

內政部建築研究所
103 年度永續綠建築與節能減碳科技
中程個案計畫協同研究計畫(一)
第 2 案「外牆構造隔熱性能之研究」
資料蒐集分析報告

內政部建築研究所 協同研究報告

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)

內政部建築研究所
103 年度永續綠建築與節能減碳科技
中程個案計畫協同研究計畫(一)
第 2 案「外牆構造隔熱性能之研究」
資料蒐集分析報告

研究主持人：何明錦

協同主持人：林沂品

研 究 員：賴啟銘

研究助理：游家旺、王思文、張家豐、單霄安

內政部建築研究所 協同研究報告

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

| | |
|-----------------------------|-----|
| 表次 | III |
| 圖次 | IV |
| 摘要 | VII |
| | |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 第一節 研究緣起與背景 | 1 |
| 第二節 研究目的與重要性 | 3 |
| 第三節 研究步驟流程 | 4 |
| 第二章 文獻回顧 | 5 |
| 第一節 相關熱傳原理 | 5 |
| 第二節 相關建材之熱傳導係數 | 11 |
| 第三節 彙整本所既有單一建材隔熱性能係數 | 14 |
| 第三章 研究方法 | 21 |
| 第一節 實地量測方法 | 23 |
| 第二節 鋼筋、水泥砂漿與混凝土之熱傳導係數 | 28 |
| 第三節 鋼筋混凝土原型之熱傳實驗 | 33 |
| 第四章 結果與討論 | 39 |
| 第一節 均質板材實驗結果 | 39 |
| 第二節 相關建材之熱傳導係數量測結果 | 44 |
| 第三節 外牆隔熱性能之實地量測結果 | 45 |

| | |
|---------------------------|----|
| 第五章 研析可提升外牆隔熱性能之構造方式..... | 53 |
| 第一節 業界專家諮詢內容..... | 53 |
| 第二節 外牆構造隔熱增能方式之擬議與評估..... | 54 |
| 第六章 結論與建議..... | 57 |
| 第一節 結論..... | 57 |
| 第二節 建議..... | 59 |
| 附錄一 各階段審查意見之回覆..... | 61 |
| 附錄二 業界專家諮詢會議概要..... | 69 |
| 參考書目..... | 73 |

表次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 表 2-1 計算等價日照溫度時所使用的參數 | 11 |
| 表 2-2 混凝土熱傳導係數 | 14 |
| 表 2-3 單一建材隔熱性能係數之彙整 | 17 |
| 表 3-1 本計畫所用量測方法 | 27 |
| 表 3-2 鋼筋混凝土牆配筋案例 | 36 |
| 表 3-3 實驗試體之製作 | 37 |
| 表 4-1 均質板材之穩定加熱源實驗-1 (摘錄部分結果) | 40 |
| 表 4-2 均質板材之穩定加熱源實驗-2 (摘錄部分結果) | 41 |
| 表 4-3 均質板材之人工光源實驗 (摘錄部分結果) | 42 |
| 表 4-4 均質板材之戶外實地實驗 (摘錄部分結果) | 43 |
| 表 4-5 相關建材之熱傳導係數量測結果 | 44 |

圖 次

| | |
|----------------------------------|----|
| 圖 1-1 研究流程..... | 4 |
| 圖 2-1 一維熱傳示意..... | 5 |
| 圖 2-2 熱傳導係數與溫度之關係..... | 5 |
| 圖 2-3 牆板熱傳導..... | 7 |
| 圖 2-4 平面牆版熱對流..... | 8 |
| 圖 2-5 多層牆之熱阻網路分析..... | 11 |
| 圖 2-6 混凝土熱傳導係數..... | 14 |
| 圖 2-7 混凝土熱傳導係數..... | 14 |
| 圖 3-1 本計畫各項序列研究之安排..... | 22 |
| 圖 3-2 研究團隊自設氣象站..... | 25 |
| 圖 3-3 2013 年 8 月份台南地區水平日射量..... | 25 |
| 圖 3-4 穩態熱源分析法之參數示意..... | 26 |
| 圖 3-5 實驗原型..... | 29 |
| 圖 3-6 版鋼筋標準圖柱列帶及雙層雙向配筋示意..... | 34 |
| 圖 3-7 樓版分區帶..... | 35 |
| 圖 3-8 柱列帶版配筋案例..... | 35 |
| 圖 3-9 雙層雙向版配筋案例..... | 36 |
| 圖 3-10 鋼筋混凝土牆配筋案例..... | 37 |
| 圖 3-11 本計畫擬採用之鋼筋混凝土實驗試體..... | 38 |
| 圖 3-12 研究團隊對於鋼筋混凝土實驗試體之施作經驗..... | 38 |

| | |
|---|----|
| 圖 4-1 說明用圖例 | 40 |
| 圖 4-2 (個案一)鋼筋混凝土牆之熱流量測..... | 45 |
| 圖 4-3 (個案一)鋼筋混凝土牆西曬時段之熱流時滯現象..... | 46 |
| 圖 4-4 (Desogus et al., 2011)的牆體隔熱性能實地量測結果.... | 47 |
| 圖 4-5 (個案一)鋼筋混凝土牆隔熱性能長時段實地量測..... | 48 |
| 圖 4-6 (個案二)鋼筋混凝土牆之熱流量測..... | 49 |
| 圖 4-7 (個案三)輕鋼構牆體之熱流量測..... | 50 |
| 圖 4-8 (個案四)編竹夾泥牆之熱流量測..... | 51 |
| 圖 5-1 外牆構造隔熱增能方式之擬議 | 54 |
| 圖 5-2 外牆隔熱增能構造之實驗評估 | 55 |
| 圖 5-3 macroPCM 抵石層施作過程(左)與成品(右) | 56 |

摘要

關鍵詞：隔熱、建築隔熱、能源、熱傳、熱阻

一、研究緣起

建築隔熱性能的優劣攸關室內人員熱舒適狀態、空調能源需求等，影響環境控制品質甚巨。經由合宜建材的選用或建築構造設計，吾人可有效調控建築熱傳導、熱對流與熱輻射等熱傳遞機制，達成良好的整體隔熱性能與居室溫熱環境品質。

然而，在熱阻值的數據來源上，廠商所提供者、設計時所採用者以及建成後實際構造體的熱阻值，三者之間有可能產生差異，使得吾人對於建築物實際耗能的計量以及能源效率的評價產生不正確性。因此，建成後實際構造體的熱阻值（常稱之 R 值）實為評估建築耗能之重要依據。

現地量測熱阻值時，許多因素會影響到量測準確性，主要有：量測時所置入的感測元件將影響既有穩態熱流行為、動態響應之數據分析方法等，歐盟 PASLINK, IQ-TEST 等專案及其他國外學術研究對此均已展開相關研究，也對建物進行大規模的實際構造體熱阻值量測。

二、研究方法及過程

本計畫彙整評析國際間常見熱阻值現地量測方法，研析外牆構造隔熱性能熱阻值之現地量測方式並進行個案量測；最後，探討在國內目前常見外牆構造上，如何利用可行的材料與構造方法來增益外牆隔熱性能，如期完成各項預期成果。

三、重要發現

本計畫已完成國際間常見 R 值現地量測法與實測儀器之分析，以及國際間常見現地動態響應之 R 值數據分析方法之分析，包含溫度合成法 (ISO 8301-1991) 以及表面溫度法 (ISO 9869-2014)。發現在我國建築能源法令的框架下，以表面溫度法 ISO 9869-2014 較為適用，並已納為本計畫外牆構造熱阻係數之主要量測方法。亦完成預定辦理之 3 則外牆構造之 R 值現地量測，包含 2 則鋼筋混凝土構造以及 1 則輕鋼構外牆構造；並額外量測 1 則編竹夾泥牆構造，以呈現本方法之適用廣度。

為求能夠簡便快速地量測熱阻係數，本計畫同步發展出穩態熱源分析法，並將此方法與儀器直接量測進行比較驗證。結果顯示，此方式適合於加熱片以及人工光源等穩定加熱邊界條件下之量測；當試體表面平整時，吾人可貼附加熱片來進行實驗；當試體表面凹凸不平整時，吾人則可利用人工光源作為熱源端輸入邊界，如此可使所擬量測方式適用於不同的實務狀況。

完成可提升外牆隔熱性能之構造方式之研析，增列說明提升外殼構造隔熱性能之途徑，另依據專家諮詢結果並考量施工便利、造價可接受以及不甚影響室內可用面積等因素後，研議出外牆構造隔熱增能方式，同時利用穩態熱源分析法進行隔熱性能分析。實驗結果發現所擬建議之熱傳透率實驗值為 $0.857 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，相較於單純混凝土牆之 $3.79 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，該項建議可有效增益外牆隔熱性能。

四、主要建議事項

根據研究發現，本計畫針對有效提升外牆構造隔熱性能之短中長期研究規劃，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

建議一

本計畫所完成之建築構造熱阻係數穩態熱源分析法，適合於加熱片以及人工光源等穩定加熱邊界條件下之量測，可作為後續檢測設施建置或相關研究分析之標準作業方

法。

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：台灣綠建材產業發展協會

建議二

賡續推動外牆構造隔熱性能實驗室量測與現地量測研究，推動實驗方法之標準化作

業：長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：標準檢驗局或國立成功大學

本所歷年來已完成多起單一建材隔熱性能係數之量測，可以此資料庫為基礎，進行外牆構造隔熱性能之實驗室量測與現地量測，構造別則包含實牆體與虛部（開口部玻璃等），據以建立我國實際構造性能資料並得以論述我國實際之建築節能效益。

ABSTRACT

Keywords: thermal insulation, energy, heat transfer, thermal resistance

1. Study background

The thermal insulation performance of a building affects the comfort of people inside and determines the energy demands of the air-conditioning system. Through appropriate selection of building materials and thoughtful design, we can effectively regulate the mechanisms of building heat transfer (conduction, convection, and radiation) to improve the thermal insulation performance and promote indoor environment quality.

Thermal resistance values from different sources may vary. The values provided by the manufacturer, listed in the records used for the design, and measured after construction can differ significantly. This inconsistency in the data will lead to inaccuracies in the predicted energy consumption and the evaluation of building energy efficiency. Therefore, the actual thermal resistance (R-value) of completed structures is an important parameter in assessing building energy consumption.

During the in-situ measurement of thermal resistance, a variety of factors can affect the accuracy of the results. Sensing elements placed during measurement, for example, may influence data analysis methods for the existing steady-state heat flux behavior and dynamic response. The PASLINK and IQ-TEST projects of the European Union and other academic research projects have carried out relevant studies on the above issue and performed large-scale thermal resistance measurements in actual buildings.

2. Study methods and process

This study first compiles and reviews common international methods of thermal resistance measurement. On this basis, we develop an in-situ thermal resistance measurement method to determine the thermal insulation performance of exterior wall constructions. The proposed method is then used to measure thermal resistance in individual cases. Finally, we discuss how to use readily available materials and construction methods to enhance the thermal insulation of exterior walls in common domestic structures.

3. Major findings

The existing domestic research findings about the thermal insulation performances of buildings are mainly based on thermal resistance measurements of single construction elements. Relevant studies have rarely conducted in-situ measurements of construction elements or analysis of the complete building. This study investigates and analyzes the international temperature synthesis method (ISO 8301-1991) and surface temperature method (ISO 9869-2014; ISO 8301-1991), which are commonly used to measure construction thermal resistance. We find that the surface temperature method is more suitable in the framework of domestic building energy conservation laws. Thus, we use

this method as the primary approach to measure the thermal resistivity of exterior wall construction.

To easily and rapidly measure thermal resistivity, this study synchronously develops a steady-state heat source analysis approach and then verifies it by comparing the results with direct instrument measurements. The findings show that the proposed approach is suitable for measurements under steady heating boundary conditions (e.g., heating bands or artificial lights).

In-situ measurement of wall insulation performance was completed in accordance with the ISO 9869-2014 standard. Thermal transmittance finally converged to $5.15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. An insulation and energization approach for exterior wall construction was developed based on the results of expert consulting and by considering relevant factors (e.g., the convenience of construction, acceptable levels of cost, and the effects on the amount of indoor usable area). Additionally, a thermal insulation performance analysis was performed by means of steady-state heat source analysis. The results show that the experimental value of thermal transmittance for the proposed recommendation is $0.857 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Compared to the corresponding value of simple concrete walls ($3.79 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), the proposed recommendation can effectively enhance the thermal insulation of exterior walls.

4. Major suggestions

Suggestion I

(Suggestion item) Immediately feasible suggestion — Cross-domain research simultaneously improving both thermal insulation and fire performance of exterior walls

Organizer: Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior.

Co-organizer: National Cheng-Kung University, Building Material Association

With respect to construction methods for thermal insulation enhancement of exterior walls, it is currently acceptable to attach high-thermal-resistance, low-thermal-conductivity sheet materials to the interior side of an exterior wall as part of interior decoration. This construction method is simple, and it can improve the thermal insulation of exterior walls. However, the influence of additional materials used in this approach on the fire performance of exterior walls must be considered.

Suggestion II

(Suggestion item) Long-term suggestion — Laboratory and in-situ measurement of the thermal insulation performance of exterior wall construction

Organizer: Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior.

Co-organizer: National Cheng-Kung University, Association of Electrical Engineers.

Our institute has completed a few measurements of relevant thermal insulation coefficients for individual building materials. Based on this dataset, laboratory and in-situ measurements can be conducted to determine the thermal insulation performance of exterior walls. Such structures include solid walls and void parts (glass at openings). The results can be used to establish actual construction performance data and to discuss the actual building energy efficiency.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

太陽輻射可藉由以下熱傳方式進入室內，成為日射熱得(solar heat gain)，進而成為空調耗能：(1)等效溫差熱傳：太陽輻射照射於建築外殼後的等效熱得與室外熱空氣，可藉由(室外側)熱對流/(構造)熱傳導/(室內側)熱對流等熱傳機制，經由建築外殼將熱量傳入室內；(2)透光部太陽輻射熱傳：太陽輻射直接透過窗戶或天窗等透光部進入室內；(3)熱滲透：室外熱空氣經由開窗、開門及縫隙等途徑滲透(infiltration)進入室內。因此，吾人可藉由阻斷或降低上述 3 種熱傳途徑來提高建築外殼隔熱性能、降低空調耗能，達成永續綠建築節能設計目標。

而藉由上述第(1)項等效溫差熱傳進入室內的熱可佔總熱得之 40%，攸關空調耗能甚巨。吾人常用熱傳透係數 (overall heat transfer coefficient, U 值) 來描述建築物外殼構造對於等效溫差熱傳的隔熱性能。U 值係由室內、外熱對流係數以及外殼構造的傳導熱阻 (total conduction resistance, R 值) 所組成。當熱對流係數越低或 R 值越高時，U 值即越低，代表該構造有較低的等效溫差熱傳，具備較佳的隔熱性能。

我國建築能源法令已將室內、外熱對流係數分別設定為 9 與 23 W/m²K，事實上，熱對流係數受熱傳表面性質、對流狀況等影響，深具個案性質，無法以單一量值來設定，然而，國內的規範方式與設定值與 ISO 標準(UNI EN ISO 6946: 2008)相仿，因此，在熱對流係數的設定上，我國可暫以既有規範內容予以施行。然而，不同的構造方式具有不同的熱阻值；再者，在熱阻值的數據來源上，廠商所提供者、設計時所採用者以及建成後實際構造體的熱阻值，三者之間有可能產生差異，使得吾人對於建築物實際耗能的計量以及能源效率的評價產生不正確性。(Peng and Wu, 2008)(Laurenti *et al.*, 2004)

建成後實際構造體的熱阻值為評估建築耗能之重要依據，現地量測熱阻值時，許多因素會影響到量測準確性，主要有：量測時所置入的感測元件將影響既有穩態熱流行為、動態響應之數據分析方法等，歐盟 PASLINK, IQ-TEST 等專案及其他國外學術研究對此均有深入的研究，也對該國建物進行大規模的實際構造體熱阻值量測。因此，本計畫彙整、評析國際間常見熱阻值現地量測方法，研析外牆構造隔熱性能熱阻值之現地量測法，並進行個案量測。最後，探討在國內目前常見外牆構造上，如何利用可行的材料與構造方法來增益外牆隔熱性能。

第二節 研究目的與重要性

近年來，許多研究單位開展實尺寸構造原形（prototype）的熱阻值實驗量測，特別是依據國際間的標準所進行的原形量測（詳見文獻所臚列之 ISO 與 ASTM 標準），然而，這些量測實驗原形量體頗大且所費不貲，特別是實驗量測而得的構造熱阻值與現實生活中實際構造熱阻值兩者有所差異（Laurenti *et al.*, 2004），特別是場鑄或是現場施工組立之構造，因此，發展構造熱阻現地量測方法是有其必要性。當然，現地量測熱阻值亦存在相當之難度，例如：該如何在現地精準地量測溫度與熱傳率？如何避免因外界環境變化而產生的熱傳暫態現象？如何因應建築構造之多元複雜性？以單一牆體為例，不同部位其內部鋼筋配置型態與水電暗管分佈即為不同，如此即會明顯地影響其局部熱阻值，亦即，一則牆面其不同部位的熱阻值即會有所不同，吾人必須考量熱傳學的理論、建築能源分析與法令規範的需求發展，發展出適合於在地條件的現地量測方法。

