

論文 若材齢コンクリートにおける引張クリープの温度依存性に関する研究

服部達也^{*1}・入矢桂史郎^{*1}・上原匠^{*2}・梅原秀哲^{*3}

要旨：若材齢コンクリートの引張クリープに与える温度の影響について、養生温度と載荷温度に着目して研究を行った。その結果、載荷材齢 5 日では養生温度が高いほど引張クリープは小さくなることが明らかとなったが、載荷材齢 3 日では顕著に認められなかった。また、載荷温度の影響は大きく、載荷中の温度が高いほど引張クリープは大きくなった。温度と材齢の評価方法として、引張クリープにおいて養生温度の影響は有効材齢で評価できるが、載荷中温度の影響は十分に評価できないことが明らかとなった。

キーワード：温度応力, 若材齢, 引張クリープ, 単位クリープ, 有効材齢

1. はじめに

コンクリートのクリープ挙動については古くから多くの研究がなされているが、そのほとんどがプレストレストコンクリートのリラクセーションや構造上の不静定力算定を目的としているため、材齢 28 日以降に荷重が載荷された場合を対象としている。特に、圧縮クリープに関する研究が多く、若材齢時の引張クリープ挙動については、ほとんど研究されていない。

著者らは、水和熱により生じる温度応力研究に資するために、若材齢時の引張クリープの研究を行ってきた。この研究の特徴は載荷材齢の影響が大きいこと、高応力強度比も対象にすること、さらに温度の影響を受けることにある。ここでは、既報^{1) 2)}に引き続き、若材齢コンクリートにおける引張クリープの温度特性の把握を目的とした。著者らの研究などでは、載荷中の温度上昇により、クリープが励起されることも報告される³⁾など、温度の影響が指摘されているが、定量的評価は行われていない。

本研究では、養生温度、載荷温度をパラメータとして、2 種類の材齢で引張クリープ試験を行い、養生温度の影響、載荷温度の影響について検討した。

2. 配合

本研究で使用した材料は、普通ポルトランドセメント、山砂（豊田市田初山産、 $\gamma=2.55$, F.M.=2.82）、砕石（春日井市外之原産、 $\gamma=2.65$, F.M.=6.67）で AE コンクリートとした。表 1 コンクリートの示方配合を示す。

表 1 コンクリートの示方配合

Sl (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
				W	C	S	G	減水剤	AE剤	
8.0	4.0	55	45	172	313	787	1015	0.313	0.016	

3. 試験方法

クリープ試験には $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体を用い、側面をアルミテープで被覆し、水分蒸発を防止した。養生方法は、打設後、温度 20°C、湿度 60% の恒温室内に 24 時間静置し、その後所定材齢まで湿潤養生槽内で養生した。養生後、湿度 98% に制御した恒温恒湿器を有するてこ式引張クリープ試験機⁴⁾を用いて、載荷時応力強度比（載荷応力/載荷時強度）40% を 5 日間載荷した。なお、載荷応力度は試験期間中一定とした。また、自己収縮等のクリープ以外のひずみは、同一環境内にセットした無載荷供試体

*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 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科（正会員）

*3 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D.（正会員）

より測定されたひずみを、載荷供試体のひずみから差し引いて補正した。

本研究では載荷材齢に3日、5日の2水準とし、各載荷材齢につき養生温度および載荷温度をパラメータとした。養生温度は30℃、40℃、50℃の3水準、載荷温度も各養生温度につき30℃、40℃、50℃の3水準を設定し、計18ケースのクリープ試験を行った。図1に温度設定の一例として、載荷材齢3日の温度履歴を示す。なお、30℃一定で行った試験については既往の文献²⁾の試験結果と比較し、試験方法の妥当性を確認した。

4. 強度に与える温度の影響

一般に、強度における温度と材齢の相互作用は有効材齢で考慮できるといわれている。そこで、クリープ試験とあわせて実施した割裂強度試験結果を有効材齢で整理した。

$$M = \sum (T+10)\Delta t \quad (1)$$

M : 積算温度(°Chr)

