

論文

[1102] 高温下におけるコンクリートのクリープ

金津 努*¹・石田 博彰*²

1. はじめに

著者らは、100℃を越える高温下における鉄筋コンクリートの力学的特性を解明するための研究を進めている。^{1) 2) 3)} 高温下の鉄筋コンクリートの力学的特性を理解するためのポイントは、次の2点であると考えられる。このうち本論文は(1)の課題について検討したものである。

- (1) コンクリートと鉄筋個々の物理的性質の温度依存性を明らかにすること
- (2) 鉄筋とコンクリートの熱膨張ひずみの差の影響を明らかにすること

100℃を越える高温下では常温からの温度変化が大きいので、設計上、温度応力の評価が重要となる。温度応力を適切に評価するには、温度上昇に伴うコンクリートの長さ変化を把握する必要がある。高温下では、コンクリートの熱膨張係数、弾性係数等が大きく変化する事に加えて、乾燥収縮やクリープの進行が著しく、これらが長さ変化に影響を与える。しかし、100℃を越える温度条件において、乾燥収縮およびクリープを含むコンクリートの長さ変化の定量評価方法に関する研究はあまり行われていない。^{4) 5)} 本論文は、昇温時のクリープを積算温度の考え方をを用いて評価し、温度上昇に伴うコンクリートの長さ変化を算定する方法を提案したものである。

2. 実験概要

2.1 使用したコンクリート

実験で使用したコンクリートは、高強度が $\sigma_{cu}=400\text{kgf/cm}^2$ $E_c=3.5 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 、低強度が $\sigma_{cu}=240\text{kgf/cm}^2$ $E_c=2.6 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 程度のものである。供試体は打設後4週の湿潤養生を行い、その後加熱試験開始まで2~3か月の気乾養生を行った。

2.2 加熱方法

高温槽内に試験体を設置後10℃/hr. 以内の速度(温度制御は手動であるので、夜間は温度を上げていない)で昇温し、所定温度到達後そのままの温度で約2日間温度を保持した。その後、試験a、cでは1~2日間で自然冷却させ、試験bでは高温を保持したまま長期クリープ試験を行った。

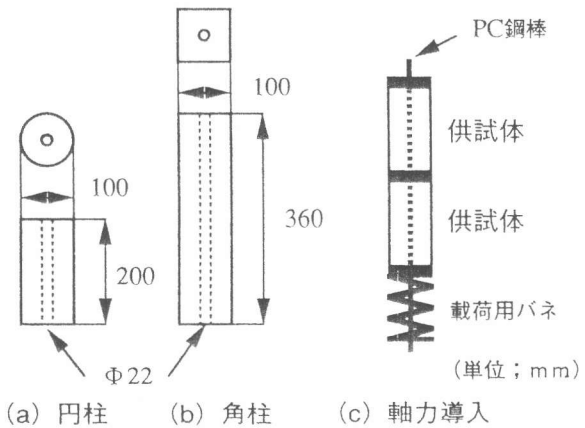


図-1 実験aの荷荷方法

表-1 実験aの条件

(a)円柱供試体 高強度						(a)円柱供試体 低強度					
T \ σ_p	0	25	50	75	100	T \ σ_p	0	25	50	75	100
80	○	○	○	○	○	90	○	○	○	○	○
100	○	○	○	○	○	97	○	○	○	○	○

(b)角柱供試体 高強度					(b)角柱供試体 低強度					
T \ σ_p	0	20	40	80	T \ σ_p	0	20	40	60	80
80	○	○	○	○	80	○	○	○	○	○
100	○	○	○	○	100	○	○	○	○	○
135	○	○	○	○	150	○	○	○	○	○
240	○	○	○	○	210	○	○	○	○	○
280	○	○	○	○	260	○	○	○	○	○

*1) σ_p : 圧縮応力度 (kgf/cm²)
 T: 温度 (°C)
 *2) 円柱: 1ヶ- ϕ 4本
 角柱: 1ヶ- ϕ 2本

*1 (財) 電力中央研究所 構造部 建設材料グループ、工修 (正会員) *2 兵庫県庁、工修 (正会員)

