

# 複合竹穿孔嵌板構造吸音特性之研究

## A Study on Sound Absorption Characteristics of Perforated Mong-Zong Bamboo Composite Panel Structure

蔡岡廷<sup>1</sup>、林明德<sup>2</sup>、張文豪<sup>3</sup>、黃耀德<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國立中興大學農村規研究所助理教授

<sup>2</sup> 國立中興大學環境工程系教授

<sup>3</sup> 國立中興大學農村規研究所碩士

<sup>4</sup> 國立中興大學環境工程系碩士生

### 摘要

目前由於國內市場對於室內裝修材質多偏好使用木料，但一般室內裝修較少考慮到關於噪音抑制效果，本研究試著朝向室內裝修使用的角度探討竹穿孔板吸音構造，竹材屬生物性綠建材，生長時間短三年成竹，五年即可採收使用，相較於木料需要二十年才能做為裝修材料，四十年方能成為結構材顯現得更為有效率且環保，且台灣產竹對於竹製品之加工技術亦十分純熟，所產之竹製品品質佳、價位平實；同時竹穿孔板健康環保、紋理美觀、質輕堅固、組裝便利，有別於其他吸音材之特色，極為適合住宅室內裝修建之使用。然而在考量做為具吸音效果之室內裝修建材，外觀應考量其美質性，本研究導入表面裝修用的面材覆蓋於竹穿孔板表面，模擬當竹穿孔板表層加上裝飾材而成為複合竹穿孔嵌板吸音構造後，是否能成為兼顧外觀美感又不失其既有吸音性能之新式吸音材料。

實驗結果顯示各因子對複合竹穿孔嵌板構造吸音特性之影響如下：

一、在面板覆蓋率 0%~66% 範圍內，相同條件下面板覆蓋率的增加(0%、33%、50%、66%)，由於面板板振動吸音特性，導致共振頻率向低頻偏移，低頻帶吸音率提升，面板覆蓋率於 50% 以下仍保有穿孔板之吸音特性，若面板覆蓋率高於 66% 以上者則將產生不同於穿孔板之吸音特性，本研究以 50% 以下之面板覆蓋率做為設計室內裝修材之建議，在美質性之設計組合考量室內所需之吸音材料特性。

二、在空氣層厚度 50cm 以下的範圍內，相同條件下空氣層厚度增加(5cm、10cm、20cm、50cm)，共振頻率越往低頻移動，主要影響範圍乃集中於中低頻帶內。隨著空氣層厚度增加，其吸音特性效率漸減，這顯示空氣層厚度增大有助於提昇吸音構造於低頻帶吸音性能之表現，當空氣層厚度高於 50cm 時則已成為全頻之吸音材料特性，其反曲點在 400Hz 處，空氣層厚度在 20cm 則為穿孔吸音材料之最佳吸音特性，若考量非全頻吸音特性之材料需求時，在節省室內空間成本之情形下可採用 20cm 之空氣層厚度之竹穿孔複合嵌板吸音構造。

**關鍵字：**穿孔率、竹穿孔板、吸音係數、多孔質材料、共振頻率、複迴歸分析

### Abstract

Eco-awareness is growing up in these years around the world, and the perforated bamboo composite panel is a kind of the building materials that green. Because it is beautiful

and natural, firm but portable, the prospect of the perforated bamboo composite panel is potentially. This study discusses all factors that can affect the sound absorption characteristics of perforated bamboo composite panel, including the perforation, backing materials, and air space. Besides, in order to upgrading the sense of beauty, and discusses the cover rate of faceplate which on the perforated panel, too.

Afterward this study will try to figure out a suitable prediction formula for resonant frequencies of perforated bamboo composite panel to make the designer surveyed the resonant frequencies quickly and simply. There are some conclusions as follow:

1. In the same perforation, backing materials, and air space, the more faceplate covered rate (from 0% to 66%), the lower the resonant frequencies goes, and the vibrated absorption effect of faceplate make the sound absorption coefficient promotion.

2. In the same cover rate, perforation, and backing materials, the larger the air space is (from 5cm to 10cm), the lower the resonant frequency goes, but there is no variation in high frequency (over 2000Hz). It showed that make the air space get larger would not weaken the sound absorption coefficient in high frequency, and also make the sound absorption coefficient in low frequency increasingly.

This study has also found out a suitable prediction formula for resonant frequencies of perforated bamboo composite panel by multiple regression analysis.

**Keywords :** Perforation, Perforated Bamboo Panel, Sound Absorption Coefficient, Porous Materials, Multiple Regression Analysis

## 壹、前言

木材本身即屬生物性綠建材，其中的竹材更因產量大、生長時間短，五年即可採收使用，與一般木料材料強度要足以作為家具或建築結構使用需要 20~40 年之生長時間相較，竹材極具效率。此外本國產竹，由南到北海拔 1000 公尺以下之丘陵皆可見其蹤跡，其中又以南投縣竹山鎮為主要產地，故本研究所測試之試體乃選用由南投縣竹山鎮具 20 多年竹材加工經驗之泉源竹木廠所生產之孟宗竹複合竹穿孔嵌板為測試材料。我國對於竹製品之加工技術十分純熟，所產之竹製品品質佳、價位平實；同時竹穿孔板具有健康環保、材質輕、强度高、紋理美觀、立體感強與組裝便利等優勢，除了既有木質材料適於室內裝潢之效果，使空間協調一致，同時更因為具有良好的吸音性能，可改善音質質量、提高語音清晰度、確保較佳的音響效果，擁有優於其他吸音材之特色，使其成為兼顧吸音、環保、實用、美觀、裝飾性強、質輕而易於安裝等傳統吸音材料無法取代之新式材料，更適合用於一般住宅、辦公室、會議室、講堂、音樂廳、飯店等室內裝修之使用。然而在考量做為具吸音效果之室內裝修建材，外觀上必然得滿足美觀之需求，故本研究擬將既有的竹穿孔嵌板吸音構造表面導入裝飾用之面材覆蓋於竹穿孔板表面，使其成為複合竹穿孔嵌板吸音構造，探討其是否能做為一兼顧外觀美感又不失其既有吸音性能之新式吸音材料。然而在國內關於穿孔板吸音性能之研究仍佔少數，因此建立本土性綠建材—複合竹穿孔嵌板吸音構造之基礎資料即

成爲本研究之另一重點。此外，關於探討複合竹穿孔嵌板吸音構造之共振頻率，由於生活環境週遭的噪音各有不同頻率之高低，若能建立準確的複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測式方可做爲日後複合竹穿孔嵌板吸音構造設計之參考準則，提供設計人員選用複合竹穿孔嵌板吸音構造時一快速檢核之工具。

