

# 論文 若材齢コンクリートのクリープの材齢および載荷応力依存性

平本昌生\*1・入矢桂史郎\*1・グプタ スプラティック\*2・梅原秀哲\*3

要旨：若材齢コンクリートの圧縮および引張クリープ試験を、載荷応力と載荷材齢に着目して行った。その結果、圧縮クリープにおいては載荷応力とクリープひずみの線形性が応力強度比 50%までは成り立つが、引張クリープにおいては低応力強度比でも成り立たないことが明らかとなった。載荷材齢の影響は、圧縮クリープにおいては載荷材齢に依存し材齢とともに小さくなるが、引張クリープにおいては載荷材齢にほとんど依存しない結果を得た。そして、上記の結果をもとに、精度良くクリープを推定できるクリープモデルの構築を行った。

キーワード：若材齢コンクリート、クリープひずみ、specific creep、応力強度比

## 1. はじめに

コンクリートのクリープ挙動については多くの研究がなされているが、そのほとんどが材齢 28 日以降に圧縮応力が載荷された場合を対象としており、若材齢コンクリートの圧縮および引張クリープ挙動については、ほとんど研究がなされていないのが現状である。

筆者らは、過去に若材齢コンクリートの圧縮および引張クリープ試験を行い、材齢、温度、配合がクリープに与える影響について検討を行った[1]。そして、応力強度比(=載荷応力/強度)30%以下での載荷応力とクリープひずみの線形性を確認し、その範囲内で各種パラメータの影響を求めた。若材齢コンクリートのクリープ挙動の把握は、マスコンクリートの水和反応熱によるひび割れを予測する上で重要である。マスコンクリートは水和反応熱により打設直後から温度が上昇し、材齢 2~3 日でピークとなり、その後下降する。また応力はコンクリートの拘束の程度に影響されるが、ほとんどの場合、温度上昇時には圧縮応力が生じ、その後の温度下降と共に引張応力となる。この引張応力がコンクリートの引張強度に近づけばひび割れが発生する。したがって、温度応力解析においてクリープ挙動を考慮するには、破壊を生じさせる程の高い応力強度比でのクリープ挙動を把握することが重要である。

本研究では、応力強度比、載荷材齢をパラメータとして、若材齢コンクリートの圧縮および引張クリープ試験を行い、載荷応力とクリープひずみの線形性、載荷材齢の影響について定量的評価を試みた。さらに圧縮と引張という応力の方向の違いがクリープ挙動に与える影響について検討した。そしてその結果をもとに若材齢コンクリートのクリープ推定式の構築を行った。

## 2. 配合

使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメント、碎石( $\gamma=2.65, F.M=6.67$ )、山砂( $\gamma=2.55, F.M=2.82$ )を用いた表 1 に示す配合の AE コンクリートである。

表 1 配合表

Sl (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	S	G	減水剤	AE剤
8.0	4.0	55	44.6	172	313	784	1015	0.063	0.013

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

\*2 名古屋工業大学助手 工学部社会開発工学科 (正会員)

\*3 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 Ph.D (正会員)

### 3. 試験方法

圧縮クリープ試験にはφ 15×30cm の円柱供試体を用い、供試体内部の水分を逃がさないように薄い鋼板で側面を覆い、図 1 に示す油圧式クリープ試験機により、温度 30℃ で試験を行った。

引張クリープ試験にはφ 10×20cm の円柱供試体を用い、水分の蒸発を防ぐため側面をアルミテープで覆い、既報[2]と同じて式クリープ試験機により、温度 30℃ で試験を行った。

両者とも供試体内部に埋込み型ひずみ計および熱電対を埋込み、温度 30℃ で供試体内部の水分の蒸発を防いで養生した。荷材齢は圧縮クリープ試験は 1, 3, 5 日、引張クリープ試験は 3, 5, 7 日で、いずれも荷材期間は 5 日とした。応力強度比は圧縮クリープ試験は 10 ~ 70%、引張クリープ試験は 20 ~ 60% とした。クリープひずみの算出は、荷材用供試体のひずみから無荷材用供試体のひずみを差し引いて行った。

