

トンネル換気における 排出ガス低減状況と将来予測

村田 雄輝¹・伊藤 哲男²・海瀬 忍³・清水 雅之⁴

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）

E-mail:y.murata.ac@ri-nexco.co.jp

²正会員 西日本高速道路株式会社 技術本部（〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島1-6-20）

E-mail:t.ito.ak@w-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）

E-mail:s.kaise.aa@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）

E-mail:m.shimizu.ac@ri-nexco.co.jp

我が国の自動車排出ガス低減対策への取組みは、主として新車の排出ガス量許容限度の段階的な改正が行われてきている。高速道路トンネルの換気設計は2009年（平成21年）に自動車排出ガス規制効果を考慮した煤煙排出量の将来予測値を採用しており、トンネル内環境の改善の実態が反映されている。本報告では、このような動向を適宜、トンネル換気設計に反映するため、近年における供用中の高速道路トンネルの実態調査を行い、排出ガス規制効果による換気対象物の更なる低減状況の把握および換気対象物の将来予測値について検討を行ったものである。

Key Words : ventilation, vehicle exhaust gas regulations, particulate matter, traffic ventilation power, carbon monoxide, nitrogen oxide

1. はじめに

我が国の自動車排出ガス低減対策への取組みは、主として新車の排出ガス量許容限度の段階的な改正が行われてきている。東日本・中日本・西日本高速道路株式会社（以下“NEXCO”という）が管理する高速道路トンネルにおける換気設計は平成21年に自動車排出ガス規制効果を考慮した煤煙排出量の将来予測値を採用しており、高速道路トンネル内の換気対象物の改善の実態が反映されている¹⁾。今後も新規規制適合車の比率が増加することが予測されることから、このような動向をトンネル換気設計に反映するため、平成27年、平成28年に供用中の高速道路3トンネルにおいて、トンネル内の換気環境に関する実態調査を実施した。本報告は、それらの結果をもとに、排出ガス規制効果による換気対象物の低減状況を把握し、トンネル換気設計諸数値の設定および合理的なトンネル換気設計手法の策定のため検討を行ったものである。

2. トンネル換気対象物質の現状

(1) 低排出ガス対策

環境省の中央環境審議会の答申²⁾により、今後の自動車排出ガス対策のあり方について図-1に示す規制目標値が設定され、特にディーゼル自動車の粒子状物質は、平成6年の短期規制時に比べ平成21年の09年規制では99%の削減を規制目標値として掲げられている。

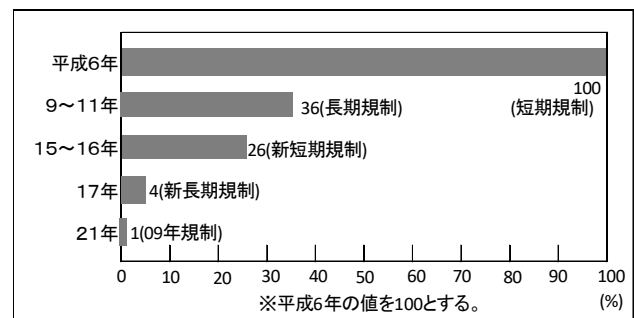


図-1 ディーゼル重量車規制強化の推移（粒子状物質）

(2) 換気対象物質と基準値

現行のNEXCOにおけるトンネル換気設計要領³⁾では、平成19年までに供用トンネル内の換気対象物質の実態が改善されている状況と今後も新規制適合車の比率が増加することが予測されるため、平成21年に換気設計に用いる諸数値を低減する改定が行われた。図-2に改定した煤煙排出量の将来予測値と測定値を示す。改定により、一方通行トンネルにおける煤煙将来予測値および一酸化炭素濃度に対するジェットファンの必要台数は、概ね延長6,000m以下で自然換気が成立することとなった。

