

## 以有限元素法預測樓版衝擊音衰減特性之研究

The Operation Procedure for Predicting Floor Impact Sound Insulation by Finite Element Method

江哲銘<sup>1</sup>、鍾松晉<sup>2</sup>、林芳銘<sup>3</sup>、曾品杰<sup>4</sup>、謝宛均<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 成功大學建築學系教授

<sup>2</sup> 雲林科技大學空間設計系助理教授

<sup>3</sup> 高苑技術學院建築系副教授

<sup>4</sup> 成功大學建築研究所博士生

<sup>5</sup> 成功大學建築研究所碩士生

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

在土地資源有限，建築物日漸高層化、輕量化發展，然而國人對於噪音品質之要求日益提高，樓版衝擊音勢為一重要課題。本研究以有限元素法操作單一模擬軟體平台之樓版衝擊音預測模式，希冀作為使用者或設計者參考之依據。數值模擬與實測結果互相比對結果顯示，不同頻域之音壓值波形趨勢相當接近，數值迴歸分析結果相關係數與判定係數分別為 0.922 與 0.850，顯示本研究以有限元素法所建立之數值解析模式，對於預測輕量衝擊源造成樓版衝擊音之可行性。

**關鍵字：**樓版衝擊音、樓版表面材、有限元素法

### Abstract

To think highly of sound environment, to keep up the sustainable trend, and to protect the resources, people should not only take steel construction into account, but also build up buildings with low noise. The research tries to use FEM to establish single method for simulating the floor impact sound of composite steel deck floors. The correlation coefficients of floor impact sound between the results of measured values and numerical analysis values  $R$  and  $R^2$  are 0.922 and 0.850, so they identify the accuracy of this method to predict the floor impact sound by tapping machine.

**Keywords:** Floor impact sound, Floor covering, Finite element method

## 壹、緒論

根據行政院主計處公佈資料顯示，國人對於噪音品質要求日漸提高。在土地資源有限，建築物朝高層化、輕量化發展之下，樓版衝擊音勢必為一重要課題。調查中更顯示台灣地區樓版衝擊音對國人之交談行為、情緒反應、睡眠等著實造成很大之影響。為能有效減少樓版衝擊音對生活的干擾，本研究以樓版表面材隔音性能作為討論對象，運用有限元素法之數值模擬方法，預測室內衝擊源縱向力作用下引致室內噪音之特性，並改變樓版表面材之材料性質，評估衝擊加振對樓版表面材之影響與相關衰減特性。

本研究以單元足尺空間為探討對象，簡化複合室樓版構造複雜之力學特性，藉以量測實際表面材料受衝擊後室內空間之噪音特性，並運用數值模擬解析結果進行比對，證實本研究建立樓版表面材數值解析操作模式之有效性，以建立有限元素法預測樓版衝擊音表面材衰減特性之機制，能供使用者或設計者建築設計階段參考之依據，及未來改善室內音環境之評斷建議。

## 貳、樓版衝擊音相關理論與實驗操作

本研究探討之樓版衝擊音，意指透過人員步行或家具移動等對樓板造成衝擊，該衝擊藉由樓版振動產生固體音，傳播至下室空間造成空氣音；樓版衝擊音主要受到衝擊源、振動反應、音響放射三層特性影響。而樓版表面材之不同直接影響輕量衝擊源之衝擊力實效值，但對重量衝擊源較無影響〔文獻 9〕。實驗室設計乃依據 ISO140-8 實驗室試驗樓版表面材樓版衝擊音衰減量測(Laboratory measurements of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a heavy weight standard floor)測試規範之規定，檢測樓版表面材之樓版衝擊音衰減值，並以實驗與模擬分析樓版表面材之防音特性。

