

架高地板構造形式對樓板衝擊音衰減影響之預測與評估

Predicting the Influence of the Raised Floor Concerning Floor Impact Sound Insulation

江哲銘¹ 鍾啟民² 曾品杰³ 鍾松晉⁴ 林芳銘⁵ 呂奇穎⁶

摘 要

隨著資訊科技發達、建築智慧化發展，使得纏繞於建築構體之管線日益增加，收納空間逐漸盤據影響我們的作息環境；架高地板之使用，也由原本辦公室、機房慢慢應用至住居當中。此外，由於土地資源有限，建築物朝高層化、輕量化發展，且國人對於噪音品質要求提高，樓板衝擊音已為一重要課題。本研究即以架高地板為目標，探討架高地板構造形式對於樓板衝擊音衰減之影響。

本研究首先對樓板衝擊音理論進行蒐集與試推導，另彙整檢證架高地板隔音性能之相關規範，建立於足尺實驗室進行輕量衝擊源樓板衝擊音實驗與評估方法。透過有限元素法數值解析理論、方法與流程之整理與操作，建立樓板衝擊音數值解析平台操作模式；嗣將數值模擬結果與足尺實驗室之實驗結果進行比對，於確立以數值模擬預測架高地板樓板衝擊音之有效性後，以本研究建立之數值解析模式，針對架高地板構造形式（面板厚度、襯墊厚度、基座高度、面板尺寸）進行變因模擬，透過統計迴歸分析方法，歸納架高地板不同構造形式對樓板衝擊音衰減特性之影響，進而建立一簡易評估模式。

關鍵字：架高地板、樓板衝擊音、有限元素法

¹作者一 成功大學建築學系教授

²作者二 成功大學建築學系博士生

³作者三 成功大學建築研究所博士候選人

⁴作者四 雲林科技大學創意生活設計系助理教授

⁵作者五 屏東科技大學木材科學與設計系副教授

⁶作者六 成功大學建築學系碩士生

Abstract

As the development of information technology and understanding buildings, the raised floors are used to accommodate the complicated piping system inside many offices and residences. The buildings in Taiwan are high-rising along with higher standards of sound environment quality to meet public demand, as to the improvement of floor impact sound has turned to an important issue. This study is to probe the influence of the raised floor upon floor impact sound insulation.

The data collection and inference of floor impact sound theories and raised floor sound insulation had been done first, then the experiment and the assessment methods for light floor impact sound in full-scale chamber were founded. A FEM model is built through a series of theory analysis and practical examination, and is demonstrated the effectiveness after comparison with the test data obtained from full-scale chamber. On the basis of the effective FEM model, the different component factors of raise floor upon the influence of floor impact sound insulation are examined by regression. Finally, a prediction model for the influence of the raised floor upon floor impact sound insulation has been set up.

Keywords: Raised Floor, Floor Impact Sound, Finite Element Method

一、緒論

隨著資訊科技發達、建築智慧化發展，使得纏繞於建築構體之管線日益增加，收納空間逐漸盤據影響作息環境；架高地板之使用，由原本辦公室、機房慢慢應用至住居中，地板下與管道間相連之空間，使管線穿梭於使用環境之任一角落。日本自 1985 年起於辦公大樓大量使用架高地板，而 1993 年建造 NEXT 21 未來實驗住宅，即使用架高地板內部空間為配管空間，試同時解決眾多配線與樓板衝擊音問題。

本研究以架高地板為對象，透過有限元素法數值解析理論、方法與流程之整理與操作，建立樓板衝擊音數值解析平台操作模式；並經數值模擬結果與足尺實驗結果比對確立數值解析模式之有效性後，針對架高地板構造形式進行變因模擬，透過統計迴歸分析方法，歸納架高地板不同構造形式對樓板衝擊音衰減特性之影響，進而建立一簡易評估模式，提供建築設計者與使用者參考。

