

# 論文 高強度コンクリートの引張クリープ予測に関する実験的検討

熊野 知司<sup>\*1</sup>・井上 正一<sup>\*2</sup>・黒田 保<sup>\*3</sup>・満田 恭輝<sup>\*4</sup>

**要旨:**コンクリートの引張クリープは、構造物のひび割れの発生に直接影響する重要な材料物性である。そこで本研究では、高強度コンクリートを対象に持続引張応力がコンクリートの微細構造に与える影響を観察し、クリープのメカニズムを考察した。その結果、普通強度のコンクリートと同様に、毛細管空隙を起点とした微細ひび割れの発生および進展が高強度コンクリートの引張クリープの重要なメカニズムになっていることを明らかにした。さらに、先に著者らが普通強度のコンクリートに対して構築した引張クリープの予測手法が、高強度コンクリートのクリープ予測に対しても適用可能であることを示した。

**キーワード:**高強度コンクリート、引張クリープ、毛細管空隙、微細ひび割れ

## 1. はじめに

コンクリートのクリープは、圧縮応力下の場合を中心に古くから研究が行なわれ、設計に用いる予測式も提案されている<sup>1)</sup>。一方、引張持続応力下におけるクリープは、構造物のひび割れの発生に直接影響する重要な材料物性であるにもかかわらず研究はきわめて少ない。従来からの設計では、Davis-Granville の法則、すなわち、引張クリープと圧縮クリープは同一であるとして、圧縮のクリープ特性がそのまま引張応力下に適用されてきた。しかし、最近の研究によると、圧縮と引張持続応力下のクリープひずみは異なること、それは圧縮と引張におけるクリープのメカニズムの相違によると考えられること、等が指摘されている<sup>2)3)</sup>。したがって、引張応力下におけるクリープ特性を把握し、予測手法を確立するためには、メカニズムに立脚した検討を行うことが重要であると考えられる。

このような観点から、著者らは、水セメント比（以下、W/Cと略記する）50%程度の普通強度のコンクリートに対して微細構造の変化に基づいた引張クリープの予測手法を構築した<sup>4)</sup>。本研究では、すでに構築した予測手法を高強度コンク

リートに拡張することを目的として、引張持続応力が、W/Cの小さいコンクリートの微細構造に与える影響を水銀圧入式ポロシメータで観察するとともに、提案した予測手法の高強度コンクリートへの適用性の検討を行った。本論文は、これら一連の検討結果について報告するものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料とコンクリートの示方配合

表-1にコンクリートの示方配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメント（密度3.15g/cm<sup>3</sup>、比表面積3150cm<sup>2</sup>/g）を使用した。粗骨材には硬質砂岩碎石（表乾密度2.69g/cm<sup>3</sup>、F.M.6.51）を、細骨材には陸砂と碎砂の混合砂（表乾密度2.67g/cm<sup>3</sup>、F.M.2.79）を使用した。

表-1 コンクリートの示方配合

セメント (mm)	G <sub>max</sub> (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 C×%
						W	C	S	G	
普通	20	8±1	4.5±1	50	44.5	157	314	821	1041	0.25*
		(7.0-)		40	43.0	165	412	756	1011	
		60±5	2.5±1	35	46.0	170	486	796	950	1.0**
				25	40.0	170	680	630	950	0.4**

\*AE減水剤標準形

\*\*ポリカルボン酸系高性能AE減水剤標準形

\*1 清水建設(株) 土木本部技術第一部 工博(正会員)

\*2 鳥取大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

\*3 鳥取大学助手 工学部土木工学科 工修(正会員)

