

湿式吹付け耐火被覆材を設置したコンクリート充填鋼殻構造の熱伝達解析

JIP テクノサイエンス

正会員 ○中井 章裕

早稲田大学

フェロー会員 清宮 理

1. はじめに サンドイッチ合成構造の沈埋トンネル（図-1）は、主部材である鋼板がトンネル内空側に露出しており、車両火災時の高温による損傷が懸念されるため、近年は耐火被覆を設置し、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。ここで、耐火材の設置効果を確認することを目的として、多数の耐火試験が実施されており、また、試験結果に対して熱伝達解析を試みた研究例もいくつかある。このとき、試験体は鋼板、コンクリートおよび耐火被覆から構成された複合構造であることから、異種部材間の熱分布は単純には連続とはならないことや、鋼板がコンクリートからはく離した場合には、両部材間の温度が著しく異なるものになることが指摘されている。そこで、本研究では熱伝達解析の精度向上を目的として、異種部材間に存在する空気層に対して、輻射・対流・熱伝導のモデルを導入した熱伝達解析を実施し、湿式吹付け耐火被覆材を適用したコンクリート充填鋼殻構造の耐火試験結果と比較することにより、提案する解析手法の適用性を検討した。

2. 耐火試験 解析対象とする耐火試験体（図-2）は、片側鋼板を設置した合成部材で、鋼材は厚さ 9mm でずれ止め用の形鋼でコンクリートと鋼板を一体化させている。また、コンクリートは普通コンクリートで呼び強度 30N/mm^2 であり、表面に湿式吹付けの耐火被覆材を設置してある。本試験体に対して、RABT30 分曲線による耐火試験を実施したところ、試験体の中央位置において、鋼板表面位置では最高温度 218°C 、コンクリート内部 20mm 位置では最高温度 100°C となった。また、加熱開始の初期段階からコンクリートからの鋼板のはく離が観察され、加熱開始 75 分頃に最大値 2.13mm となった。

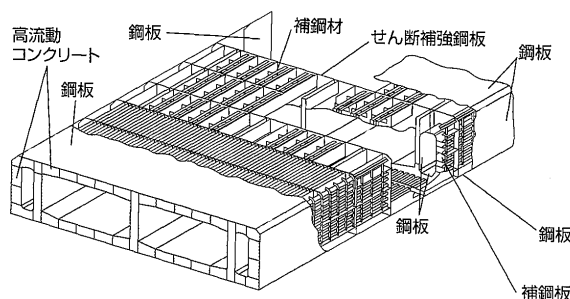


図-1 サンドイッチ合成構造の沈埋トンネル

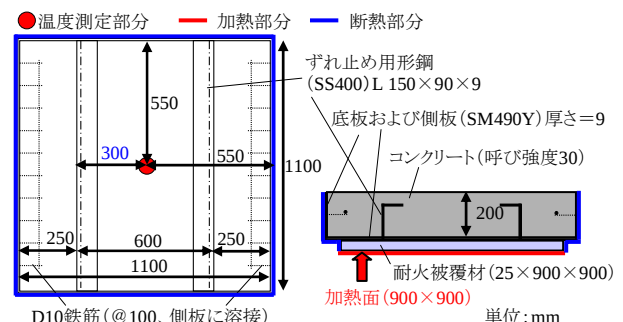


図-2 耐火試験概要図

3. 熱伝達解析 一般の熱伝達解析用プログラムでは、輻射・対流・熱伝導を考慮した空気層のモデル化が困難なため、今回実施した耐火試験の熱伝達解析を適切に行うことはできない。そこで、汎用 FEM 解析プログラム DIANA9.3 を空気層を考慮できるように改良して解析を実施した。解析モデルは 1 次元モデルとし、耐火板・鋼板・コンクリートはそれぞれ通常の熱伝達要素とするが、各部材間は次式¹⁾のモデルを組み込んだ熱インターフェース要素で接続した（図-3）。このとき、耐火板・鋼板の輻射率は既往の研究結果より 0.9 と設定し、コンクリート及び鋼板の熱特性は EUROCODE に従うものとした。耐火板の熱特性は別途実施した試験値を使用し、また、コンクリートの含水率も別途実施した試験値より 5.8%、耐火被覆材については 5.3% とし、気化潜熱分のエネルギーを 100°C 近傍の熱容量に付加するものとした。加熱方法は、モデル下端を輻射率 0.9 とした輻射境界とし、輻射境界外部の温度を RABT30 分曲線に従い入力させる方法とした。輻射・対流・熱伝導は次式により定式化した。

キーワード 耐火被覆材、湿式吹付け、コンクリート充填鋼殻構造、空気層厚さ、熱伝達解析

連絡先 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 1-2-5 JIP テクノサイエンス (株) 解析技術部 TEL 03-5614-3204

$$q = \frac{1}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_s - 1} \times \sigma \times (T_i^4 - T_{i+1}^4) + \frac{Nu \times \lambda}{\ell} \times (T_i - T_{i+1})$$

