

# 高強度コンクリートの多軸定圧縮応力下における 熱膨張とクリープに関する研究

## THERMAL EXPANSION AND CREEP OF HIGH-STRENGTH CONCRETE UNDER MULTI-AXIAL CONSTANT STRESS CONDITIONS

河辺伸二\*, 岡島達雄\*\*, 今泉大輔\*\*\*

*Shinji KAWABE, Tatsuo OKAJIMA and Daisuke IMAIZUMI*

The purpose of this study is to obtain the thermal expansion of air dried high-strength concrete, from 20 °C to 100 °C and then from 100 °C to 30 °C, under constant compressive stress including tri-axial loading in which maximum compressive stress is below the one third of strength. The conclusion is the following;

In the heating and cooling process, the thermal expansion of high-strength concrete under multi-axial constant stress is smaller than that of free expansion. The strain of this concrete 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 :** *high-strength concrete, thermal expansion, creep, multi-axial constant compressive stress, time temperature equivalence principle*

高強度コンクリート, 熱膨張, クリープ, 多軸定圧縮応力, 温度時間換算則

### 1. 序論

コンクリートが、温度の上昇・下降の繰り返しを受ける状態で使用される場合や、火災を受ける場合がある。また、構造部材として拘束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特性も重要になってくる<sup>1-6)</sup>。

筆者らは、今までに多軸応力を受ける普通コンクリートの熱特性に関する研究を行っている。多軸を含む定圧縮応力を受ける普通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について考察している<sup>7-8)</sup>。ここでは、応力度強度比で1/3の多軸定圧縮応力を受ける場合、気乾及び湿潤状態における普通コンクリートの20℃から100℃までの温度上昇時のひずみの算出にはクリープを考慮に入れるのがよく、乾燥状態における普通コンクリートの温度上昇時のひずみの算出にはクリープを考慮しなくてもよいとしている。

しかし、近年における高強度コンクリートの開発に伴う高強度コンクリート構造物の増加の現状と、高強度コンクリートが従来の普通コンクリートと組成や調合が異なり、内部組織が緻密で水分量も異なることを考慮すると、普通コンクリートだけではなく高強度コンクリートの力学的特性や熱特性も重要であると考えられる。

そこで本研究は、高強度コンクリートと普通コンクリートの力学

的特性と熱特性の比較・検討を行う。3種類の設計基準強度のコンクリート供試体を作製する。それぞれのコンクリート供試体を気乾状態において多軸を含む定圧縮応力状態に保持し、20℃から100℃まで毎時10℃で昇温、その後30℃に降温させ、その間のひずみを測定する。また実験から求めたクリープ量と「温度時間換算則」から温度上昇時及び下降時の予測クリープ量を算出し、定圧縮応力下における熱膨張を予測する。

これらの研究結果は、各種高強度コンクリート構造物の熱応力解析や、これらの構造物の合理的な設計に貢献できると考える。また、日射による温度変化を受ける高強度コンクリート構造物の応力解析にも活用できると考える。

### 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113mm角の立方体コンクリートの各稜を、ひずみ測定のために5mm面取りした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

\* 名古屋工業大学 助教授・工博

\*\* 名古屋工業大学長 工博

\*\*\* 名古屋工業大学 大学院生

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

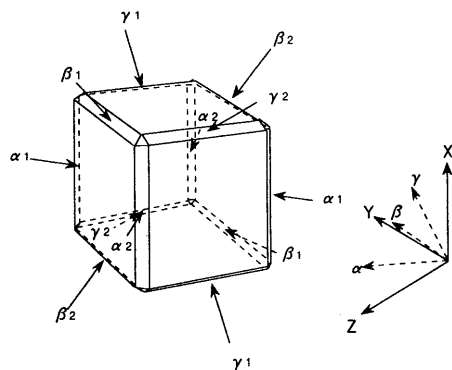


図1 面取立方供試体と変位計取り付け方向

本研究で用いるコンクリートの強度レベルは、高強度コンクリートが設計基準強度48MPaと60MPaとし、普通コンクリートが設計基準強度24MPaとする。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 (木曾川産)
- 粗骨材 : 川砂利 (木曾川産)
- 化学混和剤 : AE剤・高性能AE減水剤・消泡剤

