

論文 湿式耐火被覆材を被覆したコンクリートの熱伝導解析

小幡浩之*¹・中村秀三*²・谷辺徹*³

要旨：耐火材の加熱実験結果を基に，合成輻射率をパラメータとした数値解析を行い加熱面の総合熱伝達係数を設定した。また，耐火材とコンクリートの界面に仮想境界層を設け界面温度によって熱伝達係数を変化させることによって熱移動を表現した。耐火材を被覆したコンクリートの加熱実験におけるコンクリート表面温度が，仮想境界層を用いた熱伝導解析によって評価できることを示した。

キーワード：覆工コンクリート，耐火被覆材，RABT 加熱曲線，熱伝導解析

1. はじめに

最近の海外における火災事例などから，トンネルの覆工コンクリートが火災熱によって大きな損傷を受けることが知られている¹⁾。国内でも規制緩和，建設コスト縮減の観点から，覆工コンクリートの火災対策が検討されている²⁾。

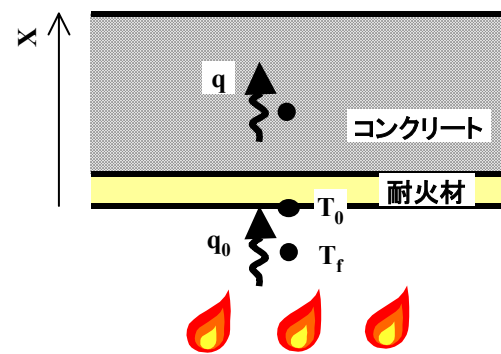
トンネル覆工コンクリートの耐火性の照査は，原則としてトンネル内火災を想定した火災温度－時間曲線（以下，加熱曲線）を設定し，設計荷重作用下における実物大の試験体を用いた耐火試験を実施するのが一般的である³⁾。しかし，これらの方法は多くの時間と費用を要することに加えて，実条件を忠実に反映させた実験が困難である場合も考えられることから，数値解析による評価手法の構築も望まれている。

本研究ではいくつかの耐火性評価のうち，耐火材が被覆されたコンクリートの温度変化の評価手法を構築することを主眼に置いた。耐火材を被覆したコンクリートの加熱実験を行い，得られた結果を数値解析によって評価し，比較検討することで数値解析の適用性を評価した。

2. 熱伝導解析

2.1 支配方程式と解析方法

図－1 に示すような耐火材が被覆されたコンクリートの 1 次元熱伝導解析を行う。



図－1 解析モデル

雰囲気温度 T_f (°C) から耐火材表面温度 T_0 (°C) に移動する熱流束 q_0 (J/m²s) は式(1)のように表される。

$$q_0 = \alpha_f(T_f - T_0) \quad (1)$$

ここに， α_f は総合熱伝達係数(W/m²°C)である。総合熱伝達係数は，対流，輻射による熱伝達率の和として与えられ，合成輻射率 ϵ_r ，ステファン-ボルツマン定数 σ (W/m²K⁴) とすると式(2)のように表される⁴⁾。合成輻射率は 2 つの物体（本ケースでは，火炎と耐火材表面）の輻射率から決定される⁴⁾。

$$\alpha_f = \alpha_c + \frac{\sigma \cdot \epsilon_r}{T_f - T_0} \{ (T_f + 273)^4 - (T_0 + 273)^4 \} \quad (2)$$

耐火材およびコンクリート内部の熱流束はフーリエの法則から式(3)のように表される。

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部チームリーダー (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部

$$q = -\lambda \frac{dT}{dX} \quad (3)$$

ここに、 λ は耐火材およびコンクリートの熱伝導率(W/m°C)である。

以上までに示した熱移動則および熱エネルギー保存の法則から、水分の蒸発潜熱を考慮した熱伝導方程式は式(4)のように表される。

$$c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} - Q_w \cdot v \quad (4)$$

ここに、 C 、 ρ 、 Q_w および v はそれぞれ、耐火材およびコンクリートの比熱(J/kg)、密度(kg/m³)、水の蒸発潜熱(J/kg)および水分の蒸発速度(kg/s)である。

熱伝導方程式を任意の初期条件ならびに境界条件のもとで解くことによって内部の温度分布を得ることができる。ただし、任意の時間、位置での水分の蒸発速度を与える必要がある。本研究では既往の研究成果⁵⁾により水の蒸発潜熱の影響を考慮する。具体的には、各位置での微小構成要素が100°Cに達したら、蓄積される熱エネルギーが初期条件として与えた含水量に相当する気化熱に達するまで100°Cで横這いさせる方法である。

