

トンネルLED照明の適正な清掃頻度の検討

日高 英治

本州四国連絡高速道路（株） 神戸管理センター 電気通信課
（〒655-0852兵庫県神戸市垂水区名谷町549）

舞子トンネルの照明設備更新により、これまでの既存ランプ照明より長寿命化が図られた。ランプの交換作業に相当するLEDユニット等の交換作業が約10年に1回となり、保全業務の効率化が期待される。従来の照明では、ランプ交換作業と同時に灯具清掃を実施することで、灯具ガラス面に付着した煤塵等による器具光束の減衰防止を図ってきた。更新後はランプ交換が不要でも灯具の汚損環境に変わりはないため、これまでと同様に定期的な清掃作業が必要となる。しかし、LED照明の清掃頻度について明確に定めた基準等が無いため、本稿ではトンネル内灯具の汚損状況の調査と、促進試験による清掃頻度の検討について報告を行うものである。

キーワード トンネル照明、灯具汚損、清掃頻度

1. まえがき

本州四国連絡高速道路株式会社が管理する舞子トンネルは、一般国道28号（E28 神戸淡路鳴門自動車道）の本州側に位置し、明石海峡大橋の直近に接続する延長約3,500mでトンネル防災等級AAのトンネルである。舞子トンネルの照明設備は、2015年度に高圧ナトリウム灯からLED照明に更新した。昨今の技術革新によりLED照明の効率及び、寿命が飛躍的に向上したことにより、灯具数量は約45%の削減、定格寿命は約3.75倍に延びた。

（表-1参照）

更新前まで使用していた高圧ナトリウム灯の定格寿命は24,000時間のため、概ね3年に1回のランプ交換を必要とされていたが、LED照明に更新後はその頻度が長周期化するため、維持管理費及び交通規制回数の低減も期待される場所である。しかし、ランプ交換とあわせて実施していた照明灯具清掃は低減されることから、これまでとは違って灯具清掃のみを行う必要があるが、清掃頻度について定められた基準は無く、基準を策定することが課題となった。

表-1 舞子トンネル照明設備概要

種別	(従来) 高圧ナトリウム灯	(更新後) LED照明	比率
灯具数量	1,406灯	780灯	45%削減
定格寿命	24,000hr	90,000hr	3.75倍

2. 清掃頻度の検討

トンネル内路面輝度の低下要因として、以下のことが考えられる。

- 1)光源光束の低下
- 2)灯具ガラス面の汚損による光束の低下
- 3)トンネル壁面及び路面の汚損による反射輝度の低下

1)については、LED照明の光源自体の劣化であり、要因が設備によるものである。

2)及び3)については、煤塵等による灯具表面の汚れ、又はトンネル壁面等の汚れであり、要因が環境によるものである。

1)については設備の寿命によるもので、時間管理により寿命到達期において交換することで光束低下を予知することが可能である。

また、3)トンネル壁面については2年に1回、路面についても定期的な清掃が実施されていることから、一定のトンネル内視環境が保たれていると考えられる。

しかし、2)灯具ガラス面の汚損については、ランプ交換にあわせて清掃を実施していたため、LED照明による長寿命化によりその頻度が減少することから、適正な清掃頻度を検討する必要がある。

3. 灯具汚損状況の把握

灯具の汚損は、トンネル内全体で発生しているものと思われるが、その度合いは一律的に汚損しているのか否か、あるいはどれくらいの差が生じているかは把握できていなかった。舞子トンネルの照明設備は、更新後既に1年程度運用していることから、灯具ガラス面への付着物による灯具の汚損状況と、路面輝度低下の要因となるLED照明の光束低下の因果関係について確認を行った。また、灯具の汚損状況より、著しく汚損している箇所のガラスを予備ガラスと交換し、光束低下状況を測定することとした。

汚損状況の確認は以下の手法により実施した。

- ①トンネル延長上で汚れの分布を把握するため50m間隔の走行車線側で灯具の汚損状況を確認
- ②確認は、LED照明具の外面（上面）に対して実施
- ③ビニールテープに煤塵等を付着させ、汚損度を視覚的に判断（写真-1～3参照）

