

# 論文 許容温度を超える加熱を受けた鋼・コンクリート合成構造内部に発生する空隙の影響

鎌田 亮太\*1・谷辺 徹\*2・菊地 弘悦\*3・清宮 理\*4

**要旨:** 鋼・コンクリート合成構造の許容温度設定を行うため、フルサンドイッチ形鋼殻沈埋トンネルを模擬した試験体において、大阪の夢咲トンネルの鋼材許容温度と設定された 250℃を超え、350℃程度まで加熱された際の、空隙厚さを実測し、空隙による伝熱特性およびコンクリートの損傷への影響を確認した。その結果、鋼材温度が 350℃程度まで加熱されることで、空隙厚さが著しく増加し、コンクリート表面にひび割れが発生した。本報告と筆者らが以前実施した試験結果より、鋼材表面温度が 250℃程度までならば、鋼材の急激な変形などが発生しない安全な領域であることを確認できた。

**キーワード:** 合成構造, 沈埋トンネル, 耐火被覆材, 許容温度, 鋼材温度, 空隙

## 1. はじめに

近年、トンネルの構造として鋼・コンクリート合成構造が適用される例が増加している。合成構造の例として、鋼殻内部にコンクリートを充てんした、フルサンドイッチ形鋼殻沈埋構造（以下、鋼殻沈埋構造）がある。これは、鋼殻がコンクリートと一体化しているため、剛性が高いという特徴を有しており、一体化のために形鋼が鋼殻に溶接されている。しかしながら、内空側に鋼材面が露出しているため、火災が発生した場合には鋼材面が高温となり、耐荷力低下が懸念される。従って、表面被覆などの耐火対策が必要である。

図-1には、鋼殻沈埋構造が火災等の急激な加熱を受けた際に想定される、部材内部の損傷状況について示す。鋼殻沈埋構造は火災によって、鋼材とコンクリートの温度差や、熱膨張率の差によりずれ止め用形鋼付近に温度ひずみが生じ、ひび割れが発生する<sup>1)</sup>。これは、鋼材の変形によるずれ止め用形鋼の変形により内部コンクリートにひび割れが発生していると推察され、鋼材の変形によって生じる鋼材とコンクリート間の空隙の大きさがコンクリート内部の損傷に大きく影響すると考えられる。これらの知見から、これまで許容温度を 350℃とされてきた合成構造の事例が多い中、鋼殻沈埋構造である大阪の夢咲トンネルでは、鋼材の許容温度を 250℃と設定されている<sup>2)</sup>。

図-2には、想定される耐火被覆材の厚み設定手順を示す。本研究では、部材の許容温度設定に関する検討を対象とするが、コンクリートの許容温度は、これまでに多くの実績があるため、それらに準ずるものとして、特に検討範囲としていない。次に、鋼材に関しては、熱膨

