

# 水和反応を抑制した若材齢コンクリートの 圧縮・引張クリープ比較

吉武 勇<sup>1</sup>・浜田純夫<sup>2</sup>・中村秀明<sup>3</sup>・永井泉治<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 修士(工学) 山口大学大学院理工学研究科博士後期課程(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>4</sup>正会員 株式会社エイトコンサルタント(〒700-0087 岡山県岡山市津島京町 3 丁目 1-21)

マスコンクリート構造物の温度ひび割れに対し、その発生予測を高い精度で行うには若材齢コンクリートのクリープ特性の明確化が必要不可欠である。本研究は、クリープ試験期間におけるコンクリートの水和反応進行の影響を低減する目的から、低温環境下において異なる配合条件の圧縮・引張クリープ実験を行った。その結果、水和反応抑制環境下では単位応力あたりの圧縮クリープに比べ引張クリープが大きくなり、既往の研究結果とは異なる傾向があることが分かった。また、圧縮・引張クリープの違いから、両者のクリープ発生機構の相違が伺えた。

**Key Words :** mass concrete, early age concrete, less hydration, creep mechanism, specific creep

## 1. はじめに

若材齢コンクリートの圧縮・引張クリープ特性の比較に関する研究は数例数えるのみであり、定量化できる程度の十分な資料に乏しいのが現状である。これらの研究は、マスコンクリートや高強度コンクリート等の若材齢時におけるひび割れ発生問題を対象とする研究ばかりでなく、コンクリートのクリープ発生機構の解明にも有用な資料となり得る。

森本ら<sup>1)</sup>は、若材齢コンクリートの圧縮クリープひずみはシーページ効果が支配的になるため、引張クリープひずみに比べ3～4倍程度大きくなることを報告している。また、入矢・梅原ら<sup>2)</sup>は若材齢におけるモルタルの圧縮・引張クリープひずみがほぼ同等であること、および粗骨材の圧縮クリープひずみが引張クリープひずみに比べ非常に大きくなる結果より、粗骨材の影響を受けて圧縮クリープひずみが引張クリープひずみより大きくなることを報告している。なお、いずれの研究成果も水和反応の進行が比較的活発な温度環境下における実験結果である。

本研究は、クリープ試験期間において時々刻々と変化する若材齢コンクリートの力学特性(特に弾性ひずみやクリープひずみの減少)を考慮するため、水和反応を抑制した低温環境下で圧縮・引張クリープ実験を行い、その特性について報告するものである。

## 2. 実験方法

### (1) 供試体の詳細および載荷応力の導入方法

クリープ試験に際し、使用したコンクリート供試体は円柱型(φ10×h20cm)であり、ひずみの計測用にT社製の埋込型ひずみゲージを用いた。なお、本研究におけるクリープ試験は、乾燥収縮の影響を排除する目的から、水(不凍液)中において行うため、載荷治具を取り付けた供試体の全表面には、吸水膨張制御用の撥水剤を塗布した。

載荷応力の導入は、クリープ試験用供試体と同時に作製した円柱型コンクリート供試体(φ10×h20cm)を用いて、クリープ試験直前に圧縮・ヤング率試験用3本、割裂引張試験用5本について強度試験を行い、それらの平均値より所定の応力強度比となるように載荷力の決定を行った。また、図-1に示されるようにクリープ試験を低温環境下(-1±0.25℃)で行うため、試験期間中におけるコンクリート供試体の水和反応の抑制程度を確認する目的から、クリープ試験終了時に低温養生および標準養生を施した円柱型供試体の強度試験(圧縮・ヤング率試験3本、割裂引張試験3本)を行った。その結果、低温養生は標準養生の約40%以下の強度発現率であったため、試験中の水和進行の影響は低減できるものと考えられる。

