

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生活與應用科學(二)科

佳作

032916

地牛翻身全台震醒－結構的共振現象與減震對策

學校名稱：嘉義市立北興國民中學

作者： 國二 羅晨晏 國二 蘇容萱 國二 黃千朔	指導老師： 李彩綾
---	------------------

關鍵詞：共振、消能、減震

摘要

為了消耗地震時帶給建築物的巨大能量、並提升結構物抗震能力，解決地震帶來的困擾，因此我們探討建築物的共振現象、與裝設阻尼器及配置方式對減震效能之影響。本研究利用加速規-Palert、加速度測量 APP-AccelView、與振動平台等工具，量測自製之建築結構模型的受震反應與分析其共振現象，再加裝消能型阻尼器，並找出最有效之阻尼器配置方式。

本研究發現：(1) 振動平台的實測震度(gal)較理論值大，推測應是振動平台之滑軌平整度不完美所造成；(2)使用針筒作為消能型阻尼器安裝於樓層之間，減震效果顯著，而平均分布在結構立面的配置方式優於集中安排在低樓層，集中安排在高樓層者效果最差。因此，本研究建議採平均分布方式，可達最佳耐震效果。

壹、研究動機

嘉義是常發生地震的地方，地區內主要的活動斷層，已知的有梅山斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層與觸口斷層等四條，我們居住的嘉義市區鄰近斷層帶，所以也是地震頻繁，每次地震發生時，房屋也會產生搖動與巨響，於是我們想研究地震造成房屋搖動相關的主題。

我們查詢之前的相關研究，發現做地震研究的，沒人做過共振的題目，因為使用的振動裝置，都是單頻的，不能變頻。而學校科技中心在去年製作了一台由高師大王仁俊教授開發的振動平台，是可控制馬達轉速改變頻率的，但是王教授只提供馬達轉速與最大加速度理論值的對照表，沒有頻率。

共振很可怕，在工程學中，共振是結構工程師必須考慮的問題。李政寬等(2009)指出共振現象是一個外力作用在某個物體上時，如果外力的頻率與物體本身的自然振動頻率相同，將會使物體的振動量愈來愈大。地震力也可能與樓房形成「共振」，只要地震頻率與結構一致，就可能形成「共振現象」，使樓房激烈振動，擺動愈來愈大，結構承受不住而倒塌，將對人類生命與財產造成極大的損失，因此以共振做為研究主題。

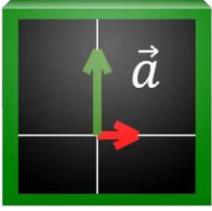
貳、研究目的

我們想要先校定出振動平台的頻率與地表加速度，才可以量測出結構本身的共振頻率，再加裝減震裝置，讓阻尼器可以在共振時阻抗結構的加速運動，消散震波傳給結構的能量，降低振幅，讓結構安然渡過共振頻率。故本研究的目的如下：

- 一、分析現有振動平台輸出之頻率及地表加速度。
- 二、探討自製縮尺建築結構模型之共振頻率。
- 三、探討消能阻尼器最佳配置方式。

參、研究設備及器材

一、模擬地震及檢測之設備

		
圖 1 振動平台 (模擬地震)	圖 2 加速規-Palert (波形檢測設備，檢測頻率 範圍 0.02~50Hz)	圖 3 加速度測量 APP- AccelView (採樣率：1 秒 10 點)

二、模擬建築物模型製作之材料及用具

(一)材料：

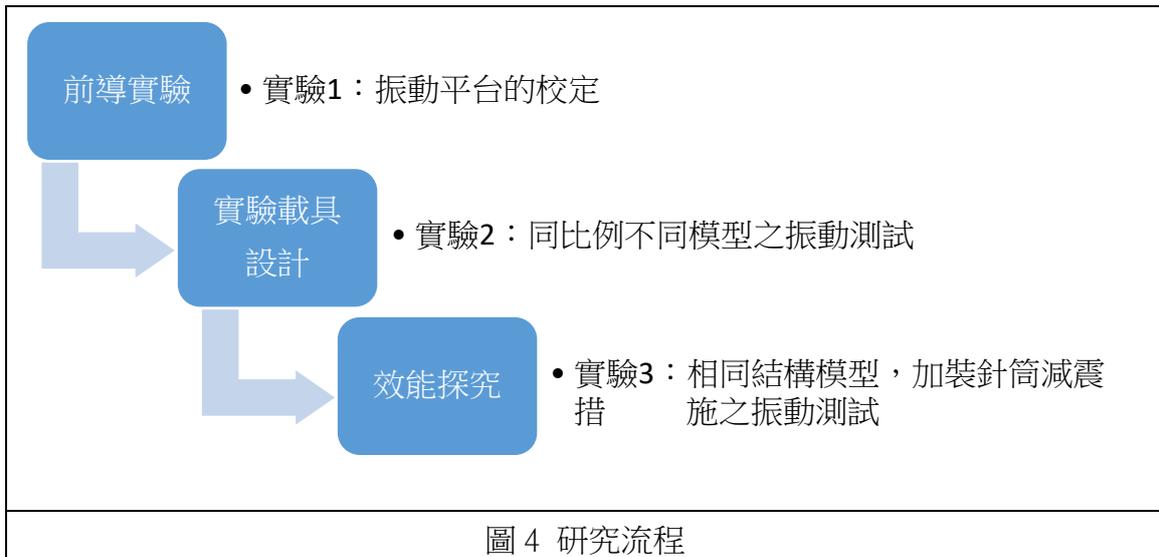
- 1、實驗 2 梁、柱材料：4*6mm 木條
- 2、實驗 3 立柱：3*5mm 木條
- 3、實驗 3 樓板：3mm 段木板
- 4、模型底座：松木板
- 5、實驗 2 載重：50g 砝碼
- 6、實驗 3 載重：3/4” 螺栓及螺帽(一組 177 公克)
- 7、電工膠帶及透明膠帶(固定砝碼、手機)
- 8、7mm 熱熔膠條
- 9、消能減震裝置：5ml 針筒（一支 5.95 公克）

(二)工具及機具：

- 1、鑽孔機
- 2、熱熔膠槍
- 3、線鋸機
- 4、快速夾
- 5、止滑墊
- 6、雷射切割機
- 7、熱風槍

肆、研究過程或方法

一、研究流程圖，如下圖 4 所示：



二、實驗 1：振動平台之頻率與加速度值校定

(一)研究設計：

控制變因：	振動平台(空台)安裝穩固
操縱變因：	馬達轉速
應變變因：	振動平台頻率與加速度值

(二)研究步驟

把加速規固定在振動平台上(圖 5)，使用轉速控制盒調整馬達轉速(圖 6)，分別記錄不同馬達轉速下，振動平台約 30 秒的振動情形(圖 9)，再利用電腦程式分析不同馬達轉速的振動資料，繪製歷時圖與頻譜圖(圖 10)。找出振動平台的最大反應加速度及振動平台的頻率範圍。



圖 5 將加速規固定在振動平台上，振動平台也要使用夾具與桌面固定。



圖 6 使用轉速控制盒調整馬達轉速。

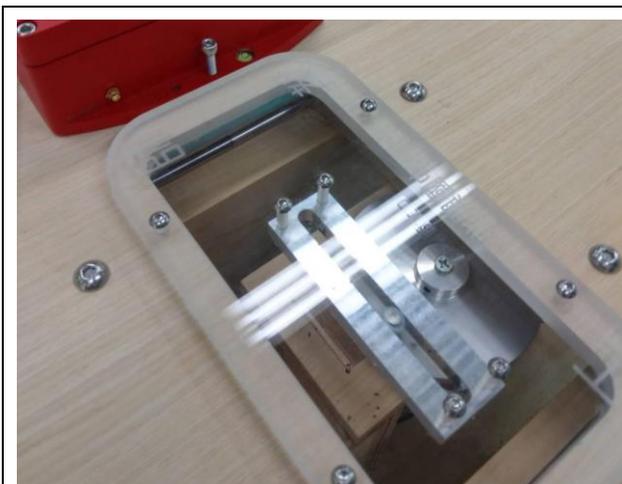


圖 7 振動平台的搖擺機構_蘇格蘭軛

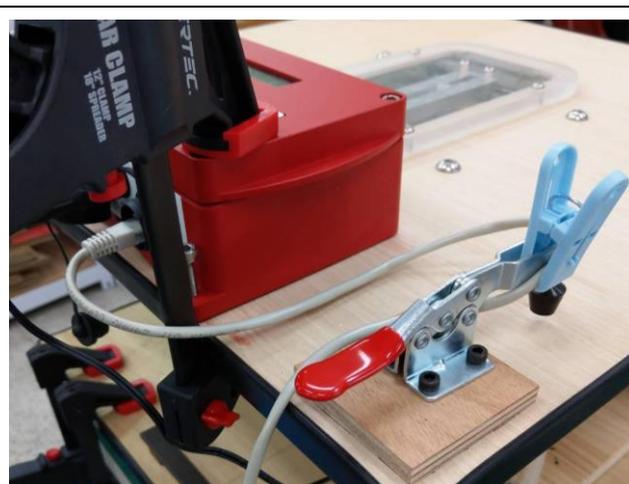


圖 8 加速規傳送訊號的電話線以夾子固定



圖 9 分別記錄約 30 秒不同馬達轉速的振動情形。

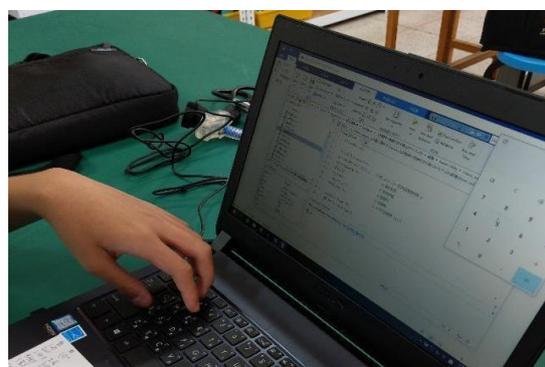


圖 10 利用電腦程式分析，導出歷時圖與頻譜圖。

(三)振動平台最大加速度理論值推導

根據王仁俊老師(2020)振動平台研習簡報中的推估，在馬達轉速 540rpm 時，振動平台剛好 1 秒來回一次，也就是週期 T 為 1 秒。其中使馬達圓周運動改變為往復運動的機構，蘇格蘭軛的作動方式，會使平台位移與時間的關係如下(圖 11) 所示，呈簡諧運動形式。

