

建築節能策略與模擬

文・圖／呂良正

建築物使用電力和燃料來產生冷暖氣、照明和動力，約占所有二氧化碳排放量的38%。根據內政部統計，臺灣夏日空調用電約占全年用電量之40%，因此如何降低室內溫度，減少空調用電，以達節能減碳之目的是刻不容緩之議題。而在眾多建築節能策略中，自然通風、外牆隔熱與綠化屋頂等是成本低且適合臺灣環境的作法，本文即針對此簡要說明近年本研究團隊（參與學生包括：唐瑤書、丁銘顯、吳昇威及李君婷）之成果。

自然通風之建築物耗能預測系統

由於季風及地形關係，臺灣的通風可利用率（環境風速達1.5m/sec以上的時間）高達40~65%。若建築物能妥善運用自然通風，在環境溫度不是特別高之下，可使得室內氣流速度達到舒適標準（0.1~0.5m/sec），減少使用冷氣空調時間，此能大幅提升節能效益。為了能定量地評估自然通風效益，本研究利用計算流體力學（CFD）軟體搭配建築耗能動態模擬分析軟體（DOE-2），建構一個完整的空調及自然通風混合形式的分析系統，用以評估自然通風效益。

一般建物耗能分析軟體（Energy Simulation, ES），如DOE-2，主要設計是用來模擬密閉式空調系統運轉效率，現今的建物耗能分析軟體都未將自然通風因素納入考量。而本團隊提出的評估系統，乃是先藉由計算流體力學軟體針對建物在不同外部環境（風速、風向等）下來預測室內換氣率（ACH），再依氣象資料，將逐時換氣率依當時風向及風速並搭配CFD計算結果輸入建物耗能分析程式進行分析，整體分析架構如圖1所示。

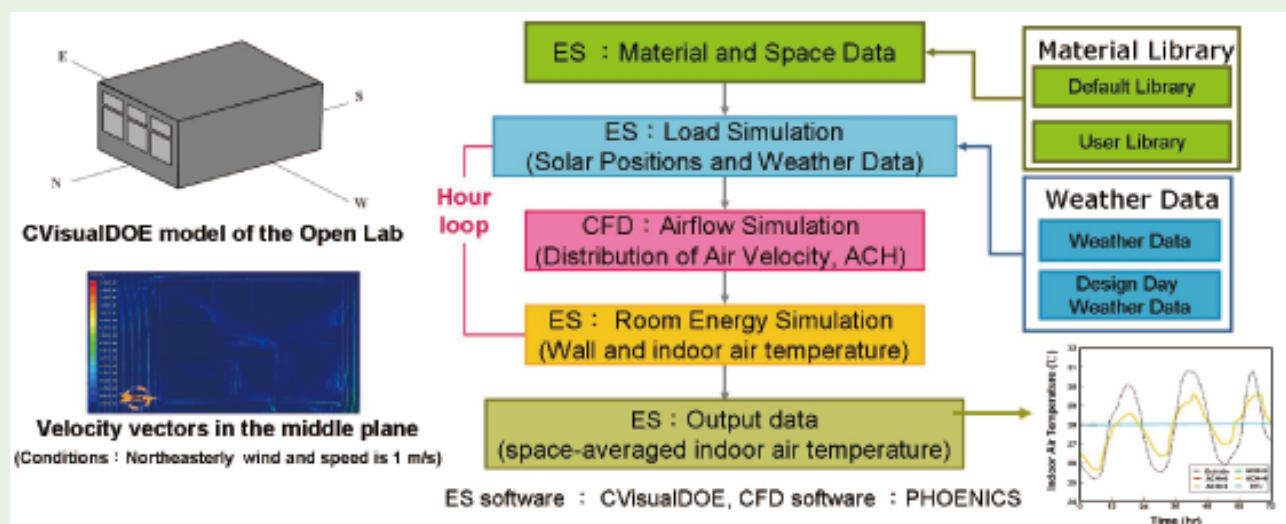


圖1：本團隊所設計之建物耗能評估系統將外部環境納入考量。

利用此評估系統針對臺大Insight Center的OpenLab中「智慧通風系統」進行運轉效益評估，以三個夏日為例（2008/7/23-25），其結果如圖2所示，可發現當不使用自然通風時，室內溫度超過28百分比高達92.1%；但在自然通風、智慧（混合）通風模式（搭配小型導風扇）下，室內溫度超過28百分比可分別降至60.4%、46.7%。由此可知，「智慧通風系統」的確能有效降低室內溫度，因此適當利用自然通風確實可以大幅減少冷氣使用時機，達到節能之目的。

