

# 隔熱混凝土工程性質之探討

洪盟峰

土木系 助理教授

## 摘 要

本文主要探討隔熱混凝土的工程性質。結果顯示，隔熱混凝土烘乾密度介於  $920\sim1240\text{ kg/m}^3$ ；混凝土抗壓強度介於  $2.8\sim23.5\text{ MPa}$ ；熱傳導係數介於  $0.28\sim0.43\text{ W/m}^0\text{K}$ ，以及高電阻性質。結論可知，本研究隔熱混凝土適宜作為隔熱節能的構造。

關鍵字：隔熱混凝土、熱傳導、工程性質

## Study on the Engineering Properties of Insulating Concrete

Meng-Feng Hung

Assistant Professor, Department of Civil Engineering  
De Lin Institute of Technology.

## Abstract

The aim of this study discusses the engineering properties of insulating concrete. The tested result show that the dry density varied from  $920\sim1240\text{ kg/m}^3$  with respective to the compressive strength varied from  $2.8\sim23.5\text{ MPa}$  and thermal conductivity factor of  $0.28\sim0.43\text{ W/m}^0\text{K}$  and high electronic resistance. It is concluded that these insulating concrete are suitable for insulating structure.

Key Word：Insulating Concrete、Thermal Conductivity、Engineering properties

## 壹、前言

近來結構物考量耐震及節能的需求，隔熱混凝土的應用漸受重視，如台北國際金融中心的裙樓使用單位重  $1000\text{kg/m}^3$  的輕質混凝土作為隔熱節能用途。隔熱混凝土主要考量作為隔熱構造用。一般常用的輕質骨材有兩種，(1)由膨脹發泡產生之粒料，如珍珠岩或輕蛭石。此粒料所製作之混凝土單位重量範圍介於  $240\sim 800\text{ kg/m}^3$ ，熱傳導係數介於  $0.065\sim 0.22\text{W/m}^0\text{K}$ 。(2)由膨脹、煅燒或燒結所製造之輕質粒料，例如爐渣、粘土、矽藻土、飛灰、頁岩、板岩或含有前述成分之淤泥；或由天然材料經適當加工處理之粒料，例如浮石、金屬熔渣或凝灰岩。此粒料所製作之混凝土單位重量範圍介於  $720\sim 1440\text{kg/m}^3$ ，熱傳導係數介於  $0.15\sim 0.43\text{ W/m}^0\text{K}$  [1]。台灣地處亞熱帶，靠冷氣調節室內氣溫的季節長達半年以上，以隔熱用混凝土（熱傳導係數  $0.5\text{W/m}^0\text{K}$ ）取代傳統的混凝土作構材，則可節約冷氣電源達  $1/2$ [2]。文獻[3]針對國內現有四座建築物的「外殼耗能量（ENVLOAD）」及「外界空調負載」進行評估，結果指出採用隔熱混凝土（熱傳導係數  $0.5\text{W/m}^0\text{K}$ ）的「建築物外殼耗能量」降低  $7\%\sim 13\%$ 及「建築物外界空調負載」節省電力  $33\%$ 以上。因此，隔熱混凝土對於隔熱及節能的效果非常明確。

熱量由材料的一面傳至另一面的性質稱為導熱性，導熱性是材料重要的熱學物理指標，它說明材料傳遞熱量的一種能力。材料之導熱能力用導熱係數“k”來表示，在物理意義上，導熱係數為「單位厚度的材料，當兩側溫度相差為  $1^0\text{K}$  時，在單位時間內通過單位面積的熱量。」

$$k = (\Delta Q \times a) / (A \times t \times \Delta T) \text{ ----- (1)}$$

k：導熱係數， $(\text{W/m}^0\text{K})$

$\Delta Q$ ：傳導熱量(J)，熱流通量  $\Delta Q = Q_1 - Q_2$

a：材料厚度(m)

A：傳熱面積( $\text{m}^2$ )

t：傳熱時間(hr)

