

間隙水圧を考慮した粒状体の DEM 解析

木山 英郎・藤村 尚・西村 強^{*1}・井筒 博明^{*2}

海洋土木工学科・^{*1}土木工学科・^{*2}(株)日本通信建設

(1986年9月1日受理)

DEM Analysis of Granular Materials with Pore Water Pressure

Hideo KIYAMA, Hisashi FUJIMURA, Tsuyoshi NISHIMURA^{*1}
and Hiroaki IZUTSU^{*2}

Department of Ocean Civil Engineering

^{*1}Department of Civil Engineering

^{*2}Nihon Tsuusin Kensetsu Co. Ltd.

(Received September 1, 1986)

The mechanical behavior of granular solid may be much influenced by the pore water pressure. For such problem, Distinct Element Method (DEM) would be modified to couple the granular materials and the pore water pressures.

In the present paper, the authors will propose one of the coupled procedures answering the request. The pore water pressure and flow are equated by Darcy's law, and related to the contact pressures and displacements of the surrounding particles in the ordinary way of DEM.

By applying the proposed method to a consolidation model, it will be proved that the proposed method can analyse the independent and total behavior of particles and pore water in the granular solid.

Key words : DEM, Granular material, Pore water pressure, Consolidation

1. 緒言

近年、地下貯水ダム、石油地下備蓄基地等、地下の利用度が高まっている。それにともない、地下水汚染あるいは地下水流の構造物への影響といった観点から、地盤内の間隙水の挙動の解明が課題となっている。ところが、その基礎となる粒状集合体内の間隙水の挙動を解析する手法が確立されているとは言い難いのが現状である。

離散剛要素法 (Distinct Element Method, 以下 DEM と略す) は亀裂性岩盤の解析手法として Cundall¹⁾ (1971) によって提案されたものである。DEM は、不連続面で区切られた要素の集合体に対し、個々の要素が運動方程式を満足し、要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件として、集合体の動力学的挙動を解析する手法である。したがって、DEM は、岩盤のみならず、粒状体の解析手法としても有望であり、応用分野の広いものと思われる²⁾。著者らは、既に、材料定数の検討^{3) 4)}、解析結果とモデル実験結果の対比⁵⁾等、実用化のための基礎的な考察を行ってきている。

本報告では、ダルシー則に基づいて、隣接する間隙間の水の流れを定式化している。そして、誘導された間隙水効果式を結合した DEM を提案し、圧密モデルの解析例を示している。

2. 間隙水の挙動と DEM 定式化

図-1 に示すような間隙 l とそれに隣接する間隙 $m_1 \sim m_4$ に注目して計算法の概要について述べる。なお、簡単のために要素形状は半径 r の円形としている。これらの間隙は水で飽和されており、時刻 $t - \Delta t$ において、それぞれ体積 $V_l, V_{m_1} \sim V_{m_4}$ 、過剰間隙水圧 $h_l, h_{m_1} \sim h_{m_4}$ を有している。図-2 に示すように微小時間 Δt 間に間隙 l の体積 V_l が $V_l' (= V_l + \Delta V_l)$ に変化し、また、間隙水の流出入量が Δq_l 、過剰間隙水圧増分 Δh_l による間隙水の体積変化量が $\Delta V_{w,l}$ であるとする。

ダルシー則に従って Δt 間の間隙 l の流出入量を次式で与える。

$$\Delta q_l = \Sigma \frac{(h_l - h_m)}{L_{lm}} k S_{lm} \Delta t \quad (1)$$

ここに、 Σ 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_{lm} は $l \sim m$ 間の流路長、 S_{lm} はその流路断面積を表している。 k はミクロな透水係数である。図-3 を参考にして、間隙 $l \sim m$ 間あるいは要素 $i \sim j$ 間の流路について、 $S_{lm} = S_{ij}$ 、 $L_{lm} = 2r \times \frac{2r}{S_{ij}}$ と仮定する。

