

# 論文 水和反応を抑制したコンクリートおよびモルタルのクリープ特性

伊藤 真佑<sup>\*1</sup>・糸山 豊<sup>\*2</sup>・上原 匠<sup>\*3</sup>・梅原 秀哲<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では、水和反応抑制下におけるクリープ特性について検討を行うため、練混ぜ水の一部をアルコールに置き換えたコンクリートおよびモルタルを対象として圧縮クリープ試験を行った。その結果、長期材齢時におけるクリープ特性の傾向がみられたことから、若材齢時のクリープは水和進行の影響を大きく受けることが推定された。また、セメント硬化体内部における微細空隙中の液体の特性が、クリープおよび回復クリープの発生機構上、重要な役割を果たすことが推察された。

**キーワード**：若材齢コンクリート、クリープ、水和抑制、アルコール置換、微細空隙

## 1. はじめに

コンクリート構造物に発生する温度応力の予測は、一般に温度応力解析の結果に基づいて行われる。しかしコンクリートの有するクリープ特性によって温度応力等の拘束応力が緩和されるため、発生する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し、クリープの影響を適切に評価する必要がある。

若材齢時におけるコンクリートは活発な水和進行過程にあり物性の変化が著しいため、水和の進行程度によってクリープ挙動は大きく影響を受けると思われる。したがって若材齢時の水和度の変化がクリープに及ぼす影響を把握することを目的に、クリープ試験期間中の水和進行を抑制させた状況下において試験を行う必要がある。

そこで本研究では、若材齢時の水和組織を極力保持した状態で、それ以上の水和進行を抑制させるために、練混ぜに用いる水の一部をアルコールで置き換える方法を試みた。そしてアルコールで置換したコンクリートおよびモルタルを対象として圧縮クリープ試験を行い、アルコール置換による水和抑制効果とクリープ挙動に及ぼす影響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 に本研究で用いたアルコールの成分構成と密度を示す。表-2 に各アルコール置換率における示方配合を示す。ただし置換率 0% シリーズは物性試験のみである。ここでアルコール置換率とは、示方配合において基本となる配合（置換率 0% シリーズ、W/C=47.5%）の単位水量を、(W+A)/C の体積比が一定となるようにアルコールで置換する割合を示す。

本研究では若材齢時の水和組織状態を保持させるため、コンクリートおよびモルタルが硬化する範囲でアルコール置換率が最大となるように置換率を設定する必要がある。そこで置換率 10~70% の範囲で 7 水準設定してモルタルの練

表-1 アルコールの成分構成および密度

成分	割合 (%)	密度 <sup>※</sup> (g/cm <sup>3</sup> )
エタノール	86.4	0.789
水	6.6	0.998
イソプロピルアルコール	5.8	0.786
メチルエチルケトン	1.2	0.805
計	100.0	0.803

※20°Cの場合

\*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 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 助手 修(工) (正会員)

\*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 助教授 工博 (正会員)

\*4 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 教授 Ph.D. (正会員)

表-2 示方配合および養生方法

シリーズ名		アルコール置換率 (%)	養生方法	W/C (%)	s/a (%)	単位量						
						W	A <sup>※2</sup>	C	S	G	減水剤 (%)	AE剤 (%)
モルタル	0-Wet <sup>※1</sup>	0	水湿潤養生	47.5	100	297	0	626	1295	0	0	0
	30-AWet	30	アルコール湿潤養生	33.2		208	72					
	30-Water		水中養生			178	96					
	40-AWet	40	アルコール湿潤養生	28.5		178	96					
コンクリート	0-Wet <sup>※1</sup>	0	水湿潤養生	47.5	44.6	175	0	368	762	1015	0.1	0.003
	30-AWet①	30	アルコール湿潤養生	33.2		122	42				0.3	0.02
	30-AWet②											
30-Water	30-Water	水中養生										

※1 アルコール置換率 0%シリーズは物性試験のみ ※2 A : アルコール

混ぜを行い、材齢 7 日の硬化状況から置換率 40%以下のシリーズが妥当であると判断した。以上より本研究におけるアルコール置換率はコンクリートでは 30%，モルタルではアルコール置換率の違いが強度発現，クリープに及ぼす影響を検討するため 30%，40%の 2 水準設定した。