2.3 実験の種類

(1) 実験 a : 図-1 に示す $\phi 10 \times 20$ cm の供試体にバネを介して軸圧縮力を与え、そのまま高温槽内に設置し昇・降温サイクルを賦与した。試験条件は表-1 に示す通り。

(2) 実験 b : $\phi 15 \times 60$ cm の供試体を高温クリープ槽に設置し、所定軸圧縮力を賦与した後に昇温し、クリープ試験を行った。試験条件は表-2 の通り。

(3) 実験 c : 図-2 に示す $15 \times 15 \times 220$ cm の試験体にバネを介して軸圧縮力を与え、そのまま高温槽に設置し、昇・降温サイクルを賦与した。試験条件は表-3 に示す通り。

試験中、PC 鋼棒のひずみを測定し、温度賦与中に載荷荷重が変化しないことを確認した。

2.4 測定項目

測定項目は、賦与温度および温度賦与中に生じた供試体の長さ変化である。

3. コンクリートの物性の温度依存性に関するまとめ

本研究で用いたコンクリートの強度、弾性係数および熱膨張係数の温度依存性評価式を以下にまとめて示す。これらの評価式は、これまでの著者らの研究から得られたものである。^{1) 2)}

(1) 圧縮強度 $\{f'_c(T)\}$

$$f'_c(T)/f'_{c,n} = -7.69 \times 10^{-4} T + 1.02 \quad \text{常温} \leq T \leq 280^\circ\text{C} \quad (1-a)$$

$$f'_c(T)/f'_{c,n} = -1.36 \times 10^{-3} T + 1.18 \quad 280^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \quad (1-b)$$

(2) 弾性係数 $\{E_c(T, 0)\}$

$$E_c(T, 0)/E_{c,n} = -4.03 \times 10^{-3} T + 1.08 \quad \text{常温} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (2-a)$$

$$E_c(T, 0)/E_{c,n} = -1.24 \times 10^{-3} T + 0.802 \quad 100^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \quad (2-b)$$

(3) 軸圧縮力がコンクリートの弾性係数に与える影響

(2) で示したように、弾性係数は温度上昇とともに急速に低下する。しかし、軸圧縮力が存在する場合には、圧縮力が零の場合に比較して温度上昇に対する弾性係数の低下が小さい。この軸圧縮力の効果は 2 次曲線により評価できる。軸圧縮力が零の場合に対する弾性係数の増加倍率 $\{E_c(T, \gamma)/E_c(T, 0)\}$ を β とすると、 β は次式で表される。

$$\beta = -a \gamma^2 + \frac{1}{2} a \gamma + 1.0 \quad 0 \leq \gamma \leq 0.25 \quad (3-a)$$

$$= 1.0 + \frac{1}{16} a \quad 0.25 \leq \gamma \quad (3-b)$$

$$a(T) = 0.034T + 1.67 \quad 80^\circ\text{C} \leq T \leq 280^\circ\text{C} \quad (4)$$

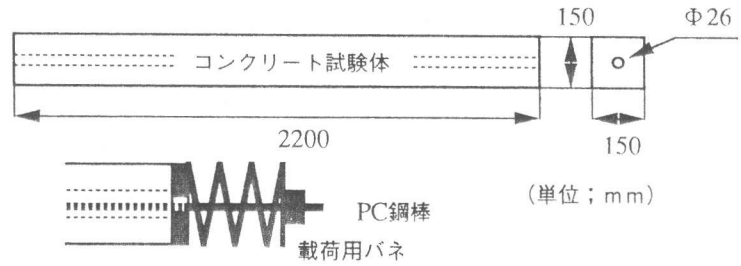


図-2 実験 c の載荷方法

表-2 実験 b の条件 表-3 実験 c の条件

試験体	T	σ_p
CYL100	100	80
CYL150	150	80
CYL180	180	80

試験体	T	σ_p
STC-1	200	0
STC-2	200	20
STC-3	200	40
STC-4	200	60
STC-5	200	80

(4) 熱膨張係数 $\{\alpha_c(T)\}$

乾燥状態で昇温した時のコンクリートの膨張ひずみを温度上昇量で除した割線係数である。

$$\alpha_c(T) = (12.4 - 0.330 \times 10^{-1} T) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad \text{常温} \leq T \leq 207^\circ\text{C} \quad (5-a)$$

$$\alpha_c(T) = (3.73 + 0.895 \times 10^{-2} T) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad 207^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \quad (5-b)$$

