

外的温度負荷を受けるRCおよび合成構造部材の
熱伝導および温度応力特性に関する研究HEAT CONDUCTION AND THERMAL STRESSES IN REINFORCED CONCRETE
AND COMPOSITE BEAMS UNDER EXTERNAL THERMAL LOADING

太田俊昭* 黒田一郎** 山口栄輝*** 日野伸一****

By Toshiaki OHTA, Ichirou KURODA, Eiki YAMAGUCHI and Shin-ichi HINO

The present study deals with unsteady heat conduction and thermal stresses in reinforced concrete and steel plate-concrete composite beams under external thermal loading. Both experiment and numerical analysis of the beams are carried out. A feature of the analysis can be found in the employment of a three-dimensional embedded model of reinforcement for the finite element, which makes it easy to discretize such a composite structure. Reasonable agreement between the numerical and experimental results is observed, and this analytical procedure is justified. Moreover, the influences of reinforcement ratio and degrees of applied temperature on inner temperature and thermal stress distributions are discussed through some numerical examples.

1. まえがき

近年、RC、PC構造や鋼・コンクリート合成構造などのコンクリート構造部材が、各種の土木・建築構造物や原子炉格納容器などに幅広く利用されるようになってきた。これら構造物の設計は、常温での構造部材の耐力や変形性能を基準として行なわれている。しかし、火災などの突発的な事故により、コンクリート構造物が高温状態に曝されることもある。そのような場合、熱によるコンクリートの劣化状態や、温度応力によるダメージを評価するために、高温状態に曝されたコンクリート構造物の温度分布や温度応力分布を正確に把握することが必要となってくる。

高温下におけるコンクリート構造物の熱伝導や温度応力特性に関する研究は、マス・コンクリートや原子力発電の開発に関連して行なわれてきた¹⁾が、そうした研究のほとんどはプレーンコンクリートを対象としている。鋼材を有するコンクリート構造物に関する研究としては、高温下におけるRC構造の耐力に関する研究²⁾、鉄筋のひびわれ抑制効果に関する研究³⁾、コンクリートの線膨張に対する鉄筋の影響に関する研究⁴⁾等がある。これらの研究は、温度分布に対する鋼材の影響を考慮しておらず、また定常温度分布でのものがほとんどである。また、温度分布や温度応力に対する鋼材の影響については十分に研究されておらず、鉄筋や鋼板を有するコンクリート構造物の非定常温度分布下における特性については明らかにされていない

* 工博 九州大学教授 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

** 工修 九州大学大学院 工学研究科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

*** Ph.D. 東京大学講師 工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷7丁目3番1号)

**** 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

というのが現状である。

本研究は、高温下に曝されたＲＣおよび鋼・コンクリート合成部材の熱伝導特性や温度応力特性を明らかにすることを目的とし、その基礎的研究として、通常のＲＣはりおよび立体トラス型ジベル付き合成はり（以下ＴＳＣはり^{*)}と略称する）を対象とした熱伝導・温度応力解析および加熱実験を行なったものである。

一般に、ＲＣや合成構造部材の温度分布や応力分布を離散鉄筋モデルを用いて有限要素法で解析する際には、鋼材の位置により要素分割が制約を受ける。その問題を解決するために、本解析では先に線形構造解析においてその有効性を検証した埋め込み鉄筋モデルを、３次元の非線形熱伝導解析および線形温度応力解析に適用している。

２．コンクリート部材の３次元非定常熱伝導・温度応力解析

２．１ 有限要素解析の概要

ここでは、熱源が要素領域 V_e 内に存在しない場合のみを研究対象とする。このとき、連続体における３次元非定常熱伝導方程式は一般に次の式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial T}{\partial z}) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここに、 T は温度、 t は時間、また、 k 、 ρ 、 c はそれぞれ物体の熱伝導率、密度、および比熱を表わしている。また、要素の境界での熱の流入は熱伝達によるもののみに限定すれば、境界面 S_e における境界条件は次式で表わされることとなる。

$$h(T - T_c) + k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

ここに、 n は境界面に鉛直外向きに立てた座標軸、 h は熱伝達係数、 T_c は熱伝達境界の流体温度を表わしている。

領域の離散化を行なうために、式（１）および式（２）にガラーキン重みつき残差法を適用すると各有限要素につき関数 G_e が次式のように表わされる。

$$G_e = \mathbf{W}_e^T (\mathbf{K}_e \dot{\mathbf{T}}_e + \mathbf{C}_e \mathbf{T}_e - \mathbf{F}_e) \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{W}_e$ は要素ごとの節点重みベクトル、 $\mathbf{T}_e$ は節点温度ベクトルであり、記号 $\dot{}$ は時間による微分を表わす。また、要素熱伝導マトリックス $\mathbf{K}_e$ 、要素熱容量マトリックス $\mathbf{C}_e$ および要素熱流束ベクトル $\mathbf{F}_e$ の成分は次のように与えられる。

