

特集 「数値解析技術」

複合載荷加熱を受ける鋼板拘束RC柱の三次元FEM解析

丹羽 博 則 長 沼 一 洋

Three-Dimensional Finite Element Analysis for Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns Confined by Steel Plates

Hironori Niwa Kazuhiro Naganuma

Abstract

This paper describes a three-dimensional finite element analysis method and analysis results obtained for the fire resistance of reinforced concrete columns confined by steel plates under high temperature. The purpose of this study was to verify the analysis method and to evaluate the fire resistant performance of the structural members. Heat transfer analyses were performed for the columns using the finite element method under transient conditions. Next, successive thermal stress analyses were performed taking into account the thermal properties of concrete and steel. The results confirmed the satisfactory performance of the proposed method in simulating the thermal behavior of reinforced concrete columns confined by steel plates subjected to both axial and horizontal loads under high temperature.

概 要

火災加熱を受ける鋼板拘束RC柱の熱応力変形挙動を予測・評価可能な解析手法を構築するため、三次元有限要素法を適用し、その適用性および解析精度を検証した。鋼板拘束RC柱の複合載荷加熱実験を対象に熱伝導解析を行った結果、本報に示した手法によりコンクリート内部温度および鉄筋温度の時間推移を精度よく追跡できることが確認された。また熱応力解析においては、コンクリートおよび鉄筋の高温材料試験の結果に基づき材料モデルを設定し、常温時の材料構成則を高温域に拡張することで、高温加熱を受ける柱の軸変形挙動および曲げ剛性の低下性状を精度よく再現できることが確認された。

1. はじめに

鋼板拘束RC柱は、帯筋の代替としてRC柱の外周を拘束鋼板で覆うことによってせん断補強を行う構造部材であり、筆者らはその耐火性能を検討するため、これまでに種々の耐火実験を実施している。その結果、表面鋼板に耐火被覆が施されていない状態で火災加熱に曝された場合にあっては十分な荷重支持能力を有していること、また柱外周に配された拘束鋼板がコンクリートの爆裂を抑制し、かぶりコンクリートの剥落を防止できること等を確認している^{1)~3)}。また同時に、鋼板拘束RC柱の熱応力変形性状の解析的評価を試みているが、既往研究^{1),2)}に用いた熱応力解析手法はファイバー法（線材置換）に基づくものであり、多軸応力下のコンクリートの力学的性質や斜めひび割れ等に代表されるせん断の影響を考慮できず、また表面鋼板と内部コンクリートの付着すべりを適切に考慮できないなど、解析手法および解析精度に幾つかの課題を有していた。

そこで筆者らは、従来よりも精緻な数値解析手法を構築することを目的として、三次元モデルを用いた有限要素法（以下、FEM）を適用し、非定常熱伝導解析および非線形熱応力解析を実施した。本報では、鋼板拘束RC柱に軸力と柱頭強制変位を同時に与えた複合載荷加熱実験¹⁾を対象として、上記解析手法の適用性と解析精度について検討を行った結果を報告する。

2. 解析対象

建物内で火災が発生した場合、建物の外柱にはFig. 1に示すように梁や床スラブの熱膨張変形によって強制水平変位が作用し、柱頭部が外側へ押し出される状態となる。文献1)ではこれを模擬した載荷加熱実験を実施し、鋼板拘束RC柱の耐火性能を検討している。

文献1)で実施された載荷加熱実験は、柱部材に軸力を与えた状態で、同時に梁などの水平部材の熱膨張変形を模擬した強制変位を柱頭部に与えながら加熱を行う載荷加熱方式を採用しており、一般に中心圧縮による載荷加熱実験と区別して、複合載荷加熱実験と称されている方式である。試験体は、全長1,200mm（試験部である鋼板拘束RC柱部分は900mm）、断面寸法□-150mmの縮小モデルとし、主な実験パラメータはコンクリートの調合強度（30, 60, 80

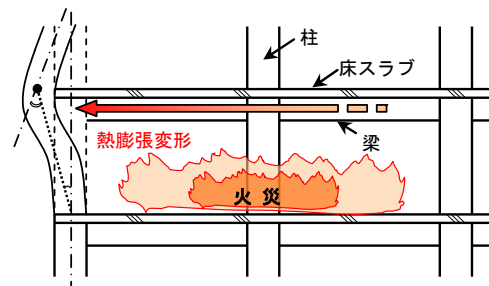


Fig. 1 火災時におけるRC架構の熱変形挙動(概念図)
Thermal Deformation of RC Structure in Fire

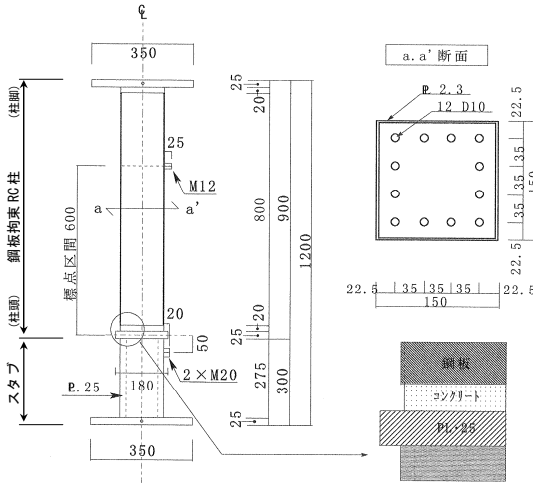


Fig. 2 鋼板拘束RC柱試験体¹⁾
Configuration of Specimen

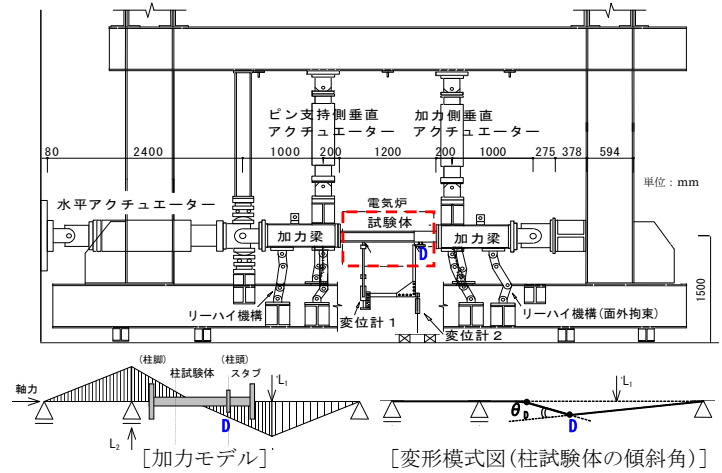


Fig. 3 載荷加熱装置¹⁾
Setup of Fire Resistance Test

Table 1 解析対象とした試験体の諸元¹⁾
Properties of Specimens

試験体名	断面寸法 b×D (mm)	試験体全長 [柱長さ] (mm)	コンクリートの圧縮強度		主筋		拘束鋼板		軸力比 ^{*2}		目標 ^{*3} 傾斜角 (rad)	崩壊 ^{*4} 時間 (分)
			調査強度 f_c (N/mm ²)	実強度 σ_B (N/mm ²)	配筋 [鋼種]	降伏点 σ_y (N/mm ²)	板厚 [鋼種]	p_w ^{*1} (%)	N/bDf _c (-)	N/(A _c σ _B ·A _s σ _y) (-)		
N30-2-0	150×150	1,200 [900]	30	30.5	12-D10 [SD295]	349.3	PL-2.3 [SS400]	3.07	0.40	0.29	1/50	237
N60-2-0			60	70.6	12-D10 [SD685]	805.2						805.2

*1 拘束鋼板を帯筋比に換算した値
*2 N: 載荷軸力, A_c: コンクリート断面積, A_s: 鉄筋断面積
*3 加熱と同時に強制変位を与え始め、加熱開始120分後に到達させる最大傾斜角
*4 軸力支持能力を喪失した時間

