

論文 若材齢コンクリートのクリープ挙動に関する研究

後藤忠広^{*1}・上原匠^{*2}・梅原秀哲^{*3}

要旨：若材齢時のコンクリートのクリープ挙動の把握を目的として、配合の異なる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った。その結果、若材齢コンクリートにおいてもクリープひずみと応力の線形性が成立した。配合においては水セメント比が大きいほど、また強度に関してはその発現が遅いほどクリープひずみが大きくなった。さらに、若材齢時のコンクリートのひずみ挙動の試験結果に対して重ね合せ則を用いて解析した結果、圧縮除荷期間のクリープ回復量と圧縮クリープひずみ量の関係を考慮すると、ひずみの挙動の実験結果に良く一致した。

キーワード：若材齢コンクリート、クリープ、重ね合せ則、specific creep

1. まえがき

最近、コンクリート構造物の大型化やポンプ等を利用したコンクリート打込み方法の合理化から、コンクリートの大量打設が行われている。そのため、セメントの水和反応に起因するコンクリートの温度ひび割れが問題となり、現在多くの研究が行われている。温度ひび割れを防止するためには、温度応力を精度よく推定し、温度応力をできるだけ小さくするような材料や施工方法の選択が必要である。しかし、温度応力を精度よく推定するには、比熱、熱伝導係数などの熱特性値だけでなく、若材齢コンクリートのクリープ挙動の精度よい推定が不可欠である。

著者らはこれまでに、若材齢コンクリートのクリープ特性の把握を目的として、若材齢コンクリートの圧縮クリープ試験に加え、引張クリープ試験を行い、粘弾性レオロジーモデルによるクリープ予測式を構築した。さらに、温度応力の計測を行った実構造物を対象として、クリープを考慮した温度応力解析を行い、実測結果との比較検討を行った。その結果、若材齢コンクリートではクリープの影響により材齢初期の弾性係数を50%近く低減する必要があるなど、温度応力の精度よい推定にクリープ挙動の推定が必要不可欠であることを明らかにした[1][2]。しかし、クリープ予測式は一種の配合のコンクリートの実験結果から導いたものであり、明らかにデータ数が少ない。またクリープ解析には、応力強度比が40%以下ではクリープひずみと応力の関係が線形であると仮定して、重ね合せ則を用いて変動応力下のクリープひずみを算出したが、若材齢コンクリートのクリープひずみと応力の線形性については明らかにされていない。

そこで本研究では、若材齢コンクリートのクリープ挙動のデータを蓄積するために、配合の異なるコンクリートを対象としてクリープ実験を行い、配合がクリープひずみに及ぼす影響を考察するとともに、若材齢コンクリートのクリープひずみと応力の関係について検討を行った。

2. 配合設計

一般にコンクリートのクリープは種々の物理的な要因によって大きな影響を受ける。著者らは

*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 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)

*3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、Ph.D. (正会員)

既に、コンクリートの配合のうち主として水セメント比および単位セメント量のクリープへ及ぼす影響が大きいと報告している[2]。そこで本研究では、単位水量を一定として単位セメント量を変化させた。配合を表-1に示す。水セメント比A(45%)、B(55%)、C(65%)の配合を用いて試験を行い、D(文献[1])、E(文献[2])の配合による試験結果を含めて検討を行った。

表-1 配合表

	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	S	G	温和剤 (g/m ³)
A	25	8.0	4.0	45	44.6	172	382	762	983	1.41
B				55			313	787	1015	1.16
C				65			265	804	1038	0.98
D	40	25		54	37.0	149	276	691	1204	0.69
E	25			56	45.5	157	281	835	1039	0.88

D:文献[1]の配合 E:文献[2]の配合

3. 若材齢コンクリートのクリープ試験

3.1 圧縮クリープ試験

(1) 試験概要

圧縮クリープ試験機は既報[1]と同じ装置を用いた。試験に使用した供試体はφ10×20cmの円柱供試体であり、内部に埋め込み型ひずみ計および熱電対を埋め込んだ。なお、供試体の乾燥収縮ひずみを防ぐため、供試体表面に厚さ0.05mmのアルミテープを貼り、恒温温湿器内部の湿度を100%に設定して試験を行った。

