

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

探究精神獎

051811

擺盪在秩序與混沌的邊緣--流體阻尼球對建築物
耐震度的探討

學校名稱：臺中市立忠明高級中學

作者： 高二 廖紫君	指導老師： 邱志雄
---------------	--------------

關鍵詞：流體、單擺、黏滯力

摘要

實驗結果發現膨性流體阻尼球對建築物有最好抗震能力。由混沌擺(雙擺)的光軌與不同長度單擺及雙擺擺動時間比較的兩個實驗，可觀察雙擺的下擺擺動可減緩上擺的擺動幅度，當總長 35cm、32.5cm、30cm(上擺長度固定)，較單擺而言可減少擺動時間的比率分別為 52.2%→47.7%→38.5%，而上擺能量衰減功率比值依次 2.071 倍→1.875 倍→1.670 倍，推知雙擺上下擺不同擺向、速度，產生干涉波可減少擺動時間與能量。將雙擺原理應用於建築物的流體阻尼球，利用流體特質，模擬上、下不同擺速的雙擺，由實驗結果推得，建築物受定力搖晃時，建築物水平加速度分別為：膨性流體(115gal) < 鹽水(172gal) < 水(207gal) < 偽塑性流體(334gal) < 剛性阻尼(346gal)，若將膨性流體應用於超高樓的阻尼球中可穩定建築物，並可利用其擴溶效應，避免阻尼球受外力時引發的變形，以增長使用年限。

壹、研究動機

某次在網路上看到混沌擺的實驗，影片中以 LED 燈所產生的光軌，呈現出雙擺擺動的軌跡，雙擺所展現的不可預測性與美麗軌跡弧線，深深印在我腦海裡。暑假到 101 大樓參觀，看到那 660 公噸像單擺的阻尼，它的存在大大降低超高樓因風所產生的自然振盪頻率，讓我們即使待在大樓也和在地平地的感覺相同。101 大樓的單擺阻尼與混沌擺的影片，這兩個看似不同又似相同的特質在我腦中一直產生許多疑惑，所以我決定試著探討雙擺的混沌擺與單擺的擺動的差異，雙擺較單擺是否可更快速將擺動穩定下來？是否可以把雙擺的原理應用在高樓的阻尼球中？或是在阻尼球中盛裝不同黏度的流體，利用其流體層流的特質模仿雙擺的阻尼效果？

貳、研究目的：

由實驗一：雙擺在不同角度擺盪的光軌實驗與實驗二：單擺與雙擺擺動至停止的時間與上擺能量衰減功率比較，兩實驗所蒐集的數據可以分析出混沌擺(雙擺)有穩定上擺擺動幅度與減緩擺動時間與能量的功用，利用上述實驗結果，並應用混沌擺的特性，改變建築物阻尼球的材質，以找出最佳效果，以下分為三個研究方向。

- 一、分析無阻尼與剛性阻尼的兩種建築物，受定力時建築物擺動時間與水平位移，探討其現象與原理。
- 二、改變阻尼的擺長，分析受定力時，建築物擺動時間與水平位移，找出最佳擺長並探討其現象與原理。
- 三、改變阻尼球的材質、黏度、與流體種類，分析受定力時，建築物擺動時間與水平位移，推導能量由基座傳至建築物所衰減的情形與建築物受力時的水平加速度，找出最合適的阻尼球並探討其現象與原理。

參、研究器材和設備

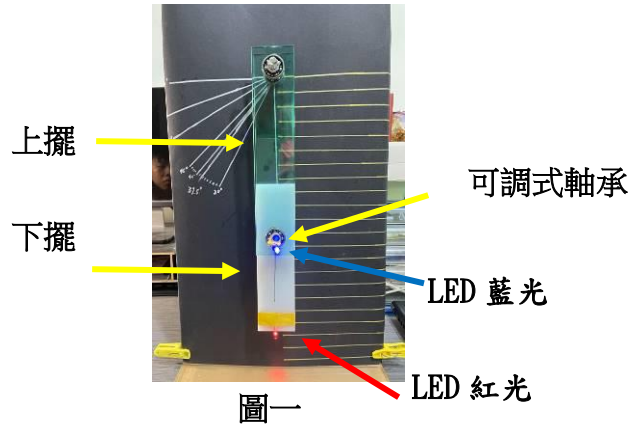
名稱	規格	數量	照 片	名稱	規 格	數量	照 片
上擺	25cm* 2cm	2		鋼製水 管	半徑:1/2 公寸 長 度:30cm	4	
下擺	20cm* 2 cm	3		90 度水 管	半徑:1/2 公寸		
雙擺組 合				塑膠底 板	35cm*26c m		
LED 燈	2V 紅光及 藍光	數個		建築物 底座		1	
水銀 電池	3V	數個		建築物		1	
LED 及 電池的 組裝				液態阻 尼承裝 容器	5 克	1	
智高	各種尺 寸	兩箱		流體黏 滯力實 驗裝置	25cm	1	

肆、研究步驟：

一、設計雙擺，以藍、紅色光的 LED 分別置放雙擺的上擺與下擺下緣，改變擺角 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° ，以手機拍攝連續曝光 10 秒的光軌照片

(一)雙擺的設計

- 1.以 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的壓克力板作為底座，再以 $44\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的壓克力板直立於底座作為雙擺的支架，在高度 40cm 處放置直徑 1cm 的滾珠螺桿與直徑 1cm 的滾珠軸承，並以螺絲固定單擺與軸承的位置。
- 2.在滾珠螺桿上放上並排的兩個 $25\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的綠色壓克力板作為上擺，下方放置 $20\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的白色壓克力板作為下擺。如右(圖一)所示。
- 3.改變下擺滾珠軸承的位置，形成總長分別為 30 、 32.5 、 35cm 的雙擺三組。



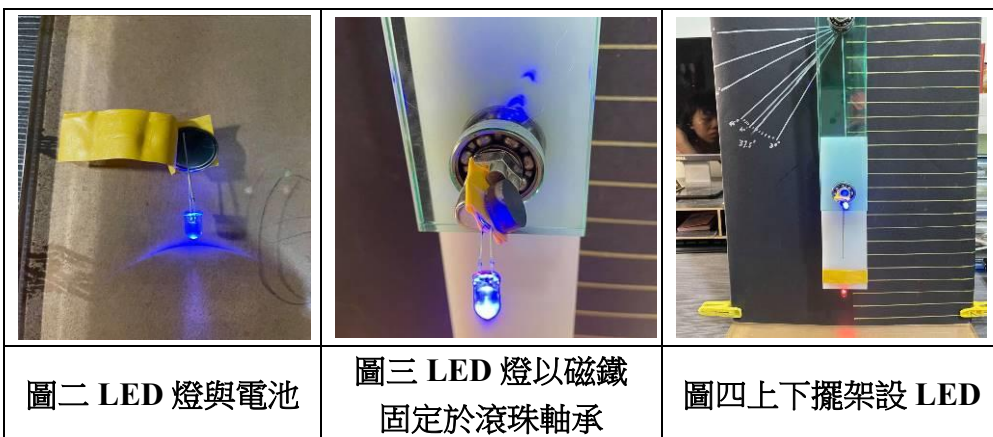
圖一

(二)雙擺角度的設計

在雙擺後方黏貼黑色的紙，在雙擺右側繪製等距 cm 的白線以方便觀測，在左側繪製角度分別為 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° 。

(三)LED 燈的設計與光軌的拍攝

- 1.製作可拆卸的 LED 燈，將 LED 燈與 3V 的水銀電池串聯，再以電器膠布網綁(如下圖二)，為了方便觀測，選擇紅、藍顏色差異較大的 LED，因下擺擺動較不可預測，故在下擺放置紅色 LED 燈，並以強力磁鐵作為固定。(如下圖三、四)
- 2.擺長為 30cm 的雙擺，控制上擺擺角 θ_1 分別為 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° ，下擺擺角 θ_2 為 0° ，以長曝光 10 秒拍攝雙擺光軌。
- 3.改變擺長長度(擺長 32.5cm 、 35cm)，重複步驟 2。



二、分別測量單擺及雙擺，在分別擺長 30cm 、 32.5cm 、 35cm 長度下，改變擺角 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° ，測量其擺動停止所需的時間與上擺能量衰減的功率。

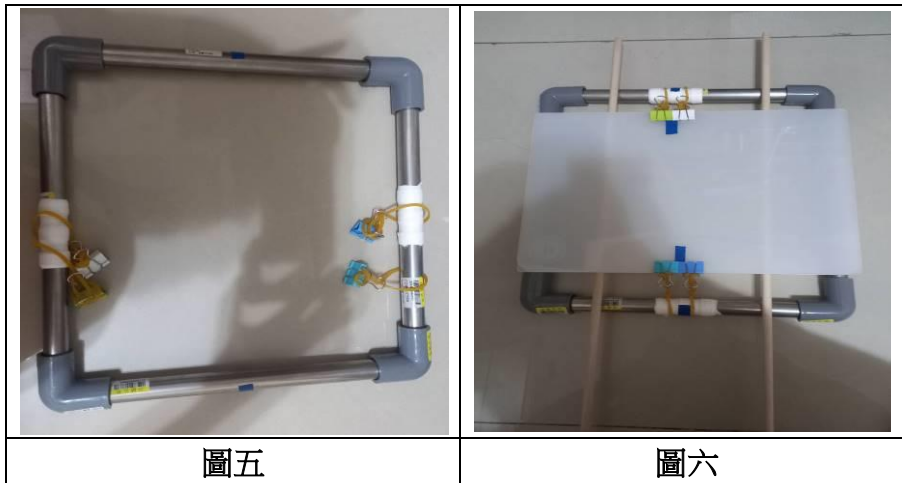
(一)以橡皮筋固定雙擺，形成長度分別為 30cm 、 32.5cm 、 35cm 單擺，分別測量當擺角為 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° ，擺動停止所需的時間，測量 3 次取其平均值。

- (二)長度分別為 30cm、32.5cm、35cm 雙擺，分別測量當上擺擺角為 90°、75°、60°、45°、30°，擺動停止所需的時間，測量 3 次取其平均值。
- (三)以 Excel 做出相同長度單擺與雙擺停止擺動時間的比較圖，探討及分析其現象。
- (四)並分別算出相同長度雙擺與單擺上擺能量的衰減功率。

三、製作地震模擬器

(一)製作基座

- 1.以四個長為 30cm 的鋼製水管與直角水管結合成方形底座。(如圖五)
- 2.以 35cm* 26cm 的塑膠片為建築物的底板。
- 3.在塑膠板上放置兩~三個長 60cm 圓棍，減少因晃動所造成的摩擦力。
- 4.在塑膠地板上以二個長尾夾夾住後，將長尾夾與塑膠水管以彈性繩作底座與水管間的連接。(如圖六)
- 5.以彈性繩長度的形變量作為建築物因地震搖晃所受的不同力量大小
- 6.測量彈性繩的彈性係數，測得單條彈性繩受力 $x(\text{nt})$ 與全長 $y(\text{m})$
 $y = 258.65x - 1.3702 \quad R^2 = 0.98$ (確認彈性繩受力皆落於於虎克定律範圍)



圖五

圖六

7.模擬地面所釋放的能量大小

將兩條彈性繩並聯,其彈性係數為單條彈性繩的兩倍。進而可用彈性繩形變量的改變，得知基座釋放的能量大小。

8.模擬建築物震動週期

建築物本身亦存在自然振動模式，而來回運動一次的時間稱為自然振動週期。若是地震的震動週期與建築物自然震動週期相似，建築物就會產生共振效應而有較大程度的搖晃。本次實驗為模擬地震真實情況。故地震周期參考建築物震動週期經驗公式 $T = 0.85 h^{3/4}$ (單位：T→ s/次)，本建築物設計高度為 45cm，周期約 0.5 s/次。

(二)建築物的設計

- 1、使用 Gigo 積木，以 15cm 長的黃色積木建築三層樓的建築本體(如圖七)，為模擬地震產生晃動效果，在樓層連接處使用長 11cm 的紅色積木並以旋轉軸作為兩者連接。(如圖八)
- 2.為穩定建築本體，不要因晃動而造成建築物解體，將 5cm 長灰色積木在積木連接處以固定軸作為固定。(如圖九)

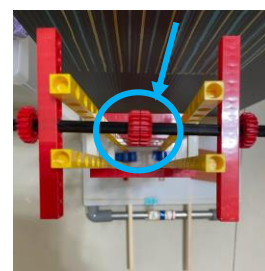


3.在頂樓黑色中長軸，兩側以齒輪固定，此處置放建築物的阻尼器。(如圖十)

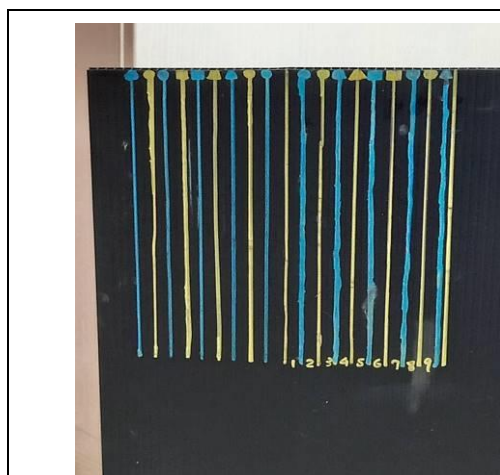
(三)底座與建築物的結合

(四)改變建築物受力大小

在建築物後方直立一黑色板子，以觀測建築物搖晃的振幅(如圖十一)。改變底座彈性繩的伸長量(如下圖十二)，以建築物自然振動頻率 2 Hz 進行震動，觀察在三個不同大小力量下，錄影紀錄建築物搖晃的水平位移與頻率。