ここで、 $f'_c(T)$, $\alpha_c(T)$; 温度 T における圧縮強度、熱膨張係数

$E_c(T, \gamma)$; 温度 T 、応力強度比 γ における弾性係数 γ ; 応力強度比 $\{\sigma_p / f'_c(T)\}$

$f'_{c,n}$, $E_{c,n}$; 常温下の圧縮強度、弾性係数 σ_p ; 導入圧縮応力度

4. 熱膨張ひずみの評価

4.1 昇・降温時のコンクリートのひずみ

昇・降温過程でコンクリートに生じるひずみを以下のように分類する。これらのひずみは温度 (T) と応力強度比 (γ) に依存する量として取り扱っている。

- ①弾性ひずみ (縮み方向+) : $\varepsilon_e(T, \gamma) \{=\sigma_p / E_c(T, \gamma)\}$
- ②熱膨張ひずみ (伸び方向+) : $\varepsilon_{exp}(T)$
- ③クリープひずみ (縮み方向+) : $\varepsilon_c(T, \gamma)$
- ④乾燥収縮ひずみ (縮み方向+) : $\varepsilon_{sh}(T)$
- ⑤骨材とペースト間のゆるみひずみ (伸び方向+) : $\varepsilon_r(T, \gamma)$

ここで、次のような仮定を設けている。

$\varepsilon_e(T, \gamma)$; 昇温とともに増加する (弾性係数が低下するため) が、降温時は変化しない。

$\varepsilon_{exp}(T)$; 温度に対して可逆的である。

$\varepsilon_c(T, \gamma)$, $\varepsilon_{sh}(T)$, $\varepsilon_r(T, \gamma)$; 昇温時および定常温度時に生じ、降温時には生じない。

$\varepsilon_r(T, \gamma)$; 骨材とペーストの熱膨張ひずみの差に起因する境界面の微細ひびわれが原因で発生するもので、軸圧縮力の存在で抑制される性質を持っている。弾性係数 $\{E_c(T, \gamma)\}$ と関係づけて、以下の式により評価できるものとする。³⁾

$$\varepsilon_r(T, \gamma) = \varepsilon_r(T, 0) - \sigma_p \left\{ \frac{1}{E_c(T, 0)} - \frac{1}{E_c(T, \gamma)} \right\} \quad \gamma < 0.25 \quad (6-a)$$

$$\varepsilon_r(T, \gamma) = 0 \quad \gamma \geq 0.25 \quad (6-b)$$

$$\varepsilon_r(T, 0) = 0.25 f'_c(T) \left\{ \frac{1}{E_c(T, 0)} - \frac{1}{E_c(T, 0.25)} \right\} \quad (7)$$

以上から、昇温前を原点にとれば、任意圧縮応力度、温度での乾燥収縮とクリープを含めたコンクリートの長さ変化 (ひずみ表示) は次式で与えられる。圧縮応力のない場合とある場合の長さ変化をそれぞれ ε_1 、 ε_2 とすれば、それぞれ①~⑤のひずみを用いて以下のように表される。

$$\varepsilon_1(T, 0) = \varepsilon_{exp}(T) - \varepsilon_{sh}(T) + \varepsilon_r(T, 0) \quad (8)$$

$$\varepsilon_2(T, \gamma) = \varepsilon_{exp}(T) - \varepsilon_{sh}(T) + \varepsilon_r(T, \gamma) - \varepsilon_c(T, \gamma) - \frac{\sigma_p}{E_c(T, \gamma)} + \frac{\sigma_p}{E_c(n, 0)} \quad (9-a)$$

$$= \varepsilon_{exp}(T) - \varepsilon_{sh}(T) + \varepsilon_r(T, 0) - \varepsilon_c(T, \gamma) - \frac{\sigma_p}{E_c(T, 0)} + \frac{\sigma_p}{E_c(n, 0)} \quad (9-b)$$

