

III-187

液状化の二次元有効応力解析において破綻しないための工夫をした一つのモデル

運輸省港湾技術研究所 正員 井合 進

1. はじめに

盛土や岸壁等の地盤一構造物系が液状化や地震動により受ける残留変形の程度を精度よく予測するには、二次元有効応力解析法が原理的に見て最も有望な方法であると思われる。しかし、この方法においては、サイクリック・モービリティに代表されるように、応力状態として、せん断破壊線に近接した応力経路を正確にしかも効率よく追跡しなければならない。特に、実務において必要となる数パーセントのオーダーのせん断歪に対応する応力経路は、周知の通り、せん断破壊線に極めて近接したものとなる。わずかな誤差が数値解析的に求めた応力経路に含まれるだけでも、その誤差に対応するせん断歪は著しく異なるものとなる。収束計算において解が発散し、数値解析上の破綻を来す場合も少なくないようである。このような数値解析上の困難を回避するため、簡単な工夫を試みる機会を得たので、その方法について報告することとしたい。

2. モデルの概要

有効応力モデルとしては、応力-歪関係と過剰間隙水圧モデルとが必要となる。このうち、応力-歪関係としては、東畑・石原(1985)による任意方向せん断面の双曲線モデルを用いた。ただし、履歴ループの大きさを任意に調節可能な様に拡張した。他方、過剰間隙水圧は、塑性せん断仕事の関数として与えた。但し、サイクリック・モービリティは、せん断応力の関数として考慮した。数値解析上の困難を回避するための工夫として、第一に、応力経路がせん断破壊線に近づくのに合わせて、せん断強度をわずかに増加させ、その代わりにこのことにより発生する悪影響をせん断弾性係数を低下させることにより補正し、工學上妥当なオーダーの歪を得ることとした。第二に、せん断強度とせん断弾性係数を、計算の結果求める(誤差の含まれた)有効拘束圧力の関数として与える代わりに、塑性せん断仕事のよびせん断応力の関数として安定して求められる有効拘束圧力に相当するパラメタの関数として与えた。

3. モデルの主要な部分の具体的な形

まず、静的非排水かつ全拘束圧力一定の条件下において $\sigma'_m / \sigma'_{mst}$ に一致する状態変数 S を、せん断応力比 $r = \tau / \sigma'_{mst}$ と液状化フロントパラメタ S_0 から、図-1 に示すように次式により定める。

(但し、 $\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \{(\sigma'_y - \sigma'_x)/2\}^2}$, $\sigma'_{mst} = (\sigma'_{xst} + \sigma'_{yst})/2$: 初期有効拘束圧力)

$$S = \begin{cases} S_0 & (\text{if } r \leq r_2) \\ S_2 + \sqrt{S_0^2 - S_2^2 + \{(r - r_2)/m_1\}^2} & (\text{if } r > r_2) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $r_2 = m_1 S_2$, $r_3 = m_1 S_0$, $S_2 = S_0 - (r_2 - r_3)/m_1$

同式で与えなければならない液状化フロントパラメタ S_0 は、正規化した塑性せん断仕事 w ($w = W_p / W_n$, W_p : 塑性せん断仕事, $W_n = \tau_{mst} / \sigma'_{mst}$ ここに、 $\tau_{mst} = m_1 \sigma'_{mst} \gamma$, $\gamma = \tau / G_{mo}$, $G = G_{mo} \sigma'_{mo} / \sigma'_m$) の関数として図-2 に示すように次式により与えられる。

$$S_0 = \begin{cases} 1 - 0.6 \cdot (w/w_p)^{p_1} & (\text{if } w \leq w_p) \\ (0.4 - S_1)(w/w_p)^{p_2} + S_1 & (\text{if } w > w_p) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、パラメタとしては、 G_{mo} (せん断弾性係数)、 S_1 , w_p , p_1 , p_2 を与えることが必要となる。

有効応力解析に当たっては、状態変数 S から塑性体積歪 ε_p を図-3 に示すように次式により求める。

(なお、同図において ε 及び $\sigma'_m S$ は、静的非排水か

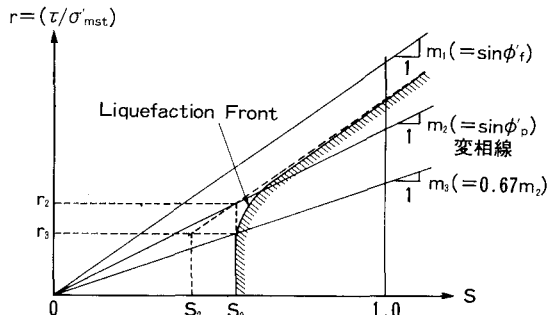


図-1 液状化フロント、状態変数 S 、とせん断応力比の概念図

つ全拘束圧力一定の条件下において、それぞれ、弾性体積歪および平均有効拘束圧力 σ'_m に一致する。）

$$\epsilon_p = \epsilon_{sc} - (\sigma'_{sc}/B)^{1-m} + n \sigma'_m (1-S)/K_f \quad (3)$$