$\Delta T = T_2 - T_1$ ：材料傳熱時兩面的溫度差(以絕

熱溫度表示， $^0\text{K}$ )， $^0\text{K} = 273^{\circ}\text{C} + T^{\circ}\text{C}$

絕緣材料（Insulating Materials）用各種方法將材料達到內部多孔化，應用空氣的低熱傳導係數（ $0.023\text{ W/m}^0\text{K}$ ）特質，以阻斷熱流量經過固體的路徑。表 1 為常溫各種材料的熱傳導係數 [4]。有關熱經多孔性固體傳導路徑可分為以下四種：

- (1) 固體傳導作用：熱傳導是由於固體是緊接觸顆粒的構造而成的，因此，孔隙度增加，勢必減低其傳導作用。
- (2) 氣體傳導作用：在高孔隙結構中，其由孔隙內氣體的熱傳導。
- (3) 對流：假設孔隙均被空氣或燃燒氣體所填塞，則一部份熱的傳導，是由於孔隙內部的對流作用，一些作用較小，可忽略不計。
- (4) 輻射：在高溫時，有相當量的熱流產生，可能是由於透過孔隙而直接輻射的，假設經孔隙度一定時，則大孔隙者將有更多的熱由輻射而傳導的。輻射所傳導的熱，正比於耐火材料表面的放射率。

表 1 常溫各材料的熱傳導係數 ( $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$ ) [4]

| 材料名稱 | 熱傳導係數   |
|------|---------|
| 空氣   | 0.023   |
| 混凝土  | 1~1.5   |
| 玻璃   | 1.05    |
| 磚    | 1.15    |
| 水    | 0.5     |
| 鐵    | 80      |
| 銅    | 398     |
| 塑膠   | 0.1~0.5 |
| 泡沫塑膠 | 0.035   |

在常溫狀態，材料的熱傳遞以固體傳導為主。常溫熱傳導係數與混凝土的密度有關，常重混凝土熱傳導係數在  $1.0\sim 1.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ ；結構輕質骨材混凝土熱傳導係數在  $0.4\sim 0.8 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ ；隔熱輕質骨材混凝土熱傳導係數在  $0.1\sim 0.4 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ 。熱傳導性的一項重要指標。材料的熱傳導性和材料的隔熱效能息息相關，熱傳導性愈差(熱傳導係數愈低)相對地隔熱效能愈佳。

## 貳、試驗方法

### 一、試驗材料

#### (一) 水泥

本研究所使用之水泥為台灣水泥公司所生產之第 I 型卜特蘭水泥，其性質符合 CNS 61 規格，所有水泥皆於購入當日即以不透水塑膠袋密封，確保品質。

#### (二) 輕質粗骨材

本研究使用之水庫淤泥輕質粗骨材顆粒密度為  $0.68\text{g/cm}^3$ 。骨材經過 24 小時烘乾並以塑膠袋密封待用。輕質骨材處於烘乾狀態，拌和中須加入面乾內飽和之水。

#### (三) 輕質細骨材

本研究使用之水庫淤泥輕質細骨材顆粒密度為  $1.01\text{g/cm}^3$ 。經過 24 小時烘乾並以塑膠袋密封待用。輕質細骨材處於烘乾狀態，拌和中須加入面乾內飽和之水。

#### (四) 礦粉摻料

爐石係由中國鋼鐵公司所生產的水淬爐石粉，經中聯爐石資源化處理公司研磨成細粉狀。飛灰取自台電興達火力發電廠為 F 級。

#### (五) 化學摻料

強塑劑為欣得實業公司所生產的 HPC 1000 型，成份為磺化木質系，屬於高性能減水劑，性質介於 ASTM C494 F 和 G 型高性能減水劑之間。輸氣劑由欣得實業公司提供。

## 二、試驗變數

- (一) 水膠比：0.28、0.32、0.40
- (二) 輸氣量：0%、1%、及 1.5%
- (三) 試驗齡期：3、7、28、56 天

本研究輕質混凝土共調配 5 種配比如表 2，本研究配比之比較項目上可分為，探討在相同顆粒密度輕質粗骨材，不同水泥漿品質對隔熱混凝土性質的影響；探討在相同水膠比，不同輸氣量對隔熱混凝土性質的影響。