現地で採取したビニールテープをトンネル略図に追記したところ、同時期に設置したLED照明灯具でもトンネル出口に近づくにつれ、煤塵の付着量が多いことが判明した。（図-1参照）

舞子トンネルは、図-2に示す縦断勾配があり、出口付近は上り勾配のため煤塵が発生しやすい傾向にある。また、舞子トンネルに設置されている換気設備は、周辺住民への環境対策として、坑口からトンネル内空気を排出しないよう設置されている。

下り線においては、非常駐車帯4近辺に設置された換気設備でトンネル内の換気が行われているため、出口側に向かう空気流と換気によるトンネル内への引き込む空気流が相殺され、トンネル内空気の流れが緩やかになり、出口側の灯具ガラス面に煤塵が付着しやすい環境にあると考えられる。

また、上り線も、出口側に換気設備があるため、出口側の灯具ガラス面に煤塵が付着しやすい結果であった。

今回の調査では、汚損が著しい箇所を主体にガラス板を採取することとし、図-1に示す20箇所をガラス交換箇所として選定した。また、その採取箇所を図-1に記載したとおり、「入口部」、「中間部」、「出口部」に区分した。



写真-1 確認箇所



写真-2 調査状況



写真-3 調査結果

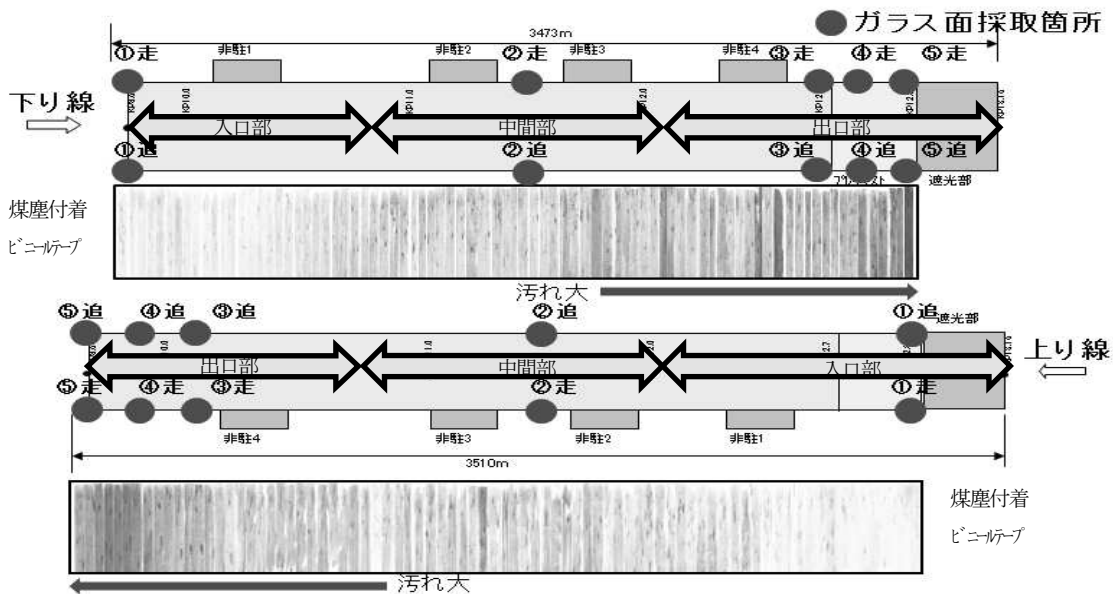


図-1 汚損分布調査結果

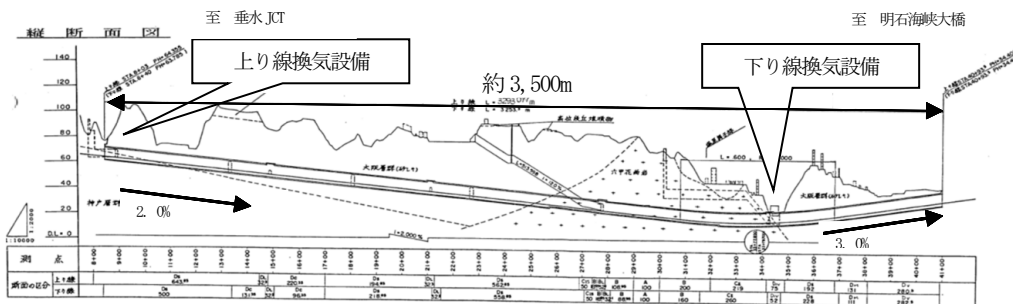


図-2 舞子トンネル縦断面図

4. 光透過率試験

調査で得た合計20箇所のガラスを新しいガラスと交換し、照明メーカーの工場へ持ち帰り、ガラス面の汚損度を数値的に表すため、光透過率試験を行った。新しいガラスと今回採取したガラスで、同一光源での光束を測定し以下の式より光減衰率を算出する。

$$\text{光減衰率} = 1 - (\text{1年後のガラス光束値} \div \text{新ガラス光束値})$$

なお、本試験は、現地でも測定可能であるが、走行車両の前照灯や隣接する照明の干渉が考えられることから工場内での配光試験環境で試験を行った。(図-3参照)

試験結果は表-2に示すとおり、トンネル出口に近づくにつれて煤塵付着量が多いことから、光減衰率も同じ傾向にあり、下り線では最大13.0%、上り線では最大27.4%の光減衰が更新後1年のトンネル内で発生していることが判明した。



