

トンネル換気設備の設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 17～平 19

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：真下英人、石村利明

【要旨】

道路トンネルの換気設備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反映させた排出量および速度勾配補正係数などの定数の設定が必要である。排出量については、供用中の道路トンネルにおいて排出ガス濃度の実態調査を行い、近年の排出ガス規制を考慮した排出量の予測を行い、換気施設の設計に用いる自動車1台あたりの排出量を提案した。速度勾配補正係数については、新短期・新長期の排出ガス規制車を用いた台上試験を行い、速度・縦断勾配の違いによる煤煙排出量の把握を行い、既往の短期・長期規制車の台上試験結果とあわせて、各排出ガス規制車の割合を考慮した速度勾配補正係数などの定数を提案した。

キーワード：道路トンネル、換気設計、実態調査、排出量、台上試験、速度勾配補正係数

1. はじめに

現在、道路トンネルの換気施設の設計には、トンネル利用者に対して生理的な影響を及ぼす物質として一酸化炭素(CO)を、トンネル内の視距に影響を及ぼす物質として排出ガス中の黒煙（排気管由来）と粉じん（巻上げ由来）を合計したもの、いわゆる煤煙を対象としている。換気施設の設計に用いる、これら対象物質の自動車1台あたりの排出量、煤煙に対する速度勾配補正係数は、それぞれ平成3～5年度に実施した実態調査および平成元年に実施した台上試験結果に基づき設定された値を用いている。

一方、近年では自動車の排出ガス規制(短期目標(H5～6年)、長期目標(H9～11年)、新短期目標(H14～16年)、新長期目標(H17～H19))が実施され、これらの排出ガス規制および自動車の性能向上により、現在、道路トンネルの換気施設の設計に用いている煤煙やCOの自動車1台あたりの排出量の減少や、速度勾配補正係数などの諸定数が変化していることが予想される。

そこで本研究は、供用中の道路トンネルを用いて煤煙、CO等に対する排気ガス濃度の実態調査を実施し、自動車1台あたりの排出量の推移を把握するとともに、近年の排出ガス規制を考慮した排出量の予測を行い、換気施設の設計に用いる自動車1台あたりの排出量を検討した。また、新短期・新長期排出ガス規制車を対象に台上試験を実施し、既往の短期・長期規制車の台上試験結果とあわせ

て、各排出ガス規制車の割合を考慮した速度勾配補正係数の検討を行った。

2. 自動車1台あたりの排気ガスの排出量

2.1 実態調査

実態調査は、平成19年に国道1号丸子藁科トンネルで実施した。本調査を含めて平成12年以降に実施した実態調査を整理すると表-1のとおりである。いずれの調査も一般国道の2車線のトンネルにおいて連続48～72時間の排気ガス濃度等の連続測定を実施した。測定は、図-1に示すように道路トンネルを1本のチューブと考えて、トンネルの入口側および出口側の2ヶ所において各種の排気ガス濃度を計測するとともに、トンネル内を通過した自動車台数を大型車・小型車別に調査を行った。調査項目は、現在、換気施設の設計の対象物質である煤煙、一酸化炭素(CO)のほか、煤煙濃度に関係する微粒子(2.5μm以下の粒子状物質)、粗粒子(10μm～2.5μmの粒子状物質)の濃度等、およびトンネル車道内風速、交通量(大型車・小型車の別)とした。

表-1 実態調査トンネルの概要および調査実施年

調査トンネル	延長(m)	最急縦断勾配(%)	換気方法	立坑の有無	交通方法	平成12年	平成13年	平成14年	平成15年	平成16年	平成19年
丸子藁科トンネル	2,027	0.3	ジェットファン付立坑集中排気縦流式	有	対面	○	○		○		○
空港北トンネル	734	1.61	ジェットファン+送排縦流式	無	一方	○					
宇津ノ谷トンネル	881	1.3	自然換気(立坑集中排気縦流式)	有	一方			○			
防府第三トンネル	1,833	1.3	ジェットファン式縦流式	無	対面				○		
南但馬トンネル	1,224	2.3	ジェットファン式縦流式	無	対面					○	

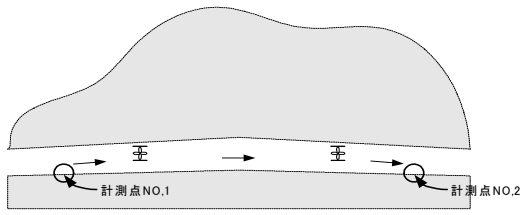


図-1 実態調査の概要

2.2 実態調査結果

実態調査結果による得られた自動車1台あたりの煤煙およびCOの各排出量の経年変化を図-2、図-3に示す。両図には平成3年以降に実施された同様の実態調査から求めた排出量¹⁾および現在の換気設計に用いられている技術基準の値を示す。図-2より、小型車の煤煙排出量は、平成19年の値が若干高めの値を示したが、過去の値と比較して大きな変化は見られない。一方、大型車の煤煙排出量は、ばらつきはあるものの技術基準の値に比べて小さく、過去に実施された値から年々減少していることが分かる。

