

火災時の閉空間におけるコンクリートの挙動に関する研究

溝淵 利明 林 亮輔
法政大学工学部都市環境デザイン工学科

トンネル等の閉空間において火災が生じた場合、コンクリート表面部は高温に曝されることとなる。そこで、コンクリートの火災に関する研究の一環として、トンネルのような閉空間で火災が生じた場合に、覆工コンクリートの表面部がどの程度の温度まで上昇するか熱流解析を行った。さらに、熱流解析の結果を基に、温度応力解析を実施した。解析では、コンクリートが高温に曝されることにより剥落する現象を表現するために、コンクリートの破壊基準を設けて、基準に達したコンクリートを徐々に削除する方法を用いて行い、より実際に近い形での解析方法の検討を行った。

1. はじめに

コンクリート構造物の火災時における温度応力挙動を把握するためには、火災によってコンクリート周囲の温度がどのように変化し、それによってコンクリートにどのような変状が生じるのか把握する必要がある。これらの現象を把握する方法として、従来は実物大規模の実験を行ってきたが、膨大な費用が掛かるだけでなく、想定されるいくつかのパターンを行うことが非常に難しい現状にある。そこで、最近ではコンピュータを用いて熱流体解析によるコンクリート周囲温度の把握や、高温時を想定したコンクリートの温度解析、コンクリートの高温時でのひび割れやコンクリートの剥落を考慮した温度応力解析シミュレーションの方法が提案されるようになってきた[1],[2]。この方法を用いれば、構造形状の違いや火源の違いによる評価などを行うことが可能となり、これらのシミュレーションを精度よく行うことが可能となれば、コンクリート構造物の耐火設計法において有効な調査方法になるといえる。

コンクリート構造物の火災時でのシミュレーション方法としては、最初に閉空間（ここではトンネルを対象とする）内のコンクリートの周囲温度履歴を算定する必要がある。コンクリート周囲温度の算定には、標準温度曲線（RABT 曲線、ISO 曲線など）を用いるか、CFD(Computational Fluid Dynamics)等の熱流体解析によって火源の燃焼過程を考慮した解析結果を用いるかによる[3]。次に、コンクリートの部材温度の評価を行うために、温度解析を実施することとなる。この場合、高温に曝されるコンクリートはひび割れの発生やかぶりコンクリートの剥落などが生じ、コンクリート表面の境界が逐次変化していくこととなる。これは、温度応力解析と温度解析を連成して解析する必要がある。

本報文では、トンネル内のコンクリート部材内部の温度解析を実施するとともに、コンクリート表面の境界条件の変化を考慮し、応力解析でひび割れなどによる剥落現象まで考慮する方法の結果についてとりまとめたものである。

2. 閉空間内での熱流解析

火災時における閉空間内の熱流に対する CFD 数値解析の研究は、1 方程式による乱流モデルを用いた解析であったが、噴出火災や旋回流の解析等の解析に用いると

もに、現在では大規模な空間の熱流解析が行える段階にまでなっている。一方、再現性の観点からは自由空間のブリュームの再現性検討を行っているのが現状である。トンネル火災の分野においても LES 乱流モデルの適用性の検討とともに強制換気時の遡上現象の解析に用いている。

2.1 熱流解析[4]～[6]

CFD は、流体を記述する偏微分方程式の従属変数（圧力や温度、流速など）を、空間上で有限個の体積（計算格子、セル）に配置し、偏微分方程式を従属変数に関する連立一次方程式に離散化のものであり、この連立方程式を解くことによって、体積要素中の変数の値を計算するものである。非定常問題では、空間だけでなく時間も離散化され、離散化によって得られた連立方程式を解くことにより、ある時刻 t における領域全体の従属変数の値が既知のとき、微小時間 δt だけ経過した時刻 $t+\delta t$ における変数値を計算することができる。

離散化の手法には、(偏)微分演算を差分演算で近似する方法（有限差分法）、偏微分方程式を分割した体積（セルという）内で積分して、セルの界面で近似された流束の代数的関係に帰着させる方法（有限体積法）、分割した体積内で従属変数がある基底関数で展開して、展開係数の代数的関係に帰着させる方法（有限要素法）が代表的である。火災等の熱流解析では、有限体積法が用いられることが多いようである。

前述の計算方法から、計算を開始する時点での圧力や温度などの値は既知でなければならず、利用者が設定せねばならない。また、計算容量などの関係から、流体現象が生じる空間の一部を計算対象とする場合がある。

CFD を用いて計算を遂行する場合は、空間のメッシュ分割、時間刻み幅は独立に設定することはできない。空間のメッシュ分割を細かくすると、もとの偏微分方程式をより精度よく近似することができるものの、解くべき連立方程式の次元（未知数の数）は分割されたセルの総数に比例するため、計算量は増大することとなる。さらに計算が安定に進行するためには、時間刻み幅には制約条件が課される。簡単のため 1 次元の流れを考え、時間刻み幅を δt 、メッシュ幅を δx 、流速を u とする。この時、計算が安定に進行するためにはすべてのセルにおいて以下の不等式が成立しなければならない。

$$\frac{u \delta t}{\delta x} \leq 1 \quad (1)$$

式(1)の左辺の量はセル CFL(Courant-Friedrics-Levy)数と呼ばれている。この条件は陽解法の場合に導出され、境界条件の影響を考慮していない。このため CFL が 1 以上でも安定な場合もあれば、0.5 でも不安定になる場合もある。しかしながらメッシュ幅と時間刻み幅を決定する目安としてしばしば利用されている。

2.1.1 閉空間での熱流動基礎方程式

火災においては通常、常温から ~ 1000 程度の温度変化が生じ、これにともなって空気の密度は数倍変化する。このため、流体の密度変化が無視できるとする非圧縮流の仮定を用いることはできない。一方、火災で生じる流速は通常数 m から数十 m であり、空気中の音速に比べてかなり小さい。このため厳密な圧縮性流体の取り扱いをすると数値解法上の不都合が生じる。音速での擾乱の伝播は通常、密度の圧力に対する依存性から生じる。火災の場合、密度の変動に及ぼす圧力の変動の影響は、温度の変動の影響に比してきわめて小さい。このことを考慮して、密度変動に及ぼす圧力の変動の影響を無視した、低マッハ数近似とよばれる基礎式が用いられる。熱流動の基礎式を以下に示す。