ここに、 S_{ij} は要素中心間距離である。

このとき式 (1) はつぎのようになる。

$$\Delta q = \Sigma (h_l - h_m) k \left(\frac{S_{ij}}{2r}\right)^2 \Delta t \quad (2)$$

水の流出入が生じた場合、間隙 l について、次の連続条件が成立する。

$$\Delta V_l = V_l - V_l' = \Delta q_l + \Delta V_{w,l} \quad (3)$$

$$\therefore \Delta V_{w,l} = \Delta V_l - \Delta q_l \quad (4)$$

式 (4) により、 $\Delta V_{w,l}$ が求められると、次式により Δt 間の Δh_l が次式より求まる。

$$\Delta h_l = E_w \frac{\Delta V_{w,l}}{V_l} \quad (5)$$

ここに、 E_w は水の体積弾性係数である。式 (5) より求まる Δh_l を h_l に加えることにより、時刻 t において体積 V_l' に対応する過剰間隙水圧 h_l' を求める。

$$h_l' = h_l + \Delta h_l \quad (6)$$

間隙水効果式 (1) ~ (6) を DEM に結合すれば、粒子間接触力や粒子の動きとともに、間隙水圧の変化の様子、あるいは、間隙水の流れ等を時々刻々と追跡できる。なお、過剰間隙水圧 h_l' は図-4 に示すように粒子間接触力に加算して処理するのが便利である。

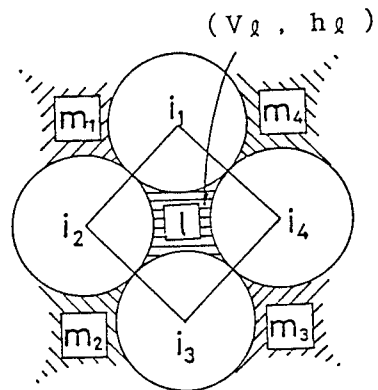


図-1 間隙水モデル

3. 圧密モデルのDEM解析

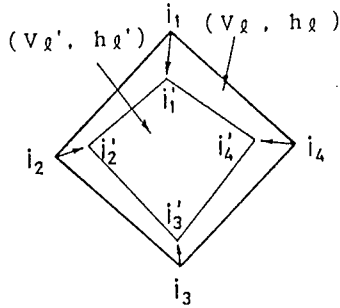


図-2 間隙の変形

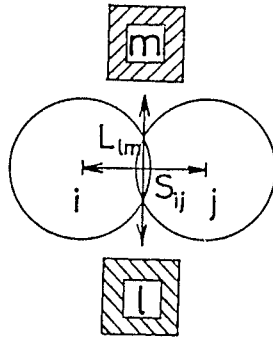


図-3 流路仮定

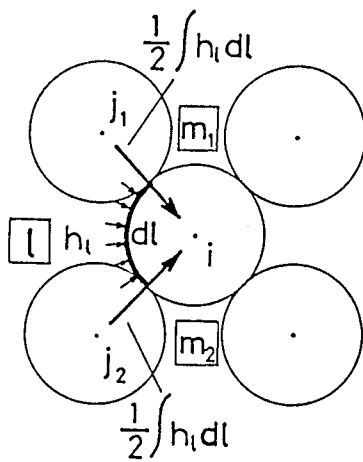


図-4 間隙圧による接触力

図-5は数値解析に用いた圧密モデルである。このようなモデルによれば、間隙の合成・分離が生じないため、プログラムの簡略化が可能であり、また、間隙水の挙動にのみ着目して解析するには有効である。寸法は図中に示すとおりであり、側壁、底壁は透水を許さないが、上壁はポーラスストーンであるとして透水を許す。

表-1 要素の諸量

particle
radius r : 1.0 cm
density ρ : 2.85 g/cm ³
Young's modulus E : 750 kgf/cm ²
Poisson's ratio ν : 0.3