圖十 懸掛阻尼處



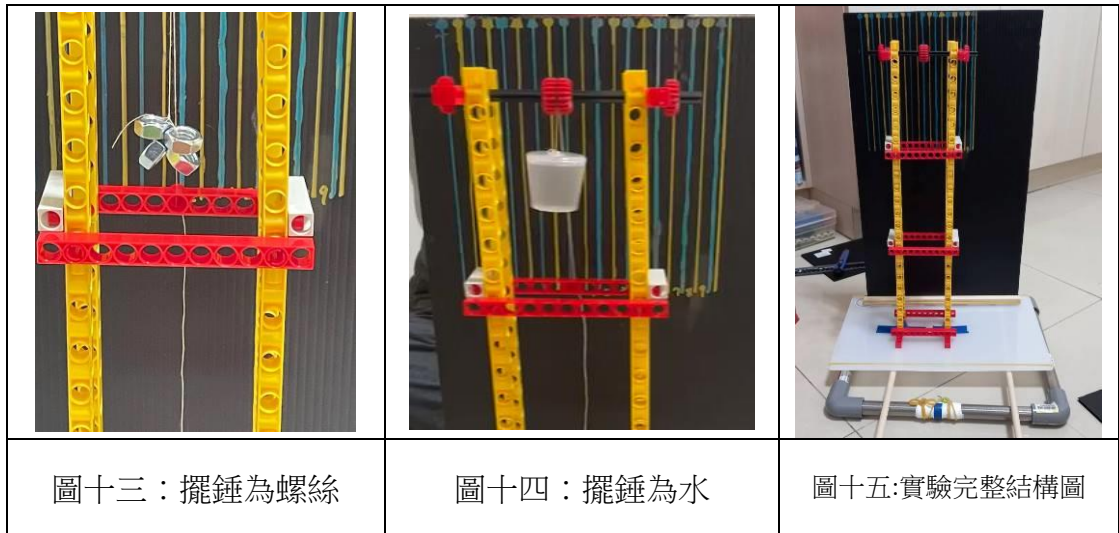
圖十一 觀察建築物振幅的板子



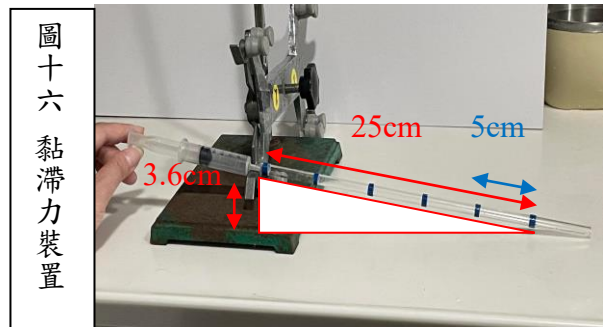
圖十二 彈性繩伸長量的改變

(五)架設阻尼器

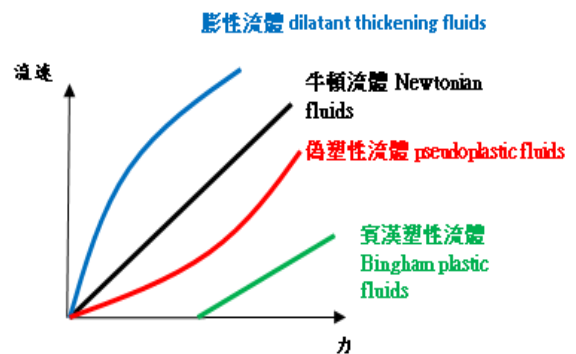
- 1.製作剛性阻尼器，擺錘質量 20 克的螺絲(如圖十三)，改變其擺長，擺長分別為 3、6、9cm，測量在震動力量為振幅 1，振動頻率為 2 Hz，錄影紀錄並繪出建築物擺動水平位移與時間的關係圖。
- 2.製作液態阻尼器，擺錘為質量 20 克的水阻尼(如圖十四)，改變其擺長，擺長分別為 3、6、9cm，測量在震動力量為振幅 1，振動頻率為 2 Hz，錄影紀錄並使用 Windows Media Player 慢速(0.2 倍)播放，再繪出建築物水平位移與時間關係圖。



3. 製作液態阻尼器，改變水的黏度，故配置為質量 20 克重的 5%及 10%的鹽水溶液作為擺錘，擺長 6cm，測量在震動力量為振幅 1，振動頻率為 2 Hz，錄影紀錄並使用 Windows Media Player 慢速(0.2 倍)播放，再繪出建築物水平位移與時間的關係圖。
4. 製作液態阻尼器，擺錘質量 20 克重的非牛頓流體(分別有:膨性流體 dilatant thickening fluids—58%太白粉粉漿和偽塑性流體 pseudoplastic fluids—蜂蜜)，擺長取 6cm，測量在震動力量為振幅 1，振動頻率為 2 Hz，錄影紀錄並使用 Windows Media Player 慢速(0.2 倍)播放，再繪出建築物水平位移與時間的關係圖。
5. 上述無阻尼、剛性阻尼、不同長度剛性阻尼、流體阻尼(水、5%鹽水、10%鹽水、膨性流體、偽塑性流體)重複做三次，取每次建築物水平位移數值並推導平均值。
6. 測量流體黏滯力，為了方便觀測流體流動的時間，取 30cm 長玻璃管以 $\sin\theta=3.6/25$ 斜向置放(如右圖十六)，以針筒注射一滴流體(水、5%及 10%的鹽水、膨性與偽塑性流體)，觀察流動 25 公分所需的時間，推斷流體黏滯力。(參考普通物理實驗黏滯係數)

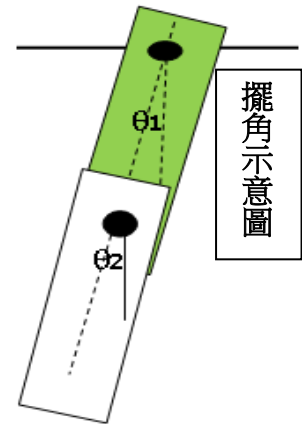


* 附註:流體分為牛頓流體與非牛頓流體，當溫度固定下，牛頓流體的黏度不會受壓力大小改變；而非牛頓流體，則會受壓力大小改變其黏度大小。非牛頓流體的膨性流體，會因壓力變大黏度也跟著變大；而偽塑性流體則會因壓力變大黏度反之變小。



伍、研究結果與討論：

一、以藍、紅色光的 LED 分別置放雙擺的上擺與下擺下方，改變擺角 90° 、 75° 、 60° 、 45° 、 30° ，以手機拍攝其 10 秒光軌照片

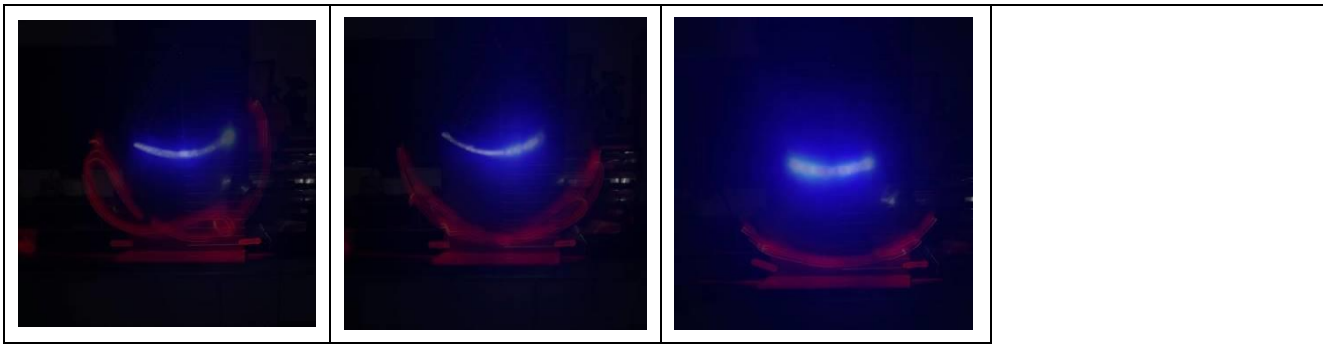


1. 雙擺長度 30cm

$\theta_1=90^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=75^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=60^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=45^\circ$ $\theta_2=0^\circ$
$\theta_1=44^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=40^\circ$ $\theta_2=0^\circ$		

2. 雙擺長度 32.5cm

$\theta_1=90^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=75^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=60^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=45^\circ$ $\theta_2=0^\circ$
$\theta_1=44^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=43^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=30^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	



3. 雙擺長度 35cm

$\theta_1=90^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=75^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=60^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=45^\circ$ $\theta_2=0^\circ$
$\theta_1=40^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=35^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=31^\circ$ $\theta_2=0^\circ$	$\theta_1=30^\circ$ $\theta_2=0^\circ$

實驗結果：擺長 35cm， $\theta_1 \geq 31^\circ$ 下擺會繞其固定點轉圈；擺長 32.5cm， $\theta_1 \geq 43^\circ$ 下擺會繞其固定點轉圈；擺長 30cm， $\theta_1 \geq 45^\circ$ 下擺會繞其固定點轉圈。
在相同擺角之下，相同質量的雙擺，其擺長越長，下擺繞固定點轉圈次數越多，軌跡也會越混沌。

實驗討論：當下擺繞固定點繞圈時，上擺擺動的角度變小；或當下擺擺動角度變大時，上擺擺動角度亦會變小。
探究其主要原因應是

1. 下擺轉圈時會耗損擺動所需的能量，所以上擺角度變小。
2. 下擺擺幅變大時，下擺需穩定的支點才能擺動或轉圈，所以此時上擺擺動幅度變小。

由此推論雙擺可以降低上擺的擺動角度。

二、測量 35、32.5、30cm 單擺分別以擺角 90°、75°、60°、45°、30° 擺動所需的時間;同時測量 35、32.5、30cm 雙擺以擺角 90°、75°、60°、45°、30° 擺動所需的時間，比較雙擺與單擺擺動時間的差異與上擺能量衰減功率。

※上擺 能量衰減功率的推導

上擺的質心距離支點為 L cm，質量為 m kg

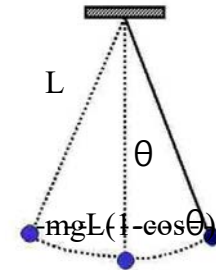
$L \rightarrow 11$ cm $m \rightarrow 0.32$ kg

定義上擺最低點的重力位能=0，

擺盪的角度為 θ ，上擺一開始的位能為 $mgL(1-\cos\theta)$ ，

擺盪至停止所花的時間為 t 秒

能量衰減功率為 $mgL(1-\cos\theta)/t$ J/s。



30cm 長 單擺與雙擺擺動時間與上擺能量衰減功率之比較

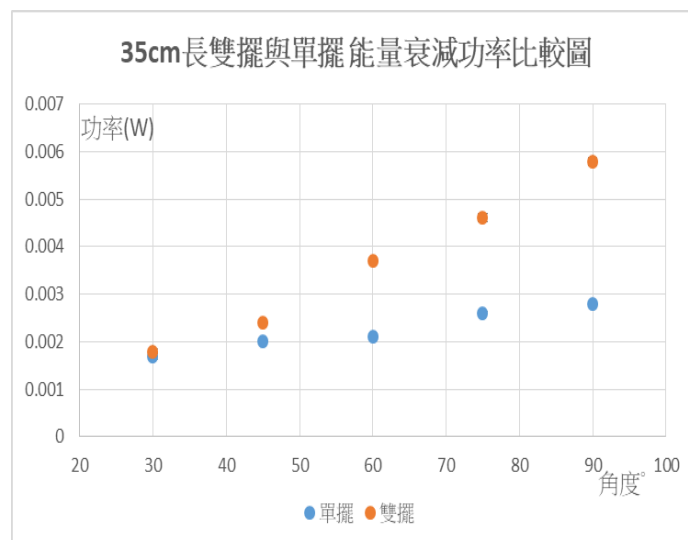
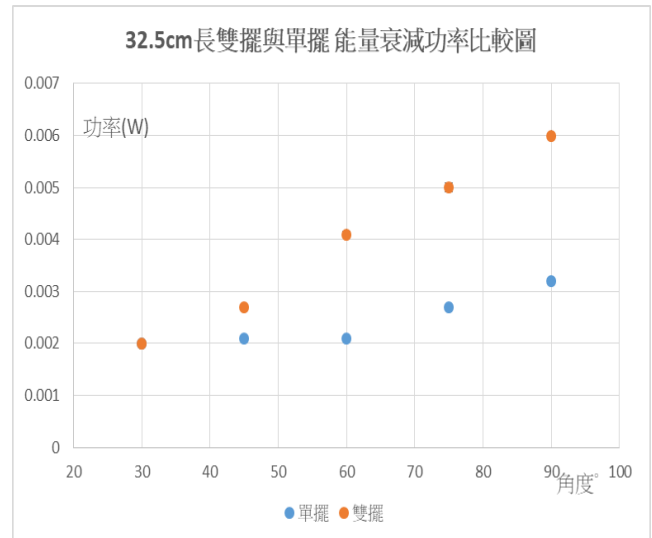
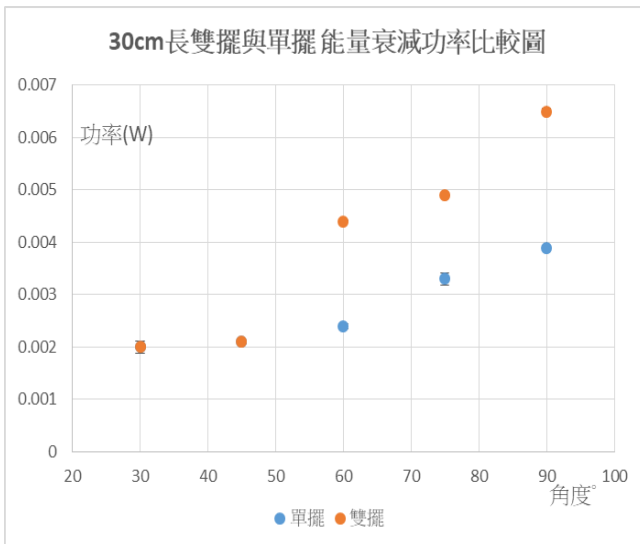
擺角	$\theta_1=30^\circ$ $\theta_2=30^\circ$			$\theta_1=45^\circ$ $\theta_2=45^\circ$			$\theta_1=60^\circ$ $\theta_2=60^\circ$			$\theta_1=75^\circ$ $\theta_2=75^\circ$			$\theta_1=90^\circ$ $\theta_2=90^\circ$		
單擺	15.55	16.79	16.20	49.32	48.54	48.69	70.88	71.86	71.73	77.73	78.03	77.52	88.03	87.63	85.58
	16.18 秒			48.85 秒			71.49 秒			77.76 秒			87.08 秒		
能量衰減功率	0.0020 J/s $\sigma=0.00153$			0.0021 J/s $\sigma=0.000023$			0.0024 J/s $\sigma=0.000015$			0.0033 J/s $\sigma=0.00001$			0.0039 J/s $\sigma=0.00004$		
雙擺	15.86	16.02	16.15	30.11	29.70	29.41	34.98	34.12	35.52	50.63	52.00	53.28	53.30	52.98	53.59
	16.01 秒			29.74 秒			34.90 秒			51.97 秒			53.29 秒		
能量衰減功率	0.0020 J/s $\sigma=0.000021$			0.0021 J/s $\sigma=0.000015$			0.0044 J/s $\sigma=0.00002$			0.0049 J/s $\sigma=0.00012$			0.0065 J/s $\sigma=0.00004$		