図-3 光透過率試験イメージ

(左：新ガラス時 右：採取ガラス時)

表-2 光透過率試験結果

下り線走行	入口部		中間部		出口部	
	①走	②走	③走	④走	⑤走	⑤走
光束値(lm)	12,420	12,305	12,318	11,223	11,795	
光減衰率(%)	3.75	4.64	4.54	13.0	8.5	
下り線追越	入口部		中間部		出口部	
	①追	②追	③追	④追	⑤追	⑤追
光束値(lm)	12,250	12,306	12,188	11,526	11,877	
光減衰率(%)	5.07	4.63	5.55	10.7	7.96	
上り線走行	入口部		中間部		出口部	
	①走	②走	③走	④走	⑤走	⑤走
光束値(lm)	12,044	10,477	9,363	9,555	12,286	
光減衰率(%)	6.66	18.8	27.4	26.0	4.79	
上り線追越	入口部		中間部		出口部	
	①追	②追	③追	④追	⑤追	⑤追
光束値(lm)	11,515	10,664	10,457	9,375	12,102	
光減衰率(%)	10.8	17.4	19.0	27.4	6.22	

注) 新品ガラスによる光束値=12,904lm

5. 付着成分の解析

今回採取したガラス面に付着した煤塵量を1年間に蓄積した量として考え、同種同量の付着物を灯具ガラス面に付着させ、数年後の付着量を再現させることとした。

しかし、灯具ガラス面に付着した煤塵量は微量であるため、トンネル壁面に付着している煤塵を採取し、成分解析を行った。成分解析の結果は、表-3に示すとおり、煤塵成分の他、塩分も検出されていることから、トンネル内構造物の腐食を早める結果であることがわかった。

6. 煤塵付着促進試験

煤塵付着促進試験においては、煤塵付着物成分解析によって得られたデータを基に煤塵と同じ化合物を生成し、灯具ガラス面に付着させる促進試験を実施した。

舞子トンネルの入口部、中間部、出口部の各地点ごとに煤塵等の付着量に違いがあり、光減衰率が異なることから、促進試験には粒子付着試験装置を使用することとした。本装置は、一定圧力で粒子を吐出し、媒体に付着させることができるため、別途生成した煤塵を連続的に

