

トンネル換気施設および非常用施設の設計・運用手法の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：日下 敦、森本 智

【要旨】

道路トンネルは閉鎖空間であることから、自動車の交通の安全性・円滑性を確保するために付属施設として換気施設、非常用施設等が必要に応じて設置される。換気施設の合理的な設計を行うためには、近年の自動車排出ガス規制の効果をふまえ、換気対象物質の適切な排出量の設計値を設定することが重要となる。また、トンネル内において火災が発生した場合には利用者の安全性に与える影響が大きいことから、火災時の煙の拡散状況等に応じた非常用施設の設置及び運用が重要となる。本研究は、供用中の道路トンネルにおける実態調査により換気対象物質等の自動車 1 台当たりの排出量について把握するとともに、排出量の実態を踏まえた換気試設計を行い所要換気量への影響の程度について検討した。また、縦断勾配が火災時の煙の拡散状況や排煙設備の規模等へ与える影響について検討した。その結果、近年の換気対象物質の排出量は減少傾向にある一方、大型車からの NOx 排出量は予測値と比べて大きい傾向にある。また、煙の遡上抑制に必要となる排煙設備の規模については、本検討において仮定した条件では、排煙風速を 2.0m/s 程度確保することで煙の風上側への拡散は限定的であることが明らかとなった。

キーワード：道路トンネル、換気施設、換気対象物質、非常用施設、排煙設備

1. はじめに

道路トンネルにおける換気施設設計の対象とする有害物質は、道路トンネル技術基準¹⁾により煤煙及び一酸化炭素 (CO) とすることが規定されている。これらの設計濃度は、トンネル内の交通の安全性及び快適性並びに維持管理作業の安全性を確保するために必要な値として、煤煙は 100m 当たりの透過率 (煤煙透過率) として、設計速度に応じて 80km/h 以上の場合は 50%、60km/h 以下の場合は 40%、CO は設計速度によらず 100ppm と規定されている。これらの設計濃度を満たすために、道路トンネル技術基準 (換気編)・同解説²⁾では、2000 年から 2007 年に実施した実態調査の結果等をもとに、2008 年に換気施設の設計に用いる換気対象物質 (煤煙及び CO) の自動車 1 台当たりの排出量の設計値を示している。2008 年以降においても、自動車の排出ガス規制の実施に伴いこれらの排出量が年々減少しており、設計に用いる排出量を見直すことにより、さらなる合理的な換気設計が可能となる。一方、換気対象物質に含まれない生理的な悪影響を及ぼす有害物質としてディーゼルエンジンから排出される窒素酸化物 (NOx) 等があり、その排出量の減少の程度は煤煙及び CO と比較して限定的である可能性が指摘されている。したがって、煤煙や CO のみを対象として換気設計を行った場合、ディーゼルエンジンを採用する大型車

の混入率が高い条件や、排出量が多くなる縦断勾配が厳しい条件等においては、NOx による人体への影響が懸念される。

また、道路トンネルは閉鎖された空間であり、火災が発生した場合には利用者の安全性への影響が大きい。火災時における利用者の安全性向上に資する非常用施設設置の検討に際しては、火災時の煙の拡散状況や排煙設備の規模等をふまえて計画することが重要となる。近年、4%を超える縦断勾配が計画される事例が増加している。縦断勾配の条件が厳しい場合、火災時の煙の拡散状況や排煙設備の規模等への影響が懸念される。

本研究は、供用中の道路トンネルにおける実態調査により換気対象物質及び NOx を対象として自動車 1 台当たりの排出量について把握するとともに、排出量の実態を踏まえた換気試設計を行い所要換気量への影響について検討した。また、縦断勾配が火災時の煙の拡散状況や排煙設備の規模等へ与える影響について検討した。

2. 換気施設の合理的な設計に関する検討

自動車からの排出ガスには炭化水素の燃焼生成物として二酸化炭素及び水分が主成分として含まれるほか、不完全燃焼により生じる粒子状物質、CO、炭化水素、NOx 等がある。

本章では、供用中の道路トンネルにおける実態調査を実施し、換気対象物質に加えて生理的な悪影響を及ぼすNOxについても着目し、自動車1台当たりの排出量を算出するとともに、換気対象物質の排出量の実態を踏まえた換気試設計により所要換気量への影響について把握した。

