

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：23201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16364

研究課題名(和文)有勾配トンネル火災における固定式垂れ壁の煙抑止効果に関する研究

研究課題名(英文)Research for smoke control effect by fixed smoke barriers in inclined tunnel fires

研究代表者

清家 美帆 (Seike, Miho)

富山県立大学・工学部・助教

研究者番号：70757244

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者はこれまで非常用設備・換気設備のない延長500m以上1000m以下の道路トンネルに対して天井に固定式の垂れ壁を設けることで、火災により発生した天井に沿って遡上する煙の抑止効果に着目し、避難安全性の向上を図るための立案を行った。そこで本研究では、平成27年度中(科研スタート支援)に製作した模型トンネルを用い縦断勾配を有する模型実験にて煙挙動の調査を行い、有勾配時の実験を可能とした。

研究成果の概要(英文)：This study investigates how smoke propagation is affected by fixing smoke barriers to the ceilings of short tunnels that lack emergency equipment, fire detectors and ventilation facilities. The arresting effect of the barriers is analysed by three-dimensional computational fluid dynamics, and an evacuation is simulated through quantitative risk assessment. Because these barriers are fixed, there is no need to install fire detectors and the activation time need not be considered. Denser smoke was found to collide with the smoke barriers and be refluxed. Consequently, the smoke accumulates upstream of the barrier and its front speed decreases. This effect becomes more pronounced as the barrier height increases, with or without longitudinal inclination of the tunnel. Some evacuees are surrounded by descending smoke close to the fixed smoke barrier, but such occurrences are rare at other locations.

研究分野：熱流体工学

キーワード：トンネル火災 煙 勾配 流体工学 避難 火災 防災 垂れ壁

1. 研究開始当初の背景

(1) EUの高速道路は延長500m以上のトンネルについて火災リスクを評価して適切に維持することになっている[1]。リスク評価において、主に使用されているのが、UPTUN:CO, 視認距離(煙), 温度, 輻射熱である[2]。

(2) 日本の規準

日本では、これら4つの要素の中でも最初に避難者に影響を与えるとして視認距離, 煙濃度によって評価を行っており, その規準値は神[3]による刺激煙の結果を参考に $C_s=0.4m^{-1}$ と決定している[4]。

(3) トンネル火災時の問題点

トンネル火災時, 煙は成層状態で遡上し, その後天井による吸熱から火源から数百m離れた地点で降下し, トンネル内に煙が充満する。トンネル火災時, 最初に避難行動に影響を与えるものは煙であり, 特に煙の移動速度が大きい場合, 避難者が煙に巻かれやすいことがわかっている[5]。

(4) 解決策

これらを解決する一つの対策としては換気(排煙)設備による煙のコントロールである。

(5) 日本の状況

日本のトンネル防災において現在の日本の規準は, 交通量とトンネル延長によってグレードを定義しており, 交通量が少ない(4000台/日以下)場合は1000m以下のトンネルには非常用設備や換気設備は設置されていない場合が多い。但し交通量が多いトンネルでは300m程度でも非常用設備および換気設備が設置されている場合もあり, 日本のトンネル防災基準は安全性に対する考え方が異なり, EUと安易に比較することはできない。しかしながら, 500m以上1000m以下のトンネル数は1329本(高速道路トンネル231本, 一般道1098本, 500m以上のトンネル2278本(500~1000mのトンネルが58%)) [6]あり, 新たに設備を導入するのは経済的に極めて困難である。

(6) 換気以外の煙の遡上, 拡散防止の設備についてその他の状況

これまで, トンネル防災に関して換気以外の煙遡上や拡散防止の設備として, Water Screen[7], Air Curtain[8], [9], Smoke Screen[10], Smoke Barrier[11], Smoke curtain[12]が提案され, 特にSmoke barrierでは煙の抑止効果に着目して避難環境がどうなるかではなくDensity Jumpの現象についての検討を行ったものである。Smoke curtainは火災感知器により自動的あるいは他動的に路面, もしくは床面から2mまで降り, 煙の遡上を抑制することを目的としており, 火災感知の時間によって逆に危険性がある可能性もあり, Smoke curtainの作動時間が非常に重要となる。本論文では固定式の垂れ壁であり, 火災感知器を必要としない, すなわち作動時間等を考慮しなくてもよい点に違いがある。

