## 4.3 詳細解析法の検討

### 4.3.1 鉄塔基礎の液状化に伴う貫入を考慮できる手法の検討

昨年度まで，送電鉄塔の支持地盤の液状化に伴う沈下に関し，有効応力に基づく地震応答解析，および地震終了後の過剰間隙水圧の消散過程を考慮した圧密解析を行った．これらの解析の結果を，遠心力載荷試験との比較を念頭においてまとめると次のようである．

①送電鉄塔基礎直下が液状化しないという現象は再現できた．

②液状化に伴う地盤の挙動はほぼ再現できた．

③地震中，および地震後鉄塔基礎が沈下していくという状況は再現できななった．すなわち，過剰間隙水圧の発生に伴って地盤および送電鉄塔は沈下して行くが，これは，過剰間隙水圧の消散に伴う土の体積減少に伴うものであり，実験で見られたように，鉄塔基礎が地盤中にめり込んでいくような挙動が再現できなかった．

すなわち，解析で一番重要と考えられる，液状化に伴う基礎の沈下現象がうまく再現できなかったわけである．その原因については，昨年度の報告で示されているが，大きく二つの原因があげられる．

①有限要素法では系を要素に分割するが，この際，要素を規定する節点は，異なる材料の境界では共有されている．このことは，異なる材料が不連続的に変位する現象を表せないことを示している．

②基礎の貫入が起こるには，地震前に基礎直下にあった地盤は，側方，そして上方に移動しなければならない．このような変位は要素の大きな変形を伴うため，有限要素法の適用範囲を超えてしまう．また，有限要素法解析では，要素の剛性を完全に0とすると，系が不安定になりやすいことや数値計算上の問題が出てくるので，ある程度の剛性を与えているが，このため，流体状に地盤が振る舞う事から生じる外力のない状態での沈下という現象そのものが起こりにくくなっている．

これらの原因はいずれも既往の有限要素法が持っている本質的な部分に関わっており，その改良は容易ではない．そこで，本年度は，このような欠点を克服できる可能性のある手法について検討する．

#### 4.3.1.1 DEM（個別要素法）

土は，土粒子とその間隙を埋める間隙物質から構成されている．DEM では，土粒子を円形状の変形しない要素に置き換え，地盤をこれら要素（粒子）と粒子間をつなぐバネでモデル化するものである．したがって，有限要素法で用いられているような，連続体解析とは本質的に考えが異なり，ここの粒子の移動を逐次計算して求めるものである．粒子が非常に小さければ地盤そのものと非常に近い構成となることから，地盤の変形のメカニズムを数値実験としてシミュレートする事などには威力を発揮する可能性を秘めている．しかし，現実には，コンピュータの容量の制約，

要素の形状の制約，粒子間バネの設定などの制約があり，かなり制約された条件下での使用となっているのが現状である．ただし，個々の粒子の移動をきちんと押さえている事から，有限要素法で言う有限変形の効果などは自然に含まれており，使い方によっては有用な武器となる可能性がある．

DEM の液状化に対する適用は，三軸試験や中空ねじり試験のシミュレーションという形で，円形状の要素を用いて行われた．しかしながら，このような単純なモデルでは，要素間の内部摩擦角をいくら大きくしても，土全体の内部摩擦角は20度前後の値しか得られない[1]など，土とは全くあわないなどの欠点も指摘され，改良が行われている．例えば沢田らは，楕円形の要素[2]を導入し，内部摩擦角の効果を表現した．さらに，実際の土粒子はこのようななめらかな形状をしておらず，角張っており，このような効果はサイクリックモビリティ以降の挙動に影響を与えるとして，角張りの効果を考慮するために，相対変位がある限度を超えると（角がはずれる事に相当）粒子間ばねの応力が0となる非線形で効果を考慮した解析も行った[3]．解析で得られた応力－ひずみ関係と応力経路を図4.3.1.1に示す．

