

個別要素法による室内せん断試験のシミュレーション

中瀬仁¹・石川博之²・武田智吉³

¹正会員 工修 東電設計株式会社 技術開発本部
(〒110 東京都台東区東上野 3-3-3, TEL:03-5818-7791)

²正会員 東京電力株式会社 技術開発本部 原子力研究所 耐震研究室
(〒110 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号)

³正会員 工修 東京電力株式会社 技術開発本部 原子力研究所 耐震研究室
(〒110 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号)

Hakuno *et. al.* による個別要素法を用いた液状化解析手法を改良し、室内液状化試験のシミュレーションに適用した。中空の供試体をモデル化するため周期境界を用いた。供試体の密度による液状化強度との関係を定量的に表すために、個別要素法における相対密度を定義した。シミュレーションの結果、相対密度の小さい供試体は液状化強度が低く、相対密度の大きい供試体は液状化強度が高いという砂の定性的な特徴を良く再現できた。また、相対密度の大きい供試体については、顕著なサイクリックモビリティが観察された。相対密度および応力比をパラメータとしたシミュレーションを整理した結果、相対密度65%の豊浦砂の液状化強度に相当する、個別要素法における相対密度は30%から37%の間にあることが解った。

key words : liquefaction test, cyclic mobility, DEM

1. まえがき

液状化現象のメカニズムには不明な点が多い。粒子レベルからモデル化する個別要素法を用いて、液状化現象をシミュレーションすることができれば、この問題に対して直接的な貢献ができると考えられる。筆者らはHakuno *et. al.*¹⁾による液状化解析手法を改良し²⁾、室内液状化試験のシミュレーションを行った。

2. 間隙水を考慮する方法

液状化のメカニズムを粒子レベルから観察するためには、各粒子に対する間隙水の影響を考慮する必要がある。個別要素法において間隙水を考慮するためには、

- ① 要素の運動による間隙の変化
- ② 間隙の変化による間隙水圧の発生
- ③ 間隙水圧の要素に対する作用
- ④ 間隙水圧の消散

について計算する必要がある。

項目②は、間隙の増分に水の体積弾性係数を乗ずること、項目③は、水圧の勾配に要素の体積を乗ずるこ

とによりそれぞれ簡単に算定できる。

項目①については、解析領域を図-1のようにマイクロゾーンに分割し、それぞれのセルに含まれる要素の平均的な運動から、各セルの間隙の増分を簡略化して計算した。例えば、セル (i, j) の間隙の増分は、厳密には、 Δv_m 、 Δv_l および Δv_n の和で表されるが、筆者らはこれを、要素 m および要素 l の水平変位増分 および要素 n の鉛直変位増分に基づいて算定している。

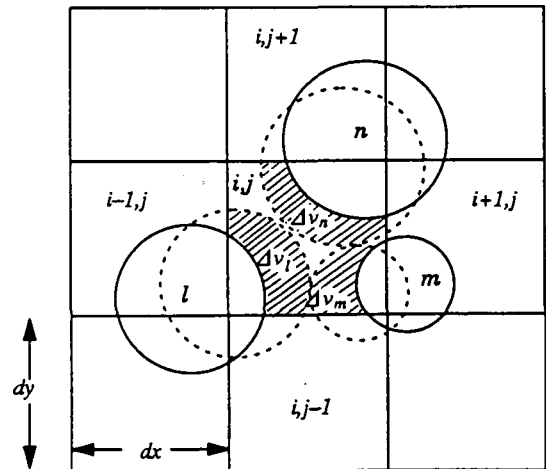


図-1 要素の移動による間隙の変化

項目④については、項目①で設定したマイクロゾーンを、差分格子と見立てて、図-2のように多孔質体の浸透流解析を適用した。これに際して、透水係数および貯留係数（水の体積圧縮率に逆比例する）を、新たなパラメータとして個別要素法に導入する必要がある。

3. 非排水中空ねじりせん断試験のモデル化

(1) 周期境界

シミュレーション対象は、非排水繰返し中空ねじりせん断試験である³⁾。中空ねじりせん断試験をモデル化するために、解析領域の左右の境界を連結するいわゆる周期境界を用いた⁴⁾。