使用材料は普通ポルトランドセメント（密度 = 3.15g/cm<sup>3</sup>，比表面積 = 3340cm<sup>2</sup>/g），山砂（表乾密度 = 2.57g/cm<sup>3</sup>，F.M. = 2.67），砕石（G<sub>max</sub> = 20mm，表乾密度 = 2.73g/cm<sup>3</sup>，F.M. = 6.65）である。

## 2.2 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た。供試体内部にはひずみと供試体温度を測定するため、埋め込み型ひずみ計と熱電対を設置した。

表-2 に示す置換率の配合で打設を行い、材齢 7 日に脱型した。その後は各シリーズにおいて表-2 に示す養生方法によって材齢 27 日まで 20℃の恒温で養生した。ここで水湿潤養生，アルコール湿潤養生シリーズについては、水およびアルコールをそれぞれ浸したウエスで供試体表面を覆い、ビニル袋に入れ密閉状態にして養生した。また無載荷用供試体を同一条件で作製，養生した。養生終了後，供試体内部の水分蒸発とアルコールの揮発を防ぐために供試体側面をアルミテープで被覆し，クリープ試験開始時まで 30℃で養生した。

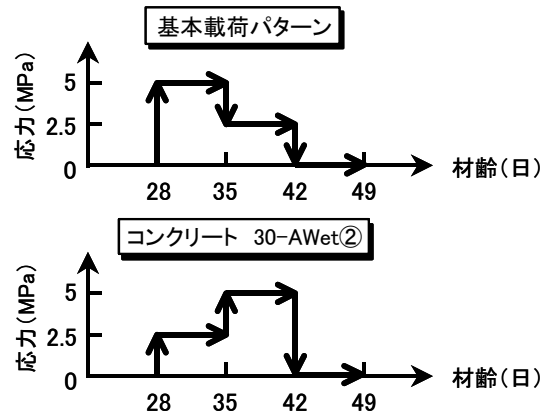


図-1 クリープ試験における載荷応力履歴

図-1 にクリープ試験における載荷応力履歴を示す。載荷開始材齢は 28 日とした。クリープ試験期間は 21 日間とし，7 日おきに載荷応力を変化させた。載荷応力履歴は基本的には 5→2.5→0(MPa)としたが，コンクリートのシリーズ 30-AWet②を対象とする場合は応力履歴の違いがクリープに及ぼす影響を検討するため 2.5→5→0(MPa)とした。クリープ試験中は温度 30℃，湿度 98%一定とした。本研究で使用した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<sup>1)</sup>。

また，クリープ試験用供試体の材齢に応じた物性値を把握するため，物性試験用供試体を同一条件で作製，養生を施した。物性試験ではアルコールの有無が強度発現に及ぼす影響を検討するために，アルコール置換率 0%シリーズも設定した。モルタルの圧縮強度試験は 4×4×

16cm の角柱供試体, コンクリートの圧縮強度試験はφ10×20cm の円柱供試体を用いた。

### 2.3 クリープひずみの評価方法

クリープひずみは, 載荷ひずみから無載荷ひずみと載荷時弾性ひずみを差し引いた値とした。しかし後述する物性試験結果より, アルコール置換する方法では水和進行を完全に停止させることは難しく, クリープ試験期間中の強度発現に伴う弾性ひずみの経時的な減少分を考慮する必要がある。そこで既往の研究<sup>2)</sup>に基づき, 載荷期間中の弾性係数を1日おきに測定して, そこて得られる載荷応力-弾性係数関係よりクリープ試験中の弾性ひずみの経時変化を算出した。

### 3. 物性試験結果

図-2, 図-3 に圧縮強度試験結果を示す。シリーズによっては打設を複数回行い試験した。

アルコール置換率の違いが強度発現に及ぼす影響に着目すると, 置換率が高いシリーズほど圧縮強度は小さな値を示した。これは大量のアルコールが水和組織形成を阻害すること, ペーストと骨材の付着力が低下し硬化体構造が弱体化することが考えられる。またクリープ試験期間中(材齢 28~49 日)において若干の強度発現が認められることから, アルコール置換する方法では水和進行を完全に停止させることはできなかった。実験計画当初においては, アルコール置換して単位水量を減らすことで, セメントの水和に必要な水が不足し, 水和進行がいずれ停止すると予想していた。当初の予想と実験結果の相違は, 練混ぜ水に溶解している大量のアルコールが, 未水和セメントや水和生成物の水和反応を長期間にわたって著しく阻害, 遅延させたため, 本試験期間範囲内においては水和が停止しなかったと考えられる。