表-3 成分解析結果

元素	構成比 (%)
C(炭素)	46.7
O(酸素)	32.7
Na(ナトリウム)	3.1
Mg(マグネシウム)	0.6
Al(アルミニウム)	1.4
Si(ケイ素)	5.6
S(硫黄)	2.0
Cl(塩素)	2.8
K(カリウム)	0.6
Ca(カルシウム)	1.4
Ti(チタン)	0.2
Fe(鉄)	2.2
Zn(亜鉛)	0.7
合計	100

一定量吹き付け、供試体ガラスに付着させることで舞子トンネルの灯具汚損を再現し、経過時間ごとの光透過率推移を確認した。

粒子付着試験装置を用いた試験条件を以下に示す。

- ①使用する化合物は、成分解析結果より得た粒子を用いる。
- ②実際の灯具ガラスは粒子付着試験装置内に収まらないため、同材質の供試体ガラスを使用する。
- ③付着させる吹き付け濃度を段階的に変化させる。(吐出圧力の調整)
- ④地点ごとの煤塵量の違いを考慮し、吐出圧力(粒子濃度)は、0.01MPa, 0.02MPa, 0.03MPaの3段階とし、一定時間経過後の光減衰率を測定する。
- ⑤経過時間は、10分, 20分, 30分, 60分, 90分, 150分の6段階で実施する。
- ⑥現地にて採取した更新1年後の灯具ガラス光減衰率と、促進試験で得られる供試体ガラス光減衰率を比較し、どの吐出圧力でどれくらいの時間経過が現地環境に近似するかを確認する。
- ⑦試験に用いる供試体ガラスは実験精度を向上させるため、2枚に付着させて実施し、その平均値を採用する。

上記試験の結果と近似曲線を示す。

(表-4、図-4参照)

表-4 促進試験結果

試験項目	試験時間(分)						
	0	10	20	30	60	90	150
0.01 MPa	0.0%	9.0%	16.0%	21.0%	28.1%	29.2%	39.4%
0.02 MPa	0.0%	17.9%	22.3%	30.1%	39.6%	43.4%	47.4%
0.03 MPa	0.0%	40.1%	52.6%	56.9%	61.3%	63.7%	62.7%

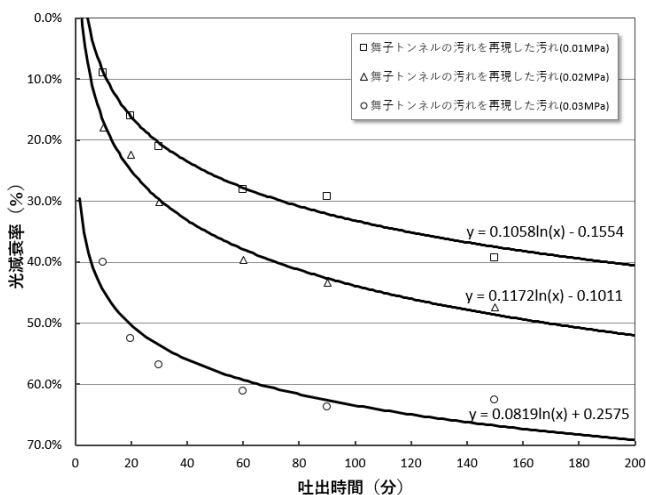


図-4 近似曲線

7. 現地平均路面輝度の確認

トンネル照明は平均路面輝度により管理を行う。舞子トンネルの平均路面輝度は、更新後の2016年2月に測定しており、1年後となる2017年2月に再測定した。測定結果を表-5に示す。

◆下り線の基本照明で約23%の平均路面輝度の低下が判明した。

◆上り線の基本照明においても約28%の平均路面輝度の低下が確認された。

いずれも基準値は満足している状況であるが、減衰していることが確認できた。

8. 清掃頻度の検討

トンネル照明設備は設計時において、時間の経過とともに減衰する光束や、照明器具の汚れ等による基準輝度の低下要因を考慮し、補正係数を用いることで必要な照度より高いレベルで照明設計を行っている。この補正係数は、「LED道路・トンネル照明導入ガイドライン(案)」に制定される保守率として適用し照明設計を行っているが、7項で述べたようにトンネル照明は平均路面輝度値を基準として管理を行うことから、表-5に示す測定結果より清掃頻度を検討することとした。