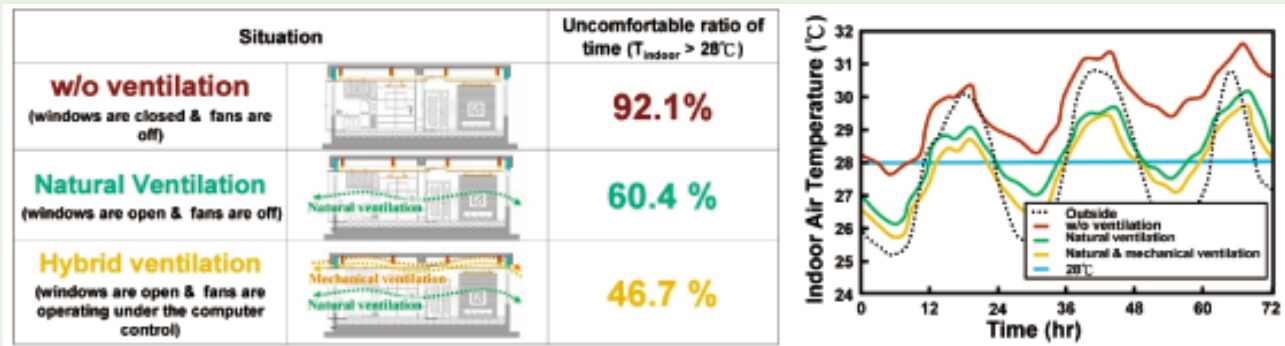


圖2：應用於評估臺大「智慧通風系統」的夏日節能效益。

再以臺大土木研究大樓為例，進行在空調條件下的建築耗能評估，選定其中的標準層樓5樓進行能耗分析，並與實際運轉數據（以2010年為例）進行比較，所得結果如圖3所示。除了寒暑假有較大誤差外，其他月份與全年平均誤差均可在9.7%以下，由此可見以 DOE-2來模擬建築耗能是非常準確的。

