



自然光照系統應用於 地下空間之節能照明初探

蘇威奇／核能研究所物理組助理研發師

黃忠偉／台灣科技大學色彩與照明科技研究所教授

曾國雄／台北科技大學電子系教授

針對「線型」地下空間如隧道工程之自然光照系統（NLIS）之應用為主軸，本文除節能照明外；另可考慮綠色生態及環境永續之概念，進行自然日照之「集、導、放」光系統之整合；並對應用於地下空間之多功能增值利用作可行性初探。

研究主以公路隧道照明為整合應用之藍本，短期目標以「可導引自然光替代人工光源之自然光照系統」於改善傳統公路隧道高耗能、耗電之探討，研究依CIE（1990、2004）、CNS與日本道路公團隧道照明規範，並以北宜高速公路雪山隧道為分析案例，對不同區段之輝度進行試算；並與集光磚、導光與放光之光纖元件設計結果配搭並且量化比對，最後建置模型以驗證節能型自然光照系統於公路隧道應用之可行性。

成果驗證則以輝度計對隧道模型實測。依線性光照原理，模型經驗證適確符合；則應可依實際隧道照明規範之建議，建置實際隧道場域之系統輔佐，尤其於隧道出入口之應用除符合規範要求外；更符合規範所不及之人因工程（橘色科技概念）要求以達低耗節能之效果。

緒論

研究動機

邇來因地球暖化與能源匱乏，全球提倡節能減碳，對於土木營造，地表建築密度逐漸提升之餘；地下空間之開發亦相對大量增加。然而，地下空間數量遞增，內部照明耗能勢必是一重要考量因素，根據研究調查指出，地上建物之照明設備佔相當之用電比例（30%），相較地下空間如要有相同功能之增值則勢必高於此值。本研究則針對如何降低照明之耗能進行初探，以線型地下空間如隧道為例，再進一步將其擴展至其餘「面型」之地下空間（如地下水力發電隧道）。燈光照明對於地下空間是個相對重要之物理設備，然而這些燈具之應用上會另一成本額度，此外，燈光所造成的熱能相當高，未來節能減碳在土木工程更應佔相當重要的一環，為使民眾居住的環境更美好，土木工程不僅與建物建造有關

聯而已，對於生態環境也須加以考量，而太陽光為地球上取之不盡，用之不竭的能源，本計劃乃利用此點，將光電系統結合土木工程，以自然光照系統將太陽光能直接引進地下空間，使用「光」引「光」的技術取代產生如一般太陽能利用光—電轉效率不高與熱能損耗的一般人工照明設備，以集光、導光、放光三分項元件之研發，可直接利用太陽光照，且用分光技術又可兼顧人與環境（如植物）之健康生態與其他文創利用。地下空間利用將具極大開發潛力，應可將「綠能環保」與「健康照明」兩大生活趨勢推廣普及。

研究目的與描述

就鐵路隧道而言，國內無論是營造或營建階段（生命週期）；新建或既有建隧道工程，內部照明依舊是使用傳統高壓鈉燈以及日光燈供給，隧道因考慮到黑洞既白洞效應，因此可分為不同光照階段使駕駛者適

應，而其照明是依照單一人工光源經照明計算有系統的配置於隧道內部，而佈置區以出入口及內部照明為主要三大部份，針對未來隧道將逐漸加長的趨勢[一公里以上]視之，以經濟成本考量各項照明所需費用，現階段傳統照明方式之工料成本高、耗電量大、施工階段與運行維護費用相對隨之增加。

國內外已有許多直接引導自然光進入室內之相關研究(黃忠偉, 2009、Rosemann, 2004),(許德清, 1994)提及在相同的隧道長度、安全規定與使用輝度條件下,導光管設備費用約高於傳統燈管 2.7 倍,安裝費用較傳統燈管約節省 66%,維護費用約節省 76%,電費較傳統燈管約節省 13%,經以上種種跡象顯示,在未來經濟考量上,傳統燈管似乎可用較新科技如導光管所替代。

