

高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の 火災時における軸方向変形挙動に関する解析的研究

— 瀬 賢 — 川 口 徹

Analytical Study on Axial Deformation Behavior of Reinforced Concrete Columns using High-Strength Concrete Subjected to Fire

Ken-ichi Ichise Toru Kawaguchi

Abstract

This paper describes an analytical study on axial deformation behavior of reinforced concrete columns using high-strength concrete subjected to fire. The following conclusions were obtained.

1. Past test results of deformation properties of reinforced concrete columns can be made to reappear with the model, in consideration of the temperature dependability of concrete and reinforcing bars, by the nonlinear finite element method.

2. This analysis, which makes concrete strength and member size of concrete column a parameter, can predict the axial deformation behavior of reinforced concrete columns using high-strength concrete subjected to fire.

概 要

高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の火災時の軸方向変形挙動について解析的に検討を行い、以下のことがわかった。

(1) コンクリート、鉄筋の温度依存性を考慮したモデルを用い、非線形有限要素解析により鉄筋コンクリート柱部材の耐火試験における軸方向変形挙動を概ね再現できる。

(2) 本解析は、コンクリート強度、柱部材の断面寸法をパラメータとして、火災時の鉄筋コンクリート柱部材の軸方向変形挙動を推定できる。

1. はじめに

近年、都心部を中心に30層を超える超高層鉄筋コンクリート造（超高層RC造）集合住宅の建設が進んでおり、設計基準強度（以下 F_c ） $100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の高強度コンクリートが適用されるようになってきた。RC造は、本来耐火構造として認められているが、 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 級の高強度コンクリートを使用した場合、火災時に表層部のコンクリートが爆裂し、耐火性能の低下が危惧される。このため高強度コンクリートの適用にあたり、部材実験や解析による検討が適宜行われている。しかし高強度コンクリートを使用した実大部材レベルの実験は、設備面、コスト面などから実施が困難であり、小型試験体を用いた載荷加熱試験結果が幾つか報告されているにすぎない^{1), 2)}。

一方解析においては、温度測定結果に基づいた検討が一部行われているが、火災時における温度依存性を考慮した熱定数や材料定数等について、まだ十分なデータが揃っていないこともあり、あまり活用されていない。しかし、実験による検討が十分にできないことを考慮すれば、解析による検討をより積極的に行うことが重要であると考えられる。

そこで本論文では、高強度コンクリートを使用した鉄

筋コンクリート柱部材の火災時の軸方向変形挙動に着眼し、解析的検討を試みるものである。初めに既往の鉄筋コンクリート柱部材の載荷加熱による耐火性能試験結果と解析によって得られる軸方向変形量との整合性を検討する。次に40層程度の鉄筋コンクリート造として設計した柱部材（ $F_c 80\text{N}/\text{mm}^2$ ）について、火災時の軸方向変形についてシミュレーション解析を行う。

2. 解析プログラム

2.1 解析方法

解析には、当社開発の非線形有限要素解析プログラム（名称FINAL[®]）を使用した^{3), 4)}。これは、熱伝導解析、静的応力解析、動的応答解析が可能であり、主にコンクリート系構造を対象として、外力および温度荷重を受ける場合の弾性から破壊に至るまでの挙動を、材料レベルの構成則に基づいて予測することができる解析プログラムである。

解析手順は、まず熱伝導解析を行い、断面の各要素における時刻歴温度を求める。続いてその時刻歴温度を各要素に与え非線形応力解析を行った。非定常熱伝導方程式の解法には、Crank-Nicolsonの差分式を用い、非線形

