

トンネル内の新照明方式に関する 共同研究報告書

道路トンネルのカウンタービーム照明設計ガイドライン(案)

平成9年3月

建設省土木研究所
トンネル研究室
日本道路公団
首都高速道路公団
岩崎電気株式会社
建電設備株式会社
小糸工業株式会社
東芝ライテック株式会社
松下電器産業株式会社

Copyright © (1997) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

トンネル内の新照明方式に関する 共同研究報告書

道路トンネルのカウンタービーム照明設計ガイドライン(案)

建設省土木研究所	トンネル研究室室長	真下 英人
	トンネル研究室研究員	石村 利明
日本道路公団	施設部施設建設課	相馬 隆治
	施設部施設企画課	稲見 寛昭
首都高速道路公団	保全施設部電気通信課課長補佐	浅見 真一
	保全施設部電気通信課	武田 裕之
岩崎電気株式会社	技術開発室	内田 和夫
	技術開発室営業技術部課長	赤坂 人司
建電設備株式会社	東京支店技術部担当部長	関口 芳夫
	大阪支店技術部次長	乗松 幸生
小糸工業株式会社	電気営業本部室理事	荒井 弘志
	照明技術部次長	森永 晃
	照明技術部	永井 渉
	照明技術部	角 建志
東芝ライテック株式会社	セールスエンジニアリングセンター部長代理	大山 敬
	セールスエンジニアリングセンター	皆川 考司
松下電器産業株式会社	照明研究所主席研究員	坂本 正悦
	照明研究所	山中 泰彦
	東京エンジニアリングセンター課長	大橋 利彦

要 旨

近年、道路トンネルの供用本数・総延長が急増しており、これに伴う維持管理費も増加してきている。今後、快適性、経済性の面から道路トンネルの合理化を図っていくためには照明効率の高い照明方式について検討する必要がある。本共同研究報告書は、道路トンネルの新しい照明方式としてカウンタービーム照明を国内に適用するための一般的事項を示すとともに、合理的な設計を行うための資料として作成したものである。

キーワード：道路トンネル，カウンタービーム照明，照明設計

はじめに

本ガイドライン(案)は、道路トンネルの照明施設の整備にあたり、カウンタービーム照明の一般的事項を示すとともに、道路トンネルのカウンタービーム照明の合理的な設計を行うための資料として作成したものである。

カウンタービーム照明は、これまでスイス等の道路トンネルの入口部照明として既に実用化され、その基本的原理・照明効果等が確認されている。しかし、国内とスイスの照明施設の設置基準の相違、交通形態・交通量等が異なっていることなどにより、国内にカウンタービーム照明を適用するためには、いくつかの確認・検討が必要である。このため、建設省土木研究所、日本道路公団、首都高速道路公団、岩崎電気(株)、建電設備(株)、小糸工業(株)、東芝ライテック(株)、松下電器産業(株)により平成5年度から平成7年度までの3カ年でカウンタービーム照明を国内に適用することを目的として「トンネル内の新照明方式に関する共同研究」を実施した。本ガイドライン(案)は、上記共同研究で実施した確認・検討事項を取りまとめた共同研究報告書「カウンタービーム照明に関する研究報告書」(平成9年3月)および共同研究報告書「カウンタービーム照明に関する研究(その2～その4)報告書」(平成9年3月)をもとに作成した設計参考資料である。

道路トンネルのカウンタービーム照明設計ガイドライン（案）

目次

第1章 総 則	1
1－1 ガイドラインの目的	1
1－2 適用の範囲	1
1－3 カウンタービーム照明の適用	3
1－4 用語の定義	5
第2章 照明設計	9
2－1 照明設計の手順	9
2－2 野外輝度の設定	10
2－3 路面輝度の設定	10
2－4 灯具の取付け	10
2－5 基本照明との関係	12
2－6 舗装路面および内装	13
2－7 照明計算法	16
2－8 平均照度換算係数	21
2－9 照明率	24
2－10 保守率	27
第3章 照明器材	28
3－1 光源の選定	28
3－2 照明器具	30
第4章 照明設計例	32
4－1 路肩近傍取付	32
4－2 車線中央取付	43
参考文献	54

第1章 総則

1-1 ガイドライン（案）の目的

本ガイドライン（案）は、道路トンネルの照明施設の整備にあたり、カウンタービーム照明の一般的事項を示し、その合理的な設計を行うのに資することを目的とする。

【解説】

本ガイドライン（案）は、道路トンネルの照明施設の整備にあたり、カウンタービーム照明の一般的事項を示すとともに、道路トンネルのカウンタービーム照明の合理的な設計を行うための資料として作成したものである。

カウンタービーム照明は、スイス等の道路トンネルの入口部照明として既に実用化され、その基本的原理・照明効果等が確認されている。しかしながら、国内にカウンタービーム照明を適用するためには、日本とスイスの照明施設の設置基準、交通形態・交通量等の相違点を考慮し、国内の諸条件に適した安全で合理的なカウンタービーム照明とする必要がある。このため、いくつかの項目についての確認・検討および開発が必要である。本ガイドライン（案）は、これらの確認・検討および開発事項をとりまとめた設計参考資料である。

1-2 適用の範囲

本ガイドライン（案）は、道路トンネルのカウンタービーム照明の設計を行う際に適用する。

【解説】

本ガイドライン（案）は、道路トンネルのカウンタービーム照明の設計を行う際に適用する。道路トンネルの照明施設に関しては、道路照明施設設置基準(昭和56年3月27日都市局長・道路局長通達および同解説((社)日本道路協会)¹⁾がある。現時点では、上記基準にカウンタービーム照明に関連する記述がなく、カウンタービーム照明に関する設計は本ガイドライン（案）によるものとする。本ガイドライン（案）作成にあたっては、上記基準を基本としており本ガイドライン（案）に記載されていない範囲については、表解1-1により上記基準を適用するものとする。ただし、今後、上記の設置基準などの改訂が実施された場合は、新しい設置基準を準拠した上で本ガイドライン（案）を活用することとする。

表解 1-1 道路照明施設設置基準・同解説¹⁾との適用対応表

適用	道路照明施設設置基準 目次	本ガイドライン 目次
■ ■ ■	第1章 総則 1-1 基準の目的 → 1-2 適用の範囲 1-3 用語の定義	1-1 ガイドラインの目的 1-2 適用の範囲 1-3 カウンタービーム照明の適用 1-4 用語の定義
○ ○ ○	第2章 道路照明施設整備計画 2-1 道路照明の目的 2-2 設置場所 2-3 道路照明施設整備計画の基本	
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	第3章 連続照明 3-1 照明設計の基本 3-2 基準輝度 3-3 照明方式の選定 3-4 光源の選定 3-5 灯具配光の選定 3-6 灯具の配置 3-7 道路照明の運用	
○ ○ ○ ○	第4章 局部照明 4-1 局部照明の一般原則 4-2 交差点 4-3 横断歩道 4-4 その他の場所	
○ ▲ ○ ○ ○ ○ ○ ○	第5章 トンネル照明 5-1 トンネル照明の目的 5-2 光源の選定 → 5-3 灯具の選定 → 5-4 トンネル照明の構成 5-5 基本照明 5-6 入口部照明 → 5-7 出口部照明 5-8 接続道路の照明 5-9 停電時照明	3-1 光源 2-4 灯具の取り付け 2-2 野外輝度の設定 2-3 路面輝度等の設定 2-5 基本照明との関係 2-6 舗装路面および内装
▲ ○ ○	第6章 照明用器材 6-1 照明器具 → 6-2 ボール 6-3 その他の器材	3-2 照明器具
○ ▲ ○ ○ ○	第7章 設計および施工 7-1 照明施設設置の手順 7-2 照明設計 → 7-3 配線設計 7-4 施工	2-1 照明設計の手順 2-7 照明計算式 2-8 平均照度換算係数 2-9 照明率 2-10 保守率
○ ○ ○	第8章 維持管理 8-1 点検 8-2 清掃および補修 8-3 記録	
○	付録	

注)

①本ガイドラインは、道路照明施設設置基準目次欄の 部分の本ガイドライン目次欄の 部分として追記・修正を行った。

②本ガイドラインの適用にあたっては、適用欄の記号（■：設置基準・ガイドライン共に適用する。

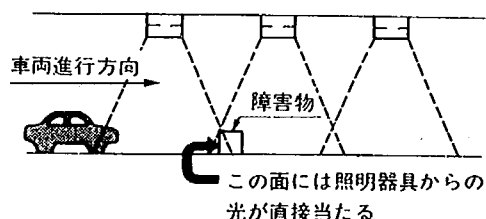
○：設置基準を適用する。▲：本ガイドラインを適用する。）を参考とする。

1-3 カウンタービーム照明の適用

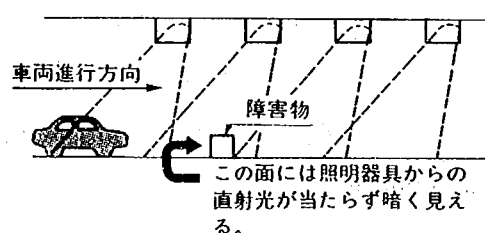
カウンタービーム照明は、一方交通トンネルおよび対面交通トンネルの入口照明に適用することとし、対面交通トンネルにあつては、両坑口の入口部照明区間が重複しない長さ以上のトンネルとする。カウンタービーム照明の適用にあつては、設計速度・坑口部周辺の野外輝度・平面線形・自然光の入射の程度・交通量等を考慮し、その効果を総合的に判断しなければならない。

【解説】

カウンタービーム照明は、図解1-1に示すように照明器具からの光を運転者側へ向け、路上に落下している障害物等の視認性をより向上させるとともに、同一の消費電力では従来の対称照明より高い路面輝度が得られるなど経済性に優れた照明方式である。この照明方式は、障害物の運転者側から見た面には照明器具からの直射光がないため、運転者は障害物をシルエット視し、背景路面とのコントラストが強調されることによって視認性が向上するものである。また、入口部周辺の野外輝度が高い場合やトンネル入口部の線形に曲線を伴っている場合などで、トンネル外部から内部の線形がわかりにくい場合でも、通常の照明方式である対称照明に比べて照明器具からの直射光が強く、視線誘導の効果の向上が期待される。



(a) 対称照明



(b) カウンタービーム照明

図解1-1 照明方式の概念

カウンタービーム照明の特性は、対象とするトンネルの長さ・設計速度・坑口部周辺の野外輝度・平面線形・自然光の入射の程度、交通量等により異なる。このため、当該トンネルの条件を勘案し、適用の効果を総合的に判断して決定する必要がある。

一般に、カウンタービーム照明は、主として照明レベルの高い入口部照明区間に適用することによってその照明効果が発揮される方式であることから入口部照明区間に適用することとした。照明レベルが低い基本照明への適用は、その照明効果等の十分な検討がなされていないため現段階では適用しないこととした。

また、対面交通トンネルにあつては、両坑口の入口部照明区間が重複するような比較的短い場合は、照明

器具からの配光がそれぞれ重複される方向となり、カウンタービーム照明の効果が十分に発揮することが困難となる。したがって、対面交通トンネルの場合は、両坑口の入口部照明区間が重複しない長さ以上のトンネルにカウンタービーム照明を適用することとした。

土木研究所における実験結果によれば、設計速度50km/h、60km/h、80km/hのトンネルでカウンタービーム照明を用いることで効果が期待できることが確認されている。しかしながら、設計速度40km/hのトンネルの場合は、照明レベルが低く、かつ入口照明の長さも短いことから、自然光の入射が大きいトンネルでは障害物と背景路面との十分な輝度対比が得られないことがあるとの報告もある。このため、設計速度50km/h以上のトンネルで適用することを原則とする。設計速度40km/hのトンネルでは、自然光の入射が極めて小さい場合や、事前の検討によりカウンタービーム照明を適用することが効果的であると判断される場合にカウンタービーム照明を適用するのが望ましい。同様な考え方により、入口照明のレベルを交通量による低減を行って照明レベルを半減する場合には、設計速度60km/h以上のトンネルに適用するのが望ましい。

先行車の視認性に関しては、一部の車種・色による背面の輝度測定、被験者による走行実験では対称照明との顕著な差は認められていない。しかしながら、カウンタービーム照明の配光特性上、先行車の背面後部の鉛直面照度が低下し車両の形状等によってはその視認性が対称照明に比べて若干低下することもあるため、設計速度が高く恒常的に先行車を伴って走行するような極めて交通量が多いトンネルでは適用にあたって検討する必要がある。

以上より、カウンタービーム照明の適用できる条件、適用した場合効果の高いと考えられるトンネル、適用にあたって検討を必要とするトンネルは下記のようになり、これらの条件を勘案してカウンタービーム照明を適用するものとする。

1) カウンタービーム照明を適用できる条件

- ①一方交通トンネル及び対面交通トンネルに適用できる。
- ②対面交通トンネルの場合は両坑口の入口部照明区間が重複しない長さ以上のトンネルに適用する。
- ③設計速度50km/h以上で適用できる。
- ④路面輝度を低減する場合は設計速度60km/h以上に適用する。

2) 適用により効果が高いと考えられる条件

- ①入口部の照明レベルが高いトンネル
- ②入口部周辺の野外輝度が高いトンネル

3) 適用にあたって検討する必要がある条件

- ①入口部の照明レベルが低いトンネル
- ②設計速度が高く極めて交通量の多いトンネル
- ③自然光の射し込みが強いトンネル

1-4 用語の定義

(1) カウンタービーム照明

道路トンネルにおいて、照明器具の配光がトンネルの縦断方向に対して、自動車の進行方向およびその反対方向に非対称となっており、反対方向に向かう光度が大きくコントラスト係数が対称照明よりも大きい照明方式をいう。

(2) 対称照明

道路トンネルにおいて、照明器具の配光がトンネルの縦断方向に対して、自動車の進行方向およびその反対方向にほぼ対称となっている照明方式をいう。

(3) コントラスト係数

道路上の視対象物の輝度対比を決める要素となる係数であり、平均路面輝度 L [単位 cd/m^2]と路面上0.1 mの高さのその物体に接近する自動車の運転者に向く面の鉛直面照度 E_v [単位 lx]の比で表される。

$$\text{コントラスト係数} = L / E_v$$

(4) 輝度対比

視対象物の輝度を L_o とし、その背景の輝度を L_b とする場合に、次の式で表される値をいう。

$$C = \left| \frac{L_o - L_b}{L_b} \right|$$

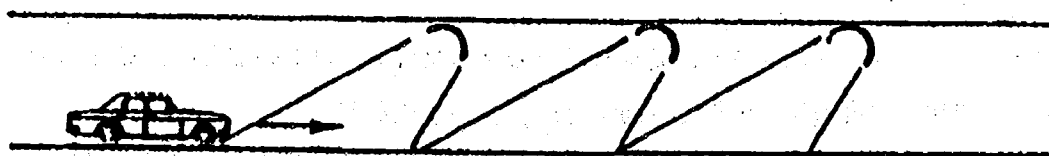
【解説】

(1) カウンタービーム照明

この照明方式は、照明器具の配光が図解1-2²⁾に示すように特殊なものとなっており、コントラスト係数が対称照明と比べて大きいので、路上の視対象物が自動車の運転者から見て、対称照明の場合と比べて低い輝度となるような効果を持つので、その物体と背景との間の輝度対比が大きくなって見やすくなる。

(2) 対称照明

この照明方式は、通常のトンネルにおいて一般的に採用されているものであり、現在の道路照明施設設置基準・同解説¹⁾は、特にこの用語を使用していないが、この方式の照明についてのみ記述している。



