

# 論文 高強度コンクリートの自己収縮変形に及ぼすクリープ特性の解析的研究

中村成春<sup>1</sup>・林田佳寛<sup>2</sup>・上西 隆<sup>3</sup>・河野政典<sup>3</sup>

**要旨:** 本研究は、高強度コンクリートの自己収縮変形条件における若材齢クリープに着目し、単純レオロジーモデルにおいて、コンクリートの若材齢時の物性変化を、時間的に変化するレオロジー定数として考慮し、その適用性を解析的に検討したものである。はじめに、レオロジーモデルを適用した既往研究と巨視的クリープ挙動の関係を明確化した。次に、時変数レオロジーモデルの特徴を考察し、フォーカトモデルでの時変数解析解を誘導した。最後に、レオロジー解析手法によるパラメトリック評価を行ない有効性を示した。

**キーワード:** 若材齢クリープ、レオロジー解析、高強度コンクリート、自己収縮

## 1. はじめに

近年、100MPa 級高強度コンクリートの実用化に伴い、若材齢時のコンクリート挙動の把握が重要となってきている。すなわち、結合材単位量が多いため、若材齢時の水和反応が活発に起き、ひび割れ発生の一因となる水和発熱の影響や自己収縮の影響が顕著に現れる。従って、水和発熱の抑制や自己収縮の制御が必要であり、その対策方法が求められている。

水和発熱が及ぼすひび割れ発生の影響については、コンクリート部材内部の温度変化が大きい場合、拘束引張応力が発生・負荷しやすいため、例えば、フライアッシュを混合したセメントや低熱ポルトランドセメントの使用により発熱量を低減し<sup>1)2)</sup>、部材内部の温度変化を小さくすることで、ひび割れ発生に至る過大な拘束引張応力を緩和・抑制できる。

一方、自己収縮が及ぼすひび割れ発生の影響については、水和の進行とともに自己収縮が持続的に進行するため、コンクリート部材内外での拘束を受けることで、材齢の経過とともに拘束引張応力が増加し続ける。このとき、若材齢時における収縮速度が加速的なときの挙動、ならびに長期材齢時での収縮速度がかなり減速し

たときの終局収縮量は、結合材種類や水結合材比等で異なる<sup>3)</sup>が、ひび割れ発生に至る過大な拘束引張応力が負荷されるときの直接要因となる。また、既報<sup>4)5)</sup>の自己収縮条件での拘束収縮実験より求められた拘束引張歪みは、弾性歪みよりもかなり大きくなり、若材齢時のクリープが及ぼす影響が大きいことがわかる。

従って、自己収縮条件における拘束力が負荷されたときの時系列挙動、特に収縮速度が速い若材齢クリープ挙動の把握・評価が非常に重要なとなる。クリープ挙動の評価方法については、古くから数多くの研究がなされている<sup>6)~14)</sup>が、弾性と粘性を直接表現した要素数の少ない単純なレオロジーモデルによる評価は、巨視的なクリープ挙動の再現が容易で、有用性に富む。

本研究は、自己収縮変形条件における若材齢クリープに着目し、単純レオロジーモデルにおいて、若材齢時の物性変化を、時間的に変化するレオロジー定数として捉え、その適用性を解析的に検討したものである。本研究における自己収縮変形条件とは、供試体が外部から水分の影響を受けない環境下にあるときの供試体の体積変化の状態を指し、いわゆるごく初期材齢の封緘養生条件と同義とする。

\*1 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博（正会員）

\*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博（正会員）

\*3 (株)奥村組 技術研究所 (正会員)

## 2. クリープとレオロジーモデルとの関係

### 2.1 クリープ挙動の概要

図-1にコンクリートのクリープ挙動の概要を示す。圧縮および引張の負荷形式に関わらず、載荷応力一定条件における巨視的クリープ挙動は、1)載荷時および除荷時に瞬間弾性変形が生じ、2)載荷中および除荷後のクリープ回復中に遅延変形が生じ、3)最後に非回復の永久変形が残る。ここで、クリープ変形自体は、1)を除いた2)と3)の変形と定義できる。