2.1 供用中の道路トンネルにおける換気実態調査

2.1.1 換気実態調査の概要

供用中の道路トンネルにおいて、換気対象物質及びNOxを対象に自動車1台当たりの排出量を把握することを目的に実態調査を実施した。表 2.1-1 に調査トンネルの概要、写真 2.1-1 に実態調査の状況を示す。

調査トンネルは延長 1,833m で二車線対面交通である。調査期間中の日交通量は 20,500 台程度であった。実態調査は 2021 年 3 月に実施し、調査期間は連続する 3 日間程度とした。調査期間中はトンネル内の風向を一方向 (図 2.1-1 に示すトンネル内風向) とするため、既設のジェットファン 6 台を常時稼働させた。

計測項目は煤煙透過率、CO 濃度、NOx 濃度、トンネル内の風向・風速、大型車・小型車別の交通量とした。計測機器は図 2.1-1 に示すとおり測点 1 (終点側坑口から 160m 程度の地点) と測点 2 (起点側坑口から 150m 程度の地点) に配置した。煤煙透過率は VI 計 (投光部と受光部が対) を測点 2 の 1 箇所を設置した。CO 濃度は CO 計、NOx 濃度は化学発光方式による NOx 計、トンネル内の風向・風速計、交通量はビデオカメラをそれぞれ測点 1 と測点 2 の 2 箇所に設置し計測した。

表 2.1-1 調査トンネルの概要

延長	1,833 (m)	断面積	51.5 (m ²)
走行速度	65km/h 程度	日交通量	20,500 台程度
交通方式	二車線対面交通	換気方式	縦流換気方式



写真 2.1-1 実態調査の状況

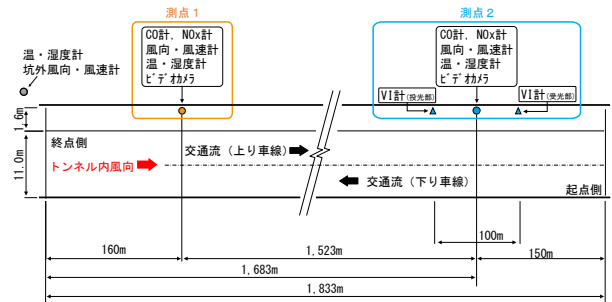


図 2.1-1 計測機器の配置

2.1.2 換気実態調査の結果

図 2.1-2 に調査期間中におけるトンネル内の風向・風速の計測結果を示す。トンネル内の風向は概ね図 2.1-1 に示すトンネル風向となっており、風速は交通換気力や自然風等の影響を受け変動し、概ね 2m/s ~ 3m/s 程度で推移している。従って、トンネル内の空気は、風上側の終点側坑口 (測点 1 の側) から新鮮な空気が取り込まれ、風下側 (測点 2 の側) に移動する際に、自動車の排出ガスの影響を受け測点 2 の濃度は高くなる。ここで、排出量の算出は各測点で得られた値を差分から求めることとなる。そのため、結果の整理は換気対象物質が測点間の通過に要する時間や取得できるデータの数を考慮し、本検討では 20 分間の値を使用することとした。従って、トンネル内風速が 1.3m/s 程度を下回る時間帯は、20 分以内で測点間を移動できないため結果の整理の対象から除外した。

図 2.1-3 に煤煙透過率と交通量の関係、図 2.1-4 に CO 濃度と交通量の関係を示す。各図から煤煙透過率・CO 濃度ともに交通の影響を受け、交通量が少ない時間帯は濃度が低く、交通量が多い時間帯は濃度が高くなる傾向を示した。煤煙透過率は最大で 65% 程度となり基準で示す規定値 (40%) を十分に満足している。CO 濃度は最大で 19ppm 程度となり基準で示す規定値 (100ppm) を十分に満足している。

図 2.1-5 に NOx 濃度と交通量の関係を示す。NOx 濃度は交通の影響を受け、交通量が少ない時間帯は濃度が低く、交通量が多い時間帯は濃度が高くなる傾向を示した。NOx 濃度は最大で 9ppm 程度となった。