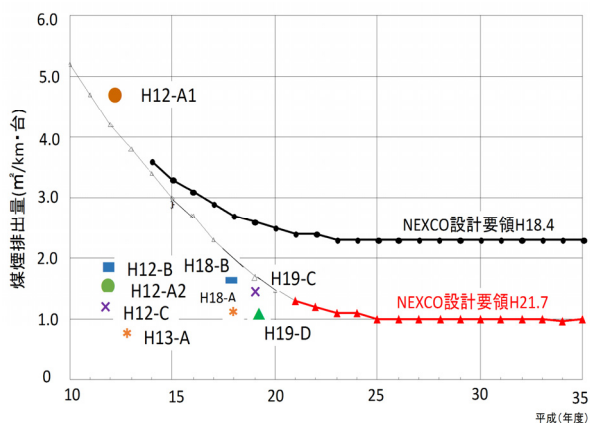


図-2 煤煙排出量の将来予測値と測定値 (大型車)

表-1 換気対象物

項目	調査対象物
換気実態調査	煤煙透過率 窒素酸化物濃度 一酸化炭素濃度 PM2.5重量濃度 SPM重量濃度 トンネル内風速 トンネル外風速 温度 湿度 交通量 走行速度
トンネル内粉じん調査	粉じん粒径分布 粉じん捕集 粉じん成分分析

3. トンネル換気対象物質実態調査

(1) 調査概要

換気実態調査は表-1の対象物とし、現地における測定と、捕集した試料を試験室に持ち込み、成分分析を行うものである。測定は供用中の3トンネルにおいて、平成27年、平成28年に、トンネル内の換気環境に関する実態調査を行った。調査は平日または休日に跨ぐ3日間連続計測で72時間以上のデータを収集することとした。調査機器の設置状況を図-3に示す。

(2) 調査結果

a) 換気対象物質

換気対象物の測定濃度を10分間毎に集計した平均値を表-2に示す。調査結果より、煤煙とCOについては現行設計基準の許容濃度(煤煙透過率50%, CO濃度100ppm)に対して大幅に低い結果であり、NO_x濃度についても労働衛生上の許容濃度(「米国産業衛生専門家会議」(ACGIH)の許容限界値等の勧告)NO=25ppm, NO₂=3ppmに比べて大幅に低い値となり、海外の道路トンネル内NO_x許容濃度15ppm~25ppmと比較しても低い状況であった。



図-3 調査機器設置状況

表-2 換気対象物実態調査結果

項目	H27				H28					
調査年										
調査トンネル	Eトンネル		Fトンネル		Bトンネル					
地点	坑口側	坑内側	坑口側	坑内側	坑口側	坑内側	坑口側	坑内側	坑口側	坑内側
煤煙透過率(%)	86.8	89.8	98.3	92.6	99.8	99.5	(未測定)	(未測定)	91.1	90.2
一酸化炭素(CO) (ppm)	1.61	2.88	2.08	4.38	2.72	5.37	2.63	5.75	0.02	0.061
窒素酸化物(NO _x) (ppm)	0.24	1.88	0.31	0.92	0.30	0.69	0.22	0.49	0.28	1.40
一酸化窒素(NO) (ppm)	0.19	1.55	0.24	0.77	0.22	0.57	0.16	0.40	0.06	0.48
二酸化窒素(NO ₂) (ppm)	0.06	0.33	0.07	0.15	0.08	0.12	0.06	0.10	0.19	2.02

b) 粒径別発生源寄与率

供用中の2トンネル内に浮遊する粒子状物質の粒径別発生源寄与率の比較を行った。図-4に示すとおり、微粒子は粒子状物質の約75%、70%を占め粗粒子が少ない。また、微粒子には自動車から排出される自動車排出ガス由来(排気管由来)が約62%、69%と非常に高く、次いでタイヤ摩耗粉じんや路面摩耗粉じんの順となっている。粗粒子は不明が約72%、43%と多い結果であるが、粒子状物質中の微粒子と比べ粗粒子の割合が小さく、その量は非常に少ないことから排気ガス規制の効果は粗粒子よりも微粒子の自動車排出ガス由来に現れるものと考えられる。以上の調査結果から、図-5に示すように自動車排出ガス由来の構成比率が高い微粒子が削減していく従来の煤煙構成物質の減少概念が適用できるものと考えられる。

