delta t \dots \dots \dots (3)$$

この流出量  $\Delta q_e$  と間隙水圧増分による間隙水圧縮量  $\Delta V_{w_e}$  の和が、間隙  $l$  の体積減少量  $\Delta V_e$  に等しいとする連続の条件を適用すれば、

$$\begin{aligned} \Delta V_e &= (V_e - V_e') = \Delta q_e + \Delta V_{w_e} \text{であるから、} \\ \Delta V_{w_e} &= \Delta V_e - \Delta q_e \\ &= V_e - V_e' - \Delta q_e \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

このとき、 $\Delta V_{w_e}$ より、 $\Delta t$ 間の間隙水圧増分  $\Delta u_e$  が水の体積弾性係数  $E_w$  を用いて次式で計算される。

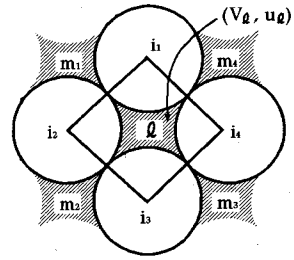


Fig.2 Modeling of pore water

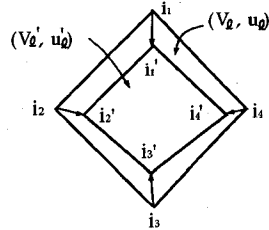


Fig.3 Deformation of a unit structural skeleton and pore water

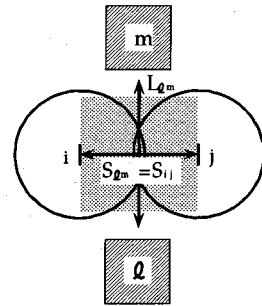


Fig.4 Assumption of length and sectional area of an intergranular flow channel

$$\Delta u_e = E_w \frac{\Delta V_{w_e}}{V_e} \dots \dots \dots (5)$$

ここで求めた  $\Delta u_e$  を  $u_e$  に加えることにより、時刻  $t$  における間隙体積  $V_e'$  に対応する過剰間隙水圧  $u_e'$  が定まる。

$$u_e' = u_e + \Delta u_e \dots \dots \dots (6)$$

時々刻々の間隙水圧  $u_e'$  が与えられたとき、間隙  $l$  を取り囲む要素それぞれに作用する水圧は、Fig.5に示すように、要素重心に作用する力の座標軸方向成分  $\bar{P}_x, \bar{P}_y$  として次式で計算する。

$$P_x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} -u_e' r \cos \theta d\theta = -u_e' r (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \dots \dots (7)$$

$$P_y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} -u_e' r \sin \theta d\theta = u_e' r (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \dots \dots (8)$$

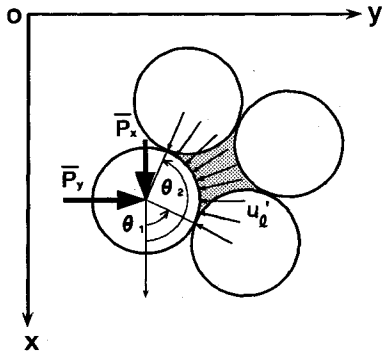


Fig.5 Calculation of element force ( $\bar{P}_x, \bar{P}_y$ ) due to pore water pressure  $u_d'$

Table 1 Properties of particle and pore water

Particle	
Radius	$r:1.0\text{cm}$
Density	$\rho:2.65\text{g/cm}^3$
Young's modulus	$E:750\text{kgf/cm}^2$ ( $7.35 \times 10^4 \text{ kpa}$ )
Poisson's ratio	$\nu:0.3$
Coefficient of permeability	$\kappa:1 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$
Pore water	
Density	$\rho_w:1.0\text{g/cm}^3$
Volume elastic modulus	$E_w:2.0 \times 10^4 \text{ gf/cm}^2$

Table 2 Constants for elements contact and analytical condition

Time step $\Delta t(\text{sec})$	$1.0 \times 10^{-4}$
$K_n / \rho \text{g}(\text{cm}^2)$	$3.64 \times 10^4$
$\eta_n / \rho \text{g}(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$	$1.53 \times 10$
$K_t / \rho \text{g}(\text{cm}^2)$	$0.91 \times 10^4$
$\eta_t / \rho \text{g}(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$	$0.76 \times 10$
$\mu$	0.577