## 貳、研究範圍

本研究以複合竹穿孔嵌板爲研究對象，因此在界定研究範圍時乃參照穿孔板共振頻率預測式中各項會影響共振頻率之結構因子與前章節文獻中提及影響穿孔板吸音特性之因子爲本研究的控制變因，並在考量在不影響竹穿孔嵌板吸音性能之前提下導入覆面板以提高複合竹穿孔嵌板外觀美質性，提高國人日後進行室內裝修時對於複合竹穿孔嵌板吸音構造之接受度。本研究擬定之研究範圍如圖 1-1 所示。

首先就面板形式之選定，考量其覆蓋於竹穿孔板表面時會減少穿孔板孔洞數，對於穿孔板之吸音性能可能會造成影響，因此透過調整覆面板之覆蓋比例來找出其對於複合竹穿孔嵌板構造吸音特性有何影響，故選擇其覆蓋率變化作爲探討方向之一；而關於穿孔板則使用一般常見之圓孔、正方形排列之竹穿孔板；背貼材質主要以多孔材質爲主，並緊貼穿孔板背面；最後考量到一般室內裝修背後空氣層多不超過 50cm，且造型平整，故本研究僅探討 50cm 以下的整形空氣層。



圖 1-1 複合竹穿孔嵌板吸音構造相關因子圖

## 參、文獻回顧

穿孔板構造之研究最早可回溯至西元 1947 年，由 Bolt 率先分析將穿孔板作爲吸音

材質使用時之吸音特性；本文將穿孔板視為一吸音材料使用時，針對其聲學行為進行分析，並依其結果而繪製了一設計圖表。只要確立了每平方英尺內的孔洞數、孔徑、孔深(板厚)與穿孔板重量,便可依此圖表得知共振頻率。由於此過程中僅考量了穿孔板表面之孔洞質量音響抗與材質對吸音特性之影響，然而卻無法提供一有效、可靠的全頻率吸音率之預測。在本文中列舉了五例，其結果如下：1.此五例於高頻音時吸音率均降低；2.相同穿孔率時，孔數、孔徑不同時，其吸音行為亦不相同，顯示穿孔率並非影響共振頻率的獨立因素；而其後至今 60 年間，關於穿孔板用於噪音吸收之相關研究便在眾人的研究下逐漸備齊。例如於 1952 年，Callaway 與 Ramer 以實驗的方式來探討穿孔板穿孔率與背貼材質密度間的關係，並得到了異於一般聲學抵抗的結果。就相同的多孔質背貼材來說，其密度由每立方英尺 3 磅增加至 9 磅，使用於穿孔率低於 5% 之穿孔板時，其音響阻抗會隨多孔質背貼材的密度增加或穿孔率的降低而上升。而當穿孔板與背貼材質間隔了一層空氣層時，音響阻抗則隨背貼材質音抗增加而提升、隨穿孔板穿孔率增加而下降。在他們的研究中找出了多孔質密度與介於穿孔板與背貼材質間空氣層厚度變化與音響阻抗間的關係。另於 1985 年，熊代希透過駐波管法與餘響室法來測量多孔性材料之吸音特性，發現兩種方式測得之結果存有明顯差異，同時也探討材料厚度與背後空氣層的變化對於吸音特性產生何種影響。實驗結果顯示在某一範圍內增加材料厚度可提升其吸音效果，超過此範圍即使再增加厚度對吸音性能亦無幫助；另當多孔性材料背後有空氣層時對於低頻音的吸音效果有明顯的助益。此研究中亦提及多孔質材料搭配穿孔板使用時，可透過調整孔洞尺寸改變共振頻率。其後馬大猷更進一步研究穿孔吸音原理，並於 1997 年提出微穿孔板吸音體準確理論；微穿孔板吸音構造作為一抗噪吸音體較穿孔板具下列優勢：1.不需背貼多孔質即具有優異的吸音效果，較適用於有高速氣流與潮溼之場所；2.當孔徑小於 1mm 時，吸音頻帶將獲得擴展，具有替代多孔質吸音材料之潛力；3.微穿孔板板材可由任何質料構成，以滿足各種對空間質感之要求。

1997 年 Takahashi 的研究當中將過去一直受人忽視的繞射現象納入考量，對於不連續抗阻境界面所產生之繞射現象，提出了一個新的方程式模型，藉以預測穿孔板構造之吸音性能，再與實驗實測值比較而獲得了預測值與實測值間良好一致性之結果。在他的研究中主要考慮了兩個因素，一是孔洞空腔造成的音抗，一是板振動效應；而經由近一步的數據分析，板振動效應在本研究中被視為可忽略的影響。而本研究最後歸納出可實際影響穿孔板構造吸音性能之因素主要有 1.孔徑 2.穿孔板厚度 3.空氣層厚度 4.背貼材設置位置 5.背貼材質、厚度與密度等。而近來關於穿孔板構造共振頻率預測之研究則於 2008 年有相關研究探討類神經網路評估不同穿孔率的木質穿孔板與多種背貼材質、厚度於各種組合方式下的吸音性能。此研究之實驗數據主要經由餘響室吸音率量測法獲得，同時了解木質穿孔板構造之吸音特性，接著再將實驗數據分別透過類神經網路與複線性迴歸建立預測模型並進一步比較之。分析結果指出除了複線性迴歸分析則不適用在無背貼材質組合之情況下，複線性迴歸與類神經網路在預測值與實測值上皆呈現令人滿意的信賴度，但整體而言類神經網路的表現仍較複線性迴歸為佳。

## 肆、複合竹穿孔嵌板吸音構造因子與實驗結果

### 一、影響複合竹穿孔嵌板構造吸音特性之因子與其設置方式

複合竹穿孔板吸音構造乃是以竹穿孔板為基礎，將其設置於距離剛性壁面一段距

離使其具有吸音能力，並於背後貼上多孔質背貼材提高吸音率，再於表面敷設面板提高美質性；圖 1 即為複合竹穿孔嵌板吸音構造設置方式示意圖。

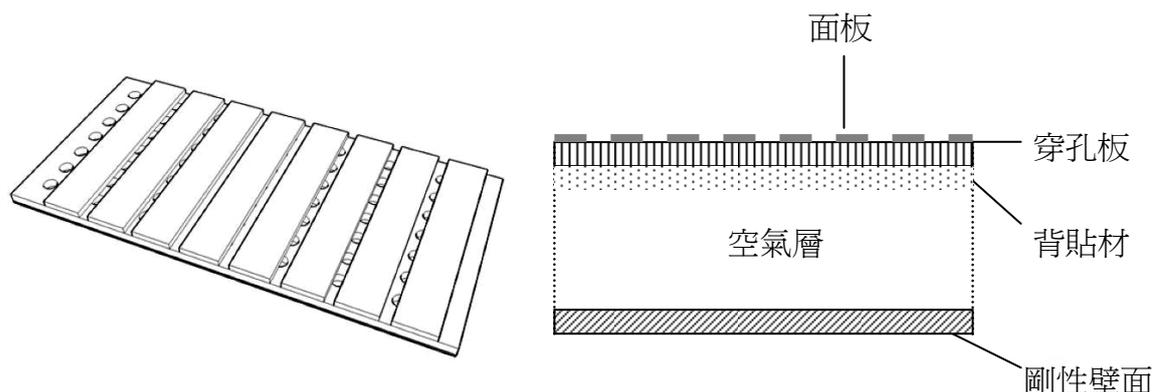


圖 1 複合竹穿孔嵌板構造示意圖(參考資料：蔡岡廷，2005)