本研究以綠色節能觀念以及橘色科技當作發展基礎,隧道工程之新觀念乃以節能效益極大化;及環境衝擊最低化(LID, Low Impact Development)為根基。並漸漸塑造為一生態式公路隧道作為未來發展目標,目前隧道之照明多半使用高壓鈉燈搭配日光燈為照明,而生態式公路隧道之前景為使用「自然光照明系統 NLIS」取代現在傳統照明方式,改善傳統高耗能缺點及發展綠植生態隧道。「自然光照明系統」(黃忠偉, 2009)主要將自然光透過集光、導光、放光三子系統,將陽光以反射與折射之方式直接引入室內作照明使用。

- 經上述之說明,整體規劃可分下列主要項目
- 自然光照明系統(NLIS)文獻回顧與持續更新
- 情境軟體模擬(數值化)
- 縮尺建置(模型化)
- 規範比對
- 現場實作
- 檢討回饋
- 加值應用(綠色、橘色科技)

本研究針對第一、三、四項製作一模擬生態式公路隧道模型,將自然光照明系統應用於此,進行檢測各區段之輝度是否符合隧道照明標準,未來並持續完成其於項目,透過此模型製作,本研究之執行效益為盼能改良傳統照明所造成高耗能之缺點,後續也可為隧道工程週遭環境行植物綠化進而降低空汙與熱溫;及將自然光照明系統應用於出入口端利用自然光之特性

自動調整光強使其更人性化,將橘色科技之概念納入規劃設計。

研究範圍與方法

主要之研究方法為實作一節能光導生態公路隧道,將自然光照明系統應用於此並進行各區段之輝度(照)度檢測。主要可分為隧道內部照明設計需求之研調;以及自然光照明系統應用之兩大整合。其詳細內容可分為照明燈源設計與模擬、集光元件演算與設計、輸光通路設計三大課題。檢測方法採用光學儀器輝(照)度計與檢測,測試自然光照明系統是否可以有效應用於公路隧道,更以台科大國際大樓(IB)地下停車場與北科大土木系館地下室之規劃設計為實際案例作一規劃與應用,本研究之長期目標期盼將現有隧道植生綠化為願景。

公路隧道模型與自然光照明系統之應用

繼上述章節對系統各元件之探討,後續將對此系統之應用以模型建置與實體規劃作一呈現,搭配儀器量測與軟體分析檢測該照(輝)度是否符合設計值,並與規範作比對,其研究流程如圖 1 所示。

研究流程

本研究模型隧道內部各區段輝度設計值為參考北宜高速公路雪山照明,並依照規範避免其危險間距與閃爍效應,再依平均係數法計算出燈具間距與集光磚所需數量,計算過程如表 1。

除對公路隧道(線型)建立模型之餘,對於地下空間(面型)也完成規劃設計。

設計與試驗之結果討論

本實驗延續 97 年學生李文富之研究,繼續著手未完成之部分,目前已將自然光照明系統安裝於公路隧道模型內(前一章節);本章節會對隧道內部輝度之量測結果作整合,將量測數據與規範做比對,再搭配軟體進行情境模擬,此外,本團隊也嘗試以一實際隧道(雪隧)進行自然光照明系統配置之計算。

量測儀器除了照度計之外,須配合遙控車,將輝度計與遙控車放入隧道中,以繩子控制,可量測模型隧道各區段輝度與設計值是否相符,以及符不符合規範標準,圖 5 為量測示意圖。

