

# 火災時におけるコンクリート内部温度の予測手法

齋藤 秀人 森田 武  
(技術研究所) (技術研究所)

## Calculating Temperatures in Concrete Elements Exposed to Fire

by Hideto Saito and Takeshi Morita

### Abstract

Six concrete-filled steel tube column specimens without fire protection measures were subjected to fire test for three hours using the fire temperature-time curve prescribed in ISO 834. The specimens were circular sections with diameters of 300, 400 and 500 mm, and rectangular sections with side lengths of 300, 400 and 500 mm. During fire test, the temperatures inside the specimens were accurately measured. The test results were used to investigate thermal properties and were applied to numerical simulation of temperatures. The calculated temperatures agreed well with the measured temperatures when the Eurocode 4's recommended values for thermal conductivity and specific heat of concrete were multiplied by 0.8 and 1.2, respectively. These corrected thermal properties for concrete were validated by a numerical simulation of the temperatures in building elements exposed to an ISO 834 test fire. The building elements used in this test consisted of unprotected steel tube columns filled with concrete of various strengths, and T-shaped composite girders. The method also proved valid for calculating temperatures in tunnel fires, as shown by numerical simulations using reinforced concrete segments made with AFR (Advanced Fire Resistant) concrete in a RABT fire.

### 概 要

概略外形寸法が300・400・500 mmの角形と円形の無耐火被覆CFT柱6体を対象に、ISO 834に基づく3時間の加熱試験を行って内部温度を精度よく測定し、その温度解析を通して熱定数を検討した。その結果、コンクリートの熱伝導率をEC4の0.8倍、比熱をEC4の1.2倍とし、鋼材の熱定数をEC4とすることにより、内部温度解析値と実測値が良く一致し、無耐火被覆CFT柱の内部温度の実用的な予測を可能にした。さらに同様の温度解析によって、強度が異なる無耐火被覆CFT柱やT形合成梁、およびRABT加熱を受けるAFRコンクリート平板の内部温度も実用的に予測できることを確認した。

### § 1. はじめに

1998年の建築基準法改正によって、かつては仕様書的に耐火構造とされてきた鉄筋コンクリート（以下RC）造の耐火設計が可能になった。しかし内部温度を予測する告示式は、一次元・半無限体の温度分布式をベースに、表面温度を加熱温度に等しいとし、材料の熱拡散率の温度依存性を無視するなど、大胆に簡略化している。一方、利用できる実験データが少ないとして、実験データとの照合も間接的にしか行っていない。

利用できる実験データが少ないとされるのは、コンクリートに特有な加熱初期の爆裂・剥落に起因していると考えられる。爆裂・剥落による断面欠損量の経時変化を定量的に把握することは困難であるので、正確な温度

分布を特定できるデータが少ないことになる。

こうしたRC造に比較して、コンクリートの外周部に鋼管があるコンクリート充填鋼管（以下CFT）柱に爆裂・剥落が生じることはまれで、CFT柱は内部温度測定に適しているといえる。一方CFT柱は一定の条件で無耐火被覆化できるので、様々な断面寸法の無耐火被覆CFT柱の載荷加熱試験が多数行われている。しかし試験時の内部温度を詳細に報告している例は少ない。紙面に限りがある論文などに、膨大な時刻歴データを全て掲載するのは難しいからである。

そこでRC系部材の内部温度を実用的に予測することを目的として、無耐火被覆CFT柱の加熱試験を行い、基礎的な温度データを精度よく得た上で、温度解析に適した熱定数を見いだすことにした<sup>1)</sup>。

## § 2. 既往の研究

無耐火被覆 CFT 柱の温度性状に関しては、齋藤・上杉による研究<sup>2,3)</sup>以降、下川ら<sup>4)</sup>や道越ら<sup>5)</sup>により実験的あるいは解析的研究が行われ、柴田<sup>6)</sup>による解析的研究はコンクリート充填鋼管構造設計施工指針<sup>7)</sup>にまとめられている。

材料の熱伝導率・比熱などの高温特性についての研究は以前から行われ<sup>8-10)</sup>、近年まとめられたものとしては Eurocode 4 (以下 EC4)<sup>11)</sup> と建築物の総合防火設計法 (以下 防火総プロ)<sup>12)</sup> がよく知られている。

## § 3. 加熱試験

試験体は、概略外形寸法が 300・400・500 mm である角形断面と円形断面で、長さ 1,150 mm の 6 体である。長さ方向中央付近の 6 断面で温度測定を行い、図 - 1 に示すように断面の中心で 1 点、その他では対称条件を満たす各 4 点を測点とし、角形断面のコーナー部には K 熱電対を多く配した。コンクリートの調合と試験結果(封かん養生)を表 - 1・2 に示す。

試験は、清水建設(株)の耐火試験炉において、概略外形寸法が同じ角形と円形を 1 体ずつ図 - 2 に示すように垂直にセットして実施した。なお断熱を目的として、試験体の上下端部約 10 cm および上面には毛布状の耐火

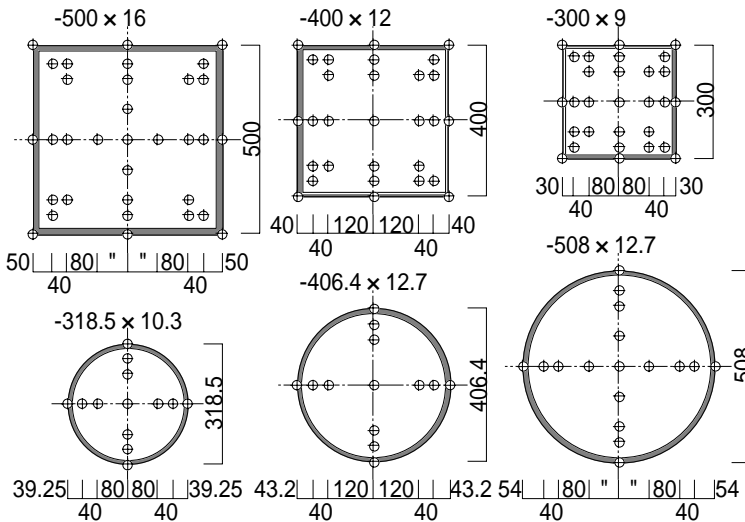


図 - 1 試験体の断面と温度測定位置

表 - 1 コンクリートの調合

Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg / m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	Ad.*
21.0	4.5	38.9	46.2	175	450	773	927	6.08

