

高熱負荷を受けるコンクリート構造部材の 温度特性に関する基礎的研究

黒田一郎¹・日野伸一²・太田俊昭³

¹正会員 工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

本研究は 100℃～1000℃の範囲の高温下に曝された鉄筋コンクリートや鋼・コンクリート合成部材などの鋼材を有するコンクリート構造物の温度特性を明らかにすることを目的としたものである。すなわち、まず、高温下におけるコンクリートの材料定数を正確に把握するための実験装置を製作し、それを用いた一連の実験より、材料定数の温度依存性に関する知見を得る。次に、鉄筋コンクリートはりおよび立体トラス型ジベル付鋼板・コンクリート合成はりを対象とした加熱実験を行ない、複合構造部材としての温度特性について検討するとともに、この種の複合構造体に適用し得る埋め込み鉄筋モデルを導入した有限要素解析法の適用性についても検討を加えるものである。

Key Words : *heat conduction, thermal stress, steel-concrete composite beam, finite element analysis, embedded model for reinforcements*

1. まえがき

現在、鉄筋コンクリートや、鋼・コンクリート合成構造などの構造部材が、各種の土木・建築構造物に幅広く利用されている。通常、これらの構造物の設計は常温条件下での保有耐荷力や変形性能を基準として行なわれている。したがって、火災などの突発的な事故によって高温状態に曝された構造物の耐荷力や劣化等の安全性については検討されることは稀である。しかしながら、原子炉格納容器や石油、ガス等可燃性のある貯蔵構造物、さらには宇宙ロケット発射施設などの構造物については、高温に曝されるような極限状態に対する安全性の検討が設計上必要と考えられる。また、火災に遭遇した橋梁や建築構造物などの被害の程度や残存耐荷性能の判定を迫られる場合もある。そのため、高温下に曝された場合のコンクリートの力学特性や熱伝導特性などの信頼性の高いデータの蓄積と、それに基づく鋼材とコンクリートから成る複合構造体の熱伝導・温度応力の解明が重要となる。

ところで、コンクリート構造物の熱伝導・温度応

力に関する既往の研究の主流は、水和熱を生じるマスコンクリートや、PCCVなどの原子炉格納容器などを対象として行なわれてきた。マスコンクリートの水和熱による温度応力についての研究としては、ダム嵩上げ時の温度応力に関する研究や、橋脚フーチングの打設時の温度応力に関する研究が1960年代から盛んに行なわれている。たとえば、田辺ら¹⁾はダム嵩上げ時の温度応力について実測するとともに、その有限要素法による解析手法について言及している。また、森本ら²⁾は橋脚フーチングの温度ひび割れ予測についての興味ある知見をまとめている。さらに、コンクリートダムの温度応力制御法としては、プレクーリング³⁾やパイプクーリング⁴⁾に関する研究がある。これらの温度制御法はコンクリートダムのみならず基礎スラブや橋脚フーチングの温度応力制御のためにも利用されている。これらのマスコンクリートに関する研究では、コンクリート構造物に熱を供給する熱源はコンクリートの水和熱に限られているものがほとんどであり、このため扱う温度範囲は常温から高くても90℃程度までに限られている。一方、PCCVなどの原子炉格納容器に関する研究としては、たとえば秋野ら⁵⁾、吉田⁶⁾、阿部ら⁷⁾

の研究を挙げる事ができる。これらの研究では、地震荷重などの温度以外の荷重と温度応力が同時に作用した際の挙動などについても研究がなされている。また、原子炉格納容器は常時高温に曝されていることから、コンクリートの高温下でのクリープが温度応力性状に及ぼす影響についても研究がなされている⁸⁾。原子炉格納容器に作用する温度荷重としては通常運転時で約50℃、事故時として最大で約140℃程度の温度が想定されている⁹⁾。これらの研究分野以外に、液化ガスタンクに関する研究¹⁰⁾があるが、これらの研究ではコンクリート構造物が高温に曝されることを想定していない。

設計時点で想定されていない予期せぬ高温に曝されるコンクリート構造物に関する研究としては、コンクリートの耐火性状についての研究¹¹⁾がある。これらの研究では、数百℃に達する高温に曝されたコンクリートの材料定数の測定実験や、合成スラブの耐火実験などが行なわれている。また、偶然火災にあったコンクリート橋の事例も報告されている¹²⁾。これらの耐火性状に関する研究は実験のみによるものがほとんどである。

以上のように、コンクリート構造物の熱伝導・温度応力に関する既往の研究の主流は100℃程度の温度レベルのものに限られており、それ以上の温度レベルに対する研究は極めて少ない状況にある。また、これらの研究では無筋コンクリートを対象としたものがほとんどであり、鋼材の影響を考慮したコンクリート構造物の高温レベルにおける熱伝導・温度応力性状については未だ十分に研究されていないのが現状である。

そこで本研究は、100℃～1000℃の範囲の高温下に曝された鉄筋コンクリートや鋼・コンクリート合成部材などの鋼材を有するコンクリート構造物の温度特性を明らかにすることを目的としたものである。著者らは過去に、材料定数の温度依存性を考慮しない解析について既に発表している¹³⁾。本報では、まず、高温下におけるコンクリートの材料定数を正確に把握するための実験装置を製作し、それを用いた一連の実験より、材料定数の温度依存性に関する知見を得る。次に、鉄筋コンクリートはりおよび立体トラス型ジベル付鋼板・コンクリート合成はり¹⁴⁾（以下、TSCはり」と略称する）を対象とした加熱実験を行ない、複合構造部材としての温度分布、高温下でのひずみ分布等の温度特性について検討するとともに、この種の複合構造体に適応し得る埋め込み鉄筋モデル¹⁵⁾、¹⁶⁾を導入した有限要素解析法の適用性についても検討を加えるものである。

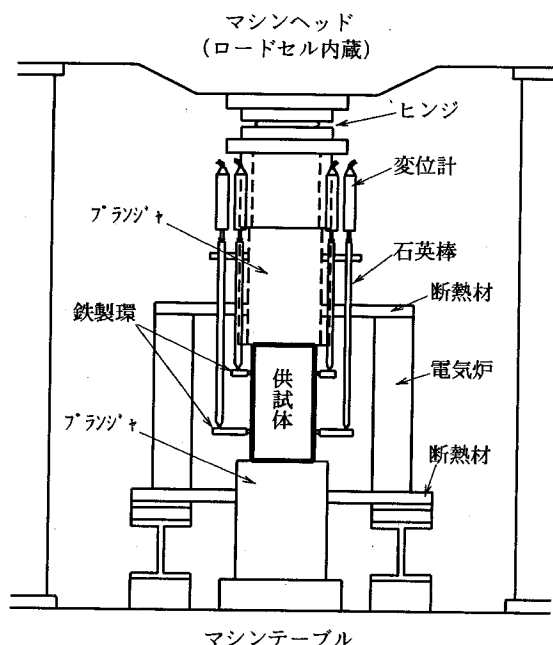


図-1 コンクリートの高温下でのヤング係数測定実験装置

2. 高温下におけるコンクリートのヤング係数、熱伝導率

著者らは、先にコンクリートのヤング係数や熱伝導率の温度依存性が熱伝導・温度応力特性に大きな影響を及ぼすことを解析的に明らかにしている¹⁷⁾。従って、コンクリート構造物の熱伝導・温度応力解析の際にはこれら材料定数の温度依存性を考慮する必要があり、そのデータを得るため、コンクリート円柱供試体の高温下でのヤング係数測定装置を試作し、標準的な普通コンクリートを対象とした一連の実験を行なうとともに、熱伝導率測定実験をも並行して行なう。

