

論文 温度依存性に着目した若材齢コンクリートのクリープに関する研究

伊藤 真佑^{*1}・糸山 豊^{*2}・上原 匠^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨：本研究では、若材齢コンクリートの圧縮クリープおよび引張クリープに与える温度の影響について、養生温度および載荷温度と除荷温度に着目してクリープ試験を行った。その結果、養生時および載荷時に高温履歴を受けた場合、載荷ひずみや除荷後の回復ひずみはともに小さくなったが、除荷期間において異なる温度履歴を与えても回復ひずみに明確な影響は見られなかった。

キーワード：若材齢コンクリート、圧縮クリープ、引張クリープ、温度履歴、除荷過程

1. はじめに

セメントの水和反応に起因する温度ひび割れを予測し制御することは、コンクリート構造物の耐久性を高める上で極めて重要なことである。しかし、クリープによって若材齢時におけるコンクリートは、温度応力等の拘束応力が緩和され、それに起因する温度ひび割れに大きな影響を与える。したがって、温度応力を精度良く予測するためには若材齢時のクリープ機構を解明する必要がある。

クリープに影響を与える要因は載荷応力、載荷材齢、配合、温度など多岐に渡り、特に若材齢コンクリートにおいては水和の進行過程であり物性も一定ではないため、クリープ挙動はより複雑なものとなる。若材齢コンクリートのクリープは、温度の上昇によって水和が促進され水和生成物の緻密化に伴いクリープが抑制される要因と、逆に高温下では内部エネルギーが活発となりクリープが促進される要因があるために、クリープに対する温度の影響を把握することを困難にしている。

若材齢コンクリートに発生する温度応力は、材齢の進行と共に変化する温度に伴って作用する応力が変動し、最終的に引張応力がコンクリ

ートの有する引張強度を上回るとひび割れが発生する経緯をたどることから、応力の減少過程や温度履歴を受ける場合のクリープ挙動について検討する必要がある。

そこで本研究では、若材齢コンクリートを対象として温度および応力を変化させた試験を行い、若材齢時のクリープ挙動における温度依存性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 配合および使用材料

表-1 に本研究で用いたコンクリートの示方配合を示す。水セメント比 47.5%，単位水量 172kg/m³，細骨材率 44.6%の AE コンクリートである。目標スランプは 8±1cm，目標空気量は 4±0.5%となるように混和剤を適宜使用した。

使用材料は、普通ポルトランドセメント、山砂（豊田産，表乾密度=2.56g/cm³，F.M.=2.83），碎石（瀬戸産，G_{max}=20mm，表乾密度=2.72g/cm³，F.M.=6.71）である。

2.2 試験条件

図-1 に本研究のクリープ試験における載荷応力履歴および温度履歴を示す。載荷開始材齢は 2 日とした。また、約 5 日でひずみの変化が

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻（正会員）

*2 名古屋工業大学助手 工学部社会開発工学科 修(工)（正会員）

*3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 工博（正会員）

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

表－1 示方配合表および物性試験(材齢 2 日)結果

シリーズ名※		Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
						W	C	S	G			
C30-30	T30-30	8.0 ±1.0	4.0 ±0.5	47.5	44.6	172	362	769	1015	20.85	2.27	2.60
C50-50	T50-50									23.51	2.72	2.62
C50-30	T50-30									20.84	2.43	2.72
C70-70	T70-70									33.84	2.36	3.33
C70-50	T70-50									32.85	2.27	3.34
C70-30	T70-30									33.10	3.21	3.19

