

セメント混合砂の変形・強度特性の一般三要素モデルによるシミュレーション

東京大学大学院 学生会員
東京大学大学院
東京大学 正会員

○西 恭彦
Lalana Kongsukprasert
龍岡 文夫

はじめに：地盤材料の変形強度特性に対する時間効果は、真の年代効果と粘性効果から成り立っている¹⁾。真の年代効果とは、「セメンテーションや風化のために、同一の応力履歴と同一の載荷条件に対して、時間経過と共に異なる応答を示す現象」である。従来の研究^{2,3)}によると、粘性を持つが年代効果を受けない地盤材料の応力ひずみ関係は、次の特徴を持つ非線形三要素モデル（図1）で表現できる。1)ひずみ増分 $d\varepsilon$ は、弾性と不可逆成分 $d\varepsilon^e, d\varepsilon^{ir}$ の線形和である。2) $d\varepsilon^e$ は現在の応力 σ の関数であるヤング率 $E(\sigma)$ を用いて求める。3) 応力 σ は「不可逆ひずみ ε^{ir} の非線形関数である非粘性成分 σ^f 」と、粘性成分 σ^v の線形和である。4) σ^v を支配する変数は ε^{ir} であり、その増分は $d\sigma^v = d[H_v(\sigma^f) \cdot g_v(|\dot{\varepsilon}^{ir}|)]$ である。 $g_v(|\dot{\varepsilon}^{ir}|) = \alpha \cdot [1 - \exp\{1 - (|\dot{\varepsilon}^{ir}|/\dot{\varepsilon}_r^{ir} + 1)^m\}]$ (≥ 0) は、粘性関数で $g_v(0)=0$ である。 $H_v(\sigma^f)$ は σ^f の関数である。従来の研究²⁾によると、応力 σ として主応力比 $R = \sigma_v/\sigma_h$ を採用すると $H_v(\sigma^f) = \sigma^f$ と単純化できる。このモデルに「 σ^f に対する年代効果を受ける降伏応力 σ_y^f 」を導入することによって、粘性を持つと同時に年代効果を受ける地盤材料に拡張できる¹⁾。このモデルにより、せん断応力が無い状態とある状態で養生されたセメント混合砂の排水三軸圧縮試験での偏差応力-軸ひずみ関係を再現できることを以下に示す。

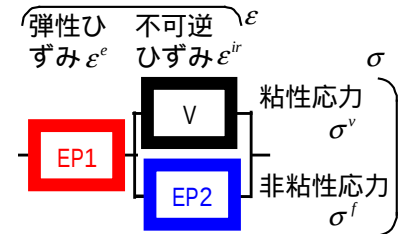


図1 非線形三要素モデル

モデルの構造¹⁾：今回は、1)弾性成分 EP1 と粘性関数 $g_v(|\dot{\varepsilon}^{ir}|)$ は真の年代効果の影響を受けず、2)年代効果は、非粘性応力 σ^f を通じてのみ発揮される一方、 ε^{ir} の増加によって減少しない、と言う単純化した仮定を用いた。また、現在 ($\varepsilon^{ir} = \varepsilon^{ir}, t_c = t_c$) の非粘性応力 σ^f は、過去 ($\varepsilon^{ir} = \tau, t_c = t$) の時の非粘性応力増分 $[d\sigma^f]_{(\tau, t)}$ を $[\sigma^f]_{(\varepsilon^{ir}, t_c)} = \int_{\tau=\varepsilon_1^{ir}}^{\varepsilon^{ir}, t_c} [d\sigma^f]_{(\tau, t)}$ (1)のように積分して求められると仮定する。ここで、降伏 ($d\varepsilon^{ir} > 0$) は $[\sigma^f]_{(\tau, t)} = [\sigma_y^f]_{(\tau, t)}$ かつ $[d\sigma^f]_{(\tau, t)} = [d\sigma_y^f]_{(\tau, t)}$ の時に生じるとする。降伏応力の増分 $[d\sigma_y^f(\varepsilon^{ir}, t_c)]_{(\tau, t)}$ は、「 $dt=0$ の時に生じる年代効果成分」と「 $d\varepsilon^{ir}=0$ の時に生じる年代効果成分」の和であり、次式で求める。 $[d\sigma_y^f]_{(\tau, t)} = E_0^f(\tau) \cdot A^f\{t(\tau)\} \cdot d\tau + [a^f \cdot \sigma_0^f\{\tau(t)\} + b^f] \cdot \alpha^f(t) \cdot dt$ (2)。 $A^f(t_c)$ は年代効果関数で $A^f(t_c=0)=1$ であり、年代効果が正の時は時間経過とともに増加する。 a^f と b^f は係数、 E_0^f は年代効果を受けない基本的な変形係数である。式(2)を積分すると、次式が求まる。

