

## 液状化後の体積変形予測に対する砂の繰返し弾塑性モデルの適用性

地震防災フロンティア研究センター  
岐阜大学工学部

正会員 渦岡良介  
正会員 八嶋 厚

### 1. はじめに

液状化による地盤の変形成分として、せん断剛性の低下に伴うせん断変形と過剰間隙水圧の消散に伴う体積変形が考えられる。液状化に起因した地盤・構造物の変形を精度よく予測するには、この両者を適切に評価する必要がある。しかしながら、一般に液状化解析で用いられている構成則には、地震中の非排水せん断挙動のみを扱ったもの(例えば FLIP<sup>1)</sup>)もあり、過剰間隙水圧の消散に伴う体積変形については、別の手法(例えば、Ishihara and Yoshimine<sup>2)</sup>)により算定することが実務で行われている。ここでは、間隙水の浸透を考慮した有効応力解析手法 LIQCA<sup>3)</sup>により、せん断変形から間隙水圧の消散に伴う体積変形まで予測することを目的として、用いている砂の繰返し弾塑性モデルの過剰間隙水圧消散に伴う体積変形に対する予測精度を Ishihara and Yoshimine<sup>2)</sup>の室内試験データをもとに検証する。

### 2. 砂の繰返し弾塑性モデルの体積変形特性

Oka<sup>4)</sup>の繰返し弾塑性モデルを若干修正したモデルをもとに検討を行う。繰返し弾塑性モデルによる体積ひずみ増分は次式で表現される。

$$dv = dv^e + dv^p = \frac{1}{K} d\sigma'_m + D(\tilde{M} - \bar{\eta}_{(\chi)}) d\gamma^p \quad (1)$$

ここに、 $dv$ :体積ひずみ増分、 $dv^e$ :弾性体積ひずみ増分、 $dv^p$ :塑性体積ひずみ増分である。このうち、弾性体積ひずみ増分について、体積弾性係数  $K$  は以下のように算定される。

$$K = \frac{(1+e)\sigma'_m}{\kappa} \frac{1}{1+\gamma^p/\gamma_r^e} \quad (2)$$

$$d\gamma^p = \sqrt{de_{ij}^p de_{ij}^p} \quad (3)$$

ここに、 $\sigma'_m$ :平均有効応力、 $e$ :初期間隙比、 $\kappa$ :膨潤指数、 $\gamma^p$ :式(3)による塑性偏差ひずみ増分の変相線到達以降の累積値、 $\gamma_r^e$ :弾性規準ひずみ、 $de_{ij}^p$ :塑性偏差ひずみテンソル増分である。式(2)右辺の右側の項は応力

経路が変相線に到達した後から考慮される。一方、式(1)右辺第二項の塑性体積ひずみ増分について、各項は以下のように算定される。

$$D = D_0 \left( \frac{\tilde{M}}{M_m} \right)^n \quad (4)$$

$$\tilde{M} = \begin{cases} M_m & f_b \geq 0 \\ -\frac{\eta}{\ln(\sigma'_m/\sigma'_{mc})} & f_b < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{\eta}_{(\chi)} = \frac{\eta_{ij}(\eta_{ij} - \chi_{ij})}{\bar{\eta}_{(\chi)}} \quad (6)$$

ここに、 $D_0$ 、 $n$ :ダイレイタンシーパラメータ、 $\tilde{M}$ :過圧密境界曲面  $f_b$  に応じて式(5)で算定されるダイレイタンシーの正負の境界となる応力比、 $M_m$ :変相応力比である。過圧密領域( $f_b < 0$ )での  $\tilde{M}$  を算定する際に用いる  $\sigma'_{mc}$  は過圧密境界曲面と平均有効応力軸との交点であり、次式で算定される。

$$\sigma'_{mc} = \sigma'_{mbi} \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} v^p\right) \exp\left(\zeta \frac{\eta_{(0)}}{M_m}\right) \quad (7)$$

ここに、 $\lambda$ :圧縮指数、 $\zeta$ :初期応力による誘導異方性の消失を表現するパラメータである。なお、式(5)~式(7)における応力比に関する諸量は以下のように算定される。

$$\eta = \sqrt{\eta_{ij}\eta_{ij}} = \sqrt{s_{ij}s_{ij}}/\sigma'_m = \sqrt{2J_2}/\sigma'_m \quad (8)$$

$$\bar{\eta}_{(\chi)} = \sqrt{(\eta_{ij} - \chi_{ij})(\eta_{ij} - \chi_{ij})} \quad (9)$$

$$\eta_{(0)} = \sqrt{\eta_{ij(0)}\eta_{ij(0)}} \quad (10)$$

ここで、非線形移動硬化則におけるパラメータ  $\chi$  は以下のように算定される。

$$d\chi_{ij} = \frac{B_0}{1+\gamma^p/\gamma_r^p} (M_f de_{ij}^p - \chi_{ij} d\gamma^p) \quad (11)$$

ここに、 $B_0$ :硬化パラメータの初期値、 $M_f$ :破壊応力比、 $\gamma_r^p$ :塑性規準ひずみである。体積弾性係数と同様に硬化パラメータも応力経路が変相線に到達した後、塑性偏差ひずみの累積に応じて低減する。