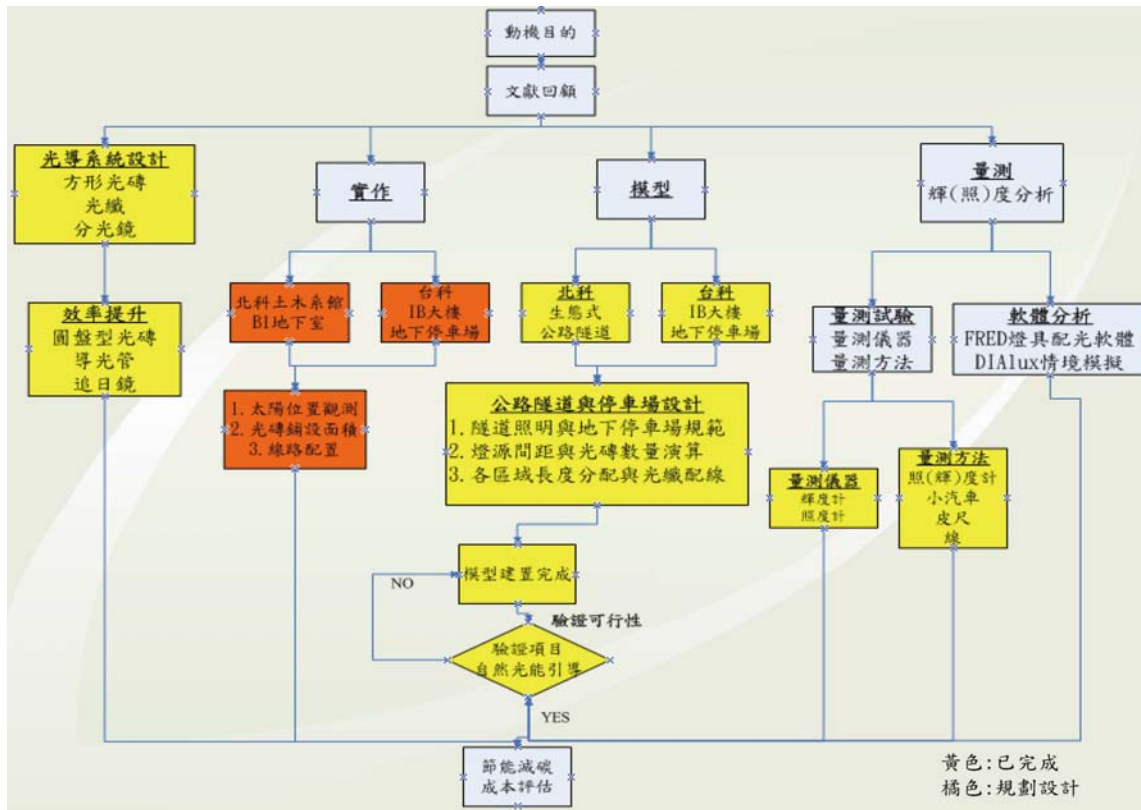


圖 1 研究流程圖

表 1 進口段燈源間距設計

| | | | | | | |
|---------|---|----------|----------|---------|----------|----------------------|
| 採用之光源 | 太陽光 (無雲晴空) $F = 1 \times 10^4 \text{ (lux)} \times 1.4 \times 10^{-3} \text{ (m}^2) = 14 \text{ (lm)}$ | | | | | |
| 燈源配置 | 採中間佈燈配置 | | | | | |
| 平均係數法公式 | $S_1 = \frac{F_1 U M N}{K L_1 W}$ | | | | | |
| 公式參數 | 平均照度換算係數 (K) | 車道寬度 (W) | 維護係數 (M) | 照明率 (U) | 配置係數 (N) | 設計輝度 (L_1) |
| 數值 | 13 lx/cd/m ² | 0.13 m | 0.6 | 0.4 | 1 | 90 cd/m ² |
| 燈距間距設計 | $S_1 = \frac{(14 \text{ lm}) \times 0.4 \times 0.6 \times 1}{13 \text{ lx/cd/m}^2 \times 90 \text{ cd/m}^2 \times 0.13 \text{ m}}$ 得 $S_1 = 2.2 \text{ cm}$ S_1 取整數設計, 得 $S_1 = 2 \text{ cm}$ | | | | | |
| 檢核 | 1. 光量是否足夠? 以所設計之燈源間距證明 $F_1^* = \frac{S_1 \times K \times L_1 \times W}{U \times M \times N} = \frac{0.02 \text{ m} \times 13 \text{ lx/cd/m}^2 \times 90 \text{ cd/m}^2 \times 0.13 \text{ m}}{0.4 \times 0.6 \times 1} = 12.675 \text{ lm}$ ∴ 光量供給 $F_1 >$ 光量需求 F_1^* ∴ 光量是足夠的 2. 本區間的輝度需求是否滿足? 以所設計之燈源間距及採用之燈源光量證明 $L_1' = \frac{F_1 \times U \times M \times N}{S_1 \times K \times W} = \frac{(14 \text{ lm}) \times 0.4 \times 0.6 \times 1}{0.02 \text{ m} \times 13 \text{ lx/cd/m}^2 \times 0.13 \text{ m}} = 99 \text{ cd/m}^2$ ∴ 輝度供 $L_1' >$ 輝度需求 L_1 ∴ 輝度需求滿足 | | | | | |
| 光磚數量計算 | 此區段長度為 15 cm, 燈具間距由上得之為 2 cm $\text{光磚數量} = \frac{L}{S_1} = \frac{15}{2} = 7.5 \text{ 個}$ | | | | | |

