



# 國道公路隧道照明改善案例淺談

中興工程顧問公司系統及電氣工程部工程師 / 謝佳祥  
 中興工程顧問公司系統及電氣工程部工程師 / 張震宇  
 中興工程顧問公司系統及電氣工程部工程師 / 簡哲凡  
 中興工程顧問公司系統及電氣工程部技術經理 / 劉諄讓

關鍵字：隧道照明檢核、隧道照明量測、輝度規劃、照明改善

## 一、前言

隧道照明的其目的係在為用路人提供良好的視覺條件，以提高交通效率，降低黑洞效應，讓用路人可快速適應隧道內之照明環境，同時幫助用路人看清周圍環境，辨別障礙物，減少交通事故。

隨著社會經濟的發展和人民生活水準的不斷提高，北部高速公路之隧道群交通流量愈來愈大，已超過當初隧道照明之設計值，因此除了燈具老化問題之檢核，亦需依據交通部頒之交通工程規範第 7 章重新檢視隧道照明現況，進行改善以符合現代隧道照明之實際需求。

隧道照明光源常用者有高壓鈉 (HPS) 燈和日光燈及較新型之 LED 燈等，在目前比較成熟的路燈光源中，HPS 燈的光效最高，一般達 100 ~ 140lm/W，故目前提供隧道照明所需之燈具，以高壓鈉氣燈佔極大比率，而日光燈具在國內則常用在長隧道內。

隨著 LED 燈的技術不斷提升，且具有光效高、能耗低、壽命長及演色性佳等優勢，是否可以成為隧道照明的替代光源，有待其進一步觀察其發展情形而定，目前暫不予考慮。

## 二、隧道照明改善計畫

民國 101 年，中興公司團隊承攬交通部高速公路局北區養護工程分局轄內隧道群之隧道照明檢核、改善設計及監造技術服務工作，工作範圍如下表所示。

道路名稱	隧道名稱
國道 1 號	中興、大業等隧道
國道 3 號	基隆、七堵、汐止、福德、木柵、景美、新店、碧潭、安坑、中和、埔頂 I、II 等隧道
國道 3 甲	台北 I、台北 II 等隧道
國道 5 號	南港、石碇、烏塗、彭山等隧道
台 2 己線	忠孝、仁愛、信義、和平、大武崙、大笨林等隧道

備註：  
 隧道為截至 106 年已完成部分，全案預定於 109 年完竣。



本技術服務工作內容包含照明檢核、設計、協助招標、施工監造等相關作業。在隧道照明檢核部分，主要包含蒐集隧道照明設計資料、燈具效能檢測、隧道照明量測、建構隧道照明模型計算分析及現況評估等工作；在隧道照明設計部分，係參照交通部頒之交通工程規範，比對照明檢核資料，依各隧道現場狀況及速限進行改善設計；現場改善工作完竣後，進行設計驗證工作。

### 三、隧道照明相關專業術語定義

#### (一) 燭光 (Candela cd)

點光源於一定方向放射  $540 \times 10^{12}$  Hz 頻率 (波長 555.016nm) 之單色光輻射能，並在該方向具有  $\frac{1}{683}$  瓦特/立體弧角度之輻射強度，稱為 1 燭光。

