

以數值模擬預測天花板空氣層之衝擊音衰減特性 Predicting the Influence of Ceiling concerning Floor Impact Sound Insulation by Finite Element Method

江哲銘¹、鍾松晉²、林芳銘³、曾品杰⁴、蘇嘉瑩⁵

¹成功大學建築學系教授

²雲林科技大學空間設計系助理教授

³屏東科技大學木材科學與設計系副教授

⁴成功大學建築研究所博士候選人

⁵成功大學建築研究所碩士生

主要聯絡方式

國立成功大學建築研究所

701 台南市大學路一號

電話：06-275-7575#54166 FAX：06-208-3669

Email:pc.tzeng@msa.hinet.net

摘要

台灣地區住宅日漸高層化，國人對於音環境品質要求提高，樓版衝擊音的改善成為相當重要的課題。本研究乃彙整有限元素法對樓版衝擊音之模擬理論與方法，探討有限元素模擬檢測機制之可行性；再依ISO 140-7 樓版衝擊音現場量測法進行「天花板空氣層衝擊音衰減特性」之足尺實驗；建立有限元素模型，並將數值模擬結果與足尺實驗屋實驗結果進行比對，以檢核數值解析模式之有效性。研究結果顯示，數值模擬結果與實驗結果之1/3Oct.音壓級趨勢一致；解析數值經迴歸分析，模擬值與實驗值之相關係數 $R=0.9067$ ，迴歸式之判定係數 $R^2=0.8221$ ，顯示本研究建立之有限元素模型於預測天花板對樓版衝擊音隔音效果之有效性。

關鍵字：天花板空氣層、數值模擬、樓版衝擊音衰減

Abstract

The habitation in Taiwan is becoming high-risingly along with higher standard for sound environment quality to meet public demand, The floor impact sound is becoming a serious noise problem. Recently, making some new noise regulations in the building code will be taking place. Hence, the improvement of the floor impact sound has turned to an important issue. This study was conducted by finite element method to simulate impact, which induces sound radiation, and the results indicate that 1/3Oct. SPL diagram from modeling is fitting experiment's well, Which correlation coefficient $=0.9067$ is obtained by regression analysis. In conclusion, it reveals the feasibility to predict the the floor impact sound insulation by ceiling using FE model, and parameters of modeling have been collected in our study.

Keywords: Ceiling, Floor impact sound, Finite element method

壹、前言

近年來台灣地區各縣市住宅皆以 2 至 5 樓公寓為主要之建築類型，占 61.8%；從 79 年以前竣工之建築物以 2 至 5 樓公寓類型居多，到目前竣工之住宅以 6 樓以上之大樓為主，在建築高層化的同時，建築物垂直向傳遞之樓版衝擊音對室內空間之干擾也隨著增加。調查中亦顯示，台灣地區樓版衝擊音對國人之生活、情緒反應、睡眠等造成很大之影響。

由國內核發建築物建築使用執照與總樓地板面積變動趨勢來看，新建建築物規模逐漸萎縮，舊建築的改善與室內空間的健康舒適將漸受重視，然舊建築在主結構體難以變更的條件下，如何以添加、裝修的手法有效達成衝擊音的改善，除衝擊源特性、版振動特性外，受音側的音響放射特性亦為一關鍵。且樓版衝擊音發生端於集合住宅內通常為樓上住戶，非所有權範圍內，為有效控制樓版衝擊音，受音側樓版間空氣層厚度將是重要的影響因子。本研究以足尺實驗屋之實驗結果為依據，比對數值模擬之境界條件及精確度，實驗過程依據 ISO 樓板衝擊音量測實驗室法進行。建立數值模擬預測模式，供天花板阻隔樓版衝擊音效果之預測用，期望建立一套可提供使用者、建築設計者、裝修業者與建材開發者操作的簡易評估工具。

貳、研究方法與理論

本研究彙整有限元素法之模擬理論、方法，據此建立有限元素模型，除依足尺實驗屋現況設定境界條件、衝擊力外，並解析樓版衝擊音於受音點之音壓數據探討天花板空氣層厚度的影響。實驗部分依據 ISO 140-7 樓版衝擊音之現場量測方法規定 (Acoustics-Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements Part7:Field measurements of impact sound insulation of floors)，測定裝設天花板前後之音壓級差，並以所得結果進行後續解析。樓版隔音評價方法參考 ISO 717-2 評估樓版衝擊音之隔音效果 (Impact Sound Insulation)。本研究之數值模型如圖 1 所示，整合結構振動、流體結構介面、音場理論，共同組成系統之統御方程式。

