

# トンネル照明設計における片側配列方式の適用条件について

## —霧立峠トンネル断面モデルを用いた—考察—

留萌開発建設部 施設整備課 ○進藤 充行  
大久保 幸治  
藤井 陽介

トンネル照明の灯具配列には、向合せ配列、千鳥配列、片側配列及び中央配列があり、片側配列は灯具清掃等の維持管理時の通行規制が片側のみで規制車線の入れ替えが不要というメリットがあるにも拘わらず採用しているトンネルは極めて少ない。片側配列を採用するためには何かの特別な適用条件があるのか、一般国道239号の霧立峠トンネル相当の断面モデルと同等の設計条件を用いて検討したので、その結果を報告する。

キーワード：設計・施工、維持・管理

### 1. はじめに

道路インフラの省エネの一環として、道路・トンネル照明のLED化が促進されている。トンネル照明をLED化することにより、従前行っていたランプ交換は不要となるが、トンネル内の適切な明るさを確保するための灯具清掃やLEDモジュール故障時の修理などの維持管理は引き続き必要である。このようなトンネル照明の維持管理やトンネル照明更新工事では、片側交互通行規制(写真-1)を伴うことが多い。通行規制は、ドライバーの快適な走行を妨げるだけでなく、長時間に及ぶ通行規制は社会的コストの増大に繋がるため、トンネル照明の維持管理等に要する通行規制は短時間であることが望ましい。

トンネル照明の灯具配列には、千鳥配列、片側配列及び中央配列があり、片側配列はその名のとおり灯具を片側にしか設置しないため、維持管理時等の通行規制では規制車線の入れ替えが不要というメリットがある。しかしながら、片側配列を採用しているトンネルは筆者が調べた限りでは極めて少ない。そこで、片側配列を採用するために何かの特別な適用条件があるのか、2023年度に供用開始した一般国道239号の霧立峠トンネル相当の断面モデルと同等の設計条件を用いて検討したので、その結果を報告する。

### 2. 片側配列とした場合のメリット・デメリット

#### ◆メリット

SHINDOU Mitsuyuki, OOKUBO Kouji, FUJII Yousuke

芝山ら<sup>1)</sup>は、トンネル照明の片側配列では電源系統を1系統にすることでコスト削減が図られることを示したが、障害発生リスクを考慮し、電源系統を2系統とした場合は千鳥配列と同等のコストとなるため、設備設置費におけるメリットを得られない可能性がある。しかしながら、延長の長いトンネルでは基本照明の区間が長い場合、通行規制を片側に集中できることは、規制資材・人員の再配置等に関するコストにおいて他の灯具配列より高い優位性があると考えられる。

#### ◆デメリット

片側配列とした場合、大型車両が灯具の光を遮えぎることにより対向車線の路面が暗くなり安全性が低下することが考えられる。しかしながら、車長11mの大型車両が時速60km/hで走行したと仮定した場合、1個の灯具を遮光する時間は0.6~0.7秒と極めて短時間であり、また