表 2 隔熱用混凝土配比

| Particle density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Mix no.     | w/cm | w/c  | Mix Proportion (kg/m <sup>3</sup> ) |     |        |         |      |       |    |     |
|------------------------------------------|-------------|------|------|-------------------------------------|-----|--------|---------|------|-------|----|-----|
|                                          |             |      |      | LWA Sand                            | LWA | Cement | Fly Ash | Slag | Water | SP | AEA |
| 0.68                                     | L68-28      | 0.28 | 0.36 | 378                                 | 176 | 456    | 107     | 24   | 135   | 30 | -   |
|                                          | L68-32      | 0.32 | 0.42 | 378                                 | 176 | 421    | 107     | 22   | 146   | 30 | -   |
|                                          | L68-32-A01  | 0.32 | 0.42 | 378                                 | 176 | 421    | 107     | 22   | 140   | 30 | 6   |
|                                          | L68-32-A015 | 0.32 | 0.42 | 378                                 | 176 | 421    | 107     | 22   | 137   | 30 | 8   |
|                                          | L68-40      | 0.40 | 0.54 | 378                                 | 176 | 326    | 107     | 19   | 179   | 16 | -   |

## 三、試驗設備及方法

### (一) 混凝土抗壓試驗

根據 ASTM C31、C192、C617 之規定，製作 10cm $\phi$ ×20cmH 混凝土圓柱試體，並於飽和石灰水中養護，以 200T 抗壓試驗機，分別測定其 3、7、28、56 天之抗壓強度。

### (二) 超音波速量測試驗

超音波非破壞量測是依據 ASTM C597 之方法，利用超音波量測儀 (Ultrasonic)，量測混凝土 10cm $\phi$ ×20cmH 圓柱試體之縱向波速，利用音波在不同物質傳遞速度，瞭解混凝土的緻密程度。

### (三) 表面電阻量測試驗

採用 C.N.S. Electronics LTD 生產之 Concrete Resistivity Meter 於預備承受載重之位置量測混凝土之電阻係數，作為判斷混凝土緻密性之指標，有助解釋耐久性的問題。本研究電阻量測是在試體處於面乾內飽和狀態下進行試驗。

### (四) 熱傳導係數試驗

本試驗參考 DIN51046 以表面式熱傳導量度計 QTM-D2，如圖 1 量測，澆置 4×20×20cm 之方形試體，測試兩面溫度 10℃ 與 40℃ 之熱傳導係數。



圖 1 表面式熱傳導量度計(QTM-D2)

## 參、試驗結果與討論

本研究進行隔熱輕質骨材混凝土，製作共調配 5 組配比，混凝土烘乾單位重介於  $920\sim1240\text{kg/m}^3$ 。其中輕質骨材材料包括輕質粗骨材 (LWA) 及輕質細骨材 (LWA Sand)。並且，添加輸氣劑 (AEA) 以能有效降低混凝土密度。

### 一、抗壓強度與超音波性質

#### (一) 水泥漿「質」的影響

David and Roger[5]及 Nasser and Almanaser[6]指出當混凝土品質均勻穩定且澆置良好的情況下，超音波速與抗壓強度有良好的相關性。圖 2 所示為不同水膠比分別為 0.28、0.32、及 0.4 的抗壓強度比較。顆粒密度  $0.68\text{g/cm}^3$  相應之抗壓強度 (56day) 分為分別可達到 23.5MPa、16.2MPa、及 9.4MPa。圖 3 所示為不同水膠比分別為 0.28、0.32、及 0.4 的超音波速比較，顆粒密度  $0.68\text{g/cm}^3$  相應之超音波速 (56day) 分為分別可達到 3715m/s、3694m/s、及 3031m/s。因此，在相同用水量情況下，呈現水膠比愈低則抗壓強度愈高及超音波速愈快的趨勢。歸納探討原因，水膠比愈低者，用水量愈少，產生孔隙少，則抗壓強度發展及超音波速快，此與傳統混凝土觀念相同的。