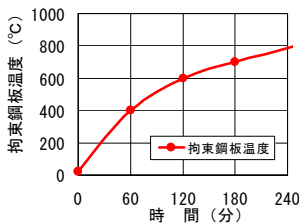


Fig. 4 加熱制御プログラム
Heating Temperature

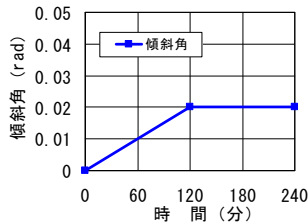


Fig. 5 変位制御プログラム
Angular Displacement

N/mm²の3水準) および拘束鋼板の形状、柱頭部に付与する強制変位量としている。なお、拘束鋼板の柱頭・柱脚部の端部には、20mmのクリアランスが設けられており、拘束鋼板へ直接的に軸圧縮力が作用しない納まりとなっている。

本報における解析対象は、これらの試験体のうち、拘束鋼板を柱の外周のみに配したNタイプ試験体2体（試験体名：N30-2-0, N60-2-0）とした。解析対象とした試験体の形状および諸元をFig. 2とTable 1に示す。当該試験体の実験条件は、Fig. 3に示すように柱試験体を水平にした状態で加力装置にセットし、所定の軸力を載荷した後に電気炉による加熱と柱頭部への強制変位を付与するものとなっている。加熱条件は、試験体が縮小断面モデルであることを考慮した上で、耐火性能に影響を及ぼす因子として主筋温度に着目し、当該実験に先立って実施した大断面柱（□-600mm）の標準加熱実験における主筋温度と、電気炉加熱による縮小モデル試験体の主筋温度の時刻歴がほぼ等しくなるよう加熱制御プログラムを設定している。また柱

頭強制変位の大きさは、Fig. 3の変形模式図に示す傾斜角（ θ_D ）に着目し、加熱開始120分後に傾斜角を1/50 radに到達させ、その後はその傾斜角を維持したまま、軸力支持能力を喪失するまで加熱を継続させている。実験時の加熱制御および柱頭部への強制変位制御プログラムをFig. 4, 5に示す。

3. 解析概要および解析モデル

三次元FEM解析には、大林組の非線形FEM解析プログラム「FINAL[®]」を使用した。FINALは、コンクリート系構造物を対象とした構造解析プログラムであり、コンクリートと鋼材の熱物性値の温度依存性等を考慮した非常熱伝導解析および非線形熱応力解析を一貫して実行することが可能な解析手法を用いている。

解析モデルはFig. 6に示すように、試験体形状の対称性を利用して、柱幅方向に2分割した1/2断面モデルとした。コンクリートは8節点六面体要素でモデル化し、拘束鋼板は4節点平面シェル要素、鉄筋は2節点線材（トラス）要素として、切断面の境界条件には連続性を考慮した対称条件を設定した。さらに熱応力解析においては、拘束鋼板とコンクリートの界面に接合要素を挿入し、両者間のすべりを考慮した付着特性を与えた。なお、接合要素は微小厚さとし、熱伝導解析の際にはこれを微小厚さの鋼板に置換することで、拘束鋼板とコンクリートの界面は密着と設定した。また、加力梁および柱頭部スタブは、柱に比して剛性の高い2節点線材要素でモデル化し、柱頭・柱脚部のエンドプレート（4節点平面シェル要素）に剛接合することで、実験時の加力条件を解析モデル上で再現した。

4. 三次元非定常熱伝導解析

4.1 解析手法

FINALでは、コンクリートと鋼材の熱伝導率および比熱の温度依存性、ならびにコンクリート中に含まれる水分の蒸発潜熱を考慮することが可能な非定常熱伝導解析手法を用いており、熱伝導方程式の近似解法にはGalerkin法、時間積分法にはCrank-Nicolsonの陰解法を用いている。

熱伝導解析では、実験時の加熱制御プログラムの時刻歴を1分刻みで拘束鋼板の表面へ直接与え、内部コンクリートおよび鉄筋温度を算定した。また、実験時は柱試験体の柱脚側端部を炉外へ露出させていたことを考慮し、熱伝導解析においても柱脚部のコンクリート露出部には、直接加熱を与えない条件を再現した。なお、非加熱対象である加力梁（含 スタブ）は、熱伝導解析の対象外とした。

4.2 コンクリートと鋼材の熱特性値

熱伝導解析における鋼材の熱特性値にはEurocode 4⁴⁾（1993年Final Draft版、以下同じ）の規定値を用い、コンクリートの熱特性値には斎藤ら⁵⁾の提案値を採用し、Eurocode 4が定める熱伝導率を0.8倍、比熱を1.2倍とした温度依存性（以下、修正EC4モデルと称す）を仮定した。コンクリートの密度は2,300 kg/m³、鋼材の密度は7,850 kg/m³として、高温時における密度変化は考慮せず一定と仮定した。なお、コンクリートの初期含水率は5.0 mass%とした。Eurocode 4および修正EC4モデルによる熱伝導率と比熱、

ならびにこれらの値から算定した熱拡散率 $a (= \lambda / (\rho \cdot c))$ 、 λ :熱伝導率、 ρ :密度、 c :比熱)をTable 2~5およびFig. 7~12に示す。参考として、上記の図表にはEurocode 2⁶⁾（2004年正式発行版、以下同じ）の規定によるコンクリートの熱特性値も併記する。これより、修正EC4モデルはEurocode 4で定めるコンクリートの熱拡散率を0.67倍した値となり、Eurocode 4の熱特性値を用いた場合よりもコンクリート内部温度を低く評価するものであることがわかる。なお、Eurocode 2では、熱伝導率に上限値と下限値が定められ、Eurocode 4よりも小さな熱伝導率が規定されているが、同時に比熱と密度の値も小さいため、熱伝導率を上限値とした場合の熱拡散率はEurocode 4とほぼ等しい値となる。

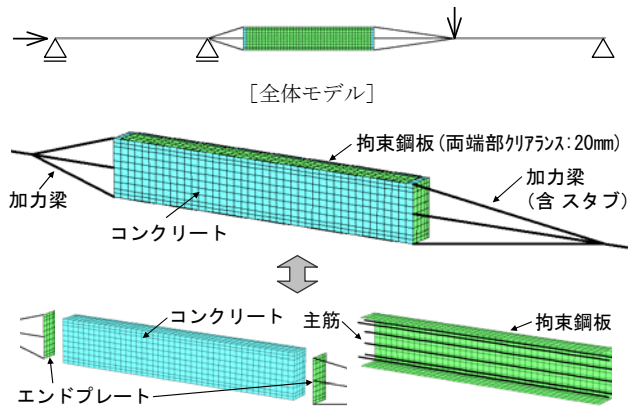


Fig. 6 解析モデル (1/2断面モデル) Finite Element Meshes

Table 2 コンクリートの熱伝導率
Thermal Conductivity of Concrete

温度 [°C]	コンクリートの熱伝導率: λ_c [W/(m·K)]			
	Eurocode 4	Eurocode 2		修正EC4 (0.8×EC4)
		上限値	下限値	
20	1.96	1.95	1.33	1.57
100	1.81	1.77	1.23	1.45
200	1.63	1.55	1.11	1.31
300	1.48	1.36	1.00	1.18
400	1.33	1.19	0.91	1.07
500	1.21	1.04	0.82	0.97
600	1.10	0.91	0.75	0.88
700	1.01	0.81	0.69	0.81
800	0.93	0.72	0.64	0.75
900	0.88	0.66	0.60	0.70
1000	0.83	0.62	0.57	0.67
1100	0.81	0.60	0.55	0.65
1200	0.80	0.60	0.55	0.64

Table 3 コンクリートの比熱
Specific Heat of Concrete

温度 [°C]	コンクリートの比熱: C_c [kJ/(kg·K)]		
	Eurocode 4	Eurocode 2	修正EC4 (1.2×EC4)
100	0.96	0.90	1.16
200	1.02	1.00	1.23
300	1.08	1.05	1.29
400	1.12	1.10	1.35
500	1.16	1.10	1.40
600	1.20	1.10	1.44
700	1.23	1.10	1.48
800	1.26	1.10	1.51
900	1.28	1.10	1.53
1000	1.29	1.10	1.55
1100	1.30	1.10	1.56
1200	1.30	1.10	1.56

