

Ⅲ-293

液状化解析で用いる地盤構成モデルのパラメータ設定法

大林組技術研究所 正会員 伊藤 浩 二

1. はじめに

本研究では、地震、波浪等の変動荷重に対して、地盤の非線形挙動が構造物ならびに地盤の動的安定性に与える影響や構造物に作用する動的外力を評価しうる応答解析手法として、新たに動的有効応力解析プログラムEFFECTを開発し、その適用性の検討を行っている。EFFECTに導入した地盤構成モデル(松岡が提案したモデルを応用した繰り返し載荷のモデル¹⁾)を実地盤を対象とする液状化解析に適用する場合、そのモデルパラメータは、対象地盤の単調載荷の要素試験から設定される。本報では、任意の初期有効応力を有する実地盤の液状化解析において、要素試験で得られる液状化強度特性を忠実に反映させるために、要素試験で設定したパラメータから実地盤で用いるパラメータの設定法を示す。

2. 地盤構成モデル

EFFECTに導入した構成モデルの塑性ひずみ増分の比例定数 λ は、せん断、主応力回転、異方圧密、等方圧密の各応力変動(降伏関数に相当)に対して(1)~(4)式で算定される。ここに添字s、r、ac、icは、せん断、主応力回転、異方圧密、等方圧密を意味し、 ϕ_i は内部摩擦角、 C_c 、 C_s は圧縮指数と膨張指数、 e_0 は初期間隙比、 k_s 、 $k_c(=0.44 C_c / (1 + e_0))$ は硬化パラメータ、 ϕ_{mo} はモービライズド角、 α は一般軸と主応力軸のなす角、 σ_m は平均応力、 σ_a は大気圧、 m は σ_m のべき係数で $m=0.5$ を仮定する。応力-ダイレイタンス関係と比例定数 λ は、(5)、(6)式で表現され、 λ 、 μ はダイレイタンスパラメータ、 $\zeta(=\pm 1)$ は荷重パラメータである。

3. 液状化解析で用いるモデルパラメータの設定

3.1 非排水条件の要素釣り合い式

非排水条件の要素釣り合い式と残差不平衡力は、通常のFEMで用いるマトリクス表示により(7)~(9)式で表現される²⁾。ここに $[K]$ 、 $[B]$ は剛性、ひずみマトリクス、 $\{dF\}$ 、 $\{dQ\}$ 、 $\{d\delta\}$ 、 $\{L\}$ は荷重増分、残差不平衡力増分、節点変位増分、影響係数ベクトル、 dP は過剰間隙水圧増分である。また収束計算は、 $\{dQ\}$ を $\{dF\}$ に代入し、所定の許容誤差が得られるまで行う。

3.2 パラメータ設定法

非排水条件で初期平均有効応力 σ'_0 が異なる場合の有効応力経路の $\sigma'_a - \sigma'_m$ 関係、応力-ひずみ関係の $\sigma'_a - \varepsilon_s$ 関係の模式図を図-1, 2に示す。ここに σ'_m 、 σ'_a 、 ε_s は平均有効応力、軸差応力、軸ひずみである。

同じ相対密度の材料の液状化強度比 $\sigma'_a / 2\sigma'_0$ は、 σ_0 が σ'_{01} 、 σ'_{02} と異なる場合でも同様という特性から、図-1の有効応力経路の相似関係と同様に、過剰間隙水圧増分 dP も(10)式で表現されると仮定する。

(8)式の $\{dQ\}$ は、 $[D^*]$ が骨格弾性係数 E 、 $\{d\varepsilon_{ij}^p\}$ が非排水条件で、硬化パラメータ k_s を比例定数とすることから、(11)、(12)式で dP は表現される。ここに α は、同じ相対密度の材料で一定である。

$$\lambda_s = \frac{k_s \sin^2 \phi_i \cos \phi_{mo}}{(\sin \phi_i - \sin \phi_{mo})^2} d\phi_{mo} \quad (1)$$

$$\lambda_r = \frac{2k_s \sin \phi_i \sin \phi_{mo}}{(\sin \phi_i - \sin \phi_{mo})} d\alpha \quad (2)$$

$$\lambda_{ac} = \frac{k_c \sin \phi_i \sin \phi_{mo}}{(\sin \phi_i - \sin \phi_{mo})} d\sigma_m \quad (3)$$

$$\lambda_{ic} = \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{\sigma_m^{m-1}}{\sigma_a^m}\right) \left(\frac{C_c - C_s}{1 + e_0}\right) d\sigma_m \quad (4)$$

$$\frac{d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_3^p}{d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p} = \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{mo} \zeta - \frac{2 - \lambda}{\lambda} \sin \phi_{mo} \quad (5)$$

$$\lambda_s, \lambda_r, \lambda_{ac} = (d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p) \zeta \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} dF \\ d\varepsilon_v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\delta \\ dP \end{Bmatrix} \quad (\because d\varepsilon_v = 0) \quad (7)$$

$$\{dQ\} = \int_{\Omega} [B]^T [D^*] \{d\varepsilon_{ij}^p\} d\Omega \quad (8)$$

$$\{L\} = L_i = \int_{\Omega} (B_{1i} + B_{2i} + B_{3i}) d\Omega \quad (9)$$

$$\left(\frac{\sigma'_{m1}}{\sigma'_{m2}}\right) = \left(\frac{\sigma'_{01}}{\sigma'_{02}}\right) = \left(\frac{dp_1}{dp_2}\right) \quad (10)$$

$$dp_1 = \alpha \sqrt{\sigma'_{m1}} k_{s1} \quad (11)$$

$$dp_2 = \alpha \sqrt{\sigma'_{m2}} k_{s2} \quad (12)$$

$$k_{s1} = \sqrt{\frac{\sigma'_{01}}{\sigma'_{02}}} k_{s2} \quad (13)$$

$$\left(\frac{\varepsilon_{a1}}{\varepsilon_{a2}}\right) = \left(\frac{k_{s1}}{k_{s2}}\right) = \sqrt{\frac{\sigma'_{01}}{\sigma'_{02}}} = \sqrt{\frac{\sigma'_{d1}}{\sigma'_{d2}}} \quad (14)$$

