

論文 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

菊地 弘悦^{*1}・谷辺 徹^{*2}・清宮 理^{*3}

要旨: 本研究では、鋼・コンクリート合成構造の許容温度設定を合理的に行うため、加熱中に生じる鋼材とコンクリート間の空気層の影響を検討している。合成構造を模擬した試験体の加熱試験にて、加熱中の空気層厚さ測定方法を考案して実測し、空気層厚さが大きいほど、空気層の断熱効果によって鋼板表面温度が増大する傾向を確認した。また、加熱中に測定した空気層厚さを考慮した熱伝達解析を実施し、解析結果と温度測定結果を比較した。その結果、鋼板とコンクリート間に形成される空気層の断熱効果によって鋼板表面温度が上昇し、空気層厚さが大きいほど上昇量も大きくなる傾向を熱伝達解析の面からも確認した。

キーワード: 合成構造, 耐火被覆材, 許容温度, 鋼材温度, 熱伝達解析, 空気層

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。このような構造としたトンネルでは、内空側に鋼材部が露出しているため、火災が発生した場合には鋼材部が高温となり、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。

耐火被覆を検討する上では部材の許容温度が重要となる。鋼構造の場合は、鋼材の耐荷力低下の観点から許容温度を 350℃程度とする考えがあるが、例えば、鋼殻内部にコンクリートを充てんした、フルサンドイッチ型鋼殻沈埋構造では、鋼殻内部からの水蒸気圧および、鋼板とコンクリートの熱膨張の差による影響から、350℃程度まで鋼板が温度上昇した場合、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ている¹⁾。また、鋼殻沈埋構造への加熱による鋼板の変形は、鋼板と内部コンクリート間にはく離を生じさせる。はく離が生じると鋼板とコンクリート間に空気層が形成され、これが断熱層の役割を果たすため、鋼板の著しい温度上昇を引き起こし、部材に大きな損傷を与える可能性がある(図-1 参照)。内部コンクリートまたはその他鋼材部に損傷が発生した場合、部分的に補修を行うことが困難な場合がある。これらのことを考慮して鋼殻沈埋構造である大阪の夢咲トンネルでは、鋼板の許容温度が 250℃と設定された²⁾。また、上述した鋼材部の変形は、鋼材部とコンクリート部の熱膨張の差に起因する熱応力により、耐荷力低下につながる損傷を構造体を与える可能性がある。これらのことから、構造体の健全性を維持するための合成構造の許容温度は、鋼材自身の耐荷力低下に

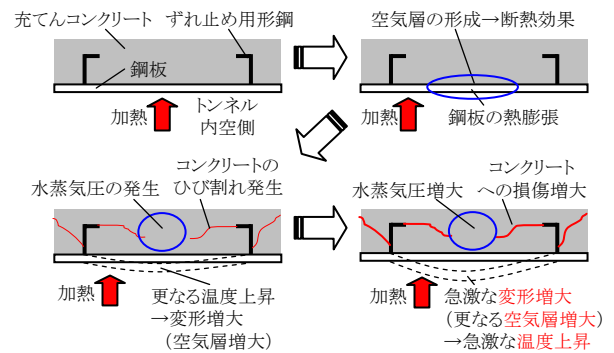


図-1 合成構造への加熱による影響

加えて、鋼材部の変形により、コンクリートに損傷が発生しない温度に設定する必要があると考える。上述したように鋼材とコンクリート間に形成される空気層が各部温度に影響を与えることから、空気層の発生状況やその影響度合いを把握することは、許容温度を設定するために重要であると考えられる。しかしながら、空気層による合成構造の鋼材温度への影響は、解析的手法にて検討された例³⁾は示されているが、その厚さと温度について実験的に検証した例はないのが現状である。

以上のことから、本研究では合成構造の部材許容温度を合理的に設定するにあたり、鋼材とコンクリート間に生じる空気層が及ぼす温度への影響を実験的に確認することを目的としている。そのため、鋼・コンクリート合成構造を模擬したものに、トンネル用耐火被覆材として用いられる湿式吹付け軽量モルタル(耐火被覆材)を適用した試験体を作製し、加熱試験中における空気層厚さの測定を行っている。

