

論文

[1099] 粘塑性飽和透水性材料としての若材令コンクリートの変形挙動

石川 靖晃*1, 大下 英吉*2, 田辺 忠顕*3

1. まえがき

若材令コンクリートでは硬化コンクリートに比べクリープ、レラクゼーションが極めて顕著に発生するという事実が実験的に確認されている。このような現象がその後のコンクリートの変形挙動に大きく影響を及ぼすことは明らかである。

著者らは、若材令コンクリートは硬化コンクリートに比べ未水和水を多く含んでいることに着目し、間隙水が若材令コンクリートの変形挙動に影響を及ぼし得ると考えた。そして若材令コンクリートを内部間隙が水で飽和された弾塑性多孔質材料としてモデル化し、ある程度まで若材令コンクリートの変形挙動に対する間隙水の影響を解析的に検討してきた[1]。

本研究では、現在までの弾塑性飽和多孔質材料モデルを、さらに粘性ダッシュポットを並列に外挿した粘塑性多孔質材料モデルに拡張し、間隙水の移動およびコンクリート自身が持つ粘性を同時に考慮することを可能にした。そして、若材令コンクリートのクリープ試験結果と比較を行い、間隙水移動の点から検討を行った。

2. 粘塑性多孔質材料モデルへの拡張

1. で述べたように著者らは、弾塑性多孔質材料として若材令コンクリートをモデル化してきた。その定式化の詳細については文献[1]に譲り、ここでは拡張した点のみを記すことにする。

2.1 粘塑性ひずみの導入

弾塑性多孔質材料モデルにおいては、コンクリートの全ひずみ増分 $d\{\varepsilon\}$ は次式で定義していた。

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon^e\} + d\{\varepsilon^p\} + d\{\varepsilon^{pr}\} + d\{\varepsilon^t\} \quad (1)$$

ここで $d\{\varepsilon^e\}$, $d\{\varepsilon^p\}$, $d\{\varepsilon^{pr}\}$, $d\{\varepsilon^t\}$ はそれぞれ弾性ひずみ、塑性ひずみ、間隙水圧によるひずみおよび温度ひずみ増分である。

本研究では、セメントペースト部分に粘塑性ひずみ $d\{\varepsilon^{vp}\}$ を導入することによりコンクリートの全ひずみ増分を

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon^e\} + d\{\varepsilon^{pr}\} + d\{\varepsilon^t\} + \frac{V_C}{V} d\{\varepsilon^{vp}\} \quad (2)$$

と定義した。ここで V_C , V はそれぞれセメントペーストの体積および固相の体積である。そして $d\{\varepsilon^{vp}\}$ は粘塑性ひずみ増分であり、次式で定義される。

$$d\{\varepsilon^{vp}\} = \Delta t \gamma F(\sigma') \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right\} \quad (3)$$

ここで、 σ' は有効応力であり、 F は粘塑性ポテンシャル曲面であり、材令と蓄積された損傷の程度により拡大もしくは縮小する。粘塑性モデルの欠点として、弾性域におけるクリープひずみが表せな

*1 名城大学助手 理工学部土木工学科、工修（正会員）

*2 広島大学助手 工学部第四類、工修（正会員）

*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

いことが挙げられる。しかし、若材令コンクリートでは弾性域がほとんど無視されるような挙動をするため、このような定式化になるのは自然なことである。

2.2 粘塑性ポテンシャルとしての修正 Drucker-Prager 曲面

本研究では、粘塑性ポテンシャル曲面は Drucker-Prager type の降伏曲面形に一致すると仮定した。

Drucker-Prager type の降伏曲面は次式で表される。

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (4)$$

ここで I_1 と $\sqrt{J_2}$ は、それぞれ応力テンソルの第1不変量と偏差応力の第2不変量を表し、 α, k は材料定数で材令および水和の程度により変化する。Mohr-Coulomb の六角錐に Drucker-Prager の円錐を合わせる際、圧縮子午線 ($\gamma_c = 60^\circ$) を一致させる。このとき

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi^*}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi^*)}, \quad k = \frac{6c^* \cos \phi^*}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi^*)} \quad (5)$$

