

避難坑を有しない長大トンネルの 縦流式吸煙設備

日根 幸雄¹・鷺尾 寛²・松本 紳¹・中堀 一郎³・前田 和男³

¹非会員 (株)エイト日本技術開発 関西支社 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39)
E-mail: hine-yu@ej-hds.co.jp

²正会員 (株)エイト日本技術開発 関西支社 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39)

³非会員 株式会社創発システム研究所 (〒650-0047 神戸市中央区港島南町5-5-2
神戸国際ビジネスセンターKIBC 612号室)

道路トンネル非常用施設設置基準では、防災等級 A 級は必要に応じて排煙設備または避難通路を設置することとなっている。しかしながら延長 4 000～4 500m、交通量 4 000～5 000 台/日以下のトンネルでは避難坑が設置されていないという実態がある。そこで延長 4 000m、交通量 5 000 台/日のトンネルをモデルに吸煙設備を検討した。吸煙設備は天井部分にダクトと吸煙用ダンパーを設け、火災が発生するとダンパーが開口し、機械室のファンで吸煙するものである。吸煙効果を試算した結果、ほとんどの火災事故に対応できること、吸煙設備の工事費は避難坑を建設する場合の約 1/3 であることがわかった。

ここでは避難坑を建設する計画のない長大トンネルに吸煙設備を設置することを提案する。

Key Words: large scale tunnel, emergency, grade of disaster prevention class, smoke extraction

1. はじめに

昭和 54 年に 7 人の死亡者を出す日本坂トンネルの火災事故が発生して以来、日本では大きな道路トンネルの火災事故がおきていない。

日本での交通事故率は高速道路で 20～30 件/台億km¹⁾程度発生しており、トンネル区間でも明り区間と事故発生率はほぼ同じ程度である²⁾。火災事故に関しては図-1 のとおり、道路トンネルでは毎年 20 件程度発生しているが、ここ 30 年以上にわたり大規模な交通事故が発生していないのは幸運としか言いようがない。

本稿では、延長 4km、交通量 5 000 台/日のトンネルを例に取り、トンネル火災発生時の状況を予測し、その対策案を提案する。

2. 日本の道路トンネルの避難環境

延長 4km、交通量 5 000 台/日のトンネルに上記のトンネル事故率を適用すると、年間 1.5～2.2 件の交通事故が発生することになる。トンネルを 100 年構造物と考え、100 年間に 150～220 件の交通事故が発生する。

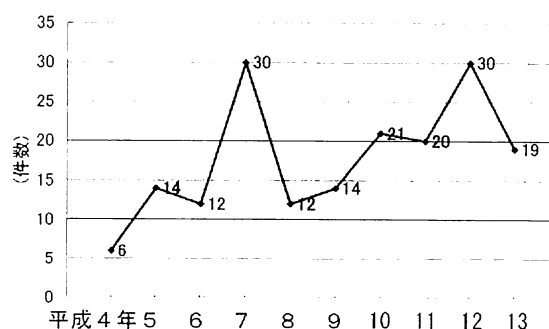


図-1 国内における道路トンネル事故火災発生件数

延長 4 km、交通量 5 000 台/日クラスの対面通行トンネルでのトンネル火災に関する備えはどうなっているかというと、図-2 のとおり防災基準 A となり、『道路トンネル非常用施設設置基準（平成 13 年 10 月）』によると、「必要に応じて排煙設備または避難用通路を設置する」、さらに「3, 000m を超す場合は避難坑を設置するのが望ましい」となっている。

実際に避難坑の設置状況はどうかというと図-3 のとおりで、概ね延長では 4 000～4 500m、交通量では 4 000～5 000 台/日付近が境界で非難坑設置の有無が分かれているのが現状である。

