

中華民國第64屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科別：物理科

組別：國小組

作品名稱：「柱」在哪兒？ 有關係！

關鍵詞：柱子、水平震動、支撐力

編號：

壹、研究動機

為了提升學生對探究科學的興趣，學校會在期末活動舉辦各種形式的團隊科學競賽。其中，有次的競賽主題是【打造耐震大樓】，競賽目標是在有限的時間，使用簡易、有限的材料蓋出最高樓層、最耐震的大樓。

那次的競賽因為時間有限，我們雖然獲得第一名，但也只有蓋出 3 層樓高的樓房通過耐震測試。我和同學對此結果不甚滿意，我們便利用課餘時間進行更深入的探究，希望在競賽規則中，透過嚴謹的實驗與分析打造出一棟又高耐震的大樓。

貳、研究目的

- 一、研發能模擬地震左右搖晃且能調控水平震動強度的平台
- 二、探究柱子數量及分布如何影響房屋支撐力

參、研究設備及器材

- 一、材料：土壤、杜邦線、魔術黏土、木板、直徑 0.6cm*長度 5cm 木棍、熱熔膠條、氣球桿、塑膠瓦楞板、橡皮筋。
- 二、工具：電子秤、彈簧、LEGO Boost 17101 機器人零件、LEGO L 號馬達、LEGO 5 號電池盒、LEGO 火車馬達、microbit、microbit 擴充板、L9110S 雙路直流馬達驅動模組、樂高軌道、雷射切割機、平板、腳架、熱熔膠槍、鑽孔器。
- 三、軟體：台灣三軸雷射切割雕刻軟體、威力導演、、、、。

肆、研究架構及流程

本研究依研究目的分為「前置實驗」及「主要實驗」兩個階段。在「前置實驗」中使用不同的材料及設計，以能精確模擬不同左右搖晃強度的地震平台；「主要實驗」中設計不同的變因以探究影響房屋耐震度的可能因素。詳細研究架構如圖 1-1。

「柱」在哪兒？有關係！

文獻探究

前置實驗

主要實驗

研發

水平震動
地震模擬平台

調整不同
水平震動強度

可

有

第一代
彈力驅動式

第二代
馬達驅動顏色辨識型

第三代
馬達驅動旋轉控制型

第四代
馬達驅動程式編碼型

觀測

水平震動週期及流暢度

能模擬地震左右搖晃
且能調控水平震動強度的平台

微震
弱震
中震
強震
烈震

一層樓 2 根柱子分布如何影響房屋的支撐力？

一層樓 3 根柱子分布如何影響房屋的支撐力？

一層樓 4 根柱子分布如何影響房屋的支撐力？

用 6 根柱子建造二層樓房時，
柱子的分布如何影響房屋支撐力？

用 9 根柱子建造三層樓房時，
柱子的分布如何影響房屋支撐力？

現有的材料下，怎樣的改良可增加
房屋的支撐力？

探究柱子數量及分布
如何影響房屋支撐力

▲圖 1-1：研究架構圖

伍、研究過程及結果

【文獻探討】

一、認識「地震波」

地震來時，我們會感受到「上下搖」和「左右搖」的兩種搖晃方式，而「上下搖」和「左右搖」其實是源自於地震波的不同！

(一) 「地震波」的分類

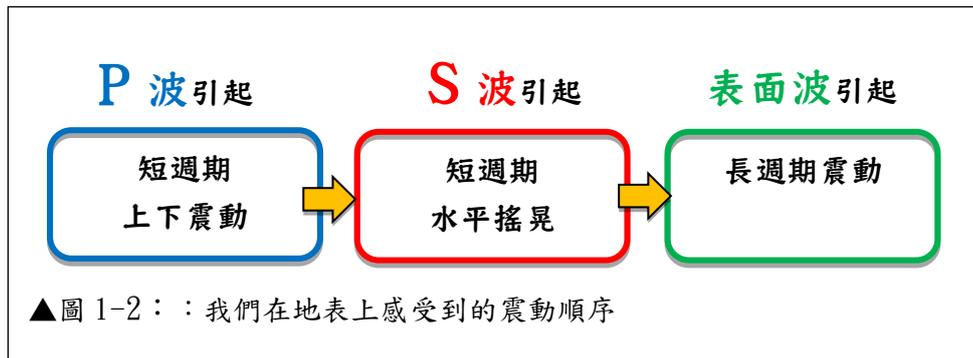
地震發生時，在震源引起的能量以彈性波從震源向四面八方傳播，依「傳播路徑」分為兩大類：

(1)體波：可在地球岩體內部傳遞，包含「縱波(P波)」與「橫波(S波)」。

(2)表面波：地震來到地球表面形成的波，有「洛夫波」與「雷利波」。

(二)人在地表上感受到的震動順序

地表上的我們感受到的震動順序是先抵達地面的P波，會使我們感受到上下震動，由於傳播速率較快，比較早到達地表，其攜帶能量小，不具有破壞力；然後到地面的S波，會感受到水平搖晃，晃動幅度較大，較具破壞力，容易釀成災害；最後才是「表面波引起的長週期震動」（如圖1-2）。



體波之中，P波的能量衰減較快，在淺層地震或離震央很近的地表，才會感受到明顯的上下震動！而深層地震或是距離震央較遠時，因為P波的能量已經很微弱了，所以地面常常感覺不到P波帶來的上下震動。

