

火災時のシールドトンネル天井排気ダクト内温度解析 CIRCUITRY THERMAL NETWORK ANALYSIS FOR CEILING EXHAUST DUCT OF THE EXPRESSWAY TUNNEL AT FULLY DEVELOPED FIRE

波津久 毅彦¹・並川 賢治²・栗岡 均³・森口 敏美⁴

Takehiko HATSUKU・Kenji NAMIKAWA・Hitoshi KURIOKA・Masami MORIGUCHI

The Central Circular Shinjuku Route of Tokyo Metropolitan Expressway has been under construction by Shield Tunneling method. The tunnel is supported by segmented linings. The fire-proofing such as fire proof panels or fire proof shot-crete are installed on the segmented linings to secure structural safety at a fully developed fire. Ceiling partitions are installed in some portion of the tunnel where the separated crown area is used as tunnel exhaust duct. Design requirements of the fire resistance for the ceiling exhaust duct, however, have not been verified yet. A circuitry network analysis for the ceiling exhaust duct of the tunnel was conducted to analyze the thermal distribution of air flow in the duct, the ceiling materials and the segmented linings using RABT(60min.) thermal conditions. The analysis showed that the thermal influence of the fire source was drastically eased since the ceiling material performed as a separator from the fire source and also air flows in the exhaust duct lowered the increase of the temperature. Computed maximum temperature of the segmented lining at crown was 233 degree in Celsius.

key words : tunnel, fire, exhaust duct, circuitry network analysis, smoke exhaust, reinforced concrete segment

1. はじめに

首都高速道路(株)が建設中の中央環状新宿線¹⁾では、トンネルの設計・施工の合理化を進め、シールドトンネルの全区間で二次覆工を省略した。この為に、火災時の坑内の安全確保とセグメント損傷の防止を目的として、図

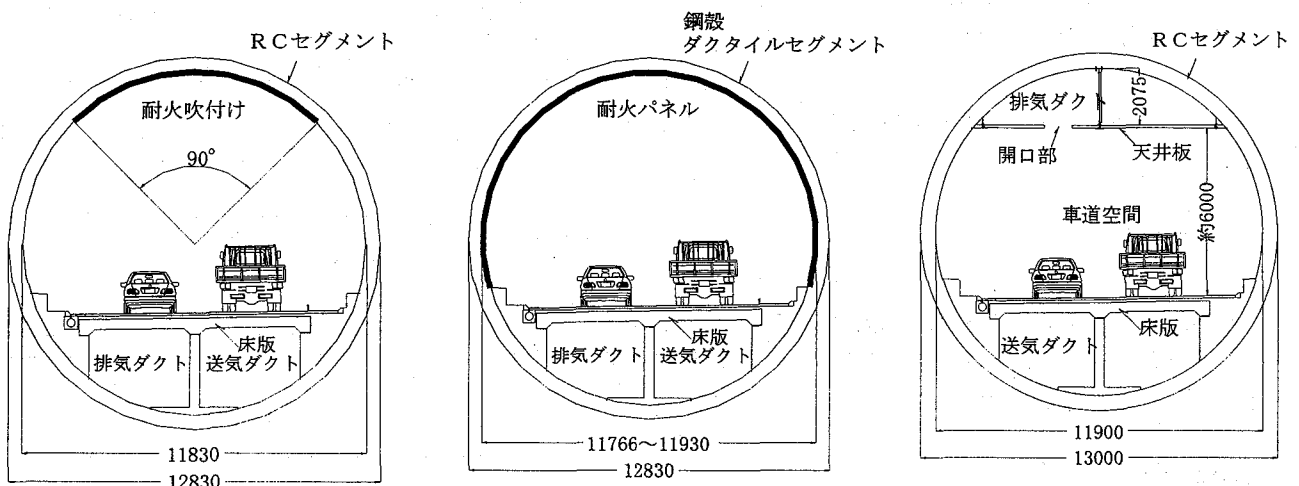


図-1 対象区間のトンネル断面

キーワード：トンネル、火災、排気ダクト、管路網解析、排煙、RCセグメント

¹正会員 修士 首都高速道路株式会社 東京建設局

²正会員 首都高速道路株式会社 東京建設局

³正会員 博士(工学) 鹿島建設 技術研究所

⁴正会員 MS 鹿島建設 東京土木支店

-1に示すようにRCセグメント部にはトンネル頂部90度の範囲に耐火吹付を、また、鋼殻・ダクトイルセグメント部には路面から上の範囲に耐火パネルを設置した。

ここで、シールドトンネルの一部では、図-1右図に示すように換気設備の関係からトンネル床版下が送気ダクト、頂部が天井板で仕切れ排気ダクトになる。このようにトンネル頂部に排気ダクトを有するシールドトンネルのRCセグメント部では、天井板が道路部の火源とセグメントとを隔離すること、また、排気ダクト内の通風によりダクト内の温度低下が想定されることから、道路部の火災および熱がセグメント頂部90度部に直接影響せず、耐火構造が不要と推察される。

今回、天井板を有するシールドトンネルの耐火構造を設計することを目的とし、管路網解析等を用いてトンネル火災による排気ダクト内の温度性状を定量的に把握した上でトンネル構造に対する照査をおこなったので報告する。

2. 解析条件

解析対象区間は、天井部に排気ダクトを持つシールドトンネルのうち、西新宿トンネル外回りの延長約600mとした。この区間で、ダクト内温度解析に最も温度条件が厳しい箇所となるのは、通過風量が少なく、車道空間から流入した煙が火災ブリュームとして発達する位置、すなわち換気所から最も遠いダクトの末端の部分となるバルクヘッド近傍であると推定される。解析に用いる設計火源としては、中央環状新宿線の耐火工で設定されている火災時間温度曲線(RABT60分曲線)に準じ、図-2に示す最大発熱速度が100MWとなる発熱速度時間曲線を用いた。

