

B-01

Contracts terms with Managerial Flexibility on Power Plant Projects

Guan-Yu Lin
Department of Civil Engineering,
National United University

Borliang Chen
Department of Civil and Hazard
Mitigation Engineering, National
United University.

Hue-Chiuen Shiong
Department of Civil and Hazard
Mitigation Engineering, National
United University.

Abstract

There are difference in project financial analysis in investing BOT projects and other type of projects. While investing regular projects, the investors will adjust the project scale and chose the right timing for investment according to market conditions. But, it is unchangeable on project scale and timing for investment in BOT projects due to the contract conditions. Thus, the lack of managerial flexibility could make the BOT projects become unprofitable or even become loss in operation. In case, project agent could have the managerial flexibility in operation phase, such as project scale, product types, and product quality level, and allows the project company to adjust project according to the market conditions. Those managerial flexibilities definitely improve the profitability of projects, reduce the probability of bankruptcy, and increase the projects' value.

A project finance evaluation model is used as a base model for financial analysis of the projects. This model is for calculating profitability indices for projects' financial feasibility analysis. These indices are net present value (NPV), internal rate of return (IRR), debt service coverage ratio (DSCR), times interest earned (TIE), return on asset (ROA), return on equity (ROE), self liquidated ratio (SLR), and payback period (PB). In additions, the sensitivity analysis and Monte-Carlo simulation are performed for determining the expected value and variance of NPV. Eventually, the Black-Sholes option pricing model is used to estimate the option values of BOT projects in considering the managerial flexibility. In empirical study, a power plant project is used for demonstration of analysis.

Keyword: Black-Sholes option pricing model, managerial flexibility, profitability indices.

Introduction

The Black-Scholes Option Pricing Model has revolutionized financial engineering through the use of derivatives. A derivative is a financial instrument that derives its price from an underlying asset. An option is a derivative that affords the owner the privilege to buy or sell the underlying asset at a determined price, sometime in the future. Usually, the owner of an option pays a premium (the option price) for the right to exercise (or buy/sell the underlying asset of) that option. The Black-Scholes model finds a fair price for these options, thus allowing them to be efficiently traded.

When an investor purchases an option, the investor is said to have taken a long position in that option. These positions are important, because an investor may create a portfolio where many different positions in options and their underlying assets are held, as part of a hedge, or risk-reducing strategy. It is important to note also that the payoff from options, and derivatives in general, is a zero-sum game. When an option is exercised, a transfer of wealth occurs between the investor in the long position and the investor in the short position. Because of this, two parties must enter into the contract, covering both positions.

There are two types of options, calls and puts. A call option gives the owner the right to buy an asset for a predetermined price, at an agreed upon date. A put option gives the owner the right to sell an asset at a determined price, at an agreed upon date. The price at which the owner of an option has the right to buy or sell the underlying asset is called the strike price, or exercise price of the option, and the date at which the option may be exercised is the maturity, or expiration date. If the option can be exercised only on the maturity date, then it is referred to as a European option, whereas if the option can be exercised anytime before the maturity date, then the option is called an American option. Trigeorgis (1996, 1993, 1991, 1987) identified seven types of real options which are shown as follows: Option to Defer, Time-to-Build Option, Option to Alter Operating Scale, Option to Abandon, Switch Option, Growth Option, and Multiple interacting Options.

Modeling

The Black-Scholes model finds a fair-market price for a European call option on a stock that does not pay dividends. It uses five parameters:

S_0 = the current stock price,

X = the strike price of the option,

r = the risk-free interest rate,

T = the time to expiration (in years),

σ^2 = the volatility of the stock.

The Black-Scholes model states that, if c is the unknown price of the call, then

$$c = S_0N(d_1) - Xe^{-rT}N(d_2),$$

where

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S_0}{X}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma\sqrt{T}},$$

$$d_2 = \frac{\ln\left(\frac{S_0}{X}\right) + \left(r - \frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma\sqrt{T}} = d_1 - \sigma\sqrt{T}$$

Option price may be affected by the fluctuation of stock price, S , strike price, X , the time to expiration, T , the risk-free interest rate, r , and the volatility of the stock return, σ^2 . Hence, the sensitivity analysis of option price is considered in this study, which is called Greek letter

analysis.

(1). Δ (Delta)

Δ : sensitivity of the option price change to a small change of S

S : stock price

C : option price

$$\Delta = \frac{\Delta C}{\Delta S} \quad \text{or} \quad \delta = \frac{\partial C}{\partial S}$$

In case that, the option price is derived from the Black and Sholes model, then we could obtain the following results.

$$\delta = \frac{\partial C}{\partial S} = N(d_1)$$

(2). θ (Theta)

θ is the sensitivity of the option price change to the passage of time

$$\theta = \frac{\partial C}{\partial t}, \quad \tau = T - t$$

$\theta = -\frac{\sigma S \varphi(d_1)}{2\sqrt{t}} - rke^{-r\tau} N(d_2)$ $\varphi(x)$ is density function of standard normal distribution.

$$\theta = \frac{\partial f}{\partial \tau}$$

f is the derivatives value of stock price S.

(3). Γ (Gamma)

Γ is sensitivity of the delta change to a small change of S

$$\Gamma = \frac{\partial^2 C}{\partial S^2} = \frac{\partial \delta}{\partial S}$$

We can derive the following equation by Black-Scholes model.

$$\Gamma = \frac{\varphi(d_1)}{S\sigma\sqrt{t}}$$

(4). v (Vega)

v is the sensitivity of the option price change to a small change of σ .

$$v = \frac{\partial C}{\partial \sigma} = S\sqrt{\tau}\varphi(d_1)$$

(5). ρ (Rho)

ρ is the sensitivity of the option price change to a small change of r. r is the interest rate.

We can derive the following equation by Black-Scholes model.

$$\rho = \frac{\partial C}{\partial r} = -\tau Ke^{-r\tau} N(d_2)$$

Empirical Study

A case of power plant project in Turkey (Bakatjan et al, 2003) is used as an empirical study of this paper to illustrate the calculation of the Black-Sholes model. The input parameters and results are shown as follow.

Input parameters

Input parameters of the power plant BOT project are shown as Table 1.

Table1. Input parameters for a power plant project

Parameters	Data
S	110 (Million US\$)
K	120(Million US\$)
r	0.05
T	1 year
σ	0.31
μ	0.15

Results

The analysis of real option model is shown in Table 2. Call value of the power plant project is shown in Table 3.

Table 2 Real option analysis by CRR model and BS model

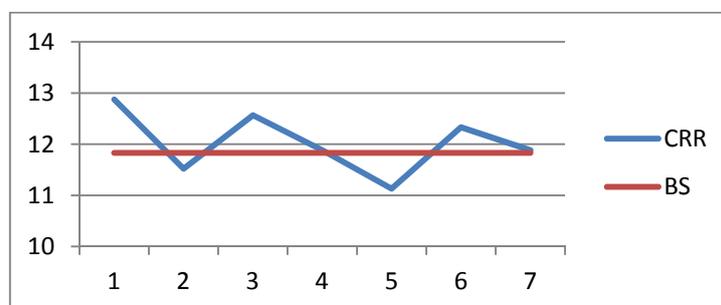
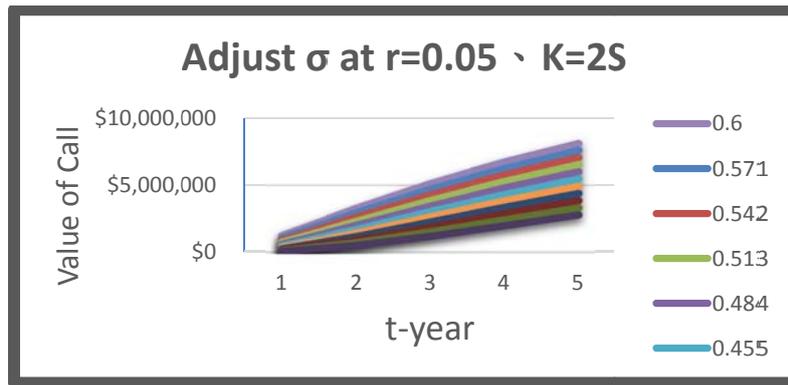
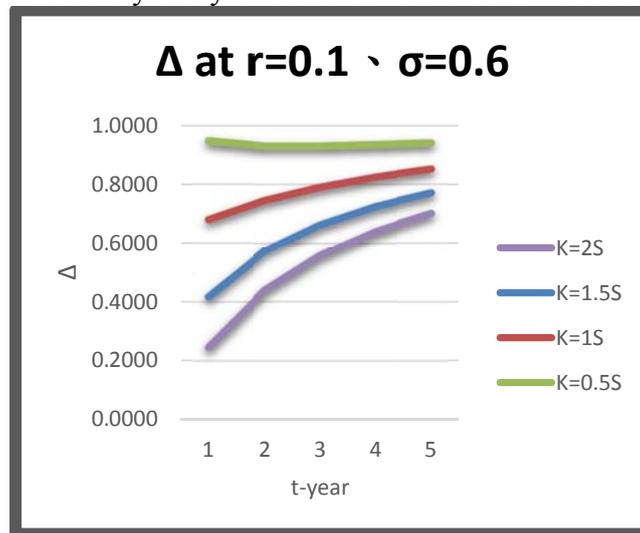


Table 3 Parameters for Black Sholes model of four scenarios



The sensitivity analysis of real option model for power plant project is shown in Table 4.

Table 4 The sensitivity analysis of Black- Sholes model for four scenarios



Conclusion

1. In this analysis, we find that there is a tendency to growth of project value in market perspective. Hence, the managerial flexibility can increase the project value.
2. In the sensitivity analysis of option price, we find that time, θ , is most critical to option price. v , ρ , Δ , Γ are shown to have less impact on option price in sequence.

References

1. A. Dias, Jr., and P. G. Ioannou, (1996), “ Company and Project Evaluation Model for Private Promoted Infrastructure Projects”, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 122(1), pp. 71-82.
2. Black, F. and Scholes, M. (1973),” The Pricing of Options and Corporate Liabilities”, Journal of Political Economy, 81(3), 637-659.
3. Duffie, D. and Pan, J. (1997), “An Overview of Value at Risk,” The Journal of Derivatives, pp.7-49.
4. Trigeorgis, L. and S. P. Mason, (1987), “Valuing Managerial Flexibility,” Midland

- Corporate Finance Journal, 5(1), 14-21.
5. Trigeorgis, L., (1991), "A Log-Transformed Binomial Numerical Analysis Method for Valuing Complex Multi-Option Investments," Journal of Financial and Quantitative Analysis, 26(3), 309-326.
 6. Trigeorgis, L., (1993), "The nature of option interactions and the valuation of investments with multiple real options," Journal of Financial and Quantitative analysis, 28(1), 1-22.
 7. Trigeorgis, L., (1996), Real Option Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation, MIT Press, Cambridge Massachusetts.
 8. Winston, W. L. (2001), "Financial Models Using Simulation and Optimization II – Investment Valuation, Options Pricing, Real Options & Product Pricing Models", Published by Palisade Corporation, Newfield, NY.
 9. Ye, Sudong and Tiong, Robert L. K. (2000), "NPV-at-risk method in infrastructure project investment evaluation", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 126, No. 3, pp 227-233.
 10. Trigeorgis, L. and S. P. Mason, (1987), "Valuing Managerial Flexibility," Midland Corporate Finance Journal, 5(1), 14-21.
 11. Trigeorgis, L., (1996), Real Option Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation, MIT Press, Cambridge Massachusetts.
 12. Sandalkhan Bakatjan, Metin Arikan, and Robert L.K. Tiong, 2003, "Optimal capital structure model for BOT power projects in Turkey", Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 129, No.1, pp. 89~97.

B-02

以營建生命週期管理探討咖啡渣灰再利用之研究

程金龍(Ching LungCheng)
品裕事業有限公司總經理

林利國(Li Guo Lin)
台北科技大學土木與防災研究所
教授

鍾佳龍(Chia LungChung)
台北科技大學土木與防災研究所
研究生

摘要

由於國內絕大多數建築係採用混凝土材料，使得水泥及砂石之用量需求極高；如今，因為國內天然資源有限，材料來源已逐漸耗竭，然混凝土材料仍是國家發展基礎建設及公共工程所不可或缺之工程材料，因此若能尋求可替代之料源，將可降低對於環境的衝擊；因此本研究思考將一般僅能當作廢料之咖啡渣於高溫燃燒後所產生之咖啡渣灰，應用於混凝土材料上，並觀察其工作性、抗壓強度、水化放熱、光學顯微鏡觀測及於受外力作用下時破壞模式量測等之巨觀及微觀變化情形，以找出最佳之添加量。

建築物生命週期管理之理念即為對生命週期成本的評價，生命週期管理可以定義為：「為了選出建築物耗用能源與使用成本最少的最佳方法，有系統的評價各種替代方案之分析方法」，即表示建築物之興建使用，不應單以初期建設成本為考量重點，而是應將規劃設計、招標發包、營造施工、營運操作、維護管理、更新修繕等費用，視為統合性成本，將其間所需要的經費與效益作整體規劃，以期能達到生命週期成本最小化的目的。本論文依據上述的理念，除說明 LCM 之基本概念外，將探討國內營建工程如何就營建生命週期管理之理念勾勒出較適用於咖啡渣灰作為添加材料再利用之來源，應用於混凝土材料之營建價值管理，從不同角度探討目前的現況，並構思以生命週期管理概念為基礎，來規劃未來國內可努力之發展與方向。

關鍵字：生命週期管理、咖啡渣灰、再利用

The Ash of Coffee Residue Application of Life Cycle Management

Abstract

With the rising of environmental awareness and the consuming of the natural resources the issue of energy reuse has been gradually emphasized by the public. Therefore, if we can find the alternative material we may be able to relieve the effect that brought by the problem. This research the coffee residue that usually is being regarded as the trash and fuel into the concrete mortar.

This research the renewal plan mechanism of the coffee residue that usually is being regarded on phases of investigation, estimation, planning and construction with life cycle management concept. We will main discussion how the construction project outlined the concept of construction management life cycle management which is more suitable for the

management of the construction value of Taiwan's local characteristics.

Keywords: Life Cycle Management, Coffee Residue Ash, Reuse

一、前言

營建工程乃應用土木技術及其他相關設施，來改造國土整治環境及防止災害發生的一種專業技能此依專業不僅與人民的生活關係密切並且影響國家的公共建設甚至是國家經濟發展的關鍵指標之一；營建工程建設涵蓋了經濟、社會、文化教育、醫療等各個層面，且營建工程建設的良窳，乃為決定國家競爭優勢的重要因素之一，但由於近年來，在市場經濟與經營環境的衝擊之下使得國內營建產業生存備受考驗，為因應全球化及數位化時代的來臨，如何將生命週期理念應用於營建與土木工程領域上，以迎接永續發展再利用時代之來臨已是刻不容緩的事情。

目前國內工程建設之主體結構大都仍採用混凝土材料，但我國近年面臨砂石枯竭之困擾；工程用的砂石需求已供不應求，且超過河川砂石的自然補充量。而隨著世界各國環保意識的提高及資源正逐步被消耗殆盡，使得資源再利用的議題逐漸受到重視，所以若能尋求有效的替代料源將可適度紓解此問題之影響。因此本研究思考將一般視為廢棄物的咖啡渣，應用於混凝土材料上若以營建生命週期管理的概念闡述其應用方式及應用策略探討[3]。

生命週期管理係 LCM 之其理念最早起源於歐洲，在管理學史上可說是既古老卻又新穎的哲學與方法，本研究主要就 LCM 中的 LCA、LCC 兩大課題著手研究與探討，所謂 LCA 乃為生命週期評估 (Life Cycle Assessment 之簡稱)，係就建築專案生命週期中對建築物本體與外在環境的評估與演算，結合地球村環境保全理念的設計手法，進行最佳化的專案規劃，除了期能藉以達到全面專案管理的品質、進度、成本安全與環境保護等目標外，更能落實政府單位或民間投資企業長期性的永續經營理念[11]。

二、文獻回顧

2.1 運用咖啡渣於混凝土之現況

由於國內絕大多數建築係採用混凝土材料，使得水泥及砂石之用量需求極高；如今，因為國內天然資源有限，材料來源已逐漸耗竭，然混凝土材料仍是國家發展基礎建設及公共工程所不可或缺之工程材料，因此若能尋求可替代之料源，將可降低對於環境的衝擊；因此本研究思考將一般僅能當作廢料之咖啡渣 (Coffee Residue) 於高溫燃燒後所產生之咖啡渣灰 (Ash of Coffee Residue)，應用於混凝土材料上，並觀察其工作性 (Workability)、抗壓強度 (Compressive Strength)、水化放熱 (Hydration Heat Transfer)、光學顯微鏡觀測 (Optical Microscope) 及於受外力作用下時破壞模式量測等之巨觀及微觀變化情形，以找出最佳之添加量[4,5]。

由於先前研究分析探討顯示隨著咖啡渣添加比例的增加，工作性及抗壓強度均會相對降低，且砂漿試體內部之孔隙亦會增多且孔洞變大導致強度與耐久度不足。因此本研究將其中影響強度之物質藉由提升溫度的方法，去除後再加入水泥砂漿中製成試體，以減少有機物質與吸水率之影響；經由其抗壓試驗結果顯示添加 600°C 15% 咖啡渣灰之試

體強度約達未添加之 70%，且 600°C 之咖啡渣灰試體強度皆高於 500°C 咖啡渣灰之試體強度；添加咖啡渣灰試體的水化放熱較未添加略低，由微觀顯示比較下水化膠體亦隨著咖啡渣灰的添加量增多有減少的趨勢[1]。

2.2 生命週期管理理念

基本上，每一個建築物從規劃設計、招標發包、營造施工、運作及維護到報廢拆除形成一個生命週期，只要在任何階段中致力於管理的改進，均為提升營建工程品質的重要課題，而生命週期管理(Life Cycle Management；簡稱為 LCM)之理念（參考圖 1），乃為從土地適當的診斷與評價、建物最適的開發與建設、設備有效率的營運與管理及收益合理的維持與保全，做一通盤性整體性考量之管理理念，若能將此理念應用在營建工程之相關產業更新計畫中，將可有助於恢復或提升營建產業之形象與競爭力、延續建築物的生命、確保建築物之資產價值、增進市容觀瞻及滿足使用者安全舒適需求等效用[11]。

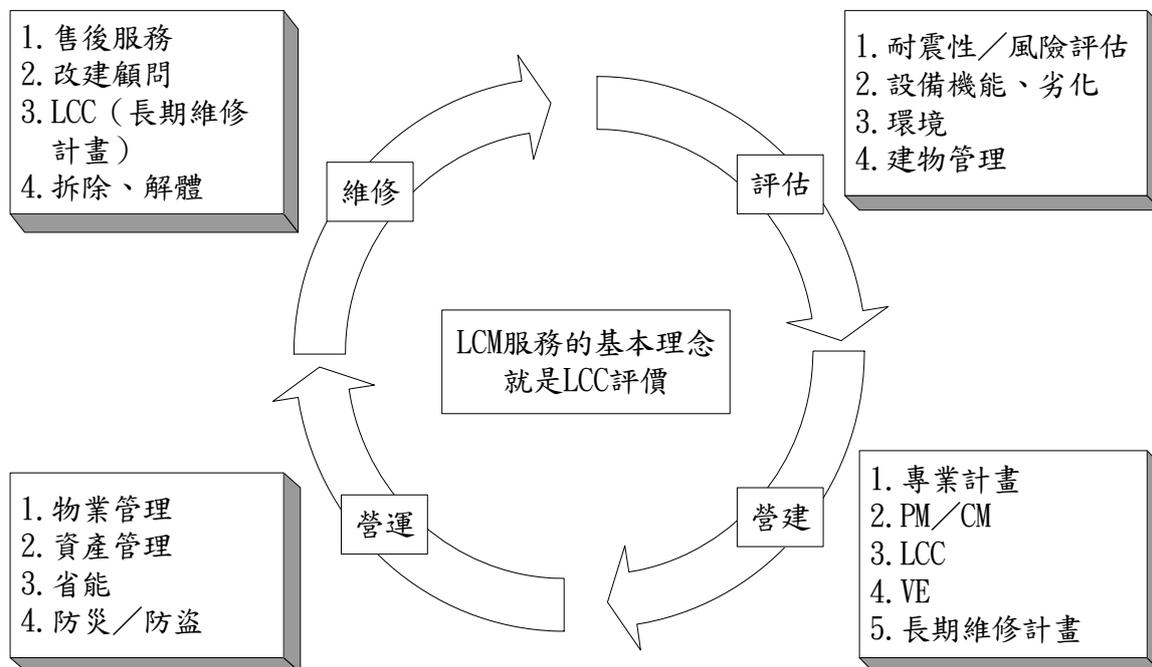


圖 1 生命週期管理的基本理念[8，9]

2.3 工程常用之混凝土種類

通常在工程上會用道之混凝土主要有以下數種[15，16]:

1. 鋼筋混凝土:在混凝土中安置鋼筋，主要用於一般房屋建築物。
2. 鋼骨混凝土:以鋼材替代鋼筋，增強抵抗外力的韌性，大多使用於高樓建築物。
3. 預力混凝土:使用預力鋼鍵，另外施加預力，並配合於預加預力前或後澆注混凝土以增加構件受力後的抵抗能力，即稱為預力混凝土;此種預力混凝土主要應用於長跨橋梁，少部分的房屋建築也有使用。
4. 輕質混凝土:乃使用較輕的天然或人造骨材製作而成的混凝土;可以用在隔熱、隔音，可降低構材的載重。

5. 重質混凝土:藉由添加重晶石、鐵磷劑，赤鐵礦，褐鐵礦，礮鐵礦及廢銅等，用於防護核子輻射，諸如醫院及核能電廠。
6. 預鑄混凝土:乃先在工廠完成灌鑄作業並養護至適當強度後，在運至工地進行安裝，此種材料之應用範圍正在推廣中。
7. 預拌混凝土:乃混凝土之拌合動作係在設備完善的工廠中依規定程序先拌合好，再以混凝土預拌車運送至工地澆築，國內土木與營建工程大多使用此種拌合方式。
8. 滾壓混凝土:乃用於大壩或大面積的版狀道路之混凝土施工作業，係使用滾壓機適度滾壓之方式使混凝土單位密度得以提高的方法。
9. 噴凝土:乃使用高壓噴射之方式，使混凝土噴出而附著所欲澆注之位置，大多使用於駁坎及邊坡維修工程。

三、生命週期評估與環境評估策略

3.1 生命週期評估簡介

生命週期評估 (LCA) 的觀念及應用，一般認為係始於 1960 年代末期、70 年代初期。國內則是於 1990 年代逐漸洞悉此一國際發展趨勢，開始 LCA 相關之概念推廣與研究發展。依據相關研究顯示國內首宗 LCA 之研究專案，可回溯至顧洋等學者於 1995 年 6 月完成之「國內保麗龍使用及廢棄處置之環境影響及相關管制對策之討論」[10]。而第一次有關 LCA 之推廣訓練研習會，則為在環保署之經費贊助下，由工業技術研究院化學工程研究所於 1994 年 5 月間舉辦之「生命週期分析研討會」；1995 年 11 月相關單位更配合召開「1995 工業減廢國際研討會 International Conference on Industrial Waste Minimization」首度邀請國際專家學者進行專題演講[12]。

生命週期評估的觀念及應用，在一開始時大多是著重於能源分析、資源需求及污染排放估算等課題。如 1969 年，可口可樂公司 (Coca Cola Co.) 便以飲料容器為對象，委託 Midwest Research Institute (簡稱為 MRI) 公司進行比較各類容器之資源耗用與環境污染排放之研究。幾乎在同時，歐洲亦開始發展類似之分析工具並稱之為 Ecobalance。1972 年，英國學者 Ian Boustead 則以計算飲料容器於生產時需耗用的能量為基礎，逐步發展出各類材料生產過程之能源耗用狀況，並於 1979 年彙整發表「工業耗能分析手冊」。直到 1990 年代，生命週期評估遂逐漸應用於工業減廢及環境管理之策略評估。1993 年國際標準組織 (Organization for International Standardization; 簡稱為 ISO) 成立技術委員會 TC207 專門負責訂定及推動國際環境管理標準，其中 14040 系列即為生命週期評估之相關規範[1]。

根據「CNS 14040 環境管理—生命週期評估—原則與架構」之描述：生命週期評估係研究產品從原料取得、生產、使用及處置的整個生命過程中的環境考量面與潛在衝擊[5]。其評估結果對廠商而言，可作為產品開發之決策依據，以符合消費者之綠色消費取向；而政府決策單位研究之目的，則在於制定產品使用法規，蒐集環境資料，甚而作為重大經建或環保決策時之參考依據。依據 ISO 14040 之規範，生命週期評估可分為：目

標與範疇界定 (Goal and Scope Definition)、生命週期盤查分析 (Life Cycle Inventory Analysis; 簡稱為 LCI)、生命週期衝擊評估 (Life Cycle Impact Assessment; 簡稱為 LCIA) 及生命週期闡釋 (Life Cycle Interpretation) 等階段。目標與範圍界定之主旨乃在於明確定義評估作業之目的與範圍；生命週期盤查分析則包括資料蒐集及相關之計算程序，並以量化整體生產系統之各類投入與產出為分析目標。生命週期衝擊評估階段則利用盤查分析結果，以評估量化產品於生命週期造成環境衝擊之程度。生命週期闡釋階段則是整合盤查分析及衝擊評估等結果，以彙整報告，作為內部生產改善參考或進行直接應用之依據。上述步驟係如圖 3 所示，以下則分別說明生命週期評估之四大步驟。

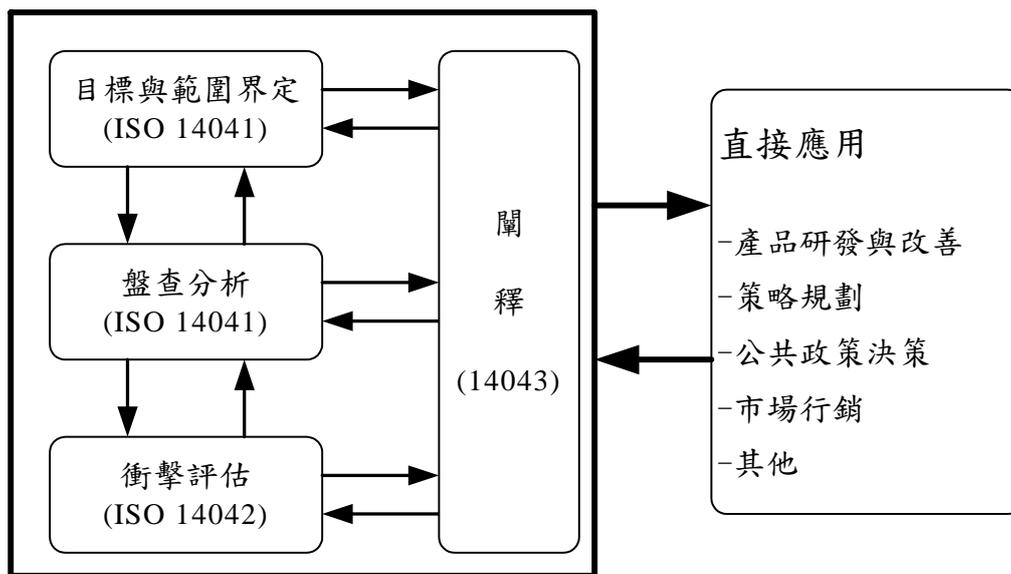


圖 2 生命週期評估的架構與應用方向 (CNS 14040) [8、12]

3.2 生命週期環境評估

生命週期評估 (LCA) 係就建築專案生命週期中對建築物本體與外在環境的評估與演算，結合地球村環境保全理念的設計手法，進行最佳化的專案規劃[3]。CO₂ 的發生量在生命週期循環的環境管理應用上，是很重要的評估指標，但並非為單一影響因素，且 CO₂ 發生量亦可思考為評估營運維護成本與廢棄物產生量指標的對等觀念，例如 CO₂ 發生量若下降 20%，即約可視同省下 20% 的營運維護費用的概念，也就是符合綠建築及地球村之永續建築設計理念。

(一) LCM 設計在環境管理、永續發展的應用

永續的都市文化 (Sustainable Urban Community; 簡稱為 SCU) 理念架構如圖 4 所示，係預期透過相關計畫案與整體預測，並融入文化、環境、經濟、安全與社會評價，再利用回饋修正之方式，以決定永續都市文化之執行方案。

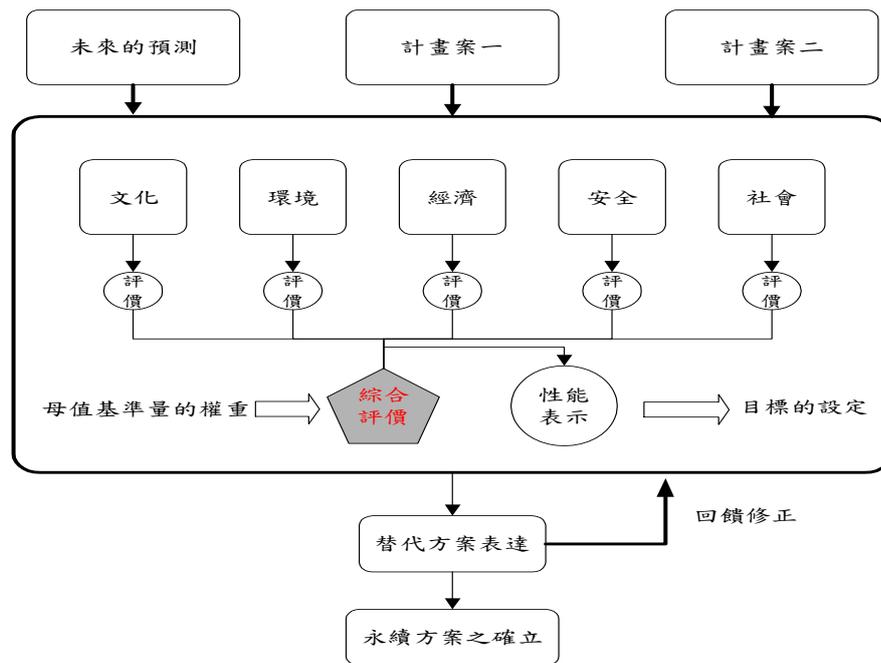


圖 3 永續的都市文化架構圖[8]

四、營建工程使用咖啡渣灰再利用之最適機制研擬

4.1 咖啡渣之處理方式與再利用

目前台灣地區咖啡市場漸趨成熟，國人飲用咖啡的風氣越來越盛，所以不論是進口或是本土栽種的咖啡豆都受到消費者的歡迎，然而隨之而來的問題在於咖啡沖泡完之後所殘餘之咖啡渣的處置。若是能將咖啡渣經由研究，轉變成為較高經濟效益的產物，將不再只是以低價位轉賣給其他業者或是直接當作廢棄物處理掩埋，則對於減低環境的負荷也是一項良好的措施。

現在台灣所販售的飲料種類繁瑣，很多食品公司所生產的飲料都含有咖啡的成分，故咖啡豆的需求量極為驚人；自然而然的，在此種情形下，國內咖啡渣的生成量每年更是高達數十公噸，如此龐大數量的咖啡渣無法馬上進入焚化爐或是掩埋場進行處理，只能暫時堆放在廠區，靜待風乾之後裝袋做下一步處理。

咖啡渣是屬於有機的廢棄物，本身就是屬於無害的廢棄物，若是採用掩埋的方法，在多年之後也是會形成有機肥料溶於土壤之中，但因為土地有限，而且若土地的有機量負荷過大，將會造成土壤與地下水汙染之環境問題。由於咖啡渣有殘餘功能多，所以大都會進行再利用。以往的做法都是選擇直接焚化或是掩埋的方法來處理咖啡渣的儲存量；後來因為發現咖啡渣尚其他的用處，例如新鮮咖啡渣有除臭之效果，所以也有人將咖啡渣當作除臭劑的一種或者將咖啡渣放入煙灰缸中，不僅可除去煙臭味也容易熄滅煙蒂。此外，咖啡渣強力去污能力，因為咖啡渣含有活性碳可以吸附很多微小的污垢。除此之外，使用咖啡渣按摩皮膚，具有緊膚和光滑皮膚的功能，也可以達到緊膚減肥的效用。近年來也有許多養殖畜牧業、漁業或是園藝景觀的業者會向食品公司購買沖泡過後的咖啡渣，以特定的調配比例，混合飼料餵食牲畜或是栽種園藝景觀樹木。這樣的作法可以

有效的減低咖啡渣的廢棄問題，也可以替食品公司回收少數的成本。

4.2 咖啡渣基本特性之建立

咖啡渣(coffee residue)源自於咖啡豆經過研磨沖泡後所剩餘之殘渣，由於咖啡渣內部由多種元素與化合物組成之有機物質，本節主要針對咖啡渣的基本特性加以探討。本研究初步係試驗所使用之咖啡渣乃取自國內一般咖啡連鎖店之廢棄咖啡渣作為研究樣品，在取得新鮮咖啡渣後烘乾 24 小時再以 600°C 高溫恆燒 3 小時所得本研究之試驗樣品，並針對該樣品做基本物質物理特性分析結果：

- 1.物理特性分析，包括:比重試驗、吸水率試驗。
- 2.化學特性分析。包括:元素分析、DTA 分析、X-Ray 分析。
- 3.微觀結構的觀察，利用光學顯微鏡觀測咖啡渣灰的孔洞分佈情形。

4.3 咖啡渣物理特性分析

由於目前國內對咖啡渣材料之研究文獻較少，故本研究將對咖啡渣及咖啡渣灰做基本物理特性分析，其項目為 1.比重試驗 2.吸水率試驗兩試驗項目。實際量測果如表 1 所示。

表 1 咖啡渣及咖啡渣灰之物理特性分析

項目 \ 材料	咖啡渣	咖啡渣灰
比重	0.88	0.75
吸水率(%)	78%	15%

4.4 咖啡渣再利用之最適時機

由於水泥之燒製溫度達 1200°C 至 1500°C 左右，而咖啡渣灰僅需 600°C，由於每製造一公噸之水泥約須耗八百萬焦耳之熱能，若能以 600°C 咖啡渣灰來取代，其燒灰溫度低於水泥燃燒溫度的一半，故每公噸將可省約四百萬焦耳的製造熱能。同時若能在水泥製燒所需約 1500°C 的高溫過程中，加以導引回收，而以其餘熱來燒製 600°C 之咖啡渣灰，則可達到雙重節約能源的效果，這對資源日益枯竭的國內而言，是可行的節能措施。使用咖啡渣再利用應用於營建產業營運經過某一特定時間後，收益遞減至負數，在特定點之前，當整個資產總收益大於支出費用，其淨收益為正數的這段時間，稱為「建築的最適壽命」，而此一特定點的尋求正是建築物更新時機的決策點；因此，根據此理念之服務性能指標趨勢與維護管理費用曲線，可繪製出如圖 4 之更新最適時機關係圖。

