

台灣竹材半穿孔吸音構造之性能研究

The Performance Research on the Semi-Perforated Sound Absorption Construction of Taiwan's Bamboo

蔡岡廷¹ 周秀雯²

摘 要

國內有關竹複合嵌板類之綠色建築材料，在吸音性能指標之基本研發與測試資料仍然缺乏，故本研究將針對半穿孔竹複合嵌板探討其應用於建築室內環境之音響性能。竹材半穿孔吸音構造為一複合材料，由半穿孔竹複合嵌板和不同之背覆材料所組成，將不同組合之半穿孔竹複合嵌板構造進行不同變因之組合，已探討其吸音率之測值。

本研究主要探討穿孔率、板材厚度與背貼材質變化對半穿孔竹複合嵌板吸音特性之影響，冀望能掌握影響其吸音特性之因子，而實驗量測所得之數據資料亦能進一步作為噪音防治使用。以下簡述本研究在半穿孔竹複合嵌板之影響因子對吸音性能之結論：

1. 在相同板材質下，無穿孔與有半穿孔形成不同之吸音率曲線，無穿孔板呈現板振動吸音特性，有半穿孔則為共振吸音特性。
2. 半穿孔木質嵌板固定板厚、背貼材質種類之因素，隨穿孔率加大而共振頻率愈高。
3. 半穿孔木質嵌板在相同條件下，發現於低頻域之吸音率為板材厚度越薄其吸音率越佳，但在中高頻域，板材厚度對吸音率則無顯著影響。
4. 半穿孔木質嵌板背貼吸音材料均較無背貼吸音材質之吸音為佳，因此需背貼吸音材質才能獲致較佳之吸音特性。

關鍵字：竹、半穿孔、穿孔率、吸音率、複合材料、共振吸音特性

A b s t r a c t

The paper explores the influences of variations in perforated rate, panel thickness, and backing material on semi-perforated bamboo panels, while the data obtained from experiment can further be used for noise reduction.

In conclusion, 1) Given the same materials, the perforated and non-perforated panels formed different sound absorption coefficient curves, while non-perforated panels displayed sound absorption characteristics concerned

¹ 作者一，國立中興大學農村規劃研究所助理教授

² 作者二，國立中興大學農村規劃研究所碩士

with panel vibration, and semi-perforated panels displayed characteristics of resonance sound absorption. 2) Given semi-perforated panels of fixed thickness and backing material. Resonance frequency rose with increasing perforated rate. 3) Given semi-perforated panels under the same conditions, sound absorption coefficient enhanced with decreasing panel thickness in the low frequency range; while sound absorption coefficient was not significantly correlated with panel thickness in the high frequency range. 4) Semi-Perforated panels with backing material were superior in sound absorption than those without backing material, so back material is necessary for better sound absorption.

Keywords : Bamboo, Semi-Perforate, Perforated Rate, Sound Absorption Coefficients, Composite, Resonance Sound Absorption

研究緣起與目的

有鑑於國內有關竹複合嵌板類之綠色建築材料，在吸音性能指標之基本研發與測試資料仍然缺乏，但國人喜用木質系建材進行室內裝修已成趨勢，故本研究計畫針對木質系板材中之半穿孔竹複合嵌板之應用，探討建築室內環境音響性能，期望開發出較適合國人於室內裝修使用時，並符合未來綠建材相關法規所訂定之吸音設計技術規範。

本研究計畫之目的乃與竹山鎮具多年竹複合嵌板製造加工經驗之泉源竹木廠，編定竹類半穿孔構造吸音率之基本資料庫的建立，並共同開發各類吸音性能之半穿孔竹複合嵌板構造。

目前市場對多用途裝修建材，在實用及美觀上的需求日益提高，建築室內裝飾裝修建材消費呈現以下流行趨勢：

- (1) 環保型建材成消費主流：無污染或污染較小的材料，特別是優質木竹系列。
- (2) 綠色建材取代傳統建材已是大勢所趨，因此綠建材成為建築室內裝飾裝修建材市場今後的主攻方向。
- (3) 重裝飾輕裝修成為建築室內裝飾裝修建材市場的新特色。
- (4) 室內飾材形成套件系列：市場開始出現半成品裝飾材料及系列飾材，以簡化裝修過程。

