

論文 遷移材令時におけるコンクリートの構成則に関する研究

安藤直樹*¹・石川靖晃*²・田邊忠顕*³

要旨：既報した Rate Type の粘弾性構成式 [1] を用いて、引張クリープについて解析的研究を行った結果、圧縮だけでなく引張についても、その挙動を捉えられることが確認された。また、混和材料を用いたコンクリートについて、特にシリカフェームを用いたコンクリートについて検討した結果、その挙動を捉えられることがわかった。

キーワード：引張クリープ、混和材料

1 はじめに

一般に、コンクリート構造物の設計、解析等においては「圧縮クリープと引張クリープとは等しい」という Davis-Glanville の法則を受け入れている。

しかし、この法則はコンクリート内の水和による硬化の進展した硬化コンクリートにおいて成り立つものであって、若材令時のコンクリートでは成り立たないことが確認されている [2]。これは圧縮の場合には間隙中に存在している未水和水が排出されるが、引張の場合には外部からの水の流入がないため間隙に存在している未水和水に負圧が生じ、引張応力が低減され、引張のクリープ関数は圧縮の時に比べて小さくなると考えられる。

梅原等の実験によれば、載荷材令 5 日におけるコンクリートの圧縮クリープは引張クリープのおよそ 1.7 倍となっている [2]。

引張クリープを考えると、圧縮クリープにある低減率のような値を乗ずることによって表すべきなのか、それとも圧縮クリープにおけるパラメーターを変化させることによって、圧縮クリープと同一の式を用いても表すことができるのだろうか。

著者等は前報において、弾塑性成分に加え、時間依存性の粘弾性成分と粘塑性成分の両方を考慮に入れた構成則を提案した。特に粘弾性成分に関しては Dirichlet 級数を用いた Rate Type 型で表した粘弾性構成式を提案し、その妥当性を示した [1]。

しかし、それは圧縮クリープについてのみの検討で、引張クリープについては何も触れていなかった。

そこで、本研究においては前報において提案した Rate Type の構成式を 3 次元化するとともに、引張クリープについても精度良く表すことができないか、既存の実験を基に解析的に検討を行った。

また、実際にコンクリートの製品を造るときは、製品の強度・耐久性・水密性などを改善する、締め固め成形を容易にする、肌面を良くする、促進養生効果を高める、早期に脱型する、等の目的で様々な混和材料が使用される。それら混和材料がクリープに及ぼす影響について、特にシリカフェームを用いた場合について実験結果により比較・検討を行った。

¹* 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

²* 名城大学理工学部土木工学科助手 (正会員)

³* 名古屋大学工学部土木工学科教授 (正会員)

2 若材合コンクリートの引張クリープ試験

解析に用いた実験結果は Benoit が行ったもの [3] で、これを再録すると水セメント比について 2 種類 (55%、35%)、使用するセメントの種類について 2 種類 (普通ポルトランドセメントとシリカフェームを含む普通ポルトランドセメント) を考え、その組み合わせで計 4 種類の供試体についてそれぞれ載荷材齢 1 日と 7 日で引張クリープ試験を行っている。

各載荷材齢における載荷応力は、それぞれ材齢 1 日の時は $7.7\text{kgf}/\text{cm}^2$ であり、材齢 7 日の時は $10.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ である。

実験に用いた供試体を表 1 に、各供試体の配合を以下の表 2 に示す。表中において TypeI は普通セメント、HSF はシリカフェームの入ったセメントを表している。

この他、梅原 [2] や森本 [4] らが同種のものを行っているが、基本的には同じことなので、ここでは Benoit のものだけを対象とする。

表 1 実験に用いた供試体

	水セメント比	使用セメント
C55	55	TypeI
C35	35	TypeI
S55	55	HSF
S35	35	HSF

表 2 実験に使用したコンクリートの配合表

	C55	C35	S55	S35
TypeI (kg/m ³)	383	495	—	—
HSF (kg/m ³)	—	—	380	494
粗骨材 (kg/m ³)	1017	1010	1017	1005
細骨材 (kg/m ³)	678	674	678	670
水 (kg/m ³)	211	173	209	173

3 構成式の 3 次元化

クリープ解析を行おうとすると一般的には、2 次元応力場、あるいは 3 次元応力場におけるクリープ則が必要となる。しかし、現在実験的に求められているクリープひずみは 1 次元によるものがほとんどで、2 次元あるいは 3 次元のクリープ実験は数少ないので、ここでは次のようにして、前報で提案した Rate Type 式を 3 次元化する。

