

トンネル内の区画化による煙の挙動に関する解析的考察

独立行政法人土木研究所 真下 英人 砂金 伸治 日下 敦

1. はじめに

近年、海外の長大トンネルにおいて大規模な火災事故が相次いで発生しており、これらの事故からの教訓として火災発生直後におけるトンネル利用者に対する避難環境の確保の重要性が再認識されている。避難環境を確保するための最も確実な方法としては、トンネル本線とは別に避難坑を設置する方法が挙げられるが、建設コストが高いため、より経済的に避難通路を設置する方法が求められている。

本研究では、縦流換気方式が採用される対面通行のトンネルを対象に、トンネル本線内に隔壁を設置することにより区画化を行い、避難通路として利用した場合のトンネル内火災時における煙の挙動を解析的に検討した。

2. 解析条件

図-1 に解析の対象としたトンネル断面を示す。トンネルの延長は1000m程度を想定した。また、隔壁には開口部を設け、その形状は幅1.2m、高さ1.9mとし、開口部の設置間隔はトンネルの縦断方向に50m毎とした。図-2 に本研究におけるトンネル内の座標系を示す。縦断方向に x 軸、横断方向に y 軸、高さ方向に z 軸を仮定し、火災が発生した点を原点とした。

表-1 に解析ケースを示す。解析ケースは合計7 ケースである。ケース1 は基本的なケースとし、ケース2 は縦断勾配の影響、ケース3 および4 は、火災が発生した時点でトンネル内を走行していた車両が停止することにより交通換気力がなくなることの影響、さらにケース5, 6, 7 は隔壁の開口位置と箇所数が煙の挙動に与える影響を把握するものである。

火災発生後10分程度の火災初期段階の火災規模は、EUREKA データ及び国際的なレベルから30MW相当の発熱速度曲線として図-3 のように設定した。実際のシミュレーションでは、輻射等で失われる熱量を考慮し、熱気流に寄与する発熱速度を完全燃焼時総発熱量の60%と想定してシミュレーションを行った。また、交通条件としては、車両の寸法は、8トントラック程度の形状を想定して2.5m×2.7m×7mの直方体として配置し、車頭間隔10mで直列配置とした。

数値解析の解法として、速度場は4次精度中心差分、温度場は3次精度風上差分、濃度場は1次精度風上差分とした。また、境界条件としては内壁、外壁にそれぞれ熱伝達係数を与えた。モデルとしてはLESモデル(スマゴリンスキー定数=0.15~0.2)による乱流モデルを採用した。

煙の挙動の評価は、火災初期段階の10分間程度を対象に、避難にあたっての指標として煙濃度に着目し、煙濃度は建物内を熟知している者が、火災等により避難する場合の一般的な目安となっているCs濃度0.4程度を避難するための限界の目安として評価した。

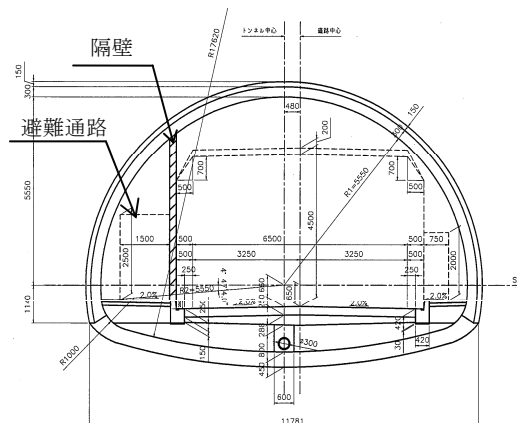


図-1 解析対象断面

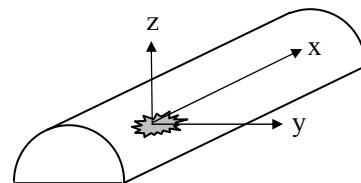


図-2 座標系の設定

表-1 解析ケース

ケース	縦断勾配	縦流風速	開口の状況
1	0%	0m/s	全開口
2	3%	2m/s	全開口
3	0%	3.2m/s→0m/s	全開口
4	3%	4.4m/s→0m/s	全開口
5	3%	2m/s	火点から650m
6	3%	2m/s	火点から350, 400, 450m
7	3%	2m/s	火点から400~750mで50m間隔

キーワード：トンネル、火災、非常用施設、数値解析

〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 TEL：029-879-6791

3. 解析結果

図-4 にケース 1 の結果として、火災発生 10 分後における、 $y=0.5$ の断面での煙の挙動を示す。Cs 濃度 0.4 の煙は路面から 1.5m の高さまでには降下せず、避難通路にも煙は進入しない結果となった。

図-5 にケース 2 の結果として、火災発生 7 分後における、 $y=0$ の断面での煙の挙動を示す。なお、トンネル内の風は図-5 中の左から右に向かって吹いている。7 分後以降、火点から 500m 離れた下流側区間において、煙の降下が始まった。また、図-6 にケース 2 の 7 分後の $x=550$ の断面における解析結果を示す。これより、隔壁の開口部からの煙の流入が確認されることが分かる。ケース 1 およびケース 2 の比較から、縦断勾配の存在とトンネル内の坑内風速の存在によって、隔壁で隔てた避難通路側に煙が流入する可能性があることが分かる。