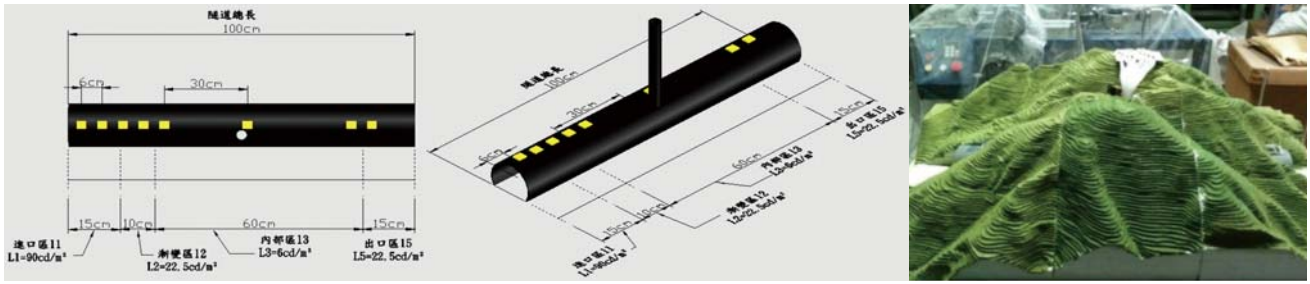


圖 2 生態式隧道模型光磚配置圖

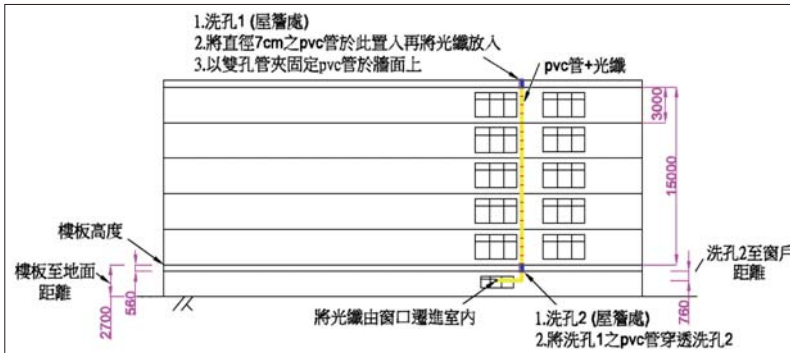


圖 3 土木系館立面圖南側 (NLIS 佈設圖)

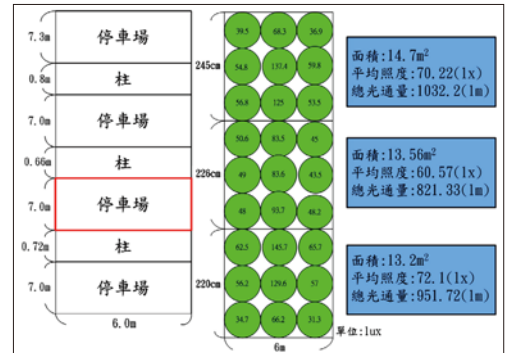


圖 4 停車場設計規劃範圍 (PSSDL, 2012)