水を圧縮性流体として取り扱う考え方も報告されているが、現在では、非圧縮性として取り扱う手法が一般的である。これは、骨格全体の剛性が水のそれに比して極めて小さいこと、さらに、有効応力の原理に保証されたことによる仮定と考えられる。本例のように、一つの要素を土粒子一つ一つに準え、質点の運動方程式によって変形メカニズムを解析する手法においては、上記のような仮定を導入することは容易ではなく、水の圧縮性も土粒子のそれに対応するものとして評価することにした。

1.にも述べたように、骨格全体に対する圧縮・非圧縮性の評価は、これとは別問題であり、次章以降に示す粒状集合体の解析例によって行なわれるものとする。なお、Table 1に示す体積弾性係数は実際の値に比べてかなり小さいが、これは、表中のような $\Delta t$ で安定した解を得るための措置であり、 $\Delta t=10^{-6}(\text{sec})$ 程度とすれば、通常の値で解析可能である。

### 3. 圧密試験の解析と問題点

前出Fig.1を圧密試験の解析モデルに用いる。供試体寸法は図中に示すとおりであり、上端は上下方向にのみ可動な剛板であり、これを介して軸応力 $p_x$ 相当の荷重が載荷される。下端は固定剛板としている。側面は液圧 $p_y$ がゴムスリブを介して作用するように、左右それぞれ2列の外側面に等分布荷重 $p_y$ を作用させ、上下・左右の変形の自由を保证している。

ここでの圧密は等方圧載荷 $p_x=p_y=p$ とし、側面と下面は不透水性、上面のみ透水性とした。解析に用いたDEM定数等の諸量はTable 1, 2に示すとおりである。

結果の一例として、等方圧密応力 $p=0.1\text{kgf/cm}^2$ を作用させた場合の間隙水圧（前述したように、過剰間隙水圧成分を表す）の発生、成長、消散の過程と、併せて粒子間接触力（有効応力に当る）の成長の様子をFig.6に示す。載荷後約10ステップの短時間で（Fig.6(c)）供試体全域に伝達され、最大値に達し、載荷応力 $p$ に等しいものとな

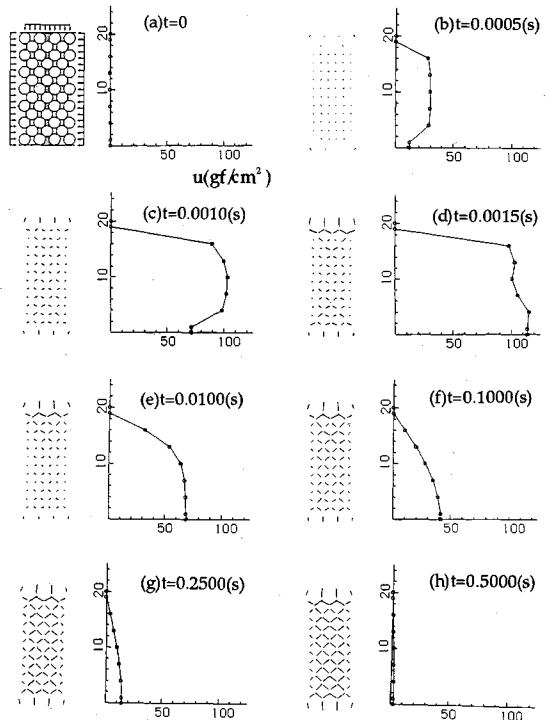


Fig.6 Distributions of contact forces and excess pore water pressures in the consolidation

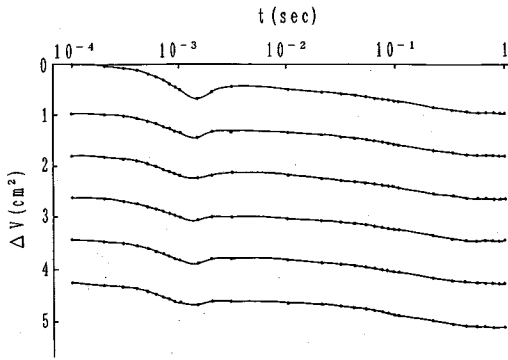


Fig.7 Consolidation-time curve of the uniform stiffness model

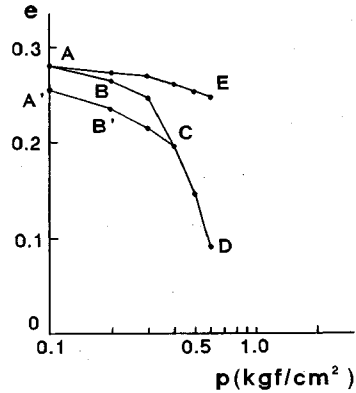


Fig.8 Consolidation curve ( $\alpha=50^\circ$  assembly),  
 path A→E→A: uniform stiffness model  
 path A→B→C→B'→A'→B'→C→D  
 : descending stiffness model