基於上述，此類孟宗竹複合半穿孔吸音板具材質輕、高強度、造型美觀、立體感強、組裝簡便能等特點。孟宗竹複合半穿孔吸音板既具有木質材料本身的裝潢效果，使整個空間協調一致，又具有良好的吸音性能，以改善音質質量，提高語音清晰度，以確保一流的音響效果，與其它的吸音產品相比有其獨到之處，因此本研究之目的將實驗測試組合，符合市場特色之孟宗竹複合半穿孔吸音板，且具有吸音、環保，實用性，美觀大方，裝飾性強，安裝簡便等傳統吸音材料無法替代的新型吸音產品，能夠製造一個安靜、舒適的工作與生活空間，例如音樂廳、飯店、會議室等場所理想裝飾材料，因此應是值得當今國內外首選使用的裝飾材料。

研究方法

一、CNS 餘響室法吸音率測定法 (CNS A3165)

本研究依據 CNS 總號 9065 (類號 3165) 之餘響室法吸音率測定法相關規定進行實驗量測，詳述如下 (賴榮平、林憲德、周家鵬，1991)：

(一) 餘響室

1. 室容積：150m³ 以上，形狀：6-8 面體。
2. 擴散條件：面積 0.8-3m² 之擴散板，合計面積約為餘室地板面積 80%，自由地配置 (用回頭翼亦可)。

(二) 試體

1. 面積：8.5-12m²，長度與寬度之比為 1.3-1.5 之長方形。
2. 配置：集中配置在室內之一面中央部位，測定試體之周邊，最好離開周圍壁面 1m 以上。

(三) 音源：1/3 八度音頻率噪音或震音。

(四) 測定頻率：1/3 八度音中心頻率 125-4KHz。

(五) 受音點：未靠近音源、試體、壁面、擴散板等之室內三點以上。

(六) 餘響時間與測定次數：125-200Hz：25 次以上，250-800Hz：15 次以上，1K-4KHz：9 次以上。

(七) 吸音率之計算 (音響透過損失之計算)

由空室時及試體設置時各頻率音程之餘響時間之測定結果，按下列算試計算出餘響法之吸音率：

$$\alpha = \frac{55.3V}{CS} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

α ：餘響室法吸音率

T_2 ：未放入試樣時之餘響時間 (S)

S ：試體面積 (m²)

C ：空氣之音速 (m/s) $C=331.5+0.61t$

T_1 ：放入試樣時之餘響時間 (S)

V ：餘響室容積 (m³)

t ：空氣中之溫度 (°C)

二、實驗室條件及量測系統說明

(一) 實驗室條件

本研究以國立成功大學建築研究所音響實驗室之餘響室 (北室) (如圖 1) 為實驗測試場所，採用音壓法量測餘響室內聲音之衰減特性，配合室容積大小，其截止頻率為 125Hz。

(二) 量測系統

本研究係利用實時分析儀 Real Time Analyzer (B&K 2260)，量測餘響室內聲音的衰減特性，即為餘響時間，儀器一端連接音源 (Norsonic Type 229)，來控制喇叭的發