養生方法の違いが強度発現に及ぼす影響として置換率 30%シリーズに着目すると, 水中養生した場合に強度増進が認められる。アルコール置換した供試体を水中養生すると, 毛細管現象により水が供試体内部の空隙に浸漬して水

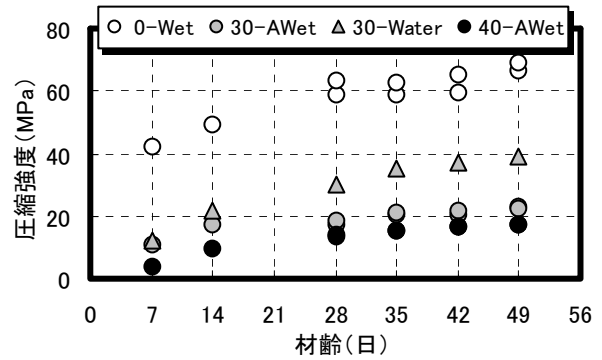


図-2 モルタル圧縮強度試験結果

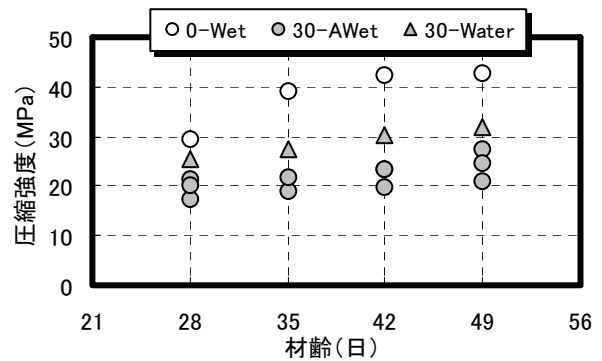


図-3 コンクリート圧縮強度試験結果

和反応が進行し, 強度が発現したものと考えられる。しかしアルコール置換した供試体を材齢 7 日に脱型後, 20 日間水中養生しても置換率 0% シリーズとの間にはかなりの圧縮強度の差が生じている。これはセメント硬化体の基本骨格をなす水和組織の形成が水中養生を開始する材齢 7 日までにかかなり行われていること, また水中養生を施しても硬化体内部の空隙に存在し続けるアルコールにより活発な水和反応が阻害されることが考えられる。

### 4. クリープ試験結果

表-3 にクリープ試験における載荷応力と載荷時の応力強度比を示す。

#### 4.1 全ひずみ挙動

クリープ試験における全ひずみ挙動として, 図-4 にコンクリートのシリーズ 30-AWet①, 30-AWet②の結果を示す。これらのシリーズは載荷応力履歴を替えただけで, クリープ試験における載荷応力の積算量は同一である。図より双方のシリーズにおいて 5MPa を 7 日間載荷し

た時点での全ひずみが約 250 $\mu$ と、材齢に依らずほぼ同じ値を示している。また、シリーズ 30-AWet②ではクリープ試験終了前に恒温恒湿器が温度制御不能になり急激に圧縮ひずみが増加しているが、双方のシリーズにおいて除荷後のひずみは同様な挙動を示しており、供試体に残留する非回復性ひずみの値もほぼ同じである。以上のような傾向は水和進行の影響の小さい長期材齢コンクリートの傾向であり、水和進行が活発な若材齢コンクリートではこのような傾向はみられないと考えられるため、若材齢時のクリープ挙動に及ぼす水和進行の影響力の大きさが推察される。