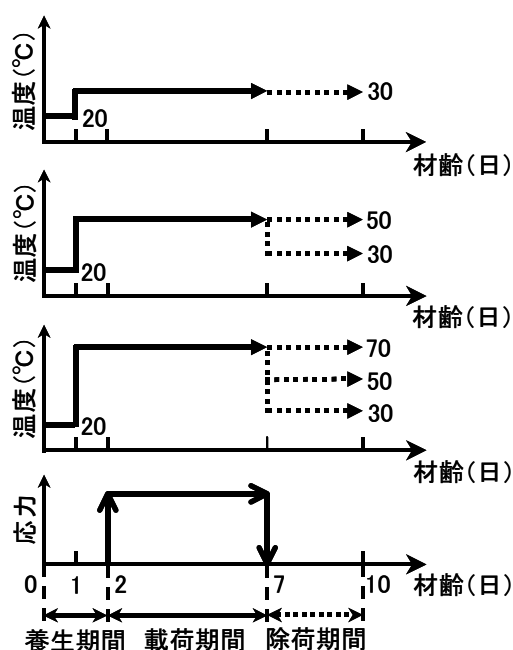
※シリーズ名について、C:圧縮クリープ、T:引張クリープ、(養生・載荷温度(°C))－(除荷温度(°C))で表す

定常となる¹⁾ことから載荷期間は5日間とした。除荷後のひずみが定常に至る期間は3日程度²⁾とされているため除荷期間は3日間とした。載荷応力は、応力強度比(載荷応力/載荷時における強度)を用いて決定しており、クリープ試験用供試体と同じ温度履歴を与えた供試体の物性試験結果より算出した。本試験では応力強度比を圧縮クリープ試験 10%、引張クリープ試験 40%とした。

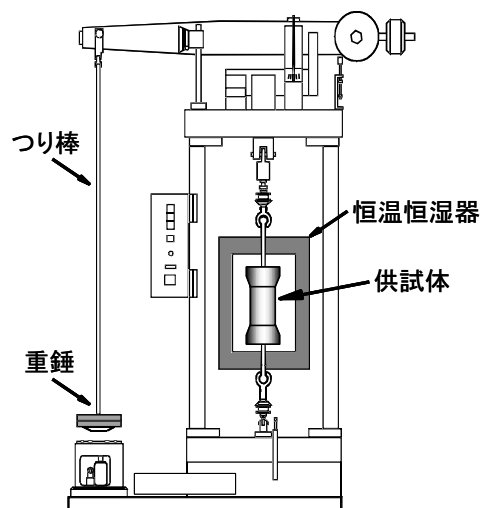
試験温度については、一般のコンクリート構造物において水和反応熱により構造物内部の温度が 30℃～50℃、場合によっては 70℃以上に達することを考慮して 30℃、50℃、70℃の3水準を設定した。養生温度および載荷温度は各シリーズにおいてそれぞれ一定とし、除荷後の温度はそれまでの載荷温度と同じか、もしくは降下させる温度履歴を与えて、これらを組み合わせた計 6 シリーズのクリープ試験を行った。湿度については、試験中の全期間を通じて 98%一定とした。

2.3 クリープ試験

圧縮クリープ試験にはφ10×20cm の円柱供試体を用い、引張クリープ試験には中心部分がφ7.5×13.4cm のドッグボーン型供試体³⁾を用いた。供試体内部にはクリープひずみと供試体温度を測定するために埋め込み型ひずみ計と熱電対を設置した。コンクリートは、温度 20℃に制御された恒温室内で打設し、24 時間静置後に脱型した。その後、水分の逸散を防止するため



図－1 クリープ試験における応力および温度履歴



図－2 引張クリープ試験機

に供試体側面をアルミテープで被覆し，所定の養生温度に設定した恒温恒湿器内で養生した。また，自己収縮等のクリープ以外の初期応力変形が予測されるため，無載荷用供試体を同一条件で作製，養生した。

本研究で使用した圧縮クリープ試験機，引張クリープ試験機は，温度および湿度が制御可能な恒温恒湿器を備えた，てこ式クリープ試験機である。図-2に引張クリープ試験機を示す。

3. 若材齢クリープの評価方法

本研究において若材齢コンクリートのクリープひずみは，クリープ試験において，載荷用供試体で計測されるひずみから，無載荷用供試体で計測されるひずみと，弾性ひずみとを差し引いた値とした。ここで，材齢が経過し強度が十分に発現しているコンクリートであれば，載荷期間中，弾性ひずみは一定と考えて問題ないが，水和反応が活発で強度の増進が著しい若材齢時においては，弾性係数の増加による弾性ひずみの減少分を考慮する必要がある。そこで，クリープ試験機を用いて簡易的に弾性係数の計測を行った。計測方法は，載荷用供試体の載荷荷重を微小に増減させ，そこから得られる応力-ひずみ関係より弾性係数を算出するものとした。この方法による弾性係数計測は1日おきに行い，弾性係数の時系列データの欠落している部分は各データ値を補間することで求めた。その結果得られる載荷応力-弾性係数関係より，クリープ試験中の弾性ひずみを算出した。

