

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 103 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

(國科會GRB 編號)
PG10301-0483

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

受委託者：財團法人成大研究發展基金會

研究主持人：林子平

協同主持人：黃瑞隆

研究助理：施文玫

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 103 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

目次	I
表次	III
圖次	V
摘要	IX
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究方法與流程	7
第二章 資料與文獻分析	11
第一節 何謂熱質量	11
第二節 蓄熱方式的分類	15
第三節 熱質量的評價參數	18
第四節 文獻回顧	24
第三章 熱質量在辦公建築的應用	33
第一節 外牆及屋頂蓄熱模擬條件概述	33
第二節 隔熱性能	35
第三節 熱質量在辦公大樓的運作機制	42
第四節 熱惰性與不同參數的耦合	52
第五節 隔熱與蓄熱性能的等效性	66
第六節 小結	72
第四章 熱質量在住宅建築的應用	75
第一節 住宅建築模型	75

第二節 熱質量在住宅的運作機制	76
第三節 改變熱惰性對自然通風熱舒適的影響	85
第四節 改變熱惰性對住宅空調能耗的影響	93
第五節 隔熱與蓄熱性能在住宅空調能耗等效性	97
第六節 小結	102
第五章 結論與建議	103
第一節 結論	103
第二節 建議	105
附錄	107
附錄一 國內常用外牆隔熱及蓄熱特性參數	107
附錄二 國內常用屋頂隔熱及蓄熱特性參數	115
附錄三 住宅類型中不同 U 值與 D 值組合在不同地區 的顯熱負荷	121
附錄四 夜間換氣回數對減少顯熱負荷的效果	125
附錄五 客廳與臥室的 6-9 月顯熱冷負荷彙整	127
附錄六 期初審查意見與期中報告回應一覽表	129
附錄七 期中審查意見與期末報告回應一覽表	131
附錄八 期末審查意見與成果回應一覽表	135
附錄九 專家諮詢座談會議紀錄	139
附錄十 第二次專家諮詢座談會議紀錄	141
參考書目	143

表次

表 1-1 中國夏熱冬暖地區居住建築屋頂和外牆的傳熱係數(K)和熱惰性指標(D)基準	4
表 1-2 英國建築節能規範對隔熱與熱質量的規定	4
表 2-1 幾種常見建築材料的熱質量	12
表 2-2 熱質量在夏季和冬季的運作原理說明	13
表 2-3 熱質量的評價參數	19
表 2-4 牆體蓄熱能力參數與材料基本物性之間的關係	20
表 2-5 部分常用外牆隔熱蓄熱特性	23
表 2-6 Lakeridou 案例研究的調查結果	26
表 2-7 Aste 等人的研究案例說明	28
表 3-1 不同隔熱性能的八種輕質量外牆熱性質說明	35
表 3-2 兩種類型外牆與屋頂的材料組成與熱力性質	42
表 3-3 U 值=2.0 W/m ² K 下，十種模擬組合蓄熱能力說明	53
表 3-4 單元辦公室於 08:00~18:00 的單位外殼面積貫流熱	55
表 3-5 單元辦公室不同空調運行模式下的顯熱負荷	57
表 3-6 蓄熱與夜間換氣耦合下單元辦公室的顯熱負荷	60
表 3-7 不同外表面太陽光吸收率與蓄熱構造組合單元辦公室顯熱負荷	63
表 3-8 不同蓄熱與隔熱排列方式下單元辦公室顯熱負荷	65
表 3-9 不同隔熱和蓄熱性能的牆體組合	66

表 4-1	兩種類型外牆與屋頂的材料組成與熱力性質	76
表 4-2	客廳和臥室選定的四種使用模式	77
表 4-3	U 值=2.0 W/m ² K 下，五種模擬組合的蓄熱能力說明	85
表 4-4	台北氣候下客廳與臥室的過熱時數及過熱嚴重度彙整	87
表 4-5	台中氣候下客廳與臥室的過熱時數及過熱嚴重度彙整	88
表 4-6	高雄氣候下客廳與臥室的過熱時數及過熱嚴重度彙整	89
表 4-7	客廳與臥室的 6-9 月顯熱負荷彙整	94
表 4-8	不同隔熱和蓄熱性能的牆體組合	98

圖次

圖 1-1 成指數衰減關係的熱流量與隔熱厚度	2
圖 1-2 以生命週期經濟評估決定最佳隔熱厚度的概念	2
圖 1-3 屋頂熱質量吸收儲存自太陽輻射並延遲釋放	3
圖 1-4 研究流程圖	7
圖 1-5 研究進度及預期完成工作項目	9
圖 2-1 熱質量效應的工作原理	11
圖 2-2 熱質量的延時與削弱作用	14
圖 2-3 特貝朗牆的基本原理	15
圖 2-4 樓板蓄熱形式	16
圖 2-5 相變材料應用於現有的建築屋頂結構	17
圖 2-6 建築外牆的熱傳導解析示意簡圖	18
圖 2-7 Dynamic Thermal Property Calculator 的操作介面	22
圖 2-8 Williamson 的研究摘要	25
圖 2-9 D’Orazio 等的研究所使用的全尺寸實驗屋	26
圖 2-10 Yang 和 Li 的研究發現：時間常數與降低冷負荷之間的關係	27
圖 2-11 Aste 等人的研究發現：牆體的熱質量對暖氣和冷氣需求的影響程度說明	28
圖 2-12 不同組合下室內溫度降低的情形	29
圖 2-13 四種不同類型的建築外牆切面	30
圖 2-14 累積的二氧化碳排放量 (a) 全空調的情況下 (b) 混合模式	31

圖 2-15 建築累積冷負荷隨熱惰性指標的變化趨勢	32
圖 3-1 燈光使用頻率	34
圖 3-2 辦公發熱設備使用頻率	34
圖 3-3 無熱質量下的外牆構造示意說明	35
圖 3-4 有不同外殼 U 值的單元辦公室的空調顯熱負荷	36
圖 3-5 有不同外殼 U 值的單元辦公室的全年空調顯熱負荷	37
圖 3-6 全年空調顯熱負荷隨外殼 U 值的變化情形	38
圖 3-7 外牆 U 值在不同方位和氣候區對空調顯熱負荷影響	39
圖 3-8 屋頂 U 值在不同氣候區對空調顯熱負荷影響	40
圖 3-9 兩種外牆與屋頂的逐時貫流熱	44
圖 3-10 兩種外牆與屋頂在 4~10 月的總貫流熱	45
圖 3-11 不同外牆與屋頂單元辦公室常時空調的逐時顯熱負荷	46
圖 3-12 不同外牆與屋頂單元辦公室間歇空調的逐時室溫	47
圖 3-13 不同外牆與屋頂單元辦公室間歇空調逐時顯熱負荷	48
圖 3-14 夜間換氣對重質量屋頂單元辦公室的室溫度顯熱負荷影響	50
圖 3-15 熱質量和夜間換氣對單元辦公室 4-10 月顯熱負荷影響	51
圖 3-16 U 值固定下的外牆構造示意說明	52
圖 3-17 十種模擬牆體的 D 值與衰減因子或時間延遲的關係	53
圖 3-18 牆體的 D 值轉移白天貫流熱的效果	54
圖 3-19 牆體 D 值減少空調顯熱負荷的效果	56

圖 3-20	夜間通風降溫原理示意圖	59
圖 3-21	夜間換氣回數對減少顯熱負荷的效果	61
圖 3-22	蓄熱與外表面吸收率耦合對顯熱負荷減少的效果	64
圖 3-23	不同外殼 U 值與 D 值組合在台北的顯熱負荷	67
圖 3-24	不同外殼 U 值與 D 值組合在台中的顯熱負荷	68
圖 3-25	不同外殼 U 值與 D 值組合在高雄的顯熱負荷	69
圖 3-26	隔熱和蓄熱能力等值效果的說明	70
圖 4-1	重質量和輕質量客廳自然通風下，室內溫度的變化	78
圖 4-2	輕、重質量客廳在自然通風下室溫過熱時數	79
圖 4-3	輕、重質量客廳在自然通風下，室溫過熱嚴重度	79
圖 4-4	輕、重質量客廳在 7/1~7/3 逐時顯熱負荷	80
圖 4-5	輕、重質量客廳在 6-9 月空調顯熱負荷	80
圖 4-6	輕、重質量臥室在自然通風下室溫變化	82
圖 4-7	輕、重質量臥室在自然通風下室溫過熱時數	82
圖 4-8	輕、重質量臥室在自然通風下室溫過熱嚴重度	83
圖 4-9	輕、重質量臥室在 7/1~7/3 逐時顯熱負荷	83
圖 4-10	輕、重質量臥室在 6-9 月空調顯熱負荷	84
圖 4-11	客廳及臥室在不同模式的空調顯熱負荷	84
圖 4-12	台北地區 D 值對 Δ 過熱時數和 Δ 過熱嚴重度影響	90
圖 4-13	台中地區 D 值對 Δ 過熱時數和 Δ 過熱嚴重度影響	91
圖 4-14	高雄地區 D 值對 Δ 過熱時數和 Δ 過熱嚴重度影響	92
圖 4-15	台北地區 D 值對 Δ 顯熱負荷的影響	95

圖 4-16	台中地區 D 值對 Δ 顯熱負荷的影響	96
圖 4-17	台中地區 D 值對 Δ 顯熱負荷的影響	96
圖 4-18	不同外殼 U 值與 D 值組合在台北的顯熱負荷	98
圖 4-19	住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在台中的顯熱負荷	99
圖 4-20	住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在高雄的顯熱負荷	99
圖 4-21	住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在台北的過熱嚴重度	100
圖 4-22	住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在台中的過熱嚴重度	100
圖 4-23	住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在高雄的過熱嚴重度	101

摘要

關鍵字：建築外牆、熱阻、熱質量、空調負荷、熱舒適

一、研究緣起

近年來，隨著建築能耗占國家總能耗的比例逐漸擴大，全球越來越重視建築節能問題。設計有良好熱性能的外牆是一個簡單而有效降低空調負荷的方法。習慣上是透過改進外牆的熱阻值以抑制外牆的熱量傳遞。利用隔熱材料的高熱阻(R值)，可以阻礙進入或離開建築物的傳導、對流和輻射熱流。在建築物正確使用外牆隔熱不僅能減少能源消耗，而且也可以降低 HVAC 系統的設計容量。綜合考量外牆隔熱系統(包括材料種類和使用厚度)的初始成本加上節省的空調和供暖系統的能源費用，以最小的成本來決定最佳的隔熱材料厚度。

二、研究方法及過程

本研究選定辦公建築和公寓住宅模型做為研究對象，利用建築能耗模擬軟體 EnergyPlus 進行全年逐時的空調負荷和室內熱環境的動態模擬，以調查建築外牆的熱質量對典型辦公室及住宅的空調能耗和室內熱環境的影響。量化分析外牆的熱質量與其他熱性能(如隔熱性能、外牆顏色和方位朝向)組合，對建築能耗與室內熱舒適度的影響。並確定熱質量與夜間通風耦合對建築能耗和室內熱環境的好處。本研究選定四種不同的夜間通風換氣情境進行分析與討論，最後透過對臺北、台中和高雄三個地區的建築空調負荷進行動態模擬，以研究地區的差異性在優化牆體構造型式方面的差異。

三、重要發現

本研究以辦公建築及住宅類建築為對象，探討外牆蓄熱能力在不同方位、不同氣候區、不同顏色的外牆蓄熱對室內空調負荷之影響，進一步的透過不同熱阻和熱質量的組合來解析最佳化組合，並透過夜間通風和熱質量耦合下的進行節能分析。研究發現：

1. 藉由增加屋頂隔熱材料厚度(降低 U 值)，於台北、台中和高雄三個氣候區，辦

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

公室的 4-10 月及全年空調顯熱負荷隨著厚度增加而跟著線性降低。屋頂或者立牆的 U 值和隔熱材料的厚度成指數遞減。但高隔熱性能的外牆，在涼爽的季節阻擋室內的熱量散到戶外，反而增加空調負荷。空調季(4-10 月)運行空調，空調顯熱負荷隨著 U 值的減少而減少，但隨著 D 值增加而降低。而全年空調則隨著立牆 U 值降低而增加，無限制的增加 U 值其實是沒有助益的。

2. 探討不同隔熱與蓄熱性能組合對空調負荷影響與最佳化組合:將隔熱材料放在室外側、中間和室內側三種組合進行不同的建築蓄熱與隔熱排列方式的情境模擬，在相同的 U 值與 D 值組合下，改變蓄熱與隔熱排列組合對減少空調顯熱負荷的幾乎沒影響。
3. 隨著外表面太陽輻射吸收率的增加，降低空調顯熱負荷的效果也愈好。當吸收率從 0.3 增加到 0.9 時，在三個氣候區中，使用輕構造外牆可以節省空調顯熱負荷 3%-5%；若是使用重構造可節省 14%-17%。
4. 進行夜間換氣的辦公建築於空調開機運行前約可降低 2~3°C，可節省約 10-14% 的顯熱負荷。且隨著夜間換氣回數的增加，降低空調顯熱負荷的效果也愈好。於空調僅在 4-10 月運行情境下，在三個氣候區可以降低單位樓板面積空調顯熱負荷 10~30%；若是空調全年運行的話，可節省至 20~40%。
5. 無論是辦公建築或住宅類建築的外牆或屋頂的 U 值與 D 值存在等值效果，辦公類較住宅類建築明顯。降低立牆的 U 值對全年空調顯熱負荷的幫助，存在著最佳 U 值。當立牆的 U 值高於 3.0W/m² K，降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷有正面幫助。但是當立牆的 U 值高於 3.0W/m² K 對降低全年空調顯熱負荷卻反而有負面效果。

四、主要建議事項

根據研究發現，本研究提出下列具體建議：

建議一

增加立牆的隔熱效果(降低 U 值)對全年空調顯熱負荷的幫助，存在著最佳 U 值。當立牆的 U 值高於 3.0W/m²-K 時，降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷有正面幫助，但是持續過度降低 U 值對全年空調顯熱負荷卻反而有負面效果之分析結果，可提供

我國作為建築與住宅節能策略與法令規範擬議研修之宣導及推廣說明參考：立即可行建議

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究所

本計畫建議將研究成果附錄三中的熱負荷模擬結果提供給住宅部門節能策略之規劃與執行建議，並於全國能源會議、國內外重要能源會議提出供政策評估參考。透過將本研究的成果分享給業界使用者了解隔熱及蓄熱的特色，以達到如何兼顧室內熱舒適又能節省空調能耗的雙贏局面，同時更能減少材料使用上不必要的花費。

建議二

辦公室夜間換氣的空調節能策略或作為：立即可行建議

主辦機關：台灣電力公司

協辦機關：內政部建築研究所、財團法人台灣建築中心

本研究發現辦公室進行夜間換氣有效降低空調顯熱負荷，且隨著換氣回數增加效果越好，當全年運行空調的辦公建築，可有效節省至 20~40%的負荷量。建議相關單位可將附錄所載相關數據做為參考依據，作為於節能政策上有效的宣導參考。

建議三

將蓄熱設計手法納入相關手冊進行宣導：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

本研究中發現住宅類建築中，根據在不同使用模式中提高牆體蓄熱能力對空調顯熱負荷有不同的影響。建議將本計畫中有關建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境影響的使用模式，羅列出不同的使用模式下的節能效果，以利刊載於相關宣導手冊，以達宣導外牆蓄熱及隔熱的節能效益，並能夠提供給使用者在同時考量牆體或屋頂的隔熱和蓄熱能力的設計方向。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

ABSTRACT

Keywords: external wall; thermal insulation; thermal mass; cooling load;
thermal comfort

In recent years, because the building energy consumption of the national energy consumption has been growing, more and more attention on building energy efficiency. Designed the external wall with better heat insulation is a simple and effective way of reducing air cooling loads. Improved thermal mass from the external wall can inhibit heat transformation. Using the high thermal insulation (R value) can hinder enter or leave the building conduction, convection and radiation heat. In addition, R-value can downsize the design capacity of the HVAC system. Overall consideration of external wall costs (including material types and thickness) and economical energy costs from air conditioning and heat systems will determine the insulation thickness with minimum costs.

This study of office buildings and apartment models uses the building energy simulation software, EnergyPlus, on cooling loads and indoor thermal environment in order to investigate the thermal mass. Through quantitative analysis of combinations from the external wall thermal mass and other thermal properties (such as thermal insulation, exterior color and orientation toward) study the impacts on building energy consumption and indoor thermal comfort. Also, it points out that the thermal mass and night ventilation can bring the positive effects for building energy consumption and indoor thermal environment. This study selected four different nighttime ventilation scenarios were analyzed and discussed, and through the dynamic simulations study the cooling loads of the building in Taipei, Taichung and Kaohsiung three regions in to better understand regional differences of optimizing wall types.

Office buildings and residential buildings are the objects in this study, we explore the external wall heat storage capacity and the indoor cooling loads effects come from different directions, different climate, and different colors. Then through different thermal resistance and thermal mass gets the optimal combination, and analyzing the energy saving by the thermal mass and night ventilation. The study shows:

1. Increasing the roof insulation thickness (U values decrease), in Taipei, Taichung and Kaohsiung three climatic zones, can effectively reduce the April to October indoor temperature and annual sensible heat load; in other words, the results are

relative decreased by the increasing insulation thickness, and the increased heat storage capacity reduces the result. However, the better external wall insulation performance stop the outgoing indoor heat during the cool seasons, and it causes the higher cooling loads. Hence, the unlimited increasing insulation thickness (U values decrease) is not useful.

2. Investigating the different combinations of insulation and thermal storage in order to find the optimal performance: putting the insulation on the room outside, the middle of the room, and the room inside. According to the three different combinations of the building thermal storage and insulation arrangement simulated situations with the same the U-value and D-value, different thermal storage and insulation arrangements have no effect on reducing sensible heat load.
3. With the increased outer surface absorptivity of the solar radiation, the result of reducing sensible heat load is better. When the absorption rate from 0.3 to 0.9 in three climate zones. The light external wall construction can save 3%-5% sensible heat load, and using the heavy construction can save 14% -17%.
4. The office buildings do the nighttime ventilation that can reduce 2~3 ° C before turn on the air conditioning, and it also can save about 10 to 14% of the sensible heat load. With the increased number of times of night ventilations, the result of reducing sensible heat load is better. When the air conditioning running during April to October, the unit floor area can reduce 10 to 30% of sensible heat load in three climatic zones; when the air conditioning running all year, it can save 20 to 40%.
5. When both insulation (U value) and regenerative (D value) exists on the office building or residential building external wall or roof, the result of office building has higher than residential construction. When the vertical wall has the increased insulation effect (lower U-value), it can bring helps for the annual sensible heat load with an optimal U value. When the U-value is higher than the vertical wall of 3.0W / m²-K, lower U-value can offer positive help for the annual sensible heat load. However, the vertical wall U-value less than 3.0W / m²-K, continue to reduce the U-value, the annual sensible heat load will instead have a negative effect.

Suggestions:

Based on the findings, this study makes the following specific recommendations:

- A. When the vertical wall has the increased insulation effect (lower U-value), it can bring helps for the annual sensible heat load with an optimal U value. When the U-value is higher than the vertical wall of $3.0\text{W} / \text{m}^2\text{-K}$, lower U-value can offer positive help for the annual sensible heat load. However, the vertical wall U-value less than $3.0\text{W} / \text{m}^2\text{ K}$, continue to reduce the U-value, the annual sensible heat load will have a negative effect. According to the result, it can be provided as a building of residential energy conservation advocacy strategies and legal regulations of the proposed training and promotion Description Reference: immediately feasible suggestions.

Sponsored agencies: Construction and Planning Agency

Co-organization: Architecture and Building Research Institute

This plan proposes will include the attachment 3 of the heat load simulation results in order to provide the planning, implementation, and recommendations of the residential sector energy-saving strategies for national energy conferences, domestic energy policy evaluation session. The results of this study will let industry user know the characteristics of thermal insulation and heat storage, both of them can achieve thermal comfort and the air conditioning energy saving, and it will reduce the unnecessary spending.

- B. Office building do nighttime ventilation or air conditioning energy policy as: immediately feasible suggestions

Sponsored agencies: Taiwan Power Company

Co-organization: Architecture and Building Research Institute, Center for Architecture Foundation in Taiwan

The study found that office building do night ventilation can effectively reduce sensible heat load, and the increased number of times of night ventilations has the positive results. When the air conditioning running all year, it can effectively save 20 to 40%. Suggesting that the relative units can use the attachment 4 to be reference, which also can be useful data in the energy-policy advocacy.

- C. The heat storage design techniques into relevant advocacy handbook: medium and long term recommendations

Sponsored agencies: Architecture and Building Research Institute

Co-organization: Construction and Planning Agency

The study found that according to the different modes of residential buildings, increasing heat storage of external walls will have different effects on the sensible heat load. Based on the results of external insulation walls and storage capacity for indoor environmental effects, list usage patterns with the energy-saving modes (Attachment 5) to be published in the relevant interest advocacy manual to achieve Vision guide. That is energy efficiency and insulation of external walls, and can be provided for users to consider the wall or roof insulation and heat storage capacity on the design directions.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

壹、研究緣起

隨著建築能耗占國家總能耗的比例逐漸擴大，各國越來越重視建築節能問題。如吾人所熟知的，經由建築外牆傳入室內的熱量往往是空調負荷的主要來源之一。所以，設計有良好熱性能的外牆是降低空調負荷的一個簡單而有效方法。習慣上是透過改進外牆的熱阻值以抑制外牆的熱量傳遞。利用隔熱材料的高熱阻(R 值)，可以阻礙進入或離開建築物的傳導、對流和輻射熱流。在建築物正確使用外牆隔熱不僅能減少能源消耗，而且也可以降低 HVAC 系統的設計容量。所謂的低能耗建築和被動式建築一般都是基於高隔熱性能，同時各國的建築節能標準也都規定外牆 U 值的最大允許上限。譬如，我國的建築技術規則就規定住宿類的建築外牆平均 U 值低於 $2.75 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ，住宿類以外的建築低於 $2.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 。隔熱材料是指能阻止或減緩熱量通過建築外殼的材料。隔熱是綠建築非常重要的設計手段，因為它具有可以讓居室空間保留他們原有的內部熱量，同時避免增加過多來自外部的熱量。隔熱材料的性能是以熱阻 R 值（高熱阻=高 R 值）來表示。根據穩態熱傳導公式，通過壁體的熱傳量與它的傳導率 U 值成正比。由於 R-值是熱傳導率 U 值的倒數，隔熱材料的厚度增加一倍並不會削減熱量損失了一半，而是成如圖 1-1 所示之指數衰減。舉例來說，假設某一個特定的牆體當其無隔熱材料和使用 1 英吋的隔熱材料之間的差可以節省 80% 的熱傳量；而當厚度打算從 1 英寸增加到 2 英寸時，該隔熱材料可再節省 9% 的熱傳量，若打算 9 英寸變成 10 英寸，則僅僅只能再節省 1% 的熱傳量。因此，需以如圖 1-2 所示之總生命週期經濟的概念[1]，綜合考量外牆隔熱系統(包括材料種類和使用厚度)的初始成本加上節省的空調和供暖系統的能源費用，以最小的成本來決定最佳的隔熱材料厚度。Kaynakli (2012)等多個研究均指出，當隔熱材持續加厚以降低 U 值至一門檻時，空調耗能卻無明顯降低，徒增材料生產製造的碳足跡。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

另一方面，特別是對只要充分滿足夏季防熱要求，一般可不考慮冬季保溫的南方溫暖氣候區而言，「不可能僅使用基於 U 值的方法(例如增加牆，屋頂，窗戶的隔熱材料厚度)來設計節能建築」這樣一個概念在近幾年中越來越受到重視[2]。通常適用於北方寒冷氣候區的建築保溫材料只是阻隔了熱傳遞，若是將此一北方氣候的節能概念一成不變的搬到南方氣候來使用，有可能反而幫倒忙，把已經很熱的建築物再用隔熱材料從外面包起來，不讓熱量散失出去，造成建築節能效果不明顯[3]。

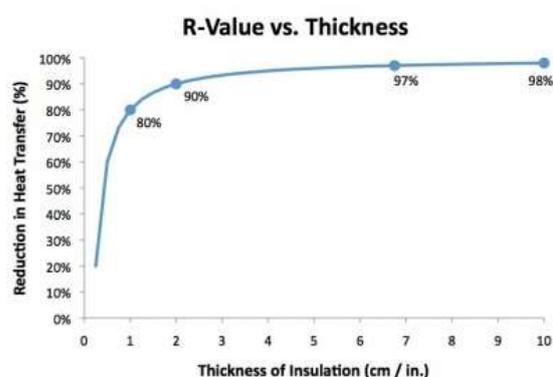


圖 1-1 成指數衰減關係的熱流量與隔熱厚度

(資料來源：Autodesk Sustainability Workshop[4])

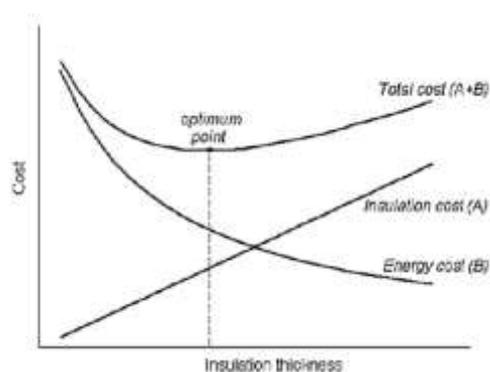


圖 1-2 以生命週期經濟評估決定最佳隔熱厚度的概念

(資料來源：Omer Kaynakli, 2012[1])

如前段所述，儘管良好的隔熱能力可以有效降低建築能耗，然而不可能永遠只使用以 R 值或 U 值為基礎的方法來設計節能建築。另一種有效的方法是利用

建築結構(特別是混泥土地板，牆壁和屋頂)本身的蓄熱能力。如圖 1-3 所示，屋頂或者外牆的蓄熱性質(或稱熱質量)可以儲存吸收自太陽的能量，並在稍後慢慢釋放蓄積的熱量，如此一來便可以達到消除來自太陽輻射熱造成的室內快速升溫現象，以及行程延遲/減少室內負荷峰值的效果。

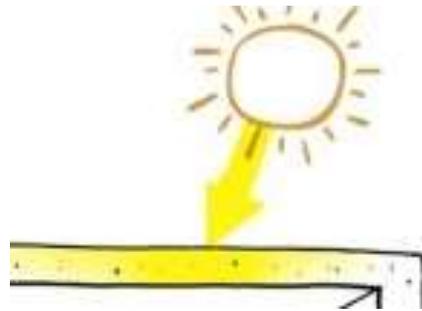


圖 1-3 屋頂熱質量吸收儲存自太陽輻射並延遲釋放

(資料來源：Omer Kaynakli, 2012[1])

也就是熱質量，以增加時間延遲與降低衰減因子也是重要的手段。建築結構本身就有熱質量。透過利用高熱容建築材料的熱質量先吸收熱量，稍後再慢慢向室內、外側釋放蓄積的熱量，將有助於室內溫度的調節，以及導致延遲/減少室內負荷峰值和降低平均輻射溫度。

熱阻和熱質量是兩個用於改善熱舒適條件，以及用於降低空調負荷峰值，並進而降低建築能耗的二個重要參數。在接近穩定的情況下，降低外牆傳熱的被動手段主要是增加外牆熱阻值，但是在室外氣溫和太陽輻射存在明顯的週期性變化的不穩定傳熱的情況下，還有必要考慮外牆結構的時間延後(time lag)與強度削弱(decrement factor)影響。在動態條件下的研究[5]指出透過在建築物中採用有較低熱導率，但有較高蓄熱能力的砌石牆(masonry wall)，可以有效延緩 60%以上由穩態 U 值所表明的熱傳遞量。有鑑於熱質量和隔熱一樣，對建築的熱特性有廣泛的影響，而且熱質量的產生蓄熱作用，是無法被隔熱材料所取代的。所以例如歐盟和中國就將外牆的蓄熱性能也納入節能標準或規範之中。表 1-1 是與台灣有相同氣候的中國夏熱冬暖氣候區的居住建築屋頂和外牆的傳熱係數(K)和熱惰性指標(D)節能設計標準[6]。如表 1-2 所示，英國新基準[7]也開始要求要求熱質量。

表 1-1 中國夏熱冬暖地區居住建築屋頂和外牆的傳熱係數(K)和熱惰性指標(D)基準

屋 頂	外 牆
$K < 1.0, D \geq 2.5$	$K \leq 2.0, D \geq 3.5$ 或 $K \leq 1.5, D \geq 3.0$ 或 $K \leq 1.0, D \geq 2.5$
$K \leq 0.5$	$K \leq 0.7$
備註：D<1.0 輕質屋頂和外牆，還應滿足國家標準 GB 5017-93《民用建築熱工設計規範》所規定的隔熱要求。 K：外牆的熱傳率 D：外牆的熱惰性指標	

(資料來源：中國建設部[6])

表 1-2 英國建築節能規範對隔熱與熱質量的規定

Element or system	Value
Opening areas (windows and doors)	Same as actual dwelling up to maximum proportion of 25% of total floor area
External walls(U value)	0.18W/m ² k
Party walls(U value)	0.0 W/m ² k
Floor(U value)	0.13 W/m ² k
Roof(U value)	0.13 W/m ² k
Windows, roof windows, glazed rooflights and glazed doors	1.4W/m ² k (whole window value), g-value=0.63
Opaque doors	1.0 W/m ² k
Semi-glazed doors	1.2 W/m ² k
Airtightness	5.0m ³ /h.m ²
Thermal mass parameter(TMP)	Medium(250kJ/m ² k)

(資料來源：Thermal Performance[7])

貳、研究計畫的重要性

由於能源與環境問題，被動式低能耗建築技術又再度成為人們關注的焦點。

其中利用建築外牆的蓄熱性能，降低建築空調能耗，是被動式供冷技術的重要手法之一。在世界各地的研究也已表明合理利用建築蓄熱可以有效的調節室內溫度，達到降低空調能耗的目的。然而，關於建築熱質量在台灣的应用有以下的幾個問題有待解決，同時也凸顯本計畫的重要性。

- (1) 由於蓄熱牆體在建築中的重要作用，國外學者提出了多種概念、方法、相關參數，透過本研究計畫執行可以將這些研究內容加以分析總結，將有助於我國蓄熱外牆的技術的發展。
- (2) 目前文獻中關於建築蓄熱的研究結果受當地氣候、建築特點、建築結構的限制，加上熱質量用於濕熱氣候的研究相當有限[1-3]，國內也缺乏對熱質量的詳細研究，因此國外的研究結果在台灣是否有通用性，有待確定也值得研究。
- (3) 我國建築大多採用鋼筋混凝土或磚石等重質材料建造，這些蓄熱容量大的牆體的蓄、放熱作用可對抑制對室內溫度波動起一定的調節作用，然而有關於鋼筋混凝土等重質牆體在北、中、南氣候區對室內熱環境影響，以及如何結合夜間通風來降低空調能耗的研究較少。
- (4) 目前有很多實用的商業軟體，如 e-Quest 和 EnergyPlus 等，都考慮了蓄熱的影響，但是需要具備較高的專業素養才能夠完成它們的操作。對於設計者而言，可能更需要一個簡單與容易使用的評估參數。考慮建築蓄熱作用的評估參數眾多，它們對於在建築設計初期進行蓄熱性能的評價有很好的幫助，可惜的是目前各國尚無統一的評價指標和評價參數。

參、研究預期成果效益

熱阻和熱質量是兩個用於改善熱舒適條件，以及用於降低空調負荷峰值，並進而降低建築能耗的二個重要參數。在動態條件下的研究表明，隔熱和熱質量對建築的熱特性有廣泛的影響。本計畫的目的在研究如何透過不同熱阻和熱質量的組合來提高外牆的熱性能。

深入研究建築蓄熱不僅能夠優化建築熱性能的設計，改善建築熱環境提高舒

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

適性，節約能源，而且對於建築能耗的可持續發展有積極的作用。基於前人的研究以及熱質量在台灣推廣有待解決的問題，本計畫內容與目的包括：

- (1) 界定國內常見外牆蓄熱能力之調查及指標。
- (2) 探討外牆蓄熱能力對室內空調負荷之影響同時分析不同方位的外牆蓄熱對室內空調負荷之影響。
- (3) 探討國內北、中、南等不同氣候區下，外牆蓄熱對室內空調負荷之影響。
- (4) 完成不同隔熱與蓄熱性能組合對空調負荷之影響與最佳化組合探討。
- (5) 完成不同方位的外牆蓄熱對室內空調負荷之影響。
- (6) 完成不同顏色的外牆蓄熱對室內空調負荷之影響。
- (7) 完成夜間通風和熱質量耦合下的節能分析。

第二節 研究方法與流程

本計畫的目的是了解和量化熱質量在台灣對建築節能造成的好處。研究工作將包括以下步驟，研究流程如圖 1-4 所示。研究進度及預期完成工作項目的甘地圖如圖 1-5。

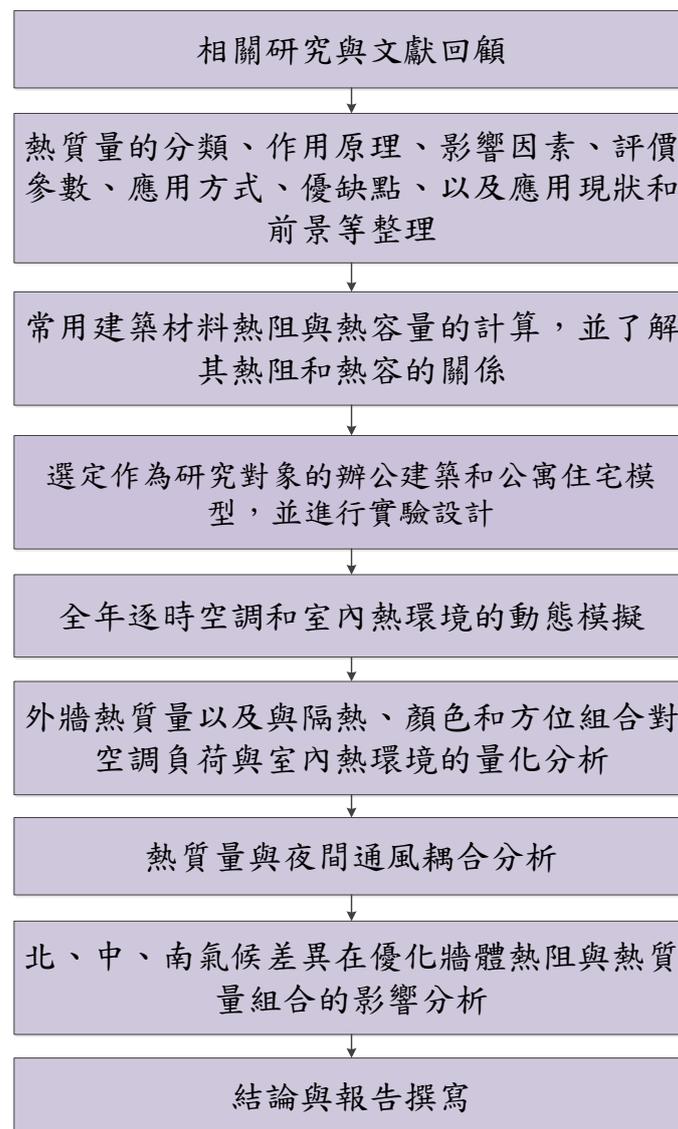


圖 1-4 研究流程圖

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

- (1)藉由回顧先前的研究與相關文獻，從熱質量的蓄熱原理出發，指出熱質量的正確概念、分類、作用原理及影響其性能發揮的因素，整理各種熱質量效果的評價參數，介紹熱質量在建築中的具體應用方式，應用現狀和應用前景，以及利用熱質量的缺點。
- (2)對實際常用的建築材料進行熱阻與熱質量的計算，以瞭解實際材料其熱阻和熱容的關係。以便研究不同熱阻與熱質量對空調負荷和室內熱舒適度的影響。
- (3)選定做為研究對象的辦公建築和公寓住宅模型，並進行實驗規劃設計。
- (4)利用著名的建築能耗模擬軟體EnergyPlus進行全年逐時的空調負荷和室內熱環境的動態模擬，以調查建築外牆的熱質量對典型辦公室及住宅的空調能耗和室內熱環境的影響。選用EnergyPlus的原因包括它是經過廣泛驗證的、能模擬各種先進的建築特色、以及多數先前的熱質量研究也使用該軟體做為模擬工具。
- (5)量化分析外牆的熱質量與其他熱性能(如隔熱性能、外牆顏色和方位朝向)組合，對建築能耗與室內熱舒適度的影響。
- (6)確定熱質量與夜間通風耦合對建築能耗和室內熱環境的好處。本研究選定四種不同的夜間通風換氣情境進行分析與討論。參考先前的研究，四種夜間通風情境暫定為：無夜間通風、換氣次數為每小時5次、10次和20次。
- (7)透過對臺北、台中和高雄三個地區的建築空調負荷進行動態模擬，以研究地區的差異性在優化牆體構造型式方面的差異。氣象資料採用TMY3逐時氣象年。

工作項目	月次												備註	
	第1個月	第2個月	第3個月	第4個月	第5個月	第6個月	第7個月	第8個月	第9個月	第10個月	第11個月			
熱質量分類、作用原理、評價參數、應用現況和前景等整理	■													
常用建築材料熱阻和熱質量的計算，並瞭解其熱阻和熱容的關係	■													
選定研究對象，進行實驗設計		■												
全年逐時空調負荷和室內熱環境的動態模擬			■											
外牆熱質量以及隔熱、顏色和方位組合對空調負荷與室內熱環境的量化分析				■										
熱質量與夜間通風耦合分析					■									
北中南氣候差異再優化牆體熱阻和熱質量組合的影響分析								■						
報告撰寫					■					■		■		
預定進度 (累積數)	5	13	23	35	50	60	73	83	93	98	100			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		

圖 1-5 研究進度及預期完成工作項目

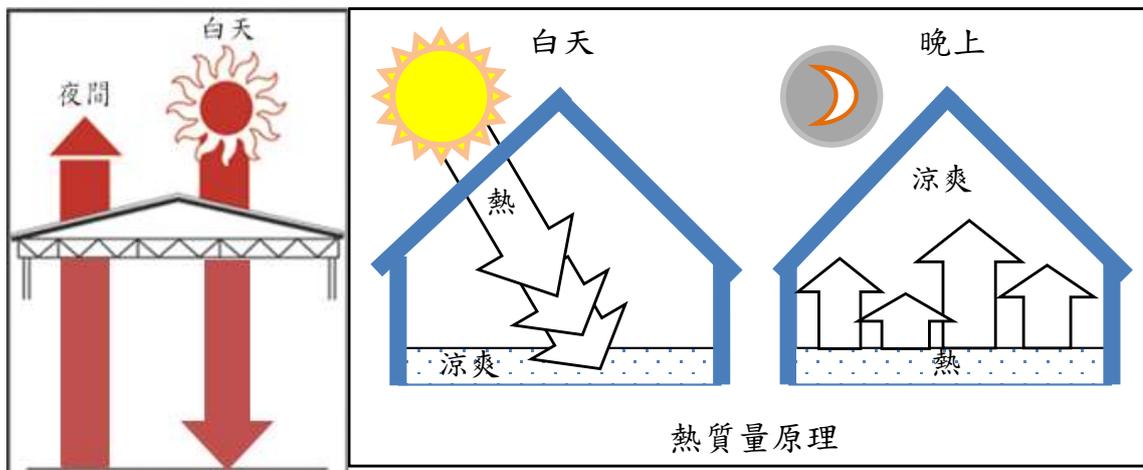
(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

第二章 資料與文獻分析

第一節 何謂熱質量

室外空氣溫度和太陽輻射存在明顯的週期性變化，所以牆壁的熱傳遞過程實際上並不存在穩定狀況，而是屬於不穩定狀況。簡單來說，如圖 2-1(a)所示，在白天，因為太陽輻射加上比較高的室外空氣溫度，熱量會透過牆體由室外往室內傳遞。到了晚上，太陽下山和氣溫下降，熱量會由室內往室外傳遞。如圖 2.1(b)所示的一種情況是增加建築物的牆體、屋頂或者樓板的蓄熱能力，將白天多餘的熱量儲存在蓄熱材料內部，到晚上才讓熱量從蓄熱材料內散發出來。這種利用建築牆體、屋頂或者樓板的蓄熱特性，將熱量先儲存起來，稍後再釋放，而在時間上產生向後推移的現象，就稱為”熱質量效應”。



(a) 日/夜間的热量交替循环

(b) 热质量的工作原理

圖 2-1 熱質量效應的工作原理

(資料來源：本研究繪製)

對某一種特定的材料來說，須同時滿足底下三項基本的特性方能提供達到有用水準的熱質量：

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

1. 具高比熱；每公斤所儲存的熱才能最大化。
2. 具高密度；材料越厚重，它能儲存的熱就越多。
3. 具適當的熱傳導係數；流入和流出外材料的熱流率才能與建築物日/夜間的熱流量循環交替同步。

我們以表 2-1 所列的幾種常見的建築材料來說明。首先，像木材這類的材料，有高的熱容量(熱容量=比熱×密度)，但是它的熱傳導係數相當低，因此局限它在白天吸熱並且在夜裡釋放的速率。接著，鋼也能夠儲存熱量，但是它和木材剛好形成對比；它有非常高的熱傳導係數，這意謂熱量可以迅速的被吸收與釋放，反而不能和建築物的日/夜間的熱流量循環交替同步。最後，像磚塊、石材和混凝土這類特別厚重的建材具有前述三項的所有特性，它們有高的熱容量和適當的熱傳導係數，使得熱量在材料的表面和內部之間的傳遞速率能和大樓熱量的日/夜間交替循環的速率一致。

表 2-1 幾種常見建築材料的熱質量

建築材料	比熱容 (J/kg.K)	密度 (kg/m ³)	熱導係數 (W/m.k)	有效熱質量
木材	1600	500	0.13	低
鋼	450	7800	50.0	低
混凝土	1000	2300	1.75	高
磚	1000	1750	0.77	高
石材	1000	2300	1.8	高

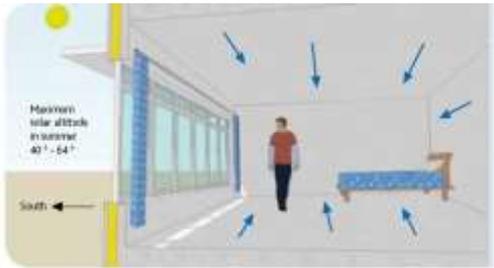
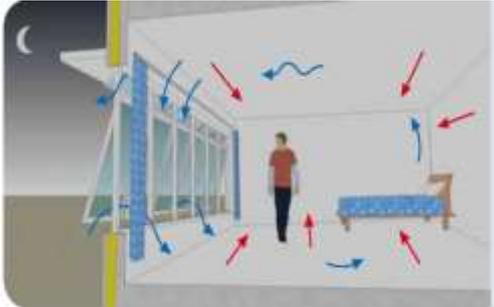
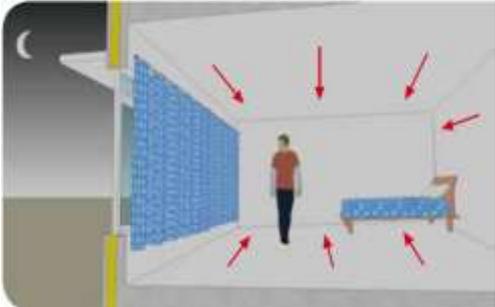
(資料來源：本研究彙整)

利用建築進行蓄熱是一種新型的建築系統，也是被動式設計的手法。利用材料的蓄熱能力有時間延遲(Time lag)與強度衰減(Decrement factor)現象兩個主要的優點。時間延遲指熱量自室外傳入室內的過程中所需的時間，同時溫度幅度發生的衰減稱為強度衰減。例如，如圖 2-2 所示，假如在設計建築時能讓延時超過 6 小時，當外界環境處於下午 2 點最高溫度時，室內受到牆體延遲作用，那麼室

外最高溫度將在晚上 8 點左右傳至室內，就可以大大的減少建築空調系統的負荷。

表 2-2 則說明瞭熱質量在夏季和冬季的運作原理。

表 2-2 熱質量在夏季和冬季的運作原理說明

夏季	冬季
<p>白天：</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 在炎熱的天氣，窗戶保持關閉，以防止戶外高溫的空氣。 • 地板和牆壁的熱質量可以吸收輻射和對流的熱量，有助於穩定室內溫度。 	<p>白天：</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 低角度的太陽光可以透過窗戶照進室內，地板和牆壁透過熱質量吸收熱量。 • 當傍晚太陽下山後，室內溫度下降，熱流反轉，傳回房間。
<p>夜間：</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 打開窗戶，利用夜間通風冷卻建築結構。 • 如果預報顯示隔天白天是高溫的天氣，則在早上關閉窗戶。 	<p>夜間：</p>  <ul style="list-style-type: none"> • 夜間拉下窗簾和關閉窗戶，以減少熱損失。 • 熱質量繼續釋放熱，直到清晨大部分儲存的熱量被釋放完為止。

