

論文 火災時における鉄筋コンクリート柱の軸変形挙動に及ぼすコンクリートの過渡ひずみの影響

豊田 康二^{*1}・平島 岳夫^{*2}・菊田 繁美^{*3}

要旨: 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の荷重加熱実験に関する既往研究を対象に、同一材料を用いた高温素材実験より得られたコンクリートの高温ひずみ構成則を用いて、熱応力変形解析を行った。解析の結果、高温素材実験に基づいた 100℃以降で過渡ひずみが生じるモデルを用いると、柱の軸方向変形挙動を精度良く追跡できることを示した。また、過渡ひずみ有りの解析でコアコンクリート部分の応力負担が増加することを示し、コンクリートの過渡ひずみが柱の断面内応力度分布にも影響を及ぼすことを示した。

キーワード: 火災, 鉄筋コンクリート柱, 軸変形挙動, 熱応力変形解析, 過渡ひずみ, 応力度分布

1. はじめに

コンクリート構造物の耐火性を検討する上で、熱応力変形解析は有用な手段である。既報¹⁾では、高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の荷重加熱実験²⁾を対象に熱応力変形解析を行い、コンクリートの過渡ひずみを考慮することにより、鉄筋コンクリート柱の高温圧縮性状を概ね評価できることを示した。しかし、コンクリートのひずみモデルおよび応力-ひずみ関係は他者の研究を引用したものであり、異なるコンクリートの素材実験より得られた結果を準用したものであった。

わが国においては、鉄筋コンクリート部材の耐火性について、同一素材より得られた高温データを適用して解析的に検討した研究は殆どない。そこで筆者らは、使用材料及び調合が文献2)と同一であるコンクリートを用いた高温素材実験を行い、データを蓄積してきた^{3),4),5)}。

本報では、新たな実験データを得て再整理したひずみモデルを熱応力変形解析に適用し、柱の軸方向変形挙動を追跡できるかを確認し、軸方向変形挙動および断面内応力度分布に及ぼすコンクリートの過渡ひずみの影響を検討した結果を報告する。

2. 鉄筋コンクリート柱の荷重加熱実験の数値解析

2.1 解析対象とした実験の概要²⁾

既報¹⁾と同様に設計基準強度が 80N/mm²~100N/mm²の高強度コンクリートを用いた断面寸法 400mm×400mmの鉄筋コンクリート柱の荷重加熱実験5体を対象とした。表-1に本解析で対象とした実験の概要を示す。試験体の全長は3.6mで、加熱区間の長さは2.0mである。鉄筋の最小かぶり厚さは40mmであり、主筋にはUSD685(12-D19)、フープ筋にはSBPD1275(U9.0@80)の高強度鉄筋を用いている。コンクリートは、使用材料が同じ

で水結合材比が異なる3種類である。コンクリート強度に対する全断面をコンクリートとした場合の荷重圧縮応力度の比を軸力比とし、軸力比と水結合材比を実験パラメータとしている。中心圧縮荷重下でISO標準加熱温度曲線に従い4時間加熱する、荷重加熱実験である。

表-1 本解析で対象とした実験条件²⁾

試験体名	コンクリート水結合材比	コンクリート強度 ^{※1)} (N/mm ²)	軸力(kN)	軸力比	爆裂深さ ^{※2)}	耐火時間
C13N27	0.18	126.5	5443	0.27	15mm	206分
C11N30	0.24	113.4	5443	0.30	5mm	240分以上
C11N35	0.24	113.4	6350	0.35	5mm	240分以上
C08N30	0.35	77.3	3710	0.30	0mm	240分以上
C08N44	0.35	77.3	5443	0.44	5mm	240分以上

※1: 同断面の模擬試験体コア抜き強度, 材齢約8ヶ月

※2: 実験後の写真から平均爆裂深さを推定した。

2.2 断面内部温度解析の概要

熱応力変形解析に用いる断面内部温度の時刻歴を得るために、材軸方向の温度分布は等しいものとし、二次元有限要素法による熱伝導解析を行なった。部材断面内温度分布を計算した。温度解析に用いた解析モデルの一例を図-1に示す。柱断面を、主筋位置に合わせて四角形要素に分割した。要素数は合計324とし、図-1に示す黒塗りの部分に主筋の要素を配置した。フープ筋における熱移動の影響は無視した。本実験で爆裂が生じたものについては、実験後の写真から爆裂深さを推定し、断面表面から一律にかぶり厚さを低減することとした。加熱条件は、実験と同様ISO834の標準加熱温度曲線を用いた4時間加熱とし、断面内温度分布は一秒間隔で計算した。コンクリートとの熱物性値にはEurocode2⁶⁾、鉄筋の熱物性値にはEurocode3⁷⁾に示された温度依存モデルを用いた。コンクリートの重量含水率は5%とした。