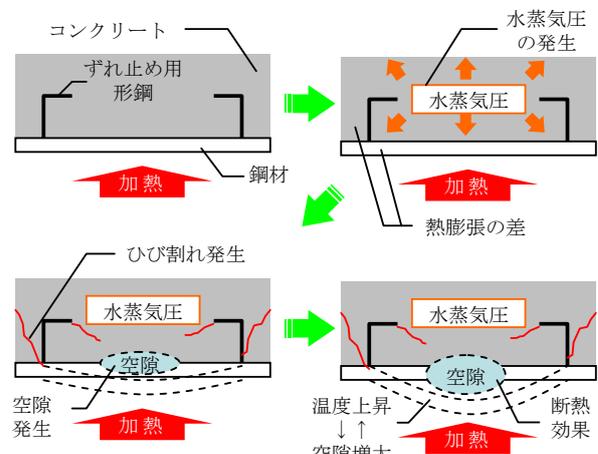


図-1 鋼殻沈埋構造への加熱による影響

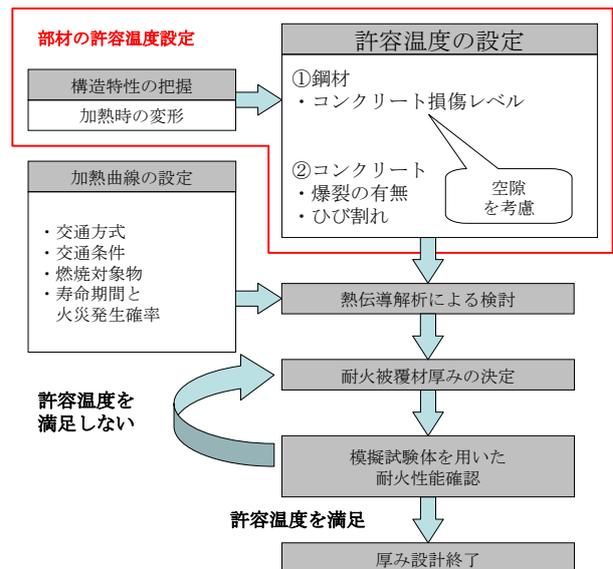


図-2 耐火被覆材の厚み設計手順

\*1 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 耐火・建築材料グループ 修士 (工学) (正会員)  
 \*2 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 耐火・建築材料グループ グループリーダー (正会員)  
 \*3 太平洋マテリアル (株) 東北支店 営業部 修士 (工学) (正会員)  
 \*4 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博 (正会員)

張によるコンクリートへの損傷を考慮して検討する必要があるが、コンクリートに損傷が発生するレベルに達する鋼材変形量とならないような許容温度とする必要があると考えられる。この際、鋼材とコンクリート間に生じる空隙が温度上昇に影響を及ぼすことが考えられるため、鋼材の許容温度には空隙の影響を考慮する必要がある。

以前、筆者らは空隙厚さの増加による鋼材の急激な温度上昇の影響を検討するため、鋼殻沈埋構造を模擬した試験体に、吹付け耐火被覆材を適用させ、加熱試験中における空隙厚さの測定を試みるとともに、夢咲トンネルの鋼材許容温度と設定された 250℃以下の領域での空隙厚さと鋼材温度の関係を把握し、表面温度が 250℃程度までならば、急激な変形などが発生しない安全な鋼材許容温度であることを確認した<sup>3)</sup>。そこで本報告では、鋼材がより高温になり、変形量が大きくなる場合の空隙の影響を検討するため、一般的な鋼材許容温度と設定されている 350℃程度まで加熱した際の、空隙による伝熱特性およびコンクリートの損傷への影響を確認した。

## 2. 耐火試験概要

### 2.1 加熱条件の設定

本報告における加熱条件は、トンネルの耐火設計に比較的好く用いられている RABT 曲線を参考に、鋼材表面温度が 350℃に到達するまで最高温度 (1200℃) を保持することとした。

### 2.2 試験体の概要

#### (1) 鋼材部の仕様

鋼材部の仕様を図-3に示す。仕様は鋼殻沈埋構造の一部を採用し、内寸 1100mm×1100mm×200mm とした SS400 の合成部材に、L 形鋼を 600mm ピッチにて鋼材裏面に溶接した。

#### (2) コンクリート

コンクリートについては、鋼材裏面に対して表-1に示す配合条件のコンクリートを厚さ 200mm にて打設した。また、加熱による鋼材とコンクリート間のはく離が容易となるように、鋼材裏面には厚さ 0.25mm のポリエチレンシートを設置し、その上部にコンクリートを打設した。

#### (3) 吹付け耐火被覆材

吹付け耐火被覆材は、セメントを結合材、骨材として軽量骨材を使用したプレミックスタイプのものを使用した。表-2には、使用した耐火被覆材の物性を示す。耐火被覆材は、写真-1に示すように鋼材表面に格子状のはく落防止用メッシュ (ステンレス製、φ1.6mm、50mm ピッチ) を耐火被覆材の厚みに対して中央付近となるように設置した後、厚さ 35mm にて吹付け施工した。なお、施工面積については、鋼材中心部の 900×900mm とした。

耐火被覆材吹付け後、25日間気中養生を行った後、加熱試験において耐火被覆材の含水率による影響を小さくすることを目的に、加熱試験の前には5日間乾燥養生 (40℃) を行った。

### 2.3 測定項目および測定箇所

#### (1) 温度 (熱電対設置箇所)

測定エリアは図-3に示すように、形鋼間に3点 (A～Cエリア)、形鋼の外側に1点 (Dエリア) 設置し、図-4に示すように各測定エリアにおいて、鋼材表面およびコンクリート表面、20mm 深さに熱電対を設置した。

