コンクリートの遷移温度クリープ性状に関する研究

—温度80℃以下における遷移温度クリープを含む線膨張係数—

STUDY ON TRANSIENT THERMAL CREEP OF CONCRETE

—Coefficient of thermal expansion including transient thermal creep of concrete at temperatures up to 80℃—

山崎 庸行*, 清水 昭之**, 森 永 繁***

Nobuyuki YAMAZAKI, Akiyuki SHIMIZU and Shigeru MORINAGA

It is important to grasp the thermal properties of concrete including creep of concrete for preventing cracks of reinforced concrete members subjected to repeated thermal loads. Some experiments were conducted using concrete specimens under constant compressive stress subjected to temperatures up to about 80℃ at slow heating and/or cooling rate to evaluate thermal strain including transient thermal creep. From the experiments, the following conclusions were derived: 1. The influence of transient thermal creep was most remarkable at the very first-time heating for the concrete, though the influence at the repeated heating and cooling phase of concrete was little. 2. A new coefficient of thermal expansion including transient thermal creep can be formulated by both the heating rate and the applied compressive stress ratio of concrete.

Keywords: concrete, transient thermal creep, coefficient of thermal expansion, heating rate, applied stress

コンクリート, 遷移温度クリープ, 線膨張係数, 加熱速度, 載荷応力度

1. はじめに

原子力発電所建屋は一般的な建築物とは異なり、地震荷重などの外力以外に通常運転時には最高で70℃程度の熱荷重が作用する。これら熱荷重に起因したコンクリートの自由膨張ひずみが拘束されると、鉄筋コンクリート部材には熱応力が発生する。そのため、部材剛性が高く、かつ拘束力が大きい原子力発電所建屋の鉄筋コンクリート部材は、大きな熱応力を負担することになる。

一方、熱応力は地震などの外力荷重による応力とは異なり、鉄筋コンクリート部材に生じたひび割れによる剛性低下やクリープなどの塑性的な挙動の影響を受ける。とりわけ、コンクリートのクリープは温度が高くなるほど大きくなるため、長期間熱荷重が作用する鉄筋コンクリート部材では無視することができない因子である。

このようなクリープ現象のうち、コンクリートが一定の荷重作用下で温度変化を受けること（遷移温度条件下または非定常温度条件下）で生じるクリープを、Schneider¹⁾やKhoury²⁾は「遷移（温度）クリープ」（Transient（またはTransitional）Thermal Creep）と呼んでいる。以下、本報において、一定の荷重が作用した状態の下（応力状態下）で温度変化によって生じるクリープを「遷移温度クリープ」と称す。

Khoury²⁾は、この遷移温度クリープに関して、1960年代から

1980年代初頭にかけて発表された文献のレビューを行っている。それによると、遷移温度クリープは、コンクリート内部の水分移動によって生じ、これは応力作用下の加熱過程において、セメントペースト内で生じる分子および微細組織の相変化が要因であるとしている。しかし、遷移温度クリープの発生メカニズムに関しては、未だ明確な結論が出されるに至っていない。また、遷移温度クリープはコンクリートが初めて受ける温度領域の加熱過程のみで生じ、冷却過程では生じないこと、加熱速度が緩やかなほど大きくなることなど、主に現象面に関して知見の整理がなされている。

一方、1985年以降においては、Khoury³⁾、Chern⁴⁾、Thienel⁵⁾、⁶⁾、Küttner⁷⁾、河辺⁸⁾など、Colina⁹⁾が、遷移温度クリープについて実験的・解析的な検討を行っている。これらは、原子力発電所を対象とした比較的低い温度領域までを扱ったものと火災を対象とした高温領域を扱ったものに大別できる。しかし、前者のように、100℃程度までの比較的低い温度領域を対象として検討が行われた例はきわめて少ない。そのため、長期間にわたり緩やかな速度で熱荷重（加熱・冷却）を受ける鉄筋コンクリート部材（構造物）における遷移温度クリープを含む熱的ひずみ挙動に関しては、十分な評価がなされていないのが現状である。

そこで、乾燥を受けない（水分が逸散しない）条件下で、コンク

* 清水建設株式会社 研究所 副所長・工修

** 東京理科大学工学部建築学科 教授・工博

*** 九州東海大学工学部建築学科 教授・工博

Duputy Director, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, School of Eng., Kyushu Tokai Univ., Dr. Eng.