*1 (財)日本建築総合試験所 修士(工学) (正会員)

*2 千葉大学大学院工学研究科 准教授 博士(工学)

*3 戸田建設(株) 技術研究所主管 工修 (正会員)

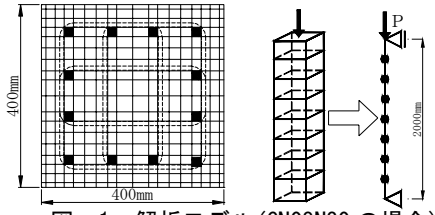


図-1 解析モデル(CN08N30の場合)

2.3 温度解析結果と実験結果の比較

60分毎の実験結果と解析結果の比較を図-2(a)~(e)に示す。加熱表面からの距離60mmが主筋位置である。主筋位置の温度はいずれも実験値を概ね追跡している。中心部(加熱表面からの距離200mm)の温度も、C13N27を除き、概ね実験値と一致している。C13N27は爆裂が最も激しかった試験体であり、一部フープ筋が露出していた。フープ筋の熱橋により中心部が高温になったと考えられ、フープ筋を無視した本解析では、C13N27実験に比べて中心部の温度を低く評価している。

2.4 熱応力変形解析の概要

熱応力変形解析には、増分計算の過程において部材の傾斜と長さを修正することによって形状非線形性を考慮した、線材要素を用いた直接剛性法に基づく計算手法を用いた^{8),9)}。部材の断面を要素分割し、その要素内では温度・応力・ひずみを均一とし、材料非線形を取り入れている。熱応力変形解析は、加熱区間2mについて行なった。図-1に示すように、材軸方向には8つの小部材に分割した。部材の入力データには、前述した熱伝導解析結果を用いた。従って、小部材における要素の分割は熱伝導解析における要素分割と同じモデルとした。ただし、鉄筋部分における要素の断面積は、D19鉄筋の公称断面積に一致するように設定した。爆裂が生じた試験体については、加熱開始時から表-1に示した爆裂深さ分断面欠損しているとした。本解析においては、熱膨張ひずみ、応力ひずみ、クリープひずみを考慮し、コンクリート要素には過渡ひずみを考慮した。コンクリートおよび鉄筋の全体ひずみを、式(1)および式(2)に示す。

$${}_c \varepsilon_{tot} = {}_c \varepsilon_{th} + {}_c \varepsilon_{\sigma} + {}_c \varepsilon_{cr} + {}_c \varepsilon_{tr} \quad (1)$$

$${}_s \varepsilon_{tot} = {}_s \varepsilon_{th} + {}_s \varepsilon_{\sigma} + {}_s \varepsilon_{cr} \quad (2)$$

${}_c \varepsilon_{tot}$, ${}_s \varepsilon_{tot}$: コンクリート, 鉄筋の全体ひずみ

${}_c \varepsilon_{th}$, ${}_s \varepsilon_{th}$: コンクリート, 鉄筋の熱膨張ひずみ

${}_c \varepsilon_{\sigma}$, ${}_s \varepsilon_{\sigma}$: コンクリート, 鉄筋の応力ひずみ

${}_c \varepsilon_{cr}$, ${}_s \varepsilon_{cr}$: コンクリート, 鉄筋のクリープひずみ

${}_c \varepsilon_{tr}$: コンクリートの過渡ひずみ

鉄筋の取扱いは既報¹⁾と同様とした。コンクリートの応力-ひずみ曲線ならびに各ひずみは、素材実験結果^{3), 4), 5)}を近似した式で与えた。なお、実験では700℃までのデータしか得ていないが、解析においては1200℃位までの値を当てる必要があるため、700℃を超える値につい

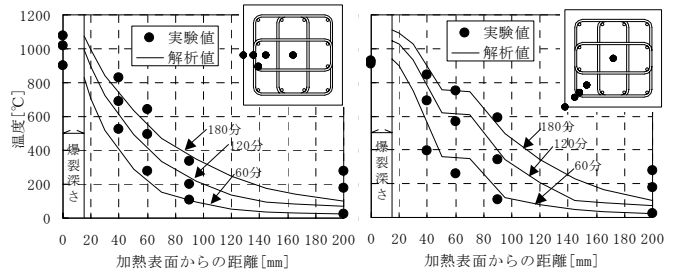


図-2(a) 断面内温度分布 (C13N27)

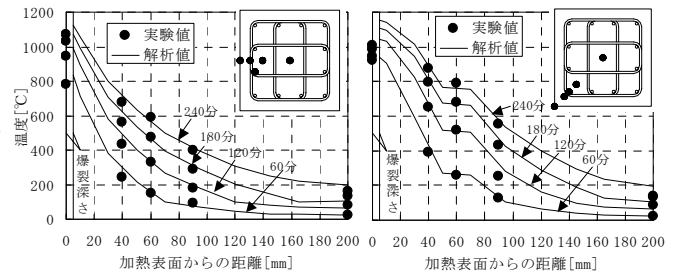


図-2(b) 断面内温度分布 (C11N30)