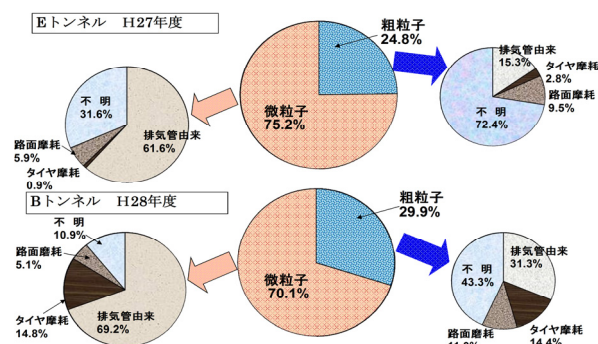


図-4 粒径別発生源寄与率

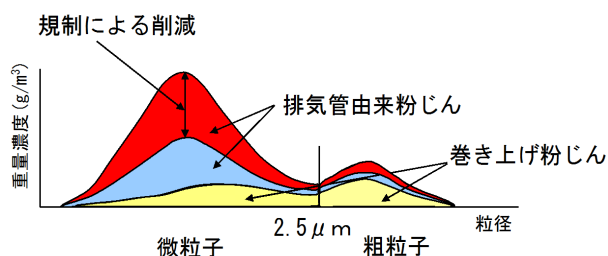


図-5 煤煙構成物質の減少概念

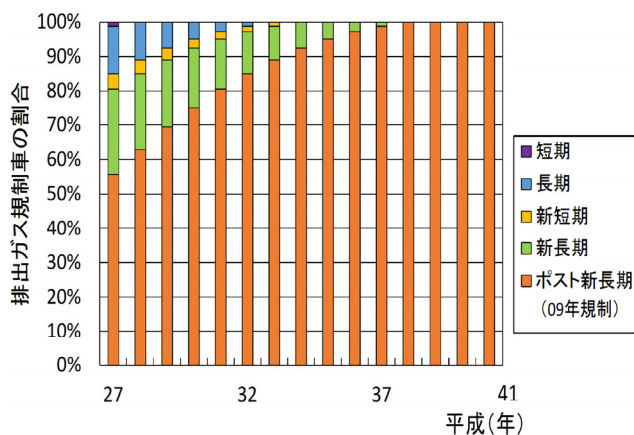


図-6 排気ガス規制適合車の推移 (大型車類)

c) 排出ガス規制適合車両の推移

換気対象物質の発生源である走行車両には年式により異なる排出ガス規制対策等が適用されていることから、換気対象物質の排出量の将来予測などを実施するために車種別、年式別の車両構成比が必要となる。供用中の高速道路の休憩施設において、平成27年にナンバープレート調査を行った。実施したナンバープレート調査の結果を基に、年式別車両構成比を作成し、将来の排出ガス規制適合車の割合を図-6に示すとおり整理した。ポスト新長期規制の割合は平成31年が80%であるが、平成38年(令和8年)になると100%となり全車両が入れ替わる予測となった。これらの状況を踏まえると、現状よりも更にトンネル換気対象物質の低減が見込まれる。

4. トンネル換気設計に用いる値の検討

(1) 将来の煤煙排出量の設定手法および手順

自動車排出規制による削減効果を考慮した将来の煤煙排出量は、図-7の手順で行った。自動車排出ガス規制は、排気管からの粒子状物質(PM)の重量濃度で与えられるのに対して、換気設計で考慮する走行環境の尺度は光学濃度を基本とするため、重量濃度と光学濃度の関係を設定することが必要となる。この光学濃度と重量濃度の関係を(1)式のとおり仮定する。

$$K = \alpha X + \beta Y \quad (1)$$

K : 煤煙の光学濃度をもとにした発生量($\text{m}^2/\text{km} \cdot \text{台}$)

α : 微粒子に対する換算係数

β : 粗粒子に対する換算係数

X : 微粒子の重量濃度をもとにした発生量($\text{g}/\text{km} \cdot \text{台}$)

Y : 粗粒子の重量濃度をもとにした発生量($\text{g}/\text{km} \cdot \text{台}$)

