

# 中華民國第 57 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國中組 地球科學科

**最佳創意獎**

030506

**游泳池可以減震耶!- - 流體阻尼的研究**

學校名稱：新北市私立裕德實驗高級中學

作者：  國二 楊啟令  國二 劉仕衡  國二 陳毅庭	指導老師：  簡寶貴
---	------------------

關鍵詞：減震、流體阻尼

## 摘要

台北 101 大樓單擺式的調質阻尼器，透過質量塊與結構體反向擺動的現象，讓主結構上的能量藉由調質阻尼器擺動而消耗，但是約需 4 層樓高的空間來安裝整個阻尼器。我們想有沒有其他阻尼方式也可以達到相同效果，如**流體阻尼器**。因此，我們設計實驗探討流體阻尼器的可行性，並試著找出最佳流體與最佳減震方式。經過模擬實驗，我們發現**水槽具有不錯的減震效果；而介於液體與固體之間的凝膠狀流體減震效果更明顯。適當的黏稠度(密度約為  $1.135 \text{ g/cm}^3$  的太白粉凝膠液)減震效果最好，大約可以減震 21%；若加細網隔間，則可以減震超過 27%。因此建議一般大樓可以在約 85%樓高的位置放一個適當大小、裝適當黏稠度的凝膠液槽或游泳池，將有不錯的減震效果。**

## 壹、研究動機

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，屬於聚合性板塊交接帶，因此在板塊擠壓的過程中經常會出現地震，小地震頻繁大家也就習慣了。但是，去年農曆除夕前台南發生的地震，景像觸目驚心，房屋倒塌導致的死傷令人鼻酸，相信整個農曆年，所有人都很難歡樂過新年。我們都知道台北 101 這樣的超高大樓，在 87 樓~92 樓間設有「單擺式的調諧質量阻尼器」，來減低風和地震的搖晃。我們就想，一般大樓很難像 101 那樣留下很大的空間來擺放單擺阻尼器，那麼是否可以利用流體呢？利用水來達到減震效果的實驗已經有人研究過；我們想除了水，其他的流體呢？凝膠液呢？是否具有更好的減震效果？於是我們利用自然與生活科技第五冊第 6 章的地震知識當基礎來進行實驗探討。

## 貳、研究目的

- 一、探討一般大樓建築物形狀不同，建物重心位置不同，地震來臨時搖晃程度的差異。
- 二、探討一般大樓利用水作為地震阻尼的效果。
- 三、找出一般大樓利用水作為地震阻尼時，最佳放置樓層。
- 四、除了水，探討流體狀態的凝膠液減震效果。
- 五、找出一般大樓除了加強建築物結構體外，最簡單可行的減震方法。

## 參、研究設備及器材

保麗龍球 冰棒棍 熱熔膠槍 熱熔膠 (如圖 1)  
太白粉 鐵絲網 模擬地震儀 (足部震動器)  
長方形小塑膠容器(長 11cm、寬 8cm、高 6cm)  
長方形大塑膠容器(長 16cm、寬 10cm、高 6cm)  
圓形塑膠容器(直徑 12cm、高 8.5cm)



## 肆、研究過程、結果與討論

我們分成六個小實驗依次探討：

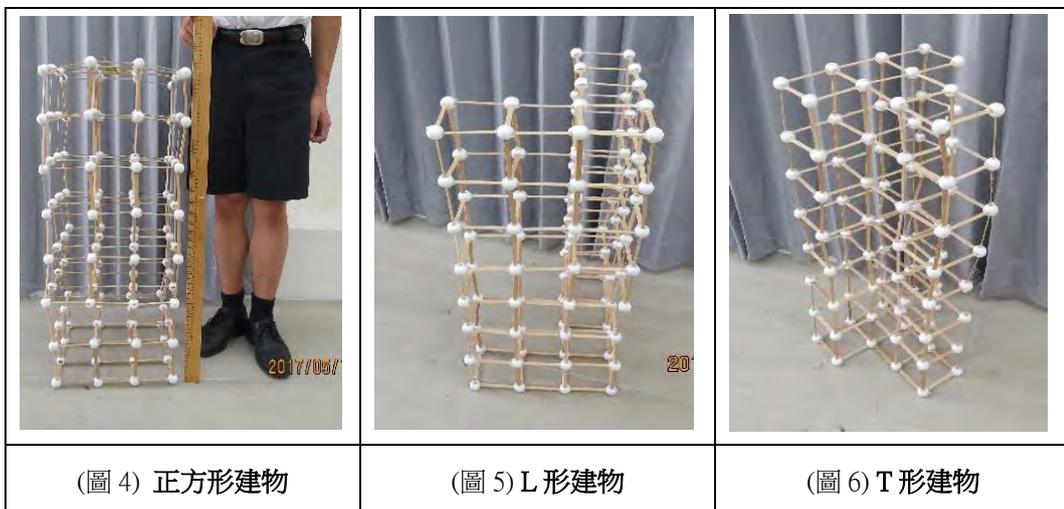
※為了了解地震時，建築物重心與建物搖晃程度的關係，我們設計實驗一。

實驗一：探討大型建築物形狀不同，建物重心位置不同，地震時搖晃程度的差異。

研究過程：

- 一、利用保麗龍球、冰棒棍及熱熔膠蓋三棟七層樓的模擬建築物，因為我們的實驗目的是要研究如何減震，所以利用熱熔膠將冰棒棍與保麗龍球固定，避免搖晃時建築物毀損、倒塌。如圖 2。
- 二、三棟七層樓的模擬建物，地基分別為 3\*3 的正方形建物(邊長：38 cm；高 89cm)、地基為 3\*4 的 L 形建物和地基為 3\*3 的 T 形建物，如圖 4、5、6。
- 三、將建築物分別固定在模擬地震儀的平台上。

【註】模擬地震儀是利用足部震動器改裝而成，如圖 3，此模擬地震儀只會做水平來回的移動，週期約為 0.35 秒/次。



四、利用手機下載震度計軟體(如圖 7，震度計說明)，將手機固定於建築物頂樓，搖動 20 秒，讀取平均震度，重複 3 次求取平均值。如圖 8、9、10。

五、為求實驗準確性，每次實驗完畢，我們均會檢查模擬建物是否受損、變形，必要時加以整修、補強，再以鉛錘線確認建物回復原先狀態，再進行下一個實驗。如圖 11。

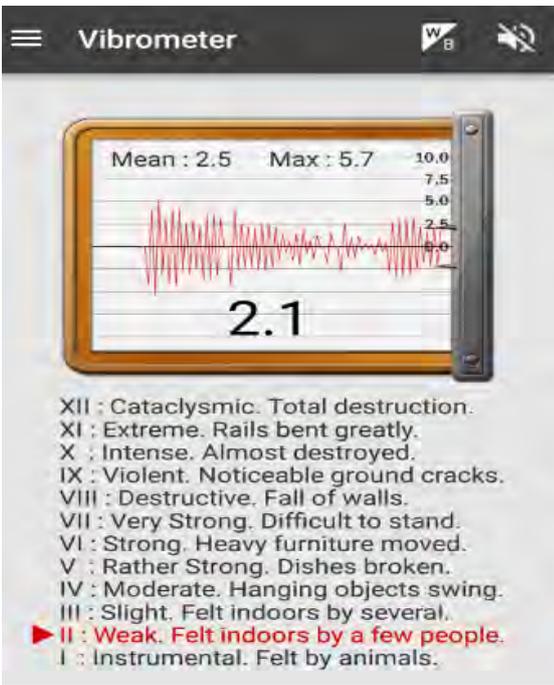
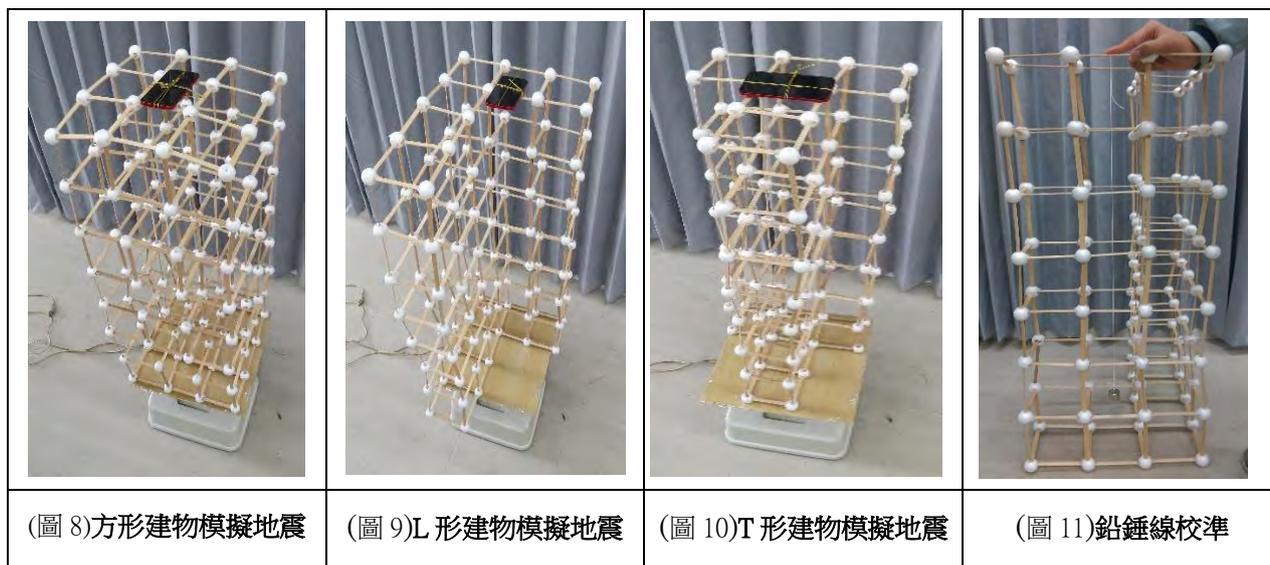
 <p>Mean : 2.5 Max : 5.7</p> <p>2.1</p> <p>XII : Cataclysmic. Total destruction.          XI : Extreme. Rails bent greatly.          X : Intense. Almost destroyed.          IX : Violent. Noticeable ground cracks.          VIII : Destructive. Fall of walls.          VII : Very Strong. Difficult to stand.          VI : Strong. Heavy furniture moved.          V : Rather Strong. Dishes broken.          IV : Moderate. Hanging objects swing.          III : Slight. Felt indoors by several.          ► II : Weak. Felt indoors by a few people.          I : Instrumental. Felt by animals.</p>	<p>APP 震度計：</p> <p>震度共分 12 級：</p> <p>12：毀滅級。山崩地裂，完全毀滅。</p> <p>11：超強級。鐵軌嚴重扭曲。</p> <p>10：猛烈級。房屋幾乎全毀。</p> <p>9：強烈級。地面有裂痕。</p> <p>8：毀壞級。牆壁坍塌。</p> <p>7：烈震級。難以站立。</p> <p>6：強震級。大型傢俱移位。</p> <p>5：中強級。碗盤破碎。</p> <p>4：中震級。吊掛物品搖晃。</p> <p>3：輕震級。多數室內民眾有感。</p> <p>2：弱震級。少數室內民眾有感。</p> <p>1：微震級。僅儀器可測，動物有感。</p>
---	--