(2) 試験結果および考察

一般に、応力強度比が40%以下ではクリープひずみと応力の関係が線形であるというDavis-Glanvilleの法則が成り立つと言われている。しかし、この法則はコンクリートの材齢が長期の場合であり、若材齢のコンクリートで成り立つかどうかは不明である。そこで、この法則が成り立つかどうかを調べるために、水セメント比45%の配合を対象に載荷応力を変えて圧縮クリープ試験を行った。図-1に試験結果を示す。図における横軸は荷重載荷後の経過時間、縦軸は単位応力当たりのクリープひずみであるspecific creep Jである。図より載荷応力比7%と14%のJ値は良く一致していることがわかる。したがって、若材齢時の圧縮応力下でのコンクリートにおいてもDavis-Glanvilleの法則が成り立つと考えられる。

配合の影響に関する試験は、供試体温度40℃、湿度100%、載荷材齢は1日とした。各供試体とも荷重載荷後5日

間のひずみの計測を行った。図-2に試験結果を示す。図より、載荷材齢5日におけるspecific creepは、Aと比較して、Bは約1.3倍、Cは約1.8倍となることがわかる。すなわち、水セメント比が大きいほどspecific creepが大きくなっている。これは、水セメント比の増大により未反応水が増し、この未反応水が圧縮応力により排出されたことや、図-3に示すようにコンクリー

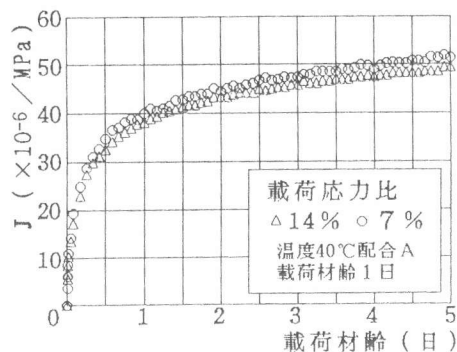


図-1 載荷応力比での比較

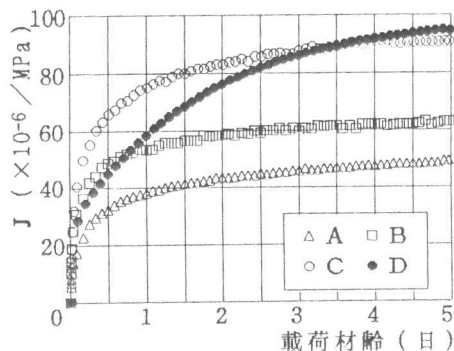


図-2 配合での比較

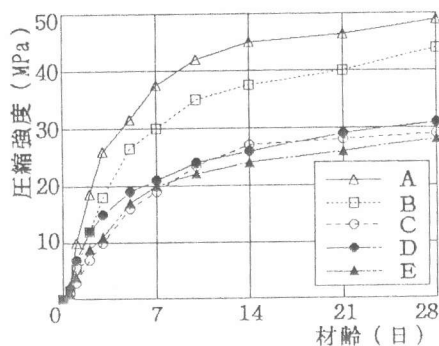


図-3 圧縮強度試験結果

トの圧縮強度の発現が遅く、セメントペーストの骨格構造が弱いことから、クリープひずみが大きくなったものと考えられる。ところで、Dのコンクリートは試験条件は同じであるが、30mmのふるいでウェットスクリーニングを行ったため、供試体作製時の配合は表-1に示す配合とは異なっている。BとDの試験結果を比較すると、載荷材齢が進むにつれて両者のspecific creepに差が現れている。これは、図-3に示すようにBのコンクリートの強度の発現がDのより早く、セメントペーストの骨格構造が強いために、載荷材齢が進むにつれて両者に差が現れたものと考えられる。また、CとDの試験結果を比較すると、載荷材齢5日でのspecific creepはほぼ同じ値を示している。これは、図-3に示すようにCとDのコンクリートの強度の発現がほとんど同じであるためと考えられる。

3.2 引張クリープ試験

(1) 試験概要

引張クリープ試験機は既報[2]と同じ装置を用いた。供試体の作製方法は圧縮クリープ試験と同じである。供試体は打込み後24時間で脱型し、温度20℃、湿度100%で圧縮クリープ試験を行い、試験終了後直ちに供試体と同じ断面積を有する鋼板を供試体の両端部に超速硬化型エポキシ系接着剤で接着し、室温20℃の恒温恒湿機内に静置し、24時間後、引張クリープ試験を開始した。各試験とも載荷時の載荷応力比は10~30%であり、5日間ひずみの計測を行った。

(2) 試験結果および考察

引張クリープ試験においても圧縮クリープ試験と同様にクリープひずみと応力の線形性について、水セメント比45%の配合を対象に検討を行った。試験結果を図-4に示す。図より載荷応力比10%と20%のspecific creepは良く一致していることがわかる。したがって、圧縮クリープと同様に引張応力下でも、クリープひずみと応力の線形性が成り立つと言える。