本實驗為確立影響複合竹穿孔嵌板構造吸音特性之因子，依具影響穿孔板構造吸音特性之各項條件；其中因考量穿孔板吸音構造於實際應用下，可能加入表面裝修材，故本研究將裝飾用之面板導入後，探討複合竹穿孔嵌板構造吸音特性。因此，本研究探討之複合竹穿孔嵌板構造吸音特性之所有因子如表 1 所示：

表 1 影響複合竹穿孔嵌板構造吸音特性之因子

	構件	因子	考量原則
影響複合竹穿孔嵌板構造吸音特性之因子	面材	覆蓋率	美質性
	竹穿孔版	板厚	吸音性能
		孔徑	
		孔距	
		穿孔率	
	背貼材	材質種類	
		排列位置	
	背後空氣層	空氣層厚度	
		空氣層形狀	

以下將進一步選定各項構件之規格，藉以組構出複合竹穿孔嵌板吸音構造各種組構形式以供實驗測試之。

#### (一) 面板之規格選定

竹材本身具有優美紋路，然而穿孔後因其外觀遭受破壞，故考量到室內裝修時為增加複合竹穿孔吸音構造外觀裝飾性，擬導入裝飾表面之面板；由於穿孔板吸音原理乃是利用聲波通過穿孔板孔頸處促使孔頸之空氣柱震動、進而與孔壁產生摩擦消耗音能，故在穿孔板吸音構造表面貼附面板等於減少孔數，勢必改變構造吸音特性，此外在以往的研究中亦未提及在既有的穿孔板吸音構造表面覆蓋面板對吸音特性將產生何種影響，因此本研究率先比較相同組構方式之竹穿孔板吸音構造在無面板與面板覆蓋

率 50%時吸音特性之異同；預備測式構造組合方式見表 2，實驗數據如表 3 所示：

表 2 面板預備測試組合表

組別編號	固定條件			比較條件
	竹穿孔板穿孔率	有無背貼材質	背後空氣層厚度	面板覆蓋率
PT1-1	7.9%	無	5cm	0%
PT1-2				50%

表 3 面板預備測試：相同條件下之複合竹穿孔嵌板吸音構造各頻率吸音率比較

組別編號	比較項目	1/3 八度音程中心頻率																NRC
		125	160	200	250	315	400	500	630	800	1K	1.25K	1.6K	2K	2.5K	3.15K	4K	
PT1-1	0%	0.00	0.01	0.01	0.04	0.02	0.06	0.08	0.13	0.18	0.20	0.18	0.16	0.12	0.10	0.09	0.10	0.11
PT1-2	50%	0.01	0.05	0.04	0.07	0.06	0.11	0.14	0.20	0.26	0.25	0.20	0.15	0.11	0.08	0.07	0.09	0.14

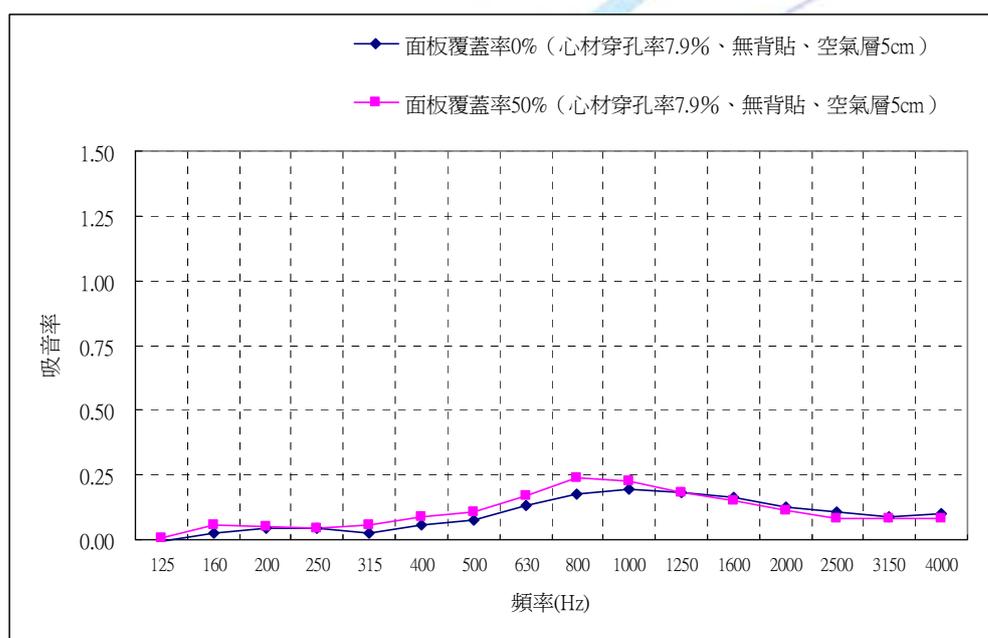


圖 1 相同條件下，面板覆蓋率 0%與 50%比較圖

由預備測試之結果本實驗發現當竹穿孔吸音構造導入面板後，其除了共振頻率稍微向低頻偏移，同時更因為面板板震動吸音的效應使得中低頻吸音率有些微提升，因此將竹穿孔板吸音構造進行適度的表面裝飾不只可提升其外表美觀，亦可兼顧吸音性能。本研究為進一步了解面板對複合竹穿孔嵌板構造吸音性能之影響程度，擬取面板覆蓋率分別為 0%、33%、50%、66%等四種規格進一步測試之，其外觀差異如圖 2 所示。由於穿孔板吸音構造之原理乃是透過孔中空氣柱震動摩擦達到消耗音能之效果，故覆蓋率超過 66%之情形不在本次研究討論之範圍內。