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、3ヶ月間水中養生後、1週間気中養生する。脱型後3週間後に打ち込み面を研磨した。なお、本研究の気乾状態とは、上記にて作製した供試体を使用し、昇温と降温過程において供試体をシールしないことをいう。

また、バ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。その結果を表3に示す。

2.2 載荷方法

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に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去するため鋼製ブラシ載荷板を使用した。荷重の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>9)</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付ける。そして $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 方向から求めたひずみ $\epsilon_\alpha$ 、 $\epsilon_\beta$ 、 $\epsilon_\gamma$ 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。

$$\begin{bmatrix} \epsilon_X \\ \epsilon_Y \\ \epsilon_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_\alpha \\ \epsilon_\beta \\ \epsilon_\gamma \end{bmatrix} \quad \dots \text{式(1)}$$

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)を取付け加熱した。また供試体内部に有害な熱応力を生じさせないよう

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

	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	AE agent	Super AE water reducing agent	Defoamer
Fc.24	15	4.0	57	20	42.7	174	305	725	1027	0.06	-	-
Fc.48	18	4.0	37	20	38.0	170	459	620	1040	-	3.44	0.03
Fc.60	18	3.0	35	20	39.8	170	486	650	1012	-	3.89	0.03

表3 コンクリートの圧縮強度

	Average compressive strength (MPa)	Standard deviation (MPa)
Fc.24	26.5	1.67
Fc.48	53.3	1.81
Fc.60	62.9	0.95

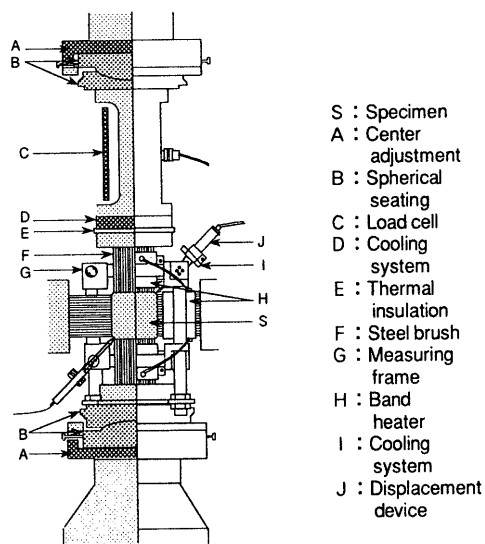


図2 三軸圧縮引張試験機

表4 載荷する応力度強度比

	X	Y	Z
free expansion	0	0	0
uni-axial stress	1/3	0	0
bi-axial stress	1/3	1/3	0
tri-axial stress	1/3	1/3	1/3
creep	1/3	0	0