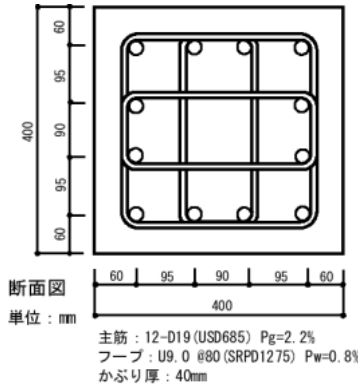


Fig. 1 RC柱部材の断面図
Section of RC Columns Member

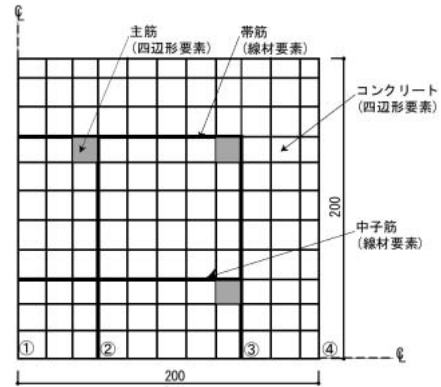


Fig.2 解析モデル
Analysis Model

応力解析は、接線剛性法により、収束計算にはNewton-Raphson法を用いた。

2.2 解析の対象

解析は、松戸ら⁵⁾の報告によるFig. 1に示す断面を有する柱部材 (400×400×3600mm) 試験体 (5体) を対象とした。加熱区間は、実験結果に基づき柱中央部2000mmとした。解析に使用した各試験体の諸元、コンクリートおよび鉄筋の常温時における力学的性質をTable 1~Table 3に示す。解析は部材の対称性を考慮し、柱断面の1/4部分をFig. 2に示すようにメッシュ分割して行った。コンクリートと主筋は四辺形要素、帯筋と中子筋は線材要素としてモデル化した。また帯筋と中子筋は、熱伝導解析ではヒートブリッジとして熱を伝わりやすくしており、また応力解析においてはコンクリートの拘束効果に關与している。加熱温度は、ISO 834⁶⁾ に定める標準加熱温度曲線として、以下の式で表す温度を与えた。加熱時間は、実験結果に合わせて4時間加熱とした。また冷却時は、文献⁵⁾で示された炉内の平均温度を与えた。

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (0 \leq t \leq 240) \quad (1)$$

T: 加熱温度(), t: 経過時間(分)

2.3 解析に用いた定数

熱伝導解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の熱定数をTable 4に示す。熱定数は、Eurocode No.4⁷⁾に準拠して設定した。また応力解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料定数は、温度依存性を有するものとし、常温値に対する比を以下の各式に基づき定めた。式の適用範囲は、コンクリートについては700 まで、鉄筋については1000 までとした。それ以上の温度においては、コンクリートでは700 , 鉄筋では1000 の値を用いた。なおコンクリートには、冷間試験の結果を適用した。

1) コンクリートの圧縮強度⁸⁾

$$\frac{c(t)}{c(20)} = 1.02 + 3.75 \times 10^{-4} (t - 20) - 2.44 \times 10^{-6} (t - 20)^2 \quad (2)$$

$c(20)$: 20 における圧縮強度
 $c(t)$: t における圧縮強度
: 温度 (以下同じ)

2) コンクリートのヤング係数⁹⁾

Table 1 各試験体の諸元
List of Specimens

試験体名	調合番号	実強度 _{c B} (N/mm ²)	軸力 _N ・A _c (kN)	軸力比 _{N/c B}	含水率(%)	
					表面	中心
C13N27	S18	126.5	5443	0.27	4.9	6.4
C11N30	S24	113.4	5443	0.30	4.6	6.6
C11N35			6104	0.35	4.6	6.6
C08N30	S35	77.3	3710	0.30	5.1	7.9
C08N44			5443	0.44	5.1	7.9

Table 2 コンクリートの力学的性質
Mechanical Properties of Concrete

調合番号	水結合材比 W/B (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	最大応力時歪 (×10 ⁻⁶)
S18	18	126.5	37910	3614
S24	24	113.4	36390	3604
S35	35	77.3	34810	2999

Table 3 鉄筋の力学的性質
Mechanical Properties of Reinforcing Bar

鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D19(USD685)	792	220500	971
U9(SBPD1275)	1410*	208000	1520