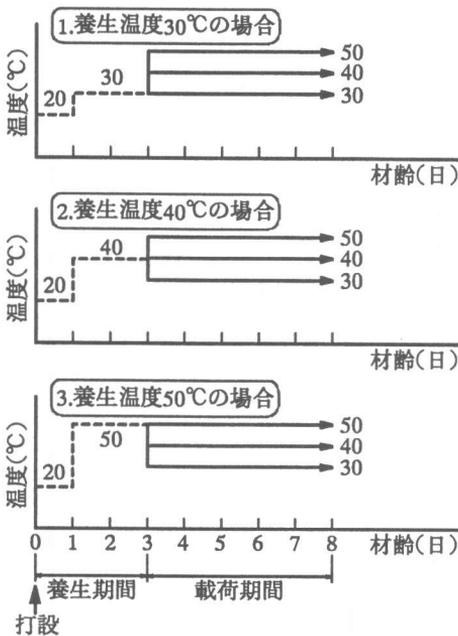


図1 温度履歴の一例
(載荷材齢3日)

Δt : 時間(hr)

T : Δt 間でのコンクリート温度(°C)

とすると、有効材齢は以下の式で表わされる。

$$t_e = \int \frac{M}{24 \cdot (20+10)} dt \quad (2)$$

t_e : 有効材齢(日)

図2に割裂強度試験結果を示す。図より、有効材齢を用いて温度の影響を定式化でき、強度と有効材齢の間に式(3)に示す対数関係が得られた。

$$\sigma_t = 0.512 \ln(t_e) + 1.151 \quad (3)$$

σ_t : 割裂強度(N/mm²)

5. 引張クリープに与える温度の影響

5.1 同一温度下でのクリープ

図3に養生時、載荷時ともに同一温度で行った載荷材齢3日の引張クリープ試験結果を示す。

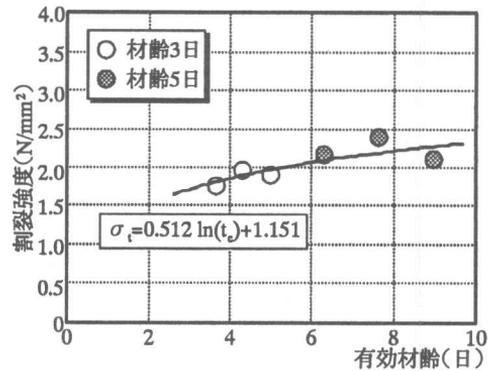


図2 割裂強度試験結果

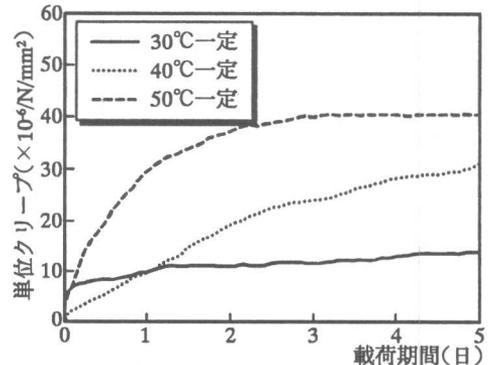


図3 一定温度の影響
(載荷材齢3日)

図より、30℃一定の場合は載荷期間が長くなっても単位クリープ（クリープひずみ/載荷応力）に大きな増進は認められないが、40℃一定および50℃一定の場合は載荷期間が長くなると単位クリープは大きく増進している。また、載荷期間5日経過時の単位クリープの値は、50℃一定では30℃一定の約3.0倍、40℃一定では30℃一定の約2.3倍の値となった。

図4に図3と同じ温度条件で行った載荷材齢5日の引張クリープ試験結果を示す。図より、載荷材齢3日の場合と同様に、温度が高くなるにしたがってクリープは大きくなっている。しかし、載荷材齢3日に比べて単位クリープの差は縮まっており、載荷材齢が大きくなると全体的に温度の影響は小さくなるといえる。