圖 7：震度計說明

〔註〕此震度計軟體是參考美國使用的麥加利地震震度，有感地震共分 12 級別。並非我國中央氣象局的 0~7 級的震度級別。有關麥加利地震震度級別，詳列於附錄一。中央氣象局的 0~7 級的震度級別詳列於附錄二。



## 結果與討論：

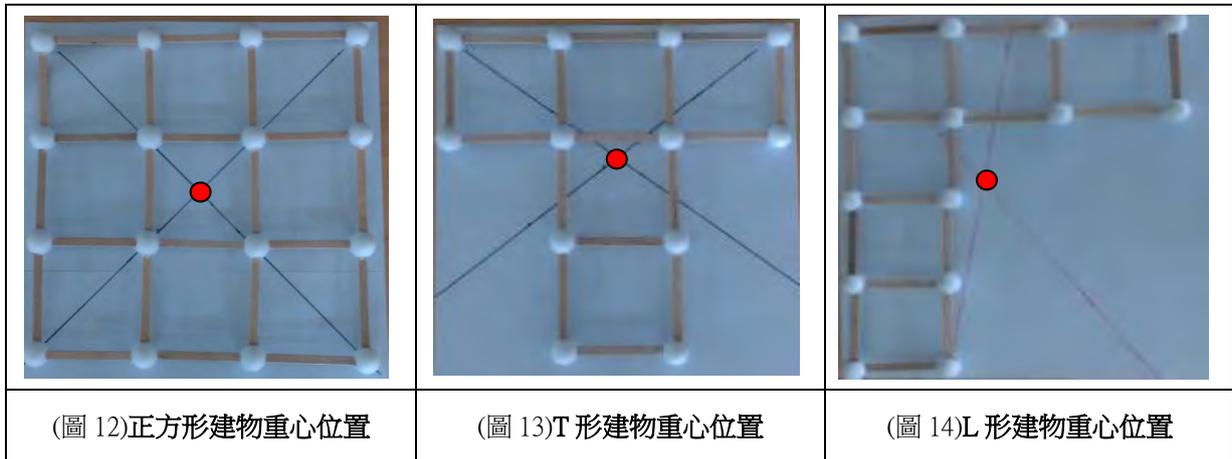
一、實驗結果為：地基為正方形建築物當地震來時平均震度最小。

二、三棟七層樓的模擬建物，地基分別為 3\*3 的正方形、地基為 3\*4 的 L 形建物和地基分別為 3\*3 的 T 形建物。搖動結果如表(一)：

表一：三種建物平均震度

模擬建物	正方形建物	T 形建物	L 形建物
3 次平均震度	6.2	6.6	6.8

三、我們認為實驗結果與建築物重心位置有關，於是我們取 3 個建物平面形狀，利用懸掛法分別求取 3 個建築物的重心位置結果，如圖 12、13、14 中的紅點：



(一)地震來臨時建築物搖晃程度：正方形建物 < T 形建物 < L 形建物。

(二) L 形建物地震時震度最大，應該與建物的重心位在建築物結構體外有關，地震來時耐震效果應該最差。

(三) T 形建物重心雖然在建築物結構體內，搖晃時震度也比 L 形建物小一些，但是整體結構不對稱，也使得耐震度不足。

(四)正方形建物的重心不僅位在建築物結構體內，而且位於建物平面的正中心位置；加上整棟建築物方正、結構緊密、對稱，震度明顯比較小，耐震度應該最好。

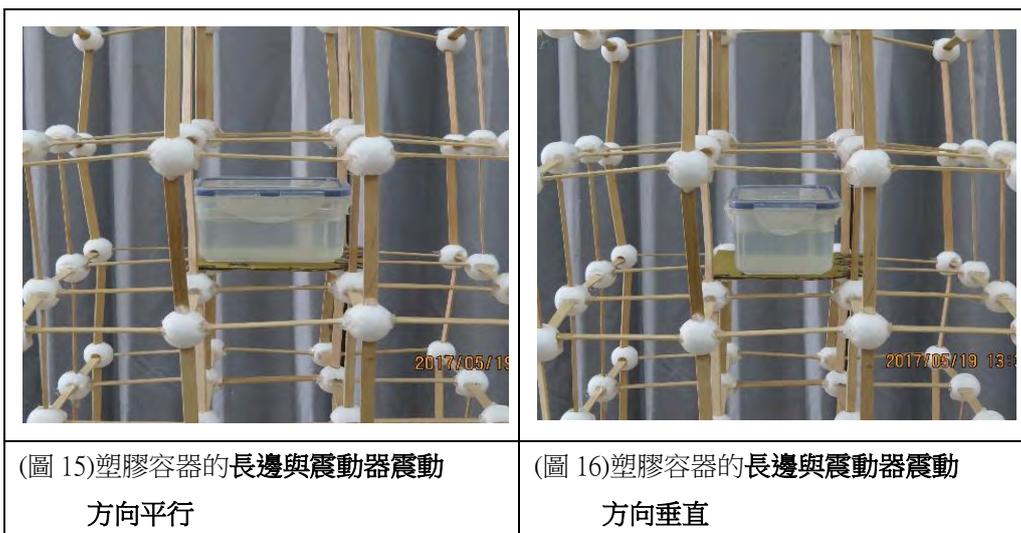
(五)我們認為一般大樓不應該將建築物外形設計過於花俏；工整、對稱、結構體緊密比較重要，地震發生時震度也會比較小。

※為了了解大樓中液體放置的樓層和方式，與建物減震效果的關係，我們設計了實驗二。

實驗二：根據實驗一的結果，選出地震來時搖晃程度最小的正方形建築物，來探討以液體減震時，液體放置的樓層與方向，哪一種狀況減震效果最好。

研究過程：

- 一、準備一長方形的塑膠容器，裝一定量的水(共重 450 克)，水高度約為 4.5 公分；並使塑膠容器的長邊與震動器震動方向平行；分別置於建物的不同樓層，搖動 20 秒，讀取平均震度。重複 3 次求取平均值。如圖 15。
- 二、將裝有等量水的同一長方形的塑膠容器改變放置方向，使塑膠容器的長邊與震動器震動方向垂直；分別置於建物的不同樓層，搖動 20 秒，讀取平均震度。重複 3 次求取平均值。如圖 16。



結果與討論：

- 一、實驗結果為：裝水的塑膠容器放在 6 樓平均震度都是最小的。
- 二、塑膠容器長邊平行震動方向結果如表(二)：

表二：長邊平行震動方向各樓層平均震度

液體放置樓層	1 F	2 F	3 F	4 F	5 F	6 F	7 F
3 次平均震度	6.3	6.3	6.2	6.1	5.9	5.7	6.4

三、塑膠容器長邊垂直震動方向結果如表(三)：

表三：長邊垂直震動方向各樓層平均震度

液體放置樓層	1 F	2 F	3 F	4 F	5 F	6 F	7 F
3 次平均震度	6.3	6.3	6.2	6.1	6.1	5.9	6.3

四、不管是長邊平行震動方向或長邊垂直震動方向，裝水的塑膠容器放在 6 樓平均震度都是最小的；這和 101 大樓將 TMD 設置在 87~92 樓間的高樓層的結果使一致的，這讓我們受到很大的鼓舞。大樓就像是「倒過來的單擺」，愈是高樓層搖晃幅度愈大，因此液體若能減震，放在高樓層效果自然愈好。