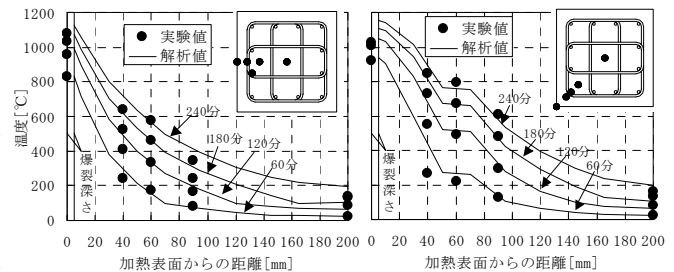


図-2(c) 断面内温度分布 (C11N35)

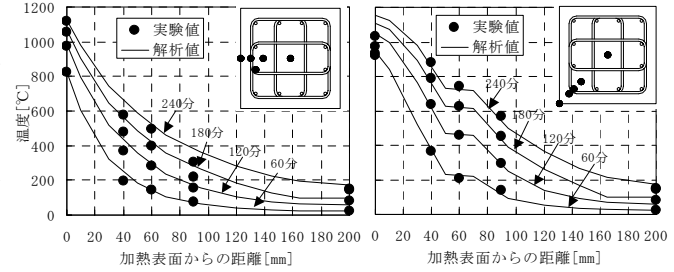


図-2(d) 断面内温度分布 (C08N30)

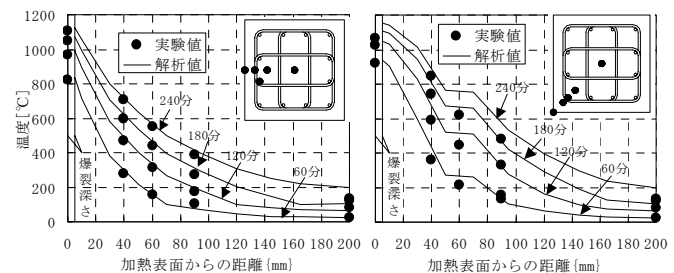


図-2(e) 断面内温度分布 (C08N44)

ては Eurocode2⁶⁾を参考にして設定した。表-2に各ひずみの数式モデルを示す。

(1) 熱膨張ひずみ

コンクリートの熱膨張ひずみは、式(3)に示すように、素材実験結果を正確に再現するように、6つの温度区間に分けて、温度の関数として与えた。鉄筋の熱膨張ひずみは、式(4)に示す Eurocode式⁷⁾を用いた。

(2) 応力-ひずみ関係

コンクリートの応力-ひずみ関係は、Eurocodeでも採用されている Popovics 式を参照した式(5)を用いた。式(5)の右辺に示す各要因の値を表-3に示す。また水結合材比 0.24 のコンクリート素材実験³⁾との対応を図-3に示す。鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-4に示す式(6)¹⁰⁾を用いた。