聲，另一端連接麥克風 (B&K 4189)，用以接收聲音的衰減訊號，其量測系統說明如圖 2 所示。

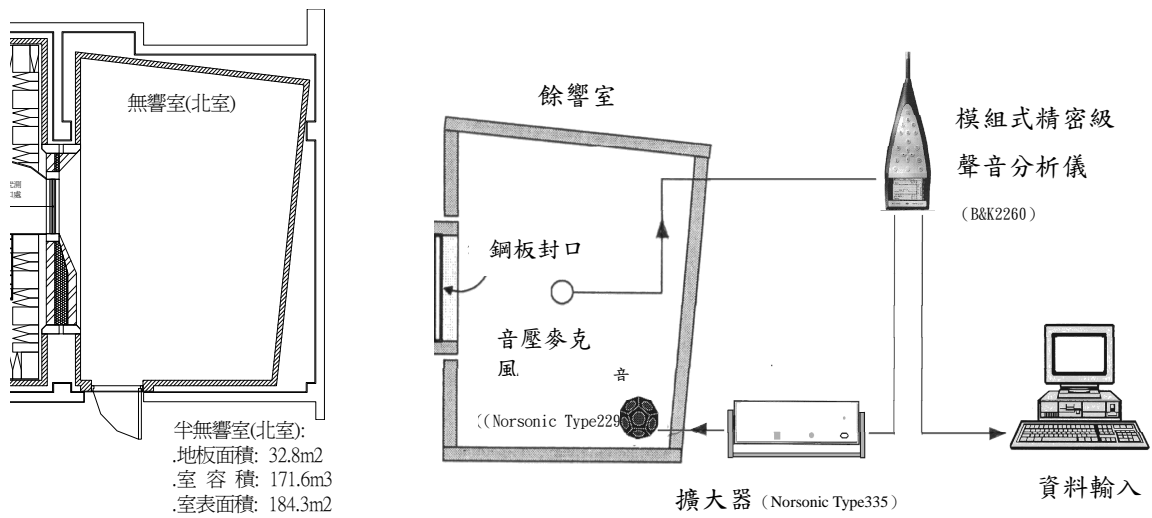


圖 1 餘響室平面圖

2 量測系統示意圖

三、試體放置安裝與餘響室測點說明

依據 CNS A3165 餘響室法吸音測定法之規定，試體面積規定為 8.5m^2 - 12m^2 ，長寬比為 1.3-1.5 之長方形，並將試體集中在餘響室內之一面中央部位，本研究之試體長為 4.2m、寬 2.856m，面積為 12m^2 ，長寬比為 1.47，符合 CNS A3165 之規定。其試體的周邊需與餘響室壁面留設 1m 以上的距離，測試時麥克風分別於五個定點進行量測，如圖 3 所示，且每一點的測試次數與紀錄等均依照 CNS A3165 之相關規定進行測試。

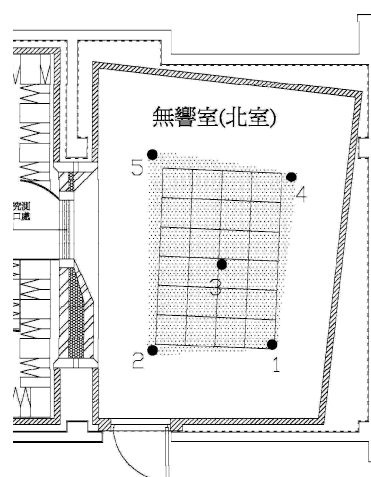


圖 3 試體放置與測點位置圖

研究過程與成果

一、實驗材料之選定

(一) 板材變化對吸音率之影響

本研究預備測試中先選擇三種不同之板材，分別為孟宗竹、麻竹、刺竹，了解不同板材對吸音率之影響，其試材規格如表 1 所示。

表 1 板材變化之試體材料規格表

原始編號	實驗試體材料之共同條件狀況				比較項目
	板厚	穿孔率	背貼材質	空氣層	板材
M01-1	3.0 mm	0%	無背貼	3.0 cm	孟宗竹
A01-1	3.0 mm	0%	無背貼	3.0 cm	麻竹
S01-1	3.0 mm	0%	無背貼	3.0 cm	刺竹

(二) 測試結果

測試結果發現，在相同條件下（相同板厚之裸材），其孟宗竹、麻竹、刺竹等三種板材之吸音率差值小於 0.01，顯示不同類別之竹複合板材對吸音率雖無十分顯著的影響，如表 2 和圖 4 所示，以孟宗竹在簡易性質、物理及機械性質之良好表現，因此，本研究優先選擇孟宗竹板材進行吸音構造之相關研究測試與分析。

表 2 孟宗竹、麻竹與刺竹（板厚 0.3 cm）之裸材，其各頻率之吸音率比較表

原始編號	比較項目	1/3 八度音中心頻率 (Hz)															NRC	
		125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150		4000
M01-1	孟宗竹	0.00	0.02	0.10	0.24	0.41	0.37	0.28	0.16	0.14	0.10	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06	0.17
A01-1	麻竹	0.06	0.05	0.09	0.17	0.37	0.42	0.28	0.17	0.14	0.11	0.07	0.07	0.06	0.05	0.06	0.07	0.16
S01-1	刺竹	0.05	0.04	0.08	0.15	0.36	0.39	0.31	0.18	0.15	0.12	0.08	0.07	0.07	0.05	0.04	0.04	0.16

