

浮式樓板緩衝材之動態剛性測定與分析

王栢村¹ 余易璋¹ 吳盈輝² 王文志³ 林芳銘⁴

¹ 國立屏東科技大學 機械工程系

² 國立內埔高級農工職業學校 機械科

³ 瑞智精密股份有限公司

⁴ 國立屏東科技大學 木材科學與設計系

wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

台灣住宅居住環境中彼此因生活噪音而影響到居住品質的情形會越來越多，其中困擾度最高之噪音源為樓板衝擊音，因此如何改善樓板衝擊音的實施對策便成為當下重要的課題之一。本文主要欲建構一套針對浮式樓板緩衝材之動態剛性量測程序，首先參考 ISO 9052-1 之緩衝材動態剛性實驗量測規範，建立量測程序及對應單自由度系統模型假設的理論模態分析(TMA)，且找出適當的量測系統架構，包括：質量塊、緩衝材及支撐邊界，並依序進行緩衝材放入八種不同邊界的量測實驗，探討不同邊界對緩衝材於動態剛性量測之影響，進而找出適當的支撐剛性邊界，且訂定出一套緩衝材動態剛性的量測標準作業程序。再透過實驗模態分析(EMA)與有限元素分析(FEA)，對質量塊與緩衝材之實體結構進行模型驗證，以確認 ISO 9052-1 規範的簡化單自由度系統模型為基礎之動態剛性量測合理性，由結構模態特性，可驗證所建立的量測方法之正確性。另外，也應用經過驗證的質量塊與緩衝材之實體結構分析模型，進行靜力分析，可求得緩衝材之靜態剛性，並與實驗所得動態剛性進行比較分析，結果顯示也有良好的對應。因應我國建築相關法規之訂定，本文建立的量測程序與方法，未來可應用於測定各種緩衝材動態剛性的參考依據。

關鍵詞：緩衝材、動態剛性、有限元素分析、實驗模態分析、模型驗證

1. 前言

由內政部建築研究所近年來針對住宅音環境相關研究調查資料顯示，台灣因地窄人稠故住宅型式已趨向於高層化發展，因此集合住宅成為都會地區最普遍的住宅形式，在居住形式趨於高層集中化的結果下，可得知在居住環境中，彼此因生活噪音而影響到居住品質的情形會越來越多。其中困擾度最高之噪音源為樓板衝擊音，且因居民對於住戶安寧權的重視逐年增加，使得糾紛、訴訟等案件日漸增加，因此如何改善樓板衝擊音的實施對策便成為當下重要的課題之一。

經由研究指出若要改善浮式地板樓板衝擊音，則須針對下方需鋪設連續的防振層、需有架高的樓板、及其下需有緩衝材料填充等三個關鍵因素加以改善才能有效降低衝擊音[1]。而相關研究發現，樓板覆蓋材料的動

態特性與降低重量衝擊音兩者存在一定的關聯性，經由實驗結果發現，針對輕量衝擊音所造成的高頻噪音若使用緩衝隔振材能有效抑制及降低，而重量衝擊音所造成的低頻噪音則需使用具阻尼特性的材料才達到有效抑制及降低的效果[2]。亦有研究者將浮式地板下所使用的緩衝材料進行一連串的動態剛性(Dynamic Stiffness)測量，經由實際測量找出緩衝材材料特性與樓板衝擊音衰減特性兩者間的相關性，發現當緩衝材材質的厚度增加時，則會導致其動態剛性降低，而低動態剛性展現出較優異的隔音性能[3]。而實驗結果發現，緩衝材料的厚度與衝擊音的衰減量呈現正相關性，當緩衝材料的動態剛性越低，對於樓板衝擊音的改善效果越佳[4]。此外，當水泥樓板上使用聚苯乙烯(PS)及聚胺脂(PU)來作為緩衝材料來降低樓板衝擊音時，由於此類發泡材料相較於傳統岩棉材料，其對人體健康影響程度較低，因發泡材料為多孔性材料且具有彈性之特性，並可同時達到吸音及降低振動傳遞的效果，因此對於降低樓板衝擊音有明顯的改善效果[5]。其他，亦有以混凝土的樓板為主題的相關研究，其緩衝材料分別使用橡膠墊與軟木。藉由實驗結果發現，針對輕量的衝擊音若緩衝材料的厚度越厚則其隔音性能越佳[6]。

而現行國內建築技術法規中，僅對牆體防音部分提出規範，針對樓板衝擊音的防音構造要求目前並無相關法規對此進行規範，且無法確保其能達到有效的隔音性能。有鑑於此，內政部建築研究所近幾年已邀集專家學者開始著手進行相關系列的研究計畫，例如「建築隔音性能基準及法制化研究」[7]，並依據研究結果，與各界之專家學者針對樓板隔音設計及技術進行商討，進而擬定符合國內的設計規範，目前草案初步擬定樓板衝擊音以 L_n, w 值不超過55dB為基準；而對於改善樓板衝擊音部分則建議使用浮式樓板構造的方式為主要隔音技術，近年來亦有研究者針對浮式樓板緩衝材動態剛性的相關主題進行研究，內容包含改善衝擊音的方法、比較不同量測的技術及利用實驗模型來估測緩衝材料抑制衝擊音的效果[8-12]，結果顯示，加入緩衝材料確實能有效降低衝擊音的影響，綜合以上說明，可知緩衝材動態剛性量測之重要性。

