

(48) 耐火板を設置した合成構造部材の熱伝達挙動に関する数値解析

清宮 理¹・中井 章裕²

¹フェロー会員 早稲田大学教授 社会環境工学科 (〒160-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail:k9036@waseda.jp

²学生会員 工修 早稲田大学 大学院理工学研究科 (〒160-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail:nakai@akane.waseda.jp

鋼・コンクリート合成構造形式のトンネルでは、鋼板がトンネル内に露出しているため、車両火災に対する耐火対策が必須である。その為、近年は耐火板を設置し、トンネル構造体の温度を所定温度下に収める耐火対策が用いられている。このとき、浮かし貼り工法により耐火板を設置した場合は、耐火板と鋼板間の中空の層により熱の伝達が抑制されるという優れた特徴を有するものの、中空の層の熱の伝達メカニズムが複雑な為、通常の熱伝導解析の適用が困難であるという問題点がある。そこで、本研究では中空の層を有する構造に適用可能な熱伝達解析手法の開発を目的として、大型模型の耐火実験を実施した後に、輻射・対流・熱伝導及び潜熱を導入した熱伝達解析を行い、提案する解析手法の適用性を検討した。

Key Words : Composite member, tunnel, fire performance, heat transfer, air layer, F.E.M.

1. はじめに

トンネル火災の事故例が各国より報告・分析¹⁾²⁾されている。特に、水底トンネルは車両火災による構造部材の損傷が水や土砂のトンネル内への流入を招くことによって、施設全体の機能不全をきたし、人命が危険にさらされる可能性が高い。この観点から、神戸港島トンネル、東京港第二航路トンネル、東京港臨海道路トンネルなど多くの水底トンネルで耐火材が設置されている。水底トンネルの一形式である沈埋トンネルでは、鋼殻と充填コンクリートによる合成構造が最近広く採用されており(図-1)、沖縄・北九州・大阪では本構造形式の水底トンネルが現在建設中である。この構造は、各種補剛材を配置した箱形状の鋼枠内に、高流動コンクリートなどを充填した合成構造であり、鋼材とコンクリートが力学的に一体化している。ただし、主構造部材である鋼板がトンネル内空側に露出しており、車両火災に対する耐火対策が不可欠であるため、これらのトンネルでは耐火材の設置によりトンネル構造体の温度を許容温度内に収める耐火対策が用いられている³⁾。このとき、一般に許容温度としては鋼材は250-350℃程度、コンクリートは250-380℃程度に設定されていることが多い⁴⁾⁵⁾。

トンネル内車両火災での標準加熱曲線の例を図-2 に

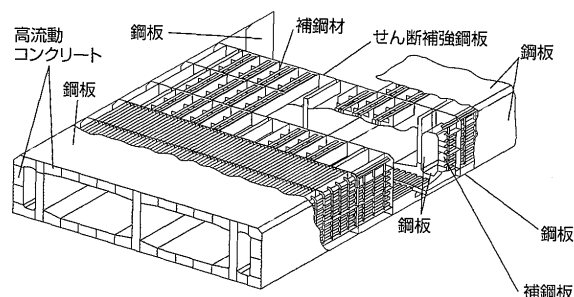


図-1 合成構造による水底トンネル

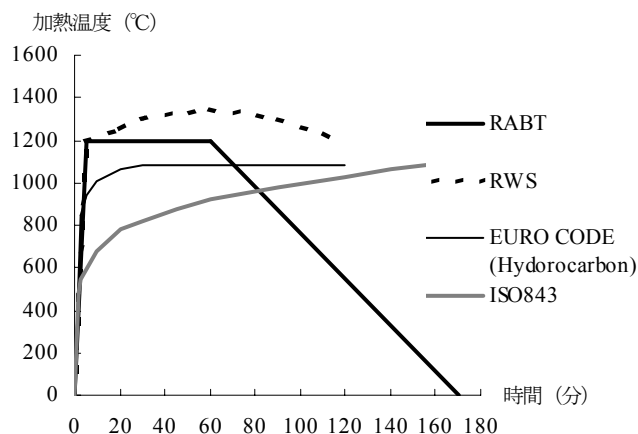


図-2 標準加熱曲線の例

示す。標準加熱曲線は各種提案されているが、日本でトンネルの耐火設計を行う場合は、トンネル内温度が加熱開始後5分で1200℃に到達し、最高温度が加熱開始後60分まで継続するRABT曲線を使用することが多い。よって、本研究においてもRABT曲線を採用して検討を行った。