ここで c^*, ϕ^* はセメントペーストにおける変動粘着力および変動内部摩擦角である。 c^* および ϕ^* は、損傷パラメータ ω を介し塑性ひずみ履歴と関連づけられることで定義される。一般に、 ϕ^* は ω の増加関数、一方 c^* は ω の減少関数であるから、

$$c^* = c \exp[-(a\omega)^2] \quad (6)$$

$$\phi^* = \begin{cases} \phi \sqrt{2\omega - \omega^2}, & \omega \leq 1 \\ \phi, & \omega > 1 \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 c, ϕ はセメントペーストの粘着力および内部摩擦角で材令や水和の程度により変化する、 a は材料定数である。

破壊曲面は応力空間において損傷パラメータと共に変化すると仮定した。その際、等価有効応力 σ_e 、等価有効粘塑性ひずみ $d\varepsilon_{vp}$ といった概念から粘塑性仕事増分 dW^{vp} は次式で表される。

$$dW^{vp} = \{\sigma'\}^T d\{\varepsilon^{vp}\} = \sigma_e d\varepsilon_{vp} \quad (8)$$

呉、田辺らは塑性仕事に対する損傷パラメータをマイクロクラックの進展による蓄積された損傷の程度として定義した [2]。本研究では、塑性仕事を粘塑性仕事に拡張し、次式で損傷パラメータを定義した

$$\omega = \frac{\beta}{\sigma_e \varepsilon_0} \int dW^{vp} \quad (9)$$

ここで、 β は材料定数であり、

$$\varepsilon_0 = \frac{f'_c}{E_c} \quad (10)$$

ここで、 E_c, f'_c はそれぞれセメントペーストの弾性係数、一軸圧縮強度を示している。そして式 (8) を式 (9) に代入すると次式となる。

$$\omega = \beta \int \frac{1}{\varepsilon_0} d\varepsilon_{vp} \quad (11)$$

3. 若材令コンクリートの間隙水流出量実験の解析

以前著者らが行った若材令モルタル供試体に対する間隙水流出量実験結果は間隙水移動の現象をよく表している [1]。このモルタル供試体の寸法は $\phi = 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ であり、水セメント比は 63%、単位セメント量および単位砂量はそれぞれ $5870\text{N}/\text{m}^3$ 、 $11750\text{N}/\text{m}^3$ である。材令 0.5, 1, 1.5 および 2 日において供試体の初期重量を測定し、その後ピーク荷重に達するまで一軸載荷を行った。そして乾いた布で供試体表面をすばやく拭き取り、再度供試体質量を測定した。結果を図-1 [1] に示す。図-1 は材令と流出量の供試体に対する体積比との関係を表しており、どの材令でも約 0.1 ~ 0.2% の流出量が存在することを示している。また弾塑性多孔質材料モデル [1] を用いての解析結果も図-1 に重ねて示している。解析的には、流出速度は荷重を作用させるとすぐに発生し、その後一定値を保つ。しかし、降伏域に達するとセメントペーストの塑性体積膨張のため流出速度はそれまでとは逆の方向に移行する、すなわち吸い込みが生じる (図-2)。解析では、外部からの流入は考慮しないため、供試体からの全流出量は降伏に達し、吸い込みが発生する以前までの流出速度と時間ステップとの積の蓄積と定義している。流出量解析は 2 通り行われた。一つは、セメントペーストおよび間隙水の体積圧縮性を考慮したもの (図-1、黒丸) と、一方は土質力学の分野で用いられているような完全非圧縮性を仮定したもの (図-1、白丸) である。材令 0.5 日以外の実験結果は 2 つの解析曲線の間 (ハッチ部分) に存在しており、解析値と同じオーダーの値となっている。