舞子トンネルに採用したLED照明器具は、初期照度補正機能を有しており、定格電流よりも低い電流値で点灯することで、定格光束値の80%に調光し点灯している。表-5に示す測定結果も、本機能が有効な状態での測定値であることから、1年後の測定値は、灯具ガラス面の汚損による減衰と考えてよいため、基準輝度を下回るまでの許容値を維持率とし、清掃頻度の検討を行う。

ここで、「維持率=基準輝度/初期の測定輝度」とし、上下線の維持率を算出する。

$$\text{舞子トンネル下り線維持率} = 4.5 / 7.5 = 0.6$$

$$\text{舞子トンネル上り線維持率} = 4.5 / 6.9 = 0.65$$

よって、灯具ガラス面の汚損による光減衰が、上述の維持率に到達した時点を清掃が必要となる時期と考えた。なお、清掃の最短周期を求めることで安全面に傾くことから、維持率は上下線とも0.65とする。(低下率を35%とする。)

表-5 平均路面輝度測定結果

点灯モード	基準値輝度	測定値		減衰率
		2016年2月	2017年2月	
基本照明 下り線	4.5cd/m ²	7.5cd/m ²	5.8cd/m ²	23%
基本照明 上り線		6.9cd/m ²	5.0cd/m ²	28%

ここに4項で述べた舞子トンネル現地より採取した灯具ガラスの光透過率試験結果を箇所別に表-6に示す。

舞子トンネル内では、各箇所により汚損状況が異なるため、促進試験による光減衰率がどの吐出圧力と最も近似するか評価を行った。図-4近似曲線より代表的な吐出時間を抽出し、表-6箇所別実測結果との照合を行ったところ、吐出時間7分時点による光減衰率が実測結果と最も近似していたことから、促進試験による吐出時間7分が舞子トンネル実環境下での1年に相当することと仮定する。(表-7参照)

吐出圧力0.01MPaは①下り線入口部及び②中間部、0.02MPaでは③下り線出口部及び、④上り線入口部が近似している。しかし、⑤上り線中間部は、誤差率が1.5(18.8/12.7)となり乖離が大きく、同様に0.03MPaでは⑥上り線出口部で誤差率0.66(27.4/41.7)であることから、補正を行うことで、おおむね近似しているものとして扱う。(図-5参照)

表-6 箇所別実測結果 (表-2より抜粋)

設置場所	入口部	中間部	出口部
光減衰率 (下り線)	5.07%	4.64%	13.0%
光減衰率 (上り線)	10.8%	18.8%	27.4%

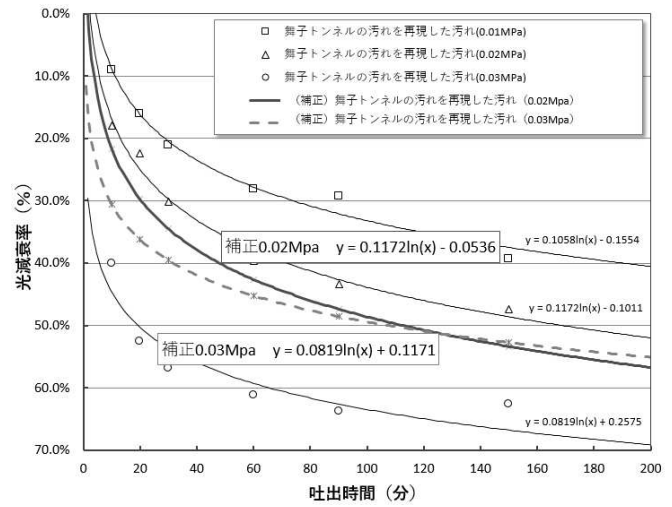


図-5 近似曲線 (補正值考慮)