(1) ヤング係数の温度依存性

コンクリートのヤング係数の温度による変化を調べるために、一定高温下で1軸圧縮荷重することにより円柱供試体のヤング係数を測定し得る特殊な装置の製作を行なった。その装置を図-1および写真-1に示す。

本装置では、コンクリート供試体は断熱材の円筒容器内に設置され、電熱線により側面から一様に加熱される。数時間の加熱後、一定の高温を保った状態(定常温度状態)で、上下面からコンクリート性プランジャ(φ15cm)を介して1軸圧縮し、その時の

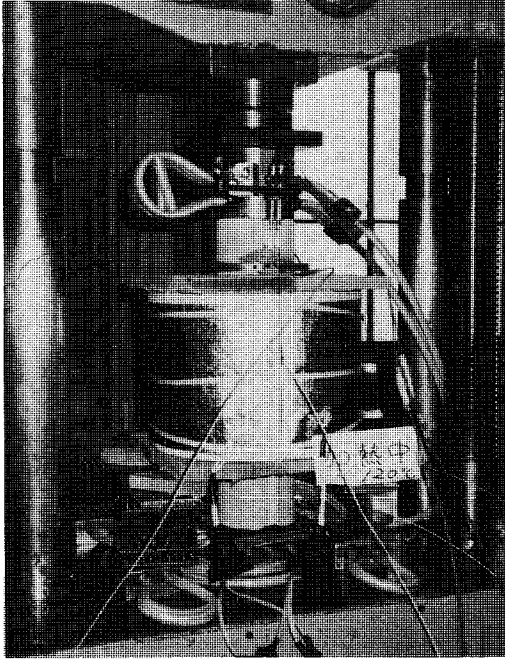


写真-1 コンクリートの高温下でのヤング係数測定実験装置

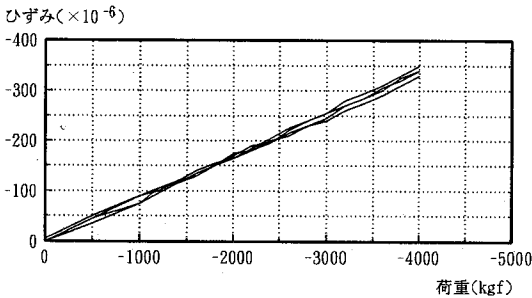


図-2 荷重とひずみの関係の一例
(420℃加熱1体目供試体)

表-1 コンクリートの示方配合と設計強度

設計強度 (kgf/cm ²)	水/セメント比 (%)	単位重量				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
300	50	326	163	781	1086	0.815

縦ひずみを鉄製環と石英ガラス棒を介して電気式変位計(感度1/1000mm)により測定する。図-2に測定によって得られた荷重-縦ひずみ関係の一例を示す。所要のコンクリートのヤング係数はこれらの荷重-縦ひずみ関係を用いて算出する。一般的には圧縮強度の1/3の割線弾性係数が用いられているが、本実験では装置の構造上の制約から25~65kgf/cm²の

ヤング係数残存比 E/E_0 (%)

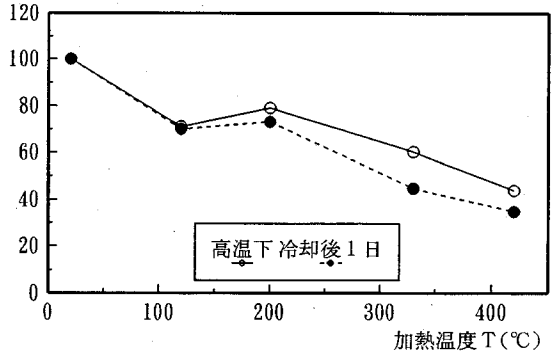


図-3 ヤング係数残存比と加熱温度との関係

間の応力レベルにおける接線弾性係数として算出することとする。

供試体加熱表面における加熱温度は120℃、200℃、330℃および420℃の4ケースとし、加熱する温度上昇速度はいずれの場合も2~3℃/min程度とした。この程度の温度上昇速度では供試体内部と表面の温度差がほとんどないことは予め熱電対を埋め込んだ円柱供試体を用いた予備実験によって確認済みである。また、炉内各部の温度分布もほぼ均一であることが、炉内数ヶ所に配した熱電対によって確かめられている。圧縮試験は同一の温度レベルにつき数体の供試体を用いて行った。供試体はφ10×20(cm)の円柱供試体であり、W/C(水セメント比)50%の配合のものを使用した。表-1に供試体の示方配合と設計基準強度を示す。使用した細骨材は粗粒率2.70、表乾比重2.58の海砂であり、粗骨材は表乾比重2.75の頁岩である。なお実験は、コンクリート打設後10週間気乾養生した後に行った。

以上のようにして求めた高温下におけるコンクリートのヤング係数 E の、常温時のヤング係数 E_0 に対する残存比 E/E_0 と加熱温度 T (°C) との関係を図-3の実線で示す。高温下でのヤング係数は120℃加熱で常温時の70%、200℃加熱で70~80%、420℃加熱で50%程度まで低減しており、温度が高くなるにつれてヤング係数が低減している。しかし、ヤング係数と温度との関係は完全な比例関係ではなく、120℃前後でヤング係数が大幅に低減している。以上、本実験より得られた両者の関係を最小2乗法によって定式化すれば次式のようになる。

$$E/E_0 = 1.02 \times 10^2 \times e^{-0.00185T} \quad (1)$$

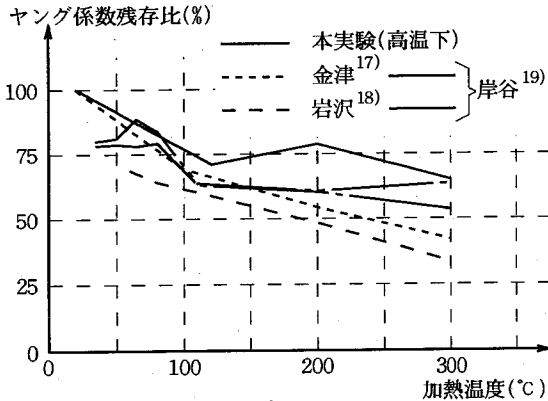


図-4 既往の研究によるヤング係数と加熱温度との関係

既往の研究によれば加熱温度が高くなるにつれてヤング係数が漸減すると報告したもの(図-4^{18), 19)}や、100°C付近でヤング係数が常温よりも低減するものの100°C~200°Cで顕著な低減傾向が認められないとしたもの(図-4²⁰⁾)もあり、未だ定説化されていない状況にある。これらの研究では温度上昇に伴うヤング係数の低減の原因を、骨材とセメントペーストの間の線膨張係数の差による組織弛緩や、水分の移動・逸散に起因する物理的・化学的变化で説明している²¹⁾。本実験の結果を基にする限り、水の沸点である100°C付近でヤング係数が大きく低減していることから、水分の移動・逸散に起因する変化の影響が大きいと見るべきであろう。