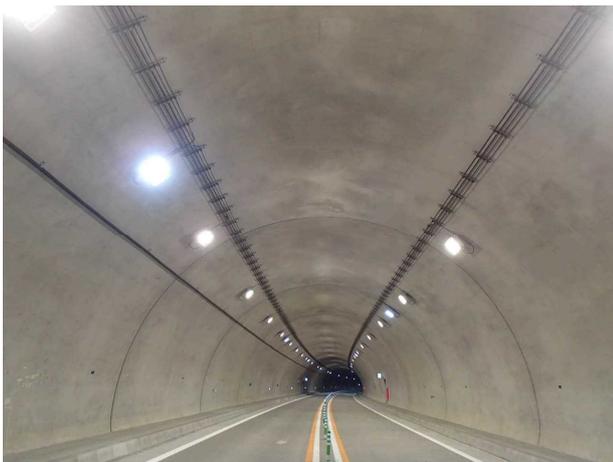
写真-1 片側交互通行規制の状況

天井や壁面からの反射光が対向車線を照らすため安全性の低下はほとんど無いと考える。

以上のとおり片側配列を採用するメリットはあるが、コストと安全に関する明確なデメリットは存在しないと考える。

### 3. 灯具配列の適用条件（基準）と検討目的

“電気通信施設設計要領(電気編)” 第10章トンネル照明設備”では基本照明の灯具配列に関して、『灯具の配列は、向合せ又は千鳥配列を原則とするが、幅員が狭いなど状況に応じて、片側又は中央配列とすることができる。』とされている。また“道路照明施設設置基準・同解説”では、『向合せ配列は平均路面輝度が高いトンネル用いることが多い』、『千鳥配列(写真-2(a))は平均路面輝度が低いトンネルおよび交通量が少ないため平均路面輝度を低減するようなトンネルに用いることが多い』、『中央配列は交通量が少なく比較的断面の小さいトンネルに用いることが多い』と記述されている。しかしなが



(a) 千鳥配列



(b) 片側配列

写真-2 灯具の配列状況

ら、片側配列(写真-2(b))については、平均路面輝度、交通量及び断面などの参考となる記述は無い。このことが片側配列を積極的に採用していない理由のひとつになっている可能性がある。

そこで、片側配列の適用条件を明確にすることによって、トンネル照明設計時の比較検討の場に片側配列が上がりやすくなることを期待し、検討を行うこととした。

### 4. 検討手法と設計条件等の設定

#### (1) 検討手法

検討は、既存トンネル断面を参考に片側配列による照明設計を行い、照明設計の中から問題を抽出し、その解決方法を検討する手法とした。照明設計は、照明器具メーカーによる灯具性能の影響を受けないようにするため照明器材仕様書<sup>4</sup>掲載の灯具を用いた。また、計算法は照明器材仕様書に記載の情報(定格光束、直射照明率)のみで設計可能な光束法とし、設計対象は光束法のみで設計可能な基本照明とした。

#### (2) 設計条件等の設定

設計条件の設定は、本検討を開始する直前に供用開始した一般国道239号霧立峠トンネルと同等の設計条件とした。また、トンネル断面は、霧立峠トンネルの断面を参考としているが、照明設計の単純化を図るため、右側断面を左右対称にしたものとした(図-1)。なお、実際の霧立峠トンネルの照明配列は千鳥配列を採用している。

##### a) 設計条件

設計条件は、表-1のとおりである。

##### b) 性能指標

設計条件から性能指標は、以下のとおりとした。

➤平均路面輝度：1.15cd/m<sup>2</sup>

➤壁面輝度比：0.6

##### c) 照明器材

照明方式及び灯具は、以下のとおりとした。

➤照明方式：対称照明(霧立峠トンネルと同じ)

➤灯具：WAE060BL

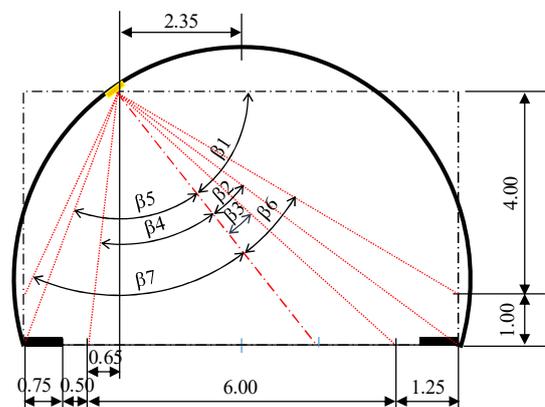


図-1 トンネル断面

#### d) 灯具配置

- 灯具の高さ及び配列は、以下のとおりとした。
- 灯具の高さ：5.0m(霧立峠トンネルと同じ)
- 配列：片側配列

#### e) 簡便法の適用の可否

適用可能である。

#### f) 照射方向

- 照射方向は、簡便法を適用し以下のとおりとした。
- 照射方向：対向車線中央

### 5. 照明設計その1(適用条件の検討)

電気通信施設設計要領(電気編) 第10章 トンネル照明設備で、光束法を用いたトンネル照明設計では平均路面輝度と壁面輝度の計算を行うこととなっているため、それらの計算を基に片側配列の適用条件の検討を行った。

