

道路トンネル本線内に設置された避難通路における トンネル火災時の煙の挙動に関する研究

Study on smoke behavior during fire in evacuation passage placed in main tunnel

日下 敦¹・真下 英人¹・砂金 伸治²

Atsushi KUSAKA・Hideto MASHIMO・Nobuharu ISAGO

In recent years, large-scale fire accidents in long tunnels have occurred successively in abroad, and they have a new appreciation of the importance of securing evacuation environment to the tunnel users immediately after the outbreak of a fire from these accidents. Installation of an evacuation passage in tunnel is needed for securing evacuation environment certainly. However, as the general method of preparing an evacuation tunnel apart from the main tube has high construction cost, the applicable tunnel is limited and the method of securing an evacuation passage more economically is required. In this study, the method of excavating a little larger section and separating its section for evacuation space by setting a wall, or that of setting a wall between a main tunnel and a pedestrian lane were proposed as a method of offering an evacuation passage economically. The influence of smoke behavior on escape environment in evacuation passage in case of fire was also investigated by numerical analysis simulating smoke behavior.

Key Words: tunnel, fire, emergency facilities, evacuation passage, numerical analysis

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方法としては, 換気設備の運転による排煙と本線トンネルとは隔離された避難通路の設置が挙げられるが, 我が国の長大トンネルの大半で採用されている縦流換気方式の対面通行トンネルの場合は, 火災時には火災発生地点の両側に車が滞留するために初期の避難段階では煙を一方に送り出すことができず, 換気設備の運転による排煙を行うことはできない. したがって避難環境を確実に確保するには避難通路の設置が必要となるが, 一般的な方法である本線と別に避難坑を設ける方法は, 建設コストが高いため設置できるトンネルは限定されており, 経済的に避難通路を構築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長大トンネルに避難通路を経済的に構築する方法として, トンネル本線の断面を通常よりも若干大きく掘削して側方の余空間と車道との間に隔壁を設けることにより車道から分離される空間を避難通路として活用する場合, あるいは歩道が設置されるトンネルについては歩道と車道の間に隔壁を設けて歩道を避難通路として活用する場合の, トンネル内火災時における煙の挙動に関して数値解析により検討を行った.

キーワード: トンネル, 火災, 非常用施設, 避難通路, 数値解析

1 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)

2 元 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (トンネル)

2. 解析の目的と諸条件

(1) 解析の目的

本研究では、隔壁を有するトンネル形状において、火災時の熱および煙がどのように挙動するか、避難通路と本線の間に設けられた避難扉付近の避難環境はどうかについて把握することを目的として、トンネル火災を模擬した有限差分法による数値解析を実施した。

(2) 解析モデル

解析に用いたトンネルの断面形状を図-1に示す。トンネル延長は1000 m程度を想定し、避難通路幅は1.5 m、避難扉の形状は幅1.2 m×高さ1.9 mの矩形とし、避難通路内への煙の進入状況を把握するために避難扉の設置間隔は50 mとした。交通条件としては、8トン程度のトラックが縦列に停止した場合を想定し、2.5 m×2.7 m×7.0 mの直方体を車両間隔10 mで直列に配置した。本稿における座標系は図-2のとおりで、縦断方向にx軸、横断方向にy軸、高さ方向にz軸をとり、火災が発生した点を原点とした。

(3) 解析ケース

解析は表-1に示す7ケースで行った。ケース1は基本ケースとし、ケース2は縦断勾配と縦流風速の影響を把握するために実施したものである。ケース3および4については、トンネル内を車両が走行し、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を把握するためのものである。また、ケース5～7は開口している避難扉の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。なお、本研究においては、避難通路内へ煙が進入する恐れがある場合の煙の拡散防止策として、避難通路内に一定区間ごとに防煙垂れ壁を設置することを想定し、ケース5, 6において、その効果についても併せて検討を行った。