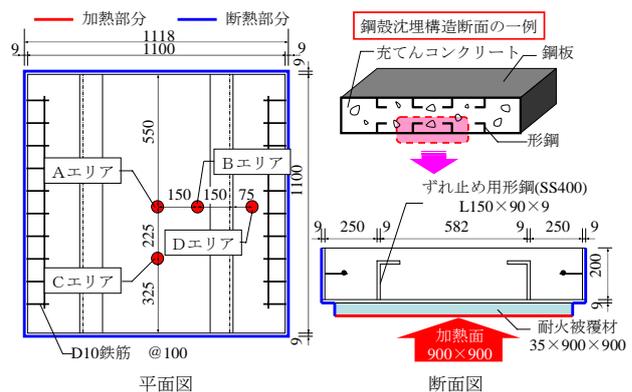


図-3 試験体の概要

表-1 コンクリートの配合条件

呼び強度	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)
30	20	8	50.7	4.5	50.7
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	
163	322	779	1058	3.22	

表-2 耐火被覆材の物性

単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	材齢 28 日 圧縮強さ (MPa)	熱伝導率 (W/m・K)	比熱 (kJ/kg・K)
700~800	1.5 以上	0.20	0.97

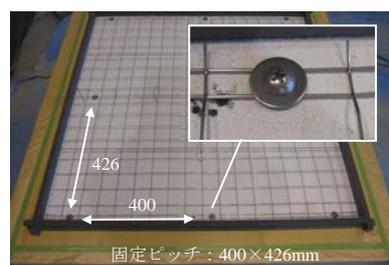


写真-1 メッシュ設置状況

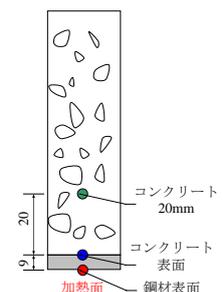


図-4 温度測定箇所

## (2) たわみ量（空隙厚さの測定）

鋼材たわみ量については、図-5に示すように、コンクリート中に鋼製パイプを埋め込み、その中に石英ガラス棒（線膨張係数： $1 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ）を設置し、その沈下量を加熱中の鋼材たわみ量として測定した。また、鋼材たわみ量測定部付近の裏面コンクリートのたわみ量も測定した。本研究においては、鋼材たわみ量から裏面コンクリートたわみ量を差し引いた値を鋼材とコンクリート間に生じた空隙厚さとした。なお、たわみ量測定用鋼製パイプは、図-3に示した温度測定用熱電対と20mm離して設置した。

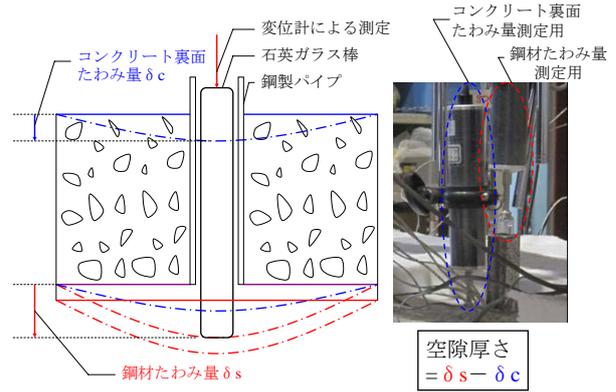


図-5 空隙厚さの測定方法

## (3) コンクリートひずみ

試験体の変形およびコンクリートのひび割れ発生状況を確認するため、図-6に示すように、コンクリート裏面にずれ止め用形鋼とは直角方向にひずみゲージを設置した。

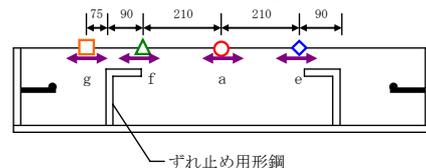


図-6 ひずみゲージ設置箇所

## 3. 加熱試験結果

### 3.1 加熱条件

本報告においては、鋼材表面温度を  $350^{\circ}\text{C}$  付近まで到達させるため、加熱開始後5分で  $1200^{\circ}\text{C}$  まで昇温し、図-3における温度測定部位A~Cエリアの鋼材表面温度が  $350^{\circ}\text{C}$  まで到達させた後、冷却を開始することとした。従って、加熱開始後270分まで最高温度（ $1200^{\circ}\text{C}$ ）を保持し続ける、図-7のような加熱曲線となった。

