

地盤材料の時間依存性変形強度特性のモデル化の一般化について

東京大学 正会員 龍岡文夫、桑野玲子

はじめに： 筆者らは、拘束圧一定の応力経路と限定された応力経路ではあるが、様々なせん断応力履歴を与えた実験を行い、地盤材料の変形強度特性の時間依存性を検討してきた¹⁻⁵⁾。その結果に基づいて、一般三要素モデル（図1）がモデル化の枠組みとして妥当であることを示してきた¹⁻⁵⁾。即ち、

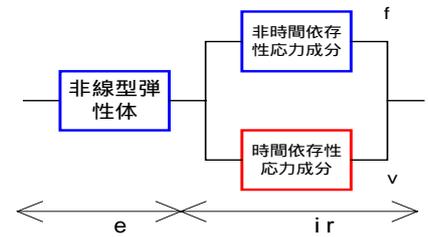


図1 一般三要素モデル

ひずみ ε は弾性ひずみ ε^e と非可逆ひずみ ε^{ir} の線形和から成り、 ε^e は歪弾性体に対する(1)式により求まる。

$$\dot{\varepsilon}^e = \dot{\sigma} / E^e \quad (E^e \text{ は応力状態に依存する弾性剛性率}) \quad (1)$$

応力 σ は非粘性成分 σ^f と粘性成分 σ^v の線形和から成る。

粘性土の一部や堆積軟岩に対しては New Isotach モデルが妥当である。このモデルでは、 σ^f は ε^{ir} の一義的関数であり、

$$\sigma^v = \sigma^f \cdot g_v(\dot{\varepsilon}^{ir}) \quad (g_v(\dot{\varepsilon}^{ir}) \text{ は非可逆ひずみ速度 } \dot{\varepsilon}^{ir} \text{ の非線形関数である粘性関数}) \quad (2)$$

が成り立つ。従って、単調载荷に対しては σ は ε^{ir} と $\dot{\varepsilon}^{ir}$ の一義的関数となる（図2）。

貧配合の砂に対しては、TESRA (temporary effects of strain rate and acceleration) モデルが妥当である（図3）。このモデルでは、「過去の ($\varepsilon^{ir} = \tau$) の時に ε^{ir} の増分 $d\varepsilon^{ir}$ とひずみ速度の増分 $d\dot{\varepsilon}^{ir}$ により生じた $d\sigma^v$ 」は ε^{ir} の増加により減衰し、それを ε^{ir} の履歴に対して3式のように積分することにより現在の応力の粘性成分 σ^v が得られる (r_1 は 1.0 より小さい定数： $r_1=1.0$ の時は New Isotach モデルになる)。従って、異なる一定のひずみ速度で载荷した場合、载荷開始直後を除いて一義的な応力ひずみ関係が得られるが、ひずみ速度を急変すると応力は一時的に急変する。

(3)

良配合の地盤材料に対しては、(3)式で r_1 が ε^{ir} の増加と共に 1.0 から減少する General TESRA モデルが妥当である(図4)。このモデルでは、ひずみが小さい内は New Isotach モデルでの挙動を、ひずみが大きくなると General TESRA モデルの挙動に漸近する。

General TESRA モデルの改良： 様々な地盤材料の変形強度特性の時間依存性を実験的に検討すると、全体としては General TESRA モデルの性質を持っているが、ピーク時にも異なるひずみ速度で異なる応力～ひずみ関係となる場合があることが分