$$\mathbf{K}_e = \int_{V_e} k \mathbf{B} \mathbf{B}^T dV + \int_{S_e} h \mathbf{N} \mathbf{N}^T dS \quad (4)$$

$$\mathbf{C}_e = \int_{V_e} \rho c \mathbf{N} \mathbf{N}^T dV \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_e = \int_{S_e} h T_c \mathbf{N} dS \quad (6)$$

ここに、 $\mathbf{N}$ は形状関数ベクトル、 $\mathbf{B}$ は形状関数と微分演算子からなるマトリックスである。式（３）をもとに解析対象とする系全体での熱伝播を考えると次の式が得られる。

$$G = \Sigma G_e = \mathbf{W}^T (\mathbf{K} \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{C} \mathbf{T} - \mathbf{F}) = 0 \quad (7)$$

ここに、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{W}$ 、 $\mathbf{T}$ はそれぞれ系全体の熱伝導マトリックス、熱容量マトリックス、熱流束ベクトル、節点重みベクトル、および節点温度ベクトルである。ここで、ベクトル $\mathbf{W}$ は任意であるから式(7)が成り立つためには次式が成り立たねばならない。すなわち、離散化された熱伝導方程式が式(8)のとおりに表わされる。

$$\mathbf{K}\mathbf{T} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{T}} - \mathbf{F} = 0 \tag{8}$$

次に非定常熱伝導方程式(8)の解法について述べる。式(8)は空間については離散化されているが、時間については離散化されていない。そこで、時間について離散化するためにクラーク・ニコルソン法を用いた。これにより式(8)を変形すると次の式を得る。

$$\left[\frac{1}{2}\mathbf{K}\left(T\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)\right)+\frac{1}{\Delta t}\mathbf{C}\right]\mathbf{T}(t+\Delta t)=\left[-\frac{1}{2}\mathbf{K}\left(T\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)\right)+\frac{1}{\Delta t}\mathbf{C}\right]\mathbf{T}(t)+\mathbf{F}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right) \tag{9}$$

ここで式(9)の右辺に現われる $\mathbf{T}(t)$ は既知であるので、非定常熱伝導方程式(8)は、式(9)を用いて逐次解くことが可能となる。

本解析では熱伝導率の温度依存性を考慮した。そのためマトリックス $\mathbf{K}$ が温度の関数となり、式(9)は非線形となる。そこで、単純繰り返し代入法⁹⁾を採用し、式(9)を解く際に、各繰り返し計算ステップにおいてマトリックス $\mathbf{K}$ を修正し $\mathbf{T}(t+\Delta t)$ が収束するまで繰り返し計算を行なった。

温度応力解析も上記の熱伝導解析と同様に有限要素法を用いて行なったが、その説明は紙面の都合上割愛する。なお、本解析ではクリープ、応力緩和の影響を考慮しなかったため、時間に依存する項がなく、時間についての離散化を省略した。

2. 2 埋め込み鉄筋有限要素モデル

本熱伝導・温度応力解析では、埋め込み鉄筋モデルに基づいた3次元6面体アイソパラメトリック要素を採用し、鋼材の影響を解析に取り入れた。すなわち、この埋め込み鉄筋モデルでは、図-1に示すようにアイソパラメトリック要素内の任意の位置に複数の鋼材要素が存在することを許し、鋼材の温度は要素の形状関数により規定されると仮定する。通常の離散鉄筋モデルを用いて鉄筋コンクリートの解析を行なう場合、鋼材の配置状態によりコンクリートの要素分割が大きな制約を受けるため、要素数、節点数が多くなったり、要素の形がいびつになり解析精度に悪影響を与えることがある。これに対し、埋め込み鉄筋モデルを用いれば、鋼材位置に関係なく要素分割を自由に行なうことができるため、要素数および節点数を大幅に低減するとともに分割形状をスムーズにすることが可能である⁷⁾。埋め込み鉄筋モデルの2次元熱伝導解析への適用については、文献8)に紹介してあるが、本解析はそれを3次元に拡張し、さらに非線形解析にも適用することとした。