第三節 研究步驟流程

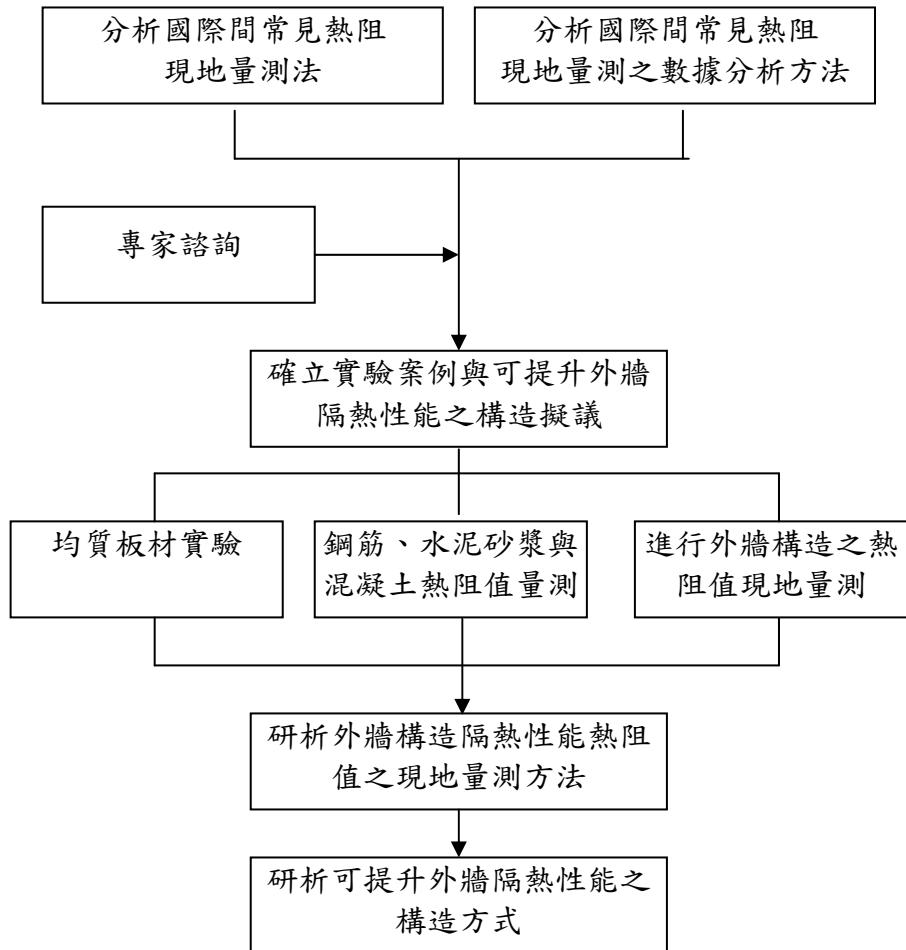


圖 1-1 研究流程（本研究整理）

第二章 文獻回顧

第一節 相關熱傳原理 (Çengel, 2006)

在穩態 (steady-state) 且無內部熱源的情形下，一維 (one-dimensional) 熱傳導過程 (例如：高寬比相當足夠的板材；為建材常見熱傳樣態) 可利用傅利葉熱傳導定律 (Fourier's law of thermal conduction) 來加以描述：(如圖 2-1 所示)

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dX} \quad (\text{單位：W}) \dots\dots\dots(1)$$

其中， \dot{Q}_{cond} 為 X 方向之熱傳導率(W)；T 為溫度 (°C)；X 為長度 (m)；A 為熱流方向之截面積 (m²)；熱傳導係數(thermal conductivity) k 為均勻熱流通過材料單位厚度而在單位面積的兩面所造成的單位溫差，其單位為 W/m K。熱傳導係數為材料性質，依材料與操作溫度而有所不同，圖 2-2 所示為熱傳導係數與溫度之關係。

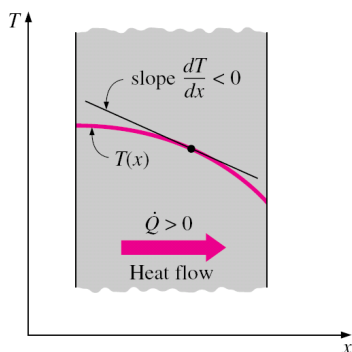


圖 2-1 一維熱傳示意

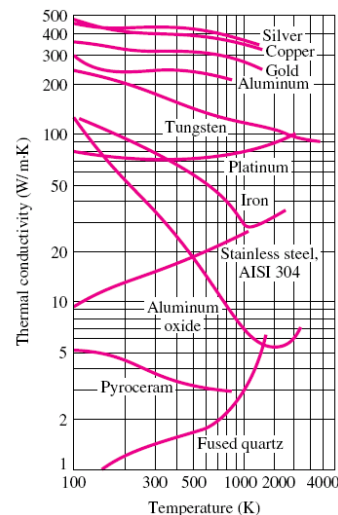


圖 2-2 熱傳導係數與溫度之關係

(兩者資料來源：Çengel, 2006)

熱傳導係數之物理意義與電學上之導電度相似，高熱傳導係數之物質稱熱的良導體，反之稱為熱的絕緣體。暫態 (transient) 且無內部熱源之一維熱傳導方程式如式 (2) 所示，此時的物體內能之變化速率與熱傳導係數成正比，與蓄熱能力 (ρc ，密度與比熱之乘積) 成反比，因此暫態熱傳過程之導熱速率則是利用熱擴散係數 $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ 來決定。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{單位：W}) \dots\dots\dots (2)$$

「半無限大物體」從幾何角度而言是指除一個方向外，於其他所有方向上皆可無限延伸之物體，在半無限大物體之表面施加突然變化之熱條件，其內部將發生一維非穩態之熱傳導，其暫態熱分佈將隨熱邊界之變化產生傳遞，但在另一有限長的觀察範圍可維持初始溫度不變的熱邊界，此問題可視為半無限長之熱傳遞問題模型。建築外牆或是屋頂板構造經常為層狀材料所組成，各層材料在主要熱傳方向 (外牆或是屋頂板的法向量) 的厚度通常遠小於其他兩個維度之長度，且外環境日射熱經常均勻撒佈在外牆與屋頂表面，因此，吾人常可利用一維熱傳導方程式來加以解析外牆或是屋頂板的日射熱傳問題。

一平面壁體或屋頂板 (如圖 2-3 所示) 之穩態熱傳導率為：

$$\dot{Q}_{cond,wall} = \frac{T_1 - T_2}{R_{wall}} \quad (\text{單位：W}) \dots\dots\dots (3)$$

$$R_{wall} = \frac{L}{kA} \quad (\text{單位：}^\circ\text{C/W}) \dots\dots\dots (4)$$

其中， $\dot{Q}_{cond,wall}$ 為此壁體或屋頂板之熱傳導率(W)； T_1 與 T_2 分別為兩邊界之表面溫度 ($^{\circ}\text{C}$)； L 為壁體或屋頂板之厚度 (m)； A 為壁體或屋頂板之面積 (m^2)； k 為壁體或屋頂板之熱傳導係數(thermal conductivity)； R_{wall} 為壁體或屋頂板之傳導熱阻 (heat conduction resistance)。

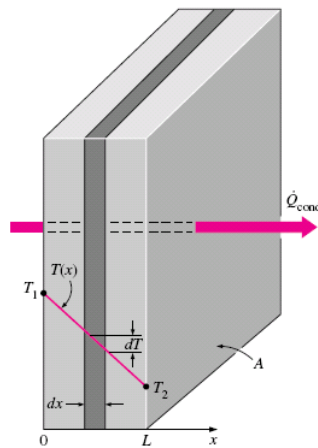


圖 2-3 牆板熱傳導 (資料來源：Çengel, 2006)

另一種經常發生在建築物理領域的熱傳模式則是熱對流 (heat convection)，為流體與固體之間的熱傳機制，例如高溫空氣流經外牆體時，空氣內的熱能傳入此牆體；亦或是室內空氣吹拂過牆體時，牆體內的熱能傳入室內空氣等。吾人可利用牛頓冷確定律 (Newton's law of cooling) 來描述此行為：(圖 2-4)

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) = \frac{T_s - T_{\infty}}{R_{conv}} \quad (\text{單位：W}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_s} \quad (\text{單位：}^{\circ}\text{C/W}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

其中， \dot{Q}_{conv} 為此壁體或屋頂板之對流熱傳率(W)； T_s 與 T_{∞} 分別為固體表面溫度與流體之 free-stream 溫度 ($^{\circ}\text{C}$)； A_s 為壁體或屋頂板之面積 (m^2)； h 為壁體或屋

頂板之熱對流係數(heat convection coefficient), h 值受到幾何形狀、表面粗糙度、流動型態等多重影響, 是則複雜且深具個案特性之參數; R_{conv} 為壁體或屋頂板之對流熱阻 (heat convection resistance)。

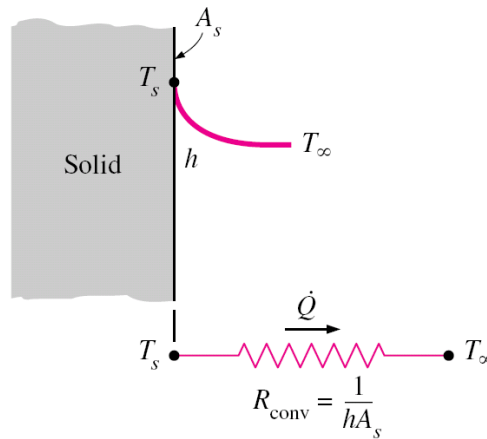


圖 2-4 平面牆版熱對流 (資料來源: Çengel, 2006)

建築構造經常是由層狀建材所構成, 如圖 2-5 所示的多層牆, 吾人則可利用熱阻網路 (thermal resistance network) 的分析方法, 建立起簡易的一維熱流方程式:

$$\begin{aligned}
 \text{系統總熱阻 } R_{total} &= R_{conv,1} + R_{wall,1} + R_{wall,2} + R_{conv,2} \\
 &= \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A} = \frac{1}{h_1 A} + \sum R_{wall} + \frac{1}{h_2 A} \dots\dots\dots (7)
 \end{aligned}$$

$$UA = \frac{1}{R_{total}} \quad (\text{單位: } ^\circ\text{C/K}) \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{Q} = UA\Delta T = UA(T_{\infty,1} - T_{\infty,2}) = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{total}} \dots\dots\dots (9)$$

其中， U 為總熱傳係數 (overall heat transfer coefficient)。由於高溫側熱源除了是戶外空氣之外，更重要的是來自太陽之日射熱得，因此，本計畫將採用等價日照溫度 (Sol-air temperature) $T_{\infty, I}$ 來設定溫度邊界。等價日照溫度 $T_{\infty, I}$ 是一種虛擬的外氣溫度，等同於外氣溫度 T_o 與日射熱輻射綜合作用於相同表面時的熱傳。利用表面受日射熱輻射時的熱平衡，吾人可得：

$$\frac{q}{A} = \alpha E_t + h_o(T_o - T_s) - \varepsilon \Delta R \dots\dots\dots (10)$$

其中

q = 表面熱傳透率，單位：kW

A = 熱傳表面積，單位：m²

α = 表面受到熱輻射時的吸收比 (absorptance)，單位：無因次

E_t = 表面所受到的日射熱輻射，單位：W/m²

h_o = 表面熱對流係數，單位：W/m² K

T_o = 外氣溫度，單位：°C

T_s = 表面溫度，單位：°C

ε = 放射率，單位：無因次

ΔR = 來自天空以及環境的長波輻射扣除外氣溫度下的黑體輻射，單位：W/m²

假設熱傳量可以用等價日照溫度 $T_{\infty, I}$ 來表示：

$$\frac{q}{A} = h_o(T_{\infty, I} - T_s) \dots\dots\dots (11)$$

由式 (10) 與式 (11)，吾人可得：

$$T_{\infty, I} = T_o + \frac{\alpha E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \dots\dots\dots (12)$$

由 ASHRAE Handbook (Fundamental)可知，對於僅接收到天空長波輻射的水平屋頂而言， ΔR 的值約為 63 W/m^2 ，若 $\varepsilon=1$ 且 $h_o=17 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ，則長波輻射修正項 $\frac{\varepsilon\Delta R}{h_o}$ 約為 4K 。由於垂直牆面會受到來自地面、周遭建築體以及天空的長波輻射，吾人將無法正確地估算 ΔR 值。當日射輻射量相當高的時候，一般建築體的表面溫度會高於外氣溫度，他們長波輻射通常會部分抵銷掉天空的低放射量因此，吾人通常可以假設垂直牆面的 $\varepsilon\Delta R=0$ 。當表面為淺色系時， α/h_o 約為 0.026 ；表面為暗色系時， α/h_o 約為 0.052 。我國建築能源法令已將室內、外熱對流係數分別設定為 9 與 $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ，事實上，熱對流係數受熱傳表面性質、對流狀況等影響，深具個案性質，無法以單一量值來設定，然而，國內的規範方式與設定值與 ISO 標準(UNI EN ISO 6946: 2008)相仿，因此，在熱對流係數的設定上，我國可暫以既有規範內容予以施行。

表 2-1 計算等價日照溫度時所使用的參數

| | α/h_o | $\frac{\varepsilon\Delta R}{h_o}$ | h_o |
|-----------------|--------------|-----------------------------------|-------|
| 90° (垂直) | 0.052 | 0 | 13.5 |

(資料來源：ASHRAE Handbook (Fundamental))

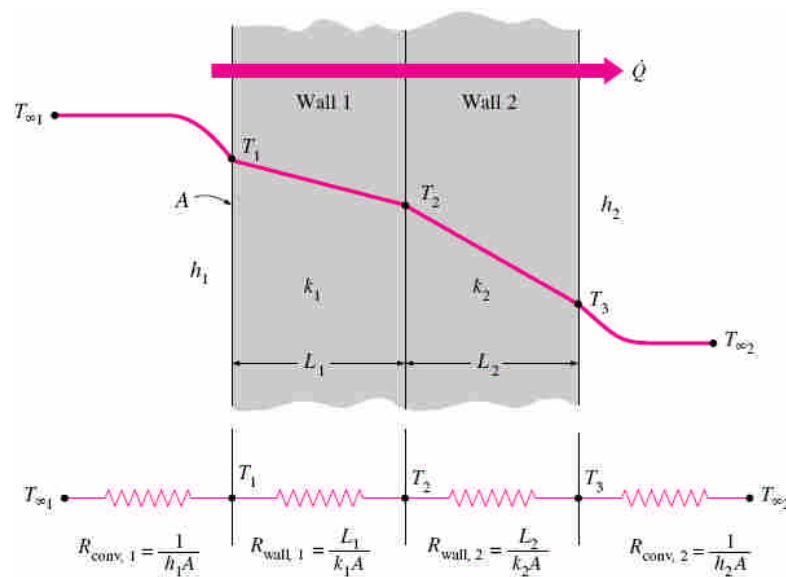


圖 2-5 多層牆之熱阻網路分析 (資料來源：Çengel, 2006)

第二節 相關建材之熱傳導係數

本文先以歐洲規範 EUROCODE 3 中 S355 等級鋼材之熱傳導係數資料進行介紹，其熱傳導係數是溫度的函數，會隨著溫度的升高而減小，大致上是由 0°C 的 54 W/mK 線性遞減至 800°C 的 27.3 W/mK，800°C 以後維持 27.3 W/mK 的數值，但當溫度超過一定限值時熱傳導係數幾乎為常數，另外不同種類的鋼材其熱傳導係數會略有不同，這主要是由於鋼材中的含碳量不同造成的，EUROCOD3 提出的鋼材熱傳導係數可由式(13)(14)得知，其中 T_{steel} 為鋼材的溫度(°C)。

$$k_x = 54 - 0.0333T_{\text{steel}} \quad 20^\circ\text{C} \leq T_{\text{steel}} < 800^\circ\text{C} \dots\dots\dots(13)$$

$$k_x = 27.3 \quad 800^\circ\text{C} \leq T_{\text{steel}} \leq 1200^\circ\text{C} \dots\dots\dots(14)$$

混凝土的組成並非均勻質，相較於前述竹節鋼筋或鋼材，混凝土的內部熱傳導機制以及熱傳導係數的量測方式會較為複雜，茲將其原因茲簡述如下：（張政豐, 1995）
（鄭永傑，2002）

1. 混凝土內含水泥、粗細骨材及各種化學摻料，各材料受高溫後性質不一致，故混凝土受高溫後之性質較鋼筋材料複雜。
2. 混凝土材料有含水量之問題，鋼筋材料則無。
3. 混凝土之晶體排列相當不規則，鋼筋材料則具有較規則之晶體排列，因此受高溫後其材料內部晶體之振動，相對於熱傳導之影響有顯著不同的情形。
4. 由於一般混凝土試體尺寸較大，所以較不適合採用鋼筋材料熱傳導係數之測試法。

混凝土熱傳能力是由水泥漿體與骨材的混合比例關係決定；而水泥漿體與骨材的熱傳導能力乃受孔隙量、含水量的影響甚大，因為水泥漿體與骨材間的界面亦存在孔隙，這些孔隙也將影響熱流的傳導。(Harold, 1982)研究發現，混凝土在溫度約 100 °C 左右時有最高的熱傳導係數 1.0~2.0 W/m K。而(Lin, 1987)所提供之熱傳導係數如圖 2-6 所示；(Harmathy and Alien LW, 1973)所提供之熱傳導係數如圖 2-7 所示，其關係式如表 2-2 所示，兩者之熱傳導係數並無(Harold, 1982)所述之現象發生，但兩者之熱傳導係數都極為類似，並且三者之熱傳導係數均隨溫度增加而遞減。

而依據(Harada T. *et al.*, 1972)研究混凝土、純水泥漿及砂漿之熱傳導係數與溫度之關係，其結果亦顯示熱傳導係數隨溫度升高而降低，如圖 2-7 所示，此乃因溫度超過 100°C 時，混凝土中的孔隙水逐漸蒸發而使得熱傳導減緩所致。

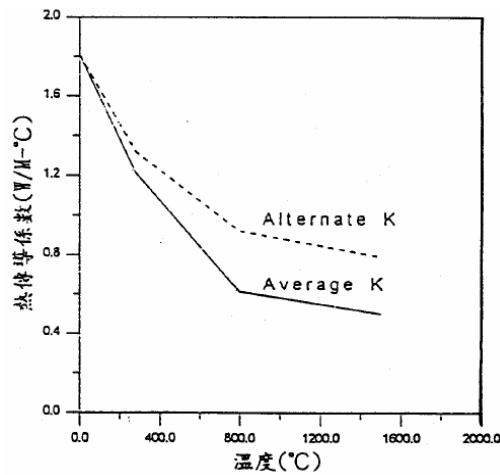


圖 2-6 混凝土熱傳導係數 (資料來源：Lin, 1987)

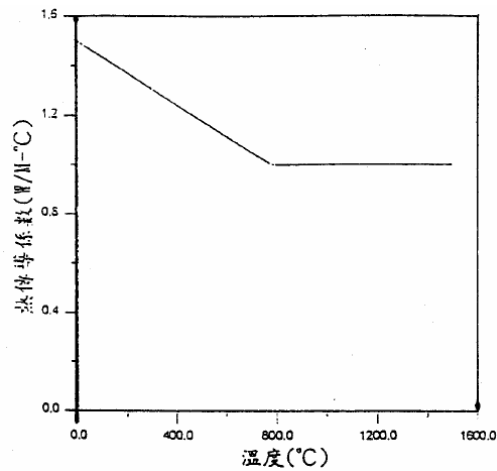


圖 2-7 混凝土熱傳導係數（資料來源：Harmathy and Alien, 1973）

表 2-2 混凝土熱傳導係數

| 溫度範圍 (°C) | 熱傳導係數 (W/m°C) |
|-----------------------------------|--|
| $0 \leq T \leq 800^\circ\text{C}$ | $k = -0.000625T + 1.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ |
| $T > 800^\circ\text{C}$ | $k = 1.0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ |