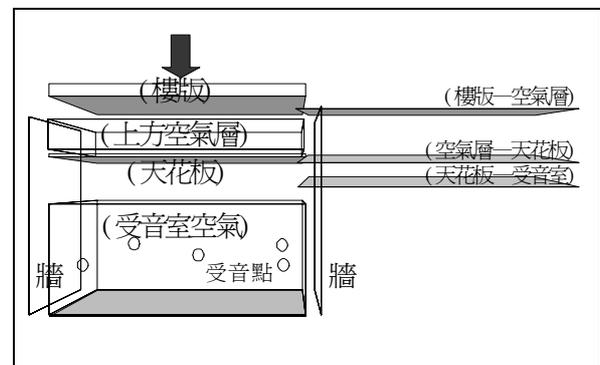


圖 1 本研究數值模型示意

2-1 實驗條件與有限元素模型之建立

研究中針對天花板空氣層之樓版衝擊音隔音性能實驗於足尺實驗屋進行，音源室尺寸為 7.0m(L)×3.4m(W)，受音室淨空間尺寸為 7.0m(L)×3 m(W)×3.2m(H)，樓版傳播機制為鋼構複合樓版，表面平坦、質硬、耐衝擊、平均厚度 14cm，受音室周壁為鋼板及石膏板裝修，天花面積 19.8m² 邊長 6.6 及 3m，餘響時間 1/3oct.實測平均值=1.4 秒，側路構造經檢測，壁面振動量與樓板振動量差值平均達 20dB。衝擊源部分，使用輕量衝擊源(B&K,3204)，輕量衝擊源包括五支擊錘，以等距線性之方式排列，五個擊錘連續衝擊之時間間隔為 100ms，每支擊錘

重量約 0.5kg，依自距樓版上高度 4cm 處垂直自由落下。

測定頻率以 1/3 八度音頻為主，從 100Hz 至 3150Hz 共 16 組，測定方法為固定測點，衝擊位置 5 處均佈於樓版面上，衝擊鏈連線方向與樓版小樑方向成 45°角，麥克風位置 5 處、均佈於空間中，間距 0.7m 以上，距間壁 0.5m 以上，距離試驗樓版 1.0m 以上，現場樓版衝擊音與背景噪音差值平均達 35dB 以上。

2-2 有限元素法模型之建立

以有限元素法動力分析之離散參數系統(Discrete Parameter System)模擬結構振動，綜合了堆積質量法(Lumped-mass Method)與廣義位移法(Generalized Displacement Method)的部分特點，將整個結構視為有限個元素的組合，計算節點之位移與加速度，而元素中選用適當的形狀函數(Shape Function)描述變位。本研究探討之樓版衝擊音機制，其中衝擊樓版所產生之強迫振動(Forced Vibration)行為，以多自由度離散系統之運動方程式[1]來解析版的振動模態：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^a\} \dots\dots\dots [1]$$

- | | |
|------------|------------------------|
| [M]：結構質量矩陣 | { \ddot{u} }：節點加速度向量 |
| [C]：結構阻尼矩陣 | { \dot{u} }：節點速度向量 |
| [K]：結構勁度矩陣 | { u }：節點位移向量 |
| | { F^a }：衝擊力向量 |

室內音場部分，模擬音場與結構體介面問題需將[1]之結構動力方程式離散化，並考量音場無損失波動方程式、邊界之阻尼緩衝作用、音場流體與結構體的耦合作用。本研究以統御方程式一離散化的無損失波動方程式進行流體與結構介面的解析，將結構動力方程式[1]與流體動量方程(Navier-Stokes equations)及流體連續方程納入。流體動量方程與流體連續方程可經假設化簡(1)流體可受壓(密度因壓力變化而改變)。(2)流體為非黏滯性(無黏滯損耗)。(3)流體無平均流(Mean Flow)。(4)流場的平均密度與壓力是均勻的。，可得音場波動方程式[Kinsler, 1982]：