1/3 : stress/strength ratio

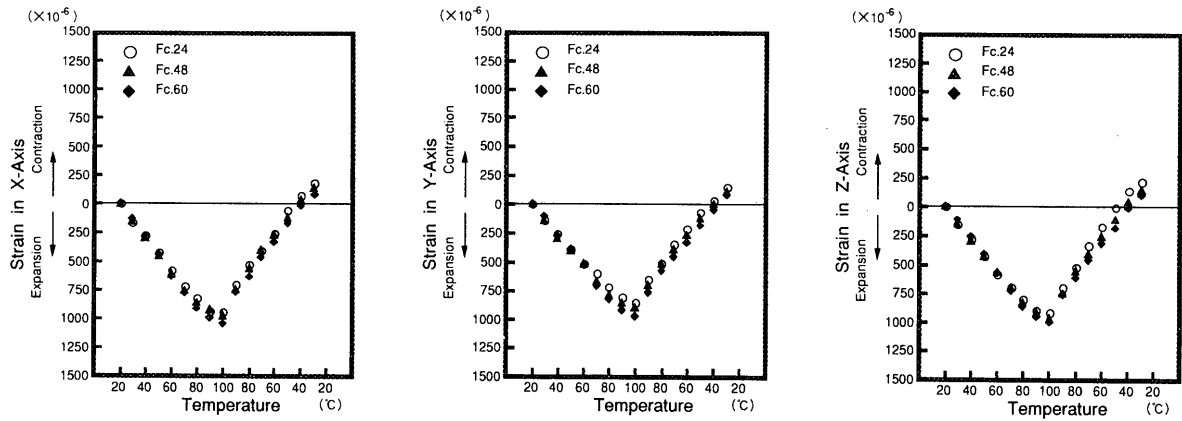


図3 無応力状態のひずみと温度の関係

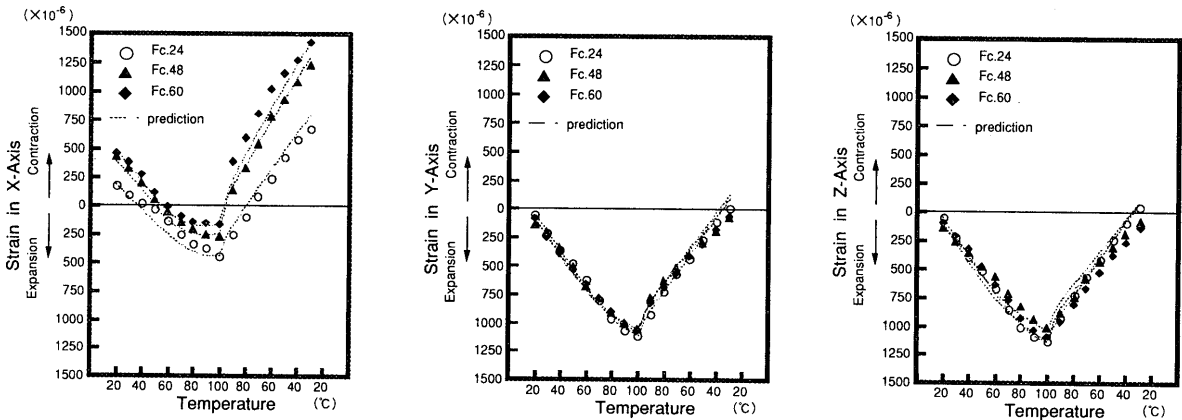


図4 一軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

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℃になるように調節した。

供試体を加熱する際、熱がロードセルに伝わるのを防ぐために、断熱板をブラシ載荷板とロードセルの間に取付け、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を取付けてある。

## 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

#### コンクリートの熱膨張実験

コンクリートの応力度強度比が表4の状態になるように载荷する。そして、各々の定圧縮応力状態を保ちながら各強度レベルの供試体を20℃から100℃まで上昇しその後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強度の1/3であることを念頭においた。

また、実験開始直前と実験終了直後に各強度レベルのコンクリート供試体の質量を測定し、実験開始直前に対する実験終了直後の質量の変化率を求める。

### (2) クリープ実験

各強度レベルの供試体を、無応力状態において毎時10℃の昇温速度で一定温度(20、60、100℃)にする。そして、その温度下でコンクリートの応力度強度比が表4の状態になるように载荷し、16時間ひずみを測定する。

また、実験開始直前と実験終了直後に各強度レベルのコンクリー

ト供試体の質量を測定し、実験開始直前に対する実験終了直後の質量の変化率を求める。

## 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 コンクリートの熱膨張実験結果

図3に無応力状態の、図4から図6に一軸、二軸、三軸定圧縮応力を受けるコンクリートのひずみと温度の関係を点で示す。常温(20℃)の時のひずみは载荷時の瞬間弾性ひずみである。

図3より、温度上昇時は普通コンクリート、高強度コンクリートともに、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のが分かる。また高強度コンクリートの温度に対するひずみの増分は、普通コンクリートのひずみの増分より少し大きいことが分かる。

温度下降時は普通コンクリート、高強度コンクリートともにひずみの収縮量の増分はほぼ一定である。これは、100℃までの昇温により供試体の含有水分が減少し、乾燥収縮の影響が小さいためと考えられる。

図4から図6より、定圧縮応力を受ける場合、温度上昇時の高強度コンクリートの温度に対するひずみの増分は、普通コンクリート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ひずみと温度上昇により生じた乾燥収縮の影響と考えられる。