（資料來源：Harmathy and Alien, 1973）

當溫度達 300°C 以上時，骨材和硬固水泥漿體間因熱應變不和諧而產生微裂縫，增加熱傳導途徑且此時由於 C-S-H 逐漸分解，部份骨架因被破壞導致熱傳導能力減弱使得熱傳導係數加速下降。當溫度到達 600°C 以上時，由於孔隙間之熱傳方式改以輻射為主，使得熱傳導係數又逐漸回升，在 800°C 時約為 20°C 時之一半（林維明，1990）（張晏祥，1994）。

第三節 彙整本所既有單一建材隔熱性能係數

本所歷年來已完成多起單一建材隔熱性能係數之量測，茲將相關內容彙整如後。(王佑萱，2004)以建材隔熱性能量測儀器-攜帶式熱傳導係數與比容量測儀、建材隔熱性能量測儀以及固定式熱傳導係數與比容量測儀來量測泡沫混凝土、隔熱磚、發泡玻璃之隔熱性能。選定市面上常用屋頂隔熱建材作為實驗主體，建立屋頂單一隔熱材之隔熱性能數據。(陳瑞鈴等，2005)將建材隔熱性能量測以建材、防火建材以及再生建材等三項，共完成木材類、玻璃類、水泥類、土石類、窯業製品類、合成樹脂板類、瀝青塑膠紙類、石膏纖維材、其他類等九類 65 種常用建材之隔熱性能量測。(王佑萱，2006)分析 9 類型隔熱磚之組成結構特性及施工工法差異，並透過建築單一材料專用隔熱性能量測儀器進行實測，得屋頂隔熱建材之單一材料熱性能係數。(施文和、黃尊澤，2010)以再生隔熱磚為研究對象，收集現行再生隔熱磚進行量測其熱傳導係數，將所得之數據輸入美國能源部開發之耗能模擬軟體 DOE-2 進行模擬，以評估再生隔熱磚與一般隔熱磚之節能效益。

綜合上述相關文獻，將實際量測之單一建材隔熱性能係數統整如下表：

表 2-3 單一建材隔熱性能係數之彙整(本研究整理)

| 分類 | 建材 | K 值(W/m ² °C) | 資料來源 |
|--------|---------------|--------------------------|-------------|
| 屋頂隔熱建材 | 泡沫混凝土 | 0.227 | 內政部建研所【C01】 |
| | 隔熱磚 | 0.112 | 內政部建研所【C01】 |
| | 發泡玻璃 | 0.046 | 內政部建研所【C01】 |
| | PS 隔熱磚(混凝土層) | 2.20 | 內政部建研所【C03】 |
| | PS 隔熱磚(PS 板層) | 0.0391 | 內政部建研所【C03】 |
| | 五角隔熱磚(高壓混凝土層) | 1.64 | 內政部建研所【C03】 |
| | 斷熱陶隔熱磚(陶土層) | 0.631 | 內政部建研所【C03】 |
| | 隔熱石英磚 | 1.69 | 內政部建研所【C03】 |
| | 保麗龍隔熱磚(保麗龍層) | 0.0489 | 內政部建研所【C03】 |
| 水泥 | 20cm 混凝土層 | 1.3 | 內政部建研所【C04】 |
| | 泡沫混凝土 | 0.227~0.246 | 內政部建研所【C02】 |
| | 普通混凝土 | 1.57~1.76 | 內政部建研所【C02】 |
| 土石 | 大理石 | 2.33~2.91 | 內政部建研所【C02】 |
| | 黃石 | 2.95 | 內政部建研所【C02】 |
| | 金米黃螺 | 0.625 | 內政部建研所【C02】 |
| | 砂粒 | 0.256 | 內政部建研所【C02】 |
| 木材 | 楓木 | 0.117 | 內政部建研所【C02】 |
| | 柚木 | 0.155~0.202 | 內政部建研所【C02】 |
| | 檀木 | 0.199~0.243 | 內政部建研所【C02】 |
| | 南方松 | 0.131 | 內政部建研所【C02】 |
| | 柳安木 | 0.272 | 內政部建研所【C02】 |
| | 杉木 | 0.146~0.279 | 內政部建研所【C02】 |
| | 檫木 | 0.172~0.214 | 內政部建研所【C02】 |

外牆構造隔熱性能之研究

| 分類 | 建材 | K 值(W/m ² °C) | 資料來源 |
|-------|--------------|--------------------------|-------------|
| 玻璃 | 清玻璃 | 0.970~0.997 | 內政部建研所【C02】 |
| | 綠玻璃 | 0.927~1.01 | 內政部建研所【C02】 |
| | 藍玻璃 | 0.958~1.017 | 內政部建研所【C02】 |
| | 茶玻璃 | 0.965~1.030 | 內政部建研所【C02】 |
| 窯業製品 | 一般磁磚 | 1.3 | 內政部建研所【C04】 |
| | 多功能高壓發泡防水隔熱磚 | 0.379 | 內政部建研所【C02】 |
| | 連鎖磚 | 1.45 | 內政部建研所【C02】 |
| | 紅磚 | 0.750 | 內政部建研所【C02】 |
| | 花崗石磁磚 | 1.02 | 內政部建研所【C02】 |
| | 石質磁磚 | 0.491~0.928 | 內政部建研所【C02】 |
| | 耐火磚 | 1.033 | 內政部建研所【C02】 |
| 合成樹脂板 | PU 發泡板 | 0.0432 | 內政部建研所【C02】 |
| | PVC 發泡板 | 0.039 | 內政部建研所【C02】 |
| | PU 板 | 0.263 | 內政部建研所【C02】 |
| | PS 板 | 0.050 | 內政部建研所【C02】 |
| | 保麗龍 | 0.0395 | 內政部建研所【C02】 |
| | PE 發泡板 | 0.0795 | 內政部建研所【C02】 |

| 分類 | 建材 | K 值(W/m ² °C) | 資料來源 |
|-----------------|-------------|--------------------------|-------------|
| 瀝青、 塑膠、 紙 | 柏油氈(紙面) | 0.209 | 內政部建研所【C02】 |
| | 抗拉柏油氈(不織布面) | 0.184 | 內政部建研所【C02】 |
| | 厚紙板 | 0.154 | 內政部建研所【C02】 |
| 石膏、 纖維材 | 岩棉板 | 0.371 | 內政部建研所【C02】 |
| | 木粒片水泥板 | 0.355 | 內政部建研所【C02】 |
| | 矽酸鈣板 | 0.311 | 內政部建研所【C02】 |
| | 石膏板 | 0.220 | 內政部建研所【C02】 |
| | 纖維水泥板 | 0.450 | 內政部建研所【C02】 |
| 防火 建材 | 矽酸鈣板 | 0.311 | 內政部建研所【C02】 |
| | 紙面石膏板 | 0.22 | 內政部建研所【C02】 |
| | 纖維水泥板 | 0.45 | 內政部建研所【C02】 |
| | 木粒片水泥板 | 0.355 | 內政部建研所【C02】 |
| | 岩棉板 | 0.371 | 內政部建研所【C02】 |
| | 蛭石板 | 0.516 | 內政部建研所【C02】 |
| | 化粧熱固性樹脂板 | 0.405 | 內政部建研所【C02】 |
| | 熱固性樹脂硬質發泡板 | 0.0787 | 內政部建研所【C02】 |
| | 阻燃纖維板 | 0.335 | 內政部建研所【C02】 |

| 分類 | 建材 | K 值(W/m ² °C) | 資料來源 |
|------|---------------|--------------------------|-------------|
| 再生建材 | 再生粒片板 | 0.160 | 內政部建研所【C02】 |
| | 水庫淤泥混凝土 | 0.178 | 內政部建研所【C02】 |
| | 再生建材連鎖磚(57mm) | 0.559 | 內政部建研所【C02】 |
| | 再生建材連鎖磚(64mm) | 0.874 | 內政部建研所【C02】 |
| | 再生建材連鎖磚(67mm) | 1.22 | 內政部建研所【C02】 |
| | 再生木質水泥隔熱磚 | 0.157 | 內政部建研所【C04】 |
| | 再生冷結磚(B3&C50) | 0.653 | 內政部建研所【C04】 |
| | 再生輕質磁磚 | 0.121 | 內政部建研所【C04】 |
| 其他 | 壓克力 | 0.196 | 內政部建研所【C02】 |
| | 發泡玻璃 | 0.208 | 內政部建研所【C02】 |

備註：

【C01】王佑萱，2004，建築物屋頂單一建材之隔熱性能研究與檢測方法分析，內政部建研所 P.74

【C02】陳瑞鈴、林憲德、李訓谷，2005，單一建築材料隔熱性能資料庫之建立，內政部建研所 P.29~P.30, P.32, P.34

【C03】王佑萱，2006，屋頂建材隔熱性能實測與節能效益分析研究，內政部建研所 P.45~ P.65

【C04】施文和、黃尊澤，2010，再生建材隔熱效果之研究-以再生隔熱磚為例，內政部建研所 P.36

我國建築牆體或屋頂板多為由鋼筋以及混凝土組合而成的鋼筋混凝土構造，除了鋼筋與混凝土外，尚有支柱、水電管線、出線盒等，因此，總熱阻無法由各材料熱阻加總而成。國內既有研究成果以單一構件之熱阻值量測為主，對於構件熱阻值現地量測以及環境控制構造熱阻值分析則不多見。

第三章 研究方法

本計畫所用的熱傳原理相當簡易，但量測原理、邊界條件的假設以及其與實際構造方式之契合、材料特性等均需要留意與釐清，包含：

考量一：量測方法的妥適性：所用到的熱傳原理相當簡易，但利用熱流計進行量測時需要注意其介入實驗體邊界後是否會影響既有實驗體內部熱流模式？假設實驗體邊界以及熱流計邊界兩者熱對流係數相同是否合理？此假設可以簡化量測，但影響量測結果的程度如何？

考量二：日射條件的影響：建材之高熱容性會造成室內外熱流的時滯現象，因此，在實地量測時，相關計量時往往以單/多日累積量或是單/多日平均量為分析基礎，如此是否會影響量測之準確性？是否有較簡易之方法？

考量三：適合於我國常見構造之量測方式為何？

因此，本計畫規劃一系列之研究程序，如圖 3-1 所示，希望有效結合學術與實務，且將成果反應為簡便實用又符合學理之現地檢測方法。

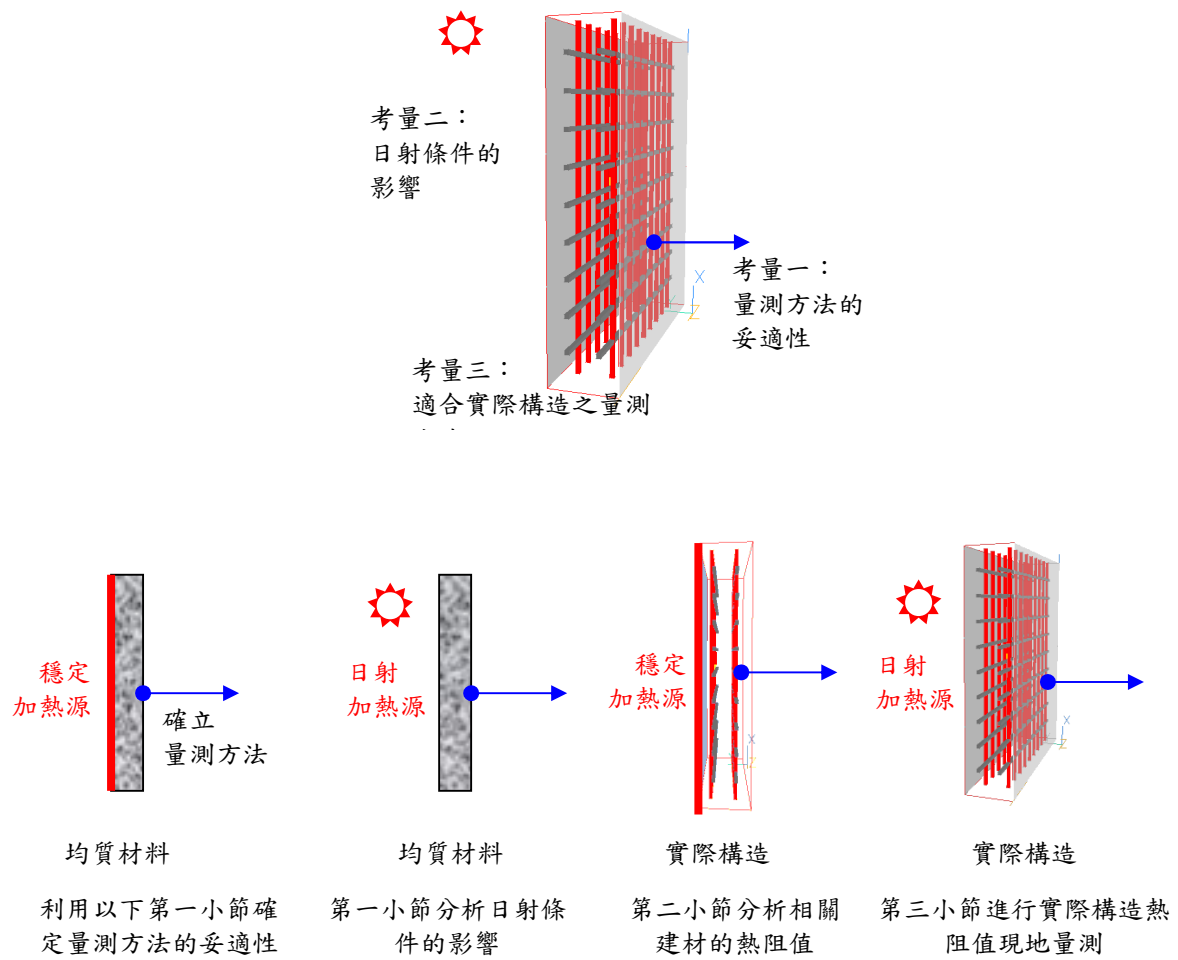


圖 3-1 本計畫各項序列研究之安排（本研究整理）

第一節 實地量測方法

與本計畫相關之研究方法包含：(1)溫度合成法（ISO standard 8301-1991）、(2)表面溫度法（ISO 9869-2014）以及(3)穩態熱源分析法，本小節將研析上述三種方法是否適用於研究課題？

(1) 溫度合成法（Method of synthetic temperatures）（ISO standard 8301-1991; BS EN ISO 6946-1997）

在現地測試時，吾人可藉助太陽日照作為高溫側熱源，然而，此熱源係隨時間而變，並非完美穩態；室內側則可藉助空調來達成穩定的對流邊界。由於建築外殼熱阻的因素，僅有部分的日照能量得以進入室內而成為室內熱得（heat gain），且由於我國建築外殼需負擔部分耐震之責，厚實的建材其高熱容性會造成室內外熱流的時滯現象。因此，為了避免牆體熱容效應，在分析外牆體或屋頂板的熱阻值時，實驗量測溫度與熱流率的時間必須足夠（至少一天），無法利用暫態量測方式來取代。熱阻值 R_{total} 的計量方式為：

$$R_{total} = \frac{\bar{T}_{\infty,1} - \bar{T}_{\infty,2}}{\bar{Q}} \dots\dots\dots(15)$$

$$\bar{T}_{\infty,1} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} T_{\infty,1} \dots\dots\dots(16)$$

$$T_{\infty,1} = T_o + \frac{\alpha E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \dots\dots\dots(12)$$

此方法有則關鍵參數 \bar{Q} （穿越實驗體之熱流率(W)），可配合熱流計以及本研究自行推導之方式來加以估算：

$$\bar{Q} = q_{hf}'' A \frac{T_{s,i} - T_{\infty,2}}{T_{hf} - T_{\infty,2}} \dots\dots\dots(17)$$

其中， q''_{hf} 為熱流計量得之熱通量 (W/m^2)； A 為試體表面積 (m^2)； $T_{s,i}$ 為室內側壁溫； T_{hf} 為熱流計室內側表面溫度。其他各參數如詳 2.1 小節所說明。吾人採用等價日照溫度 (sol-air temperature) $T_{\infty,l}$ 來設定戶外溫度邊界，其等同於外氣溫度 T_o 與日射熱輻射綜合作用於相同表面時的熱傳現象。

上述實驗的熱源來自太陽日照，本研究亦將利用穩定熱源來輔助觀察溫度合成法的適用性。再者，本方法無須得知室內、外熱對流係數，此與我國建築能源法令的內容有所差異 (該法令將其分別設定為 9 與 $23 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$)，因此，此方法之適用性有待商榷。

根據研究團隊自設氣象站 (圖 3-2) 多年來的數據觀察，南向立面與水平面的日射量在夏季中午時段會呈現一段穩定的數據變化 (圖 3-3)，此 1-2 小時的穩定日射環境是否可視為 quasi-state state？是否足以造成穩定的邊界條件以提供分析之用？本計畫將仔細探討上述疑點，以利簡化現地量測方法。



圖 3-2 研究團隊自設氣象站 (本研究整理)

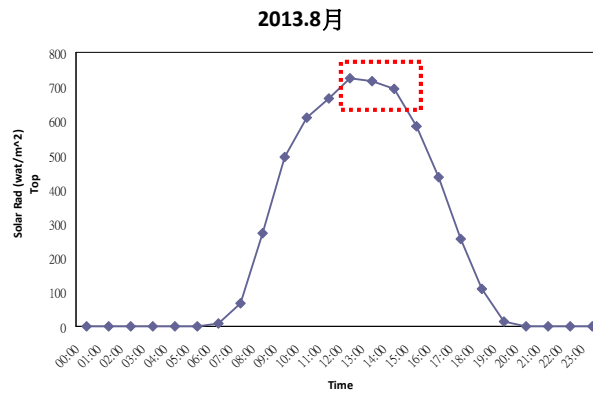


圖 3-3 2013 年 8 月份台南地區水平日射量 (本研究整理)

(2) 表面溫度法 (Method of surface temperatures) (ISO 9869-2014; ISO 8301-1991; BS EN ISO 6946-1997)

吾人可利用實驗牆體之表面溫度之一日平均值 ($\bar{T}_{s,o}, \bar{T}_{s,i}$) 以及前述 h_1, h_2, \bar{Q} 來決定牆體熱阻值 R_{total} :

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A} + \sum R_{wall} + \frac{1}{h_2 A} \dots\dots\dots(18)$$

$$\sum R_{wall} = \frac{\bar{T}_{s,o} - \bar{T}_{s,i}}{\bar{Q}} \dots\dots\dots(19)$$