\*4 鳥取大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

## 2.2 供試体の作製

コンクリートの練混ぜは、パン型強制練りミキサ（容量 100 ℥）を用い、1 バッチあたりの練混ぜ量は 70 ℥とした。供試体は  $10 \times 10 \times 40$  cm の角柱体で、1 実験要因ごとに載荷用 3 本と比較のための無載荷用 3 本の計 6 本を作製し、同時に強度試験用の  $\phi 10 \times 20$  cm 円柱供試体も作製した。これらの供試体は、翌日脱型し、 $20^{\circ}\text{C}$  で 24 時間の水中養生を行った。その後、供試体の表面の水分をウェスで軽く拭き取り、供試体内の湿度を一定とすることを目的に、表面をアルミ粘着テープでシールした。アルミ粘着テープでシールすることにより材齢 28 日まで供試体重量の変化がないことを確認している。供試体は、載荷開始まで  $20^{\circ}\text{C}$  の恒温室内に保存した。

## 2.3 実験方法

表-2 に実験計画を示す。W/C は 50 ~ 25% の 4 水準とした。載荷応力は、 $1.2\text{N/mm}^2$  とし、水セメント比 50% の場合には、0.8 と  $1.6\text{N/mm}^2$  の載荷も行った。載荷時材齢は全て 3 日とした。引張クリープ試験は 3 台のレバー重錘式引張クリープ試験機（てこ比 10 : 1）を用いて行った。ひずみの測定はホイットモア型ひずみ計（基長 10 in, 檜長 1/1000 mm）により行い、測定頻度は、載荷後 3 日までは 12 時間ごとに、その後は 24 時間ごととした。除荷は、載荷期間 0 日（載荷直後に除荷）、7 日および 28 日で行った。除荷した供試体および無載荷供試体は長手方向に 4 分割し、それぞれの中心部分を粉碎して 2.5 ~ 5 mm のものを試料として採取した。これらの試料は直ちにアセトンに浸漬し、48 時間の D-乾燥を行った後、水銀圧入法による細孔直径分布の測定に供した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 引張クリープひずみと細孔容積の変化

表-3 に、用いたコンクリートのフレッシュ時および硬化後の試験結果を示す。

図-1 および図-2 に引張クリープひずみの測定結果を示す。引張クリープひずみは、載荷供試体のひずみを同一環境条件に置いた無載荷供試体

表-2 実験計画

水セメント比 (%)	載荷時材齢 (日)	載荷応力 ( $\text{N/mm}^2$ )	載荷応力 / 強度比	載荷期間 (日)	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	湿度 (%)
50	3	0.8	0.29	0,7,28	20	100 (シール)
		1.2	0.52			
		1.6	0.63			
40			0.55			
35		1.2	0.37			
25			0.26			

表-3 フレッシュ時および硬化後の試験結果

W/C (%)	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	試験材齢 (日)	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	圧縮ヤング係数 (kN/mm $^2$ )	割裂引張強度 (N/mm $^2$ )
50	7.5	3.8	20.0	31	44.4	38.1	3.61
40	8.5	4.6	25.0	31	50.0	38.3	3.37
35	59.0	2.8	26.5	31	68.2	38.3	3.94
25	60.0	1.9	27.5	21	76.7	42.3	5.20