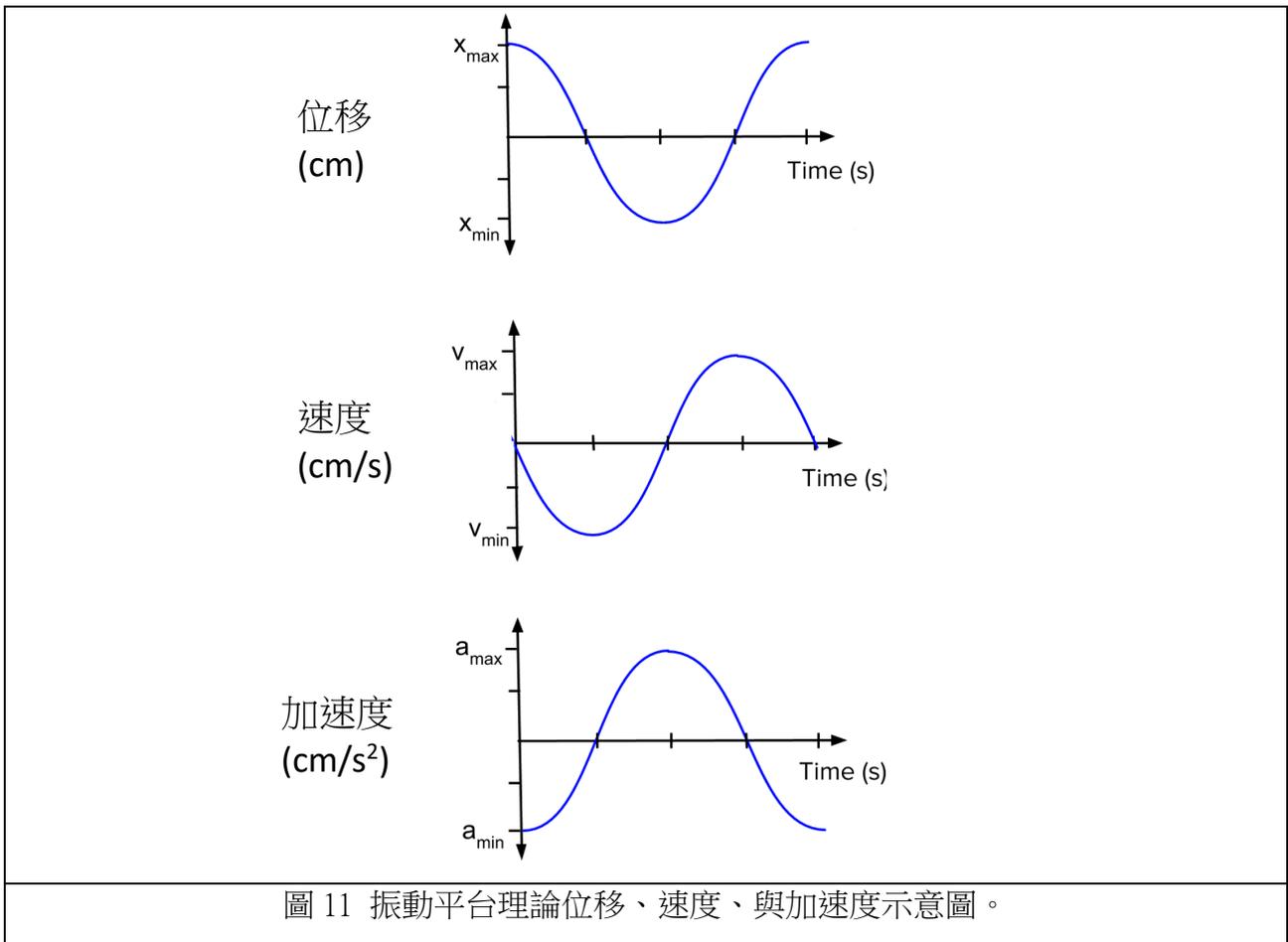


圖 11 振動平台理論位移、速度、與加速度示意圖。

假設完美狀況下，振動平台之最大往復位移為 x_{max} (如圖 11)，振動角頻率為 ω (單位： rad/s)，則振動平台往復的位移可以表示為：

$$x(t) = x_{max} \sin\omega t$$

振動平台的往復速度可表示為：

$$v(t) = x_{max}\omega \cos\omega t = V_{max} \cos\omega t$$

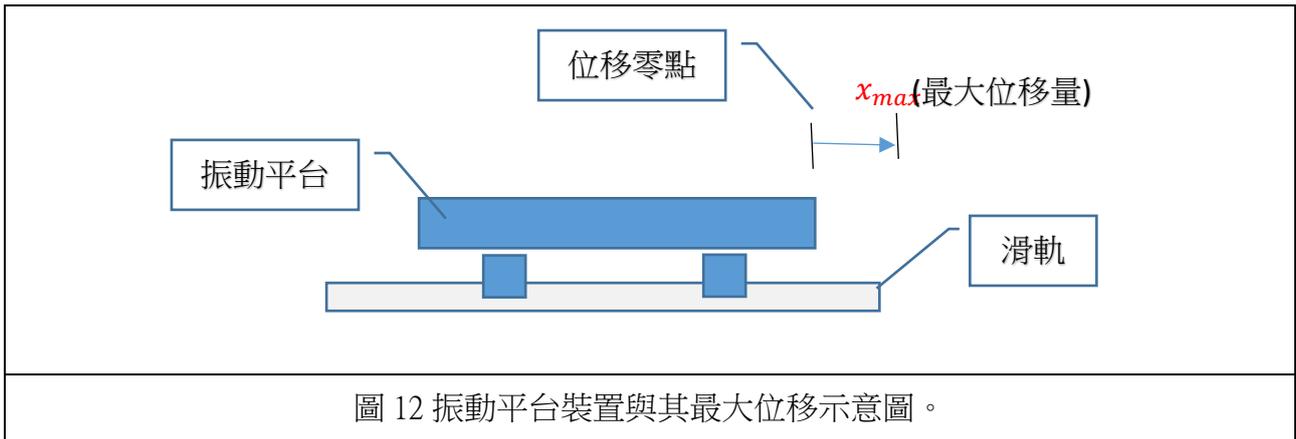
振動平台的往復加速度可表示為：

$$a(t) = -x_{max}\omega^2 \sin\omega t = -a_{max} \sin\omega t$$

故在振動角頻率為 ω 的情況下，振動平台的最大理論加速度值為：

$$a_{max} = x_{max}\omega^2$$

其中，本研究振動平台之最大往復位移 x_{max} 為 5cm(如圖 12)。在馬達轉速 540rpm 時，平台剛好 1 秒來回一次(1 Hz)，或($2\pi rad/s$)。



以此推導出振動平台最大加速度之關係圖，如下(表一與表二)所示：

表一：震度與振動平台馬達轉速及最大加速度理論值對照表

震度	對應 rpm	gal 值
3 級	109	8gal
4 級	192	25gal
5 級(弱)	343	80gal
5 級(強)	454	140gal
6 級(弱)	607	250gal
6 級(強)	805	440gal
7 級	1086	800gal

表二：振動平台馬達轉速及最大加速度理論值對照表

gal 值	對應 rpm
8gal	109
25gal	192
80gal	343
250gal	607
400gal	768
500gal	859

600gal	941
700gal	1016
800gal	1086
900gal	1152
1000gal	1214
1100gal	1274
1200gal	1330
1300gal	1385
1400gal	1437
1500gal	1487
1600gal	1536
1700gal	1583

三、實驗 2：同比例不同模型之振動測試

(一)研究設計：

控制變因：	材質、載重、馬達轉速。
操縱變因：	模型尺寸(長、寬、高)。
應變變因：	模型結構共振頻率。

(二)研究步驟

1、模型製作過程

王紫楹等(2015)的研究使用鍵結式積木來構築實驗模型，我們仿效其實驗模型形式，使用 4*6mm 的木條，以長:寬:高=1:1:9 的比例，分別製作 A、B、C 三座模型，進行振動測試。

模型 A：長寬皆為 50mm，高度 450mm，共 5 層。

模型 B：長寬皆為 70mm，高度 630mm，共 7 層。

模型 C：長寬皆為 90mm，高度 810mm，共 9 層。

先從木條裁切開始(圖 13)，再組合成建築結構模型(圖 14)，最後再次確認各個黏著點是否牢固(圖 15)，在頂樓加上觀察指標(圖 16)。依序完成結構模型 A、B、C 的製作(圖 17)，固定在振動平台上的方式如(圖 18)。製作過程如下：



圖 13 測量木條長度並裁切木條



圖 14 架設結構柱、梁，測量距離。



圖 15 準確黏著並穩固模型



圖 16 完成結構模型後，再頂樓加上觀察指標。



圖 17 按照設定尺寸(5,6,7)，完成模型 A、B、C。

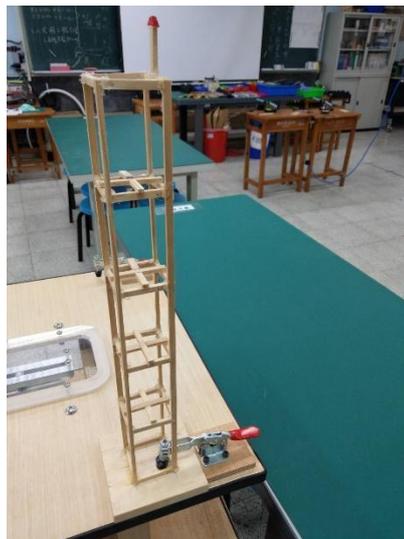


圖 18 將結構用快速夾固定在振動平台上並確認其穩固。

2、模型振動測試

每層加裝一顆 50g 砝碼做為載重，並以快速夾固定結構於振動平台上(圖 19)，使用智高積木組裝架設置量尺置放架(圖 20)，再以手機對準量測指標錄影，啟動馬達，平台振動後開始觀察(圖 21)，並錄製不同轉速的震動情形(圖 22)。

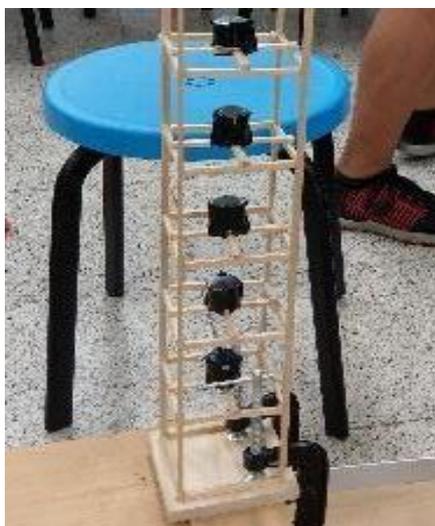


圖 19 每層加裝 50g 載重，並固定結構於平台上。

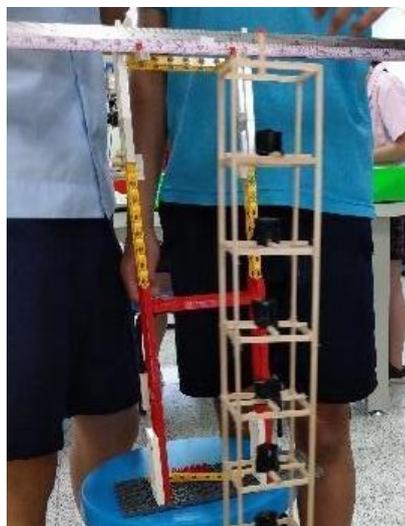


圖 20 用智高積木架設置量尺置放架，再以手機對準量測指標錄影。



圖 21 啟動馬達，平台振動後開始觀察。



圖 22 錄製不同轉速的震動情形。

(1)模型 A 振動測試

從 100rpm 開始搖一直搖到 1500rpm 左右（一顆砝碼 50g），但是頂樓振幅都沒有明顯的改變，之後每層各加裝了第二顆砝碼(50g)，再開始搖，還是沒有明顯改變，最後每層加裝到三顆砝碼。頂樓振幅還是沒有明顯改變。

(2)模型 B 振動測試

從 100rpm 開始搖一直搖到 1500rpm 左右（一顆砝碼 50g），有稍微的搖動，但因頂樓振幅很小不容易觀察，所以每層加裝第二顆砝碼，但還是不明顯，所以我們把每層加裝到二顆砝碼，加裝後擺動的幅度就變得比較明顯了。

(3)模型 C 振動測試

從 100rpm 搖到 1500rpm 左右（一顆砝碼 50g），有些微搖晃，再於每層加裝第二顆砝碼，到 1000rpm 有明顯的搖晃，產生共振現象，接近結構的共振頻率，即停止實驗。

表三：A、B、C 模型振動測試結果比較

	馬達轉速區間 (rpm)	對應頻率 (Hz)	是否接近共振頻率
模型 A(5*5*45m m)	100-1500	0.2~4.11	否（沒有共振現象）
模型 B(7*7*63m m)	100-1500	0.2~4.11	否（沒有共振現象）
模型 C(9*9*81m m)	100-1000	0.2~2.0	是（2.0 時有振幅放大現象）

四、實驗 3：相同結構模型，加裝針筒減震消能措施之振動測試

(一)研究設計

控制變因：	結構尺寸及材料、重量、載重、馬達轉速、5ml 針筒(10 支)
操縱變因：	加裝針筒的位置
應變變因：	模型結構共振頻率

(二)研究步驟

1、原型試體製作

根據實驗 2 結果，使用模型 C 的尺寸來做為實驗操作的原型試體，原想考究根據國家地震中心舉行的抗震盃(IDEERS) 的模型載重配置，但因我們已買五金行最大尺寸的螺栓與螺帽(一組共重 177 公克)，故載重被限制，因此我們選擇弱化建築結構，把原本的 4*6mm 的木條弱化為粗細為 3*5mm 的木條，來弱化結構本身的強度，讓結構更易達到共振，以利實驗觀察。共製作 2 座模型，分別命名為模型 C-1(圖 23)與模型 C-2(圖 24)，本身重量皆控制為 313 公克，製作步驟與實驗 2 雷同，不再贅述。但是層板(圖 25)改為使用雷射切割機製作，中央開圓孔，以利加裝載重(圖 25)。



