トンネル照明設備の保守率設定

正会員 平川 恵士 (西日本高速道路株式会社)

非会員 戸枝 邦夫 (㈱ネクスコ東日本エンジニアリング)

非会員 菅原 剛 (㈱ネクスコ東日本エンジニアリング)

専門会員 坂本 正悦 (西日本高速道路エンジニアリング関西㈱)

Maintenance Factor in Installation of Tunnel Lighting

Member **Satoshi Hirakawa**(West Nippon Expressway Co. Ltd), Non Member **Kunio Toeda**(NEXCO-East Engineering Co. Ltd), Non Member **Tsuyoshi Sugawara**(NEXCO-East Engineering Co. Ltd) and Fellow Member **Sho'etsu Sakamoto** (West Nippon Expressway Engineering Kansai Co. Ltd)

ABSTRACT

Maintenance factors in installation of tunnel lighting have been considered in terms of traffic volume and tunnel length based on results from investigations into the use of tunnels. Ventilation conditions in tunnels are drastically improved by reinforcing exhaust gas regulations for cars, and dirt on luminaire is also remarkably reduced. Further, the life times of light sources are advancing. Therefore, we studied lumen maintenance factor, survival factor and partial maintenance factor by using dirty luminaire to take maintenance factor into consideration and these suggested a new method of establishing maintenance factor.

KEYWORDS : tunnel lighting, maintenance factor, survival factor, partial factor caused by dirt

1. 緒 言

道路トンネル内部の大気は、内部を走行する自動車から排出する排気ガスに含まれる煤煙やタイヤからの巻上げ粉塵等によって汚染される。トンネル内に設置された照明器具は、このような汚染された大気に曝されるため、時間の経過とともに照明器具のグローブ（前面ガラス）が汚染されて器具効率が低下する。トンネル照明設備の保守率は、このような状況を考慮して、個々の光源の光束低下や不点、照明器具の汚損による光束低下の程度を見込む係数であり、設計時点で照明設備の規模を決定する要素である。このため、保守率を高く設定できれば、照明設備のコストダウンと省エネルギー化、それによる二酸化炭素（CO₂）排出量の削減を通じて地球環境保全にも寄与できる。

昨今、地球環境保全を目的として、自動車の排気ガス規制が急速に進展しており、ディーゼルエンジンから排出される、煤煙の主成分であるSPM（微小粒子状物質）の量が大幅に減少しており、照明器具のグローブの汚損も減少する傾向にある。

トンネル照明用光源については、従前は低圧ナトリウムランプであったものが、近年では高周波点灯専用蛍光ランプ（以下、Hf蛍光ランプ）がトンネル基本照明に、高圧ナトリウムランプがトンネル入口照明にそれぞれ採用されている。このように、光源の採用動向も変化してきており、それらに応じた適切な保守率を設定することが必要であるが、従前の手法では実質的に対応が困難であった。

本稿では、まずトンネル照明の光源及び設備運用の現状について述べる。次に、従来の保守率設定方法の問題点について明らかにする。そして、トンネル照明の実態に即し、かつ将来の新光源の採用にも対応できる、精度の高い保守率の設定方法を提案する。

2. トンネル照明の動向

2.1 トンネル照明用光源の動向

トンネル照明用光源として、1960～1980年代は低圧ナトリウムランプがほぼ全面的に採用されてきた。このランプは波長589nm（nm=10⁻⁹m）の単色光源であり、演色性は有していないが、現在でも、人工光源中、最高の発光効率を有しており、優れた省エネ光源であると言える。しかし、1990年代以降、低圧ナトリウムランプと同等以上の総合効率と優れた演色性をもつHf蛍光ランプがトンネル基本照明に、同光束の低圧ナトリウムランプより効率は劣るものの交通安全施設として必要な演色性を有する高圧ナトリウムランプがトンネル入口照明にそれぞれ採用されてきた。ここ数年は、白色光源かつ演色性に優れるセラミックメタルハライドランプが主としてトンネル入口照明に採用されている。