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \dots\dots\dots [2]$$

- c：傳播介質中的音速($\sqrt{k/\rho_0}$)
- ρ_0 ：平均流體密度
- k：流體容積彈性模數(Bulk Modulus of Fluid)
- P：音壓=P(x,y,z,t)
- t：時間

在有限元素法數值模型中，結構體包被於室內音場四周，依實驗室現況將電腦模型結構特性依柱、樑、版、牆元素組構形成，各受力與變位間之關係組成整體結構系統，反應系統外力。結構體與空氣間的界面為流體結構介面，為音場與結構耦合作用面，由該介面上之流體與結構所共用節點傳遞數值，包括流體與結構摩擦之阻尼表現、結構振動變位引致流體受壓之作用。透過流體結構介面的阻尼作用，描述流體摩擦固體表面之能量損失。

系統結構外力以實驗室輕量衝擊源作為模擬對象，依施力行為及週期性進行動態描述，以連續穩定之敲擊方式(施力頻率間隔為 10Hz)，對各頻率之施力大小一致，以頻率域(Frequency Domain)描述輕量衝擊源之施力狀況。

參、結果與分析

3-1 樓版空氣層厚度之樓版衝擊音隔音性能實驗結果

實驗檢測室內餘響時間、樓版空氣層厚度之衝擊音音壓級，實驗的天花板空氣層厚度為 40cm，以石膏板(12mm)封閉之足尺模型，實驗結果顯示，天花板對樓版衝擊音之阻隔於低、中、高頻之效果平均。依 ISO 717-2 樓版衝擊音隔音等級之評定規範，進行 $\Delta L'$ 隔音等級性能之評定，將參考曲線向測試所得 $L'n$ 或 $L'nT$ 曲線平移至不利偏差總和不於 32dB，此時參考曲線於 500Hz 之數值即為隔音等級之標稱值 ($L'n,w$ 或 $L'nT,w$) (圖 2)，並計算 $\Delta L'$ 值(圖 3)，表示本實驗中天花板對樓版衝擊音的阻隔效果：(1)天花板空氣層厚度會影響隔音性能；(2)輕量衝擊源之隔音效果，高頻隔音較低頻隔音顯著；(3) $\Delta L'w=9dB$ (ISO 717-2)，表示天花板對於樓版衝擊音改善效果之綜合評價。

3-2 數值模擬結果

電腦數值模擬分析，結構體所封圍之室內音場流體(Acoustic fluid)，可求得音場元素 x,y,z 三方向位移自由度，再配合時間 t 自由度，乃可描述流體之壓力狀況，再由壓力計算最終之音壓級。