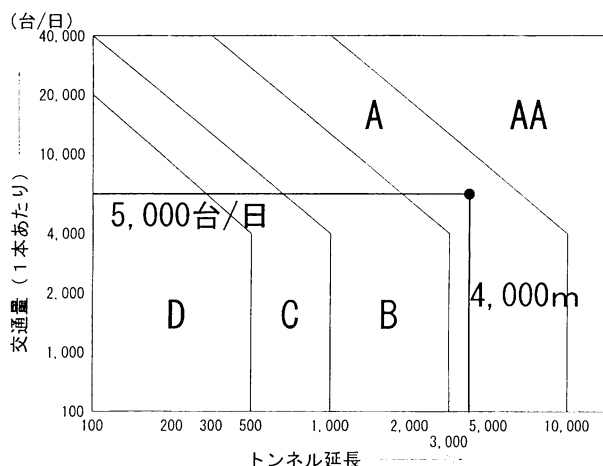


図-2 防災等級

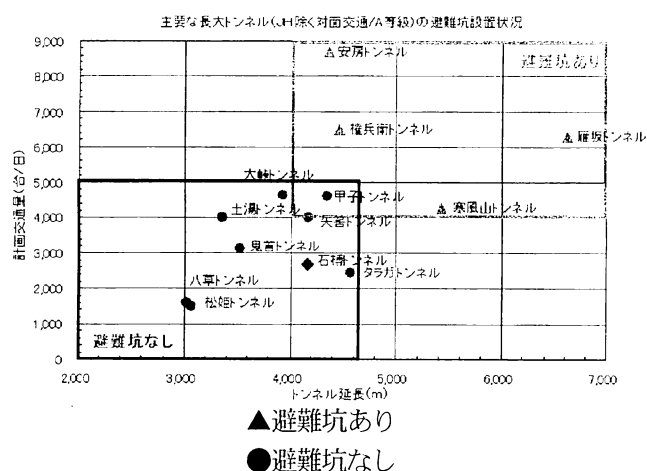


図-3 避難坑の設置状況

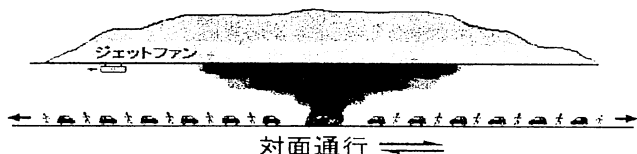


図-4 煙の拡散

火災が発生するとどうなるかと言うと、火災によって発生する煙は図-4 のように真直ぐ上に登り、次は天井に沿って左右に広がる。

煙の拡がる速さは、火災規模、トンネル断面の大きさ、トンネル内風速によって異なるが、大規模火災の場合や風下の地点では人の避難速度より煙のほうが早く、人は煙に巻かれて避難できなくなると言われている。

そのための対策としては、本坑トンネルと並行して避難トンネル（避難坑）を作り、適切な間隔（350m程度が多い）で本坑と避難坑を結ぶ避難連絡坑を設置し、それ

に逃げ込むのが現時点で最善の策とされている。

しかしこの方法は避難坑建設費が 60 万円/m 程度と高価で、仮に 4km 建設すると 24 億円必要となる。

将来、4 車化する計画があり、2 期線トンネルの導坑と位置付けると投資もしやすいが、その計画がない場合は 24 億円は余りにも高価である。

もう少し安い対策としては何があるかという、風速抑制化程度しか現在の日本にはない。風速抑制化とはジェットファンを噴射しトンネル内風速をできるだけゼロ近くにコントロールすることで、煙の拡散速度を抑制し風下に逃げる人の避難環境を良くしようとする方法である。しかし、この方法を用いても大規模な火災が発生すると避難坑がない場合は煙に巻かれる可能性が高い。

たとえば、大型バス火災の熱出力 30MW の場合は、煙の拡散と利用者の避難速度を仮定したシミュレーションの結果によると 200m 程度しか逃げることが出来ず、トンネル中央付近で火災が発生したときには大惨事になることを示唆している。（この計算にもとづき、少なくとも 175m 避難すれば避難用連絡坑に到達できるように、避難用連絡坑は 350m 間隔程度で設置されている。）