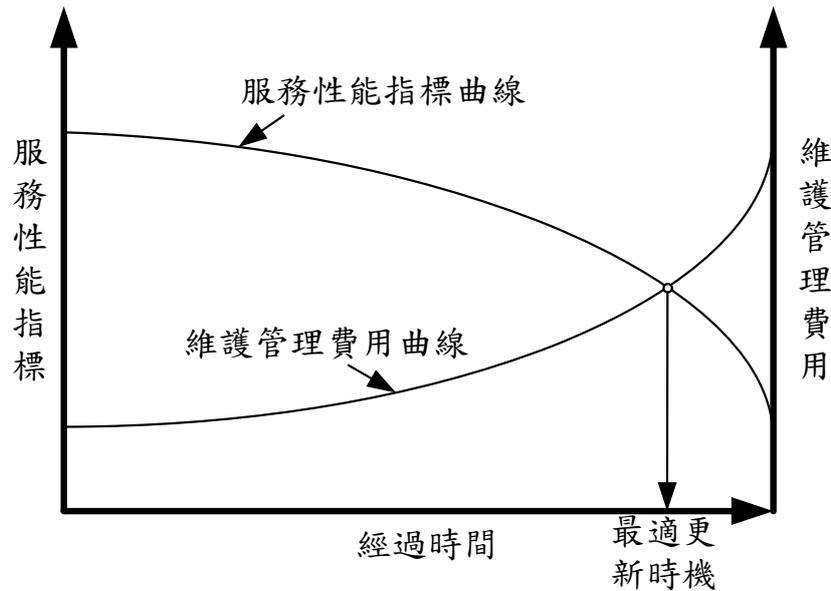


圖 4 更新最適時機關係圖[11]

五、結論與討論

由於咖啡渣灰是由沖泡後的咖啡廢渣再生利用而成，以目前國內每年約有 12400 公噸之咖啡渣需處理，若能加以收集而燒製成咖啡渣灰，如以平均 91% 的燒失率來計算，則每年約可製成 1116 公噸之咖啡渣灰，若以 2008 北部袋裝 50KG 水泥之價格 171.5 元/包來計算，則有相當於每年約有 382.8 萬的水泥價值，因此可謂其有節能減廢及知識經濟的雙重價值。也是廢物再生利用的最佳示範。

生命週期管理 (LCM) 之科學理念，正是從營建材料適當的診斷評價、營建材料的研發、到有效率的營運管理及合理收益的維持，均能統籌做通盤性考量，得以完善的整體性管理規劃。若能將前述理念應用在國內營建工程建築物更新計畫之現況，無論是營建材料選擇採購，或是於規劃設計、興建施工階段，抑或是使用營建材料導入工程階段，都將有助於恢復或提升公共建築物之機能，以延續地球永續經營，同時確保其附屬經濟價值需求。

本論文僅對咖啡廢渣再生利用導入應用生命週期管理之理念在營建工程做為作初步可行性探討，除了利用最是更新時機考慮避免過度的資源與成本的浪費外，在實際案例分析上，由於其評估過程之複雜性與需要大量之資料處理，故國外目前生命週期衝擊評估階段大多以電腦分析軟體作為輔助工具，來進行資料之儲存與計算，然而由於此等分析需要諸多具本土性特性影響因子之輸入，故無法直接完全套用國外軟體之參數；因此未來對於咖啡渣灰添加後砂漿試體的耐久性試驗，例如乾濕循環、抗蝕與抗凍等試驗以及建議未來增加卜作嵐活性指數等試驗，可再做進一步分析。

參考文獻

1. Stark, J. (2015). Product lifecycle management. In *Product Lifecycle Management* (1), 1-29. Springer International Publishing.
2. Atkinson, R. (1999). Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*, 17(6), 337-342.
3. 余思儀，(2008)。咖啡渣在混凝土材料再利用之可行性研究，台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
4. 李訓聿，(2014)。咖啡渣運用於園藝造景材料之可行性研究，台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
5. 許益書，(2009)。咖啡渣灰在混凝土材料之再利用探討，台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
6. 林紋君，(2009)。以生命週期成本觀點探討台灣既有建築物改善效率模型之研究-以室內健康因子為例，成功大學建築學系碩士論文。
7. 魏嘉雄，(1993)。建築物更新計畫之生命週期管理探討-以國際觀光旅館為例，台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
8. 張智強，(2004)。暑期研習心得與成果報告書，國科會博士生國外研習計劃。
9. 顧洋，(1994)。生命週期分析應用及發展，國科會環境發展委員會研究主題規劃永續發展策略研討會，行政院國家科學委員會，1-13 頁。
10. 李育明，(1998)。我國生命週期評估研究概況彙整，工業減廢暨永續發展研討會。
11. 張智強、林利國、程金龍，(2004)。營建生命週期管理之探討，營建創新科技研討會。
12. 楊詩弘，(2004)。Preliminary Research on the Energy Consumption Evaluation Method of Detached House Production Processes，日本建築學會論文。
13. 城處求行，(2004)。社會資本的維持管理現狀與今後的的方向，土壤基礎。
14. 環境配慮設計シート説明会資料，建築物総合環境性能評価システム（C A S B E E）の概要，2003 年。
15. 黃兆龍，(1989)。高性能混凝土設計及應用，國立台北科技大學。
16. 黃兆龍，(2012)。新編混凝土材料品質控制試驗，詹氏書局。
17. 黃國棟，(2012)。焙炒條件對咖啡豆香氣形成影響之研究，屏東科技大學碩士論文。
18. 洪蘊華，(2005)。物理程序對咖啡殘渣熱解特性之初探，輔英科技大學碩士論文。
19. 行政院環境保護署，(2007)。 <http://www.epa.gov.tw/>。
20. 台灣咖啡協會，(2007)。 <http://www.taiwancoffee.org/info.asp>。
21. 中華民國經濟部，(2007)。 <http://www.moea.gov.tw/>。

B-03

綠建築屋頂構造隔熱性能實證之研究

曾毅振 *黃國倉 陳麒任 姚志廷 張陸滿
臺灣大學土木工程 臺灣大學生物環 內政部建築研 內政部建築研 臺灣大學土木工程
學系 境系統工程學系 究所 究所 學系

摘要

鑑於國內許多既有建築屋頂隔熱性能不佳，太陽輻射熱將直接影響建築物室內之使用者對溫度的熱不舒適，且屋頂樓版之隔熱性能對位於頂層之室內熱得影響甚鉅，係由於水平面之日射輻射比垂直牆面來得多。我國建築節能設計規範以構造之熱傳透率(U值)作為評估屋頂隔熱性能之指標，雖屋頂之隔熱性能要求更甚於立面外牆，然而，U值僅能反應建築之熱傳透，單一的U值指標無法評估壁體或屋頂表面之熱反射、構造熱蓄熱等效果，故急需屋頂隔熱之效益評估方法，作為屋頂隔熱之改善依據。

本研究針對國內常見之三種屋頂隔熱工法，進行同步實測，針對室內熱不舒適之改善效益進行比對實驗，探究國內常見屋頂隔熱工法與不同材料間在隔熱、反映在室內熱不舒適的差異，提出並分析實測的量化數據，印證各式屋頂隔熱策略效果，期能成為國內相關法令規範在屋頂隔熱改善方式之實證分析依據，進而協助國內建立最適合臺灣熱濕氣候區之量化數據，並作為業界進行屋頂隔熱策略選擇之參考。

關鍵詞：全尺度實驗屋、屋頂隔熱技術、室內熱舒適

An in-situ study on thermal performance of green building roof construction

Abstract

The thermal insulation of a roof slab is of crucial influence on indoor heat gain because the horizontal solar radiation is relatively larger than the vertical wall. The solar heat gain will eventually contribute to the cooling load, hence increasing the cooling energy. The coefficient of conductivity (U-value) is an index used for the insulation performance of building roof compliance in Taiwan. However, solely U-value is incapable of evaluating some advanced roof insulation constructions. To synthesis assessing the indoor thermal comfort improving capability, it is necessary to simultaneously conduct experiments among various roof constructions.

Three full-scale experimental chambers located at Tainan, south Taiwan, were used for in-situ experiments of three different types of roof construction including thin-layered extensive green roof, PS insulated roof and traditional concrete tile roof. The experiment was performed in hot season to simultaneously investigate the indoor thermal comfort. The purpose of this study is hope to quantify the above benefits in the context of local climate. The results of the study could be useful and applicable for construction industries.

Keywords : Full-scale experiment chamber, Roof insulation technique, Indoor thermal comfort

一、前言

屋頂樓版之隔熱性能對位於頂層之室內熱得影響甚鉅，係由於水平面之日射輻射比垂直牆面來得多，日射熱之取得最終將反應於空調之耗能量。我國之建築節能設計規範以構造之熱傳透率(U值)作為評估屋頂隔熱性能之指標，雖屋頂之隔熱性能要求更甚於立面外牆，然而，U值僅能反應建築之熱傳透，單一的U值指標無法評估壁體或屋頂表面之熱反射、構造熱蓄熱以及雙層屋頂通風等效果。

今日業界上常見之建築隔熱工法、材料眾多，然而其隔熱之原理亦各異，無法僅以U值來評估之，有必要進行各工法間對室內實際之熱不舒適程度的影響效果比較，以獲得整體性之評估。過去常以電腦動態模擬之方式進行分析，在實證研究上之資料較為缺乏。因此，本研究擬以內政部建築研究所於台南成大歸仁校區所屬之實驗群用地，應用新建置之全尺度實驗屋，同步探討常見之屋頂隔熱工法、材料間對室內溫度之影響，以及對室內使用者熱不舒適之影響差異，期能建立符合臺灣熱濕氣候區本土化之量化數據，以為業界進行屋頂隔熱策略選擇之參考。

本研究除了探討構造熱傳透率對室內溫度之影響外，另探究各種屋頂隔熱工法、材料間對室內熱不舒適實測的量化數據，印證各式屋頂隔熱策略之可能效果，使得過去難以量化之特殊屋頂隔熱技術得以評估，進而提出合乎法令規範之屋頂隔熱技術改善建議，期建立符合臺灣熱濕氣候區本土化之量化數據，以為業界進行屋頂隔熱策略選擇之參考。

二、研究內容

2.1 研究構想

本研究利用內政部建築研究所位於台南成大歸仁校區所屬之實驗群用地，所新建置之全尺度實驗屋，針對三種國內常見之屋頂隔熱工法，包括薄層屋頂綠化、聚合乙烯板(或稱高密度保利龍板、PS板)隔熱屋頂，以及台灣常見之傳統五腳隔熱磚屋頂(對照組)等三種不同屋頂隔熱策略，分別施作於三個同規模與座向之全尺度實驗屋、進行

同步實測，進行室內及樓板表面溫度實測，室內熱不舒適改善效益之比對實驗，包括：室內空氣溫濕度及屋頂下表面溫度等物理量之變化，最後提出較佳之屋頂隔熱方案，以為業界參考。

鑒於同時間之同步實驗可避免因實驗組數量不足而需分批實驗，或於各組實驗期間、氣候上之不連續情況而產生之誤差。同步實驗之結果將更為精確，並可將實驗之效果與差異完全歸結於所實驗之屋頂外殼變因。

2.2 研究理論與方法

本研究同時考量屋頂構造的隔熱與蓄熱作用在穩態傳熱的情況下，僅用熱阻這項參數便可以詳盡的描述牆體的傳熱特性。然而在實際情況中，牆體的傳熱現象是複雜的不穩定傳熱過程。屋頂的隔熱能力是指阻止或減緩熱量通過屋頂樓版的能力。屋頂構造或材料的隔熱能力是以熱阻R值(單位為 m^2K/W)來衡量測量。R值為熱傳導率(U值)的倒數，與厚度(L)和材料的傳導係數(k)有關。而屋頂構造的蓄熱能力通常慣稱為熱質量，它對通過屋頂的熱量具延時與削弱作用。中國的建築節能標準中所使用的熱惰性指標(D值)即是其中一種描述熱質量的指標。

本研究使用之全尺度實驗屋位於國內臺南市歸仁區內政部性能實驗群基地內。除一個實驗屋作為儀器設備中央監控室外，共以三組規模大小、外殼構造性能、面向方位皆一致實驗屋，可同時供三組實驗同步進行實測。三座實驗屋為相連並排配置開口部開窗面面向西方，如圖 2-2所示。三間實驗屋為20呎貨櫃改裝，長5.89m、寬2.35m、高2.38m開門於東側，西側全為一大面積玻璃其餘北向與南向立面皆無開窗。其外牆構造現況皆為2mm鐵板內加2.3cm的PE隔熱層。以下說明為了進行相異各式屋頂隔熱技術之實測實驗，必須將既有三組實驗屋進行改裝工程以符實驗所需。

實驗上為了類比真實之RC樓地板，需事先將屋頂改裝為RC構造，以確保其熱性能與真實樓板相當。本研究擬於每一實驗屋屋頂面首先鋪設一層木心板，並於上方澆置混凝土之方式改裝之。此外，原實驗屋於西側面是一大面積之玻璃開窗，未避免日射輻射熱大幅影響室內之熱取得，因此擬將西側之玻璃外側封以5公分厚之保利龍板阻絕開口部之熱傳透。

各實驗屋改裝後之屋頂構造熱傳透率(U值)與代表構造蓄熱之熱惰性指數(D值)整理如下表 2-1所示。

表 2-1 各式屋頂之熱性能

屋頂構造	構造熱傳透率 $U(W/m^2K)$
薄層綠化屋頂(15cm 覆土)	0.80
PS 版隔熱屋頂	0.77
五腳磚屋頂	0.80

(資料來源：本研究整理)

2.3 實驗配置與測點規劃

在實驗之進行將選取夏季連續數日晴朗，日射量充足之日期為施測日期且連續為期至少三日之實測，所有儀器之資料記錄間隔以每2分鐘為一筆進行記錄。為進行對室內熱不舒適影響之實驗，所需測得之物理量包括屋頂上下表面之表面溫度、屋頂下表面之熱流量、室內空氣溫度、室內黑球溫度。此外為探討屋頂隔熱之性能，本研究擬實測每一實驗屋室內側之屋頂下表面溫度與熱流量，以解釋進入室內熱流之多寡以及提供屋頂下表面溫度，再輔以地板面表面溫度數據以進行輻射不對稱分析。表面溫度以熱電耦線(K-type或T-type)感測而熱流量則以薄型熱流計(HeatFlux)貼附於屋頂下進行量測。屋頂熱流量之分析將區分日間與夜間探討有無日射情況下屋頂之隔熱效益。以五腳磚屋頂為例，測點之分佈示意圖如圖2-1所示。

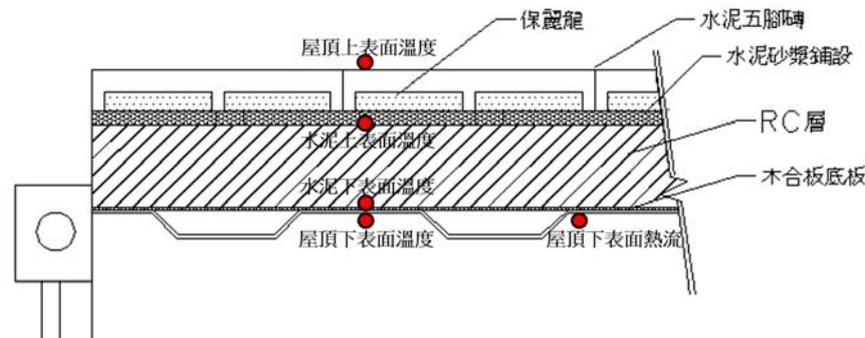


圖 2-1 屋頂隔熱量測之測點分佈示意圖

三、結論

本研究之實驗屋屋頂隔熱改造於105年7月底至8月初進行，並於8月13日起完成所有測點之佈點開始實測。綠屋頂澆灌以自動滴灌之方式以使土壤含水達飽和為原則。在實測結果之呈現上，屋頂隔熱性能與室內熱舒適改善之效益二方面探討，分述如下：

3.1 研究發現

本研究所定義之時滯係為屋頂下表面最高溫發生時刻與最高外氣溫度發生時刻之

時間差。

1. 隔熱性能

(1) 如圖3-1顯示，有空調期間，各組室內側屋頂下表面溫度之歷線圖，實驗結果呈現，隔熱效益依次為：薄層屋頂綠化、PS 版隔熱屋頂與五腳磚隔熱屋頂。

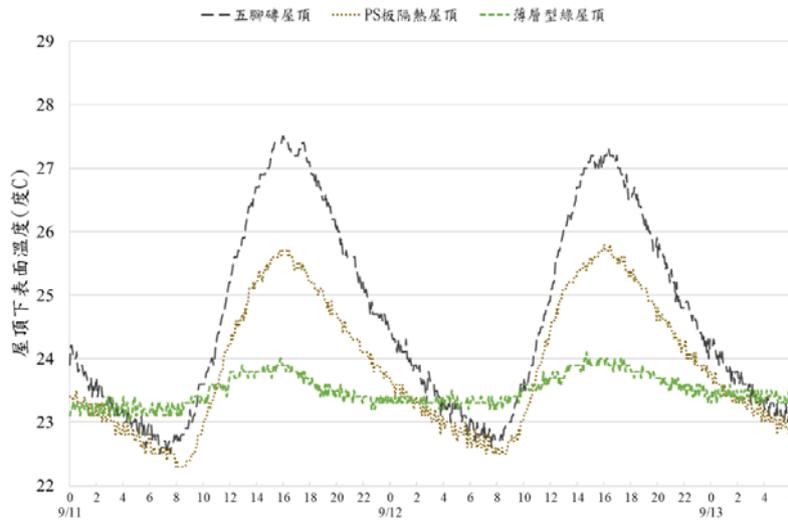


圖3-1 室內屋頂下表面溫度變化

(2) 如單就混凝土樓板上(外)表面之溫度變化觀之，如圖3-2所呈現的是8月31日至9月2日之量測結果。值得注意的是薄層屋頂綠化構造，由於混凝土上表面有一蓄排水層且又有土壤介質覆蓋其上，加上研判蓄排水層內有多餘之水體蓄積其內，高比熱之水體與覆土之雙重影響下，導致整日下來混凝土樓板本身之上表面溫度幾乎維持在約上下1°C之變動範圍。

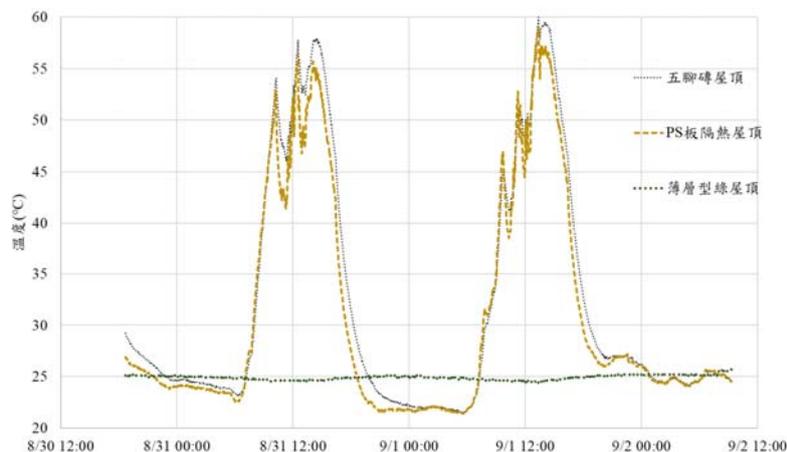


圖3-2 混凝土樓板上(外)表面溫度變化(8/31-9/1)

2. 室內熱舒適效益

(1) 在無室內空調時之室內熱舒適之比較上，105年10月6日至10月7日連續二日呈現如圖3-3、圖3-4，顯示有屋頂綠化者，其 MRT 亦較其他構造為低，而五腳磚隔熱屋頂與 PS 板隔熱屋頂之 MRT 較高，惟三種屋頂隔熱構造之 MRT 縱使在日間最熱之時段其 MRT 差異皆約在1.5度以內，顯示在 U 值約0.8左右各案例皆有一定之室內

熱舒適水準，且以有屋頂綠化者表現最佳。

(2)然而，不論是日間或夜間，薄層綠化屋頂在對室內空氣溫度或平均輻射溫度之控制上，皆較傳統之五腳磚隔熱屋頂與 PS 板隔熱屋頂表現優良。

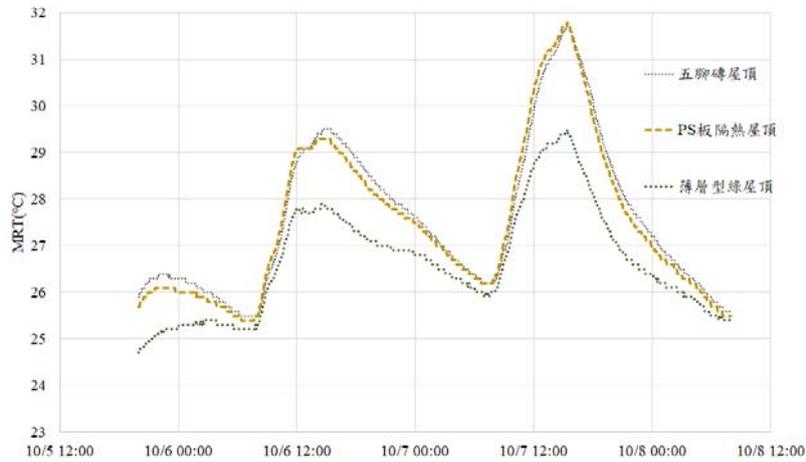


圖3-3 室內平均輻射溫度(MRT)變化

(資料來源：本研究整理)

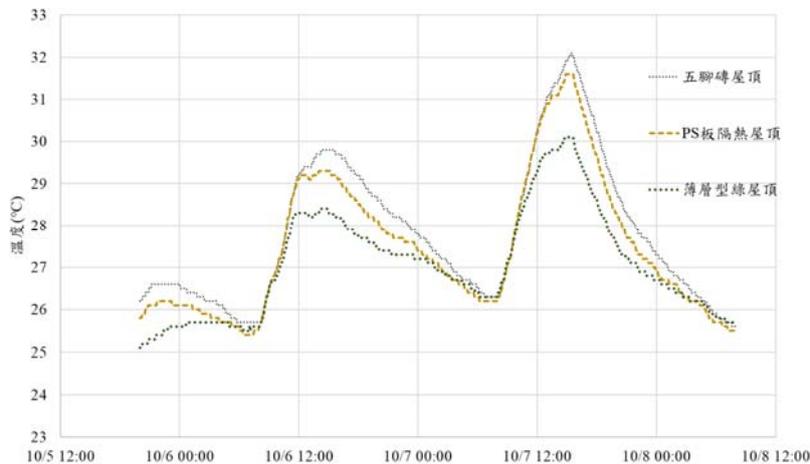


圖3-4 室內空氣溫度變化

(資料來源：本研究整理)

3.2 結論重點

1. 隔熱效果：屋頂綠化組於日間具有良好的隔熱效果，但在夜間由於其日間蓄熱量亦高之故，使得夜間散熱不易，導致屋頂下表面溫度亦較其他組別稍高。
2. 室內熱舒適之效益：不論是日間或夜間，薄層綠化屋頂在對室內空氣溫度或平均輻射溫度之控制上，皆較傳統之五腳磚隔熱屋頂與 PS 板隔熱屋頂表現來得優良。尤其綠屋頂在日間最具室內熱舒適改善效果，惟因其蓄熱能力，在夜間反呈現較高之室溫，但尚在舒適範圍內。
3. 另外，在綠屋頂之工法上，由於覆土層具較大荷重，尚需進一步考量與評估建築結構

體之負載是否足夠。此外，就綠建築之生態精神而言，屋頂綠化施作時應以種植灌木或小喬木，以利創造生物之棲地，始有生態上之效益，一般薄層綠屋頂在實務上為符合效益需求，在栽種植栽之種類選擇受限較多，較難具有生態上之效益。

參考文獻

- 1..Akbari, H., R. Levinson and L. Rainer (2005). "Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings." *Energy and Buildings* 37(10): 1007-1016.
2. Yew, M. C., N. H. Ramli Sulong, W. T. Chong, S. C. Poh, B. C. Ang and K. H. Tan (2013). "Integration of thermal insulation coating and moving-air-cavity in a cool roof system for attic temperature reduction." *Energy Conversion and Management* 75: 241-248.
- 3.Zingre, K. T., M. P. Wan, S. K. Wong, W. B. T. Toh and I. Y. L. Lee (2015). "Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate." *Energy* 82: 813-826.
- 4.王松永, 陳昶源 and 林振榮 (2000). "木質構造建築複合壁體及屋頂之隔熱效應." *林產工業* 19(2): 195-207.
- 5.何明錦 and 黃國倉 (2013). 臺灣建築能源模擬解析用逐時標準氣象資料 TMY3之建置與研究. 台北, 內政部建築研究所.
- 6.余文元 (2013). 室內植栽牆對室內溫熱環境及空調節能效益之研究. 碩士, 國立臺灣大學碩士論文.
- 7.周鼎金 and 邱繼哲 (2007). "建築物雙層通風屋頂構造隔熱性能之研究." *建築學報* 59: 79-92.
- 8.林怡君 (2012). 永續型容器薄層屋頂綠化之研究, 成功大學博士論文.
- 9.洪照坤 (2012). "隔熱塗料應用於建築物節能改善之研究." 國立彰化師範大學碩士論文.
- 10.張采依 (2012). "薄層屋頂綠化植物選擇與應用之研究." 國立臺灣大學碩士論文.
- 11.游立偉 (2004). "建築物雙層通風屋頂之隔熱性能研究—以平屋頂構造為例." 國立臺北科技大學碩士論文.
- 12.黃國倉 (2010). 植草屋頂熱性能與對綠建築日常節能指標計算修正之探討, 國家科學委員會期末報告.
- 13.楊冠雄, 李訓谷, 蘇煌文 and 戴奇甫 (2011). "冷屋頂設計於我國氣候條件下之建築節能應用分析與驗證.", 內政部建築研究所.
- 14.楊國祥 (2013). "屋頂隔熱磚隔熱效能之研究.", 中國科技大學碩士論文.
- 15.葉仲哲 (2014). "屋頂板雙層組合之隔熱效能研究.", 國立高雄第一科技大學碩士論文.
- 16.廖志中 and 王松永 (2002). "Thermal Insulation of Interior Wood-based Composite Wall in the Reinforced Concrete House." *林產工業* 21(3): 167-179.
- 17.蘇煌文 (2012). 冷屋頂於建築物之節能設計應用分析, 國立中山大學碩士論文。

B-04

逃生口分流疏散之探討

*邱勇標(Yung-Piao Chiu)
中華大學科技管理博士生

蕭炎泉(Yan-Chyuan Shiau)
中華大學營建管理學系教授

摘要

建築物災害發生人群疏散時，常會在逃生口發生擁擠的現象。本研究以Unity軟體模擬在逃生口放置分流物，以不同的門寬、分流物寬度、疏散人數，探討這些因素對疏散時間的影響。本研究發現在出口前方放置分流物可以減少避難時間，尤其是門寬與障礙物的寬度相近時，為最有效，可以減少約34%的時間，但當人數達60人以上，出口在120公分以下時，雖然放置分流物，但是在門口依然會堵塞。

關鍵詞：Unity、EXODUS、疏散模擬、分流物、踩踏事故

Investigating Crowd-Diversion-Based Evacuation at Emergency Exits

Abstract

When building occupants evacuate during disasters, they tend to crowd at the exit(s). This study employed the Unity software to simulate evacuation scenarios wherein flow diverters were installed in front of the exit. The effects of different door widths, flow diverter widths, and numbers of evacuating occupants on the evacuation time were investigated. The results revealed that evacuation time can be effectively reduced by installing a flow diverter directly in front of the exit. The optimal effect was observed when the width of the obstacle was similar to that of the exit door; this reduced the evacuation time by 25%. When more than 60 occupants were evacuating from an exit less than 120 cm wide, congestion occurred regardless of whether a flow diverter was installed.

Keywords: Unity, EXODUS, Evacuation Simulation, Flow Diverter, Stampede

一、緒論

當建築物內災難發生時，人群會開始往出口方向疏散，為了讓使用者能順利逃離現場或進入避難層，在建築物在設計初期，便會作依據建築技術規則建築設計施工編作逃生步行距離計算。目前建築物量體愈來愈龐大，機能也趨向複雜，為了確保建築物內部人員能安全逃離災難現場，我國現行的避難安全驗證方式，除了作法規基準計算外，也採用內政部建築研究所出版之「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」[1]，所提出的驗證方法，作性能設計驗證。不論是採用條列式設計法規或者性能式設計法規，均無法滿足日實際的需求，例如大巨蛋的逃生計算。所以建築主管機關也開始採用更專業的

驗證方法，或已經被政府或一般業界普遍認可之套裝火災模擬軟體或避難分析軟體進行驗證。如：Exodus、Pathfinder等，來預測避難人流。但是這些軟體在計算時，會因為演算法及參數設定不同，而有不同的結果產生。

1.1 踩踏事故

2010年11月22日，在柬埔寨首都金邊附近的鑽石島鑽石橋發生金邊踩踏事故[2]，人們在鑽石島慶祝完一年一度的送水節之後，由於連接金邊市區和鑽石島的狹窄橋樑出現晃動引發群眾恐慌，導致至少347人死亡，另有至少395人受傷；2014年12月31日23時35分，中國上海市黃浦區外灘陳毅廣場台階處發生的踩踏事故，共造成36人死亡，49人受傷[3]。最有名的是沙烏地阿拉伯每年會有大批伊斯蘭信徒，聚集在麥加附近的米納沙漠平原舉行「射石驅鬼」宗教活動時，因為聚集的人數眾多(常超過數百萬人)，非常容易發生踩踏事故，而在最近三十多年裡，朝覲參加的過程當中已發生11次各類事故[4]，比較有名的麥加朝覲踩踏事故如表1所述。除了麥加朝覲踩踏事故以外，比較嚴重的踩踏事故如表2所述。由上顯示研究如何安全的疏散人群非常迫切。室內人群疏散時會集中湧向出口，除了正對出口方向的人流，還有人從出口兩側橫向插入。結果對出口往外走的人，到門口時會被橫向插入的人擠住，拖慢了疏散速度。

1.2 研究目的

為了避免人群在意外事件發生時，因為恐慌及逃生口橫向插隊等因素引起的湧塞，本研究期透過Unity軟體建立建築物空間、尺寸、出口大小、分流物大小等，並調整人群與出口距離，及分流物與出口之距離，以探討疏散模擬之結果。本文之研究目的為：

- A. 以文獻回顧彙整歷年嚴重踩踏事故的發生，及其造成之傷亡情形，並探索目前有關分流疏散之研究。
- B. 使用Exodus及與Unity軟體模擬相同條件下人員疏散之結果，來探討不同套裝軟體在人員疏散的適用情形。
- C. 以Unity軟體建構逃生模擬環境，包含空間之大小、出口大小、人數、分流物之大小等，以測得各不同變數組合下之模擬結果，以供相關單位參考。

表1. 1990年來麥加朝覲踩踏事故表

發生日期	傷亡情形	備註
1990/7/2	1426死亡	[5]
1994/5/23	270死亡	[6]
1998/4/9	118死亡、180受傷	[6]
2001/3/5	35死亡	[6]
2004/2/1	251死亡、244受傷	[6]
2005/1/22	500受傷	[6]
2006/1/12	362死亡	[6]
2015/9/24	769死亡、934受傷	[7]

表2 世界嚴重的踩踏事故(參加朝覲踩踏除外)

發生日期	事故概述	傷亡情形	備註
1956/1/1	日本新潟縣彌彥神社踩踏事故	124死、77傷	[8]
1957/11/7	中國廣州越秀山煙花晚會事件	33死、傷57	[9]
1989/4/15	英格蘭雪菲爾希爾斯堡慘劇	96死	[10]
1991/9/24	中國山西太原踩踏事件	105死、108傷	[11]
1993/1/1	香港蘭桂坊慘劇	21死、62傷	[12]
2004/2/5	中國北京密雲燈會踩踏事故	37死、15傷	[13]
2010/11/22	柬埔寨金邊鑽石島踩踏事故	347死、395傷	[14]
2011/1/14	印度喀拉拉邦踩踏事件	104死、100傷	[15]
2013/1/1	象牙海岸踩踏慘劇	61死、200傷	[16]
2014/12/31	中國上海外灘陳毅廣場踩踏事件	36死、49傷	[3]

二、逃生口分流

韓戰鋼(Zhangang Han) 研究團隊發現，在出口兩側設置圓柱形的阻礙物，可減少橫向插隊的行為[17]。引導人群由正對出口的方向行進，能有效提高疏散速度。該團隊在北師大邱季瑞體育館進行了人群疏散實驗，場地是面積約100平方米的二層大廳，出口寬約1米。該團隊選擇了近似圓柱形的垃圾桶（直徑0.8米、高1.2米，內裝三分之二的）作為阻礙物，共有80人參與了實驗。實驗以無阻礙物、有一個阻礙物和有兩個阻礙物的情況分三組進行。實驗結果顯示，人群的平均疏散速度分別為2.48、2.73和2.87（單位均為人/秒）。出口設置兩個阻礙物時，人群疏散速度較沒有阻礙物時提高約16%。另有機構以同一批人做疏散的模擬，顯示當在出口放置一分流物時，人群疏散的速度比沒放置分流物快(圖1)[18]。



圖1 出口放置分流物之疏散模擬

三、套裝軟體疏散模擬

當建築物內災難發生時，人群會開始往出口方向疏散，若是人數眾多而逃生口較小時，容易造成推擠情形，影響人員逃生速度。現行法規在計算逃生口的寬度及步行距離時，多以條列式計算，忽略了現場空間安排的多樣性。所以建築主管機關也會採用套裝火災模擬軟體進行驗證。