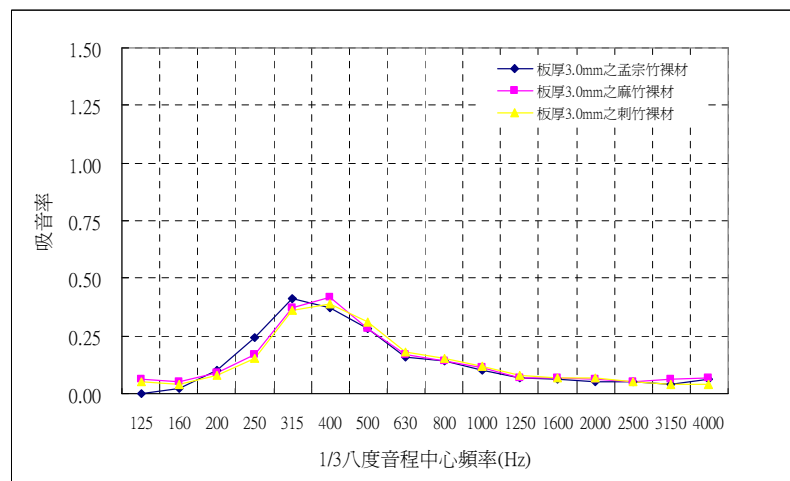


圖 4 孟宗竹、麻竹與刺竹（板厚 3.0 mm）之裸材，其各頻率之吸音率比較圖

(三) 穿孔竹複合嵌板之選定

1. 影響穿孔板吸音特性之因子

本研究探討板厚、穿孔率及背貼材質等三個因子變化，其因子設定情況如表所示，其影響因子分述如下：

(1) 板厚

本研究探討之穿孔板材質為木質嵌板，實驗設計之板厚為 3.0 mm、5.0

mm、7.0 mm三種板材厚度，探討其竹複合嵌板厚度變化對吸音率之影響。

(2) 穿孔率

半穿孔竹複合嵌板之穿孔率係由孔徑、孔距所決定的，本研究之實驗設計孔徑 6 mm—孔距 18 mm之二種不同的巢形穿孔率為 7.9%以及 14.8%。本研究著重探討孔徑—孔距固定下的穿孔率加倍情形之變化。

(3) 背貼材質

本研究之背貼材質選定，以材料科技之進步為考量，並藉由前人研究中常提及之材質及目前台灣實務界常使用之玻璃棉（厚度 50 mm，基重 1600g/m²，密度 32 kg/m³，材料為玻璃纖維（平均纖維直徑 8μm），產地為台灣）及奈米發泡材（厚度 50 mm，基重 240-330g/m²，密度 8-11 kg/m³，材料為發泡泡棉，產地為德國）為主。

2. 影響穿孔木質嵌板吸音特性之組合

本研究探討板厚、穿孔率及背貼材質等三個因子變化，其三因子變化總共有 27 種不同組合如表 3 所示。

表 3 孟宗竹穿孔竹複合嵌板吸音構造 27 種不同組合條件一覽表

條件 編號	板厚 (mm)			穿孔率 (%)			背貼材質		
	3.0	5.0	7.0	0	7.9	14.8	無背貼 材質	50 mm 玻璃棉	50 mm 奈米發泡
M01-1	○			○			○		
M01-2	○			○				○	
M01-3	○			○					○
M02-1		○		○			○		
M02-2		○		○				○	
M02-3		○		○					○
M03-1			○	○			○		
M03-2			○	○				○	
M03-3			○	○					○
M04-1	○					○	○		
M04-2	○					○		○	
M04-3	○					○			○
M05-1	○				○		○		
M05-2	○				○			○	
M05-3	○				○				○
M06-1		○				○	○		
M06-2		○				○		○	
M06-3		○				○			○
M07-1		○			○		○		
M07-2		○			○			○	
M07-3		○			○				○
M08-1			○			○	○		
M08-2			○			○		○	
M08-3			○			○			○
M09-1			○		○		○		
M09-2			○		○			○	
M09-3			○		○				○