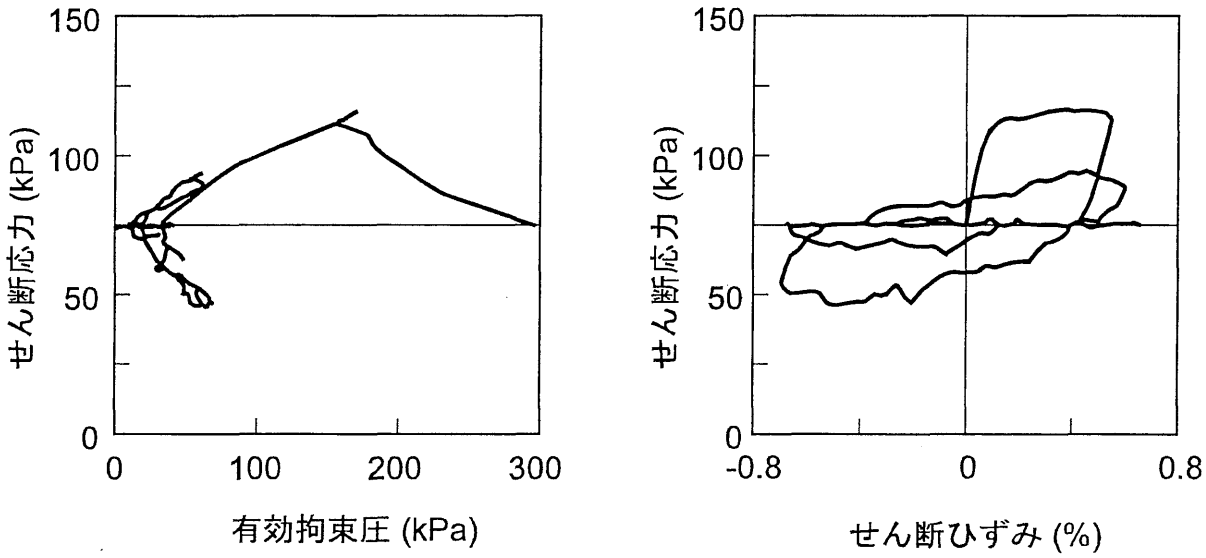



図4.3.1.1　DEM による中空ねじり試験のシミュレーション結果

このような解析により，ある程度，要素レベルの解析は可能となっていると考えられる．しかし，これらの解析では，液状化を考慮しているとは言っても，間隙に水のある状態を考えているわけではない．間隙は空気で，非排水条件に相当する条件として，等体積条件を与え，繰返しせん断による有効応力の減少を扱っている．これでは，本報告で対象としているような送電鉄塔基礎の沈下現象の解析には使えない．

粒子間の間隙に水を考慮した方法がその後提案されている．伯野ら[4]は間隙に水を考慮した解析を行った．この解析では，間隙物質に水の性質を考慮しているが，水の体積弾性係数は非常に大きいため，少しの体積変化でも大きな水圧変動が生じるので，それぞれの間隙の水圧の変動が非常に大きいなども問題も得られている．

中瀬ら[5]は，このような極端な水圧変動をさけるため，ある程度の広がりのある領域で水圧を平均化するような手法を導入し，結果的に透水方程式をこれまでの粒子のみによるDEMに加えた形で二相系の問題が定式化できることを示した．

中空ねじりせん断試験のシミュレーション結果を図4.3.1.2に示す．沢田らの方法に比べ，より履歴挙動が安定していること，過剰間隙水圧の発生に伴うサイクリックモビリティ現象がかなり再現されることなどが見て取れる．