コンクリートが等方性で、体積クリープひずみ ϵ^V と偏差クリープひずみ ϵ_{ij}^D について、全く一軸クリープひずみと類似の関係が成り立つとすると

$$3\epsilon^V = \int_0^t J^V(t, t') d\sigma^V(t') \quad (1)$$

$$2\epsilon_{ij}^D = \int_0^t J^D(t, t') d\sigma_{ij}^D(t') \quad (2)$$

と書ける。ここで $J^V(t, t')$ 、 $J^D(t, t')$ はクリープポアソン比 ν を用いて

$$J^V(t, t') = 6\left(\frac{1}{2} - \nu\right)J(t, t') \quad (3)$$

$$J^D(t, t') = 2(1 + \nu)J(t, t') \quad (4)$$

と表される。ここで、Double Power 則をあてはめ $J(t, t') = \frac{1}{E_0}\{1 + \Psi_0(t'^{-m} + \alpha)(t - t')^n\}$ とする。

クリープポアソン比 ν は、実際には t と t' の関数であるが、ここでは一定 (≈ 0.18) として考える。しかし、これは基本クリープを扱う場合のことであって、乾燥クリープを考慮する場合には当然一定とはならない。

これらを前報と同様にして Rate Type 型の方程式に変換していくと、

$$\varepsilon_\mu^V(t) = \int_0^t \frac{d\sigma^V(t')}{C_\mu(t')} - \gamma_\mu^V(t) \quad (5)$$

$$\gamma_\mu^V(t) = \exp\{-y_\mu(t)\} \int_0^t \exp\{y_\mu(t')\} \frac{d\sigma^V(t')}{dy_\mu(t')} \frac{dy_\mu(t')}{C_\mu(t')} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\mu ij}^D(t) = \int_0^t \frac{d\sigma_{ij}^D(t')}{C_\mu(t')} - \gamma_{\mu ij}^D(t) \quad (7)$$

$$\gamma_{\mu ij}^D(t) = \exp\{-y_\mu(t)\} \int_0^t \exp\{y_\mu(t')\} \frac{d\sigma_{ij}^D(t')}{dy_\mu(t')} \frac{dy_\mu(t')}{C_\mu(t')} \quad (8)$$

となり、結局

$$d\varepsilon^V = (1 - 2\nu) \frac{\Delta\sigma^V}{E''} + (1 - 2\nu)\Delta\varepsilon''_V \quad (9)$$

$$d\varepsilon_{ij}^D = (1 + \nu) \frac{\Delta\sigma_{ij}^D}{E''} + (1 + \nu)\Delta\varepsilon''_D \quad (10)$$

が得られる。

ここで、 $C_\mu(t')$ 、 $\gamma_\mu(t)$ 、 y_μ 、 (E'') 、 $(\Delta\varepsilon'')$ は前報で述べたように次式で定まる関数である。

$$\frac{1}{C_\mu(t')} = \begin{cases} \frac{1}{E_0} + a(n)\left(\frac{\tau_1}{0.002}\right)^n \Psi(t') & \mu = 1 \\ b(n)\left(\frac{\tau_1}{0.002}\right)^n 10^{n(\mu-1)} \Psi(t') & 1 < \mu < N \\ 1.2b(n)\left(\frac{\tau_1}{0.002}\right)^n 10^{n(N-1)} \Psi(t') & \mu = N \end{cases} \quad (11)$$

$$\gamma_\mu(t) = \exp\{-y_\mu(t)\} \int_0^t \exp\{y_\mu(t')\} \frac{d\sigma(t')}{dy_\mu(t')} \frac{dy_\mu(t')}{C_\mu(t')} \quad (12)$$

$$y_\mu(t) = -\ln B_\mu(t) \quad (13)$$

$$\frac{1}{E''} = \sum_{\mu=1}^N \frac{1 - \lambda_\mu}{C_{\mu(r+1/2)}} \quad (14)$$

$$\Delta\varepsilon'' = \sum_{\mu=1}^N \{1 - \exp(-\Delta y_\mu)\} \gamma_\mu(r) \quad (15)$$

また、体積ひずみ、偏差ひずみはそれぞれ

$$\varepsilon^V = \frac{1}{3}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \quad (16)$$

$$\varepsilon_{ij}^D = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon^V \quad (17)$$

と書けるので、これと式(9)、式(10)から次式を得る。

$$d\varepsilon_{ij}^{ve} = \frac{1}{E''} D_{ijkl} \Delta\sigma_{kl} + D_{ijkl} \Delta\varepsilon_{kl}'' \quad (18)$$

ここで、 D_{ijkl} は実際には4階のテンソルであるが、 $d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ji}$ 、 $\Delta\sigma_{kl} = \Delta\sigma_{lk}$ により、次式に示す6×6のマトリックスになる。

$$\{D\} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{bmatrix} \quad (19)$$

また、

$$\Delta\varepsilon_{ij}'' = \sum_{\mu=1}^N \{1 - \exp(-\Delta y_{\mu})\} \gamma_{\mu(r)ij} \quad (20)$$

