

トンネル付属施設の設計・運用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 27～平 30

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、付属施設として換気施設、照明施設、非常用施設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、換気対象物質の排出量の傾向について実態を把握し、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や利用者の避難行動等に応じた非常用施設の設置が重要となる。本研究は、合理的な換気施設設計を行うために必要となる換気対象物質の排出量を把握するとともに、縦断勾配が火災時の煙の拡散状況や利用者の避難行動等へ与える影響について検討を行うものである。その結果、換気対象物質の排出量は、現在、換気施設の設計に用いられている設計値と比較し、全体に少なくなっていることが明らかとなった。また、火災時の煙の拡散状況は縦断勾配の影響を受けること、利用者の避難速度は縦断勾配の影響は本実験条件において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，換気対象物質，煙の拡散状況，利用者の避難行動

1. はじめに

道路トンネルの換気施設の設計の対象とする有害物質は、道路トンネル技術基準¹⁾（以下「基準」という）により煤煙及び一酸化炭素とすることが規定されている。煤煙はトンネル内の見え方に影響を及ぼす物質で主にディーゼル車の排出ガス中に含まれる黒煙（排出ガス由来）とタイヤ等に付着した土砂、路面やタイヤの摩耗による粉じん（巻上げ由来）を合計したものである。煤煙濃度は道路トンネル内の見え方を表す指標として100m当たりの透過率（以下「煤煙透過率」という）で規定されている。一酸化炭素はトンネル内の利用者に対して生理的な影響を及ぼす物質で自動車の排出ガス中に含まれている。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、煤煙は設計速度に応じて80km/h以上の場合は煤煙透過率50%、60km/h以下の場合は煤煙透過率40%、一酸化炭素は設計速度によらず100ppmと基準により規定されている。上記基準の解説書として、道路トンネル技術基準（換気編）・同解説²⁾（以下「同解説」という）がある。同解説では2000年から2005年に実施した供用中の道路トンネルにおける実態調査をもとに自動車1台当たりの排出量を把握するとともに、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た将来予測を行い、2008年に換気施設の設計に用いる換気対象物質の自動車1台当たりの排出量の見直しを行っている。一方、その後においても排出ガス基準に適合した自動車の割合が増加することなどにより、換気対象物質の排出量が増加していることが予想される。合理的な換気施設設計を行うためには、排出量の傾向について実態を把握し、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、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優先度等の検討に際しては、火災時の煙の拡散状況や利用者の避難行動等をふまえて計画することが重要となる。同解説²⁾の改訂において縦断勾配による煤煙排出量の補正係数が見直され、従来、換気の観点から上限目標値とされていた縦断勾配3%程度から、近年、4%を超える設計が適用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利用者の避難行動等への影響が想定される。

本研究は、合理的な換気施設設計を行うために必要となる換気対象物質の排出量を把握するとともに、

縦断勾配が火災時の煙の拡散状況や利用者の避難行動等へ与える影響について検討を行うものである。

2. 研究方法

2.1 自動車から排出される換気対象物質の把握

自動車から排出される換気対象物質を把握することを目的に、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の濃度を調査するとともに、得られた結果から換気対象物質の1台当たりの排出量の算出を行った。

1) トンネル内の換気対象物質の濃度の調査

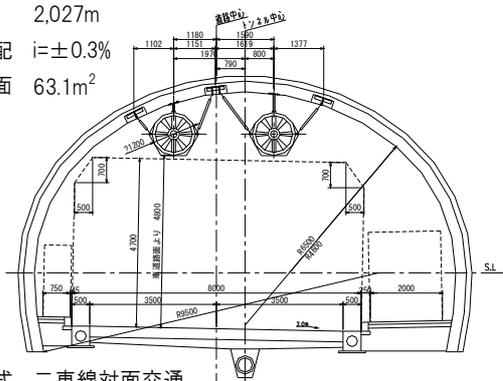
供用中の道路トンネルにおいて、換気対象物質の濃度を把握することを目的に実態調査を実施した。実施時期は2017年の10月頃、調査期間は連続する64時間程度とした。調査トンネルは表-1に示す一般国道1号静清バイパス丸子藁科トンネルとした。調査期間中は計測機器の配置をふまえてトンネル内の風向を一方方向(図-1に示すトンネル内の風向の方向)としておく必要があるため、既設のジェットファン・送風機を常時稼働させた。計測項目は換気対象物質である煤煙透過率、一酸化炭素濃度のほか、排出量の算出に必要なトンネル内の風向・風速、大型車・小型車別の交通量とした。煤煙透過率は煤煙透過率計を風下側の立坑付近1箇所(図-1に示す測点2)に設置した。煤煙透過率計は、投光器と受光器等から構成され、一般にはそれぞれの機器を100m離して設置し投光器から受光器へ到達した光の割合を計測する(写真-1)。したがって、煤煙透過率100%とは投光器から発した光が全て受光器に到達した状況で、煤煙・粉じんなどの浮遊物質等による見え方への影響がほとんど無い状態を表す。一酸化炭素濃度は一酸化炭素濃度計を風上側の坑口付近(図-1に示す測点1)及び風下側の立坑付近の2箇所に設置しそれぞれ計測した。