埋め込み鉄筋モデルでは、鋼・コンクリート複合要素の熱伝導マトリックス、熱容量マトリックスを、コンクリートに関する項と鉄筋に関する項の和で表現する。前者については式(4)、(5)をそのまま用いることができるが、鋼材は1次元部材として取り扱われるため、式(4)、(5)から導かれる次の式を用いる必要がある。

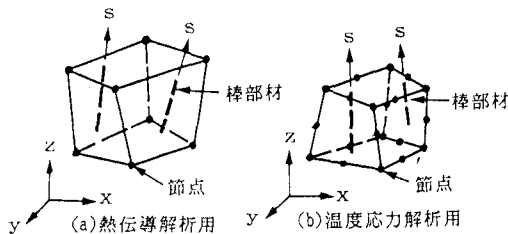


図-1 埋め込み鉄筋有限要素

$$\mathbf{K}_{es} = \sum \int_{L_s} k_s A_s \mathbf{B} \mathbf{R}^T \mathbf{R} \mathbf{B}^T ds \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_{es} = \sum \int_{L_s} \rho_s c_s \mathbf{N} \mathbf{N}^T ds \quad (11)$$

ここに、記号Σの上の m は要素内の鋼材数を表わし、 k_s 、 A_s 、 L_s 、 ρ_s 、 c_s はそれぞれ鋼材の熱伝導率、断面積、長さ、密度、比熱を表わす。また、 $\mathbf{R}$ は鋼材の向き即ち線積分の積分経路 s の向きを示す方向余弦ベクトルである。なお、鋼材はすべてコンクリート中に埋め込まれていると仮定するので、熱伝達境界に関する項は存在しない。

2. 3 解析に用いた諸定数および要素分割

表-1に解析で用いた材料諸定数を示す。

熱伝導率を除き諸定数は既往の研究成果を引用した^{9)~12)}。コンクリートの力学特性は高温下で変化する。しかし、今回の実験では、コンクリートの温度が100℃程度にしか上昇しないため、その力学特性は常温時に比して大きく変化することはないと考えられる。そこで、本解析では常温時に測定したヤング率、ポアソン比を用いることとした。また、コンクリートの熱伝導率は別途行なった実験により測定した値を用いた。実験によって得られた、温度と熱伝導率の関係を図-2に示す。図より100℃前後で熱伝導率が低減していることがわかる。既往の研究でも100℃前後での熱伝導率の低減が報告されており、その原因として水分の気化熱の影響などが考えられる。

解析に用いた要素分割を図-3に示す。解析対象であるTSCはりとはRCはりの断面形状については3章で詳述する。図に示すように埋め込み鉄筋モデルの採用により要素分割は鋼材の配置によらず自由に行なうことができる。要素数はTSCはりのが72要素、RCはりのが96要素である。熱伝導解析と温度応力解析では使

表-1 解析に用いた諸定数^{9)~12)}

	熱容量 kcal/m ³ °C	熱伝導係数 kcal/m ² h°C	線膨張係数 ×10 ⁻⁶ /°C	静弾性係数 kgf/cm ²	ポアソン比
コンクリート	390.0	10.0	10.0	2.97×10 ⁵	0.192
鋼材	890.0		11.7	2.1×10 ⁶	0.3

熱伝導率 (単位 kcal/mh°C)

温度(°C)	0	20	40	60	80	100	120	140
コンクリート	2.14	2.14	2.14	2.12	1.93	1.75	1.52	1.40
鋼材	64.08	62.93	61.78	60.62	59.47	58.32	57.17	56.02