表-2 解析定数

	particle to particle	particle to wall
$Kn/\rho g$ (cm)	3.64×10^4	7.28×10^4
$\eta n/\rho g$ (cm/s)	1.53×10	3.08×10
$Ks/\rho g$ (cm)	0.91×10^4	1.83×10^4
$\eta s/\rho g$ (cm/s)	0.78×10	1.53×10
dt (sec)	1.0×10^{-4}	

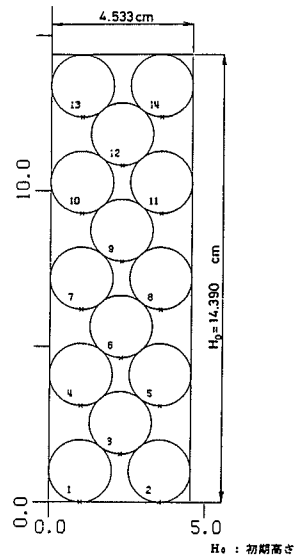


図-5 圧密モデル

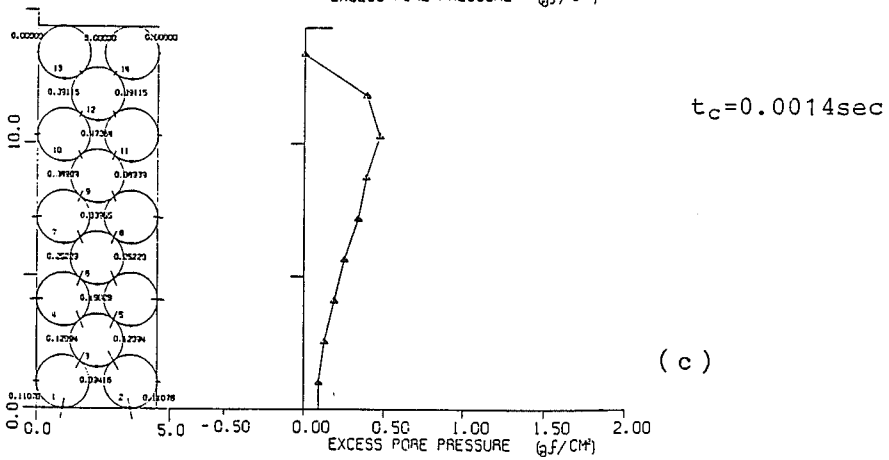
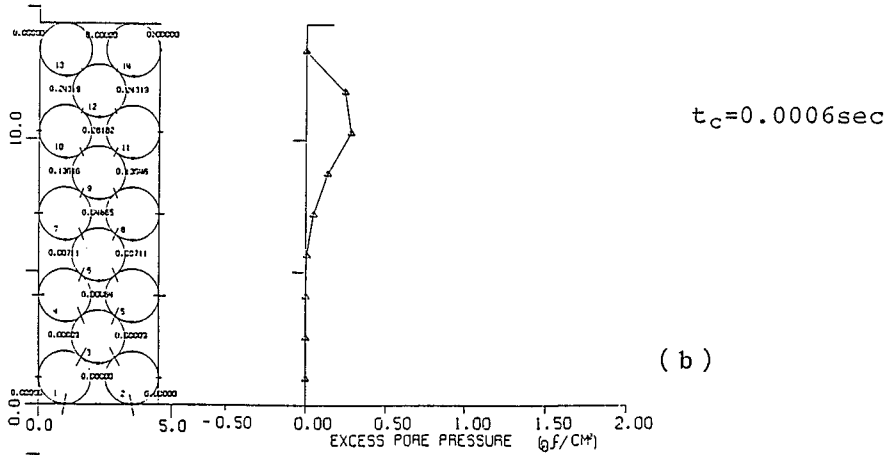
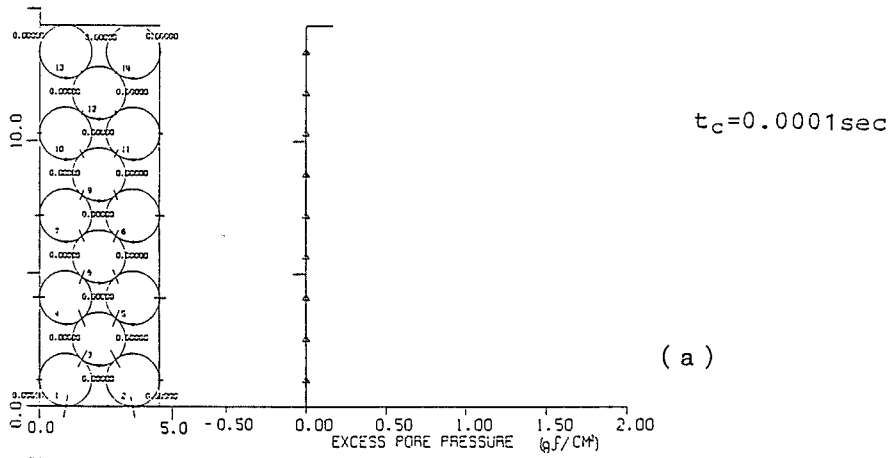