リート試験体に一定の圧縮荷重を作用させ、その状態を保持したまま緩やかな速度にて繰り返し温度を付与する実験（以下、**載荷加熱実験**と称す）を行い、加熱過程および冷却過程における遷移温度クリップを含むコンクリートの熱的ひずみ挙動に関して評価を行った。

本報は、その評価結果を示したものである。

2. 載荷加熱実験の概要

2.1 実験パラメータ

載荷加熱実験におけるパラメータは、表1に示すように、加熱速度を5水準、載荷応力度比を7水準とした。

加熱速度 (K) に関しては、熱荷重を受ける原子力発電所建屋における鉄筋コンクリート部材を想定して0.03, 0.09, 0.3, 1.0および2.5 $^{\circ}\text{C}/\text{hr.}$ の5通りとした。一方、載荷応力度比 (σ_0/f'_c) は、コンクリートの長期許容応力度である設計基準強度の1/3を基準として、載荷開始時におけるコンクリート圧縮強度 (f'_c) の0/12（無載荷）、2/12, 4/12および6/12の4通りとし、加熱速度0.3 $^{\circ}\text{C}/\text{hr.}$ の場合のみ、これら4通りに載荷応力度比1/12, 3/12および5/12の場合を加えて合計7通りとした。

2.2 試験体

(1) 試験体形状

実験に供した試験体は、図1に示すように、150mm×150mm×530mmの無筋コンクリートで、試験体中心部に埋込み型のひずみゲージおよびT熱電対 ($\phi 0.32\text{mm}$) を設置したものである。

(2) コンクリートの計画調合および使用材料

実験で用いたコンクリートの計画調合、ならびに使用した材料の諸元を表2に示す。コンクリートは、設計基準強度が24 N/mm^2 （管理材齢28日）となるよう調合を定めた。使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材と粗骨材はともに鬼怒川産で、粗骨材の最大寸法は25mmである。なお、化学混和剤にはAE減水剤を用いた。

(3) 試験体の製作

試験体の製作は、温度20 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度60% R.H.の恒温室にて行った。

図1 載荷加熱実験装置の概要

コンクリートは鋼製型枠に打ち込み、振動締固めを行った後20 $^{\circ}\text{C}$ の室内で湿空養生とした。試験体は、コンクリート打込み後3日目に脱型し、それ以降は載荷開始直前まで20 $^{\circ}\text{C}$ 水中養生とした。

2.3 実験方法

実験は、図1や写真1に示すような装置を用い、試験体の長辺方向に4本のPC鋼棒と皿ばねを設置し、センターホールジャッキを介して試験体の長手方向（150mm×150mmの面）に一定の圧縮荷重（載荷応力度 σ_0 ）を作用させた。その荷重を保持した状態で水槽内の水温を上昇・降下させ、試験体に所定の温度履歴を付与した。試験体への載荷荷重は、皿ばねと手動制御によって設定荷重の $\pm 3\%$ 以内に制御した。

水温は、試験体断面内に温度勾配が生じないよう一定の加熱速度 ($K=0.03\sim 2.5^{\circ}\text{C}/\text{hr.}$) で連続して変化させた。試験体に温度変化を与え、かつ試験体における乾燥収縮ひずみを排除するため、試験体を入れた水槽内で直接温水を循環させた。水温は基準温度を15 $^{\circ}\text{C}$ として、最高温度を約80 $^{\circ}\text{C}$ （温度差 $\Delta T=65^{\circ}\text{C}$ ）とした。

