

コンクリート充填鋼管柱の耐火性に関する研究

Study on Fire Resistance of Concrete Filled Tubular Columns

菊田 繁美

Shigemi KIKUTA

コンクリート充填鋼管柱の耐火性に関する研究



菊田 繁美^{*1}

概 要

本研究は、火災時にコンクリート部分が高軸力となる CFT 柱の高温軸圧縮耐力を、過渡ひずみを考慮した理論的解析によって明らかにすることを目的とする。コンクリートが圧縮応力を受けながら温度上昇する際に生じる各種ひずみには、応力ひずみ、熱膨張ひずみ、過渡ひずみがあり、これら各ひずみを考慮した終局強度について理論的かつ具体的に論じる。高軸力下における過渡ひずみは他と比べて大きなひずみ成分となるため、過渡ひずみを適切に評価し、鉛直荷重支持能力への影響を把握する必要がある。発生する過渡ひずみを問題の特徴に照らして近似的にとらえ、当該問題に対する高温軸圧縮耐力数式解を得た。本数式解モデルを用いることにより、さまざまなコンクリート強度・軸力比・断面寸法を持つ既存の CFT 柱の実験結果に対してより精確な耐力評価ができるようになった。

Study on Fire Resistance of Concrete Filled Tubular Columns

Shigemichi KIKUTA

This study aims to evaluate theoretically the fire resistance capacities of concrete filled tubular columns subjected to fire and axial compression. A strength analysis has been made in which all strains found in heated concrete including stress strain, thermal expansion and transient strain are taken into account. Since, among others, transient strain plays a key role on the behavior of heated columns, a new theoretical procedure to treat this strain is postulated and an explicit closed form solution is derived for the ultimate column strength. With comparison between the solutions and test data, it is found that the strength of a heated column is decreased significantly below its full plastic strength due to transient strain, if the column is made of higher strength concrete, is subjected to larger axial force or if it is of a larger cross section. For all the cases, the solutions are found in good agreement with the test results.

^{*1} 技術研究所

^{*1} Technical Research Institute

コンクリート充填鋼管柱の耐火性に関する研究

菊田 繁美^{*1}

1. 序論

1.1 研究の背景

コンクリート充填鋼管構造は鉄骨構造に比べてコンクリート充填鋼管柱（以下、CFT 柱）の剛性が高く振動が小さいため居住性に優れ、鉄骨鉄筋コンクリート構造に比べて型枠が不要、下層階から高流動コンクリートの圧入が可能などの施工性に優れている。また、CFT 柱や鉄骨梁を用いるため、鉄筋コンクリート構造に比べて階高や梁スパンを大きくできる構造である。したがって、近年、コンクリート充填鋼管構造は、鉄骨構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造に代わる構造形式として、事務所、ホテル、物販店舗、倉庫など多用途で採用されるようになっており、超高層集合住宅の主流である鉄筋コンクリート構造に対しても建築計画の自由度を向上させるために用いられることがある。

以上のように、耐震構造やコンクリート施工法の面で優れた構造として認知されてきているが、耐火構造の面では鉄骨構造と同等の耐火対策が必要とされてきた。耐火構造の法規制では鋼材温度が規定されているため、コンクリートの温度にかかわらず鋼材温度を抑制しなければならない。したがって、CFT 柱には鉄骨柱と同じ耐火被覆が必要であった。また、日本では、昭和 34 年の建築基準法の第 2 次改正により鉄筋コンクリート構造が耐火構造として規定されたため、鉄筋コンクリート構造の耐火性能に関する研究は長い間滞っていたことが原因として挙げられる。鉄骨とコンクリートが高温となったときの CFT 柱の耐火性能を評価するために必要なコンクリートの高温時性能の研究はほとんど存在しなかった。コンクリートの高温時性能については、1993 年に行われた NewRC 総プロで Fc100 レベルの高強度コンクリート柱の火災時爆裂現象を始めとして研究の必要性が出てきた。1996 年には CFT 柱のコンクリートの大きな熱容量を利用した無耐火被覆を可能とする設計法¹⁾が、新都市ハウジング協会から提案されたところであり、コンクリート系構造物の耐火性能に関する研究は始まったばかりともいえる。

耐火被覆は躯体工事完了後の仕上げ工事の施工工程を遅らせ、柱断面を大きくし居住面積を減少させるなどデメリットが大きいと、無耐火被覆を可能とした新都市ハウジング協会の設計法は画期的ともいえた。しかし、この設計法は CFT 柱の載荷加熱実験結果から耐火性能の下限値を設定したものであり、破壊機構を解明したものではない。

以上のように、CFT 柱には普及・発展性が見込め

ること、しかし、そのためには耐火上の優位性を明確に証明することが必要であるといえる。

1.2 既往の研究

耐火性能の理論的評価を困難にしているのは、高温時におけるコンクリートの応力～ひずみ関係の実験データが不足していたことや、温度分布が一様でないコンクリート断面に複雑に発生する各種ひずみを適切に評価できなかったことが原因である。

高温時におけるコンクリートの応力～ひずみ関係については、近年、高強度コンクリートを主とする研究²⁻⁴⁾が行われており、実験資料の獲得・蓄積とともに詳細な構成関係が明らかにされつつある。コンクリートが圧縮応力を受けながら温度上昇する際に生じる各種ひずみには、剛性低下による圧縮ひずみ、熱膨張による伸びひずみ、クリープによる圧縮ひずみ、過渡ひずみと呼ばれる圧縮ひずみがあり、これら各ひずみの発生量に関する式評価が提案されるようになってきた³⁻¹³⁾。過渡ひずみは Anderberg らが 1970 年代に提案した概念¹⁴⁾であり、熱膨張ひずみと圧縮応力に依存して温度上昇に即時応答する圧縮ひずみである。高軸力下における過渡ひずみは他と比べて大きなひずみ成分となるため、過渡ひずみを適切に評価し、鉛直荷重支持能力への影響を把握する必要がある。火災加熱を受けるコンクリート柱の終局挙動に対して、過渡ひずみはどのような役割を果たすのか、さもなければ、どのような悪影響を及ぼすのかを、理論的かつ具体的に論じようとした研究は未だみられない。