\* : 高性能AE減水剤標準形

被覆を施した。加熱は ISO 834<sup>13)</sup> に定める標準加熱 3 時間とし、加熱終了後も 3 時間程度の計測を行った。その結果、炉内温度は標準加熱温度曲線にほぼ一致し、対称条件を満たす各 4 測点での内部温度には大きなバラツキは認められなかった (図 - 7・8 参照)。

## § 4. 温度解析

内部温度解析は、加熱温度・熱伝達率・材料の熱定数・コンクリートの含有水分の取扱いを定め、有限要素法あるいは差分法により一般に行われている。本論では、角形断面に対しては 1/4 断面を対象にした二次元差分法、円形断面に対しては一次元差分法を用いた。第 i-1 層 (温度  $T_{i-1}$ , 熱伝導率  $\lambda_{i-1}$ , 層厚  $d_{i-1}$ ) から第 i 層 (温度  $T_i$ , 熱伝導率  $\lambda_i$ , 層厚  $d_i$ ) に面積 ( $A_i$ ) を通して微小時間 ( $\Delta t$ ) に流入する熱量 ( $q_i$ ) の一次元差分式を式 (1) に、第 i 層 (比熱  $C_i$ , 密度  $\rho_i$ , 体積  $V_i$ ) の微小時間 ( $\Delta t$ ) の温度上昇 ( $\Delta T_i$ ) を式 (2) に示す<sup>12)</sup>。

$$q_i = \frac{2 \cdot (\lambda_{i-1} \cdot d_{i-1} + \lambda_i \cdot d_i)}{(d_{i-1} + d_i)^2} \cdot (T_{i-1} - T_i) \cdot A_i \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta T_i = \frac{q_i - q_{i+1}}{C_i \cdot \rho_i \cdot V_i} \quad (2)$$

図 - 3 に示すように、鋼管を厚さ方向に 3 分割 ( $d/4 \cdot$

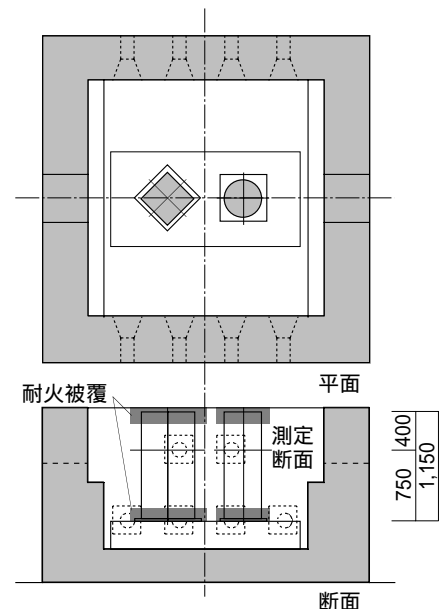


図 - 2 耐火試験炉と試験体

表 2 コンクリートの試験結果

4 週強度 (N/mm <sup>2</sup> )	試験時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)	材令 (日)
47.8	54.3	4.9	114

$d/2 \cdot d/4$ ,  $d$ : 厚さ) し、コンクリートは中心から  $5 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} \dots$  と分割して、鋼管と接する部分で端数を調整することとした。設定した諸条件は次のとおりである。

加熱温度は、昇温過程では ISO 834 の標準加熱曲線、冷却過程では3回の加熱試験で得られた炉内温度実測値の近似曲線とする。

対流熱伝達率 ( $\alpha_f$ ) は  $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  で一定とする<sup>12,14)</sup>。また火炎の等価放射率  $0.9$ ・鋼の放射率  $0.8$ ・合成放射率 ( $\epsilon_r$ )  $0.73$  とし<sup>14)</sup>、ステファン・ボルツマン定数 ( $\sigma$ ) を用いて放射熱伝達率は温度に依存させる。火炎(温度  $T_f$ ) から第1層(温度  $T_1$ , 面積  $A_1$ ) に微小時間 ( $\Delta t$ ) に

流入する熱量 ( $q_1$ ) を式 (3) に示す<sup>12)</sup>。

$$q_1 = \left\{ \alpha_f \cdot (T_f - T_1) + \epsilon_r \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_1^4) \right\} \cdot A_1 \cdot \Delta t \quad (3)$$

鋼材とコンクリートの比熱・熱伝導率は、図 - 4 に示すように防火総プロと EC4 には一見して大きな差はない。しかし防火総プロの適用範囲は EC4 に比較して極めて狭い。すなわち EC4 の適用範囲が常温から  $1,200$  までであるのに対し、防火総プロの適用範囲は鋼材が  $600$  以下、コンクリートが  $800$  以下に限られ外挿が必要になる。そこで本論で用いる熱定数は EC4 に準拠することにした。