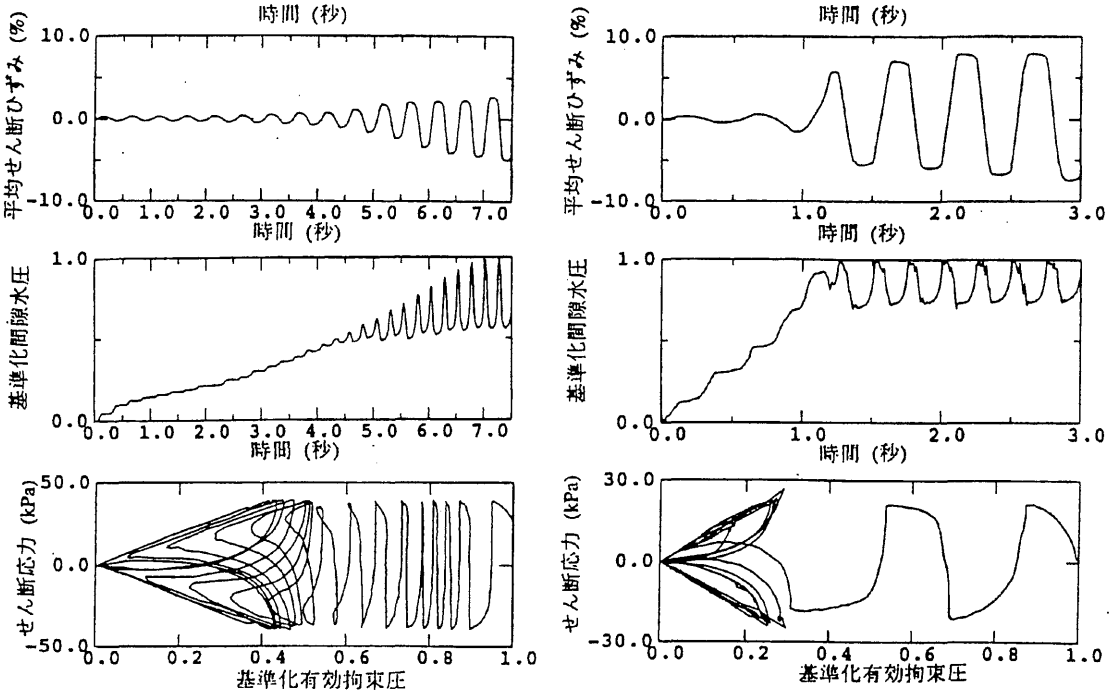



図4.3.1.2　中空ねじり試験のシミュレーション

このように，液状化を考慮できるDEMは，幾つかの改良が施され，実現象の把握に向けての実現性が高くなりつつある．しかし，これまでシミュレーションしているのは，外的には非排水の挙動であり，かつ，要素試験レベルの小さいモデルである．本論で対象とするような，送電鉄塔基礎の沈下をシミュレートするレベルの解析では，コンピュータの容量や計算速度も問題，実材料をDEMのばねと要素形状にどのように反映させるかというモデル化の問題などがあり，既往の手法をそのまま使うことは出来ない．今後の発展が待たれる手法である．

### 4.3.1.2　有限変形理論

通常の有限要素法では，微小変形理論が用いられている．微小変形理論では，支配微分方程式は，常に変形前の座標系に対して作られるため，変形に応じて変化する外力や応力成分の影響が考慮されない．ひずみや変形が小さい場合には微小変形理論は十分な近似度を持っており，多くの問題がこれを用いて解かれており，何の

問題も起きない．しかし，ひずみが非常に大きくなったり，変位や変形が大きくなってくると，微小変形理論で用いている仮定が適用できなくなる．

微小変形理論が適用できなくなる最も代表的な例は，柱の座屈のような不安定現象である．例えば，まっすぐな棒に圧縮力を加えていくと，微小変形理論では棒は縮む一方であり，それ以外の現象は生じない．しかし，実際には，圧縮力がある限度を超えると，棒は急に横にはらみ出す，いわゆる座屈が生じる．このような現象は，変形後の釣り合いを考える有限変形理論でないと考慮できない．