(四) 穿孔竹複合嵌板之測試結果分析

1. 穿孔率變化對吸音率之影響

針對孟宗竹半穿孔竹複合嵌板在相同條件下，板材均為 3.0 mm厚的半穿孔竹

複合嵌板，其穿孔率分別為 0%、7.9% 及 14.8%，如表 4 所示，進行吸音率之量測分析與比較。以固定之板厚 (3.0 mm)、無背貼 (3.0 cm 空氣層)，改變其穿孔率，分別為 0%、7.9% 及 14.8%，等三種比較組合為例，其吸音率比較如表 5 和圖 5 所示。

(1) 材料規格

表 4 穿孔率變化之試體材料規格表

原始編號	實驗試體材料之共同條件狀況			比較項目
	板厚	背貼材質	空氣層	穿孔率
M01-1	3.0 mm	—	3.0 cm	0%
M04-1	3.0 mm	—	3.0 cm	7.9%
M05-1	3.0 mm	—	3.0 cm	14.8%

(2) 測試結果

表 5 3.0 mm 厚半穿孔竹複合嵌板, 無背貼, 穿孔率 0%、7.9% 與 14.8%，其各頻率之吸音率比較表

原始編號	比較項目	1/3 八度音中心頻率 (Hz)																NRC
		125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
M01-1	0%	0.00	0.02	0.10	0.24	0.41	0.37	0.28	0.16	0.14	0.10	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06	0.17
M04-1	7.9%	0.03	0.04	0.07	0.20	0.34	0.42	0.28	0.17	0.15	0.12	0.07	0.08	0.06	0.07	0.07	0.08	0.16
M05-1	14.8%	0.05	0.03	0.04	0.12	0.21	0.35	0.31	0.20	0.16	0.15	0.11	0.10	0.09	0.09	0.10	0.11	0.17

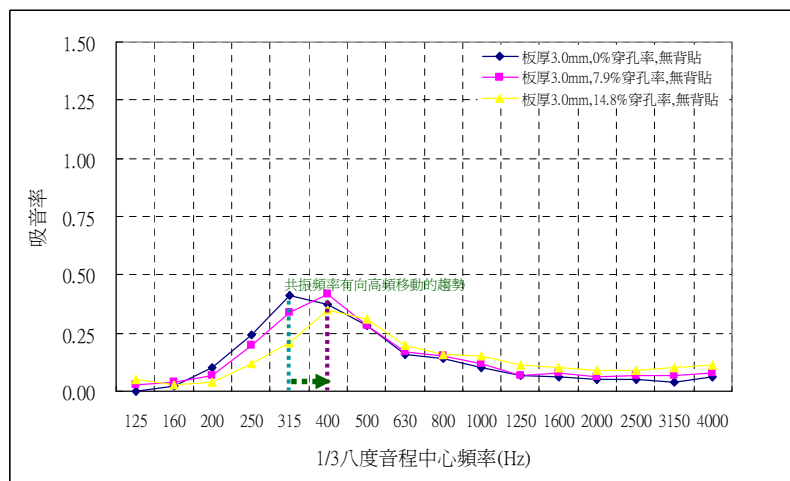


圖 5 3.0 mm 厚半穿孔竹複合嵌板, 無背貼, 穿孔率 0%、7.9% 與 14.8%，其各頻率之吸音率比較圖

就上述之試體組合所測試之結果，本研究發現在相同條件下 (固定板厚、背貼材質)，改變其穿孔率，穿孔率由 0% 增加至 8.4% 再增加至 15.1%，其試體之吸音率變化具下列特性：

※在同樣條件下，0% 穿孔率所量測之共振頻率為 315Hz，8.4% 穿孔率其共振頻率為 400Hz，穿孔率增加至 15.1% 時其共振頻率增加至 400-500Hz，顯示其穿孔率越高其相對所量測之共振頻率有往高頻移動的趨勢。