#### (1) 平均路面輝度(灯具間隔)

平均路面輝度は、路面の明るさを計算するものであり、4章2節で設定した平均路面輝度を満足する灯具間隔を算出する。灯具間隔は、以下の式(1)により算出する。式(1)の要素である配列係数(N)は千鳥配列と片側配列で同じ値である。トンネル断面が左右対称の場合、千鳥配列と片側配列で灯具間隔の計算結果に差が生じないことから、灯具間隔の設計は行わないこととした。

$$S = (F \cdot U \cdot M \cdot N) / (W \cdot L_r \cdot K) \quad (1)$$

- S：灯具の間隔(m)、F：光源光束(lm)、
- U：照明率、M：保守率、N：配列係数
- W：車道幅員、L<sub>r</sub>：平均路面輝度(cd/m<sup>2</sup>)
- K：平均照度換算係数(lx/cd/m<sup>2</sup>)

#### (2) 壁面輝度(壁面輝度比)

壁面輝度を計算し、路面輝度と壁面輝度の比を算出する。壁面輝度比は、その値が高いと路面と壁面との境を視認しやすく、それにより人や障害物も視認しやすくなる。平均路面輝度が路面の明るさの指標に対し、壁面輝度比は安全、円滑に走行するための指標である。

表-1 設計条件

道路分類	一般国道等	
交通量	5,000台/日未満	
設計速度	60km/h	
仕上げ	路面	コンクリート舗装
	壁面	コンクリート (内装無し)
	天井面	コンクリート

#### a) 簡便法を適用した照射方向で検証

簡便法を適用し、照射方向を対向車線中央に設定して壁面輝度比を計算した。

壁面輝度比は、以下の式(2)により計算する。式(2)では、U<sub>2</sub>'(対象壁面Hmから近い灯具の照明率)とU<sub>3</sub>'(対象平面Hmから遠い灯具の照明率)の和と2・U(路面の照明率)の比が計算の要素となっていることから、両側の壁面輝度比の平均を計算していると考えられる。これは、左右の壁面に灯具が配置される向合せ配列や千鳥配列の場合は問題無いが、片方の壁面にしか灯具を配置しない片側配列への適用に疑問がある。そこで、灯具に近い壁面の壁面輝度比は式(2)を式(2)'に、灯具から遠い壁面の壁面輝度比は式(2)を式(2)''に分解して、それぞれの壁面の壁面輝度比を計算した。

$$L_w/L_r = K \cdot (\rho w / \pi) \cdot (W/Hm) \cdot ((U_2' + U_3') / (2 \cdot U)) \quad (2)$$

- L<sub>w</sub>：平均壁面輝度(cd/m<sup>2</sup>)、L<sub>r</sub>：平均路面輝度(cd/m<sup>2</sup>)
- K：平均照度換算係数(lx/cd/m<sup>2</sup>)、ρw：壁面の反射率
- W：車道幅員(m)、π：円周率
- Hm：計算対象とする壁面の高さ(m)
- U<sub>2</sub>'：対象壁面Hmから近い灯具の照明率
- U<sub>3</sub>'：対象平面Hmから遠い灯具の照明率
- U：路面の照明率

$$L_{w2}'/L_r = K \cdot (\rho w / \pi) \cdot (W/Hm) \cdot (U_2'/U) \quad (2)'$$

$$L_{w3}'/L_r = K \cdot (\rho w / \pi) \cdot (W/Hm) \cdot (U_3'/U) \quad (2)''$$

壁面輝度比の計算結果は、以下のとおりである。

- 灯具に近い壁面：0.21
- 灯具から遠い壁面：1.01
- 灯具から近い壁面と灯具から遠い壁面の平均：0.61

この結果から、千鳥配列の場合は簡便法を適用した照射方向で推奨値を満足できるが、片側配列の場合は灯具から近い壁面は推奨値を満足しないことが分かった。

#### b) 照射方向を可変させた検証

壁面輝度比の計算式の要素である路面と壁面の照明率は、灯具固有の直射照明率に照明率を求めるための係数を掛けて求める。直射照明率は灯具の照射方向により値が異なる。そこで、4章2節で設定した照射方向を変更し、照射方向を変えることによって灯具に近い壁面の壁面輝度比がどのように変化するのか検証した。検証する照射方向の範囲は、灯具直下から灯具から遠い壁面までとした。

照射方向の代表点における壁面輝度比は、表-2のとおりである。この結果から、霧立峠トンネルの断面及び同等の設計条件では、照射方向を変えても灯具から近い壁面の壁面輝度比は推奨値を満足しないことが分かった。