送電鉄塔基礎の沈下の問題に戻れば，沈下の現象が再現出来ない理由として二つを上げているが，基礎の直下にあった土が側方に移動する程度であれば，微小変形理論で十分対処可能な変位のオーダーと考えられるが，基礎が地盤中にめり込むためには，これに加え，基礎の沈下に伴って，基礎周辺地盤の土は上の方に移動する必要がある．また，地震前には，例えば，基礎のコーナー部にあった土は地震後はコーナーをはずれてしまう．これは，非常に大きな変形であり，通常の微小変形理論に基づく有限要素理論では取り扱うことの出来ない領域である．このような大きな変位を扱うには，有限変形に基づく理論を用いる必要がある．

有限変形を比較的簡易に扱え，したがって，比較的よく用いられる方法は二つある．一つは，updated Lagrangian 法（更新 Lagrange 法，移動 Lagrange 法などとも呼ばれる），もう一つは，Eulerian 法である．

updated Lagrangian 法は，有限変形を微小変形理論の枠組みを少し変えただけで使うことが出来る手法である．この方法では，次の二つの作業を行う．

①増分解析を行い，増分計算が終わったら，次の増分計算の前に，変位をこれまでの座標に加えることにより，座標値を更新する．

②増分解析に用いる剛性マトリックスに，幾何剛性マトリックス $\mathbf{K_g}$ と荷重補正マトリックス $\mathbf{K_c}$ を加える．すなわち，剛性マトリックス $\mathbf{K_L}$ は，微小変形理論に基づく剛性マトリックス $\mathbf{K}$ と $\mathbf{K_g}$，$\mathbf{K_c}$ の和として，次のように表される．

$$\mathbf{K_L} = \mathbf{K} + \mathbf{K_g} + \mathbf{K_c}$$

ここで，幾何剛性マトリックスは次のように表される．

$$\mathbf{K_g} = \int \mathbf{B_e}^{\mathrm{T}} \mathbf{D_t} \mathbf{B_e} dv$$

二次元問題では，

$$\mathbf{D_t} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & \tau_{xy} & 0 \\ 0 & \sigma_x & 0 & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & 0 & \sigma_y & \\ 0 & \tau_{xy} & 0 & \sigma_y \end{bmatrix}, \qquad B_e = \begin{bmatrix} \frac{N_1}{x} & 0 & \frac{N_2}{x} & 0 & \frac{N_3}{x} & 0 & \frac{N_4}{x} & 0 \\ 0 & \frac{N_1}{x} & 0 & \frac{N_2}{x} & 0 & \frac{N_3}{x} & 0 & \frac{N_4}{x} \\ \frac{N_1}{y} & 0 & \frac{N_2}{y} & 0 & \frac{N_3}{y} & 0 & \frac{N_4}{y} & 0 \\ 0 & \frac{N_1}{y} & 0 & \frac{N_2}{y} & 0 & \frac{N_3}{y} & 0 & \frac{N_4}{y} \end{bmatrix}$$

