



中華民國振動與噪音工程學會  
第十五屆學術研討會

優良應用論文獎

論文名稱：高層建築機械停車塔之結構音  
防制設計法

得獎人：盧威宇 王偉輝

中華民國振動與噪音工程學會

理事長

洪振發

第十五屆振動與噪音工程學術研討會主任委員

中國文化大學

廖慶隆

中華民國九十六年六月十六日

## 高層建築機械停車塔之結構音防制設計法

盧威宇<sup>1</sup> 王偉輝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>宇泰威工程有限公司 總經理 工學博士

<sup>2</sup>國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系振動與噪音工程研究中心

網址: www.luweiyu.com.tw E-mail : luweiyu6050@yahoo.com.tw

連絡電話: 0932-023-043

### 摘要

高層建築由於對耐震、材料輕量化及綠建築等要求標準日漸提升，許多高樓建築設計乃逐漸由傳統的 RC 構造改採 SRC 或 SC 構造，此項轉變，加上高樓建築對停車位的高需求，一般大樓會將機械式停車塔與之共構，當停車塔運轉使用時，常造成大樓內之結構振動及傳音非常嚴重，此問題乃近年來建築界極待解決的項目。

本文應用類比測試及振動功率流之動性理論，來鑑定機械停車塔運轉時之振動功率流及結構音路徑，建立排序診斷方法，就最大振動功率流傳遞路徑提出有效之隔振措施，利用隔振量頻譜預估結構音之改善量。本文方法可作為結構音防制設計分析之參考。

**關鍵字:** 類比測試、振動功率流、動性理論

### 1. 前言

在地狹人稠的地區，為了在有限建築空間內增加停車位數量，常常將住宅結構本體內與機械停車塔作共構之空間設計。因機械停車塔大部分的結構皆由鋼骨及鋼架所組成，無論是哪種入車方式，均是由機械驅動設備，經由纜索及絞鏈等，帶動車台進入定位而存放車輛。

若機械停車塔未經仔細良好之隔振防音設計，在運作時便成為一巨大之振動噪音源而造成層出不窮的住戶抱怨。因此，與建築共構之機械式停車塔的振動噪音防制問題，便是本文主要探討的主題。

本文在進行 SC 建築結構因振動所引致的噪音防制設計時，先由類比實驗，找出同類型停車塔振動功率流能量頻譜特性，再由動性傳遞理論，預測分析振動噪音傳遞路徑頻帶範圍，及設計該結構應加裝何種類型隔振器，才可有效提升隔振效率，藉以隔離改善影響住戶聲環境的主要振動能量頻帶。

### 2. SC 鋼構與 RC 混凝土建築結構音傳遞比較

建築物內之停車塔因升降機運轉而引起的噪音，依傳遞方式可分為兩種類型，一為“空氣噪音”(air-borne noise)，另一方面為“結構噪音”(structure-borne noise)。停車塔內的空氣噪音會經由管路或管道間傳遞至其它樓層住戶，而結構噪音則能經由樑柱結構傳遞至其它樓層住戶內的牆面樓板並透過牆面幅射出噪音。以建築結構種類而言，耐震性高且輕量化的鋼構建材，在結構音的低頻振動能量傳遞上較傳統鋼筋混凝土建築來得大且據烈。其原因乃振動在不同 SC 與 RC 結構中傳遞波長的差異與結構內阻尼的特性不同所造成。

#### 2.1 振動波傳遞速度之比較

振動波傳遞速度與該振動頻率之波長成正比，同一組機器運作所產生的振動頻率波傳遞速度在鋼結構約為 5500m/sec 而混凝土結構約在 3000~3500m/sec 之間，由介質振動速度與頻率波長關係式， $C = f \times \lambda$  得知，當機器運作所產生的同一振動頻率在鋼結構的波

長為混凝土的 1.6 至 1.8 倍，因而鋼結構對於某些特定頻率運轉機械造成的結構音傳播速度 SC 結構是 RC 結構之 1.6 至 1.8 倍。

## 2.2 振動對數衰減量的比較

由於鋼結構與混凝土結構材料損失係數的差異，以致其振波傳遞之對數衰減量分別為：

SC 結構之對數衰減量：

$$\delta = \ln \left( \frac{x_j}{x_{j+1}} \right) \cong \pi \eta \cong 10^{-3} \pi \quad (1)$$

RC 結構之對數衰減量：

$$\delta = \ln \left( \frac{x_j}{x_{j+1}} \right) \cong \pi \eta \cong (3 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2}) \pi \quad (2)$$

式中  $x_j/x_{j+1}$  為相鄰前後振波振幅比， $\eta$  為損失係數，鋼為  $10^{-3}$ ，混凝土為  $3 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2}$ ，由(1)與(2)式得知 RC 的對數衰減量較 SC 結構的衰減量大 30 至 50 倍，故在 SC 鋼構建築因機械運作所產生的振動幅度會比傳統 RC 混凝土建築振動幅度衰減得慢很多。

## 2.3 相同振源鋼結構與混凝土結構之振動量比較

考慮五層樓之鋼結構建築與混凝土建築，材料參數如表一，施以單位力作用於頂樓中心點，如圖 2.1，由有限元素分析軟體 ANSYS 分析，輸入參數如表 2.1，比較兩種結構各樓層之傳遞動性，如圖 2.2~圖 2.4。