熱伝導方程式の解法は、有限差分法を用いた。数値解析では、加熱面以外を断熱境界とし、雰囲気温度は実測した炉内温度を用いた。

2.2 熱物性値の設定

(1) 密度および比熱

耐火材とコンクリートの密度 ρ (kg/m³)および比熱 C (J/kg)は、水分の影響のみを考慮する。微小構成要素が100°C以下の領域と100°Cよりも大きい領域に区分して密度および比熱の設定を行った。

耐火材と含水時のコンクリートの密度は、絶乾密度 ρ_d (kg/m³)および含水比 w (%)により式(5)によって与えた。また、耐火材と含水時のコンクリートの比熱は、絶乾状態の比熱 C_d (J/kg)および水の比熱 C_w (J/kg)により式(6)によって与えた。

絶乾密度、絶乾状態の比熱は、660kg/m³、890J/kg(耐火材)および2320 kg/m³、850J/kg(コンクリート)とした。

$$\rho = \begin{cases} \rho_d(1 + w/100) & (T \leq 100^\circ\text{C}) \\ \rho_d & (T > 100^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (5)$$

$$C = \begin{cases} (C_d \cdot \rho_d + C_w \cdot \rho_d \cdot w/100) / \rho & (T \leq 100^\circ\text{C}) \\ C_d & (T > 100^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (6)$$

(2) 熱伝導率

コンクリートの熱伝導率は、常温における測定値に基づき式(7)のように設定した。

$$\lambda_c = 1.4 - 0.58 \left(\frac{T}{500} \right) \quad (7)$$

耐火材の熱伝導率は、解析に与える感度が非常に大きいため、実測に基づき設定を行った。熱伝導率の測定は、GHP法(JIS A 1412-1 熱絶縁体の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法)により測定を行った。

熱伝導率の測定結果を図-2に示す。測定された耐火材の熱伝導率は、供試体の平均温度が600°Cまではほぼ一定値を示したが、800°Cにおいてやや増加し1000°Cにおいてやや減少する傾向を示した。その変化はわずかであったので、数値解析では耐火材の熱伝導率を0.2 W/m°Cで一定として取り扱った。

3. 耐火材ならびに耐火材を被覆したコンクリートの加熱実験

3.1 使用材料

実験に使用した耐火材はセメント、人口軽量骨材を主材料とするプレミックス材料であり、所定の水量を加えパン型ミキサで練混ぜ使用した。

3.2 耐火材単体の供試体

式(2)によって熱伝達率を算出するためには、合成輻射率を与える必要がある。そこで、耐火材単体の加熱試験を行い得られた結果を基に、

合成輻射率をパラメータとした数値解析を行い総合熱伝達係数の設定を行った。

耐火材単体の加熱供試体の寸法は、100×100×200mmとした(図-3)。加熱面表面から15mmピッチで75mm位置までの合計5点に熱電対を設置した。使用した熱電対はJIS 0.75級φ0.65mmのガラス被覆K型熱電対とした。

供試体は、実機の施工方法を想定しスネーク型モルタルポンプにより圧送し吹付けて成形を行った。養生方法は、加熱実験時の目標含水比を5%として気乾状態で養生を行った。

加熱試験は、加熱試験体の側面および上面をセラミックスボードおよびセラミックスブランケットで被覆し、加熱を行った(図-3)。

3.3 耐火材を被覆したコンクリート供試体

耐火材を被覆したコンクリート供試体は、幅300mm×奥行き300mm×厚さ200mmのコンクリートブロックに設定厚さが10, 30, 50および70mmの耐火材を設置させたものとした(図-4)。コンクリートブロックに使用したコンクリート

の配合は、単位水量135kg/m³、水粉体比35%、細骨材率45%とした(表-1)。

熱電対の設置位置は、コンクリート試験体の中心位置から25mm位置の2箇所、厚さ方向に加熱面から0, 40, 80および200mmの位置に設置し、合計8箇所、に設置した(図-4)。また、耐火材の設定厚みが30mmの水準では、耐火材からコンクリートブロックへの熱の流れを観察するために、耐火材の加熱表面および耐火材裏面にも熱電対を設置した。