また、低圧ナトリウムランプの定格寿命9,000時間に対し、Hf蛍光ランプは12,000時間、高圧ナトリウムランプおよびセラミックメタルハライドランプは24,000時間であり、光源の長寿命化が進んでいる。さらに、近年トンネル照明に採用されつつある無電極蛍光ランプは定格寿命が90,000時間、今後、採用が見込まれる発光ダイオード（LED）は40,000時間以上といった具合にさらなる光源の長寿命化は時代の流れである。

言い換えれば、光源の位置づけがこれまでの“消耗品”から“耐久品”へと転換しつつあると言える。さらに注目すべきは、無電極蛍光ランプ及びLEDは光束維持率が従来光源と同等でありながら、残存率が従来光源に比べて高く、相対的に光束維持率が定格寿命を決定する主要因となると考えられる。因みに、無電極蛍

光ランプの定格寿命における残存率は94%であり⁷⁾、LEDについては残存率に相当する仕様が確立されていない。

2.2 トンネル照明設備保守運用の現況

トンネル照明器具の汚れの程度は、トンネル内大気に含まれる自動車の排気ガス成分やタイヤによる巻上げ粉塵の量に左右される。昨今の自動車の排気ガス規制や車両の高性能化により煤煙等の排出量が減少しており、これと共に照明器具の汚れも減少傾向にある。

従来、交通量の多いトンネルでは年に数回程度、照明器具の清掃が実施されていたが、照明器具の汚れの減少に伴い、最近では清掃頻度が年に1回程度となってきた。特に高速道路のトンネルにおける維持・管理作業には交通規制が不可避のため、清掃回数の削減（清掃周期の延伸）は、道路利用者に対するサービスレベルの向上とメンテナンスコストの削減の両面に寄与する。

3. 従来の保守率設定方法と問題点

3.1 保守率の定義

照明設備の保守率 M は、その設備で確保すべき照度（設計照度 E_t ）に対する新設時に見込む照度（初期照度 E_i ）の比 E_t/E_i で定義され、以下に示す4つの要素から構成される²⁾。

$$M = E_t/E_i = Ma \times Mf \times Md \times Mw \quad \dots \dots (1)$$

Ma ：光源の光束維持率、 Mf ：光源の残存率、

Md ：照明器具（光源を含む）の汚れによる部分保守率、

Mw ：室内面の汚れによる部分保守率

(1)式において、光源の光束維持率 Ma 、および光源の残存率 Mf は光源自身の特性に関わる要因であり、通常は定格寿命到達時における値が用いられる。照明器具の汚れによる部分保守率 Md 、および室内面の汚れによる部分保守率 Mw は、照明器具によって“照明される場（環境）”に関わる要因である。このうち、室内面の汚れによる部分保守率 Mw は、保守率に関わる他の部分保守率（ Ma 、 Mf 、 Md ）に比べてかなり高いため無視できる場合が多い。

3.2 保守率の設定

これまで高速道路のトンネル照明設備の設計に用いられてきた保守率 M は、表1に示すとおり、年平均日交通量（A.A.D.T.）、トンネル延長、道路の縦断勾配（平坦度）に応じて0.40～0.75の範囲から設定されてきた。また、これを満たすための清掃周期として、交通量ごとに表2が推奨されている。

このように、交通量、トンネル延長、縦断勾配によって保守率 M が設定されてきたのは以下の背景による。

- 1) 保守率 M の大部分を、照明器具の汚れによる部分保守率 Md が占めていたこと。
- 2) トンネル照明の光源として低圧ナトリウムランプが標準的に採用されていたため、光束維持率 Ma を一定（＝0.8）として取り扱ったこと。
- 3) 少なくとも年に数回以上、ランプ交換の機会があり、ほぼ“不点ランプの即時交換”が成立し、光源の残存率 Mf は1.0と考えられたこと。