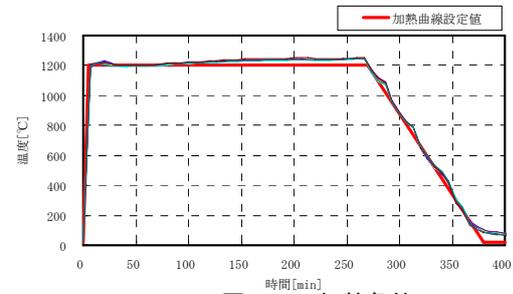


図-7 加熱条件

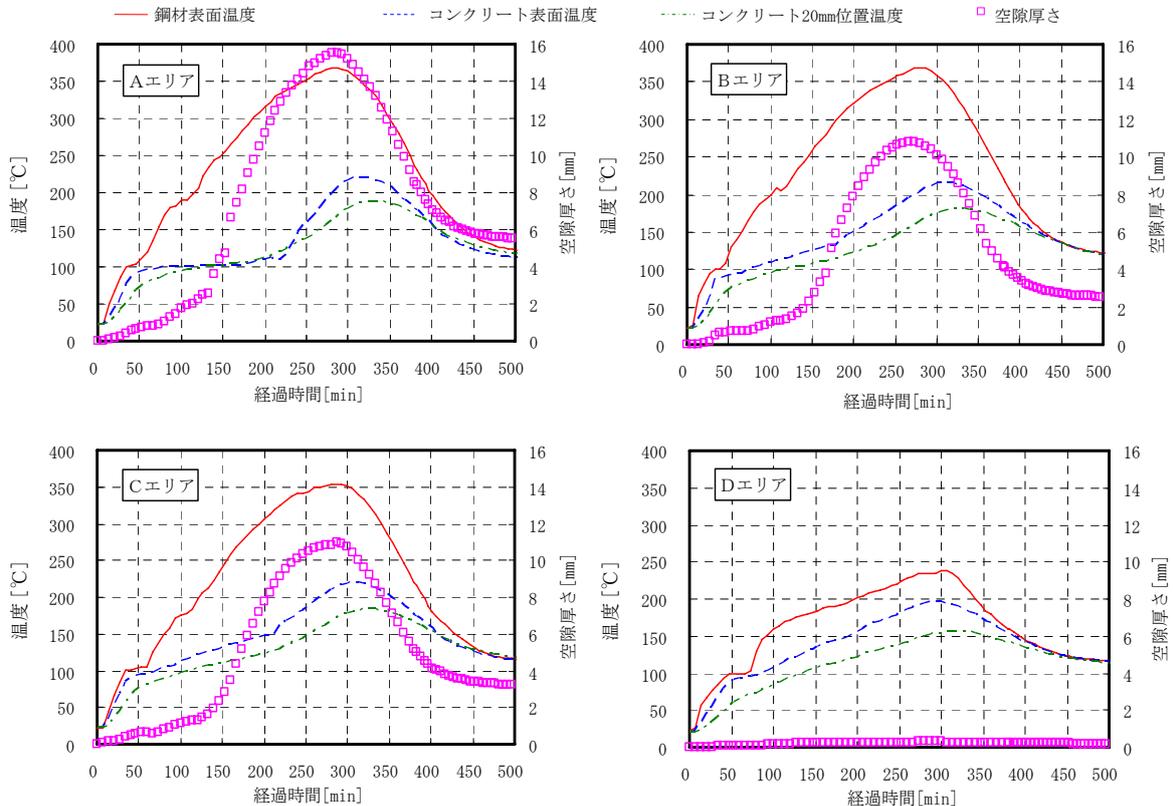


図-8 試験体内部温度および空隙厚さと時間の関係

### 3.2 温度および空隙厚さ測定結果

#### (1) 試験体内部温度と空隙厚さの関係

図-8には、温度および空隙厚さと時間の関係を測定エリア別に示す。空隙厚さと時間の関係は、鋼材表面温度変化と同様の挙動を示し、鋼材表面温度が最大となった時点で空隙厚さも最大値を示した。各エリアともに、鋼材表面温度およびコンクリート内部温度変化は比較的同様の挙動を示したが、空隙厚さの最大値はAエリアが最も大きく15.5mmとなり、BエリアおよびCエリアはそれぞれ10.8mm、11.0mmとなった。これは、試験体の形状およびコンクリート内部の形鋼の配置により、Aエリアが最もたわみやすい部分であったことが理由として考えられる。一方、Dエリアにおいては、鋼材表面最高温度が238℃と他と比較して小さく、空隙の増加が確認されなかった。また、A～Cエリアにおいて、コンクリート表面および20mm位置の最高温度は各エリアとも同程度の値を示しているが、試験体中央部ほど、100℃で停滞している時間が長いことが分かる。同一深さにもかかわらず、試験体中央部において100℃で停滞している時間が長いことから、水蒸気が鋼製パイプと接して冷却ならびに液化され、鋼製パイプとコンクリートとの界面を通じ、鋼材とコンクリート間へと供給され続け、鋼材たわみ量が激しい試験体中央部へと集中したためだと推察される。

#### (2) 空隙の断熱効果

図-9には、空隙厚さに対する鋼材表面温度とコンクリート20mm位置との温度差を示す。各エリアともに鋼材表面との温度差は、空隙厚さが増加するに従って大きくなる傾向を示した。これは、加熱によって空隙が形成され、その厚さが大きいほど、空隙の断熱効果が発揮されているためだと考えられる。

#### (3) 鋼材表面温度と空隙厚さの関係

図-10には、加熱開始から、空隙厚さが最大になるまでの鋼材表面温度と空隙厚さの関係を示す。各エリアにおいて、空隙厚さの増加に伴い鋼材表面温度も増加した。また、空隙厚さが急激に増加し始めた際の鋼材表面温度は大阪の夢咲トンネルの許容温度と設定された250℃<sup>2)</sup>であり、Aエリアのそれが特に顕著であることが分かる。これより、本仕様条件においては、鋼材表面温度が250℃程度までならば、鋼材の急激な変形などが発生しない温度であると想定される。

#### (4) 前回試験結果との比較

図-11には、筆者らが以前実施した試験結果との比較とを示す。なお、以前実施した試験の加熱条件は、1200℃を加熱開始後30分まで維持するRABT曲線30分加熱を採用している。以前実施した試験では鋼材表面最高温度が218℃であるのに対し、空隙厚さ最大値が2.2mmであったが、本試験では、鋼材表面最高温度が368℃であるの