(Trethowen, 1986) 發現，依據本標準進行量測時，需進行以下事項以降低量測不確定度 (measurement uncertainty)：(1) 讓室內溫度盡可能保持穩定；(2) 盡可能讓牆體兩側壁溫差高於 10°C。依據 ISO 9869-1994 所述，此標準所衍生之量測不確定度為 14-28 %。上述提點出執行 ISO 9869-2014 時注意之處，也提供本計畫後續進行熱流量測實驗以及熱流數據分析與判斷之重要依據。

(3) 穩態熱源分析法

上述兩種方法雖為國際間公認之通用法則，但使用上受限於需要進行 24 小時量測。為簡化量測，本計畫參酌 (Kato *et al.*, 2007)，並假設熱流計表面與試體表面具有相同的熱對流係數，因此發展出穩態熱源分析方法：

$$k = q''_{hf} L \frac{(T_{s,i} - T_{\infty,2})}{(T_{hf} - T_{\infty,2})(T_{s,o} - T_{s,i})} \dots\dots\dots(20)$$

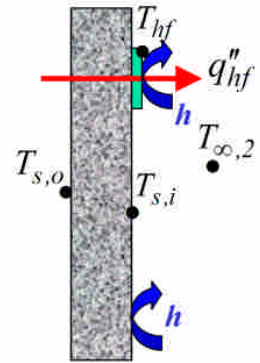




圖 3-4 穩態熱源分析法之參數示意 (本研究整理)

綜評上述方法論後，本計畫決定以 ISO 9869-2014 作為外牆構造熱阻係數之主要量測方法。同時，為求能夠簡便快速地量測熱阻係數，本計畫同步發展出穩態熱源分析法，並將此方法與儀器直接量測進行比較驗證。

表 3-1 本計畫所用量測方法

| | ISO 表面溫度法 | 穩態熱源分析法 | 儀器 KD2 直接量測 |
|---------|--|---|-------------|
| 均質板實驗 | 用來驗證方法論 | 用來驗證方法論 | 用來驗證方法論 |
| 現場實測 | 適用於實際足尺構造  | 適用於實際足尺構造  | (不適用) |
| 現場實測之限制 | 依照 ISO 標準之內容，本方法執行時需有日照條件。若無，則可改用本計畫所擬穩態熱源分析法。 | 非為國際標準；但此方法為國際間多則研究單位目前發展中的方法論。 | (不適用) |

(本研究整理)

第二節 鋼筋、水泥砂漿與混凝土之熱傳導係數：建立基礎數據

水泥砂漿可視為均質，因此在板材試體的尺度設計上只要能滿足一維熱傳導模式即可，尺度不大，因此，可直接使用本團隊既有熱傳導值量測儀器 KD2 (Decagon Devices Inc.)來進行熱阻值量測，其量測原理與金屬暫態熱線法原理相同，符合 ASTM D5334-05 及 IEEE442 標準測試方法，而儀器本身誤差於±5%以內。。

在混凝土板材部分，考量混凝土內含粗細骨材等，由一般試體尺度視之屬於非均質材質，欲求得混凝土板材代表性熱阻值，待測板材之厚度必須遠高於粗骨材之最大標稱粒徑（3/4 吋）；再加上本所既有熱傳導值量測儀器之量測原理係利用一維熱傳導模式，如此的量測原理將需要相當足夠的混凝土板材高寬比，亦即，混凝土板材需要相當大的寬度，如此，混凝土板材試體將具有相當之體積而無法置入本所既有熱傳導儀之量測艙體。因此，將使用研究團隊所設計之實驗模型來量測混凝土板材熱阻值。實驗模型如圖 3-5 所示，為了減少與環境之熱傳，在實驗模型外均以隔熱膠棉包覆，以杜絕外界干擾因素，獲得較穩定之實驗數據。

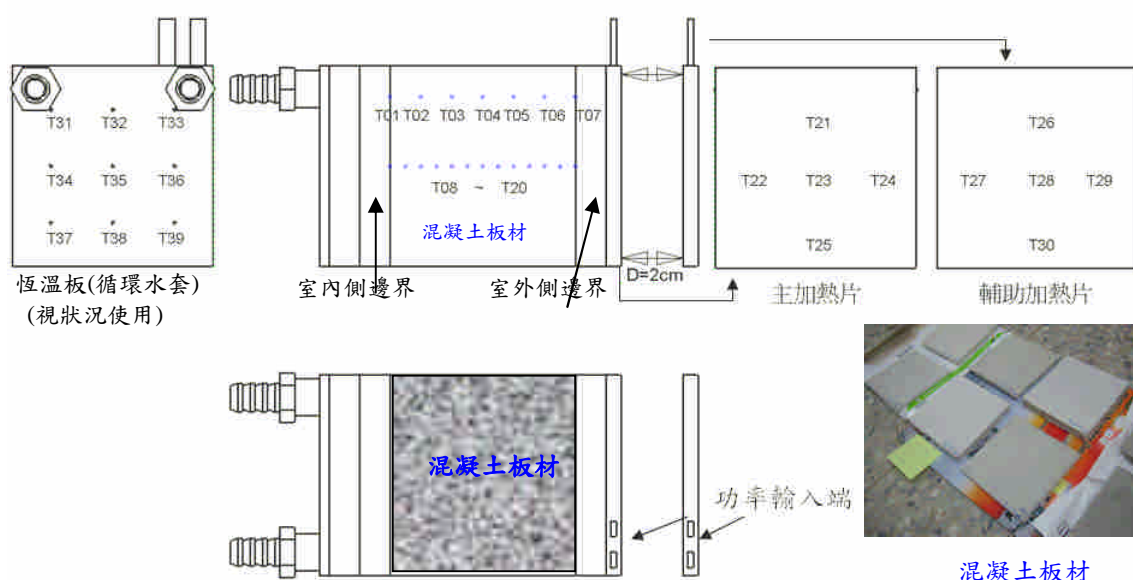


圖 3-5 實驗原型（本研究整理）

(1) 加熱壁

加熱部份為雲母式加熱片黏貼於一銅板上，此加熱片最大輸出電功率為 1000W/m^2 ，銅板厚度為 1cm 其目的是讓加熱壁能達均勻等溫；除此之外，為了減低加熱壁因溫差而散失至環境之熱量，於距離主加熱片 2cm 處，以另一片雲母式加熱片輔助加熱形成副加熱壁，實驗中進行溫度監控，再手動調整補償加熱片之溫度控制器，使補償加熱片溫度與主加熱片一致。目的在於控制副加熱壁溫度與主加熱壁溫度相同，即可使主加熱壁熱量朝單一方向傳至實驗模型端。為了使控制輸出功率更加準確，將電源供應器與功率計 (TES WM-01) 串接並將加熱片做為負載，當輸出功率流經功率計至加熱片時，功率計會顯示出實驗所需之精確功率值，並利用電腦紀錄及擷取當時實驗所使用之功率值以利分析。

(2) 溫度量測

在溫度量測方面，本文使用 K 型熱電偶量測實驗模型各溫測點溫度，加熱端部分，於主加熱片與輔助加熱片表面各設立 5 個熱電偶來量測溫度，而在與主加熱片相連之銅板靠試體端表面上設立 2 個熱電偶，以即時監控加熱壁溫度；於實驗試體中央與側邊不同位置分別設置熱電偶，以觀測實驗中溫度變化分佈之趨勢，熱電偶位置分佈如圖 3-5 所示。

(3) 實驗量測周邊系統

本實驗所需之設備與數據擷取系統主要包括：

- (a) 數據擷取系統(YOKOGAWA MX-100)一組；
- (b) 個人電腦一台；
- (c) 直流電源供應器(Gwinstek SPD-3606)一台；
- (d) 恆溫槽(華夏 RCB-412)一台；
- (e) 熱影像儀(Fluck Ti-25)一台。

(4) 實驗方法與步驟

熱壁主要藉由電源供應器輸入所需電量來提供熱能，等溫冷壁則藉由恆溫槽循環水路控制，而起始溫度則與實驗參數設定之等溫冷壁壁溫或常溫為實驗初始值。在實驗開始之前，必須先設定實驗模型溫度達實驗所須等溫冷壁，即實驗初始值，當整體溫度皆達冷壁壁溫時實驗則開始進行。以下為實驗步驟：

- (a) 開啟恆溫槽，設定實驗模型初始溫度值(冷壁溫度)。
- (b) 當模型均勻到達所需初始溫度，電熱片開始加熱至設定瓦數，控制於等熱通量邊界狀態。
- (c) 全程記錄其溫度、輸入功率並定時拍攝熱影像。
- (d) 等試驗試體內部升溫曲線至穩態即完成實驗。

(5) 實驗數據換算

本實驗主要控制參數為冷熱壁壁溫，主要數據有實驗模型中各熱電偶所量測之溫度及實驗中電源供應器輸出之電壓、電流，由這些數據即可依據 3.1 小節所述計算出熱傳係數，其計算方式如下：

(a) 輸入熱量 q_{in} 之計算

實驗中以電源供應器供應主加熱片所需熱量，其供應之電壓、電流數據由數據擷取器擷取之，再以電壓及電流來求得輸入功率，即 $q_{in} = V \cdot I$ ，故熱通量為 $q_{in}'' = \frac{q_{in}}{A}$ ，其中 A 為加熱壁面積。

(b) 熱損失 q_{loss} 之估算

於實驗過程中，調整輔助加熱片溫度時，並不易使其溫度與主加熱片溫度完全相符，因此必須考慮主加熱片與輔助加熱片之間的熱傳關係。實驗模型架構中主加熱

片與輔助加熱片之間有 2cm 的距離，故在主加熱片與輔助加熱片間之熱量傳遞計算可分為熱輻射及熱傳導($Ra_w < 10^3, \overline{Nu}_w = 1$ 或熱對流 $Ra_w > 10^3$)兩部份：

(b1) 當 $Ra_w < 10^3, \overline{Nu}_w = 1$ 時

$$q_{loss} = \frac{k_{air} \cdot (T_{main} - T_{aux}) \cdot A}{w} + \frac{A \cdot \sigma \cdot (T_{main}^4 - T_{aux}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{main}} + \frac{1}{\epsilon_{aux}} - 1} \dots\dots\dots(20)$$

(b2) 當 $Ra_w > 10^3$ 時

$$q_{loss} = \frac{\overline{Nu}_w \cdot k_{air} \cdot (T_{main} - T_{aux}) \cdot A}{w} + \frac{A \cdot \sigma \cdot (T_{main}^4 - T_{aux}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{main}} + \frac{1}{\epsilon_{aux}} - 1} \dots\dots\dots(21)$$

$$\overline{Nu}_w \text{ 的計算方法如下(Incropera, 1996): } \overline{Nu}_w = 0.18 \left(\frac{Pr}{0.2 + Pr} Ra_w \right)^{0.29} \dots\dots\dots(22)$$

$$\text{參數範圍: } 1 < \frac{H}{W} < 2, 10^{-3} < Pr < 10^5, 10^3 < \frac{Ra_w Pr}{0.2 + Pr}$$

$$\text{計算式中萊利數}(Ra_w)\text{計算如下: } Ra_w = \frac{g \cdot \beta_{T,air} \cdot \Delta T \cdot W^3}{\alpha_{air} \cdot \nu_{air}} \dots\dots\dots(23)$$

其中 k_{air} 為空氣熱傳導係數、 T_{main} 為主加熱片表面之溫度、 T_{aux} 為補償加熱片表面之溫度、 A 為加熱壁面積、 w 為兩加熱壁間距、 ϵ_{main} 、 ϵ_{aux} 分別為兩加熱片表面之放射係數(=0.074)、 σ 為史蒂芬-波之曼常數(=5.67×10⁻⁸W/m²·K⁴)、 $\beta_{T,air}$ 為空氣之熱膨脹係數、 ΔT 為主加熱片與輔助加熱片之溫差、 α_{air} 為空氣熱擴散係數、 ν_{air} 為動黏滯係數。

(c)修正輸入熱量 q_{corr}

外牆構造隔熱性能之研究

在計算熱損失後，我們只需要減去 q_{loss} 即可求出修正後之輸入熱量 q_{corr} ；

$q_{corr} = q_{in} - q_{loss}$ ，實驗中當補償加熱片溫度低於主加熱片之溫度時 q_{loss} 經計算後為正值，反之則 q_{loss} 為負值。

第三節 鋼筋混凝土原型之熱傳實驗

鋼筋混凝土樓板構造與牆構造具有相似厚度，唯樓板會因其受力後之力學特徵而將配筋模式分為長短向柱列帶及中間帶，以及雙層雙向配筋模式兩種差異，如圖 3-6 及圖 3-7 所示：長向鋼筋柱列帶 CDC，長向鋼筋中間帶 ABA；短向鋼筋柱列帶 CAC，短向鋼筋中間帶 DBD。若考慮設置成本，柱列帶板配筋模式之材料使用較為經濟(公共工程使用較多)，如圖 3-8 所示；若由施工角度觀視，雙層雙向配筋模式之鋼筋加工及施工會較為簡易，且可降低與水電工程施工介面之衝突，故現階段多數鋼筋工程多採用雙層雙向模式配筋(坊間工程使用較多)，如圖 3-9 所示。

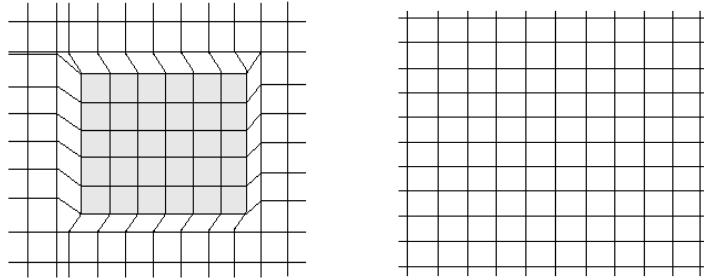


圖3-6 版鋼筋標準圖柱列帶及雙層雙向配筋示意

(資料來源：楊秉蒼，2013)

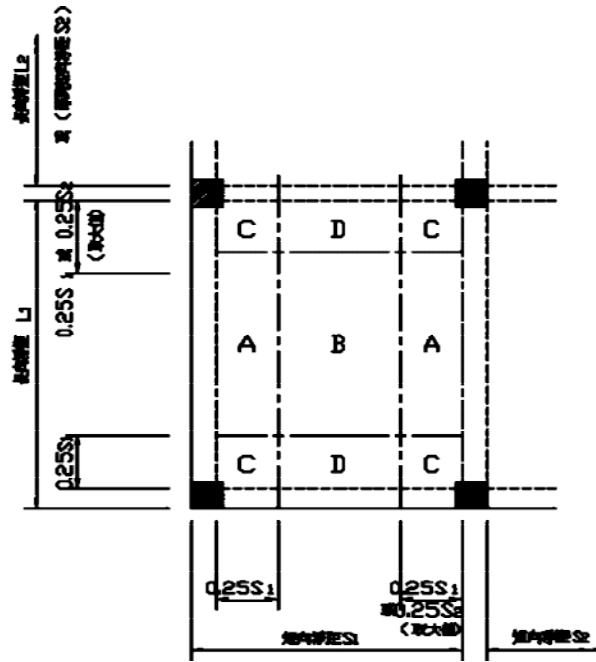


圖 3-7 樓版分區帶 (資料來源：楊秉蒼，2013)

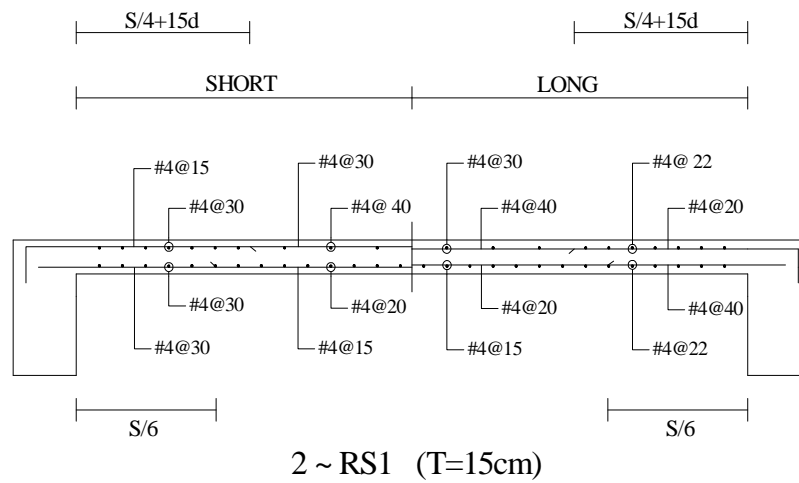


圖3-8 柱列帶版配筋案例 (本研究整理)

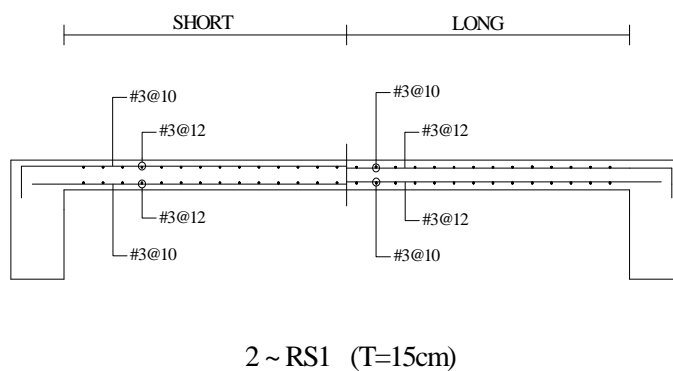


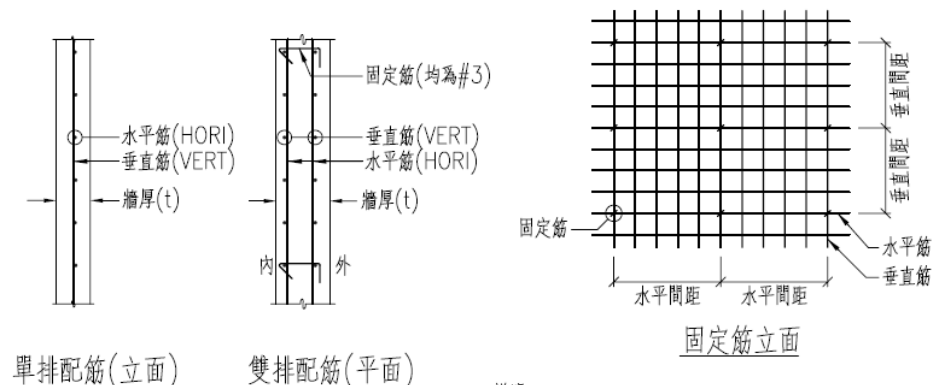
圖3-9 雙層雙向版配筋案例（本研究整理）

鋼筋混凝土牆的厚度與配筋方式亦相當多元，本計畫將多方收集各規範與實務案例進行研判，挑選出具有代表性之案例。

表3-2 鋼筋混凝土牆配筋案例

| 牆厚(t) | 垂直、水平 | 單排 | 雙排 | 位置 |
|----------------|----------|----------------|--------------------------|--------|
| 10 cm 12 cm | 垂直 水平 | #3@10 #3@15 | | |
| 15 cm 16 cm | 垂直 水平 | | #3@15 E.F. #3@20 E.F. | |
| 15 cm | 垂直 水平 | | #4@15 E.F. #3@20 E.F. | 外牆、女兒牆 |
| 18 cm 20 cm | 垂直 水平 | | #4@20 E.F. #4@20 E.F. | |
| 25 cm | 垂直 水平 | | #4@15 E.F. #4@20 E.F. | |
| 30 cm | 垂直 水平 | | #4@15 E.F. #4@20 E.F. | |
| 35 cm | 垂直 水平 | | #4@10 E.F. #4@15 E.F. | |
| 40 cm | 垂直 水平 | | #5@15 E.F. #5@15 E.F. | |