2. 耐火対策

トンネルの耐火対策として採用される耐火材⁶⁾は、吹き付け系耐火材とパネル系耐火材（以下、耐火板）に大別できる。また、耐火板の設置方法（図-3）は、ボルト・ナットを介して耐火板を直接鋼板に取り付ける直貼り工法と、取付け金具を利用して鋼板から距離を持たせて設置する浮かし貼り工法に分類される。浮かし貼り工法により耐火板を設置すると、耐火板と鋼板間に中空の層が形成されるため、熱の伝達が大きく抑制できるということと、構造体の不陸に容易に対応でき、施工性や美観性が良好なことから、近年は後者の工法の採用実績が増えてきている。しかしながら、中空層での熱の伝達メカニズムについては不明な点が多く、計算や解析手法が確立されていないことが、本工法により耐火設計を行う際の大きな問題点となっている。一方、吹き付け系耐火材や、直貼り工法で設置された耐火板の熱伝達解析は、既往の研究⁷⁾⁸⁾により、良好な結果を得ることができることがわかっている。ただし、加熱中に材料間にはく離が生じ中空層が形成されたときの解析は容易にはできない。

3. 大型試験体を用いた耐火実験

(1) 実験目的および実験条件

浮かし貼り工法により耐火板を設置した合成構造の火災時の挙動を把握することを目的とし、大型試験体を使用した耐火実験を実施した。試験体の寸法は図-4に示すように鋼枠は幅1300mm、奥行き1300mm、高さ218mm、厚さ9mmとし、鋼材とコンクリートの一体化のために、150mm×90mm×9mmのL形鋼を設置し鋼枠と溶接した。なお、鋼材の材質はいずれについてもSS400とした。試験体にはコンクリート打設前に、試験体中央位置のコンクリート下面から20mm、50mm、90mm、140mm位置に熱電対を埋め込み、耐火板中空層側、下側鋼板中空層側にも熱電対を設置した。これらの熱電対の設置位置の概要を図-5に示す。図-6に示すようなガス加熱装置によりRABT加熱実験を実施した。なお、試験体には荷重を載荷せず、無応力状態での加熱実験とした。試験体は4