* : 0.2%オフセット

Table 4 コンクリート・鉄筋の熱定数
Heat Constants of Concrete and Reinforcing Bar

種類	項目	算定式
コンクリート	熱伝導率 (W/mK)	$c = 2.0 - 0.24 \times \left(\frac{t}{120}\right) + 0.012 \times \left(\frac{t}{120}\right)^2$ (20 1200)
	比熱 (J/kgK)	$C_c = 900 + 80 \times \left(\frac{t}{120}\right) - 4 \times \left(\frac{t}{120}\right)^2$ (20 1200)
	線膨張係数	$c = 9.0 \times 10^{-6} + 6.9 \times 10^{-11} t^2$ (20 700) $c = 0.0$ (700 <)
鉄筋	熱伝導率 (W/mK)	$s = 54 - 3.33 \times \left(\frac{t}{100}\right)$ (20 800) $s = 27.3$ (800 1200)
	比熱 (J/kgK)	$C_s = 470 + 20 \times \left(\frac{t}{100}\right) + 3.8 \times \left(\frac{t}{100}\right)^2$ (20 800) $C_s = 873$ (800 1200)
	線膨張係数	$s = 1.2 \times 10^{-5} + 0.8 \times 10^{-8} t$ (20 750) $s = 0$ (750 < 860) $s = 2.0 \times 10^{-5}$ (860 <)

$$E_{c(\cdot)} / E_{c(20)} = 1.07 - 2.53 \times 10^{-3} \cdot \cdot + 1.45 \times 10^{-6} \cdot \cdot^2 \quad (3)$$

$E_{c(20)}$: 20 におけるヤング係数

$E_{c(\cdot)}$: におけるヤング係数

3) コンクリートの圧縮強度時のひずみ⁹⁾

$$\cdot / \cdot_{(20)} = 1.00 - 1.10 \times 10^{-4} \cdot + 5.64 \times 10^{-6} \cdot^2 \quad (4)$$

$\cdot_{(20)}$: 20 における圧縮強度時のひずみ

\cdot : における圧縮強度時のひずみ

コンクリートの - 曲線は、修正Ahmadモデルを用いた⁴⁾。

4) 鉄筋の降伏点¹⁰⁾

高強度鉄筋の高温時における物性データは、ほとんど報告されていない。このため降伏点およびヤング係数については、文献10) に示されるSD490のデータを代用した。

$$s(\cdot) / s_{(20)} = 0.978 + 1.85 \times 10^{-4} \cdot - 2.83 \times 10^{-6} \cdot^2 + 1.69 \times 10^{-9} \cdot^3 \quad (5)$$

$s_{(20)}$: 20 における降伏点

$s(\cdot)$: における降伏点

5) 鉄筋のヤング係数¹⁰⁾

$$E_{s(\cdot)} / E_{s(20)} = 0.988 + 3.42 \times 10^{-4} \cdot - 2.39 \times 10^{-6} \cdot^2 + 1.13 \times 10^{-9} \cdot^3 \quad (6)$$

$E_{s(20)}$: 20 におけるヤング係数

$E_{s(\cdot)}$: におけるヤング係数

鉄筋の - 曲線は、bilinearモデルを用いた。

6) コンクリートの過渡ひずみ¹¹⁾

コンクリートに圧縮荷重が作用した状態で加熱を受ける際に生じる全体ひずみは、熱膨張ひずみと応力ひずみおよびクリープひずみを足し合わせた値よりもかなり大きな収縮を示す。この加熱過程で生じる収縮ひずみは、「過渡ひずみ (Transient strain)」または「遷移ひずみ」と呼ばれている。このひずみを考慮しないと火災加熱を受けるコンクリート系構造物の熱応力・変形性状を精度良く模擬できないといわれている。本解析では、Anderbergら¹¹⁾によって示された次式により過渡ひずみを考慮している。なおクリープひずみは、ここでは考慮していない。

$$\epsilon_{tr} = -2.35 \times \epsilon_{th} \cdot \cdot / \cdot_{c(20)} \quad (7)$$