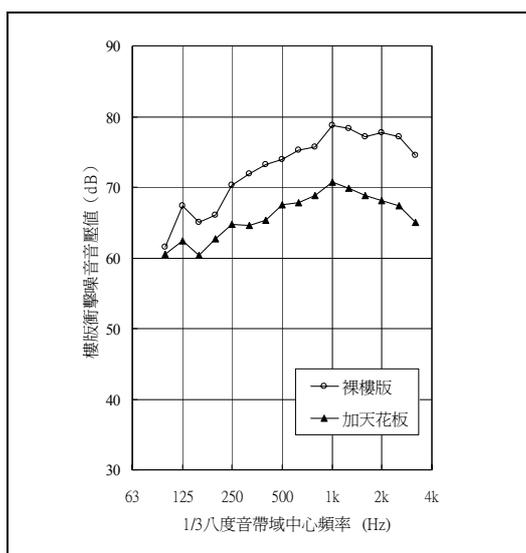


圖 2 各音程之衝擊音壓值 $L'n$

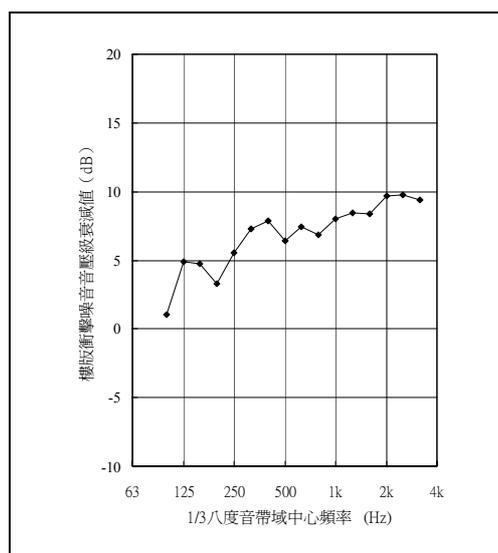


圖 3 樓版衝擊音壓級衰減值 $\Delta L'$

模擬結果數值採用音壓輸出，依據實測之測點位置進行資料之擷取，其中數值資料之輸出值為各頻率音壓值，單位為分貝(dB)。數值模擬樓版空氣層厚度之隔音性能，分析不同頻

率之室內空間音壓垂直衰減分布(圖 4)，樓版空氣層厚度直接影響輕量衝擊源對於樓版衝擊源之隔音效果。

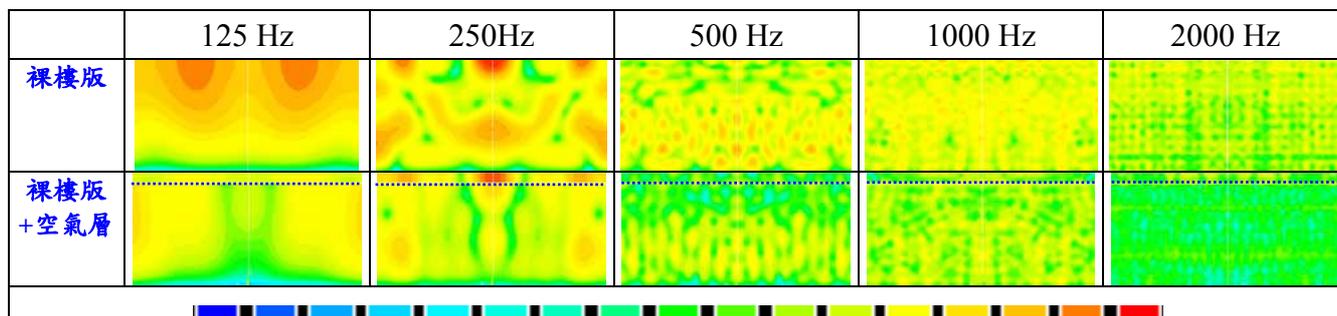


圖 4 音場剖面圖

3-3 數值模擬結果與實測結果比對

進行裸樓版不同頻域之音壓波形趨勢比對，將數值模擬結果與實測結果分別比對各受音點之 1/3 八度音頻音壓圖，其一受音點如圖 7。並以二者差之絕對值計算以 $|(實測值-模擬值)| / 實測值 = 2.18\%$ ，在裸樓版加設天花板後，如圖 8，二者差之絕對值計算如 $|(實測值-模擬值)| / 實測值 = 3.36\%$ ，顯示在不同頻域之音壓值趨勢十分接近。

將數值模擬所得結果與實驗解析結果之數值比對部分，實驗與模擬之 1/3 八度音頻音壓值結果經回歸分析得相關係數 $R=0.9067$ 為高度正相關，散佈圖如圖 9。顯示本研究以有限元素法所建立之數值模型，對於預測天花板對樓版衝擊音隔音效果之可行性。