ε_1 は式(5)の熱膨張係数に温度上昇量を乗じて計算することができる。式(5)の熱膨張係数の温度依存性評価式は、大型コンクリートはり部材の昇温時の自由膨張量の測定結果¹⁾から求めたもので、乾燥収縮ひずみおよびゆるみひずみを含んだものである。

5. 実験結果のまとめ

4. で示したひずみの評価方法を採用すれば、各実験における高温時のクリープひずみを算出することができる。

(1) 実験 a の結果

図-3には、実験 a から得られたコンクリートのクリープひずみと応力強度比の関係を示す。このデータは、昇温-所定温度保持-降温の温度サイクルで生じた総クリープひずみを示すものである。限られた条件の範囲ではあるが、常温下で成立すると言われているクリープひずみと応力強度比の線形関係は、高温下でも成立することが確認された。

図-4には、同じデータの単位クリープひずみと温度の関係を示した。データのバラツキは大きいですが、単位クリープひずみと温度の関係もほぼ直線であることが判断できる。

(2) 実験 b、c の結果

図-5には、実験 b、c から得られたコンクリートの単位クリープひずみと温度の関係を示す。全般的には S T C-2 試験体のデータがやや大きな値を示すものの、他のデータは試験体の形状や大きさに係わらずほぼ等しいクリープ量を示し、単位クリープは温度上昇に伴ってほぼ直線的に増加する傾向が認められる。しかし、温度一定状態で単位クリープが増加する箇所が数カ所認められる。C Y L 供試体の場合には、温度制御を手動で行っているため、昇温途中に 1 2 時間程度の温度一定状態(夜間)が生じ、また、S T C 供試体では 2 0 0 °C で 2 日間所定温度を意図的に保持しているため、この間にクリープが進行したものである。したがって、昇温時のクリープ

