

# 多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープ

## THE EFFECT OF WATER CONTENT ON THERMAL EXPANSION AND CREEP OF CONCRETE UNDER CONSTANT MULTI-AXIAL STRESS

河辺伸二\*, 岡島達雄\*\*

*Shinji KAWABE and Tatsuo OKAJIMA*

The purpose of this study is to obtain the effect of water content on thermal expansion of plain concrete under multi-axial constant stress conditions. The conclusion is the following ;

The thermal expansion of pre-heated concrete between 20°C and 100°C, under constant compressive stress including tri-axial loading in which maximum compressive stress is below the one third of strength, can be concluded to be equal to the sum of elastic deformation caused by external forces and by the thermal expansion without external load.

But the thermal expansion of air dried and water saturated concrete is smaller than that of free expansion. The strain of these concretes can be obtained as the sum of elastic deformation, free thermal expansion and creep strain.

The creep strain of concrete at any temperature can be obtained by using "Time Temperature Equivalence Principle."

**Keywords:** *thermal expansion, multi-axial constant compressive stress, water content, Time Temperature Equivalence Principle, concrete*

熱膨張, 多軸定圧縮応力, 含水状態, 温度時間換算則, コンクリート

### 1. 序

コンクリートが温度の上昇や下降の繰り返しを受ける状態で使用されることがある。また、構造部材として荷重を受ける状態で使用される場合がある。常温と異なった温度で使用され、かつ荷重を受けるコンクリートについては、コンクリートの多軸を含めた力学的性質だけでなく熱的性質も重要になってくる。

これまでコンクリートの熱特性に関する研究は数多く行われている<sup>1-3)</sup>。しかし荷重を受けるコンクリートの熱膨張に関する研究は少ない<sup>4-6)</sup>。

筆者らは、今までに多軸応力を受けるコンクリートの熱特性に関する研究を行っている。多軸を含めた定圧縮応力を受ける乾燥コンクリートの熱膨張とクリープについて考察している<sup>7)</sup>。ここでは、多軸定圧縮応力を受ける乾燥コンクリートの温度上昇時 (20°C~100°C) のひずみの算出に長期許容圧縮応力度 (応力度強度比で1/3) 以下の低い定圧縮応力が作用する場合は、クリープを考

慮に入れなくてもよいとしている。また、乾燥コンクリートの温度上昇時の膨張ひずみ拘束力と応力緩和についても検討し、コンクリートを加熱したときの膨張ひずみを、一定に拘束するのに必要な応力を算出している<sup>8)</sup>。

これらの研究はコンクリートの安定した熱特性を得るため、あらかじめ乾燥したコンクリートの供試体を使用している。しかし、コンクリートの諸性質は、その含水状態に影響を受けることが知られている<sup>1, 2)</sup>。

そこで、本研究では、乾燥、気乾、湿潤状態からの乾燥過程における多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープについての実験を行う。コンクリートを乾燥、気乾、湿潤の3種類の含水状態にして、それぞれ多軸を含む定圧縮応力下の状態に保持し、温度上昇時 (20°Cから100°C) と温度下降時 (100°Cから30°C) のコンクリートのひずみを求める。また、それぞれの含水状態の一軸定圧縮応力を受ける乾燥過程のクリープを測定する。そして、温度上昇時の予測クリープ量を算出し、

\* 名古屋工業大学社会開発工学科 助教授・工博

\*\* 名古屋工業大学社会開発工学科 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

多軸定圧縮応力を受ける乾燥過程の温度上昇時のひずみを予測する。

これらの結果は、熱源のある建物の安全及び合理的な設計に貢献できると考えられる。また、日射を受けるコンクリート構造物や、その仕上げに発生するひずみや応力を解析する資料となると考えられる。なお、本研究の結果の一部は日本建築学会学術講演会<sup>9)</sup>とコンクリート工学協会年次講演会<sup>10)</sup>において発表している。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試体の作製

#### (1) 供試体の形状

供試体は、図-1に示す113 mm角の立方体コンクリートの各稜を、5 mm面取りした形状の面取立方供試体とする。供試体の寸法精度を高くするために、特別の鋼製型枠を用いて作製する。温度測定用のT型熱電対を、供試体の上、中、下の3ヶ所に埋設する。

#### (2) 使用材料と調合

本実験の使用材料を以下に示す。

セメント : 普通ポルトランドセメント

細骨材 : 川砂 (木曽川産)

粗骨材 : 川砂利 (木曽川産)