図-6 解析図、過剰間隙水圧分布

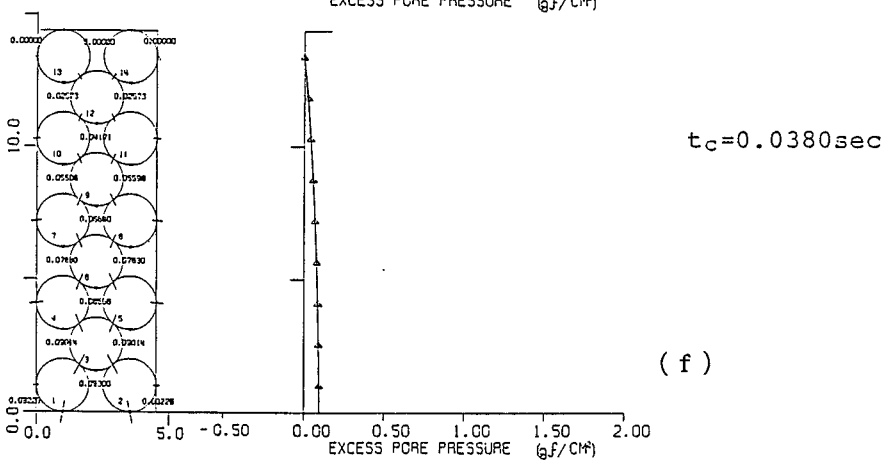
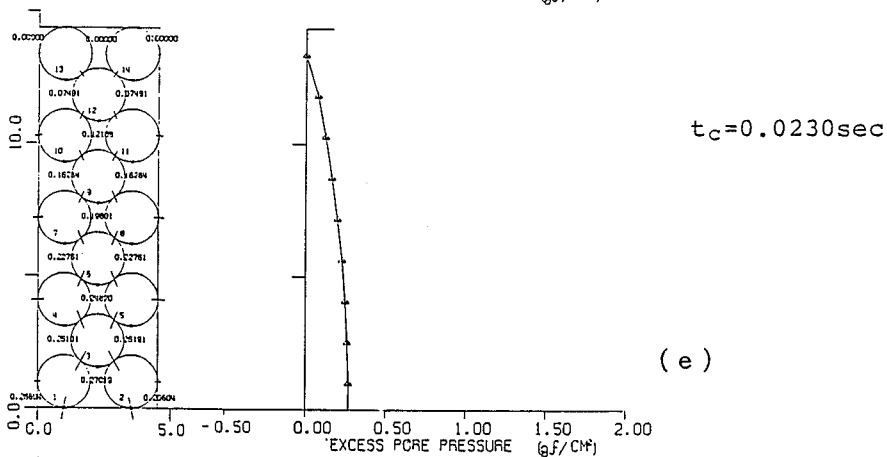
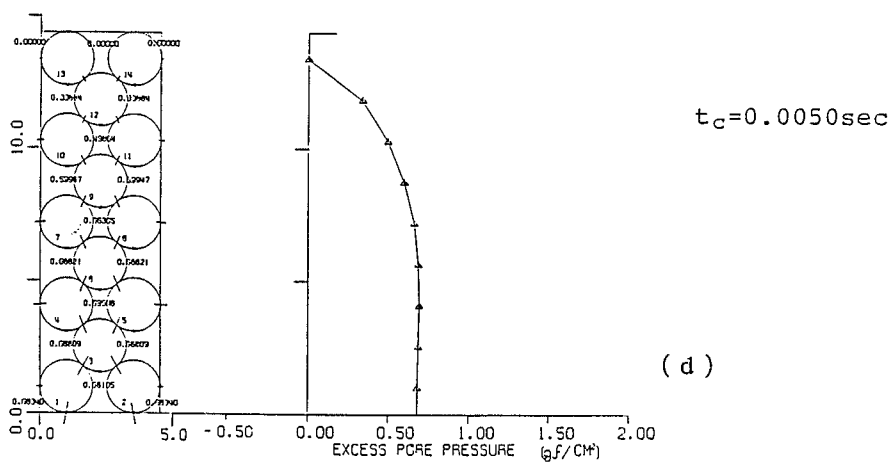