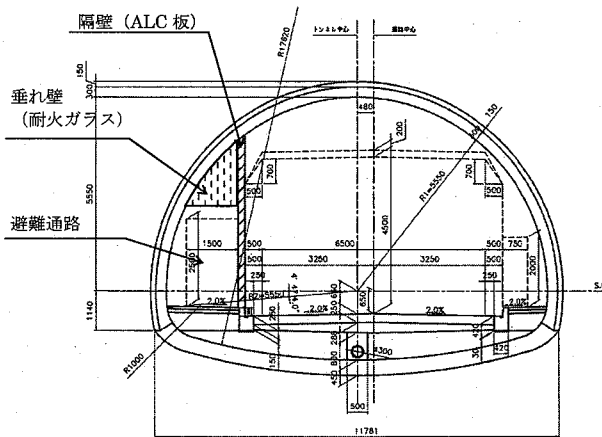


図-1 解析対象断面

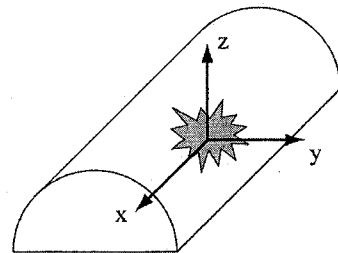


図-2 座標系の設定

表-1 検討ケース

ケース	縦断勾配	縦流風速	避難扉の開口	垂れ壁
1	0%	0 m/s	全開口	無
2	3%	2 m/s	全開口	無
3	0%	3.2 m/s → 0 m/s	全開口	無
4	3%	4.4 m/s → 0 m/s	全開口	無
5	3%	2 m/s	火点から 650m	有
6	3%	2 m/s	火点から 350, 400, 450 m	有
7	3%	2 m/s	火点から 400～700 m で 50 m 間隔	無

(4) 解析条件

火災発生後 10 分程度の火災初期段階の火災規模は、EUREKA データおよび国際的なレベルから 30 MW 相当の発熱速度曲線として図-3 のように設定した。なお、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。

解法としては、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。また乱流モデルを採用し、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）を採用した。

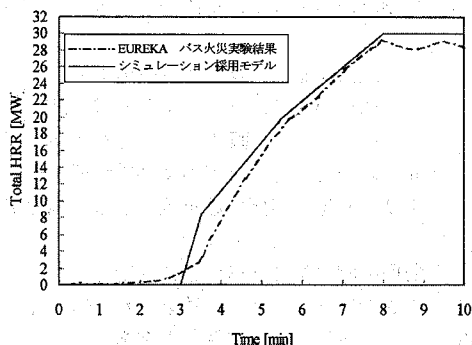


図-3 発熱速度曲線

(5) 評価指標

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、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 を避難するための限界の目安として設定した。

3. 解析結果

(1) 縦断勾配の影響

初めにケース 1 として、縦流風速 0 m/s、勾配 0% の基本的条件で解析を実施したが、火災発生 10 分以内に Cs 濃度 0.4 の煙は避難者の視点の高さと想定している路面から 1.5 m の高さに降下せず、避難通路にも煙はほとんど進入しない結果となった。

次にケース 2 として縦流風速 2 m/s、勾配 3% の条件では、火災発生 7 分後に降に火点から 500 m 離れた下流側区間において、煙の降下および避難扉からの煙の流入が確認された。図-4 にケース 2 の 7 分後の解析結果として Cs 濃度の分布を示す。このことから、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は、