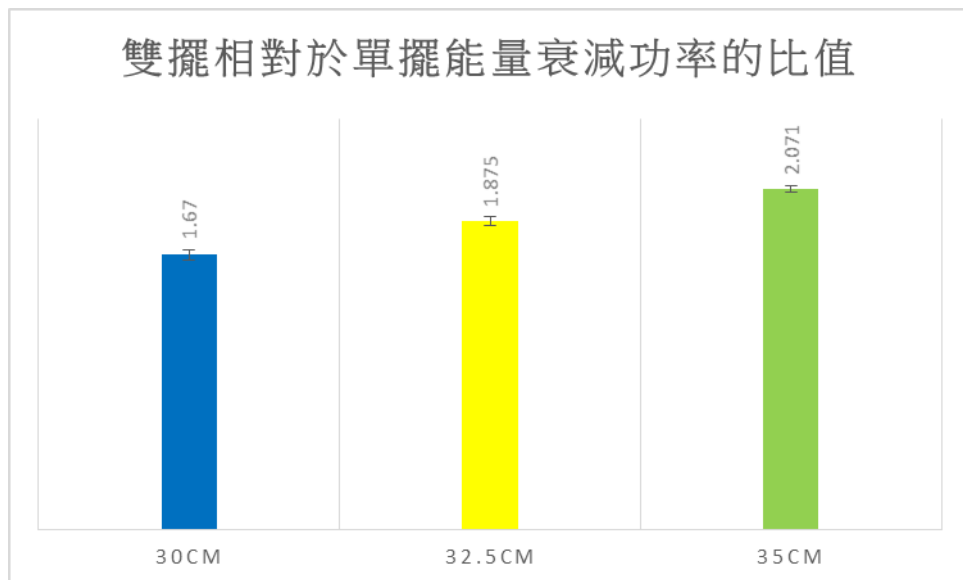
32.5cm 長單擺與雙擺擺動時間與上擺能量衰減功率之比較

擺角	$\theta_1=30^\circ$ $\theta_2=30^\circ$			$\theta_1=45^\circ$ $\theta_2=45^\circ$			$\theta_1=60^\circ$ $\theta_2=60^\circ$			$\theta_1=75^\circ$ $\theta_2=75^\circ$			$\theta_1=90^\circ$ $\theta_2=90^\circ$		
單擺	22.80	23.00	22.57	48.60	49.21	48.77	81.02	80.15	81.68	95.23	94.80	94.64	110.00	107.96	107.84
	22.79 秒			48.86 秒			80.95 秒			94.89 秒			108.6 秒		
能量衰減功率	0.0020 J/s $\sigma=0.000021$			0.0021 J/s $\sigma=0.000015$			0.0021 J/s $\sigma=0.00002$			0.0027 J/s $\sigma=0.000011$			0.0032 J/s $\sigma=0.000035$		
雙擺	22.30	23.01	22.22	38.11	37.42	37.72	43.07	42.23	41.81	51.00	52.01	50.29	57.00	56.88	57.39
	22.51 秒			37.75 秒			42.37 秒			51.10 秒			57.09 秒		
能量衰減功率	0.0020 J/s $\sigma=0.000038$			0.0027 J/s $\sigma=0.000025$			0.0041 J/s $\sigma=0.000066$			0.0050 J/s $\sigma=0.00008$			0.0060 J/s $\sigma=0.000026$		

35cm 長單擺與雙擺擺動時間與上擺能量衰減功率之比較

擺角	$\theta_1=30^\circ$ $\theta_2=30^\circ$			$\theta_1=45^\circ$ $\theta_2=45^\circ$			$\theta_1=60^\circ$ $\theta_2=60^\circ$			$\theta_1=75^\circ$ $\theta_2=75^\circ$			$\theta_1=90^\circ$ $\theta_2=90^\circ$		
單擺	26.75	27.88	25.62	50.03	49.11	49.96	81.00	82.02	80.07	96.59	98.88	97.89	124.68	125.50	126.11
	26.75 秒			49.70 秒			81.03 秒			96.78 秒			125.43 秒		
能量衰減功率	0.0017 J/s $\sigma=0.000075$			0.0020 J/s $\sigma=0.000023$			0.0021 J/s $\sigma=0.000025$			0.0026 J/s $\sigma=0.000026$			0.0028 J/s $\sigma=0.000015$		
雙擺	26.11	27.21	25.88	40.9	39.97	40.81	46.92	45.97	45.41	56.16	55.90	54.29	59.00	60.00	60.73
	26.40 秒			40.56 秒			46.10 秒			55.45 秒			59.91 秒		
能量衰減功率	0.0018 J/s $\sigma=0.000047$			0.0024 J/s $\sigma=0.000032$			0.0037 J/s $\sigma=0.00006$			0.0046 J/s $\sigma=0.000087$			0.0058 J/s $\sigma=0.000085$		





- 實驗結果**：(1)以單擺擺動時間來看， $35\text{cm} > 32.5\text{cm} > 30\text{cm}$ 。相同角度下，擺長越長其擺動有較大的重力位能，所以擺盪時間較長。
- (2)當擺角越大，可發現擺長越長，雙擺相較於單擺可減少擺動時間的比率分別為 $52.2\% \rightarrow 47.7\% \rightarrow 38.5\%$ ，說明雙擺的下擺可有效減少擺動時間，讓上擺擺盪很快達到平穩。
- (3)上擺能量衰減功率結果可推測，當擺角越大，上擺初始的位能越大時，雙擺能量衰減的功率明顯大於單擺。當下擺越長的雙擺，相對於相同長度的單擺，其上擺能量衰減功率的比值分別為 2.071 倍 \rightarrow 1.875 倍 \rightarrow 1.670 倍（全長 $35\text{cm} \rightarrow 32.5\text{cm} \rightarrow 30\text{cm}$ ）。

實驗討論：依實驗的結果可以發現，雙擺的混沌特性雖使擺動的變得難以預測，但也可發現其下擺可有效減少上擺擺動的時間與能量。而上、下擺就像是建築物與阻尼球的關係，若將阻尼球再填入不同流體，流體與器壁、流體間不同的黏滯力也如同雙擺特性，是否又比一般的剛性的阻尼球更能快速減少建築物的晃動，讓建築物盡快的平穩下來，所以進行下面阻尼球的研究。

三、探討建築物在不同受力下，其擺盪的頻率與振幅變化

實驗由兩條橡皮筋並聯, 其彈性係數為 $26.393 \times 2 = 52.786 \text{ gw/cm}$

$$F = 52.786 \times \Delta x \text{ (F 單位為 nt、} \Delta x \text{ 單位為 m)}$$

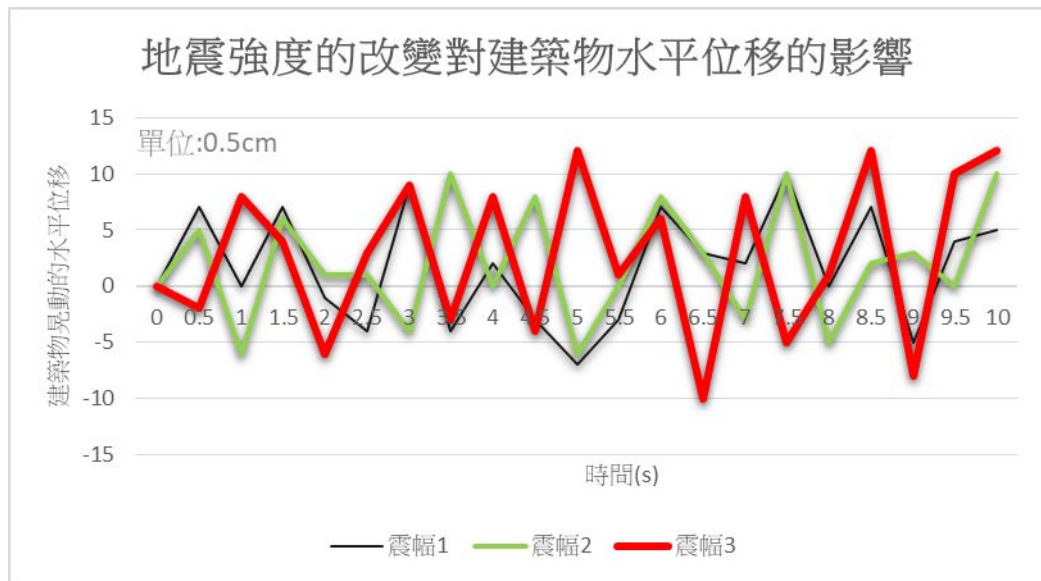
三種受力下，由小至大為振幅 1 ($\Delta x = 0.708 \text{ cm}$ 建築物受力為 38.16 gw)

振幅 2 ($\Delta x = 2.486 \text{ cm}$ 建築物受力為 134.02 gw)

振幅 3 ($\Delta x = 4.816 \text{ cm}$ 建築物受力為 259.62 gw)

* **建築物擺動週期的決定**：依參考資料非結構剛性牆，其基本振動週期 T (單位為秒) 之經驗公式為 $\rightarrow T = 0.85 h^{3/4}$ (h ：基面至屋頂面高度)

因為建築物製作高度為 45 cm ，可算出建築物基本震動週期為 0.5 秒，也代表在這基本震動週期下，建築物會受到最大的破壞力，所以以下的實驗皆以底座震動週期 0.5 秒進行觀察



實驗結果：由上圖結果可看出當建築物地震頻率相同時，建築物會地震產生共振現象，造成波的疊加現象而使建築物晃動的振幅變大。而受力越大，建築物晃動的振幅也越大。

實驗討論：依照地表振動頻率 = 2 Hz 週期 $T = 1/2 \text{ s}$ 振幅 1 \rightarrow 地表水平位移 $r = 3.5 \text{ cm}$

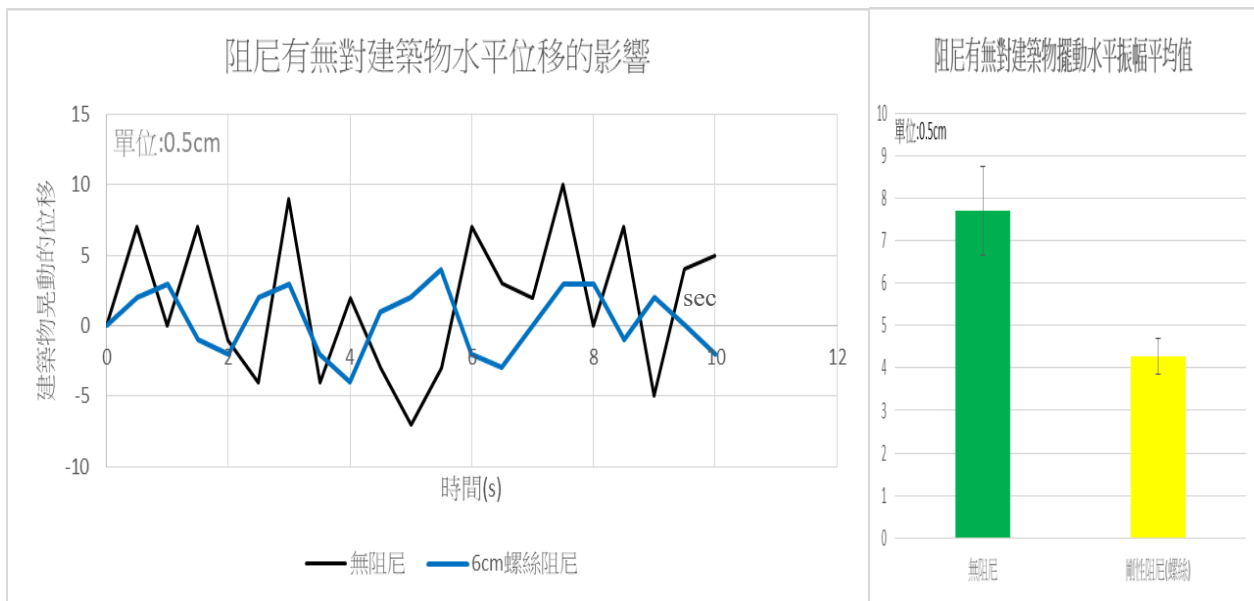
$$\text{角速度 } \omega = 2\pi / T \text{ 加速度 } a_c = \omega^2 r = 5.53 \text{ m/s}^2$$

$$\therefore 1 \text{ gal} = 0.001 \text{ g} = 0.0098 \text{ m/s}^2$$

$$\therefore \text{加速度 } a_c = \omega^2 r = 1.58 \text{ m/s}^2 = 564.29 \text{ gal} \text{ 已達震度 7 級的強震 (7 級震度加速度 } > 400 \text{ gal)}$$

