

論文 水和反応を抑制した若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究

吉武 勇^{*1}・浜田純夫^{*2}・中村秀明^{*3}・永井泉治^{*4}

要旨：マスコンクリートの温度応力は、若材齢時に顕著なクリープ特性によって大きく緩和される傾向があり、温度応力解析の推定精度の向上にはクリープによる応力緩和の明確化が必要不可欠なものである。特にマスコンクリート構造物では、部位により水和の進行状態が異なるため、それに応じたクリープひずみを的確に表現するクリープ推定式が必要とされる。そこで本研究では、基礎的研究として水和反応の進行の影響を小さくした低温環境下において、若材齢コンクリートの圧縮クリープ実験を行うとともに、実験結果を基にレオロジーモデル等を介したクリープ式の適合性について検討を行った。

キーワード：若材齢コンクリート、圧縮クリープ、Specific Creep, レオロジーモデル

1. まえがき

コンクリート構造物は、セメントの水和反応に伴い温度応力や自己収縮応力が発生するが、若材齢時に顕著なクリープ特性によって、作用する応力が緩和される傾向がある。温度応力や自己収縮応力によるひび割れ発生を検討を行うには、このクリープによる応力緩和作用の明確化が必要不可欠なものである。

近年、若材齢コンクリートのクリープに関する研究は盛んに行われているが、いずれも若材齢時の活発な水和反応進行過程におけるクリープ試験であるため、試験期間中におけるコンクリートの強度発現の影響を十分には考慮できないものと思われる。そこで本研究は、クリープ試験中の強度発現の影響をできるだけ小さくする目的から、若材齢コンクリートの水和反応を抑制できる低温環境下において圧縮クリープ試験を行った。特に、圧縮クリープに対し、載荷材齢および単位セメント量の及ぼす影響の明確化を図った。また、得られた実験結果を基に、数種類のレオロジーモデル等を用いて回帰を行った。

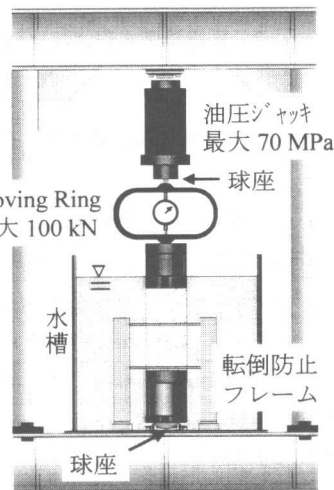


図-1 圧縮クリープ試験装置

2. 実験概要

2.1 実験方法

本研究では、室温-1℃(以下、低温養生と略す)の冷凍庫において、不凍液で満たされた水槽内で圧縮クリープ試験を行った。なお、積算温度則ではコンクリートの強度発現停止温度は-10℃とされているが、-5℃で供試体破壊がみられたため、本研究では環境温度-1℃を採用した。

また、試験に用いたコンクリート供試体は、φ

*1 山口大学大学院 理工学研究科博士後期課程設計工学専攻, 修士(工学) (正会員)

*2 山口大学教授 工学部社会建設工学科, Ph.D. (正会員)

*3 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科, 博士(工学) (正会員)

*4 (株)エイトコンサルタント

表-1 配合条件と諸物性値

記号	単体量 kg/m ³				混和剤 %/m ³	
	W	C	S	G	AE	防凍
O20	110	200	912	1177	0.50	4.0
O30	165	300	812	1047	0.75	6.0
O40	220	400	711	917	1.00	8.0