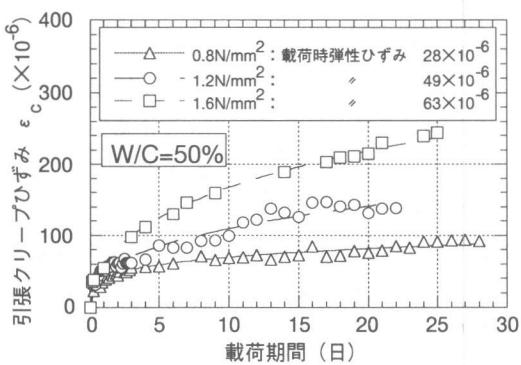


図-1 引張クリープひずみ測定結果

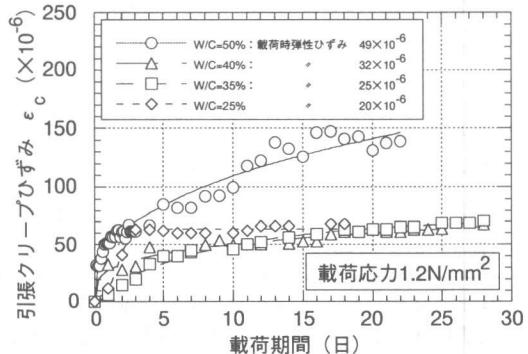


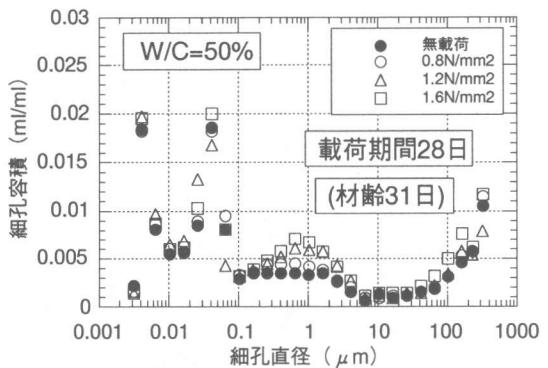
図-2 引張クリープひずみ測定結果

のひずみ（自己収縮によるひずみを含んでいると思われる）で補正することによって求めた。図一より、載荷応力の影響に関しては、応力が大きくなるに従って引張クリープひずみは大きくなることがわかる。一方、図一より、水セメント比の影響に関しては、W/C=25～40%の範囲では引張クリープに明確な差異は見られず、特に載荷初期に関しては、W/C=25%のクリープひずみがW/C=35%および40%よりも大きくなるという現象が見られた。

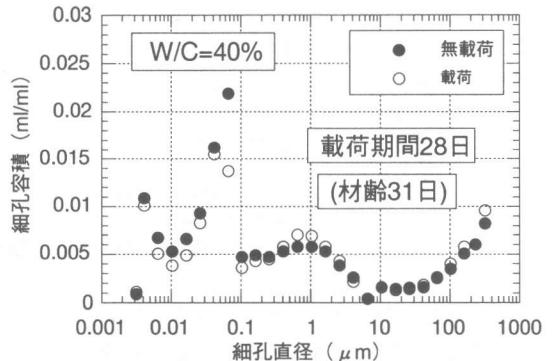
図一に、W/C=50%の場合の載荷期間28日における無載荷および載荷供試体の細孔直径分布の測定結果を示す。図より、引張持続応力を作用させた供試体の細孔直径分布は、0.1～5 μmの範囲の細孔容積が無載荷の場合よりも大きくなる傾向にあり、載荷応力が大きくなるに従って、より顕著になっていることがわかる。このことより、引張持続応力の作用は細孔直径0.1～5 μmの範囲の細孔容積を増加させるような影響を与えていたと考えられる。細孔直径0.1～5 μmの空隙は、一般に骨材まわりの遷移帯に多く存在する毛細管空隙で、微細ひび割れ等の発生源と考えられること<sup>5)</sup>、引張クリープ試験において、載荷応力比を増加させるとAEカウント数が増加し、微細ひび割れの発生が多くなるとする報告<sup>6)</sup>があること等を考え併せると、引張持続応力が作用することによる0.1～5 μmの範囲の細孔容積の増加は、毛細管空隙を起点とした微細ひび割れの発生および進展によるものである可能性が高い。

図一～図六にW/C=40～25%における細孔直径分布の測定結果を示す。各図より、W/C=50%の場合と同様に、引張持続応力を作用させた供試体は、細孔直径0.1～5 μmの範囲の細孔容積が無載荷供試体のそれよりも大きくなる傾向はあるが、W/Cが小さくなるにつれてグラフ上ではその差異が明確ではなくなっている。そこで、すべての実験水準に対して、以下に詳細な検討を行った。