周期境界を表すために、個別要素法本来の作業である要素位置の算定と、新たに導入した浸透流解析に対してそれぞれ手当てしておく必要がある。

要素位置の算定では、接触判定の際に、反対側の境界付近の要素を対象とすることにより周期境界を表すことができる。これは、図-3を例にとれば、要素hに対する接触判定を、要素hからみて右側にある要素fおよび要素eだけでなく、線分*i-i'*と線分*l-l'*が同じ位置にあると見なすことにより、要素hからみて左側に存在することになる要素bおよび要素cに対しても行うということである。

浸透流解析においても、周期境界に接する差分格子の外側に、反対側の周期境界に接する差分格子が存在すると見なすことにより周期境界を表すことができる。具体的には、接点方程式を解く際の接点係数のバンド行列（図-4）において、図-5のように着目する格子が端部にある場合、その隣に、あたかも反対側の端の格子（ N_x, j ）が存在するとして接点係数を計算し、その値を格子（ N_x, j ）の係数としてバンド行列に代入するという作業を行う。

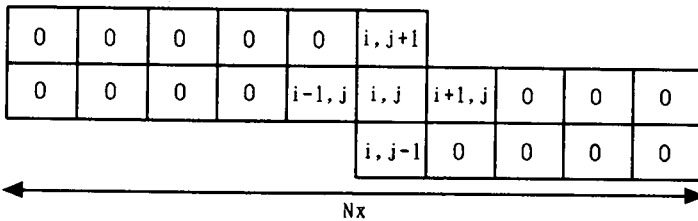


図-4 接点 (i, j) を中心としたバンド行列

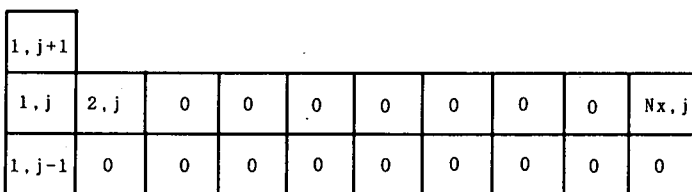


図-5 接点の左端が周期境界である時の考え方

解析のモデルを図-6に示す。要素3000個を用いて直径14 cm、高さ14 cmの供試体を作成した。左右が周期境界により仕切られた供試体モデルをせん断することは、図-6のようなモデルにトルクを加えることと等価である。