化学混和剤 : A E 剤

骨材の物理的性質を表-1に、調合を表-2に示す。

#### (3) 養生

コンクリート打設後、6時間でキャッピング、24時間で脱型し、以下それぞれの含水状態の供試体を作製する。

乾燥状態: 3ヶ月間水中養生後1週間気中養生し、6時間60℃の乾燥炉内におき、その後3日間乾燥炉内で105℃乾燥させ、含有水分を放出させる。

気乾状態: 3ヶ月間水中養生後、1週間気中養生する。

湿潤状態: 3ヶ月間水中養生後、表面の水を拭う。

また、偏心を防ぐために、脱型後3週間ほどで供試体の打ち込み面を研磨した。パッチ間のコンクリートの強度管理を行うため、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を同時に作製し、1ヶ月間水中養生後圧縮強度を測定した。その結果 圧縮強度の平均が265(kgf/cm<sup>2</sup>)、標準偏差16.7(kgf/cm<sup>2</sup>)であった。

### 2.2 荷重方法

実験に用いた三軸圧縮引張試験機を、図-2に示す。

この試験機は、供試体を同時に直交3方向に圧縮力と引張力を加えることができる。一方向の反力フレームは直径120mmの4本の鋼棒で構成されており、試験機全体の剛性は高い。また、荷重が供試体の中心に均一にかかるような調心球座を備えている。載荷板は、端面摩擦による拘束を除くため、鋼製ブラシ載荷板を使用した。荷重の

表-1 骨材の物理的性質

	Maximum size of aggregate (mm)	Water absorption (%)	Specific gravity (oven dry)	Fineness modulus (%)	Weight per unit volume (kg/m <sup>3</sup> )
Fine aggregate	5	1.67	2.50	2.61	—
Coarse aggregate	20	1.25	2.58	7.05	1556

表-2 コンクリートの調合表

Slump (cm)	Air content (%)	Water cement ratio (%)	Maximum size of aggregate (mm)	Sand aggregate ratio (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
					Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture
15	4	57	20	42.7	174	305	725	1027	0.06

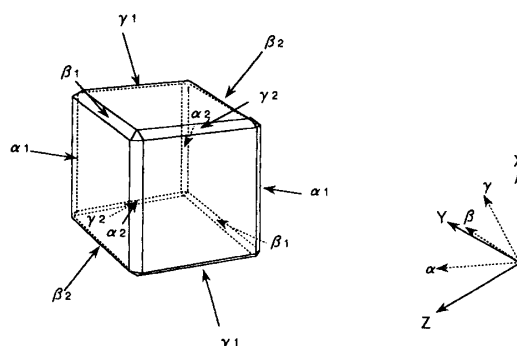


図-1 面取立方供試体と変位計取り付け方向

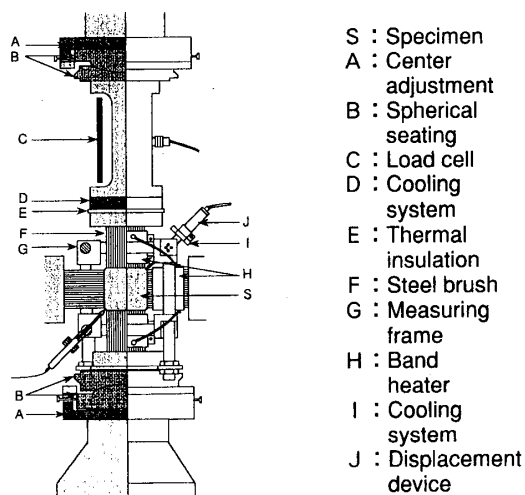


図-2 三軸圧縮引張試験機

値は、ロードセルの出力により検出する。

### 2.3 ひずみ測定方法<sup>11)</sup>

図-1に示す供試体の面取り部分に、12個の変位計を6方向から対にして取り付ける。そして  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  方向から求めたひずみ  $\varepsilon_\alpha$ 、 $\varepsilon_\beta$ 、 $\varepsilon_\gamma$  を式(1)に代入して X、Y、Z 方向のそれぞれのひずみを求める。

