

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 工程學(二)科

052401

震「骨」鑲「筋」—模擬鋼骨結構、剪力牆等
抗震效果

學校名稱：國立宜蘭高級中學

作者： 高二 林郁芹 高二 王弘禹 高二 吳恕葆	指導老師： 林清正 陳萬城
---	-----------------------------

關鍵詞：防震結構、減震裝置

摘要

隨科技演進，大多數天然災害我們已有能力做到預報的工作，而少數尚未有準確預報系統的自然災害，地震——即名列其中。故對於震災，熟稔預防工作、設計抗震、耐震建築顯為首要之務。本研究透過水平搖晃槽及垂直震動器模擬地震發生時之 S、P 波 並以造型棒、頂點珠模擬鋼骨結構受震。觀測各異樓層、底面、抗震裝置下其搖晃程度及破壞位置等，並探討：(一)建築物破壞點和抗震力關係、(二)建築和地震來向關係、(三)梁柱、結構對稱性對耐震程度關係、(四)制震裝置等之功效。

壹、研究動機

臺灣，土生土長大洋西緣一嶼，恰坐落在歐亞、菲律賓海板塊交會處，從板塊推擠而生也脫離不了地震頻仍的歷史。孩提時期，常有忽而天搖地動、地牛攢動的經驗，也不乏從長輩口耳相傳間聽聞諸如 921 地震等嚴重災害。為應對尚無以預測的地震，學校常有地震避難、防災 SOP 等的宣導、演練；戴上防災頭套之餘，不免會思考是否有有效預測所在建築對地震產生的破壞、倒塌情形，針對不同類型建築選擇較安全有效的避難方式的方法。或建築物本身，從結構(支撐或房屋構型及建物高度等)、防震消能裝置等著手，可能可更有效的避免地震造成的災害及減少倒塌會造成的後續影響。

貳、研究目的

- 一、探討不同地震下，建築物破壞情形(不同頻率垂直.水平.混和)
- 二、探討不同建築結構下，地震影響情形(底面正三角~正六.H.L.T 型)
- 三、探討剪力牆放置位置與晃動方向的關係。
- 四、探討富有彈性的地震模型的運動狀況。

參、研究設備及器材

一、研究器材

(一)造型棒、頂點珠組合

模擬各種結構鋼骨大樓：

1.製作方法：

計算各種造型棒長度，拼接成底面積相近、且每層重量相當的等高 6 層樓結構。

2.各種鋼骨結構基本資料：

建築	三角形	正方形	五邊形	六邊形	L 形	T 形	H 形
樓層面積	249.42	240.25	247.75	259.87	259	248.5	245
重量	342.85	342.85	342.85	342.85	342.85	342.85	342.85
每樓柱子數	3	4	5	6	6	8	12
平面圖							
實際圖片							

表(一)

(二)堆疊積木組

底面皆為 6 塊積木組，每棟 18 層

	一字形	十字形	口字形	冂字形	工字形	L 形	T 形
實際圖							

表(二)

(三)水平搖晃槽、垂直震動器

1.水平搖晃槽：以木箱及紙板加高底座，使建築物置放於上易於觀察，並在側邊固定支架以利從高處拍攝。

2.垂直震動器：以物理頻率播放器改裝，在喇叭上加裝鐵片、紙板供模型固定。

(四)拍攝支架

(五)震動追蹤軟體(tracker)

(六)鋼珠輪

(七)海綿

			
<p>圖(一)</p> <p>在木箱上黏貼紙板當載物平台，並用小紙板補足木箱和水平搖晃槽的空隙。</p>	<p>圖(二)</p> <p>把大小剛好的紙箱當作底座固定在水平搖晃槽上。</p>	<p>圖(三)</p> <p>頻率加裝紙板與彈簧(不影響震動)。</p>	<p>圖(四)</p> <p>垂直與水平搖晃結合示意圖。</p>

			
<p>圖(五)</p> <p>譜架維持手機鏡頭平行地面。</p>	<p>圖(六)</p> <p>自製手機架維持鏡頭垂直桌面。</p>	<p>圖(七)</p> <p>積木模擬以觀察建築破壞情形</p>	<p>圖(八)</p> <p>鋼珠輪裝置抗震效果。</p>



(圖(九)側面圖)



圖(十)俯視圖

透明軟棒模型：使用富彈性的長細柱做柱子及壓克力板做樓板建構模型，並用彩色膠帶標示以利追蹤。

肆、研究過程及方法

一、積木堆疊模擬

(一)器材：水平搖晃槽，疊疊樂兩組（共 108 塊）

(二)實驗方法：

步驟 1. 堆疊出六種不同形狀的底面(L、T、一、口、十、工)，且每層由六面積木拼成。

步驟 2. 層面堆疊置十八層，並移至水平震盪器上。以 50rpm 的頻率搖晃積木 15 秒，每種底面類型測兩次(垂直和水平搖晃方向)。

步驟 3. 紀錄倒塌位置、倒塌時間及破壞點等，並以倒塌時間先後來比較抗震程度。

二、不同形狀建築結構水平搖晃

(一)器材：水平搖晃槽，頂點珠造型棒兩組

(二)實驗方法：

步驟 1. 分別將每建築的最底層以熱熔槍固定於紙板(能固定其與搖晃地基間部產生位移，且便於更換模型)。

步驟 2. 依不同底面搭建建築物並連同底座移至水平震盪器，再以長尾夾將其固定。

步驟 3.每種建築物分別以 50、100、150、200rpm 的頻率各搖晃 3 次，同時從平面及上方拍攝。

步驟 4.以 tracker 分析運動軌跡，比較不同層、不同建築的振幅、頻率等。

三、不同形狀建築結構垂直震動

(一)器材：垂直震動器，頂點珠造型棒兩組

(二)實驗方法：

步驟 1.分別將每建築的最底層以熱熔槍固定於紙板（能固定其與搖晃地基間不產生位移，亦利於更換模型）。

步驟 2.依不同底面搭建建築物並連同底座移至垂直震動器，再以長尾夾將其固定。

步驟 3.每種建築物分別以 1~5hz 的頻率搖晃，並從平面拍攝。

步驟 4.以 tracker 分析運動軌跡，比較不同層、不同建築的振幅、頻率等。

四、加裝剪力牆建築搖晃

(一)器材：水平搖晃槽、頂點珠造型棒四組

(二)實驗方法:

步驟 1.使用等長造型棒組裝 2*2 大小的底面並建構達三層，再使用交叉組裝之造型棒模擬剪力牆。

步驟 2.根據實驗將剪力牆加裝至 2 樓板面、2 和 3 樓板面、平行及垂直搖晃方向的側牆面。

步驟 3.使用水平搖晃槽並使用 250rpm 搖晃至建築物破壞。

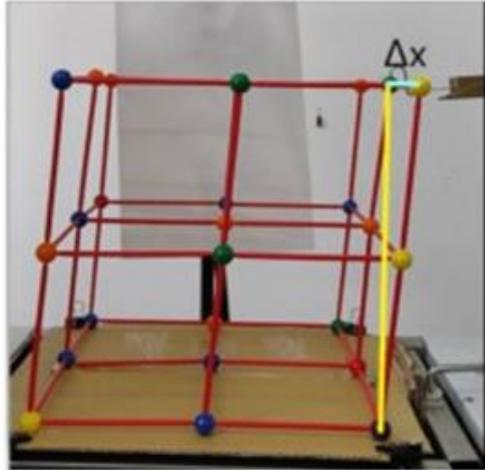
步驟 4.拍攝並用 Traker 紀錄搖晃及破壞的情形。

五、加裝剪力牆拉力測試

(一)器材:頂點珠造型棒四組、彈簧秤

(二)實驗方法:

- 步驟 1.使用等長造型棒組裝 2*2 大小的底面並建構達三層，再使用交叉組裝之造型棒模擬剪力牆。
- 步驟 2.根據實驗將剪力牆加裝至 2 樓板面、2 和 3 樓板面、平行及垂直搖晃方向的側牆面。
- 步驟 3.用彈簧秤勾住頂點珠、從 50g 開始施力直至結構斷裂，並依序紀錄位移。(如下圖)。



六、彈性結構搖晃

(一)器材:水平搖晃槽、彈性模型

(二)實驗方法:

- 步驟 1.使用彈性材料建構模型，並在柱子底部以熱熔槍將其與底座黏合 (少量嵌合，不影響擺動為主)。
- 步驟 2.用水平搖晃槽分別以 75rpm、100rpm、125rpm 各搖晃十秒。
- 步驟 3.以 tracker 分析運動軌跡，觀察其搖晃情形。

七、加裝防震裝置建築搖晃

(一)器材：垂直震動器、水平搖晃槽、頂點珠造型棒兩組、鋼珠輪、海綿

(二)實驗方法：

- 步驟 1.選擇較常見的正方形結構，製作兩底座分別加裝鋼珠輪、海綿。
- 步驟 2.在水平搖晃槽中固定垂直震動器，並將結構放置於垂直震動器上。
- 步驟 3.同時開啟水平搖晃及垂直震動，垂直震動保持 3hz，待水平搖晃 達 100rpm 之後關閉垂直震動，維持 100rpm 並搖晃 15 秒 (模擬實際地震先 P 波垂直搖晃再 S 波水平搖晃)。
- 步驟 4.分別拍攝未加裝任何防震裝置、加裝海綿(1~5cm)、加裝鋼珠輪、及兩者都加裝的搖晃情形。

伍、研究結果

一、實驗 1. 疊疊樂積木模擬搖晃

名詞解釋

行、列:縱向從拍攝方向記數稱行，橫向從左往右記數稱列。

長軸:建築物地基面長度較長的方向

例如：若圈選處為第一個倒塌位置則表示為**(1,1,1,11-12)**



底面形狀	實際圖	擺放方式	頻率	倒塌位置 (順序,行,列,倒塌高度)	倒塌時間 (單位/s)
一字形		長軸平行	100 rpm (50 不倒)	(1,1,1,8) (2,1,2,8) (3,2,2,8) (4,1,3,1) (5,2,3,4) (6,2,1,9)	7`400 8`400 8`867 9`600 10`200 12`167
		長軸垂直	50 rpm	(1,all,1,6) (2,all,2,8)	1`167 1`167
十字形		長軸平行	50 rpm	(1,3,3,1)	1`300
		長軸垂直	50 rpm	(1,4,2,4) (2,1,2,4) (3,2,2,7)	1`000 1`333 3`300
口字形		長軸平行	50 rpm	(1,2,1,7) (2,2,2,7)	1`200 2`733
		長軸垂直	50 rpm	(1,1,3,5) (1,2,3,6) (3,2,1,7) (4,1,1,5)	1`267 1`867 3`067

U字形		長軸平行	50 rpm	(1,1,1,4) (1,2,1,5)	1`167
		長軸垂直	50 rpm	(1,1,1,6) (1,2,1,6) (1,1,2,6) (2,2,2,6)	0`833 0`900
工字形		長軸平行	50 rpm	(1,2,1,8) (1,3,1,8)	5`700
		長軸垂直	50 rpm	(1,1,1,4) (1,2,1,6) (2,1,4,6) (2,2,4,7)	2`667 13`800
L形		長軸平行	50 rpm	(1,1,1,4) (1,2,1,10)	1`800
		長軸垂直	50 rpm	(1,1,1,4) (1,2,1,4) (1,3,1,5)	1`400
T形		長軸平行	50 rpm	(1,1,1,6) (2,2,1,5) (2,3,1,6)	1`400 1`933
		長軸垂直	50 rpm	(1,2,2,4) (1,3,2,4) (2,1,2,6)	1`000 1`300

表(三)

1.由表三我們可以發現在相同搖晃頻率時，建築物長軸若平行水平搖晃方向，則其破壞處通常較少(倒塌數)且破壞點通常較高，抗震力相對較佳。其中 尤以結構最單純的一字型最為明顯，其在 50rpm 時，主軸平行不倒塌，而主軸垂直則全倒。

2.不計入 100rpm 時一字形的數據，我們可以發現破壞高度以 3~4、5~6、7~8 處為最多，故推論最常發生破壞的位置為 1/3~1/2 高度處。

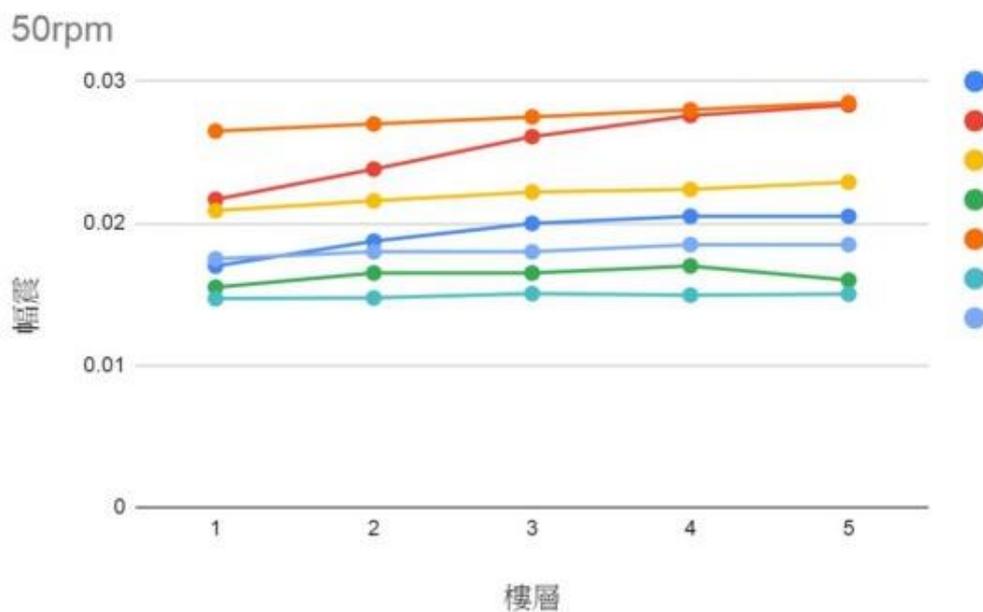
3.建材的摩擦也可能影響耐震程度，雖於表中無法呈現，但下面將以簡單敘述說明摩擦力延遲倒塌之過程。

