

# 鉄筋コンクリート部材の火災挙動に関する研究

—高温時におけるコンクリートの機械的性質のモデル化—

森 田 武  
(技術研究所)

## §1. はじめに

火災時における建築物の耐火性能は、一般に、建設省告示第2999号で規定される耐火試験に準じた部材試験で確認されている。この試験で所定の性能を有すると判断された部材は耐火構造として建築物に適用できる。また、鉄筋コンクリート部材などは建設省告示第1675号のような仕様書の規定に準じて耐火構造として建築物に適用される。一方、過去2、30年間に、火災安全工学分野における研究や開発がめざましく進展し、建築物の性能を工学的な予測手法に基づいて評価・設計する事例が増えてきている。

建築物の工学的な耐火設計は通常、区画火災温度予測、部材温度予測および構造挙動予測から成り立っており<sup>1)</sup>、この中の構造挙動予測においては、有限要素法等を用いた数値解析手法が主流を成している。このような数値解析手法では、構造材料の高温時における機械的性質が解析精度を支配する一つの要因となる。

火災加熱を受けるコンクリートの機械的性質については、種々の材料モデル(例えば<sup>2),3)</sup>が提案されてきているが、それらの多くは、加熱中における弾性係数や遷移クリープひずみの荷重による影響を考慮していない。一方、シュナイダーらは火災加熱時における応力履歴を考慮したコンクリートモデル<sup>4),5),6),7)</sup>を提案しており、筆者らはそのモデルを基にして数値解析用モデル<sup>8)</sup>(以下、シュナイダーモデルと言う)を提案した。

本研究では圧縮強度約20~48N/mm<sup>2</sup>のコンクリートに関する実験から得られたシュナイダーモデルを改良し、加熱中における応力履歴をさらに詳細に取り扱えるようにした。本報では、改良したコンクリートモデルおよび強度約59N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の中心載荷加熱実験について述べ、数値計算結果と実験結果との比較

を示す。

## §2. コンクリートモデル

### 2.1 基本事項(加熱時)

応力履歴を考慮したコンクリートモデルを取り扱うために、加熱中における2種類の応力を次のように明確に区別する。

$\sigma$ : 加熱中、時間と共に変動する任意の応力

$\sigma_h$ : 加熱中、常に一定に保たれる応力(高温時におけるコンクリートの機械的性質に関する実験で一般的に用いられる応力条件)

(1)一定応力下における弾性係数

コンクリートの応力-ひずみ関係を表わす応答関数は(1)式で与えられる。コンクリートの機械的ひずみは弾性ひずみ、塑性ひずみおよび遷移クリープひずみで構成され、弾性係数は温度と荷重の関数として表わされる。

$$J(\sigma_h, T) = \frac{1}{E(\sigma_h, T)}(1 + \kappa + \Phi) \quad (1)$$

$$E(\sigma_h, T) = E(\sigma_h = 0, T) \times g(\sigma_h, T) \quad (2)$$

一方、コンクリートの加熱中における外部荷重の影響を調べるために、コンクリート温度を試験温度まで上昇させる間は所定の一定荷重を与え、試験温度に達したところで除荷-載荷を数回繰り返した後、高温時におけるコンクリートの弾性係数を測定する方法で得られた、温度および応力と弾性係数の関係は(2)式、応力がゼロの場合の温度と弾性係数の関係は(3)式、弾性係数の外部荷重による増加率は(4)、(5)式で与えられる。弾性係数に対する外部荷重の影響は、応力レベル $\alpha$ が0.3より大きい場合には応力レベルが0.3の場合と同程度であるため、(5)式が与えられている。

$$\left. \begin{aligned} E(0,T) &= E(0,20^\circ\text{C}) \times \left\{ 1 - \frac{0.9}{580}(T-20) \right\} \\ &\quad (20 \leq T \leq 600^\circ\text{C}) \\ E(0,T) &= E(0,20^\circ\text{C}) \times \left\{ 0.1 - \frac{0.1}{400}(T-600) \right\} \\ &\quad (600 < T \leq 1000) \\ E(0,T) &= 0 \quad (1000 < T) \end{aligned} \right\} (3)$$

$$g(\sigma_h, T) = 1 + 0.7\alpha(0.6 - \alpha) \left( \frac{T-20}{100} \right)^2 \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_h}{f_c(20^\circ\text{C})} \leq 0.3 \quad (5)$$

(2) 応力-応力ひずみ関係

高温時におけるコンクリートの応力-応力ひずみ関係は(6)式で表わされるものとする。

$$\sigma = f_c(T) \times \frac{\epsilon_{stress}}{\epsilon_{ult}(\sigma_h, T)} \times \frac{n}{(n-1) + \left( \frac{\epsilon_{stress}}{\epsilon_{ult}(\sigma_h, T)} \right)^n} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} f_c(T) &= f_c(20^\circ\text{C}) \quad (T \leq 250^\circ\text{C}) \\ f_c(T) &= f_c(20^\circ\text{C}) \times \{1 - 0.0018 \times (T-250)\} \\ &\quad (250 < T \leq 750) \\ f_c(T) &= f_c(20^\circ\text{C}) \times \{0.1 - 0.0004 \times (T-750)\} \\ &\quad (750 < T \leq 1000) \\ f_c(T) &= 0 \quad (1000 < T) \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\epsilon_{ult}(\sigma_h, T) = \epsilon_{ult}(0, 20^\circ\text{C}) + k_1(T) \times k_2(\sigma_h) \quad (8)$$

$$k_1(T) = \{42 \times 10^{-6} + (T-20) \times 5.4 \times 10^{-9}\} \times (T-20) \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} k_2(\sigma_h) &= 1.0 \quad \left( \frac{\sigma_h}{f_c(20^\circ\text{C})} = 0.0 \right) \\ k_2(\sigma_h) &= 0.227 \quad \left( \frac{\sigma_h}{f_c(20^\circ\text{C})} = 0.1 \right) \\ k_2(\sigma_h) &= -0.095 \quad \left( \frac{\sigma_h}{f_c(20^\circ\text{C})} \geq 0.3 \right) \end{aligned} \right\} (10)$$

(6)式中の高温時におけるコンクリートの圧縮強度と圧縮強度時ひずみについては、シュナイダーらによる実験から得られた実験式があり、強度については(7)式、ひずみについては、(8)、(9)、(10)式が与えられている。高温時における圧縮強度は、応力レベルが0.2程度までの外部荷重によりわずかに増加することが報告されているが、本モデルではその影響を

無視している。また、圧縮強度時ひずみは弾性係数と同様に、温度と応力レベルの関数であり、温度が高いほど大きく、応力レベルが高いほど小さくなる。そして、応力レベルが0.3以上の場合の圧縮強度時ひずみは、応力レベルが0.3の場合の圧縮強度時ひずみと同じになる。