調査解析の結果は表-3のとおりである。

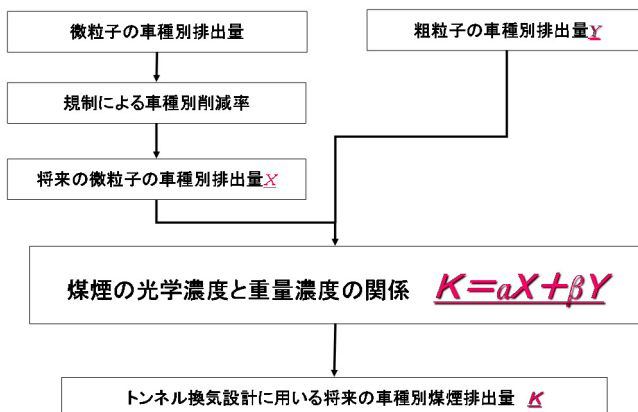


図-7 将来煤煙排出量の予測手順

表-3 光学濃度と重量濃度の換算係数

	α	β
Aトンネル	14.18	4.20
Bトンネル	11.05	9.86

(2) 煤煙排出量の将来予測

設計要領による大型車と小型車 1 台当たりの煤煙排出量の将来予測値と今回までの調査結果を図-8、図-9 に示す。大型車の平成 27 年調査の F トンネルの特異値を除いて、現行設計要領の煤煙排出量を下回っていることが確認できる。F トンネルの特異値は、深夜の交通量が少ない時間帯に排出量の値が大きい車両が通過したため、10 分間データの平均値が高い値となった。この値を除いてデータ整理を行うと、他のトンネルと同等の値となることを確認している。更に、この 2 カ年の調査結果を基に煤煙排出量の将来予測値によると、今後も平成 32 年(令和 2 年)頃まで減少傾向が続き、大型車は現行設計値の約 8 割となる約 $0.8\text{m}^3/\text{km} \cdot \text{台}$ 、小型車は現行設計値の約 3 割となる約 $0.1\text{m}^3/\text{km} \cdot \text{台}$ と予測した。

(3) 一酸化炭素排出量の予測値

トンネル内で交通渋滞が発生する場合には、視認性よりも生理的影響を及ぼす一酸化炭素を対象として換気設計を行うこととなっており、換気の検討を行う場合のチェックとして渋滞における車道の走行状況を把握することとした。実態調査は通常走行の 40km/h 以上の走行状態に追加して渋滞が予想される時期に実施し、走行速度 $5\sim 40\text{km/h}$ の走行域のデータを収集して予測値の検討を行った。

(4) 一酸化炭素排出量の提案値

過年度の実態調査結果の比較を図-10 に示す。煤煙排出量と同様に現行設計要領の値に比べて下回っていることが確認された。現行設計要領の通常時は $0.005\text{m}^3/\text{km} \cdot \text{台}$ であり、渋滞時の CO 排出量は $0.007\text{m}^3/\text{km} \cdot \text{台}$ であるが、今後の設計値として渋滞時の CO 排出量も通常時と同様に低い実態値を示していることから、表-4 に示すとおり通常時と渋滞時を区別せず $0.003\text{m}^3/\text{km} \cdot \text{台}$ の排出量を提案する。

現行設計要領では、一方通行トンネルにおける煤煙将来予測値および一酸化炭素濃度に対するジェットファンの必要台数は、概ね延長 $6,000\text{m}$ 以下で自然換気が成立することとなっているため、改定案の値を適用した場合、更に設置不要となる範囲の拡大が見込まれると考えられる。

(5) 一酸化炭素排出量の提案値

換気設計の補正值について、平成 27 年の全国の交通量データを基に、現行の設計要領で区分されている交通変動パターンのタイプ別に妥当性を確認した。現行の交通パターンは都市型、都市近郊型、郊外型、地方型、通過型の 5 区分に分けられているが、検討の結果、平成 21 年 7 月の改定から 10 年程度経過しており、交通ネットワークの整備が進んだことにより、各パターンとも同様な傾向を示すことが分かった。

