

論文 多軸定圧縮応力を受ける高強度コンクリートの熱膨張とクリープ

河辺伸二*¹・岡島達雄*²・今泉大輔*³

要旨：本研究は、高強度コンクリートを、多軸を含む応力度強度比で1/3の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℃に毎時10℃で降温させ、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。その結果、応力度強度比で1/3の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の予測にはクリープを考慮に入れる必要があることが分かった。

キーワード：高強度コンクリート、高温、熱膨張、クリープ

1. はじめに

近年、高強度コンクリートの開発が盛んになり、これを用いた構造物も増えつつある。高強度コンクリートは、組成や調合が従来の普通コンクリートと異なる。内部組織が緻密であり、水分量も異なるため力学的特性や熱特性が異なると考える。また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時の場合において構造部材として拘束を受ける状況で使用され、多軸を含めた外力荷重が作用するコンクリートの熱挙動についての情報は重要であると考えられる [1]。

そこで本研究は、3種類の設計基準強度 (24、48、60MPa) のコンクリート供試体を、それぞれ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℃に毎時10℃で降温させ、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火災時の熱応力解析や、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

本研究で用いるコンクリートの強度レベルは、設計

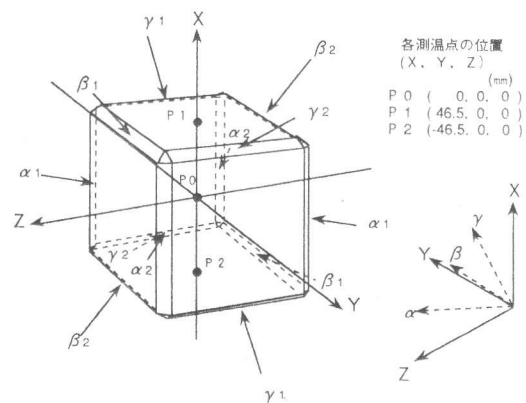


図-1 面取立方供試体と変位計取付け方向及びT型熱電対埋設位置

* 1 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)

* 2 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)

* 3 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻

基準強度 24MPa、48MPa、60MPaとする。セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は木曽川産、混和剤は A E 剤、高性能 A E 減水剤、消泡剤とする。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。

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 100 mm、高さ 200 mm 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。供試体の直交3方向に同時に圧縮力と引張力を加えることができる。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く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

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 α 、 β 、 γ 方向から求めたひずみ ϵ_α 、 ϵ_β 、 ϵ_γ 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。

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

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。また供試体に有害な熱応力を内部に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

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 ³)
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 ³)						
						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 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