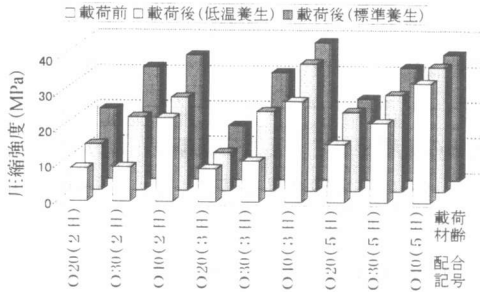


図-2 圧縮強度発現性状比較

10×h20cmの円柱型であり、表面に撥水処理を施した後、ステンレス製の載荷板を取り付けたものである。

載荷応力は、クリープ載荷供試体と同時に作製された円柱型供試体(φ10×20cm)の圧縮強度試験結果より決定し、所定の応力強度比となるように油圧ジャッキおよび Proving Ring を用いて載荷応力の導入を図った(図-1 参照)。ここで導入された載荷応力は、Proving Ring に取り付けられたダイヤルゲージの指示値により求めた。

また、クリープ試験期間中の水和反応の抑制度を把握するため、試験終了時(載荷期間7日)に低温養生および20℃水中養生(標準養生)した円柱型供試体の強度試験を行った。なお、いずれの供試体も打設後1日で脱型し、クリープ試験直前まで標準養生を行ったものである。

本研究では、ひずみの計測にあたり測温機能を有する内部ひずみゲージを採用し、Data Logger に取り込まれるデータを15分ごとにパソコンのハードディスクに記録・処理を行った。またクリープひずみは、無載荷供試体との重ね合わせより求めた。

2.2 実験項目

既往の研究より、若材齢コンクリートにおいて

も応力強度比40%以下では載荷応力と圧縮クリープひずみに比例関係の成立が認められている¹⁾。そこで本研究では、応力強度比を40%と一定にし、単位セメント量200~400kg/m³のコンクリートについて載荷材齢(2, 3, 5日)を変えて試験を行った。

2.3 使用材料と配合

コンクリート供試体を作製するにあたり、普通ポルトランドセメント、北九州若松産の細骨材(比重2.60, F.M2.36)および山口県宮野産の粗骨材(比重2.70, 最大寸法20mm)を使用した。また、コンクリート内部の凍結およびそれに伴う破損防止の目的から、練り混ぜ水を一部防凍剤に置換した。なお、この防凍剤は規定量の半量とし、コンクリート物性に与える影響の低減を図った。配合条件を表-1に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 低温養生における強度発現性状

図-2に標準および低温養生を施した若材齢コンクリートの強度発現性状を示す。この結果より、低温養生は標準養生に比べいずれも強度が低いことから水和反応を抑制しているものと考えられる。特に載荷材齢が若材齢であるほどその傾向は著しいことがわかる。

3.2 養生方法の違い

載荷材齢3日および5日において、低温養生を施した本研究の実験結果と平本ら²⁾の研究結果(養生温度30℃、応力強度比36%または38%)の比較をそれぞれ図-3、図-4に示す。

クリープ試験中において、水和反応を抑制する低温養生のほうがコンクリートの骨格構造の形成が遅れるために、養生温度30℃の Specific Creep(単位クリープ:クリープひずみ/載荷応力)より大きくなることが予想されたが、図-3および図-4の結果では、低温養生を施したほうが著しく Specific Creep が小さい結果となった。一般

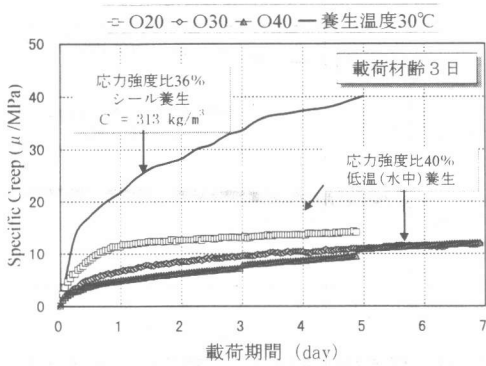


図-3 養生方法および単位セメント量の比較 (載荷材齢3日)