(1)十字形長邊平行的 1_3 未倒可能是被摩擦面積較大所致，其在長邊垂直的 3_3 亦可能是被中間長軸摩擦導致延長時間。

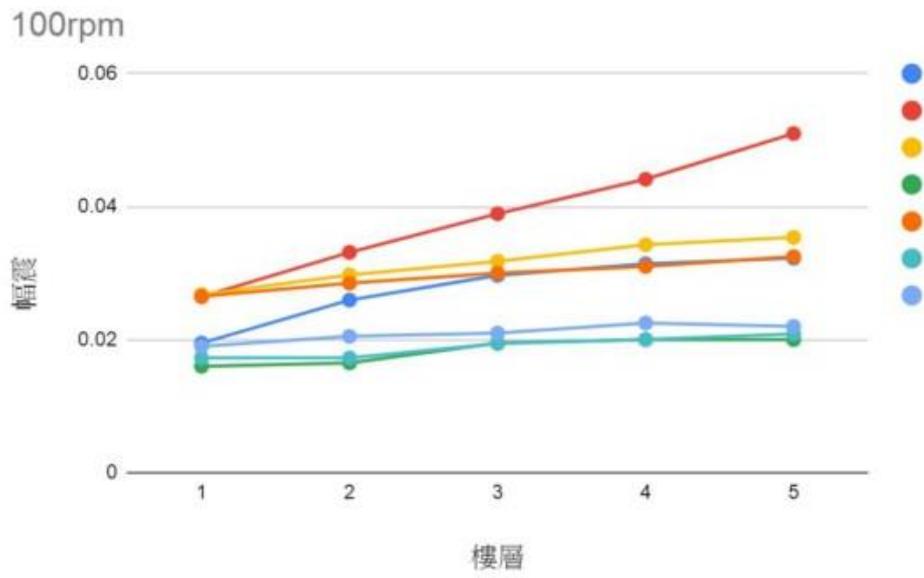
(2)口字形長邊平行的 2_1 和兩側間隙稍大故較快倒，否則兩側應相同。

(3) 工字形開口平行 3_1 和兩側摩擦一延長倒塌的時間，其開口平行屢次被旁側擋住而及慢才傾倒。

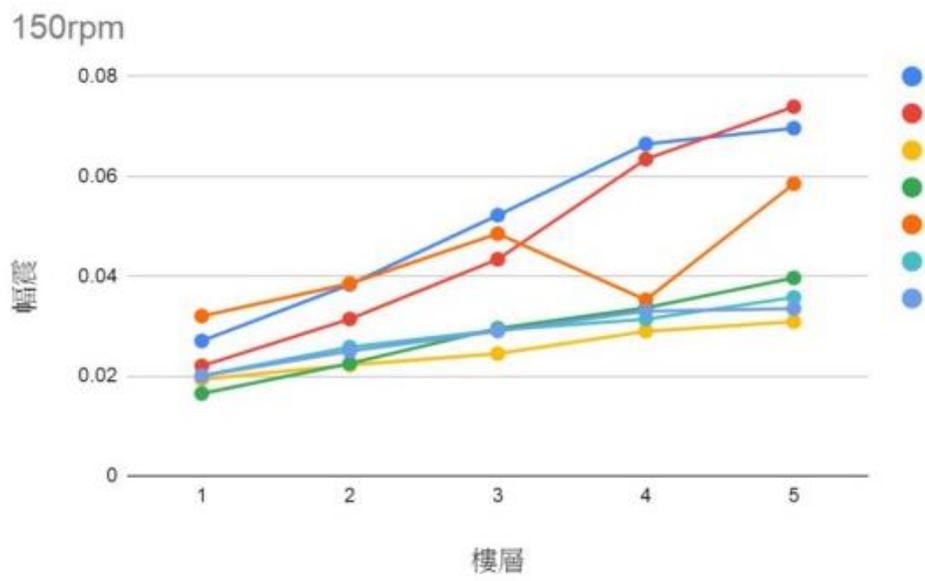
二、實驗 2.不同建築結構水平搖晃



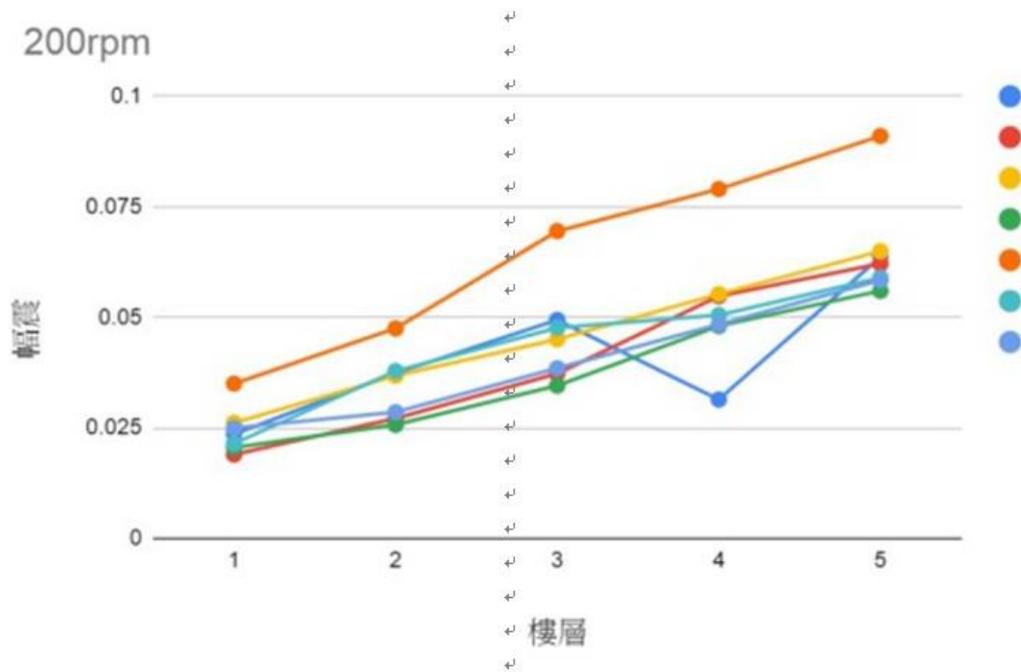
圖(十)



圖(十一)



圖(十二)



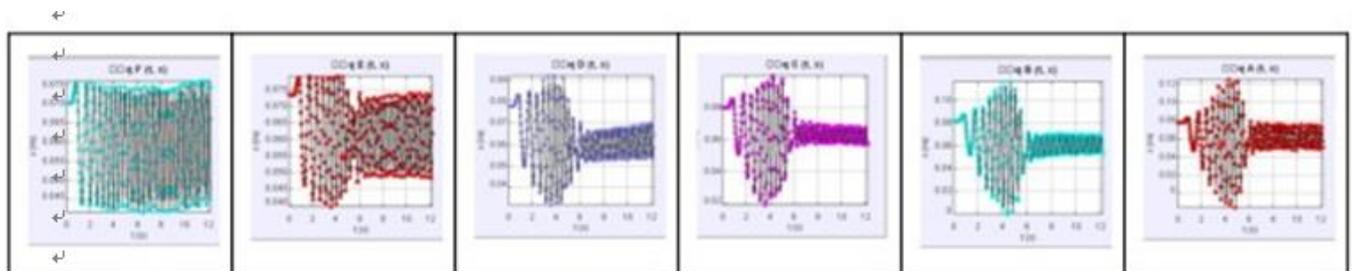
圖(十三)

(一)各結構水平搖晃拍攝測量結果

1.建築物搖晃幅度隨搖晃槽頻率增加而變大，且樓層越高，擺幅越趨明顯。如在 50rpm 及在 100rpm 時，不同結構其上下樓層震幅差異不大；但在 150 或 200rpm 時，其幅度成長變率(上圖傾斜度)則越趨明顯。

2.建築物有橫梁斷裂脫落時，有震幅因而減小且搖晃變穩定的情形。

(附表以正方形 200rpm 水平搖晃為例)



推論其原因為橫梁斷裂阻礙能量傳遞，導致其震幅不如斷裂前劇烈。

3.考慮影響結構穩定性較主要因素有對稱性及直柱數，其排列如下:

對稱性(對稱軸數):

六邊形(6)>五邊形(5)>正方形(4)>三角形(3)>H形(2)>T形(1)>L形(0)

直柱數:H形(12)>T形(8)>L形(6)=六邊形(6)>五邊形(5)>正方形(4)>三角形(3)

就上圖觀察依各結構震幅做出趨勢線比較斜率其結果如下:

150rpm(震幅變化傾斜度):五邊形<H形<T形<六邊形<L形<三角形<正方形

200rpm(震幅變化傾斜度):三角形<H形<六邊形<T形<五邊形<正方形<L形

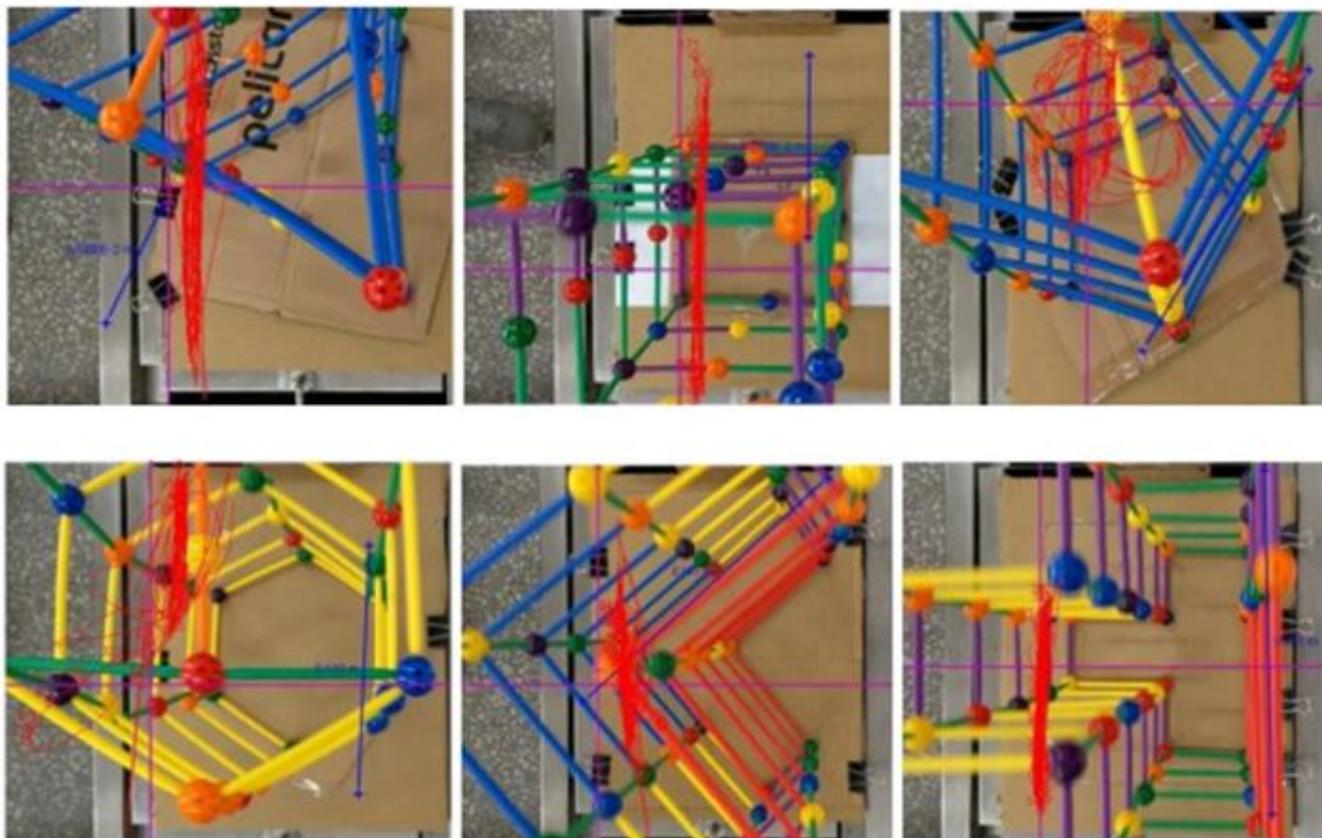
對稱性高及梁柱數量多有樓層震幅差異較小、搖晃易達穩定的趨勢。

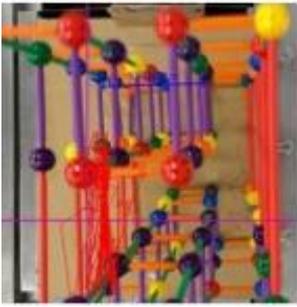
4.建築物搖晃有震幅緩慢增大，但在倒塌前刻會有一瞬間最大震幅，再漸漸收小的現象。

5.大部分建築在低頻率(50~150)時，以最高層振動頻率為最。但超過此限後，某些建築最大震幅處有稍微下降至第四甚至第三層的情況。

(二)上方拍攝水平震動

六種結構分別在水平 150rpm 追蹤上方





當搖晃頻率超過 150rpm 個結構除單純水平搖動，亦有 扭擺的現象。發現柱子數量在扭擺現象上佔有較大決定性，如柱子較少的五邊形及六邊形其扭擺情形即相對明顯，甚至有近乎規律的擺動。