質量保存式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \cdot \bar{\nabla} \rho = -\rho \bar{\nabla} \cdot \bar{u} \quad (2)$$

ここで ρ は気体の密度、 \bar{u} は流速ベクトルである。

運動量保存式：

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \bar{\nabla}) \bar{u} = \frac{1}{\rho} (\bar{\nabla} p - \rho \bar{g} + \bar{\nabla} \cdot \tau) \quad (3)$$

ここで、 p は気体の圧力、 \bar{g} は重力加速度ベクトル、 τ は粘性応力テンソルで、 μ を粘性係数として次式であらわされる。

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{\nabla} \cdot \bar{u} \right) \quad (4)$$

エネルギー保存式：

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \rho h \bar{u} = \frac{Dp}{Dt} - \bar{\nabla} \cdot \bar{q}_r + \bar{\nabla} \cdot \lambda \nabla T + \dot{q}'' \quad (5)$$

ここで、 h は気体の比エンタルピ、 \bar{q}_r は輻射による熱流束、 \dot{q}'' は火災からの発熱密度である。 λ は熱伝導率である。

化学種の保存式：

$$\frac{\partial \rho Y_l}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \rho Y_l \bar{u} = \bar{\nabla} \cdot \rho D \bar{\nabla} Y_l + \dot{m}'' \quad (6)$$

ここで、 Y_l は化学種 l の質量分率、 D は拡散係数、 \dot{m}'' は化学種 l の質量生成率である。

状態方程式：

$$p = \rho RT \quad (7)$$

ここで、 R は気体定数である。

2.1.2 乱流モデル

工学的に重要な流れのほとんどは乱流であり、火災による気流も通常は乱流である。乱流では、粘性係数、熱伝導率、拡散係数のいずれも層流に比べて格段に大きい値となり、これらの輸送係数は流れの状態に依存する。乱流は大小さまざまなスケールの不規則な渦運動と考えられる。すべてのスケールの渦運動を前述した基礎式の数値解として再現することは、実用的には不可能であり、小さいスケールの渦運動の効果をモデル化する必要がある。

るといえる。現在、CFD で実用的に用いられている代表的な乱流モデルにはレイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式(RANS)モデルとラージエディシミュレーション(LES)モデルとがある。

RANS モデルは、平均操作した Navier-Stokes 方程式を用い、平均からの変動量に対する輸送方程式を導入して計算を行うものである。この代表的なものは $k-\varepsilon$ モデルである。LES モデルは格子サイズより大きなスケールの渦運動は Navier-Stokes 方程式から直接計算し、格子サイズより小さなスケール(サブグリッドスケール、SGS)渦運動の寄与をモデル化する。 $k-\varepsilon$ モデルは管内流れや定常流に対してはよい結果を与えるが、複雑形状まわりの流れや非定常問題については難点があることが指摘されている。LES モデルは $k-\varepsilon$ モデルの難点を克服していると考えられるが、モデルの利点を発揮させるためには十分細かい格子を用いる必要がある。

(1) 標準 $k-\varepsilon$ モデル

標準 $k-\varepsilon$ モデルの場合、粘性応力は平均流の流速を用いてあらわされる。

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{\nabla} \cdot \bar{u} \right) \quad (8)$$

ここで μ_t は乱流粘性係数で、乱流運動エネルギー k と乱流エネルギー散逸率 ε を用いて次式のようにモデル化される。

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

ここで C_μ はモデル定数で通常 0.09 が用いられる。 k および ε の輸送式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{P_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t G - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{P_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 \mu_t G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (11)$$

ここで、 C_1 及び C_2 はモデル定数、 P_k 及び P_ε は運動エネルギー及び散逸の乱流プラントル数を表わす。 G は乱流生成率であり、次式で表される。

$$G = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (12)$$

(2) LES モデル(Smagorinsky モデル)

Smagorinsky モデルにおいては、乱流粘性係数は次式で表される。

$$\mu_t = (C_s \Delta)^2 |S| \quad (13)$$

ただし、 $|S|$ は以下の式で表される。

$$|S| = (2S_{ij} S_{ij})^{1/2}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

ここで、 C_s はモデル定数、 Δ は格子幅である。 $|S|$ は変形速度テンソルの大きさである。

粘性係数以外の輸送係数は、 $k-\varepsilon$ モデルと LES モデルのいずれも乱流拡散係数に比例するものとして扱われる。すなわち、乱流熱伝導率 λ_T と乱流拡散係数 D_T はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$\lambda_T = \frac{\mu_t C_p}{Pr} \quad (15)$$

$$(\rho D)_T = \frac{\mu_t}{Sc} \quad (16)$$

ここで、 Pr と Sc はそれぞれ乱流プラントル数、乱流シ

ユミット数でそれぞれ 1 に近い定数 (通常 0.9) が用いられる。

3. トンネルでの熱流解析事例

前述した CFD による熱流解析の事例として、高速道路等の標準的なトンネルをモデル化し、火源の規模及び風の有無を考慮した解析を行った。

表 1 火災規模 (PIARC 資料)

火災規模	台数	熱出力の最高値 (MW)
小型乗用車	1台	2.5
普通乗用車	1台	5
乗用車	2~3台	8
貨客車	1台	15
バス	1台	20
一般可燃物積載車	1台	20~30
油槽トラック	1台	100~300

解析は、火災規模に関して表 1 に示す PIARC 資料[7]を参考に普通乗用車 (5MW)、バス (20MW) および一般可燃物を搭載した貨物車両 (30MW) を解析対象火源として設定して行った。燃焼工程に関しては、RABT 加熱曲線等が用いられている場合が多いが[8]、本解析では火源を変化させることから、図 1 に示すような熱出力と時間との関係を用いることとし、各ケースとも発火後 10 分で最高熱出力に達し、その後 20 分間は最高熱出力が持続し、その後 40 分かけて徐々に鎮火すると仮定して解析を行った。

解析に用いたトンネルは、図 2 に示すように幅 8m、高さ 7m、トンネル長 100m とし、コンクリートの覆工厚を 60cm とした。解析モデルは、図 2 に示すように火源近傍での温度変化が大きいことから、火源の前後 10m の範囲を 50cm のセルで分割し、その他の部位はトンネル縦断方向を 4m 間隔で分割とした。火源は、トンネルの中央 (入口から 50m) とし、火源の大きさは火災規模によって異なるが、今回選定した火源がどの程度の大きさとなるか明確でないことから、ここでは幅 2m × 長さ 2m × 高さ 0.5m で同じ大きさの火源とした。熱流解析に用いたコンクリートおよび空気層の諸物性を表 2 に示す。