(三)「地震預警」與「地震波」的關係

因為P波跑得比破壞性高的S波快，所以一旦偵測到較大的P波時，即能運用此時間差發出地震警告，也就是說P波可作為強震發生前的警示。

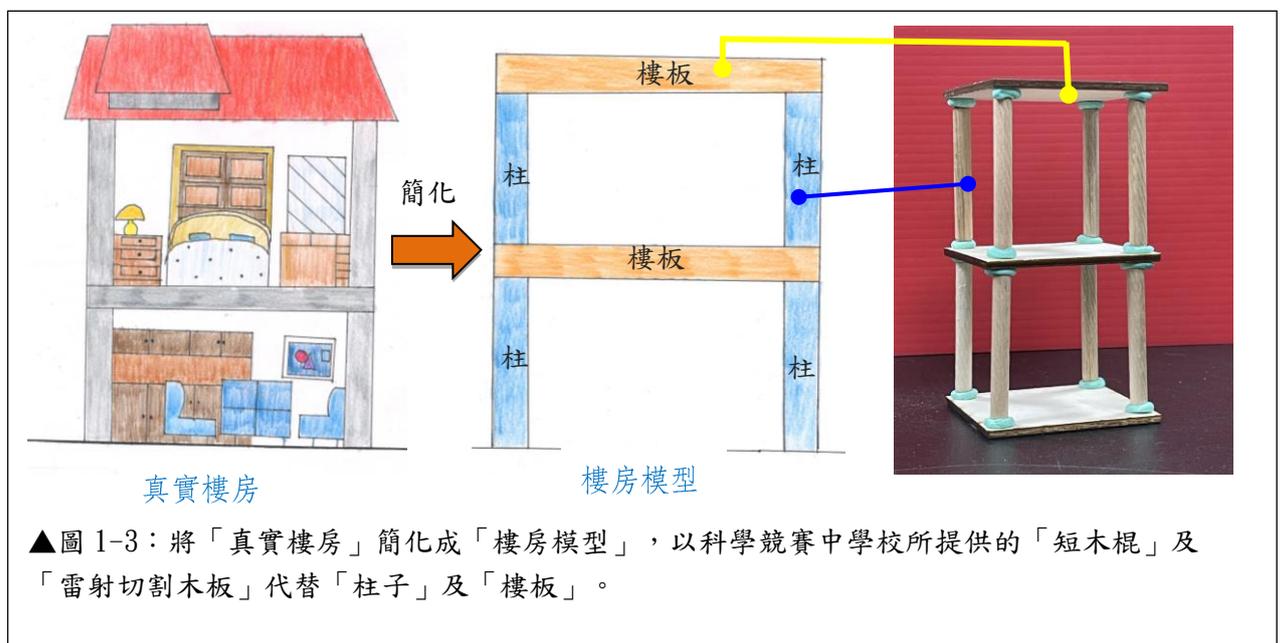
透過文獻閱讀，了解在地震波中，讓人感受到水平搖晃的S波會對房屋帶來較大的破壞力，因此本研究擬設計一個能調整水平搖晃程度的地震模擬平台，觀測不同結構的房屋在地震後的支撐力表現情形。

二、認識房屋的建築構造

整理國家地震工程研究中心官網內容，我們居住的建築物大致由柱、梁、樓板、牆體等所組成的結構框架，承擔著不同的功能和負荷：

- (一)柱：負責支撐樓層的重量。
- (二)樑：跨在柱子上，承擔樓層的重量，並將其傳遞至兩旁的柱子。
- (三)牆：用來隔離、分割或保護區域的垂直構造體。
- (四)樓板：樓房的地面部分，用來支撐人們行走的區域。

一棟建築物的主結構中，樓板和樑的重量佔建築物總重量相當高的比例，而數量有限的柱子不僅須支撐樓板和樑的重量，同時還須抵抗地震力。為了方便模擬，我們將「真實樓房」簡化成僅有柱、樑、樓板組成的「樓房模型」(圖 1-3)，分別以科學競賽中學校所提供的「短木棍」及「雷射切割木板」代替，柱與樓板間則以魔術黏土固定。



三、關於「房屋抗震」的相關科展研究：

我們在台灣網路科學教育館上，針對過去 10 年國小組與「房屋抗震」相關之實驗研究，閱讀後整理摘要如表 1-1：

表 1-1：全國科展第 54~63 屆國小組與「房屋抗震」相關研究作品一覽表

國展屆數	作品名稱	作品摘要
56	形不行？差很大 -形狀及方向對抗彎 變形之研究	<p>研究者使用厚紙板製作各式模型體，在相同材質、長度及斷面積等控制變因下，以砝碼吊重，並設計將微小變形量放大再依比例縮小的間接測量方法，算出微小變形量。</p> <p>經實驗後發現物體載重力和形狀有關，以 W 型、工字型和長方形樑較佳。物體載重力和擺放方向有關，相同形狀時長邊的支撐力優於短邊。物體增加寬度的方向如與力的方向平行，可以有效提高支撐力；如與力的方向垂直，也可提高支撐力但效果比較差。利用樑或柱的強邊去補強建築物平面的弱邊，可提高抗震能力。</p> <p>最後其將研究結果用電腦程式模擬驗證，得知適當的樑柱配置是有助於建築結構的抗震效果。</p>
58	天「柱」我也	<p>研究者使用吸管排列成不同狀子樣態實驗，即使數量、高度相同，但所排列出的承重切面形狀不同，承重狀況差異很大，最佳到最差的順序為：正方形柱>三角形柱>H 形柱=圓形柱>梯形柱>T 形柱>長方形柱>L 形柱。</p> <p>進一步測試四方形、十字形、ㄇ字形、ㄣ字形柱子排列結構大樓在地震模擬器下的承重狀況，發現凡有開口的面向與地震震動方向平行者，皆發生傾斜、甚至崩塌。經由實驗發現不論樓層平面大小，施重所在的區域所對應的柱子承重量最高，兩旁區域的柱子次之，斜對角的柱子都是承重最輕的。</p> <p>研究者推測，由於地震的震動方向可能來自四面八方，四個周邊都有足夠立柱支撐的大樓結構是最適合地震頻傳的台灣。</p>
59	Hold 得住嗎？ ~不同耐震補強方 式對改善建築	<p>研究者透過資料蒐集了解學校建物較常見的補強工法有擴柱、增設 RC 翼牆及剪力牆補強。並用珍珠板當作樓地板，並在 4 個角落及長邊中央位置分別穿入 1 支圓木棍做為模擬建物的柱子，標準組以 5 片珍珠板組合成 4 個樓層，每層樓高 14cm。</p> <p>經實驗發現不同耐震補強方式都能改善建物的穩固性，通常補強樓層越多，耐震效果就越好。研究中補強效果較佳的方式是翼牆補強，其次是剪力牆補強與斜支撐補強方式。研究發現擴柱和增設剪力牆補強方式，補強 3 層和補強 4 層效果差異不大。他們也發現斜支撐補強可增加建物的穩固性，其中以 W 字形及具彈簧的 V 字形結構補強效果較佳。</p>