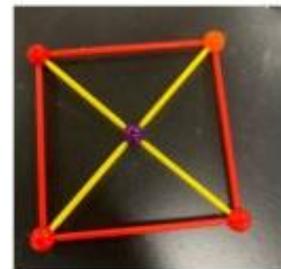
三、實驗 3.不同建築結構垂直震動

(一)各結構垂直震動拍攝測量結果

- 1.建築物震動頻率和搖晃槽頻率大致呈正相關。震動的幅度則未有太大差別。
- 2.相較結構的對稱性，在垂直震動中反而是梁柱數量對抗震性質有更大影響。
- 3.建築物的震動比起水平搖晃幅度漸進式的成長與瞬間破壞，在垂直震動中則不改變搖晃幅度，而是明顯的轉折，即使樑柱斷裂振動頻率依舊。

四、實驗 4.加裝剪力牆、實驗 5.加裝剪力牆拉力測試

模擬剪力牆及地板結構(如右圖)



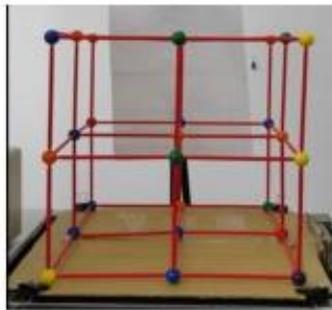
(一)示意圖





(二)各種結構模型

基本型



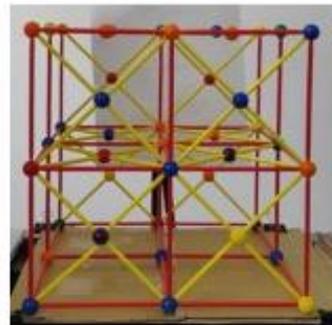
完全型



完全(垂直搖晃方向)



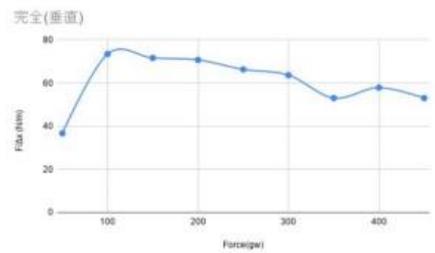
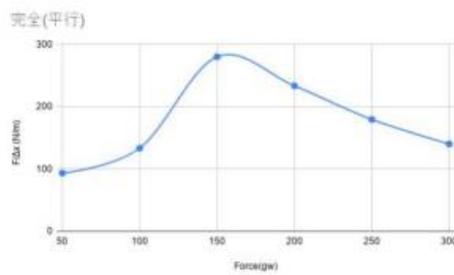
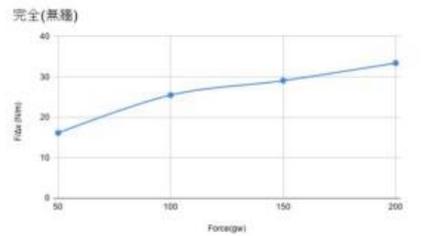
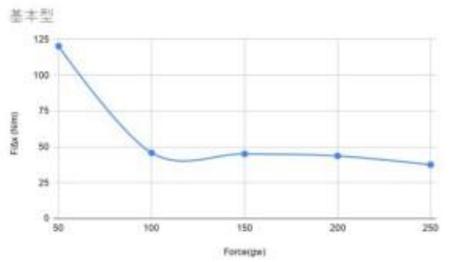
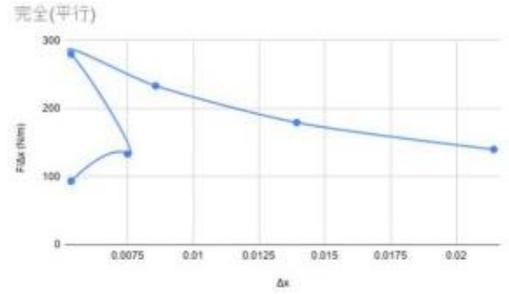
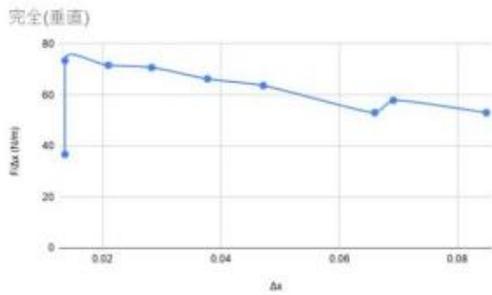
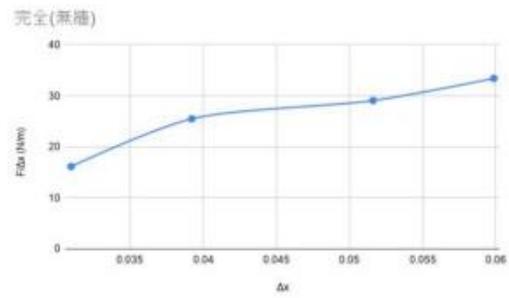
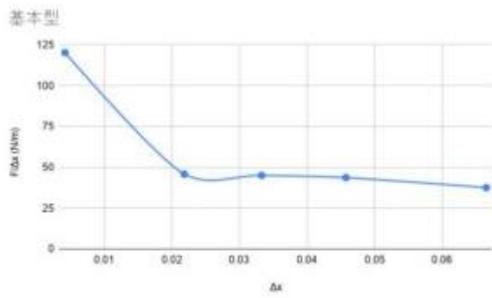
完全(水平搖晃方向)



(三)各加裝剪力牆方式彈力係數圖比較:

測量方式(如右圖)

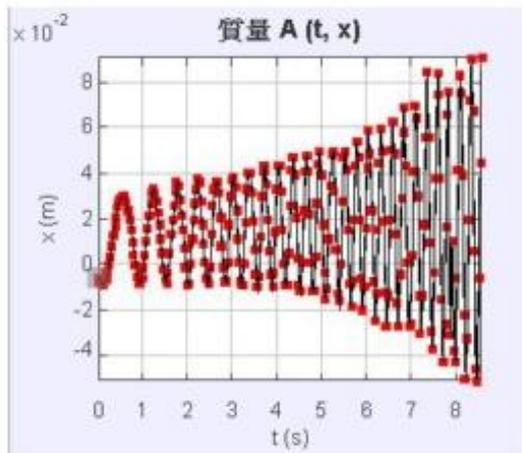
(四) $F/\Delta x$ - F 圖 、 $F/\Delta x$ - Δx 圖



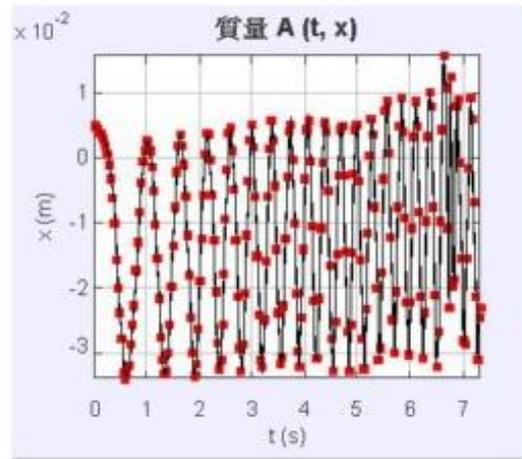
從 Δx 的數值發現：大多數一樣外力的情況下，形變量大小：完全 > 基本 > 完全(垂直) > 完全(平行)
而在拉力測驗中能夠撐大力量量值的為完全(垂直) > 基本 > 完全(平行) > 完全

(五)晃動情形 x-t 圖

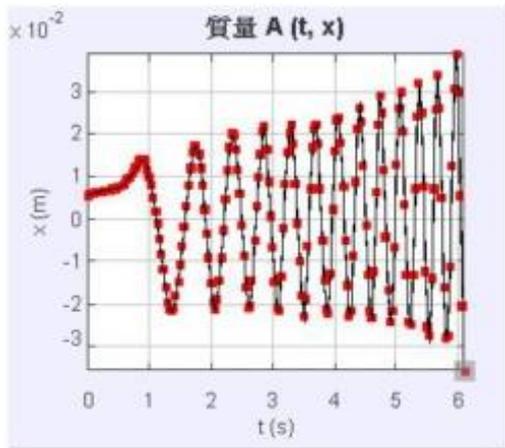
基本型



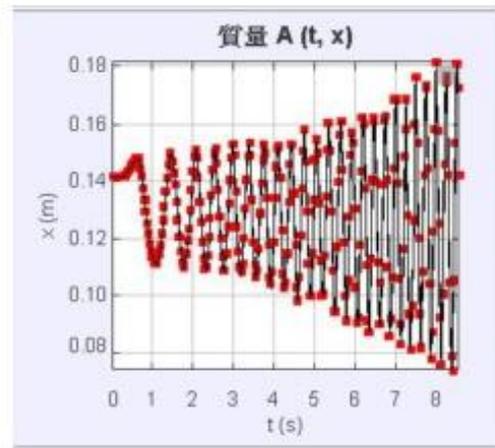
完全型



完全(垂直)

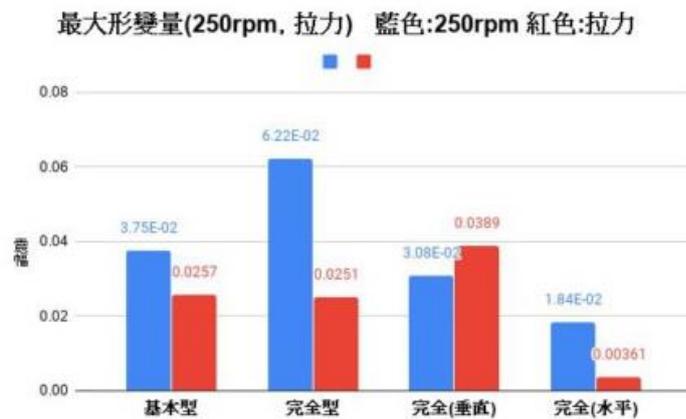


完全(平行)



x-t 圖看出除完全(平行)外其他結構皆有明顯震幅越來越大的趨勢，又完全(垂直)是其中變化最大的，其次是完全，最後是基本型。

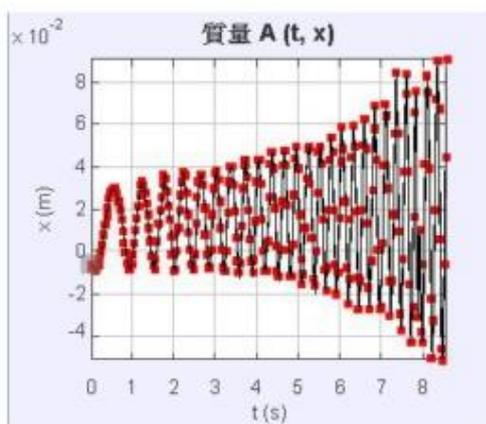
(六)250rpm 時的最大形變量與拉力測驗時的最大形變量比較



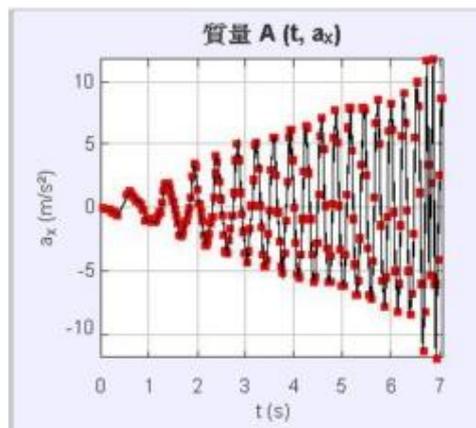
1.從這張圖發現完全形與完全(水平)在 250rpm 搖晃時的表現都明顯比單純的拉力 測驗好，而基本形與完全(垂直)都在拉力最大值的附近，在此推測是因為我們 在拉力測驗時，彈簧秤是掛在單一顆球，導致是在檢測單一施力點時，結構 的抗拉程度，以上圖數據來說我們會發現完全(水平)型與完全型會將力分散開來 以致於當與單一施力點比較時，最大位移量可以高上許多。

(七)晃動情形 **a-x** 分布圖(從開始晃動取至結構破壞) 、**a-t** 圖

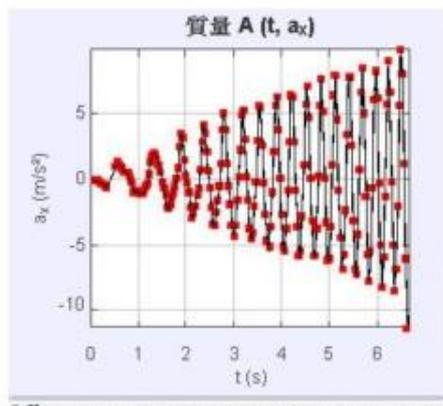
基本型



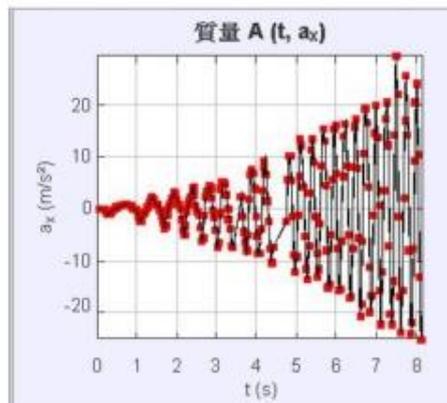
完全型



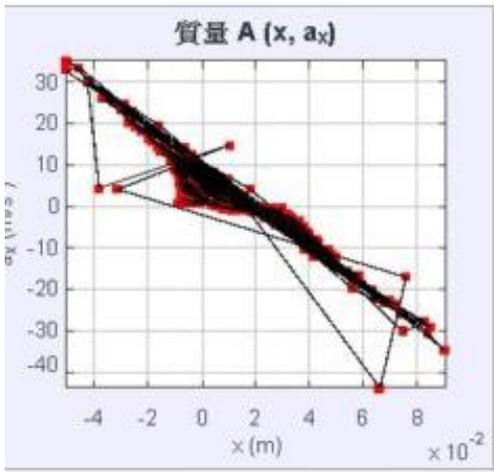
完全(固定)