コンクリートの含有水分は移動せず、 $100$  で蒸発し、

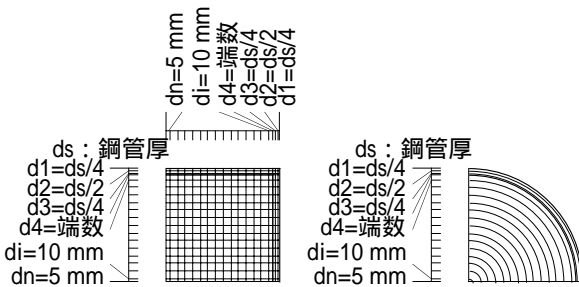


図 - 3 温度解析時の分割方法

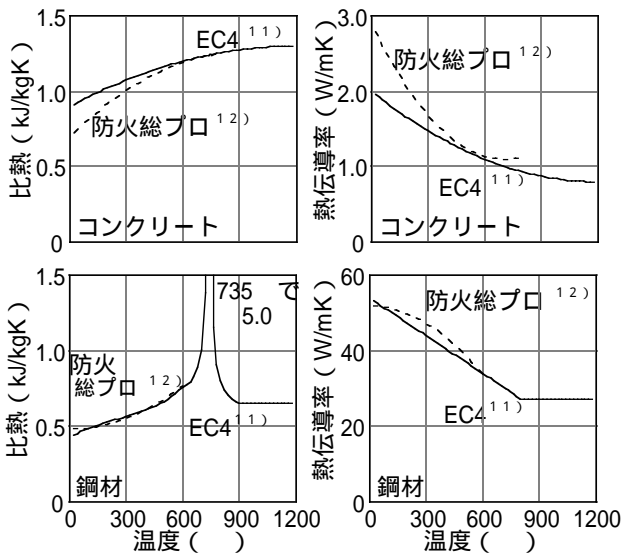


図 - 4 コンクリートと鋼材の熱定数

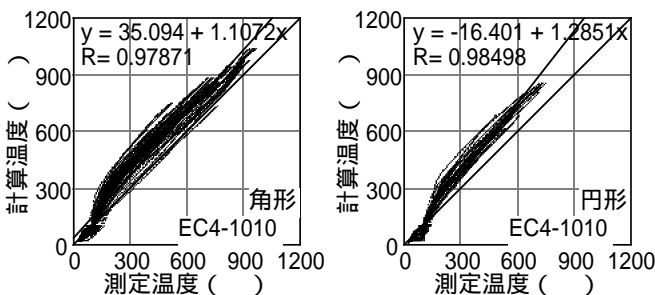


図 - 5 測定値と計算値の比較

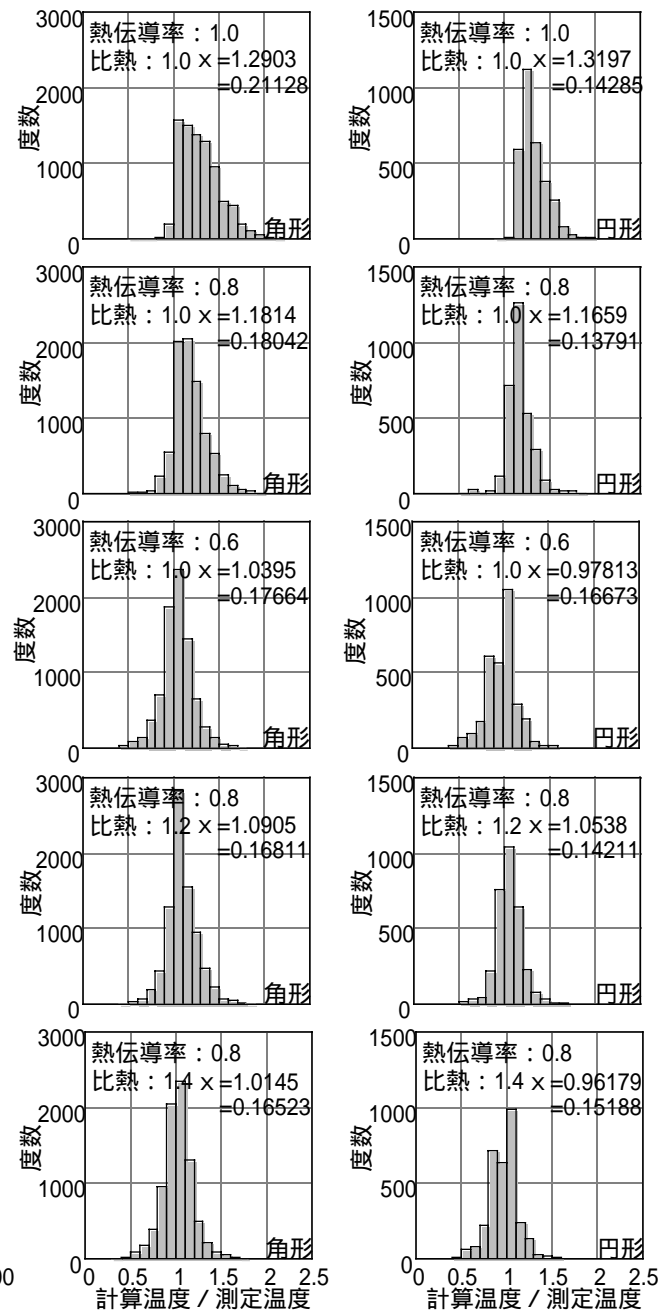


図 - 6 コンクリートの熱定数を変化させた温度解析

水分がある間は温度上昇しないと仮定する。含水率は4.9%とした。水の蒸発潜熱( $H_b$ )による第*i*層の水分蒸発量 ( $W$ )を式(4)に示す<sup>12)</sup>。

$$\Delta W = \frac{q_i - q_{i+1}}{H_b} \quad (4)$$

密度は鋼材 7,850 kg/m<sup>3</sup>・コンクリート 2,300 kg/m<sup>3</sup>で一定とする。

昇温過程でのコンクリート温度の解析値と実測値の比較を図-5に示す。断面形状に関係なく、解析結果は測定結果を大きく上回る傾向が認められる。これは安全側の設計(高い内部温度)を意図し、EC4が高い熱伝導率と低い比熱をコンクリートに設定しているためであると考えられる。