*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

*3 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)

2. 許容温度設定および耐火被覆材の厚み設計手順

本研究では、図-2 に示すような手順による部材の許容温度設定および耐火被覆材の厚み設計を検討している。その手順を以下に詳述する。

2.1 加熱曲線の設定

加熱曲線については、トンネルの設計条件などにより異なる。近年ではドイツにおける道路トンネル火災を想定した RABT 曲線を用いることが多い。

2.2 部材の許容温度設定

(1) 鋼材部の許容温度設定

a) 構造特性把握

加熱によって部材は熱膨張し、変形が生じる。鋼材部とコンクリート部では熱伝達性に差があるため、同様に加熱されても熱膨張に差が生じる。特に鋼殻構造とした沈埋トンネルおよびシールドトンネルでは、内空側の鋼材と背面にあるコンクリートの間に空気層が形成される場合がある。このような場合、空気層が断熱層になることで鋼材部の温度上昇が顕著になることが考えられる。空気層の形成には、鋼材部とコンクリート部の変形挙動が影響していると推察される。そのため、鋼材部の許容温度を設定するには、加熱時における変形挙動などの、構造特性の把握が必要と考えられる。

b) 許容温度設定

鋼材部の許容温度は、鋼材部の熱膨張によるコンクリートの損傷レベルなどを考慮して検討する必要がある。図-1 に示したように、鋼材部の変形によってコンクリート部に損傷が発生する可能性がある。そのため、合成構造の種類によって異なるが、コンクリート部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、温度上昇に対して、鋼材とコンクリート間に生じる空気層が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気層の影響を考慮する必要がある。

(2) コンクリート部の許容温度設定

コンクリート部の許容温度については、これまでに耐火設計の実績が多くあるため、それらに準ずるものとし、本論文においては特に検討範囲としていない。

2.5 熱伝達解析による検討

構成材料の熱特性および鋼材とコンクリート間に発生する空気層の熱伝達挙動を考慮した解析を実施し、許容温度を満たす耐火被覆材厚さを検討する。

2.6 模擬試験体による耐火性能確認試験

熱伝達解析結果について、模擬試験体による確認試験を行い、許容温度を満足できるかを判断する。許容温度を満足できれば耐火被覆材の厚み設計を終了とする。

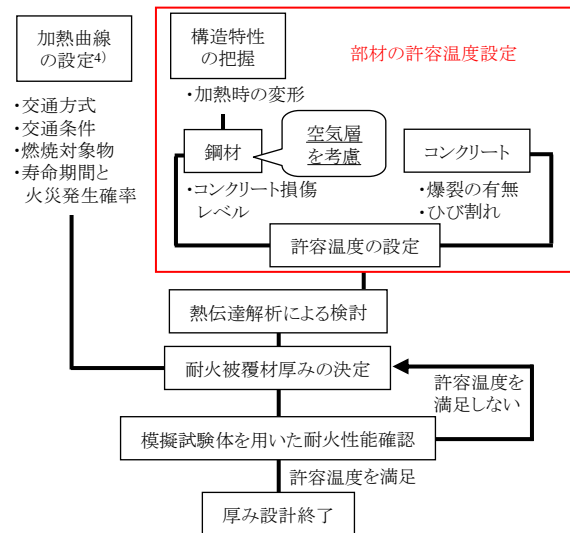


図-2 合成構造の耐火設計手順

3. 本研究における検討範囲

本研究においては、図-2 に示した手順の中で、鋼材の許容温度設定に必要な空気層の影響について実験により検討することを目的としている。そのため、加熱中における空気層厚さの測定を実施し、空気層厚さと鋼材温度の関係を検討した。さらに、空気層厚さ測定結果を解析条件として考慮した熱伝達解析を実施し、加熱試験による温度測定結果と比較することで、解析の面からも温度へ及ぼす空気層の影響を確認した。

また、鋼材の許容温度は、最大でも構造体としての耐荷力低下が発生しないとされる 350°C程度であると考えられる。本研究では、検討段階を2つに区分し、第1段階としては 250°C程度まで、第2段階として 350°C、またはそれを超える領域での空気層の影響を検討することとした。第1段階の 250°Cは、近年のフルサンドイツ型の鋼殻沈埋トンネルに適用されている許容温度レベルである。本論文では、第1段階の 250°C程度までの温度領域における空気層の影響について報告するものである。