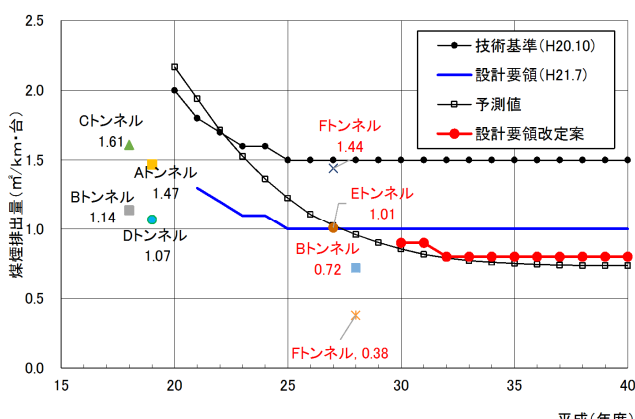


図-8 煤煙排出量の予測及び測定値 (大型車)

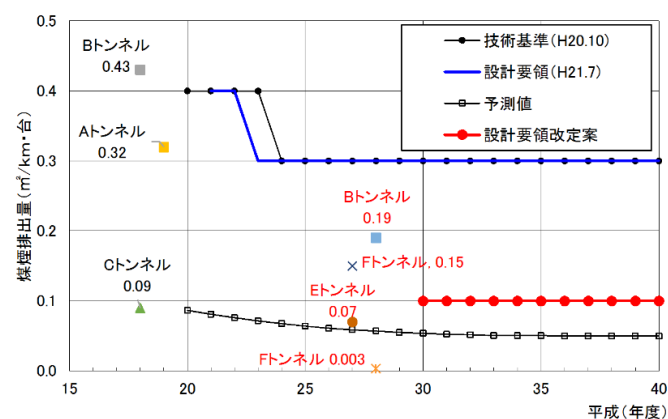


図-9 煤煙排出量の予測及び測定値 (小型車)

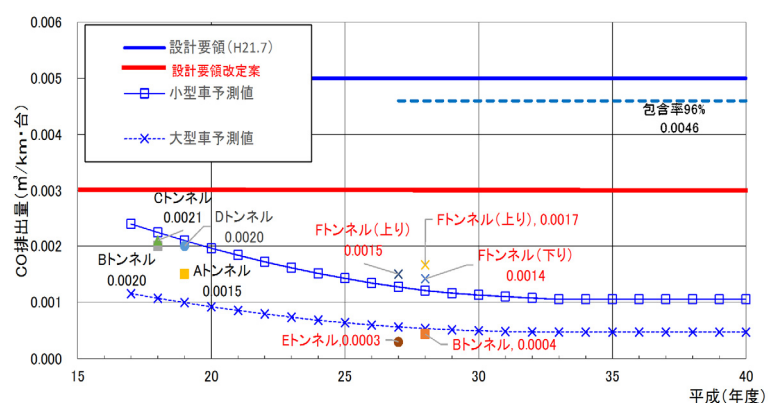


図-10 一酸化炭素濃度の測定値 (全車)

表-4 一酸化炭素の 1 台当たりの排出量

	排出量		備考
	平均値	標準偏差	
小型車	0.003 $\text{m}^3/\text{km} \cdot \text{台}$	考えない	渋滞時の排出量 $0.003 \text{ m}^3/\text{km} \cdot \text{台}$
大型車			停止時の排出量 $0.001 \text{ m}^3/\text{分} \cdot \text{台}$

図-11 に路線区分別の時間係数を示す。路線区分別の交通変動パターンが類似する傾向から、現行のように地域別とせず、断面日交通量が2万台/日毎の交通量で区分した値に特徴が確認出来たことからK値、D値、 S_{α} 、 S_{β} の換気設計の補正値を表-5に示す断面日交通量毎の交通量区分による補正値で行うことを提案した。

(6) 換気設備規模の縮減

換気対象物の煤煙排出量の予測値およびCO排出量を

表-5 換気設計補正値

断面日交通量	2万台未満	2万台以上 4万台未満	4万台以上 6万台未満	6万台以上
K値	12	10	8	7
D値	60			
S_{α}	0.5	0.6	0.8	1.0
S_{β}	0.4	0.4	0.5	0.6