温度下降時の高強度コンクリートのひずみの収縮量の増分は、普通コンクリートのひずみの収縮量の増分より大きいことが分かる。

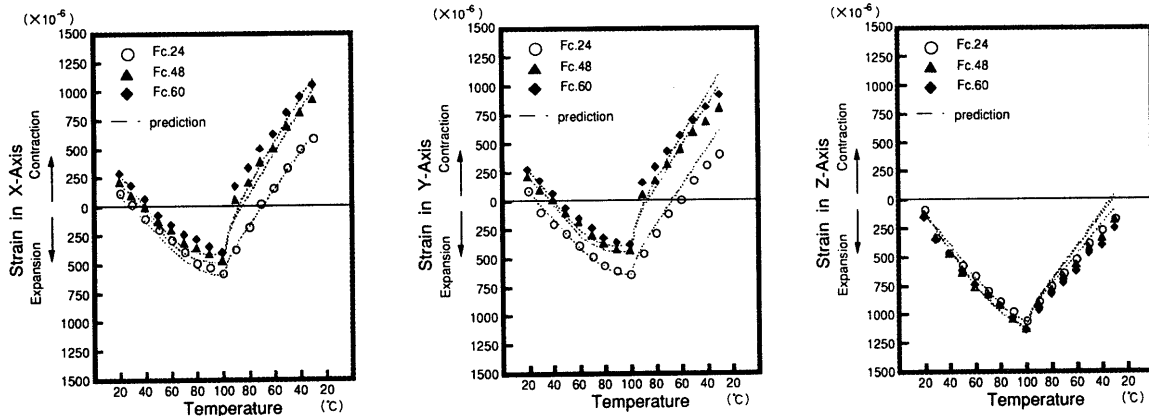


図5 二軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

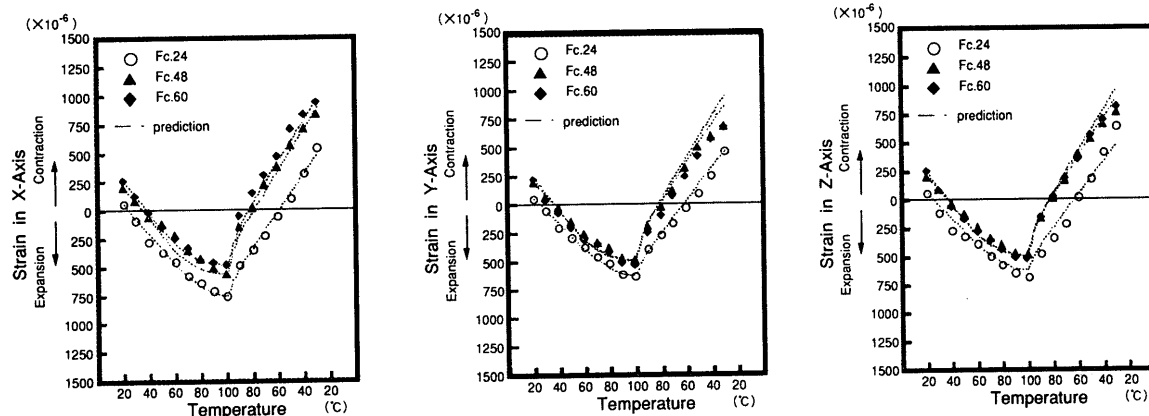


図6 三軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

これは、定圧縮応力により生じたクリープひずみだけの影響と思われる。100℃までの昇温により供試体の含有水分が減少するため乾燥収縮の影響は小さいものと考えられる。

図3と、図4から図6を比較すると、温度上昇時の場合、多軸定圧縮応力を受ける高強度コンクリート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。温度上昇時の場合、気乾状態の普通コンクリートは、定圧縮応力に生じるクリープの影響が大きく無視できないものとしてきた<sup>7・8</sup>)。同様に、高強度コンクリートもクリープの影響は大きいものと推定できる。また、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。

温度下降時の場合、高強度コンクリートのひずみの収縮量の増分は、無応力状態のそれぞれのひずみの収縮量の増分より大きい。温度下降時の普通コンクリートのクリープは無視できるほどに小さいとしてきた<sup>7・8</sup>)。しかし、高強度コンクリートはクリープが大きく無視はできないものと推定できる。