Table 4 コンクリートの熱拡散率
Thermal Diffusivity of Concrete

温度 [°C]	コンクリートの熱拡散率: a_c [mm ² /sec]			
	Eurocode 4	Eurocode 2		修正EC4 (0.8× λ , 1.2× C)
		λ : 上限値	λ : 下限値	
20	0.93	0.94	0.64	0.62
100	0.82	0.85	0.59	0.54
200	0.69	0.69	0.49	0.46
300	0.60	0.58	0.43	0.40
400	0.52	0.50	0.38	0.34
500	0.45	0.44	0.35	0.30
600	0.40	0.39	0.32	0.27
700	0.36	0.35	0.29	0.24
800	0.32	0.31	0.28	0.22
900	0.30	0.29	0.26	0.20
1000	0.28	0.27	0.25	0.19
1100	0.27	0.27	0.25	0.18
1200	0.27	0.27	0.25	0.18

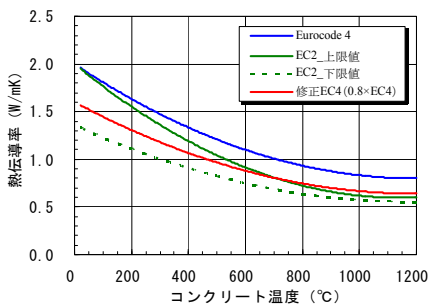


Fig. 7 コンクリートの熱伝導率
Thermal Conductivity of Concrete

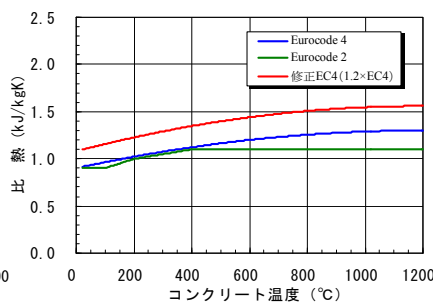


Fig. 8 コンクリートの比熱
Specific Heat of Concrete

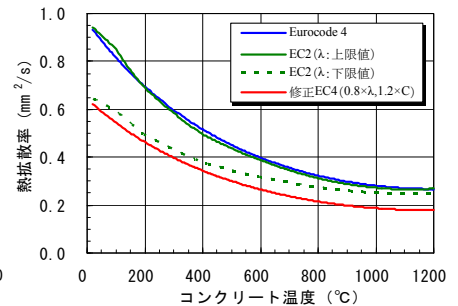


Fig. 9 コンクリートの熱拡散率
Thermal Diffusivity of Concrete

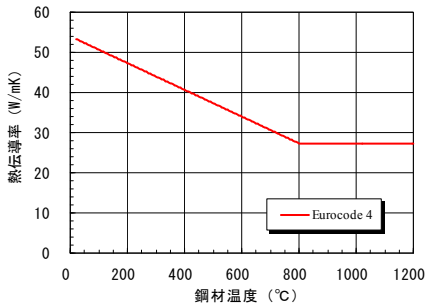


Fig. 10 鋼材の熱伝導率
Thermal Conductivity of Steel

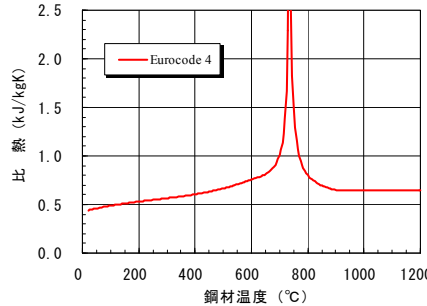


Fig. 11 鋼材の比熱
Specific Heat of Steel

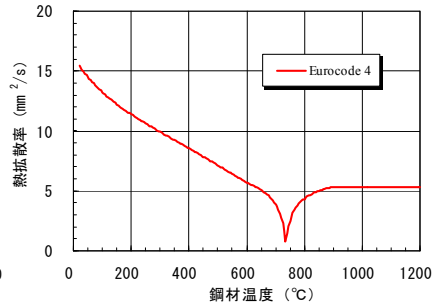


Fig. 12 鋼材の熱拡散率
Thermal Diffusivity of Steel

Table 5 鋼材の熱特性値
Thermal Properties of Steel

温度 [°C]	鋼材の熱伝導率 λ_s [W/(m·K)]	鋼材の比熱 C_s [kJ/(kg·K)]	鋼材の熱拡散率 a_s [mm ² /sec]
20	53.3	0.44	15.4
100	50.7	0.49	13.2
200	47.3	0.53	11.4
300	44.0	0.56	9.9
400	40.7	0.61	8.6
500	37.4	0.67	7.1
600	34.0	0.76	5.7
700	30.7	1.01	3.9
800	27.3	5.00	0.8
900	27.3	0.80	4.3
1000	27.3	0.65	5.3
1100	27.3	0.65	5.3
1200	27.3	0.65	5.3

※上表はEurocode 4の規定式に基づき100°C毎に算出した値を示す。

コンクリート中の自由水は、100°Cに達すると蒸発するものとし、蒸発潜熱を2256 kJ/kg (100°Cにおける水の蒸発潜熱) と仮定して、潜熱を考慮した熱収支に基づき温度変化を一時的に停留させるエンタルピー法 (熱収支法) により蒸発潜熱の影響を考慮した。なお、本解析ではコンクリート中の水分移動は考慮していない。

4.3 熱伝導解析結果

熱伝導解析結果の一例として、試験体N30-2-0における主筋温度と断面中心部コンクリート温度の時刻歴を実験値と比較してFig. 13に示す。実験では、加熱開始とともに比較的緩やかな勾配で温度が上昇し始めた後、コンクリート中の自由水の蒸発に伴い温度上昇が一時停滞するが、その後は急勾配で温度が上昇する傾向を示している。解析においても、蒸発潜熱の影響を考慮することによって、水分蒸発に伴う温度停滞およびその前後における温度上昇特性の変化がほぼ再現されており、また自由水が蒸発した後の温度上昇性状も実験値と良好な対応を示している。

以上の結果より、本解析手法によって実験時の試験体内部の温度変化をほぼ良好な精度で追跡可能であることが確認された。

5. 三次元非線形熱応力解析

5.1 解析手法

熱伝導解析に引き続き、熱応力解析にもFINALを使用した。FINALでは、応力解析の非線形求解法に接線剛性法を

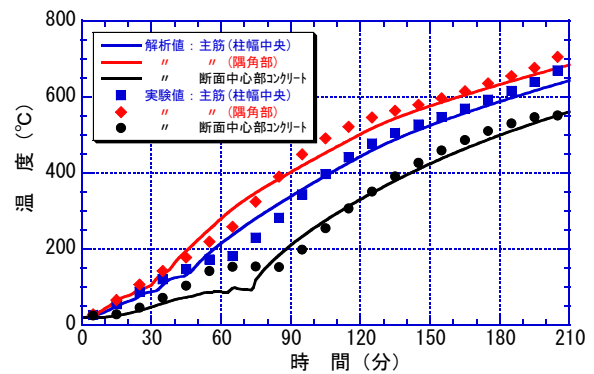


Fig. 13 熱伝導解析結果と実験値の比較
(試験体 N30-2-0)

Result of Heat Transfer Analysis

用い、材料非線形現象やコンクリートに生じるひび割れ等の局所的なひずみ分布に対応することを考慮して、各要素にはすべて一次の形状関数を用いた低次要素を用いている。さらに、コンクリートと鋼材の力学的性質の温度依存性を考慮することが可能であり、本解析では解析対象とした試験体の製作時に採取したコンクリート供試体の熱間強度試験の結果に基づき、解析に用いるコンクリートの高温物性値を設定した。また鉄筋に対しても、各種強度レベルの異形鉄筋を対象とした高温引張試験の結果に基づき、本解析に用いる高温強度特性を設定した。