(3) 遷移クリープひずみ

遷移クリープひずみは、急加熱下において圧縮荷重を受けるコンクリートの弾性ひずみと塑性ひずみを除いた機械的ひずみとして定義され、自由水や化学吸着水等の脱水や水分移動によるひずみが含まれている。遷移クリープひずみの基本式は(11)式で表わされ、(11)式中の $\Phi$ は(12)式で算定される。また、(12)式中の $g(\sigma_h, T)$ は(4)式と(5)式で算定され、 $\phi$ は(13)式により算定される。なお、(13)式中の各定数は表-1のように与えられ、 $\gamma_w$ はコンクリート中の含水率を考慮した係数で(14)式によって算定される。

$$\epsilon_{cr} = \frac{\sigma_h \times \Phi}{E(\sigma_h, T)} \quad (11)$$

$$\Phi = g(\sigma_h, T) \times (\phi + 1) - 1 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \phi &= C_1 \cdot \tanh \gamma_w (T-20) \\ &\quad + C_2 \cdot \tanh \gamma_0 (T-T_g) + C_3 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\gamma_w = (0.3w + 2.2) \times 10^{-3} \quad (14)$$

| パラメータ      | 単位   | 珪岩質<br>コンクリート | 石灰質<br>コンクリート | 軽量<br>コンクリート |
|------------|------|---------------|---------------|--------------|
| C1         | 1    | 2.60          | 2.60          | 2.60         |
| C2         | 1    | 1.40          | 2.40          | 3.00         |
| C3         | 1    | 1.40          | 2.40          | 3.00         |
| $\gamma_0$ | 1/°C | 0.0075        | 0.0075        | 0.0075       |
| $T_g$      | °C   | 700           | 650           | 600          |

表-1 遷移クリープ関数のパラメータの値

(4) 熱ひずみ

コンクリートの熱ひずみ(熱膨張ひずみ)は(15)式で表わされる。熱ひずみは、一般にアンシールの無載荷コンクリートを用いて測定されるため、(15)式で算定される熱ひずみには乾燥による収縮ひずみが含まれていると考えられる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{th} &= -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \times T \\ &\quad + 23 \times 10^{-11} \times T^3 \quad (T \leq 700^\circ\text{C}) \\ \epsilon_{th} &= 1.4 \times 10^{-3} \quad (700 < T) \end{aligned} \right\} (15)$$

## 2.2 モデルの改良 (加熱時)

### (1) 外部荷重による弾性係数の増加

外部荷重を受けるコンクリートの弾性係数の増加率は(4)式と(5)式により算定され、その時の弾性係数は(2)式と(3)式により算定される。一方、(6)式を微分し、ひずみがゼロの位置での初期弾性係数を求めると(16)式が得られ、(16)式を(2)式に代入することにより、弾性係数の増加率を表わす(17)式が導かれる。

$$E(\sigma_h, T) = \frac{n \times f_c(T)}{(n-1) \times \epsilon_{ul}(\sigma_h, T)} \quad (16)$$

$$g'(\sigma_h, T) = \frac{E(\sigma_h, T)}{E(\sigma_h=0, T)} = \frac{\epsilon_{ul}(\sigma_h=0, T)}{\epsilon_{ul}(\sigma_h, T)} \quad (17)$$

(4)、(5)式から得られる $g$ と(17)式から得られる $g'$ はどちらも弾性係数の増加率である。図-1に $g$ と $g'$ の計算結果を示す。図-1から明らかなように、応力レベルが0以外の場合には $g$ と $g'$ の間に違いが生じる。

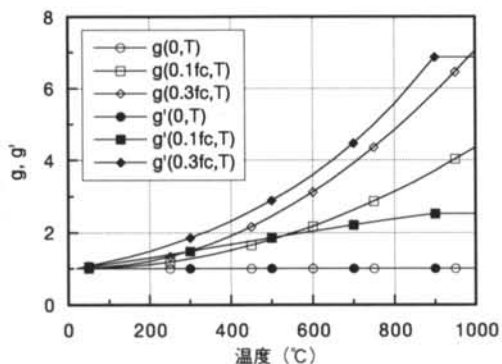


図-1 弾性係数の増加率 $g$ と温度の関係

図-1に示される弾性係数の増加率の相違は、(2)式から得られる弾性係数と(16)式から得られる弾性係数との違いに起因している。(2)式が実験から得られた実験式であることを考慮すると、(16)式から得られる弾性係数を(2)式から得られるものに一致させた方がより実際的であると考えられる。そこで(16)式中の $n$ に着目する。 $n$ は(6)式で表わされる応力-応力ひずみ関係の理論式に用いられており、普通コンクリートの場合 $n=3$ 、軽量コンクリートの場合 $n=2.5$ が慣習的に用いられている。このようなことから、普通コンクリートと軽量コンクリートで $n$ が異なるように、 $n$ の値が温度および加熱中の荷重レベルによって異なると仮定する。この仮定のもとに、(2)式と(16)式の等価関係から、 $n$ が(18)式のように導かれる。

(18)式に(3)式と(7)式を代入して得られた値を図-2

$$n(\sigma_h, T) = \left\{ 1 - \frac{1}{\epsilon_{ul}(\sigma_h, T) \times g(\sigma_h, T)} \times \frac{f_c(T)}{E(0, T)} \right\}^{-1} \quad (18)$$

に示す。図-2から明らかなように、(18)式から求められる $n$ は明瞭な温度依存性を示している。600°C付近における特異点は、文献(4)、(5)、(6)における多くの実験が珪岩質骨材を用いていることから、石英の $\alpha \rightarrow \beta$ 変態による影響が現れているものと考えられる。応力レベルが0の場合には、普通コンクリートに関して慣習的に用いられている $n=3$ よりも、(18)式から求められる値の方が全般的に小さくなっている。

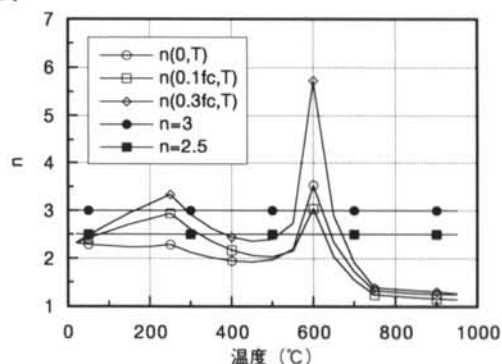


図-2  $n$ と温度の関係

### (2) 応力履歴のモデル化

本報では、ここまで、加熱中の応力変化が無いものとしてコンクリートモデルを説明してきた。ここではこのモデルにおいて加熱中の応力変化を考慮するための改良について述べる。

