

III-10 小断面トンネルの換気・照明設計法に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路勘定）
研究期間：平 11～平 14
担当チーム：トンネルチーム
研究担当者：真下 英人、石村利明、
砂金伸治、森本 智

【要旨】

都市内交通の渋滞緩和を目的として、建設コストの縮減を図りながら交通容量の増加を目指す一方策として小型車専用道路の導入が検討されている。小型車専用道路のトンネルでは断面高さが低く、また縦断勾配が大きい場合が考えられるため、換気施設に関しては急勾配における換気対象物質の排出量の把握、照明施設に関しては設置高さの変化による視認性、照明器具からの眩しさ等の把握が必要である。本調査では、台上試験などにより急勾配における小型車から排出される換気対象物質の排出量の調査を行い、小断面トンネルの換気設計に用いる換気対象物質の排出量の設定方法を提案するとともに、試設計により視認性、照明器具からの眩しさ等の検討を行い、現行のトンネル照明設計法に基づいた照明方法の小断面トンネルへの適用性を確認した。

キーワード：小型車専用道路、小断面トンネル、換気設計、照明設計、グレア

1. はじめに

主として都市内の渋滞緩和を目的として、建設コストの縮減を図りながら交通容量の増加を目指す一方策として、小型車専用道路の導入が検討されている。小型車専用道路のメリットの一つに縦断勾配を大きくとることが可能になる点がある。しかし、トンネル換気については、現状では急勾配における換気対象物質の排出量が不明であること、および自動車の性能向上により排出量が年々減少していることを勘案すると、設計に用いる排出量を新たに設定する必要がある。また、照明施設に関しては設置高さの変化による視認性、照明器具からの眩しさに関する検討を行い、通常の2車線道路トンネルと同様の視環境が確保されるかどうかの確認が必要である。そのため本研究は、換気施設に関しては急勾配での小型車の排出量の検討を行うとともに、小断面トンネルにおける照明特性について検討した。

2. 急勾配条件下での換気設計に関する研究

2.1 研究目的

主として都市内の渋滞緩和を目的として、建設コストの縮減を図りながら交通容量の増加を目指す一方策として、小型車専用道路の導入が検討されている。小型車専用道路のメリットの一つに縦断勾配を大きくとることが可能になる点がある。しかし現状

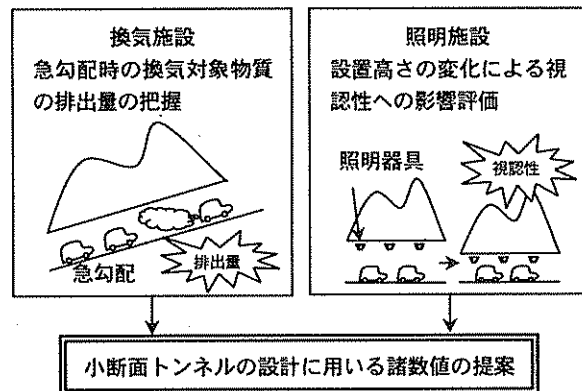


図-1 本調査のフロー

のトンネル換気については縦断勾配が4～5%程度を超えるような急勾配における換気対象物質の排出量が不明であること、および自動車の性能向上により排出量が年々減少していることを勘案すると、設計に用いる排出量を新たに設定する必要がある。そのため、本研究では急勾配条件下での小型車の排出量を台上試験により測定し、既存の調査結果を含めて小型車専用道路トンネルの換気設計のための排出量、急勾配時の勾配補正係数について検討を行い、提案することを目的とした。

2.2 研究方法

小型車専用道路トンネルの換気設計のための排出量、勾配補正係数は、台上試験結果と実態調査結果をもとに検討することとし、ディーゼル車の排出量

に関する台上試験および実態調査については既存の調査結果^{1) 2)}を活用することとし、ガソリン車の排出量については既存の資料がないために新たに台上試験を行った。