そこで、避難坑を建設する計画のない長大トンネルの避難対策として吸煙設備を提案する。

3. 縦流式吸煙設備の考え方

(1) 縦流式吸煙設備とは

ヨーロッパのモンブラントンネルでは、1999 年の大火災事故後のトンネル改築で、換気用ダクトを利用して火災時の煙を吸煙するシステムが採用されている。それをヒントにして、縦流換気方式の日本のトンネルに吸煙専用ダクトをトンネル内に設置し吸煙するシステムを考えた。

ヨーロッパの吸煙は横流式の換気ダクトを利用するものであるが、ここで提案する縦流式吸煙設備は換

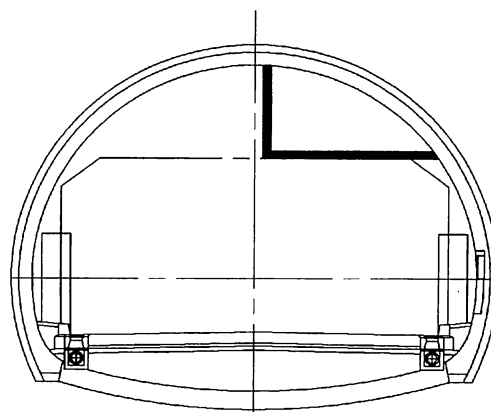


図-5 吸煙ダクト

気は従来どおりジェットファンによる縦流換気方式とし、吸煙用の小さいダクトのみを設けるものである。

たとえば、図-5 のように片車線の天井部分に 5㎡程度のダクトを設け、100m 程度の間隔で吸煙用ダンパーを設ける。火災が発生すると、火点近傍のダンパーの 2～3 個が開口し、吸煙するシステムである。

(2) 吸煙効果の試算

図-6 から火災規模を設定し、吸煙ダクトの効果を試算してみる。

a) 計算条件

- トンネル内空断面積 60㎡
- 煙発生量 (図-6 より)
- 大型バス床下火災の場合 3 000㎡/分
- 乗用車床下火災の場合 1 500㎡/分

b) 大型バス床下火災の試算結果

①吸煙システムがまったくない場合

$3\,000\text{m}^3/\text{分} \div 60\text{m}^2 = 50\text{m}/\text{分}$
すなわち、トンネル坑内全体で煙が拡散する場合は、毎分 50m ずつ煙は拡散する。(片側 25m/分)
実際は、高温の煙は天井を這うので、仮に内空断面上部 1/3 の 20㎡を煙が這うとすると、毎分 150m ずつ煙は拡散する。(片側 75m/分)
健常者が歩く早さが概ね 1 m/秒=60m/分とすると煙に巻かれる。
しかも、上記は風速ゼロ(風速抑制化でも困難)の仮定の場合であるため、風下側に逃げた人は逃げ切れない。

②吸煙設備がある場合

吸煙設備がダクト断面積 5㎡、ダクト内風速 10m/秒と仮定すると、 $50\text{m}^3/\text{秒} = 3\,000\text{m}^3/\text{分}$ の吸煙ができる。 $3\,000\text{m}^3 - 3\,000\text{m}^3 = 0$ したがって、すべての煙を吸煙できる。

③吸煙設備があり、その吸煙効率を考慮した場合

吸煙効率を 50%と仮定する。すなわち、設備がダクト断面積 5㎡、ダクト内風速 10m/秒と仮定すると、 $3\,000\text{m}^3/\text{分}$ の吸煙が理論上できるが、ダンパー付近での吸煙状況やダクト継目への空気の吸引により吸煙効率を 50%と仮定すると、煙の吸煙量は $1\,500\text{m}^3/\text{分}$ となり、 $3\,000\text{m}^3 - 1\,500\text{m}^3 = 1\,500\text{m}^3/\text{分}$ の煙が残る。
 $1\,500\text{m}^3/\text{分} \div 60\text{m}^2 = 25\text{m}/\text{分}$
すなわち、毎分 25m ずつ煙は拡散する。(片側 12.5m/分)

実際は煙は天井を這うので、仮に内空の上部 1/3 の 20㎡を煙が這うとすると、毎分 75m ずつ煙は拡散する。(片側 37.5m/分)

