

高強度コンクリートの長期性状に関する研究（その1）

——コンクリートクリープ特性モデル化への時間依存性線型粘弾性理論の適用——

高橋 久雄
川口 徹

Study on Time-dependent Behavior of High Strength Concrete (Part 1)

——Application of the Time-dependent Linear Viscoelasticity
Theory of Concrete Creep Behavior——

Hisao Takahashi
Tohru Kawaguchi

Abstract

The creep behaviors of concrete are modeled by applications of the time-dependent linear viscoelasticity theory. The basic model consists of a time-dependent dashpot, a Kelvin solid, and a time-independent Kelvin solid in series. The time-dependency of the model is due to the viscosities of dashpot and Kelvin solid being assumed as linear functions of time.

The following merits are pointed out comparing experimental results. (1) The model can be made to fit experimental data well not only in loading under unit creep strain, but also including creep recovery after load removal. (2) The influence of loading age can be considered. (3) Creep of concrete under variable stresses can be more satisfactorily predicted with this model than with conventional analytical methods.

概 要

時間依存性線型粘弾性理論を適用してコンクリートのクリープ特性をモデル化した。基本モデルは、時間依存性のダッシュポットと Kelvin Solid および時間依存性のない Kelvin Solid の直列結合で構成した。時間の依存性は、ダッシュポット、 Kelvin Solid の粘性係数を時間の一次関数で仮定した。なお、本論中の「時間依存性～」というのは、一般的な線型粘弾性理論で定数として扱われている材料係数自身が時間依存性をもつ場合を示すものである。

実験結果との比較から次のような長所を明らかにすることができた。(1)単位クリープ歪で載荷中のみならず、除荷後のクリープ回復特性を含め実験値によくfitさせることができる。(2)載荷材令の影響を考慮することができる。(3)応力の変動を伴う場合の変形の解析的予測においても、従来の解析方法に比べ非常によく実験値と対応させることができる。

1. はじめに

PCCV, PCRV 等のプレストレスト構造物を合理的に安全設計するための一環として、これら構造物の設計寿命期間中の長期性状を把握する必要がある。そのために筆者らは種々の載荷履歴を受ける構造物の長期応答を予測する解析方法の開発・改良、および基本データであるコンクリートのクリープ特性の実験的解明を継続して実施している^{1)~4)}。

この報告は、時間依存性線型粘弾性理論 (Time-Dependent Linear Viscoelasticity Theory) にもとづくコ

ンクリートのクリープ特性のモデル化と、応力変動を伴うクリープ解析の方法を紹介し、実験結果と比較して、従来からの方法に比べ非常によくコンクリートの長期性状を予測できることを明らかにしようとするものである。

2. コンクリートクリープ特性のモデル化とクリープ解析の方法

筆者等は、すでにコンクリートのクリープ特性を線型粘弾性理論 (Time-Independent Linear Viscoelasticity Theory, 以後 T.I.L.V. 法と略す。) にもとづいて、Kel-

vin Solid(およびダッシュポットを含む)の直列結合で仮定し、単位クリープ歪の関数化を行ない、step-by-step法によるクリープ解析の方法を紹介している¹⁾³⁾。

しかし T.I.L.V. 法によるコンクリートクリープ特性のモデル化には、次のような事項が欠点として指摘される。

(1) コンクリートのクリープ歪は、載荷後20~30年経過しても収れんしないというのが一般的であるにもかかわらず、Kelvin Solidの直列結合だけでモデル化すると、比較的短期にクリープ歪が収れんしてしまう。

(2) 実験では、除荷後のコンクリートのクリープ歪の大部分は、非回復クリープ歪として残留するにもかかわらず、Kelvin Solidの直列結合だけでモデル化すると、すべてが回復性のクリープ歪になる。

(3) (1)、(2)の欠点をカバーするために、Kelvin Solidにダッシュポットを直列結合すると、クリープ歪が収れんせず、かつ、非回復性のクリープ歪をも考慮することが可能になるが、クリープ速度 $(\partial J/\partial t)$ が時間無限大でもconstantになり、コンクリートについての一般的な事実である下記の条件に反することになる。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\partial J/\partial t) = 0 \quad \dots\dots(1)$$

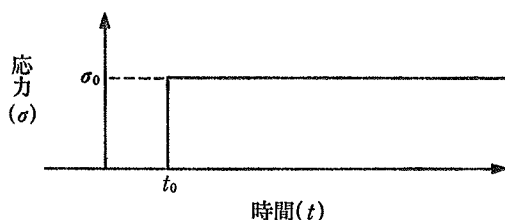
(4) クリープ歪におよぼす載荷材令の影響を考慮することが困難である。

上記の欠点を解決するため、時間依存性線型粘弾性理論 (Time-Dependent Linear Viscoelasticity Theory, 以後 T.D.L.V. 法と略す) の導入を検討した結果⁵⁾、ダッシュポット、Kelvin Solidの粘性係数を次式による時間の一次関数で仮定することとした。

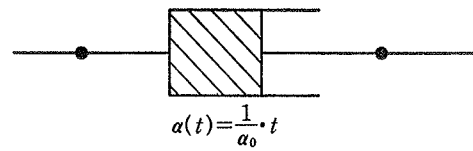
$$\alpha(t) = \frac{1}{\alpha_0} \cdot t \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 $\alpha(t)$: 粘性係数
 t : 時間
 α_0 : 定数

時間 $t_0 (>0)$ から $\sigma = \sigma_0 \cdot I(t)$ なる荷重を作用させた場合のダッシュポットおよび Kelvin Solid のクリープコンプライアンスは、それぞれ次のようになる。



(i) ダッシュポットのクリープコンプライアンス



(時間依存性のダッシュポット)