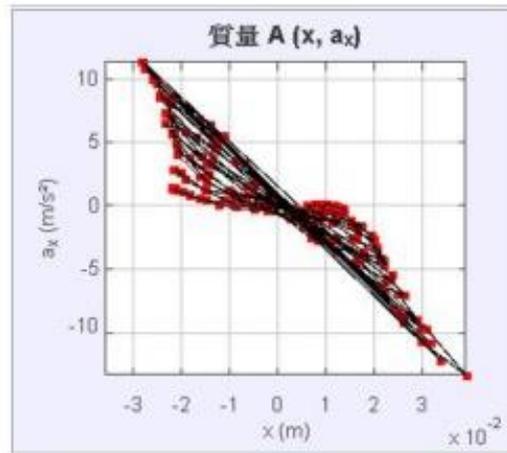
完全(水平)



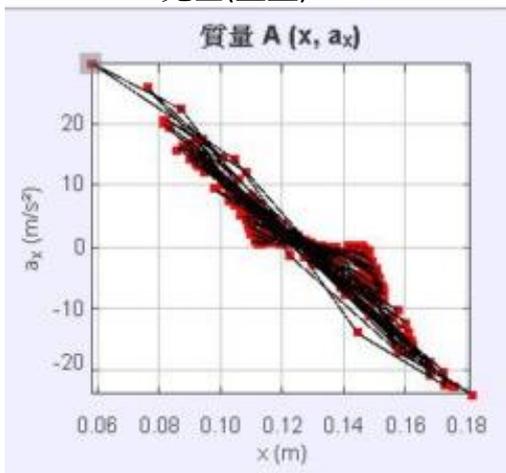
基本型



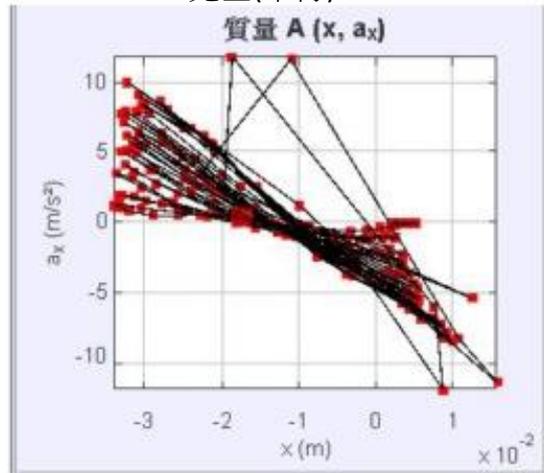
完全型



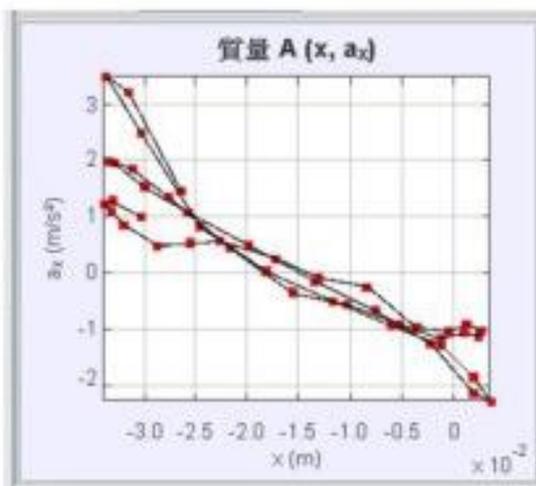
完全(垂直)



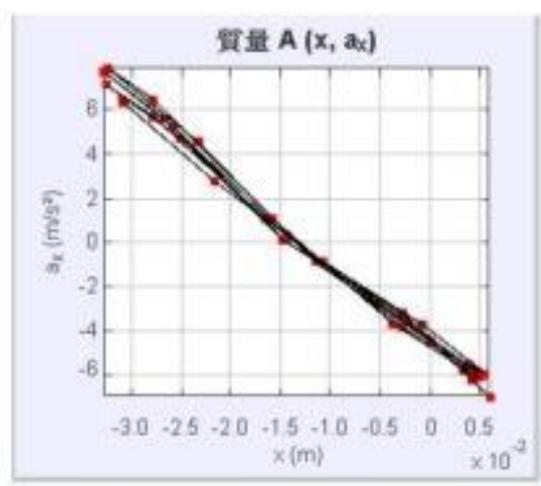
完全(平行)



其中 a-x 分布圖為多粗線組成取較短的時間作圖



圖(a)



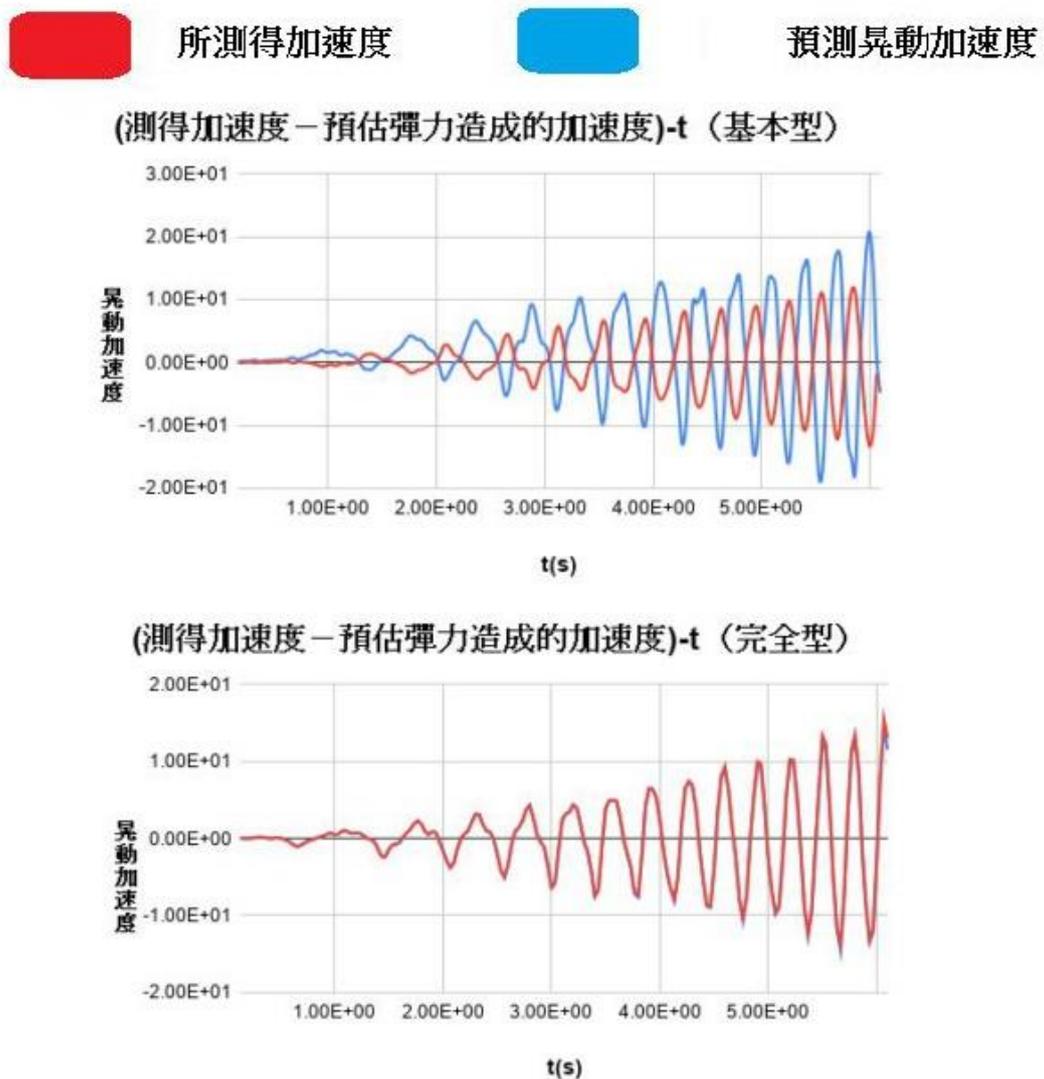
圖(b)

1.圖(a)為剛開始晃動時 a-x 圖的分佈模樣； 圖(b)為搖晃一陣子、晃動頻率上升後可觀察到圖(a) 與圖(b)在震幅相近的情況下 a-x 的斜率相差許多。

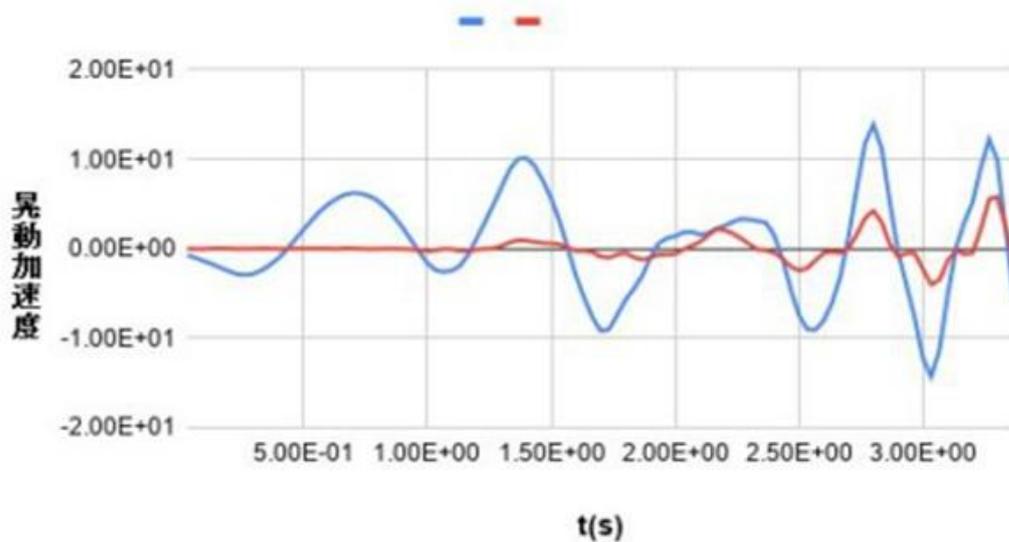
2.由震幅相近判斷使結構破壞的主因是"加速度大小"而"非震動幅度"。

3.觀察 a-x 圖，基本型與完全(垂直)都是像直線的圖形，而完全與完全(平行)則都是許多斜率相差許多、相交於一點的直線組成，完全與完全(平行)圖形斜率的增加來自水平搖晃槽的頻率慢慢加速所致，而基本型與完全(垂直)的斜率代表的是結構的加速度受到 x 的位移的影響比頻率的影響更大。

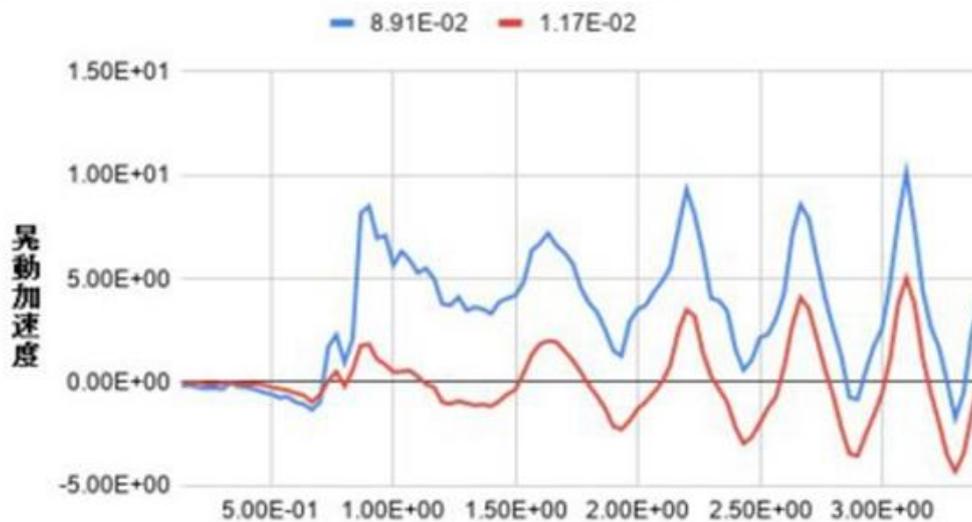
(八) 由前方的彈力係數估計其彈力造成的加速度，再以測得加速度減去彈力 造成的加速度得出水平晃動儀造成的加速度圖形



(測得加速度－預估彈力造成的加速度)-t (完全垂直型)



(測得加速度－預估彈力造成的加速度)-t (完全平行型)



1.我們預估晃動造成的加速度理應是長的像 sin 波圖形，除完全(水平)外其圖形會類似 sin 函數，在此推測是因為完全(平行)的彈力常數不依準所致 (Δx 量過小造成測量儀器誤差被放大 詳見上方完全(平行)的彈力係數圖)

2.比較圖中紅色線條(所測得加速度)與藍色線條(預估由晃動造成的加速度)我們發現:

[基本型]所測得加速度受到大量彈力的影響，其彈力加速度約等於-3 倍的晃動加速度

[完全型]所測得的加速度幾乎不受彈力影響，加速度震幅與基本型都是明顯遞增。

[完全垂直]