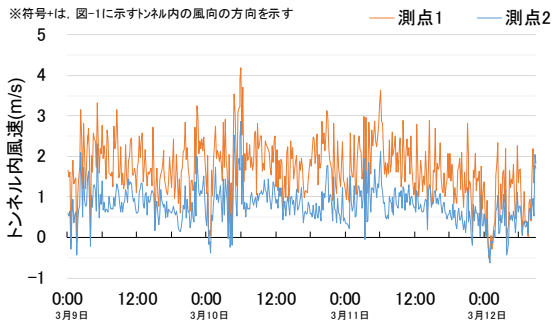


図 2.1-2 風向・風速

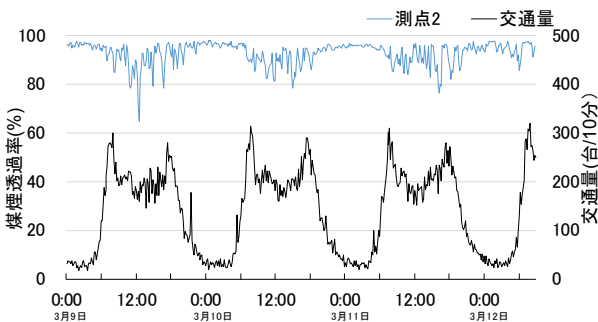


図 2.1-3 煤煙透過率

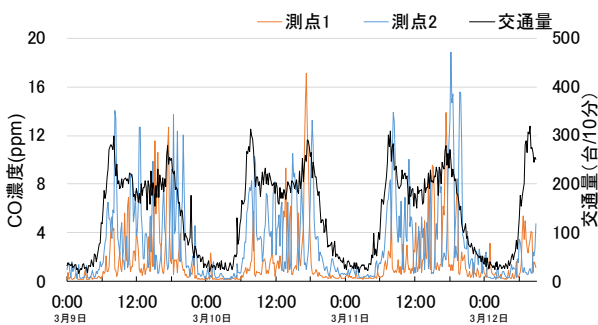


図 2.1-4 CO 濃度

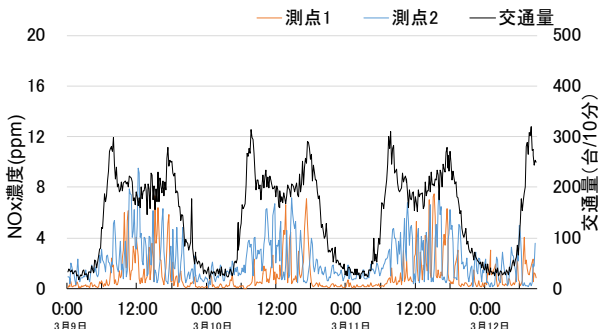


図 2.1-5 NOx 濃度

2.2 換気対象物質等の排出量の算出

2.2.1 算出方法

2.1.2 に示した調査結果から、煤煙、CO 及び NOx の自動車 1 台当たりの排出量を算出した。煤煙の排出量は式(1)により煤煙透過率を煤煙濃度 (ki) に変換し、式(2)により各測点で得られた値の差分から 1 台当たりの排出量として算出した³⁾。式(1)を用いて k1 を算出する際は終点側坑口の煤煙透過率は 100%と仮定した。式(2)で用いる計測地点間の距離は、煤煙濃度は終点側坑口と測点 2 の距離(1,683m)とし、CO 及び NOx は測点 1 と測点 2 の距離(1,523m)とした。各物質の排出量は大型車混入率毎に算出し、得られた線形近似式に大型車混入率 100%を代入した値が大型車 1 台当たりの排出量、大型車混入率 0%を代入した値が小型車 1 台当たりの排出量とした。

$$ki = -\frac{1}{L} \ln \tau \dots\dots\dots (1)$$

$$K = \frac{(k2-k1)*Q}{L*N} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

τ : 煤煙透過率、K : 煤煙排出量(m²/km・台)、

k1,k2 : トンネル内の煤煙濃度(1/m)、

Q : 車道内流量(m³/20min)、

L : 計測地点間の距離(km)、

N : 交通量(台/20min)

とした。

2.2.2 算出結果

2.1.2 に示した調査結果を用いて 2.2.1 の方法により煤煙、CO 及び NOx の自動車 1 台当たりの排出量を算出した。図 2.2-1 に煤煙の排出量と大型車混入率の関係、図 2.2-2 に CO の排出量と大型車混入率の関係、図 2.2-3 に NOx の排出量と大型車混入率の関係を示す。また、小型車・大型車別に算出した各排出量の結果を表 2.2-1 に示す。実態調査で得られた各排出量は、現行の設計値と比較し、煤煙は小型車が 30%程度・大型車が 50%程度、CO は小型車が 24%程度・大型車が 2%程度となっており、全体に少なくなっていることがわかる。