ϵ_{th} : 熱膨張ひずみ, \cdot : 存在応力度,

$\cdot_{c(20)}$: 20 における圧縮強度

3. 既往の実験を対象とした解析

3.1 熱伝導解析

熱伝導解析値と実験値の比較の一例をFig. 3に示す。解析では、水分の蒸発潜熱を考慮しており、コンクリートの含水率として帯筋の内側にはTable 1⁵⁾に示す中心の含水率、外側には表面の含水率を与えた。解析結果によれば、経過時間200分後に中心部の含水率が0%に達すると急激に温度上昇が生じており、実験値とは大きく異なった。これは、実際の柱部材の加熱では、コンクリート中の水蒸気圧の上昇に伴い、内部の水分移動によって

高含水状態の領域が生じ、中心部の水分が移動しにくくなるものと考えられる。その結果、解析値に比べ水分蒸発が遅くなるものと推察される。

3.2 応力解析

柱部材の崩壊条件は、耐火性能試験における合格判定基準に基づき、軸方向収縮量または軸方向変形速度が次の条件のどちらかを満たす時点と仮定した。なお実験値については、構造耐力上の崩壊までの軸方向変形量を示した。

軸方向収縮量(mm) : h/100以上。

軸方向変形速度(mm/分) : 3h/1000以上。

ここで h : 加熱区間長さ(mm)

本解析では、h=2000mmのため軸方向収縮量20mm、軸方向変形速度6mm/分を崩壊条件とした。

解析値と実験値の比較をFig. 4~Fig. 6に示す。これらの結果からC13N27を除いて、鉄筋コンクリート柱部材の加熱時の変形を概ね推定できることがわかった。C13N27は、解析値と実験値との差が大きい。これは、他の試験体に比べ加熱開始直後に広い範囲で爆裂が生じ、部材の断面欠損により変形が早く進んだためと推察できる。実験写真の結果から、かぶりコンクリートの1/3が加熱初期から欠損していたものと仮定して再度解析すると、実験値と比較的良く整合できることがわかった。こ

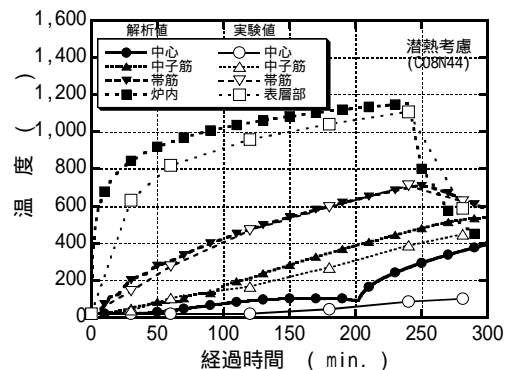


Fig. 3 熱伝導解析による温度の時刻歴
Time History of Concrete Column Temperature
by Heat Transfer Analysis

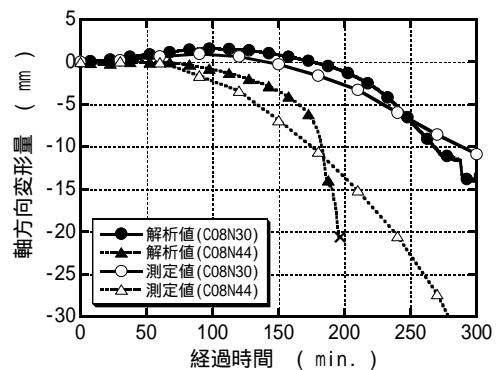


Fig. 4 応力解析による軸方向変形量の時刻歴(CO8)
Time History of Axial Deformation
by Stress Analysis(CO8)

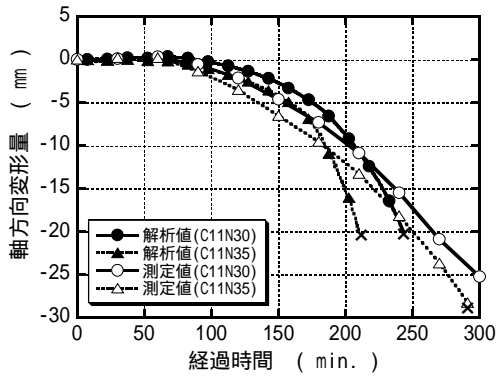


Fig. 5 応力解析による軸方向変形量の時刻歴(C11)
Time History of Axial Deformation
by Stress Analysis(C11)