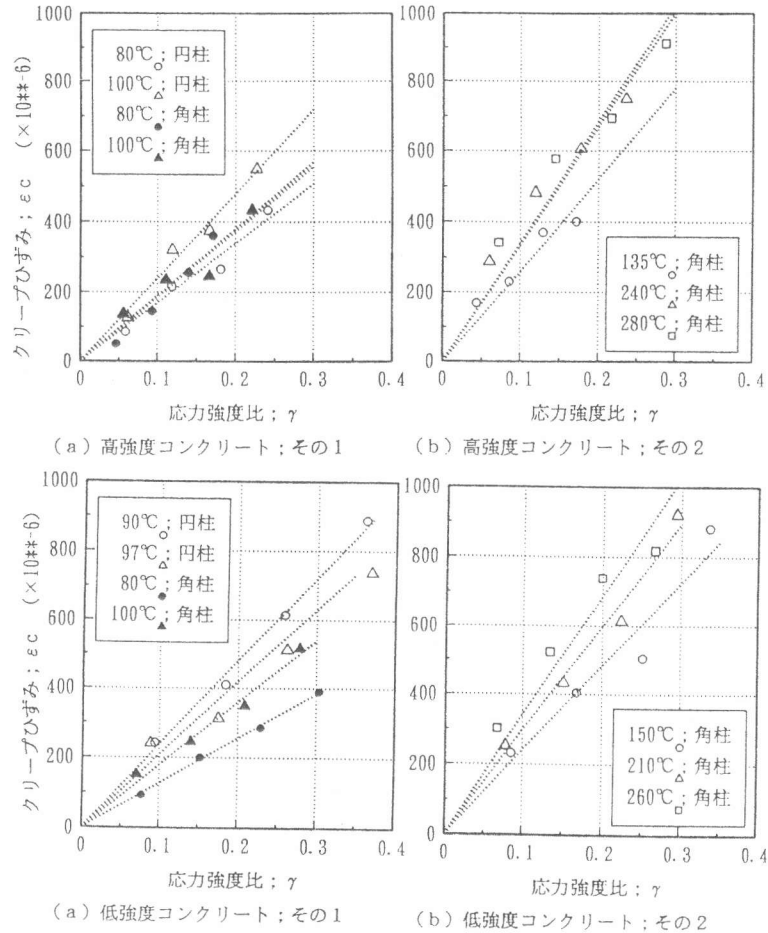


図-3 応力強度比とクリープひずみの関係

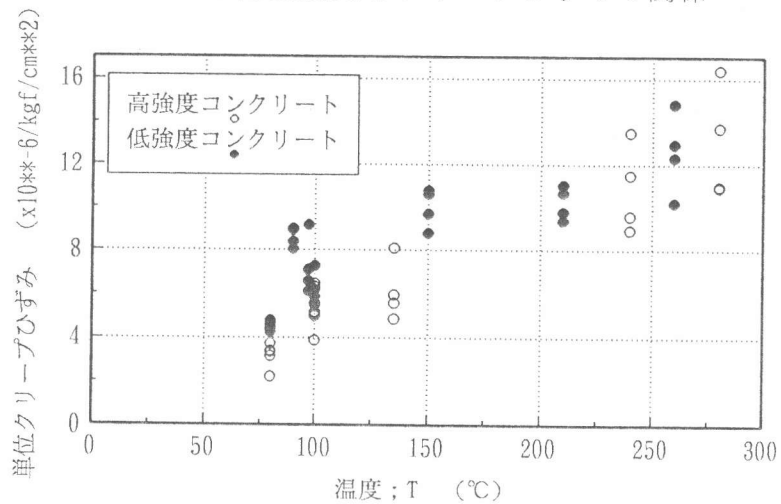


図-4 温度と単位クリープひずみの関係; 実験 a

ひずみは、温度条件および経過時間を考慮して評価する必要がある。

6. 昇温過程のクリープの評価

ここでは、高温での経過時間がクリープに与える影響を、積算温度により評価する方法について検討した。積算温度の考え方の基本条件は以下のようにした。

- ①経過時間は「時間」として評価する。(t: hours)
- ②温度は「摂氏(°C)」として評価する。(T: °C)
- ③積算温度(M)の平方根を経過時間と温度の影響を考慮する指標とする。

以上の条件により図-4、図-5の温度軸を積算温度の平方根に換算し、単位クリープとの関係を図-6に示した。ある程度のばらつきは残るものの、図-5で認められた温度一定でクリープが増加する不連続部分はなくなり、全てのデータがほぼ直線上にプロットされることが判る。

昇温速度が10°C/hr. 未満、昇、降温の賦与期間が最大で1週間程度と限られた条件の実験結果ではあるが、積算温度の考え方をを用いると温度と経過時間がクリープに与える影響を評価できることが示された。本研究で得られたクリープを評価する回帰式は次の通りである。

$$\varepsilon_{uc} = 0.076 \sqrt{M} \quad (10) \quad M = \int T(t) dt \quad (11)$$

ここで、t; 時間(hr.) T(t); 温度の経時変化(°C) ε_{uc} ; 単位クリープひずみ($\times 10^{-6}/\text{kgf}/\text{cm}^2$)
式(8)(9)(10)を用いてSTCシリーズ試験体の昇温に伴う長さ変化の推定を行い図-7に示した。記号表示が実測値、線表示が計算値である。点線と一点鎖線がクリープの計算値である。

軸圧縮力の無い試験体(STC-1)を含めて、各試験体の長さ変化量は計算値が実測値より200~250 μ 程度小さいが、全般的には良好に実測値を評価していると判断できる。

昇温時の長さ変化は、クリープひずみ、熱膨張係数および弾性係数の変化から計算される。この内、熱膨張係数とクリープひずみの推定精度が長さ変化の計算結果に大きく影響する。図-7において、軸圧縮力の無い試験体でも計算値と実測値に200 μ 程度の差があったことから、実測値と計算値の相違が熱膨張係数に起因するものとする、計算値ではコンクリートの熱膨張係