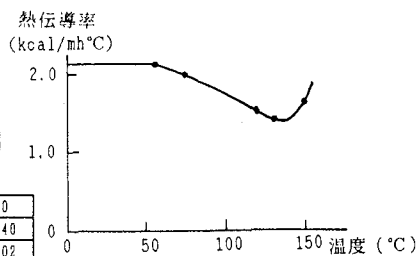


図-2 温度とコンクリートの熱伝導率の関係

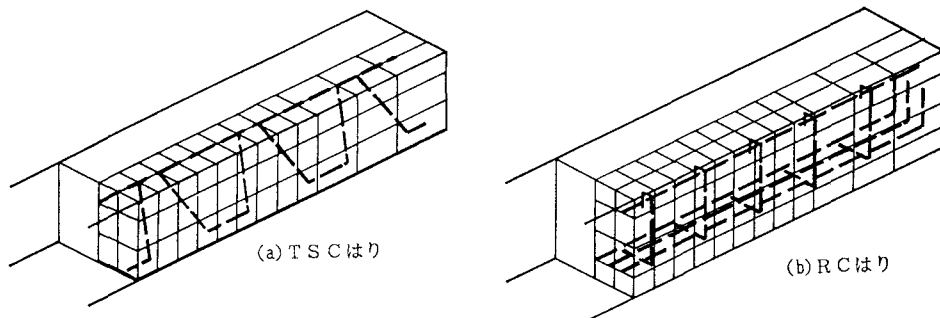


図-3 解析に用いた要素分割

用した要素が異なるため、総自由度数は異なる。熱伝導解析の際の総自由度数はTSCはりが156、RCはりが195である。一方、温度応力解析の際の総自由度数はTSCはりが1563、RCはりが1983である。なお、熱伝導解析の時間差分の際の微小時間増分 Δt は10min.とした。

3. 加熱実験

高温下におけるTSCはりおよびRCはりの挙動を調べるために電熱線による加熱実験を行なった。実験に用いたTSCはりおよびRCはり供試体はそれぞれ2体である。TSCはりには圧縮鉄筋、底部鋼板、立体トラス型ジベルおよびコンクリートからなる合成はりである。図-4に供試体の断面諸元を示す。RCはりにはTSCはりと同曲げおよびせん断耐力の設計値が同等になるよう設計されている。すなわち、両者の引張圧縮鉄筋量およびせん断補強鉄筋量が等しく、また、はりは高引張鉄筋のかぶりコンクリート分だけTSCはりの方が小さく、両者の有効高さが等しくなるように製作されている。供試体はコンクリート打設後6週間養生した後に実験に供した。表-2にコンクリートの設計基準強度および示方配合を、また表-3に加熱実験時のコンクリートの材料試験結果を示す。

実験は、図-5に示す電熱線を利用した加熱装置を用いて、TSCはりおよびRCはりをコンクリート面より加熱し、内部温度とひずみを測定するものである。

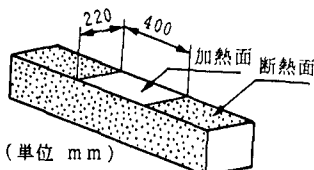
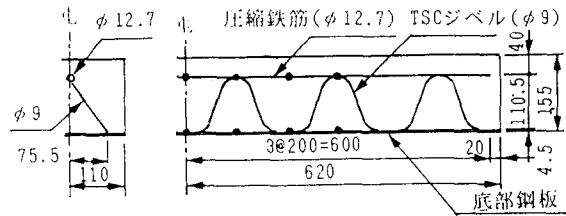


図-6 供試体の加熱面



(a) TSCはり

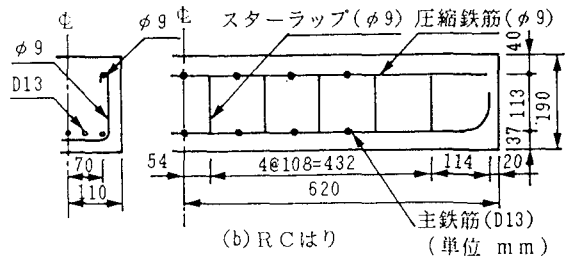


図-4 供試体の断面諸元

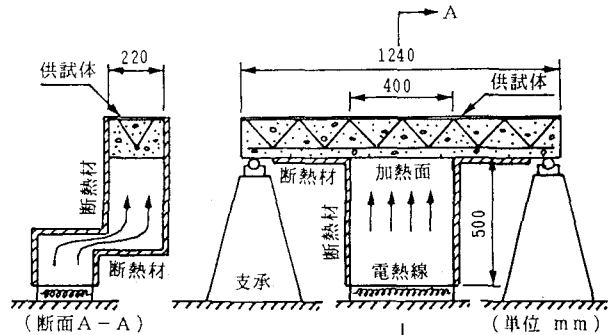


図-5 実験概要

表-2 コンクリートの設計基準強度および示方配合

設計基準強度 (kgf/cm^2)	最大粗骨材寸法 (mm)	単位重量 (kg/m^3)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	A/E減水剤
30.0	20	367	165	740	1086	0.918

表-3 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)	ヤング率 ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	ポアソン比
40.6	2.7	2.97	0.192