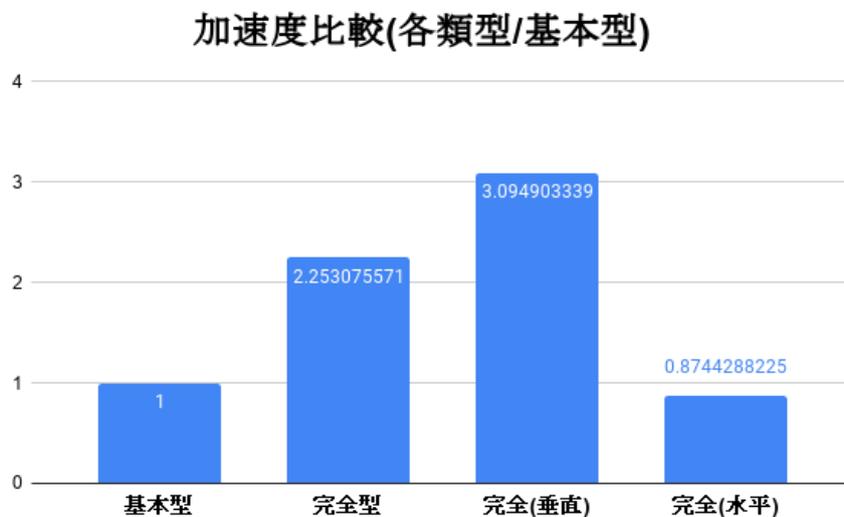
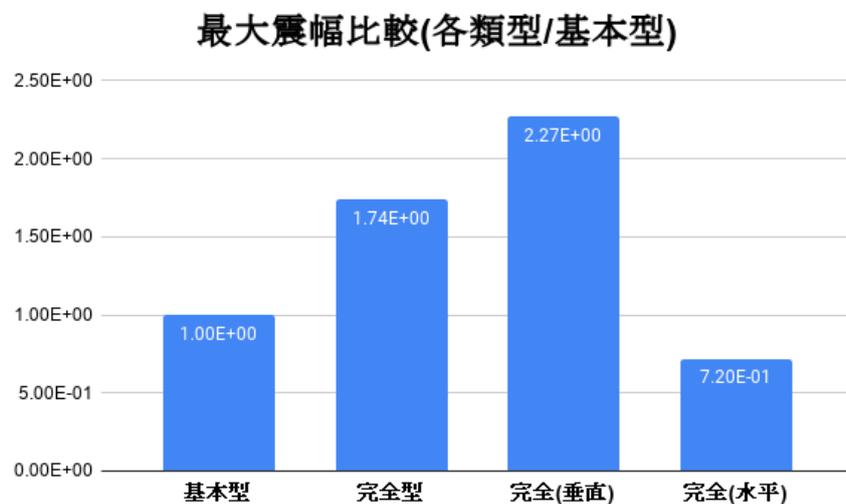
則受大量彈力影響，但與基本型不同的是其彈力與搖晃加速度方向相同。

[完全平行]

圖形也明顯受到彈力影響，圖形近乎是平移。

從上述觀察發現增加樓板會讓彈力減少，增加平行的剪力牆有效減緩加速度震幅變大的情形，增加垂直的剪力牆會讓結構變得緊繃，將晃動的加速度造成的效應近乎抵銷。

(九)最大震幅比較圖、加速度比較圖



[基本型]頂樓 最大正向加速度 11.38m/s^2 底端最大正向加速度 7.551m/s^2

[完全型]頂樓 最大正向加速度 25.64m/s^2 底端最大正向加速度 8.4m/s^2

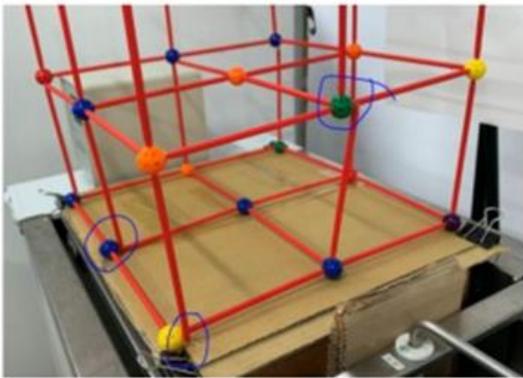
[完全垂直]頂樓 最大正向加速度 35.22m/s^2 底端最大正向加速度 9.582m/s^2

[完全平行]頂樓 最大正向加速度 9.951m/s^2 底端最大正向加速度 8.883m/s^2

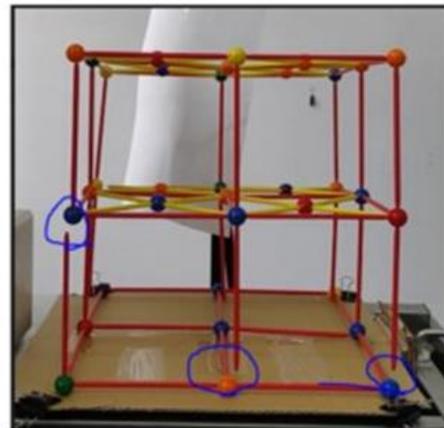
加速度差：完全垂直>完全>基本>完全平行

(十)破壞情形討論：

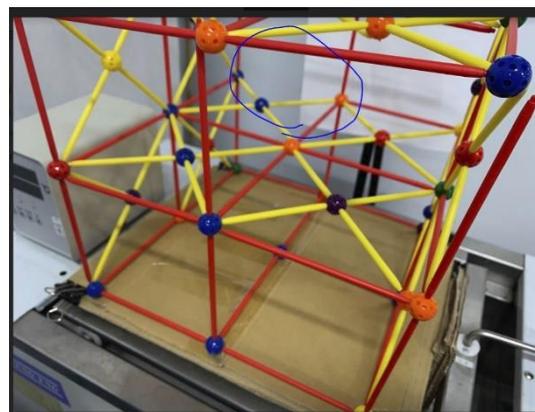
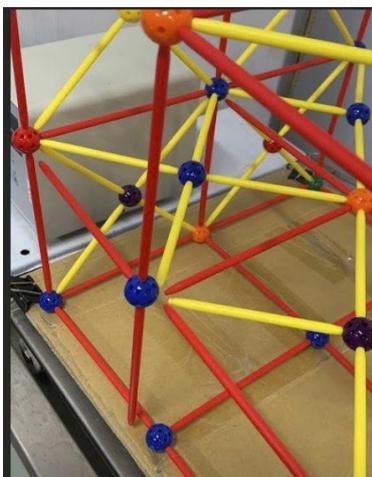
基本型：經常破壞於一樓梁柱如圖



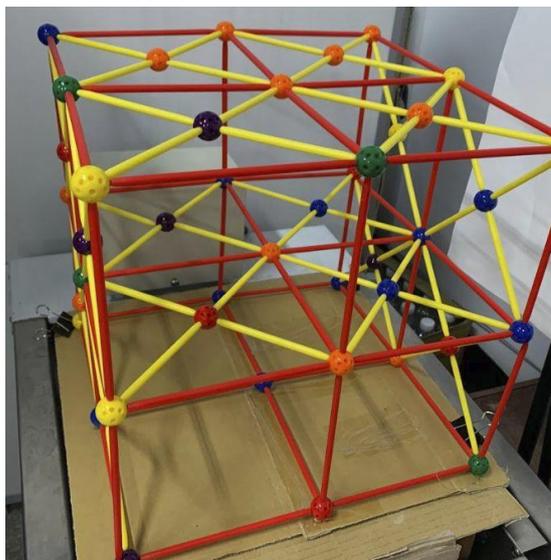
完全型：與基本型相同



完全(垂直)：在晃動 7 秒左右後開始破壞，破壞處大多發生在二樓梁柱以及二樓地板的交界處。



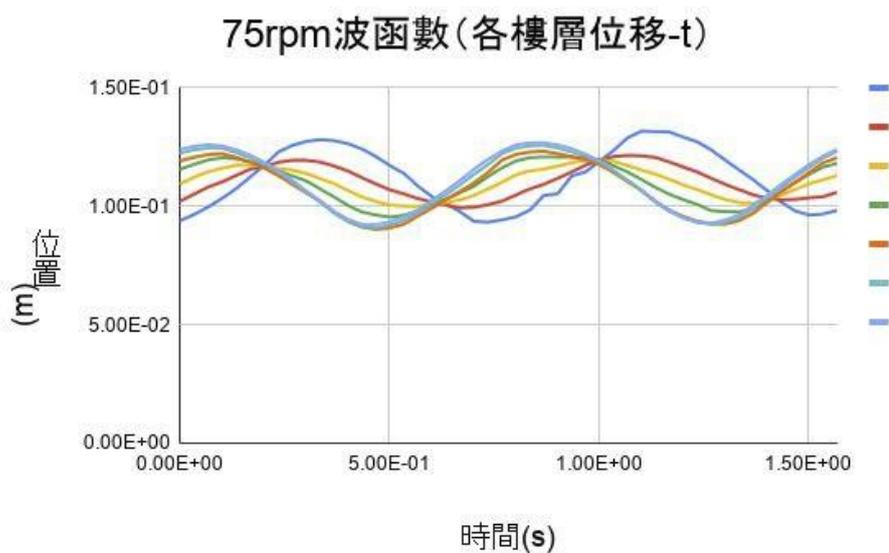
完全(水平)：晃動 20 秒依然無結構破壞



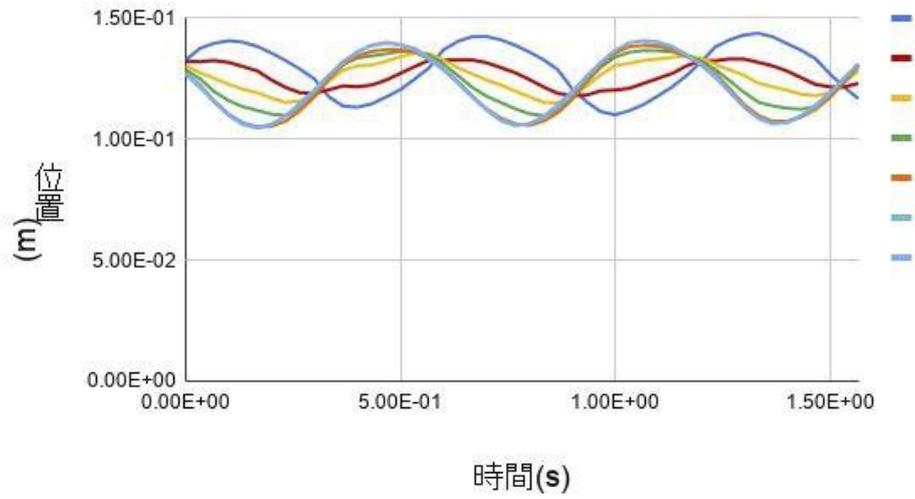
五、實驗 6.彈性結構搖晃



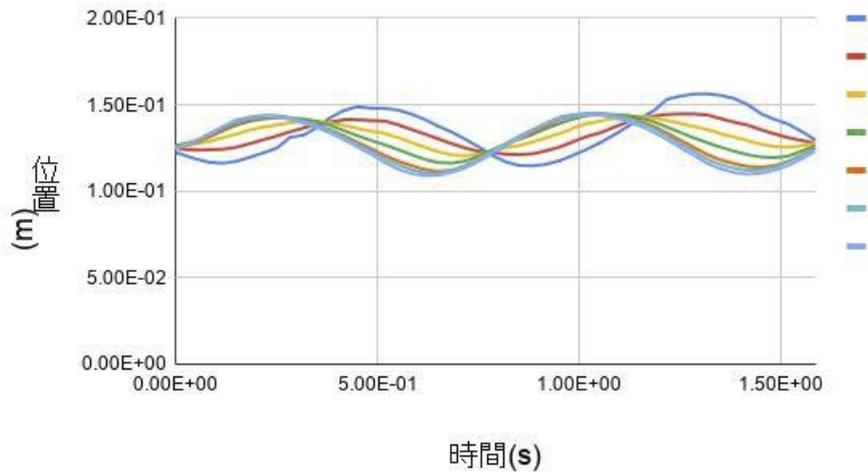
(一)各樓層位移對時間圖



100rpm波函數(各樓層位移-t)