実験では、載荷応力度比が異なる4試験体（1体のみ無載荷）を同時に、同じ加熱速度にて温度を付与した。なお、加熱速度0.3 $^{\circ}\text{C}/\text{hr.}$ の載荷加熱実験は、実験装置の関係から、載荷応力度比を0/12, 2/12, 4/12, 6/12とした場合と、同じく0/12, 1/12, 3/12, 5/12とした場合に分けて行った。

載荷加熱実験において、同一実験条件での繰り返し加熱回数は2回～5回とした。実験における試験体への載荷および加熱パターンを、

表1 実験パラメータ

加熱速度 K ($^{\circ}\text{C}/\text{hr.}$)	計画載荷応力比 σ_0/f'_c						
	0/12	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12	6/12
0.03	○	—	○	—	○	—	○
0.09	○	—	○	—	○	—	○
0.3	○	○	○	○	○	○	○
1.0	○	—	○	—	○	—	○
2.5	○	—	○	—	○	—	○

注) ○は実施した実験を表す。

表2 コンクリートの計画調合

W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				細骨材率 (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)
	C	W	S	G			
54.0	282	153	772	1088	41.5	4.0 $\pm$ 1.0	12.0 $\pm$ 2.5

セメント：密度 3.15 g/cm^3
粗骨材：表乾密度 2.61 g/cm^3 、粗粒率 6.79、吸水率 1.71%
細骨材：表乾密度 2.58 g/cm^3 、粗粒率 2.64、吸水率 2.17%

写真1 載荷加熱実験状況

図2に示す。実験開始時におけるコンクリートの材齢は、28日～71日であった。

2. 4 測定項目および測定方法

(1) コンクリートのフレッシュ性状および強度性状

試験体に打ち込んだコンクリートのスランプ、空気量、温度および単位容積質量は、JIS A 1101 および JIS A 1128 に準拠して測定した。また、硬化コンクリートについては、圧縮強度を標準養生供試体にて材齢28日、載荷直前および載荷終了（除荷）時点でJIS A 1108 に従って測定した。なお、圧縮強度試験の際には、JIS A 1149 に準拠してヤング係数を求めた。

(2) コンクリートのひずみと温度

試験体に埋め込んだひずみゲージおよびT熱電対にて、コンクリートのひずみと温度を30分間隔で測定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 コンクリートの基本的性質

(1) フレッシュ性状

試験体に用いたコンクリートは、いずれの実験においても、スランプは10.5cm～13.5cm、空気量は3.2%～4.7%、コンクリート温度は20.0℃～21.5℃で、概ね計画値どおりの性状が得られた。

(2) 強度性状

コンクリートの圧縮強度およびヤング係数を、表3に示す。材齢28日における圧縮強度は、27.6 N/mm²～37.2 N/mm²であった。

3. 2 載荷応力度

表4に、載荷応力度(σ_0)、載荷応力度比(σ_0/f'_c)および載荷時の瞬間弾性ひずみ(ε_0)を示す。載荷応力度は、載荷直前に測定した標準養生供試体の圧縮強度(f'_c)によって定めた。表4に示すように、載荷応力度を載荷直前の圧縮強度で除して得られた載荷応力度比は概ね計画値どおりであった。

3. 3 載荷加熱実験時のひずみ挙動

本実験で得られたコンクリートの全ひずみ（ひずみゲージの温度ドリフト分を補正したひずみ）には、載荷による瞬間弾性ひずみ、線膨張ひずみ、遷移温度クリープひずみが含まれると考える。ただし、本実験では、試験体を水槽内で載荷加熱しているため、

図2 試験体への載荷および加熱パターン

全ひずみには乾燥収縮によるひずみ成分は含まれないと考えられる。したがって、全ひずみは式(1)のような形で表すことができる。

$$\varepsilon_{total} = f(\varepsilon_0, \varepsilon_{th}, \varepsilon_{nc}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ε_{total} : 全ひずみ