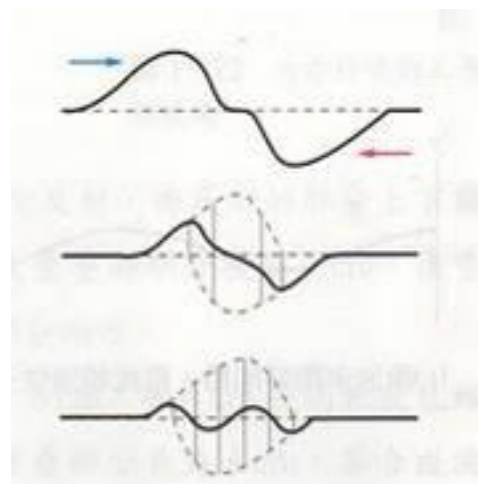
已助於實驗觀測的強度，之後皆以振幅 1 作為實驗觀測

四、探討阻尼有無及不同長度的剛性阻尼器對建築物耐震程度的比較

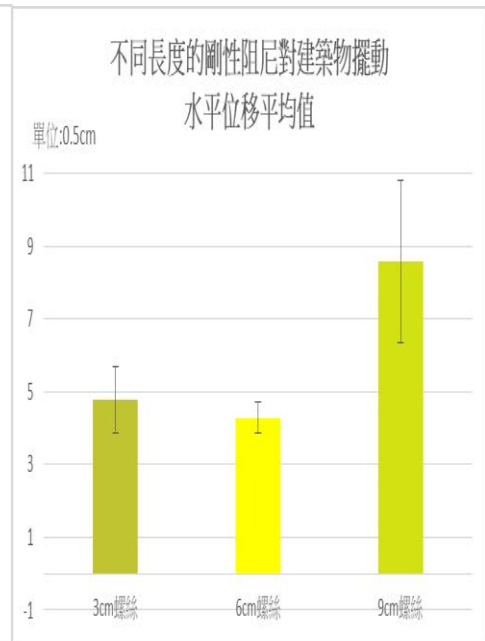
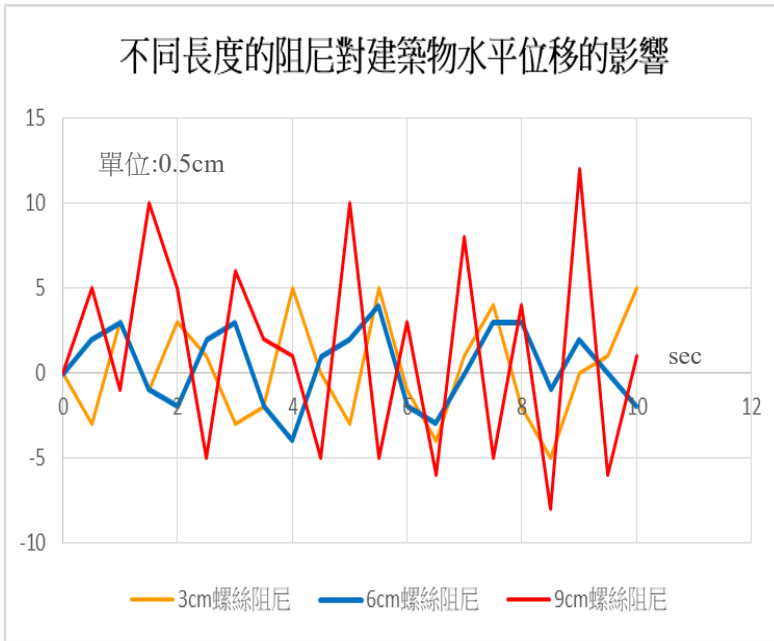


實驗結果：當建築物置放螺絲的剛性單擺作為阻尼器時，其建築物擺動頻率減少，擺動振幅也減少。

實驗討論：當建築物因地震產生晃動時，依慣性原理，阻尼器會產生與主結構反向波，此時建築物的波動與阻尼的反向波互相干涉，所以在主結構上的能量會藉由阻尼器而減少。(如右圖所示)



藍色箭頭為建築物因地震所造成的波動，紅色箭頭為阻尼器的反向波動，黑色實線為合成後建築物的實際波動



實驗結果：6 cm 長的剛性阻尼可明顯減少建築物的晃動頻率與晃動的振幅
 3 cm 長的剛性阻尼可稍減少建築物的晃動振幅
 9 cm 長的剛性阻尼並無減少建築物的晃動頻率與晃動振幅

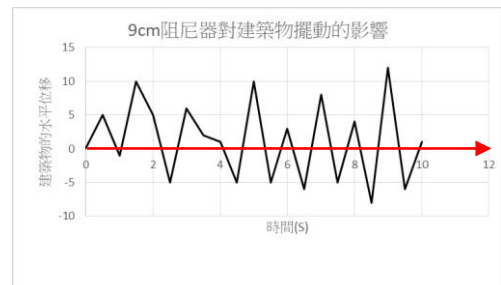
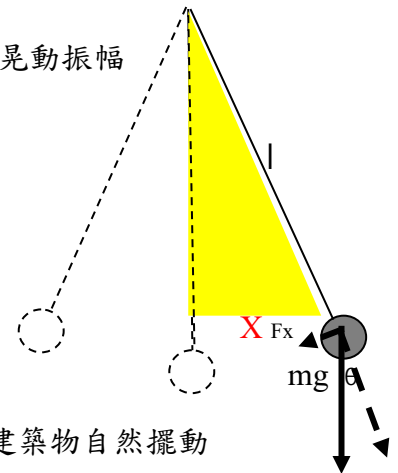
實驗討論：依單擺的擺盪週期原理，當擺角 θ 極小時，可看成水平直線移動，
 $F_x = mg \sin \theta = mg(X/l) = kX$
 $\therefore k = mg/l$

$$\therefore T = 2\pi\sqrt{(m/k)} = 2\pi\sqrt{(m/(mg/l))} = 2\pi\sqrt{(l/g)}$$

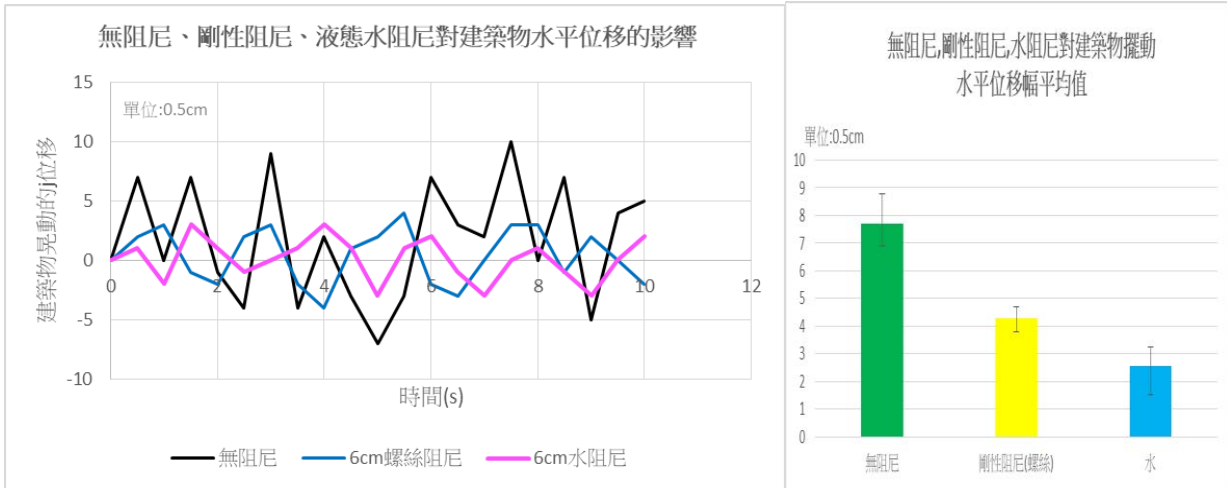
可推知單擺長度為 6cm，其週期約 0.5s 與自製的建築物自然擺動頻率相近，依參考資料 3. 可得知當阻尼擺動頻率接近與主結構振動頻率時，可產生相差 1/2 周期的反向波動，依波動的干涉理論可減少建築的擺動頻率與振幅。本實驗的結果也是，6cm 的剛性阻尼可使建築物的自然擺動頻率降低，並減少建築物擺動振幅。

而當剛性阻尼長度小於 6cm，阻尼擺盪頻率大於主結構震盪頻率時，依實驗結果與干涉理論推知其建築物擺盪振幅減少但晃動頻率沒有明顯減少。

阻尼長度大於 6cm，阻尼擺盪頻率小於主結構震盪頻率則建築物擺盪頻率與振幅皆無明顯減緩，且易造成建築物偏移傾斜的現象。(如右圖)

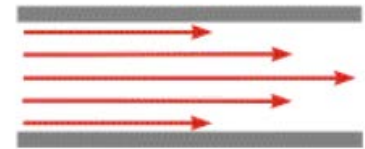


五、探討純水阻尼球對建築物耐震程度的比較

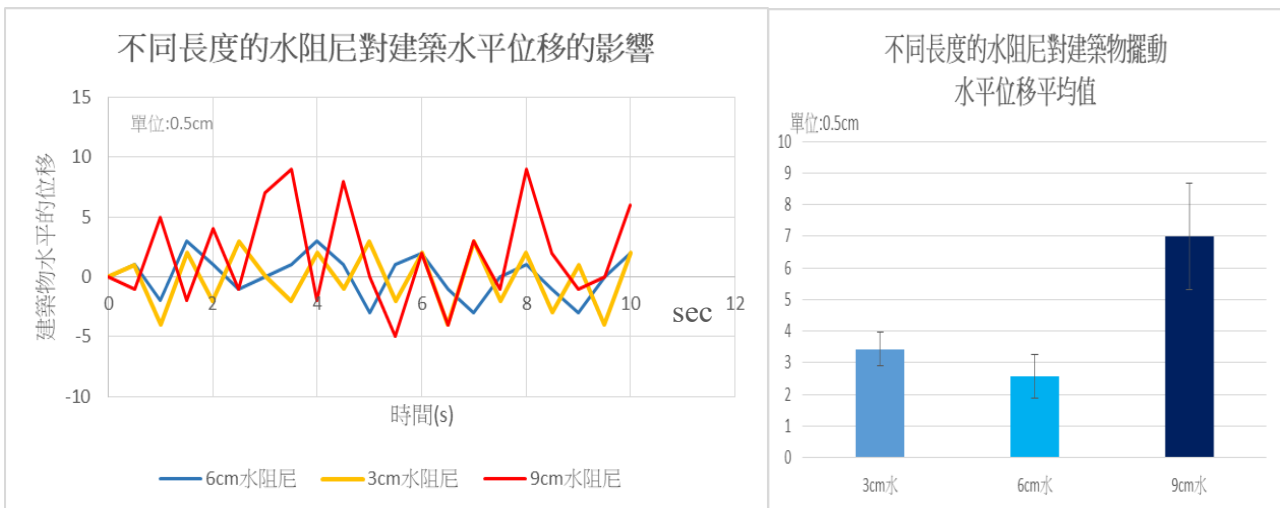


實驗結果：6cm 長的剛性阻尼與填充水的液態阻尼皆可減少主結構的擺盪頻率，而液態水阻尼對主結構減少擺盪振幅效果比剛性阻尼好。

實驗討論：不論是剛性阻尼或是液態的水阻尼，當其擺長為 6cm 時，與主結構的自然擺動週期相似，因相同頻率的反向波，可有效降低建築物擺盪振幅與頻率。

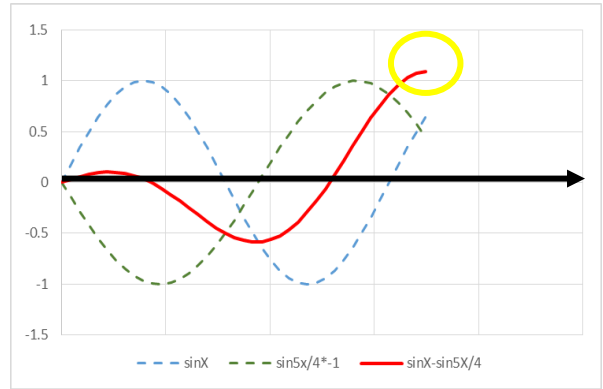


而液態水在阻尼球內，會因液體黏滯力與不同物質的大小不同(如右圖)，靠近器壁的液體或液體與液體間的流速不同，就相似於混沌擺的多擺，上下擺的擺速不同。就會造成如同實驗二的雙擺結果，因液體的層流特質，黏滯力讓彼此牽制而減少建築物的擺動振幅。



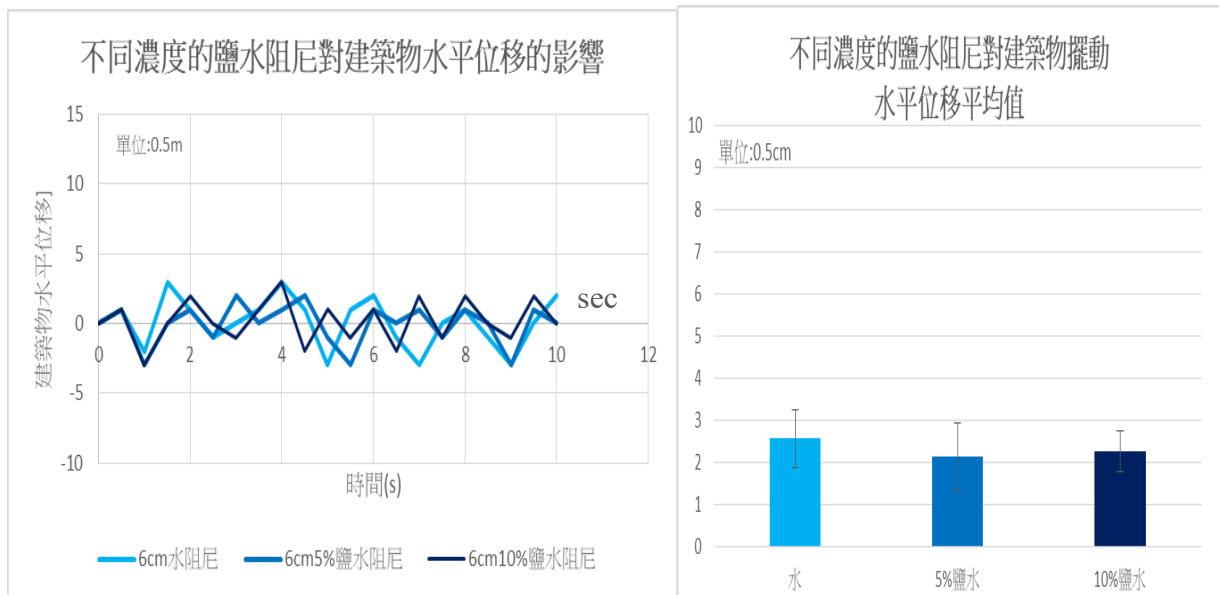
實驗結果：以主結構振動頻率來看，6cm 長的水阻尼可減少建築物晃動的頻率，這和剛性阻尼結果相同。而 9cm 的水阻尼則會讓建築物有長時間的偏移且傾斜的現象。