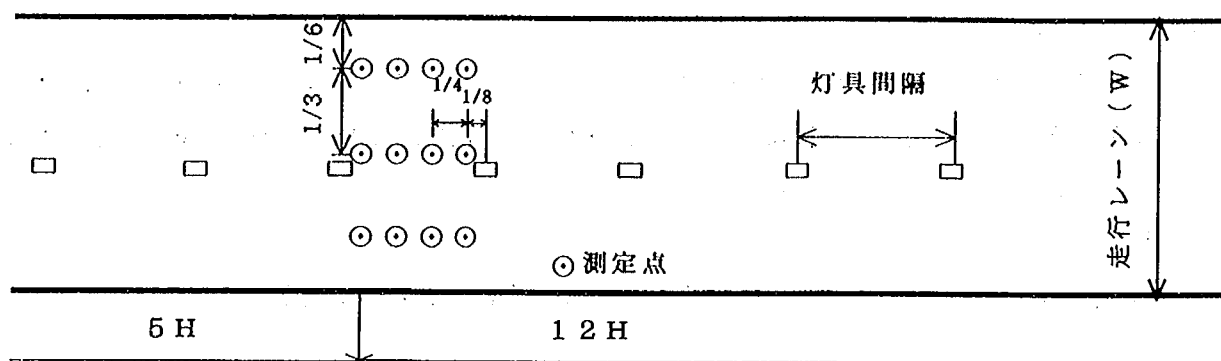
図解1-2 カウンタービーム照明の概念図

(3) コントラスト係数

この係数は、カウンタービーム照明と対称照明を種別するためにCIE（国際照明委員会）が定義した用語であり、本ガイドラインではその定義に従った意味を示している。

CIE（国際照明委員会）では、このコントラスト係数 L/E_v の最小値（計算の方法は図解1-3参照）が0.2以下のものが対称照明、0.6以上のものがカウンタービーム照明であると定義³⁾している。

一方、SEV（スイス電気技術協会）ではコントラスト係数が0.5以上のものをカウンタービーム照明と定義⁴⁾している。



トンネル照明システムの L/E_v 比率の定義において考慮すべきグリッドおよび照明
(W = 走行レーンの幅、 S = 照明器具の間隔、 H = 照明器具の取付高さ)

鉛直面照度は、接近するドライバーが直面する路上0.1mの面を対象とする。通常グリッドは、1走行レーンあたり12ポイント、レーンを横切って3ポイント、隣接する2つの照明器具の間に縦方向に4ポイントで定義される。比率 L/E_v の計算に関しては、考慮される照明器具の数は、計算ポイント手前の照明器具の取付高さの5倍、うしろでは照明器具の取付高さの12倍の区域で定義される。鉛直面照度の計算に関しては、直接の貢献と間接の貢献の両方を考慮に入れることが重要である。

図解1-3 CIE（国際照明委員会）が示している鉛直面の照度の計算点³⁾

(4) 輝度対比

輝度対比とは、CIE（国際照明委員会）の用語集⁵⁾によれば下記の通りである。

[コントラスト、たいひ]

- ①知覚的意味では、同時又は継時的に見える視野の2つ又はそれ以上の部分の、見え方の差の評価（すなわち、明るさ対比、明度対比、色対比、同時対比、継時対比など）。
- ②物理的意味では、知覚的な明るさ対比と対応するように意図された量で、普通、対象の輝度を含むいくつかの式の一つで定義される。例えば光覚輝度閾付近では $\Delta L/L$ 、あるいはより高い輝度では L_1/L_2 。

道路照明施設において路上の視対象物を見る場合に、その物体の輝度対比は、通常、次の式で表される。

$$C = \left| \frac{L_b - L_o}{L_b} \right| \dots\dots\dots (1.1)$$

但し、C : 視対象物の輝度対比

L_b : 背景輝度[cd/m²] (通常は平均路面輝度Lと等しい)

L_o : 視対象物の輝度[cd/m²]

カウンタービーム照明が良い照明効果を持つためには、その物体の運転者側の鉛直面照度ができるだけ低くなければならない。その鉛直面照度は、この方式の特性上、照明器具からの直射による成分はほとんどなく、路面や壁面からの相互反射による成分が大部分となる。従って、その鉛直面照度の値は路面や壁面の種類によりやや変わるが、高くてもその付近の路面の水平面照度の1/5程度となっていることが必要である。

その値が、1/5となっていれば、カウンタービーム照明が設置されているトンネルで、例えば平均照度換算係数が9 [lx/cd/m²]の路面上にある反射率30%の視対象物の輝度および輝度対比は次式で計算する値となる。

視対象物の輝度 L_o は次の式で計算できる。

$$L_o = \frac{\rho}{\pi} E_v \dots\dots\dots (1.2)$$

視対象物の輝度対比は次の式で計算できる。

$$E_v = \frac{1}{5} E_h = \frac{9}{5} L \dots\dots\dots (1.3)$$

$$L_o = \frac{\rho}{\pi} E_v = \frac{9\rho}{5\pi} L = 0.17 L \dots\dots\dots (1.4)$$

$$C = \left| \frac{L_b - 0.17 L}{L_b} \right| = 0.83 \dots\dots\dots (1.5)$$

但し、 E_v : 路面上0.1mの高さの視対象物に接近する自動車の運転者に向く面の鉛直面照度[lx]

E_h : 水平面照度[lx]

L_o : 視対象物の輝度[cd/m²]

L_b : 背景輝度[cd/m²] (通常は平均路面輝度Lと等しい)

ρ : 視対象物の反射率

π : 円周率

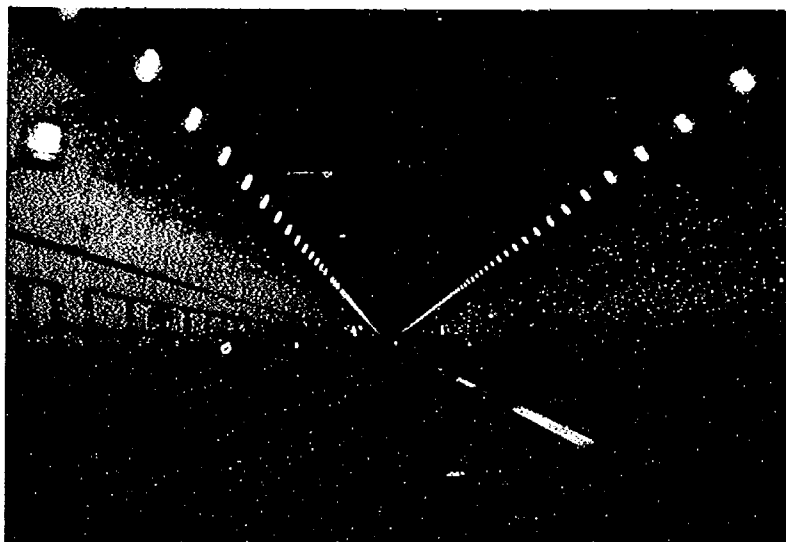
したがって、その輝度対比は、83%となり、この物体はシルエット効果でよく見える事になる。

(100cd/m²の背景の中に17cd/m²の物体として見える状態)

なお、その場合の平均路面輝度L [cd/m²]と鉛直面照度 E_v [lx]との比(コントラスト係数)はほぼ0.56となる。

輝度対比が大きいほど視対象物はよく見えるので、 L_o が小さければ式(1.1)の分子 $L_b - L_o$ が大きくなり、物体の輝度が小さいほどそれがよく見えることとなる。

したがって、対称照明では、 E_v が平均水平面照度 E_h の約 $1/2$ であり、カウンタービーム照明ではその値が約 $1/5$ であることは、同一の物体の輝度対比が対称照明の場合と比べて大きくなり、視対象物の見え方が良くなることとなる。



図解 1 - 4 自動車の運転者が道路上で視対象物を見る状況

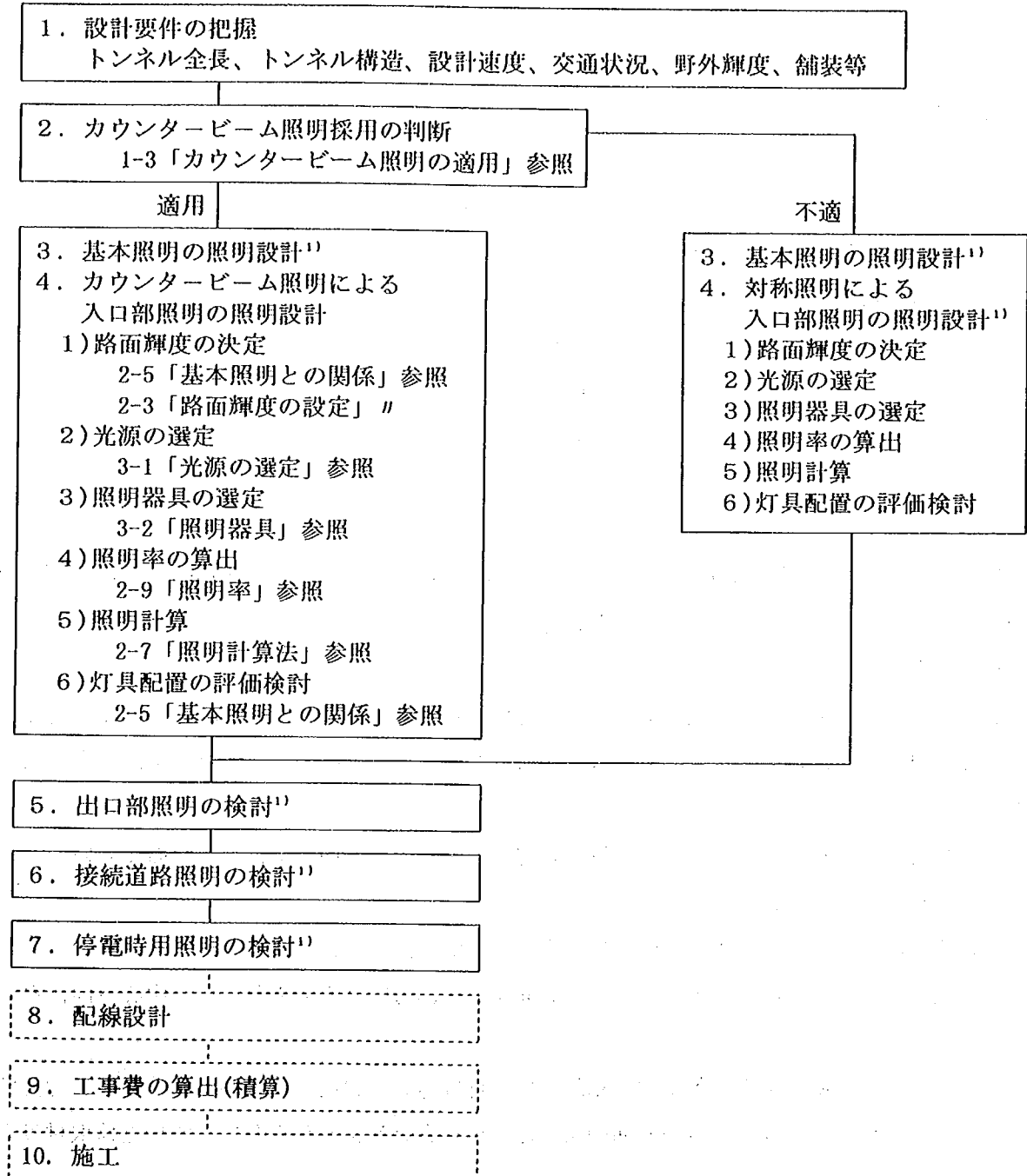
第2章 照明設計

2-1 照明設計の手順

トンネル内部の特殊な条件下において交通の安全性、円滑性を確保するため、トンネル照明設計上の規定に従い、光源、照明器具、照明器具の配置を決定するものとする。

【解説】

設計は図解2-1の1～7の手順で行う



図解2-1 照明設計の手順

2-2 野外輝度の設定

野外の輝度は、道路照明施設設置基準（昭和56年 3月27日都市局長・道路局長通達）および同解説¹⁾（（社）日本道路協会）により設定する。

2-3 路面輝度の設定

路面輝度の設定は、道路照明施設設置基準（昭和56年 3月27日都市局長・道路局長通達）および同解説¹⁾（（社）日本道路協会）により設定する。

2-4 灯具の取付け

- (1) 入口照明の灯具配置は車線中央または路肩近傍とし、配列は向き合わせを原則とする。
- (2) 入口照明の灯具取付け高さは、路面上4.5m以上の建築限界外とする。
- (3) 入口照明の灯具取付け高さに対する灯具間隔は、下記を標準とする。

$$S \leq 2.0H$$

H：灯具の取付け高さ

S：灯具の間隔

【解 説】

灯具取付けの設定は、建設省土木研究所内の実大トンネルにおける照明実験、照明特性の検証、均斉度およびグレアの主観評価実験などを基に決められたものである。^{8)~11)}

(1) 灯具取付け位置

カウンタービーム照明は、運転者側へ光を照射することにより背景路面の輝度を高め、また障害物の運転者側から見た面に直射光が当たらないため、運転者側から見た路面と障害物との輝度対比を効率良く高める照明方式である。

したがって、その目的を発揮するための灯具配置としては、現状の標準的なトンネル断面において、車線中央と路肩近傍の2種類が考えられる。

車線中央取付け方式は、灯具を車線中央に取付けて光軸を車線方向と並行に向ける方式であり、路肩近傍取付け方式は、灯具を路肩近傍に取付けて光軸と車線方向を並行あるいは光軸方向を車線中心方向に振り向ける方式である。

入口照明の灯具配置は、照明特性上、効率的な車線中央取付け方式を原則とするが、維持管理、他設備との取り合い、トンネル断面上およびトンネル壁面の明るさを要求されるような場合には路肩近傍取付け方式とする。

(2) 灯具取付け高さ

灯具取付け高さを4.5 m以上としたのは、道路構造令の建築限界外であり、灯具のグレアによる影響を出来るだけ少なくするためである。なお、灯具などに対する破損やオーバーレイを考慮すると、灯具取付け高さは高くすることが望ましい。

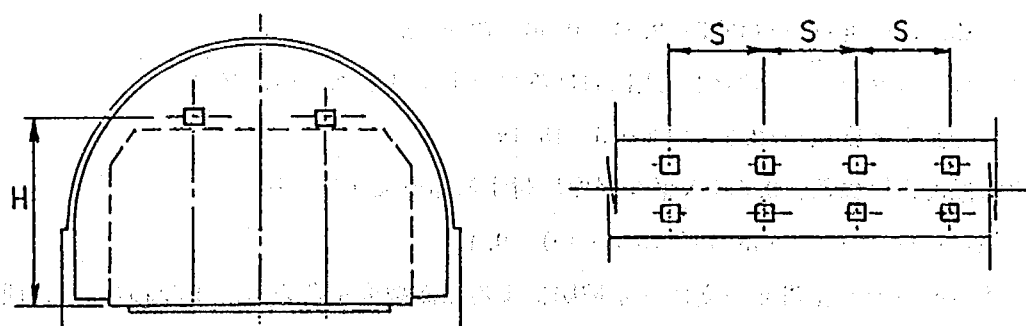
(3) 灯具取付け高さに対する灯具間隔

灯具取付け高さ H に対する灯具間隔 S の関係は、路面の輝度分布の均一性を良好にすることを目的に、ランプ光束の関係から標準的に決められたものであり、出来るかぎりこの範囲内にあることが望ましい。なお、カウンタービーム照明の最大光度角は、視覚低下グレアの規制から鉛直角を約60度を設定している。

カウンタービーム照明によるトンネル内の視覚低下グレアは、相対閾値増加 $T I$ を計算することにより、ある程度推測することができると考える。ここで相対閾値増加 $T I$ とは、視野内にグレアがあるほど閾値が増加して、障害物の識別が困難となってくるが、この見えにくさの程度をパーセントで表したものである。

灯具の配置、および灯具取付け高さ H に対する灯具間隔 S は、車線中央取付けは図解2-2に、路肩近傍取付けは図解2-3に示すとおり、向き合わせ配列を原則とする。ただし、基本部照明とのすり付け部を、設計速度、交通形態および運用上から、輝度均斉度等を考慮し千鳥配列や片側配列となる場合があるが、その場合においても使用する光源の光束などを調整し極力避けることが望ましい。

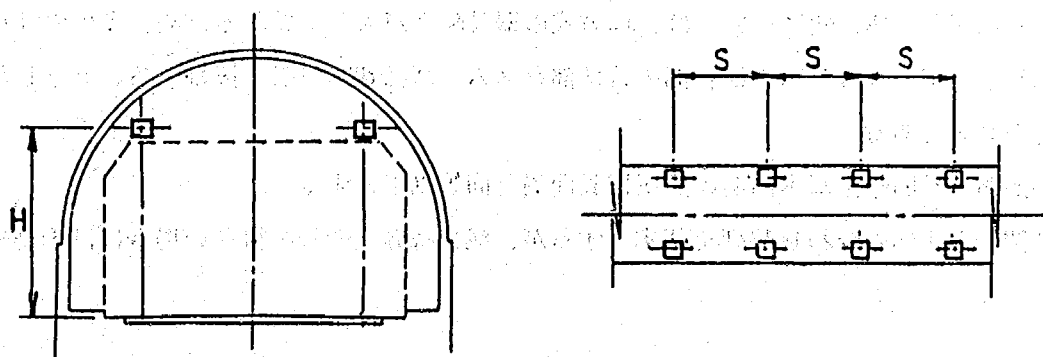
なお、灯具間隔の適否は路面の輝度均斉度を左右し、輝度均斉度は特に平均輝度が低い場合に見え方に大きい影響を与えるので、できる限り良好に保つことが望ましい。