（資料來源：楊秉蒼，2013）



說明:
 1. 固定筋之水平間距為垂直筋間距之5倍，垂直間距為水平筋間距之4倍。
 2. 牆垂直筋與水平筋端部均須埋入樑或柱內至少 L_d 之長度。
 3. 牆厚150mm(含)以上牆，若位於筏基頂版上時，應延伸入筏基版內。

圖3-10 鋼筋混凝土牆配筋案例 (楊秉蒼, 2013)

本研究試驗變數包括粗骨材含量、水灰比，含水量與鋼筋單雙層配置等，相當多元，囿於時程與經費，初步規劃將採用中央廠拌 3000 psi 混凝土並使用雙層雙向配筋方式，實驗試體厚度為 15 cm，上下保護層厚度均為 2.5 cm，配筋方式如圖 26 所示，上下層長短向鋼筋尺寸與間隔均相同，配筋方式為：#3@10、#3@15、#3@20。相關規劃內容詳見表 3-2 與圖 3-11。

表3-3 實驗試體之製作

| 項次 | 項目 | 變數內容 | 變化範圍 |
|----|-----|-----------------|--|
| 1 | 粗骨材 | 含量變化 | 100%(標準量) |
| 2 | 水灰比 | 比值變化 | 0.5 |
| 3 | 含水量 | 氣乾：試體置於室內大氣中氣乾。 | |
| 4 | 鋼筋 | 屋頂板 外牆 | 上下層長短向鋼筋尺寸與間隔均相同，配筋方式為：#3@10、#3@15、#3@20 |
| 5 | 版牆 | 試體尺寸 | 版 厚度15cm，面積大小取5倍版厚， 長×寬=75cm×75cm |
| | | 牆 | 厚度15cm，面積大小取5倍牆厚， 長×寬=75cm×75cm |

(資料來源：本研究整理)

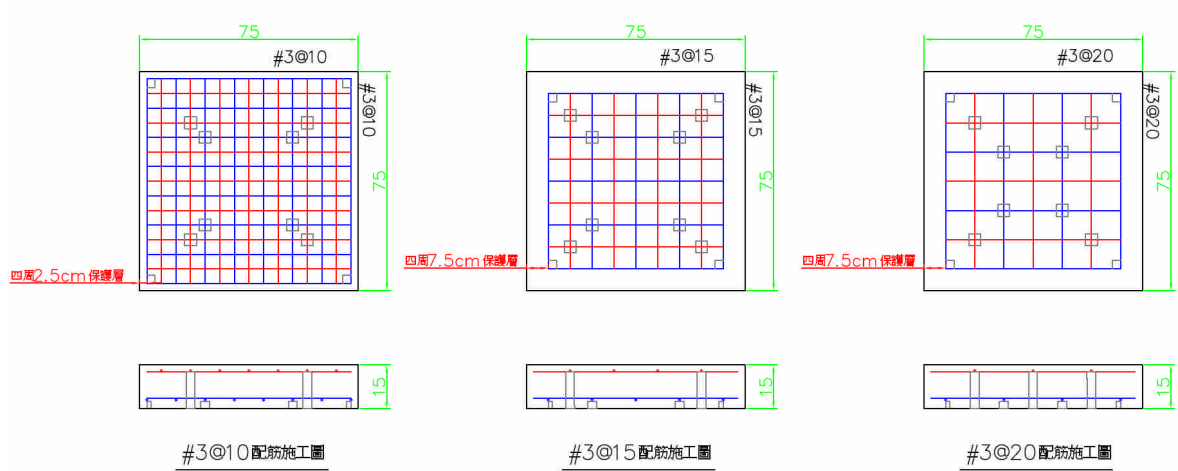


圖 3-11 本計畫採用之鋼筋混凝土實驗試體（資料來源：本研究整理）



圖 3-12 研究團隊對於鋼筋混凝土實驗試體之施作經驗

（資料來源：本研究整理）


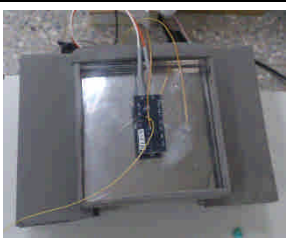

第四章 結果與討論

第一節 均質板材實驗結果

本計畫先由均質板材（壓克力板）試體著手，板材尺寸為 10 cm x 10 cm x 1.5 cm（厚度），採用電熱片提供穩定加熱源，並且嘗試將試體擺放為直立或水平等不同方式。研究團隊同步使用熱傳導係數量測儀（以下簡稱 KD2）來進行壓克力板材熱傳導值之量測，以作為比較之用，儀器本身誤差為 5%。

KD2 量測結果顯示，壓克力板材熱傳導值平均為 0.17 W/m K。實驗結果如表 4-1 所示，各項實驗均進行重複性量測，確保實驗數據之可信度。由於本計畫自行假設與推導之方程式（式(20)）係假設熱流計表面之熱對流係數與試體表面之熱對流係數相仿，當試體直立時，熱流計表面與試體表面之熱流邊界層呈現穩定發展，如圖 4-1(a) 所示意，上述「熱對流係數相仿」之假設可有效成立，進而使熱傳導係數估算值 0.16 W/m K（表 4-1(a)）與 KD2 之量測結果相近。

表 4-1 均質板材之穩定加熱源實驗-1（摘錄部分結果）

| | | | |
|-------|---|--|---|
| 試體種類 | 10 cm x 10 cm x 1.5 cm (厚度) 均質板材 (壓克力板) | | |
| 分析方法 | 本計畫自行研擬之估算方式 (式(20)) | | |
| 實驗方式 | (a) 試體直立, 單面貼附 加熱片 | (b) 試體水平放置, 加熱片 位於試體下方 | (c) 試體水平放置, 加熱片位 於試體上方 |
| 實驗照片 |  |  |  |
| k 值平均 | 0.16 W/m K | 0.15 W/m K | 0.14 W/m K |

（資料來源：本研究整理）

當試體水平放置時，熱流計表面與試體表面之熱流呈現非穩定紊流場(如圖 4-1(b)所示)，上述假設恐難成立，也因此影響到 k 值估算(表 4-1(b)與(c))的正確性。

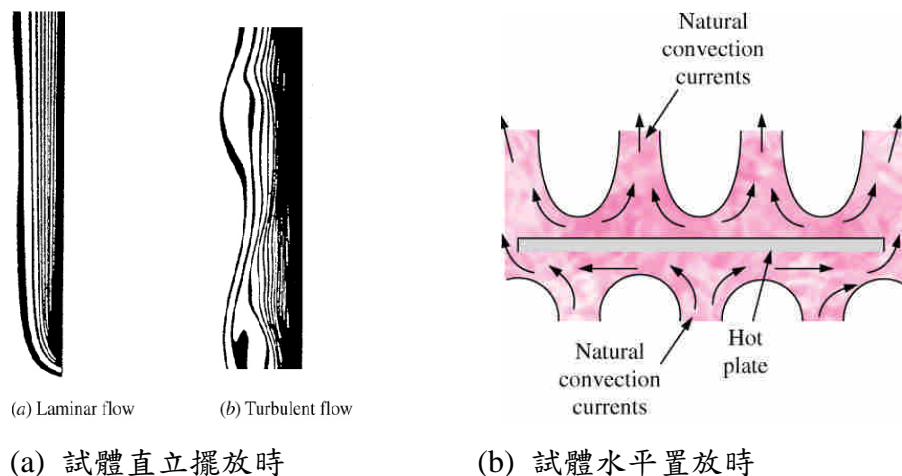

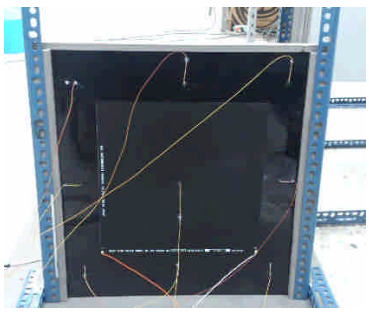


圖 4-1 說明用圖例 (資料來源：Çengel, 2006)

接著吾人將試體更換為較大尺寸 50 cm x 50 cm x 2 cm (厚度)的均質板材(壓克力板)，分別使用大尺寸熱流計(30 cm x 30 cm)以及小尺寸熱流計(5 cm x 5 cm)來進行量測，以觀測本計畫所研擬之估算方式是否適用於一般足尺度建材，結果如表 4-2 所示。

結果顯示，當進行一般建材量測時，以使用大尺寸熱流計為宜，可獲得較佳之 k 值正確性，此現象源自大尺寸熱流計表面之熱流邊界層可穩定發展。結果亦顯示，本計畫所研擬之估算方式適合於一般建材在穩態加熱源條件下之量測。

表 4-2 均質板材之穩定加熱源實驗-2 (摘錄部分結果)

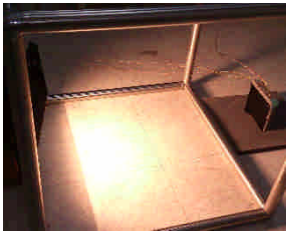

| | | |
|-------|---|--|
| 試體種類 | 50 cm x 50 cm x 2 cm (厚度) 均質板材 (壓克力板) | |
| 分析方法 | 本計畫自行研擬之估算方式 (式(20)) | |
| 實驗方式 | (a) | (b) |
| | 試體直立，一側貼附 50 cm x 50 cm 加熱片，另一側貼附 5 cm x 5 cm 熱流計 | 試體直立，一側貼附 50 cm x 50 cm 加熱片，另一側貼附 30 cm x 30 cm 熱流計 |
| 實驗照片 |  |  |
| k 值平均 | 0.15 W/m K | 0.16 W/m K |

(資料來源：本研究整理)

接著將穩態加熱源由加熱片更改為鹵素燈，用來模擬日照穩定地照射在試體表面，結果如表 4-3 所示。當試體為直立時，由於熱流計表面以及試體表面之熱流邊界層呈現穩定發展，使得所擬估算方法之假設條件有效成立，因此平均 k 值為 0.17 W/m K，與 KD2 量測結果差距不大。當試體水平擺放時，熱流計表面以及試體表面之熱流出現不穩定之 thermal plume，使得所量測的 k 值與 KD2 量測結果有所差距。

至此，吾人可確認本計畫所擬 k 值量測方式可適用於加熱片以及人工光源等穩定加熱邊界，當試體表面平整時，吾人可貼附加熱片來進行實驗；當試體表面凹凸不平整時，吾人則可利用人工光源來作為熱源端輸入邊界，如此可使所擬量測方式適用於不同的實務狀況。

表 4-3 均質板材之人工光源實驗 (摘錄部分結果)

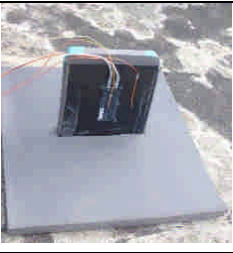

| | | |
|-------|---|---|
| 試體種類 | 10 cm x 10 cm x 1.5 cm (厚度) 均質板材 (壓克力板) | |
| 分析方法 | 本計畫自行研擬之估算方式 (式(20)) | |
| 實驗方式 | (a) | (b) |
| | 試體直立，人工光源 (鹵素燈) 用以模擬穩定日照 | 試體水平放置，人工光源 (鹵素燈) 位於試體上方 |
| 實驗照片 |  |  |
| k 值平均 | 0.17 W/m K | 0.18 W/m K |

(資料來源：本研究整理)

如表 4-4 所示，當吾人利用戶外日照作為實驗用熱源且利用表面溫度法 (ISO 9869-2014) (式(18)-(19)) 進行 k 值估算時，可發現 k 值平均為 0.11 W/m K (試體直立放置) 以及 0.23 W/m K (試體水平放置)，皆與 KD2 量測值有一段差距；當吾人利用表面溫度法 (ISO 9869-2014) 的計算法則且配合本研究所擬 k 值分析方式，則可發現 k 值平均為 0.176 W/m K，與 KD2 量測值相仿。但若採用一段穩定日照來作為加熱邊界 (例如本案例採用 12:00-13:00) 且進行分析時，其數據與 KD2 所量得之數據有一段差距。

表 4-4 均質板材之戶外實地實驗 (摘錄部分結果)

| | | |
|------|---|-------------------------|
| 試體種類 | 10 cm x 10 cm x 1.5 cm (厚度) 均質板材 (壓克力板) | |
| 實驗方式 | (a) | (b) |
| | 試體直立面向南方，直接曝曬日光，實驗時間 24 h | 試體水平放置，直接曝曬日光，實驗時間 24 h |





| | | | | |
|-------|---|----------------------------|---|----------------------------|
| 實驗照片 |  | |  | |
| k 值平均 | 量值(W/m K) | 使用方法 | 量值(W/m K) | 使用方法 |
| | 0.11 | ISO 9869-2014 (24 h 平均) | 0.23 | ISO 9869-2014 (24 h 平均) |
| | 0.176 | 本計畫所擬 (24 h 平均) | 0.175 | 本計畫所擬 (24 h 平均) |
| 0.16 | 本計畫所擬 (12:00~13:00 平均) | 0.27 | 本計畫所擬 (12:00~13:00 平均) | |

(資料來源：本研究整理)

第二節 相關建材之熱傳導係數量測結果

吾人利用上一小節所驗證之方法論進行相關建材之熱傳導係數量測，結果如表 4-5 所示。

表 4-5 相關建材之熱傳導係數量測結果

| 試體種類 | (a) 混凝土 50cm x 50cm x 10cm, 3000 Psi 混凝土板 | (b) PS 板 50cm x 50cm 3cm, PS 板 | (c) 隔熱磚 25cm x 25 cm x 3cm 隔熱磚(底 下貼附保麗龍) | (d) 水泥砂漿 10cm x 10cm 2cm 水泥砂漿 板 |
|---------|--|--|---|--|
| 實驗方式 | 直立，一側貼附 50cm x 50cm 加 熱片，另一側貼 附 30cm x 30cm 熱流計 | 直立，一側貼附 50cm x 50cm 加 熱片，另一側貼 附 30cm x 30cm 熱流計 | 直立，一側貼附 50cm x 50cm 加 熱片，另一側貼 附 5cm x 5cm 熱流計 | 直立，一側貼附 10cm x 10cm 加 熱片，另一側貼 附 5cm x 5cm 熱流計 |
| 實驗照片 |  |  |  |  |
| k 值平均 | 0.913 | 0.03 | 0.11 | 0.48 |
| 分析方法 | 本計畫自行研擬之估算方式 (式(20)) | | | |
| KD2 量測值 | -- (本儀器不適用) | 0.028 | -- (本儀器不適用) | -- (本儀器不適用) |

(資料來源：本研究整理)

第三節 外牆隔熱性能之實地量測結果

(個案一)

吾人利用 ISO 9869-2014 標準進行外牆實際構造之熱傳導係數實地量測，並依據我國節能規範將此值轉換為熱傳透係數，節錄一段量測結果如圖 4-2 所示。該牆體位於台南市某大樓 3 樓西側，構造內容由外至內分別為：二丁掛磁磚、水泥砂漿、鋼筋混凝土(15cm 厚)、水泥砂漿，室內側為自然通風狀態。量測時間分別為今年 8 月 22 日與 9 月 1 日之全日 24 小時量測，依照式(18)與式(19)以及此兩日之熱流量測數據，吾人可計算得知此牆體之熱傳透係數為 $5.84 \text{ W/m}^2\text{K}$ 與 $5.34 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。

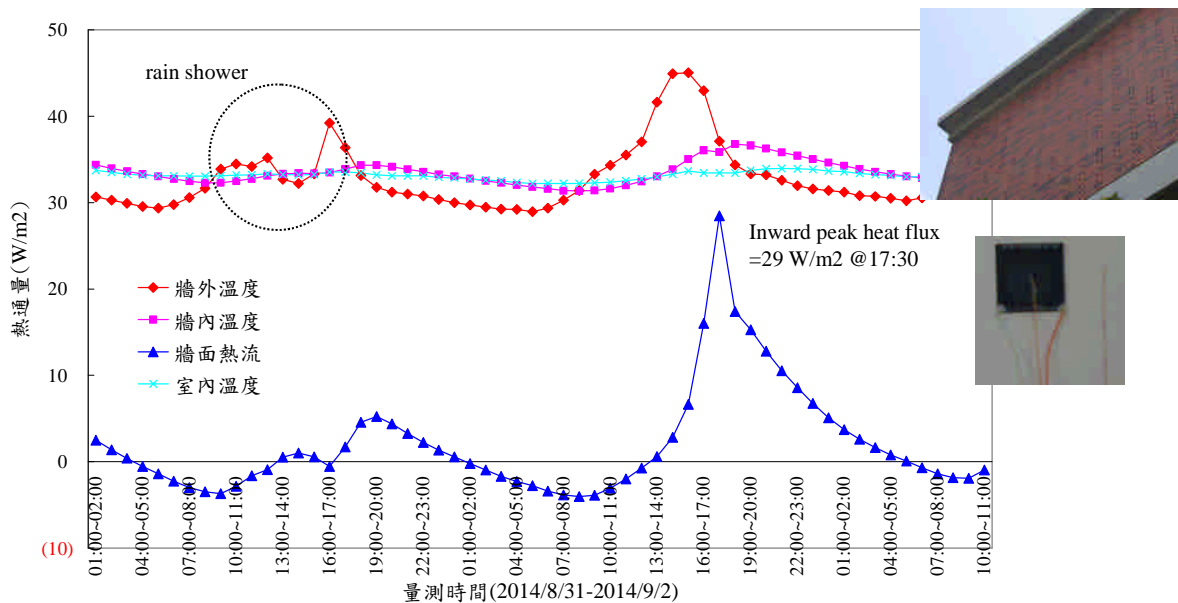


圖 4-2 (個案一)鋼筋混凝土牆之熱流量測 (節錄一段量測結果)
(資料來源：本研究整理)