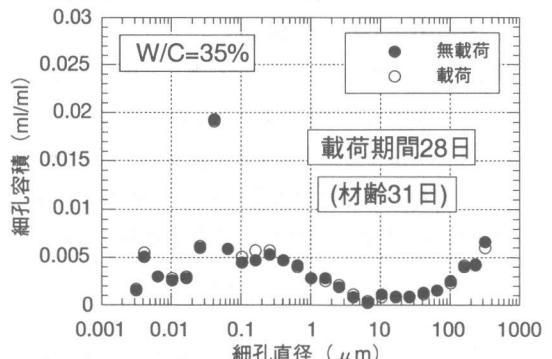
まず、水銀圧入式ポロシメータにより測定された細孔直径を分布の形状的特徴により以下のようないくつかの範囲に分ける。



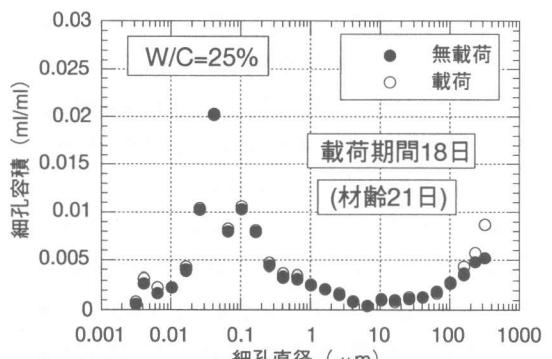
図一 細孔直径分布測定結果



図二 細孔直径分布測定結果



図三 細孔直径分布測定結果



図四 細孔直径分布測定結果

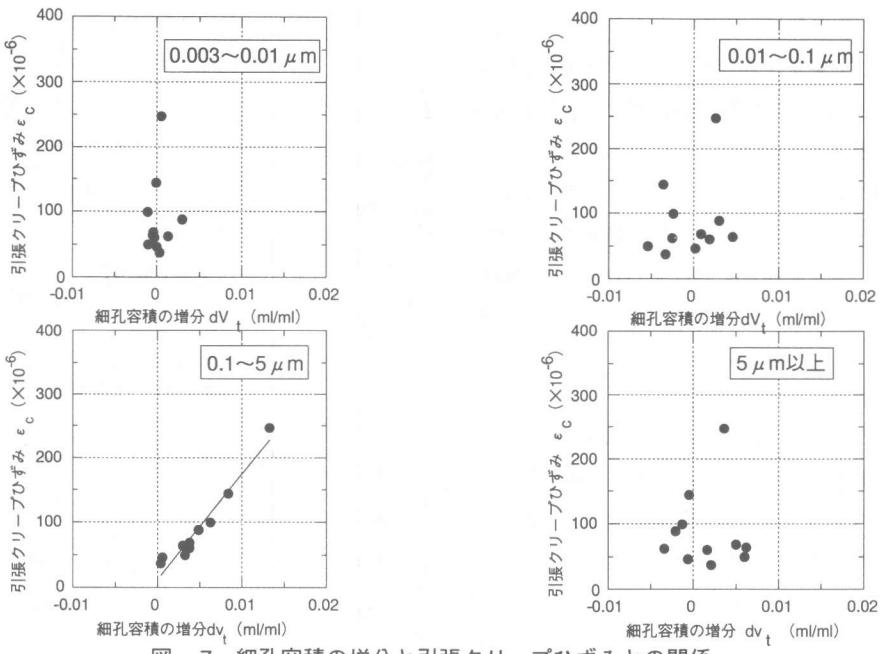


図-7 細孔容積の増分と引張クリープひずみとの関係

- (i) 0.005  $\mu\text{m}$ 程度に細孔容積のピークが存在する細孔直径が0.003~0.01  $\mu\text{m}$ の範囲
- (ii) 0.03~0.07  $\mu\text{m}$ 程度にピークを持つ細孔直径が0.01~0.1  $\mu\text{m}$ の範囲
- (iii) 分布形状がなだらかになり細孔容積が一度消失する細孔直径が0.1~5  $\mu\text{m}$ の範囲
- (iv) 再び細孔容積が増加する5  $\mu\text{m}$ 以上の範囲  
それぞれの範囲に対して、引張持続応力による細孔容積の増分  $dV_{t-t'}$  を下式で定義した。