2) 換気対象物質の1台当たりの排出量

1)の調査結果から、換気対象物質の自動車1台当たりの排出量を算出する。煤煙の排出量は式(1)により煤煙透過率を煤煙濃度(k_i)に変換し、式(2)により1台あたりの排出量として算出した。なお、本調査では、測点1における煤煙透過率は計測していないため、 k_1 を算出する際の煤煙透過率は100%とした。一酸化炭素の排出量についても式(2)と同様の考え方で算出した。

表-1 調査トンネルの概要

路線名	一般国道1号
トンネル名	丸子藁科トンネル
延長	2,027m
縦断勾配	$i = \pm 0.3\%$
内空断面	63.1 m^2



交通方式 二車線対面交通
換気方式 ジェットファン付立坑集中排気縦流換気方式

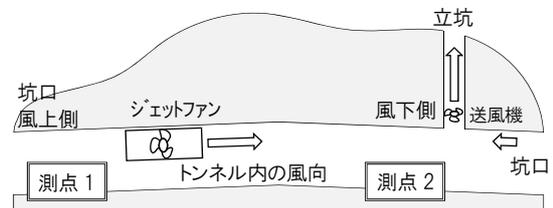


図-1 実態調査の概念



写真-1 煤煙透過率計の設置例

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

$$K = \frac{(k_2 - k_1) \cdot Q}{L \cdot N} \dots\dots(2)$$

ここで、

- τ 煤煙透過率、
- K 煤煙排出量($m^3/km \cdot 台$),
- k_1, k_2 トンネル内の煤煙濃度(1/m),
- Q 車道内流量($m^3/10min$),
- L 計測地点間の距離(km),
- N 交通量(台/10min)

とした。

2. 2 火災時の煙の拡散状況及び利用者の避難行動に対する縦断勾配の影響

近年、適用事例が増加している縦断勾配が厳しい条件における火災時の煙の拡散状況や利用者の避難行動等へ与える影響について検討した。

1) 火災時の煙の拡散状況と縦断勾配の関係

縦断勾配が火災時の煙の拡散状況に与える影響等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」³⁾を実施した。解析領域は、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。トンネル内の停車車両として、大型車及び小型車の2種類に大別し、対面通行トンネルにおいて大型車混入率が25%程度となるよう配置した。坑内風は交通換気風や自然風は考慮せず無風状態とした。

解析条件は、縦断勾配を2種類(0%、4%)、火災規模を2種類(8MW、15MW)変化させた。火災規模は、文献⁴⁾を参考に、大型車両単独の火災を想定した15MW程度、乗用車2台程度の火災を想定した8MWと仮定した。数値解析に用いた発熱速度曲線を図-2に示す。発熱速度曲線はEUREKA火災実験解析データのバス火災発熱速度曲線⁵⁾を参考に、最大発熱速度を30MWと仮定し10分以降は最大発熱速度を維持するモデル(30MWモデル)から、最大発熱速度を15MWと8MWに設定し比例するものと考えて設定したモデル(15MWモデル、8MWモデル)とした。