ここで，$N_i$ は補間関数である．幾何剛性マトリックスの物理的な意味は，要素が回転することにより，元の要素に対して局所的に定義されていた応力の作用方向

が変わるので，この補正をしているものである．

次に，荷重補正マトリックスは次のように表される．

$$\mathbf{K}_c = \int \mathbf{N}^{\mathrm{T}} \mathbf{D}_p \mathbf{N} dv$$

ここで，

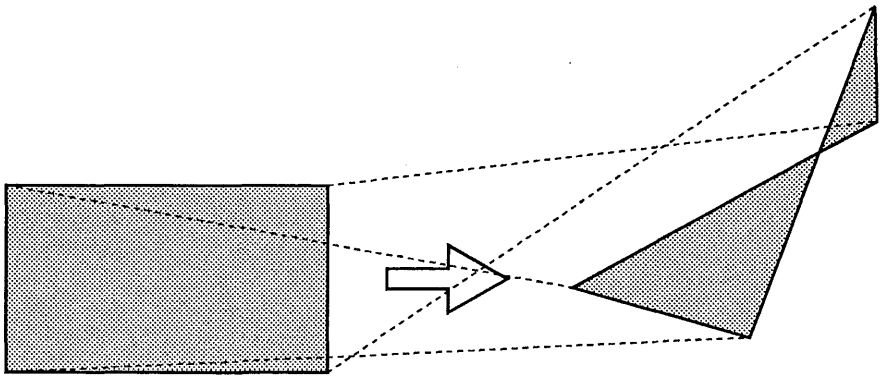
$$\mathbf{D}_t = \begin{bmatrix} X_x & 0 & 0 & X_x \\ X_y & 0 & 0 & X_y \end{bmatrix}$$

**N** は補間関数である．また，$X$ は変形後の体積あたりの物体力の x，y 方向成分である．この項は，体積変化によって物体力の密度が変わることによる補正項である．

updated Lagrangian 法は，ある程度の大きなひずみまで扱うことが出来る．液状化の分野では，例えば文献6では，液状化に伴う流動を求める際にこの手法を用いており，傾斜面が水平に近づいてくると重力により地盤に発生するせん断応力が減少し，したがって，流動は地表面が水平になった時点で止まることを示している．なお，実務では，剛性マトリックスの二つの補正項を考えず，座標値のみを置き換える近似法も使われる．

updated Lagrangian 法は，有限変形を扱う手法ではあるが，非常に複雑な変形を扱うことは出来ない．これは，変形が複雑になると，要素の形状がいびつになり，要素剛性マトリックスを求めることが出来ないからである．例えば，図4.3.1.3に例を示すような変形が起こったとすれば，要素剛性マトリックスが計算できなくなる．したがって，この手法を送電鉄塔基礎の沈下の問題に適用する事は，現状では困難と考えられる．

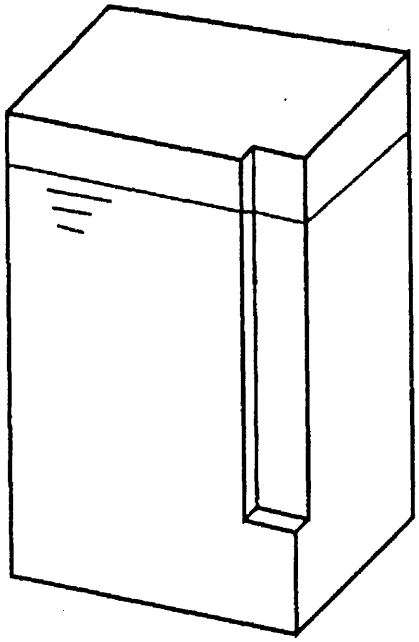
updated Lagrangean 法が，変形に伴ってメッシュを変形させたのに対し，Eulerian 法はメッシュの形状はそのままにし，内容物質を移動させる方法である．図4.3.1.4は代表的な Eulerian 法による解析例である．(a)は解析のイメージ図を示している．ここでは，スラリー状の地盤に矢板を打ち込む問題を考えており，図の手前に矢板の部分がある．(b)のメッシュ図から分かるように，メッシュでは矢板の部分はモデル化されていない．このメッシュの形状は変化させず，下方からスラリーをどんどん