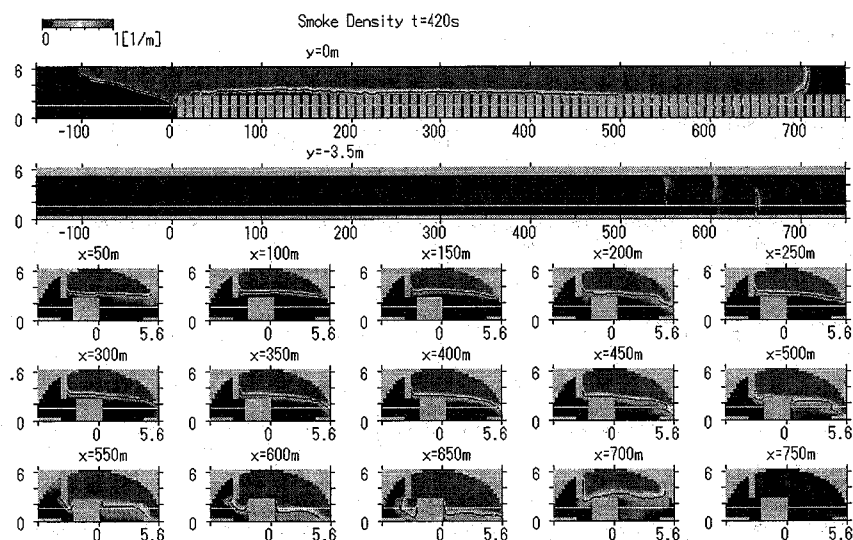


図-4 ケース 2; 7 分後の Cs 濃度

避難通路側に煙が流入する可能性があることが分かる。

(2) 車両停止による交通換気力消失の影響

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。

ケース4については、図-5に6分後の解析結果を示すが、火災発生6分後以降に火点から350 m離れた下流側区間において、煙の降下および避難扉からの煙の流入が確認された。これらのケースから、縦断勾配の存在により、避難通路側に煙が流入する可能性があることが分かる。

(3) 避難扉の開口位置と箇所数の影響

ケース5では、ケース2の結果より、煙の降下が500 m付近で見られたことから、扉開口位置を火点から650 mの1箇所のみとして解析を実施するとともに、垂れ壁の効果を検討するために、避難通路内に垂れ壁を設置した。その結果を図-6に示すが、開口部を1箇所に限定することにより、熱や煙の移動に伴って車道