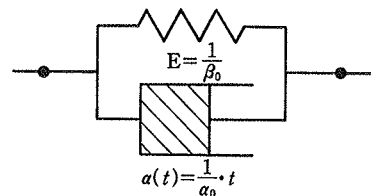
$$J_{11}(t, t_0) = \alpha_0 \cdot \ln(t/t_0) \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 $\alpha(t) = 1/\alpha_0 \cdot t$
 $t \geq t_0 \geq 0$

比較として、 $\alpha(t) = 1/\alpha_0$ (定数) の場合

$$J_{10}(t, t_0) = \alpha_0(t - t_0) \quad \dots\dots(4)$$

(ii) Kelvin Solid のクリープコンプライアンス



(時間依存性の Kelvin Solid)

$$J_{21}(t, t_0) = \beta_0 \left[1 - \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-\lambda} \right] \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 $\alpha(t) = 1/\alpha_0 \cdot t$
 $E = 1/\beta_0$
 $\lambda = \alpha_0/\beta_0$
 $t \geq t_0 \geq 0$

比較として、 $\alpha(t) = 1/\alpha_0$ (定数) の場合

$$J_{20}(t, t_0) = \beta_0 [1 - e^{-\lambda(t-t_0)}] \quad \dots\dots(6)$$

一定応力を載荷した実験から求まるクリープ曲線を解析モデル化する場合、可能性としては上記の(2)~(5)式の任意の組合せおよび、それぞれの任意の直列結合が考えられる。しかし、ここでは常温の乾燥収縮を伴わないシールしたコンクリートの基本クリープ (basic creep) について、その基本性状を考慮し、かつ、煩雑でないものにするため、原則的に次式によるモデル化を行なった。これ以外の乾燥収縮を伴う場合のクリープや、高温クリープの扱いについては、後出の実験結果の検討の中で詳述する。

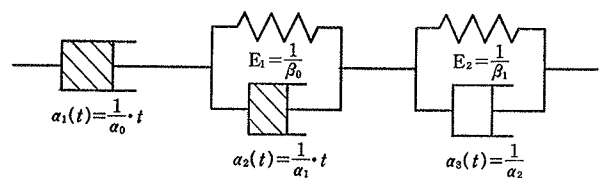


図-1 基本クリープモデル

$$J(t, t_0) = \alpha_0 \cdot \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) + \beta_0 \left[1 - \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-\lambda_0} \right] + \beta_1 [1 - e^{-\lambda_1(t-t_0)}] \quad \dots\dots(7)$$

ここに, $J(t, t_0)$: 単位クリープ関数

t : コンクリートの材令 (日)

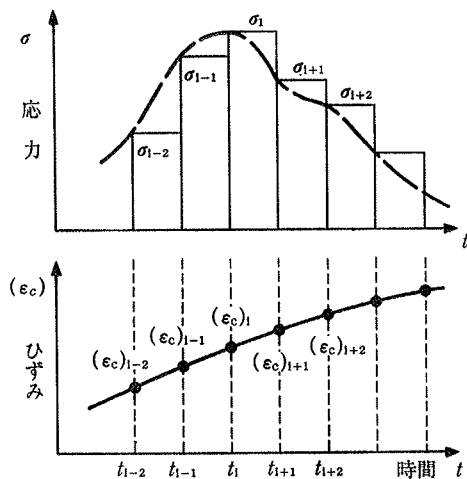
t_0 : 載荷材令 (日)

なお, (7)式の右辺第1項は, 非回復性のフロー歪, 第2項は, 時間依存性の遅延弾性歪, 第3項は, 時間に依存しない遅延弾性歪を表わすものと解釈できる⁶⁾⁷⁾。

このモデルの特徴として次の点があげられる。

- (1) 時間無限大でもクリープ歪が収れんしない。
- (2) 時間無限大でクリープ速度がゼロになる。
- (3) 除荷後のコンクリートのクリープ回復特性を適正に評価することができる。
- (4) 載荷材令の影響を考慮することができる。
- (5) (1)~(4)の特性から, 実験範囲外のコンクリートの単位クリープ歪もある程度妥当性のある予測が可能になる。

さらに, 応力変動を伴うコンクリート (構造物) の長期性状を解析的に予測しようとする場合, step-by-step法を適用し, step 内の応力を一定とみなすと, 以下に示すように, ステップの始めの応力, クリープ歪さえわかれば, それ以前の応力・歪の履歴にかかわらず, そのstepの終点でのクリープ歪を算出することができる。



$$(\epsilon_c)_i = (\epsilon_{c1})_i + (\epsilon_{c2})_i + (\epsilon_{c3})_i \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$(\epsilon_{c1})_i = (\epsilon_{c1})_{i-1} + \alpha_0 \cdot \ln\left(\frac{t_i}{t_{i-1}}\right) \cdot \sigma_{i-1} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$(\epsilon_{c2})_i = (\epsilon_{c2})_{i-1} \cdot \left(\frac{t_i}{t_{i-1}}\right)^{-\lambda_0} + \beta_0 \left[1 - \left(\frac{t_i}{t_{i-1}}\right)^{-\lambda_0}\right] \cdot \sigma_{i-1} \quad (10)$$

$$(\epsilon_{c3})_i = (\epsilon_{c3})_{i-1} \cdot \exp\{-\lambda_1(t_i - t_{i-1})\} + \beta_1 [1 - \exp\{-\lambda_1(t_i - t_{i-1})\}] \cdot \sigma_{i-1} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに, $(\epsilon_c)_i$: 時間 t_i での総クリープ歪