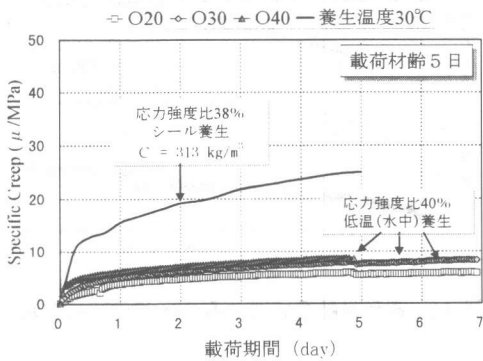


図-4 養生方法および単位セメント量の比較 (載荷材齢5日)

に環境温度が高温である場合、セメントペースト中の間隙水の粘性低下や吸着水の表面張力低下が生じ、シーページ効果が顕著になるものと考えられる。しかしながら低温環境下では、このようなクリープ発生機構の影響は小さく、結果的に Specific Creep が小さくなったものと思われる。これらのことから、載荷材齢3日以降の若材齢コンクリートの圧縮クリープは、シーページ効果の影響が支配的であると考えられる。

3.3 単位セメント量の違い

図-3～図-5において、単位セメント量の違いによる Specific Creep の比較結果を示す。載荷材齢2日(図-5参照)の配合記号O40の Specific Creep が他の結果に比べ突出して大きいものの、載荷材

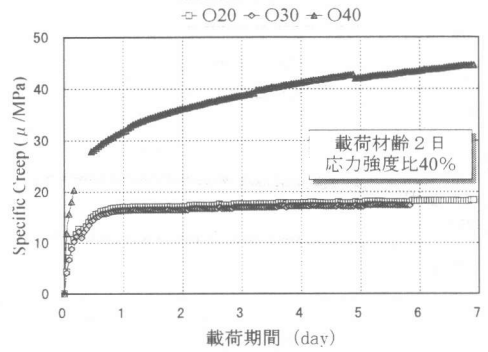


図-5 単位セメント量の違い(載荷材齢2日)

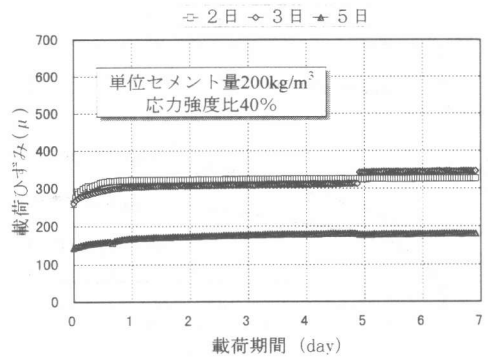


図-6 載荷材齢違いによる載荷ひずみ(O20)

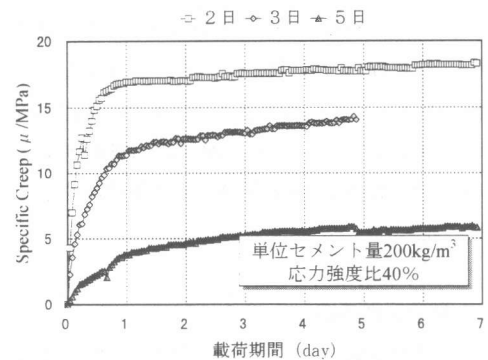


図-7 載荷材齢違いによる Specific Creep (O20)

齢3日(図-3参照)および5日(図-4参照)では、単位セメント量の違いによる有意な差異は認められない。本研究は、低温環境下における試験であるため、粘性流動の要因となるセメントペースト量の影響よりも、シーページ効果に顕著な影響をもたらす環境温度の影響が大きく現れ、結果的に単位セメント量の違いによる Specific Creep の