2.3 研究結果

(1) 台上試験から得られるガソリン車の排出量

台上試験はガソリン乗用車2台(車両A,B)を用いて表-1に示す台上試験条件で行い、台上試験により得られたCOと煤煙の排出ガス濃度をもとに速度および縦断勾配毎に排出量を算定し比較した。図-2に供試体車両毎の各走行モード、縦断勾配とCOの排出量の関係を示す。各車両とも速度や縦断勾配が大きいほど排出量は増加する傾向がある。+6%以上になると定速走行モードと実走行モードの違いがはっきりとし、実走行モードの排出量が多くなる。特に、車両Bが顕著な増加を示し、現在の換気設計で使用されている

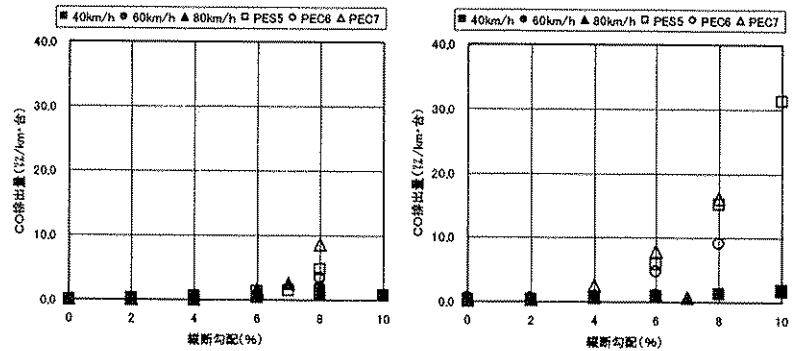
排出量 $7 \text{ ㉫}/\text{km} \cdot \text{台}$ と比較すると一部の条件で超過する場合がある。ただし、極端にCO排出量の多いPES5モードは、停止を含む加減速の繰り返しで構成されており、トンネル内の実走行状況を考慮するとトンネル内で発現する可能性は低いと考えられる。

図-3は供試体車両毎の各走行モード、縦断勾配と煤煙の排出量の関係を示したものである。車両Aの排出量は縦断勾配、速度にかかわらず0に近い値となっている。車両Bは勾配が増加すると増加傾向にあり、 40km/h 走行の 10% 勾配の場合には大幅に増加するが排出量の値としては $0.13\text{m}^2/\text{km} \cdot \text{台}$ 程度である。

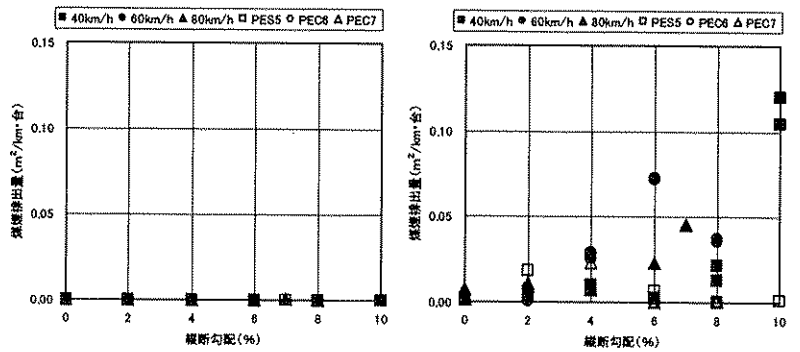
(2) 台上試験から得られるディーゼル車の排出量

小型ディーゼル車の排出量については、過去に実施された台上試験結果^{1) 2)}から以下のことが明らかとなっている。

COの排出量は、車両毎に縦断勾配の変化によって異なり、一部車両で縦断勾配の増加によって排出量が増加するものの、縦断勾配 8% で約 $1 \text{ ㉫}/\text{km} \cdot \text{台}$ と非常に小さい。煤煙の排出量は、勾配が増加すると排出量が増加する傾向にあり、ある条件以上になると急激な増加を見せ、その後の排出量はほぼ一定になる。また、同じ走行モードでもギア位置の違い