健常者が歩く早さが概ね 1 m/秒=60m/分だから、健常者は逃げ切れるが、身障者は難しい。
しかも、上記は風速ゼロ(風速抑制化でも困難)で、風速があると風下側に逃げた人は逃げ切れない。したがって、吸煙設備があっても風速抑制化設備は必要となる。

c) 乗用車床下火災の試算結果

煙発生量 1,500㎡/分 (図-6 より)
吸煙効率を 50%と仮定した場合でも、 $1\,500\text{m}^3 - 1\,500\text{m}^3 = 0$ すべてを吸引できる。

d) 吸煙効果の結論

吸煙ダクト断面=5㎡、ダクト内風速 10m/秒、風速抑制化設備ありの条件下での試算の結果は、目安として表-1 のとおりとなる。

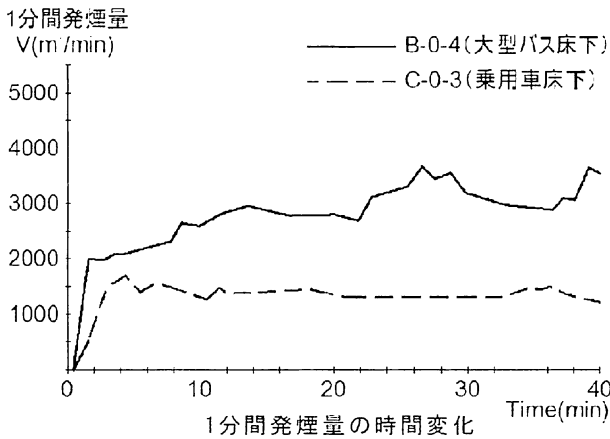


図-6 火災時の発煙量⁴⁾

表-1 吸煙効果表

想定事故	煙発生量 ①	吸煙設備 (効率) 吸煙量②		煙残量 ①-②	天井煙 拡散 速度	避難 結果
	m ³ /分	有無	m ³ /分	m ³ /分	m/分	
1) 大型バス 床下火災	3,000	なし	0	3,000	片側 75m	×
2) 大型バス 床下火災	3,000	有 (100%)	3,000	0	片側 0m	○
3) 大型バス 床下火災	3,000	有 (50%)	1,500	1,500	片側 37.5m	△
b) 乗用車 床下火災	1,500	有 (50%)	1,500	0	片側 0m	○

吸煙効率 50%と仮定すると、大型バス床下火災の場合で、健常者は逃げ切れるが、身障者は難しい結果となり、普通車床下火災の場合では、健常者、身障者とも逃げ切れることができる。

したがって、この程度の吸煙設備規模があれば完璧ではないが概ねほとんどの火災事故に対応できる。

4. 吸煙システムの費用

(1) 設備規模

上記の縦流式吸煙設備の建設費用を試算する。

a) モデルの設定

検討モデルとして、以下のトンネルを想定した。

- ①トンネル構造 : 延長 4km, 内空断面 60m²
- ②交通条件 : 対面 2 車線トンネル,
計画交通量 5 000 台/日
- ③吸煙ダクト : 断面積 5m², ダクト内風速 10m/秒

b) 吸煙ファン規模の検討

以下の条件で吸煙ファン費用を算出する。

- ・ 軸流ファンを両坑口に設置し、各々 2 km の延長を吸引する。
- ・ ダクトは P C プレキャスト板で製作し、摩擦係数は 0. 015 とする。
- ・ 摩擦はダクト以外にも存在するため、圧損を 1. 3 倍して軸流ファンを設定する。

c) 吸煙機械室の計画

以下の条件で吸煙機械室費用を算出する。

- ・ 4km トンネルのため両坑口に電気室があるものと仮定する。
- ・ その電気室の横に吸煙機械室を設ける。
軸流ファンは予備を設けずに 1 台とする。
- ・ 軸流ファン、受配電設備、動力盤、制御盤を配置する建屋 10m×15mを建設する。