表-2 コンクリートと鉄筋のひずみモデル

熱膨張ひずみ	コンクリート	$c \varepsilon_{th} (\times 10^{-6}) = \begin{cases} 11.5(T-20) & (20^\circ C \leq T \leq 100^\circ C) \\ 4.1(T-100) + 920 & (100^\circ C < T \leq 300^\circ C) \\ 0.017T^2 - 2.0T + 810 & (300^\circ C < T \leq 500^\circ C) \\ 0.15T^2 - 138T + 35560 & (500^\circ C < T \leq 600^\circ C) \\ -0.305T^2 + 425T - 138440 & (600^\circ C < T \leq 700^\circ C) \\ 9610 & (700^\circ C < T) \end{cases} \quad (3)$
	鉄筋	$s \varepsilon_{th} = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-5} T + 0.4 \times 10^{-8} T^2 - 2.416 \times 10^{-4} & (20^\circ C \leq T \leq 750^\circ C) \\ 1.1 \times 10^{-2} & (750^\circ C < T \leq 860^\circ C) \\ 2 \times 10^{-5} T - 6.2 \times 10^{-3} & (860^\circ C < T \leq 1200^\circ C) \end{cases} \quad (4)^7$
応力ひずみ	コンクリート	$c \sigma = c \sigma_{u,T} \cdot \frac{c \varepsilon_{\sigma}}{c \varepsilon_{cl}} \cdot \frac{n}{n-1 + \left(\frac{c \varepsilon_{\sigma}}{c \varepsilon_{cl}} \right)^n} \quad (5)$ <p> $c \sigma$: 応力[N/mm²] $c \sigma_{u,T}$: 温度 T °Cにおける圧縮強度[N/mm²] $c \varepsilon_{cl}$: 温度 T °Cにおける圧縮強度時ひずみ n : 応力-ひずみ曲線の曲がり具合を決定する係数 </p>
	鉄筋	$s \varepsilon_{\sigma} = \frac{s \sigma}{E_T} + \left(\frac{s \sigma}{\sigma_k} \right)^k \quad (6)^{10}$ <p> $s \sigma$: 応力[N/mm²] E_T : 温度 T °Cにおける弾性係数 σ_k, k : 塑性ひずみを定める係数 </p>
クリープひずみ	コンクリート	$c \varepsilon_{cr} = a \cdot \left(\frac{t}{180} \right)^b \quad (7)$ <p> a : 180 分時のクリープひずみ b : 係数 t : 時間[分] </p>
	鉄筋	$s \varepsilon_{cr} = 10^A \cdot s \sigma^B \cdot t^n \quad (8)^{11}$ <p> A, B : 定数 $s \sigma$: 応力[kg/mm²] t : 時間[分] n : 応力の関数 </p>
過渡ひずみ	記号	過渡ひずみモデル
	k2=5.56	$\begin{cases} c \varepsilon_{ir} = 0 & (T \leq 100^\circ C) \\ \Delta_c \varepsilon_{ir} = -5.56 \cdot \frac{c \sigma}{c \sigma_{u,20^\circ C}} \cdot \Delta_c \varepsilon_{th} & (100^\circ C < T) \end{cases} \quad (10)$
	k2=2.35	$c \varepsilon_{ir} = -2.35 \cdot \frac{c \sigma}{c \sigma_{u,20^\circ C}} \cdot c \varepsilon_{th} \quad (11)^{12}$
	k2=0.00	$c \varepsilon_{ir} = 0.00 \quad (12)$ <p> $\Delta_c \varepsilon_{ir}$: 過渡ひずみ増分 $c \sigma$: 応力[N/mm²] $c \sigma_{u,20^\circ C}$: 常温圧縮強度[N/mm²] $\Delta_c \varepsilon_{th}$: 100°C以降における熱膨張ひずみ増分 </p>

(3) クリープひずみ

コンクリートのクリープひずみは、素材実験結果⁵⁾を近似した式(7)にひずみ硬化則を適用して用いた。式(7)に用いる a, b の値を表-4に示す。また水結合材比 0.24 のコンクリート素材実験との対応を図-5に示す。鉄筋のクリープひずみは、式(8)¹¹⁾を用いた。

表-3 コンクリートの高温時特性値

温度 T [°C]	$c \sigma_{u,T} / c \sigma_{u,20^\circ C}$	$c \varepsilon_{cl} (\times 10^{-6})$	n
20	1.000	3548	10
100	0.952	3140	8
200	0.905	3890	8
300	0.735	5713	8
400	0.554	5583	8
500	0.405	6417	6
600	0.313	8462	4
700	0.306	9763	3
800	0.150	10000	3
900	0.080	10900	3
1000	0.040	11800	3
1100	0.010	12800	3
1200	0.000	13700	3

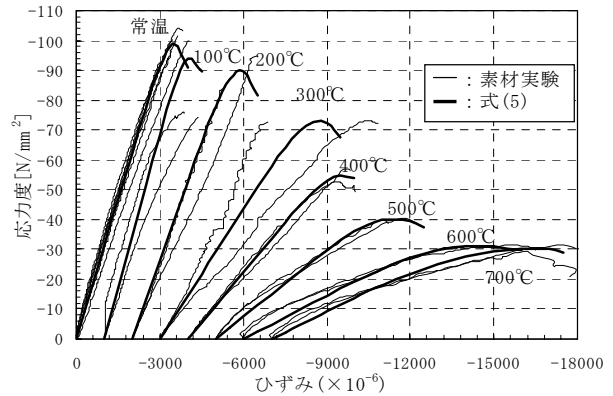


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係(実験値³⁾との対応)