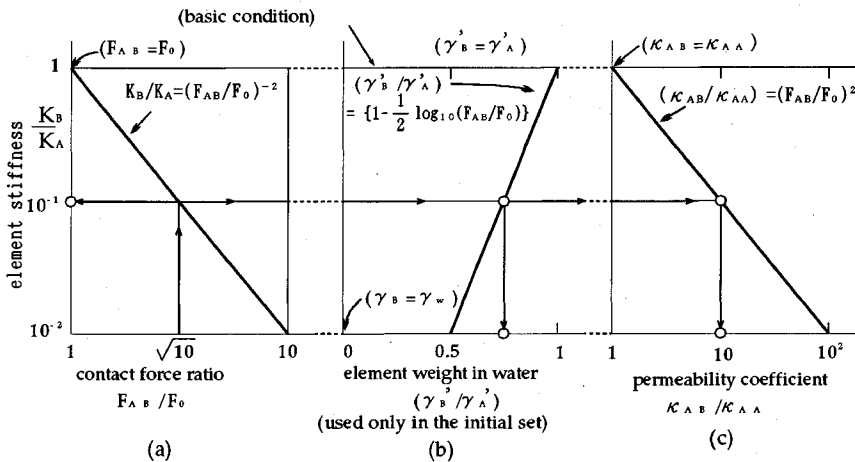


Fig.9 Assumptions of decrease of element stiffness (a), element weight (b) and increase of permeability coefficient (c) due to increase of contact force of a descending stiffness element

る。間隙水の伝達に要するこの10ステップ、 $t=0.0010$ sは実用上問題とならないが、このとき応力 $p$ の荷重によって、既に粒子間接触力(有効応力)が発生している点が通常の圧密理論から外れている。これはモデルの構造骨格の剛性が間隙水の剛性に比して極めて高いことによるものである。

同様にして、圧密応力 $p$ を段階的に0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 $\text{kgf/cm}^2$ と増加させて解析し、Fig.7に示す時間-体積変化量曲線を得た。DEMにおいては要素接触点間にバネ-ダッシュポットが並列配置され、接触力算出に用いられる。したがって、運動状態にある要素系が静的安定状態に向かうとき減衰振動を示す。この図は、荷重が瞬時荷重された後、静的安定状態に至る仮定を表現していることになり、減衰振動の影響が、初期において

は表れている。

この結果から、圧密曲線( $e-\log p$ 曲線)を描くとFig.8のようになる。圧密曲線において、モデル(Fig.1参照)の間隙比 $e$ が元々小さい上に、圧密応力 $p$ の0.1から0.6 $\text{kgf/cm}^2$ までの増加に対応する間隙比の減少が極めて小さい。さらに、点Eより除荷を行っても荷重過程のA→Eをほぼ逆にたどるだけで圧密履歴を示さない。これらは用いた円形要素の4接点規則配列モデルが、土粒子の構造骨格に比して極めて安定かつ弾性的であり、その剛性も高いことによる。

この点で、手始めに要素一つ一つが構造骨格を有するものとみなし、要素自体に塑性成分を持たせた弾-塑性型DEMを開発したが<sup>3)</sup>、数値実験、数値解析の本質からすれば、構造骨格の特性こそDEMモデルで表現すべきで

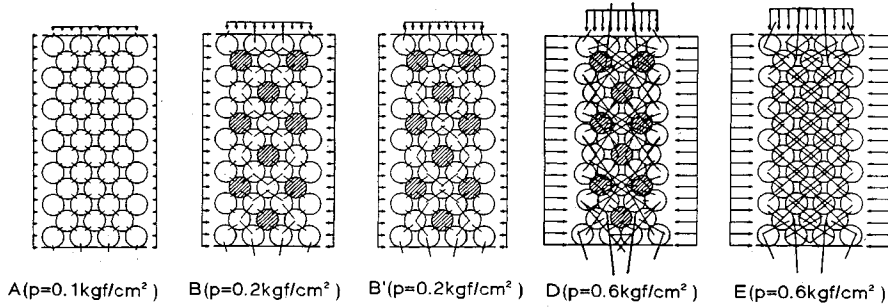


Fig.11 Deformation of structural skeleton and change of contact forces in the consolidation test