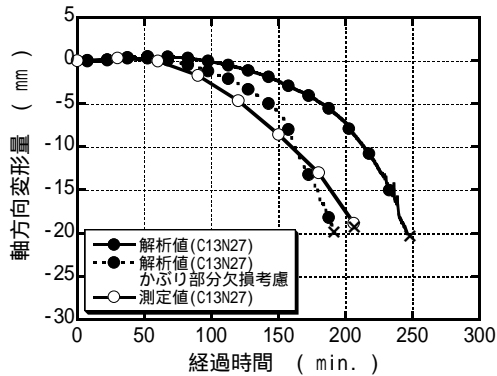


Fig. 6 応力解析による軸方向変形量の時刻歴(C13)
Time History of Axial Deformation
by Stress Analysis(C13)

の結果から、爆裂を考慮することで、柱部材の軸方向変形の推定が他の試験体と同様に可能であることがわかった。

4. シミュレーション

4.1 解析対象

40層程度の実工事に適用した鉄筋コンクリート柱部材（断面寸法：900×900mm，加熱区間：3000mmに仮定）の火災時の変形性状について検討した。柱部材の断面図をFig. 7に示す。この部材は設計上最も鉄筋量が少なく、 $F_c 80\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを使用している。解析モデルは、柱部材断面の対称性を利用してFig. 8に示す1/4断面とした。熱定数は、Table 4から算定される値を用いた。また常温時における各材料定数をTable 5に示す。コンクリート中の含水率は、既往の実験結果^{5),9)}を参考に柱部材内部5%と仮定した。加熱温度は、IS 0 834 に定める標準加熱温度曲線に従い、(1)式で表される温度を与えた。加熱時間は3時間加熱とした。また冷却時の炉内温度は、加熱速度と同一速度で冷却させ、次の(8)式で表す温度を与えた。

$$T = 1110 - 345 \log_{10} \{8(t-180)+1\} \quad (180 < t < 300) \quad (8)$$

T：加熱温度()， t：経過時間(分)

柱部材の崩壊条件は、前述と同様(3.2参照)とし、

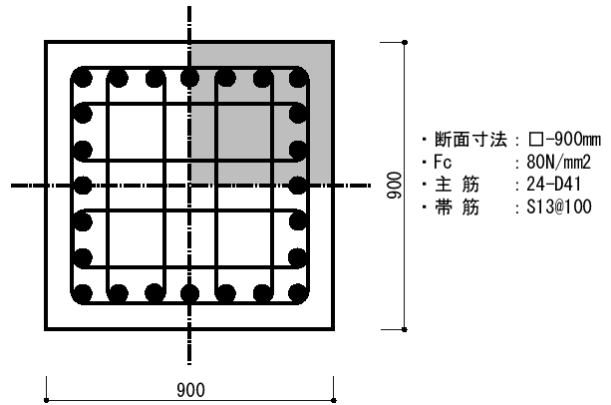
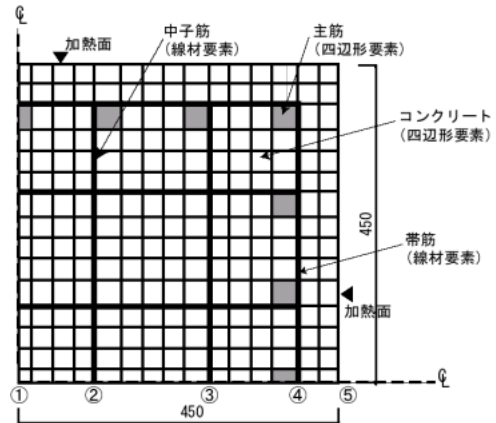


Fig. 7 柱部材の断面図
Section of Concrete Column Member



解析モデル (1/4断面)