### 4. 圧縮クリープ試験結果

#### 4. 1 応力強度比の影響

図 2 に荷材齢 1 日の応力強度比の影響を示す。specific creep とは、クリープひずみを荷材応力で除したもので、単位クリープともいわれる。クリープ挙動をクリープひずみそのものではなく specific creep で表す意義は、荷材応力とクリープひずみの線形性が成り立つならば、specific creep は同一となり、応力の影響を無次元化できることにある。

図より、応力強度比 50% 以下の specific creep 挙動はほぼ同じであり、この範囲では荷材応力とクリープひずみの線形性が成り立っている。しかし、応力強度比 70% の specific creep は他の応力強度比の結果の約 2.7 倍とかなり大きく、急激にクリープが増加している。

図 3 に荷材齢 3 日の結果を示す。図より、荷材齢 1 日と同様に、応力強度比 50% 以下は specific creep 挙動は同一で線形性が成り立っている。また、応力強度比 70% では他の応力強度比の結果の約 1.8 倍であり、荷材齢 1 日と比べて 50% 以下での結果との差が小さい。これは、材齢 1 日~3 日での強度発現により、コンクリート中に生じるマイクロクラックの発生の程度が少なくなったものと考えられる。

図 4 に荷材齢 5 日の結果を示す。図より、応力強度比 52% の結果は 18, 32, 38% と比べてやや

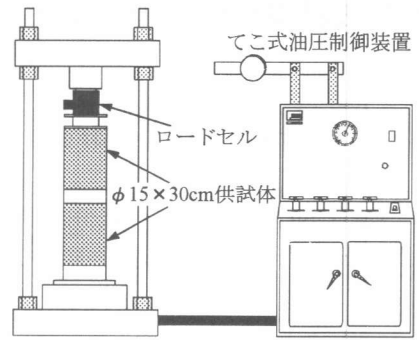


図 1 圧縮クリープ試験機

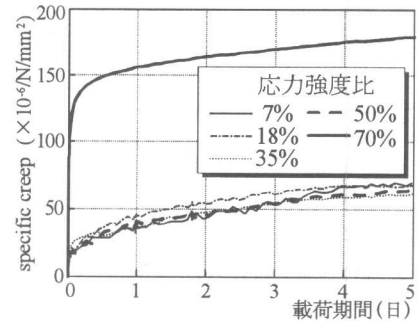


図 2 応力強度比の影響(荷材材齢 1 日)

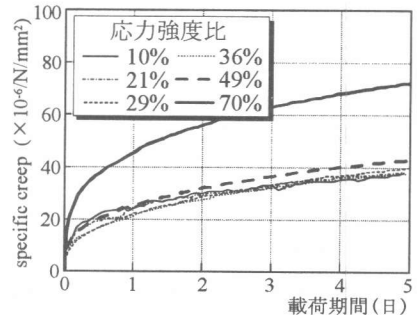


図 3 応力強度比の影響(荷材材齢 3 日)

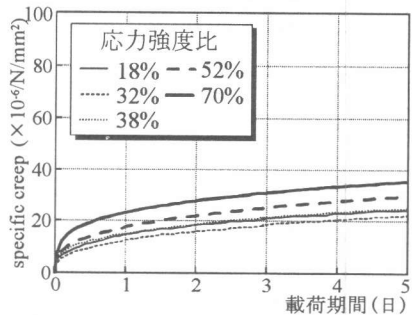


図 4 応力強度比の影響(荷材材齢 5 日)

大きくなっており、応力強度比 50%以上で specific creep が大きくなるのがわかる。載荷材齢 1、3 日と同様、応力強度比 50%以下では載荷応力とクリープひずみの線形性が成り立っており、70%での specific creep は 50%以下の約 1.5 倍と、載荷材齢 3 日と比べて 50%以下での結果との差がさらに小さくなっている。これは材齢 3 日～5 日における強度発現の影響が大きいためと思われる。