また、図-3よりCO排出量も煤煙排出量と同様に平成19年の値が若干高めの値を示したが、全般的には減少傾向を示しており、小型車・大型車ともに技術基準の値に比べて小さくなっていることが分かる。

以上より、平成19年の実態調査結果においても自動車1台あたりの排出量は、年々減少傾向にあり

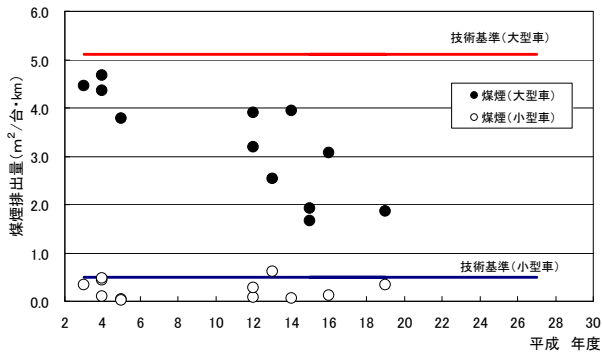


図-2 煤煙排出量の経年変化

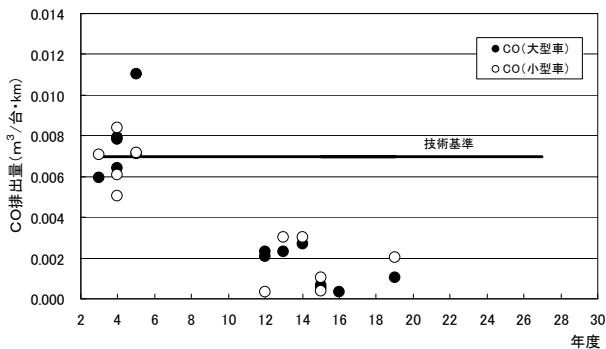


図-3 CO排出量の経年変化

現行の技術基準で用いられている煤煙、COの排出量に比べ小さくなっていることを再確認した。

2.3 換気施設設計に用いる排出量

2.3.1 排出ガス規制を考慮した排出量の予測

排出ガス規制を考慮した排出量の将来予測は、平成12年から平成16年までの実態調査結果を用いて中央環境審議会における第4次答申までを対象とした新長期規制までを考慮した予測値を求めた方法²⁾を見直すことにより実施した。

自動車の排出ガス規制による効果を考慮した将来の煤煙排出量は、煤煙排出量を巻き上げ粉じんによるもの、排気管由来によるものに分け、排気管由来分だけが減少していくという考えをもとに図-4の手順で行っている。予測の見直しに際しては、平成19年の実態調査結果を反映させるとともに、削減倍率を算出する際に用いる年式別車両構成比に最近の車両保有台数のデータを反映させた。表-2に将来予測値を算出した設定条件を示す。

上記方法・条件によって各年度における煤煙排出量の予測結果を図-5に示す。図中にはこれまでの実態調査の結果も示した。図より次のことが分かる。

①小型車の煤煙排出量の予測値は、ケース①が最も

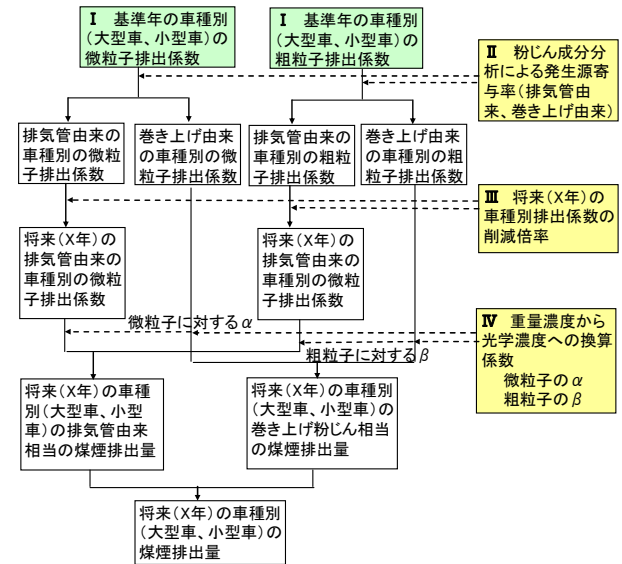
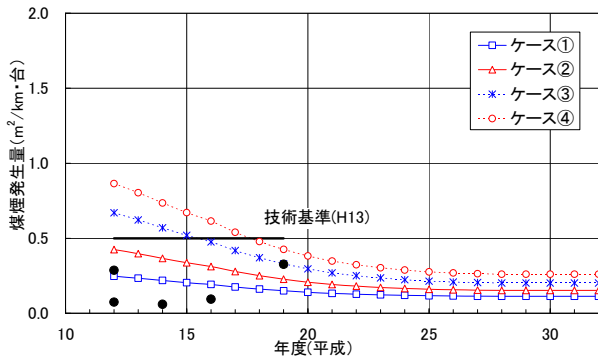