CFT 柱は、火災時において表面の鋼管が早期に高温になり強度や剛性を喪失するため、終局状態は無筋コンクリート柱として荷重を支持することになる。無筋コンクリート柱という単純な構造でありながら、火災時の鉛直荷重支持能力の推定には実験式が用いられており、破壊状況を把握した理論式を構築するには至っていない。

1.3 研究目的

CFT 柱は建物の長期荷重に対して許容応力度設計されている。しかし、火災時に表面鋼管が高温になり強度・剛性が低下するに当たって、鋼管が支持してきた圧縮力のコンクリート部分への再配分が進行するため、コンクリートが高圧縮応力状態となる。設計基準強度の 1/3 以下の応力で設計された CFT 柱のコンクリートが、火災時には設計基準強度の 1/2 以上の圧縮応力となる可能性がある。このように、応力再配分によって高圧縮応力状態となる CFT 柱は、応力再配分の少ない鉄筋コンクリート柱や鉄骨鉄筋コンクリー

^{*1} 技術研究所

ト柱に比べて耐火性能に劣る構造形式である。既往の実験式や既往の研究において、高軸力を受ける柱や高強度コンクリートより成る柱の高温軸圧縮耐力は、当該柱の累加強度を下回るという報告がある。しかし、今日、その原因についてはほとんど解明されていない。

本研究はCFT柱を対象とし、当該柱の火災時挙動をシミュレーションできるFEM精算解析モデルを構築し、耐火性能を把握するとともに、過渡ひずみを考慮した理論的解析によってCFT柱の高温軸圧縮耐力を明らかにすることを目的とする。具体的には、過渡ひずみの作用を組み込んだ理論高温軸圧縮耐力式を直接導き、過渡ひずみの影響を明らかにするものである。

2. CFT柱の有限要素による精算解析

2.1 熱伝導解析

表面が加熱されるコンクリート内部の温度上昇推移とその分布を評価すべく、FEM熱伝導解析を用いた。解析モデルおよび解析結果の例を図-1に示す。コンクリートと鋼材の熱伝導率については、Euro Codeを修正した温度に依存するものとし¹⁵⁾、コンクリートの含水率による潜熱を考慮した。鋼材表面の熱伝達率を総合熱伝達率として対流熱伝達率と放射熱伝達率の和で与えた。標準加熱温度曲線を外気温として入力し、各時刻における断面内温度分布を求めた。

2.2 コンクリートの高温素材試験

火災による加熱と長期荷重による圧縮を受けるコンクリートには、熱膨張ひずみ (ϵ_{th})、応力ひずみ (ϵ)、クリープひずみ (ϵ_{cr})、過渡ひずみ (ϵ_{tr}) の4種類

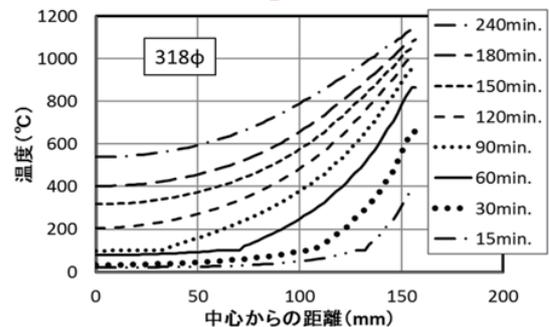
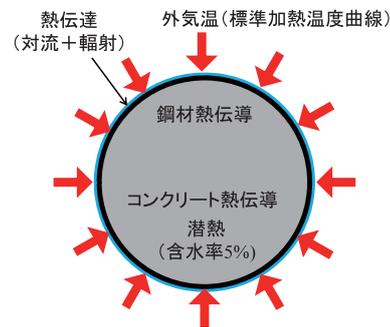