※在相同條件下，穿孔率由 8.4% 再增加至 15.1%，其吸音率的差值在低頻 (400Hz 以下) 小於 0.02 以下，在中頻 (500-1600Hz) 之差值為 0.20 以下，在高頻 (2000Hz 以上) 為 0.03 以內，顯示三種不同之穿孔率其吸音率之

差值在中低頻帶，具有較顯著的差異。

2.板厚變化對吸音率之影響

針對半穿孔竹複合嵌板在相同條件下，0%穿孔率之半穿孔木質嵌板，背貼50 mm玻璃棉，其板厚分別為3.0 mm、5.0 mm及7.0 mm，如表6所示，進行吸音率之量測分析與比較。以固定之穿孔率(0%)、背貼材質(50 mm玻璃棉)，改變其板厚，分別為3.0 mm、5.0 mm及7.0 mm，等三種比較組合為例，其吸音率比較如表7和圖6所示。

(1) 材料規格

表6 板厚變化之試體材料規格表

原始編號	實驗試體材料之共同條件狀況			比較項目
	穿孔率	背貼材質	空氣層	板厚
M01-2	0%	50 mm玻璃棉	—	3.0 mm
M02-2	0%	50 mm玻璃棉	—	5.0 mm
M03-2	0%	50 mm玻璃棉	—	7.0 mm

(2) 測試結果

表7 0%穿孔率之半穿孔竹複合嵌板,背貼50 mm玻璃棉,板厚3.0 mm、5.0 mm與7.0 mm,其各頻率之吸音率比較表

原始編號	比較項目	1/3八度音中心頻率(Hz)																NRC
		125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
M01-2	3.0 mm	0.42	0.59	0.84	1.08	1.01	0.91	0.68	0.60	0.52	0.43	0.36	0.31	0.26	0.24	0.22	0.22	0.61
M02-2	5.0 mm	0.54	0.72	0.97	1.03	0.93	0.74	0.59	0.53	0.44	0.37	0.33	0.28	0.24	0.22	0.21	0.21	0.56
M03-2	7.0 mm	0.59	0.82	0.82	0.94	0.75	0.64	0.55	0.46	0.40	0.34	0.30	0.28	0.24	0.23	0.21	0.21	0.52

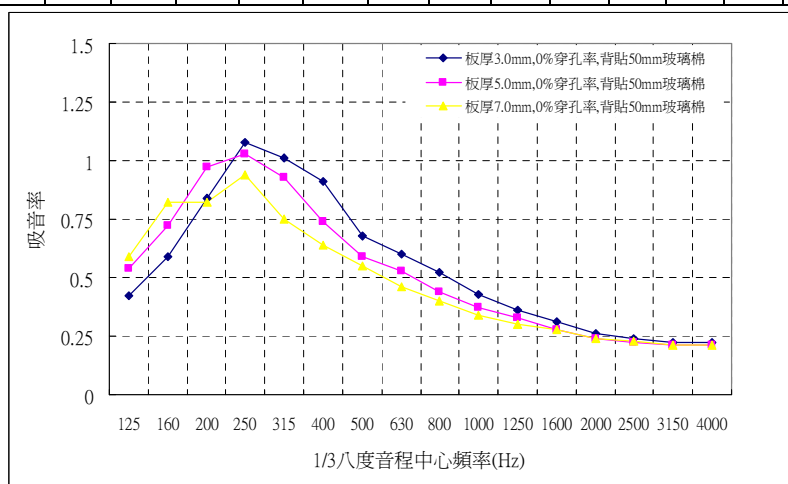


圖6 0%穿孔率之半穿孔竹複合嵌板,背貼50 mm玻璃棉,板厚3.0 mm、5.0 mm與7.0 mm,其各頻率之吸音率比較圖

就上述之試體組合所測試之結果，本研究發現在相同條件下（固定穿孔率、背貼材質），改變其板厚分別為3.0 mm、0.5 mm與0.7 mm，其試體之吸音率變化具下列特性：