3.3 保守率設定上の問題

2.で述べたように、①トンネル照明光源の長寿命化が進んでいること、②トンネル照明器具の汚れが減少しており、清掃周期が従前と比較して長くなってきていることが最近の傾向と言える。これらの傾向に対応して保守率の設定について注意すべき点がある。2.2で述べたとおり、トンネル照明設備の照明器具が汚れにくくなった結果、器具清掃のための交通規制の回数が削減されると、器具清掃と同時に実施される場合が多いランプ交換作業についても、その機会が減少する。その結果、不点または著しく光束低下したランプが従来よりも長期間放置される可能性が高くなる。

表1 トンネル照明設計計算に用いる保守率³⁾

Table 1 Maintenance factor used tunnel lighting design.

トンネル A. A. D. T.	延長 勾配 %	1,500m 以上		500～1,500m		500m 未満	
		≥2	<2	≥2	<2	≥2	<2
2万台/日以上		0.40	0.50	0.50	0.55	0.55	0.60
1万～2万台/日		0.45	0.55	0.55	0.60	0.60	0.65
5千～1万台/日		0.50	0.60	0.60	0.65	0.65	0.70
5千台/日未満		0.55	0.65	0.65	0.70	0.70	0.75

表2 トンネル照明器具の清掃周期³⁾

Table 2 A cleaning interval of luminaires in tunnel.

年平均日交通量 (A. A. D. T.) 台/日	器具内外面 清掃回数/年	器具外面 清掃回数/年	合計 清掃回数/年
2万台/日以上	1	2	3
1万～2万台/日	1	1	2
5千～1万台/日	1	0	1
5千台/日未満	1	0	1

また、2.1で述べたように、光源の長寿命化に伴って、定格寿命を決定する主因が残存率から光束維持率にシフトする可能性があるが、現地毎の清掃周期、ランプ交換周期及び使用する光源の光束維持率等に対して、上記3.2の方法によって保守率を設定することは困難である。

4. 新たな保守率設定法の検討

4.1 保守率の包括的設定法⁴⁾

トンネル内大気中に浮遊する煤煙の絶対量は減少しつつあるものの、トンネル照明設備に用いられる照明器具の汚れの主因は依然としてトンネル内大気中に浮遊する煤煙である。そこで、煤煙濃度とトンネル照明設備の保守率との間に相関があれば、煤煙濃度に基づいて保守率を設定できると考え、以下の検討を行なった。

4.1.1 煤煙濃度の計算

煤煙濃度 K は次式により算出される⁵⁾。

$$K = \mu / Tt / Q + 3 \times \sigma / (2 \times Q \times Tt \times Ar \times L)^{1/2} \quad \dots \dots (2)$$

μ ：自動車群のトンネル延長当りの煤煙排出量平均値（ m^2 ）

σ ：自動車群のトンネル延長当りの煤煙排出量標準偏差（ m^2 ）

Tt ：自動車群の平均車頭時間間隔（ s ）

Q ：換気量（ m^3/s ）＝トンネル断面積×坑内風速

Ar ：トンネル断面積（ m^2 ）

L ：トンネル延長（ m ）

(2)式を用い、表1に示した保守率を設定するベースとなった実態調査が行われた40本のトンネルについて煤煙濃度を計算した⁶⁾⁷⁾。煤煙濃度の計算対象とした40本のトンネルを表1の保守率の分類にしたがって整理した結果を表3に示す。

表3 調査対象トンネルの分類

Table 3 Classification of conditions of tunnels.

(本)

トンネル A. A. D. T.	延長 勾配	1,500m 以上		500～1,500m		500m 未満	
		≥2%	<2%	≥2%	<2%	≥2%	<2%
2万台/日以上		0	0	2	2	1	1
1万～2万台/日		0	0	0	1	0	0
5千～1万台/日		0	3	1	6	1	5
5千台/日未満		0	3	1	5	3	5

なお、自動車1台当りの煤煙排出量の予測値（単位： $m^2/km/台$ ）は表4の値とした⁷⁾。

表 4 自動車 1 台当りの煤煙排出量の予測値 (昭和 60 年度)

Table 4 An estimated value of soot & smoke emissions of a car.