#### (二) 流明 (Lumen lm)

點光源以 1 燭光均等強度放射至 1 公尺等距離之半球表面 1 平方公尺面積內之輻射通量稱為 1 流明。流明為光通量 (Luminous flux) 單位。

#### (三) 輝度 (Luminance cd/m<sup>2</sup> 或 nit)

由光源或反光面上之任一點朝與觀測方向垂直之單位面積上放射或反射之光強度。

#### (四) 照度 (Illuminance lm/m<sup>2</sup> 或 lux)

單位面積上所照射之光通量，適合於室內照明要求之參考值。

#### (五) 總均勻度 (Overall uniformity)

最小照度 (或輝度) 與平均照度 (或輝度) 之比值。

#### (六) 縱向均勻度 (Longitudinal uniformity)

每車道中心線上，最小輝度與最大輝度之比值。

#### (七) 眩光 (Glare)

視野內產生人眼無法適應之光亮感覺，可能引起厭惡、不舒服甚或喪失明視度。

#### (八) 門檻增量值 (Threshold increment, T.I.)

在眩光下較無眩光下恰可看清物體之門檻輝度所需增加之輝度，與無眩光下門檻輝度之百分比比值。

#### (九) 閃爍效應 (Flicker)

燈具裝設之間距避免產生光源顯著之不連續情形，造成閃爍頻率在 2.5Hz ~ 15Hz 之間，使視覺產生閃爍現象。

#### (十) 停車視距 (Stopping distance)

在設計速率下，駕駛者由反應至煞車將車輛完全停止時所需要的距離。停車視距包括反應距離及煞車距離。

#### (十一) 維護係數 (Maintenance factor)

設計所考慮光源衰減與燈具表面污染之寬容度。

#### (十二) 黑洞效應 (Black hole effect)

當駕駛者由隧道外駛進隧道時必須辨識隧道內之路況，此時如洞外輝度高，則隧道內有如黑洞無法辨識，此種現象稱為黑洞效應。

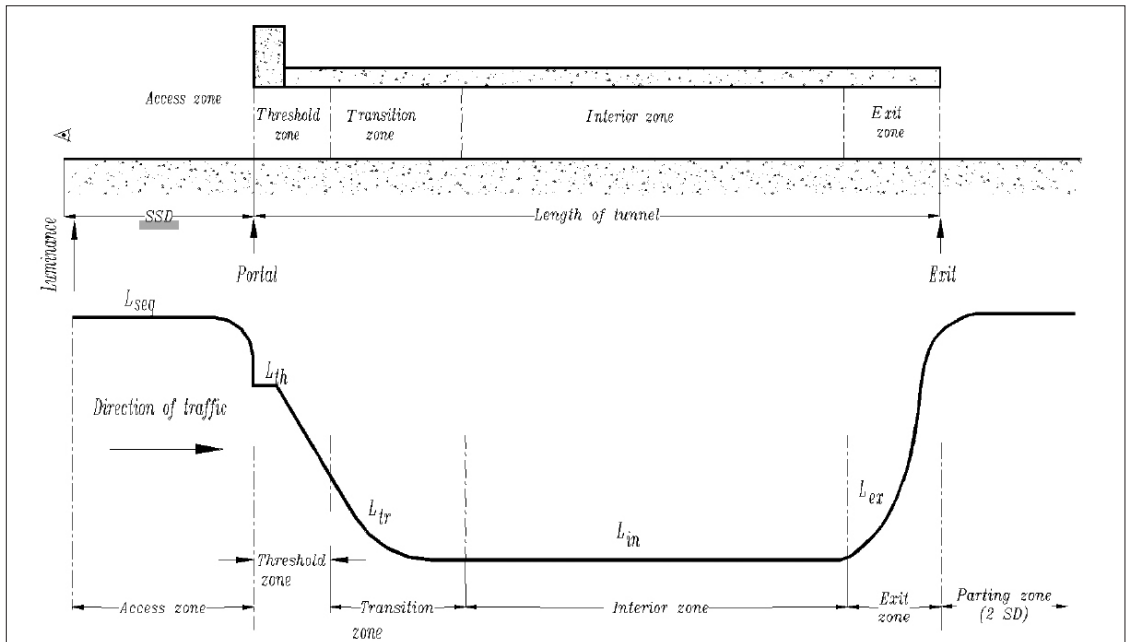


圖 1 單向隧道照明分區及輝度曲線圖。

**(十三) 逆照式照明 (Counter-bean lighting)**

在行車方向分佈為非對稱且朝向駕駛者，使物體與背景間產生較大對比，能以較低之輝度值而獲致較高的能見度。

**(十四) 光幕輝度 (Veiling luminance)**

由視野內之光源或區域所產生之輝度，使視網膜影像對比降低，減低視覺能力。

**(十五) 演色性 (Color rendering Index)**

原始的定義為與日光照射下比較起來，色彩的逼真程度。

**(十六) 燈具光效率 (Luminaire Efficiency)**

燈具光效率是用來評估燈具之能源效率的一項重要標準，其值為裸光源光通量與燈具輸出光通量之比。

**(十七) 車流量 (Traffic flow)**

在規定時間及方向通過特定點之車輛數，為每車道每小時尖峰時刻車流量。

**四、隧道照明分區及其晝間輝度**

為避免車輛進入隧道時駕駛者眼睛發生黑洞效應，隧道內的照明應依其眼睛之需要來設計不同的照明分區及其輝度，以調節駕駛者眼睛的適應能力。圖 1 為單向隧道照明分區及輝度曲線圖。