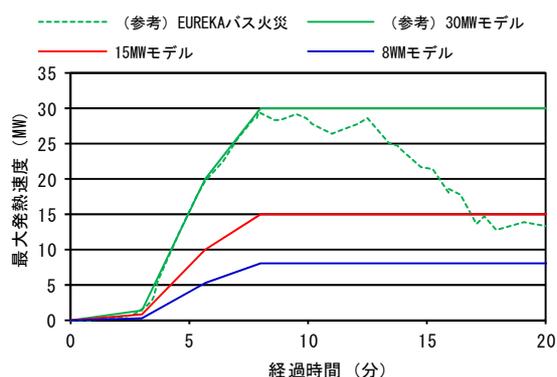


図-2 数値解析に用いた発熱速度曲線

2) 利用者の避難行動と縦断勾配の関係

火災時を想定した既往の避難実験⁶⁾によると、縦断勾配が0%の条件における避難速度は、煙の状態や照明条件等の避難環境により変化するものの概ね1m/s~2m/s程度であることが明らかとなっている。ここでは、縦断勾配が避難速度に与える影響を把握するこ

とを目的に、実トンネル用いて避難速度に関する実験を実施した。実験は未供用の2車線の道路トンネル(延長約950m、断面積約51m²)の約700mの区間を用いて実施した。当該トンネルの縦断線形は片側勾配で4.2%~4.8%の範囲で変化している。路面状態は砂利等が堅く締め固められている状態で歩行への影響はない。また、坑内には40m毎に仮設照明が設置されており、仮設照明付近の路面照度は140(lx)程度、区間全体の路面照度の平均値は35(lx)程度であり、歩行に支障のない明るさが確保されている。実験条件は縦断勾配の向き(上り勾配、下り勾配)を変化させた。被験者は29名で年齢は21~71歳(平均年齢42歳)であった。被験者には開始地点から終点までの700mの区間を、火災時を想定して自身の判断で避難するように指示し、100m毎に設置している目印を参考に100m区間を避難するのに要した時間を計測した。なお、本実験においてはトンネル内に火災時の煙は模擬しておらず、視環境は確保されている状態である。

3. 研究結果

3. 1 換気対象物質の自動車からの排出量の把握

1) トンネル内の換気対象物質の濃度

図-3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。計測された値は全て正の値となっており、トンネル内の風向は、常時、図-1に示す風向となっていることがわかる。トンネル内の風速は、バラツキはあるもののおおむね2m/sから5m/sの間で推移していることがわかる。すなわち、トンネル内の空気は、風上側(測点1の側)の坑口から新鮮な空気を取り込まれ、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。

図-4に煤煙透過率と10分間毎の交通量を示す。煤煙透過率は、交通の影響を受け、交通量が少ない時間帯は高い値となり、交通量が多い時間帯は小さい値となる。その値は、基準で示す規定値(40%)を十分に満足していることがわかる。

図-5に一酸化炭素濃度と10分間毎の交通量を示す。一酸化炭素濃度はトンネル内の風上側(測点1)では濃度の変動は少ない。一方、風下側(測点2)では交通の影響を受け、交通量が少ない時間帯は小さな値となり、交通量が多い時間帯は大きな値となる。その値は、基準で示す規定値(100ppm)を十分に満足していることがわかる。なお、煤煙透過率が一時的に60%程度まで低下する時間帯があったが、この状況下