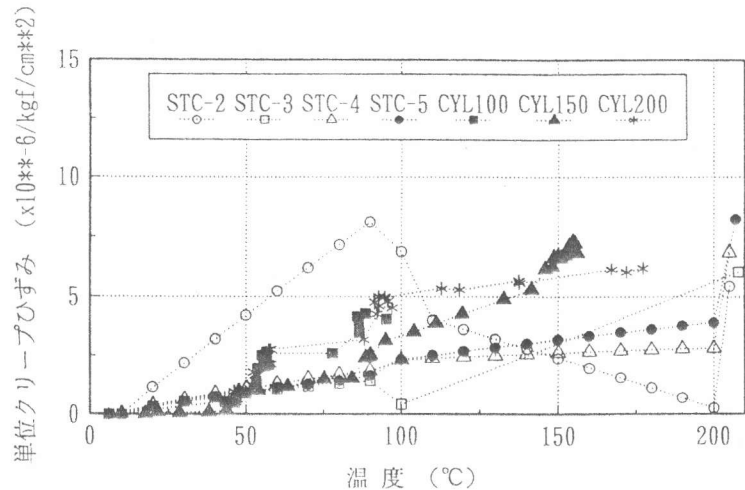


図-5 温度と単位クリープひずみの関係; 実験 b、c

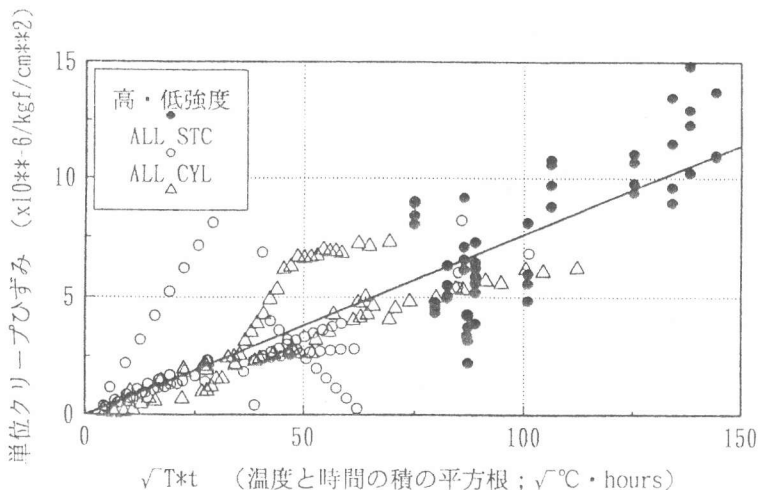


図-6 積算温度の平方根と単位クリープひずみの関係

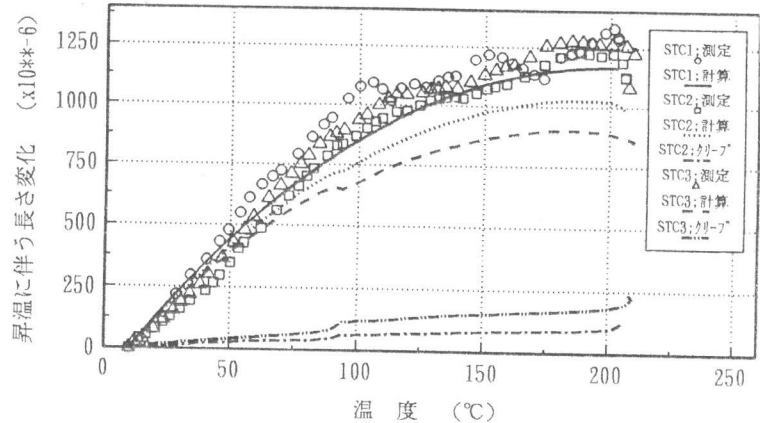
数を平均的に約 $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度小さく評価したことになる。図-8に示すように、式(5)の熱膨張係数の評価式は、同配合のコンクリートで別途行った試験結果から定めたものである。¹⁾ 評価に用いたデータは、この程度のバラツキを含んでいる。