再者，由圖 4-3 可知(節錄一段量測結果)，經由鋼筋混凝土牆流入室內的熱通量具有時滯(time lag)現象，流經窗框後再流入室內的熱通量首先在 13:30 到達最大值；流經玻璃後再流入室內的熱通量則是在 14:30 時到達最大值；流經鋼筋混凝土實牆面

再流入室內的熱通量則會在 18:00 到達最大值 28 W/m²，使得居室人員在此時感覺到壁體有大量的熱量傳入。一般民眾在傍晚下班返家後，經常會感受到壁體高溫以及熱度，特別是西曬牆面，而原因即在於上述熱通量時滯效應，這點可由實測值清楚得知。

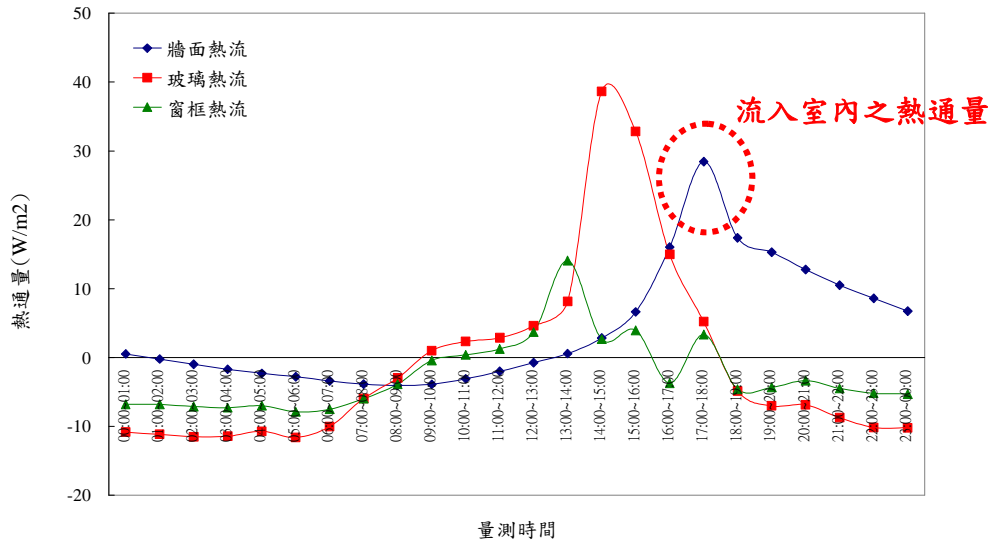


圖 4-3 (個案一) 鋼筋混凝土牆西曬時段之熱流時滯現象
(資料來源：本研究整理)

ISO 9869-2014 標準之內文所述：若能依照該標準的量測與分析方式來進行，最終所測得的熱阻值將收斂到實際熱阻值，且收斂值的量測不確定性 (uncertainty band) 約為最終 24 小時的量測值偏差。亦即，若量測時間足夠的話，吾人將可得到該構造之實際熱阻值，同時可獲得熱阻值之不確定區間。但問題是：針對我國的氣候條件與待測構造，最適量的 (最少的) 量測時間應該是多久？

(Desogus *et al.*, 2011) 的牆體隔熱性能實地量測結果如圖 4-4 所示，可看出實測熱阻值會隨著量測時間的增加 (由 1 天至 3 天) 而逐漸平穩收斂，且由於各量測日之牆體室內外壁溫差值差異不大，因此實測熱阻值的變化亦不大，兩天的量測分析即足以辨識出該牆體之實測熱阻值。本研究建議，最終收斂熱阻值應為實測值進入 5% 震盪區間後的平均值。

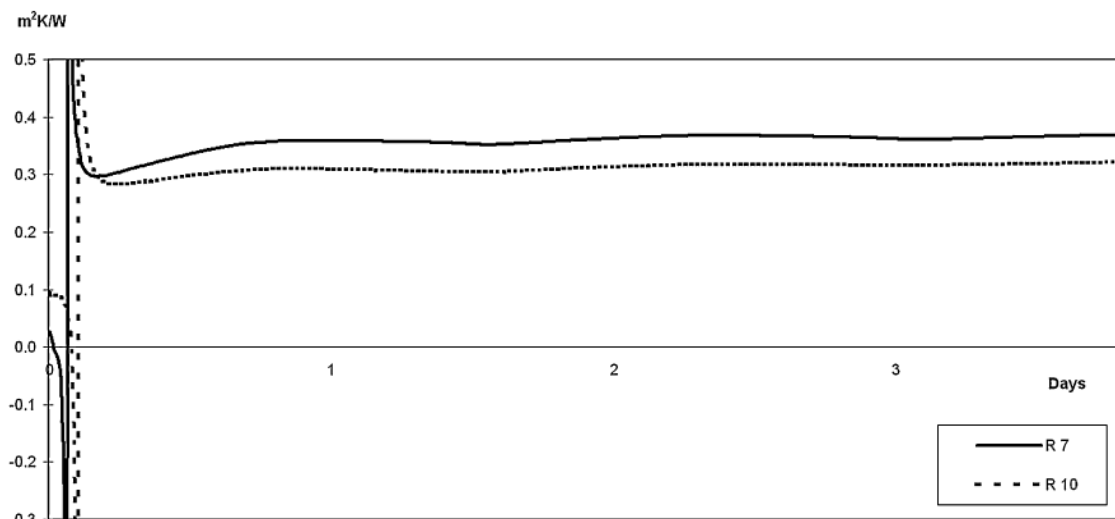


圖 4-4 (Desogus et al., 2011) 的牆體隔熱性能實地量測結果

本計畫接著在前述個案之牆體進行較長時間(超過 ISO 9869-2014 所列 72 小時)之牆體隔熱性能實地量測，過程中使室內溫度盡可能保持穩定，且吾人觀察到牆體兩側壁溫差在日間多高於 10°C ，如此可降低量測不確定度 (Trethowen, 1986)，結果如圖 4-5 所示。發現如果以每日的量測值作為分析基礎的話，熱傳透係數呈現較大幅度變化，其值介於 $4.0\text{-}6.7\text{ W/m}^2\text{K}$ ，然而此數據已與後述最終收斂熱傳透係數相差不大；隨著分析時間的拉長，熱傳透率呈現收斂穩定的數據分佈型態；依據前述分析基礎「5% 震盪區間後的平均值」，最終收斂熱傳透係數為 $5.35\text{ W/m}^2\text{K}$ 。

(BRE, 2000)的報告指出，利用此法量得的熱傳透係數值往往會較高於設計值，其原因有可能來自構造上高熱傳導材料的熱橋效應 (thermal bridges)，例如：周遭窗框等開口部材料、周遭柱體內部的鋼筋、牆壁與梁柱交界處較大量的鋼筋、兩後牆體的內含水分等 (Peng and Wu, 2008)。如同第一章緒論所述，由於牆體內部構造、施工品質、量測部位等太多的因素會影響到熱阻現地量測值；再者，欲評論一般建物之牆體熱阻狀態需有大量樣本檢測結果，就如同歐盟 PASLINK, IQ-TEST 等專案對於該國建物進行大規模的檢測，因此，本計畫量測結果僅為個案。賡續推動外牆構造隔熱性能實驗室量測與現地量測研究建議列入長期性研究工作。

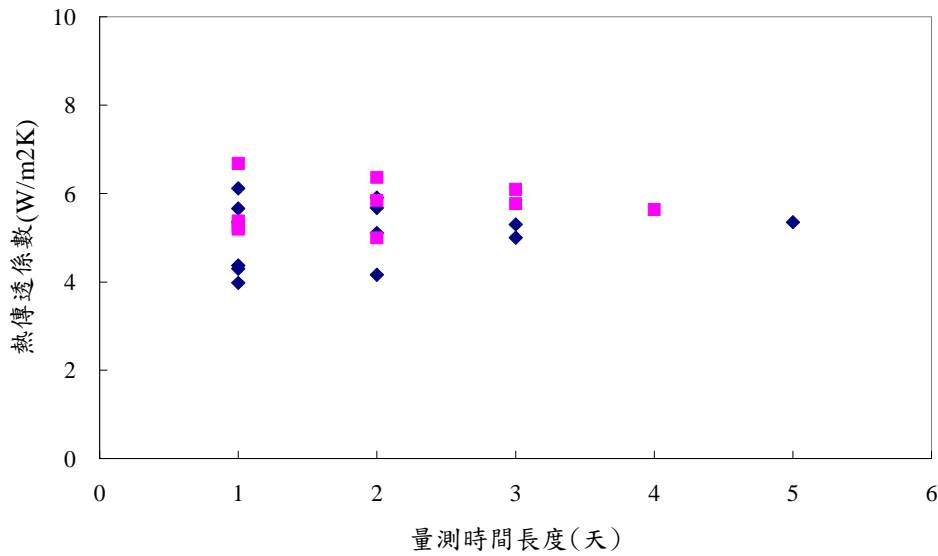


圖 4-5 (個案一) 鋼筋混凝土牆隔熱性能長時段實地量測
(資料來源：本研究整理)

(個案二)

吾人接著利用 ISO 9869-2014 標準進行另一外牆實際構造之熱傳導係數實地量測，並依據我國節能規範將此值轉換為熱傳透係數，節錄一則量測結果如圖 4-6 所示。該牆體位於台南市某大樓 1 樓西側，該牆面並無被他棟建物陰影遮蔽之情勢，構造內容由外至內分別為：水泥砂漿、鋼筋混凝土(20cm 厚)、水泥砂漿，室內側為自然通風狀態。量測時間為今年 11 月 12 日至 11 月 27 日之連續量測，依照式(18)與式(19)、各日熱流量測數據以及前述數據分析前提，吾人可計算得知此牆體之熱傳透係數收斂值為 3.74 W/m²K。本案例之鋼筋混凝土牆體厚度為 20 cm，而個案一之鋼筋混凝土牆體厚度為 15 cm 的，兩者構造方式相似但厚度不同，厚度為 20 cm 者其熱傳透係數收斂值低於厚度為 15 cm 者。

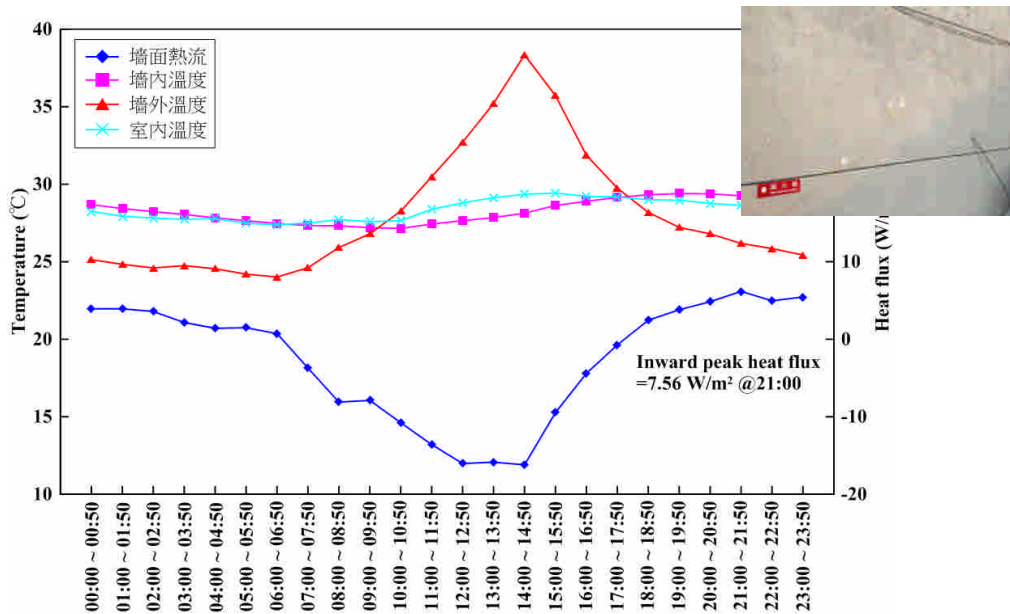


圖 4-6 (個案二)鋼筋混凝土牆之熱流量測 (節錄一段量測結果)

(資料來源：本研究整理)

(個案三)

吾人利用 ISO 9869-2014 標準進行輕鋼構建物牆體之熱傳導係數實地量測，結果如圖 4-7 所示。該牆體厚度為 4.2 cm，內外壁用 0.27 mm 雙面烤漆鋼板，採用一體成型 PU 發泡牆板，量測時間為今年 11 月 12 日至 11 月 28 日之連續量測，構造樣貌如圖 4-7(右)所示。依照式(18)與式(19)、各日熱流量測數據以及前述數據分析前提吾人可得此牆體之熱傳透係數收斂值為 $0.671 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。我國節約能源設計技術規範中並無與實驗對象相似構造者，但此量測值遠低於規範中所列一般牆體之熱傳透係數值。

由上述熱傳透係數值 0.671 推論，似乎所測構造之隔熱性能極佳，但若由建築耗能的觀點來看，實則不然。我國隔熱性能之評估是以熱傳導係數為指標，而熱傳導係數之取得來自穩態熱傳狀態；然而，建築耗能卻為一日暫態表現，暫態熱傳行為除了與熱傳透係數有關之外，尚與構造材料密度、構造材料比熱等熱容(heat capacity)性質有關，無法以單一指標熱傳透係數作為圭臬。本個案於 11 月 26 日流入室內之最高室內熱傳率為 21.2 W/m^2 ，而當日相同方位鋼筋混凝土構造(個案二)之最高室內熱傳率為 21.9 W/m^2 ，兩者相差無幾，亦即，兩者之尖峰耗能相差無幾。因此，在建築耗能的評價上，需將其他因素列入考量，此議題並非本計畫之研究範圍，僅提供參酌。

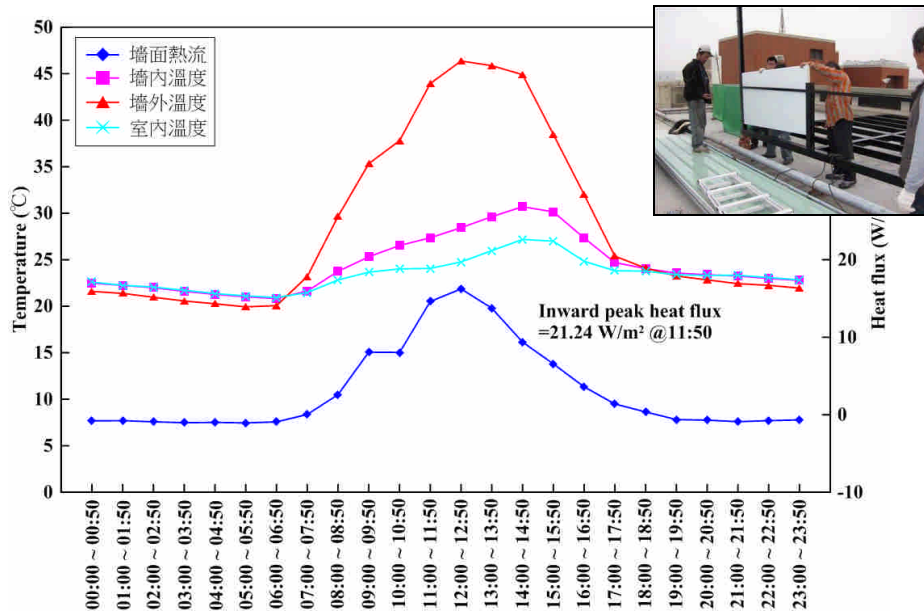


圖 4-7 (個案三) 輕鋼構牆體之熱流量測之熱流量測 (節錄一段量測結果)
(資料來源：本研究整理)

(個案四)

於此，本計畫已完成預定辦理之 3 則外牆構造之 R 值現地量測，但為了展示現地量測方法之適用範疇，研究團隊額外量測 1 則歷史建築物之牆體構造 R 值。吾人利用 ISO 9869-2014 標準進行編竹夾泥牆構造之熱傳導係數實地量測，結果如圖 4-8 所示。該牆體位於台南市後壁區某國小之歷史建物，量測時間分別為今年 8 月 23 日之全日 24 小時量測，構造樣貌如圖 4-8(右)所示。依照式(18)與式(19)以及熱流量測數據，吾人可得此牆體之熱傳透係數(U 值)為 $1.01 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。我國節約能源設計技術規範中並無與實驗對象相似構造者，但此量測值遠低於規範中所列一般牆體之熱傳透係數值。但如同前述，除了熱傳透係數之外，吾人必須將構造材料密度、構造材料比熱等熱容性質列入考量，方能合理評論其實際耗能行為，此議題亦非本計畫之研究範圍，僅提供參酌。

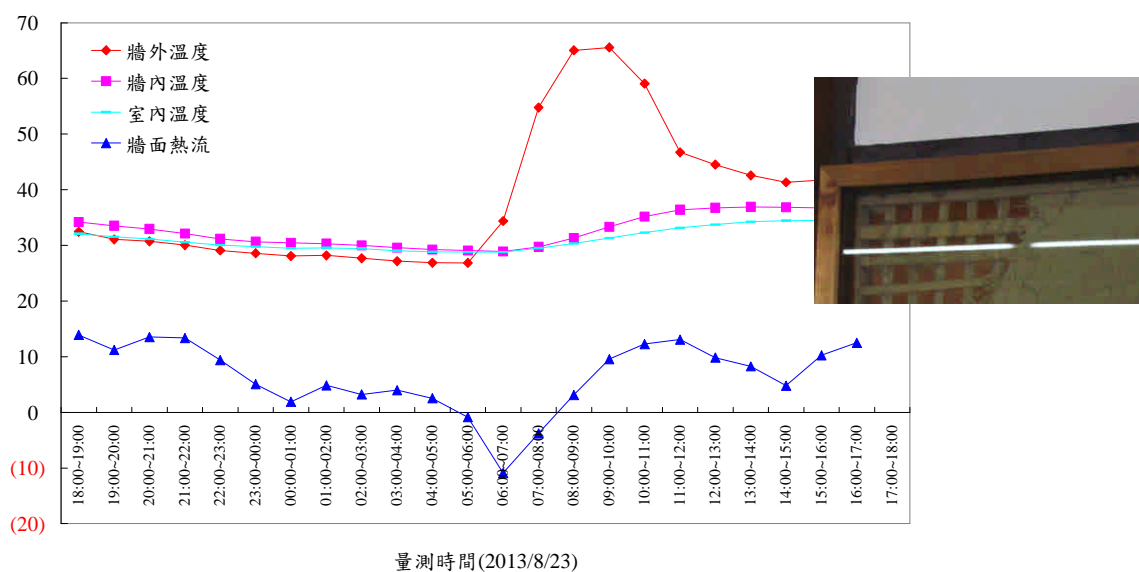


圖 4-8 (個案四) 編竹夾泥牆之熱流量測 (資料來源：本研究整理)