加熱中の応力変化を考慮するために、コンクリートの温度と応力が(19)式と(20)式のように時間(加熱時間)の関数で表わされるものとする。

$$T = u(t) \quad (19)$$

$$\sigma_h = \sigma = v(t) \quad (20)$$

(19)式と(20)式を、温度と応力の関数である圧縮強度時ひずみ(8)式)およびコンクリートの弾性係数の増加率((4)式または(17)式)に代入して、時間について微分すると(21)式と(22)式が得られる。

$$\frac{d\epsilon_{ul}(\sigma, T)}{dt} = \frac{\partial \epsilon_{ul}(\sigma, T)}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial \epsilon_{ul}(\sigma, T)}{\partial \sigma} \frac{d\sigma}{dt} \quad (21)$$

$$\frac{dg(\sigma, T)}{dt} = \frac{\partial g(\sigma, T)}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial g(\sigma, T)}{\partial \sigma} \frac{d\sigma}{dt} \quad (22)$$

圧縮強度時ひずみおよびコンクリートの弾性係数の増加率は、コンクリートをある一定応力レベル下において一定温度上昇速度により加熱し、所定の温度に達した後除荷し、温度を一定に保った状態におけるひずみ制御による応力-ひずみ実験から得られた関係である。ε<sub>ult</sub>とgは温度一定下における応力-ひずみ実験から得られるが、応力-ひずみ実験の載荷過程における応力の変化に関係なく一意に定まるものである。したがって、(21)式と(22)式において各式の右辺第2項の偏微分は一定温度下において応力が変化した場合の増分を表わしているが、これらの増分はゼロになる。すなわち、(23)式と(24)式が成り立つ。

$$\frac{\partial \varepsilon_{ult}(\sigma, T)}{\partial \sigma} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial g(\sigma, T)}{\partial \sigma} = 0 \quad (24)$$

(21)式と(22)式に(23)式と(24)式をそれぞれ代入し、時間tからt+Δtまで積分すると(25)式と(26)式のようになり、時間Δt間の圧縮強度時ひずみと弾性係数の増加率に関する増分が得られる。

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{d\varepsilon_{ult}(\sigma, T)}{dt} dt = \frac{\partial \varepsilon_{ult}(\sigma, T)}{\partial T} \int_t^{t+\Delta t} \frac{dT}{dt} dt \quad (25)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{dg(\sigma, T)}{dt} dt = \frac{\partial g(\sigma, T)}{\partial T} \int_t^{t+\Delta t} \frac{dT}{dt} dt \quad (26)$$

Δtが十分小さい場合、(25)式と(26)式を増分表現にするとそれぞれ(27)式と(28)式のようになり、さらに時間差分を用いて非線形問題を解く場合の簡単な関係式として(29)式と(30)式が得られる。

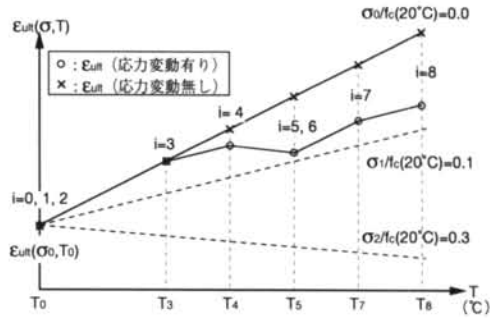
$$\Delta \varepsilon_{ult}(\sigma, T)_{(t+\Delta t)-t} = \left| \frac{\partial \varepsilon_{ult}(\sigma, T)}{\partial T} \right|_t \times \Delta T_{(t+\Delta t)-t} \quad (27)$$

$$\Delta g(\sigma, T)_{(t+\Delta t)-t} = \left| \frac{\partial g(\sigma, T)}{\partial T} \right|_t \times \Delta T_{(t+\Delta t)-t} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{ult,i} &= \varepsilon_{ult,i-1} + (\varepsilon_{ult}(\sigma_{i-1}, T_i) - \varepsilon_{ult}(\sigma_{i-1}, T_{i-1})) & (T_{i-1} < T_i) \\ \varepsilon_{ult,i} &= \varepsilon_{ult,i-1} & (T_{i-1} \geq T_i) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} g_i &= g_{i-1} + (g(\sigma_{i-1}, T_i) - g(\sigma_{i-1}, T_{i-1})) & (T_{i-1} < T_i) \\ g_i &= g_{i-1} & (T_{i-1} \geq T_i) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

(29)式と(30)式を用いて、加熱中の応力変化を考慮した圧縮強度時ひずみの時間変化(温度変化)を模式的に表現すると、図-3のようになる。図-3には、コンクリート温度上昇開始時点における応力レベルによりε<sub>ult</sub>を算定し、加熱中の応力変化を考慮しない場合のε<sub>ult</sub>の変化も合わせて示した。この場合に



| 時間ステップ i | 温度 T           | 応力度 σ          | 圧縮強度時ひずみ ε <sub>ult</sub>   |   |
|----------|----------------|----------------|---|---|
|          |                |                | 応力変動無し  | 応力変動有り  |
| i=0      | T <sub>0</sub> | σ <sub>0</sub> | ε <sub>ult,0</sub> =ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>0</sub> ) | ε <sub>ult,0</sub> =ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>0</sub> )   |
| i=1      | T <sub>0</sub> | σ <sub>x</sub> | ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>0</sub> )                     | ε <sub>ult,1</sub> =ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>0</sub> )   |
| i=2      | T <sub>0</sub> | σ <sub>0</sub> | ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>0</sub> )                     | ε <sub>ult,2</sub> =ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>0</sub> )   |
| i=3      | T <sub>3</sub> | σ <sub>1</sub> | ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>3</sub> )                     | ε <sub>ult,3</sub> =ε <sub>ult,2</sub> +(ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>3</sub> )-ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>0</sub> )) |
| i=4      | T <sub>4</sub> | σ <sub>2</sub> | ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>4</sub> )                     | ε <sub>ult,4</sub> =ε <sub>ult,3</sub> +(ε <sub>ult</sub> (σ <sub>1</sub> , T <sub>4</sub> )-ε <sub>ult</sub> (σ <sub>1</sub> , T <sub>3</sub> )) |
| i=5      | T <sub>5</sub> | σ <sub>x</sub> | ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>5</sub> )                     | ε <sub>ult,5</sub> =ε <sub>ult,4</sub> +(ε <sub>ult</sub> (σ <sub>2</sub> , T <sub>5</sub> )-ε <sub>ult</sub> (σ <sub>2</sub> , T <sub>4</sub> )) |
| i=6      | T <sub>5</sub> | σ <sub>0</sub> | ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>5</sub> )                     | ε <sub>ult,6</sub> =ε <sub>ult,5</sub>  |
| i=7      | T <sub>7</sub> | σ <sub>1</sub> | ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>7</sub> )                     | ε <sub>ult,7</sub> =ε <sub>ult,6</sub> +(ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>7</sub> )-ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>5</sub> )) |
| i=8      | T <sub>8</sub> | σ <sub>0</sub> | ε <sub>ult</sub> (σ <sub>0</sub> , T <sub>8</sub> )                     | ε <sub>ult,8</sub> =ε <sub>ult,7</sub> +(ε <sub>ult</sub> (σ <sub>1</sub> , T <sub>8</sub> )-ε <sub>ult</sub> (σ <sub>1</sub> , T <sub>7</sub> )) |