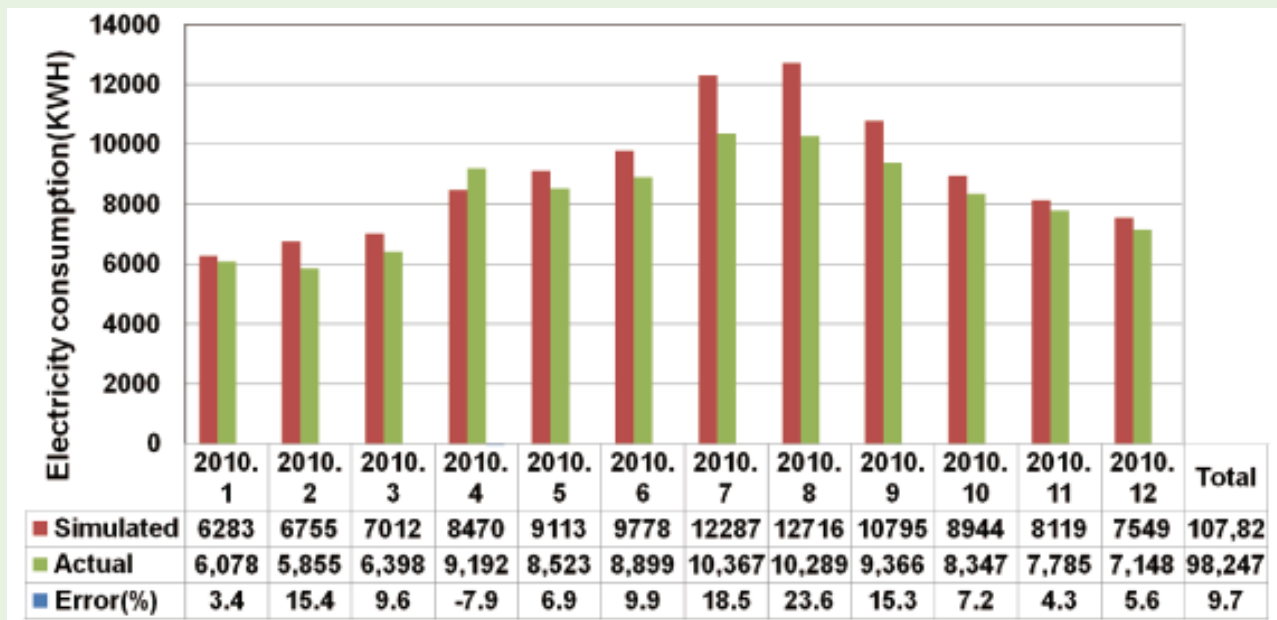


圖3：於臺大土木館進行耗能分析（2010）準確性高。

廣義隔熱材料節能效益評估

廣義隔熱材料，依其隔熱機制不同，分為隔熱材料與相變材料。隔熱材料乃利用物質本身的低熱傳

導係數特性，阻隔熱能傳遞，使物體維持在某一固定溫度範圍、或延時室外溫度對於室內所帶來的效應，故熱傳係數越低，減少熱能進出的效果越佳。建築上常用的隔熱材料為發泡聚合物（如發泡聚苯乙烯，簡稱EPS），其熱傳係數約為 $0.03\sim 0.04\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ，遠小於混凝土（ $1.4\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ）。

相變材料（Phase Change Material, PCM）則利用物質發生相變化時伴隨大量熱能吸收或釋放以達到恆溫或降低室內空氣溫度振幅。國外將PCM材料加入建材中之研究約有20年的歷史，並已實作於建築物作為保溫節能之用，主要是利用白天吸熱晚上放熱的原理，減少暖氣使用。將PCM材料運用於建築除熱（臺灣環境）是近幾年才開始的，主要是以其減少進到室內空氣的熱能。目前有多家廠商已量產PCM微膠囊建材，以德國BASF的PCM智慧板材（Micronal® PCM SmartBoard™）為例，其PCM原料為石蠟，其重量約占板材之26%，此板材輕且薄（密度約 0.77 g/cm^3 ，厚度為 1.5 cm ），熔點為 26°C ，但其蓄熱能力達 330 kJ/m^2 ，相當於 9 cm 厚的混凝土牆或 15 cm 厚的磚牆的蓄熱能力。美國杜邦（DuPont）所開發的PCM材料（DuPont™ Energain® panel）更標榜能降低室內溫度 7°C 左右。由於PCM建材質輕且薄，若與混凝土外牆搭配使用，可以達到一定的保溫或除熱效果，故PCM材料運用於建築節能方面具有相當潛力及市場。

為了解以上廣義隔熱材料應用於臺灣氣候下建築物的除熱效果，以有限元素計算軟體ABAQUS先建立一個含窗戶、外牆與室內空氣的2D模型，其局部圖可參考圖4左側，並輸入臺灣氣候資料（太陽輻射、室外氣溫等），計算出逐時的平均室內溫度。由圖4(a)~(f)的等溫線分布可看出在典型夏季中午時，內含廣義隔熱材料（ 2 cm EPS或PCM）的外牆能有效將熱能隔絕在外，避免牆體溫度上升，在夏季夜晚時，相較於一般外牆的室內空氣局部會高達 34°C 以上，內含廣義隔熱材料（ 2 cm EPS或PCM）的外牆則讓室內空氣維持在 30°C 左右。