61	天搖地動～耐震屋研究	<p>研究者利用木條、風扣板建造方型結構房屋模型，樑柱位置皆為固定，分析三、六、九樓基準點，將每秒不同位置變化，畫成每秒振幅變化，計算每隔 10 秒位移平均。</p> <p>研究發現樑柱分段的振動時間>不分段振動時間，房屋樑柱不分段較快停止振動。相同面積下，愈接近正方形的模型屋震動時間較長。模型屋在垂直振動下，不管是幾層屋，樓層越高，振動時間越長。模型屋在水平振動下，四層屋以上，樓層越高，振動時間越長；三層屋以下，樓層越高，振動時間越短。</p>
----	------------	--

從歷屆科展相關作品中，我們可以發現過去的研究主要以房屋整體建築為主，柱子的排列方式多為固定，集中於樓板的四個角落或者長邊之處，在針對其耐震程度進行實驗或補強驗證。過去的實驗，並沒有針對同一樓層中，柱子的排列方式、分布情形進行實驗，因此我們決定就「每樓層柱子分布的位置如何影響房屋的支撐力」之方向著手，進行我們的實驗。

【前置實驗一】擇定能模擬地震左右搖晃的平台型式

(一) 研究方法：

1. 先在紙上設計能夠模擬地震左右搖晃的平台樣式。
2. 採用各種材料將所繪製的平台設計圖製作成實物。
3. 將設計出的每種型式平台啟動 10 秒，觀測其每次搖動的週期、位移是否一致？

(二) 研究結果：

表 2-1：不同代數地震模擬平台之設計圖、照片、啟動方式一覽表



代數	第一代	第二代	第三代	第四代
名稱	彈力驅動式 地震模擬平台	Legoboost 馬達驅動式 顏色辨識型 地震模擬平台	Lego 馬達驅動式 旋桿控制開關 地震模擬平台	Lego 馬達驅動式 程式編碼型 地震模擬平台
設計圖				
平台照片				
啟動方式	用手將平台（塑膠瓦楞板）移至往箭頭右側拉緊後放手，平台會反覆左右水平晃動。	以 Lego Boost 主機及馬達驅動平台移動，用智慧鏡頭辨識顏色：當鏡頭看到紅色時，平台會向左移動；當鏡頭看到綠色時，平台會向右移動。	以電池提供電力，驅動馬達上的旋桿來撥動開關，開關的方向將控制平台會向右/向左移動。	使用 Micro bit 控制 Lego 馬達驅動平台，平台兩邊連接彈簧及伸縮桿，使平台能利用彈力左右移動。
優缺點 分析	<p>✓優點</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 材料簡單。 <p>✗缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 放手後平台會左右反覆晃動，但震動幅度顯著越來越小，很快就靜止。 	<p>✓優點</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 平台能在樂高火車軌道上反覆水平移動。 ▶ 可自由調整水平搖晃幅度 <p>✗缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 平台變換方向時會出現停頓。 	<p>✓優點</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 平台能在軌道上流暢地反覆水平移動。 ▶ 更換旋桿長度可調整水平震動頻率及位移幅度。 <p>✗缺點</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 要變換水平震動頻率及位移時需更換旋桿長度，拆裝超費時。 ▶ 撥動開關的旋桿很容易脫落，導致平台停止水平震動。 	<p>✓優點</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 平台可流暢地反覆水平移動。 ▶ 可改寫程式碼隨時輕易地調整平台水平震動頻率及位移幅度。

表 2-2：不同代數地震模擬平台左右搖晃之週期、位移實驗數據一覽表



代數	第一代		第二代		第三代		第四代		
名稱	彈力驅動式地震模擬平台		Legoboot 馬達驅動式顏色辨識型地震模擬平台		Lego 馬達驅動式旋桿控制開關地震模擬平台		Lego 馬達驅動式程式編碼型地震模擬平台		
照片									
實驗結果	搖晃週期	搖晃位移	搖晃週期	搖晃位移	搖晃週期	搖晃位移	搖晃週期	搖晃位移	
實驗次數	1	0.033	-6.5~+5.5	2.0 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分
	2	0.050	-5.0~+4.6	2.0 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分
	3	0.067	-4.3~+3.9	2.0 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分
	4	0.083	-3.7~+3.5	2.0 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分
	5	0.100	-3.1~+2.9	2.0 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分	1/3 秒	±3 公分
平台左右搖晃穩定性	無法穩定地反覆水平晃動		可反覆水平晃動 變換方向時會停頓		可流暢、快速、穩定地反覆水平晃動		可流暢、快速、穩定地反覆水平晃動		

※註：當地震模擬平台位移「往右」時，位移值為「正值」；
當地震模擬平台位移「往左」時，位移值為「負值」。

(三) 研究發現：

1. 【第一代彈力驅動式地震模擬平台】雖然可簡單利用橡皮筋彈力讓平台反覆地左右晃動，但平台水平晃動幅度越來越小，秒內平台會完全靜止，不適合當作實驗用的地震模擬平台。
2. 【第二代~第四代地震模擬平台】都是使用 Lego 系列馬達及零件組裝，不斷地測試、發現問題、改良的優化過程，改良的缺點包含變換方向時出現的停頓問題(第二代)、需費時更換旋桿長度才能變換水平震動頻率及位移的問題(第三代)、撥動開關的旋桿很容易脫落的問題(第三代)。
3. 因【第四代 Lego 馬達驅動式程式編碼型地震模擬平台】(之後簡稱第四代地震模擬平台)能流暢的左右搖晃，且每次左右搖晃的週期、位移數值穩定，又能調控平台水平震動的頻率，因此之後所有實驗都將採用【第四代地震模擬平台】來進行地震模擬測試。

【前置實驗二】：設計能使【第四代地震模擬平台】產生不同強度的水平震度。

(一) 研究方法：

1. 使用程式碼來改變 Lego 馬達轉速，使【第四代地震模擬平台】能形成不同的水平搖晃頻率，每更換馬達轉速後錄影 10 秒鐘，每個馬達轉速錄製 3 次，使用威力導演軟體慢速播放影片，計數 10 秒鐘內其水平震動次數(往返一趟算震動 1 次)。
2. 不斷重複步驟 1，找出五種【第四代地震模擬平台】不同強度呈等差的水平震度。