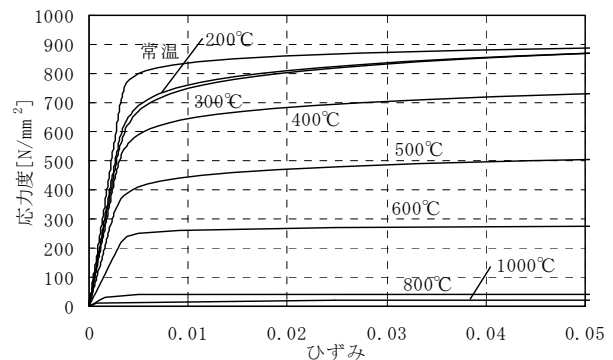


図-4 鉄筋の応力-ひずみ関係¹⁰⁾

表-4 クリープひずみに用いる特性値

温度 [°C]	応力レベル [*] ($c \sigma / c \sigma_{u,20^\circ C}$)				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
20	115	98	140	198	85
100	0.47	0.34	0.5	0.3	0.34
200	197	320	369	474	604
300	0.55	0.5	0.43	0.7	0.57
400	166	255	363	523	622
500	0.7	0.47	0.69	0.54	0.52
600	260	484	602	878	1123
700	0.61	0.45	0.48	0.5	0.41
800	369	736	1129	1451	2420
900	0.5	0.47	0.47	0.39	0.36
1000	539	1029	1725	2394	2992
1100	0.45	0.38	0.36	0.46	0.46
1200	687	1556	2608	4017	5021
1300	0.44	0.32	0.36	0.46	0.46
1400	1503	3818	3996	5328	6661
1500	0.55	0.32	0.46	0.46	0.46

* : 常温時圧縮強度に対する載荷応力の比

(4) 過渡ひずみ

コンクリートの過渡ひずみは、全体ひずみから熱膨張ひずみ、応力ひずみ、クリープひずみを差し引く式(9)を用いて算出した¹²⁾。全体ひずみは文献(13)に示す加熱速度1℃/分の実験結果を用いた。

$${}_c\varepsilon_{tr} = {}_c\varepsilon_{tot} - {}_c\varepsilon_{th} - {}_c\varepsilon_{\sigma} - {}_c\varepsilon_{cr} \quad (9)$$

式(9)を用いて算出した過渡ひずみを縦軸に、100℃以降の熱膨張ひずみ増分と応力レベルの積を横軸としたグラフを図-6に示す。過渡ひずみは100℃未満では殆ど発生せず、100℃以降は概ね応力レベルに比例し、熱膨張ひずみ増分と500℃程度まで線形関係にある。Anderbergらは、過渡ひずみの算定において、応力レベルと熱膨張ひずみの積に比例するモデルを提案している¹²⁾。本解析では、100℃までは過渡ひずみが生じないように修正し、100℃以降は応力レベルと熱膨張ひずみ増分に比例する式(10)を用いた。過渡ひずみ係数 k_2 は、各応力レベルの500℃における3点の値を直線回帰して $k_2=5.56$ を決定した。全体ひずみの実験値と式(10)を用いた計算値の比較を図-7に示す。

本研究では、過渡ひずみが鉄筋コンクリート柱の軸方向変形挙動に及ぼす影響を検討するため、式(10)に加え、式(11)に示す既報¹⁾に用いたAnderberg式($k_2=2.35$)と式(12)に示す過渡ひずみなしの3モデルを用いた。

2.5 熱応力変形解析の結果と実験結果の比較

鉄筋コンクリート柱の載荷加熱実験より得られた軸方向変形量の結果と解析結果の比較を図-8(a)~(e)に示す。ここで軸方向収縮量とは図-1に示す柱頭の鉛直変化である。すべての試験体について、 $k_2=0.00$ (過渡ひずみなし)モデルは、実験に対して膨張方向へ変形を予測し、実験と異なる挙動となった。例えば、図-8(a)の180分後において比較すると、実験値と14mm(平均ひずみ0.7%)位の差が見られる。 $k_2=5.56$ の過渡ひずみモデルは最も精度良く実験の軸方向変形挙動を追跡している。C11N30及びC08N30の試験体の軸方向変形挙動を2mm(平均ひずみ0.1%)程度の差で追跡でき、Anderberg式($k_2=2.35$)より精度良く追跡できている。加熱開始120分位までは100℃まえ過渡ひずみをゼロと修正したことで、それ以降の収縮変形の増加については過渡ひずみ係数を大きめに修正したことで、Anderberg式を用いた解析より追跡できたと考えられる。図-8(a)に示す爆裂の激しかったC13N27については、爆裂を考慮しない場合の結果も示す。爆裂による断面欠損を考慮しないと、軸方向変形挙動が実験と大きく異なることがわかる。高軸力比のC11N35及びC08N44の試験体については、実験より早い時間で収束不可能となった。この理由として、解析に組み込んでいないフープ筋の拘束効果(高温時強度の上昇^{例えば14)}および強度時ひずみ後にお

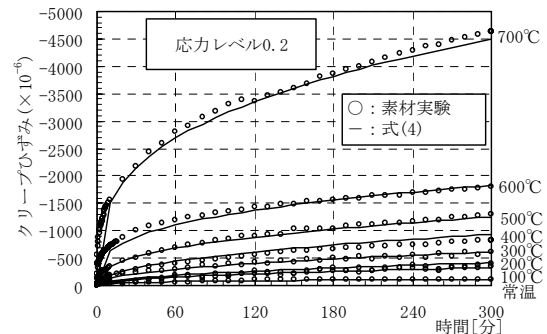


図-5 クリープひずみ(素材実験との対応)