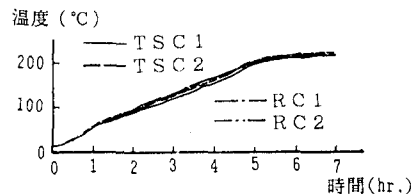


図-7 加熱表面の熱気の温度

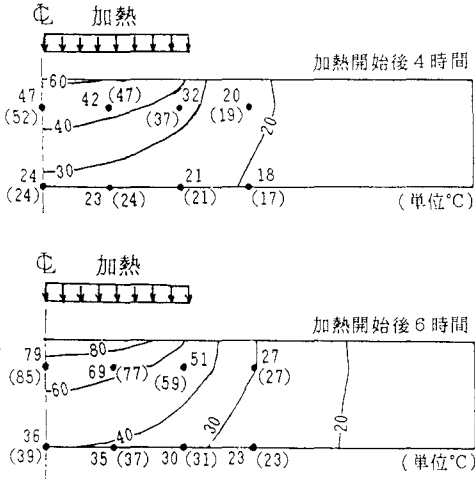
供試体は加熱実験装置に上下逆に設置し、電熱線によって熱せられた空気が供試体の圧縮鉄筋側（加熱装置に設置された状態での下面側）に触れることにより、供試体が加熱された。図－6に供試体の加熱範囲（熱気に曝される範囲）を示す。供試体側面と、圧縮鉄筋側の加熱範囲以外の部分は断熱材が貼付されており熱的に絶縁されている。また、供試体の主鉄筋側（加熱装置に配置された状態での上面側）は常温の空気（約14℃）に曝されている。供試体内部には十数カ所に熱電対が埋め込まれており、これにより内部の温度を随時測定できる。また、鋼材に貼り付けられた耐熱性ひずみゲージ（ZFLA-3:東京測器研究所製）によりひずみの測定も行なった（図－4参照）。なお、ひずみゲージの温度補償は熱電対による温度実測値を用いて行なった。また、供試体は両端のみ単純支持されているので、支点反力は自重によるもののみである。図－7に加熱表面における熱気の温度を示す。図より、熱気の温度に供試体間の差は若干見受けられるが、いずれも加熱時間に比例して温度上昇し、約5時間で200℃に達して、その後は220℃前後ではぼ安定していることがわかる。

4. 実験および解析の結果と考察

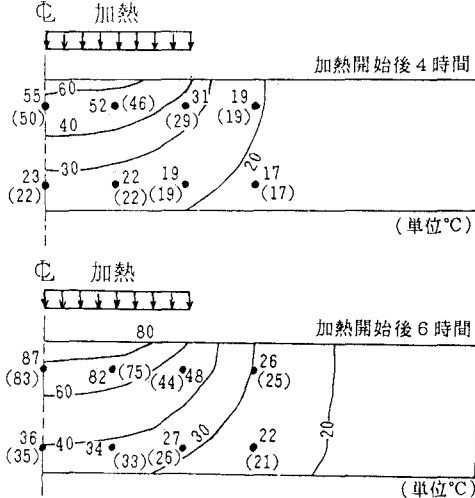
4. 1 温度分布

図－8は、TSCはり、RCはりの圧縮鉄筋を通る断面における、加熱開始後4,6時間の時点での温度分布の実験結果および解析結果を示す。図中の実線は解析結果であり、黒丸とその横の数値は熱電対埋め込み位置とその点での実測温度を示す。実験値で括弧内の数値は2体目の供試体のものである。図より、解析結果は実験値と比較して若干の誤差が認められるものの、全般的には実験挙動をよく追跡できており、埋め込み鉄筋モデルがコンクリート合成構造の温度分布解析に十分適用できることがわかる。なお、解析値と実験値の間の若干の誤差の原因としては、コンクリートの熱容量の温度による変化を解析で考慮しなかったことや、加熱炉内の熱気の温度が均一でなかった可能性、加熱炉内の放射の影響などが考えられる。