今回のダクト内熱解析の特徴的な点は、解析対象区間において換気開口が10mピッチで約60箇所設置されることから、開口からの空気流入量によりトンネル軸方向に徐々に換気風量が増加することである。特に、火災発生時には、各開口から約1.43m³/sの空気が流入し、末端部では風速が20m/sと高速になる。表-1に今回の解析で使用した各諸元を示す。

3. 解析方法

本検討では、排気ダクト、天井板、およびRCセグメントの温度分布を求めるために、火災時熱流動を短時間で予測可能な管路網解析法を用いた。

(1) 検討フロー

排気ダクト内の温度性状を求めるための検討フローを図-3に示す。トンネル火災時の排気ダクト内およびRCセグメントのダクト延長方向の温度分布を管路網解析により算出した。また、火源周辺の開口部から高温空気が流入した場

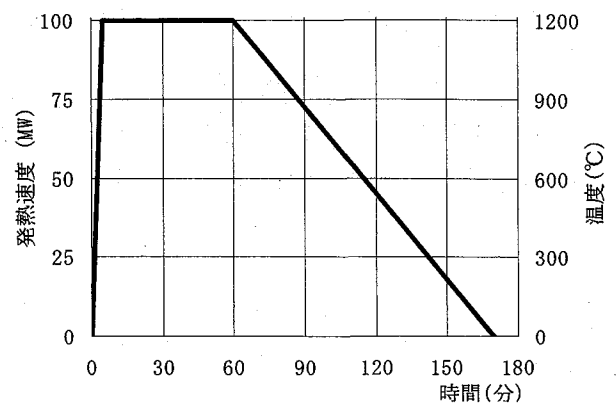


図-2 火災事故時の温度および発熱速度時間曲線

表-1 各諸元

項目名	条件
検討区間	西新宿トンネル (初台～西新宿)
延長	外回り約600m
火災時換気方式	横流方式
排気ダクト断面積	13.013m²/m
ダクト内天井高さ	2.076m
天井板上面積	9.032m²/m
セグメント部面積	10.255m²/m
セグメント	RCセグメント t=550mm
排気口設置間隔	10m
排気口開口面積	1m²/箇所
開口流入空気量	1.43m³/s

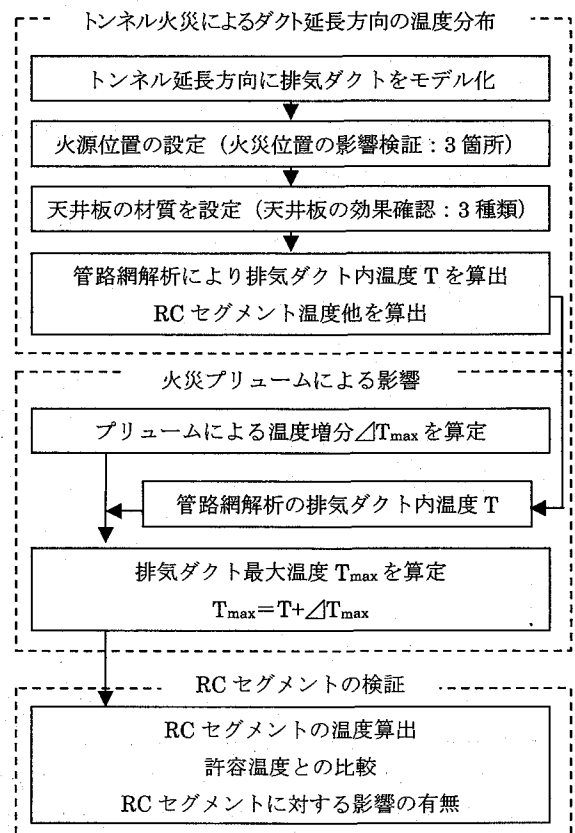


図-3 検討フロー

合の火災ブリュームによる影響についても併せて検討をおこなった。上記2つの解析結果を合算し、RCセグメントの温度を算出しセグメントの検証を行った。

(2) ダクト部の熱移動の概念

排気ダクトは、火源である車道空間に接する天井板、排気開口、排気ダクト空間、RCセグメントおよび地山により構成される。

排気ダクト部の熱移動の概念を図-4に示す。車道空間の火災時には、火源から発生する熱による高温煙層が天井板下に発達する。その際、車道空間から排気ダクトへの熱移動として、天井板での対流熱伝達、熱放射に加え、排気口面から排気ダクト内への熱放射や排気口から誘引された高温ブリュームガスの拡散が考えられる。排気ダクトをとりまくRCセグメントに対しては、天井板のダクト側の熱放射、ダクト内の空気との熱伝達、およびRCセグメントを通過して地山（周囲土壌）への熱伝導などの熱の移動を考慮した。

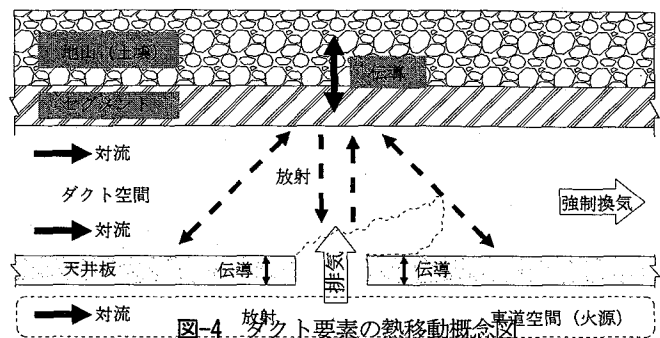


図-4 ダクト要素の熱移動概念図

(3) ダクト延長方向の温度分布解析手法

a) 支配方程式

熱エネルギーの保存式を式(1)から(4)に示す。これらの式を適用する場合、以下の項目を仮定した。

- ① 空気はダクト内（トンネル軸方向）に一様に流れる。
- ② ダクト内の温度は、空気の流れに沿って一様に変化する。
- ③ トンネル周囲のRCセグメント内や地山（土壌）内の熱移動は、トンネル半径方向に一次的に変化する。