解析手順は、Fig. 5に示す解析モデルへまず軸力に相当する水平力を与えた後、熱伝導解析により得られた各要素温度の時刻歴を1分刻みで増分的に与えるものとした。これと同時に、柱頭部の加力用垂直アクチュエーターの荷重点に相当する位置に、鉛直下向きに強制変位を1分刻みで増分的に与える変形制御解析を行った。ただし、解析では実験時に測定された柱頭部 (Fig. 3に示すD点) の絶対変位に基づき、柱頭側の加力梁が端部のピン支点を中心に剛体変形するものとして加力点の鉛直変位量を求め、解析上の制御変位を定めた。

5.2 高温時のひずみ構成則

高温時においてコンクリートおよび鋼材に生じる全ひずみ (ϵ_{total} , s_{total}) は次式によって表されるものとし、熱膨張ひずみと過渡ひずみは初期ひずみとして扱うものとした。

$$[\text{コンクリート}] \quad c\varepsilon_{\text{total}} = c\varepsilon_{\text{th}} + c\varepsilon_{\sigma} + c\varepsilon_{\text{tr}} \quad (1)$$

$$[\text{鋼材}] \quad s\varepsilon_{\text{total}} = s\varepsilon_{\text{th}} + s\varepsilon_{\sigma} \quad (2)$$

ここで、 $s\varepsilon_{\text{th}}$ 、 $c\varepsilon_{\text{th}}$ は熱膨張ひずみ、 $s\varepsilon_{\sigma}$ 、 $c\varepsilon_{\sigma}$ は応力に関するひずみ、 $c\varepsilon_{\text{tr}}$ は過渡ひずみを表し、クリープひずみは考慮していない。

5.3 熱膨張ひずみ

コンクリートと鋼材の熱膨張ひずみは、Eurocode 4の規定値に基づき、これを温度に関して微分することにより得られる熱膨張係数を用いて、解析ステップ毎に熱膨張ひずみ増分を求めるものとした。コンクリートと鋼材の高温時における熱膨張ひずみおよび熱膨張係数をFig. 14~17に示す。参考としてFig. 14には、Eurocode 2が定めるコンクリートの熱膨張ひずみと、5.4節で後述する試験体製作時に採取したコンクリート供試体を用いた熱間強度試験の結果⁷⁾（載荷応力ゼロ時の熱膨張ひずみ）を併記する。

$$c\varepsilon_{\text{th}}' = 9.0 \cdot 10^{-6} + 6.9 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 \quad [20 \leq T \leq 700^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

$$= 0.0 \quad [700 < T \leq 1200^{\circ}\text{C}]$$

$$s\varepsilon_{\text{th}}' = 12.0 \cdot 10^{-6} + 0.8 \cdot 10^{-8} \cdot T \quad [20 \leq T \leq 750^{\circ}\text{C}] \quad (4)$$

$$= 0.0 \quad [750 < T \leq 860^{\circ}\text{C}]$$

$$= 20.0 \cdot 10^{-6} \quad [860 < T \leq 1200^{\circ}\text{C}]$$

ここで、 $c\varepsilon_{\text{th}}'$ 、 $s\varepsilon_{\text{th}}'$ はそれぞれコンクリートと鋼材の熱膨張係数、 T は温度を表す。なお、Eurocode 2では2種類の骨材について熱膨張ひずみを規定しており、珪岩質骨材 (siliceous aggregates) の場合はEurocode 4の規定値と等しく700°C ($c\varepsilon_{\text{th}}=1.4\%$) を上限とし、石灰質骨材 (calcareous aggregates) では805°C ($c\varepsilon_{\text{th}}=1.2\%$) を上限としている。

5.4 過渡ひずみ

温度上昇過程で圧縮応力を受けるコンクリートに生じる収縮ひずみには、式(5)に示すAnderbergらの提案による過渡ひずみ (transient strain) モデル⁸⁾を用い、同式を増分形で表した式(6)により、解析ステップ毎に過渡ひずみ増分を求めるものとした。

$$c\varepsilon_{\text{tr}} = -k_2 \times \frac{\sigma}{\sigma_B} \times c\varepsilon_{\text{th}} \quad (5)$$

$$\Delta_c \varepsilon_{\text{tr}} = -k_2 \times \frac{\sigma}{\sigma_B} \times \Delta_c \varepsilon_{\text{th}} \quad (6)$$

ここで、 $c\varepsilon_{\text{tr}}$ は過渡ひずみ、 k_2 は過渡ひずみ係数、 σ は存在応力度 (圧縮)、 σ_B は常温時の一軸圧縮強度、 $c\varepsilon_{\text{th}}$ は熱膨張ひずみを表す。上式に示すように、Anderbergらの実験式では過渡ひずみを熱膨張ひずみと存在応力度比の比例関数として表しており、上式における比例定数である過渡ひずみ係数 k_2 は、コンクリートの材種や加熱方法によって異なることが実験的に確認されている⁸⁾。そこで本解析では、実験に供した試験体の製作時に採取したシリンダー供試体 ($\phi 100 \times h 200 \text{ mm}$) を用いて熱間強度試験を実施した結果⁷⁾に基づき、過渡ひずみ係数 k_2 を定めた。コンクリートの熱間強度試験は調合強度30N/mm² (以下、C30) と80N/mm² (以下、C80) を対象として、一定圧縮応力下

における温度上昇時のひずみ測定試験と、定常温度下における熱間圧縮強度試験の2種類の試験を行っている。前者のひずみ測定試験より得られたコンクリートの全ひずみ量とコンクリート温度の関係をFig. 18, 19に、後者の熱間強度試験より得られた高温時における応力-ひずみ関係をFig. 20, 21に示す⁷⁾。

以上の実験結果に基づき、Anderbergらの手法を準用して過渡ひずみ成分の抽出を行った。ただし、上記実験では高温下におけるクリープひずみの測定を行っていないため、これを含む形で下式により過渡ひずみ成分を抽出した。

$$c\varepsilon_{\text{tr}} = c\varepsilon_{\text{total}} - c\varepsilon_{\text{th}} - c\varepsilon_{\sigma} \quad (7)$$

ここで、 $c\varepsilon_{\text{total}}$ と $c\varepsilon_{\text{th}}$ は一定圧縮応力下におけるひずみ測定試験より得られた全ひずみと熱膨張ひずみを、 $c\varepsilon_{\sigma}$ は定常温度下における熱間圧縮強度試験より得られた応力に関するひずみを表す。過渡ひずみデータを式(5)に基づき整理し、直線回帰によって過渡ひずみ係数を求めた結果をFig. 22, 23に示す。またC30とC80における過渡ひずみ-温度関係をまとめてFig. 24に示す。過渡ひずみ係数は、C30で $k_2=4.25$ 、C80で $k_2=4.11$ を得たが、両データには顕著な差が認められないため、さらにC30とC80のデータをまとめて直線回帰を行った結果、Fig. 25に示すように過渡ひずみ係数 $k_2=4.18$ を得た。

以上の検討結果に基づき、本解析ではコンクリート強度の違いによらず、過渡ひずみ係数を $k_2=4.18$ として熱応力解析を行うこととした。

5.5 高温時におけるコンクリートの力学的性質

5.5.1 三軸応力下のコンクリート材料モデル

本解析では、常温実験データに基づき構築された多軸応力下のコンクリート材料モデルを基本として、これに高温下における強度劣化特性などを反映させることによって、高温域にも対応可能なコンクリート材料モデルへと拡張した。すなわち、多軸応力がコンクリートの強度特性に及ぼす影響については、常温試験の結果に基づき定められた構成則に従うものとし、この構成則に高温時における一軸圧縮強度試験の結果より得られた圧縮強度などの温度依存性を導入することによって、三軸応力下におけるコンクリートの高温材料モデルを定めた。