二、樓板衝擊音相關理論與實驗操作

本研究探討之樓板衝擊音，係指透過人員步行或家具移動等對樓板造成衝擊（衝擊源），該衝擊藉由樓板振動產生固體音（振動反應），嗣傳播至下室空間造成空氣音（音響放射）之音響特性。架高地板樓板衝擊音傳遞方式分為二部分，一為衝擊源衝擊板面造成音響放射，經由樓板衰減後，放射於受音室中；另一傳遞路徑為板振動經由支架傳遞固體音，經由樓板放射於受音室中。相關文獻顯示，架高地板基座影響衝擊音隔音效果甚鉅，若能減低支承之振動量傳遞（如採用防音襯墊等減振材），對於輕量及重量衝

擊源樓板衝擊音之改善將有顯著效果；另增加架高地板板材厚度及面密度亦均有助於板振動或樓板衝擊音之改善[文獻 13]。

(一) 架高地板樓板衝擊音隔音性能實驗方法

實驗場所為足尺實驗室：音源室尺寸 7.0m(L)×3.4m(W)，受音室為 7.0m(L)×3.4m(W)×3.0m(H)；樓板傳播機制含括架高地板與鋼構混凝土複合樓板，該室容積、餘響時間與樓板構造、尺寸、強度等皆符合 ISO140-8 規範規定。量測儀器系統、裝置及測定方法等概述如下：(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 之 1/3 OCT.共 16 組；(4)溫度控制：18 至 25°C；(5)試體與施工方法：架高地板，面板尺寸 60cm(L)×60cm(W)×3cm(D)，四週封邊確保其氣密性；(6)測定方法：固定測點法，5 點測試點，距地面高度 1.2m，距離試驗樓板 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)樓板衝擊音與背景噪音差值：差值 40dB 以上，符合規範 15dB 以上之規定。

(二) 架高地板樓板衝擊音隔音性能評估方法

樓板衝擊音隔音等級，依據 ISO 717-2 Impact Sound Insulation 測試規範規定，係針對樓板表面材訂定評估標準。本研究以單一數值 ΔL_w 值表示增設架高地板之樓板隔音性能，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之總合不得大於 32dB；(4)隔音等級之求法：以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： $L_{n,w}$ 值即為評定樓板衝擊音值，當評估樓板衝擊音時，須將 $L_{n,w}$ 值參照 ISO 140-8 規範轉換為 ΔL 值。

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

其中

L_{no} : 未增設架高地板材之標準衝擊音音壓級 (dB)

L_n : 增設架高地板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 : $10m^2$

(三) 以有限元素法數值解析樓板衝擊音

本研究採用有限元素法模擬樓板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、邊界條件阻尼緩衝作用、音場流體與結構體耦合作用。依據足尺實驗室建築尺寸建構數值模型，操作步驟略可分為數值模型建立、衝擊源設定與數值解析等三大部分。

1.數值模型建立：

(1)模型元素設定：結構體之牆體、樓板與架高地板使用實體元素(Solid)作為數值模擬元素，鋼樑與鋼柱以柱元素(Beam)作為數值模擬元素，室內音場則以流體元素(Fluid)作為數值模擬元素，每個元素單元之邊長為 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、彈性係數等；室內音場之材料與壓力設定有密度、音速、吸音率、空氣壓力等。音場與結構耦合關係設定與材料阻抗部份，係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 向之力學行為與壓力，作為結構體與流體間傳遞元素。

2.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，各擊鎚依序自距樓板上高度 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 $4.9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ ；衝擊鎚每 10Hz 衝擊一次樓板。

3.數值解析

(1)解析頻率與取樣間隔：參照 ISO 140-8 與 ISO 717-2 規範規定，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：依據實際測點位置，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 規範規定三分之一八度音共 16 組頻率作為輸出頻率，分頻率輸出室內音壓分佈情形。