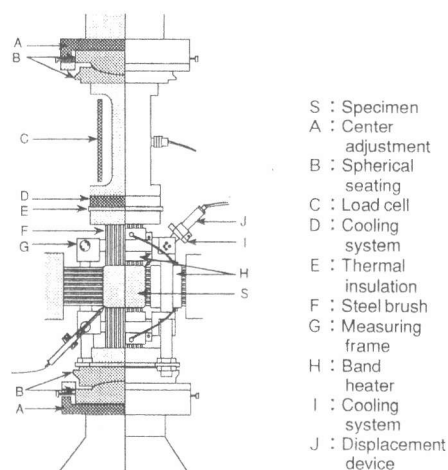


図-2 三軸圧縮引張試験機

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

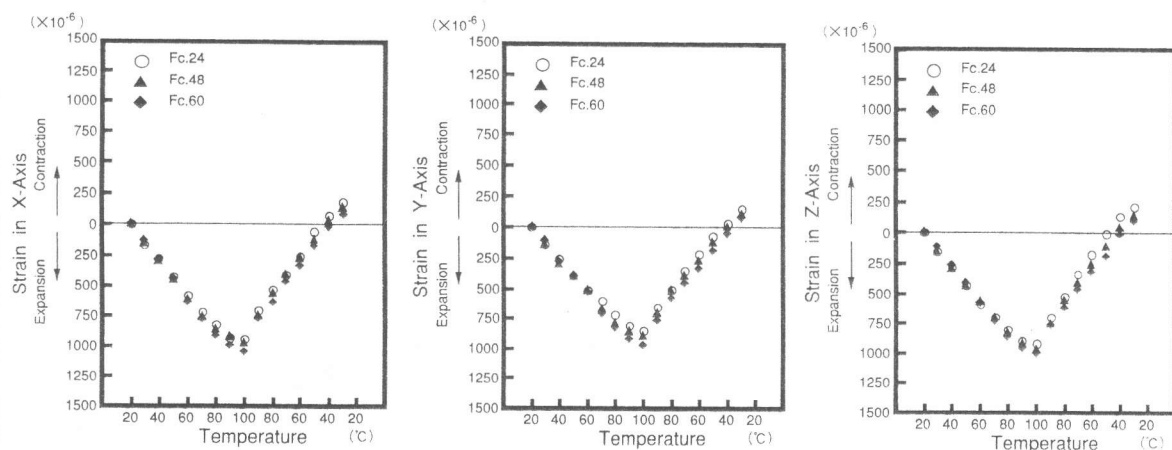


図-3 無応力状態のひずみと温度の関係

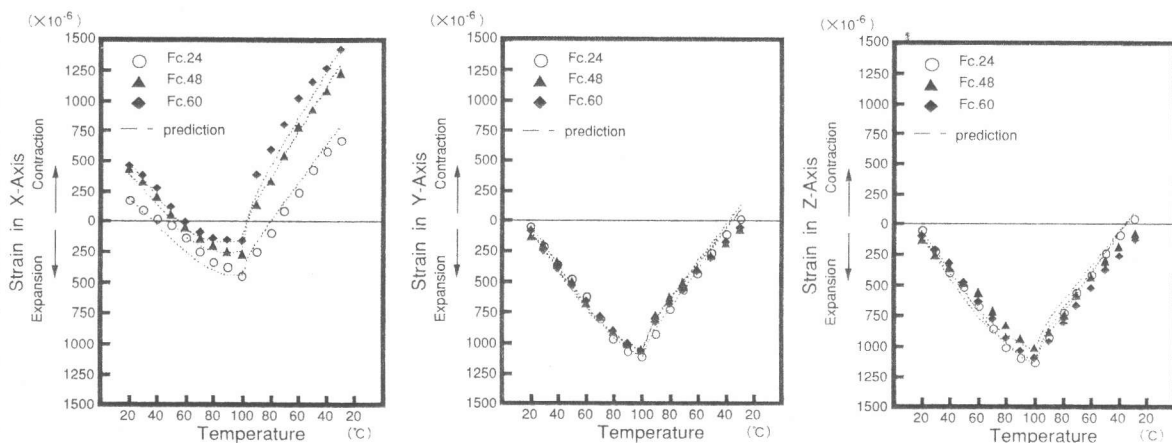


図-4 一軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

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載荷する。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。昇温・降温速度は毎時10℃とする。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。

(2) クリープ実験

各強度レベルの供試体を一定温度(20、60、100℃)にする。そして、各一定温度下において応力度強度比が表-4の状態になるように載荷し、16時間ひずみを測定する。

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示す。20℃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ことが分かる。また高強度コンクリートの温度に対するひずみの増分(20℃~100℃までの全ひずみ増分量)は、普通コンクリートのひずみの増分より若干大きい。これは、高強度コンクリートが骨材より大きい熱膨張係数をもつペーストを多く含んでいるためと思われる。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(100℃~30℃までの全ひずみ収縮量)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