4. 物性試験結果

物性試験はクリープ試験用供試体と同様の温度履歴を与えた供試体を用いて行った。表-1に材齢2日（クリープ試験の載荷時の材齢）における物性試験結果を示す。割裂強度を除き，各シリーズにおいて養生温度が高いほど各物性値が大きくなっていることが分かる。これは，材齢初期の高温養生によって水和反応が促進され，早期の強度発現につながったものと思われる。

る。図-3にシリーズ30-30の弾性係数試験の経時変化を示す。図より，静弾性係数試験とクリープ試験機を用いた簡易弾性係数試験を比較すると概ね一致していることが分かる。

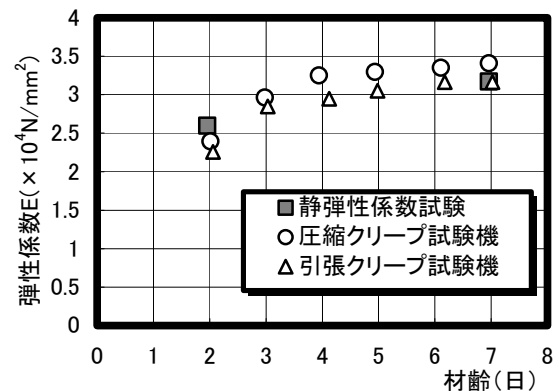


図-3 弾性係数経時変化(30-30)

表-2 クリープ試験における応力強度比

シリーズ	載荷時 応力強度比 (%)	載荷応力 (N/mm ²)
C30-30	10	2.08
C50-50		2.35
C50-30		2.08
C70-70		3.39
C70-50		3.29
C70-30		3.31
T30-30	40	0.91
T50-50		1.09
T50-30		0.96
T70-70		0.95
T70-50		1.11
T70-30		1.29

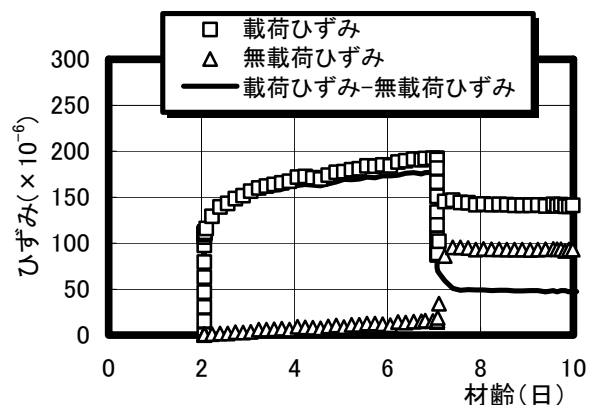


図-4 クリープ試験結果(C70-30)

5. クリープ試験結果

表-2 にクリープ試験における各シリーズの荷重応力を示す。

図-4 にクリープ試験におけるひずみの計測結果としてシリーズ C70-30 の結果を示す。ここで、荷重ひずみとはクリープ試験において荷重を載荷した供試体で計測されたひずみのことであり、無荷重ひずみとは無荷重で静置した状態で計測されたひずみのことである。また、材齢の評価基準として、温度履歴と材齢の影響を同時に評価できる有効材齢を用いた。式(1)に有効材齢の定義を示す。

$$t_e = \int_0^t (T + 10) dt / 30 \quad (1)$$

ここで、 t_e ：有効材齢(日)， T ：温度(℃)， t ：期間(日)である。

5.1 養生温度および荷重温度の影響

図-5 に圧縮クリープ試験におけるシリーズ C30-30，C50-50，C70-70 の荷重期間中の単位クリープひずみを有効材齢で表したものを示す。ここで、単位クリープひずみとは単位応力あたりのクリープひずみのことである。図より、シリーズ C30-30 の単位クリープひずみの増加が大きく、荷重温度が高いシリーズほど単位クリープひずみは小さくなるのがわかる。これは、若材齢時において高温でクリープ試験を行った場合、①コンクリートの水和反応が促進されて早期に強度が発現し、その結果クリープが抑制される影響と、②高温下ではクリープが促進されるという相反する要因が作用し、本試験では①の影響が顕著に表れたものと思われる。