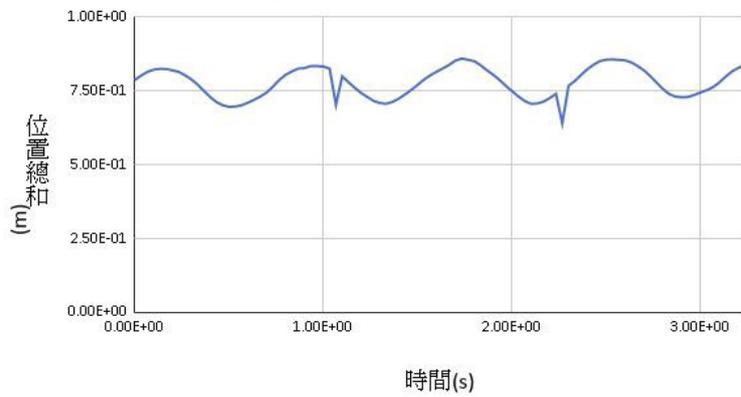


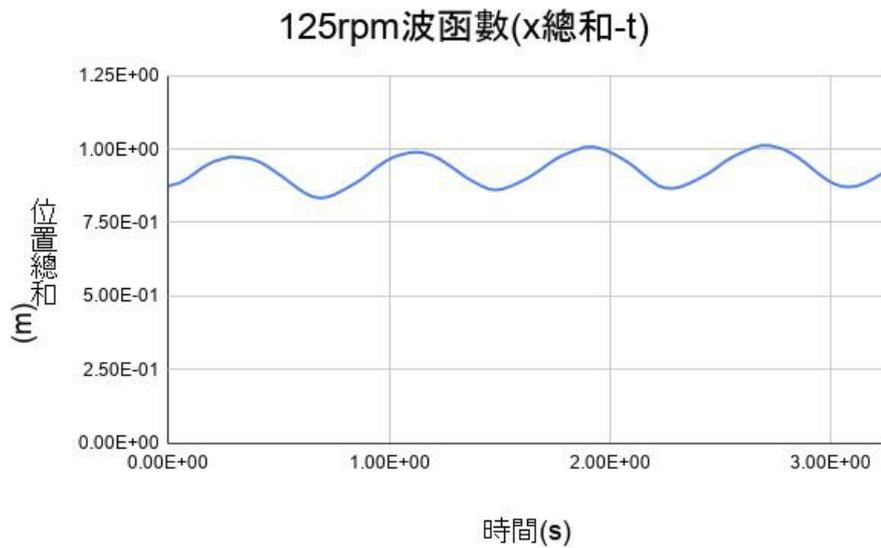
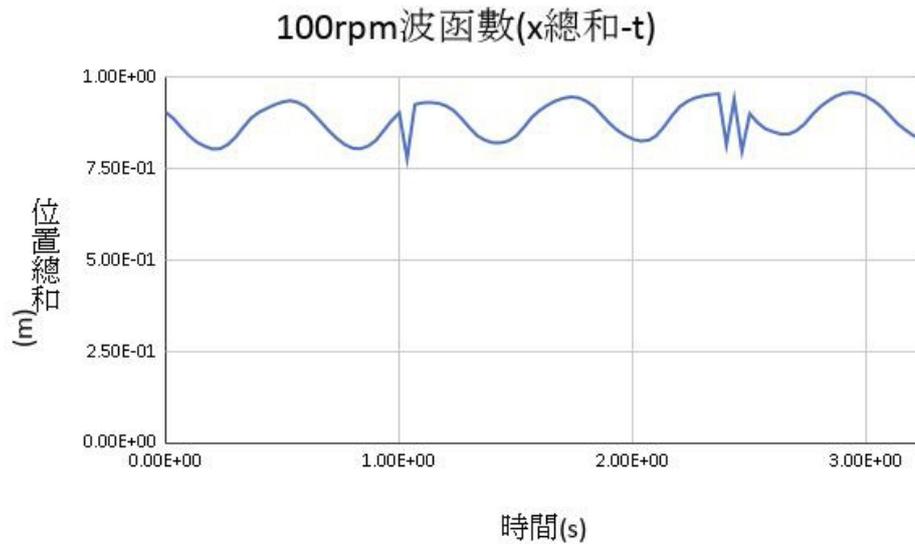
125rpm波函數(各樓層位移-t)



(二)各層位置總和對時間的波函數

75rpm波函數(x總和-t)





樓層	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F
最大震幅	0.021	0.0135	0.013	0.0155	0.0165	0.0185	0.018

表(1) (125rpm)

1.在此我們暫不討論 75rpm 與 100rpm 的運動狀況，因其晃動極不穩定會發生建築物 同時移動、轉動的情形，所以我們認為這討論起來難度太高，同時也與水平搖 晃的討論目的有出入，故僅呈列監測數據。

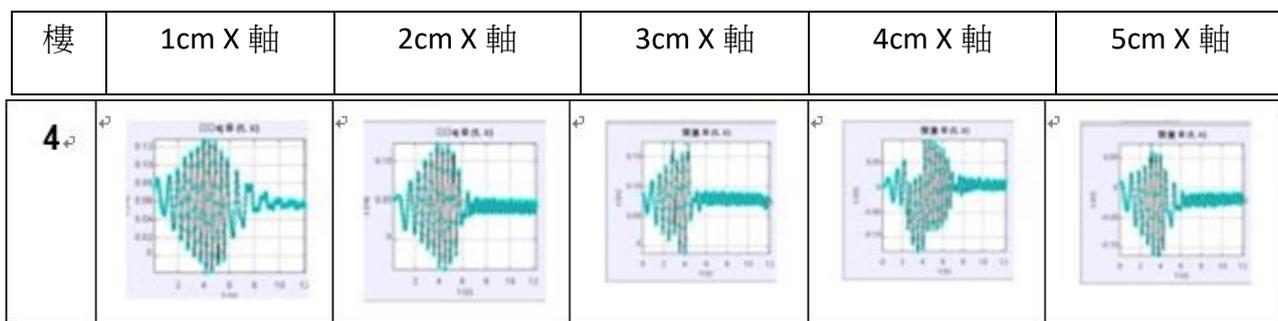
2.位置總和的震幅最大值為 0.166m (平均每層樓位移 0.024m)大於水平搖晃槽震幅 0.0175m 符合能量疊加的假設。

3.觀察表(1)發現較大震幅出現在 1F 以及 6F、7F，較小的震幅則出現在 2F、3F，在此判斷 1F 是因為離固定端較近，7F 是建築物的自由端，當固定端在動時持續輸入力學波進入建築物，而 7F 的震幅相較於其他樓層較大，便是因為發生了自由端反射的現象，這使的 7F 的晃動震幅相較於其他點更大，此外在此力學波的假設下便能解釋各樓層晃動圖形為何像是差了一點相位角般，不過因為能力不足，暫時無法透過數據算出其相位角相差多少、波速多快。

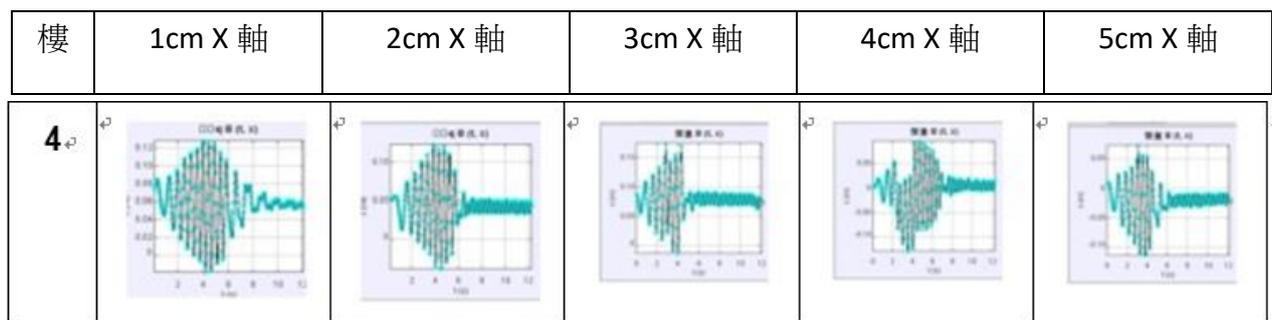
六、實驗 7.加裝防震裝置建築搖晃

(一)加裝抗震裝置拍攝測量結果

吸震海棉 100rpm(表 2)



吸震海棉 100rpm(表 3)



1.若以搖晃程度作為抗震力依據並比較未加裝海綿時之搖晃情形，可發現以 1~2cm 厚海綿的效果為佳。

(二)加裝鋼珠輪的抗震效果

1.因加裝鋼珠輪時和地基必非完全黏合，使用 tracker 較難追蹤，但能觀察到其耐震的效果。在未加裝鋼珠輪時，正方形結構在 100 rpm 以上 即易斷裂，再加裝之後，正方形甚至能承受 150 rpm 的晃動頻率。偶有斷裂也多是因為鋼珠輪的移動遭平台卡住才造成，故鋼珠輪確實有其耐震效果。

陸、討論

一、在加入後項實驗的建築結構後，我們發現先前實驗結構的搖晃原因是綠色造型棒特別容易鬆脫，且購入的每盒造型棒皆有相似情形，因此先前數據 如各樓層 v-t 圖我們便不深入討論，但對於每個形狀建築穩定性的比較，仍有其可信度(在柱子材質皆相同的情況下，變因仍只有建築物之結構形狀)。

二、實驗中主要選用造型棒和頂點珠當作建築結構，但其連接方式是非連續的，可能造成地震能量或地震的力傳遞上與現實不符。

三、嘗試以駐波模型去討論 125rpm 軟棒的運動情型，駐波方程式如下

$$y = 2y_0 \cos(\omega t) \sin(kx).$$

其中 x 為定值時，其最大震幅 $R=2y_0\sin(kx)$

設底端地基 $x=0$ ，x 軸正向朝建物頂樓。假設 $2y_0=0.035$ （水平槽晃動震幅）利用反正弦函數算出 k 值。

樓層	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F
最大震幅	0.021	0.0135	0.013	0.0155	0.0165	0.0185	0.018

樓層	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F
k 值	9.75	3	1.92	1.74	1.49	1.4	1.17

k 值在 3F~7F 間量值較為接近，推測所謂駐波的模型可能只適合在 3F~7F 間。不過明顯在 125rpm 運動時找不到腹點的位置，雖以圖形及能量累積的觀點我們推測與駐波有相似的運動行為，但這模型明顯有些錯誤的地方，例如波的能量可能會遞減、反射波不只是在頂樓才會反射，每層樓都會有一點反射波，目前我們的假設還有非常多可以改進的地方。

柒、結論

- 一、建築物破壞點位置和抗震力有一定關係，而抗震力較佳的建築破壞點通常較高；並且倒塌時間和破壞高度略有呈正相關。
- 二、最常發生破壞的位置約為總高度 $1/2 \sim 1/3$ 的樓層。
- 三、較高對稱性的建築有較好防震效能，除此之外梁柱的數量也有其影響力；特別是對於垂直震盪的 P 波，梁柱多者抗震力明顯較高。
- 四、同樣結構會因建築主軸垂直或水平晃動方向而影響抗震的效果，如倒塌方式、破壞情況等，又以底面長邊平行於搖晃方向為佳。
- 五、建築結構主體如有縱橫交錯(如十字、H 形等)，有提升抗震的效果。
- 六、結構破壞不一定直接影響倒塌，時有結構破壞後晃動幅度減小的情況。
- 七、實驗四、實驗五中，形變量大小：完全型 > 基本型 > 完全(垂直) > 完全(平行)；而在拉力測試撐大力量量的為完全(垂直) > 基本=完全(平行) > 完全。除完全(平行)外其他結構皆有震幅漸大的趨勢，而變化幅度則是完全(垂直) > 完全 > 基本型。
- 八、實驗五中使結構破壞的主因是"加速度大小"而"非震動幅度"。
- 九、在持續許久的強震中，與搖晃方向相同的剪力牆是最有效的抗震結構。
- 十、地基加裝抗震裝置(如：吸震海棉)確實能在 2cm 左右時最有制震的效果，但當吸震海棉厚度過高時，反而形成人造柔軟的地基使搖晃更劇烈。

捌、參考資料及其他

- 一、國立臺灣科學教育館-歷屆科展作品(49~59 屆)
- 二、國家實驗研究院國家地震工程研究中心.安全耐震的家-認識地震工程
- 三、你所在的大樓會與地震共振嗎? 2017.每日頭條.資訊
- 四、【科學不一樣】「共振效應」破壞力加倍 抗震建築緩衝搖晃 2015.生活
- 五、國研院國震中心
- 六、如何防震、隔震、減震? 一次搞懂建築「抗震」原理 2016 The News Lens

玖、未來展望

- 一、實驗為研究單純方向晃動情形，缺乏對於混合地震(垂直和水平震動)強度的比較，希望未來能夠做到同時探討，將對地震情形觀測有更大幫助。
- 二、地殼非均質，地基也不會如實驗中完全連接地面。現實裝地震波傳遞的方向、能量大小也將受地層結構影響，不論是厚薄、軟硬，皆會改變地震波的性質。
- 三、製波器造成的能量與實際地震的能量即有明顯落差，因此目前僅能針對情形探討，而非以實驗數據比及實際地震數據。
- 四、上述討論僅在建築物橫梁與搖晃方向垂直或水平的情況進行，現實狀況中地震的搖晃方向並不會總是與建築物橫樑成特定的角度，應試著討論不同角度時的各種情況。
- 五、應利用感測器放置各樓層用以監測數據，這樣的方式會比我們用拍攝影片再以軟體分析的方式更為精準。

【評語】 052401

本作品透過水平搖晃槽及垂直震動器模擬地震發生時之S、P波，並以造型棒、頂點珠模擬鋼骨結構受震，觀測各不同樓層、底面、抗震裝置下其搖晃程度及破壞位置等，並探討建築物破壞點和抗震力關係及制震裝置等之功效。探討重點：(一)建築物破壞點和抗震力關係、(二)建築和地震來向關係、(三)梁柱、結構對稱性對耐震程度關係、(四)制震裝置等之功效。雖然模型簡單易於操作，測試結果所得到之基礎定性結論(高對稱性或樑柱較多之抗震力較高)與一般常識也相合，但其建築結構與連接方式可能仍無法與現實相符，以至於其參考價值未能彰顯。若能清楚掌握地震工程中之結構分析的力學原理，如扭轉剛度、撓曲剛度、質量慣性、構件內力與結點力平衡等，可使實驗設計及結果更能充分反映結構抗震能力之特性。

有關建物受地震影響及抗震研究的文獻及科展作品相當多，作者宜蒐集相關文獻與本實驗結果進行比較，以凸顯本作品研究亮點。實驗數據整理及圖表的呈現宜參考正式學術論文或報告之格式。

作品海報

摘要

本研究主要以水平搖晃槽模擬地震發生時之P波並以造型棒、頂點珠模擬結構的受震情形。觀測各建築在不同搖晃方向下其搖晃程度及破壞位置的差異，研究所呈現的有：(一)建築物破壞點位於何處、(二)不同底面的建築物晃動時的差異(三)剪力牆和地震來向關係、(四)此裝置下增加地基的抗震效果如何、(五)面對地震來向不利於結構時的應對方式

壹、研究動機

由於台灣的地理位置特殊，地震時常是我們必須得面對的事物，從小到大也學過許多關於地震 避震的知識、守則，而卻很少聽過地震搖晃方向會不會對同一建築物造成不同的影響，基於好奇我們開始研究不同的晃動方向與建築物的關係，除此之外，在晃動的運動模式也不甚熟悉，對於力具體如何影響建築物，我們一竅不通，於是才有接下來的一切實驗。