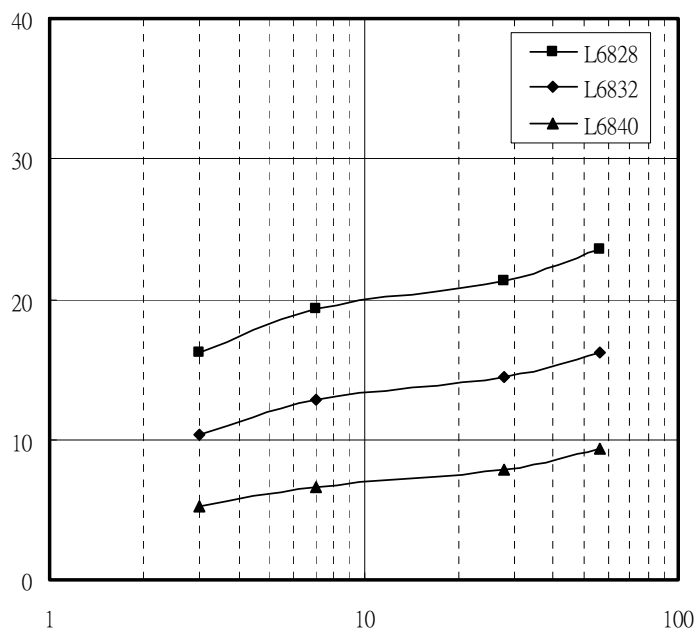


圖 2 隔熱混凝土水膠比與抗壓強度及齡期比較

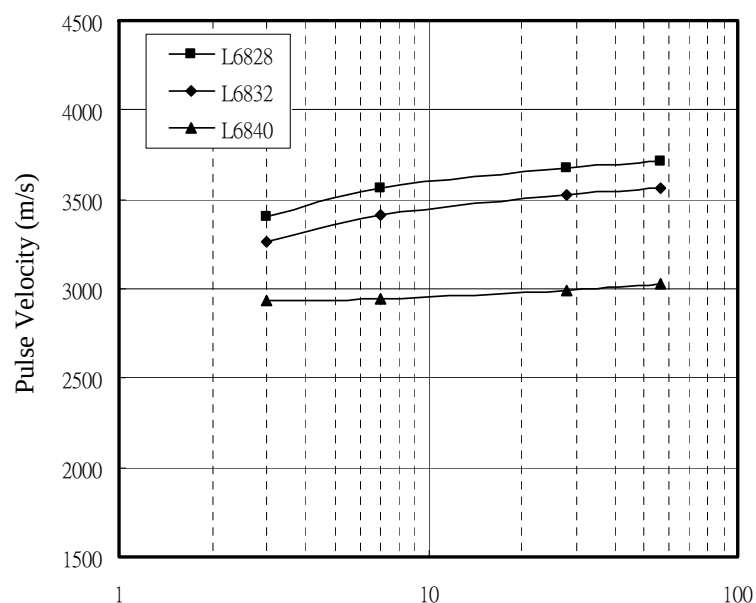


圖 3 隔熱混凝土水膠比與超音波速及齡期比較

## (二) 輸氣劑「量」的影響

圖 4 所示為固定水膠比為 0.32，添加不同輸氣劑含量為 0%、1%、或 1.5% 的抗壓強度比較。顆粒密度  $0.68\text{g/cm}^3$  相應之抗壓強度 (56day) 分別可達到 16.2MPa、8.3MPa、及

Compressive Strength (MPa)

2.82MPa。圖 5 所示為固定水膠比為 0.32，添加不同輸氣劑含量為 0%、1%、1.5% 的超音波速比較。顆粒密度  $0.68\text{g/cm}^3$  相應之超音波速 (56day) 分別可達到 3694m/s、3195m/s、及 2817m/s。