## 引張クリープ試験装置

## 圧縮クリープ試験装置

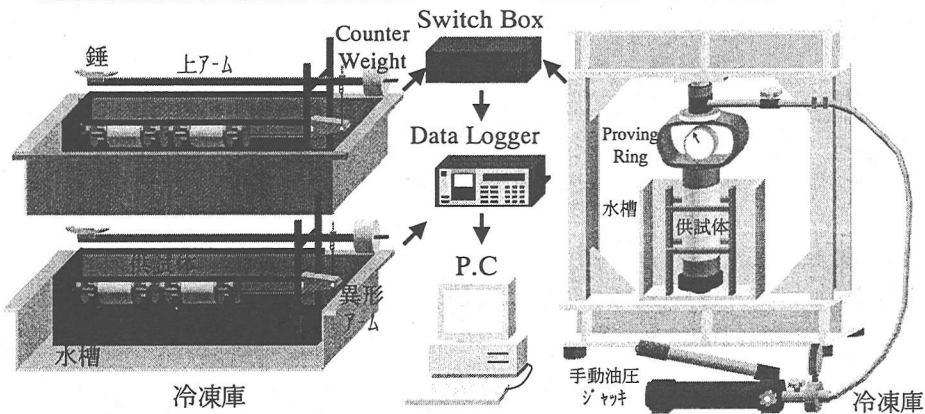


図-1 クリープ試験装置と試験方法

### (2) 圧縮クリープ実験方法

図-1に示されるようにコンクリート供試体には、手動油圧ジャッキによって圧縮応力を導入(載荷速度:約0.2MPa/s)するとともに、載荷荷重の検定および急激な油圧減少を防ぐ目的から Proving Ring(Max100kN)を併用した。しかしながら経時的な油圧の減少およびコンクリートの圧縮クリープ発生により載荷応力が徐々に小さくなるため、クリープ試験開始後より1時間ごとに載荷力のチェックを行い、所定の載荷力となるようにした。なお、載荷直後では頻繁に荷重制御を行い、載荷力の減少は0.1MPa程度内で収まるようにした。また、クリープ試験開始6時間以降ではほとんど載荷力の減少はみられなかった。

コンクリート供試体には、載荷によるひずみ(弾性ひずみ+クリープひずみ)以外に、自己収縮ひずみや熱ひずみ等が考えられる。そこで載荷に伴うひずみ成分(以下、載荷ひずみと表す)を求めるため、載荷供試体と無載荷供試体(載荷供試体と同様に埋込型ひずみゲージ埋設)より得られるひずみデータの差を用いた。厳密には両者に生じる微細な間隙は異なるため、それに伴う収縮ひずみも異なるが、本研究では、試験の便宜上その影響を無視することとした。

### (3) 引張クリープ実験方法

引張クリープ試験は、図-1に示すように供試体端面に異形アームとワイヤーで連結された載荷治具が取り付けられ、上アームに錘を載せることで、引張力を導入する2重レバー式載荷装置(レバー比1:40)を用いた。載荷装置の構造上載荷速度の制御は困難なため、特に急激な荷重が作用しないよう、手動にて徐々に載荷した。なお、圧縮クリープ試験と同様

表-1 実験項目

	載荷材齢 (日)	応力強度比 (%)	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	載荷時ひずみ ( $\mu$ )
圧縮	2	40	200	259
	2	40	300	259
	2	40	400	超過
	3	40	200	261
	3	40	300	114
	3	40	400	456
	5	40	200	143
	5	40	300	252
	5	40	400	469
	引張	2	20	200
2		20	300	12.3
2		20	400	18.7
2		30	200	14.4
2		30	300	7.0
2		30	400	26.7
2		40	200	破断
2		40	300	23.5
2		40	400	破断
3		20	200	13.5
3		20	300	12.5
3		20	400	18.9
3		30	200	22.2
3		30	300	16.7
3		30	400	19.4
3		40	200	超過
3		40	300	32.0
3		40	400	破断
5		20	200	10.3
5		20	300	17.3
5	20	400	16.9	
5	30	200	超過	
5	30	300	19.9	
5	30	400	破断	
5	40	200	破断	
5	40	300	破断	
5	40	400	破断	