図-1 断面内温度分布

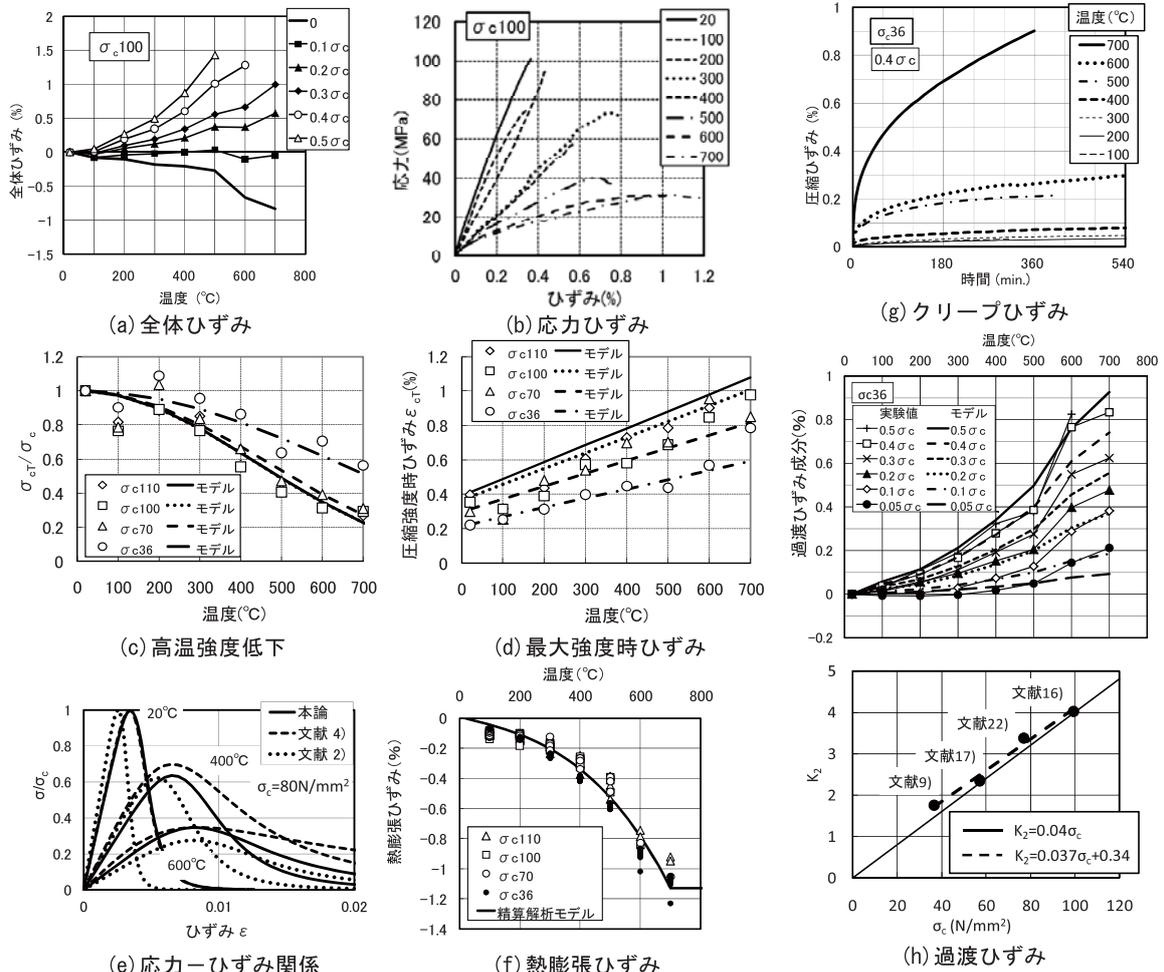


図-2 コンクリートの高温圧縮試験結果

表-1 各種ひずみの定式化

| | |
|---|--|
| (熱膨張ひずみ) | |
| $\varepsilon_{th} = \begin{cases} -5.0 \cdot 10^{-6}(T-T_{RT}) - 2.3 \cdot (T-T_{RT})^3 & ; T \leq 700 \text{ }^\circ\text{C} \\ \varepsilon_{th}(700 - T_{RT}) & ; T > 700 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$ | |
| (クリープひずみ) | |
| $\varepsilon_{cr} = \beta_0 \left(\frac{t}{t_r}\right)^q \cdot \frac{\sigma}{\sigma_c} e^{\tau(T-T_{RT})}$ | |
| $\sigma_c \leq 60: \beta_0 = -0.00020, \tau = 0.0056, t_r = 300 \text{ 分}, q = 0.30$ | |
| $\sigma_c > 60: \beta_0 = -0.00088, \tau = 0.0026, t_r = 300 \text{ 分}, q = 0.46$ | |
| (応力-ひずみ関係) | |
| $\sigma = \sigma_{cT} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cT}} \cdot \frac{n_T}{n_T - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cT}}\right)^{n_T}}$ | |
| $\frac{\sigma_{cT}}{\sigma_c} = \left\{ 0.5 \cos\left(\frac{3.14T}{1500}\right) + 0.5 \right\}^{\frac{2.5 \sigma_c}{80}}$ | |
| $\frac{\varepsilon_{cT}}{\varepsilon_c} = 0.0025 T + 1$ | |
| $\varepsilon_c = 2.4 \cdot 10^{-5} \sigma_c + 0.00128$ | |
| $n_T = 7.5 - 6.0 \times 10^{-3} T$ | |
| (過渡ひずみ) | |
| $d\varepsilon_{tr} = K_2 \frac{\sigma}{\sigma_c} (-d\varepsilon_{th}) \quad K_2 = 0.037 \sigma_c + 0.34$ | |

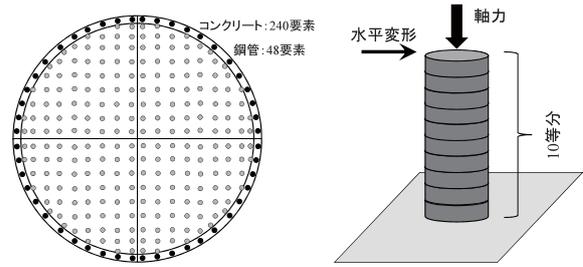


図-3 解析モデル

のひずみが発生する。

コンクリート強度が 37、80、100、110N/mm² の 4 種類について高温圧縮試験を行い、これらのひずみの定式化を行った。実験結果の一例を図-2 に示す。これらの実験結果をもとに、熱膨張ひずみ、クリープひずみ、応力-ひずみ関係、過渡ひずみを表-1 のように定式化した。

2.3 精算解析モデル

解析方法は、図-3 に示したように、鋼管 48 要素、コンクリート 240 要素に分割した円形 CFT 柱の断面について、平面保持の仮定に基づき解析するものである。高さ方向には 10 等分し、それぞれの断面の曲率を高さ方向に積分することによって水平変形が得られ

る。

熱伝導解析により得られた各要素の温度時刻歴を与えて、一定圧縮軸力下において水平変形を受ける柱の軸変形、軸耐力について解析した。

2.4 累加強度

累加強度はある時間における断面内の高温強度分布を全断面で積分した値である。すなわち、ある温度分布において取りうる軸圧縮耐力の最大値である。精算解析モデルの累加強度は、熱伝導解析から直接得る温度分布に基づいて、圧縮強度分布を持つ強度を全断面にわたって総計したものであり、軸耐力の基準となるものでもある。

2.5 荷加熱実験と精算解析の比較

コンクリートは断面寸法が大きくなると圧縮強度が低下する寸法効果を有している。直径 D を持つ柱の圧縮強度 $\sigma_c(D)$ と基準直径 $d=100\text{mm}$ を持つ柱の圧縮強度 $\sigma_c(d)$ との比は $\frac{\sigma_c(D)}{\sigma_c(d)} = \left(\frac{D}{d}\right)^{-0.1}$ である関係¹⁶⁾ を解析値に適用して実験結果と比較検討する。軸力比と耐火時間の関係について解析結果、累加強度、実験結果¹⁾ の比較を図-4 に示す。(a) は鉛直軸力のみを受ける柱、(b) は鉛直軸力と 1/50rad. の水平変形を受ける柱である。解析値は、累加強度に比べて耐力低下する実験値とよく一致する適切なモデルであることがわ