圖 23 模型原型試體



圖 24 加裝載重及指標



圖 25 雷射層板

2、原型試體 C-1 與 C-2 振動測試

在載重方面，我們原想參考國加地震中心抗震盃的配比，一般大樓縮尺模型載重 1 平方公分 10 克，再依模型 C 的尺寸 81 平方公分換算，因此每層樓需加裝 810 克重的載重，但是我們因載重材料取得的限制，所以最後以我們在五金行所買得到最大尺寸的螺絲與螺帽，在模型 C-1 與 C-2 的 1~9 樓板上皆加裝一組，單組 177 公克，共裝設九組做為載重(1593 公克)，加上結構本身的重量 313 公克，所以測試時的結構總重量皆控制為 1906 公克，再以快速夾固定在振動平台上，進行振動測試實驗，找出模型 C-1 與 C-2 本身的共振頻率。

3、可行的減震方式探討

一般而言，提高建築耐震能力之方式主要可分為兩大類：一是消能減震、二是隔震。消能是利用可變形，或可破壞之斜撐桿件或可復原之阻尼器(damper)，是一種利用阻尼特性來吸收或抑制衝量，藉以減緩力學振動及消耗震波之能量，以達到提高建築耐震能力之效果。隔震則是利用阻尼器拉長建築物振動周期，以降低地震力對建築物的衝擊。將地震能量由隔震器來吸收。也會明顯的降低搖擺程度，因而降低構造及設備的破壞。

(1)消能減震：

我們希望地震傳入結構物的能量，能透過阻尼器消散能量的方式來消滅，即讓大部分的地震能量傳至額外加裝的消能阻尼器中，以確保結構物在設計地震中能保持彈性行為，來降低結構物在地震力作用下的反應，以避免結構構材的損壞，提高結構物的防震能力，這即是結構被動控制消能的基本原則。

學者翁駿民指出消能減震乃以增加結構物之阻尼為目的，其可針對結構動力反應(加速度、速度、位移)中之一項或多項加以控制，這種透過增加額外阻尼以降低結構動力反應之方法即為消能結構設計之主要目的。

消能減震系統的種類有：(a)位移相依型(僅適用於抗震)金屬降伏阻尼器、磨擦阻尼器(b)速度相依型(兼具抗震及抗風用)黏彈式阻尼器、黏滯式阻尼器(c)動態減振器(兼具抗震及抗風用)調諧質量阻尼器、液體阻尼器。

(2)隔震：

隔震器是裝置在基礎(或下層結構體)與上部結構中間的一種連結裝置，通常位於柱之下端。晏京機構(2019)指出建築用的隔震器通常為圓形，也有方形，大致上可分為兩大類：一類是單擺或雙擺隔震器，這類隔震器是利用擺垂原理將地震的動能轉化為位能，再慢慢消散

掉這些能量將建築物回歸原來位置。這類隔震器材質為鋼材，磨差面鍍鐵氟龍。因本身之間上下構造沒有連結，不能抵抗向上之拉力，故適用於高寬比較小之建築。

最後，我們選擇使用消能減震，並想到物體受力會產生形變或位移，而針筒中有一個活塞，要用力才能推動活塞，因此想到若將空針筒架設在結構側面斜對角邊上，空針筒也可以做為結構斜撐，將結構形狀變成更穩定的三角形，在結構受力產生形變時還能將力傳送來推動活塞，利用活塞與筒壁的摩擦，可以達到消耗能量的效果。其中 5ml 的針筒(5.95 公克)長度最適合用來安裝在側立面對角，因為端點用熱熔膠固定後，活塞會在比較中央的位置，左右都還有可移動的範圍，在受力時尚可伸長縮短。

4、加裝減震裝置震動測試

(1)一層樓加裝 177 公克的載重，共九組(1593 公克)，加上結構本身的重量 313 公克，加裝 10 支 5ml 針筒的重量為 59.5 公克，故結構總重皆為 1965.9 公克。

(2)在模型 C-1 的 1~5 層樓振動方向兩側皆加裝一根 5ml 的針筒(圖 26)，同樣在每層加裝一組螺栓與螺帽後，再以快速夾固定在振動平台上，並加裝與質量塊等重之手機，使用軟體 APP-AccelView 來測量(圖 27)，進行震動測試，實驗觀察模型 C-1 的共振頻率。

(3)在模型 C-2 的 5~9 層樓振動方向兩側皆加裝一根 5ml 的針筒(圖 28)，同樣在每層加裝一組螺栓與螺帽後，再以快速夾固定在振動平台上(圖 29)，進行震動測試，實驗觀察模型 C-2 的共振頻率。

(4)在模型 C-2 的 1、3、5、7、9 層樓振動方向兩側皆加裝一根 5ml 的針筒(圖 30)，同樣在每層加裝一組螺栓與螺帽後，再以快速夾固定在振動平台上(圖 31)，進行震動測試，實驗觀察模型 C-1 的共振頻率。

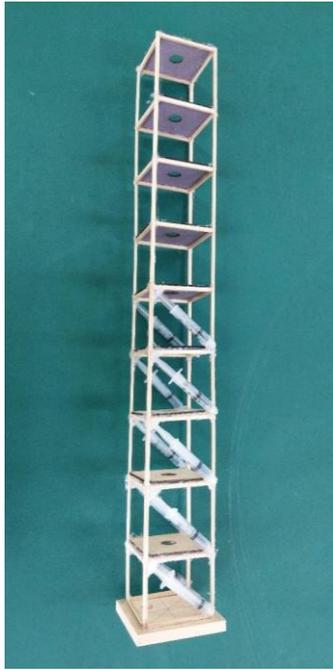


圖 26，模型 C-1，1~5 層樓加裝針筒。



圖 27，實驗配置情形。



圖 28 模型 C-2，5~9 層樓加裝針筒。



圖 29 實驗配置情形。



圖 30 模型 C-2，1、3、5、7、9 層樓加裝針筒。



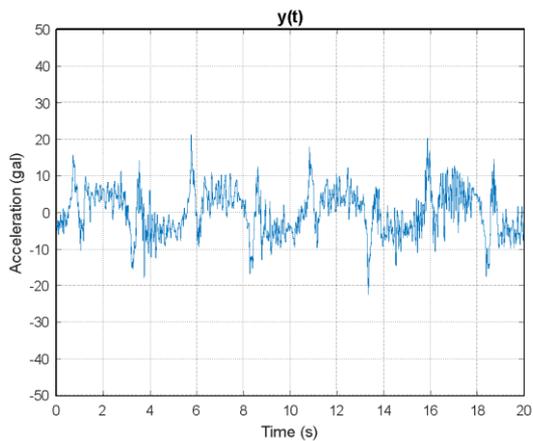
圖 31 實驗配置情形

伍、研究結果

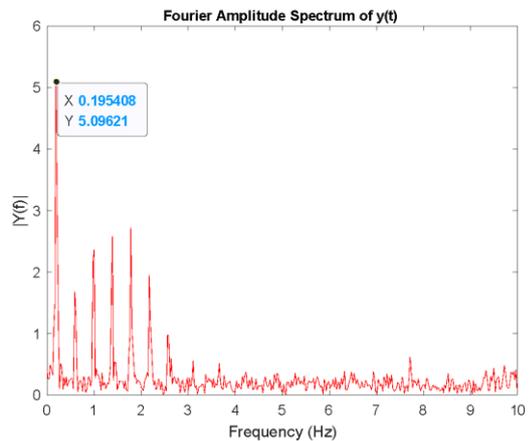
一、實驗 1：振動平台的校定結果

將加速規(alert)測得的不同馬達轉速平台振動實驗數據加以分析，得到以下的實驗圖組，其中圖 a 為振動台加速度歷時圖，圖 b 則為對應之頻譜圖，由歷時圖可知轉速愈高，加速度愈大，由頻譜圖可知不同馬達轉速之下，皆有一個對應之振動頻率，並標示於圖上。從最低轉速 90rpm 開始，再來為 100rpm，然後每次增加轉速 100rpm，都會產生一組實驗數據，共有 16 個圖組，礙於篇幅限制，取 4 個圖組代表，如下(圖 32~35)所示。