図-3 加熱中の応力変化にともなう圧縮強度時ひずみの変化

は、ε<sub>ult</sub>は時間(温度)のみの関数になる。なお、弾性係数の増加率の時間変化についても、図-3に類似した模式図で表現できる。(27)式から(30)式を(18)式に代入することにより、加熱中における応力変化を考慮したn(σ, T)が得られ、このn(σ, T)、(27)式および(29)式を(6)式に代入することにより、温度・応力履歴を考慮した応力-ひずみ関係が得られる。

### 2.3 冷却時および冷却後

加熱冷却後のコンクリートの機械的性質については多くの実験結果があるが、冷却期間中の性質についての研究結果は見当たらない。EUROCODE4の参考付録の中では、冷却期間中の性質を最高受熱温度時における性質と冷却後の性質を直線補間して求める方法が示されている。

鉄筋コンクリート部材の耐火性能を予測するためには冷却時の構造挙動も継続的に計算するべきであるため、本研究ではEUROCODE4の参考付録の方法を適用した。

#### (1)弾性係数

弾性係数は(16)式により算定する。ただし、(16)式中のnは(18)式により算定し、(16)式と(18)式の要素には最高受熱温度におけるε<sub>ult</sub>(σ, T)、g(σ, T)、E(0、

$T$ )および次項(2)で述べる $f_c(T)$ を用いる。

(2)応力-応力ひずみ関係

応力-応力ひずみ関係は(6)式で表わされるものとする。ただし、(6)式中の $n$ と $\epsilon_{ult}(\sigma_n, T)$ については前項(1)に従い、 $f_c(T)$ はEUROCODE4の参考付録に準じて算定する。すなわち、最高受熱温度における $f_c(T)$ と冷却後の常温における $f_c(T)$ を直線補間して、冷却中の温度における $f_c(T)$ を算定する。

(3)遷移クリープひずみ

加熱後の冷却時においては遷移クリープひずみはほとんど生じないことが知られており、本モデルでは冷却時における遷移クリープひずみの変化は無いものとした。

(4)熱ひずみ

受熱温度が600℃を越えると、冷却後の残留温度ひずみが顕著であることが知られている。本モデルでは、最高受熱温度における熱ひずみと表-2に示す常温時における残留熱ひずみを直線補間して、冷却中の温度における熱ひずみを算定する。

2.4 高温下におけるコンクリートのひずみ性状

ここでは2.1から2.3に示したコンクリートモデル

| コンクリート種類 | 最高受熱温度 (℃) |       |       |      |      |      |      |
|----------|------------|-------|-------|------|------|------|------|
|          | 200        | 300   | 400   | 500  | 600  | 700  | 800  |
| 珪岩質      | -0.03      | -0.05 | -0.02 | 0.10 | 0.20 | 0.60 | 0.40 |
| 石灰質      | -0.06      | 0.00  | 0.05  | 0.16 | 0.30 | 0.53 | 0.60 |

表-2 残留熱ひずみ (%)

を適用し、中心圧縮荷重を支持するブレンコンクリート柱に連続した温度変化(加熱→冷却)を与えた場合のひずみ性状を計算例を用いて示す。

(1)計算条件

計算条件を以下に示す。

- ・圧縮強度 : 50N/mm<sup>2</sup>
- ・形状寸法 : (D)100×(W)100×(H)300 mm
- ・荷重レベル: 0.15, 0.45
- ・伸び変位 : 無拘束, 拘束
- ・温度履歴 : 20℃→500℃→20℃
- ・断面内温度: 一様

(2)計算結果

図-4(1)から図-4(4)に計算結果を示す。図中の矢印はひずみの発生過程を示している。これらの図に示されるように、本報のコンクリートモデルでは、応力ひずみ(弾性ひずみ+塑性ひずみ)、熱ひずみ

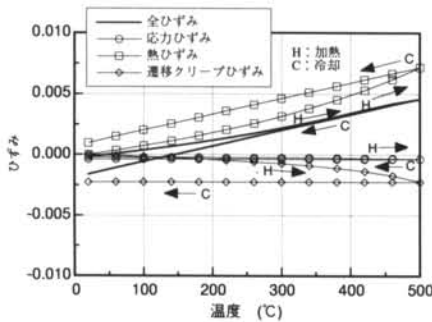


図-4(1) 高温載荷状態におけるひずみ性状 (荷重レベル: 0.15, 伸び変位: 無拘束)

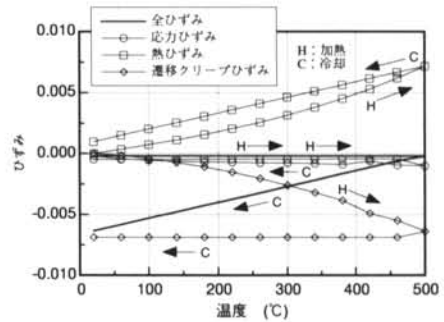


図-4(3) 高温載荷状態におけるひずみ性状 (荷重レベル: 0.15, 伸び変位: 拘束)

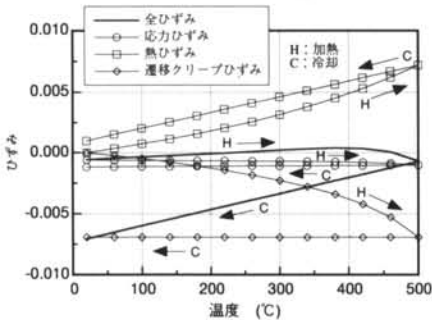


図-4(2) 高温載荷状態におけるひずみ性状 (荷重レベル: 0.45, 伸び変位: 無拘束)

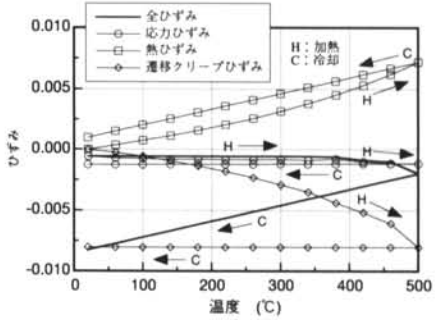


図-4(4) 高温載荷状態におけるひずみ性状 (荷重レベル: 0.45, 伸び変位: 拘束)