(資料來源：本研究繪製)

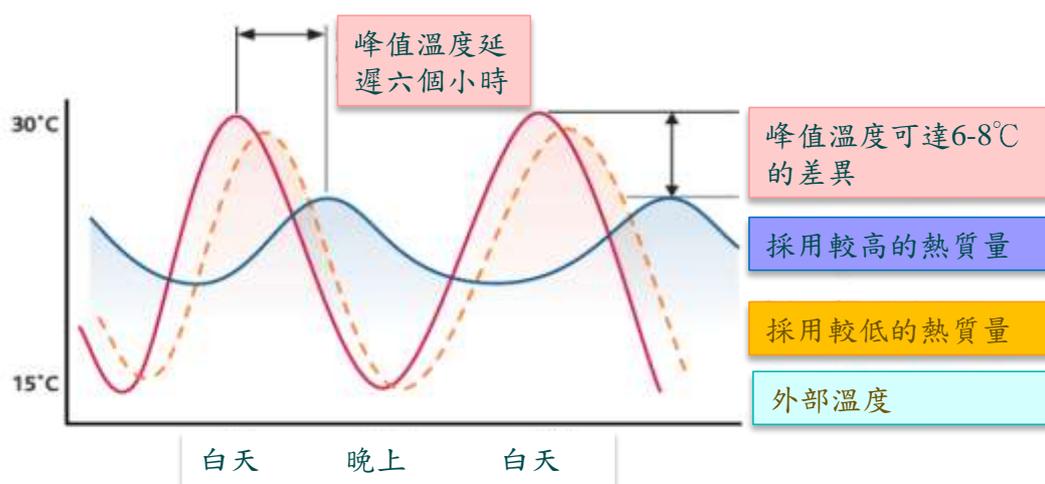


圖 2-2 熱質量的延時與削弱作用

(資料來源：本研究繪製)

第二節 蓄熱方式的分類

蓄熱材料的定義是能夠儲存能量的物質（儲存的能量可以用於暖房(heating)也可用於冷房(cooling)。它包括建築外圍護結構，建築內部的分隔物、傢俱，甚至連建築室內的空氣也可以看成是蓄熱材料。就蓄熱材料所處的位置來看，可以分為室外蓄熱材料和室內蓄熱材料。像傢俱和室內的水泥隔間或者樓板，因為它們沒有直接暴露在室外空氣溫度的作用下，便屬於室內蓄熱材料。相反的，像建築物的外牆和屋頂等直接暴露在不斷變化的室外空氣溫度的作用下，就屬於室外蓄熱材料。

根據蓄熱的方式的不同，應用於建築外牆結構進行冷、熱量儲存的方式也有很多。本報告將按照其主要蓄熱方式來進行闡述。

牆體蓄熱：利用通過牆體進行熱儲存系統研究最多的是特貝朗牆(Trombe Wall)系統，如圖 2-3 所示。這種系統一般是南面安裝透明的玻璃蓋板，背面是預製的具有一定厚度的混凝土牆，牆體外表面塗成深色，白天吸收太陽輻射。在冬天通過如圖 2-3(a)的空氣迴路向室內供熱，同時存儲多餘的熱量，再於夜間向建築室內散熱。在夏季的空調季節通過如圖 2-3(b)的空氣迴路，利用原本要排出室外的涼爽空氣，冷卻牆體，減少傳入室內的熱量。

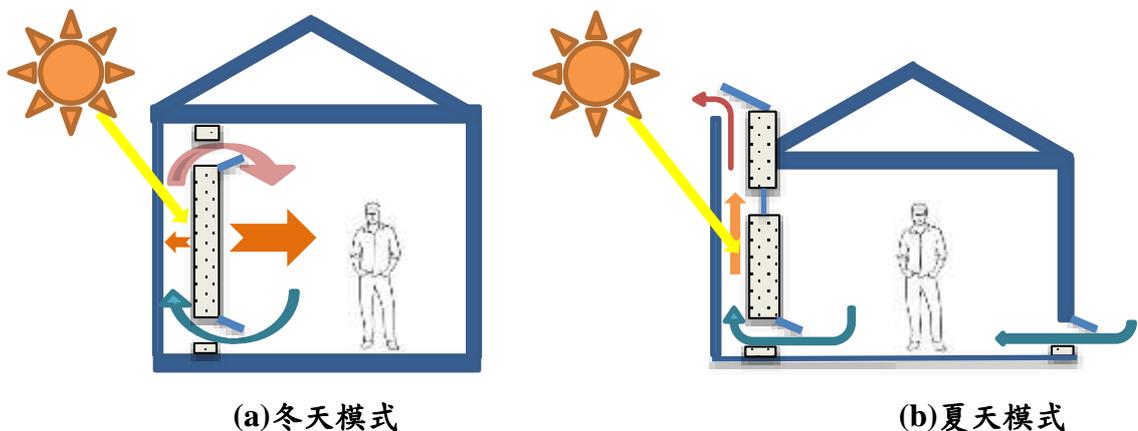


圖 2-3 特貝朗牆的基本原理

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

樓板蓄熱：樓板作為建築組成的一部分也可以用於蓄熱和蓄冷，利用樓板進行採暖、供冷的工程應用越來越普遍，且樓板材料一般熱容量較大，因此其蓄熱作用也越來越得到關注。較常見的樓板材料為混凝土，太陽直接照射在地板熱質量上表面，熱質量升溫與室內換熱並同時儲存熱量。如圖 2-4 所示，其優點為太陽輻射得熱利用率高，適用於南面窗牆比大的建築。但缺點是太陽照射在地板上表面，熱源由底部供熱，由於熱質量的熱延遲效果地板過熱不可避免。

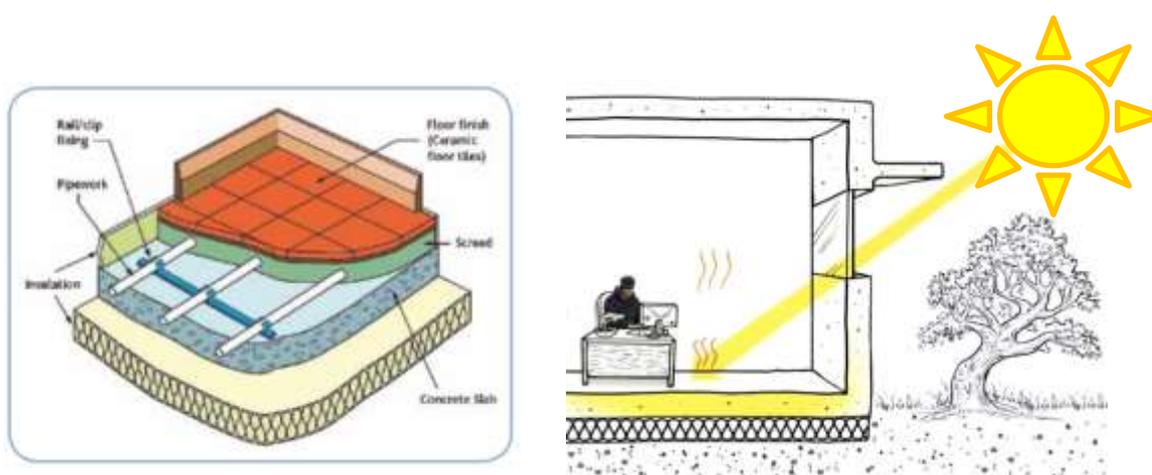


圖 2-4 樓板蓄熱形式

(資料來源：本研究繪製)

相變材料蓄熱

相變材料是指隨著溫度變化而改變形態並能提供潛熱的物質。相變材料在發生相變的過程中，可以吸收環境的熱量，並在需要時間向環境釋放出熱量，從而達到控制周圍環境溫度的目的。在相變過程時，相變材料將吸收或釋放大量的潛熱，同時材料自身的溫度在相變完成前後幾乎維持不變。透過在普通建築材料中加入相變材料，製成具有較高熱容量的輕質建築材料，稱為相變儲能建築材料。被稱為新一代熱質量的相變儲能建築材料作為一種熱功能複合材料，可將能量以相變潛熱的形式進行貯存，實現能量在不同時間，空間位置之間的轉換。如圖 2-5 所示，將相變材料應用到現有的建築屋頂結構中，可以大大增加屋頂結構的儲熱功能。由於相變儲能結構的儲熱作用，穩定了屋頂結構的溫度，建築物室內

和室外之間的熱流波動被減弱，作用時間被延遲，從而減少室內溫度波動，同時可以降低建築物空調系統的設計負荷，達到節能的目的。

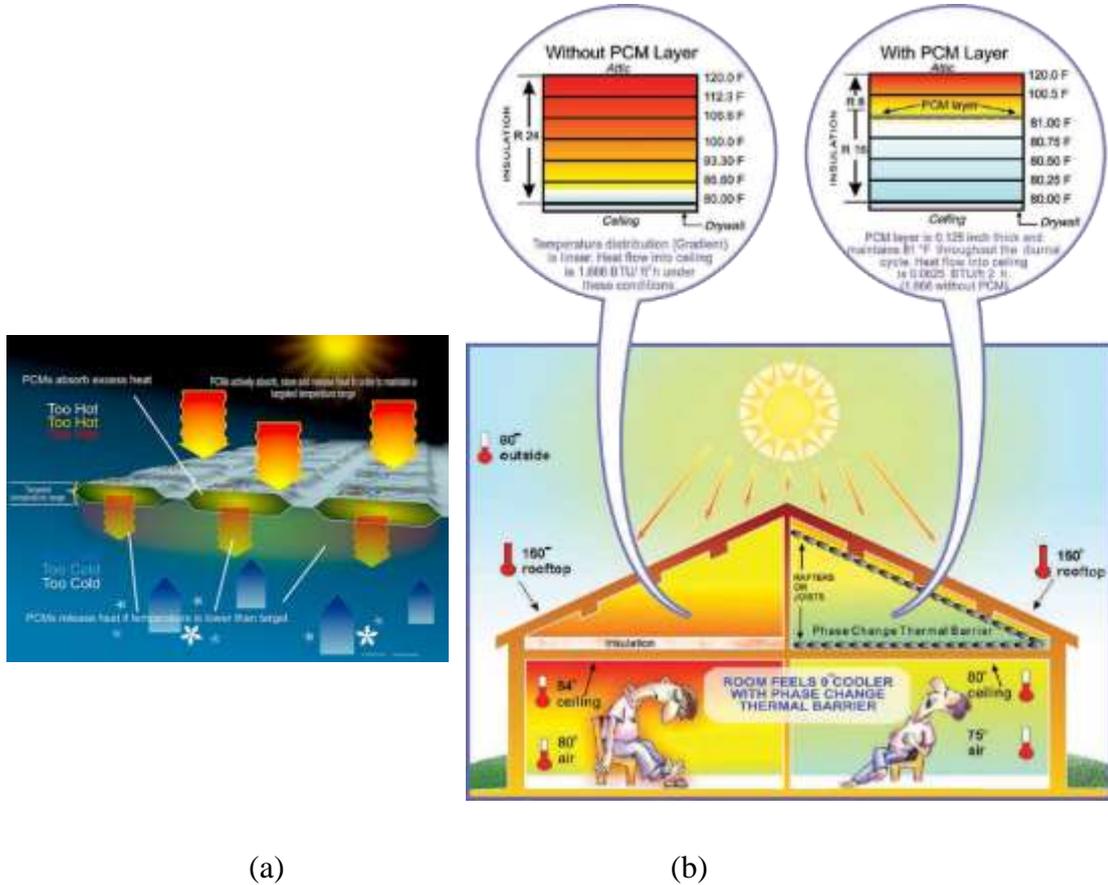


圖 2-5 相變材料應用於現有的建築屋頂結構

(資料來源：

a) <http://media.treehugger.com/assets/images/2011/10/phasechange-how.jpg>、b) <http://www.villagepcm.com/thermal-mass.htm>)

第三節 熱質量的評價參數

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。建築外牆的熱傳導解析可以如圖 2-6 所示的簡圖來表示，其相關假設如下：溫度僅沿 x 軸方向變化；牆體無內熱源熱；牆體材料的物性參數為常數；牆體導熱過程忽略濕氣傳導及其相變熱對牆體的熱物性參數和溫度分佈的影響。則牆體的熱傳導可視為一維非穩態的傳熱過程，其方程式為

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2-1)$$

式中： ρ 為密度(kg/m³)； c 為比熱容(KJ/kg-K)； k 為熱傳導係數(W/m-K)。

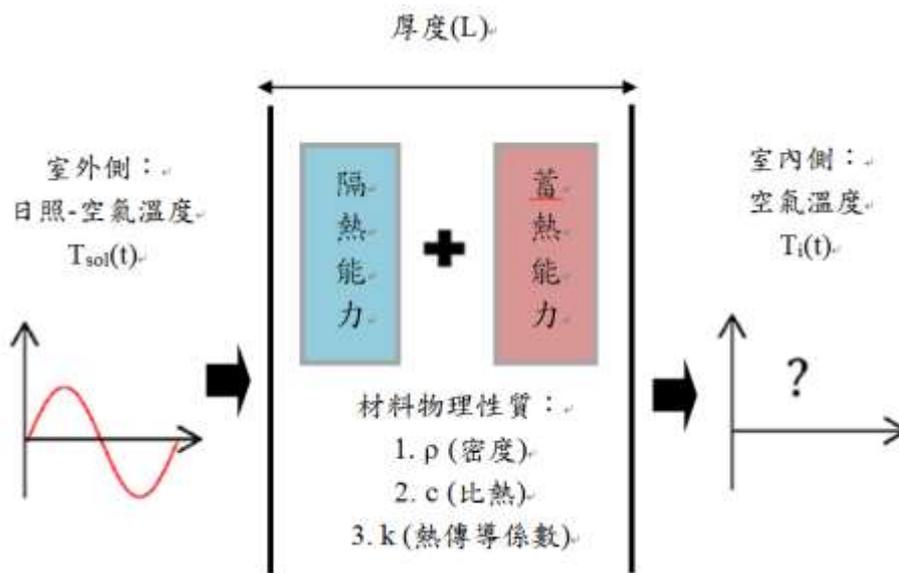


圖 2-6 建築外牆的熱傳導解析示意簡圖

(資料來源：本研究繪製)

在實際的應用中，牆體的兩側的邊界條件為

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h_o [T_{sol}(t) - T_{x=0}(t)] \quad (2-2)$$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h_i [T_{x=L}(t) - T_i(t)] \quad (2-3)$$

式中 h_o 和 h_i 分別為牆體外側、內側空氣對流換熱係數($W/m^2 K$)； $T_{x=0}(t)$ 和 $T_{x=l}(t)$ 分別為牆外、內壁面溫度。 $T_i(t)$ 為室內空氣溫度； $T_{sol}(t)$ 為室外的日照-空氣溫度(sol-air temperature)，考慮日照-空氣溫度的 24 小時週期性，一般將其視為正弦變化。

由公式(2-1)可知方程的解，在邊界條件不變下，只考慮厚度(L)、密度(ρ)、比熱容(c)及導熱係數(k)四個參數的影響。而且這四項參數也組成了如圖 2-6 所示的牆體的隔熱與蓄熱能力。

表 2-3 熱質量的評價參數

參數名稱	物理意義
熱容量	某種物質單位質量溫度升高 $1^\circ C$ 所吸收的熱量
時間常數	決定建築物對周圍熱負荷的響應率，定義為溫度降到初始值的 63% 時所需的時間。
時間延遲	對於建築外牆任何深度 x 處，溫度到達最大值的時間比牆體室外側表面溫度達到最大值的時間落後的相位角。
衰減倍數	描述溫度波或熱流波通過外牆的衰減現象，定義為室內溫度振幅和室外溫度振幅的比率。
導納因數	當溫度按照 24 小時為一個週期變化時，熱量傳遞到牆體的深度。
蓄熱係數	週期性作用下，當表面溫度波的振幅為 $1^\circ C$ 時，消耗在加熱無限大之厚度牆體材料的熱流波振。
熱擴散率	表面溫度對單位元表面熱流密度變化的響應，定義為熱流密度和熱傳導率乘積的平方根。
日熱容量	一天 24 小時材料儲存的熱量
有效熱儲存	考慮建築的熱容量、熱阻、建築內外表面熱阻的影響。
熱質量效應係數	考慮與不考慮熱質量蓄熱時所需的月冷負荷之比。
M 因數	考慮建築動態特性，修正穩態熱傳係數。
熱惰性指標	外殼結構抵抗溫度波和熱流波在材料層傳播的指標。

(資料來源：本研究彙整)

牆體的隔熱能力是指阻止或減緩熱量通過牆體的能力。牆體或材料的隔熱能力是以熱阻 R 值來衡量測量。 R 值為熱傳導率(U 值)的倒數，其計算式為：

$$R = \frac{1}{U_{19}} = \frac{L}{k} \quad (2-4)$$

牆體的蓄熱能力通常慣稱為熱質量，它對通過牆體的熱量起延時與削弱作用。描述牆體蓄熱能力的參數有很多，其名稱和物理意義整理如表 2-3。其中導納因數、時間延遲、衰減倍數在英國的建築節能規範中使用，蓄熱係數和熱惰性指標則在中國的建築節能標準中使用。表 2-4 說明瞭牆體導納因數、時間延遲、衰減倍數、蓄熱係數和熱惰性指標與牆體材料的基本物性參數之間的關係。底下是它們計算方法的說明。

表 2-4 牆體蓄熱能力參數與材料基本物性之間的關係

	厚度(L)	密度(ρ)	比熱(c)	熱導係數(k)
熱阻	◎			◎
導納因數	◎	◎	◎	◎
時間延遲	◎		◎	◎
衰減倍數	◎		◎	◎
蓄熱係數		◎	◎	◎
熱惰性指標	◎	◎	◎	◎

(資料來源：本研究彙整)

蓄熱係數：材料的蓄熱係數是指在一定週期性的熱作用下，當牆體表面溫度的波幅為 1°C 時，消耗在加熱無限大之厚度牆體材料的熱流波振幅，材料的蓄熱係數可以表示材料的穩定性。材料蓄熱係數的單位為 W/m² K，計算公式如下：

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\rho ck}{w}} = 0.51\sqrt{\rho ck} \quad (2-5)$$

式中 ρ 為材料的密度(kg/m³)；c 為材料的比熱(KJ/kg-K)；k 為材料的導熱係數(W/m-K)；w 為溫度的波動週期(秒)，一般取 86,400 秒(24 小時)為週期。

牆體的熱惰性指標：當牆體的熱阻相同而組成材料不同時，室外溫度對室內環境的影響不同，牆體材料的蓄熱係數愈大，則對室內環境的影響也就愈大；所

以在實際的建築牆體中，也會採用牆體的熱阻與牆體材料的蓄熱係數的積，即建築牆體的熱惰性指標，來評價牆體的傳熱、蓄熱性能。牆體熱惰性指標的計算公式如下：

$$D = R \cdot S \quad (2-6)$$

若為多層牆體材料，則

$$D = \sum_{i=1}^n R_i \cdot S_i \quad (2-7)$$

式中 R 為牆體材料的熱阻， $\text{m}^2 \text{K/W}$ ；S 為牆體材料的蓄熱係數， $\text{W/m}^2 \text{K}$ 。

在熱惰性指標中熱阻反映介質或介質間的傳熱能力的大小，蓄熱係數表達吸收和釋放熱能的能力。因此，熱惰性指標表達了牆體對於溫度變化和傳熱變化的抵抗能力；熱惰性指標越大，牆體越不易改變其溫度。

導納因數、時間延遲、衰減倍數的理論計算公式相當繁瑣，在 ISO 13786:2007 中有詳細的說明。透過由 Arup 開發 Concrete Centre 發行的免費軟體 Dynamic Thermal Property Calculator 可以算出各種牆體構造的導納因數、時間延遲、衰減倍數。圖 2-7 是該軟體的操作介面。

接下來我們將利用公式(2-4)-(2-6)以及 Dynamic Thermal Property Calculator 算出國內常用外牆與屋頂構造的導納因數、時間延遲、衰減倍數、蓄熱係數和熱惰性指標等描述其蓄熱特性的參數。部分的計算結果如表 2-5，完整的計算結果請參考附錄一與附錄二。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

Dynamic Thermal Property Calculator (ver 1.0)

Project data

Project name	Brick and block cavity wall		
Project number	1		
Calculation made by	AA		
Date	2009/10/13		
Checked by	BB		

Calculation settings

Period	24	hours	Default - 24 hours
Internal surface resistance	0.13	m ² K/W	Default from ISO 6945 - 0.13 m ² K/W
External surface resistance	0.04	m ² K/W	Default from ISO 6945 - 0.04 m ² K/W
Location of element	External		

Element construction

Layer type - select from the drop down menu for each layer.	Layer name	Thickness [mm]	Density [kg/m ³]	Specific heat capacity [J/kgK]	Thermal conductivity [W/mK]	User defined thermal resistance [m ² K/W]
Solid Layer	plaster (dense)	13	1300	1000	0.57	
Solid Layer	aggregate block	100	1400	1000	0.5	
Solid Layer	mineral wool	150	25	1400	0.038	
Cavity - Unlined	cavity	50				
Solid Layer	brick (exposed)	105	1750	1000	0.77	

Heat Flows Due to Unit Swing in Internal Environmental Temperature

Key results

Admittance [W/m ² K]	4.43
Decrement factor [-]	0.25
Decrement delay [hours]	11.05
K value [kJ/m ² K]	139

For further details see Full Results sheet.

Instructions

- Enter the calculation settings.
- Choose the layer type from the drop down menu for each layer, with the inner most layer first.
- Enter the required parameters for each layer, which will automatically have been highlighted in green. Values may be copied from the reference data.
- For cavities either a thickness or a user defined thermal resistance can be specified.
- Click the CALCULATE button.
- A full list of inputs and results will be displayed on the Full Results sheet.

This spreadsheet is based on ISO 13786. Neither Arup or TCC are responsible for any results produced by this spreadsheet or the way in which such results are used or interpreted.

圖 2-7 Dynamic Thermal Property Calculator 的操作介面

(資料來源：Dynamic Thermal Property Calculator)

表 2-5 部分常用外牆隔熱蓄熱特性

編號	構造大樣	厚度 m	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
W001	室外空氣層					0.043		
	瓷、磚	0.010	2400	0.841	1.3	0.008	13.81	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.120	2200	0.881	1.4	0.086	14.05	
	灰漿	0.010	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層					0.111		
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.78			導納因數	5.64		
	熱惰性	1.53			衰減倍數	0.72		
					時間延遲	4.00		
W002	室外空氣層					0.043		
	瓷、磚	0.010	2400	0.841	1.3	0.008	13.81	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.150	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.010	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層					0.111		
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.50			導納因數	5.78		
	熱惰性	1.83			衰減倍數	0.63		
					時間延遲	4.86		

(資料來源：本研究彙整)

第四節 文獻回顧

由於熱質量的延時與削弱作用在建築節能中的重要性，在國際上已獲得相當程度的重視，並已有許多學者對這一領域展開了大量的研究。

國際能源機構（IEA）在其 Task 13: Advance solar low energy buildings 計畫中，特別在其歐洲和北美洲的 12 個測試模塊房子中的 5 個進行熱質量的影響實驗。實驗結果表明，建築熱質量可以在溫帶氣候區有效抑制夏天室內溫度過熱的問題[8]。

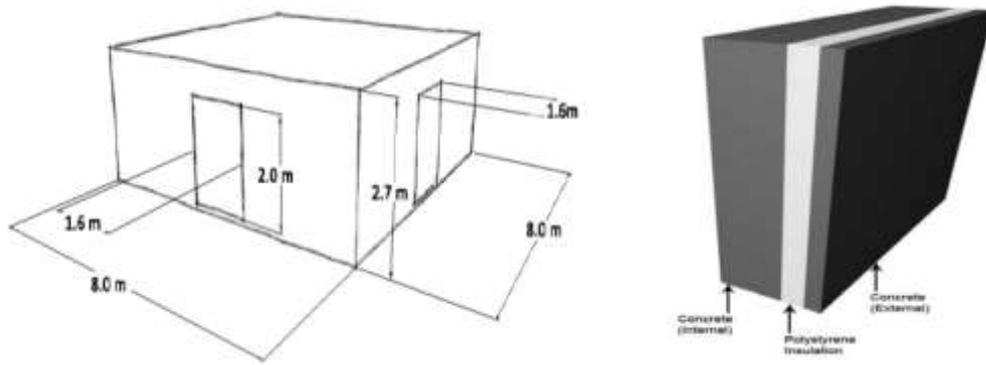
Williamson[9]的文章介紹了在澳大利亞氣候條件下採用熱質量的好處。在遵循澳大利亞的建築規範要求下，Williamson 透過對如圖 2-8 (a)的建築模型進行能耗模擬。Williamson 使用圖 2-8(b)所示之混凝土夾心板的牆構造，在牆體的總 U 值不變的前提下，調整混凝土和隔熱材的厚度，以組成有不同熱質量的外牆。圖 2-8 (c)顯示逐漸增加牆體熱質量在澳大利亞不同氣候區產生的節能效益。從這些結果可見，增加外牆的熱質量（其他性質保持不變）可以大量減少總能耗量。在夏季和冬季明顯的氣候區 2 和氣候區 3 其效果最為突出。根據研究發現，Williamson 提出一個質量增強 R 值(Mass Enhanced R-value)的概念。

$$R_{ME} = \frac{R}{m}$$

式中 R 是穩態狀況下的 R 質，m 是牆體的 m 因數(m-Factor)。而且此一 RME 值可以取代建築規範中的 R 值。

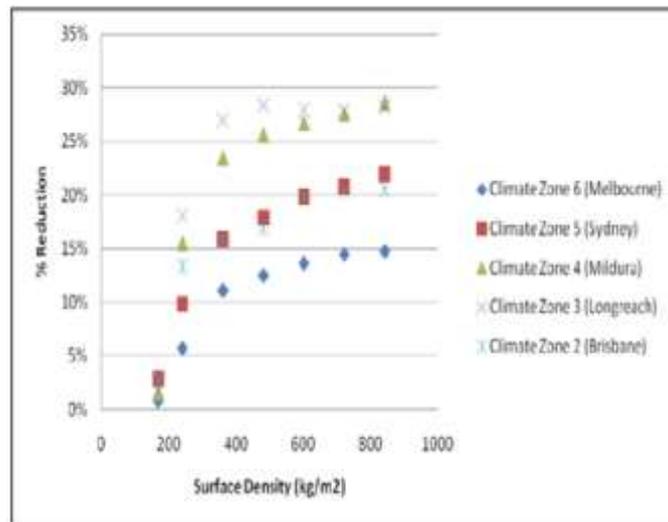
D’Orazio 等[10]有感於許多目歐盟成員國前的節能建築法規似乎遵循北歐的趨勢要求高隔熱性能的建築外殼，以及這種規定忽略了在溫暖氣候區建造典型建築的所必需的元素—外殼熱質量。D’Orazio 等的研究透過在圖 2-9 的全尺寸實驗屋的實測實驗，探討了屋頂熱質量如何影響室內的舒適度。實測實驗使用了輕型和重型兩種不同的屋頂。實驗地點是在有溫暖氣候的義大利的安科納(Ancona,

Italy)。實驗表明，一定程度的屋頂熱質量能保證在夏季和冬季有更好的室內舒適度，而且還可以減少暖氣的能源消耗。



(a)使用的建築模型

(b)使用的混凝土夾心板牆



(c)熱質量的節能效果

圖 2-8 Williamson 的研究摘要

(資料來源：Williamson, 2011[9])

Lakeridou[11]以位於英國南部的巴斯大學(the University of Bath)內具有不同的熱質量的兩棟大樓進行案例研究。案例研究的內容包括室內溫度測量以及熱舒適問卷調查。如表 2-6 所示之調查結果表明，建築熱質量可以在實現熱舒適性方面發揮關鍵作用。Lakeridou 強調在英國熱質量是達成建築物於夏天，室內有舒適溫度的最重要參數。



圖 2-9 D'Orazio 等的研究所使用的全尺寸實驗屋

(資料來源：Lakeridou, 2010[11])

表 2-6 Lakeridou 案例研究的調查結果

Thermal mass	Orientation	Indoor air temperature (°C)	Actual comfort vote	Adjusted comfort vote
Lightweight	East	26.6 (4)	0.33	0.09 (1)
	West	23.8 (2)	0.90	1.52 (4)
	South	23.3 (1)	0.73	0.98 (2)
	North	24.8 (3)	0.76	1.02 (3)
Heavyweight	East	23.7 (3)	0.39	0.78 (3)
	South	22.0 (1)	0.10	0.14 (1)
	North	22.7 (2)	0.26	0.34 (2)

Note: the number in the brackets represents the most favorable conditions, with (1) being the highest.

(資料來源：Lakeridou, 2010[11])

Yang 和 Li[12]進行了熱質量結合夜間換氣對香港空調辦公樓能耗影響的定量分析。Yang 和 Li 的研究以時間常數(time constant)作為描述建築熱質量的參數。研究結果(參考圖 2-10)發現：以完全沒有熱質量的建築(時間常數=0)做為比較基準，增加時間常數 (即建築物的熱質量)，能有效減少冷負荷。若時間常數>400，減少冷負荷多達 60%以上；然而，當時間常數>1000，進一步增加建築物的熱質量可能會稍微增加了冷卻負荷。這是因為過大的時間常數，推遲了熱質量的熱釋

放到隔日的白天。因此，研究指出為了達到最有效減少冷負荷時，建築熱質量和夜間換氣量需要匹配。另外，Zhou 等人[13]也在香港進行熱質量與自然通風耦合的研究，也得到類似的結果。

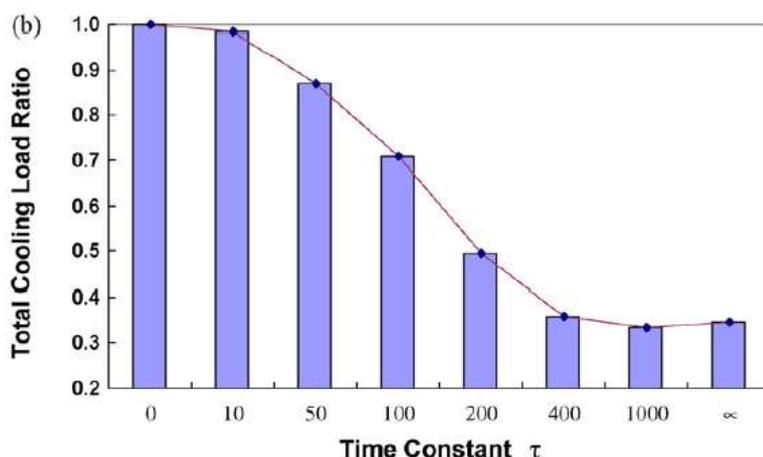


圖 2-10 Yang 和 Li 的研究發現：時間常數與降低冷負荷之間的關係
(資料來源：Yang 和 Li, 2008[12])

Aste 等人[14]的研究評估了多種參數的組合對提升或衰減熱慣性作用的結果。他們對一些具有相同外牆 U 值，但有不同的動態性能的案例(如表 2-7)進行了電腦模擬，計算其節能效果(如圖 2-11)。其分析結果顯示牆體的熱質量會影響暖氣和冷氣需求的範圍約在 6%(暖氣)和 21%(冷氣)。Kossecka 和 Kosny[15]的研究指出在美國不同的氣候區和建築類型下，牆體熱質量的節能效果介於 2.3%至 11.3%。然而，Bojic 和 Loveday 的研究[16]指出若 HVAC 系統為間歇運轉，熱質量對暖氣的節能效果可達 40%，而對冷氣的效果更高達 84%。不過若 HVAC 系統是連續運轉，則沒有發現熱質量會產生相關的影響。

Balaras[17]表明建築物的熱質量可以降低冷氣負荷的峰值和室內溫度的波動。他還表明作為能源節約替代方案的熱質量在提供舒適的室內環境的效果。Balaras 的研究表明，對於大晝夜溫度變化的氣候區，熱質量顯著減少了空調系統的能耗。他建議設計者應先計算建築物的最佳的熱質量，然後以可以減少室內溫度波動的方式來佈置熱質量。他還提出對於辦公樓，可以通過夜間通風來增加

熱質量。

表 2-7 Aste 等人的研究案例說明

Case	2.1	2.2	2.3	2.4
Ventilation	0.3	1	0.3	1
Solar shading (overhangs)	No	No	Yes	Yes
Number of heat transfer walls	4	4	4	4
Orientation	All	All	All	All
S_{int}/S_{ext}	0.06	0.06	0.06	0.06
HVAC System	Intermittent/attenuated	Intermittent/attenuated	Intermittent/attenuated	Intermittent/attenuated
Internal gains	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Cooling demand				
High inertia wall (kWh)	587	439	358	253
Low inertia wall (kWh)	617	502	383	301
Percentage difference	5.1%	14.3%	7.0%	19.0%
Heating demand				
High inertia wall (kWh)	943	2119	1054	2261
Low inertia wall (kWh)	993	2123	1090	2253
Percentage difference	5.3%	0.2%	3.4%	-0.4%

(資料來源：Aste, 2009[14])

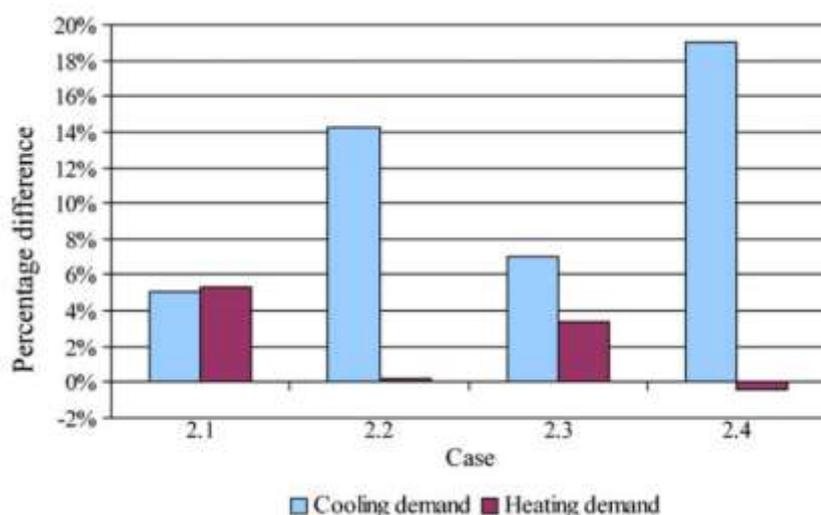


圖 2-11 Aste 等人的研究發現：牆體的熱質量對暖氣和冷氣需求的影響程度說明

(資料來源：Aste, 2009[14])

Brown[18]透過將地板熱質量從 20 kg/m² 增加到 200 kg/m² 的實驗方式來了辦公大樓中熱質蓄熱對於減少能耗的作用，研究結果顯示：在門窗關閉和通風兩種情況下，室內最高溫度分別下降了 1°C 和 2°C；與原建築相比，增加熱質量後節能 18~20%。

Givoni[19]測試在美國加州北部氣候下，不同重質材料的蓄熱能力對夏天白天降低室內溫度的作用。研究發現利用建築蓄熱耦合夜間通風在潮濕的加州是一種非常有效的降溫措施，在白天最高溫度為 38°C 時，室內最高溫度只有 24.5°C。

Ednashav 等人[20]利用 EnergyPlus 軟體模擬了四種蓄熱材料(輕質、中輕質、中重質、重質)和四種夜間通風情況(無通風、自然通風、每小時 20 回和 30 回的機械通風)下的室內溫度變化的情況。結果顯示，建築蓄熱結合適當的通風能使無空調房間的室溫降低 3~6°C，如圖 2-12 所顯示。

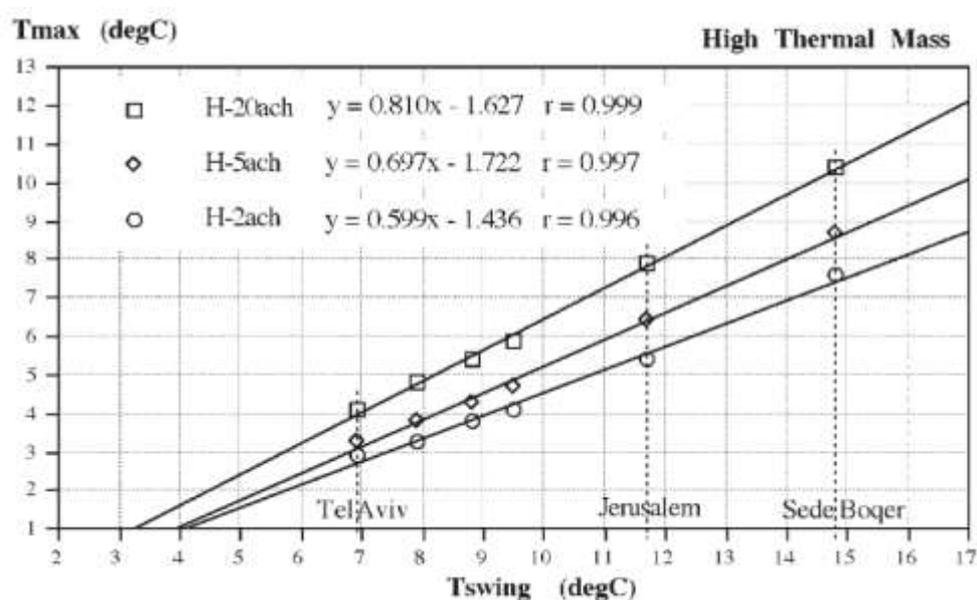


圖 2-12 不同組合下室內溫度降低的情形

(資料來源：Edna Shaviv，2001)

Gregory[21]等透過軟體模擬了澳洲四種有不同熱質量的常見外牆構造，如圖 2-13 所示，以瞭解熱質量在澳洲氣候下對住宅的空調能耗影響。Gregory[19]等發現：熱質量具有在沒有使用暖氣或冷氣情況下，還能保持室內溫度的舒適，從而顯著降低住宅能耗的能力。為了最大限度地減少能源消耗和建築創造一個可持續發展的未來，充分利用建築結構的熱質量是必須的。而且 Gregory 的研究也發現搭配良好的隔熱，外牆熱質量的節能效果更能發揮。

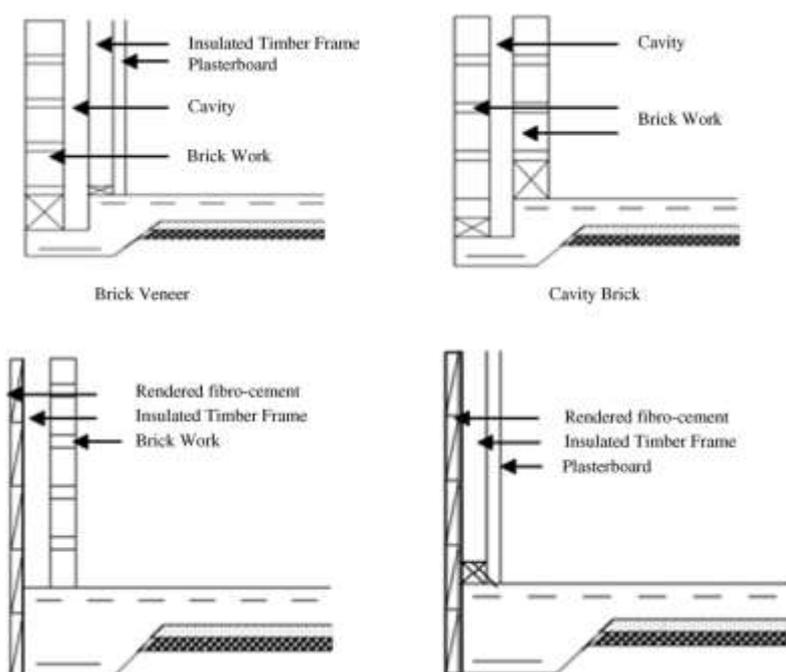


圖 2-13 四種不同類型的建築外牆切面

(資料來源：Sami A. Al-Sanea，2012)

Hacker [22]等以生命週期的觀點評估位於英國的一棟住宅，外牆熱質量在 100 年的建築生命週期內，對建造和運轉(暖氣和冷氣能耗)所產生的 CO₂ 的影響。針對四種不同熱質量水準的外牆的分析結果，Hacker 發現源自於外牆蓄熱作用，運轉暖氣和冷氣所消耗的能量會隨著外牆熱質量增加而顯著的減少。圖 2-14 顯示出，就建造所排放的 CO₂ 而言，高熱質量的外牆至多較低熱質量的外牆多排放 15% 的 CO₂(4.93 噸)，但是此一建造所多排放的 CO₂，很快的在生命週期的初期便被運轉所減少的 CO₂ 排放量平衡回來。在整個生命週期內，高熱質量的外牆所減少的 CO₂ 排放量達 17%(35.7 噸)。

Tasnuva[23]探討熱質量在加拿大住宅建築對能源性能的影響。研究表明，熱質量對降低能源消耗顯著影響(在溫哥華節省 15% 的暖氣與冷氣能耗)，以及降低室內溫度。另外研究也表明熱質量若能與其他策略(如高隔熱 R 值)結合能創造比單單使用熱質量更多的節能減排。

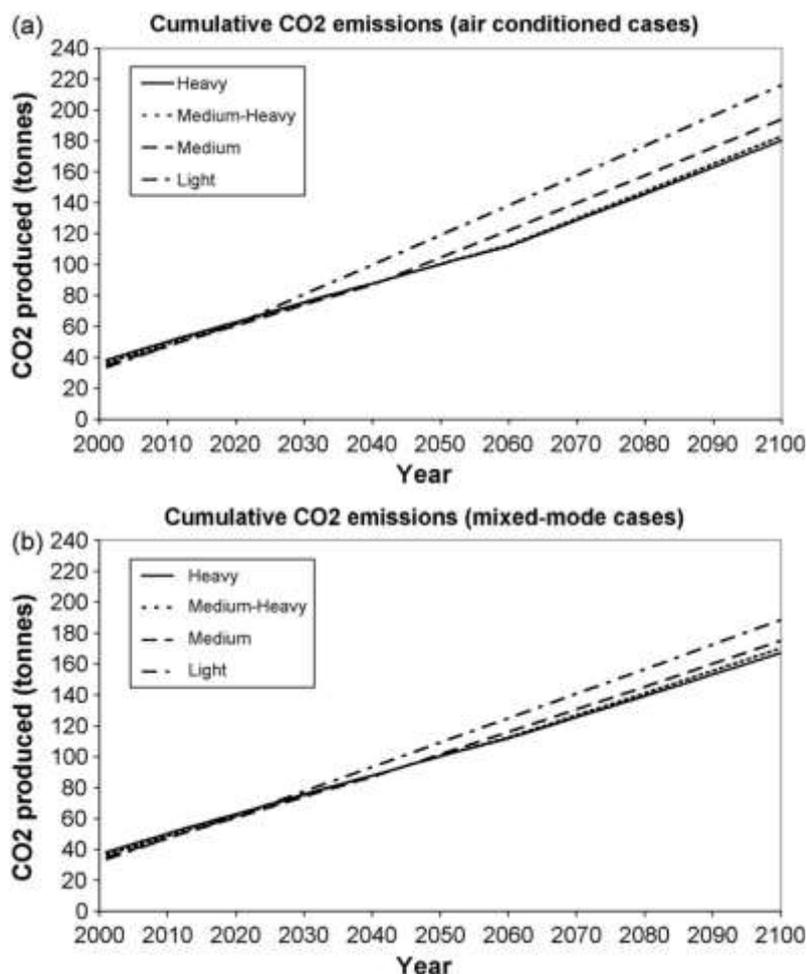


圖 2-14 累積的二氧化碳排放量 (a) 全空調的情況下 (b) 混合模式 (資料來源：Jacob N Hacker，2008)

Balaras[24]表明熱質量可以降低建築物冷負荷的峰值和溫度的波動。他建議有效的利用熱質量可以提供舒適的室內環境，作為節約能源的替代方法。他的研究表明，熱質量在大晝夜溫度變化的氣候下，顯著減少了空調系統的能耗。他還提到在辦公建築熱質量若能搭配到夜間通風，可以創造更多的空調節能潛力。

袁偉等[25]對中國西安地區某一居住建築的全年累計冷/熱負荷進行動態模擬，分析在自然通風和蓄熱耦合作用下對能耗的影響，研究結果發現：牆體的材是影響建築能耗的重要因素，重型牆體結構比輕型牆體結構節能，外牆結構為重型材料時的節能率可以達到 11.76%。袁偉和張雪玲[26]分析不同氣候下自然通風與蓄熱耦合作用的節能效果。結果表明由於地區的差異性，各個地區達到最佳的節能效果的牆體構造型式有很大的差異。