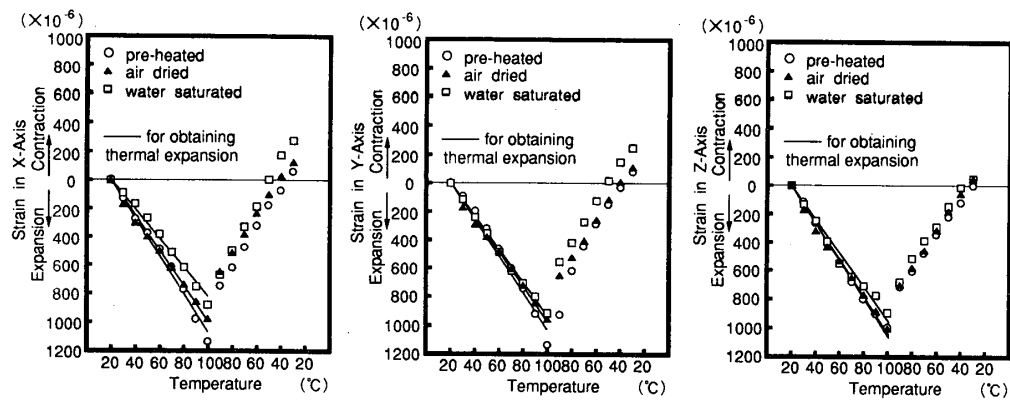


図-3 無応力状態のひずみと温度の関係

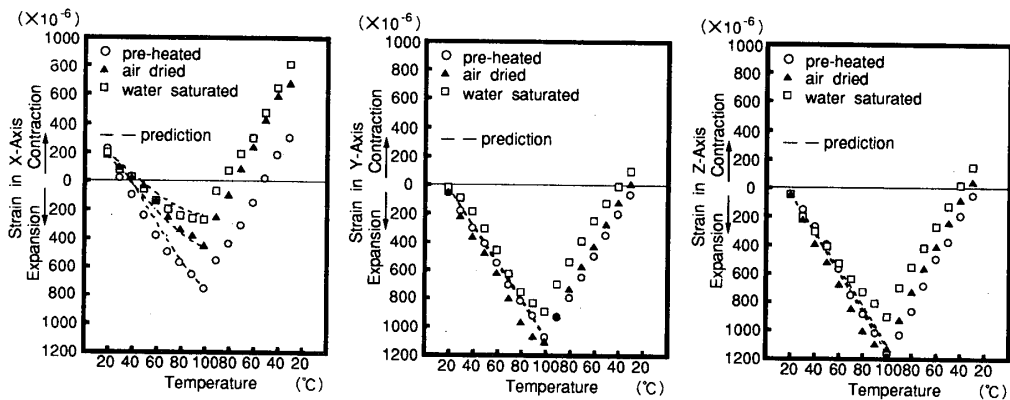


図-4 一軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \varepsilon_\beta \\ \varepsilon_\gamma \end{pmatrix} \cdots (1)$$

このひずみ測定方法は、ひずみ算定の基礎となる変位測定区間が、供試体の局部や表層部分だけでなく常に中心を含む供試体全体にわたっているため、安定したひずみの測定が期待できる。

#### 2.4 加熱方法

3方向6個のブラシ載荷板に、バンドヒーター（500w×2）を取り付け加熱した。また 供試体に有害な熱応力を生じさせないようにするため、温度制御は供試体に埋設した熱電対の温度に基づき、昇温速度が毎時10℃になるように調整した。

供試体を加熱する際、熱が三軸圧縮引張試験機に伝わるのを防ぐために断熱板をブラシ載荷板と試験機の間に取り付け、さらにロードセルを保証温度以下に保つために水冷式冷却用ステンレス製円盤を断熱板とロードセルの間に挿入した。また、変位計にも冷却用カバーが取り付けられている。

#### 2.5 実験内容

##### (1) 無応力状態及び多軸定圧縮応力を受ける

##### コンクリートのひずみ測定

最初に、コンクリートの応力度強度比が次の状態となるように載荷する。

X軸-Y軸-Z軸

無応力状態 : 0 - 0 - 0  
一軸定圧縮応力下 : 1/3 - 0 - 0  
二軸定圧縮応力下 : 1/3 - 1/3 - 0  
三軸定圧縮応力下 : 1/3 - 1/3 - 1/3

そして、この定圧縮応力状態を保ちながらそれぞれ乾燥、気乾、湿潤の3つの含水状態の供試体を 20℃から100℃まで昇温しその後30℃まで降温させ、この間10℃おきにひずみを測定する。ここに応力度強度比の 1/3は、コンクリートの長期許容圧縮応力度がコンクリートの設計基準強度の 1/3であることを念頭においた。その強度は、同時に作製した円柱供試体の圧縮強度に寸法効果を考慮して算出し、約281(kgf/cm<sup>2</sup>)であった。