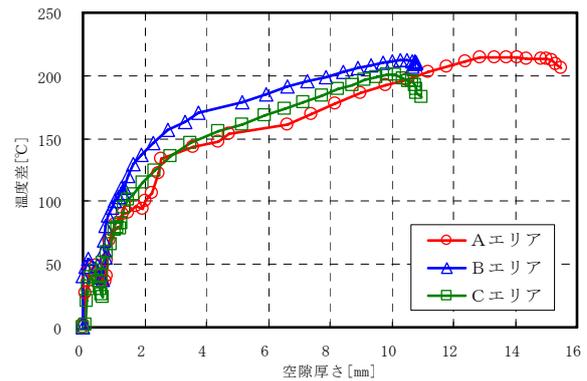


図-9 空隙厚さに対する鋼材表面温度とコンクリート20mm位置における温度差

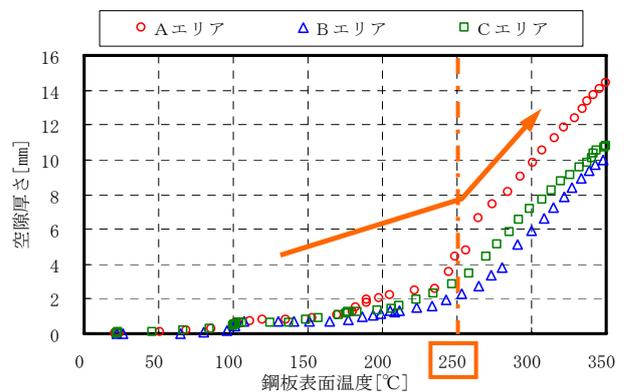


図-10 鋼材表面温度と空隙厚さの関係

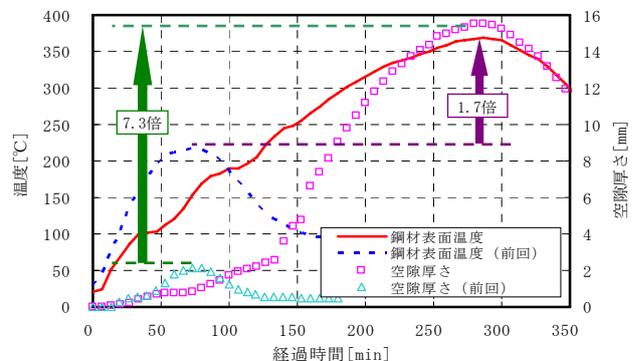


図-11 Aエリアにおける前回試験との比較

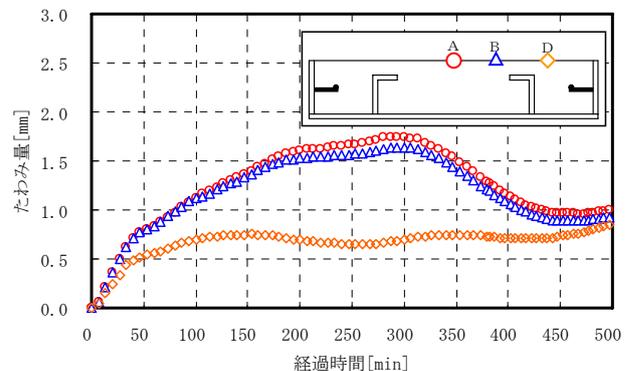


図-12 コンクリートたわみ量と時間の関係

に対し、空隙厚さ最大値は 15.5mm まで増大した。このことから、鋼材表面温度が 250℃ 以上に加熱された際には、鋼材表面温度の増加率に対して、空隙厚さの増加率が、特に顕著であることが分かる。

### (5) 加熱時におけるコンクリートの変形

図-12 には、コンクリート裏面に設置した変位計が観測した、コンクリート裏面たわみ量の推移を示す。鋼材表面温度最大時において、形鋼の外側に設置した測定点 D は 0.6mm 程度のたわみを示し、形鋼内部に設置した測定点 A および B は 1.6mm 程度のたわみを示した。従って、本試験における加熱条件においては、コンクリートも下に凸のたわみが発生しており、試験体全体が変形していたことが推察される。しかし、図-13 に示した、コンクリート裏面のひずみ測定結果より、空隙厚さの急激な増加に伴い、形鋼間に設置した e および f エリアは圧縮側に推移していたが、形鋼の外側に設置した g エリアは、引張側に推移していた。これより、図-14 に示すように、形鋼がコンクリートの変形を部分的に拘束し、形鋼外側のコンクリート裏面 (g エリア) に引張ひずみが生じたと推察される。なお、冷却開始時 (加熱開始後 270 分) に g エリアの引張ひずみが変曲点が生じているが、これは、冷却に伴う鋼材変形の復元によるものと推察される。