3.1 EXODUS軟體

EXODUS是由英國格林威治大學火災安全工學小組所開發[19]，其避難計算方法，是根據東京消防廳火災預防規程（昭和61年5月東京消防廳訓令第36號）第76條的規定綜合預防技術檢討委員會的討論結果，基於預測避難必要時間算定的相關綱要（平成20年3月19日預防部長依命通達）第3、1、(3)，通過東京消防廳認定作為「火災避難模擬同等的認定算定方法」[20]。

EXODUS的避難模擬，是以個人空間的中心點，畫出0.5m×0.5m正方形，又稱為節點，各節點通過弧橋連接，避難者經由弧橋在各節點間移動。弧的長度是以節點中心間的距離0.5m計算。所以是形狀0.5m×0.5m的正方形。如圖2所示。在圖3中藍色點是人員的位置，綠色點是人員的可移動的空間，Door_1是出口處，出口處若有3個點，表示門寬為 $0.5 \times 3 = 1.5\text{m}$ 。

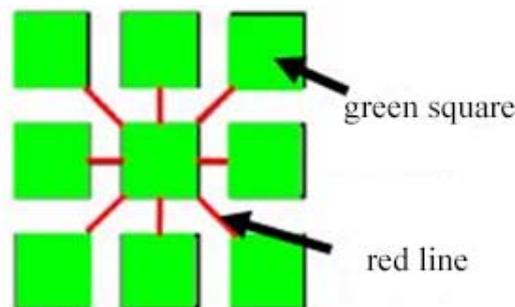


圖2.節點及弧橋連接圖

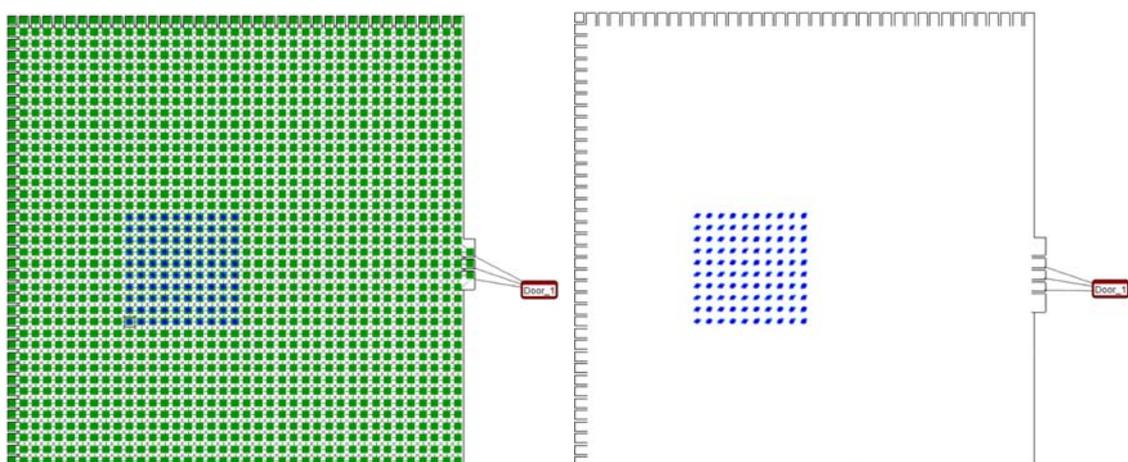


圖3 使用EXODUS軟體模擬逃生

3.2 Unity軟體

Unity是一套遊戲引擎，使用NVIDIA的PhysX物理引擎來模擬實體世界。尋路(Navigation)大致分三種：A-Star、WayPoint及NavMesh，Unity使用NavMesh凸多邊形演算法，就是用三角形代替傳統方格[21]。可行走區域的路徑規劃，由NavMesh決定模擬人物活動的範圍(圖4藍色區域)。NavMeshAgent組件是Unity提供的尋路系統的核心組件。從目前的位置到另一個三角形中的點之間的線段，與這條線段相交的線段全部是路徑所穿越的線段，就是節點，把所有的節點找出來，並得到一條最長的節點，那個節點就是最佳的節點位置。

3.3 EXODUS及Unity疏散模擬之比較

本研究針對EXODUS及Unity軟體，進行疏散模擬的比較。本文模擬的出口寬度分別為0.5m、1.0m、1.5m；逃生人數為1~100人時所需要的時間，其模擬結果如表3所示。經由EXODUS與Unity的測試結果，發現Unity比較接近真人現場模擬的情形，因為EXODUS 模擬的時間是以線性增加，但是以人群在實際模擬時，當人數達到臨界值時，會出現擁擠的現象，與Unity的結果很近。

表3. EXODUS及Unity逃生時間比較表

軟體	Unity			EXODUS		
	0.5 m	1.0 m	1.5 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m
出口寬度						
1人	7.44	7.40	7.40	8.17	8.17	8.17
2人	8.49	7.43	7.42	16.42	8.17	8.17
10人	31.59	9.86	9.42	28.25	17.09	17.16
20人	63.39	27.08	20.57	40.42	24.42	18.92
40人	00.00	42.33	34.17	73.25	40.25	29.59
60人	00.00	62.91	44.93	104.59	55.75	40.42
80人	00.00	72.53	49.34	135.59	73.59	50.09
100人	00.00	102.37	62.13	170.75	88.59	62.75

四、使用Unity進行分流模擬

本研究使用Unity軟體，模擬人員在災害發生時疏散的情形，及設置分流設施的不同疏散結果。模擬疏散的變數包括疏散人數、分流物寬度、及出口寬度等，如圖5所示。本研究設定出口門寬為0.9m、1.2m、1.5m、1.8m；分流物的尺寸為未設置、0.6m、0.9m、1.2m、1.5m、1.8m；逃生人數為20人、40人、60人、80人、100人，其模擬結果如表4所示：

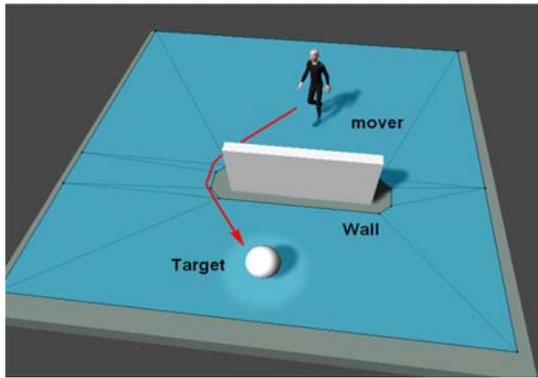


圖4 Unity的路徑演算法

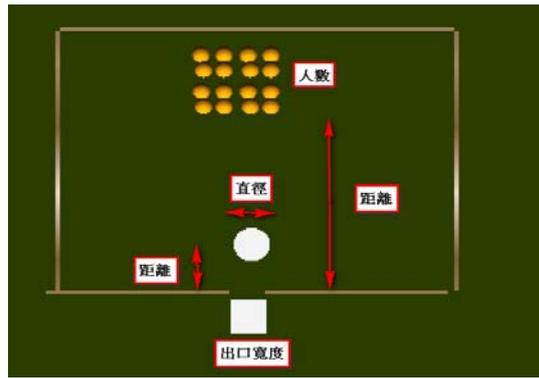


圖5 本研究的模擬逃生的變數

五、討論

- A. 本研究使用EXODUS軟體，雖然可以計算出逃生時間增加的情形，但是不應是線性增加，它乎沒有確實反應出人群在逃生口前推擠的情形。EXODUS使用0.5m*0.5m的方格，作為人員移動的架構，這樣可以增加逃生時間的計算速度，但是卻被限制在固定的模距中，缺乏彈性。因此若在逃生口前方放置分流物，分流物的尺寸及門寬的尺寸，只能為0.5M的倍數，無法有效的執行比較複雜的逃生避難模擬。
- B. 本研究採用Unity來模擬逃生的情形，經由本研究測試，它的模擬結果能貼進真實避難實驗的結果。經由Unity 模擬逃生時，若在出口前方放置分流物可以減少避難時間，尤其是門寬與障礙物的寬度相近時為最有效，約可以減少25%的避難時間。
- C. 當逃生出口太小時，雖然有分流物作分流功能，但是由於出口發生堵塞，所以分流後又會再出口前產生合流及湧塞，形成無效的分流。當疏散人數在20人以下時，因為不會造成堵塞，所以分流的功能不大。
- D. 本研究發現分流物必須放置在出口前的中央位置，才能將人員作均勻的分流。分流物以放置一個的效果最明顯，若放置2個反而容易造成堵塞的情形。當分流物太小時(<0.6m)，反而失去分流的作用，變成阻擋逃生的障礙物。
- E. 疏散模擬計時是以全部人員逃離現場為主，所以總避難時間是以最後一位來計算，雖然前面的人員可以較快速度逃生，但是後面的人員被堵住其時間還是拉長了。
- F. 人員的分佈，儘量以中央線為準作對稱分佈為佳。當人數達60人以上、出入口寬度在120公分以下時，雖然放置分流物，但是在門口依然會堵塞，所以逃生主要關鍵在於出入口大小，其次是才是放置分流物。

表4. 不同門寬、人數及分流物尺寸之疏散模擬結果(秒)

門寬 (M)	人數(人)	分流物設置情形(寬度)					
		未設置	0.6M	0.9M	1.2M	1.5M	1.8M
0.9	20	23.43	18.69	18.18	19.42	20.30	20.36
	40	47.66	45.09	43.71	42.83	40.16	39.17
	60	79.18	75.63	74.68	72.80	69.50	66.08
	80	91.09	87.97	86.28	82.43	80.55	76.76
	100	122.81	118.53	117.91	116.84	114.84	114.15
	Max %	-	20.23%	22.41%	9.52%	11.58%	15.73%
1.05	20	21.54	18.68	17.45	16.71	17.05	16.98
	40	40.57	38.44	38.23	36.58	34.09	33.06
	60	60.18	57.96	57.32	55.63	53.66	52.38
	80	68.90	67.48	67.03	65.75	64.28	62.45
	100	90.80	88.28	88.23	88.20	86.42	84.68
	Max %	-	13.27%	18.98%	22.42%	10.83%	12.96%
1.2	20	21.29	18.58	17.43	15.42	15.36	15.35
	40	37.22	35.35	33.68	32.41	32.71	32.01
	60	54.92	53.44	51.10	50.75	50.32	49.16
	80	60.59	58.60	57.38	56.43	56.69	57.21
	100	78.31	77.00	76.82	75.10	75.20	75.71
	Max %	-	12.72%	18.13%	27.57%	27.85%	27.90%
1.5	20	20.57	18.55	17.32	15.38	14.76	13.40
	40	34.17	32.27	31.97	31.39	29.81	28.03
	60	44.93	44.31	43.86	43.50	42.44	42.11
	80	49.34	49.01	48.68	48.60	46.75	47.23
	100	62.13	61.90	60.48	61.23	60.41	61.05
	Max %	-	9.82%	15.79%	25.23%	28.24%	34.85%
1.8	20	20.42	18.42	16.79	14.98	14.41	13.29
	40	31.82	31.13	30.64	28.91	27.53	26.91
	60	40.90	40.78	40.41	40.34	40.22	39.05
	80	44.95	44.93	44.71	44.67	44.53	44.12
	100	55.40	54.95	54.94	54.92	54.16	53.95
	Max %	-	9.79%	17.78%	26.64%	29.43%	34.92%

六、結論

本研究使用EXODUS及Unity軟體，模擬災害發生時人員的緊急避難疏散情形，具體貢獻如下：

- 以文獻回顧彙整歷年世上重大踩踏事故的發生，及其造成之傷亡情形，並探索目前有關分流疏散之研究情形。
- 本研究使用Exodus及與Unity軟體，來模擬在相同條件下人員疏散之結果，來探討不同套裝軟體在人員疏散的模擬結果及其適用情形。
- 用Unity軟體來建立逃生模擬環境，包含不同出口大小、不同疏散人數、不同分流物之大小等，以測得各不同變數組合下之模擬結果，以供相關單位參考。

EXODUS的開發者Galea教授，已經將Unity導入EXODUS的定制開發，並作為VR模擬和防災解決方案[22]，可見Unity是可以被認可使用在逃生避難評估的軟體。未來研究的方向可以探討人群與出口的距離，及分流物與出口的距離的變動下人員的疏散情形。

參考文獻

1. 蔡匡忠, 鄭元良, 林慶元, 建築物防火避難安全性能驗證技術手冊, 內政部建築研究所, 2016.06
2. <http://www.chinanews.com/gj/2010/11-25/2680760.shtml>
3. <http://news.sina.com.cn/c/2015-01-01/013731350255.shtml>
4. <https://wechat.kanfb.com/archives/118697>
5. <https://read01.com/nM8o4G.html>
6. <https://read01.com/yyN3JK.html>
7. <http://www.cna.com.tw/news/firstnews/201509245011-1.aspx>
8. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yahiko_Shrine_Accident.jpg
9. <http://www.taodabai.com/19524602.html>
10. <https://theinitium.com/article/20160427-dailynews-hillsborough/>
11. <http://t.2web.cn/wfdslsc/jdht/html/?4247.html>
12. <http://hk.apple.nextmedia.com/news/art/20150102/18988730>
13. <http://news.qq.com/a/20040416/000075.htm>
14. <http://global.dwnews.com/big5/news/2010-11-23/57119991.html>
15. <http://www.epochtimes.com/b5/11/1/15/n3143395.htm>
16. <http://news.cnyes.com/news/id/1403101>
17. Dong Zhou, Zhangang Han, The Use of Tail Inequalities on the Probable Computational Time of Randomized Search Heuristics, Theoretical Computer Science, 436 (2012), pp. 106-117.
18. <http://tv.ck101.com/play/vid5749485acc608>
19. <https://prw.kyodonews.jp/opn/release/201103305524/>
20. <https://prw.kyodonews.jp/opn/release/201103305524/>, Accessed May 28, 2017
21. Unity official website: Available at: <https://unity3d.com/>, Accessed May 28, 2017.
22. <http://www.forum8.co.jp/fair/report/201610-18-e.htm>

B-05

運用犬走設置垂直綠化之效益分析

宋文沛(Wen-Pei Sung)

國立勤益科技大學景觀系

劉峻豪(Chun-Hao Liu)

國立勤益科技大學景觀系

陳芷儀(Chih-Yi Chen)

國立勤益科技大學景觀系

李哲綸(Che-Lun Lee)

國立勤益科技大學景觀系

摘要

由於城市化速度快，城市中建築群密集，都市空間被過度開發，硬鋪面有較大的熱容量和吸收熱比率，使得城市地區儲存了較多的熱量，並向四周和大氣中幅射，造成了同一時間城區氣溫普遍高於周圍的郊區氣溫，目前城市用地緊湊，不能滿足單一的城市綠地面積擴增，而垂直綠化是解決此問題的有效途徑之一。發展牆面綠化是增加都市的綠化量，改善生態環境的重要途徑。然而牆面綠化具有擴大都市地區綠化美化市容、降低噪音、吸收淨化灰塵、改善空氣品質、有效率的綠化空間來改善生活環境品質，在我國夏日平均建築空調耗電量佔總尖峰用電的三分之一左右，若能藉由垂直綠化牆面根源著手改善建築物外殼耗能量，將有助於降低夏日電力負荷，本研究提出以建築物犬走設置垂直綠化牆面，實驗結果顯示，本法確可有效改善建築外殼耗能，且對於室內夏季可以降溫、冬季可以保溫，對於室內熱環境有莫大的助益。

關鍵詞：垂直綠化、室內熱舒適度、隔熱與保溫

Benefit Analysis for Applying Dog go to Construct Vertical Greening Wall of Building

Abstract

According to rapid urbanization and densely populated buildings in the city, urban space is over developed. The high heat capacity and absorption heat ratio of the hard pavement make the urban area to store more heat and shoot in the ambient and atmosphere, which causes the temperature of the city to be higher than the surrounding suburban temperature at the same time. Presently, the use of urban land is compact, can not expand the urban green area. Vertical Greening wall is one of the effective ways to solve this problem. Developing greening wall is an important way to increase urban greening and improve ecological environment in the city. However, the greening wall of the metropolitan area provides the advantages of improving the quality of living environment by enlarging green urban area, reducing noise, absorbing and purifying dust, improving air quality and efficient greening space. Air-conditioning power consumption of building is about one-third of the total peak

electricity consumption in summer. If the energy consumption of building shell can be improved by the vertical greening wall, it will help to reduce the summer electric load. In this study, the dog go of building is applied to set up vertical greening wall, the experimental results show that this method can effectively improve the building shell energy consumption, and for indoor can be cooled in summer, can be warm in winter. This technology provides great advantages to increase indoor thermal environment.

Keywords: Vertical Greening Wall, Indoor thermal comfort, thermal insulation and preserve heat

一、前言

「熱島效應 (Urban heat island effect)」。造成室內溫度升高，而增加冷氣空調的使用，大量二氧化碳排放造成都市熱島效應與全球的氣候異常。對居民而言，城市綠化是解決熱島效應的方法；根據日本東北大學齊藤武雄報告提出，只要在東京綠化47%，便可降低市區4°C的溫度。綠化不只是在地面種植樹木花草，也包括建築物的牆面綠化與屋頂綠化。

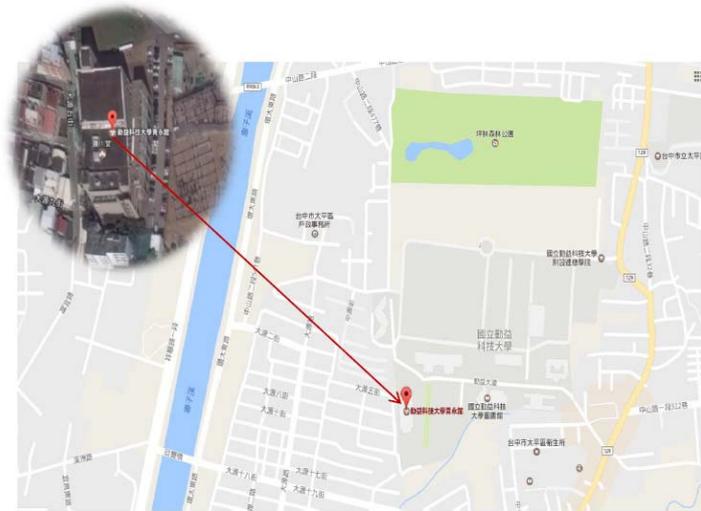
隨著綠化技術的進步和生態都市的要求越來越強烈，立面垂直綠化的形式越來越多，而且方式方法越來越先進多樣，這是因為立面垂直綠化對都市的非常重大的意義。垂直綠化可以美化環境，生態環境回歸大自然；節能環保，使得建築物室內冬暖夏涼；營造健康，自然的生活環境。在綠化與建築節能實測結果表明：在室外氣溫38°C時，無綠化建築物的外表面溫度最高可達50°C，而有建築物綠化外牆面溫度為27°C，尤其是朝西的牆面，綠化覆蓋後降溫的效果更為顯著，有植物遮蔭的地方，光照強度僅有陽光直射地方的幾十分之一至百分之一，濃密的枝葉像一層厚厚的絨毯，可降低太陽的輻射強度，同時也可降低建築物外牆溫度，凡是有植物覆蓋的牆面溫度通常可降低2~7度；同時，空氣相對濕度可以提高10~20%，於建築物牆面綠化的建築室內空氣溫度較無綠化建築物室內溫度約3~5°C，降溫效果明顯。其主要作用有美化環境及節能環保，使得建築物室內冬暖夏涼營造健康，自然的生活環境並改善城市熱島效應。

本研究以春、夏、冬三季期程實驗規劃，期初實驗規劃無植栽對建築體溫度變化影響，第二階段種植立面綠化植栽對建築體溫熱影響性試驗；植栽採用黃金葛植物、植栽遮蔽率(70~100%)實驗基礎、框架與綠色實驗屋體壁面距離(為D=100cm)，而試驗數據分析採整點收集數據分析(上午六時至下午六時整)，進行溫熱影響量測比較性試驗來了解植栽對室內環境改善。

二、實驗位置與區域環境

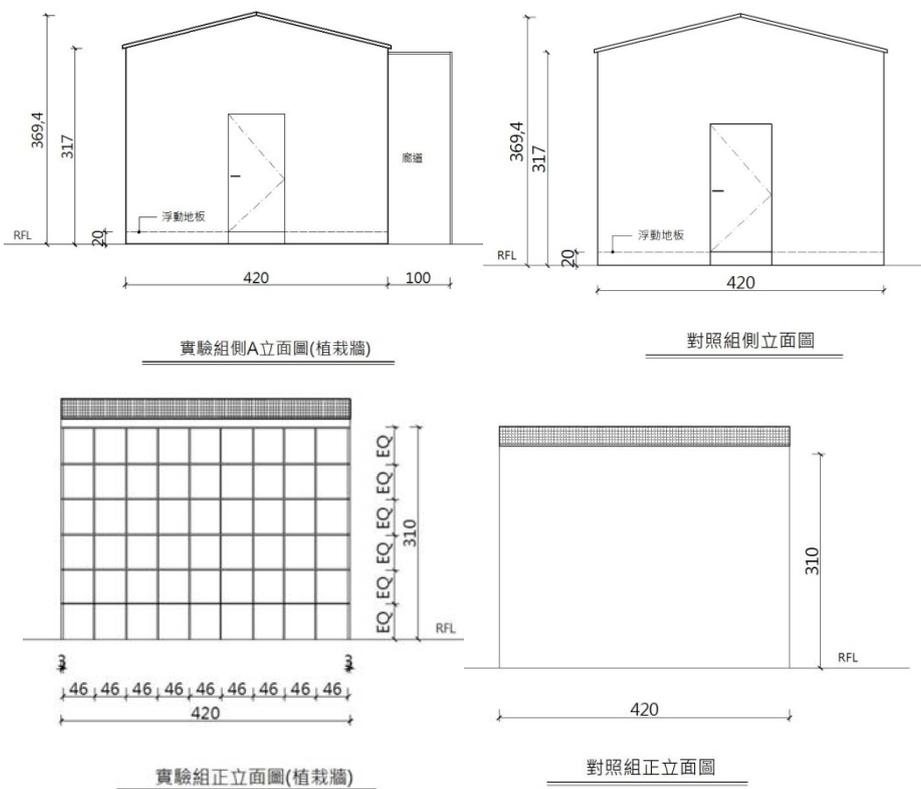
本研究地區規劃選擇於勤益科技大學青永館頂樓C型鋼建材塔建築物，地理位置於臺灣台中市太平區位於臺中市南部偏東，相對位置如圖一所示。每年的一月，是太平區氣溫最低的月份，平均溫度近16度，平均最低溫在十度左右。最熱的月份是八月，平均溫度在二十八度左右，平均最高溫度在三十二度。太平區的雨季大都集中在五月至八月，其中六至八月的降雨量總和超過全年的一半，而十月至十二月是最乾旱的季節，由

於太平區屬於頭嵙山系下降階台地，故地勢落差大。



圖一 實驗標的物位置

本研究主要探討在立面綠化植栽對室內量測溫熱影響試驗整體格局中所扮演之角色，並以實驗組合屋實際以長寬高為 4.2m,4.2m,3.17m 之兩棟實驗屋為研究標的如圖二所示。綠覆溫度變化情形，進行景觀結構立面綠化植栽分析，繼而提出立面綠化植栽無植栽牆及有植栽牆對室內溫度量測變化之影響，實驗組設置垂直綠化系統(植生牆)於西側距離實驗組外牆 1m 處，探討綠化植栽綠覆率結構指數值之差異情形，瞭解立面綠化植栽分析對於建築物室內溫熱影響性之重要性與影響。本研究以夏冬兩季研究時間依據。

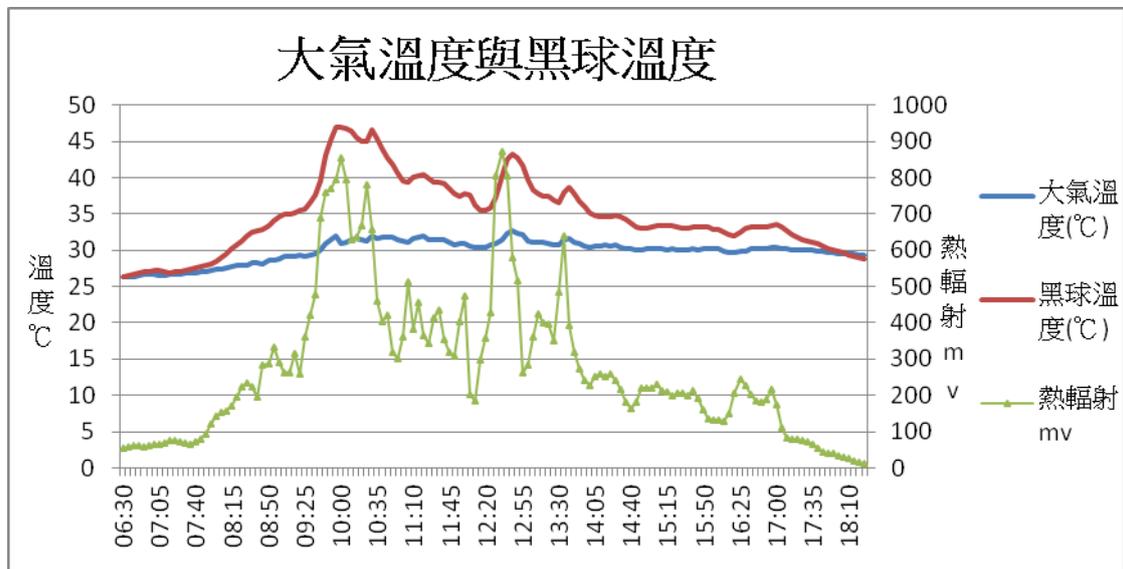


圖二 實驗屋之實驗架構圖

三、實驗結果與討論

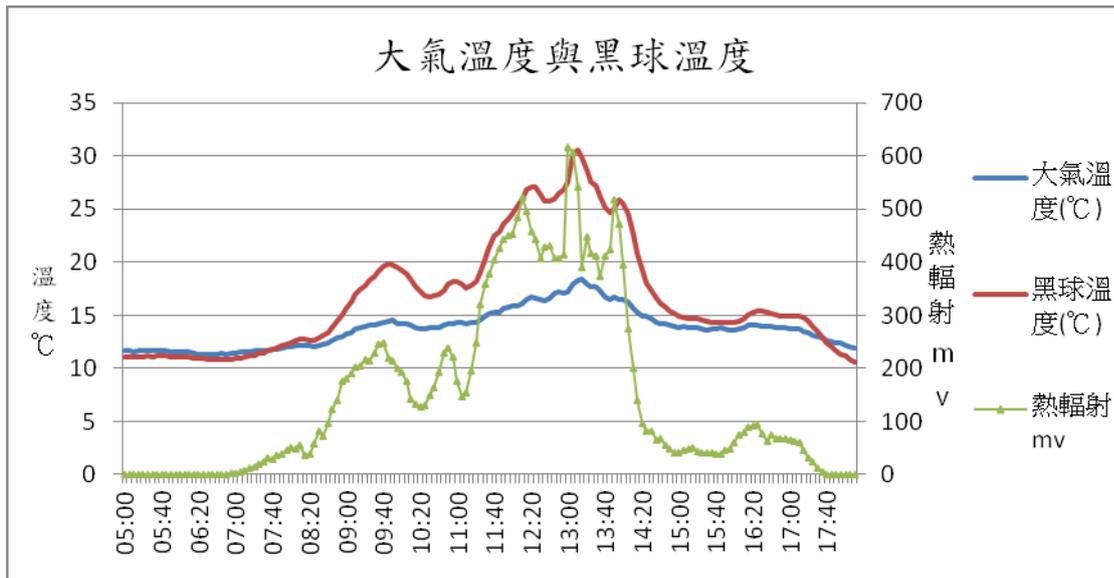
3.1 夏季冬季微氣象站之溫度變化

本研究實驗前先行在於距離實驗屋 15m 處設置微氣象站一座，共監測大氣溫度、黑球溫度、熱輻射值、濕度及降雨量等，大氣溫度及黑球溫度熱輻射量測一天夏季春秋季及冬季變化值量量測，以做為本實驗對照綠化植栽無植栽牆及有植栽牆對室內溫度量測變化之影響。夏季變化值量整理如圖三所示。由曲線可看出，整體溫度於上午七點開始上升，下午五點逐步下降，熱輻射值最高為 872mV，出現在上午十點及中午十二點三十五分，大氣溫度最高 32.6°C 出現時間在十二點四十五分，黑球溫度最高 47.0°C 出現於早上九點五十五分，熱輻射值受通常與當地的雲量有直接關係，雲層變化影響而產生輻射跳動，但整體趨勢顯示太陽在軌道運行的過程中，其熱輻射的確造成大氣中溫度的上升。



圖三 夏季氣象站之大氣溫度與黑球溫度熱輻射

冬季微氣象站之溫度變化由冬季變化值量整理如圖四所示。由圖曲線可看出，整體溫度於上午八點開始上升，下午五點逐步下降，熱輻射值最高為 615mV，出現在及中午一點正時，大氣溫度最高 18.4°C 出現時間在下午一點十五分，黑球溫度最高出現於下午一點十分最高 30.5°C。



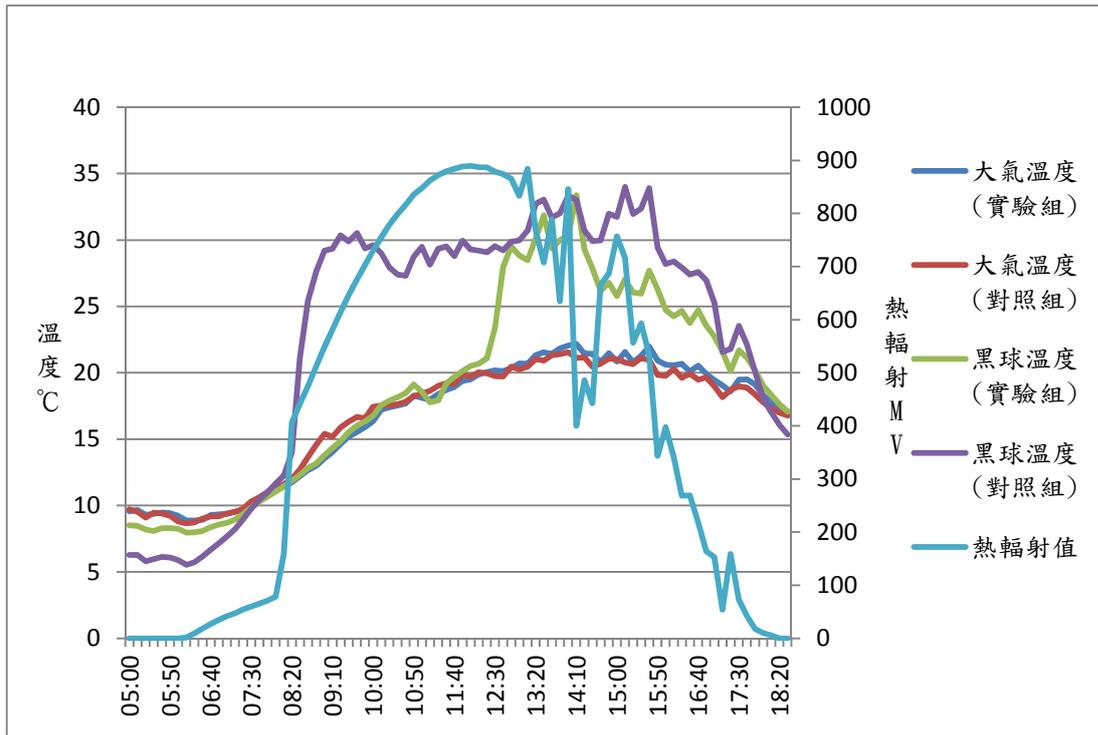
圖四 冬季氣象站之大氣溫度與黑球溫度熱輻射

3.2 垂直綠化植生牆綠覆率對建築溫度影響

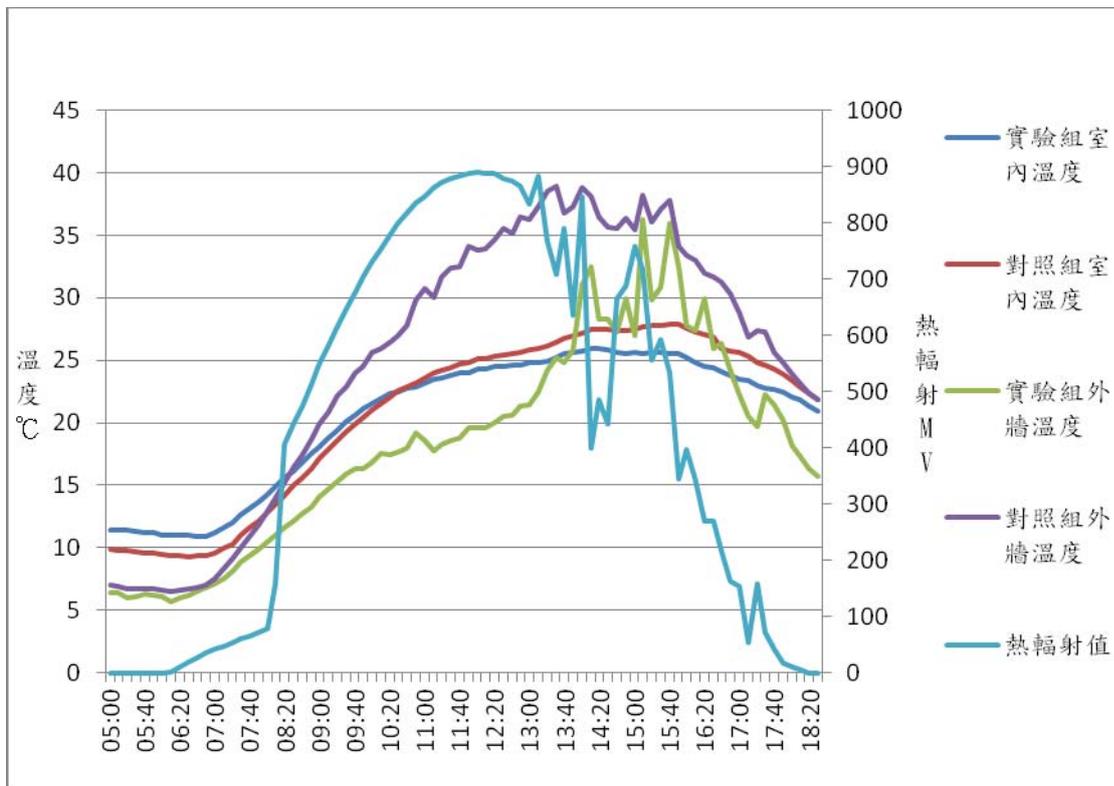
本研究之所指的垂直綠化之綠覆率，指的是建築物表面為植栽覆蓋的百分比

故本研究以綠覆率 70%、100 作為牆面綠化量之模擬基礎。實驗組設置垂直綠化系統(植生牆)於距離實驗組外牆 1m 處，研究採用植栽掛盆，植栽所選置之植物(天南星科麒麟葉屬之綠蘿,學名：*Epipremnum aureum*)。研究期程分為夏季與冬季，利用氣候分析儀進行實驗分析比對。