2. 研究の目的

本研究では, 天井に固定式の垂れ壁を設けることで天井に沿って遡上する煙抑止効果着目し, 煙の遡上を阻止することを目的とした固定式の垂れ壁の効果について, 煙流動CFD解析と避難シミュレーションを連成させた手法を用いて検討する。もし天井に固定式の垂れ壁を設けることで天井に沿って遡上する煙をせき止めることができれば, 比較的安価な対策となり有望である。(図1: イメージ図)

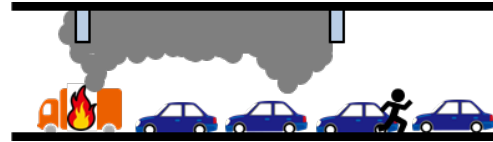


図1 垂れ壁イメージ図

垂れ壁のメリットをまとめると

- ・コントロールフリー：可動部がなく, 感知器などと連携させる必要がない
- ・メンテナンスフリー：トンネル構造の一部とすることが可能であり, メンテナンスが不要である。

以上から, 極めて安価で, 特にこれまで感知器や排煙設備が設置されていない短延長TNに適している。

固定式垂れ壁については, 主に建築火災時の防煙垂れ壁として世界的に使用されている[13-18]。しかしながら, 建築火災では, トンネルと異なり, 縦断勾配や自然風の影響を考慮する必要がないため, トンネル火災時の状況と異なる。火災規模が圧倒的に大きいなどから建築用垂れ壁の基準の適用は不適切と考えられる。

3. 研究の方法

製作した模型トンネルをジャッキにより縦断勾配を変化させることで, 火災時の煙流動を調査する。次に実験結果とシミュレーションの結果との比較を行い, CFDシミュレーション解析時の条件設定について調べ, 垂れ壁設置時の煙挙動について調べる。次にCFDシミュレーションと避難シミュレーションを連成させることで, 避難安全性に対する効果について明らかにする。模型トンネル(長さ10.3m, 幅0.54m, 高さ0.54m, 図2, 3)を製作し, 断熱性能が優れるケイカルボード(厚さ: 6mm, 熱伝導率: $0.13W/(m \cdot K)$)を用いて製作し, 火源位置を坑口から0.5m, 垂れ壁設置位置を火源から3mとして火災実験を行った。このトンネルは長さ100m, 幅5m, 高さ5mの矩形断面の実大トンネルを模擬しており, スケール比が1/10となるようにフルード相似則を考慮して設計されたものである。さらに実大トンネルの勾配も考慮し, 模型トンネル自体に0~4%程度の勾配を持たせ, 火災実験を行っている。ただし, 本研究では無風時における火災熱気流の流動を調査対象としている。そのため, 無風時の熱気流流

動の対称性を考慮して、模型トンネルの片側をケイカルボードで閉鎖し、火源をその閉鎖壁の付近に設置することで火災時のトンネル片側の状況を再現した。なお、下記の2点に着目して模型実験を行った。

1. 縦断勾配を有する模型火災実験による垂れ壁設置時の煙挙動の調査
2. 模型実験と同条件でのシミュレーションの実施

次に、模型実験結果と研究協力者が開発したオリジナルCFDコード[19]を用いてシミュレーションを行い、下記の二点を調査した。

3. 実験結果とシミュレーション結果の比較による検討 (図4)
4. 縦断勾配を有するトンネル火災時のCFDシミュレーションによる垂れ壁設置時の煙挙動についての調査
5. CFDシミュレーションと避難シミュレーションによる[5]トンネル火災の垂れ壁の効果についての調査
6. 経済的かつ効果的な垂れ壁の設置間隔の検討

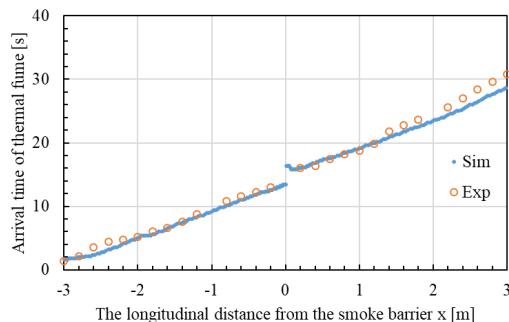


図4 長さ方向の熱気流到達時間 (y=0m, z=0.52m 地点2 上昇値, 模型実験とシミュレーション結果の比較)