図-6 に引張クリープ試験におけるシリーズ T30-30，T50-50，T70-70 の荷重期間中の単位クリープひずみを有効材齢で表したものを示す。図より、シリーズ T70-70 については他のシリーズと比べて有効材齢の経過に伴って圧縮クリープ試験と同様にクリープが抑制されていることがわかる。しかし、荷重直後の短期間にお

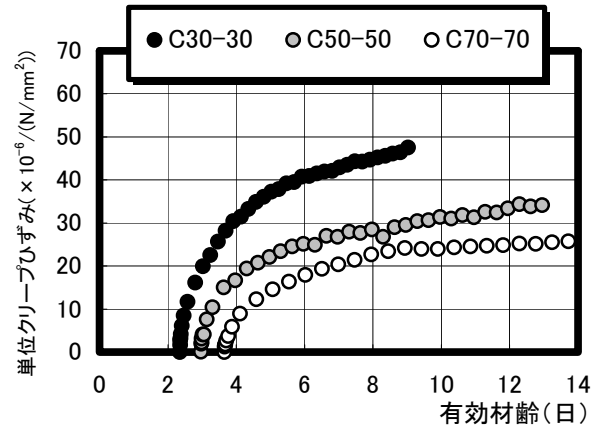


図-5 圧縮クリープにおける単位クリープひずみ

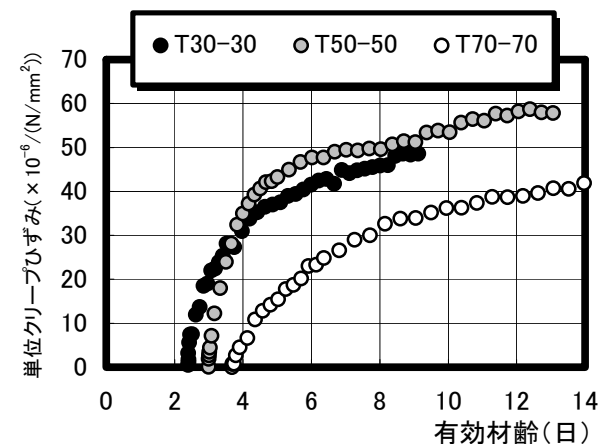


図-6 引張クリープにおける単位クリープひずみ

ける T50-50 の単位クリープひずみの伸びが著しいため、シリーズ T30-30 と T50-50 を比較すると、温度設定の高いシリーズ T50-50 において若干ひずみが大きくなっている。シリーズ T50-50 について、荷重直後の単位クリープひずみが急激な伸びが生じた要因としては、引張クリープ試験に用いたドッグボーン型供試体の断面変化部に生じていたクラックが考えられる。ドッグボーン型の供試体形状から、治具を用いて引張応力を導入する断面変化部には応力集中が予想され、この部分にクラックが生じていたことで、荷重直後に急激にクリープが進行したものと思われる。

圧縮クリープと引張クリープを比較すると、いずれのシリーズにおいても両者は同様な、もしくは引張クリープの単位クリープひずみが大きくなる傾向を示している。引張クリープに

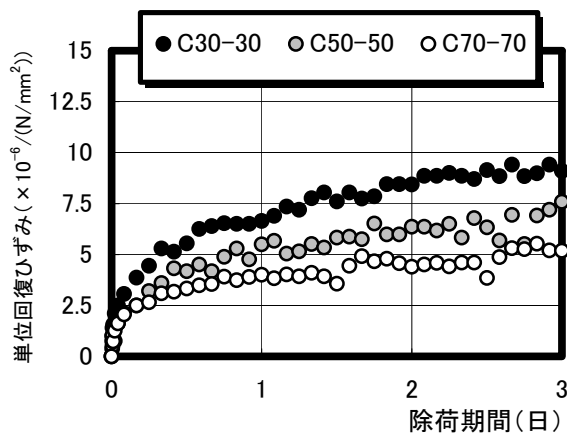


図-7 圧縮クリープにおける単位回復ひずみ
(全期間一定温度シリーズ)