また、実験開始直前と実験終了後に各含水状態のコンクリート供試体の重量を測定し、重量変化率を求める。

##### (2) クリープ実験

乾燥、気乾、湿潤の3つの含水状態の供試体を、無応力状態において毎時10℃の昇温速度で、各一定温度20、60、100℃にする。次にそれぞれの一定温度において一軸定圧縮応力を載荷し、8時間ひずみを測定した。一軸定圧縮応力を応力度強度比で1/3とした。

また、クリープの実験開始直前と実験終了後に各含水状態のコンクリート供試体の重量を測定し、重量変化率を求める。

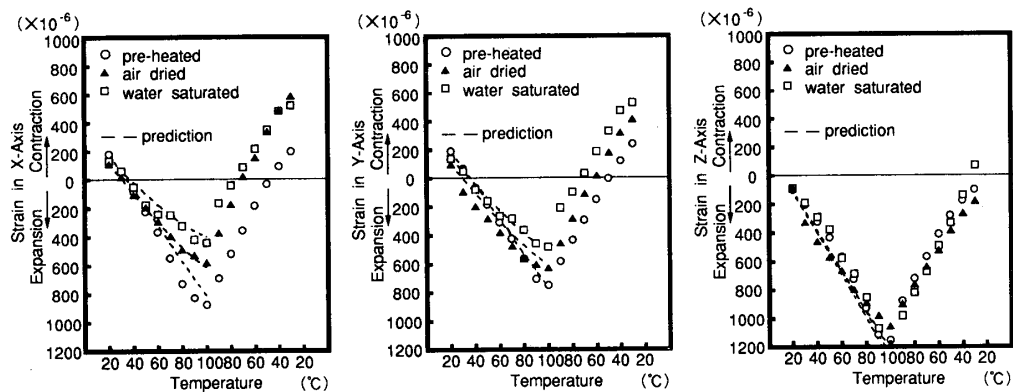


図-5 二軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

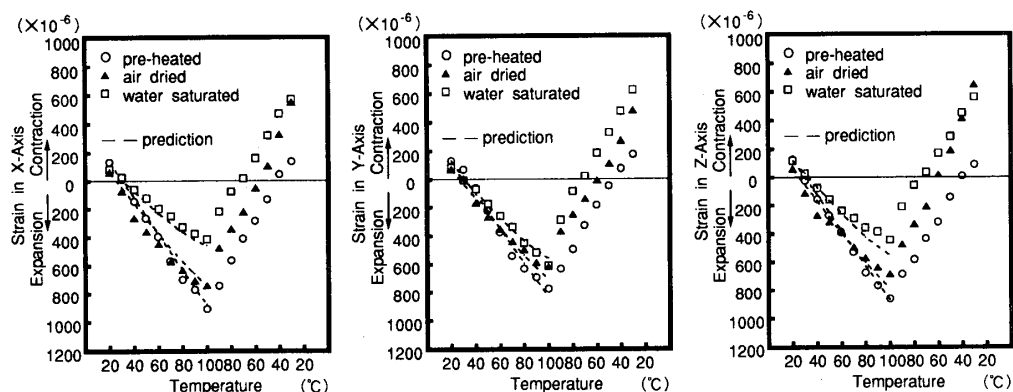


図-6 三軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 無応力状態及び多軸定圧縮応力を受ける コンクリートのひずみ測定の結果

図-3に無応力状態の、図-4から図-6に一軸、二軸、三軸定圧縮応力下のコンクリートのひずみと温度の関係を示す。常温(20℃)の時のひずみは載荷時の瞬間弾性ひずみである。

図-3より、温度上昇時は気乾、湿潤状態から始めた場合の温度に対するひずみの増分が、乾燥状態の増分より小さいことが分かる。あらかじめ乾燥してある場合は比較的ひずみの増分が一定となる。気乾、湿潤状態から始めた場合は、温度上昇に伴いコンクリートが乾燥し、乾燥収縮の影響のためひずみの増分が小さくなると思われる。また、温度下降時の収縮量の増分はどの含水状態から始めた場合もほぼ同じである。これは100℃までの昇温により気乾、湿潤状態の供試体の含水量が低下し、乾燥収縮の影響が小さいためと思われる。