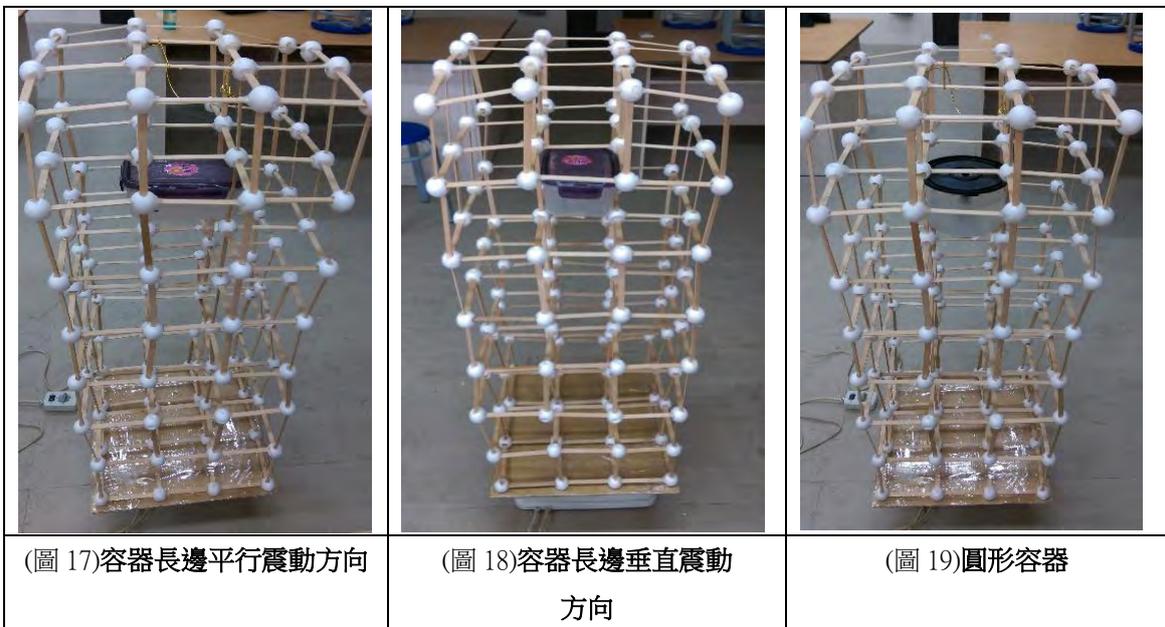
五、長邊平行震動方向減震效果比垂直方向好，但減震效果並不是那麼明顯，我們認為可能是受限於冰棒棍的長度，只能用比較小的塑膠容器，水量不多效果有限，因此決定將容器加大，用較大的塑膠容器裝水置於建物 6 樓重新實驗，一方面確認減震效果，另一方面可以較清楚看出液體在容器中的運動狀態。

※為了了解大樓中容器形狀、容器中放置的水量和擺放方式，與建物減震效果  
的關係，我們設計了實驗三。

實驗三：根據實驗二的結果，減震效果最好的液體放置樓層為 6 樓，再設計以下實驗步  
驟，比較減震效果為何。實驗時所有容器均放置 6 樓。

研究過程：

- 一、為了在 6 樓放置較大的容器，我們拆掉兩根冰棒棍，同時以熱熔膠加強其他冰棒棍的黏著力。
- 二、將大長方形容器（16cm×10 cm×6 cm）長邊平行震動方向放置，分別裝不等量的水(低水位、中水位、高水位、滿水位)，比較減震效果。如圖 17。
- 三、將大長方形容器長邊垂直震動方向放置，分別裝不等量的水，比較減震效果。如圖 18
- 四、將圓形容器（直徑 12 cm），分別裝不等量的水(低水位、中水位、高水位、滿水位)，比較減震效果。如圖 19。
- 五、重複操作 3 次，求得平均值。

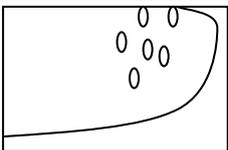
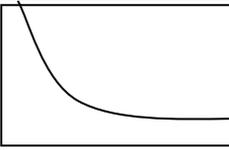
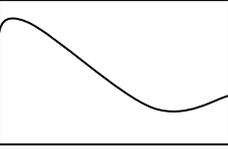
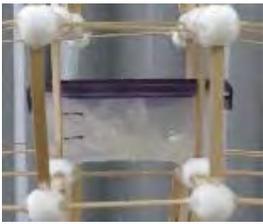
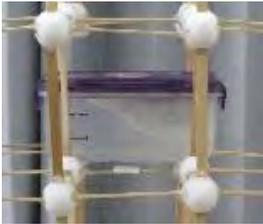


**結果與討論：**

一、實驗結果為：當長方形容器放在 6 樓，裝高水位(佔容器高度 3/4)、且容器長邊與震動方向平行時震度最小。

二、長方形容器、平行震動方向、水位不同，震動結果如表(四)：

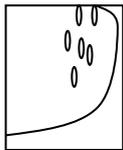
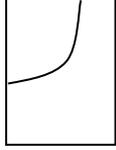
表四：長方形容器平行震動方向、不同水位的平均震度與水的震動情形

容器內水位高度	低水位 (1.5 cm)	中水位 (3cm)	高水位 (4.5cm)	滿水位 (6cm)
3 次平均震度	5.9	5.8	5.6	6.0
震度變化	-0.3	-0.4	-0.6	-0.2
水震動狀況描述	水晃動很劇烈，震動台向右時右側水升高再從容器頂部往下掉落，無明顯波形	震動台向右時右側水降低	震動台向左右側水降低，有明顯波形出現（水位右下左上，右上左下變化）	看不出來
容器側邊看震動示意圖				
容器側邊看水震動照片				

〔註〕：所有表格中震度變化均是與正方形建物不加容器震動時的平均震度（6.2）做比較。

三、長方形容器、垂直震動方向、水位不同，震動結果如表(五)：

表五：長方形容器垂直震動方向、不同水位的平均震度與水的震動情形。

容器內水位高度	低水位 (1.5 cm)	中水位 (3 cm)	高水位 (4.5cm)	滿水位 (6 cm)
3 次平均震度	6.1	6.1	6.1	6.0
震度變化	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
水震動狀況描述	震動台向右時大量水向右側集中，右側水升高再從容器頂部往下掉落，無明顯波形	震動台向右時水向 右側集中，右側水 升高再從容器頂部 往下掉落，但掉落 的水量較少	<b>震動台向右時右側 水升高，有出現小 小的波形</b>	看不出來
容器側邊看水震動示意圖				
容器側邊看水震動照片				

〔註〕：所有表格中震度變化均是與正方形建物不加容器震動時的平均震度（6.2）做比較。

四、圓形容器、水位不同，震動結果如表(六)：

表六：圓形容器不同水位，平均震度與水的震動情形。

容器內水位高度	低水位 (2.5 cm)	中水位 (4.5 cm)	高水位 (6.5 cm)	滿水位 (8.0 cm)
3 次平均震度	6.1	6.4	6.3	6.0
震度變化	-0.1	+0.2	+0.1	-0.2
水震動狀況 描述	水亂晃、翻攪 震動台向右 右側水升高	水先右高左低 晃，然後旋轉	水先右高左低 晃，然後旋轉	看不出來

