

EFFECTIVENESS OF SMOKE EXTRACTION DURING A TUNNEL FIRE IN SHORT ROAD TUNNELS

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/43789

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



延長の短い道路トンネルにおける火災発生時の排煙の
有効性に関する研究

金沢大学大学院 自然科学研究科
システム創成科学専攻

三瓶 靖弘

1 概要

本論文は、延長が 500 m 以下の船底型をした都市内道路トンネルを対象に、自動車火災が発生した場合の換気施設による排煙の有効性について検討したものである。検討には煙挙動 CFD 数値シミュレーションと避難数値シミュレーションを用いた。トンネル内に 1.2 m/s の自然風を有していると煙が拡がり、換気施設による排煙を行わない場合は 10 人を超える利用者が煙に暴露され避難が困難な状況となる。一方、換気施設による排煙を行った場合、自然風が存在する状況下においても $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以上の排煙量を確保すると煙の拡がりには抑制され、煙に暴露される利用者は 3 人から 0 人程度に減少した。このことから、延長が短い場合でも利用者の避難時の安全性を確保するためには、換気施設による排煙が必要であることを確認した。また、トンネル内にバスが存在する場合は、乗車人数が多いことから避難に時間を要するため 20 人から 50 人程度の煙暴露者が発生するケースが見られたが、換気施設による排煙量を $0.5 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以上とすることで、煙に暴露される利用者がほぼ 0 人となった。

2 研究の背景と目的

都市部の道路トンネルは、交通量が多いためトンネルの延長によらず換気施設が設置されている。換気施設は自動車排出ガス等の排出、火災時の排煙の 2 つの目的で設置されている。これら換気施設の規模や方式は、自動車排出ガス等の排出に必要な規模で決定されているが、近年の自動車排出ガス規制の強化により自動車排出ガス等の排出の必要性が無くなりつつあることから、換気施設は縮小されたり撤去されることになる。このような状況のもと、本研究では、換気施設を撤去しても火災時に利用者の安全性を確保することは可能であるか、また、排煙が有効であるとされた場合、どの程度の排煙を行うことが利用者の安全につながるのかを目的に検討を行ったものである。

3 方法及び条件

道路トンネルの火災時における安全性の評価を行うためには、火災発生後の時間変化に伴う煙の挙動とトンネル利用者の避難状況の関係を把握することが必要である。本研究における煙挙動解析は、実大実験結果との比較検証が行われており、道路トンネル火災時の煙の挙動を評価する際、本邦で最も利用されているモデルである乱流モデルに LES (Large Eddy Simulation) を用いた三次元シミュレーション Fireles を利用した。また、トンネル利用者の避難状況の把握については一次元避難シミュレーションを利用する。このモデルは、時間の経過とともに避難する利用者の数を把握することが可能である。これら双方のモデルを連携させ、煙の影響によりあるしきい値を超えた場合に避難に支障が出るとモデル化し、トンネル利用者の避難の状況をトンネル長さ軸と時間軸によるコンター図で表現し、ある一定濃度の煙に暴露される人数（煙暴露者数）によってトンネル火災安全性の評価をする手法を活用し、10 分経過時の煙暴露者数によって評価した。

4 条件

本研究における条件は以下のとおりである.

4-1 構造等

- ・都市内トンネル（船底型, 2 車線 1 方通行）.
- ・トンネル延長 450 m（入口区間長 150 m 縦断勾配 -4%, 中央区間長 150 m 縦断勾配 0%, 出口区間長 150 m 縦断勾配 4%）, 断面形状は矩形（幅 8.5 m, 高さ 4.5 m）である.

4-2 解析領域

- ・トンネル入口を原点として計算格子幅を x 方向 0.333 m, y 方向 0.307 m, z 方向 0.236 m, 計算格子分割数を x 方向 1429, y 方向 43, z 方向 29 とした.
- ・トンネル両坑口間の圧力差を起因とするトンネル内の自然風を与えるため, 解析領域に坑口外部の大気領域を含むものとした.

4-3 交通条件

- ・都市内トンネルをモデルとしているため, トンネル内全域において渋滞を想定.
- ・大型車の混入率は 10% とした.
- ・トンネル内の利用者人数に影響を考慮するため, 大型バスの有無を設定.
- ・平均乗車人数は小型車 1.4 人, 大型車 1.3 人, バス 50 人/台とした.
- ・利用者総数はバス無の場合, 平均 178.8 人, バス有の場合, 平均 272.8 人である.

4-4 発災時の条件

- ・坑口間圧力差（自然風）を 3 ケース, 0 Pa（初期縦流風速 0 m/s）, 5 Pa（0.85 m/s）, 10 Pa（1.2 m/s）与えた. 風向は, 入口から出口方向で, 道路トンネルでは常時発生している風速である.
- ・発災地点は 2 ケースとし, 入口から 225 m（トンネル中央部）, 入口から 130 m（下り勾配部）とした.
- ・発災車両は大型車 1 台とし, 発熱速度を対流成分 18 MW（有効成分 30 MW）とした.
- ・解析時間は 600 秒とした.

