



# 大学の研究室紹介 - 東海シリーズ No.17 -

## 部分排水振動三軸試験における砂の締固め、液状化・液状化後の圧密挙動の水～土連成計算

名古屋大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻  
教授 野田利弘

### 1. はじめに

地震のような繰返し振動を受けた緩い砂質地盤は、振動中に間隙水の移動が十分に生じる場合には「締固め」を、そうでない場合には「液状化」を生じ振動停止とともに圧密沈下が生じる。

多くの砂の構成式研究において、構成式は非排水時の不安定挙動（液状化）専用であって、砂の排水条件下での締固めや液状化後の圧密挙動（揺すり込み沈下）などの大圧縮を表現することできない。また、既存の砂の構成式を搭載した既存の多くの動的解析において、液状化後の圧密解析ができず、地震後の変形挙動を知るためには動的プログラム使用後に別の静的プログラムの使用が必要で、その変更時には材料定数または状態量の人為的な見直しも別途必要である。

本報では、初期条件・境界条件が明確な側圧一定の砂の部分排水振動三軸試験を例に、名古屋大学で開発した地盤総合解析ツール (**GEOASIA**<sup>1),2)</sup>) を用いて、砂の締固め、液状化・液状化後の圧密挙動を一貫して再現する。この解析ツールは、土骨格の構成式に土の骨格構造（構造・過圧密・異方性）の働きを記述する弾塑性構成式 (SYS カムクレイモデル<sup>3)</sup>) を使用し、変形も破壊も、そして静的も動的も区別することなく解析できる有限変形・水～土骨格連成有限要素計算である。なお、この構成式における「構造」概念とは、ランプの「カードハウス」に似て、嵩張って、土の間隙が大きくなっている土の骨格構造の状態を表す。これを過圧密と異方性の概念と並んで通常のカムクレイモデルに導入することにより、砂の場合は、緩い砂のように大きな有効応力変化を伴わないでも、微小な応力振幅で容易く圧縮できる状態に移ることができる様子が表現できる。また、緩い砂は構造が高位で、密な砂は構造が低位として表される。

### 2. 計算条件

図-1 は計算に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す。計算は簡単のため、円筒供試体と荷重の上下・軸対称性を仮定して供試体の 1/4 断面を用いて行う。上端は剛で摩擦があるペDESTALの条件を表現している。水理境界は上端を排水（水圧ゼロ）、それ以外を非排水とした。荷重条件は、側圧一定下で、上端から正弦波で振幅 40kPa の鉛直応力を荷重制御により、低周波(100sec)と高周波(0.01sec)で 20 回与えた後、初期と同一の等方応力状態にした。砂の材料定数と供試体の初期状態は省略するが、中密な砂を想定し、間隙水の移動の影響が出やすいように透水係数を  $10^{-5}$ cm/s とした<sup>2)</sup>。

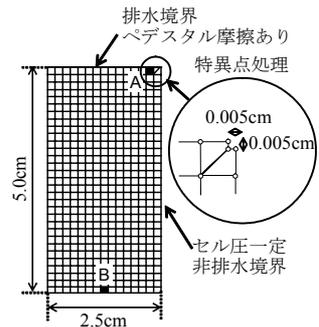


図-1 供試体の有限要素メッシュ

### 3. 計算結果

#### (a) 動的計算による低周波と高周波振動での供試体の見かけの挙動の比較

図-2 と図-3 はそれぞれ、低周波と高周波で加振した供試体の見かけの挙動（1 要素としてみた場合の挙動）で、軸ひずみ  $\epsilon_a$  ～ 軸差応力  $q$  関係、軸ひずみ  $\epsilon_a$  ～ 体積ひずみ  $\epsilon_v$ 、平均有効応力  $p'$  ～  $q$  関係ならびに比体積  $v (=1+間隙比 e) \sim p'$  関係を示す。低周波の場合は、微小な応力振幅で容易に締まり（「締固め」）、圧縮側（ $\epsilon_a$  の正側）に  $\epsilon_a$  が進行して、振動停止とともに直ちに変形が収束する。一方、高周波の場合、振動中は供試体がほぼ非排水的に振舞い、14 周期目以降から  $\epsilon_a$  が圧縮側・伸張側に大きく振れ始める。加振停止後は速やかに過剰水圧が消散して大圧縮が生じる。低周波と高周波では、同じだけ繰返しを与えたのにも関わらず、高周波の方が大沈下を示す。なお高周波の場合、供試体内部の土の挙動を後に詳述する。なお、図中では加振中を a-b、加振終了から圧密終了時点を示す b-c で表す。