#### c) トンネル内仕上げの組み合わせを変えた検証

照明率の計算に必要な照明率を求めるための係数は、

トンネル内各部の仕上げの組み合わせにより値が異なる。そこで、4章2節で設定した各部の仕上げの組み合わせを変更し、組み合わせを変えることによって灯具に近い壁面の壁面輝度比が推奨値を満足できるのか検証した。照射方向は、本節b項と同じ範囲とした。

検証結果は、表-3のとおりである。路面、壁面及び天井面の仕上げの組み合わせで灯具に近い壁面の壁面輝度比が推奨値を満足できたのは、”路面がアスファルト+壁面がコンクリート(内装あり・壁面反射率60%)+天井面がコンクリートの組み合わせで且つ照射方向が灯具直下から1.24m以下の範囲”のみで、それ以外の組み合わせでは、全ての照射方向で灯具から近い壁面の壁面輝度比は推奨値を満足しなかった。

### (3)問題点

霧立峠トンネルの断面及び設計条件において、簡便法を適用した照射方向では、灯具に近い壁面の壁面輝度比が推奨値を満足しないことが分かった。また、照射方向を簡便法以外の位置に設定しても簡便法適用時と同様に灯具に近い壁面の壁面輝度比が推奨値を満足しないことが分かった。トンネル内仕上げの組み合わせを変えた場合は、”路面がアスファルト+壁面がコンクリート(内装あり・壁面反射率60%)+天井面がコンクリートの組み合わせで且つ照射方向が灯具直下から1.24m以下の範囲”でのみ灯具に近い壁面の壁面輝度比が推奨値を満足することが分かった。しかしながら、この条件はかなり限定的なものであるため、片側配列の適用を幅広く検討して

表-2 照射方向別の壁面輝度比

(推奨値 : 0.6)

照射方向	灯具からの距離 (m)	壁面輝度比		
		灯具に近い壁面	灯具から遠い壁面	平均
灯具直下	0.00	0.43	0.25	0.34
道路中心	2.35	0.28	0.65	0.46
対向車線中央	3.85	0.21	1.01	0.61
外側線	5.35	0.20	1.28	0.74
灯具から遠い壁面	6.60	0.17	1.06	0.61

表-3 トンネル内仕上げの組み合わせ別の壁面輝度比を満足する照射方向

設計条件(トンネル内仕上げ)			灯具に近い壁面の壁面輝度比を満足する照射方向	壁面輝度比推奨値
路面	壁面	天井面		
コンクリート舗装	コンクリート(内装なし)	コンクリート	無し	0.6
	コンクリート(内装あり・壁面反射率40%)		無し	1.5
	コンクリート(内装あり・壁面反射率60%)		無し	1.5
アスファルト舗装	コンクリート(内装なし)		無し	0.6
	コンクリート(内装あり・壁面反射率40%)		無し	1.0
	コンクリート(内装あり・壁面反射率60%)		灯具直下から1.24m以下まで	1.0

もらうためには、灯具に近い壁面の壁面輝度比が推奨値を満たさない問題を解決する必要がある。

### (4)解決方法

灯具に近い壁面の壁面輝度比が推奨値を満たさない問題の解決方法を検討した。“電気通信施設設計要領(電気編) 第10章 トンネル照明設備”では、壁面輝度比の推奨値の注釈に『広い路肩や歩道を有するトンネルの壁面輝度比は、障害物の背景とならないためこの限りでない。』と記載がある。これにより、歩道を有するトンネルでは歩道側に灯具を設置することで灯具に近い壁面の壁面輝度比は推奨値を満たす必要がなくなり、問題は解決される。

## 6. 照明設計その2(設計条件の検討)

5章では片側配列を採用可能な適用条件について検討した。本章では、片側配列で照明設計する際の設計条件について検討した。

照明設計が必要となる設計条件は、4章2節の各項のとおりである。a~d項は本検討の前提条件として設定されるものであるため、f項の照射方向とe項の簡便法適用の可否について検討した。なお、片側配列を適用するには歩道を有する必要があるため、4章のトンネル断面に幅2.0mの歩道を追加し(図-2)、それ以外の設計条件は5章2節b項と同じとした。