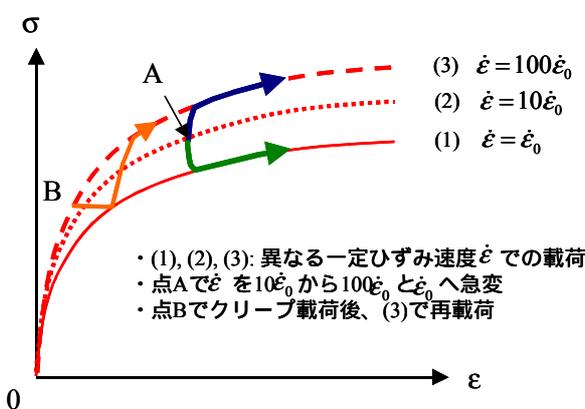


図2 New Isotach モデルによる挙動

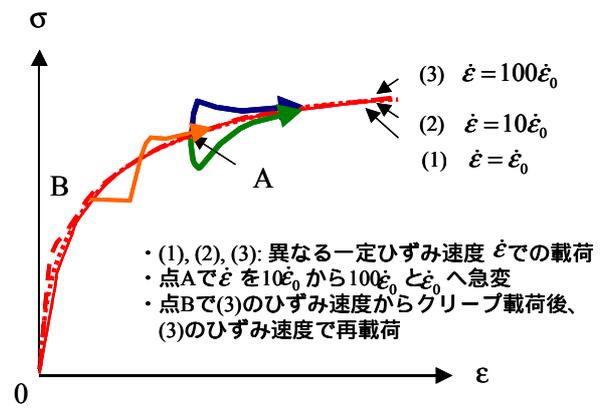


図3 TESRA モデルによる挙動

キーワード：変形、時間依存性挙動、モデル化、粘性、エイジング

連絡先：東京都文京区本郷 7-3-1、東京大学工学系研究科社会基盤専攻、Tel:03-5841-6120、Fax:03-5841-8504

かった(図5)。即ち、応力の粘性成分 σ^v は ϵ^{ir} の増加と共に減退するが完全に減退することはない。(4)式はこのような場合に対する候補の一つである。

$$\sigma^v = \lambda^v \cdot \sigma_{iso}^v + (1 - \lambda^v) \cdot \sigma_{TESRA}^v = \int_{\tau=\epsilon^{ir}}^{\epsilon^{ir}} \left[d\{\sigma^f \cdot g_v(\dot{\epsilon}^{ir})\}_{(\tau)} \right] \cdot [\lambda^v + (1 - \lambda^v) \cdot \{r^v(\epsilon^{ir})\}^{(\epsilon^{ir}-\tau)}] \quad (4)$$

ここで、 σ_{iso}^v は(2)式で σ_{TESRA}^v は(3)式で与えられる。 λ^v は σ^v の持続性を表していて $0.0 \leq \lambda^v \leq 1.0$ であり、 $\lambda^v = 1.0$ の場合はNew Isotachモデルに、 $\lambda^v = 0.0$ の場合で $r_1=1.0$ の時はTESRAモデルに r_1 が ϵ^{ir} の関数の時はgeneral TESRAモデルになる。

General time effect モデル： 上記のモデルは、時間効果の内の粘性効果しか表現していない。時間効果のもう一つの要因は「粒子間に年代効果やセメント混合によりセメンテーションが発達する場合」であり、例えば図6でせん断応力のある状態Bでageing(養生)すると、載荷開始後にB-C-D-Eのような挙動を示す。この場合は、弾性剛性率 E^e と $\sigma^f \sim \epsilon^{ir}$ 関係もageingにより時間的に変化する一方、ageingで発達した「構造」は常にせん断変形により損傷を受ける可能性がある。この場合、次式が候補の一つである。

$$E^e = E_0^e(\sigma, t_c) = 1 + \{A^e(t_c) - 1\} \cdot [\lambda^e + (1 - \lambda^e) \cdot (r^e)^{\epsilon^{ir}}] \quad (5)$$

$$\sigma^f = \int_{\tau=\epsilon^{ir}}^{\epsilon^{ir}} [d\sigma^f]_{(\tau)} = \int_{\tau=\epsilon^{ir}}^{\epsilon^{ir}} \left[E_0^f(\sigma, history) \cdot \left(1 + \{A^f(t_c) - 1\} \cdot [\lambda^f + (1 - \lambda^f) \cdot \{r^f(\epsilon^{ir})\}^{(\epsilon^{ir}-\tau)}] \right) \right] \cdot d\tau \quad (6)$$