加熱試験後の供試体は、常温(約20°C)で1日かけて自然冷却した後、高温下での測定と同一の装置を用いて常温下でのヤング係数を測定した。このようにして求められた冷却直後(1日後)のヤング係数残存比 E/E_0 と温度 T との関係を図-3の破線で示す。図から、冷却直後のヤング係数の方が高温下でのヤング係数よりも小さくなっていることがわかる。既往の研究報告では、冷却後のヤング係数を高温下でのヤング係数として代用しているものも多い。しかし、本実験の結果は高温下のヤング係数と冷却後のヤング係数との間に明らかな差があることを示している。

(2) 熱伝導率の温度依存性

コンクリートはその内部に多くの空隙を持ち、自由水や結晶水等様々な形で水分を含んでおり、コンクリートの熱伝導現象はこれらの水分の移動や気化熱等の影響を受けることになる。特にコンクリートの熱伝導率は、コンクリート自身の熱伝導率とこれらの影響が合成されたものであるため、温度による

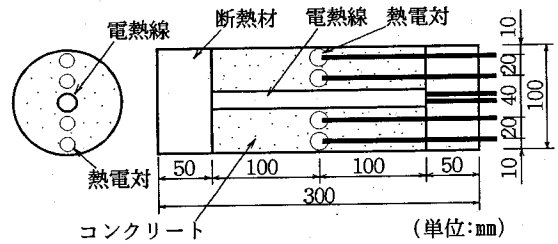


図-5 コンクリートの熱伝導率測定に用いた供試体

変化が複雑になる。そこで、コンクリートの熱伝導率の温度による変化を定量的に把握するため、熱伝導率測定を行なうことにする。

測定は、円柱供試体の定常温度分布における温度勾配から熱伝導率を求める、いわゆる円筒法²²⁾を用いて行なった。測定に供したコンクリート円柱供試体を図-5に示す。この供試体は、その中心軸上に全長にわたって直径15.8mmの内孔が設けられており、この内孔に挿入した電熱線に流れる電流と電圧および熱電対によって得られた温度の値を用いれば、コンクリートの熱伝導率が次の式で算定できる。

$$\lambda = \frac{Q}{2\pi l(T_1 - T_2)} \log \frac{r_1}{r_2} \quad (2)$$

ここに、

λ : 熱伝導率(kcal/mh°C),

l : 円柱供試体の長さ(m),

$Q = E I \times 0.859$ (kcal/h),

E : 電圧(volt), I : 電流(ampere),

r_1, r_2 : 円柱供試体の中心軸から熱電対1, 2までの距離(m),

T_1, T_2 : 熱電対1, 2による温度(°C)

上式で得られる熱伝導率は温度 T_1, T_2 の中間の温度における熱伝導率とした。実験は10体の供試体を用い、合計20のデータを得た。なお、供試体製作に用いたコンクリートは前述のヤング係数測定実験に用いたものと同一である。

図-6に実験によって求めた熱伝導率 λ と温度 T の関係を示す。図から、温度が高くなるに従い、熱伝導率が1°Cにつき約0.1%の割合で低減することが認められた。この関係を最小2乗法によって定式化すれば、次の式が得られる(図-6中の実線)。

$$\lambda = 2.07 - 0.0023 T \quad (3)$$

図-7に、本実験の結果と既往の研究によるコンクリートの熱伝導率測定結果を示す²²⁾⁻²⁴⁾。これら

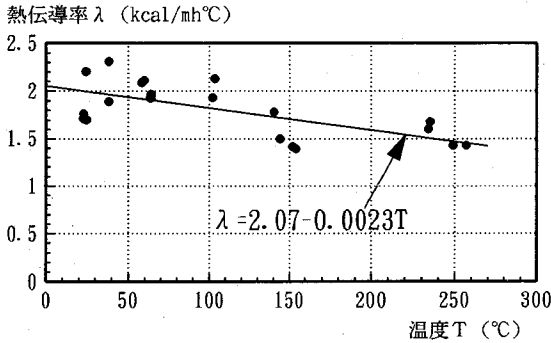


図-6 高温下でのコンクリートの熱伝導率と温度との関係

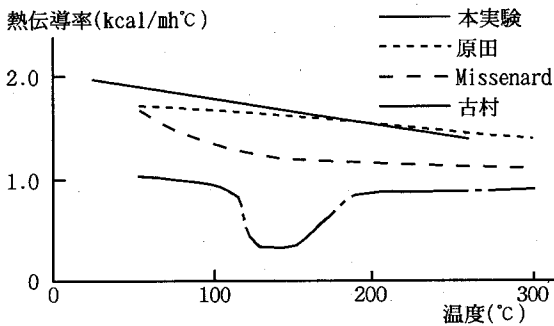


図-7 既往の研究によるコンクリートの熱伝導率

の測定結果は、古村氏の結果を除いていずれも温度上昇とともに熱伝導率が低減することを示しており、本実験と一致する傾向が見られる。

3. 埋め込み鉄筋モデルによる熱伝導・温度応力解析

(1) 埋め込み鉄筋モデル

一般に、鉄筋コンクリートや合成構造などのコンクリート構造物は、主鉄筋や鋼板、形鋼などの主鋼材の他に、スターラップ、ずれ止め等多数の鋼材を内蔵している。そして鋼材の熱伝導率はコンクリートのその数十倍あるため、鋼材の量、位置、方向等の温度特性に及ぼす影響は無視できない。

通常、コンクリート構造物を有限要素法で解析する際には、鋼材に沿って要素分割を行なう離散鉄筋モデルがよく用いられる。しかしながら鋼材配置によって要素分割が制約を受ける離散鉄筋モデルによる解析では、いびつな要素形状の採用や要素数、節点数の増大を余儀なくされる。

そこでその改善のために、要素内の任意の位置に鉄筋を挿入可能な埋め込み鉄筋モデル¹⁵⁾(図-8)が提案されている。このモデルは、要素内に挿入され

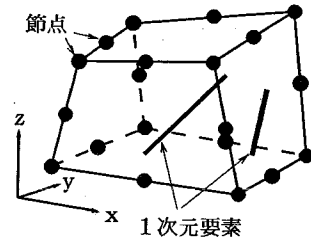


図-8 埋め込み鉄筋モデル

た鋼材の影響を、要素内での位置及び方向を考慮して評価するものであり、その主な特徴は次の2点である。

- ① 鋼材とコンクリートの複合体の挙動を正確に追跡可能である。
- ② 鋼材の配置が、要素分割に影響を及ぼさないため、鋼材配置に依らない自由な要素分割が可能となり、従来の離散鉄筋モデルに比べて要素数・節点数を大幅に減らすことが可能となる。

ただし、本モデルでは要素内の鋼材とコンクリートは完全に付着していると仮定し、両者の相対変位(すべり)を無視する。

このモデルのコンクリート構造物への適用に関する研究は著者らの研究^{13), 16)}を除けば未だ少ない状況にある。ここでは、鉄筋とコンクリートの複合構造物の熱伝導・温度応力問題をより忠実に解明するため、埋め込み鉄筋モデルを拡張・応用し、熱伝導率やコンクリートの弾性係数の温度依存性を考慮し得る一般的な3次元有限要素解析の定式化を試み、以下にその骨子を述べる。

(2) 熱伝導解析法

一般に、ガラーキン法による有限要素法を用いて空間について離散化された熱伝導方程式は次の式で表わされる。

$$[A]\{T\} + [C]\{T\} - \{F\} = \{0\} \quad (4)$$

ここに、

- $[A]$: 系全体の熱伝導マトリックス,
- $[C]$: 系全体の熱容量マトリックス,
- $\{F\}$: 系全体の熱流速ベクトル,
- $\{T\}$: 系全体の節点温度ベクトル,
- $\{0\} = \{0, \dots, 0\}^T$