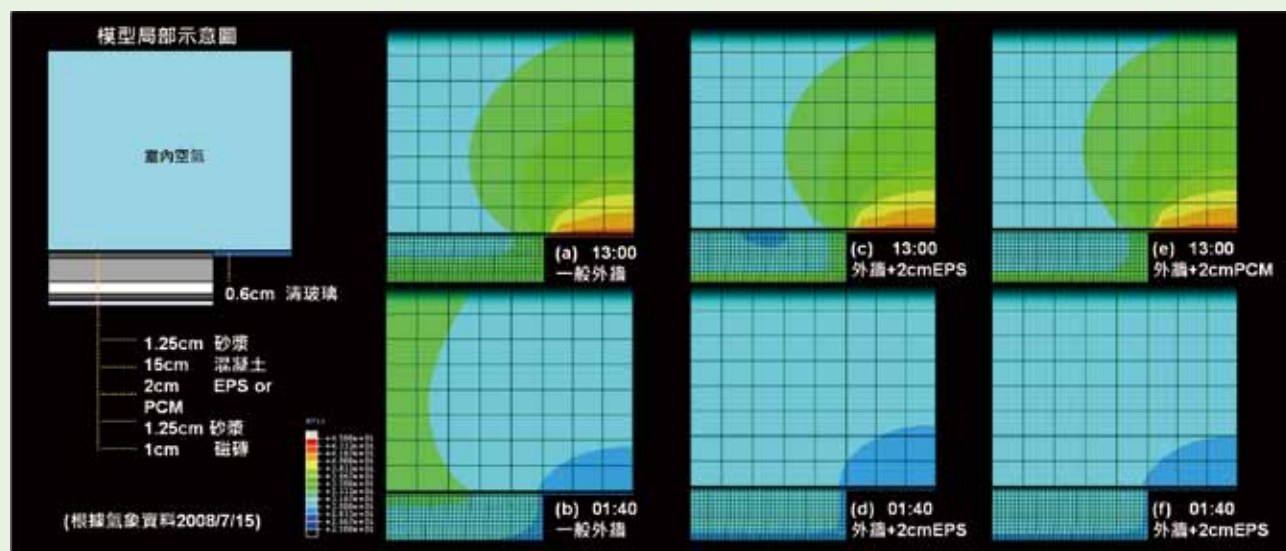


圖4：以廣義隔熱材料可降低夏季室溫。

同時利用此模型，輸入近10年的臺灣氣象資料，並探討廣義隔熱材料其擺放位置、相變材料熔點範圍及不同厚度條件下，計算出耗電量改善比例，根據模擬結果，可知當EPS與PCM（熔點 $28\sim 29^{\circ}\text{C}$ ）擺在外側時效能較佳，且其耗電量改善比例分別為 $7.5\sim 9.5\%$ 與 $5.5\sim 8.0\%$ 。再考慮施工成本與能源花費，以20年的生命週期進行最佳化厚度設計，如圖5所示，EPS與PCM最佳厚度分別為 2 cm 與 4 cm 。

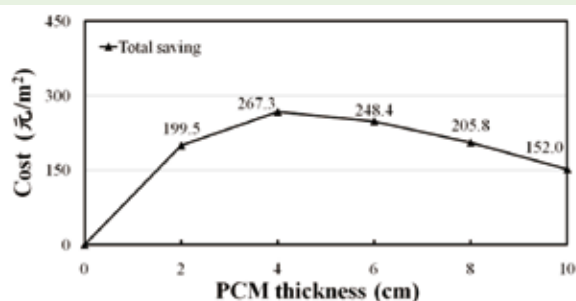
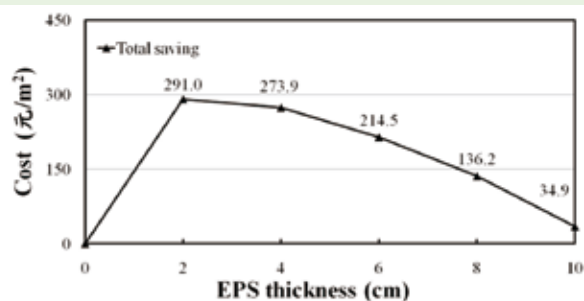


圖5：廣義隔熱材料EPS和PCM最佳除熱厚度各為2cm與4cm。

綠屋頂之降溫效益

由於植物提供遮陽作用，通過植被進入建築物的日照輻射會大幅減少。而且植物行蒸發作用也會帶走大量熱能，土壤也會額外增加結構之熱質量，使進入建築物室內的熱能明顯地減少，達到室內降溫效應，從而降低空調耗電量，達到節能的目的。

綠屋頂（屋頂綠化）意指在建築物之屋頂覆蓋植物、土壤（或生長介質）。綠屋頂大致可分為密集式與開闊式兩種，其特點如表1所列，因開闊式綠屋頂易維護也較為普及，故本研究目前先針對開闊式綠屋頂進行分析探討。

表1：綠屋頂種類比較

綠屋頂種類	密集式綠屋頂	開闊式(薄層式)綠屋頂
		
土壤深度	30cm以上	3-20cm
植栽	喬木、灌木、花園	植栽地被、草地
荷重	800-1500kg/m ²	100-500kg/m ²
維護	需求較大	僅需年度維護
灌溉與排水系統	較複雜	較簡單

國內外相關文獻利用實驗證實綠化屋頂系統確實能降低室內溫度，然而卻缺乏定量的分析證明，故本研究旨在建立通用之分析模型，量化分析綠化系統應用在建築物上之除熱性質及行為，並了解建築物在設置綠化系統前後造成溫度及熱舒適度之改善效果。本研究使用有限元素分析軟體ABAQUS進行熱傳分析，建立綠屋頂分析模型（如圖6所示），配合臺灣氣候資料進行分析。