### 2-1 樓版表面材之樓版衝擊音隔音性能實驗方法

實驗場所為足尺實驗屋，音源室尺寸為 7.0m(L)×3.4m(W)，受音室為 7.0m(L)×3.4m(W)×3.0m(H)，樓版傳播機制為樓版表面材與鋼構混凝土複合樓版，其室容積、餘響時間、天花尺寸，與樓版構造、尺寸、強度符合 ISO140-8 規定。量測儀器系統與裝置及測定方法詳細內容如下：(1)衝擊源：輕量衝擊源；(2)受音裝置：音壓量測儀器、麥克風五組、濾波器 2ch 三組；(3)測定頻率：中心頻率 100-3150Hz 的 1/3 OCT.共 16 組；(4)溫度控制：18 至 25°C；(5)試體與施工方法：橡膠，尺寸 61mm(L)×61mm(W)×3mm(D)，屬試體分類 I，完全黏著；(6)測定方法：固定測點法，為 5 點測試點，距地面高度 1.2m，距離試驗樓版 1.0m 以上，距間壁 0.75m，麥克風間距 0.7m 以上；量測時間為 90 秒；(7)樓版衝擊音與背景噪音差值：差值為 40dB 以上，符合規範之 15dB 以上規定。

### 2-2 樓版表面材之樓版衝擊音隔音性能評估方法

樓版衝擊音隔音等級，依據 ISO 717-2 Impact sound insulation 測試規範之規定，針對樓版表面材訂定評估標準，該規範以單一數值  $\Delta L_w$  值表示樓版表面材之隔音性能，具有

將實驗室差異因素減至最小之優點，評定內容包括：(1)頻率特性：1/3 OCT；(2)測定頻率：100Hz-3150Hz，共 16 組，包括 100Hz、125Hz、160Hz、200Hz、250Hz、315Hz、400Hz、500Hz、630Hz、800Hz、1000Hz、1250Hz、1600Hz、2000Hz、2500Hz、3150Hz；(3)容許誤差：各頻率超越參考曲線的總合不得大於 32dB；(4)隔音等級之求法：參考曲線符合容許誤差標準，基準曲線於頻率 500Hz 所對應之音量(Db)值，即為該測試之  $L_{n,w}$  值；(5)隔音等級之評定： $L_{n,w}$  值即為評定樓版衝擊音值，當評估樓版表面材時，須將  $L_{n,w}$  值搭配 ISO 140-8 轉換為  $\Delta L$  值。

$$\Delta L = L_{no} - L_n \dots\dots\dots(1)$$

其中

$L_{no}$  : 未覆蓋表面材之標準衝擊音音壓級 (dB)

$L_n$  : 覆蓋表面材之標準衝擊音音壓級 (dB)

$$L_n = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_j^n 10^{L_{j/10}} \right] + 10 \log_{10} \frac{A}{A_0} \dots\dots\dots(2)$$

其中

$L_j$  : 受音室 j 位置測點音壓級 (dB)

n : 測試點數量。

A : 室內吸音力 ( $m^2$ )

$A_0$  :  $10 m^2$

## 2-3 有限元素法模擬樓版衝擊操作方法

本研究採用有限元素法模擬樓版衝擊引致之室內音響放射特性，音場模擬運用流體及波動理論方程式計算，包括無損失波動方程式離散化、音場矩陣微分方程式、邊界條件的阻尼緩衝作用、音場流體與結構體的耦合作用。根據實際建築尺寸建構數值模型，步驟可分三大部分，即數值模型建立、衝擊源設定、數值解析；數值解析電腦模型如圖 2。

### 一、數值模型建立

1. **模型元素設定**：結構體之牆體、樓版與表面材使用實體元素 (Solid) 作為數值模擬元素，鋼樑與鋼柱則以柱元素 (Beam) 作為數值模擬元素，室內音場以流體元素 (Fluid) 作為數值模擬元素，每個元素邊長為 0.05 公尺。