(二) 研究結果：

表 3-1：【第四代地震模擬平台】五種不同強度呈等差的水平震度頻率一覽表

10 秒震動次數(次)		程式碼				
		304	408	612	816	1020
實驗次數	1	6	12	18 次	24 次	30 次
	2	6	12	18 次	24 次	30 次
	3	6	12	18 次	24 次	30 次
10 秒平均震動次數		6	12	18 次	24 次	30 次
水平震動頻率(次/秒)		0.6	1.2	1.8	2.4	3.0

(三) 研究發現：

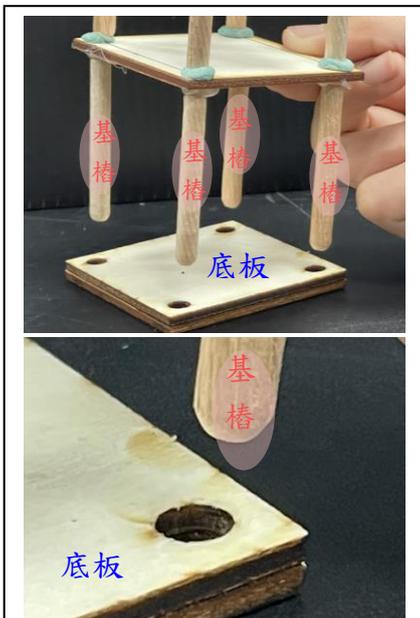
受限於頁數，研究結果中僅呈現最終所擇定的五種不同強度呈等差的水平震度頻率，從震動頻率低至高分別命名為：「微震」、「弱震」、「中震」、「強震」、「烈震」。

【前置實驗三】：實驗環境介紹。

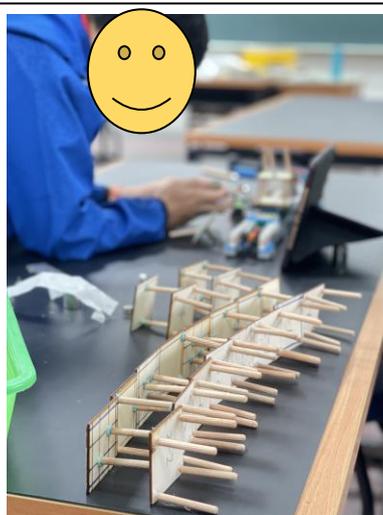
(一)房屋模型結構及命名

房屋模型分為【地基區】及【房屋區】。【地基區】用熱熔膠將基樁固定在頂板，採用「榫卯技術」將基樁穩穩地固定在底板，底板牢牢地黏在地震模擬平台上。

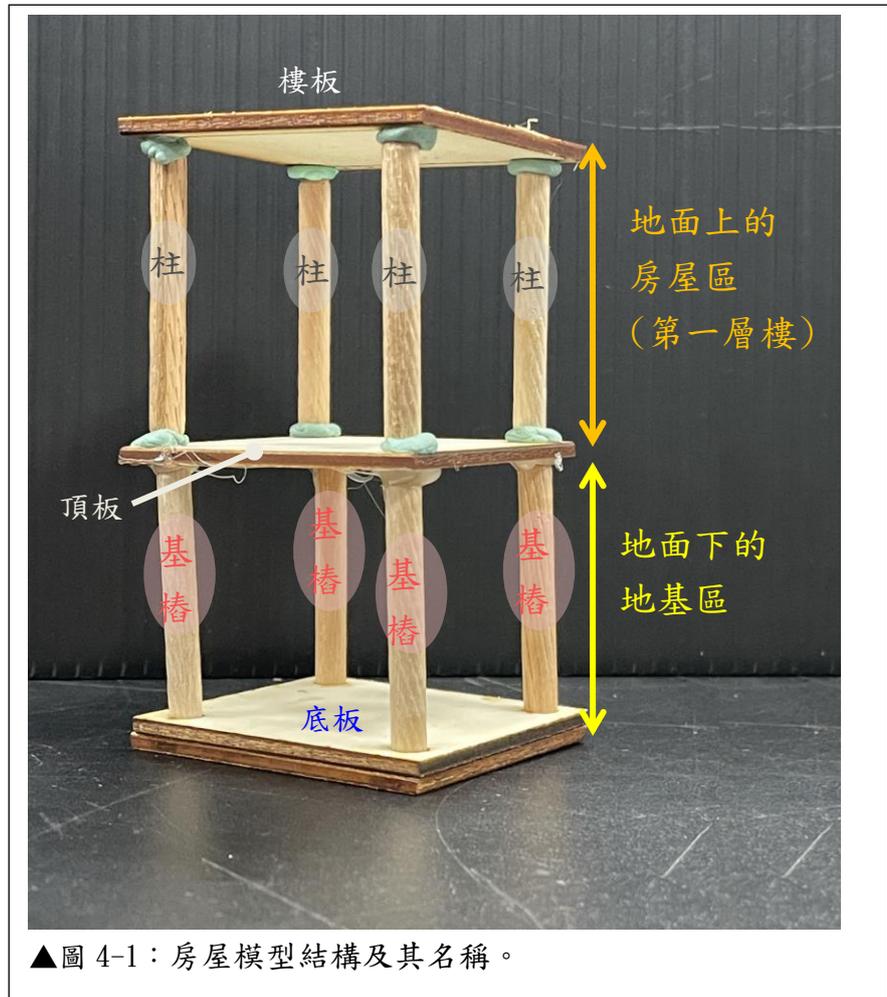
【房屋區】用每坨 0.2 公克的魔術黏土將木棍固定在樓板上



▲圖 4-2：地基區基樁以「榫卯技術」穩穩地固定在底板。



▲圖 4-3：基樁採用「榫卯技術」也便於更換不同房屋結構模型。



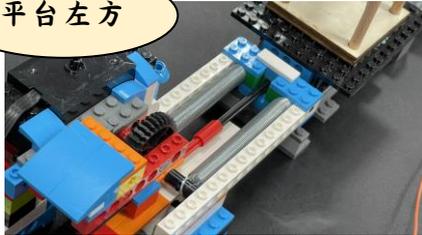
▲圖 4-1：房屋模型結構及其名稱。

※【樓板】及【柱子】的尺寸及重量：

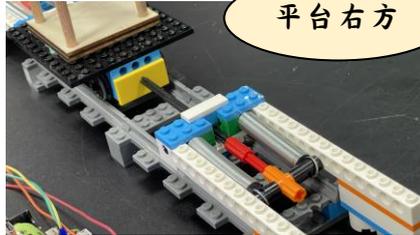
- ▶【樓板】每片樓板為長 6cm、厚 2mm 的正方形，重 6 公克。
- ▶【柱子】每根柱子為直徑 0.6cm*長度 5cm，重 0.8 公克。

