

RC セグメントの耐火における熱伝導解析の検討

○首都高速道路公団 正会員 田嶋仁志、正会員 角田 浩、正会員 川田成彦
日本シビック 正会員 神田 亨 黒崎播磨 溝部有人

1. はじめに

近年、シールドトンネルではコスト削減などを目的に二次覆工を省略することが多くなってきたが、一次覆工のみでは火災時に影響を受けることが懸念される。そこで今回、耐火材を取り付けた RC セグメントの耐火性状の基礎データを得る目的で耐火試験を実施した¹⁾。

ここでは、その測温結果を基に、熱伝導解析の適用方法について検討したので以下に報告する。

2. 耐火試験

1)耐火試験方法 長さ 900×幅 600×高さ 550 mm の RC 試験体に、コンクリートと耐火材の界面の温度(以下コンクリート表面温度)が 200、350、425 および 500℃ の 4 水準になるように所定の厚さとした種々の耐火材を設置した。コンクリートの配合は設計基準強度 48N/mm² の高強度コンクリートとした。

耐火試験には、(独)建築研究所の大型水平炉を用いた。時間温度曲線は、ドイツの基準である RABT 曲線(5 分で 1200℃まで昇温、その後 60 分後まで 1200℃を継続し、170 分後に常温に戻る曲線)とした。測温には K 型熱電対を使用し、コンクリート表面、コンクリート内部(本報告では、75、150 mm 深さを示す)および主鉄筋(75 mm 深さに配設された主鉄筋の下面)の温度を測定した。

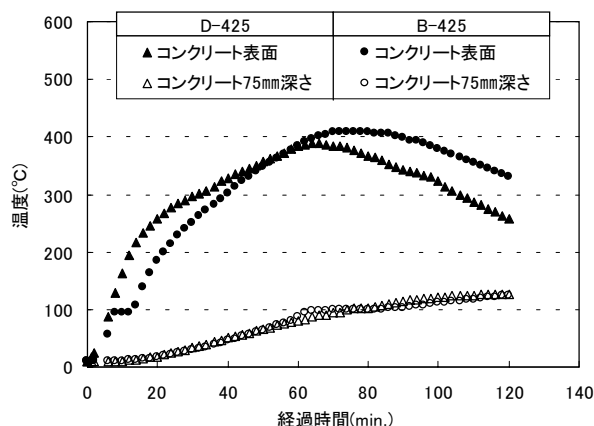


図 1 耐火材で保護された RC セグメントの耐火試験結果の一例

2)耐火試験結果 断熱材、或いはセラミック系耐火板でコンクリート表面温度を 425℃に保護することを想定した耐火試験を実施した。その結果の一部を図 1 に示す。

断熱材(D-425)のコンクリート表面温度は、約 230℃までは急速に上昇し、その後緩やかに上昇した後、64 分

後に最高温度の 389℃に達した。一方、耐火板(B-425)の場合は、約 100℃において温度が維持される現象が認められた後穏やかに上昇し、その後 D-425 より遅れた 75 分後に最高温度の 409℃に達した。しかしながら、主鉄筋埋設位置に相当する 75 mm 深さでは、両者は概ね同じ温度であった。

3. 熱伝導解析の適用方法

1)熱伝導解析の基本条件 フーリエの熱伝導方程式を元に、FEM による熱伝導解析を実施した。熱解析に用いた材料の物理的性質を表 1、図 2 に示す。

表 1 材料の物理的性質

	コンクリート	断熱材 (D)	セラミック系耐火板(B)
密度(kg/m ³)	2450	200	1000
比熱(kJ/kgK)	0.88	1.00	0.84
熱伝導率 (W/mK)	図 2 参照	0.126	0.17
厚さ(mm)	-	8	14

2)解析結果 先ず、解析上取り扱いやすい断熱材について検討した。コンクリートの熱伝導率は、文献 2)を参考に、図 2 に示すように温度依存性を持たせ、この適用性について検証することとした。熱伝達係数については、経験上 116W/m²K(100kcal/mh℃)と仮定した。解析結果を図 3 に示す。解析値は、後述する一部のデータを除いて、どの深さにおいても測温値と概ね一致しており、仮定した熱伝導率や熱伝達係数が妥当であると分かった。但し、降温域におけるコンクリート表面温度は、時間の経過と共に乖離した。この理由としては、降温域では熱量が少なく炉内の風速が小さくなるため、経時的に熱伝達係数が小さくなり温度が低下することが影響したと推察した。

そこで、この影響を調査するため、降温域の熱伝達係数を種々変化させた場合の熱解析を実施した。その

キーワード:シールドトンネル、RC セグメント、熱伝導解析、断熱材、耐火板

〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1 TEL 03-3539-9459 FAX 03-3502-2411

結果を図4に示す。この結果から、熱伝達係数の低下と共にコンクリート表面温度も低下し、 $20\text{W/m}^2\text{K}$ の時に測温値と最も良く一致することが分かった。