Fig. 8 解析モデル
Analysis Model

Table 5 材料定数および算定式 (常温時)
Material Constant and Calculation formula

種類	項目	材料定数および算定式
コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	$c_B : 60, 80, 100, 120$
	ヤング係数 (kN/mm ²)	$E_c = 33.5 \times (/ 2.4)^2 \times (c_B / 60)^{1/3}$ (: 2.4)
	ポアソン比	$= 0.17$
鉄筋	降伏点 (N/mm ²)	主筋：490 帯筋：785
	ヤング係数 (kN/mm ²)	主筋：205 帯筋：208
	ポアソン比	$= 0.30$

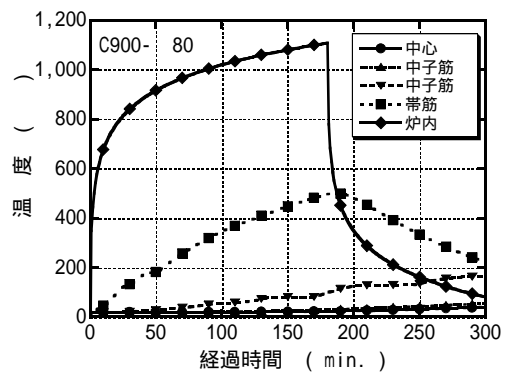


Fig. 9 熱伝導解析による温度の時刻歴
Time History of Concrete Column Temperature
by Heat Transfer Analysis

軸方向変形30mm, 軸方向変形速度9mm/分とした。建物の形状, 高さによってコンクリート強度, 鉄筋強度や本数が異なるが, ここでは, 配筋状態は変えず, コンクリート強度, 軸力, 部材の断面寸法を変えてシミュレーションした。なお設計条件に近い実強度(c_p)80N/mm², 軸力比0.3の場合を基準値として検討した。 c_p は, 60~120 N/mm², 軸力比は, 0.2~0.5の範囲で検討し, 断面寸法は, 900×900mmと1000×1000mmを比較した。図中の表示は, 部材寸法 - コンクリート強度 - 軸力比の順 (表示例 C900- 80-N 0.3) に記した。

4.2 軸力比の影響

c_p 80N/mm², 軸力比を0.2~0.5 (全断面に対し軸力として12.96MN~32.4MN) とした場合の熱伝導解析および応力解析の結果をそれぞれFig. 9, Fig. 10に示す。Fig. 3の既往実験の結果に比べて柱部材中心部の温度上昇が低いことがわかる。これは, 部材断面が既往実験の400mm角に比べ, 900mm角と大きいことと, 加熱時間が4時間から3時間へと短いことによる。またFig. 9より中子筋の部分までは, 受熱温度として200 未満であり, 既往の材料実験結果⁸⁾からも強度劣化がほとんどないことが推察できる。またこの部材では, 軸力比の増加に伴い変形量は収縮側に大きくなるが, 軸力比として0.5を与えた場合でも崩壊に至っておらず, 十分に3時間の耐火性能を有することが予想できる。

c_p 60N/mm²を超える高強度コンクリートでは, 含水状態, 強度レベル等の違いにより加熱開始10~30分後からかぶりコンクリートの爆裂が生じる場合が多い。既往の文献¹²⁾では, かぶりコンクリートの半分以上が爆裂する報告も示されている。そこで加熱開始前からかぶりコンクリートの半分(20mm)が欠損部分と仮定して, 熱伝導解析および応力解析を行った。断面の欠損面積は, 約8.7%になる。また断面には, 欠損のない状態の軸力を与えた。応力解析結果をFig. 11に示す。応力解析結果によれば, Fig. 10に比べて, 収縮側への変形量が大きくなっているものの, 3時間加熱後の収縮量は小さく, 崩壊しないことが予想できる。しかし, 解析の結果によれば, 軸力比0.4以上において冷却時に崩壊の危険性を示している。冷却時の変形性状については, 冷却速度により大きく左右されることが予想できるが, 比較できる十分なデータがないので, 評価方法も含め今後の課題の一つと考える。