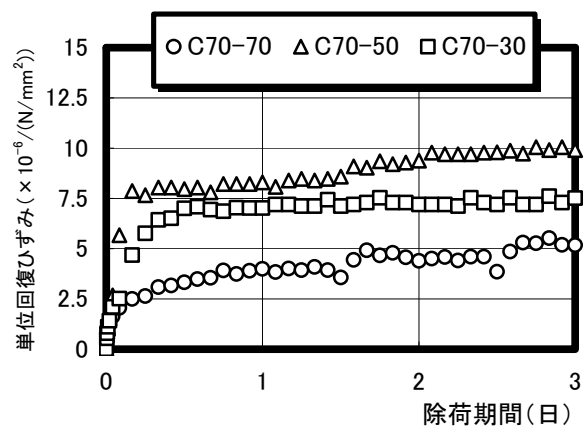


図-9 圧縮クリープにおける単位回復ひずみ
(載荷温度 70°Cシリーズ)

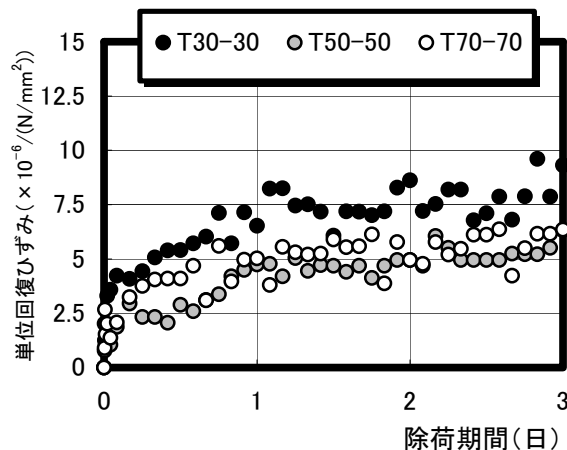


図-8 引張クリープにおける単位回復ひずみ
(全期間一定温度シリーズ)

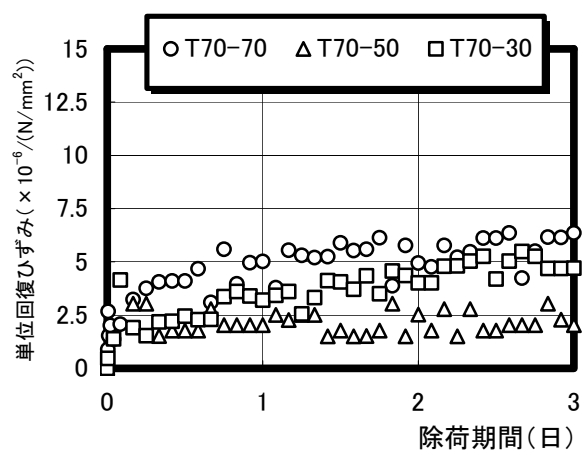


図-10 引張クリープにおける単位回復ひずみ
(載荷温度 70°Cシリーズ)

において単位クリープが大きい傾向を示すのは、圧縮クリープに比べて引張クリープではより低レベルの応力においてマイクロクラックが発生、発達するためと思われる。

5.2 除荷期間における温度の影響

(1) 載荷時と除荷時で一定温度の場合

図-7 に圧縮クリープ試験におけるシリーズ C30-30, C50-50, C70-70 の除荷後の単位回復ひずみを示す。ここで、単位回復ひずみとは回復ひずみを除荷した応力で除した値とする。図-8 のシリーズは載荷時と除荷時の温度は一定で試験を行っている。図より、各シリーズにおいて温度の違いによる回復ひずみの差が顕著に表れているわけではないが、温度の低いシリーズ C30-30 において回復ひずみの絶対値が大き