白雪蓮等[27]以重慶地區居住建築為研究對象，構造九種有不同蓄熱性能的外牆型式。利用 e-Quest 軟體模擬建築空調冷負荷，分析了在不同空調運行模式下熱惰性指標對累計負荷的影響。結果表明：熱惰性指標和衰減倍數的增大有益於累計冷負荷的減小，當熱惰性指標小於3時，其變化對空調冷負荷影響不明顯，如圖 2-15 所示。同時，熱惰性指標對累計冷負荷的影響還需要考慮不同功能房間在不同時段的熱性能要求。

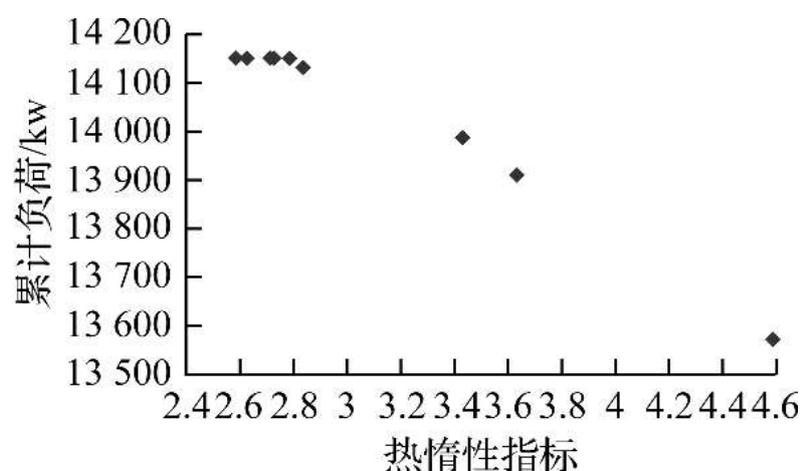


圖 2-15 建築累積冷負荷隨熱惰性指標的變化趨勢

(資料來源：白雪蓮，2013)

白貴平等[28]引入圍護結構的“熱穩定性度時數(DH)”和“反應係數”(BER)”的概念，分析不同形式的維護結構對室內空調冷負荷及室內空氣熱穩定性的影響，提出如何對針對不同的使用條件下合理選擇維護結構的隔熱形式。Xing Jin 等[29]透過熱質量的時間延遲及衰弱因數兩個參數分析發現，牆壁的熱質量對能耗和房間的熱舒適性有很大影響。Kyoung-ho Lee 等[30]，探討熱質量及建築結構儲能來減少建築能耗在高峰時刻的用電需求，研究中發現這樣的設計能夠促使空調耗電高峰期減少約 30%的能耗，並兼顧室內使用者的舒適程度。

第三章 熱質量在辦公建築的應用

第一節 外牆及屋頂蓄熱模擬條件概述

為獲得辦公建築熱質量對建築節能性能的影響，本計畫的研究對象為典型一般辦公建築，每一層樓平面劃分為東、南、西、北四個辦公空間單元，皆為寬 5m，長 6m，面積 30 m²的長方形區域，且各單元空間皆有一個寬 4m，高 1m 的窗戶及遮陽深度 1m 的外遮陽。計算熱負荷時，使用 EnergyPlus 模擬軟體及標準氣象年來計算全年的空調負荷量。其輸入條件為：在上班時間(星期一至星期五，8:00-18:00)全年供應冷氣。在每間辦公空間的人員密度為 0.1 人/m²；每辦公空間的光源使用頻率如圖 3-1 所示，早上 8 點到 12 點與下午 1 點到 6 點為主要使用時段；而辦公空間中的相關設備使用時段如圖 3-2 所示，使用頻率與燈光使用一致。

就辦公建築耗能可分為牆體的貫流熱及顯熱負荷兩種，本研究取實驗模型分成外周區四個方位及內周區水平方位兩部分來討論。外周區負荷包括外周熱及內部發熱，與外界氣象條件關係密切；內周區(中央區)則包括內部發熱及屋頂隔熱。本章將討論在不同方位和氣候區屋頂及外牆隨外殼 U 值變化對空調顯熱負荷的情形，透過三種不同模式來探討調整空調時間是否能節省空調負荷；並透過改變熱質量的材料來探討最佳化的情形。

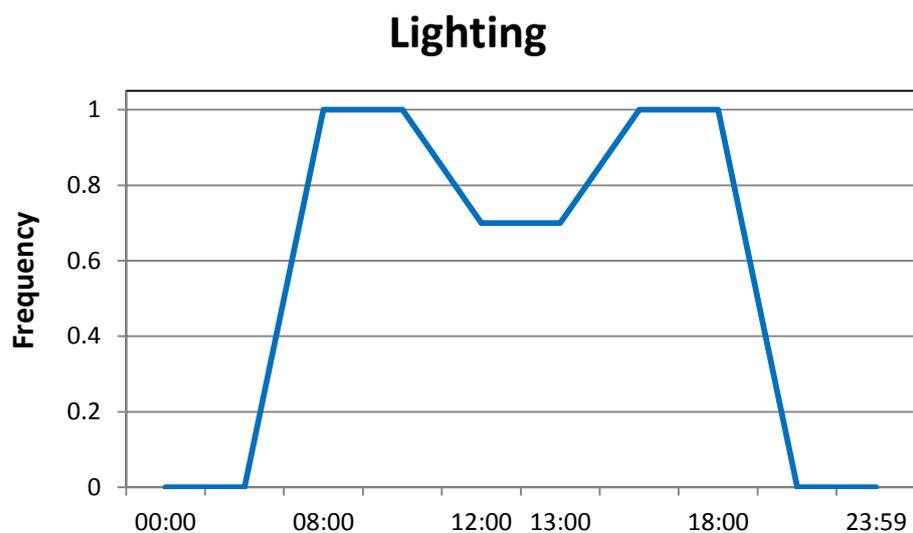


圖 3-1 燈光使用頻率

(資料來源：本研究繪製)

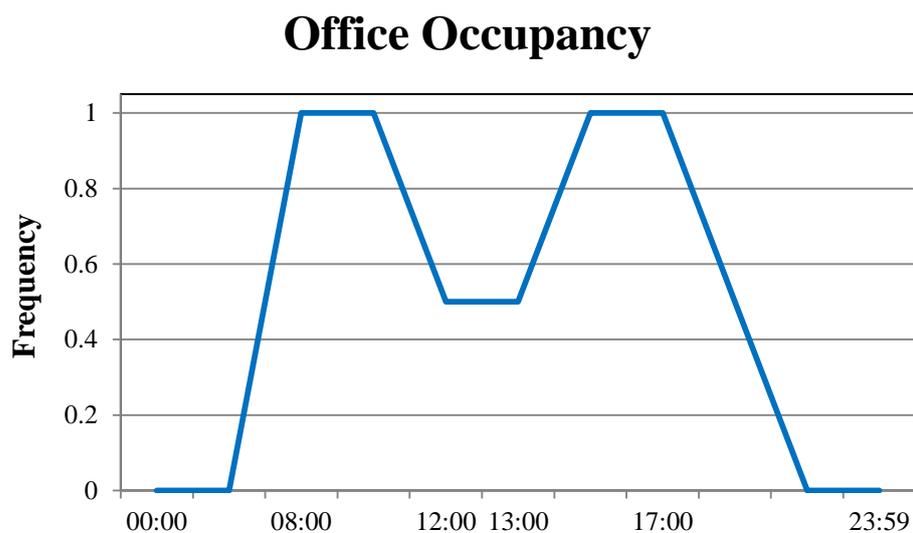


圖 3-2 辦公發熱設備使用頻率

(資料來源：本研究繪製)

第二節 隔熱性能

建築外殼能夠具有良好的蓄熱性能和隔熱性能影響空調節能的關鍵性因素。在這一節我們先探討隔熱性能的影響，至於蓄熱性能的影響則在後續的幾節中探討。為了瞭解隔熱性能在台灣地區對辦公建築空調負荷的影響，首先我們透過如圖 3-3 所示之改變幾乎無熱質量的金屬帷幕外牆或鐵皮屋頂的隔熱材厚度，來觀察隔熱性能對辦公室空調負荷的影響。其中外飾材料為 9 mm 的鋼板，內飾材料為 19mm 的石膏板。表 3-1 列出了我們所選擇的八種外牆或者屋頂的構造的說明。這八種構造隔熱材厚度由 0 mm 到 55mm，其對應的 U 值是從 6.0W/ m²K 到 0.5 W/ m²K。

表 3-1 不同隔熱性能的八種輕質量外牆熱性質說明

編號	1	2	3	4	5	6	7	8
隔熱厚度 (mm)	0	5	7.5	10	25	35	45	55
U 值(W/m ² K)	6.0	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.75	0.5
D 值(-)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

(資料來源：本研究彙整)

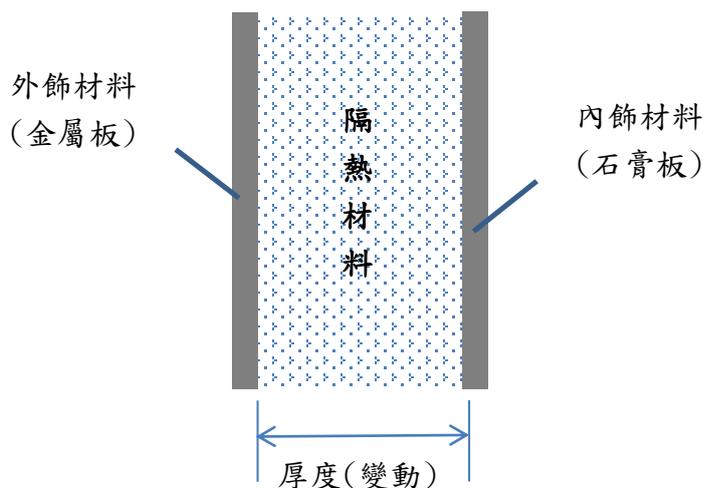


圖 3-3 無熱質量下的外牆構造示意說明

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

首先，我們從表 3-1 中選出編號 2 (5 mm 隔熱材，U 值=3.0W/m²K)、編號 5 (25mm 隔熱材，U 值=1.5W/m²K)和編號 8(55mm 隔熱材，U 值=0.5W/m²K)，並以有西向外牆的單元辦公室，在台北氣候下的全年空調負荷模擬結果為例，來詳細說明外殼的 U 值變化對不同季節的空調顯熱負荷影響。眾所周知，低 U 值的外牆或屋頂具有良好的隔熱效果。在炎熱的季節它可以阻擋熱量從戶外傳入室內，從而減輕空調負荷；但另一方面，在涼爽的季节它也會阻擋室內的熱量散到戶外，反而增加空調負荷。圖 3-4 是這三種構造在天氣較炎熱的 4-10 月，以及較涼爽的 11-3 月的空調顯熱負荷。圖 3-4 明白顯示不論是有較低 U 值的西向外牆或者是水平屋頂的單元辦公室，在 4-10 月有較低的空調顯熱負荷，在 11-3 月反而有較高的空調顯熱負荷。在西向外牆，當 U 值從 3.0 W/ m²K 依序遞減至 1.5 W/m²K、0.5 W/m²K 時，在 4-10 月的總空調冷負荷從 7863MJ(1.0)遞減至 7519 MJ(0.956)和 7292MJ (0.927)。同樣在水平屋頂部分，U 值從 3.0 W/m²K 依序遞減至 1.5 W/m²K 和 0.5 W/m²K 時，在 4-10 月的總空調冷負荷從 12924MJ(1.0) 遞減至 10836MJ(0.838)和 9076 MJ(0.702)。然而在 11-3 月，當 U 值從 3.0 W/m²K 依序遞減至 1.5 W/m²K 和 0.5 W/m²K 時，西向外牆的總空調冷負荷從 1442MJ(1.0)遞增至 2,435 MJ(1.69)和 3,560 MJ(2.47)；水平屋頂從 1797 MJ(1.0)遞增至 2265 MJ(1.25)和 4026MJ (2.26)。

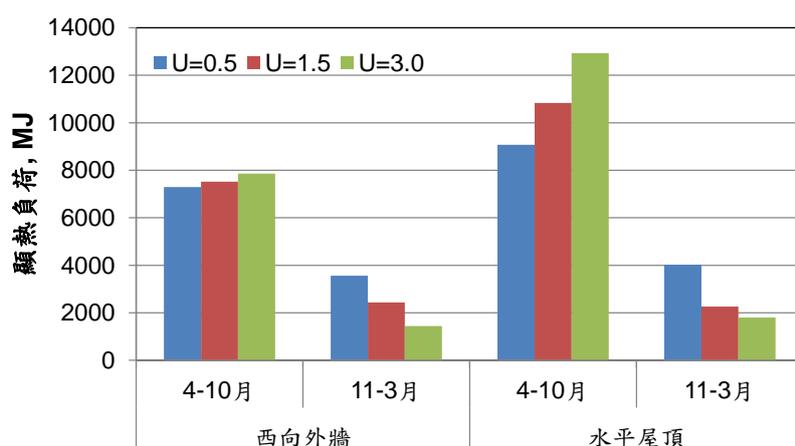


圖 3-4 有不同外殼 U 值的單元辦公室的空調顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

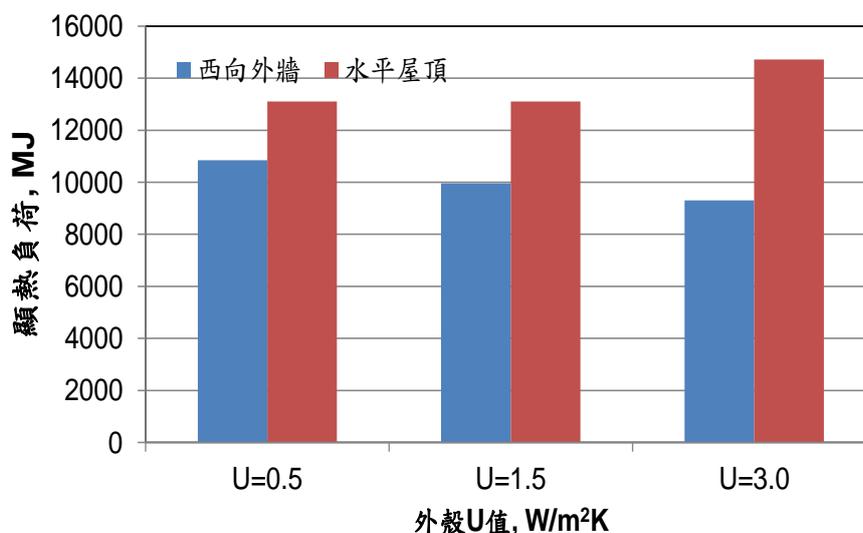


圖 3-5 有不同外殼 U 值的單元辦公室的全年空調顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

若是以全年空調顯熱負荷的觀點來看，增加外殼 U 值的效益在西向外牆和水平屋頂得到的是不同的結果，如圖 3-5 所顯示。對西向外牆而言，當 U 值從 3.0 W/m²K 依序遞減至 1.5W/m²K 和 0.5W/m²K 時，全年的總空調冷負荷從 9305 MJ(1.0) 遞增至 9955 MJ(1.07)和 10851 MJ(1.17)。也就是說，西向外牆的 U 值從 3.0W/ m²K 將低至 1.5 和 0.5W/m²K 時，並不會降低全年空調顯熱負荷，反而使有西向外牆的單元辦公室的全年空調顯熱負荷分別增加了 7%和 17%。然而，同樣的 U 值變化，對水平屋頂而言，有著和西向外牆不同的效果，全年空調顯熱負荷 14721MJ(1.0) 遞減至 10101MJ(0.86)和 13103MJ(0.86)。

從前面的模擬結果似乎暗示存在著最佳 U 值。圖 3-6 顯示單元辦公室全年空調顯熱負荷隨著不同的外殼 U 值變化的情形。從圖中可以看到，對於西向外牆而言，當 U 值=3.0W/m² K 時，有最低的全年顯熱負荷。對水平屋頂而言，最低全年顯熱負荷發生在 U 值=1.0W/m² K 時。

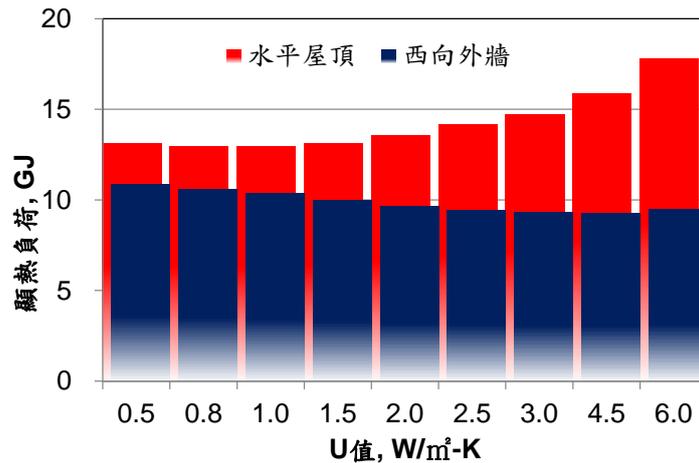
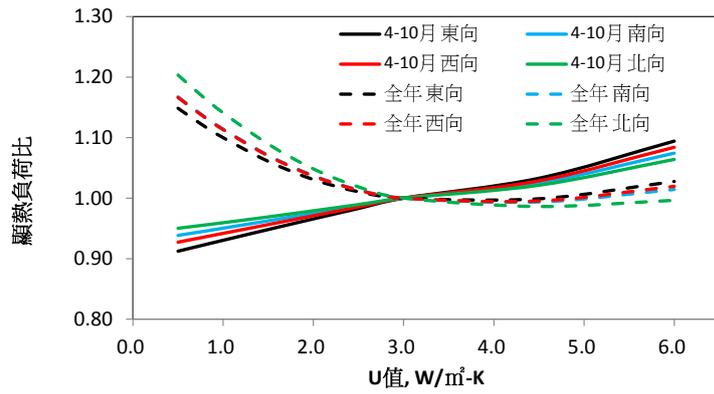


圖 3-6 全年空調顯熱負荷隨外殼 U 值的變化情形

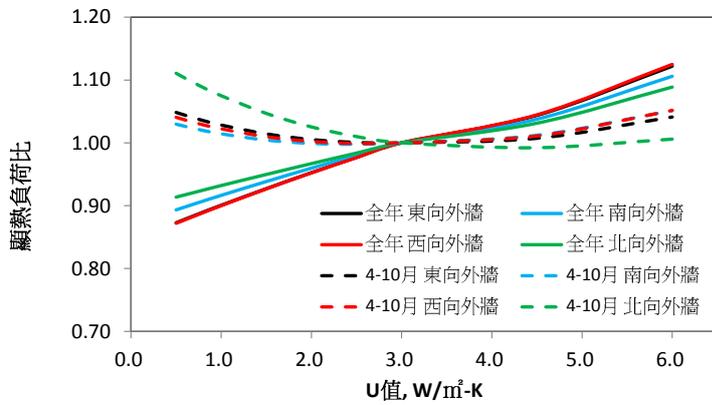
(資料來源：本研究繪製)

由於圖 3-6 顯示最佳的立牆 U 值發生在 3.0 W/m² K，因此我們以單元辦公室外牆 U 值=3.0 W/m² K 時的空調顯熱負荷做為比較基準，來觀察不同方位、不同氣候分區下立牆 U 值的變化對空調顯熱負荷的影響。圖 3-7 顯示了有著東、南、西、北向外牆的單元辦公室，在台北、台中和高雄三個氣候區的空調顯熱負荷的變化。特別強調，圖中的比值是指與 U 值=3.0 W/m² K 時的空調顯熱負荷的比值。當改變 U 值時，使得其數值大於 1.0 時，表示改變 U 值會增加空調顯熱負荷；相同的，其數值小於 1.0 時，表示改變 U 值能減少空調顯熱負荷。

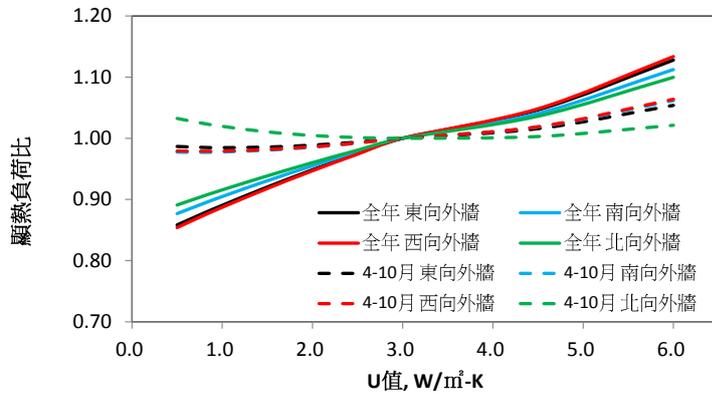
對於 4-10 月的空調顯熱負荷而言，模擬結果顯示，當立牆 U 值從 6.0 W/m² K 降低到 0.5W/m² K 時，空調顯熱負荷的比值，是隨著 U 值的降低，比值也跟著成線性降低。降低的比例則依立牆方位不同數值稍有變動。在台北是從 1.09~1.06 降低至 0.95~0.91；台中是從 1.12~1.09 降低至 0.91~0.87；高雄是從 1.13~1.10 降低至 0.89~0.85。然而，對於全年空調顯熱負荷面而言，模擬結果則顯示完全不同於 4-10 月的空調顯熱負荷的現象。當立牆 U 值從 6.0 W/m² K 降低到 3.0 W/m² K 時，空調顯熱負荷的比值是隨著 U 值降低而降低；但當 U 值從 3.0 W/m² K 降低 0.5W/m² K 時，隨著 U 值的降低，比值卻反而跟著升高。當 U 值從 6.0 W/m² K



(a) 台北



(b) 台中



(c) 高雄

圖 3-7 外牆 U 值在不同方位和氣候區對空調顯熱負荷影響

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

降低到 $3.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 時，在台北、台中和高雄其比值分別從 $1.02\sim 1.01$ 、 $1.04\sim 1.01$ 和 $1.06\sim 1.02$ 降低至 1.0 。當 U 值從 $3.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 降低到 $0.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 時，在台北、台中和高雄其比值分別從 1.0 升高至 $1.20\sim 1.15$ 、 $1.11\sim 1.03$ 和 $1.03\sim 0.98$ 。若比較台北、台中和高雄氣候區的模擬結果可以發現，隨著冬天的氣候由北到南逐漸變暖和，所以在降低立牆 U 值使得 11-3 月的空調顯熱負荷反而增加的現象愈來愈不明顯。甚至在高雄氣候區，其比值還來到 1.0 左右 ($1.03\sim 0.98$)。這表示在高雄地區降低立牆的 U 值，並不會像在台北地區一樣，會在冬天造成反效果。

由於圖 3-6 顯示最佳的水平屋頂 U 值發生在 $1.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ，因此我們以單元辦公室水平屋頂 U 值 $= 1.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 時的空調顯熱負荷做為比較基準，來觀察不同氣候分區下水平屋頂 U 值的變化對空調顯熱負荷的影響。圖 3-8 顯示了單元辦公室，在台北、台中和高雄三個氣候區的空調顯熱負荷的變化。從模擬的結果可以看到：雖然在台北氣候區，屋頂 U 值低於 $1.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 會略為增加全年空調顯熱負荷；但在台中和高雄氣候區屋頂 U 值低於 $1.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 仍可以降低全年空調顯熱負荷。所以，整體而言，藉由增加水平屋頂的隔熱材料來降低其 U 值可以持續降低 4-10 月或者全年空調負荷。當屋頂 U 值由 $6.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 降低到 $0.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ，或者隔熱材料厚度由 0 mm 增加到 5.5 mm 時，在台北 4-10 月或全年空調顯熱負荷比值從 1.59 或 1.38 成線性的降低至 1.0 。4-10 月或全年空調顯熱負荷比值，在台中或者是高雄則是從 1.76 或 1.58 降低至 0.87 。

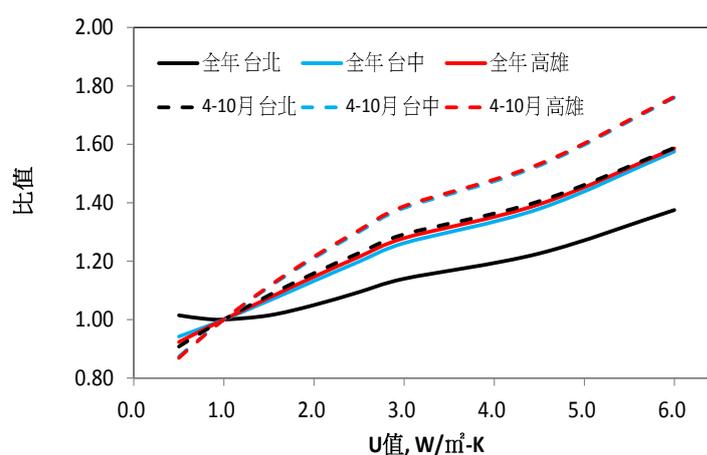


圖 3-8 屋頂 U 值在不同氣候區對空調顯熱負荷影響

(資料來源：本研究繪製)

綜合前面對幾乎無熱質量的輕質外牆或屋頂的模擬結果，我們得到幾個發現：

1. 整體而言，藉由增加屋頂隔熱材料厚度來降低屋頂的 U 值，於台北、台中和高雄三個氣候區，對辦公室的 4-10 月或者全年空調顯熱負荷的降低是有正面幫助的。4-10 月或者全年空調顯熱負荷基本上是隨著 U 值的降低而跟著線性降低。
2. 藉由增加立牆隔熱材料厚度來降低立牆的 U 值，對辦公室 4-10 月的空調顯熱負荷的降低是有正面幫助的。於台北、台中和高雄三個氣候區，4-10 月的空調顯熱負荷基本上是隨著 U 值的降低而跟著線性降低。
3. 降低立牆的 U 值對辦公室的全年空調顯熱負荷的幫助，存在著最佳 U 值。當立牆的 U 值高於 $3.0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ，降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷有正面幫助。但是當立牆的 U 值低於 $3.0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ，繼續降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷卻反而有負面效果。主要原因是高隔熱性能的外牆，在涼爽的季節它也會阻擋室內的熱量散到戶外，反而增加空調負荷。這種現象，在氣候較為涼爽的台北氣候區尤為明顯。
4. 當考慮建築立牆的隔熱性能時，必須考慮建築的特性。如果是屬於自然通風能力良好的辦公建築物，在涼爽的 11-3 月份可以透過自然通風維持室內的舒適性，則持續降低外牆的 U 值基本上是有利的。但是，若是屬於自然通風能力不佳的辦公建築物，在涼爽的 11-3 月份仍然必須靠空調系統方可以維持室內的舒適性，一味的降低外牆的 U 值，對降低全年空調負荷不見得是有利的，它存在著最佳 U 值。
5. 但是我們也並需強調，不論是屋頂或者立牆的 U 值和隔熱材料的厚度並不是成線性關係，而是成指數遞減。而隔熱材的初期費用往往是隨著厚度線性增加，亦即就經濟觀點而言，也不應無限制的增加隔熱材料的厚度。

第三節 熱質量在辦公大樓的運作機制

為了說明牆體熱惰性對經由牆體傳入室內的熱量、以及空調負荷的影響，在單元辦公室的外牆的選擇上，選用輕質量的金屬帷幕外牆(或屋頂)和重質量的混凝土外牆(或屋頂)進行模擬。兩種外牆及屋頂的組成材料和熱力性質如表 3-2 所示。為了比較牆體在其它條件均相同的情況下，不同的熱惰性對空調負荷的影響，表 3-2 所示的兩種外牆有不同的材料組成，但是有相同的 U 值。

表 3-2 兩種類型外牆與屋頂的材料組成與熱力性質

構造		材料	厚度 mm	密度 kg/m ³	比熱 J/kg-K	熱導係 數 W/m-K	U值 W/ m ² K	D值 [-]
輕 熱 質 量	輕 質 牆	鋼材	8	7824	500	45.28	1.84	0.54
		隔熱材	12.7	43	1210	0.03		
		石膏板	19	800	1090	0.16		
	輕 質 屋 頂	鋼材	8	7824	500	45.28	0.74	0.62
		隔熱材	25.4	43	1210	0.03		
		空氣層	150			5.6		
		岩棉吸音板	19.1	368	590	0.06		
重 熱 質 量	重 質 牆	面磚	12.7	1920	1260	1.59	1.84	2.32
		混凝土	203.2	2240	900	1.95		
		隔熱材	9.34	43	1210	0.03		
		石膏板	19	800	1090	0.16		
	重 質 屋 頂	面磚	12.7	1920	1260	1.59	0.74	2.46
		混凝土	203.2	2240	900	1.95		
		隔熱材	22.0	43	1210	0.03		
		空氣層	150			5.6		
		岩棉吸音板	19.1	368	590	0.06		

(資料來源：本研究彙整)

建築外牆(或屋頂)能夠具有良好的蓄熱性能和隔熱性能影響空調節能的關鍵性因素。同時，空調運行的方式決定外牆的蓄熱性能是否能夠發揮節能的效益。瞭解常時空調和間歇空調運行模式下，外牆的蓄熱性能的節能效益是本節所要研

究的重點之一。因此，選定兩種空調運行模式，說明如下：

常時空調運行模式：每日 00:00 ~ 24:00，設定溫度為 26°C。

間歇空調運行模式：每日 08:00 ~ 18:00，設定溫度為 26°C。

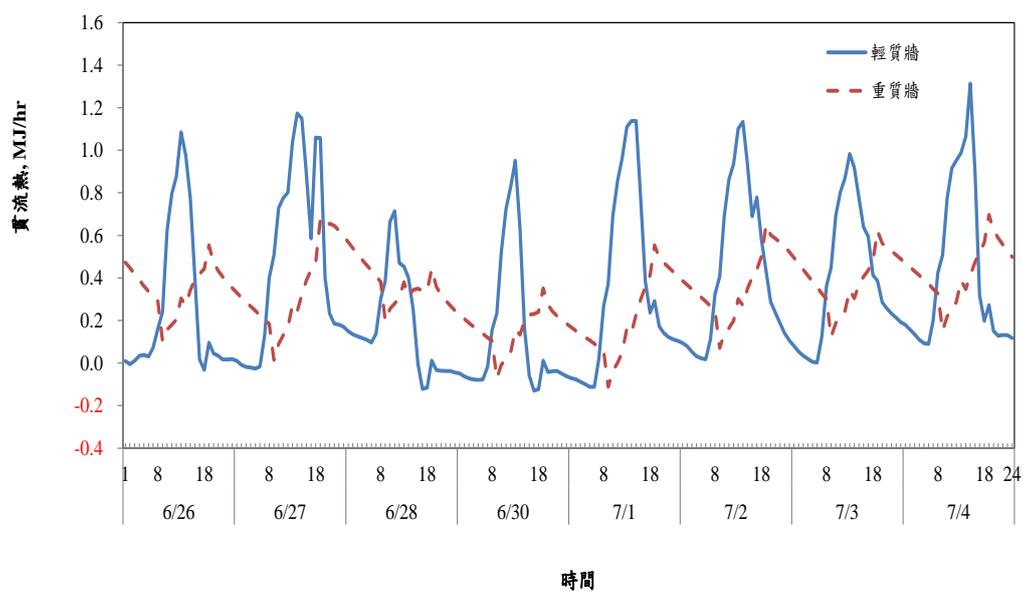
夜間通風運行模式：每日 08:00 ~ 18:00，設定溫度為 26°C。00:00 ~ 07:00
通風 2ACH。

(一)牆體的貫流熱

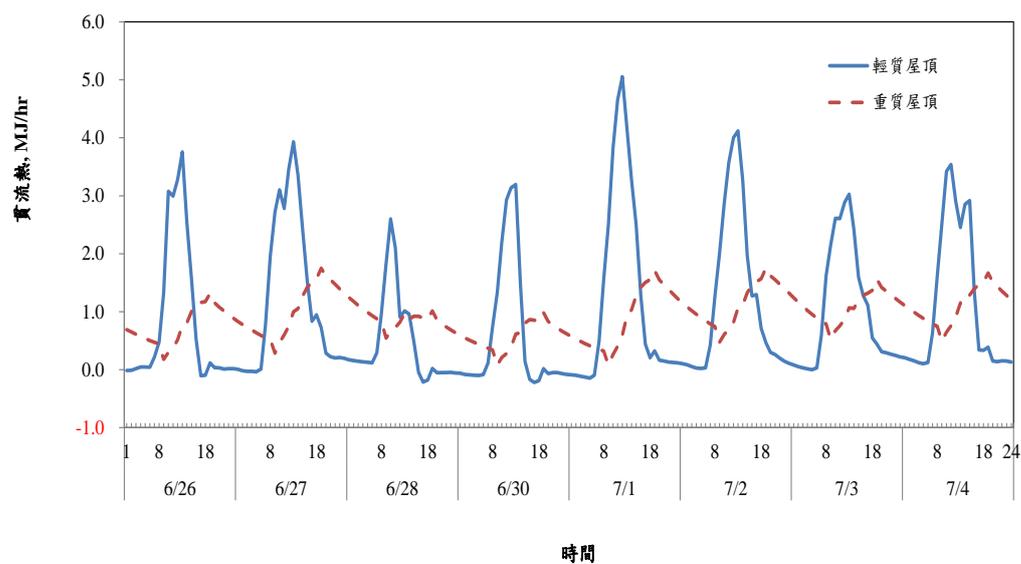
圖 3-9 顯示重質量和輕質量兩種類型的西向外牆與屋頂在 6/26~7/4 的逐時貫流熱。從圖中可以明顯看到熱質量的”振幅削減”和”時間延後”的兩大效應。輕質量構造的牆體或屋頂因為其熱惰性指標 D 值只有 0.54 和 0.62，幾乎無蓄熱效果，所以其貫流熱的變化幾乎和外氣溫度的變化同步，所有的貫流熱幾乎都是發生在白天的 08:00~18:00 之間。相對的，重質量構造的牆體或屋頂因為其熱惰性指標 D 值達 2.32 和 2.46，有很好的蓄熱效果，其貫流熱的變化與輕質量外牆有明顯的”時間延後”現象，大約延後了 8-9 小時。在”振幅削減”方面，以屋頂為例，在 6/26~7/2 這段期間，輕質量屋頂最大的貫流熱為發生在 7/1 12:00 的 5.05 MJ/hr，而重質量屋頂發生在同日的 19:00 的 1.71 MJ/hr，只剩 34%。

圖 3-10 顯示了兩種類型的西向外牆與屋頂在主要空調季節(4-10 月)的貫流熱累積值。圖中用兩種方式來統計空調季節的貫流熱總和。在圖中左半部，我們統計 00:00~24:00 全天的總和。由於牆體熱質量僅能儲存熱量，無法減少熱量，所以可以看到不論是輕質量或者重質量的外牆，其在空調季節全天傳入的貫流熱總和是相同的。在圖 3-10 中右半部是另一種統計，我們只統計白天上班開空調時間(08:00~18:00)內的貫流熱總和。首先，先比較輕質量外牆或屋頂在全天和白天貫流熱總和的差異。由於輕質量構造幾乎無蓄熱能力，對貫流熱未能產生時間延後效應，所以不論是西向外牆或者屋頂，其白天的貫流熱總和幾乎和全天的總和相同。相反的，我們可以看到重質量構造的蓄熱能力產生之時間延後效應，使得其白天的貫流熱總和遠低於有相同 U 值的輕質量構造的貫流熱總和。對屋頂而言，重質量構造在白天的貫流熱總和僅為輕質量構造的 38%；對西向外牆而言，僅剩 27%。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討



(a) 西向外牆



(b) 水平屋頂

圖 3-9 兩種外牆與屋頂的逐時貫流熱

(資料來源：本研究繪製)

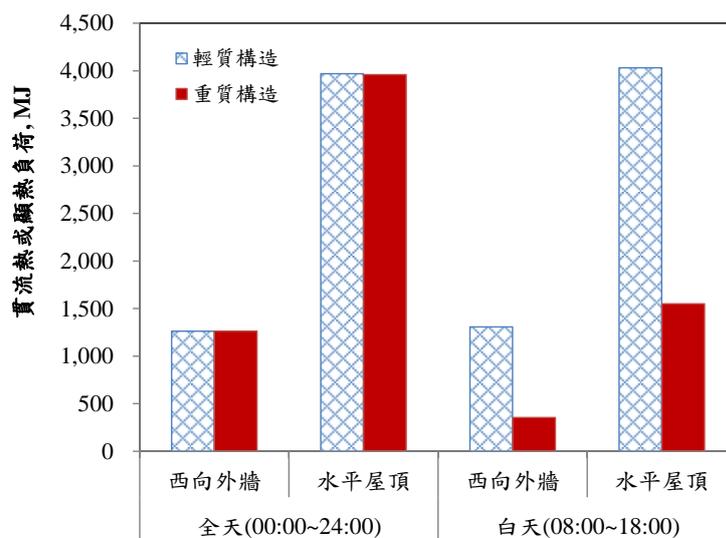


圖 3-10 兩種外牆與屋頂在 4~10 月的總貫流熱

(資料來源：本研究繪製)

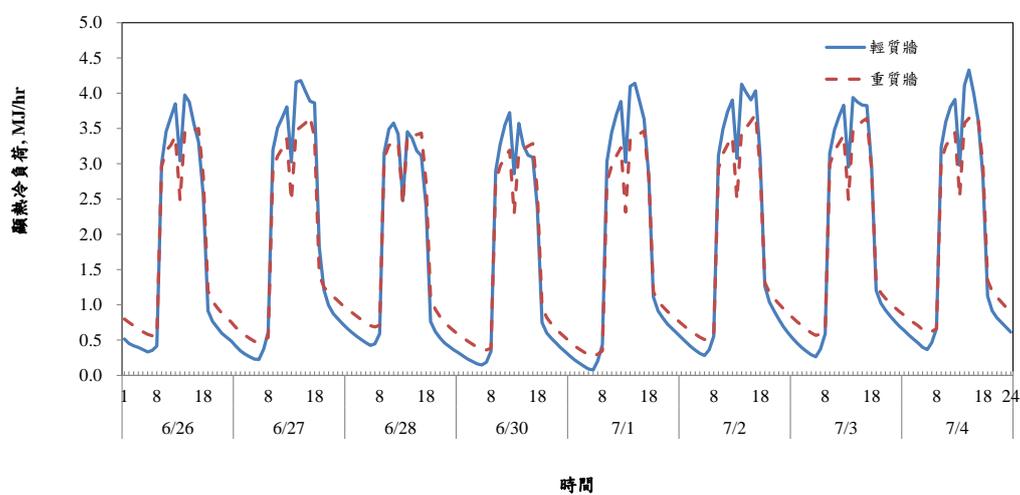
(二)顯熱負荷

在圖 3-10 中我們雖然看到由於熱質量的時間延遲效果使得外牆或屋頂的貫流熱可以大幅度的從白天轉移到夜間。若是採用常時空調運行模式，在不論在白天或者夜間都有空調，這些移轉到夜間的热量，終將成為空調負荷。就如圖 3-11 所示，有重質量外牆或屋頂的單元辦公室，在白天有相對較低的顯熱負荷，但是在夜間卻有較高的顯熱負荷。

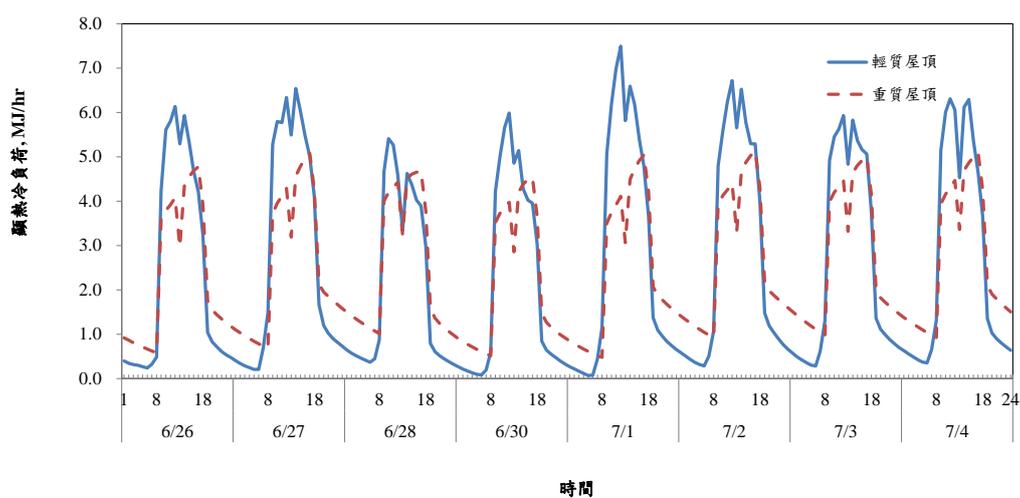
若是採用間歇空調運行模式，只在白天上班時段(08:18:00)有空調，在夜間下班時段(18:00-08:00)沒有空調，藉由熱質量蓄熱能力轉移到夜間的热量，將會造成單元辦公室在下班時段室內溫度的上升，如圖 3-12 所示。雖然如一般認知的，夜間室溫的上升會使得隔天早晨空調開機時負荷的增加；但是從另一個方面來看，熱質量蓄熱效果導致的夜間室內溫度的上升，也並非全然無助於降低空調負荷。因為室內空氣溫度的上升，會使縮小牆體內側表面溫度和室內空氣溫度之間的溫度差，這是有助於阻擋儲存在壁體內的热量繼續往室內釋放。特別是在深夜到清晨這段時間，外氣溫度通常較低，此時有可能室內溫度高於外氣溫度，則

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

蓄積在牆體裡原本要往室內釋放的熱量有機會往回傳到室外，從而減輕空調負荷。



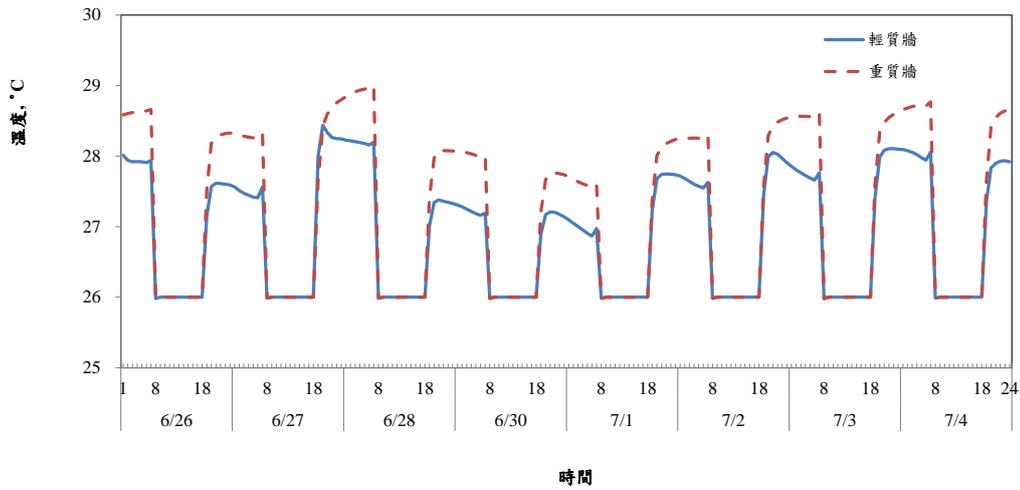
(a) 西向外牆



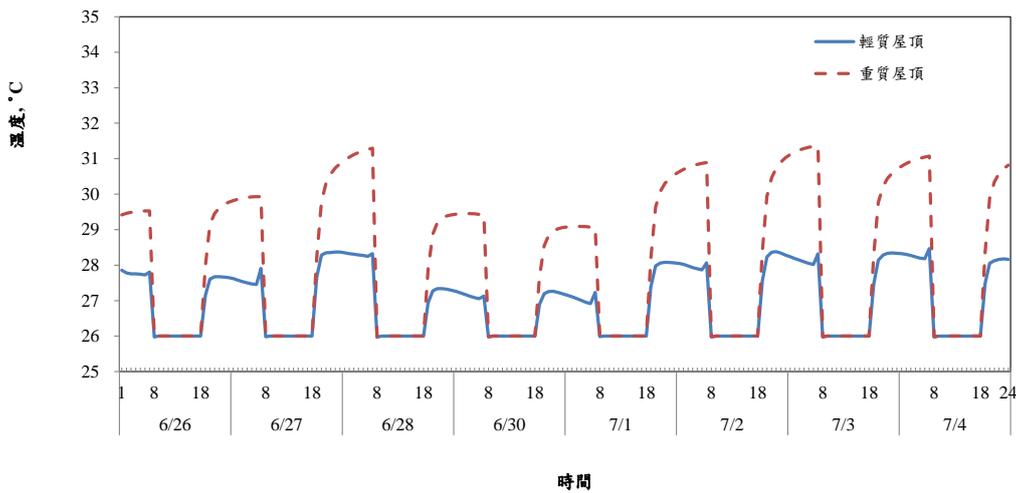
(b) 水平屋頂

圖 3-11 不同外牆與屋頂單元辦公室常時空調的逐時顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)