ここに示すマトリックス $[A]$, $[C]$ およびベクトル $\{F\}$ は、それぞれ各要素の熱伝導マトリックス $[\lambda]$, 熱容量マトリックス $[c]$ および熱流速ベクトル $\{f\}$ を、系の全要素について足し合わせたも

のである。

ここで、鋼材を有するコンクリート構造物の熱伝導挙動を簡易に解析するために、埋め込み鉄筋モデルを拡張・応用する。

埋め込み鉄筋モデルでは、鉄筋、すれ止め等の鋼材はコンクリートを表わすアイソパラメトリック要素内の所定の位置にある1次元要素とみなされ、その温度は、埋め込まれた要素の形状関数によって規定される。この考え方に立てば、鋼材 j の熱伝導マトリックス $[\lambda_{s,j}]$ および熱容量マトリックス $[c_{s,j}]$ は1次元積分を用いて次のように定式化することができる。

$$[\lambda_{s,j}] = \int_{L_{s,j}} \lambda_{s,j} A_{s,j} [B]^T \{R\}_j \{R\}_j [B] dL \quad (5)$$

$$[c_{s,j}] = \int_{L_{s,j}} \rho_{s,j} c_{s,j} A_{s,j} [N]^T \{N\}_j [N] dL \quad (6)$$

ここに、

$\lambda_{s,j}$ 、 $\rho_{s,j}$: 鋼材 j の熱伝導率および密度、
 $c_{s,j}$ 、 $A_{s,j}$ 、 $L_{s,j}$: 鋼材 j の比熱、断面積および全長

式(5)および式(6)中の勾配マトリックス $[B]$ および形状関数 $[N]$ は、コンクリートを表わす20節点アイソパラメトリック要素のものと同一である。また、ベクトル $\{R\}_j$ は鋼材 j の挿入される向きを表わす方向余弦ベクトルであり、次の式で表わされる。

$$\{R\}_j = \{\cos \phi_{x,j}, \cos \phi_{y,j}, \cos \phi_{z,j}\} \quad (7)$$

ここに、 $\phi_{x,j}$ 、 $\phi_{y,j}$ および $\phi_{z,j}$ は、それぞれ x 軸、 y 軸および z 軸と鋼材 j のなす角である。

m 本の鋼材($j=1 \sim m$)が埋め込まれたアイソパラメトリック要素全体の熱伝導マトリックス $[\lambda]$ および熱容量マトリックス $[c]$ は、アイソパラメトリック要素自体の熱伝導マトリックス $[\lambda_0]$ および熱容量マトリックス $[c_0]$ に、式(5)および式(6)で表わされる m 本の鋼材($j=1 \sim m$)のマトリックス $[\lambda_{s,j}]$ および $[c_{s,j}]$ を足し合わせたものとすれば良く、それぞれ次の式で表わされる。

$$[\lambda] = [\lambda_0] + \sum_{j=1}^m [\lambda_{s,j}] \quad (8)$$

$$[c] = [c_0] + \sum_{j=1}^m [c_{s,j}] \quad (9)$$

さて、非定常熱伝導方程式(4)を解くに当たっては時間について離散化する必要がある。そこで時間について離散化する手法としてクランク・ニコルソ

ン法を採用する。その際、対象とするコンクリートや鋼材の熱伝導率は温度依存性を持っており、そのため熱伝導マトリックス $[A]$ が温度の関数となり、式(4)は非線形となる。そこで、本解析では式(4)を解く際に、各時間ステップ i において熱伝導マトリックス $[A]$ を修正し、次の時間ステップ $t+\Delta t$ の節点温度ベクトル $\{T(t+\Delta t)\}$ が収束するまで繰り返し計算を行なう、いわゆる単純繰り返し代入法²⁵⁾を採用することとした。

(3)温度応力解析法

ここでは、(1)節で提案した埋め込み鉄筋モデルの温度応力解析への拡張適用を行なう。

一般にガラーキン法を用いて離散化された温度応力解析の基礎式は次の式で表わされる。

$$[K]\{d\} + \{F_s\} = \{0\} \quad (10)$$

ここに、

$[K]$: 系全体の剛性マトリックス、
 $\{F_s\}$: 系全体の温度ひずみによる見かけの節点荷重ベクトル、
 $\{d\}$: 系全体の節点変位ベクトル

ここに示すマトリックス $[K]$ およびベクトル $\{F_s\}$ は、各要素の剛性マトリックス $[k]$ および温度ひずみによる見かけの節点荷重ベクトル(以後、温度ひずみ節点荷重ベクトルと略称する) $\{f_s\}$ をそれぞれ、系の全要素について足し合わせたものである。

要素内の一つについて着目した場合、 m 本の鋼材($j=1 \sim m$)を埋め込まれたアイソパラメトリック要素全体の剛性マトリックス $[k]$ および温度ひずみ節点荷重ベクトル $\{f_s\}$ は、アイソパラメトリック要素自体の剛性マトリックス $[k_0]$ および温度ひずみ節点荷重ベクトル $\{f_{s,0}\}$ に、鋼材のマトリックス $[k_{s,j}]$ およびベクトル $\{f_{s,j}\}$ を足し合わせたものとすれば良く、それぞれ次の式で表わされる。

$$[k] = [k_0] + \sum_{j=1}^m [k_{s,j}] \quad (11)$$

$$\{f_s\} = \{f_{s,0}\} + \sum_{j=1}^m \{f_{s,j}\} \quad (12)$$

4. 鉄筋コンクリートはりおよび鋼・コンクリート合成はりの温度特性

高熱負荷を受ける鉄筋コンクリートはりおよび鋼・コンクリート合成はりの挙動を解明するとともに、前述の有限要素解析の有用性を検証するため、100

℃～1000℃の領域を対象とした加熱実験を行なう。比較的低温域(100℃～200℃)については温度制御が容易な電熱線による加熱実験結果を活用する。この種の実験内容についてはその成果の一部を既に文献(13)で報告しているの、ここでは詳細を省き必要事項のみ略述する。一方、200℃～1000℃についてはガスバーナーによる加熱実験で対処するものとする。すなわち、この場合 600℃以下では温度制御が必ずしも安定しないが、火力が強い装置であるため、加熱温度を常温から1000℃の範囲まで取り扱うことが可能となる。いずれの場合も測定は、はり内部の温度分布、ひずみ分布を対象とする。

(1)加熱実験の概要

電熱線による加熱実験に供した鉄筋コンクリートはり(RCはり)および鋼・コンクリート合成はり(TSC合成はり)の供試体はそれぞれ2体、合計4体であり、図-9に示す諸元を有する。TSC合成はりは底部鋼板、圧縮鉄筋、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り、その寸法諸元については鉄筋コンクリートはりと同様と曲げ耐力およびせん断耐力がほぼ等しくなるように決定した。また、ガスバーナーによる加熱実験に供したTSC合成はり供試体(2体)を図-10に示す。ガスバーナーによる加熱実験ではこのTSCはりに加えて、同寸法の無筋コンクリートはりも実験に供した。これらのはり供試体のコンクリートの示方配合は前述の材料定数測定試験に用いたものと同じである。