小型車		大型車	
平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
0.3	0.8	9.5	7.2

4.1.2 煤煙濃度 (煤煙透過率) と保守率の関係

表 1 に示したトンネル照明設備の保守率は昭和 60 年代の実態調査に基づいて規定されている³⁾。そこで、表 3 の 40 本のトンネルを対象に実施した煤煙濃度の計算結果と表 1 の保守率との関係を求めた。その結果を図 1 に示す。

- 1) 図 1 から、煤煙濃度と保守率との間には相関があると言える。すなわち、煤煙濃度を計算することにより、保守率を予測することができる。同時にこれによって、トンネル内の煤煙濃度が変化した場合にもそれに対応した保守率の設定が可能である。
- 2) 表 1 に示した保守率は過去におけるトンネル照明器具の汚損度実態調査に基づいて規定されたものである³⁾が、計算によって得た煤煙濃度との間に高い相関が得られた。

次に(3)式を用いて、煤煙濃度 K (1/m) を煤煙透過率 τ (%) に変換し、図 1 をもとに煤煙透過率 τ と保守率 M との関係を求めた。その結果を図 2 に示す。ここで図中の階段状の線は、表 1 のように保守率を便宜上 0.05 ごとに設定する場合の煤煙透過率の範囲を示したものである。

$$K = \{-\ln(\tau/100)\} / 100 \quad \dots (3)$$

一例として、昭和 60 年度と平成 21 年度の煤煙濃度を計算し⁷⁾、煤煙透過率に換算した。その結果を以下に示す。ただし、計算条件は交通量 2 万台/日、トンネル延長 1,500m、道路の縦断勾配+2%である。

表 5 保守率 M の算出例

Table 5 Calculation example of maintenance factor.

項 目	煤煙濃度	煤煙透過率	保守率
昭和60年度	0.527 10 ² /m	60 %	0.50
平成21年度	0.122 10 ² /m	89 %	0.65

表 5 の結果から、平成 21 年度の煤煙濃度は同一条件における昭和 60 年度のそれに比べて約 1/4 となっており、保守率は 0.50 から 0.65 に約 30%、高く設定できることがわかった。この算出例は、保守率の変更により設備規模が約 30%低減できることを示しており、大きな初期コスト及び消費電力削減の可能性があると言える。

4.2 保守率の要素別設定法⁸⁾

4.1 においては、煤煙透過率と保守率の関係を検討し、保守率を煤煙濃度から直接的に設定する方法を提案した。この方法は、(1)式における照明器具の汚れによる部分保守率 M_d が、保守率 M の大部分を占める場合に有効である。しかし多くのトンネルでは表 5 の例と同様、昨今、トンネル内の換気状態が著しく改善され、煤煙透過率が高いレベルに維持されるようになってきており、これに伴って保守率 M に占める部分保守率 M_d の比率が低下しているものと推測される。

また、2.1 で述べたように、トンネル照明に使用される光源の変遷に伴って、(1)式に示す保守率 M における、光源の光束維持率 M_a 、光源の残存率 M_f の関係も従前と異なってきた。

そこで、保守率 M の定義 ((1)式) に立ち返り、光源の光束維持

図 1 煤煙濃度 K と保守率 M との関係 (昭和 60 年)

Fig.1 The relation between soot & smoke density and maintenance factor.

図 2 煤煙透過率 τ と保守率 M との関係

Fig.2 The relation between soot & smoke transmittance and maintenance factor.