【ダクト内空気の熱保存式】

$$A_T C_{Ta} \rho_{Ta} \left(\frac{\partial \theta_{Ta}}{\partial t} + U_{Ta} \frac{\partial \theta_{Ta}}{\partial x} \right) = S_{T1} \alpha_T (\theta_{Ts1} - \theta_{Ta}) + S_{T2} \alpha_T (\theta_{Ts2} - \theta_{Ta}) + \sum_{j=1} \nabla \cdot q_T \quad (1)$$

【天井板・RCセグメント・土壌の熱保存式】

$$C_{TR} \rho_{TR} \frac{\partial \theta_{TR}}{\partial t} = \lambda_{TR} \left(\frac{\partial^2 \theta_{TR}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_{TR}}{\partial r} \right) \quad (2)$$

ただし、RCセグメントの場合、添字TR=c2、天井板の場合、添字c1

$$C_{cl} \rho_{Tcl} \frac{\partial \theta_{cl}}{\partial t} = \lambda_{cl} \frac{\partial^2 \theta_{cl}}{\partial r^2} \quad (2)'$$

【天井板・RCセグメントの表面での熱収支】

車道空間側の天井板

$$-\lambda_{Tc} \left(\frac{\partial \theta_{Tc}}{\partial r} \right)_{r=r0} = \alpha_T (\theta_{Tsi} - \theta_f) + \varepsilon \varepsilon_f C_b [(T_{Tsi}/100)^4 - (T_f/100)^4] \quad (3)$$

ダクト内の壁面

$$-\lambda_{Tc} \left(\frac{\partial \theta_{Tc}}{\partial r} \right)_{r=r0} = \alpha_T (\theta_{Tsi} - \theta_{Ta}) + \varepsilon \varepsilon_f \Phi C_b [(T_{Tsi}/100)^4 - (T_f/100)^4] + \varepsilon \varepsilon_f (1 - \Phi) C_b [(T_{Tsi}/100)^4 - (T_{Tsj}/100)^4] \quad (3)'$$

【RCセグメントと土壌の境界熱収支】

$$\lambda_{Tc} \left(\frac{\partial \theta_{Tc}}{\partial r} \right)_{r=r2} = -\lambda_{TR} \left(\frac{\partial \theta_{TR}}{\partial r} \right)_{r=r2} \quad (4)$$

一般的には、上記の支配方程式を用いて排気ダクトの温度を差分法や有限要素法で離散化して求める^{2),3)}。ただし、今回のように風速が速くなると移流項の影響で解が不安定になる傾向がある。そこで、式(1)については厳密解を求め、解の安定化のための工夫を行った⁴⁾。

b) 対流熱伝達率

ダクト内壁面での対流熱伝達率は（ダクト内空気とセグメント間およびダクト内空気と天井板間），式(5)に示す Jurges 式の普通面の値⁵⁾を用いた。また，車道空間に発達した火災および高温煙層からの天井板への対流熱伝達率は，火災気流が強く発達した場合（空気流速が大きい場合）を想定し， $\alpha_T = 0.0349 \text{ [kW/m}^2/\text{°C]}$ を用いた。

$$U < 5 \text{ m/s} \quad \alpha_T = 0.0058 + 0.00395U \quad (5)$$

$$U > 5 \text{ m/s} \quad \alpha_T = 0.0071 \cdot U^{0.78} \quad [\text{kW/m}^2/\text{°C}]$$

c) 天井近傍空気温度推定式

解析対象の西新宿トンネルでは，横流換気方式が採用されている。横流換気方式では，天井板開口部からの排煙により熱および煙が吸引され，車道空間の熱等の拡散範囲が狭くなる。このため，天井近傍空気温度は，自然換気の場合のそれに比較し，トンネル延長方向に急激に低下すると推定される。しかし，本解析では，安全側の見地から，火災時の天井近傍の高温煙層温度分布を自然換気下模型実験から導出された式(6)の推定式⁶⁾を用いて求め，解析時の境界温度条件とした。この推定式は約 800°C までの発熱条件下で得られたものであるが，本解析では 1200°C まで拡大適用可能と判断し，式(6)の推定式を適用した（ただし，推定結果が 1200°C を超える場合は 1200°C を上限値とした）。図-5 に発熱速度が 100MW 時のトンネル延長方向の天井近傍煙層の温度分布を示す。

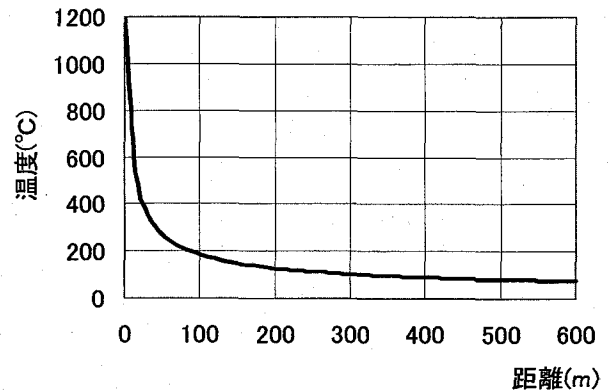


図-5 天井近傍の温度分布（トンネル軸方向）

$$\Delta T_o^* = \Delta T / T_o (Q^*)^{2/3} = a(r/H)^n \quad (6)$$

$$Q^* = Q / (\rho_o C_p T_o g^{1/2} H^{5/2})$$

$$a = -0.3Bp + 3.53$$

$$n = -0.15Bp - 0.353$$

(4) 火災プリームの影響解析手法

ダクト開口部では，車道空間から流入した火災や高温の煙が火災プリームとして発達し，RCセグメント表層に接触する場合は考えられる。図-6 に示すようなダクト換気流（横風）を受ける開口部から吸い込まれた高温空気の挙動に関しては，床面に設置された火源が横風を受けた場合の火災の特性式^{7), 8)}を用いてRCセグメント部の温度を算定した。