但是除了該主要振動頻率之外，還有一些較低的反應頻率出現在頻譜圖上。

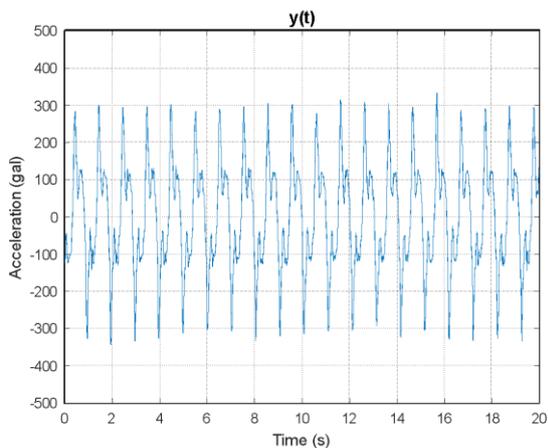


(a) 歷時圖

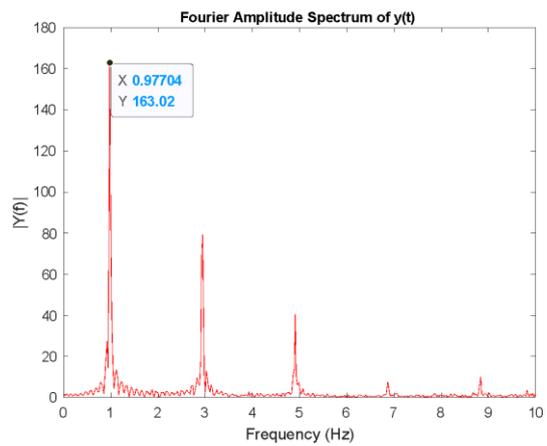


(b) 頻譜圖

圖 32 馬達轉速 100rpm

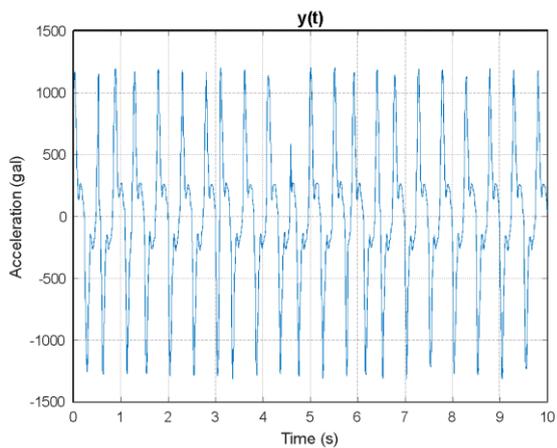


(a) 歷時圖

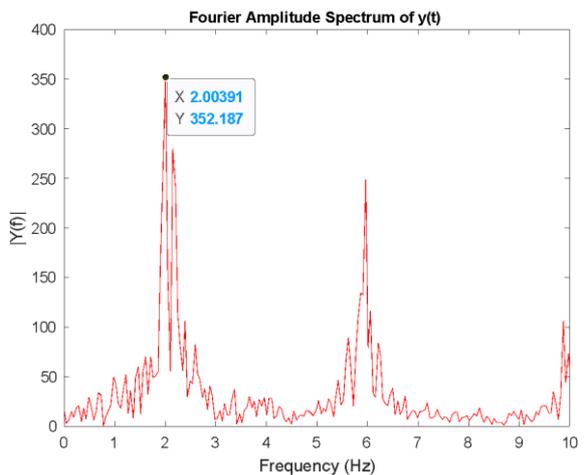


(b) 頻譜圖

圖 33 馬達轉速 500rpm



(a) 歷時圖



(b) 頻譜圖

圖 34 馬達轉速 1000rpm

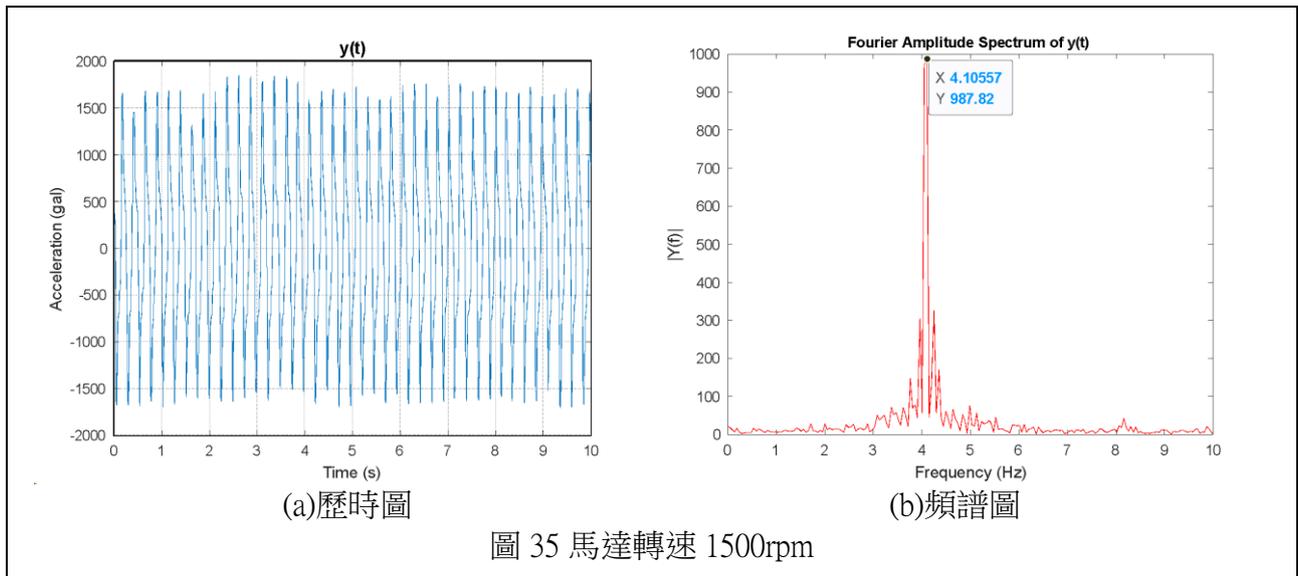


圖 35 馬達轉速 1500rpm

利用實驗所得全部 16 組的實驗數據，找出振動平台馬達轉速與振動頻率及最大加速度的關係，其中平台振動頻率，由頻譜圖的數據從小數點後第三位數字四捨五入到小數點後第二位數字；每次實驗時，平台最大加速度是由歷時圖之 10 次波峰取平均值而得，記作 (x_i) ，重覆五次實驗後，可得到 5 個樣本 $(N = 5)$ 。表二中之最大加速度值則為該 5 次實驗之平均值 (\bar{x}) ；標準差即由此五次實驗之最大加速度值計算，公式如下：

$$\text{標準差} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

由表二可知，所計算之標準差遠小於最大加速度值，證明實驗量測結果之穩定性與可信度高。對照中央氣象局定的震度等級，製成表四，如下所示：

表四：馬達轉速與振動平台頻率之關係																
馬達轉速(rpm)	90	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
平台振動頻率(Hz)	0.17	0.20	0.39	0.59	0.78	0.98	1.17	1.37	1.56	1.78	2.00	2.83	3.08	3.32	3.52	4.11
平台最大加速度(gal)	13.4	17.6	37.6	81.8	169.5	299.5	464.7	603.3	731.8	930.3	1176.5	1322.5	1555.5	1639.5	1684.7	1689.6
加速度標準差	±1.1	±1.8	±1.6	±4.2	±11.8	±2.8	±4.2	±3	±6.5	±3.5	±2.6	±9.6	±8.7	±25.8	±26.9	±41.5
相對震度	3	3	4	5弱	5強	6弱	6弱	6強	6強	7	7	7	7	7	7	7

二、實驗 2：同比例不同模型之振動測試結果

(一)、模型 A：馬達轉速從 100rpm 搖到 1500rpm，振動頻率從 0.2~4.11Hz，振動程度都有慢慢增加，但會達到一個穩態，頂樓振幅大約介於 7.6~11.7 公分之間，如表五所示。

平台振動 頻率(Hz) 振幅 (公分)	0.20	0.39	0.59	0.78	0.98	1.17	1.37	1.56	1.78	2.00	2.83	3.08	3.32	3.52	4.11
模型 A	7.6	7.9	7.9	8.4	8.1	8.6	8.4	8.9	9.1	9.1	9.4	9.9	10.9	11.4	11.7

(二)、模型 B：馬達轉速從 200rpm 搖到 1500rpm，振動頻率從 0.39~4.11Hz，振動程度都有慢慢增加，但會達到一個穩態，頂樓振幅大約介於 5.1~12.7 公分之間，如表六所示。

平台振動 頻率(Hz) 振幅 (公分)	0.39	0.59	0.78	0.98	1.17	1.37	1.56	1.78	2.00	2.83	3.08	3.32	3.52	4.11
模型 B	5.1	5.1	6.1	6.4	5.8	5.8	6.4	6.9	6.9	7.6	10.2	10.9	11.4	12.7

(三)、模型 C：馬達轉速從 100rpm 搖到 1000rpm，從振動頻率為 0.2~2.0 Hz 振動程度都有慢慢增加且會達到一個穩態，但馬達轉速到 1000rpm 時振動頻率為 2.0 Hz 不變,擺動幅度愈來愈大，從 15.7 公分放大到 19 公分以上，有共振現象產生，如表七所示。

平台振動 頻率(Hz) 振幅 (公分)	0.2	0.39	0.59	0.78	0.98	1.17	1.37	1.56	1.78	2.0
模型 C	4.6	4.8	5.1	5.6	6.4	7.9	8.9	12.2	13.7	15.7→17.8→19.0→>19.0

三、實驗 3：相同結構模型，加裝針筒減震措施之振動測試結果

(一)模型 C-1 模型裸測，振動測試結果：

模型 C-1 模型裸測，共振頻率測試結果，馬達轉速從 100rpm 搖到 800rpm，振動頻率從 0.2~1.56 Hz，轉速來到 800rpm 時，頂樓振幅在頻率 1.56Hz(800rpm)不變時卻有逐漸放大現象，如表八所示，對照其加速度歷時圖(圖 36~39)，推測其共振頻率約為 1.56Hz。

表八：平台振動頻率與模型 C-1(裸測)最大反應(位移)之關係								
平台振動 頻率(Hz) 振幅 (公分)	0.20	0.39	0.59	0.78	0.98	1.17	1.37	1.56
模型 C-1	3.8	6.6	9.9	11.7	13.0	14.0	16.8	17.5→19.3→20.6→>22.6

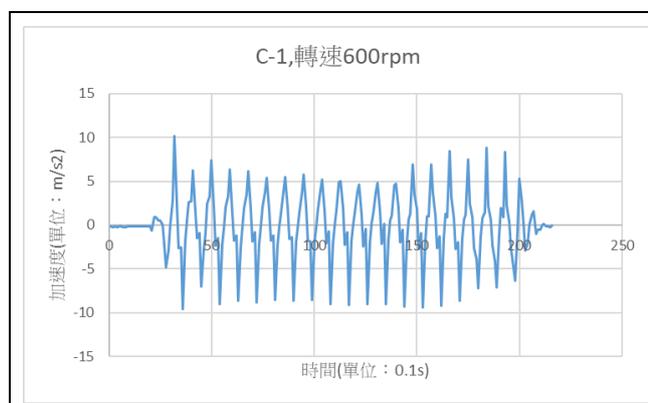


圖 36 頂樓加速度歷時圖(C-1, 600rpm)

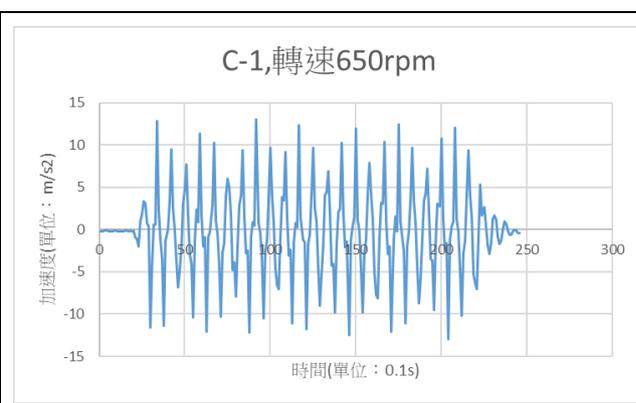


圖 37 頂樓加速度歷時圖(C-1, 650rpm)

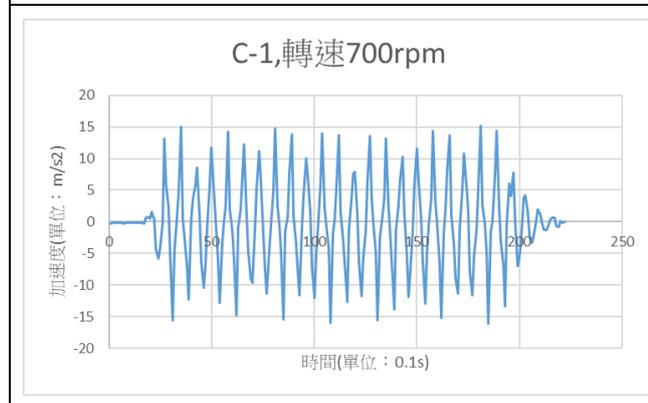


圖 38 頂樓加速度歷時圖(C-1, 700rpm)

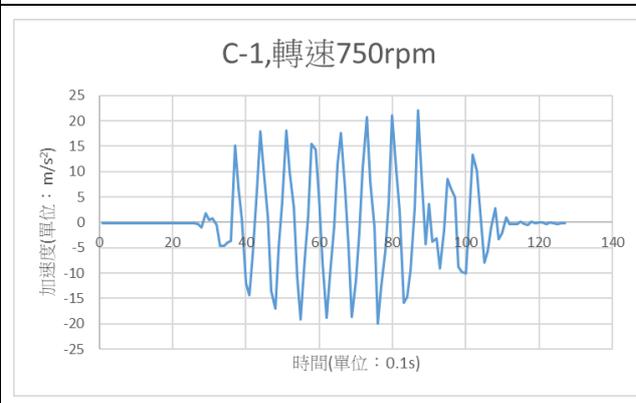


圖 39 頂樓加速度歷時圖(C-1, 750rpm)

(二)模型 C-1，1-5 層樓加裝減震針筒，振動測試結果：

模型 C-1，1-5 層樓加裝減震針筒共振頻率測試結果，馬達轉速從 300rpm 搖到 1050rpm，振動頻率從 0.59~2.95Hz，量尺目測結構頂樓振幅在轉速 2.95Hz(1050rpm)時，突然有急速放大現象，如表九所示，並造成結構物破壞(第六層三根柱子斷裂)如圖 40 所示。對照其加速度圖(圖 41)，推測其共振頻率約為 2.95Hz。

表九：平台振動頻率與模型 C-1(1-5 層樓加裝減震針筒)最大反應(位移)之關係								
平台振動 頻率(Hz) 振幅 (公分)	0.59	0.78	0.98	1.17	1.37	1.56	1.78	2.95
模型 C-1	6.4	7.4	8.9	9.7	10.4	11.7	13.2	14.0→16.0→17.3→18.3→19.5