コンクリートの応力-ひずみ構成則には、等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル⁹⁾を用いており、コンクリート要素に生じるひび割れは、要素内に一樣ひび割れ状態を仮定する分散ひび割れモデルで表現し、引張主応力の方向と直交する方向に生じるものとして、一つの軸で同時に直交する三方向まで許容する¹⁰⁾。なお、主軸の方向は、無ひび割れ状態の場合には主応力方向とし、ひび割れ発生時にはひび割れ方向に基づき固定するものとした。

5.5.2 コンクリートの応力-ひずみ関係

コンクリートの応力-ひずみ関係には修正Ahmad式¹¹⁾を適用し、三軸圧縮下におけるコンクリートの圧縮破壊条件には、Ottosenの4パラメータモデル¹²⁾を用いた。ここでは、修正

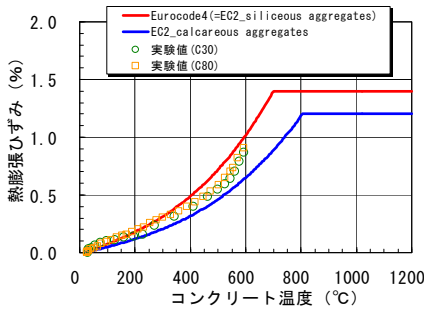


Fig. 14 コンクリートの熱膨張ひずみ
Thermal Elongation of concrete

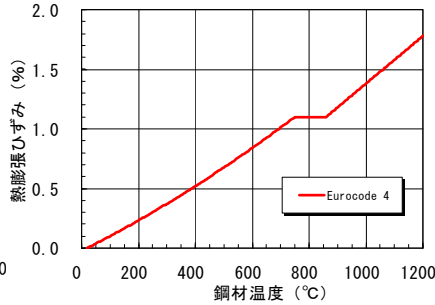


Fig. 16 鋼材の熱膨張ひずみ
Thermal Elongation of Steel

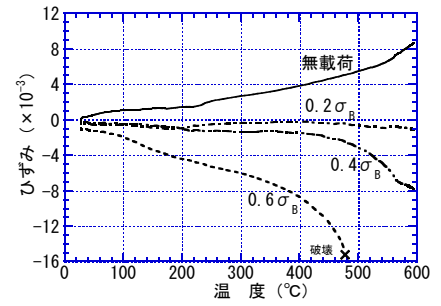


Fig. 18 全ひずみ-温度関係 [C30]
Total Strain-Temp Relationship

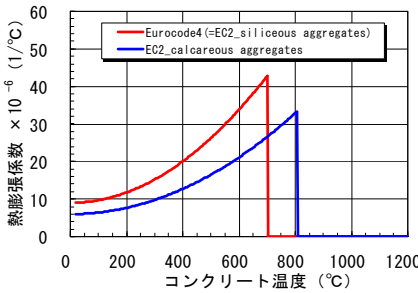


Fig. 15 コンクリートの熱膨張係数
Coefficient of Thermal Elongation

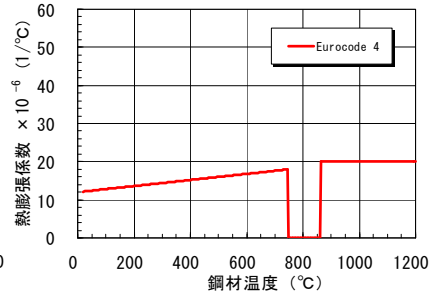


Fig. 17 鋼材の熱膨張係数
Coefficient of Thermal Elongation

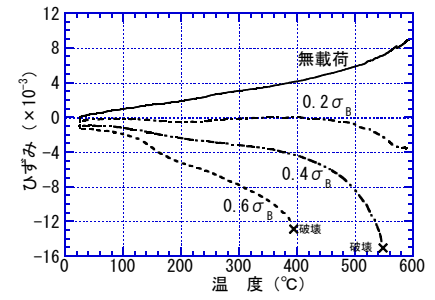


Fig. 19 全ひずみ-温度関係 [C80]
Total Strain-Temp Relationship

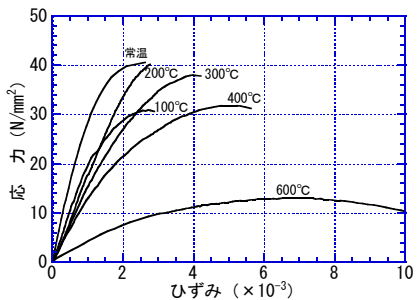


Fig. 20 応力-ひずみ関係 [C30]
Stress-Strain Relationship

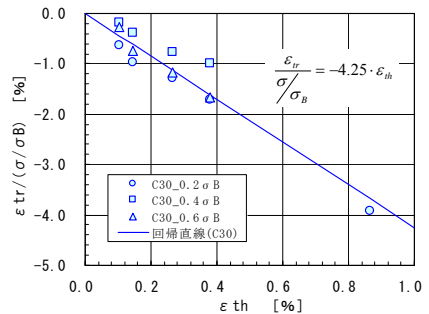


Fig. 22 実験データの直線回帰 [C30]
Linear Regression of Transient Strain

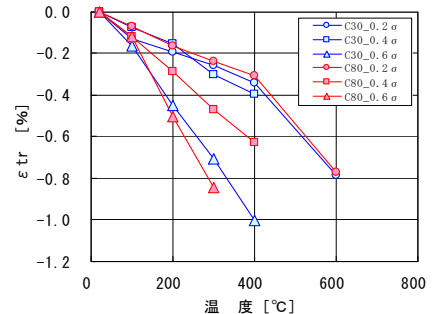


Fig. 24 過渡ひずみ-温度関係 [C30, C80]
Transient Strain-Temp Relationship

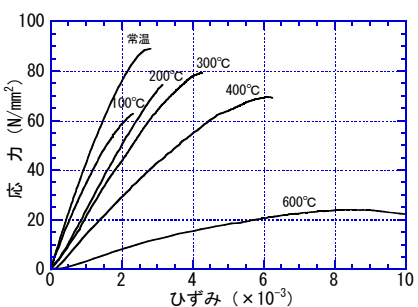


Fig. 21 応力-ひずみ関係 [C80]
Stress-Strain Relationship

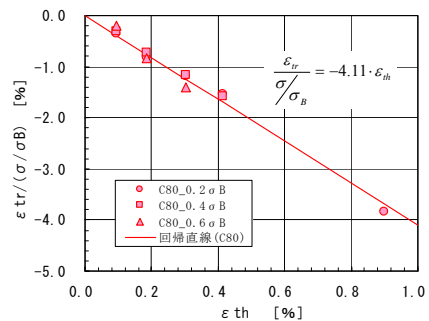


Fig. 23 実験データの直線回帰 [C80]
Linear Regression of Transient Strain

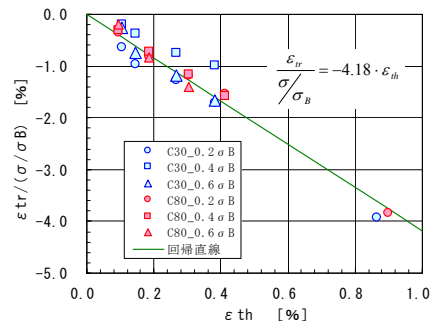


Fig. 25 実験データの直線回帰 [C30, C80]
Linear Regression of Transient Strain

Ahmad式により規定される常温時の応力-ひずみ関係を基本として、これに高温下におけるコンクリートの強度劣化特性、すなわち5.5.3項にて後述する一軸圧縮強度や圧縮強度時ひずみの温度依存性を反映させることによって、高温域に拡張したコンクリートの応力-ひずみ関係を定めた。

引張側の応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生まで線形弾性とし、またひび割れ発生後の解析の安定性を図るため、