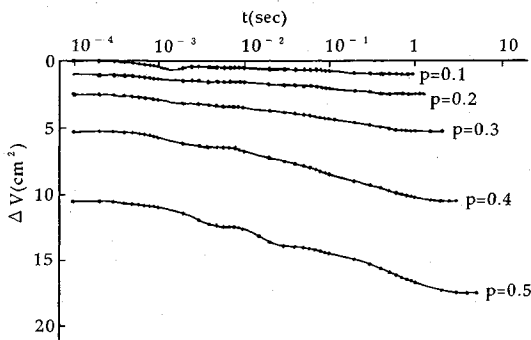


Fig.10 Consolidation-time curve of the model with descending stiffness elements

あるという考えに至っている。したがって、要素配列が作る構造が構造骨格として、より柔らかくかつ圧密応力の増加とともに残留変形（塑性変形に相当）の生じるモデルの作成が必要と結論された。

#### 4. 圧密履歴を表すDEMモデル

DEMモデルで圧密の履歴特性を支配する塑性変形を表現するためには、粒子間接触力の増加に伴って構造骨格、すなわち要素配列の残留変形や崩壊を引き起こす工夫が必要である。その一つは、多角形要素のランダム配置による崩れ易い構造骨格を作る方法であるが、これは系統的な数値実験のためには、所要の条件設定が難しく、不向きである。そこで、等粒径円形要素の規則配列を基本にして、その中の一部要素の剛性を要素が受ける接触力のレベルに応じて逓減する方法を用いて、任意の空隙の創出と崩れ易い構造骨格を表現する方法を考えたい。例えば、前出Fig.1の陰影を施した要素を剛性逓減要素とし、その極限はこの部分を空隙とし、水粒子に同化させる方法である。

要素剛性の低下と接触ばね定数の関係は、先に報告したトンネル掘削過程のDEM解析<sup>7)</sup>で用いたトンネル断

面要素の場合と同様に考えればよい。つまり、通常剛性 $K_A$ の要素Aと剛性を $K_B$ に低下させた要素Bの接触におけるばね定数 $K_n$ 、 $K_s$ は次式で計算される。

$$\begin{bmatrix} K_n \\ K_s \end{bmatrix}_{AB} = \frac{2K_B}{K_A+K_B} \begin{bmatrix} K_n \\ K_s \end{bmatrix}_{AA} \dots\dots\dots(9)$$

ただし、添字のAAは通常要素AとAの接触時のばね定数を表し、ABは要素AとBの接触時のそれを表す。

要素A,B間の接触力 $F_{AB}$ の増加に伴う要素剛性 $K_B$ の逓減の関係をFig.9のように仮定する。このとき、初期状態の接触力の平均値 $F_0$ を基準にとって、随時の接触力 $F_{AB}$ におけるばね定数 $(K_n, K_s)_{AB}$ は、式(9)より次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} K_n \\ K_s \end{bmatrix}_{AB} = \frac{2}{1+(F_{AB}/F_0)^2} \begin{bmatrix} K_n \\ K_s \end{bmatrix}_{AA} \dots\dots\dots(10)$$

同時に、要素水中重量 $\gamma_B'$ （単位体積当り、以下同じ）および透水係数 $\kappa_{AB}$ の変化を同図(b)のように仮定すれば、次式で計算できる。

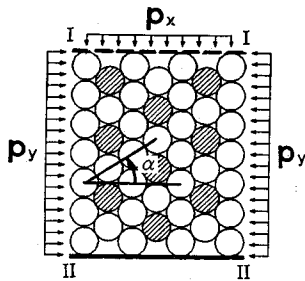
$$\gamma_B' = \gamma_A' \{1 - (1/2) \log_{10}(F_{AB}/F_0)\} \dots\dots\dots(11)$$

$$\kappa_{AB} = (F_{AB}/F_0)^2 \kappa_{AA} \dots\dots\dots(12)$$

上述したように、要素剛性の低下の極限は空隙水の剛性に合わせ、そのとき要素の水中重量 $\gamma_B' (= \gamma_B - \gamma_w)$ は0、すなわち $\gamma_B = \gamma_w$ として空隙水に同化させる。ただし、要素重量の減少は初期構造骨格の設定時のみに用い、試験中の要素剛性低下に対しては不変とする。なお、ばね定数 $K_n$ 、 $K_s$ の低下に伴う粘性定数 $\eta_n$ 、 $\eta_s$ の変化は、通常要素の場合と同様に臨界振動を仮定し、次式で与えるものとする。

$$\begin{bmatrix} \eta_n \\ \eta_s \end{bmatrix}_{AB} = \sqrt{\frac{2}{1+(F_{AB}/F_0)^2}} \begin{bmatrix} \eta_n \\ \eta_s \end{bmatrix}_{AA} \dots\dots\dots(13)$$

