

地盤の液状化時の有効応力解析法の開発

中部復建（株） 森 信夫

1. はじめに

昨年度、西、金谷¹⁾により提案されたものを基本とし、繰返し中空ねじり試験および繰返し三軸圧縮試験の砂の非排水繰返しせん断試験結果を整理し、非排水繰返し中空ねじり試験結果のシミュレートを報告した。

本年度は、この結果をもとに、地盤の液状化時の有効応力解析法を開発した。用いた方法は、加藤²⁾、田口³⁾、渦岡⁴⁾による方法と同じで、クリスチャン法によるピオ式の有限要素化である。開発の初段階として、といったものは、成層地盤の水平動である。

2. 基礎式とFEM化

固相は、FEM化すると、次のようになる²⁾³⁾⁴⁾。

$$\{\rho\} \int_V \delta u^T [N]^T [B] [N] dv \ddot{u} + \{\int_V \delta u^T [B]^T [D] [B] dv\} du + \{\int_V \delta u^T [B]^T dv\} \sigma'_i + \{\int_V \delta u^T [B]^T dv\} p_E = 0 \quad (1)$$

液相は、FEM化すると、次のようになる²⁾³⁾⁴⁾。

solid = uncomp. liq. = uncomp.

$$\{\rho_f\} \int_V \delta u^T [B]^T dv \ddot{u} - \left\{ \frac{\gamma_w}{k} \int_V \delta u^T [B]^T dv \right\} \dot{u} - \alpha \cdot p_E + \sum_{k=1}^K \alpha_k \cdot p_{ek} = 0 \quad (2.1)$$

solid = uncomp. liq. = comp.

$$\{\rho_f\} \int_V \delta u^T [B]^T dv \ddot{u} - \left\{ \frac{\gamma_w}{k} \int_V \delta u^T [B]^T dv \right\} \dot{u} - \alpha \cdot p_E + \sum_{k=1}^K \alpha_k \cdot p_{ek} + A p_E = 0 \quad (2.2)$$

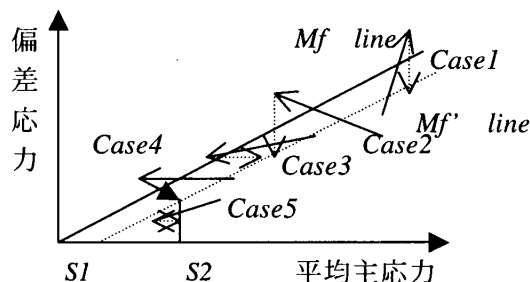
ここで、

$$A = \int_V \frac{n\gamma_w}{kK_f} dv \quad (3.1) \quad \alpha = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^N \frac{A_k n_i}{s_{ki}} \right) \quad (3.2) \quad \alpha_k = \sum_{i=1}^N \frac{A_k n_i}{s_{ki}} \quad (3.3)$$

ここに、 A_k は要素の隣合う面。六面体要素であれば6面。 s_{ik} 隣合う要素の重心距離。六面体要素で6要素が隣会えば、考えている要素の重心と隣合う6要素の重心距離である。

逐次積分法としては Newmark 法²⁾³⁾⁴⁾を、水圧項は前進差分²⁾³⁾⁴⁾を用いた。これは、式 4.1 と式 4.2 となる。そのほか、解にあたって必要なことを以下に示す。

- ① $[K]_{i+4}$ が非対象であることから、非対象 matrix を解く必要がある。当該計算は front 法を用いた
- ② $[K]_{i+4}$ と $-\alpha'$ とを比較すると、約 1,000 倍程度の異なる。このような場合、scaling により計算をすることもあ
- る。当該計算は、 $-\alpha'$ 項をこの比に応じて倍数する方法を用いている⁵⁾。③解の安定のため Rayleigh 減衰を用い、減衰項を作成する。



計算上、応力は限界応力状態 M_f line を越える。このため、図 1 に示した応力補正⁴⁾が必要で、補正限界応力 M'_f line 設けた。そして、図において、

$$S1 = \sigma'_{mcr} = 0.001\sigma'_{mo}, \quad S2 = \sigma'_{mmin} = 0.01\sigma'_{mo} \quad \text{とする。}$$

図 1 応力補正の説明図

キーワード：液状化解析、二相問題、弾塑性構成式、動的解析、FEM
 連絡先：〒466-0059 名古屋市中区昭和区福江一丁目 1805 番地 TEL 052-882-5851 FAX 052-882-6170

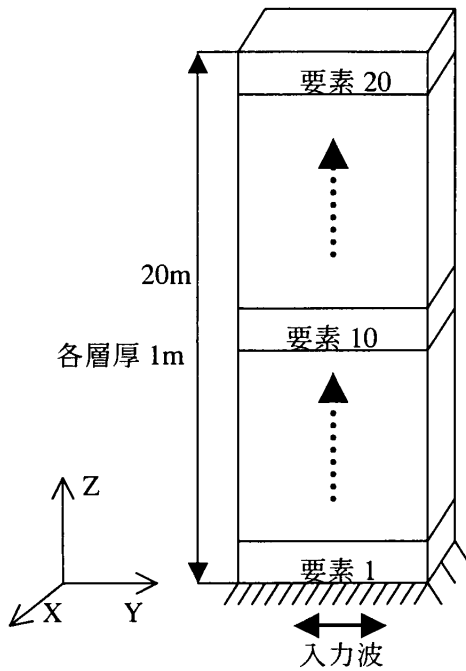


図2 計算モデル図

solid = uncomp. liq. = uncomp.