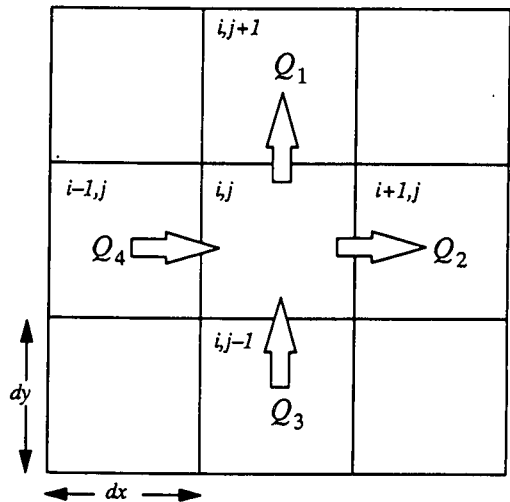


図-2 浸透流解析

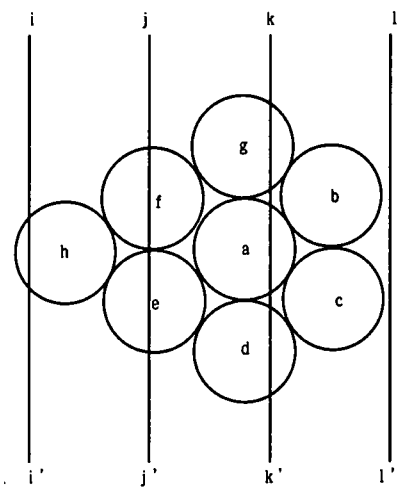


図-3 周期境界における接触判定

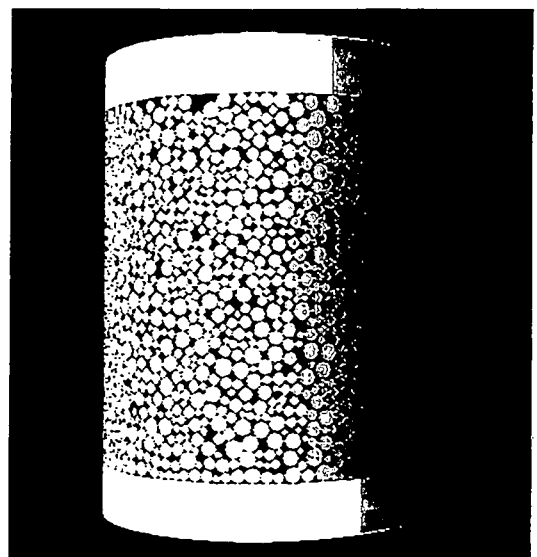


図-6 解析モデル

入力荷重としては、計算時間を短縮するため、実際(0.1 Hz)の20倍速く荷重を繰り返す2 Hzの正弦波を用いた。ただし、高速荷重によって供試体に生じる慣性力は、強制的に減衰させた。また、水の体積圧縮率を実際の10倍とした。これらの操作が解析結果に与える影響は、小さいことを確認してある。透水係数は、豊浦砂相当(0.02 cm/秒)を用いた。

(2) 供試体の相対密度

供試体の密度は、パッキングの際に、要素間の摩擦係数を操作することにより調整できる。本研究では、相対密度26%、30%、37%および50%の供試体を作成した。相対密度を定義する際、要素間摩擦を0として初期拘束圧(98 kPa)をかけてパッキングした供試体の間隙比を最小間隙比、重力場において要素間摩擦を与え、自重によりパッキングした供試体の間隙比を最大間隙比とした。こうして定めた相対密度は、一般に用いられる相対密度とは異なる指標なので、 Dr^* と表示する。供試体のせん断強度を実際の砂相当に合わせるため、要素の回転自由度は拘束した⁵⁾。

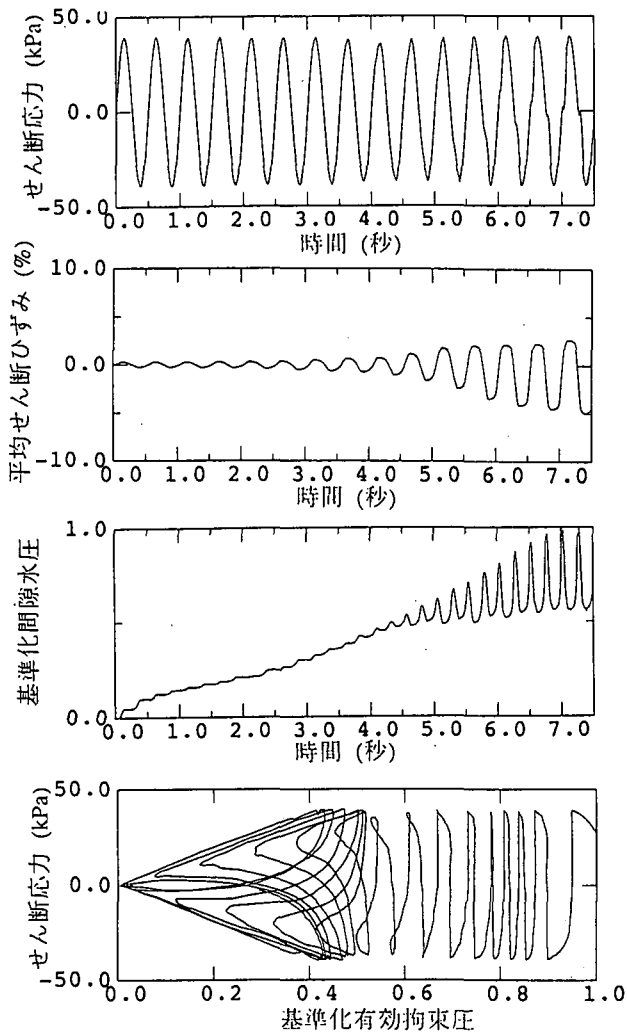


図-8 液状化試験のシミュレーション結果($Dr^*26\%$)

4. 静的ねじりせん断試験のシミュレーション

まず、単調荷重の中空ねじりせん断試験に対するシミュレーションを行った。境界と供試体の間ですべりが生じないように、上の境界に接する要素を、一定の速度で水平方向に強制変位させることで荷重し、下端に接する要素については水平方向の自由度を拘束した。