Fig.1の陰影を施した要素を剛性低減要素にとり、接触定数、透水係数がFig.9に示した関係に従うとした解析結果をFig.8, Fig.10, Fig.11に示す。応力履歴による剛性低下を忠実に適用するためには、基準にとったFig.11 Aにおける要素間の平均接触力 $F_0$ （全要素接触点における法線方向接触力の総和を総接触点数で除したもの）に対



I I : vertically loading (drained)  
 I ~ II : gum sleeve (undrained)  
 II II : fixed plate (undrained)

Fig.12 Another DEM model of consolidation test  
 ( $\alpha=30^\circ$  assembly,  $p_x:p_y=1:1.5$ )

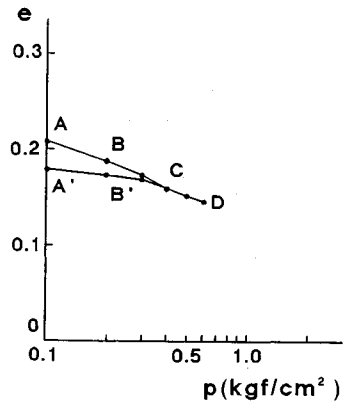


Fig.14 Consolidation curve ( $\alpha=30^\circ$  assembly)

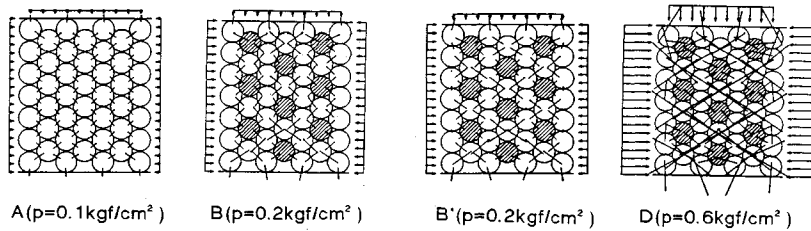


Fig.13 Deformation of structural skeleton and change of contact forces  
 in the consolidation test

し、時々刻々の当該要素の接触力平均値を $F_{AB}$  (当該要素に関する接触法線方向力の総和を当該要素に関する接触点数で除したもの)として、接触力比 $F_{AB}/F_0$ によって要素剛性の低下を読み取って、対応する接触定数、透水係数を式(10), (12), (13)を用いて設定する。

Fig.10には、時間一体積変化曲線を示した。Fig.7の結果と比較すれば、体積変化量が増大しており、上記仮定の導入によって、骨格の変形が大きくなっていることが伺える。しかし、 $p=0.6\text{kgf/cm}^2$ になると、骨格の変形が著しく、Fig.2のように空隙を定義すれば、Fig.11中D図にも示されるように空隙が消滅する部分もみられるようになった。そこで、 $p=0.6\text{kgf/cm}^2$ では、 $p=0.5\text{kgf/cm}^2$ の要素位置、接触力を引き継ぎながら、間隙水の存在を考慮せず、最終的な骨格変形にのみ注目して解析を続行した。このため、Fig.10では、 $p=0.6\text{kgf/cm}^2$ の曲線は省略しており、Fig.8 D点、Fig.11中D図は、このような解析の結果であることを断っておく。

これらの結果から圧密曲線を描くと前出のFig.8で、 $p=0.1$ から $0.4\text{kgf/cm}^2$ までの負荷過程はA→Cとなり、 $p=0.4\text{kgf/cm}^2$ から0までの除荷過程はC→A'、引き続き $p=0$ から $0.6\text{kgf/cm}^2$ までの再負荷過程はA'→C→Dの曲線となる。剛性減衰要素を用いた軟化する構造骨格モデルで圧密履歴が表現できることがわかる。ただし、圧密曲線よく見かける除荷(C→A')と再負荷(A'→C)過程での微妙

なヒステリシス・ループの存在を示すまでには至っていない。

モデルにおける構造骨格の変化を見るため、代表点A, B, B', D, および、通常要素の点Eに対応する要素位置と接触力の分布を示すとFig.11のようである。さきにも述べたように、D図では骨格の変形が著しく、間隙が消滅する部分も認められる。通常要素ばかりで構成された場合の最終圧密点Eの要素配列と接触力分布の一様性(これがマスとしての弾性挙動を示す)に対し、今回の点A', C, Dの負荷、除荷、再負荷過程における構造骨格の変形とそれに伴う接触力伝達経路の変化が、 $e\text{-log } p$ 曲線の不可逆性を創ると理解できる。