灯具の取付け高さ

灯具の間隔

図解2-2 車線中央取付けの場合の灯具の配置



灯具の取付け高さ

灯具の間隔

図解2-3 路肩近傍取付けの場合の灯具の配置

2-5 基本照明との関係

(1) 入口部照明区間における基本照明の取り扱い

入口部照明の設計においては、入口部照明の所要路面輝度に、基本照明の路面輝度を含めて設計するものとする。

(2) 基本照明との連続性

基本照明との連続性を確保するため、入口照明の緩和部の終端部をスムーズに基本照明に接続するものとする。

【解 説】

(1) 入口部照明区間における基本照明の取り扱い

通常、入口部照明においては、入口部照明の所要路面輝度から、基本照明の所要路面輝度を差し引いた値を、この区間に入口照明として付加すべき路面輝度として設計を行なっている。

入口照明をカウンタービーム照明、基本照明を従来の対称照明とした場合、入口照明と基本照明を入口部照明において同時に点灯すると、基本照明によって路面上の鉛直面照度が上昇するため、カウンタービーム照明の特徴である「高いコントラスト係数(L/E_v)」が減少するという問題がある。たとえば、設計速度60 km/h、野外の輝度 $3,000\text{cd/m}^2$ 、の境界部輝度 43.5cd/m^2 ($58 \times 3,000 / 4,000$) に対し、基本照明の路面輝度を 2.3cd/m^2 とすれば、以下の試算ができる。

$$\text{①入口照明による鉛直面照度} \cdots \cdots (43.5 - 2.3) / 0.56 = 73.6 \text{ lx}$$

ここで、0.56は、カウンタービーム照明方式におけるコントラスト係数(L/E_v)

$$\text{②基本照明による鉛直面照度} \cdots \cdots 2.3 \times 13 \times 0.5 = 15 \text{ lx}$$

ここで、13は平均照度換算係数、0.5は水平面照度に対する鉛直面照度の比

$$\text{③コントラスト係数} \cdots \cdots 43.5 / (73.6 + 15) = 0.49$$

以上のように、入口照明の所要路面輝度に基本照明による路面輝度を含める、すなわち、入口照明と基本照明とを同時に点灯すると、この入口部照明によるコントラスト係数は減少するが、概ね0.5程度は確保できる。なお、入口照明を1/4点灯(曇天2)した場合には、コントラスト係数は約0.35となる。

(2) 基本照明との連続性

入口照明と基本照明との連続性については、両方式の器具配光が大きく異なるため、多少の違和感を生ずることは避けられないが、入口照明の緩和部の終端部をスムーズに基本照明に接続することとした。具体的には以下の注意が必要である。

①入口照明の照明器具間隔を基本照明の照明器具間隔と同等以下とする。

②取付方法に関わらず向き合わせ配列を基本とするが、減光時等でやむを得ない場合には千鳥配列も許すものとする。

2-6 舗装路面および内装

(1) 舗装路面の選択

カウンタービーム照明を採用するトンネル照明施設においては、その照明方式の特徴が発揮出来るような舗装を採用することが望ましい。

(2) 内装の設置

カウンタービーム照明を採用するトンネルにおいては、入口照明区間に内装を設けることが望ましい。

【解 説】

(1) 舗装路面の選択

カウンタービーム照明は、運転者の進行方向と向き合う(カウンター)方向に主配光を向ける事により、以下の効果を得ることを目的としている。

①同一照度における路面輝度を高く(平均照度換算係数を小さく)する。

②路上の障害物を背面から照明し、その鉛直面照度を低くすることによって、背景路面との輝度対比およびコントラスト係数を高くする。

これらの効果は、路面の種類やその仕上げの方法によって異なる。路面の舗装には、表解2-2に示すような物理的な諸特性等をもとに、総合的に選定されるのが一般的である。最近、標準的なコンクリート舗装、アスファルト舗装に加え、「半たわみ性舗装」、「骨材露出コンクリート舗装」、「転圧コンクリート舗装」などもトンネル内舗装として使用されつつある。建設省土木研究所で行われたコンクリート舗装(粗面仕上げ)、半たわみ性舗装、アスファルト舗装(コンクリート舗装は実大トンネル実験施設の路面、半たわみ性舗装・アスファルト舗装は寸法900mm×1,800mmのサンプル板を用いた。)の3種類の路面における路面輝度、コントラスト係数の測定では、半たわみ性舗装が路面輝度、コントラスト係数共に最も高く、次いでアスファルト舗装、コンクリート舗装(粗面仕上げ)の順であった⁸⁾。また、カウンタービーム照明の適用トンネルでの供用前に実施されたコントラスト係数、平均照度換算係数の測定でも表解2-3に示すようにコンクリート舗装系の路面のコントラスト係数よりもアスファルト舗装系の路面のコントラスト係数が高い結果が得られている。

表解2-3 実トンネルにおけるコントラスト係数と平均照度換算係数の測定例

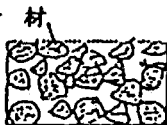
トンネル	舗装路面の種類	路面輝度 L_r (cd/m^2)	鉛直面照度 E_v (lx)	水平面照度 E_h (lx)	コントラスト係数 L_r/E_v	平均照度換算係数 E_h/L_r
上尾トンネル	コンクリート舗装(粗面仕上げ)	146	301	1,170	0.48	8.0
新野花南トンネル	コンクリート舗装(粗面仕上げ)	70.9	116	495	0.61	6.8
新与那トンネル	転圧コンクリート舗装	120	224	780	0.54	6.5
奈茂尻トンネル	アスファルト舗装	88.6	101	670	0.88	7.6
田結トンネル	半たわみ性舗装	176	221	895	0.80	5.1

カウンタービーム照明の特徴が発揮できる舗装路面は、一般的に路面の鏡面性(光沢の程度)がある程度高いことが望ましい。したがって、舗装路面の種類は、舗装の物理的諸特性のほか照明効率と合わせて選定することが重要である。

(2)内装の設置

昼間、自動車が野外の極めて高い輝度の状態から輝度の低いトンネル内に突入する際に、運転者の眼は急激な輝度の変化と、順応の遅れのためトンネル内の詳細が良く分からなくなる。これらの現象を除くためにトンネルの入口部の照明は設けられる。トンネル入口部の明るさは、路面のみならず壁面、天井面も含めてバランスのとれた明るさとすることが重要である。カウンタービーム照明は、視線誘導の面からの向上も期待される照明方式と考えられるが、さらに良好な視環境を確保するために入口照明区間に内装を設置することが望ましい。特に、照明器具を車線中央取付とする場合は、壁面の輝度が低下する傾向となるため内装を設置することが望ましい。なお、内装の種類、設置高さ、材料等については、その機能を十分に発揮できるよう考慮して決定することが重要である。

表解2-2 舗装の主な特徴

項 目	アスファルト舗装		コンクリート舗装	
	標準の アスファルト舗装	半たわみ性舗装	標準の コンクリート舗装	骨材露出工法
設計年数	設計の目標は10年		設計の目標は20年	
耐変形 耐摩 擦性	変形してわだち掘れ を生じやすい。	アスファルト舗装に 比べてわだち掘れを 生じにくい（コンク リートとアスファル トの中間程度の期待 ができる）。	わだち掘れのような変形を生じにくく、耐 摩耗性も一般に大きい。	
騒音・振 動	コンクリート舗装に比べて騒音・振動とも 小さい。		目地による振動、粗 面による騒音が問題 になる事がある。	標準コンクリート舗 装より騒音がない。
施工性	一般にコンクリート舗装に比べ、施工上の 制約を受けることが少なく、その施工速度 は、速い。		施工機械が長大編成となるため、アスファ ルト舗装に比べて、その施工速度は遅い。	
維持管理	簡易な方法で維持管理が可能である。		比較的規模の大きい工法を採用しなければ ならないので、軟弱地盤箇所への適用は問 題がある。	
建設費と 維持管理	建設費はコンクリート舗装に比べていくら か安い。維持修繕を頻繁に行う必要が有20 年間ぐらいの比較では、割高となる場合も ある。		建設費はアスファルト舗装に比べて高い。 打ち替えの場合も、アスファルト舗装より 高い。	
設計輝度 の考え方	_____		_____	骨材の種類によって 反射率が大きく変わ ることが、予想され る。
・半たわみ性舗装(アスファルト系) 半たわみ性舗装は、アスファルト舗装のたわみ性とコンクリート舗装の剛性及び耐久性を複合的に活用しようとするもので、空隙の大きな配合のアスファルト舗装を施工後、その空隙にセメントミルクを浸透させる工法である。対象する層の全層に浸透させる全浸透タイプと表面から一部の厚さだけ浸透させる半浸透タイプがある。 半たわみ性舗装は、耐油、耐流動性に富み、かつ浸透用のセメントミルクが表面を覆っているため白色に近い明色舗装となるので、トールゲート、交差点付近、バスターミナル、バスストップ、トンネル内及び駐車場などに適用される。 反面、施工直後は、すべりやすくなる欠点があるが、これに対して余剰セメントミルクを除去することや舗装面のケレンなどにより対処が可能である。			・骨材露出工法（コンクリート系） 舗装直後のコンクリート舗装の欠点のひとつであるすべりを改善するコンクリート舗装の特殊工法で、コンクリート打設後完全に固まる前に、表面のセメントペースト部を剥き取り骨材を露出させる。 これによりすべり抵抗は改善されるが、黒色系の骨材が多い場合は暗い路面になる傾向がある。 (従来のコンクリート舗装) (骨材露出工法による舗装)	
 骨 材 セメントミルク 半たわみ性舗装構造			 表面のセメントペーストをはぎとり骨材を露出させる 骨材露出工法	

2-7 照明計算法

平均路面輝度の計算には光束法による照度をベースにした計算法を用いることとし、必要に応じて逐点的な輝度計算法を併用するものとする。

【解説】

平均路面輝度の計算には、光束法による照度をベースにした計算法と逐点的な輝度計算法があるが、一般的には取り扱いが容易な光束法が広く用いられている。これは、光束法では、路面の照明率に壁面からの相互反射を考慮しているが、逐点的な輝度計算法は現在のところ直射光のみを対象とした計算であることによる。図解3-1と異なる配光をもつ照明器具を採用する場合など、輝度均斉度、コントラスト係数などを確認する必要がある場合には、逐点的な輝度計算法を併用するものとする。

(1) 光束法による照度をベースにした計算

光束法による照度をベースにした計算法により平均路面輝度を計算する場合、カウンタービーム照明の平均照度換算係数は、通常用いる対称配光の照明方式のそれと異なることに注意が必要である。

$$L = \frac{F \cdot U \cdot M \cdot N}{S \cdot W \cdot K} \quad \text{----- (2.1)}$$

但し L : 平均路面輝度 (cd/m^2)

F : 照明器具1灯当りのランプ光束 (lm)

U : 照明率

M : 保守率

N : 照明器具の間隔 S 内の器具数 (片側・千鳥は1、向合せは2)

S : 照明器具の間隔 (m)

W : 車道幅員 (m)

K : 平均照度換算係数 ($\text{lx}/\text{cd}/\text{m}^2$)

(2) 逐点的な輝度計算法

1) 路面の光反射特性の表わし方

図解2-3において、観測者 O が見ている路面上の一点 P の輝度を L_p (cd/m^2)、この部分の水平面照度を E_p (lx)、照明器具 L の取付高さ H (m)、照明器具 L から点 P に向かう光度 I (cd) の鉛直入射角を γ ($^\circ$) とするとき、次の関係が成り立つ。

$$L_p = q_p \times E_p \quad (\text{cd}/\text{m}^2) \quad \text{----- (2.2)}$$

ここで、 q_p を P 点におけるこの路面の輝度係数という。

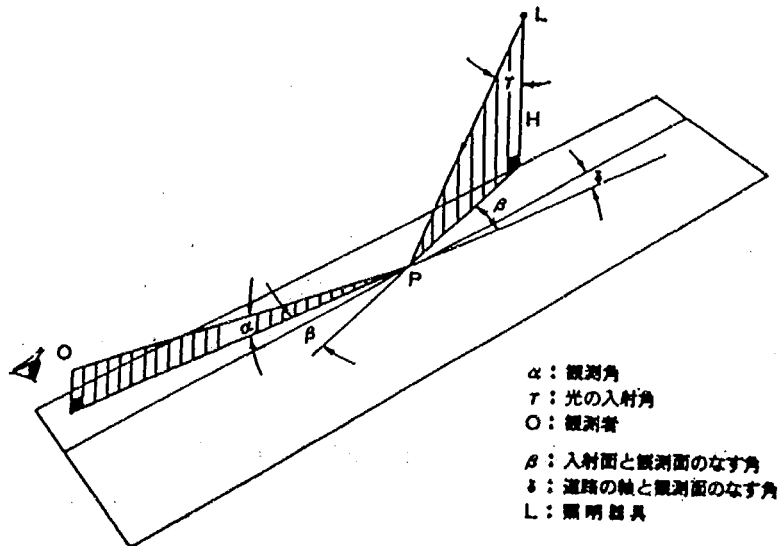
P 点の水平面照度は、

$$E_p = (I / H^2) \times \cos^3 \gamma \quad \text{----- (2.3)}$$

として表わされるので、(2.2)式に(2.3)を代入すると、

$$L_p = q_p \times E_p = (I/H^2) \times (q_p \times \cos^3 \gamma) \quad (\text{cd/m}^2) \quad \cdots \cdots (2.4)$$

ここに、 $q_p \times \cos^3 \gamma$ を輝度換算係数といい、図解2-3における角 α 、 β 、 γ の関数となる。路面の反射特性は、路面の種類ごとに光の入射方向(β 、 γ)に対する輝度換算係数($q_p \times \cos^3 \gamma$)の分布として表わすことができ、路面上の各点の輝度換算係数 r の分布がわかると、照明器具の配置と配光から路面の輝度分布を逐点計算によって求めることができる。



図解2-3 照明器具L、観測点Pおよび観測者Oの位置の幾何学的関係

2) 標準的な路面の光反射特性

実際の照明設計において必要の都度、対象となる路面の光反射特性を測定することは困難なため、標準的な路面の光反射特性を規定し、その中から選択する方法がとられている。

舗装路面の光反射特性は、路面の色彩的な明るさを表わす平均輝度係数 Q_0 と、光沢の程度を表わす2つの係数 S_1 、 S_2 によって表わされる。ここで、 Q_0 、 S_1 、 S_2 は次式によって求められる(図解2-4参照)。

$$Q_0 = \Omega q(\beta, \gamma) d\omega / \Omega d\omega \quad \cdots \cdots (2.5)$$

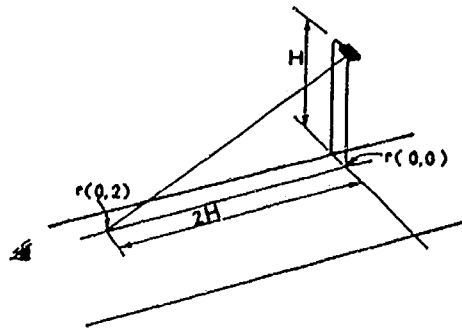
$$S_1 = r(0, 2) / r(0, 0) \quad \cdots \cdots (2.6)$$

$$S_2 = Q_0 / r(0, 0) \quad \cdots \cdots (2.7)$$

但し Q_0 : 道路照明で起こり得るあらゆる方向に対する輝度係数の平均値で、立体角 ω は、輝度係数が有意な値をもつすべての範囲を含む。

$r(0, 0)$: 照明器具直下の輝度係数

$r(0, 2)$: 照明器具の直下を通る、道路軸に平行な直線上で、照明器具直下から観測者の方向に向かって2Hだけ離れた点の輝度換算係数



図解 2 - 4 輝度換算係数 $r(0, 0) / r(0, 2)$ の位置

路面の反射特性係数 Q_0 、 S_1 、 S_2 のうち、 S_1 、 S_2 は輝度係数 q_r の分布、すなわち、路面輝度の分布を左右し、 Q_0 は路面輝度の分布はそのままにしながら平均輝度を比例的に増減させる。