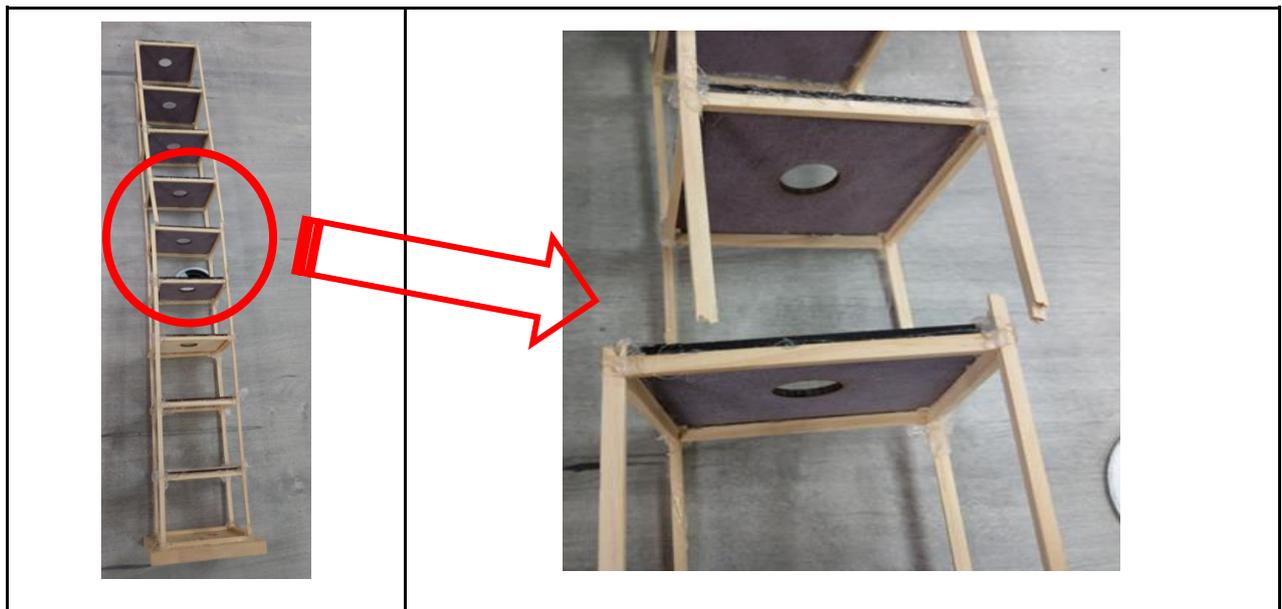


圖 40 結構第六層三根柱子斷裂情形，及細部放大圖

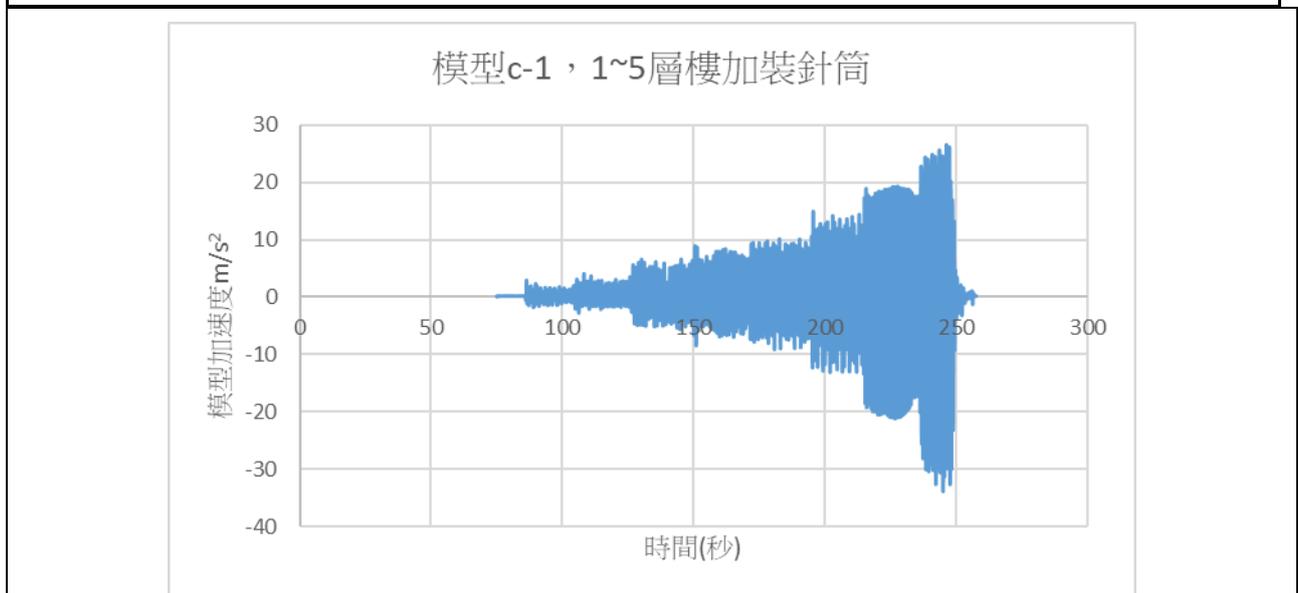


圖 41，模型 c-1，1~5 層樓加裝針筒，頂樓加速度與時間之關係圖。

(三)模型 C-2，模型裸測，共振頻率測試結果：

模型 C-2 模型裸測，共振頻率測試結果，馬達轉速從 100rpm 搖到 700rpm，振動頻率從 0.2~1.37Hz，量尺目測結構頂樓振幅在轉速 1.37Hz(700rpm)時有逐漸放大現象，如表十所示，對照其加速度圖(圖 42)，推測其共振頻率約為 1.37Hz。

平台振動 頻率(Hz) 振幅 (公分)	0.2	0.39	0.59	0.78	0.98	1.17	1.37
模型 C-2	4.8	6.1	8.9	10.4	12.4	14.2	16.0→17.5→19.3→19.6

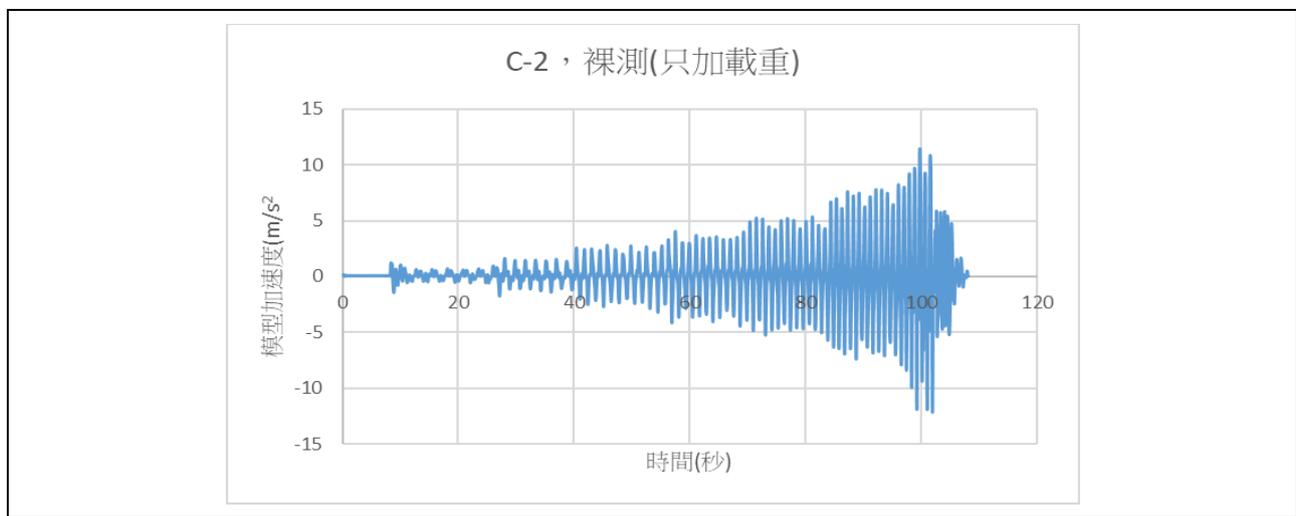


圖 42，C-2 模型裸測(只加載重)，頂樓加速度與時間之關係圖。

(四)模型 C-2，5~9 層樓加裝減震針筒，振動測試結果。

模型 C-2，5-9 層樓加裝減震針筒共振頻率測試結果，馬達轉速從 400rpm 搖到 800rpm，振動頻率從 0.78~1.56Hz，量尺目測結構頂樓振幅在轉速 1.56Hz(800rpm)，如表十一所示。對照其加速度歷時圖(圖 43~46)，推測其共振頻率約為 1.56Hz。

平台振動 頻率(Hz) 振幅 (公分)	0.78	0.98	1.17	1.37	1.46	1.56
模型 C-2	8.1	8.9	9.4	10.7	11.9	14.7→16.3→18.5→>24.4

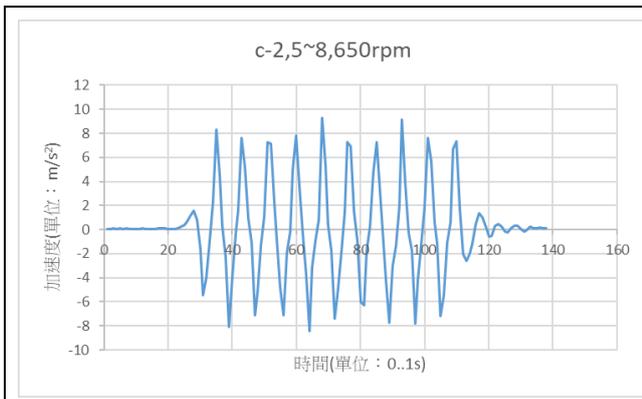


圖 43 頂樓加速度歷時圖(C-2, 650rpm)

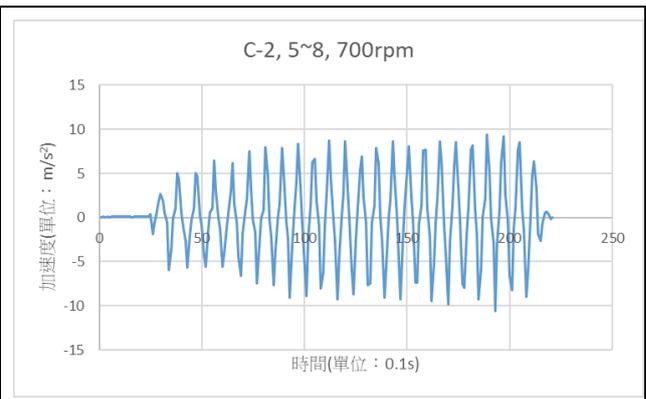


圖 44 頂樓加速度歷時圖(C-2, 700rpm)

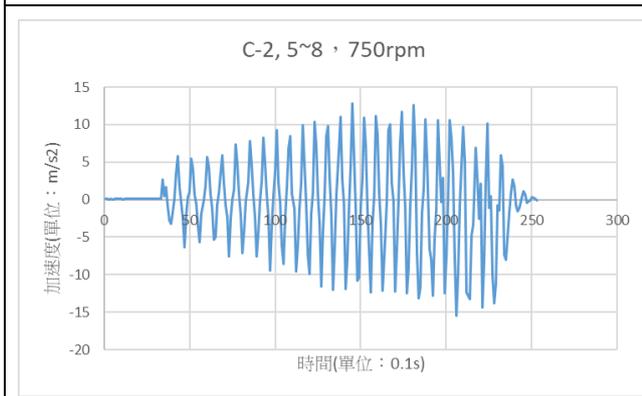


圖 45 頂樓加速度歷時圖(C-2, 750rpm)

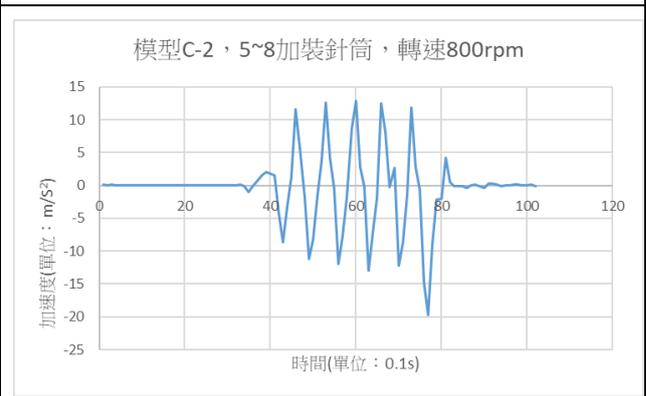


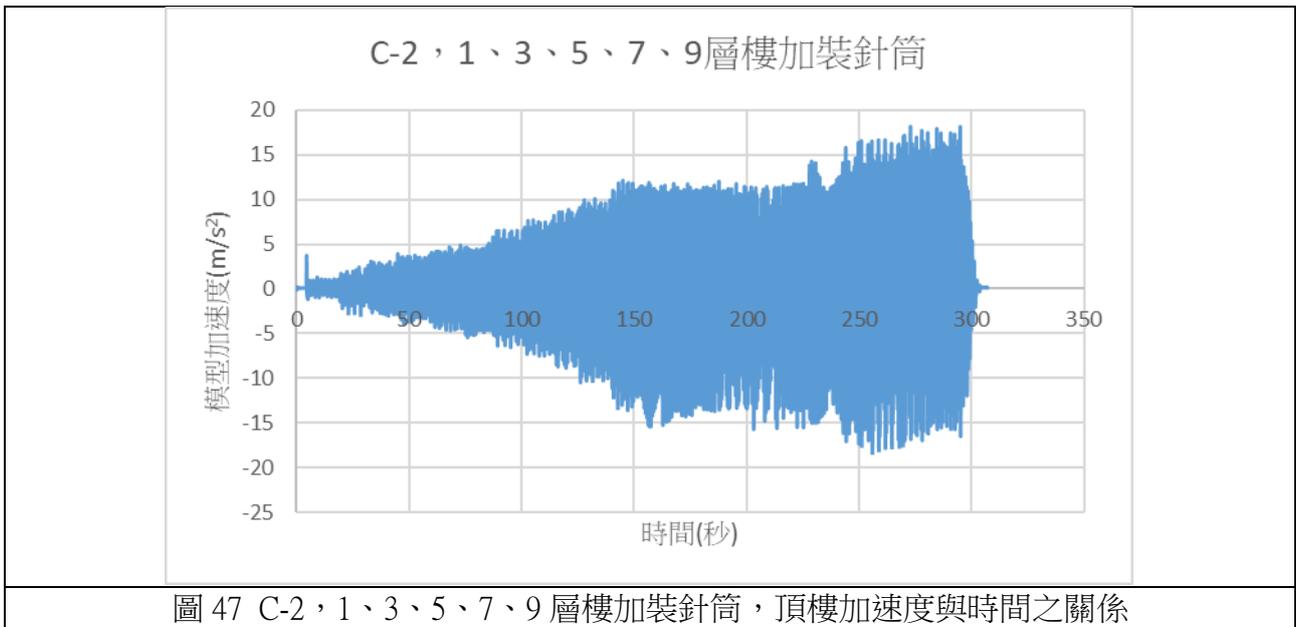
圖 46 頂樓加速度歷時圖(C-2, 800rpm)