電熱線による加熱実験は、図-11に示すような電熱線を利用して熱放射効果を極力回避できるような加熱装置を考案し、それを用いて供試体を圧縮鉄筋側のコンクリート面から加熱し、内部温度とひずみを測定した。供試体は加熱装置に上下逆に配置され、電熱線によって熱せられた熱気が供試体の圧縮鉄筋側(加熱装置に配置された状態での下面側)に触れることによって供試体に熱が伝えられる。加熱範囲とその反対側の面以外はすべて断熱材により断熱されている。加熱温度は加熱開始時の常温(約14℃)から、加熱時間に比例して温度上昇させ、約5時間で200℃に達して、その後は220℃前後でほぼ安定させた。

ガスバーナーを用いた加熱実験装置を写真-2に示す。

電熱線を用いた加熱実験では、加熱装置の限界により最高加熱限度を200℃としたが、ガスバーナーによる加熱実験では、コンクリート構造物が火災に曝されたときを想定した、1000℃までの高温レベルを対象とする。実験に用いたガスバーナーは燃料

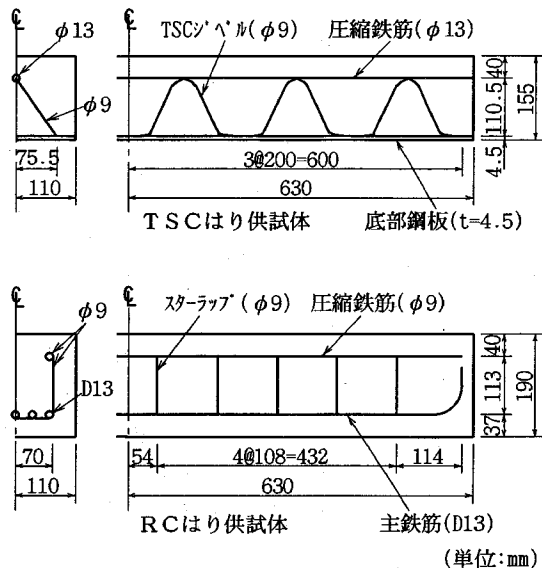


図-9 電熱線による加熱実験に用いたはり供試体

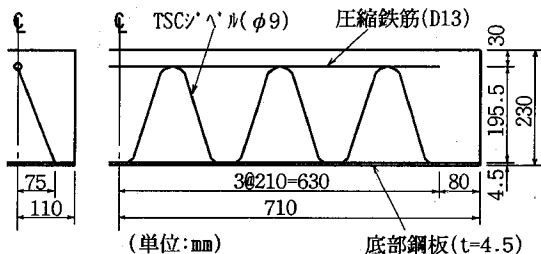


図-10 ガスバーナーによる加熱実験に用いたTSCはり供試体

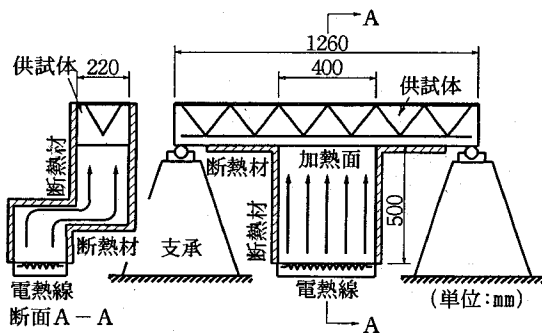


図-11 電熱線を用いた加熱装置

としてLPガスを用い、燃焼ガスを供試体表面の加熱面に直接吹き付けることによって、はりの加熱を行なう。加熱温度は、室温(約10℃)から約16℃/分のペースで直線的に上げていくこととした。その際、

表-2 解析に用いた諸定数

	熱伝導率 kcal/mh°C	熱容量 kcal/m³°C	熱伝達係数 kcal/m²h°C	線膨張係数 x10⁻⁶/°C	ヤング係数 x10⁹kgf/cm²	ポアソン比
コンクリート	2.07-0.0023T*	420	10.0	10.0	3.27e ^{-0.00178T*}	0.192
鋼材	60-0.06T*	890		11.7		21.0

*T:温度(°C)

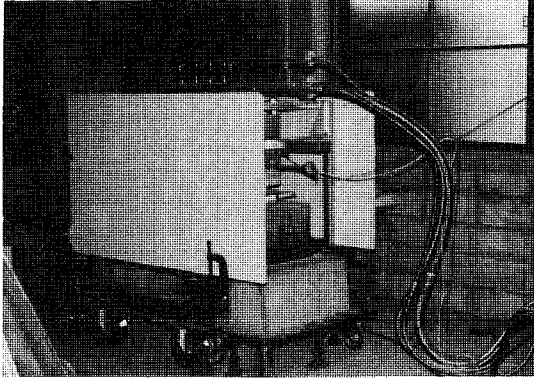


写真-2 ガスバーナーを用いた加熱実験装置

加熱温度の上限を1000°Cとし、1000°Cに達した後は一定の温度を保つこととした。

なお、供試体内の温度や加熱温度の測定にはKタイプ熱電対(測定最高温度1200°C、誤差±0.75%以内)を用いた。

(2)解析の概要

まず解析で用いた諸定数を表-2に示す。空気と固体との熱伝達係数、鋼材の諸定数は既往の文献^{26)・27)}の値を、コンクリートの諸定数の内、熱容量および線膨張係数は、既往の文献^{24)・26)}の値を採用した。コンクリートのヤング係数および熱伝導率は、前述の高温下での測定実験による値を用いた。ただしコンクリートの熱容量 $\rho \cdot c$ とポアソン比 ν については高温下でのデータが得られなかったことと $\rho \cdot c$ と ν の値を変化させても計算結果にあまり差が見られないことを考え合わせ、ここでは常温時の値 $\rho \cdot c = 420(\text{kcal/m}^3\text{°C})$ 、 $\nu = 0.192$ を用いた。

ただしガスバーナーによる加熱実験では、ガスバーナーのノズルから吹き出される燃焼ガスが供試体表面に直角に吹き付けられる、いわゆる衝突噴流と呼ばれる境界条件となっている。このため、燃焼ガスと供試体表面との間の熱伝達係数を燃焼ガスの流速を考慮して修正した²⁸⁾。室内などでの無風状態での熱伝達計数は通常6~10(kcal/m²h°C)とされている。本装置では加熱温度を高くするためには、より多くの燃料を燃焼させる必要があり、供試体表面に吹きつける燃焼ガスの流速が上がることになる。

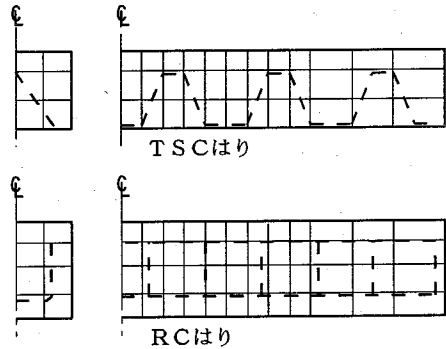


図-12 要素分割(電熱線による加熱実験)

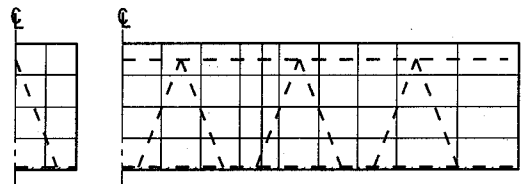


図-13 要素分割(ガスバーナーによる加熱実験)