將一組機械力頻譜，如圖 2.5，由頂樓中點輸入後，分析比較兩種結構各樓層之速度響應頻譜得知，離振動源越遠之樓層，鋼結構對於主要振動頻率之振動量都比混凝土結構大，如圖 2.6~圖 2.8。

表 2.1 鋼結構建築與混凝土建築材料參數表

材料參數 建築結構	彈性係數 $E(N/m^2)$	泊松比	密度 $kg/m^3$	結構總 阻尼比 $\xi$	柱	樓板
鋼結構建築	$2 \times 10^{11}$	0.3	30000	0.0126	盒型鋼 (A=4400mm <sup>2</sup> )	厚 0.2m RC
混凝土建築	$3.25 \times 10^{10}$	0.2	2700	0.063	矩形柱 (1.1m*1.1m)	厚 0.2m RC

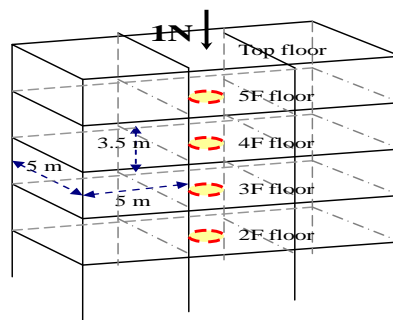


圖 2.1 單位力作用於五樓 SC 及 RC 建築

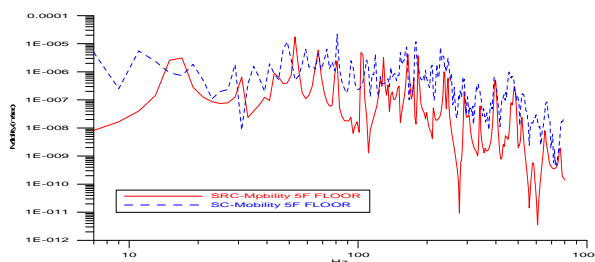


圖 2.2 SC 及 RC 結構五樓地板中心傳遞動性頻譜比較

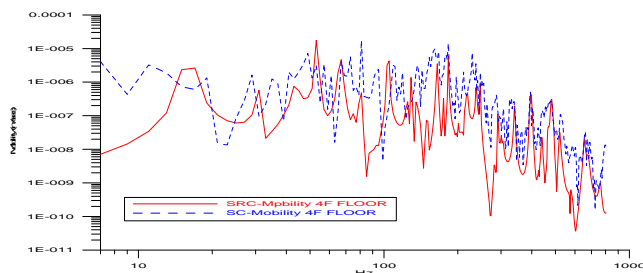


圖 2.3 SC 及 RC 結構四樓地板中心傳遞動性頻譜比較

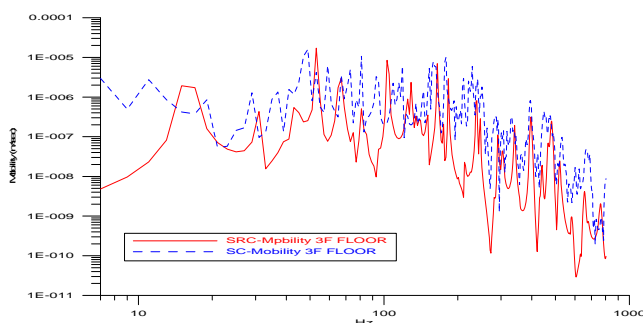


圖 2.4 SC 及 RC 結構三樓地板中心傳遞動性頻譜比較

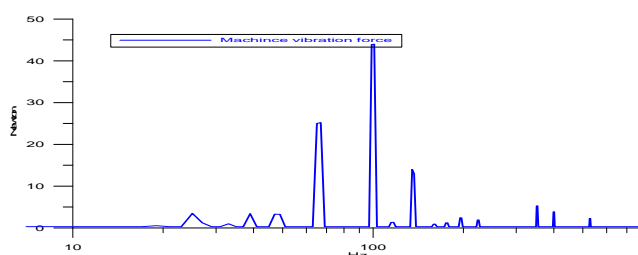


圖 2.5 機械作用力頻譜圖

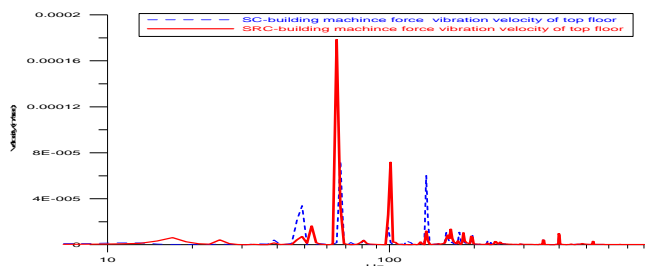


圖 2.6 機械作用下 SC 及 RC 結構五樓中心處  
振動速度頻譜比較

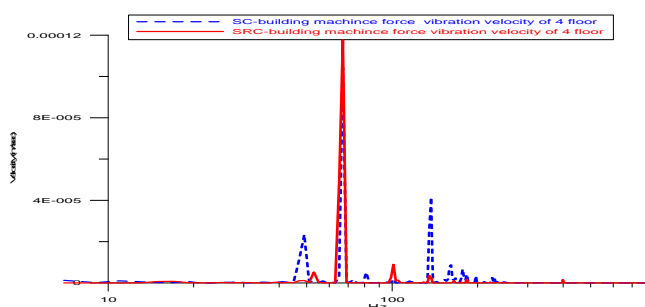


圖 2.7 機械作用下 SC 及 RC 結構四樓中心處  
振動速度頻譜比較

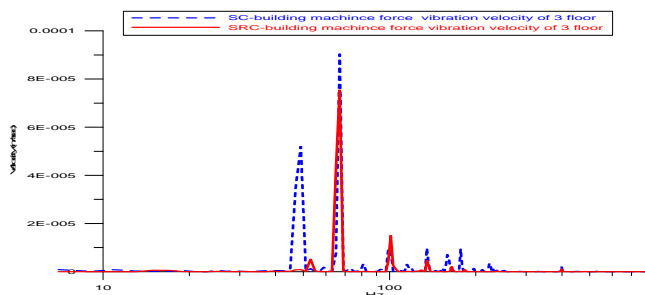


圖 2.8 機械作用下 SC 及 RC 結構三樓中心處  
振動速度頻譜比較

### 3. 振源振動量鑑定

以最簡單的一維機器振源(source)與平台基座(platform seating)之耦合系統(圖 3.1)來看,通常將機器視作速度源(velocity source),此意指機器在與基座結構之接合處會引發無法改變之運動,故振源可以機器自由懸吊情況在接合位置處量測之速度(或其他形式之反應,如振動位移、振動加速度)來描述。假設機器在接點處之內力為  $\{F\}_{int}$ ,則機器接點位置處之振源速度可由動性函數  $\{M\}_{source}$  表示為:

$$\{v\}_{free} = [M]_{source} \{F\}_{int} \quad (3)$$

但在實際現場,要量測(3)式右邊之任何一個量均極度困難,其原因是不可能在現場將機器自由懸吊起來,而且令其運轉,以供量動性矩陣;同時機器內部各項內部力亦很難量。但當機器由支座支承之耦合情況,如圖 3.2,則在結合點之耦合速度可表示為[1]

$$\{v\}_{coupled} = [M]_{seat} ([M]_{ss} + [M]_{seat})^{-1} \{v\}_{free} \quad (4)$$