第五章 研析可提升外牆隔熱性能之構造方式

第一節 業界專家諮詢內容

本計畫藉由召開業界專家諮詢會議以及多次個案訪談方式，研討目前建築實務界常用之屋頂以及外牆隔熱方式與構造材料，與談建築師亦提供多則自身設計案場之圖面與材料資訊。茲歸納重要結語如後，相關討論內容詳見附錄二。

議題一：目前屋頂面常用的隔熱方式為何？

小結：

- (1)平屋頂最常使用五角隔熱磚，亦有 6 公分厚的印花泡棉。
- (2) PS 板或是保力龍板的效果相當好。
- (3)目前屋頂板之厚度又加上配管，保護層根本不足，導致熱傳透與漏水之問題。可提升 RC 保護層厚度。
- (4)可將結構層加厚或以複層方式（利用天花形成空氣層）。
- (5)或施以隔熱塗料。

議題二：如何提升外牆的隔熱性能？

小結：

- (1)屋頂構造可以利用逐層累加方式，輕易地施作多種隔熱材料來提升隔熱性能，外牆則無法依此方式。
- (2)外牆隔熱通常會使用陽台或外部遮陽，較少思考於構造上來加以提升。
- (3)可以由室內裝修材著手，貼附隔熱材料，但厚度不可太大以免影響室內面積。當如此施作時(室內裝修高隔熱性建材)可些許提升容積率以為獎勵。

第二節 外牆構造隔熱增能方式之擬議與評估

依據專家諮詢結果以及執行團隊的研究與實務經驗，欲提高外牆構造之整體隔熱性能可有以下途徑：

- (1) 不改變結構材料，以調整非結構材為主：外加高隔熱板材且配合室內裝修；
- (2) 不改變結構材料，以調整非結構材為主：增加粉光層水泥砂漿的厚度；
- (3) 不改變結構材料，以調整非結構材為主：改變粉光層或裝飾層的材質；
- (4) 改變結構材料：需綜合考量結構安全，短期內較不可行。

其中，以途徑(1)最為簡便可行，且為專家會議所推薦，因此後述將以此為擬議目標。上述途徑必須彈性考量，欲增能之牆面若所處空間將進行牆面室內裝修工程，則可順勢而為一併貼附高隔熱板材；若無室內裝修，則可考量途徑(2)與(3)。

途徑(1)：不改變結構材料，以調整非結構材為主：外加高隔熱板材且配合室內裝修

本計畫依據專家諮詢結果且考量施工便利、造價可接受以及不甚影響室內可用面積等因素後，研議如圖 5-1 所示之外牆構造隔熱增能方式，主要係在外牆室內側安裝小尺度立柱（木料角料或其他材料均可），再依序將 PS 板（或其他隔熱板材）以及室內裝修面板（矽酸鈣板、石膏板或其他具備一定耐火時效之裝修材）

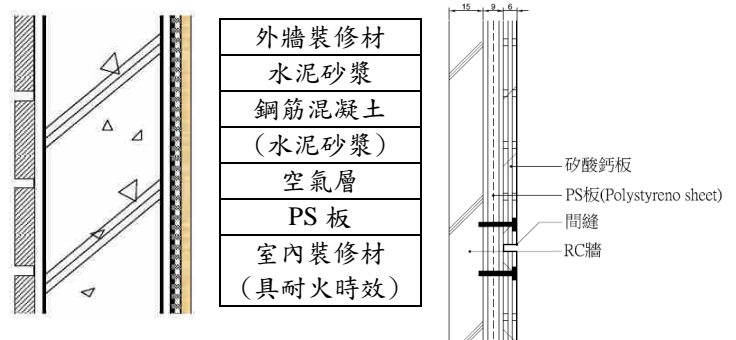


圖 5-1 外牆構造隔熱增能方式之擬議
（資料來源：本研究整理）

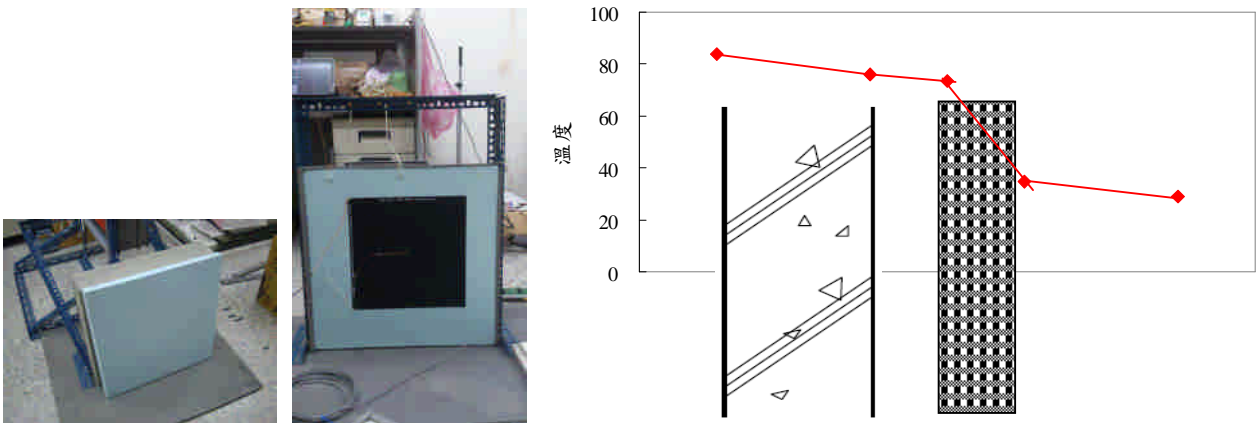
固定於立柱，如此由(戶)外而(室)內形成：外牆裝修材、水泥砂漿、鋼筋混凝土、(水泥砂漿)(可省略)、空氣層、隔熱板材、室內裝修材（建議需具一定耐火時效）之構造方式。由於隔熱板材多具防火功效，作為外牆構造之一時，建議在隔熱板材室內側貼附具有一定耐火時效之室內裝修材，同時可完善室內裝修面之視覺與使用功效。

本建議為概念性擬議，相關定性與定量化係為了後續評估實驗所用，讀者無須拘泥所述材料與尺寸。雖然本建議已參考實施例及專家建議，但建議熟習相關技術者可

在本概念精神與範疇下，進行各種修改、變化以及等效替代，將有助於我國隔熱構造實務與科技之提升。

所擬構造成本低廉、不甚影響室內可用面積，且立柱所形成之空氣層(1cm 厚度以上) 可額外增加外牆隔熱性能。為了評估所擬建議對於外牆構造隔熱性能之影響，本計畫接續進行相關隔熱性能實驗，實驗對象係在混凝土牆(厚 10 cm) 貼附 PS 板(厚 3 cm)，兩者之間留有 1cm 空氣層，用以模擬前述構造；所用量測方法為穩態熱源分析法(式(20))。所用混凝土牆與 PS 板之熱阻性能如表 4-5 所示，依據我國節能規範對於熱傳透率之計量方式，本次實驗所使用的混凝土牆其熱傳透率為 $3.79 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，與我國節約能源設計技術規範中鋼筋混凝土牆(W001)之熱傳透率(U_i 值為 $3.778 \text{ W/m}^2\text{K}$) 相似，在穩態熱傳實驗時(用量測熱傳導係數)，可用來代表具有熱傳透率設計值之外牆構造。

所擬構造(混凝土牆-1cm 空氣層-3cm PS 板)(如圖 5-2 (a))之熱傳透率實驗值為 $0.857 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，相較於單純混凝土牆之 $3.79 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，所擬建議可有效增益外牆隔熱性能，且此值已符合建築技術規則 308 條所律定之外牆平均熱傳透率($2 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、 $2.75 \text{ W/m}^2\text{K}$)，甚至於近符合該條文所述屋頂平均熱傳透率($0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$)。



(a) 實驗照片

(b) 溫度分佈

圖 5-2 外牆隔熱增能構造之實驗評估 (資料來源：本研究整理)

途徑(2) 不改變結構材料，以調整非結構材為主：增加粉光層水泥砂漿的厚度

欲提升外殼構造隔熱性能，除上述調整構造方式此途徑外，亦有學者討論到是否可以增加鋼筋混凝土牆體厚度或是粉光層水泥砂漿的厚度來遂行？由於鋼筋混凝土牆體厚度主要取決於結構安全之需要，即便是些許增加牆體厚度，其所提升的隔熱性能亦有限，請參閱第四章第三節對於個案三之評論。而在施工可行性的限制下，粉光層水泥砂漿可增加的厚度有限，參考我國節約能源設計技術規範所列鋼筋混凝土之k值以及本研究表4-5所列水泥砂漿之k值，若要達成建築技術規則308條所律定之外牆平均熱傳透率（ $\sim 2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ），吾人需敷設11 cm厚的粉光層水泥砂漿。

途徑(3) 不改變結構材料，以調整非結構材為主：改變粉光層或裝飾層的材質

除此之外，可在適當部位添加奈米高隔熱材料以提升外殼構造隔熱性能，或利用材料改質方式來提升外殼構造熱容。舉例來說：在能量儲存與環境控制材料的應用上，相變化材料（Phase Change Material, PCM）是相當重要的擇材對象，特別是PCM微膠囊（micro-encapsulated PCM, mPCM）或PCM膠囊（encapsulated PCM capsule, macroPCM）極容易與既有建材結合來使用。吾人可利用「macroPCM 抵石層」以及「macroPCM 與 PVA 結合」此兩種構造取代既有內外牆構造中的抵石層以及樹脂層；利用「macroPCM 與 Epoxy 結合」以及「macroPCM 與 PU 結合」此兩種構造取代既有屋頂構造中的Epoxy層以及PU層。其施作過程簡便，經研究團隊與業界討論、實作後，皆可為泥作師傅或隔熱工程師所接受，試操作過程與成品如圖5-3所示。然而，這些材料改質對於建築節能的實際效益有待實驗驗證，此課題並非本計畫之研究範圍，僅提供參酌。



圖 5-3 macroPCM 抵石層施作過程(左)與成品(右)
(資料來源：本研究整理)

第六章 結論與建議

第一節 結論

本計畫彙整評析國際間常見熱阻值現地量測方法，研析外牆構造隔熱性能熱阻值之現地量測方式並進行個案量測；最後，探討在國內目前常見外牆構造上，如何利用可行的材料與構造方法來增益外牆隔熱性能，如期完成各項預期成果。本計畫所獲致之研究結論如下：

- (1) 本計畫已完成國際間常見 R 值現地量測法與實測儀器之分析，以及國際間常見現地動態響應之 R 值數據分析方法之分析，包含溫度合成法 (ISO 8301-1991) 以及表面溫度法 (ISO 9869-2014)。發現在我國建築能源法令的框架下，以表面溫度法 ISO 9869-2014 較為適用，並已納為本計畫外牆構造熱阻係數之主要量測方法。
- (2) 完成外牆構造隔熱性能 R 值之現地量測方法之草擬，並依據文獻以及自身量測分析經驗，就執行量測分析時應注意要項給予建議，以符合我國之實務需求。
- (3) 完成預定辦理之 3 則外牆構造之 R 值現地量測，包含 2 則鋼筋混凝土構造以及 1 則輕鋼構外牆構造；並額外量測 1 則編竹夾泥牆構造。依據 ISO 9869-2014 所完成之牆體隔熱性能實地量測，發現鋼筋混凝土構造最終收斂熱傳透率分別為 5.35 W/m^2K (15cm 牆體厚度個案) 以及 3.74 W/m^2K (20cm 牆體厚度個案)，輕鋼構外牆構造為 0.671 W/m^2K ，編竹夾泥牆構造為 1.01 W/m^2K 。
- (4) 本計畫邀集業界專家召開諮詢會議，討論「目前屋頂面常用的隔熱方式為何？」以及「如何提升外牆的隔熱性能？」等議題，有效聽取業界對於本案之實務建議，並據以收納為本計畫內容。

- (5) 完成可提升外牆隔熱性能之構造方式之研析，增列說明提升外殼構造隔熱性能之途徑，另依據專家諮詢結果並考量施工便利、造價可接受以及不甚影響室內可用面積等因素後，研議出外牆構造隔熱增能方式，同時利用穩態熱源分析法進行隔熱性能分析。實驗結果發現所擬建議之熱傳透率實驗值為 $0.857 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，相較於單純混凝土牆之 $3.79 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，該項建議可有效增益外牆隔熱性能。
- (6) 國內有關構造隔熱性能之既有研究成果以單一構件材料之熱阻值量測為主，構件之熱阻值現地量測以及完整構造之熱阻值分析則不多見，本所歷年亦已完成多起單一建材隔熱性能係數之量測，本計畫業將其彙整於內文。
- (7) 為求能夠簡便快速地量測熱阻係數，本計畫同步發展出穩態熱源分析法，並將此方法與儀器直接量測進行比較驗證。結果顯示，此方式適合於加熱片以及人工光源等穩定加熱邊界條件下之量測；當試體表面平整時，吾人可貼附加熱片來進行實驗；當試體表面凹凸不平整時，吾人則可利用人工光源作為熱源端輸入邊界，如此可使所擬量測方式適用於不同的實務狀況。

第二節 建議

根據研究發現，本計畫針對有效提升外牆構造隔熱性能之短中長期研究規劃，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

建議一

本計畫所完成之建築構造熱阻係數穩態熱源分析法，適合於加熱片以及人工光源等穩定加熱邊界條件下之量測，可作為後續檢測設施建置或相關研究分析之標準作業方法。

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：台灣綠建材產業發展協會

建議二

賡續推動外牆構造隔熱性能實驗室量測與現地量測研究，推動實驗方法之標準化作業：長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：標準檢驗局或國立成功大學

本所歷年來已完成多起單一建材隔熱性能係數之量測，可以此資料庫為基礎，進行外牆構造隔熱性能之實驗室量測與現地量測，構造別則包含實牆體與虛部（開口部玻璃等），據以建立我國實際構造性能資料並得以論述我國實際之建築節能效益。

附錄 各階段審查意見之回覆

評選階段評選委員發言單及廠商回應一覽表

| 委員 | 評選意見 | 廠商回應 |
|--------|---|--|
| 廖召集人慧燕 | 1. 本案主要目的為建立外牆隔熱值之量測方式，並提出國內可行的提升外牆 U 值之構造方式，請補充說明方式辦理。 | 1. 外殼構造隔熱性能的提升，可藉由構造方式及材料改質方式予以執行，研究團隊依照委員建議予以配合執行。 |
| 吳委員德賢 | 1. 外牆構造除研究核心主題以鋼筋混凝土構造(考量水電管路、出線盒等)，亦請比較及考量其他外牆材料或其他複合外牆設計手法，以更全面了解隔熱性能。 | 1. 外殼構造隔熱性能的提升，可藉由構造方式及材料改質方式予以執行，研究團隊將依照委員建議予以配合執行。 |
| 李委員魁鵬 | 1. 建請本計畫應建立可重複性、科學化及公正化之實驗室檢測方法與標準。 2. 建請本計畫應加強提供多樣之隔熱性能解決實務方案，以提升我國建材隔熱水準。 | 1. 研究團隊將依照委員建議特別注意實驗室檢測方法。 2. 遵照辦理。 |
| 張委員俊哲 | 1. 輻射熱對於室內環境的影響為建築師設計時常遇之問題，建請提出選用最佳隔熱係數建材之方法，以利建築符合規定。 2. 樓板及外牆是熱傳導可考量之研究方向，過去 RC 板厚度是為構造安全而訂。其保護層的厚度是何種最好？或許是先取得先期成果之方法。 | 1. 遵照辦理。 2. 在外殼隔熱性能的判斷上，將依照委員建議予以配合執行。 |
| 呂委員文弘 | 1. 本所前於性能實驗中心建置建築外殼隔熱性能實驗設施，相同成果請納入本計畫文獻探討。 | 1. 遵照辦理。 |