図-4から図-6より、多軸定圧縮応力を受ける場合温度上昇時の気乾、湿潤状態から始めた場合の温度に対するひずみの増分は、乾燥状態のひずみの増分より小さいことが分かる。これは定圧縮応力により生じたクリープと温度上昇により生じた乾燥収縮の影響と思われる。また、温度下降時の収縮量の増分はどの含水状態から始めた場合もほぼ同じである。これは、100℃までの昇温

表-3 実験前と実験後の供試体の重量変化率

Stress (X-Y-Z)	Change of weight (%)		
	pre-heated	air dried	water saturated
0-0-0	0.1	-1.4	-2.2
1/3-0-0	0.0	-1.9	-2.5
1/3-1/3-0	0.0	-1.4	-2.3
1/3-1/3-1/3	0.1	-1.5	-2.2

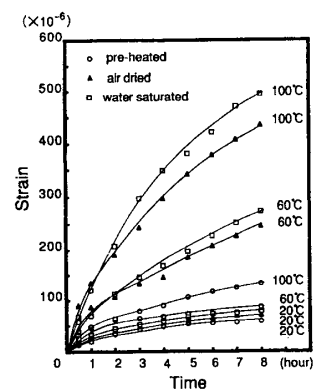


図-7 クリープ実験の結果

表-4 クリープ実験前と実験後の供試体の重量変化率

Temperature (℃)	Change of weight (%)		
	pre-heated	air dried	water saturated
20	0.1	-0.1	-0.1
60	0.0	-0.8	-1.2
100	0.0	-2.5	-4.3

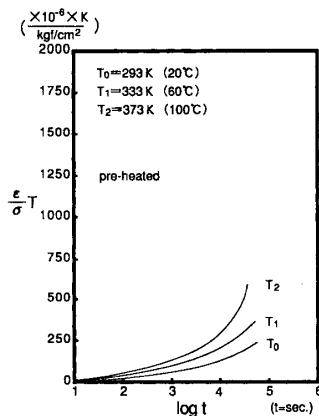


図-8 変換された曲線  
(乾燥状態)

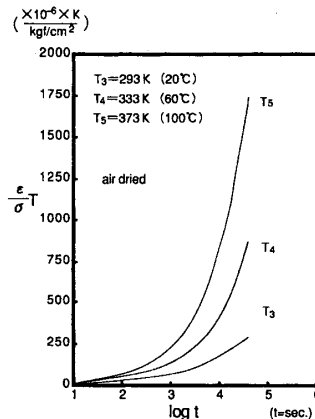


図-9 変換された曲線  
(気乾状態)

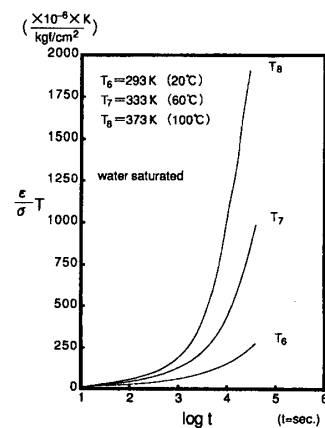


図-10 変換された曲線  
(湿潤状態)

により供試体の含水量が低下したため温度下降時の乾燥収縮が小さいことと、温度下降時はクリープが生じにくいことによると思われる。

図-3と、図-4から図-6を比較すると、多軸定圧縮応力を受ける場合、温度上昇時の乾燥状態から始めた場合の温度に対するひずみの増分は、無応力状態の乾燥状態のひずみの増分と変わらない。これは乾燥状態の場合、応力度強度比で 1/3 程度の低い定圧縮応力が作用しても、発生するクリープの影響が無視できるほど小さいことが分かる。これに対し、気乾、湿潤状態から始めた場合の温度に対するひずみの増分は、無応力状態のそれぞれのひずみの増分より小さい。これは気乾、湿潤状態から始めた場合は、定圧縮応力により生じたクリープの影響が大きく無視できないものと推定できる。温度に対するひずみの増分の低下を比べると、乾燥収縮の影響よりクリープの影響の方が大きいことが分かる。また温度下降時の傾きはどれもほぼ同じである。これは温度下降時は乾燥収縮やクリープの影響が小さいためと思われる。

表-3に実験前と実験後の重量の変化率を示す。含水状態が大きい程、供試体の重量は減少していることが分かる。また、定圧縮応力にかかわらず供試体の重量はほぼ同じ割合で減少していることが分かる。