図 5 に応力強度比と最終 specific creep の関係を示す。クリープ試験の載荷期間は 5 日のため、最終 specific creep は載荷期間 5 日の specific creep の値とした。図より、いずれの載荷材齢でも応力強度比 50%以上で specific creep が増加しているが、その程度は若材齢ほど大きいといえる。

#### 4. 2 載荷材齢の影響

図 6 に載荷材齢と最終 specific creep の関係を示す。図より、載荷材齢が大きいほど最終 specific creep が小さくなっている。これは、材齢が進むほどコンクリート強度が増進していくためと思われる。載荷材齢 1 日～3 日にかけての応力強度比 70%の specific creep の減少が著しいのは、この期間の強度発現によるものと思われる。

### 5. 引張クリープ試験結果

#### 5. 1 応力強度比の影響

図 7 に載荷材齢 3 日の応力強度比の影響を示す。引張の specific creep は圧縮と異なり、応力強度比に依存して specific creep が増加する結果となった。応力強度比 20%では、載荷直後からほとんど specific creep の増加がない。しかし 40、60%では時間経過に伴って、specific creep が漸増している。20、40、60%の specific creep は同一でなく、載荷応力とクリープひずみの線形性は成り立っていない。図 8 に載荷材齢 5 日の結果を示す。載荷材齢 3 日と同様に、応力強度比に依存して、specific creep が増加している。図 9 に載荷材齢 7 日の応力強度比の影響を示す。応力強度比 20%と 40%の specific creep はかなり近く、材齢の進行とともに線形性が成り立っていくと推測される。これは材齢が進むにつれてコンクリートの内部構造が安定してくるためと考えられる。図 10 に応力強度比と最終 specific creep の関係を示

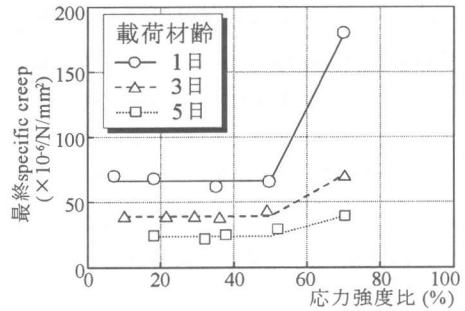


図 5 応力強度比と最終 specific creep の関係

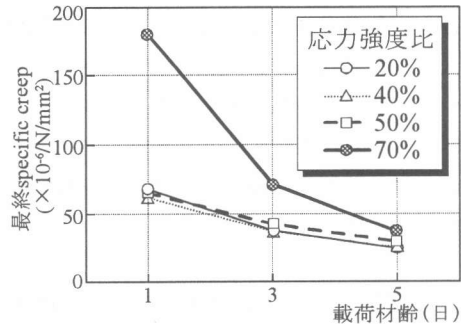


図 6 載荷材齢と最終 specific creep の関係

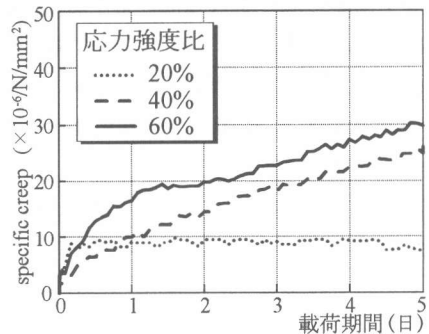


図 7 応力強度比の影響(載荷材齢 3 日)

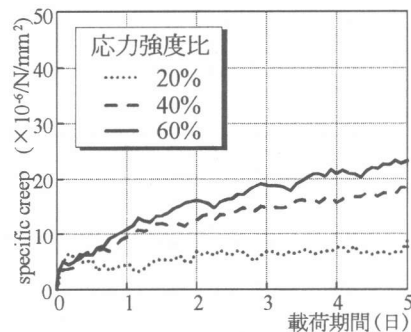


図 8 応力強度比の影響(載荷材齢 5 日)