CIE (国際照明委員会)^{6) 7)} では、標準的な路面の反射特性とし、表解 2 - 3 に示す 4 種類を定めており、輝度計算においては、コンクリート舗装の場合 C_1 、アスファルト舗装の場合 C_2 を用いるのが一般的である。

表解 2 - 3 標準路面の光反射特性(CIE)

標準路面	Q_0	S_1	S_2	適用路面の例
C_1	0.10	0.24	1.30	コンクリート
C_2	0.07	0.97	2.13	アスファルト

これら、2つの路面に対して、表解 2 - 4 に一例を示すような輝度換算係数の分布が与えられている。

わが国のトンネル照明設計に用いられている「平均照度換算係数」は、定義としては平均輝度係数の逆数であり、舗装路面の平均的な光反射特性を表わすに過ぎない。したがって、上記 CIE の推奨する光反射特性にしたがって輝度計算を行なうことが望ましい。

表解 2 - 4 輝度換算係数の一例

beta tan gamma	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770
0.25	710	708	703	710	712	710	708	708	707	704	702	708	698	702	704	714	708	724	719	723
0.5	586	582	587	581	581	576	570	567	564	556	548	541	531	544	546	562	566	587	581	589
0.75	468	467	465	455	457	446	430	420	410	399	390	383	373	384	391	412	419	437	438	445
1	378	372	373	363	347	331	314	299	285	273	263	260	250	265	278	295	305	318	323	329
1.25	308	304	305	285	270	244	218	203	193	185	179	173	173	183	194	207	224	237	238	245
1.5	258	254	251	229	203	178	157	143	134	128	124	120	120	132	140	155	163	177	179	184
1.75	217	214	205	182	153	129	110	100	95	90	87	84	88	98	103	116	123	134	137	138
2	188	181	174	142	116	95	80	73	69	64	62	64	64	72	78	88	95	105	108	109
2.5	145	136	121	90	66	53	46	41	39	37	36	36	39	44	50	55	60	66	69	71
3	118	108	87	57	41	32	28	26	25	23	22	23	25	28	31	37	41	45	47	51
3.5	97	87	64	39	26	20	18	17	16	15	15	16	17	19	23	27	30	33	35	37
4	80	69	50	29	17	14	13	12	11	11	11	11	13	15	17	19	22	26	27	29
4.5	70	58	37	21	13	10	9	8	8	8	8	9	10	12	14	16	17	20	21	22
5	60	51	29	15	9	7	6	6	6	6	6	7	7	9	10	12	14	17	17	18
5.5	52	41	23	12	7	6	6	6	6	6	6	7	7	9	10	12	14	17	17	18
6	48	36	19	8	6	5	5	5	5	5	5	6	7	9	10	12	14	17	17	18
6.5	44	32	17	7	6	5	5	5	5	5	5	6	7	9	10	12	14	17	17	18
7	41	28	14	6	5	4	4	4	4	4	4	5	6	8	9	11	13	16	16	17
7.5	37	26	12	6	4	3	3	3	3	3	3	4	5	7	8	10	12	15	15	16
8	34	23	11	5	4	3	3	3	3	3	3	4	5	7	8	10	12	15	15	16
8.5	32	21	9	5	4	3	3	3	3	3	3	4	5	7	8	10	12	15	15	16
9	29	19	8	4	3	3	3	3	3	3	3	4	5	7	8	10	12	15	15	16
9.5	27	17	7	4	3	3	3	3	3	3	3	4	5	7	8	10	12	15	15	16
10	26	16	6	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5	7	8	10	12	15	15	16
10.5	25	16	6	3	2	2	2	2	2	2	2	3	4	6	7	9	11	14	14	15
11	23	15	6	3	2	2	2	2	2	2	2	3	4	6	7	9	11	14	14	15
11.5	22	14	6	3	2	2	2	2	2	2	2	3	4	6	7	9	11	14	14	15
12	21	14	5	3	2	2	2	2	2	2	2	3	4	6	7	9	11	14	14	15

Standard reflection table c1

class C1

$\rho = 0.10$

(a) コンクリート舗装 (標準路面 C₁)

beta tan gamma	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329	329
0.25	362	358	371	364	371	369	362	357	351	349	348	340	328	312	299	294	298	288	292	281
0.5	379	368	375	373	367	359	350	340	328	317	306	280	266	249	237	237	231	231	227	235
0.75	380	375	378	365	351	334	315	295	275	256	239	218	198	178	175	176	176	169	175	176
1	372	375	372	354	315	277	243	221	205	192	181	152	134	130	125	124	125	129	128	128
1.25	375	373	352	318	265	221	189	166	150	136	125	107	91	93	91	88	94	97	97	97
1.5	354	352	336	271	213	170	140	121	109	97	87	76	67	65	66	66	67	68	71	71
1.75	333	327	302	222	166	129	104	90	75	68	63	53	51	49	49	47	52	51	53	54
2	318	310	266	180	121	90	75	62	54	50	48	40	40	38	38	38	41	41	43	45
2.5	268	262	205	119	72	50	41	36	33	29	26	25	23	24	25	24	26	27	29	28
3	227	217	147	74	42	29	25	23	21	19	18	16	16	17	18	17	19	21	21	23
3.5	194	168	106	47	30	22	17	14	13	12	12	11	10	11	12	13	15	14	15	14
4	168	136	76	34	19	14	13	11	10	10	10	8	8	9	10	9	11	12	11	13
4.5	141	111	54	21	14	11	9	8	8	8	8	7	7	8	8	8	8	10	10	11
5	126	90	43	17	10	8	8	7	6	6	6	6	6	7	8	8	8	8	8	9
5.5	107	79	32	12	8	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	7	8	8	8
6	94	65	26	10	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	8	8	8
6.5	86	56	21	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	8	8	8
7	78	50	17	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	7	7	7
7.5	70	41	14	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	6	6
8	63	37	11	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	6	6
8.5	60	37	10	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	6	6
9	56	32	9	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	6	6
9.5	53	28	9	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	6	6
10	52	27	7	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	6	6	6
10.5	45	23	7	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5	5	5
11	43	22	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5	5	5
11.5	53	22	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5	5	5
12	42	20	7	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	5	5	5

Standard reflection table c2

class C11

$\rho = 0.07$

(b) アスファルト舗装 (標準路面 C₂)

(3) コントラスト係数の計算

カウンタービーム照明を採用した入口照明におけるコントラスト係数(L/E_v 、 L は平均路面輝度、 E_v は鉛直面照度)の計算においては、以下の事項を考慮することが望ましい。

1) 鉛直面照度に対する路面からの反射の影響

カウンタービーム照明は、路面輝度を高く、鉛直面照度を低くする照明方式であり、通常の照明方式に比べ、鉛直面照度に対する路面からの反射の影響を大きく受ける。したがって、鉛直面照度およびコントラスト係数の計算においては、この影響を含めることが望ましい。

2) 路面輝度に対する壁面からの相互反射の影響

従来、路面輝度に対する壁面からの相互反射の影響は、前項(1)の照明率の算出において考慮されてきた。現在もなお、壁面からの相互反射を考慮した輝度計算法は開発されていないことから、コントラスト係数の計算における路面輝度には、壁面からの相互反射の影響を考慮した前項(1)の計算値を用いることとした。

2-8 平均照度換算係数

平均照度換算係数の値は、照明器具の配光特性および路面の種類によって、適切な値を採用するものとする。

【解説】

平均照度換算係数は、路面の平均輝度を平均水平面照度に換算する係数である。

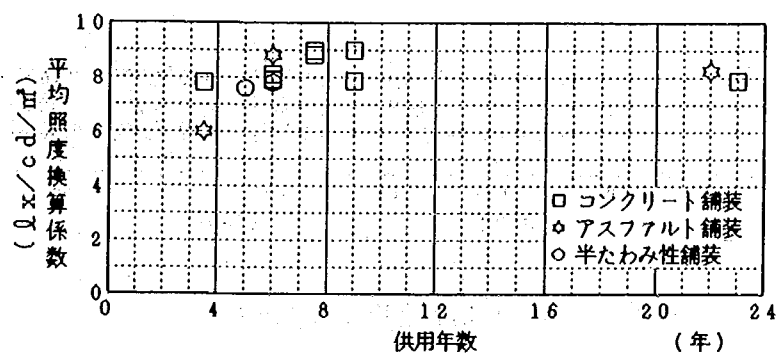
平均照度換算係数の値は、路面の反射特性や照明器具の配置とその配光特性によって変わるが、これらの条件が決定すれば、ほぼ一定の値となることが確認されている。従来トンネル照明に用いられていた対称照明では、コンクリート舗装で $13 \text{ lx} / \text{cd/m}^2$ 、アスファルト舗装で $18 \text{ lx} / \text{cd/m}^2$ という値を採用してきたが、カウンタービーム照明では平成5年度より3ヶ年にわたって実施した測定結果^{9)~10)}より、コンクリート舗装とアスファルト舗装で平均照度換算係数の値に大差がない事が明らかになったため、器具取付位置および路面舗装の種類に関わらず平均照度換算係数の値を $9 \text{ lx} / \text{cd/m}^2$ とする。

平均照度換算係数について行った測定結果の内、実トンネルで実供用年数が1年以上のものについて、測定した結果を整理したものを表解2-5及び図解2-5に示す。(13ケース)

表解2-5 平均照度換算係数測定結果(実トンネル)

トンネル	路面舗装	供用年数	換算係数	トンネル	路面舗装	供用年数	換算係数
A	コンクリート	6.0	8.10	H	コンクリート	6.0	7.90
B	コンクリート	9.0	8.98	I	アスファルト	6.0	8.80
C	コンクリート	9.0	7.86	J	アスファルト	3.5	6.00
D	コンクリート	3.5	7.81	K	アスファルト	22.0	8.24
E	コンクリート	7.5	8.97	L	半たわみ性	5.0	7.60
F	コンクリート	23.0	7.88	M	半たわみ性	6.0	7.70
G	コンクリート	7.5	8.82				

(注) 換算係数の単位は、 $\text{lx} / \text{cd/m}^2$ とする。



図解2-5 平均照度換算係数調査結果

舗装の種類別に結果を整理すると、コンクリート舗装（8ケース）の平均値は $8.29 \text{ lx} / \text{cd} / \text{m}^2$ アスファルト舗装（3ケース）の平均値は $7.68 \text{ lx} / \text{cd} / \text{m}^2$ 、半たわみ性舗装（2ケース）の平均値は $7.70 \text{ lx} / \text{cd} / \text{m}^2$ となっている。全体での平均値は $8.06 \text{ lx} / \text{cd} / \text{m}^2$ となっている。

上記の結果は、車線中央取付の場合についてまとめたものである。路肩近傍取付の場合は、車線中央取付の場合と比較して若干、平均照度換算係数の値が高いため、これを考慮して器具取付位置及び路面舗装の種類に関わらず、平均照度換算係数の値を $9 \text{ lx} / \text{cd} / \text{m}^2$ とした。

表解-2. 6 にサンプル路面（明かり部）を用いて行った測定結果を示す。サンプル路面を用いた測定は、照明器具の取付位置別に整理したものである。

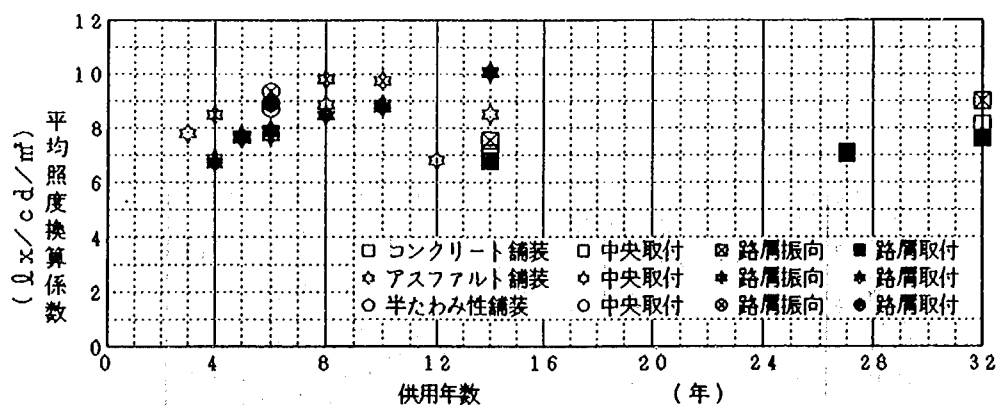
いずれの調査も、照明器具の配光は、鉛直角 60° に最大光度を要するものを使用した。

なお、平均照度換算係数の値は、各種路面の測定平均値を考慮して設定した値であるため、舗装の状況により実際の設備において異なる場合もある。

表解 2-6 平均照度換算係数測定結果（サンプル路面・明かり部）

サンプル名	路面舗装	供用年数	平均照度換算係数			平均値
			中央取付	路肩振向	路肩取付	
1	コンクリート	32.0	8.12	8.99	7.61	8.24
2	コンクリート	14.0	7.07	7.54	6.79	7.13
3	コンクリート	27.0	7.08	7.10	7.06	7.08
4	アスファルト	12.0	6.80	—	—	6.80
5	アスファルト	3.0	7.80	—	—	7.80
6	アスファルト	4.0	6.86	8.48	6.71	7.35
7	アスファルト	14.0	8.50	10.08	10.03	9.54
8	アスファルト	8.0	8.85	9.79	8.46	9.03
9	アスファルト	6.0	7.70	7.92	7.84	7.82
10	アスファルト	5.0	7.70	7.72	7.61	7.67
11	アスファルト	10.0	8.87	9.73	8.76	9.12
12	半たわみ性	6.0	8.72	9.35	8.92	9.00
平均値		11.8	7.84	8.67	8.00	8.05

(注) 換算係数の単位は、 $\text{lx} / \text{cd} / \text{m}^2$ とする。



図解 2-6 平均照度換算係数調査結果

また、参考に机上計算（逐点法）の結果を表解 2-7 に示す。机上計算の結果も器具取付位置および路面舗装の種類に関わらず、概ね $9 \text{ lx} / \text{cd} / \text{m}^2$ 前後の値を得た。

表解 2 - 7 カウンタービーム照明計算結果

配光ピーク	取付高さ	取付位置	平均照度 $\ell \times$	平均輝度 cd/m^2		換算係数 $\ell \times / \text{cd/m}^2$	均斉度 U_0
60°	4.52m	路 肩 近傍取付	189.9	C1	20.9	9.09	0.69
				C2	22.0	8.63	0.60
		車 線 中央取付	231.6	C1	25.8	8.98	0.49
				C2	26.9	8.61	0.47
	4.85m	路 肩 近傍取付	185.1	C1	20.4	9.07	0.74
				C2	21.5	8.61	0.68
		車 線 中央取付	222.5	C1	24.9	8.94	0.55
				C2	26.1	8.52	0.53
	5.20m	路 肩 近傍取付	180.0	C1	19.9	9.05	0.75
				C2	20.9	8.61	0.73
		車 線 中央取付	213.2	C1	23.9	8.92	0.58
				C2	25.2	8.46	0.55