從圖五資料整理中綠覆率 70% 可明顯植栽實驗組屋外表面受到植栽牆隔絕有阻熱輻射。受到實驗環境地區輻射熱對地上的物體的照射現象，對室內外的環境而言，熱輻射會影響氣溫、溼度、照度等物理環境因素。在被照射到的物體會產生極大的變化。從實驗結果顯示，夏季設置植生牆之實驗屋實驗組於上午七時起，大氣與黑球溫度逐漸升高，上午七點至下午五點這段期間，為溫度較高之時段，受到雲層變化溫度有所改變，實驗屋大氣最高溫度為 22.16°C 於下午二點十分，對照組大氣最高溫度為 21.54°C 於下午二點整。實驗屋黑球最高溫度 33.38°C 於下午二點十分，對照組黑球最高溫度 34.01°C 於下午三點十分。由圖六資料顯示分析太陽直射，對照組外側牆面溫度逐漸上升最高溫度 38.96°C，於下午三點十分，對照組屋內溫度最高 27.90°C，下午三點四十分。然而實驗屋外側牆面受到植生牆隔絕有阻熱輻射溫度最高 36.23°C，下午三點十分。且實驗屋內部最高溫 25.98°C。對照組外牆溫度逐漸高於實驗屋外側牆面溫度，並隨著時間增加兩者溫差越大。



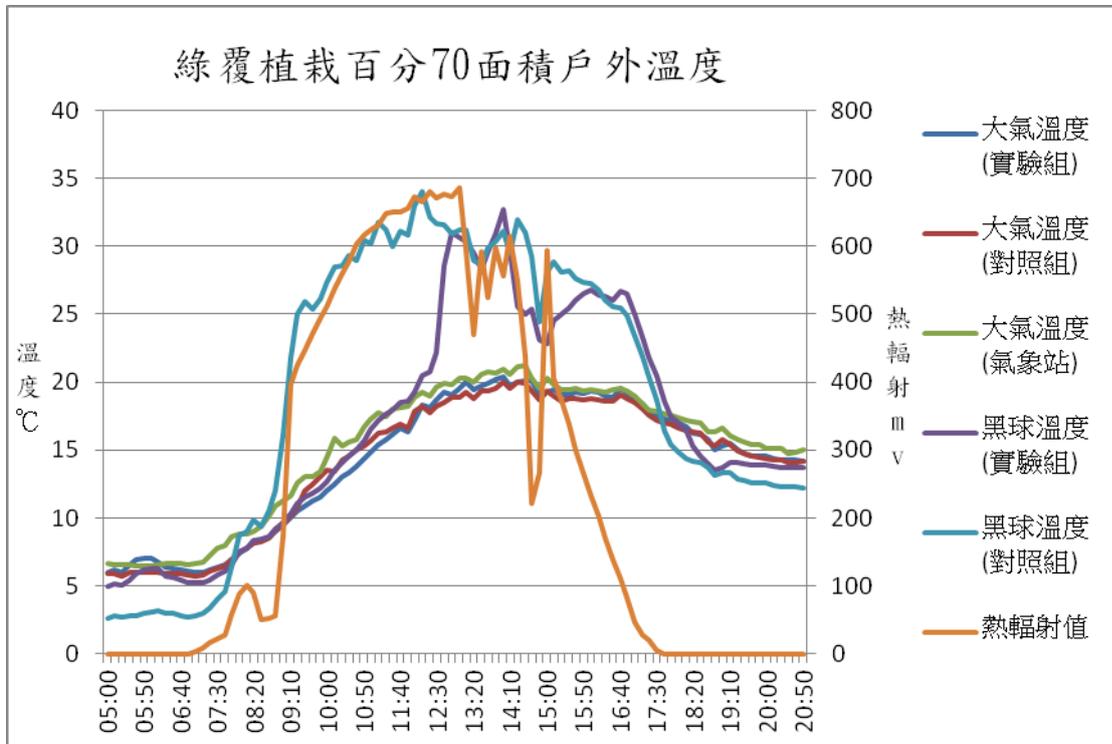
圖五 夏季植栽實驗組屋戶外大氣及黑球溫度



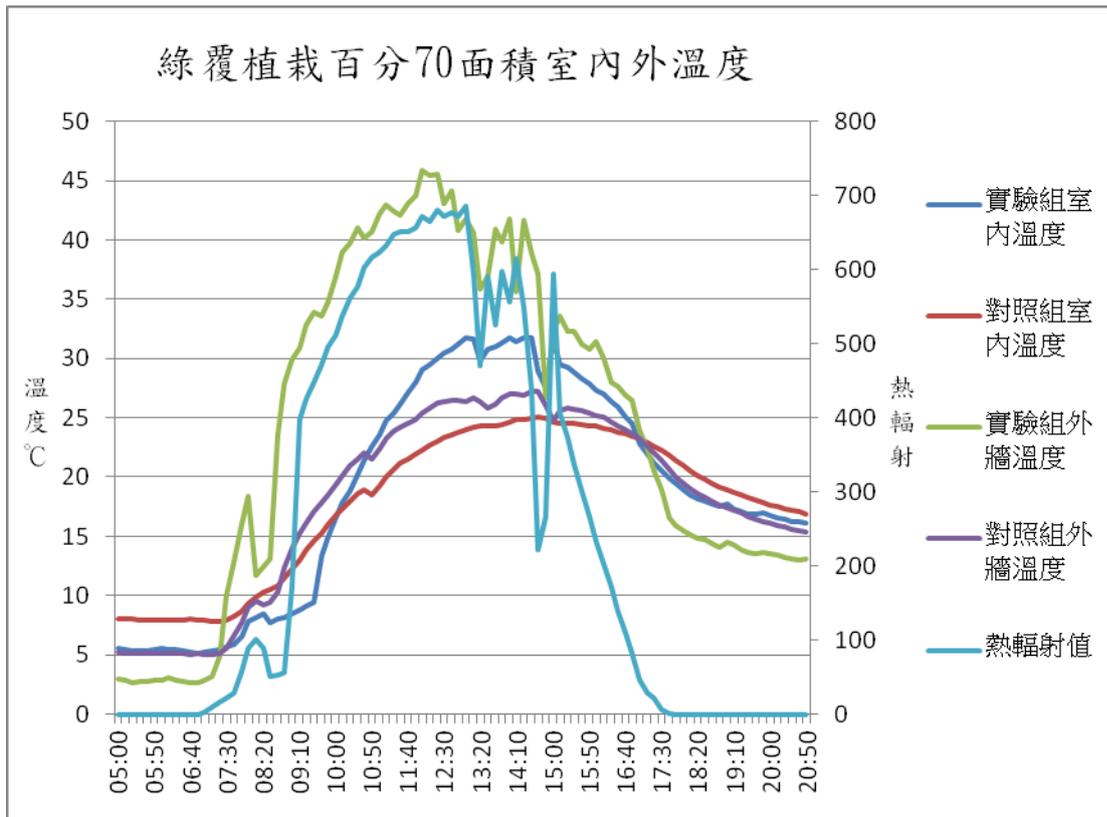
圖六 夏季植栽實驗組屋室內及外牆溫度

冬季植栽綠覆率 70%由圖七實驗數據分析大氣溫度黑球溫度比對最高溫度及落在

時間點,實驗組大氣最高溫度為 20.38 度,時間點在下午十四點整,對照組大氣最高溫度為 19.98 度,時間點在下午十四點整。兩者溫度相差微小同樣時間點都在下午十四點整,微氣象站大氣最高溫度 21.19 度,時間點在下午十四點三十分。實驗組黑球最高溫度 32.70 度,時間點在下午十四點整。對照組黑球最高溫度 34.06 度,時間點在中午十二點十分整,黑球最高溫度兩者相差二度。由圖八顯示實驗屋及對照組外牆外牆及屋內溫度實驗數據資料分析,冬季太陽直射,對照組外牆面溫度隨冬季冷空氣影響最高溫度 27.25 度,時間於下午十四點四十分,對照組屋內溫度最高 25.060 度,時間於下午十四點四十分。然而實驗屋外側牆面受到植生牆隔絕冷空氣溫度,外側牆最高 45.87 度,時間點在中午十二點整。且實驗屋受到植生牆隔絕冷空氣溫度,實驗屋內部保溫最高溫度 31.78 度。對照組外牆溫度受到冬季冷空氣影響,沒有植生牆保護逐漸降溫,隨著時間增加對照組與實驗組兩者溫差越大。由實驗分析得知垂直綠化植生牆綠覆率對夏季冬季有相對影響。能達到隔絕熱輻射及有保溫隔冷成效。



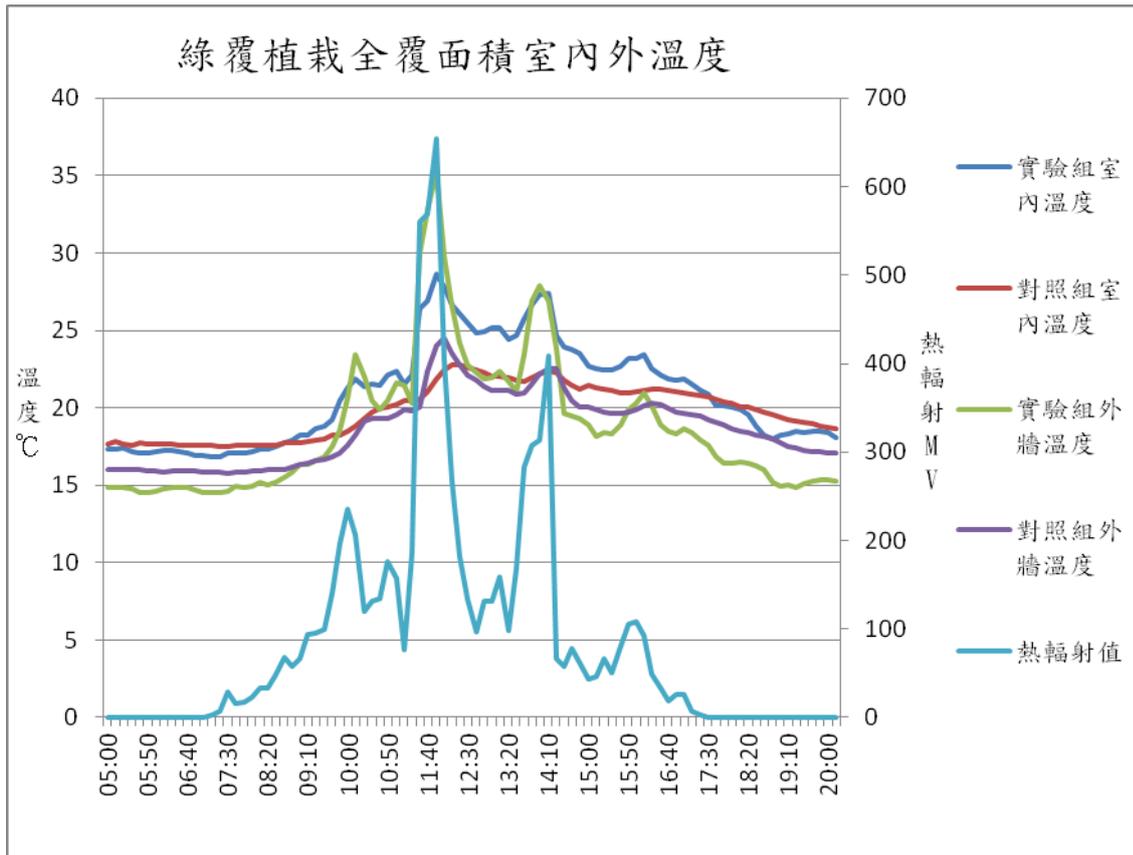
圖七 冬季植栽百分70實驗組屋戶外大氣及黑球溫度



圖八 冬季植栽百分70植栽實驗組屋室內及外牆溫度

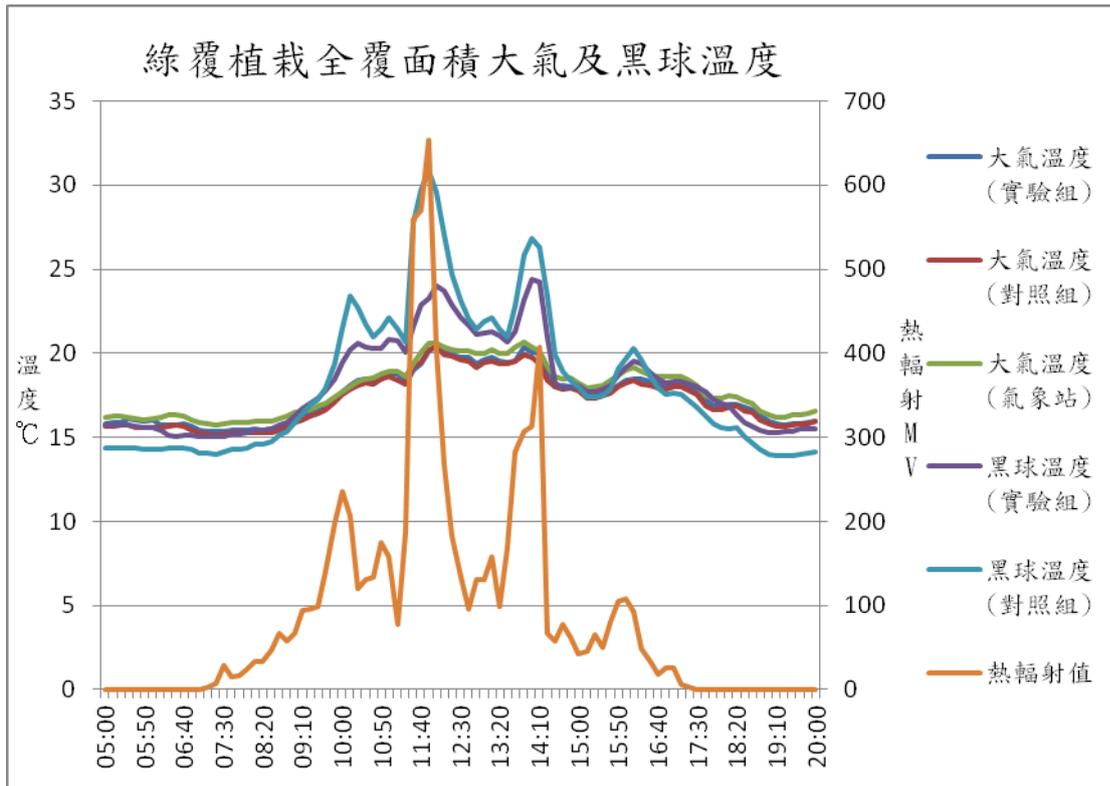
垂直綠化之綠覆率，指的是建築物表面為植栽覆蓋的百分比，測量日期為氣象天氣急遽變冷，由數據分析顯示垂直綠化植栽配置為綠覆率 100 作為牆面綠化量之模擬基礎。從研究實驗中探討冬季垂直綠化之綠覆率，實驗組室內最高溫度 28.61 度發生時間上午十一點五十分，然而對照組室內最高溫度 22.78°C，時間中午十二點十分。實驗組外牆最高溫度 35.36 度，時間上午十一點五十分，對照組最高外牆 24.52 度時間十二點 00 分整。

從圖九資料探討整理中可明顯得知，垂直綠化之綠覆率植栽對實驗組屋外牆表面受到垂直綠化植栽牆隔絕有保溫隔冷成效。輻射熱會影響氣溫、溼度、照度等物理環境因素。在被照射到的物體會產生極大的變化。故由冬季實驗整理總結建築物明顯受到垂直綠化植栽牆隔絕戶外溫度據有效保溫隔熱隔冷效果。



圖九 綠覆植栽全覆面積室內外溫度

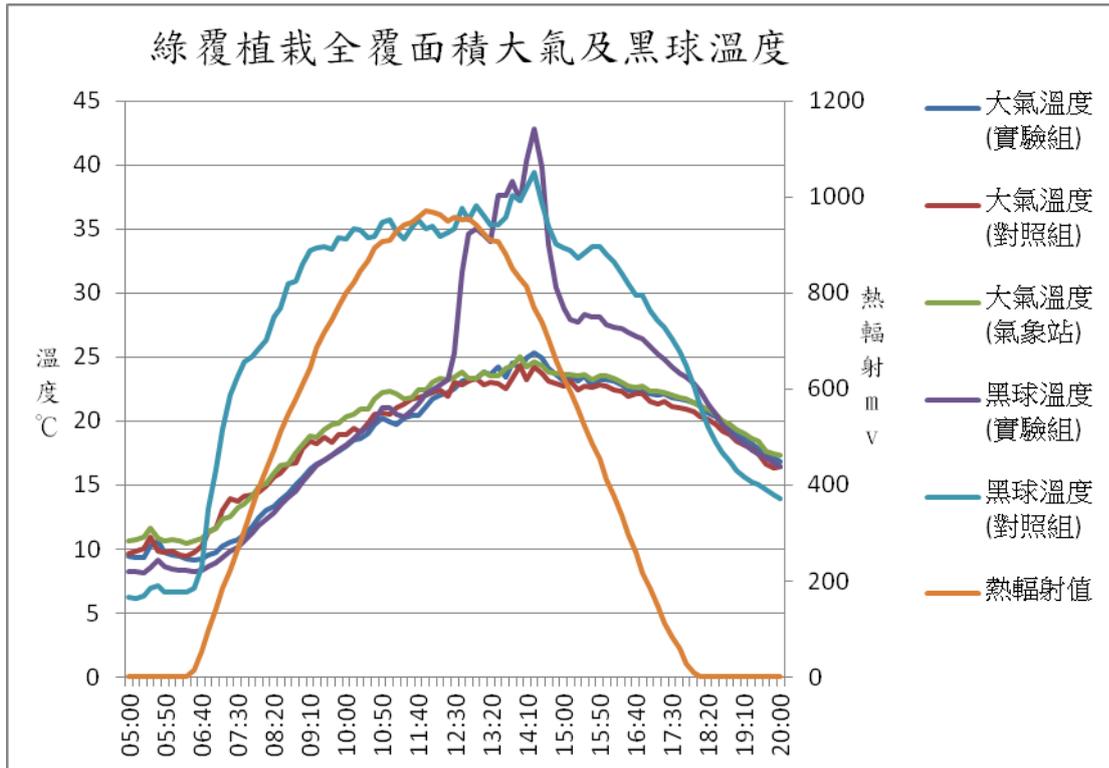
冬季植栽綠覆率 100%由圖十實驗數據分析大氣溫度黑球溫度比對最高溫度及落在時間點,實驗組大氣最高溫度為 20.6 度,時間點在中午十二點整,對照組大氣最高溫度為 20.35 度,時間點在中午十二點整。兩者溫度相差微小同樣時間點都在中午十二點整,微氣象站大氣最高溫度 20.66 度,時間點在下午十三點五十分。實驗組黑球最高溫度 24.40 度,時間點在下午十四點整。對照組黑球最高溫度 30.84 度,時間點在上午十一點五十分整,黑球最高溫度兩者相差六度。由此可知植栽對建築物有保溫隔冷效果



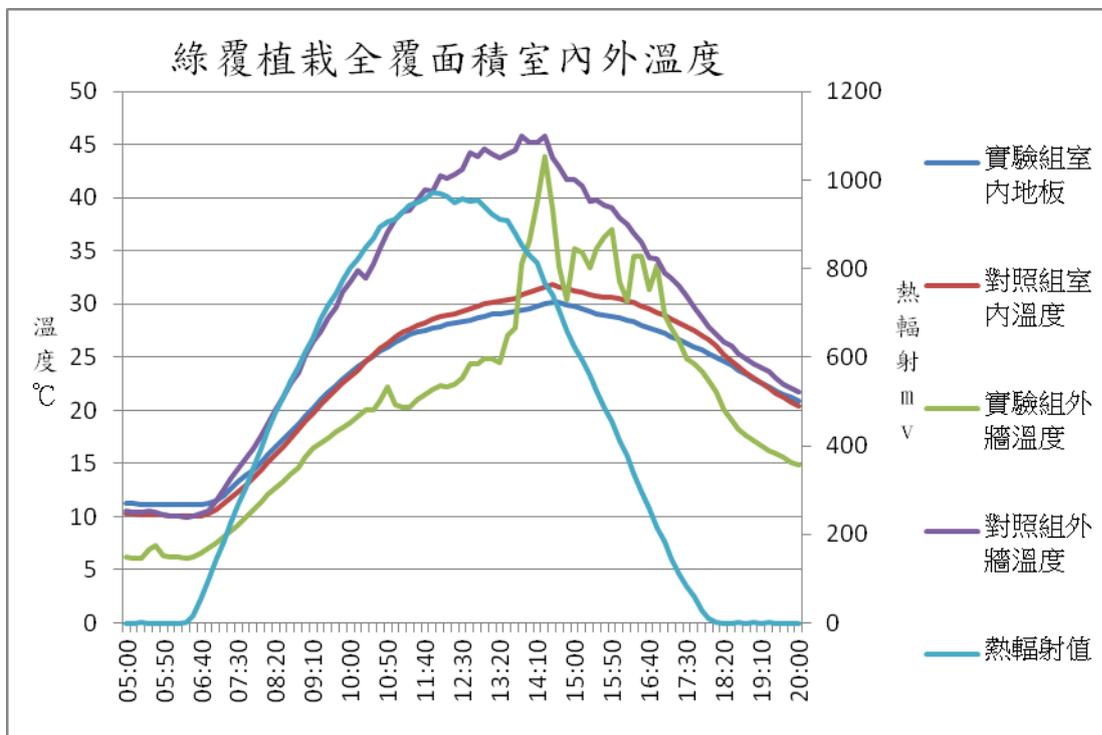
圖十 綠覆植栽全覆面積大氣及黑球溫度

夏季植栽綠覆率 100%由圖十一實驗數據分析大氣溫度黑球溫度比對實驗組及對照組最高溫度及落在時間點,實驗組大氣最高溫度為 25.35 度,時間點在下午十四點二十分整,對照組大氣最高溫度為 24.35 度,時間點在下午十四點整。微氣象站大氣最高溫度 25.04.19 度,時間點在下午十四點整。實驗組黑球最高溫度 42.81 度,時間點在下午十四點二十分整。對照組黑球最高溫度 39.38 度,時間點在下午十四點二十分整。

垂直綠化之綠覆率,指的是建築物表面為植栽覆蓋的百分比,測量氣象天氣相對濕度比較乾燥由圖十二顯示氣候炎熱,由數據分析顯示垂直綠化植栽配置為綠覆率 100 作為牆面綠化量之模擬基礎。從研究實驗中探討夏季垂直綠化之綠覆率,實驗組室內最高溫度 30.19 度發生時間下午十四點三十分,然而對照組室內最高溫度 31.80 度,時間下午十四點三十分。實驗組外牆最高溫度 43.92 度,時間下午十四點二十分,對照組最高外牆 45.84 度時間下午十四點二十分整。



圖十一 夏季綠覆植栽全覆面積大氣及黑球溫度



圖十二 夏季綠覆植栽全覆面積室內外溫度

四、結論

綜合上述相關溫濕分析圖，可得知太陽輻射對地上的物體的照射現象，對室內外的環境而言，熱輻射會影響氣溫、溼度、照度等物理環境因素。在被照射到的物體會產生極大的熱量，尤其在夏季，對建築而言是相當不利，將會增加熱負荷而使室內外的環境不舒適。反之，冬季的日射通過窗戶進入室內，則可提高室溫降低相對濕度，具有防寒、防濕的功能，此為日照的熱效應。國內相關文獻 國內研究指出太陽輻射能量是造成表面溫度上升的主要原因，若有效利用綠化的手法，亦可阻隔太陽輻射對建築物直接的影響。

本研究目的是在探討「牆面有無綠化」、「不同植栽種類與不同綠覆率」與「不同植栽形式」對於環境屬性之評值，了解目前建築牆面綠化探討牆面有無綠化、不同植栽種類(形式)與不同綠覆率探討環境屬性評值與影響，以及了解各環境屬性對，藉以了解牆面綠化對環境空間影響。

參考文獻

- 1.林憲德(2000)。綠建築設計技術彙編，內政部建築研究所。
- 2.黃世孟(2008)。建築物的垂直綠化與風土外牆設計，高雄大學都市發展與建築研究所。
- 3.宋苾璇(2002)。壁面綠化隔熱效能之研究，國立臺灣科技大學，碩士論文。
- 4.黃世孟(2008)。建築物的垂直綠化與風土外牆設計，高雄大學都市發展與建築研究所
- 5.財團法人錫埕環境綠化基金會，2009 節能減碳綠工法-綠屋頂及綠牆交流討論及推廣展示活資料。
- 6.陳慶、蔡永立，2006，"藤本植物在城市垂直綠化中的選擇與配置"，《城市環境與城市生態》，第 19 卷，第 5 期，pp.26-29。
- 7.高丕基，2002，"城市建築的立體綠化"，《裝飾》，第 12 期，pp.15-16。
- 8.杜元軍、周家娜、邴兆珍，2008，"牆面綠化及其對城市生態環境的影響"，《中國林副特產》，第 6 期，總第 97，pp.93-94。
- 9.劉宗群、黎明，2007，《綠色住宅綠化環境技術》，化學工業，北京。
- 10.Patrick Blanc, 2008, "The Vertical Garden : From Nature to the City "W.W. Norton & Company, New York.
- 11.Wong, N. H., Tan, Y. K., Chen, Y., Tan, P. Y. and Wong, N. C (2009). Energysimulation of vertical greenery systems. Energy and Buildings, 41(12).1401-1408.
- 12.Tokyo Metropolitan Government, 2006, "Wall Greening Guideline", Environmental Document No. 17102, NO.153.
- 13.Patrick Blanc, 2008, "The Vertical Garden : From Nature to the City "W.W. Norton & Company, New York.
- 14.Brown, T.C. and T.C.Daniel., 1990, " Scaling of ratings: Concepts and method." USDA Forest Service Research Paper RM-239.
- 15.杉孝の壁面緑化システム『緑化ウォール』網址：<http://www.hekimenryokuka.com/index.html>。

B-06

綠建築敷地貯集滲透保水設計策略之研究

陳海曙 (Hai-Shu Chen)

中國科技大學建築系副教授

摘要

台灣位處於西太平洋低緯度亞熱帶與熱帶濕熱氣候區，年降雨量2500mm~3000mm，是全球雨量最高地方，又因為是多山的島嶼地形地表水流動性大，因此建築導入基地保水設計以減少雨天地表逕流水增加地下水入滲，緩和晴天地面乾旱炎熱之不舒適，為敷地環境規劃考量目的。這十多年來，全球暖化氣候變遷形成極端天氣，台灣暴雨日集中雨量增多，乾早日增多，敷地計畫水環境結合基地保水設計須更被重視，並應朝保水量較大之貯集滲透保水設計發展。本研究以各種基地保水設計做初步分析，再透過實際案例保水分析與現場案例調查進行綜合分析，然後對建築基地各貯集滲透技術之設計應用策略進行深入探討與研擬。研究結果得知，從貯集滲透保水量多寡、景觀效益影響、管理維護等三方面整體考量，地下組合式蓄水框架貯集滲透設計，是我國濕熱多雨氣候區敷地計畫需兼具保水、防洪、綠化景觀多功能用途需求策略時，最為全面適用之技術及設計手法，值得應用推廣。

關鍵詞：綠建築，敷地計畫，基地保水，雨水貯集滲透

Storage Type Rain Retention Designs and Strategies for Green Building Site Planning

Abstract

Located in west region of the Pacific Ocean with subtropical and tropical hot humid climate, Taiwan has average annual rainfall 2500mm~3000mm as the highest rainfall area of the world, consequently how to design rain water retention becomes a main consideration in site planning. However due to global warming and climate change, rainfall pattern is change, so the water retention design strategy need to change to enlarge rainwater storage capacity in the site. The underground rainwater storage technologies are focused for study from the viewpoints of storage capacity, landscape effect, and management and maintenance. The results of this study show that underground rainwater with framework elements combined in site is the most suitable technology for the site rainwater retention design of green building, and as a better strategy for dealing with extremely weather of heavy storm rain.

Keywords : green building, site planning, groundwater retention, rain storage typed permeation

一、研究動機與目的

台灣位處於西太平洋低緯度亞熱帶與熱帶濕熱氣候區，全年降雨量平均2500mm~3000mm，是全球雨量最高地方，又因為是多山的島嶼地形，地表水流動性大，因此建築導入基地保水設計以減少雨天地表逕流水，及緩和晴天地面乾旱炎熱之不舒適，同時增加地下水的入滲，應為敷地水環境規劃考量因素。這十多年來，由於大氣溫室氣體濃度增高，全球暖化氣候變遷形成極端天氣，以致於多雨地區的台灣，暴雨日集中雨量增多，乾早日增多，所以敷地計畫水環境結合基地保水設計須更被重視，並且應朝向具保水量較大之貯集滲透保水設計發展，然而這對建築敷地規劃設計上有何影響，值得去探討。由於中高緯度先進國家除了日本以外，年降水量皆不大，多在1000mm左右且降雨日少，敷地計畫對於雨水之貯集滲透保水較不被重視，相關研究較少；又因貯集滲透之技術近年來才被導入於熱濕多雨的地區及台灣，相關之研究國內也不多見，所以值得進一步去探討。本研究將先以各種基地保水設計做初步分析，再透過實際案例保水分析與現場案例調查方式進行綜合分析，然後對建築基地各貯集滲透技術之設計應用策略進行深入探討與研擬。

二、氣候降雨與綠建築基地保水理論探討

2.1 氣候變遷與降雨型態探討

全球氣候依氣溫與雨量，概分為低緯度濕熱氣候區、熱乾氣候區，中緯度溫暖潮濕氣候區、乾燥氣候區，高緯度寒冷乾燥氣候區、寒冷多雪氣候區。由於低緯度之熱溼氣候區，全年日射熱高水氣蒸發快速，因此位於海洋下風區的陸地區，全年降雨量相當大，例如台灣、日本琉球、越南、印尼、菲律賓、馬來西亞、印度南部、斯里蘭卡、東非、美國東南角、加勒比海各國等。因降雨多且日照充足，形成熱帶雨林的生態自然景觀。由於森林本身具有良好的水土保持效果，構成熱帶溼氣候之良好生態系，因此成為地球生物多樣性的基因庫。但是隨著工業化的發展，以及經濟活動的成長，熱溼氣候區的自然林地逐漸被建地或農地取代，如果建地與農地使用未能與自然降雨有所連動或保留，將會造成地表水過多不易渲洩而積淹水。台灣年平均降雨量約2500mm~3000mm，乃是全球高雨量的國家，因此建築基地保水設計應是理所當然的趨勢。

近來因全球暖化氣候變遷，許多地區形成極端氣候(extreme climate)，不時出現極端氣候天氣(extreme weather)而讓天氣變兩極化，雨季越濕乾季越乾，天氣大旱、大水反而變成常態。台灣這十年來也出現極端氣候現象，最明顯就是降雨型態的變遷：(1)年降雨日數減少，雨季縮短，無雨常旱日拉長；(2)降雨強度增加暴雨次數變多，大豪雨(日雨量 $\geq 200\text{mm}$)及超大豪雨(日雨量 $\geq 350\text{mm}$)次數變多，常會一雨淹水成災，都市型態洪水災害增加；大雨降於都市增加，降於山區減少。

2.2 敷地計畫水環境之保水設計需求探討

在溫帶國家，因為年降雨量在1000mm以下，所以基地保水透水性並不會被重

視，所以敷地計畫水環境規劃設計較簡略。然而日本雖然是溫帶國家，但是因為有颱風常會帶來瞬間大雨，所以會在敷地計畫(site planning)系統中將基地保水納入敷地之庭園綠地設計中，包括樹木、花圃、碎石步道、仿自然生態水池、灌木群等，因而形成日式庭園的基本元素與特色。早期台灣承襲日式建築敷地計畫概念與設計手法，因此也注重基地保水透水性，但是後來因經濟發展，現代RC建築敷地計畫開始仿效歐美溫帶少雨地區設計手法，減少喬木、花圃綠化，水池改為不透水之純景觀池，而無生態特色，讓敷地計畫成為人工景觀設計，水環境規劃被忽略而欠缺與自然環境水循環及生態系統之連貫。因此之故，基地透不透水或需不需要保水，多不在敷地計畫的考量範圍內。後來雖然各地方政府有要求基地之綠覆率，但是綠覆率可以是在人工地盤上的綠化植栽，所以並不一定會與大地土壤接氣，基地保水仍然未能真正確實被規範到。雖然近年來，我國地方政府又要求屋頂面積要超過1/2為綠化面積，然而屋頂綠化之覆土量有限，故整體保水量不大，且不列入敷地計畫之設計要求，所以敷地計畫的基地保水設計仍是常被忽略而遺漏。然而目前建築技術規則並無強制要求敷地須設計基地保水，只有在綠建築標章申請時才會納入考量，不過標章申請是自願制，因此除非是使用國家預算經費超過五千萬元之建築工程，強制須申請綠建築標章，才會將基地保水納入設計，否則就完全不做基地保水。

2.3 基地保水機制探討

台灣本來就是個多雨氣候的國家，地表水的問題一直都是建築設計時的考量項目，也是都市經營者必須面對的主要議題。一直以來建築基地排水就是由政府負責興建都市排水溝系統，過去台灣因為都市化過程隨著都市建築物密度的增加，必須不斷修改增加其排水溝系統。因此都市地區經常在挖道路與設置排水溝，並且每隔幾年都市排水溝就必須重新再挖大挖深，以便容納更多都市內建築基地之雨水排出量，所以消耗都市政府之工程預算。近十多年來因為全球暖化而氣候變遷，極端氣候下的豪大雨次數及雨量都增加，颱風降雨量也暴增，基地保水設計已是必須考慮要全面納入敷地計畫的項目，以分擔都市暴雨之負荷，並且應朝向再提高基地之設計保水量方向移動。在德國，因為基地所排出之雨水是由政府處理而須付費的，所以建築物在設計時都會自動增加基地保水及貯留再利用設計，以減少雨水排放量及降低費用。台灣是雨水多的國家，基地雨水排放全由政府處理卻不收費，所以就不會出現敷地計畫自動設計基地保水的情況，因此未來為因應極端氣候多豪大雨量情況，基地保水設計應該要被強制要求，或以經濟手段誘導方式來導入敷地計畫中。