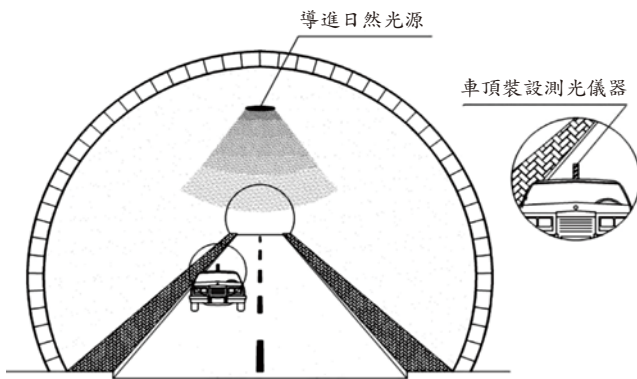


圖 5 照度量測示意圖

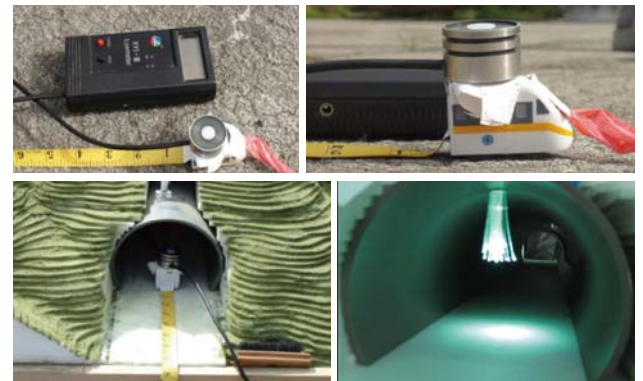


圖 6 量測方式

隧道模型內部輝度量測

經第二章模型建置完畢後，為印證其內部亮度是否符合規範，本章節試以較簡便之輝度計先進行各階段輝度之量測，本研究模型照比例尺 1:10 縮放，因考量自然光照系統安裝操作便利性，先針對不同區域作簡單的配置，再將量得知數據以 excel 作一趨勢圖與規範比對 (圖 8)。

量測儀器以一照 (輝) 度計搭配皮尺與尼龍線，再搭配紙盒或模型車如圖 6、7 所示，其量測方式步驟為 (1) 將模型車連接照度計置入隧道內 (2) 於隧道出口側以尼龍線帶動模型車，而由隧道入口側可觀測皮尺讀數，以對應各區段長度 (3) 記錄各區段輝度數據。

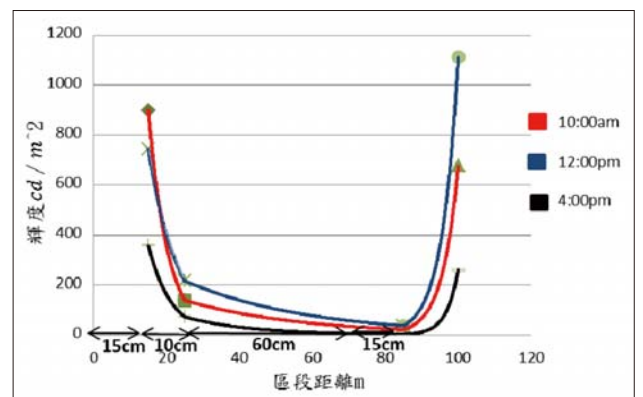


圖 7 距離輝度關係圖

因應本系統須藉由太陽作為主要光源，以北科土木館頂樓作為量測地點，預測值與實際量測數據如表 2 所示。

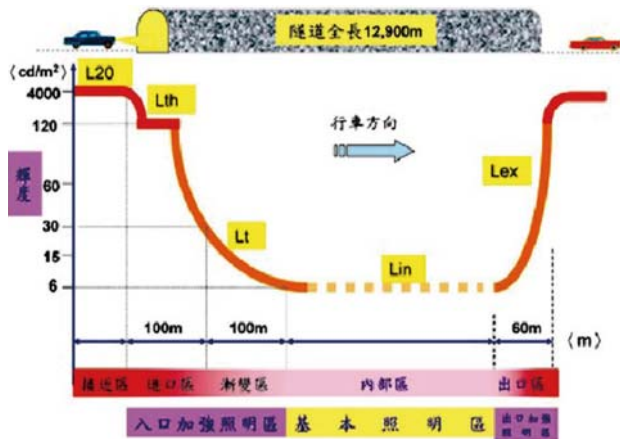


圖 8 模型量測結果趨勢圖比對

由於模型內使用完整輝度量測方式不易（考慮儀器高、燈具等等因素），研究中先以照度為量測基準，再以照度輝度轉換公式（式 1）轉換與預測值比對。

$$L = E/C \quad (1)$$

L：輝度

E：照度

C：轉換系數：9~11 水泥、13~16 柏油。

本研究除以綠色科技為主要研究方向之餘，更融入橘色科技，創造另一顏色之科技，關心環保與能源課題，強調人本與人道關懷，更以發展健康、幸福、人文關懷鄉關的科技與系統產業為訴求。