ひび割れ直後にコンクリートの応力を全て解放 (tension cut-off) させず、出雲らのモデル¹³⁾を参考にtension stiffening特性を考慮した。ただし、出雲らの提案では係数cは0.4と定められているが、本解析では付着の影響はほとんどないものと考え、同モデルの係数cを1.0と仮定した。

5.5.3 高温時におけるコンクリートの強度劣化特性

高温時におけるコンクリートの力学的性質に関しては、1950年代より近年に至るまで国内外において多くの研究

Table 6 本解析に用いた高温時における
コンクリートの圧縮強度残存率
Residual Ratio of Concrete Strength

コンクリート 温度(°C)	水結合材比60% [70~50%]	水結合材比40% [50~30%]	水結合材比20% [30%~]
20	1.00	1.00	1.00
100	0.80	0.80	0.80
200	0.96	0.90	0.83
300	0.93	0.86	0.78
400	0.83	0.74	0.65
500	0.64	0.57	0.49
600	0.48	0.39	0.29
700	0.38	0.29	0.20
800	0.15	0.15	0.15
900	0.08	0.08	0.08
1000	0.04	0.04	0.04
1100	0.01	0.01	0.01
1200	0.00	0.00	0.00

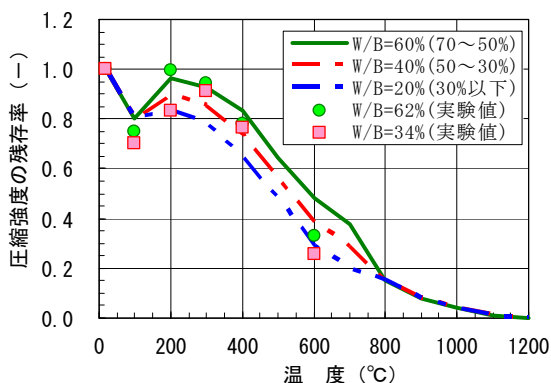


Fig. 26 本解析に用いた高温時における
コンクリートの圧縮強度残存率
Residual Ratio of Concrete Strength

報告がなされているが、コンクリートの調合やセメント・骨材の種類、昇温過程における存在応力の大きさなど様々な要因が複雑に影響するため、これらの実験データには非常に大きなばらつきが認められる。上記背景を踏まえ、国内にて実施された熱間圧縮強度試験データに限定し、これを日本建築学会にて統計的にまとめたデータが文献14) (以下、AIJガイドブックと称す) に示されている。5.4節に示した筆者らによる熱間強度試験データも、この統計データに含まれている。

AIJガイドブックのデータによれば、実験結果には非常に大きなばらつきが認められるが、コンクリートの水結合材比(水セメント比)に基づき整理した結果、200~700°Cの範囲では、水結合材比が小さいほど(高強度であるほど)高温時における強度残存率が小さくなる傾向を示すことが報告されており、各温度ごとに水結合材比を変数とした圧縮強度残存率の算定式が提案されている。

本解析では、上記のAIJガイドブックによる提案式を参考に、コンクリートの水結合材比を60% (70~50%)、40% (50~30%)、20% (30%以下) の3グループに代表させ、解析対象とした試験体に使用したコンクリートの水結合材比(W/B=62, 34%)が該当する各グループにおける強度残存率を用いるものとした。なお、AIJガイドブックによる提案式は800°Cまでしか規定されていないため、800°Cを超える温度域(900~1200°C)では、水結合材比によらず

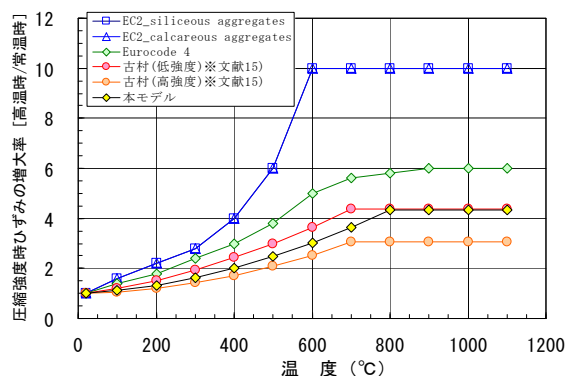


Fig. 27 高温時における一軸圧縮強度時のひずみ増大率
Growth Rate of Compressive Ultimate Strain

一律にEurocode 4による強度残存率を適用することとした。

以上の考え方に基づき定めた高温時におけるコンクリートの圧縮強度残存率をFig. 26とTable 6に示す。なおFig. 26には、5.4節に示した熱間圧縮強度試験の結果もプロットしている。

また、高温時における一軸圧縮強度時のひずみは、温度の上昇とともに増大する傾向を示す。本解析では、ひずみ評価時の一般性を考え、常温の圧縮強度時ひずみからの増大率を与える古村らの提案式¹⁵⁾を参考とし、これに5.4節に示した熱間強度試験の結果を踏まえ、高温時における圧縮強度時ひずみの増大率 κ を式(8)により定めた。本モデル(式(8))と古村らの提案式ならびにEurocode 2, 4の規定値との比較をFig. 27に示す。

$$\kappa = 1.0 + 8.32 \cdot 10^{-6} \cdot T + 4.17 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad [20 \leq T \leq 800^\circ\text{C}] \quad (8)$$

$$= 4.33 \quad [800 < T \leq 1200^\circ\text{C}]$$

上式に基づき、本解析ではまず常温時における一軸圧縮強度時ひずみを、コンクリートの圧縮強度 σ_B の関数で与える雨宮らの提案式¹⁶⁾を用いて規定し、これに高温時のひずみ増大率 κ を乗じることにより、高温時における一軸圧縮強度時のひずみを定めた。

以上に示した材料モデルに基づく高温時におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線を、5.4節に示した実験値と比較してFig. 28, 29に示す。同図より、本手法で定めた応力-ひずみ曲線は、5.4節に示した実験値と概ね良好な対応を示しているが、600°Cにおいては実験値よりも応力度を高く評価している。この理由は、Fig. 26からも明らかのように、600°Cの実験値がAIJガイドブックの統計データに基づく圧縮強度残存率を下回るデータとなっていることによる。しかしながら、前述の通りコンクリートの熱間強度試験の結果にはばらつきが存在し、本実験値は統計データにおける一定のばらつきの範囲内にあると判断できることから、本解析では材料試験における個値を忠実に再現するのではなく、より一般性のある統計処理されたデータに基づき高温材料モデルを定める方針とした。

5.6 高温時における鋼材の力学的性質

鉄筋の高温時における力学的性質については、筆者らが

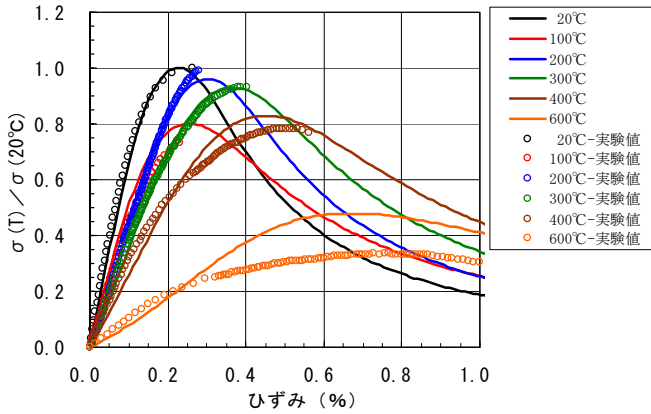


Fig. 28 高温時におけるコンクリートの応力-ひずみ関係
[実線: W/B=60モデル, プロット点: C30実験値]
Stress-Strain Relationship of Concrete