(五)模型 C-2，1、3、5、7、9 層樓加裝減震針筒，振動測試結果。

模型 C-2，1、3、5、7、9 層樓加裝減震針筒共振頻率測試結果，馬達轉速從 300rpm 搖到 1500rpm，振動頻率從 0.59~4.11Hz，量尺目測結構振幅在轉速 1.78Hz(900rpm)時最大，如表十二所示，對照其加速度圖(圖 47)，推測其共振頻率約為 1.78Hz。

表十二：平台振動頻率與模型 C-2(1、3、5、7、9)層樓加裝減震針筒)最大反應(位移)之關係

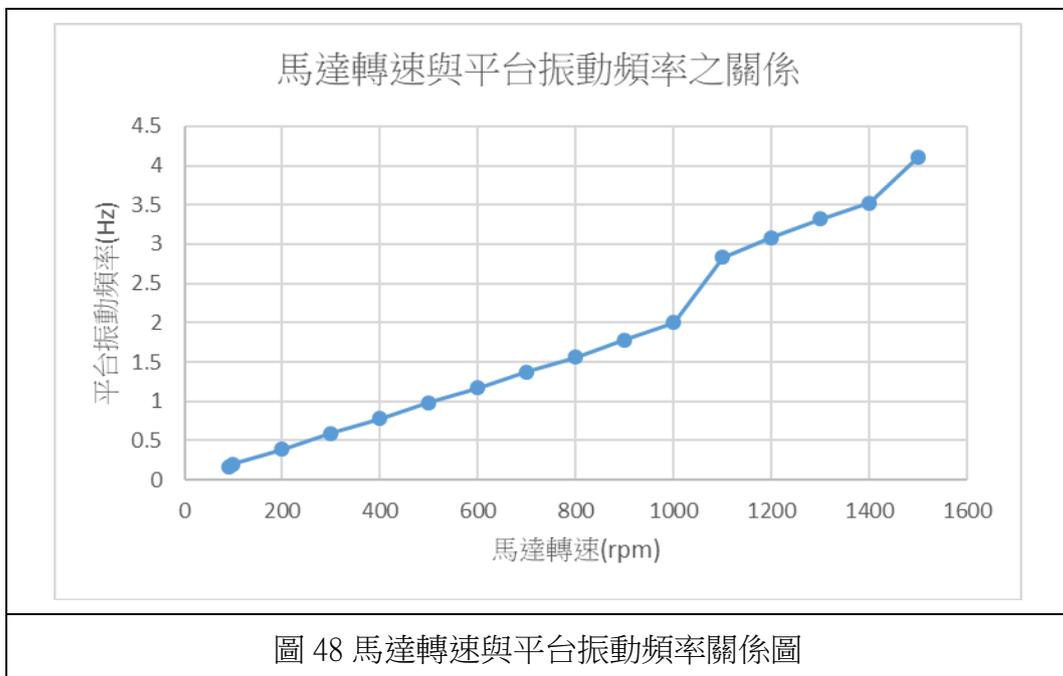
平台振動 頻率(Hz)	0.59	0.78	0.88	0.98	1.07	1.17	1.27	1.37	1.46	1.56	1.67	1.78	1.89	2.00	2.41	2.83	2.95	3.08	3.20	3.32	3.52	4.11
振幅 (公分)	5.1	5.8	6.4	7.1	7.4	8.1	8.4	9.1	9.9	10.9	12.2	13.5	12.2	11.4	10.4	9.9	9.7	9.1	8.9	8.6	8.1	6.9
模型 C-2	5.1	5.8	6.4	7.1	7.4	8.1	8.4	9.1	9.9	10.9	12.2	13.5	12.2	11.4	10.4	9.9	9.7	9.1	8.9	8.6	8.1	6.9



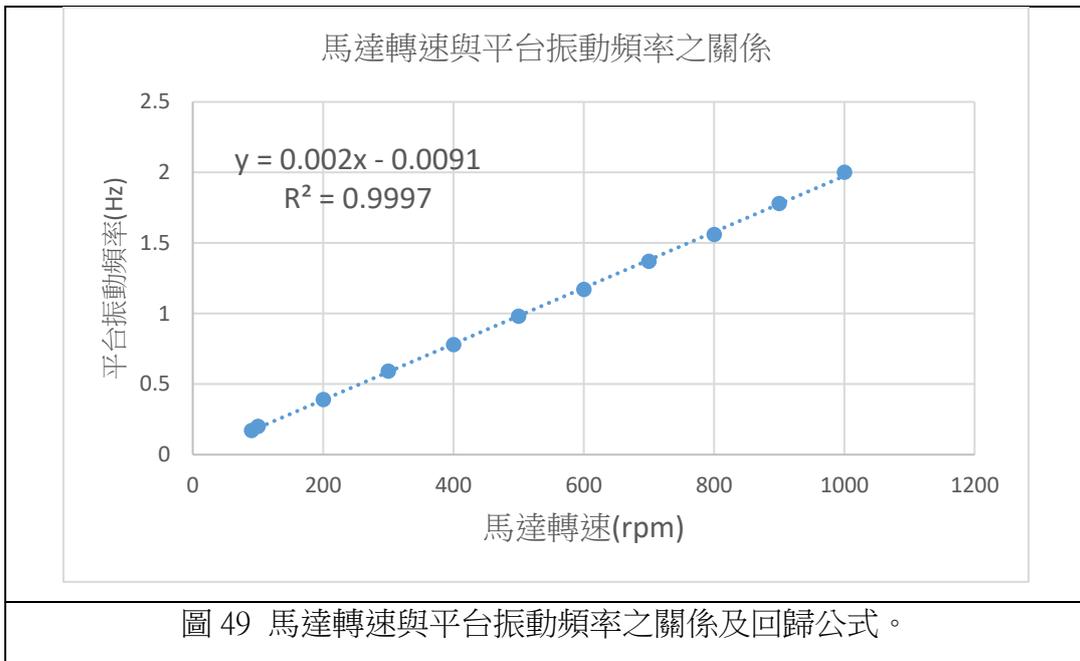
陸、討論(及分析)

一、實驗 1，振動平台校定結果討論

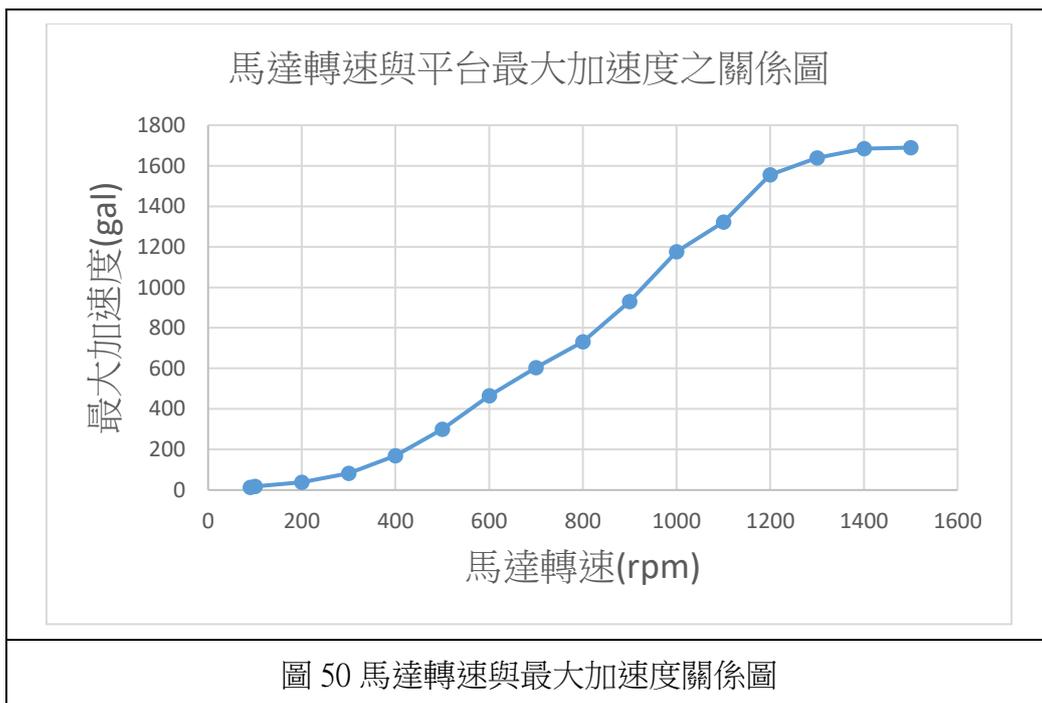
(一) 將表四中，馬達轉速與平台振動頻率數據繪圖，如下圖 48 所示。發現在馬達轉速 1000rpm 以內，振動頻率 2.0 Hz 以下為線性，但是 1000~1100rpm 時，突然有急速增加現象，推測應是固定不周全，使得振動平台底座與桌子產生滑動，故有不規則頻率放大現象產生。



使用圖 48 中馬達轉速 90~1000rpm 的數據(振動平台未與桌面產生滑動)，放到 Excel 中做擬合，得到以下的關係圖(圖 49)及回歸公式：



(二) 將表四中，馬達轉速與平台最大加速度數據繪圖，如下圖 50 所示。



使用圖 50 中馬達轉速 90~1200rpm 的數據，放到 Excel 中做擬合，得到以下的關係圖(圖 51)及回歸公式：

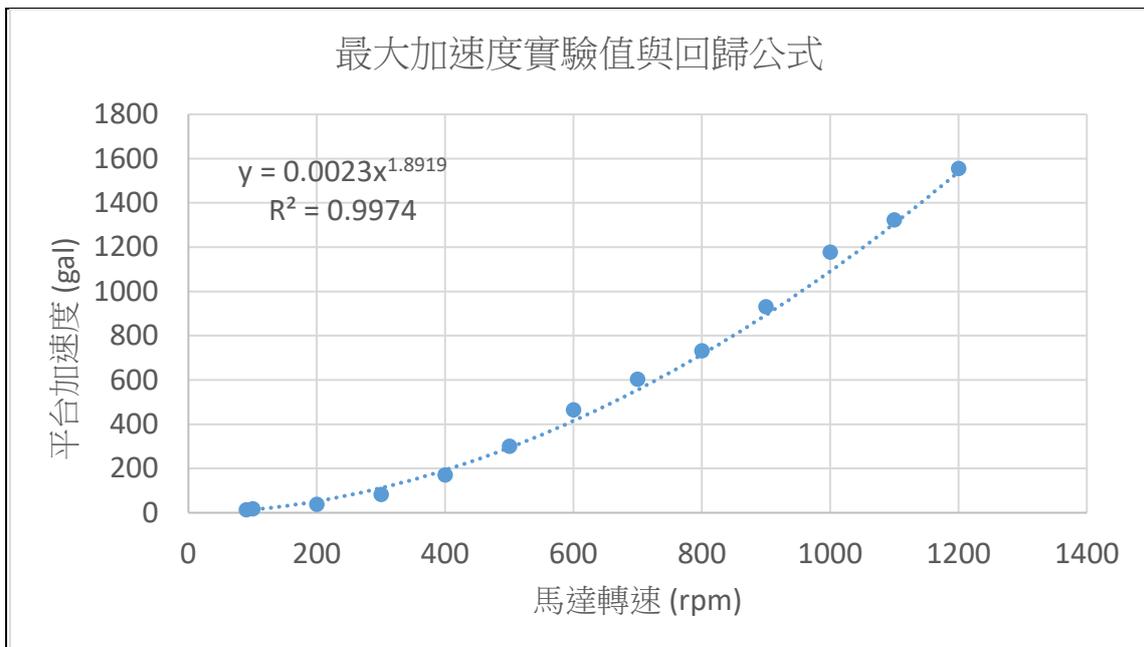


圖 51 振動平台最大加速度與馬達轉速關係圖及回歸公式。

本振動平台功能也有所不足，就是當頻率提高，最大加速度也會跟著增加，反之亦然，無法單獨改變頻率或是最大加速度，是為此設備研究效能的限制。

(三)將震度的理論值與實測值參照，製作出振動平台的震度對照表，如下表十三所示，以回歸公式在 Excel 軟體中，將表一的實測值換算成與理論值相同的(gal)數值，比較振動平台實驗與理論之加速度值，發現振動平台在馬達轉速較理論值低時，就達到震度對應的最大加速度(gal 值)。