基於上述的理由，故本研究主要參照 ISO 9052-1 「Acoustics-Determination of Dynamic Stiffness-Part 1: Materials used under floating floors in dwellings」與其他規範[13-15]以及文獻中針對測量緩衝材動態剛性所提



出的相關研究及建議[16-20]。

本文目的欲建構一套針對浮式樓板緩衝材之動態剛性量測程序，首先參考 ISO 9052-1 之緩衝材動態剛性實驗量測規範，進而建立一套標準的量測程序與方法，未來可應用在於測定各種緩衝材動態剛性的參考依據。

2. 緩衝材簡介與研究方法

緩衝材是目前常用於高層住宅，樓與樓之間降低樓板衝擊音之媒介，其材料優點為減少加工、降低成本、降低噪音，圖 1 為本次研究之緩衝材實物圖，緩衝材一般以橡膠顆粒為原料所製成，在設計緩衝材的過程常以經驗或試誤法方式，缺點是相對耗費大量人力與物力，然而改善的方式，可運用有限元素法分析方式進行設計，透過虛擬測試的設計變更，不僅減少資源消耗，也能有效縮短開發的時程。

本文的研究方法，以圖 2 實驗量測架設示意圖為緩衝材實驗量測架設手法，並依序進行緩衝材放至八種不同邊界的量測實驗研究，在以單自由度系統假設之質量塊與緩衝材系統模型，其中質量塊為 8kg，圖 3 為實驗與分析模型示意圖，其中圖 3(a)以質量塊給與緩衝材負重，進行實驗模態分析，擷取質量塊與緩衝材之模態參數，圖 3(b)為實驗量測點示意圖，為獲得模態參數，規劃垂直方向進行量測，圖 3(c)為質量塊與緩衝材系統之有限元素模型圖，在系統模型中，可控制參數為幾何尺寸、材料參數與邊界限制，僅變更幾何尺寸來建立質量塊與緩衝材之有限元素模型。

接著以本研究目標為例，說明緩衝材剛性與阻尼係數的實驗研究方法，本研究以單自由度系統假設，透過質量塊與緩衝材系統模型來求得緩衝材之剛性與阻尼係數，在研究中分為三個目標層次，分別為(1)模型驗證、(2)求解剛性、(3)剛性確認，共三大目標，如以下說明：

1. 模型驗證：預期以分析模型進行設計變更，因此目標為獲得等效於實際結構之質量塊與緩衝材系統之有限元素模型，利用實驗模態分析與有限元素分析來比對進行模型驗證，以指標為模態參數，包含自然頻率(f_n)、模態振型(ϕ_n)、頻率響應函數進行比較，重複進行模型修正，直達到驗證之標準。
2. 求解剛性：圖 4 為質量塊及緩衝材實際結構系統圖，其中 4(a)為質量塊與緩衝材之實際結構，在依照單自由度系統假設為質量塊與緩衝材之數學模型，如圖 4(b)單自由度系統示意圖，其為了解緩衝材之特性，並建立緩衝材剛性與阻尼係數量測程序，故目標為求解緩衝材之動態剛性與阻尼係數，首先以實驗模態分析獲得質量塊與緩衝材系統之頻率響應函數，透過曲線嵌合擷取模態參數，獲得 f_n 與 ζ_n ，再以單自由度系統假設，求解緩衝材之動態剛性(s')與阻尼係數(c)。
3. 剛性確認：由於系統有無限多組模態參數，為確認求解剛性時所使用的自然頻率(f_n)與阻尼比(ζ_n)

參數，即是對應實際之彈簧常數 k_2 與阻尼係數 c_2 ，故目標為比較實驗動態剛性與分析靜態剛性之差異，利用等效模型進行靜力分析，以外力與變形量比值關係，求解分析靜態剛性，再與實驗動態剛性比對確認。

透過上述研究方法，以圖 5 策略系統方塊圖表說明，圖中歸納出一套通用的目標評估思考流程，確認研究目標後，通常會執行實驗量測或模擬分析，在實驗過程中需搭配量測設備與量測方式，來獲得有效的判斷指標，當然指標需依據目標而定義，接著是標準的定義，其用來衡量指標是否達到研究目標。

3. 質量塊與緩衝材系統之模型驗證

圖 6 為模型驗證流程圖，在有限元素分析時，首先建立有限元素模型，模型中包含幾何尺寸、材料參數與邊界條件設定，接著進行模態分析求取理論模態參數，而實驗模態分析時，首先規劃量測方式，包含感測器選用、量測點規劃，接著量測頻率響應函數，進行曲線嵌合擷取實驗模態參數，進一步比對理論與實驗模態參數，並重複修整模型，直到相互吻合，獲得等效於實際結構之有限元素模型。