2. **材料幾何特性與境界條件設定**：構件材料設定內容包括密度、波松比、彈性係數。在室內音場之材料與壓力設定內容包括密度、音速、吸音率、空氣壓力。在音場與結構耦合關係設定與材料阻抗部份，乃將室內空間音場與結構體交界之流體元素視為耦合且具有阻抗特性，藉由元素傳遞 X 向、Y 向、Z 向的力學行為與壓力，作為結構體與流體之間的傳遞元素。

### 二、衝擊源設定

標準輕量衝擊源擊鎚有效質量為 500(±12.5) 公克，五個擊鎚連續產生衝擊之時間間隔為 100(±5)ms，各擊鎚依序自距樓版上高度 4(±0.1) 公分處垂直自由落下。本研究之衝擊力設定以「牛頓第二運動定律」計算，每衝擊鎚質量為 0.5 公斤，自由落體加速度為重力加速度(g)，衝擊力為 4.9 Kg•m/s<sup>2</sup>；衝擊鎚每 10Hz 衝擊一次樓版。

### 三、數值解析

1. **解析頻率與取樣間隔**：依據 ISO 140-8 與 ISO 717-2 以三分之一八度音作為評估音程標準，測定頻率包括 100-3150Hz 共 16 組。
2. **音壓頻譜輸出設定**：依實際測點位置，擷取測點之音壓頻譜資料；輸出單位採用音壓輸出，單位為分貝(dB)，以數值與圖形模式輸出。
3. **音壓分布圖輸出設定**：音壓分布圖可輸出室內空間之音壓分布情形，以 ISO 717-2 規定之三分之一八度音共 16 組頻率作為輸出頻率，分頻率輸出室內之音壓分佈。

### 參、結果與分析

#### 3-1 樓版表面材之樓版衝擊音隔音性能實驗結果

本實驗分別測試室內餘響時間、裸樓版與加上樓版表面材之衝擊音壓級，作為計算樓版衝擊音隔音值  $\Delta L$  之依據。實驗的樓版表面材試體材質為一般市售橡膠地磚，規格為 610mm(L)×610mm(W)×3mm(D)，依 ISO 717-2 之計算式得出  $\Delta L_w$  值為 15 dB，實驗結果分別以各音程之衝擊音壓值  $L_n$  值(圖 4)與各音程之衝擊音壓衰減值  $\Delta L$  值(圖 5)呈現。實驗結果顯示：(1) 衝擊接觸面材質的不同會影響隔音值；(2) 輕量衝擊源隔音效果，高頻隔音較低頻隔音顯著。

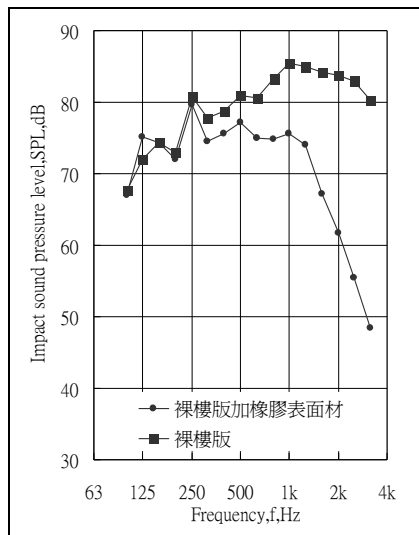


圖 4 樓版衝擊音壓值

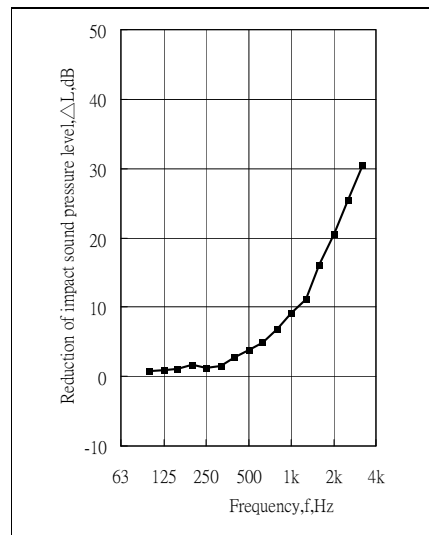


圖 5 樓版衝擊音壓衰減值  $\Delta L$  值

### 3-2 數值模擬結果

音壓頻譜之模擬輸出，依據實測之測點位置進行數值模擬之解析，模擬輸出值共量測五點，量測高度皆為實測腳架架設之 1.2 米，輸出單位採用音壓輸出，單位為分貝(dB)。再將各步率音壓級可轉換為三分之一八度音(1/3 Oct.)之音壓級。