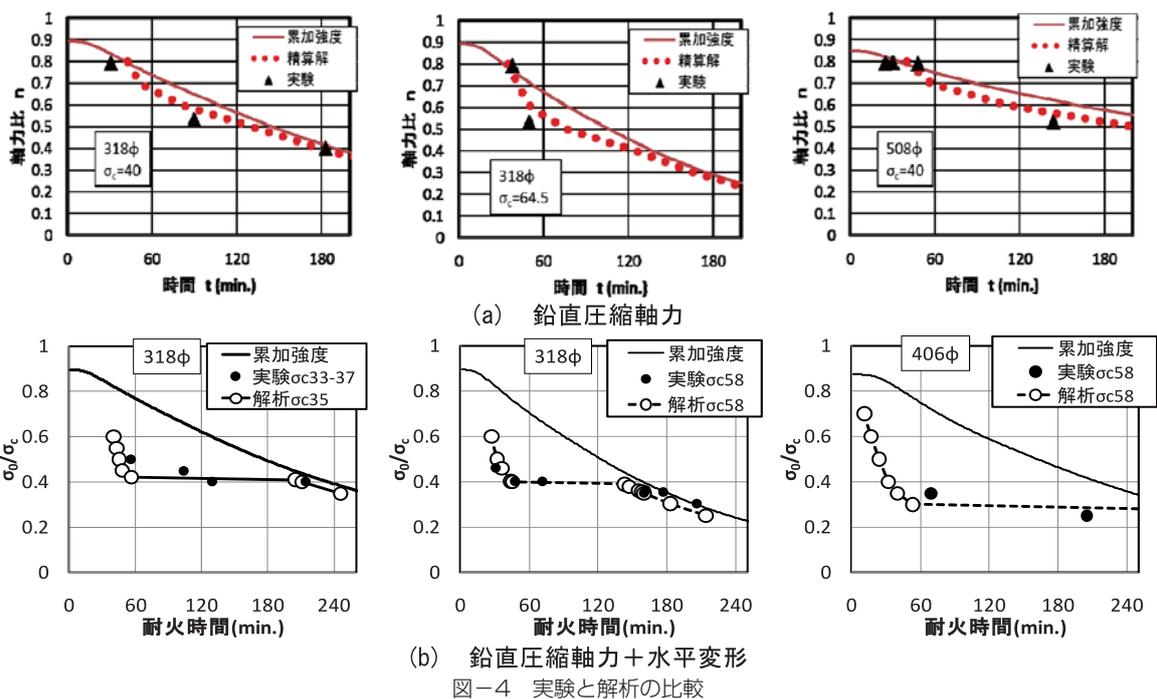
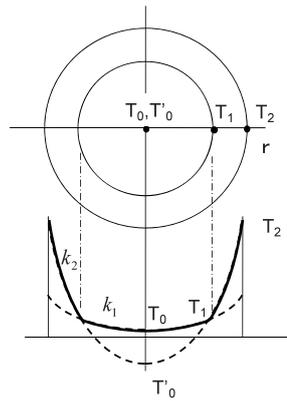


図-4 実験と解析の比較



(温度分布)

$$T = \begin{cases} T_0 + k_1 r^2 & (0 \leq r < r_1) \\ T_0' + k_2 r^2 & (r_1 \leq r \leq r_2) \end{cases}$$

$$r_1^2 = r_2^2 - \frac{T_2 - T_1}{k_2}, \quad k_1 = \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T_0'} k_2$$

r_2 : コンクリートの外縁部半径
 r_1 : 温度 T_1 のコンクリート部分の半径
 $T_0' = T_2 - k_2 r_2^2$

図-5 断面内温度分布

かる。本精算解析手法はCFT柱の耐火性能を評価するために有効であることが判明した。

3. CFT柱の理論数式解

精算解析により、過渡ひずみの発生がCFT柱の耐火性能に大きく影響することが推測できた。過渡ひずみの影響を明確に把握・説明する目的で理論数式解モデルを構築する。

3.1 温度分布の2次関数近似

数式解モデルでは、FEM熱伝導解析結果に整合するように2つの2次関数の大きい方で各時刻の温度分布を表現する。2本の2次曲線は T_1 (100℃)で交わる。曲線は外縁温度 T_2 、中央温度 T_0 と係数 k_2 により確定する。 k_2 は、得られる温度分布がFEM熱伝導解析結果に整合するように最小2乗法によって定める。

3.2 コンクリートのモデル化

(1) 全体ひずみ

精算解析で示したように、加熱と圧縮を受けるコンクリートの全体ひずみ $\bar{\epsilon}$ は、応力ひずみ ϵ 、熱膨張ひずみ ϵ_{th} 、クリープひずみ ϵ_{cr} 、および過渡ひずみ ϵ_{tr} の和である。しかし、クリープひずみは熱膨張ひずみ・応力ひずみ・過渡ひずみに比べて小さいため、数式解モデルではクリープひずみを無視する。

(2) 応力と応力ひずみの関係

精算モデルでは、高温時におけるコンクリートの $\sigma \sim \epsilon$ 関係をPopovicsの式¹⁷⁾を用いて表現した。数式解モデルでは、コンクリートは、温度ごとに線形弾性体であると仮定する。すなわち、コンクリートの力学特性は、温度毎の圧縮強度 σ_{ct} を同強度時ひずみ ϵ_{ct} で除したヤング率のみで特徴付けられるとする。圧縮強度時ひずみ ϵ_{ct} は精算モデルと同様に1次式とし、高温圧縮強度 σ_{ct} は100℃未満では強度低下せず、100℃を上回るとき温度の1次式で強度低下する

とする。係数 c は3種類のコンクリート強度について、200℃以上の実験データを線形近似して求めた強度低下の負勾配をコンクリート強度の1次式としたものである。弾性体近似は材料特性に対する大幅な簡略化であるが、火災加熱と圧縮を同時に受けるコンクリート柱の挙動の特徴を踏まえた上での仮定である。