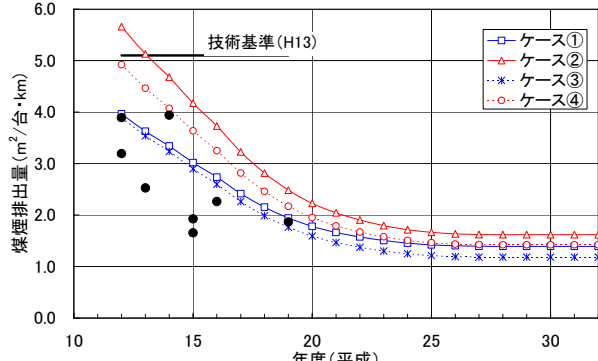
図-4 将来の煤煙排出量の推定手順

表-2 煤煙排出量の予測条件の組合せ

ケース	車種別(大型車、小型車)の 微粒子・粗粒子排出量(g/台・km)				換算係数 α 、 β		基準年		
	設定値 の考え方		設定値 の考え方		α	β			
	小型車	大型車	小型車	大型車					
①	H12~H16 の平均	0.020	0.344	0.021	0.049	H12~H16 の平均	7.7	1.8	H16 基準
②	H12~H19 の平均	0.027	0.335	0.021	0.050	H12~H19 の平均	7.1	2.1	H19 基準
③	H19丸子薬 科の測定値	0.060	0.290	0.000	0.054	H19丸子薬 科の値	5.5	3.1	H19 基準
④	H19丸子薬 科の測定値	0.060	0.290	0.000	0.054	H12~H19 の平均	7.1	2.1	H19 基準



(a) 小型車



(b) 大型車

図-5 煤煙排出量の将来予測値

小さい値であり、ケース②、③、④の順で大きい値となる。

- ②大型車の煤煙排出量の予測値は、ケース①、③とケース②、④でそれぞれほぼ同値をとり、前者が小さく、後者が大きい値となる。
- ③平成 19 年の小型車の排出量はケース①の予測値を上回る。
- ④すべての実態調査結果を包含するのは、小型車でケース④が、大型車でケース②、④の予測条件である。小型車、大型車ともにすべての実態調査結果を包含しているのはケース④の予測条件である。

以上より、煤煙排出量の予測は小型車、大型車ともに実態調査結果を包含しているのはケース④であり、その場合の煤煙排出量の将来予測では平成 25 年頃まで減少傾向にあり、最終的には小型車で約 $0.3\text{m}^2/\text{km}\cdot\text{台}$ 、大型車で約 $1.5\text{m}^2/\text{km}\cdot\text{台}$ 程度まで減少することが明らかとなった。

2.3.2 CO 排出量

現在、換気設計に用いる CO 排出量は、 $7\text{リットル}/(\text{km}\cdot\text{台})$ としている。実態調査結果からは表-1 に示すように CO 排出量は減少していることが確認されているが、CO が人体に与える影響は急性毒性によって濃度、暴露時間や作業の程度によって異なる。また、煤煙に対する所要換気量を算出する際には、煤煙排出量のほか、ばらつき(標準偏差)を考慮しているが CO に対する必要換気量を算出する際はばらつきを考慮していない。したがって、これらを考慮したうえで換気設計に用いる CO 排出量を設定する必要がある。

図-6 に実態調査トンネルにおける CO 排出量の全ての測定値を示した。上記に示したように換気設計に用いる CO 排出量は、急性毒性に対する人体への影響を考えて、ばらつきなどを考慮した安全側の値

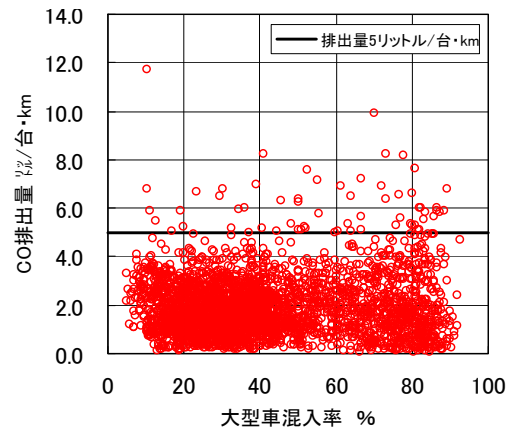


図-6 CO 排出量 (H12~H19 年)