#### 4.2 単位クリープ挙動

図-5、図-6にクリープ試験载荷一週目の単位クリープ挙動を示す。

モルタルにおいてアルコール置換率の違いに着目すると、载荷期間約1日までは双方のシリーズにおいて急激に単位クリープが増加しているが、その後の挙動は異なる結果となった。置換率30%シリーズではひずみの増進が緩やかでクリープは収束する傾向であるのに対して、40%シリーズでは载荷期間7日までひずみは増加し続けており収束する傾向はみられなかった。この原因として40%シリーズではアルコール置換率がかなり高い(W/C=28.5%)のために供試体内部に未水とセメントが多数存在し、また水和反応が阻害されて組織形成も粗いために単位クリープが大きくなったものと考えられる。養生方法の違いがクリープに及ぼす影響として置換率30%シリーズに着目すると、水中養生した場合は载荷直後の単位クリープは小さいが、その後は一定の割合で増加し続けている。これは水中養生を施すと供試体内部に水が浸漬するために水和反応が進行、強度発現が起こりクリープは抑制される。しかし圧縮クリープの発生機構をゲル水、層間水など微細空隙中に存在する水の圧出、ペーストの粘性流動によるものと考えられるならば、水中養生により硬化体内部の微細空隙にまで水が浸入すればクリープが大きくな

表-3 クリープ試験における  
载荷応力および载荷時応力強度比

シリーズ		载荷応力 (MPa)	载荷時 応力強度比
モルタル	30-AWet	5	0.29
	30-Water	5	0.17
	40-AWet	5	0.38
コンクリート	30-AWet①	5	0.23
	30-Awet②	2.5	0.14
	30-Water	5	0.20

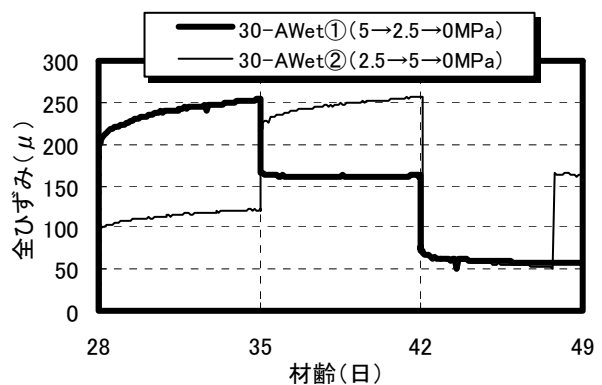


図-4 クリープ試験における全ひずみ挙動

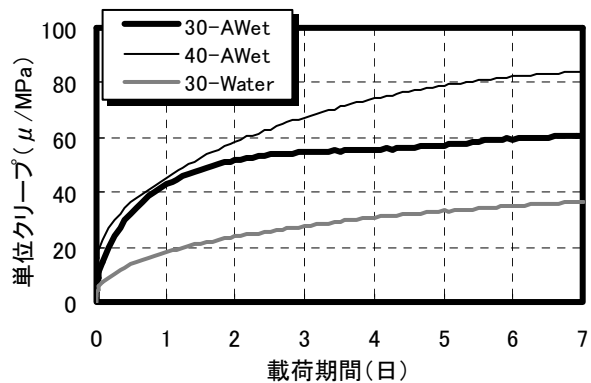


図-5 モルタル単位クリープ挙動(载荷一週目)

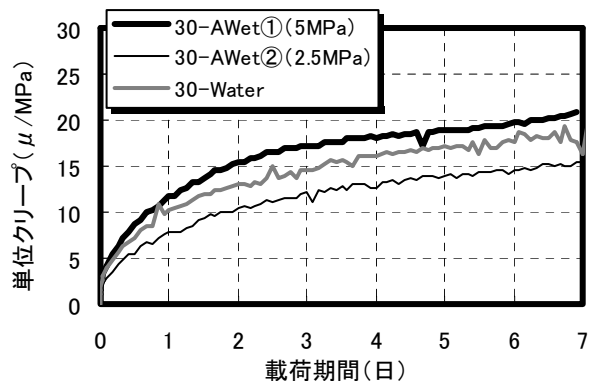


図-6 コンクリート単位クリープ挙動(载荷一週目)