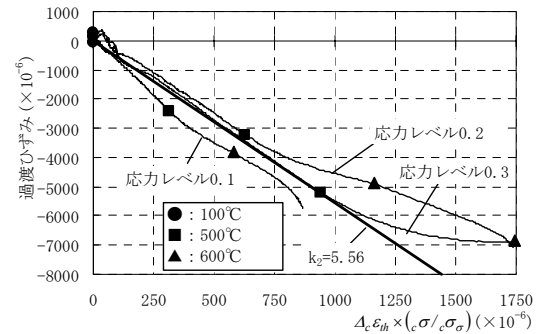


図-6 過渡ひずみ- $\Delta{}_c\varepsilon_{th} \times$ 応力レベル関係

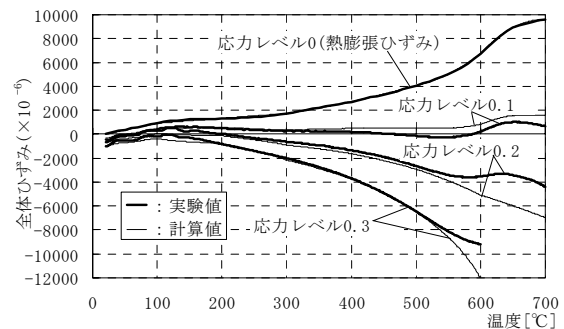


図-7 全体ひずみ-温度関係(実験値と計算値の比較)

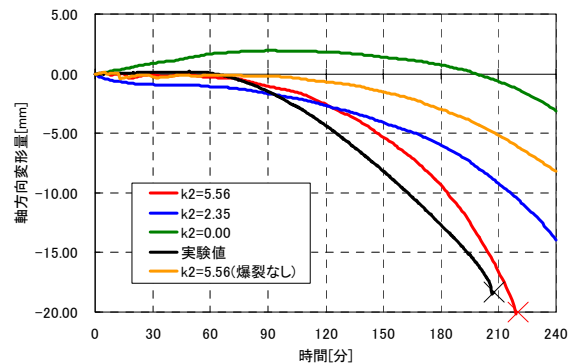


図-8(a) 軸方向変形量 (C13N27)

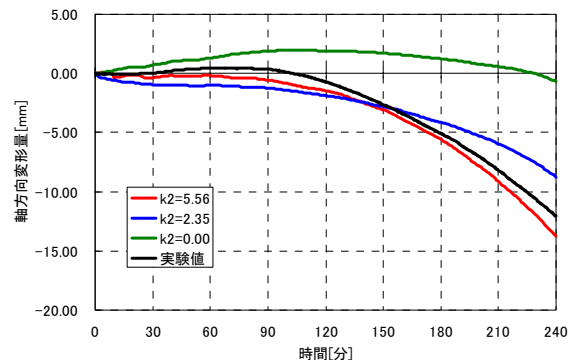


図-8(b) 軸方向変形量 (C11N30)

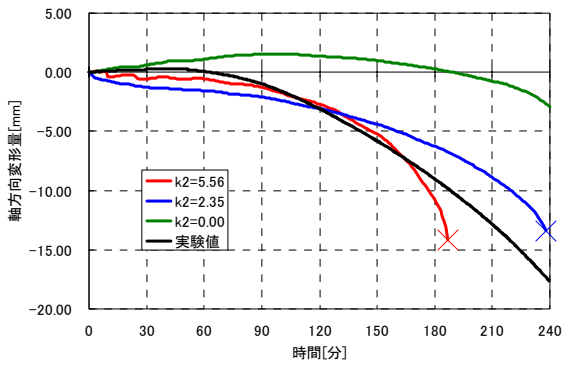


図-8(c) 軸方向変形量 (C11N35)

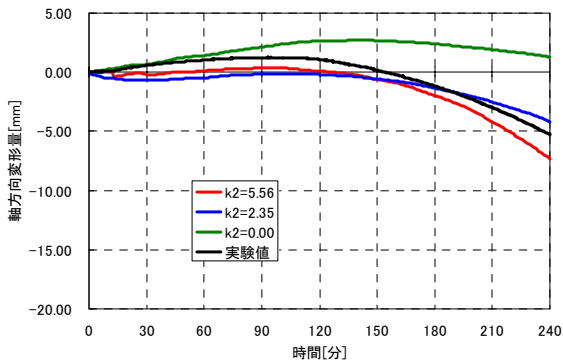


図-8(d) 軸方向変形 (C08N30)