である。

4 引張クリープの解析

式(18)を用いて解析は次のように行った。

最初に、各配合において載荷材齢1日のものについて、実験結果と解析結果とが一致するように Try and Error によって決定すべきパラメータ (前報における Dirichlet 級数の遅延時間 τ_1 、 τ_2 など) を決定する。又、今回の解析においては、Dirichlet 級数は10項までとった。

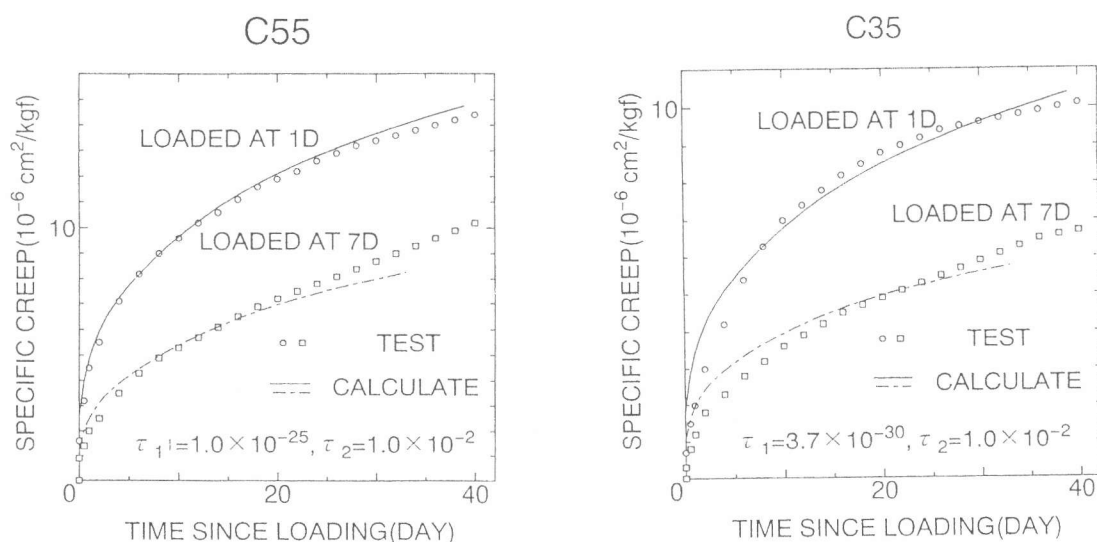


図1 普通セメントにおける SPECIFIC CREEP

次に、決定したパラメータはそのまま、載荷材齢だけを7日に変えて実験結果と解析結果が一致するかどうかを調べる。

提案式が引張クリープについても、その挙動を表すことができるのであれば当然7日についても実験結果と解析結果は一致するはずである。

まず、普通セメントによる供試体 (C55,C35) について、図1に解析結果を示す。

どちらの図においても引張クリープの載荷材齢の違いによる挙動の変化の違いを良く表しているものと思われる。

次に、シリカフェームを用いた供試体 (S55,S35) についての結果を図2に示す。S35については載荷材齢1日の実験値がC35と比べた場合、あまりにもその値が大きすぎるので、載荷材齢7日のものに一致させた後載荷材齢を1日に変えて解析値を求めた。