ることが考えられる。本実験では以上のような要因が相互作用したものと考えられる。

コンクリートにおいて載荷応力の違いに着目すると、5MPa 載荷したシリーズにおいて  $5\mu$  程度単位クリープが大きくなった。載荷応力とクリープが比例しなかった原因としては、載荷応力が大きいシリーズほど応力強度比が高くなり、双方のシリーズにおいて支配的なクリープ機構が異なったためと考えられる。養生方法の違いに着目すると双方のシリーズにおいて単位クリープの差はわずかである。コンクリートにおいては、アルコール湿潤養生と水中養生における圧縮強度の差がモルタルほど大きくなかったこと、また水中養生することで硬化体内部の微細空隙にまで水が浸入した結果、クリープが大きくなったことが考えられる。

次に、各シリーズにおいて応力強度比 0.2 一定の場合に換算したクリープひずみ挙動を図-7、図-8 に示す。ここでコンクリートに関しては、アルコール置換しない若材齢コンクリートを用いて行った既往の研究<sup>2)</sup>におけるシリーズ C30-30 のクリープ試験結果も合わせて示す。既往の研究で用いたコンクリートは W/C=47.5% で、載荷開始材齢 2 日、応力強度比 0.1、温度 30°C でクリープ試験を行っており、載荷時圧縮強度は約 21MPa で本研究のシリーズ 30-AWet と同等の強度を有している。

モルタルに関してはアルコール置換率の違い、養生方法の違いに関わらず全てのシリーズにおいてほぼ同様なクリープひずみ挙動を示した。一般に応力強度比とクリープが線形関係にあるのは水和進行の影響の小さい長期材齢コンクリートの場合であり、若材齢コンクリートでは載荷時強度に応力強度比をそろえても、応力強度比とクリープの間には線形関係は成立しないと思われる。しかし本研究において試験期間中の水和進行を抑制させてクリープ試験を行った結果、応力強度比とクリープは線形関係にあることから、クリープ試験期間中における活発な水和進行が若材齢コンクリートのクリープに多大

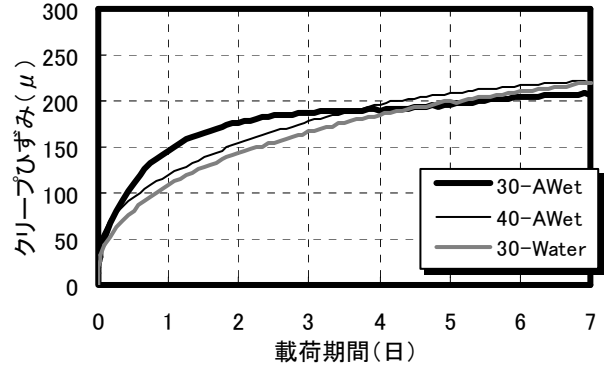


図-7 モルタルクリープひずみ挙動  
(載荷時応力強度比 20%)

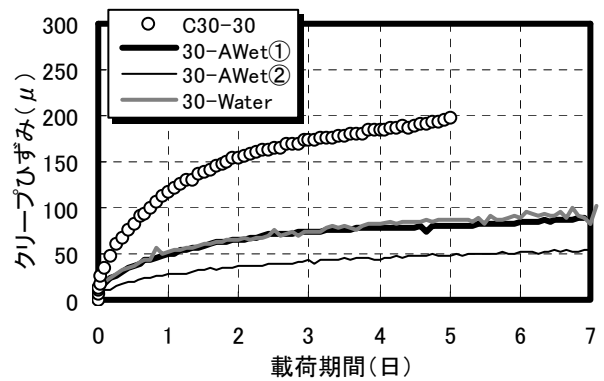


図-8 コンクリートクリープひずみ挙動  
(載荷時応力強度比 20%)