次に、ケース 3 および 4 として、火災が発生した時点で交通換気力がなくなることを模擬したケースで煙の挙動を検討した。縦断勾配のないケース 3 については、ケース 1 と同様に煙の降下は見られなかった。図-7 にケース 4 の 6 分後の解析結果を示す。ケース 4 については、火災発生 6 分後以降に火点から 350m 離れた下流側区間において、煙の降下および隔壁の開口部から避難通路への煙の流入が確認された。以上のケース 2 およびケース 4 の結果から、縦断勾配の存在が煙の挙動に影響を及ぼす可能性が高いことが分かる。

ケース 1~4 は、隔壁の開口がすべての部分でなされていることを前提とした解析である。これらの結果より、縦断勾配が 3% の場合では、煙の降下が火点より 300~500m 程度離れたところで発生し、開口部から避難通路に煙が流入する可能性が高いことが明らかになった。そこで、ケース 5, 6 および 7 では、隔壁の開口位置を火点から 650m の 1 箇所、350~450m の 3 箇所および 400~750m の 8 箇所として解析を実施した。ケース 5 では避難通路内に煙の流入が見られなかったが、ケース 6 (図-8) では火災発生から 6 分後に避難通路内に煙の流入が確認された。しかし、解析を継続したところ、8 分後からは逆に避難通路側から車道側に煙が逆流する結果が見られた。これは車道内の熱の移動により圧力が低下し、相対的に避難通路側の圧力が高くなったため煙が逆流したものと考えられる。また、ケース 7 では、ケース 6 と同様に火災発生から 6 分後に避難通路内に煙が流入し、一部の区間で避難環境が阻害される現象が見られたが、10 分後から車道側に煙が逆流する現象が見られた。

4. おわりに

煙の挙動に関する数値解析の結果、縦断勾配がない場合は避難通路への煙の流入は認められなかったが、縦断勾配が 3% 程度で煙の降下が見られる区間においてすべての開口部が開いた状態の場合には、避難通路内に流入する現象が発生した。しかし、縦断勾配が 3% の場合でも開いている開口部が限定されていれば煙が連続的に避難通路内に進入する可能性は低いことが明らかとなった。今後、実トンネルへの適用のためには、実大規模の実験を実施して解析結果を検証するとともに、煙の進入をさらに抑制する方法を検討する必要がある。

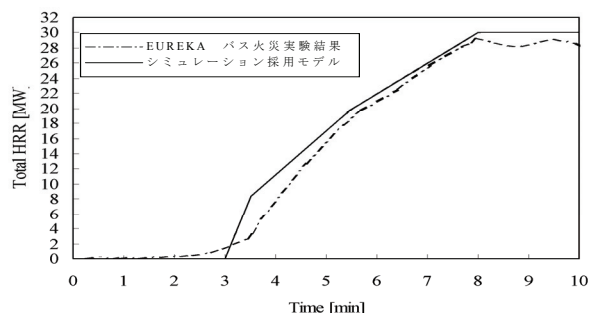


図-3 発熱速度曲線

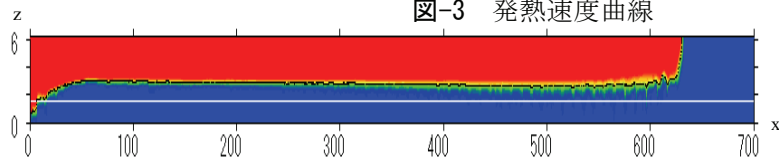


図-4 解析結果(ケース 1, 経過時間 10 分, $y=0.5$)

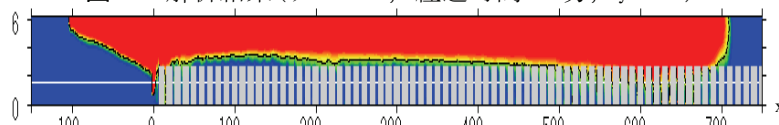


図-5 解析結果(ケース 2, 経過時間 7 分, $y=0$)

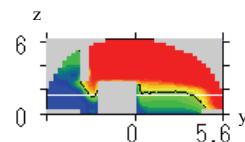


図-6 解析結果
(ケース 2,
経過時間 7 分,
 $x=550$)

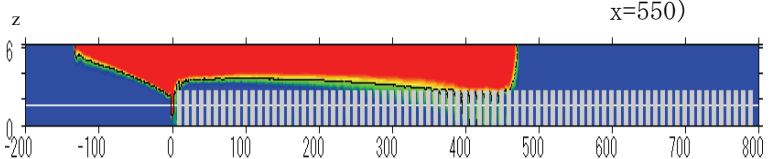


図-7 解析結果(ケース 4, 経過時間 6 分, $y=0$)

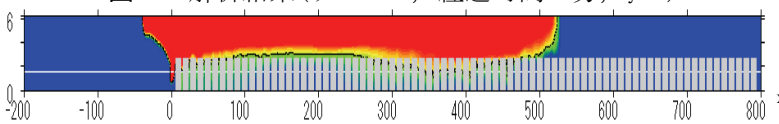


図-8 解析結果(ケース 6, 経過時間 6 分, $y=0$)