ϵ_{c1} : 時間依存性ダッシュポットに関するクリープ歪

ϵ_{c2} : 時間依存性 Kelvin Solid に関するクリープ歪

ϵ_{c3} : 時間依存性のない Kelvin Solid に関するクリープ歪

そこで以後においては, これまでの理論展開によるクリープ特性モデル化の妥当性を検証するために行なった実験の結果と, このモデルによる解析結果について述べる。実験では, 重錘式の油圧載荷⁴⁾によって載荷期間中一定応力をかけたものと, PC 鋼棒による締めつけ, 締めなおしで載荷応力を時間的に変化させたものを同一載荷材令でスタートさせ, 一定応力下のクリープ試験結果に T.D.L.V. 法による曲線化を行ない, このモデルをもとに載荷応力が変動する場合のコンクリートの変形を解析的に予測し, 実験結果との比較を行なった。実験のある部分については, 本解析法と従来からある解析法との解析結果の比較も試みた。

3. 実験の概要

3.1. 実験条件

実験は, 試験温度20°C, 載荷材令100日のシリーズを中心に, 同一試験温度で載荷材令を変えたシリーズ, 同一載荷材令で試験温度を変えたシリーズの合計3シリーズについて行った。実験条件の詳細は表一に示す通りである。クリープ試験用供試体は, シールの有・無の各条件についてコントロール用供試体を含め, 各載荷方法ごとに1体ずつ用意した。なお, 今回の実験では, 試験環境の湿度コントロールは行なわなかった。

実験のシリーズ	試験温度	載荷材令	供試体のシールの有無	載荷方法	供試体の数 (シール有/無)
I	20°C	100日	有	油圧	4/4
			無	φ17PC鋼棒 φ32PC鋼棒	
II	20°C	30日	有	油圧	3/3
			無	φ17PC鋼棒	
III	60°C	100日	有	油圧	4/4
			無	φ17PC鋼棒 φ32PC鋼棒	

表一 実験条件

3.2. 載荷方法と載荷期間

載荷方法, 載荷期間は, 原則として図一2に示す通りである。なお, シリーズIIでは, φ32 PC 鋼棒による載荷のものは行なっていない。

3.3. コンクリートの使用材料および調合

コンクリートは, 諸外国の PCCV, PCRV 用コンクリートを参考にした。セメントは中庸熱ポルトランドセメント, 細骨材は富士川産の天然川砂, 粗骨材は石灰岩砕石, 混和剤は凝結遅延型分散剤をそれぞれ使用した。なお, 細・粗骨材は, 一定の粒度分布になるようにフルイ分けを行なって使用した。コンクリートの調合は, 表一2に示す通りである。

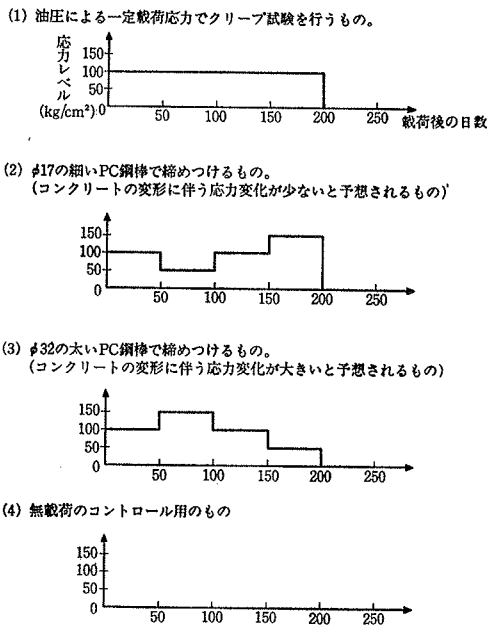


図-2 載荷方法と載荷期間

骨材の最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (ℓ/m³)	セメント (kg/m³)	細骨材 (kg/m³)	粗骨材 (kg/m³)	混和剤
20	10±2.5	4±1	40	41.5	160	400	714	1064	C×0.25%

骨材は、絶乾状態である。

表-2 コンクリートの調合

3.4. 供試体の製作と養生

(1) クリープ試験用供試体の形状は、PC鋼棒による締めつけを行なうため中空円筒形とした。大きさは、外径150 m/m、内径 60 m/m、長さ 400 m/m である。

(2) 供試体の成型には水平打込み型モールドを使用した。なお、供試体内部の φ60 m/m の穴は、あらかじめモールド内に φ60 m/m の鋼管をセットしておいてコンクリートを打込み型枠脱型と同時にその鋼管を抜きとることによって成型した。

(3) コンクリートの練り混ぜは、強制練り 100ℓ ミキサーを使用して行なった。1バッチのコンクリートで一載荷材令・一養生条件のクリープ試験用供試体 4 体と、強度試験用供試体 9 体を成型した。強度試験は、標準水中養生、材令 4 週時と、クリープ試験用供試体と同一養生を行なってクリープ試験の載荷時と除荷時に行なった。

(4) クリープ試験用供試体は、コンクリート打込みの翌日に脱型し、脱型後直ちに供試体外表面の欠陥部（アバタ）にセメントペーストを充填し、ペーストが乾いてから標準水中養生槽に入れて養生を行なった。打設後 4 週間は標準水中養生を行なった。ただし、載荷材令 30 日のシリーズ II の供試体は打設後 3 週間だけ標準水中養生を行なった。

(5) 標準水中養生をおえた供試体のうち、シール養生を行なわない供試体は、直ちに 20°C の恒温室内で気中養生を開始した。残りの供試体は、20°C、80% RH の恒温恒湿室内に一昼夜放置して表面の水分を切ってから、エポキシ樹脂を塗付した。エポキシ樹脂を 3 層塗付した後、外表面は厚さ 0.25 m/m の銅板でシールし、内表面はアルミホイルをエポキシ樹脂で接着してシールを行なった。シール終了後、供試体は 20°C の恒温室に移して養生を行なった。