4. 加熱試験

鋼板とコンクリート間に生じる空気層厚さの違いによる鋼板表面温上昇量の違いを実験的に確認することを目的に加熱試験を実施した。試験体は、仕様の異なる鋼・コンクリート合成構造を模擬したものを2種類作製した。

4.1 試験概要

(1) 試験体

a) 鋼材部の仕様

鋼材部の仕様は図-3 に示すようなものとした。種類は2種類とし、タイプ1が 9×300×300mm の鋼板裏面

に D10 鉄筋を 200mm ピッチにて溶接した。また、タイプ 2 については、実際の鋼殻沈埋トンネルの仕様を参考に、L 形の形鋼を 600mm ピッチにて鋼板裏面に溶接した。

b) コンクリート

コンクリートについては、鋼板裏面に対して表-1 に示す配合のコンクリートを厚さ 200mm にて打設した。また、加熱による鋼板とコンクリート間のはく離が容易となるように、鋼板裏面には厚さ 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。

c) 耐火被覆材

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、鋼板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）をタッピンビスにて設置した後、厚さ 25mm にて吹付け施工した。なお、施工面積については、タイプ 1 は鋼板全面（300×300mm）、タイプ 2 については鋼板中心部の 900×900mm とした。耐火被覆材吹付け後、25d 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 5d 乾燥養生（40℃）を行った。

(2) 測定項目および測定箇所

a) 温度（熱電対設置箇所）

温度測定部分は図-3 に示した部分とし、また、各部分の温度測定箇所は図-4 に示した箇所とした。なお、タイプ 2 の試験体については、測定部分を A、B および C エリアの 3 箇所とした。

b) たわみ量（空気層厚さの測定）

鋼板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板たわみ量として測定した。また、鋼板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。本論文においては、図-6 に示すように、鋼板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板とコンクリート間に生じた空気層厚さとした。なお、たわみ量測定は、図-3 に示した温度測定と同様の部分にて実施した。

c) 含水率

コンクリートについてはφ100×200mm、耐火被覆材については25×300×300mmの含水率測定用の試験体を作製し、加熱用試験体と同条件の養生を行って、試験前のコンクリートおよび耐火被覆材の含水率を測定した。

(3) 加熱試験

加熱試験は高性能水平炉に対して試験体を図-7 に示すように設置して実施した。加熱条件は、トンネルの耐

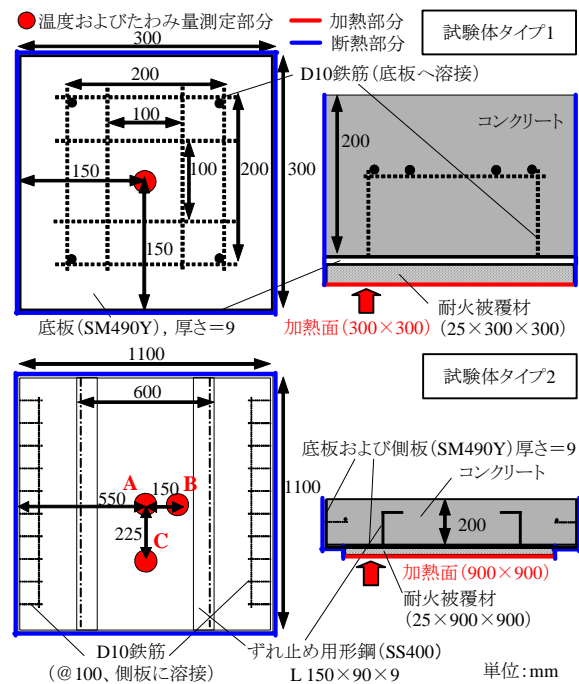


図-3 試験体概要

表-1 コンクリートの配合

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	43.2
単位量 (kg/m ³)					
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 ³)	材齢 28d 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