ここで、 $E_0^f(\sigma, history)$ は $\sigma^f \sim \epsilon^{ir}$ 関係の接線剛性率、 $A^e(t_c)$ 、 $A^f(t_c)$ はageing効果による剛性の増加分を表しageing期間 t_c の増加により増加する関数、 λ^e 、 λ^f は ϵ^{ir} の増加により損傷を受ける程度を表すパラメータ(λ^e 、 $\lambda^f = 1.0$ は無損傷、 λ^e 、 $\lambda^f = 0.0$ は損傷率最大)、 $\{r^f(\epsilon^{ir})\}^{(\epsilon^{ir}-\tau)}$ 、 $(r^e)^{\epsilon^{ir}}$ は損傷関数であり r^e は1.0以下の定数である。また、応力の粘性成分 σ^v に関しては、この場合も(4)式が成り立つとするのが最も簡単な仮定である。しかし、これらの式は実験によって検証される必要がある。

まとめ： 時間効果(粘性効果と年代効果)による応力・ひずみ関係の変化を数学的に表現する方法を検討した。実験データが全く不足しているため、これ以上の考察は行えない。

参考文献： 1) Tatsuoaka, F., Santucci de Magistris, F., Hayano, K., Momoya, Y. and Koseki, J. (2000): Some new aspects of time effects on the stress-strain behaviour of stiff geomaterials, Keynote Lecture, Proc. 2nd Int. Conf. on Hard Soils-Soft Rocks, Napoli, 1998, Balkema, Vol.2. 2) Tatsuoaka, F., Uchimura, T., Hayano, K., Di Benedetto, H., Koseki, J. and Siddiquee, M.S.A. (2000): 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) 龍岡文夫・石原雅規・丸山直樹(2000): 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)。4) 石原雅規・龍岡文夫(2000): 砂の時間依存変形特性とそのモデル化、同上。5) 龍岡文夫・石原雅規(2000): 応力に対するひずみ速度・加速度の影響の一時的性を考慮した砂の変形特性のモデル化、土木学会(仙台)第三部門

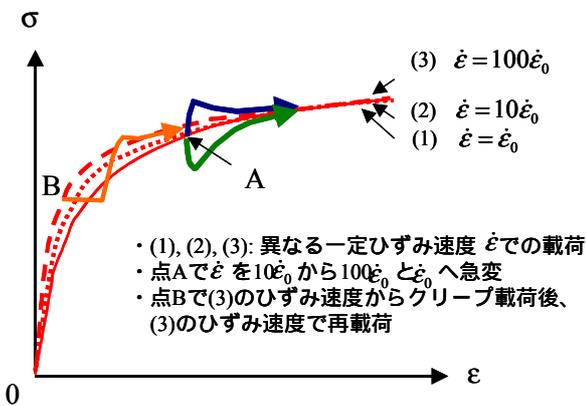


図4 General TESRAモデルによる挙動

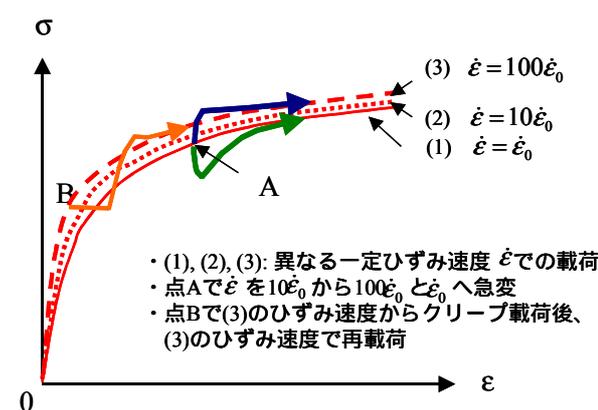


図5 一般化したモデルによる挙動(セメンテーション無し)

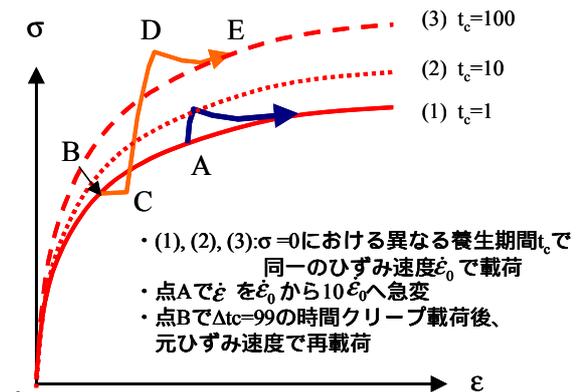


図6 一般化したモデルによる挙動(セメンテーション有り)