6. まとめ

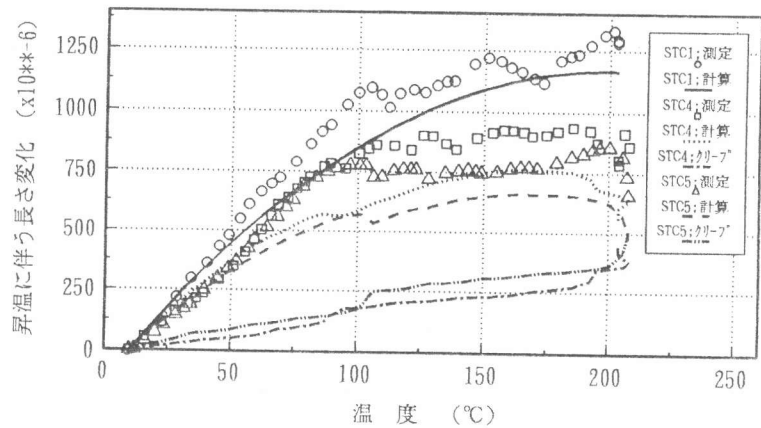
乾燥条件下で昇温されるコンクリートのクリープを、積算温度の考え方をを用いて評価した。この方法は、温度と経過時間がクリープに与える影響を考慮でき、有効な方法である。さらに、このクリープ評価法を用いて、温度上昇に伴うコンクリートの長さ変化(乾燥収縮とクリープを含む)を評価する方法を提案した。実験結果との比較により評価方法の妥当性が確認されたことから、この方法は、昇温期間を含めて数日間 100 $^\circ\text{C}$ を越える高温下に曝されるコンクリートの長さ変化を評価する方法としては、有用な方法と考えられる。

【参考文献】

- 1) 金津努 他：100 $^\circ\text{C}$ を越えるコンクリート、鉄筋コンクリートの力学的性質、電力土木 No. 202, 1986
- 2) 金津努 他：高温下の鉄筋コンクリート部材の挙動に与える軸力・鉄筋比の影響、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp553-556, 1986
- 3) 金津努 他：軸圧縮力の影響を考慮した高温下のRCはり部材の変形評価、第9回コンクリート工学年次論文報告集 9-2、pp229-234, 1987
- 4) 大岸佐吉 他：立方体コンクリートの高温多軸圧縮クリープの研究(30 $^\circ\text{C}$ ~200 $^\circ\text{C}$)、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp173-176, 1983
- 5) 岡島達雄 他：乾燥過程における多軸応力下のコンクリートの熱膨張とクリープ、コンクリート工学年次論文報告集 10-2、pp267-270, 1988



(a) STC-1 STC-2 STC-3



(b) STC-1 STC-4 STC-5

図-7 昇温に伴う長さ変化の計算結果と実測値の比較

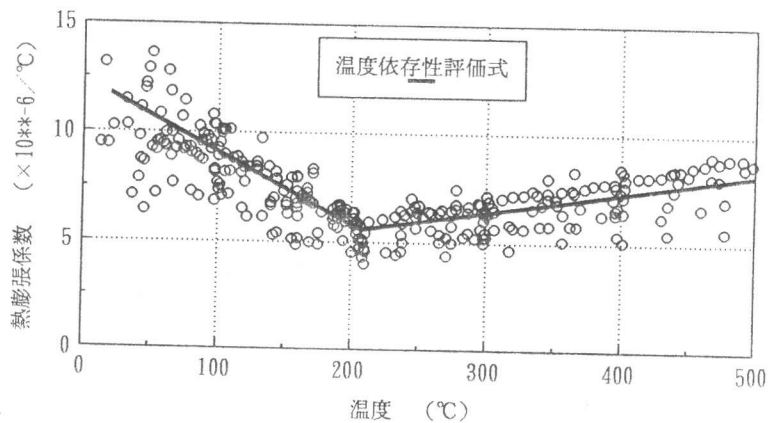


図-8 熱膨張係数の温度依存性