$$[\sigma_y^f]_{(\varepsilon^{ir}, t_c)} = \sigma_0^f(\varepsilon^{ir}) + \int_{\tau=\varepsilon_1^{ir}}^{\varepsilon^{ir}} [E_0^f(\tau) \cdot \{A^f\{t(\tau)\} - 1.0\}] \cdot d\tau + \int_{t=0}^{t_c} [a^f \cdot \sigma_0^f\{\varepsilon^{ir}(t)\} + b^f] \cdot \alpha^f(t) \cdot dt \quad (3)$$

$\sigma_0^f(\varepsilon^{ir}) \left(= \int_{\tau=\varepsilon_1^{ir}}^{\varepsilon^{ir}} E_0^f(\tau) \cdot d\tau \right) \sim \varepsilon^{ir}$ 関係は、年代効果を受けない基本的応力～ひずみ関係である。

$a^f=1, b^f=0$ で $\alpha^f(t_c) = \partial A^f(t_c)/\partial t$ の時は、3式は ε^{ir} と t_c に関する積分経路に依存しない potential 関数： $[\sigma_y^f]_{(\varepsilon^{ir}, t_c)} = \sigma_y^f(\varepsilon^{ir}, t_c) = \sigma_0^f(\varepsilon^{ir}) \cdot A^f(t_c)$ (4)となる。今回簡単化のため4式を仮定した。また4式は、実際には年代効果により応力ひずみ関係の非線形性が変化することを反映していないので、今後改良が必要である。このモデルによると、クリープ載荷が開始されると

キーワード：年代効果、粘性効果、変形強度特性、クリープ、セメンテーション

連絡先：113-8656 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

$[\sigma^f]_{(r,t)} = [\sigma_y^f]_{(r,t)}$ になった時点で非降伏状態 ($d\epsilon^{ir} = 0$) となり、その後は $[\sigma^f]_{(r,t)} < [\sigma_y^f]_{(r,t)}$ となり、時間の経過とともに両者の値の差は拡大する。今回は、非降伏状態では、 $[d\sigma^f]_{(r,t)} = d\sigma$ (剛体挙動)

かつ $d\sigma^v = 0$ (粘性応力の固定) であると仮定した。

三軸圧縮試験⁴⁾：図2は、初期含水率22%、セメント/砂重量比4.3%で青森砂にセメントを混合してから乾燥密度 1.23 g/cm^3 程度に締固め、11日間大気圧下で等含水比で養生した後、拘束圧200 kPaで等方圧密して排水三軸圧縮試験を行った結果である。等方圧密は実験A11APSCとC11APSCでは20時間、Cc11APSCでは92時間である。圧密後軸ひずみ速度(0.03%/min)で载荷したが、実験A11APSCでは载荷途中で72時間の排水クリープ(養生)を行った。図2では、実験A11APSCでの応力値は、「クリープ開始時点での応力はC11APSCの同じひずみでの応力と等しい」と仮定して補正してある。C11APSCとCc11APSCでは等方圧密による真の年代効果の影響が異なるために、等方圧密時間が長い後者での剛性と強度が大きい。実験A11APSCでは、クリープ開始後にひずみの進行が実質的に停止し、クリープ後に载荷を再開すると大きな応力範囲で高い剛性を示した。しかし、最終的強度は実験Cc11APSCとほぼ同じになった。A11APSCでのクリープ中のひずみ時刻歴。

シミュレーション：年代効果関数は、等方圧密開始後20時間経過した時点をもとに $t_c = 0$ とし、 $A(t_c) = \log_{10} \left(\frac{(t/86400) + 10}{10} \right)$ とした。より厳密なモデル化では、水和反応開始時を $t = 0$ とし $A(t = \infty) \neq \infty$ なるように関数型を決定すべきである。また粘性応力は、

$$\text{TESRA 粘性}^2) \text{を仮定して、} \sigma^v = \int_{\tau=\epsilon^{ir}}^{\tau=\epsilon^{ir}} [d\sigma^v]_{(r)} \cdot r^{(\epsilon^{ir}-\tau)} \quad (5)$$