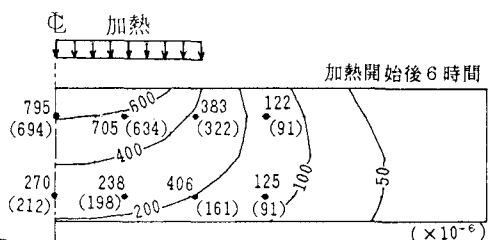
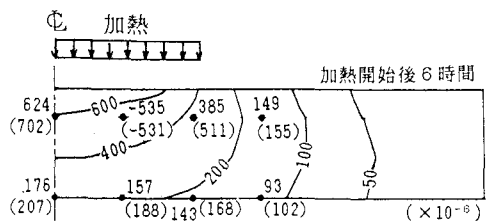
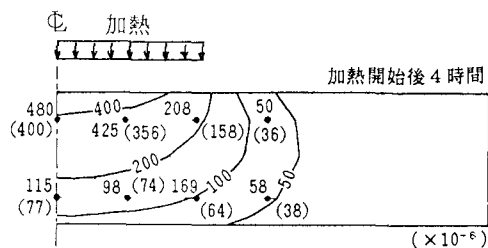
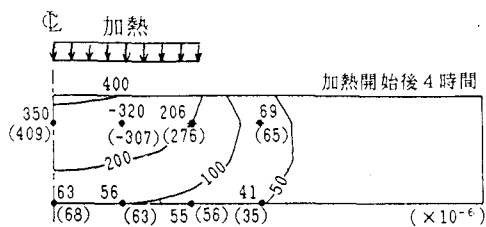
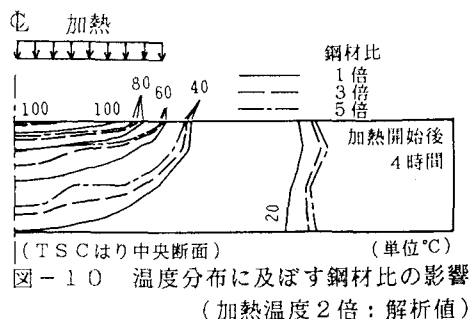
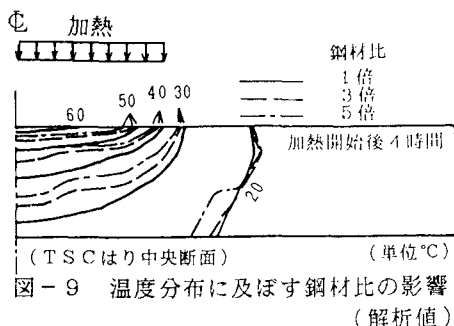
次に、温度分布に及ぼす鋼材比の影響を調べるために、TSCはりの鋼材比を実験供試体の3倍、5倍にした場合についても解析を行なった。各々の場合のはり中央断面の温度分布を図－9に示す。鋼材比が大きい



図－8(a) TSCはりの温度分布



図－8(b) RCはりの温度分布



注) 実線および線上の数値は解析値、
●印とその横の数値は実験値 (括弧内は2体目)

図-11(a) TSCはりのひずみ分布

図-11(b) RCはりのひずみ分布

ものほど高温部(加熱面付近)の温度が相対的に低いことが確かめられる。同様の解析を加熱温度を2倍にした場合についても行ない、その結果を図-10に示す。図より鋼材比の影響は加熱温度が高い場合でも同様の傾向が認められる。以上より、高温下に置かれたコンクリートはその強度や剛性にダメージを受けるが⁹⁾¹⁰⁾、鋼材比が大きい場合、加熱面付近のコンクリートの温度上昇が相対的に抑制され、被害を軽減することが可能であると思われる。

4.2 ひずみ分布および温度応力分布

図-11に温度応力解析によって得られたスパン方向ひずみの分布と実験による測定値をあわせて示す。等高線は解析値を、黒丸とその横の数値はひずみゲージの貼付位置とそれによる測定値(実験値)を示す。実験値で括弧内のものは2体目の供試体のものである。いずれも単純支持された供試体である。解析値と実験値の間には若干の誤差が認められるものの、解析値は実験値を比較的良好に捉えており、埋め込み鉄筋モデルがコンクリート合成構造の温度応力解析に対しても熱伝導解析と同様に有効であるということがわかる。温度応力解析に用いたコンクリートの諸定数は常温において測定したものをを用いたが、実験値と比べて満足いく結果が得られた。

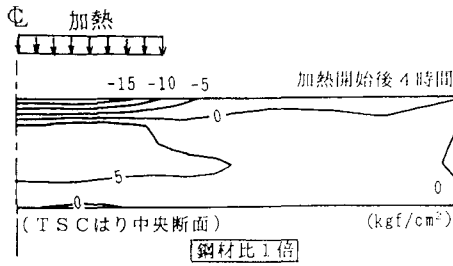


図-12 単純支持TSCはりの
スパン方向応力分布 (解析値)