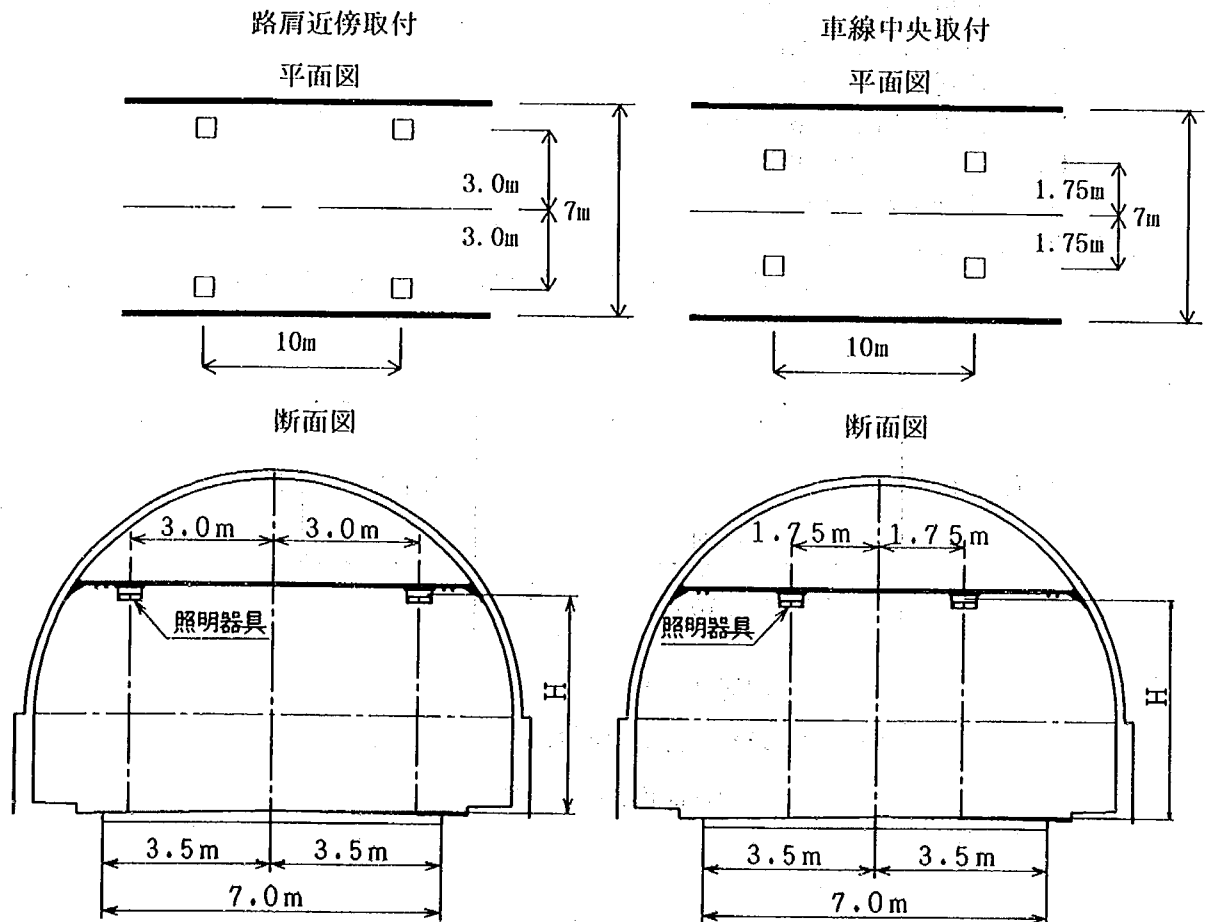
注1) C1 : コンクリート路面、C2 : アスファルト路面

各路面の係数は、
ROAD SURFACES AND LIGHTING joint technical report CIE/PIARC
CIE PUBLICATION No 66 1984 による。

注2) 計算結果は直射光のみによるもので、間接光は含んでいない。

注3) 計算方法は、
CALCULATION AND MEASUREMENT OF LUMINANCE AND ILLUMINANCE
IN ROAD LIGHTING
CIE PUBLICATION No 30-2 (TC-4.6) 1982 による。

注4) その他の計算条件は、図解 2 - 7 のとおりである。



図解 2 - 7 計算に用いた条件

2-9 照明率

トンネルは、一般部と異なり周囲が壁面等で覆われているため照明率には直射成分の他に天井、壁面、路面によって反射される相互反射成分を加えなければならない。

【解説】

照明率とは、光源の光束のうち車道面に入射する光束の割合を言う。

照明率の算出は照明器具（配光特性）、照明器具取付位置、照明器具取付高さ、照明器具の取付角度を決定した後、計算によって求めることが出来る。

（「道路照明施設設置基準・同解説」P124の計算式を用いる。）

路面の照明率： $U' = A_1 U_1 + A_2 U_2 + A_3 U_3 + A_4 U_4 \cdots (2.8)$

車道の照明率： $U = U_4 + \frac{W}{W_0} (U' - U_4) \cdots (2.9)$

ここで、 A_1 ：照明率を求めるための係数〔天井面(1)〕

A_2 ：照明率を求めるための係数〔壁面(2)〕

A_3 ：照明率を求めるための係数〔壁面(3)〕

A_4 ：照明率を求めるための係数〔路面(4)〕

U_1 ：直射照明率〔天井面(1)〕

U_2 ：直射照明率〔壁面(2)〕

U_3 ：直射照明率〔壁面(3)〕

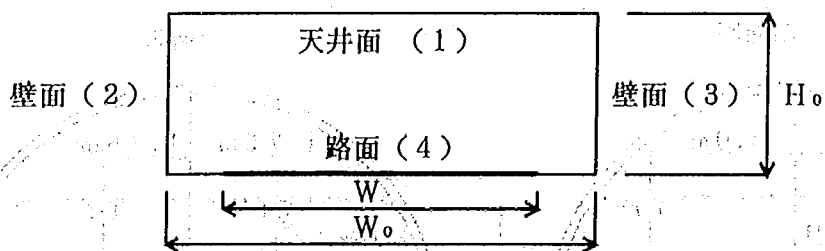
U_4 ：直射照明率〔路面(4)〕

U_4' ：車道の直射照明率

W_0 ：路面全幅員〔m〕

W ：車道幅員〔m〕

（ U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 の係数は、図解2-11に示す照明器具照明率曲線から求める）



図解 2-8
照明率を求めるための断面図
(矩形断面)

照明率を求めるための係数（天井面(1)、壁面(2)、壁面(3)、路面(4)）は、全幅員と照明器具取付高さの比を求めて、「道路照明施設設置基準・同解説」のP 1 2 4, 1 2 5の表より選定する。

図解 2 - 8 に示した断面図は矩形であるが、馬蹄形のトンネルの場合であっても図解 2 - 9 に示すように H_0 、 W_0 をとり各面に対する直射照明率 $U_1 \sim U_4$ を同図に示す範囲で求めて (2. 8) 式及び (2. 9) 式から照明率を算出して十分近似出来る。

(図解 2 - 9 のように取り付ける場合は $U_1 = 0$ となる。)

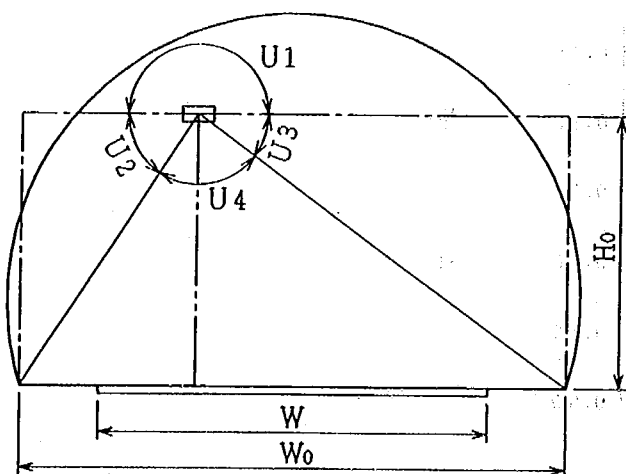
また、トンネル内に内装板等有り壁面の反射率が「道路照明施設設置基準・同解説」の P 1 2 4, 1 2 5 の表と異なる場合は、(2. 1 0) 式によって計算し、その値を壁面の反射率として近似することが出来る。

$$\rho = \frac{\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2}{H_0} \quad \dots (2. 1 0)$$

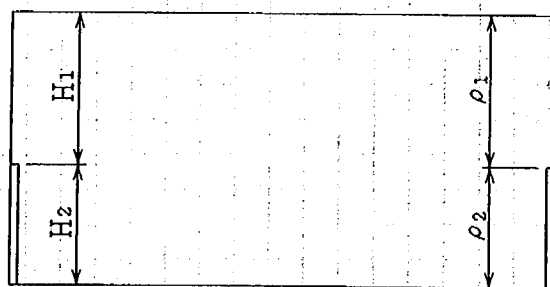
ここで、 ρ : 壁面の反射率 (%) H_1 : H_1 部の高さ (m)

ρ_1 : H_1 部の反射率 (%) H_2 : H_2 部の高さ (m)

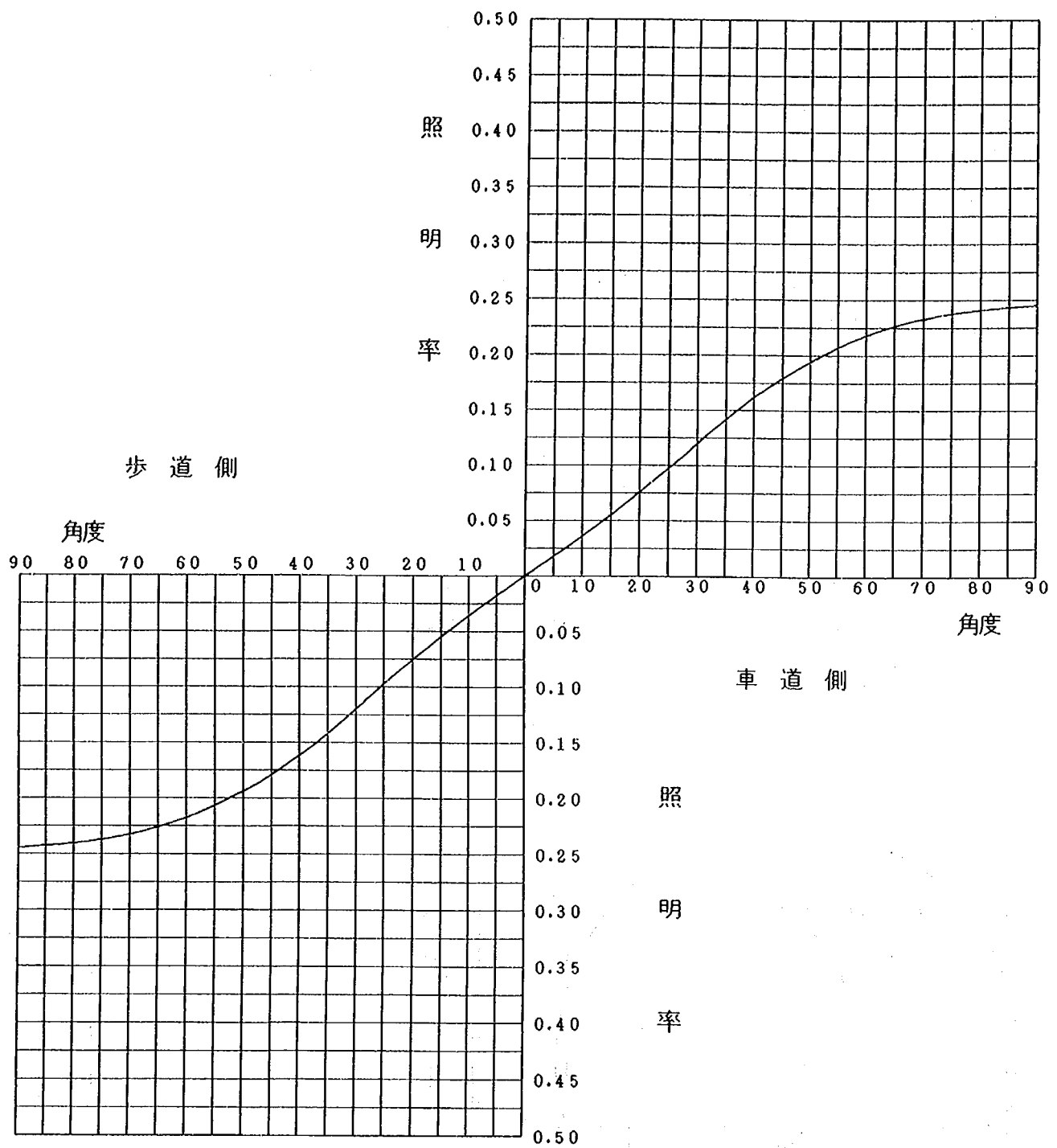
ρ_2 : H_2 部の反射率 (%)



図解 2 - 9
照明率を求めるための断面図
(馬蹄形断面)



図解 2 - 1 0
反射率を求めるための断面図



図解 2-11 カウンタービーム照明器具照明率曲線

2-10 保守率

保守率は、道路照明施設設置基準（昭和56年3月27日都市局長・道路局長通達）および同解説（（社）日本道路協会）により設定する。

第3章 照明器材

3-1 光源の選定

光源の選定に当たっては、次の諸事項を留意し選定する事を原則とする。

- (1) 効率が高く寿命が長いこと。
- (2) 周囲温度の変化に対して特性が安定であること。
- (3) トンネル内の視環境を考慮し、光色、演色性が適切であること。
- (4) 昼間時に高い照明レベルが必要であることを考慮し、光束が適切であること。
- (5) 照明器具の特性（配光）を十分発揮できる光源であること。

【解説】

カウンタービーム照明器具に使用する光源は、器具が特殊な配光を有するため器具の取付位置や角度が通常の照明器具（対称配光）と異なり、器具の大きさに制限がある事、また高い照明レベルが要求される等の特殊性を考慮して、その適合性を判断しなければならない。

従って、使用する光源の選定にあたっては、下記の事項を十分留意する必要がある。

(1) 効率と寿命

高い照明レベルを要求されること、および維持管理作業が困難なこと、その他経済性等を考慮して、効率が高く寿命が長い光源を選定する必要がある。

(2) 周囲温度の影響

カウンタービーム照明が使用される入口部付近では、トンネル内部の基本部に比べ自然環境の影響を受けやすいので、周囲温度の影響を受けにくい光源を選択する必要がある。

(3) 光色および演色性

光源にはそれぞれ特色のある光色や演色性がある。

トンネル照明では、それらの違いが照明効果にあまり大きな影響を及ぼすものではないが、演色性の悪い光源を使用する場合は、その光により照明された物体の色の見え方が違うことに注意しなければならない。

また、カウンタービーム照明を使用する入口部照明と対称照明を用いる基本部照明の各々に使用するランプの光色および演色性についても、入口部照明から基本部照明に移行する部分での違和感が生じないように十分検討する必要がある。

(4) 光束

カウンタービーム照明を使用する入口部照明では高い照明レベルが要求される。従って使用する光源にも大きな光束が必要となる。

(5) 照明器具への適合性

光源の形状や輝度は照明器具の寸法や配光性能に大きく影響を与える。従ってそれぞれの照明器具の使用目的にあった光源を選択する必要がある。

入口部照明に使用される光源には、高圧ナトリウムランプ、低圧ナトリウムランプ、蛍光水銀ランプ等があるが、トンネル照明器具の中でも特殊な配光の部類に属するカウンタービーム照明には、発光部や外管寸法が小さく、配光制御が比較的容易に出来ると同時に大きい光束が得られる、T形ガラス球の高圧ナトリウムランプが現状では最も適したランプと言える。

表解3-1に高圧ナトリウムランプの主な特性の一例を示す。

表解3-1 高圧ナトリウムランプの主な特性例

形 式	ランプの大きさ (W)	初 光 束 (100時間標準値 1m)	平均寿命 (h)
NHT110・L	110	10,400	12,000
NHT180・L	180	19,000	〃
NHT220・L	220	26,500	〃
NHT270・L	270	33,500	〃
NHT360・L	360	47,500	〃

3-2 照明器具

カウンタービーム照明は、以下に示す性能、構造、材料を満足するカウンタービーム照明用の照明器具を用いるものとする。

(1) 性能

- 1) 照明器具はグレアが少なく高い照明率が得られ、所期の目的を効率的に達成する配光を有するものとする。
- 2) 照明器具は長期にわたりランプを安定的に点灯させるために必要な電気性能、機械性能、防水性能、耐食性能等を有するものとする。