$$\begin{bmatrix} [M] + \gamma\Delta t[C] + \beta(\Delta t)^2[K]_{i+\Delta t}, & K_v \\ K_v^T & -\alpha \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{i+\Delta t} \\ p_{E,i+\Delta t} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ p_{ek,i+\Delta t} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{i+\Delta t} - R_i - [C](\dot{u}_i + \Delta t\ddot{u}_i - \gamma\Delta t\ddot{u}_i) \\ + [K]_{i+\Delta t} \{ \Delta tu_i + (\frac{1}{2} - \beta)(\Delta t)^2 \ddot{u}_i \} \\ K_v (u_i + \Delta t\dot{u}_i - \gamma\Delta t\ddot{u}_i) - \frac{1}{k(\frac{1}{g} - \frac{\gamma\Delta t}{k})} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

図2に、計算モデルを示した。計算に用いた波形は、正弦波400ガル、0.4Hz、神戸PI波（G1-32m,EW）の2波である。地盤の透水係数は、いずれも 10^{-3} cm/sである。図3.1に要素20の正弦波の有効応力経路、図3.2に神戸PI波の有効応力経路を示した。両図ともサイクリックモビリティ一現象を表していることがわかる。図4.1に要素20の正弦波の応力-ひずみ関係図、図4.2に神戸PI波の応力-ひずみ関係図を示した。両図から、応力-ひずみ関係は紡錘型、ひずみは両振幅で1.5%であることがわかる。

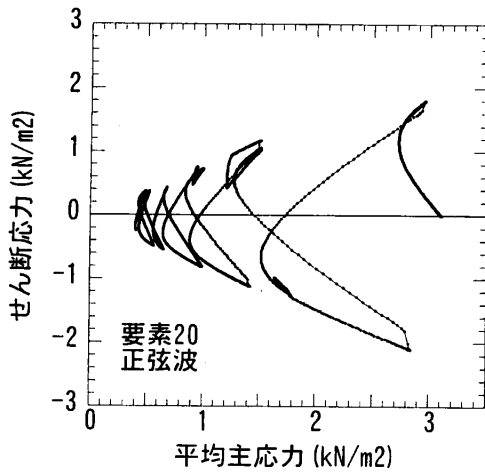


図3.1 要素20の有効応力経路図

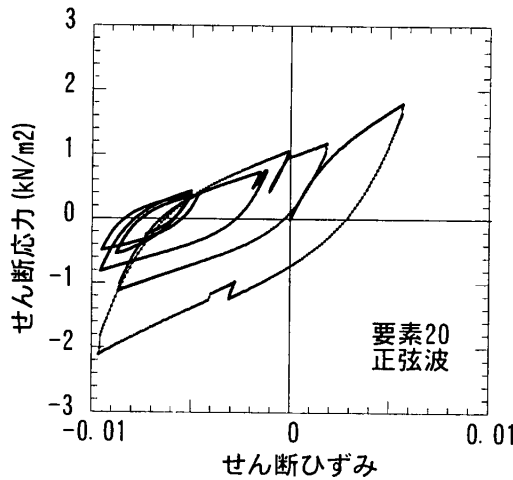


図4.1 要素20の応力-ひずみ関係図

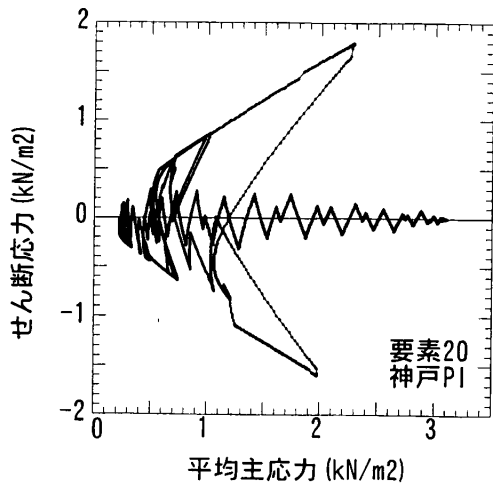


図3.2 要素20の有効応力経路図

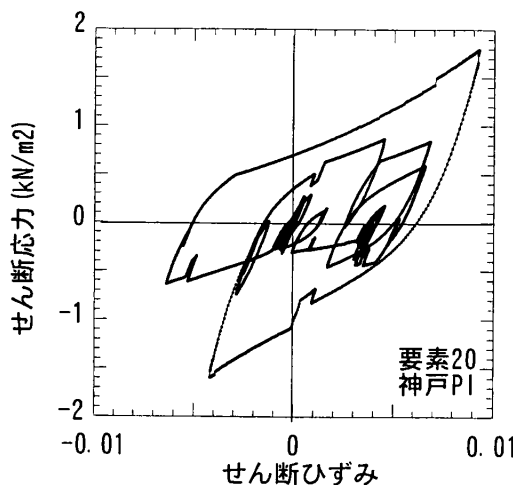


図4.2 要素20の応力-ひずみ関係図

3. おわりに 開発の初段階として、解いたものは、成層地盤の水平動である。応力修正法をもちいることで、神戸PI波の8秒まで計算できることを可能とした。なお、岐阜大八嶋教授には、応力修正法をお教えいただいた。お礼申し上げます。参考文献：(1)森信夫：「弾塑性構成式による土要素の液状化過程の模擬」、第56回土木学会年次講演会、Ⅲ-A088 (2)加藤 満：‘多次元液状化解析とその応用に関する研究’、岐阜大学、博士論文、平成7年1月 (3)田口洋輔：‘液状化による地盤・基礎構造物の3次元挙動に関する研究’、岐阜大学、博士論文、平成9年1月 (4)渦岡良介：‘地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解析手法に関する研究’ 岐阜大学、博士論文、2001.1 (5)吉田 望：‘7. 動的問題に対する有限要素法（その1）’、土と基礎、pp.35-40、2001.7