および遷移クリープひずみの3種類のひずみが別々に計算され、全体ひずみはこれらのひずみの和として求められる。冷却後の残留応力ひずみは塑性ひずみであり、冷却後の遷移クリープひずみと熱ひずみの残留量に比べると極めて小さいことがうかがえる。コンクリートの熱膨張による伸び変位を拘束することにより、コンクリート内部に大きな圧縮力が発生する。この拘束の影響は図-4(1)と図-4(3)に示される圧縮側ひずみの発生に明確に現れており、遷移クリープひずみが拘束の有無により大きく異なることがわかる。一方、図-4(2)と図-4(4)から、荷重レベル0.45では伸び変位の拘束の有無によって圧縮側ひずみの発生に大きな違いはない。

### §3. 鉄筋コンクリート柱の中心載荷加熱実験

#### 3.1 使用材料の性質

実験に用いたコンクリートの調合を表-3に、硬化コンクリートの常温時における性質を表-4に示す。また、鉄筋はSD345の異形棒鋼とし、主筋はD16、帯筋はD6とした。鉄筋の常温時における性質を表-5に示す。

| 普通ポルトランドセメント | 水   | 細骨材<br>(混合砂*1) | 粗骨材<br>(砂岩質砕石) | AE<br>減水剤*2 |
|--------------|-----|----------------|----------------|-------------|
| 500          | 175 | 673            | 1067           | 8.0         |

\*1 山砂 (340kg/m<sup>3</sup>) + 石灰石砕砂 (333kg/m<sup>3</sup>)

\*2 MT-2000WH

表-3 コンクリートの調合 (kg/m<sup>3</sup>)

| 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(10 <sup>4</sup> *N/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比          | 密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 含水率<br>(%)   |
|------------------------------|---|----------------|----------------------------|--------------|
| 54.3<br>~ 59.9               | 3.34<br>~ 3.70                                | 0.18<br>~ 0.24 | 2380<br>~ 2390             | 4.2<br>~ 4.7 |

注) 供試体は実験室で封かん養生し、材齢126から196日の間で試験した。

表-4 硬化コンクリートの性質

| 鉄筋 | 公称断面<br>(mm <sup>2</sup> ) | 降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(10 <sup>5</sup> *N/mm <sup>2</sup> ) | 伸び<br>(%) |
|----|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---|-----------|
| 主筋 | 198                        | 375.9                        | 559.0                        | 2.08  | 26.7      |
| 帯筋 | 32                         | 378.1                        | 492.5                        | 未測定   | 30.0      |

表-5 鉄筋の性質

#### 3.2 試験体と実験装置

試験体形状を図-5に実験装置を図-6に示す。試験体には、試験体断面中央を材軸方向に貫通する穴を設け、この穴にPC鋼棒を通してセンターホールジャッキにより圧縮荷重を作用させた。また、試験体の断面は30cm角として、試験体高さは、日本における一般的な鉄筋コンクリート柱のアスペクト比が3から5程度であることを考慮して、試験体の加熱部分のアスペクト比が3になるようにした。

#### 3.3 実験条件

載荷加熱実験の実験要因は、加熱温度、載荷荷重レベル、試験体の伸び変位の拘束の3要因とした。また、加熱中および加熱後に崩壊しなかった試験体については、柱の残留圧縮耐力を確認した。実験条件の概要を表-6に示し、各実験条件の内容は以下に説明する。

##### (1) 加熱温度

試験体の加熱は建設省告示第2999号に規定される標準加熱温度曲線に準じ、180分加熱を基本とした。

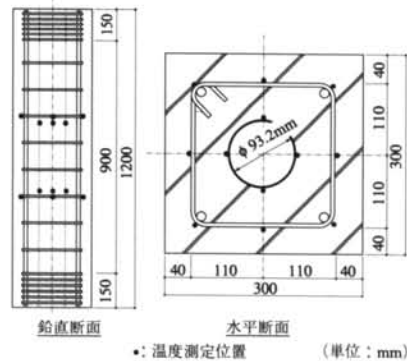


図-5 柱試験体の形状・寸法

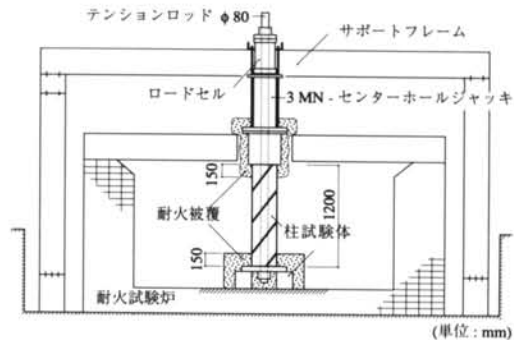


図-6 実験装置と試験体

| 試験体名 | 加熱強度                  | 荷重レベル     | 伸び拘束 |
|------|-----------------------|-----------|------|
| A-1  | 標準 (180分)             | 0         | 無し   |
| A-2  | 標準×0.9 (180分)         |           |      |
| A-3  | 標準×0.6 (180分)         |           |      |
| B-1  | 標準 (180分または<br>柱崩壊まで) | 0.15      | 無し   |
| B-2  |                       | 0.30      |      |
| B-3  |                       |           |      |
| B-4  |                       |           |      |
| B-5  |                       |           |      |
| C-1  | 標準 (180分または<br>崩壊まで)  | 0         | 有り   |
| C-2  |                       | 0.15      |      |
| C-3  |                       |           |      |
| C-4  |                       |           |      |
| C-5  |                       |           |      |
| C-6  |                       |           |      |
| C-7  |                       | 標準 (120分) |      |

表-6 実験条件

また、加熱温度を標準加熱温度の90%および60%とした場合について、それぞれ1体の無載荷柱を実験した。

#### (2) 載荷荷重レベル

試験体の最大圧縮耐力に対する載荷圧縮荷重の大きさとして、0、15、30および45%の4段階を載荷荷重レベルの設定目標とした。載荷は試験体の加熱に先だてて行ない、試験体の伸び変位を拘束しない場合には、加熱中に試験体が崩壊した場合を除き、加熱中および加熱終了後3時間は荷重を一定に保持した。

#### (3) 伸び変位の拘束

加熱中、加熱前の載荷時における初期変位に対して、試験体が熱膨張により伸び変位を生じる場合には、その伸びを拘束した。試験体の耐力が試験体温度の上昇とともに低下して、初期変位よりも圧縮側に変位を生じる場合には、初期の載荷荷重レベルを保持して加熱実験を続行した。

#### (4) 柱の残留耐力

所定の条件下で載荷加熱実験を行なった試験体について、実験中に崩壊しなかったものについては残留圧縮耐力を確認した。残留圧縮耐力の確認実験は、加熱実験後1日から60日程度の放置期間の後に実施した。