(2) 検討結果

検討の結果、建設費は約 8 億円となる。

- ①ダクト建設費 P C プレキャスト板 10 万円/m×
4 000m=4. 0 億円
- ②吸煙機械室 10m×15m×80 万円/坪×2 箇所
=0. 7 億円
- ③軸流ファン 50m³/s-100kW×1 台×2 箇所=2. 4 億円
- ④動力・制御盤=0. 6 億円/一式
- ⑤100m間隔のダンパー 100 万円/1 箇所×40 箇所
=0. 4 億円

合計 8. 1 億円

避難坑建設費 24 億円の約 1/3 の工事費となる。

5. 今後の研究課題

(1) 課題

a) 煙の希釈

煙は高温のため真直ぐ上に上昇し、天井にぶつかり天井に沿って縦断方向に拡散する。

トンネルクラウン部はアーチ形状で上に行くほど幅が狭くなっているため、煙は希釈されにくい条件にあるが、いくらかの希釈は発生する。また、ダクトも完全な密閉はありえず、継目等から煙以外の空気が流入する。その希釈や継目からの流入による煙以外の量を本稿では 50%を仮定したが、検討する必要がある。

b) 耐熱

大規模火災では火点近くでは 1 000℃近くの高温になる。吸煙するダンパー近くではダンパー関連機器やケーブルがあり、火点ほどでもないが高温が予測され、耐火ケーブル等を使用するが、温度を調査する必要がある。

しかし、この課題はダンパーが火災時に開口されさえすれば、その後は熱でダンパー等が制御不能となっても吸煙は機械室の軸流ファンとダクトで行なわれるため、吸煙には支障がなく大きな課題ではないと考えられる。

(2) 研究の方法

吸煙システムを実現するために今後、以下の調査研究が必要と思われる。

- ① ヨーロッパの横流式吸煙システムを調査し、その性能等を調査する。
- ② シミュレーションを実施し、実際の吸煙の挙動を予測する。
- ③ 模型実験をしてダンパーの吸込みがうまくいくかを調査する。

6. 終わりに

本縦流式吸煙設備の利点は以下のとおりである。

(1) 安いこと

吸煙設備費は 4 kmのトンネルで 8. 1 億円と避難坑の約 1/3 の費用で設置できるため、交通量の少ない 2 期線計画のないトンネルでも比較的採用がしやすい。

また、吸煙をすることで吸熱効果もあり、水噴霧設備と同様に構造物を熱から守る効果も期待もできるため、水噴霧設備をなくしてその費用を吸煙設備に充てるとさらに安くなる。

(2) 後付けが可能

片側交通規制で後付けも可能であるため、現在供用中のトンネルに関しても適用可能である。

今後、新設トンネル設計段階で、長大トンネルの避難対策施設として、①避難坑設置案、②風速抑制化システム導入案とならんで、③縦流式吸煙設備案が検討対象となることを期待する。

参考文献

- 1) 高速道路における交通事故・違反の実態とその防止対策に関する研究 自動車安全運転センター pp52, 1989
- 2) 道路交通データブック (社)交通工学研究所 1987
- 3) 消防庁編：消防白書 平成14年度版, 2002
- 4) 日本道路公団東京第二建設局委託 関越トンネル換気運用に関する研究報告書総集編, 財団法人高速道路調査会, 1987

THE SMOKE EXTRACTION SYSTEM FOR LARGE SCALE TUNNEL WITHOUT EVACUATION ROUTES

Yukio HINE, Satoru WASHIO, Shin MATUMOTO, Ichiro NAKAHORI, Kazuo MAEDA

Tunnels in length of between 4,000m and 4,500m with 5,000 or less vehicles passing per an hour, and they are not equipped with the evacuation routes. Thus, a ventilation system is designed for a tunnel in length of 4,000m with 5,000 vehicles passing per an hour. The system is considered to equip with ducts and dampers on the tunnel ceiling; in case of fire, the dampers would be opened and fans in machine room/s would be used for ventilation. As a calculation result, the system would work suitably for most fire cases, and costing for the system construction would be about one-third of costing for the evacuation routes construction. The calculation result with the fan-ventilation system suggests to install the system in all long tunnels that are not planned to equip with any evacuation routes.