此處  $[M]_{ss}$  為耦合系統接點在振源側之點動性;  $[M]_{seat}$  是耦合系統接點在基座側之點動性。

若  $[M]_{seat} \gg [M]_{ss}$ ,則由(4)式知  $\{v\}_{coupled}$  近似等於  $\{v\}_{free}$ ,故若機器是架在柔軟的彈性基座上,則可將安裝妥當的機器,在接合點處量得的振動速度視作振源速度。

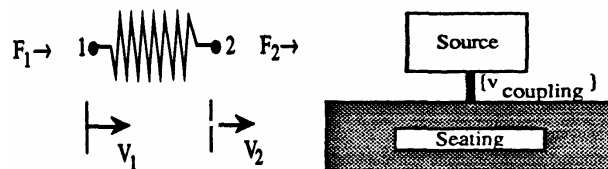


圖 3.1 典型隔振元件 圖 3.2 機器振源與基座  
結構之耦合系統

### 4. 結構中隔振器傳遞之振動量及減振原理

基本隔振器元件如圖 3.1,其動態行為可由頻率反應特徵來表示。隔振器兩端之振動力與振動位移關係為:

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

或

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中  $[M_{ij}]$  及  $[Z_{ij}]$  分別稱作隔振器之動性矩陣(mobility matrix)及阻抗矩陣(impedance matrix)。

當隔振器已安裝於支承結構,但機器尚未吊放安裝前,隔振器之輸入阻抗有以下關係:

$$F = Z_{seat} v \quad (7)$$

一旦機器裝上後,則[2]

$$\frac{F_{top}}{v_{top}} = Z_{top} = Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{22} + Z_{seat}} \quad (8)$$

$$v_{seat} = -\frac{Z_{21}}{Z_{22} + Z_{seat}} v_{top} \quad (9)$$

$$\frac{F_{seat}}{v_{top}} = Z_{transfer} = -\frac{Z_{21}}{1 - Z_{22}/Z_{seat}} = M_{transfer}^{-1} \quad (10)$$

利用式(7)~(10)之關係及振動速度源( $v_{top}$ )，即可預估在隔振器頂部輸入之振動功率流 $\langle P_{input} \rangle$ ，及透過隔振器傳遞至支承結構之振動功率流 $\langle P_{transmit} \rangle$ 為：

$$\langle P_{input} \rangle = \frac{1}{2} |v_{top}|^2 \operatorname{Re}\{Z_{top}\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \langle P_{transmit} \rangle &= \frac{1}{2} |v_{seat}|^2 \operatorname{Re}\{Z_{transfer}\} \\ &= \frac{1}{2} |F_{seat}|^2 \operatorname{Re}\{Z_{transfer}^{-1}\} \end{aligned} \quad (12)$$

若(9)式中 $-\frac{Z_{21}}{Z_{22} + Z_{seat}}$ ，或(10)式中 $|Z_{transfer}|$ 之值愈小，即代表隔振器之隔振效果愈好，此即為隔振器之隔振原理。