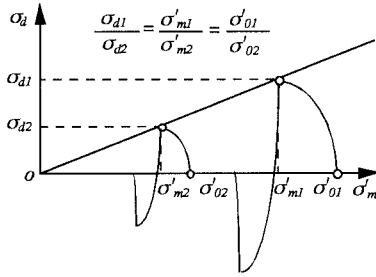


図-1 有効応力経路の模式図

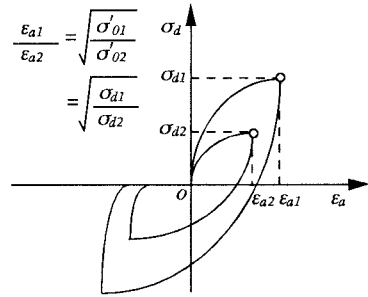


図-2 応力-ひずみ関係の模式図

硬化パラメータ k_s は、(11)、(12)式を(10)式に代入すると(13)式の関係が得られる。したがって同じ相対密度の材料で σ'_0 が異なる場合、(13)式の関係から k_s を設定することにより、有効応力経路の相似関係が満足される。

軸ひずみ ϵ_s は、(13)式を用いた場合、 ϵ_s が k_s を比例定数とすることから(14)式の関係が得られ、図-2に示すように、 σ'_0 あるいは σ_0 の平方根に比例する関係を示す。

4. 解析結果

非排水単純せん断条件 ($\tau_{xy}/\sigma'_0 = 0.14$) の解析から、(13)式の適用性を検討する。要素試験の初期平均有効応力 $\sigma'_{02} = 98\text{kPa}$ 、要素試験で設定した硬化パラメータ $k_{s2} = 0.1\%$ による $\tau_{xy} - \sigma'_m$ 関係、 $\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係を図-3に示す。次に、想定した実地盤の初期平均有効応力 $\sigma'_{01} = 49\text{kPa}$ において、実地盤の硬化パラメータが $k_{s1} = k_{s2} = 0.1\%$ の場合、(13)式で設定した $k_{s1} = 0.071\%$ 場合の $\tau_{xy} - \sigma'_m$ 関係、 $\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係を図-4、5に示す。

図-5と図-3の $\tau_{xy} - \sigma'_m$ 関係は相似関係、図-5と図-3の $\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係は、 γ_{xy} を0.5の平方根で縮小した関係となり、(13)、(14)式を反映した結果を示す。

図-4と図-3の $\tau_{xy} - \sigma'_m$ 関係は、相似関係と異なり、実地盤の液状化強度が要素試験の液状化強度と比較して過小に評価される結果を示す。

以上から、液状化解析で用いる実地盤の硬化パラメータ k_{s1} は、要素試験で設定した硬化パラメータ k_{s2} と初期平均有効応力 σ'_{02} 、実地盤の初期平均有効応力 σ'_{01} を用いて(13)式で設定することにより、要素試験で得られる液状化強度特性を適切に反映した液状化解析が可能である。

5. まとめ

要素試験で観測される液状化強度特性を適切に反映した実地盤の液状化解析を行うために、要素試験で設定したパラメータから実地盤のパラメータを設定する手法を示した。

参考文献

- 1)伊藤浩二、鳥井原誠、松田隆(1994)：液状化解析で用いる地盤構成則に関する考察、土木学会第49回年次学術講演会、p.558~559。
- 2)赤井浩一、田村武(1978)：弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析、土木学会論文報告集、第269号、p.95~104。

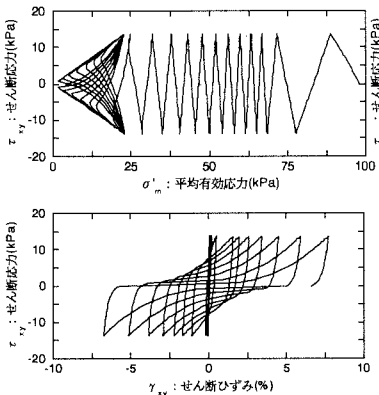


図-3 要素試験 ($k_{s2} = 0.1\%$)

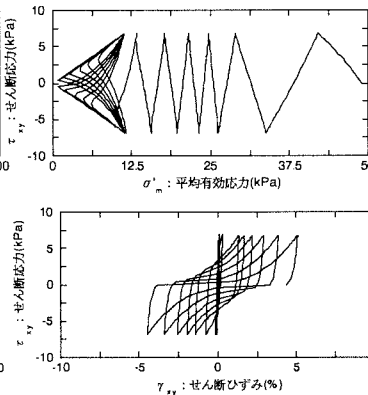


図-4 実地盤 ($k_{s1} = 0.1\%$)

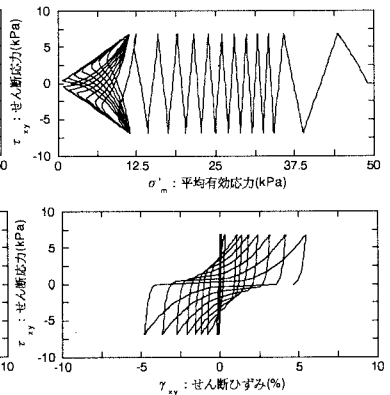


図-5 実地盤 ($k_{s1} = 0.071\%$)