ここに、 $B = \{(1-m)K_o/(\sigma'_{mo})^m\}^{1-m}$

モデルのパラメタとして与えるべきものは、 K_o （砂粒子骨格の体積弾性係数）、 σ'_{mo} （ K_o に対応する有効拘束圧力）、 m （砂粒子骨格の体積弾性係数の拘束圧力依存指数）、 n （間隙率）、 K_f （水の体積弾性係数）である。

さらに、応力-歪関係において必要となるせん断強度 τ_m 、およびせん断弾性係数 G_m を次式により求める。

$S_0 \geq 0.4$ の時、

$$\tau_m = \tau_{mst} S, \quad G_m = \tau_m / \gamma_{mst} \quad (4)$$

ここに、 $\tau_{mst} = m \sigma'_{sc} \gamma_{mst} / G_m$, $G_m = G \sqrt{\sigma'_{sc} / \sigma'_{mo}}$

$S_0 < 0.4$ の時

$$\tau_m = \tau_{mst} S + \Delta \tau_m, \quad G_m = \tau_m / \gamma_m \quad (5)$$

ここに、 $\Delta \tau_m = \Delta \tau_{mst} \sigma'_{sc} \Delta \tau_m = (m-m/2)(0.4-S_0)$,

$$\gamma_m = \gamma_{mst} / (S_0/0.4)$$

また、塑性せん断仕事の計算においては、全せん断仕事から差し引く弾性せん断仕事にパラメタ c_q を掛けて、小さいせん断応力レベルでの過剰間隙水圧の発生/非発生の挙動を柔軟にシミュレートできるようにしている。さらに、変相線を越えた領域に於いては、塑性せん断仕事がすべて液状化を促進させるようには作用しないと考えられることから、その増加率に付いて若干の補正を加えている。

4. 計算例

上述のモデルを用いて、有限要素法により、一要素を用いて、応力制御により、 $K_o(=0.5)$ 圧密（ $\sigma'_{sc}=49\text{kPa}$ 、 $\sigma'_{sc}=98\text{kPa}$ ）で側方への変形を拘束した条件での非排水単純せん断試験を数値解析した。用いたパラメタは、 $G_{mo}=65030\text{kPa}$ 、 $K_o=86700\text{kPa}$ 、 $\sigma'_{mo}=73.5\text{kPa}$ 、 $\phi'_f=37^\circ$ 、 $\phi'_p=28^\circ$ 、 $m=0.5$ 、 $n=0.448$ 、 $K_f=2 \times 10^6\text{kPa}$ 、 $S_1=0.005$ 、 $w_1=7.0$ 、 $p_1=0.6$ 、 $p_2=1.3$ 、 $c_1=1.5$ である。この結果、図-4に示すような応力-歪関係が得られた。なお、同図において各ピークに付した数字は繰り返し载荷の回数を示している。

5. 参考文献

Touhata, I. and Ishihara, K. 1985 : Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. 5th International conference on numerical methods in geomechanics, Nagoya, pp.523-530

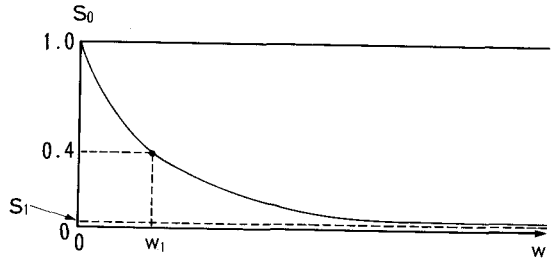


図-2 正規化塑性せん断仕事 w と液状化フロントパラメタ S の関係の概念図

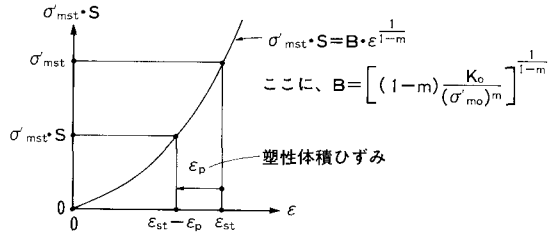


図-3 塑性体積歪の求め方の概念図

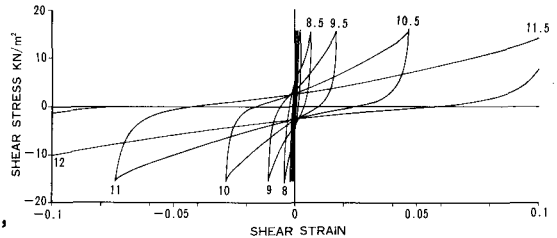


図-4 非排水単純せん断試験のシミュレーション結果