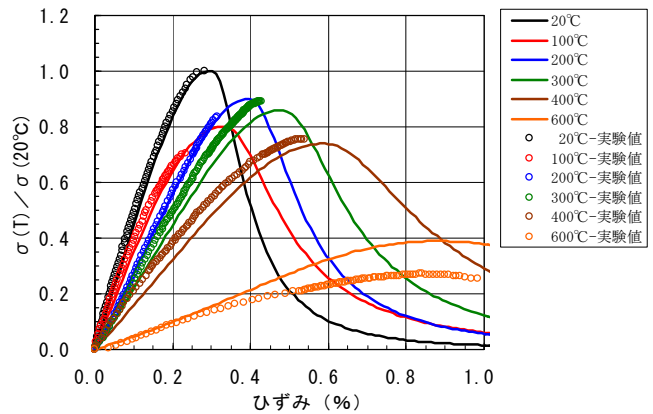


Fig. 29 高温時におけるコンクリートの応力-ひずみ関係
[実線: W/B=40モデル, プロット点: C80実験値]
Stress-Strain Relationship of Concrete

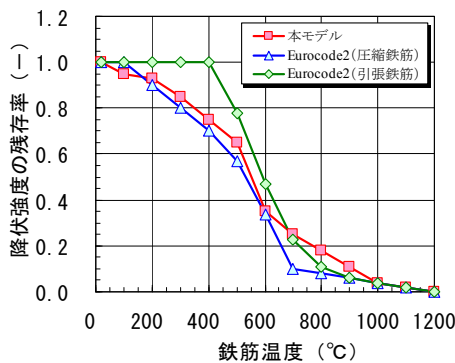


Fig. 30 高温時における鉄筋の降伏強度残存率
Residual Ratio of Yield Strength of Rebar

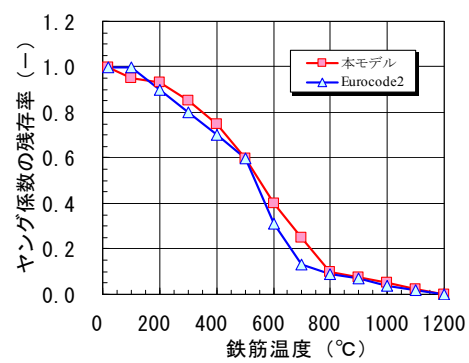


Fig. 31 高温時における鉄筋のヤング係数残存率
Residual Ratio of Young's Modulus of Rebar

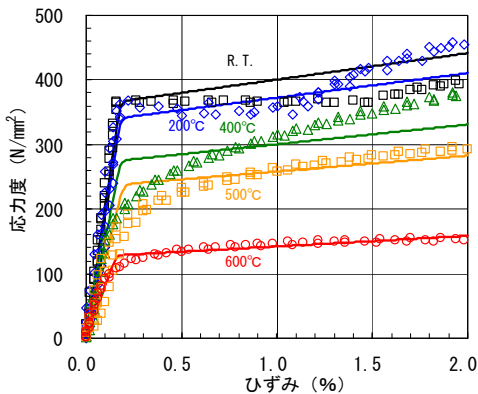


Fig. 32 高温時における鉄筋の応力-ひずみ関係
[実線: SD295高温モデル, プロット点: 実験値]
Stress-Strain Relationship of Rebar

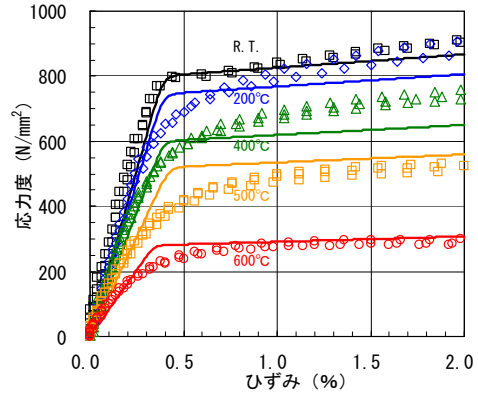


Fig. 33 高温時における鉄筋の応力-ひずみ関係
[実線: USD685高温モデル, プロット点: 実験値]
Stress-Strain Relationship of Rebar

別途実施した各種強度レベルの異形鉄筋を対象とした高温引張試験の結果¹⁷⁾に基づき設定した。

同結果に基づき、高温時における降伏強度およびヤング係数の残存率は鋼種の違いによらないものと見做し、Fig. 30, 31に示す高温劣化特性を定めた。なお参考として、同図中にはEurocode 2による規定値も併記する。高温時における応力-ひずみ関係については、ひずみ1.0%までの範囲における適応性に主眼を置き、0.2%オフセット耐力を鉄筋の降伏応力度を規定する指標とし、弾性限を超えた後の二

次剛性（ひずみ硬化）を初期剛性の1/50と仮定した。

以上の高温強度特性に基づき、鉄筋の応力-ひずみ関係をCiampiのモデル¹⁸⁾（修正Menegotto-Pintoモデル）により定め、履歴特性には移動硬化則を適用してパウシンガー効果を考慮した。本解析で仮定した高温時における鉄筋の応力-ひずみ関係について、SD295とUSD685の実験値¹⁷⁾と比較してFig. 32, 33に示す。なお本解析では、拘束鋼板（SS400）の高温材料モデルも上記の温度依存性に準じるものとし、パイリニア型の応力-ひずみ関係により定めた。