検討ケースは、火源 3 種類 (5MW、20MW、30MW)、トンネル内の風の有無 (風速 0m/s、2m/s) の計 6 ケースについて解析を行った。

3.1 解析結果

火源 5MW、風速 0m/s での火源および火源直上でのコンクリート表面温度の温度履歴を図 3 に示す。図 3 から、火源では発火後最高熱出力に達する 10 分後には 1000 を超える温度となり、火源直上でのコンクリート表面温度は 300 を超える結果となった。発火後 30 分以降徐々に鎮火するのに伴い、火源およびコンクリート表面部の温度も降下し、火源が鎮火する 70 分後には、トンネル内の温度はほぼ同様 (約 80) となった。一方、火源 5MW、風速 2m/s の場合には、火源直上のコンクリート表面部の最高温度は図 4 に示すように約 450 であり、風速がない場合の 1/6 以下の温度であった。ただし、風速 2m/s の場合には図 5、6 に示すように火源直上よりも風下のほうに高温部が流されており、火源から風下 10m

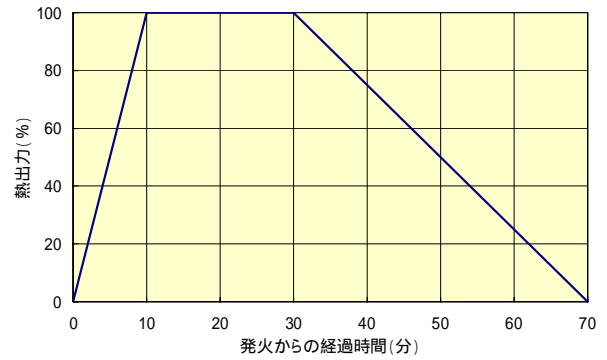


図 1 発火からの経過時間と熱出力との関係

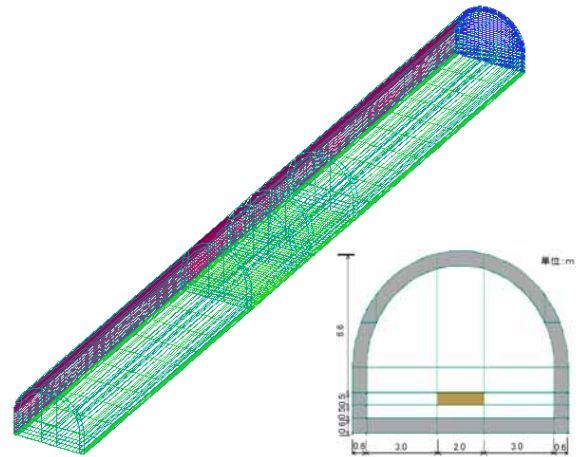


図 2 解析モデル

表 2 熱物性値

対象	項目	物性値
空気	密度 (kg/m ³)	1.18
	粘性率 (kg/m·s)	1.85 × 10 ⁻⁵
	熱容量 (J/kg·K)	1000
	熱伝導率 (W/m·K)	0.0262
	熱膨張係数 (1/K)	0.0033
コンクリート	密度 (kg/m ³)	2300
	熱容量 (J/kg·K)	880
	熱伝導率 (W/m·K)	1.13

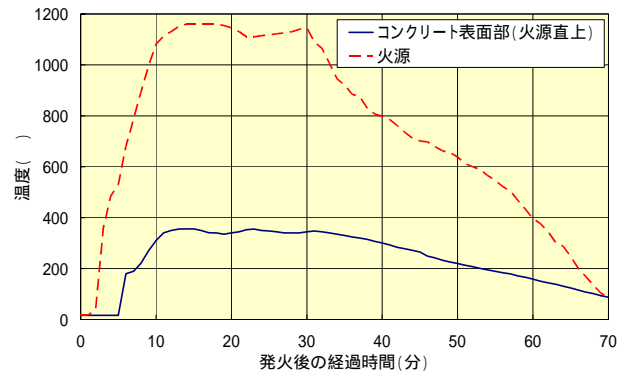


図 3 温度履歴 (5MW、風速 0m/s)

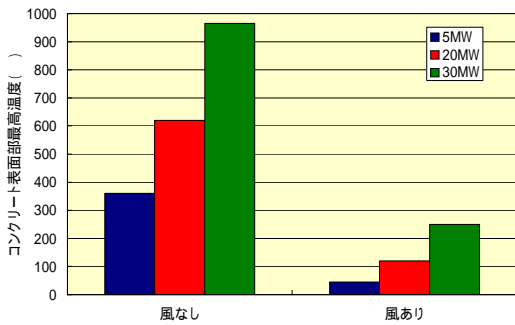


図4 コンクリート表面部の最高温度

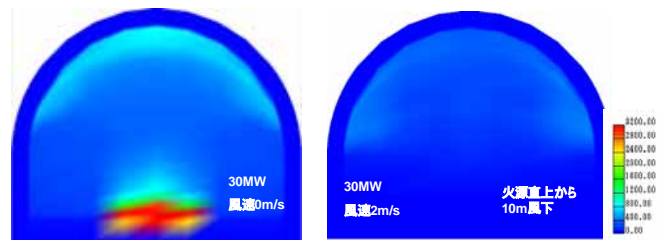


図5 トンネル内の温度分布 (トンネル横断方向)

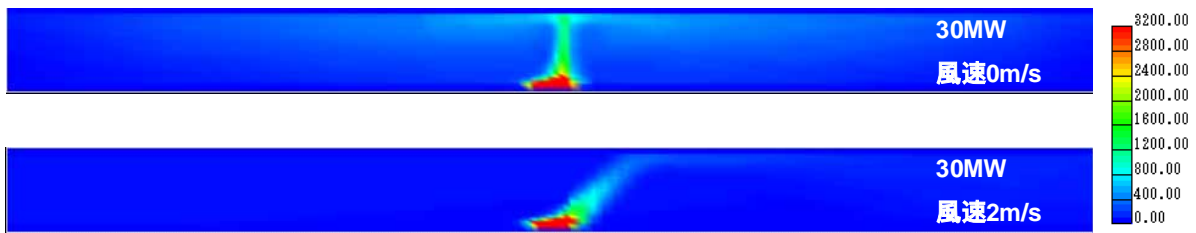


図6 トンネル内の温度分布 (トンネル縦断方向)