配合の影響に関する試験は、温度20℃、湿度100%で材齢1日において圧縮応力1.5MPaを1日間載荷し、1日の除荷期間を経た後、供試体温度40℃、湿度100%で引張応力を作用させた。図-5に試験結果を示す。図より、圧縮クリープと同様に水セメント比が大きいほどクリープひずみが大きく現れている。載荷材齢5日におけるspecific creepについてCはAの約2.1倍（圧縮の結果は約1.8倍）となっており、A、Bのクリープひずみがほぼ収束しているのに対して、Cは安定していない。また、A、Bでは載荷材齢1日において5日のspecific creepの約7~8割が生じているのに対して、Cでは約6割しか生じていない。このことはCに載荷材齢1日以降

もかなりの未反応水が残留しており、供試体内でのクリープひずみの発生が不均一となったためと考えられる。また、試験条件が同じであるEの試験結果をCの試験結果と比較すると、引張強度は図-3に示す圧縮強度とほぼ同じ傾向を示しており、両者の強度の発現にほとんど差が見られないため、specific creepもCの方が少し大きいもののほぼ同じ値を生じたものと考えられる。

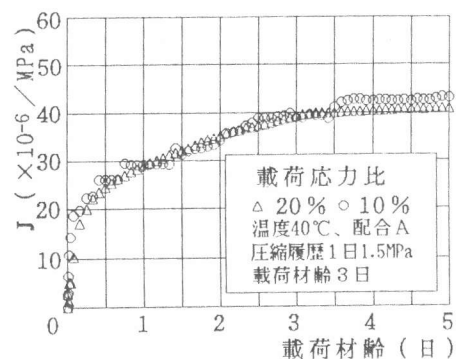


図-4 載荷応力比での比較

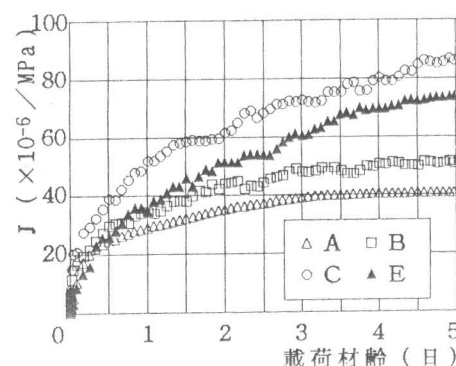


図-5 配合での比較

3.3 圧縮および引張クリープ特性の比較

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のであって、若材齢のコンクリートで成り立つかは不明である。そこで、若材齢時のコンクリートにおいて、圧縮および引張クリープ試験を行い、その結果に対して比較検討を行った。図-6に試験結果を示す。図より、圧縮クリープのspecific creepが引張よりも上回っており、載荷材齢5日においては、圧縮クリープのspecific creepは引張の約1.7倍となった。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specific creepが小さくなったと考えられる。したがって、今回の試験結果から若材齢時のコンクリートにおいては圧縮クリープと引張クリープが等しいという仮定は成り立たないことが確認され、引張クリープは圧縮クリープより小さくする必要があると言えよう。

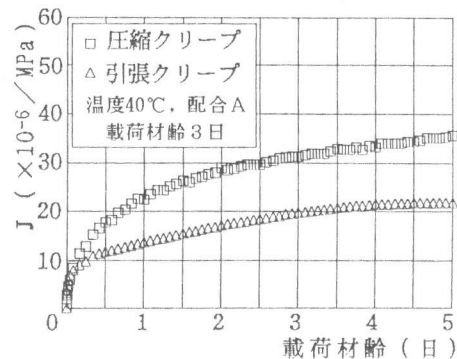


図-6 圧縮と引張の比較

4. 若材齢コンクリートのクリープひずみと応力の関係

4.1 概要

若材齢コンクリートはセメントの水和反応により、打込み直後から温度が上昇し、材齢2~3日でコンクリート温度はピークとなり、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、その後下降し始めると引張応力に転じる傾向にある。このような応力によって生ずるクリープひずみを重ね合せ則を用いて解析する際、特に応力が圧縮から引張に変化する場合や引張応力が引張強度の40%以上となる場合では、クリープひずみと応力の関係が線形であるとの仮定が成り立たない可能性がある。そこで、今回、既報[2]の実験結果を用いて、圧縮から引張に変化する場合のクリープひずみ挙動に着目して考察を行った。