(2) 構造

照明器具は保守点検が容易で、構造物との取付部は十分な強度を有し、簡単な作業により取付け得る構造を有するものとする。

(3) 材料

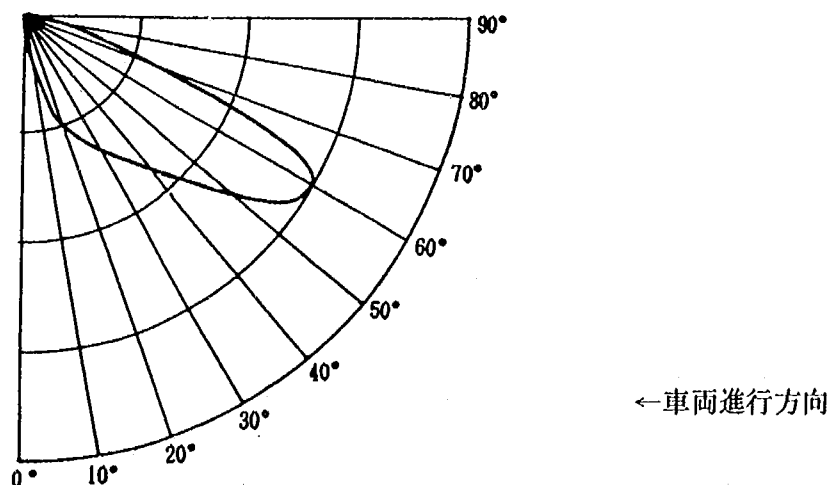
照明器具に使用する材料は良質なもので耐久性に富み、腐食、劣化性の少ないものとする。

【解説】

照明器具については、JIS C 8105「照明器具通則」に準拠するものとする。

(1) 性能

- 1) 照明器具に要求される最も重要な性能は配光特性であり、照明施設の質と経済性に大きく影響する。カウンタービーム照明器具は通常の照明器具（対称照明）と異なり、運転者の進行方向に対向する方向の鉛直角 60° 付近に配光の最大光度を必要とするため（図解3-1参照）、運転者に対するグレアがあまり大きくならないような範囲で、照明率が良く、均斉度の良い配光特性を有することが必要である。



図解3-1 トンネル縦断方向の断面配光曲線参考図

また、トンネル内で他の車両、歩行者、障害物等の視認を容易にするためには、側壁への光束も必要であり、器具からの光束が路面のみでなく、側壁にも適当に配分されることが望ましい。

2) 照明器具は所期の配光特性を持ち、照明率および器具効率の良いものを選定する必要がある。

3) 照明器具は絶縁抵抗、絶縁耐力ともに長期間にわたり良好であることが必要とされる。

4) 照明器具は通常の使用状態で予想される振動、衝撃等によってランプとソケットの接触不良、脱落、器具各部の緩み、破損等を生じないような機械的性能が要求される。

5) 照明器具は洗浄時に圧力水を噴射されることがあるので、正常な作動を阻害するおそれのある浸水が起こらない防水性を有しなければならない。

6) 照明器具は自動車の排気ガス、腐食性物質にさらされ、その他のトンネル内漏水等によって湿潤状態におかれる。このような使用環境で長期間にわたり安全に点灯し、前述の光学性能、電気性能、機械的性能が劣化しないような耐食性能が必要である。

7) 照明器具は内部温度上昇等によって器具の各部の変形、変質を生じないほか、安定器、ソケット、内部配線等の絶縁劣化が生じないような耐熱性能も必要である。

(2) 構造

1) 照明器具は反射板、照明カバー、ランプおよび保守点検のためのカバー開閉機構、ランプ装着のためのソケット、電線接続のための端子台等ならびにこれらを取付け、保護する本体から構成され、安定器を内蔵する構造のものが多い。

開閉機構は蝶番、締付金具等によるものとし、照明カバー等と本体の接合箇所には防水用パッキングを用いるほか、電線引入れ部等は、容易に浸水しない構造としなければならない。

2) 照明器具の取付けは、一般に高所作業になるので簡易な方法で強固に取付け得ることが望ましく、容易に脱落しない構造とする。

(3) 材料

1) 反射板は高輝度アルミニウム板を鏡面または梨地等の特殊仕上げするなど反射率の優れたものとする必要がある。

2) 照明カバーは透明強化ガラスで透過率の良好な材質のものが用いられる。

3) 防水用のパッキングには耐久性のあるクロロプレンゴム又は、シリコン製スポンジ等を用いることが多い。

4) 照明器具は鋼板製が一般的であるが、特に使用場所における耐食性を考慮してステンレス製又はアルミニウム合金製などが用いられることもある。鋼板製の場合は腐食の防止と美観の保持のため、亜鉛メッキまたは所要の防食塗装を行う必要がある。

第4章 照明設計例

4-1 路肩近傍取付（路肩より0.2mの位置）

4-1-1 設計条件

(1) トンネル諸元

トンネル延長	500m以上
路面全幅員	$W_0 = 11.01\text{m}$
車道幅員	$W = 7.00\text{m}$
通行方式	2車線対面通行
設計速度	60km/h
日交通量	16,000台以上

(2) 野外の輝度

3,000cd/m²

(3) 照明器具取付

灯具取付高さ 5.2m

(4) 反射率

路面の種別：アスファルト	壁面：内装板付
天井10%	壁41.8% 路面10%

4-1-2 照明率の計算

(1) 基本部

従来の対称照明とする。

(2) 入口部

1) 断面図

図4-1、図4-2のとおり

2) 照明率（左）

①灯具中心軸に対する角度

$$(a) \angle BOD = \tan^{-1} \frac{6.8 + 1.405}{5.2} \approx 57.6^\circ$$

$$(b) \angle COD = \tan^{-1} \frac{6.8}{5.2} \approx 52.6^\circ$$

$$(c) \angle DOD = \tan^{-1} \frac{0.2}{5.2} \approx 2.2^\circ$$

$$(d) \angle DOF = \tan^{-1} \frac{0.2 + 2.605}{5.2} \approx 28.3^\circ$$

$$\therefore \beta_1 = \angle BOD = 57.6^\circ$$

$$\beta_2 = \angle COD = 52.6^\circ$$

$$-\beta_3 = \angle DOE = 2.2^\circ$$

$$-\beta_4 = \angle DOF = 28.3^\circ$$

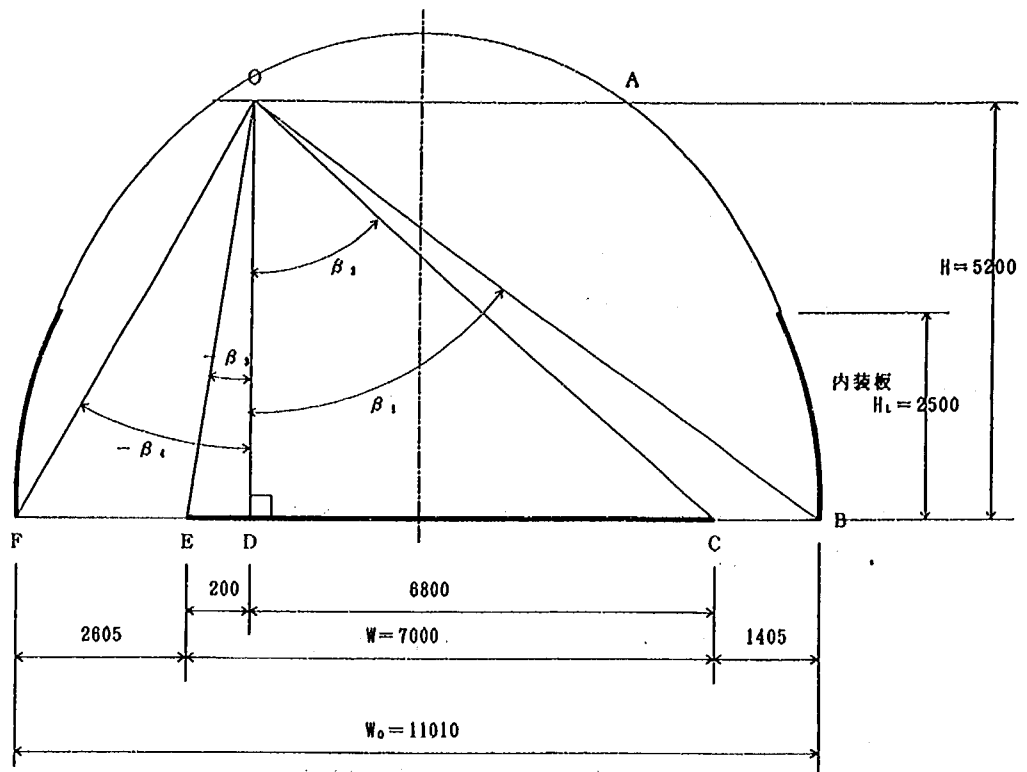


図 4 - 1 照明率を求めるための灯具取付位置図 (左)

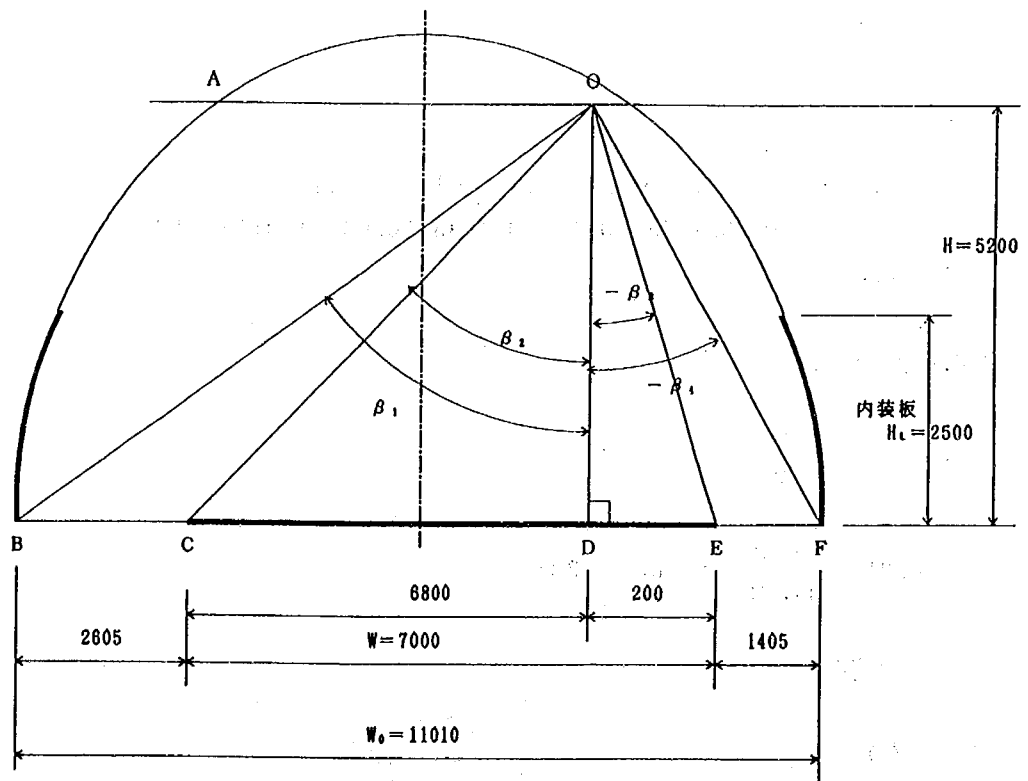


図 4 - 2 照明率を求めるための灯具取付位置図 (右)

②照明率を求めるための係数

$$\frac{W_0}{H_0} = \frac{11.01}{5.2} \approx 2.117$$

$$A_1 \text{ 天井面} \cdots \cdots \cdots 0.0712$$

$$A_2 \cdot A_3 \text{ 壁面} \cdots \cdots \cdots 0.1943$$

$$A_4 \text{ 路面} \cdots \cdots \cdots 1.0115$$

③照明率

$$U_1 = 0$$

$$\begin{aligned} U_2 &= U(-90^\circ) - U(-\beta_4) = U(-90^\circ) - U(-28.3^\circ) \\ &= 0.245 - 0.115 \\ &= 0.13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_3 &= U(90^\circ) - U(\beta_1) = U(90^\circ) - U(57.6^\circ) \\ &= 0.245 - 0.215 \\ &= 0.03 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4 &= U(\beta_1) + U(-\beta_4) = U(57.6^\circ) + U(-28.3^\circ) \\ &= 0.215 + 0.115 \\ &= 0.33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4' &= U(\beta_2) + U(-\beta_3) = U(52.6^\circ) + U(-2.2^\circ) \\ &= 0.20 + 0.01 \\ &= 0.21 \end{aligned}$$

(路面の照明率)

$$\begin{aligned} U' &= A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2 + A_3 \cdot U_3 + A_4 \cdot U_4 \\ &= 0.0712 \times 0 + 0.1943 \times 0.13 + 0.1943 \times 0.03 + 1.0115 \times 0.33 \\ &\approx 0.365 \end{aligned}$$

よって車道照明率は、

$$\begin{aligned} U_L &= U_4' + \frac{W}{W_0} (U' - U_4) \\ &= 0.21 + \frac{7.00}{11.01} (0.365 - 0.33) \\ &\approx \underline{0.223} \end{aligned}$$

3) 照明率 (右)

①灯具中心軸に対する角度

$$(a) \angle BOD = \tan^{-1} \frac{6.8 + 2.605}{5.2} \approx 61.1^\circ$$

$$(b) \angle COD = \tan^{-1} \frac{6.8}{5.2} \approx 52.6^\circ$$

$$(c) \angle DOD = \tan^{-1} \frac{0.2}{5.2} \approx 2.2^\circ$$

$$(d) \angle DOF = \tan^{-1} \frac{0.2 + 1.405}{5.2} \approx 17.2^\circ$$

$$\therefore \beta_1 = \angle BOD = 61.1^\circ$$

$$\beta_2 = \angle COD = 52.6^\circ$$

$$-\beta_3 = \angle DOE = 2.2^\circ$$

$$-\beta_4 = \angle DOF = 17.2^\circ$$

② 照明率を求めるための係数

A_1 天井面……………0.0712

A_2, A_3 壁面……………0.1943

A_4 路面……………1.0115

③ 照明率

$$U_1 = 0$$

$$\begin{aligned} U_2 &= U(-90^\circ) - U(-\beta_4) = U(-90^\circ) - U(-17.2^\circ) \\ &= 0.245 - 0.065 \\ &= 0.18 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_3 &= U(90^\circ) - U(\beta_1) = U(90^\circ) - U(61.1^\circ) \\ &= 0.245 - 0.22 \\ &= 0.025 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4 &= U(\beta_1) + U(-\beta_4) = U(61.1^\circ) + U(-17.2^\circ) \\ &= 0.22 + 0.065 \\ &= 0.285 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4' &= U(\beta_2) + U(-\beta_3) = U(52.6^\circ) + U(-2.2^\circ) \\ &= 0.20 + 0.01 \\ &= 0.21 \end{aligned}$$

(路面の照明率)

$$\begin{aligned} U' &= A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2 + A_3 \cdot U_3 + A_4 \cdot U_4 \\ &= 0.0712 \times 0 + 0.1943 \times 0.18 + 0.1943 \times 0.025 + 1.0115 \times 0.285 \\ &\approx 0.328 \end{aligned}$$

よって車道照明率は、

$$\begin{aligned}U_L &= U_4' + \frac{W}{W_0} (U' - U_4) \\&= 0.21 + \frac{7.00}{11.01} (0.328 - 0.285) \\&\approx \underline{0.237}\end{aligned}$$

4) 照明率 (左右の灯具による照明率)

左側灯具による照明率 U_L 0.232

右側灯具による照明率 U_R 0.237

従って平均車道照明率は

$$U = \frac{U_L + U_R}{2} = \frac{0.232 + 0.237}{2} = 0.235$$

4-1-3 照度計算書

(1) 基本部照明

路面輝度 (cd/m²) 基準どおり 2.3cd/m²とする。

(2) 入口部照明

路面輝度 (cd/m ²)	L ₁	43.50	長さ(m)	ℓ ₁	25.0
	L ₂	26.25		ℓ ₂	65.0
	L ₃	—		ℓ ₃	0.0
	L ₄	2.30		ℓ ₄	135.0

1) 境界部 (第1段)

$$L_1 = 43.5 \text{ (cd/m}^2\text{)} \quad \ell = 25 - 10 = 15 \text{ (m)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (43.5 - 2.3)}{2 \times 0.235 \times 0.7} \approx 7,889 \text{ (ℓ m/m)}$$

光源にNHT220・L (26,500 ℓ m)を使用すると

$$S = \frac{26,500}{7,889} \approx 3.36 \text{ (m)}$$

設置間隔を S = 3.3m とすると平均輝度は

$$L = \frac{26,500 \times 2 \times 0.235 \times 0.7}{3.3 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 44.24 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

区間(m)を $(25 - 10) \div 3.3 = 4.55$

スパンNを5として

$$3.3 \times 5 = 16.5 \text{ m}$$

第1段は光源にNHT220・L を10灯使用すると

平均輝度は $L = 44.24 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は $10.0 + 16.5 = 26.5 \text{ m}$ となる。