の位置でのコンクリート表面部の温度が 100 近い温度を示し、コンクリート表面部での最高温度となった。

各条件でのコンクリート表面部の最高温度は、風速 0m/s の場合図 4 に示すように火源の熱出力が大きくなるほど高くなり、30MW の場合には 900 を超える温度までコンクリート表面部の温度が上昇する結果となった。一方、風速 2m/s の場合には火源の熱が風によって拡散することから、風速 0m/s の場合に比べてそれほど上昇せず、30MW の場合で 250 程度であった。

トンネル断面での温度分布は、30MW の場合風速 0m/s の場合、図 6 に示すようにクラウン部の温度が他の部位よりも高くなっているのがわかる。一方、風速 2m/s の場合コンクリート表面部の温度が最も高くなった火源直上から 10m 風下での断面の温度分布は風速がない場合に比べてトンネル上部全体の温度が上昇しているのがわかる。

4. 火災時におけるコンクリートの温度解析

コンクリートが高温に曝される場合、コンクリートの熱物性値は大きく変化する。特に、コンクリート内に存在する水（物理吸着水及び結晶水）が位相変化（液相から気相への変化）する際の蒸発潜熱や水蒸気となって拡散していくことから、厳密に温度を推定するためにはこれらを考慮した形で算定していく必要がある。しかしながら、上述したような位相が大きく変化する水やセメント水和物の熱分解等を考慮して求めるためには、非常に煩雑で膨大な計算を行わなければならない、トンネルのような大型構造物の温度挙動を把握するのは現状で難しいといえる。

そこで、本検討では高温時の温度挙動を把握する第一歩として、常温でほぼ一定といわれている熱伝導率、比熱に対して、高温時での温度依存性を考慮した非線形・非定常熱伝導方程式を用いて、高温時での温度挙動を推定することとした。

水の影響を考慮しない場合で直交異方性及び発熱を考

慮した場合以下に示す式となる。

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (17)$$

ここで、 ρ : 密度 (kg/m³)、 $c(T)$: 比熱 (kJ/kg)， $\lambda_x(T), \lambda_y(T), \lambda_z(T)$: 各方向での熱伝導率、 Q : 単位時間、単位体積当りに供給される熱量（発熱率）である。

火災を受けるような構造物の場合、コンクリート打込み直後に火災を受けるような場合がほとんどないと考えて差し支えないとすれば、発熱率は考慮する必要がなくなる。また、熱伝導率は温度依存性を考慮する必要があるものの、直交異方性を考慮する必要がなければ式(17)は以下ようになる。

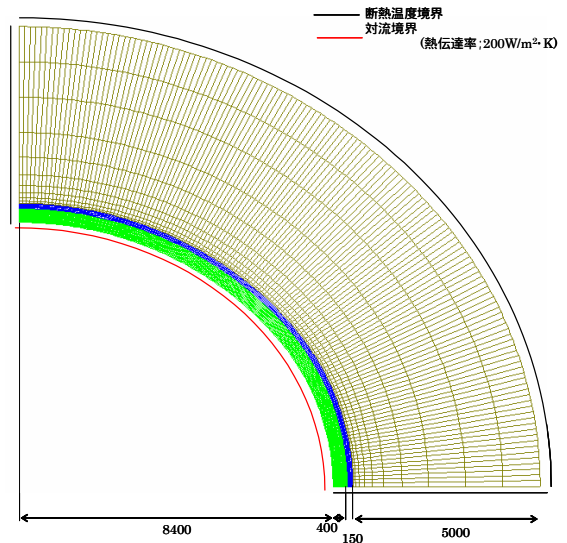


図7 解析モデル (トンネル断面)

$$\rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (18)$$

本検討では、式(18)とコンクリート表面での境界条件式で輻射熱を除いた熱伝達境界のみを用いて温度解析を行った。また、比較のために熱伝導率及び比熱の温度依存性の有無による影響についても合わせて検討を行った。

4.1 解析モデル

対象とした構造物は、第2東名高速道路で建設されているトンネルの標準的な断面とした。トンネル断面は直径16.8mで40cm厚の覆工コンクリート及び15cm厚の吹付けモルタルを施しているとした。解析モデルは、2次元でトンネル断面の1/4とし、覆工コンクリート背面に5mの地盤を含むものとした。解析モデルを図7に示す。

4.2 解析条件

解析条件は、熱物性値であるコンクリートの比熱、熱伝導率及び密度を以下に示すような値及び式とした。

コンクリートの密度は、温度上昇に伴い水分の逸散やセメント水和物の熱分解などで低下するものと考えられるが、本解析では温度依存性を考慮せず2300kg/m³で一定とした。

コンクリートの比熱は、Schneiderの論文[9]に示された種々のコンクリートの比熱と温度との関係の図のうち、珪酸質骨材を用いたコンクリートのデータから近似曲線を求めて、温度の関数とした。ただし、Schneiderが示した図には600までのデータしかないため、本検討では600以上は一定値として解析を行った。Schneiderの論文からデータを抽出した結果とそれを基に近似した式を図8に示す。また、温度依存性を考慮せず一定とした場合には、図8に示す近似式で0～1200の範囲での平均値1.29(kJ/kg)を用いることとした。

0 コンクリート温度 600

比熱: $c(T) = -1.9 \times 10^{-6} T^2 + 2.079 \times 10^{-3} T + 0.8098$ (kJ/kg)

600 < コンクリート温度

比熱: $c(T) = 1.38$ (kJ/kg)

ここで、 T : コンクリート温度(°)である。

コンクリートの熱伝導率は、比熱の場合と同様にSchneiderの論文[9]に示された種々のコンクリートの熱伝導率と温度との関係の図のうち、珪酸質骨材を用いたコンクリートのデータから近似曲線を求めて、温度の関数とした。ただし、コンクリート温度が700以上のデータがないが、他の文献[10],[11]やEurocode2[12]等は1200までコンクリート温度の上昇に伴い熱伝導率が減少していることから、本解析では700以上においても前述した近似式を外挿して用いることとした。Schneiderの論文からデータを抽出した結果とそれを基に近似した式を図9に示す。また、温度依存性を考慮せず一定とした場合には、図9に示す近似式で0～1200の範囲での平均値1.06(W/m)を用いた。