數值模擬裸樓版及表面材之樓版衝擊音模擬結果，分析不同頻率之室內空間音壓垂直衰減分布(如圖 6)，樓版表面材質的不同會直接影樓版對於響輕量衝擊源之隔音值；高頻隔音較低頻隔音顯著。

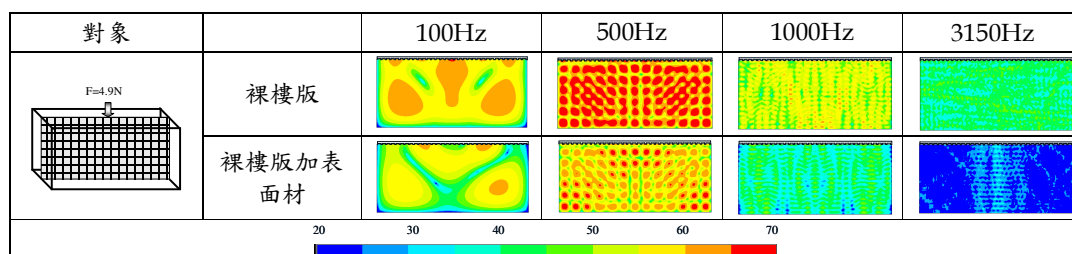


圖 6 室內空間音壓垂直衰減分布圖

### 3-3 數值模擬結果

#### 與實測結果之比對

##### (1) 音壓波形趨勢比對

數值模擬結果與實測結果，採用二分之一八度音(1/3Oct.)作為評估標準，分別比對裸樓版與裸樓版加 3mm 橡膠表面材之三分之一八度音程音壓圖，由圖 7 可看出實測與模擬結果於不同頻域音壓值趨勢相當接近。

##### (2) 音壓級數值比對

將裸樓版與裸樓版加 3mm 橡膠表面材兩種樓版形式之三分之一八度音程音壓值之實測數值與模擬數值各取五點比對，依 ISO 717-2 規範頻率 100 至 3150Hz 16 組，共計 160 組資料作迴歸分析，在 95% 的信賴度下，迴歸結果如圖 8，實測與模擬數值 R 與 R<sup>2</sup> 分別為 0.9221 與 0.8503，顯示以有限元素法模擬樓版衝擊音之有效性。