(a)車両A (b)車両B
図-2 COの排出量結果



(a)車両A (b)車両B
図-3 煤煙の排出量結果

により影響を受け、一部の車両では縦断勾配 8% で約 $1.3\text{m}^2/\text{km} \cdot \text{台}$ と高い結果を示す。すなわち、小型ディーゼル車は、COの排出量は小型車

ガソリン車よりも低い、煤煙の排出量は高い。したがって、COについてはガソリン車、煤煙についてはディーゼル車によって排出量および勾配補正係数を決定する必要があると考えられる。

(3) 実態調査から得られる小型車の排出量

供用中の道路トンネルにおいて最近実施された排気ガス実態調査²⁾からは、小型車におけるCOの排出量は約 $2 \text{ ㉫}/\text{km} \cdot \text{台}$ 、煤煙の排出量は約 $0.48\text{m}^2/\text{km} \cdot \text{台}$ 程度の結果が得られている。

(4) 換気設計のための排出量の検討

1) 換気設計に用いるCOの排出量・勾配補正係数

現在の道路トンネルの換気設計では、実際の排出量に比べて余裕を見込んだ値を採用しており、COに対する勾配および速度に対する補正は行っておらず、実態調査の結果をもとに $7 \text{ ㉫}/\text{km} \cdot \text{台}$ を採用している。

表-1 台上試験条件一覧

走行モード	平均速度	縦断勾配
定速走行	40km/h	0~10%
	60km/h	0~8%
	80km/h	0~8%
実走行(加減速あり)	40.7km/h(PES5)	0~10%
	57.3km/h(PEC6)	0~8%
	67.6km/h(PEC7)	0~8%

最近の実態調査および台上試験の結果から CO の排出量は縦断勾配が±4.0%以下のトンネルにおいては、従来の値の半分程度で減少傾向にある。しかしながら、ガソリン車を用いた台上試験結果から縦断勾配が大きくなると 7 ㉫/km・台程度になる場合も見られることから、換気設計に用いる CO の排出量は上限値を 7 ㉫/km・台として縦断勾配との関係に注意して設定する必要がある。

2) 換気設計に用いる煤煙の排出量・勾配補正係数
a) 排出量

煤煙は、配管由来と巻き上げ粉じんで構成されており、台上試験から得られる排出量は配管由来による値である。台上試験結果^{1) 2)}による定常状態(0%勾配、60km/h)における煤煙の排出量は表-2 に示すとおりであり、実態調査から得られた 0.48m²/km・台を下廻っているが、台上試験結果には巻き上げ粉じんによる排出量が含まれないことから、換気設計に用いる煤煙の排出量として現在用いている値の 0.5m²/km・台を採用するのが適切であると考えられる。

b) 勾配補正係数

勾配補正係数は、想定される縦断勾配、速度の組合せに対して短期規制車、長期規制車毎に煤煙排出量を次式により求め、近年の車両保有台数調査から得られた表-3 に示す規制車両の構成割合を考慮して算出した。

$$S = K_{Vi} \times Q_{ex}$$

ここで、S : 煤煙排出量 m²/km
 K_{Vi} : 吸光係数 m⁻¹
 Q_{ex} : 排出ガス量 m³/km

上式の吸光係数、排出ガス量は、それぞれエンジンの当量比、体積効率に関係するものであり、これらは車両諸元、車種、縦断勾配、速度によって決まる。本研究では縦断勾配、速度等と吸光係数、排出ガス量との関係は台上試験結果等から得られている回帰式²⁾を用いることとした。

表-2 台上試験による煤煙排出量 (0%勾配、60km/h (m²/km・台))