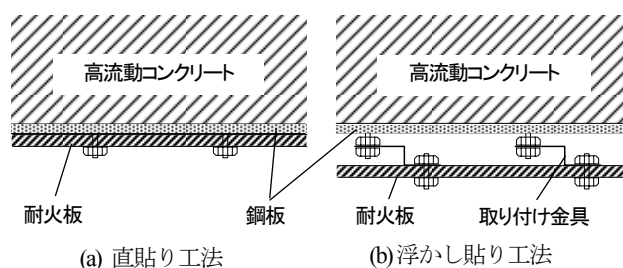


図-3 耐火板の設置方法

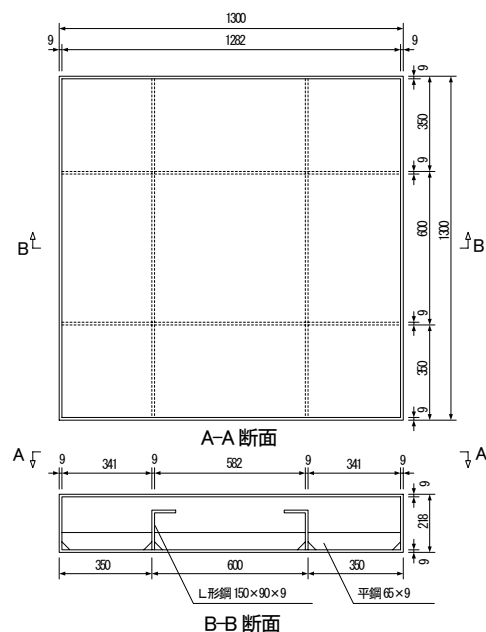


図-4 試験体の形状

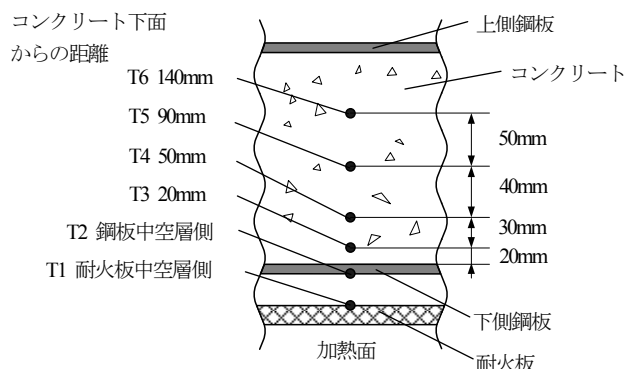


図-5 熱電対位置

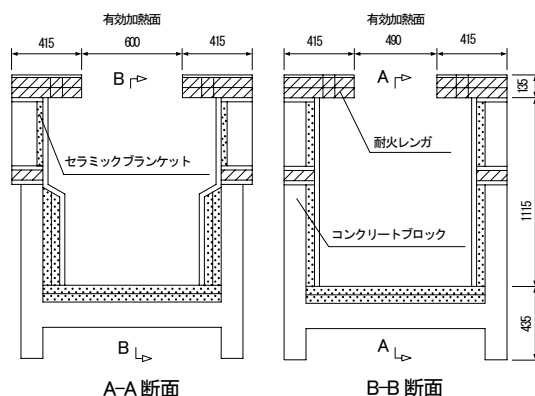


図-6 加熱装置

体作成し、表-1 に示すケースで実験を行った。一般に浮かし貼り工法を使用する場合、構造体から5mm～30mm程度の距離を持たせて耐火板を設置することが多いことから、浮かし貼り量は5mmと25mmの2パターンとした。耐火板厚については、RABT加熱時に鋼板の目標温度を200℃に設定し、この目標温度に達するような耐火板厚である30mm程度を採用した。含水量については、耐火板を適切に管理した状態を想定したものをケース1およびケース2とし、実際にトンネルに設置され、トンネル内の湿気・水分を吸収した状態を想定したものをケース3およびケース4とした。

(2) 実験結果

実験結果を図-7～図-10 に示す。耐火板を適切に管理した状態であるケース1及びケース2では、耐火板の潜熱の影響により、100℃近傍において温度の停滞が多少見られる結果となった。トンネル内の湿気・水分を吸収した状態を想定したケース3及びケース4では、潜熱の影響が強くみられ、100℃近傍で耐火板および鋼板の温度が停滞する時間が30分～40分程度と長期間となった。鋼板温度に着目すると、ケース1とケース2の条件の相違は浮かし貼り量のみであるが、最高温度の差が多少見られ、ケース1で213.1℃、ケース2で236.4℃であった。また、浮かし貼り量（5mm）が等しいのはケース2～4であるが、それぞれのケースで含水量が大きく異なるにも関わらず、鋼板の最高温度は耐火板厚が27mmであるケース2で236.4℃、耐火板厚が30mmであるケース3で208.4℃、耐火板厚が35mmであるケース4で179.9℃と線形的に変化した。このことから、耐火板の含水量は鋼板温度に対して100℃での温度停滞に大きく影響を与えるものの、最高温度に対する影響はわずかであることがわかった。