$$dV_{t-t'} = V_{c,t-t'} - V_{n,t-t'} - dV_{t'} \quad (1)$$

ここに、

$V_{c,t-t'}$ : 材齢  $t'$  から  $t$  まで引張持続応力が作用した供試体の細孔容積

$V_{n,t-t'}$ : 材齢  $t'$  から  $t$  まで同じ環境条件に置いた無載荷供試体の細孔容積

$dV_{t'}$ : 材齢  $t'$  で載荷し、その直後に除荷した供試体と材齢  $t'$  における無載荷供試体との細孔容積の差分

図-7に細孔容積の増分  $dV_{t-t'}$  と引張クリープひずみとの関係を示す。細孔直径が0.003~0.01  $\mu\text{m}$ , 0.01~0.1  $\mu\text{m}$ および5  $\mu\text{m}$ 以上の範囲においては、プロット点の関係は明確では無いが、0.1~5  $\mu\text{m}$ の範囲において、W/Cが小さい

場合も含めて、細孔容積の増分  $dV_{t-t'}$  と引張クリープひずみとの間に高い相関（相関係数  $r=0.971$ ）が認められた。このことより、毛細管空隙からの微細ひび割れの発生および進展であると考えられる細孔容積の増加が、W/Cが小さい場合も含め、コンクリートの引張クリープの重要なメカニズムであると考えられる。

なお、引張クリープには細孔直径0.1~5  $\mu\text{m}$ の範囲の細孔容積の挙動が重要であるとすると、図-2において引張クリープひずみがW/C=35%, 40%よりもW/C=25%の方が大きくなっている理由としては以下のように考えられる。

図-8にW/C=50%, 35%および25%の載荷開始時（材齢3日）の細孔直径分布を示す。図より、0.05  $\mu\text{m}$ 以下の範囲ではW/Cが小さくなるにつれて細孔容積は減少し、組織が緻密になっていることがうかがえるが、引張クリープと関係があると考えられる0.1~5  $\mu\text{m}$ の範囲では、W/C=35%よりもW/C=25%の方が細孔容積が多く、潜在的に微細ひび割れの発生源と思われる毛細管空隙が多いことを示している。このことが、W/C=25%の方が引張クリープひずみが大きくなった原因であると考えられる。0.1~5  $\mu\text{m}$ の細孔容積が大き

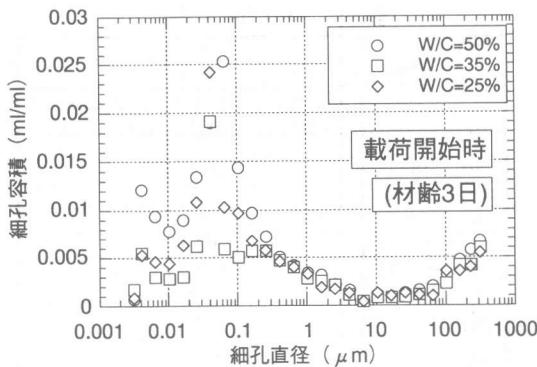


図-8 細孔直径分布測定結果

くなった理由は明確でないが、コンクリートの打込みから載荷開始までの間の養生中の環境条件の影響が一因となっているものと推察される。

### 3.2 引張クリープの予測手法の適用性

$W/C=50\%$  のコンクリートを基に構築した引張クリープの予測手法が、 $W/C$  が小さな高強度コンクリートに対しても適用できるか否かを検討する。この手法は、持続引張応力を受けたコンクリートの微細構造の変化の観察結果に基づいて、メカニズム面から構築したものである。その概要を以下に示す（詳細は文献<sup>4)</sup>を参考にされたい）。