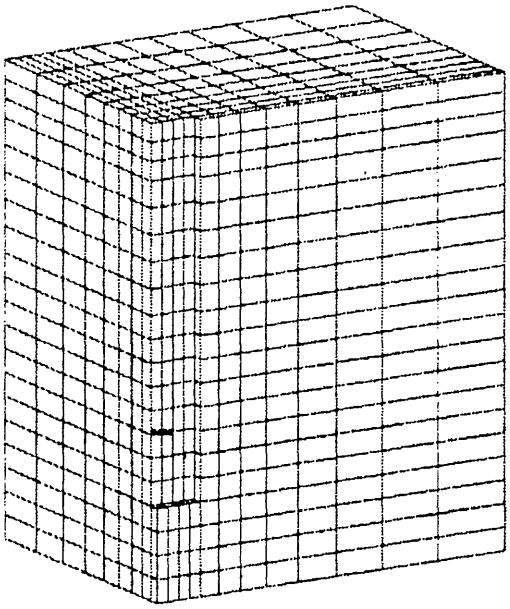
**初期状態**　　**変形後**

図4.3.1.3　極端な要素の変形の例

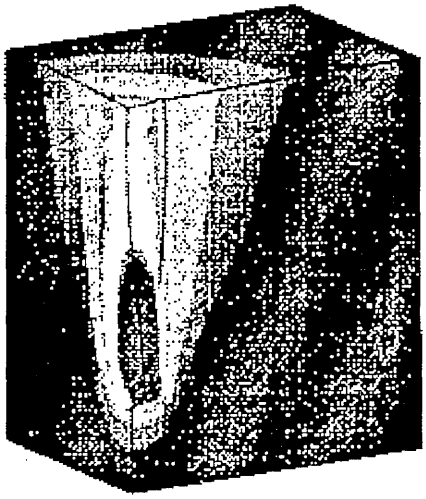
送り込んでいくと，あたかも矢板が下方に貫入していくのと同じ効果を得ることが出来る．(c)はその際の変位図である．



(a) イメージ図



(b) メッシュ図



(c) 変位等高線図

図4.3.1.4　スラリー地盤に対する矢板の打ち込み問題

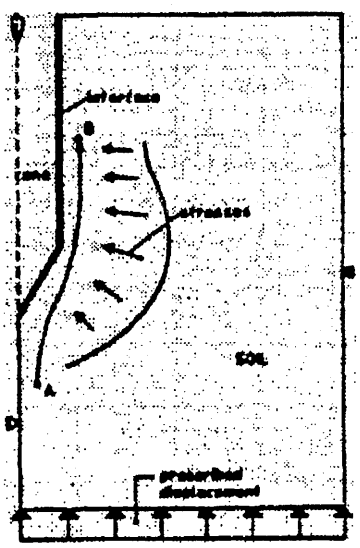


図6.3.1.5　コーンの貫入問題

図6.3.1.5は別の例題で，コーンを地盤に貫入させている．このような問題では，updated Lagrangean 法では，コーン先端のメッシュが異様に変形し，正しい応力分布が得られないが，Eulerian 法だと良い結果が得られるとされている．

この方法の問題点は，メッシュの形状を変えないので，下方から物質がどんどん流れ込んで来なければいけないことにある．これに対して，本検討の対象としている場合には，液状化層厚には限界があり，下方からどんどん物質が流れ込んでくるようなケースではないことにある．つまり，液状化層が非常に深くて，その底に到達することを考えないのであれば，この手法は使える可能性があるが，底面がある問題に対しては使うことが困難である．

これまでに見たように，有限変形に基づく，よく使われる方法は，いずれも，基礎の地盤への貫入の問題には適用が困難と考えられる．すなわち，updated Lagrangean 法は要素のひずみがあまりにも大きすぎるため，また，Eulerian 法は下方に境界が存在するために，各手法の適用限界を超えている．

最近，両者の欠点を克服するために，ALE 法というのが提案されている．ALE は，Arbitrary Lagrangian Eularian の略である．すなわち，Lagrange 法と Eulerian 法を適当な割合でミックスし，両者の良いところを組み合わせて使おうというものである．