## 5. 振動功率流量測診斷及隔振改善分析

### 5.1 同型停車塔之振源類比試驗

為診斷新建大樓之停車塔於車台運作時，停車塔與建築結構支承構件是否有可能造成振動傳遞短路現象，同時為確認停車塔原設計各傳動機構之隔振措施是否完備，遂選擇同型機械停車塔，進行振源振動與噪音位準量測，由量得之數據作為新建機械停車塔隔振系統規劃設計之振源振動量依據。

在類比試驗中係對同機型大樓機械停車塔系統，分別進行電梯上升與下降兩階段運作過程中，分起動加速、穩定行進與減速停止前的振度量測，記錄電梯系統中各部位結構振動加速度頻譜，並診斷鑑定各振源振動功率，依大小排序。

由振動可能傳遞路徑，分別計算出之振動能量功率流大小並加以排序，就其主要振動能量傳遞路徑選擇適當減振方案，並預定各減振方案之隔振分貝值、

噪音衰減量，作為新建大樓機械停車塔隔振系統規劃設計之參考依據。

### 5.2 振源隔振器動性測試與隔振效能驗證

為有效降低停車塔機械平台升降運轉之馬達及振動傳遞量，最有效的改善方式便是在升降平台與建築結構之接觸點安裝隔振裝置，而隔振器之選擇，可藉由類比試驗之停車塔現場驅動馬達運轉振動功率流頻譜，決定隔振器所欲隔離的主要頻率範圍。經過量測計算後，由馬達傳遞至四角落之振動功率流頻譜如圖 5.1~圖 5.4 所示，得知振動能量傳遞在 63Hz 及 160Hz 頻率處有明顯振動能量傳遞情形，將該頻率依功率流傳遞路徑與隔振效能製圖排序，如圖 5.5~圖 5.6 所示。

由各路徑功率流圖診斷出在何位置之隔振效能較差，即可對症改善，經探討後研判較差之隔振器係因為平台四邊支承荷載不平均所致，因此重新仔細計算各支承處荷重後，再搭配設計合適之隔振器，有效分擔平台四角之負荷，即可大幅改善隔振效果。