率 M_a 、光源の残存率 M_f 、照明器具の汚れによる部分保守率 M_d をそれぞれ個別に検討し、この M_a 、 M_f 、 M_d をもとに保守率 M を設定する手法を検討した。

4.2.1 光源の残存率 M_f

光源の残存率は、光源の定格寿命の定義に用いられており、残存率が 50%に達した時点の累積点灯時間をもって定格寿命とすることが多い。しかし、高速道路のトンネル照明設備においては、少なくとも年に 1 回はランプ交換が行われるため、半数の光源が不点 (残存率 50%) となるまで放置されることはない。

そこで、実際のトンネルにおいて、定期点検時にどの程度の不点が発生しているかを光源の種類別、交換周期別に調査し、光源の残存率 $M_f = 1 - \text{不点率}$ として、「トンネル照明設備としての光源の残存率」を求めた。

対象トンネル数は、採用されている光源の種類別に、Hf 蛍光ランプ: 96 トンネル、高圧ナトリウムランプ: 101 トンネル、低圧ナトリウムランプ: 101 トンネルの計 298 トンネルであった。トンネル照明設備としての光源別の残存率の調査結果を図 3、図 4 及び図 5 に示す。

これらの光源別のデータをもとに、累積相対度数として 85%タイル値 (85%のトンネルで確保される光源の残存率) を採って、光源別、交換機会別の残存率 M_f を求めた。その結果を表 6 に示す。表中の残存率 M_f には、光源の寿命、使用中の点滅頻度 (一般的に一定の累積点灯時間において、基本照明よりも入口照明の方が点滅回数が多い) 等が影響している。当然のことながら、光源の寿命が長く、その交換機会が多いほど、トンネル照明設備としての光源の残存率 M_f は高いレベルに維持される。

図3 トンネル照明設備としての光源の残存率Mf（蛍光ランプ）

Fig.3 Survival factor of light sources of tunnel lighting installations(Fluorescent lamps).

図4 トンネル照明設備としての光源の残存率Mf（高圧ナトリウムランプ）

Fig.4 Survival factor of light sources of tunnel lighting installations(High pressure sodium lamps).

図5 トンネル照明設備としての光源の残存率Mf（低圧ナトリウムランプ）

Fig.5 Survival factor of light sources of tunnel lighting installations(Low pressure sodium lamps).

表6 トンネル照明設備としての光源の残存率Mf

Table 6 Survival factor of light sources of tunnel lighting installations.

光 源		交換機会		
		1 回/年	2 回/年	3 回/年
入口照明	高圧ナトリウムランプ ^o	0.94	0.95	---
	低圧ナトリウムランプ ^o	0.83	0.86	0.93
基本照明	Hf 蛍光ランプ ^o	0.90	0.90	---
	高圧ナトリウムランプ ^o	0.87	0.88	---
	低圧ナトリウムランプ ^o	0.73	0.79	0.86

4.2.2 照明器具の汚れによる部分保守率Md⁹⁾

4.1においては、煤煙濃度から直接、保守率Mを設定する方法を提案したが、本項では、煤煙濃度から照明器具の汚れによる部分保守率Mdのみを予測することとした。以下、照明器具の汚れについて実態調査を行うとともに、照明器具の汚れの原因となる煤煙濃度の予測について検討する。

1) 照明器具の汚れの実態調査

トンネル照明設備に用いられる照明器具は密閉構造であり、その汚れはグローブ（前面ガラス）の外面に集中することから、前面ガラスの透過率の現地測定を行った。透過率の測定には可視光線透過率計(HA・T、スガ試験機)を用いた。調査対象は、以下のとおりである。

<一方交通のトンネル>

交通量2万台/日以上、延長1,500m以上の3トンネル

<対面交通のトンネル>

交通量1万台/日未満、延長1,000～3,000mの6トンネル

測定結果の一例を図6～図7に示す。図6から一方交通のトンネルにおける照明器具の汚れによる部分保守率Mdは、トンネル入口から内部に進むにつれて、また経過月数とともに低下することがわかった。また、図7から、対面交通のトンネルにおける照明器具の汚れによる部分保守率Mdは、トンネル坑口からの距離に関わらず、ほぼ一定となり、1年経過時点でのMdは0.9程度と、照明器具の汚れは僅少であることがわかった。

図6 照明器具の汚れによる部分保守率Md（一方交通）

Fig.6 Partial maintenance factor caused by dirty luminaires(One way traffic).