液状化、過剰間隙水圧、体積変形、有限要素法、繰返し弾塑性モデル

〒673-0433 兵庫県三木市三木山 2465-1, TEL:0794-83-6637, FAX:0794-83-6695, Email: [uzuoka@edm.bosai.go.jp](mailto:uzuoka@edm.bosai.go.jp)

3. モデルの検証

検討対象は Ishihara and Yoshimine<sup>2)</sup> によってまとめられたきれいな砂に対する最大せん断ひずみと過剰間隙水圧消散後の体積ひずみの関係(図-1のExp.)である。これらの関係は種々の相対密度を有するきれいな砂に対して、三軸試験や単純せん断試験装置を用いて、繰返しせん断応力を作用させ、所定のせん断ひずみ振幅に達した後排水し、再圧密時の体積ひずみを測定した結果をまとめたものである。

砂の繰返し弾塑性モデルの一要素有限要素モデルを用いて、単純せん断試験のシミュレーションを実施した結果を図-1のSim.に示す。解析は既往の試験データが豊富な相対密度 40, 60, 80%の豊浦砂を対象とした。まず、各相対密度に対して既往の室内試験結果<sup>5)-8)</sup>よりモデルパラメータを設定した。次に、設定したパラメータを用いて、所定のせん断ひずみに到達した後の過剰間隙水圧の消散による体積ひずみを算定した。例えば、相対密度40%の場合、図-2に示すように非排水条件のもとせん断応力振幅比 0.2 で 10 回の繰返し载荷を行うと、最大 12.2%のせん断ひずみが発生する。この後、要素上面を排水面として、せん断载荷なしの状態での解析を継続させ、過剰間隙水圧が十分に消散した場合の体積ひずみを記録する。繰返し回数を9回、8回と減少させると、発生する最大せん断ひずみは減少し、それに応じた間隙水圧消散後の体積ひずみが得られる。図-1の解析値はこのようにして算定したものである。モデルと室内試験結果の間には多少の誤差がみられるものの、モデルはせん断ひずみ振幅の増加とともに体積ひずみが増加する傾向や相対密度の増加とともに体積ひずみが減少する傾向など室内試験での基本的挙動を再現している。

4. まとめ

砂の繰返し弾塑性モデルによる過剰間隙水圧消散後の体積変形量の予測精度について、室内試験結果をもとに検証した。その結果、室内試験結果の基本的挙動を再現することができたが、今後、室内試験などを通じ、液状化過程における体積変形特性について、さらに検討を進める予定である。

謝辞

豊浦砂のモデルパラメータの設定にあたって、岐阜大学大学院(現:名工建設株式会社)山本哲也氏にお世話になりました。ここに記して感謝いたします。

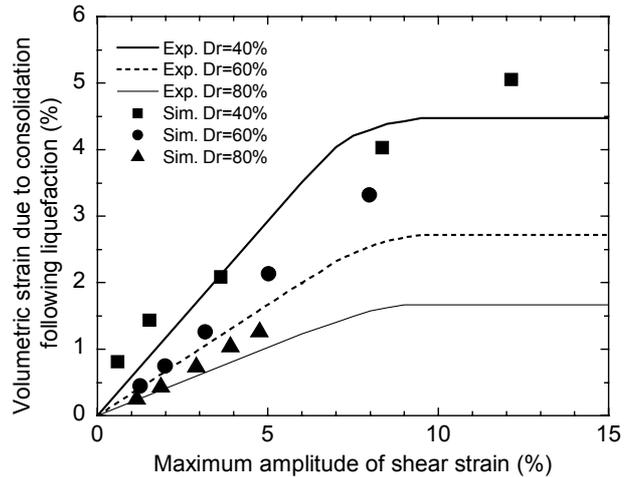


図-1 せん断ひずみと体積ひずみの関係

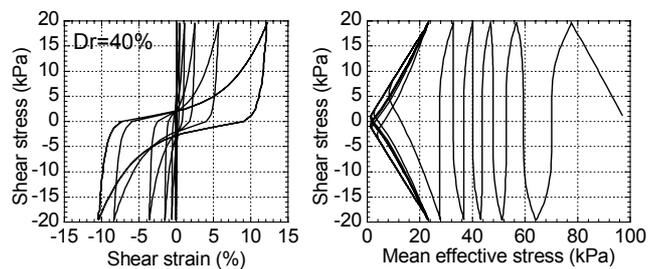


図-2 応力ひずみ関係と有効応力経路(相対密度 40%)

参考文献

- 1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 2) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 3) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol. 52, pp. 209-245, 1994.
- 4) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 5) Iwasaki, T. and Tatsuoka, F.: Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, Soils and Foundations, Vol.17, No.3, pp.19-35, 1977.
- 6) Tatsuoka, T., Muramatsu, M. and Sasaki, T.: Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test, Soils and Foundations, Vol.22, No.2, pp.55-70, 1982.
- 7) Fukushima, S. and Tatsuoka, F.: Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures, Soils and Foundations, Vol.24, No.4, pp.38-48, 1984.
- 8) Pradhan, B. S., Tatsuoka, F. and Sato, Y.: Experimental stress-dilatancy relations of sand subjected to cyclic loading, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.45-64, 1989.