(a) 西向外牆



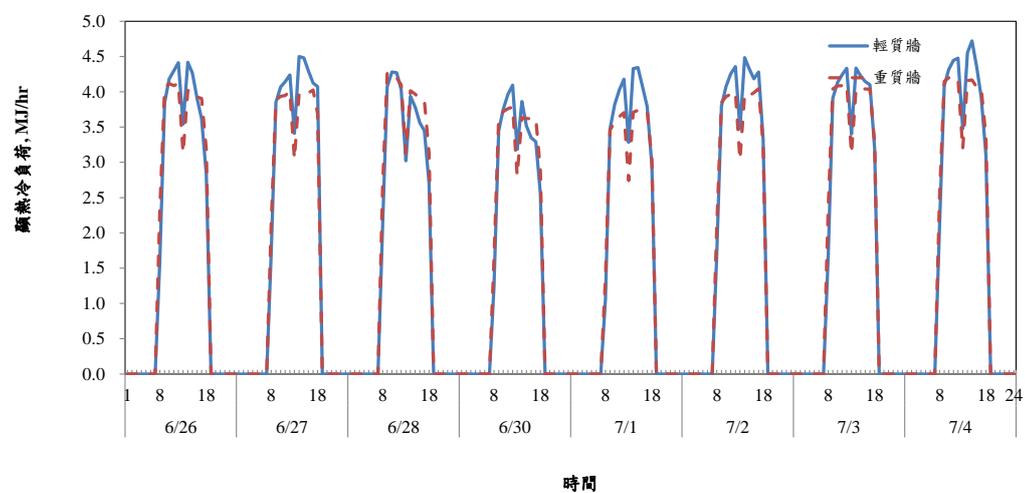
(b) 水平屋頂

圖 3-12 不同外牆與屋頂單元辦公室間歇空調的逐時室溫

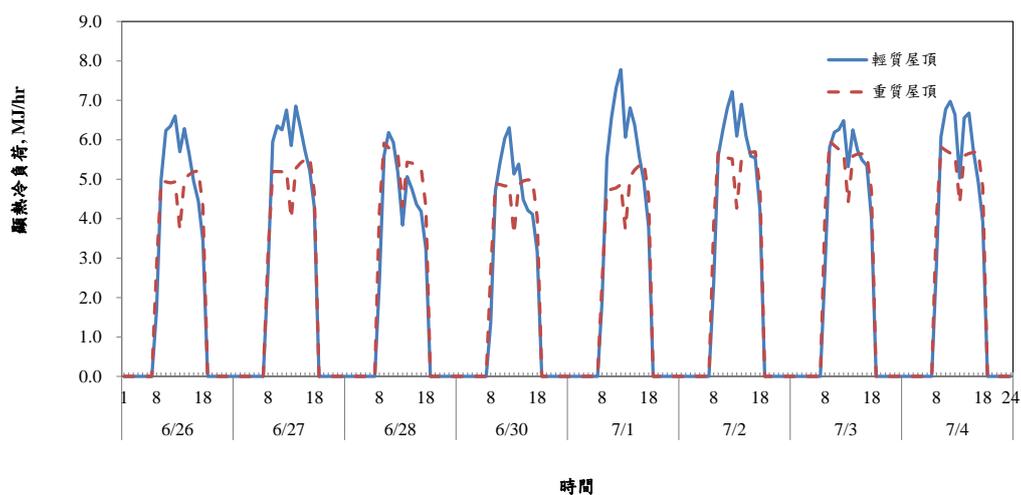
(資料來源：本研究繪製)

圖 3-13 顯示採用間歇空調運行模式下，有不同外牆或屋頂熱質量時，單元辦公室在 6/26~7/4 的逐時顯熱負荷。若對照圖 3-11 與圖 3-13，因為夜間蓄積在室內的熱量，特別是有重質量外牆或屋頂的單元辦公室，可以發現在採用間歇空調模式時，於每天上午的顯熱負荷都比常時空調模式同一時段的冷負荷高了許多。整體而言，採用間歇空調模式時的總顯熱負荷還是比採用常時空調模式的低。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討



(a) 西向外牆



(b) 水平屋頂

圖 3-13 不同外牆與屋頂單元辦公室間歇空調逐時顯熱負荷

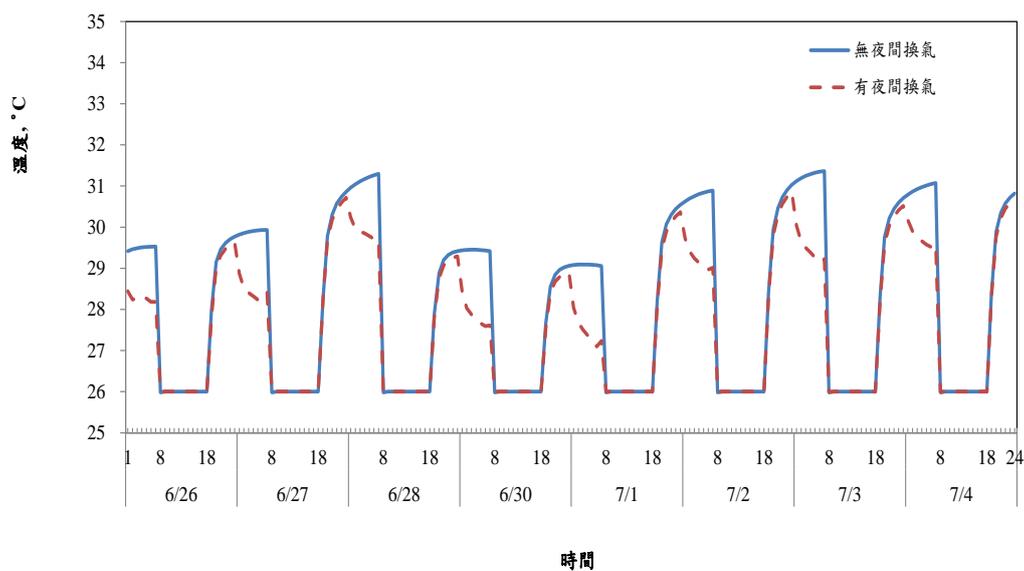
(資料來源：本研究繪製)

(三)夜間換氣

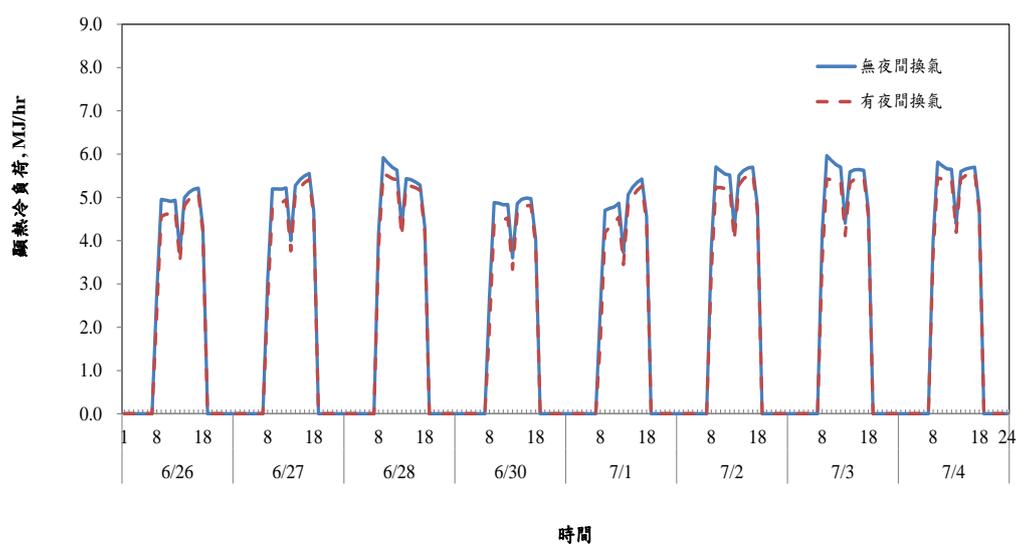
因為深夜到清晨這個時段外氣溫度通常較低，此時可以利用夜間換氣引入較低溫的外氣，將因重質量外牆或屋頂的蓄熱能力所轉移至夜間的热量排除，以避免其留到隔天成為空調負荷。以有重質量屋頂的單元辦公室為例，在深夜到清晨(00:00-07:00)這段時間每小時引入 2 回的外氣，圖 3-14(a)顯示這樣的夜間換氣可以明顯的將室內溫度降低。與無夜間換氣的情況相比，有夜間換氣的室內溫度，即是在炎熱的 6/26~7/4 這段期間於空調開機運行前(08:00)大約可以降低 2~3°C 的程度。圖 3-14(b)顯示夜間換氣對顯熱負荷產生的影響。可以注意到有進行夜間換氣的單元辦公室其每天上午都有較低的顯熱負荷，這就是因為夜間換氣利用較低溫的室外空氣排除了原本蓄積在室內的热量。如果這些热量不被排除至室外，則一定會成為上午的空調負荷。

圖 3-15 彙整了於間歇空調運行模式下，有輕質量構造、重質量構造、以及重質量構造配合夜間換氣三種情境單元辦公室在 4-10 月主要空調期間的顯熱負荷的總和。透過這張圖，我們可以了解熱質量和夜間換氣對辦公室建築的空調負荷的影響。在西向的單元辦公室，在外牆的熱傳透率 U 值相同的情況下，使用輕質量構造的外牆，4-10 月的顯熱負荷總和為 6,152 MJ，使用重質量外牆顯熱負荷總和降為 5,981 MJ(98%)，若再配合夜間換氣則可降至 5,524 MJ(90%)。在水平屋頂的情形，若使用重質量屋頂，以及重質量屋頂加夜間換氣，則 4-10 月的顯熱負荷總和可以從使用輕質量屋頂的 8,947 MJ，降至 8,486 MJ(95%)、7,672 MJ(86%)。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討



(a)室內溫度



(b)顯熱負荷

圖 3-14 夜間換氣對重質量屋頂單元辦公室的室溫度顯熱負荷影響

(資料來源：本研究繪製)

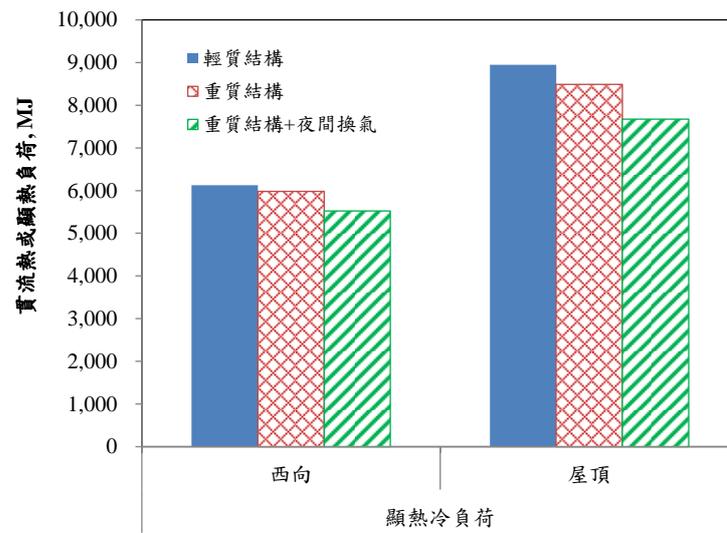


圖 3-15 熱質量和夜間換氣對單元辦公室 4-10 月顯熱負荷影響

(資料來源：本研究繪製)

第四節 熱惰性與不同參數的耦合

在前一節我們闡明了熱質量在辦公類建築的運作機制，為了更加瞭解外牆和屋頂蓄熱性能的節能效益，我們在這一節將透過在外牆的隔熱性能 U 值固定在 $=2.0 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 下，改變各種重要參數，藉由模擬各種情境，來觀察這些參數的變動對外殼蓄熱性能的節能效益產生的影響。 U 值 $=2.0 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 係根據現行建築技術規則的規定而來的。這些情境包括：

情境一：外殼熱惰性對空調負荷的影響

情境二：建築蓄熱與夜間換氣的耦合

情境三：外殼熱惰性與外表面太陽輻射吸收率

情境四：隔熱與蓄熱材料的排列方式

(一)不同外殼的熱惰性

圖 3-16 說明模擬所使用的牆體構造示意。其中外飾材料是瓷磚，內飾材料為水泥砂漿粉刷，使用 RC 混凝土做為蓄熱材料。由於 RC 混凝土也具有部分隔熱性能，為了讓每一種構造都有相同的 U 值 $=2.0 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ ，所以其隔熱材厚度亦要配合蓄熱材厚度隨著調整。 U 值 $=2.0 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 係根據現行建築技術規則的規定而來的。藉由從無蓄熱材到以 450mm 混凝土作為蓄熱材料，創造如表 3-3 所示之有不同蓄熱性能的十種外牆組合。這十種組合其熱惰性指標(D 值)從 0.2 提升到 4.7，衰減因子從 0.99 到 0.16，時間延遲從 0.8 小時增加到 11.3 小時。

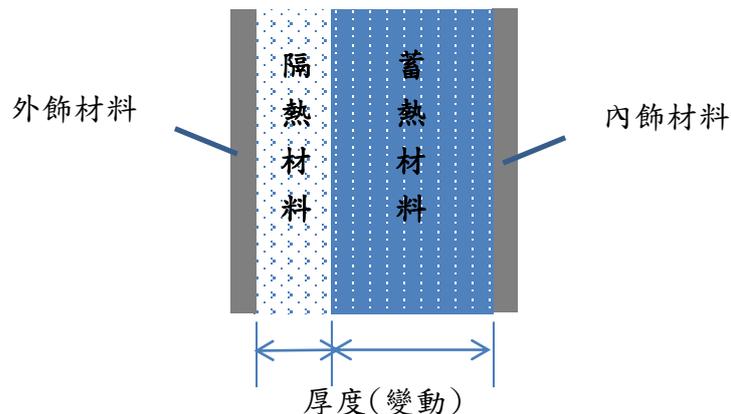


圖 3-16 U 值固定下的外牆構造示意說明

(資料來源：本研究繪製)

表 3-3 U 值=2.0 W/m² K 下，十種模擬組合的蓄熱能力說明

編號	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
隔熱厚度(mm)	10.0	8.9	7.8	6.8	5.7	4.6	3.5	2.5	1.4	0.3
蓄熱厚度(mm)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
U 值(W/m ² K)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
熱惰性指標	0.2	0.7	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2	3.7	4.1	4.7
衰減因子	0.99	0.92	0.76	0.59	0.46	0.36	0.29	0.23	0.19	0.16
時間延遲(hour)	0.9	2.0	3.5	4.9	6.1	7.2	8.3	9.3	10.4	11.3

(資料來源：本研究彙整)

圖 3-17 顯示這十種組合的 D 值與衰減因子或時間延遲的關係。從圖中所顯示的相關係數 R² 都高達 0.99 以上，顯示這三者有很高的相關性，這也意謂只要從這三者中挑選出一個作為反應牆體熱質量效益的參數。相較之下，D 值因為具有容易計算的優點，所以底下所有的分析，都將以 D 值作為反應各種牆體或屋頂蓄熱性能的參數。

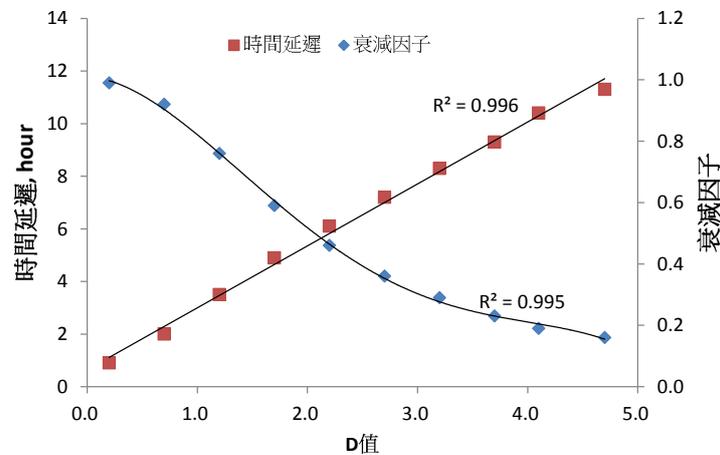


圖 3-17 十種模擬牆體的 D 值與衰減因子或時間延遲的關係

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

表 3-4 彙整了做為模擬對向的單元辦公室在台北、台中和高雄三個氣候區於 (a)4-10 月較炎熱季節、(b)3-11 月較涼爽季節每日 08:00~18:00 的單位外殼面積貫流熱的總合。表 3-4 的數據顯示在較炎熱的 4-10 月其數值正值，表示在這段期間的白天貫流熱是由戶外傳向室內，一般稱為貫流熱得；在 11-3 月數值為負值，表示在較涼爽的這段期間的白天貫流熱是由室內傳向戶外，一般稱為貫流熱損。若以無質量的牆體構造 A 的白天的貫流熱得或貫流熱損做為比較基礎，我們可以計算其它牆體構造在白天的貫流熱得或貫流熱損，來了解增加牆體蓄熱能力轉移白天貫流熱至夜間的效果。圖 3-18 以台北氣候區說明牆體的 D 值(熱惰性指標)與白天貫流熱被轉移至夜間的比例之關係。從圖中可以看到當牆體或屋頂具有良好的蓄熱能力(D 值>2.0)時，在較炎熱的 4-10 月，其白天貫流熱得多數被轉移到夜間，只剩無蓄熱能力構造的 0.1~0.3 倍；而在較涼爽的 11-3 月，當 D 值>1.0 時，其夜間的貫流熱損被轉移到白天，所以其白天貫流熱損也增至無蓄熱能力構造的 1.4~2.0 倍。

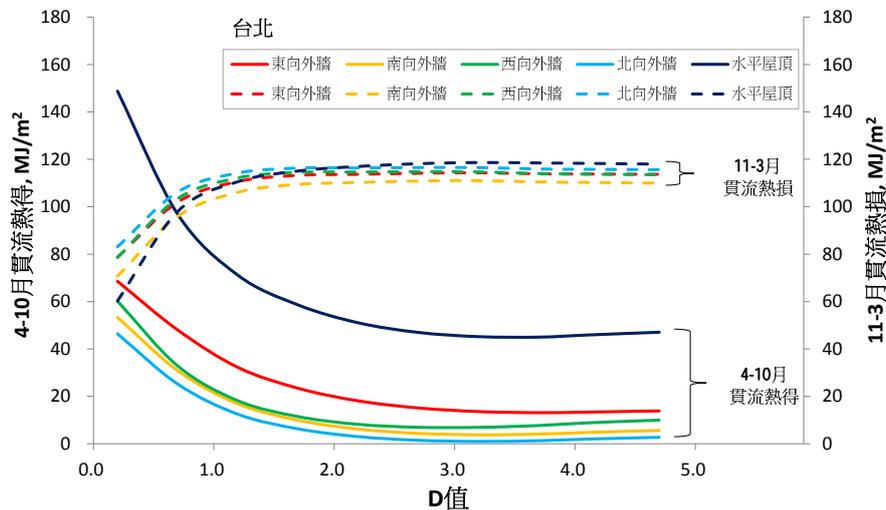


圖 3-18 牆體的 D 值轉移白天貫流熱的效果

(資料來源：本研究繪製)

表 3-4 單元辦公室於 08:00~18:00 的單位外殼面積貫流熱

(a) 4-10 月

方位	熱惰性指標									
	0.20	0.70	1.20	1.70	2.20	2.70	3.20	3.70	4.10	4.70
台北										
東向外牆	68.5	48.0	32.2	23.4	18.1	15.1	13.6	13.1	13.3	13.8
南向外牆	53.3	30.8	16.8	9.9	6.2	4.3	3.8	4.0	4.8	5.6
西向外牆	60.1	32.8	18.1	11.4	8.2	6.9	6.9	7.7	8.8	10.0
北向外牆	46.4	25.2	12.4	6.3	3.0	1.4	1.0	1.3	1.9	2.7
水平屋頂	148.8	96.8	71.1	58.6	51.0	47.0	45.2	45.0	45.9	47.0
台中										
東向外牆	92.5	66.9	48.4	38.3	32.3	29.1	27.6	27.4	27.9	28.8
南向外牆	78.0	49.8	32.8	24.6	20.2	18.3	18.0	18.5	19.7	21.0
西向外牆	94.4	55.4	37.0	29.2	25.8	25.1	25.9	27.6	29.6	31.6
北向外牆	64.7	38.7	24.2	17.4	14.0	12.6	12.5	13.2	14.3	15.5
水平屋頂	211.5	143.3	111.2	95.6	86.4	81.9	80.3	80.7	82.6	84.8
高雄										
東向外牆	90.1	72.2	57.2	48.5	43.0	40.0	38.5	37.9	38.3	38.9
南向外牆	76.3	56.3	42.9	35.9	31.9	30.1	29.5	29.8	30.6	31.6
西向外牆	94.8	64.1	48.8	42.0	38.8	38.1	38.6	39.8	41.5	43.2
北向外牆	66.4	47.9	36.4	30.6	27.3	25.9	25.6	25.9	26.7	27.6
水平屋頂	207.5	149.1	119.8	105.4	96.6	92.2	90.6	90.8	92.5	94.5

單位：MJ/m²

(b) 11-3 月

方位	熱惰性指標									
	0.20	0.70	1.20	1.70	2.20	2.70	3.20	3.70	4.10	4.70
台北										
東向外牆	-78.7	-102.0	-110.6	-113.2	-113.7	-114.2	-114.3	-113.9	-113.8	-113.7
南向外牆	-70.7	-96.0	-106.1	-109.4	-110.2	-110.8	-111.0	-110.5	-110.3	-110.0
西向外牆	-78.6	-103.5	-112.2	-114.5	-114.6	-114.8	-114.7	-114.0	-113.8	-113.5
北向外牆	-83.1	-106.2	-114.2	-116.3	-116.3	-116.5	-116.5	-115.9	-115.8	-115.6
水平屋頂	-60.3	-98.0	-110.6	-115.1	-117.0	-118.2	-118.6	-118.5	-118.3	-118.0
台中										
東向外牆	-40.4	-70.7	-84.6	-90.0	-92.0	-93.3	-93.7	-93.1	-92.7	-92.2
南向外牆	-10.6	-48.2	-67.4	-75.4	-78.8	-80.5	-80.9	-80.0	-79.1	-78.0
西向外牆	-36.8	-73.0	-87.5	-92.3	-93.5	-93.7	-93.2	-91.8	-90.8	-89.8
北向外牆	-53.4	-83.1	-95.0	-98.9	-99.8	-100.3	-100.2	-99.3	-98.7	-98.1
水平屋頂	16.9	-40.7	-63.9	-73.7	-78.7	-81.3	-82.2	-81.6	-80.7	-79.5
高雄										
東向外牆	-17.7	-44.4	-57.1	-62.2	-64.3	-65.3	-65.6	-65.0	-64.4	-63.8
南向外牆	4.6	-28.0	-44.6	-51.6	-54.6	-55.9	-56.1	-55.2	-54.2	-53.1
西向外牆	-15.5	-47.5	-60.5	-64.9	-66.1	-66.2	-65.6	-64.3	-63.2	-62.1
北向外牆	-30.1	-56.2	-67.0	-70.7	-71.7	-72.1	-71.8	-70.9	-70.2	-69.5
水平屋頂	37.0	-15.4	-35.9	-44.3	-48.5	-50.6	-51.1	-50.3	-49.1	-47.9

單位：MJ/m²

(資料來源：本研究彙整)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

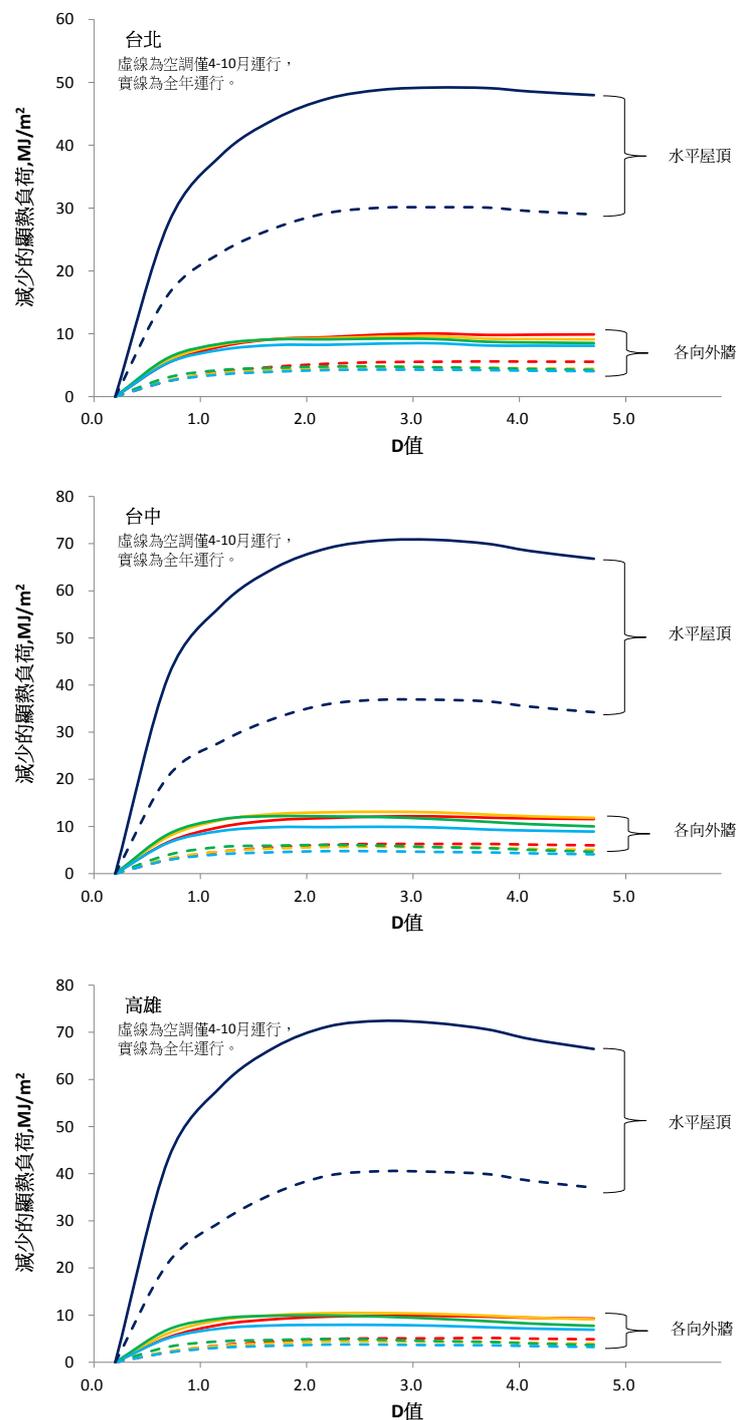


圖 3-19 牆體 D 值減少空調顯熱負荷的效果

(資料來源：本研究繪製)

表 3-5 單元辦公室不同空調運行模式下的顯熱負荷

(a) 4-10 月運行模式

方位	熱惰性指標									
	0.20	0.70	1.20	1.70	2.20	2.70	3.20	3.70	4.10	4.70
台北										
東向外牆	260	258	256	255	255	255	255	255	255	255
南向外牆	248	246	244	244	244	244	244	244	244	244
西向外牆	254	251	250	250	250	250	250	250	250	250
北向外牆	245	243	242	242	241	241	241	241	241	241
水平屋頂	322	306	299	295	293	292	292	292	292	293
台中										
東向外牆	277	274	272	271	271	271	271	271	271	271
南向外牆	265	262	260	260	259	259	259	259	260	260
西向外牆	280	276	274	274	274	274	274	274	275	275
北向外牆	259	256	255	255	255	255	255	255	255	255
水平屋頂	373	353	345	340	337	336	336	337	338	339
高雄										
東向外牆	283	281	280	279	278	278	278	278	278	278
南向外牆	272	270	269	268	268	268	268	268	268	268
西向外牆	288	284	283	283	283	283	283	283	284	284
北向外牆	268	266	265	265	264	264	265	265	265	265
水平屋頂	457	436	427	421	418	417	417	417	419	420

單位：MJ/m²

(b) 全年運行模式

方位	熱惰性指標									
	0.20	0.70	1.20	1.70	2.20	2.70	3.20	3.70	4.10	4.70
台北										
東向外牆	327	322	319	318	317	317	317	317	317	317
南向外牆	319	313	310	309	309	309	309	309	309	309
西向外牆	321	315	313	312	312	312	312	313	313	313
北向外牆	310	304	302	301	301	301	301	301	301	301
水平屋頂	377	349	338	332	329	328	327	327	328	329
台中										
東向外牆	369	362	359	358	357	357	357	357	357	357
南向外牆	371	363	360	359	358	358	358	359	359	360
西向外牆	375	366	363	362	363	363	363	364	364	365
北向外牆	344	337	335	334	334	334	334	334	335	335
水平屋頂	483	441	426	418	414	412	412	413	414	416
高雄										
東向外牆	399	394	391	390	390	389	389	390	390	390
南向外牆	398	392	389	388	387	387	388	388	388	389
西向外牆	406	399	396	396	396	396	396	397	397	398
北向外牆	377	372	370	369	369	369	369	369	370	370
水平屋頂	621	578	563	554	550	549	549	551	553	555

單位：MJ/m²

(資料來源：本研究彙整)

雖然 D 值對牆體的貫流熱有很好的轉移效果，但是被轉移至夜間的貫流熱一部分會被蓄積在室內成為翌日的空調負荷，另一部分則會因夜間戶外溫度較低有機會傳回戶外。表 3-5 彙整了做為模擬對象的單元辦公室在台北、台中和高雄三個氣候區當空調系統(a)僅在 4-10 月較炎熱季節、以及(b)全年的每日 08:00~18:00 運行時單位樓板面積空調顯熱負荷的總合。

圖 3-19 說明了增加牆體的 D 值(熱惰性指標)在台北、台中和高雄在減少空調顯熱負荷的效果。從圖中可以看到當屋頂具有良好的蓄熱能力降低空調顯熱負荷的效果較各向外牆的效果好。當屋頂的 D 值 >3.0 時，若空調僅在 4-10 月運行，在三個氣候區可以降低單位樓板面積空調顯熱負荷 30~40MJ/m²(相當於 9~10%)；若是空調全年運行的話，在三個氣候區可以降低單位樓板面積空調顯熱負荷擴大至 40~70MJ/m²(相當於 12~15%)。

(二)蓄熱與夜間換氣的耦合

夜間通風是指於夜間把室外相對涼爽的空氣引入室內，直接降低室內空氣的溫度，排除室內蓄熱，解決室內的高溫問題，如圖 3-20 所示。夜間通風的降溫效果與辦公建築中的蓄熱體有密切的關係。

夜間通風可以採取自然通風、機械通風或混合通風的方式。無論是採用哪一種方式，一個非常關鍵的環節就是要確定房間的通風換氣量。由於夜間通風同時利用通風和蓄熱來對建築進行降溫，所以在確定夜間通風建築的熱環境狀況時，需要同時考慮通風和蓄熱的作用。同時，圖 3-19 有最大減少空調顯熱負荷效果的牆體 D 值發生在 3.2，所以，我們考慮了如表 3-3 中 D 值=3.2 的編號 G 構造，以及夜間換氣回數從 0~6ACH 的組合，來進行建築蓄熱與夜間換氣的耦合情境模擬。夜間換氣時間是從深夜的 24:00 到清晨的 07:00。表 3-3.4 彙整了做為模擬對象的單元辦公室於蓄熱與夜間換氣的耦合模擬情境下，在台北、台中和高雄三個氣候區當空調系統(a)僅在 4-10 月較炎熱季節、以及(b)全年的每日 08:00~18:00 運行時單位樓板面積空調顯熱負荷的總合。

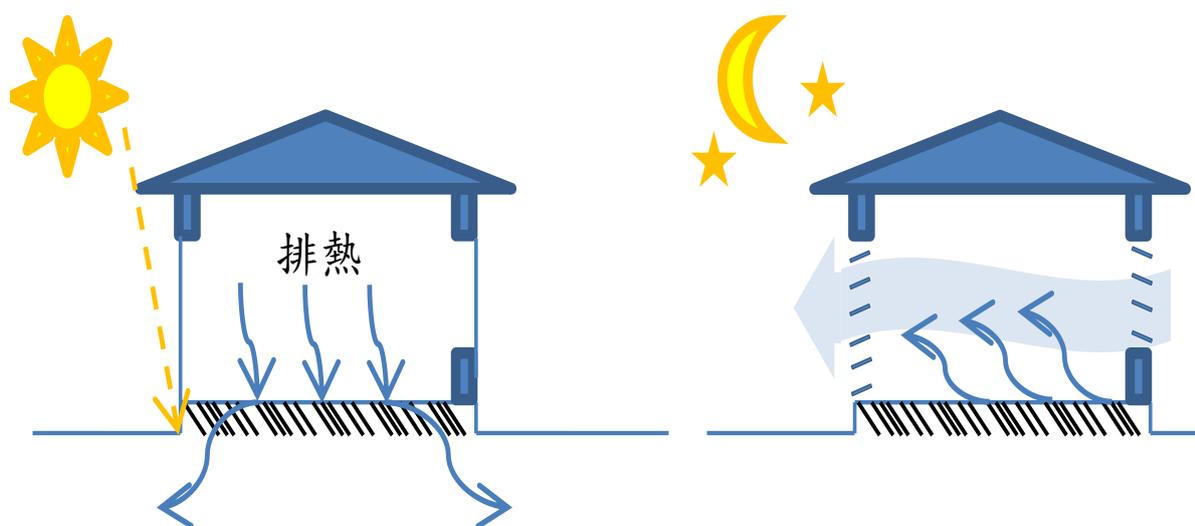


圖 3-20 夜間通風降溫原理示意圖

(資料來源：本研究繪製)

圖 3-20 說明了採取夜間通風的降溫效果，來排除室內蓄熱以減少空調顯熱負荷，在台北、台中和高雄的節能效果。從圖 3-21 中可以看到隨著夜間換氣回數的增加，降低空調顯熱負荷的效果也愈好。當夜間換氣回數增加到 6.0 ACH 時，若空調僅在 4-10 月運行，與無夜間通風的狀況相比，在三個氣候區可以降低單位樓板面積空調顯熱負荷 10~30MJ/m²(相當於 8~15%);若是空調全年運行的話，在三個氣候區可以降低單位樓板面積空調顯熱負荷擴大至 50~80MJ/m²(相當於 20~30%)。若是與無蓄熱能力(編號 A 構造)加無夜間通風的情況相比，具有良好。

表 3-6 蓄熱與夜間換氣耦合下單元辦公室的顯熱負荷

夜間換氣 (ACH)	空調全年運行					空調僅 4-10 月運行				
	東向 外牆	南向 外牆	西向 外牆	北向 外牆	水平 屋頂	東向 外牆	南向 外牆	西向 外牆	北向 外牆	水平 屋頂
台北										
0.0	317	309	312	301	327	255	244	250	241	292
1.0	291	283	287	276	312	244	234	240	232	281
2.0	276	268	272	262	300	237	227	233	225	272
3.0	267	259	262	253	292	232	223	228	221	266
4.0	260	253	256	247	286	228	219	224	217	261
5.0	256	248	252	243	281	225	216	221	214	258
6.0	252	245	248	240	278	223	214	219	212	255
台中										
0.0	357	358	363	334	412	271	259	274	255	336
1.0	327	328	333	306	386	260	249	263	245	324
2.0	309	308	314	289	367	253	242	256	238	314
3.0	297	296	302	278	354	247	237	250	233	306
4.0	289	287	293	271	345	243	233	246	230	300
5.0	283	281	288	265	338	240	230	242	227	295
6.0	279	277	283	262	333	237	228	240	224	291
高雄										
0.0	389	388	396	369	458	278	268	283	265	347
1.0	367	365	373	348	434	272	262	276	259	338
2.0	351	349	357	333	416	267	258	272	255	330
3.0	340	337	346	323	404	264	255	268	252	325
4.0	333	330	338	316	395	262	252	266	250	320
5.0	328	324	333	311	388	260	251	263	248	316
6.0	323	320	328	307	382	258	249	262	247	313

單位：MJ/m²

(資料來源：本研究彙整)

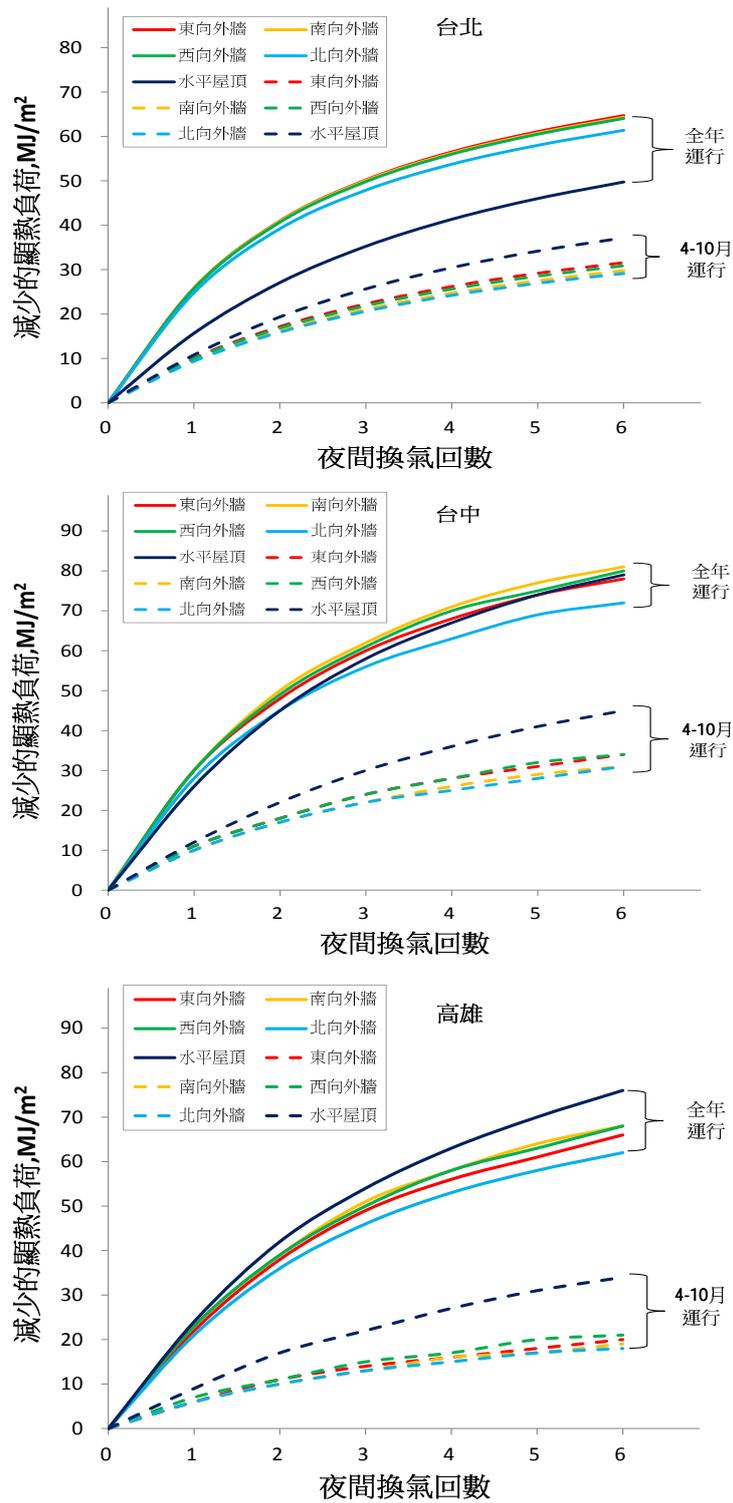


圖 3-21 夜間換氣回數對減少顯熱負荷的效果

(資料來源：本研究繪製)

蓄熱能力加足夠夜間通風(6ACH)，於空調僅在 4-10 月運行情境下，在三個氣候區可以降低單位樓板面積空調顯熱負荷 20~140MJ/m²(相當於 10~30%)；若是空調全年運行的話，擴大至 70~240MJ/m²(相當於 20~40%)。

(三)蓄熱與外表面吸收率

建築外殼的外表面通常有不同的顏色，而不同的顏色意謂著對於太陽輻射有不一樣的吸收率。吸收率介於 0~1.0 之間。外牆或屋頂外表面的吸收率越高，就會吸收越多的太陽輻射，造成其白天的外表面溫度變得越高，使得外表面溫度日夜間溫度差的變動振幅擴大。此一溫度振幅的擴大，則為牆體或屋頂的蓄熱能力創造更為有利的條件。為了了解外表面太陽輻射吸收率對外牆或屋頂蓄熱能力節能效果的影響，我們選擇了表 3-3.1 中無蓄熱能力編號 A(D 值=0.2)的構造和良好蓄熱能力的 3.2 的編號 G(D 值=3.2)，以及外表面吸收率為 0.3、0.6 和 0.9 的組合，來進行建築蓄熱與外表面吸收率的耦合情境模擬。表 3-7 彙整了做為模擬對象的單元辦公室於蓄熱與外表面吸收率的耦合模擬情境下，在台北、台中和高雄三個氣候區當空調系統(a)僅在 4-10 月較炎熱季節、以及(b)全年的每日 08:00~18:00 運行時單位樓板面積空調顯熱負荷的總合。

圖 3-22 說明了外表面太陽輻射吸收率對外牆或屋頂蓄熱能力節能效果的影響。圖中縱座標的減少的顯熱負荷是指輕構造 A 和重構造 G 的空調顯熱負荷的差。

從圖中可以看到隨著外表面太陽輻射吸收率的增加，降低空調顯熱負荷的效果也愈好。當外表面太陽輻射吸收率從 0.3 增加到 0.9 時，在三個氣候區使用重構造較使用輕構造外牆的單元辦公室，可以降低單位樓板面積的空調顯熱負荷也從 6~15MJ/m²(約相當於顯熱負荷總和的 3%)擴大至 16~25MJ/m²(約相當於顯熱負荷總和的 5%)；若是使用重構造較使用輕構造屋頂的單元辦公室的話，可以降低單位樓板面積空調顯熱負荷從 30-70 MJ/m²(約相當於顯熱負荷總和的 14%)擴大至 70~150MJ/m²(約相當於顯熱負荷總和的 17%)。

表 3-7 不同外表面太陽光吸收率與蓄熱構造組合單元辦公室顯熱負荷

構造別	吸收率	空調全年運行					空調僅 4-10 月運行				
		東向外牆	南向 外牆	西向 外牆	北向 外牆	水平 屋頂	東向 外牆	南向 外牆	西向 外牆	北向 外牆	水平 屋頂
台北											
輕構造 (D 值=0.2)	0.3	369	371	375	344	483	277	265	280	259	373
	0.6	416	425	425	372	709	309	290	313	279	526
	0.9	464	478	475	401	939	342	315	346	298	681
重構造 (D 值=3.2)	0.3	357	358	363	334	412	271	259	274	255	336
	0.6	399	406	408	359	599	299	281	304	272	461
	0.9	441	454	454	385	789	328	304	335	290	587
台中											
輕構造 (D 值=0.2)	0.3	327	319	321	310	377	260	248	254	245	322
	0.6	360	348	350	330	518	287	267	277	261	434
	0.9	393	377	379	351	661	313	286	299	277	548
重構造 (D 值=3.2)	0.3	317	309	312	301	327	255	244	250	241	292
	0.6	346	335	338	319	438	278	260	270	255	383
	0.9	375	360	364	337	552	302	277	290	270	475
高雄											
輕構造 (D 值=0.2)	0.3	399	398	406	377	518	283	272	288	268	381
	0.6	444	445	454	405	736	313	295	320	287	528
	0.9	489	493	502	433	958	343	318	352	306	677
重構造 (D 值=3.2)	0.3	389	388	396	369	458	278	268	283	265	347
	0.6	429	430	440	394	638	305	288	312	281	467
	0.9	469	473	484	419	819	331	308	342	298	588