図7 照明器具の汚れによる部分保守率Md（対面交通）

Fig.7 Partial maintenance factor caused by dirty luminaires (Two way traffic).

一方交通トンネルでは、トンネル内の煤煙濃度が入口から出口に向けて漸次高くなるのに対し、対面交通トンネルでは、トンネル内の煤煙濃度が長期間の平均値としては、トンネル内の位置に関わらずほぼ一定となることに起因している。

2) 煤煙濃度予測値と現地計測値との比較

ここでは、(2) 式の偏差に関する第 2 項を無視した(4)式を用いて煤煙濃度の予測計算を行い、トンネル内での実測値と比較した。その結果を(3)式を用いて煤煙濃度から煤煙透過率に変換し、図 8 に示す。図 8 から、交通方向に関わらず、煤煙透過率の実測値と予測値との間にある程度の相関があり、(4)式を用いて煤煙濃度を予測できる見通しを得た。

$$K = \mu / Tt / Q \cdots (4)$$

これを前提とすれば、運用中のトンネルに煤煙透過率計が設置されていなくても(4)式による煤煙濃度の計算結果を予測値として用いることが可能となる。

図 8 煤煙透過率の実測値と予測値との比較

Fig.8 The comparison of soot & smoke transmittance of measurement and simulation.

3) 累積煤煙量と照明器具の汚れによる部分保守率 Md

照明器具の汚れは、煤煙濃度とその濃度に曝露されている累積日数に依存すると考えられることから、煤煙濃度 K と累積日数 Day との積を「累積煤煙量 $K \cdot Day$ 」と定義し、累積煤煙量と照明器具の汚れによる部分保守率 Md との関係を求めた。その結果を図 9 に示す。図 9 から、累積煤煙量 $K \cdot Day$ と照明器具の汚れによる部分保守率 Md との間に相関があり、 Md は(5)式で表されることがわかった。また、図 9 および(5)式、(6)式から、同じ累積煤煙量における交通方向による Md の違いは僅少であることがわかった。

<一方交通のトンネル>

$$Md = -0.001 \times (K \times Day) + 0.92 \cdots (5)$$

<対面交通のトンネル>

$$Md = -0.001 \times (K \times Day) + 0.95 \cdots (6)$$

4. 2. 3 光源の光束維持率 Ma

光源の光束維持率 Ma についても光源の残存率 Mf と同様、定格寿命時の値とトンネル照明設備の実態とは異なる可能性がある。例えば、現場では光源が不点となった時点で交換されており、定格寿命を超えて使用される可能性も否定できないことから、本稿ではライフテスト等により実力値が明らかになっている Hf 蛍光ランプ以外は定格寿命時点での値を採用することとした。将来、実態調査を行って、トンネル照明設備における実力値が明らかになれば、それを採用することも可能である。

定格寿命時点での低圧ナトリウムランプの光束維持率は 80%、高圧ナトリウムランプのそれは 85%である。なお Hf 蛍光ランプにつ

図 9 累積煤煙量と照明器具の汚れによる部分保守率 Md

Fig.9 The relation between cumulative value of soot & smoke and Partial maintenance factor caused by a dirty luminaires.

いては、定格寿命時点における光束維持率 80%に対し、高速道路に標準的に採用されているトンネル照明専用の Hf 蛍光ランプは、トンネル照明設備の運用条件を踏まえたライフテストの結果により光束維持率を 85%に設定している¹⁰⁾。

4. 2. 4 保守率の設定と検証

4.2.1 光源の残存率 Mf 、4.2.2 照明器具の汚れによる部分保守率 Md 、4.2.3 光源の光束維持率 Ma から保守率 M を設定した。表 7 の設定条件において保守率 M を計算した結果は以下のとおりとなった。

入口照明 (高圧ナトリウムランプ) :

$$M = Ma \times Mf \times Md = 0.85 \times 0.95 \times 0.92 = 0.74$$

基本照明 (Hf 蛍光ランプ) :

$$M = Ma \times Mf \times Md = 0.85 \times 0.90 \times 0.90 = 0.68$$

この計算例から、照明器具の汚れによる部分保守率 Md が高くなった (照明器具の汚れが少なくなった) 結果、光源の光束維持率 Ma が支配的な要素となることがわかった。

表 7 保守率の条件設定 (例)

Table 7 Conditions of maintenance factor.