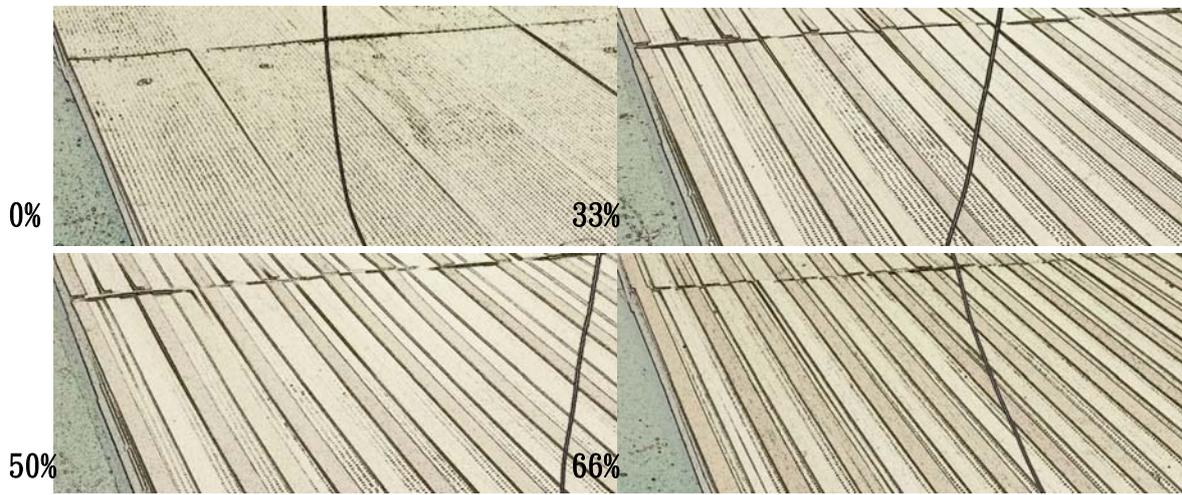


圖 2 不同面板覆蓋率試體外觀示意圖

### (二) 面板覆蓋率變化對吸音特性之影響

本節將在竹穿孔板穿孔率、有無背貼材質與空氣層厚度等條件固定的情況下，比對四種面板覆蓋率 0%、33%、50%與 66%對於複合竹穿孔嵌板構造吸音特性影響之情況。其比較組合如表 4-1 所示。以不同面板覆蓋率(0%、33%、50%、66%)，在固定竹穿孔板穿孔率 14.8%、背貼美耐皿發泡棉、背後空氣層厚度 5cm 等條件為例(其餘各組詳見附錄三)，其吸音率比較如圖 3 所示：

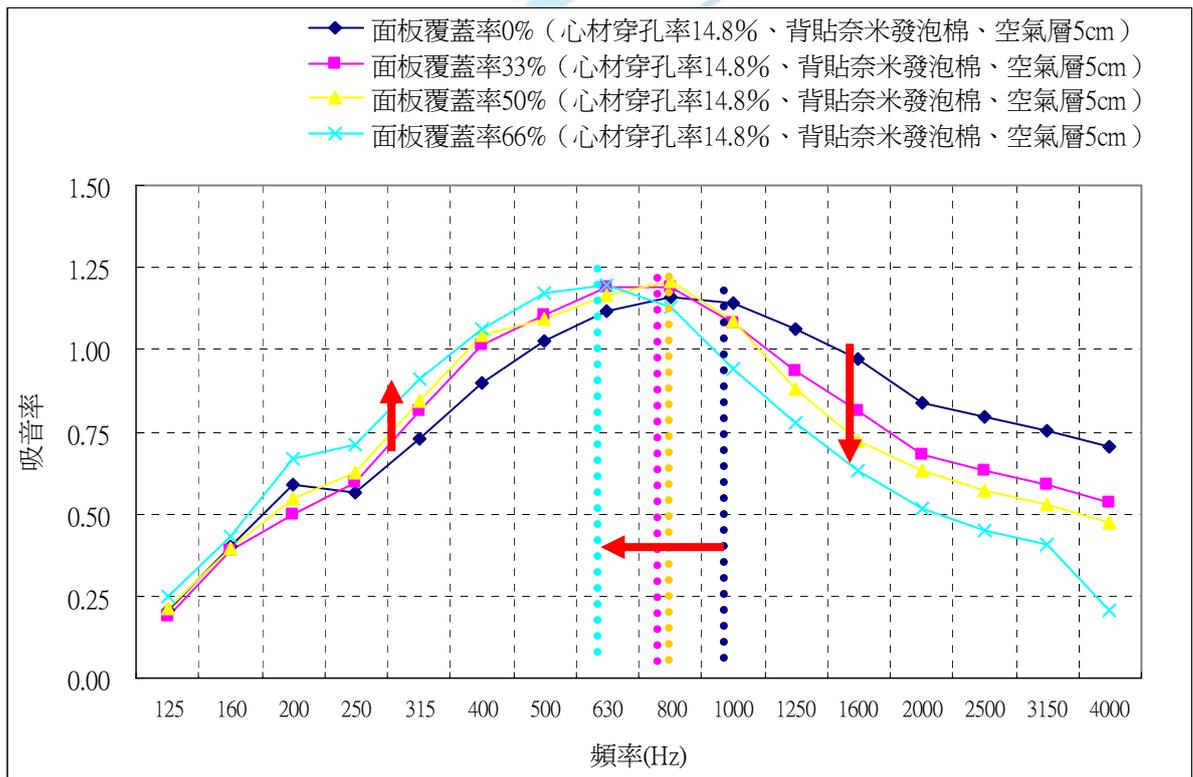


圖 3 不同面板覆蓋率吸音率比較圖

在固定條件(竹穿孔板穿孔率 14.8%、背貼美奈皿發泡棉、背後空氣層 5cm)下，改變面板覆蓋率對複合竹穿孔嵌板構造吸音特性產生下列影響：

1. 隨著覆蓋率由 0% 逐漸提升至 66%，各頻率吸音率曲線有些微向低頻偏移之趨勢，但覆蓋率 33%與 50%兩者之偏移量皆在一個 1/3 八度音頻率中心範圍內，僅有覆蓋率 66%者達到兩個 1/3 八度音頻率中心；由此可知覆蓋率在 50%以下對於共振頻率偏移的影響不大，使得外觀裝飾具有選擇上的彈性。

2.隨著覆蓋率由 0% 逐漸提升至 66%，其中高頻帶(1000Hz 以上) 吸音率逐漸下降，最少下降 0.1 以上，而低頻帶(500Hz 以下)在面板板振動吸音效應的影響下吸音率則些微提升，最多增加不超過 0.07，顯示覆蓋率的改變對於共振頻率的偏移影響雖不明顯，但削弱中高頻帶吸音性能的影響卻較為顯著。

### (三) 竹穿孔板穿孔率變化對吸音特性之影響

面板覆蓋率、有無背貼材質與空氣層厚度等條件固定的情況下，比對兩種竹穿孔板穿孔率 7.9%、14.8% 對於複合竹穿孔嵌板構造吸音特性影響之情況。以不同竹穿孔板穿孔率 7.9%、14.8%，在固定面板覆蓋率 33%、背貼美奈皿發泡棉、背後空氣層厚度 10cm 等條件為例(其餘各組詳見附錄四)，其吸音率比較如圖 4 所示：