す。引張クリープは圧縮クリープと異なり、載荷材齢7日以前は **specific creep** は一致せず、載荷応力とクリープひずみの線形性が応力強度比20%以上は成り立たないといえる。したがって、若材齢時の引張クリープ挙動を、圧縮クリープ結果の様に **specific creep** を用いて表すより、クリープひずみそのもので表す方が直接的かつ有効であると思われる。

### 5. 2 載荷材齢の影響

図11に載荷材齢とクリープひずみの関係を示す。応力強度比毎に、載荷材齢に関係なく引張クリープひずみがほぼ等しいことがわかる。これより、引張クリープ推定式をクリープひずみを用いて表わせば、載荷材齢のパラメータを除いた式が構築できると思われる。

### 6. 圧縮クリープと引張クリープの比較

圧縮および引張のクリープ試験結果をもとに、クリープ挙動の比較を行った。まず載荷材齢3日で  $1\text{N/mm}^2$  を載荷したときのクリープひずみの比較を図12に示す。図より明らかに圧縮クリープひずみの方が大きい。両者の応力強度比は、圧縮が4.3%、引張が49.6%である。

次に同一応力強度比での比較を行った。図13に載荷材齢3日、応力強度比20%の圧縮と引張のクリープひずみの比較を示す。図より、圧縮クリープひずみと引張クリープひずみの大きさが全く違うことがわかる。これは圧縮の載荷応力が引張と比べてはるかに大きいためと考えられる。

さらに単位応力当たりのクリープひずみについて両者を比較するために、図13の結果を **specific**

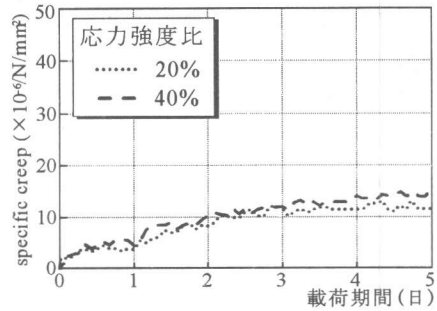


図9 応力強度比の影響(載荷材齢7日)