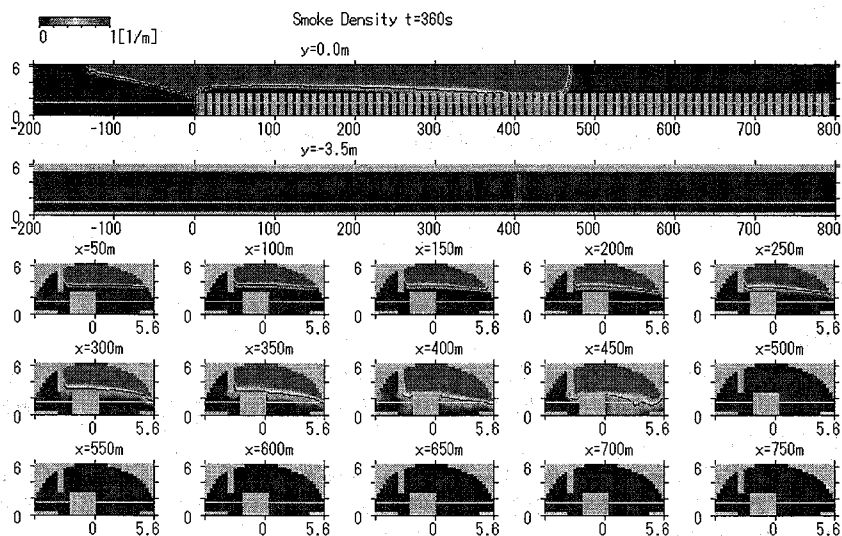


図-5 ケース4; 6分後のCs濃度

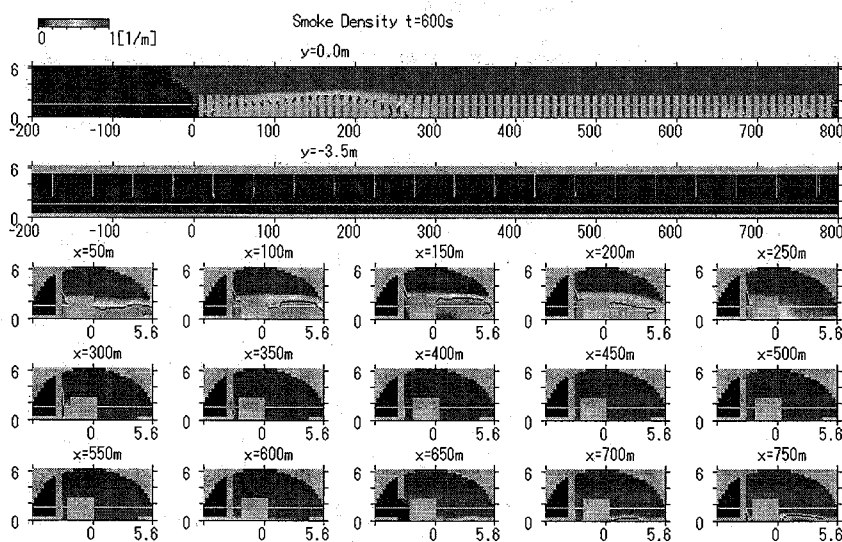


図-6 ケース5; 10分後のCs濃度

内圧力が低下し、相対的に避難通路の圧力が高くなると考えられ、避難通路内に煙の流入は見られなかった。また、避難通路内に煙の流入が見られなかったため、垂れ壁の効果は確認できなかった。

ケース5の結果を踏まえ、ケース6として、煙の降下が見られた火点から350・400・450 mの3箇所の扉を開いた解析を実施した。図-7にケース6の6分後の解析結果を示す。これより、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、図-8に示すように8分後からは逆に車道内に煙が逆流する現象が見られた。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。なお、垂れ壁の効果については、多少煙の降下は見られたものの扉から避難通路内に流入した煙の拡散を抑制していることが確認された。

さらに、ケース7として、ケース6よりも開口している避難扉の箇所数を多くし、400～700 mで50 m間隔で開口した解析を実施した。図-9にケース7の10分後の解析結果を示す。その結果、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。