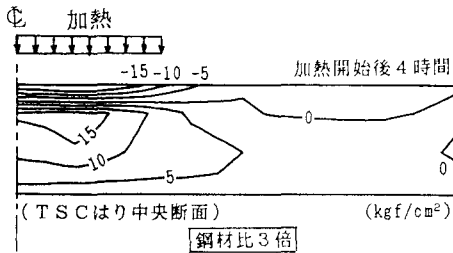


図-13 単純支持TSCはりの
スパン方向応力分布 (解析値)

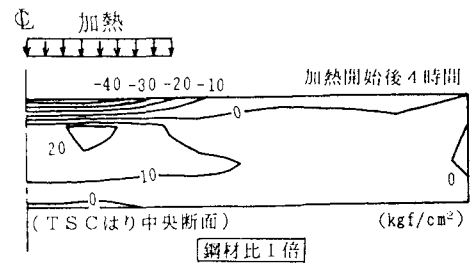
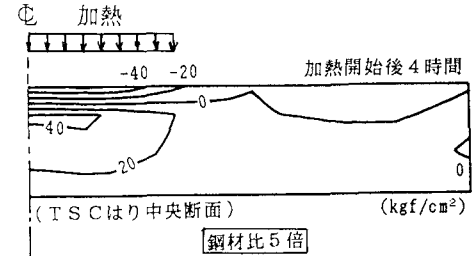
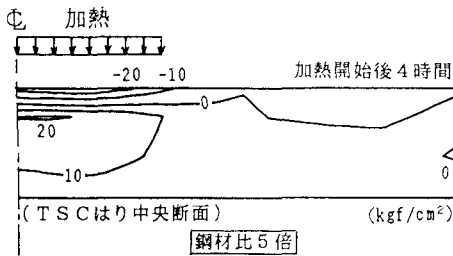
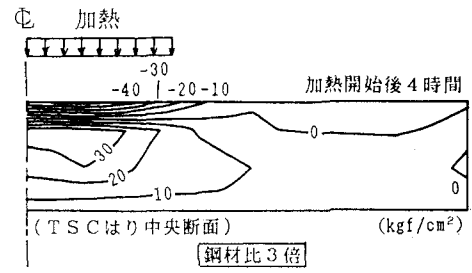


図-14 単純支持TSCはりの
スパン方向応力分布 (加熱温度2倍:
解析値)



実験値によると、TSCはりのジベル頂部には大きな負のひずみが生じており解析値と大きな隔たりが認められた。この位置は多くの鋼材が集中しているところであり、なんらかの原因で負のひずみが生じたものと思われるが、これについては今後の検討課題である。

図-12に解析によって得られた、加熱開始後4時間の時点でのTSCはりのスパン方向温度応力分布を示す。実験で温度応力を直接測定することはできないが、ひずみ分布において実験および解析結果の比較的良好一致がみられたことから推測して温度応力についての本解析結果の信頼性も高いと思われる。TSCはり単独支持されており、支点による拘束がないため、ここに示す応力は温度勾配の場所による違いや、鋼材とコンクリートの線膨張係数の違いによる応力、すなわち内部拘束による応力のみである。上端部と下端部に圧縮応力が生じ、その間に引張応力が生じていることが判る。これははり内部の温度がはりの上下方向に均一な温度勾配で分布していないためである。

図-13に、TSCはりの鋼材比を3倍、5倍にした場合の解析結果を示す。図より、鋼材比が大きいものほどコンクリートの引張応力が大きいことがわかる。さらに、加熱温度の影響を調べるために、加熱温度を2倍にした場合について解析を行なった。その結果を図-14に示す。図より、コンクリートにより大きな引張応力を生じさせるという鋼材の影響は、加熱温度が高くなった場合でも同様に認められ、また、その影響は加熱温度が高い方が顕著である。

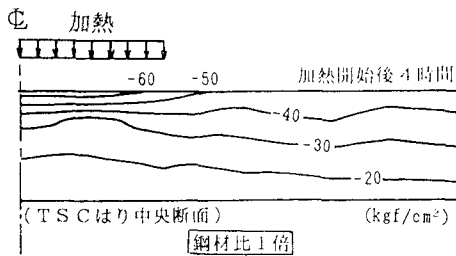


図-15 両端固定TSCはりの
スパン方向応力分布（解析値）

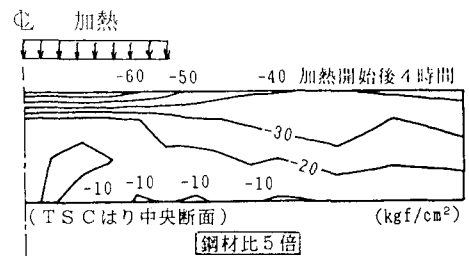


図-16 両端固定TSCはりの
スパン方向応力分布（解析値）

4. 3 両端固定の場合の温度応力

前節では実験の都合上単純支持されたはり供試体を対象に検討したが、実構造物における構造部材は何らかの形で変位拘束されている場合がほとんどである。そこで、ここでは、両端固定の支持条件でのTSCはり供試体の温度応力分布について解析的に考察する。