4. 耐火実験対する熱伝達解析

(1) 解析モデル

一般の熱伝導解析の汎用プログラムでは、中空層の輻射・対流・熱伝導をすべて考慮したモデルが整備されておらず、今回実施した耐火実験の熱伝達解析を正確に行うことはできない。そこで、汎用FEM解析プログラムDIANA[®]に以下に示すモデルを組み込んで解析を実施した。解析モデルを図-11 に示す。解析ステップは1秒×10800ステップ=3時間とし、時間方向の積分方法としてクランク・ニコルソン法を用いた熱伝導FEM解析を実施した。

表-1 実験ケース一覧

ケース 名称	浮かし貼り量 (mm)	耐火板厚 (mm)	含水量 (kg/mm ³)
1	50	27	16.0
2	5	27	16.0
3	5	30	127.7
4	5	35	91.1

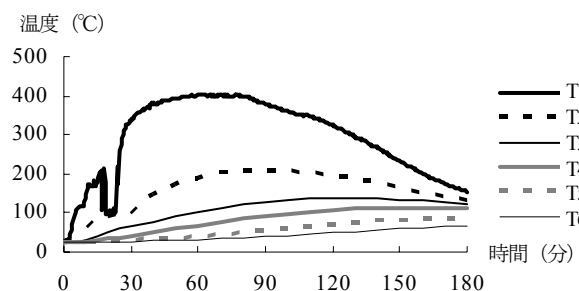


図-7 温度計測結果（ケース1）

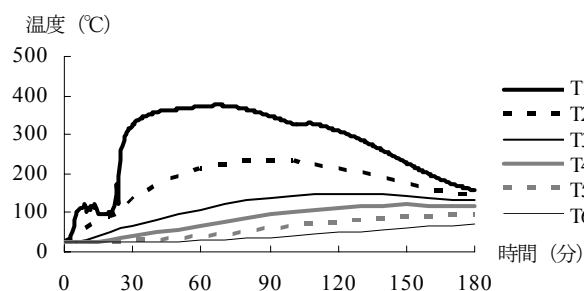


図-8 温度計測結果（ケース2）

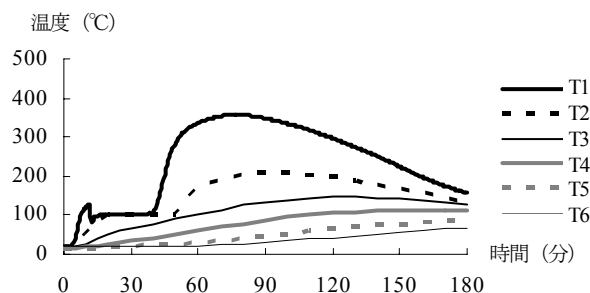


図-9 温度計測結果（ケース3）

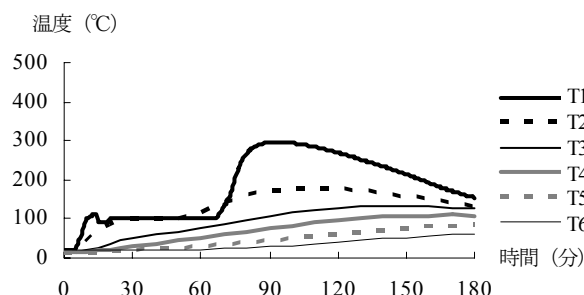


図-10 温度計測結果（ケース4）

a) 中空層の熱伝達挙動のモデル化

中空層には図-12 に示すような輻射および対流・熱伝導^{10) 11)}を模擬する熱インターフェース要素を配置した。本要素の熱流量 q_{f1} は、式(1) に示すように、輻射の項と対流および熱伝導の項の和によって構成されており、高次の項を汎用プログラムに組み込むことができないため、 $(T_i - T_{i+1})$ 以外の項を熱伝達係数 k_{f1} に置き換えた一次の式で定式化している。このとき、輻射の項で必要となる輻射率 ε は式(2) の輻射率 ε_1 と ε_2 に別途実施した材料試験で得られた0.9（鋼板および耐火板の輻射率）を代入して算出した0.818を使用した。