そこで、ガスの流速を測定し、熊田らの算定式²⁸⁾を用いて衝突噴流境界条件での熱伝達係数を定め、解析に用いた。これによると熱伝達係数は加熱温度500°Cで無風時の約1.9倍、1000°Cで無風時の約4.0倍となる。従ってガスバーナーによる加熱状態は、無風状態での加熱に比べて加熱を受ける境界面での熱の流入量がかかなり多くなり、TSC合成はりによってより厳しい条件下での加熱となる。

前述の実験で求めた熱伝導率は常温から250°C程度までの温度範囲のものであるのに対し、ガスバーナーによる加熱実験ではコンクリートの温度が250°Cを越し400°C程度まで達する領域を対象とするものである。しかしながら、250°Cを越える場合の熱伝導率は未だ究明されていないため、一応、式(3)が適応できるものと仮定して解析を進めるものとする。

解析に用いた3次元要素分割を図-12および図-13に示す。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配置によらず自由に行なうことができる。ここでは供試体形状の対称性を考慮してはり全体の1/4について要素分割を行なった。要素数および節点数は、それぞれ、電熱線による加

熱実験ではTSCはり供試体が72および521、RCはり供試体が96および661、ガスバーナーによる加熱実験のTSCはり供試体は80および557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、電熱線による加熱実験では10min.とし、ガスバーナーによる加熱実験では3min.とした。

(3)結果および考察

a)温度分布

図-14(a, b)に電熱線を用いた加熱実験による圧縮鉄筋を通る断面における温度分布の実験結果および解析結果を示す(文献(13)の解析例では、温度依存性が考慮されていない)。また、図-15(a, b)にはガスバーナーを用いた加熱によるものを示す。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。但し、図-15(b)(ガスバーナーによる無筋コンクリートはりの加熱)には解析結果のみが示されている。これは無筋コンクリートでは加熱開始後10分以内の時点で加熱面全体にわたって爆裂が生じ実験の継続が不能となったためである。この爆裂現象についてはひずみ分布についての考察と併せて後述する。

圧縮鉄筋の温度は電熱線による加熱では加熱開始後6時間でTSCはり、RCはり共に80℃前後に、またガスバーナーによる加熱では加熱開始後60分で最高250℃となっている。はり内部の最高温度は、電熱線による加熱では80~100℃、ガスバーナーによる加熱では400℃台に達している。温度勾配は加熱範囲付近の部位では急であり、加熱範囲から遠ざかるにつれて緩やかになっている。このような非定常熱伝導の一般的傾向は解析結果によって良く表わされている。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熱伝導解析に十分適用し得ることが確かめられた。

なお、解析値と実験値との間の誤差の原因としては、

- ①加熱装置内の熱気温度の場所による不均一
 - ②加熱装置と供試体との間の熱放射の影響
 - ③供試体表面の粗さが熱伝達係数に与える影響
(特にガスバーナーによる衝突噴流の場合)
- 等が考えられる。また、後述するように、ガスバーナーによる加熱実験では温度応力によってコンクリートにひび割れが発生した。それにとまう、
- ④ひび割れに沿った水分の移動

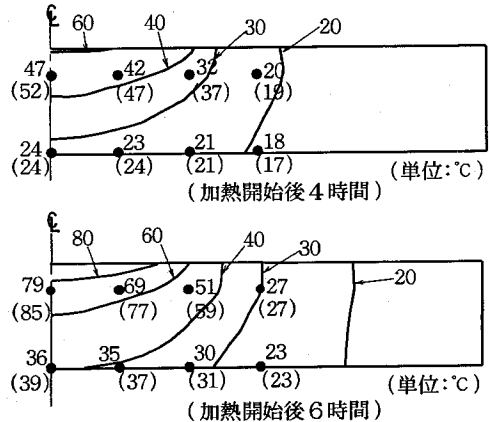


図-14(a) TSCはりの温度分布
(電熱線による加熱実験)

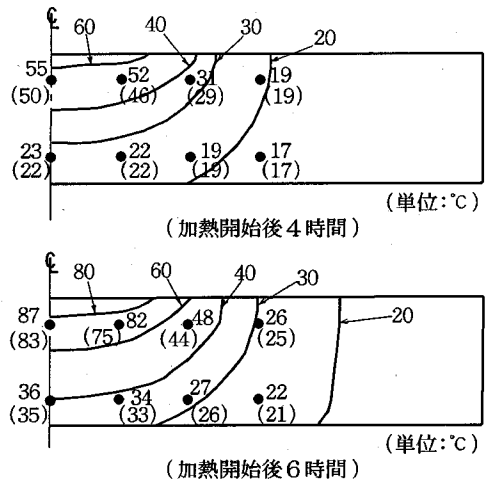


図-14(b) RCはりの温度分布
(電熱線による加熱実験)

⑤衝突噴流の、ひび割れを介してのはり内部への浸透
等も誤差の原因として考えられる。

電熱線による加熱結果(図-14(a, b))によれば、TSCはり、RCはりとの間には、両者の鉄筋量がほぼ等しいため大きな差は認められない。TSCはり、RCはりに比べて主鉄筋のかぶりの分だけ桁高が小さくなっている。しかし本実験の加熱継続時間並びに加熱温度範囲では、コンクリートの断熱効果が十分大きく、主鉄筋側表面の温度が少ししか上昇しないため、かぶりの有無による桁高の違いの影響は

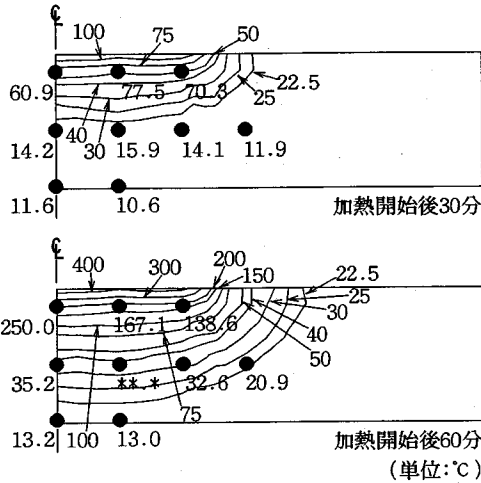


図-15(a) T S Cはりの温度分布
(ガスバーナーによる加熱実験)

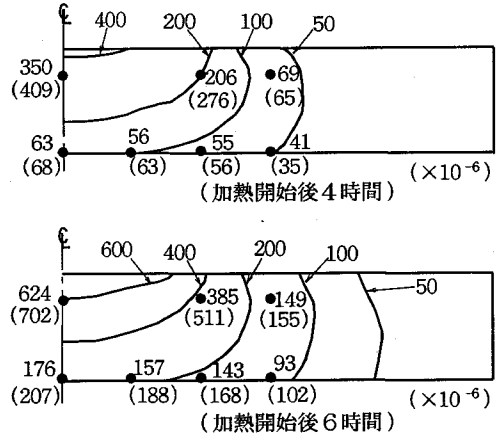


図-16(a) T S Cはりのスパン方向ひずみ分布
(電熱線による加熱実験)

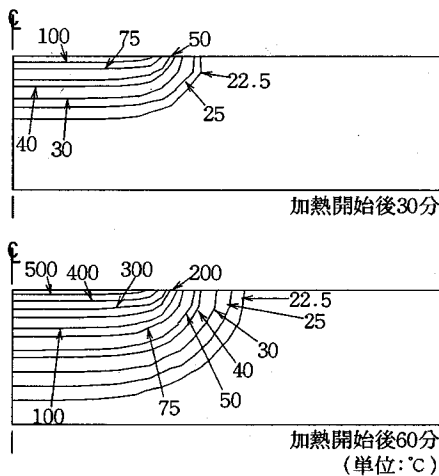


図-15(b) 無筋コンクリートはりの温度分布
(ガスバーナーによる加熱実験)