a) 有風時のダクト天井近傍温度上昇 ($\Delta T_{\max}$) の算出

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_a} = \alpha_4 \left(\frac{Q^{*2/3}}{Fr^{1/3}} \cdot \left(\frac{b}{D_2} \right)^{1/2} \right)^{\beta_4} \quad (7)$$

$$(Q^{*2/3} / Fr^{1/3}) (b/D_2)^{1/2} < 3.3 \quad \alpha_4 = 0.60 \quad \beta_4 = 6/5,$$

$$3.3 \leq (Q^{*2/3} / Fr^{1/3}) (b/D_2)^{1/2} < 8 \quad \alpha_4 = 2.53 \quad \beta_4 = 0$$

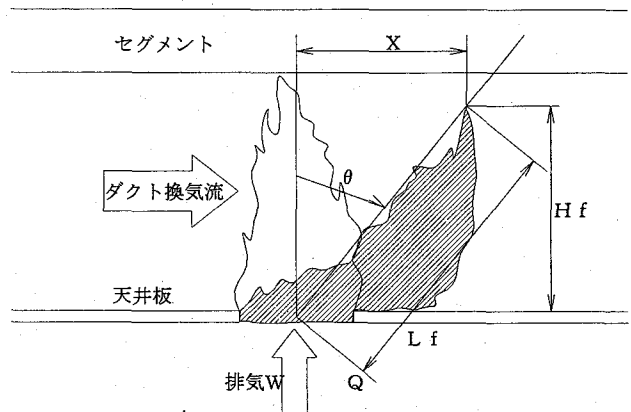


図-6 ダクト内に吸引された高温空気および火災

b) 有風時の火炎の傾斜角度 (θ) 及び火炎長さ (L_f) の算出

$$\cos \theta \cdot Fr^{-1/2} = \alpha_6 \left[A_f^{1/2} \cdot \frac{b^{1/2}}{H_d^{2/3}} Fr^{-1} \cdot Q^{*(1-2\eta)/5} \cdot \left(\frac{b}{D_2} \right)^{1/2} \right]^{\beta_6} \quad (8)$$

$$L_f/DD1=2.71Q^{2/5} \quad (9)$$

表-2 式(8)の係数

	ΔT_{max}	η	α_6	β_6
領域Ⅰ	<250K	-1/3	0.54	0.63
領域Ⅱ	250~550K	0	0.46	0.66
領域Ⅲ	$\geq 550K$	1/2	0.52	0.57

4. 管路網解析における解析モデル

(1) 対象領域のモデル化

一般のダクト部では、暖められた天井表面とセグメントからの熱放射やダクト内部の空気による対流が考えられる。一方、開口部周辺では、上記に加えて、トンネル車道空間からの火炎、高温煙層の流入、さらに直接の熱放射が影響する。

解析のためのモデル化に際しては、排気ダクトを一般部と開口部周辺の二つの領域とに分けて考え、延長方向に設置された開口部 62 箇所を接点とし、

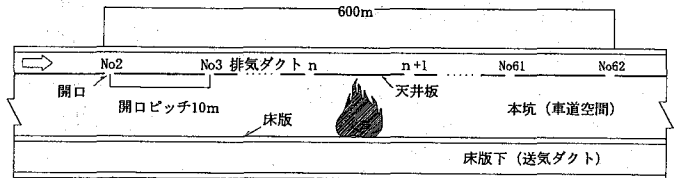
各開口部を結ぶ合計 61 要素を一般部をあらわすダクト要素としてモデル化を行なった (図-7 参照)。

なお、No. 1 接点及び No. 1 トンネル要素は、解析モデルとなる天井ダクトに排気流が流れ込む部位を表す要素とした。

トンネル横断面図



トンネル縦断面図



管路網モデル図

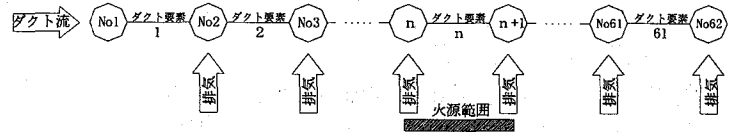


図-7 解析モデルイメージ

(2) 火源領域のモデル化

車道空間内の火源領域は、火災時の燃焼領域の延長方向への広がり(車輛の延焼拡大)を考慮し隣接する二つの開口部を結ぶダクト要素部に相当する長さとして設定した。開口 2 箇所及び開口部間の天井板約 11m は、火源条件として最高温度に曝され、火源から遠ざかるに従って図-5 に示す延長方向の距離減衰する火炎ならびに高温の煙層に曝されると仮定した。

5. 管路網解析の検討ケース

天井ダクト内はトンネル内換気の運転方式、即ち、ダクト内の換気量、開口からの吸い込み空気量、開口面積とトンネル本体の火災時の排煙方式(自然換気方式、縦流機械換気方式等)および火源位置と吸い込み開口位置の組合せにより温度分布が異なってくる。

本検討では、トンネル延長方向に対する火源位置が、どのようにダクト内の温度に影響を与えるのかを確認するために、排気ダクト内風量が最も少ない位置であるダクト上流端のNo. 2要素、トンネルのほぼ中間点であるNo. 31要素、および排気ダクト内風量が最も多い位置であるダクト下流端のNo. 61要素の3地点でそれぞれ事故が発生した