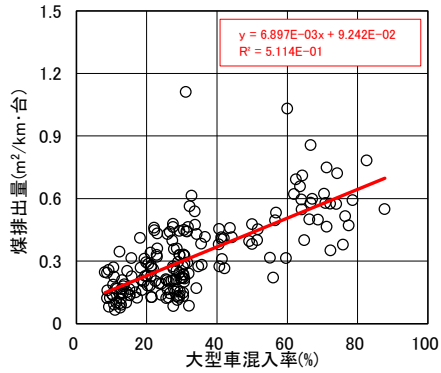


図 2.2-1 煤煙排出量と大型車混入率

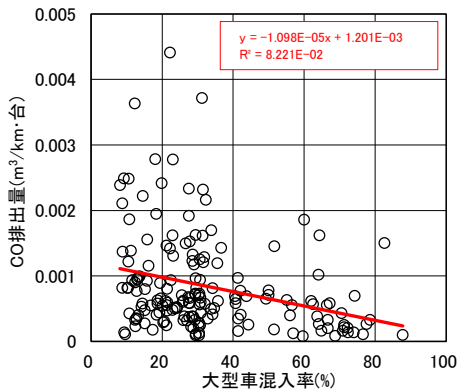


図 2.2-2 CO 排出量と大型車混入率

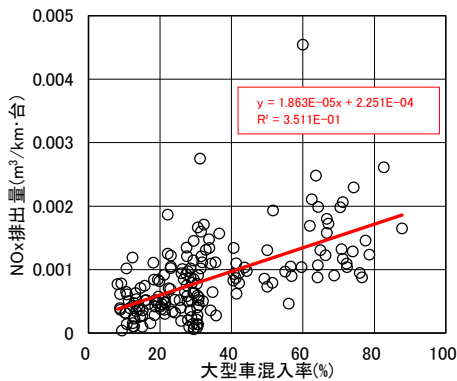


図 2.2-3 NOx 排出量と大型車混入率

表 2.2-1 排出量の算出結果

	煤煙 (m²/km・台)		CO (m³/km・台)		NOx (m³/km・台)	
	小型車	大型車	小型車	大型車	小型車	大型車
調査結果	0.092	0.782	0.0012	0.0001	0.0002	0.0021
現行の設計値	0.3	1.5	0.005	0.005	-	-
調査結果 / 現行の設計値	31%	52%	24%	2%	-	-

2.3 換気対象物質等の排出量の経年変化

煤煙、CO 及び NOx の自動車 1 台当たりの排出量の経年変化を把握するため、同解説²⁾に示されている将来予測値(2005年排出ガス基準(新長期規制)までの自動車排出ガス規制に適合した車両が年々ある割合で入れ替わっていくことを前提として2008年に算出した値)³⁾を基に、その後の排ガス規制・削減率の改定を加味した将来予測値を算出し、実態調査結果と比較した。図 2.3-1 に煤煙排出量、図 2.3-2 に CO 排出量、図 2.3-3 に NOx 排出量をそれぞれ示す。図には 2.2.2 で算出した排出量及び 2,000 年以降に実施した同様の実態調査で得られた排出量並びに現行の設計値、将来予測値についても記載した。

2015 年以降の排出量は、図 2.3-1 より煤煙は小型車・大型車ともに現行の設計値と比べて小さく、予測値と同程度であることが確認できる。図 2.3-2 より CO は小型車・大型車ともに現行の設計値と比べて小さく、小型車は予測値と同程度、大型車は予測値と比べて小さいことが確認できる。図 2.3-3 より NOx は小型車・大型車ともに予測値と比べて大きいことが確認できる。

