繰返し載荷時の砂の時間依存性変形特性のモデル化

建設省土木研究所 正会員 石原 雅規 東京大学 正会員 龍岡 文夫

はじめに: 貧配合砂の任意のひずみ速度履歴に対する変形特性の 時間依存性は、応力に対するひずみ速度・加速度の影響はひずみの 増加に対して一時的であるとした TESRA モデル^{1),2)}(temporary effects of strain rate and acceleration)によって正確に再現できる。 今回このモデルを用いて、砂の平面ひずみ圧縮試験から得られた除 荷過程の応力比~鉛直ひずみ関係をシミュレーションし、除荷過程 においてクリープひずみが負になる現象をシミュレーションでき ることを確認した。

平面ひずみ圧縮試験: 豊浦砂を小型多重ふるいを用いて堆積させ て、初期間隙比 e₀=0.705の供試体(高さ 200mm,奥行き 160mm、 幅 80mm)を作成し、空気乾燥状態で圧密・せん断を行った。鉛直 ひずみは LDT を用いて計測し、側方ひずみは片面4計8個の GAP センサーを用いて計測した。一定鉛直ひずみ速度(0.0125%/min)で



図 1 実験結果(応力比~鉛直ひずみ関係)とクリープ ひずみ進行方向

392kPa まで等方圧密後、一定鉛直ひずみ速度(0.005%/min)でせん断を開始した。応力比が4および5.5 に達した後、応力比 1まで一定応力速度(-98kPa/hour)で除荷した。載荷中は応力比が1増えるたびにクリープ試験を行い、一回目の除荷中は、 応力比3.5、3、2.5、2、1において、2回目の除荷中は、応力比5、4.5、4、3.5、3、2、1においてクリープ試験を行った。各 クリープ継続時間は4時間である。図1に応力比~鉛直ひずみ関係を示す。図中の矢印は、クリープひずみの進行方向を示し、 両矢印は進行方向判別不能を意味する。

モデルの構造(図2): 基本仮定は、次の四つである。1)ひずみ は、弾性ひずみ ^eと非可逆ひずみ ^eの線形和(弾・粘塑 性論的扱い)。2)弾性ひずみ増分は、現在の応力 の関数であるヤング率 **E**₁()を用いて求める(亜弾性モデル)。3)時間効果 の変数として、原点の定義が不要な非可逆ひずみ速度 ⁱ と加速度 ⁱ を用いる。より高次な時間微分項は考慮しない。4)応力 は、 ^eと履歴の非線形関数である時間非依存成分 ^fと非線形時間依存成分 ^eの線形和である。

時間依存性応力 *: 堆積軟岩や小ひずみで粘性土・良配合のシルト砂・礫に適合する New Isotach モデルは、 $\sigma = \sigma^{f}(\varepsilon^{ir}) + \sigma^{v}(\dot{\varepsilon}^{ir}) = \sigma^{f}(\varepsilon^{ir}) \cdot \{1 + g_{v}(\dot{\varepsilon}^{ir})\}$ (1); $g_{v}(\dot{\varepsilon}^{ir}) = \alpha \cdot [1 - \exp\{1 - (\dot{\varepsilon}^{ir} / \dot{\varepsilon}_{r}^{ir} + 1)^{m}\}]$ (2) (2)

このモデルでは、「応力に対するひずみ速度・加速度の影響がひずみの増加に対し て持続」する。一方、砂の実験で観察される特有の現象は、「応力に対するひずみ 速度・加速度の影響がひずみの増加に対して減衰する(一時的である)」とした TESRA モデルによって説明可能である。従って、TESRA モデルを式で表現する と、

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^{f} + \int_{\boldsymbol{\varepsilon}^{ir}}^{\boldsymbol{\varepsilon}^{ir}} \left[d \left\{ \boldsymbol{\sigma}^{f} \left(\boldsymbol{\varepsilon}^{ir} \right) \cdot \boldsymbol{g}_{v} \left(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{ir} \right) \right\} \right]_{(\tau)} \cdot \boldsymbol{r}^{\left(\boldsymbol{\varepsilon}^{ir} - \tau \right)} (1)$$