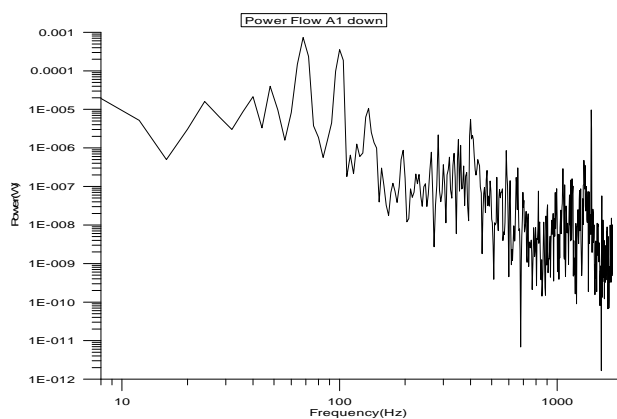


圖 5.1 機械平台振源傳遞至 A 處振動功率流頻譜

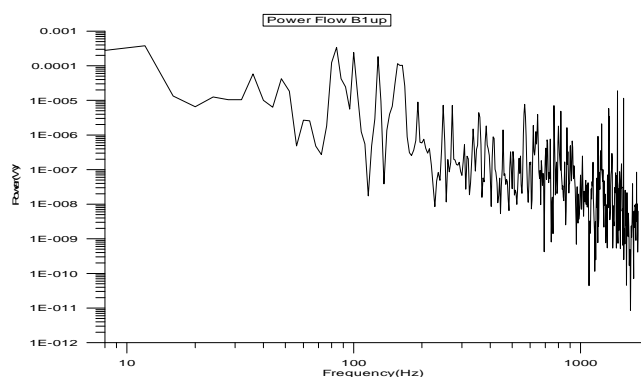


圖 5.2 機械平台振源傳遞至 B 處振動功率流頻譜

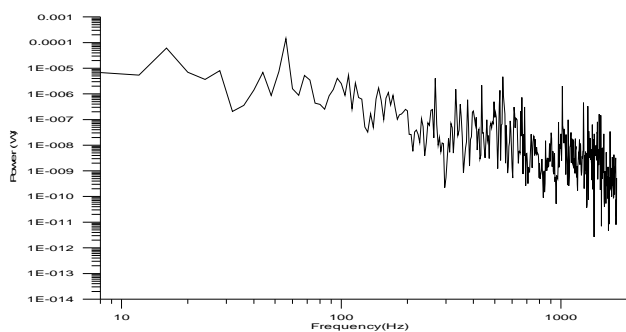


圖 5.3 機械平台振源傳遞至 C 處振動功率流頻譜

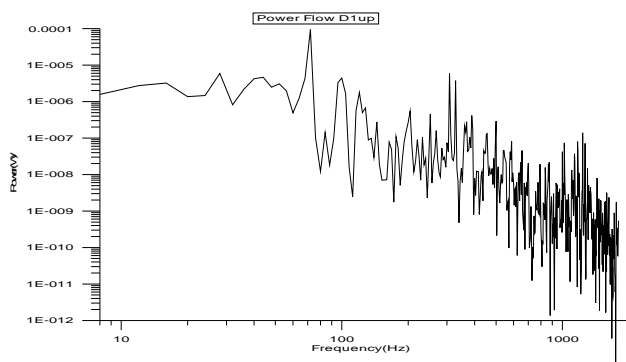


圖 5.4 機械平台振源傳遞至 D 處振動功率流頻譜

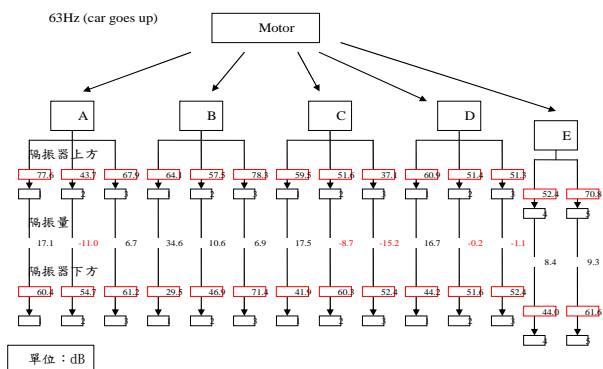


圖 5.5 停車塔車台上升時 63 Hz 處馬達與各支承墊功率流分佈與隔振量圖

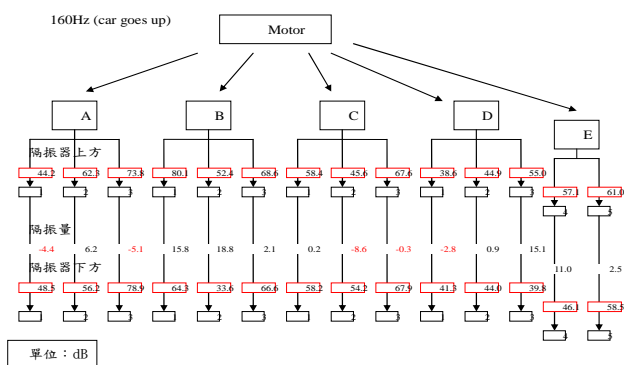


圖 5.6 停車塔車台上升時 160 Hz 處馬達與各支承墊功率流分佈與隔振量圖

### 5.3 機械平台四邊支承荷載之精確計算

隔振設計過程中若未考慮隔振器有效荷載範圍時，不論是荷載不足或過負荷，隔振器都無法發揮應有的效果，甚至有會發生短路或失效的現象，因此在設計隔振器前，需要正確計算各支承隔振器荷載範圍，以決定隔振器之彈性係數範圍，而機械停車塔進行平台各支承荷載計算時，須要考慮的重量元件有鋼承板、側邊鋼樑、昇降台、車台板、滑輪組、配重塊及驅動軸...等構件，再加上空載及載車重量的變異範圍，而專業的隔振設計必需要將各支承位置重量精確計算，以搭配具有該負載能力的隔振器。該計算可應用 EXCEL 軟體進行配重運算，將可節省許多人工計算時間，如下圖 5.7 所示。

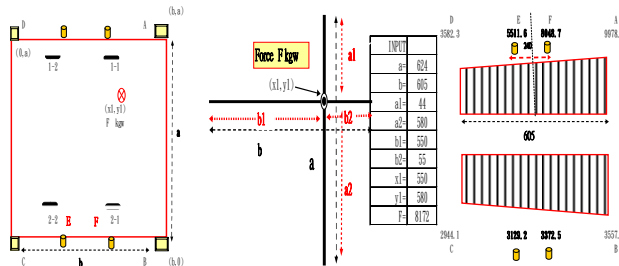


圖 5.7 應用 EXCEL 軟體計算分佈荷重範例

### 5.4 主要隔振頻率控制範圍與隔振效率決定

經由圖 5.1 圖~圖 5.4 馬達傳遞至各支承之振動功率流頻譜圖，研判主要隔振最低頻率處，再依圖 5.8 隔振效率率圖，由訂定之隔振效率對應頻率比決定隔振器自然頻率範圍。隔振阻尼係數是否採用，可依現場振動來源是否包含瞬間衝擊振動量而定，若存在衝擊振動問題，可搭配具黏彈性阻尼與線性彈簧共構之隔振器系統隔離含衝擊性之振動量。

