

III - 5

間隙水の移動を制御した流動破壊実験手法の開発

東北大学大学院工学研究科 学会員 ○君島 芳友

東北大学大学院工学研究科 正会員 仙頭 紀明 風間 基樹

東北学院大学工学部土木工学科 正会員 山口 晶

1. はじめに

1964 年の新潟地震, 1983 年の日本海中部地震等において, 液状化に伴う側方流動が生じ, 多くの被害を受けた. これらの被害を契機に, 液状化に伴う流動現象に関する研究が行なわれており, それらに関する研究は非排水条件の下で行なわれているものが多い¹⁾. しかし, 過去の事例から報告されている数 m オーダーの地盤変位や時間遅れを伴った進行性の破壊現象をうまく説明できているものはない. 風間ら^{2),3)}は, 地震後の過剰間隙水圧の再分配により, ある層で浸透破壊が生じることが側方流動のメカニズムの主要因である可能性を示した. しかし, 大変形・時間遅れの両方を表現できる手法ではあるものの, 流動地盤の物性評価について未解明の部分が多く, これを数値モデルに基づいて解析するところまでには至っていない. そこで, 本研究では圧密・浸透の支配方程式を逐次解きながら, 現位置の応力状態を再現した土要素に過剰間隙水圧の勾配に応じた間隙水を移動させることで給排水時の土の実際のせん断挙動を反映した流動変形解析システムを構築する.

2. 流動オンラインシステムに関する理論的背景

(1) 支配方程式

方程式はテルツァギの一次元圧密方程式に従う.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{m_v \rho_w} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (1)$$

t : 時間, z : 深度, k : 透水係数, ρ_w : 水の密度, p : 過剰間隙水圧, m_v : 体積圧縮係数である.

(2) 空間・時間方向の離散化

式(1)を空間・時間に対して差分近似で解く. 離散化の模式図を図-1 に示す. 土中水の単位面積あたりの浸透速度は式(2)で表される.

$$v_i = \overline{k_{i,i-1}} \frac{p'_i - p'_{i-1}}{(h_i + h_{i-1})/2} \quad (2)$$

ここで, p_i , p_{i-1} は i 層と $i-1$ 層の過剰間隙水圧, h_i , h_{i-1} は i 層と $i-1$ 層の層厚である. $\overline{k_{i,i-1}}$ は i 層と $i-1$ 層間の平均透水係数であり, それぞれの層の透水係数

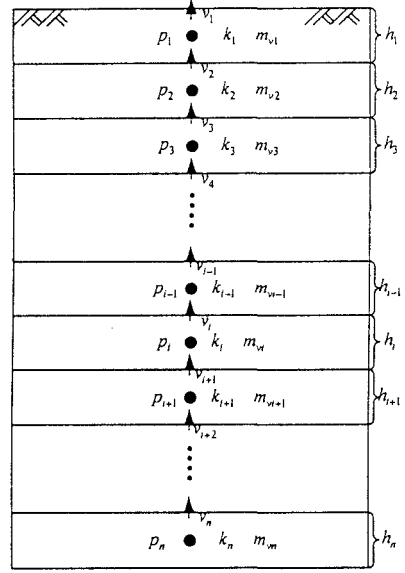


図-1 離散化の模式図

k_i , k_{i-1} を用いて式(3)で表される.

$$\overline{k_{i,i-1}} = \frac{h_{i-1} + h_i}{h_{i-1}/k_{i-1} + h_i/k_i} \quad (3)$$

i 層の時間増分 dt あたりの体積ひずみ ε_{vi} は式(4)で表される.

$$\varepsilon_{vi} = \frac{(v_{i+1} - v_i)dt}{h_i} \quad (4)$$

ここで時間 $t+dt$ における過剰間隙水圧 p_i^{t+dt} は時間 t における過剰間隙水圧 p'_i , 体積ひずみ ε_{vi} , 体積圧縮係数 m_{vi} を用いて式(5)で表される.

$$p_i^{t+dt} = p'_i + \frac{\varepsilon_{vi}}{m_{vi}} \quad (5)$$

上記の式(2)~式(5)は, 式(1)を前進差分近似により解いたことと等しい.