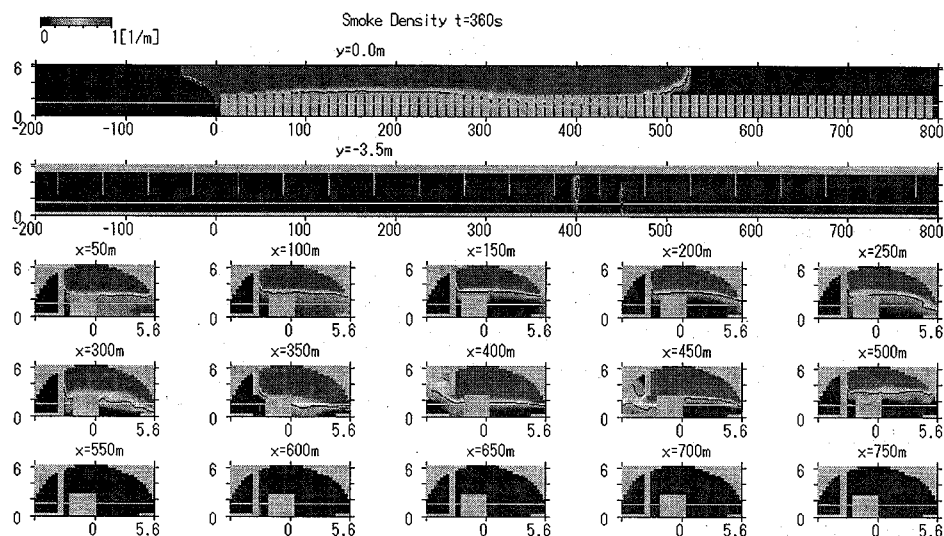


図-7 ケース6; 6分後のCs濃度

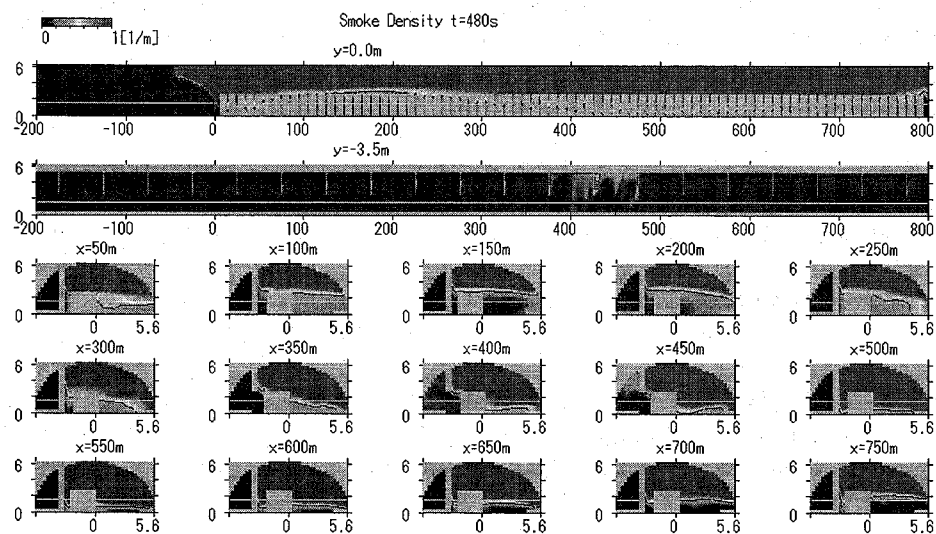


図-8 ケース6; 8分後のCs濃度

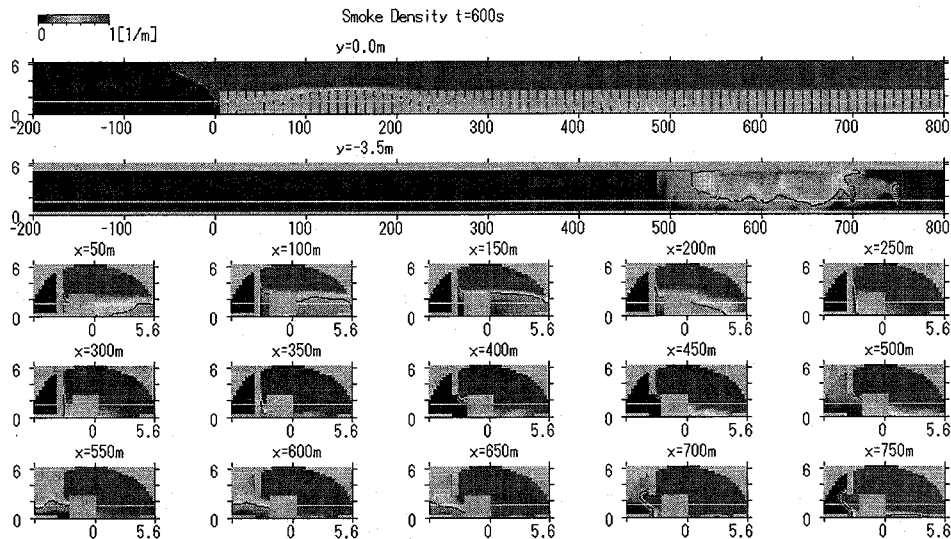


図-9 ケース 7; 10 分後の Cs 濃度

(4) 解析結果のまとめ

以上の結果より、縦断勾配がない場合は避難通路への煙の流入はほとんど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避難扉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避難扉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。したがって、避難扉に短時間で自動的に閉鎖できる構造を採用すれば、煙の避難通路内への進入は避難行動の障害にならない程度に抑えることは可能になるものと考えられる。

4. 本研究により得られた成果

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数値解析により検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 火災発生時における初期の避難段階では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。
- 2) 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。
- 3) 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。

以上のことから、避難扉に短時間で自動的に閉鎖できる構造を採用することにより避難扉の開口時間の短縮化を図ることができれば、避難行動の障害にならない程度に煙の進入を抑えることは可能になるものと考えられる。

今後の課題としては、煙の挙動については、実大規模の実験等によりシミュレーション結果の検証を行うとともに、避難扉の開口時間を極力短くするための方法とその効果について検討する必要がある。また、避難通路とする区画に歩道の機能を付与する場合は、煙の挙動といったトンネル火災に対する安全性のみならず、通路の防犯性についても検討する必要がある。