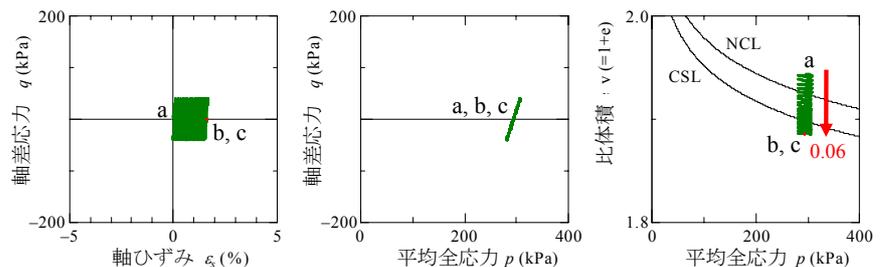


図-2 締固め挙動（低周波(周期 100 秒),  $\Delta q = \pm 40$ kPa)

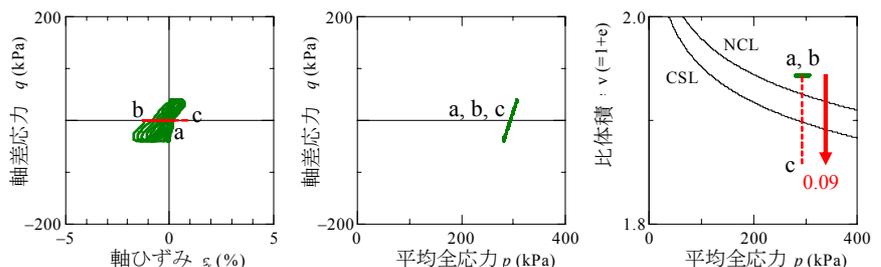


図-3 液状化後の圧縮（「揺すり込み沈下」）（高周波(周期 0.01 秒),  $\Delta q = \pm 40$ kPa)

(b) 動的計算による低周波と高周波振動での供試体内部の構造と比体積変化（経時変化）の比較

図-4 と図-5 はそれぞれ、低周波と高周波の振動を受ける供試体内部の構造( $1/R^*$ )と比体積変化( $\Delta v$ )の分布の経時変化を示す。図-4 は 1,5,10,15,20 周期目、図-5 は 5,10,20 周期目および加振停止後 1.0 秒と圧密終了時を示す。高周波では構造低位化と体積変化が排水端側で見られるのに対し、低周波では供試体深部で顕著に見られる。すなわち、高周波では、供試体の深部にまで構造の低位化（破壊）が生じ、供試体は低周波の場合よりも密になる（大圧縮を示す）。

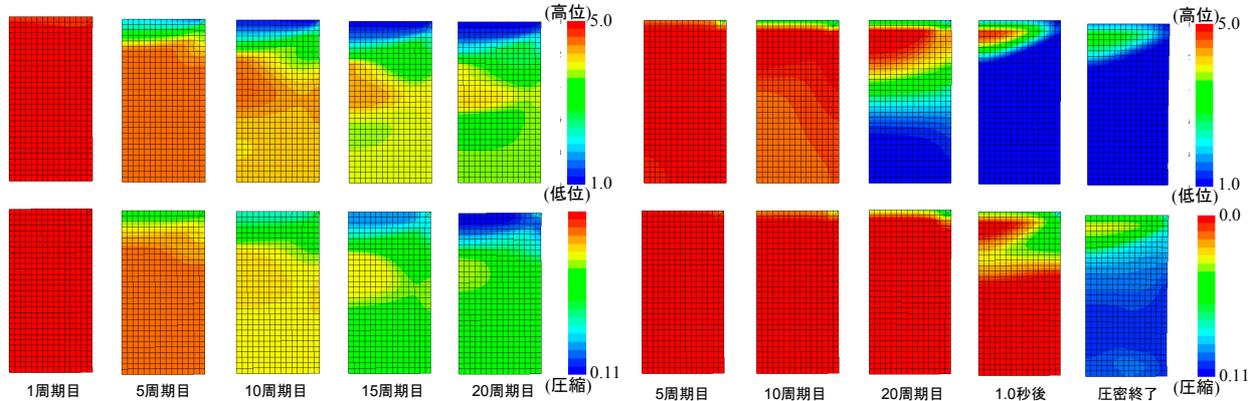


図-4 供試体内部の経時変化（低周波）（上:  $1/R^*$ , 下:  $\Delta v$ ） 図-5 供試体内部の経時変化（高周波）（上:  $1/R^*$ , 下:  $\Delta v$ ）