※在相同條件下，於低頻與中高頻帶（250-1250Hz）之吸音率發現，板材厚度越薄吸音率越佳，但在高頻帶（1600Hz以上），板材厚度對吸音率則無顯著影響。

※在同樣條件下，於低頻帶（250-1250Hz）之吸音率差值為0.24以上，顯示

三種不同板後之半穿孔木質嵌板其吸音率之差值在低頻帶具有顯著差異，於中高頻帶（1600Hz 以上）差值在 0.02 以內。

3.背貼材質變化對吸音率之影響

針對實驗試體中，半穿孔竹複合嵌板在相同條件下，不同背貼材質，其吸音率之比較，以固定穿孔率（14.8%穿孔率）、固定板厚（7.0 mm）之半穿孔木質嵌板為例，如表 8 所示，改變背貼材質，分別為無背貼（空氣層 3.0 cm）、背貼 50 mm玻璃棉、背貼 50 mm奈米發泡之組合，其吸音率比較如表 9 和圖 7 所示。

(1) 材料規格

表 8 背貼材質變化之試體材料規格表

原始編號	實驗試體材料之共同條件狀況			比較項目
	板厚	穿孔率	空氣層	背貼材質
M09-1	7.0 mm	14.8%	—	無背貼
M09-2	7.0 mm	14.8%	—	50 mm玻璃棉
M09-3	7.0 mm	14.8%	—	50 mm奈米發泡

(2) 測試結果

表 9 7.0 mm厚半穿孔竹複合嵌板,14.8%穿孔率,不同背貼材質，其各頻率之吸音率比較表

原始編號	比較項目	1/3 八度音中心頻率 (Hz)																NRC
		板厚	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
M09-1	7.0 mm	0.10	0.07	0.10	0.23	0.44	0.40	0.28	0.20	0.16	0.14	0.10	0.11	0.10	0.10	0.12	0.15	0.19
M09-2	7.0 mm	0.55	0.66	0.94	1.00	1.00	0.81	0.64	0.55	0.47	0.42	0.36	0.32	0.29	0.27	0.28	0.29	0.59
M09-3	7.0 mm	0.65	0.83	1.00	1.03	0.93	0.79	0.62	0.54	0.50	0.43	0.39	0.34	0.31	0.30	0.30	0.31	0.60

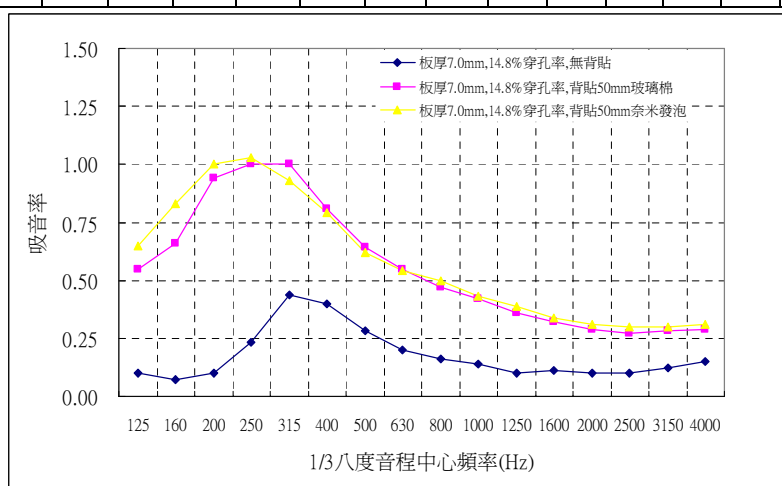


圖 7 7.0 mm厚半穿孔竹複合嵌板,14.8%穿孔率,不同背貼材質，其各頻率之吸音率比較圖

由上述試體之測試結果發現，7.0 mm厚的穿孔木質嵌板，在同樣條件下（板厚固定、穿孔率固定）背貼不同吸音材質，其試體之吸音率變化有下列特性：

※在全頻（125-4000Hz）發現，背貼 50 mm玻璃棉及背貼 50 mm奈米發泡之穿孔竹複合嵌板具有較佳之吸音率，因此半穿孔竹複合嵌板背貼吸音材質均

較無背貼吸音材質之吸音為佳，顯示半穿孔竹複合嵌板仍需背貼吸音材質才能獲得較佳之吸音特性。

※背貼 50 mm 玻璃棉及背貼 50 mm 奈米發泡之半穿孔木質嵌板主要在低頻與中高頻帶（250-1250Hz）有較佳的吸音率，與無背貼之半穿孔木質嵌板之吸音率差異甚大，於高頻（1600Hz 以上）反而與無背貼之半穿孔竹複合嵌板於吸音表現上差異較小。