## 3.3 加熱後試験体確認結果

### (1) 鋼材たわみ量測定結果

図-15 には、加熱冷却後の鋼材たわみ量の測定結果を示す。測定は、50mm ピッチごとに厚みゲージにて測定し、たわみ量を 0 と仮定した鋼材周囲部と各測定箇所との差を算出した。これより、図-8 に示す空隙厚さ測定結果と同様に、形鋼間において、試験体中央部ほどたわみ量が増大していた。

### (2) コンクリート裏面ひび割れ状況観察結果

図-16 には、加熱試験後のコンクリート裏面のひび割れ状況観察結果を示す。ひび割れは、ずれ止め形鋼上部において 0.05mm 程度発生していたことから、鋼材表面温度が 350℃ 程度の領域における鋼材変形量は、コンクリートに損傷を及ぼすレベルであることが分かる。

### (3) コンクリート内部ひび割れ状況観察結果

写真-2 には、加熱試験後試験体の切断状況を示す。鋼

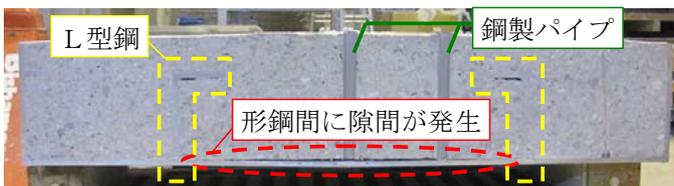


写真-2 加熱試験後試験体切断状

材とコンクリート間の隙間は形鋼間のみ発生していた。また、形鋼間中央部の隙間は 5.6mm であり、図-8 に示す A エリアにおける残存空隙厚さと概ね一致した。しかし、コンクリート内部にひび割れは発生しておらず、これは 350℃ 程度まで鋼材が温度上昇した際、コンクリート内部の形鋼付近からひび割れが生じることが報告された過去の内容<sup>4)</sup>とは異なる結果となった。