被覆厚み10~70mm水準それぞれに、耐火材の目標含水比を5%、15%の水準とした。

コンクリート供試体の加熱試験は、供試体の側面および上面を厚さ25mmのセラミックスブランケットで被覆し、耐火材の表面を加熱した。

表-1 コンクリートの配合

W/P (%)	単位量(kg/m ³)					
	W	C	Sg	S	G	SP(%)
35	135	193	193	893	1044	1.20

記号 W：水、C：普通ポルトランドセメント、Sg：高炉スラグ、S：陸砂、G：砂岩碎石、SP：高性能 AE 減水剤

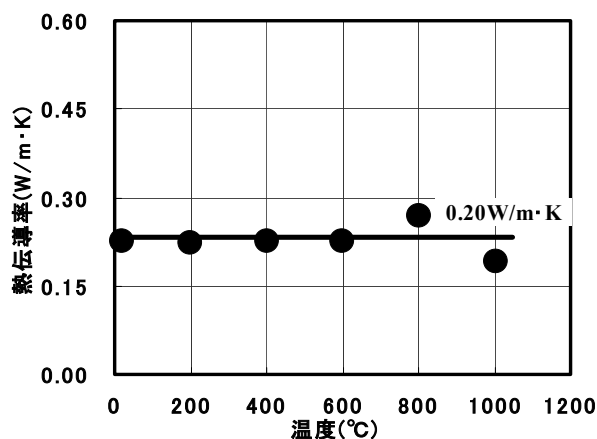


図-2 耐火材の熱伝導率

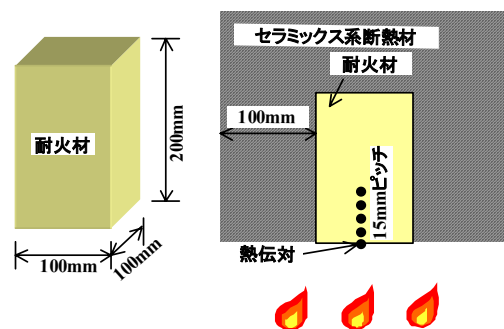


図-3 耐火材単体の供試体

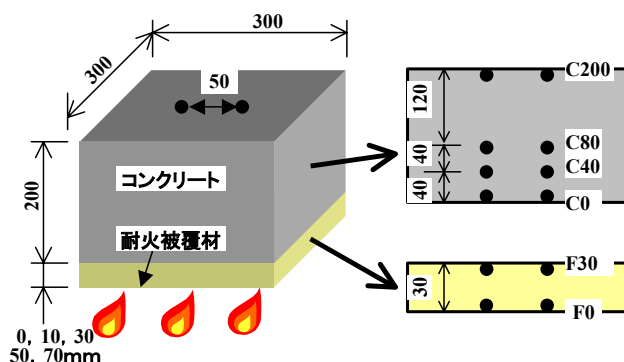


図-4 耐火材を被覆したコンクリート供試体

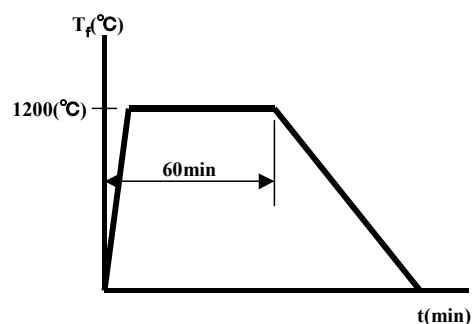


図-5 RABT 加熱曲線

3.4 加熱曲線および耐火炉

加熱曲線は加熱開始から5分で炉内雰囲気を1200℃まで昇温させ、その後、炉内雰囲気を保持、降温させる、RABT加熱曲線³⁾とした(図-5)。RABT加熱曲線は、ドイツ交通省道路建設部で規定され、木材を積載したトラックの炎上を想定した火災温度曲線である。加熱実験は、有効加熱面積950mm×950mmの耐火炉を使用した。

4. 実験結果および解析結果

4.1 加熱面の熱伝達係数

耐火材を被覆したコンクリートの熱伝導解析に先立ち、加熱面の総合熱伝達率の設定を行った。式(2)中の対流による熱伝達率 α_c を15W/m²℃とし、合成輻射率 ε_r を変化させて数値解析を行った。その結果、合成輻射率 ε_r を0.14程度に設定した場合に耐火材温度の解析値と実験値がよく一致した(図-7)。数値解析で与えた加熱面の総合熱伝達係数および耐火材の熱伝導率が適切であったと考えられる。本ケースにおいて耐火材表面温度および炉内温度から計算された総合熱伝達係数は、最大値で100W/m²℃程度となった(図-6)。以下の数値解析では、同様のパラメータにより加熱面の熱伝達係数を設定した。