(6) シリーズ III の 60°C で高温クリープ試験を行なう供試体は、材令 60 日まで 20°C 恒温室で養生し、それ以後 60°C の試験室に移し高温養生を 40 日間行なってから載荷した。

3.5. 歪の測定方法

供試体の歪は、軸方向歪のみを測定した。歪測定は検長 250 m/m のコンプレッションメーターを使用した。今回の実験では、コンクリート用の埋込みゲージは一切使用しなかった。

3.6. 実載荷応力の検出方法

クリープ試験用の個々の供試体に作用する実載荷応力は、ロードセルで検出した。なお、PC鋼棒で載荷したものについては、補助的に、PC鋼棒自身の歪および、PC鋼棒締めつけ端部間の変形の測定も行なった。

4. 実験結果および解析結果との比較

4.1. 強度試験結果

強度試験の結果を表-2 に示す。各値は、3本の平均値である。なお、各シリーズの載荷時、除荷時の強度試験は、クリープ試験用供試体と同一養生を行なった供試体による結果である。今回の実験では、高温の影響による強度低下はほとんどないものと考えられる。弾性係数は、いずれのシリーズともシールした供試体のほうが、シールしないものに比べ大きい。

実験のシリーズ	養生の別	標準養生材令 4 週強度	載荷時強度			除荷時強度		
			試験材令	圧縮強度	弾性係数	試験材令	圧縮強度	弾性係数
I	シール有	585	99	656	4.32	315	695	4.19
	シール無	571	99	676	4.00	315	636	3.69
II	シール有	567	31	578	3.82	296	714	4.19
	シール無	566	31	617	3.83	296	622	3.58
III	シール有	585	102	675	4.00	314	671	4.19
	シール無	601	102	635	3.55	314	655	3.35

試験材令(日)、圧縮強度(kg/cm²)、弾性係数(×10⁵kg/cm²)

表-3 強度試験結果

4.2. 単位クリープ曲線の抽出

4.2.1. (弾性+クリープ) 歪について 実験の各シリーズごとに一定載荷応力下でのクリープ試験の結果を図-3～5 に示す。(弾性+クリープ) 歪は、載荷した供

試体で測定した全歪から、同一養生を行なったコントロール用供試体の歪を差し引いたもので定義した。ただし、シリーズ I, II のシール有の場合は、コントロール用供試体の歪の動きが小さいので載荷した供試体の歪をそのまま (弾性+クリープ) 歪とみなした。なお、シリーズ III のシール有のコントロール用供試体の歪は、シリーズ I, II に比べかなり大きかったが、載荷した供試体の歪の動き、および他の実験結果との比較から判断してシリーズ I, II と同様に載荷した供試体で実測した歪を (弾性+クリープ) 歪とみなした。次節で述べる応力が変動する場合の結果の整理も同様に扱った。

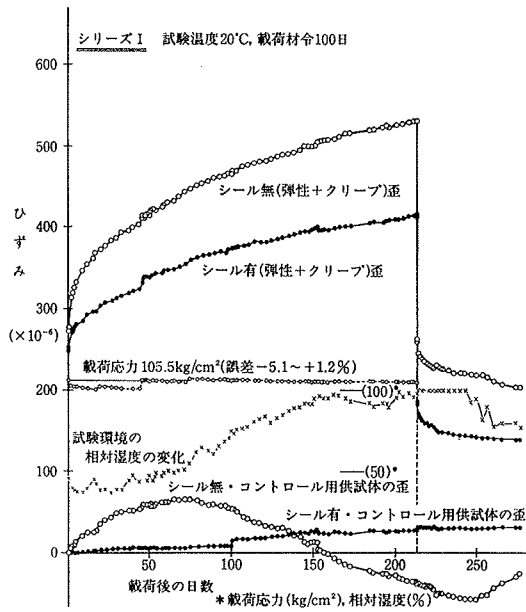


図-3 (弾性+クリープ) 歪 (シリーズ I)

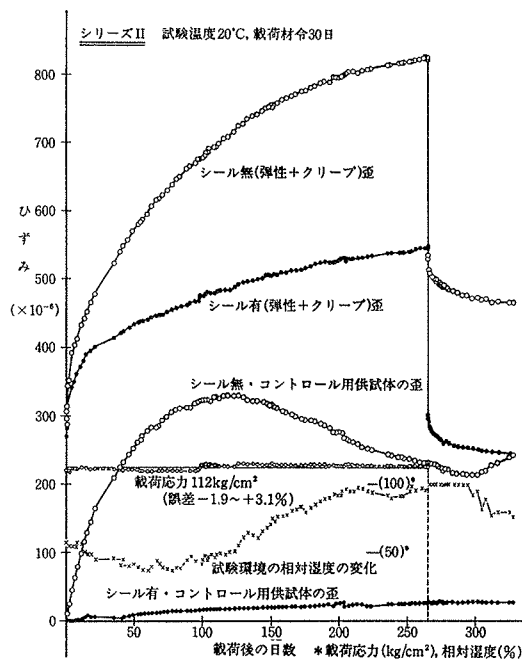


図-4 (弾性+クリープ) 歪 (シリーズ II)

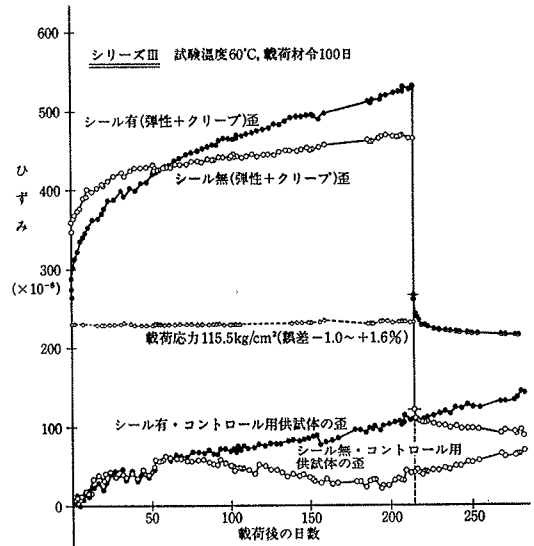


図-5 (弾性+クリープ) 歪 (シリーズ III)