$$q_{f1} = \varepsilon \times \sigma \times (T_i^4 - T_{i+1}^4) + \frac{Nu \times \lambda}{\ell} \times (T_i - T_{i+1})$$

$$= \left\{ \varepsilon \times \sigma \times (T_i^2 + T_{i+1}^2) \times (T_i + T_{i+1}) + \frac{Nu \times \lambda}{\ell} \right\} \times (T_i - T_{i+1})$$

$$= k_{f1} \times (T_i - T_{i+1}) \quad (1)$$

ここに、

ε : 輻射率

σ : シュテファンボルツマン係数

λ : 空気の熱伝導率

ℓ : 2平板間の距離

Nu : ヌルセト数で以下の式より計算する。

$G_r < 10^4$: 対流なし

$10^4 < G_r < 4 \times 10^5$: $Nu = 0.195 G_r^{0.25}$

$4 \times 10^5 < G_r$: $Nu = 0.068 G_r^{0.33}$

G_r : グラスホフ数で以下の式により計算する。

$$G_r = \frac{\ell^3 \times \beta \times g \times (T_1 - T_2)}{\nu^2}$$

β : 空気の体積膨張率

g : 重力加速度

ν : 空気の動粘性係数

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2)$$

ここに、

ε_1 : 下側平板の輻射率

ε_2 : 上側平板の輻射率

同様に輻射境界（図-13）は、式(3)で定式化した。なお、 T_{out} は境界外部の温度であり、輻射率 ε は0.9とした。

$$q_{f2} = \varepsilon \times \sigma \times (T_{out}^4 - T_i^4)$$

$$= \left\{ \varepsilon \times \sigma \times (T_{out}^2 + T_i^2) \times (T_{out} + T_i) \right\} \times (T_{out} - T_i) \quad (3)$$