2) 移行部 (第2段)

第1段の終端から5mの地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{((10 \log 44.24 - 10 \log 26.25) \times (65 - 1.5 - 5) / 65 + 10 \log 26.25)}$$

$$\approx 42.89 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (42.89 - 2.3)}{2 \times 0.235 \times 0.7} \approx 7,772 \text{ (ℓ m/m)}$$

光源に NHT220・L (26,500 ℓ m)を使用すると

$$S = \frac{26,500}{7,772} \approx 3.41 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 3.3\text{m}$ (第1段と同様) とすると平均輝度は

$$L = \frac{26,500 \times 2 \times 0.235 \times 0.7}{3.3 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 44.24 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数 N を8として

$$3.3 \times 8 = 26.4\text{m}$$

第2段は光源に NHT220・L を16灯使用すると

平均輝度は $L = 44.24 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は26.4mである。

3) 移行部 (第3段)

第2段の終端から5mの地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{((\log 45.3 - \log 26.25) * (65 - 27.9 - 5) / 65 + \log 26.25)} \\ \approx 34.38 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (34.38 - 2.3)}{2 \times 0.235 \times 0.7} \approx 6,143 \text{ (lm/m)}$$

光源に NHT220・L (26,500 lm) を使用すると

$$S = \frac{26,500}{6,143} \approx 4.31 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 4.3\text{m}$ とすると平均輝度は

$$L = \frac{26,500 \times 2 \times 0.235 \times 0.7}{4.3 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 34.48 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数 N を8として

$$4.3 \times 8 = 34.4\text{m}$$

第3段は光源に NHT220・L を16灯使用すると

平均輝度は $L = 34.48 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は34.4mである。

4) 緩和部 (第4段)

第3段の終端から5mの地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{((\log 26.25 - \log 2.3) * (135 + 2.7 - 5) / 135 + \log 2.3)} \\ \approx 25.18 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (25.18 - 2.3)}{2 \times 0.235 \times 0.7} \approx 4,381 \text{ (lm/m)}$$

光源に NHT180・L(19,000 lm)を使用すると

$$S = \frac{19,000}{4,381} \approx 4.34 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 4.3\text{m}$ とすると平均輝度は

$$L = \frac{19,000 \times 2 \times 0.235 \times 0.7}{4.3 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 25.37 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数Nを7として

$$4.3 \times 7 = 30.1\text{m}$$

第4段は光源にNHT180・Lを14灯使用すると

平均輝度は $L = 25.37 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は30.1mである。

5) 緩和部 (第5段)

第4段の終端から5mの地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{[(10 \times 26.25 - 10 \times 2.3) \times (135 - 27.4 - 5) / 135 + 10 \times 2.3]} \\ \approx 14.63 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (14.63 - 2.3)}{2 \times 0.235 \times 0.7} \approx 2,361 \text{ (lm/m)}$$

光源に NHT180・L(19,000 lm)を使用すると

$$S = \frac{19,000}{2,361} \approx 8.05 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 8.0\text{m}$ とすると平均輝度は

$$L = \frac{19,000 \times 2 \times 0.235 \times 0.7}{8.0 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 14.70 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数Nを4として

$$8 \times 4 = 32.0\text{m}$$

第5段は光源にNHT180・Lを8灯使用すると

平均輝度は $L = 14.70 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は32.0mである。

6) 緩和部 (第6段)

第5段の終端から5mの地点の基準輝度は

$$L_o = 10^{((\log 26.25 - \log 2.3) * (136 - 59.4 - 5) / 135 + \log 2.3)} \\ \approx 8.22 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (8.22 - 2.3)}{2 \times 0.235 \times 0.7} \approx 1,134 \text{ (lm/m)}$$

均斉度を考慮して、光源に NHT110・L(10,400 lm)を使用すると

$$S = \frac{10,400}{1,134} \approx 9.17 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 9.1\text{m}$ とすると平均輝度は

$$L = \frac{10,400 \times 2 \times 0.235 \times 0.7}{9.1 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 8.27 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数 N を4として

$$9.1 \times 4 = 36.4\text{m}$$

第6段は光源にNHT110・Lを8灯使用すると

平均輝度は $L = 8.27 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は36.4mである。

7) 緩和部 (第7段)

第6段の終端から5mの地点の基準輝度は

$$L_o = 10^{((\log 26.25 - \log 2.3) * (135 - 95.8 - 5) / 135 + \log 2.3)} \\ \approx 4.26 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (4.26 - 2.3)}{2 \times 0.235 \times 0.7} \approx 375 \text{ (lm/m)}$$

光源に NHT110・L(調光)(4,160 lm)を使用すると

$$S = \frac{4,160}{375} \approx 11.09 \text{ (m)}$$

設置間隔 S は2.0Hまでなので

$$S = 2.0 \times 5.2 = 10.4\text{m}$$

平均輝度は

$$L = \frac{4,160 \times 2 \times 0.235 \times 0.7}{10.4 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 4.39 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数Nを4として

$$10.4 \times 4 = 41.6\text{m}$$

第7段は光源にNIT110・L(調光)を8灯使用すると

平均輝度は $L = 4.39 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は41.6mである。

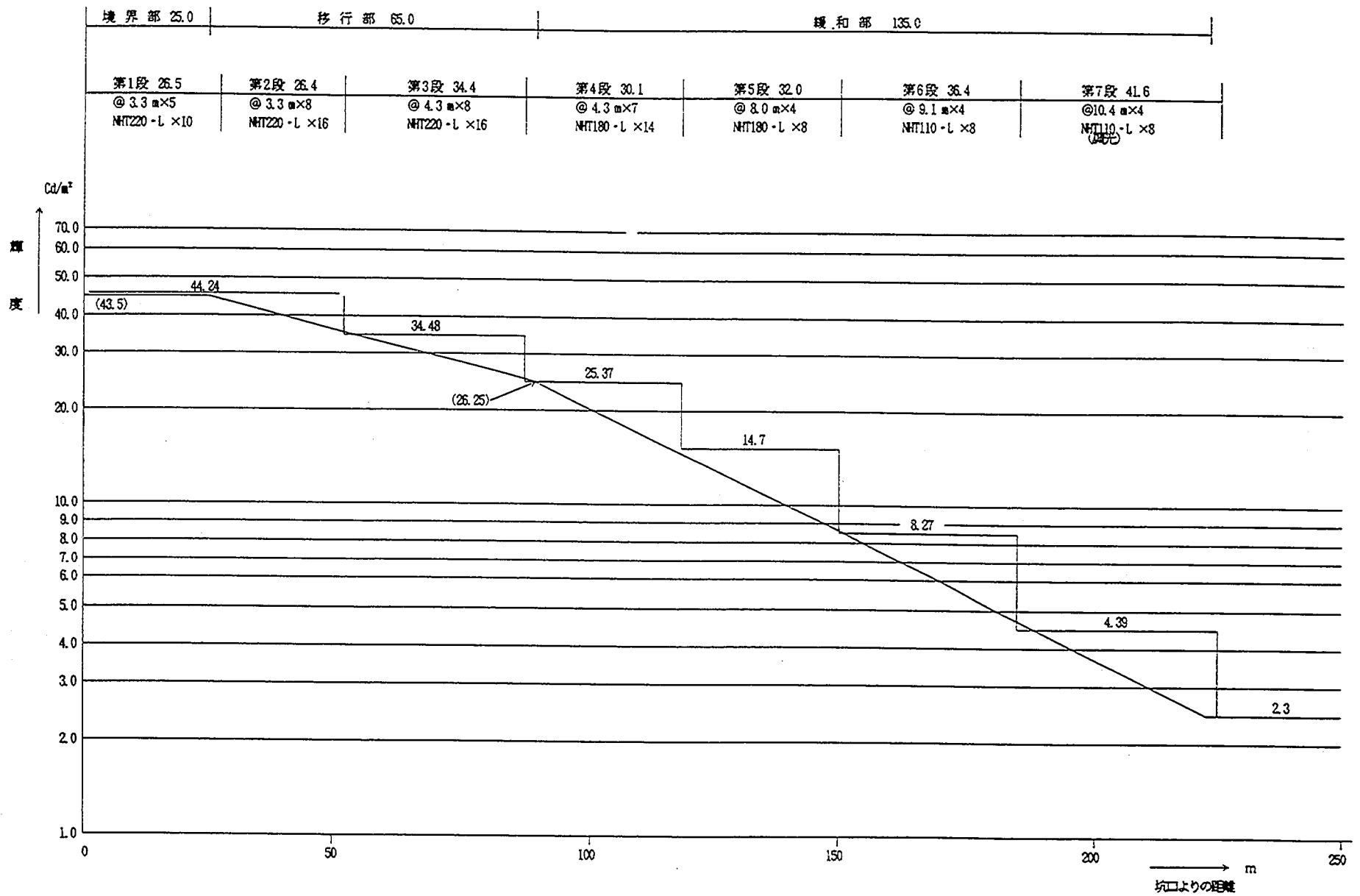


図 4 - 3 照明曲線図

4-2 車線中央取付

4-2-1 設計条件

(1) トンネル諸元

トンネル延長	500m以上
路面全幅員	$W_0 = 11.01\text{m}$
車道幅員	$W = 7.00\text{m}$
通行方式	2車線対面通行
設計速度	60km/h
日交通量	16,000台以上

(2) 野外の輝度

3,000cd/m²

(3) 照明器具取付

灯具取付高さ 5.2m

(4) 反射率

路面の種別：アスファルト	壁面：内装板付
天井 10%	壁 41.8%
	路面 10%

4-2-2 照明率の計算

(1) 基本部

従来の対称照明とする。

(2) 入口部

1) 断面図

図4-4、図4-5のとおり

2) 照明率 (左)

①灯具中心軸に対する角度

$$(a) \angle BOD = \tan^{-1} \frac{5.25 + 1.405}{5.2} \approx 52.0^\circ$$

$$(b) \angle COD = \tan^{-1} \frac{5.25}{5.2} \approx 45.3^\circ$$

$$(c) \angle DOD = \tan^{-1} \frac{1.75}{5.2} \approx 18.6^\circ$$

$$(d) \angle DOF = \tan^{-1} \frac{1.75 + 2.605}{5.2} \approx 39.9^\circ$$

$$\therefore \beta_1 = \angle BOD = 52.0^\circ$$

$$\beta_2 = \angle COD = 45.3^\circ$$

$$-\beta_3 = \angle DOE = 18.6^\circ$$

$$-\beta_4 = \angle DOF = 39.9^\circ$$

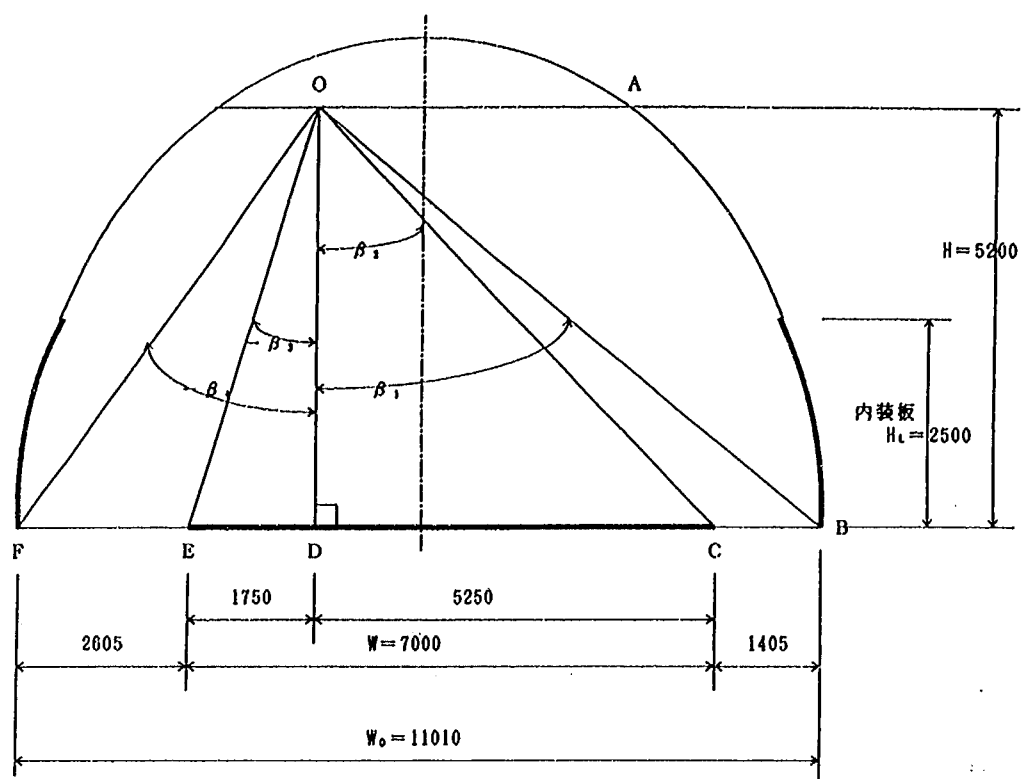


図 4 - 4 照明率を求めるための灯具取付位置図 (左)

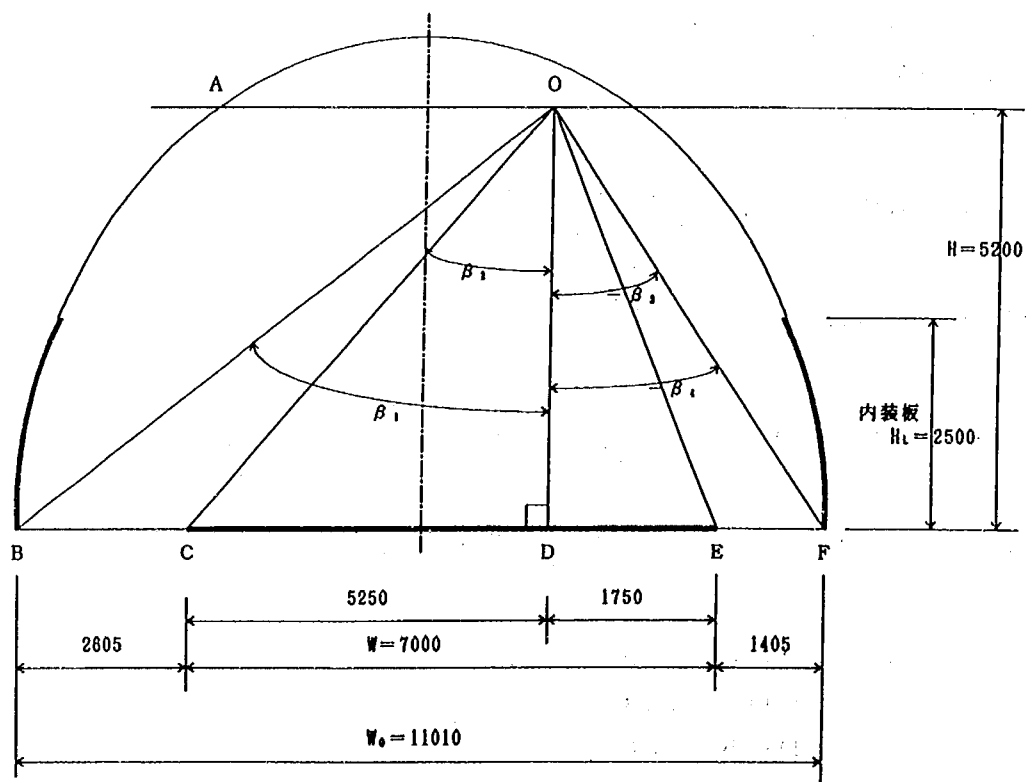


図 4 - 5 照明率を求めるための灯具取付位置図 (右)