(二) 【第四代地震模擬平台】介紹

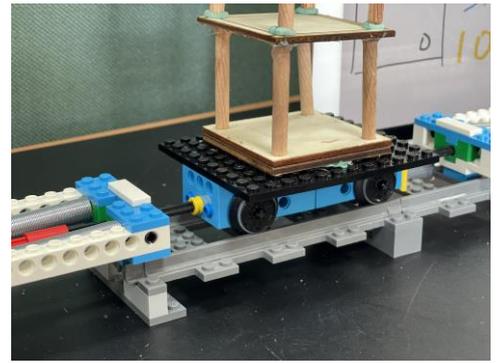
平台左方



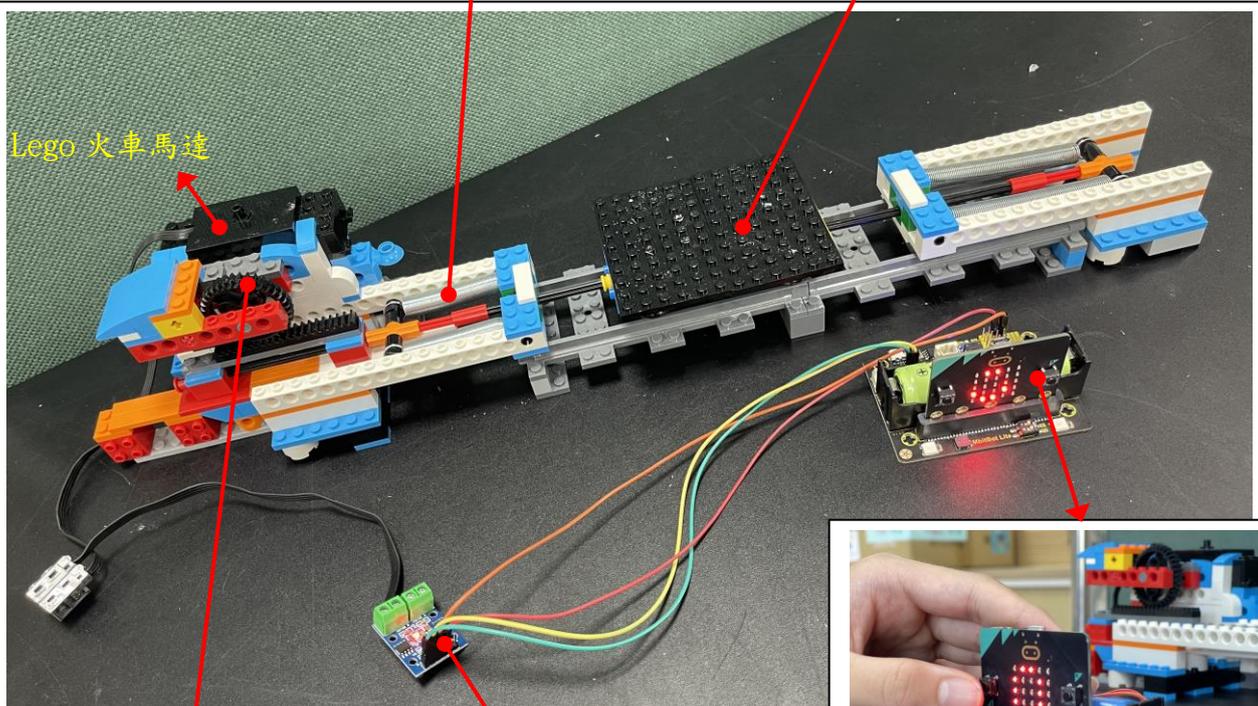
平台右方



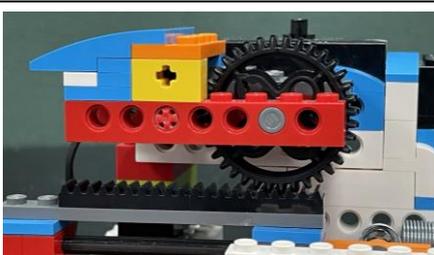
▲圖 4-5：地震模擬平台兩側伸縮桿及彈簧裝置推動平台反覆地左右晃動。



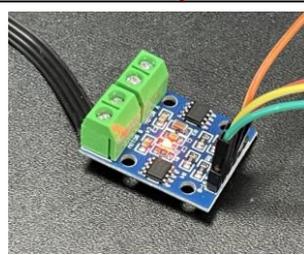
▲圖 4-6：將待測房屋模型放在平台上。



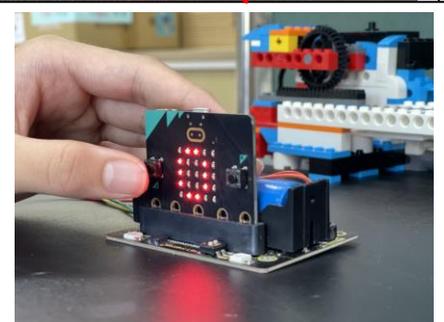
▲圖 4-4：【第四代地震模擬平台】全貌



▲圖 4-7：由火車馬達帶動齒輪，藉由齒輪在齒條上的轉動帶動伸縮桿。



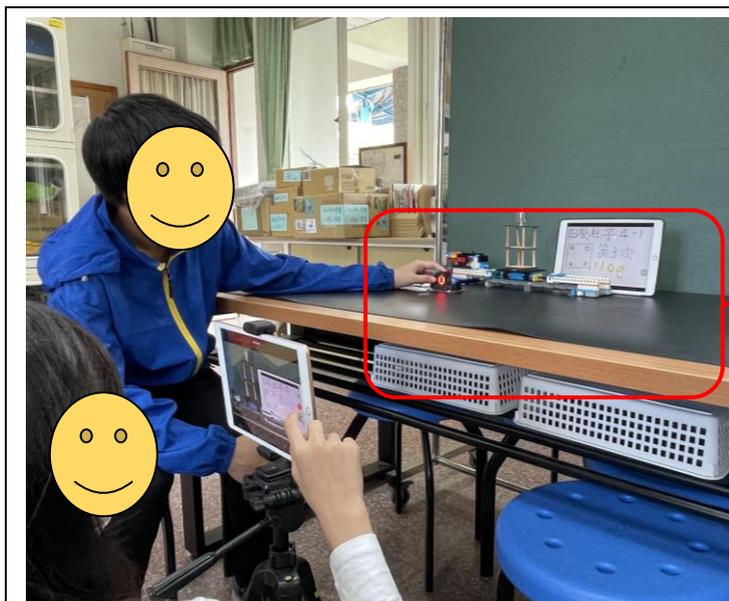
▲圖 4-8：以 L9110S 馬達驅動板連接 micro bit 及 Lego 火車馬達。



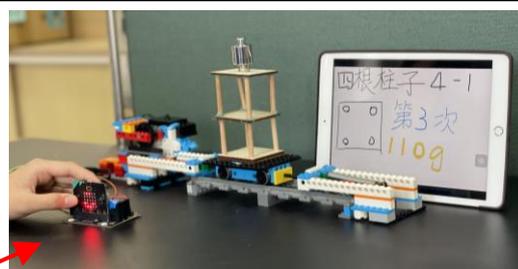
▲圖 4-9：由 micro bit 按鈕調整地震模擬平台擺動頻率。

(三)實驗環境說明

將【第四代地震模擬平台】架設在桌上，在前方以水平視角架設一台平板當攝影機，將所錄製的實驗影片以威力導演軟體精準判讀相關數據。



▲圖 4-10：在桌方以水平視角架設一台平板當攝影機，將所錄製的實驗影片以威力導演軟體精準判讀相關數據。



▲圖 4-11：將【第四代地震模擬平台】架設在桌上。

【主要實驗一】：第一層樓 2 根柱子的分布位置如何影響房屋的支撐力？

(一)研究方法：

1. 第一層樓 2 根柱子的分布有以下 4 種房屋架構型式：



●2-外對角型



●2-內對角型



●2-平行

(與平台震動平行)



●2-垂直

(與平台震動垂直)

▲圖 5-1：第一層樓 2 根柱子分布的 4 種房屋架構型式

2. 先將「2-外對角型」型式的房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，並在第一層樓的樓板上方依序放置 0 公克、10 公克、20 公克……的砝碼，啟動「烈震」模式 30 秒鐘，觀測該種房屋模型架構能支撐多少時間才



▲圖 5-2：在樓板最上方依序放置不同重量的砝碼。

倒塌。每種重量實驗 3 次，取其倒塌所需時間之平均值。

3. 再依序將其他型式的房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，重複步驟 2。

4. 只要 1 根柱子倒塌即停止計時。若 30 秒鐘內無倒塌，則記錄「無」。

(二)研究結果：

表 5-1：「2-外對角型」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		2					