0 コンクリート温度 1200

熱伝導率: $\lambda(T) = -4.0 \times 10^{-7} T^2 - 8.38 \times 10^{-4} T + 1.740$ (W/m)

本解析では、表3に示すように比熱及び熱伝導率を一定とした場合と、それぞれ温度依存性を持たせた場合及び両方とも温度依存性を持たせた場合の4ケースについて行った。コンクリートの密度も温度依存性を有する

ことは2章で述べられているが、Eurocode2[12]等を見ると温度による変化が小さいことから、ここでは一定値として解析を行った。

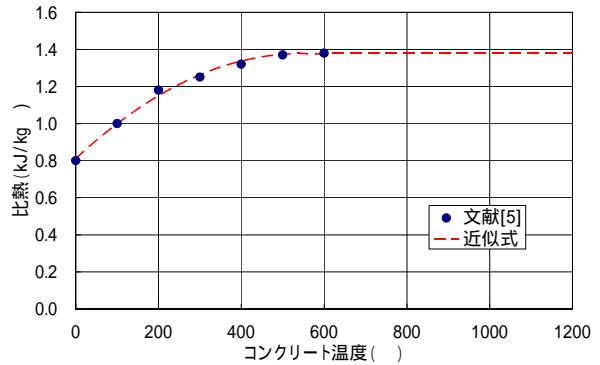


図8 コンクリート温度と比熱との関係
(出典: U.Schneider 著, 1983)

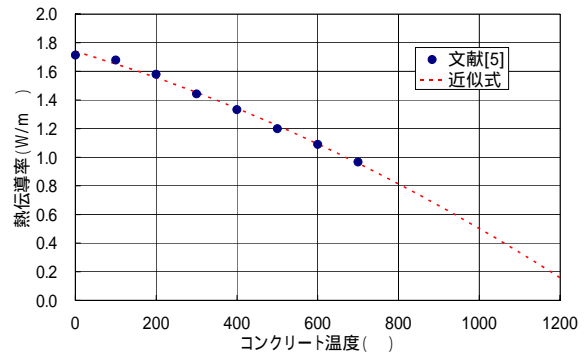


図9 コンクリート温度と熱伝導率との関係
(出典: U.Schneider 著, 1983)

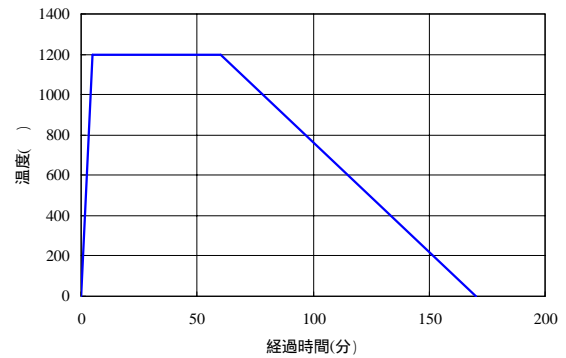


図10 標準温度曲線 (RABT 曲線)

表3 検討ケース

ケースNo.	比熱	熱伝導率	備考
1	一定	一定	コンクリートの密度は一定
2	温度依存	一定	
3	一定	温度依存	
4	温度依存	温度依存	

コンクリート表面の周囲温度は、熱流解析から求めた結果を用いるべきであるが、熱流解析結果と本解析プログラムのインターフェイスが現状ないことから、本解析では図 10 に示す標準温度曲線である RABT 曲線を用いて行った。

吹付けモルタルの熱特性値は、コンクリートの熱特性値に準拠して解析を行った。また、覆工コンクリート背面の地盤の熱特性値については、土木学会コンクリート標準示方書施工編（2002 年制定）に記載されている平均的な値の範囲の平均値（岩盤の密度： 2650kg/m^3 ，熱伝導率： 3.45W/m ，比熱： 0.795kJ/kg ）を用いた。

コンクリートの表面熱伝達係数は、100 以下の場合であれば、 14W/m^2 を用いているが、本解析ではコンクリート表面からの水蒸気の逸散によって見かけ上大きくなっていると仮定し、 200W/m^2 を用いて行った。

4.3 解析結果

コンクリート表面から 0mm，40mm，80mm 及び 120mm の位置での各ケースを比較した結果を図 11～14 に示す。

コンクリート表面部は、図 11 に示すように比熱、熱伝導率の温度依存性の考慮に関係なくほぼ同様の温度履歴を示し、各ケースとも RABT 曲線に近い温度履歴であった。コンクリート表面から 40mm の位置では、比熱の温度依存性を考慮したケース（ケース 2）は、比熱、熱伝導率の温度依存性を考慮しないケース（ケース 1）とほとんど変わらない温度履歴を示した。一方、熱伝導率の温度依存性を考慮したケース（ケース 3）は、比熱、熱伝導率の両者の温度依存性を考慮したケース（ケース 4）とほぼ同様な温度履歴を示した。また、ケース 1 とケース 4 で比較した場合、温度依存性を考慮したケース 4 はコンクリート周囲が急激に温度上昇する時間帯で温度依存性を考慮しない場合よりも高い温度を示し、その後周囲温度が最高温度に達し、徐々に低下する時間帯では、ケース 4 の方がケース 1 よりも低い温度を示す結果となっている。この傾向は、図 13 及び図 14 に示すようにコンクリート表面から 80mm 及び 120mm の位置においても同様な傾向を示した。このことは、火源の熱がコンクリート表面の温度を急激に上昇させるような段階では、温度依存性を考慮した温度推定を行わないと危険側に評価していると考えられる。ただし、今回の解析は実際の構造物の温度と比較していないことから、温度依存性の考慮がどの程度実際の火災を受けた構造物の温度挙動を追従しているかは明らかでなく、今後の課題である。

5. 温度及び応力を連成させた熱応力解析方法

高温に曝されたコンクリート表面が剥落するのに伴い境界面が変化する状態を再現する方法について検討を行った。本解析方法は、温度解析と応力解析を連成させて、各ステップで温度解析を行い、そのデータを基に同一ステップで応力解析を行うものである。応力解析の結果から、コンクリートが圧壊等で剥落もしくは爆裂してコンクリートがなくなるかどうか判定し、なくなる場合は要素を削除して新たな境界面を構築する方法である。