2.4 基地保水設計手法探討

依據內政部建築研究所之「綠建築評估手冊」，基地保水設計手法分為兩大類：直接滲透設計，貯集滲透設計。依據各類保水設計之保水量計算，貯集滲透因為具備同時貯集與滲透水量的功能，於下暴雨時可以先暫時蓄洪，再讓雨水以自然滲透方式滲入地下，故其保水量計算，除了依所占面積大小外，另加上本身之貯水體積量。因此當基地土壤為黏土及粉土時，入滲係數分別只有 10^{-7} m/s 或 10^{-6} m/s，其入滲量遠遠小於貯水體積之蓄水量，這對要滿足台灣熱溼氣候瞬

間暴雨大水量的貯留能力而言，貯集滲透保水設計是較佳之選擇。而台灣建築基地之表土土壤，大多數是為黏土及粉土，較少砂土，因此敷地貯集滲透之保水設計，及是暴雨時基地不易形成大淹水的較佳設計手法。

由評估手冊顯示，貯集滲透設計又細分為(1)貯集滲透空地或景觀貯集滲透水池設計，以及(2)地下貯集滲透設計兩類。貯集滲透空地設計之蓄水量，須在雨後24小時內消退以回復空地之原使用功能；另外為顧慮安全性，其深度以不超過50cm為佳，且其空地邊緣高差應分段漸變，以增加空間使用安全。而景觀貯集滲透水池，須保留一部份底層為不透水以維持景觀之用，因此其實際可以蓄水之體積須將其扣除而會減少，且其滲可供透之表土面積也須將水池底層不透水面積扣除，實際貯集滲透水量因而被限制住而打折扣。

地下貯集滲透設計之蓄水量，可分為礫石或廢棄水泥塊貯集滲透，以及組合式蓄水框架貯集滲透兩種保水設計。由於礫石較為密實，其貯水孔隙率為0.2，而組合式框架為中空構造，其蓄水孔隙率為0.8，因此大雨時便能貯集較多的水量，所以組合式蓄水框架之地下貯集滲透設計手法，在日本多暴雨的氣候環境下被普遍設計應用，而台灣暴雨的氣候型態與日本相似，其技術應用設計及策略值得進一步去探討。

三、研究調查與結果整理

由以上理論之探討，本研究將從基地保水量多寡、敷地景觀影響、維護管理三個角度去進行資料分析與現場調查，做為分析比較之依據。

3.1 基地保水量多寡之比較

依據內政部建築研究所綠建築評估手冊(2015年版)，綠建築各類保水設計手法之保水量，在相同保水面積或相同保水體積下，貯集滲透保水量會比其他保水設計的保水量都多約2倍以上(基地為粉土土壤情況)，或3倍以上(黏土土壤情況)，見表1所示。在同為貯集滲透保水設計手法中，地下組合式蓄水框架的貯集滲透保水量，是貯集滲透空地或景觀滲透水池保水量的1.5倍以上(基地為粉土與黏土情況)，或是地下礫石的貯集滲透保水量的3倍以上(基地為粉土與黏土情況)，見表1所示。顯然地下組合式蓄水框架的貯集滲透，對於暴雨瞬間雨量的貯集有較大的容量與效益。

表1 綠建築各類保水設計之保水量比較(單位： m^3)

各類基地保水設計	黏土 ($f=10^{-7}m/s$)	粉土 ($f=10^{-6}m/s$)	砂土 ($f=10^{-5}m/s$)
綠地、披覆地、草溝	0.1728	1.728	17.28
透水鋪面(連鎖磚)	0.3364	1.114	8.89
透水鋪面	1.5043	2.364	10.14
花園土壤	1.0	1.0	1.0
貯集滲透空地(或景觀貯集滲透水池)	10.1728	11.728	27.28
地下貯集滲透(組合式蓄水框架貯集)	16.1728	17.728	33.28
地下貯集滲透(礫石貯集)	4.1728	5.728	21.28
以基地保水面積： $20m^2$ ，或保水體積： $20m^3$ (= $20m^2*1m$ 深)為計算基準(註：貯集滲透空地、景觀滲透水池依評估手冊只能有0.5m深度限制規定，及高低水位差0.5m計算；池底體積減少部分未扣除。)			

(資料來源：本研究整理)

貯集滲透設計之保水量較直接滲透設計之保水量大的原因，是因為它除了地表直接滲透面積之保水量外，還有一個可蓄存水量的體積保水量。而不同之貯集滲透設計，其體積蓄存保水量的原理與分法也不同，也會讓保水量有很大的差異。依評估手冊，可以細分為貯集滲透空地、景觀貯集滲透水池、地下組合式蓄水框架貯集滲透、地下礫石貯集滲透等四種。見表 2 所示。

由於基地保水指標 λ 是以基地設計保水量與基地原土地之保水量做比較，再與基準值 λ_c 計算系統得分，因此基地設計之保水量越大， λ 值會越高，系統得分也會越高。所以採取保水量較高之保水設計手法，是有利於綠建築評估而是必要的發展方向。

表 2 各類貯集滲透保水設計之原理與方法比較

貯集滲透設計種類	保水原理與設計方法	構成示意圖
貯集滲透空地	<ol style="list-style-type: none"> 1.利用地表凹陷或窪地形成蓄水空地 2.大雨時滯留雨水於空地內並形成短暫滯留水池 3.經由透水空地入滲雨水 4.大雨後一日內須滲透成無水狀態 5.空地蓄水深度 $\leq 0.5\text{ m}$ 	
景觀貯集滲透水池	<ol style="list-style-type: none"> 1.利用景觀水池高水位區域形成蓄水水池 2.大雨時滯留雨水於水池高水位區域 3.經由高水位區透水池護岸入滲雨水 4.貯集之水可以長時間蓄留成為景觀水體 5.水池蓄水深度 $\leq 0.5\text{ m}$ 	
地下組合式蓄水框架貯集滲透	<ol style="list-style-type: none"> 1.利用地下組合式蓄水框架中空槽體形成貯水槽 2.大雨時滯留雨水於地下貯水槽內 3.經由貯水槽四周及底部入滲雨水 4.貯水槽上部可覆土綠化成為草坪或花園 5.地下框架蓄水深度 \leq 地下水位深度 	
地下礫石貯集滲透	<ol style="list-style-type: none"> 1.利用地下礫石堆積之空隙形成蓄水體 2.大雨時滯留雨水於地下蓄水體內 3.經由蓄水體四周及底部入滲雨水 4.貯水體上部可覆土綠化或直接裸露 5.地下礫石蓄水深度 $\leq 1\text{ m}$ 	

(資料來源：本研究整理)

就實際某一辦公類綠建築案為例，其基地面積 1000m^2 ，地表 2m 內之土壤為粉土(最終入滲係數為 10^{-6})。如將其原設計面積 14m^2 之草坪被覆地直接滲透保水設計，改為地下組合式蓄水框架之貯集滲透設計，其保水指標之系統得分RS3由原來之 2.44 分可提高為 4.66 分。並且其表土面積仍可做為草坪綠化面積計算，完全不會影響到而減少綠化量指標的系統得分。

3.2 敷地景觀影響之調查

基本上，不同之基地保水設計手法，除了對基地保水量有極大的差異會影響綠建築的分級評估的分外，其實對敷地景觀也有不同之結果，因而影響整體綠地庭園環境之感覺。由於綠地被覆地、草溝保水設計手法，與透水量太低不納入考量，本研究敷地景觀調查對象，只針對綠建築採取貯留滲透之保水設計手法之案例，進行現場調查。分別為(1)貯集滲透空地、(2)景觀滲透、(3)地下組合式蓄水框架貯集滲透、(4)地下礫石貯集滲透等四種設計手法。調查結果整理如表 3 所示。

由表 3 調查實際案例保水設計現況影像之貯集滲透空地實景顯示，在有貯水

的情況時，空地就不能使用，但是會有水景，能讓敷地景觀增加多樣性；在沒有貯水呈現乾涸的情況時，空地會有綠草生長，仍尚具景觀效果，且因地形有高低變化，增加敷地的趣味性。由景觀貯集滲透實景現況顯示，為了保護水池安全性，其周圍都會設置一些人工圍阻設施，因此景觀水池大多只能遠觀而不能親近，而這些圍阻設施如果欠缺設計感就會降低敷地整體景觀之品質；另外景觀水池如果長滿了浮水性植物，遮蔽水面的觀賞，會讓水池之景觀性打折扣而降低，而影響敷地之整體景觀。

再由地下組合式蓄水框架貯集滲透之實景現況顯示，因為貯水體位於地表土下，水體上面為覆土層或鋪設白色景觀碎石層，可以與周圍庭園景觀相互融合，可創造出草坪景觀效果，或是碎石步道景觀，具有因地制宜創造敷地多樣性景觀特色之潛力。

另外由地下礫石貯集滲透之實景現況顯示，因為貯水體位於地表土下，上面為覆土層或表面一部分裸露出來，這樣可以與周圍景觀設計時一起結合處理。由於地下礫石本身沒有強力抗壓力之支撐性，所以只能遠看不能實際在此活動，因而降低其作為提升敷地整體景觀元素之潛力。

表 3 貯及滲透保水設計四種手法景觀調查案例實景

A.貯集滲透空地	B.景觀貯集滲透水池
<p>A-1</p> 	<p>B-1</p> 
<p>A-2</p> 	<p>B-2</p> 
C.地下組合式蓄水框架貯集滲透	D.地下礫石貯集滲透
<p>C-1</p> 	<p>D-1</p> 
<p>C-2</p> 	<p>D-2</p> 

(資料來源：本研究整理)

3.3 管理維護成本及使用安全性調查

針對四種不同之貯集滲透基地保水設計，透過現場觀察，探討其管理維護成本與安全性，綜合比較如下。

由於地下貯集滲透保水設計，皆是預埋在地底下，上面覆土厚20cm做綠化，形成天然保護層，雨水經由表面覆土層自然滲透到地下蓄水層，因此不論是地下組合式蓄水框架貯集滲透手法，或是地下礫石貯集滲透手法，兩者皆沒有外露在大氣中，所以沒有時常管理維護成本之需要。又因為是蓄水體埋在地下，使用安全性高，不會有任何人為意外發生的可能，安全管理也不需要。然而貯集滲透空地或景觀貯集滲透水池之保水設計，因為有蓄水且都是採露天地表水貯留方式，雖然景觀趣味性高，但地表水池之管理維護作業較多，包括水池內植物之定期清理與整理，供補水設施之管理等。景觀貯集滲透水池因為要維持一定景觀效果之水位，如果水池可連結至基地內自然溪溝水源，在乾季無雨水時做為補充水源，減少自來水補充耗量，否則水景景觀會喪失而景觀品質變差，或須耗用大量自來水資源作為補充水源，這就不符合綠建築省水設計之精神，也會增加管理維護之成本。貯集滲透空地保水，因為水體並不要一直蓄留，多保持乾燥狀態，所以管理維護上較為簡單而成本低。然而這兩種滲透貯集保水設計，因為都會有水體滯留情況，確保池內有水時的防溺安全性維護，成為重要的考慮因素與執行重點。

四、應用策略與設計手法研擬

經由案例分析與調查，將綠建築評估手冊之四種貯集滲透設計，應用在敷地計畫時之優缺點，做綜合整理比較，如表4所示。由表中可知，這四種貯集滲透保水設計，除地下組合式蓄水框架貯集滲透幾乎無缺點外，其他三種各有優缺點。

表4 敷地貯集滲透設計優缺點綜合比較

貯集滲透設計種類	保水量多寡程度 (比例)	景觀效益影響	管理維護成本/安全性
貯集滲透空地	中等級 (黏土：2.44) (粉土：2.05)	不確定： 須先做旱濕兩種情況設計，以確保在無水時之空地景觀品質，以及有水時之水池景觀品質	<ul style="list-style-type: none"> ● 平常管理維護成本低。 ● 在有水時須做安全性管理，避免意外發生，稍增成本。
景觀貯集滲透水池	中等級 (黏土：2.44) (粉土：2.05)	佳： 增加敷地水池景觀，提高敷地整體景觀效益	<ul style="list-style-type: none"> ● 在旱季為維持景觀水池之一定水量，不時必須進行補充水源作業，同時常要進行水生植物清除處理，增加人事及水資源成本。 ● 因長時間水池有一定水量而須做安全性管理，以避免意外發生，故將增加安全管理成本。
地下組合式蓄水框架貯集滲透	高等級 (黏土：3.87) (粉土：3.09)	佳： 增加草坪綠化景觀，提高敷地整體景觀效益	<ul style="list-style-type: none"> ● 地面上之自然草坪免保養免維護，地下框架完全免維護保養，故維護管理成本極低。
地下礫石貯集滲透	低等級 (黏土：1) (粉土：1)	佳： 增加草坪綠化景觀，提高敷地整體景觀效益	<ul style="list-style-type: none"> ● 地面上之自然草坪免保養及維護，地下礫石完全免維護保養，故維護管理成本極低。

(資料來源：本研究整理)

由此再針對其優缺點，研擬出這四種貯集滲透之敷地計畫之規劃設計策略，如表 5 所示。由表中可知，貯集滲透空地與景觀貯集滲透水池，因為有安全性管理上之顧慮，不建議設置在市區有幼兒活動多的地方，以及住宅區內或社區綠地公園內有幼童易到達之處，避免發生幼童溺水意外。由於地下貯集滲透保水設計之表面為覆土綠化，故其在敷地配置之停車場、廣場、操場等空間型態皆可設計採用，既防洪保水又可兼做其他空間使用，達到多目的之功能，提高土地使用之效益，讓環保生態與經濟利益可以兼顧，值得在台灣地少人稠國家之敷地推廣應用。

表 5 四種基地貯集滲透保水設計應用於敷地計畫之策略

貯集滲透設計種類	敷地所在區域	敷地之使用分區	敷地配置之空間型態
貯集滲透空地	<ul style="list-style-type: none"> • 郊區 • 鄉村區 	<ul style="list-style-type: none"> • 都市綠地公園 • 工業區 • 學校校園 	<ul style="list-style-type: none"> • 非景觀區 • 外圍非主要活動區
景觀貯集滲透池	<ul style="list-style-type: none"> • 市區 • 郊區 • 鄉村區 	<ul style="list-style-type: none"> • 都市綠地公園 • 工業區 • 商業區 • 學校校園 	<ul style="list-style-type: none"> • 景觀區 • 主要活動區 • 綠化庭園
地下組合式蓄水框架貯集滲透	<ul style="list-style-type: none"> • 市區 • 郊區 • 鄉村區 	<ul style="list-style-type: none"> • 都市綠地公園 • 社區綠地公園 • 工業區 • 商業區 • 學校校園 • 住宅區 	<ul style="list-style-type: none"> • 景觀區 • 非靜觀區 • 主要活動區 • 外圍非主要活動區 • 綠化庭園 • 停車場 • 綠化廣場 • 學校操場
地下礫石貯集滲透	<ul style="list-style-type: none"> • 市區 • 郊區 	<ul style="list-style-type: none"> • 都市綠地公園 • 社區綠地公園 • 工業區 • 商業區 • 學校校園 • 住宅區 	<ul style="list-style-type: none"> • 景觀區 • 非景觀區 • 主要活動區 • 外圍非主要活動區 • 綠化庭園 • 停車場 • 綠化廣場

(資料來源：本研究整理)

五、結論與建議

5.1 結論

為因應氣候變遷極端天氣暴雨之都市防洪功能，建築敷地計畫水環境系統應將基地貯集滲透保水設計擴大納入，以提高都市保水容量。其中以貯集滲透空地、景觀貯集滲透水池、地下組合式蓄水框架貯集滲透為主要之保水設計為主，因為地下礫石滲透貯集之蓄水容量偏低，不建議採用作為防洪設計手法。另外由於貯集滲透空地、景觀貯集滲透水池設計有安全性管理之需求，故會增加維護成本；此外景觀貯集滲透水池尚須隨時保持一定的景觀水池水量，以及須定期水生植物清除整理等作業，維護管理之成本也會再增加，所以在敷地計畫時須依個案可行性情形，納入設計應用。本研究結果得知，從貯集滲透保水量多寡、景觀效益影響、管理維護等三方面整體考量，地下組合式蓄水框架貯集滲透設計，是我國濕熱多雨氣候區敷地計畫需考量保水、防洪、綠化景觀多功能用途需求時，應用策

略最為全面適用之技術及設計手法，值得建築水環境設計之應用推廣與發展。

5.2 建議

事實上，貯集滲透雖然在本研究將其概分為四種類，但各個種類因為其採用細部設計與工法之不同，以及產品材料規格之不同，其施工作業之成本也會不同，本研究並未納入研究，例如貯集滲透空地之不同工法、景觀貯集滲透水池之不同工法，或是地下組合式蓄水框架貯集滲透之不同產品材料規格及施工方法，都會影響到施工成本與維護管理成本，及施工及使用階段的安全性與成本等，甚至敷地水環境規劃設計發展方向，因此值得後續針對個別設計手法或是統合手法，再進一步做更精細的研究與分析。

參考文獻

1. 綠建築評估手冊（2015年版），內政部建築研究所，2015
2. 雨の建築学，日本建築学会，2000
3. 雨水貯留滲透設施（塑膠製品）技術手冊及其應用，台灣下水道學會，2016
4. CROSSWAVE 地下水滲透貯集槽，lynch-ecl.com.tw，2017
5. 環境共生住宅 A-2，環境共生住宅推進協議會，2009

B-07

低層建築物附設水平雨庇風荷載之研究

何明錦

中國科技大學建築系
教授

陳若華*

建國科技大學創意生活應用設計研究所
副教授

摘要

附置於建築物表面之雨庇常採用輕量化建材設計，其風荷載應加以注意，但目前國內建築耐風設計規範關於此部分尚未有明確的規定，因此需加以深入探討。本研究利用風動實驗探討不同安裝位置與懸伸情形對於建築物立面上之水平雨庇其風荷載的影響。研究顯示，雨庇安裝高度接近屋頂高度位置時，上游區的邊緣有較強烈的負風壓係數分布，顯示前緣渦流的作用強烈，而隨著安裝高度的下降，版面平均淨風壓係數的分布趨於均勻，且其負風壓作用亦趨緩，顯示主導氣動力作用的為建築物量體，建築物屋頂高度處的強烈分離剪力流作用影響雨庇所受風壓分布情形。雨庇版面擾動性淨風壓係數分布情形亦類似。雨庇整體風荷載隨風攻角的變化情形以來流正吹及小攻角的情況所受風荷載最為嚴重。雨庇所受的尖風風荷載在正風壓及負風壓兩種情形均存在，但有呈現接近對稱的狀況。如將雨庇安裝於建築物高度一半的地方，因為後方建築物量體阻擋，雨庇板所受整體淨風壓係數呈現下降的現象。

關鍵詞：雨庇，風荷載，風洞實驗

The Wind Loadings on Horizontal Canopy of Low-rise Buildings

Abstract

The canopy attached to a building is often made of light-weight building materials, and the wind load should be paid attention to. However, there is no clear stipulation about the wind-resistant design code in this part, so it needs to make some further discussion. In this study, the effect of different installation positions and overhangs to the wind loads on the horizontal canopy of buildings was discussed by using the wind experiment. The research results shows that when the installation location of canopy is close to the roof height, there is a strong negative wind pressure coefficient distribution at the edge of the upstream area, which shows that the leading edge eddy plays a very strong role. With the installation height decreasing, the mean net pressure coefficient decreased and the distribution tends to be uniform. This is indicating that the dominant aerodynamic effect is the building body. And the strong separation shear layer at the roof height of the building affects the wind pressure distribution of the canopy. The distribution of fluctuating net pressure coefficient of canopy is also similar. However, the most severe loading is in the cases where the oncoming flow at a small angle of attack. The extreme wind loadings of canopy are present in both positive and negative pressures, and they appear close to symmetrical. Also we found as canopy is to be installed at middle height of the building, the total net pressure coefficient of the canopy is declining due to the mass blockage of the building.

Keywords : Canopy, Wind Loadings, Wind Tunnel Test

一、前言

臺灣地區颱風盛行，附掛於外牆的附置物如立面上的外伸式雨庇等，因多半不屬建築物主要抗風結構系統，因此其結構系統設計通常較為簡化或缺乏合適的設計參考數據，面對颱風等強烈的氣流作用下易受到風災損失。此類構造物造型多變，結構系統受風荷載的計算及考慮項目常以簡化或經驗作取捨，在現行規範中較無明確規定，如能提供的合適的風力係數，提供安裝與規劃之參考，對於提升此類設施的耐風性能、減低財產風損、減少安全危害應有所裨益。

二、文獻回顧

附置於建築物表面之遮陽板或雨庇如與建築物主體一併施作，常採用與建築物主體相同的建材如混凝土等，其耐風性能較無疑慮。如採用輕量化建材設計則其風荷載應加以注意。Ioannis(2009)針對低層建築物的雨庇風荷載利用風洞實驗加以量測，檢討包括簷口高度之雨庇或建築物半高之雨庇等多種條件進行實驗，量測結果並與規範建議值相比較，結果顯示以淨風壓觀點檢視風壓係數，雨庇的尖峰風壓係數分布在不同風攻角作用下，正負值均存在，因此兩種情形均須加以考慮，特別是簷口高度之雨庇其所受風荷載明顯高於其他配置方式，甚至有高於規範建議值的情形，其餘安裝於建築物半高度處的雨庇構造物，則風荷載均較小。李(2012)以風洞實驗探討設置於建築物入口處之懸臂式雨庇各部分所受之風壓分布，以風攻角 45-67.5 度附近具有最強烈的平均負風壓係數分布，而在風向角與雨庇平行時，受到角隅渦流影響，雨庇平面上游區有最大的擾動性風壓係數分布。此研究對於建築物地面層的雨庇受風作用有良好的探討，可進一步擴大其探討的雨庇與建築量體間尺寸比例範圍與安裝區域，則更具實用價值。Jose(2012)運用風洞實驗探討一般民居建築立面上雨庇構造物風荷載，包含全建築物寬度配置或半邊建築物立面上配置；結果顯示安裝於屋頂高度的雨庇其風荷載遠高於安裝於建築物一般高度位置的構件。同時以淨風壓觀點，負的尖峰風壓出現亦較嚴重，顯示安裝於屋頂高度的雨庇其所承受的渦流作用十分強烈，其餘高度則雨庇上下風壓差異較低，因此尖峰風荷載亦較低。

建築物耐風設計規範中有關雨庇構造物的風荷載規範，以紐澳規範(ASNZS 1170 2:2002)有較為明確的作定義，該規範中主要針對低矮型建築物之雨庇所受淨風壓係數進行建議，淨風壓係數建議值包括正值及負值，設計時兩者均需加以考慮。風荷載仍以等值靜態風力方式進行計算，合力作用點設於雨庇版面之幾何中心。依規範建議採用的淨風壓係數應以雨庇高度與建築物平均屋頂高度之比值(h_c/h)進行分類，主要是 h_c/h 小於 0.5 為一類，而 h_c/h 大於或等於 0.5 為另一類，並建議對於中間數值以內插方式計算。由建議之淨風壓係數顯示，正值淨風壓係數隨雨庇安裝的高度比上升而下降，負值淨風壓係數隨雨庇安裝的高度比上升而上升，特別是接近屋頂高度附近的雨庇有最強烈的負風壓作用。

三、研究方法

3-1 流場規劃

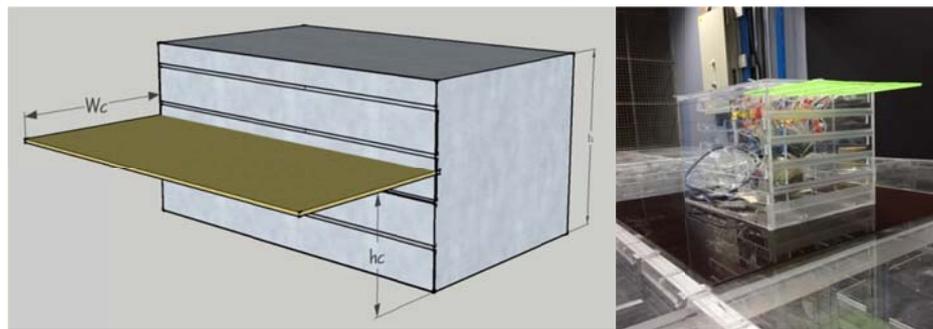
本研究規劃之實驗項目較多，氣動力實驗於淡江大學風工程研究中心第一號學術風洞進行，此風洞為吸入式開放型。風洞試驗段長 12.0 m，寬 2.2 m，高 1.8 m。進風處收縮段之收縮比為 3.6:1。進風口段前方設有蜂巢管(Honey core)及三層濾網(Screen filter)，可降低風洞內自由流之紊流強度至約為 0.5% ~ 1.0%。離心式風扇由一具 250 匹馬力之

直流無段變速馬達帶動。風速可經由控制風扇之轉速而調整，正常運轉下其流速範圍為 1.0 m/s 至 28 m/s。

本實驗設定風洞實驗風速為 10m/s，考慮雨庇、太陽能光電系統等多建置於一般建築物高度之屋頂，建築高度僅位於整體大氣邊界層之底層部分，因此本研究改以均勻紊流場取代大氣邊界層流場進行風洞實驗。為使風洞流場假設更為理想，設計一座離地 30 公分之端板，並將模型固定於此端板上，再於端板前緣設置一鋒利導流板，將接近地表之邊界層效應所產生影響導入端板下方。另外於導流板前方 1.8 公尺處設置一隔柵板，製造出 10~13% 之紊流強度剖面。此時風洞有效高度將由 1.8 m 降為 1.5 m，本次模型投影面積所形成之阻塞比為 1.8%，不致造成阻塞比效應。

3-2 實驗量測與模型規劃

雨庇模型氣動力實驗採用之氣動力模型包括建築物與雨庇板兩部分，建築物模型以 5mm 厚之壓克力板黏合，模型尺寸為寬 20cm、高 30cm、深 30cm，建築物模型表面未設風壓孔。雨庇模型以 3D 列印方式製作，以上下兩片黏合方式完成，表面均布風壓孔，在黏合前預先安裝 1.2mm 外徑之風壓管線，完成後雨庇模型實際厚度為 4mm，雨庇模型尺寸為 20 cm x 16cm，版之兩面相對應位置均佈設壓力孔，搭配壓力管線系統，量測風壓變化。板可安裝於不同的立面高度及伸縮，以變化高度比及懸伸比，共有五種高度及四種懸伸比可供變化，氣動力實驗模型及模型之各項特徵尺寸代號如圖 1 所示。



資料來源：本研究繪製

圖 1 雨庇氣動力模型設計

表 1 雨庇模型氣動力實驗系列

h (cm)	hc/wc	wc				hc/h
		3 cm	6 cm	9 cm	12 cm	
20	9.5	3.17	1.58	1.06	0.79	0.48
	15.5	5.17	2.58	1.72	1.29	0.78
	19	6.33	3.17	2.11	1.58	0.95
40	6	2.00	1.00	0.67	0.50	0.15

資料來源：本研究整理

氣動力模型之上下版面風壓孔以細管線製作之壓力傳感管線系統(tubing system)與量測儀器相接，管線材質為 PVC 因此具備良好的可撓性，不致影響風壓信號傳送。壓力量測管線系統為實驗前經具白噪音(white noise)特性之擾動壓力信號進行率定，驗證無扭曲頻率可達 35Hz 以上。管線系統連接至電子式壓力掃描模組上的壓力輸入埠，分別接入電子式壓力掃描器。表面風壓量測使用之壓力掃描器(ZOC33/64 PX)，該系統每個單一模組有 64 個壓力輸入管，對應 64 個壓電式壓力感應器，每一壓力感應器皆可單獨校正。各模組接連接至壓力訊號處理系統(RAD BASE 3200)，並儲存於個人電腦進行分析。採樣頻率為 256Hz，每次實驗採樣 132 秒。模型安置於風洞試驗段之中央圓盤，該圓盤可利用馬達驅動改變模型面對來流的座向，模擬不同風攻角的影響。

建築模型立面上採多層開口式設計，兩底板模型可鎖定在立面上，控制之變數包括高度比與懸伸比，設計兩底板模型可伸縮於建築物立面不同高度上，本研究在安裝條件變化如表 1 所示。

3-3 實驗資料分析

由實驗量測所得之板面風壓資料首先將計算其表面風壓均值、擾動值等，以完整掌握表面風壓分佈情形。氣動力係數定義如下所示：

$$\text{平均風壓係數 } C_p = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (1)$$

$$\text{擾動性風壓係數 } C'_p = \frac{\sqrt{P'^2}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (2)$$

其中 P 為風壓時序列資料， \bar{P} 為平均壓力， $\sqrt{P'^2}$ 為擾動性風壓的均方根值， ρ 為空氣密度， U 為平均風速。

尖峰風壓係數採用 Mayne & Cook(1980)建議之方法推估尖峰風壓係數。

考慮薄板型氣動力模型受風作用來自板的兩面風壓差，因此實驗成果分析將迎風面的風壓與背風面的風壓，所得時間序列資料中作相減的運算，由於模型設計時即已考慮到淨風壓計算的需求，版面布的風壓孔位置在兩面均相同，因此可計算得各風壓孔位的淨風壓係數。

$$\text{淨風壓係數 } C_{pn}(t) = C_{P_{up}}(t) - C_{P_{lower}}(t) \quad (3)$$

其中 $C_{P_{up}}$ 為零攻角時迎風面風壓係數， $C_{P_{lower}}$ 為零攻角時背風面風壓係數，採時序列資料作及時相減運算，後續可計算淨風壓係數之平均值與擾動值。淨風壓係數表達的是板所受到的風荷載，以指向版面向為壓力的正，因此如果迎風面與背風面均同受相同的正壓力，則其整體淨風壓將為零，如果迎風面受到指向離版面的壓力，亦即為負壓力，而此同時背風面如受到指向版面的正風壓，兩者聯合作用以(3)式計算之，則得甚低的負值，對於太陽光電板而言，代表掀翻板面的作用力，不利於結構安全。

為比較不同來流條件下的太陽光電板風荷載，將採用面積分計算方式，將板面上各風壓孔之瞬時淨風壓係數以其代表的貢獻面積為權重加權計算太陽光電板整體所受淨風壓係數。

$$C_{Pnet} = (\sum C_{P_i} \times A_i) / A_{total} \quad (4)$$

其中 A_i 為各風壓孔的貢獻面積， A_{total} 為該片光電板的總面積。

四、結果與討論

雨庇在不同配置條件下的氣動力行為，本研究採用板所受的整體淨風壓係數為代表，分別探討其平均值與擾動值的變化，據以觀察不同安裝條件及風攻角的影響。

4-1 不同安裝條件對雨庇表面淨風壓分布的影響

首先以 $hc/h=0.95$ 、 $hc/wc=1.58$ 雨庇模型淨風壓係數分布為例，檢討風壓分布特徵，風攻角零度時， $hc/h=0.95$ ， $hc/wc=1.58$ ，雨庇模型淨風壓係數分布如圖 2 所示。如圖 2(a)、2(b)所示，平均風壓係數與擾動性風壓係數之分布均呈現靠近外緣處有較高的風壓荷載及高擾動性，因接近建築立面位置受到建築物牆面的阻擋，使得壓力梯度下降較為迅速，而靠近外緣處則因前緣分離流渦漩生成，造成較大的風壓荷載。利用 Cook and Mayne (1980)建議的方法推估版面淨風壓的尖峰風壓分布如圖 2(c)所示，相同的，在靠近外緣有極大的尖峰風壓分布。

圖 2 顯示的雨庇安裝位置接近屋頂高度處，如調整不同安裝高度，則其平均淨風壓係數分布如圖 3 所示。圖 3 中顯示，隨著安裝高度的下降，版面的平均淨風壓係數分布有逐漸趨於中性(neutral)的狀況，而且隨著安裝高度的下降，較強的負壓區域不再是為於雨庇之前緣，有逐漸向接近建築物牆面的區域移動的趨勢，形成新的核心區域。因安裝高度的下降，使得沿建築物正立面下洗(downwash)的氣流得以充分發展，因此形成新的作用核心區域位於版面較後方的位置。如雨庇安裝高度接近屋頂高度，則主導風荷載的是前緣的分離剪力流，隨安裝高度的下降，下洗氣流與前緣的分離剪力流交互混合，同時受到牆面的阻撓，前緣的分離剪力流生成見受限制，因此雨庇的風荷載逐漸減輕，因此，對於雨庇的受風作用力而言，隨安裝高度的下降而減輕。

因此，雨庇安裝高度接近屋頂高度位置時，上游區的邊緣有較強烈的負風壓係數分布，顯示前緣渦流的作用強烈，而隨著安裝高度的下降，版面平均淨風壓係數的分布趨於均勻，且其負風壓作用亦趨緩，顯示主導氣動力作用的為建築物量體，建築物屋頂高度處的強烈分離剪力流作用影響雨庇所受風壓分布情形。

不同安裝高度雨庇擾動性淨風壓係數分布如圖 4 所示。圖 4 中顯示，隨著安裝高度的下降，版面的擾動性淨風壓係數分布較強區域不再是為於雨庇之前緣，有逐漸向接近建築物牆面的區域移動的趨勢，形成的核心區域與平均風壓係數的變化情形十分類似，顯示高擾動性的區域向版之後方區域移動。但整體而言，擾動性風壓係數的分布仍是以位於屋頂高處時最為強烈。

因此，雨庇位於接近屋頂高度位置時，上游區的邊緣有較強烈的風壓擾動分布，而靠近建築物立面部分則略為下降。雨庇版位於建築物中高度位置時，擾動風壓較低，接近建築物底層附近雨庇版的擾動性分壓分布有微幅的上升，顯示接近地面的建築物底層渦流影響，提高雨庇版所受的擾動性風力。

4-2 風攻角對雨庇表面淨風壓分布的影響

不同風攻角的影響，如圖 5 所示。風攻角為 10 度時，如圖 5(a)所示，雨庇版面的

平均風壓係數不再是對稱的分布，隨來流的方向而有偏斜的現象，來流為小攻角時，平均風壓變化差異不大，平均風壓係數的值以接近建築物牆面的區域較高，應是受到牆面阻擋版面下方氣流，造成板下之壓力回升，因此有較強的負風壓值分布。風攻角 90 度時，如圖 5(b)所示，平均淨風壓係數趨近於零值；由於雨庇安裝高度比 $hc/h=0.95$ ，表示安裝位置接近建築物頂部，風攻角 90 度時，版之迎風及背風區均為開放區域，版面上下流況接近對稱因此平均淨風壓係數接近零的分布較多。