4.3 コンクリート強度の影響

軸力を一定 (全断面に対し19.44MN), コンクリート強度を, c_p 60N/mm²~120N/mm²まで変えた場合の応力解析結果をFig. 12に示す。コンクリート強度が高いほど収縮側への変形量が小さくなることわかる。これは, 軸力を一定としているので, コンクリート強度が高いほど軸力比が小さくなることと, コンクリートの残存強度も高くなるため, 収縮側への変形が小さくなるものと推察

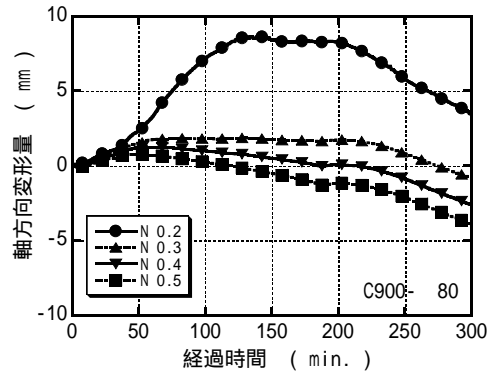


Fig. 10 軸力比の影響(C900- 80)
Influence of Axial Force Ratio(C900- 80)

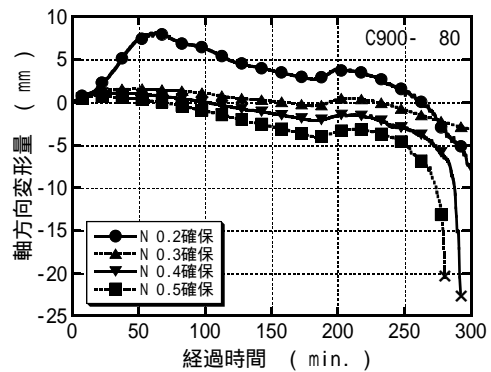


Fig. 11 軸力比の影響(かぶり厚さの欠損)
Influence of Axial Force Ratio
(Lack of Cover Reinforcement)

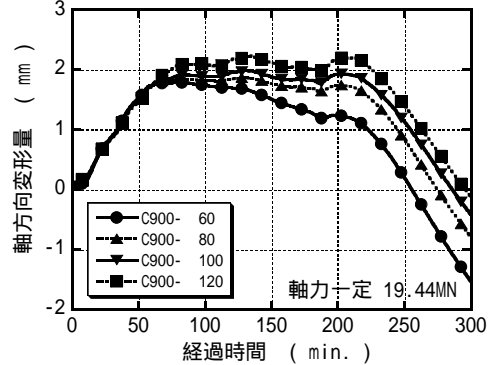


Fig. 12 コンクリート強度の影響(軸力一定)
Influence of Concrete Strength
(Constant Axial Force)

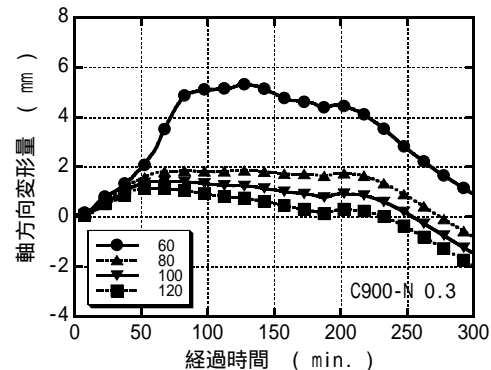


Fig. 13 コンクリート強度の影響(軸力比一定)
Influence of Concrete Strength
(Constant Axial Force Ratio)

できる。またこの部材に、 $60\text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリートを使用した場合でも、3時間の耐火性能を有する可能性が高いことが予想できる。

また軸力比を0.3一定として、 $60\text{N}/\text{mm}^2 \sim 120\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲で変えた場合（軸力 $14.58\text{MN} \sim 29.16\text{MN}$ ）の応力解析結果をFig. 13に示す。軸力比を一定とした場合は、コンクリート強度が高いほど火災時の伸び出しが小さい。これは鉄筋の配筋が同一であるため、コンクリート強度が高いほど主筋の負担が小さくなるためと推察できる。