三、結果與分析

(一)樓板增設架高地板之樓板衝擊音隔音性能實驗結果

本實驗分別測試室內餘響時間、裸樓板與加上架高地板之衝擊音壓級，作為計算樓板衝擊音隔音值 ΔL 之依據。實驗之架高地板試體為一般市售架高地板，單元規格為 60cm(L)×60cm(W)×3cm(D)，300 型合金鋼，空氣層厚度(基座高度)15cm，依 ISO 717-2 規範之計算式得出 ΔL_w 值為 25 dB，實驗結果分別以各音程之衝擊音壓值 L_n 值(圖 1)與各音程之衝擊音壓衰減值 ΔL 值(圖 2)呈現。實驗結果顯示：(1) 不同衝擊接觸面材質將會影響隔音值；(2) 輕量衝擊源隔音效果，中高頻隔音性能較低頻顯著。

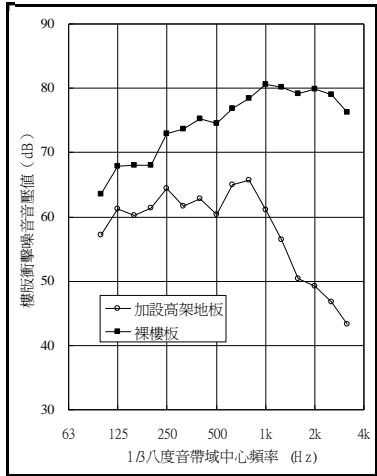


圖 1 各音程之衝擊音壓值 $L'n$

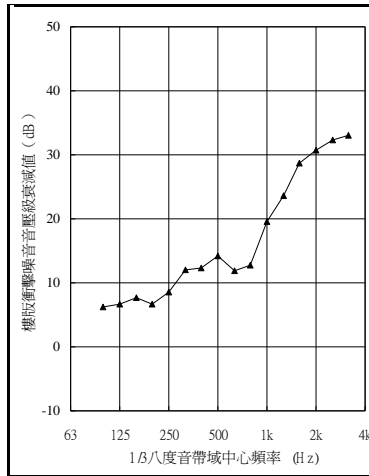


圖 2 樓板衝擊音壓衰減值 $\Delta L'$

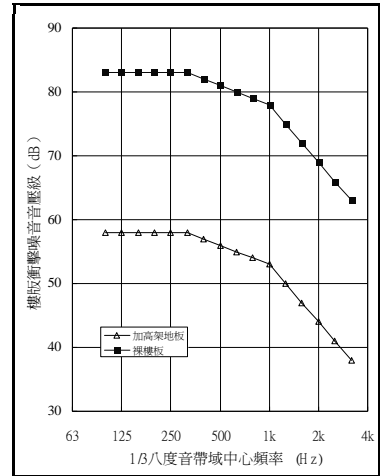


圖 3 ISO 717-2 參考曲線 $(L'n,r)$ 頻譜圖

(二) 數值模擬結果

音壓頻譜之模擬輸出，係依據實測測點位置進行數值模擬解析，量測五點，量測高度 1.2m，輸出單位採用音壓輸出，單位為分貝(dB)，並將各頻率音壓級轉換為三分之一八度音(1/3 Oct.)音壓級。

數值模擬裸樓板及加設架高地板之樓板衝擊音結果，分析不同頻率之室內空間垂直向音壓衰減分布(如圖 4)，樓板加設架高地板後會直接影響樓板對於輕量衝擊源之隔音值，且中高频隔音較低頻隔音顯著。