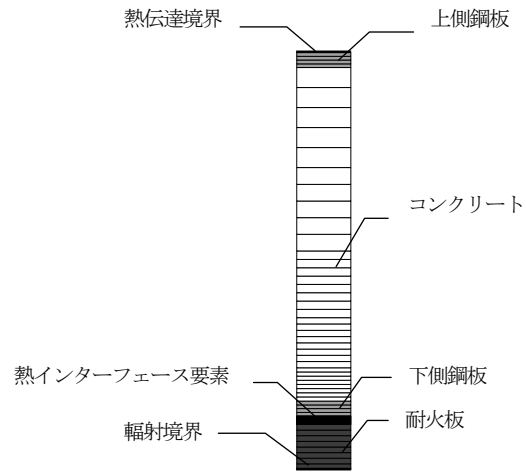


図-11 解析モデル

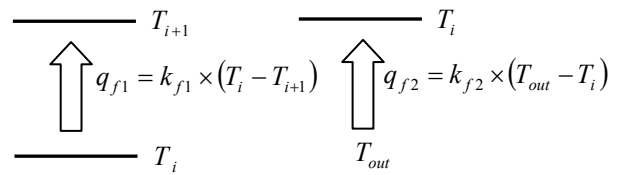


図-12 熱インターフェース

図-13 輻射境界

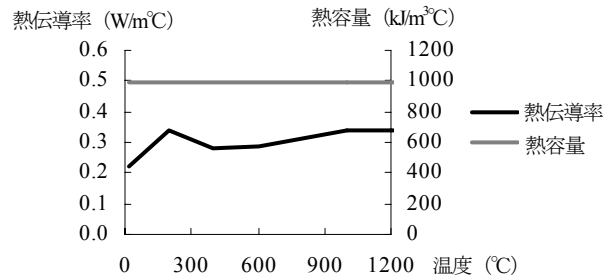


図-14 耐火板熱特性

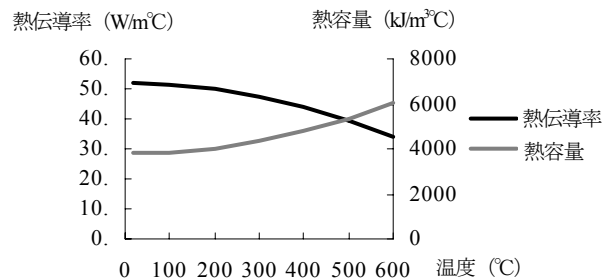


図-15 鋼板熱特性

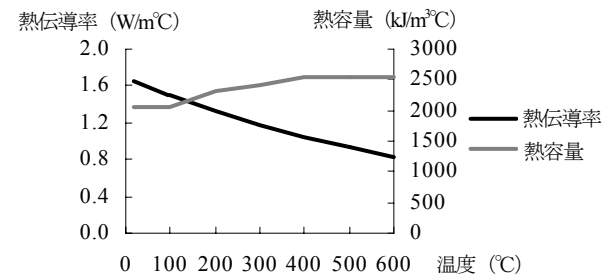


図-16 コンクリート熱特性

$$= k_{f2} \times (T_{out} - T_i)$$

b) 耐火板・鋼板・コンクリートの熱伝導率と熱容量

耐火板に使用した熱伝導率および熱容量を図-14 に示す。これらの値は今回使用した耐火板の材料試験から求めた値である。また、鋼板に使用した熱伝導率および熱容量を図-15 に示す¹²⁾。コンクリートに使用した熱伝導率および熱容量は図-16に示す値とした¹³⁾。なお、参考とした文献にはコンクリートの熱伝導率としてUpperの場合とLowerの場合の2パターンが記載されているが、本解析では平均値を採用した。

c) 潜熱の考え方

実験ではコンクリートの最高温度は100℃～150℃程度と比較的低い結果となっており、潜熱の影響が顕著に出ていることが予想される。そこで、耐火板とコンクリートについては、100℃において材料中の水分が気化するまで、温度が上昇しないと考えると、95～100℃区間の熱容量に潜熱が消費するエネルギーを付加させた。このとき、材料中の水分が潜熱として消費するエネルギーは2.256GJ/m³とし、耐火板の含水量は表-1で示した値とした。また、コンクリートの含水量は200kg/m³とした¹⁴⁾。今回採用したコンクリートの含水量は、通常のコンクリートのものよりも高いが、充填コンクリートは気密された状態で養生しているため、大気中への水分の蒸発がないことより、水中に存在するコンクリートと等価な状態であると考え、参考文献に記載されている水中コンクリートの絶乾試験結果を使用した。

d) 加熱方法と境界条件

解析モデルへの熱量の入力は、輻射境界の外気温度をRABT曲線に従い変化させる方法とした。非加熱面側の熱伝達境界の熱伝達率¹⁵⁾は14W/m²℃とし、外気温度は試験中の平均室温30℃とした。

(2) 解析結果

耐火実験と熱伝達解析の温度履歴の比較を図-17～図-20 に示す。このとき、着目箇所は耐火板・鋼板・コンクリート（20mm位置）とした。耐火板の温度履歴は、潜熱による100℃近傍の温度の滞留を再現できていない。これは、本解析では潜熱を考慮しているものの耐火板内部での水分移動を解析モデルに組み込んでいない事が理由だと考えられるが、実験では高温加熱により常に多量の水が試験体外部に漏出しているような状況であり、水滴が直接降り注ぐような箇所に設置している耐火板熱電対の計測値も多分に誤差を含んでいることも実験と解析値がかい離した理由として挙げることができる。一方、鋼板とコンクリートの熱履歴については実験値をよく模擬できていない結果となった。

本構造の耐火設計時には、一般に許容温度として鋼板は250-350℃程度、コンクリートは250-380℃程度とすることが多いことから、通常は鋼板を許容温度以内に収め