圖 1 緩衝材實物圖

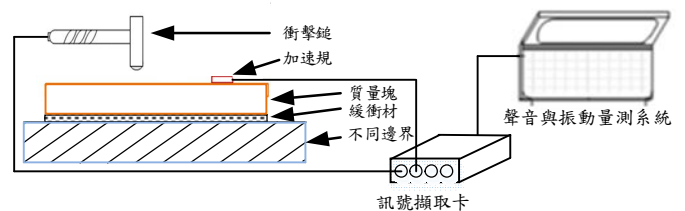


圖 2 實驗量測架設示意圖

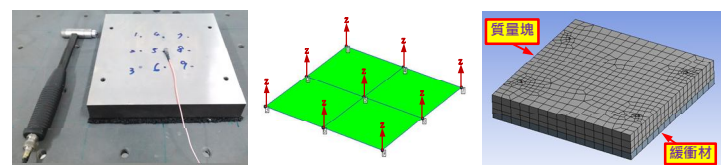


圖 3 實驗與分析模型示意圖

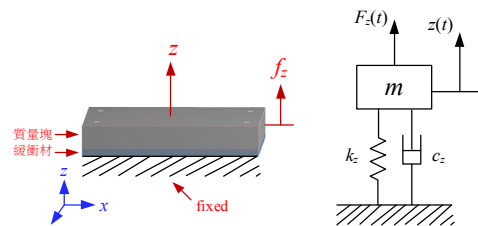


圖 4 質量塊及緩衝材實際結構系統圖

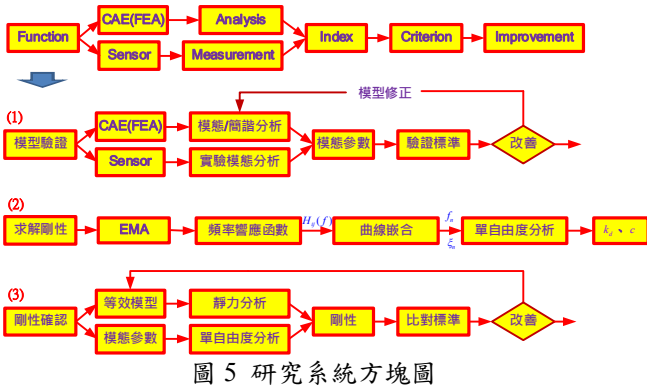


圖 5 研究系統方塊圖

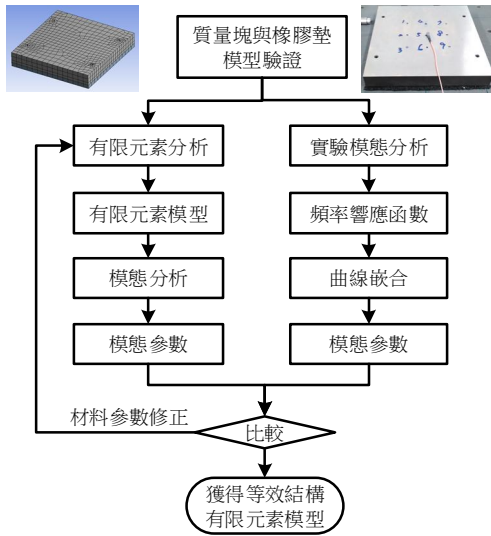


圖 6 模型驗證流程圖

表 1 質量塊與緩衝材之材料參數

材料參數	緩衝材	質量塊
尺寸(長*寬*高)(mm)	200-200-9	200-200-26
重量(Kg)	0.1435	8
密度(Kg/m ³)	396.60	7692.30
楊氏係數(Pa)	18652	200·10 ⁹
蒲松比	0.49	0.30

3.1 實驗模態分析(EMA)

規劃實驗量測方式，如圖 2 所示，首先安裝緩衝材於邊界上再將質量塊放至緩衝材上方，讓質量塊壓於緩衝材 10 分鐘後再進行實驗量測，感測器選用單軸向加速規(endevco 27AM1-10)，與驅動器衝擊鉗(PCB-086C03)，將加速規固定於質量塊頂面中心點處，移動衝擊鉗垂直量測點，如圖 3(b)所示，共規劃 9 個量測點，透過頻譜分析儀進行實驗量測質量塊與緩衝材系統之頻率響應函數，後處理以曲線嵌合軟體 ME'scopeVES 擷取模態參數，包含自然頻率、模態振型與阻尼比，依據上述實驗步驟分別進行由(花崗石+塑膠桌面、花崗石+木質桌面、衝擊平台、花崗石+衝擊平台、花崗石+衝擊平台+木條固定、振動平台、花崗石+振動平台、花崗石+振動平台+木條固定)八種不同邊界之實驗模態分析。

3.2 有限元素分析(FEA)

依據實際結構定義幾何尺寸、材料參數與邊界條件，建立有限元素模型，如圖 3(c)所示，質量塊與緩衝材系統之有限元素模型圖，元素採用立方體元素，材料參數設定，如表 1 質量塊與緩衝材之材料參數表，元素分割進行收斂性分析，誤差在 3% 以下，位移限制於緩衝材底部設定固定邊界，並設定自重，進行模態分析與簡諧響應分析，另外在簡諧響應分析時，設定外力 F_z 為 -1 N，分別求解 z 方向之頻率響應函數。