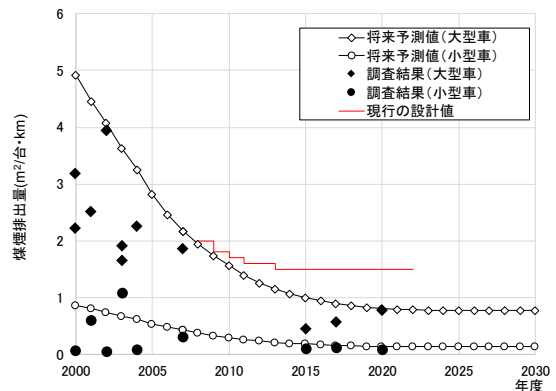


図 2.3-1 煤煙排出量の経年変化

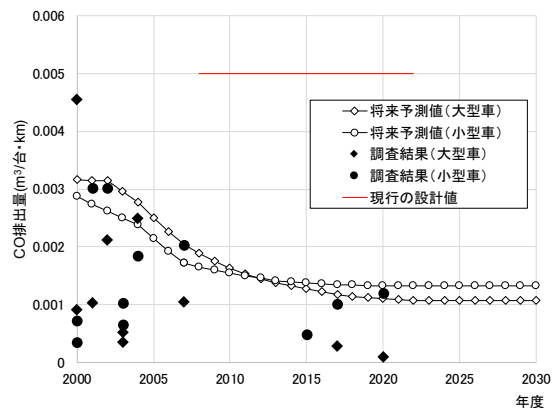


図 2.3-2 CO 排出量の経年変化

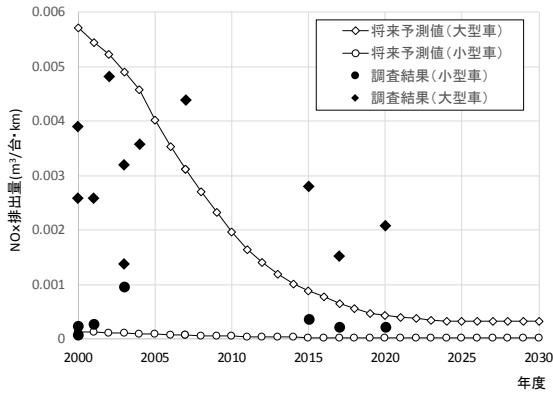


図 2.3-3 NOx 排出量の経年変化

以上の結果から、換気実態調査により得られた煤煙及びCOの自動車1台当たりの排出量は、設計値及び将来予測値と比べて減少傾向にあることが明らかとなった。一方、NOx排出量は予測値と比べて大きい傾向にあることが明らかとなった。

2.4 排出量の実態を踏まえた換気試設計

2.3 に示した換気対象物質の1台当たりの排出量の実態を踏まえて仮定した値を用いて換気試設計を行い、所要換気量への影響の程度について検討した。

各排出量の試算は、Case1として現行の設計値、Case2として今回の調査で得られた実態を踏まえて仮定した値とした。実態を踏まえて仮定した排出量は、2015年以降の実態調査結果の平均値を参考に、煤煙は小型車 $0.2(\text{m}^2/\text{km}\cdot\text{台})$ ・大型車 $0.9(\text{m}^2/\text{km}\cdot\text{台})$ 、COは小型車・大型車ともに $0.003(\text{m}^3/\text{km}\cdot\text{台})$ とした。また、各ケースについて縦断勾配は1%と3%、大型車混入率は0%~50%まで10%毎に変化させた。設計濃度は基準で規定されている値(煤煙は40%、COは100ppm)とし、トンネル断面積は 51.1m^2 、対面交通方式、延長は2,000m、設計速度は60km/h、交通量は設計交通容量を用いた。

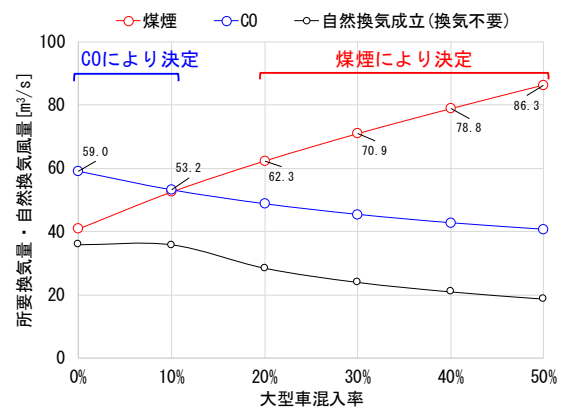
図 2.4-1 に縦断勾配を1%とした場合の大型車混入率と所要換気量の試算結果について示す。図 2.4-1の(a)よりCase1の所要換気量は、大型車混入率0%及び10%ではCOにより決定し、大型車混入率20%以上では煤煙により決定する。図 2.4-1の(b)よりCase2の所要換気量は、大型車混入率10%及び20%では自然換気が成立するため換気設備は不要となり、大型車混入率20%以上では煤煙により決定し、Case1と比較して減少する結果となった。