### 3.2 クリープの実験結果

図-7に乾燥、気乾、湿潤状態から始めた各温度における乾燥過程のクリープ実験の結果を示す。この図より湿潤、気乾、乾燥の順に含水量が大きい程、また温度が高い程クリープ量が多いことが分かる。

表-4に実験前と実験後の重量の変化率を示す。含水状態が大きい程、供試体の重量は減少していることが分かる。

### 4. 多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみの予測

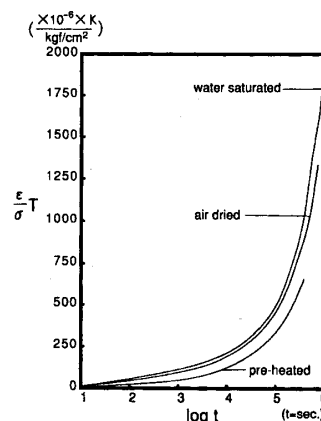


図-11 合成曲線

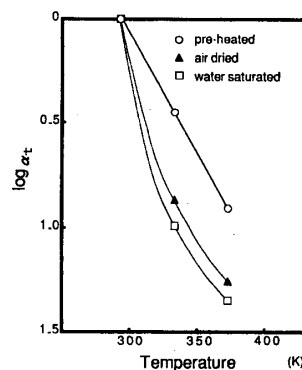


図-12 移動量  $\alpha_t$  と絶対温度  $T$  の関係

多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみを測定した結果、乾燥状態から始めた場合、応力度強度比で 1/3 の定圧縮応力を受けるひずみにはクリープの影響を無視できるとした。しかし、気乾、湿潤状態から始めた場合は、応力度強度比で 1/3 の定圧縮応力により生じるクリープの影響は無視できないと推定した。

そこで、各含水状態も一定温度におけるクリープ量から、「温度時間換算則<sup>12-16)</sup>」を利用して温度上昇時のクリープ量を算出し、これを用いて多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみを予測する。

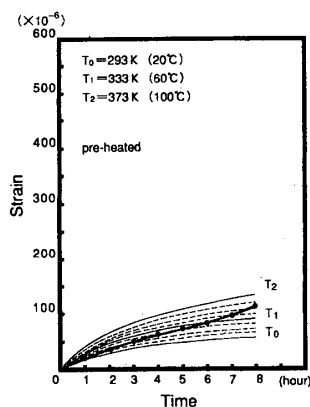


図-13 温度上昇時の  
クリープ予測値 (乾燥状態)

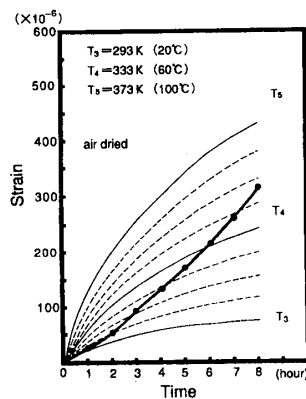


図-14 温度上昇時の  
クリープ予測値 (気乾状態)

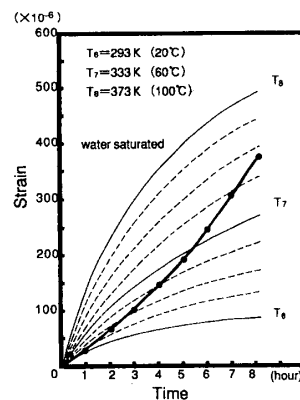


図-15 温度上昇時の  
クリープ予測値 (湿潤状態)

#### 4.1 温度上昇時のクリープ量の算出

乾燥、気乾、湿潤状態のクリープ実験の結果から「温度時間換算則」を用いて、図-8から図-10に示す変換された曲線を作成した。これらを20℃の曲線を基準に時間軸に沿って平行移動させ、図-11にそれぞれの合成曲線を得た。図-12に移動させた量  $\log \alpha_t$  と絶対温度  $T$  の関係を示す。これより任意の温度の移動時間量  $\alpha_t$  が求められ、20、60、100℃以外の任意の温度のクリープ曲線も、合成曲線から想定することができる。

次に20から100℃までの間の10℃ごとのクリープ曲線を作成し、これを図-13から図-15に点線で示す。各曲線を10℃ごとにクリープが移動すると仮定する。実験の昇温速度が毎時10℃のため、クリープは3600秒（1時間）進んで次の曲線に乗り移るとする。こうして得られた曲線を図-13から図-15の太線で示す。これより乾燥、気乾、湿潤状態の温度上昇時のクリープ量が算出できる。