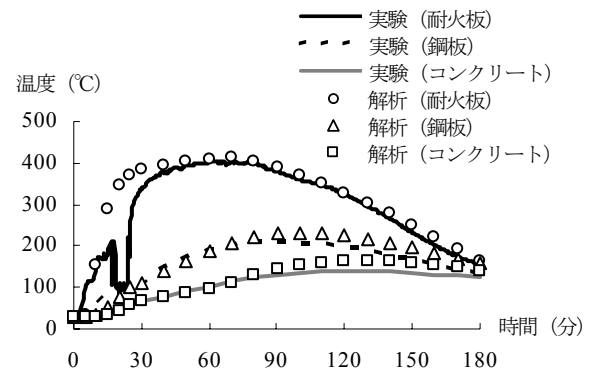


図-17 熱伝達解析結果（ケース 1）

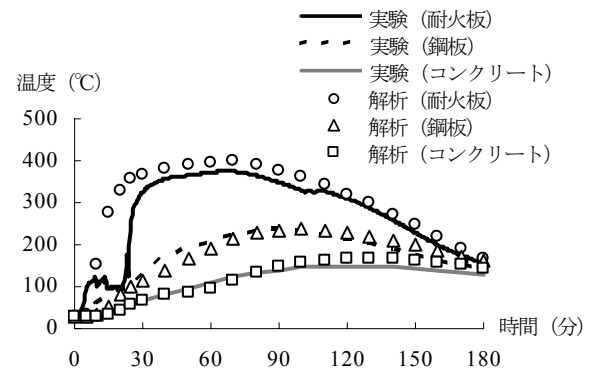


図-18 熱伝達解析結果（ケース 2）

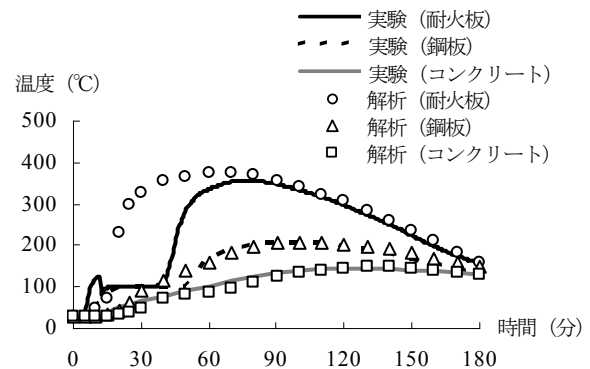


図-19 熱伝達解析結果（ケース 3）

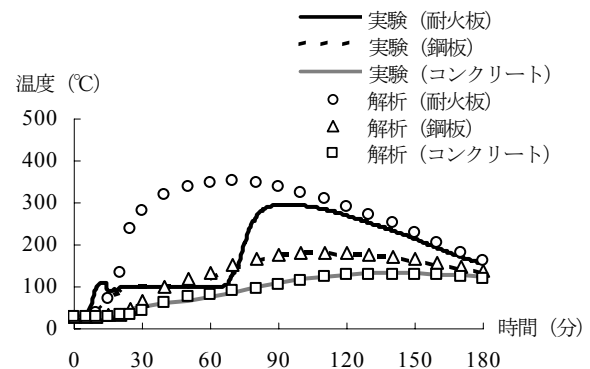


図-20 熱伝達解析結果（ケース 4）

表-2 鋼板最高温度の比較

ケース 名称	実験 (°C)	解析 (°C)	解析/実験
1	213.1	233.5	1.10
2	236.4	237.2	1.00
3	208.4	208.3	1.00
4	179.9	182.8	1.02

ればコンクリートも許容温度以内に収まっていることを担保することになる。よって、熱伝達解析では鋼板の最高温度を精度良く求めることが最も重要であり、その他の箇所の結果は参考値に過ぎないを考える。そこで、各ケースにおける実験と解析の鋼板の最高温度の比較を表-2示した。浮かし貼り量50mmのケース1の耐火実験と熱伝達解析の差は10%と比較的大きかったものの、浮かし貼り量5mmのケース2～4では両者の差が0～2%程度となり、非常に良好な解が得られることがわかった。