図 2.4-2 に縦断勾配を3%とした場合の大型車混入率と所要換気量の試算結果について示す。縦断勾配が1%の場合と比較して、換気設計上考慮する勾配補正による所要換気量の増加が確認できるものの、排出量に

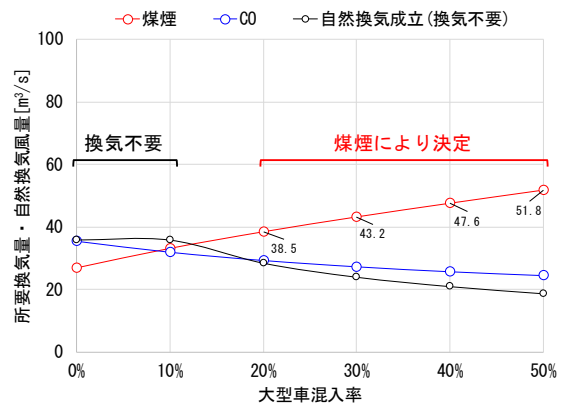
ついて実態を踏まえて仮定した値を用いた場合の所要換気量への影響は同様の傾向となった。

以上の結果から、換気対象物質の排出量の経年変化の実態を踏まえた換気試設計により得られた所要換気量は、現行の設計値を用いた場合と比較して4割程度減少する結果となった。

ただし、2.3 に示したとおりNOx排出量は予測値と比べて大きい傾向にあることから、煤煙及びCOの設計値を低減して換気設計を行った場合、条件によってはNOxを対象とした換気設計の検討が必要となる可能性があり、今後の課題と考えられる。

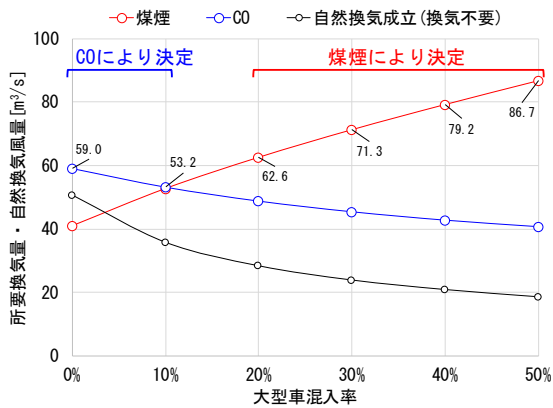


(a) Case1

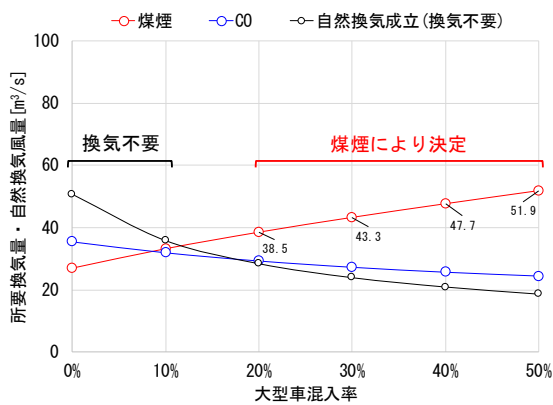


(b) Case2

図 2.4-1 所要換気量の試算結果 (縦断勾配 1%)



(a) Case1



(b) Case2

図 2.4-2 所要換気量の試算結果 (縦断勾配 3%)

3. 火災時の煙の拡散状況等の影響に関する検討

道路トンネル内で火災が発生した場合、被害を最小限にとどめるために非常用施設が設置⁴⁾される。一方通行トンネルでは、適切な運用体制等を構築したうえで排煙設備を設置し、事故車両もしくは火災地点より進行方向前方(車両の停滞していない側)へ排煙することにより、火災初期段階における避難環境の確保に有効となる。この際、風上側への煙の遡上を抑制するために必要となる排煙風速を把握し、適切に排煙設備の規模を設定することが重要となる。

本章では、一方通行トンネルにおける火災初期段階の排煙設備の運用を想定し、火災時の煙の拡散状況や排煙設備の規模に対する影響について、適用事例が増加している縦断勾配が厳しい条件を踏まえて検討を実施した。