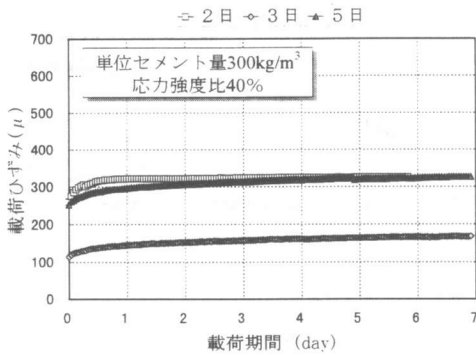


図-8 載荷材齢違いによる載荷ひずみ(○30)

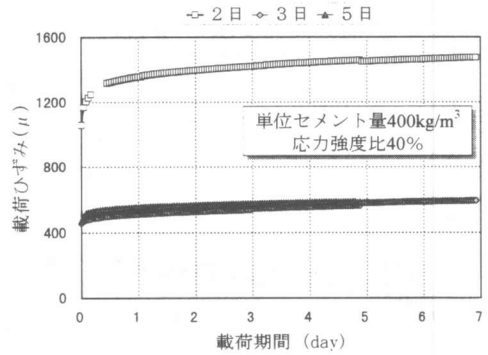


図-10 載荷材齢違いによる載荷ひずみ(○40)

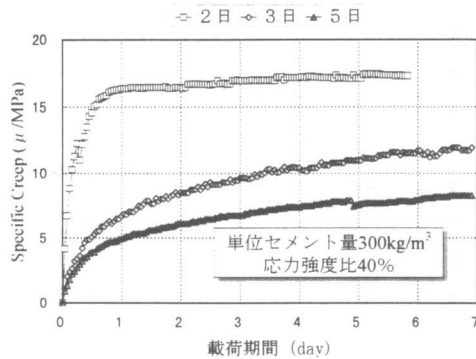


図-9 載荷材齢違いによる Specific Creep (○30)

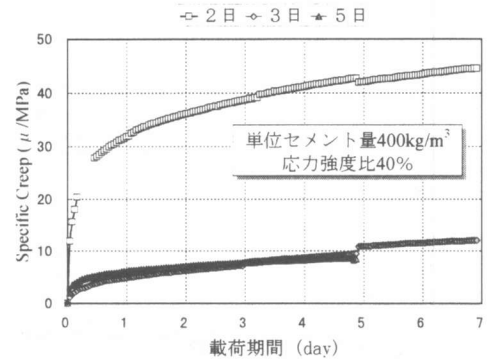


図-11 載荷材齢違いによる Specific Creep (○40)

違いが現れなかったものと思われる。また、載荷材齢2日の○40の結果が突出して大きくなった原因の一つとして、単位セメント量の増加に伴う未水和セメントペーストの増大の影響が考えられる。これは載荷が若材齢ほどその傾向は著しいものと推察される。

3.4 載荷材齢の違い

載荷材齢が異なるクリープひずみ変化の比較を図-6～図-11に示す。なお、図-6、図-8および図-10の載荷ひずみ(Y軸)とは、載荷に伴うひずみを示し、弾性ひずみとクリープひずみの和である。

載荷ひずみの結果において、いずれもクリープひずみの増進分は弾性ひずみに比して非常に小さいことが分かる。特にその傾向は、載荷材齢5日の試験結果において顕著である。また、一般に載荷材齢が若材齢であるほどクリープひずみは

大きくなるが、載荷材齢の進行に伴いコンクリートの強度が増進するため、同一の応力強度比で載荷する場合、載荷ひずみが大きくなる傾向にある。したがって、載荷ひずみは載荷材齢やコンクリートの強度の影響が複雑に入り交じるため、各要因で一律に評価することは困難であるものと考えられる。

ここで応力の影響を無次元化することができる Specific Creepに着目すると、配合記号○20や○30の結果では、若材齢ほど載荷初期に発生するひずみが著しいとともに、載荷材齢の進行に伴い徐々に小さくなっていることが分かる。しかしながら、○40の結果では、載荷ひずみの結果と同様に載荷材齢3日と5日の Specific Creep がほぼ等しいものとなった。これは、○40の載荷材齢3日の試験結果において、クリープ試験期間中におけるコンクリートの強度増進が、載荷材齢5日に比