5. 結論

本研究では、鋼・コンクリートによる合成構造のトンネル内での車両火災を想定して、耐火実験と有限要素法による数値解析を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。(1) 浮かし貼り工法により耐火板を設置した合成構造を対象に加熱実験を実施ところ、鋼板の最高温度に対して浮かし貼り量の影響は少ないことがわかった。また、一般に耐火板内の水分は耐火性能に大きな影響を与えると考えられているが、加熱曲線としてRABT曲線を用いた場合は、温度上昇時に耐火板の潜熱を消費しきってしまう為、鋼板の最高温度に対する影響が少ないということがわかった。(2) 輻射・対流・潜熱を考慮した熱伝達モデルを汎用有限要素法プログラムに組み込み数値解析を実施したところ、耐火板の温度履歴は実験結果を再現できなかったものの、コンクリートと鋼板の温度履歴は実験結果を良く模擬できた。また、鋼板の最高温度については、浮かし貼り量5mmでは実験値と解析値は一致したが、浮かし貼り量50mmでは実験値と解析値の差が10%程度と比較的大きいものなり、今後の課題として残った。

謝辞：本研究を実施するにあたり、(株)エーアンドエーマテリアルの丸山諭氏、三宅雅之博士、安本辰也氏に多大なるご協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Haack, A. : Fire Protection in Traffic Tunnels Initial Findings from Large-scale Tests, *Tunnelling and GroundSpace Technology*, Vol.7, No.4, pp.363-375, 1992.
- 2) Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. : Fires in Transport Tunnels, Report on Full-Scale Tests, EUREKA-Project EU 499 : FIRETUN, 1995.
- 3) 清宮理, 飯田博光, 滝本孝哉 : 沈埋トンネル内の車両火災への対策の現状, トンネルと地下 4月号, pp.63-70, 2000.
- 4) 清宮理, 工藤健一, 上田隆, 滝本孝哉 : 大阪夢洲トンネルでの車両火災に対する設計許容温度の設定, *Techno-ocean*, 2006-19th, JASNAOE Ocean, 2006.
- 5) 工藤健一, 山本邦夫, 清宮理 : 沈埋トンネルの車両火災を想定した合成構造部材の耐火実験, 第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム, pp.4-1-4-4, 2005.
- 6) 土木学会 : コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集, pp.151-157, 2004
- 7) 松尾幸久, 溝部有人, 清宮理 : 耐火板で保護された鋼・コンクリート合成構造部材の耐火性評価, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.97-108, 2005.
- 8) 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, Vol.53A, pp.1117-1124, 2007.
- 9) TNO DIANA BV : DIANA9.3 User's Manual Analysis Procedures 17. Heat Flow Analysis, JIP テクノサイエンス株式会社, 2008.
- 10) 萩三二 : 熱伝達の基礎と演習, pp.155-180, pp.189-208, 東海大学出版会, 1995.
- 11) 日本火災学会 : 火災と建築, pp.117-145, 共立出版株式会社, 2002.
- 12) 国土開発技術研究センター : 建築物の総合防火設計法, 第 4 巻 耐火設計法, p.124, 日本建築センター, 1989.
- 13) CEN:EN 1992-1-2, pp.26-30
- 14) 水上純一, 菊池喜昭, 吉野博之 : リサイクル材としてのコンクリート塊の諸特性, 港湾技研資料, No.906, pp.3-5, 運輸省港湾技術研究所, 1998.
- 15) 土木学会 : コンクリート標準示方書設計編, p.333, 2007.

HEAT ANALYSIS FOR STEEL-CONCRETE COMPOSITE MEMBER WITH FIREPROOF BOARD

Osamu KIYOMIYA and Akihiro NAKAI

Composite members made of steel and concrete have been widely adopted for undersea tunnels. Since steel plates are exposed to the internal side of the tunnel, vehicle fire countermeasures are required. First, the RABT heating test with fireproof board was executed, and the internal temperature was measured and the effect of the air layer was confirmed. Next, the heat analysis that considered the radiation, convection, and the conduction was executed. As a result, validity of the proposed analytical model was confirmed by comparing the heat analysis results with the heat tests results.