ε_0 : 載荷による瞬間弾性ひずみ

ε_{th} : 線膨張ひずみ（無載荷状態で温度のみを受けて生じる自由膨張ひずみ）

ε_{nc} : 載荷加熱によって生じる遷移温度クリープひずみ

図3に、一例として、加熱速度1.0℃/hr.の場合における載荷応力度比、温度および全ひずみ(ε_{total})の経時変化を示す。また、図4に、試験体に付与した温度と全ひずみの関係を加熱速度別に示す。なお、図3と図4において、コンクリートのひずみは膨張側を正で、収縮側を負で表示し、凡例は載荷応力度比を表している。

図3に示すように、載荷加熱実験の期間中において、載荷応力度比はほぼ計画値に保持されており、また付与した温度も計画した加熱速度どおりであった。

表3 硬化コンクリートの性状

加熱速度 (℃/hr.)	圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (kN/mm ²)		
	材齢 28日	載荷時	除荷時	材齢 28日	載荷時	除荷時
0.03	37.2	40.0 (71日)	46.5 (346日)	32.7	33.2 (71日)	37.9 (346日)
0.09	37.2	38.7 (53日)	46.5 (346日)	32.7	33.0 (53日)	37.9 (346日)
0.3	32.5	32.5 (28日)	40.6 (130日)	30.0	30.0 (28日)	32.5 (130日)
	27.6	29.4 (49日)	36.3 (139日)	27.9	28.1 (49日)	31.0 (139日)
1.0	27.7	31.0 (52日)	33.0 (78日)	28.3	31.2 (52日)	31.5 (78日)
2.5	27.7	30.6 (45日)	33.0 (78日)	28.3	31.4 (45日)	31.5 (78日)

() 内は、コンクリートの材齢を表す。

表4 載荷加熱実験開始時における諸元

加熱速度 (℃/hr.)	載荷時 の諸元	計画載荷応力度比						
		0/12	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12	6/12
0.03	σ_0	0.0	—	6.8	—	13.4	—	18.4
	σ_0/f'_c	0.00	—	0.17	—	0.34	—	0.46
	ε_0	—	—	-229	—	-522	—	-895
0.09	σ_0	0.0	—	6.4	—	13.0	—	18.6
	σ_0/f'_c	0.00	—	0.17	—	0.34	—	0.48
	ε_0	—	—	-255	—	-608	—	-812
0.3	σ_0	0.0	—	5.5	—	11.1	—	16.1
	σ_0/f'_c	0.00	—	0.17	—	0.34	—	0.50
	ε_0	—	—	-232	—	-488	—	-854
	σ_0	0.0	2.3	—	7.4	—	12.3	—
	σ_0/f'_c	0.00	0.08	—	0.25	—	0.42	—
	ε_0	—	-84	—	-302	—	-535	—
1.0	σ_0	0.0	—	5.2	—	10.5	—	15.5
	σ_0/f'_c	0.00	—	0.17	—	0.34	—	0.50
	ε_0	—	—	-189	—	-474	—	-726
2.5	σ_0	0.0	—	5.2	—	10.3	—	15.4
	σ_0/f'_c	0.00	—	0.17	—	0.34	—	0.50
	ε_0	—	—	-234	—	-439	—	-747

表中で、 σ_0 は載荷応力度 (N/mm²) を、 σ_0/f'_c は載荷応力度比を、 ε_0 は瞬間弾性ひずみ (×10⁻⁶) を表す。

(1) 初回加熱時のひずみ挙動

無載荷状態 ($\varepsilon_0 = 0$) でコンクリート試験体に温度履歴を付与すると、温度変化に伴ってひずみは直線的に増減し、加熱前の温度 (基準温度 $\approx 15^\circ\text{C}$) に戻ると、ほぼ無ひずみとなった。この無載荷状態における温度変化に伴うひずみ挙動は、加熱速度に依存せず、い

れの場合も同様の傾向を示した。

無載荷状態におけるコンクリートのひずみは線膨張ひずみ (ε_{th}) が支配的であるため、温度とひずみの関係を原点を通過する一次式で近似させると、一次式の勾配が線膨張係数 α_0 として評価することができる。