図-15は、両端のスパン方向変位を拘束した場合の、TSCはりのスパン方向応力分布である。また、鋼材比を5倍にした場合の応力分布図を図-16に示す。両ケースともに、支点拘束のためにはり全体に圧縮応力が分布している。両者を比較すると、鋼材比が大きい場合はコンクリートの圧縮応力が小さいことがわかるが、単純支持の場合ほど鋼材比の影響は顕著でない。これは、内部拘束による応力よりも支点拘束による応力が卓越しているためと考えられる。

図-17に加熱温度を2倍にした場合の応力分布を示す。図-15、17を比較すると、加熱温度が2倍になると応力もほぼ2倍になるが、応力分布形状はほとんど変わらず定性的に同様であるといえる。

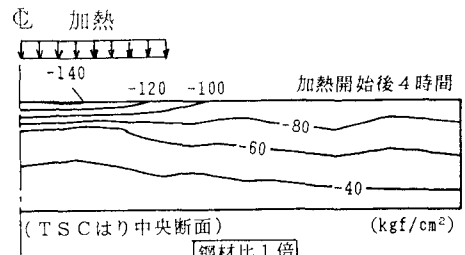


図-17 両端固定TSCはりの
スパン方向応力分布（加熱温度2倍：
解析値）

5. まとめ

本研究では埋め込み鉄筋モデルを用いた3次元有限要素解析ならびに加熱実験によってRCはりおよびTSC合成はりの熱伝導特性および温度応力特性を検討した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) TSCはりやRCはりなどの鋼材とコンクリートからなる合成部材の非定常熱伝導解析は、埋め込み鉄筋モデルを用いた有限要素法によって実験値をよく追跡している。
- (2) 解析によると、熱伝導率の大きな鋼材が多量の熱を伝えるため鋼材比が大きい場合ほど、高温部の温度上昇が相対的に抑制される。
- (3) TSCはりおよびRCはりのひずみ分布は、埋め込み鉄筋モデルを用いた有限要素解析によって実験値を比較的良好に捉えている。今回の温度応力解析では、コンクリートの温度が85℃以下であり、この範囲では常温時の材料定数で十分満足のいく結果が得られることが判明した。
- (4) 単純支持のTSCはりの場合、鋼材比が大きい場合ほどコンクリートの引張応力が大きくなる。
- (5) 一方、TSCはりの両端変位を拘束した場合は、変位の拘束による応力が卓越しているため、鋼材比の影響が単純支持の場合ほど顕著に認められない。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，1985.
- 2) 例えば、青柳，金津：高温領域において温度勾配を受ける鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性，セメント技術年報，pp. 397-400，1980.
- 3) 例えば、新開，芳賀，十河：マスコンクリートの温度応力に及ぼす鉄筋の影響，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集（第5部），pp. 405-406，1983.
- 4) 例えば、竹下，横田，浅沼：マスコンクリート中の鉄筋の作用効果について，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集（第5部），pp. 297-298，1984.
- 5) 例えば、太田，日野，輿石，日向：立体トラス型ジベルを有する合成版構造の力学特性と設計法に関する研究，構造工学論文集，Vol. 34，pp. 297-305，1988.
- 6) 矢川，宮崎：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，pp. 444-445，サイエンス社，1985.
- 7) 山口，太田，輿石，川野：コンクリート構造物の有限要素解析における埋め込み鉄筋モデルについて，構造工学論文集，Vol. 36，pp. 305-313，1990.
- 8) 山口，太田，金田，弘重：コンクリート部材の熱伝導解析に関する一考察，土木学会第45回年次学術講演集（第1部），pp. 220-221，1990
- 9) シュナイダー：コンクリートの熱的性質，pp. 31-50，技報堂出版，1983
- 10) 徳田：コンクリートの熱的性質，コンクリート工学，Vol. 22，No. 3，pp. 29-37，1984
- 11) 古村：コンクリートと熱，コンクリート工学，Vol. 17，No. 8，pp. 87-95，1979
- 12) 渡辺，佐藤：溶接工学とその応用，p. 163，朝倉書店，1965

(1990年10月12日 受付)