合成輻射率は、火災の輻射率および表面物体の輻射率によって求められる⁴⁾。それぞれの輻射率は、火災の状態や表面部の材料によって変

化すると考えられる。したがって、総合熱伝達率も実験条件によって変化すると考えられる。

4.2 耐火材とコンクリートの界面の伝熱

耐火材の表面、裏面およびコンクリート中に熱電対を設置した供試体の加熱実験結果を図-9、10に示す。耐火材の表面温度は耐火材単体の加熱実験結果とほぼ同様であったが、耐火材裏面およびコンクリート表面位置の温度はその位置によって明らかな差異が認められた。100℃程度までの両者の温度パターンはほぼ同様であるが、100℃以上の範囲では耐火材裏面位置で温度が急激に上昇した。両者の温度差は、加熱時間75分において150℃程度に達した。加熱実験後の耐火材とコンクリートの界面に浮きなどは認められなかったことから、界面に空気層がなくともそれに類似した境界が生じていると考えられる。そして、その原因は対流、輻射などによるものと考えているが、詳細なメカニズムの解明は今後の課題としたい。

実験結果に見られる界面の温度変化を表現する方法は、耐火材の熱伝導率を変化させる方法や仮想の境界を設ける方法などが考えられる。これらのうち、耐火材の熱伝導率を変化させる方法は、先に示した熱伝導率の測定値や解析結果から適切でないと考えられる。本研究では、耐火材とコンクリート間に仮想境界層(以下、仮想境界モデル)を設け、耐火材とコンクリートの界面の熱移動を表現する(図-8)。耐火材裏面温度 T_b (℃)からコンクリート表面温度 T_c (℃)に

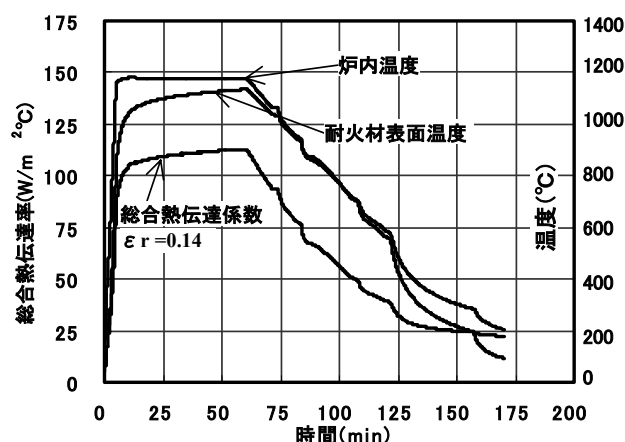


図-6 加熱面の総合熱伝達係数

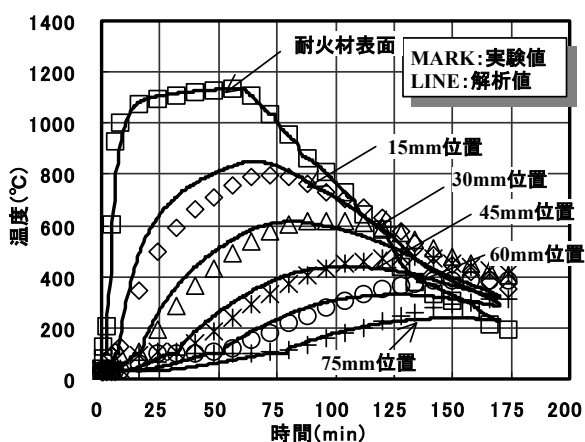


図-7 耐火材単体供試体の温度変化

流入する熱流束を式(8)のように表現する。

$$q_m = \alpha_m (T_b - T_c) \quad (8)$$

ここに、 α_m は仮想境界層での熱伝達係数($W/m^2\text{C}$)であり、耐火材とコンクリートの界面温度により式(9)に示すように設定する。

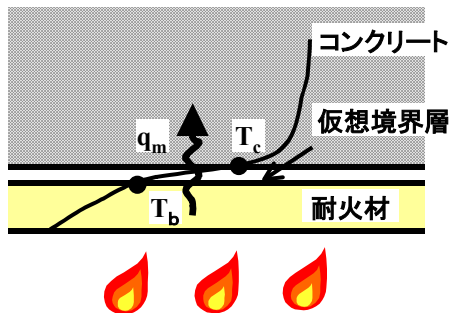


図-8 耐火材とコンクリートの仮想境界

$$\alpha_m = \begin{cases} 100 & (T \leq 100^\circ\text{C}) \\ 40 & (T > 100^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (9)$$