雨庇擾動性風壓係數的分布在靠近建築物的版面上，受到較高的擾動性風壓係數，應與建築物側面對來流形成阻擋作用，因此版面下方會有較高的正壓恢復，促使計算出的淨風壓係數略顯較高。

4-3 不同安裝條件對雨庇整體淨風壓的影響

為瞭解雨庇整體所受風荷載，將各不同位置之風壓孔風壓資料，以各風壓孔所在位置之貢獻面積為權重，計算個瞬時的整體風壓係數，再進行統計分析。各不同配置的雨庇板所受整體淨風壓係數隨風攻角的變化情形繪圖表現，如圖 6~圖 7 所示，圖 6 為雨庇安裝於接近屋頂高度處的情況，隨風攻角的變化情形不論懸伸比(hc/wc)為高或低，均呈現接近零值附近的狀況，因此以來流正吹及小攻角的情況對於雨庇所受風荷載最為嚴重。如將雨庇安裝於建築物高度一半的地方，因為後方建築物量體阻擋，雨庇板所受整體淨風壓係數呈現下降的現象，如圖 7 所示。

五、結論

1. 雨庇安裝高度接近屋頂高度位置時，上游區的邊緣有較強烈的負風壓係數分布，顯示前緣渦流的作用強烈，而隨著安裝高度的下降，版面平均淨風壓係數的分布趨於均勻，且其負風壓作用亦趨緩，顯示主導氣動力作用的為建築物量體，建築物屋頂高度處的強烈分離剪力流作用影響雨庇所受風壓分布情形。
2. 雨庇位於接近屋頂高度位置時，上游區的邊緣有較強烈的風壓擾動分布，而靠近建築物立面部分則略為下降。雨庇版位於建築物中高度位置時，擾動風壓較低，接近建築物底層附近雨庇版的擾動性分壓分布有微幅的上升，顯示接近地面的建築物底層渦流影響，提高雨庇版所受的擾動性風力。
3. 雨庇安裝於接近屋頂高度處的情況，隨風攻角的變化情形不論懸伸比(hc/wc)為高或低，雨庇整體所受風荷載均呈現接近零值附近的狀況，因此以來流正吹及小攻角的情況對於雨庇所受風荷載最為嚴重。如將雨庇安裝於建築物高度一半的地方，因為後方建築物量體阻擋，雨庇板所受整體淨風壓係數呈現下降的現象。

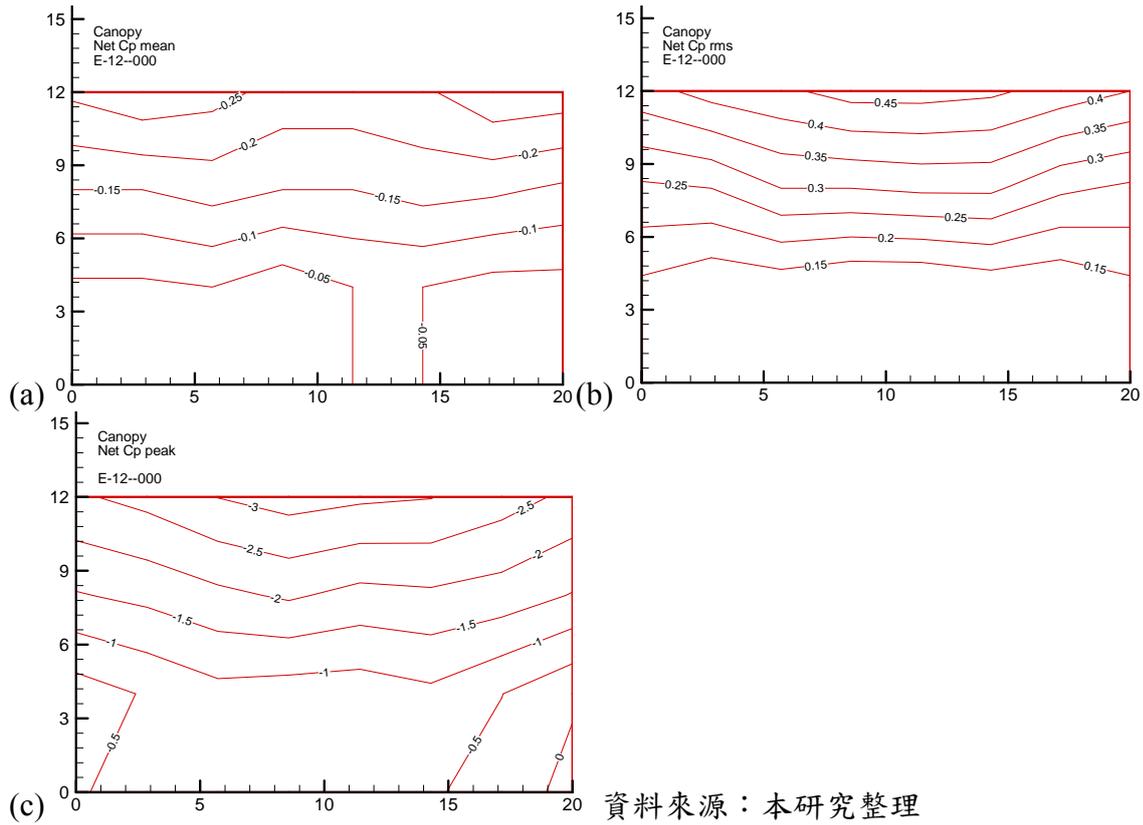


圖 2 風攻角零度時，雨庇模型淨風壓係數分布， $h_c/h=0.95$ ， $h_c/w_c=1.58$ ，(a)平均值，(b)擾度值，(c)尖峰值

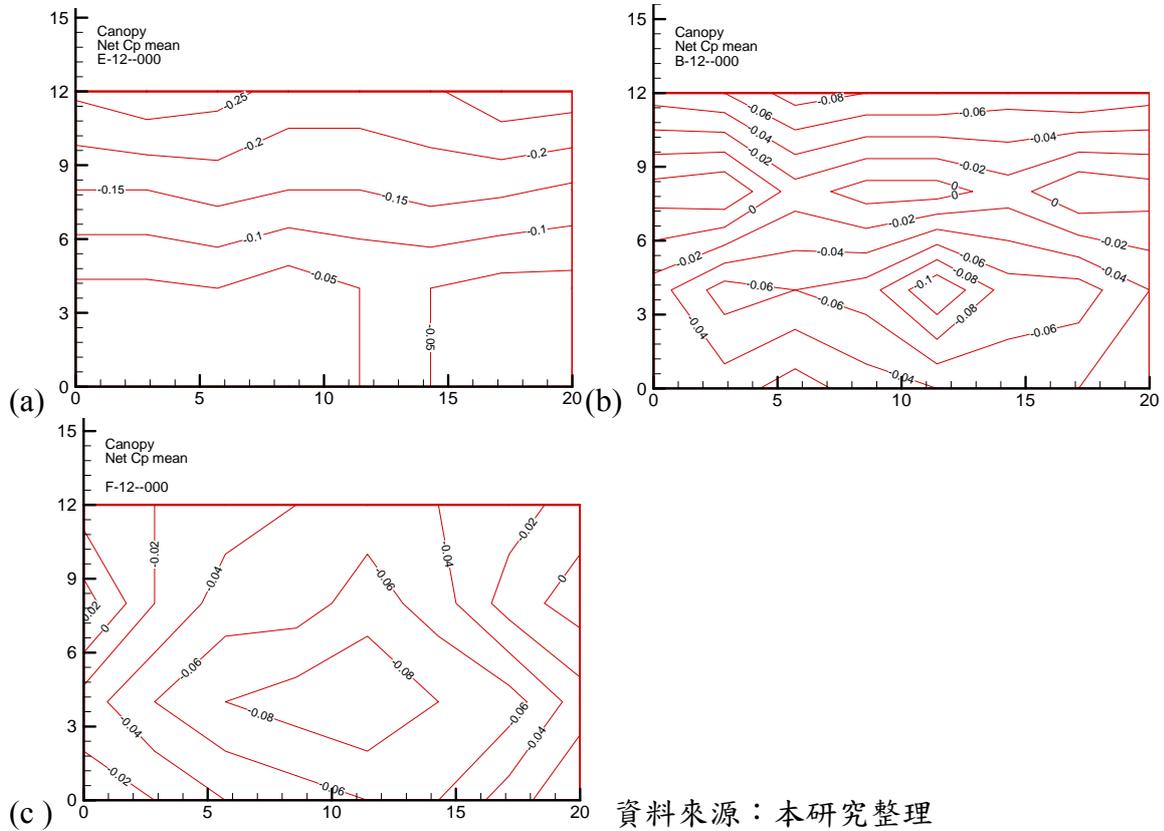


圖 3 風攻角 0 度時，雨庇模型平均淨風壓係數分布， $h_c/w_c=1.58$ ， $h_c/h=(a) 0.95$ ，(b)0.48，(c)0.15

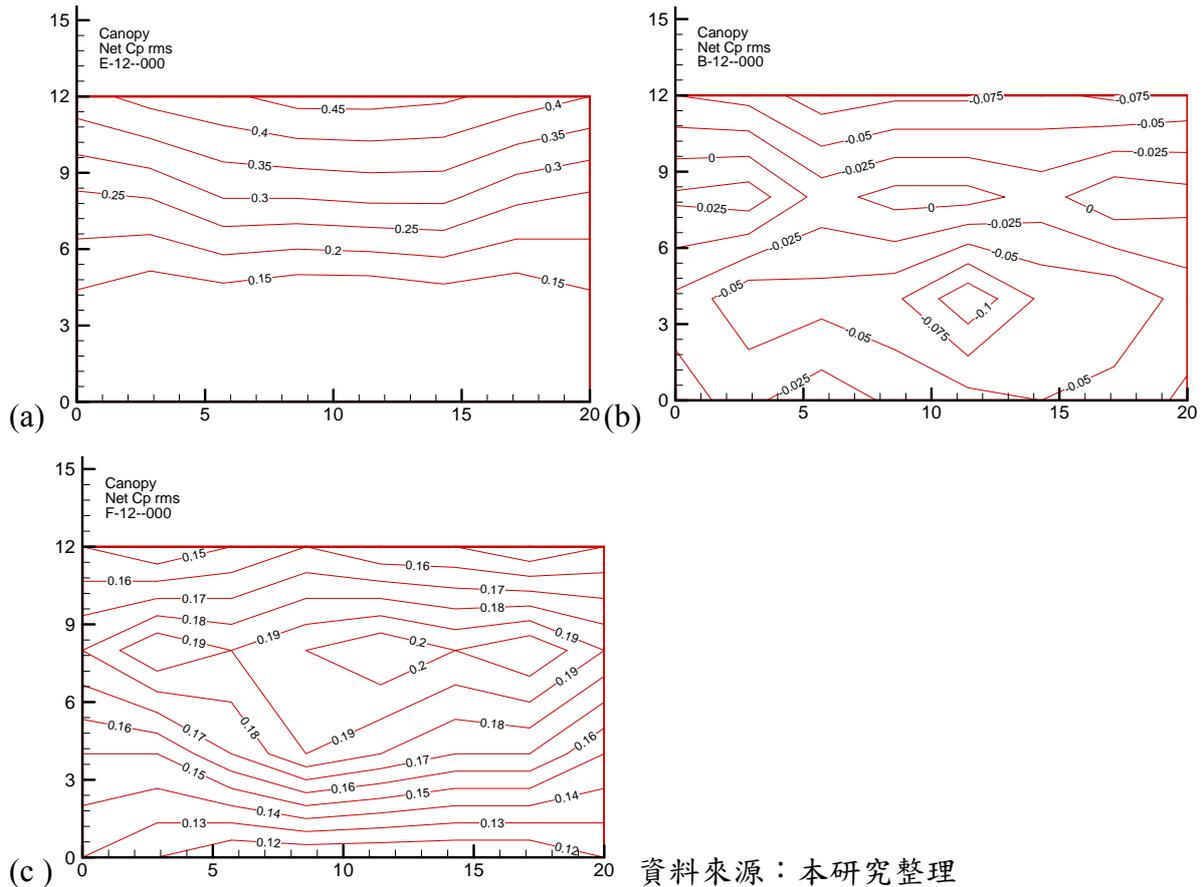
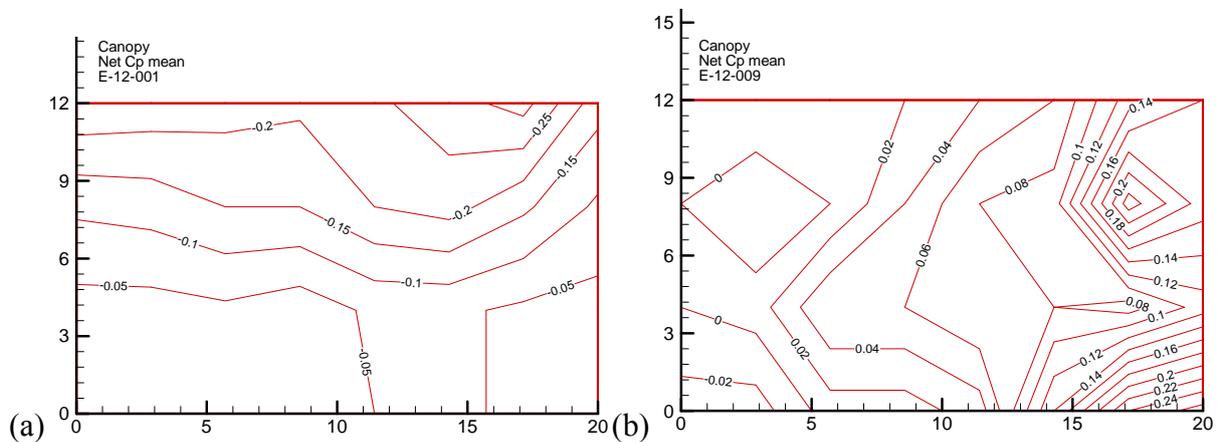
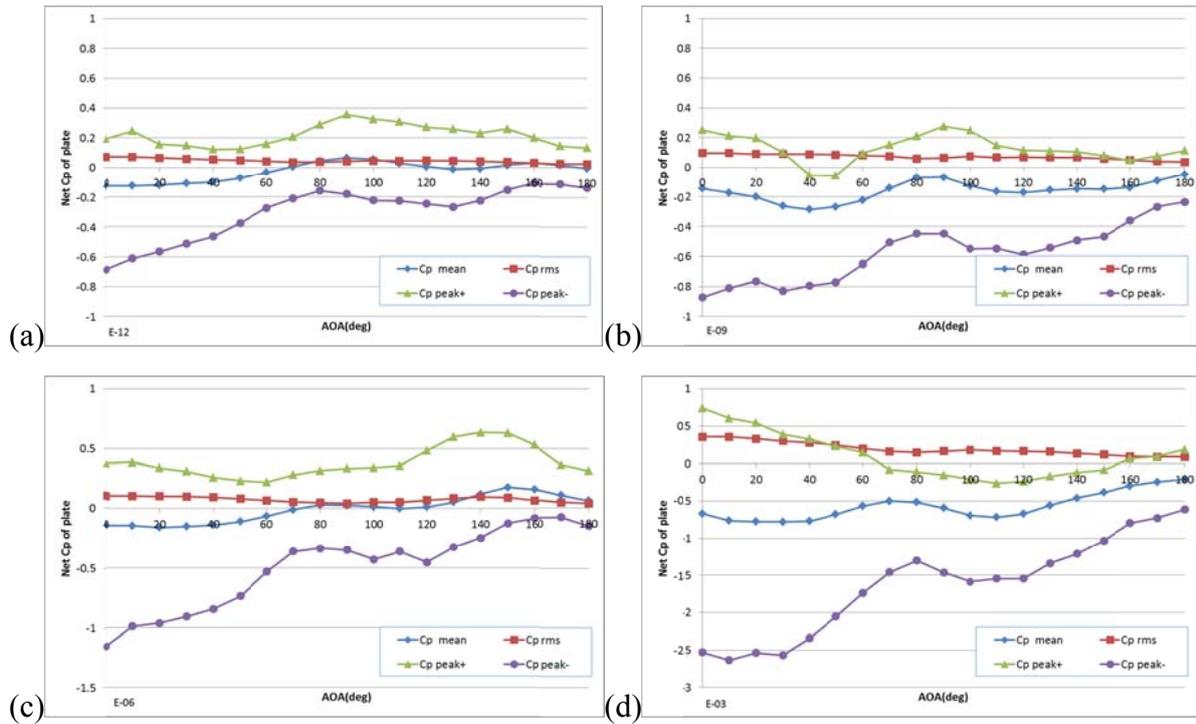


圖 4 風攻角 0 度時，雨庇模型擾動性淨風壓係數分布， $h_c/w_c=1.58$ ， $h_c/h=(a) 0.95$ ，(b)0.48，(c)0.15



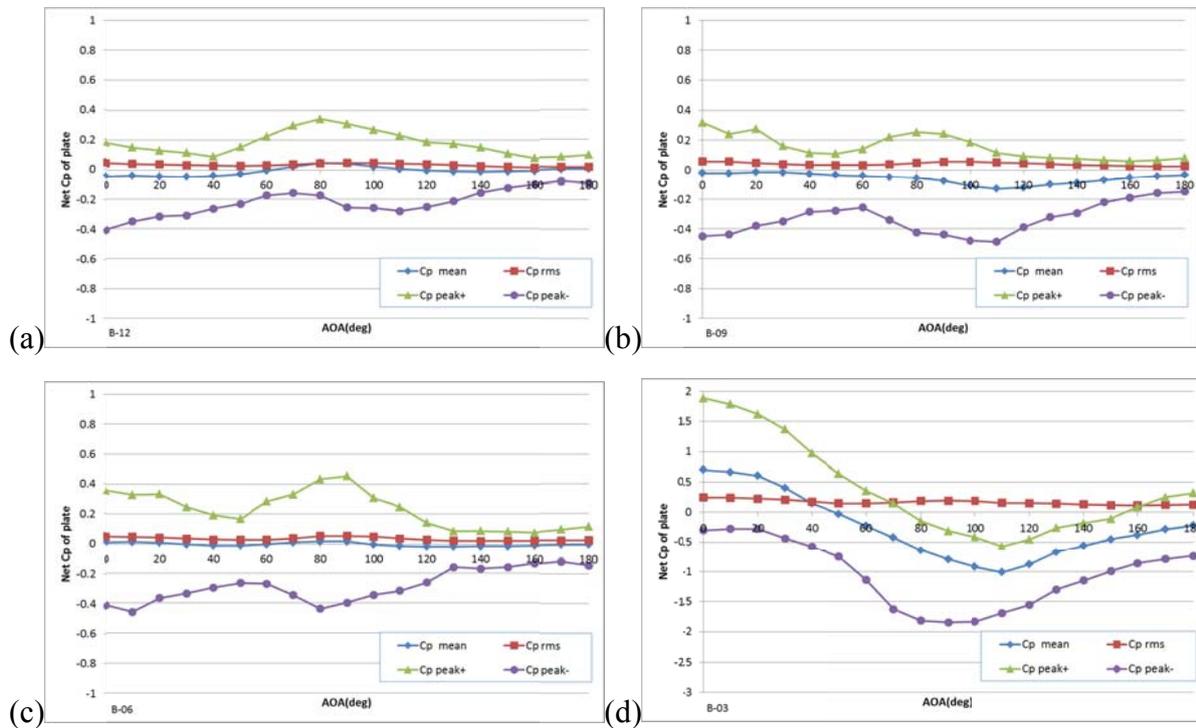
資料來源：本研究整理

圖 5 雨庇模型淨風壓係數分布， $h_c/h=0.95$ ， $h_c/w_c=1.58$ ，風攻角(a)10 度，(b) 90 度



資料來源：本研究整理

圖 6 雨庇模型淨風壓係數分布隨風攻角變化, $h_c/h_{c0}=0.95$, $h_c/w_c =$ (a) 1.58, (b) 2.11, (c) 3.17, (d) 6.33



資料來源：本研究整理

圖 7 雨庇模型淨風壓係數分布隨風攻角變化, $h_c/h_{c0}=0.48$, $h_c/w_c =$ (a) 1.58, (b) 2.11, (c) 3.17, (d) 6.33

六、誌謝

本研究承蒙內政部建築研究所在軟硬體設備及經費上之大力支持(計畫編號106301070000G0018)，始得以完成，特此申謝。

參考文獻

1. 「建築物耐風設計規範及解說」，營建雜誌社 編印，內政部建築研究所，2015，台灣。
2. 李旻原，2012，「建築物入口處懸臂式雨遮受風壓影響之研究」，朝陽科技大學建築及都市設計研究所碩士論文。
3. N. J. Cook, J. R. Mayne, 1980, A Refined Working Approach to the Assessment of Wind Loads for Equivalent Static Design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 6(1-2), 125-137.
4. Ioannis, Z. and Stathopoulos, T. 2009. Wind tunnel experiments on a patio cover attached to a low-rise building. *Proceeding of the 11th Americas Conference on Wind Engineering (ACWE)*, San Juan, PR, USA.
5. José D. Candelario, 2012, Wind-induced pressures on canopies attached to the walls of low-rise buildings, A Thesis In The Department Of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.

B-08

SPIM在人工濕地工程永續性落實之探討

*苗敬美 (Ching-Mei Miao)
中華大學土木系博士生

蕭炎泉(Yan-Chyuan Shiau)
中華大學營建管理學系教授

摘要

人工濕地能有效淨化水質，但目前其管理仍停留在傳統模式，無法因應施工過程中各項變化，導致不少失敗案例。本文提出永續性成效指標管理模型(Sustainable Performance Indicators Model，簡稱SPIM)來執行專案之永續成效控制，並透過人工濕地案例來檢驗專案之永續成效效果，結果顯示使用永續性成效指標管理模型的專案更具整體性及具執行效益，證實SPIM可有效發揮在人工濕地專案之永續性成效。

關鍵詞：永續性、成效指標、人工溼地、生態工程、生命週期

Study on Performing SPIM in Wetland Construction Project

Abstract

Constructed wetlands are capable of purifying water quality effectively; however, they are currently managed using conventional management models, which are incapable of responding to various changes that occur during the construction process, thus resulting in numerous failures. This study proposed a sustainability performance indicators model (SPIM) to implement the sustainable performance control of projects, and the results are examined through the case study of a constructed wetland. The results indicated that projects using the SPIM have higher integrity and implementation effectiveness, verifying that the SPIM is capable of facilitating the sustainable performance of constructed wetland projects.

Keywords: Sustainability, Performance Indicators, Constructed Wetlands, Ecological Engineering, Life Cycle.

一、緒論

許多國家的水資源十分有限，台灣也是其一[1]。河川及水庫經常遭受到污染，不但造成優養化[2]，嚴重者更使水體含有毒物質[3]，使得淨化水質成為刻不容緩的工作。過去台灣政府投注了相當多的資源，運用生態工法在各地建造許多人工濕地[4]，結果證明確實可以改善水質，如營養鹽、懸浮固體物等之消除有良好的成效[5]。由統計資料顯示人工濕地的失敗案例頗多[6, 7]，造成公共工程績效不彰和政府財政重大損失。其原因為人工濕地工程之驗收階段，是決定整體計畫成敗及採取補救措施之關鍵時期，但卻不被相關單位重視，其問題包含偷工減料、為降低施工成本不惜破壞生態、施工時發現環

境條件與原設計條件不同未通知設計單位更改卻繼續施工等。目前人工濕地專案管理仍停留在傳統模式，加上近年政府精簡人力及公共工程採最低標等因素，使公共工程的永續性無法有效落實。本文以永續發展為目標，在施工過程導入建管理及成效式合約[8, 9]，選擇生態環境比較複雜及難以掌控之人工濕地專案，透過所提出的SPIM管理手法，探討人工濕地驗收階段永續性之實踐成效。

本研究架構介紹如下：第2段探討人工溼地、永續發展、成效式合約等相關文獻；第3段解說研究設計的執行及釐清專案永續性指標，進一步介紹建構之人工濕地SPIM；第4段應用SPIM進行人工濕地之案例探討，並展示實施結果；最後提出結論與建議。

二、文獻回顧

溼地是整個地球上生產力最豐沛的生態系，是一般良田的兩倍半到四倍[10]。它提供了許多重大功能，如淨化水質、調節洪流、防止地表及地下水的海水入侵、蘊育天然資源等[11]，對地球的永續有著巨大的貢獻。應用生態工程技術設置人工溼地，可以去除水體中顆粒性及溶解性污染物。Campbell認為永續發展是以環境之自然資源為基礎，以經濟的發展為實現人類之社會福祉[12]。Munasinghe提出永續發展的概念應包括經濟、社會及環境等三個構面，且彼此間具競合與協調關係[13]。為了推動永續發展政策，世界各國發展出許多專案的永續性指標[14-16]。近年來工程專案逐漸從傳統管理模式轉向永續性發展。成效式契約(Performance-Based Contract, 簡稱PBC)目的是為了獲得交付成果之效益，PBC以專案目標之成果(Outcome)或成效 (Performance)做為專案驗收與考核之依據，而非傳統以施做流程之投入、技術或過程為依據。[17, 18]。

三、人工濕地之永續性成效指標模型

3.1 研究設計

本研究透過實際案例及相關文獻之探討，論述專案之永續目標架構，以建立達成永續成效之關鍵因素，並建構永續成效指標管理模型之雛形。為了確認管理模型的有效性，本研究邀請35位具有永續專案或人工溼地相關經驗之專家進行訪談。透過統計分析顯示，專家對於模型之指標檢驗內容之看法為：(1).永續性成效指標項目總計93項具重要性項目佔36.56%，因此保留指標共計34項；(2).要求標準之接受度在80%以上；(3).測量方法之接受度在80%以上；(4).容許差或反應時間(TOR)之接受度在69%以上，根據分析結果及建議修改模型。

3.2 永續性成效目標

人工濕地是一個動態平衡的自然環境，各國不同地區的氣候、地理、生態等都不一樣，需因不同條件制定成效目標，並隨時依據環境的變化來調整。本文探討水資源發展政策以建立永續性目標架構，在人工濕地之永續總目標下建立不同永續性成效目標。在專案施工中，承攬廠商依據業主合約中的永續性成效目標條件，在專案的計畫書、作業規定、自主檢查等項目，都將永續性成效目標納入工作內容，作為主要工作目標。

3.3 人工溼地之SPIM

人工溼地之SPIM，由永續成效指標架構、永續成效指標、永續性成效檢驗方法、永續性成效判定標準、永續創新評定方法、永續性成效管制流程及管控機制等所組成，如圖1、表1(摘錄)所示。人工溼地之SPIM擁有之34項指標，是清楚、可量測、量測程序明確、設有門檻值、有相對反應時間等特性。SPIM以專案之永續目標為指導原則，透過成效式合約之創新模式作為激勵手段(Incentive /Inspired means)，依循作業管理流程進行檢測及管控，透過判定標準來確認專案是否具永續性成效。在管制機制方面，工程的施作依循施工流程，每月有明確驗收成果進行服務考核，主辦機關或其代表透過SPIM(第二級SPI)審查廠商提送之自我評價服務水準(含第一級SPI)是否屬實及其永續性成效程度，審核結果作為合約付款、獎勵及懲罰等管控手段之依據。

四、案例研究

4.1 案例介紹

本研究案例為台灣北部之某人工濕地工程，位於都市周邊主要河川旁之高灘地區。本案例採自由表面流動式系統(FWS, free water surface system)，現場配置從場區之頂端施作取水道，引入小溪河之水體，先經過沉澱池初步處理後，再流入第一密植區、開放水域、第二密植區及生態池串連而成的濕地淨化系統，水質淨化後再排入河川。施工期間從2013年12月至2015年2月為止，工程內容包括土方挖掘及回填、不透水黏土鋪填、夯壓、運輸、河岸護坡工程、灌漿工程、鋪面工程、植栽工程、水電工程及其他附屬工程等。

4.2 SPIM之案例實施結果

本研究隨機選取施工階段2014年9月至10月期間的工程驗收成果，配合施工進度採用了SPIM的34項檢驗指標中，在該期間中適用的23項(表1中使用指標欄內標為●者)進行檢驗。結果顯示本案例有許多未合乎永續的要求標準，包含水池軀體及池坡面夯壓不夠確實及黏土含量比例不足，造成下雨時水池坡面產生裂痕或崩坍，使得淨水成效不佳影響環境維度之效益；木棧道及解說平台之施工品質極差，環塑木(Wood Plastic Composites, WPCs)搭接不平整及破損、高壓地磚鋪面凹凸不平整等，造成遊客受傷及視覺的不美觀，使遊客抱怨件數增加影響社會維度(Social Dimension)之效益。由表2統計結果顯示，檢驗不合格的指標合計20項，不符合(是否合格欄中標為X者)比例高達87%，遠超出40%之檢驗判定標準值，故判定本案例的工程為「不具永續性」。為了驗證研究結果之正確性，我們以傳統目標為比較基礎，將SPIM之檢驗結果與2014年9月4日之公共工程查核報告進行交叉比對，結果表明兩者並無明顯差異。經研究證明本文提出之SPIM確實可以實際應用於人工溼地，並且檢核出專案是否具永續發展性。

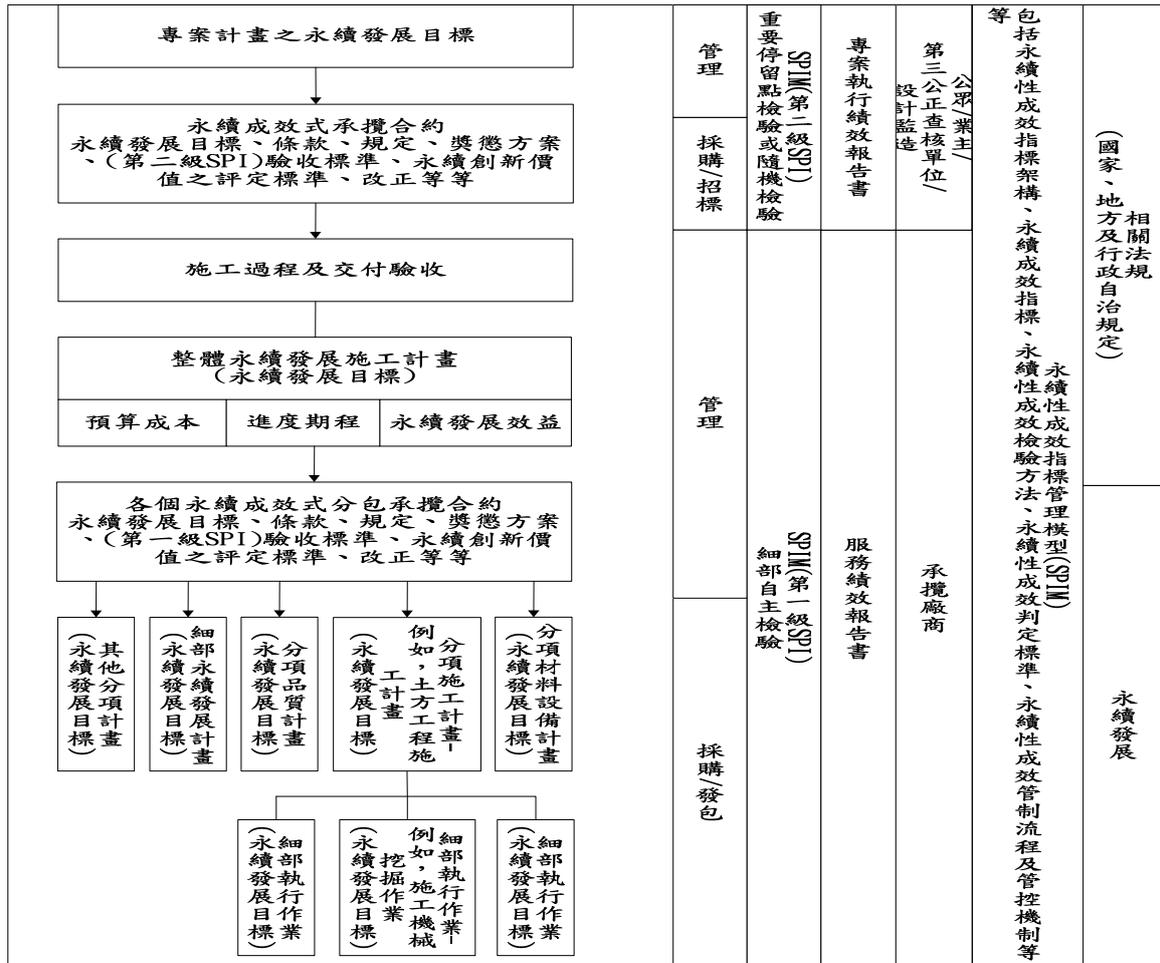


圖1 永續性成效指標管理模型

表 1 永續性成效指標檢測成果

指標編號	永續性成效指標 SPI	要求標準	不符合標準之說明	數據來源	使用指標	檢測結果	是否合格
SP01	基地沉陷面積	每處沉陷面積 $\leq 0.7m^2$ ；總沉陷面積 $\leq 2m^2$	沉陷面積達 $8m^2$ 及 $3.5m^2$ ；總沉陷面積 $>11.5m^2$	現場測量	●	共 2 處	X
SP02	水池/河岸邊坡塌陷	每處塌陷面積 $\leq 0.3m^2$ ；總塌陷面積 $\leq 1m^2$	總塌陷面積 $6.4m^2$	現場測量	●	共 4 處	X
SP03	坑洞	基地地面坑洞直徑 $< 8cm$ ；坑洞深度 $< 0.8cm$	基地地面坑洞直徑 $28cm$ ；坑洞深度 $12cm$	現場測量	●	共 1 處	X
SP04	就地取材量換算金額	就地取材量換算金額 $>$ 總採購材料金額之 20%	就地取材量換算金額 $=$ 總採購材料金額之 9%	紀錄資料	●	$< 20\%$	X
SP05	水池水位高度	若平均水深 $< 30cm$ 則須清淤泥	施工中，工程尚未執行完成	-	○	-	-
SP06	水池漏水	漏水量 $< 5\%$	漏水量 $= 8\%$	現場測量	●	$> 5\%$	X
SP07	水池進出水流速	水池水流進量/流出量	施工中，工程尚未執行完成	-	○	-	-
SP08	水池水質污染	各水池放流水之臭味、水溫、濁度、pH 值、電導度、BOD ₅ 、總懸 TSS、Cl ⁻ 、(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻ 、NH ₃ 、TKN、TP 等值須合乎設計值	施工中尚未營運	-	○	-	-
SP09	工程興建能源消耗量換算	施工機具使用汽油等能源費用 $<$ 施工機具總耗油量之 70%	施工中，工程尚未執行完成	-	○	-	-