そこで内部温度の解析値を実用的な水準まで実測値に近づけることを目的として、EC4のコンクリートの熱伝導率に0.8と0.6、比熱に1.2と1.4を乗じ、同様の温度解析を行った。解析値を実測値で除した値を横軸とし、縦軸を度数として図-6に示す。図中、 $\bar{x}$ は平均値、 $\sigma$ は標準偏差である。コンクリートの熱定数としては、EC4の熱伝導率に0.8・比熱に1.2を乗じた解析結果が最適である。

コンクリートの熱伝導率をEC4の0.8倍、比熱をEC4の1.2倍、鋼材の熱定数をEC4とした温度解析結果を、時刻歴の温度測定結果(炉内・鋼管表面・内部)に上書

きして図-7・8に示す。解析結果と測定結果は極めて良く一致している。

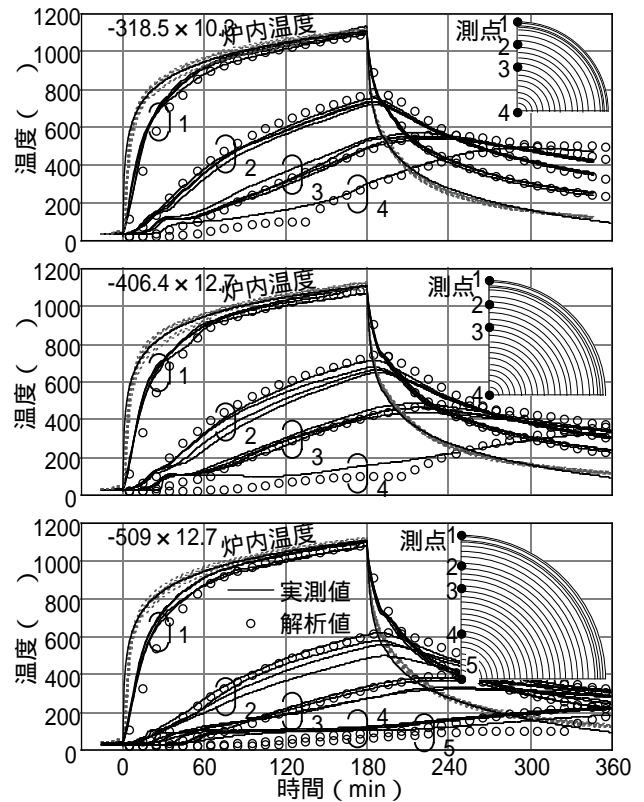


図-7 温度測定値と計算値の時刻歴(円形断面)

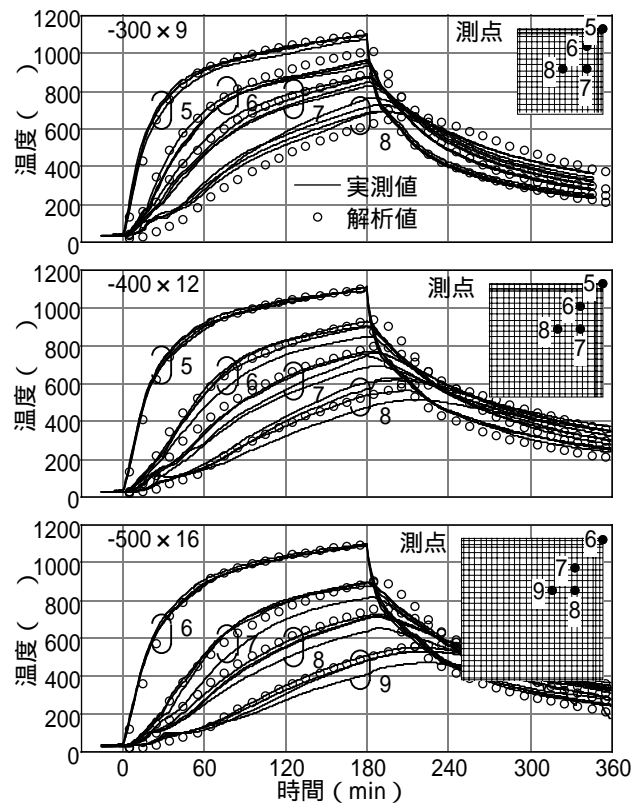
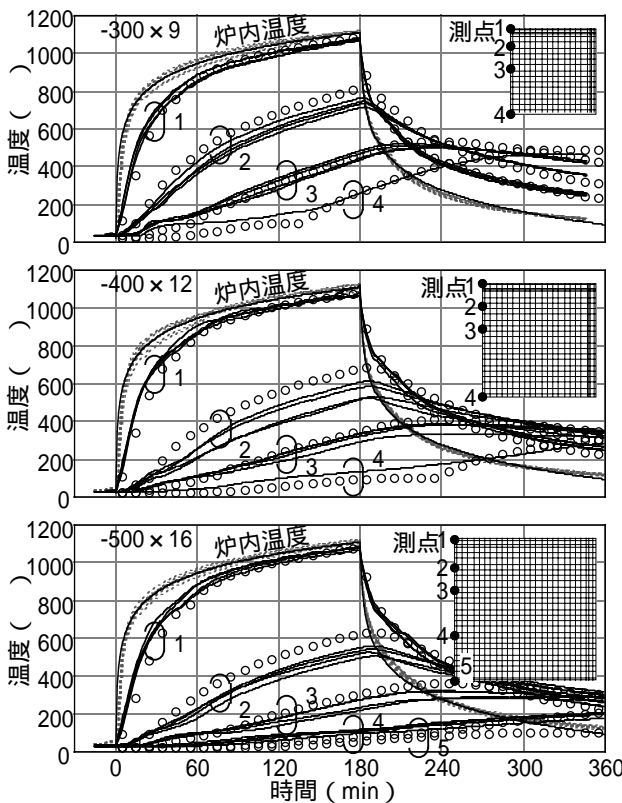