く、温度の高いシリーズほど回復ひずみは小さくなる傾向がみられる。これは載荷期間中の単位クリープひずみと同様の傾向であり、材齢初期からの高温養生、高温載荷によってコンクリートの強度、弾性係数が増進し回復ひずみが小さくなったものと思われる。

図-8 に引張クリープ試験におけるシリーズ T30-30, T50-50, T70-70 の除荷後の単位回復ひずみを示す。図より、圧縮クリープと同様に各シリーズにおいて顕著な差は認められないが、温度の低いシリーズほど単位回復ひずみが大きくなる傾向を示している。

(2) 除荷時に温度降下させた場合

シリーズ C50-30 および T50-30 については、載荷荷重を除荷する際の工程が他のシリーズ

表－3 コンクリートの線膨張係数

シリーズ	線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
C70-70	8.160
C70-50	10.117
C70-30	10.111
T70-70	8.160
T70-50	9.497
T70-30	9.975

と異なり，除荷時弾性ひずみやその後のひずみ挙動の計測に影響を及ぼしたと考えられるため，除荷後の回復ひずみの検討から除外した。

また，除荷時の温度変化によるクリープ試験用供試体の熱膨張ひずみを除去するために，各シリーズにおいてコンクリートの線膨張係数を求めて計測ひずみの補正を行った。線膨張係数は，温度降下時の無載荷用供試体で計測される温度変化とひずみの関係より求めた。表－3に各シリーズにおけるコンクリートの線膨張係数を示す。

図－9 にシリーズ C70-70，C70-50，C70-30 における除荷後の単位回復ひずみを示す。これらのシリーズは除荷開始時点まで同じ温度履歴を受けており，各々のコンクリートは同じ状態であると思われる。図より，一定温度のシリーズ C70-70 に比べて除荷時に温度降下させたシリーズ C70-50，C70-30 では除荷直後の回復ひずみの伸びが大きくなっているが，除荷時の温度の違いと単位回復ひずみの間に相関関係は認められない。また，シリーズ全体についてひずみ挙動の収束が早く，シリーズ C70-50，C70-30 については除荷後約 0.5 日でひずみ挙動がほぼ収束していることがわかる。これは，各シリーズにおいて除荷開始時の材齢 7 日まで 70℃という高温で養生，載荷を行っておりコンクリートの水和や強度発現が著しいため，除荷時の温度の違いによる影響は小さく，ひずみが収束するのも早くなったと考えられる。

図－10 にシリーズ T70-70，T70-50，T70-30 における除荷後の単位回復ひずみを示す。図よ

り，各シリーズにおいて単位回復ひずみは小さく，除荷時の温度の違いと単位回復ひずみの間に相関関係は認められない。これは，圧縮クリープと同様に除荷開始の時点では，既にコンクリートの強度が発現した状態にあり，除荷時の温度の影響が小さくなったものと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 若材齢時のクリープ挙動に与える温度の影響として，温度上昇に伴うセメントの水和促進によって早期に強度が発現し，クリープが抑制される要因と，逆に高温下では内部エネルギーが活発になりクリープが促進される要因が挙げられる。本研究においてはセメントの水和度の影響が大きく，圧縮および引張クリープ試験における載荷期間中の単位クリープひずみは，養生温度および載荷温度が高いほど小さくなる。
- (2) 圧縮および引張クリープ試験において全期間一定の温度履歴を受けた場合，除荷期間中の単位回復ひずみは温度の影響が大きく，温度が高いほど単位回復ひずみは小さくなる。
- (3) 養生および載荷期間中に高温履歴を受けた場合，除荷期間中の単位回復ひずみに与える温度の影響は顕著に認められない。

参考文献

- 1) 入矢桂史郎ほか：若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究，土木学会論文集，No.599/V-40，pp.1-14，1998.8
- 2) Iriya,K. Hiramoto,M. Hattori,T. and Umehara,H.: Creep Behavior for Early Aged Concrete, 1997, Proceedings of International Conference on Engineering Materials,1997.6.8.
- 3) 入矢桂史郎ほか：若材齢コンクリートの引張クリープに関する研究，土木学会論文集，No.620/V-43，pp.201-213，1999.5