表-7 照合結果

試験項目	0.01MPa y = 0.1058ln(x) - 0.1554 0.02MPa y = 0.1172ln(x) - 0.1011 0.03MPa y = 0.0819ln(x) + 0.2575								
	吐出時間 5分時点			吐出時間 7分時点			吐出時間 10分時点		
	0.01MPa	0.02MPa	0.03MPa	0.01MPa	0.02MPa	0.03MPa	0.01MPa	0.02MPa	0.03MPa
促進試験による 供試体ガラス 光減衰率	1.4%	8.8%	38.9%	5.1%	12.7%	41.7%	8.8%	16.9%	44.6%
①下り線入口部	5.07%			5.07%			5.07%		
② 中間部	4.64%			4.64%			4.64%		
③ 出口部		13.0%			13.0%			13.0%	
④上り線入口部		10.8%			10.8%			10.8%	
⑤ 中間部		18.8%			<u>18.8%</u>			18.8%	
⑥ 出口部			27.4%			<u>27.4%</u>			27.4%
①~⑥欄 平均	4.9%	14.2%	27.4%	4.9%	14.2%	27.4%	4.9%	14.2%	27.4%
誤差率	3.5	1.6	0.7	0.96	1.1	0.66	0.6	0.8	0.6
誤差率平均	1.9			0.9			0.7		
結果	ばらつきが大きい			最も近似している			ばらつきが大きい		

これより、吐出時間7分を1年間の汚損として換算し維持率0.65より、低下率が35%に到達する年数を予測する。(表-8参照)

以上より、舞子トンネルにおける清掃は表-9に示す頻度で行う必要がある。

吐出圧力0.01MPaに該当する舞子トンネル下り線入口部、及び中間部の予測では、16年ごとの清掃頻度となるが、LEDユニット等の寿命が約10年であることから、10年で清掃を行うこととした。

なお、今回算出した清掃頻度(案)の精度確認を行うため、壁面清掃や交通量との光衰率の相関についても調査し、引き続き検証していく予定である。

9. まとめ

今回の検討により舞子トンネル内では、上下線の入口部、中間部、出口部ごとに灯具ガラス面の汚損状況に違いがあり、どの程度の汚れで光減衰による平均路面輝度が低下しているかがわかった。

表-8 予測年数

種別	7分 (1年)	14分 (2年)	21分 (4年)	42分 (6年)	112分 (16年)	予測 年数
0.01MPa	5.1%	12.4%	19.7%	24.0%	34.4%	16年
0.02MPa	12.7%	20.8%	28.9%	33.7%	45.2%	6年
0.02MPa (補正)	17.4%	25.6%	33.7%	38.5%	49.9%	3年
0.03MPa (補正)	27.6%	33.3%	39.0%	42.3%	50.4%	2年

今後、トンネル照明がLED照明に更新される予定であることから、今回得られた結果を基に、当社が管理する他のトンネルにおいても同様に適正な清掃頻度を検討するとともに、精度向上のため今後も実測データを検証し、基準化を目指したい。

また、灯具ガラス面の汚損軽減を目的とした「防汚コーティング」の適用試験も実施し、清掃頻度の長周期化も検討していく予定である。

LED照明はこれまでのランプ照明より寿命が長いが故に、灯具にアプローチする機会がこれまでの運用より減少することから、構造物点検とあわせて実施することを含め、作業の効率化を図り、各箇所に応じた清掃作業を実施すべく適切な維持管理に努めていきたい。

表-9 清掃頻度(案)

場所	吐出圧力	清掃周期 (予測)	考察	対象数量
下り線 入口部	0.01MPa	16年	10~16年ごとに 清掃実施	162灯
下り線 中間部	0.01MPa	16年	10~16年ごとに 清掃実施	83灯
下り線 出口部	0.02MPa	6年	6~7年ごとに 清掃実施	151灯
上り線 入口部	0.02MPa	6年	6~7年ごとに 清掃実施	160灯
上り線 中間部	0.02MPa (補正)	4年	4~5年ごとに 清掃実施	82灯
上り線 出口部	0.03MPa (補正)	2年	2~3年ごとに 清掃実施	142灯