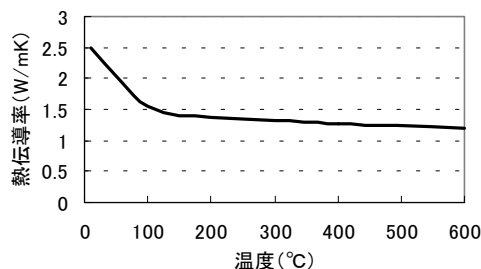


図2 コンクリートの熱伝導率

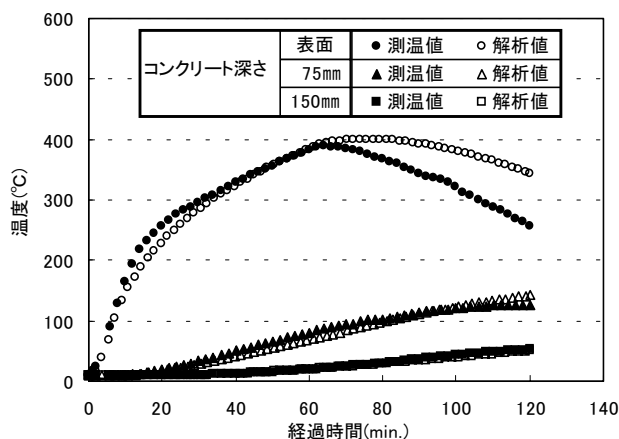


図3 D-425における測温値と解析値比較
(熱伝達係数: $116\text{W/m}^2\text{K} \sim 100\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$)

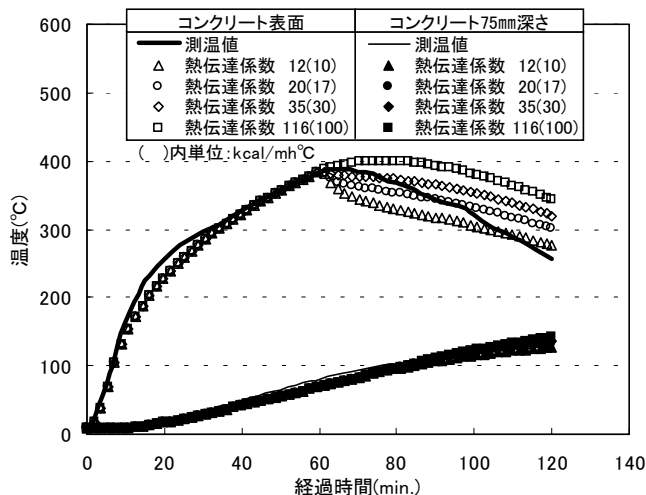


図4 熱伝達係数を変化させた解析値と測温値比較
(耐火材:D-425)

3)耐火板への適用結果 耐火板の場合には、6分間約 100°C で一定の温度となっている特有の現象が認められたが、これは耐火板中の水分に起因した現象(蒸発潜熱)と推察された。水の比熱は 100°C で急激に変化することから、解析精度を向上させるには、この挙動を正確に反映させる必要がある。そこで、水の比熱の温度依存性を、熱計算の時間間隔も考慮し、図5に示すように設定した。また、耐火板中の水分は加熱中背面側に移動

すると考えられたことから、含水分の全てが背面側の $1/5$ 厚さ相当部に存在すると仮定した。背面側の水分量については、実測値が2%前後であったことから0, 5, 10%と仮定した。熱伝達係数は断熱材で得られた値を適用した。

この結果を図6に示す。耐火板中の背面側水分を0%とした場合は断熱材の場合と同様であったが、5~10%とした場合は実測値と同様の 100°C を維持する現象を表すことができた。また、全体的な傾向としてはB-425についても、D-425の検討で得られた熱伝達係数を用いることで概ね一致すると判断されたが、降温時の後半では測温値と解析値ではややずれが見られた。

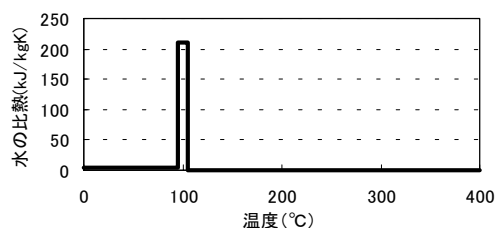


図5 耐火板中における水分の比熱の取り扱い方

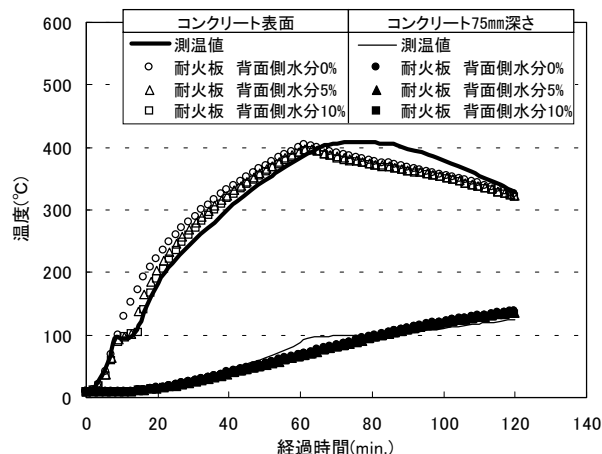


図6 B-425における解析値と測温値比較

4. まとめ

耐火材を取り付けたRCセグメントの温度挙動を熱伝導解析の点から検討した結果、以下の知見を得た。

- コンクリートの熱伝導率に温度依存性を持たせ、且つ昇温から恒温域における熱伝達係数を $116\text{W/m}^2\text{K}$ 、降温域を $20\text{W/m}^2\text{K}$ と設定した解析値は、耐火材の材質に拘わらず、測温値と概ね一致した。
- 耐火板については、更に含水分の蒸発時の挙動を加味することで、 100°C で一定となる現象を表せた。

【参考文献】 1)半野、田嶋、川田、谷上「RCセグメントの耐火性能に関する実験的検証」コンクリート工学年次論文集 2002年、2)徳田弘「コンクリートの熱的性質」コンクリート工学 Vol.22, No.3, March 1984