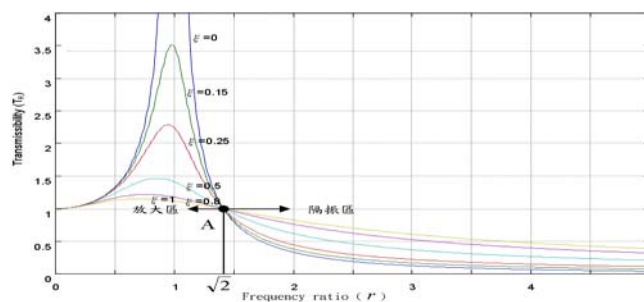


圖 5.8 振動傳遞率與頻率比關係圖

### 5.5 隔振實例及振噪改善結果

大樓停車塔升降機械平台量測加速規及隔振裝置  
佈置如圖 5.9。

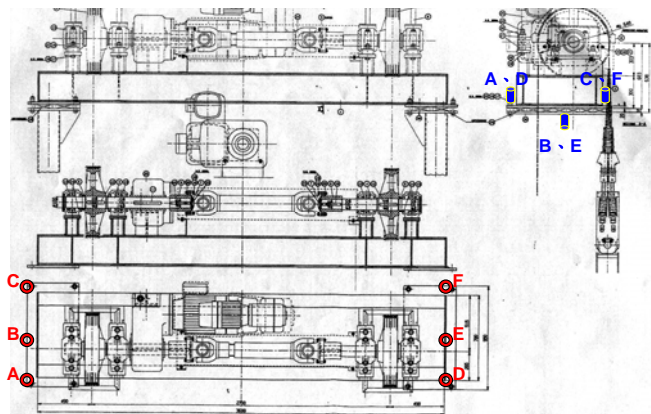


圖 5.9 升降機械馬達減速機支承平台量測加速規  
及隔振器佈置

(1) 振動改善前後機械平台隔振效能檢測結果

對機械支承平台重新安裝彈簧隔振器前後之隔振效能，經量測比較其頻率響應函數 FRF (Frequency Response Function) 即傳遞動性頻譜，得如圖 5.10~圖 5.17。