實驗討論：以不同長度的剛性阻尼與水阻尼來看，9cm 長的阻尼擺盪頻率小於主結構震盪頻率對建築物振動頻率與振幅皆無明顯減緩，且易造成建築物偏移傾斜的現象。以右圖解釋，主要原因是 9cm 長的阻尼，振動頻率為 1.63Hz→為綠色虛線(建築物自然振動頻率 2Hz→為藍色虛線)，雖建築物振動時 9cm 阻尼仍會產生反向波，但與建築物原先產生的正向波疊加後(紅色實線)，瞬時會有較大振幅(黃色圓圈處)，依此推論這是建築物傾斜的主因。



六、探討牛頓流體黏度改變(不同濃度的食鹽水)及非牛頓流體的種類改變對建築物的耐震效果的比較

(一)不同濃度的鹽水阻尼球對建築物耐震程度的比較



實驗結果：依上圖結果當阻尼長度皆為6cm，建築物擺動頻率相似，皆有減緩建築物的擺盪頻率。在建築物振幅的變化上，5%鹽水阻尼的擺動振幅小於純水阻尼，但10%鹽水阻尼沒有明顯減少。後續針對兩種濃度的黏滯力進行探討。

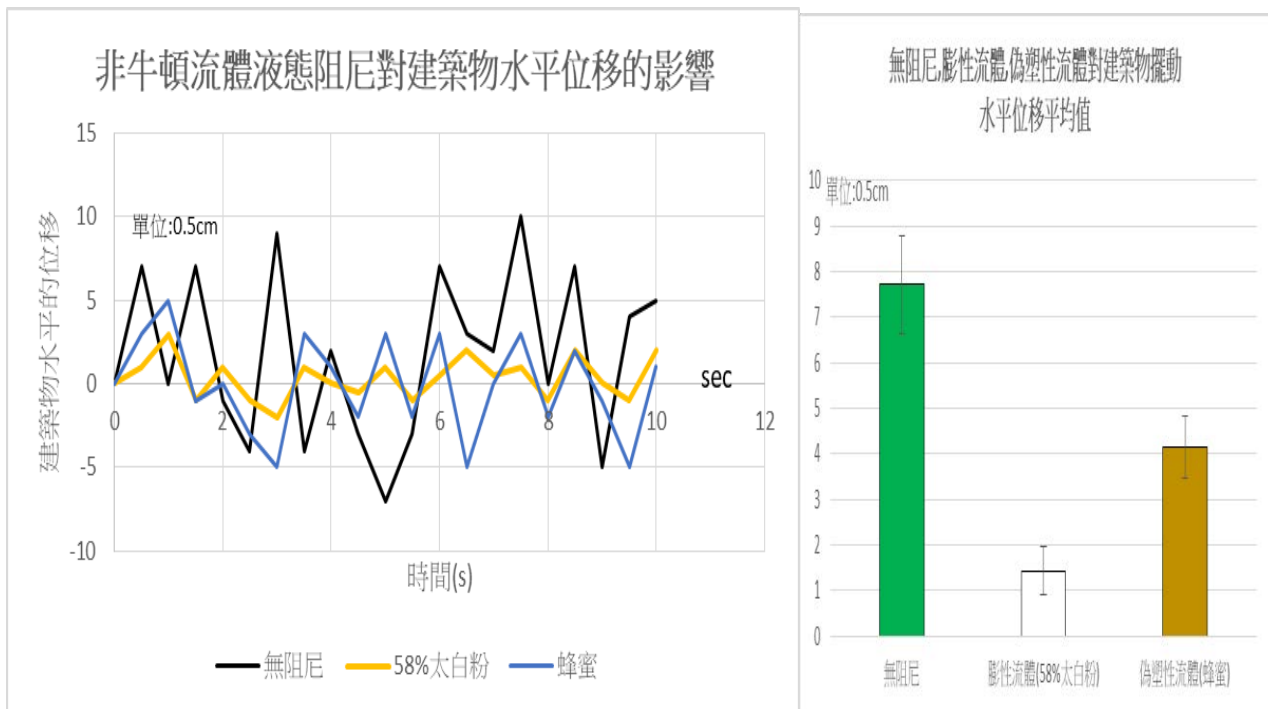
(二)牛頓流體與非牛頓流體阻尼球對建築物耐震程度的比較

※**牛頓流體Newtonian fluid**定義為應力與應變率成正比的流體。而正比的比例係數為流體的黏度，意指牛頓流體的黏度不受外力改變大小。

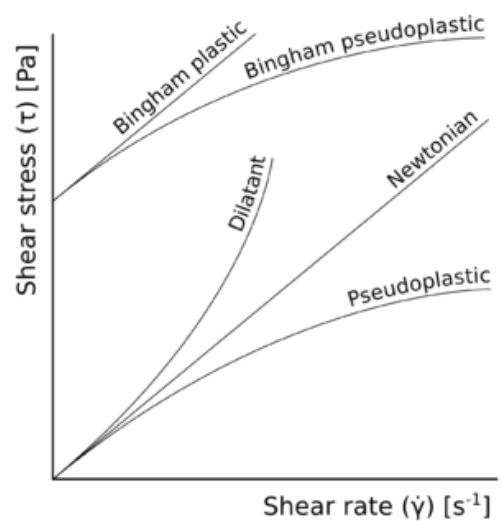
非牛頓流體則其應力與應變率呈非線性關係。也代表其黏度會受外力影響大小。非牛頓流體我們選擇兩個性質相反的膨性流體與偽塑性流體。

膨性流體Dilatant fluid其黏度會因應力變大而隨之變大，如:58%太白粉

偽塑性流體Pseudoplastic fluid其黏度會因應力變大而隨之變小，如:蜂蜜



實驗結果:58%太白粉阻尼是所有液態阻尼中明顯可減少建築物擺動振幅，但蜂蜜在液態阻尼中卻比水阻尼在減少建築物晃動振幅上效果更差。接下來將建築物晃動時最大動能相對於基座釋放的能量做比較，並推出建築物的衰減能量與建築物所承受的地震強度進行推導與分析。



※能量由基座傳至建築物(在無阻尼、剛性阻尼、與流體阻尼下)能量衰減量與建築物所承受的地震強度(水平加速度)進行探討：

基座所釋放的能量 → 基座採固定驅動力，藉由彈性繩的形變，產生固定頻率的擺動
依單條彈性繩推得全長(m)與力(nt)的關係式為

$$y(\text{全長}) = 258.65x(\text{力}) - 1.3702 \quad R^2 = 0.98$$

(拉力範圍皆遵守虎克定律的範圍)

推得彈性繩的 $k=258.65\text{nt/m}$

由兩條彈性繩並聯 $k_{\text{並}}=2*258.65=517.3 \text{ nt/m}$

∴ 振幅 $l \rightarrow \Delta x=0.02\text{m}$

∴ 基座所釋放的能量 $E=1/2(k_{\text{並}}*\Delta x^2)$

$$=1/2*517.3*0.02^2=0.10346 \text{ joul}$$

建築物晃動的能量 → 建築物振動頻率為 $f \text{ Hz}$ 、質量為 $m (0.150\text{kg})$ 、建築物高度為 $H \text{ m}(0.45\text{m})$ 、建築物質心高度為 $H/2 \text{ m}(0.225\text{m})$ 、最高點受定力的平均水平位移為 $R \text{ m}$ 、質心水平位移為 $R/2 \text{ m}$ 、質心水平運動最大速度 $v \text{ m/s}$

$$\omega=2\pi f \rightarrow v=\omega*R/2=2\pi f R/2=\pi f R$$

$$E_k(\text{建築物晃動能量})=1/2(mv^2)=1/2(m*(\pi f R)^2)$$

基座釋放能量給建築物，建築物(在無阻尼、剛性阻尼、與流體阻尼下)

衰減能量 → = 基座釋放的能量-建築物晃動能量

建築物晃動水平加速度 a_c → 質心平均水平位移: R_m

建築物晃動頻率: $f \text{ Hz}$ (無阻尼 $f=2$ 、6cm 阻尼的 $f < 2$)

$$\therefore \omega=2\pi f \quad \therefore a_c=\omega^2 R=4\pi^2 R(\text{m/s}^2) \text{ 且}$$

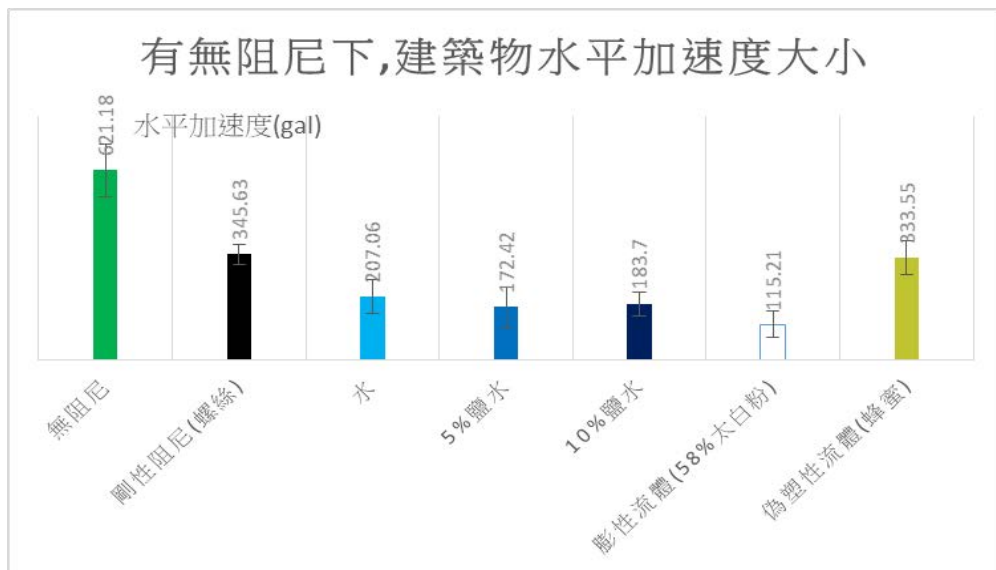
$$|g| = 0.0098\text{m/s}^2$$

依此可推導有無阻尼下建築物水平加速度

	無阻尼	剛性阻尼	水阻尼	5%鹽水阻尼
建築物能量	0.0176 joul	0.00545 joul	0.00196 joul	0.00135 joul
衰減 能量	0.08586 joul	0.09801 joul	0.10150 joul	0.10211 joul
建築物水平 加速度	621.18gal	345.63gal	207.06gal	172.42gal
	10%鹽水阻尼	膨性流體 (58%太白粉)	偽塑性流體 (蜂蜜)	
建築物能量	0.00154 joul	0.000605 joul	0.00507 joul	
衰減 能量	0.10192 joul	0.102855 joul	0.09839 joul	
建築物水平 加速度	183.70gal	115.21gal	333.55gal	

※基座釋放能量=0.10346 joule

※阻尼的長度皆為6cm，取與建築物自然振動頻率相同的阻尼長度，目的是分析不同阻尼的防震效果



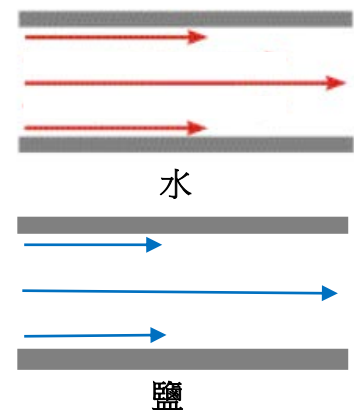
- 實驗結果**：
- (1)以建築物水平加速度大小可推知，在無阻尼下建築物所感受的地震強度為7級；當加上與地震頻率相同的阻尼，地震強度降為6級；當架上液態阻尼，其地震強度可降至5級。(資料參考：中央氣象局地震震度分級)
 - (2)以鹽水濃度改變看建築物水平加速度相對關係：鹽水黏度大於純水，鹽水濃度越大，黏度越大。由建築物加速度的結果可看見，5%鹽水抗震效果優於純水
 - (3)5%與10%鹽水建築物水平加速度差距不大，可判斷5%到10%的濃度改變對建築物防震效果差異不大。
 - (4)58%太白粉建築物水平加速度最小，抗震效果最好。
 - (5)蜂蜜的抗震效果在流體中最差，與剛性螺絲阻尼相近。

實驗討論：

(1) 純水的黏度與水分子間的氫鍵有關，加入食鹽後，食鹽溶於水後會解離出鈉離子與氯離子，離子會與水分子產生離子 - 偶極力，其作用力比水分子間的氫鍵更強。故以理論得知鹽水黏度大於純水。

而黏度代表流體物質的一種物理特性，黏度所產生的黏滯力是流體受到外力所產生的阻力。

食鹽水相對於水黏度較大，故在容器中的層流現象會更明顯(如右圖)，靠近器壁鹽水流速較鹽水與鹽水之間的流速差異較大，如此應證我們實驗二中，當下擺擺動幅度較大(下擺較長、擺速越快)會使雙擺的擺動能量較快速減少。



(2) 5%鹽水及10%鹽水阻尼其建築物水平加速度差距不大，依據黏滯力實驗所測得的結果(如下表)。

	水	5%鹽水	10%鹽水
黏滯力(nt)	3.56358E-06	6.64998E-06	6.89938E-06
標準差	3.69892E-07	5.64732E-07	3.22684E-07