單位：MJ/m²

(資料來源：本研究彙整)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

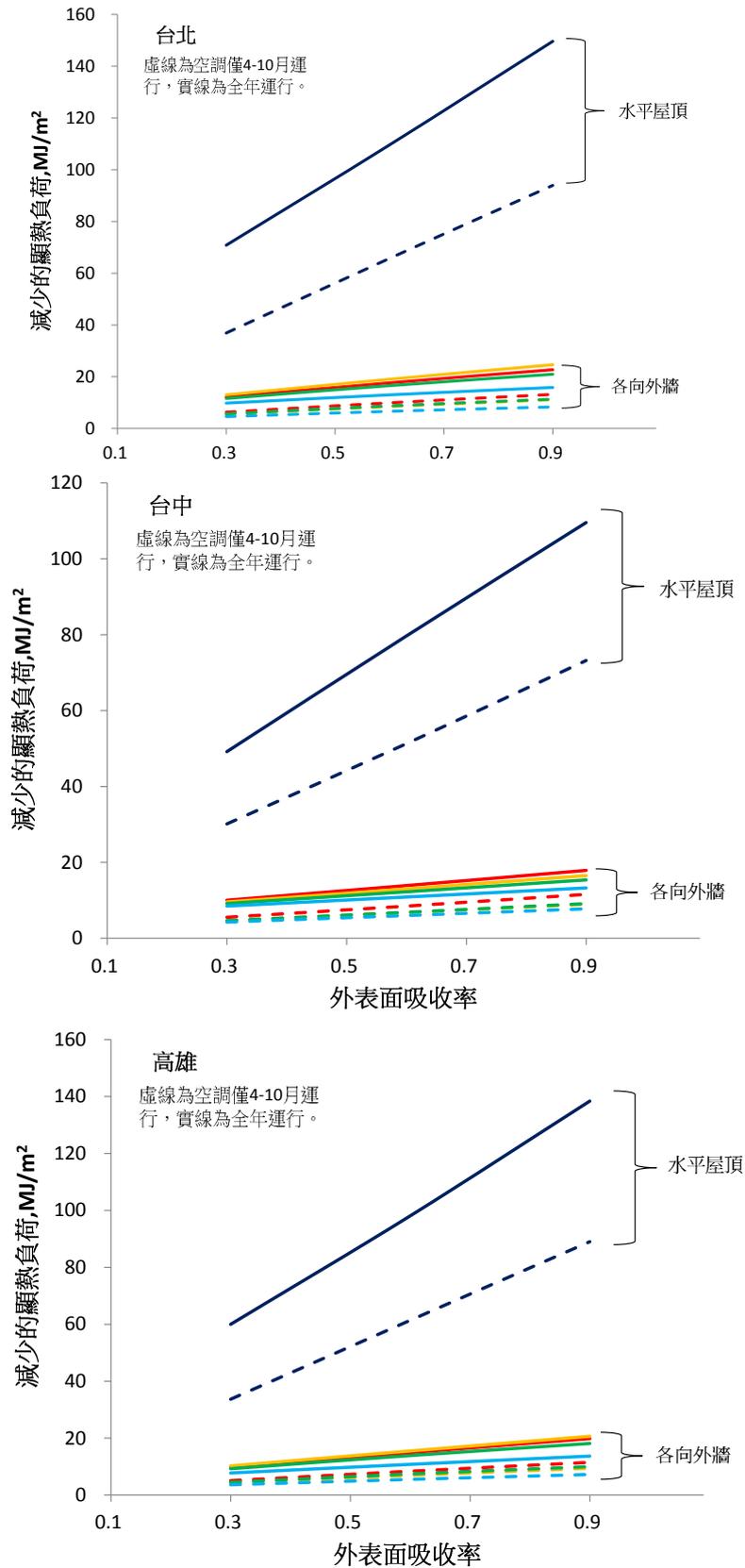


圖 3-22 蓄熱與外表面吸收率耦合對顯熱負荷減少的效果

(資料來源：本研究繪製)

(四)隔熱與蓄熱的排列方式

為了瞭解隔熱材料和蓄熱材料在牆體或屋頂裡的排列方式對減少空調負荷的效果，我們考慮了如表 3-3 中 D 值=3.2 的編號 G 構造，以及考慮將隔熱材料放在室外側、中間和室內側三種組合，來進行不同的建築蓄熱與隔熱排列方式的情境模擬。表 3-8 彙整了做為模擬對象的單元辦公室於不同蓄熱與隔熱排列組合模擬情境下，在台北、台中和高雄三個氣候區當空調系統(a)僅在 4-10 月較炎熱季節、以及(b)全年的每日 08:00~18:00 運行時單位樓板面積空調顯熱負荷的總合。從表中所示的數據顯示，在相同的 U 值與 D 值組合下，改變蓄熱與隔熱排列組合對減少空調顯熱負荷的幾乎沒影響。

表 3-8 不同蓄熱與隔熱排列方式下單元辦公室顯熱負荷

夜間換氣 (ACH)	空調全年運行					空調僅 4-10 月運行				
	東向 外牆	南向 外牆	西向 外牆	北向 外牆	水平 屋頂	東向 外牆	南向 外牆	西向 外牆	北向 外牆	水平 屋頂
台北										
室外側	317	309	312	301	327	254	244	250	241	291
中間層	317	309	312	301	327	255	244	250	241	292
室內側	318	310	313	302	328	254	244	250	241	291
台中										
室外側	357	359	364	334	413	271	260	275	255	337
中間層	357	358	363	334	412	271	259	274	255	336
室內側	357	359	364	335	413	270	259	274	255	335
高雄										
室外側	389	388	397	369	458	278	268	284	265	348
中間層	389	388	396	369	458	278	268	283	265	347
室內側	390	388	397	369	458	278	268	283	265	346

單位：MJ/m²

(資料來源：本研究彙整)

第五節 隔熱與蓄熱性能的等效性

在前面一節，我們以 U 值固定在 $2.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 下，改變牆體或屋頂的蓄熱能力 D 值的方式，探討牆體蓄熱能力對辦公建築空調負荷的影響。分析結果發現建築牆體和屋頂的 D 值在間歇空調下，與 U 值一樣具有降梯空調負荷的影響。有鑑於此，在這一節我們將透過在同時變動牆體的隔熱能力和蓄熱能力，來觀察隔熱和蓄熱性能在降低全年顯熱負荷的等效性。

藉由改變隔熱材料的厚度和蓄熱材料(混凝土)的厚度，可以組合出如表 3-9 所示之有不同隔熱和蓄熱性能的 44 種外牆構造。這 44 種牆體的 U 值變動範圍為 $0.5\text{-}3.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ，D 值變動範圍為 0.2- 3.7。圖 3-23~3-25 彙整了這 44 種牆體組合，在台北、台中和高雄的模擬結果。

表 3-9 不同隔熱和蓄熱性能的牆體組合

U 值 ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)	厚度 (mm)	0.2	0.7	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2	3.7
0.50	隔熱材	55	54	53	52	51	50	49	48
	混凝土	-	50	100	150	200	250	300	350
1.00	隔熱材	25	24	23	22	21	20	19	17
	蓄熱材	-	50	100	150	200	250	300	350
1.50	隔熱材	15	14	13	12	11	10	9	7
	蓄熱材	-	50	100	150	200	250	300	350
2.00	隔熱材	10	9	8	7	6	5	4	2
	蓄熱材	-	50	100	150	200	250	300	350
2.50	隔熱材	7	6	5	4	3	2	1	
	蓄熱材	-	50	100	150	200	250	300	
3.00	隔熱材	5	4	3	2	1			
	蓄熱材	-	50	100	150	200			

(資料來源：本研究彙整)

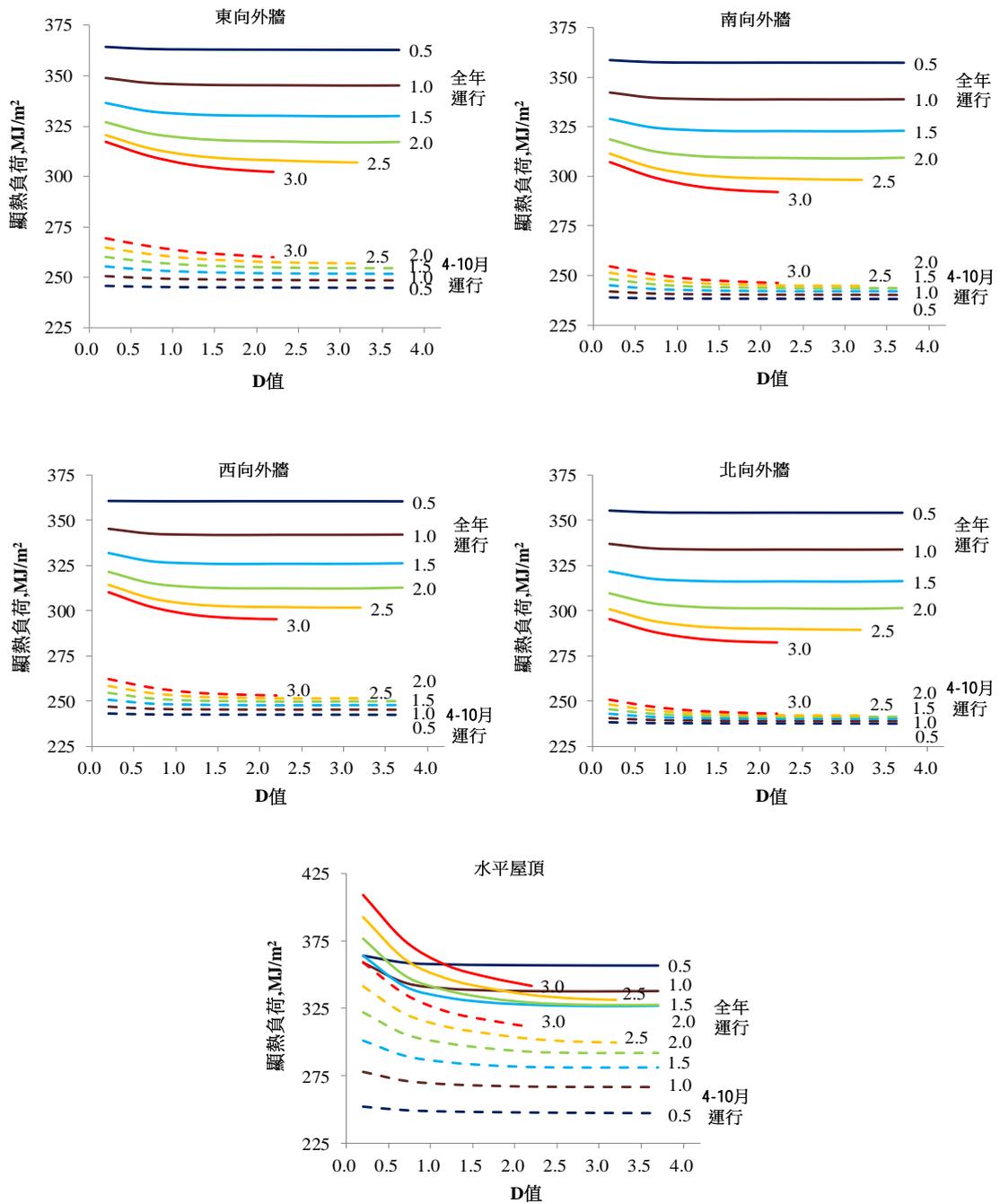


圖 3-23 不同外殼 U 值與 D 值組合在台北的顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

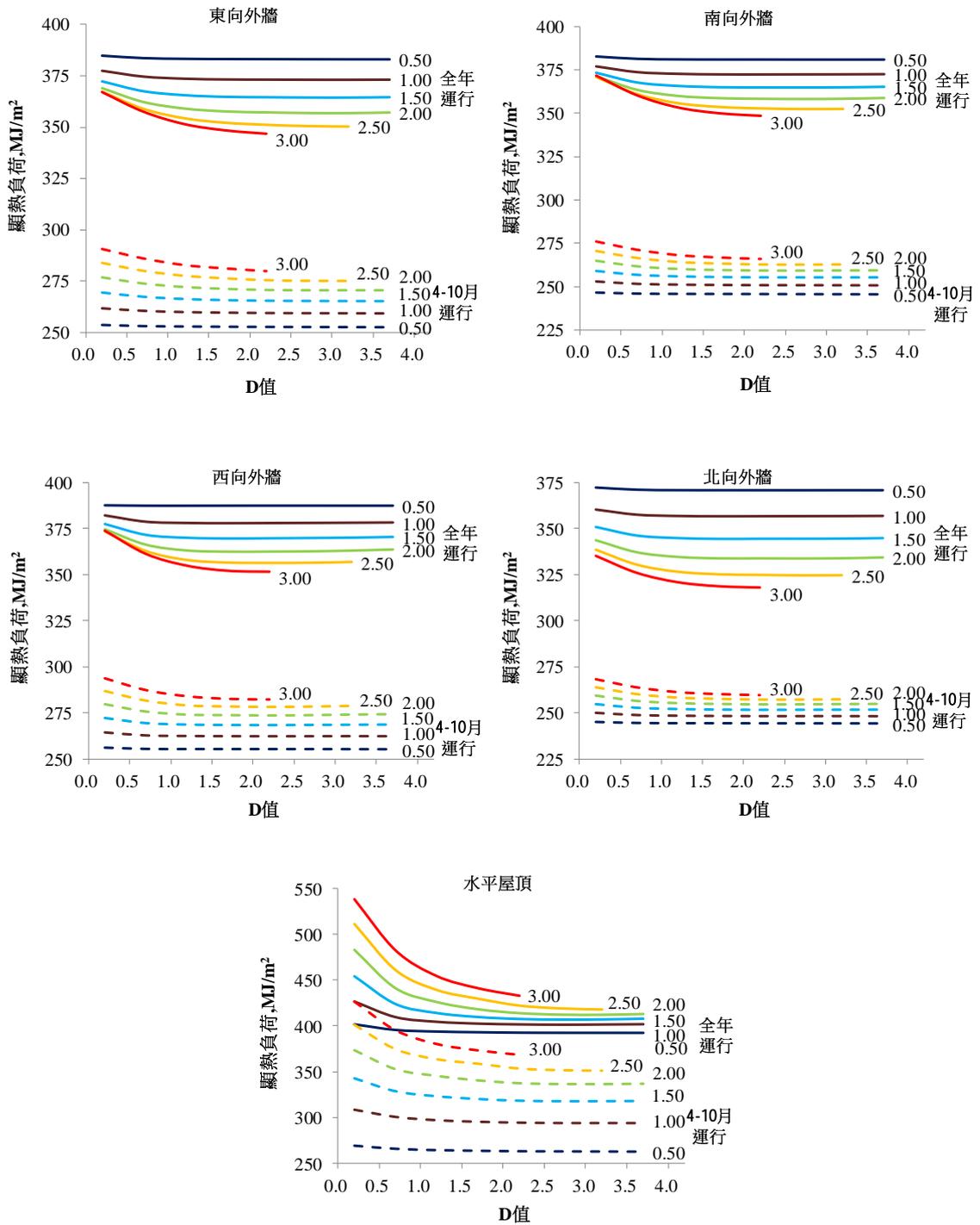


圖 3-24 不同外殼 U 值與 D 值組合在台中的顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

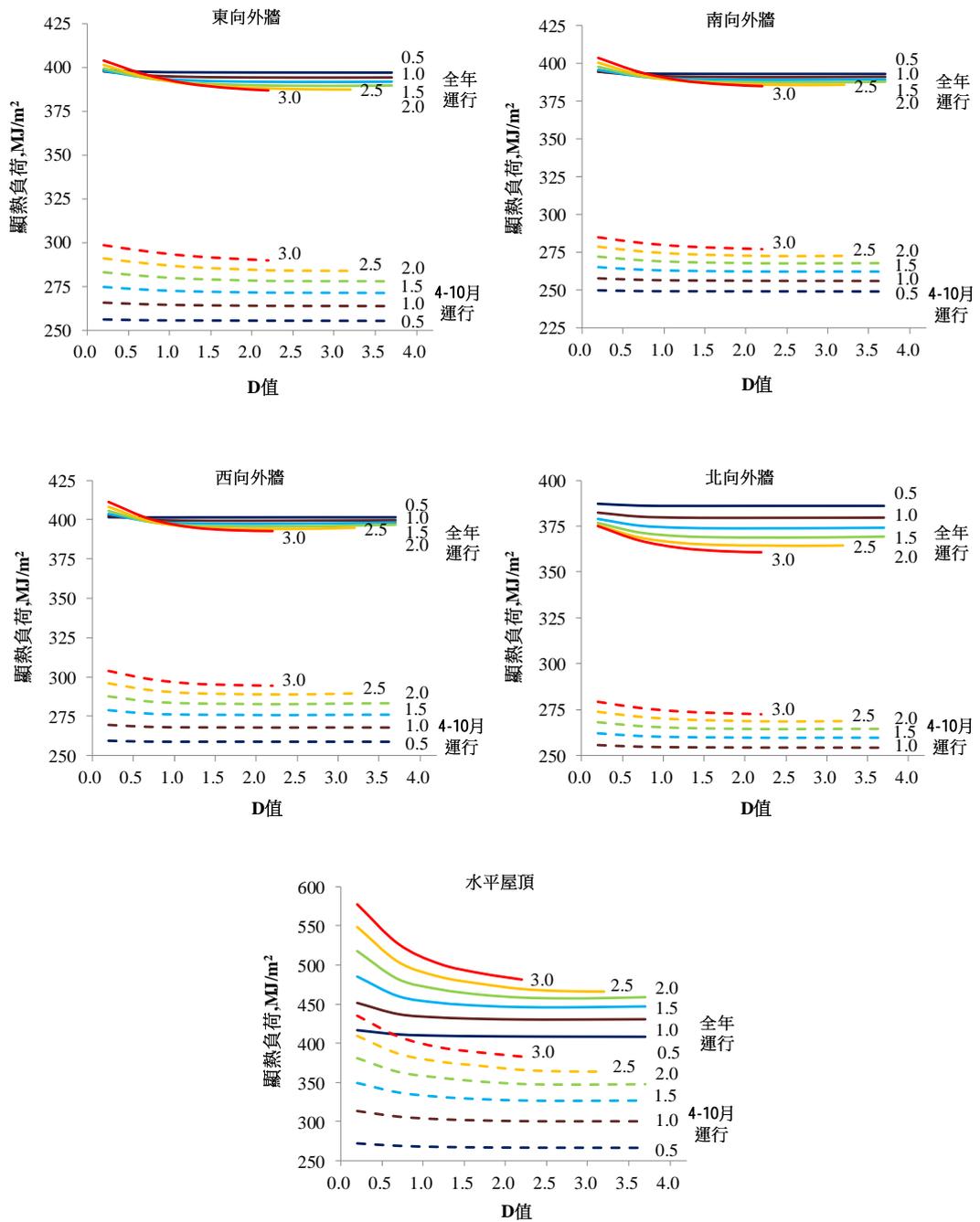


圖 3-25 不同外殼 U 值與 D 值組合在高雄的顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

模擬結果揭露幾個重要現象：

1. 若辦公建築是屬於僅需在較炎熱的 4-10 月運行空調系統，空調顯熱負荷的總合是隨著各方位立牆 U 值的減少而減少。但若需全年運行空調系統，則全年的空調顯熱負荷並不會隨著立牆 U 值降低而減少，而是隨著立牆 U 值降低而增加，無限制的增加 U 值其實是沒有助益的，反而幫倒忙。
2. 不論是僅需在 4-10 月運行或者需全年運行空調系統的辦公建築，其顯熱負荷總合都是隨著屋頂的 U 值降低而降低。
3. 不論是僅需在 4-10 月運行或者需全年運行空調系統的辦公建築，其顯熱負荷總合都是隨著立牆或者屋頂的 D 值增加而降低。與空調僅 4-10 月運行相比，空調全年運行的顯熱負荷總合隨 D 值增加而降低的幅度較大。
4. 在某些情況辦公建築的外牆或屋頂的 U 值與 D 值存在等值效果。

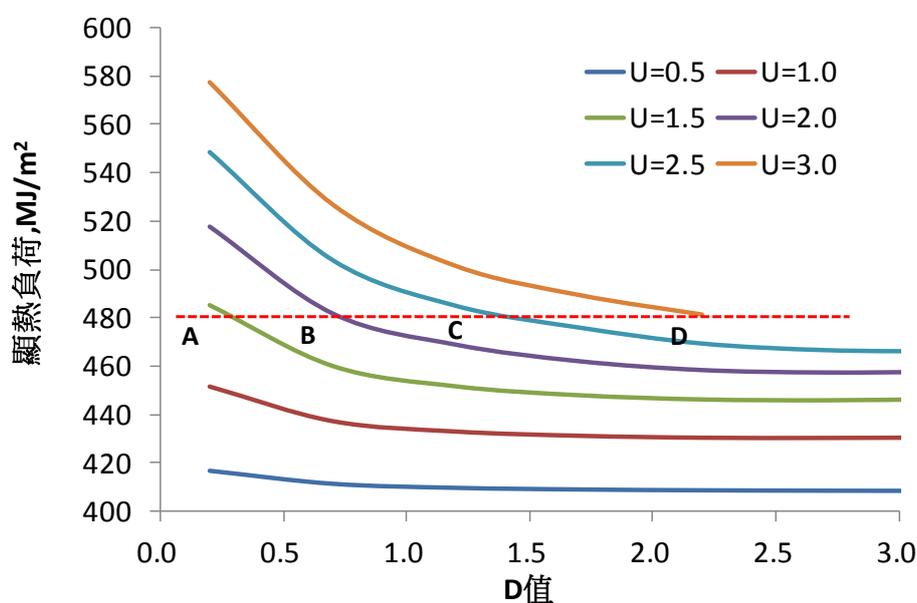


圖 3-26 隔熱和蓄熱能力等值效果的說明

(資料來源：本研究繪製)

何謂牆體的隔熱和蓄熱能力存在者等值效果?我們在以高雄水平屋頂的模擬結果為例，繪成圖 3-26 來說明。首先在圖中畫一條顯熱負荷=480 MJ/m²的水平線。這一條水平線在圖上與 U 值=1.5、2.0、2.5 和 3.0W/m² K 的曲線交於 A、B、C 和 D 點。這意謂 A、B、C 和 D 四個點雖有不同的隔熱性能(U 值)和蓄熱性能(D 值)的組合，但是卻有相同的全年顯熱負荷。對於 D 點而言，儘管其 U 值=3.0 W/m² K 高於 A 點 U 值=1.5 W/m² K，甚至高過現行技術規則訂 U 值需小於 2.0 W/m² K 的規定，但是這類的牆體藉由提升其 D 值一樣可以達到與較低 U 值相同的效果。也就是說，現行的僅規範牆體隔熱性能的節能法規，可以朝向如圖 3-28 所揭露之同時注意牆體或屋頂的 U 值和 D 值具有等值效果的方式調整。

第六節 小結

本章以辦公建築為對象，探討隔熱性能及蓄熱性能的影響，研究發現：

1. 整體而言，藉由增加屋頂隔熱材料厚度來降低屋頂的 U 值，於台北、台中和高雄三個氣候區，對辦公室的 4-10 月或者全年空調顯熱負荷的降低是有正面幫助的。4-10 月或者全年空調顯熱負荷基本上是隨著 U 值的降低而跟著線性降低。
2. 降低立牆的 U 值對辦公室的全年空調顯熱負荷的幫助，存在著最佳 U 值。當立牆的 U 值高於 $3.0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ，降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷有正面幫助。但是當立牆的 U 值低於 $3.0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ，繼續降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷卻反而有負面效果。
3. 當考慮建築立牆的隔熱性能時，必須考慮建築的特性。如果是屬於自然通風能力良好的辦公建築物，在涼爽的 11-3 月份可以透過自然通風維持室內的舒適性，則持續降低外牆的 U 值基本上是有利的。但是，若是屬於自然通風能力不佳的辦公建築物，在涼爽的 11-3 月份仍然必須靠空調系統方可以維持室內的舒適性，一味的降低外牆的 U 值，對降低全年空調負荷不見得是有利的，它存在著最佳 U 值。但是我們也並需強調，不論是屋頂或者立牆的 U 值和隔熱材料的厚度並不是成線性關係，而是成指數遞減。而隔熱材的初期費用往往是隨著厚度線性增加，亦即就經濟觀點而言，也不應無限制的增加隔熱材料的厚度。
4. 透過在外牆的隔熱性能 U 值固定在 $2.0\text{ kW}/\text{m}^2\text{ K}$ 下，改變各種重要參數，藉由模擬各種情境，來觀察這些參數的變動對外殼蓄熱性能的節能效益產生的影響。隨著夜間換氣回數的增加，降低空調顯熱負荷的效果也愈好。外牆或屋頂外表面的吸收率越高，就會吸收越多的太陽輻射，造成其白天的外表面溫度變得越高，使得外表面溫度日夜間溫度差的變動振幅擴大。在相同的 U 值與 D 值組合下，改變蓄熱與隔熱排列組合對減少空調顯熱負荷的幾乎

沒影響。

5. 辦公建築屬於 4-10 月運行空調系統，空調顯熱負荷隨著各方位立牆 U 值的減少而減少。但若為全年運行空調系統，則全年的空調顯熱負荷並不會隨著立牆 U 值降低而減少，而是隨著立牆 U 值降低而增加，無限制的增加 U 值其實是沒有助益的，反而幫倒忙。
6. 不論是 4-10 月運行或全年運行空調系統的辦公建築，其顯熱負荷總合都是隨著立牆或者屋頂的 D 值增加而降低。與空調僅 4-10 月運行相比，空調全年運行的顯熱負荷總合隨 D 值增加而降低的幅度較大。
7. 在某些情況辦公建築的外牆或屋頂的 U 值與 D 值存在等值效果。

第四章 熱質量在住宅的應用

第一節 住宅建築模型

本章以住宅建築為研究對象，分別對客廳及臥室進行模擬室內狀況。客廳單元為長 5.1m，寬 3.3m，樓高 3.0m 的空間，含有長 1.8m，高 0.9m 的窗戶，並有一外遮陽，長 2.0m，深度 0.7m。而臥室的單元為長 6.0m，寬 4.2m，樓高 3.0m 的空間，含有長 2.4m，高 2.1m 的落地窗，並有一深度 1.5m，寬 4.2m 的陽台。計算熱負荷時，使用 EnergyPlus 模擬軟體及標準氣象年來計算全年的空調負荷量。

參考多數人在家中客廳的作息，在空調運行模式與自然通風模式分成在分成 08:00-23:00 及 18:00-23:00 兩種模式進行討論，分別為白天有人使用客廳與下班之後才有人使用客廳的情形。空調運行模式為 6-9 月每日使用時間內空調運行，設定溫度為 26°C。無人時空調停止運轉。自然通風模式為全年使用時間內門窗全開，無人時門窗關閉。自然通風量由 EnergyPlus 根據風向和風速逐時計算。空間的使用人員為 2 人，燈光為 90W/m²，燈源使用頻率為早上 8 點到晚上 11 點。

而臥室的作息為在空調運行模式與自然通風模式分成在分成 00:00-24:00 及 19:00-07:00 兩種模式進行討論，分別為一整天皆有人使用臥室與下班之後才有人使用臥室的情形。空調運行模式及自然通風模式運行模式與客廳一致。臥室的使用人員為 2 人，燈光為 90W/m²，燈源使用頻率為早上 8 點到晚上 11 點。

建築物耗能可分為牆體的貫流熱及顯熱負荷兩種，取客廳及臥室的實驗模型分別就東、西、南、北四個方位的外牆及水平屋頂的部分進行討論。先透過彙整全年或者冷氣使用季節(6-9 月)室內溫度超過 30°C 的過熱時數，來了解牆體和屋頂的蓄熱能力對傳入熱量的延遲作用，並針對客廳及臥室的貫流熱及顯熱負荷討論熱質量在住宅的運作機制，進一步改變熱惰性對自然通風熱舒適的影響，並討論改變熱惰性對住宅空調能耗的影響；最後對住宅提出外牆及屋頂在隔熱與蓄熱性能在住宅空調能耗的等效性。

第二節 熱質量在住宅的運作機制

我們以頂樓的住戶的客廳和主臥室作為模擬對象，來說明牆體熱惰性對住宅建築的運作機制，以及其對熱舒適以及空調負荷的影響。對於模擬住家外牆的選擇上，選用如表 4-1 所示的輕質量金屬帷幕外牆及屋頂，以及重質量混凝土外牆及屋頂。及屋頂的組成材料。為了比較牆體在其它條件均相同的情況下，不同的熱惰性對住家熱舒適以及空調負荷的影響，表 4-1 所示選用的兩種外牆有不同的材料組成和熱力性質，但是有相同的 U 值。

客廳和臥室各分別選定四種使用模式，說明如表 4-2。其中客廳 18:00~23:00 和臥室 19:00~07:00 使用時間是模擬上班族白天上班，晚上下班後的客廳和臥室使用情形。另外，客廳 8:00~23:00 和臥室全天使用是模擬非上班族(小孩或退休族等)的使用情形。

表 4-1 兩種類型外牆與屋頂的材料組成與熱力性質

構造	材料	厚度 (mm)	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kg-K)	熱導係數 (W/m-K)	U值 (W/ m ² K)	D值 [-]	
輕 質 量 住 宅	外 牆	鋼材	8	7824	500	45.28	1.84	0.54
		隔熱材	12.7	43	1210	0.03		
		石膏板	19	800	1090	0.16		
	屋 頂	鋼材	8	7824	500	45.28	0.86	0.62
		隔熱材	25.4	43	1210	0.03		
		岩棉吸音板	19.1	368	590	0.06		
重 質 量 住 宅	外 牆	面磚	12.7	1920	1260	1.59	1.84	2.32
		混凝土	203.2	2240	900	1.95		
		隔熱材	9.34	43	1210	0.03		
		石膏板	19	800	1090	0.16		
	屋 頂	面磚	12.7	1920	1260	1.59	0.86	2.46
		隔熱材	22.0	43	1210	0.03		
		混凝土	203.2	2240	900	1.95		
		砂漿	19.1	368	590	0.06		

(資料來源：本研究彙整)

表 4-2 客廳和臥室選定的四種使用模式

	環境控制	有人使用	說明
客廳	空調運行	08:00-23:00	6-9月每日使用時間內空調運行，設定溫度為26°C。 無人時空調停止運轉。
		18:00-23:00	
	自然通風	08:00-23:00	全年使用時間內門窗全開，無人時門窗關閉。 自然通風量由EnergyPlus根據風向和風速逐時計算。
		18:00-23:00	
臥室	空調運行	00:00-24:00	同上
		19:00-07:00	
	自然通風	00:00-24:00	同上
		19:00-07:00	

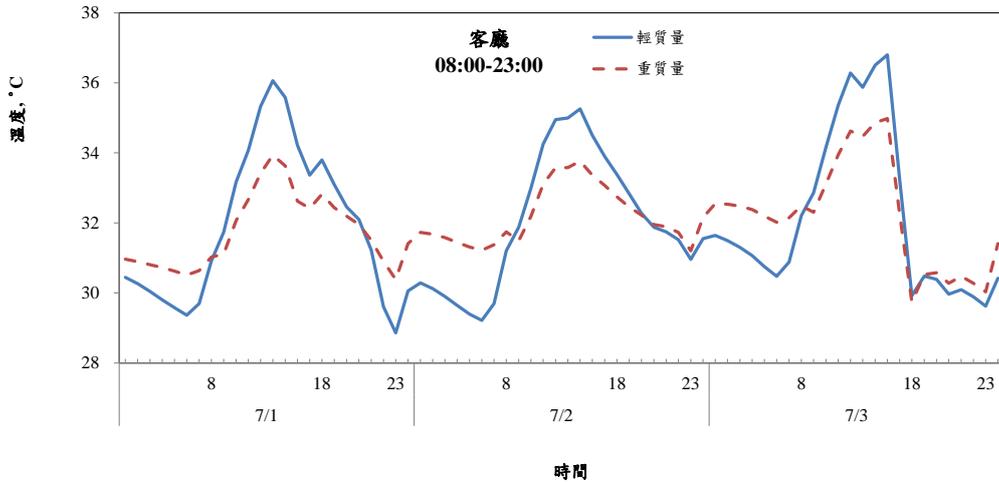
(資料來源：本研究彙整)

1. 客廳

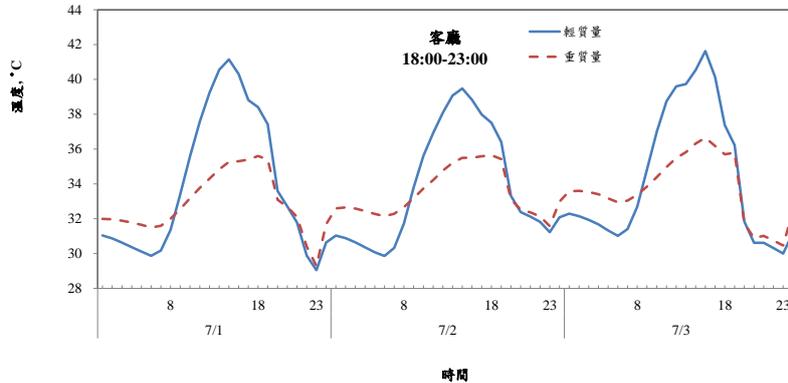
圖 4-1 顯示重質量和輕質量兩種構造的客廳採用自然通風的模式下，室內溫度在 7/1~7/3 的逐時變化。在 08:00~23:00 的使用模式中(圖 4-3(a))，重質量客廳藉由牆體和屋頂的蓄熱能力對傳入熱量產生的削減與延遲作用，可以看到在白天 08:00~18:00 時段，其室內溫度明顯比輕熱質量客廳的室溫低。在夜間 18:00-23:00 時段，重熱質量客廳牆體和屋頂的蓄存的熱量開始釋放，使得內溫度升高。但是因為此時客廳的門窗是全開的，有足夠的通風能將釋放的熱量帶走，所以重質量客廳的室溫僅稍微比輕質量客廳的溫度略高一些。到了深夜以後(23:00~08:00)，牆體和屋頂的蓄存的熱量繼續釋放，但是此時門窗全關閉，從牆體和屋頂釋放的熱量，無法順利排到室外，而蓄積在客廳內，造成溫度升高，所以可以看到在 23:00~08:00 這段時間，重熱質量的客廳有較高的室內溫度。不過此時客廳已經沒有人，並不會造成居住者熱不舒適的困擾。

在圖 4-1(b)的 08:00~23:00 的使用模式中，客廳溫度的變化比較，基本上也是呈現白天時段重質量客廳溫度較低，在深夜到清晨時段重質量客廳的室溫較高，不過這兩個時段客廳基本上是沒人在使用，在有人使用的時段(18:00-23:00)，因為自然通風量足夠的關係，重質量和輕質量客廳的室溫差異不大。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討



(a) 08:00-23:00



(b) 18:00-23:00

圖 4-1 重質量和輕質量客廳自然通風下，室內溫度的變化

(資料來源：本研究繪製)

圖 4-2 彙整了重質量和輕質量客廳自然通風下，全年或者冷氣使用季節(6-9 月)室內溫度超過 30°C 的過熱時數。從過熱時數的統計結果，可以看到重質量客廳因為牆體和屋頂的蓄熱能力對傳入熱量的延遲作用，使得其不論是全年或者 6-9 月的總過熱時數都比輕質量客廳的總過熱時數高。

但是若是觀察圖 4-3 重質量和輕質量客廳自然通風下，室內溫度的過熱嚴重度的統計結果，可以發現除了 18:00-23:00 使用模式在 6-9 月的過熱嚴重度外，其他三種情況的過熱重度統計結果，都顯示重質量客廳因為牆體和屋頂蓄熱能力

的削減與延遲作用，對傳入熱量產生攤平的效果，而有較低的過熱嚴重度。

在圖 4-2~4-3 中，我們可以看到客廳的過熱時數或者過熱嚴重度，主要是發生在 6-9 月的空調使用季節。圖 4-4 是重質量和輕質量客廳使用空調下，室內顯熱負荷在 7/1~7/3 的逐時變化。由於熱質量的削減和延遲效果，使得重質量客廳在 08:00~18:00 有較低的空調顯熱負荷，但是在 18:00~23:00 卻有較高的空調顯熱負荷。模擬的結果顯示(圖 4-7)：6-9 月的空調顯熱負荷總和在 08:00~23:00 使用模式重質量客廳為 6189 MJ，相較輕質量客廳的 6720 MJ 減少了 8%；但是在 18:00~23:00 使用模式中，重質量客廳的 3055 MJ 比輕質量客廳的 2822 MJ 增加了 8%。

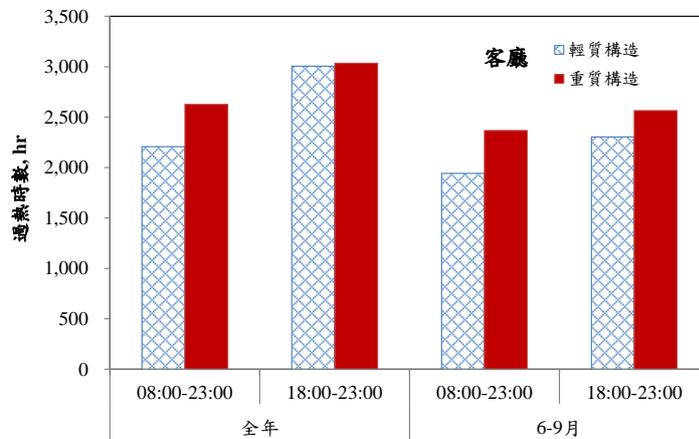


圖 4-2 輕、重質量客廳在自然通風下室溫過熱時數

(資料來源：本研究繪製)

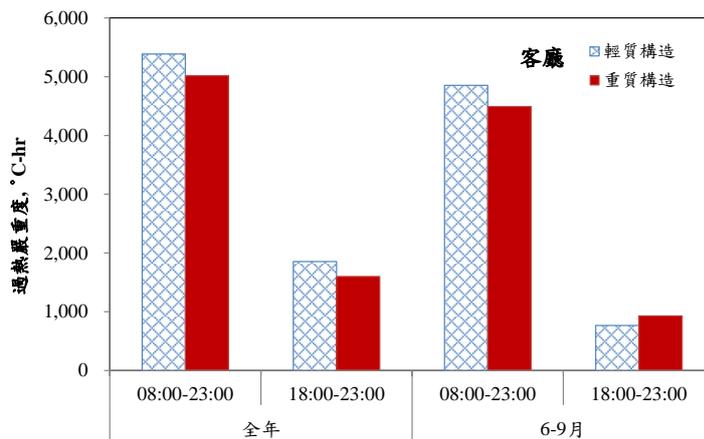


圖 4-3 輕、重質量客廳在自然通風下，室溫過熱嚴重度

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

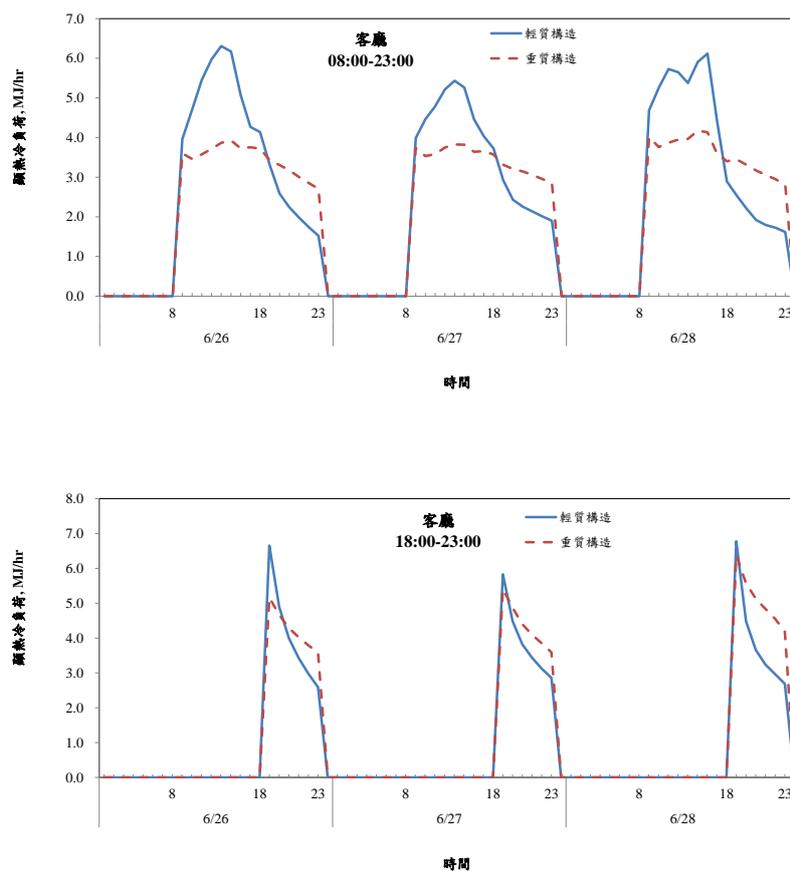


圖 4-4 輕、重質量客廳在 7/1~7/3 逐時顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

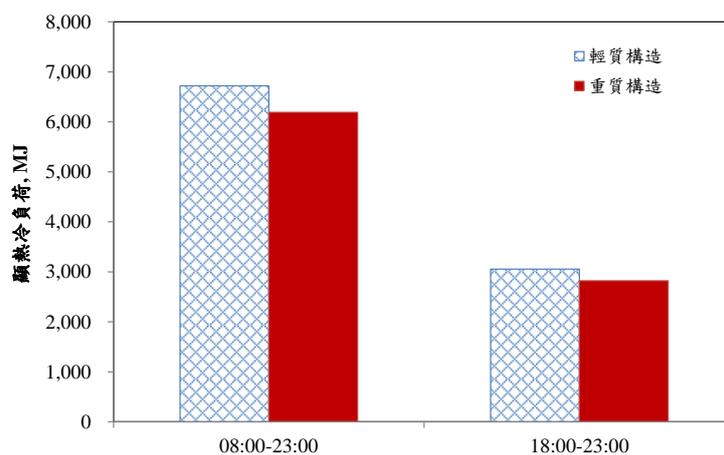


圖 4-5 輕、重質量客廳在 6-9 月空調顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

2. 臥室

圖 4-6 顯示重質量和輕質量臥室採用自然通風的模式下，室內溫度在 7/1~7/3 的逐時變化。在 00:00~24:00 全天空使用的模式中(圖 4-6)，可以看到重質量臥室因牆體和屋頂蓄熱能力的削減與延遲作用，在白天 08:00~19:00 時段，其室內溫度明顯比輕熱質量臥室的室溫低約 4°C；在夜間 19:00-08:00 時段，其室溫較輕質量客廳的溫度高 1°C 左右。在圖 4-6 的 19:00~07:00 的使用模式中，基本上在有人居住的時段內也是呈現重質量的臥室呈現有較高的室溫。

圖 4-7 彙整了重質量和輕質量臥室自然通風下，全年或者冷氣使用季節(6-9 月)室內溫度超過 30°C 的過熱時數。從過熱時數的統計結果，可以看到重質量臥室不論是全年或者 6-9 月的總過熱時數都比輕質量客廳的總過熱時數高。但是若是觀察圖 4-8 可以發現在 19:00-07:00 使用模式，重質量臥室有較高的過熱嚴重度，但在 00:00~24:00 使用模式，重質量臥室有較低的過熱嚴重度。

圖 4-9 是重質量和輕質量臥室使用空調下，室內顯熱負荷在 7/1~7/3 的逐時變化。由於熱質量的削減和延遲效果，和客廳一樣，重質量客廳在 08:00~18:00 有較低的空調顯熱負荷，但是在 19:00~07:00 卻有較高的空調顯熱負荷。模擬的結果顯示(圖 4-10)：6-9 月的空調顯熱負荷總和在 00:00~24:00 使用模式重質量客廳為 4716 MJ，較輕質量客廳的 4696 MJ，略為增加 0.5%；但是在 19:00~07:00 使用模式，重質量客廳的 2886 MJ 比輕質量客廳的 2141 MJ 增加了 35%。

在圖 4-11 中，我們可以看到由於熱質量的削減和延遲效果，使得當客廳採用空調運行，不論是在 08:00~23:00 或者 18:00~23:00 的使用時間模式，重質量構造的客廳都有較低的空調顯熱負荷。模擬的結果顯示：重質量客廳在 6-9 月的空調顯熱負荷只有輕質量客廳的 92%。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