3.3 結果與討論

在質量塊與緩衝材系統之實驗量測部分，共有八種不同邊界實驗量測結果，並從實驗結果中探討各種支撐邊界對於質量塊與緩衝材量測的影響，進而獲得適合質量塊與緩衝材標準量測系統的支撐邊界，在者以這套量測系統進行模型驗證，來驗證等效於實際結構之有限元素模型。透過有限元素分析與實驗模態分析，來比較頻率響應函數、自然頻率與模態振型進行驗證，由圖 7 為八種不同邊界量測之重現性，結果顯示各邊界量測三次之重現性對應良好，且各邊界量測非常穩定，搭配表 2 八種不同邊界量測之自然頻率總表，來訂定出最佳的質量塊與緩衝材量測邊界，A 邊界量測出 4 種頻率且出現兩個主要峰值，B 邊界也相同出現兩主要峰值，無法判定；C 邊界雖然有明顯的主要峰值但多一個小峰值無法被解釋；D、E 邊界系統上沒有變更，只多加木條固定，但頻率會多 3Hz，表示加木條固定會有其他因素影響，故不採用；F 邊界出現過多峰值；G、H 邊界系統上沒有變更，多加木條固定在頻率上量測結果非常相近，而 H 邊界在與 FEA 分析結果對應良好，八種邊界量測結果中以 H 邊界為這次緩衝材系統之動態剛性實驗量測最佳之邊界。

在實驗模態分析與有限元素分析分別獲得 z 方向之頻率響應函數，圖 8 為質量塊與緩衝材之頻率響應函數圖($H_{F_z, az}$)，將實驗、合成、分析之頻率響應函數重疊比較，確認實驗與分析結果之等效性，從比較結果顯示垂直方向有單一峰值 f_z ，且實驗、合成與分析之頻率響應函數皆相當吻合，由實驗模態分析與有限元素分析之自然頻率比較，表 3 為自然頻率總表，表中顯示在實驗自然頻率 E01、E02、E03、E04 對應分析自然頻率分別為 F03、F04、F05、F06，其依模態物理意義為 z 方向之扭轉模態、(X,Y)=(1,2)、(X,Y)=(2,1)、(X,Y)=(1,1)，其中 X 與 Y 為 x 與 y 方向之節線數，其中以 E04 頻率為我們主要動態剛性量測主要頻率，誤差在 1%，其餘皆在 5% 以上原因為此有限元素模型假設為等向性材料，而緩衝材為非線性材料之差異，接著實驗模態分析與有限元素分析模態振型比較，表 3 為實驗與分析之模態振型總表，從分析模態振型顯示，第 F03、F04、F05、F06 模態振型之物理意義分別為 z 方向之扭轉模態、(X,Y)=(1,2)、(X,Y)=(2,1)、(X,Y)=(1,1)，與實驗第 E01、E02、E03、E04 模態振型對應相當吻合。

質量塊與緩衝材系統之模型驗證結果，頻率響應函數與模態振型比對相當吻合，而自然頻率 f_z 頻率誤差 1% 以下，在未來有限元素模型進行設計變更時，建議緩衝材改採以非線性材料設定以符合實際需求。

表 2 八種不同邊度量測之自然頻率總表

邊界	A	B	C	D	E	F	G	H			
EMA	花崗石 +塑膠桌面(Hz)	花崗石 +木質桌面(Hz)	衝擊平 台(Hz)	花崗石 +衝擊平 台(Hz)	花崗石 +衝擊平 台 +木條固 定(Hz)	振動平 台 (Hz)	花崗石 +振動平 台(Hz)	花崗石 +振動平 台 +木條固 定(Hz)	FEA	底部固定 邊界(Hz)	物理意義
E-01	--	--	--	--	--	8.88	9.38	--	F-01	9.27	左右平移-y
E-02	--	--	--	--	--	11.60	--	--	F-02	9.27	左右平移-x
E-03	18.10	19.20	--	--	--	15.40	13.10	13.10	F-03	9.29	扭轉模態-z
E-04	--	--	--	--	--	33.90	32.60	32.80	F-04	45.95	(X,Y)=(1,2)
E-05	39.40	--	--	--	--	41.30	--	38.50	F-05	46.00	(X,Y)=(2,1)
E-06	51.90	--	50.10	49.60	53.10	57.20	55.80	54.10	F-06	54.02	(X,Y)=(1,1)
E-07	63.70	62.20	62.50	60.70	63.00	--	--	--	--	--	--
E-08	--	--	--	73.10	76.70	69.60	--	--	--	--	--
--	--	--	--	--	--	--	--	--	F-07	220.00	緩衝材第一 模態