次に設定した仮想境界層の妥当性を検証する

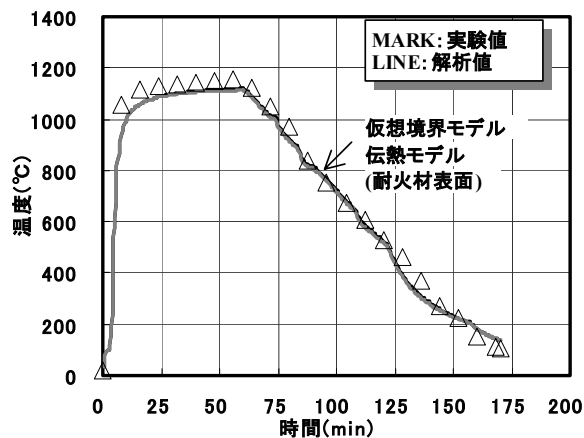


図-9 耐火材表面の温度変化

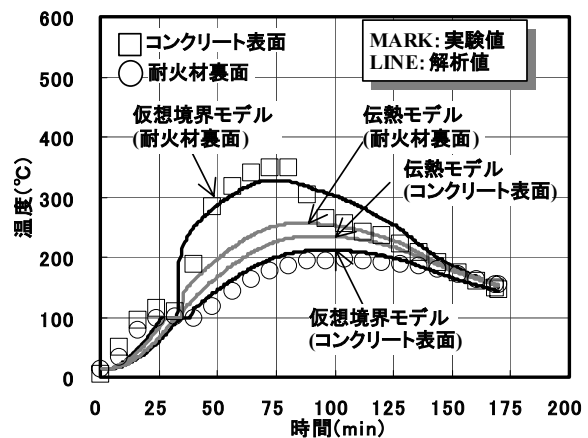


図-10 耐火材裏面とコンクリート表面の温度変化

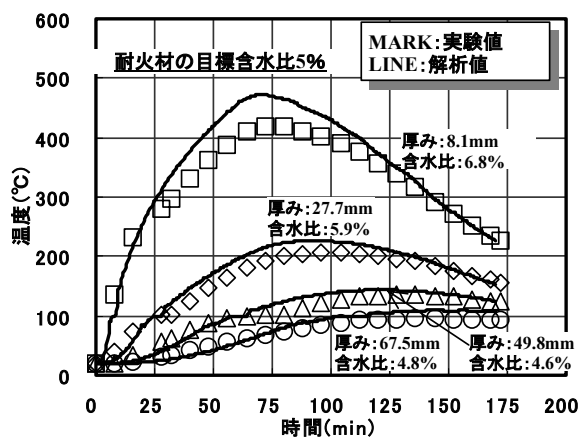


図-11 コンクリート表面の温度変化

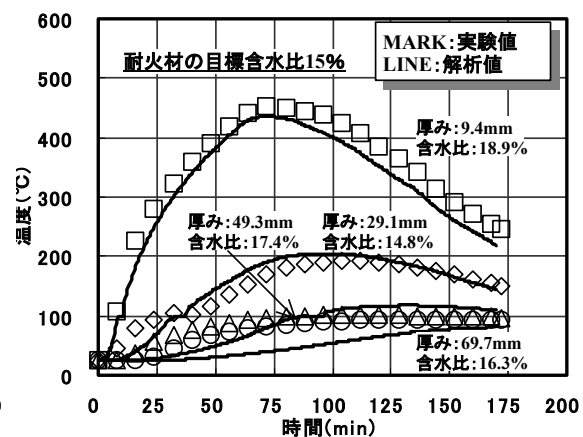


図-12 コンクリート内部の温度変化

ために数値解析を行った。数値解析は仮想境界モデルと耐火材とコンクリートの界面に仮想境界を設けない場合(以下、伝熱モデル)について行った。伝熱モデルでは耐火材表面の温度を再現することができたが(図-9)、耐火材裏面およびコンクリート表面の位置で実験値と解析値が解離する結果となった(図-10)。一方、仮想境界モデルでは、それぞれの位置での温度を良好に再現することができた(図-9, 10)。