での一酸化炭素濃度は6ppm程度であり、基準で示す規定値を十分に満足している。

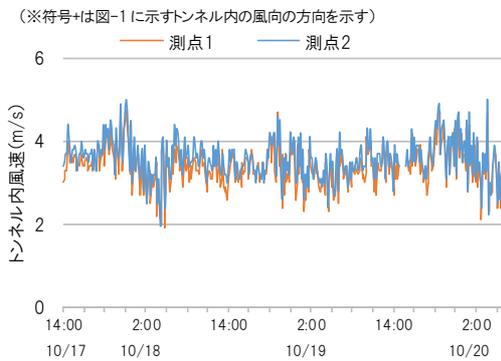


図-3 トンネル内の風向・風速

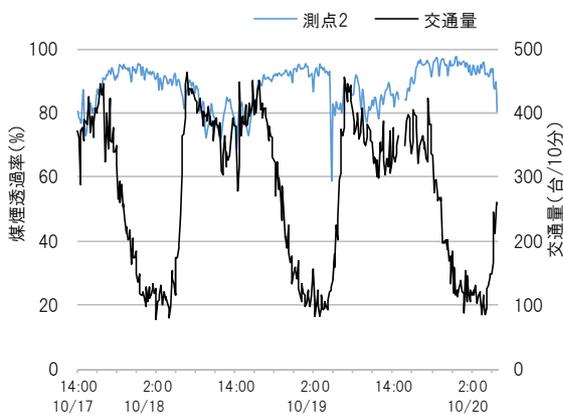


図-4 煤煙透過率

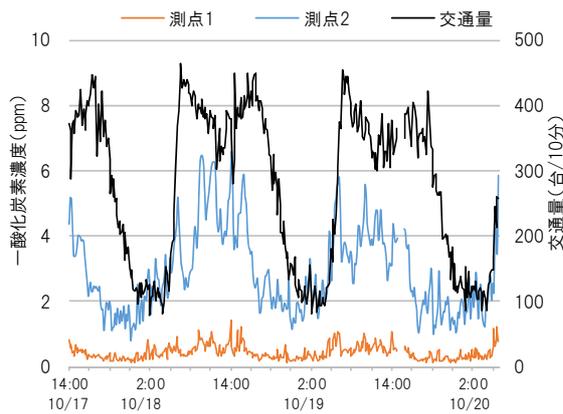


図-5 一酸化炭素濃度

2) 換気対象物質の1台当たりの排出量

図-6に煤煙の排出量と大型車混入率の関係、図-7に一酸化炭素の排出量と大型車混入率の関係を示す。この図から求め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なる。この方法により算出した排出量の結果及び2015年に筆者らが同様の調査を実施し、同様の方法で排出量を算出した結果を表-2にあわせて示す。調査で得られた排出量は、同解説の設計値と比較し、煤煙は小型車が40%程度・大型車が35%程度、一酸化炭素は小型車が15%程度・大型車が5%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。

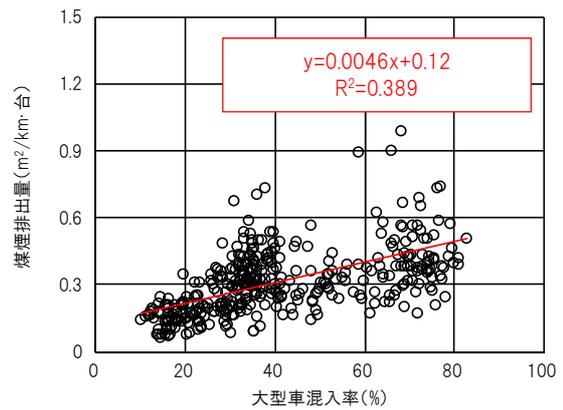


図-6 煤煙排出量と大型車混入率

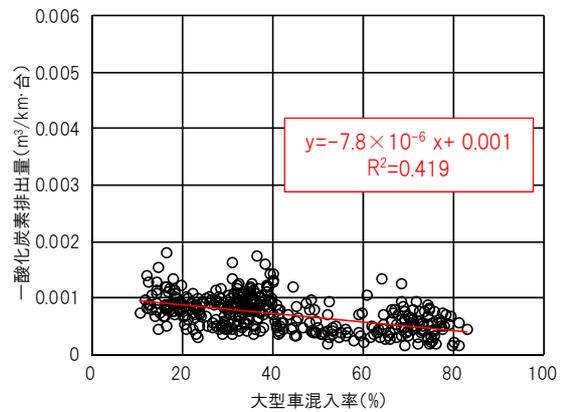


図-7 一酸化炭素排出量と大型車混入率

表-2 排出量の算出結果

実施年度	交通量 (台/日)	大型車 混入率(%)	走行速度 (km/h)	煤煙 (m²/km・台)		一酸化炭素 (m³/km・台)	
				小型車	大型車	小型車	大型車
2015	42,128	33.7	49.8	0.12	0.44	0.0005	-
2017	39,104	33.7	50.1	0.12	0.59	0.0010	0.0003
排出量の平均値				0.12	0.51	0.0008	0.0003
同解説の設計値				0.3	1.5	0.005	0.005
排出量の平均値/同解説の設計値				41%	34%	15%	5%