に設定する必要がある。このことから、換気設計に用いる CO 排出量の設定としては、実態調査結果をほぼ包含できる値とする必要があり、その場合の CO 排出量は概ね $5\text{リットル}/(\text{km}\cdot\text{台})$ (包含率:95%)となる。

3. 速度勾配補正係数

3.1 検討方法

速度勾配補正係数の設定に際しては、換気施設的设计対象とする煤煙排出量を巻き上げ粉じんによるもの、排気管由来によるものに分け、排気管由来だけが減少していくという考えを用いたことから、従来のような所要換気量を求める際の補正係数ではなく、小型車および大型車の各煤煙排出量を補正するための係数として検討する。

速度勾配補正係数の検討は、図-7 に示すとおりとした。新短期規制(平成 14~16 年度)、新長期規制(平成 17~19 年度)の規制車については台上試験を行い、速度および縦断勾配が自動車から排出される煤煙の排出ガス濃度に及ぼす影響を把握した。さらに、既往の短期規制(平成 5~6 年度)、長期規制(平成 9~11 年度)の台上試験結果³⁾とあわせて、車両保有台数お

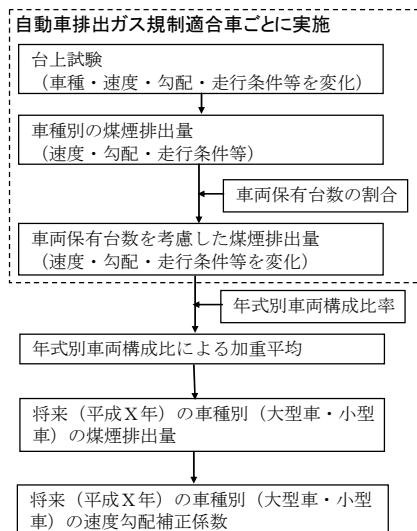


図-7 速度勾配補正係数の検討の流れ

よび型式別車両構成比を考慮した小型車および大型車の煤煙排出量を算出し、トンネル換気施設の設計を行う際の速度勾配補正係数について検討した。

3.2 新短期・新長期規制適合車の台上試験

3.2.1 台上試験の概要

試験に使用した台上試験装置(シャシダイナモメータシステム)の概要を図-8に示す。システムは、シャシダイナモメータ、吸入空気流量計、燃料流量計、直接排出ガス用分析計、オパシメータ等から構成される。シャシダイナモメータは、直流電気動力計と接続された金属製のローラにより駆動輪からの力を吸収または駆動することや試験車の等価慣性重量を機械的および電氣的に与えることができる装置である。また、煤煙はオパシメータを用いて光源と受光部の間に排出ガスを流した際の光強度の損失を測定することにより、透過度、吸光係数を測定した。

3.2.2 試験車両

試験は、表-5に示す小型車1台および大型車4台、合計5台について実施した。試験車両は新短期および新長期の排出ガス規制車として、排出ガスの後処理方式の異なる車両を選定した。

3.2.3 試験条件

試験は、定速走行モード(40km/h,60km/h,80km/h)および実走行モード(新建設省モードのTEC6(平均車速:56.3km/h)、TEC7(平均車速:61.3km/h)、TEC9(平均車速:83.4km/h))で縦断勾配(-4%~+6%)を変化させ

表-5 試験車両一覧

車体	車重重量(kg)	小型車	大型車1	大型車2	大型車3	大型車4
		最大積載量(kg)	1750	3790	11670	3740
車両総重量(kg)	1050	4000	13200	4100	13900	
燃焼方式	3130	7955	24980	7950	24915	
燃焼方式	直接噴射方式	直接噴射方式	直接噴射方式	直接噴射方式	直接噴射方式	
吸気方法	インタークーラー付きター	自然吸気	インタークーラー付きター	インタークーラー付きター	インタークーラー付きター	
シリンダ配列・気筒数	直列4気筒	直列6気筒	直列6気筒	直列6気筒	直列6気筒	
圧縮比	18.5	18.5	17.5	17.5	16.5	
総排気量(CC)	2494	7166	12913	7545	9203	
最高出力(kW/rpm)	80/3400	140/2900	279/1800	177/2700	265/2200	
最大トルク(N・m/rpm)	260/1600~2600	500/1500	1912/1100	686/1400	1442/1400	
排出ガスの後処理方式	酸化触媒	粒子状物質低減装置(酸化触媒+セラミック製フィルタ)	粒子状物質低減装置(酸化触媒+セラミック製フィルタ)	粒子状物質低減装置(酸化触媒+ワイヤーメッシュ式フィルタ)	NOx還元触媒	
排気ガス規制年度	新短期	新短期	新短期	新短期	新長期	
既走行距離(km)	13600	7400	139100	3900	2800	