4.4 部材寸法の影響

主筋および帯筋の配筋は変えずに、部材断面を $1000 \times 1000\text{mm}$ に変えた場合（ $80\text{N}/\text{mm}^2$ ，軸力比0.3）の比較をFig. 14に示す。コンクリート強度および軸力比を一定とした場合は、部材断面の大きい方が加熱時の変形量を小さくできることがわかる。これは部材断面の大きい方が、火災時の部材平均温度が低く、熱膨張ひずみも小さくなり、部材の変形が小さくなるものと推察できる。

以上のように、火災時における変形状について、軸力比、コンクリート強度、部材寸法をパラメータとしたシミュレーション解析により、比較検討できる。

5. まとめ

高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の火災時の軸方向変形状について解析的に検討を行い、以下のことがわかった。

1) コンクリート、鉄筋の温度依存性を考慮したモデルを用い、非線形有限要素解析により鉄筋コンクリート柱部材の耐火試験における軸方向変形挙動を概ね再現できる。

2) 本解析は、軸力比、コンクリート強度、柱部材の断面寸法をパラメータとして、火災時の鉄筋コンクリート柱部材の軸方向変形挙動を推定できる。

今後は、爆裂の時期や程度を考慮した評価式の提案、高温時における材料の力学性状の見直しを行い、解析精度の向上を目指す予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたりご指導を頂いた名古屋工業大学大学院都市循環システム工学専攻 河辺伸二助教授に深く感謝いたします。

参考文献

1) 水野敬三，他：高強度($F_c=1000\text{kgf}/\text{cm}^2$)RC柱の耐火性能に関する研究（その1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），A-2，pp.73-78，1995.8
 2) 茂木 武，他：鉄筋コンクリート柱の耐火実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），A-2，pp.85-

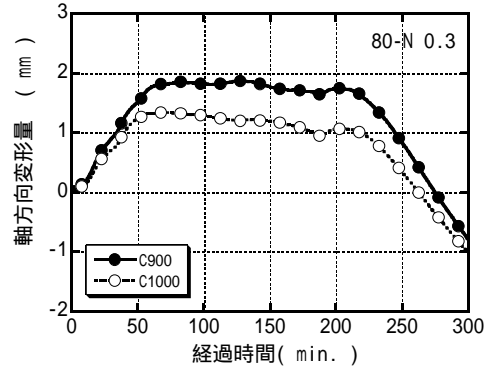


Fig. 14 部材寸法の影響(軸力比一定)
Influence of Member Size (Constant Axial Force Ratio)

86，2000.9
 3) 長沼一洋：平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル，日本建築学会構造系論文報告集，第421号，pp.39～48，1991.3
 4) 長沼一洋：非線形ポアソン効果を考慮した三軸応力下のコンクリートの直交異方性構成モデル，日本建築学会構造系論文報告集，第485号，pp.109～116，1996.7
 5) 松戸正士，他：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究（その1～2），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），A-2，pp.21-24，2002.8
 6) Testing Method in the Standard of ISO 834, BS 476: part20～24
 7) Commission of European Communities: Eurocode No.4, Design of Composite Structures part10, Structural Fire Design, 1990.4
 8) 一瀬賢一，河辺伸二：高温加熱を受けた高強度コンクリートの圧縮強度の推定，日本建築学会構造系論文集，第561号，pp.17～21，2002.11
 9) 一瀬賢一，長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第541号，pp.23～30，2001.3
 10) 長尾覚博，江戸宏彰，丹羽博則，上杉英樹：鉄筋コンクリート用棒鋼の高温引張試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），A-2，pp.75-76，2000.9
 11) Anderberg, Y. and Thelandersson, S.: Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures 2. Experimental Investigation and Material Behavior Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Sweden, 1976
 12) 長尾覚博，中根 淳：高強度コンクリートの爆裂制御に関する検討結果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1，pp.631-636，1997.7