*黏滯力實驗：測量一滴流體滑落25cm玻璃管所花的時間 t 秒

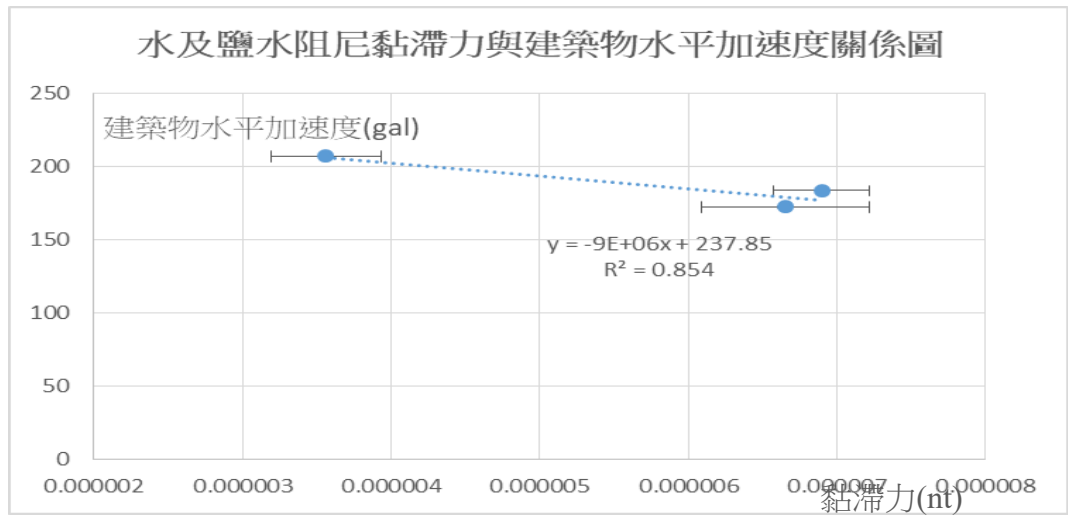
一滴流體體積約1/20mL，溶液密度為D g/cm³，玻璃管sinθ=3.6/25

可推得

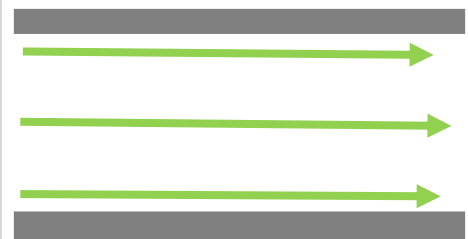
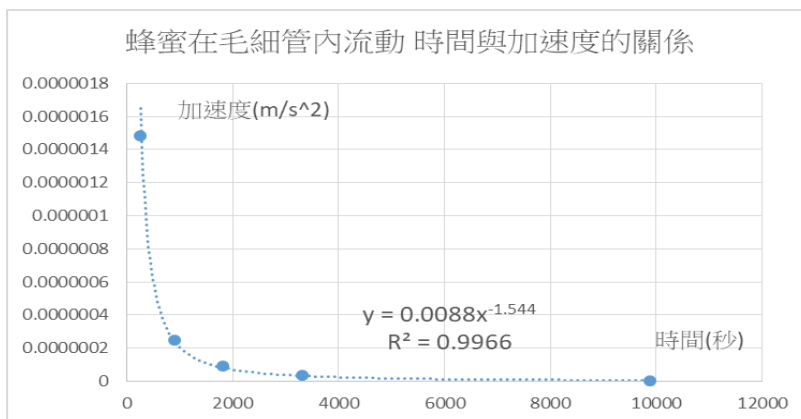
$$\text{流體下滑力} (1/20) * D * 10^{-3} * g * \sin\theta - \text{黏滯力} = (1/20) * D * 10^{-3} * (0.25 * 2 / t^2)$$

5%與10%鹽水黏滯力的差距不如鹽水與水之間，流速差異不大，所以無法從濃度改變看見抗震差異。

若將黏滯力與抗震能力(建築物水平加速度)做比較，以下圖呈現結果，水及鹽水皆為牛頓流體，可發現黏度越大可有效減少建築物的晃動。



(3) 蜂蜜為非牛頓流體的偽塑性流體，會隨著受力變小而黏度增加，左下圖為黏滯力實驗，蜂蜜在玻璃管流動的時間與加速度關係圖，下滑時因蜂蜜黏滯力使往下滑動的蜂蜜量會漸少，所以下滑力變小→加速度變小(黏度變大)。反之可驗證蜂蜜和器壁因留滯力較大，而使靠近器壁的液體黏度變小流速相較其他流體快，與中間流速差距越小(右下圖解釋)，較近似於單擺阻尼，抗震效果也較近似於剛性組尼。



蜂蜜

(4) 58%的太白粉粉漿為非牛頓流體的膨性流體，其特性有兩個(a)黏度大(b)受力時黏度會呈現非線性急速增加。(所以膨脹性流體的應用於防彈衣。當子彈侵入時，由於變形集中，造成極高的應變率，使流體黏性增加，形成阻力擋住子彈)。以右上圖解釋，器壁因黏滯力而使靠近器壁液體黏度更大使流速更慢，與液體與液體間流速差距越大，就如實驗二下擺擺長越長(擺速越大)越能有效減少擺動時間與能量。本實驗欲測試太白粉粉漿黏度，但流動約兩分鐘粉漿分離(如右圖)，並停止滑動。



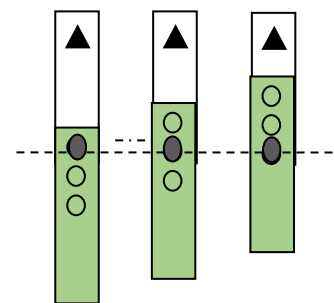
58%太白粉

粉漿分離圖

陸、結 論

一、實驗一:雙擺之上下擺，連續曝光10秒的光軌實驗，觀察到雙擺的下擺繞固定點繞圈時，上擺擺動的角度變小；或當下擺擺動角度變大時，上擺擺動角度亦會變小。探究其主要原因應是(1)下擺轉圈時在耗損擺動所需的能量，造成上擺角度變小。(2)下擺擺幅變大時，下擺需穩定的支點才能擺動或轉圈，所以此時上擺擺動幅度變少。依此推知雙擺可以穩定上擺的晃動幅度。

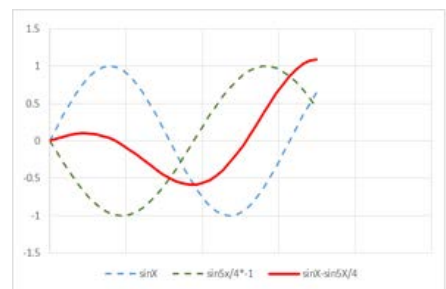
二、實驗二：將雙擺的下擺挖三個等距的洞，改變可調式軸承的位置，形成三個不同長度的雙擺(如右圖)。測量雙擺與單擺擺盪至停止分別所花的時間。發現雙擺35cm、32.5cm、30cm相較於相同長度與重量的單擺可減少擺動時間的比率分別為52.2%、47.7%、38.5%，而其上擺能量衰減功率的比值分別為2.071倍、1.875倍、1.67倍。說明雙擺可有效減少擺動時間與能量，讓擺盪很快達到平穩。且下擺擺長越長、擺動速度越快，更可以有效減少擺動的時間與振幅。因此實驗結果讓我思考利用混沌擺的特性作為建築物的阻尼器，進而以液體阻尼的層流特性模擬混沌擺的上下擺不同擺速的情形，以找出合適的液體阻尼。



長度：35cm 32.5cm 30cm

三、建築物阻尼的探討結果與討論

1.不同長度的單擺阻尼對建築物的耐震比較，6cm長的阻尼可有效降低建築物晃動的頻率與振幅，因為6cm長的單擺週期與建築物的自然擺動周期相近，所以可產生頻率相同的反向波，有效減少建築物的擺盪幅度。若掛週期小於建築物自然週期的單擺(如:3cm單擺)，則會使建築物擺盪振幅變小。反之懸掛單擺週期大於建築物自然週期(如:9cm單擺)，則易讓建築物產生較大持久的位移。右圖藍色虛線為建築物擺動的波動，綠色虛線為單擺阻尼所產生的反向波動，而紅色為兩者互相干涉所產生的波動。由紅色曲線可以看出建築物明顯的水平位移，而使建築物產生傾斜。

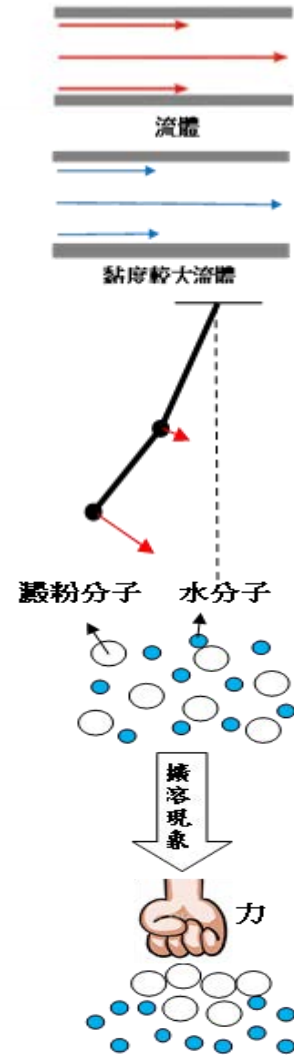


2.以建築物水平加速度結果來分析：螺絲→345.63gal、水→207.06gal、5%鹽水→172.42gal、10%鹽水→183.70gal、58%太白粉漿→115.213gal、蜂蜜→333.55gal。

流體阻尼皆優於螺絲剛性阻尼，主要因流體在加速度下，因其不同黏滯力而具有層流特質(圖右上)，層流為流體的一種流動狀態。當流速小時，流體分層流動而不混合，且當流體黏度越大層流特性越明顯。靠近器壁流速因流體與器壁黏滯力大所以較中間流速小，造成如混沌擺上下擺不同擺速(圖右中)，兩擺的互相牽制使建築物擺動趨於穩定。太白粉漿為膨性流體，在器壁的流體受力時，黏度會急速增加，造成層流間流速差異更大，流體間更可配合晃動彼此制衡並緩和建築物擺動。

而蜂蜜為偽塑性流體，在器壁的流體受力時，黏度反之變小，造成層流間的流速差異不大，而沒有混沌擺彼此制衡的性質。推之內部層流間速度相近的另一原因，蜂蜜的相對阻尼非常接近螺帽的剛性阻尼，代表兩者性質極為相近。

四、懸掛58%的太白粉漿阻尼球的建築物，其水平加速度最小，耐震度最佳，與膨性流體的擴溶效應有關，擴溶效應是指當太白粉漿受力時，澱粉分子會將水排出，澱粉分子會聚在一起使黏度增加(如右下)。也因此特性，當流體阻尼器因地震產生反向加速擺動時，其器壁與流體間的作用力，使太白粉漿黏度變大、流速變慢，與中間流體流速差異較大，故當建築物晃動時更能彼此制衡使建築物擺動幅度最小。



柒、未來展望與結語

關於流體阻尼器的相關研究很少，多用於建築鋼骨樓層與樓層間的斜撐制震結構(如右圖)，利用其彈性減少建築物震盪。但現在地價越來越高，人民區住地須和天空爭地，超高樓的建築定會越來越多，阻尼球可能是接下來的研究方向。此次實驗發現膨性流體的阻尼球，對建築物的防震能力皆高於其他流體與剛性阻尼。且依照膨性流體的特性，當受外力時可能引發變形時，膨性流體可產生抗力避免結構變形，並吸收外力所造成的能量。接下來好奇的是有沒有其他膨性流體更適合於建築物的阻尼球中?還有想了解阻尼球質量與建築物重量與質心位置的彼此關係，是否可推出其相關性?



斜撐制震結構

這次的研究開始於疫情在家網課的時間，因看到混沌擺的光軌影片，興起「好想自己做一个!」的想法。某天一股腦沿著街道，去了許多滾珠軸承與鋼鐵廠，只為了尋找合適的尺寸，並從隔壁工廠要來剩下的壓克力材料，在鄰居阿伯指導下，完成了自己的混沌擺，看成品擺盪的那刻真的很感動。而一開始只是想做混沌擺的小實驗，因為在實驗過程中產生了許多疑問，為了尋求答案一步步往下繼續實驗，並從嘗試→解釋→修正重複過程中完成實驗，看著自己的成品產出，心中有滿滿的充實感。

捌、參考資料

- 一、高中基礎物理一第五章牛頓運動定律的運用--簡諧運動。龍騰出版社。
- 二、洪李陵、黃偉倫、劉坤松、林昭儀(1998)。台灣地區建築物高度與基本振動周期之相關性研究，中央氣象局地震測報中心科技報告彙編，19，161-238，1998。
- 三、張民崑(2005)。淺談調諧質量阻尼器。中華技術季刊的27期。
- 四、Kurt Su(2021)。如何利用線性迴歸(Linear Regression)分析計算阻尼係數(Damping Ratio)。2021/02/03，取自 <https://hahow.in/creations/6018c4a11b88f71cfc73ae53>
- 五、李忠華,張永利,孫可明(2004)。流體力學，東北大學出版社。
- 六、非牛頓流體力學—台灣 WORD。2017年10月22日，取自 <https://goo.gl/2GbqTV>
- 七、普通物理實驗 大海文化出版事業公司印行 實驗九 黏滯係數。

【評語】 051811

本實驗作品探討雙擺震盪模式以及阻尼球的材質、黏度、與液體種類對震盪物的震盪影響，並嘗試用以分析如何用來減低建築物在地震期間之震盪。如何以阻尼器減振是一個常被討論的議題，本實驗在設計上多考慮複合擺與液體阻尼的效果，然大樓本身即為一震盪器，液體阻尼器如液體沒有空隙，應該沒有阻尼效果，所觀測到的效果應為阻尼器與大樓耦合的效果，雖然如此，作者具有探究的精神可以進一步將阻尼效果再加入做的更好。