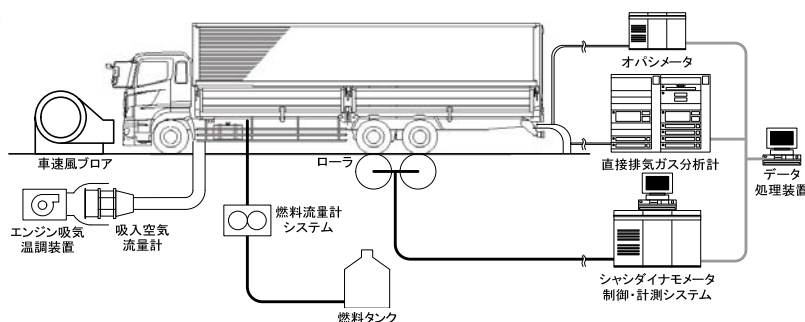


図-8 台上試験装置(シャシダイナモメータシステム)の概要

て実施した。試験時の積載条件は、半積載および定積載とした。

3.3 台上試験結果

図-9に走行速度60km/h(定速60km/h、実走行TEC7)時の各車両における1台あたりの煤煙排出量について、走行モード・積載条件毎に縦断勾配との関係を示す。図より、0%勾配の時の煤煙の排出量は、車両によるばらつきはあるものの、小型車・大型車の区別を含む車両、走行モード、積載条件の違いによる顕著な差異は見られず、煤煙の排出量は最大でも0.1m²/kmと非常に少ない。過去に実施された長期規制車の台上試験結果³⁾によれば、走行速度60km/h~80km/h時の半積載の条件で煤煙の排出量は最大1m²/km程度であり、その値と比較すると約10%と非常に小さい値となっていることが分かる。

次に、縦断勾配の違いによる排出量は、車両および走行条件によって傾向が異なるものの、縦断勾配が下り(-)の場合に小さく、縦断勾配が上り(+)の場合で大きくなる傾向が認められる。しかし、縦断勾配が上りの+4%の時で最大約0.3m²/kmであり、長期規制の排

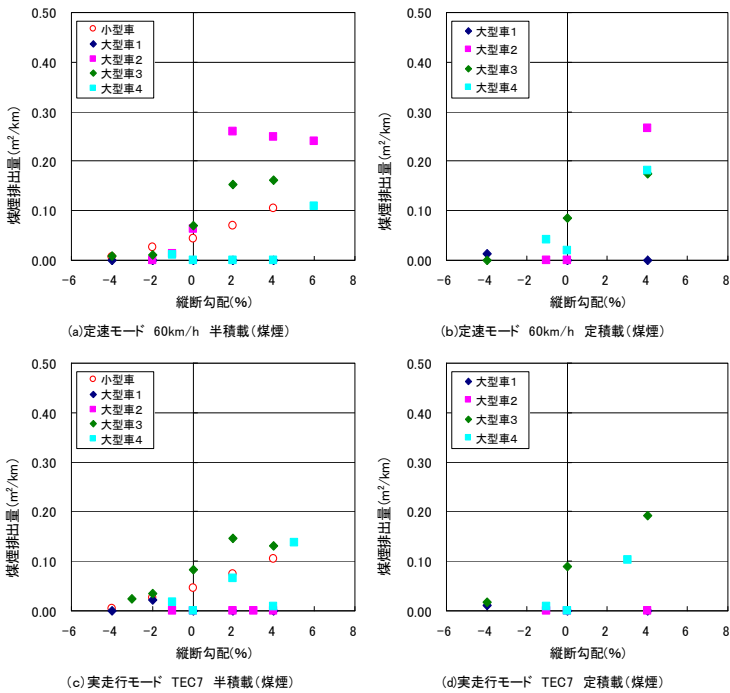


図-9 走行速度 60km/h 時の煤煙排出量と縦断勾配の関係

出ガス規制車を対象にした台上試験結果¹⁾から得られた上りの縦断勾配 4%の走行速度 60km/h の時の最大値の約 3m²/km と比較しても非常に小さい。また、0% 勾配時と同様に、小型車・大型車の区別を含む車両、走行モード、積載条件の違いによる顕著な差異は認められない。なお、走行速度が 40km/h、80km/h 時の条件でも 60km/h の排出量と顕著な差は見られず、また勾配による排出量の傾向も同様な結果であった。

以上より、新短期規制車および新長期規制車の排出量は、排出ガス規制の効果により長期規制の排出ガス規制車の排出量に比較して確実に減少しており、速度勾配補正係数を検討する上では、走行モード、積載条件を区別せずに整理できるものと考えられる。