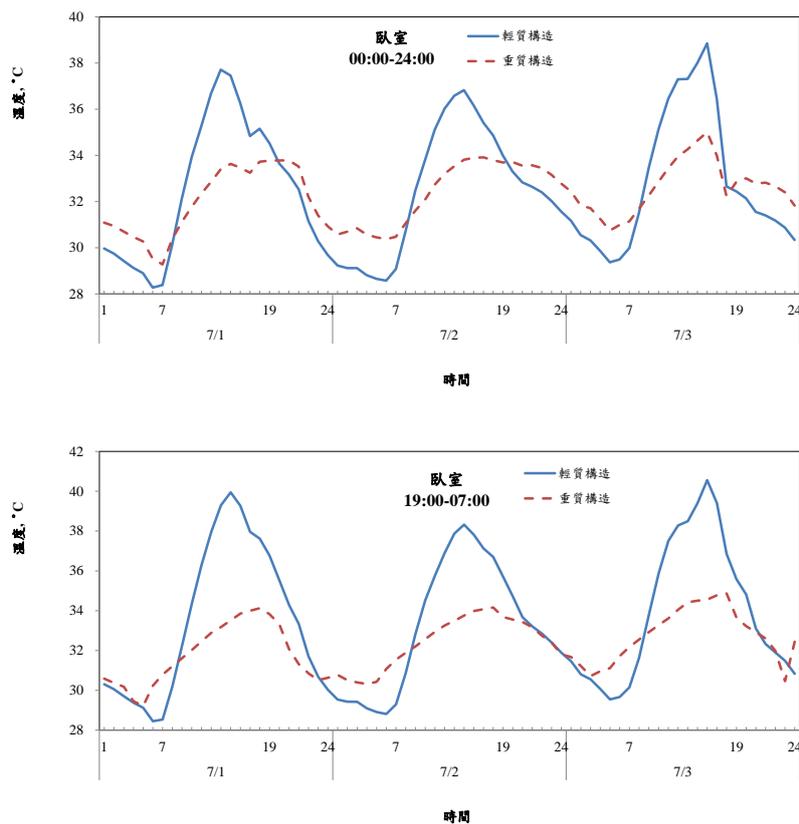


圖 4-6 輕、重質量臥室在自然通風下室溫變化

(資料來源：本研究繪製)

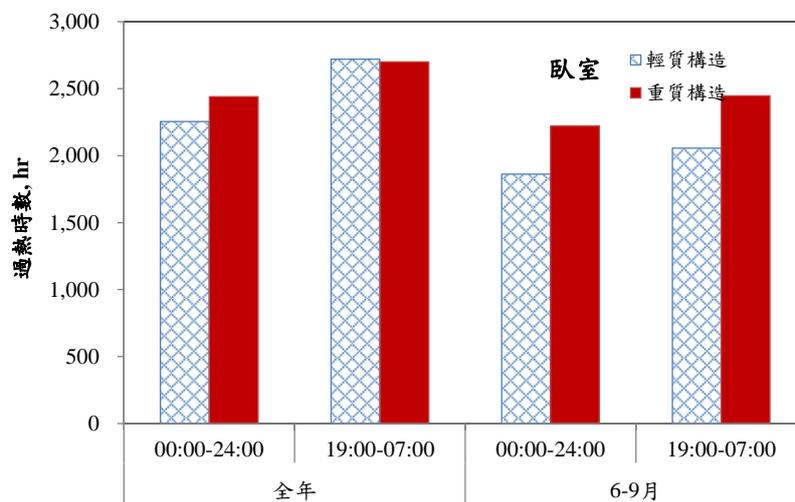


圖 4-7 輕、重質量臥室在自然通風下室溫過熱時數

(資料來源：本研究繪製)

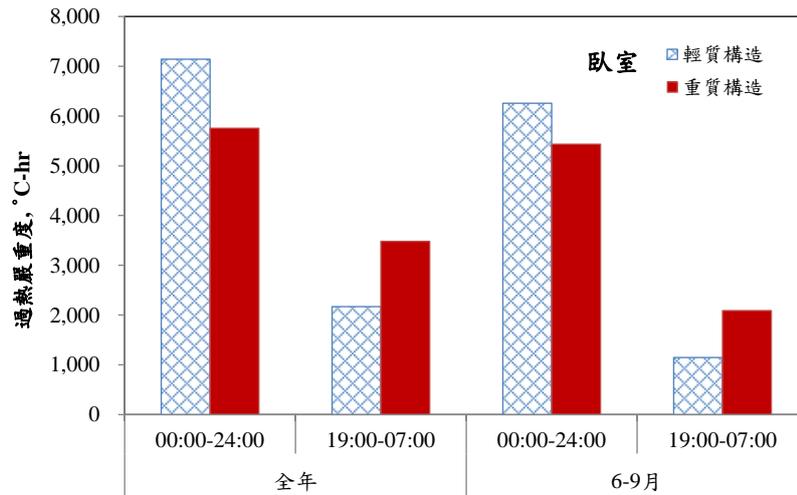


圖 4-8 輕、重質量臥室在自然通風下室溫過熱嚴重度

(資料來源：本研究繪製)

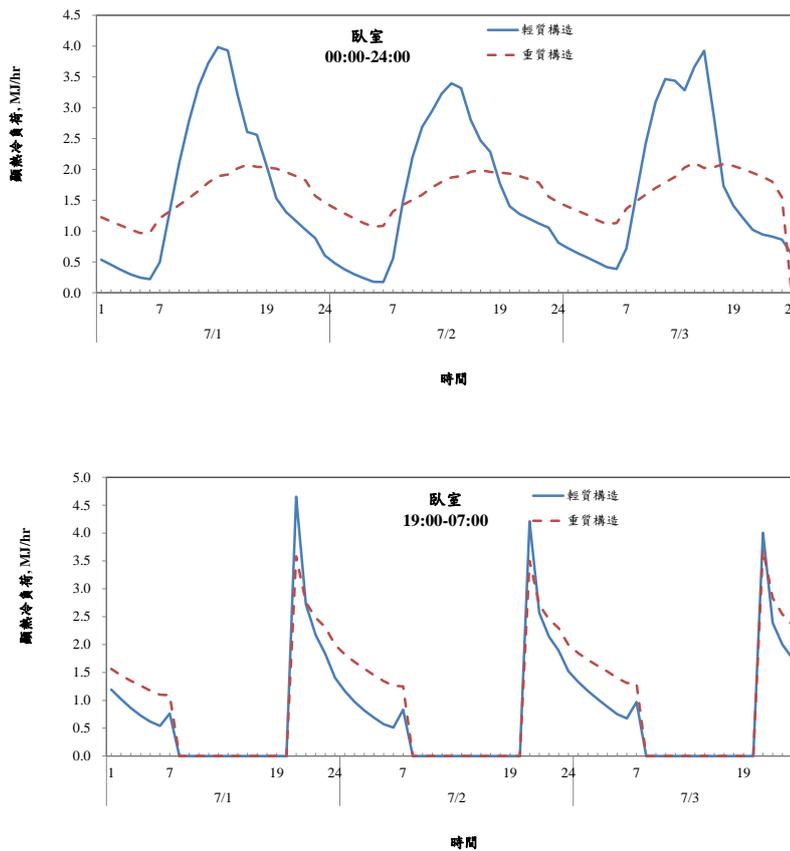


圖 4-9 輕、重質量臥室在 7/1~7/3 逐時顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

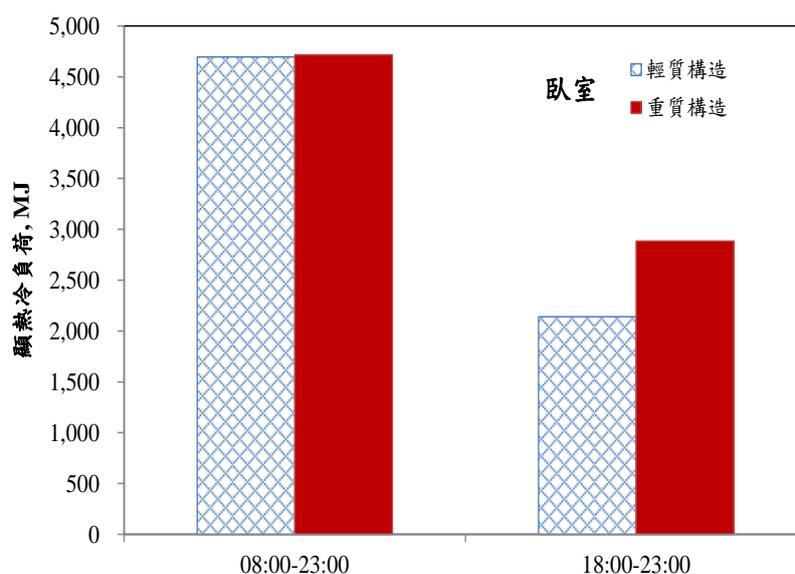


圖 4-10 輕、重質量臥室在 6-9 月空調顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

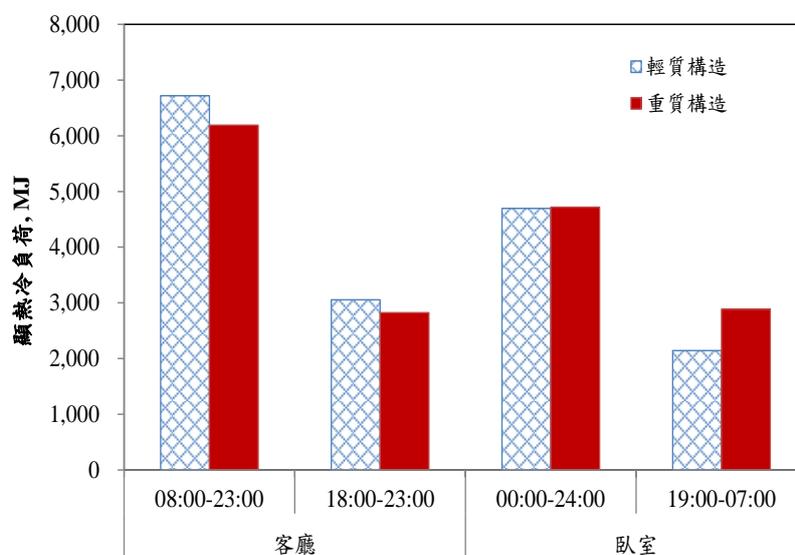


圖 4-11 客廳及臥室在不同模式的空調顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

第三節 改變熱惰性對自然通風熱舒適的影響

在這一節我們藉由表 4-3 所示之 U 值固定在 $2.0 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ 、熱惰性指標(D 值)從 0.2 到 4.2 的五種外牆組合，來闡明改變熱質量在對自然通風住宅熱舒適影響。

表 4-3 U 值 $=2.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 下，五種模擬組合的蓄熱能力說明

編號	A	B	C	D	E
隔熱厚度(mm)	10.0	7.8	5.7	3.5	1.4
蓄熱厚度(mm)	0	100	200	300	400
U 值($\text{W/m}^2 \text{ K}$)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
D 值(-)	0.2	1.2	2.2	3.2	4.2

(資料來源：本研究彙整)

透表 4-3 的五種外牆組合，進行外牆的性能模擬，如表 4-4~4-6 為彙整了各向的客廳和臥室位於非屋頂層以及屋頂層的模擬數據和經歷台北、台中和高雄三區的氣候，於 6-9 月當不同的使用情境：(1)客廳:08:00~23:00 (全日使用)、(2)客廳:17:00~23:00 (下班使用)、(3)臥室:00:00~24:00 (全日使用)、(4)臥室:19:00~07:00 (下班使用)時，統計出在客廳與臥室的過熱時數(即室內溫度超過 30°C 的總時數)，以及過熱嚴重度(即室溫超過 30°C 的度時總合)。

為了幫助理解，我們以各方位使用無熱質量構造的客廳或臥室做為比較基準，分別計算使用具有不同 D 值構造的客廳或臥室其過熱時數與過熱嚴重度與基準的差異，即 Δ 過熱時數和 Δ 過熱嚴重度。若 Δ 過熱時數或 Δ 過熱嚴重度 >0 ，則表示增加圍護結構的 D 值，是會降低室內的熱舒適程度。反之，若 Δ 過熱時數或 Δ 過熱嚴重度 <0 ，則表示會促進室內的熱舒適程度。 Δ 過熱時數和 Δ 過熱嚴重度計算的結果如圖 4-12~4-14。

從圖 4-12~4-14 中可以看到不論是客廳或者是臥室，在 U 值固定下，增加圍

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

圍護結構的 D 值，是會增加室內溫度 6-9 月的過熱時數。而且臥室 Δ 過熱時數隨著圍護結構 D 值的增加而增加的趨勢，遠較客廳明顯。然而，圖 4-12~4-14 也顯示，除了臥室下班使用(19:00~07:00)的情境外，其他的客廳全日使用(08:00~23:00)、客廳下班使用(17:00~23:00) 和臥室全日使用(00:00~24:00)三種情境增加圍護結構的 D 值都得到 Δ 過熱嚴重度 < 0 的情形，這表示在這三種使用情境下，增加圍護結構的熱質量是有助於減輕其室內的過熱不舒適度程度。特別是在白天有人使用的客廳全日使用和臥室全日使用的情境，利用增加圍護結構的 D 值來減緩室內的過熱嚴重是有效的。相反的，主要是夜間才有人使用的臥室下班使用(19:00~07:00)情境，增加圍護結構的 D 值卻得到 Δ 過熱嚴重度 > 0 的結果，表示增加圍護結構的熱質量是不利於減緩室內的過熱不舒適度程度。

而這樣的情形比較在不同的氣候區的過熱嚴重度，結果顯示在台北地區的情況(Δ 過熱嚴重度-600~-1000°C-hr)較台中地區(Δ 過熱嚴重度-500~-700°C-hr)及高雄地區(Δ 過熱嚴重度-200~-400°C-hr)來的明顯，顯示增加圍護結構的 D 值可以有效減緩室內的過熱嚴重度。

表 4-4 台北氣候下客廳與臥室的過熱時數及過熱嚴重度彙整

(a)過熱時數(單位：小時)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	1343	1350	1355	1362	1368	1364	1370	1377	1373	1369
南	東	1406	1409	1414	1417	1420	1318	1314	1320	1315	1314
西	南	1376	1375	1376	1379	1379	1367	1403	1408	1405	1402
西	北	1374	1385	1385	1391	1384	1313	1336	1337	1329	1326
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	471	471	470	469	468	497	501	511	508	508
南	東	512	518	517	518	513	455	457	460	457	455
西	南	489	505	497	491	493	527	538	535	528	527
西	北	492	514	503	499	497	469	486	480	478	473
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	1750	1801	1834	1835	1848	1910	1939	1954	1960	1971
南	東	1988	2073	2100	2107	2112	1784	1815	1835	1845	1848
西	南	1795	1992	2032	2061	2067	1899	2085	2123	2149	2137
西	北	1821	2038	2067	2097	2111	1794	1953	1976	2009	2009
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	589	649	658	661	651	724	790	790	786	783
南	東	769	849	856	866	863	660	721	728	737	742
西	南	650	831	849	854	853	759	925	944	944	919
西	北	664	850	874	884	876	687	834	854	855	850

(b)過熱嚴重度(單位：°C-hr)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	3206	2931	2896	2884	2890	3338	3121	3090	3083	3084
南	東	3459	3211	3157	3117	3122	3410	3225	3191	3178	3175
西	南	3856	3256	3152	3135	3131	3855	3427	3331	3305	3308
西	北	3932	3366	3236	3202	3194	3844	3432	3343	3316	3314
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	868	804	754	728	716	1076	1017	977	954	942
南	東	985	956	916	890	874	993	949	910	888	877
西	南	1189	1046	939	883	856	1406	1256	1156	1102	1073
西	北	1178	1072	974	921	890	1245	1131	1036	984	959
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	3007	2529	2433	2395	2383	3310	2924	2841	2805	2792
南	東	3657	3252	3136	3085	3062	3274	2860	2763	2723	2711
西	南	4307	3484	3330	3271	3257	4454	3887	3755	3705	3689
西	北	4502	3698	3512	3438	3410	4303	3700	3560	3506	3492
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	640	660	614	575	545	813	882	853	824	792
南	東	883	975	956	931	906	730	794	769	742	719
西	南	986	1164	1111	1054	1006	1160	1442	1408	1362	1315
西	北	988	1202	1168	1123	1077	1013	1267	1240	1200	1159

(資料來源：本研究彙整)

表 4-5 台中氣候下客廳與臥室的過熱時數及過熱嚴重度彙整

(a)過熱時數(單位：小時)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	1422	1434	1430	1433	1432	1488	1493	1506	1502	1499
南	東	1447	1458	1452	1468	1461	1504	1515	1528	1529	1531
西	南	1427	1455	1472	1473	1469	1498	1521	1533	1536	1543
西	北	1440	1462	1468	1475	1472	1519	1544	1556	1559	1564
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	498	503	501	497	490	554	558	558	553	551
南	東	516	520	519	516	515	539	547	545	546	543
西	南	526	536	531	526	523	565	578	574	576	573
西	北	522	536	534	530	524	558	571	571	569	566
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	1863	1955	1953	1950	1964	2073	2097	2117	2130	2137
南	東	2019	2062	2073	2074	2075	2073	2112	2133	2127	2140
西	南	1877	2147	2190	2220	2235	2065	2276	2333	2355	2373
西	北	1881	2161	2217	2235	2253	2078	2314	2356	2392	2413
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	669	756	748	748	731	803	852	860	856	848
南	東	738	804	810	814	802	778	830	837	824	815
西	南	748	956	983	980	968	851	1024	1049	1059	1064
西	北	729	955	984	987	976	852	1025	1051	1060	1061

(b)過熱嚴重度(單位：°C-hr)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	2908	2707	2664	2663	2667	3230	3083	3060	3053	3057
南	東	3104	2913	2852	2835	2825	3701	3527	3497	3487	3492
西	南	3560	3103	3019	3001	3012	3819	3457	3391	3374	3383
西	北	3600	3134	3026	2995	2994	4450	3930	3848	3830	3842
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	872	772	710	685	677	1295	1195	1147	1122	1112
南	東	905	857	813	787	774	1253	1183	1131	1106	1096
西	南	1343	1099	975	913	890	1796	1519	1404	1342	1315
西	北	1247	1081	972	914	887	1681	1485	1364	1300	1273
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	2963	2590	2515	2490	2495	3376	3074	3004	2977	2974
南	東	3288	2947	2835	2787	2770	3663	3309	3204	3163	3152
西	南	4264	3749	3626	3587	3589	4616	4280	4186	4154	4153
西	北	4249	3760	3615	3557	3547	5144	4599	4456	4404	4403
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	629	697	657	623	598	861	946	916	878	841
南	東	710	806	787	763	738	892	968	933	900	873
西	南	1106	1389	1333	1274	1227	1384	1720	1670	1621	1571
西	北	1007	1310	1280	1239	1199	1416	1746	1700	1641	1589

(資料來源：本研究彙整)

表 4-6 高雄氣候下客廳與臥室的過熱時數及過熱嚴重度彙整

(a)過熱時數(單位：小時)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	1423	1448	1453	1448	1445	1483	1496	1490	1491	1492
南	東	1459	1472	1468	1468	1466	1493	1500	1504	1506	1505
西	南	1436	1485	1485	1487	1484	1498	1533	1530	1529	1527
西	北	1435	1480	1481	1484	1482	1508	1537	1535	1534	1532
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	525	528	525	526	524	587	606	605	604	599
南	東	535	537	536	533	530	563	568	568	562	562
西	南	545	565	561	554	545	608	625	626	625	622
西	北	540	558	556	549	544	579	595	591	590	587
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	2000	2160	2196	2204	2198	2131	2253	2276	2292	2292
南	東	1998	2103	2129	2132	2123	2063	2172	2192	2205	2201
西	南	1964	2297	2323	2342	2327	2123	2397	2427	2434	2438
西	北	1951	2284	2316	2330	2322	2070	2332	2359	2355	2354
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	789	908	935	945	945	924	1014	1042	1043	1046
南	東	751	832	844	851	836	801	887	907	911	902
西	南	849	1081	1104	1101	1092	971	1170	1189	1199	1202
西	北	826	1065	1091	1092	1085	905	1096	1106	1114	1112

(b)過熱嚴重度(單位：°C-hr)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	2454	2357	2325	2317	2323	2668	2595	2575	2565	2563
南	東	2449	2364	2317	2312	2303	2983	2875	2847	2837	2835
西	南	2962	2683	2610	2592	2591	3143	2925	2864	2841	2841
西	北	2941	2688	2597	2578	2561	3586	3242	3168	3142	3144
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	836	751	698	678	668	1252	1180	1139	1118	1109
南	東	757	721	693	674	666	1125	1078	1033	1011	1004
西	南	1245	1057	939	883	868	1708	1492	1388	1328	1301
西	北	1156	1024	926	874	856	1510	1359	1251	1195	1170
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	2806	2650	2619	2614	2612	3043	2997	2976	2960	2950
南	東	2727	2546	2484	2459	2447	3143	2959	2895	2866	2855
西	南	3773	3606	3565	3550	3543	3986	4015	3997	3978	3962
西	北	3727	3549	3501	3479	3466	4303	4024	3946	3912	3898
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	681	772	744	720	700	955	1066	1046	1021	997
南	東	598	675	662	647	630	803	867	842	816	794
西	南	1089	1428	1411	1381	1343	1448	1853	1839	1804	1761
西	北	995	1340	1348	1323	1293	1276	1600	1575	1533	1494

(資料來源：本研究彙整)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

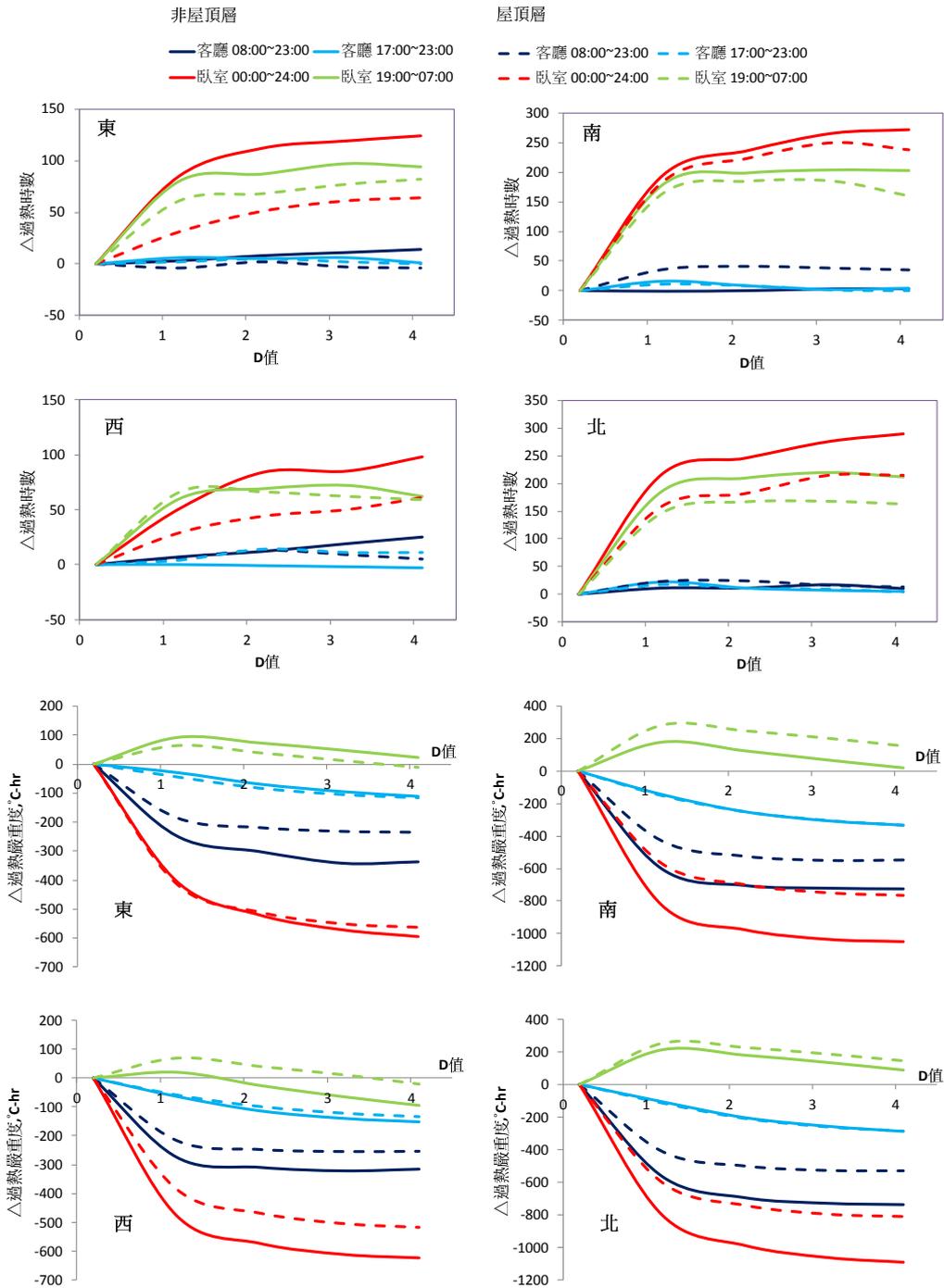


圖 4-12 台北地區 D 值對△過熱時數和△過熱嚴重度影響

(資料來源：本研究繪製)

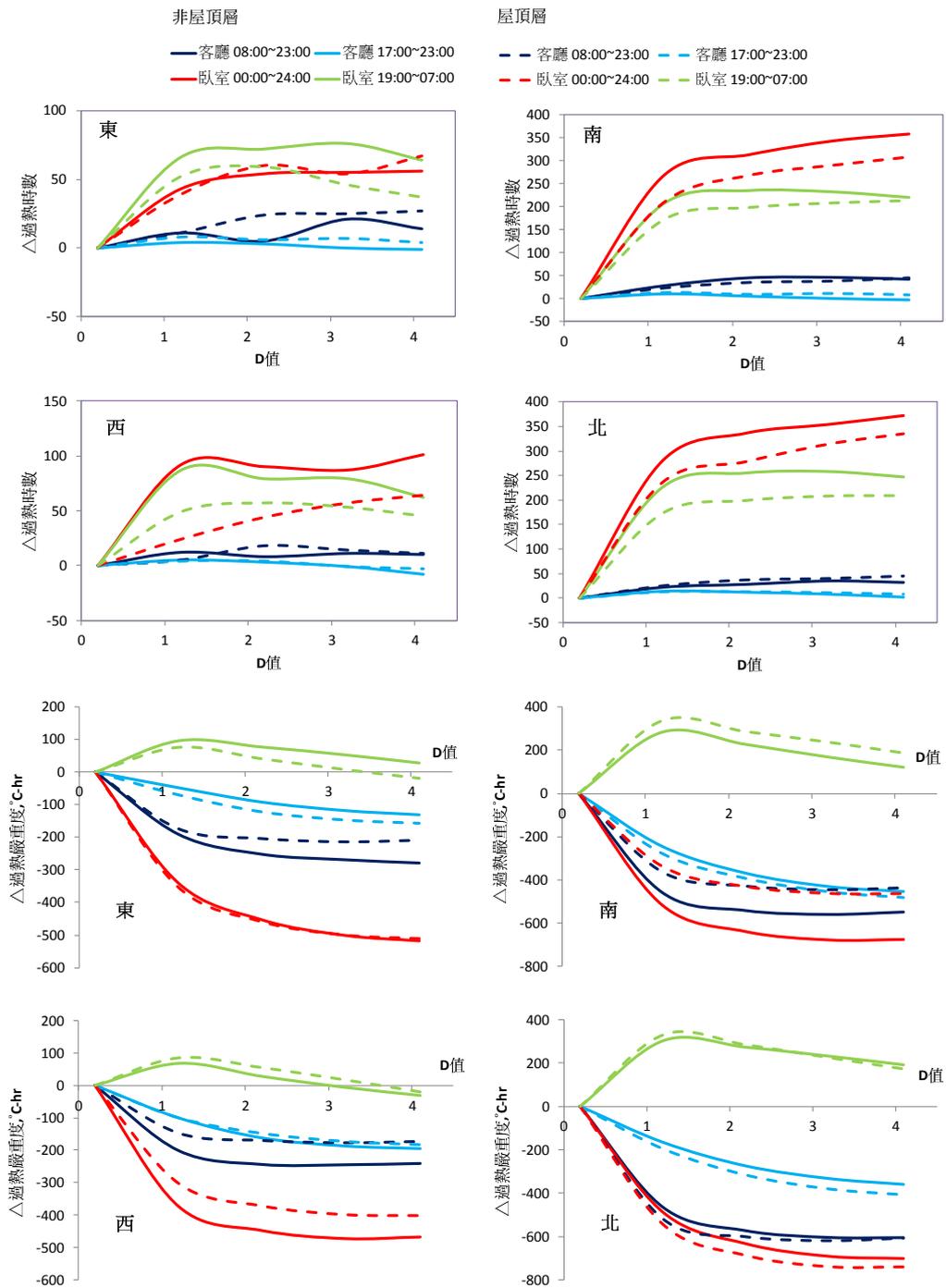


圖 4-13 台中地區 D 值對 Δ 過熱時數和 Δ 過熱嚴重度影響

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

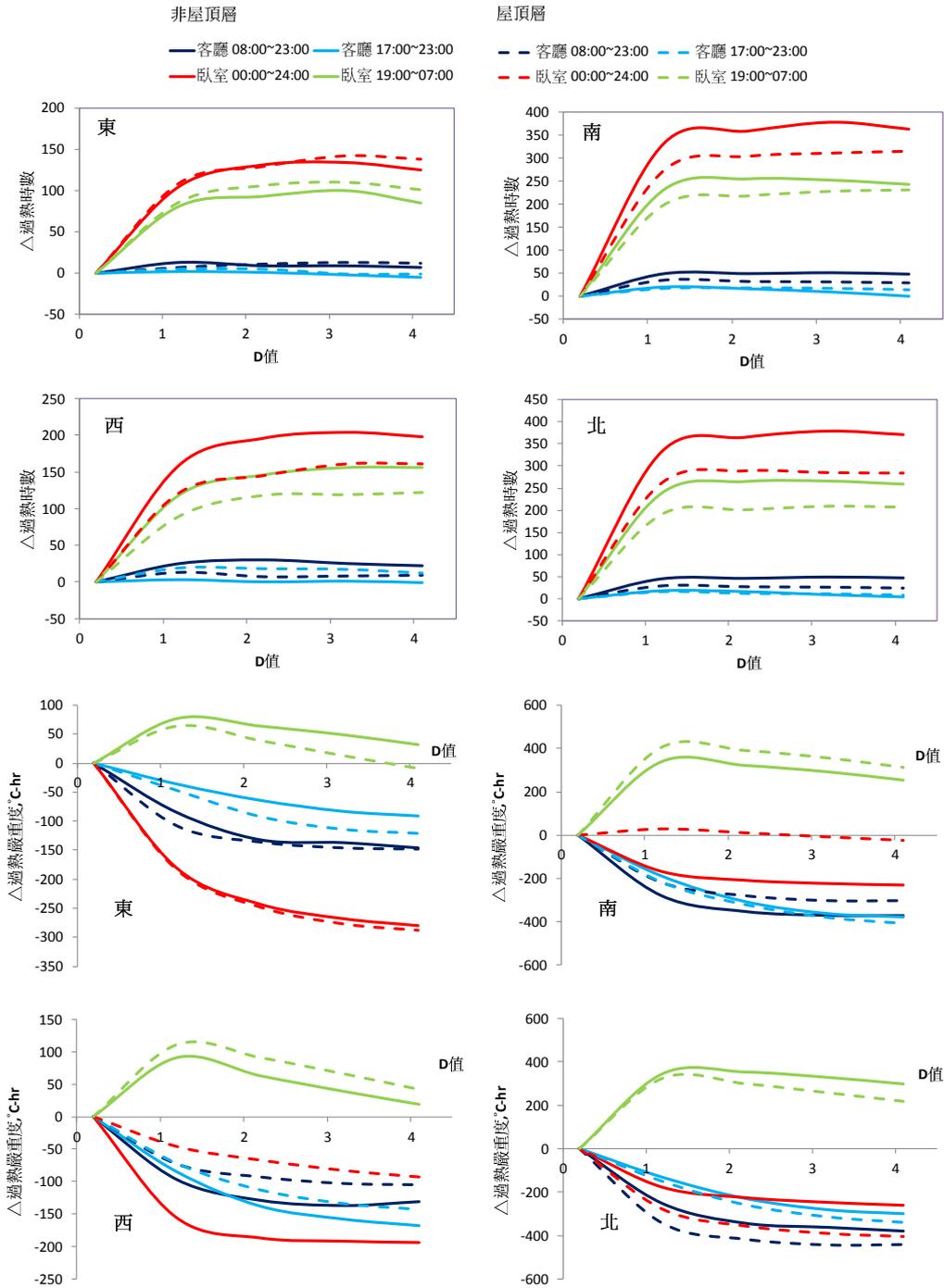


圖 4-14 高雄地區 D 值對△過熱時數和△過熱嚴重度影響

(資料來源：本研究繪製)

第四節 改變熱惰性對住宅空調能耗的影響

高 D 值的牆體對貫流熱有很好的轉移效果，但是被轉移的貫流熱，若是剛好轉到空間有人使用的時間，就不見得有利。譬如對臥室而言，通常上班日白天沒人，晚上才有人，若是將白天的貫流熱轉到夜間，就有可能反而增加空調負荷。表 4-17 彙整了於非屋頂層以及屋頂層客廳和臥室和經歷台北、台中和高雄三區的氣候，於 6-9 月當不同的使用情境：(1)客廳 08:00~23:00 (全日使用)、(2)客廳 17:00~23:00 (下班使用)、(3)臥室 00:00~24:00 (全日使用)、(4)臥室 19:00~07:00 (下班使用)時，客廳與臥室的空調顯熱負荷。

同樣我們以使用無熱質量構造的客廳或臥室做為比較基準，來幫助理解 D 值對住宅空調能耗的影響。首先，分別計算使用具有不同 D 質構造的客廳或臥室其顯熱負荷與基準的差異，即 Δ 顯熱負荷。若 Δ 顯熱負荷 >0 ，則表示增加圍護結構的 D 值，是會增加空調能耗。反之，若 Δ 顯熱負荷 <0 ，則表示可以減少空調能耗。 Δ 顯熱負荷計算的結果如表 4-7 彙整不同氣候區在非屋頂層及屋頂層 6-9 月的顯熱負荷。

從圖 4-15~4-17 中可以看到在 U 值固定下，增加圍護結構的 D 值，對空調住宅 6-9 月的能耗有不同的結果。

- (1) 在臥室下班使用(19:00~07:00)情境下，增加 D 值反而會增加空調顯熱負荷。
- (2) 在臥室全日使用(00:00~24:00)情境下，增加 D 值對空調顯熱負荷沒有影響。
- (3) 在客廳下班使用(17:00~23:00)情境下，對一開始增加 D 值會增加空調顯熱負荷，但是若是 D 值增加到一定程度後，空調顯熱負荷會隨著降低。
- (4) 在客廳全日使用(08:00~23:00)情境下，增加 D 值會可以降低空調顯熱負荷。

表 4-7 客廳與臥室的 6-9 月顯熱負荷彙整

(a) 台北氣候(單位：MJ)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	4650	4550	4506	4497	4496	5009	4914	4870	4860	4856
南	東	4761	4671	4619	4604	4595	5408	5323	5281	5267	5262
西	南	6112	5736	5603	5555	5541	6570	6188	6059	6008	5991
西	北	6226	5863	5721	5663	5641	6829	6467	6333	6281	6265
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	2338	2393	2333	2299	2282	2680	2725	2673	2640	2620
南	東	2363	2448	2404	2375	2355	2691	2782	2721	2690	2673
西	南	2901	3014	2885	2815	2767	3272	3357	3227	3157	3110
西	北	2908	3060	2946	2881	2834	3164	3332	3218	3134	3084
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	3108	3111	3107	3108	3105	3150	3152	3147	3147	3142
南	東	3206	3208	3203	3203	3197	3273	3274	3270	3270	3265
西	南	4203	4206	4198	4197	4189	4289	4292	4283	4281	4272
西	北	4317	4319	4310	4308	4297	4394	4397	4387	4385	4375
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	1706	1880	1889	1881	1866	1761	1927	1934	1928	1914
南	東	1750	1935	1957	1957	1945	1782	1963	1982	1980	1969
西	南	2136	2636	2666	2656	2626	2206	2703	2731	2723	2697
西	北	2163	2689	2734	2735	2708	2205	2726	2767	2763	2737

(b) 台中氣候(單位：MJ)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	4846	4725	4675	4666	4673	5553	5443	5399	5386	5383
南	東	4810	4708	4655	4637	4635	5555	5457	5414	5403	5405
西	南	6622	6161	6022	5984	5987	7451	6984	6855	6819	6822
西	北	6609	6178	6035	5990	5980	7306	6876	6737	6691	6690
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	2511	2548	2470	2432	2416	3128	3150	3086	3053	3037
南	東	2413	2493	2445	2415	2399	2820	2910	2836	2804	2791
西	南	3261	3335	3169	3089	3043	3937	3957	3799	3725	3683
西	北	3158	3294	3159	3094	3047	3471	3628	3492	3403	3357
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	3264	3267	3264	3268	3269	3342	3344	3340	3342	3342
南	東	3218	3221	3218	3221	3220	3302	3304	3303	3306	3306
西	南	4550	4561	4559	4571	4578	4686	4696	4694	4704	4709
西	北	4544	4555	4553	4563	4566	4637	4648	4646	4656	4659
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	1809	2013	2023	2015	2002	1892	2080	2091	2087	2075
南	東	1734	1941	1968	1972	1964	1791	1988	2012	2014	2007
西	南	2332	2923	2956	2948	2922	2444	3020	3051	3052	3030
西	北	2274	2873	2927	2933	2914	2336	2927	2975	2977	2958

(c) 高雄氣候(單位：MJ)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	4918	4816	4773	4767	4771	5562	5474	5435	5423	5425
南	東	4826	4744	4699	4686	4681	5473	5397	5359	5349	5348
西	南	6593	6199	6067	6029	6033	7363	6967	6850	6817	6811
西	北	6532	6166	6035	5989	5982	7122	6763	6631	6589	6588
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	2541	2595	2525	2493	2480	3105	3142	3089	3060	3047
南	東	2417	2505	2465	2442	2427	2779	2870	2808	2783	2771
西	南	3211	3325	3185	3111	3068	3850	3904	3765	3704	3668
西	北	3097	3259	3149	3088	3045	3371	3548	3431	3352	3311
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	3358	3361	3358	3363	3364	3411	3413	3409	3412	3412
南	東	3269	3271	3267	3270	3268	3353	3355	3352	3354	3354
西	南	4611	4622	4619	4632	4639	4725	4735	4732	4743	4749
西	北	4561	4570	4567	4577	4580	4643	4652	4649	4658	4662
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	1896	2083	2093	2089	2079	1961	2127	2140	2138	2130
南	東	1795	1978	2002	2008	2001	1858	2032	2053	2056	2051
西	南	2425	2955	2987	2983	2962	2519	3033	3066	3069	3052
西	北	2347	2876	2925	2934	2918	2405	2925	2970	2975	2960

(資料來源：本研究彙整)

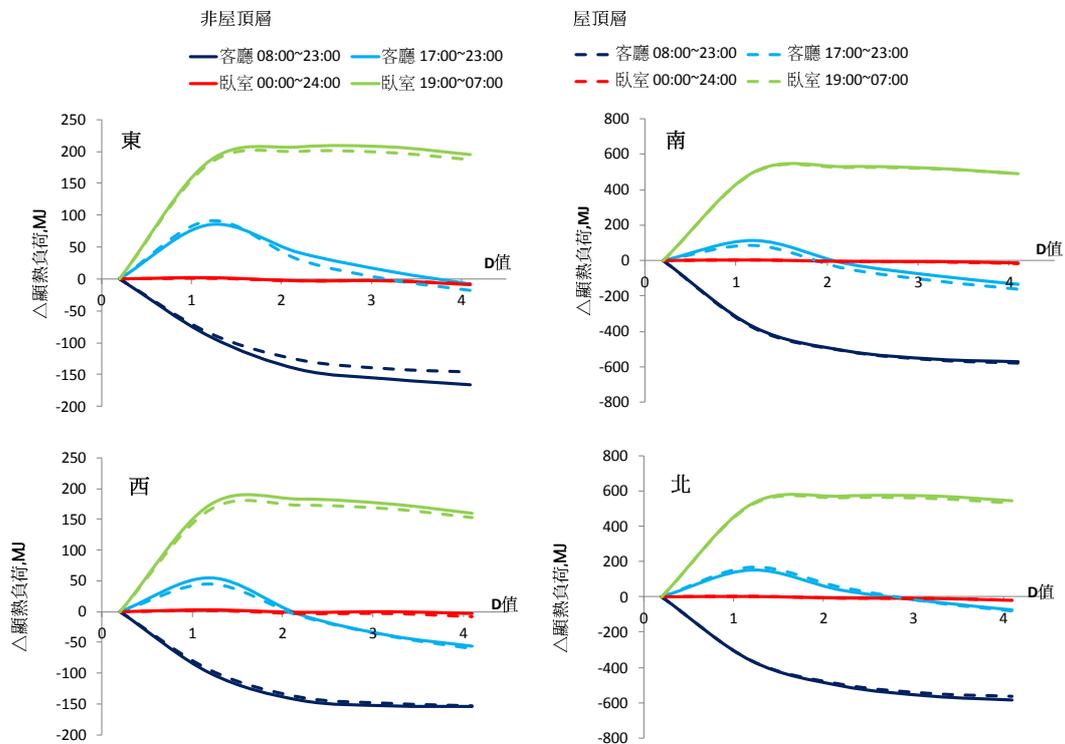


圖 4-15 台北地區 D 值對 Δ 顯熱負荷的影響

(資料來源：本研究繪製)

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

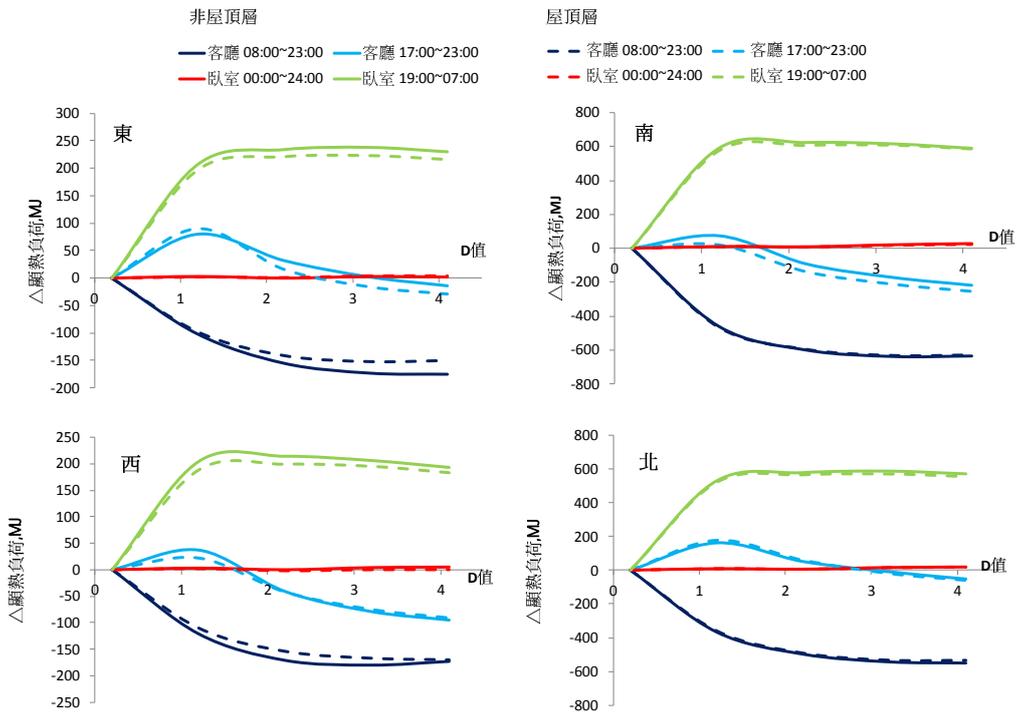


圖 4-16 台中地區 D 值對 Δ 顯熱負荷的影響

(資料來源：本研究繪製)