### 2.2 単純レオロジーモデルの概要

レオロジーモデルを考える際、実際のコンクリートのクリープ挙動とモデル中に構成される各要素が受け持つ働きが整合されなければ、モデルの物理的な意味が失われる。そこで、レオロジーモデル中のスプリング要素とダッシュボット要素が受け持つ働きを明確にするため、各要素が個々に組み合わさった単純モデルについて、単位面積当たりの外力 $\sigma$ が、材齢 $t_0$ から $t_1$  ( $t_0 < t_1$ )まで一定に載荷したときの、全変形量 $\varepsilon$ の時系列挙動を考察する。図-2に各種単純レオロジーモデルの概要を示す。

#### (1) 1要素モデル

スプリング要素は、フックの弾性則に従い、瞬間弾性の性質を示す。比例定数（ヤング係数） $E_0$ は、材齢に関係なく常に一定である。

ダッシュボット要素は、ニュートンの粘性則に従い、外力とそれに対応する変形（流動）速度が線形関係にある。外力が作用する限り流動を続ける。材齢 $t_1$ で除荷してもその位置で静止し決して回復しない。載荷・除荷時の瞬間的な外力作用には全く動かず、比例定数（粘性係数） $\eta_0$ は、材齢に関係なく常に一定である。

#### (2) 2要素モデル

スプリング要素とダッシュボット要素が直列に結合したモデルをマクスウェルモデルと呼ぶ。全変形量は、各要素の変形量の和で表される。載荷時と除荷時で、スプリング要素のみが負担する瞬間弾性変形が生じる。除荷後は、ダッシュボット要素のみが負担する永久変形が生じる。

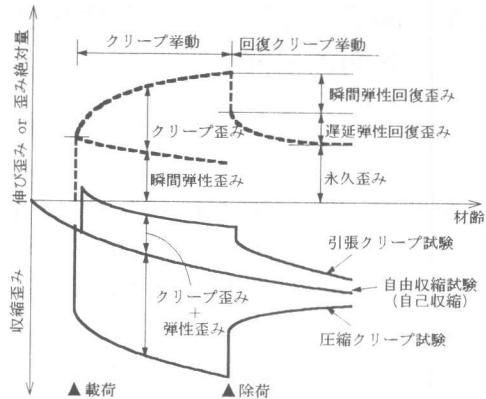


図-1 載荷一定時の巨視的クリープの概要

スプリング要素とダッシュボット要素が並列に結合したモデルをフォークト（ケルビン）モデルと呼ぶ。外力は、各要素に作用する力の和で表される。外力が作用するとスプリング要素が瞬時に変形しようとするが、並列に存在するダッシュボット要素の制動を受けて徐々に弹性平衡点 $\varepsilon_{\infty}$ へ漸近する。除荷後も同様に、徐々に変形量0の位置へ復帰する。

以下、サフィックス M と V は、各々マクスウェルモデルとフォークトモデルを表す。

#### (3) 3要素モデル

スプリング要素とフォークトモデルが直列に結合したモデルをツェナーモデルと呼ぶ。載荷・除荷時に、スプリング要素の瞬間弾性変形が生じる。除荷後は、フォークトモデルの回復挙動と同一となり、最終的に変形量は0に戻る。

ダッシュボット要素とフォークトモデルが直列に結合したレザジヒモデルでは、載荷・除荷時の瞬間弾性変形は生じないが、單一ダッシュボット要素が負担する永久変形は生じている。

#### (4) 4要素モデル

マクスウェルモデルとフォークトモデルを直列に結合したモデルをバーガーズモデルと呼ぶ。載荷・除荷時の瞬間弾性変形と最終永久変形は、マクスウェルモデル部分が受け持ち、載荷中及び回復中の遅延変形は、フォークトモデルとマクスウェルモデルの重ね合わせで表現される。