(3) 熱膨張ひずみ

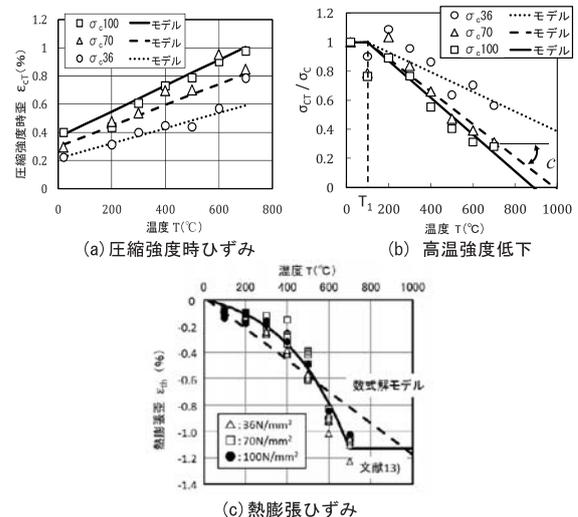
数式解モデルでは精算モデルの常温から950℃までの熱膨張ひずみを平均的に評価した1次式を採用する。

(4) 過渡ひずみ

過渡ひずみ ϵ_{tr} は、増分形式で定義される。しかし、ここでは一定圧縮力と火災加熱を受けるコンクリート円柱各部の過渡ひずみの発達と分布の特徴をとらえ、数式解モデルでは、到達した最終の応力と温度の関数として過渡ひずみの大きさを近似評価する。図-7のように推定される $\sigma \sim T$ 曲線下部の T_1 から T までの面積を図上の斜線部面積で近似した。

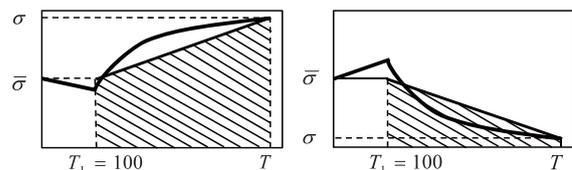
3.3 累加強度の数式表示

累加強度はある時間における断面内の高温強度分布



(全体ひずみ): $\bar{\epsilon} = \epsilon + \epsilon_{th} + \epsilon_{tr}$
 (応力-ひずみ関係): $\sigma = E \epsilon; \quad E = \frac{\sigma_{ct}}{\epsilon_{ct}}$
 (最大強度時ひずみ): $\epsilon_{ct} = \epsilon_c + bT$
 (高温強度): $\sigma_{ct} = \begin{cases} \sigma_c & : T \leq T_1 \\ \sigma_c' - cT \quad (\sigma_c' = \sigma_c + cT_1) & : T > T_1 \end{cases}$
 $b = 0.0025 \epsilon_c, \quad c = 0.0016 \sigma_c - 0.033$
 (熱膨張ひずみ): $\epsilon_{th} = -\alpha(T - T_{RT}); \quad \alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

図-6 数式解モデル



(a) 低温部の応力積分近似 (b) 高温部の応力積分近似

$$d\epsilon_{tr} = \frac{\sigma}{\sigma_o} \alpha dT \quad (\sigma_o = 25 \text{ N/mm}^2)$$

$$\epsilon_{tr} = \int_{T_1}^T \frac{\sigma}{\sigma_o} \alpha dT = \frac{\alpha}{\sigma_o} \int_{T_1}^T \sigma dT = \frac{\alpha}{2\sigma_o} (T - T_1)(\bar{\sigma} + \sigma)$$

図-7 過渡ひずみ

を全断面で積分した値である。すなわち、ある温度分布において取りうる軸圧縮耐力の最大値である。累加強度は、2次関数で規定した温度分布に基づく圧縮強度分布を全断面について積分したものとす。中心温度 T_0 と T_1 ($=100^\circ\text{C}$) の大小関係で異なる表-2 に示す式となる。

3.4 CFT 柱の高温軸耐力式

円形無筋コンクリート柱が温度分布の1つを受けたとき、このコンクリート柱は軸力と水平変形を受けて、どれほどの軸圧縮力に耐えうるかを、数式解モデルを用いて導出する。

(1) 数式解モデルにおける応力と全体ひずみの関係

コンクリート各部応力 σ と全体ひずみ $\bar{\varepsilon}$ の関係は表-3 に示すように導かれる。また、図-8 に示すように全体ひずみ $\bar{\varepsilon}$ は平面保持され、曲げ変形によって生じる曲率 ϕ 、中央ひずみ ε_0 、曲げ中心軸からの距離 $r \cdot \cos \theta$ を用いてあらわされる。ここで、過渡ひずみを無視する場合は $\sigma_0 \rightarrow \infty$ とする。したがって、 $T < T_1$ のときは、 $\sigma_0 \rightarrow \infty$ である。

(2) 柱の全体耐力式

柱の断面内の全体ひずみ $\bar{\varepsilon}$ は、温度分布によらず平面保持される。全体ひずみは全断面に対する力の釣り合いから表-4 に示すように求められる。軸圧縮力 P は応力 σ を全断面で積分することにより得られ、これを $\bar{\varepsilon}$ について解いて、全体ひずみの表示式を得る。 $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_0 + r\phi \cos \theta$ の関係から、軸力、温度分布、曲げ曲率が与えられたときの各部の応力が得られる。

表-4 において積分記号の外にある σ 、 T 、 E' 、 r 、 θ をわかりやすくするために σ^* 、 T^* 、 E^* 、 r^* 、 θ^* と書き換え、平均応力 $\bar{\sigma}$ について解く。そうすると任意点の応力・温度・見かけのヤング率・位置の極座標が σ^* 、 T^* 、 E^* 、 r^* 、 θ^* のときの断面の平均応力 $\bar{\sigma}$ が得られる。数式解モデルでは、 σ^* が臨界値に達