K値：年平均日交通量に対する30番目時間交通量の割合
D値：往復合計の交通量に対する重方向交通量の割合
 S_{α} ：煤煙に対する30番目時間換気量への大型車混入率の補正値
 S_{β} ：COに対する30番目時間換気量への大型車混入率の補正値

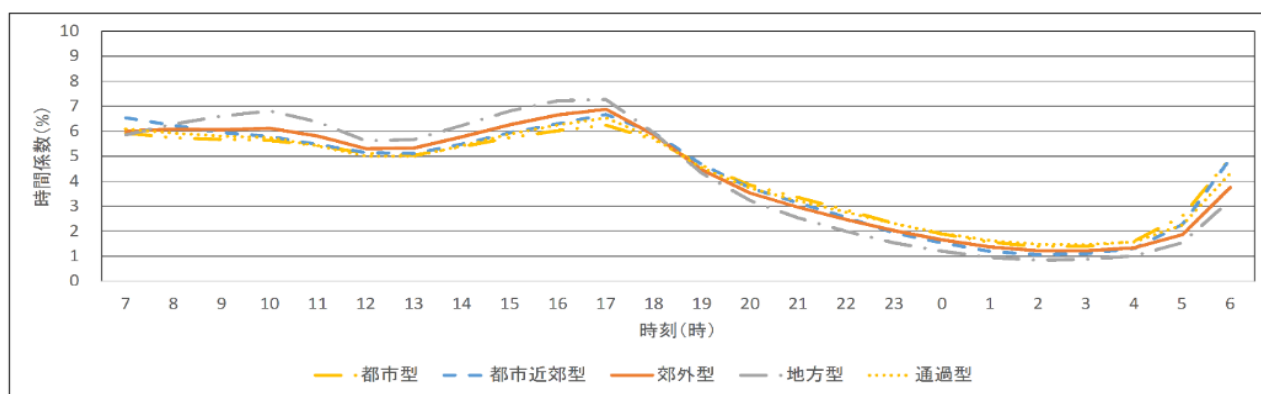


図-11 路線区分別の時間係数

表-6 試算条件

1)トンネル構造条件		2)換気計画条件				
①道路構造規格	1種3級	①交通条件				
②交通方式	2車線（一方、対面）	種別	設計交通量 （台/h）	大型車混入率 （%）	走行速度 （km/h）	備考
③トンネル延長	1500～10,500m（一方、対面）1,500m毎					
④トンネル断面	断面積64.8m2 代表寸法8.2m（Ⅴ-a）（対面） 断面積55.8m2 代表寸法7.6m（Ⅲ-a）（一方）					
⑤縦断勾配	±2%（対面） +3%（一方）	②設計濃度		煤煙：τ＝30%、CO：100ppm（対面） 煤煙：τ＝42%、CO：100ppm（一方）		

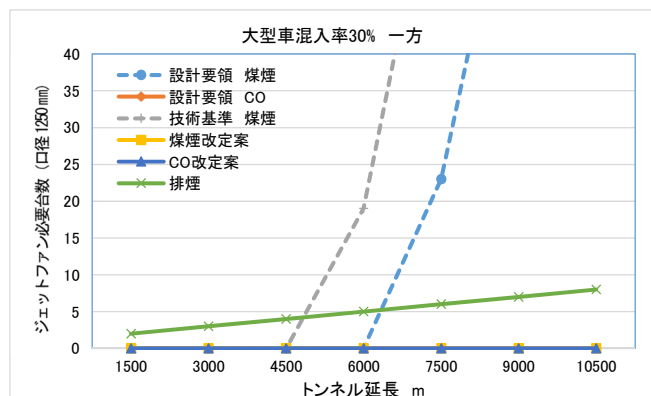


図-12 換気設備規模 (一方通行)