### 2.3 クリープとレオロジーモデルとの関係

非線形性の強いクリープ挙動の説明に、例えば、文献 7) 14)では、多要素構成した複雑なレオロジーモデルで表現しているが、個々の各要素が受け持つ働きが複雑化するため、コンクリート物性としての物理的意味が不明確となる。

一方、コンクリート自体の前述の巨視的なクリープの挙動 1) ~ 3)は、クリープメカニズム

を表現しているわけではないが、バーガーズモデルにより直接的に表現できることがわかる。

従って、クリープ挙動の非線形性とコンクリート物性が時系列で変化することを考え合わせると、レオロジーモデルの非線形性の表現には、要素を多大に増やすよりも、要素数を固定にした単純モデルのレオロジー定数が、時系列で変化していくものを考える方が有用性がある。

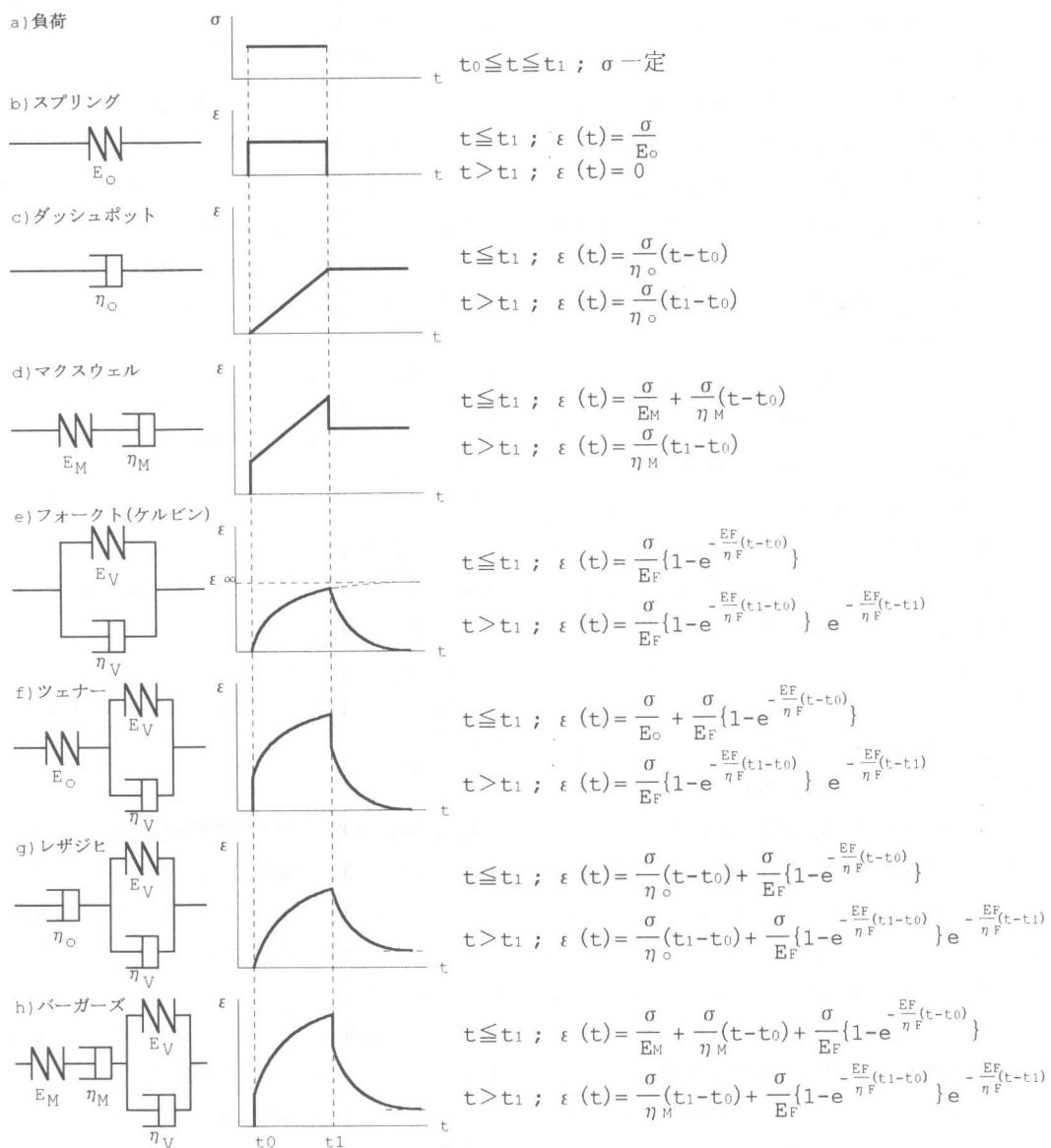


図-2 レオロジー定数が一定の各種単純レオロジーモデルの概要

### 3. 若材齢クリープのレオロジー解析概要

#### 3.1 既往の時変数レオロジーモデルの概要

時変数レオロジー定数を検討した例として、文献 15)では、材齢 7 時間までのごく初期材齢を対象に、逐次的に材齢を変えてクリープ試験を行い、各材齢で得られた個々のクリープ結果について、レオロジー定数を定常のバーガーズモデルに当てはめ、得られた各材齢ごとの定数をプロットすることで、レオロジー定数が時変数となる時系列挙動を定めている。

文献 16)では、バーガーズモデルにおける 2 つの粘性係数  $\eta_M$  と  $\eta_V$  を、予め時間依存型の関数に設定し、実測されたクリープ挙動に回帰させることで、関数中の実験定数を求め、定量化している。文献 6)10)にも同一の関数モデルが紹介されているが、関数自体の導出・誘導については、大学紀要文献から引用されているために詳細は不明である。

また、文献 17)でも、全く同一の関数モデルが適用されている。ただし、ここでは、コンクリートをセメントペーストと骨材の 2 相材料として考え、セメントペーストにバーガーズモデルを、骨材にスプリング要素を配し、それを直列結合した 5 要素モデルで検討している。