図-9にモデル図を示す。コンクリートを3種類の長軸半径を持つ楕円状空隙と弾性体骨格構造から成る2相系材料であるとする。このモデルに一軸持続引張応力が作用する際に、楕円状空隙のうち毛細管空隙である $a_2$ の長軸半径を持つ空隙からひび割れが進展し長軸半径が $A_2$ になるとする。その時のひずみの増加分、すなわち、引張クリープひずみ  $\varepsilon_c(t-t')$  はエネルギーの釣合いを考えることによって求まり、式(2)で表される。

$$\varepsilon_c(t-t') = \frac{\pi[A_2(t-t')^2 - a_2^2]\rho_2(t)}{E'} \sigma_y \quad (2)$$

ここに、 $E'$ ：弾性体骨格構造のヤング係数

式(2)の構成則には毛細管空隙の数の材齢に伴う変化  $\rho_2(t)$  とひび割れ長さの載荷開始からの時間に伴う変化  $A_2(t-t')$  がある。本手法では、 $\rho_2(t)$  を無載荷供試体の細孔直径分布の  $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$  の細孔容積の実測値から推定する。また、 $A_2(t-t')$  は、図-10に示すように、微細ひび割れが骨材や気泡の影

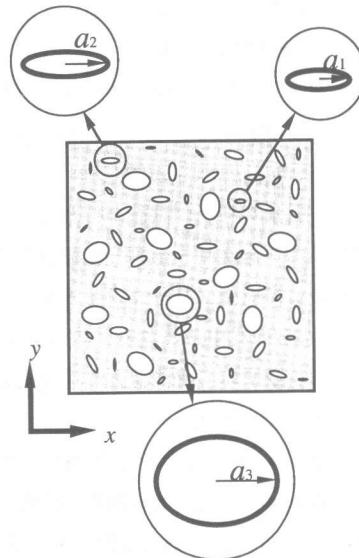


図-9 モデル図

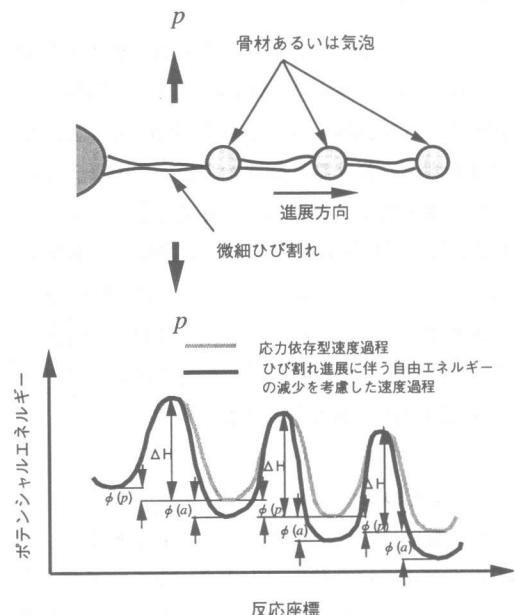


図-10 応力依存型速度過程の概念

響によって停止、進展を繰返す様子を応力依存型速度過程であるとみなし、式(3)および式(4)で表現している。

$$A_2(t-t') = \left[ \left( 1 + \frac{1}{n_2 k T} \right) \beta(\alpha p)^{\frac{1}{n_1 k T}} (2\eta)^{\frac{-1}{n_2 k T}} (t-t') \right]^{\frac{1}{1+\frac{1}{n_2 k T}}} + a_2 \quad (3)$$

$$\beta = C \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F}{kT}\right) \quad (4)$$

ここで、 $k$ ：ボルツマン定数 ( $\text{J}/\text{K}$ )

$h$ : プランク定数 ( $J \cdot s$ )

$T$ : 絶対温度 ( $^{\circ}K$ )

$\Delta F$ : 活性化自由エネルギー (J)

$\gamma$ : 表面エネルギー ( $J/m^2$ )

$a, n_1, n_2, C$ : 定数

すなわち、引張クリープ試験を行わなくても数材齢にわたってコンクリート細孔直径分布を測定することによって引張クリープひずみを推定できる。なお、これらの式中に表れる定数はW/C=50%の引張クリープひずみの実測値より逆解析によって決定したものである<sup>4)</sup>。