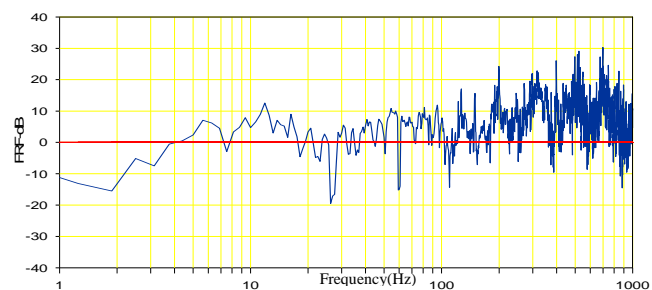


圖 5.10 改善前升降平台載車下降情況測點 A 至 B 之  
隔振分貝數

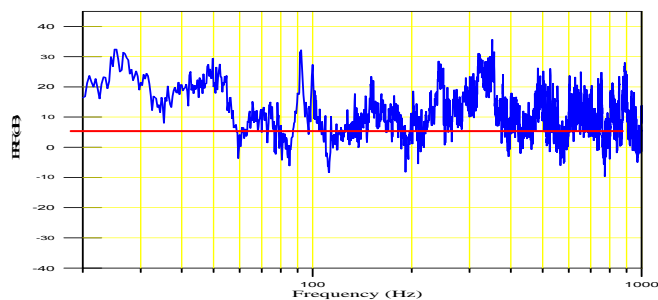


圖 5.11 改善後升降平台載車下降情況測點 A 至 B 之  
隔振分貝數

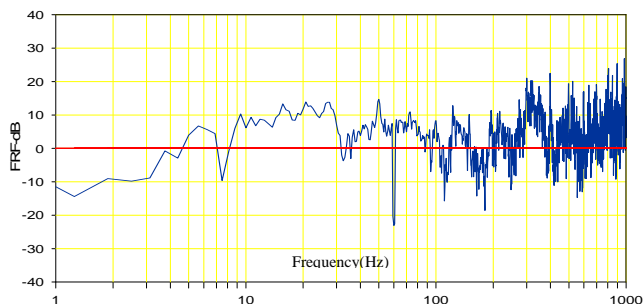


圖 5.12 改善前升降平台載車下降情況測點 C 至 B 之  
隔振分貝數

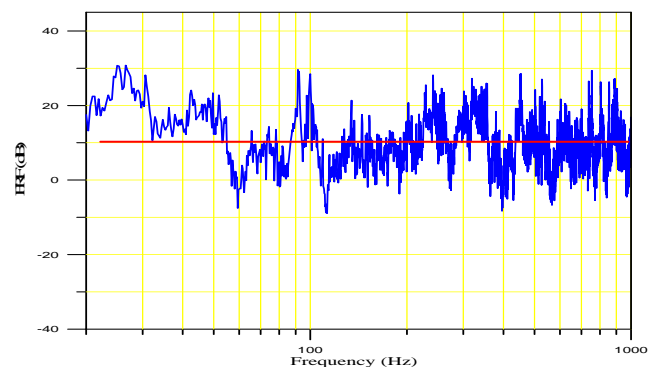


圖 5.13 改善後升降平台載車下降情況測點 C 至 B  
之隔振分貝數

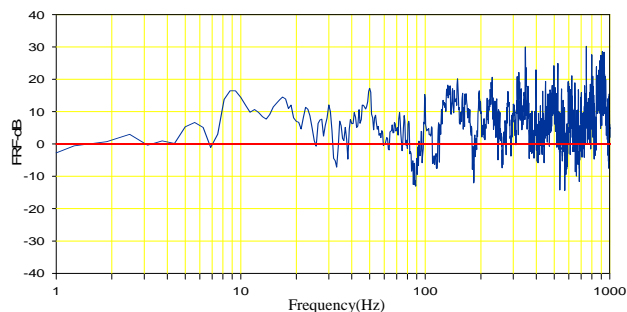


圖 5.14 改善前升降平台載車下降情況測點 D 至 E 之  
隔振分貝數

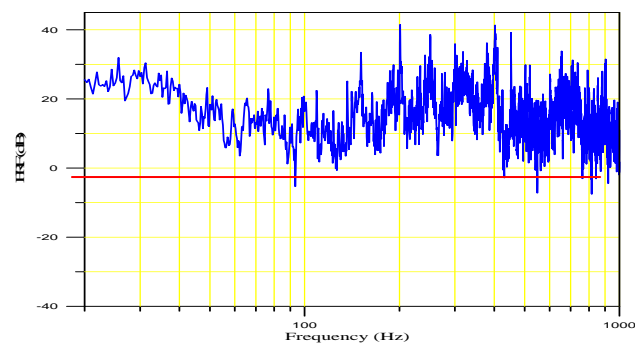


圖 5.15 改善後升降平台載車下降情況測點 D 至 E 之  
隔振分貝數

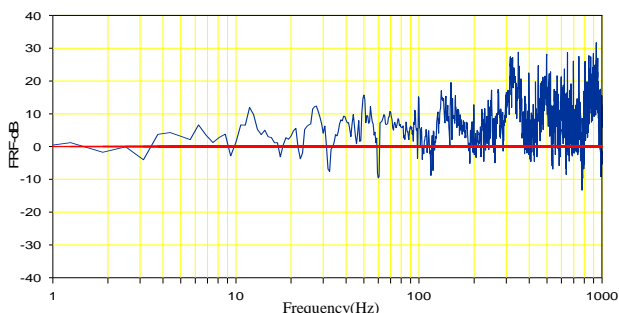


圖 5.16 改善前升降平台載車下降情況測點 F 至 E 之隔振分貝數

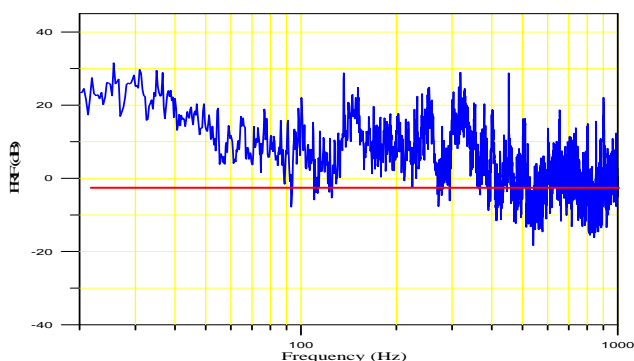


圖 5.17 改善後升降平台載車下降情況測點 F 至 E 之隔振分貝數

(2) 改善前後車台運轉時平台隔振器下方振動量：量測之結果如圖 5.18~圖 5.21。

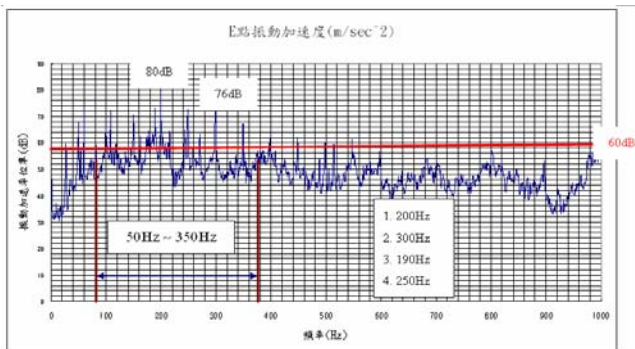


圖 5.18 改善前平台隔振器下方 E 位置振動量頻譜圖

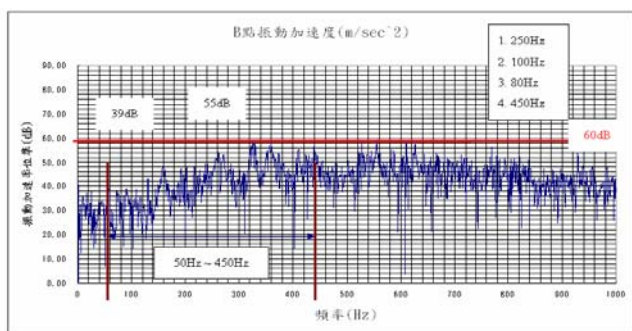


圖 5.19 改善後平台隔振器下方 B 位置振動量頻譜

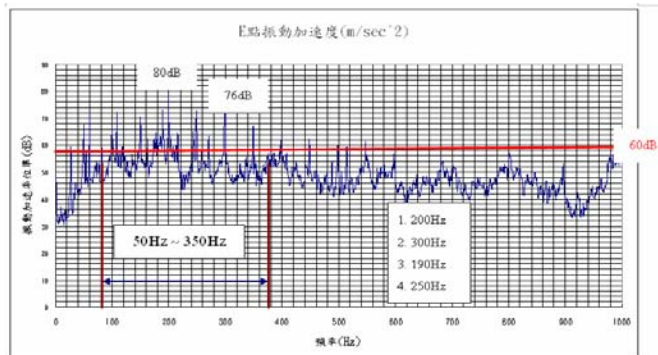


圖 5.20 改善前平台隔振器下方 E 位置振動量頻譜圖

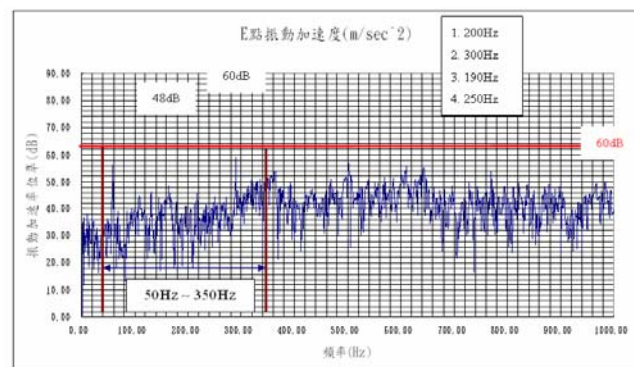


圖 5.21 改善後平台隔振器下方 E 位置振動量頻譜圖

(3) 機械平台隔振改善前後停車塔正上方二住戶地板振動值：量測結果如圖 5.22~圖 5.23。

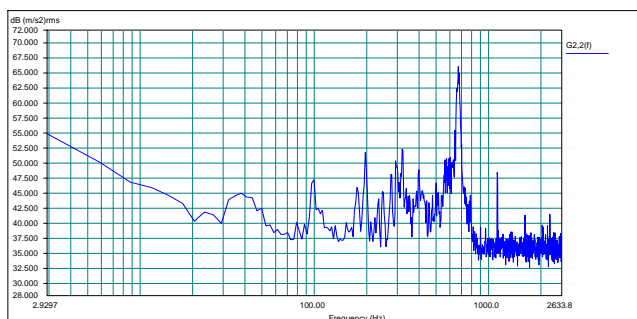


圖 5.22 隔振改善前停車塔上方二樓住戶於車台載車下降狀態下地板振動分貝值

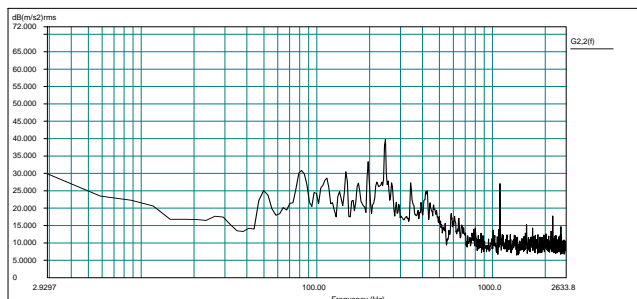


圖 5.23 隔振改善後停車塔上方二樓住戶車台載車下降狀態下地板振動分貝值



(4) 機械平台隔振改善後停車塔正上方二樓住戶噪音頻譜及總音量值：改善後噪音達到預期標準 50dB 以下，其改善前後之音量如表 5.1 所示，而改善前後之總音量與 NC 值比較如表 5.2 所示。

表 5.1 停車塔正上方二樓處總均能音壓

車台負載情況	空載	滿載	背景
改善前音量 (dB)	48.2	52.2	44.3
改善後音量 (dB)	44.8	45.1	42.4