指標編號	永續性成效指標 SPI	要求標準	不符合標準之說明	數據來源	使用指標	檢測結果	是否合格
	金額						
SP10	基地清潔	基地全區應保持清潔，不可有泥土、殘骸、垃圾等	基地到處有寶特瓶、生態池有棄置之鋼筋	現場量測	●	共 5 處	X
SP11	施工材料之有毒物質質量測值	有毒物質質量測值 \leq 法規規範值	不透水黏土有毒物質質量測值 $<$ 法規規範	紀錄資料	●	\leq 法規規範	V
SP12	使用生態綠章及健康標章產品金額比例	生態及健康綠建材標章產品金額 $>$ 總購材料金額之 70%	施工中，工程尚未執行完成	-	○	-	-
SP13	施工 CO ₂ 排放量	使用能資源計算之 CO ₂ 排放量 $<$ 工程總 CO ₂ 排放量之 60%	施工中，工程尚未執行完成	-	○	-	-
SP14	基地周遭施工面積	干擾面積 \leq 工區面積之千分之五	干擾面積達工區面積之 20%	現場量測	●	$\geq 5\%$	X
SP15	生態工程面積比例	生態工程面積 $\geq 90\%$ 工區施工面積	生態工程面積=25%工區施工面積	現場量測	●	$\leq 90\%$	X
SP16	濕地植物種植存活比例	植物種植存活面積 \geq 植物種植面積之 90%	已種植平均存活面積 17%	現場量測	●	$\leq 90\%$	X
SP17	專案生態專業人員比例	俱生態專業人員數 \geq 總工程人員數之 80%	俱生態專業人員數=總工程人員數之 15%	紀錄資料	●	$< 80\%$	X
SP18	生物數量異動比例	施工中生物族群數量減少量 \leq 施工前生物族群總數量之 80%	施工中生物族群數量減少量=施工前生物族群總數量之 88%	紀錄資料	●	$\geq 80\%$	X
SP19	空氣污染告發件數	平均事件數/月 ≤ 1 件	平均月事件數=2 件	紀錄資料	●	≥ 1 件	X
SP20	噪音陳情案件數	噪音干擾平均事件數/月 ≤ 2 件	月平均事件數=1 件	現場量測	●	≤ 2 件	V
SP21	民眾抱怨或檢舉數	平均事件數/月 ≤ 3 件	月平均事件數=2 件	紀錄資料	●	≤ 3 件	V
SP22	河川、溪流之災損費用比例	河川、溪流之災損費用 \leq 總工程費之 3%	河川、溪流之災損費用=總工程費之 7%	現場量測	●	$\geq 3\%$	X
SP23	工區安全、防災設施費用比例	工區安全防災設施費用 \geq 總工程費之 1.5%	實際安全防災設施及措施費用=總工程費 1.4%	現場量測	●	共 1 項	X
SP24	古蹟保存費用比例	古蹟保存費 ≥ 1.5 倍古蹟價值時需作施工前調查	施工中未無此項	-	○	-	-
SP25	雇用弱勢勞工比率	雇用弱勢勞工人數/雇用一般勞工人數 $\geq 30\%$	雇用弱勢勞工人數/雇用一般勞工人數=10%	紀錄資料	●	$\leq 30\%$	X
SP26	辦理相關說明會等人次數比例	辦理相關公聽會及說明會等人次數/月 ≥ 125 人/5 次/月	辦理相關公聽會及說明會等人次數/月=53 人/2 次/月	紀錄資料	●	≤ 125 人/5 次/月	X
SP27	設施施工品質	飾面或鋪面或設施不可有鬆散剝落	木棧道欄杆材料破裂剝落、取水井混凝土有片塊剝落及蜂窩	現場量測	●	共 2 處	X
SP28	鋪面凸起或凹陷	鋪面凸起或凹陷其深度或高度 < 1.5 cm；直徑 < 15 cm	觀景平台木地板凸起高度=2.1cm；環保再生磚步道磚面凹陷深度=1.8cm	現場量測	●	共 8 處 > 1.5 cm	X
SP29	施工查核等次以上百分比	查核成績甲等以上次數/承攬工程數(近五年年平均) $\geq 40\%$	施工中實際工程尚未執行完成	-	○	-	-
SP30	雇用本地居民就業人數比率	雇用本地職工人數/工區雇用外地職工人數(月平均) ≥ 19 倍	雇用本地勞工人數/雇用外地勞工人數(月平均)=5%	現場量測	●	$\leq 95\%$	X
SP31	發包本地工程、材料	採購本地工程、材料金額/發包非本地工程、材料金額 ≥ 6	發包本地工程、材料金額/發包非本地工程、材料金額	紀錄資料	●	$\leq 85\%$	X

指標編號	永續性成效指標 SPI	要求標準	不符合標準之說明	數據來源	使用指標	檢測結果	是否合格
	金額比例	倍(占總採購金額 85%)	=55%				
SP32	工程專案財務平衡能力	收入/支出 ≥ 1	施工中尚未有收入	-	○	-	-
SP33	工程經濟效益金額	人工濕地處理系統實際總工程費(年平均)/一般傳統污水處理設施工程費(年平均) $< 18\%$	施工中實際總工程費尚未執行完成	-	○	-	-
SP34	實際工期與預定工期比例	實際工期/預定工期 ≤ 1	施工中，工程尚未執行完成	-	○	-	-

表 2 永續性成效指標檢測成果及處理方法(部分)

編號	SPI	說明	量測方法	改善時間	照片
SP02	水池/河岸邊坡塌陷	總塌陷面積 6.4m ²	使用捲尺量測	3 天內修補完成	
SP28	鋪面凸起或凹陷	觀景平台木地板凸起高度=2.1cm；環保	短直尺量測	須在 7 天內修補密合或拆除重作	

4.3 SPIM之實施效益

研究結果顯示，SPIM可賦予廠商提出永續性創新方案，包括創新生態工法、採購在地分包商及材料、從工區現地取材等。SPIM擁有的指標驅動特性、指標監測機制、永續性成效合約之創新模式及獎勵、懲罰機制等功能，皆能有效啟發(Inspired)廠商之永續性創新。永續性服務水準之考核及監控，不但積極的落實專案之永續發展，同時大幅減少查驗人力及提升政府公共工程之施政績效。

五、結論與建議

5.1 結論

本文提出了SPIM及其實施於人工溼地永續性發展之案例應用。該專案位於台灣北部周邊主要河川旁之高灘地區域。本研究將SPIM導入案例進行永續性成效之檢測管控，結果顯示該案例之永續性成效不符合比例為61%，工程整體性為「不具永續性」，驗證SPIM能檢測出專案是否具永續性。本文之具體研究貢獻有以下三項：

- A. 建立釐清專案永續目標之架構：專案透過系統性之程序，由上而下展開不同位階之永續發展目標，以賦予該專案成效之定義並作為考核之依據。
- B. 建立 SPIM：整合永續發展及成效式契約，改善傳統營建管理技術之缺失，建立一個具永續發展能力之創新管理技術，以確實的落實專案之永續發展。
- C. 提出落實專案的永續成效之操作範本：展示了永續性成效指標管理模型於人工濕地案例之實際應用，同時驗證 SPIM 之可行性。

5.2 未來研究方向之建議

本文中只針對人工溼地的施工驗收階段進行永續性成效落實之研究，未來研究可以就其他類型的工程，例如建築工程、交通工程、道路工程等，採用本文提供之SPIM經驗，建構不同工程之SPIM實務操作範本，以實踐營建專案之永續發展。

參考文獻

1. I. Arto, V. Andreoni, J.M. Rueda-Cantucho, “Global use of water resources: A multiregional analysis of water use, water footprint and water trade balance”, *Water Resources and Economics*, Vol. 15, pp. 1-14, 2016.
2. Andrea E. Ulrich, Diane F. Malley and Paul D. Watts, “Lake Winnipeg Basin: Advocacy, challenges and progress for sustainable phosphorus and eutrophication control”, *Science of The Total Environment*, Vol. 542, Part B, pp. 1030-1039, 2016.
3. M.T. Auer, N.A. Auer, B.B. Barkdoll and T.J. Bornhorst, “The Great Lakes: Nutrients, Sediments, Persistent Pollutants, and Policy Perspectives for a Sustainable Future”, *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Comprehensive Water Quality and Purification*, Vol. 4, pp. 390-426, 2014.
4. 行政院環境保護署水保處,「人工濕地改善水質成果斐然 河川生態重獲新生」, Web Document:
http://enews.epa.gov.tw/enews/fact_Newsdetail.asp?InputTime=1040127151842 , 2017年4月5日查得。
5. V.A. Tsihrintzis and G.D. Gikas, “Constructed wetlands for wastewater and activated sludge treatment in North Greece: a review”, *Water Science & Technology*, 61 (10), pp. 2653-2672, May 2010.
6. Beth Daley, and Jess Aloe, “Failed projects and weak oversight lead to loss of state’s wetlands”, *Energy and Environment*, Dec. 2014.

7. North Carolina State University, "Information on Wetlands", Web Document: <http://www.water.ncsu.edu/watershedss/info/wetlands/mitsucc.html#econ> , 2017 年 4 月 5 日查得。
8. A.J. Gilbert Silvius, R.P.J. Schipper, "Sustainability in project management: a literature review and impact analysis", *Social Business*, Vol. 4, pp. 63-96, 2014.
9. Ching-Mei Miao, "On The Construction of The Sustainability Performance Indicators for Constructed Wetlands Ecological Engineering : Taking Construction Acceptance Phase as An Example", Master's thesis, Department of Construction Management, Chung Hua University, Taiwan, 2015.
10. Odum, E.P. and Gary W. Barrett, "Fundamentals of Ecology", 3rd. Ed., W.B. Saunders. Company, Philadelphia, London, Toronto, 1971.
11. 洪國鑫, 高水力負荷下溼地污染物模式分析, 碩士論文, 國立成功大學環境工程學系碩士班, 臺灣, 2002。
12. Campbell, S., "Green cities, growing cities, just cities?: Urban planning and the contradictions of sustainable development", *Journal of the American Planning Association*, Vol. 62, No.3, pp. 296-312, 1996.
13. Munasinghe, M., "Environmental economics and sustainable development", World Bank Publications, 1993.
14. Labuschagne, C., and Brent, A. C. "Sustainable Project Life Cycle Management: Aligning project management methodologies with the principles of sustainable development", PMSA International Conference, Johannesburg, South Africa, 2004.
15. Lapinski, A. R., Horman, M. J., and Riley, D. R. "Lean processes for sustainable project delivery", *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(10), 1083-1091, 2006.
16. 許維庭, 「國家層級永續營建評估指標建立之研究」, 博士論文, 國立中央大學土木工程學研究所, 臺灣, 2011。
17. 楊智斌、余文德、邱垂德、鄭紹材, 「道路工程成效規範契約示範案例」, 行政院公共工程委員會-委託專案研究計畫成果報告, 編號: 970705, 臺灣, 2008。
18. World Bank, "Sample Bidding Documents for Procurement of Works and Services under Output- and Performance-Based Road Contracts and Sample Specifications", The World Bank, Washington, D.C., 2006.

B-09

安裝於建築屋頂太陽光電板陣列之設計風力研究

陳若華*

建國科技大學創意生活應用設計研究所
副教授

丑倫彰

建國科技大學土木工程系
助理教授

摘要

安裝於建築物屋頂面之太陽光電板陣列受風作用強烈，有必要探討其所受風荷載，提供相關數據業界參考。本研究利用風洞實驗探討不同安裝位置對於建築物屋頂面上之太陽光電板陣列其風荷載的影響。研究顯示，風荷載主要受到安裝位置及光電板陣列排列方式影響，在多排太陽光電板陣列的受風作用以接近建築物邊緣的第一排最為強烈，後排的光電板受到前排的遮擋，受風力減少甚多。女兒牆的存在使得光電板所受風荷載大幅減輕，光電板的風荷載受到女兒牆的遮蔽保護而無強烈風荷載，將光電板陣列退縮，光電板的風荷載亦僅微幅上升。在設計風力方面，安裝於屋頂面上之太陽光電板在低端與地板接合的安裝狀況下，本研究利用氣動力實驗推估之設計風力係數與開放式單斜屋頂之建議值相比略低，因此如採用開放式單斜屋頂之設計風力係數亦屬保守的設計。

關鍵詞：太陽光電板陣列，風荷載，風洞實驗

The Wind Loadings on Roof Top Mounted Solar Panel Array of Low-rise Buildings

Abstract

The roof-top mounted solar photovoltaic array of the building is strongly affected by the wind, it is necessary to explore the wind load, providing relevant data for industry reference. In this study, wind tunnel aerodynamic experiment was adopted to investigate the effect of different installation locations to the wind loadings on the photovoltaic array on the roof of a building. The results shows, that the wind load is mainly affected by the installation location and arrangement of the photovoltaic array. In the rows of photovoltaic arrays, the first row close to the edge of the building is most strongly affected by the wind and the rear photovoltaic panels are blocked by the front row. Therefore, wind loadings were reduced a lot. The existence of parapet wall on roof may greatly reduce the wind loadings on the photovoltaic panel. The wind loading on the photovoltaic panel is protected by the shield effect of the parapet wall, and the array of photovoltaic panels retreat. The wind loadings of the photovoltaic panel also increase only slightly. In the determination of design wind force, the installed solar photovoltaic panels installed on the roof surface are slightly lower than the code proposed value of the open monoclinic roof when the aerodynamic force is used to estimate the designed wind force coefficient under the installation condition of the low end and the floor. Therefore, the adoption of design wind coefficient from the open sloping roof is also conservative.

Keywords : Solar panel, Wind Loadings, Wind Tunnel Test

一、前言

台灣天然資源匱乏，所需石油、煤炭及天然氣等主要石化能源等幾乎都依賴進口，

經濟部正推行陽光屋頂百萬座計畫，規劃於 2030 年推廣太陽光電發電系統設置容量達到 6,200MW，目標建立我國太陽光電設置應用完善環境，積極推動太陽光電發電系統。考慮到臺灣位處亞熱帶地區，颱風頻仍，耐風強度成為產品設計上重要參考指標。太陽光電能源系統與熱水器裝置在臺灣已相當普及，關於太陽能熱水系統的風荷載已有部分研究成果，而陽光屋頂規劃之太陽光電板與太陽能熱水系統光電板不同之處在於其數量更為龐大、採陣列式排列、光電板形狀單一且幾乎無其他附屬設備(如熱水桶)。太陽能熱水系統之熱水桶因其鈍體形狀對降低整體結構風荷載是有助益的，而太陽光電板相對於此其受風作用將更為強烈，因此有必要探討其所受風荷載，提供相關數據業界參考。

二、文獻回顧

2-1 屋頂陣列式太陽能光電板之氣動力特性

安裝於建築物平屋頂面上之陣列式太陽能光電板數量為單排或多排，每排由多片太陽能光電板連續排列。如 Chung 等人(2008, 2011)研究單片太陽能熱水器集熱板氣動力特性，發現在版面上端產生迴流區以及兩側形成角渦流並產生三維交互作用。前人研究分析太陽能光電板表面壓力得知，太陽能光電板安裝於屋頂時，由於建築物與太陽能光電板外型以及太陽能光電板安裝數量及排數皆會影響渦流產生機制，因此周圍氣動力特性與流場結構是非常複雜。Bienkiewicz 和 Sun(1992)指出，考量風向角效應時，角渦流易在建築物向風角落處產生，Kopp 等人(2012)指出在風向角 40 度~50 度為最危險風向角條件，進一步分析不同風向角條件下，太陽能光電板上、下版面壓力分佈，由結果可得知太陽能光電板安裝位置、片與片間距、前後排之間保留空間等設計細節有重大影響。David(2013)研究角隅渦流對架設於平屋頂面上太陽能光電板陣列之尖峰風荷載研究指出，角隅渦流對於整體昇力有明顯的影響，而陣列排列方向如與角隅渦流迴捲方向近似或排列位置位於再接觸區域，均對尖峰風荷載產生明顯的改變。R. Nicolas(2013)研究平屋頂面上架設太陽能光電板陣列後風速剖面的影響指出，屋頂面上設置太陽能光電板陣列後，屋頂表面雷諾應力有下降的趨勢，而影響太陽能光電板上整體昇力峰值的重要因素為建築物分離剪力流與其再接觸現象的綜合表現。Aly(2013)研究架設於平地上之太陽能光電板陣列氣動力特性，研究不同縮尺模型對於實驗精確度的影響，由於考慮風洞阻塞比，大氣邊界層流場採用部分模擬的作法，不同縮尺模型氣動力實驗結果顯示，以 Aly 實驗所用風洞斷面尺寸為 22m(長) x 2.4m(寬) x 1.55m(高)以 1 比 20 至 1 比 30 的模型較為合適，過小的模型對於壓力訊號的解析度不佳，且位於邊界層的近地底層亦與實況略有不符。同時 Aly 指出，模型縮尺主要影響的是擾動壓力與尖峰壓力，平均風壓係數對於模型縮尺較不敏感。

陳(2015)由氣動力實驗與結構分析等方向來探討風場對太陽光電板或陣列的風載重，研究結果顯示建築物屋頂太陽光電板模組風荷載主要受到安裝位置及光電板陣列排列方式影響，在多排太陽光電板陣列的受風作用以接近建築物邊緣的第一排最為強烈，後排的光電板受到前排的遮擋，其受風力減少甚多。在小風攻角條件下，兩排光電板之間距不超過前排光電板高度四倍時遮蔽效應可達百分之五十以上。以低層建築物而言，屋頂面上建築物高度十分之一的周邊區域，受到分離剪力流或角隅渦旋影響，安裝於此區域的太陽光電板將受到強烈負風壓作用，有掀翻的潛在危機，對光電板結構安全最為不利。不同屋頂坡度的建築物屋頂上安裝太陽光電模組時，光電板所受的風荷載相比較可見在小攻角的情形下，隨屋頂坡度的增加，負風壓作用更為強烈，顯示屋頂坡度越位陡峭時，架設其上的太陽光電板陣列所受負風壓作用將更為嚴重。女兒牆的存在使得光電板所受風荷載大幅減輕，將光電板陣列進行退縮時，光電板的風荷載僅微幅上升。研究

發現退縮距離達女兒牆高度的四倍時，光電板的風荷載仍受到女兒牆的遮蔽保護而無強烈風荷載。

2-2 相關設計規範

建築物屋頂上太陽能光電板之受風作用以外型而言，接近開放式建築物單斜平板屋頂版，ASCE7-10 規範對於開放式建築物單斜平板屋頂版的主抗風結系統設計所使用的設計風力採用淨風壓(Net pressures)的概念加以表達。淨風壓係數表達的是上表面風壓係數與下表面風壓係數相減的共同作用結果，亦隱含對於相關性的考量於其中。

我國建築物耐風設計規範及解說(2014)中並未針對類似光電板所受風荷載作建議，但規範解說中有針對開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數作建議，如表 1 所示。

表 1 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數 C_f

θ	各種 L/B 值之 C_f						
	5	3	2	1	1/2	1/3	1/5
10	0.2	0.25	0.3	0.45	0.55	0.7	0.75
15	0.35	0.45	0.5	0.7	0.85	0.9	0.85
20	0.5	0.6	0.75	0.9	1.0	0.95	0.9
25	0.7	0.8	0.95	1.15	1.1	1.05	0.95
30	0.9	1.0	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0
θ	各種 L/B 值所對應的壓力中心位置，X/L						
	2~5		1		1/5~1/2		
10~20	0.35		0.30		0.30		
25	0.35		0.35		0.40		
30	0.35		0.40		0.45		

- 註：
- (1) 風力垂直作用在屋頂面上，向內及向外均要考慮。
 - (2) B ：與風向垂直的屋頂尺寸，m。
 L ：與風向平行的屋頂尺寸，m。
 X ：從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離，m。
 θ ：屋頂斜面與水平面所夾的角度。
 - (3) 計算設計風力所用之受風作用特徵面積為屋頂面積。

資料來源：建築物耐風設計規範(2014)

此兩者在幾何外型上有所類似，而光電板的低端常見的架設方式為固定於地面或整體支架加高可通氣流。依據我國建築物耐風設計規範及解說(2014)中第 2.8 條之解說，開放式建築物所受之風力則為風速壓乘以風力係數 C_f 及開放式建築物受風作用的特徵面積 A_c ， A_c 依其類型可分為實際表面面積及與風向垂直面上投影面積兩種。規範之表 2.1(a)定義普通建築物(自然頻率大於或等於 1Hz)中開放式建築物設計風力計算可採用下式，

$$F = q(z_{Ac}) G C_f A_c \quad (1)$$

其中 A_c ：開放式建築物受風作用特徵面積。

G ：普通建築物之陣風反應因子可依規範建議之公式計算或直接取用較保守的值 1.88。

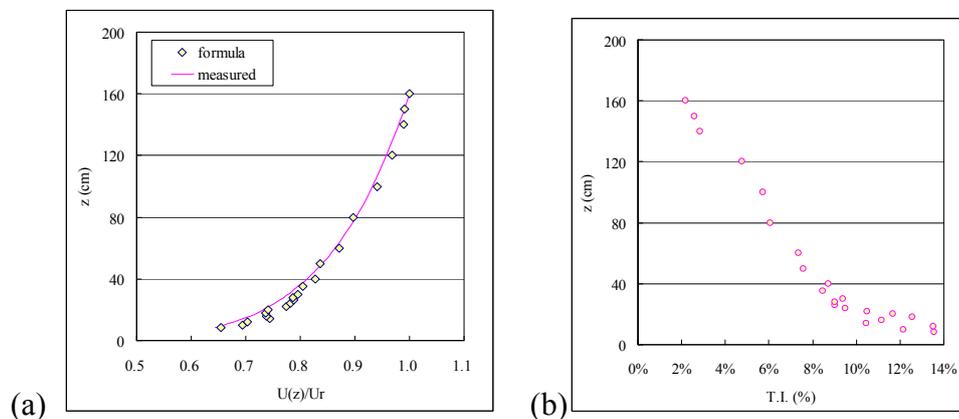
z_{Ac_f} ： A_c 之形心高度。

三、研究方法

3-1 流場規劃

本研究利用內政部建築研究所台南風洞實驗室進行建築物氣動力模型實驗研究，風洞設施為一封閉式的循環風洞，具有兩種測試斷面(第一測試區 $4\text{ m} \times 2.6\text{ m}$ 、第二測試區 $6\text{ m} \times 2.6\text{ m}$)，本研究利用內政部建築研究所台南風洞實驗室進行實驗，採用第一試驗段進行，試驗段長 26.5 m ，風洞可提供最大風速為 25 m/s 。氣動力模型置於試驗段旋轉台的中央，可用數控旋轉台旋轉模型，表現不同風向角的效果。

風洞中邊界層流場之模擬方式為在試驗段上游區域擺設錐形渦流產生器(spire)以及地表粗糙元素(roughness element)，以產生近似鄉村地形之大氣邊界層來流。本研究以 C 地況流場為來流條件，配合邊界層元件所產生平均流速剖面指數律分佈之 α 值為 0.16 ，而在距地 10 cm 處之紊流強度(turbulence intensity)約為 12% ，流場之平均風速剖面及紊流強度如圖 1 所示。邊界層特徵之除以平均風速剖面指數律公式之指數加以辨識，邊界層厚度的縮尺 $1:200$ 亦為設計模型及地形所需的技和縮尺條件。

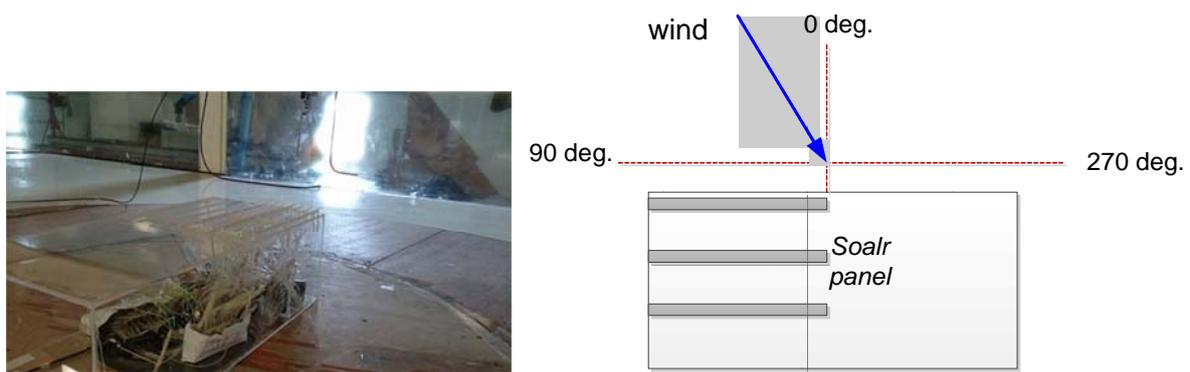


資料來源：本研究整理

圖 1 流場特性之垂直分佈，(a)平均風速剖面，(b)紊流強度剖面

3-2 實驗量測與模型規劃

本研究建築物氣動力模型利用壓克力板製作，各光電板氣動力模型之上下版面各均布風壓孔 30 個，因此一片光電板氣動力模型布設有 60 個風壓孔，風壓孔以細管線製作之壓力傳感管線系統(tubing system)與量測儀器相接，管線材質為 PVC 因此具備良好的可撓性，不致影響風壓信號傳送，模型實驗控制風壓孔數量在 200 個以下，利用本所實驗室現有的電子式壓力掃描器量測模型屋頂上下面同步的風壓資料。氣動力模型實驗量測時，透過旋轉工作平台，表現不同風向角對模型風壓變化之效果。氣動力實驗模型及模型之各項特徵尺寸代號如圖 2 所示。



資料來源：本研究繪製

圖 2 太陽光電板陣列氣動力模型設計

壓力量測管線系統為內徑 1mm、長度 25cm 的管線，實驗前經具白噪音(white noise)特性之擾動壓力信號進行率定，驗證無扭曲頻率可達 35Hz 以上。管線系統連接至電子式壓力掃描模組上的壓力輸入埠，電子式壓力掃描器以 64 個量測孔為一模組，壓力量測模組安置於模型內部，模型規劃以鄰近 64 個孔位規劃為同一壓力模組，分別接入電子式壓力掃描器。表面風壓量測使用之壓力掃描器(ZOC33/64 PX)，該系統每個單一模組有 64 個壓力輸入管(pneumatic inputs)，對應 64 個壓電式壓力感應器，每一壓力感應器皆可單獨校正。藉由管線連接至模型量測點以量測壓力。各模組接連接至壓力訊號處理系統(RAD BASE 3200)，此系統可支援類比數位之轉換，最高可支援 8 個模組，其解析度達 16bits，最大採樣頻率為 500Hz，傳輸介面為 USB，具備網路控制及傳輸功能。本研究之採樣頻率為 256Hz，每次實驗採樣 120 秒，擷取之資料轉換完成之後藉由此系統傳至個人電腦供儲存及分析之用。

3-3 氣動力實驗規劃

實驗進行係採用多片排列之光電板陣列於風洞中進行實驗，採地況 C 之大氣邊界層流場條件，參考風速為屋頂高度之風速，建築物採平屋頂方式考慮，量測風壓資料以前三排光電板為主。光電板陣列排列方式變化包括光電板排與排之間的間距變化、光電板陣列前緣與建築物屋頂前緣退縮距離、屋頂是否安裝女兒牆及陣列與女兒牆距離、風向作用等條件。本研究由氣動力實驗成果，採用各不同配置情形下的版面整體淨風壓係數時序列資料，利用極值推估方法並配合國內耐風設計規範中對於設計風速的基本假設，計算各不同配置情形下的太陽光電板版面極端風力係數推估值。

3-4 實驗資料分析

由實驗量測所得之板面風壓資料首先將計算其表面風壓均值、擾動值等，以完整掌握表面風壓分佈情形。氣動力係數定義如下所示：

$$\text{平均風壓係數 } C_p = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (2)$$

$$\text{擾動性風壓係數 } C'_p = \frac{\sqrt{P'^2}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (3)$$

其中 P 為風壓時序列資料， \bar{p} 為平均壓力， $\sqrt{\overline{p'^2}}$ 為擾動性風壓的均方根值， ρ 為空氣密度， U 為平均風速。

尖峰風壓係數採用 Mayne & Cook(1980)建議之方法推估尖峰風壓係數。

考慮薄板型氣動力模型受風作用來自板的兩面風壓差，因此實驗成果分析將迎風面的風壓與背風面的風壓，所得時間序列資料中作相減的運算，由於模型設計時即已考慮到淨風壓計算的需求，版面布的風壓孔位置在兩面均相同，因此可計算得各風壓孔位的淨風壓係數。

$$\text{淨風壓係數 } C_{Pn}(t) = C_{Pup}(t) - C_{Plower}(t) \quad (4)$$

其中 C_{Pup} 為零攻角時迎風面風壓係數， C_{Plower} 為零攻角時背風面風壓係數，採時序列資料作及時相減運算，後續可計算淨風壓係數之平均值與擾動值。淨風壓係數表達的是板所受到的風荷載，以指向版面向為壓力的正，因此如果迎風面與背風面均同受相同的正壓力，則其整體淨風壓將為零，如果迎風面受到指向離版面的壓力，亦即為負壓力，而此同時背風面如受到指向版面的正風壓，兩者聯合作用以(3)式計算之，則得甚低的負值，對於太陽光電板而言，代表掀翻板面的作用力，不利於結構安全。

為比較不同來流條件下的太陽光電板風荷載，將採用面積分計算方式，將版面上各風壓孔之瞬時淨風壓係數以其代表的貢獻面積為權重加權計算太陽光電板整體所受淨風壓係數。

$$C_{Pnet} = (\sum C_{P_i n} \times A_i) / A_{total} \quad (5)$$

其中 A_i 為各風壓孔的貢獻面積， A_{total} 為該片光電板的總面積。

四、結果與討論

4-1 太陽光電板版面之風荷載

本研究以平屋頂建築模型，分別進行在不同條件下的太陽光電板陣列氣動力實驗，由實驗量測結果計算光電板上所受整體平均淨風壓係數隨風攻角的變化分別如圖3所示，間距的變化是以光電板高為單位，本研究氣動力模型板高為2cm。

圖3(a)為間距緊密排列實驗成果，圖3(b)為排間距1單位排列，可見基本上第一排光電板的平均淨風壓係數變化改變不多，第二、三排光電板則係數值正負變化幅度增加，此變化趨勢隨間距的增加而加劇。如圖3(d)所示，在小風攻角時，三排光電的平均淨風壓係數變化均相似，仍以第一排光電板的負風壓係數最低，隨風攻角的增加各自變化略有不同，而風攻角大於180度後，第三排光電板的風壓係數負值更低，負風壓作用較為強烈。

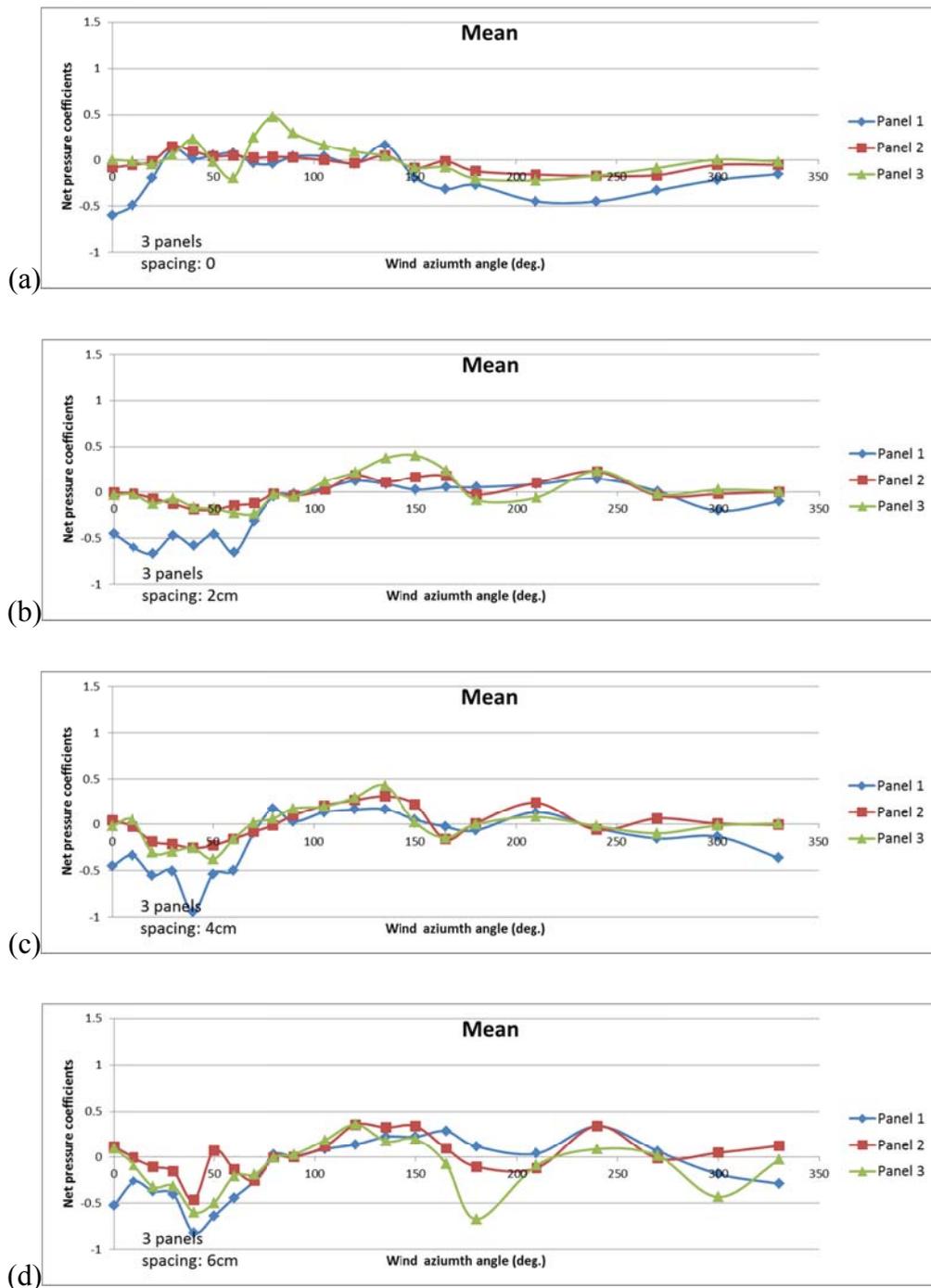


圖 3 平屋頂建築物，各排太陽光電板上所受整體平均淨風壓係數隨風攻角變化，(a)無間距，(b)1 單位間距，(c)2 單位間距，(d)3 單位間距。

4-2 太陽光電板版面極端風力係數

推估得各不同配置情形下的太陽光電板版面極端風力係數值如表 2 所示，各版面的極端風力係數值分別計算其正風壓與負風壓兩種荷載，由時序列資料中計算各個風攻角的計算值再挑選最嚴重的數值作為該配置條件下的極端風力係數。