図-17 には、加熱試験により鋼材表面において最高温度が 370℃ を示し、試験体内部にひび割れが発生した過去の報告より引用した、試験体の断面図を示す。また、その際に発生したひび割れ状況を図-18 に示す<sup>4)</sup>。ひび割れ発生状況を見ると、形鋼を中心とし、アーチ状にひび割れが観察されており、これは、鋼材に作用する外向きの圧力が形鋼に集中したために、コンクリートの許容せ

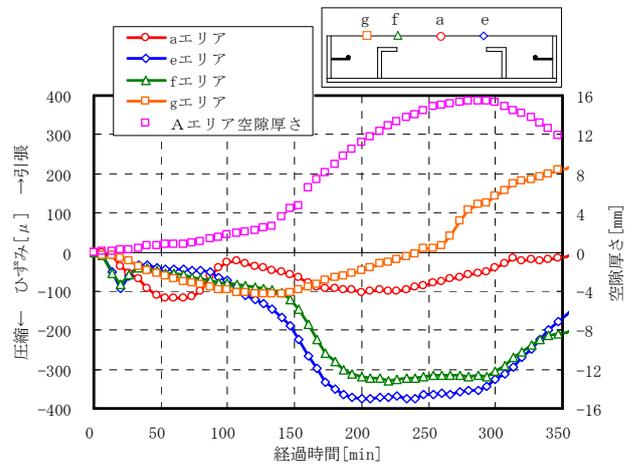


図-13 コンクリート裏面ひずみと時間の関係

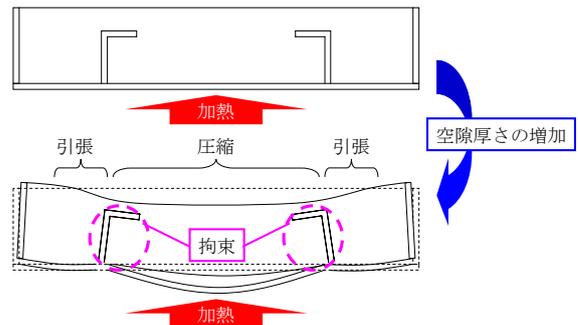


図-14 加熱による試験体の変形イメージ

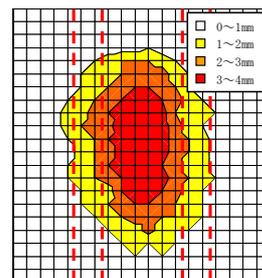


図-15 鋼材たわみ測定結果

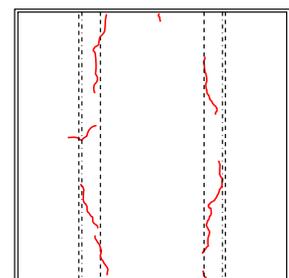


図-16 コンクリートひび割れ状況観察結果

ん断応力以上の引き抜きせん断応力がコンクリートに発生し、ひび割れが生じたと推察されている。本試験と異なる結果となった原因として、試験体寸法の差が考えられる。本試験においては、断面高さが 1/2 以下の試験体を採用していることから、試験体の剛性が低く、試験体全体が変形し、形鋼付近のコンクリートに発生する引き抜きせん断応力が緩和されたために、コンクリート内部のひび割れが発生しなかったものと推察される。

また、過去の報告と本試験との試験体内部温度の比較を図-19に示す。過去の報告では鋼材表面温度が 350℃程度の段階で、急激な温度上昇が生じ、この際に、空隙厚さの増加およびコンクリート内部へひび割れが発生したものと推察されるが、本試験の測定結果においては、鋼材表面最高温度付近の急激な上昇が見られず、さらには、温度上昇速度が緩やかであることが分かる。これは、コンクリート内部に埋め込まれた鋼製パイプが影響していると推察される。図-19の本試験結果を見ると、コンクリート表面および 20mm 位置の温度が 100℃に到達後、加熱開始後約 200 分まで停滞していることが分かるが、本試験においてコンクリート内部に設置した鋼製パイプ上部より加熱開始 107 分後に蒸気の噴出が確認されたことから、コンクリート中の水分が、鋼製パイプとコンクリートとの界面を通じ、鋼材とコンクリート間へと供給され続けたために、温度上昇が緩やかになったと推察される。