に、無載荷供試体とのひずみの重ね合わせにより、載荷ひずみを求めた。

表-2 配合条件と諸物性値

記号	W/C %	単位量 kg/m <sup>3</sup>				混和剤 ㎖/m <sup>3</sup>	
		W	C	S	G	AE剤	防凍剤
○20	55	110	200	912	1177	0.50	4.0
○30		165	300	812	1047	0.75	6.0
○40		220	400	711	917	1.00	8.0
セメント	比重	比表面積		細骨材	比重	F.M	
普通	3.15	3200 cm <sup>2</sup> /g		粗骨材	2.60	2.36	
					2.72	Max 20mm	

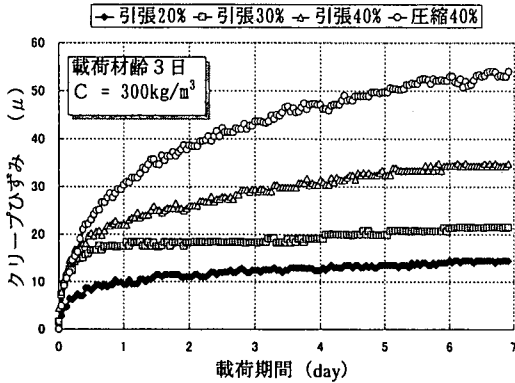


図-2 クリープひずみ比較(載荷材齢3日, 記号O30)

#### (4) 実験項目

既往の研究成果より応力強度比40%以下における若材齢コンクリートの圧縮クリープでは、載荷応力とクリープひずみに比例関係が認められることが報告されている<sup>3)</sup>。そこで本研究では、圧縮クリープ実験を応力強度比40%で行い、引張クリープ実験は応力強度比20~40%で行った(載荷材齢2, 3, 5日)。また、セメントペースト量がクリープ現象に及ぼす影響を把握するため、W/Cを55%に一定にして、単位セメント量を200~400kg/m<sup>3</sup>に変えて圧縮・引張クリープ実験を行った。本研究で行った実験の詳細を表-1に示す。なお、表-1における破断および超過は、供試体破断または試験装置の性能を超えたものを意味する。一般に、引張クリープにおいても応力強度比40%程度以下であれば、供試体は破断しないが、本研究では試験対象が若材齢コンクリートで且つ試験を低温な水中で行ったため、マイクロクラックの発生・進展が早期に生じたものと考えられる。また、本実験では載荷力の決定に際し、引張強度を純引張試験ではなく割裂試験から求めているため、実質的な応力強度比が高くなっている可能性も考えられる。

ここで、表-1に示されるように載荷時に生じるひ

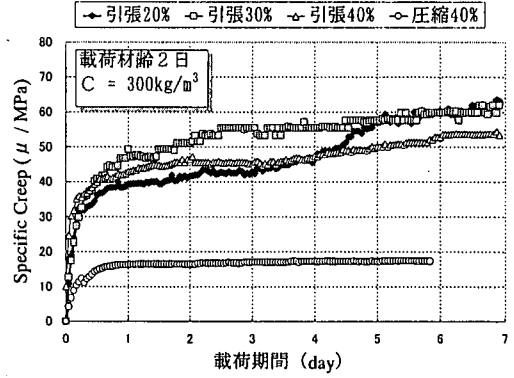


図-3 Specific Creep 比較(載荷材齢2日, 記号O30)

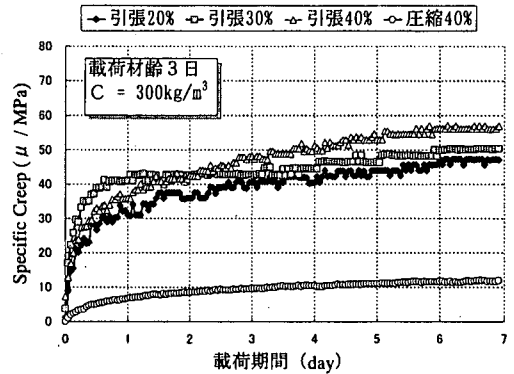


図-4 Specific Creep 比較(載荷材齢3日, 記号O30)