文献 18)では、クリープ変形について、フォークトモデルにおけるレオロジー定数を検討している。ここでは、水和進行による物性変化を考慮した補正を加えた解析を行っている。レオロジー定数は、引張強度の強度発現式を利用した時間依存型の関数に設定している。

#### 3.2 若材齢クリープのレオロジー解析概要

本研究のクリープ挙動解析は、バーガーズモデルを適用する。時変数レオロジー定数の時系列関数における物性値は、できるだけ自己収縮条件での物性値を適用することとした。

##### (1) 時変数レオロジー定数の関数表現

マクスウェルのスプリング要素は、コンクリートのヤング係数の時系列関数で表す。関数中の定数は、既報 5)の自己収縮条件での物性値を適用した。

$$E_M(t) = a_1 \cdot \ln(t) + b_1 ; f_c(t) = a_2 \cdot \ln(t) + b_2 \quad (1)$$

;  $t$ : 材齢[day],  $f_c$ : [MPa],  $E_M$ : [GPa]  
; 文献 5) の定数  $a_1=5$ ,  $b_1=25$ ,  $a_2=25$ ,  $b_2=45$

マクスウェルのダッシュポット要素は、文献 16)17) の関数表現に従う。関数中の定数は、自己収縮条件での物性値が不明なので、とりあえず文献 17) の値を適用した。

$$\eta_M(t) = \alpha_1 \cdot e^{\alpha_2(t-t_0)} \quad (2)$$

; 文献 17) (単位は原文に従う,  $E_M$ : [kgf/cm<sup>2</sup>])  
;  $f_c > 420 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $t_0 = 3 \text{ day}$ ,  $t - t_0 < 1000 \text{ day}$   
;  $\alpha_1 \alpha_2 = 0.5 E_M(28)$ ,  $\alpha_2 = 0.001$