図-7に応力経路を比較する。相対密度の小さい供試体ほど、有効拘束圧の低下が大きい。

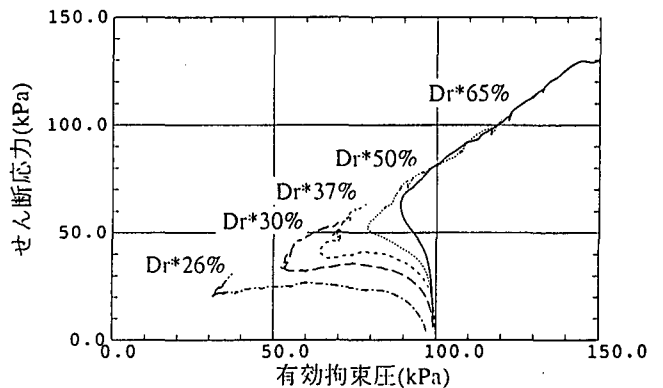


図-7 非排水ねじりせん断試験の応力経路

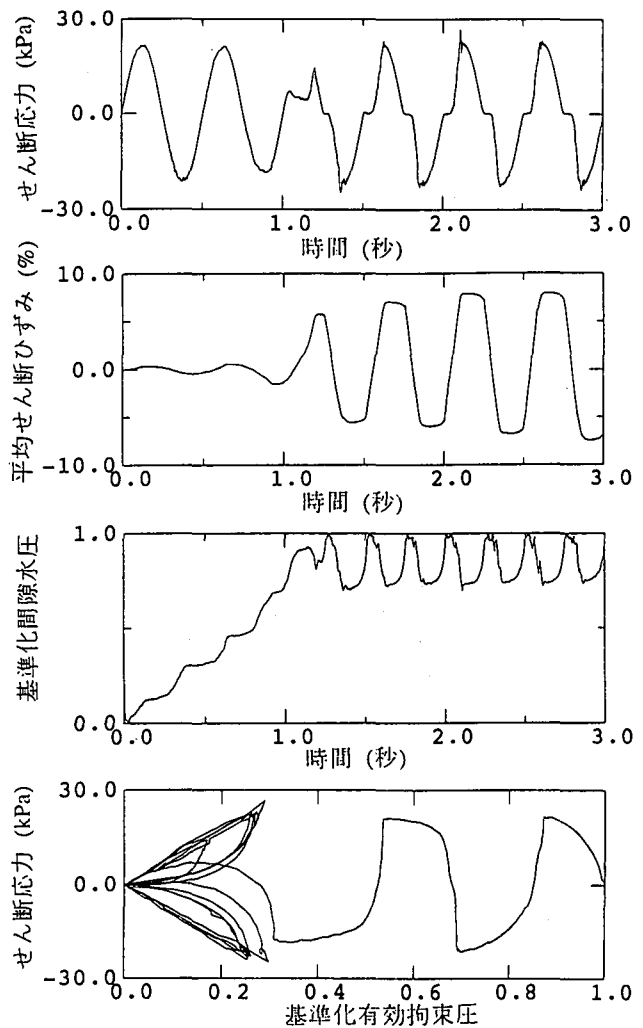


図-9 液状化試験のシミュレーション結果($Dr^*50\%$)

5. 繰り返しねじりせん断試験のシミュレーション

繰り返しねじりの荷重は、上の境界に接する要素に対して、正弦波形の荷重を加えることにより行った。図-8に $D_r^*50\%$ の供試体に対して応力比0.4、図-9に $D_r^*26\%$ の供試体に対して応力比0.25の繰り返し荷重を加えたシミュレーション結果をそれぞれ示す。上から、下端の境界に接する要素に加わるせん断応力の時刻歴、上端の境界に接する要素の平均水平変位から計算した供試体の平均的なせん断ひずみの時刻歴、上端の境界で観測された間隙水圧の時刻歴および応力経路図である。間隙水圧および有効拘束圧は初期拘束圧で除して基準化した。応力経路図のせん断応力は、下端の境界に接する要素に加わるせん断応力を用いた。

$D_r^*50\%$ の供試体は、応力比が大きいにもかかわらず、間隙水圧増加の程度は緩慢である。基準化間隙水圧が0.5を越えたあたりで、平均せん断ひずみの増加が顕著になることから、液状化が始まったと判断される。供試体に強い「ねばり」があり、応力経路図においてはサイクリックモビリティが観察される点で、実際の砂を密詰めにした供試体の特徴が現れている。これに対して、 $D_r^*26\%$ の供試体は、荷重開始直後から急速に間隙水圧が上昇し、繰り返し荷重3波目においてひずみが急激に大きくなっている。図-10に両者をせん断応力-平均せん断ひずみ関係について比較する。相対密度の違いによる液状化特性の差が顕著に再現されている。