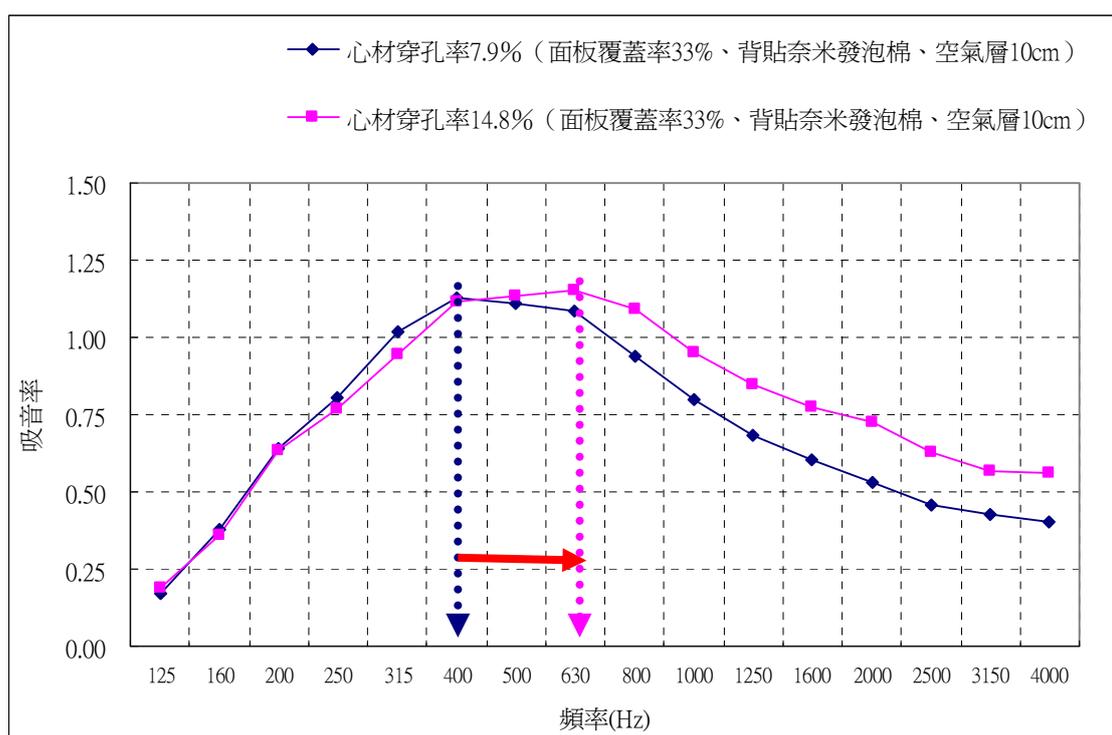


圖 4 不同竹穿孔板穿孔率之吸音率比較圖

在固定條件(面板覆蓋率 33%、背貼美奈皿發泡棉、背後空氣層 10cm)下，改變竹穿孔板穿孔率對複合竹穿孔嵌板構造吸音特性產生下列影響：

1.隨著穿孔率由 7.9% 提升至 14.8%，共振頻率有向高頻偏移之趨勢(400Hz 提升至 600Hz)。

2.隨著覆蓋率由 7.9% 提升至 14.8%，其於中高頻音(800Hz 以上)之吸音率最少提升 0.15 以上，而在低頻音(500Hz 以下)則幾無差異，顯示穿孔率的增加可提升中高頻音之吸音性能，同時亦可保有對低頻音之吸收效果。

### (三) 有無背貼材質對吸音特性之影響

面板覆蓋率、竹穿孔板穿孔率與空氣層厚度等條件固定的情況下，比對無背貼材質與背貼美奈皿發泡棉對於複合竹穿孔嵌板構造吸音特性影響之情況。(圖 5)

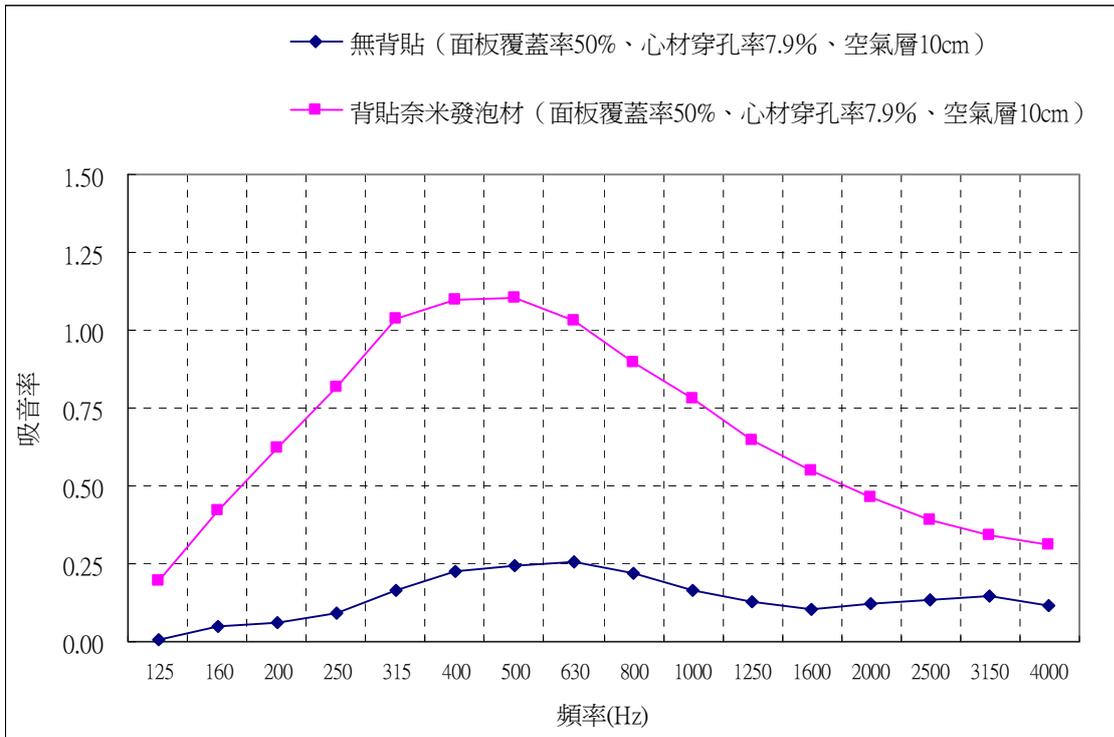


圖 5 有無背貼材質於面板覆蓋率 50%、竹穿孔板穿孔率 7.9%、背後空氣層厚度 10cm 時之吸音率比較圖

在固定條件(面板覆蓋率 33%、背貼美耐皿發泡棉、背後空氣層 10cm)下，有無背貼材質對複合竹穿孔嵌板構造吸音特性產生下列影響：

- 1.無背貼者各頻率吸音率較差，但導入美耐皿發泡棉後全頻段吸音率皆有顯著提升，顯示複合竹穿孔嵌板需搭配背貼材質方可獲得較佳的吸音效果。
- 2.當竹穿孔板背貼美耐皿發泡棉時會使共振頻率稍微向低頻偏移。