4. 研究成果

モデルトンネル(長さ(x)700m,幅(y)10m,高さ(z)7mの馬蹄断面)に対して垂れ壁の効果を検討した結果、下記のことことが判明した。

- 1) 自然風がない場合、熱気流は垂れ壁にぶつかり、その層の下に逆流する煙層を形成し、遡上する。
- 2) 勾配の有無の関わらず、垂れ壁により煙の移動速度が減少する(図5)。
- 3) 垂れ壁の高さは2m程度にするのが良く、勾配が2%以下ではNPRHは5名以下にすることが出来る(図6)。
- 4) 垂れ壁の設置間隔は250mで半数近くの

NPRHを減少させる(図7)。

以上より、垂れ壁は熱気流の遡上を抑制する効果があり、煙に巻かれる要救助者の低減に大きい効果を有することが分かった。さらに、垂壁の設置に要する費用は安価であり、合理的かつ効果的な対策と成りうる事が分かった。なお、本内容は、国際ジャーナル(Tunnelling and Underground Space Technology)に投稿中である。

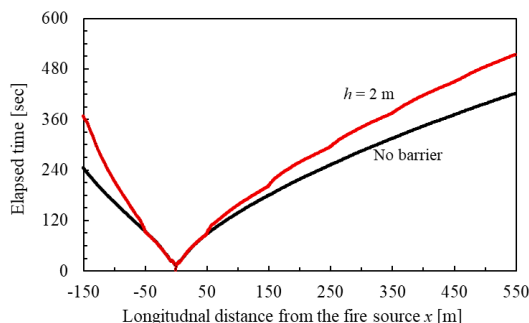


図5 垂れ壁の有無 (垂れ壁の長さ(h)0,2m)による煙先端到達時間の比較 (勾配2%, z=6m, Cs=0.2m⁻¹)

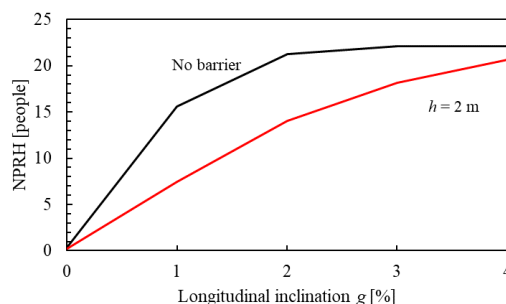


図6 勾配と要救助者数(NPRH)の関係

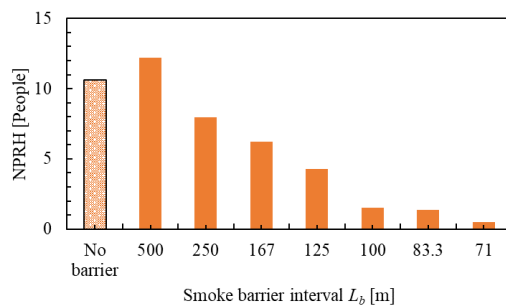


図7 勾配2%, h=2mの場合の垂れ壁間隔L_bとNPRH (煙に巻かれた要救助者数)

参考文献

- [1] European Commission, 2004. Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network National Fire Protection Association, 2014