したときコンクリート柱は崩壊すると仮定し、柱の軸圧縮耐力を与える表現式となる。

(3) 破壊の判定

数式解モデルで対象とする破壊モードは、外縁部分が弾性に止まっている間に断面中央部が破壊する形式である。一方、過渡ひずみの発生が小さい低軸力の場合

表-2 累加強度の数式表示

$$\begin{aligned}
 T_0 < T_1 : \\
 \bar{P} &= \int_A \sigma_{cT} dA = \frac{\pi}{k_1} \int_{T_0}^{T_1} \sigma_c dT + \frac{\pi}{k_2} \int_{T_1}^{T_2} (\sigma'_c - cT) dT \\
 &= \frac{\pi}{k_1} \sigma_c (T_1 - T_0) + \frac{\pi}{k_2} \left\{ \sigma'_c (T_2 - T_1) - \frac{c}{2} (T_2^2 - T_1^2) \right\} \\
 T_0 \geq T_1 : \\
 \bar{P} &= \int_A \sigma_{cT} dA = \frac{\pi}{k_2} \int_{T_0}^{T_2} (\sigma'_c - cT) dT \\
 &= \frac{\pi}{k_2} \left\{ \sigma'_c (T_2 - T_0) - \frac{c}{2} (T_2^2 - T_0^2) \right\}
 \end{aligned}$$

表-3 応力と全体ひずみの関係

$$\begin{aligned}
 \bar{\varepsilon} &= \frac{\sigma}{E} - \alpha(T - T_{RT}) + \frac{\alpha}{2\sigma_0} (T - T_1)(\bar{\sigma} + \sigma) \\
 &= \frac{\sigma}{E'} - \alpha'T - f + \alpha T_{RT} \\
 \frac{1}{E'} &= \frac{1}{E} + \frac{\alpha(T - T_1)}{2\sigma_0} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c + bT}{\sigma_c} & ; T < T_1 \\ \frac{\varepsilon_c + bT}{\sigma'_c - cT} + \frac{\alpha(T - T_1)}{2\sigma_0} & ; T \geq T_1 \end{cases} \\
 \alpha' &= \left(1 - \frac{\bar{\sigma}}{2\sigma_0}\right) \alpha & f &= \frac{\alpha T_1 \bar{\sigma}}{2\sigma_0} \\
 \sigma &= E' (\bar{\varepsilon} + \alpha'T + f - \alpha T_{RT}) \\
 &= E' (\varepsilon_0 + r\phi \cos \theta + \alpha'T + f - \alpha T_{RT}) \\
 \varepsilon_0 : & \text{中央の全ひずみ} \quad \phi : \text{曲率}
 \end{aligned}$$

表-4 柱の全体耐力式

$$\begin{aligned}
 P &= \bar{\sigma} A = \int_A \sigma dA = \bar{\varepsilon} \int_A E' dA + \int_A E' \alpha' T dA + \int_A E' f dA - \alpha T_{RT} \int_A E' dA \\
 \bar{\varepsilon} &= \frac{\bar{\sigma} A - \int_A E' \alpha' T dA - \int_A f \cdot E' dA + \alpha T_{RT} \int_A E' dA}{\int_A E' dA} \\
 \varepsilon_0 &= \frac{\bar{\sigma} A - \int_A E' \alpha' T dA - \int_A f \cdot E' dA + \alpha T_{RT} \int_A E' dA - \phi \int_A E' r \cos \theta dA}{\int_A E' dA} \\
 \sigma &= E' \left(\frac{\bar{\sigma} A - \int_A E' \alpha' T dA - \int_A f \cdot E' dA - \phi \int_A E' r \cos \theta dA}{\int_A E' dA} + r \phi \cos \theta + \alpha' T + f \right)
 \end{aligned}$$

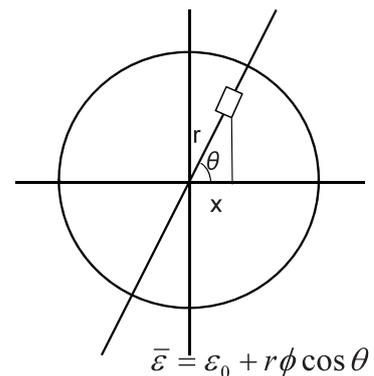


図-8 曲げひずみ

表-5 柱の軸圧縮耐力式

$$\begin{aligned}
 T^* < T_1 \quad \bar{\sigma} &= \frac{\left(\frac{\sigma^*}{E^*} - \alpha T^* - r^* \phi \cos \theta^*\right) \left(\int_{A_1} E dA + \int_{A_2} E' dA\right) + \alpha \int_{A_1} E T dA + \alpha \int_{A_2} E' T dA + \phi \int_A E' r \cos \theta dA}{A + \frac{\alpha}{2\sigma_0} \left(\int_{A_2} E' T dA - T_1 \int_{A_2} E' dA\right)} \\
 T^* \geq T_1 \quad \bar{\sigma} &= \frac{\left(\frac{\sigma^*}{E^*} - \alpha T^* - r^* \phi \cos \theta^*\right) \left(\int_{A_1} E dA + \int_{A_2} E' dA\right) + \alpha \int_{A_1} E T dA + \alpha \int_{A_2} E' T dA + \phi \int_A E' r \cos \theta dA}{A + \frac{\alpha}{2\sigma_0} \left(\int_{A_2} E' T dA - T^* \int_A E' dA + T_1 \int_{A_1} E dA\right)}
 \end{aligned}$$

合は、外縁部分の塑性変形が発達するために、弾性解である数式解は適用できない。この場合の耐力は累加強度としても大差ない。次のふたつの仮定を設けて、平押しされる柱の破壊位置を特定する。

- ①ひとつの温度における $\sigma \sim \epsilon$ 関係の圧縮強度前後の正負勾配の絶対値は同じと仮定して、低温負剛性域と高温正剛性域を分ける半径 r_{cr} を求める。
- ②低温負勾配域内のコンクリートの応力重心を r^* とし、ここが高温圧縮強度 σ_{cr} に達したとき、柱は軸圧縮崩壊する。