供試車両	エンジン種類	規制	煤煙 (m ² /km・台)
短期目標	ディーゼル乗用車	IDI・NA	0.214
		IDI・TC	0.468
	ディーゼル軽貨物車	IDI・NA	0.126 (空積載)
			0.102 (定積載)
長期目標	ディーゼル貨物車	DI・NA	0.086 (定積載)
			0.272 (定積載)
	ガソリン乗用車	NA	0.0005
			極少

表-3 規制車両の構成割合

年度	年別構成比率	規制車両
平成13年	10.27	長期規制 25%
平成12年	8.04	
平成11年	7.65	
平成10年	8.21	短期規制 75%
平成9年	9.31	
平成8年	9.44	
平成7年	8.49	
平成6年	7.59	
平成5年	6.82	
平成4年	6.5	
平成3年	5.68	
平成2年	11.99	

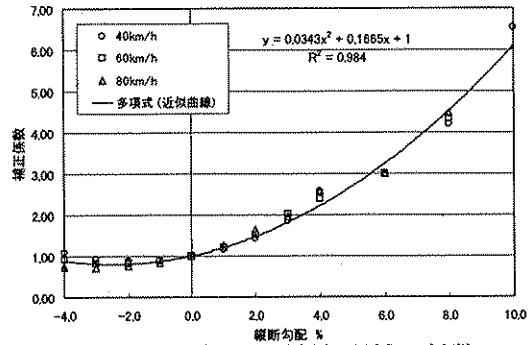


図-4 煤煙の縦断勾配補正係数

図-4 に算出した勾配補正係数を示す。これより、速度の違いによる勾配補正係数の差異はほとんどないことから一つの近似式による補正係数で代表できることが分かる。

3. 照明施設に関する検討

3.1 研究目的

乗用車専用道路のトンネルは、通常の2車線の道路トンネル断面に比べて小さな断面となるため、照明施設の設置にあたっては照明器具の設置高さが低くなることによって、従来のトンネル断面と同等程度の視環境が確保されているかどうかの確認が必要となる。本研究は、小断面の道路トンネル断面を想定し、現行の道路トンネルの照明施設設置基準に準拠した照明設計を行い、その状態における障害物の視認性、照明器具からのグレア(眩しさ)等について検討を行い、現行の照明設計法に基づいた照明方法の小断面トンネルへの適用性について検討を行った。

3.2 研究方法

研究は、小断面の道路トンネルを想定し、現行の照明施設設置基準に従って「設定路面輝度を下回らないこと」「照明器具の設置間隔を満足(向き合わせ配列時:2.5H(Hはトンネル高さ)、千鳥配列時:1.5H以下)すること」の条件を満足するように基本照明区間と入口照明区間の2照明区間の照明設計を逐点法³⁾による計算を行い、その状態下での照明器具からのグレア、ちらつき、障害物の視認性等を把握し

た。なお、逐点法の計算は、CIE（国際照明委員会）の方法によった。

(1) 基本照明区間の検討

設計速度に応じた4つの断面を想定し、表-4に示す条件で基本照明区間の設計を行い各検討項目の評価を行った。ここで、基本照明区間の検討項目は、路面の均斉度、障害物の視認性と照明器具からのグレア、ちらつきとした。図-5に小断面トンネルの一例としてB-1（設計速度 60km/h）の設定断面を示す。

(2) 入口照明区間の検討

入口照明区間は、基本照明区間に比べて設定路面輝度が高く照明器具の設置間隔が短いため、現状の路面輝度が確保されていれば、障害物の視認性、ちらつきについては問題はないことから、照明器具からのグレアについてのみの検討した。また、照明器具の設置高さによるグレアの影響を把握するため、設置高さを2車線道路トンネルでの一般的な設置高さ 4.8m とした場合の検討も実施した。なお、検討は、基本照明区間の検討と同様な方法により、表-5に示す条件で入口照明区間の設計を行い検討項目の評価を行った。