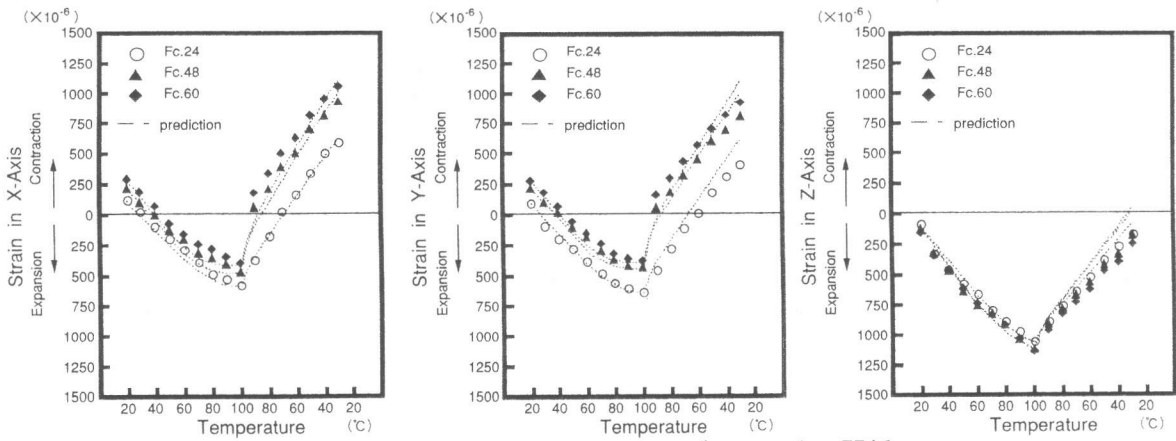


図-5 二軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

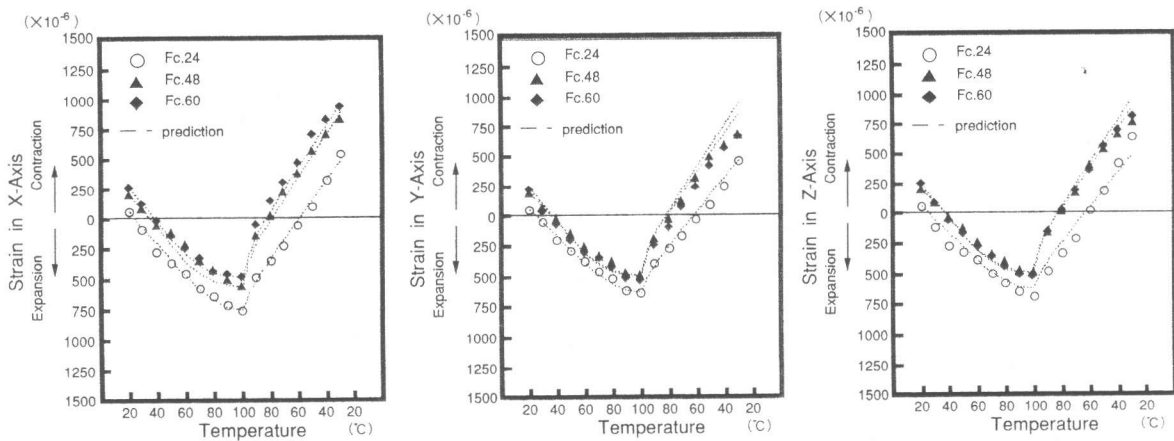


図-6 三軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

水分が減少し、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思われる。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。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。

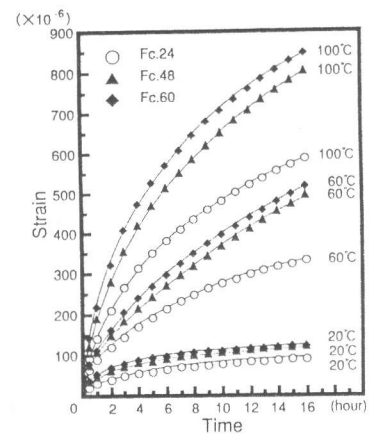
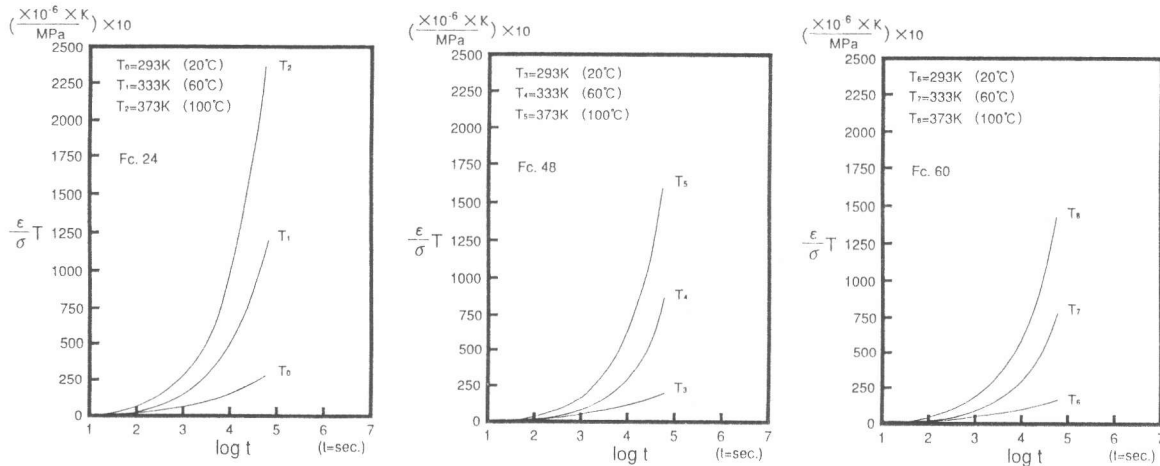


図-7 クリープ実験の結果

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 [1]。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ように小さいとしてきた [1]。しかし、高強度コンクリートはクリープの影響が大きく無視はできないものと



図一八 変換された曲線

推定できる。

3. 2 クリープ実験結果

図一七に各強度レベルにおける各温度のクリープ実験の結果を示す。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。