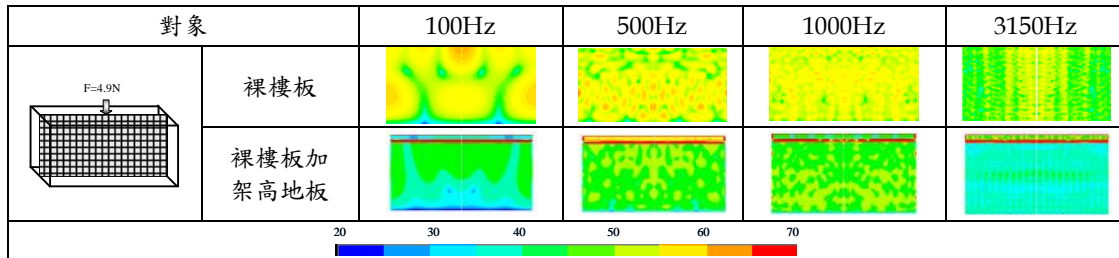


圖 4 室內空間垂直向音壓衰減分布圖

(三) 數值模擬與實測結果之比對

- 音壓波形趨勢比對：數值模擬與實測結果，採用三分之一八度音(1/3 Oct.)為評估標準，分別比對裸樓板與裸樓板加設架高地板之三分之一八度音程音壓圖；由圖 5 所示，模擬與實測結果於不同頻率之音壓值趨勢甚為接近。
- 音壓級數值比對：將裸樓板與裸樓板加設架高地板二種樓板形式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 ISO 717-2 規範頻率 100 至 3150Hz 16 組，共計 160 組資料作迴歸分析，於 95% 信賴度下，迴歸結果如圖 6，實測與模擬數值 R 與 R^2 分別為 0.971 與 0.943，顯示以有限元素法模擬架高地板樓板衝擊音之

有效性。

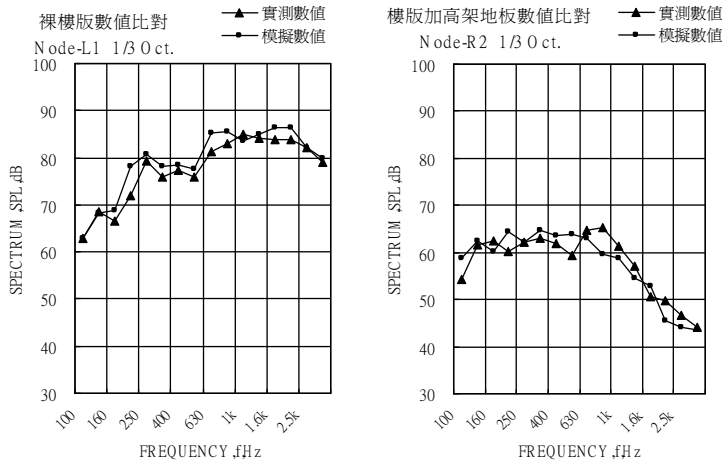


圖 5 模擬與實測各音程之衝擊音壓值趨勢比對

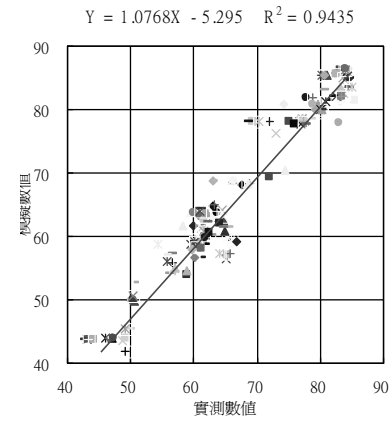


圖 6 有限元素法模擬數值與實測數值之迴歸分析圖

四、變因模擬

本研究針對架高地板構造形式變因：基座高度（空氣層厚度）、面板厚度、襯墊厚度以及面板單元尺寸等進行電腦模擬，並對架高地板對衝擊音減音效果之影響進行可視化呈現，以提出不同之隔音替選方案，提供設計、使用者參考。

(一) 改變架高地板面板厚度對樓板衝擊音之影響

增加面板厚度可降低架高地板之振動量[文獻 6]，而音響放射特性則取決於物體振動特性。本研究依市售架高地板形式，以架高地板面板厚度 1cm~10cm 範圍中，選取五組不同厚度變因進行模擬操作探討。