表 3 自然頻率總表

EMA	邊界(H) 花崗石 +振動平台 +木條固定(Hz)	FEA	底部固定邊界(Hz)	誤差(%)	阻尼比(%)	物理意義
--	--	F-01	9.27	--	--	左右平移-y
--	--	F-02	9.27	--	--	左右平移-x
E-01	13.10	F-03	9.29	-29.06	1.66	扭轉模態-z
E-02	32.80	F-04	45.95	40.09	1.84	(X,Y)=(1,2)
E-03	38.50	F-05	46.00	19.49	1.60	(X,Y)=(2,1)
E-04	54.10	F-06	54.02	-0.15	4.10	(X,Y)=(1,1)
--	--	F-07	220.00	--	--	緩衝材第一模態

表 4 實驗與分析之模態振型比較表

模態數	E-01_13.10 Hz	E-02_32.80 Hz	E-03_38.50 Hz	E-04_54.10 Hz
實驗振型				
模態數	F-03_9.29 Hz	F-04_45.95 Hz	F-05_46.00 Hz	F-06_54.02 Hz
分析振型				
物理意義	扭轉模態-Z	(X,Y)=(2,1)	(X,Y)=(1,2)	(X,Y)=(1,1)

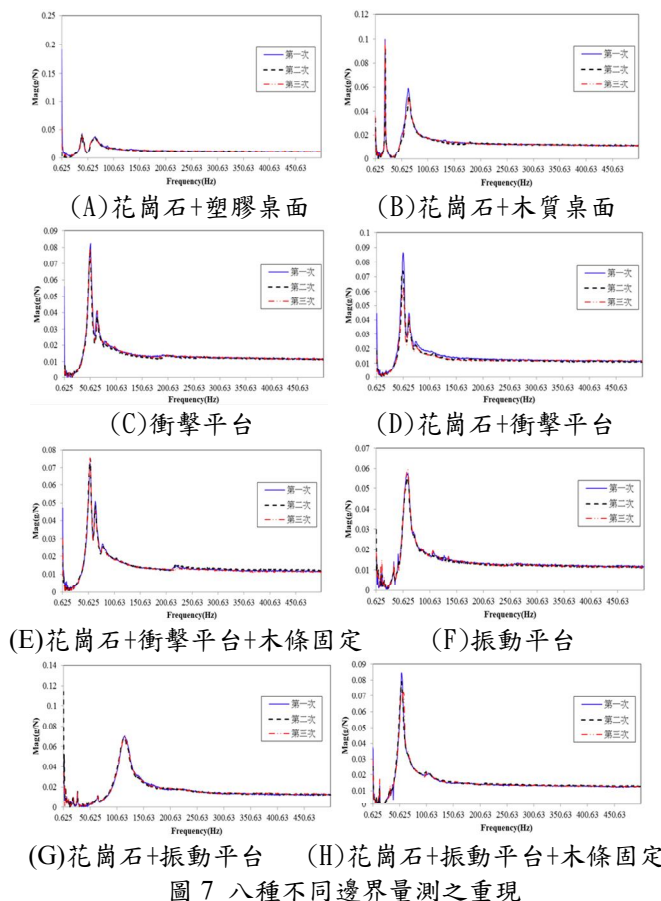


圖 7 八種不同邊界量測之重現

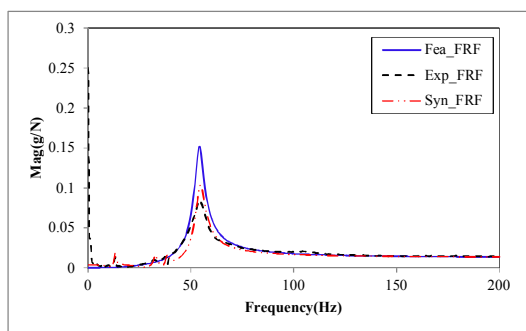


圖 8 質量塊與緩衝材之頻率響應函數圖 ($H_{Fz, az}$)

4. 緩衝材剛性與阻尼係數

本節以第 3 節實驗模態分析，所獲得質量塊與緩衝材之自然頻率 f_z 與阻尼比 ζ_z ，來提供單自由度系統假設參數，進而求解緩衝材之動態剛性 (s') 與阻尼係數 (c)，並利用所建立的有限元素模型，進行靜力分析求取緩衝材之靜態剛性，進一步比較確認靜態與動態剛性是否吻合。

4.1 動態剛性與阻尼係數

由質量塊與緩衝材實際結構，在依照單自由度系統假設為質量塊與緩衝材之數學模型，如圖 4(b) 所示，質量塊與緩衝材之 z 方向單自由度系統之數學模型，其運動方程式如下：