図3 加熱速度 1.0°C/hr. の場合の载荷応力度比、温度および全ひずみの経時変化

図4 載荷加熱実験で得られたコンクリート試験体のひずみ挙動 (初回加熱時)

$$\varepsilon_{th} = \alpha_0 \cdot \Delta T \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 α_0 : コンクリートの線膨張係数 (1/°C)

ΔT : 温度差 (°C)

式 (2) によって本実験における無載荷状態での線膨張係数 α_0 を求めると、加熱速度にかかわらず概ね $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。

一方、コンクリート試験体に一定の荷重を作用させた状態で加熱した場合には、無載荷状態の場合とは異なるひずみ挙動を示した。すなわち、図 4 に示すように初回加熱時の温度上昇過程では、無載荷状態の場合と異なる勾配でひずみが増加したり、あるいは温度上昇過程にもかかわらず全ひずみが減少 (収縮) した。これらのひずみ挙動は、載荷応力度比が大きくなるほど、また加熱速度が遅くなるほど顕著になり、遷移温度クリープの影響が卓越した。なお、加熱速度がひずみ挙動に及ぼす影響は、載荷応力度比ほど顕著ではなかった。

他方、初回加熱時の温度降下過程においては、無載荷状態のひずみ挙動と同様に概ね温度に対して線形の挙動を示し、そのときの比例定数はほぼ $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で、無載荷状態における温度上昇過程での値 (線膨張係数 α_0) と同等であった。また、この温度降下過程では、温度が基準温度である 15°C まで降下すると、加熱前の初期ひずみ (ε_0) よりも収縮側に大きな残留ひずみが生じた。このため、コンクリートの熱変形が拘束された場合を想定すると、初めて温度上昇を受ける過程においては遷移温度クリープによって熱応力は緩和されるが、温度降下過程で発生するこの大きな残留収縮ひずみは、コンクリートに大きな引張応力を生じさせる結果となり、ひび割れが発生する可能性があることを示唆している。

(2) 繰返し加熱時のひずみ挙動

図 3 に示すように、無載荷状態のひずみ挙動に関しては、初回加熱時の温度上昇過程および温度降下過程と 2 回目以降の繰返し加熱時とで、ひずみは経過時間 (換言すれば温度) に対してほぼ同じ勾配で増減しており、繰返し加熱による影響はなかった。また、載荷状態にあるひずみは、経過時間 (温度) に対して、初回加熱時の温度上昇過程以外は、無載荷状態における温度上昇過程および温度降下過程とほぼ同じ勾配で増減しており、この挙動は加熱の繰返し回数が増えても変わらなかった。

3. 4 遷移温度クリープを含む線膨張係数に関する評価

図 4 に示したように、温度変化に伴うひずみ挙動は、遷移温度クリープの影響が卓越する初回加熱時の温度上昇過程においても線形またはそれに近い関係にある。そこで、温度とひずみの関係における比例定数を新たに「遷移温度クリープを含む線膨張係数 (α_{t+cr})」と定義し、その値を求め、載荷応力比および加熱速度との関係について評価を試みた。

図 4 に示した全ひずみから瞬間弾性ひずみ

を差し引いて求めた初回加熱時の温度上昇過程における遷移温度クリープを含むコンクリートひずみ ($\varepsilon_{t+cr} = f(\varepsilon_{th}, \varepsilon_{tc}) = \varepsilon_{total} - \varepsilon_0$) のみを、温度と関係づけて図 5 に示す。ここで、このひずみを ε_{t+cr} として扱う理由は、本実験において瞬間弾性ひずみは加熱開始直前に付与しているため全ひずみからの分離は可能と考えられるが、荷重作用下でコンクリートが温度変化を受ける場合には、無載荷状態における線膨張ひずみ (ε_{th}) と遷移温度クリープひずみ (ε_{tc}) との間で重ね合わせの原理が適用可能か否か明確でないためである。