同様にして、いままじ密詰の $\alpha=30^\circ$ 配列の場合の解析モデル、解析結果、および圧密曲線を示すとFig.12, 13, 14のようである。先と同じ等方圧密応力ステップに対し、初期間隙比の小さい分だけ、構造骨格の変形量の少なく、除荷過程の回復量の大きいモデルになっていることがわかる。

さきのFig.11の解析では、 $p_x=p_y=p$ ,すなわち等方的な圧力のもとで解析を実施した。一方、Fig.13では等方応力条件下では、初期状態(A点)すら求めることができなかった。これは、既報<sup>7)</sup>で述べたように、円形要素において配列は強度特性のみならず、応力状態をも支配する重要な因子であることを改めて示すものである。そこ

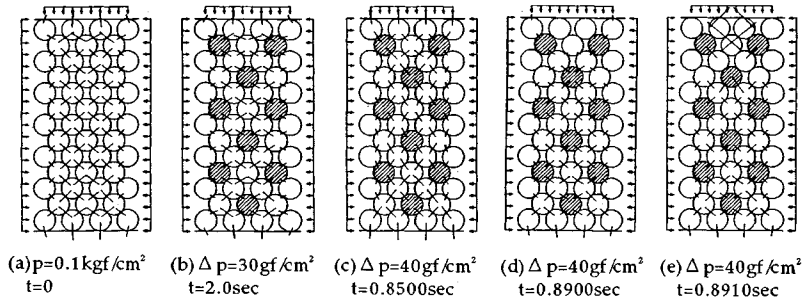


Fig.15 Deformation of structural skeleton and change of contact forces due to repeated loading

- (a) uniform stiffness model after isotropic consolidation of  $p_x = p_y = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$
- (b) final state of the model after repeated loading of  $\Delta p = 30 \text{ gf/cm}^2$
- (c)~(e) states of the model under the loading of  $\Delta p = 40 \text{ gf/cm}^2$

Table 3 Change of external pressure

P	$p_x$	$p_y$	$p_x : p_y$
0.1	0.075	0.125	1 : 1.50
0.2	0.125	0.250	1 : 1.50
0.3	0.225	0.375	1 : 1.67
0.4	0.300	0.500	1 : 1.67
0.5	0.350	0.650	1 : 1.86
0.6	0.425	0.780	1 : 1.86

( $p_x, p_y$ : kgf/cm<sup>2</sup>)

で、従来の解析を目安に、安定な初期状態（これは、ただ単に要素が静止することのみではなく、要素の座標値、粒子間接触力が左右対称性をも保持していることを意味する）を求めたところ、 $p_x:p_y=1:1.5$ 以上とする必要のあることがわかった。したがって、Fig.14のe-log P曲線を求めるにあたっては、Fig.8と平均主応力を一致させるように配慮しているが、Table 3に示すとおり、 $p_x=p_y$ とはなっていないことに注意を要する。さらに、この表から剛性を低下させてゆくことにより粒子構造が不安定度を増し、粒子構造保持のために側圧比( $p_y/p_x$ )を高める必要が生じていることがわかる。これは、トンネルの掘削解析<sup>7)</sup>における不安定な地盤(11/12配列)の結果に呼応するものである。

以上の結果、Fig.9に示した程度の剛性逓減率を用いても、要素配列と剛性逓減要素の個数・配置によって、相当広範囲の構造骨格の差違を表現(モデル化)できるものと判断された。

### 5. 繰返し荷重下の間隙水挙動

液状化現象の表現の可能性を見るため、繰返し荷重下の間隙水圧の変化を観察する。前章4と同様に、剛性逓減要素を配したFig.1のモデルを用いる。解析は、まず等方的に応力を作用させて全要素を静止に至らしめる。そ

の後、平均主応力一定の条件下で、軸圧 $p_x$ 、側圧 $p_y$ を位相を半周期ずらして同時に変化させ、非排水条件で繰返し載荷するものである。

本例では、 $p_x=p_y=0.1 \text{ kgf/cm}^2$ の等方圧縮を初期状態とし、平均主応力 $(p_x+p_y)/2=0.1 \text{ kgf/cm}^2$ 、一定のもとで、 $|\Delta p_x| = |\Delta p_y| = 10, 20, \dots, 50 \text{ gf/cm}^2$ 、周波数 $f=3, 5, 10 \text{ Hz}$ を種々組み合わせ、正弦波として繰返し載荷を実施した。

Fig.15(a)に要素剛性一様とした場合の上面排水条件の等方圧縮による初期状態を示す。ついで、Fig.15(b)は、非排水条件で $f=10 \text{ Hz}$ 、 $|\Delta p_x| = |\Delta p_y| = 30 \text{ gf/cm}^2$ として、20回(2秒間)の繰返し載荷をした後の供試体と要素間の接触力分布を示す。