因 ISO 717-2 規範參考曲線對於高頻帶域較嚴格，對於低頻較寬鬆，故以總合評估結果顯示。結果顯示，不同面板厚度之架高地板對於樓板衝擊音均有相當之隔音效果：各組變因中以面板厚度 8cm 及 10cm 之衰減效果最顯著，面板厚度 1cm 則為四組中衰減效果欠佳者；面板厚度自 1cm 增加為 5cm 時，增加之衰減值為 5dB；若增加面板厚度至 8cm 時，其 $\Delta L'w$ 值增加量僅微量增加 1dB，再繼續增加面板厚度至 10cm 時，其 $\Delta L'w$ 並無隨面板增厚而增加，仍然維持 $\Delta L'w=28\text{dB}$ 。

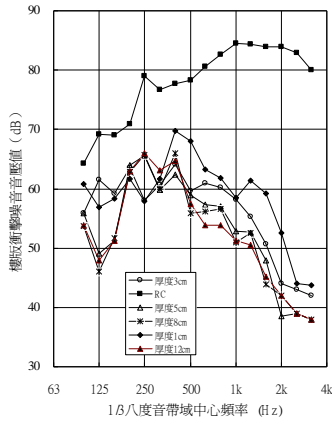


圖 7 樓板衝擊音音壓值 (L'n) 頻譜圖

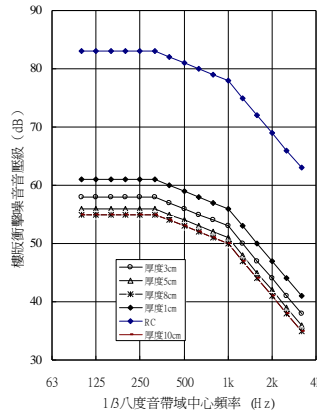


圖 8 樓板衝擊音之 ISO 717-2 參考曲線 (L'n,r) 頻譜圖

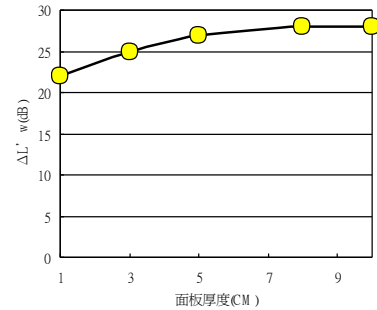


圖 9 架高地板面板厚度變因 L'w 數值模擬結果

(二) 改變架高地板襯墊厚度對樓板衝擊音之影響

於外力突然作用或某一速度交替作用下，襯墊之設置，將能吸收能量、抑止衝擊振動，進而減輕衝擊音之產生[文獻 6]。本研究以四種市面上常見之襯墊厚度及無加裝襯墊時，對樓板衝擊音之影響為探討對象。

結果顯示，不同襯墊厚度之架高地板對於樓板衝擊音均有相當之隔音效果。綜合評估結果顯示，各組變因中以襯墊厚度 0.9cm 和 1.2cm 之衰減效果最為顯著，襯墊厚度 0.6cm 為四組中衰減效果次佳者；面板厚度自 0cm（無加裝襯墊）增加為 0.6cm 時，其差值為 7dB，增加襯墊厚度至 0.9cm 時，其 $\Delta L'w$ 值僅微量增加 1dB 為 29dB，若續增加厚度至 1.2cm 時，其 $\Delta L'w$ 則維持於 29dB， $\Delta L'w$ 將無隨著襯墊厚度增加而再提升。