現状の解析方法では、前述したように高温時でのクリブ特性や水分移動、混合ガスの膨張圧、セメント水和物の熱分解による化学組成の変化などの複雑な過程を盛り込むまでには至っていない。本検討では、極簡単な構

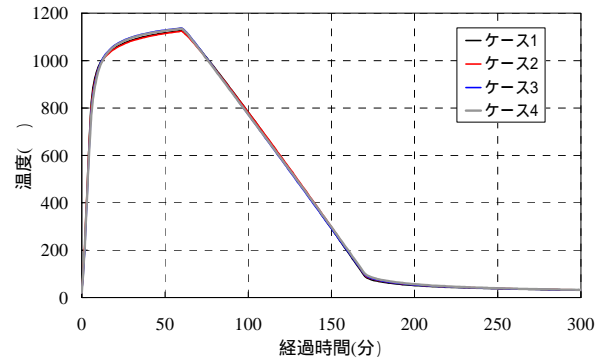


図 11 温度履歴の比較（コンクリート表面から 0mm）

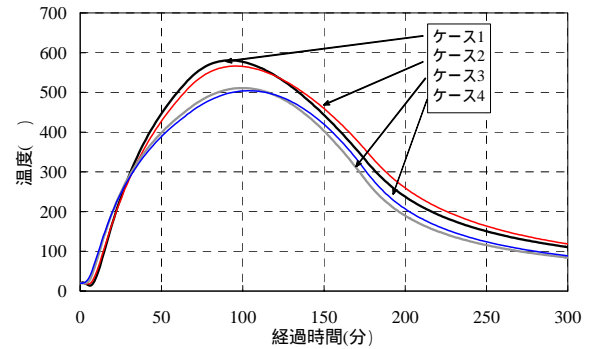


図 12 温度履歴の比較（コンクリート表面から 40mm）

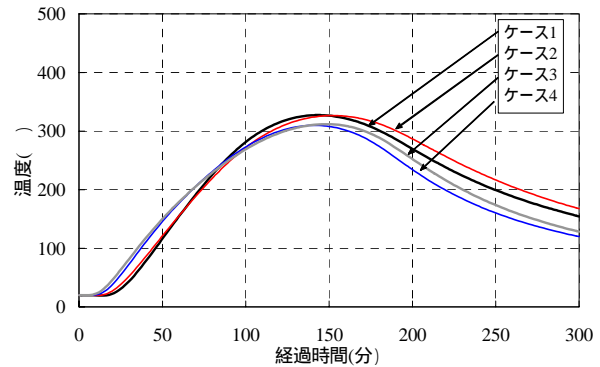


図 13 温度履歴の比較（コンクリート表面から 80mm）

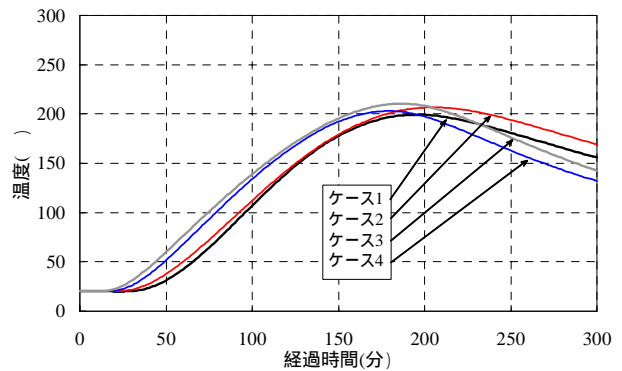


図 14 温度履歴の比較（コンクリート表面から 120mm）

成則を基に解析を行ったが、今後は解析モデルに一つずつ上記の条件を考慮した構成則を加えていき、解析精度を高めてゆくことが必要と考えている。今回行ったのは、ひび割れを考慮しない場合の簡便な構成則による解法である。

ひび割れを考慮しないモデルは、引張強度を超えてもひび割れは生じないとし、圧縮側は Drucker-Prager の塑性理論[12]に基づいた解法とする。コンクリートが熱応力で圧壊応力に達すると、ひずみ軟化は考慮せず直ちに応力をすべて解放し、次の解析ステップでは0に近い非常に小さな剛性を与えることとした。

温度及び応力を連成させた熱応力解析のアルゴリズムを図 15 に示す。

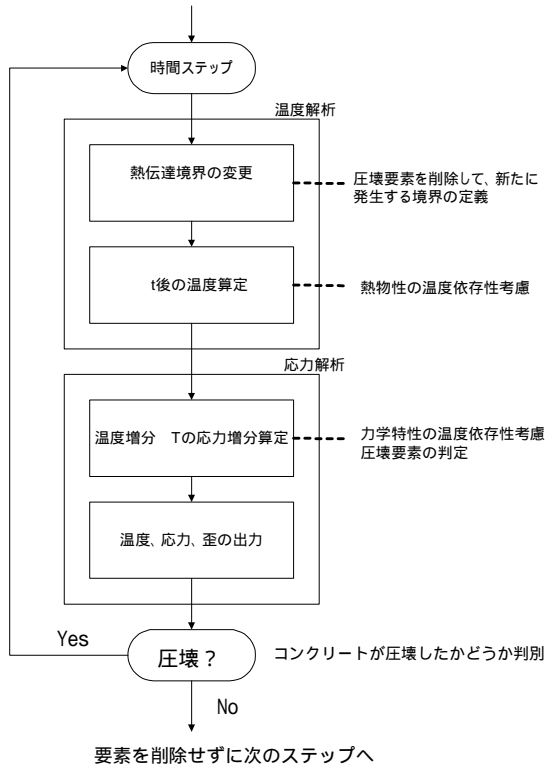


図 15 温度及び応力を連成させた熱応力解析アルゴリズム

5.1 解析モデル

解析対象モデルは、半径 3000mm、コンクリート厚 250mm のトンネル 1/4 モデルである。内面の対流境界は火災の当たる部分の熱伝達率を 200W/m^2 とし、その他の部分は 20W/m^2 とした。また、圧壊したコンクリートが剥落するのは中央より上のコンクリートと考え、下側のコンクリートは圧壊しないものとした。解析モデルを図 16 に示すとともに、図 17 に境界条件を示す。

5.2 解析条件

解析に用いる熱物性値は、4.2 で用いた温度依存性を考慮した比熱及び熱伝導率を用いた。また、コンクリートの密度は 2300kg/m^3 で一定とした。覆工コンクリート背面の地盤の熱特性値については、土木学会コンクリート標準示方書施工編（2002 年制定）[13]に記載されている平均的な値の範囲の平均値（岩盤の密度： 2650kg/m^3 、