#### (四) 背後空氣層厚度對吸音特性之影響

本節將在面板覆蓋率、竹穿孔板穿孔率與有無背貼材質等條件固定的情況下，比對四種背後空氣層高度 5cm、10cm、20cm 與 50cm 對於複合竹穿孔嵌板構造吸音特性影響之情況。以不同背後空氣層厚度(5cm、10cm、20cm、50cm)，在固定面板覆蓋率 66%、竹穿孔板穿孔率 14.8%、背貼美耐皿發泡棉等條件下為例(其餘各組詳見附錄六)，其吸音率比較如圖 5 所示：

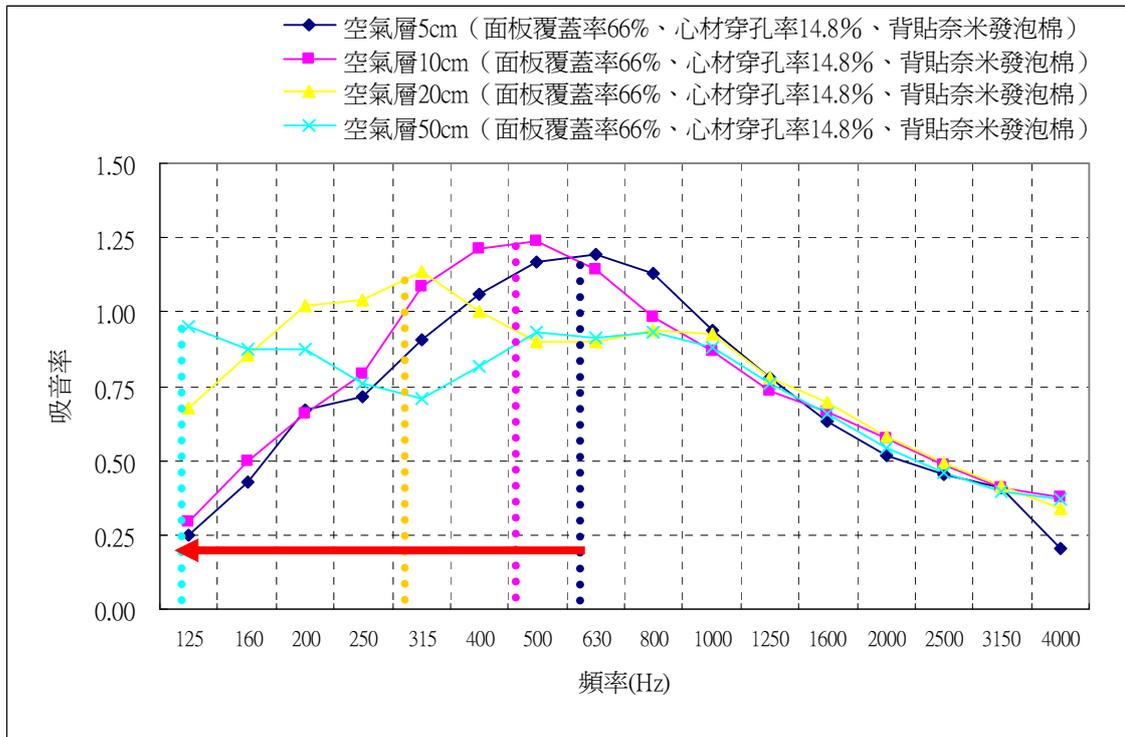


圖 5 不同背後空氣層厚度於面板覆蓋率 66%、竹穿孔板穿孔率 14.8%、背貼美耐皿發泡棉時之各頻率吸音率比較圖

以此例而言，在固定條件(面板覆蓋率 66%、竹穿孔板穿孔率 14.8%、背貼美耐皿發泡棉)下，不同背後空氣層厚度對複合竹穿孔嵌板構造吸音特性產生下列影響：

一、當空氣層為 5cm、10cm、20cm、50cm 時，其所對應之共振頻率各為 630Hz、500Hz、315Hz、125Hz，顯示隨空氣層厚度增加，共振頻率有逐漸向低頻偏移之傾向。

二、隨空氣層厚度的增加，對中高頻帶(1000~4000Hz)吸音率並無明顯影響，但中低頻帶(125~800Hz)之吸音率變化則較為複雜；中頻帶(500~800Hz)之吸音率隨空氣層厚度增加而遞減，低頻帶(125~500Hz)之吸音率則隨空氣層厚度增加而提升，因而使得 125~800Hz 之間的吸音率曲線隨空氣層厚度的增加在趨於平緩。故空氣層厚度的增加不僅是導致共振頻率向低頻移動，亦使中頻帶吸音率下降、低頻帶吸音率上升，但對高頻帶則無明顯影響。

### 伍、複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測模型之建立

本研究針對面板覆蓋率與穿孔率、板厚對共振頻率的影響，建立包含面板覆蓋率與背貼材質有無等因子考量之共振頻率預測模型，提供設計者快速檢核複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率之參考工具。

面板覆蓋率、竹穿孔板穿孔率、背貼材質有無與背後空氣層厚度做為本實驗之操控變因，並探討共振頻率如何受上述條件之改變所影響，因此本研究乃視面板覆蓋率、竹穿孔板穿孔率、背貼材質有無與背後空氣層厚度為自變數，而受其影響之共振頻率則視為依變數；由於本研究欲建立複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測模型，因此在自變數有四項之情況下本研究將採用複迴歸分析建立之。而在未來，設計人員只需謹記此預測模型，單單以紙筆進行簡單運算便可預測特定組合條件下複合竹穿孔嵌板吸音構造之共振頻率，符合本研究建立一快速、便利檢核工具之原則。因本研究操控變因之選取皆依據文獻中提及可影響複合竹穿孔嵌板吸音構造吸音特性表現之因子，

故迴歸模式將以「強迫進入變數法」(Enter)不增減變數個數。本研究迴歸分析之相關設定如表 4-9 所示：

表 4-9 複迴歸分析情境設定

迴歸分析類型	複迴歸分析
樣本數	64
自變數項目	面板覆蓋率、 穿孔板穿孔率、 有無背貼材質、 背後空氣層厚度
依變數項目	共振頻率
變數選擇模式	強迫進入法(Enter)
信賴區間	95%

一般的迴歸分析中，迴歸式大多被表示為：

$$y = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} + \varepsilon_i \quad \text{式 1}$$