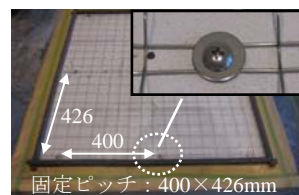


写真-1 メッシュ設置状況

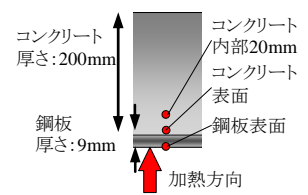


図-4 温度測定箇所

火設計に比較的良好に用いられる RABT 曲線に準じ、最高温度（1200℃）保持時間を 25min に設定した RABT 曲線 30 分による加熱とした。

4.2 試験結果および考察

(1) 温度、たわみ量および空気層厚さ測定結果

図-8 には、試験体タイプ 1 の温度、たわみ量および空気層厚さと時間の関係を示す。鋼板表面温度は加熱開始から 83min の時点で最大値である 187℃を示し、空気

層厚さについては明確なピークは認められず、最大でも0.2mm程度であった。また、本試験では、鋼板のたわみ変形は温度上昇による熱応力の発生が主要因と考えられるが、図-8の結果からは、鋼板表面温度と鋼板たわみ量が最大値を示す時間帯が異なる。これは、図-6に示した試験体設置条件の影響により、試験体設置ジグの沈下量が鋼板およびコンクリートたわみ量測定結果に反映されているためと推察される。

図-9には、試験体タイプ2の温度、たわみ量および空気層厚さと時間の関係を測定エリア別に示す。試験体タイプ2の空気層厚さと時間の関係は、鋼板表面の温度変化と同様な挙動を示し、鋼板表面温度が最大となった73minの時点で空気層厚さも最大値を示した。これは、本試験の条件では鋼板の変形に影響を及ぼす要因が、加熱による鋼板への熱応力であったためと推察される。また、空気層厚さはAエリア（加熱面中心部）が最も大きく、最大値が2.13mm、Bエリアで1.33mm、Cエリアで1.44mmとなった。Aエリアで空気層厚さが最大となるのは、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が生じやすい部分であったことが理由として挙げられる。また、鋼板表面温度には、加熱中に大きな変曲点などは認められない。従って、今回の加熱試験における250℃程度までならば、鋼板とコンクリート間に空気層が形成されても、試験体に急激な温度上昇などが発生しない温度領域であると考えられる。

(2) 鋼板とコンクリート間の温度差および鋼板表面最大温度に及ぼす空気層厚さの影響

図-10には、鋼板表面温度最大時における鋼板表面温度とコンクリート表面および20mm位置との温度差を示す。なお、図中に示した空気層厚さは、加熱開始から鋼板表面温度が最大値を示した73minまでの平均値を示している。空気層厚さは、時間の経過と共に変動しており、73minまでに測定された空気層厚さを考慮するため、それまでの平均値を評価に用いた。なお、平均値は、測定された空気層厚さの累計値を測定回数で除して算出した。