以上より、若材齢であるほど温度による影響

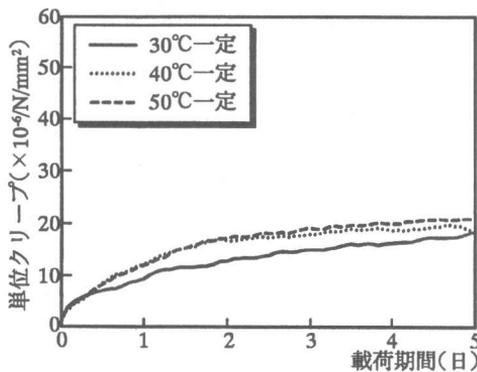


図4 一定温度の影響
(載荷材齢5日)

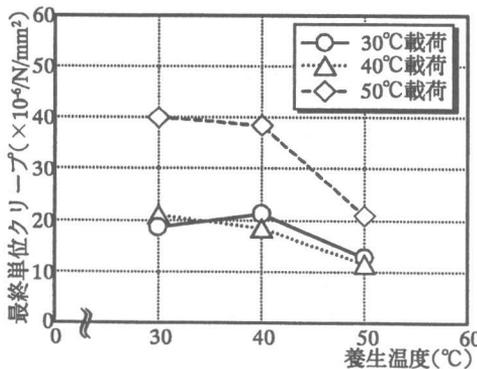


図5 養生温度の影響
(載荷材齢5日)

が顕著に表われる。ここでは、載荷材齢や載荷期間と温度の関係を容易にするために、クリープに与える温度の影響を養生温度の影響と載荷温度の影響に分けて検討する。

5.2 養生温度の影響

図5に載荷材齢5日における養生温度の影響を示す。横軸に養生温度を、縦軸に載荷期間5日経過時の単位クリープを最終単位クリープとして用いた。図より、載荷温度一定で比較すると、養生温度が高くなるにしたがって最終単位クリープは小さくなる傾向が認められ、高い養生温度ではクリープが低減された。これは、高温養生で硬化が促進されることによると考えられ、載荷材齢が大きくなった場合の現象と一致している。

図6に載荷時有効材齢により評価した載荷温

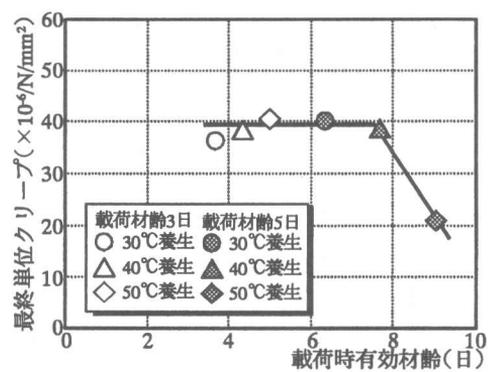


図6 載荷時有効材齢による養生温度の評価
(載荷温度50℃)

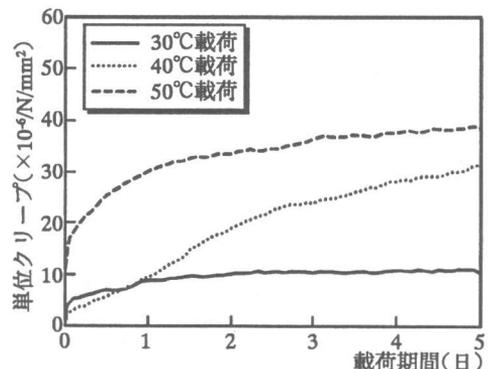


図7 載荷温度の影響
(CASE.1: 載荷材齢3日, 養生温度40℃)