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

Nu : ヌルゼット数で以下の式より計算する。 G_r : グラスホフ数で以下の式により計算する。

$G_r < 10^4$: $Nu = 1$ 対流なし

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

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

ε_p : 耐火板の輻射率

ε_s : 鋼板の輻射率

$$G_r = \frac{\ell^3 \times \beta \times g \times (T_{i+1} - T_i)}{\nu^2}$$

β : 空気 の 体積膨張率

g : 重力加速度

ν : 空気 の 動粘性係数

ℓ : 空気層の高さ

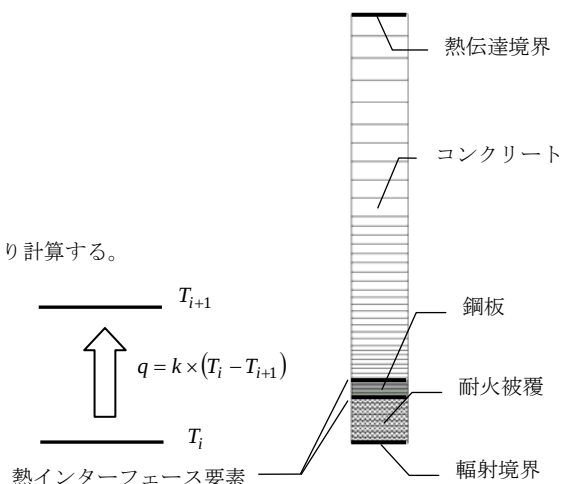


図-3 解析モデル

解析ケースを表-1に示す。ケース1は、耐火試験において平均1mm前後のはく離が観察された鋼板-コンクリート間に熱インターフェース要素を設置し、耐火被覆-鋼板間については連続体とするモデルとした。ケース2は、鋼板-コンクリート間に加えて耐火被覆-鋼板間にも熱インターフェース要素を設置するモデルとした。これは、耐火試験で用いたのは吹付け耐火被覆材であるため、耐火被覆-鋼板間は物理的には密着していると考えられるものの、乾燥収縮等の影響により両者間には微小な隙間が存在すると考えられることと、異種部材間には例えばグリースのような高熱伝導体を塗布しない限り、必ず熱のギャップが生じると考えたからである。

4. 解析結果 各ケースについて、鋼板およびコンクリート内部20mm位置の試験結果と解析結果の比較を図-4に示す。鋼板-コンクリート間の空気層を考慮したケース1では、試験結果(鋼板 218℃, コンクリート 100℃)に対して、鋼板 236℃, コンクリート 112℃となり、解析値は試験値をやや上回る結果となった。鋼板-コンクリート間に加えて、耐火被覆-鋼板間の空気層を考慮したケース2では、鋼板 221℃, コンクリート 105℃となり、最高温度および温度履歴ともに試験結果を良好に再現できる結果となった。このことより、耐火被覆-鋼板間の空気層の考慮の重要性が確認された。

5. まとめ 本研究では、湿式吹付け耐火被覆材を適用したコンクリート充填鋼殻構造の加熱試験結果に対して、空気層における輻射・対流・熱伝導と潜熱のモデルを導入した熱伝達解析を実施した。その結果、鋼板-コンクリート間に空気層を考慮すると、良好な解析結果が得られることを確認した。また、耐火被覆-鋼板間にも空気層を考慮すると、更に実験と解析が一致することを確認した。

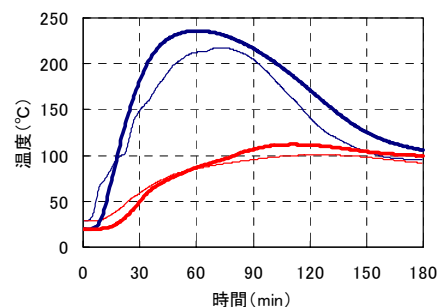
なお、本計算対象とした耐火試験結果と材料特性は太平洋マテリアル(株)から提供を受けたものである。ここに深甚なる感謝の意を表す。

参考文献 中井章裕, 清宮理: 耐火板を設置した合成構造部材の熱伝達挙動に関する模型実験と数値解析, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 2, 2011. 1

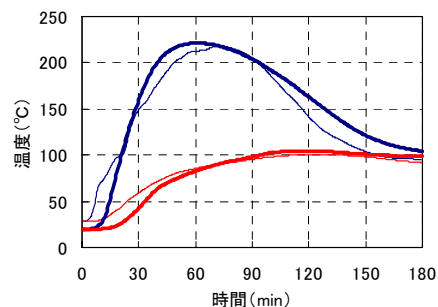
表-1 解析ケース

	鋼板-コンクリート間	耐火被覆-鋼板間
ケース1	空気層考慮	連続体
ケース2	空気層考慮	空気層考慮

— 鋼板(試験) — コンクリート内部20mm位置(試験)
— 鋼板(解析) — コンクリート内部20mm位置(解析)



(a) ケース1



(b) ケース2

図-4 解析結果と試験結果の比較