図 5 から、加熱速度にかかわらず、いずれの場合もひずみと温度はほぼ線形関係にあることがわかる。また、この両者の関係を表す勾配 (遷移温度クリープを含む線膨張係数 α_{t+cr}) は、載荷応力度比が大きくなると正側 (膨張側) から負側 (収縮側) へ移行している。そこで、図 5 における両者の関係を一次式にて近似し、その勾配である遷移温度クリープを含む線膨張係数 α_{t+cr} を求めた。なお、遷移温度クリープを含む線膨張係数は、式 (3) のように表すことができる。

$$\alpha_{t+cr} = \frac{\varepsilon_{t+cr}}{\Delta T} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 α_{t+cr} : 遷移温度クリープを含む線膨張係数 (1/°C) で、無載荷状態の初回加熱時においては、コンクリートの線膨張係数 α_0 と同じになる。

ε_{t+cr} : 遷移温度クリープを含む線膨張ひずみ (全ひずみから瞬間弾性ひずみを除いたひずみ)

遷移温度クリープを含む線膨張係数の算定結果を表 5 に示す。表

図 5 初回加熱時の温度上昇過程における温度とコンクリートひずみ (ε_{t+cr}) の関係

5に示すとおり、無載荷状態 ($\varepsilon_0 = 0$) における初回加熱時の遷移温度クリープを含む線膨張係数 α_{t+cr} は、2回目以降の繰返し加熱時における α_{t+cr}' と概ね等しい。しかし、載荷状態における初回加熱時の遷移温度クリープを含む線膨張係数 α_{t+cr} は、繰返し加熱時における α_{t+cr}' よりも小さく、載荷応力度比6/12の場合には α_{t+cr} はいずれも負の値を示している。

初回加熱時における載荷状態の遷移温度クリープを含む線膨張係数 α_{t+cr} を無載荷状態における線膨張係数 α_0 で除して規準化し、載荷応力度比と関係づけて図6に、2回目以降の繰返し加熱時の載荷状態における α_{t+cr}' を α_0 で除して規準化し、載荷応力度比と関係づけて図7にそれぞれ示す。

初回加熱時には、図6に示すように、載荷応力度比と規準化した遷移温度クリープを含む線膨張係数（以下、規準化線膨張係数と略記）の関係は、ほぼ線形関係にあり（いずれの加熱速度も決定係数 $r^2 \geq 0.926$ ）、式（4）のように表すことができる。

$$\frac{\alpha_{t+cr}}{\alpha_0} = 1.0 + D \times \frac{\sigma_0}{f_c'} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 α_{t+cr}/α_0 ：規準化線膨張係数

D ：比例定数（図6における回帰式の勾配）

σ_0/f_c' ：載荷応力度比

一方、繰返し加熱時には、図7に示すように、規準化線膨張係数は、載荷応力度比や加熱速度にかかわらず1.0前後であり、このことから繰返し加熱の場合は、無載荷状態における初回加熱時の温度上昇過程と同様のひずみ挙動を示すことがわかる。なお、本実験では、載荷開始時のコンクリートの材齢が28日～71日と広範囲に及んでおり、圧縮強度も表3に示すように、約30 N/mm²～40 N/mm²と異なっているが、図6や図7に示すように、コンクリートの圧縮強度を載荷応力度比として無次元化して評価すると、載荷時におけるコンクリートの材齢の影響はほとんどなかったと判断される。

図6に示す初回加熱時の規準化線膨張係数は、載荷応力度比が小さいほど、また加熱速度が速いほど大きくなる傾向にある。そこで、図6における比例定数 (D) を最小二乗法で求め、加熱速度と関係づけて図8に示す。

図8から、加熱速度が速いほど比例定数 D は大きくなり、加熱速度の平方根 ($\sqrt{K}$) と良好な関係にあることがわかる。このことは、加熱速度が速いほど遷移温度クリープが小さくなるとした *Khoury* ら¹⁾ による知見を裏付ける結果となった。この関係を用いると、規準化線膨張係数 (α_{t+cr}/α_0) は式（5）のように表すことができる。

$$\frac{\alpha_{t+cr}}{\alpha_0} = 1.0 + (1.38 \times \sqrt{K} - 4.56) \times \frac{\sigma_0}{f_c'} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 K ：加熱速度 (°C/hr.)