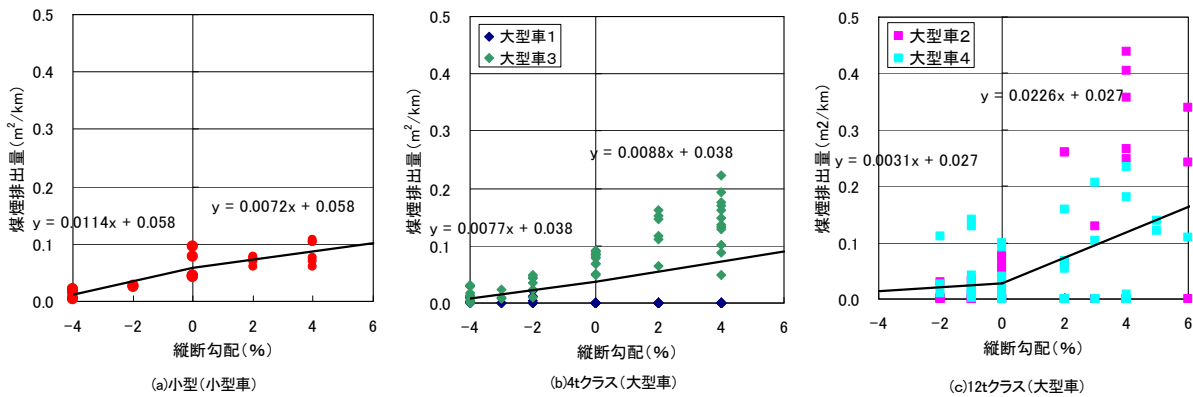


図-10 縦断勾配による各クラス毎の煤煙排出量

3. 4 排出ガス規制車の割合を考慮した速度勾配補正係数

台上試験により新短期・新長期規制車における煤煙排出量は非常に小さく、走行モード、積載条件の違いによる顕著な差異は認められないことが分かった。このため、図-10 に各クラス(小型(小型車)、4t クラス(大型車 1, 大型車 3)、12t クラス(大型車 2、大型車 4))のデータを用いて縦断勾配による煤煙排出量を近似した。

また、図-11(c)に各クラスごとの車両保有台数を参考に、小型：4t クラス：12t クラス = 70：15：15 として重み付けを行い新短期・新長期規制車の煤煙排出量を求めた。なお、同図には短期および長期規制車についても過去に実施された台上試験結果³⁾を用いて、各クラス毎の車両保有台数を考慮して上記方法と同様に整理した煤煙排出量もあわせて示した。

次に、近年の自動車保有台数を反映させた年式別車両構成比をもとに短期規制、長期規制、新短期・新長期規制の各排出ガス規制車の割合を求めると、図-12 のように推移する各排出ガス規制車の割合が得られた。これらの割合を考慮した加重平均した煤

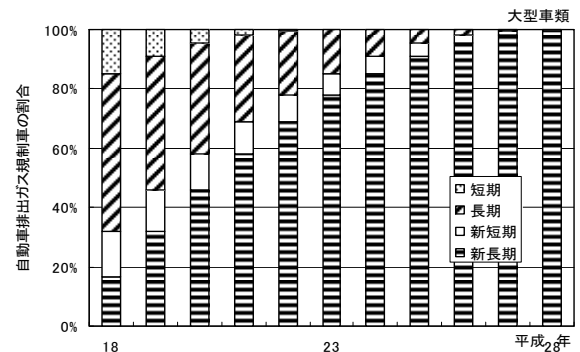


図-12 自動車排出ガス規制車の割合 (大型車)