熱伝導率： 3.45W/m 、比熱： 0.795kJ/kg ）を用いた。

コンクリートの周囲温度は、これまでの火災事例[14]を参考に、最初の 10 分間で 700 まで急激に温度上昇させ、その後 2 時間まで徐々に温度上昇させて 1000 以上に達するようにし、その後 2 時間かけて常温まで温度低下させることとした。温度曲線を図 18 に示す。

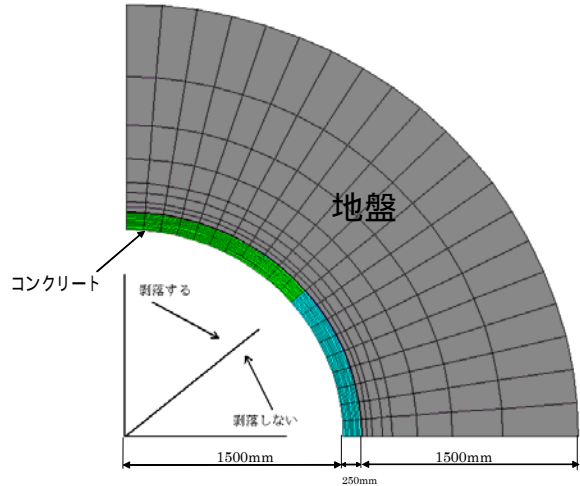


図 16 解析モデル

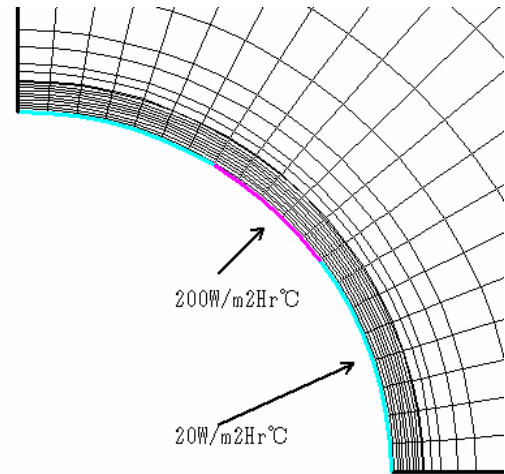


図 17 温度解析における境界条件

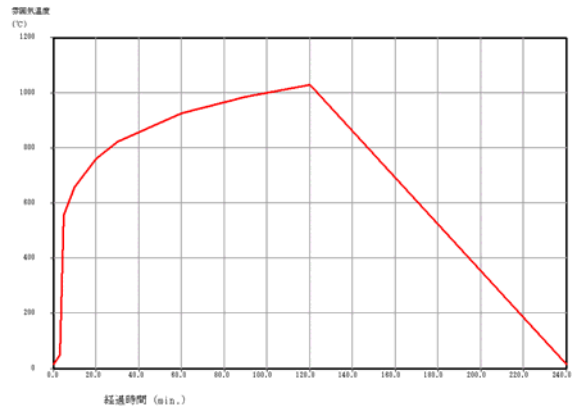


図 18 コンクリートの周囲温度曲線

5.3 解析結果

コンクリートが圧壊しない断面での温度履歴を図 18 に示す。図 19 から、コンクリート周囲温度が降下する段階においても、コンクリートの内部は温度上昇しており、境界面の再構築効果が現れているといえる。また、コンクリート周囲の温度が最高温度に達した時点(発火から 2 時間後)での温度分布及び応力分布を図 20 及び図 21 に示す。

図 20 から、コンクリートの圧壊によって、火炎が当たると仮定した部分のコンクリートはほとんど剥落してしまい、その影響は、圧壊によって境界面が変わるとしたクラウン部まで達しているのが分かる。今回の解析では、鉄筋を考慮していないので、かぶり以深で応力状態が変化するような状態とはならなかった。また、覆工コンクリートの剥落に伴い、境界面がコンクリート内部に向かっていくために、断面に沿った剥落現象(玉葱の皮がむけていくような現象)が本解析でも見られた。

図 21 の主応力分布から、コンクリート表面となっている部分に非常に大きな圧縮力が生じているのが分かる。これは、コンクリートの熱膨張によってコンクリートの極表面が膨張しようとするのに対して、その近傍の温度がそれほど高くない部位で拘束されることによって生じるものと考えられる。本解析では、高温時でのクリープを考慮していないことから、実現象と必ずしも一致した挙動は示していないものの、火災によってコンクリート表面が高温に曝された場合の剥落現象の一部は再現できているものと思われる。図 22 に時間経過に伴う主応力分布を示す。図 22 から上述した剥落現象が見られるのがわかる。

6. おわりに

コンクリートが火災のような高温に曝された場合の挙動を把握するための研究の一環として、熱源の大きさおよび風の有無によるコンクリート表面部の温度について熱流解析を行った。その結果、風がない場合には火源直上のコンクリートはかなり高温に曝されること、風がある場合には火源直上の温度が風のない場合に比べてかなり低下するものの、比較的高温に曝される範囲が広がる結果が得られた。今回の解析は、トンネルのような閉空間での熱流解析検討の第一歩であり、今後はより実際に近い燃焼工程の設定、火源規模の影響、トンネル断面の影響などの検討も行っていく予定である。

次に、高温に曝された場合のコンクリートの挙動について、熱物性値に温度依存性を考慮した場合の温度解析

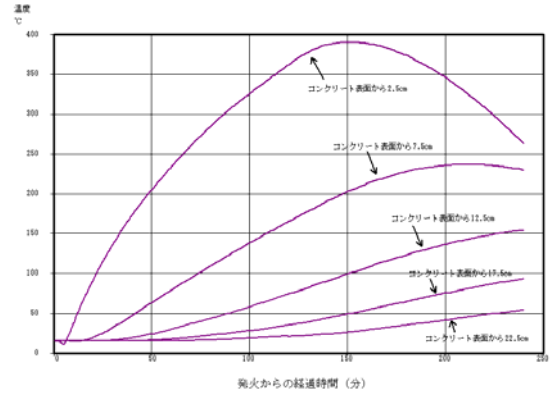


図 19 温度履歴

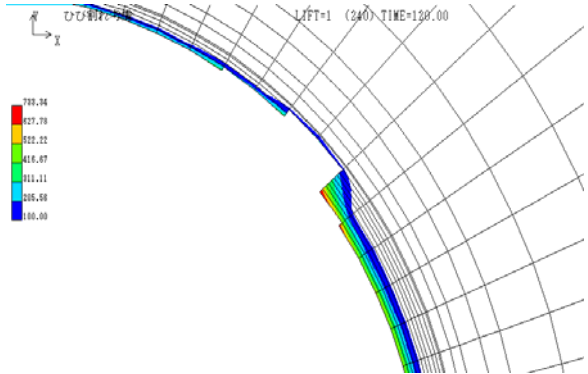


図 20 温度分布 (発火後 120 分)

