耐火板背面の中空層を考慮した熱伝達解析

早稲田大学 大学院理工学研究科	学生会員	〇中井	章裕
早稲田大学 社会環境工学科	フェロー	清宮	理
株式会社エーアンドエーマテリアル 技術開発研究所	正会員	三宅	雅之
株式会社エーアンドエーマテリアル 技術開発研究所	正会員	安本	辰也

1. 目的

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.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.耐火板の設置方法として、以前はボルト・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が多く用いられていたが、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が開発された事により、近年は後者の工法を用いる事例が増加している(図-2).浮かし 貼り工法は、耐火板と鋼板間に中空の層が存在する為、熱の伝達が抑制されるという優れた特徴を有している が、中空層の熱の伝達性状が複雑な為、通常の1次元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 対象に輻射・対流・熱伝導及び潜熱のモデルを導入した熱伝達解析を実施し、提案する解析手法の適用性を検 討した.



2. 耐火実験

試験体の寸法図を図-3 に示す. 鋼殻は幅 1300mm, 高さを 218mm とし, コンクリートの周囲を鋼板で囲う フルサンドイッチ構造とした. 耐火被覆は板厚 27mm のケイ酸カルシウム系耐火板とし, 浮かし貼り量 50mm で試験体下面に設置した. 耐火板内面側に 1 箇所, 下側鋼板外面側に 1 箇所, コンクリート内部に 4 箇所の合 計 6 箇所に熱電対(図-4)を設置し, RABT 曲線により加熱を行った. 熱電対の計測結果を図-5 に示す. 耐火



キーワード 沈埋トンネル,耐火被覆,熱伝達,輻射,対流

連絡先 〒160-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 51 号館 清宮研究室 TEL:03-5286-3852

板内面側の最高温度は 405℃,鋼板の最高温度は 213℃,コンクリート 20mm 位置での最高温度は 140℃となった.また,温度履歴は潜熱の影響により 100℃近傍で停滞する結果となった.

3. 熱伝達解析

一般の熱伝導解析用プログラムでは、輻射・対流・熱伝導を考慮した中空層のモデル化が困難な為、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 DIANA9.3 を カスタマイズ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・コンクリートは通常の熱 伝導要素とするが、耐火板と下側鋼板間は式(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-6). コンクリート及び鋼板の熱特性は EUROCODE に従い,耐火板の熱特性は図-7 に示す値とした.耐火板・鋼板の輻射率は別途実施した材料試験結果より 0.9 と設定した.また,コンクリートの含水量を 200kg/m³ と仮定し,気化潜熱分のエネルギーを 100℃近傍の熱容量に付加した.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変動させる方法とした.

 $q = \frac{1}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_s - 1} \times \sigma \times \left(T_i^4 - T_{i+1}^4\right) + \frac{Nu \times \lambda}{\ell} \times \left(T_i - T_{i+1}\right) = \left\{\frac{1}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_s - 1} \times \sigma \times \left(T_i^2 + T_{i+1}^2\right) \times \left(T_i + T_{i+1}\right) + \frac{Nu \times \lambda}{\ell}\right\} \times \left(T_i - T_{i+1}\right) = k \times \left(T_i - T_{i+1}\right) \xrightarrow{\mathbb{R}} (1)$



:中空層の高さ

4. 解析結果

実験結果と解析結果の比較を図-8 に示す.着目点 は、耐火板内面側・鋼板・コンクリート 20mm 位置 の3箇所とした.熱履歴はいずれの箇所についても 試験値をよく模擬できていることがわかる.解析に おける耐火板内面側の最高温度は,実験値 405℃に 対して 414℃,鋼板の最高温度は実験値 213℃に対し て 233℃,コンクリート 20mm 位置の最高温度は実 験値 140℃に対して 164℃となり,実験値に対して解 析値が上回る傾向となったものの,実験値と解析値 との差は 5~15%程度となった.誤差の原因として は、耐火実験は完全な1次元問題となっていない事, 解析に使用したパラメータの影響等が考えられる.

5. 結論

耐火パネルを設置した大型試験体に対して RABT 加熱実験を実施し内部温度履歴を計測した. 続いて, 中空層での輻射・対流・熱伝導及び潜熱のモデルを 導入した有限要素法による熱伝達解析手法を提案し, 実験結果と比較したところ,比較的精度良く解が得 られることがわかった.

上側鋼板 コンクリート T_i 熱インターフェース要素 下側鋼板 耐火板 輻射境界 図-6 解析モデル 熱容量 (kJ/m³℃) 熱伝導率(W/m℃) 1200 0.6 1000 0.5 0.4 800 熱伝導率 600 03 熱容量 0.2 400 200 0 1 0.0 0 300 600 900 1200 温度 (℃) 0 図-7 耐火板熱特性 実験 (耐火板) 温度 (℃) 実験 (鋼板) (コンクリート) 500 解析(耐火板) 400 Δ 解析 (鋼板) 0^{0'} 解析 (コンクリート) 300 444 200 合合 100 0 時間 (分) 120 150 180 0 30 60 90

図-8 実験結果と解析結果の比較

参考文献

・TNO DIANA BV: DIANA9.3 User's Manual Analysis Procedures, JIP テクノサイエンス株式会社, 2008.