図-8 温度測定値と計算値の時刻歴(角形断面)

## § 5 . 適用事例

### 5.1 強度が異なる無耐火被覆 CFT 柱

コンクリート強度が前記と異なる無耐火被覆 CFT 柱への温度解析の適用性を確認するために、CFT 柱の載荷加熱試験<sup>15)</sup>の試験体について同様の温度予測を行い測定温度と比較する。

試験体は、 $-300 \times 9$ および  $-318.5 \times 7.9$  各 6 体の鋼管に鉄筋を配しコンクリートを充填した 12 体である。試験は 2 期にまたがり、呼び強度は同じであるが、表 - 3 に示すようにコンクリートの調合がわずかに異なる。試験体には図 - 9 に示すように長さ 1.2 m の筒体部が 2 つあり、その片方を無耐火被覆の加熱試験部とし、加熱試験部以外には十分な耐火被覆を施した。温度測定は加熱試験部の中央断面において行った。温度解析に対応する測定位置を図 - 10 に示す。

試験では、熱膨張による梁の伸び出しを考慮した変形を軸力とともに作用させて、軸力を保持できなくなるまで JIS A 1304<sup>16)</sup> の標準加熱を行った。コンクリー

表 - 3 コンクリートの調合

区分	Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg / m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	Ad.*
C1	15.0	4.5	51.6	45.1	165	320	815	1017	0.8
C2	15.0	4.5	52.0	45.2	165	318	818	1017	0.8

\*: AE減水剤標準形

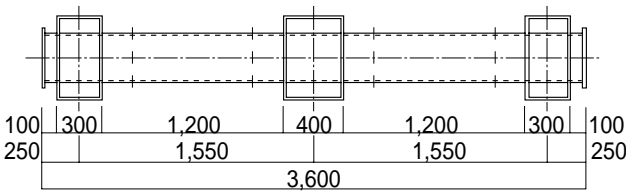


図 - 9 試験体の形状寸法

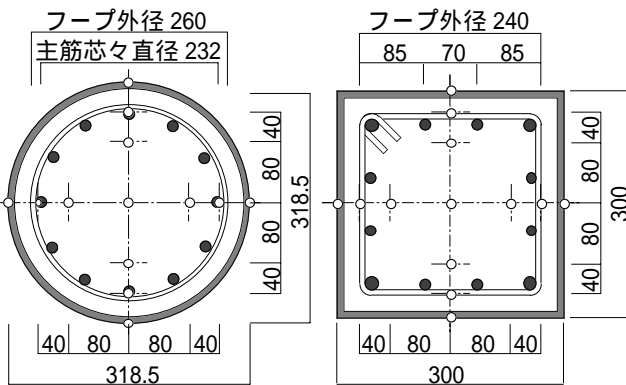


図 - 10 試験体の断面と温度測定位置

表 - 4 コンクリートの試験結果

区分	4 週強度 (N/mm <sup>2</sup> )	試験時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)	材令 (日)
C1	33.2	35.0 ~ 38.4	6.3 ~ 6.4	59 ~ 88
C2	29.7	32.0 ~ 34.1	6.1 ~ 6.5	71 ~ 85

トの試験結果 (封かん養生) を表 - 4 に示す。

温度解析の分割方法は § 4 . と同じにした。鉄筋は無視し、次の諸条件以外は § 4 . と同様である。

加熱温度は JIS A 1304 の標準加熱曲線とする。

コンクリートの含水率は 6.0% とする。

温度解析結果を時刻歴の温度測定結果 ( 炉内・鋼管表面・内部 ) に上書きして図 - 11 に示す。また図 - 6 と同様に、解析値を実測値で除した値を横軸とし、縦軸を度数として図 - 12 に示す。

柱の載荷加熱試験では、コンクリートのひびわれによる熱電対の損傷やひびわれでの水蒸気の移動があるためか、測定温度にバラツキが認められる。また標準偏差も図 - 6 に比較して大きい。しかし度数分布を見ると解析結果と測定結果は概ね良く一致しており、§ 3 . とは異なる強度のコンクリートを用いた無耐火被覆 CFT 柱においても、コンクリートの熱伝導率を EC4 の 0.8 倍、比熱を EC4 の 1.2 倍、鋼材の熱定数を EC4 とした温度解析が十分実用的であることを確認できた。