#### 4. まとめ

本報告での試験結果を総括すれば、以下の通りである。

- (1) 前回報告した鋼材温度 250℃以下の領域での空隙厚さと部材内部温度との関係に対し、鋼材温度が 350℃以上に達する領域における空隙厚さと部材内部温度を実測することができた。
- (2) 鋼材表面温度が 250℃以下の領域における空隙厚さと比較して、350℃まで加熱した際、空隙厚さは 15.5mm となり、大幅に増加することを確認した。
- (3) 空隙厚さの増加に伴い、前回の試験では確認されなかったコンクリート裏面のひび割れが本試験では観測された。
- (4) 鋼材表面温度が 250℃を超えた際に、空隙厚さが急激に増加する傾向にあったため、鋼材表面温度が 250℃程度までならば、鋼材の急激な変形などが発生しない安全な許容温度であることを再確認することができた。
- (5) 過去の報告と比較して、本試験では、コンクリート内部のひび割れが観測されなかったが、これは、試験体の形状や鋼製パイプによる空隙への水分の供給が影響していると推察される。

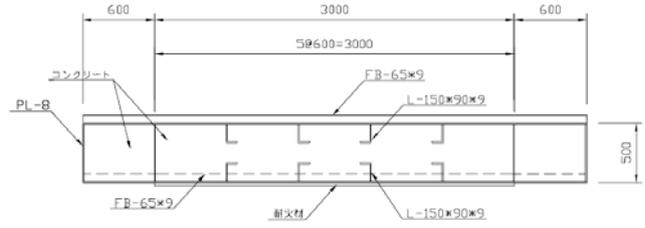


図-17 試験体断面図<sup>4)</sup>

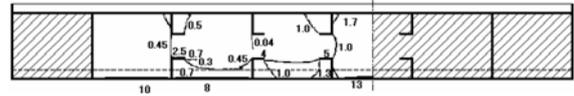


図-18 ひび割れ発生状況<sup>4)</sup>

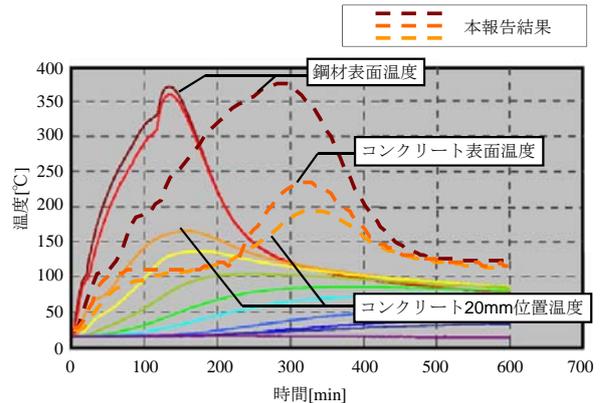


図-19 試験体内部温度の比較<sup>4)</sup>

#### 5. 今後の課題

本報では、鋼材表面温度が 350℃を超える領域における空隙厚さと鋼材温度を実測し、空隙厚さが著しく増加することで、部材の耐火性能に影響を及ぼすことを確認した。しかし、形鋼間に発生すると思われるコンクリート内部のひび割れが、本試験において観測されなかったため、加熱によりコンクリート内部に発生する引き抜きせん断応力への試験体断面高さの影響を、熱応力解析により検証する必要があると思われる。

#### 参考文献

- 1) 清宮 理：サンドイッチ構造の耐火技術と設計，コンクリート工学，Vol.45，No.9，pp.74-78，2007.9
- 2) 松本典人，中島興康，尾崎克己，清宮 理：夢咲トンネルの耐火被覆の施工，コンクリート工学，Vol.48，No.2，pp.45-49，2010.2
- 3) 菊地弘悦，谷辺 徹，清宮 理：鋼・コンクリート合成構造の許容温度設定に対する鋼材とコンクリート間に生じる空気層の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，2011
- 4) 工藤健一，山本邦夫，清宮 理：鋼・コンクリートサンドイッチ構造部材の車両火災を想定した加熱変形特性について，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.843-844，2005