### (1) 照射方向の検討

照射方向に応じた灯具間隔、路面の照明率及び壁面輝度比を比較する方法により適正な照射方向を検討した。灯具間隔の計算要素である光源光束(F)、照明率(U)、保守率(M)、配列係数(N)、車道幅員(W)、平均路面輝度(Lr)及び平均照度換算係数(K)は次のとおりとした。

➤光源光束(F) : 6,000lm

➤照明率(U) : 照射方向により計算で求める

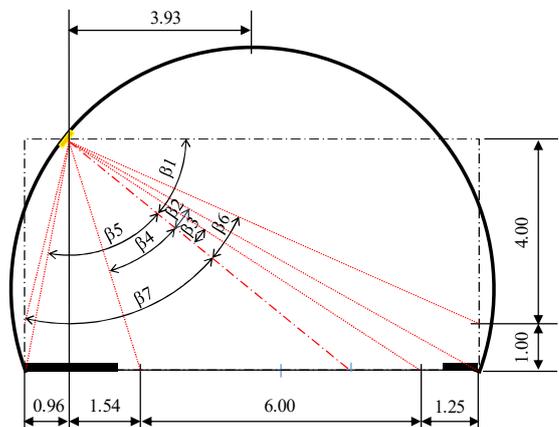


図-2 トンネル断面(歩道追加)

- 保守率(M) : 0.7
- 配列係数(N) : 1
- 車道幅員(W) : 6.0m
- 平均路面輝度(Lr) : 1.15cd/m<sup>2</sup>
- 平均照度換算係数(K) : 13 lx/cd/m<sup>2</sup>

照射方向の代表点における灯具間隔、路面の照明率及び壁面輝度比は、表4のとおりである。灯具間隔は照射方向が灯具から近いほど広がる傾向が見られ、壁面輝度比は灯具から離れるほど大きくなる傾向が見られた。また、照射方向に応じた路面の照明率と壁面輝度比を図-3に示す。この傾向は、壁面輝度比が推奨値以上となる範囲では外側線まで続いていることが確認できた。このことから、照射方向は壁面輝度比が推奨値を満足させることを前提とした場合、灯具にできるだけ近い位置とした方が設置コスト面で有利であると考えられる。設置コストは、式(1)のとおり路面の照明率と灯具の設置間隔が比例しているため、路面の照明率が高いほど灯具の設置間隔を広くすることができ、設置コストが有利となる。

## (2) 簡便法の適用可否の検討

簡便法の適用条件に灯具の配列方式の別は含まれていないため、片側配列で簡便法が適用可能か検討した。

検討は、千鳥配列で簡便法により照射方向を設定した際の壁面輝度比と路面の照明率の特徴と、片側配列で簡便法により照射方向を設定した際の壁面輝度比と路面の照明率の特徴を比較する方法とした。

表4 照射方向別の灯具間隔・路面の照明率・壁面輝度比

照射方向	灯具からの距離 (m)	灯具間隔 (m)	路面の照明率	壁面輝度比
灯具直下	0.00	39.6	0.845	0.15
道路中心	4.54	23.7	0.506	0.96
対向車線中央	6.04	21.2	0.452	1.13
外側線	7.54	18.9	0.404	1.29
灯具から遠い壁面	8.79	22.3	0.477	1.09