表5に実験前後のコンクリート供試体の質量変化率を示す。高強度コンクリートよりも普通コンクリートの方が、供試体の質量が減少していることが分かる。また、定圧縮応力の組合せに関わらず供試体の質量はほぼ同じ割合で減少していることが分かる。

### 3.2 クリープ実験結果

図7に各強度レベルにおける各温度下のクリープ実験の結果を示す。応力度強度比が1/3の場合、高強度コンクリートのクリープ量は普通コンクリートのクリープ量より大きい。また、温度が高いほどクリープ量は大きい。

表5 実験前後の供試体の質量変化率

	Change of weight (%)		
	Fc.24	Fc.48	Fc.60
free expansion	-1.4	-1.1	-1.0
uni-axial stress	-1.9	-1.4	-1.0
bi-axial stress	-1.4	-1.3	-1.1
tri-axial stress	-1.5	-1.2	-1.1
creep (20℃)	-0.1	-0.04	-0.03
creep (60℃)	-0.8	-0.4	-0.4
creep (100℃)	-2.5	-1.9	-1.7

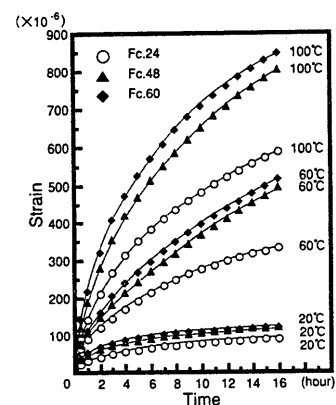


図7 クリープ実験の結果

表5に実験前後のコンクリート供試体の質量変化率を示す。高強度コンクリートよりも普通コンクリートの方が、供試体の質量が減少

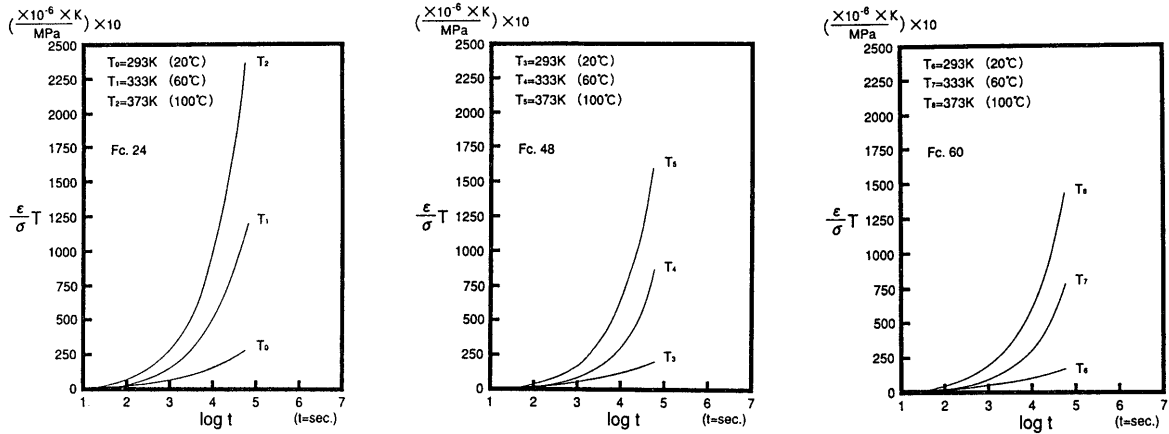


図8 変換された曲線

少していることが分かる。また、高強度コンクリート、普通コンクリートともに、60℃から100℃の間で急激に供試体の質量が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

温度上昇時及び下降時のひずみの予測

多軸定圧縮応力を受ける高強度コンクリートの温度上昇時及び下降時のひずみを測定した結果、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、各強度レベルごとに、20℃、60℃及び100℃の一定温度におけるクリープ量から、「温度時間換算則<sup>10-14)</sup>」を利用して温度上昇時及び下降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及び下降時のひずみを予測する。