3.1 煙の拡散状況と縦断勾配の影響

縦断勾配が火災時の煙の拡散状況に与える影響及び煙の遡上を抑制するために必要となる排煙風速を把握することを目的に、3次元による数値解析(乱流モデ

ルに LES を用いた解析コード:Fireles)⁵⁾を実施した。解析は 2 車線の道路トンネルを想定し、断面積は約 57m²、延長は 2,000m とした。火災規模は乗用車 2 台程度の火災を想定した 8MW と仮定した。解析条件は、縦断勾配を 2 種類 (0%、進行方向に対して下り 4%)、排煙風速を 2 種類 (2.0m/s、2.5m/s) 設定した。

図 3.1-1 に煙の先端が火源から遡上した距離と火災発生からの経過時間の関係を示す。ここで、煙の先端とは煙による視認性の低減を表す指標 (Cs 濃度) が避難に影響を及ぼすと考えられる値 0.4 を上回る⁶⁾位置とした。火源からの遡上距離は排煙風向と逆側(車両の進行方向とは逆側)を示している。また、利用者の避難行動の想定として、トンネル利用者が火災を覚知し避難を開始するまでに 4 分程度要し、避難時の歩行速度を 1m/s 程度と仮定⁷⁾した場合についても示している。

まず、排煙設備による運用を行わない場合(風速 0.0m/s の場合)、煙の遡上距離は火災発生から増加し、同一の経過時間で比較すると勾配 0% に比較し勾配 4% の方がより遠方まで到達していることがわかる。また、利用者の避難行動の想定よりも煙先端は避難方向の前方まで達していることがわかる。

次に、排煙風速を 2.0m/s とした場合、火災発生から約 240 秒後までは煙の遡上はわずかであり、その後、時間の経過に応じて遡上距離が増加し、約 480 秒後には 50m 程度まで遡上した。排煙風速を 2.5m/s とした場合、火災発生から約 360 秒後までは煙の遡上はわずかであり、その後、時間の経過に応じて遡上距離が増加し、約 480 秒後には 15m 程度まで遡上した。同一の排煙風速において縦断勾配の違いを確認すると、煙の遡上状況に大きな違いは見られない。また、利用者の避難行動の想定よりも煙先端は避難方向の後方でとどまっていることがわかる。

以上の結果から、本検討で仮定した条件においては、排煙設備による運用を行わない場合、煙の遡上距離は同一の経過時間で比較すると勾配 0% に比較し勾配 4% の方がより遠方まで到達する。排煙風速を 2.0m/s 程度確保することにより煙の風上側への拡散は限定的となることが明らかとなった。なお、火災規模について大型車火災に相当する 30MW とした条件での検討⁹⁾においても同様の傾向が確認されている。

ただし、本結果はあくまで本検討における条件によるものであり、トンネルの断面積、換気方式、交通方式、火災発生位置、火災の規模、自然風の状況等によって結果が異なることに注意が必要である。

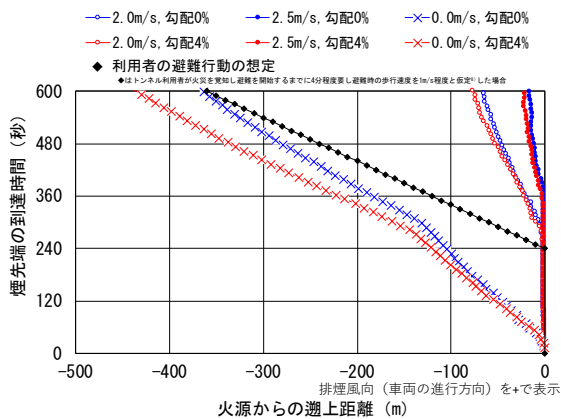


図 3.1-1 遡上距離と経過時間の関係の例

3.2 遡上抑制に必要なとなる排煙設備の試算

3.1 の結果を踏まえ、排煙風速を確保するために必要となるジェットファンの必要台数を試算した。試算は 2 車線の道路トンネルを想定し、断面積は約 57m²、ジェットファンは高風速 1,000 型、自然風による抵抗 2.5m/s の状態を想定した。排煙風速を 2 種類 (2.0m/s、2.5m/s) 設定し、風速を満たすために必要となるジェットファン台数について延長を変化させて算出した。

図 3.2-1 にトンネル延長と排煙設備として必要となるジェットファン台数の関係を示す。トンネル延長の増加に応じてジェットファン台数は増加することとなる。例えば、延長 2,000m の場合、排煙風速 2.0m/s を確保するためには 3 台、排煙風速 2.5m/s を確保するためには 4 台が必要となる結果となった。