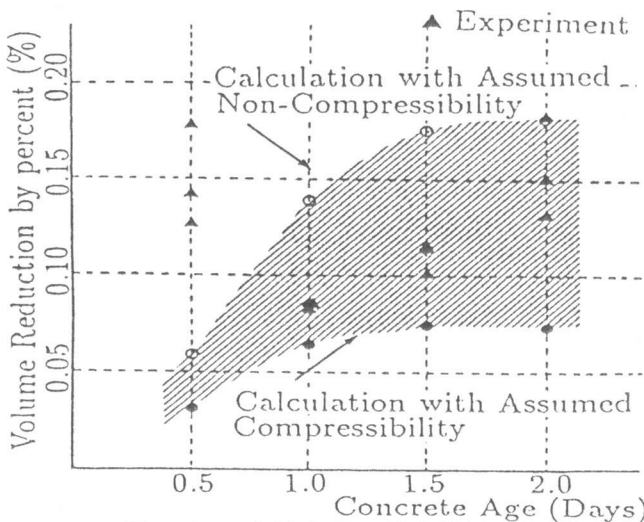


図-1 全流出量-材令関係 [1]

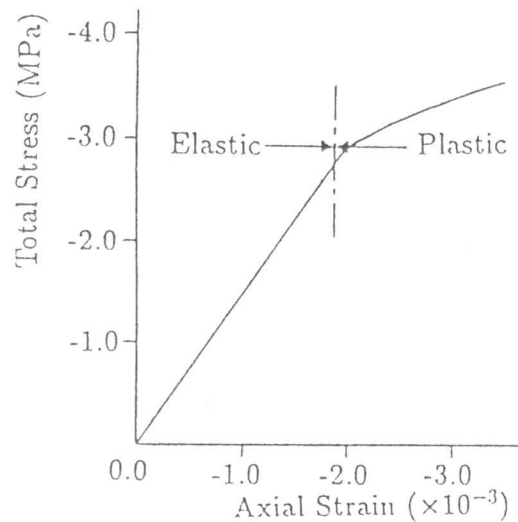


図-2a 軸応力-軸ひずみ関係

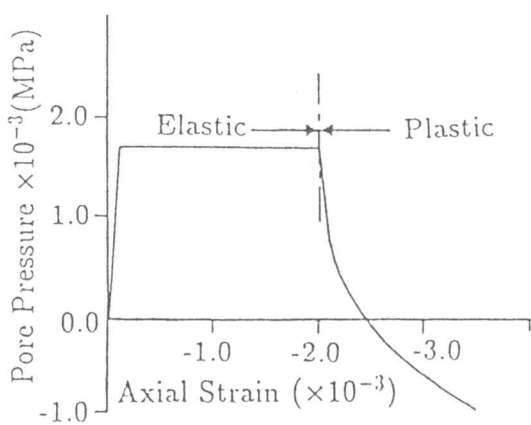


図-2b 間隙水圧-材令関係

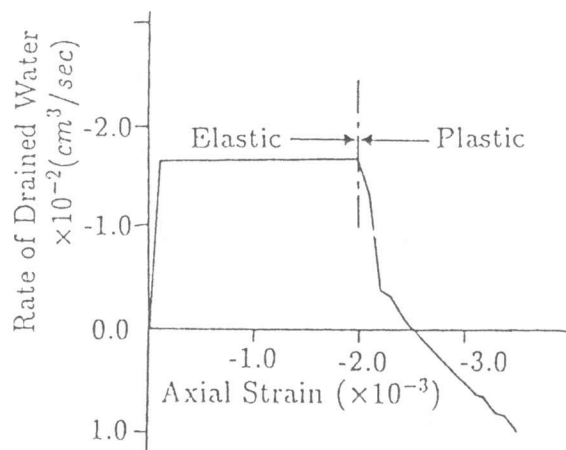


図-2c 流出速度-軸ひずみ関係

4. クリープ試験の解析

粘塑性多孔質材料モデルを用いて、電力中央研究所で行われた若材令コンクリートの圧縮クリープ試験[3]に対する解析を行った。配合は、 $W/C = 0.49$, $s/a = 0.40$ であり、単位セメント量、単位水量、単位細骨材量および単位粗骨材量はそれぞれ $3390N/m^3$, $1660N/m^3$, $7300N/m^3$, $10630N/m^3$ である。この配合で $\phi = 15cm \times 30cm$ の円柱供試体を作製した。5時間後に脱型し、銅缶に入れ、直ちに蓋を半田で取り付けた。材令0.69, 1.0 および 3.0 日後に、それぞれ 1.0, 2.0 および 2.5 MPa の応力レベルに達するまで載荷した。それぞれの一軸圧縮強度に対する荷重の比はそれぞれ 45, 38, 22% である。クリープ試験結果を図-3 に示す。これらの結果の最も支配的な特徴は、載荷直後クリープひずみが急激に発生し、次に一定値を保った後さらに徐々に増加することである。