非常に大きく、そのため試験期間中のクリープの増進が抑制されたものと思われる(図-2 参照)。一般的なコンクリートでは、材齢3～5日程度まで、コンクリートの強度増進の過渡期にあり、強度増進性が収束に向かう材齢5日以降に比べ、試験期間における強度増進の影響が大きく現れるものと考えられる。特に単位セメント量の大きいO40では、試験期間に生成される水和物の占める割合が大きいため、その傾向が著しいものと考えられる。

また荷重応力は、クリープ試験供試体とは別の供試体から得られた強度試験データを基に決定しているため、供試体そのものの強度のばらつきが及ぼす影響も少ないものと思われる。

4. クリープ回帰式

4.1 レオロジーモデル

既往の研究においてコンクリートのクリープ挙動を再現するにあたり、VoigtモデルやMaxwellモデル等を数種類組み合わせることでモデル化した回帰式がしばしば用いられている^{1)・2)}。本研究では、図-12に示す3種類のレオロジーモデル(以下、各々VV、VM、VVDモデルと略す)を用い、式(1)～(3)に示される各式の実験値への適合性について検討した。また、精度の良いクリープ回帰式を構築する目的からレオロジーモデルによる式(以下、提案式と称す)を基に、式(4)を考案し比較検討を試みた。

$$J = a[1 - \exp(-bt)] + c[1 - \exp(-dt)] \quad (1)$$

$$J = a \exp(-bt) + c[1 - \exp(-bt)] + dt \quad (2)$$

$$J = a[1 - \exp(-bt)] + c[1 - \exp(-dt)] + et \quad (3)$$

$$J = a\sqrt{t} + b[1 - \exp(-ct^d)] \quad (4)$$

ここに、 J は Specific Creep(μ /MPa)を表し、 t は荷重期間(day)を示す。また、 $a \sim e$ は最小二乗法によって求まる実験定数である。

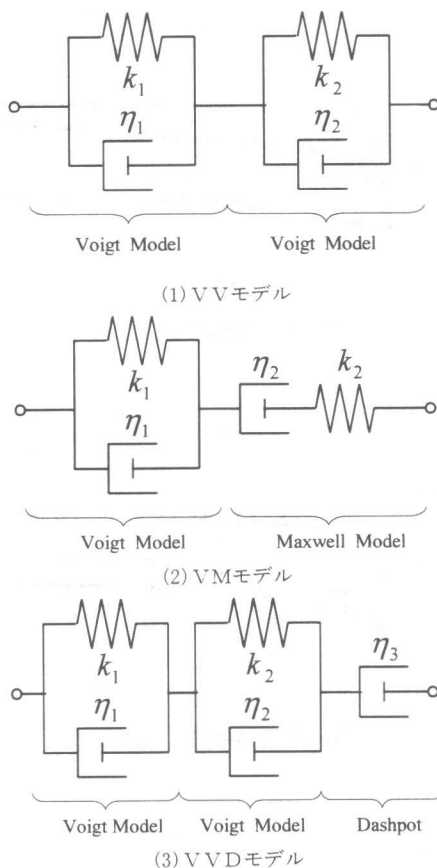


図-12 レオロジーモデル

4.2 回帰結果と考察

本研究で行った各配合の実験結果を、式(1)～(4)を用いて回帰を行ったところ、図-13～図-15に示される結果を得た。また、回帰結果の適合性を評価する目的から、VVDモデルによる誤差累計(回帰値と実験値の差の累計)に対する他の回帰式による誤差累計の比を表-2に示す。