フォークトのスプリング要素は、マクスウェルのスプリング要素に比例すると仮定する。文献 16)17) では、ヤング係数を材齢 28 日での一定値としているが、式(1)より時系列関数で表す。比例定数は、自己収縮条件での物性値が不明なので、文献 17) の値を適用した。

$$E_V(28) = a_3 \cdot E_M(28) \quad (3)$$

; 文献 17) (単位は原文に従う,  $E_M$ : [kgf/cm<sup>2</sup>])  
;  $f_c > 420 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $t_0 = 3 \text{ day}$ ,  $t - t_0 < 1000 \text{ day}$   
;  $a_3 = 0.7$

$$E_V(t) = a_3 \cdot E_M(t) \quad (3)$$

フォークトモデルのダッシュポット要素も、文献 16)17) の関数表現に従う。関数中の定数は、文献 17) の値を適用した。

$$\eta_V(t) = 1 / \beta \cdot E_V(28) \cdot (t - t_0)^{0.5} \quad (4)$$

; 文献 17) (単位は原文に従う,  $E_V$ : [kgf/cm<sup>2</sup>])  
;  $\beta = 0.164$

$$\eta_V(t) = 1 / \beta \cdot E_V(t) \cdot (t - t_0)^{0.5} \quad (4)$$

##### (2) 巨視的クリープ挙動の解析概要

全歪みは、自己収縮歪みと瞬間弾性歪みとクリープ歪みの総和となる。ここで、自己収縮歪みを差し引いた瞬間弾性歪みとクリープ歪みの和からなる歪み  $\varepsilon(t)$  は、マクスウェルのスプリング要素歪み  $\varepsilon_s(t)$  とダッシュポット要素歪み  $\varepsilon_d(t)$  とフォークトモデル歪み  $\varepsilon_v(t)$  の重ね合わせで求めることとする(式(5))。 $\varepsilon_s(t)$  は式(6)で表す。 $\varepsilon_d(t)$  と  $\varepsilon_v(t)$  については、文献 16)17) では、次の式(7), (8)で表されている。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_d(t) + \varepsilon_v(t) \quad (5)$$

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\sigma}{E_M(t)} = \frac{\sigma}{\{a_1 \cdot \ln(t) + b_1\} \cdot 1000} \quad (6)$$

$$\varepsilon_d(t) = \frac{\sigma}{\alpha_1 \alpha_2} \{1 - e^{-\alpha_2(t-t_0)}\} \quad (7)$$

$$\varepsilon_v(t) = \frac{\sigma}{E_v(28)} \{1 - e^{-2\beta(t-t_0)^{0.5}}\} \quad (8)$$

ところで、式(8)は、粘性係数を時変数で表現しているが、ヤング係数を一定値と仮定して解を導いている。ここで、若材齢での物性変化を評価するためにも、ヤング係数も時変数関数になるよう、 $\varepsilon_v(t)$ を新たに定式化する。

まず、フォートモードルの構成式は式(9)で表され、整理して式(9)'となる。

$$\sigma = E_v(t) \varepsilon_v(t) + \eta_v(t) \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_v(t)}{\eta_v(t)} \varepsilon_v(t) = \frac{\sigma}{\eta_v(t)} \quad (9)'$$

ここで、積分因子 IF を式(10)で定義する。

$$IF = e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} \quad (10)$$

式(9)'の両辺に式(10)を掛けて、整理するときに以下に示す公式を利用する。

公式 ;  $\alpha e^{\alpha \beta} = \frac{d(e^{\alpha \beta})}{d\beta}$  より、

$$\frac{E_v(t)}{\eta_v(t)} \varepsilon_v(t) e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} = \varepsilon_v(t) \frac{d \left[ e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} \right]}{d\tau}$$