### 3.4 実験結果と考察

実験結果を図-7(1)~(2)、図-8(1)~(2)、および図-9に示す。また、試験体B-1、2、3、4お

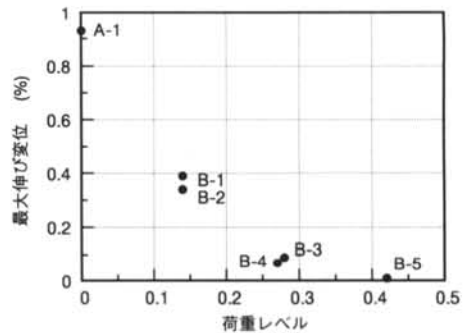


図-7(1) 荷重レベルと最大伸び変位との関係

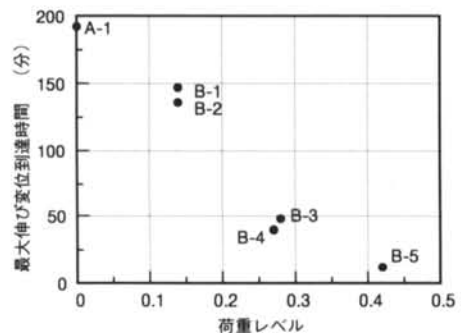


図-7(2) 荷重レベルと最大伸び変位到達時間との関係

およびC-2、3、4、5の軸方向変位および拘束荷重の経時変化を数値計算結果と合わせて図-10~図-13に示す。

#### (1) 柱の崩壊

載荷加熱実験時において加熱中に崩壊した柱は荷重レベル0.45のB-5、C-6であり、加熱後の冷却期間中に崩壊した柱は荷重レベル0.30のB-4、C-5であった。本実験に供したコンクリートでは爆裂が発生しなかった。柱の崩壊は温度上昇に伴うコンクリートと鉄筋の機械的性質の劣化によるものと判断される。崩壊した柱の概要は次のとおりである。

B-4：180分加熱終了から47分後に圧壊

B-5：加熱中115分に圧壊

C-5：180分加熱終了から43分後に圧壊

C-6：加熱中117分に圧壊

B-4とC-5およびB-5とC-6の比較から、柱の崩壊時間は、柱試験体の伸び変位に対する拘束の有無に関わらず、荷重レベルに支配されると判断できる。

#### (2) 伸び変位

荷重レベルと伸び変位の関係を図-7(1)、(2)に示す。部材の温度上昇に伴う伸び変位の大きさおよび最大伸び変位に達するまでの時間は荷重レベルに反



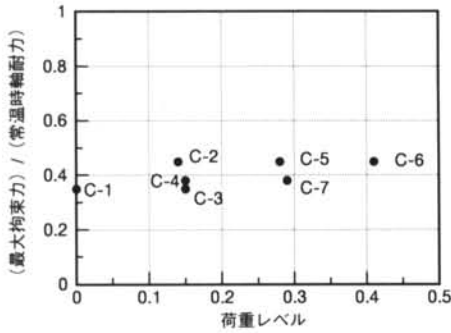


図-8(1) 荷重レベルと最大拘束力との関係

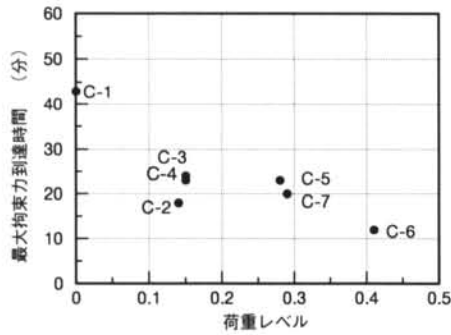


図-8(2) 荷重レベルと最大拘束力到達時間との関係

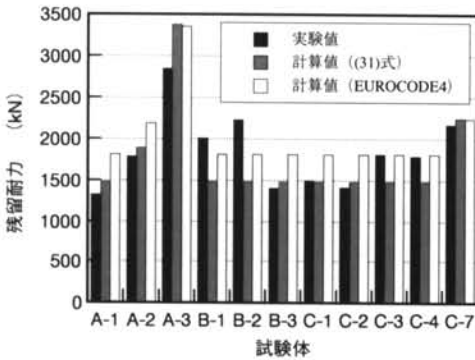


図-9 柱試験体の残留耐力

比例し、実験結果の外挿から載荷荷重レベルが0.45より大きくなると伸び変位を生じないと推定される。(3)伸び変位の拘束荷重

荷重レベルと拘束荷重の関係を図-8(1), (2)に示す。部材の温度上昇に伴う伸び変位を拘束するための最大荷重は荷重レベルによらず、常温時における柱の圧縮耐力の35%から45%程度であることがわかる。また、最大拘束荷重に達するまでの時間は、荷重レベルに反比例することがわかる。図-7(2)と

図-8(2)の比較から、同じ荷重レベルの場合における最大伸び変位到達時間と最大拘束力到達時間は一致しないことがわかる。

#### (4)残留耐力

実験および計算から得られた柱の残留耐力を図-9に示す。A-1, B-3とB-1, B-2の比較およびA-1, C-1とC-3, C-4の比較から、荷重レベルが0.15程度の場合、他の荷重レベルよりも残留耐力が大きくなっている。また、B-1, B-2とC-3, C-4の比較から、荷重レベルが0.15の場合、伸び変位を拘束しない方が残留耐力は大きくなっている。

残留耐力の計算に用いた最高受熱温度とコンクリートの残留圧縮強度との関係には、同等のコンクリートを用いた供試体の実験から得られた(31)式<sup>9)</sup>とEUROCODE4<sup>2)</sup>の参考付録に示されている関係を用いた。

$$\left. \begin{aligned} f_{cr}(T_{max}) &= f_c(20C) & (20 < T_{max} \leq 200C) \\ f_{cr}(T_{max}) &= f_c(20C) \times \left( 1 - \frac{T_{max} - 200}{600} \right) & (200 < T_{max} \leq 500C) \end{aligned} \right\} (31)$$

残留耐力の計算では部材内部温度を非定常伝熱計算で求め、計算から得られた断面内各部のコンクリートの最高受熱温度を用いてコンクリートの残留強度を求めた。柱の残留耐力は上述した方法により求めたコンクリートの残留強度、および鉄筋の常温時における強度を断面について積分して算定した(以下、積分によって得られた強度を累加強度と称す)。なお、(31)式においてコンクリートの最高受熱温度が500℃を越える範囲については外挿して残留強度を求めた。実験結果と計算結果を比較すると、(31)式を用いた方がEUROCODE4の関係を用いた場合よりも実験値に近い値を示している。今回の残留耐力の計算では荷重レベルの影響を考慮していないが、(31)式の関係を用いて最高受熱温度から累加強度を求めれば、残留耐力はほぼ安全側に推定できる。

## §4. コンクリートモデルの適用

§2.で示したコンクリートモデルなどを用いて、§3.で示した実験における鉄筋コンクリート柱の挙動を数値計算によりシミュレートして、実験結果と計算結果との比較をする。



#### 4.1 計算条件

##### (1)部材温度計算

コンクリートおよび鉄筋の熱定数にはEUROCODE4に示されている温度依存性を考慮したモデルを適用し、計算には差分法を適用したプログラム<sup>10), 11), 12)</sup>を用いた。