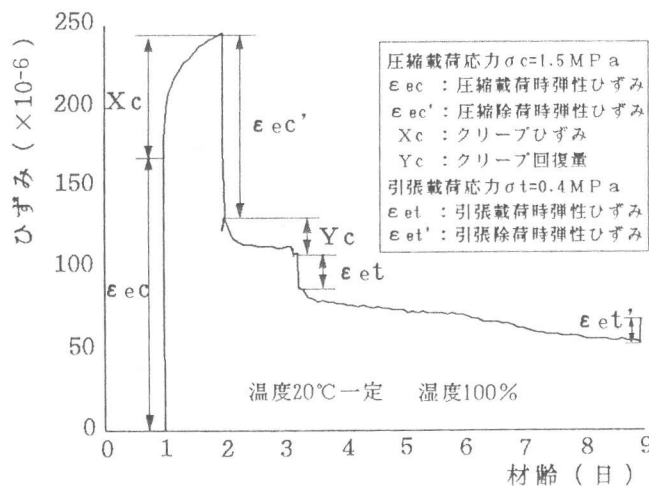


図-7 ひずみ挙動結果(一例)

4.2 クリープ挙動の分析

図-7に既報[2]の試験結果の一例を示す。表-2 クリープ回復量と圧縮クリープの関係
図より圧縮載荷後、載荷期間1日で圧縮クリープひずみ X_c が生じ、荷重を除荷した後、1日でクリープひずみ Y_c だけ回復することがわかる。表-2にこのクリープ回復量と圧縮クリープひずみの関係を示す。表より圧縮載荷荷重の大きさにか

σ_c (MPa)	X_c ($\times 10^{-6}$)	Y_c ($\times 10^{-6}$)	Y_c / X_c
0.5	25.5	3.5	0.14
1.5	78.8	15.9	0.20
1.5	78.7	16.5	0.21
1.5	80.4	21.9	0.27
2.5	195.8	43.6	0.22

かわらず、圧縮クリープひずみの約2割の割合でクリープが回復することが明らかとなった。

4.3 クリープひずみの重ね合せ

図-8に載荷応力を変化させた時のひずみの挙動の試験結果を示す。この結果に対して、ひずみの重ね合せ則の成立について検討を行った。一般にひずみは式(1)によって示される。

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_e + \varepsilon_t + \varepsilon_c + \varepsilon_s \quad (1)$$

ここに、 ε_e ：弾性ひずみ ε_t ：温度ひずみ
 ε_c ：クリープひずみ ε_s ：乾燥収縮ひずみ

温度20℃一定、湿度100%の条件で試験を行ったことから、 ε_t および ε_s を零とした。また、弾性ひずみ ε_e は、試験結果を参考にして値を決定した。

クリープひずみ ε_c は、既報[1][2]において構築した構成式に載荷応力 σ を乗じて表した。

$$\varepsilon_c = J_c \sigma \quad (\text{圧縮クリープひずみ}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_c = J_t \sigma \quad (\text{引張クリープひずみ}) \quad (3)$$

以下に既報[1][2]において構築した構成式を示す。

$$J_c = \xi_c(\tau) \cdot \phi_c(T) \cdot \{26.96(1 - e^{-24.7t}) + 71.99(1 - e^{-0.575t})\} \times 10^{-6} \quad (4)$$

ここに、載荷材齢関数 $\xi_c(\tau)$ ： $\xi_c(\tau) = -0.3071 \log \tau + 1.0$

温度関数 $\phi_c(T)$ ： $\phi_c(T) = 0.0112T + 0.552$

τ ：載荷時の材齢(日)、 T ：温度(℃)、 t ：載荷材齢(日)

$$J_t = \phi_t(\sigma_{max}) \cdot \phi_t(T) \cdot \xi_t(\tau) \cdot \{28.74(1 - e^{-0.801t}) + 8.130(1 - e^{-45.38t}) + 4.468t\} \times 10^{-6} \quad (5)$$

ここに、圧縮応力関数 $\phi_t(\sigma_{max}) = 0.17\sigma_{max} + 0.701$

温度関数 $\phi_t(T) = 0.0257T + 0.487$

載荷材齢関数 $\xi_t(\tau) = -1.107 \log \tau + 1.538$

σ_{max} ：最大圧縮応力(MPa)、 τ ：載荷時の材齢(日)、 T ：温度(℃)、 t ：載荷材齢(日)

圧縮応力除荷後における回復クリープひずみは、4.2の考察より、圧縮除荷応力に J_c を乗じたものの2割とした。

$$\varepsilon_c' = 0.2 J_c \sigma' \quad (6)$$

ここに、 ε_c' ：回復クリープひずみ σ' ：圧縮除荷応力(MPa)