**(一) 接近區 (Access zone)**

接近區指隧道進口前端之路段；接近區之輝度 (L20) 係指於隧道進口端前停車視距處，以 ¼ 洞口高度為中心點，由駕駛者眼睛所形成 20° 角錐視野內量測之平均輝度。

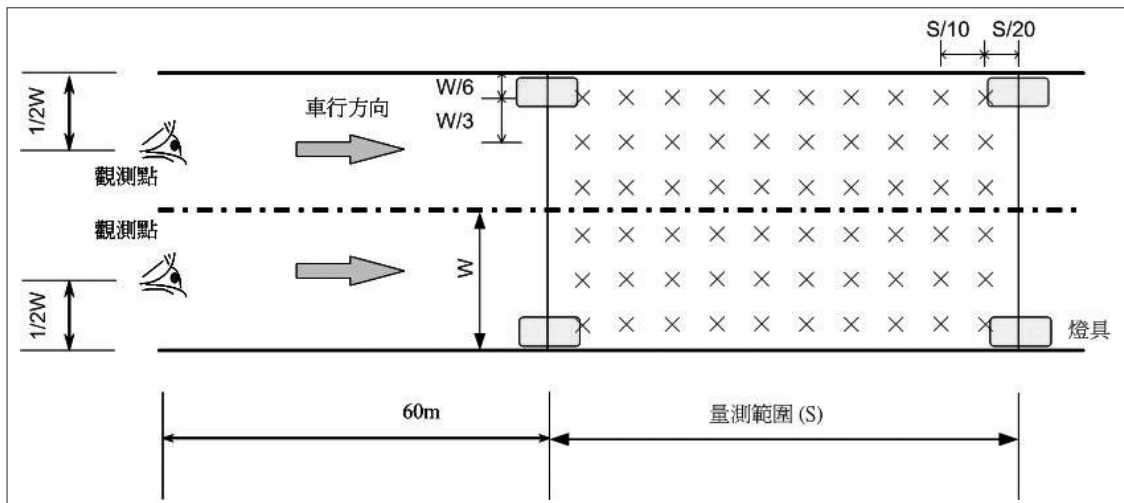


圖 2 輝度量測範圍說明圖

## (二) 進口區 (Threshold zone)

進口區 (或譯為境界區) 指隧道入口端向內延伸適當距離鄰接漸變區之路段；進口區內任一位置之平均路面輝度稱為此一位置之進口區輝度 ( $L_{th}$ )。

## (三) 漸變區 (Transition zone)

漸變區指延續進口區向隧道內延伸至內部區之路段；漸變區內任一位置之平均路面輝度稱為此一位置之漸變區輝度 ( $L_{tr}$ )。

## (四) 內部區 (Interior zone)

內部區指鄰接漸變區延伸至出口區之路段；內部區內任一位置之平均路面輝度稱為此一位置之內部區輝度 ( $L_m$ )。

## (五) 出口區 (Exit zone)

出口區指駕駛者駛近隧道出口，受到洞口外輝度影響之路段；出口區內任一位置之平均路面輝度稱為此一位置之出口區輝度 ( $L_{ex}$ )。

## 五、隧道照明量測

### (一) 量測方法

參考 CIE140-2000 “Road Lighting Calculations” 量測隧道照明輝度，並計算平均輝度 ( $L_{av}$ ) 及總均勻度 ( $U_o$ )。