4.3 コンクリート温度の実験結果と解析結果

耐火材の目標含水比を5%ならびに15%としたコンクリート供試体の加熱実験および解析結果のうち、コンクリート表面温度(図-4 中 C0)の温度の経時変化をそれぞれ図-11, 12に示した。併せて、加熱試験時の耐火材の厚みおよび含水比を図示した。また、コンクリート表面温度の最高値の実測値と解析値の関係を図-13に示した。

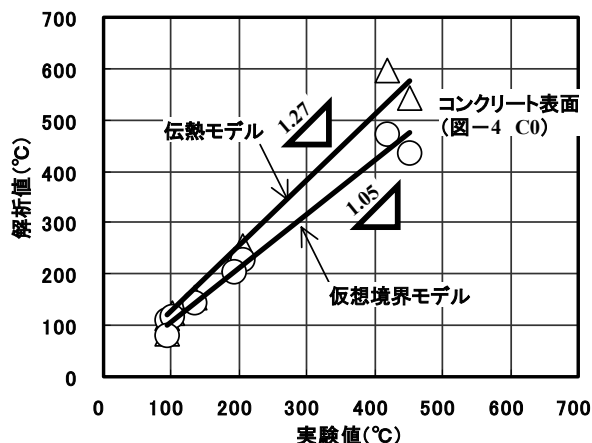


図-13 コンクリート表面温度の解析精度

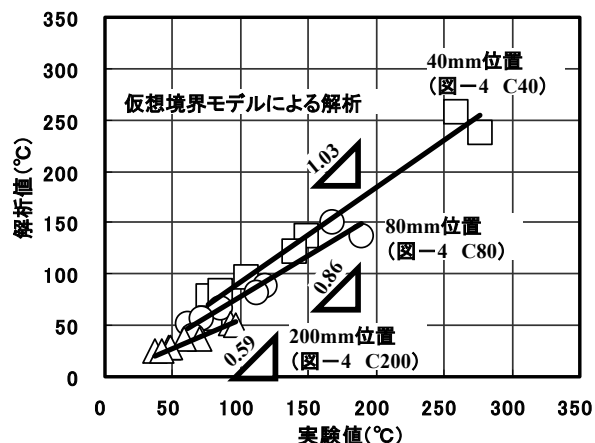


図-14 コンクリート内部温度の解析精度

解析結果は、耐火材の被覆厚みおよび含水比の異なる供試体のコンクリート表面温度を良好に再現することができた(図-11, 12)。特に、伝熱モデルでは解析値が実験値よりも大きい傾向(傾き 1.27)を示したが、仮想境界モデルでは良好(傾き 1.05)に実験値を評価できた(図-13)。コンクリート表面温度は、耐火設計を行う際の重要な指標の一つであり、数値解析によって評価できることは有意義であると考えられる。

コンクリート内部の温度(図-4 中 C40, 80, 200)については、解析値が実験値よりも小さい傾向を示し、その傾向(傾き 1.05~0.59)はコンクリート背面になるほど解析値が実験値よりも小さくなった(図-14)。コンクリート中の水蒸気移動による熱移流などを考慮していないことが主な理由であると考えられ、熱伝導と物質移動を連成させた解析⁶⁾を発展させることで解析精度は向上すると考えられる。

4. まとめ

加熱試験と数値解析の結果を比較検討して数値解析の適用性について検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 加熱面の熱伝達係数を対流および輻射によって与え、昇温・降温の温度変化を表現することができた。
- (2) 耐火材とコンクリートの界面に仮想境界層を設けることによって、界面部の温度変化が

数値解析によって再現可能であった。

- (3) 耐火材を被覆したコンクリートの、表面温度が数値解析によって評価できた。

参考文献

- 1) 森田武：トンネル火災におけるコンクリートの耐火性について、コンクリート工学，Vol.38，NO.11，pp.61-65，2000.11
- 2) 半野久光，川田成彦：大断面シールド工法による都市内長大トンネルの施工ー首都高速中央環状新宿線ー，コンクリート工学，vol.41 NO.1，pp.38-42，2003.1
- 3) 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，2002.6
- 4) 日本国土開発センター：建築物の総合防火設計法第4巻耐火設計法，pp.48-63，1989.4
- 5) 若松孝旺：火災時における建築部材の内部温度算定に関する研究，日本建築学会論文報告集，第109号，pp.73-79，1965.3
- 6) 原田和典，寺井俊夫：コンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響，日本建築学会構造系論文集，No.481，pp.145-151，1996