式（5）から、初回加熱時の温度上昇過程における遷移温度クリープを含むコンクリートの線膨張係数 α_{t+cr} は、式（6）に示すように、

表5 遷移温度クリープを含む線膨張係数の評価結果

加熱速度 (°C/hr.)	加熱 繰返し	計画載荷 応力度比 σ_0/f_c'	0/12	1/12	2/12	3/12	4/12	5/12	6/12
0.03	初回加熱	α_{t+cr}	8.09	—	3.42	—	-1.07	—	-10.45
	2回目以降	α_{t+cr}'	8.15	—	8.03	—	8.59	—	7.65
0.09	初回加熱	α_{t+cr}	8.29	—	2.76	—	-1.11	—	-9.37
	2回目以降	α_{t+cr}'	8.30	—	8.64	—	8.61	—	8.30
0.3	初回加熱	α_{t+cr}	8.32	—	3.40	—	-1.91	—	-9.98
	2回目以降	α_{t+cr}'	8.12	—	7.79	—	7.78	—	7.61
	初回加熱	α_{t+cr}	8.44	5.68	—	1.25	—	-4.09	—
	2回目以降	α_{t+cr}'	7.83	7.51	—	7.36	—	7.47	—
1.0	初回加熱	α_{t+cr}	7.81	—	4.32	—	0.02	—	-4.79
	2回目以降	α_{t+cr}'	7.85	—	8.14	—	8.11	—	8.02
2.5	初回加熱	α_{t+cr}	8.10	—	5.17	—	2.38	—	-2.34
	2回目以降	α_{t+cr}'	8.25	—	8.60	—	8.61	—	8.39

表中で、 α_{t+cr} は初回加熱時の温度上昇過程における遷移温度クリープを含む線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を、 α_{t+cr}' は繰返し加熱時 (2回目以降) における線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) の平均値 (温度上昇過程と温度降下過程の平均) を表す。

図6 載荷応力度比と規準化線膨張係数の関係（初回加熱時）

図7 載荷応力度比と規準化線膨張係数の関係（繰返し加熱 [2回目以降] 時）

図8 加熱速度と式（4）における比例定数の関係

無載荷状態における線膨張係数 α_0 、加熱速度 K 、載荷応力度 σ_0 および載荷加熱開始時のコンクリートの圧縮強度 f_c' を用いて、遷移温度クリープを含む形で評価することが可能と言える。

$$\alpha_{t+cr} = \alpha_0 \left\{ 1.0 + (1.38 \times \sqrt{K} - 4.56) \times \frac{\sigma_0}{f_c'} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

この式 (6) および式 (3) に基づいて遷移温度クリープを含む線膨張ひずみ ε_{t+cr} を求め、実験で得られた全ひずみから瞬間弾性ひずみを差し引いたひずみ ($\varepsilon_{total} - \varepsilon_0$) と比較し、図 9 に示す。図 9 では、加熱速度 $0.09^\circ\text{C}/\text{hr}$ の場合を一例として示してある。これによると、式 (3) および式 (6) による計算値と実測値は概ね一致することがわかる。

また、図 10 に、式 (6) によって推定した遷移温度クリープを含む線膨張係数 α_{t+cr} と実験結果に基づいて推定した初回加熱時の温度上昇過程における線膨張係数 (表 5 に示す初回加熱時の α_{t+cr}) の関係を示す。図 10 に示すように、両者はよく一致しており、式 (6) によって遷移温度クリープを含む線膨張係数 α_{t+cr} を評価できることが確認された。