柱子分布		 2-外對角型					
樓層倒塌時間(秒)		載重					
實驗次數		0 公克	10 公克	20 公克	30 公克	40 公克	50 公克
實驗 次 數	1	無	無	6.80	1.93	0.00	
	2	無	無	7.00	1.53	0.00	
	3	無	無	7.20	1.33	0.00	
樓層平均倒塌時間(秒)		無	無	7.00	1.60	0.00	

表 5-2：「2-內對角型」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		2					
柱子分布		 2-內對角型					
樓層倒塌時間(秒)		載重					
實驗次數		0 公克	10 公克	20 公克	30 公克	40 公克	50 公克
實驗 次 數	1	無	16.97	6.33	2.26	0.00	
	2	無	15.43	7.63	2.67	0.00	
	3	無	15.73	7.00	3.27	0.00	
樓層平均倒塌時間(秒)		無	16.04	6.99	2.73	0.00	

表 5-3：「2-平行」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		2					
柱子分布		 2-平行					
樓層倒塌時間(秒)		載重					
實驗次數		0 公克	10 公克	20 公克	30 公克	40 公克	50 公克
實驗 次 數	1	無	無	無	9.10	2.80	0.00
	2	無	無	無	8.03	3.96	0.00
	3	無	無	無	9.23	3.53	0.00
樓層平均倒塌時間(秒)		無	無	無	8.79	3.43	0.00



表 5-4：「2-垂直」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		2					
柱子分布		 2-垂直					
樓層倒塌時間(秒)		載重					
實驗次數		0 公克	10 公克	20 公克	30 公克	40 公克	50 公克
實驗 次 數	1	無	14.50	2.76	1.30	0.00	
	2	無	12.40	2.70	1.67	0.00	
	3	無	13.13	2.43	1.30	0.00	
樓層平均倒塌時間(秒)		無	13.34	2.63	1.42	0.00	

(三)研究發現：

1. 當承載重量相同，2 根柱子分布位置不同時，烈震發生，房屋倒塌所需時間也不相同。以承載 30 公克的砝碼來說，房屋倒塌所需時間由多至少為：【2-平行】>【2-內對角型】>【2-外對角型】>【2-垂直】。

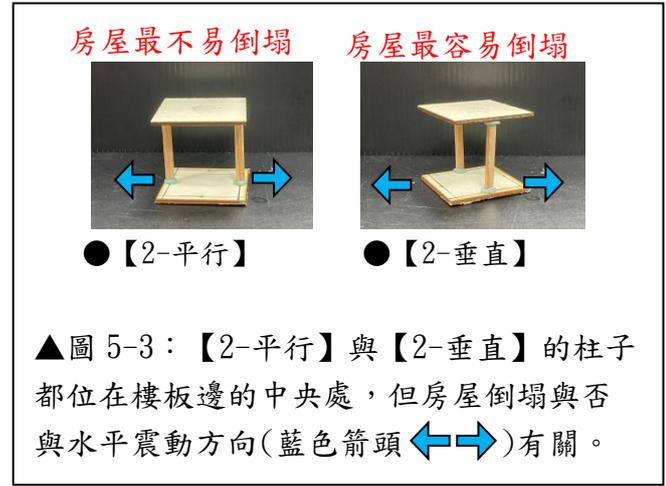
2. 承1，由【2-平行】與【2-垂直】房屋模型可顯著看出，柱子的分布位置雖都在樓板邊的中央處，但房屋倒塌與否與水平震動方向息息相關(圖 5-3)。