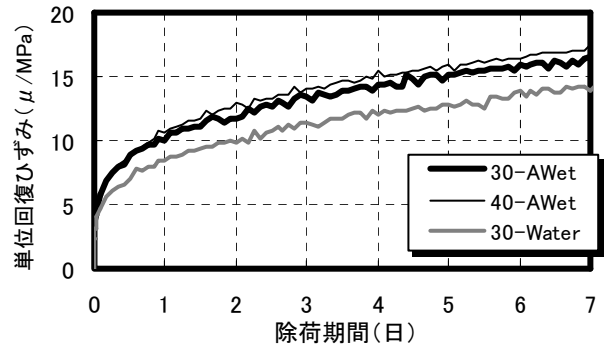


図-9 モルタル単位回復ひずみ挙動

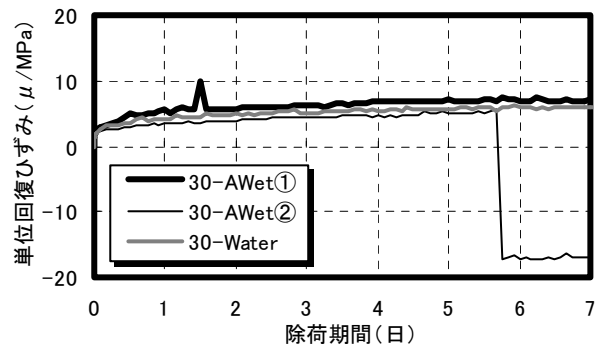


図-10 コンクリート単位回復ひずみ挙動

な影響を及ぼしており、またクリープ試験期間中の水和進行を抑制させることで長期材齢時の傾向が表れたものと思われる。

コンクリートに関して本研究結果と既往の研究結果を比較すると、本研究におけるアルコール置換したシリーズのクリープひずみが著しく小さな値を示した。この原因としてはアルコール置換することで空隙中に存在する水が減少しクリープが生じ難くなったことが考えられる。一方で硬化体の空隙中に存在するアルコールがクリープ発生に寄与すると思われた。しかし本研究で用いたアルコールの主成分であるエタノールは、水に溶解させるとエタノールの疎水基と水分子との疎水性相互作用により液体の粘性が大幅に増加する。よって本研究ではクリープ試験が短期間であるため、クリープの発生機構として考えられている液体の圧出、粘性流動が進まずクリープが抑制されたものと考えられる。

#### 4.3 単位回復ひずみ挙動

図-9、図-10 にクリープ試験における載荷三週目の除荷後の単位回復ひずみ挙動を示す。

モルタルにおいてアルコール置換率の違いに着目すると、双方のシリーズにおいて同様な挙動を示している。図-5 に示したクリープ試験一週目の単位クリープ挙動では置換率 40%シリーズが  $25\mu$  程度大きい値を示していたことから、クリープ変形に含まれる微細ひび割れやペーストと骨材との局所的な破壊といった非回復性である塑性ひずみの割合が 40%シリーズでは高くなり、単位回復ひずみが小さな値を示したものと考えられる。養生方法の違いが回復ひずみに及ぼす影響として置換率 30%シリーズに着目すると、載荷一週目では水中養生シリーズの単位クリープが  $25\mu$  程度小さい値を示していたが、単位回復ひずみにおける差はほとんど認められなかった。ここで、圧縮荷重によってゲル空隙、層間空隙から圧出された水が除荷により元の空隙に再浸入する現象を回復クリープの発生機構と考えるならば、水中養生により硬化体内部の空隙に水が再供給されることで

回復ひずみが大きな値を示したと考えられる。

コンクリートにおいて載荷応力履歴の違いに着目すると、シリーズ 30-AWet②については期間後半に恒温恒湿器の温度制御が不能になったため急激に圧縮ひずみが生じている。しかし双方のシリーズは期間途中まで同様な挙動を示していることから、クリープ試験期間中の水和進行を抑制させることで、載荷応力履歴が異なっても載荷応力の積算量が同じ場合は、回復ひずみの量も同じになることが示された。養生方法の違いに着目すると、双方のシリーズにおいて単位回復ひずみ挙動に差は認められなかったことから、モルタルの場合と同様に水中養生すると硬化体内部の微細空隙にまで水が浸入し回復ひずみ量が大きくなったと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、クリープ試験期間中の水和進行を抑制させるために練混ぜ水の一部をアルコール置換してクリープ試験を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 試験期間中の水和進行を抑制させてクリープ試験を行った結果、長期材齢時におけるクリープ特性の傾向がみられたことから、若材齢時のクリープは水和進行の影響を大きく受けることが推察された。
- (2) セメント硬化体における微細空隙中の液体の特性がクリープおよび回復クリープの発生機構上、重要な役割を果たすことが推察された。
- (3) 練混ぜ水の一部をアルコール置換することで強度発現が小さくなり、水和反応が長期間にわたって抑制された。

#### 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) 伊藤真佑ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.443-448，2003