交通方式	一方交通
トンネル延長 (m)	1,500
設計速度 (km/h)	80
交通量 (台/日)	20,000
大型車混入率 (%)	25
縦断勾配 (%)	2
トンネル断面積 (m ²)	55.9
入口照明区間 (m)	300
光源	入口照明 高圧ナトリウムランプ
	基本照明 Hf 蛍光ランプ
照明器具清掃周期 (日)	183 (2 回/年)
ランプ交換機会 (回/年)	2
煤煙濃度予測値 (× 10 ⁻² /m)	入口: 0.019 基本: 0.096

4. 3 考 察

トンネル照明設備の保守率は、昭和 60 年代の実態調査に基づいて設定されてきた。当時の保守率においては、照明器具の汚れによる部分保守率 Md が保守率 M の支配的要素であると考えられたため、昭和 60 年度の自動車 1 台当りの煤煙排出量をもとに、煤煙透過率と保守率との関係を求めた結果、両者の間に高い相関

が得られた。それらの結果をもとに、平成 21 年度の自動車 1 台当りの煤煙排出量から、煤煙透過率を算出し、その値を上記煤煙透過率と保守率との関係に代入することにより保守率を求めた結果、例えば昭和 60 年度に保守率が 0.50 となった交通量、トンネル延長等の条件において、平成 21 年度には煤煙濃度の低下（煤煙透過率の上昇）により保守率が 0.65 となることがわかった（表 5 参照）。これは、自動車 1 台当りの煤煙排出量が減少し、照明器具が汚れにくくなったことに起因する。この結果、保守率 M に占める照明器具の汚れによる部分保守率 Md が支配的要素ではなくなってきたものと予想される。

そこで煤煙透過率から保守率 M 自体を求めるのではなく、照明器具の汚れによる部分保守率 Md を求めるに留め、保守率 M はこの Md に光源の光束維持率 Ma、光源の残存率 Mf を乗じて算出することとした。具体的には、①光源の残存率 Ma をトンネル照明設備の点検率から算出すること、②照明器具の汚れによる部分保守率 Md をトンネル内の煤煙濃度と累積日数から予測することの 2 点を検討した。この結果、保守率 M における部分保守率の構成をみると、光源の光束維持率 Ma が最も低く、次いで照明器具の汚れによる部分保守率 Md と光源の残存率 Mf が同レベルとなることがわかった。したがって、トンネル照明器具の汚れが少ない場合には、光束維持率 Ma が保守率の支配的要素となる。今後、LED など新たな光源を用いる場合にはその光源の光束維持率 Ma がより重要になってくると考えられる。

前者（4.1 包括的設定法）は、自動車の排気ガス規制が不十分な開発途上国等に適した方法であり、後者（4.2 要素別設定法）はわが国のように排気ガス規制が浸透し、トンネル照明器具の汚れが少ない先進国等に適した方法と言える。

5. 結 言

本稿では、高速道路におけるトンネル照明の光源及び設備運用の現状と、従来の保守率設定方法の問題点を明らかにし、トンネル照明の実態に即し、設計段階において適用でき、かつ将来の光源の採用にも対応できる、保守率の設定方法を提案した。高速道路の維持管理の実態として、自動車の排気ガス規制によってトンネル内の煤煙濃度が低下して照明器具が汚れにくくなり、清掃周期が長くなってきていることからランプ交換の機会が少なくなる傾向にある。これが逆に、点検または著しく光束の低下したランプが長期にわたって放置される危険性につながる。実際に調査した結果からも、ランプ交換周期によって光源の残存率が変化することが示されている。したがって、今後はトンネル照明設備の保守率に光源の残存率を予め見込んでおく必要がある。特に、トンネル照明においても近い将来主力光源となるであろう発光ダイオード（LED）についても、何らかの形で残存率を定義し、保守率に加える必要がある。