図-6 解析図、過剰間隙水圧分布

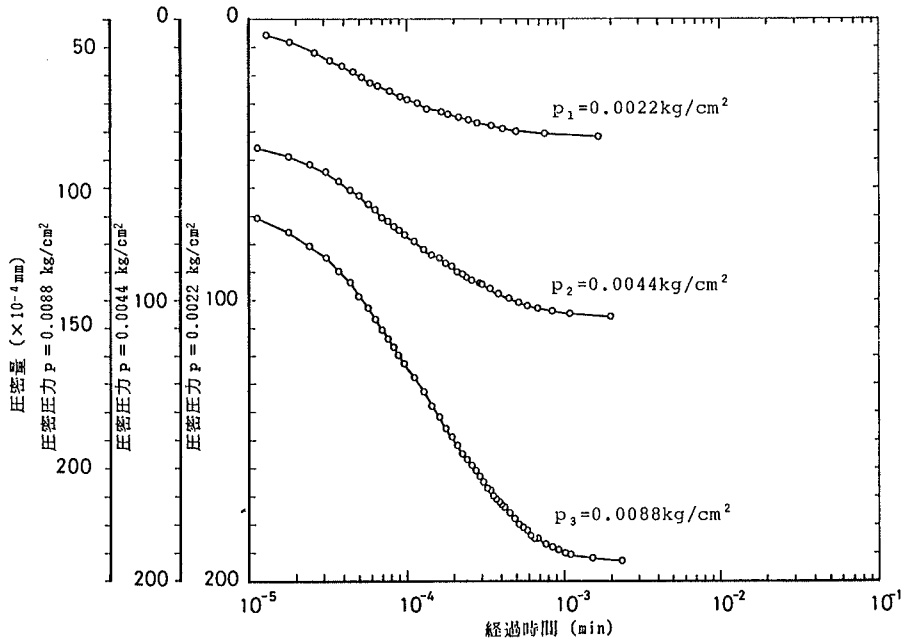


図-7 時間-圧密度曲線 (a)