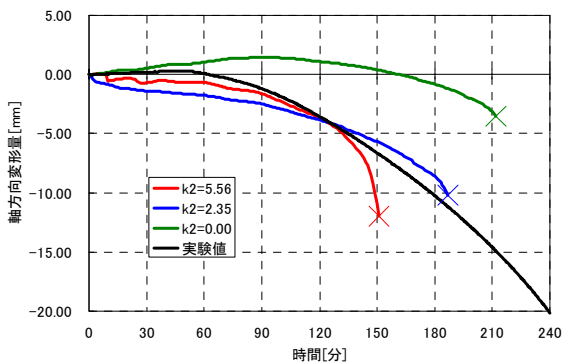


図-8(e) 軸方向変形 (C08N44)

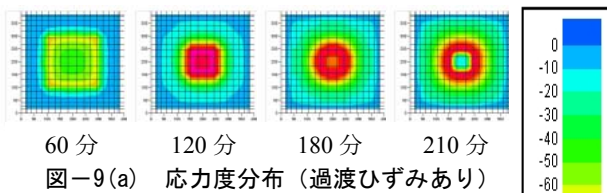


図-9(a) 応力度分布 (過渡ひずみあり)

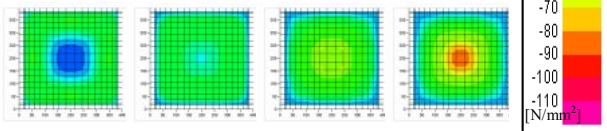


図-9(b) 応力度分布 (過渡ひずみなし)

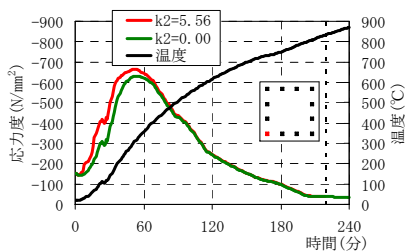


図-10(a) 鉄筋

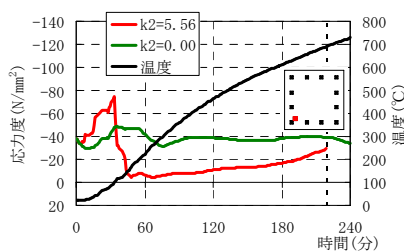


図-10(b) 鉄筋近傍コンクリート

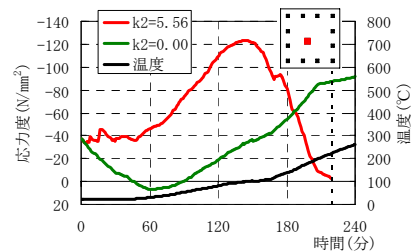


図-10(c) コア中央部コンクリート

る応力低下の緩和) が実験で影響したと考えられる。

3. 断面内応力度分布に及ぼす過渡ひずみの影響

断面内応力度分布に及ぼす過渡ひずみの影響を把握するため、C13N27の試験体を対象に、 $k_2=5.56$ (過渡ひずみ) モデルと $k_2=0.00$ (過渡ひずみなし) モデルを用いた熱応力変形解析より得られる、コンクリート要素の応力度コンター図を図-9(a), (b)に示す。図-9においては、鉄筋部分を取り除き、鉄筋部分は周辺コンクリート応力度の平均として図示している。過渡ひずみモデルは、過渡ひずみなしモデルに比べ、かぶりコンクリート部分の応力負担が小さく、コアコンクリート部分の応力負担が大きい。また両者とも、加熱時間の増加に伴い、かぶりコンクリート部分の応力負担が小さくなり、コアコンクリート部分の応力負担が増加している。高温域のかぶりコンクリート部分は、過渡ひずみが生じて、全体ひずみ中に占める応力ひずみ成分が小さくなり、応力負担が小さくなる。一方、低温域のコアコンクリート部分は、負担応力が増加して応力ひずみ成分が増加し、全体ひずみが収縮側に増加して軸方向変形量が収縮側へ増加する。過渡ひずみモデルでは、収束不可能となる少し前の210分時点で、中心部におけるコンクリート部分の応力が小さくなっているのは、この部分の要素が強度時ひずみを超えたためである。図-10(a)~(c)に鉄筋、鉄筋近傍コンクリート、コア中央部コンクリート要素の応力度時刻歴を示す。鉄筋要素の応力度時刻歴は、50分位まで加熱時間に伴い応力が増加するが、60分位から緩和する。60分(鉄筋温度400°C)以降において、過渡ひずみの有無によらず同じ値を示す理由は、両者とも降伏領域に入っており、温度上昇に伴う強度低下により、鉄筋の応力度が決まるためである。鉄筋近傍コンクリート要素では、過渡ひずみが発生する30分後(100°C以降)から急激に応力緩和しており、過渡ひずみなしに比べて応力負担が小さい。コア中央部コンクリート要素では、過渡ひずみなしモデルにおいて60分では、断面温度差による引張応力度が発生している。過渡ひずみモデルでは引張応力度の発生は見られず、圧縮強度に達する150分まで応力上昇して、その後はひずみの増加に伴い急激に応力が低下する。過渡ひずみを考慮するとコア部分のコンクリートの応力負担が大きくなり、より早い段階にコ