(3) 各検討項目の評価

各検討項目の評価内容および評価方法は、各項目に関する一般的な考え方、基準等を参考に表-6に示すとおりとした。照明器具からのグレアは、一般的な評価指標として用いられている TI 値を算出した。

3.3 研究結果

(1) 基本照明区間

計算結果を表-7に示す。表中の総合均斉度および輝度対比の値は最低値を、グレアの指標値の TI 値は最大値を示す。

1) 路面輝度

照明器具の光源、配列にかかわらず現行の設置基準の照明器具設置間隔を満足させると目標路面輝度に対して高い路面輝度となった。設計速度 80km/h を除き、その傾向が強い。これより、小断面トンネ

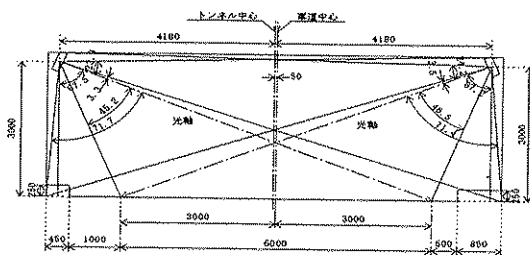


図-5 トンネル断面 (B-1:設計速度 60km/h)

表-4 照明設計の条件

基本照明区間	トンネル断面	4種類 (A-1, A-2, B-1, B-2)
	路面輝度	各設計速度に応じた値 設計速度40km/h : 1.5cd/m ² (A-1) 設計速度60km/h : 2.3cd/m ² (A-2, B-1) 設計速度80km/h : 4.5cd/m ² (B-2)
	光源	2種類 (低圧ナトリウムランプ(NX)、Hf蛍光ランプ(Hf))
	配列	2種類 (向き合わせ配列、千鳥配列)
	照明器具設置間隔	向き合わせ配列の場合2.5H以下、千鳥配列の場合1.5H以下 (Hは照明器具設置高さ)
入口照明区間	照明器具設置高さ	3.0m
	照明器具	道路トンネルで一般的に使用されている照明器具
	トンネル断面	4種類 (A-1, A-2, B-1, B-2)
	入口照明区間の路面輝度と延長	各設計速度に応じた入口照明曲線 (表-2)
	野外の輝度	4000cd/m ²
入口照明区間	光源	1種類 (高圧ナトリウムランプ)
	配列	1種類 (向き合わせ配列)
	照明器具設置高さ	3.0m, 4.8m
	照明器具	道路トンネルで一般的に使用されている照明器具

トンネル断面のA-1, A-2, B-1, B-2は、それぞれの幅員が2.5m, 2.75m, 3.0m, 3.25mを想定

表-5 入口照明区間の設計条件

設計速度 [km/h]	路面輝度 [cd/m ²]			長さ [m]			
	境界部	移行部 終端	緩和部 終端	境界部	移行部	緩和部	総延長
40	29	20	1.5	15	30	85	130
60	58	35	2.3	25	65	135	225
80	83	46	4.5	40	100	155	295

表-6 各検討項目の内容

検討項目	評価項目および内容
路面の均斉度	【総合均斉度】総合均斉度U ₀ は、照明計算から求める場合は路面上を逐点に分割して算出された個々の輝度の最小値L _{min} と平均路面輝度L _r の比 U ₀ = L _{min} / L _r
障害物の視認性	【輝度対比】輝度対比は、障害物の視認性を評価する指標として背景路面輝度L _r に対する障害物の輝度L _o と背景路面輝度と差の比 C = (L _r - L _o) / L _r
照明器具からのグレア	【TI値】グレア(減能グレア)は眼球内の散乱光によって生じる等価光輝度とその時の順応輝度の比率によって変化する。運転者の視線方向(俯角θ: 0°: 視点より86m先)の順応輝度(平均路面輝度)とグレア光源からの等価光輝度Leqを用いて以下の算出式で求められる。 TI = 165 × Leq / (L _r ^{1.25}) L _r ≤ 5.0 cd/m ² の場合 TI = 195 × Leq / (L _r ^{1.25}) L _r ≥ 5.0 cd/m ² の場合 Leq : 等価光輝度 L _r : 視線方向(視点より86m先)の路面輝度
ちらつき	【避けるべき周波数f ₂] トンネルで起こるちらつきによる不快感は、自動車の前面ウィンドの遮光角、ダッシュボードの構造、色彩、自動車の走行速度と照明器具の配光、設置間隔と生じる周波数、明暗輝度比、明暗時間率などが特定の領域になることが原因であると考えられる。 避けるべき周波数 [Hz] = 照明器具の設置間隔[m] / 走行速度 [m/s]