3. 柱子呈「2-平行」的房屋模型是所有模型中承載最大砝碼重量(20 公克)，在經歷烈震 30 秒的水平震動後依然屹立在平台上的。

4. 透過計算得知不同柱子分布位置中的每根柱子的平均承載重量，如表 5-5。

計算方式為：

$$\text{(砝碼重+樓板重)} / \text{柱子數量} = \text{每根柱子的平均承載重量}$$



▲圖 5-3：【2-平行】與【2-垂直】的柱子都位在樓板邊的中央處，但房屋倒塌與否與水平震動方向(藍色箭頭←→)有關。

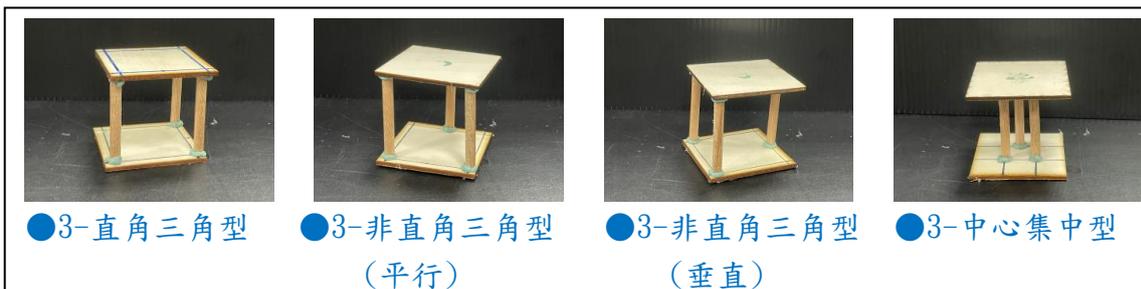
表 5-5：2 根柱子分佈位置不同其每根柱子所乘載重量一覽表

柱子分佈位置				
	2-外對角型	2-內對角型	2-平行	2-垂直
所能承受最大重量(公克)	16	0	26	0
每根柱子承受的平均重量(公克)	8	0	13	0

【主要實驗二】：第一層樓 3 根柱子的分布位置如何影響房屋的支撐力？

(一)研究方法：

1. 第一層樓 3 根柱子的分布有以下 4 種房屋架構型式：



▲圖 6-1：第一層樓 3 根柱子分布的 4 種房屋架構型式

2. 先將「3-直角三角型」型式的房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，並在第一樓層的樓板上依序放置 0 公克、10 公克、20 公克……的砝碼，啟動「烈震」模式 30 秒鐘，觀測該種房屋模型架構能支撐多少時間才倒塌。每種重量實驗 3 次，取其倒塌所需時間之平均值。
3. 再依序將其他型式的房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，重複步驟 2。
4. 只要 1 根柱子倒塌即停止計時。若 30 秒鐘內無倒塌，則記錄「無」。

(二)研究結果：

表 6-1：「3-直角三角型」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		3										
柱子分布		 3-直角三角型										
載重												
樓層倒塌時間 (秒)		0 公克	10 公克	20 公克	30 公克	40 公克	50 公克	60 公克	70 公克	80 公克	90 公克	100 公克
實驗次數												
實驗 次 數	1	無	無	無	無	無	26.73	11.03	7.40	4.00	0.00	
	2	無	無	無	無	無	27.57	11.53	8.50	4.06	0.00	
	3	無	無	無	無	無	27.00	11.30	6.40	4.36	0.00	
樓層平均倒塌時間(秒)		無	無	無	無	無	27.10	11.29	7.43	4.14	0.00	

表 6-2：「3-非直角三角型(平行)」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		3										
柱子分布		 3-非直角三角型(平行)										
載重												
樓層倒塌時間(秒)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
實驗次數		公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克
實驗次數	1	無	無	無	無	無	無	無	17.37	9.40	3.70	0.00
	2	無	無	無	無	無	無	無	15.30	8.00	4.63	0.00
	3	無	無	無	無	無	無	無	15.86	8.73	4.43	0.00
樓層平均倒塌時間(秒)		無	無	無	無	無	無	無	16.18	8.71	4.25	0.00

表 6-3：「3-非直角三角型(垂直)」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		3											
柱子分布		 3-非直角三角型(垂直)											
載重													
樓層倒塌時間(秒)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
實驗次數		公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	
實驗次數	1	無	無	無	無	無	無	無	無	19.17	14.96	5.53	0.00
	2	無	無	無	無	無	無	無	無	18.40	13.73	4.20	0.00
	3	無	無	無	無	無	無	無	無	20.10	15.37	6.50	0.00
樓層平均倒塌時間(秒)		無	無	無	無	無	無	無	無	19.22	14.69	5.41	0.00