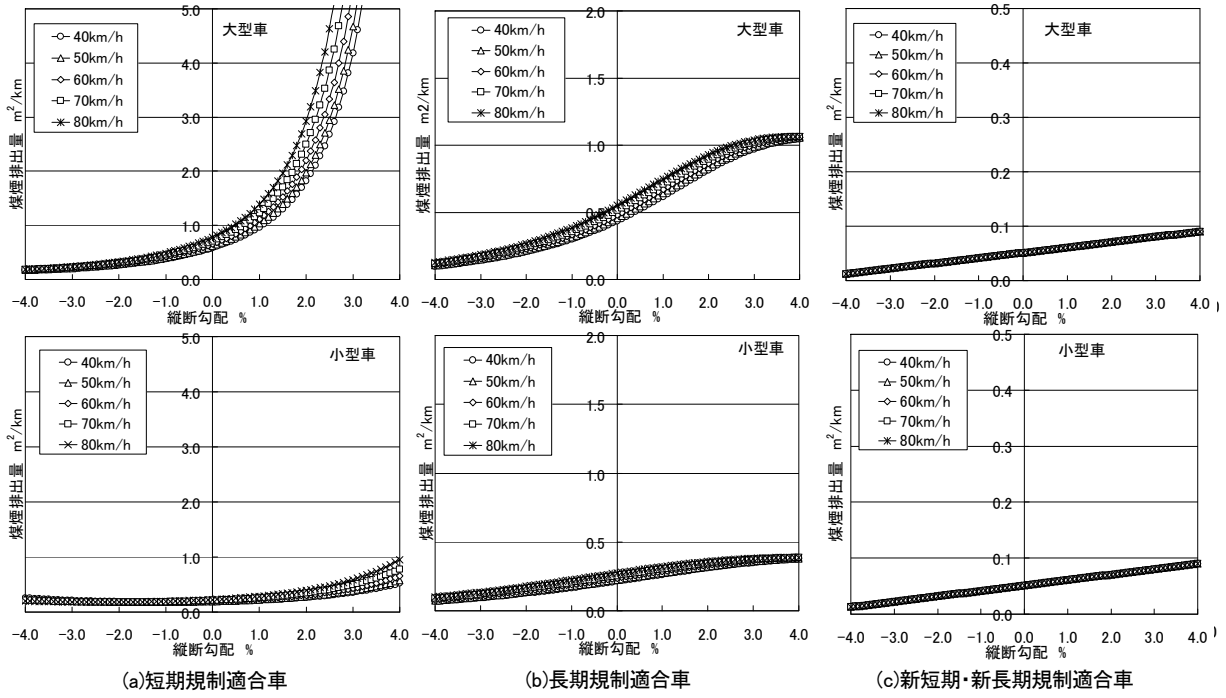


図-11 自動車の各排出ガス規制車における速度および縦断勾配による煤煙排出量

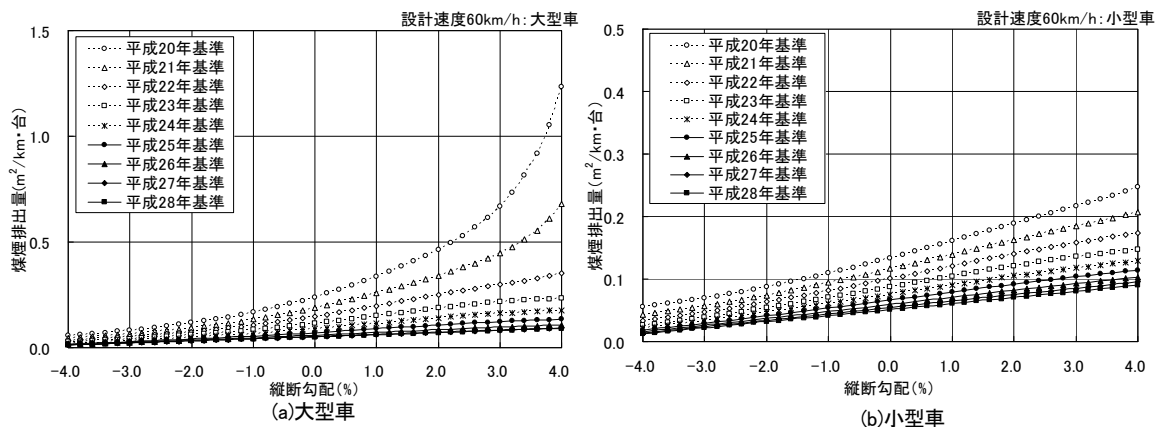


図-13 自動車の各排出ガス規制車の割合を考慮した縦断勾配による煤煙排出量 (設計速度60km/h)

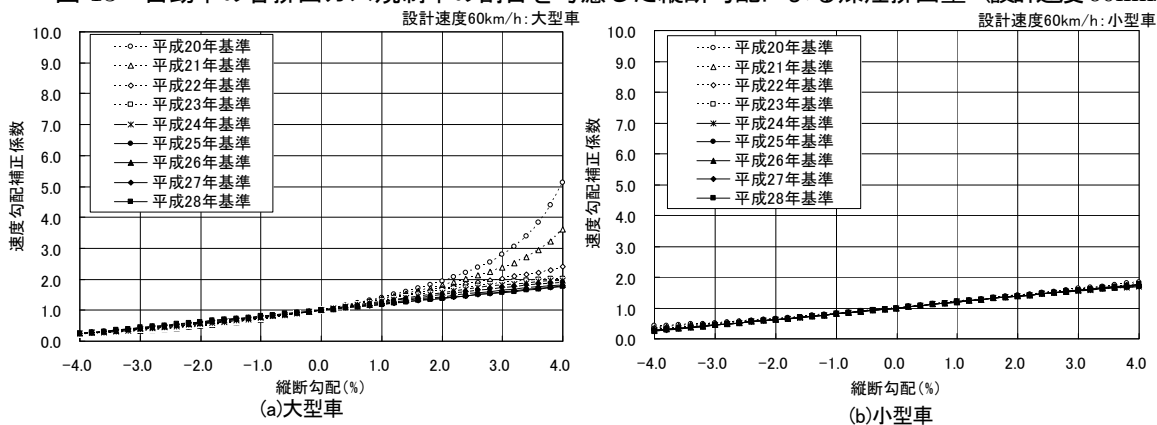


図-14 自動車の各排出ガス規制車の割合を考慮した縦断勾配補正係数 (設計速度60km/h)