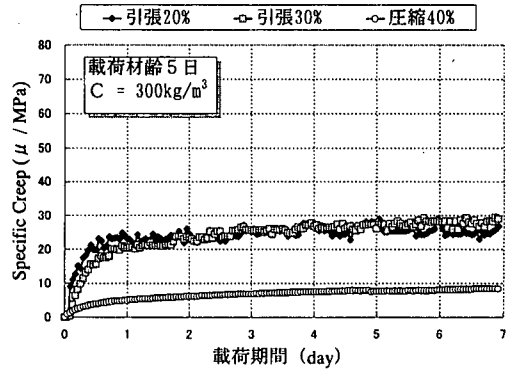


図-5 Specific Creep 比較(載荷材齢5日, 記号O30)

ずみは、圧縮・引張ともに単位セメント量の相違に伴う差異はほとんどみられないことが分かる。また、引張クリープ試験においては、一部に例外は認められるものの、応力強度の増加に伴い、若干ながら載荷時ひずみが大きくなっていることが分かる。同一配合・同一応力強度比においては圧縮クリープ試験による載荷時ひずみとは、約10倍程度の差が認められる。

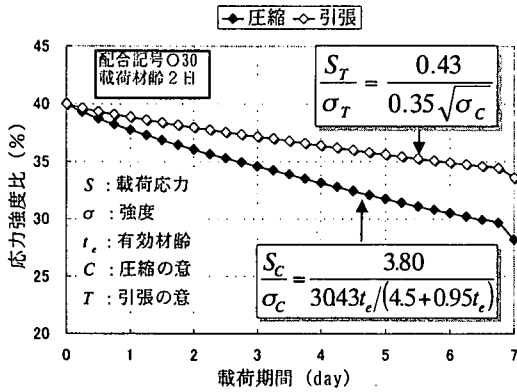


図-6 荷重期間における応力強度比低下の一例

### (5) 使用材料と配合条件

本研究で用いた使用材料と配合条件の詳細を表-2に示す。なお、クリープ試験を低温環境下において行うことから、内部水の凍結抑制のために練り混ぜ水の一部を防凍剤(既定値の半量)に置換した。この防凍剤混入により、コンクリート供試体の凍結ひび割れはみられなかった。

## 3. 結果と考察

### (1) 圧縮・引張クリープひずみの違い

図-2に荷重材齢3日、単位セメント量300kg/m<sup>3</sup>のクリープひずみ変化を示す。この結果において、応力強度比40%のものでは、荷重期間7日において圧縮クリープひずみのほうが引張クリープひずみに比べ約20μ程度大きいことが分かる。しかしながら、本結果は応力強度比を基準としているため、荷重応力は圧縮と引張で約10倍程度異なっている。また、引張クリープでは、応力強度比が大きくなるにつれクリープ量が大きくなっていることより、圧縮・引張クリープともに荷重応力の影響が極めて大きいことが分かる。

### (2) Specific Creepの違い

荷重応力の影響を排除するため、得られた結果をSpecific Creepで評価すると、図-3～図-5に示される結果となった。なお、図-3～図-5の結果より応力強度40%以下の引張Specific Creepは、多少のばらつきはあるものの有意な差異は認められない。荷重材齢5日では、荷重する応力強度比は異なるものの、Specific Creepを用いることで圧縮・引張の比較が行えるものと考えられる。引張クリープのばらつきの原因としては、引張ひずみおよび荷重応力が比較的