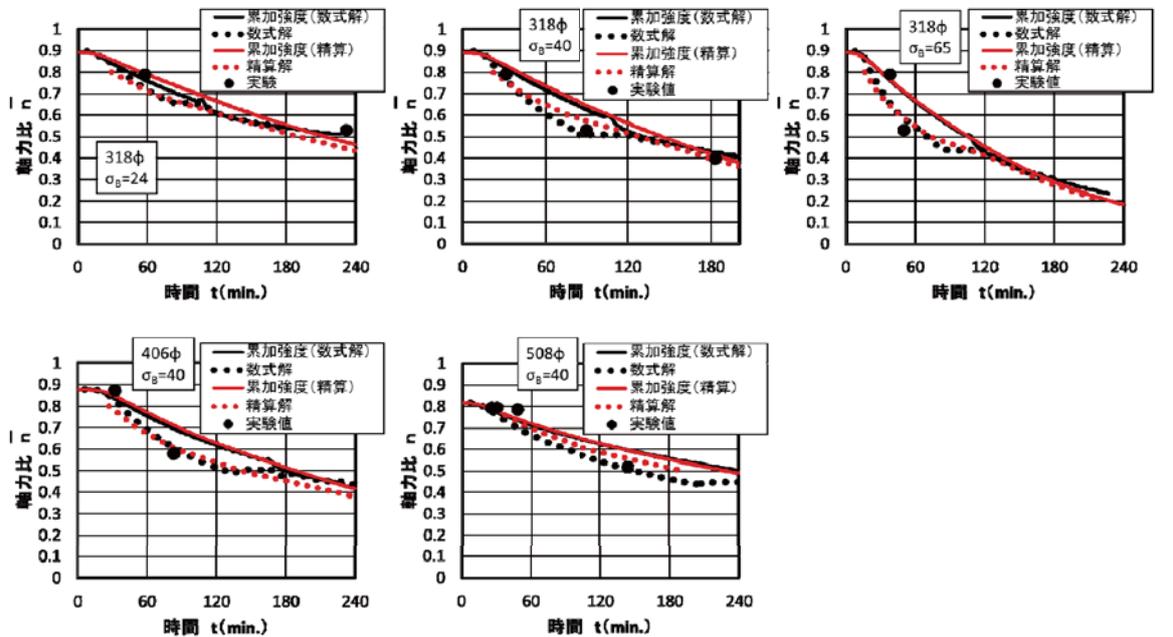
曲げ変形を受ける柱の破壊位置は、次のふたつの仮定を設けて、平押しされる柱の破壊位置を移動して特定する。

①曲げによって圧縮ひずみが減少する側の柱の半分の断面の r_{cr} は、平押しされる柱の r_{cr} から曲率 ϕ に依存して移動する。

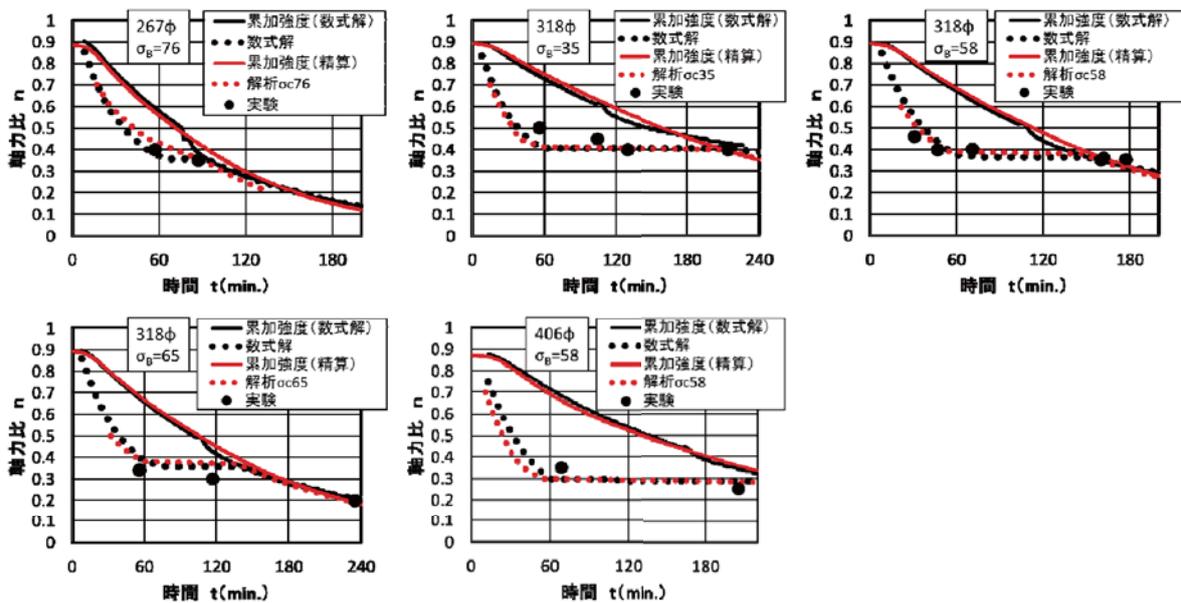
②破壊位置 r^* 、 θ^* は、平押しされる柱の曲げ回転軸上の位置から、上記 r_{cr} の移動量の半分移動する。

3.5 載荷加熱実験、精算解析と理論数式解の比較
 新都市ハウジング協会のCFT構造技術指針・同解説における円形コンクリート充填鋼管柱に記載されている一連の耐火試験結果と精算解析および理論数式解の比較を行う。

円形コンクリート充填鋼管柱に関して、平押しされる13体および軸力と同時に曲げ変形を受ける17体の実験結果¹⁾と本論の与える数式解・累加強度数式解を



(a) 軸力を受ける柱



(b) 軸力と曲げ変形を受ける柱

図9 耐火試験結果と精算解析および理論数式解の比較

詳細に比較する。数式解は、実験に供した試験体の寸法・コンクリート強度を踏まえたパラメータを用いて求める。すなわち、平押し実験と曲げ圧縮実験とも直径とコンクリート強度別に試験体をそれぞれ5パターンに分類して5種の推定を行い、これと対応する実験値とを比べたものを図-9 (a)、(b) にそれぞれ示す。充填管外縁の鋼管は早期に高温化し、加熱を始めてほぼ45分が経つとどの試験体の鋼も強度を失う。大部分の試験体の耐火時間はこの時間を上回り、これらに対して数式解を適用する。