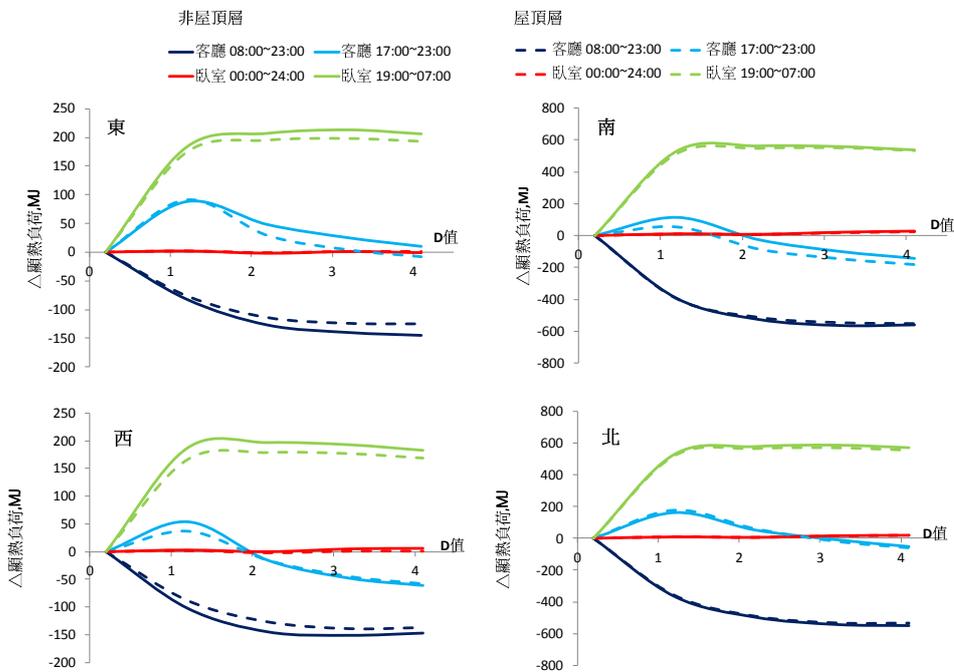


圖 4-17 台中地區 D 值對 Δ 顯熱負荷的影響

(資料來源：本研究繪製)

第五節 隔熱與蓄熱性能在住宅空調能耗等效性

在前面一節，我們以 U 值固定在 $2.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 下，改變牆體或屋頂的蓄熱能力 D 值的方式，探討牆體蓄熱能力對住宅空調負荷的影響。分析結果發現牆體和屋頂的 D 值在客廳全天空使用(08:00-23:00)情境中，才具有與 U 值一樣具有降低空調負荷的效果；但是在客廳中下班使用空調的情境，以及在臥室中的全天空使用或者下班使用空調的情境下，並沒有降低空調負荷，甚至反而增加空調負荷的效果。有鑑於此，在這一節我們僅將對客廳全天空使用(08:00-23:00)情境，透過在同時變動牆體的隔熱能力和蓄熱能力，來觀察牆體的隔熱和蓄熱性能在降低全年顯熱負荷的等效性。

藉由改變隔熱材料的厚度和蓄熱材料(混凝土)的厚度，可以組合出如表 4-8 所示之有不同隔熱和蓄熱性能的 27 種外牆構造。這 27 種牆體的 U 值變動範圍為 $0.5\text{-}3.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ，D 值變動範圍為 0.2- 4.2。圖 4-18~4-23 彙整了這 27 種牆體組合在台北、台中和高雄住宅客廳單元顯熱負荷和過熱嚴重度的模擬結果。模擬結果揭露幾個重要現象：

1. 在一般住宅僅會在較炎熱的 6-9 月運行空調系統，在空調顯熱負荷的總合是隨著牆體 U 值的減少而減少。同樣，6-9 月的顯熱負荷總合也是隨著外殼的 D 值增加而降低。在某些情況住宅外的 U 值與 D 值對減少空調能耗存在等值效果，但是因為住宅類住宅的使用時間模式與辦公建築有所不同，所以統計結果發現其等值效果不若在辦公類來得明顯。
2. 對於住宅空間單元採用自然通風而言，在 6-9 月的室內過熱嚴重度是隨著牆體 U 值的減少而減少，而隨著外殼的 D 值增加而降低。對於自然通風住宅外殼的 U 值與 D 值舒緩室內過熱嚴重度存在等值效果，且其等值效果較空調能耗明顯。

表 4-8 不同隔熱和蓄熱性能的牆體組合

U 值 (W/m ² K)	厚度 (mm)	厚度				
		0.2	1.2	2.2	3.2	4.2
0.50	隔熱材	55	53	51	49	47
	混凝土	-	100	200	300	400
1.00	隔熱材	25	23	21	19	17
	蓄熱材	-	100	200	300	400
1.50	隔熱材	15	13	11	9	7
	蓄熱材	-	100	200	300	400
2.00	隔熱材	10	8	6	4	2
	蓄熱材	-	100	200	300	400
2.50	隔熱材	7	5	3	1	
	蓄熱材	-	100	200	300	
3.00	隔熱材	5	3	1		
	蓄熱材	-	100	200		

(資料來源：本研究彙整)

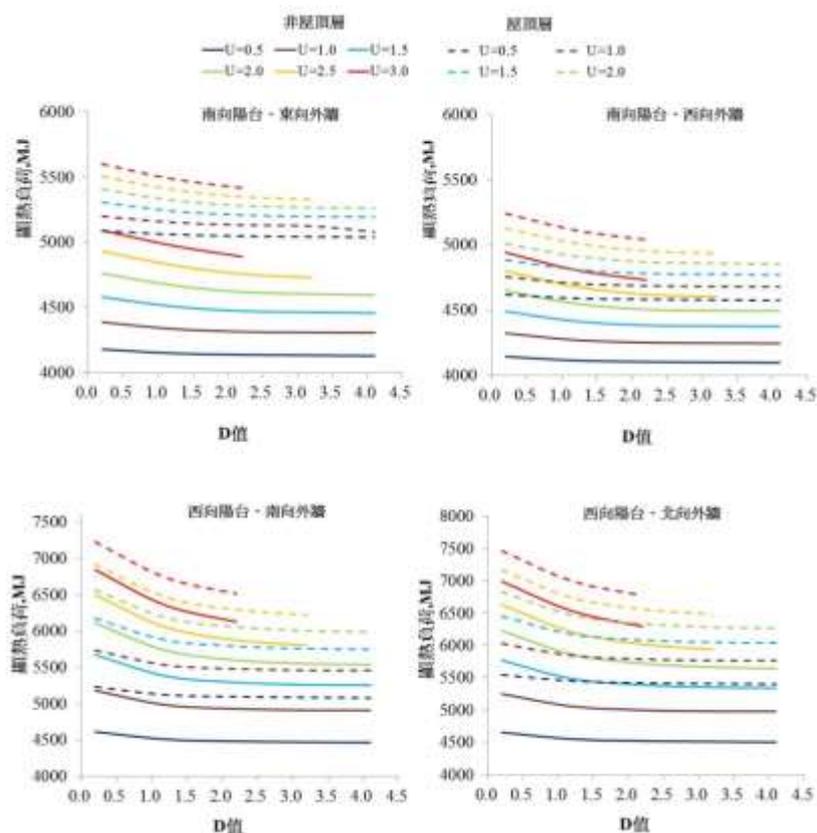


圖 4-18 不同外殼 U 值與 D 值組合在台北的顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

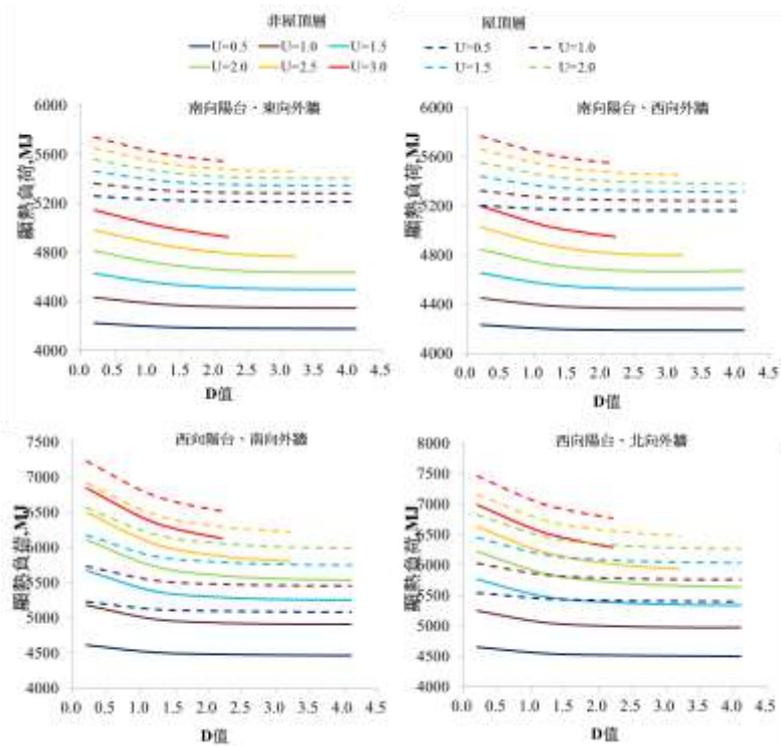


圖 4-19 住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在台中的顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

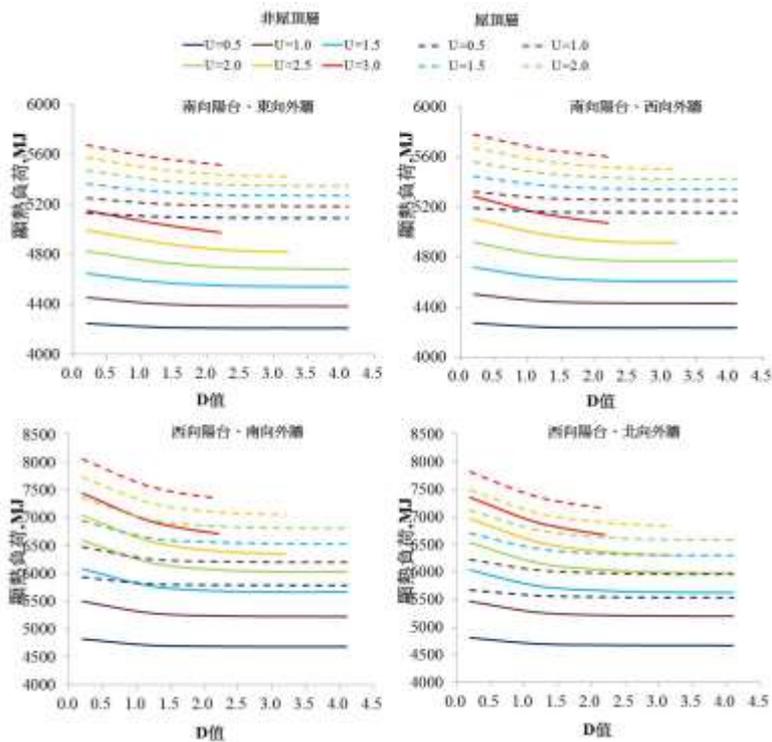


圖 4-20 住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在高雄的顯熱負荷

(資料來源：本研究繪製)

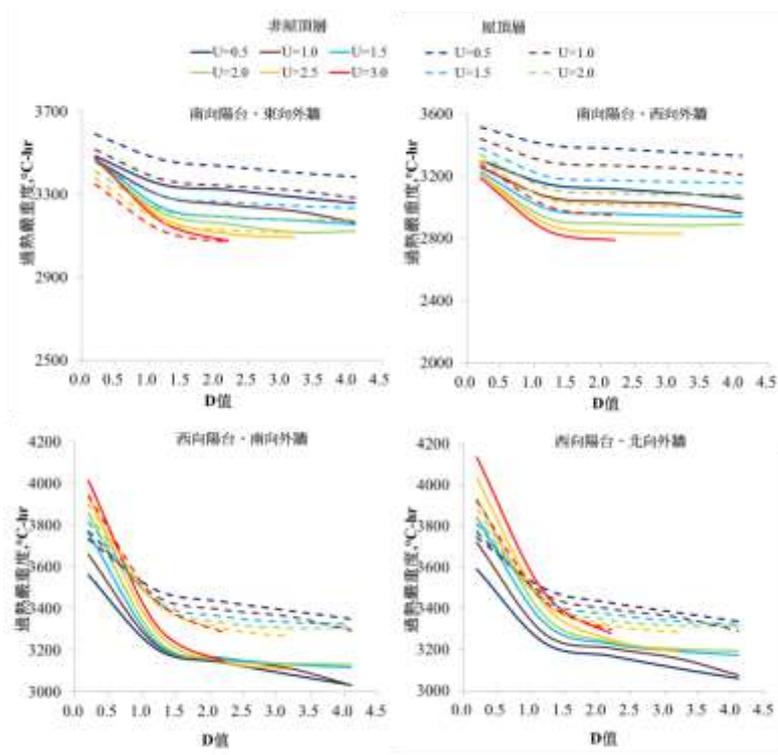


圖 4-21 住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在台北的過熱嚴重度
(資料來源：本研究繪製)

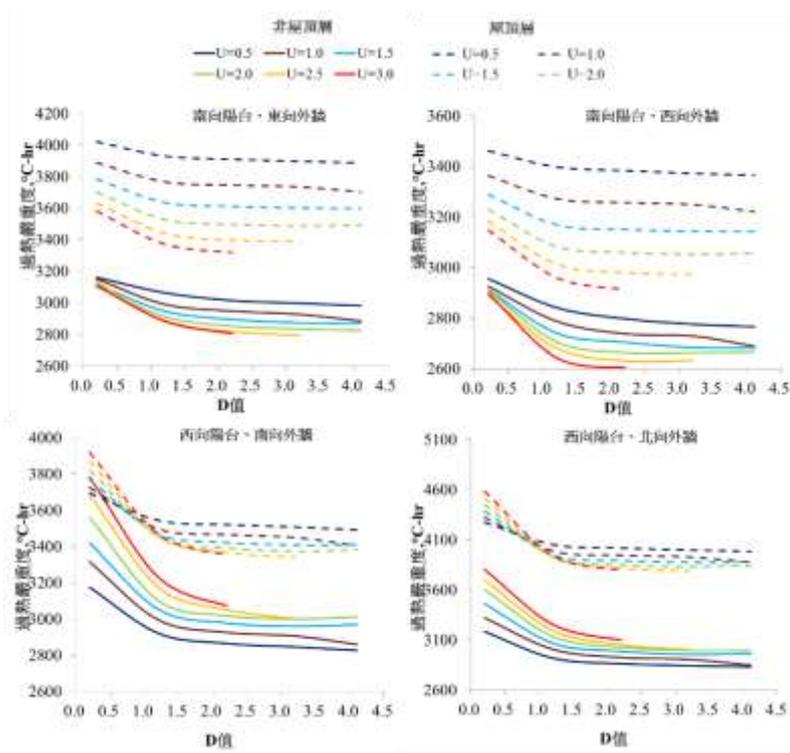


圖 4-22 住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在台中的過熱嚴重度
(資料來源：本研究繪製)

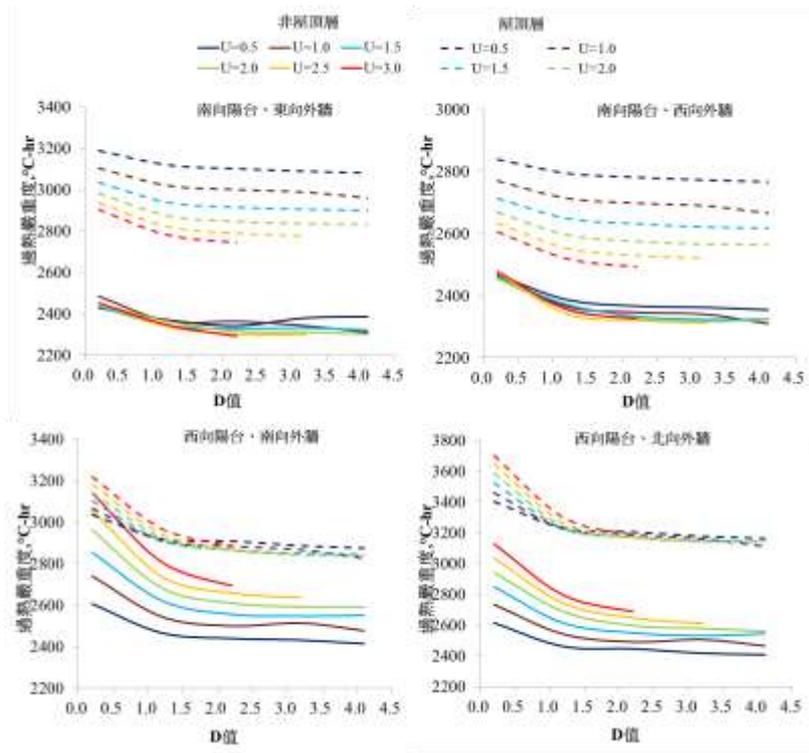


圖 4-23 住宅外殼不同 U 值與 D 值組合在高雄的過熱嚴重度

(資料來源：本研究繪製)

第六節 小結

本章以公寓住宅為對象，探討隔熱性能及蓄熱性能的影響，研究發現：

1. 客廳及臥室，在 U 值固定，增加圍護結構的 D 值增加室內溫度 6-9 月的過熱時數。而且臥室 Δ 過熱時數隨著圍護結構 D 值的增加而增加的趨勢，遠較客廳明顯。除了臥室下班使用的情境外，其他的客廳全日使用、客廳下班使用和臥室全日使用在這三種使用情境下，增加圍護結構的熱質量是有助於減輕其室內的過熱不舒適度程度。相反的，主要是夜間才有人使用的臥室下班使用(19:00~07:00)情境，增加圍護結構的 D 值卻得到 Δ 過熱嚴重度 >0 的結果，表示增加圍護結構的熱質量是不利於減緩室內的過熱不舒適度程度。
2. 在 U 值固定下，增加圍護結構的 D 值，對空調住宅 6-9 月的能耗的結果：
 - i、 臥室下班使用(19:00~07:00)情境下，增加 D 值反而增加空調顯熱負荷。
 - ii、 臥室全日使用(00:00~24:00)情境下，增加 D 值對空調顯熱負荷沒影響。
 - iii、 在客廳下班使用(17:00~23:00)情境下，對一開始增加 D 值會增加空調顯熱負荷，但是若是 D 值增加到一定程度後，空調顯熱負荷會隨著降低。
 - iv、 客廳全日使用(08:00~23:00)情境下，增加 D 值可以降低空調顯熱負荷。
3. 在一般住宅僅會在較炎熱的 6-9 月運行空調系統，在空調顯熱負荷總合隨著牆體 U 值的減少而減少。顯熱負荷總合也是隨著外殼的 D 值增加而降低。在某些情況住宅外的 U 值與 D 值對減少空調能耗存在等值效果，但是因為住宅類住宅的使用時間模式與辦公建築有所不同，所以統計結果發現其等值效果不若在辦公類來得明顯。
4. 對於住宅空間單元採用自然通風而言，在 6-9 月的室內過熱嚴重度是隨著牆體 U 值的減少而減少，而隨著外殼的 D 值增加而降低。對於自然通風住宅外殼的 U 值與 D 值舒緩室內過熱嚴重度存在等值效果，且其等值效果較空調能耗明顯。

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究以辦公建築及住宅類建築為對象，界定國內常見外牆蓄熱能力之調查及指標，探討外牆蓄熱能力在不同方位、不同氣候區、不同顏色的外牆蓄熱對室內空調負荷之影響，進一步的透過不同熱阻和熱質量的組合來解析最佳化組合，並透過夜間通風和熱質量耦合下的進行節能分析。本計畫研究發現之成果如下：

1. 完成國內常見外牆蓄熱能力調查及指標計算：透過 Dynamic Thermal Property Calculator 統計出國內常用外牆與屋頂構造的導納因數、時間延遲、衰減倍數、蓄熱係數和熱惰性指標等描述其蓄熱特性的參數。
2. 完成外牆蓄熱能力對室內空調負荷之影響：藉由增加屋頂隔熱材料厚度(U 值降低)，於台北、台中和高雄三個氣候區有效降低辦公室 4-10 月及全年空調顯熱負荷，隨著隔熱材厚度增加而跟著線性降低，且隨著蓄熱能力增加而降低。但隔熱性能較好的外牆，在涼爽的季節阻擋室內熱量散到戶外，反而增加空調負荷，所以無限制的增加隔熱厚度(U 值降低)其實是沒有助益的。
3. 探討不同隔熱與蓄熱性能組合對空調負荷影響與最佳化組合：將隔熱材料放在室外側、中間和室內側三種組合進行不同的建築蓄熱與隔熱排列方式的情境模擬，在相同的隔熱(U 值)與蓄熱材料(D 值)組合下，改變排列組合對減少空調顯熱負荷的幾乎沒影響。
4. 完成不同吸收(反射)性的外牆蓄熱對室內空調負荷之影響：隨著外表面太陽輻射吸收率的增加，降低空調顯熱負荷的效果也愈好。當吸收率從 0.3 增加到 0.9 時，在三個氣候區中，使用輕構造外牆可以節省空調顯熱負荷 3%-5%；若是使用重構造可節省 14%-17%。
5. 完成夜間通風和熱質量耦合下的節能分析：進行夜間換氣的辦公建築於空調開機運行前約可降低 2~3°C，可節省約 10-14% 的顯熱冷負荷。且隨著夜間換氣回數的增加，降低空調顯熱負荷的效果也愈好。於空調僅在 4-10 月運

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

行情境下，在三個氣候區可以降低單位樓板面積空調顯熱負荷 10~30%；若是空調全年運行的話，可節省至 20~40%。

6. 無論是辦公建築或住宅類建築的外牆或屋頂的隔熱(U 值)與蓄熱(D 值)存在等值效果，辦公類較住宅類建築明顯。增加立牆的隔熱效果(降低 U 值)對全年空調顯熱負荷的幫助，存在著最佳 U 值。當立牆的 U 值高於 $3.0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ，降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷有正面幫助。但是當立牆的 U 值低於 $3.0\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 時，持續降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷卻反而有負面效果。
7. 其中在住宅類建築中，根據使用模式的不同發現:(1)在臥室下班使用(19:00~07:00)情境下，提高蓄熱能力(D 值增加)反而會增加空調顯熱負荷。(2)在臥室全日使用(00:00~24:00)情境下，增加蓄熱能力對空調顯熱負荷沒有影響。(3)在客廳下班使用(17:00~23:00)情境下，對一開始增加蓄熱能力會增加空調顯熱負荷，但是若是蓄熱能力增加到一定程度後，空調顯熱負荷會隨著降低。(3)在客廳全日使用(08:00~23:00)情境下，增加蓄熱能力會可以降低空調顯熱負荷。

第二節 建議

根據研究發現，本研究提出下列具體建議：

建議一

增加立牆的隔熱效果(降低 U 值)對全年空調顯熱負荷的幫助,存在著最佳 U 值。當立牆的 U 值高於 3.0W/m²-K 時,降低 U 值對降低全年空調顯熱負荷有正面幫助,但是持續過度降低 U 值對全年空調顯熱負荷卻反而有負面效果之分析結果,可提供我國作為建築與住宅節能策略與法令規範擬議研修之宣導及推廣說明參考：**立即可行建議**

主辦機關：內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究所

本計畫建議將研究成果附錄三所載熱負荷模擬結果,提供給住宅部門節能策略之規劃與執行建議,並於全國能源會議、國內外重要能源會議提出供政策評估參考。透過將本研究的成果分享給業界使用者了解隔熱及蓄熱的特色,以達到如何兼顧室內熱舒適又能節省空調能耗的雙贏局面,同時更能減少材料使用上不必要的花費。

建議二

辦公室夜間換氣的空調節能策略或作為：立即可行建議

主辦機關：台灣電力公司

協辦機關：內政部建築研究所、財團法人台灣建築中心

本研究發現辦公室進行夜間換氣有效降低空調顯熱負荷,且隨著換氣回數增加效果越好,當全年運行空調的辦公建築,可有效節省至 20~40%的負荷量。建議相關單位可將附錄所載相關數據做為參考依據,作為於節能政策上有效的宣導參考。

建議三

將蓄熱設計手法納入相關手冊進行宣導：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

本研究中發現住宅類建築中,根據在不同使用模式中提高牆體蓄熱能力對空

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

調顯熱負荷有不同的影響。建議將本計畫中有關建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境影響的使用模式，羅列出不同的使用模式下的節能效果，以利刊載於相關宣導手冊，以達宣導外牆蓄熱及隔熱的節能效益，並能夠提供給使用者在同時考量牆體或屋頂的隔熱和蓄熱能力的設計方向。

附錄

附錄一 國內常用外牆隔熱及蓄熱特性參數

編號	構造大樣	厚度 m	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
W001	室外空氣層					0.043		
	瓷、磚	0.01	2400	0.841	1.3	0.008	13.81	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.12	2200	0.881	1.4	0.086	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層					0.111		
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.78			導納因數	5.64		
	熱惰性	1.53			衰減倍數	0.72		
					時間延遲	4.00		
W002	室外空氣層					0.043		
	瓷、磚	0.01	2400	0.841	1.3	0.008	13.81	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層					0.111		
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.5			導納因數	5.78		
	熱惰性	1.83			衰減倍數	0.63		
					時間延遲	4.86		
W003	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	瓷、磚	0.01	2400	0.841	1.3	0.008	13.81	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.23	1650	0.841	0.8	0.288	8.98	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	2.14			導納因數	5.05		
	熱惰性	2.9			衰減倍數	0.46		
					時間延遲	7.25		
W004	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	瓷、磚	0.006	2400	0.841	1.3	0.005	13.81	
	鋼材	0.003	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.12	2200	0.881	1.4	0.086	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.82			導納因數	5.63		
	熱惰性	1.5			衰減倍數	0.72		
				時間延遲	3.97			

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

編號	構造大樣	厚度 m	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
W005	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	瓷、磚	0.01	2400	0.841	1.3	0.008	13.81	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	人工輕骨材鋼筋混凝土版	0.1	1600	1.001	0.8	0.125	9.65	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.29			導納因數	4.82		
	熱惰性	1.5			衰減倍數	0.80		
					時間延遲	3.53		
W006	室外空氣層		0	0.000	23	0.04	0.00	
	瓷、磚	0.008	2400	0.841	1.3	0.006	13.81	
	PC 混凝土	0.18	2400	0.791	1.5	0.120	14.39	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	木絲水泥板(鑽混板)	0.025	735	1.694	0.26	0.096	4.85	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	2.16			導納因數	3.28		
	熱惰性	2.3			衰減倍數	0.49		
					時間延遲	6.21		
W007	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	板玻璃(清玻璃)	0.008	2540	0.771	0.78	0.010	10.54	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石棉板	0.01	1500	1.201	1.2	0.008	12.54	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	合板	0.018	550	1.301	0.18	0.100	3.06	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	2.25			導納因數	2.38		
	熱惰性	0.5			衰減倍數	0.98		
				時間延遲	1.03			
W008	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	板玻璃(清玻璃)	0.008	2540	0.771	0.78	0.010	10.54	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	鋁及鋁合金	0.0016	2700	0.901	210	0.000	192.75	
	岩綿保溫材	0.03	100	1.313	0.042	0.714	0.63	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石膏板、板條	0.012	910	1.188	0.17	0.071	3.66	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.89			導納因數	1.26		
熱惰性	0.8			衰減倍數	0.99			
				時間延遲	1.05			

編號	構造大樣	厚度 m	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
W009	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	板玻璃(清玻璃)	0.008	2540	0.771	0.78	0.010	10.54	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石棉板	0.004	1500	1.201	1.2	0.003	12.54	
	岩綿保溫材	0.032	100	1.313	0.042	0.762	0.63	
	石棉板	0.004	1500	1.201	1.2	0.003	12.54	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.98			導納因數	1.14		
	熱惰性	0.7			衰減倍數	0.99		
				時間延遲	0.89			
W010	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	板玻璃(清玻璃)	0.008	2540	0.771	0.78	0.010	10.54	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石棉水泥矽酸鈣板	0.025	750	0.793	0.15	0.167	2.55	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	2.4			導納因數	2.45		
	熱惰性	0.5			衰減倍數	0.99		
					時間延遲	0.59		
	W011	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00
板玻璃(清玻璃)		0.008	2540	0.771	0.78	0.010	10.54	
非密閉中空層			0	0.000	11.63	0.086	0.00	
石棉水泥矽酸鈣板		0.025	750	0.793	0.15	0.167	2.55	
非密閉中空層			0	0.000	11.63	0.086	0.00	
石棉板		0.004	1500	1.201	1.2	0.003	12.54	
岩綿保溫材		0.032	100	1.313	0.042	0.76	0.63	
石棉板		0.004	1500	1.201	1.2	0.00	12.54	
室內空氣層			0	0.000	9	0.11	0.00	
隔熱與蓄熱能力參數								
熱傳導率	0.79			導納因數	1.070			
熱惰性	1.1			衰減倍數	0.950			
				時間延遲	1.970			
W012	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	噴岩綿	0.02	1200	0.841	0.051	0.392	1.93	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石棉水泥矽酸鈣板	0.025	1050	0.777	0.15	0.167	2.98	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	1.24			導納因數	1.73		
	熱惰性	1.3			衰減倍數	0.96		
					時間延遲	1.94		

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

編號	構造大樣	厚度 m	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
W013	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋼材	0.00	7860	0.480	45.0	0.000	111.11	
	*瀝青、柏油	0.00	2230	0.923	0.7	0.004	10.45	
	非密閉中空層		0	0.000	11.6	0.086	0.00	
	石棉水泥矽酸鈣板	0.03	1050	0.777	0.2	0.167	2.98	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	2.4			導納因數	2.50		
熱惰性	0.6			衰減倍數	0.99			
				時間延遲	0.90			
W014	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	瓷、磚	0.006	2400	0.841	1.3	0.005	13.81	
	鋼材	0.003	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	噴岩綿	0.02	1200	0.841	0.051	0.392	1.93	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石棉板	0.004	1500	1.201	1.2	0.003	12.54	
	岩綿保溫材	0.032	100	1.313	0.042	0.762	0.63	
	石棉板	0.004	1500	1.201	1.2	0.003	12.54	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
熱傳導率	0.71			導納因數	1.07			
熱惰性	1.4			衰減倍數	0.92			
				時間延遲	2.50			
W015	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
		0.005						
	水泥防水塗料	0.003	0	0.000	1.5	0.002	0.00	
	岩綿保溫材	0.05	100	1.313	0.042	1.190	0.63	
	水泥防水塗料	0.003	0	0.000	1.5	0.002	0.00	
	木絲水泥板(鑽混板)	0.012	735	1.694	0.26	0.046	4.85	
	岩綿保溫材	0.09	100	1.313	0.042	2.143	0.63	
	石膏板、板條	0.012	910	1.188	0.17	0.071	3.66	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
熱傳導率	0.28			導納因數	1.29			
熱惰性	2.6			衰減倍數	0.59			
				時間延遲	5.64			
W016	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	水泥防水塗料	0.003	0	0.000	1.5	0.002	0.00	
	岩綿保溫材	0.05	100	1.313	0.042	1.190	0.63	
	水泥防水塗料	0.003	0	0.000	1.5	0.002	0.00	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	室內空氣層		0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.68			導納因數	6.30		
	熱惰性	2.4			衰減倍數	0.30		
				時間延遲	6.68			

編號	構造大樣	厚度 m	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
W017	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	岩石	0.02	2800	0.841	3.5	0.006	24.48	
	灰漿	0.005	2000	0.801	1.5	0.003	13.22	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.52		導納因數		5.77		
	熱惰性	1.9		衰減倍數		0.62		
			時間延遲		5.04			
W018	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	岩石	0.03	2800	0.841	3.5	0.009	24.48	
	灰漿	0.03	2000	0.801	1.5	0.020	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.37		導納因數		5.82		
	熱惰性	2.1		衰減倍數		0.56		
				時間延遲		5.64		
W019	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	岩石	0.018	2800	0.841	3.5	0.005	24.48	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	3.53		導納因數		6.77		
	熱惰性	1.9		衰減倍數		0.82		
				時間延遲		4.99		
W020	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	岩石	0.024	2800	0.841	3.5	0.007	24.48	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	2.77		導納因數		6.00		
	熱惰性	1.8		衰減倍數		0.51		
				時間延遲		5.73		
W021	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	板玻璃(清玻璃)	0.01	2540	0.771	0.78	0.013	10.54	
	密閉中空層	----	0	0.000	5.37	0.186	0.00	
	板玻璃(清玻璃)	0.01	2540	0.771	0.78	0.013	10.54	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	2.73		導納因數		2.89		
熱惰性	0.3		衰減倍數		0.99			

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

編號	構造大樣	厚度 m	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
				時間延遲		0.67		
W022	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	土	0.5	1600	1.010	1.05	0.476	11.11	
	硬塑膠、柏油毯	0.02	1250	1.255	0.19	0.105	4.66	
	瀝青柏油屋面材類	0.01	1000	0.921	0.11	0.091	2.71	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	1.05		導納因數		6.11	
	熱惰性	7.8		衰減倍數		0.02		
				時間延遲		21.20		
W023	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋁及鋁合金	0.006	2700	0.901	210	0.000	192.75	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	鋁及鋁合金	0.0016	2700	0.901	210	0.000	192.75	
	玻璃棉保溫板	0.03	24	0.841	0.042	0.714	0.25	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石膏板、板條	0.012	910	1.188	0.17	0.071	3.66	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	0.9		導納因數		1.21	
	熱惰性	0.4		衰減倍數		0.99		
				時間延遲		0.79		
W024	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋁及鋁合金	0.006	2700	0.901	210	0.000	192.75	
	噴岩綿	0.02	1200	0.841	0.051	0.392	1.93	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石棉水泥矽酸鈣板	0.025	750	0.793	0.15	0.167	2.55	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	1.251		導納因數		1.59	
		熱惰性	1.2		衰減倍數		0.97	
					時間延遲		1.60	
W025	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋁及鋁合金	0.006	2700	0.901	210	0.000	192.75	
	*瀝青、柏油	0.003	2230	0.923	0.73	0.004	10.45	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石棉水泥矽酸鈣板	0.025	750	0.793	0.15	0.167	2.55	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	2.431		導納因數		2.48	
		熱惰性	0.5		衰減倍數		0.99	
					時間延遲		0.63	

編號	構造大樣	厚度 m	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
W026	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋁及鋁合金	0.006	2700	0.901	210	0.000	192.75	
	噴岩綿	0.02	1200	0.841	0.051	0.392	1.93	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石棉板	0.004	1500	1.201	1.2	0.003	12.54	
	岩綿保溫材	0.032	100	1.313	0.042	0.762	0.63	
	石棉板	0.004	1500	1.201	1.2	0.003	12.54	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.714		導納因數		1.06		
熱惰性	1.3		衰減倍數		0.93			
			時間延遲		2.36			
W027	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	岩石	0.03	2800	0.841	3.5	0.009	24.48	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	鋁及鋁合金	0.0016	2700	0.901	210	0.000	192.75	
	玻璃棉保溫板	0.03	24	0.841	0.042	0.714	0.25	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	石膏板、板條	0.012	910	1.188	0.17	0.071	3.66	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.893		導納因數		1.22		
熱惰性	0.6		衰減倍數		0.97			
			時間延遲		1.51			
W028	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	岩石	0.03	2800	0.841	3.5	0.009	24.48	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	室內空氣層	----	0	0.000	9	0.111	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	2.76		導納因數		6.12		
	熱惰性	1.8		衰減倍數		0.34		
				時間延遲		7.23		

(資料來源：本研究彙整)

附錄二 國內常用屋頂隔熱及蓄熱特性參數

編號	構造大樣	厚度 mm	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
R001	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋼材	0.005	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	瀝青柏油屋頂材	0.01	1150	0.921	0.11	0.091	2.91	
	成形聚苯乙烯保溫板 (保麗龍)	0.04	30	1.251	0.04	1.000	0.33	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.783			導納因數	0.79		
	熱惰性	0.6			衰減倍數	0.99		
					時間延遲	0.57		
R002	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋼材	0.033	7860	0.480	45	0.001	111.11	
	岩綿保溫材	0.05	100	1.313	0.042	1.190	0.63	
	鋼材	0.003	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.73			導納因數	1.15		
	熱惰性	0.8			衰減倍數	0.92		
					時間延遲	2.26		
R003	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	噴岩綿	0.003	1200	0.841	0.051	0.059	1.93	
	細骨材混凝土	0.05	2200	0.881	1.4	0.036	14.05	
	硬質成形聚烏保溫板 (PU板)	0.025	38	1.407	0.028	0.893	0.33	
	細骨材混凝土	0.02	2200	0.881	1.4	0.014	14.05	
	PC 混凝土	0.15	2400	0.791	1.5	0.100	14.39	
	細骨材混凝土	0.015	2200	0.881	1.4	0.011	14.05	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
熱傳導率	0.77			導納因數	5.28			
熱惰性	2.7			衰減倍數	0.19			
				時間延遲	9.46			
R004	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	細骨材混凝土	0.05	2200	0.881	1.4	0.036	14.05	
	硬質成形聚烏保溫板 (PU板)	0.025	38	1.407	0.028	0.893	0.33	
	噴硬質成形聚烏板	0.005	40	0.938	0.05	0.100	0.37	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
熱傳導率	0.745			導納因數	5.25			
熱惰性	2.6			衰減倍數	0.23			
				時間延遲	8.34			

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

編號	構造大樣	厚度 mm	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
R005	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	瓷、磚	0.01	2400	0.841	1.3	0.008	13.81	
	灰漿	0.005	2000	0.801	1.5	0.003	13.22	
	輕質泡沫混凝土 (ALC)	0.1	600	1.101	0.17	0.588	2.86	
	瀝青柏油屋面材類	0.01	1000	0.921	0.11	0.091	2.71	
	細骨材混凝土	0.02	2200	0.881	1.4	0.014	14.05	
	PC 混凝土	0.15	2400	0.791	1.5	0.100	14.39	
	細骨材混凝土	0.015	2200	0.881	1.4	0.011	14.05	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	0.998			導納因數	5.23	
		熱惰性	3.9			衰減倍數	0.21	
						時間延遲	9.94	
R006	室外空氣層		0	0.000	23	0.04	0.00	
	土	0.55	1600	1.010	1.05	0.524	11.11	
	硬塑膠、柏油毯	0.02	1250	1.255	0.19	0.105	4.66	
	瀝青柏油屋面材類	0.01	1000	0.921	0.11	0.091	2.71	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	0.971			導納因數	5.15	
	熱惰性	8.3			衰減倍數	0.01		
					時間延遲	22.82		
R007	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋼材	0.005	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	瀝青柏油屋面材類	0.01	1000	0.921	0.11	0.091	2.71	
	成形聚苯乙烯保溫板 (保麗龍)	0.04	30	1.251	0.04	1.000	0.33	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	0.78			導納因數	0.78	
	熱惰性	0.6			衰減倍數	1.00		
					時間延遲	0.54		
R008	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋼材	0.033	7860	0.480	45	0.001	111.11	
	岩綿保溫材	0.05	100	1.313	0.042	1.190	0.63	
	鋼材	0.003	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	0.73			導納因數	1.15	
	熱惰性	0.8			衰減倍數	0.92		
					時間延遲	2.26		

編號	構造大樣	厚度 mm	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
R009	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	防水層	0.003	0	0.000	0.05	0.060	0.00	
	細骨材混凝土	0.05	2200	0.881	1.4	0.036	14.05	
	硬質成形聚烏保溫板 (PU板)	0.025	38	1.407	0.028	0.893	0.33	
	細骨材混凝土	0.02	2200	0.881	1.4	0.014	14.05	
	PC 混凝土	0.15	2400	0.791	1.5	0.100	14.39	
	細骨材混凝土	0.015	2200	0.881	1.4	0.011	14.05	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	0.769			導納因數	5.28	
	熱惰性	2.6			衰減倍數	0.19		
					時間延遲	9.46		
R010	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	細骨材混凝土	0.05	2200	0.881	1.4	0.036	14.05	
	硬質成形聚烏保溫板 (PU板)	0.025	38	1.407	0.028	0.893	0.33	
	噴硬質成形聚烏板	0.005	40	0.938	0.05	0.100	0.37	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	0.745			導納因數	5.25	
	熱惰性	2.6			衰減倍數	0.23		
					時間延遲	8.34		
R011	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	瓷、磚	0.01	2400	0.841	1.3	0.008	13.81	
	牆壁、天花裝修用壁 紙	0.005	550	1.391	0.15	0.033	2.89	
	輕質泡沫混凝土 (ALC)	0.1	600	1.101	0.17	0.588	2.86	
	瀝青柏油屋面材類	0.01	1000	0.921	0.11	0.091	2.71	
	細骨材混凝土	0.02	2200	0.881	1.4	0.014	14.05	
	PC 混凝土	0.15	2400	0.791	1.5	0.100	14.39	
	細骨材混凝土	0.015	2200	0.881	1.4	0.01	14.05	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.14	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.969			導納因數	5.23		
	熱惰性	3.9			衰減倍數	0.20		
					時間延遲	10.06		
R012	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	土	0.55	1600	1.010	1.05	0.524	11.11	
	硬塑膠、柏油毯	0.02	1250	1.255	0.19	0.105	4.66	
	瀝青柏油屋面材類	0.01	1000	0.921	0.11	0.091	2.71	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
		熱傳導率	0.971			導納因數	5.15	
	熱惰性	8.3			衰減倍數	0.01		
					時間延遲	22.82		

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

編號	構造大樣	厚度 mm	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
R013	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	噴硬質成形聚烏板	0.002	40	0.938	0.05	0.040	0.37	
	人工輕骨材鋼筋混凝土版	0.10	1600	1.001	0.8	0.125	9.65	
	鋼材	0.00	7860	0.480	45.0	0.000	111.11	
	噴岩綿	0.03	1200	0.841	0.1	0.490	1.93	
	發泡聚苯乙烯保溫板	0.01	28	1.251	0.0	0.270	0.31	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.899			導納因數	1.16		
	熱惰性	2.3			衰減倍數	0.54		
				時間延遲	5.70			
R014	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	噴硬質成形聚烏板	0.002	40	0.938	0.05	0.040	0.37	
	人工輕骨材鋼筋混凝土版	0.1	1600	1.001	0.8	0.125	9.65	
	鋼材	0.0015	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	噴岩綿	0.02	1200	0.841	0.051	0.392	1.93	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	岩綿吸音板	0.015	300	0.946	0.064	0.234	1.15	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.94			導納因數	1.22		
熱惰性	2.3			衰減倍數	0.55			
				時間延遲	5.53			
R015	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	硬塑膠、柏油毯	0.0015	1250	1.255	0.19	0.008	4.66	
	發泡聚苯乙烯保溫板	0.075	28	1.251	0.037	2.027	0.31	
	鋼材	0.0023	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	噴岩綿	0.003	1200	0.841	0.051	0.059	1.93	
	通風空氣層		0	0.000	1.28205	0.780	0.00	
	岩綿吸音板	0.012	300	0.946	0.064	0.188	1.15	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.308			導納因數	0.69		
熱惰性	1			衰減倍數	0.82			
				時間延遲	2.78			
R016	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	硬塑膠、柏油毯	0.0015	1250	1.255	0.19	0.008	4.66	
	發泡聚苯乙烯保溫板	0.05	28	1.251	0.037	1.351	0.31	
	PC 混凝土	0.1	2400	0.791	1.5	0.067	14.39	
	鋼材	0.0015	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	噴岩綿	0.003	1200	0.841	0.051	0.059	1.93	
	通風空氣層		0	0.000	1.28205	0.780	0.00	
	岩綿吸音板	0.012	300	0.946	0.064	0.188	1.15	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
熱傳導率	0.379			導納因數	0.87			
熱惰性	1.7			衰減倍數	0.11			
				時間延遲	6.57			

編號	構造大樣	厚度 mm	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
R017	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	輕質泡沫混凝土(ALC)	0.15	600	1.101	0.17	0.882	2.86	
	瀝青柏油屋面材類	0.01	1000	0.921	0.11	0.091	2.71	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.785			導納因數		5.23	
	熱惰性	4.4			衰減倍數		0.18	
				時間延遲		11.23		
R018	室外空氣層		0	0.000	23	0.043	0.00	
	噴硬質成形聚烏板	0.002	40	0.938	0.05	0.040	0.37	
	輕質泡沫混凝土(ALC)	0.1	600	1.101	0.17	0.588	2.86	
	瀝青柏油屋面材類	0.01	1000	0.921	0.11	0.091	2.71	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	非密閉中空層		0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	岩綿吸音板	0.015	300	0.946	0.064	0.234	1.15	
	屋頂室內空氣層		0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
熱傳導率	0.75			導納因數		2.01		
熱惰性	3.7			衰減倍數		0.12		
				時間延遲		9.84		
R019	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	PC 混凝土	0.02	2400	0.791	1.5	0.013	14.39	
	成形聚苯乙烯保溫板 (保麗龍)	0.03	25	1.251	0.04	0.750	0.30	
	人工輕骨材鋼筋混凝土 土版	0.07	1600	1.001	0.8	0.088	9.65	
	瀝青柏油屋頂材	0.01	1150	0.921	0.11	0.091	2.91	
	灰漿	0.02	2000	0.801	1.5	0.013	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	屋頂室內空氣層	----	0	0.000	7	0.143	0.00	
隔熱與蓄熱能力參數								
熱傳導率	0.795			導納因數		5.10		
熱惰性	3.3			衰減倍數		0.13		
				時間延遲		10.66		
R020	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	噴硬質成形聚烏板	0.002	40	0.938	0.05	0.040	0.37	
	輕質泡沫混凝土(ALC)	0.1	600	1.101	0.17	0.588	2.86	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.075	2200	0.881	1.4	0.054	14.05	
	鋼材	0.001	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	非密閉中空層	----	0	0.000	11.63	0.086	0.00	
	鋼材	0.001	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	細骨材混凝土	0.075	2200	0.881	1.4	0.054	14.05	
灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22		
隔熱與蓄熱能力參數								
熱傳導率	1.134			導納因數		4.96		
熱惰性	3.4			衰減倍數		0.19		
				時間延遲		10.26		