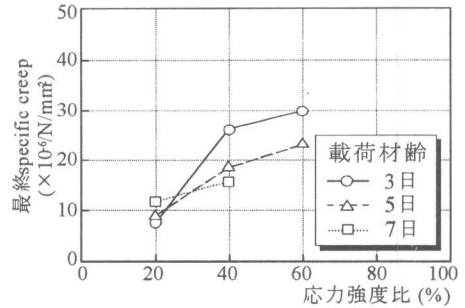


図10 応力強度比と最終 **specific creep** の関係

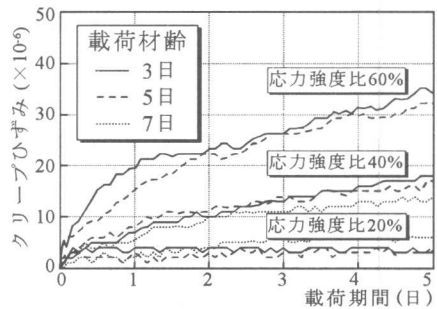


図11 クリープひずみへの載荷材齢の影響

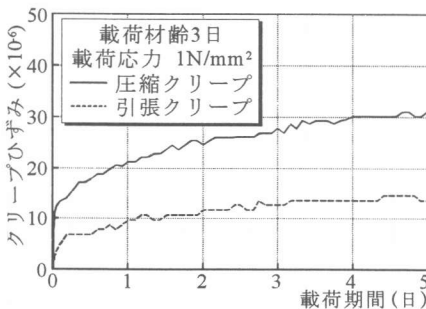


図12 クリープひずみの同一応力での比較

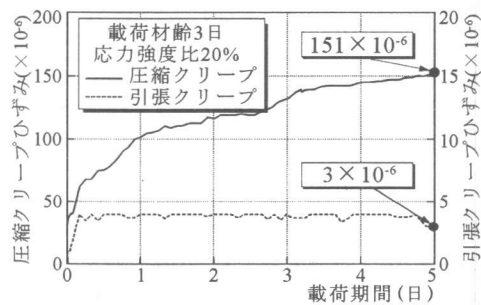


図13 クリープひずみの同一応力強度比での比較

creep で表わすことにする。図 14 に載荷材齢 3 日の圧縮と引張の specific creep の比較を示す。圧縮の specific creep は応力強度比 50%以下は同一なので、応力強度比 20%の結果を代表として用いた。引張の specific creep は、図 7 の応力強度比 20、40、60%の結果である。図より、引張の specific creep は応力強度比 20%ではほぼ一定であり、圧縮の挙動と異なっているが、40、60%は時間経過とともに漸増しており、圧縮の挙動と似ている。また、圧縮の specific creep は、いずれの応力強度比の引張の specific creep よりも大きい。

図 15 の載荷材齢 5 日での比較結果も、図 14 と同様の傾向を示している。したがって、同一応力において同一応力強度比においても、圧縮のクリープひずみおよび specific creep は引張よりも大きいといえよう。

## 7. クリープひずみの定式化

### 7. 1 圧縮クリープ推定式

既報[2]では、若材齢の specific creep 挙動を、図 16 の 5 要素レオロジーモデルで表わすことを提案した。

圧縮クリープは、応力強度比 50%以下は載荷応力とクリープひずみの線形性が成立すること、温度応力において、応力強度比 50%以上の圧縮応力が発生する可能性が少ないことから、圧縮の specific creep 挙動を 5 要素レオロジー式  $J_c(t, S, \tau)$  で表わし、それに載荷応力  $\sigma$  を乗じて圧縮クリープひずみをモデル化した。使用パラメータは、載荷期間  $t$ 、応力強度比  $S$ 、載荷材齢  $\tau$  である。

$J_c(t, S, \tau)$  は、載荷材齢 3 日、応力強度比 40%の specific creep 挙動を 5 要素レオロジー式  $J_c(t)$  で表わし、これに載荷材齢  $\tau$  と応力強度比  $S$  を考慮した外部関数を乗じて求めた。

$$J_c(t) = 8.5966(1 - e^{-182.05t}) + 16.733(1 - e^{-0.88831t}) + 2.4795t \quad (1)$$

図 5 より、応力強度比 50%以下は、載荷応力とクリープひずみの線形性が成り立つので一定値とした。応力強度比 50~70%は直線関係と考え、さらに載荷材齢による傾きの違いを考慮して、応力強度比関数  $A(S, \tau)$  を最小二乗法によって定めた。また、図 6 より、載荷材齢関数  $B(\tau)$  も同様に定めた。  $A(S, \tau)$  および  $B(\tau)$  を以下に示す。

$$0 \leq S \leq 50 : A(S, \tau) = 1$$

$$50 \leq S \leq 70 : A(S, \tau) = 0.0454(-1.9329 \log \tau + 1.8876)(S - 50) + 1 \quad (2)$$

$$1 \leq \tau \leq 5 : B(\tau) = -1.5308 \log \tau + 1.7061 \quad (3)$$

以上より、圧縮クリープひずみ推定式は以下のように表わされる。

$$\varepsilon_{cc}(t, S, \tau, \sigma) = A(S, \tau) \times B(\tau) \times J_c(t) \times \sigma \quad (4)$$

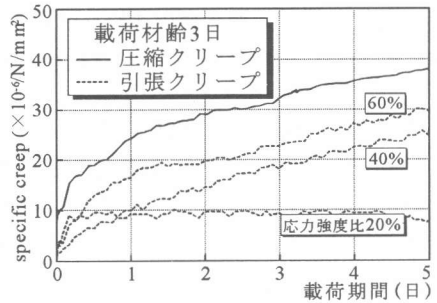


図 14 同一応力強度比での比較 (載荷材齢 3 日、specific creep)

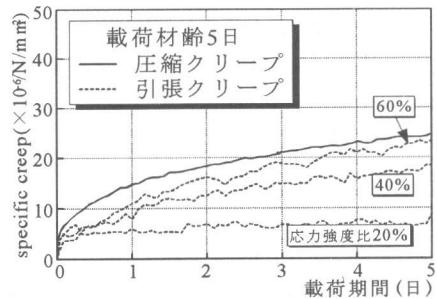


図 15 同一応力強度比での比較 (載荷材齢 5 日、specific creep)