4.2.2. 弾性歪の経時変化について 図-3~5の (弾性+クリープ) 歪曲線からクリープ歪を抽出するためには、弾性歪の経時変化を調べる必要がある。応力が変動する場合の結果も含めて、載荷時・除荷時および PC 鋼棒締めなおし時の各供試体の単位応力当りの弾性歪をコンクリート材令に対してプロットした例が図-6 である。今回の実験の整理ではシリーズ I, II のシール有の単位応力当りの弾性歪は、図-6 中に破線でプロットしたように、次式で材令による変化を考慮した。

$$\epsilon_0 = 2.15 + 0.25 \cdot \exp\{-0.0073(t-30)\} \quad \dots\dots(12)$$

ここに ϵ_0 : 単位応力当りの弾性歪 ($\times 10^{-6} \text{ kg/cm}^2$)

t: コンクリートの材令 (日) { $t \geq 30$ 日}

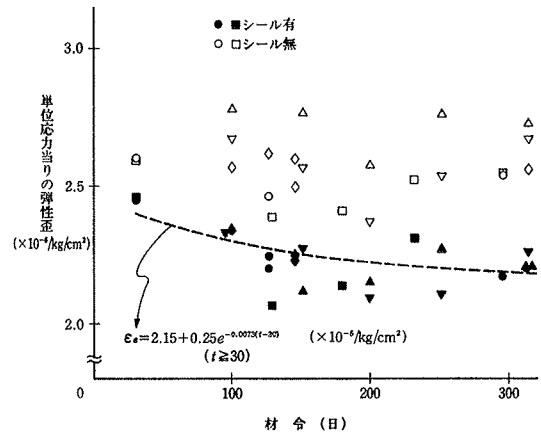


図-6 弾性歪の経時変化 (シリーズ I, II)

その他は、処女載荷時の単位応力当りの弾性歪がその後も変化せず一定に保たれるものと仮定して、クリープ歪の抽出を行なった。

4.2.3. 基本クリープについて シリーズ I, II のシール有の単位クリープ歪 (基本クリープ, basic creep) を図-7 に示した。それぞれの実験値に対し、1章で展

開した T.D.L.V. 理論にもどづく曲線のあてはめと、T.I.L.V. 理論にもとづく曲線のあてはめを行がった。前者の方が载荷中のみならず、除荷後も実験値によく fit していることがわかる。今回の実験では、シリーズ I と II で(7)式の係数 $\alpha_0, \beta_0, \beta_1, \lambda_0, \lambda_1$ は必ずしも一致しなかった。この原因は、コンクリートのバッチの違い、载荷前の養生方法・養生期間の違い等が考えられるが、詳細な検討は将来の課題としたい。ただし、図-7 の中にも示したように、今回の実験の終了後、载荷材令約1年で载荷したコンクリートのクリープ歪は、今回の実験でそれぞれのシリーズについて求めた(7)式の係数をそのまま使用して载荷材令だけを変えて推定した値と非常によく fit している。

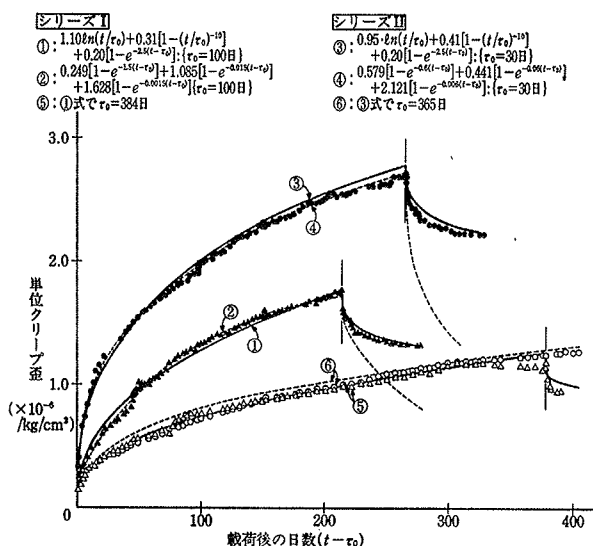


図-7 基本クリープ (シリーズ I, II)

4.2.4. 乾燥クリープについて 次に、シリーズ I, II のシール無のクリープ歪について考える。シール無のクリープ試験のように試験期間中の雰囲気湿度の影響を受ける場合の単位クリープ歪は一般に次のように表わされる⁸⁾。

$$(\text{単位クリープ歪})_{\text{シール無}} = (\text{基本クリープ歪})_{\text{シール有}} + (\text{乾燥クリープ歪}) \dots\dots\dots (13)$$

そこで、図-8 はシリーズ I, II のシール無の乾燥クリープ歪 (drying creep) をプロットしたものである。同図には比較のためそれぞれのシリーズのコントロール用供試体の歪 (乾燥収縮歪) もプロットした。この図より、乾燥クリープ歪は、基本クリープ中のフロー歪と同様に非回復性のクリープ歪と考えることができる。したがって、この乾燥クリープは、後出の高温付加クリープと同様に、T.D.L.V. 理論を拡張したダッシュポットによるモデル化が可能であると考えられる。しかし、今回の実験条件は一般的な湿度一定ではないため、将来湿度一定条件でのデータを蓄積し、乾燥クリープ・乾燥収縮・湿