期中審查會議記錄與回應情形

| 審查委員 | 期中審查意見 | 回覆意見 |
|-------------------------|---|---|
| <p>電機技師公會 (方嘉和)</p> | <p>1.外牆構造中，玻璃材質也被應用甚廣，故此研究應納入玻璃之隔熱性能（傳導熱與輻射熱）。 2.內容大多引用相關學理及文獻，鮮少屬於研究成果之文章，包括要達成之研究目的「發展構造熱阻現地量測」</p> | <p>1.所列議題並非本計畫之研究目標，但確實具備研究之需要，本計畫已將此議題列入長期研究規劃之建議，以提供主辦機關後續辦理之參酌。 2.目前國外許多研究單位正在發展熱阻現地量測方法，相關研究成果文獻較為少見，本計畫正可與國外研究同步；已於內文補入相關文獻。</p> |
| <p>台灣綠建材產業發展協會</p> | <p>外牆隔熱可否加入考量使用塗料之相關研究。</p> | <p>所列議題並非本計畫之研究目標，但確實為目前法令之缺口且具備急迫研究之需要，本計畫已將此議題列入立即可行之建議，以提供主辦機關後續辦理之參酌。</p> |
| <p>台灣省建材公會</p> | <p>1.建議 P.33 簡報，研究外牆隔熱性能簡化為： (一) 結構部：輕質結構牆、玻璃帷幕等；(二) 間格部：空氣層、PS 板等；(三) 裝飾材：磚、瓦、砂漿、塗料等。 2. 建議提升外牆隔熱性能之構造方式，同時考量建築法規對外牆防火性之要求。</p> | <p>1.感謝您的資訊，已遵照辦理。 2.所列議題並非本計畫之研究目標，但確實具備急迫研究之需要，本計畫已將此議題列入立即可行之建議，以提供主辦機關後續辦理之參酌。</p> |
| <p>林教授憲德</p> | <p>1.外牆 R、U 值之量測有 CNS 標準與 ISO 標準，不宜自創現場量測方法。即使自創自測也無法被公認。 2. U 值因施工方法有嚴重誤差，即使現場實測也無用。所有法定上之 U 值皆由材料 K 值合成，法令上應積極訂立 K 值，實測 R 值對法規應無太大助益，當前應努力擴大建材 K 值而非 R 值。 3. K 值與日射量應完全無關，為何引入日照變數？</p> | <p>1.外牆 R 值之 ISO 量測標準有其使用限制，詳見報告書內文。為求本計畫執行順遂並建置國內建築物理相關研究能量，本計畫依照熱傳學基本原理研擬另則量測方法，此法亦為國外研究單位同步發展中的方法。 2.努力擴大建材 k 值並非本計畫之研究目標，但確實具備研究之需要，本計畫已將此議題列入長期研究規劃之建議，以提供主辦機關後續辦理之參酌。 3.ISO 量測標準係利用太陽日照作為高溫側熱源，因此該標準需引入</p> |

| | | |
|--------|--|--|
| | | 日照變數。 |
| 張建築師矩墉 | <p>1. P.44 常用外牆形式所列未見台灣地區所見最多之 RC 外牆貼磁磚，原因為何？</p> <p>2. 目前實務應用上混凝土的熱傳導係數，都引用外殼節能設計技術規範上所列之數據，本研究是試圖以實測方式驗證其數值？結果是否有誤差？</p> <p>3. P.18 認為 RC 構體及屋頂因有管線、出線盒等，並非單一材料構件，在以往是確實的，但工法和構造也都同時在進步，在開放式建法等理念之下，這些都會漸漸退出構造方法。</p> <p>4. 所使用的混凝土試體是否都經養護且達 28 天強度以上再予以測試？且建議應訂定試體要有一定的含水率之下，數值應較客觀。</p> | <p>1. 此為專家諮詢會議時建築師所提供之經驗案例，非屬我國常用外牆形式，此部分已修正。</p> <p>2. 本計畫目標並非在於驗證技術規範上之數據。欲評論規範所列數據之正確與否需有大量樣本檢測結果。</p> <p>3. 本計畫目標之一在於發展出具有彈性使用功效之熱阻值現地檢測方法，此方法將不受構造方式改變之影響。</p> <p>4. 已遵照辦理。</p> |
| 張建築師國章 | <p>1. 影響室內溫度的因素除了隔熱性能角色外，還有蓄熱性能，且兩者因時間延遲因素互有影響，故研究報告最後單項提供「可提升外牆隔熱性能之構造方式」是否在實用性上會有疑義。</p> <p>2. 理論值與實測值的差異如果能有長期的研究，其結論的正確性以及對實際節能的論述較有意義。</p> | <p>1. 牆體蓄熱性能會表現在牆體熱流之暫態現象，我國隔熱性能之評估係以熱傳導係數為本體，而熱傳導係數之取得來自穩態熱傳狀態，因此與蓄熱性能表現無關。</p> <p>2. 所列議題並非本計畫之研究目標，但確實具備研究之需要，本計畫已將此議題列入長期研究規劃之建議，以提供主辦機關後續辦理之參酌。</p> |
| 黃教授國倉 | <p>本計畫以穩態熱源分析法作為簡化現場量測 R 值之方法，未考量被測體之熱儲存性能，且現場量測之環境非為穩定之熱源，恐無法測得正確之 R 值，建議仍應回歸 ISO 標準進行量測為宜。</p> | <p>牆體蓄熱性能會表現在牆體熱流之暫態現象，然而，我國隔熱性能之評估係以熱傳導係數為本體，而熱傳導係數之取得來自穩態熱傳狀態，因此與蓄熱性能表現無關。反倒是 ISO 標準係利用太陽日照作為高溫側熱源，此舉將引入 quasi steady-state 現象，為避免牆體蓄熱對於計量熱傳導係數之影響，因此該標準係用一日平均來作為計量依據。</p> |
| 廖組長慧燕 | <p>希望本計畫能藉由標準方法量測外牆之隔熱性能，並提出有效改善方式或建議之施工方法，以符合目</p> | <p>已遵照辦理。</p> |

外牆構造隔熱性能之研究

| | | |
|-------|---|--|
| | 前國內法規之要求。 | |
| 何所長明錦 | <p>1.期望藉由本計畫對外牆材料隔熱進行量測的同時，進一步改善熱箱量測設備之系統與方法，以利往後建立熱箱標準量測方式。</p> <p>2.結論應規劃出在符合成本且為可行工法之原則下，提出改善外牆隔熱之材料組合或建議改善之方式與工法。</p> | <p>1.期末前之工作著眼於可提升外牆隔熱性能之構造方式，同時嘗試改善既有熱箱量測設備。既有熱箱量測設備尚待完善之際，本計畫將採用國際間標準或常用量測方式。</p> <p>2.已遵照辦理。</p> |

期末審查會議記錄與回應情形

| 審查委員 | 期末審查意見 | 回覆意見 |
|--------|--|---|
| 吳建築師德賢 | <p>1.針對不同構造、座向、用途等簡易方式討論於事後增加外牆隔熱性能外，對事先設計時有何原則或注意事項。</p> <p>2.建築物外牆隔熱構造與現有建築面積計算方式有何關聯性，請補充說明。</p> | <p>1.所擬隔熱性之增益係依據期中報告階段委員之建議，希望提出有效改善方式或建議之施工方法。所擬構造方式亦可實施於新建物。</p> <p>2.所擬隔熱性之增益係於既有外牆結構體之室內側敷設高隔熱性能之板材，此舉將稍微影響樓地板實際使用面積，但影響層面不大。若實施於將設或既設室內裝修之空間，則影響層面更小。</p> |
| 林組長福銘 | <p>1.本研究重點之一為開發現地R值測試方法，應先考慮現有 ISO 標準有何不足之處須要改善，並考量所提出方法是否可以負荷整體牆面之行為，並提出強化方法之可行性。</p> <p>2.量測時間長短與 R 值合理性有關，應先做熱傳模擬，了解合理的時間長短，否則過短的量測時間與實際行為不同，結果亦會有問題，請詳加說明。</p> | <p>1.本計畫依據文獻以及自身量測分析經驗，就執行 ISO 9869 分析應注意要項給予建議，以符合我國之實務需求。</p> <p>2.ISO 標準係利用太陽日照作為高溫側熱源，此舉將引入 quasi steady-state 現象，為避免牆體蓄熱對於計量熱傳導係數之影響，因此該標準係用一日平均來作為計量依據。針對我國的氣候條件與待測構造，本研究使用超過 3 日之量測來分析最適量的（最少的）量測時間應該為何。</p> |
| 張建築師矩墉 | <p>1.本研究是否可針對實測值與理論推估值間做比對，相互對照印證。</p> <p>2.本研究於建議部分提及外牆內側增加空氣層及 3 cm ps 板和硬質材板之構造，為何使用量測方法測得 U 值，若依照原先公式就可推算出 U 值，請問目的為何請說明。</p> | <p>1.本計畫目標並非在於驗證技術規範上之數據。欲評論規範所列數據之正確與否需有大量樣本檢測結果。</p> <p>2.用於瞭解其實際值。</p> |
| 張建築師國章 | <p>1.本研究成果最終要落實實用，故預期成果”研析可提升外牆隔熱性能之構造方式”為最後目標。故 P.53 所提建議構造方式是否能落實到詳圖或 shop drawing，表達使用材之大小、ps 板、矽酸鈣板、厚度空氣層及管線等材料且提供幾</p> | <p>1.圖說修正部分已遵照辦理。由於增能方式相當多樣，建議熟習相關技術者可在本概念精神與範疇下，進行各種修改、變化以及等效替代。</p> <p>2.牆體蓄熱性能會表現在牆體熱流之暫態現象，然而，我國隔熱性能</p> |

| | | |
|-------------------|---|---|
| | 種適用台灣的方案。 2. P.54 構造改善後(混凝土牆)從 3.79 降為 0.857 增益外牆隔熱性能，但事實上蓄熱的影響事實存在；請綜合評估何者較佳，請陳述說明。 | 之評估係以熱傳導係數為本體，而熱傳導係數之取得來自穩態熱傳狀態，因此與蓄熱性能表現無關。 |
| 蕭教授弘清 | 1.第六章結論與建議中 P.59 所提建議一，有關外熱節能塗料對太陽輻射熱反射率效果之影響在美國為極佳之節能技術之一並獲肯定，國內位處亞熱帶夏季酷暑宜優先納入研究。 2. 請參閱”給未來總統的物理課”及”給未來總統的能源”課兩本書，有益於本研究之探討 | 1.所列議題並非本計畫之研究目標，但確實為目前法令之缺口且具備急迫研究之需要，本計畫已將此議題列入立即可行之建議，以提供主辦機關後續辦理之參酌。 2.感謝提供。 |
| 黃教授國倉 | 依研究結論第四點現場量測之 U 值與規範值差異甚大，請補充說明其可能之原因為何，請加以說明。 | 誠如報告書與期中審查委員所述，U 值因施工方法有嚴重誤差。本計畫目標並非在於驗證技術規範上之數據。欲評論規範所列數據之正確與否需有大量樣本檢測結果。 |
| 台灣省建築材料商業同業公會聯合會 | 簡報 P.4，第四行”間隔部”之用字”格”使用有誤，請再檢視修正。 | 此內容為期中審查委員所述。 |
| 台灣電力股份有限公司（陳先生顯明） | 1.本研究可減少用電，有降低供電需求之效果，台電公司感謝建築研究所的研究貢獻。 2. P.53 之擬議案件，可降低 U 值亦造成蓄熱增大，建議增加時滯分析、並且分析對日間(如辦公室)及夜間(如住宅)主建築物使用之耗能影響，以及分析空氣層厚度之有效性，多少厚度最為有效，請加以說明。 3. 外牆隔熱可降低耗能來誘導民眾加設，若要採用容積獎勵建議應謹慎，否則影響到都市計畫對公共設施的衝擊。 | 1.感謝支持。 2.立柱所形成之空氣層(1cm 厚度)為最簡易構造方式時所自然形成，目前的構造方式已可符合法令。 3.容積獎勵方式為專家會議時與會建築師所提，為會議記錄之內容，非為本計畫之建議，亦非為本計畫之研究目標。 |
| 廖組長慧燕 | 目前僅提出一則可提升外牆隔熱性能構造的方式，應增加 R 值現地量測及構造方式，以符合本研究之預期成果。 | 已依據研究需求與契約完成超過 3 則外牆構造之 R 值現地量測，請參閱第四章第三節。同時亦增列說明提升外殼構造隔熱性能之途徑，請參閱第五章第二節。 |
| 陳副所長瑞鈴 | 1. 預期成果提及需進行 3 則外牆 | 1. 已依據研究需求與契約完成超過 |

| | | |
|--|---|--|
| | <p>構造之 R 值現地量測，目前僅看到一則請說明原由，並於時間內補足以符合預期成果之要求。</p> <p>2. 為何使用 ISO 9869 為最佳方法，請在報告書詳細說明，相較於其他方法與現行法規進行比較，但 IOS 9869 卻沒有進行比較，若本研究認為使用此方法為最好，請佐證並具體說明。</p> | <p>3 則外牆構造之 R 值現地量測，請參閱第四章第三節。</p> <p>2. ISO 9869 之分析方式可與我國建築節能規範內容銜接，建議可以本法為基礎進行外牆構造 R 值現地量測。相關內容已詳述於報告書，請參閱第三章第一節。</p> |
|--|---|--|

附錄二 專家會議概要

開會時間：103 年 5 月 23 日(五)上午 10：00

開會地點：國立成功大學土木系卓群大樓 1 樓會議室

主 持 人：林沂品助理教授

出席人員：趙元鴻建築師、吳禹賢建築師、陳重宜建築師、曾凱儀建築師、陳清乾建築師

列席人員：賴啟銘教授、王思文研究助理、張家豐研究助理、游家旺研究助理、單霄安研究助理



專家諮詢會議現場照片（資料來源：本研究整理）

壹、議程討論

1. 目前屋頂面常用的隔熱方式為何？
2. 若要提升屋頂面的隔熱性能，常用且經濟實惠的方式為何？
（陳清乾建築師提供屋頂實際案例電子檔以供參考）

● 陳重宜建築師

屋頂層隔熱可分為斜屋頂及平屋頂兩種形式探討，斜屋頂又分 RC 造與鋼板型式，平屋頂最常使用的隔熱磚為五角隔熱磚，亦有 6 公分厚的印花泡棉。

由於 RC 熱傳導是直接穿透，若將 RC 選擇加厚或以複層式添加阻熱材料來阻斷熱，只要有空氣層其實就可以阻斷熱輻射至少一半，室內的通風也是其中因素之一。

目前台灣屋頂隔熱之問題，主要是以目前屋頂樓板之厚度又加上配管，保護層根本不足，導致熱傳透與漏水之問題。鋼筋支配一定會影響隔熱效能，所以樓板厚度應提升。

● **吳禹賢建築師**

目前最常用為平屋頂加蓋鐵皮屋，隔熱及防水一起達成，另一種方式為隔熱塗料。

每一種材料皆有本身的隔熱係數，但在不同氣候因素及當地環境採用的材料皆有差別，材料本身沒有問題，但組合起來就有問題。

● **陳清乾建築師**

運用太陽能板隔熱，既可發電又可隔熱，此方式漸漸看得出效能有節省成本。應給予政府建議，屋頂隔熱結合太陽能應提升容積率作獎勵。

屋頂隔熱方式可分為固定式及非固定式，但當固定式發現漏水就需要重新打掉施作，非固定式在未來的維護管理上比較好控制。

● **曾凱儀建築師**

公共案主要有成本考量，因此用最精簡方式來處理，因此常用隔熱磚。將隔熱方式施作於結構外是最有效果的。但如果有心要做一定可以達成效果，只是需要成本考量。

● **趙元鴻建築師**

隔熱主要探討為舒適感問題，可是運用複層式樓板。習慣外部隔熱較為有成效，外部隔熱，運用泡棉及雙層概念。

3. 目前外牆是否有特別在進行隔熱?其方式為何?

4. 若要提升外牆的隔熱性能，常用且經濟實惠的方式為何?

(陳重宜建築師提供一份以不同外牆形式施作隔熱書面資料)

(陳清乾建築師提供保溫層、外牆板實際案例電子檔以供參考)

● **陳重宜建築師**

外牆分為 RC 及鋼板以內外包覆工法施作，玻璃帷幕以複層式做法或加上隔柵。木頭部分由於台灣氣候較為潮濕較不適合使用，不然木頭阻絕性也非常良好。通常針對外牆的隔熱，會使用陽台或外部遮陽，較少思考於構造上。

● **陳清乾建築師**

遮陽設備較為重要，又分為開口部及非開口部。外牆隔熱曾使用保麗龍球加砂漿，但漏水率高，防裂要做好。

● **曾凱儀建築師**

遮陽設備較為重要，目前玻璃帷幕多採用中空玻璃或 low-e 玻璃。

參考書目

ASTMC 177-97: Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.06, West Conshohocken, PA, 2000.

ASTM C518-04 Standard, Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.

ASTM C1199-00 Standard, Test Method for Measuring the Steady-State Thermal Transmittance of Fenestration Systems Using Hot Box Methods.

Building Research Establishment. BRE Client Report No.78132, Field investigations of the thermal performance of construction elements as built. 2000.

BS EN ISO 6946:1997, Building components and building elements thermal resistance and thermal transmittance - calculation method.

BS EN ISO 8990:1996, Thermal insulation determination of steady-state thermal transmission properties - calibrated and guarded hot box.

BS EN 12667:2001, Thermal resistance of building materials and products determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods - products of high and medium thermal resistance.

Buchanan AH (2001), Structure Design for Fire Safety, John Wiley & Sons, New York, USA., pp.169-271.

Çengel YA (2006), Heat and mass transfer: A practical approach. 6th ed. McGraw-Hill.

Desogus G, Mura S, Ricciu R (2011), Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance, Energy and Buildings 43: 2613-2620.

Harada T. et al. (1972), Strength、elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, ACI special publication SP 34, Detroit, USA.

Harmathy TZ, Alien LW (1973), Thermal Properties of Selected Masonry Unit Concrete, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 70

ISO standard 8301-1991, Thermal insulation determination of steady-state thermal resistance and related properties - heat flow meter apparatus.

ISO standard 8302-1991, Thermal insulation determination of steady-state thermal resistance and related properties - guarded hot plate apparatus.

ISO standard 8990-1994, Thermal insulation determination of steady-state thermal resistance and related properties - calibrated and guarded hot box.

ISO standard 9869-1-2014, Thermal insulation - Building elements- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method.

Kato S, Kuroki K, Hagihara S (2007), Method of in-situ measurement of thermal insulation performance of building elements using infrared camera, The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings IAQVEC 2007, Oct. 28 - 31 2007, Sendai, Japan.

Kubicar L, Bohac C (2000), A step-wise method for measuring thermophysical parameters of materials, Measurement Science and Technology 11: 252-258.

Laurenti L, Marcotullio F, de Monte F (2004), Determination of the thermal resistance of walls through a dynamic analysis of in-situ data, International Journal of Thermal Sciences 43: 297-306.

Lin TD, Ellingwood B, Piet O (1987), Flexural and Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams During Fires Tests, Portland Cement Association Research and Development Bulletin R&D 091T.

Peng CH, Wu ZS (2008), In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, Energy and Buildings, 40: 2076-2082.

Trethowen H (1986), Measurement errors with surface-mounted heat flux sensors. Building and Environment 21: 41-56.

Xue J, Taylor R (1993), An evaluation of specific heat measurement methods using the laser flash technique, International Journal of Thermophysics 14: 313-320.

Yesilata B, Turgut P (2007), A simple dynamic measurement technique for comparing thermal insulation performances of anisotropic building materials, Energy and Buildings

39: 1027-1034.

Zarr RR (2001), A history of testing heat insulators at the national institute of standards and technology, ASHRAE Transactions 107: 661-671.

王佑萱，2004，建築物屋頂單一建材之隔熱性能研究與檢測方法分析，內政部建築研究所。

王佑萱，2006，屋頂建材隔熱性能實測與節能效益分析研究，內政部建築研究所。

林維明，1990，高強度混凝土之材料特性與工程行為(上、下)，現代營建。

張政豐，1995，高性能混凝土熱傳導性質之研究，國立臺灣工業技術學院碩士論文。

張晏祥，1994，高溫對高強度混凝土巨微觀性質影響之研究，國立臺灣工業技術學院碩士論文。

陳瑞鈴、林憲德、李訓谷，2005，單一建築材料隔熱性能資料庫之建立，內政部建築研究所。

施文和、黃尊澤，2010，再生建材隔熱效果之研究-以再生隔熱磚為例，內政部建築研究所。

楊秉蒼，2013，建築鋼筋施工圖應用實務，詹氏書局。

鄭永傑，2002，卜作嵐材料及細粒料對水泥漿體熱傳導係數之影響，國立臺灣科技大學營建工程系碩士論文。

外牆構造隔熱性能之研究

外牆構造隔熱性能之研究

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：何明錦、林沂品、賴啟銘

出版年月：103年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-04-3156-8 (平裝)