相對於綠色科技以綠色象徵環境議題，橘色科技以橘色象徵人本議題，而橘色科技之源起，可回顧兩百年來科技的進步與發展，確實帶來經濟發展，但也造成物質化的結果，以及貧富懸殊、地球暖化等問題。因此有許多有識之士高呼人文精神的提升，以平衡科技與人文的發展，並期許科技能帶給人類幸福、世界和平、安居樂業（王駿發，2011）

本計畫將日光整合系統（SIS）應用於公路隧道，利用集、導、放三元件將自然光直接引入隧道作為光照使用，以綠色科技之角度，節省電能之耗損，並搭配節能照明作為夜間補償，既有之隧道照明輝度值為一固定數據，無法因應洞外太陽光隨即作改變，人眼對隧道照明最敏感之區域為接近區至境界區（暗適應）與出口區至洞外（明適應）（交通部運輸研究所，1994），未來可將該系統裝置於此交界區，善用太陽光之特性進行自動調光，皆須搭配人工照明作為補償。

結論與建議

結論

本研究主以公路隧道照明為整合應用之藍本，短期目標以「可導引自然光替代人工光源之自然光照系統」於改善傳統公路隧道高耗能、耗電之探討，研究依 CIE（1990、2004）、CNS 與日本道路公團隧道照明規範，並以北宜高速公路雪山隧道為分析案例，對不同區段之輝度進行試算；並與集光磚、導光與放光之光纖元件設計結果配搭並且量化比對，最後建置模型以驗證節能型自然光照系統於公路隧道應用之可行性。

規範層面

1. 日本道路公團準則鮮少人使用，現行隧道照明以 CIE 為設計準則。
2. 研究中模型內輝度試算值已可符合規範標準趨勢。
3. 除計算數據之餘，需考量燈具配光曲線、安裝位置與路面材質等影響因子，可提高其準確度。

模型層面

1. 完整輝度量測方式不易於模型進行，先以照度量測再作轉換，本研究經照輝度之轉換，已可符合預估輝度值（表 2）。
2. 模型中之輝度分佈趨勢可符合隧道照明標準（圖 8）。

表 2 各區段照輝度量測與設計比較

| 尺寸 | 高 (燈具至地面) m | 寬 (m) | 長 (m) | |
|---------------------------|-------------------------|---------|--------|------|
| 實際隧道 (Ex: 雪隧) | 4.6 | 7.6 | 12900 | |
| 模型 | 0.085 | 0.1 | 1 | |
| 倍數 | 54 | 76 | 12900 | |
| 雪山隧道 | | | | |
| 區域 | 境界區 | 漸變區 | 內部區 | 出口區 |
| 長度 (m) | 100 | 100 | 12640 | 60 |
| 平均值 | 輝度 (cd/m ²) | | | |
| | 90 | 22.5 | 6 | 22.5 |
| 隧道模型實際量測 | | | | |
| 區域 | 境界區 | 漸變區 | 內部區 | 出口區 |
| 長度 (m) | 0.15 | 0.1 | 0.6 | 0.15 |
| 預測值 | 輝度 (cd/m ²) | | | |
| | 1.6 | 0.41 | 0.11 | 0.41 |
| 量測照度 (lux) | 24 | 19 | 20 | 19 |
| 照度轉輝度 | 1.5 | 1.2 | 1.25 | 1.2 |
| 輝度量測 (cd/m ²) | | | | |
| 10:00am | 899 | 139.425 | 21.57 | 676 |
| 12:00pm | 743 | 217 | 37.105 | 1111 |
| 2:00pm | 359.5 | 72.8 | 2.48 | 262 |



橘色科技產業 (王駿發, 2011)

實測層面

1. 可利用軟體 (Europic) 評估隧道洞口輝度，再至實際場域作比對。
2. 照明方式依燈具外型可分逆照、對稱與非對稱三類型，而光纖放光之方式屬非對稱之照明方式，可供後續設計參考。
3. 本研究對面型空間 (地下室、停車場) 已完成部分前置規劃設計。