表-3 使用した材料の熱定数等

材料名	厚さ(r) (mm)	分割数	熱伝導率(λ) (kW/m/°C)	比熱(C) (kJ/kg/°C)	密度(ρ) (kg/m³)
コンクリート板	100mm	6	0.0015	0.921	2300
耐火板	27mm	6	0.00020	1.042	950
RC セグメント	550mm	12	0.0015	0.921	2300
土壌領域	1.0m	11	0.00189	1.549	2080

ものと仮定し検討を行った。また、車道空間とダクト空間を区画する天井板の材質が、ダクト内の温度温度分布へ及ぼす影響を把握するために、コンクリート板と耐火板の2種類の材料で検討を行った。表-3に解析に使用した材料の熱定数等を示す。

6. 管路網解析の解析結果

(1) 火源位置による影響

トンネル延長方向での火源位置の影響を確認するために、No. 2, No. 31, No. 61 各要素に火源があるケースにて、火源近傍にある開口部直上の RC セグメント表面温度時間履歴を図-8 に示す。ここで天井板材質は、耐火板としている。No. 2 要素に火源がある場合、RC セグメント表面温度は、100MW の発熱速度が終了する約 1 時間後に 233℃と最も高い表面温度を示す。これは、最も上流にある No. 2 開口のダクト内換気流量が、他の火源位置よりも少ないため、流入した高温煙が十分に希釈されないためである。

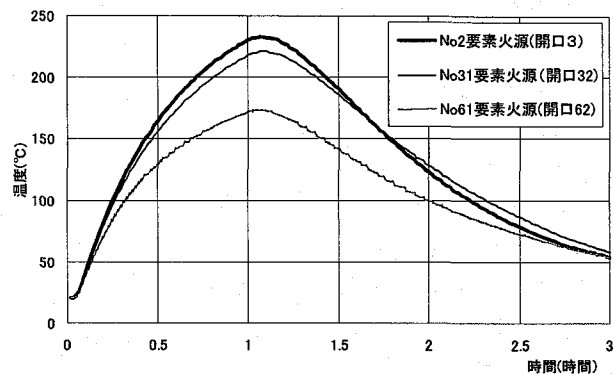


図-8 火源位置での RC セグメント表面温度時間履歴
(耐火板、開口部直上)

(2) 天井板の種類による影響

図-9に火源近傍にある開口部周辺の天井板表面(ダクト側)温度時間履歴について、天井板材質別に示す。比較検討を目的として、熱伝導率が大きく熱容量が小さい天井板(仮想区画)を仮定し、図中に示している。天井版の熱的な重みが小さい材料順、すなわち、仮想区画、耐火板、コンクリート板の順に、図-2に示す発熱速度時間曲線に基づく温度時間変化に追随している。

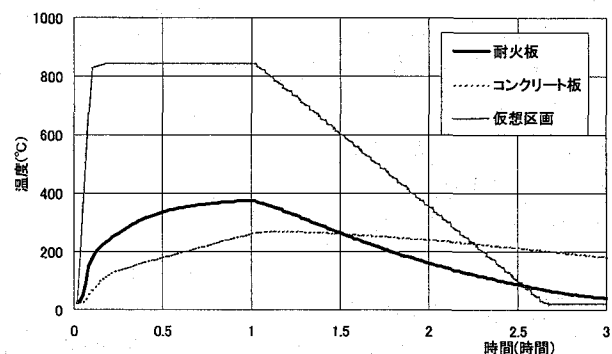


図-9 天井板材質による影響
(No.2 要素火源、開口 3 の天井板ダクト側表面温度)

コンクリート板は、3種類の中では最も「熱的に重い」材料であるため、発熱速度時間曲線に基づく温度時間変化に比べて、ダクト側表面温度は緩やかで、かつ低い最高温度を示した。一方、耐火板は、熱抵抗がコンクリート板と比べ大きいものの、厚さが薄いことから「熱的に軽い」材料であるため、最高温度は高くなるが、車道空間温度が低下すると、それに追随し急速に低下する。