4.1 温度上昇時及び下降時のクリープ量の算出

各強度レベルのコンクリートにおけるクリープ実験の結果から、温度時間換算則を用いて、各強度レベル別に図8に示す各温度の変換された曲線を作成する。ただし、横軸は時間(秒)の対数をとる。各強度レベルごとに、20℃の曲線を基準に60℃と100℃の曲線を時間軸に沿ってlog α t だけ平行移動させ、1本の合成曲線を得る。図9に各強度レベルの合成曲線を示す。図10に移動させた量log α t と絶対温度Tとの関係を示す。これより逆に任意温度における移動時間量 α t が求められる。20℃、60℃、100℃以外の任意温度のクリープ曲線も、合成曲線から逆の手順で推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する。これを図11に点線で示す。図12に示すクリープ予測概念図に従い、各曲線を10℃ごとにクリープ量が移動すると仮定する。実験の昇温速度が毎時10℃のため、図12に示す①から②の様にクリープの時間は3600秒(1時間)進む。その間に温度は上昇するため、②から③の様に、次のクリープ曲線に乗り移るとする。そして、次の曲線上を③から④に進むと仮定する。こうして得られた曲線を図11の太線で示す。これより各設計基準強度における温度上昇時及び下降時のクリープ量が算出できる。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を表6に、その後の温度下降時の予測クリープ量を表7に示す。

4.2 温度上昇時及び下降時のひずみの予測

定圧縮応力を受ける場合、コンクリートの温度上昇時及び下降時のひずみ ε は、無応力状態の温度上昇時及び下降時のひずみを ε<sub>r</sub>、

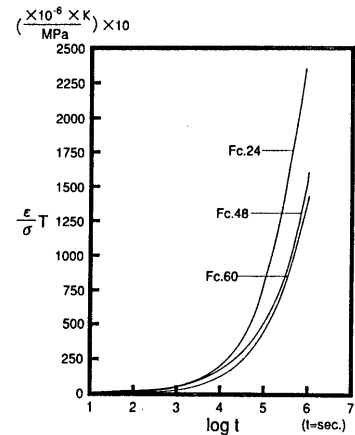


図9 合成曲線

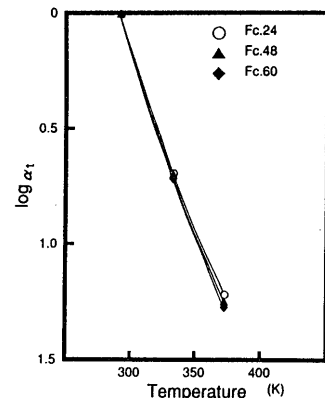


図10 移動量 α t と絶対温度 T の関係

載荷時の瞬間弾性ひずみを ε<sup>e</sup>、温度時間換算則を用いて算出したクリープひずみを ε<sup>c</sup>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及び下降時のひずみは、熱膨張ひずみに乾燥収縮ひずみを加えたものとする。

$$\epsilon = \epsilon^t + \epsilon^e + \epsilon^c \quad \dots \text{式(2)}$$

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>15)</sup>と仮定し、重ね合わせの原理<sup>16)</sup>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及び下降時のひずみの予測値を点線で示す。これより各強度レベルにおける温度上昇時及び下降時のひずみの予測について、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。応力度強度比で1/3の定圧縮応力を受ける高強度コン