②照明率を求めるための係数

$$\frac{W_0}{H_0} = \frac{11.01}{5.2} \approx 2.117$$

$$A_1 \text{ 天井面} \cdots \cdots \cdots 0.0712$$

$$A_2 \cdot A_3 \text{ 壁面} \cdots \cdots \cdots 0.1943$$

$$A_4 \text{ 路面} \cdots \cdots \cdots 1.0115$$

③照明率

$$U_1 = 0$$

$$\begin{aligned} U_2 &= U(-90^\circ) - U(-\beta_4) = U(-90^\circ) - U(-39.9^\circ) \\ &= 0.245 - 0.16 \\ &= 0.085 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_3 &= U(90^\circ) - U(\beta_1) = U(90^\circ) - U(52.0^\circ) \\ &= 0.245 - 0.20 \\ &= 0.045 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4 &= U(\beta_1) + U(-\beta_4) = U(52.0^\circ) + U(-39.9^\circ) \\ &= 0.20 + 0.16 \\ &= 0.36 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4' &= U(\beta_2) + U(-\beta_3) = U(45.3^\circ) + U(-18.6^\circ) \\ &= 0.18 + 0.07 \\ &= 0.25 \end{aligned}$$

(路面の照明率)

$$\begin{aligned} U' &= A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2 + A_3 \cdot U_3 + A_4 \cdot U_4 \\ &= 0.0712 \times 0 + 0.1943 \times 0.085 + 0.1943 \times 0.045 + 1.0115 \times 0.36 \\ &\approx 0.389 \end{aligned}$$

よって車道照明は、

$$\begin{aligned} U_L &= U_4' + \frac{W}{W_0} (U' - U_4) \\ &= 0.25 + \frac{7.00}{11.01} (0.389 - 0.36) \\ &\approx \underline{0.268} \end{aligned}$$

3) 照明率 (右)

①灯具中心軸に対する角度

$$(a) \angle BOD = \tan^{-1} \frac{5.25 + 2.605}{5.2} \approx 56.5^\circ$$

$$(b) \angle COD = \tan^{-1} \frac{5.25}{5.2} \approx 45.3^\circ$$

$$(c) \angle DOE = \tan^{-1} \frac{1.75}{5.2} \approx 18.6^\circ$$

$$(d) \angle DOF = \tan^{-1} \frac{1.75 + 1.405}{5.2} \approx 31.2^\circ$$

$$\therefore \beta_1 = \angle BOD = 56.5^\circ$$

$$\beta_2 = \angle COD = 45.3^\circ$$

$$-\beta_3 = \angle DOE = 18.6^\circ$$

$$-\beta_4 = \angle DOF = 31.2^\circ$$

② 照明率を求めるための係数

$$A_1 \text{ 天井面} \cdots \cdots \cdots 0.0712$$

$$A_2, A_3 \text{ 壁面} \cdots \cdots \cdots 0.1943$$

$$A_4 \text{ 路面} \cdots \cdots \cdots 1.0115$$

③ 照明率

$$U_1 = 0$$

$$\begin{aligned} U_2 &= U(-90^\circ) - U(-\beta_4) = U(-90^\circ) - U(-31.2^\circ) \\ &= 0.245 - 0.125 \\ &= 0.12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_3 &= U(90^\circ) - U(\beta_1) = U(90^\circ) - U(56.5^\circ) \\ &= 0.245 - 0.21 \\ &= 0.035 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4 &= U(\beta_1) + U(-\beta_4) = U(56.5^\circ) + U(-31.2^\circ) \\ &= 0.21 + 0.125 \\ &= 0.335 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4' &= U(\beta_2) + U(-\beta_3) = U(45.3^\circ) + U(-18.6^\circ) \\ &= 0.18 + 0.08 \\ &= 0.26 \end{aligned}$$

(路面の照明率)

$$\begin{aligned} U' &= A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2 + A_3 \cdot U_3 + A_4 \cdot U_4 \\ &= 0.0712 \times 0 + 0.1943 \times 0.12 + 0.1943 \times 0.035 + 1.0115 \times 0.335 \\ &\approx 0.369 \end{aligned}$$

よって車道照明率は、

$$\begin{aligned}U_L &= U_4' + \frac{W}{W_0} (U' - U_4) \\&= 0.26 + \frac{7.00}{11.01} (0.369 - 0.33) \\&\approx \underline{0.282}\end{aligned}$$

4) 照明率 (左右の灯具による照明率)

左側灯具による照明率 $U_L \cdots \cdots 0.268$

右側灯具による照明率 $U_R \cdots \cdots 0.282$

従って平均車道照明率は

$$U = \frac{U_L + U_R}{2} = \frac{0.268 + 0.282}{2} = 0.275$$

4-2-3 照度計算書

(1) 基本部照明

路面輝度 (cd/m²) 基準どおり 2.3cd/m² とする。

(2) 入口部照明

路面輝度 (cd/m ²)	L ₁	43.50	長さ (m)	ℓ ₁	25.0
	L ₂	26.25		ℓ ₂	65.0
	L ₃	—		ℓ ₃	0.0
	L ₄	2.30		ℓ ₄	135.0

1) 境界部 (第1段)

$$L_1 = 43.5 \text{ (cd/m}^2\text{)} \quad \ell = 25 - 10 = 15 \text{ (m)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (43.5 - 2.3)}{2 \times 0.275 \times 0.7} \approx 6,742 \text{ (ℓ m/m)}$$

光源に NHT220・L (26,500 ℓ m) を使用すると

$$S = \frac{26,500}{6,742} \approx 3.93 \text{ (m)}$$

設置間隔を S = 3.9m とすると平均輝度は

$$L = \frac{26,500 \times 2 \times 0.275 \times 0.7}{3.9 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 43.82 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

区間 (m) を (25 - 10) ÷ 3.9 = 3.8

スパン N を 4 として

$$3.9 \times 4 = 15.6 \text{ m}$$

第1段は光源に NHT220・L を 8 灯使用すると

平均輝度は L = 43.82 cd/m² で

区間距離は 10.0 + 15.6 = 25.6m となる。

2) 移行部 (第2段)

第1段の終端から 5 m の地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{\{(1/\log 43.5 - 1/\log 26.25) \times (65 - 0.6 - 5) / 65 + 1/\log 26.25\}} \\ \approx 43.22 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (43.22 - 2.3)}{2 \times 0.275 \times 0.7} \approx 6,696 \text{ (ℓ m/m)}$$

光源に NHT220・L (26,500 ℓ m) を使用すると

$$S = \frac{26,500}{6,696} \approx 3.96 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 3.9\text{m}$ とすると平均輝度は

$$L = \frac{26,500 \times 2 \times 0.275 \times 0.7}{3.9 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 43.82 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数 N を 8 として

$$3.9 \times 8 = 31.2\text{m}$$

第 2 段は光源に NHT220・L を 16 灯使用すると

平均輝度は $L = 43.82 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は 31.2m である。

3) 移行部 (第 3 段)

第 2 段の終端から 5 m の地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{\{(10.845.3 - 10.826.25) \times (65 - 31.8 - 5) / 65 + 10.826.25\}} \\ \approx 33.26 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (33.26 - 2.3)}{2 \times 0.275 \times 0.7} \approx 5,066 \text{ (lm/m)}$$

光源に NHT220・L (26,500 lm) を使用すると

$$S = \frac{26,500}{5,066} \approx 5.23 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 5.2\text{m}$ とすると平均輝度は

$$L = \frac{26,500 \times 2 \times 0.275 \times 0.7}{5.2 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 33.44 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数 N を 7 として

$$5.2 \times 7 = 36.4\text{m}$$

第 3 段は光源に NHT220・L を 14 灯使用すると

平均輝度は $L = 33.44 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は 36.4m である。

4) 緩和部 (第 4 段)

第 3 段の終端から 5 m の地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{\{(10.826.25 - 10.82.3) \times (135 - 3.2 - 5) / 135 + 10.82.3\}}$$

$$\approx 22.65 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (22.65 - 2.3)}{2 \times 0.275 \times 0.7} \approx 3,330 \text{ (lm/m)}$$

光源に NHT180・L(19,000 lm)を使用すると

$$S = \frac{19,000}{3,330} \approx 5.7 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 5.7\text{m}$ とすると平均輝度は

$$L = \frac{19,000 \times 2 \times 0.275 \times 0.7}{5.7 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 22.67 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数 N を 5 として

$$5.7 \times 5 = 28.5\text{m}$$

第4段は光源に NHT180・L を 10 灯使用すると

平均輝度は $L = 22.67 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は 28.5m である。

5) 緩和部 (第5段)

第4段の終端から 5m の地点の基準輝度は

$$L_o = 10^{\{(10 \log 26.25 - 10 \log 2.3) \times (135 - 31.7 - 5) / 135 + 10 \log 2.3\}} \\ \approx 13.54 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (13.54 - 2.3)}{2 \times 0.275 \times 0.7} \approx 1,839 \text{ (lm/m)}$$

光源に NHT180・L(19,000 lm)を使用すると

$$S = \frac{19,000}{1,839} \approx 10.33 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 10.3\text{m}$ とすると平均輝度は

$$L = \frac{19,000 \times 2 \times 0.275 \times 0.7}{10.3 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 13.57 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数 N を 3 として

$$10.3 \times 3 = 30.9\text{m}$$

第5段は光源に NHT180・L を 6 灯使用すると

平均輝度は $L = 13.57 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は 30.9m である。

6) 緩和部 (第6段)

第5段の終端から5mの地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{((\log 26.25 - \log 2.3) * (135 - 62.6 - 5) / 135 + \log 2.3)} \\ \approx 7.761 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (7.76 - 2.3)}{2 \times 0.275 \times 0.7} \approx 893 \text{ (lm/m)}$$

均斉度を考慮して、光源に NHT110・L(10,400 lm)を使用すると

$$S = \frac{10,400}{893} \approx 11.64 \text{ (m)}$$

設置間隔を $S = 10.4\text{m}$ ($S \leq 2.0H$) とすると平均輝度は

$$L = \frac{10,400 \times 2 \times 0.275 \times 0.7}{10.4 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 8.41 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数Nを3として

$$10.4 \times 3 = 31.2\text{m}$$

第6段は光源にNHT110・Lを6灯使用すると

平均輝度は $L = 8.41 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は31.2mである。

7) 緩和部 (第7段)

第6段の終端から5mの地点の基準輝度は

$$L_0 = 10^{((\log 26.25 - \log 2.3) * (135 - 93.8 - 5) / 135 + \log 2.3)} \\ \approx 4.42 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$\frac{F}{S} = \frac{7.0 \times 9 \times (4.42 - 2.3)}{2 \times 0.275 \times 0.7} \approx 347 \text{ (lm/m)}$$

光源に NHT110・L(調光)(4,160 lm)を使用すると

$$S = \frac{4,160}{347} \approx 11.9 \text{ (m)}$$

設置間隔Sは2.0Hまでなので

$$S = 2.0 \times 5.2 = 10.4\text{m}$$

平均輝度は

$$L = \frac{4,160 \times 2 \times 0.275 \times 0.7}{10.4 \times 7.0 \times 9} + 2.3 = 4.74 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

灯数Nを4として

$$10.4 \times 4 = 41.6\text{m}$$

第6段は光源にNHT110・L(調光)を8灯使用すると

平均輝度は $L = 4.74 \text{ cd/m}^2$ で

区間距離は41.6mである。

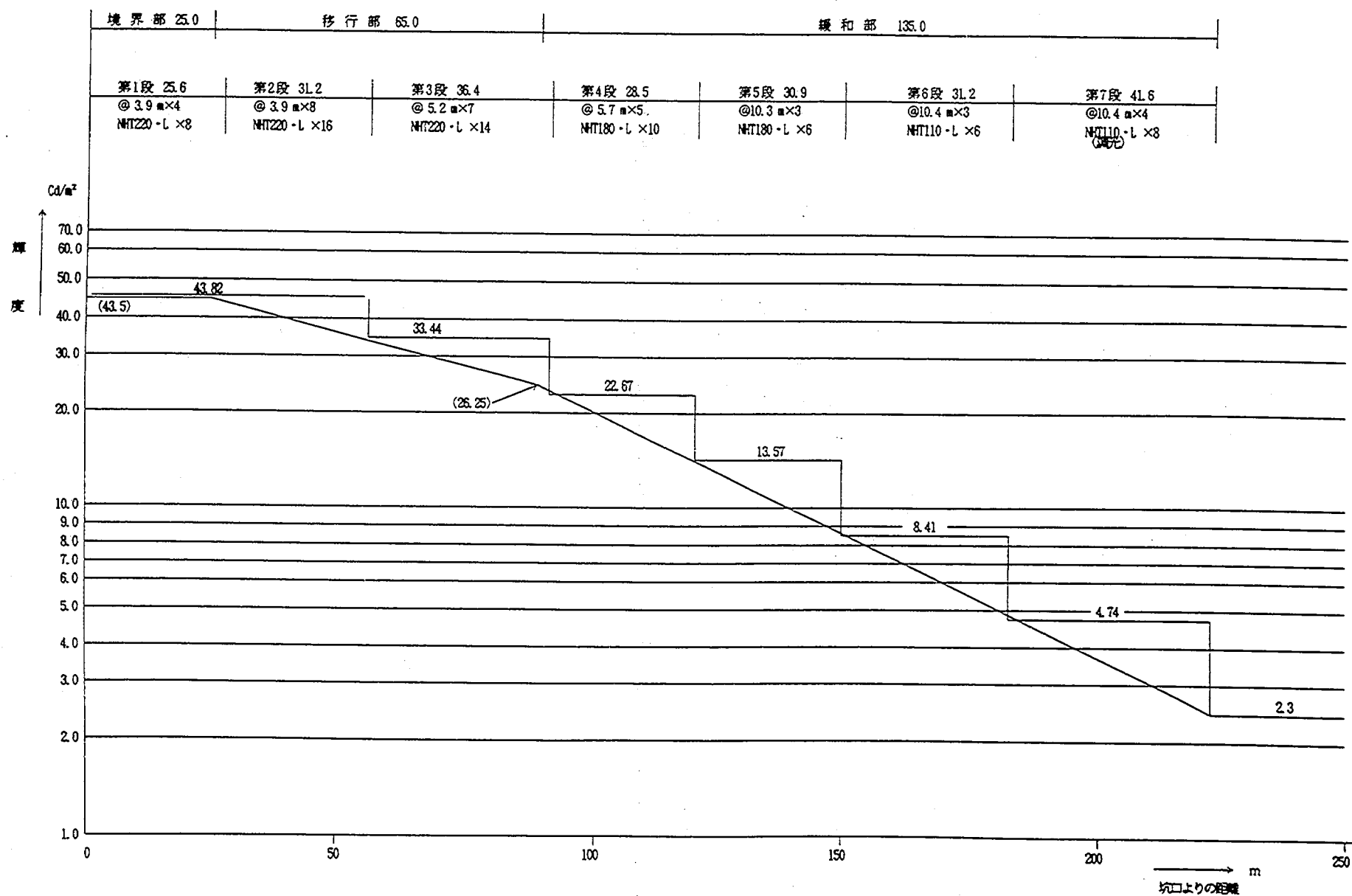


図 4 - 6 照明曲線図

【参考文献】

- 1) (社) 日本道路協会：「道路照明施設設置基準・同解説」、昭和56年4月
- 2) F. Novellas, "Eclairage des tunnels routiers. Intérêt des systèmes à mobilisation de contraste," Revue générale des routes et des aérodromes, No. 592, décembre 1982
- 3) "GUIDE FOR THE LIGHTING OF ROAD TUNNELS AND UNDERPASS", CIE PUBLICATION No. 26/2, 1988
- 4) "Öffentliche Beleuchtung Strassentunnels, -galerien und -unterführungen", SEV8915, 1992
- 5) (社) 日本照明委員会：「国際照明用語集 第4版」、1989年9月
- 6) Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting, 2nd ed, CIE Pub. 30.2, 1982
- 7) Road surface and lighting, CIE/PIARC Publ. 66, 1984
- 8) 建設省土木研究所ほか：「トンネル内の新照明方式に関する共同研究報告書」－カウンタービーム照明に関する研究報告書－、建設省土木研究所共同研究報告書第173号、平成9年3月
- 9) 建設省土木研究所ほか：「トンネル内の新照明方式に関する共同研究報告書」－カウンタービーム照明に関する研究（その2）報告書－、建設省土木研究所共同研究報告書第174号、平成9年3月
- 10) 建設省土木研究所ほか：「トンネル内の新照明方式に関する共同研究報告書」－カウンタービーム照明に関する研究（その3）報告書－、建設省土木研究所共同研究報告書第175号、平成9年3月
- 11) 建設省土木研究所ほか：「トンネル内の新照明方式に関する共同研究報告書」－カウンタービーム照明に関する研究（その4）報告書－、建設省土木研究所共同研究報告書第176号、平成9年3月