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

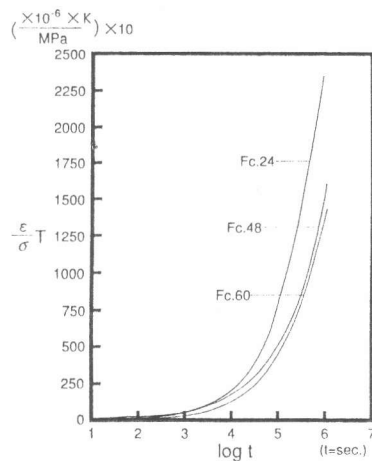
4. 1 温度上昇時及び下降時のクリープ量の算出

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一八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 $\log \alpha t$ 分平行移動させ、1本の合成曲線を得る。図一九に各強度レベルの合成曲線を示す。図一十に移動させた量 $\log \alpha t$ と絶対温度 T の関係を示す。これより逆に任意温度における移動時間量 αt 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。

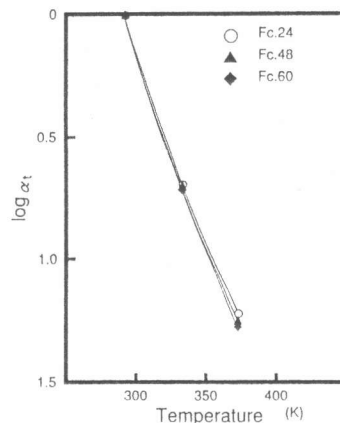
次に20℃から100℃までの間の10℃ごとのクリープ曲線を作成する。これを図一十一に点線で示す。図一十二に示すクリープ予測概念図に従い、各曲線を10℃ごとにクリープ量が移動すると仮定する。実験の昇温速度が毎時10℃のため、図一十二に示す①から②の様にク

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一十一の太線で示す。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一五に、その後の温度下降時の予測クリープ量を表一六に示す。

4. 2 温度上昇時及び下降時のひずみの予測



図一九 合成曲線



図一十 移動量 αt と
絶対温度 T の関係

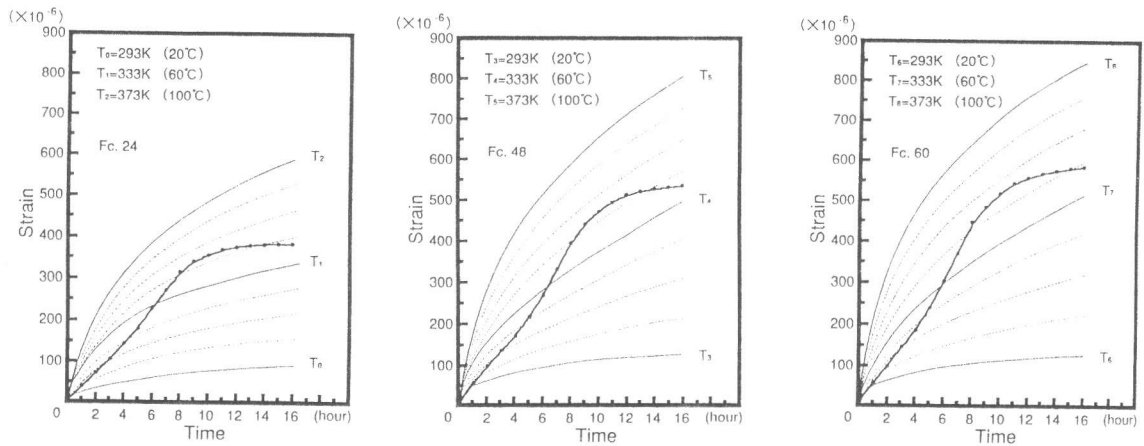


図-11 温度上昇時及び温度下降時のクリープ予測値

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 ϵ は、無応力状態の熱膨張ひずみを ϵ^t 、載荷時の瞬間ひずみを ϵ^e 、温度時間換算則を用いて算出したクリープひずみを ϵ^c とすれば式(2)で表せられると考える。ただし、乾燥収縮は ϵ^t に含める。

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

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と考え、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

応力度強度比で1/3の多軸定圧縮応力を受ける場合、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にはクリープを考慮に入れる必要がある。

謝辞 本研究は、日本スパンクリート協会研究助成金、文部省科学研究費（奨励 A07750659）により行われた。

参考文献

- [1] 河辺伸二他：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，第16号，第1巻，pp.699～704，1994

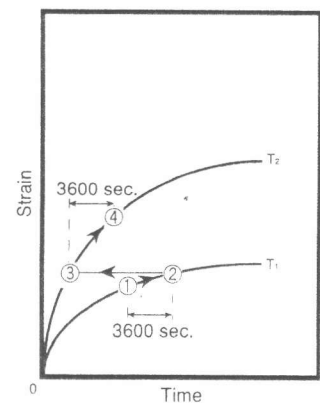


図-12 クリープ予測概念図

表-5 温度上昇時の予測クリープ量

Prediction of creep ($\times 10^6$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)								
	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-6 温度下降時の予測クリープ量

Prediction of creep ($\times 10^6$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)								
	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