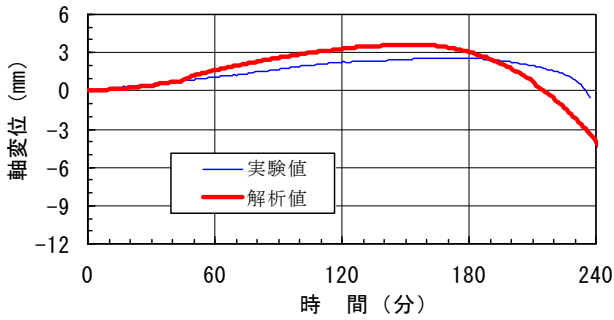


Fig. 34 軸方向変位の経時変化 [N30-2-0]
Axial Displacement

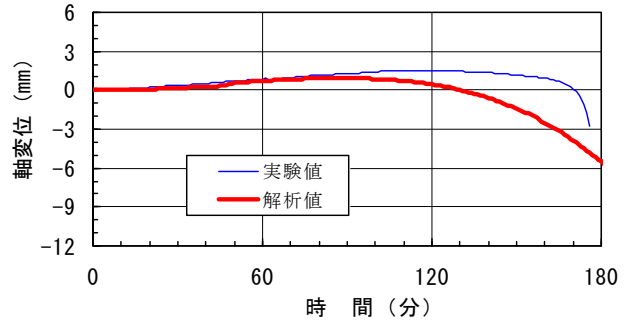


Fig. 35 軸方向変位の経時変化 [N60-2-0]
Axial Displacement

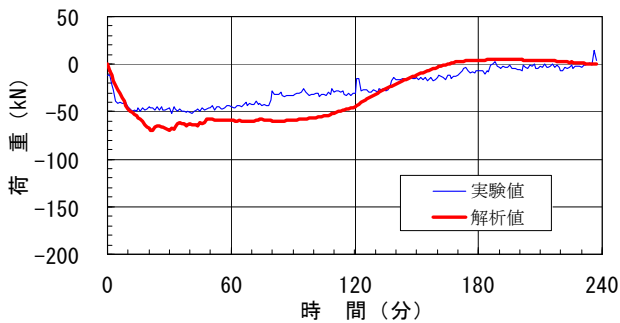


Fig. 36 加力側アクチュエーター荷重の経時変化 [N30-2-0]
Vertical Load of Column Capital

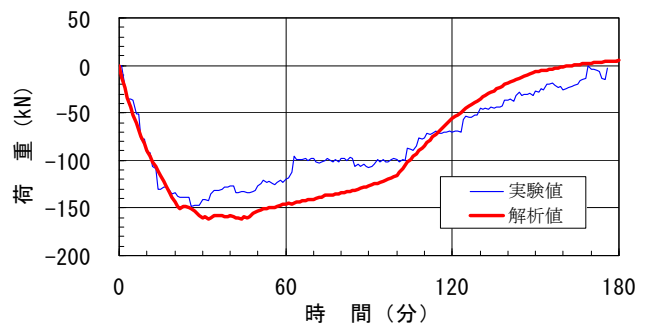


Fig. 37 加力側アクチュエーター荷重の経時変化 [N60-2-0]
Vertical Load of Column Capital

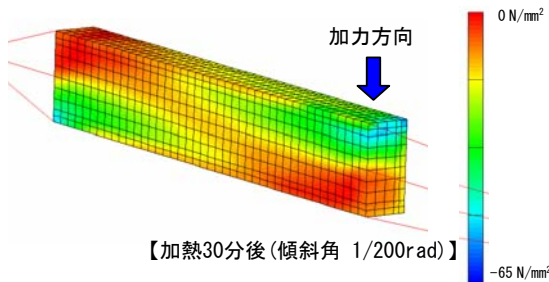


Fig. 38 最小主応力コンター [N60-2-0]
Contour of Minimum Principal Stress

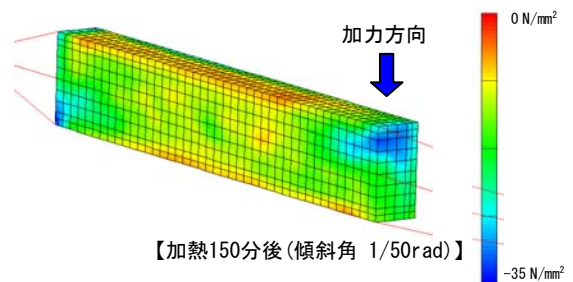


Fig. 39 最小主応力コンター [N60-2-0]
Contour of Minimum Principal Stress

5.7 熱応力解析結果

熱応力解析の結果について、鋼板拘束RC柱試験体の軸変形挙動を実験値と比較してFig. 34, 35に示す。Fig. 34より、普通強度コンクリートを用いたN30-2-0の解析は、柱の軸変形挙動の時間推移をほぼ妥当な精度で再現しており、伸び変形量のピーク値およびピーク後の収縮変形量を若干大きめに評価しているが、定性的には実験値と良好な対応を示している。Fig. 35に示す高強度コンクリートを用いたN60-2-0の解析についても、加熱90分後程度までは実験値とほぼ一致しており、両者は良好な対応を示している。しかし解析では、伸び変形がピークを示して収縮に転じる時刻が実験よりも早く、またその後の収縮変形量を大きめに評価する傾向を示している。

次に、試験体の柱頭部に強制変形を与えるために作用させた加力点における荷重値の解析結果を、実験時に測定された加力側アクチュエーターの荷重値と比較してFig. 36, 37に示す。同図より、解析は試験体に強制変形を与え始め

た荷重の立ち上がり、すなわち柱試験体の初期剛性をほぼ妥当な精度で再現できている。また実験では、柱の傾斜角が最大値に達する120分以前 (Fig. 5参照)には、既に柱頭部へ強制変位を付与したアクチュエーターの荷重、すなわち柱の抵抗モーメントが低下し始めているが、解析はこの時間推移をほぼ良好な精度で再現しており、部材温度の上昇に伴う鋼板拘束RC柱の曲げ剛性の低下性状を良好な精度で評価可能であることが確認された。

また、試験体N60-2-0のコンクリート内部の応力状態について、加熱30分後および150分後における最小主応力コンターをFig. 38, 39に示す。なお、同図には柱外周の拘束鋼板等を除いたコンクリート要素のみを示している。Fig. 38より、柱頭部に強制変形を与えたアクチュエーターの荷重値がほぼピークを示す加熱開始30分後においては、内部コンクリートに生じている圧縮応力が、柱頭・柱脚の圧縮縁を結ぶほぼ対角線上に作用していることがわかる。その後、柱の曲げ剛性の低下に伴い、荷重値がほぼゼロとなる

加熱開始150分後 (Fig. 39) においては、最大傾斜角 $1/50$ rad を保持しているにもかかわらず、コンクリート内部における主応力の方向が材軸方向となり、軸圧縮が支配的な応力状態となっていることが確認できる。

以上より、本報に示した解析手法によって、鋼板拘束RC柱の熱応力変形性状、すなわち梁の伸び出しによって柱に生じる過渡的な熱応力は、部材温度の上昇に伴う柱の曲げ剛性の低下により、終局的にはほぼ消失する過程を妥当な精度で評価できることが確認された。

6. まとめ

従来よりも精緻な熱伝導解析および熱応力解析手法を構築することを目的として、鋼板拘束RC柱の複合載荷加熱実験を対象に三次元FEM解析を実施し、その解析手法の妥当性および解析精度を検討した。

非定常熱伝導解析では、コンクリート中の自由水の蒸発潜熱の影響を考慮し、またコンクリートの熱伝導率および比熱にEurocode 4の既定値を補正した修正モデルを採用することで、鋼板拘束RC柱の内部コンクリート温度および主筋温度の時間推移を良好な精度で再現できており、本解析手法の妥当性が確認された。

非線形熱応力解析では、コンクリートおよび鉄筋の高温材料モデルに別途実施した高温材料試験の結果を反映させた上で、三軸応力下の応力-ひずみ関係を再現可能なコンクリート材料モデルを用いて解析を行った。その結果、軸力と同時に柱頭部に強制変位を受ける鋼板拘束RC柱の軸方向変位量の時間推移をほぼ妥当な精度で追跡可能であることが確認された。また、部材温度の上昇に伴う材料強度の劣化により、鋼板拘束RC柱の曲げ剛性が加熱の進展とともに低減し、終局的には過渡的な熱応力がほぼ消失して軸圧縮が支配的な応力状態となる過程を良好な精度で再現できており、本解析手法の妥当性が確認された。

今後は、柱部材が荷重支持能力を喪失する崩壊時間に対する解析精度の向上を図るため、さらに検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 上杉英樹, 他: 鋼板巻き鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, pp. 213~216, (1997)
- 2) 丹羽博則, 他: 鋼板拘束鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45B, pp. 351~358, (1999)
- 3) Niwa, H., Nagao, K. and Uesugi, H. : Controlling Method of Spalling of High-Strength Concrete subjected to Fire, Fourth International Conference on Concrete Under Severe Conditions: Environment & Loading, (2004)
- 4) European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2 : Structural fire design, European Prestandard, CEN, Brussels, Final Draft prENV 1994-1-2, (1993)
- 5) 齋藤秀人, 他: 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)
- 6) European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 2 : Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, European Standard, CEN, Brussels, EN 1992-1-2, (2004)
- 7) 丹羽博則, 他: 20~600°Cまでの高温載荷加熱を受けるコンクリートのひずみ挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, pp. 249~250, (1999)
- 8) Anderberg, Y. and Thelandersson, S.: Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures, 2. Experimental Investigation and Material Behaviour Model, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Bulletin No.54, Lund, Sweden, (1976)
- 9) Darwin, D. and Pecknold, D. A. : Nonlinear Biaxial Stress - Strain Law for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM2, pp. 229-241, (1977)
- 10) 米澤健次, 他: 正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の三次元非線形FEM解析—自社開発ソフト“FINAL[®]”の精度向上—, 大林組技術研究所報, No. 67, pp. 1-8, (2003)
- 11) Ottosen, N. S. : A Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp. 527-535, (1977)
- 12) 長沼一洋: 三軸応力下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp. 163-170, (1995)
- 13) 出雲淳一, 他: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, (1987)
- 14) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, 丸善, pp. 36-38, (2004)
- 15) Furumura, F., Oh, C., Abe, T. and Kim, W. : Simple Formulation for Stress-Strain Relation of Concrete at Elevated Temperature, Transactions of AIJ, No. 384, pp. 1~14, (1988)
- 16) 雨宮 篤, 他: 超高強度鉄筋コンクリート部材の有限要素解析プログラムの開発(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 639~640, (1990)
- 17) 丹羽博則, 他: 鉄筋コンクリート用棒鋼の高温時における力学的性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, pp. 11~12, (2006)
- 18) Ciampi, V., et al. : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No.UCB/EERC-82/23, University of California, Berkeley, (1982)