因此，輸氣劑「量」愈多，造成輕質混凝土內部空隙增加，以致降低強度及超音波速。分析輸氣量、強度與混凝土密度的關係，顯示輸氣量由 0% 增加至 1.5%，造成混凝土烘乾密度由  $1190\text{kg/m}^3$  降至  $920\text{kg/m}^3$ ；同時造成混凝土強度由 16.2MPa 降至 2.82MPa，由此可知，添加輸氣劑降低混凝土密度，但影響抗壓強度甚大。

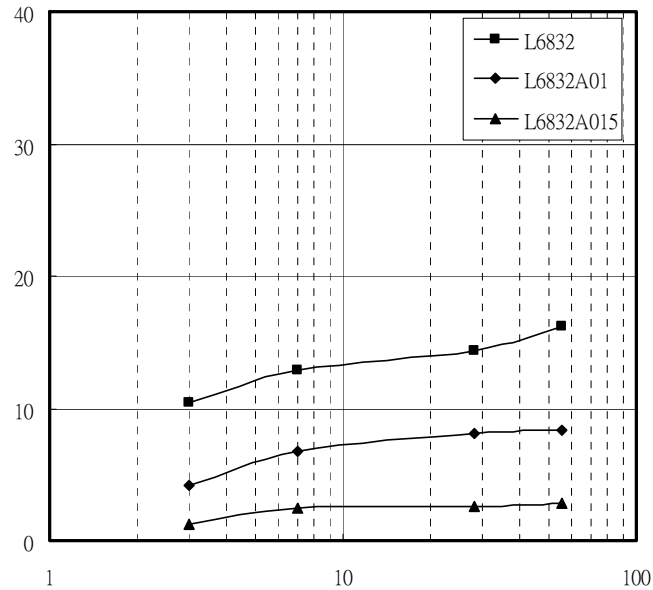


圖 4 隔熱混凝土輸氣劑含量的抗壓強度比較

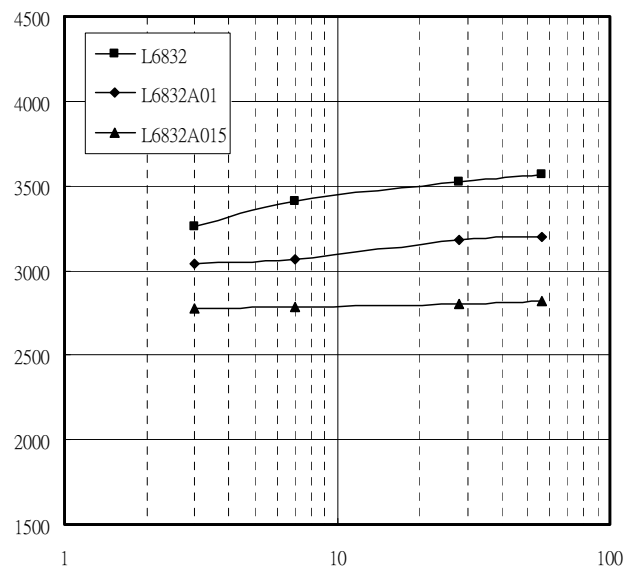


圖 5 隔熱混凝土輸氣劑量的超音波速與齡期比較

## 二、混凝土表面電阻

判斷耐久性指標的方法可參考混凝土表面電阻 (AASHTO T259,T277)。影響混凝土電阻的因素有水泥含量、含水量、鹼含量、氯離子、氫氧根離子、水化程度、溫度、濕度、齡期、及孔隙結構。Buenfeld and Newman and Page[7]建議當混凝土電阻值高於  $20\text{k}\Omega\text{-cm}$  時，抵抗腐蝕因子侵入的能力強。

### (一) 水泥漿「質」的影響

圖 6 為不同水膠比分別為 0.28、0.32、及 0.4 的表面電阻比較。顆粒密度  $0.68\text{g/cm}^3$  相應之混凝土表面電阻 (56day) 分為分別可達到  $158\text{k}\Omega\text{-cm}$ 、 $133\text{k}\Omega\text{-cm}$ 、及  $82\text{k}\Omega\text{-cm}$ 。水膠比愈低，水泥漿「質」愈佳，可發揮較高的混凝土表面電阻。