小さいことによるものと思われる。

これらの結果より水和反応を抑制した環境下においては、荷重材齢2～5日の範囲内で圧縮Specific Creepに比べ引張Specific Creepが大きくなることが分かる。長期材齢のコンクリートを対象としたDavis<sup>4)</sup>の研究では、同一荷重下において荷重初期に引張クリープひずみが大きくなるものの、荷重長期に渡っては圧縮・引張に差がないことが報告されている。Illston<sup>5)</sup>の研究では、引張クリープひずみのほうが圧縮に比べ約2倍程度大きくなることが報告されている。また、若材齢コンクリートを対象とした森本<sup>1)</sup>、入矢・梅原<sup>2)</sup>の研究では、圧縮クリープひずみのほうが引張クリープひずみに比べ大きくなることを報告している。本研究では、水和反応を抑制したため、クリープ試験期間中の強度発現性が著しく小さく、長期材齢コンクリートと同様の傾向になったものと思われる。

ここで、図-6に配合記号O30、荷重材齢2日の荷重期間における実質的な応力強度比低下を示す。なお、荷重期間のコンクリート強度は土木学会コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に基づき算出した。図-6の結果から水和反応(強度増進)の影響より、圧縮クリープおよび引張クリープの応力強度比の低下量は、荷重期間7日においてそれぞれ約12%、6%程度であることが分かる。このように圧縮クリープの応力強度比の低下量が大きいために、クリープひずみ量そのものが小さくなったものと考えられる。このことより、コンクリートのクリープ現象に水和反応の進行が大きな影響を及ぼすものと推察される。また、既往の研究結果<sup>1), 2)</sup>と異なる傾向となった要因のひとつに、クリープ試験そのものを水中で行ったことも考えられる。現状の結果のみでは、断定することはできないが、少なくともクリープ試験の実験条件(温度環境や湿潤状態)によって、若材齢コンクリートのクリープ特性は大きく異なるものと推察される。

圧縮・引張クリープの特性の違いに及ぼす要因として、シーページ効果や粘性流動、マイクロクラック等のクリープ発生機構の違いが考えられる<sup>7)</sup>。圧縮クリープにおいては、荷重応力の導入により骨格構造中の空隙が圧迫され、未水和水が毛細管を通じて外部へ排出される<sup>8)</sup>。しかしながら排出される未水和水には限りがあるとともに、圧縮応力荷重下では骨材界面の遷移帯に生じるマイクロクラックの進展に多くのエネルギーが必要とされるため<sup>9)</sup>、徐々にクリープ量は一定値に収束していく。逆に引張応力荷重下では、比較的低い応力レベルからマイクロクラックを進展させることができることから<sup>9)</sup>、圧縮に比べクリープひずみ量が大きくなるものと推察される。

また、引張応力荷重下では、コンクリート中に未水和水が存在すると、クラック周辺に水分子が吸着され、そのくさび作用や表面エネルギーの低下によりマイクロクラックの成長は促進される<sup>10)</sup>。特に水と反応を抑制した本研究では、このような現象が顕著になるものと予想される。

また、クリープ現象には環境温度が大きく影響を及ぼすことが知られている。森本ら<sup>1)</sup>、入矢・梅原ら<sup>2)</sup>の研究はいずれも環境温度20℃または30℃における試験結果であり、そのためクリープ試験供試体は活発な水和反応進行過程にある。本研究は水和反応を抑制する目的から、環境温度を-1℃に設定して圧縮・引張クリープ試験を行った結果である。しかしながら、コンクリートのクリープには水和度の影響のほかに環境温度の影響も小さくなく、環境温度の高温化に伴い、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、その結果クリープひずみ量は大きくなる傾向にある<sup>11)</sup>。本研究で得られた圧縮Specific Creepが、既往の研究結果<sup>1), 2)</sup>に比べ著しく小さくなったのは、低温環境下でクリープ試験を行ったためであり、このことより圧縮クリープは環境温度の影響が比較的大きいものと推察される。また、上記のような未水和水（間隙水等）の特性がシーページ現象に直接関係づけられることから、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特に大きいものと考えられる。