結論

本研究主要探討穿孔率、板材厚度與背貼材質變化對半穿孔竹複合嵌板吸音特性之影響，冀望能掌握影響其吸音特性之因子，而實驗量測所得之數據資料亦能進一步作為噪音防治使用。以下簡述本研究在半穿孔竹複合嵌板之影響因子對吸音性能之結論：

1. 在相同板材質下，無穿孔與有半穿孔形成不同之吸音率曲線，無穿孔板呈現板振動吸音特性，有半穿孔則為共振吸音特性。
2. 半穿孔木質嵌板固定板厚、背貼材質種類之因素，隨穿孔率加大而共振頻率愈高。
3. 半穿孔木質嵌板在相同條件下，發現於低頻域之吸音率為板材厚度越薄其吸音率越佳，但在中高頻域，板材厚度對吸音率則無顯著影響。
4. 半穿孔木質嵌板背貼吸音材料均較無背貼吸音材質之吸音為佳，因此需背貼吸音材質才能獲致較佳之吸音特性。

誌謝

本文為行政院國家科學委員會之提升產業技術及人才培育研究計畫「穿孔竹複合嵌板吸音構造之研發」（計畫編號：93-2622-E-005-026-CC3）之部分成果，承蒙行政院國家科學委員會經費補助，以及泉源竹木廠提供實驗測試木料，及國立成功大學建築學系賴榮平教授提供音響實驗室供實驗測試，得以讓本研究順利完成，特此誌謝。

參考文獻

1. 呂福原、蔡崑堉、林慶東、莊純合，1990，〈臺灣商用木料圖鑑〉，行政院農業發展委員會與嘉義農業專科學校合作編印，台北。
2. 經濟部中央標準局編，1986，〈餘響室法吸音率測定法 CNS-9056-A3165〉，經濟部中央標準局印，台北。
3. 賴榮平、林憲德、周家鵬，1991，〈建築物物理環境〉，六合出版社，台北。
4. Bolt, R. H., 1947, "On the design of perforated facings for acoustic materials", J. Acoust. Soc. Am., Vol.19, pp. 917-921.
5. Callaway, D. B., Ramer, L. G., 1952, "The use of perforated facings in designing low frequency resonant absorbers," J. Acoust. Soc. Am., Vol.24, pp. 309-312.
6. Davern, W. A., 1977., "Perforated facings backed with porous materials as sound absorbers—an experimental study", Applied Acoustics, Vol.10, pp. 85-112.
7. Guignouard, P., and Meisser, M., "Prediction and Measurement of the Acoustical Impedance and Absorption Coefficient at Oblique Incidence of Porous Layers with Perforated Facings", Noise Control Eng. J., 1991, Vol.36, pp. 129-135.
8. H. Kuttruff, 1991, Room Acoustics third edition, Elsevier applied science London and new york.
9. Ingard, K. U., 1954, "Perforated facing and sound absorption", J. Acoust. Soc. Am., Vol.26, pp. 151-154.
10. Ingard, K. U., Bolt, R. H., 1951., "Absorption Characteristics of Acoustic Material with Perforated Facings", J. Acoust. Soc. Am.,

Vol.23, pp. 533-540.

11. L. L. Beranek and V. Istvan, 1992, Noise and Vibration Control Engineering, principles and application johnwiley & sons,inc..
12. L. L. Beranek, 1949, Acoustical Measurements, Publisher for the Acoustical Society of American by American Instit.
13. Sacerdote, G. G., Gigli. A. , 1951, "Absorption of Sound by Resonant Panels" , J. Acoust. Soc. Am., Vol.23, pp. 349-352.
14. Takahashi, D., 1997, "A new method for predicting the sound absorption of perforated absorber systems," Applied Acoustic, Vol.51, pp. 71-84.