作品簡報

擺盪在秩序與混沌的邊緣

——流體阻尼球對建築物耐震度的探討



研究動機

- 某次看到混沌擺的實驗，影片中以LED燈所產生的光軌，呈現出雙擺擺動的軌跡，雙擺所展現的不可預測性與美麗軌跡弧線，深深印在我腦海裡。暑假到101大樓參觀，看到那660公噸像單擺的阻尼，它的存在大大降低超高樓因風所產生的自然振盪頻率，讓我們即使待在大樓也和在地平地的感覺相同。101大樓的單擺阻尼與混沌擺的影片，這兩個看似不同又似相同的特質在我腦中一直產生許多疑惑，所以進行以下的實驗。



研究目的與流程

實驗一
雙擺在不同角度擺盪的光軌實驗

實驗二
單擺與雙擺擺動至停止的時間與上擺能量衰減功率比較

應用於

改變建築物
阻尼球的條件，找出最佳抗震效果

實驗三

分析無阻尼與剛性阻尼的兩種建築物，受定力時建築物擺動時間與水平位移

實驗四

改變阻尼的擺長，分析受定力時，建築物擺動時間與水平位移

實驗五-牛頓流體阻尼球

改變水的黏度，分析受定力時，建築物擺動時間與水平位移關係

流體黏滯力實驗

實驗六-非牛頓流體阻尼球

探討膨性與偽塑性流體阻尼球，測定力下建築物擺動時間與水平位移關係

綜合分析，各種阻尼下建築物
水平加速度與能量衰減量

實驗一：

以藍、紅色的LED分別置於上、下擺，
改變擺角拍攝光軌照片

實驗結果與討論：

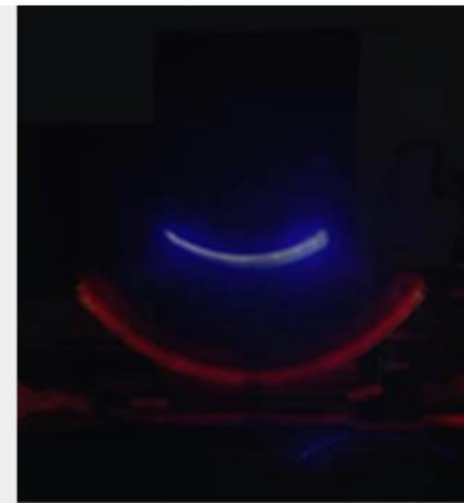
下擺擺動角度變大時，上擺擺動角度會變小。原因應是

1. 下擺轉圈時在耗損擺動所需的能量，所以上擺角度變小。
2. 下擺擺幅變大時，下擺需穩定的支點才能擺動或轉圈，所以此時上擺擺動幅度變小。

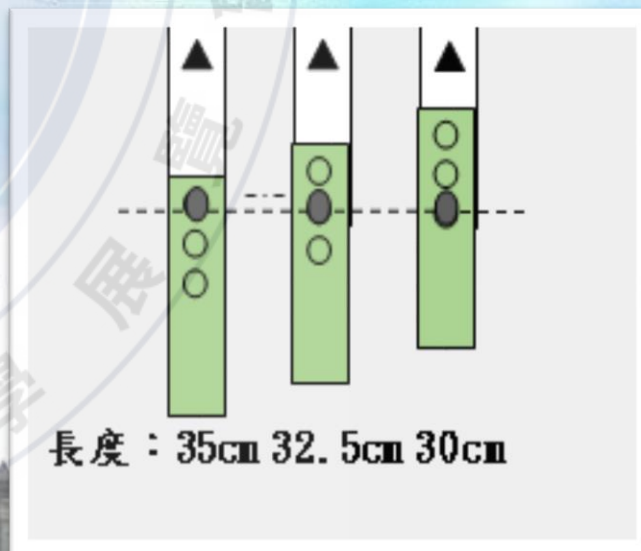
由此推論雙擺可以穩定上擺的晃動幅度。



下擺轉圈光軌圖



下擺未轉圈光軌圖

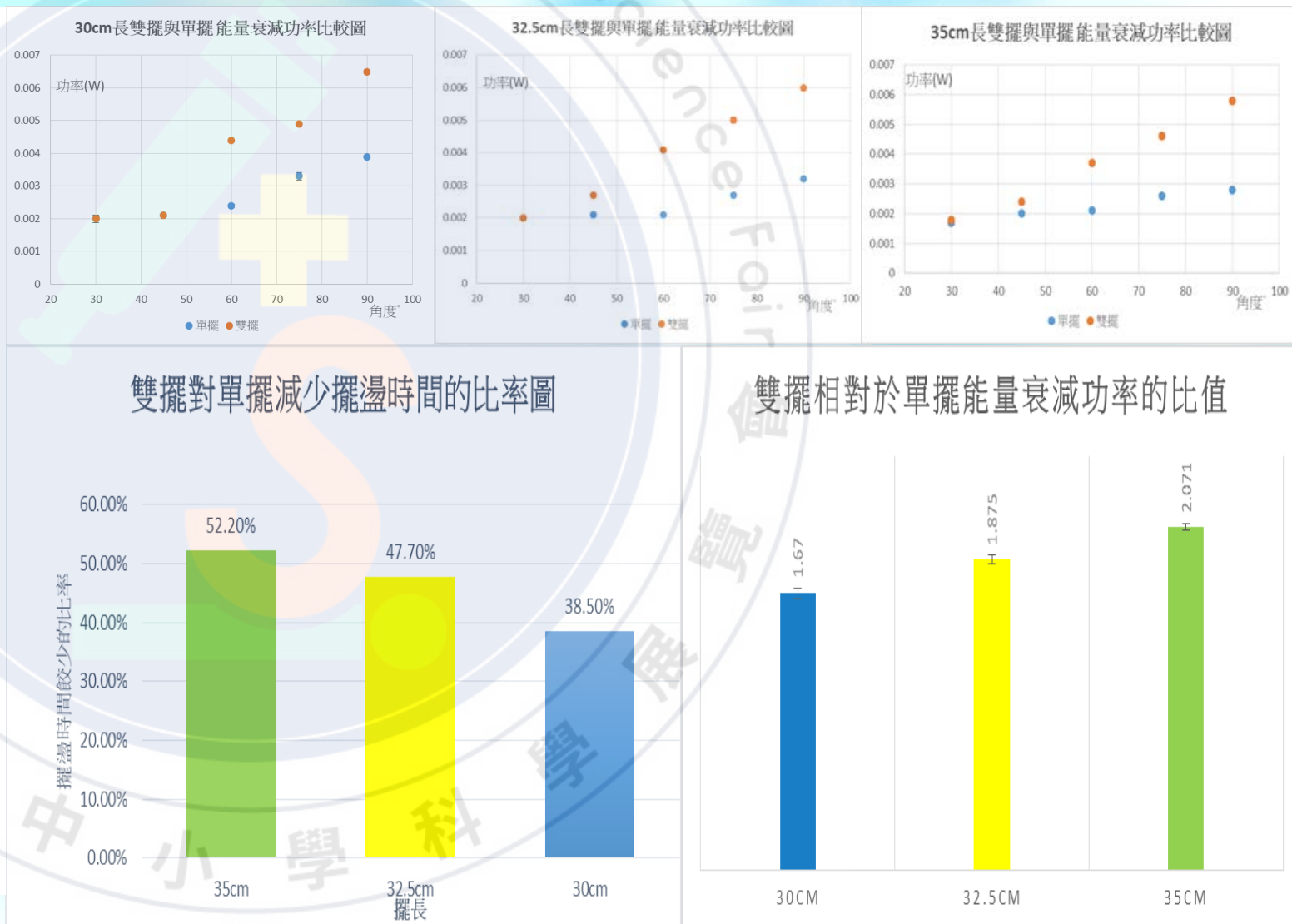


實驗二：

測量不同長度、與擺角，單擺與雙擺擺動所需的時間，比較兩者擺動時間的差異與上擺能量衰減功率。

實驗結果與討論：

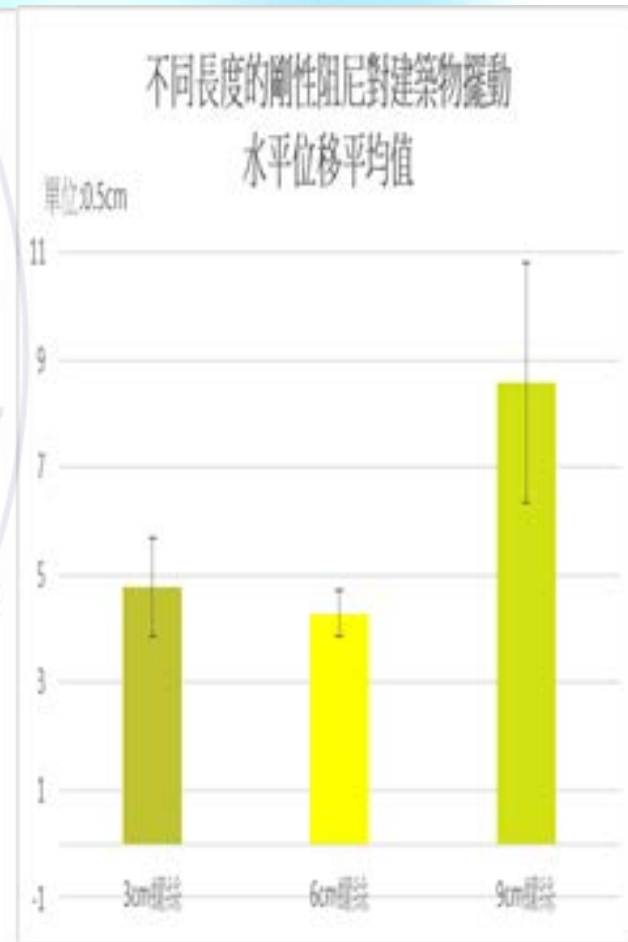
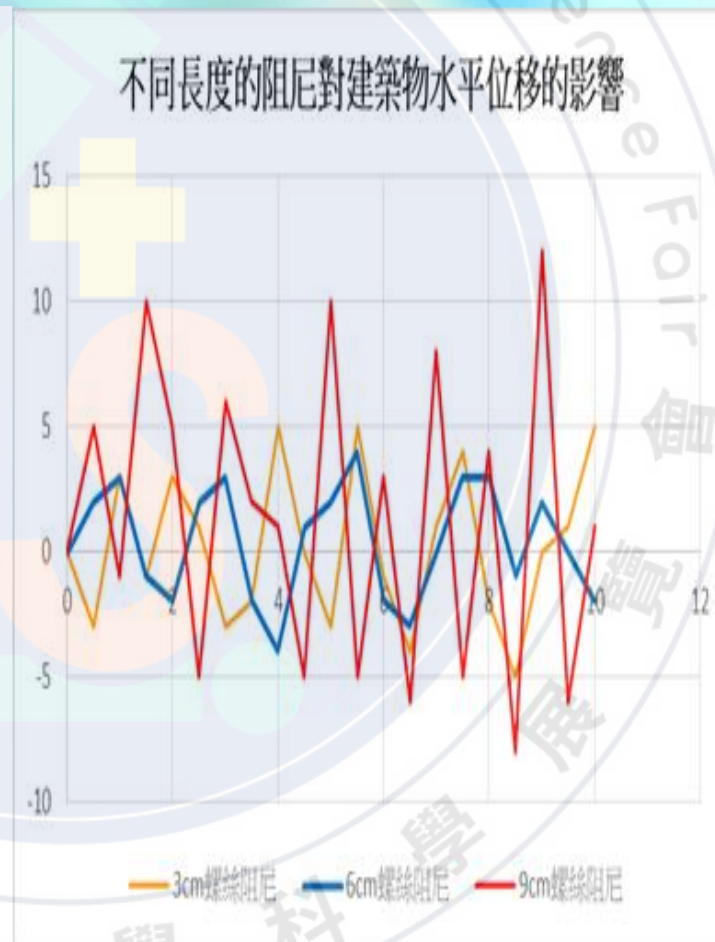
雙擺下擺可有效減少上擺擺動的時間與能量。而上、下擺就像是建築物與阻尼球的关系，若將阻尼球再填入不同流體，流體與器壁、流體間不同的黏滯力也如同雙擺特性，是否又比一般的剛性的阻尼球更能快速減少建築物的晃動，讓建築物盡快的平穩下來，所以進行下面阻尼球的研究。



實驗四:

不同長度的剛性阻尼器對建築物耐震程度的比較

- 單擺長度為6cm，其週期約0.5s與自製的建築物自然擺動頻率相近，依參考資料3. 可得知當阻尼擺動頻率接近與主結構振動頻率時，可產生相差1/2週期的反向波動，依波動的干涉理論可減少建築的擺動頻率與振幅。



實驗五+實驗六:

無阻尼、剛性阻尼、不同黏滯力的牛頓流體(水、5%及10%鹽水)
與非牛頓流體阻尼球對建築物耐震程度的綜合比較

	無阻尼	剛性阻尼	水阻尼	5%鹽水阻尼
建築物能量	0.0176joul	0.00545joul	0.00196joul	0.00135joul
衰減 能量	0.08586joul	0.09801joul	0.10150joul	0.10211 joul
建築物水平 加速度	621.18gal	345.63gal	207.06gal	172.42gal
	10%鹽水阻尼	膨性流體 (58%太白粉)	偽塑性流體 (蜂蜜)	
建築物能量	0.00154joul	0.000605joul	0.00507joul	
衰減 能量	0.10192joul	0.102855joul	0.09839joul	
建築物水平 加速度	183.70gal	115.21gal	333.55gal	