- [2] NFPA502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and other Limited Access Highways, 2014, ed., National Fire Protection Association.
- [3] Jin, T., Yamada, T., 1985. Irritating Effects of Fire Smoke on Visibility, *Fire Science & Technology*, 5:1, pp. 79-89.
- [4] Japan Road Association, 2001 Road Tunnel Emergency Equipment Installation Standard and Interpretation, p.9.
- [5] Seike, M., Kawabata, N., Hasegawa, M., 2017 Quantitative Assessment Method for Road Tunnel Fire Safety: Development of an Evacuation Simulation Method using CFD-derived Smoke Behavior, *Safety Science*, Vol. 94, pp. 116-127.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Japan, 2015 http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2015/pdf/t_genkyou74.pdf
- [7] Amano, R., Kurioka, H., Kuwana, H., Murakami, M., Tsuruda, T., Suzuki, T., Ogawa, Y., 2006. APPLICABILITY OF WATER SCREEN FIRE DISASTER PREVENTION SYSTEM TO ROAD TUNNELS IN JAPAN, 3rd International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation', Graz, pp. 162-173.
- [8] Gao, R., Li, A., Lei, W., Zhao, Y., Zhang, Y., Deng, B., 2012. Study of a proposed tunnel evacuation passageway formed by opposite-double air curtain ventilation, *Safety Science*, 50, pp. 1549-1557.
- [9] Severino, G., Elicer-Cortes, J., C., Fuentes, A., 2013. Characterization of a diffusion flame inside a scale tunnel using double stream-twin jets air curtains, *Fire Safety Journal*, 62, pp. 264-271.
- [10] Meng, N., Hu, L., Yang, L., 2014. Effect of smoke screen height on smoke flow temperature profile beneath platform ceiling of subway station: An experimental investigation and scaling correlation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, pp. 204-212.
- [11] Miho Seike, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, 2014 THE EFFECT OF FIXED SMOKE BARRIERS ON EVACUATION ENVIRONMENT IN ROAD TUNNEL FIRES WITH NATURAL VENTILATION, 7th International Conference Tunnel Safety and Ventilation - New Developments in Tunnel Safety -, Graz, pp. 126-132.
- [12] Bettelini, M., Rigert, S., Seufert, N., 2012. FLEXIBLE DEVICES FOR SMOKE CONTROL IN ROAD TUNNELS, 6th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation', Graz, pp. 265-272.
- [13] Cooper, Leonard Y., 1990 Estimating the Environment and the Response of Sprinkler Links in Compartment Fires with Draft Curtains and Fusible Link-Actuated Ceiling Vents—Theory, *Fire Safety Journal*, 16, pp. 137-163.
- [14] Chow, W., K., Wong, K., Y., Chung, W., K., 2010 Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, pp. 122-128.
- [15] Qu, L., Chow, W., K., 2012 Numerical studies on density jump in a long corridor fire, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, pp. 113-126.
- [16] Rogev, A., Hassid, S., Poreh, M., 2004. Density jumps in smoke flow along horizontal ceilings, *Fire Safety Journal*, 39, pp. 465-479.
- [17] SFPE Handbook (Chapter 12. Smoke Control by John H. Klote)
- [18] Tso, C., Y., Chow, W., K., 2012 SCALE MODEL STUDIES ON SMOKE MOVEMENT IN INCLINED TUNNEL WITH LONGITUDINAL VENTILATION AND SMOKE BARRIERS, *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Volume 11, Number 2, pp. 21-26.
- [19] Kawabata, N., Wang, Q., Yagi, H., Kawakita, M., 1998. Study of Ventilating Operation during Fire Accident in Road Tunnels with Large Cross Section, *Proceedings of the Fourth KSME-JSME Fluid Engineering Conference*, Pusan, pp. 53-56.

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

[1] 叶優介, 清家美帆, 中川慎二, 畠山友行, 模型トンネル火災実験による天井に設けた固定式垂れ壁の熱気流抑止効果に関する研究 - 模型トンネル製作と熱気流計測について -, 鉄道総研と北陸地区のトンネル火災研究者とのミニワークショップ, 2018

[2] Miho Seike, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Evaluation of tunnel fire safety, Sweden/Japan workshop on tunnel fire safety, 2017.

- [3] 清家美帆, 道路トンネル火災時の定量的評価に関する研究, 2017年度日本伝熱学会北陸信越支部総会・春季セミナー, 2017 (招待講演)
- [4] Taisuke Kobayashi, Miho Seike, Nobuyoshi Kawabata, Masato Hasegawa, Scale model tunnel fire experiments for thermal fume stopping effect by smoke barrier, 8th Japan/Korea/Taiwan Joint Seminar for Tunnel Fire Safety and Management, 2017.
- [5] 小林泰輔, 清家美帆, 川端信義, 長谷川雅人, トンネル火災時の固定式垂れ壁の煙伝播抑止効果に関する模型実験, 日本機械学会 2016年度年次大会, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清家 美帆 (SEIKE, Miho)
富山県立大学・工学部・
機械システム工学科・助教
研究者番号: 70757244

(2) 研究協力者

川端 信義 (KAWABATA, Nobuyoshi)

長谷川 雅人 (HASEGAWA, Masato)