気乾及び湿潤はほぼ似たような曲線を描き、乾燥の予測クリープ量は極めて小さいことが分かる。表-5は応力度強度比で1/3の一軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時の予測クリープ量 ( $\epsilon/\sigma$ ) を示す。

#### 4.2 温度上昇時のひずみの予測

定圧縮応力を受ける場合、コンクリートの温度上昇時のひずみ  $\epsilon$  は、無応力状態の温度上昇時のひずみを  $\epsilon^t$ 、載荷時の瞬間弾性ひずみを  $\epsilon^e$ 、クリープによるひずみを  $\epsilon^c$ 、とすれば、式(2)で表せられると考える。ただし、無応力状態の温度上昇時のひずみは、熱膨張ひずみに乾燥収縮ひずみを加えたものとする。

$$\epsilon = \epsilon^t + \epsilon^e + \epsilon^c \quad \dots (2)$$

非載荷方向及び多軸定圧縮応力のひずみの予測には、静弾性ポアソン比とクリープポアソン比が等しい<sup>16)</sup>と仮定し、また重ね合わせの原理を用いる。図-4から図-6に、多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみの予測値を点線で示す。これより、気乾及び

表-5 温度上昇時の予測クリープ量

Prediction of creep ( $\times 10^{-6}$ kgf/cm <sup>2</sup> )	Temperature (°C)								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
pre-heated	0	0.22	0.41	0.47	0.69	0.76	0.89	1.07	1.33
air dried	0	0.40	0.67	1.01	1.45	2.00	2.62	3.40	4.35
water saturated	0	0.56	0.88	1.32	1.69	2.42	2.97	3.94	4.95

表-6 多軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係  
(100℃)

		pre-heated			air dried			water saturated		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
free expansion	experiment	1136	1134	1000	978	958	1003	882	914	897
	$\epsilon^t$	1075	1031	1053	996	972	1037	825	934	948
uni-axial stress	$\epsilon^e$	-224	54	44	-182	48	47	-199	15	43
	$\epsilon^t$	1075	1031	1053	996	972	1037	825	934	948
	$\epsilon^c$	-106	23	23	-348	79	79	-396	58	58
	experiment	756	1077	1164	448	1110	1131	266	897	902
	$\epsilon^e + \epsilon^t + \epsilon^c$	745	1108	1120	466	1099	1163	230	1007	1049
bi-axial stress	$\epsilon^e + \epsilon^t$	851	1085	1097	814	1020	1084	626	949	991
	$\epsilon^e$	-179	-188	103	-111	-95	98	-133	-136	190
	$\epsilon^t$	1075	1031	1053	996	971	1038	825	934	948
	$\epsilon^c$	-83	-83	47	-269	-269	159	-338	-338	115
	experiment	879	750	1170	583	631	1057	442	483	1222
tri-axial stress	$\epsilon^e + \epsilon^t + \epsilon^c$	813	760	1203	616	607	1295	354	460	1253
	$\epsilon^e + \epsilon^t$	896	843	1156	885	876	1136	692	798	1138
	$\epsilon^e$	-131	-131	-124	-59	-69	-63	-80	-87	-120
	$\epsilon^t$	1075	1031	1053	996	971	1038	825	934	948
	$\epsilon^c$	-60	-60	-60	-181	-181	-181	-281	-281	-281
tri-axial stress	experiment	911	778	865	745	618	687	416	611	442
	$\epsilon^e + \epsilon^t + \epsilon^c$	884	840	869	756	721	794	464	566	547
	$\epsilon^e + \epsilon^t$	944	900	929	937	902	975	745	847	828

+ : Expansion  
- : Contraction

湿潤状態から始めた場合は、応力度強度比で 1/3 の多軸定圧縮応力を受ける温度上昇時のひずみの予測にはクリープを考慮する必要があることが分かる。

表-6 にひずみの一例を 温度100℃ の場合について示す。 $\varepsilon^*$  は載荷時の瞬間弾性ひずみを、 $\varepsilon^s$  は乾燥収縮ひずみを含んだ無応力状態の温度上昇時のひずみを、 $\varepsilon^c$  は温度上昇時のクリープひずみを示す。