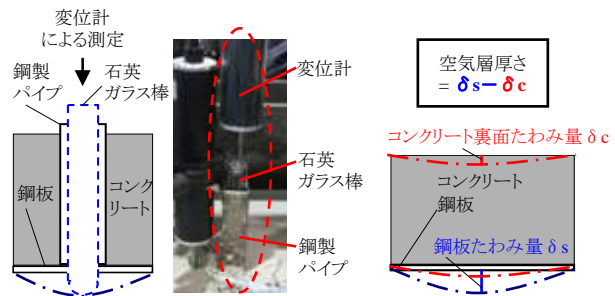


図-5 鋼板たわみ量測定方法 図-6 空気層厚さの測定方法

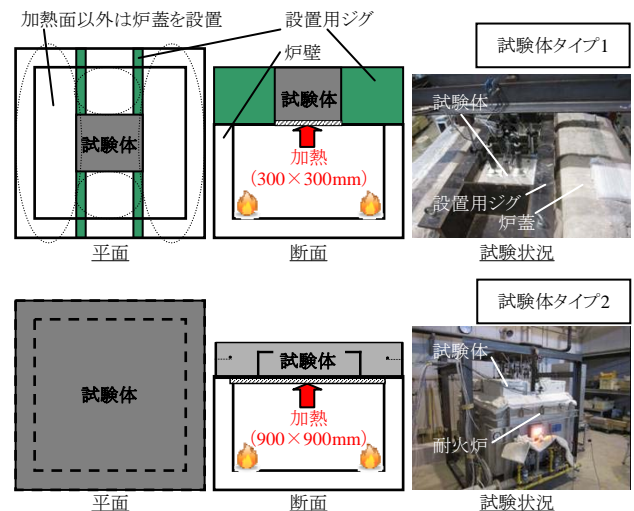


図-7 加熱方法

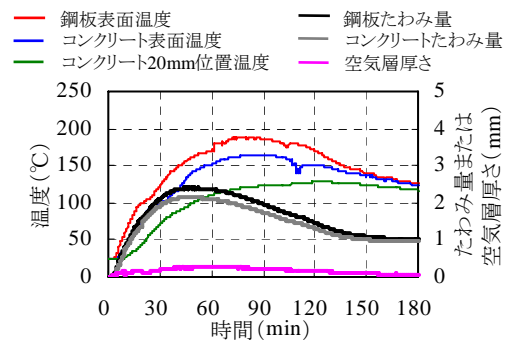


図-8 温度、たわみ量および空気層厚さと時間の関係 (タイプ1)

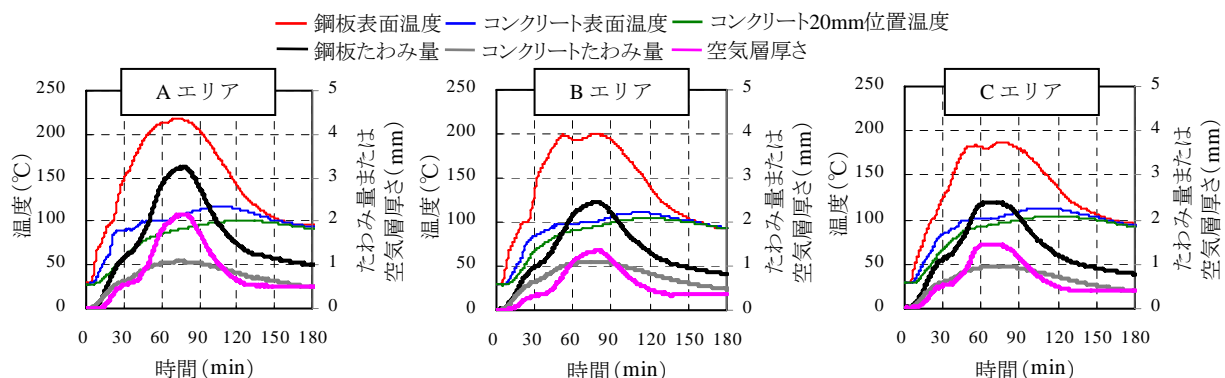


図-9 温度、たわみ量および空気層厚さと時間の関係 (タイプ2)

鋼板表面温度との温度差は、73min 平均空気層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、加熱によって空気層が形成されることにより、空気層の断熱効果が発揮されているためと考えられる。なお、既往の熱伝導解析結果³⁾では、空気層厚さの増加によって鋼板とコンクリートの温度差が大きくなる結果が示されており、本試験結果についても同様の傾向が確認された。また、試験体タイプ1の温度差は、試験体タイプ2のいずれの測定エリアにおける温度差よりも小さい。これは、試験体タイプ2と比較して空気層厚さが小さくなったためと考えられる。空気層厚さが小さくなった理由としては、試験体タイプ2と比較してD10鉄筋を溶接することで、より小スパンで鋼板を拘束していること、鋼板の面積が異なることなどにより、鋼板の温度上昇に伴うたわみ変形を抑制していることが挙げられる。従って、加熱による鋼板のたわみ変形を抑制することは、鋼板とコンクリート間に形成される空気層による断熱効果を低減し、鋼板の著しい温度上昇を抑制する効果が期待される。

図-11には、試験体タイプ2のAエリア鋼板表面温度が最大値を示した時間（加熱後73min）における鋼板表面温度と73min平均空気層厚さの関係を示す。試験データが少ない中ではあるが、空気層厚さの増加に伴って鋼板表面温度は増大する傾向にある。また、AエリアとCエリアを比較すると約30℃の温度差が生じていた。これにより、同等の熱量を与えた場合でも、空気層厚さによって鋼板温度が異なる傾向が確認された。