従って、式(9)'は式(11)に整理できる。

$$e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + \varepsilon_v(t) \frac{d \left[ e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} \right]}{d\tau} = \frac{\sigma}{\eta_v(t)} e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} \quad (11)$$

さらに、式(11)の左辺を、以下に示す公式を利用して整理する。

公式 ;  $\frac{d(u \cdot v)}{dt} = u \frac{dv}{dt} + v \frac{du}{dt}$  より、

$$\frac{d \left[ \varepsilon_v(t) \cdot e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} \right]}{d\tau} = \frac{\sigma}{\eta_v(t)} e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} \quad (12)$$

式(12)は、変数分離可能なので、積分を実行する。

$$\varepsilon_v(t) \cdot e^{\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} = \sigma \int_{t_0}^t e^{\int_{t_0}^x \frac{EV(x)}{\eta V(x)} dx} \frac{d\tau}{\eta V(\tau)} \quad (13)$$

従って、求める解  $\varepsilon_v(t)$  は、式(14)となる。

$$\varepsilon_v(t) = \sigma \cdot e^{-\int_{t_0}^t \frac{EV(\tau)}{\eta V(\tau)} d\tau} \int_{t_0}^t e^{\int_{t_0}^x \frac{EV(x)}{\eta V(x)} dx} \frac{d\tau}{\eta V(\tau)} \quad (14)$$

以上より、式(6), (7), (14)に、式(1), (2), (3)', (4)'を適用することで、時変数レオロジー解析評価が可能となる。

#### 4. 解析結果及び考察

今回の解析は、文献 17)の物性値に従ったが、自己収縮条件の物性値でないため、諸定数の設定に問題がある。しかしながら、若材齢クリープ評価を行うことに対し、3.(2)で新たに提案した時変数レオロジー解析手法と文献 17)の解析手法を比較することには意味があると考える。このため、本研究では、定量的な考察には触れず、巨視的クリープ挙動の比較評価にとどめる。なお、文献 17)の解析は、材齢 28 日のヤング係数と瞬間弾性歪みを式(1), (6)より算定し、式(2), (3), (4)を式(7), (8)に適用し、最後に式(5)に集約することで求められる。

図-3 に文献 17)による解析結果を、図-4 に時変数レオロジー解析結果を示す。文献 17)の結果では、ごく初期材齢のヤング係数が対応しておらず、クリープ変形が表現できていない。時変数レオロジー解析結果は、ごく初期材齢の変化が概ね表現できている。すなわち、若材齢物性の変化を、すべてのレオロジー定数を時変数として考慮することで対応できた。ただし、クリープ変形となる遅延変形  $\varepsilon_v(t)$  と永久変形  $\varepsilon_d(t)$  の和に対する評価はできているようであるが、 $\varepsilon_d(t)$  自体の評価はできていない。

今後は、自己収縮条件における若材齢クリープ実験結果を利用し、逆解析を行うことで、時変数レオロジー定数の関数パラメータおよび  $\varepsilon_d(t)$  を検討し、自己収縮特性が及ぼす影響の考察を深めたいと考える次第である。