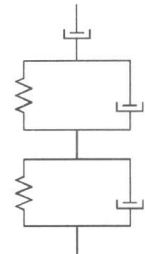


図 16 5 要素レオロジーモデル

図 17 に実測値と解析値の比較を示す。図より解析値は良く実測値を近似しているといえる。

## 7. 2 引張クリープ推定式

引張クリープについては荷重応力とクリープひずみの線形性が成り立たないので、引張クリープひずみ挙動を 5 要素レオロジー式  $\varepsilon_{ct}(t, S)$  で表わした。図 11 より、引張クリープひずみは荷重材齢に影響されないため、使用パラメータは、荷重期間  $t$ 、応力強度比  $S$  である。

$\varepsilon_{ct}(t, S)$  は、応力強度比 40% のクリープひずみ挙動を 5 要素レオロジー式  $\varepsilon_{ct}(t)$  で表わし、これに応力強度比  $S$  を考慮した応力強度比関数  $A(S)$  を乗じて求めた。

$$\varepsilon_{ct}(t, S) = A(S) \times \varepsilon_{ct}(t) \quad (5)$$

$$\text{ここに } \varepsilon_{ct}(t) = 1.335(1 - e^{-26.271t}) + 5.0028(1 - e^{-1.1525t}) + 2.3635t$$

$$A(S) = 0.0005S^2 + 0.0044S \quad (0 \leq S \leq 60)$$

図 18 に実測値と解析値の比較を示す。図より解析値は良く実測値を近似しているといえる。

## 8. まとめ

得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 圧縮クリープは、応力強度比 50% 以下は荷重応力とクリープひずみの線形性が成り立ち、それ以上では荷重応力の影響を受ける。これは従来言われている線形性成立範囲よりも大きい。
- (2) 引張クリープは荷重材齢 3、5 日では、応力強度比 20% 以上については荷重応力とクリープひずみの線形性は成り立たない。しかし、荷重材齢 7 日以降には線形性が成り立つ傾向にあることが明らかとなった。
- (3) 実験の範囲内では、同一応力強度比の引張クリープひずみは、荷重材齢にかかわらずほぼ等しいことがわかった。
- (4) クリープひずみ、specific creep 共に、圧縮側が引張側よりも大きいことが明らかになった。
- (5) 5 要素レオロジー式を用いた若材齢コンクリートのクリープ推定式により、クリープ挙動を精度良く推定できた。

本研究は、文部省科学研究費(課題番号 07650528)によって行われた研究成果を取りまとめたものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 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、1995.6
- [2] 野村幸弘、上原匠、梅原秀哲：クリープを考慮したマスコンクリートの温度応力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.1121-1126、1993.6

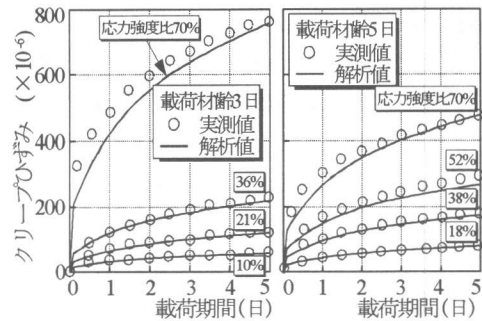


図 17 圧縮クリープ試験結果と解析値の比較

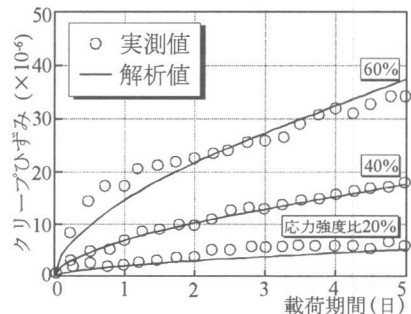


図 18 引張クリープ試験結果と解析値の比較