### (二) 輸氣劑「量」的影響

圖 7 所示為固定水膠比為 0.32，添加不同輸氣劑含量為 0%、1%、1.5% 的混凝土表面電阻比較。顆粒密度  $0.68\text{g/cm}^3$  相應之混凝土表面電阻 (56day) 分為分別可達到  $133\text{k}\Omega\text{-cm}$ 、 $76\text{k}\Omega\text{-cm}$ 、及  $67\text{k}\Omega\text{-cm}$ 。輸氣劑「量」愈多，造成輕質混凝土內部空隙增加，以致降低混凝土表面電阻。

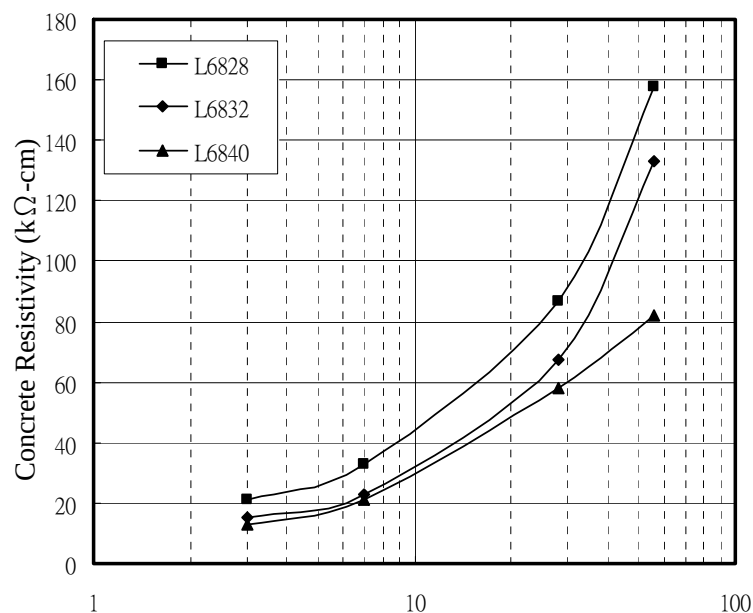


圖 6 隔熱混凝土水膠比與電阻及齡期比較



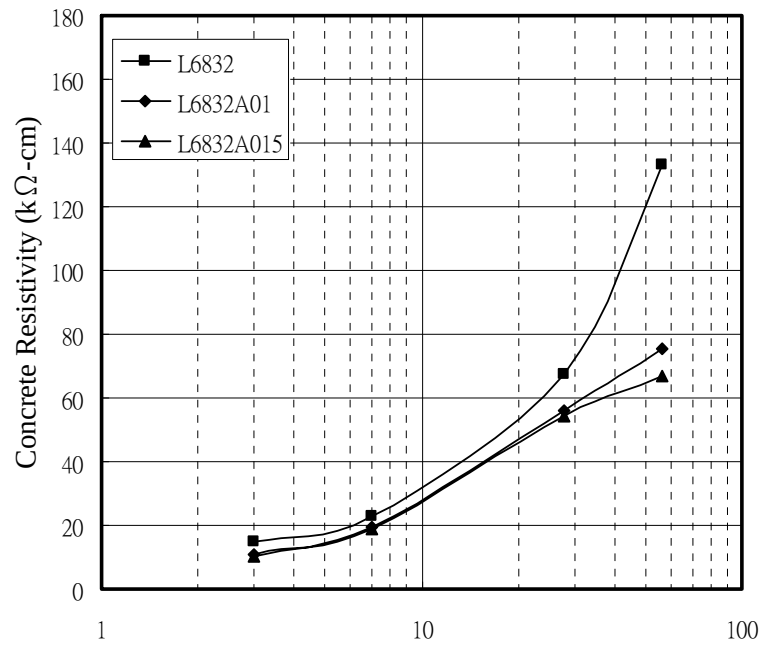


圖 7 隔熱混凝土輸氣劑含量的電阻比較

### 三、熱傳導性

Short and Kinniburgh[8]指出不同輕質混凝土含水量的密度與熱傳導係數之關係，如圖 8 所示。隨著混凝土密度愈低者，內部的孔隙就愈多，熱傳導性就愈差，相對地熱傳導係數就愈低。本研究所有配比的混凝土熱傳導係數，其值均在  $0.28 \sim 0.43 \text{ W/m}^0\text{K}$ 。將本研究不同輕質混凝土烘乾密度的熱傳導係數標示圖 8 上，顯示，其本研究所有配比多落在此兩趨勢線的範圍內。