式中：

$\alpha$ =截距

$\beta$ =各項 x 之迴歸係數

$\varepsilon_i$ =隨機誤差，期望值為 0

$i=1 \sim n$  ( $n$ =樣本數目)

本研究選定之變因，其迴歸方程式可表示為：

$$f_0 = \alpha + \beta_1 CP + \beta_2 P + \beta_3 N + \beta_4 L \quad \text{式 2}$$

式中

$f_0$ =共振頻率，%

$P$ =竹穿孔板穿孔率，%

$L$ =背後空氣層厚度，cm

$CP$ =覆面板覆蓋率，%

$N$ =背貼材質有無，0 為無背貼材，1 為背貼美奈皿發泡棉

本研究擬逐次刪去一變因進行複迴歸分析，觀察  $R^2$  值大小變化以找出最佳迴歸式。(表 4)

表 4 各種條件之迴歸式其  $R^2$  比較表

自變數	剔除變數	依變數	迴歸式	$R^2$	編號
面板覆蓋率、穿孔板	無	共振頻率	$f_0 = 972.65 - 2.84CP + 19.88P - 183.44N - 45.19L$	0.81	式 3

穿孔率、有無背貼材質、空氣層厚度					
穿孔板穿孔率、有無背貼材質、空氣層厚度	面板覆蓋率	共振頻率	$f_0=867+19.88P-183.44N-45.19L$	0.68	式 4
面板覆蓋率、有無背貼材質、空氣層厚度	穿孔板穿孔率	共振頻率	$f_0=1198.32-2.84CP-183.44N-45.19L$	0.67	式 5
面板覆蓋率、穿孔板穿孔率、空氣層厚度	有無背貼材質	共振頻率	$f_0=880.93-2.84CP+19.88P-45.19L$	0.59	式 6
面板覆蓋率、穿孔板穿孔率、有無背貼材質	空氣層厚度	共振頻率	$f_0=663.75-2.84CP+19.88P-183.44N$	0.47	式 7

由表 4 中可看出迴歸式式 3 的  $R^2$  最高，故背後空氣層厚度未滿 20cm 之複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測模型可表示為：

$$f_0=972.65-2.84CP+19.88P-183.44N-45.19L \quad \text{式 3}$$

為驗證式 3 所推估預測值與實測值之準確性，本研究將此 32 組試體之組合條件代入式 3 中求得共振頻率預測值與實驗測試值做進一步比較，以驗證此預測模型對背後空氣層未滿 20cm 之複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測之準確性。因考量實驗誤差、實際情形與理論之異同，本研究視預測值和實測值相差於一個 1/3 八度音頻率內為準確，而差異超過兩個 1/3 八度音頻率中心者則為不準確；其比較結果如表 5 所示。

表 5 共振頻率預測值與實測值比較表

實驗組別 (空氣層 5cm)	SF01	SF02	SF03	SF04	SF05	SF06	SF07	SF08	SF09	SF10	SF11	SF12	SF13	SF14	SF15	SF16
共振頻率 預測值	1000 (904)	800 (810)	800 (762)	800 (716)	1000 (1041)	1000 (947)	800 (899)	800 (853)	800 (720)	630 (627)	630 (578)	500 (533)	800 (857)	800 (764)	800 (715)	630 (670)
共振頻率 實測值	1000	800	800	630	1250	1000	1000	800	630	630	500	500	800	630	800	630
預測值與實 測值相差之 1/3 倍頻個數	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
實驗組別 (空氣層 10cm)	SF17	SF18	SF19	SF20	SF21	SF22	SF23	SF24	SF25	SF26	SF27	SF28	SF29	SF30	SF31	SF32
共振頻率 預測值	630 (678)	630 (584)	500 (536)	500 (490)	800 (815)	800 (721)	630 (673)	630 (628)	500 (494)	400 (401)	315 (352)	315 (307)	630 (632)	500 (538)	500 (490)	400 (444)

共振頻率 實測值	630	630	630	500	630	630	630	500	500	400	400	315	630	630	630	500
預測值與實 測值相差之 1/3 倍頻個數	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1

共振頻率預測值已轉化為 1/3 八度音頻率中心表示，(\*)為原值  
而此 32 組試體經迴歸分析後其殘差分布圖如圖 4-7 所示：

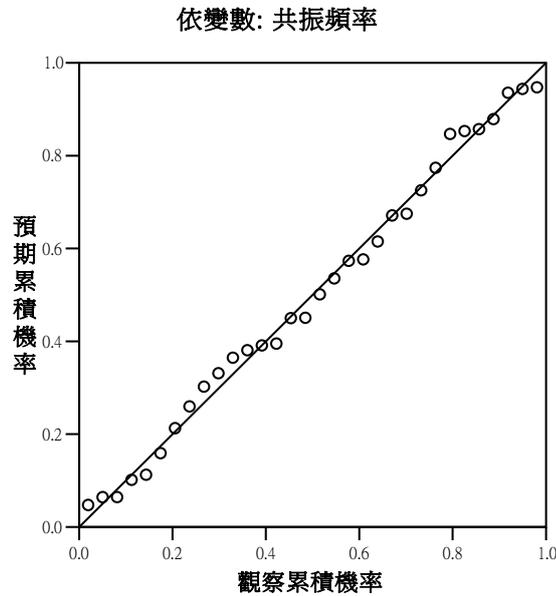


圖 6 迴歸分析之殘差分布圖

圖 6 顯示屬常態分布。而表 5 則顯示依式 3 求得之複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測值與實測值有良好的一致性(32 組樣本之預測值與實測值誤差皆在一個 1/3 八度音中心頻率範圍內)，因此式 3 可代表背後空氣層未滿 20cm 之複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測模型。

針對空氣層大於 20cm 以上之預測結果如表 6 所示。

表 6 空氣層大於 20cm 以上之吸音率預測迴歸式其 R<sup>2</sup> 比較表

自變數	剔除變數	依變數	迴歸式	R <sup>2</sup>	編號
面板覆蓋率、穿孔板 穿孔率、有無背貼材 質、空氣層厚度	無	共振頻率	$f_0=483.89-0.85CP+6.11P-33.44N-7.47L$	0.93	式 8
穿孔板穿孔率、有無 背貼材質、空氣層厚 度	面板覆蓋率	共振頻率	$f_0=452.32+6.11P-33.44N-7.47L$	0.90	式 9
面板覆蓋率、有無背 貼材質、空氣層厚度	穿孔板穿孔率	共振頻率	$f_0=553.28-0.85CP-33.44N-7.47L$	0.90	式 10
面板覆蓋率、穿孔板 穿孔率、空氣層厚度	有無背貼材質	共振頻率	$f_0=467.17-0.85CP+6.11P-7.47L$	0.91	式 11
面板覆蓋率、穿孔板	空氣層厚度	共振頻率	$f_0=222.48-0.85CP+6.11P-33.44N$	0.78	式 12