### (二) 測量區域的選擇

依據不同燈具的間距、高度、仰角及光源之光色等方面具有典型週期性的平坦路面上，測量範圍是位於同一列的兩個燈具之間，如圖 2 所示。

### (三) 測量點取樣

對於道路輝度測量所需之點數，依據 CIE140 之建議於橫向每車道取 3 點，但為提供較高準確性之輝度計算分析，我們將採每車道橫向取 3 點，縱向第一個與最後一個燈具間格取 10 點，測量點與道路相關位置如圖 2 所示，在測量範圍前 60 公尺及高 1.5 公尺做觀測點。



#### (四) 量測點區域

隧道內各分區，包含進口區 (Threshold Zone)、漸變區 (Transition Zone)、內部區 (Internal Zone) 及出口區 (Exist Zone)，各區域若有再細分，再依據實際區域量測，如將漸變區分為漸變區(一)及漸變區(二)、(三)等。

#### (五) 輝度計算

1. 平均輝度 ( $L_{av}$ ) 計算， $cd/m^2$

$$L_{av} = \sum_{i=1}^n L_i / n$$

$L_i$ ：各測量點輝度， $cd/m^2$ ； $n$ ：測量點數

2. 輝度總均勻度 ( $U_o$ ) 的計算

$$U_o = L_{min} / L_{av}$$

$L_{min}$ ：各測量點上找出的最小輝度， $cd/m^2$

### 六、隧道照明改善設計

本技術服務工作範圍包含北部 27 座隧道，以下節錄福德隧道南下線照明改善設計實例說明如下。

#### (一) 改善設計原則

福德隧道原設計採用 CIE 88-1990 規劃，本案則採用新版的 CIE 88-2004 來加強其適切性。

在 CIE 88-1990 與 CIE 88-2004 版中，在隧道加強區照明方面，有一個最大的差異，就在於隧道進口區的輝度值計算。

在 CIE 88-1990 版中，以  $L_{20}$ (隧道洞口外輝度值)，再乘上一個依安全停車視距及照射方式(對比)不同所得到的一個比值求得隧道進口區的輝度值；而 CIE 88-2004 版中，採用被察覺對比度的方法，依照一個等量漫射

光的區域極限圖，來算出隧道進口區的輝度值，由於該方法需要準確的知道隧道洞口地理環境才可行，一般在設計階段無法有效取得，而本案由於隧道洞口地理環境容易取得，故可採用 CIE 88-2004 版方式計算，更準確得到隧道進口區的輝度值。

隧道的照明要求，白天和夜間是完全不同的。在夜間，問題相當簡單，包括在隧道內照明路線上提供的至少等於隧道外面照明的輝度等級。白天照明的設計則由於人的視覺系統而特別關鍵。

#### (二) 隧道環境及照明設計資料蒐集

福德隧道，位於國道三號北部路段，為雙孔單向 3 車道，隧道座向為東北向南，隧道環境及照明設計條件資料如表 1 及表 2 所示。

表 1 福德隧道長度一覽表

福德隧道	里程	隧道長	車道數
南下線	18K+232M~ 19K+994M	1762M	3
北上線	19K+911M~ 18K+185M	1726M	3

表 2 福德隧道照明設計條件

設計速率	90 km/hr
車流量	1,800
道路鋪面	瀝青混凝土 (R3)
洞口外輝度	S : 2800 cd/ m <sup>2</sup> N : 2200 cd/ m <sup>2</sup>
停車視距	135 m
道路寬度	3.75 m
車道數	3
隧道淨高	8 m
燈具安裝高度	5.8 m





### (三) 進口區照明平均輝度 ( $L_{th}$ ) 分析

參照 CIE 88-2004 方式，使用極限圖 (Polar diagram) 與隧道洞口套繪如圖 3 藉由  $L_{ij}$  及  $L_{ijc}$  矩陣分析，計算求得進口區平均輝度如表 3 所示。其中極限圖中心對準隧道洞口高度 1/4，觀測位置於於停車視距。