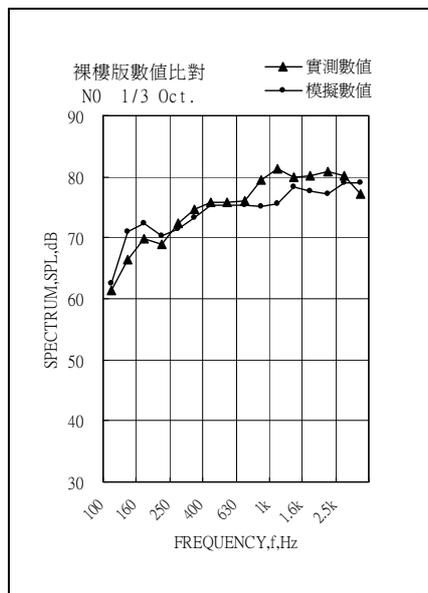


圖 7 裸樓板趨勢比對

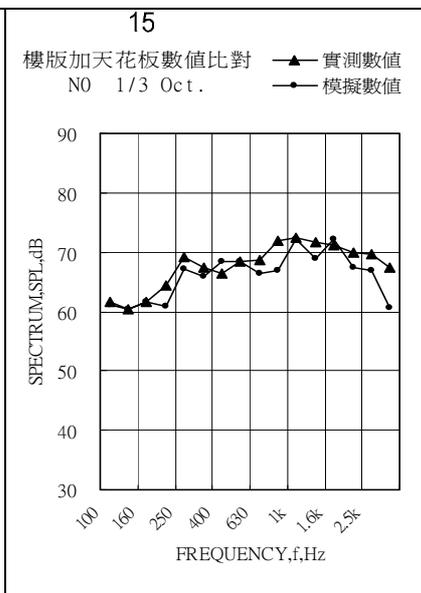


圖 8 裸樓板加天花板趨勢比對

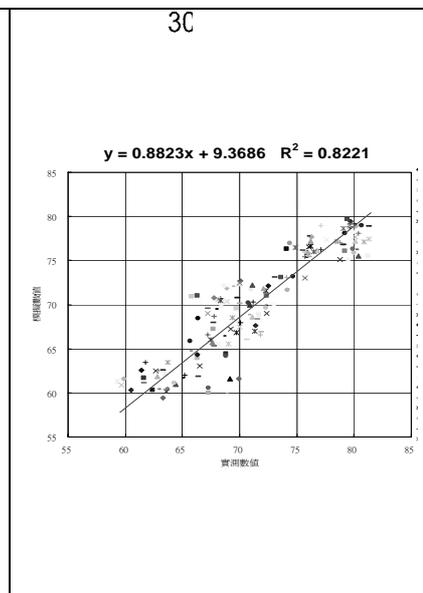


圖 9 數值迴歸分析圖

肆、結論

本研究以有限元素模型擬樓版衝擊引致音響放射，對象為一層樓之鋼構混凝土複合造之實驗屋，模擬與實驗結果之 1/3Oct. 音壓級趨勢相當接近；模擬值與實驗值之相關係數 $R=0.9067$ ，顯示本研究之有限元素模型於預測天花板對樓版衝擊音隔音效果之可行性，經彙整模擬操作所需參數，以供後續應用。

本研究之三維度室內音場模擬模式建立後，對於三維度音場中任一剖面位置皆以可視化表現，亦即透過後處理器計算模型中各元素之音壓值，按數值大小以分色呈現。本研究之輸出單位採用音壓輸出，單位為分貝(dB)，對於使用者具可視化表現之效果。

有限元素法之衝擊音模擬操作經驗證可有效預測樓版衝擊音，可供研究單位或材料開發廠商建構預測模式之參考。實際操作改變材料特性時，可以材料參數值代換方式達到替換材料之用；亦可針對不同及構造方式、構造尺寸、解析頻率範圍等進行有限元素數值模型之網格化建立，減化試驗過程中對於現場實驗之程序。

陸、參考文獻

1. 謝宛均，有限元素法預測樓版衝擊音衰減特性之研究—以樓版表面材彈性係數變因探討之，成功大學建築研究所碩士論文，2003。
2. 鍾松晉，台灣地區樓版衝擊音影響因子預測模式之研究，國立成功大學建築研究所博士論文，1999。
3. Beranek, Leo L. et. al., Noise and Vibration Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1960.
4. Crocker, Malcolm J., Handbook of acoustics, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1998.
5. 康淵、陳信吉，ANSYS 入門，全華科技圖書，台北市，2002。
6. 劉偉源譯，結構體的有限元素法，東華書局，台北市，1992。
7. SAS IP Inc., ANSYS Theory Reference, Release 7.1, SAS IP Inc., 2002.
8. ISO 140-7 Acoustics-Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors, 1998
9. ISO 140-1 Acoustics-Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements part 6: Laboratory measurements of impact sound insulation of floors, 1998
10. 大鶴 徹，有限要素法による室内音場解析に関する研究—吸音要素とインピーダンスを利用した応答解析，日本建築學會大會學術講演梗概集，pp.157-158，1996。
11. 日本音響材料協會，騒音・振動対策ハンドブック，技報堂，東京，1982。
12. 渡部 和良、木村 翔、井上 勝夫、矢島 浩之，木質系床構造における床衝撃音予測のための天井効果量の検討，日本建築學會大會學術講演梗概集，4192，1990。