このときの過剰間隙水圧の変化の一例をFig.16に示した。これは、同図中陰影部の間隙の圧力変化を示したものである。外圧の変化に応じて変動しているものの骨格が全体として荷重負担能力をなくし、間隙水圧が外圧に等しくなるような状態には至らない。また、外圧の振幅 $30 \text{ gf/cm}^2$ に対し、間隙水圧の変動は $20 \text{ gf/cm}^2$ 程度となっているが、これは、2で述べたとおり粒子骨格の剛性が水の剛性に比して高めに設定されており、外圧の変化の一部が粒子間接触力によって負担されているためである。(b)図において、陰影部要素の剛性は頭初(Fig.15(a))の7割程度となっており、 $\Delta p_x = \Delta p_y = 0$ として、非排水のまま釣合状態を求めたところ、骨格に塑性変形が生ずるため、 $5 \text{ gf/cm}^2$ 程度の間隙水圧が残留した。

Fig.15(c)~(e)は、 $|\Delta p_x| = |\Delta p_y| = 40 \text{ gf/cm}^2$ としたときの状態である。このときの間隙水圧の経時変化を示すとFig.17のようである。さらに、Fig.17に加えて、供試体中央部、下部の間隙水圧の変化の様子を示したものがFig.18, 19である。これらの図においても、注目間隙を陰影で示している。いずれも、荷重の振動に連動し

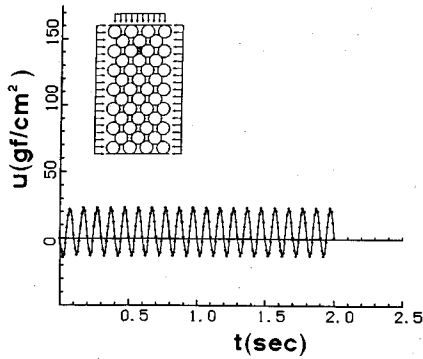


Fig. 16 Time-pore water pressure curve under repeated loading ( $\Delta p=30\text{gf}/\text{cm}^2, 10\text{Hz}$ )

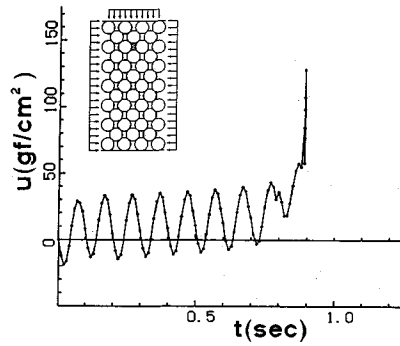


Fig. 17 Time-pore water pressure under repeated loading ( $\Delta p=40\text{gf}/\text{cm}^2, 10\text{Hz}$ )

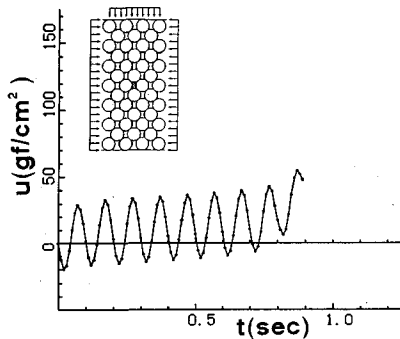


Fig. 18 Time-pore water pressure under repeated loading ( $\Delta p=40\text{gf}/\text{cm}^2, 10\text{Hz}$ )

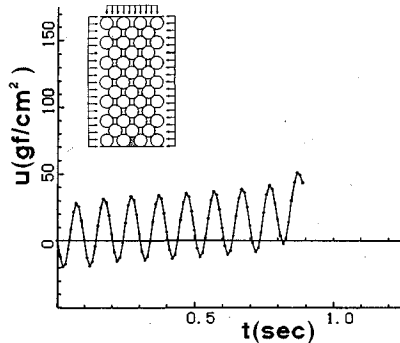


Fig. 19 Time-pore water pressure under repeated loading ( $\Delta p=40\text{gf}/\text{cm}^2, 10\text{Hz}$ )

て間隙水圧が緩やかな振動を示しながら、繰返し数とともに徐々に上昇している。そして、Fig.17に示されるように、0.9秒前後から上部の間隙において急激な上昇が始まり、それとともに粒子構造が乱れだし、演算不能となった。その直前の粒子間接触力の様子がFig.15(e)である。間隙水圧の上昇に対応して上部での消滅が目立っている。図からもわかるように、要素配置、粒子間接触力も左右の対称性を保持しており、計算繰り返し回数も少ないことから、誤差の累積に伴う現象でないことは保証されると判断している。また、上部において間隙水圧が急上昇したことは、軸方向荷重を上盤圧の変化（下盤固定）として与えているため、供試体上部の方が外荷重変化に敏感であり、変形が集中したためと考えられる。