ここで図-13～図-15に示されるように、VVモデルによる式(1)の回帰は、荷重長期において実験値を十分に再現できず、他の式に比べ精度が低いことが分かる(表-2 参照)。これは、式(1)による回帰が荷重期間の進行に伴い一定値に収束する傾向があるため、荷重長期において徐々にひずみが増進するコンクリートのクリープ現象を十分に再現できないことによるものと考えられる。また表-2の結果より、式(1)～(4)の中では、本研究で提案する式(4)が最も精度良く実験値を再現

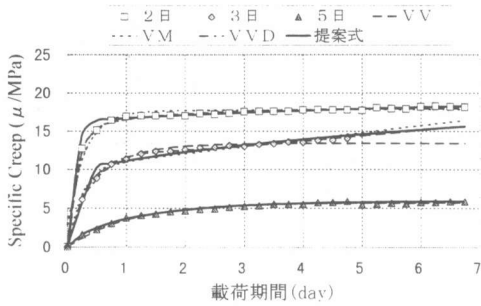


図-13 回帰結果 (O20)

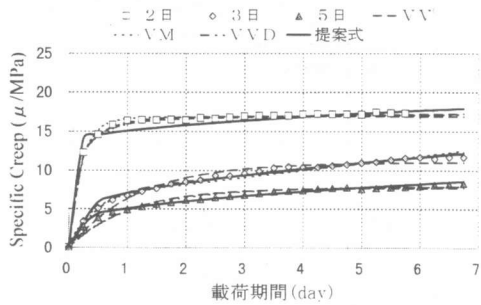


図-14 回帰結果 (O30)

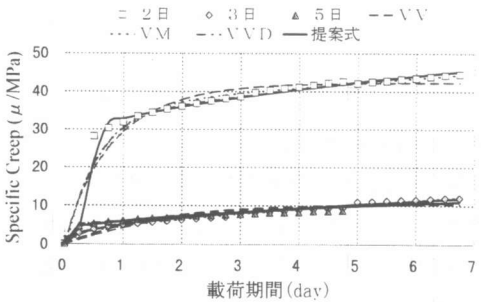


図-15 回帰結果 (O40)

できていることが分かる。これは、載荷長期においてクリープひずみの発生が停滞する特性を式(4)の右辺第1項でうまく表現できているためと思われる。なお、本提案式は載荷過程のみを解析対象としたため、今後広範囲に利用するためには、除荷も考慮に入れたクリープ式を構築する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究は、若材齢時におけるコンクリートの水和反応がクリープ特性に及ぼす影響を考慮する

表-2 回帰結果の精度比較

	VV	VM	VVD	提案式	
O20	2日	1.223	3.044	1.000	1.482
	3日	0.917	1.088	1.000	1.043
	5日	1.014	0.867	1.000	0.779
O30	2日	0.999	1.017	1.000	1.148
	3日	1.870	1.263	1.000	0.872
	5日	1.131	0.967	1.000	0.580
O40	2日	1.582	1.051	1.000	0.688
	3日	2.149	0.748	1.000	0.887
	5日	1.134	1.010	1.000	0.963
平均	1.335	1.228	1.000	0.938	

ため、水和反応を抑制できる温度環境下において圧縮クリープ実験を行い、その特性について考察を加えたものである。本研究の範囲内において得られた結論を以下に要約する。

- ① 載荷材齢3日以降の圧縮クリープでは、試験期間における水和反応の進行度よりも、クリープひずみ発生の温度依存性の影響が大きい。
- ② 水和反応を抑制する低温養生において、単位セメント量 200~400kg/m³ 程度の若材齢コンクリートの Specific Creep はほぼ等しい。
- ③ 水和反応抑制環境下における若材齢コンクリートの圧縮クリープを回帰するにあたり、本研究の提案式が最も精度良く回帰できる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、山口大学大学院の林一成氏、三村陽一氏に多大な御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

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論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1133~1138, 1995.6.
- 2) 平本昌生, 入矢桂史郎, Gupta Spratic, 梅原秀哲: 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論文報告集, Vol.19, No.1, pp.775~780, 1997.6.