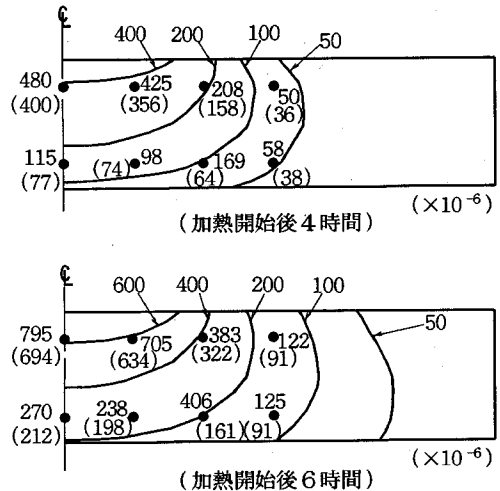


図-16(b) R Cはりのスパン方向ひずみ分布
(電熱線による加熱実験)

明瞭には現れなかった。

また、ガスバーナーによる加熱の解析結果(図-15(a, b))によれば、無筋コンクリートはりの温度勾配はT S Cはりの温度分布よりも急となっており、加熱面付近の温度は100°C程高くなっている(加熱開始後60分の図を参照)。これは大きな熱伝導率を持つ鋼材の影響である。このことは熱が未だ圧縮鉄筋まで達していない加熱開始後15分の時点でT S Cはりおよび無筋コンクリートはりの温度分布にほとんど差がないことから裏付けられる。

b) ひずみ分布

次に、図-16(a, b)に電熱線による加熱実験によるスパン方向ひずみ分布の実験結果および解析結果を示す。また、図-17(a, b)にガスバーナーによる加熱実験によるものを示す。実線は解析値を、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を示す(但し、爆裂現象発生のため無筋コンクリートは解析値のみ)。実験値で括弧内の数値は2体目の供試体のものである。なお、正值は引張を表わす。図から明らかなように、この種の実験においては載荷実験などに比較して、本来、供試体

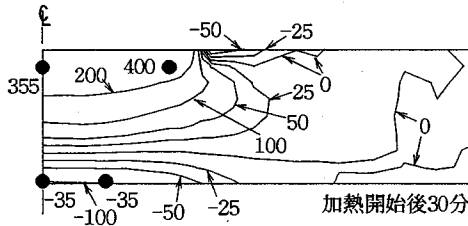


図-17(a) TSCはりのひずみ分布
(ガスバーナーによる加熱実験)

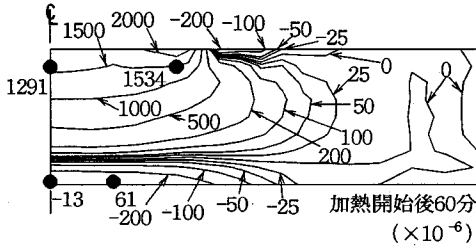


図-17(b) 無筋コンクリートはりのひずみ分布
(ガスバーナーによる加熱実験)

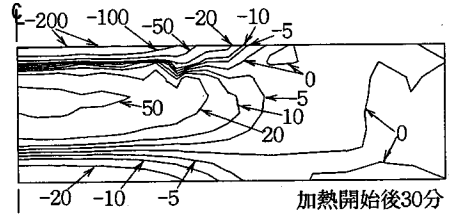
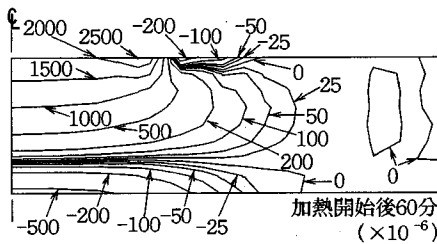
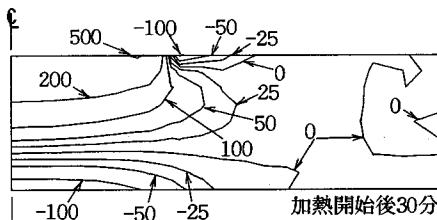
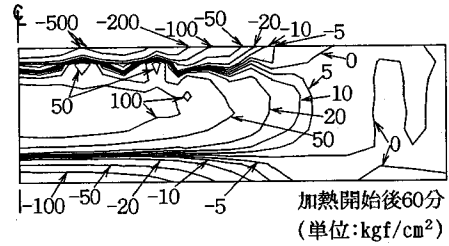


図-18 TSCはりの応力分布
(ガスバーナーによる加熱実験)



間の測定値のばらつきも大きく、従って実験値と解析値の一致を見るのは極めて困難である。それに対して本実験で、多くの測点で実験値と解析値との誤差を20%以内に抑えることができてきていることは評価に値すると考えられる。以上より、埋め込み鉄筋モデルを用いた本解析法は、複雑に鋼材が配置された合成構造に対しても要素分割等の取り扱いが簡便であり、かつ、比較的精度の良い解が得られることから、有用性は高いと判断される。

しかしながら、ガスバーナーによる加熱実験結果(図-17(a))に着目すれば、底部鋼板については、加熱開始後15分では解析値と実験値が一致しているものの、加熱開始後60分では両者の差は著しい。これ

は急激な加熱により、はりの中間レベル高さの付近で引張応力によるひび割れが生じた結果によるものと考えられる。その根拠の一つとして図-18に示すスパン方向応力の分布を見れば、加熱開始後30分ではり中央部の一部に 50kgf/cm^2 以上の引張応力が生じていることが挙げられる。すなわち、この時点でコンクリートに引張ひび割れが生じたと判定できることになる。このひび割れ発生によってコンクリートの引張抵抗力が低減し、応力が解放され、それに伴い鋼板の圧縮ひずみが低減されたものと考えられる。高温下においてコンクリートのひび割れを考慮し得る非線形解析法の確立が望まれるが、これは今後の研究課題としたい。

図-17(a, b)に示すTSCはりと同様に無筋コンクリートはりのひずみ分布によれば、ひずみ分布の傾向は両者ともほぼ同じであるが、最大ひずみは無筋コンクリートの方が大きめの値となっている。この差は温度分布の違い(図-14(a, b)参照)で説明できるが、コンクリートと鋼材の線膨脹係数の違いによる影響も原因として挙げられる。

ところで、前述したようにガスバーナーによる無筋コンクリートの加熱実験では加熱開始後約10分以内の時点で加熱面全体に爆裂が生じた。この爆裂によるはりの破壊ははり表面から5cmの深さにまで及ぶものであった。爆裂の原因としては加熱による間隙の圧力の増加や蒸気の急速な流れ等が従来から指摘されている²⁹⁾。図-15(a, b)および図-17(a, b)に示す温度分布およびひずみ分布を比較しても、TSCはりと同様に無筋コンクリートはりとの間には最大温度や最大ひずみの違いは20%程度認められるものの、