コンクリート板と耐火板の熱定数を比較すると、耐火板の方が約2倍の熱抵抗を有する。熱の供給が時間経過に

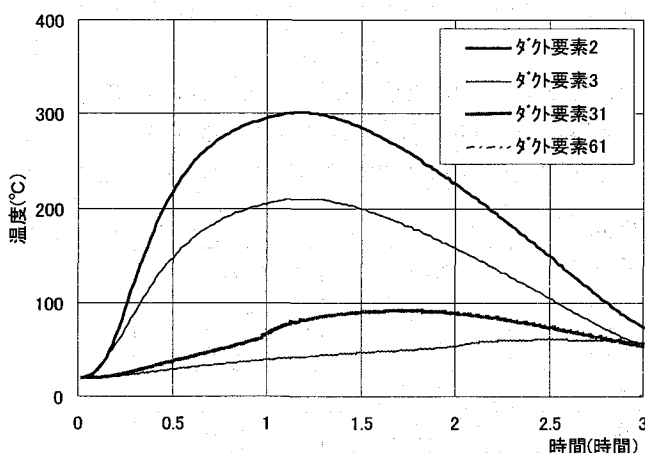


図-10 一般部天井板表面温度の時間履歴

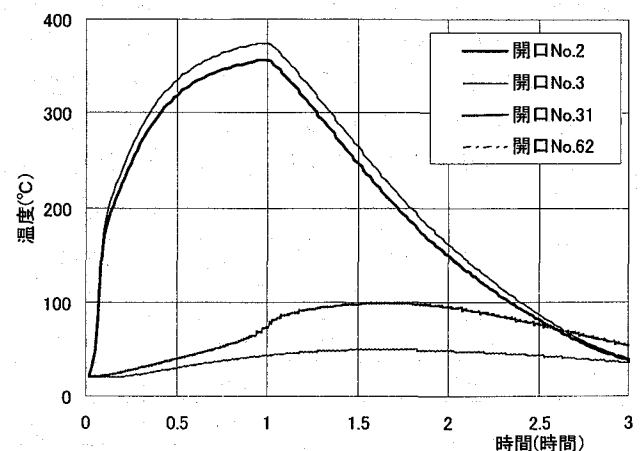


図-11 開口部周辺天井板表面温度の時間履歴

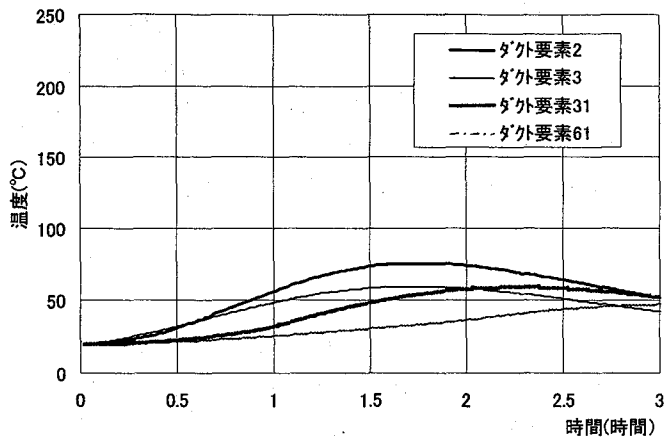


図-12 一般部 RC セグメント表面温度の時間履歴

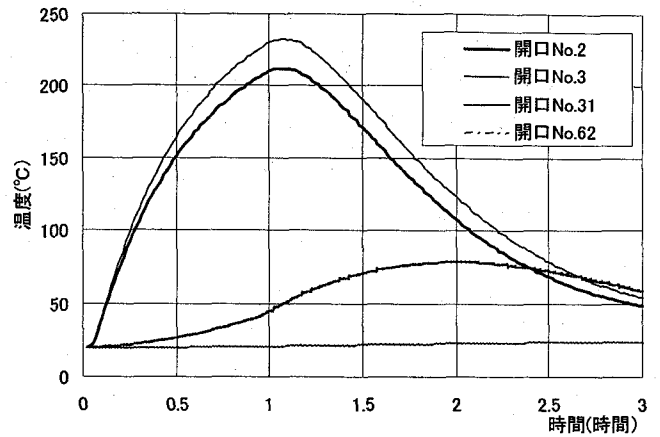


図-13 開口部周辺 RC セグメント表面温度の時間履歴

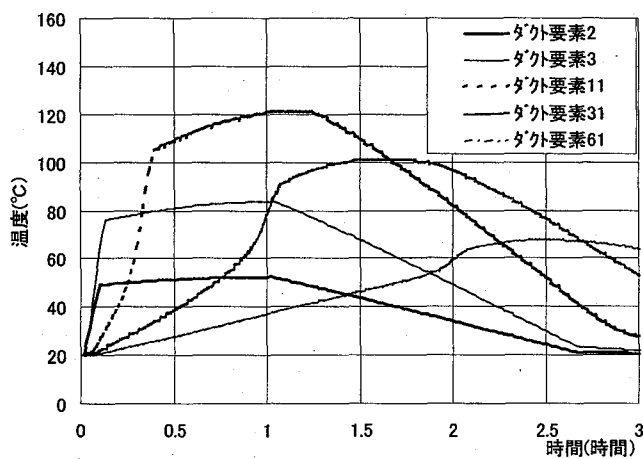


図-14 一般部平均空気温度の時間履歴

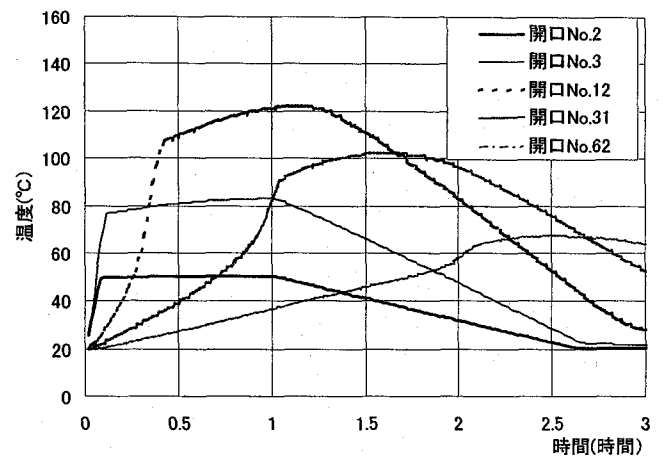


図-15 開口部周辺平均空気温度の時間履歴

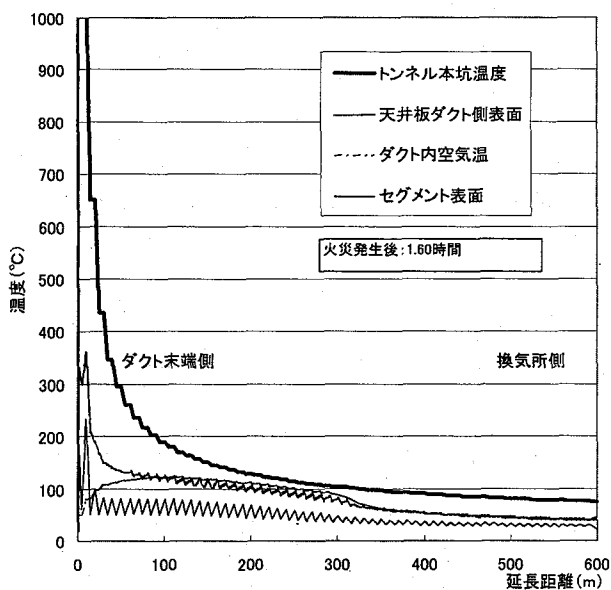


図-16 RC セグメント最高温度呈示時の
ダクト延長方向温度分布

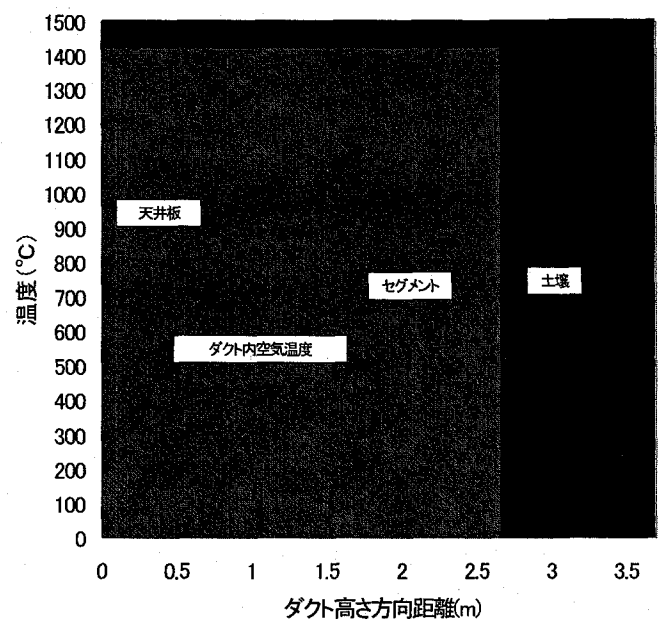


図-17 RC セグメント最高温度呈示時の
高さ方向断面温度分布

対し定常の場合、ダクト側の表面温度は耐火板の方が低くなると推定される。一方で、熱容量に着目すると、コンクリート板の方が耐火板と比較し約2倍大きいため、コンクリート板ダクト側表面温度は、耐火板の結果と比較して緩やかな温度上昇を示している。車道空間の空気温度が、最高温度である1200℃を長時間に渡り持続すれば、コンクリート板のダクト側表面温度も最高温度まで上昇するが、図-2に示すように、1時間後に車道空間温度が減少に転ずるため、コンクリート板のダクト側表面温度の最高温度は、耐火板のそれよりも低い温度となったと考えられる。また、コンクリート板の温度減少は、耐火板よりも緩やかであり、長期間にわたって高い温度を示したものと推定される。

(3) その他の知見

図-10～15に一般部と開口部周辺に分けてダクト側天井板表面温、RCセグメント表面温度、ダクト内の平均空気温度を示す。なお、この解析結果は、天井板材料として耐火板を使用し、火源位置をダクト要素No. 2直下に設置した解析結果である。図-10, 12, 14に示すように、火源からの放射の影響が小さい一般部では、天井板、内部空気、RCセグメントの順に温度が高くなっている。その一方で図-11, 13, 15に示すように、放射の影響が大きいと考えられる開口部周辺は、天井材、RCセグメント、内部空気の順に温度が高くなっている。また、開口部周辺(図-11)では、開口からの直接の放射や、火炎及び高温煙層からの熱放射の影響で、火源の温度変化に敏感に追従するが、一般部(図-10)では、壁面部の熱的な重みの影響から緩やかな温度変化を示している。