〔註〕：所有表格中震度變化均是與正方形建物不加容器震動時的平均震度（6.2）做比較。

五、比較三種狀況的曲線圖，如圖 20：

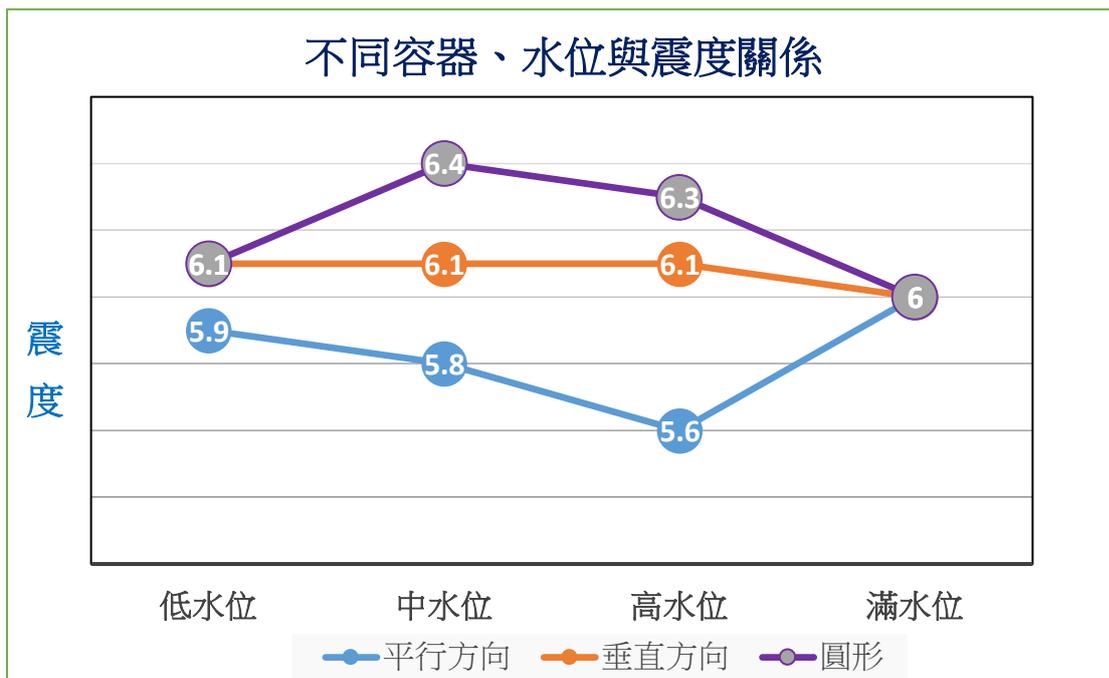


圖 20：長方形容器長邊平行震動方向、垂直震動方向、圓形容器，裝不同水位的平均震度比較。

(一) 長方形容器平行震動方向，除了滿水位外明顯都有減震效果，尤其是高水位減震效果特別好。仔細觀察水在容器中的震盪情形，可以發現，當振動器向右瞬間、建物向右，容器中的水是向左移動，尤其是高水位更能明顯看出水在容器中震盪的波形。

(二) 我們認為容器中的水也能具有和 TMD 相同的效應，如圖 21：當建築物往西移動時容器中的水往東移；當建築物往東移動時容器中的水往西移。也就是大樓將部分的震動能量轉移到水的擺盪上，再由水來消耗這些能量，讓建物的振動幅度降下來。

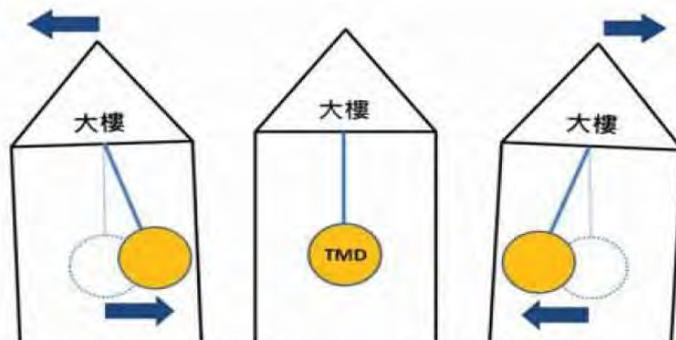


圖 21：調諧質量阻尼器(TMD)建築制震略圖 (王哲夫繪製)

(三)長方形容器垂直震動方向放置，不管水位高低，都無法達到減震效果；原因應該是容器在震動方向的長度不足，使得建物向右水也向右，無法達到兩者震動方向不一致的減震效果。

(四)圓形容器低水位和滿水位對於減震似乎也沒有幫助；但是中水位和高水位則不但無法減震，甚至讓震度增加，應該是和水在容器中旋轉有關，水在容器中旋轉無法與建物達到反向擺動的效果。

(五)三種容器滿水位時，因為液體無法形成震盪波，因此都無法有效減震。

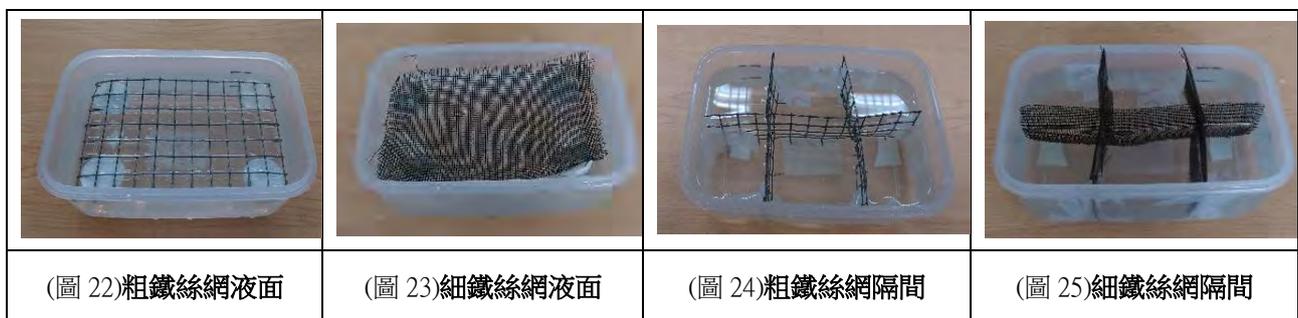
※為了了解容器中的水若受到其他設施或阻力干擾，對建物減震效果是否有影響，我們設計了實驗四。

實驗四：根據實驗三的結果，也就是減震效果最好的狀況是，將高水位長方形容器置於 6 樓且容器長邊與震動方向平行，再設計以下實驗步驟，看看是否有更好的減震效果。

### 研究過程：

- 一、在水面分別放置粗、細不同的兩種鐵絲網，鐵絲網加保麗龍球方能浮於液面。  
如圖 22、23。
- 二、塑膠容器中分別放置粗、細不同的兩種鐵絲網，將塑膠容器中的水隔成 6 格。  
如圖 24、25。
- 三、長方形容器置於 6 樓且容器長邊與震動方向平行，操作 3 次求取平均震度。

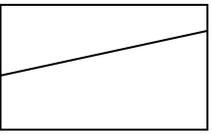
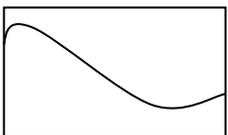
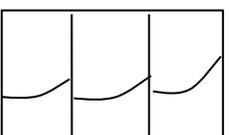
【粗鐵絲網網孔：1.2cm\*1.2cm ；細鐵絲網網孔：0.2cm\*0.2cm 】



### 結果與討論：

- 一、實驗結果為：當長方形容器放在 6 樓，裝高水位、且容器長邊與震動方向平行，當容器中加細鐵絲網隔間時，震度最小，亦即減震效果最好。
- 二、各種情況如表(七)：

表七：水受各種干擾的平均震度與震動狀況。

容器增加裝置	液面加粗鐵絲網	液面加細鐵絲網	粗鐵絲網隔間	細鐵絲網隔間
3次平均震度	5.6	5.7	5.6	5.2
震度變化	-0.6	-0.5	-0.6	-1.0
水震動狀況描述	鐵絲網跟著液面上下震盪	鐵絲網跟著液面上下震盪	水仍上下震盪受鐵絲網影響不大仍有波形	水除了整體左右震盪，也在小隔間裡上下震盪
容器側邊看水震動示意圖				
容器側邊看水震動照片				

〔註〕：表格中震度變化均是與正方形建物不加容器震動時的平均震度（6.2）做比較。

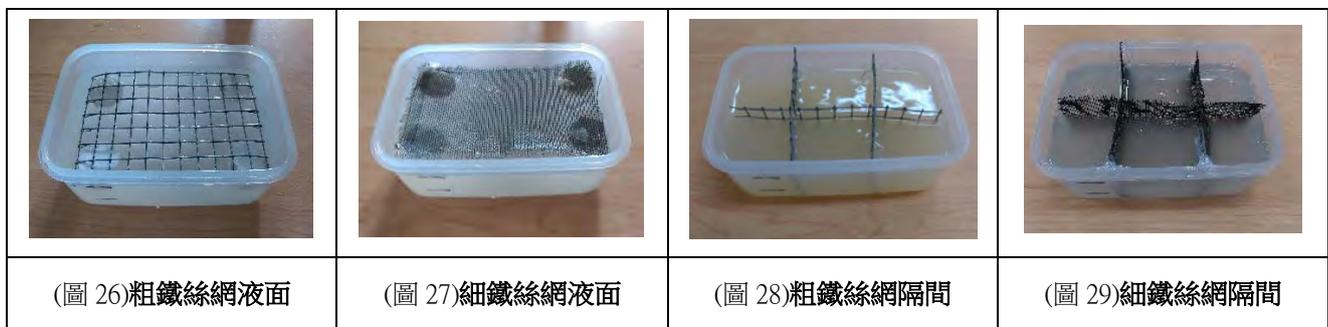
- (一)液面加粗鐵絲網和細鐵絲網，可以看到鐵絲網隨著液面左上右下、右上左下的震盪，看不出波形，和只有水不加鐵絲網具有相同減震效果，只是沒有更好。然而，可能受到液面鐵絲網的影響，水震盪的幅度比較小。我們會在液面加鐵絲網的想法來自游泳池水面的水道分隔繩和浮球，希望能減緩液面震動幅度，確實有使液面晃動幅度較小。
- (二)用粗鐵絲網隔間，可能網孔太大，對水的震盪似乎沒有明顯影響，水一樣左上右下、右上左下的震盪，雖有減震效果但無法使減震效果變得更好。
- (三)以細鐵絲網隔間則減震效果有明顯比較好，可能是細體絲網的阻隔，使水的震動波形變得比較奇怪，水除了整體左右震盪外，也在小隔間裡各自左右、上下震盪。也許因此能量被多重波動分散，而降低了震度。