4. まとめ

本研究では、乾燥収縮ひずみの影響を排除するため水槽内において圧縮荷重 (載荷応力度比で $0 \sim 0.5$) を作用させたコンクリート試験体に、5通りの加熱・冷却速度 ($0.03^\circ\text{C}/\text{hr} \sim 2.5^\circ\text{C}/\text{hr}$) で、 15°C から約 80°C までの温度を付与する実験を行い、その際に得られた遷移温度クリープを含むコンクリートの熱的ひずみ挙動に関して評価を行った。

本報で得られた主な知見を、以下に示す。

- 1) 無載荷状態にあるコンクリートを、 $15^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ の範囲において加

図 9 遷移温度クリープを含む線膨張ひずみ (ε_{t+cr}) の実測値と計算値の比較

図 10 遷移温度クリープを含む線膨張係数 α_{t+cr} の比較

熱あるいは冷却した場合、コンクリートひずみは温度変化に対応して線形関係で膨張あるいは収縮挙動を示す。この関係から求められる線膨張係数は、加熱速度の影響を受けない。

2) コンクリートが繰返し加熱を受ける場合、遷移温度クリープは初めて加熱を受ける場合 (初回加熱時) の温度上昇過程において顕著に現れるが、それ以降の繰返し加熱時の温度上昇過程あるいは温度降下過程においては、遷移温度クリープの影響はほとんど認められず、無載荷状態と同等のひずみ挙動を示す。

3) 遷移温度クリープは、載荷応力度比や加熱速度の影響を受ける。特に、載荷応力度比の影響は顕著である。

4) 載荷状態にあるひずみ挙動は、初回加熱時の温度上昇過程においては、本報で新たに提案した「遷移温度クリープを含む線膨張係数」によって評価が可能である。この遷移温度クリープを含む線膨張係数は、無載荷状態での線膨張係数、加熱速度および載荷応力度比によって定式化することができる。

5) コンクリートが荷重作用下で温度変化を受けたときの熱的ひずみ挙動から、コンクリートの熱変形が拘束された場合を想定すると、初めて温度上昇を受ける過程においては遷移温度クリープによって熱応力は緩和されるが、温度が降下する過程においては収縮側に大きな残留ひずみが発生し、コンクリートに大きな引張応力が生じることとなり、ひび割れが発生する可能性が示唆される。

なお、今後は、本報で提案した遷移温度クリープを含む線膨張係数を用いたコンクリートの熱応力の評価方法に関して検討する予定である。

参考文献

- 1) Schneider, U. (森永繁 監訳) コンクリートの熱的性質, 技報堂出版, 1983
- 2) Khoury, G.A., Grainger, B.N., and Sullivan, P.J.E. : Transient thermal strain of concrete : literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents, Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.132, pp.131-144, September, 1985
- 3) Khoury, G.A., Grainger, B.N., and Sullivan, P.J.E. : Strain of concrete during first heating to 600°C under load, Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.133, pp.195-215, December, 1985
- 4) Chern, J.C., Marchertas, A.H., and Bažant, Z.P. : Concrete creep at transient temperature : Constitutive law and mechanism, Transactions of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, No.H, pp.67-74, 1985
- 5) Thienel, K.-Ch., Rostásy, F.S., Hinrichsmeyer, K., and Diederichs, U. : Transient creep of PCRV - concrete subjected to biaxial stress and elevated temperature, Transactions of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, No.Q, pp.91-96, 1989
- 6) Thienel, K.-Ch., and Rostásy, F.S. : Transient Creep of Concrete under biaxial stress and high temperature, Cement and Concrete Research, Vol.26, No.9, pp.1409-1422, 1996
- 7) Küttner, C.H., and Ehlert, G. : Experimental investigations of transitional creep of concrete at temperatures up to 130°C and boundary moisture conditions, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen-B, 38, No.3/4/5, pp.211-218, 1992
- 8) 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. 熱膨張実験, その 2. クリープ実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.761-764, 1993
- 9) Colina, H., and Sercombe, J. : Transient thermal creep of concrete in service conditions at temperatures up to 300°C , Magazine of Concrete Research, 56, pp.559-574, No.10, December, 2004

(2005年12月9日原稿受理, 2006年4月28日採用決定)