$$m\ddot{z} + c_z\dot{z} + k_z z = F_z(t) \quad (1)$$

其中， $F_z(t)$ 為輸入於質量塊之激振力、 $z(t)$ 為質量塊輸出

之位移量、 m 為質量、 c_z 為阻尼係數、 k_z 為彈簧常數，透過理論模態分析，可得自然頻率 (f_z) 與阻尼比 (ζ_z) 如下：

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}} \quad (2)$$

$$\zeta_z = \frac{c_z}{c_{c,z}} \quad (3)$$

$$c_{c,z} = 2\sqrt{mk_z} = 4\pi m f_z \quad (4)$$

其中， f_z 為 z 方向之自然頻率、 π 為圓周率、 ζ_z 為 z 方向之阻尼比、 $c_{c,z}$ 為臨界阻尼係數。

為求解緩衝材之動態剛性，由實驗可得 f_z 與 ζ_z ，由式(2)可求得系統的彈簧常數 k_z 如下：

$$k_z = (2\pi f_z)^2 m \quad (6)$$

接著由式(3)及式(4)，可求得系統的阻尼係數 c_z 如下：

$$c_z = \zeta_z 4\pi m f_z \quad (5)$$

最後即可求得每單位面積緩衝材實驗量測之動態剛性值 (s'_i) 如下：

$$s'_i = \frac{k_z}{S} = 4\pi^2 m'_i (f_z)^2 \quad (7)$$

其中 m'_i 為每單位面積作用於實驗緩衝材之總質量

$$m'_i = \frac{m}{S} \quad (8)$$

其中， S 為質量塊表面積。由於大部分材料的自然頻率與外力作用大小有關，為了避免外力作用大小對結果造成影響，故量測時至少需求取 3 個位置之結果，才能合理計算推測至零作用力時的共振頻率，最後求得需欲測試緩衝材的動態剛性值 (s') 如下：

$$s' = \frac{k_z}{S} = \frac{F / \Delta d}{S} = \frac{F / S}{\Delta d} \quad (9)$$

其中， Δd 為緩衝材之變形量。

此外，由於不同的測試片大小將會導致不同的 s'_i 結果，因此仍需考慮緩衝材內部空氣的影響，並依規範要求視需求進行空氣流阻抗 (airflow resistivity) 測量來修正結果，本研究將忽略空氣流阻抗效應之修正，最後預得動態剛性值 (s') 如下：

$$s' = s'_i \quad (10)$$

分別利用實驗模態分析，量取輸入與輸出之比值，即質量塊與緩衝材系統之頻率響應函數，圖 9 所示為頻率響應函數示意圖，可獲得峰值處之自然頻率 f_z ，並利用半能量點法獲得阻尼比 ζ_z 。本文已於第 3 節完成實驗模態分析，取得質量塊與緩衝材系統之自然頻率 f_z 與阻尼比 ζ_z ，計算動態剛性 s' 與阻尼係數 (c_z)，如表 5 動態剛性與阻尼係數總表，E-04 模態為緩衝材動態剛性量測之主要模態 (X,Y)=(1,1)，故以此模態所得頻率求得緩衝材動態剛性 s' 與阻尼係數 (c_z)，其中 s' 與 (c_z) 分別由式(5)以及式(7)求得。

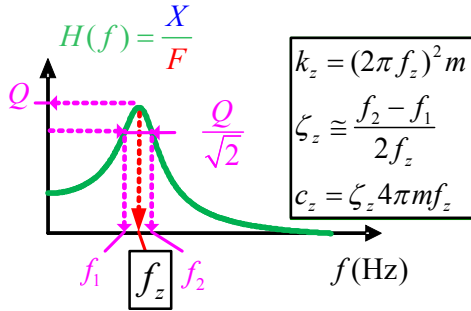


圖 9 動態剛性與阻尼係數求解示意圖

表 5 動態剛性與阻尼係數總表

模態數	自然頻率(Hz)	阻尼比 ζ_z (%)	動態剛性 s' (MN/m ³)	阻尼係數 c_z (N*s/m)
E-04	54.10	4.10	23.41	224.45

4.2 靜態剛性

透過第 3 節所建立質量塊與緩衝材之有限元素模型，進行靜力分析，圖 10 為靜力分析之有限元素模型示意圖，分別設定垂直方向外力，分析其外力與變形量關係曲線圖，如圖 11 為垂直位移與 F_z 關係曲線圖，利用外力與變形量之關係，求解緩衝材之靜態剛性，如下：

$$s'_s = \frac{F_z / S}{\Delta d} \quad (11)$$

其中 s'_s 為靜態剛性， F_z 為外力、 Δd 為變形量，圖中斜率倒數即為靜態剛性，質量塊在外力與變形量曲線為線性關係，原因為垂直方向具有初始位移關係，如在自重增加予時，越初始位移量就越大，而外力與變形量之比值相同。

4.3 動態與靜態剛性比較探討

實驗與分析剛性對應上，對應良好，特性一致，在剛性確認上，質量塊與緩衝材系統結果顯示，求解緩衝材動態剛性時，所使用的模態參數 E04，即是對應分析 F06，完成緩衝材之動態剛性(s')與阻尼係數(c_z)求解與確認。

表 6 為動態剛性與靜態剛性比較表，其中 s' 為實驗動態剛性由式(7)所得， k_z 由實驗所得、 \bar{s}' 為分析動態剛性由式(7)所得， k_z 由分析所得、 \bar{s}'_s 為分析靜態剛性由式(10)所得，表 6 中為確認實驗動態剛性求解時，選用的模態參數 E04 之自然頻率與阻尼比無誤，預期分析靜態剛性會與實驗動態剛性吻合，以分析動態剛性與靜態剛性，與實驗動態剛性比較，在(A)實驗與(B)分析動態剛性比較， z 方向動態剛性誤差在 2% 以下，主要顯現分析與實驗結果相當吻合。在(A)實驗動態剛性與(C)分析靜態剛性比較下，與(A)(B)比較時之結果相同，其特性一致，且 z 方向則對應相當良好， z 方向剛性比較， z 誤差在 2% 以下。