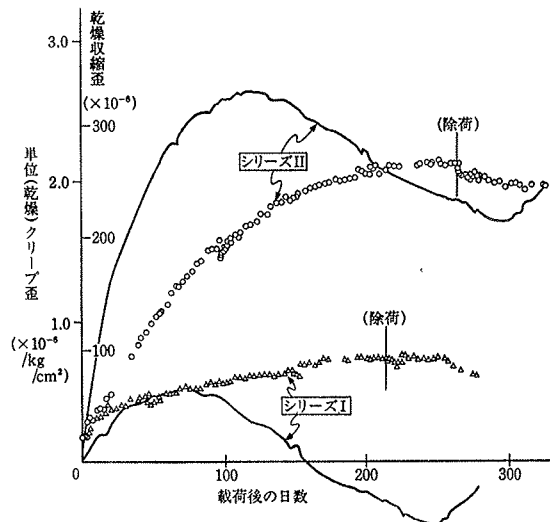


図-8 乾燥クリープ (シリーズ I, II)

度および载荷材令の相関を検討してからモデル化を試みたい。今回、次節の解析では、乾燥クリープが除荷後ほとんど回復しない点に着目してクリープ率法⁹⁾を適用し、T.D.L.V. 法と組合せた。

4.2.5. 高温クリープについて シリーズ III の高温 (60°C) 試験の単位クリープ歪を図-9 に示す。シール有について、同一载荷材令で試験したシリーズ II の常温 (20°C) の結果と比較を行なったものが図-10 である。この図より次のことがわかる。

(1) 今回の実験では高温 (60°C) と常温 (20°C) のクリープ歪の倍率は全試験期間を通じて 2 倍以下であり他の研究報告と比較して小さ目である^{10)~13)}。これは载荷前の高温養生期間の違いが影響しているものと考えられる。同一载荷材令でも载荷前の高温養生期間が長いとクリープ歪は小さくなるようである⁸⁾。高温クリープ歪への载荷前養生期間の影響については、別の機会に報告する予定である。

(2) 常温クリープに対する高温クリープの倍率は、载荷期間を通じて一定ではなく、減少する傾向がある。

(3) 高温クリープと常温クリープの差を温度の影響に

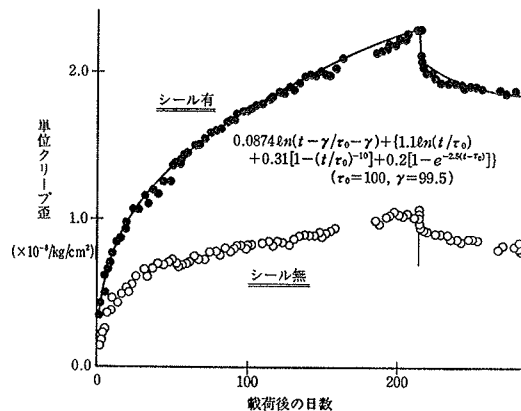


図-9 高温クリープ (シリーズ III)

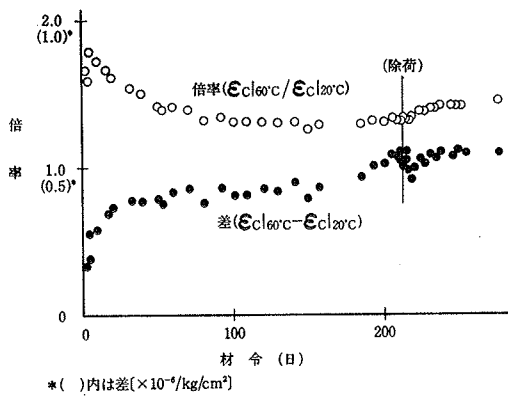


図-10 高温クリープと常温クリープの比較

よる付加クリープ歪とみなすと、この付加歪は載荷後比較的早い時期にその大部分があらわれる傾向がある。さらに、この歪は常温のフロー歪、乾燥クリープ歪と同じように、除荷後もほとんど回復しない非回復性のクリープ歪であると考えられる。このことは、コンクリートのクリープ回復歪は常温であっても高温であってもほとんど変わらないことを意味している¹¹⁾¹²⁾。

(4) (2), (3)より高温クリープ歪を予測するのに次式の

$$\epsilon_{c|高温} = \Phi(T) \cdot \epsilon_{c|常温} \quad \dots\dots(14)$$

形での温度 (T°C) の影響関数 $\Phi(T)$ による常温クリープ歪の倍率で評価するのは簡便ではあるが、コンクリートの性状を正しくとらえてはいないと考える。

(5) 以上の検討より、高温クリープ歪は次式で示すように常温クリープ歪に温度の影響による付加クリープ歪を累加した型で評価する方が合理的であると考え¹⁵⁾。

$$\epsilon_{c|高温} = \epsilon_{c|常温} + \mathcal{L}(T, t_1, t_0) \quad \dots\dots(15)$$

ここに $\mathcal{L}(T, t_1, t_0)$: 温度の影響による付加クリープ歪
次に、 $\mathcal{L}(T, t_1, t_0)$ のモデル化について検討する。上記(3)よりこの付加歪は、非回復性のクリープ歪であること、載荷後比較的早い時期にその効果があらわれることを考慮して、2章で展開した T.D.L.V. 理論を拡張して次のような形で粘性係数を定義したダッシュポットでモデル化した。

$$\zeta(T, t) = \frac{1}{\alpha'_0(T)} \{t - \gamma(T)\} \quad \dots\dots(16)$$

ここに、t: コンクリートの材令 (日)

T: 温度 (T ≥ 20°C)