由表 2 中可見，正風壓的作用並不強烈，主要關鍵性的風荷載以負風壓作用為主，第一片光電板所受的極端風力係數最強烈，隨後的各片光電板其極端設計風力係數均遞

減非常明顯。比較不同板間距的配置下，隨光電板排與排間距的增加，其極端風力亦漸趨增高。光電板陣列手排距離建築物屋頂邊緣有所退縮時，其所受之極端風荷載亦隨之下降。有女兒牆存在時，對於風荷載的減輕有很大的影響，光電板陣列如距離女兒牆較近，則所受極端風力作用下降一半以上，有保護光電板受風作用的效果，但安裝位置如距離女兒牆越遠，則保護的作用遞減。

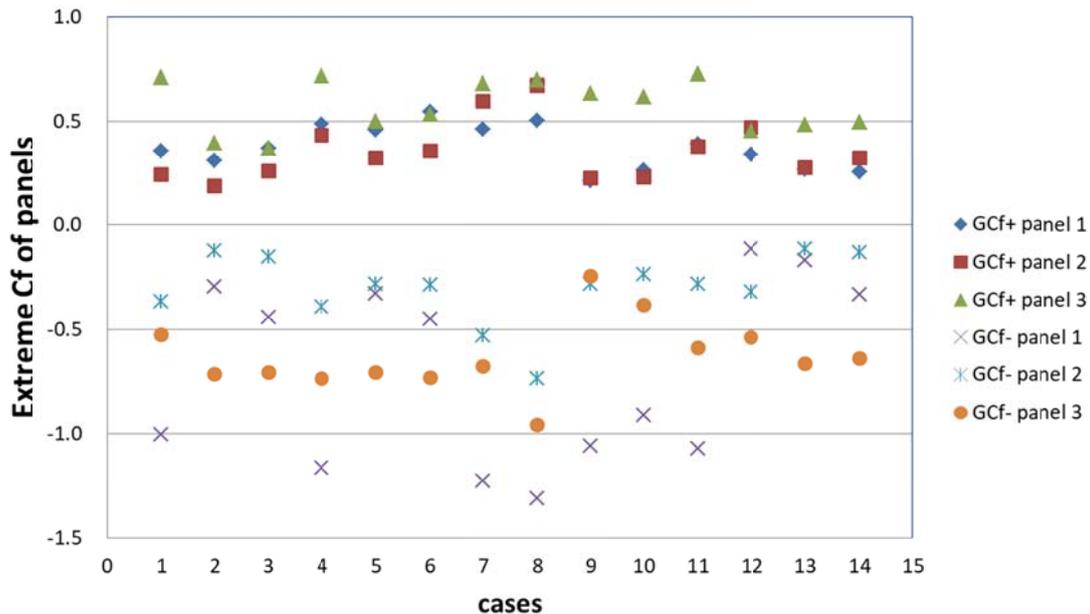
由於光電板所受正負極端風力係數差異甚大，很一致的是負風壓作用較強烈，考量設計時保守的評估風荷載及簡化設計係數的查閱，因此建議採用第一排光電板所受極端負風力係數作為代表性係數，應為較安全保守的。圖 4 將前三片光電板在各種不同光電板陣列配置方式下所推估得之極端風力係數繪製出其分布狀況，顯示即使在最極端狀況下，負風力係數亦未有超過 1.5 的情形。

表 2 各不同配置情形下的太陽光電板版面極端風力係數推估值

版間距	退縮	屋頂高	女兒牆	編號	panel 1	panel 2	panel 3	panel 1	panel 2	panel 3
					Extreme Cf+			Extreme Cf-		
0	0	10Q		1	0.354	0.242	0.708	-1.006	-0.367	-0.526
0	Q	10Q		2	0.308	0.186	0.392	-0.296	-0.123	-0.716
0	2Q	10Q		3	0.366	0.259	0.369	-0.441	-0.153	-0.708
Q	0	10Q		4	0.487	0.432	0.718	-1.163	-0.393	-0.739
Q	Q	10Q		5	0.455	0.323	0.497	-0.329	-0.283	-0.708
Q	2Q	10Q		6	0.543	0.357	0.530	-0.452	-0.288	-0.732
2Q	0	10Q		7	0.460	0.595	0.679	-1.226	-0.530	-0.677
3Q	0	10Q		8	0.505	0.671	0.698	-1.312	-0.739	-0.956
0	0	5Q		9	0.212	0.225	0.632	-1.057	-0.282	-0.245
0	0	7.5Q		10	0.261	0.230	0.617	-0.909	-0.237	-0.385
0	0	10Q		11	0.390	0.375	0.728	-1.070	-0.284	-0.589
0	0	10Q	V	12	0.339	0.470	0.450	-0.114	-0.322	-0.538
0	Q	10Q	V	13	0.268	0.274	0.482	-0.167	-0.113	-0.666
0	2Q	10Q	V	14	0.252	0.320	0.496	-0.333	-0.130	-0.642

註：Q 為光電板高度

表 2 數據實驗模型之光電板採用仰角 30 度進行設計，而實際應用時光電板角度有所差異變化，未來可利用 CFD 模擬光電板所受風力的狀況，比較不同仰角對於受風力的變化趨勢，可供一併考慮。



資料來源：本研究整理

圖 4 實驗資料推估之光電板整體風壓係數極值

我國建築物耐風設計規範中並未針對類似光電板所受風荷載作建議，但規範解說中有針對開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數作建議，如表 1 所示，兩者在幾何外型上有所類似，而光電板的低端常見的架設方式為固定於地面或整體支架加高可通氣流。以本研究實驗模型幾何條件為例，仰角 30 度，且 G 取用 1.88，則 $G \cdot C_f = 1.88 \cdot 1.0 = 1.88$ ，相對於實驗值第一排光電板之 GcF 尚屬保守。應用我國耐風設計規範建議之開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數時，版面的深寬比應注意核算。實驗中採用的光電板模型依表中 L/B 計算，其值低於 1/5，因此較為保守，但由表中顯示在接近正方形或短矩形的版面，其風力係數值較高，因此對於較少數量組合成之光電板單元其 L/B 值較高，應注意核算。

五、結論

1. 由建築物屋頂安裝太陽光電系統進行一系列實驗，研究結果顯示風荷載主要受到安裝位置及光電板陣列排列方式影響，在多排太陽光電板陣列的受風作用以接近建築物邊緣的第一排最為強烈，後排的光電板受到前排的遮擋，受風力減少甚多。
2. 女兒牆的存在使得光電板所受風荷載大幅減輕，光電板的風荷載受到女兒牆的遮蔽保護而無強烈風荷載，將光電板陣列退縮，光電板的風荷載亦僅微幅上升。
3. 安裝於屋頂面上之太陽光電板在低端與地板接合的安裝狀況下，本研究利用氣動力實驗推估之設計風力係數與開放式單斜屋頂之建議值相比略低，因此如採用開放式單斜屋頂之設計風力係數亦屬保守的設計。

六、誌謝

本研究承蒙內政部建築研究所在軟硬體設備及經費上之大力支持(計畫編號 106301070000G0018)，始得以完成，特此申謝。

參考文獻

1. Aly Mousaad Aly, Girma Bitsuamlak, 2013, Aerodynamics of ground-mounted solar panels - Test model scale effects, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 123, 250-260.
2. Bienkiewicz, B., Sun, Y., 1992. Local wind loading on the roof of a low-rise building. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 45, 11-24.
3. B. Nicolas Pratt, Gregory A. Kopp, 2013, Velocity measurements around low-profile, tilted, solar arrays mounted on large flat-roofs, for wall normal wind directions, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 123, 226-238.
4. Chung, K.M., Chang, K.C., Chou, C.C., 2011. Wind load on residential and large-scale solar collector models. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 99 (1), 59-64.
5. Chung, K.M., Chang, K.C., Liu, Y.M., 2008. Reduction of wind uplift of a solar collector model. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 96 (8-9), 1294-1306.
6. Davis Banks, 2013, The role of corner vortices in dictating peak wind loads on tilted flat solar panels mounted on large, flat roofs, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 123, 192-204.
7. Gregory A. Kopp, Steve Farquhar, M. J. Morrison, 2012, Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilted, roof-mounted, solar arrays. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol.111 pp.40-52
8. N. J. Cook, J. R. Mayne, 1980, A Refined Working Approach to the Assessment of Wind Loads for Equivalent Static Design. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 6(1-2), 125-137.
9. 建築物耐風設計規範及解說，營建雜誌社編印，內政部建築研究所，2015，台灣。
10. 陳若華，包匡，曾亮，李旻原，2012a，”太陽光電板設置於不同斜屋頂上所受風壓之初探”，空間設計學報。

B-10

住宅之外氣環境過濾換氣必要性之探討

張丞瑤(Cheng-Yao Chang) *崔征国(Jeng-Gwo Tsuei) *曾亮(Liang Tseng)
逢甲大學建築專業學院 逢甲大學建築專業學院 逢甲大學建築專業學院

摘要

2016 年根據世衛組織(WHO)監控空氣品質的裝置證實，全世界約有 92%的人口生活在空氣污染程度超出限值的區域。每年有近 300 萬人直接或間接因室外空氣污染而死亡。國人每人每天約有 80~90%的時間處於室內環境，但目前室內兩種換氣方法不論是自然通風或是機械通風都會遇到戶外汙染物質與懸浮微粒入侵(因室外空氣污染)的問題，為研究出能減少室外空氣進入室內時帶來的汙染物質，同時能將室內汙染物質排出至室外時降低對室外空氣品質的負擔，針對此問題本研究提議結合空氣淨化系統與開放式的循環的換氣系統的優點建立新的具有良好的過濾功能的換氣裝置，並對此裝置提出其架設與樣式的可能性。

關鍵字：通風換氣、空氣過濾、PM2.5

Discussion on the Necessity of Filtration and Ventilation About Outside Air Environment

Abstract

In 2016, according to WHO's air quality monitoring devices, about 92% of the world's population live in areas where air pollution levels are out of limits. Nearly 3 million people die each year, directly or indirectly, from outdoor air pollution. About 80-90% of the population lives in the indoor environment every day. However, at present, both indoor ventilation methods encounter problems of outdoor pollutants and aerosol intrusion (due to outdoor air pollution), whether it is natural or mechanical ventilation. In order to study to reduce the outdoor air into the room when the pollutants brought about, while indoor pollutants can be discharged to the outside when the outdoor air quality to reduce the burden on this issue proposed the combination of air purification systems and open loop Advantages of the ventilation system Establish a new ventilation device with good filtering function and propose the possibility of its installation and style.

Keywords: Ventilation, air filtration, PM2.5

一、前言

2016年根據世衛組織(WHO)監控空氣品質的裝置證實，全世界約有92%的人口生活在空氣污染程度超出限值的區域。每年有近300萬人直接或間接因室外空氣污染而死亡，在2012年導致的死亡的人數高達650萬人，占當年全球死亡人數總數的11.6%。國人每人每天約有80~90%的時間處於室內環境(行政院環保署)其中包括住家、辦公室或其他建築物內，又因在密閉的室內空間內若室內換氣量不足時，污染物就容易蓄積而導致室內空氣品質惡化易造成「病態建築物症候群」(世界衛生組織(WHO))對健康造成危害。目前室內換氣方法有兩種自然通風或是機械通風但不論是自然通風或是機械通風都會遇到戶外汙染物質與懸浮微粒入侵(因室外空氣污染)的問題，當引入新鮮空氣時也引入危害身體健康的有害物質。然而目前有換氣功能的設備如空調設備、窗式通風器、抽風或送風機、新風系統等，這些開放式的循環系統雖然具有過濾空氣的功能但多只能過濾大顆粒物質如灰塵，無法過濾對人體傷害性極大的細懸浮微粒等細小顆粒的物質，而空氣淨化系統雖可以過濾小顆粒的物質但卻屬於封閉式的循環系統，無法有效引入新鮮得空氣。因此本研究希望能提議可供室外流入室內之外氣的過濾方法，提供住宅室內環境維持乾淨且新鮮的空氣，讓居住於室內的使用者更為健康。

二、主要內容

為研究出能減少室外空氣進入室內時帶來的汙染物質，同時能將室內汙染物質排出至室外時降低對室外空氣品質的負擔，針對此問題本研究利用以下方法進行本研究換氣裝置之研究。

2.1 研究方法與流程

透過文獻調查室外空氣汙染物質以及汙染物質對身體造成的危害和空氣淨化系統與各類換氣系統的相關資料，找出最適合新換氣系統的過濾方式與裝置樣式的可能。

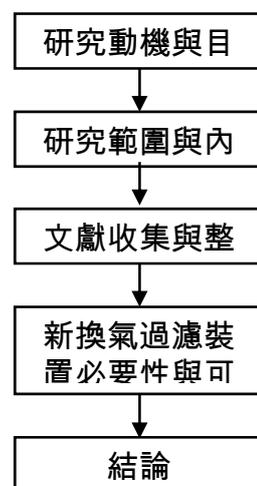


Fig. 1. Research Process

2.2 室外空氣汙染

室外空氣污染（或大氣污染）指一些危害人體健康及周邊環境的物質對大氣層所造成的污染，較廣義之定義為「存在於大氣中之物質足以直接或間接傷害到人們之健康與財產，這些物質我們都稱為空氣污染物，排放這些空氣污染物於大氣中之事實稱為空氣污染。」依據中華民國「空氣污染防制法施行細則-第二條」對空氣污染物之分類如下

一、 氣狀污染物

- | | |
|-----------------|----------|
| 1. 硫氧化物 | 2. 一氧化碳 |
| 3. 氮氧化合物 | 4. 碳氫化合物 |
| 5. 氯氣 | 6. 氯化氫 |
| 7. 氟化氫 | 8. 二硫化碳 |
| 9. 氟化物氣體 | 10. 鹵化烴類 |
| 11. 全鹵化烷類(CFCs) | |

二、 粒狀污染物

1. **總懸浮微粒 (TSP)**：係指懸浮於空氣中之微粒，主要為小於 100 μm 之微粒，簡稱 TSP (Total Suspended Particulates)。
2. **懸浮微粒 (PM-10)**：係指粒徑在 10 微米(μm)以下之微粒，容易通過鼻腔之鼻毛與彎道到達喉嚨，又稱 PM-10。粒徑小於 2.5 μm 之微粒又稱 PM-2.5，容易為人體鼻腔吸入達到下呼吸道甚或肺泡。
3. **落塵**：粒徑超過 10 微米(μm)，能因重力逐漸落下而引起公眾厭惡之物質。營建工地附近之落塵量，常比一般住宅區高至 10 倍以上。
4. **金屬燻煙及其化合物**：含金屬或其化合物之微粒。
5. **黑煙**：以碳粒為主要成分之暗灰色至黑色之煙。主要為有機物燃燒，如：木材、煤碳、燃料油、柴油、汽油燃燒不完全產生黑煙。
6. **酸霧**：含硫酸、硝酸、磷酸、鹽酸等微滴之煙霧。
7. **油煙**：含碳氫化合物之藍白色煙霧。

三、 二次污染物

1. **光化學霧**：經光化學反應所產生之微粒狀物質而懸浮於空氣中能造成視程障礙者。
2. **光化學性高氧化物**：經光化學反應所產生之強氧化性物質，如臭氧、過氧硝酸乙醯酯(PAN)等。（但不包括二氧化氮）。

四、 惡臭物質

1. 氨氣(NH_3)。
2. 硫化氫(H_2S)。
3. 硫化甲基($(\text{CH}_3)_2\text{S}$)。
4. 硫醇類(RSH)。
5. 甲基胺類($(\text{CH}_3)_\text{X}\text{NH}_3\text{-X}$, $\text{X}=1,2,3$)

五、 有機溶劑蒸氣。

六、 塑、橡膠蒸氣。

七、 石棉：石棉及含石綿之物質，容易引起肺癌。

八、 其他經中央主管機關指定公告之物質。

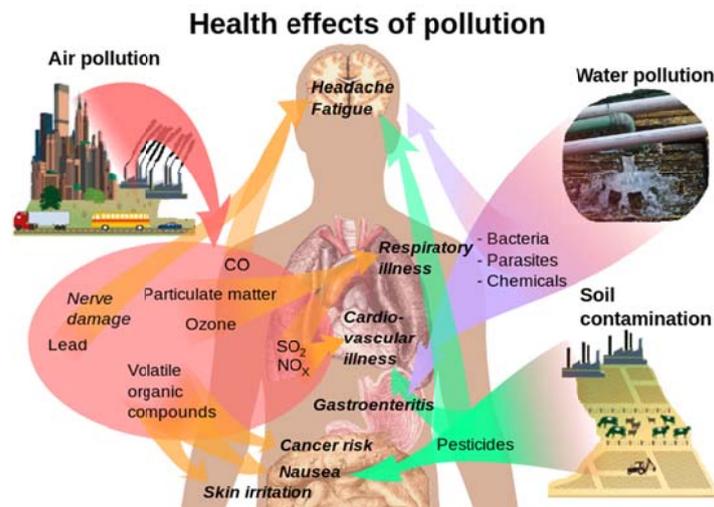


Fig. 2. Health Effects of Pollution (Author: Mikael Häggström)

2.3 細懸浮微粒PM2.5

空氣污染物中漂浮在空氣中類似灰塵的粒狀物稱為懸浮微粒(particulate matter, PM)，PM粒徑大小有別，小於或等於2.5微米(μm)的粒子，就稱為PM2.5，通稱細懸浮微粒，單位以微克/立方公尺($\mu\text{g}/\text{m}^3$)表示之

Table 1. Particulate Matter Classification

粒徑(μm)	粒徑大小說明
<100	稱總懸浮微粒(TSP)，約為海灘沙粒，可懸浮於空氣中。
<10	稱懸浮微粒(PM10)，約為沙子直徑的 1/10，容易通過鼻腔之鼻毛與彎道到達喉嚨
2.5~10	稱粗懸浮微粒(PM2.5-10)，約頭髮直徑的 1/8~1/20 大小，可以被吸入並附著於人體的呼吸系統
<2.5	稱細懸浮微粒(PM2.5)，約頭髮直徑的 1/28，可穿透肺部氣泡，直接進入血管中隨著血液循環全身。

(資料來源:行政院環保署)

2.3.1 台灣細懸浮微粒PM2.5來源與成分

PM2.5來源可分為原生性及衍生性，皆可能由自然界或人為產生。原生性細懸浮微粒係指被排放到大氣時即為PM2.5的粒狀物，該成分主要乃由物理破碎或一次污染排放所產生，如海鹽飛沫、微粒，鍋爐及機動車輛之燃燒排放，而衍生性細懸浮微粒則係指被釋出之非PM2.5之化學物質(稱為前驅物，可能為固體、液體或氣體)，在大氣環境中經過一連串化學變化與光化反應後成為PM2.5的微粒，主要為硫酸鹽、硝酸鹽及銨鹽，以上污染來源均除本地污染外，亦受到境外長程傳輸污染之影響。(資料來源:行政院環保署)

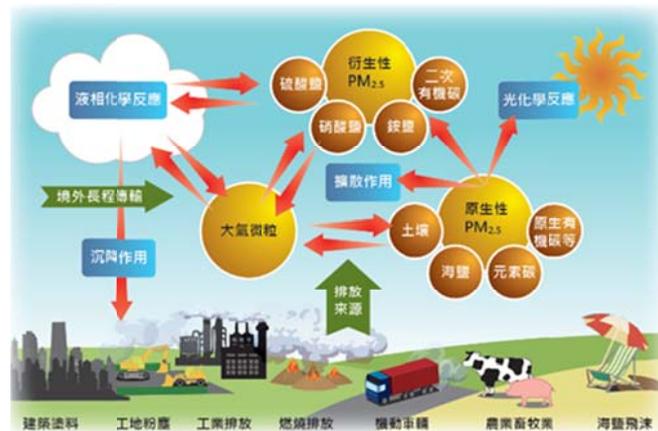


Fig. 3. PM2.5 sources

2.3.1 細懸浮微粒PM2.5對人體健康的危害與影響

空氣中的懸浮微粒會經由鼻、咽及喉進入人體，10微米以上的微粒可由鼻腔去除，較小的微粒則會經由氣管、支氣管經肺泡吸收進入人體內部。不同粒徑大小的懸浮微粒，可能會導致人體器官不同的危害。近年來，許多流行病理學研究已確立PM2.5對於健康造成影響，包括：支氣管炎、氣喘、心血管疾病、神經系統、肺癌等，無論長期或短期暴露在空氣污染物的環境之下，皆會提高呼吸道疾病及死亡之風降低平均壽命

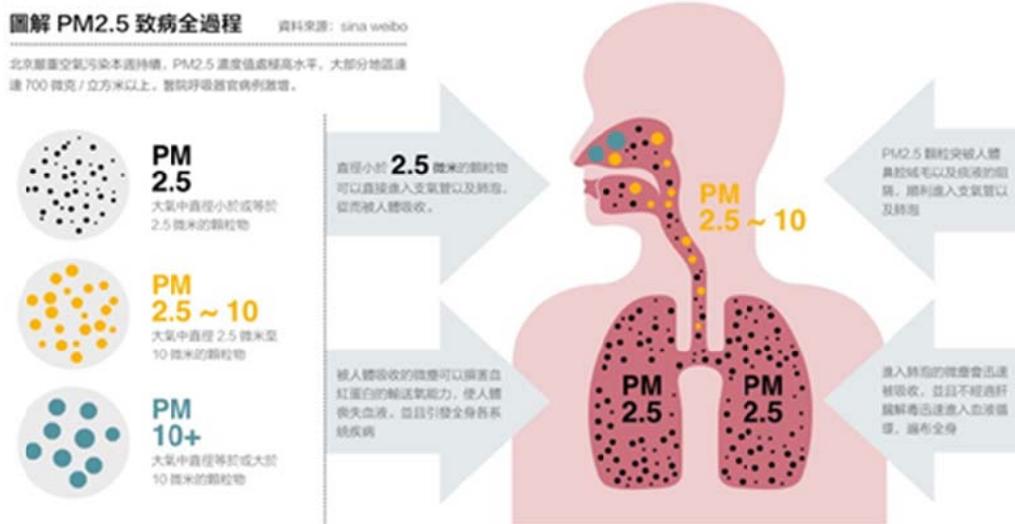


Fig. 4. Health Effects of PM2.5 (source: Sina Weibo)

2.4 目前住宅現有的換氣或過濾裝置

住宅換氣指室內外進行的空氣交換，一般住宅除局部區域外，常以整體換氣之方式室進行室內換氣。整體換氣又稱稀釋換氣，指從外面導入新鮮空氣將室內之污染物濃度稀釋到容許濃度以下再排出室外的方式，其換氣方式可分為1.自然換氣 2.機械換氣。住宅過濾指藉由物理性或化學性將不好的物質隔離或減少進入指定的區

域內，一般住宅常藉由設備進行物理性的空氣過濾方式。而可過濾微小粒子之裝置又因為無換氣之功能，而無法引入新鮮空氣，不易於人體的健康。

2.4.1 目前住宅現有的換氣裝置

目前住宅現有的換氣裝置大部份是依靠機械通風，少數是自然通風，然而這兩種方式都會遇到戶外汙染物質與懸浮微粒入侵(因室外空氣汙染)的問題，即使部分換氣裝置裝置放置克過濾的濾網也都只能過濾大顆粒物質(如灰塵)，無法過濾微小顆粒。

1. 送/排風機

依靠輸入的機械能，提高氣體壓力並排送氣體的機械，它是一種從動的流體機械。

2. 門窗自然通風換氣器

窗式自然通風器是根據自然環境造成的局部氣壓差和氣體的擴散原理而產生空氣交換的一種換氣方式，在室外無風時，依靠室內外穩定的溫差，則能形成穩定的熱壓自然通風換氣。當室外自然風風速較大時，依靠風壓形成有效的換氣。



Fig. 5. Natural ventilation window (source: 家泰風通風設備有限公司)

3. 新風系統

新風系統是由風機、進風口、排風口及各種管道和接頭組成。室內受汙染的空氣經排風口及風機排往室外，使室內形成負壓，室外新鮮空氣便經安裝在窗框上方(窗框與牆體之間)的進風口進入室內。(資料來源:Baidupedia)

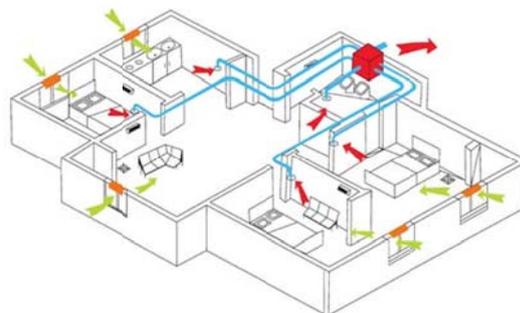


Fig. 6. Ventilation System (source: Talent Insulation)

4. 全熱交換氣

熱交換器是一種高效節能型空調通風裝置，在雙向置換通風的同時，產生能量交換，從而大大節約了新風預處理的能耗，達到節能換氣的目的。(資料來源:互動百科)



Fig. 7. Natural ventilation window (source: Lifegear)

5. 空調系統

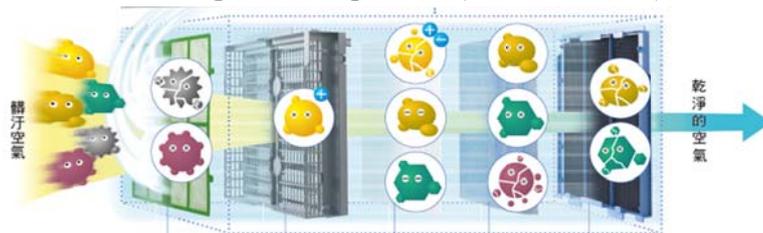
空氣系統是包含溫度、濕度、過濾空氣（大顆粒）以及空氣循環的控制系統，其利用冷媒在壓縮機的作用下，引發週遭空氣的蒸發或凝結，以達到改變溫、濕度的目的。(資料來源:圖解建築環境控制，詹氏書局)

2.4.2 目前住宅現有的過濾裝置

1. 空氣清淨機

空氣淨化器又稱「空氣清新機」，是指能夠吸附、分解或轉化各種空氣污染物（一般包括 PM2.5、粉塵、花粉、異味、甲醛之類的裝修污染、細菌、過敏原等），有效提高空氣清潔度。

Fig. 8. Air purifier (source: Daikin)



2. 冷暖氣機

冷暖氣機原裡與空調系統相似，但無換氣之功能，其主要目的是用於室內溫度之控制，具有過濾塵蟎等較大顆粒物質之功能。

2.5 住宅換氣或過濾設備常用之過濾材料

1. 預濾網

通常為尼龍材質，用於過濾粗大之物質如貓毛、灰塵等。

2. 活性炭濾網

活性炭是疏水性的吸附劑，具有對非極性物質有選擇性吸附的特性，同時可去除臭味。

3. 奈米光觸媒濾網

利用光所提供的能量來進行催化作用，使觸媒周圍的氧氣或水分子轉換成極具活性的氫氧自由基(OH free radicals)，再藉由自由基分解對人體或環境有害的有機物質，可分解部分對環境不利的有機物與令人不適之臭味。

4. HEPA濾網（高效濾網）

高效濾網的過濾材質通常由無規則排布的化學纖維（例如：聚丙烯纖維即丙綸或聚酯纖維即滌綸的無紡布）或玻璃纖維製成，直徑約0.5到2.0微米，通過微觀的絮狀結構，主要是用來去除0.5 μm 以上之微粒。根據不同的濾淨率可分為不同的等級（E10~E12,H13~H14,U15~U17）。（資料來源:維基百科）

5. 靜電空氣濾網

在過濾材（不織布）內植入正負向永久性電荷處理，使布面上充滿高伏特數的強力靜電，使有害人體的壞分子在通過濾網時被吸附在布面上，可吸附浮游於空氣中、且肉眼看不見的微粒與致敏原。（資料來源:3M）

6. 靜電集塵

利用電力使氣流中的塵粒帶電，然後再依「異性電相吸」的原理將微粒子捕集，可收集粒徑大於0.1微米之粒子。

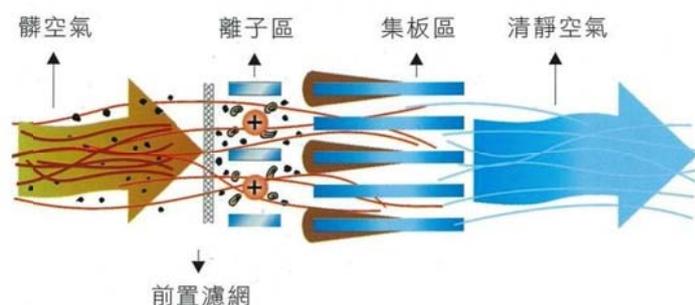


Fig. 9. Electric Precipitator (source: Woofaa)

2.6 本研究提議換氣過濾裝置之可能性

由於目前得過濾裝置與換氣裝置都無法同時擁有量好的過濾效能與換氣之功能，因此本研究提議結合空氣淨化系統與開放式的循環的換氣系統的優點建立新的具有良好的過濾功能的換氣裝置，以利於降低室內污染物質與通風量的提升，使處於室內密閉環境的人們能減少污染物質為害健康的機率，同時其新換氣裝置要能同時在新舊建築物上使用並能簡單操作與維護。因此本研究希望以過濾材的方式進行空氣的淨化，而非靜電集塵之方式，故提出以下之概念以期望能達成本研究之研究目的：

I. 新換氣過濾裝置之結構

為方便維護與安裝因此本研究以層狀之過濾材進行空氣之淨化，其結構參考目前過濾裝置，其可能性下圖所示

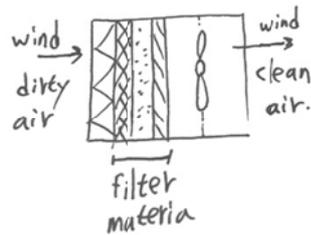


Fig. 10. New Machine -1 (Draw by this study)

II. 新換氣過濾裝置架設與樣式之可能性

為能有效的將新鮮且乾淨的空氣引入室內同時方便各種住宅類型之使用，本研究提議以下之可能方式於新換氣過濾裝置。

1. 新換氣過濾裝置架設於窗戶、氣窗或窗框之下

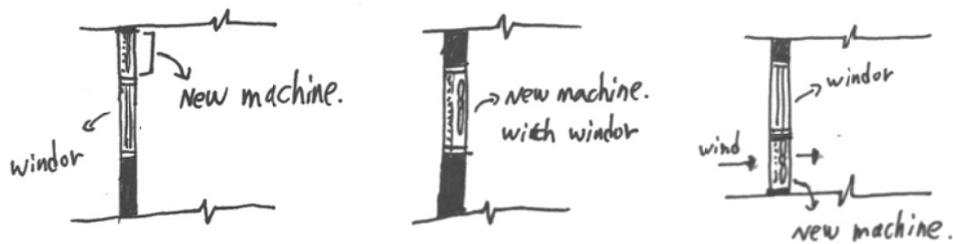


Fig. 11. New Machine -2 (Draw by this study)

2. 新換氣過濾裝置結合室內冷暖氣機

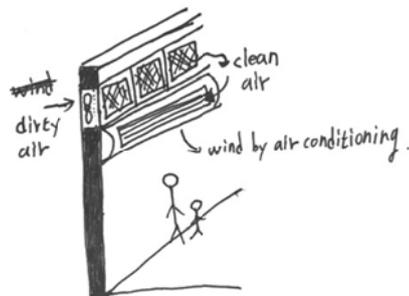


Fig. 12. New Machine -3 (Draw by this study)

3. 新換氣過濾裝置為整體換氣過濾裝置

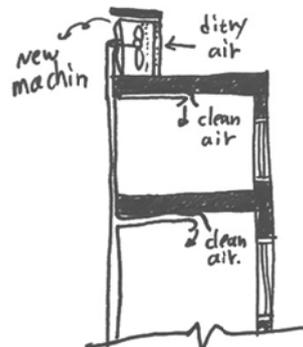


Fig. 13. New Machine -4 (Draw by this study)

2.7 結論

近年來越來越多的疾病被證明是因空氣汙染而致病或會因空氣汙染而增加疾病發生的機率如肺部疾病、心臟疾病、呼吸道過敏疾病等，且空氣汙染也被研究證實會影響平均壽命，因此如何使生活的環境保持較乾淨的空氣減少對人體有害的污染物質是極其必要的，又根據勞工安全衛生設施規則規定每小時每人所需之新鮮空氣應在0.4立方公尺以上，因此良好的換氣也是極其必要的。故本研究之提議裝置能同時達到上述之兩點要求，且若能配合室內空氣循環系統能將有更理想的效果，由於每人每天平均有80%的時間處於室內環境，故本研究期望此裝置能使得人們處於封閉室內環境時能有新鮮乾淨的空氣可以使用，同時由於通風量增加，使得室內環境的含氧量上升，因此更能提昇工作的效率也能減少缺氧而精神不佳導致意外發生的機率。

三、參考文獻

1. 陸沛鈺，「臺中市空品測站 PM2.5 及相關空氣污染物之研究」，碩士論文，國立中興大學環境工程學系研究所，2017。
2. 洪若雅，「臺灣大氣背景 PM2.5 質量濃度之推估」，碩士論文，國立中央大學大氣科學學系，2017。
3. 劉晏瑜，「細懸浮微粒空氣污染事件特性分析」，碩士論文，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系研究所，2017。
4. WHO, "Indoor air pollution from solid fuels and risk of low birth weight and stillbirth Report".
5. WHO, "Releases country estimates on air pollution exposure and health impact", 2017.