### (四) 洞口野外輝度 ( $L_{20}$ ) 規劃

洞口野外輝度參照 CIE 88-2004 建議，依據表 4 數值，以內差法計算，求得洞口野外輝度 ( $L_{20}$ ) 為 3000 nit。

### (五) 進口區長度輝度規劃

參照 CIE 88-2004 建議，進口區的總長度必須至少等於停車視距，且由進口區起點 1/2 以上之停視距，其輝度值必須等於  $L_{th}$ ，

隨後各區照明輝度等級可逐漸縮小，其中 CIE 88-2004 建議如圖 4 所示。

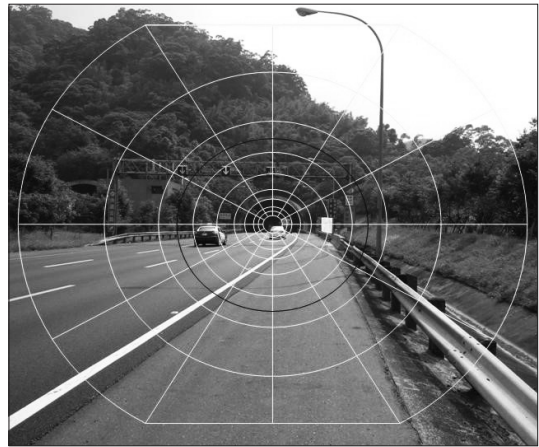


圖 3 極限圖及其各環幾何特性

表 3 隧道洞口界區平均輝度

福德隧道 南下線	Lseq	Lm	$L_{th}$
	117.8	309.8	141.3

※ $L_{th}$  為逆照式照明設置條件下數值。

表 4 各種車速條件下  $L_{th} / L_{20}$  比率

速度	$k = L_{th} / L_{20}$
< 60 km/h	0.05
80 km/h	0.06
120 km/h	0.10

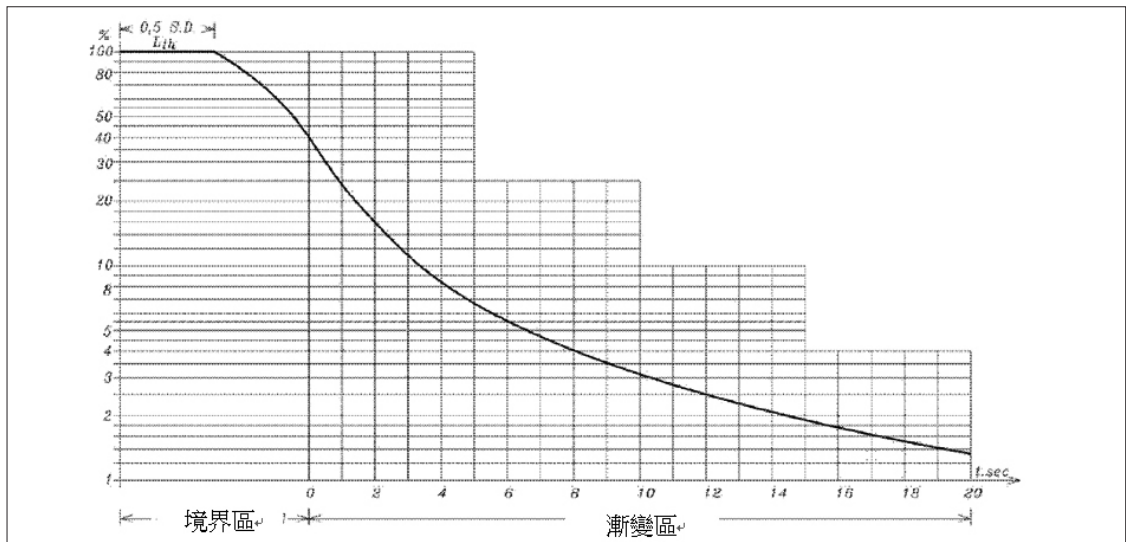


圖 4 隧道沿途變化曲線圖



表 5 內部區輝度值 單位：cd/m<sup>2</sup>

停車視距	長隧道交通流量	
	低	高
160 m	6	10
60 m	3	6

表 6 交通流量分類

交通流量	單向交通	雙向交通
高	> 1500	> 10
低	< 500	< 6

#### (六) 漸變區輝度規劃

漸變區照明輝度漸減原則如圖 4 所示，唯各區漸減之照明輝度梯階允許的最大輝度比率為 3，且漸變區最後一區間輝度不應大於內部區輝度的 2 倍。

#### (七) 內部區日間輝度規劃

內部區照明輝度參照 CIE 88-2004 建議，依據表 5 數值，以內差法計算求得。其中交通流量分類如表 6 所示。

#### (八) 出口區照明輝度規劃

為了確保小型車輛能有足夠的照明，且能從後視鏡清楚看到後方視野，CIE 88-2004 建議出口區的照明應與內部區的照明相同。唯如果隧道出口處可能有預期的危險，且內部區行駛距離長，則建議出口區的日間輝度應線性增加，其距離相當於停車視距，且在距離出口 20 公尺處輝度應為內部區輝度的五倍。

#### (九) 福德南下隧道照明改善實例

福德隧道照明改善設計，採用非對稱高壓鈉氣燈具作為基本區燈具；加強區採用逆

表 7 福德南下隧道設計及施工後量測值

照明區域	控制階段	設計值		施工測量值	
		L <sub>av</sub>	U <sub>o</sub>	L <sub>av</sub>	U <sub>o</sub>
進口區	7	155	0.5	215.9	0.6