ンクリート要素が圧縮強度に達して、その後により早く崩壊する結果となった。

5. まとめ

鉄筋コンクリート柱の載荷加熱実験を対象に、断面内部温度解析より得られた温度時刻歴を用いて、柱部材と同一材料・調合のコンクリート素材実験より得られたひずみモデルを適用した熱応力変形解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 火災加熱を受ける鉄筋コンクリート柱の軸方向変形挙動を解析で追跡するには、コンクリートの過渡ひずみを考慮する必要がある。素材実験より得た 100°C 以降で過渡ひずみが生じるモデル ($k_2 = 5.56$) は、Anderberg らのモデル ($k_2 = 2.35$) よりも、柱の軸変形に関する実験結果をより精度良く追跡できた。
- 2) 過渡ひずみを考慮した解析では、高温域のかぶりコンクリート部分では応力度が小さくなり、低温域のコアコンクリート部分では負担する応力度が増加する。一方、鉄筋の応力度は、鉄筋温度 400°C 位に至るまでに降伏域まで応力上昇し、その後は温度上昇に伴う強度低下により存在応力度が決まるため、過渡ひずみの有無による差は小さい。
- 3) 熱応力変形解析においては、コアコンクリート部分の応力ひずみが圧縮強度時ひずみを超える領域が増加することにより、収束不可能となる。したがって、過渡ひずみ有りの解析では、コア部分の応力負担が大きくなるため、より早く崩壊する結果となる。
火災加熱を受ける鉄筋コンクリート柱の崩壊時間をさらに精度よく解析するには、フープ筋によるコンクリートのコンファインド効果を組み込んだモデルの構築と、その実験データの蓄積が必要と考える。

謝辞

本研究は、熊谷組・佐藤工業・戸田建設・西松建設・ハザマ・フジタ・前田建設工業の7社による共同研究「高強度コンクリート構造の耐火設計法の開発」(委員長：齋藤 光，事務局：日本建築総合試験所)にて行われた研究に対して引き続き追加検討を加えたものです。本解析においては、清峰俊太郎氏をはじめとする千葉大学火災工学研究室の諸兄に多大なる協力をいただきました。関係者各位には深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 菊田繁美，平島岳夫，吉田正友，上杉英樹：超高強度コンクリート柱の耐火性に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.187-192，2003

- 2) 松戸正士ほか：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)(その2)，日本建築学会大会，防火，pp.21-24，2002.8
- 3) 豊田康二ほか：火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究(その1.定常温度下における高温圧縮試験)，構造工学論文集，Vol.49B，pp.367-374，2003.3
- 4) 豊田康二ほか：火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究(その2.一定応力下において温度変化を伴う高温圧縮試験)，構造工学論文集，Vol.50B，pp.9-14，2004.3
- 5) 山下平祐ほか：火災加熱を受ける超高強度コンクリートの力学的特性に関する実験的研究(その3.高温クリープ実験)，構造工学論文集，Vol.54B，pp.465-470，2008.3
- 6) Eurocode2, Design of concrete Structures, Part 1-2, General rules – structural fire design, The European Standard EN1992-1-2, 2004
- 7) Eurocode3, Design of steel Structures, Part 1-2, General rules – structural fire design, The European Standard EN1993-1-2, 2005
- 8) 上杉英樹，小池浩：高層鉄骨架構の熱応力変形解析(その1)区画火災を受ける超高層鉄骨架構の熱応力解析手法，日本建築学会構造系論文報告集，第381号，pp.73-80，昭和62年11月
- 9) Becker J., Bresler B., “FIRE-RC A Computer Program for Fire Response of Structure – Reinforced Concrete Frames”, Report No.UCB FRG 74-3, University of California Berkley, July 1974
- 10) 松戸正士ほか，高強度鉄筋の高温引張試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.175-176，2003.9
- 11) Morihisa FUJIMOTO et al, PRIMARY CREEP OF STRUCTURAL STEEL (SS41) AT HIGH TEMPERATURES, 日本建築学会論文報告集 第296号，pp.145-157，昭和55年10月
- 12) Anderberg Y. and Thelenderson S. : Stress and Deformation Characteristics of concrete at High Temperature 2. Experimental Investigation and Material Behaviour Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden, 1976
- 13) 兼城莉乃，豊田康二，平島岳夫：高強度コンクリートの力学的特性に関する実験(その1)加熱速度の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.181-182，2008.9
- 14) 久保田一男ほか，フープ筋で拘束されたコンファインドコンクリートの高温特性(その1)(その2)日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.37-44，1999.