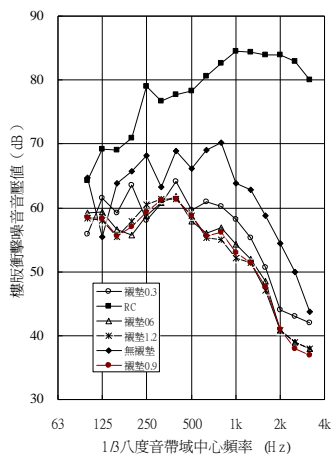


圖 10 樓板衝擊音音壓值 (L'n) 頻譜圖

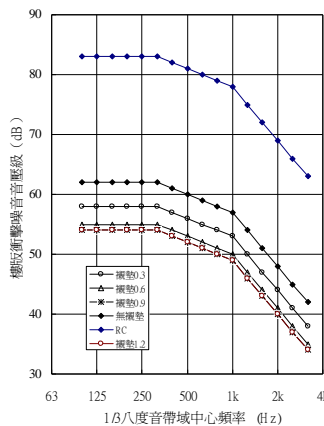


圖 11 樓板衝擊音之 ISO 717-2 參考曲線 (L'n,r) 頻譜圖

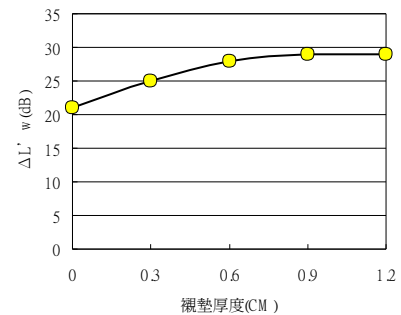


圖 12 架高地板襯墊厚度變因 L'w 數值模擬結果

(三) 改變架高地板空氣層厚度對樓板衝擊音之影響

市售架高地板基座多可調整，調整幅度約在 10cm~35cm 間。因調整過高之架高地板將會影響室內空間高度，故本研究選擇三種常用架高地板基座高度進行模擬，探討空氣層厚度對架高地板樓板衝擊音之影響程度。

結果顯示，於既有空氣層厚度（15cm）增加或減少空氣層厚度，其數值依 ISO717-2 規範解析得各組變因之 $L'_{n,r}$ 以及 $\Delta L'_{w}$ 值皆相同，顯見空氣層厚度對樓板衝擊音衰減影響並無顯著差異。

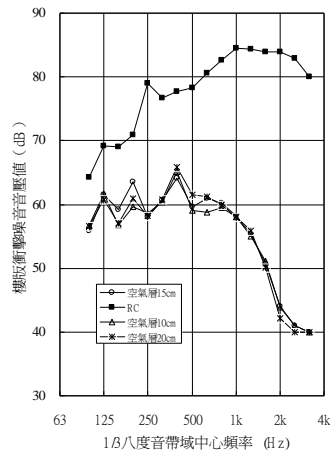


圖 13 樓板衝擊音音壓值 (L'_{n}) 頻譜圖

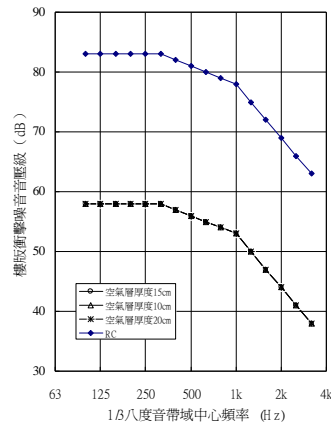


圖 14 樓板衝擊音之 ISO 717-2 參考曲線 ($L'_{n,r}$) 頻譜圖

(四) 改變架高地板面板單元尺寸對樓板衝擊音之影響

不同之面板單元尺寸，將會造成基座數目增減，而影響振動傳遞量之差異。本研究以 60cm×60cm、50cm×50cm 二組市面上較普遍之尺寸及 80cm×80cm 較大之面板單元尺寸為探討對象，比較其對樓板衝擊音衰減之影響。

模擬結果顯示，於既有架高地板面板單元（60cm×60cm）增加和減少面板單元尺寸，其數值經 ISO717-2 解析得各組面板單元尺寸變因之 $L'_{n,r}$ 以及 $\Delta L'_{w}$ 值皆相同，顯見調整面板單元尺寸對樓板衝擊音衰減影響並無顯著差異。