※為了了解凝膠液對建物減震效果的影響，我們設計了實驗五。

實驗五：根據實驗三、四的結果，我們想換一種溶液來代替水，又不能用有危險的液體，於是想到用太白粉加熱水調成凝膠狀來代替水重複實驗，測試何者減震效果較好。

研究過程：

- 一、將容器中的水以太白粉膠狀液取代，重複實驗四的步驟，如圖 26、27、28、29；  
操作 3 次求取平均值。

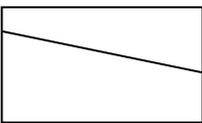
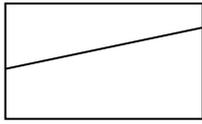
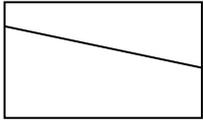
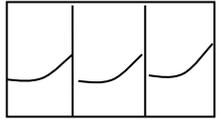


〔註〕太白粉凝膠液的備製：將太白粉 100 c.c 先加入 100 c.c 冷水中攪拌均勻，再緩慢加入 1000 c.c、100°C 的熱水中，並且不斷攪拌至溶液呈黏稠狀。

結果與討論：

- 一、實驗結果為：黏稠狀的太白粉凝膠液減震效果比水好。
- 二、太白粉凝膠液實驗結果如下表(八)：

表八：太白粉凝膠液在各種狀態下的平均震度與震動情形。

	太白粉凝膠	液面加粗鐵絲網	液面加細鐵絲網	粗鐵絲網隔間	細鐵絲網隔間
平均震度	5.1	5.2	5.1	5.2	4.5
震度變化	-1.1	-1.0	-1.1	-1.0	-1.7
震動狀況	與水相同，液體震盪方向與建物相反	鐵絲網隨液面上下震盪	鐵絲網隨液面上下震盪	太白粉凝膠整體震動幅度變小，6小格內各自小震盪	太白粉凝膠在6小格內各自震盪，震盪方向與建物相反
震動示意圖					
震動照片					

〔註〕：表格中震度變化均是與正方形建物不加容器震動時的平均震度（6.2）做比較。

- (一) 容器中加太白粉凝膠液時（震度 5.1）沒想到減震效果這麼明顯，比加水（震度 5.6）好很多；太白粉凝膠液也與建築物震盪方向相反，震盪時振幅比水小，我們認為太白粉凝膠液除了利用反向震盪方式減震外，黏稠的太白粉凝膠液本身更容易吸收建築物震動的能量，使得減震效果更顯著。
- (二) 我們更驚訝在太白粉凝膠液中加細鐵絲網隔間，減震效果更是好，可以看到太白粉凝膠液在 6 小格內各自震盪，6 個震盪波減震效應也許可以加乘，所以減震效應更顯著。

※為了了解不同黏稠度的凝膠液對建物減震效果的差異，我們設計了實驗六。

實驗六：我們沒想到太白粉凝膠液減震效果這麼明顯，想測試不同黏稠度的太白粉凝膠液，減震效果的差異。

研究過程：

- 一、調製五種不同濃稠度的太白粉凝膠液，密度分別為  $D=0.917\text{g/cm}^3$ (最稀)、 $D=1.115\text{g/cm}^3$ 、 $D=1.135\text{g/cm}^3$ 、 $D=1.148\text{g/cm}^3$ 、 $D=1.165\text{g/cm}^3$ 、 $D=1.196\text{g/cm}^3$ (最稠)，放置在 6 樓，容器平行震動方向，搖動 20 秒，讀取平均震度。重複操作 3 次求取平均值。

結果與討論：

- 一、實驗結果為：太白粉凝膠液的黏稠度不同，減震效果也不同，適當的黏稠度減震效果最好，太稠或太稀減震效果反而不好。
- 二、不同黏稠度的太白粉凝膠液，實驗結果如下表(九)：

表九：不同濃稠度的太白粉凝膠液的平均震度。

液體種類及密度( $\text{g/cm}^3$ )	水	太白粉凝膠液 ( $D=1.196$ )	太白粉凝膠液 ( $D=1.165$ )	太白粉凝膠液 ( $D=1.148$ )	太白粉凝膠液 ( $D=1.135$ )	太白粉凝膠液 ( $D=1.115$ )	太白粉凝膠液 ( $D=0.917$ )
平均震度	5.6	5.3	5.2	5.1	4.9	5.1	5.3
震度變化	-0.6	-0.9	-1.0	-1.1	-1.3	-1.1	-0.9

〔註〕：表格中震度變化均是與正方形建物不加容器震動時的平均震度（6.2）做比較。

三、比較水與五種不同黏稠度的凝膠液的震度曲線圖，如圖 30：

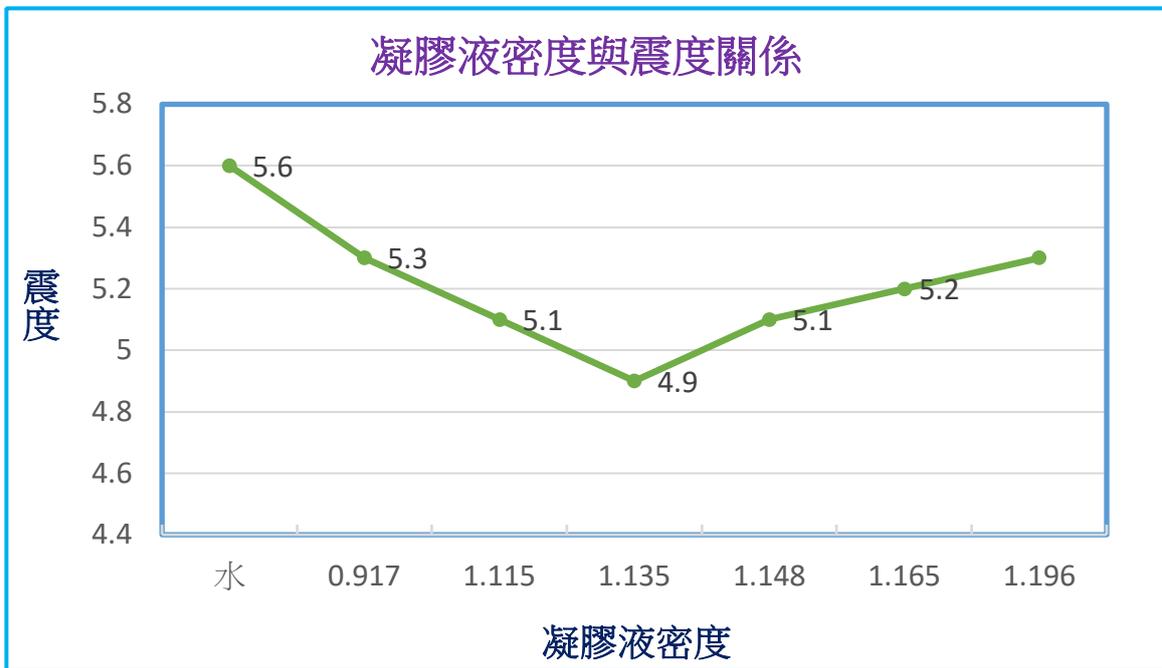


圖 30：水與五種不同黏稠度的凝膠液的震度曲線圖。

(一)由圖可以看出太白粉凝膠液黏稠度(密度)不同，減震效果也不同，適度的黏稠度 ( $D=1.135 \text{ g/cm}^3$ ) 減震效果最好。

(二)並非凝膠液黏稠度愈大減震效果愈好，因為黏稠度太大時，凝膠液不易產生反向震動，使得凝膠液震動幅度、波形都不明顯，因此減震效果不夠好。

(三)當凝膠液黏稠度太小時，雖有較大的反向震動波形，但相對的黏滯力較小吸收震動的能量也較少，因此減震效果也不夠好。

(四)當凝膠液黏稠度很大時(以  $D=1.196 \text{ g/cm}^3$  為例)，凝膠液產生反向震動的幅度比水小，但是減震效果卻比水好，可見凝膠液確實能有效的吸收震動能量。

## 伍、結論

- 一、一般大樓在外形上應該力求方正、對稱，以增加建築物的穩定性，地震來臨時搖晃振幅會比奇怪形狀的房子來得小。同時建築物的重心一定要位在建築結構體內，絕不可以落在建物結構體外，否則將會成為危險建築，大地震來時易倒塌。
- 二、我們認為液體阻尼是一種建築物減震的好選擇；當地震發生時，建物的能量可以傳遞給液體，當液體與建物產生反向共振時，建物的震幅就會變小。
- 三、大樓就像是「倒過來的單擺」，愈是高樓層搖晃幅度愈大，因此液體減震，放在高樓層效果會愈好(6F / 7F)。
- 四、凝膠液除了具有反向共振的效應，也可以吸收地震能量，對於大樓的減震效果更是顯著。
- 五、我們建議一般大樓在蓋的同時，可以根據大樓的週期在適當的高樓層(6F / 7F)，設計一座適當大小的泳池、注入適當的水量(必須配合大樓的整體結構及負載能力，且使建築物與水的震動週期相當，兩者可以產生反向共振。)平時是游泳池但地震來臨時，則可做為液體阻尼，降低建築物搖晃的震幅，可謂一舉兩得。若不想當泳池，可在適當的高樓層設置一個大槽，槽內可以放入適量某種適度黏滯性的無毒凝膠液(如果有密度較小的聚合物凝膠應該更適合，密度小可以避免大樓承載過重)，可以用細網子將大槽隔成若干隔間，使地震時每一隔間都能反向共振，整體阻尼更具有驚人的加乘的效果。