### 5.2 T 形合成梁

断面形状が異なり 3 面加熱となる T 形合成梁への温度解析の適用性を確認するために、T 形合成梁の載荷加熱

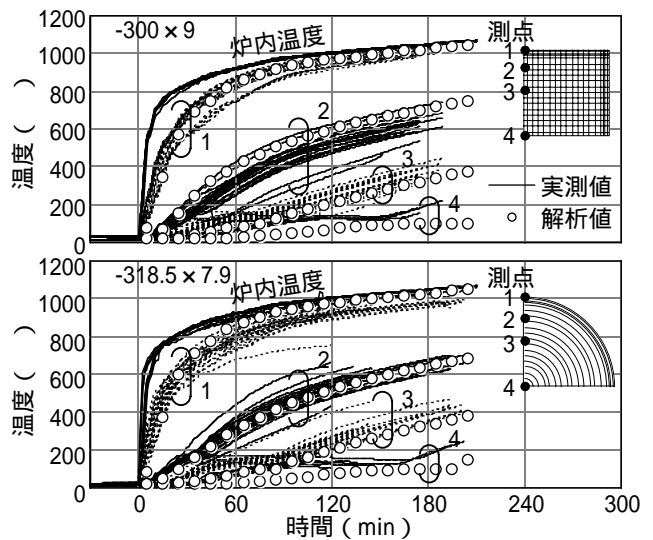


図 - 11 温度測定値と計算値の時刻歴

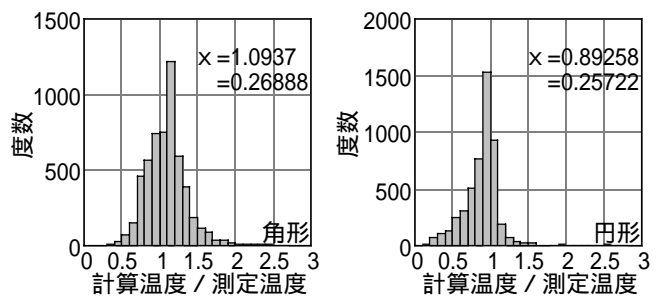


図 - 12 温度解析結果の度数分布

試験<sup>17)</sup>の試験体について同様の温度予測を行い測定温度と比較する。

試験体は、H-500 × 200 × 10 × 16の鉄骨に鉄筋を配し、上下フランジ間とスラブにコンクリートを打設した5体である。図 - 13に示すように、上フランジはスラブに埋設し、下フランジの下面と側面は露出させた。梁下端の幅はフランジ幅に合わせ、部分的にテーパを付けてある。温度測定は試験体の中央2断面において行った。コンクリートの調合を表 - 5に示す。

試験では、3点曲げにより下端フランジに引張力を作用させて、ISO 834の標準加熱を2～3時間行った。コンクリートの試験結果(封かん養生)を表 - 6に示す。梁側などにひびわれが観察されたが、鉄筋量が少なく拘束力が小さいためか、爆裂・剥落は生じなかった。

温度解析は図 - 14に示すように、1/2断面を対象にした二次元差分法を用いた。鉄筋は無視し、鋼材は厚さ方向に3分割(d/4・d/2・d/4, d:厚さ)し、コンクリートは5mm・10mm・20mmを基準に分割して、鋼材と接する部分で端数を調整した。なお、次の諸条件以外は前節と同様である。

加熱温度はISO 834の標準加熱曲線とする。

火炎の等価放射率0.9・鋼の放射率0.8・コンクリート

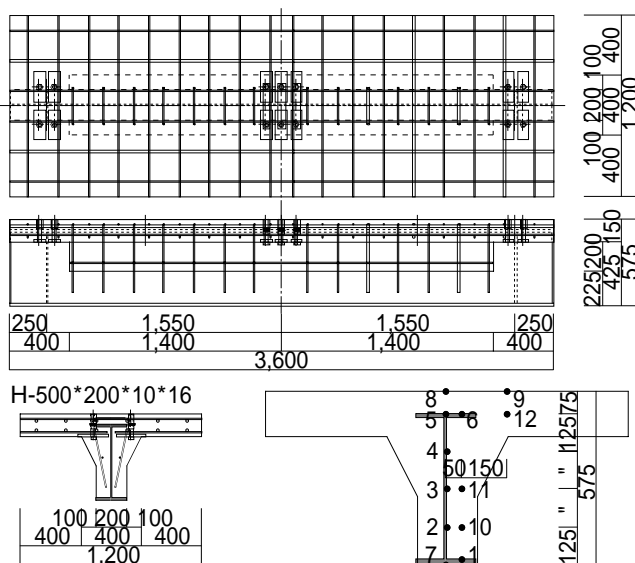


図 - 13 試験体の形状寸法等と温度測定位置

表 - 5 コンクリートの調合

Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単体量 (kg / m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	Ad.*
15.0	4.5	65.8	49.9	170	259	920	954	2.76

\* : AE減水剤標準形

表 - 6 コンクリートの試験結果

4週強度 (N/mm <sup>2</sup> )	試験時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)	材令 (日)
27.9	31.0 ~ 32.3	6.4 ~ 6.5	161
30.0	31.9	6.4	~ 175

の放射率0.9として、合成放射率を求める。

コンクリートの含水率は6.0%とする。

温度解析結果を時刻歴の温度測定結果(炉内・表面・内部)に上書きして図 - 15に示す。また図 - 6と同様に、解析値を実測値で除した値を横軸とし、縦軸を度数として図 - 16に示す。

測点10と11では、コンクリート打設時に熱電対が中心側に移動したためか、解析値を下回る測定値が多い。しかし、全体に測定温度のバラツキは小さく、平均値・標準偏差ともに図 - 6と同等である。解析結果と測定結果は極めて良く一致しており、3面加熱を受けるT形合成梁に対しても、コンクリートの熱伝導率をEC4の0.8倍、比熱をEC4の1.2倍、鋼材の熱定数をEC4とした温度解析は十分実用的であることを確認できた。