震度	最大加速度 (gal)	對應馬達 rpm	
		理論值	由實測值推估
3 級	8gal	109	75
4 級	25gal	192	136
5 級(弱)	80gal	343	252
5 級(強)	140gal	454	338
6 級(弱)	250gal	607	460
6 級(強)	440gal	805	620
7 級	800gal	1086	850

(四)振動平台的最大加速度對照表，如下表十四所示。對照振動平台的開發者王仁俊老師所提供的理論數據，最大加速度(gal) 實測值約為理論值的 1.5~2 倍。推測應是滑軌與搖動平面之間的摩擦力造成的，因滑軌滑動時不可能完全沒有摩擦力，而振動平台機構作動時，機件間也會有摩擦，造成不平順，導致實測加速度值會變大。

表十四：振動平台馬達轉速與最大加速度對對照表		
馬達轉速 rpm	對應最大加速度 gal 值	
	(由回歸公式推估)	理論值
100	14.0	7.0
200	51.9	28.2
300	111.7	63.4
400	192.6	112.8
500	293.7	176.3
600	414.7	253.9
700	555.1	345.7
800	714.6	451.6
900	893.0	571.6
1000	1090.0	705.8
1100	1305.4	854.1
1200	1539.0	1016.6

二、實驗 2，模型 A、B、C 之振動測試結果討論

模型 A：振動頻率從 90 搖到 1600 沒有任何明顯共振情形，可能是因為結構過於堅固，或者是振動頻率不夠高，以至於此結果。

模型 B：震度 90-1600 沒有任何明顯共振情形，模型頂樓振幅較小且無漸增現象，可能是因為結構過於堅固。

模型 C：振動頻率從 90rpm 搖到 1000rpm，頂樓振幅皆緩慢增加，並且有放大現象產生，在 1000rpm 時，模型突然大幅搖動，有共振現象產生，故推斷已接近模型本身的共振頻率，約 2.0Hz。

綜合以上三個模型振動表現，以模型 C 較適合做為本研究的實驗載具，故採用模型 C 的尺寸來製作設計實驗 3 的兩個結構模型，並再將結構弱化，將 4*6mm 的木條改為 3*5mm 的木條，以利實驗觀察。

三、實驗 3，相同結構模型，加裝針筒減震措施之振動測試結果討論。

(一) 模型 C-1 模型裸測，振動測試共振頻率約為 1.56Hz，可耐震度達 6 強等級。在 1-5 層樓加裝減震針筒後，振動測試共振頻率約為 2.95Hz，在提升共振頻率的方面，1-5 層樓加裝針筒效果顯著，可耐震度也有提昇為 7 級。

(二) 模型 C-1 在 1-5 層樓加裝減震針筒在達到共振頻率(2.95Hz)後頂樓振幅明顯增長，結構物在第六層(加裝針筒與未加裝針筒的交界)斷裂，推測是因為結構並不平均，導致結構強度不同，上(6-9)層搖晃劇烈，但(1-5)層卻無明顯搖晃，因此結構在強度不連續的交界處扭斷。

(三) 模型 C-2 模型裸測，振動測試共振頻率約為 1.37Hz(六強級)，在 5-9 層樓加裝減震針筒後，振動測試共振頻率約為 1.56Hz(六強級)，並無明顯提升共振頻率的效能，推測是針筒雖有發揮消能效果，但因為不是裝在地面樓層，所以由地表傳上來的能量震波沒有消滅，且原模型在加上針筒的重量後，又增加載重頂樓振幅變大，使其減震效果降低，以致整體效能並不顯著。

(四) 模型 C-2 模型裸測，振動測試共振頻率約為 1.37Hz(六強級)，在 1、3、5、7、9 層樓加裝減震針筒共振頻率測試共振頻率約為 1.78Hz(七級)，且結構並無損壞，反而頂樓振幅在達到最高點後，雖然頻率及加速度變大的情形下，頂樓振幅還依序遞減，顯示加裝之針筒消能阻尼器，適時發揮減震功效，讓結構安然渡過與振動平台頻率相同的振動測試過程，故均勻分布消能減震裝置在提升共振頻率與減震效果顯著。

(五) 原本預估(1-5)層樓加裝針筒的效果優於 1、3、5、7、9 層樓加裝針筒的效果，但在 1、3、5、7、9 層樓加裝針筒實際上的效果最佳，且無任何結構破壞，推測是因為針筒分布平均，使得各樓層之層間位移降低量較為平均，因此減震效果良好。

(六)綜合以上討論，在 1、3、5、7、9 層樓加裝針筒不但能提升共振頻率、更耐震，也可以在達到共振頻率時，消能減震使結構物完好不損毀，此方法在各方面都最有效。而本研究在實驗 3 用了較細的木條，弱化結構，恰巧可比擬 921 地震發生前，因建築法規訂定不同，而產生雖符合法規，但結構設計仍然不足抵抗強震，而可能倒塌的房子，可採用研究結果之方式，在預算有限無法重建的條件下，可採均勻分布方式加裝具減震消能效果的斜撐，來加強耐震程度，以防止鄰近斷層產生大地震時，因房屋倒塌而造成生命財產的損失。

柒、結論

- 一、經由加速規實測與分析，振動平台可輸出之振動頻率介於 0.17~4.11 Hz 之間，震度可達 7 級以上強震。振動平台的實測震度(gal)較理論值大。
- 二、模型 A 無明顯共振現象，若要改善實驗結果，可增加重載重，或是降低結構強度(弱化木條)。
- 三、模型 B 與模型 A 結果相同，皆無明顯共振現象。
- 四、模型 C 於加載共 700g 的砝碼重量下，該模型約可承受到 2.4 Hz 或 760 gal(大約為 7 級震度)。但若發生頻率 2.3 Hz，加速度在 760 gal 以上的地震，則此模型會因共振效應而受損、倒塌。因此，模型 C 的尺寸最適合用來作為實驗平台，加裝阻尼器，探討阻尼器減震效能。
- 五、以針筒作為模擬摩擦型阻尼器的裝置，實驗發現其減震效果顯著，確實可以提高結構的耐震性能。
- 六、阻尼器平均分散在各樓層(1、3、5、7、9 樓)的效果，優於集中設計在低樓層(1~5 樓)，阻尼器集中設計在高樓層(5~9 樓)的效果最差。

捌、參考文獻資料

- 一、中央氣象局-震度新分級。108 年 12 月 18 日。
[震度新分級 - 交通部中央氣象局新聞稿](#)。
- 二、李政寬、張惠玲、邱世彬(2009)，安全耐震的家—認識地震工程。臺北市：財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心。
- 三、王仁俊(2020)，振動平台研習講義。

四、翁駿民，結構隔震及消能設計導論講義。

五、王紫楹、鄭芷庭、張芷軒、劉志煦、王識傑(2015)，震不震「阻」了就知道—從阻尼器看地震對鋼骨大樓的影響。第 55 屆全國中小學科展作品。

六、劉冠澤、柯維恆、柯維恩(2011)天不搖，地不動—非牛頓流體在建築結構抗震之應用。第 51 屆全國中小學科展作品。

七、網路參考資料：

(一)晏京機構 (2019)，中正晏京-隔震小知識。<http://www.yenjing.com.tw/?p=24383>。

(二) askIITians(2006)，簡諧運動的圖形表示。[https://www.askiitians.com/iit-study-material/iit-
jee-physics/oscillation/graphical-representation-of-shm/](https://www.askiitians.com/iit-study-material/iit-jee-physics/oscillation/graphical-representation-of-shm/)。

(三) 國家實驗研究院，耐震、減震、隔震？一次搞懂建築耐震原理。

[https://www.narlabs.org.tw/xscience/cont?xsmsid=0I148638629329404252&sid=0I1645300245510
48848](https://www.narlabs.org.tw/xscience/cont?xsmsid=0I148638629329404252&sid=0I164530024551048848)

(四) 數位建築雜誌(2013)，一次搞懂「耐震」、「制震」、「免震工法」，三項抗震工法誰能制霸。http://www.ibtmag.com.tw/new_article.asp?ar_id=25588。

(五)維基百科，阻尼器。

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%98%BB%E5%B0%BC%E5%99%A8>。

八、可能變因之探討：

(1)在針筒上做針孔大小的調整，例如用針塞住孔的一部分讓空氣的進出量減少，改變阻尼的大小。

(2)增加不同樓層數的縮尺模型，來探討高矮樓層的振動頻率，及對地震的反應情形，以設計適切的隔減震裝置，結構可在花費最少的條件下，達到最佳效果。

【評語】 032916

1. 本研究有系統的分析各項變因對平台上模型振動的影響，成功建立產生共振的條件，再進一步探討減震的作法，對操縱變因和應變變因作清楚的描述，是從架構到執行都有條理的作品。
2. 實驗設計妥當且合理，具有進一步深入探討的潛力。
3. 以針筒作為模擬摩擦型阻尼器的裝置，實驗發現其減震效果顯著，採均勻分布方式加裝具減震消能效果的斜撐。實驗設計妥當且合理，具有進一步深入探討的潛力。
4. 善用科技器材輔助實驗，並提出論點。
5. 惟以單一馬達驅動，同時改變振幅與頻率，無法獨立討論共振與加速度（震度）的影響。

作品簡報

中華民國第61屆中小學科學展覽會

地牛翻身全台震醒 -結構的共振現象與減震對策

組別：國中組

科別：生活與應用科學(二)



研究動機

台灣地處環太平洋地震帶，不定時會遭受大地震的侵襲，尤其當地震主要頻率與建築物振動頻率相近時，會產生**共振效應**，對於建築物的危害會更大。查詢文獻可知，受限於**單頻的振動裝置**，**過去的相關研究無法探討共振效應**，而本校科技中心在高師大 **教授**的協助下，製作一台可以手動調整**馬達轉速**之**變頻式振動平台**，使探討共振現象成為可能。



變頻式振動平台



馬達轉速調整器

研究目的

由於王仁俊教授只提供**馬達轉速**與**最大加速度理論值**的對照表，並沒有平台的**振動頻率**。因此，本研究主要目的為：

- 校訂變頻式振動平台之**馬達轉速**與**振動頻率**之關係
- 校訂變頻式振動平台之**馬達轉速**與**平台加速度**之關係
- 自製**縮尺建築結構模型**，並以變頻式振動平台**模擬不同頻率的**
地震，探討建築物之**共振現象**
- 利用**消能阻尼器**降低共振效應之影響，並探討**最佳配置方式**

研究設備及器材



變頻式振動平台
(模擬不同頻率之地震)



加速規
(量測振動平台加速度及頻率)



手機APP-AccelView
(量測模型結構加速度)



自製模型結構
(皆使用4*6mm木條)