全図において数式解と精算解、実験値はよく一致している。これより、低軸力域においては累加強度の概念が成立すること、一方、高軸力域においては柱の高温軸圧縮耐力は累加強度にまでは達せず、過渡ひずみの発生が耐力を低下させる主な要因であること、しかもその小さくない低下量は数式解によつて的確に評価できることがわかる。

4. まとめ

円形 CFT 柱の高温軸圧縮耐力に過渡ひずみが具体的にどのような悪影響を及ぼすかについて理論的説明を試みた。発生する過渡ひずみを問題の特徴に照らして近似的にとらえ、当該問題に対するエクспリシットな高温軸圧縮耐力数式解を得た。数式解耐力は、低温部破壊条件式を付与した耐力数式解と累加強度数式解の小さい方で与えられる。CFT 柱の軸圧縮耐力が低下してその累加強度を下回るのは、外縁の高温部に発生する大きな過渡ひずみによりこの部分の応力が緩和され、断面中央の低温域が早期に破壊してしまうためである。コンクリート強度が高いほど、軸力比が高いほど、また断面寸法が大きいほど、この耐力低下は顕著であり、導出した数式解はこれらの過渡ひずみの影響を的確にとらえることができる。すなわち、本数式解モデルを用いることにより、新都市ハウジング協会が規定する円形 CFT 柱の耐火性能評価指針式の妥当性を理論的に位置付けることができるようになるばかりでなく、さまざまなコンクリート強度・軸力比・断面寸法を持つ既存の CFT 柱の実験結果に対してより精確な耐力評価ができるようになる。

参考文献

- 1) 新都市ハウジング協会：CFT 構造技術指針・同解説
- 2) 宮本圭一、安部武雄：高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.227-234、2003.12
- 3) 安部武雄、大塚貴弘、小林裕、道越真太郎：高温度における普通強度コンクリートの力学的特性、日本建築学会構造系論文集、第 615 号、pp.7-13、2007.5
- 4) 松戸正士、西田浩和、大塚貴弘、平島岳夫、安部武雄：高温加熱時における高強度コンクリートの力学的特性について 高強度コンクリートの耐火性に関する研究 (その 1)、日本建築学会構造系論文集、第 624 号、pp.341-347、2008.2
- 5) 豊田康二、常世田昌寿、織茂俊泰、菊田繁美、高橋孝二、堀 昭夫、松戸正士、中込 昭、吉田正友：普通コン

- クリートの過渡ひずみに関する実験的研究 (その 1 実験概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.23-24、2001.9
- 6) 常世田昌寿、豊田康二、織茂俊泰、菊田繁美、高橋孝二、堀 昭夫、松戸正士、中込 昭、上杉英樹：普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究 (その 2 結果と考察)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.25-26、2001.9
- 7) 山下平祐、豊田康二、常世田昌寿、鈴木敏夫、菊田繁美、高橋孝二、堀 昭夫、松戸正士、中込 昭、吉田正友、平島岳夫、上杉英樹：普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究 (その 3 クリープひずみの定式化)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.31-32、2002.8
- 8) 豊田康二、山下平祐、常世田昌寿、鈴木敏夫、菊田繁美、高橋孝二、堀 昭夫、松戸正士、中込 昭、吉田正友、上杉英樹、平島岳夫：普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究 (その 4 過渡ひずみの定式化)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.33-34、2002.8
- 9) 常世田昌寿、豊田康二、山下平祐、鈴木敏夫、菊田繁美、高橋孝二、堀 昭夫、松戸正士、中込 昭、吉田正友、平島岳夫、上杉英樹：普通コンクリートの過渡ひずみに関する実験的研究 (その 5 過渡ひずみを含む構成則と検証実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.35-36、2002.8
- 10) 豊田康二、山下平祐、篠原幸一、野中 英、近藤 悟、高橋孝二、井上 超、松戸正士、中込 昭、吉田正友、平島岳夫、上杉英樹：超高強度コンクリートの高温下における力学特性に関する実験的研究 (その 1 超高強度コンクリートの熱膨張ひずみ)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.169-170、2003.9
- 11) 山下平祐、豊田康二、篠原幸一、野中 英、近藤 悟、高橋孝二、井上 超、松戸正士、中込 昭、吉田正友、平島岳夫、上杉英樹：超高強度コンクリートの高温下における力学特性に関する実験的研究 (その 2 超高強度コンクリートの全体ひずみ)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.171-172、2003.9
- 12) 篠原幸一、山下平祐、豊田康二、平島岳夫、上杉英樹：超高強度コンクリートの高温下における力学特性に関する実験的研究 (その 3 定常状態における超高強度コンクリートのクリープひずみ)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.73-74、2004.8
- 13) 山下平祐、篠原幸一、豊田康二、平島岳夫、上杉英樹：超高強度コンクリートの高温下における力学特性に関する実験的研究 (その 4 超高強度コンクリートの過渡ひずみ)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、pp.75-76、2004.8
- 14) Y.Anderberg, S.Theandersson : Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature,Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden 1976
- 15) 齋藤秀人、森田 武、上杉英樹：中心圧縮を受ける充填鋼管コンクリート柱の内部温度と耐火時間に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第 582 号、pp.9-16、2004.8
- 16) Blanks,R.F, McNamara, c. : Mass Concrete Tests in Large Cylinders', Journal, American Concrete Institute, Vol. 3, pp. 280-303, 1935
- 17) Sandor Popovics : A NUMERICAL APPROACH TO THE COMPLETE STRESS-STRAIN CURVE OF CONCRETE, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol.3, pp.583-599, 1973