噪音值降低量 (dB)	3.4	7.1	

表 5.2 停車塔正上方二樓處 NC 值(符合預期標準 NC 45 以下)

車台負載情況	空載	滿載	背景
改善前音量 (dB)	52	56	43
改善後音量 (dB)	38	40	33
NC 值降低量 (dB)	14	16	

(5) 振動改善：二樓板及牆面振動改善前後振動加速度各頻率隔振量在 17 至 40 dB，如表 5.3；馬達平台振動於改善後對主要振動頻率隔振效果提升 16 至 36 dB，如表 5.4 所示。

表 5.3 停車塔正上方二樓住戶改善前後樓板及牆面振動加速度分貝數

振動量測位置	二樓樓板				二樓牆面			
	1	2	3	4	1	2	3	4
成分振波排序	1	2	3	4	1	2	3	4
成分振波頻率(Hz)	670	319	196	292	1174	196	50	100
改善前振動加速度位準(dB)	65.9	52.3	51.7	50.3	53.7	51.7	50	46.7
改善後振動加速度位準(dB)	22	22.3	29.6	24	26	34	29	26
振動降低量(dB)	43.9	30	22.1	26.3	27.7	17.7	21	20.7

表 5.4 平台振動於改善前後之隔振增加分貝數

測點位置	B點位置		E點位置	
	1	2	1	2
成分振波排序	1	2	1	2
成分振波頻率(Hz)	250	100	200	300
改善前振動加速度位準(dB)	80	75	80	76
改善後振動加速度位準(dB)	55	39	48	60
振動降低量(dB)	25	36	32	16

## 6. 結論與建議

- 文中探討高層大樓SC輕量化結構所面臨的結構音傳遞問題來源，並提供解決振動噪音問題之診斷與改善方式。
- 類比試驗可提供隔振設計單位未來於相關機構安裝前之參考，可避免完工後機械運作結構音等後續複雜的改善工程經費支出。
- 本文歸納出停車塔振動噪音問題診斷與改善方法，可由振動源驅動馬達平台振動量頻譜以及受影響住戶內的聲壓頻譜、樓板牆面振動量頻譜量測結果，分別依改善優先順序列表，再依此表研判改善方案，以決定由改善振動源隔振器或由住戶臥房改善裝潢材料來解決居家噪音振動問題。
- 傳遞動性應用於解決停車塔機構振動傳遞至住宅臥室的問題，改善前後音壓比較結果顯示，主要振動頻率及該頻率處噪音分貝數，兩者在改善前後效果均可降低約 10 dB 以上。

## 7. 參考文獻

- B.J. Dobson, R.J.Pinnington and R.G. White, Vibrational Power Transmission Analysis of Machinery Installations in ships with the Objective of Noise Reduction, ISVR Technical Report No.216, University of Southampton,1993.
- Wei-Hui Wang, Modeling Machine Induced Noise and Vibration in a Ship Structure, PhD dissertation, University of Plymouth, UK,2001.