穿孔率、有無背貼材質					
------------	--	--	--	--	--

由表 6 的比較中可看出迴歸式式 8 之  $R^2$  最高，因此背後空氣層厚度 20cm 以上之複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測模型可表示為：

$$f_0 = 483.89 - 0.85CP + 6.11P - 33.44N - 7.47L \quad \text{式 8}$$

為驗證式 8 所推估預測值與實測值之準確性，本研究將此 32 組試體之組合條件代入式 8 中求得共振頻率預測值與實驗測試值來做進一步比較，以驗證此預測模型對背後空氣層厚度 20cm 以上之複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測之準確性。因考量實驗誤差、實際情形與理論之異同，本研究視預測值和實測值相差於一個 1/3 八度音頻率內為準確，而差異超過兩個 1/3 八度音頻率中心者則為不準確；其比較結果如表 7 所示。

表 7 共振頻率預測值與修正後實測值比較表

實驗組別 (空氣層 20cm)	SF33	SF34	SF35	SF36	SF37	SF38	SF39	SF40	SF41	SF42	SF43	SF44	SF45	SF46	SF47	SF48
共振頻率 預測值	400 (383)	315 (355)	315 (340)	315 (327)	400 (425)	400 (397)	400 (382)	400 (369)	315 (349)	315 (321)	315 (307)	315 (293)	400 (391)	400 (363)	315 (349)	315 (335)
共振頻率 實測值	400	400	315	315	500	400	400	400	315	315	250	250	400	400	315	315
預測值與實 測值相差之 1/3 倍頻個數	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
實驗組別 (空氣層 50cm)	SF49	SF50	SF51	SF52	SF53	SF54	SF55	SF56	SF57	SF58	SF59	SF60	SF61	SF62	SF63	SF64
共振頻率 預測值	160 (159)	125 (131)	125 (116)	100 (103)	200 (201)	160 (173)	160 (158)	160 (145)	125 (125)	100 (97)	80 (83)	80 (69)	125 (167)	125 (139)	100 (125)	100 (111)
共振頻率 實測值	125	125	125	125	160	125	125	125	125	125	125	125	160	160	125	125
預測值與實 測值相差之 1/3 倍頻個數	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	2	2	1	1	1	1

共振頻率預測值已轉化為 1/3 八度音頻率中心表示，(\*)為原值

而此 32 組試體經迴歸分析後其殘差分布圖如圖 7 所示：

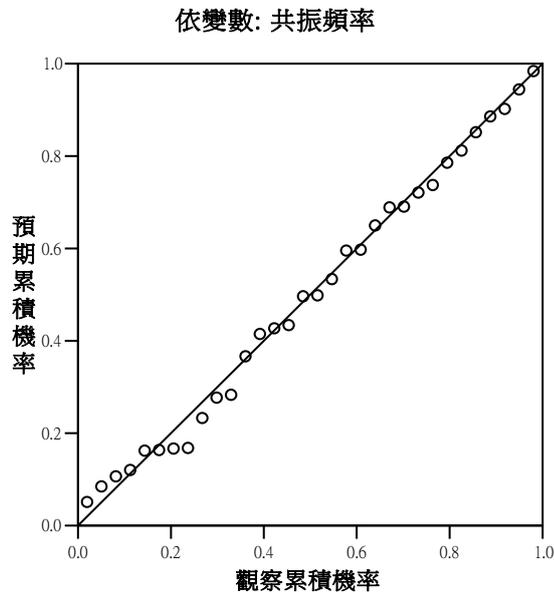


圖 7 迴歸分析之殘差分布圖

圖 7 中試體編號 SF01 至 SF32 等 32 組試體之殘差屬常態分布。而表 4-26 則顯示依式 8 求得之複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測值與實測值有良好的一致性，因此式 8 可做為背後空氣層 20cm 以上之複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率預測模型。

## 陸、結論

穿孔板共振頻率預測公式之適用特性依背後空氣層厚度不同為分野，將 64 組實驗數據分為背後空氣層厚度未滿 20 公分與 20 公分以上兩大組別各 32 組進行複迴歸分析，進而得到預測模型式 3 與式 8，並依序將既有之 64 組試體之組構條件代入式中求得共振頻率之預測值。經比較，由式 3 與式 8 推估而得之共振頻率預測值與實驗實測值具有良好的一致性，進而確立的複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率的預測模型；故在面板覆蓋率 0%~66%、背貼材質為美耐皿發泡棉且空氣層厚度不超過 50 公分 ( $\leq 50\text{cm}$ ) 之前提下，複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率之預測在背後空氣層厚度未滿 20 公分之情形下適用式 3。

本文主要探討複合竹穿孔嵌板吸音構造當中，面板覆蓋率、竹穿孔板穿孔率、有無背貼材質與背後空氣層厚度對於其吸音性能之影響，以了解各因子對吸音特性之影響程度與方式，並依實驗數據推導出複合竹穿孔嵌板吸音構造共振頻率的預測模型，以供未來材料設計時吸音性能參考之依據。

## 柒、參考文獻

1. Bolt, R. H., "On the design of perforated facings for acoustic materials", *J. Acoust. Soc. Am.*, 1947, Vol.19, No. 5, pp. 917-921.
2. Maa, D. Y., "Potential of microperforated panel absorber", *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, Vol. 104, Issue 5, pp. 2861-2866.
3. Ingard, K. U., Bolt, R. H., "Absorption Characteristics of Acoustic Material with Perforated Facings", *J. Acoust. Soc. Am.*, 1951, Vol.23, No.5, pp. 533-540.

4. Callaway, D. B., Ramer, L. G., "The use of perforated facings in designing low frequency resonant absorbers," *J. Acoust. Soc. Am.*, 1952, Vol.24, No. 3, pp. 309-312.
5. Ingard, K. U., "Perforated facing and sound absorption", *J. Acoust. Soc. Am.*, 1954, Vol.26, No. 2, pp. 151-154.
6. Davern, W. A. "Impedance Chart for Designing Sound Absorber Systems" , *J. Sound Vib* ,1967, Vol. 6, No. 3, pp. 396-405.
7. Davern, W. A., "Perforated facings backed with porous materials as sound absorbers an experimental study", *Applied Acoustics*, 1977, Vol.10, pp. 85-112.
8. Takahashi, D., "A new method for predicting the sound absorption of perforated absorber systems," *Applied Acoustic*, 1997, Vol.51, pp. 71-84.
9. Lin, M.D., Tsai, K.T., Su, B.S., "Estimating the sound absorption coefficients of perforated wooden panels by using artificial neural networks", *Applied Acoustics*, 2008, In Press, Corrected Proof.