研究過程或方法

前導實驗

• 實驗1：振動平台的頻率校定

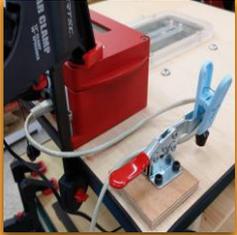
實驗載具
設計

• 實驗2：共振效應之探討

效能探究

• 實驗3：相同結構模型，加裝針筒減震措施之振動測試

固定加速規



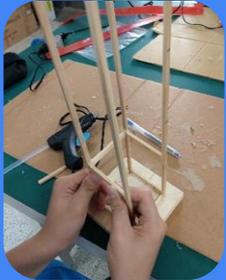
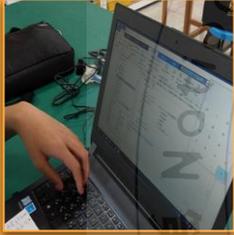
振動訊號量測



調整馬達轉速



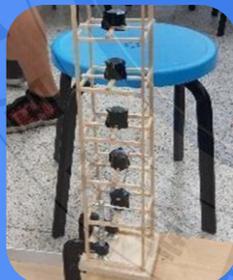
分析振動頻率



製作模型



同比例不同模型



加裝載重並固定



加設尺規
以手機對準量測



模型配置針筒情形

皆為5ml針筒，共10支



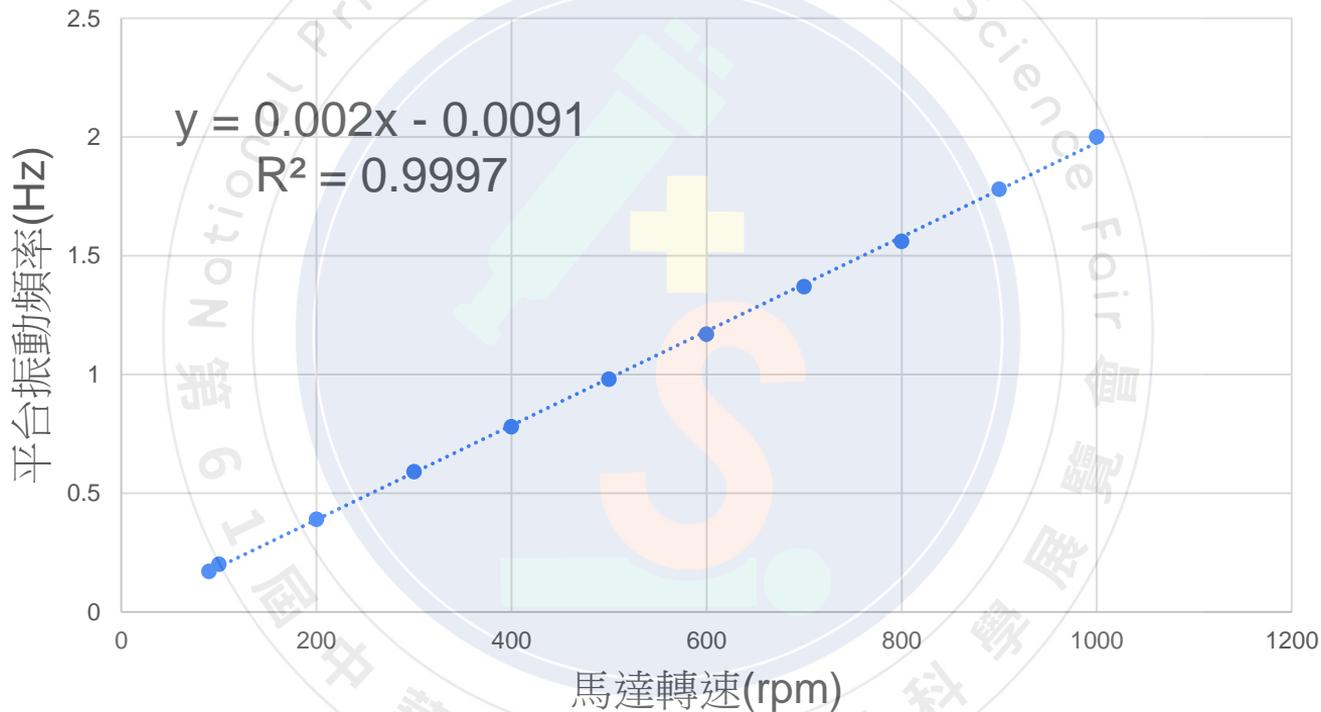
在最上層加裝手機

再以手機對準指標錄影

研究結果

(實驗1：馬達轉速與振動平台之頻率校定)

馬達轉速與平台振動頻率之關係

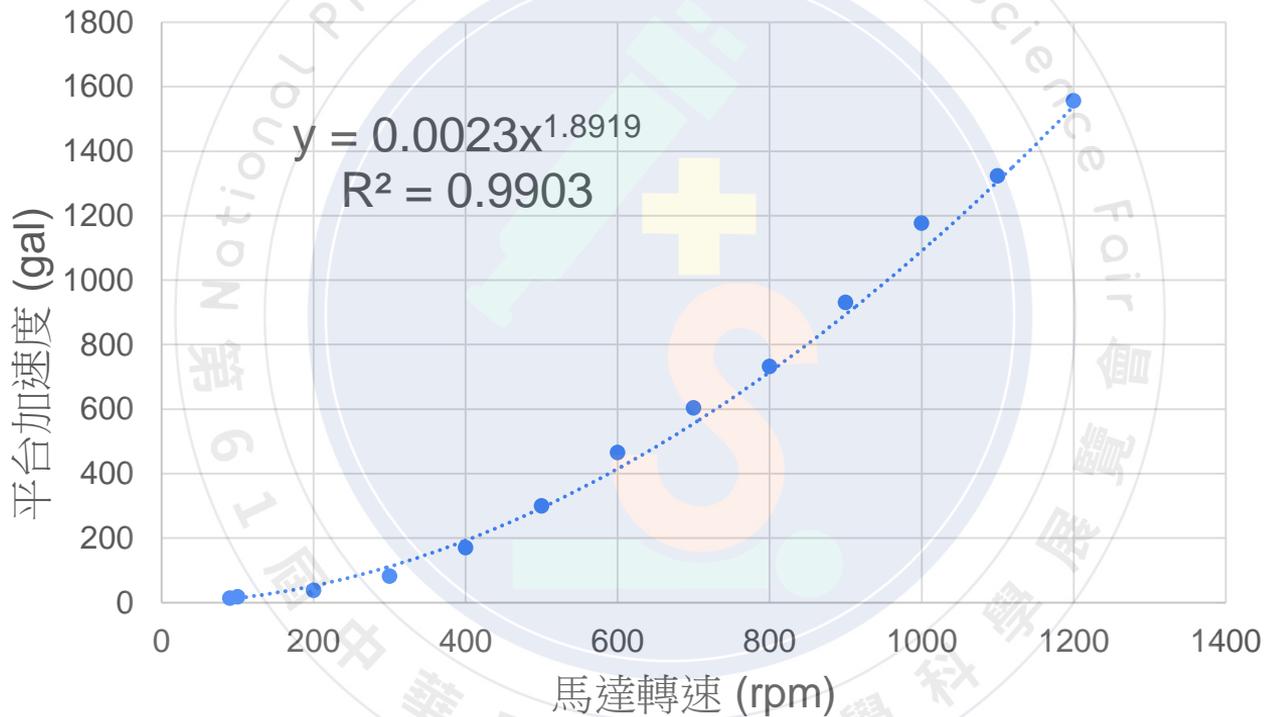


□ 馬達轉速愈高，平台振動頻率愈高

研究結果(續)

(實驗1：馬達轉速與振動平台之加速度校定)

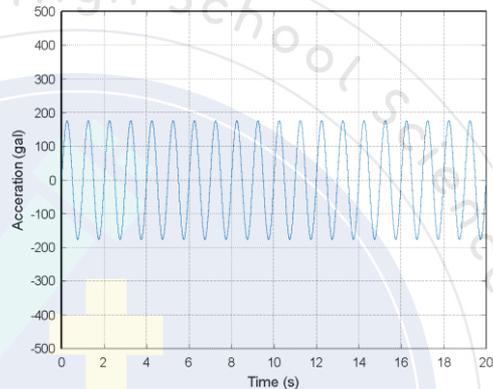
最大加速度實驗值與回歸公式



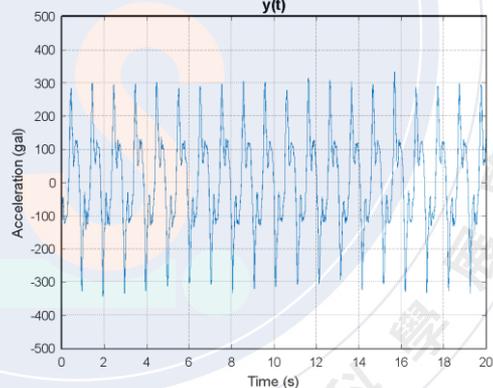
□ 馬達轉速愈高，振動平台之加速度愈大

討論(及分析) 振動平台之實測加速度 (對比 教授提供之理論值)

馬達轉速 rpm	對應最大加速度gal值	
	實測值 (由回歸公式推估)	理論值
100	14.0	7.0
200	51.9	28.2
300	111.7	63.4
400	192.6	112.8
500	293.7	176.3
600	414.7	253.9
700	555.1	345.7
800	714.6	451.6
900	893.0	571.6
1000	1090.0	705.8



理論值
(完美簡諧振動)



實測值
(以馬達轉速500rpm為例)

□ 實測加速度值約為理論值的1.5~2倍，推測應是平台滑軌滑動不平順所導致

討論(及分析) 振動平台之實測加速度 (對比氣象局定義之震度)

震度 (氣象局)	最大加 速度 (gal)	對應馬達rpm	
		實測值	理論值
3級	8gal	75	109
4級	25gal	136	192
5級(弱)	80gal	252	343
5級(強)	140gal	338	454
6級(弱)	250gal	460	607
6級(強)	440gal	620	805
7級	800 gal	850 rpm	1086 rpm

- 由此表，可透過控制**馬達轉速**，使振動平台輸出**不同震度**之地震。
- 振動平台在**馬達轉速較低**時即達到**震度對應的加速度(gal)**。

研究結果(續) (實驗2：共振效應之探討)



模型編號及尺寸	馬達轉速區間 (rpm)	頻率 (Hz)	是否接近共振頻率，而產生共振現象？
A (5*5*45cm)	100-1500	0.2-4.11	否
B (7*7*63cm)	100-1500	0.2-4.11	否
C (9*9*81cm)	100-1000	0.2-2.0	是 (2.0 Hz模型之振動隨時間逐漸放大)

- 模型A、B：皆使用相同木條，使**結構過於堅固**，或是**振動平台頻率範圍未涵蓋共振頻率**。
- 模型C：在平台頻率為2.0 Hz時，模型振幅逐漸放大，**可觀察到共振現象**，故較適合採用此尺寸，作為後續實驗的原型試體。

研究結果 (實驗3：相同結構模型，加裝針筒減震措施之振動測試結果)



1-5層樓
加裝針筒



5-9層樓
加裝針筒



單數層樓
加裝針筒

皆加裝(10支)針筒

	(未加裝 針筒)	1-5層樓加 裝針筒	5~9層樓加 裝針筒	單數層樓 加裝針筒
可承受之 最高振動 頻率	1.37 Hz	2.95 Hz (損壞)	1.56 Hz (損壞)	4.11 Hz (無損壞)
結構頻率 (概估)	1.37 Hz	2.95 Hz	1.56 Hz	1.78 Hz

- 加裝針筒後，模型結構頻率上升。
- **單數層**樓加裝針筒，模型振幅在外力頻率為1.78 Hz時最大，且外力頻率逐漸增加至4.11 Hz皆無損壞，**安然渡過共振頻率**，有最佳減震效果。

結論

- 經由**加速規**實測與分析，**變頻式振動平台**可輸出之振動頻率介於 **0.17~4.11 Hz**，**震度可達7級以上**。振動平台的**實測頻率與理論值吻合**，但**實測震度 (gal)較理論值大**，相關數據可供擁有此平台之學校作參考。
- **模型C** 可承受約760 gal的地震 (大約為**7 級震度**)而不損壞。若地震在760 gal以上，則此模型會因共振現象而受損。因此，**模型C** 的尺寸較適合作為探討加裝阻尼器減震效能的模型結構。
- 以**針筒**作為**摩擦型阻尼器**，實驗發現其**減震效果顯著**，確實可以提高結構的耐震性能。
- **阻尼器平均分散在各樓層**(單數層)的效果，優於集中設計在低樓層(1~5 樓)，¹²