5. 熱伝達解析

本試験で得られた加熱試験結果について、熱伝達解析からも空気層厚さによる鋼板温度への影響を確認した。本試験においては、試験体の鋼板とコンクリート間に空気層が生じており、その影響によって鋼板の温度上昇量が増大していると考えられる。そこで、鋼板とコンクリート間に生じる空気層を考慮した熱伝達解析を実施した。なお、一般の熱伝達解析の汎用プログラムでは、空気層の輻射、対流および熱伝導を全て考慮したモデルが整備されておらず、本試験のように、材料間に空気層があると熱伝達解析が正確にできない。そこで、汎用FEM解析プログラムDIANA⁵⁾に以下に述べる条件を組込んで、本試験でのAエリア部分を対象に解析を行った。

5.1 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルは図-12に示すものを用いた。鋼板とコンクリート間には厚さ1.0mmの空気層を配置した。これは、本試験で得られたAエリアにおける加熱時間中(140min)の平均空気層厚さを算出し、0.99mmであったため、その値を参考に設定したものである。なお、試

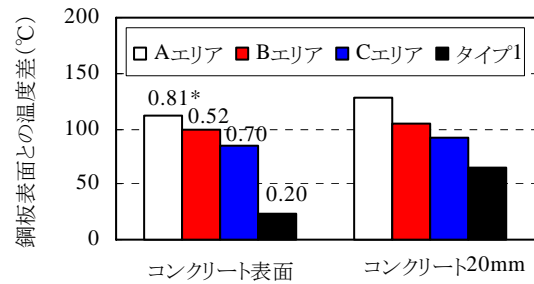


図-10 鋼板表面温度とコンクリート表面および20mm位置における温度差（鋼板表面温度最大時）
注）*：73min平均空気層厚さ（mm）

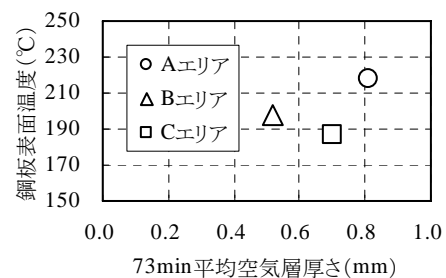


図-11 加熱後73minにおける鋼板表面温度と平均空気層厚さの関係（試験体タイプ2）

験結果より空気層厚さは時間の経過によって変動しているが、解析条件に反映すると計算が非常に複雑となるため、本解析においては空気層厚さを1.0mm一定とした。

(2) 空気層の熱伝達挙動

空気層の熱伝達挙動については、既往の研究⁶⁾と同様とし、輻射、対流および熱伝導を考慮する条件とした。

(3) 耐火被覆材、鋼板およびコンクリートの熱伝導率ならびに熱容量

耐火被覆材の熱伝導率は表-2に示した0.20 W/m·Kとし、熱容量は727.5 kJ/m³·K（密度：750 kg/m³、比熱：0.97 kJ/kg·Kとして計算）とした。鋼板については文献記載値⁷⁾を使用した。コンクリートについても文献記載値⁸⁾を用いたが、コンクリートについては熱伝導率がUpperおよびLowerについての記載があり、本解析ではそれらの平均値を用いた。

(4) 潜熱の影響

潜熱についても既往の研究⁶⁾と同様の方法で考慮することとした。耐火被覆材およびコンクリートの含水量は、含水率試験結果（耐火被覆材5.3%、コンクリート5.8%）から算出し、それぞれ耐火被覆材39.8 kg/m³、コンクリート145 kg/m³と設定した。

(5) 加熱方法および境界条件

解析モデルへの熱量の入力は、輻射境界の外気温をRABT曲線30分に従い変化させる方法とし、熱伝達による入熱は考慮していない。これは、RABT曲線の高温下

では輻射による入熱が支配的になると考えられるからである。また、本解析での非加熱側面の熱伝達境界の熱伝達率は $14\text{W/m}^2\cdot\text{K}^9$ とし、外気温は 20°C と設定した。