度 50°Cでの養生温度の影響を示す。図より、
 載荷時有効材齢が8日までは養生温度に関係なく最終単位クリープはほぼ一定であるが、載荷時有効材齢が8日頃から最終単位クリープは減少した。以上より、載荷材齢3日では養生温度の影響は顕著でないが、載荷材齢5日の高温養生を施した場合は、養生温度の影響が大きくなることが明らかとなった。また、有効材齢を用いることにより、養生期間と養生温度の影響を考慮できることが明らかとなった。

5.3 載荷温度の影響

図7に載荷材齢3日、養生温度40°Cにおける載荷温度の影響を示す。横軸には載荷期間、縦軸には単位クリープを用いた。図より、載荷温度30°Cの単位クリープは載荷期間2日で一定値に達しているのに対し、載荷温度40°C、

50°Cの単位クリープは載荷期間2日以降も増進しており、載荷温度が高くなるにしたがってクリープは励起されているといえる。

図8に載荷材齢5日、養生温度30°Cにおける載荷温度の影響を示す。図7に比べて載荷温度30°Cと載荷温度40°Cの単位クリープの差は少なくなったが、載荷材齢5日においても載荷温度50°Cのクリープが大きくなっている。

ここでは、まず載荷温度の影響を水和の促進で表わすことができるか検討した。図7の試験条件をCASE.1、図8の試験条件をCASE.2として図9、図10に各ケースの有効材齢による評価を示す。なお、両図とも横軸、縦軸には対数軸を用いた。図9、図10より、CASE.1、CASE.2ともに有効材齢では、各載荷温度の単位クリープは一致せず、載荷温度が高くなるにしたがっ

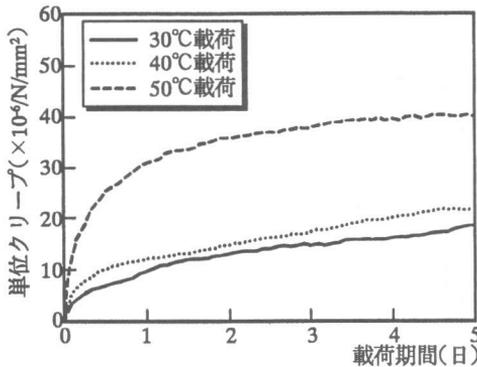


図8 載荷温度の影響

(CASE.2: 載荷材齢5日, 養生温度30°C)

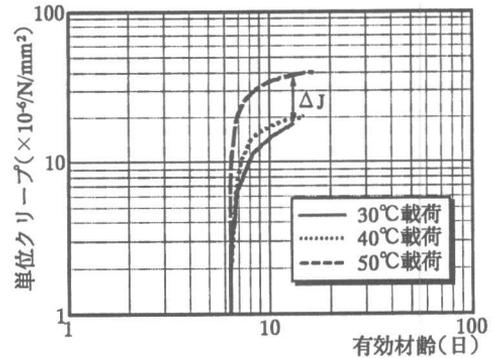


図10 有効材齢による評価

(CASE.2)

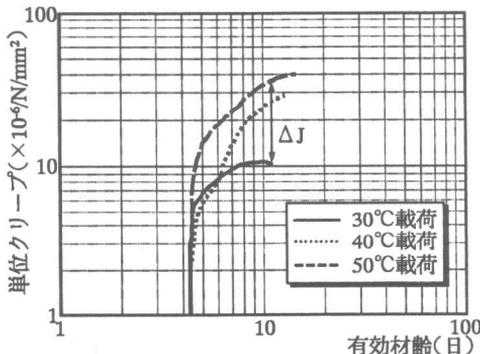


図9 有効材齢による評価

(CASE.1)

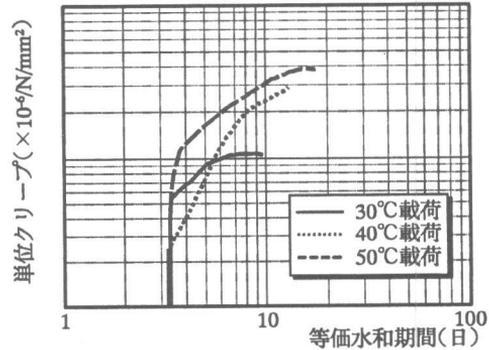


図11 等価水和期間による評価

(CASE.1)