##### (2)構造挙動計算

コンクリートの材料モデルには本報 §2. で示したシュナイダーモデル（以下、改良モデルと称す）、文献<sup>8)</sup>で示したシュナイダーモデル（以下、オリジナルモデルと称す）およびEUROCODE4<sup>3)</sup>の推奨値（以下、EC4モデルと称す）の3種類のモデルを適用し、鉄筋の材料モデルにはEUROCODE4のモデルを適用した。計算には時間積分直接剛性法を適用したプログラム<sup>13), 14)</sup>を用いた。

#### 4.2 計算結果と考察

図-10から図-13に実験結果と計算結果の比較を示す。

##### (1)荷重レベル0.15, 無拘束の場合 (図-10)

改良モデルとオリジナルモデルの場合の時間-変位関係は、加熱期間については実験値とかなり良く一致しているが、冷却期間については変位の減少勾

配に差異を生じている。EC4モデルの場合は明らかに伸び変位が実験値よりも大きい。EC4モデルは遷移クリープひずみが考慮されていることになっているが、実際よりも小さいクリープ量が適用されていると考えられる。

##### (2)荷重レベル0.30, 無拘束の場合 (図-11)

前述の考察から、EC4モデルはクリープひずみが小さいために加熱表面近くの高温度域のコンクリートの圧縮ひずみが小さくなり、柱内部の低温域のコンクリートの応力負担が小さくなると考えられる。これに対して、改良モデルとオリジナルモデルの遷移クリープひずみはEC4モデルよりも大きい。加熱表面近くの高温度域のコンクリートの圧縮ひずみが大きくなり、柱内部の低温域のコンクリートの応力負担が大きくなると考えられる。これらの差異が図-11に示されている時間-変位関係に現れているものと考えられ、改良モデルとオリジナルモデルの収縮変位の増加および崩壊時間が実験値と比較的良く一致しているが、EC4モデルでは伸び変位が過大となって、実験値との差が大きくなっている。柱の崩壊時間は改良モデルまたはオリジナルモデルによって概ね予測できている。

##### (3)荷重レベル0.15, 拘束の場合 (図-12(1),(2))

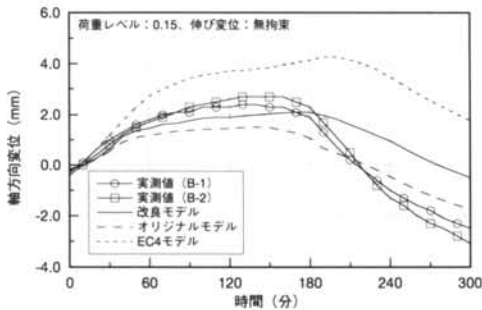


図-10 B-1, B-2の軸方向変位の経時変化

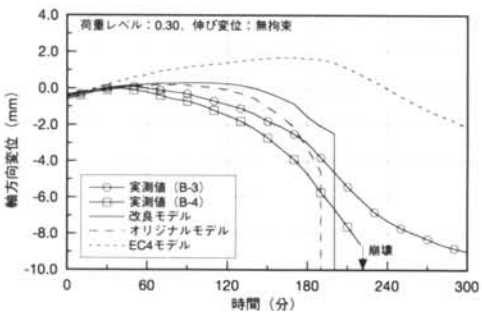


図-11 B-3, B-4の軸方向変位の経時変化

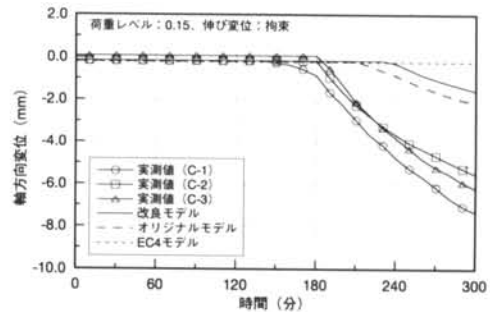


図-12(1) C-2, C-3, C-4の軸方向変位の経時変化

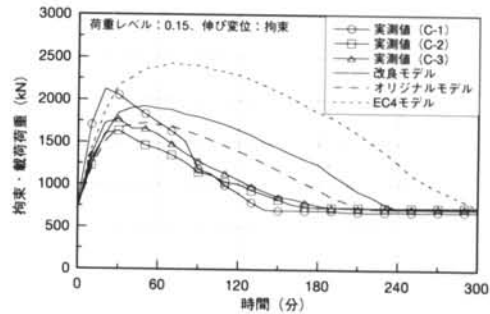


図-12(2) C-2, C-3, C-4の拘束・載荷荷重の経時変化

時間-変位関係について、加熱期間は改良モデル、オリジナルモデルおよびEC4モデルも実験値とかなり良く一致しているが、冷却期間については変位の減少開始時間・減少勾配共に差異を生じている。冷却時間中における改良モデルとオリジナルモデルによる計算値とEC4モデルによる計算値の差異は(1)と(2)で述べた理由によるものと考えられる。時間-荷重関係について、伸び変位の拘束荷重の発生性状は、改良モデルとオリジナルモデルの方がEC4モデルより実験結果に近い。これも(1)と(2)で述べた理由によるものと考えられる。

(4)荷重レベル0.30、拘束の場合 (図-13(1), (2))

時間-変位関係と時間-荷重関係について、(3)と同じ考察ができる。柱の崩壊時間は改良モデルまたはオリジナルモデルによっておおよそ予測できている。

(5)改良モデルとオリジナルモデルについて

改良モデルとオリジナルモデルについて比較すると、柱の変位はオリジナルモデルよりも改良モデルの方が収縮変位が小さくなっている。これは、2.4で示した高温時におけるひずみの構成から判るように、収縮変位の大部分が応力ひずみではなく遷移ク

リーブひずみによることから、応力履歴を考慮した改良モデルの方が遷移クリープひずみが小さくなっているためだと判断できる。また、拘束荷重は改良モデルの方がオリジナルモデルよりも大きくなっているが、これも上記の遷移クリープひずみの発生量の違いによって説明できる。本報に示した実験結果と計算結果との比較からは改良モデルとオリジナルモデルの差異は比較できたが、実際の鉄筋コンクリート部材の火災挙動の予測にどちらのモデルが適しているかを判断するにはより多くの実験結果との比較が必要である。