3) 排出量の経年変化

換気対象物質の排出量は、同解説の設計値と比較し少なくなっていることが明らかとなった。ここでは、同解説の設計値を定める際の根拠のひとつとして用いられている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年に算出した将来予測値⁷⁾と比較する。図-8に煤煙排出量の経年変化、図-9に一酸化炭素濃度の経年変化を示す。なお、図には2)で算出した排出量及び2000年以降に実施した同様の実態調査から得られた排出量ならびに同解説の設計値、同解説の改定以前に用いられていた設計値⁸⁾、将来予測値⁷⁾について記載した。

図-8より今回の実態調査から得られた煤煙の排出量は、小型車・大型車ともに、その値は同解説の設計値及び予測値をともに下回っていることが確認できる。図-9より今回の実態調査から得られた一酸化炭素の排出量は、小型車の値は予測値と同程度であるものの同解説の設計値と比較すると下回っており、大型車の値は、同解説の設計値及び予測値をともに下回っていることが確認できる。

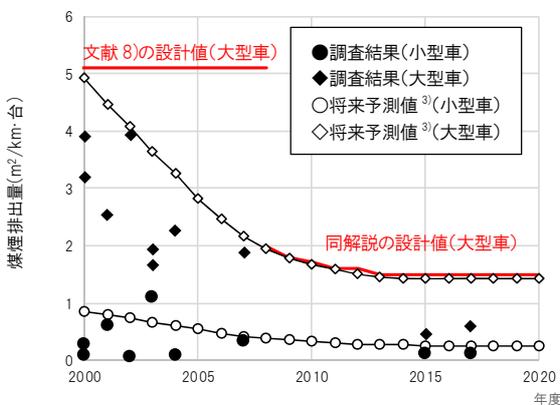


図-8 煤煙排出量の経年変化

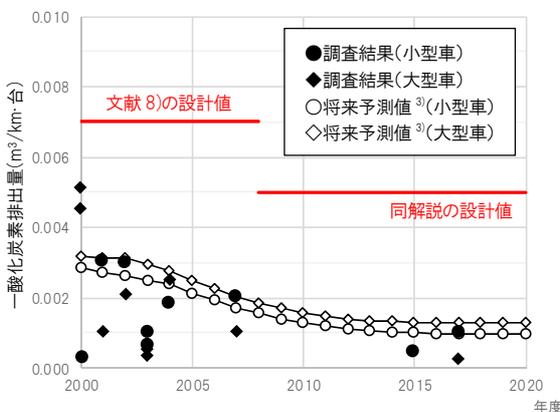


図-9 一酸化炭素排出量の経年変化

3. 2 火災時の煙の拡散状況及び利用者の避難行動に対する縦断勾配の影響

1) 火災時の煙の拡散状況と縦断勾配の関係

図-10に路面から1.5m高さの煙先端位置の時間変化を示す。ここで、煙先端位置とは既往の文献⁹⁾等により煙の状態を表す指標(Cs濃度)が避難に影響を及ぼすと考えられる値0.4を上回る位置とした。路面から1.5m高さに煙の先端位置が到達するまでの火災発生からの経過時間は、縦断勾配が0%の場合(図-10の(a))、縦断勾配が4%の場合(図-10の(b))ともに約240秒程度となることがわかる。その後、縦断勾配の違いによる煙の拡散状況への影響を確認すると、縦断勾配が0%の場合は時間の経過とともに火源から両方向へ移動し、縦断勾配が4%の場合は火源から標高が高い側へ移動する結果となった。また、火災発生からの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。次に、火災規模の違いによる煙の拡散状況への影響を確認すると、縦断勾配が0%の場合、8MWに比較し15MWの方がより移動速度が高いもののその差は明確には現れてはいない。一方、縦断勾配が4%の場合、8MWに比較し15MWの方がより移動速度が高く、勾配0%の場合に比べ移動速度の差が明確に現れていることがわかる。

以上の結果から、火災時の煙の拡散状況に対する縦断勾配の影響は、本解析条件においては、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ことが明らかとなった。

2) 利用者の避難行動と縦断勾配の関係

図-11に縦断勾配と避難速度の関係を示す。避難速度は100m毎の各区間に要した時間から避難速度を算出し、区間毎の被験者全員の平均値として示した。

下り勾配の場合、開始地点から100mまでの避難速度は1.8m/s程度で最も早く、それ以降は若干速度が低下するものの、700m区間の平均値は1.7m/sとなっており、避難距離の増加に伴う避難速度の変動は確認されなかった。上り勾配の場合においても、避難速度は概ね1.6m/s程度で安定している結果となった。