図-11に、 $D_r^*26\%$ 、 30% 、 37% および 50% の供試体に対して、拘束圧の異なる液状化試験のシミュレーションを行い、それぞれの液状化強度を整理した。液状化判定の基準は $D_a=3\%$ である。

$D_r^*37\%$ および $D_r^*50\%$ の供試体に対する応力比の小さいシミュレーションでは、液状化に至らな

かったので、解析終了時点における間隙水圧の上昇量から、 $D_a=3\%$ 、に達すると思われる液状化回数を推定した。

相対密度が大きいほど液状化強度が大きい傾向が再現されている。比較のため豊浦砂 $D_r65\%$ の液状化強度を重ね描いた。 $D_r65\%$ の豊浦砂の液状化強度は、シミュレーションにおける $D_r^*30\%$ と $D_r^*37\%$ の供試体の液状化強度の中間に相当する。

6. あとがき

液状化試験を対象に個別要素法を適用した結果、サイクリックモビリティ、せん断剛性の急激な低下などの挙動を再現することができ、定量的にも、砂の液状化強度を再現できそうであることを示した。個別要素法のプログラムは、京都大学澤田純男氏のDEMSを用いた。

参考文献

- 1) Hakuno *et. al.*: A granular assembly simulation for the seismic liquefaction of sand, Proc. of JSCE No.398/I-10, pp129-138
- 2) 藤谷昌弘他：個別要素法による液状化現象のシミュレーション, 第31回地盤工学研究発表会 pp997-998
- 3) 小瀬木他：砂の非排水繰り返し線断試験のシミュレーション, 土木学会第51回年次学術講演会 pp332-333
- 4) 澤田他：楕円要素を用いた個別要素法による砂の液状化発生機構の解析, 第40回地盤工学シンポジウム, pp131-138
- 5) 中瀬仁他：回転自由度を拘束した個別要素法による平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション, 土木学会第47回年次学術講演会 I I I - 175 pp390-391

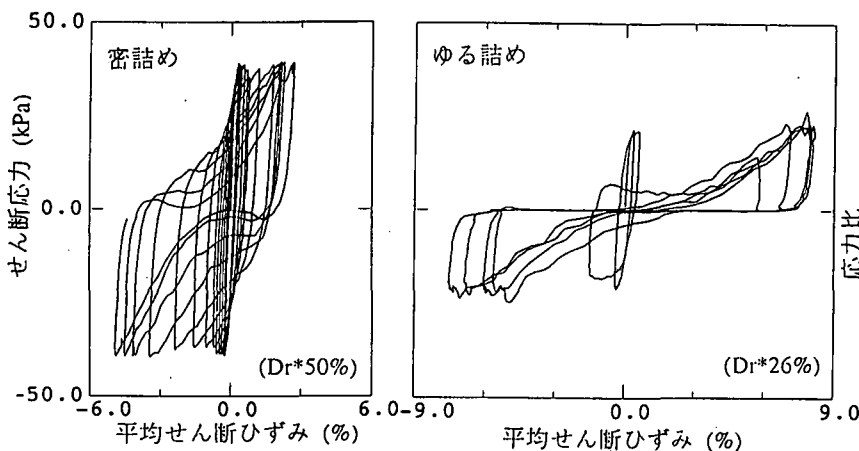


図-10 せん断応力-平均せん断ひずみ関係

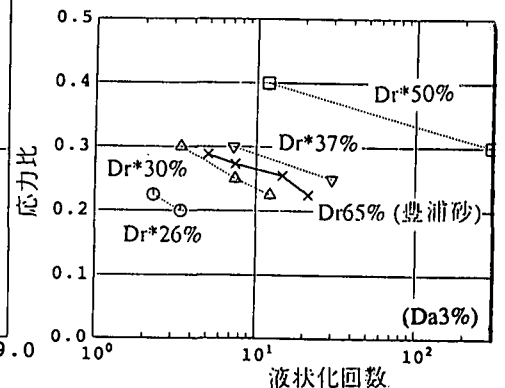


図-11 応力比-液状化回数関係