これらの実験値を解析する際、弾性係数は初期のひずみに適合するように決定した。また、初期粘着力は一軸圧縮強度の $1/9$ とし、初期および終局内部摩擦角はそれぞれ 27° とした。解析結果は実験値の図に実線で描かれている。これらの結果は、セメントペーストおよび間隙水の体積圧縮性を考慮しないものである。なお解析ケースにおいても、載荷後数時間でクリープひずみが急激に発生し、その後は徐々に増加している。言い換えるならば、載荷後発生した間隙水圧は、間隙水の流出によって急激に有効応力に転移し、急激にクリープひずみが発生する。そして間隙水の流出が生じなくなると、クリープひずみは発生しなくなる。その後はむしろ粘塑性変形のため、クリープひずみは徐々に増加する。しかし、ここで言うべきことは、ここでの計算における粘塑性は、粘性係数と降伏曲面に強く依存することである。若材令コンクリートでは、はっきりした弾性域は現れないため、粘着力は一軸圧縮強度の $1/9$ とした。解析で決定すべき粘性係数 γ は養生時間の経過により $5.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-5} / MPa \cdot Day$ の範囲で減少させた。勿論明かなことではあるが、我々は粘性だけでなく粘塑性ポテンシャルに対しても精力的に研究を進めていく必要がある。

また、セメントペーストおよび間隙水の圧縮を考慮した場合についても解析を行ったがその場合は、クリープひずみは特に発生しなかった。このことは、もしクリープひずみの急激な増加が間隙水の流出によるものだとしたら、クリープ解析において、圧縮性の仮定はモデルにおける他の仮定よりもより小さいということであろう。