根據相關文獻，通過植被層進入下方之日照輻射與葉面積指標（leaf area index/LAI）及平均葉片角度有關。LAI越大則進入土壤層之有效輻射越小；而水平之葉片較垂直之葉片有較好之遮陽效果，故平均

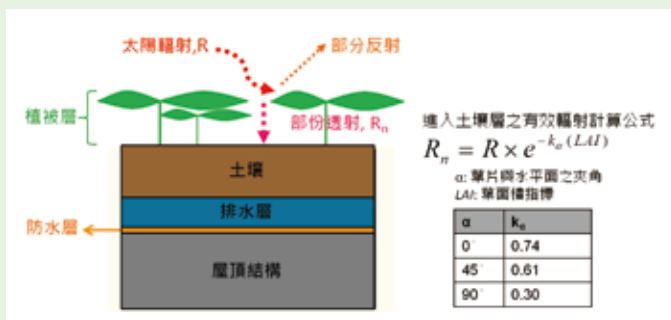


圖6：本研究使用有限元素分析軟體ABAQUS進行熱傳分析，建立綠屋頂分析模型。

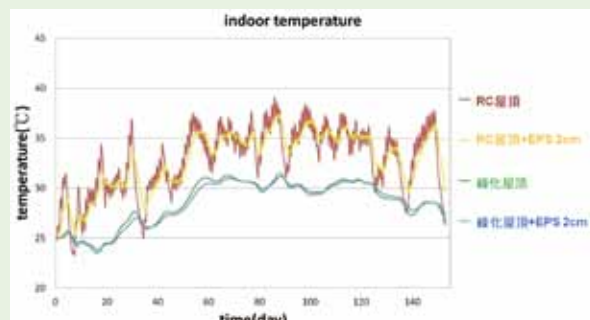


圖7：4種屋頂降溫效果比較。

葉片角度越接近水平，則進入土壤層之有效輻射越小。利用圖6右側公式計算出有效輻射，則可忽略葉片層，並輸入其他各層材質的相關熱傳及對流參數，可建立綠屋頂分析模型。

以2008年5月至9月為例，進行4種屋頂形式的數值模擬，包括綠化屋頂、綠化屋頂內加2公分隔熱材料（綠化屋頂+ EPS 2cm）、鋼筋混凝土屋頂內加2公分隔熱材料（RC屋頂+EPS 2cm）及鋼筋混凝土屋頂（RC屋頂）。所得的室內溫度分析結果，如圖7所示，由分析結果可得知綠屋頂於夏日之降溫效果十分顯著，室內溫度可降溫達5~10°C，比一般常用之隔熱材料EPS效果（約2~4°C）更為顯著。若綠屋頂內再加設隔熱材料，其額外降溫貢獻是很小的，因此不必重複設置。■（本專題策畫／化工系陳文章教授）

延伸閱讀：

- [1] Tang, J.-S. and Leu, L.-J. (2009), "A study of coupled building energy and CFD simulations," *Proceedings of the 22nd KKCNN Symposium on Civil Engineering*, Chiang Mai, Thailand, October 31- November 2.
- [2] Tang, J.-S. and Leu, L.-J. (2010), "Simulation of building electric energy consumption using CVisual DOE," *Proceedings of the 23rd KKCNN Symposium on Civil Engineering*, Taipei, Taiwan, November 13-15.
- [3] Mehling, H. and Cabeza, L. F. (2008), *Heat and cold storage with PCM*, Springer, 2008.
- [4] Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., and Davison, J.B. (2010), "Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit," *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 1582-1591.



呂良正小檔案

1987、1989年臺大土木學士、碩士，1994年康乃爾大學學士學位。自1994年起任教於臺大土木工程系，2001年升等為教授，現任土木工程系教授兼系主任，也兼任中華工程教育學會（IEET）副秘書長及結構工程期刊主編，此外也擔任結構工程學會及地震工程學會理事。

曾任臺大土木工程系副主任、臺大地震工程研究中心主任、土木水利雙月刊總編輯及UCLA訪問學者。研究領域主要包括結構最佳化設計、建築物理模擬（綠建築）、計算力學、結構健康監測、地震工程及結構可靠度分析。