## 陸、參考資料

一、國中自然與生活科技課本。第五冊。翰林書局。

二、維基百科

<http://zh.wikipedia.org>

三、中央氣象局全球資訊網

<http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm>

四、王哲夫。摩天大樓的制震護身符-調諧質量阻尼器。國立自然科學博物館管訊。

第 323 期。

五、歷屆作品參考

(一)「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 屆國小組地球科學科

(二)「水塔超人震得住—液體阻尼器的防震研究」--第 56 屆國小組物理科

## 柒、附錄

### 一、麥加利地震震度

麥加利地震震度（Mercalli intensity scale）是一個用來量度地震震度的單位，也就是說用來量化地震對某一特定地點所受到的影響。由地震時地面建築物受破壞的程度、地形地貌改變、人的感覺等宏觀現象來判定。地震震度源自和應用於十度的羅西福瑞規模（Rossi-Forel），由義大利火山學家朱塞佩·麥加利（Giuseppe Mercalli）在 1883 年及 1902 年修訂。後來多次被多位地理學家、地震學家和物理學家修訂，成為今天的修訂麥加利地震震度（Modified Mercalli Scale）。麥加利地震震度從感覺不到至全部損毀分為 1 至 12 級。5 級或以上才會造成破壞，震度會因觀測地點的不同而異。麥加利地震震度與影響如下：

## 震度

震度	影響
1(I)度	無感覺。只有儀器能觀察到。
2(II)度	在完全靜止的情況下，少部分人有感覺。
3(III)度	大部分室內的人感覺到震動，很多人意識不到是地震。
4(IV)度	連室外的人也感覺到震動；家中較小的飾物開始搖晃，但不造成破壞。
5(V)度	幾乎所有人都有感覺；睡者驚醒，牲畜不寧，擺鐘停擺，不穩定的物件可能傾翻。
6(VI)度	很多人慌張逃跑，走路搖晃；玻璃破碎，書籍或擺設從書架掉下，家具移動或翻倒，破壞輕微。
7(VII)度	站立困難。家具損壞。 未加固，建築材料差的建築物出現裂縫，甚至毀壞。開車中的人可以察覺。
8(VIII)度	煙囪、紀念碑、塔、牆倒塌，重型家具移動。 未周密考慮抵抗外力的建築物遭受某種損壞，部分嚴重損毀。水平方向抗力弱的建築物倒塌。破壞力強。
9(IX)度	人民普遍恐慌。 未周密考慮抵抗外力類建築物隨時倒塌。 建築物可能脫離地基。
10(X)度	一些木造建築物毀壞，大多數建築物連同地基毀壞。 鐵路軌道輕微彎曲。
11(XI)度	只有少數建築物尚未倒塌。 鐵路軌道明顯彎曲，地下管道完全不能使用，地面有很多裂縫、大規模滑坡、山崩，地表斷裂。
12(XII)度	所有建築物遭受毀滅性破壞，動植物普遍滅絕。 天崩地裂，視線扭曲，地貌完全改觀。 地殼呈波浪狀劇烈抖動，甚至形成大峽谷，物體被拋入空中。

## 二、中央氣象局地震震度

交通部中央氣象局地震震度分級表

震度分級	地動加速度 cm/s <sup>2</sup> (gal)	人的感受	屋內情形	屋外情形
0 無感	0.8 以下	人無感覺。		
1 微震	0.8—2.5	人靜止時可感覺微小搖晃。		
2 輕震	2.5—8.0	大多數的人可感到搖晃，睡眠中的人有部分會醒來。	電燈等懸掛物有小搖晃。	靜止的汽車輕輕搖晃，類似卡車經過，但歷時很短。
3 弱震	8—25	幾乎所有的人都感覺搖晃，有的人會有恐懼感。	房屋震動，碗盤門窗發出聲音，懸掛物搖擺。	靜止的汽車明顯搖動，電線略有搖晃。
4 中震	25—80	有相當程度的恐懼感，部分的人會尋求躲避的地方，睡眠中的人幾乎都會驚醒。	房屋搖動甚烈，底座不穩物品傾倒，較重傢俱移動，可能有輕微災害。	汽車駕駛人略微有感，電線明顯搖晃，步行中的人也感到搖晃。
5 強震	80—250	大多數人會感到驚嚇恐慌。	部分牆壁產生裂痕，重傢俱可能翻倒。	汽車駕駛人明顯感覺地震，有些牌坊煙囪傾倒。
6 烈震	250—400	搖晃劇烈以致站立困難。	部分建築物受損，重傢俱翻倒，門窗扭曲變形。	汽車駕駛人開車困難，出現噴沙噴泥現象。
7 劇震	400 以上	搖晃劇烈以致無法依意志行動。	部分建築物受損嚴重或倒塌，幾乎所有傢俱都大幅移位或摔落地面。	山崩地裂，鐵軌彎曲，地下管線破壞。

## 【評語】 030506

1. 團隊設計實驗探討流體阻尼器的可行性，並找出最佳流體與最佳減震方式。內容資料尚稱豐富，議題探討深入，具有實驗精神。
2. 可進一步思考實驗設計與實際一般建物之差異，並設計更符合現實建築設計所需之實驗。

作品海報

# 壹、研究動機

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，屬於聚合性板塊交接帶，因此在板塊擠壓的過程中經常會出現地震，小地震頻繁大家也就習慣了。但是，去年農曆除夕前台南發生的地震，景象觸目驚心，房屋倒塌導致的死傷令人鼻酸，相信整個農曆年，所有人都很難歡樂過新年。我們都知道台北101這樣的超高大樓，在87樓~92樓間設有「單擺式的調諧質量阻尼器」，來減低風和地震的搖晃。我們就想，一般大樓很難像101那樣留下很大的空間來擺 阻尼，那麼是否可以利用液體呢？液體搖晃也會產生波動，有沒有可能因此減緩地震波引起的建築物震動呢？我們利用自然與生活科技第五冊第6章的地震知識當基礎來進行實驗探討。



圖1. 臺北101大樓風阻尼器(TMD)安裝位置略圖  
(資料來源：維基共享資源 Someformhuman 的作品)



圖2. 臺北101大樓風阻尼器(TMD)特寫近照  
(資料來源：維基共享資源 BreakdownDiode 的作品)

# 貳、研究目的

- 一、探討一般大樓建築物形狀不同，建物重心位置不同，地震來臨時搖晃程度的差異。
- 二、探討一般大樓利用流體作為地震阻尼的效果。
- 三、找出一般大樓利用流體作為地震阻尼時，最佳放置樓層。
- 四、流體除了水，能否找出其他流體具有更加減震效果。
- 五、找出一般大樓除了加強建築物結構體外，是否有簡單可行的減震方法。



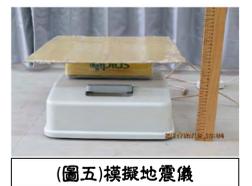
(圖三) 蓋模擬建築物材料



(圖四) 蓋模擬建築物

# 參、研究設備與器材

保麗龍球 冰棒棍 熱熔膠槍 熱熔膠 太白粉 鐵絲網 模擬地震儀 (足部震動器)  
長方形小塑膠容器(長11cm、寬8cm、高6cm)  
長方形大塑膠容器(長16cm、寬10cm、高6cm)  
圓形塑膠容器(直徑12cm、高8.5cm)



(圖五) 模擬地震儀

# 肆、研究過程、結果與討論

## 實驗一：探討大型建築物形狀不同，建物重心位置不同，地震來臨時搖晃程度的差異。

### 研究過程：

- 一、利用保麗龍球、冰棒棍及熱熔膠蓋三棟七層樓的模擬建築物，因為我們的實驗目的是要研究如何減震，所以利用熱熔膠將冰棒棍與保麗龍球固定，避免搖晃時建築物毀損、倒塌。為求實驗準確性，每次實驗完畢，會以鉛錘線確認建物回復原先狀態，如右圖六，再進行下一個實驗。
- 二、三棟七層樓的模擬建物，地基分別為3\*3的正方形建物、3\*4的L形建物和3\*3的T形建物，如右圖七、八、九。
- 三、將建築物分別固定在模擬地震儀的平台上，如圖十一、十二、十三。
- 四、利用手機下載APP震度計軟體，將手機固定於建築物頂樓，搖動20秒，讀取平均震度，重複3次求取平均值。