$\alpha'_0(T)$: 温度 T が一定の場合は定数

$\gamma(T)$: 高温の影響による疑似時間項

$\zeta(20^\circ, t) = 0.0$

以上のモデル化から、高温による付加クリープ歪は常温のフロー歪と同様次式で表わされることになる。

$$\mathcal{L}(T, t_1, t_0) = \alpha'_0(T) \cdot \ln(t'/t'_0) \quad \dots\dots(17)$$

ここに $t' = t - \gamma(T)$

$$t'_0 = t_0 - \gamma(T)$$

この考え方にもとづいて実験データの曲線のあてはめを行なった結果が図-9の実線である。常温の場合と同様に、除荷後を含め全試験期間を通じて実験値に非常によく fit させることができた。

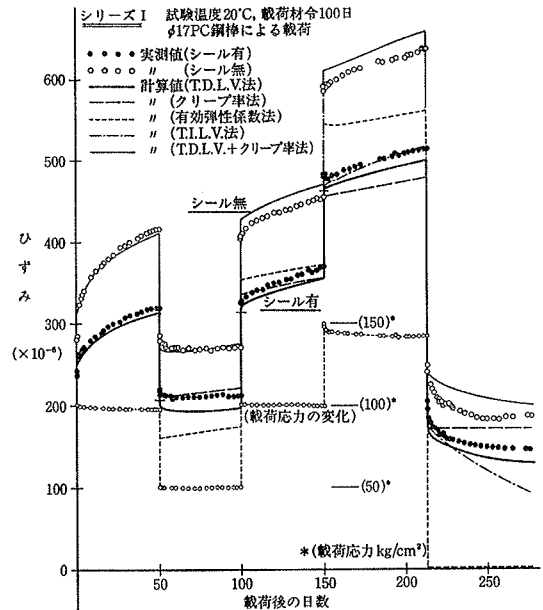


図-11 実験値と解析値の比較 (1)

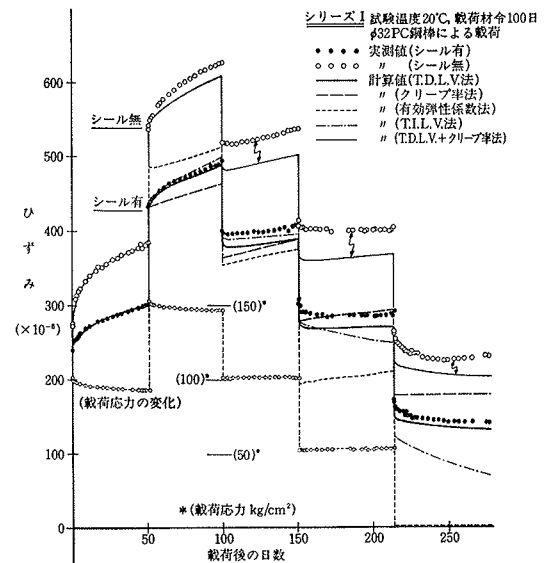


図-12 実験値と解析値の比較 (2)

一方、シリーズIIIのシール無の単位クリープ歪は、図-9よりわかるように、シール有のクリープ歪より小さい。従って、シリーズI, IIのシール無のクリープ歪に適用したような基本クリープと乾燥クリープの和として単位クリープ歪を考えることは不可能であった。高温でシール無の単位クリープ歪が小さくなる原因としては、高温の影響により載荷する以前に供試体中の水分の大部

分がぬけてしまったためであろうと考えられる¹⁴⁾。

4.3. 変動応力下のコンクリートの変形

載荷応力が経時的に変化する場合のコンクリートの長期変形の実測値と、解析結果との比較を、実験の各シリーズ、載荷方法ごとに図-11~15に示した。図中の実測値は、4.2.1.節と同様に測定した全歪からコントロール用供試体の歪を差し引いた（弾性+クリープ）歪を表わすものである。解析ではある特定の時刻の載荷応力の値は、実験で測定した結果をそのまま input data として与えた。シリーズ I, II のシール有については、T.D.L.V. 法による解析値と従来からある解析方法（ここでは、クリープ率法、有効弾性係数法、T.I.L.V. 法の三つの方法を取りあげた。）による解析値の比較を試みた。

図-11~15より次のことがわかる。シール有の実験値と解析値の比較から、ここで紹介した T.D.L.V. 法にもとづく解析値は実験値と非常によく対応している。シール無では、乾燥クリープの部分にクリープ率法を適用しているため、部分的に応力履歴の影響が考慮されていないので、やや誤差が大きくなる傾向がある。なお、シール有・無をとわず、中間的な除荷を生じた場合に、除荷時の単位弾性歪が載荷時のそれと必ずしも同一になっていないので実験値と解析値の差を大きくする傾向がみられる。（特に、シリーズ III の高温試験でその差が大きい。）

図-11~13のシール有についての種々の解析法による解析値と実験値の対応から、T.D.L.V. 法の有効性が一段と明らかになった。ただし、載荷応力の変動量が小さ

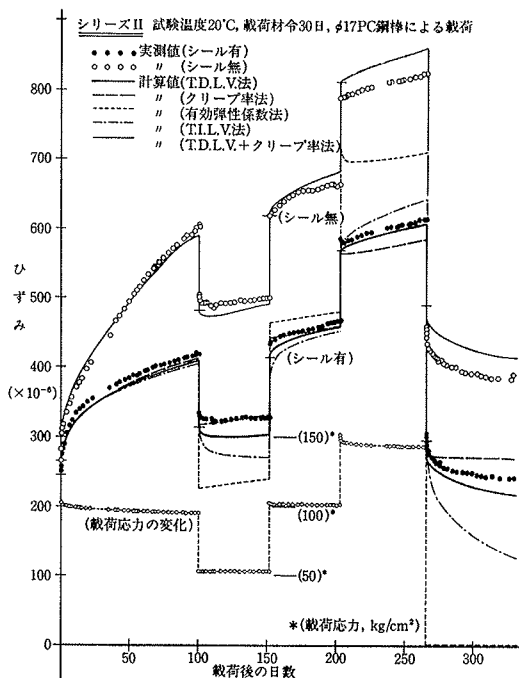


図-13 実験値と解析値の比較 (3)