図-14, 15に示すように、火源直上のダクト内平均空気温度は、最大発熱速度時(100MW)においても約80℃程度であり、風下側約100mで120℃の最高温度となる。トンネル軸方向の流れを持つダクト内の空気は、火源近傍の開口、および天井板から熱が連続的に供給されるが、一方でダクトを取り巻く壁面(セグメント)へ熱が放出される。このような熱の授受に加えて、火源より風上側のダクト内の空気は、給気温度が低く(20℃)、また換気空気量が多いことから、火源直上ではなく風下側において最高温度を示したものと推定される。

RCセグメント表面温度が、最高温度に達した時の車道空間、天井板、RCセグメント表面、およびダクト内空気層のトンネル延長方向の温度分布を図-16に示す。延長方向でダクトを取り巻く温度上昇が高い領域としては、火源領域に隣接する開口部周辺であり、その領域の火源直上の天井板、およびRCセグメント表面温度が200～300℃の最高温度を示した。一方、他の開口部では温度上昇は低い値を示した。RCセグメントが最高温度を呈示した時のダクトの高さ方向(トンネル円周方向)の温度分布を図-17に示す。RCセグメント表層部は最高温度で233℃となるが、RCセグメント内部温度は50℃以下である。RCセグメントは、表面から5層(225mm)程度までしか温度上昇は見られないこと、また、RCセグメント土壌側端部の温度は解析時間内において平常時の温度を保っていることから、解析の条件として土壌領域1mをモデル化したことは、解析範囲としては妥当な設定であると考えられる。

7. 火災プルームによる影響の解析結果

管路網解析による結果は空気の流れに沿って一様に変化する条件で解析している。そこで、開口部上部のRCセグメントに対する火災プルームの影響として式(8)、式(9)を用いて、開口部を通してダクト内に侵入する火災プルームの影響を検討した。

ダクト空間内に最も火災プルームが発達するのは火源直上の開口部である。直上開口部でダクト内に侵入した火災プルームは約58度傾斜し、火炎長さは約1mとなった。この結果から、火炎(先端境界部で約350℃程度)はRCセグメントクラウン部に接触しないと推定される。

式(7)より開口上部のRCセグメント近傍では表-4に示すようにダクト内空気温度より最大で20℃の上昇温度と計算された。仮に気流の乱れにより、RCセグメントにプルームが接触したとしても、セグメントの表面温度は250℃程度と推定される。

表-4 火災プルームの影響の検討結果

開口 No.	セグメント 表面温[℃]	空気上昇 温度[℃]	合計値 [℃]	許容値 [℃]	判定
2	212	19	231	350℃	OK
3	233	21	254		OK
4	99	18	117		OK
5	83	15	98		OK

8. RCセグメントの検証

管路網解析による結果に火災プルームの影響を加味した場合でもセグメント表面の最高温度は約250℃であり、コンクリートの強度が著しく低下する温度の350℃以下であった。