(3) 構成モデルとせん断ひずみの発展則

浸透破壊を起こした層における i 層の時間 $t+dt$ におけるせん断ひずみ γ_i^{t+dt} は, 時間 t におけるせん断ひずみ γ'_i と破壊時の体積ひずみ増分とせん断ひずみ増分の比 β_i を用いて式(6)で表される. なお, 浸透破壊した層では, 過剰間隙水圧が破壊線に達した後は, それ以上過剰間隙水圧が上昇しないものとし

た(式(7)).

$$\gamma_i^{t+dt} = \gamma_i^t + \frac{\varepsilon_{vi}^t}{\beta_i} \quad (6)$$

$$p_i^{t+dt} = p_i^t \quad (7)$$

3. 流動オンラインシステムの開発

式(1)～(7)で構成モデルによるせん断ひずみの発達までを説明したが、式(6)の体積圧縮係数や式(7)の構成モデルによるひずみの発達などには仮定が含まれており、明確なモデル化がなされていない。そのため、流動オンラインシステムによりそのモデル化による仮定の部分を取り除いている。図-2 にフローチャートを示し、以下でその流れについて説明する。

①パラメータとして層の単位体積重量、層厚、透水係数、傾斜角度を与える。

②式(3)により平均透水係数を求める。

③a)要素試験層の場合

要素試験に設定した層に対して式(8)により計算された初期せん断応力を載荷する。

$$\tau_{initial} = \sigma_{vi}^t \tan \theta \quad (8)$$

$\tau_{initial}$: 初期せん断応力, σ_{vi}^t : 初期有効応力,
 θ : 傾斜角度

初期せん断応力載荷中は排水状態とする。所定の初期せん断応力に達したら非排水状態にする。その後、応力振幅一定のサイン波を入力する。

b)計算層の場合

初期過剰間隙水圧はパラメータとして与える。

④式(2)を用いて浸透速度を求める。

⑤式(4)により体積ひずみを求める。

⑥過剰間隙水圧、せん断ひずみを求める。

a)要素試験層の場合

流動オンライン実験の要素試験層の次のステップの過剰間隙水圧は式(4)によって計算された体積ひずみを供試体に注入(または排水)し、かつ、傾斜角度から算出された初期せん断応力と計測されるせん断応力が釣り合ったときの過剰間隙水圧を直接計測することで求めることができる。また同様に、せん断ひずみは初期せん断応力が釣り合った時点で計測される。過剰間隙水圧、せん断ひずみとともに実験による実測値であるため複雑なモデル化を必要としない。また、過剰間隙水圧は次ステップの速度の計算に用いるため、変化する地盤

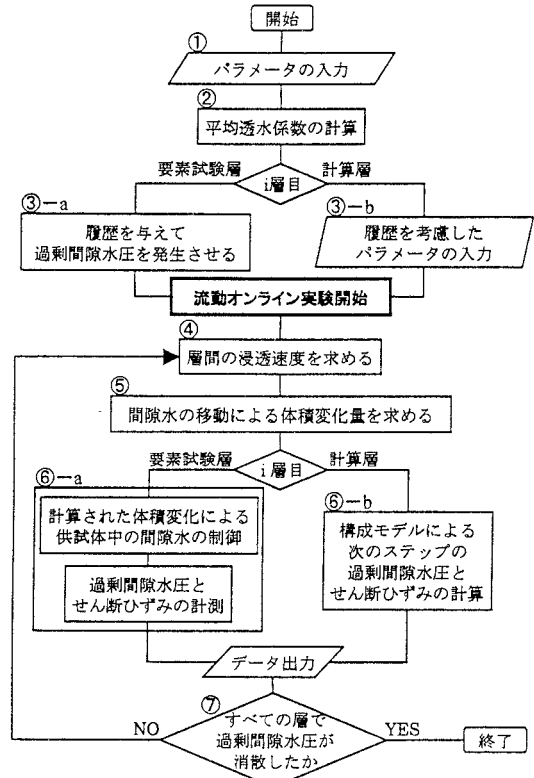


図-2 オンラインシステムのフローチャート

の挙動を知ることができる。

b)計算層の場合

過剰間隙水圧とせん断ひずみは構成モデルである式(6)、(7)によって計算する。

⑦全層で過剰間隙水圧が消散したら終了とし、消散していないならば④へ戻る。

4. 結論

緩傾斜地盤の浸透破壊に起因する側方流動量を求めることのできる構成モデルに大きく依存しない流動オンライン実験システムを構築した。その結果、構築したシステムにより、室内試験で間隙水の流入による流動変形挙動をシミュレーションできることが確認できた。

<参考文献>

- 1) 規矩大義, 吉田 望, 安田 進: 繰返し載荷時のひずみ履歴が液状化後の流動特性に与える影響, 第33回地盤工学研究発表会, pp.1043~1044, 1998
- 2) 風間基樹, 仙頭紀明, 赤堀一彦, 大村洋史: 地震後の浸透破壊に関する流動変形メカニズム, 第36回地盤工学研究発表会, pp.2415~2416, 2001
- 3) 赤堀一彦, 大村洋史, 風間基樹, 仙頭紀明: 地震後の浸透破壊による流動変形予測法, 第36回地盤工学研究発表会, pp.2417~2418, 2001