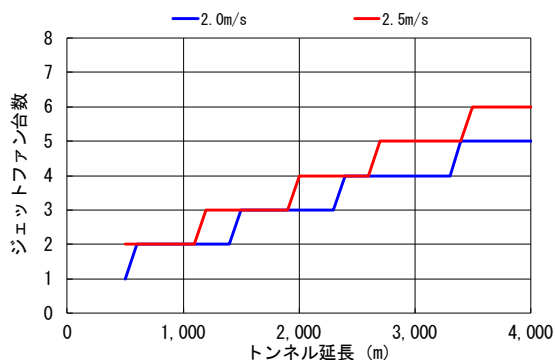


図 3.2-1 排煙設備として必要となるジェットファン台数の試算結果の例

4. まとめ

本研究は、供用中の道路トンネルにおける実態調査により換気対象物質及び NO_x を対象として自動車 1 台当たりの排出量について把握するとともに、排出量の実態を踏まえた換気試設計を行い所要換気量への影響

について検討した。また、縦断勾配が火災時の煙の拡散状況や排煙設備の規模等へ与える影響について検討した。

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 換気実態調査により得られた煤煙及び CO の自動車 1 台当たりの排出量は、現行の設計値及び将来予測値と比べて減少傾向にあることが明らかとなった。一方、NO_x 排出量は予測値と比べて大きい傾向にあることが明らかとなった。
- 2) 換気対象物質 (煤煙及び CO) の排出量の経年変化の実態を踏まえた換気試設計により得られた所要換気量は、現行の設計値を用いた場合と比較して 4 割程度減少する結果となった。ただし、NO_x 排出量は予測値と比べて大きい傾向にあることから、煤煙及び CO の設計値を低減して換気設計を行った場合、条件によっては NO_x を対象とした換気設計の検討が必要となる可能性があり、今後の課題と考えられる。
- 3) 本検討で仮定した条件においては、排煙設備による運用を行わない場合、煙の遡上距離は同一の経過時間で比較すると勾配 0% に比較し勾配 4% の方がより遠方まで到達する。排煙風速を 2.0m/s 程度確保することにより煙の風上側への拡散は限定的となることが明らかとなった。ただし、本結果はあくまで本検討における条件によるものであり、トンネルの断面積、換気方式、交通方式、火災発生位置、火災の規模、自然風の状況等によって結果が異なることに注意が必要である。

今後は、これらの検討結果を踏まえ、道路トンネルの換気施設及び非常用施設の合理的な設計や利用者の安全性向上に資する提案につながる検討を続けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 建設省都市局長・道路局長：道路トンネル技術基準、1989
- 2) (社) 日本道路協会：道路トンネル技術基準 (換気編)・同解説 平成 20 年改訂版、2008
- 3) 真下英人、石村利明：道路トンネルの換気施設設計に用いる諸定数に関する研究、土木研究所資料第 4097 号、2008.
- 4) (公社) 日本道路協会：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説、2019
- 5) 川端信義、王謙、佐々木啓彰、内藤祐輔：トンネル内火

災時に発生する熱気流の挙動に関する数値シミュレーション、1999

- 6) 神忠久：煙の中での歩行速度について、火災 第25巻2号、1975
- 7) 砂金伸治、七澤利明、日下敦、森本智：道路トンネル非常用施設設置基準・同解説の改定、トンネルと地下、2020.11
- 8) 矢野慎一、上原勇氣、七澤利明：日本道路協会第33回日本道路会議、論文番号6018、2019.11

RESEARCH ON DESIGN AND OPERATION OF VENTILATION AND EMERGENCY FACILITIES FOR ROAD TUNNELS

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Road Technology Research Group (Tunnel)

Author: KUSAKA Atsushi

MORIMOTO Satoshi

Abstract: We conducted a survey of the actual conditions of road tunnels in service and studied the emissions per vehicle of substances subject to ventilation. In addition, the capability of the smoke ventilation equipment during a fire needed for suppressing the back layering of smoke in the various condition of longitudinal slope was also studied. As a result, the emissions of substances subject to ventilation have been decreasing in recent years, while NO_x emissions from heavy-duty vehicles tend to be larger than the predicted values. And, the velocity required suppressing back layering of smoke became almost 2.0m/s.

Keywords: road tunnels, tunnel ventilation facilities, emissions of substances subject to ventilation, emergency facilities, smoke ventilation system