気乾及び湿潤状態より始めた温度上昇時のひずみの予測については、式(2)より求めた予測値は実験値と近似していることが分かる。定圧縮応力を受ける場合、クリープを考慮しない  $\varepsilon^* + \varepsilon^s$  の和の値では実験値と近似しているとはいえないのが分かる。また、乾燥状態より始めた温度上昇時のひずみの予測については、定圧縮応力を受ける場合、クリープを考慮しない  $\varepsilon^* + \varepsilon^s$  の和の値でも実験値と近似しており、温度上昇時の熱膨張の予測にクリープの影響を無視できるといえる。これは、応力度強度比で 1/3 の定圧縮応力を受ける乾燥状態のコンクリートのクリープが小さいためである。

以上より、応力度強度比で 1/3 の定圧縮応力を受ける場合、気乾及び湿潤状態より始めた温度上昇時のひずみの予測にはクリープを考慮に入れるのがよく、乾燥状態より始めた温度上昇時のひずみの予測にはクリープを考慮しなくてもよいことが分かる。またそれぞれの状態の温度上昇時のひずみの予測は、式(2)を用いて表すことができる。

## 5. 結論

乾燥、気乾、湿潤状態からの乾燥過程における多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープについて、本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

(1) 無応力状態及び多軸定圧縮応力下においては、含水量が大きいコンクリートほど温度上昇時のひずみの増分が小さくなる。

(2) 多軸定圧縮応力下の温度下降時の収縮量は無応力状態のそれにほぼ等しい。

(3) 応力度強度比で 1/3 の多軸定圧縮応力を受ける場合、気乾及び湿潤状態より始めた温度上昇時のひずみの予測にはクリープを考慮に入れるのがよく、乾燥状態より始めた温度上昇時のひずみの予測にはクリープを考慮しなくてもよい。

## 謝辞

本研究は、名古屋工業大学工学部講座研究費、一般設備費をはじめ文部省科学研究費などにより行われたものである。ご指導ご協力いただいた本学名誉教授岩下恒雄博士、同大岸佐吉博士ならびに当時の卒論生溝口雄一氏、高山雄嗣氏に厚く謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Neville, A. M. : Properties of Concrete, 後藤幸正、尾坂芳夫訳、技報堂出版(株)、1979年11月
- 2) 岩崎訓明: コンクリートの特性、共立出版、1979年10月
- 3) 川口 徹: コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究成果について、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp. 15~18、昭和57年5月
- 4) 森永 繁、山崎庸行: コンクリートのクリープを含めたみかけの熱膨張係数の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP. 317~318、昭和58年9月
- 5) 森永 繁、山崎庸行、林 章二訳: シュナイダー著、コンクリートの熱特性、技報堂出版(株)、昭和58年
- 6) Schneider, U.: Concrete Creep at Elevated Temperatures, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete, E & FN SPON, 233~246, 1993.9
- 7) 岡島達雄、河辺伸二、岩下恒雄、大岸佐吉: 多軸応力下のコンクリートの熱膨張とクリープ、日本建築学会構造系論文報告集、第309号、pp. 1~9、昭和63年9月
- 8) 河辺伸二、岡島達雄: 乾燥コンクリートの温度上昇時の膨張ひずみ拘束力と応力緩和、日本建築学会構造系論文報告集、第405号、pp. 9~18、1989年11月
- 9) 河辺伸二、岡島達雄、溝口雄一: 定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープに及ぼす含水状態の影響(その1、その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP. 761~764、1993年9月
- 10) 河辺伸二、溝口雄一、岡島達雄: 定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープに及ぼす含水状態の影響、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 15, NO. 1, PP. 549~554、1993年6月
- 11) 岡島達雄、河辺伸二、岩下恒雄: 多軸応力下のコンクリートのひずみ測定方法、日本建築学会構造系論文報告集、第384号、pp. 50~57、昭和63年2月
- 12) 神原 周ほか: 「力学的性質2」、高分子実験学、第10巻、共立出版(株)、昭和58年9月
- 13) 村上謙吉: 「やさしいレオロジー、基礎から最先端まで」、産業図書(株)、昭和61年6月
- 14) Mukaddam, M. A. and Bresler, B.: Behavior of Concrete under Variable Temperature and Loading, Concrete for Nuclear Reactors, Special Publication SP-34, vol. 2, A. C. I. 1972
- 15) 大岸佐吉: コンクリートのレオロジー挙動に関する研究、昭和46年12月
- 16) 大岸佐吉: コンクリートのレオロジーに関する研究 その6。(レートプロセス理論の適用、重畳原理および応力時間対応について)、日本建築学会論文報告集、第189号、pp. 1~9、昭和46年11月

(1994年1月7日原稿受理、1994年3月23日採用決定)