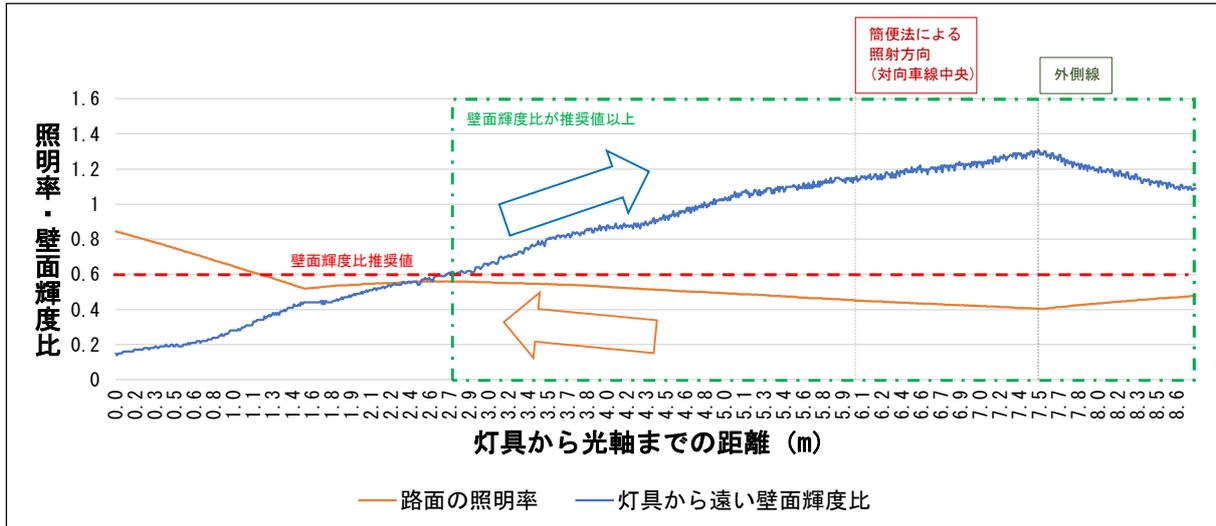


図3 照射方向に応じた路面の照明率・壁面輝度比(歩道あり・片側配列)

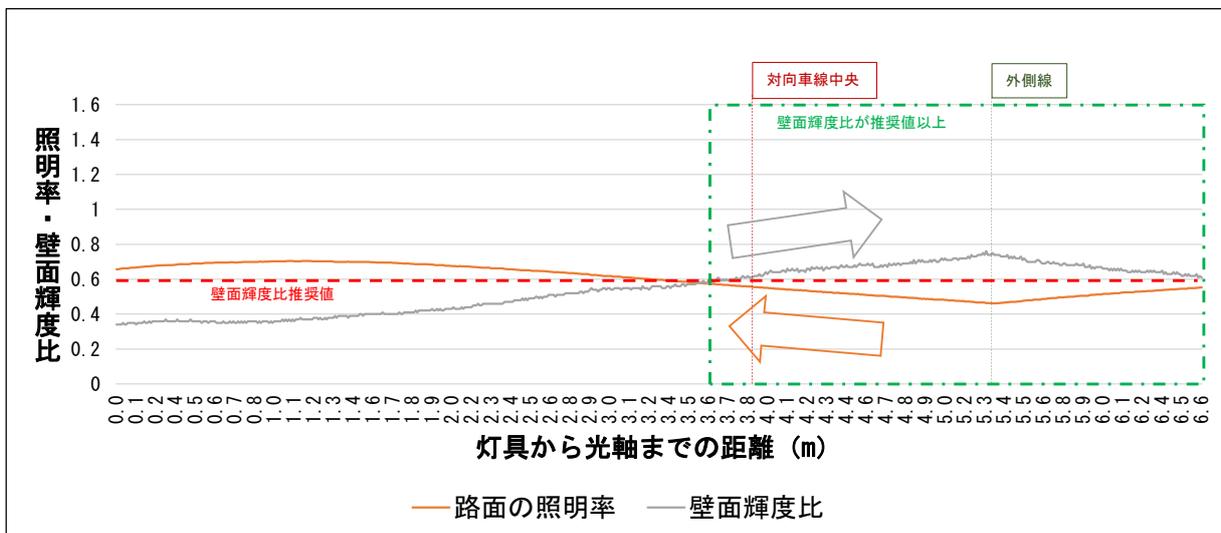


図4 照射方向に応じた路面の照明率・壁面輝度比(歩道なし・千鳥配列)

### a) 千鳥配列

図-1のトンネル断面に千鳥配列した場合の照射方向に応じた壁面輝度比と路面の照明率をまとめたグラフを図-4に示す。千鳥配列でも片側配列と同様に壁面輝度比が推奨値以上となる範囲では、灯具から近いほど路面の照明率が上がる傾向が見られた。照射方向の設定に簡便法を適用させた場合、照射方向は対向車線中央となる。この照射方向は、「壁面輝度比が推奨値以上となる範囲の中で灯具に比較的近い位置」であることから比較的照明率が高い。このことから、簡便法の照射方向は設置コストが比較的有利となる位置に設定されていることが分かった。