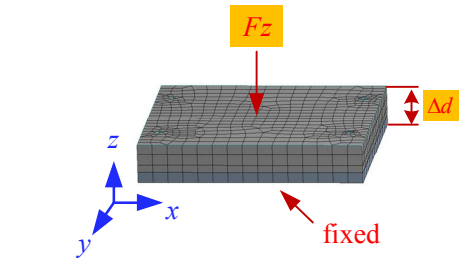


圖 10 靜力分析之有限元素模型示意圖

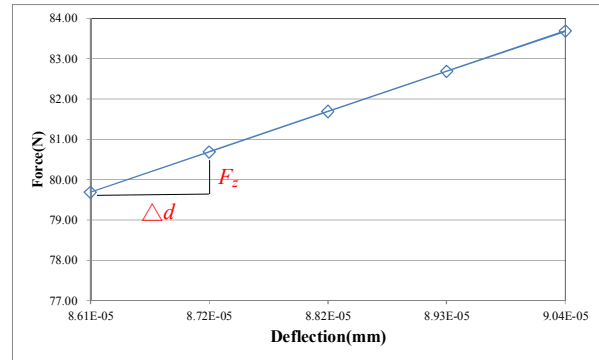


圖 11 垂直位移與 F_z 關係圖

表 6 動態剛性與靜態剛性比較表

量測方向	(A)		(B)		(C)	A、B 誤差 (%)	A、C 誤差 (%)
	模態 E-04	實驗動態剛性 s' (MN/m ³)	模態 F-06	分析動態剛性 \bar{s}' (MN/m ³)	分析靜態剛性 \bar{s}'_s (MN/m ³)		
Z	54.10	23.41	54.02	23.04	23.14	-1.59	-1.15

5. 結論

本文對浮式樓板緩衝材進行動態剛性測定與分析研究，透過建立的目標評估思考流程，以單自由度系統假設，定義目標為選定最佳量測邊界，足以模擬固定緩衝材之實際邊界，並求解剛性、剛性確認，有限元素分析，實驗模態分析、模型驗證，建立質量塊與緩衝材系統模型，並定出一套構浮式樓板緩衝材之動態剛性量測程序，求解出緩衝材之動態剛性與阻尼係數，經結果顯示，在八種實驗邊界中以 H 邊界(花崗石+振動平台+木條固定)為本研究最佳的量測邊界，此量測結果也與有限元素分析(FEA)對應良好，而在求解緩衝材動態剛性、阻尼係數之系統模型，再透過有限元素模型獲得緩衝材分析動態與靜態剛性，比對確認實驗所量測 f_z 與模態參數，即是對應緩衝材之 z 方向動態剛性(s')與阻尼係數(c_z)。未來在分析模型與實驗架設部分，建議改採非線性材料，以符合實際需求，並且實驗架設部分，因緩衝材表面呈現波浪形狀，質量塊在壓制緩衝材時，要塗模上一層石膏，讓緩衝材表面成為平面狀態進而質量塊才能均勻壓制於緩衝材表面，不會因緩衝材幾何結構造成影響量測數據與實驗誤差，且透過 ISO 規範質量塊因壓制緩衝材三天才能進行實驗量測，透過文中所建立量測程序與分析模型，可提供下一階段緩衝材測定之參考。