しかしながら、引張クリープは圧縮クリープほど環境温度の影響は小さくなく、比較的大きなクリープひずみ量となった。このことは、圧縮クリープのようなシーページ効果よりも、遷移帯のマイクロクラックなど別のクリープ発生機構が高い割合を占めていることを意味するものと思われる。これまでDavis-Granvilleの法則に基づいて、圧縮・引張のクリープ発生機構は同一として取り扱われてきたが、近年の研究成果より圧縮と引張クリープの発生機構の相違が指摘されている<sup>5)</sup>。本研究の結果からも両者のクリープ発生機構の差異が、ある程度推定できるものと考えられる。

### (3) 単位セメント量がクリープ量に及ぼす影響

圧縮・引張クリープの発生機構に影響を及ぼす要因のひとつとして配合条件の違いが挙げられる。入矢・梅原ら<sup>2)</sup>は、若材齢モルタルは圧縮・引張クリープ係数がほぼ同程度であるが、粗骨材が介入する若材齢コンクリートでは圧縮クリープ係数が引張クリープ係数に比べ大きくなることを報告している。これは粗骨材単体において圧縮クリープは発生するが、引張クリープはほとんどみられないことに起因する

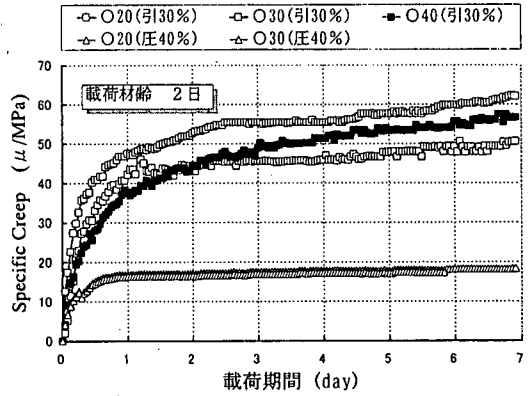


図-7 単位セメント量の比較(載荷材齢 2日)

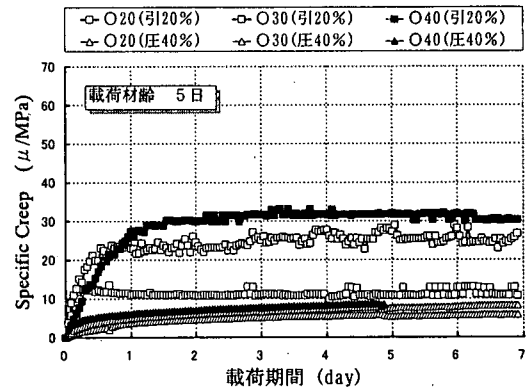


図-8 単位セメント量の比較(載荷材齢 5日)

ものである。また、若材齢コンクリートの引張クリープは粗骨材量を減ずる(モルタル量の増加)ことで、圧縮クリープと同程度のクリープひずみ量に近づくことも報告されている。

本研究は、W/CおよびS/aをそれぞれ55%、44.6%と一定にすることから、単位セメント量200~400kg/m<sup>3</sup>を変化させることで、配合条件の違いがクリープに及ぼす影響について検討を試みた。載荷材齢2日および5日における圧縮・引張クリープ実験結果をそれぞれ図-7、図-8に示す。載荷材齢2日の結果より、圧縮・引張は各々単位セメント量の違いによるSpecific Creepに有意な差異は認められないことが分かる。また載荷材齢5日の結果では、配合記号O20の引張Specific Creepが、配合記号O30およびO40の引張Specific Creepより非常に小さくなっているものの、その他に関しては載荷材齢2日と同様に単位セメント量の違いによるSpecific Creepに差異がないものと考えられる。なお、載荷材齢5日、配合記号O20の結果の原因としては、粘性流動するセメントペースト量が少なく、引張クリープの少ない粗骨材が占める割合が増加したことによるものと考え

られる<sup>2)</sup>。また、載荷応力が比較的大きく、骨材間を接着するペースト量が少ないことから、局部的な内部破断が生じ、供試体に偏心的な応力が作用したことが予想される。