參考文獻

1. 中華民國國家標準，隧道照明標準，2005
2. 王駿發，橘色科技的源起與發展，科學發展，466 期，2011
3. 中華民國建築學會「建築學報」第 64 期，103~118 頁，2008 年 6 月
4. 交通部運輸研究所，人因工程與隧道照明之應用，1994
5. 李文富，光電工程於生態式隧道之應用及其綠營建指標效益評估，學士專題，台北科技大學土木工程系，台北，2007
6. 李宏徹、宋治青、楊啟榮、陳可賀，雪山隧道機電工程，土木水利，第三十三卷，第三期，2006，p6-p17
7. 李宏徹，長公路隧道安全管理策略，2007
8. 李碩重，照明設計學，全華科技圖書股份有限公司，台北，1995
9. 李昱麒，應用於自然導光之分光鏡，碩士論文，國立台灣科技大學電子工程系，台北，2010
10. 林傳本，屋外照明設計與維護，台北，1997
11. 林維屏，LED 光源新式應用之研究，碩士論文，國立中央大學光電科學研究所，桃園，2005
12. 胡德欽，隧道工程，台灣科技圖書，台北，2004
13. 陳淑瑜，談優質光環境，照明基礎講座，2013
14. 陳偉安，具光學結構設計之高效率傳光管，碩士論文，國立台灣科技大學電子工程系，台北，2012
15. 陳隆建，淺談 LED 生態照明原理與技術，國立台北科技大學光電工程系，2012



綠色科技結合橘色科技

16. 張謙允、黎倩如、鄭哲璋，太陽集光器結合人工光源之室內照明應用，設計學報，第 16 卷，第 2 期，2011 年 6 月
17. 張吉佐，劉弘翔，山岳隧道工程設計與實例手冊，科技圖書股份有限公司，台北，1999
18. 許丕廉，隧道照明設計研究與性能評估探討，碩士論文，台灣科技大學電機工程系，台北，2007
19. 許德清，導光管照明燈具用於隧道內之可行性評估，工程技術，第八十四期，1994
20. 莊雅竹，垂直導光通風管於室內導光性能之研究，碩士論文，台北科技大學建築與都市設計研究所，台北，2008
21. 徐智屏，室內聚光行太陽能發電系統設計與實作，碩士論文，雲林科技大學光電工程研究所，雲林，2011
22. 劉瑞麟，追日聚光式太陽能光纖照明系統之研製，碩士論文，台北科技大學能源與冷凍空調工程研究所，2011
23. 彭彥凱，不同型式光纖與集光器搭配之效率測試，碩士論文，國立中央大學能源工程研究所，2006
24. 國際照明委員會 (CIE) 88，2004
25. 國際照明委員會 (CIE) 88，1990
26. 劉火炎，隧道照明設計及輝度計算，中興工程，1993
27. 劉書勝，照明設計，徐氏文教，台北，1980
28. 蕭傑仁，應用於室內照明之高輸出靜態式圓盤堆疊結構集光器，碩士論文，國立台灣科技大學電子工程系，台北，2012
29. 謝璋哲，非聚焦式自由取面透鏡於圓盤集光器設計，碩士論文，國立台灣科技大學電子工程系，台北，2011
30. Chen, C.H., Chen, Y.Y., Whang, J.W., "Using the Natural Light Guiding System to apply in Ecological Illumination of Traffic Tunnel," National Taiwan University of Science and Technology, 2009.
31. Chen, Y.Y., Liu, C.Y., Whang, J.W., "Static Refractive Concentrator Design for Light Collimation," Proc. SPIE, Santiago, USA, pp. 7059, 70590Q, 2008.
32. Rosemann A., Kaase H., "Lightpipe applications for daylighting systems," Solar Energy, 2004.
33. Whang, J.W., Chen, Y.Y., Cheng, C.N., Chen, L.H., "Design and Evaluation of Natural Light Guiding System in Ecological Illumination of Traffic Tunnel," 2009.
34. Whang, J.W., Yu, C.M., Chen, Y.Y., "Light Collection System Unit Design via Mathematical Modeling," Proc. SPIE, Santiago, USA, pp. 6896, 68961B, 2008.
35. Yang, S.H., Chen, Y. Y. Whang, J.W., "Using prismatic structure and brightness enhancement film to design cascaded unit of static solar concentrator in natural light guiding system," Proc. SPIE, Santiago, USA, pp. 7423, 74230J, 2009.
36. Sunportal, <http://www.thesunportal.com/>
37. Monodraught-Natural Daylight, <http://www.monodraught.com/products/>
38. Heliobus, www.heliobus.com 