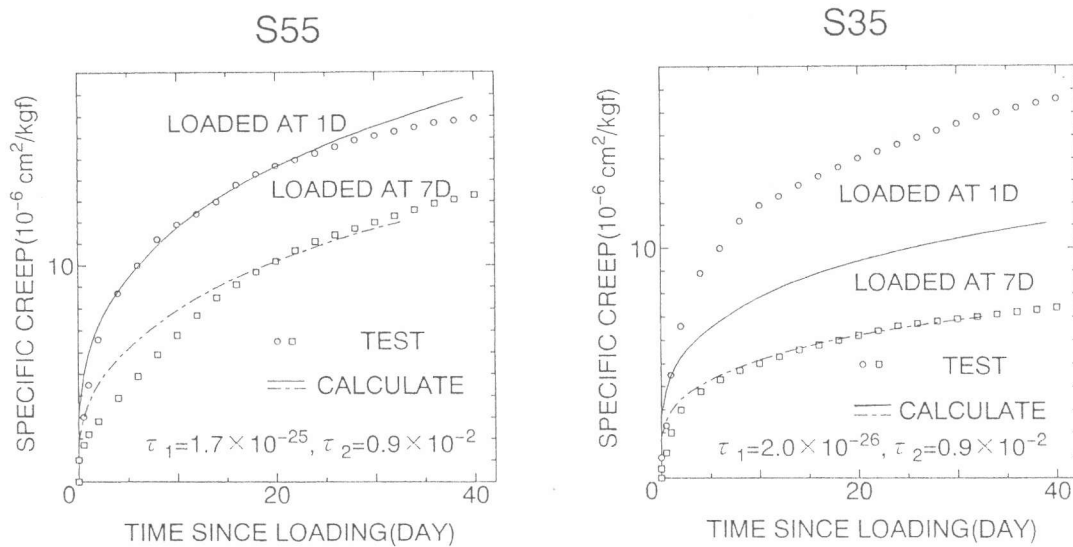


図2 シリカフェームを用いた供試体における SPECIFIC CREEP

S55 に関してはシリカフェームを用いた場合でも、引張クリープの載荷材齢の違いによる変形挙動の違いを良く表しており、混和材による影響を捉えているものと思われる。

しかし、S35 については解析値を載荷材齢1日のものに一致させると載荷材齢7日のものが、載荷材齢7日のものに一致させると載荷材齢1日のものが表せなくなってしまう。他の3つの結果から考えれば、これだけが捉えられないというのはおかしいはずである、そこにはクリープ以外の何らかの原因があるはずである。

若材齢のコンクリートにおいて、このようなひずみに及ぼす原因として考えられるものに乾燥収縮がある。この実験は湿度50%の状態で行われているので、この影響は無視できないものと考えられる。

そこで、乾燥収縮についても実験を行っているので、その結果をしてみることにする。図3に、水セメント比35%のものについて、水中養生期間が1日のものについてと7日のものについて示す。

c35 に関しては養生期間による違いがほとんど見られないが (C55、S55 に関してほとんど見られていない)、S35 に関してはその違いが顕著に現れている。この乾燥収縮のひずみの違いが、得られた引張クリープの値に影響を及ぼしたものと考えられる。従って、遷移材齢時の挙動をよ

りの的確に捉えるためには、こういった乾燥収縮などの影響を考慮に入れたモデルが必要であると考えられる。

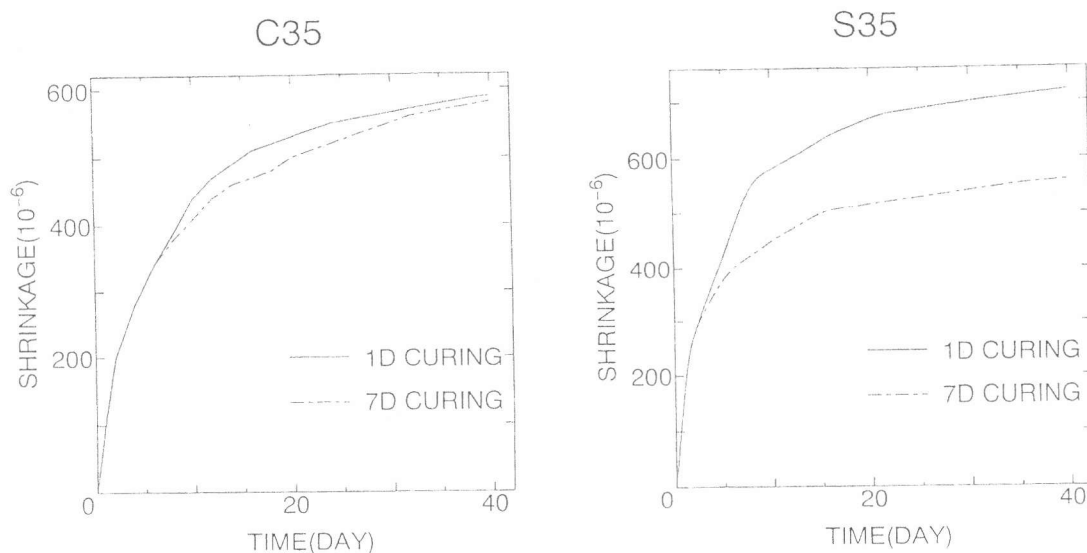


図3 乾燥収縮ひずみ

5 結論

前報において提案した構成則で、圧縮だけでなく引張クリープについても Double Power 則、その増分形の Rate Type で表すことが出来ることが確認された。これは即ち1日の材齢での載荷によるクリープが分かれば、材齢1/2日あるいは3日、7日の載荷状態に対して引張クリープが推定出来ることを意味している。また、混和材料を用いたコンクリートについても同様に、表すことが出来ることが確認された。

そして、遷移材齢時の挙動を得るためには乾燥収縮の影響も考慮に入れなければならないものと思われる。

参考文献

- [1] 石川靖晃ほか: ビンガム流体から固体への遷移過程におけるコンクリートの構成則に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.627-632, 1995.
- [2] 後藤忠広、上原匠、梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープ挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1133-1138, 1995.
- [3] Benoit Bissonnette and Michel Pigeon: TENSILE CREEP AT EARLY AGES OF ORDINARY, SILICA FUME AND FIBER REINFORCED CONCRETE, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.5, pp.1075-1085,1995.
- [4] 森本博昭ほか: 若材齢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, Oct.1993