4-5 避難行動のモデル

- ・利用者が暴露される煙の条件は, 煙濃度 (C_s 濃度) を 0.4m^{-1} かつ路面からの煙の高さ 1.5m とした.
- ・避難のタイミングは C_s 濃度 0.4m^{-1} の煙が頭上に達した, 又は他の避難者を確認した場合とした.
- ・避難準備時間として, 5 から 15 秒後に避難行動を開始するものとし, 平均歩行速度は 1.5 m/s とした.
- ・避難シミュレーションは, 各ケースに対し 1,000 回計算し 10 分経過時の平均煙暴露者数を算出した.

4-6 排煙

- ・排煙はトンネル全線を排気したケースを想定し、天井部から 10m 間隔設置された排煙口より排煙を行うものとした。
- ・排煙量は、 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ とした。
- ・火災発生の 60 秒前に事故等が発生、火災発生時を 0 秒、火災の感知及びトンネル換気施設の起動開始時間を 120 秒、最大排煙量となるまでの時間を 180 秒とした。

4-7 研究の進め方

本研究では、以下に従い検討を行った。

(1)排煙をしない自然換気状態のトンネルの安全性について検討

自然風の影響を検証、排煙なし、バスなしのケース

(2)排煙を行った場合の効果（バスが存在しない場合）について検証

自然風を考慮、段階的に排煙量を増加、バス無しのケース

(3)排煙を行った場合の効果（バスが存在する場合）について検証

自然風を考慮、段階的に排煙量を増加、バス有りのケース

5 排煙をしない自然換気状態のトンネルの安全性

(1)煙の挙動

発災地点が 225 m の場合の煙の挙動は以下のとおりであった。

- ・ 0 Pa の場合、両坑口に向かい対称に拡がる。
- ・ 5 Pa、10 Pa と坑口間圧力差が増えるに従い、煙はトンネルの出口方向に流される。

発災地点が 130 m の場合の煙の挙動は以下のとおりであった。

- ・ 0 Pa の場合、火点左側は下り勾配で入口側に煙が遡上し、火点右側は遡上の影響が強い
ためトンネル中央部で拡がり停止する。
- ・ 5 Pa、10 Pa と坑口間圧力差が増えるに従い、煙はトンネルの出口方向に流される。
- ・ 発災地点左側の煙の遡上の影響は、自然風の増加に反比例し減少してゆく。

(2)煙暴露者数の傾向

- ・ 発災地点 225 m、130 m とともに、坑口間圧力差 10 Pa で平均煙暴露者数が 10 人を超える。
- ・ 坑口間圧力差 0 Pa、5 Pa、の場合はほぼ 0 人である。

(3)まとめ

- ・ 自然換気状態のトンネルでは低風速であっても自然風が存在する場合、煙がトンネル内に拡がる。
- ・ 坑口間圧力差が 5 Pa (0.85 m/s) 以下の自然風であれば、利用者の避難環境は確保出来る。
- ・ 坑口間圧力差が 10 Pa (1.2 m/s) 以上の自然風の場合、利用者の避難環境は極端に悪化する。

- ・排煙が出来ない自然換気状態のトンネルで火災が発生した場合、低風速ではあるが 1.2 m/s 程度の自然風が存在すると利用者の安全性に重大な影響を与える。

6 排煙を行った場合の効果（バスが存在しない場合）

(1)煙の挙動

発災地点が 225 m の場合の煙の挙動は以下のとおりであった。

- ・坑口間圧力差 10 Pa の場合、排煙量 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ では自然風の影響を受け発災地点右側、トンネル出口坑口方向に拡がる。
- ・この場合、排煙により自然風が徐々に減速し出口坑口近くでは風速が 0.6 m/s 程度に低下減速し、天井に沿う熱気流の進行速度低下により、煙が路面近くに拡散しやすくなりトンネル内利用者が煙に暴露される。
- ・排煙量 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以上では、出口坑口における平均縦流風速が負になり逆流し、利用者への煙の到達時間が遅れることにより、避難が可能となる。

発災地点が 130 m の場合の煙の挙動は以下のとおりであった。

- ・坑口間圧力差が 0 Pa, 5 Pa の場合は排煙量の増加に伴い、発災地点左側で煙の遡上及び発災地点右側に流される範囲が狭くなる。
- ・坑口間圧力差が 10 Pa の場合、排煙量 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以下では排煙をしない場合と傾向は同様である。
- ・排煙量 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以上では、300 m から 350 m 付近で出口側に流されていた煙の進行が停止する。

(2)平均煙暴露者数の傾向

- ・発災地点 225 m の場合、排煙量が $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ のケースでは、排煙を行わない場合（約 14 人）に比べて 70%以上減少（約 3 人）する。
- ・発災地点 130 m の場合、排煙を行わない場合は約 10 人であるが、排煙量を $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ とすることで、ほぼ 0 人となる。
- ・坑口間圧力差 0 Pa, 5 Pa, の場合、排煙量に係らずほぼ 0 人である。
- ・排煙量を $0.1 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ では排煙を行わない場合とほぼ変わらない。