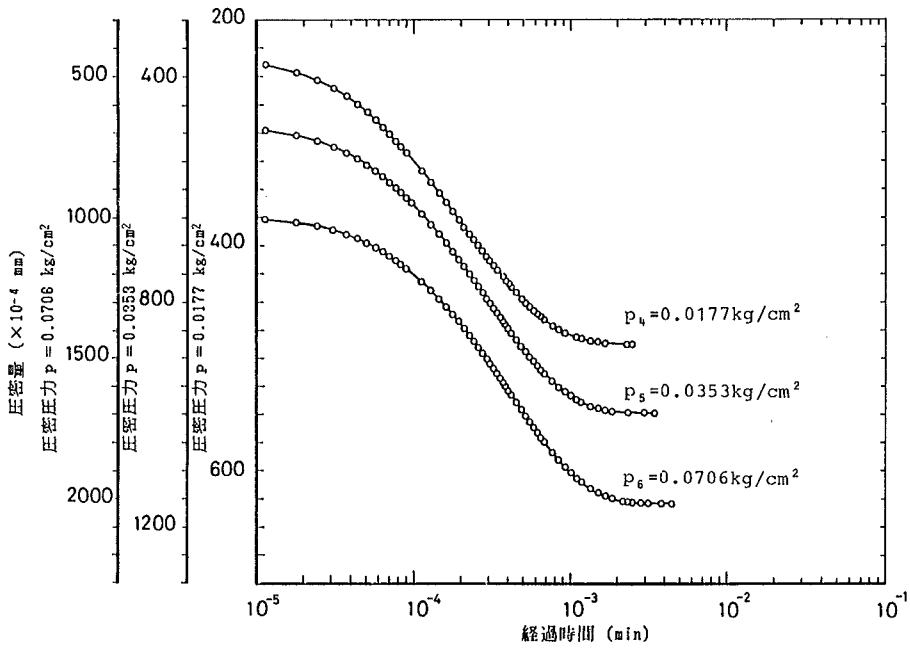


図-7 時間-圧密度曲線 (b)

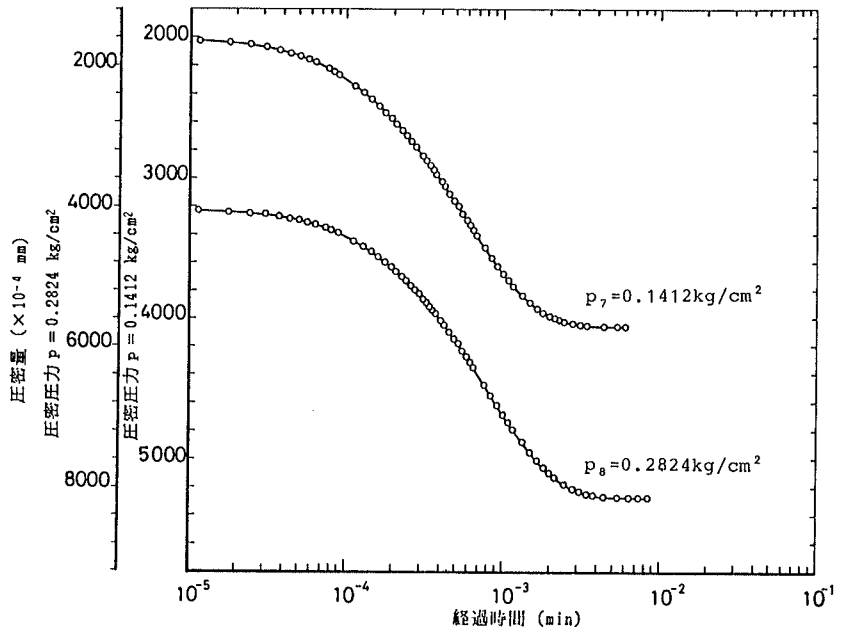


図-7 時間-圧密曲線 (c)

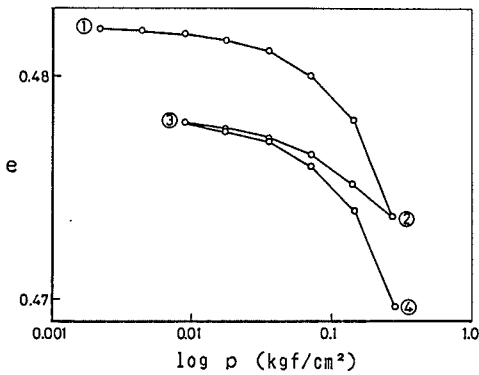


図-8 e - log p 曲線

円形要素に与えた諸量は表-1に示すとおりであり、また、これらの諸量から求められる解析定数を表-2に示している。上板に圧密応力 $\sigma = 0.0022(\text{kgf/cm}^2)$ を作用させた場合の過剰間隙水圧の発生、消散の過程を図-6に示している。この解析では、 $k = 2 \times 10^{-1} (\text{cm/s}^{-1})$ 、 $E_w = 2.04 \times 10^4 (\text{kgf/cm}^2)$ を与えている。このkの値