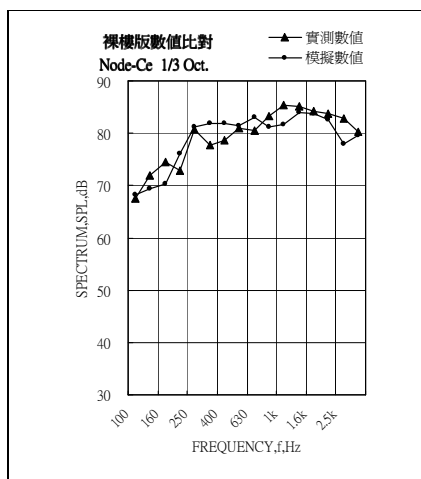


圖 7 音壓波形趨勢比對圖

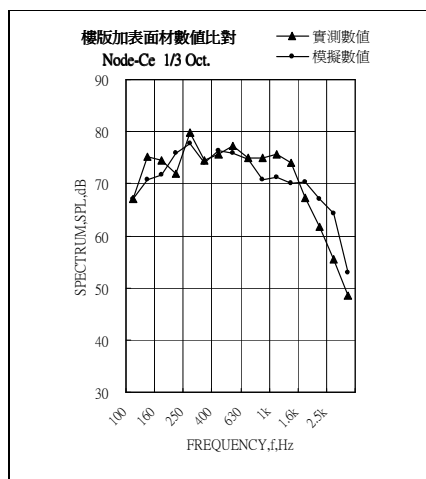


圖 8 樓版衝擊音壓衰減值  $\Delta L$  值

## 肆、結論

本研究之實驗場符合 ISO 140-8 規範之規定，可提供實驗室試驗樓版表面材樓版衝擊音衰減量測。

數值模擬所得結果與實測解析結果經分析比對，各頻域之音壓值趨勢一致，經數值迴歸分析檢驗，相關係數 R 為 0.922，判定係數  $R^2$  為 0.850，顯示本研究以有限元素法所建立之數值解析模式，對於預測輕量衝擊源造成樓版衝擊音之可行性。

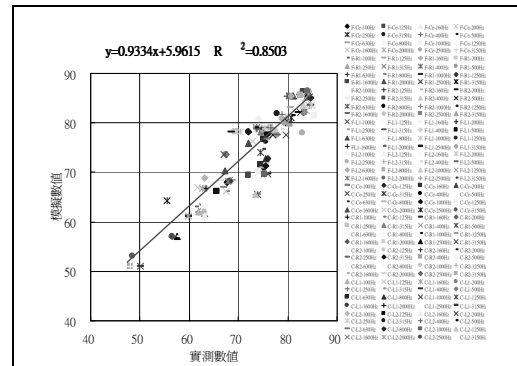


圖 8 有限元素法模擬與實測數值迴歸圖

## 伍、參考文獻

1. 江哲銘、鍾松晉，「建築物輕量化樓版隔音性能之探討-以小試體樓版振動減低量預測樓版衝擊音減低量之可行性分析」，中華民國音響學會第六屆論文集(1994)
2. 江哲銘、鍾松晉、蕭憲聰，「不同厚度與抗壓強度鋼筋混凝土樓版衝擊音特性之比較研究-以小試體實驗方法探討」，中華民國音響學會九屆論文集，第 277-284 頁(1996)。
3. 江哲銘、鍾松晉、林芳銘、李原彰，「以有限元素法預測樓版衝擊振動特性之研究」，中華民國音響學會十屆論文集，第 156-163 頁(1997)。
4. 江哲銘、鍾松晉、林芳銘、曾品杰，「樓版衝擊音模擬系統之研究」，中華民國音響學會十一屆論文集，第 213-218 頁(1998)。
5. 鍾松晉、江哲銘、林芳銘、王敏州、曾品杰，「鋼構樓板衝擊振動預測模式之研究」，中華民國音響學會第十三屆論文集，pp.84-89 (2000)。
6. C.M.Chiang, F.M.Lin, S.C.Chung, and C.M.Chung, Prediction of Reduction of Impact Vibration in Raised Access Floor, journal of Building Acoustics, Volume8.No.3. pp207-220(2001)
7. 江哲銘、林芳銘、鍾松晉、曾品杰、黃詠仁「鋼構複合樓版衝擊振動之數值模擬與減振評估」，中華民國音響學會第十四屆學術研討會論文集，NO.C1-6 (2001)
8. P.C. TZENG, C.M. CHIANG, F.M. LIN, S.C. CHUNG, Y.J. HUANG, The Influence of Impact Vibration by Varying Factors of Composite Steel Deck Floors, The Eighth Western Pacific Acoustics Conference, MD33, Melbourne, Australia(2003)
9. 江哲銘，建築物噪音與振動，台北市，胡氏圖書(1993)。
10. 安岡正人，床衝擊音 關 研究，學位論文(1981)。
11. Beranek, Leo L. et. al., Noise and Vibration Control, McGraw-Hill Book Company, New York(1960).