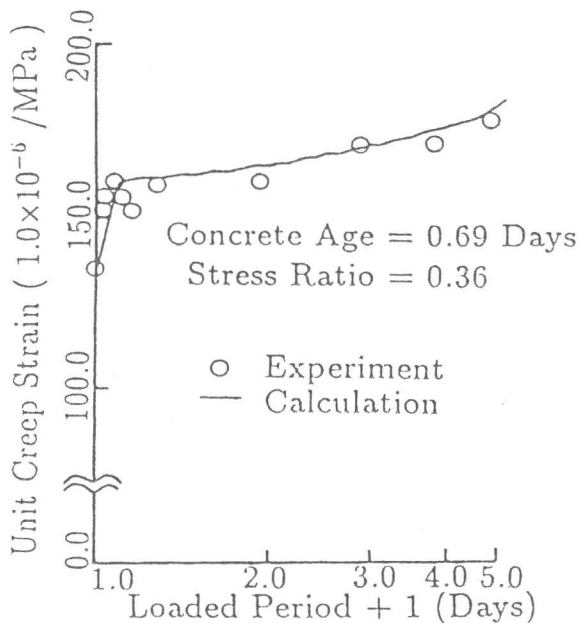


図-3a クリープ試験結果および解析結果

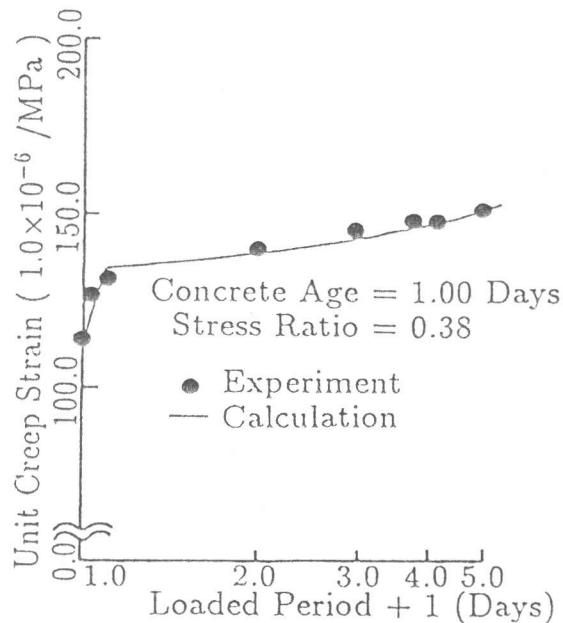


図-3b クリープ試験結果および解析結果

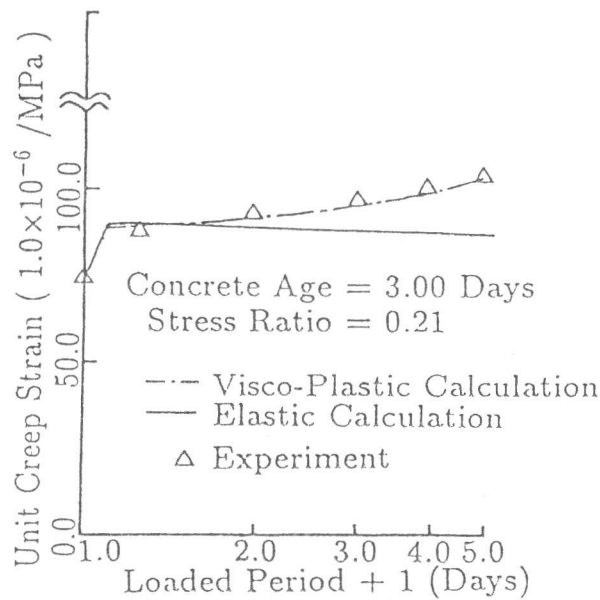


図-3c クリープ試験結果および解析結果

5. 若材令コンクリートの圧縮クリープおよび引張クリープ特性

若材令コンクリートの引張クリープは圧縮のそれと比べ小さく発生するといわれている。最近岐阜大学で行われた引張および圧縮クリープ試験結果はそういった現象をよく表している[4]。実験供試体寸法は、圧縮クリープでは $10 \times 10 \times 38\text{cm}$ 、引張クリープでは $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ であり、配合は $W/C = 0.59, s/a = 0.45$ であり、単位セメント量、単位水量、単位細骨材量および単位粗骨材量はそれぞれ2800, 1660, 8340 および 10400N/m^3 である。クリープ試験は、恒温室内(温度 20°C 、湿度70%以上)に設置したレバー式圧縮および引張クリープ試験装置で行った。载荷中供試体からの水分の逸散を防ぐため、供試体表面にアルミテープを張り付けた。試験は材令3日および7日のものを2回ずつ行った。また、引張のクリープ限を超えない程度の応力(引張強度の40%程度)を圧縮、引張ともに载荷した。その実験結果を図-4に示す[4]。材令3日においては引張クリープは圧縮クリープに比べ $1/3 \sim 1/4$ となっている一方、材令7日では引張、圧縮クリープ共ほとんど同じ値となっている。

材令3日のコンクリート供試体について4.で述べた方法でクリープ解析を行った。図-5に解析結果を示す。ここでいっておくべきことは、実験の状況から圧縮クリープに対しては表面から間隙水の流出を許す一方で、引張クリープではアルミテープにより間隙水の外部からの流入はほとんどありえないということである。解析でも実験に基づいて間隙水の境界条件を決定したため、载荷初期では圧縮クリープでは間隙水の流出によりクリープひずみが比較的大きく発生する一方、引張クリープは間隙水の移動が起きないため载荷初期でのクリープひずみの発生の度合いは圧縮クリープと比べ非常に小さい。ここで得られた解析結果はあまり実験結果と一致していないが、クリープ試験での若材令コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの発生傾向をある程度捉えているものと思われる。