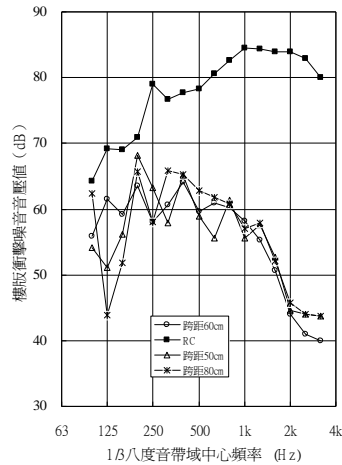


圖 15 樓板衝擊音音壓值 (L'n)頻譜圖

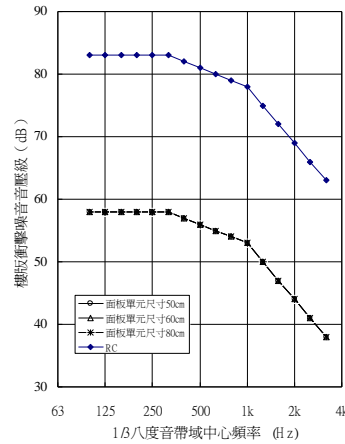


圖 16 樓板衝擊音之 ISO 717-2 參考曲線 (L'n,r)頻譜圖

五、結論

(一)架高地板面板厚度對樓板衝擊音衰減之影響

增加架高地板面板厚度可改善樓板衝擊音之隔音性能，但有其侷限。本研究數值模擬結果顯示：面板厚度 1cm 時，其 $\Delta L'w=22\text{dB}$ ，為 1~10cm 各組厚度中效果最差者；當面板厚度增加至 8cm 時， $\Delta L'w$ 提升至 28dB，則為各組厚度中效果最佳者。面板厚度 5cm 時， $\Delta L'w$ 值已達 27dB；從 5cm 增至 8cm 後， $\Delta L'w$ 值僅再提升 1dB 至 28dB；若繼續增加面板厚度至 10cm，其 $\Delta L'w$ 仍維持於 28dB，隔音量並無再隨著面板厚度增加而提升，故在考慮施作成本和隔音效益下，面板厚度上限應以 8cm 即可。

(二)架高地板襯墊厚度對樓板衝擊音衰減之影響

增加架高地板襯墊厚度可改善樓板衝擊音之隔音性能，惟亦有其侷限。本研究數值模擬結果顯示：無襯墊時，其 $\Delta L'w=21\text{dB}$ ，為五組模擬厚度中效果最差者；當襯墊厚度增加至 0.9cm 時， $\Delta L'w$ 提升至 29dB，則為各組厚度中效果最佳者。襯墊厚度 0.6cm 時， $\Delta L'w$ 已達 28dB；從 0.6cm 提升至 0.9cm 後， $\Delta L'w$ 值僅再提升 1dB 至 29dB；若增加襯墊厚度至 1.2cm，其 $\Delta L'w$ 仍維持於 29dB，隔音量並無再隨著襯墊厚度增加而提升，故在考慮施作成本和隔音效益下，襯墊厚度上限應以 0.9cm 即可。

(三)架高地板面板單元尺寸和基座高度對樓板衝擊音衰減之影響

面板單元尺寸和基座高度二變因經數值模擬所得各音程之音壓衰減值 ($\Delta L'$) 趨勢大致相同，並無顯著變化，對樓板衝擊音衰減較無影響性。

六、參考文獻

1. 江哲銘、鍾松晉，「建築物輕量化樓板隔音性能之探討-以小試體樓板振動減低量預測樓板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板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板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，「樓板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. 鍾啟民，架高地板衝擊振動數值解析模型之研究，國立成功大學建築研究所碩士論文（1999）
7. 蘇嘉瑩，以有限元素法預測天花板空氣層厚度對樓板衝擊音衰減影響之研究，國立成功大學建築研究所碩士論文（2004）
8. 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)
9. 江哲銘、林芳銘、鍾松晉、曾品杰、黃詠仁「鋼構複合樓板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)
10. 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)
11. 江哲銘，建築物噪音與振動，台北市，胡氏圖書（1993）
12. 安岡正人，床衝擊音 關 研究，學位論文（1981）
13. 石渡康弘 雷澤秀夫 中澤真司，2006，各種仕上げ構造の床衝擊音レベル低減量に関する実験的検討—乾式二重床の各種要因変化による影響
14. Beranek, Leo L. et. al., Noise and Vibration Control, McGraw-Hill Book Company, New York (1960)