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

編號	構造大樣	厚度 mm	比重量 kg/m ²	比熱 kJ/kg·K	熱導係數 W/m·K	熱阻 K·m/W	蓄熱係數	
R021	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	瓦、石版	0.05	2000	0.761	1	0.050	10.52	
	<20cm 空氣通風層	----	0	0.000	2.17391	0.460	0.00	
	瀝青柏油屋頂材	0.01	1150	0.921	0.11	0.091	2.91	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	成形聚苯乙烯保溫板 (保麗龍)	0.02	25	1.251	0.04	0.500	0.30	
	屋頂室內空氣層	----	0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.691			導納因數		1.46	
熱惰性	2.6			衰減倍數		0.12		
				時間延遲		8.60		
R022	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	瓦、石版	0.05	2000	0.761	1	0.050	10.52	
	<20cm 空氣通風層	----	0	0.000	2.17391	0.460	0.00	
	瀝青柏油屋頂材	0.01	1150	0.921	0.11	0.091	2.91	
	輕質泡沫混凝土(ALC)	0.1	600	1.101	0.17	0.588	2.86	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	成形聚苯乙烯保溫板 (保麗龍)	0.02	25	1.251	0.04	0.500	0.30	
	屋頂室內空氣層	----	0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.53			導納因數		1.29	
熱惰性	2.8			衰減倍數		0.32		
				時間延遲		8.57		
R023	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	瀝青柏油屋面材類	0.05	1000	0.921	0.11	0.455	2.71	
	瀝青柏油屋頂材	0.01	1150	0.921	0.11	0.091	2.91	
	硬質纖維板	0.04	1050	1.301	0.22	0.182	4.67	
	灰漿	0.01	2000	0.801	1.5	0.007	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	屋頂室內空氣層	----	0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.964			導納因數		5.15	
熱惰性	4.1			衰減倍數		0.19		
				時間延遲		10.32		
R024	室外空氣層	----	0	0.000	23	0.043	0.00	
	鋼材	0.005	7860	0.480	45	0.000	111.11	
	通風空氣層	----	0	0.000	1.28205	0.780	0.00	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	細骨材混凝土	0.15	2200	0.881	1.4	0.107	14.05	
	灰漿	0.015	2000	0.801	1.5	0.010	13.22	
	屋頂室內空氣層	----	0	0.000	7	0.143	0.00	
	隔熱與蓄熱能力參數							
	熱傳導率	0.914			導納因數		5.24	
	熱惰性	1.8			衰減倍數		0.26	
				時間延遲		6.92		

(資料來源：本研究彙整)

附錄三

住宅類型中不同 U 值與 D 值組合在不同地區的顯熱負荷

台北 方位	顯熱負荷, (MJ)	U 值 (W/m ² -k)	D 值-熱惰性指標(無單位)				
			0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
南向陽台 西向外牆	非屋頂層	U=0.5	4145	4115	4105	4101	4098
		U=1.0	4324	4272	4252	4248	4246
		U=1.5	4492	4416	4385	4379	4377
		U=2.0	4650	4550	4506	4497	4496
		U=2.5	4800	4680	4621	4604	
		U=3.0	4943	4808	4732		
	屋頂層	U=0.5	4620	4591	4584	4580	4576
		U=1.0	4757	4705	4688	4683	4681
		U=1.5	4886	4812	4782	4776	4771
		U=2.0	5009	4914	4870	4860	4856
		U=2.5	5127	5014	4956	4936	
		U=3.0	5242	5113	5041		
南向陽台 東向外牆	非屋頂層	U=0.5	4179	4148	4137	4132	4129
		U=1.0	4387	4336	4314	4308	4306
		U=1.5	4580	4509	4473	4464	4457
		U=2.0	4761	4671	4619	4604	4595
		U=2.5	4931	4826	4757	4730	
		U=3.0	5091	4976	4890		
	屋頂層	U=0.5	5089	5060	5047	5042	5039
		U=1.0	5200	5153	5132	5125	5080
		U=1.5	5307	5240	5210	5199	5194
		U=2.0	5408	5323	5281	5267	5262
		U=2.5	5506	5405	5349	5330	
		U=3.0	5600	5487	5417		
西向陽台 南向外牆	非屋頂層	U=0.5	4616	4511	4484	4473	4468
		U=1.0	5183	4985	4931	4913	4911
		U=1.5	5676	5383	5295	5264	5257
		U=2.0	6112	5736	5603	5555	5541
		U=2.5	6500	6057	5879	5807	
		U=3.0	6846	6357	6131		
	屋頂層	U=0.5	5234	5124	5100	5089	5082
		U=1.0	5738	5534	5481	5463	5461
		U=1.5	6178	5879	5795	5761	5752
		U=2.0	6570	6188	6059	6008	5991
		U=2.5	6918	6472	6297	6226	
		U=3.0	7229	6739	6518		
西向陽台 北向外牆	非屋頂層	U=0.5	4654	4549	4520	4509	4502
		U=1.0	5250	5056	4998	4977	4975
		U=1.5	5768	5483	5389	5351	5341
		U=2.0	6226	5863	5721	5663	5641
		U=2.5	6631	6209	6020	5936	
		U=3.0	6991	6531	6293		
	屋頂層	U=0.5	5545	5449	5419	5408	5401
		U=1.0	6029	5841	5786	5766	5764
		U=1.5	6452	6171	6081	6049	6039
		U=2.0	6829	6467	6333	6281	6265
		U=2.5	7163	6738	6561	6483	
		U=3.0	7462	6996	6774		

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

台中 方位	顯熱負荷, (MJ)	U 值 (W/m ² -k)	D 值-熱惰性指標(無單位)				
			0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
南向陽台 西向外牆	非屋頂層	U=0.5	4232	4199	4189	4188	4187
		U=1.0	4450	4388	4368	4364	4362
		U=1.5	4654	4562	4527	4523	4526
		U=2.0	4846	4725	4675	4666	4673
		U=2.5	5027	4881	4812	4799	
	屋頂層	U=0.5	5204	5172	5164	5162	5159
		U=1.0	5324	5266	5249	5242	5240
		U=1.5	5440	5356	5326	5317	5313
		U=2.0	5553	5443	5399	5386	5383
		U=2.5	5662	5530	5471	5453	
南向陽台 東向外牆	非屋頂層	U=0.5	4224	4193	4182	4179	4177
		U=1.0	4432	4377	4355	4348	4346
		U=1.5	4627	4547	4511	4500	4498
		U=2.0	4810	4708	4655	4637	4635
		U=2.5	4982	4862	4792	4764	
	屋頂層	U=0.5	5259	5226	5215	5213	5212
		U=1.0	5360	5306	5287	5282	5280
		U=1.5	5460	5383	5352	5345	5345
		U=2.0	5555	5457	5414	5403	5405
		U=2.5	5648	5531	5475	5459	
西向陽台 南向外牆	非屋頂層	U=0.5	4814	4691	4668	4662	4659
		U=1.0	5503	5265	5212	5198	5196
		U=1.5	6099	5744	5654	5629	5630
		U=2.0	6622	6161	6022	5984	5987
		U=2.5	7084	6540	6345	6291	
	屋頂層	U=0.5	7496	6895	6645		
		U=1.0	5980	5843	5825	5820	5816
		U=1.5	6537	6285	6239	6227	6225
		U=2.0	7023	6656	6574	6553	6552
		U=2.5	7451	6984	6855	6819	6822
西向陽台 北向外牆	非屋頂層	U=2.0	8170	7576	7337		
		U=2.5	7831	7287	7102	7048	
		U=3.0	8170	7576	7337		
		U=0.5	4812	4693	4669	4662	4659
		U=1.0	5498	5271	5216	5199	5197
	屋頂層	U=1.5	6091	5756	5661	5632	5626
		U=2.0	6609	6178	6035	5990	5980
		U=2.5	7065	6561	6362	6296	
		U=3.0	7470	6921	6667		
		U=0.5	5828	5715	5687	5680	5677
屋頂層	U=1.0	6389	6166	6109	6093	6091	
	U=1.5	6877	6544	6450	6420	6419	
	U=2.0	7306	6876	6737	6691	6690	
	U=2.5	7685	7179	6992	6924		
	U=3.0	8024	7467	7232			

高雄 方位	顯熱負荷, (MJ)	U 值 (W/m ² -k)	D 值-熱惰性指標(無單位)				
			0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
南向陽台 西向外牆	非屋頂層	U=0.5	4272	4241	4234	4234	4234
		U=1.0	4503	4447	4433	4431	4429
		U=1.5	4717	4638	4611	4607	4608
		U=2.0	4918	4816	4773	4767	4771
		U=2.5	5106	4985	4924	4915	
		U=3.0	5283	5149	5072		
	屋頂層	U=0.5	5192	5163	5157	5156	5154
		U=1.0	5322	5273	5258	5253	5251
		U=1.5	5445	5375	5348	5342	5342
		U=2.0	5562	5474	5435	5423	5425
		U=2.5	5674	5570	5518	5502	
		U=3.0	5780	5666	5603		
南向陽台 東向外牆	非屋頂層	U=0.5	4247	4218	4210	4210	4209
		U=1.0	4455	4406	4389	4385	4383
		U=1.5	4647	4581	4551	4543	4540
		U=2.0	4826	4744	4699	4686	4681
		U=2.5	4994	4900	4838	4819	
		U=3.0	5152	5050	4974		
	屋頂層	U=0.5	5130	5103	5093	5091	5090
		U=1.0	5251	5207	5189	5185	5183
		U=1.5	5365	5305	5277	5270	5270
		U=2.0	5473	5397	5359	5349	5348
		U=2.5	5576	5487	5438	5423	
		U=3.0	5674	5577	5516		
西向陽台 南向外牆	非屋頂層	U=0.5	4823	4709	4688	4683	4682
		U=1.0	5500	5289	5238	5227	5225
		U=1.5	6083	5776	5686	5665	5668
		U=2.0	6593	6199	6067	6029	6033
		U=2.5	7043	6581	6403	6348	
		U=3.0	7444	6941	6714		
	屋頂層	U=0.5	5935	5813	5794	5790	5787
		U=1.0	6479	6260	6216	6203	6201
		U=1.5	6950	6637	6560	6537	6533
		U=2.0	7363	6967	6850	6817	6811
		U=2.5	7729	7271	7106	7057	
		U=3.0	8054	7562	7349		
西向陽台 北向外牆	非屋頂層	U=0.5	4806	4696	4674	4669	4666
		U=1.0	5468	5267	5215	5201	5199
		U=1.5	6037	5747	5659	5631	5628
		U=2.0	6532	6166	6035	5989	5982
		U=2.5	6968	6544	6366	6304	
		U=3.0	7355	6899	6674		
	屋頂層	U=0.5	5671	5572	5546	5539	5536
		U=1.0	6226	6035	5980	5963	5961
		U=1.5	6704	6423	6333	6304	6302
		U=2.0	7122	6763	6631	6589	6588
		U=2.5	7490	7072	6900	6836	
		U=3.0	7818	7363	7153		

(資料來源：本研究彙整)

附錄四

夜間換氣回數對減少顯熱負荷的效果

台北		夜間換氣回數					
減少的顯熱負荷, MJ/m ²	無	1次	2次	3次	4次	5次	6次
東向外牆	0	26	41	50	57	61	65
南向外牆	0	26	41	50	56	61	64
西向外牆	0	26	41	50	56	61	64
北向外牆	0	25	39	48	54	58	61
水平屋頂	0	16	27	35	41	46	50
東向外牆	0	10	17	22	26	29	32
南向外牆	0	10	16	21	25	28	30
西向外牆	0	10	17	22	26	29	31
北向外牆	0	9	16	21	24	27	29
水平屋頂	0	11	19	26	30	34	37
台中		夜間換氣回數					
減少的顯熱負荷, MJ/m ²	無	1次	2次	3次	4次	5次	6次
東向外牆	0	30	48	60	68	74	78
南向外牆	0	30	50	62	71	77	81
西向外牆	0	30	49	61	70	75	80
北向外牆	0	28	45	56	63	69	72
水平屋頂	0	26	45	58	67	74	79
東向外牆	0	11	18	24	28	31	34
南向外牆	0	10	17	22	26	29	31
西向外牆	0	11	18	24	28	32	34
北向外牆	0	10	17	22	25	28	31
水平屋頂	0	12	22	30	36	41	45
高雄		夜間換氣回數					
減少的顯熱負荷, MJ/m ²	無	1次	2次	3次	4次	5次	6次
東向外牆	0	22	38	49	56	61	66
南向外牆	0	23	39	51	58	64	68
西向外牆	0	23	39	50	58	63	68
北向外牆	0	21	36	46	53	58	62
水平屋頂	0	24	42	54	63	70	76
東向外牆	0	6	11	14	16	18	20
南向外牆	0	6	10	13	16	17	19
西向外牆	0	7	11	15	17	20	21
北向外牆	0	6	10	13	15	17	18
水平屋頂	0	9	17	22	27	31	34

*採取夜間通風的降溫效果，來排除室內蓄熱以減少空調顯熱負荷，在台北、台中和高雄的節能效果。從圖 3-21 中可以看到隨著夜間換氣回數的增加，降低空調顯熱負荷的效果也愈好。

(資料來源：本研究彙整)

附錄五

客廳與臥室的 6-9 月顯熱冷負荷彙整

(a) 台北氣候(單位：MJ)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	4650	4550	4506	4497	4496	5009	4914	4870	4860	4856
南	東	4761	4671	4619	4604	4595	5408	5323	5281	5267	5262
西	南	6112	5736	5603	5555	5541	6570	6188	6059	6008	5991
西	北	6226	5863	5721	5663	5641	6829	6467	6333	6281	6265
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	2338	2393	2333	2299	2282	2680	2725	2673	2640	2620
南	東	2363	2448	2404	2375	2355	2691	2782	2721	2690	2673
西	南	2901	3014	2885	2815	2767	3272	3357	3227	3157	3110
西	北	2908	3060	2946	2881	2834	3164	3332	3218	3134	3084
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	3108	3111	3107	3108	3105	3150	3152	3147	3147	3142
南	東	3206	3208	3203	3203	3197	3273	3274	3270	3270	3265
西	南	4203	4206	4198	4197	4189	4289	4292	4283	4281	4272
西	北	4317	4319	4310	4308	4297	4394	4397	4387	4385	4375
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	1706	1880	1889	1881	1866	1761	1927	1934	1928	1914
南	東	1750	1935	1957	1957	1945	1782	1963	1982	1980	1969
西	南	2136	2636	2666	2656	2626	2206	2703	2731	2723	2697
西	北	2163	2689	2734	2735	2708	2205	2726	2767	2763	2737

(b) 台中氣候(單位：MJ)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	4846	4725	4675	4666	4673	5553	5443	5399	5386	5383
南	東	4810	4708	4655	4637	4635	5555	5457	5414	5403	5405
西	南	6622	6161	6022	5984	5987	7451	6984	6855	6819	6822
西	北	6609	6178	6035	5990	5980	7306	6876	6737	6691	6690
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	2511	2548	2470	2432	2416	3128	3150	3086	3053	3037
南	東	2413	2493	2445	2415	2399	2820	2910	2836	2804	2791
西	南	3261	3335	3169	3089	3043	3937	3957	3799	3725	3683
西	北	3158	3294	3159	3094	3047	3471	3628	3492	3403	3357
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	3264	3267	3264	3268	3269	3342	3344	3340	3342	3342
南	東	3218	3221	3218	3221	3220	3302	3304	3303	3306	3306
西	南	4550	4561	4559	4571	4578	4686	4696	4694	4704	4709
西	北	4544	4555	4553	4563	4566	4637	4648	4646	4656	4659
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	1809	2013	2023	2015	2002	1892	2080	2091	2087	2075
南	東	1734	1941	1968	1972	1964	1791	1988	2012	2014	2007
西	南	2332	2923	2956	2948	2922	2444	3020	3051	3052	3030
西	北	2274	2873	2927	2933	2914	2336	2927	2975	2977	2958

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

(c) 高雄氣候(單位：MJ)

朝向		非屋頂層房間					屋頂層房間				
		D 值									
陽台	外牆	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1	0.2	1.2	2.2	3.2	4.1
客廳 08:00~23:00 (全日使用)											
南	西	4918	4816	4773	4767	4771	5562	5474	5435	5423	5425
南	東	4826	4744	4699	4686	4681	5473	5397	5359	5349	5348
西	南	6593	6199	6067	6029	6033	7363	6967	6850	6817	6811
西	北	6532	6166	6035	5989	5982	7122	6763	6631	6589	6588
客廳 17:00~23:00 (下班使用)											
南	西	2541	2595	2525	2493	2480	3105	3142	3089	3060	3047
南	東	2417	2505	2465	2442	2427	2779	2870	2808	2783	2771
西	南	3211	3325	3185	3111	3068	3850	3904	3765	3704	3668
西	北	3097	3259	3149	3088	3045	3371	3548	3431	3352	3311
臥室 00:00~24:00 (全日使用)											
南	西	3358	3361	3358	3363	3364	3411	3413	3409	3412	3412
南	東	3269	3271	3267	3270	3268	3353	3355	3352	3354	3354
西	南	4611	4622	4619	4632	4639	4725	4735	4732	4743	4749
西	北	4561	4570	4567	4577	4580	4643	4652	4649	4658	4662
臥室 19:00~07:00 (下班使用)											
南	西	1896	2083	2093	2089	2079	1961	2127	2140	2138	2130
南	東	1795	1978	2002	2008	2001	1858	2032	2053	2056	2051
西	南	2425	2955	2987	2983	2962	2519	3033	3066	3069	3052
西	北	2347	2876	2925	2934	2918	2405	2925	2970	2975	2960

- (1) 在臥室下班使用(19:00~07:00)情境下，增加 D 值反而會增加空調顯熱負荷。
- (2) 在臥室全日使用(00:00~24:00)情境下，增加 D 值對空調顯熱負荷沒有影響。
- (3) 在客廳下班使用(17:00~23:00)情境下，對一開始增加 D 值會增加空調顯熱負荷，若 D 值增加到一定程度後，空調顯熱負荷會隨著降低。
- (4) 在客廳全日使用(08:00~23:00)情境下，增加 D 值會可以降低空調顯熱負荷。

(資料來源：本研究彙整)

附錄六

期初審查意見及期中報告回應一覽表

委員	審查委員意見	廠商回應
吳委員德賢	<ol style="list-style-type: none"> 1.不同方位的外牆蓄熱對室內空調負荷影響程度值得探討,如以台北市中心近正面向東、南、西或北方向,究竟現有建物設計如何因應,可能面臨那些問題及有何改進方式,建議可與本研究之方法或成果相互對照。 2.不同的外牆材料及開口如何相互搭配設計,並配合不同的使用機能及型態,建議考量納入探討之可行性。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.已於期中報告中第三章中初步探討,進一步的方位討論將於期末報告呈現。 2.如何相互搭配設不同的外牆材料及開口設計,將納入熱質量與夜間通風耦合分析中一併討論。
陳委員宗鵠	<ol style="list-style-type: none"> 1.本研究探討之隔熱和蓄熱合併效果,並分析何種組合外牆材料對空調負荷最有利,具有研究價值。 2.建議將台灣亞熱帶氣候濕度之特性納入研究項目,譬如隔熱材位置排列對室內溼度產生影響最少。另濕度對建材耐久性有直接影響,應納入隔熱建材分析要項之一。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.謝謝委員意見。 2.有關外牆材料溫度變動對濕度影響部分,本計畫研究方法將檢視模擬軟體之解析項目,視模擬材料個案情形納入探討。
張委員俊哲	<ol style="list-style-type: none"> 1.請補充隔熱對建築物內部空間散熱影響有何看法。 2.內外材料是蓄熱兩項來源,請補充說明隔熱對降低冷氣(暖氣)使用預期成效是否顯著。 3.開口材料也是外牆的一種,建議納入考量。 4.好的開口通風對外牆散熱的影響甚大,亦請一併納入探討。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.謝謝委員意見,將於報告中說明。 2.有關於內外蓄熱材料對降低空調的效果將於報告中說明。 3.開口材料一般多為玻璃,其熱阻和熱質量性能偏低,與本計畫研究主題相關性低。因此不納入考量。 4.開口通風對外牆散熱的影響將納入熱質量與夜間通風耦合分

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

		析中一併討論。
林委員谷陶	<ol style="list-style-type: none"> 1.研究團隊具有本案研究主題所需之專業能力與經驗。 2.研究方法與內容符合計畫執行要求。 3.田口式實驗設計法屬穩態設計,是求得最佳因子組合的設計方法,因此所列實驗控制因子的顯著性,應先予確認。 4.實驗控制因子外牆吸收率,顏色只是概稱,應以更精確的名詞,如:明度、彩度、或表面性質表示。 5.實驗設計求得可能的最佳組合是否納入建築模型中,予以歷時模擬分析,請補充說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.謝謝委員意見。 2.謝謝委員意見。 3.謝謝委員意見,實驗控制因子將進一步地確認。 4.謝謝委員意見,於期中報告中修正相關的名詞。 5.關於計畫目標及執行方向之建議,本計畫將遵照委員建議,以台灣的氣候、工法、材料、建築特性做整體之考量,提出隔熱及蓄熱組合下的最佳化組合方案。
羅副召集人 時麒	<ol style="list-style-type: none"> 1.台灣位處亞熱帶氣候區,與寒帶及熱帶氣候不同,如何發展國內外牆隔熱及蓄熱效果很重要,有關國內常見外牆續熱能力之調查,請補充說明採取之調查方法。 2.所提研究對象(P.8),建議將國內常用之辦公及住宅建築類型歸納分析後,再進行模擬。 3.所提 EnergyPlus 之室內環境品質 PMV-PPD 指標(P.10),涉及相當多數據,請補充說明國內數據資料庫之取得方式。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.關於國內常見外牆蓄熱能力調查及指標計算將以綠建築設計規範中羅列的外牆構造為主。 2.謝謝委員意見,遵照委員意見辦理。 3.關於 PMV-PPD 指標資料庫取得方式將於報告中補充說明。

附錄七 期初審查意見及期中報告回應一覽表

委員	審查委員意見	廠商回應
林教授 憲德	<ol style="list-style-type: none"> 1. 蓄熱通常只影響溫度穩定及舒適性，對空調年負荷與耗能量影響不大，對法規亦難反應，建築研究所應理解該研究對營建政策之直接影響很小，況且在營建輕量化之永續議題下，亦不宜推廣高蓄熱化之策略。 2. 模擬模型 U 值在 0.5~2.0 之案例，在台灣建築材料使用上並不存在，故在各種假設條件之設定上，請調整以台灣實際常用建築材料之 U 值為主。 3. 模擬模型無開窗，尺寸與實際相差太遠，其研究結果將難以採信。 4. 隔熱能力佳之材質通常蓄熱能力亦相對好，故請再考量獨立增加材料蓄熱能力之意義。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員意見，這部分在期末報告第三章第三節中有討論外牆蓄熱的能力與空調負荷間的關係。 2. 已於期末報告中調整使用常見的 U 值進行討論。 3. 已於期末報告中調整模型，有開窗及遮陽。 4. 謝謝委員意見，這部分在期末報告第三章第四節中有討論隔熱及蓄熱間的交互影響。
張建築 師矩墉	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書 P.1 有關我國建築技術規則規定之外牆平均 U 值不得低於 $2.75\text{w/m}^2\text{K}$ (住宿類)，其他類為 $2.0\text{w/m}^2\text{K}$，此為採用第 308 條之 2 構造式的檢討，若採用第 308 條之後之條文，則住宿類為 $3.5\text{w/m}^2\text{K}$，其他類則不對外牆 U 值做規定，請先釐清其適用。 2. 請說明報告書 P.4 表 1-1 中 K 與 D 各代表之意義為何。 3. 請說明附錄 A、B 是否與現行之外殼耗能設計技術規範所訂定之外牆、屋頂構造一致，並說明新增部分如何應用。另請注意金屬材料部分，厚度有諸多錯誤，P.65 附錄 B 厚度單位應為 m，請更正。 4. 此為一個很有價值之研究，在成果結案時，希望能夠提出一套讓業界能夠容易應用於實務上的模式。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已於期末報告中第三章及第四章分別討論。 2. 已於期末報告中 P4 中補上。 3. 附錄 A、B 為目前建築規範中所訂定的外牆，新增的部分為提供給使用者在參照國外指標時所參考的依據。 4. 謝謝委員意見。

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

張建築師國章	<ol style="list-style-type: none"> 1. 對室內環境溫度影響的因素，除了隔熱、蓄熱及夜間通風外，建議將日間通風(尤其是一般住宅)、遮陽板(台灣氣候特質之造型元素)等因素納入考量。 2. 建議研究成果在實務的應用上，能夠變成相關的應用軟體模式，且可與 BIM 整合，使規劃設計初期即可初步分析，決定最佳選擇，同時配合 BIM 之政策推動，以提升 BIM 應用價值與使用誘因。 3. P.20 式 2-4 中 w 知單位誤植為(秒)，請釐清是否應更正為(時)。 4. P.33 建築模型之長寬尺寸與面積不符，請釐清並更正。 5. P.36 圖表 Y 軸「節能百分比」之部分應更正為「空調負荷比」或「耗能百分比」。 6. P.47 文中(倒數第 9 行)惰性指標誤植單位，請更正。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.礙於研究時程考量，且遮陽板及日間通風不在研究範圍內，建議後續研究可繼續討論。 2.謝謝委員建議，後續將建議建研所可以往這方向研究。 3.正確單位為秒。 4.已於期末報告中 P.37 中修正。 5.已於期末報告中刪除該圖。 6.已於期末報告中刪除該段。
黃教授國倉	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究探討牆體隔熱與蓄熱之綜合效果，確認材料蓄熱對建築耗能之影響，成果可期。 2. 未來於提出建築外殼熱性能之規範建議時，宜考量在既有之 U 值規範下亦有其相應熱惰性(以 20cm 之 RC 外牆為例)之前提下訂定不同之 U 值與熱惰性之建議值。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.謝謝委員意見。 2.謝謝委員意見，會納入後續工作項目建議。
電機技師公會	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書 P.1 緒論提及我國建築技術規則規定 U 值"不得低於".....，似乎不合邏輯，請再釐清是否筆誤。 2. 請釐清 P.39 所舉例之 10 種外牆性質，產業應用上是否有此種材料。 3. 承上，該 10 種隔熱、蓄熱材，使否皆為相同材料?若是，改變各材料厚度但總厚度不改變之情況下，其 U 值要維持不變，似乎不可能達成(因合成材料之總 U 值與各隔熱材、蓄熱材之厚度有關)；若否，請說明能符合所述 U 值不變之材料為何。 4. P.42 表 3-4 所示，外牆總厚度定會改變， 	<ol style="list-style-type: none"> 1.已於期末報告中 P.1 修正。 2.3.謝謝委員意見，已於第三章及第四章中重新敘述。 4.已於期末報告中第三章

	<p>例如:為達 $U=0.5$、$D=4.7$，隔熱材與混凝土厚度須達 45mm 及 450mm，其總厚度為 495mm，倘只用隔熱材，要達到相同節能目的不須使用如此大的厚度，換言之，依 P.46 建議設計，是否造成厚度過後而不符實際之應用?</p>	<p>中詳述其討論的結果。</p>
<p>台灣省建築材料公會</p>	<p>建議加強說明隔熱與蓄熱相關研究，是以單一產品研究數據還是整體外牆。</p>	<p>謝謝委員建議，已於期末報告中修正。</p>
<p>台灣綠建築協會</p>	<p>建議增加隔熱塗料的研究。</p>	<p>謝謝委員建議，礙於時間因素，增加熱塗料會建議給建研所作為後續的研究方向。</p>
<p>廖組長慧燕</p>	<p>本計畫應著重於外牆材料之隔熱、蓄熱能力，對於住宅類建築因西曬問題所導致之額外空調耗能改善，故請加強該部份之研究。</p>	<p>已於期末報告中第三章中以西向牆來比較討論其相關問題。</p>
<p>何所長明錦</p>	<p>台灣建築物因西曬與外牆材料蓄熱問題，導致空調耗能提高。本研究之目的係藉由了解外牆材料與構造之原理，解決高蓄熱造成之空調耗能問題，以達到節能之效果，並做為未來開發單位設計之參考依據。</p>	<p>謝謝委員意見，已於期末報告中進一步的討論。</p>

附錄八

期末審查意見及成果報告回應一覽表

委員	審查委員意見	廠商回應
李教授 魁鵬 (吳建 築師德 賢 代):	<ol style="list-style-type: none"> 建議補充說明某些類別之建築物如何在建築物管理維護上配合換氣通風，俾能提升室內環境溫度之舒適與節能效益。 除北、中、南不同氣候區外，不同之建築類型及不同使用功能之建築物亦會有所差異，建請略予論述。 	<ol style="list-style-type: none"> 已於成果報告中增加第三章及第四章的小結，分別描述辦公及住宅的情形。 已於成果報告中，描述在辦公及住宅類型使用差異。
林組長 福銘：	<ol style="list-style-type: none"> 國內太陽光電系統愈趨普及，建議外牆隔熱與蓄熱未來可納入PV屋頂及外牆結構評估。 請補充說明 P.16 提到有關相變材料之蓄熱，是否對於相變材料有可行之評估方法。 本研究係以目前實際運用之建材為參數分析依據，建議考量未來可否增加以降低目前能耗 10% 為目標探討可運用之材料或設計方向，俾能強化發展的前瞻性。 	<ol style="list-style-type: none"> 謝謝委員意見，可提供給建研所做為未來研究方向。 謝謝委員，礙於研究時程限制，相變材料不在本研究範圍。 謝謝委員意見，可提供給建研所未來研究方向。
張建築 師矩墉	<ol style="list-style-type: none"> 建議對適用外牆蓄熱的建築物類型(如空調型辦公建築或其他建築物)多加闡述。 非空調型建築物變數會很多，例如白天是否有人？門窗是否關閉？都會影響空調負荷。尤其是住宅使用狀況、習慣以及人員耐受力狀況都不同，應有不同結果，建議於成果報告補充說明。 使用高密度、高質量的材料，通常意味著建築物會增加自重，故建築設計需整體考量，無法用單一熱質量觀點來決定，後續研究建議整合更多面向進行探討。 目前建築技術規則第 308 條之 2 的外牆 	<ol style="list-style-type: none"> 已於成果報告中第三章及第四章分別討論及修正。 已於成果報告中第三章及第四章分別討論及修正及補充說明。 謝謝委員意見，可作為未來建研所持續研究的方向。 謝謝委員意見，已於成

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

	<p>U 值基準為 $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 及 $2.75 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$，是否太低反而耗能，建議補充說明。</p>	<p>果報告中結論中敘述。</p>
<p>張建築師國章</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究結合隔熱與蓄熱的交互影響分析，成果值得嘉許。 2. P.21 蓄熱係數公式中 W 單位標註為「秒」，取 86,400 秒(24 小時)，那數值 0.51 是如何計算得到，請補充說明。 3. 建築物隔熱元素尚包括遮陽版及開窗材質與型式，而使用功能、使用行為及區位、微氣候...等也都是變動參數，故未來研究方向建議考量將設計案導入 BIM Model，再結合 ECO 的軟體導入前揭變動參數，俾能得到最佳解決方案。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員意見。 2. 為蓄熱係數計算的公式參數。 3. 謝謝委員意見，可提供給建研所未來研究方向。
<p>蕭教授弘清：</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本案研究基本上符合預期成果，亦為相當有意義的研究，但對於隔熱、蓄熱、熱傳三者間之名詞定義、物理意義、相互影響等關連性，宜以口語化內容加強說明，使全民充分瞭解，俾利後續推廣。 2. 本案期末報告排版格式、圖表標題文字、中英文摘要之關鍵字位置等，似與慣例不符，建議重新檢視，並依規定格式調整。 3. 報告 P.39 及內文中之字型(英文與數字)應予統一，以利閱讀。 4. 期末報告提出之結論，撰寫方法過於學術化，尚缺具體作法或效果說明，建議朝口語化內容調整，並增加具建設性的改善措施，俾使研究建議更具參用價值。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員意見，於成果報告中有修正用詞及口語化。 2. 謝謝委員意見，成果報告已依照規定修正。 3. 已於成果報告中修正。 4. 謝謝委員意見，已於成果報告第五章中修正。
<p>黃教授國倉 (書面資料)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究內容豐富，獲致之結論具應用意義。 2. P.105 結論第 4 點所列，有關外牆表面吸收率對空調負荷之論述，容易被誤解為高吸收率而有較佳之節能效果，文字用語建議審酌調整。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見，已於成果報告中修正。

	3. P.106 結論第 6 點文字誤繕，最後一句「當立牆的 U 值高於 3.0 W/(m ² .K) 對降低全年空調顯熱負荷卻反而有負面效果。」，其中「高」字應為「低」才對，請再檢視修正。	3. 謝謝委員意見，已於成果報告中修正。
中華民國全國建築師公會	簡報提及外牆顏色深，利於蓄熱；但顏色淺應有利於反射太陽熱能，故於不同建築使用型態究應如何應用或取捨？建議於報告書中補充述明。	已於成果報告中第三章及第四章中增加小結，彙整及修正。
台灣省建築材料公會	請補充 P.89 相關數據，俾利瞭解室內溫度與通風之關連性。	謝謝委員建議，已於成果報告中修正。
廖組長慧燕	1. 請釐清建築構造隔熱與蓄熱對空調耗能的影響，二者是否相互衝突。 2. 建議針對既有建築西向立面日照西曬造成室內悶熱的情形，研議改善對策，供各界參用。	1. 建築構造隔熱與蓄熱實為互補之物理熱性能，比如混凝土構造。 2. 已於成果報告中第三章中以西向牆來比較討論其相關問題。
陳副所長瑞鈴	1. 本次審查之 3 案研究計畫執行單位均相當投入，先予肯定。 2. 請針對因應臺灣亞熱帶氣候特徵常見的建築室內環境「冬暖夏涼」狀態，進行常用的空調系統耗能評估分析，如臺灣建築物冬天開啟冷氣的時間長短，以強化報告中有關提高外牆隔熱與蓄熱性能反而造成冬天空調負荷增加的論述，俾使結論更接近實際建築空調耗能狀況。 3. 有關夜間換氣有助於建築空調節能的研究發現，本所建築能源效率提升計畫補助的部分案例已有實證，建議引用納入成果報告輔助說明。 4. 本研究所獲致結論部分相當具體，並能作為對外宣導的材料；建議於成果報告之結論與建議中強化有關建築隔熱最適化的論述，以導正各界對節能成效與投入成本的認知。	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見，已於成果報告中增加附錄三。 3. 謝謝委員意見，已於成果報告中，第五章建議中，增加立即可行建議及附錄四。 4. 謝謝委員意見，已於成果報告中，第五章建議中，增加建議及附錄五

附錄九 專家諮詢座談會議紀錄

「建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討」

第一次專家學者座談會會議記錄

- 一、 時間：103 年 06 月 03 日(星期二)下午 2 時 30 分
- 二、 地點：國立中興大學
- 三、 主席：林子平 教授
- 四、 出/列席人員：林子平、黃瑞隆、施文玫、吳友烈、鄭明仁、陳若華、柯佑沛、陳海曙、黃國倉
- 五、 主席致詞：(略)
- 六、 計畫簡報：(略)
- 七、 委員意見：

吳友烈老師：

- 1.此研究對於建築外牆隔熱與蓄熱之設計準則具有實質上的貢獻，具有研究價值。
- 2.透過熱質量的概念，探討辦公室與住宅建築外牆隔熱與蓄熱，在研究上因辦公室與住宅的使用時間上有些許不同，如何透過熱質量的概念，將熱適當的移轉(延遲)或是阻隔。
- 3.後續搭配夜間通風研究時是否有開窗的狀況，窗戶的影響是否要加入考慮？

鄭明仁老師：

- 1.辦公室的外牆有一大部分是玻璃窗或帷幕牆，因此此一部分是否有其他的研究相互呼應；另外在外牆(透別是帷幕牆)大部分都是複合材料搭配使用，因此表 2-1 之建材均為單一材料，在複合使用時之熱質量不知如何運用，進行研究。
- 2.圖 2-1 之熱質量效應示意圖一再修正共明確表達其內涵意義。
- 3.外牆結構若加上外遮陽因子時期外牆隔熱與蓄熱之變化不知如何？是否另開題進行研究比較。

陳若華老師：

- 1.本研究內容甚具創新性，研究成果對未來法規中熱傳透率(U)值的調整或運用有其貢獻。
- 2.本研究中考慮的辦公室與住宅兩類型其使用時間分布及熱源等差異甚大，可討論其牆體隔熱及蓄熱材料配置上的調整，並做出意見。

黃國倉老師：

- 1.本研究討論牆體隔熱性能與蓄熱能力之綜合效益，重新檢討目前法規僅規定牆體之u值之情況，許估熱質量於建築外牆之適用，成果可期，對外來法令之修正具參考意義。

陳海曙老師：

- 1.本研究分為辦公類與住宅類建築外殼隔熱與蓄熱之比較，由於辦公室使用時間與室內熱負荷與住宅類不同，在模擬時須分開分析。
- 2.由於外牆材料的使用，如考慮蓄熱性，即所謂的熱惰性，在採用複合性材料外牆時，蓄熱性高的材料在室內側或是外側對室內熱環境溫度之差異，須做分別考慮。
- 3.未來對法規修訂之目標，希望再做更詳細的分析，以免造成執行上的困難。
- 4.由於不同的結果會有不同的技術發展，因此有關技術上的問題須提供業界參考。

柯佑沛老師：

- 1.初步結果令人讚賞。
- 2.研究對象為辦公室建築及公寓住宅，兩者使用型態相異，外牆隔熱及蓄熱效果對室內熱環境的影響可能大異其趣，期待兩者的對照結果
- 3.報告中探討了各國使用的蓄熱指標，建議不必受限於既有指標，或許可開發本土指標。

附錄十

第二次專家諮詢座談會議紀錄

「建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討」

第二次專家學者座談會會議記錄

八、 時間：103 年 12 月 05 日(星期五)下午 2 時 30 分

九、 地點：國立成功大學建築系 7 樓研討室

十、 主席：林子平 教授

十一、 出/列席人員：林子平、黃瑞隆、施文玫、吳友烈、柯佑沛、
蔡耀賢、李訓谷

十二、 主席致詞：(略)

十三、 計畫簡報：(略)

十四、 委員意見：

吳友烈老師：

- 1.本研究對於建築物外牆材料其 U 值對室內環境及空調負載影響有完整的研究成果，且成果對於實際設計應用及法規之修訂有實質之參考價值。
- 2.建議可針對以研究所找出的最佳 U 值與 D 值條件下，以列表的方式歸納出住宅或辦公室最佳夜間通風換氣模式，更具參考價值。

柯佑沛老師：

- 1.本計劃研究架構完整，研究成果達到計劃目標，內容具參考價值。
- 2.受限於計劃規模，本研究只探討辦公與住宅建築；若有後續計劃，可比較其他類型的建築物之隔蓄熱作用，尤其是 24 小時空調型建築在不同蓄熱能力下的耗能情形。

蔡耀賢老師：

- 1.研究成果具體且方法嚴謹，具有相當的參考價值。

李訓谷老師：

- 1.夜間換氣對中央空調的辦公建築是很好的運轉策略，本研究從耗能量上進行分析；若考慮時間電價，從電費上進行比較，也許對使用者更具說服性。

參考書目

- [1] Omer Kaynakli, A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 415-425
- [2] Y Feng, Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones, Energy and Buildings 36 (2004) 1309–1312.
- [3] 謝芳，相變建築材料在建築節能中的應用研究，華南理工大學，碩士論文，2010。
- [4] Autodesk Sustainability Workshop, Concepts and tools for sustainable design, <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/>
- [5] Technical Notes on Brick Construction, Technical Notes 4-Heat Transmission Coefficients of Brick Masonry Walls, in The Brick Industry Association, 1997.
- [6] 中國建設部, JGJ 75-2003：夏熱冬暖地區居住建築節能設計標準
- [7] Thermal Performance:Part L1A 2013 New Part L1A (2013) compliance requirements for energy and CO2
- [8] M Brown , Solar Energy, The thermal effect of thermal mass in large office buildings, 1990 , 112 :273-282
- [9] T J Williamson, ASSESSING THE EFFECTIVENESS FOR THERMAL MASS IN THE BUILDING ENVELOP, Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November,P1655:1661
- [10] Marco D’Orazio, Costanzo Di Perna, Elisa Di Giuseppe, A field study of thermal inertia of roofs and its influence on indoor comfort, Journal of Building Physics published online 18 September 2013, 1–16, DOI: 10.1177/1744259113480134
- [11] Michelle Lakeridou, AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF A

- BUILDING'S CHARACTERISTICS ON THE THERMAL ENVIRONMENT OF NATURALLY VENTILATED EDUCATIONAL OFFICES, A thesis submitted for the degree of Master of Philosophy University of Bath, Department of Architecture and Civil Engineering, July 2010
- [12] Lina Yang, Yuguo Li, Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation, *Energy and Buildings* 40 (2008) 2052 – 2058
- [13] Junli Zhou, Guoqiang Zhang, Yaolin Lin, Yuguo Li, Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings, *Energy and Buildings* 40 (2008) 979–986
- [14] Niccolo` Aste, Adriana Angelotti, Michela Buzzetti, The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, *Energy and Buildings* 41 (2009) 1181 – 1187
- [15] E. Kossecka, J. Kosny, Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building, *Energy and Buildings* 34 (2002) 321 – 331.
- [16] M. Bojic, D.L. Loveday, The influence on building thermal behavior of the insulation/masonry distribution in a three-layered construction, *Energy and Buildings* 26 (1997) 153 – 157.
- [17] Balaras C.A (1996), “The Role of Thermal Mass on The Cooling Load of Buildings, An Overview Of Computational Methods”, National observatory of Athens, Institute of Meteorology and Physics of the Atmospheric Environment, Group Energy Conservations, Athens, Greece.
- [18] M Brown , Solar Energy, The thermal effect of thermal mass in large office buildings, 1990 , 112 :273-282
- [19] B Givoni, Personal discussions with David Mwale Ogoli during the Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2000) Conference, July 2000 at the University of Cambridge, UK, and other notes from Givoni shared in January, 2001
- [20] E Shaviv, A Yezioro, IG Capeluto, Thermal mass and night ventilation as

- passive cooling design strategy, *Renewable Energy* 24 (2001) 445-452
- [21] K Gregory, B Moghtaderi, H Sugo, A Page, Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential construction systems, *Energy and Buildings* 40 (2008) 459-465
- [22] JN Hacker, TP de Saulles, AJ Minson, MJ Holmes, Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: A case study on the effects of thermal mass and climate change, *Energy and Buildings* 40 (2008) 375–384
- [23] Ahmed, Tasnuva, Investigating The Impact Of Thermal Mass Towards Energy Efficient Housing In Canada, (2012), Theses and dissertations. Paper 1218, <http://digitalcommons.ryerson.ca/dissertations/1218>
- [24] Balaras C.A (1996), “The Role of Thermal Mass on The Cooling Load of Buildings, An Overview Of Computational Methods”, National observatory of Athens, Institute of Meteorology and Physics of the Atmospheric Environment, Group Energy Conservations, Athens, Greece.
- [25] 袁偉, 薑喬喬, 王麗娟, 基於自然通風和蓄熱耦合作用下的節能分析, *建築熱能通風空調*, 29(6) (2010)89~93
- [26] 袁偉, 張雪玲, 不同地區自然通風與蓄熱耦合作用的節能分析 *建築熱能通風空調*, 31(6) (2012) 9-12
- [27] 白雪蓮, 張在喜, 李文龍, 建築外牆熱惰性對空調冷負荷的影響, *工業建築* 2013 年第 43 卷增刊 102-105
- [28] 白貴平, 冀兆良, 圍護結構隔熱對室內熱穩定性及空調負荷的影響, *建築熱能通風空調*, 24(1)2005 : 69-72
- [29] Xing Jin, Xiaosong Zhang, Yiran Cao, Geng Wang, Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor, *Energy and Buildings* 47(2012) 369-374
- [30] Kyoung-ho Leea, James E. Braun, Model-based demand-limiting control of building thermal mass, *Building and Environment* 43 (2008) 1633 - 1646

建築外牆隔熱及蓄熱效果對室內環境溫度影響之探討

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：林子平，黃瑞隆，施文玫編

出版年月：103年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-04-2911-4 (平裝)