となる。ここで、 $r^{(\varepsilon^{ir}-\tau)}$ (r < 1.0)は減衰関数であり、ひずみ差 ir が大きく

図 2 一次元三要素モデル

キーワード:砂の変形特性、時間依存性、平面ひずみ圧縮試験、繰返し載荷 連絡先:東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻土質 / 地盤研究室 Tel:03(5841)6123、Fax:03(5841)8504、email:<u>uchimura@civil.t.u-tyokyo.ac.ip</u> なると減少してゼロに漸近するので、ひずみ速度が一定の時のひずみ速度に依存しない応力・ひずみ関係が表現できる。

シミュレーション: 今回シミュレーションしたのは、せん断開始から第1回 目の除荷までである。TESRA モデルによって一定応力速度除荷を開始すると、 徐々に不可逆ひずみ速度が低下し、ある応力ひずみ状態Pにおいて不可逆ひず み速度が0になる。さらに除荷を行うために、Pを原点とし、不可逆ひずみお よび応力の正の向きを反転する。この座標上で新たなリファレンスカーブ(非 時間依存性応力成分と全ひずみの関係)を設定する(図3)。パラメータ(=

0.2、m=0.04、r=0.1、E₀=200kPa)は、載荷中の応力比~鉛直ひずみ関係、
前述の応力ひずみ状態 P 付近における接線ヤング率から決定し

た。図4~6にシミュレーション結果を示す。除荷過程において、 高い応力レベルではクリープひずみがほとんど発生せず、低い応 カレベルになるにつれ、負のクリープひずみが発生し、その絶対 値が大きくなる現象をTESRAモデルによって再現できた(図5)。 除荷中のひずみ速度の時刻歴に関しても高い精度で予測できて いる(図6)。

まとめ: TESRA モデルによって、除荷過程をクリープひずみ が負になる現象を含めてシミュレーション可能であることを確 認した。

参考文献: 参考文献: 1) <u>Tatsuoka,F., Santucci de Magistris,F.</u> <u>Hayano,K., Momoya,Y. and Koseki,J. (2000)</u>: Some new aspects of time effects on the stress-strain behaviour of stiff geomaterials,



図 3 除荷中の粘性体 V の応力とひずみ の原点と正の向き、Reference curve



係)と実験結果との比較

Keynote Lecture, *Proc. 2nd Int. Conf. on Hard Soils-Soft Rocks, Napoli*, 1998, Balkema, Vol.2. 2) <u>Tatsuoka,F., Uchimura,T., Hayano,K., Di</u> <u>Benedetto,H., Koseki,J. and Siddiquee,M.S.A. (2000)</u>: Time-dependent deformation characteristics of stiff geomaterials in engineering practice, Theme Lecture, *Proc. 2nd Int. Conf. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino, 1999*, Balkema, Vol.2. 3) <u>Di Benedetto,H. and Tatsuoka,F. (1997)</u>: Small strain behaviour of geomaterials: Modelling of strain rate effects, *Soils and Foundations, 37-*2, pp.127-138. 4) <u>龍岡文夫・石原雅規・丸山直樹(2000)</u>: 地盤材料の時間依存変形特性のモデルの構造について、地盤工学会(岐 阜)。<u>5) 石原雅規・龍岡文夫 (2000)</u>: 砂の時間依存変形特性とそのモデル化、同上。6)<u>Matsushita,M., Tatsuoka,F., Koseki,J.,</u> <u>Cazacliu,B., Di Benedetto,H. and Yasin,S.J.M.</u> (1999): Time effects on the pre-peak deformation properties of sands (2)と同じ, Vol.1, pp.681-689. 7)<u>龍岡文夫・石原雅規(2000)</u>: 応力に対するひずみ速度・加速度の影響の一時性を考慮した砂の変形特性のモデル 化、本土木学会。