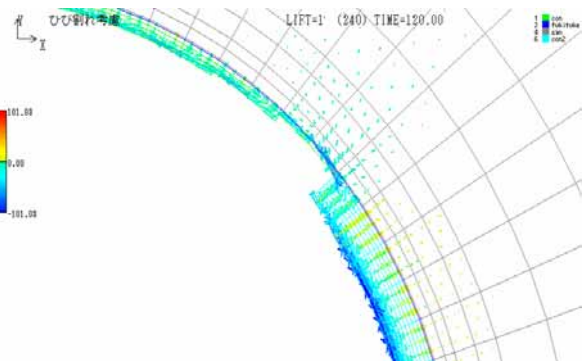


図 21 主応力分布 (発火後 120 分)

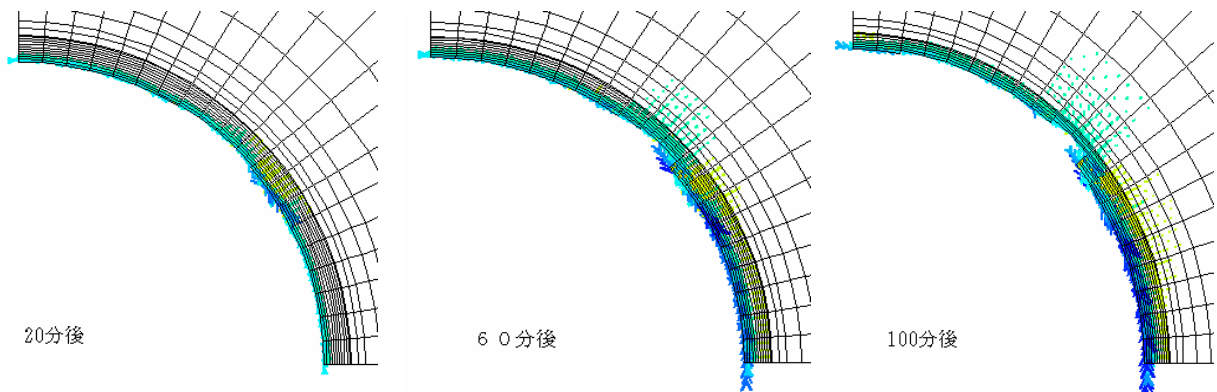


図 22 主応力分布の時間変化

を行った結果、火源の熱がコンクリート表面の温度を急激に上昇させるような段階では、温度依存性を考慮した温度推定を行わないと危険側に評価していると考えられる。また、剥落現象によるコンクリート表面の境界条件変化についての解析手法についても、その解法に対する可能性を見出すことができた。今後は、コンクリートが高温時に曝される際の温度推定におけるコンクリートの熱伝導、混合ガス（水蒸気と空気）の移流、水蒸気の移流・拡散、物理吸着水の拡散、結晶水の熱分解による水蒸気の生成の 5 つの方程式を連成させて求める解析手法などについて検討するとともに、高温時でのクリープ特性についても検討していく必要がある。

参考文献

- [1] 佐藤博臣, 栗岡均, 今関修, 岡泰資, “CFD による放水設備作動時のトンネル空間熱性状予測”, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 9 巻, pp69-77, 2004
- [2] 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”, 2004.10
- [3] 今関修, 栗岡均, 岡泰資, 滝川慎一, “CFD によるトンネル壁際火源時の熱気流性状予測”, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 10 巻, 2005
- [4] S.V.バタンカー, “コンピュータによる熱移動と流れの数値解析”, 森北出版
- [5] 荒川忠一, “数値流体工学”, 東大出版会
- [6] 村上周三, “CFD による建築・都市の環境設計工学”, 東大出版会
- [7] PIARC Committee on Road Tunnels, “Fire and Smoke Control in Road Tunnels (C5)”, 1999
- [8] 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”, 2002.06
- [9] 森永繁, 山崎庸行, 林章二監訳, U. Schneider 著, “コンクリートの熱的性質”, 技報堂出版, 1983.12
- [10] 戸倉毅, 寺井俊夫, 上田哲夫, 石原毅, 小南和也, 行貝光史, “コンクリートの高温時の熱物性に関する実験的研究(その 2. 実験結果)”, 日本建築学会大会学術講演概要集(近畿), pp.755-756, 1987.10
- [11] 土井文好, 太田福男, 斉藤辰彦, “超高強度コンクリートの熱的性質に関する実験的研究”, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.109-114, 1993
- [12] Eurocode2: Design of concrete structure Part 1,2 General rules - Structural fire design, DO ENV 1992-1-2, 1996
- [13] 土木学会, “コンクリート標準示方書[施工編]【2002年制定】”, pp.46-47, 2002.3
- [14] 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”, pp.17-66, 2002.6

キーワード.

火災, 熱流解析, トンネル, コンクリート, 高温, 劣化, 剥落

Summary.

Analytical Study on Temperature Distribution and Thermal Stress of Concrete in Tunnel Fire

Toshiaki Mizobuchi Ryouzuke Hayashi
Department of Civil and Environmental Engineering, Hosei University

It is known that a surface of tunnel lining concrete is exposed to high temperature, when the fire was generated in enclosed space such as tunnels. Then, the computational fluid dynamics analysis was carried out to estimate about concrete damages caused by fire. The analysis was carried out from the viewpoint of size of heat sources and existence of wind. As the results, it was made clear that concrete just above fire source was exposed to high temperature, when there is no wind. Also, it was made clear that the range exposed to high temperature enlarged, though temperature just above fire source in case when the wind blows, became lowers than that in case when there is no wind.

Keywords.

Fire, Heat Flow Analysis, Tunnel, Concrete, High Temperature, Degradation, Flaking