て、クリープが大きくなる現象を十分に評価しきれていない。

次に、等価水和期間³⁾を用いて載荷温度の影響を検討した。等価水和期間とは、硬化の進行を25°Cで養生した場合の水和期間に換算したものであり、式(4)により与えられる。

$$t_{0e} = \sum_0^{t_0} \left\{ \exp \left[\frac{4000}{273+25} - \frac{4000}{273+T} \right] \right\} \Delta t_0 \quad (4)$$

t_{0e} : 等価水和期間(日)

Δt_0 : 載荷期間(日)

T : Δt_0 間における平均温度(°C)

式(4)より得られた等価水和期間を用いて評価したCASE.1を図11に、同様にCASE.2を図12に示す。図11より、CASE.1では有効材齢で整理した場合に比べて、単位クリープのばらつき幅が減少した。しかし、載荷温度30°Cの単位クリープが小さい点や、載荷温度50°Cの単位クリープが大きい点に対しては一致させることができなかった。また、図12のCASE.2においても載荷温度30°Cと載荷温度40°Cで単位クリープは良い一致を示しているが、載荷温度50°Cの単位クリープを一致させることはできなかった。

以上より、材齢と温度を等価に取り扱い、載荷温度の影響を水和反応として捉えた有効材齢や等価水和期間では引張クリープにおける載荷温度の影響を十分評価できないことが明らかとなった。そこで、式(1)および式(2)に示した有効材齢をもとに、載荷温度によるクリープ励起の効果を大きく評価し、べき乗の形で表わした修正有効材齢を考え、CASE.1, CASE.2について再度評価を試みた。式(5)に修正積算温度を、式(6)に修正有効材齢を示す。

$$\bar{M} = \sum (T+10)^n \Delta t \quad (5)$$

$$\bar{t}_c = \int \frac{\bar{M}}{24 \cdot (20+10)^n} dt \quad (6)$$

\bar{M} : 修正積算温度(°Chr)

\bar{t}_c : 修正有効材齢(日)

n : 有効材齢促進係数

式(5)、式(6)におけるnを変化させて、図9、図10に示した ΔJ (載荷温度30°Cと載荷温度50°Cにおける単位クリープの差)を算出した。その結果を図13に示す。図より、nが増加するにしたがって ΔJ は減少している。ここでは、n=5の場合を取り上げて修正有効材齢による整理を行った。

図14に修正有効材齢を用いたCASE.1の結果を示す。図より、有効材齢、等価水和期間で評価した場合に比べて載荷温度の違いによる単位クリープの違いは少なくなっており、ほぼ一つの関数型で表現できる。同様に修正有効材齢を用いたCASE.2の結果を図15に示す。図より、載荷温度30°C、40°Cに関しては図14と同様に良い一致を示している。また、図14と比

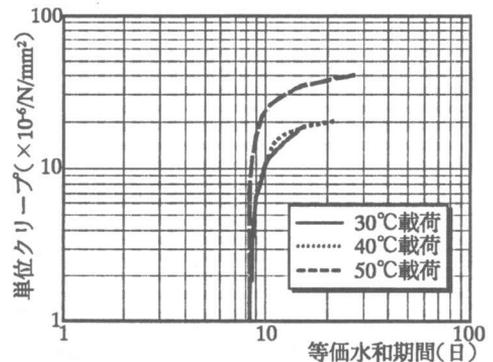


図12 等価水和期間による評価
(CASE.2)