	6	118		211.9	0.62
	5	80		143.5	0.63
	4	43		77.8	0.63
漸變一	6	80		138.8	0.75
	5	55		105.2	0.89
	4	30		60.7	0.88
漸變二	6	65		120.6	0.9
	5	45		86.8	0.89
漸變三	4	25		48.8	0.92
	6	35		51.1	0.67
	5	25		46.9	0.85
漸變四	4	15		34.5	0.84
	5	15		36.9	0.88
漸變五	4	10		24.9	0.89
	4	10	21.6	0.77	
內部區	3	5	0.7	8.2	0.7
	2	2.5		3.6	0.83
	1	1.3		2.8	0.73
出口一	4	10	0.8	16.5	0.83
出口二	5	25		38.5	0.81
	4	15		23.3	0.8

照式高壓鈉氣燈具，且燈泡改採強光型高壓鈉氣燈泡。藉由照明設計軟體建立隧道照明模型，實際模擬隧道內各區各階照明輝度及均勻度，隧道照明改善設計及改善後測量值如表 7 所示。



表 8 福德隧道南下照明點滅控制階段

照明點滅控制		洞口野外輝度值	
階段	區分	點燈	滅燈
7	白天 1	2250	1800
6	白天 2	1500	1200
5	白天 3	750	600
4	白天 4	100	80
3	黎明	時控	時控
2	夜間	時控	時控
1	深夜	時控	時控

在照明控制部分，依不同時段、天候陰晴及交通量等因素，利用監控軟體編輯與洞外輝度偵測值作比較，控制隧道內各階段照明迴路，使洞內輝度隨著洞外輝度比例變化。

隧道內照明採七階控制模式，第 1～3 階為隧道基本照明，第 4～7 階照明分別設置於隧道進口區、漸變區及出口區位置，各階控制設定如表 8 所示。

## 七、結論

國道 1 號、國道 3 號及國 3 甲、台 2 己線等隧道，往來交通流量大，故隧道內行車照明極為重要，改善隧道照明可增加用路人視覺享受，減輕駕駛員疲勞，降低用路人行車風險，提高隧道通行能力及行車安全。隧道照明改善作業中，選擇使用高效率及低耗能的光源，在符合現行法規需求之前提下，改善及提升隧道內照明，並汰換及更新更具節能效益之照明燈具，進而降低隧道照明的營運成本，符合政府節能減碳目標，確保用路人之行車安全。◆

## 參考文獻

1. 高公局隧道照明檢核改善設計及監造案隧道照明檢核報告。
2. 高公局隧道照明檢核改善設計及監造案隧道照明設計報告。
3. 交通工程規範，交通部 104 年 12 月
4. 國道公路照明設計準則，國工局 1997 年
5. 國道公路隧道照明設計實務，照明學刊第 21 卷第 1 期。
6. Guide for The Lighting of Road Tunnels and Underpasses，Publication CIE 88，2004。