貳、研究目的

- 一、找尋建築物在搖晃時的破壞點
- 二、探討建築物底面不同時，水平晃動以及垂直晃動影響的情形(底面正三角~正六.H.L.T型)
- 三、探討剪力牆與晃動方向夾不同角度時的晃動情形、並看在特定情況下、建築物的運動有無疊加性
- 四、探討在模擬地基時，不同深度的地基對晃動幅度的差異如何。

參、研究設備及器材

一、研究器材

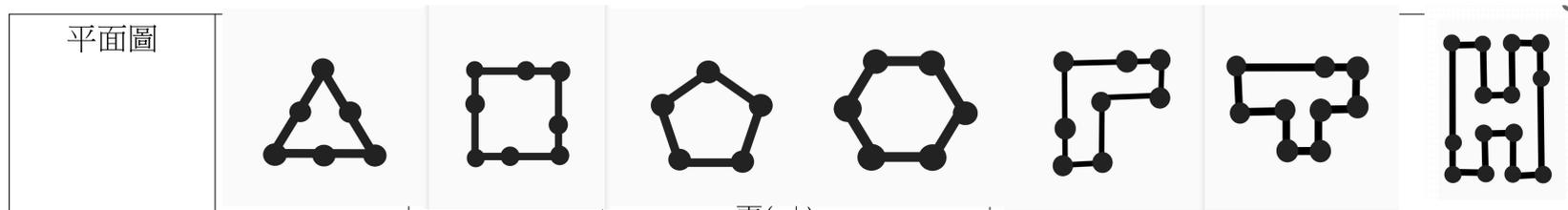
(一)造型棒、頂點珠組合

模擬各種結構鋼骨大樓：

1.製作方法：

計算各種造型棒長度，拼接成底面積相近、且每層重量相當的等高6層樓結構。

2.平面圖



表(一)

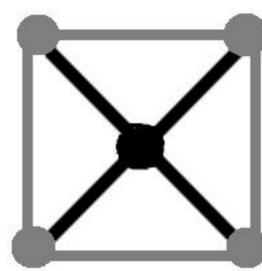
模擬剪力牆及其建築結構:

1.製作方法:

以兩等長造型棒做邊長，搭建兩層高的正立方體結構。(如右圖)

(二)堆疊積木組(用以找尋破壞點)

底面皆為6塊積木，每棟18層樓



	一字形	十字形	口字形	凹字形	工字形	L形	T形
實際圖							

表(二)

(三)水平搖晃槽、垂直震動器、土地、富有彈性的結構

1.水平搖晃槽：

以木箱及紙板加高底座，使建築物置放於上易於觀察，並在側邊固定支架以利從高處拍攝。

2.垂直震動器：

以物理頻率播放器改裝，在喇叭上加裝鐵片、紙板供模型固定。

3.以收納箱裡頭裝滿培養土(較砂土輕，機器才得以晃動)在將紙板固定在收納箱口，最後放置建築物，再穿孔插入造型棒用以模擬地基。

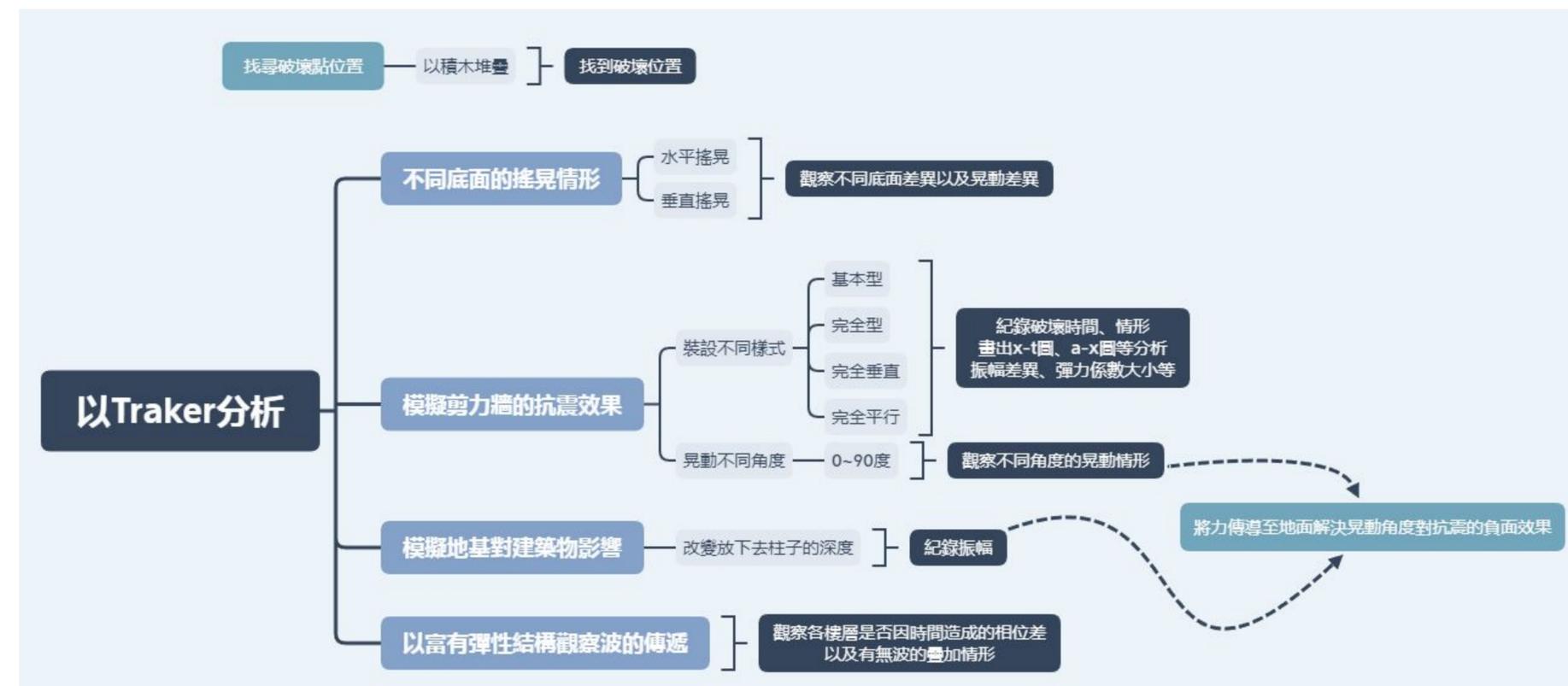
(模擬地基的方法如右圖)

4.彈性結構(詳見下兩頁)



紅色部分為造型棒
棕色則是培養土

肆、研究過程及方法



伍、研究結果

一、積木堆疊找尋破壞位置

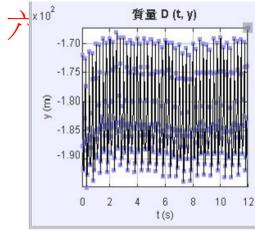
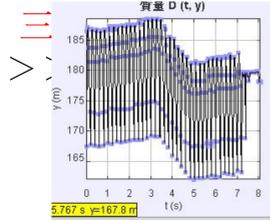


- 1.我們發現在相同搖晃頻率時，建築物主軸若平行水平搖晃方向，則其破壞處通常較少(倒塌數)且破壞點通常較高，抗震力相對較佳。其中尤以結構最單純的一字型最為明顯，其在50rpm時，主軸平行不倒塌，而主軸垂直則全倒。
- 2.不計入100rpm時一字形的數據，我們可以發現破壞高度以3~4、5~6、7~8處為最多，故推論最常發生破壞的位置為1/3~1/2高度處。

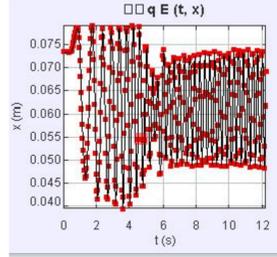
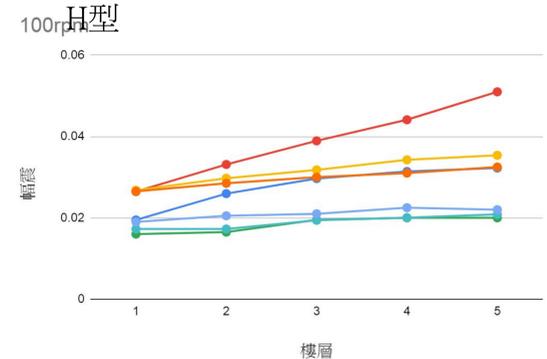
二、不同建築結構在水平以及垂直震動的情形

(一)各結構垂直震動拍攝測量結果:

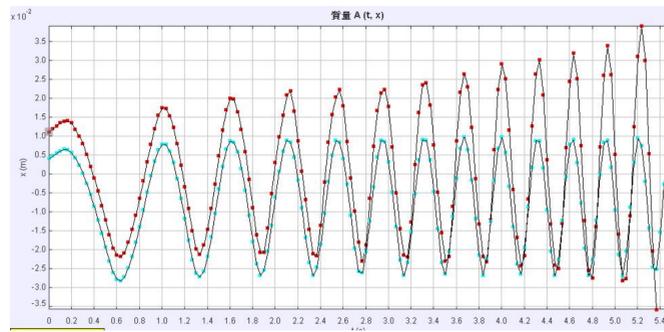
- 1.在垂直震動中是梁柱數量對抗震性質有挺大的影響。



- 三角型
- 正方形
- 五邊型
- 六邊型
- L型
- T型
- H型

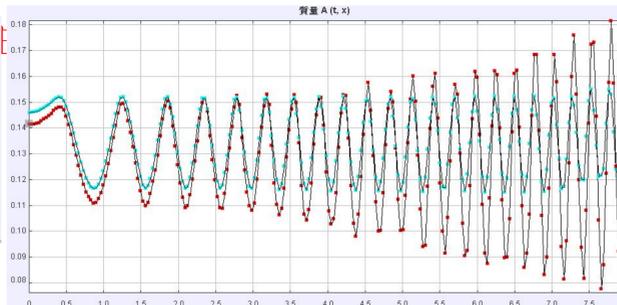


二、各x-t圖(紅點為二樓的頂點珠、藍色為水平晃動器)基本型



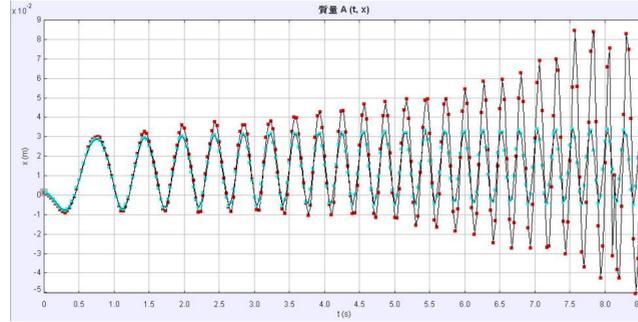
在基本型裡可以看到震幅隨時間而稍微遞增，在與晃動槽的比較中可以發現兩者頻率幾乎相同鋒對鋒 谷對谷。

完全型



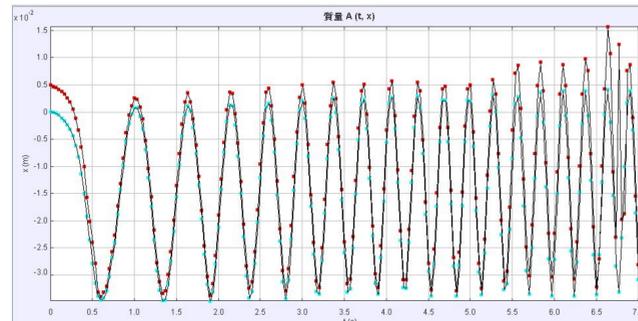
離結構毀壞時在完全型當中，震幅會隨著時間遞增，其最終的晃動的幅度比晃動槽的兩倍還多。除外在晃動到較後期，頻率方面二樓處較晃動槽本身略高一點。

完全(垂直)



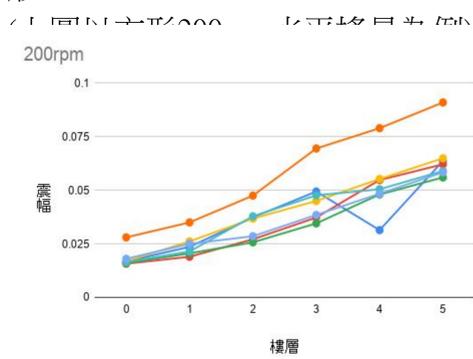
毀壞時間t=7.62
完全(垂直)一樣震幅會隨著時間遞增，而震動幅度是增加最快的，最終震幅略超越晃動本身的3倍。頻率方面也是後期較晃動本身略高一點。毀壞時間t=8.63

完全(水平)



完全(水平)的狀況與其他三者完全不同，其震幅變化很小，與晃動本身近乎重疊，頻率方面也是如此。毀壞時間t=∞
晃動三十秒以上也未看其有明顯破壞

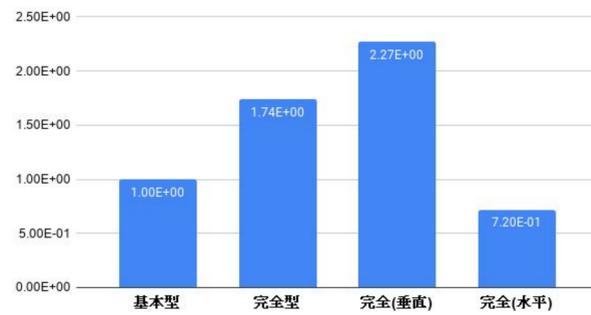
- 1.建築物搖晃幅度隨搖晃槽頻率增加而變大，樓層越高擺幅越趨明顯。
- 2.建築物有橫梁斷裂脫落時，有震幅因而減小且搖晃變穩定的情形。