ルでは現在一般に用いられている照明器具を用いて現行の設置基準に従って照明設計を行った場合、路面輝度が過剰に得られてしまうことが分かる。ただし、より経済的な照明として路面輝度を設置基準の設計輝度に設定するためには、Hf 蛍光灯光源等の調光が可能器具を用いることで可能となる。

2) 総合均斉度

総合均斉度は、路上の障害物の視認性に影響する指標の一つである。総合均斉度に関する現行の設置基準での規定は特にないが、ヨーロッパ規格であるCEN ではトンネル照明の総合均斉度を0.3以上、日本道路公団では総合均斉度を0.4以上とする規定を

設けている。計算結果では、目標値を 0.4 とした場合、いずれの条件においても満足した値となっており、現在一般に用いられている照明器具を用いて現行の設置基準に従って小断面トンネルの照明設計を行った場合、総合均斉度に問題がないことが分かった。

3) 輝度対比

輝度対比は、Hf 向き合わせが 0.4 程度で、他の条件に比べて若干低い

が、他の NX 向き合わせ、NX 千鳥配列、Hf 千鳥配列の全ての条件で概ね 0.5 程度以上の結果となっている。通常、0.3~0.4 程度の輝度対比が確保できれば障害物等の視認性は確保されると考えられることから、現在一般に用いられている照明器具を用いて現行の設置基準に従って小断面トンネルの照明設計を行った場合、輝度対比に問題がないことが分かった。

4) グレア

設置基準ではグレアの制限は設けていないが、国際照明学会 (CIE) ではトンネル照明での減能グレアの規制値を 15% 以下としている。計算結果は、全ての条件で 10% 以下の値であり、この値を満足している。したがって、小断面トンネルでは現在一般に用いられている照明器具を用いて現行の設置基準に従って照明設計を行った場合、減能グレアに問題はないことが分かった。

5) ちらつき

設置基準では避けるべき周波数 5~18Hz を規定している。計算結果では B-2 において規定値に近い 4.9Hz を示すが全ての条件で避けるべき周波数以外となっており、ちらつきによる問題がないことが分かった。

(2) 入口照明区間

1) グレア

図-6 にグレアの評価指標 TI 値の結果の例を示す。横軸は坑口からの視点の位置、縦軸は TI 値を示す。TI 値の制限値については CIE(国際照明委員会) で推奨している 15% 未満を目安として評価した。図より、器具設置高さが 3.0m の場合は、小断面トンネルを既存の標準照明器具、光源を使用して所要の路面輝度を確保した場合、検討条件の全てにおいて TI 値が 15% を越えている範囲が存在することが分かる。一方、器具設置高さが 4.8m の場合は、検討条件の全て