### b) 片側配列

図-3から、簡便法の照射方向である対向車線中央は、壁面輝度比が推奨値以上であるが灯具から離れているため照明率が低い。このことから、片側配列では、簡便法の照射方向は設置コストが有利な位置となっていない可能性があることが分かった。

### c) 簡便法の適用可否のまとめ

簡便法の照射方向は、壁面輝度比が推奨値を満足し且つ設置コストが比較的有利な位置を設定していると考えられる。しかしながら、片側配列では簡便法の照射方向は設置コストが有利な位置となっていなかった。このことから、片側配列における照射方向の設定は、簡便法の適用が可能な条件であっても安易に簡便法を適用しない方がいいと考える。

簡便法を適用しない場合、基本照明であっても照射方向は総合均斉度、相対閾値増加及び車線軸均斉度の性能指標を満足させる位置にしなければならないため、逐点法による輝度計算が必要となる。逐点法による輝度計算には、灯具固有の光度値が必要となる。光度値は照明器具メーカー毎、灯具毎に異なることから、照明設計に用いた灯具の性能未満の灯具で現地施工しないよう留意する必要がある。

### (3) 照明設計2のまとめ

片側配列では、照射方向は「壁面輝度比が推奨値を満足する範囲では灯具にできるだけ近い位置」とした方が設置コストを抑えられる可能性があることが分かった。

簡便法で設定された照射方向は、千鳥配列の場合は比較的照明率が高く設置コストが有利となる位置に設定されていることが分かった。しかしながら、片側配列の場合は壁面輝度比は推奨値以上であるが照明率が低いため設置コストが有利にならない位置となる可能性があることが分かった。このことから、片側配列における照射方向の設定では、簡便法の適用が可能な条件であっても安易に簡便法を適用しない方がいいと考える。

なお、本検討は、照明器材仕様書掲載の灯具を用いて光束法により行っているため、逐点法を用いた計算結果が必要となる総合均斉度などの評価は行っていない。

## 7. まとめ（片側配列の適用条件）

一般国道239号霧立峠トンネルの断面及び設計条件からトンネル照明の片側配列の適用条件を検討した結果、片側配列を適用可能な条件は、以下のとおりである。

- 歩道(広い路肩)を有するトンネルである
- 路面がアスファルト舗装で且つ壁面に内装板があるトンネルは適用可能な場合がある
- また、照明設計の設計条件は、以下のとおりである。
- 灯具の取付位置は歩道側とする
- 壁面輝度比を判定する対象壁面は「灯具から遠い壁面」とする

➤照射方向の設定は簡便法を適用しない方がいい

片側配列とすることによるトンネル内の視環境の変化として、見た目の視覚的違和感が考えられるが、照明基準に則った路面及び壁面輝度となっており、路面上の明るさは千鳥配列と同等であるため車両走行の安全性に問題は無い。また、視覚的違和感は、片側配列が普及することにより解消されると考える。

## 8. あとがき

「カーボンニュートラル・維持コスト削減・省人化」と、「新たな技術や前例にとらわれない施策の検討」は世界的な潮流である。適用条件を満たすトンネルにおいて片側配列の検討を行うことは、維持コスト削減・省人化に合致し、排出ガス削減はカーボンニュートラルに繋がるものであるため、国の設備を維持管理する立場として、極めて重要であると考えられる。

本稿では、一般国道239号霧立峠トンネルをモデルに検討した結果を報告したが、多岐にわたるトンネル断面、設計条件の全てに上記の適用条件、設計条件を当てはめることができる訳ではない。しかしながら、本稿が片側配列を検討するきっかけとなり、カーボンニュートラル・維持コスト削減・省人化に繋がる一助になれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 芝山義一、田村雅嗣、七尾理恵  
トンネル照明設備のコスト縮減について-片側配列の採用検討-第66回(令和4年度)北海道開発技術研究発表会論文  
<https://thesis.ceri.go.jp/db/files/170739381648f6090ec2b5.pdf>
- 2) 一般社団法人建設電気技術協会 電気通信施設設計 要領・同解説(電気編)平成29年度版。
- 3) 公益社団法人日本道路協会 道路照明施設設置基準・同解説平成19年度版。
- 4) 一般社団法人建設電気技術協会 道路・トンネル照明器材仕様書平成30年度版。