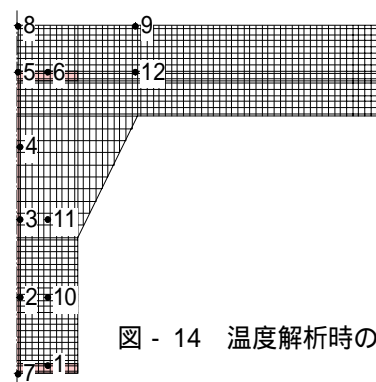


図 - 14 温度解析時の分割方法

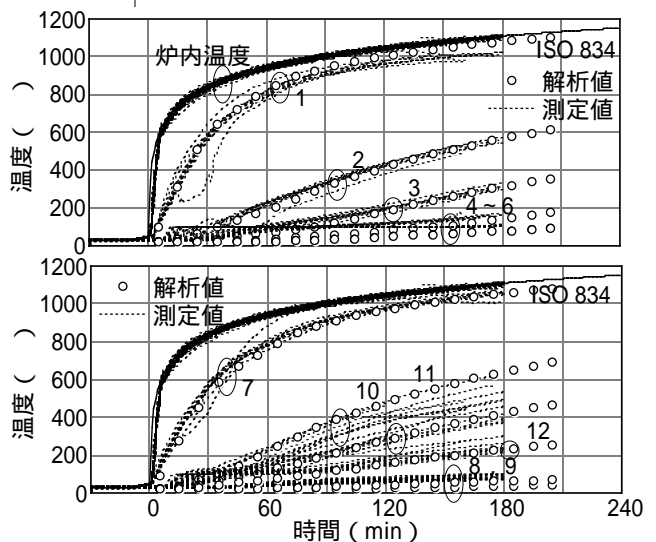


図 - 15 温度測定値と計算値の時刻歴

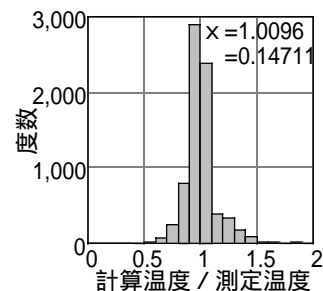


図 - 16 温度解析結果の度数分布

### 5.3 RABT加熱を受けるAFRコンクリート平板

トンネル火災用のRABT加熱を受けるAFR(Advanced Fire Resistant)コンクリート<sup>18)</sup>平板への温度解析の適用性を確認するために、トンネル用コンクリートの加熱試験<sup>19)</sup>の試験体について同様の温度予測を行い測定温度と比較する。

試験体は、図-17に示すようなセグメントの小型模型で、表-7に示す高強度で固練りの調合(粗骨材:硬質砂岩)をベースに短繊維樹脂を混入した7体である。短繊維はポリプロピレン(径48 $\mu$ m、長さ20mm、密度0.91g/cm<sup>3</sup>、以下PP)とポリアセタール(径41 $\mu$ m、長さ20mm、密度1.41g/cm<sup>3</sup>、以下PA)の2種類であり、混入率は0.3vol%と0.5vol%である。試験体は試験直前まで標準養生した。

RABT加熱とはドイツ交通省道路建設部が定めた加熱曲線で、加熱開始5分で1,200に至らしめ、その後は1,200を維持し、除冷開始から110分で常温に戻すというもので、本試験では加熱開始30分で除冷を開始した(RABT30分加熱)。コンクリートの試験結果(標準

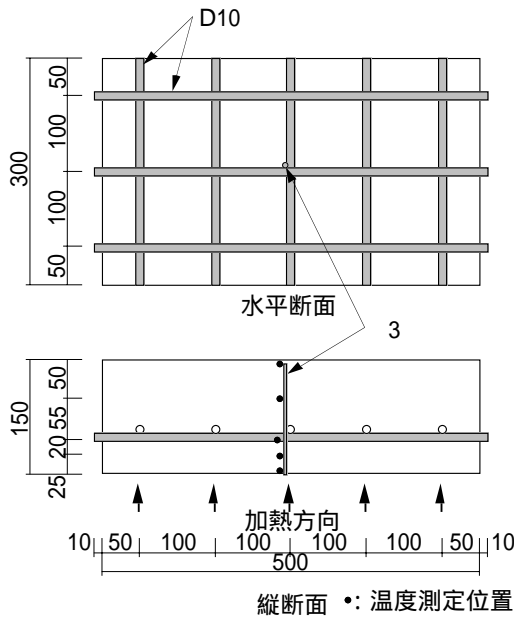


図-17 試験体の形状寸法等と温度測定位置

表-7 コンクリートの調合

Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	Ad.*
3.0	1.5	36.4	43.5	150	412	804	1059	16.9

\*:高性能減水剤標準形

表-8 コンクリートの試験結果

No.	4週強度 (N/mm <sup>2</sup> )	試験時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)	材令 (日)
PP.3	69.1	80.2	4.8	37
PP.5	70.7	77.3	4.9	
PA.3	70.6	76.9	4.9	
PA.5	69.2	75.5	4.8	

養生)を表-8に示す。粗骨材の膨張・変色は認められたが、いずれの試験体にも爆裂・剥落は全く生じなかった。また、短繊維の種類や混入率の違いによる差異も認められなかった。

温度解析は一次元差分法を用い、鉄筋は無視し、コンクリートは上下端部を2.5mm・その他を5mmに分割した。また、次の諸条件以外は前節と同様である。

加熱温度はRABT30分加熱曲線とする。

火炎の等価放射率0.9・コンクリートの放射率0.9・合成放射率0.82とする。

コンクリートの含水率は5.0%とする。

温度解析結果を時刻歴の温度測定結果(炉内・内部)に上書きして図-18に示す。また図-6と同様に、解析値を実測値で除した値を横軸とし、縦軸を度数として図-19に示す。

測点1と5では、コンクリート打設時に熱電対が中心側に移動したと考えられるので、解析値は表面から5mmの位置の値とした。測点4と5の測定値が高いのは、試験上の都合から試験体の裏面を断熱材で覆ったことによると考える。全体に測定温度のバラツキは小さく、平均値がやや低いが標準偏差は図-6と同等である。解析結果と測定結果は非常に良く一致しており、RABT加熱を受けるAFRコンクリート平板に対しても、コンクリートの熱伝導率をEC4の0.8倍、比熱をEC4の1.2倍、鋼材の熱定数をEC4とした温度解析は十分実用的であることを確認できた。