以上より、ひずみの重ね合せ則を用いた解析結果を図-8に示す。図より、圧縮および引張載荷期間においてクリープひずみの解析結果は試験結果と良く一致しており、ひずみの重ね合せが若材齢コンクリートでも成り立つと考えられる。また、圧縮除荷期間のクリープ回復量を式(6)を用いた結果、圧縮応力除荷後のひずみ挙動に良く一致することが明らかとなった。

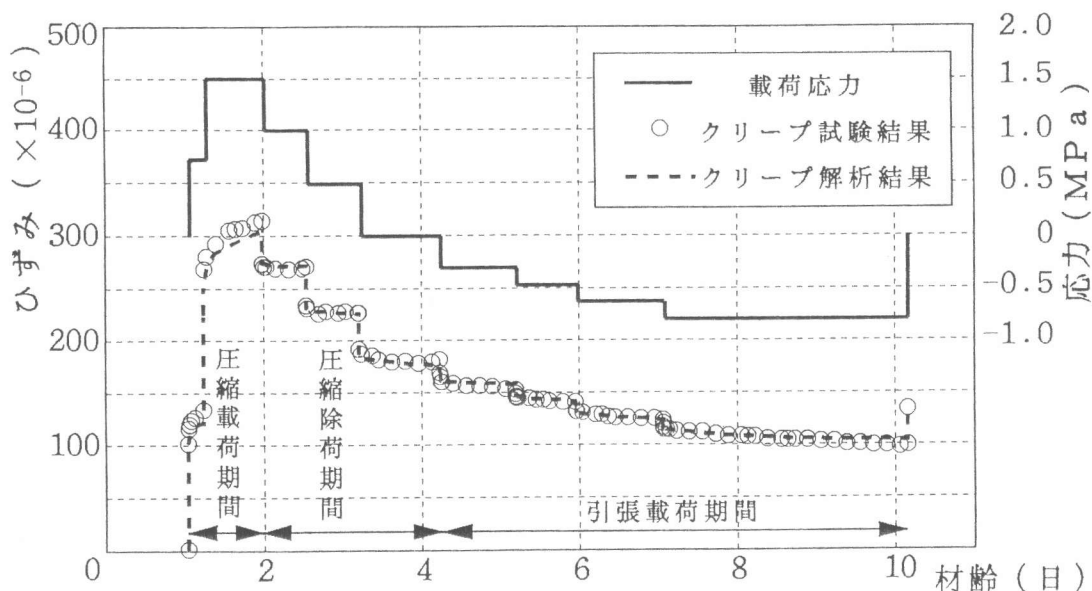


図-8 载荷応力を変えたひずみ挙動結果

5. 結論

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 若材齢コンクリートにおいても応力強度比が40%以下では、クリープひずみと応力の関係は線形であることが明らかとなった。
- 2) 配合の異なる若材齢コンクリートの圧縮クリープ試験より、水セメント比が45%、55%、65%と大きくなるにしたがってspecific creepは、45%と比較して、55%は約1.3倍、65%は約1.8倍となる結果が得られた。一方、配合の異なる若材齢コンクリートの引張クリープ試験より、圧縮クリープと同じく水セメント比が大であるほどspecific creepが大きくなり、65%は45%の約2.1倍となる結果が得られた。すなわち、配合においては水セメント比が大きいほど、また強度に関してはその発現が遅いほどspecific creepが大きくなることが明らかとなった。
- 3) 若材齢時のコンクリートにおいて圧縮および引張クリープ試験を行った結果、圧縮クリープのspecific creepが引張よりも上回っており、若材齢のコンクリートにおいては圧縮クリープと引張クリープが等しいという仮定は成り立たないことが確認され、引張クリープは圧縮クリープより小さくする必要があると言えよう。
- 4) 本研究で行った実験の範囲内では、圧縮載荷荷重の大きさにかかわらず、回復クリープは圧縮クリープひずみの約2割の割合で回復することが明らかとなった。
- 5) 解析においてひずみの重ね合せ則を用いた結果、圧縮および引張クリープひずみの解析結果は試験結果と良く一致し、ひずみの重ね合せが若材齢コンクリートでも成り立つと考えられる。また、圧縮除荷期間のクリープ回復量の算定に式(6)を用いた結果、解析による圧縮応力除荷後のひずみ挙動が試験結果と良く一致することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 梅原秀哲・北川善己・吉田弥智：マスコンクリートの温度応力へのクリープの影響に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.845-850、1991.6
- 2) 野村幸広・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