(3)まとめ

- ・排煙量 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ では、排煙の効果はほとんど見られなかった。
- ・トンネル内に 10 Pa 程度の自然風が存在する場合でも、排煙量が $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以上であれば避難環境を維持することが出来、効果的である。
- ・自然風を有する場合においても一定規模の排煙はトンネル内の安全性を確保するために有効である。

7 排煙を行った場合の効果（バスが存在する場合）

本章では、50人乗りのバスを入口坑口から100 m、出口坑口から100 mに計2台配置したケースを検討した。なお、坑口間圧力差、排煙量などの条件及び煙の挙動の傾向については前章と同様である。

(1)平均煙暴露者数の傾向

- ・発災地点225 mの場合は坑口間圧力差5 Paでバス無しの場合ほぼ0人、バス有の場合は排煙量を $0.2 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以下では20人以上である。
- ・10 Paの場合、バス無しで最大約14人、バス有では約50人程度発生している。
- ・発災地点右側にあるバス付近で暴露者数が多い。自然風で流された煙が原因である。
- ・この傾向は排煙量が $0.4 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ まで続き、30人以上の平均煙暴露者数が発生、 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ ではほぼ0人となる。
- ・発災地点130 mの場合、0 Paではバス無しではほぼ0人であったがバス有のケースでは約30人発生しており、下り勾配による煙の遡上の影響が強いものと考えられる。
- ・坑口間圧力差10 Paでは、発災地点右側のバスで40人程度の平均煙暴露者が発生しているが、排煙量を $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ とするとほぼ0人となる。

(2)まとめ

- ・バスは乗車人数が多く避難に時間を要することから、排煙を行っていても利用者の避難環境が悪化する場合がある。
- ・トンネル内にバスが存在する場合でも、排煙量を $0.5 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以上の排煙量とすると、下り勾配による煙の遡上や自然風による影響を含めて避難環境を維持することが出来、効果的である。

8 結論

- ・延長が短い道路トンネルでも、排煙をしない自然換気状態のトンネルでは、 1.2 m/s 以上の自然風を有する場合、利用者の避難環境は極端に悪化する。
- ・この 1.2 m/s 以上の自然風は通常トンネル内で発生する可能性がある自然風である。
- ・換気施設による排煙は有効であり、 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以上の排煙量とすると、トンネル内に自然風が存在する場合でも、避難環境を維持することが出来、効果的である。
- ・さらに、利用者の多いバスがトンネル内に存在する場合、 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 以上の排煙量を確保することで、利用者の避難環境を確保することが可能である。

EFFECTIVENESS OF SMOKE EXTRACTION DURING A TUNNEL FIRE IN SHORT ROAD TUNNELS

The present paper indicates that effects of smoke extraction by ventilation system in road tunnel fires, which model tunnels adopted urban U-shaped tunnels shorter than 500 m length. The investigation used smoke CFD simulation and evacuation simulation. In the case with natural ventilation velocity 1.2 m/s, the situation where it difficult for over 10 users to evacuate due to exposure by smoke occurred with no smoke extraction by ventilation facilities. Meanwhile in the case with over $0.3 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ of smoke extraction by ventilation facilities, smoke propagation can be controlled even with natural ventilation existing, the number of users exposed by smoke decreased from 3 persons to 0. Hence, it was confirmed that even in short tunnels smoke extraction by ventilation facilities was necessary to keep the users' evacuation safety in tunnel fires.

平成 27 年 8 月 4 日

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

..... 延長の短い道路トンネルにおける火災発生時の排煙の有効性に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 システム創成科学 専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{みかめ} ^{やすひろ}
三瓶 靖弘

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

..... 当該学位論文に関し、平成 27 年 8 月 4 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について検討を加え、同日の口頭発表後、第 2 回審査委員会を開催し、協議の結果以下の通り判定した。

..... 近年、自動車の環境対策が進み道路トンネルの換気設備の縮小が検討される一方で、火災時の排煙性能の低下が危惧されている。特に都市部の日常的に渋滞が発生するようなトンネルにおいては危険性が大きいと推測されるが、具体的な検討はほとんど進んでいない。本論文は、500m 程度の延長の短い都市道路トンネルを対象に、火災発生時の換気施設による排煙の有効性について、シミュレーションによって検討を行ったものである。まず、排煙をしない自然換気状態の場合の火災時の安全性について検討し、自然風速が 1.2m/s 以上（両坑口間圧力差が 10Pa 以上）になると、トンネル内の避難環境は極端に悪化することを明らかにした。排煙運転を行う場合でも、 $0.1\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 以下の排煙風量では効果はほとんどないが、 $0.3\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 以上とすることで自然風速が 1.2m/s 以上の場合でもほぼ全員が安全に避難できる避難環境を維持できることを明らかにした。さらに、利用者人数の多いバスがトンネル内に存在する場合を想定して検討を行った結果、 $0.5\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 以上の排煙風量とすることにより、安全な避難環境を提供できることを明らかにした。

..... 本論文によって示されたトンネル火災時の有効な排煙風量は、今後の道路トンネルの換気設備設計の基礎的な指針となりうるものであり、工学的な寄与が大きく、博士（工学）の学位に値するものと判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印） 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士（ 工 学 ）