煙煤排出量は図-13のとおりとなる。図-13の各縦断勾配における煤煙排出量から0%勾配を基準(1.0)にした時の設計速度60km/h時の勾配補正係数を図-14に示す。図より、小型車の速度勾配補正係数は、

下り・上りの勾配に関係なく、年度によらずほぼ一つの補正係数で示すことができる。大型車の速度勾配補正係数は、上り勾配の補正係数は平成24年までは急激に変化するものの、平成25年以降は大き

な変化はない。また、下り勾配は年度によらずほぼ一つの補正係数で表すことが可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では供用中の道路トンネルを用いて、換気対象物質である煤煙、CO を主な対象とした排気ガス濃度の実態調査を実施し、過去に実施した実態調査結果も含めて自動車1台あたりの排気ガスの排出量の推移を把握し、排出ガス規制を考慮した換気施設の設計に用いる自動車1台あたりの排気ガスの排出量を検討した。また、新短期・新長期排出ガス規制車を対象に台上試験を実施するとともに、短期・長期排出ガス規制車を対象とした既往の台上試験結果もあわせて、各排出ガス規制車の割合を考慮した速度勾配補正係数の検討を行った。

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)平成 19 年の供用中の道路トンネルの実態調査結果から、自動車1台あたりの排出量は年々減少傾向にあることを再確認した。
- 2)換気設計に用いる煤煙排出量は、第4次答申までの自動車の排出ガス規制を考慮した排出量の将来予測結果から、大型車・小型車ともに煤煙排出量は平成 25 年頃まで減少傾向があり、最終的には小型車で約 $0.3\text{m}^2/\text{km}\cdot\text{台}$ 、大型車で約 $1.5\text{m}^2/\text{km}\cdot\text{台}$ 程度まで減少する。
- 3)換気設計に用いる CO 排出量は、急性毒性に対する人体への影響などを考えて測定結果のばらつきなどを考慮した安全側の値として考えると、実態調査結果をほぼ包含できる概ね $5\text{ppm}/\text{km}\cdot\text{台}$ となる。
- 4)新短期・新長期規制車を対象とした台上試験での煤煙排出量は、上りの縦断勾配が大きくなると高くなる傾向があるものの、排出量は非常に小さく、車両・走行モード・積載条件の違いによる顕著な差異は認められない。
- 5)換気設計に用いる速度勾配補正係数は、小型車は下り・上りの勾配に関係なく、年度によらずほぼ一つの補正係数で示すことができる。また、大型車は上り勾配の補正係数は平成 24 年までは急激に変化するものの、平成 25 年以降は大きな変化はなく、下り勾配は年度によらずほぼ一つの補正係数で示すことができる。

参考文献

- 1)建設省土木研究所：トンネル換気設計に用いる煤煙の自動車 1 台あたりの発生原単位と補正係数に関する研究報告書、建設省土木研究所共同研究報告書第 114 号、平成 7 年 3 月
- 2)独立行政法人土木研究所：土木研究所成果報告書平成 16 年度、平成 17 年 3 月
- 3)(財)高速道路調査会：第二東名・名神トンネルの換気設計に関する調査検討(その 3)報告書、平成 12 年 3 月

A STUDY ABOUT A DESIGN METHOD OF ROAD TUNNEL VENTILATION FACILITIES

Abstract : It is necessary to specific the amount of emission and correction coefficient to velocity and gradient reflecting the latest automobile exhaust gas regulations, for rational design of ventilation facilities in road tunnel. In terms of the amount of emission, field surveys on the density of automobile exhaust gas in the road tunnel, which is in service, are carried out. The amount of emission with the consideration of recent exhaust gas regulations is estimated, and the amount of emission per car used in design of ventilation facility is proposed. In terms of correction coefficient to velocity and gradient, the engine bench tests using the cars, which are content with new short-term and long-term automobile exhaust gas regulations, are carried out. The amounts of emission of funnel fume in different velocities and longitudinal gradients are measured. With these results and the results of engine bench test using the cars, which are content with past short-term and long-term automobile exhaust gas regulations, correction coefficient to velocity and gradient, in which the ratio of cars with automobile exhaust gas regulations is considered, is proposed.

Key words : Road tunnel, Ventilation plan, Field survey, Engine bench test, Correction coefficient to velocity and gradient