導致其震幅不如斷裂前

將基本型設為1 做最大震幅比較 越大振幅與破壞時間並無直接關係

最大震幅比較(各類型/基本型)



但在破壞程度上則有一定的相關性，我們發現越大震幅破壞程度就越大。

- 3.考慮影響結構穩定性較主要因素有對稱性及直柱數，其排列如下:

對稱性(對稱軸數):

六邊形(6)>五邊形(5)>正方形(4)>三角形(3)>H形(2)>T形(1)>L形(0)
就上圖觀察依各結構震幅做出趨勢線比較斜率其結果如下:

200rpm(震幅變化傾斜度):三角形<H形<六邊形<T形<五邊形<正方形<L形

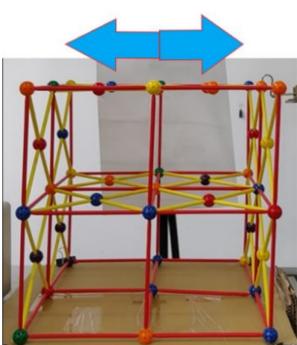
發現有在結構模型裡，對稱軸數與柱子數對於震幅變化幾乎沒有直接關係的，於是我們搭建此層高的模型，分別有兩與四種關係性，於是轉而深入探討其他抗震要素。



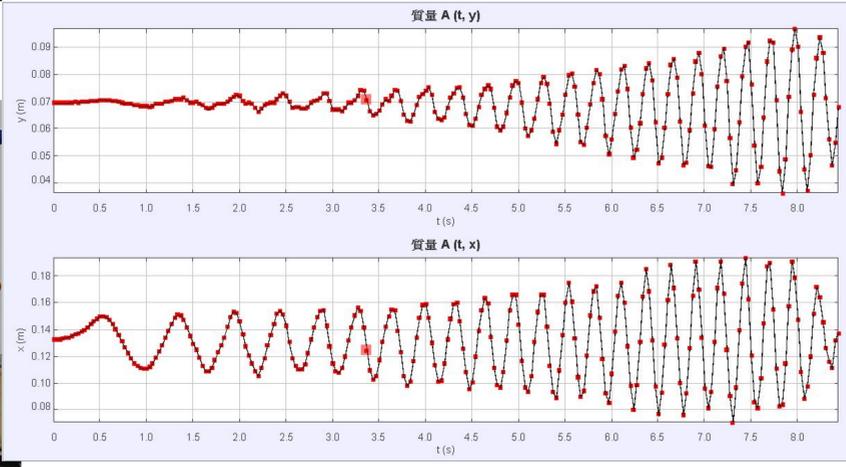
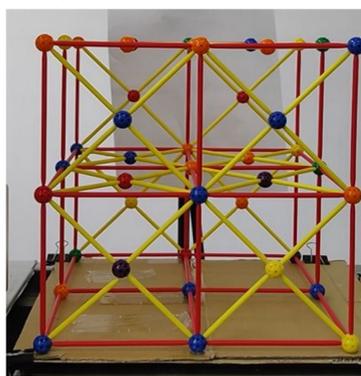
四、改變剪力牆與晃動方向的角度

在這裡我們以5度為單位討論0~90度的運動情形，有別於前面的實驗除了x方向外、也有y(垂直晃動方向)方向的運動。以下以60度的x-t圖、y-t圖作為舉例

完全(剪力牆垂直晃動方向) 晃動方向

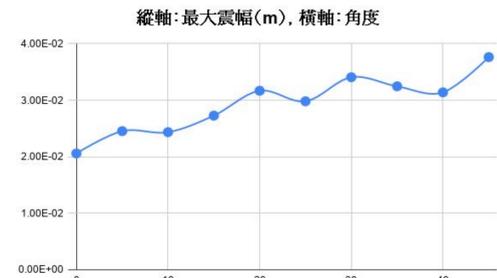


完全(水平)



可以發現兩個方向皆有類似波函數的圖形，不過兩者的時間有相差約0.033秒，頻率的部分則無差異。除此之外，兩者的震幅比例為0.102:0.059 比值約為1.728
破壞時間t=8s

以統計圖比較各角度的差異

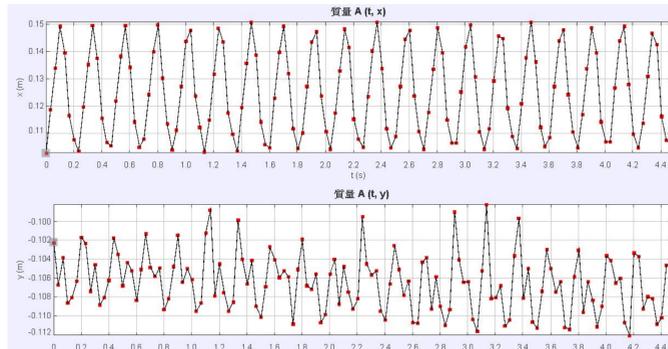


0~45度時x方向的震動幅度與角度正相關且大多數都不會有大範圍的破壞而45~90度時x方向的震動幅度時常晃一晃就壞了而與震幅沒明顯關係

由於建築物的不對稱性在此不深入研究x跟y的關係改以全部牆壁都裝設的模型探討，兩個方向的運動以及是否可由上面模型中30度+60度的運動情形，推得都裝設的模型的運動狀況

五、將四面牆都安裝剪力牆

x-t圖與y-t圖跟上個實驗有所不同(下圖為45度的圖)



從圖中可以發現其x-t圖震幅並無明顯增長而y-t圖的部分則呈現一有規律的圖形，在此推論是因為我們的建築物各樑、柱並不是都相同以及角度難以精準至45度，所以會有偏向一方的狀況發生

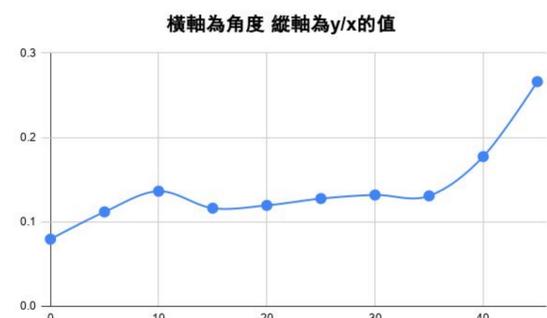
破壞時間 $t=\infty$ ，都是微小的破壞(有時會讓晃動變小)

將上個實驗30度與60度的最大震幅(x方向)相加，與全部都裝比較。

30度:0.055 60度:0.124 全都裝:0.048 從以上的數據發現

很顯然的這種模型下並無運動疊加的樣子。

X方向最大震幅與Y方向震幅隨角度變化的比值。



發現在0~35度時y/x值並無顯著增加但在40和45度時，y的震動幅度大幅上升。(原始數據中x的震幅並無大變化都在0.46m左右而y的震幅都有些微上升)

在四面牆都裝剪力牆的實驗中，雖結果好像很好，幾乎都不會大範圍破壞，但在實際實驗時，整個建築物相當緊繃，破壞確實沒很大，常常是牆的造型棒斷掉，我們認為這在有承重、晃動更大的狀況下，超過建築物能承受的震幅時，毀壞情形會無法想像。

六、引進地基以及用以分散剪力牆壓力的柱子

完全(平行)時沒有地基時晃動幅度為0.045(m)

當地基長度0.141m時，晃動幅度為0.043(m)

當地基長度0.100m時，晃動幅度為0.044(m)

由上面的數據發現，這模型中地基長度只有些許的影響而長度也略為正比於影響程度



加入一造型棒連結地基與造型棒如右圖

陸、討論

一、在不同底面的實驗中，我們發現有些綠色的造型棒特別容易鬆脫，在實驗時雖盡量避免使用品質較差的造型棒，但依然還是無法改變造型棒品質差異所造成的誤差問題，在之後的實驗我們都改用紅色與黃色的造型棒(這兩種相對穩定)，從這裡看出這個模型因為各個棒子的差異性以及耗損性，並不會是模擬建築物最好的方式，連接方式是非連續的特點，可能造成地震能量或地震的力傳遞上與現實不符。

二、嘗試以駐波模型去討論125rpm軟棒的運動情形，駐波方程式如:

樓層	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F
k值	9.75	3	1.92	1.74	1.49	1.4	1.17

k值在3F~7F間量值較為接近，推測所謂駐波的模型可能只適合在3F~7F間。不過明顯在125rpm運動時找不到腹點的位置，雖以圖形及能量累積的觀點我們推測與駐波有相似的運動行為，但這模型明顯有些錯誤的地方，例如波的能量可能會遞減、反射波不只是在頂樓才會反射，每層樓都會有一點反射波，目前我們的假設還有非常多可以改進的地方。

柒、結論

- 一、最常發生破壞的位置約為總高度1/2~1/3的樓層，主軸是否平行晃動方向是抗震力的關鍵。
- 二、建築結構主體如有縱橫交錯(如十字、H形等)，有提升抗震的效果。
- 三、微小的結構破壞不一定會引發後續的破壞，時有結構破壞後晃動幅度減小的情況。
- 四、在完全型與完全(垂直)時，都有發現頂樓處頻率稍微增快的情形。
- 五、雖完全型與完全(垂直)能增加建築物存活的時間，但其也因存活較久、震幅疊加較大而破壞嚴重。
- 六、在持續許久的強震中，與搖晃方向相同的剪力牆是最有效的抗震結構。
- 七、搖晃方向與建築物耐震程度有相當大的關聯性，在接近45度時X軸與Y軸都會有規律晃動的情形，而角度偏離平行，通常越糟。
- 八、增加如第六點的造型棒，能有效抵抗由地震方向不同造成的負面影響。
- 九、在此模擬裝置中，我們模擬地基的方式

捌、參考資料及其他

- 一、國立臺灣科學教育館-歷屆科展作品(49~59屆)
- 二、國家實驗研究院國家地震工程研究中心.安全耐震的家-認識地震工程
- 三、國研院國震中心
- 四、如何防震、隔震、減震?一次搞懂建築「抗震」原理 2016 The News Lens

完全(垂直)在之前的實驗非常不穩 多加4個造型棒後震幅從0.14 --> 0.134 破壞時間從 $t=8.36$ --> 13.16 從上述發現抗震能力顯著提升 接下來我們在增加地基

增加一個長為0.141(m)的地基

震幅從0.14 ->0.1242 破壞時間從 $t=8.36$ ->11.779

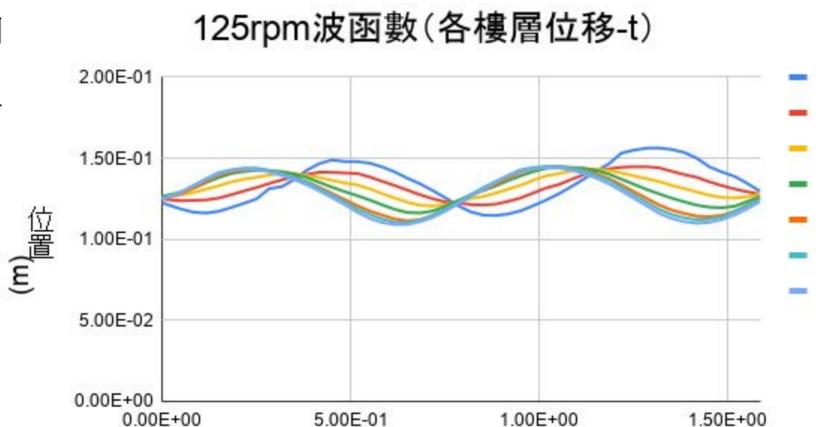
增加一個長為0.100(m)的地基

震幅從0.14->0.1309 破壞時間從 $t=8.36$ ->11.62

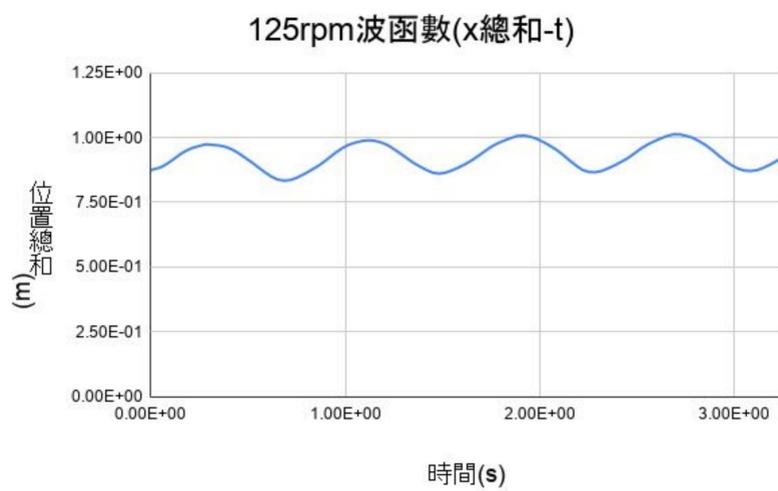
從以上數據看似加地基對震幅有關，但仔細觀察後，我們發現在無地基時， $t=11.7$ 左右時震幅為0.112，由此得到結論在**這個模型下我們所模擬的地基對抗震能力幾乎毫無幫助**

七、彈性結構搖晃

(一)各樓層位對時間圖



(二)各層位置總和對時間的波函數



樓層	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F
最大震幅	0.021	0.0135	0.013	0.0155	0.0165	0.0185	0.018

震幅最大值的總和為0.166m (平均每層樓位移0.024m)大於水平搖晃槽震幅 0.0175m 符合能量疊加的假設。

各樓層晃動幅度呈現2、3F小 5、6F大的情況，這個原因我們推測是因為上端是自由端，波反射時會同向反射造成震幅變大，底段是固定端，波反射時會反向反射造成震幅變小。

$$y = 2y_0 \cos(\omega t) \sin(kx)$$