以上の結果から、利用者の避難速度に対する縦断勾配の影響は、本実験条件においては、縦断勾配が4%程度の場合においても、視環境を確保することにより限定的であることが明らかとなった。

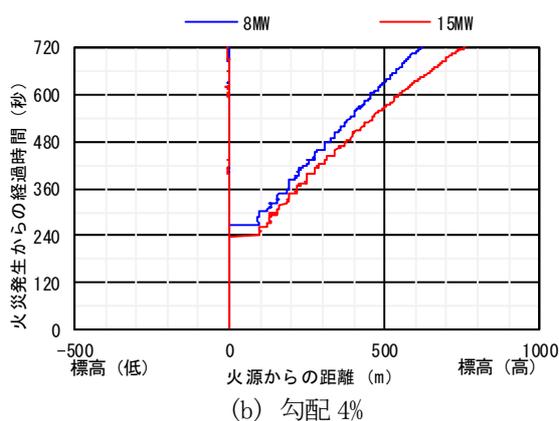
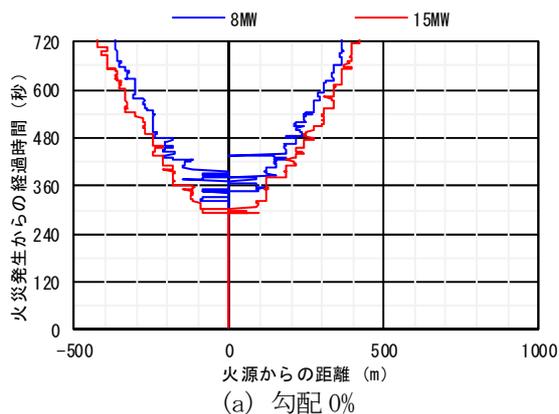


図-10 路面から 1.5m 高さの煙先端位置の時間変化

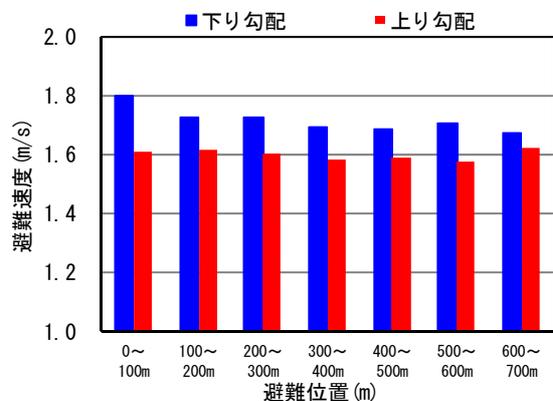


図-11 縦断勾配と避難速度の関係

4. まとめ

供用中の道路トンネルにおいて、換気対象物質の濃度を把握することを目的に実態調査を実施し、得られた結果から、自動車1台当たりの排出量の傾向について把握した。また、縦断勾配が火災時の煙の拡散状況や利用者の避難行動等へ与える影響について把握した。

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) 調査結果から得られた自動車1台あたりの煤煙および一酸化炭素の排出量は、同解説の設計値及び2008年に算出した将来予測値と比較し、減少傾向にあることが明らかとなった。
- 2) 火災時の煙の拡散状況に対する縦断勾配の影響は、本解析条件においては、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ことが明らかとなった。
- 3) 利用者の避難速度に対する縦断勾配の影響は、本実験条件においては、縦断勾配が4%程度の場合においても、視環境を確保することにより限定的であることが明らかとなった。

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の合理的な設計や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) 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
- 4) The PIARC document：Fire and Smoke Control in Road Tunnels，2007
- 5) H Ingason：An Overview of Vehicle Fires in Tunnels，2001
- 6) 石村利明，砂金伸治，森本 智：道路トンネル内の火災時における足下灯の避難誘導効果，(社) 土木学会，第70回年次学術講演会，2016
- 7) 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
- 8) (社) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説，2001
- 9) 神忠久：煙の中での歩行速度について，火災 第25巻2号，1975.