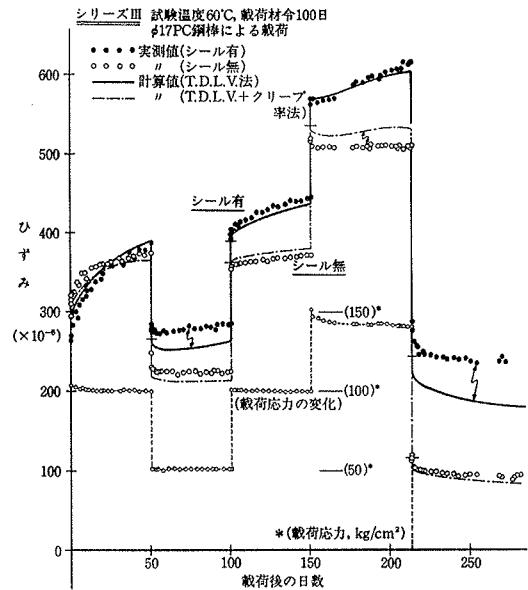


図-14 実験値と解析値の比較 (4)

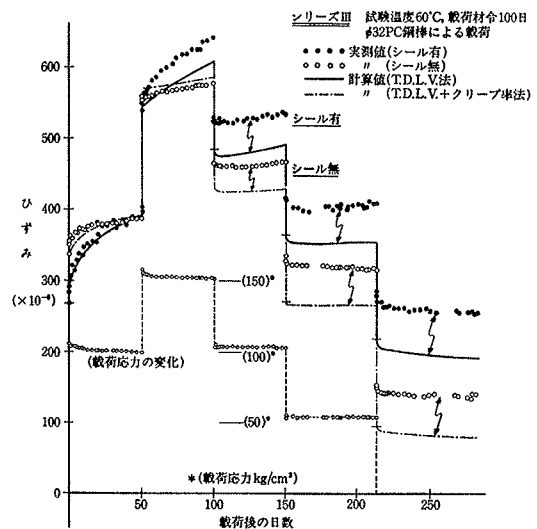


図-15 実験値と解析値の比較 (5)

く、かつ、応力変化が徐々に進行するような場合には、従来からある方法による解析値でもさしつかえないと思われる。

5. まとめ

以上述べた実験結果との比較から、本論で紹介した時間依存性線型粘弾性理論にもとづくコンクリートクリープ特性のモデル化は、シールした状態での基本クリープ、高温クリープについて、載荷中のみならず除荷後の回復特性を含め実験値によく fit させることができ、かつ、応力の変動を伴う場合の変形の解析的予測においても、従来の解析方法に比べ非常によく実験値と対応している

ことを明らかにすることができた。シールのない場合については、今回はクリープ率法と組合せて解析を試み、一応の成果が得られた。しかし、将来的にはシールのない場合も含め統一的に、T.D.L.V.法で扱えるよう検討を進めたい。

なお、高温クリープ試験では、実験上一部シールの良好でない部分があったり、解析においても実験値と解析値の差が常温に比べて大きい箇所があったので、機会があればさらに追加実験を試みたい。

参考文献

- 1) 川口, 他: 有限要素法によるクリープ解析, 大林組技術研究所報, No. 9, (1974)
- 2) 川口, 他: プレストレストコンクリート原子炉圧力容器 (PCR) 構造物に関する研究, VI-1 常温, 一軸・三軸コンクリートクリープ試験, 大林組技術研究所報, No. 12, (1976)
- 3) 川口, 他: 同題, VI-2 PCR のクリープ解析, 大林組技術研究所報, No. 14, (1977)
- 4) 川口, 他: 高強度コンクリートの長期性状に関する研究, その2, 載荷材令・養生方法がクリープに及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和53. 9)
- 5) Gabrielsen, B. L.: Stochastic models for viscoelastic materials.
- 6) Rüschi, H., Jungwirth, D.: コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, (百島訳), 鹿島出版会.
- 7) England, G. L., Illston, J. M.: Methods of Computing Stress in Concrete from a History of Measured Strain, Civil Engineering and Public Works Review, (1965)
- 8) Bazant, Z. P., Panula, L.: Practical prediction of time-dependent deformations of concrete, MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS, No. 65, No. 66, No. 69, (1978)
- 9) Ross, A. D.: Creep of Concrete Under Variable Stress, ACI Journal, (Mar. 1958)
- 10) 河角, 他: 高温下におけるコンクリートのクリープ, 電力中央研究所技術第二研究所報告, No. 72018, (昭和48. 5)
- 11) 大沼, 他: 高温下において三軸圧縮応力を受けるコンクリートのクリープ, 電力中央研究所技術第二研究所報告, No. 378020, (昭和54. 1)
- 12) 岡田, 他: 高温下におけるコンクリートのクリープ, 竹中技術研究報告, No. 17, (1977)
- 13) Hannant, D. J.: Strain behavior of concrete up to 95°C under compressive stresses, Conference on PCPV, (1967)
- 14) 岡島, 他: 複合応力を受けるコンクリートのクリープ, 日本建築学会論文報告集, No. 242, (昭和51. 4)
- 15) Illston, J. M., Sanders, P. D.: Characteristics and prediction of creep of a saturated mortar under variable temperature, Magazine of Concrete Research, vol. 26, No. 88, (1974)