ALE 法の流動の問題に関する適用例として，文献7がある．この研究は題目に Preliminary の文字があることから分かるように，基礎的な研究である．解析事例を図4.3.1.6に示す．ここでは，図の右上に示したような盛土タイプの地盤の上部のみが流体になったとしてその後の変形を追いかけている．ここで，自由表面については Langangian が，その他については Eulerian が用いられている．図から，時間の経過に伴って盛土が流動する状況が定性的には表現できていることが分かる．しかし，メッシュの変形を見ると，必ずしもスムーズなものではなく，数値計算上の困難があることが想定される．また，彼らは，これ以降，継続的な研究を発表していない．さらに，ここで示されている例題は，比較的簡単な例題であり，かつ，これまで実績のある Eulerian 法が多くの部分で用いられており，より複雑なケースへの適用性

については論じられない.

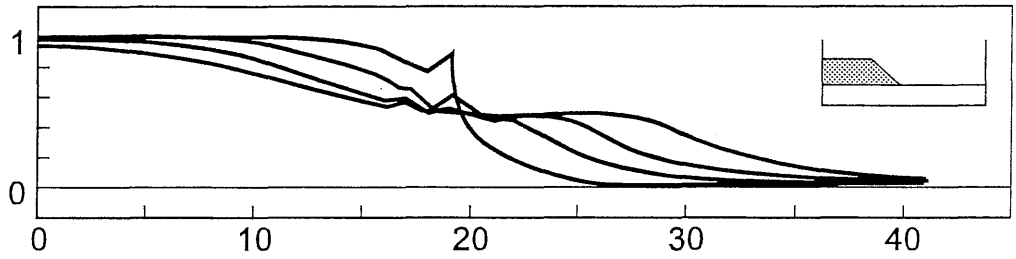



図4.3.1.6　盛土タイプモデルの流動による変形の推移

### 4.3.1.3　まとめ

この項では，送電鉄塔基礎で，支持地盤が液状化した際，基礎が液状化地盤中に沈下していく現象について，これが既往の有限要素法解析では表現が不可能なものであることを示し，さらにこの問題を解決できそうな新しい理論について調査した．これらをまとめると次のようになる．

DEM は，将来的な可能性としては，適用かもしれないが，現在の所，要素試験レベルの非常に単純なケースについての適用であり，実構造物レベルの現象の解析に至るには，まだまだ時間が掛かると考えられる．

有限の大きさの変形を考えた理論では，updated Lagrangian，Eulerian 法の両方とも欠点があり，直接的に適用することは困難である．これらの長所を集めた，ALE 法は，比較的簡単な問題に対しては解かれている．しかし，複雑な状況のものでの適用性はまだ実証されていない．さらに，この場合，物質はすべて流体として扱われている．土と水との混合体に対する ALE 法の適用性は行われておらず，適用性の検証も含め，今後の課題と考えられる．

### 参考文献

1) Towhata, I. (1989), Models of cyclic loading, Mechanics of Granular Materials, XII IXSMFE, Rio de Janeiro, pp. 80-90
2) 沢田純男，岩崎好規，プラタンテージ（1991）：楕円要素を用いた個別要素法による砂のせん断挙動の解析，第26回土質工学研究発表会，pp. 521-522
3) 沢田純男、土岐憲三、吉田望（1994）：楕円要素を用いた個別要素法による液状化シミュレーション、第9回日本地震工学シンポジウム、pp. 967-972
4) Hakuno, M. et al. : A granular assembly simulation for the seismic liquefaction of sand, 土木学会論文集，No. 298/I-10, pp. 129-138
5) 中瀬仁，石川博之，武田智吉（1995）：個別要素法による室内せん断試験のシミュレーション，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.489-492
6) Yoshida, N.: Finite Displacement Analysis on Liquefaction-Induced Large Permanent Ground Displacements, Proc., 2nd Japan-US Workshop on Liquefaction, Large Ground

Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, pp. 207-217, 1989
7) Keane, C. M. and Prevost, J. H. (1991): Preliminary results of a numerical technique to model flow failure induced by soil liquefaction, pp. 253-267