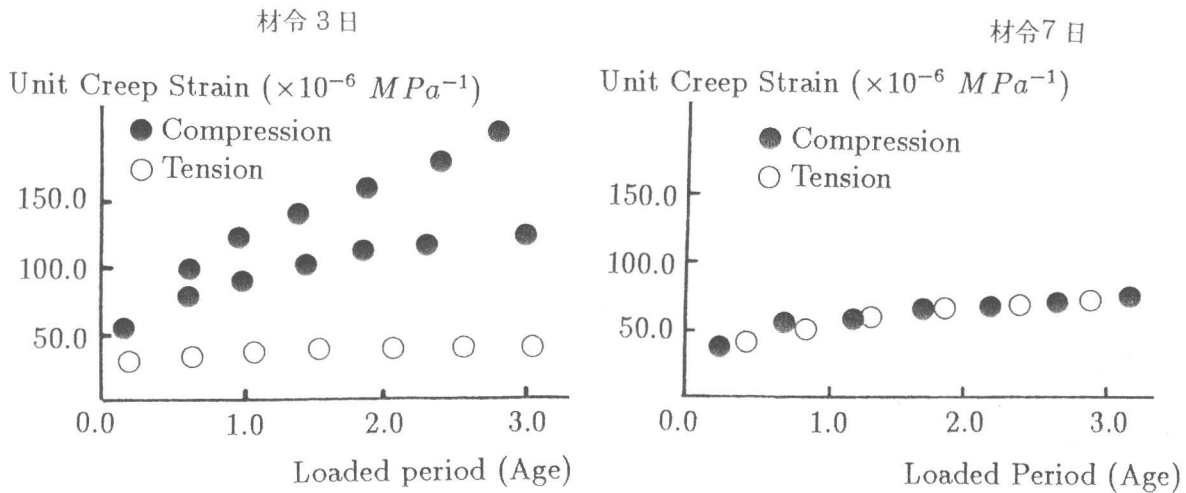


図-4 圧縮クリープおよび引張クリープ試験結果 (材令3日、材令7日) [4]

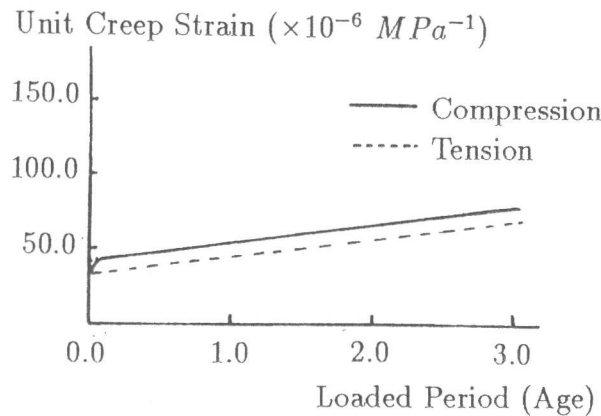


図-5 圧縮クリープおよび引張クリープ解析結果 (材令3日)

6. 結論

以上述べたように、本研究では粘塑性あるいは弾塑性飽和透水性材料モデルを用いて若材令コンクリートの変形挙動の時間依存性に関するいくつかの実験結果に対して解析を行った。そして、若材令コンクリートのクリープ挙動に対して間隙水が大きく影響を及ぼすことがわかった。

参考文献

- [1] 石川, 大下, 田辺: 若材令壁状コンクリート構造物の飽和透水性材料としての温度応力解析、コンクリート工学論文報告集, Vol.15, No.1, pp.1137-1142, 1993
- [2] Wu, Z.S. and Tanabe T.: A Hardening-softening Model of Concrete Subjected to Compressive Loading, 構造工学論文集, Vol.36B, pp.153-161, 1990
- [3] 原口, 河角, 田辺, 岡沢: 黒田ダム嵩上げ工事におけるコンクリート打設計画の検討(その1) - コンクリートの力学的、熱的性質の実験検討 -, 電力中央研究所報告, No.375561, July, 1976
- [4] 森本, 岩本, 栗原, 小柳: 若材令コンクリートの圧縮および引張クリープ特性, 中部セメントコンクリート工学論文集, 第8号, pp.17-20, October, 1993