6. 參考文獻

- [1] D. Jones, and J. Szymanski, Handbook for Sound Engineers: Acoustical Treatment for Indoor Areas, G. M. Ballou, Editor, pp. 73-88, 2002.
- [2] J. H. Kim, S. Y. Yoo and J. Y. Jeon, "Dynamic Properties of Damping Materials for Reducing Heavyweight Floor Impact Sounds," *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, ICA 2010, Sydney, Australia, pp. 1156-1159, 2010.
- [3] K.-W. Kim, "Correlation between Dynamic Stiffness of Resilient Materials and Heavyweight Impact Sound Reduction Level," *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 1589-1600, 2009.
- [4] K. Miškinis, Investigation of Resilient Materials and Their Influence on Impact Sound Insulation of Floor Constructions, Doctoral Theses, Kaunas University of Technology, Lithuania, 2010.
- [5] H. Robin, Impact Sound Insulation of Flooring Systems with Polyurethane Foam on Concrete Floors, Doctoral Theses, Sheffield Hallam University, UK, 1999.
- [6] A. C. C. Warnock, "Impact Sound Measurements on Floors Covered with Small Patches of Resilient Materials or Floating Assemblies," *Internal Report*, Paper No.: IRC-IR-80, 2000.
- [7] 林芳銘, 建築隔音性能基準及法制化研究期末報告書, 內政部建築研究所委託研究報告, 2011。
- [8] D. K. Anthony, D. Fernández, P. Luque and F. Simón, "Dynamic Stiffness of Elastic Layers to Improve the Impact Sound Insulation of Floors," *Proceedings of 12th International Congress on Sound and Vibration*, Lisbon, Portugal, Paper No. FP0135, 2005.
- [9] N. Baron, P. Bonfiglio and P. Fausti, "Dynamic Stiffness of Materials Used for Reduction in Impact Noise: Comparison between Different Measurement Techniques," *Proceedings of Acoustics 2004*, Guimaraes, Paper No.: 066, 2004.
- [10] L. Barbaresi, G. Semprini and A. Schiavi, "Acoustic Performances of Resilient Layers for Impact Sound Insulation in Standard Laboratory," *Proceedings of 7th Forum Acusticum*, Krakow, Poland, Paper No.: R03H_3, 2014.
- [11] A. Schiavi, A. Pavoni Belli and F. Russo, "Dynamic Stiffness Measurement: an Empirical Model to Estimate the Reduction in Impact Sound Pressure Level and its Relative Improvement Curve," *Proceedings of 14th International Congress on Acoustics*, ICA 2004, Kyoto, Japan, pp. 3401-3404, 2004.
- [12] 沈郁蕙, 浮式地板構造使用表面材及緩衝材改善隔音性能之實驗研究, 碩士論文, 國立雲林科技大學, 2012。
- [13] ISO 9052-1, Acoustics – Determination of Dynamic Stiffness. Part 1: Materials Used in floating floors in dwellings, 1989.
- [14] ISO 9053, Acoustics – Materials for Acoustical Application – Determination of Airflow Resistance, 1991.
- [15] EN 29052-1, Acoustics – Determination of Dynamic Stiffness; Part 1: Materials used under Floating Floors in Dwellings, 1992.
- [16] A. Schiavi, A. Pavoni Belli and F. Russo, "Estimation of Acoustical Performance of Floating Floors from Dynamic Stiffness of Resilient Layers," *Building Acoustics*, Vol.12, pp. 99-113, 2005.
- [17] H. A. Metzen, "Estimation of the Reduction in Impact Sound Pressure Level of Floating Floor from the Dynamic Stiffness of Insulation Layers," *Building Acoustics*, 3, Paper No.: 1, 1996.
- [18] A. Schiavi, A. Pavoni Belli, M. Corallo and F. Russo, "Acoustical Performance Characterization of Resilient Materials Used under Floating Floors in Dwellings," *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 93, pp. 477-485, 2007.
- [19] F. Bettarello, P. Fausti and A. Schiavi, "On the Dynamic Stiffness of Materials used under Floating Floors: Analysis of the Resonance Frequency Dependence by Excitation Force Amplitude using Different Measurement Technique," *Proceedings of 19th International Congress on Acoustics*, Madrid, Spain, Paper No.: RBA-07-008, 2007.
- [20] A. Schiavi, C. Guglielmo, P. Miglietta and F. Alasia, "Influence of Static-load on Airflow Resistivity Determination," *Proceedings of Acoustics'08 Paris*, Paris, France, pp. 5585-5589, 2008



Determination and Analysis of Dynamic Stiffness of Resilient Materials Used under Floating Floors

**Bor-Tsuen Wang¹, Yi-Zhang Yu¹, Ying-Huei
Wu², Wen-Chih Wang³, Fang-Ming Lin⁴**

**¹ Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and
Technology**

**² Machinery Division National Nei-Pu Senior
Agricultural-Industrial Vocational School**

³Rechi Precision Co., LTD

**⁴ Department of Wood Science and Design
National Pingtung University of Science and
Technology**

ABSTRACT

Taiwan residential living environment may affect each other due to noise, in which the most annoyance is the floor impact sound. How to improve the floor impact sound is a crucial issue in policy making. This work aims to establish the standard operation procedure (SOP) to determine the dynamic stiffness of the resilient materials used under the floating floors. First, ISO 9052-1 is reviewed to summarize the experimental procedure and develop the theoretical modal analysis base on the single degree-of-freedom (SDOF) assumption. The test arrangement for the resilient material specimen placed between the base plate and the load plate needs to validate the rigidity of the base plate. Eight different boundary conditions for the base plates are evaluated to study the boundary effects on the determination of dynamic stiffness. The proper base plate condition can be obtained and the SOP to determine the dynamic stiffness can then be finalized. Experimental modal analysis (EMA) and finite element analysis (FEA) are, respectively, performed on the test structure to validate the analytical model by comparing modal parameters. Also, from the vibration modal properties comparison the simplified SDOF model assumption can be validated and assured the correctness of measurement method. In addition, the verified analytical model can be used to predict the static stiffness of the resilient materials that can be compared with the experimentally obtained dynamic stiffness and shown reasonably agreed. In response to the relevant building regulation, this work develops the measurement procedure that can be used to determine the resilient material's dynamic stiffness and useful for future applications.

Keywords: Resilient Materials, dynamic stiffness, finite element analysis (FEA), experimental modal analysis (EMA), model verification.