本稿では、光源の残存率にトンネル照明設備の実態調査をもとに光源の点検率から「1 - 点検率」として求めた値を採用したが、平均照度を算出する場合に、たとえば、トンネル延長 100m に設置された 20 本のランプの中 1 本の点検を考慮することを、保守率においてどう意味付けるかは今後の課題である。

なお、本稿では高速道路のトンネル照明設備を対象として保守率の検討を行ったが、高速道路と同レベルの維持管理がなされているトンネルであれば、一般道にも適用は可能である。

最後に、本稿の一部は（財）高速道路調査会「高速道路の照明技術検討委員会（委員長：成定康平氏）」で検討されたものであり、委員各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 杉野公和、伊東勇人、坂本正悦：トンネル照明設備の保守率の検討、照学全大 No.39 (2006)。
- (2) 照明学会：照明設計の保守率と保守計画（技術指針 JIEG-001 (2005)）。

- (3)（財）高速道路調査会：トンネル照明設計指針(1990)
- (4) 平川恵士、佐藤元久、小西茂、坂本正悦：煤煙濃度に基づくトンネル照明設備の保守率の予測、照学全大 No.40 (2006)。
- (5) 伊吹山四朗：道路トンネルの換気、理工図書。
- (6) 日本道路公団：設計要領第 7 集 電気施設、第 5 編 トンネル照明設備。
- (7) 日本道路公団：設計要領第 3 集、第 9 編 トンネル。
- (8) 平川恵士、佐藤元久、戸枝邦夫、菅原剛、坂本正悦：光源の残存率を考慮したトンネル照明設備の保守率、照学全大 No.62 (2008)。
- (9) 早川正昭、柏木祐幸、戸枝邦夫、菅原剛、坂本正悦：トンネル照明設備の保守率の設定 ―照明器具の汚れによる部分保守率 Md に交通方向が及ぼす影響―、照学全大 No.61 (2009)。
- (10) 鳥海英一郎、清水正則、和氣厚夫、武内徹二、山中直：トンネル照明用 Hf 蛍光ランプの検討、照学全大 No.52 (2006)。

(受付日 2011 年 4 月 28 日/採録日 2011 年 10 月 6 日)

平川 恵士（正会員）

西日本高速道路株式会社
技術本部 技術課
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-8
1972 年生まれ、1996 年 3 月徳島大学大学院電気電子工学専攻修了。現在、大阪大学大学院工学研究科 NEXCO 西日本 高速道路学共同研究講座 研究員として研究開発業務に従事。

戸枝 邦夫（非会員）

株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング
佐久道路事務所
116-0014 東京都荒川区東日暮里 5-7-18
1972 年生まれ、1995 年埼玉工業大学工学部機械工学科卒。現在、(株)ネクスコ東日本エンジニアリング佐久道路事務所佐久施設保全課、高速道路施設維持管理業務に従事。

菅原 剛（非会員）

株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング
施設計画部
116-0014 東京都荒川区東日暮里 5-7-18
1963 年生まれ、1982 年秋田県立大館工業高校電気工学科卒。現在、(株)ネクスコ東日本エンジニアリング施設計画部施設計画課、高速道路施設関係業務に従事。

坂本 正悦（専門会員）

西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 施設技術部
567-0032 大阪府茨木市西駅前町 5-26
1949 年生まれ、1968 年島根県立松江工業高校電気科卒。現在、西日本高速道路エンジニアリング関西(株) 2010 年照明プロフェッショナル(Pro 10-009)。