表-7 基本照明区間の検討結果一覧

光源・配列	種類	設計速度 [km]	設計輝度 [cd/m ²]	平均路面輝度 [cd/m ²]	総合均斉度	輝度対比 (Lr-Lo)/Lr	TI 値 [%]	明暗周波数 [Hz]	設置間隔 [m]
NX 向き せ配列	A1	40	1.5	4.37	0.70	0.48	5.0	1.5	7.5
	A2	60	2.3	4.08	0.69	0.48	5.2	2.2	7.5
	B1	60	2.3	3.58	0.77	0.49	5.6	2.2	7.5
	B2	80	4.5	4.75	0.88	0.54	5.1	4.0	7.5
NX 千鳥 配列	A1	40	1.5	3.64	0.64	0.53	5.0	2.5	4.5
	A2	60	2.3	3.40	0.63	0.52	5.4	3.7	4.5
	B1	60	2.3	2.98	0.70	0.50	5.7	3.7	4.5
	B2	80	4.5	4.80	0.68	0.49	5.7	4.9	4.5
Hf 向き せ配列	A1	40	1.5	4.34	0.56	0.38	7.1	1.5	7.5
	A2	60	2.3	4.00	0.55	0.38	7.4	2.2	7.5
	B1	60	2.3	3.52	0.62	0.39	7.7	2.2	7.5
	B2	80	4.5	4.88	0.60	0.38	7.5	3.0	7.5
Hf 千鳥 配列	A1	40	1.5	3.62	0.57	0.51	7.2	2.5	4.5
	A2	60	2.3	3.34	0.55	0.49	7.6	3.7	4.5
	B1	60	2.3	2.93	0.61	0.49	7.7	3.7	4.5
	B2	80	4.5	5.74	0.59	0.47	7.6	4.9	4.5

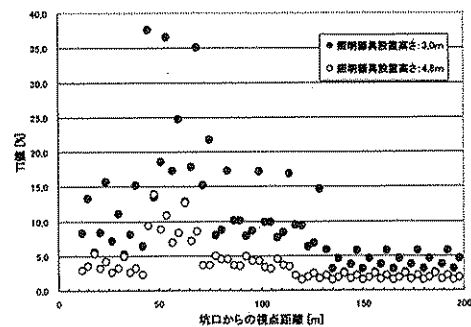


図-6 TI 値の算出結果 (A-1: 設計速度 40km/h)

において、局所的に高い箇所があるが TI 値は全体的に低く概ね 5% 程度あり 15% 以内に収まっていることが分かる。また、他のケースについても同様の結果が得られている。このことから、グレアには器具設置高さの影響が非常に大きく、小断面トンネルではグレアの低減方策について検討する必要があることが明らかとなった。

2) グレアの低減方策の検討

TI 値を減少させるには等価光幕輝度を低下させるか順応輝度を増加させる必要がある。そこで、以下の 2 つの方法について検討した。

① 入口照明区間を延長する方法

図-7 に示すように入口照明区間を延長し順応輝度を増加した場合、TI 値がどの程度減少するかを計算した。小断面トンネルの全ての検討条件を対象に、TI 値が最大となる位置で緩和部最終段が延長されたと仮定して、TI 値が最大となる位置において緩和部最終段の路面輝度を順応輝度として TI 値を算出した。

その結果、表-8 に示すように TI 値は大きく減少し、TI 値の制限値の 15% 以下となり、入口照明区間を延長することによって照明器具からのグレアに対して対応できることが分かった。ただし、この方法

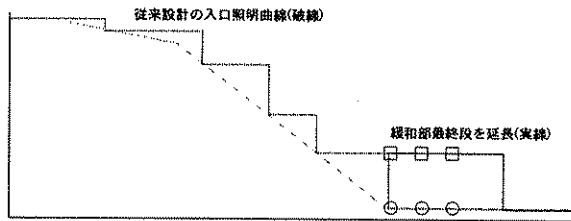


図-7 入口照明区間を延長する方法

は入口照明区間を延長するため、現行の設置基準だけから設計することができず、本検討のように TI 値が 15% を越えた範囲を求め、延長範囲を特定するための計算が必要となる。また、従来照明方式に比べて入口照明延長分のイニシャルコスト、ランニングコストが上昇する課題がある。