(c) 高周波の場合の砂要素の挙動

図-6 と図-7 はそれぞれ、高周波振動を与えた場合の図-1 中の砂要素 A, B の挙動を示す。排水端に近い要素 A は振動中に多少の  $p'$  の減少と応力比  $q/p'$  の増加を示しながら「締固め」挙動を示す。一方、深部の要素 B は加振中のみならず加振後も波の伝播が残り、 $q/p'$  の増加とともに有効応力が原点に近づき「液状化」挙動を示す。このとき要素 A よりも構造が低位化し超過圧密になる（図省略）。加振停止後は、圧密の進捗とともに大圧縮を示す。

3. おわりに

ここでは、砂の比較的単純な動的三軸試験を例に、砂の締固めと、加振中・加振後の挙動として液状化/液状化後の圧密（揺すり込み沈下）とが一貫して記述できることを示した。

構成式研究において、これまでは砂一つとっても対象とする力学挙動が細分化され、それを一貫して構成式で説明できる状況になかった。これは、少し話を挙げて土（全体）の構成式研究を見回すと、砂の構成式は粘土が説明できない、粘土の構成式は砂が説明できないということに通じる。つまり、粘土と砂からなる中間土にはお手上げで、中間土には中間土専用の無数の構成式が必要になる。さらに、長らく変形と破壊とは別の問題でまた静的問題と地震のような慣性力が働く動的問題も別の問題として使い分けてきたから、技術者は圧密計算専用ツールでは液状化計算ができず、液状化計算専用ツールでは地盤の支持力計算もできない状況だから、事前に対象とする問題を決めて、それに応じた解析ツールを選ぶ必要があった。

名大地盤力学研究室では、砂から中間土、粘土までの広範な土を同じ理論的枠組みで記述できる土骨格の構成式（SYSカムクレイモデル）を開発するとともに、この構成式を搭載して、変形も破壊も、そして静的問題も動的問題も対応可能な解析ツール（**GEOASIA**）を開発してきた。これは、上述のように、解くべき問題を決めてから随時解析ツールを使い分けるのではなく、採取土試料などから土の定数や状態を決定した地盤に対し、盛土を載荷するのか地震を入力するのか、つまり与える外力形態のみを変えて、地盤に何がどのように生じるかを教えてくれる解析ツールであると考えている。

参考文献 1) Asaoka, A. and Noda, T. (2007): All soils all states all round geo-analysis integration, International Workshop on Constitutive Modelling - Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, China, 11-27. 2) Noda, T, Asaoka, A. and Nakano, M.(2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, 48(6), in printing. 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, 42(5), 47-57.

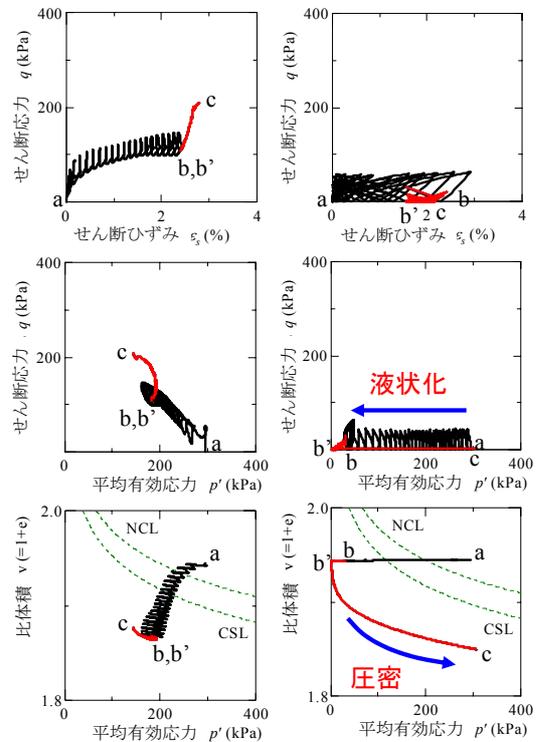


図-6 砂要素 A の挙動（「締固め」） 図-7 砂要素 B の挙動（「液状化」と圧密）