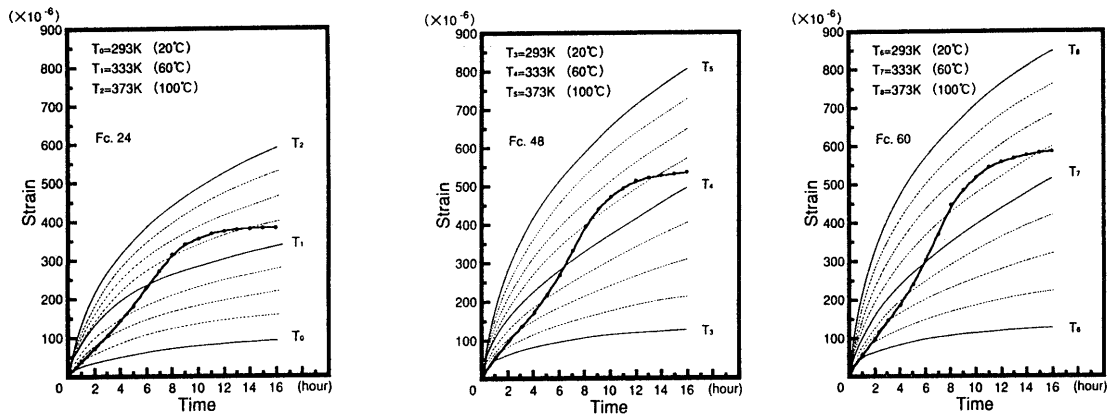


図11 温度上昇時及び下降時のクリープ予測値

クリートの、温度上昇時及び下降時のひずみの予測にはクリープを考慮に入れる必要がある。

5. 結論

多軸定圧縮応力を受ける気乾状態の高強度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) 応力度強度比で1/3の多軸を含む定圧縮応力を受ける場合、温度上昇時及び下降時のクリープを考慮に入れ、高強度コンクリートの温度上昇時及び下降時におけるひずみの予測が可能である。

(2) 温度上昇時及び下降時のクリープ量を、一定温度のクリープ量から温度時間換算則を用いて算出することが可能である。

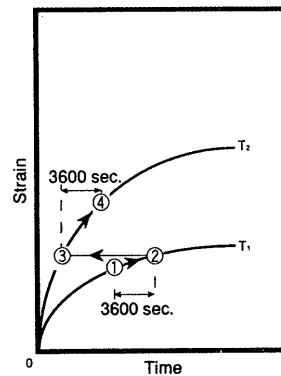


図12 クリープ予測概念図

謝辞

本研究は、文部省科学研究費(奨励A07750659)、日本スパンクリート協会研究助成金、名古屋工業大学工学部講座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、故大岸佐吉博士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), pp.367~377, 1979年11月
- 2) 岩崎訓明: コンクリートの特性, 共立出版(株), pp.148~150, 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, 1982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, 1983年9月
- 5) 森永 繁、山崎庸行、林 章二訳: シュナイダー著, コンクリートの熱的性質, 技報堂出版(株), pp.42~48, 1983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, pp.233~246, 1993年9月
- 7) 河辺伸二、岡島達雄: 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, 日本建築学会構造系論文報告集, 第460号, pp.19~25, 1994年6月
- 8) Kawabe,S. and Okajima,T., : Effect of water content on expansion and creep of concrete under multi-axial stress, Concrete under Severe Conditions, E & FN SPON, pp.1543~1552, 1995
- 9) 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, 1986年2月

表6 温度上昇時の予測クリープ量

Prediction of creep (x10 <sup>-6</sup> )	Temperature (°C)								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Fc.24	0	34	69	101	141	177	224	268	311
Fc.48	0	52	93	131	166	213	264	328	391
Fc.60	0	54	95	142	184	236	299	368	444

表7 温度下降時の予測クリープ量

Prediction of creep (x10 <sup>-6</sup> )	Temperature (°C)								
	100	90	80	70	60	50	40	30	20
Fc.24	311	338	351	365	371	375	378	379	379
Fc.48	391	438	470	492	510	518	524	528	532
Fc.60	444	482	515	541	554	565	573	579	583

- 10) 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), 1983年9月
- 11) 村上謙吉: 「やさしいレオロジー、基礎から先端まで」, 産業図書(株), pp.129~150, 1986年6月
- 12) 村上謙吉: 「レオロジー基礎論」, 産業図書(株), pp.151~170, 1991年5月
- 13) 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., pp.151~170, 1972
- 14) 大岸佐吉: コンクリートのレオロジー挙動に関する研究, 1971年12月
- 15) Jordan, I. J. and Illston, J. M., : The Creep of Sealed Concrete under Multiaxial Compressive Stress, Magazine of concrete Research, vol.21, No.69, pp.195~204, 1969
- 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応, 重畳原理および応力時間対応について), 日本建築学会構造系論文報告集, 第189号, pp.1~9, 1971年11月

(1996年5月10日原稿受理, 1996年10月8日採用決定)