($r = 0.001$) によって求めた。 $d\sigma^v = d[\sigma^f \cdot g_v(|\dot{\epsilon}^{ir}|)]$ であり、 σ^f は1式で求めた。また、実験での微小ひずみ振幅の繰返し载荷は、シミュレーションでは無視した。図3に、シミュレーションの結果を示す。実験C11APSCでの剛性と強度が、等方圧密時に発達した真の年代効果の結果、実験Cc11APSCよりも大きくなったことが再現できている。同時に、実験A11APSCで、クリープ载荷中にひずみの進行が止まり、その後载荷を再開すると大きな応力範囲で高剛性を示し、明確な降伏点を示した後応力の飛出しが生じて最終的に実験Cc11APSCとほぼ同じ応力ひずみ関係と強度を示すなどの、特徴的な挙動が再現できている。

まとめ：年代効果と粘性効果の影響を同時に受けるセメント混合砂の応力-ひずみ関係を、従来の一般三要素モデルを年代効果の要因を考慮できるように拡張することにより表現できた。今後、真の年代効果のより現実的なモデル化とその物理的意味を明らかにする必要がある。

参考文献：1) 龍岡文夫・西恭彦・Di Benedetto, H. (2002)：年代効果を受けて粘性がある地盤材料の変形強度特性のモデル化, 第37回地盤工学研究発表会。2) Di Benedetto, H., Tatsuoka, F. & Ishihara, M. (2002), Time-dependant shear deformation characteristics of sand and their constitutive modeling, *S&F*, 42 (2). 3) Tatsuoka, F., Ishihara, M., Di Benedetto, H. & Kuwano, R. (2002), Time-dependent shear deformation characteristics of geomaterials and their simulation, *S&F*, 42 (2). 4) Kongsukprasert, L., Kuwano, R. & Tatsuoka, F. (2001)：Effects of ageing and the associated development of yield locus of cemented-mixed sand, 第36回地盤工学研究発表会。

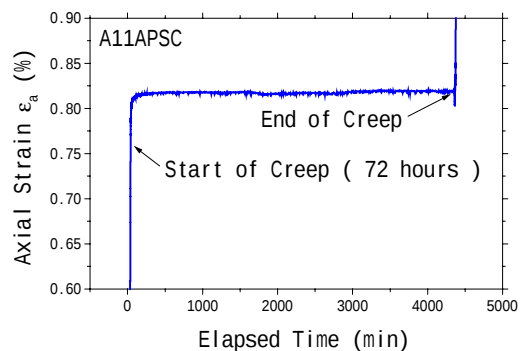
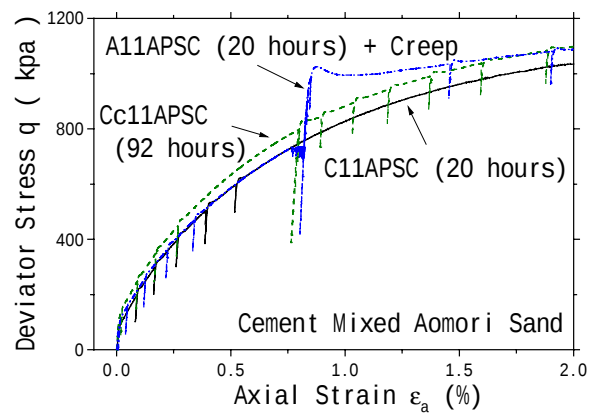


図2 上) 偏差応力-軸ひずみ関係、下) A11APSCでのクリープ中のひずみ時刻歴。

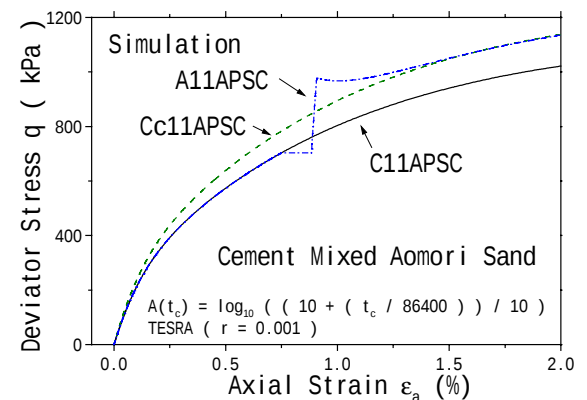


図3 シミュレーション結果