§5. まとめ

本報では応力履歴を考慮したコンクリートモデルの改良、鉄筋コンクリート柱の中心荷重加熱実験および実験結果と数値計算結果との比較によるコンクリートモデルの検証を行なった。それらの結果は次のa)~e)のようにまとめられる。

a) 実験的に得られた高温時における弾性係数の変化を文献8)のシュナイダーモデルに導入し、加熱中の応力履歴を詳細に考慮できるようにした。

b) 数値解析用コンクリートモデルについて、文献8)と本報§2.のシュナイダーモデルを数値計算に適用することにより、EUROCODE4モデルよりも実験結果に近い計算結果が得られた。しかし、本報§2.と文献8)のどちらのコンクリートモデルが実際の鉄筋コンクリート部材の火災挙動の予測に適しているかを判断するにはより多くの実験結果との比較が必要である。

c) 中心荷重加熱を受ける鉄筋コンクリート柱の崩壊時間は、柱試験体の伸び変位に対する拘束の有無に関わらず、載荷荷重レベルに支配される。

d) 中心荷重加熱を受ける鉄筋コンクリート柱の伸び変位を拘束するための最大荷重は載荷荷重レベルによらず、常温時における圧縮耐力の35%から45%程度であった。

e) 中心荷重加熱を受けた鉄筋コンクリート柱の残留圧縮耐力は、(3)式の関係を用いて最高受熱温度から累加強度を求めれば、ほぼ安全側に判断できる。

本研究で述べたシュナイダーモデルは圧縮強度59 N/mm<sup>2</sup>程度までのコンクリートに対して適用が可能であると判断される。しかし、圧縮強度33N/mm<sup>2</sup>と100N/mm<sup>2</sup>のコンクリートではセメント量の違いか

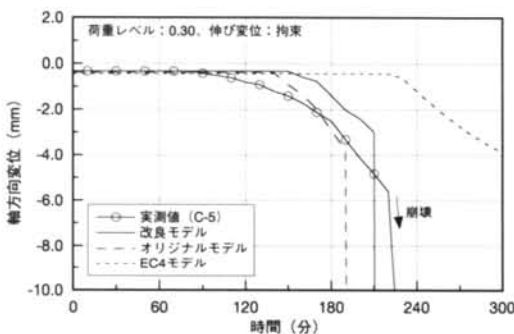


図-13(1) C-5の軸方向変位の経時変化

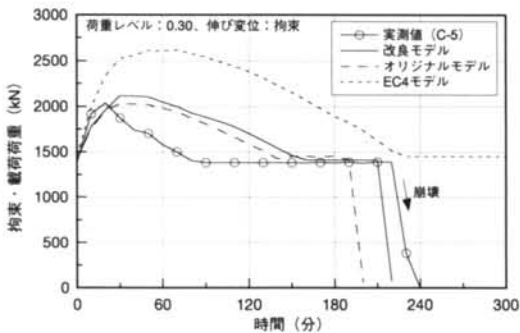


図-13(2) C-5の拘束・載荷荷重の経時変化

ら機械的性質の温度依存性が異なることが文献15)に示されており、コンクリートモデルの適用範囲は明確に示される必要がある。

**謝辞** 本研究のコンクリートモデルの改良についてはウィーン工科大学のSchneider教授およびリエージュ大学のFranssen博士の多大なるご指導を賜った。ここに記して謝意を表します。

**記号**

|                     |  |
|---------------------|--|
| $E(\sigma, T)$      | 応力度 $\sigma$ 、温度 $T^{\circ}\text{C}$ における弾性係数(N/mm <sup>2</sup> or kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| $f_c(T)$            | 温度 $T^{\circ}\text{C}$ における圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> or kgf/cm <sup>2</sup> )               |
| $f_{cr}(T_{max})$   | $T_{max}^{\circ}\text{C}$ を履歴後の常温時における残留圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> or kgf/cm <sup>2</sup> )  |
| $T$                 | 温度( $^{\circ}\text{C}$ )   |
| $T_{max}$           | 最高履歴温度( $^{\circ}\text{C}$ )   |
| $t$                 | 時間(分)  |
| $\omega$            | 含水率(%)   |
| $\alpha$            | 荷重レベル  |
| $\epsilon_{cr}$     | 遷移クリープひずみ  |
| $\epsilon_{stress}$ | 応力ひずみ  |
| $\epsilon_{th}$     | 熱ひずみ   |
| $\epsilon_{ult}$    | 圧縮強度時の応力ひずみ  |
| $\Phi$              | クリープ関数   |
| $\chi$              | 塑性ひずみ係数  |
| $\sigma, \sigma_h$  | 応力度(N/mm <sup>2</sup> or kgf/cm <sup>2</sup> )   |

〈参考文献〉

- 1) “建築物の総合防火設計法” 第4巻耐火設計法, 日本建築センター, 1989
- 2) Eurocode 2 Design of Concrete Structures Part 1.2 : “Structural Fire Design” prENV 1992-1-2, October 1992
- 3) Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures Part 1.2 : “Structural Fire Design” CEN/TC250/SC4 N39, prENV 1994-1-2, Second Draft 1992
- 4) Schneider, U., Diederichs, U., Ehm, C. and Hinrichsmeyer, K. : “Hochtemperaturverhalten von Festbeton” Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten von Bauteilen - Arbeitsbericht 1981 - 1983 Teil II, Technische Universität Braunschweig, pp.5 - 158, 1983
- 5) Schneider, U. : “Properties of Materials at High Temperatures - Concrete”, RILEM 44-PHT, University of Kassel, Kassel 1985
- 6) Schneider, U. : “Concrete at High Temperature - General review” Fire Safety Journal, 13(1988) pp.55 - 68
- 7) Schneider, U. : “Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen” Habilitationsschrift, Technische Universität Braunschweig, 1979
- 8) Schneider, U., Morita, T. and Franssen, J.-M. : “A Concrete Model Considering the Load History Applied to Centrally Loaded Columns under Fire Attack” Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium, pp. 1101 - 1112, 1994
- 9) 森田, 斎藤, 熊谷 : “高温を受けた高強度コンクリート部材の力学的特性 (その1. 材料試験)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) pp.1015 - 1016, 1992年8月
- 10) 若松孝旺 : “火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究 (第一報) - 算定式の誘導, 算定条件および算定要素 -” 日本建築学会論文報告集, 第109号, 1965
- 11) 若松孝旺 : “火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究 (第二報) - 算定式の解法 -, 日本建築学会論文報告集, 第111号, 1965
- 12) Morita, T., Wakamatsu, T., Uesugi, H. and Saito, H. : “Analyses of Composite Beams and Frames at

Elevated Temperature" Proceeding of the Third International Symposium on Fire Safety Science, 1991

13) 上杉, 小池 : "高層鉄骨架構の熱応力解析 (その1)" 日本建築学会構造系論文報告集, 368号, 昭和61年10月

14) Saito, H., Uesugi, H., Yamaguchi, M. and Kodaira, A. : "Thermal Stress and Deformation of Steel Structures of High Rise Buildings in Fire" Proceeding of the Second International Symposium on Fire Safety Science, 1989 Tokyo

15) Diederichs, U., Jumpanen, U.-M. and Pentala, V. : "Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperature" 13th Congress Report, International Association for Bridge and Structural Engineering, 1988, Helsinki