表-4にW/C=40%, 35%および25%に対する入力値の一覧を示す。 $\rho_2(t)$ は無載荷供試体の細孔直径分布の0.1~5  $\mu m$ の細孔容積の実測値から、 $E'$ は、細孔容積とヤング係数の実測値からそれ推定した<sup>4)</sup>。

図-11に引張クリープひずみの実測値と計算値の比較を示す。図より、W/C=40%および35%は、実測値と計算値はよく一致した。W/C=25%に関しては実測値における載荷開始直後の急激なクリープひずみの増加を計算値では追従できていないが載荷期間7日以降においては、実測値と計算値は概ね一致している。これらのことより、W/C=50%の普通強度のコンクリートを基に構築した引張クリープ予測手法がW/Cの低い高強度コンクリートにも適用可能であるといえる。

#### 4.まとめ

本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- (1) W/Cが小さい高強度コンクリートを含めて、持続引張応力を受けたコンクリートは、細孔直径0.1~5  $\mu m$ の範囲の細孔容積が増加する。この増加は毛細管空隙を起点とした微細ひび割れの発生および進展と考えられる。
- (2) 細孔直径 0.1~5  $\mu m$  の細孔容積の増分と引張クリープひずみとの間に相関関係が見られる。
- (3) 毛細管空隙からのひび割れの進展をモデル化し、W/C=50%の普通コンクリートに対して構築した引張クリープ予測手法は、W/Cが小さい高強度コンクリートに対しても適用可能である。

表-4 入力値の一覧

	W/C (%)		
	40	35	25
$\rho_2(t)$	$682t + 161591$ 4.993 $t$	$6638t + 48233$ 6.140 $t$	$9247t + 47976$ 5.753 $t$
$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )		1.2	
$a_2$ (mm)		0.0792	
$\gamma^2$		112	
$E'$ (kN/mm <sup>2</sup> )	58.7	58.1	58.5
$\alpha$ (J/N/m <sup>2</sup> )		$6.385 \times 10^{-8}$	
$\beta$ (m/day)		$7.677 \times 10^{-8}$	
$\gamma$ (J/m <sup>2</sup> )		5.8390	
$\frac{1}{n_1 k T}$ (1/J)		0.4540	
$\frac{1}{n_2 k T}$ (1/J)		0.8797	

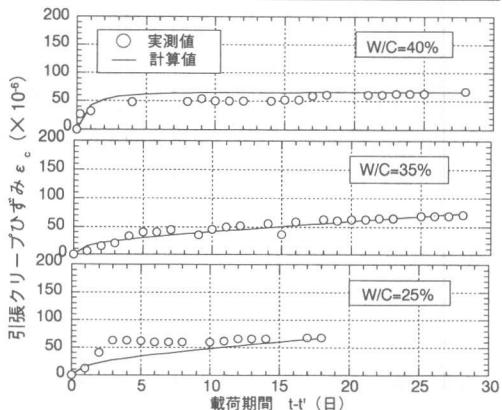


図-11 実測値と計算値の比較

#### 参考文献

- 1) 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.5-13, 1993
- 2) 森本博昭ほか：若材令コンクリートの圧縮および引張クリープ特性、セメント・コンクリート論文集、No.47, pp.356-359, 1993
- 3) 服部達也ほか：若材令コンクリートにおける圧縮・引張クリープ挙動の比較、土木学会第52回年次学術講演概要集/V, pp.1038-1039, 1997
- 4) 熊野知司ほか：コンクリートの空隙構造の変化に基づく引張クリープ予測モデルに関する研究、土木学会論文集、No.613/V-42, pp.121-135, 1999
- 5) 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響、コンクリート工学、Vol.33, pp.5-17, 1995
- 6) 田中敏継ほか：コンクリートの引張クリープ機構に関する一考察、土木学会第42回年次学術講演概要集/V, pp.358-359, 1987