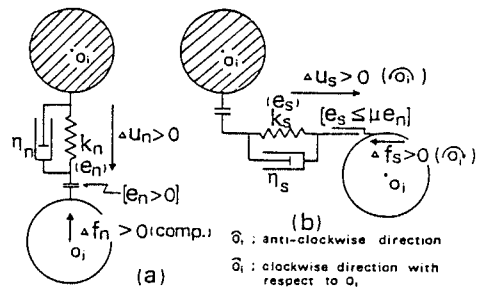


図-9 接触点における弾性スプリング(K)と粘性ダンショット(η) (粘弾性型DEM)

は、砂あるいは砂と砂利の混合物の透水係数に相当する。この図より、載荷直後に上壁付近で過剰間隙水圧が生じ(b)図、時間の経過とともに、過剰間隙水圧が下壁付近でも生じていることがわかる(c)図。さらに、時間の経過とともに上壁から排水されるため、過剰間隙水圧が消散してゆく過程(e)図)を見ることができる。通常の圧密試験と同様に、圧密応力を段階的に増加させて解析し、図-7に示す時間-圧密曲線を得た。

これらの曲線は、砂などの圧密試験から得られる曲線と比較してよい対応を示している。

4. 間隙水の挙動を考慮したDEM解析の問題点

図-8に示す $e - \log p$ 曲線において、①→②に至る過程は、圧密モデルの解析結果(図-6)から得られたものである。②の状態から除荷すれば、従来のDEM解析(以下、粘弾性型DEMと呼ぶ)では、負荷経路(①→②)を逆向きにたどり、塑性変形は生じない。粘弾性型DEMでは、接点間に弾性スプリングと粘性ダッシュポットを仮定し(図-9)、粘性ダッシュポットは速度に比例して抗力を生じるため、要素が静止状態に達した後は、接触力は弾性スプリングによる力のみとなる。それゆえ、各荷重段階における圧密終了時の要素に生じている変形は弾性成分のみであり、履歴等に依存せず、その時の荷重状態で決まるためである。この修正案として、図-8、②→③に至る過程は、弾性スプリングの剛性定数を負荷過程の2倍程度に大きくして除荷を行った場合である。個々の要素において、開放される変形が1/2になるため、あたかも塑性変形を生じたかのような除荷曲線を示す。上記の修正は不完全であるが、土の静的な応力履歴を表現するのに、塑性変形の考慮が有効であることがわかる。

5. 結言

本報告では、ダルシー則に基づいて、隣接した間隙間の水の流れを定式化し、間隙水圧を考慮したDEM解析を提案した。圧密モデルの解析例から示されるように、本解析手法は、粒状体-間隙水系の挙動を表現しうるものと考えられる。

しかしながら、4.で述べたように、従来の粘弾性型DEMでは、土の静的な応力履歴を表現できないことがわかった。塑性変形を考慮できる弾塑性型DEMの定式化が今後の課題である。

参考文献

- 1) Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Bloky Rock Systems, Syms. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2 pp.129~136, 1971.
- 2) 木山英郎・藤村尚：カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析，土木学会論文報告集，第333号，pp.137-146, 1983.
- 3) 藤村尚他：離散剛要素法における岩の衝撃特性について(2)，鳥取大学工学部研究報告，第14巻，第1号，pp.207-216, 1984.
- 4) 木山英郎・藤村尚・西村強：離散剛要素法における力学定数に関する研究，鳥取大学工学部研究報告，第16巻，第1号，pp.119-127, 1985.
- 5) 木山英郎・藤村尚・二木隆：粒状体地盤の離散剛要素法解析と模型実験-地下浅所のトンネルによる地盤変形-，材料，第392号，pp.466-471, 1986.