5.2 解析結果と実験値の比較

図-13 には、解析結果と加熱試験結果の比較を示す。コンクリート表面温度においては解析値と実験値の誤差があるが、鋼板表面温度については良く整合している。また、加熱試験において確認された鋼板表面温度とコンクリートの温度差も、深さ 20mm の位置ではある程度の精度を持って再現できている。このことから、加熱試験において確認された空気層による断熱効果が解析によっても確認できた。

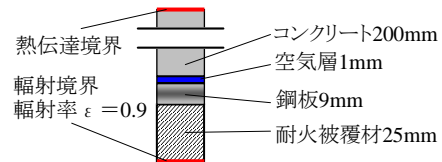


図-12 解析モデル

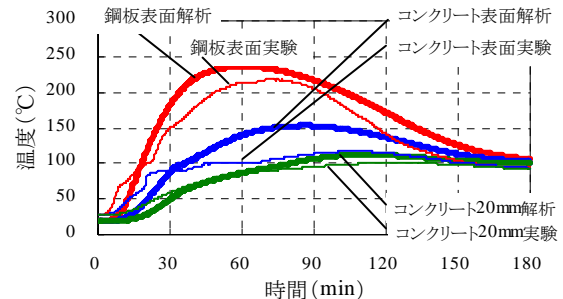


図-13 解析結果と加熱試験結果の比較

6. まとめ

本研究での試験結果を総括すれば、以下の通りである。

- (1) 加熱中に発生する鋼板とコンクリート間の空気層厚さを実測することができた。また、本試験の条件では最大で 2.13mm の空気層厚さが測定された。
- (2) 鋼板の温度応力に起因して発生する鋼板とコンクリート間の空気層厚さは、鋼板表面温度の上昇に伴い増大する傾向を示す。
- (3) 今回加熱試験を実施した試験体仕様では、鋼板表面温度が 250°C 程度までならば、鋼材部の急激な変形などが発生しない安全な許容温度であると考えられる。
- (4) 鋼板とコンクリート間に形成される空気層の厚さが大きいほど断熱効果が大きくなり、鋼板とコンクリートの温度差が大きくなることを実験的に確認した。
- (5) 鋼板の剛性を増大させることは、加熱による鋼板とコンクリート間の空気層厚さ増大を抑制し、鋼板の著しい温度上昇を低減する効果が期待できる。
- (6) 同等の熱量を与えた場合でも、鋼板とコンクリート間に生じる空気層厚さが大きい方が、鋼板表面温度が高くなる傾向を確認した。
- (7) 鋼板とコンクリート間に発生する空気層を考慮した熱伝達解析結果は、加熱試験の結果とよく整合しており、空気層による鋼板温度への影響を熱伝達解析の面からも確認した。

7. 今後の課題

本報では、鋼材温度が 250°C 以下の領域での空気層厚さと鋼材温度の関係を把握し、熱伝達解析で鋼材温度を精度良く推定できることを確認した。今後は鋼材がより高温になり、変形量が大きくなる場合でも空気層の影響を考慮して、鋼材温度を精度良く解析で推定可能とするため、検討段階 2 に位置付けた 250°C を超える領域での空気層厚さと鋼材温度の関係を把握する予定である。

謝辞

本研究における熱伝達解析には、JIP テクノサイエンス (株) の中井氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を申し上げます。

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，Vol.48，No.2，pp.45-49，2010.2
- 3) 中井章裕，清宮 理，工藤健一：サンドイッチ合成構造部材耐火実験への熱伝導及び熱応力解析，構造工学論文集 A，Vol.53，pp.57-64，2007.3
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，p.196，2002.6
- 5) TNO DIANA BV：DIANA9.3 User's Manual Analysis Procedures 17.Heat Flow Analysis，JIP テクノサイエンス，2008
- 6) 清宮 理，中井章裕：耐火板を設置した合成構造部材の熱伝達に関する数値解析，第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.48—1-6，2009
- 7) 国土開発技術センター：建築物の総合防火設計法 第 4 巻耐火設計法，日本建築センター，p.124，1989.4
- 8) CEN：EN 1992-1-2 Eurocode 2 Design of Concrete Structures - Part 1-2 General Rules - Structural Fire Design，pp.26-30，2004
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，p.333，2007