この結果、間隙水圧が上昇し、最終的には粒子間接触力（有効応力）の消滅とともに外圧と等しくなる段階まで解析できる。今後、要素定数や荷重条件と演算時間の検討が必要と思われるが、基本的には本法により液状化モデルの作成が可能と判断した。

## 6. まとめ

本研究では、DEMに間隙水の作用を連成させるとも

に、剛性低下要素を用いることによって応力履歴による塑性変形を示す柔構造の表現を試みた。結果を以下に要約する。

- (1)DEMの基本仮定を損なうことなく、間隙水連成の基本プログラムを作成した。圧密解析を実施して解析条件の検討を行い、外荷重載荷にともなう過剰間隙水圧の発生・消散過程を表現した。
- (2)接触力の大きさに応じて特定位置の要素剛性を低下させることによって、崩れ易い柔構造を導入した。圧密試験の解析において負荷→除荷→再負荷に伴う骨格の塑性変形を $e\text{-log } p$ 曲線により表現した。
- (3)間隙水圧連成型DEMにより液状化のモデル解析を実施したところ、間隙水圧が徐々に上昇し、やがて外圧と同レベルになるまで追跡できた。要素定数、荷重条件にはさらなる詳細な検討を要すが、液状化のための基本的なモデルは提示できたと考える。

本例で用いた等粒規則配列によって粒状集合体をモデル化するとき、 $\alpha$ は $30^\circ \sim 60^\circ$ の値を取り得る。既に、単純せん断解析を実施して、 $\alpha$ とせん断強度定数の間に有意な関係があることを報告している<sup>8)</sup>。さらに、本文中にも触れたように、この $\alpha$ は強度ばかりか集合体内部



の応力状態までも支配する重要な因子であることがわかっている。本文では、一部要素の剛性を低減することで柔構造DEMにおける表現を模索してきたが、今後これらの成果を踏まえて、実現象への定量的なアプローチを可能にしてゆくことが重要である。

#### 参考文献

- 1) Cundall, P.A. : A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2, pp.129 ~136, 1971.
- 2) 井筒博明・木山英郎・藤村 尚・西村 強：間隙水の挙動を考慮したDEM解析，第21回土質工学研究発表会講演集，pp.1621-1622, 1986.
- 3) 井筒博明・木山英郎・藤村 尚・西村 強：間隙水の挙動を考慮したDEM解析の問題点と弾・塑性型DEMの提案，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp.559-560, 1986.
- 4) Tarumi, Y. & Hakuno, M. : A granular assembly simulation for the dynamic liquefaction of sand, *Natural Disaster Science*, vol.10, No.1, pp.45-59, 1988.
- 5) 西村 強・木山英郎・藤村 尚・脇本公朋：間隙水連成型DEMの拡張と適用性，第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.411-416, 1990.
- 6) 米田憲司・西村 強・藤村 尚・木山英郎：浸透破壊の個別要素法解析，第27回土質工学研究発表会講演集，pp.1943-1944, 1992.
- 7) 木山英郎・藤村 尚・西村 強：DEM解析によるFenner-Pacher型支保特性曲線の実現と考察，土木学会論文集，第394号/Ⅲ-9, pp.37-44, 1988.
- 8) 木山英郎・藤村 尚・西村 強：せん断モデルを用いた離散剛要素法の材料定数の検討，土木学会論文集，第382号/Ⅲ-7, pp.167-174, 1987.

(1993. 4. 30 受付)

## AN ADVANCED DISTINCT ELEMENT MODEL COUPLING WITH PORE WATER

Hideo KIYAMA, Tsuyoshi NISHIMURA and Hisashi FUJIMURA

It has been recognized that DEM is a successful tool in analyzing geomechanical problems. However, the mechanical behaviors of ground may be much influenced by pore water, whose effects have not been considered by the conventional DEM.

This paper presents a modified DEM which can simulate interaction between solid skeleton and pore water. This method was advanced to explain the irreversible deformation of solid skeleton, by developing a procedure of decrease of element contact stiffness due to increase of contact force. The advanced DEM was applied to soil and water problems, such as consolidation and liquefaction. Some numerical results have proved that this method has a high potential in analyzing the pore water in the soil.