• 實驗結果：

以建築物水平加速度大小可推知：

☆無阻尼下建築物→地震強度為7級

☆6cm剛性阻尼→地震強度降為6級；

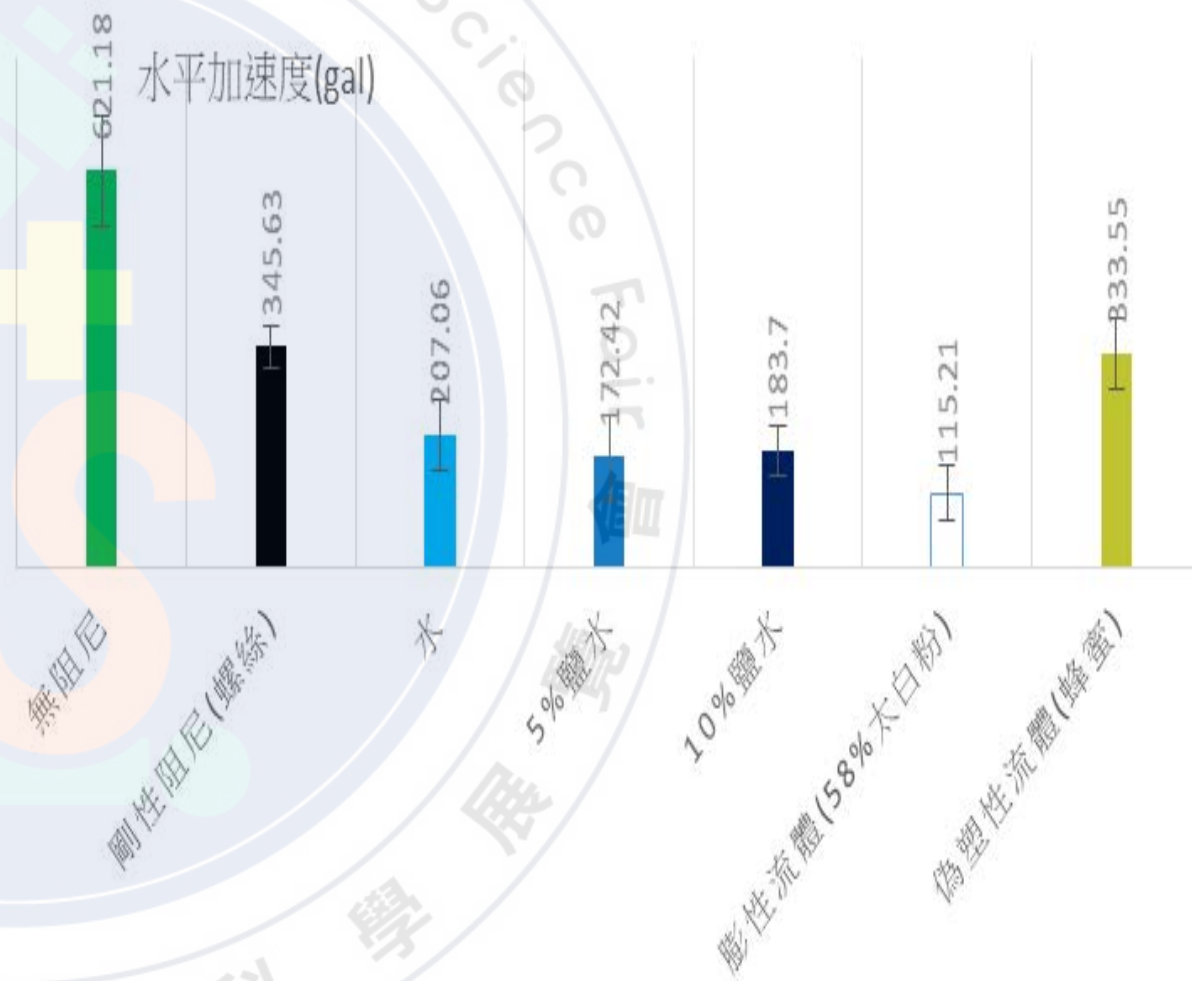
☆液態阻尼→地震強度可降至5級

(資料參考：中央氣象局地震震度分級)

• 實驗討論：

液態阻尼球內，液體與不同物質的黏滯力大小不同，靠近器壁的液體或液體與液體間的流速不同，就相似實驗二的雙擺結果因液體的層流特質，讓彼此牽制而減少建築物的擺動振幅。

有無阻尼下,建築物水平加速度大小

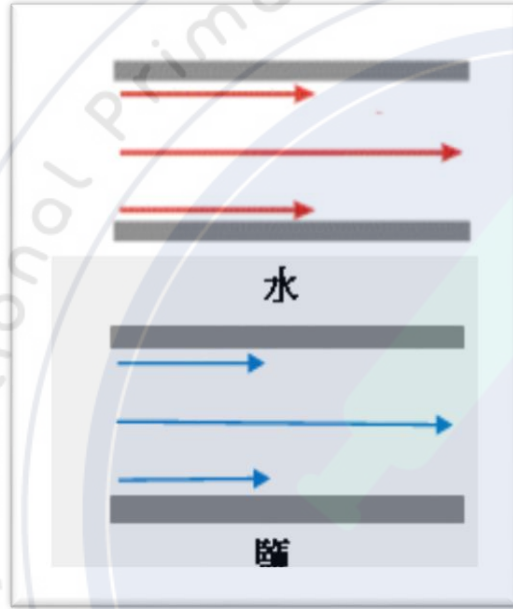


牛頓流體(水、5%及10%鹽水)黏滯力大小對建築物耐震度的比較

實驗討論:

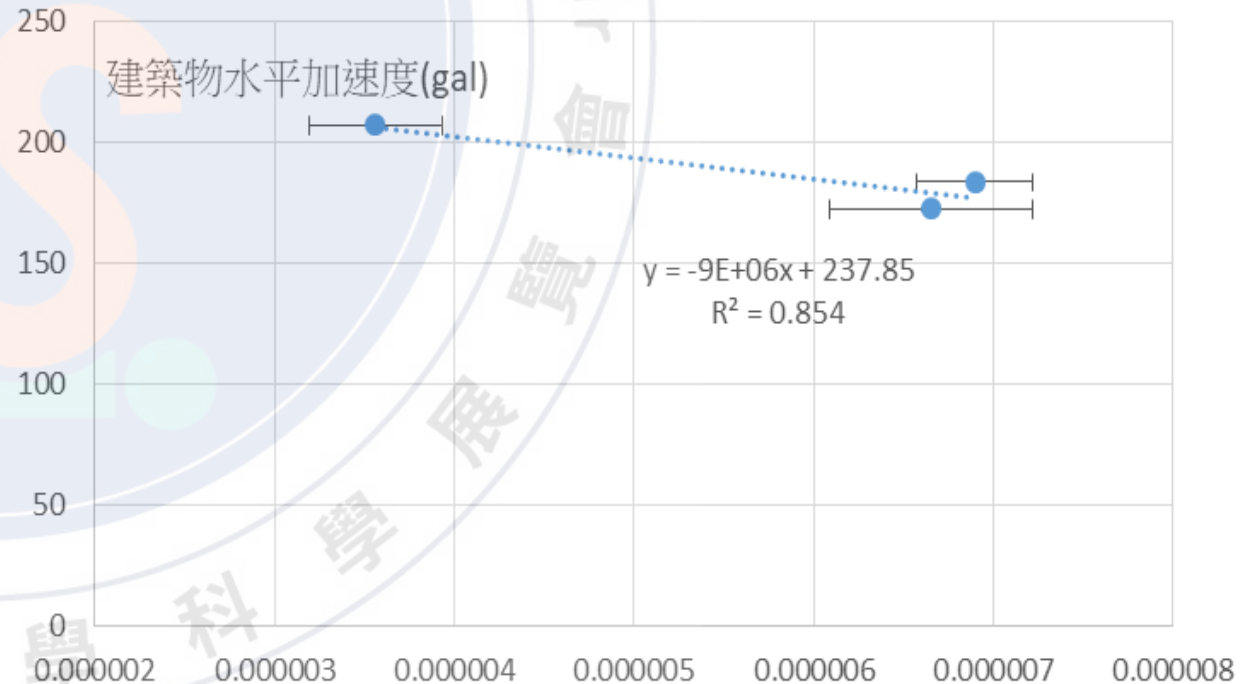
鹽水因其離子-偶極力大於水分子間的氫鍵作用力，故鹽水黏滯力明顯大於純水。因此鹽水在器壁與流體間流速差異大於水，應證我們實驗二中，當下擺擺動幅度較大，會使雙擺的擺動能量較快速減少。

5%與10%鹽水黏滯力的差距不如鹽水與水之間，所以無法從濃度改變看見抗震差異。若將黏滯力與抗震能力(建築物水平加速度)做比較，仍可發現黏度越大可有效減少建築物的晃動。



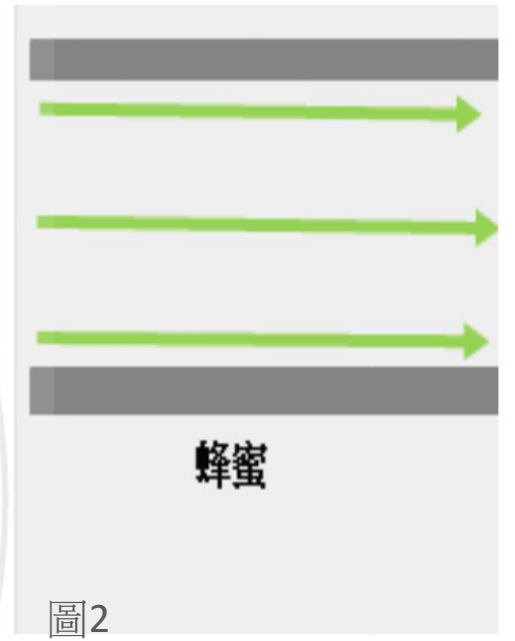
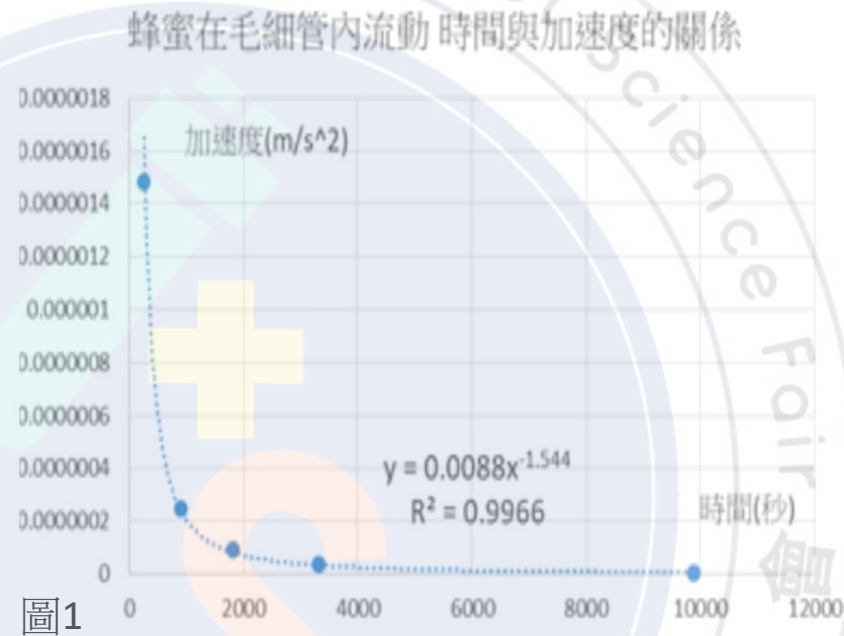
	水	5%鹽水	10%鹽水
黏滯力 (nt)	3.56358E-06	6.64998E-06	6.89938E-06
標準差	3.69892E-07	5.64732E-07	3.22684E-07

水及鹽水阻尼黏滯力與建築物水平加速度關係圖

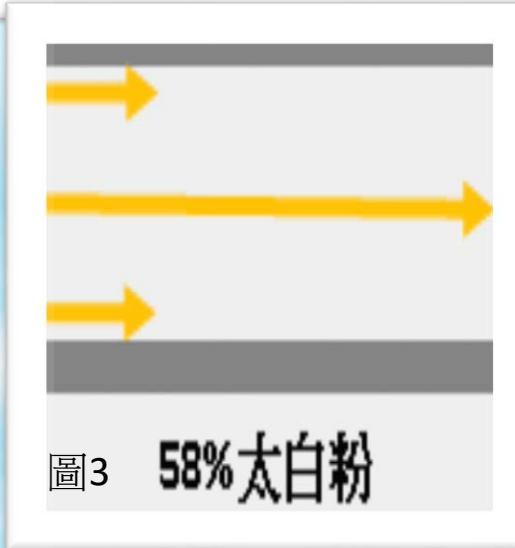


非牛頓流體(膨性流體與偽塑性流體) 對建築物耐震度的比較

蜂蜜為偽塑性流體，右圖1為黏滯力實驗，蜂蜜在玻璃管流動時間與加速度關係圖，下滑時因黏滯力使下滑的蜂蜜量會漸少，所以下滑力變小→加速度變小(黏度變大)。反之可驗證蜂蜜和器壁因黏滯力較大，而使靠近器壁的液體黏度變小流速相較其他流體快，與中間流速差距越小(右圖2解釋)，較近似於剛性阻尼，



58%的太白粉粉漿為膨性流體，其特性有(a)黏度大(b)受力時黏度會呈現非線性急速增加。以右圖3解釋，器壁因黏滯力而使靠近器壁液體黏度更大使流速更慢，與液體與液體間流速差距越大，就如實驗二下擺擺長越長(擺速越大)越能有效減少擺動時間與能量。



結 論

- 58%的太白粉漿阻尼球對建築物耐震度最佳，所造成水平加速度最小，此與膨性流體的擴溶效應有關。擴溶效應是指當太白粉漿受力時，澱粉分子會將水排出，澱粉分子會聚在一起使黏度增加。也因此特性，當流體阻尼器因地震產生反向加速擺動時，其器壁與流體間的作用力，使太白粉漿黏度變大、流速變慢，與中間流體流速差異較大，故當建築物晃動時更能彼此制衡使建築物擺動幅度最小。且依照膨性流體的特性，當受外力時可能引發變形時，膨性流體可產生抗力避免結構變形，並可有效吸收外力。



無阻尼與膨性阻尼，建築物在定力下
長曝光擺動比較圖

非常感謝各位評審的聆聽
Thank you for your time.

鞠躬