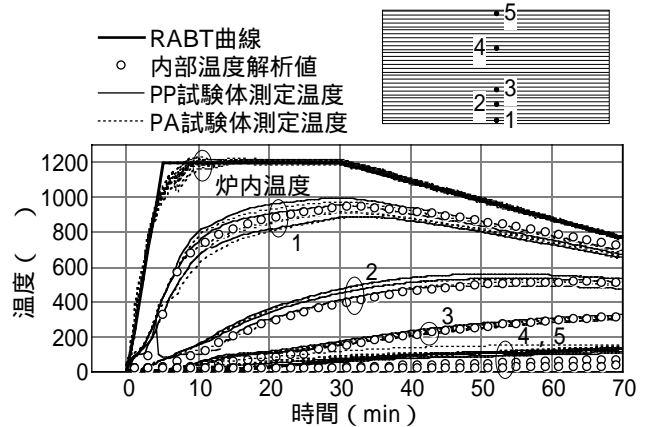


図-18 温度測定値と計算値の時刻歴

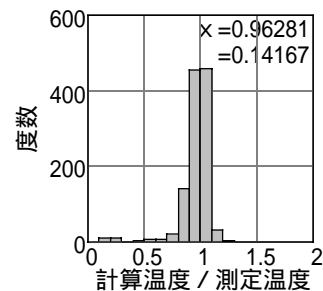


図-19 温度解析結果の度数分布

## § 6 . 結論

RC系部材の内部温度を実用的に予測することを目的として、無耐火被覆CFT柱の加熱試験を行い、基礎的な温度データを精度よく得た上で、温度解析に適した熱定数を見いだすことにした。

まず、概略外径寸法が300・400・500mmの角形各1体と円形各1体の無耐火被覆CFT柱を対象に、ISO 834に基づく3時間の加熱試験を行い精度のよいデータを得た。次いでEC4の熱定数の内、コンクリートの熱伝導率と比熱を変化させて内部温度解析を行い比較検討し

た。その結果、コンクリートの熱伝導率をEC4の値の0.8倍、比熱をEC4の値の1.2倍とし、鋼材の熱定数をEC4の値とすることにより、解析温度と測定温度との傾向が良く一致することがわかり、無耐火被覆CFT柱の内部温度の実用的な予測を可能にした。

同様に、コンクリートの熱伝導率をEC4の値の0.8倍、比熱をEC4の値の1.2倍とし、鋼材の熱定数をEC4の値とした温度解析によって、強度が異なる無耐火被覆CFT柱や3面加熱を受けるT形合成梁、およびRABT加熱を受けるAFRコンクリート平板の内部温度も実用的に予測できることを確認した。

### <参考文献>

- 1) 齋藤秀人, 森田 武, 上杉英樹: “ 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 No.582, pp.9 ~ 16, 2004.8
- 2) 齋藤 光, 上杉英樹: “ 角形鋼管コンクリート柱の耐火試験 ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, pp.2107 ~ 2108, 1977.10
- 3) 上杉英樹: “ 鋼管コンクリート柱の耐火性 ( 充てんコンクリートの有効性 ) ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造系, pp.2153 ~ 2154, 1978.9
- 4) 下川弘海, 今野和近, 中村信行, 吉田正友, 伊藤茂樹: “ 充填鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する研究 ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.1417 ~ 1422, 1994.9
- 5) 道越真太郎, 西垣太郎, 水野敬三, 黒岩秀介, 後藤和正, 前沢澄夫, 塚田康夫, 齋藤 光, 上杉英樹, 中村賢一: “ 大断面コンクリート充填鋼管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, pp.1407 ~ 1410, 1994.9
- 6) 柴田道生: “ コンクリート充填鋼管の火災時の温度分布 ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.1431 ~ 1432, 1994.9
- 7) 日本建築学会: “ コンクリート充填鋼管構造設計施工指針 ”, 1997.10
- 8) 原田 有: “ 建築耐火構法 ”, 工業調査会, 1973
- 9) H. Bizri: “ Structural Capacity of Reinforced Concrete Columns Subjected to Fire Induced Thermal Gradients ”, Report No. UC SESM 73-1, University of California Berkeley, January 1973
- 10) Juri Kajaste-Rudnitski: “ Numerical model of thermoelastic-plastic concrete material ”, VTT publications 154, Technical Research Centre of Finland, September 1993
- 11) Eurocode 4: “ Design of Composite Steel and Concrete Structures, Draft for Part 1.2: Structural Fire Design ”, 1994
- 12) 日本建築センター: “ 建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法 ”, 1988.4
- 13) ISO 834-1: “ Fire-resistance tests - Elements of building construction -, Part 1: General requirements ”, 1999
- 14) 日本建築学会: “ 鋼構造耐火設計指針 ”, 1999.1
- 15) 齋藤秀人, 池田憲一: “ 鉄筋を配した充填鋼管コンクリート柱の耐火性能に関する実験的研究 - 梁の伸び出しによる横力を受ける場合について - ”, 日本建築学会構造系論文集 No.549, pp.151 ~ 157, 2001.11
- 16) JIS A 1304: “ 建築構造部分の耐火試験方法 ”, 1995
- 17) 齋藤秀人: “ T形合成梁の耐火性能について ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.157 ~ 158, 2004.8
- 18) 森田 武, 山崎庸行, 橋田 浩, 西田 朗, 米澤敏男, 古平章夫, 三井健郎: “ AFRコンクリート工法 ”, GBRC第101号, pp.47 ~ 54, (財)日本建築総合試験所, 2001.1
- 19) 江渡正満, 後藤 徹, 森田 武: “ トンネル用AFR(Advanced Fire Resistant)コンクリートの耐火性能に関する基礎的試験 ”, 土木学会「コンクリート構造物の耐火技術研究」小委員会成果報告会・シンポジウム, 2004.10