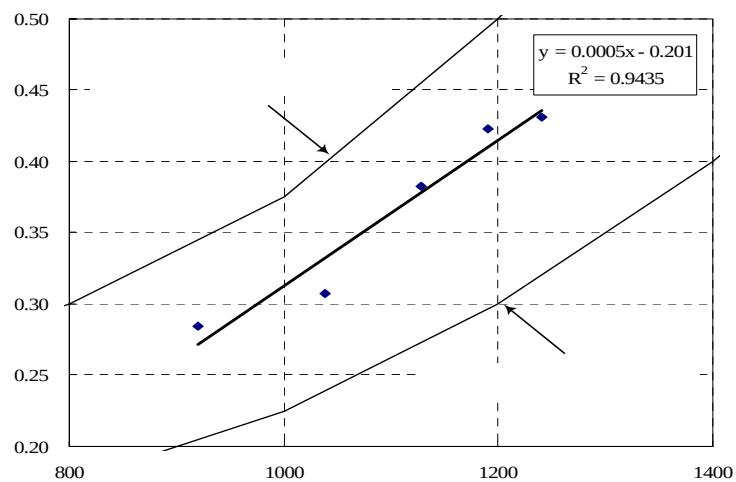


圖 8 混凝土密度與熱傳導係數關係

## 肆、結論

- 1.結果顯示，輸氣量由 0%增加至 1.5%，造成混凝土烘乾密度由  $1190 \text{ kg/m}^3$  降至  $920 \text{ kg/m}^3$ ；同時造成混凝土強度由  $16.2\text{MPa}$  降至  $2.82\text{MPa}$ ，由此可知，添加輸氣劑降低混凝土密度，但影響抗壓強度甚大。
- 2.本研究各組配比的電阻值在  $66.6\sim 157.7\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ ，大於文獻建議的  $20\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ ，顯示本研究隔熱混凝土配比具有良好的耐久性指標。
- 3.本研究各組配比的熱傳導係數在  $0.28\sim 0.43 \text{ W/m}^0\text{K}$ ，可作為良好的隔熱節能材料。

## 參考文獻

- 1.中國國家標準，隔熱用混凝土之輕質粒料，第 1 頁(2004)
- 2.顏聰，「輕質混凝土的隔熱性能與能源節約」，營建知訊，120 期，pp.81-89 (1992)。
- 3.黃兆龍、洪盟峰、潘誠平、陳宗鵠、黃博全，「淤泥輕質骨材鋼筋混凝土之經濟效益分析」，輕質骨材及輕質混凝土應用研討會論文集，內政部建築研究所，台灣科技大學（北部）、中興大學（中部）、嘉義大學（南部），第 25-39 頁 (2003)。
- 4.William D, Materials and Engineering an Introduction 5/e, John Wiley & Sons, (2002).
5. David, A.A., and Roger, K.S., "Pulse Velocity as a Predictor of 28-day and 90-day Strength," ACI Materials Journal, pp.116-122 (1981).
6. Nasser, K.W., and Almanaser, A.A., "Comparison of Nondestructive Testers of Hardened Concrete," ACI Materials Journal, pp.374-380 (1987).
7. Buenfeld, N.R., Newman, J.B. and Page, C.L., "The Resistivity of Mortar Immersed in Sea-Water," Cement and Concrete Research, Vol.16, No.3, pp. 511-524 (1986).
8. Short, A., Kinniburgh, W., Lightweight Concrete, 3<sup>rd</sup> ed., Applied Science Publishers, Ltd., London(1978).