これらの結果から、図-18に示すように、火災の際に熱による天井板の崩落を防止し、ダクトとしての機能を確保可能な隔壁として、鋼殻等に適用され実績のある耐火パネル（厚さ27mm）を天井板の材料として採用し、セグメントボルトに支持された鋼材により耐火パネルを吊り下げる構造とした。また、RCセグメントに対しては、耐火吹付け等の耐火構造は必要がないものと判断した。

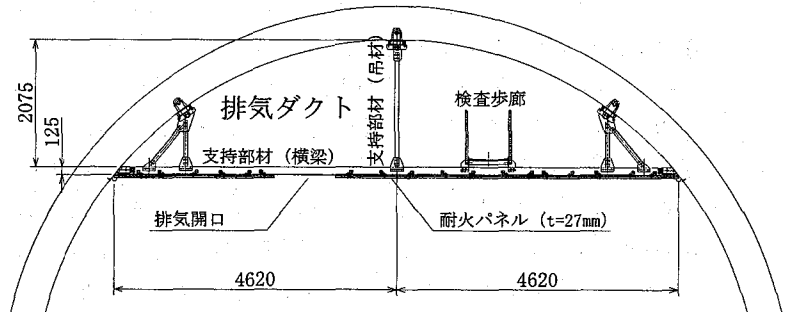


図-18 天井板（耐火パネル仕様）

9. おわりに

天井板を有するシールドトンネルにおいて火災事故が発生した時、車道空間での温度上昇に強く影響を受ける天井板とクラウン部セグメントに仕切られた排気ダクトを構成するRCセグメント部の耐火検証方法の提案を行った。検討対象は末端風速が20m/sと高速になり数値解析的に困難さが伴うもので、管路網解析により熱の流動をマクロ的に把握し、さらにダクト開口からの火災プルームの影響を加味することにより排気ダクトに接するRCセグメントの温度性状を求めた。

RABT曲線相当の火災を想定した場合には天井板の裏面温度は最高で約375℃になるが、RCセグメント部表面はコンクリートの強度が著しく低下する温度の350℃以下であり、耐火性能を有するものと判断される。

謝辞: 本解析の実施にあたり首都高速道路株式会社石戸谷淳氏および鹿島建設東京土木支店中村康彦氏の多大な協力を頂いたことに感謝の意を表します。

記号

A_T : 断面積[m²] C : 比熱[kW・h/kg・K], L : 節点間のダクト長さ[m], q : 発熱速度[kW], r : ダクト半径方向長さ[m], r_0 : ダクト半径[m], r_2 : ダクト中心から半径方向のRCセグメント壁と土壌の接する距離[m], S : 周長[m], t : 時間[h], U : 速度[m/s], V : 体積[m³], x : トンネル長手方向長さ[m], α : 対流熱伝達率[kW/m²・K], ρ : 密度[kg/m³], θ : 温度[K], λ : 熱伝導率[kW/m・K], $C_b=5.67 \cdot 10^{-11}$ kW/m²/K⁴: ステファンボルツマン係数, ε : 火災の放射率 (黒体=1.0), $\varepsilon_i, \varepsilon_j$: 天井板, RCセグメントの放射率[-], Φ : 壁面に対する開口もしくは火災・高温煙の形態係数[-], $DD1=D2^{3/2}/D1^{1/2}$: 修正火源径[m], $D1$: トンネル長手方向の火源長さ[m], $D2$: トンネル短手方向の火源長さ[m], θ : 火災傾斜[rad], $Fr=U^2/(gH)$, b : ダクト開口幅[m]

添字

方程式の変数の添え字は、以下のとおり、それぞれ場所や物質を示す変数であることを表す。例えば、 θ_{ts} はダクト空間の空気温度であり、 θ_{ts} はダクト壁面の温度を表す。

a : 空気, $c1$: 天井板, $c2$: RCセグメント, m : ダクト内平均空気温度に対する値, n : トンネル要素の入口温度に対する値, R : 岩盤, s : 壁面, T : ダクト, f : 火災および高温煙, i, j : 天井板もしくはRCセグメント

参考文献

- 1) 川田成彦, 伊藤崇法, 岡野孝司; 「防災・災害復旧 首都高速道路中央環状新宿線のトンネル防災概要」, 建設の施工企画, No. 690, pp. 54-59, 2007
- 2) 王 謙, 川端信義, 石川拓司; 「トンネル火災時の熱気流の遡上を阻止する臨界縦流風速」, 日本機械学会論文集

(B編), vol.67, No.656, pp. 911-918, 2001

- 3)佐藤博臣, 栗岡 均, 今関 修, 田中 太:「CFD による散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, pp.69-78, 2004
- 4)今関 修, 栗岡 均, 天野玲子, 岡 泰資:「管路網による地下空間火災の性状予測」, 地下空間シンポジウム論文・報告集(日本土木学会), vol. 11, pp.41-49, 2006
- 5)渡辺要:「建築計画原論Ⅱ」, 丸善株式会社, p.64, 1999
- 6)栗岡 均, 岡 泰資, 佐藤博臣, 桑名秀明:「トンネル火災時における天井ジェットの温度減衰特性」, 地下空間シンポジウム論文・報告集(日本土木学会), vol. 5, pp.75-84, 2000
- 7)岡 泰資, 栗岡 均, 佐藤博臣, 小川輝繁:「トンネル断面形状および火源形状が火源近傍火災性状に与える影響について」, 地下空間シンポジウム論文・報告集(日本土木学会), vol. 9, pp.19-28, 2004
- 8)栗岡 均, 岡 泰資, 滝川慎一, 今関 修:「トンネル空間の火炎形状について」, 地下空間シンポジウム論文・報告集(日本土木学会), vol. 10, pp.31-40, 2005