入矢・梅原ら<sup>2)</sup>の研究では、粗骨材量が小さくなるほど引張クリープ係数が大きくなる傾向にあるが、本研究で行った配合条件の範囲内では、粗骨材量の違いは比較的小さいため、配合の違いによる Specific Creep に有意な差異が生じなかったものと考えられる。また、本研究は水和反応抑制環境下において実験を行っているため、特に引張クリープには配合条件等の影響よりも、載荷時のコンクリート強度(水和の進行度)が及ぼす影響が大きいものと推察される。

#### 4. 結論

本研究は、若材齢コンクリートを対象に圧縮・引張クリープ実験を行い、その特性について比較検討したものである。特に試験中における水和反応の進行の影響を小さくする目的から、低温環境下(水中)においてクリープ試験を行った。

本実験結果より、水和反応抑制環境下では、若材齢コンクリートのクリープに関する既往の研究結果とは大きく特性が異なり、圧縮 Specific Creep に比べ引張 Specific Creep が非常に大きくなる結果となった。これはむしろ長期材齢のコンクリートの特性に近いことから、クリープ試験中における水和反応の進行の影響は著しいものと推察された。また本研究結果および既往の研究結果を比べ、圧縮クリープに対する環境温度の影響が非常に大きいものの、引張クリープではそのような傾向が顕著でないことから、両者のクリープ発生機構の違いが伺えることが分かった。また、単位セメント量を変えて圧縮・引張クリープ試験を行ったところ、単位セメント量 200~400kg/m<sup>3</sup>の範囲内では、Specific Creep に大きな差は

生じなかった。

今後、若材齢コンクリートのクリープに及ぼす環境温度の影響および養生条件の違いについて研究を進めていく予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、林一成氏、三村陽一氏をはじめとする山口大学工学部社会建設工学科施設材料学研究室の各位に多大の協力を受けました。また、本研究の一部は、日本スパンクリート協会の助成を受け行いました。ここに記して深甚の謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 森本博昭, 岩本隆裕, 栗原哲彦, 小柳 洽: 若材令コンクリートの圧縮および引張クリープ特性, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.356~359, 1993.
- 2) 入矢桂史郎, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの比較に関する研究, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.105~117, 1998.8.
- 3) 入矢桂史郎: 若材齢コンクリートのクリープに関する研究, 名古屋工業大学学位論文, 1999.3.
- 4) Davis, R.E., Davis, H.E., Brown, E.H.: *ASTM PROC.* 37, p.327, 1937.
- 5) Illston, J.M.: *The Creep of concrete under uniaxial tension, Magazine of Concrete Research*, Vol17, No.51, 1965.
- 6) 土木学会コンクリート標準示方書(施工編): 土木学会, pp.173~193, 1996.
- 7) 清水昭之: コンクリートの引張クリープ, コンクリート工学, Vol.21, No.6, pp.4~13, 1983.6.
- 8) 村田二郎, 岡田清共著: 最新コンクリート技術選書 1, 山海堂, 1981.5.
- 9) P.Kumar Mehta, J.M.Monterio: コンクリート工学, 田澤栄一・佐伯昇監訳, 技報堂出版, 1998.10.
- 10) 吉本 彰: コンクリートの変形と破壊, 学献社, 1990.
- 11) 服部達也, 入矢桂史郎, 上原 匠, 梅原秀哲: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.673~678, 1998.7.

(1999. 4. 27 受付)

## COMPRESSIVE AND TENSILE CREEP PROPERTIES OF EARLYAGE CONCRETE UNDER LESS HYDRATION

Isamu YOSHITAKE, Sumio HAMADA, Hideaki NAKAMURA and Senji NAGAI

The important factor on concrete creep behavior at early age concrete is amount of hydration. This experimental study on compressive and tensile creep has been carried out at condition of the lower temperature in order to inhibit hydration of early age concrete.

As the result, tensile creep became bigger than compressive creep, it was shown that tensile creep mechanisms is different to compressive one.