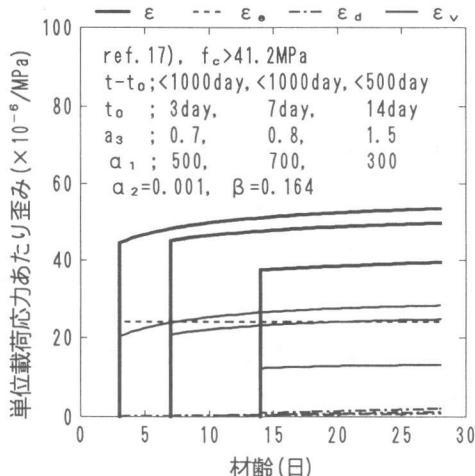


図-3 文献17)の解析結果

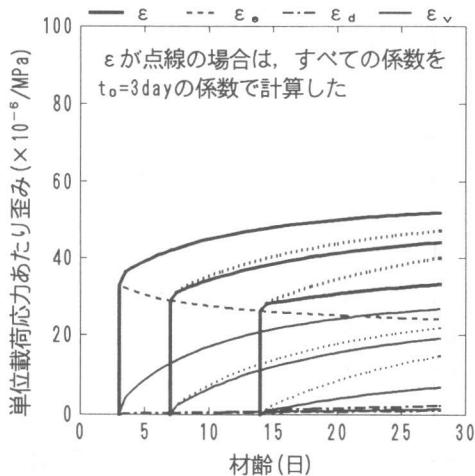


図-4 時変数レオロジー解析結果

## 5. 結論

高強度コンクリートの自己収縮条件における若材齢クリープに着目し、クリープ解析を実施する上で、若材齢時のコンクリート物性の変化を考慮するため、時間的に変化するレオロジーモデルを組み込んだ時変数レオロジーモデルを定式化し、解析的に検討した。その結果、有効性が示されたが、その取り扱いに関して、若材齢物性と時変数レオロジーモデルとの整合性が重要であることが示された。

## 謝辞

本研究をまとめるにあたり、宇都宮大学大学院生の萩原伸治君にご協力いただきました。謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 手島則夫・中村成春・樹田佳寛：高粉末度フライアッシュを使用した高強度マスコンクリートの発熱特性、日本建築学会構造系論文集, No.508, pp.9-15, 1998.6
- 2) 中村成春・樹田佳寛・安田正雪・荒金直樹：低熱ポルトランドセメントを使用した高強度マスコンクリートの発熱特性、セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.902-909, 1998.12
- 3) 日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書の第3章, pp.7-78, 1996.11
- 4) 萩原伸治・樹田佳寛・中村成春・上西 隆：高強度コンクリートの自己収縮特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.661-666, 1998.7
- 5) 中村成春・萩原伸治・樹田佳寛・上西 隆・河野政典・起橋孝徳：高強度コンクリートの自己収縮挙動に関する考察(その1)&(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), A-1, pp.773-776, 1998.9
- 6) Neville, A.M. : Creep of Concrete- Plain, Reinforced and Prestressed, Amsterdam, North-Holland publishing Co., 1970
- 7) 大岸佐吉：硬化したコンクリートのレオロジー、コンクリート・ジャーナル, Vol.12, No.4, pp.1-14, 1974.4
- 8) 岡田 清：コンクリートのクリープについて、セメント技術年報, Vol.33, pp.29-34, 1979
- 9) 清水昭之：コンクリートの引張クリープ、コンクリート工学, Vol.21, No.6, pp.4-13, 1983.6
- 10) Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J. : Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, 1983
- 11) 阪田憲次：コンクリートの乾燥収縮およびクリープの予測、コンクリート工学, Vol. 31, No.2, pp.5-14, 1993.2
- 12) 米倉亞州夫：水分の散逸とクリープ、コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.37-42, 1994.9
- 13) 橋田 浩：コンクリートの乾燥クリープとその機構、コンクリート工学, Vol.35, No. 10, pp.33-36, 1997.10
- 14) 赤木知之：レオロジーモデル定数の一決定法、土と基礎, Vol.25, No.3, pp.47-52, 1977.3
- 15) 岡本寛昭・遠藤孝夫：持続荷重を受ける極若材令コンクリートの変形予測に関する研究、土木学会論文集, No.396/V-9, pp.69-77, 1988.8
- 16) 田 政範：水で飽和されたモルタルのクリープ挙動に関する研究、土木学会論文報告集, No.256, pp.59-68, 1976.12
- 17) Osama, E.-M., Yamaguchi, T. and Ikeda, S. : On Predicting Creep Towards High-Strength Concrete, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.173-181, 1996.2
- 18) 樹田佳寛・田中 斎：コンクリートの若材令載荷時の変形性状、S57年度建築研究所年報, pp.77-79, 1982