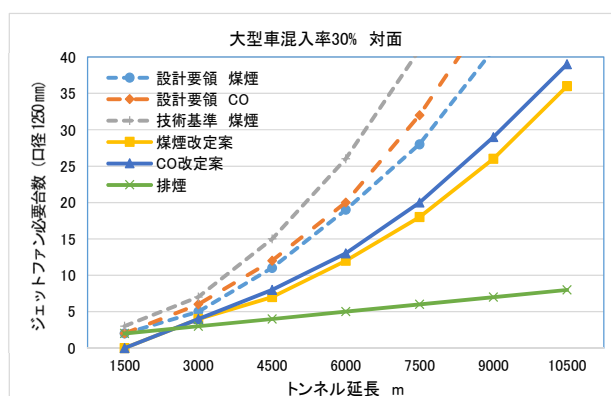


図-13 換気設備規模 (対面通行)

表-7 ジェットファンの必要台数

ジェットファン 口径	現行台数 (台)	改定台数 (台)	削減台数 (台)
1530mm	97	144	65
1250mm	112		
1030mm	26	9	17
合計	235	153	82

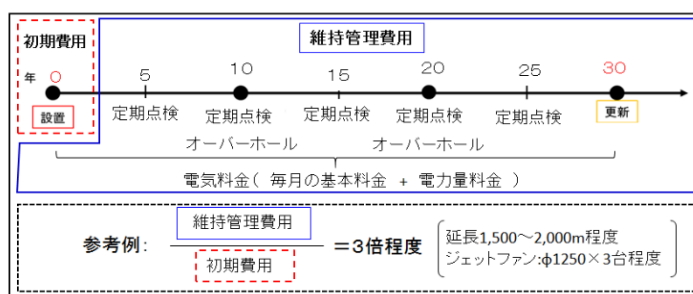


図-14 維持管理費のイメージ

(7) 削減効果

供用トンネルの換気設備の必要台数について、平成28年の設備調書と資産調書を基に全国55本のトンネルを対象に試算した。表-7にジェットファン必要台数の試算結果を示す。排煙設備は別にして、35%程度の換気設備の台数削減が可能となった。台数削減により、車道上の落下リスクの低減や点検・維持管理の効率化も図られることとなり、図-14に示す維持管理費のイメージで30年間の維持管理費を60,000千円/台と仮定すると約50億円の削減規模となる。また、煤煙排出量の値が低減されたことにより、照明の保守率も低減されることとなり照明の設備費や維持管理費の縮減にも寄与することとなった。

また、従来、換気設備は煤煙を対象とした規模で決定される場合が大半であったが、今後は一酸化炭素濃度を対象とする設備規模の決定が多くなることも新たな知見として得られた。今後も排出ガス規制適合車両の移行過程や排出量の動向、および非常時の排煙設備としての取扱いに注意を払い、換気の運用実態をモニタリングしながら適宜、換気設計諸数値の妥当性を確認していく必要があるとともに、NOxについては規制値の動向も含め検討をしていきたい。

謝辞：本報告は、工学院大学水野顧問を委員長とする排出ガス規制動向に関するトンネル換気設計検討会の委員の皆様、多大なご協力を頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

5. まとめ

2ヵ年の換気実態調査より、車両からの換気対象物の発生量が確実に減少していることを確認し、新たな煤煙排出量と一酸化炭素濃度の将来予測値を提案することができたことから、既設の換気設備規模よりも大幅に縮減されることとなった。

参考文献

- 1) 下田哲史, 中野清人, 佐伯徹: 自動車排出ガス規制を適用させた高速道路トンネル換気設計の検討, 日本機械学会年次大会講演論文集, pp.129-130, 2009.
- 2) 中央環境審議会: 今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について(第八次答申), pp.2-3, 2005.
- 3) 設計要領第三集 トンネル本体工建設編・保全編, 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株), 2016.

(2019. 8. 9 受付)

EXHAUST GAS REDUCATION AND FUTURE PREDICTION IN TUNNEL VENTILATION

Yuki MURATA, Tetsuo ITO, Shinobu KAISE and Masayuki SHIMIZU

Japanese emission control for vehicle act regarding to particulate matter has been tightened gradually. We checked the sources of particle matters and its proportion and annual variation of extinction concentration by emission control to confirm the validity of our estimation. As a result the reduction of turbidity has been confirmed by the actual measurement in tunnel. It can be expected that the turbidity will be decreased according to strengthening of emission control in future. In this report, we investigated the reduction situation of the ventilation object by emission control, and examined the future prediction value of the ventilation object.