### 結果與討論：

#### 一、搖動結果如下表一：

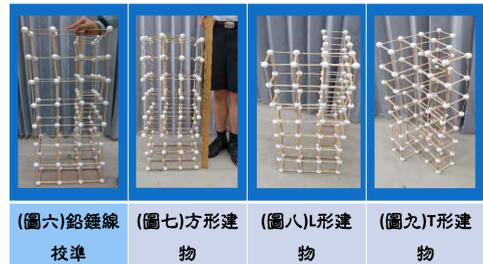
模擬建物	正方形建物	T形建物	L形建物
3次平均震度	6.2	6.6	6.8

#### 二、實驗結果為：地基為正方形建築物當地震來時平均震度最小。

#### 三、我們認為實驗結果與建築物重心位置有關，於是我們取3個建物平面形狀，

利用懸掛法分別求取3個建築物的重心位置結果如圖中的紅點，如圖十四、十五、十六：

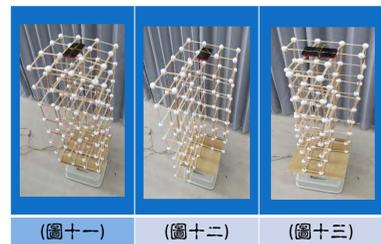
- (一)地震來臨時建築物搖晃程度：正方形建物 < T形建物 < L形建物。
- (二) L形建物地震時震度最大，應該與建物的重心位在建築物結構體外有關。
- (三) T形建物重心雖然在建築物結構體內，搖晃時震度也比L形建物小一些，但是整體結構不對稱，也使得耐震度不足。
- (四) 正方形建物的重心不僅位在建築物結構體內，而且位於建物平面的正中心位置；加上整棟建築物方正、結構緊密、對稱，震度明顯比較小，耐震度應該最好。
- (五) 我們認為一般大樓不應該將建築物外形設計過於花俏；工整、對稱、結構體緊密。



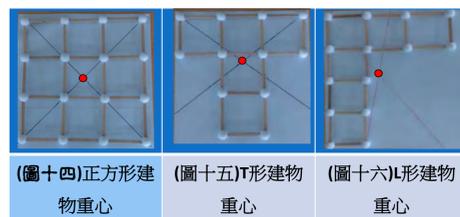
(圖六) 鉛錘線 (圖七) 方形建物 (圖八) L形建物 (圖九) T形建物



(圖十) 震度計說明



(圖十一) (圖十二) (圖十三)

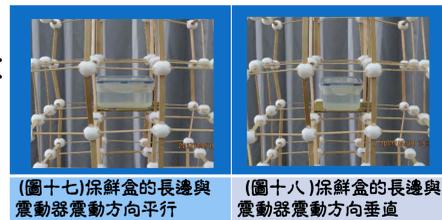


(圖十四) 正方形建物重心 (圖十五) T形建物重心 (圖十六) L形建物重心

## 實驗二：根據實驗一的結果，選出地震來時搖晃程度最小的正方形建築物，來探討以液體減震時，液體放置的樓層與方向，一種狀況減震效果較好

### 研究過程：

- 一、準備一長方形的保鮮盒，裝一定量的水(共重450克)，水高度約為4.5公分；並使保鮮盒的長邊與震動器震動方向平行，如圖十七；分別置於建物的不同樓層，搖動20秒，讀取平均震度。重複3次求取平均值。
- 二、將裝有等量水的同一長方形的保鮮盒改變放置方向，使保鮮盒的長邊與震動器震動方向垂直，如圖十八；分別置於建物的不同樓層，搖動20秒，讀取平均震度。



(圖十七) 保鮮盒的長邊與震動器震動方向平行 (圖十八) 保鮮盒的長邊與震動器震動方向垂直

### 結果與討論：

#### 一、保鮮盒長邊平行、垂直震動方向結果如下表二：

液體放置樓層	1F	2F	3F	4F	5F	6F	7F
長邊平行震動方向	6.3	6.3	6.2	6.1	5.9	5.7	6.4
長邊垂直震動方向	6.3	6.3	6.2	6.1	6.1	5.9	6.3

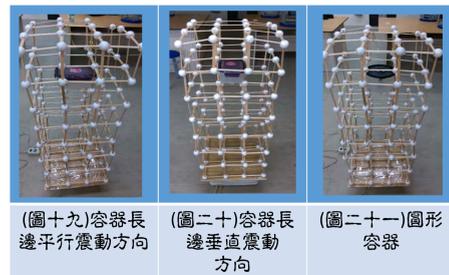
二、不管是長邊平行震動方向或長邊垂直震動方向，裝水的保鮮盒放在6樓平均震度都是最小的；這和101大樓將「單擺式的調諧質量阻尼器」設置在87樓~92樓間的高樓層結果似乎一致，這讓我們受到很大的鼓舞。大樓就像是「倒過來的單擺」，愈是高樓層搖晃幅度愈大，因此液體若能減震，放在高樓層效果自然愈好。

三、長邊平行震動方向減震效果比垂直方向好，但減震效果並不是那麼明顯，我們認為可能是受限於冰棒棍的長度，只能用比較小的保鮮盒，水量不多效果有限，因此決定將容器加大，用較大的保鮮盒裝水置於建物6樓重新實驗，一方面確認減震效果，另一方面可以較清楚看出液體在容器中的運動狀態。

**實驗三：根據實驗二的結果，找出減震效果最好的液體放置樓層為6樓，再設計以下實驗步驟，比較減震效果為何。**

**研究過程：**

- 一、為了在6樓放置較大的容器，我們拆掉兩根冰棒棍，同時以熱熔膠加強其他冰棒棍的黏著力。
- 二、將大長方形容器（16cm×10cm×6cm）長邊平行震動方向放置，分別裝不等量的水(低水位、中水位、高水位、滿水位)，比較減震效果，如圖十九。
- 三、將大長方形容器長邊垂直震動方向放置，分別裝不等量的水，比較減震效果，如圖二十。
- 四、將圓形容器（直徑12cm），分別裝不等量的水(低水位、中水位、高水位、滿水位)，比較減震效果，如圖二十一。重複操作3次，求得平均值。



**結果與討論：**

一、長方形容器、平行震動方向、水位不同，震動結果如下表三：

容器內水位高度	低水位 (1.5 cm)	中水位 (3cm)	高水位 (4.5cm)	滿水位 (6cm)
3次平均震度	5.9	5.8	5.6	6.0
震度變化	--0.3	--0.4	--0.6	--0.2
水震動狀況	水晃動很劇烈，震動台向右時右側水升高再從容器頂部往下掉	震動台向右時右側水位降低	震動台向右，右側水位降低，有明顯波形	看不出來
容器側邊看水震動照片				

表三

〔註〕：所有表格中震度變化均是與正方形建物不加容器震動時的平均震度 (6.2) 做比較。

二、長方形容器、垂直震動方向、水位不同，震動結果如下表四：

容器內水位高度	低水位	中水位	高水位	滿水位
3次平均震度	6.1	6.1	6.1	6.0
震度變化	--0.1	--0.1	--0.1	--0.2
水震動狀況	震動台向右時大量水向右側集中，右側水升高再從容器頂部往下掉落，無明顯波形	震動台向右時水向左右側集中，右側水升高再從容器頂部往下掉落，但掉落的水量較少	震動台向右時右側水升高，有出現小小的波形	看不出來
容器側邊看水震動照片				

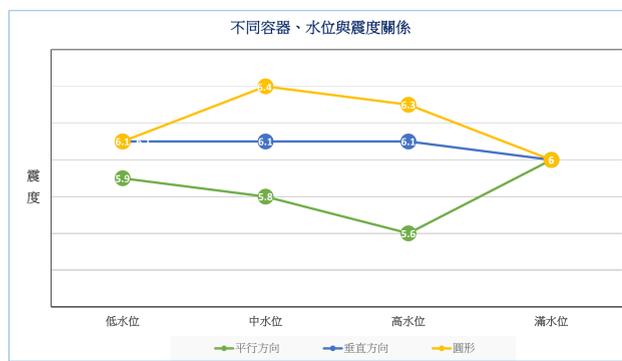
表四

三、圓形容器、水位不同，震動結果如下表五：

容器內水位高度	低水位 (2.5 cm)	中水位 (4.5 cm)	高水位 (6.5cm)	滿水位 (8.1 cm)
3次平均震度	6.1	6.4	6.3	6.0
震度變化	--0.1	+0.2	+0.1	--0.2
水震動狀況	水亂晃、翻攪，震動台向右，右側水升高	水先右高左低晃，然後旋轉	水先右高左低晃，然後旋轉	看不出來

表五

四、比較三種狀況的曲線圖(圖二十三)。



圖二十三：長方形容器長邊平行震動方向、垂直震動方向、圓形容器，裝不同水位的平均震度比較。

(一)長方形容器平行震動方向，除了滿水位外明顯都有減震效果，尤其是高水位減震效果特別好。仔細觀察水在容器中的震盪情形，可以發現，

當振動器向右、建物向右，容器中的水是向左移動，尤其是高水位更能明顯看出水在容器中震盪的波形。也就是當建築物向右移動時水向左，我們不禁想起這和101大樓「單擺式的調諧質量阻尼器」(簡稱TMD)的減震原理相同，減震結果相似。如上圖二十二：

(二)我們認為容器中的水也能具有和TMD相同的效應，當建築物往西移動時容器中的水往東移；當建築物往東移動時容器中的水往西移。也就是大樓將部分的震動能量轉移到水的擺盪上，再由水來消耗這些能量，讓建物的振動幅度降下來。

(三)長方形容器垂直震動方向放置，不管水位高低，都無法達到減震效果；原因應該是容器在震動方向的長度不足，使得建物向右水也向右，無法達到兩者震動方向不一致的減震效果。