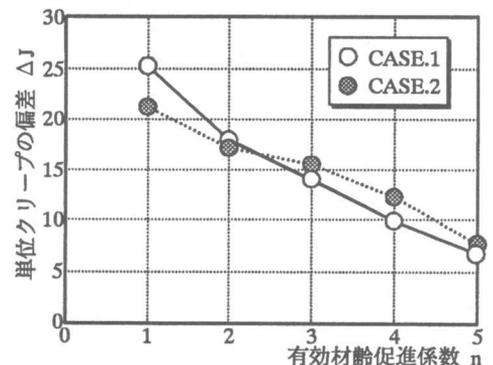


図13 nの変化に伴う ΔJ の推移

較して、載荷温度 50℃と載荷温度 30℃、40℃の単位クリープの差は若干少なくなったが、完全な一致には至っていない。

以上より、載荷温度の影響評価として、温度の影響を水和の促進と考えた有効材齢や等価水和期間では、載荷温度が高温の場合に過小評価する傾向にあり、十分に評価できない。しかし、べき乗の形を導入し、載荷温度によるクリープ励起の効果を大きく評価する指標を用いることにより評価可能であるといえる。載荷温度が高くなると、セメントペースト中の間隙水の粘性が低下すること、吸着水の流動に要する活性化エネルギーが減少すること、さらに、吸着水の表面張力が減少することなどが考えられる。本実験では、温度上昇によりクリープが増大することは認められたが、それを定量的に解明する

ことはできなかったので今後の課題としたい。

7. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1)若材齢時の引張クリープは温度の影響を強く受ける。しかし、載荷材齢の経過に伴って、温度の影響は小さくなる。
- (2)養生温度の影響は、水和の影響を考慮した載荷時有効材齢で考慮できる。
- (3)載荷温度の影響は、若材齢において養生温度の影響に比べて顕著であり、載荷温度が高いほど単位クリープは大きくなる。
- (4)引張クリープに与える載荷温度の影響評価に関して、水和の促進と考えた有効材齢や等価水和期間では十分に評価できないことが明らかとなった。

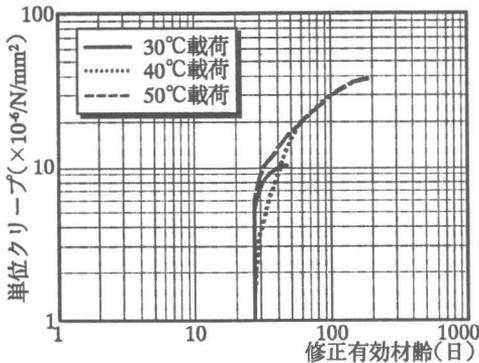


図 14 修正有効材齢による評価
(CASE.1・n=5)

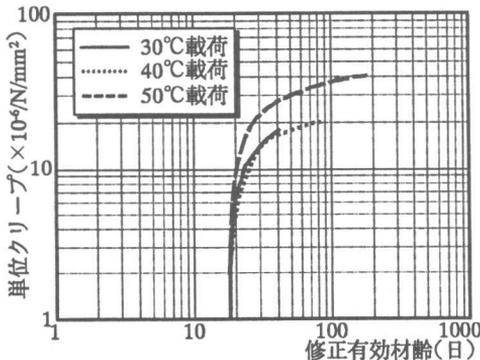


図 15 修正有効材齢による評価
(CASE.2・n=5)

なお、本研究は文部省科学研究費(課題番号 09650509)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。また、本研究を行うにあたり、実験、データの整理・分析に協力してくれた名古屋工業大学大学院 1 年の根木崇文君、同社会開発工学科 4 年の長谷川健一君、松本章君に深く感謝します。

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報告論文集, Vol.17, No.1, pp.1133-1138, 1995.6
- 2)平本昌生, 入矢敬史郎, Supratic Gupta, 梅原: 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, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.19, No.1, pp.775-780, 1997.6
- 3) Brooks J. J., Wainwright P. J., Al-Kaisi A. F.: Compressive and tensile creep of heat-cured ordinary Portland and slag cement concretes, Magazine of Concrete Research, Vol.43, No.154, pp.1-12, Mar. 1991