温度およびひずみの分布の傾向にはほとんど差が認められない。即ち、本解析の結果では爆裂現象の発生を予測することは不可能であると言わざるを得ない。しかし一般に爆裂現象は、温度およびひずみの分布だけではなく、水分の分布、骨材の組成や、ポアサイズの影響を受けると言われており²⁰⁾、爆裂現象の発生まで正確に予測するためにはこれらを含めて考慮した複雑な解析が必要となる。本実験の結果を見る限りでは、TSCはりと無筋コンクリートはりは同じ加熱条件であったにも関わらずTSCはりは2体とも爆裂現象から免れており、コンクリート中の鋼材の存在が爆裂の発生防止に何らかの寄与をしたと考えるべきである。

5. まとめ

本研究は1000℃に達する高温下に曝された、RCはりおよびTSC合成はりの温度特性を明らかにすることを主目的とし、

①高温下におけるコンクリートのヤング係数および熱伝導率測定実験を行ない、これらの材料定数やその温度依存性を明らかにするとともに、

②埋め込み鉄筋モデルによる熱伝導・温度応力解析手法を提案して、その有用性を実験結果との比較により実証したものである。

本研究により得られた成果を以下に要約する。

(1) 高温下のコンクリートのヤング係数を精度良く定量的に測定することができる計測装置を試作し、標準的な普通コンクリートを対象とした実験を行なった。その結果、高温下におけるコンクリートのヤング係数は100℃で常温時の約70%、420℃で約50%程度まで低減することが明らかにされ、そのヤング係数の温度依存性の評価式を導くとともに、高温下でのヤング係数と冷却後のヤング係数との間に差があること等の知見を得た。

(2) さらに、コンクリートの熱伝導率についても温度依存性の評価式を実験結果から定め、1℃の温度上昇につき約0.1%の割合で低減することが明らかとなった。

(3) RCはり、TSC合成はりの電熱線およびガスバーナーによる2種類の高温加熱実験を行なった。これにより、圧縮鉄筋の最高温度は、電熱線による加熱(加熱継続時間6時間、最高加熱温度約220℃)では80℃前後に、ガスバーナーによる加熱(同60分、1000℃)では約250℃に達することなど、これらのはりの高温下での温度特性に関する種々の知見を得るとともに、実験結果との比較により、提案した埋め込み鉄筋モデルを用いた解析法の有用性を実証した。

参考文献

- 1) 田辺忠顕, 原田晃, 内田敏久: ダム嵩上げ時の温度応力の実測と温度応力検討方法についての提案, 土木学会論文報告集, 第333号, pp. 185-196, 1983.
- 2) 森本博昭, 小柳冷: コンクリート構造物の温度ひび割れ予測に関する研究, 土木学会論文報告集, 第338号, pp. 197-206, 1983.
- 3) たとえば, 木村克彦, 小野定, 後藤貞雄, 江渡正満: プレケーリングによるマスコンクリート温度ひび割れ制御効果の解析, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 1129-1136, 1989.
- 4) たとえば, 田辺忠顕, 山川秀次, 渡辺朗: パイプクーリングにおける管断面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析, 土木学会論文報告集, 第343号, pp. 171-179, 1984.
- 5) 秋野金次, 渡部征男: コンクリート製原子炉格納容器の設計法, コンクリート工学, Vol. 19, No. 7, pp. 79-87, 1981.
- 6) 吉田一: 原子炉建屋の熱応力解析, コンクリート工学, Vol. 22, No. 3, pp. 66-69, 1984.
- 7) 阿部博俊, 青柳征夫, 田辺忠顕: プレストレストコンクリート圧力容器の温度クリープ性状とクリープ解析について, コンクリートジャーナル, Vol. 12, No. 6, pp. 47-57, 1974.
- 8) たとえば, 塩屋繁松, 川股重也, 高山誠, 秋山宏, 金井頼利: 有限要素法を用いた原子炉圧力容器のクリープ解析, コンクリートジャーナル, Vol. 12, No. 6, pp. 111-126, 1974.
- 9) 加藤宗明: 原子炉関連施設とコンクリート, コンクリート工学, Vol. 27, No. 4, pp. 21-28, 1989.
- 10) たとえば, 山本康博, 杉正: LNG地下タンクの設計法, コンクリート工学, Vol. 19, No. 7, pp. 72-78, 1981.
- 11) たとえば, 横室隆, 依田彰彦: 熱を受けたコンクリートと鉄筋との付着強度・圧縮強度・ヤング率, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9-1, pp. 169-174, 1987.
- 12) たとえば, 小山堯: 耐久性診断事例—火災—, コンクリート工学, Vol. 26, No. 7, pp. 84-88, 1988.
- 13) 太田俊昭, 黒田一郎, 山口栄輝, 日野伸一: 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, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 1319-1328, 1991.
- 14) たとえば, 太田俊昭, 日野伸一, 興石正己, 日向泰山: 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. 34A, pp. 297-305, 1988.
- 15) ASCE Committee on Concrete and Masonry Structures, *A State-of-the-art report on finite element analysis of reinforced concrete*, Task Committee on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ASCE Spec. Publ., 1981.
- 16) 山口栄輝, 太田俊昭, 興石正己, 川野清: コンクリート

- 構造物の有限要素法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. 36A, pp. 305-313, 1990.
- 17) 太田俊昭, 黒田一郎, 日野伸一: 高温下における鉄筋コンクリートはりの熱伝導特性と温度応力特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13-1, pp. 333-338, 1991.
- 18) 金津努, 中野毅弘, 遠藤達巳: 高温にさらされるコンクリートの物性に関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演概要集, No. 38, pp. 113-114, 1983.
- 19) 岩沢二郎, 嵩英雄, 佐久田昌治, 佐藤忠博: 高温にさらされた蛇紋岩コンクリートの諸性質その1, 建築学会大会学術講演梗概集, pp. 461-462, 1977.
- 20) 岸谷孝一, 嵩英雄, 奥山治也, 奥野亨: 20~300°Cの高温にさらされたコンクリートの諸性質に関する研究, 建築学会大会学術講演梗概集, pp. 143-144, 1972.
- 21) 嵩英雄, 大野定俊: 高温下のコンクリートの物性, コンクリート工学, Vol. 22, No. 3, 1984.
- 22) 原田有: 高温度に於けるセメントモルタル及びコンクリートの熱伝導率の変化, 建築学会研究報告, No. 18, 1952.
- 23) Missenard, A.: Recherches Theoriques et Experimentales sur la Conductivite Thermique des Betons, *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, Nos. 211-212, pp. 950-968, 1965.
- 24) 古村福二郎: コンクリートと熱(1), コンクリート工学, Vol. 17, No. 8, pp. 87-95, 1979.
- 25) 矢川元基, 宮崎則幸: 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.
- 26) 徳田弘: 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.
- 27) 渡辺正紀・佐藤邦彦: 溶接工学とその応用, 朝倉書店, p. 163, 1965.
- 28) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂第4版, pp. 65-66, 日本機械学会, 1986.
- 29) U. Шайтэр-著, 森永繁監訳: コンクリートの熱的性質, 技法堂出版, pp. 124-126, 1983.

(1994. 10. 21 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE THERMAL PROPERTIES
OF CONCRETE STRUCTURAL MEMBERS
UNDER EXTERNAL HIGH TEMPERATURE LOADING

Ichirou KURODA, Shin-ichi HINO and Toshiaki OHTA

Heat conduction and thermal stress problems of reinforced concrete members and steel-concrete composite members are discussed based on the experimental and theoretical points of view under external high temperature loading condition such as 1000°C. Finite element analysis using an extended embedded model for reinforcements is presented to solve the three dimensional thermal problems of these members. In addition, the heat conductivity and Young's modulus of concrete are measured under such high temperature.