(四)圓形容器低水位和滿水位對於減震似乎也沒有幫助；但是中水位和高水位則不但無法減震，甚至讓震度增加，應該是和水在容器中旋轉有關，水在容器中旋轉無法與建物達到反向擺動的效果。

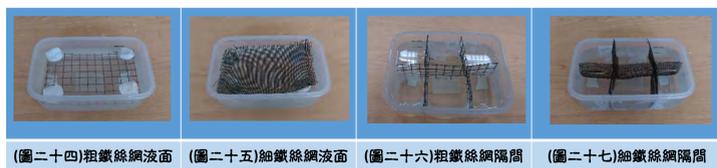
(五)三種容器滿水位時，因為液體無法形成震盪波，因此都無法有效減震。

**實驗四：根據實驗三的結果，也就是減震效果最好的狀況是，將高水位長方形容器置於6樓且容器長邊與震動方向平行，再設計以下實驗步驟，看看是否有更好的減震效果。**

**研究過程：**

- 一、在水面分別放置粗、細不同的兩種鐵絲網，鐵絲網加保麗龍球方能浮於液面。如下圖二十四、二十五。
- 二、保鮮盒中分別放置粗、細不同的兩種鐵絲網，將保鮮盒中的水隔成6格。如下圖二十六、二十七。
- 三、長方形容器置於6樓且容器長邊與震動方向平行，操作3次求取平均震度。

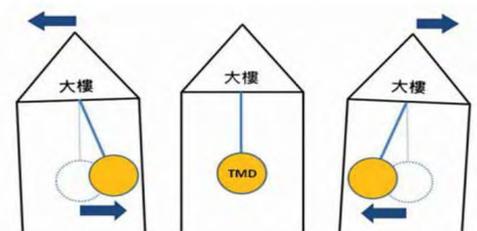
【粗鐵絲網網孔：1.2cm\*1.2cm；細鐵絲網網孔：0.2cm\*0.2cm】



(圖二十四)粗鐵絲網液面 (圖二十五)細鐵絲網液面 (圖二十六)粗鐵絲網隔間 (圖二十七)細鐵絲網隔間

**結果與討論：**

一、結果如下表六：



調諧質量阻尼器(TMD)建築制震略圖(王哲夫繪製) 圖二十二

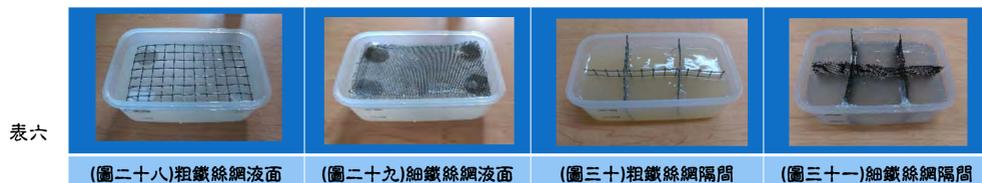
容器增加裝置	液面加粗鐵絲網	液面加細鐵絲網	粗鐵絲網隔間	細鐵絲網隔間
3次平均震度	5.6	5.7	5.6	5.2
震度變化	--0.6	--0.5	--0.6	--1.0
水震動狀況	鐵絲網跟著液面上下震盪	鐵絲網跟著液面上下震盪	水仍上下震盪	水仍上下震盪，但水面有多一些細微的小波動
				

- (一)液面加粗鐵絲網和細鐵絲網，可以看到鐵絲網隨著液面左上右下、右上左下的震盪，看不出波形，和只有水不加鐵絲網具有相同減震效果，只是沒有更好。
- (二)用粗鐵絲網隔間，可能網孔太大，對水的震盪似乎沒有任何影響，雖有減震效果但無法使減震效果變得更好。以細鐵絲網隔間則減震效果有比較好一些，可能是細體絲網的阻礙，使水的震動波形變得比較奇怪，波面不平滑，多了小擾動波在大波形上。也許因此能量被多重波動分散，而降低了震度。

**實驗五：根據實驗三、四的結果，我們想換一種溶液來代替水，又不能用有危險的液體，於是想到用太白粉加熱水調成凝膠狀來代替水重複實驗，測試何者減震效果較好。**

研究過程：

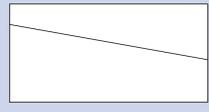
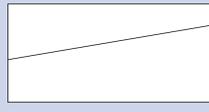
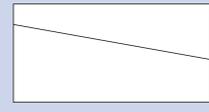
- 一、將容器中的水以太白粉膠狀液取代，重複實驗四的步驟，操作3次求取平均值。【太白粉凝膠液，密度： $0.98\text{g}/\text{cm}^3$ 】



結果與討論：

- 一、太白粉凝膠液實驗結果如下表七：

表七

	太白粉凝膠	液面加粗鐵絲網	液面加細鐵絲網	粗鐵絲網隔間	細鐵絲網隔間
平均震度	5.1	5.2	5.1	5.2	4.5
震度變化	--1.1	--1.0	--1.1	--1.0	--1.7
震動狀況	與水相同，液體震盪方向與建物相反	鐵絲網隨液面上下震盪	鐵絲網隨液面上下震盪	太白粉凝膠在6小格內各自震盪，震盪方向與建物相反	太白粉凝膠在6小格內各自震盪，震盪方向與建物相反
					
					

- (一)容器中加太白粉凝膠液時（震度5.1）沒想到減震效果這麼明顯，比加水（震度5.6）好很多；太白粉凝膠液也與建築物震盪方向相反，震盪時振幅比水小，我們認為太白粉凝膠液除了利用反向震盪方式減震外，黏稠的太白粉凝膠液本身更容易吸收建築物震動的能量，使得減震效果更顯著。
- (二)我們更驚訝在太白粉凝膠液中加細鐵絲網隔間，減震效果更是好，可以看到太白粉凝膠液在6小格內各自震盪，6個震盪波減震效應也許可以加乘，所以減震效應更顯著。

**實驗六：太白粉凝膠液減震效果非常明顯，想測試不同濃稠度的太白粉凝膠液，其減震效果的差異。**

研究過程：

- 一、調製三種不同濃稠度的太白粉凝膠液，密度分別為 $D = 0.96\text{g}/\text{cm}^3$ (稀)、 $D = 0.98\text{g}/\text{cm}^3$ (中)、 $D = 1.04\text{g}/\text{cm}^3$ (稠)，放置在6樓，容器平行震動方向，搖動20秒，讀取平均震度。重複操作3次求取平均值。

結果與討論：

- 一、不同濃稠度的太白粉凝膠液，實驗結果如下表八：

表八

液體	水	太白粉凝膠液(稀)	太白粉凝膠液(中)	太白粉凝膠液(稠)
平均震度	5.6	5.4	5.1	4.9
震度變化	--0.6	--0.8	--1.1	--1.3

- 二、我們看到太白粉凝膠液的黏稠度越大，震盪波振幅越小，減震效果越好；我們想這應該可以證明，黏稠的太白粉凝膠液會吸收建築物震動的能量，而且黏稠度越大，吸收能量效果顯然愈好。

## 伍、結論

- 一般大樓在外形上應該力求方正、對稱，以增加建築物的穩定性，地震來臨時搖晃振幅會比奇怪形狀的房子來得小。同時建築物的重心一定要位在建築結構體內，決不可以落在建物結構體外，否則將會成為危險建築，大地震來時易倒塌。
- 大樓就像是「倒過來的單擺」，愈是高樓層搖晃幅度愈大，因此使用液體減震，放在高樓層效果會愈好(6F/7F)。另外，一般地震發生時地面搖晃時間並不長，但是當地面停止搖動，高層建物仍會持續晃動，此時若有液體阻尼，我們預期大樓會將能量傳給液體而提早停止晃動；只剩下液體在水槽中不斷震盪，慢慢減弱直到靜止。
- 我們建議一般大樓在蓋的同時，可以根據大樓的週期在適當的樓層，設計一座適當大小的泳池、注入適當的水量(必須配合大樓的整體結構及負載能力，且使建築物與水的震動週期相當，兩者可以產生反向共振。)平時是游泳池但地震來臨時，則可做為液體阻尼，降低建築物搖晃的震幅，可謂一舉兩得。沒有人游泳時，則可以在泳池表面覆蓋一層加了浮球的網子，當地震時則可以降低水震動的振幅。
- 另一個建議是：若不想當泳池，可在適當的高樓層設置一個大槽，但裡面可以放入適量某種黏滯性更好的無毒凝膠液(如果有密度較小的聚合物凝膠應該更適合，密度小可以避免大樓承載過重)，凝膠液除了具有反向共振的效應，也可以吸收更多地震能量，對於大樓的減震效果更好。也可以用細網子將大槽隔成若干隔間，使地震時每一隔間都能產生反向共振，整體阻尼更具有驚人的加乘的效果。

## 陸、參考資料

- 國中自然與生活科技課本。第五冊。翰林書局。
- 維基百科 <http://zh.wikipedia.org>
- 中央氣象局 球資訊網 <http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm>
- 王哲夫。摩天大樓的制震護身符-調諧質量阻尼器。國立自然科學博物館館訊。第323期。