②入口照明器具の配光を調整してグレアをカットし等価光幕輝度を減少させる方法

TI 値は各照明器具によって発生する等価光幕輝度の大きさに影響する。そこで、配光の光軸を進行方向に傾けることで視線方向への光束を低下させた場合について、B-1 断面を対象に TI 値を計算した。計算結果を図-8 に示す。図より、既存の入口照明器具の配光の光軸を 10° 傾けた場合は TI 値が 15% 以下に減少することが可能となり、本方法によってグレアに対して対応できることが確認できた。

4. まとめ

本研究は、小型車専用の道路トンネルを対象として、換気施設については急勾配での小型車の排出量の設定方法、照明施設については視認性、グレア等の照明特性について検討した。本研究で得られた結果をまとめると以下のようなものである。

換気設計について

- 1) 小型車の CO の排出量は、実態調査および台上試験結果から現在用いている値の半分程度で減少傾向にあることが分かった。しかし、縦断勾配が大きくなるとガソリン車の排出量は 7 ㄲ/km・台程度になる場合も見られたことから、換気設計に用いる CO の排出量は上限値を現在用いられている 7 ㄲ/km・台として縦断勾配との関係に注意して設定する必要がある。
- 2) 小型車の煤煙の排出量は、実態調査から現在用いている値とほぼ同程度の値を示すことが明らかとなった。また、台上試験からガソリン車の排出量はディーゼル車に比較して非常に小さいが、ディーゼル車の排出量は縦断勾配の増加とともに増加し、一部の車両で高い値を示すことが明らかとな

表-8 入口照明区間を延長した場合の TI 値

断面形状	TI 値最大地点 (坑口からの距離)	延長前の TI 値	延長前の路面輝度	延長後の路面輝度	延長後の TI 値
①A1	45m	37.69	1.5 cd/m ²	6.4 cd/m ²	11.78
②A2	144m	33.66	2.3 cd/m ²	6.9 cd/m ²	13.15
③B1	144m	29.3	2.3 cd/m ²	6.4 cd/m ²	12.92
④B2	225m	19.15	4.5 cd/m ²	8.4 cd/m ²	9.94

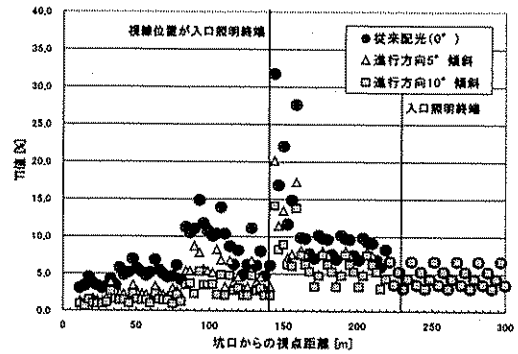


図-8 照明器具傾斜時の TI 値

った。このため、換気設計に用いる煤煙の排出量として、現在用いられている 0.5m²/km・台を使用するものとし、縦断勾配および速度による勾配補正係数を台上試験結果から求めた。

照明設計について

- 1) 現行の照明設計法に基づいた照明方法の小断面トンネルへの適用性が確認された。
- 2) 基本照明区間では、平均路面輝度が設置基準に規定されている値を大幅に上回る場合があるが、より経済的な照明として路面輝度を設置基準の設計輝度に設定するには、Hf 蛍光灯光源等の調光が可能な器具を用いることが考えられる。
- 3) 入口照明区間については、照明設置高さの影響によってグレアが 2 車線道路トンネルの一般的な断面に比べて高くなるが、入口照明器具を傾斜させて配光制御する方法、入口照明区間を延長する方法によってグレアの低減を図ることが可能であることが分かった。

参考文献

- 1) (財) 高速道路調査会：「第二東名・名神のトンネル内付帯設備の設計、施工に関する調査検討報告書」、平成 8 年 3 月
- 2) (財) 高速道路調査会：「トンネル換気設計手法に関する調査研究報告書」、平成 14 年 2 月
- 3) Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting : CIE PUBLICATION 30-2 (1982)