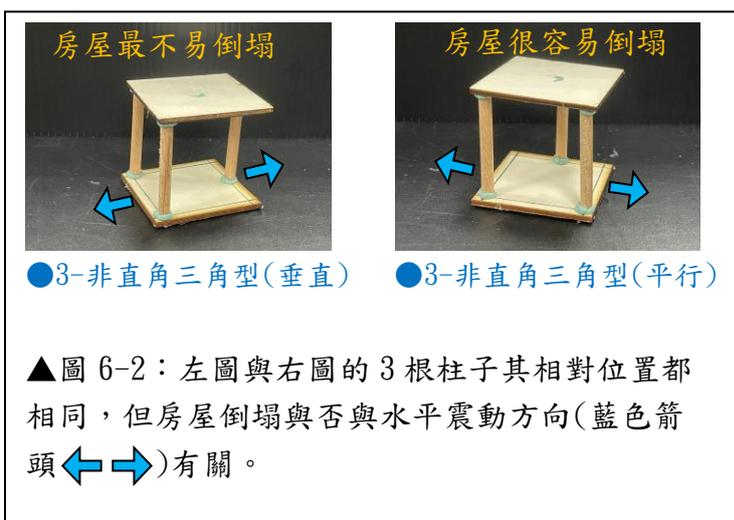
表 6-4：「3-中心集中型」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		3										
柱子分布		 3-中心集中型										
載重												
樓層倒塌時間(秒)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
實驗次數		公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克
實驗次數	1	無	無	無	無	無	無	20.67	10.53	3.83	0.00	
	2	無	無	無	無	無	無	21.97	10.87	5.30	0.00	
	3	無	無	無	無	無	無	19.10	11.47	4.20	0.00	
樓層平均倒塌時間(秒)		無	無	無	無	無	無	20.58	10.96	4.44	0.00	

(三)研究發現：

1. 當承載重量相同，3 根柱子分布位置不同時，烈震發生，房屋倒塌所需時間也不相同。以承載 70 公克的砝碼來說，房屋倒塌所需時間由多至少為：【3-非直角三角型(垂直)】>【3-中心集中型】>【3-非直角三角型(平行)】>【3-直角三角型】。

2. 承 2，由【3-非直角三角型(垂直)】與【3-非直角三角型(平行)】房屋模型可顯著看出，柱子的分布相對位置雖相同，但房屋倒塌與否亦與水平震動方向息息相關(圖 6-2)。



3. 柱子呈「3-非直角三角型(垂直)」的房屋模型是所有模型中承載最大砝碼重量(60 公克)，在經歷烈震 30 秒的水平震動後依然屹立在平台上的。

3. 透過計算得知不同柱子分布位置中的每根柱子的平均承載重量，如表 5-5。

計算方式為：

$$(\text{砝碼重} + \text{樓板重}) / \text{柱子數量} = \text{每根柱子的平均承載重量}$$

表 6-5：3 根柱子的分佈位置不同其每根柱子所乘載的重量一覽表



柱子分佈位置	 3-直角三角型	 3-非直角三角型 (平行)	 3-非直角三角型 (垂直)	 3-中心集中型
所能承受最大重量(公克)	46	56	66	56
每根柱子承受的平均重量(公克)	15.33	18.67	22	18.67

【主要實驗三】：第一層樓 4 根柱子的分布位置如何影響房屋的支撐力？

(一)研究方法：

1. 第一層樓 4 根柱子的分布有以下 3 種房屋架構型式：



2. 先將「4-頂點型」型式的房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，並在第二樓層的樓板上依序放置 0 公克、10 公克、20 公克……的砝碼，啟動「烈震」模式 30 秒鐘，觀測該種房屋模型架構能支撐多少時間才倒塌。每種重量實驗 3 次，取其倒塌所需時間之平均值。
3. 再依序將其他型式的房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，重複步驟 2。
4. 只要 1 根柱子倒塌即停止計時。若 30 秒鐘內無倒塌，則記錄「無」。

(二)研究結果：

表 7-1：「4-頂點型」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		4										
柱子分布		 <p>▲4-頂點型</p>										
載重												
樓層倒塌時間(秒)		60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
實驗次數		公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克
實驗次數	1	無	無	無	無	無	無	21.43	13.17	8.83	4.26	0.00
	2	無	無	無	無	無	無	23.27	14.3	9.83	6.07	0.00
	3	無	無	無	無	無	無	22.56	13.83	8.10	5.53	0.00
樓層平均倒塌時間(秒)		無	無	無	無	無	無	22.42	13.77	8.92	5.29	0.00



表 7-2：「4-邊型」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		4										
柱子分布		 <p>▲4-邊型</p>										
載重												
樓層倒塌時間(秒)		60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
實驗次數		公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克	公克
實驗次數	1	無	無	無	18.33	10.10	5.63	3.53	0.00			
	2	無	無	無	17.13	8.47	6.17	3.16	0.00			
	3	無	無	無	17.63	9.36	6.50	4.20	0.00			
樓層平均倒塌時間(秒)		無	無	無	17.70	9.31	6.10	3.63	0.00			

表 7-3：「4-邊型」之柱子分布其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子數量		4										
柱子分布		 <p>▲4-中心集中型</p>										
載重 樓層倒塌時間(秒) 實驗次數		60 公克	70 公克	80 公克	90 公克	100 公克	110 公克	120 公克	130 公克	140 公克	150 公克	160 公克
實驗 次數	1	無	無	無	無	12.03	9.10	6.96	4.03	0.00		
	2	無	無	無	無	13.60	10.73	6.90	5.80	0.00		
	3	無	無	無	無	12.23	10.67	7.50	5.46	0.00		
樓層平均倒塌時間 (秒)		無	無	無	無	12.62	10.17	7.12	5.10	0.00		

(三)研究發現：

1. 當承載重量相同，4 根柱子分布位置不同時，烈震發生，房屋倒塌所需時間也不相同。以承載 120 公克的砝碼來說，房屋倒塌所需時間由多至少為：【4-頂點型】>【4-中心集中型】>【4-邊型】。
2. 柱子呈「4-頂點型」的房屋模型是所有模型中承載最大砝碼重量(110 公克)，在經歷烈震 30 秒的水平震動後依然屹立在平台上的。
3. 透過計算得知不同柱子分布位置中的每根柱子的平均承載重量，如表 5-5。

計算方式為：

$$(\text{砝碼重} + \text{樓板重}) / \text{柱子數量} = \text{每根柱子的平均承載重量}$$

表 7-4：4 根柱子的分佈位置不同其每根柱子所乘載的重量一覽表

柱子的分佈位置	 4-頂點型	 4-邊型	 4-中心集中型
所能承受最大重量(公克)	116	86	96
每根柱子承受的平均重量(公克)	29.00	21.50	24.00

【主要實驗四】：使用 6 根柱子建造二層樓的房屋時，柱子的分布位置如何影響房屋的支撐力？

(一)研究方法：

1. 依據【主要實驗一~三】實驗結果中支撐力最佳的柱子分布情形，思考只能使用 6 根柱子建造二層樓房屋的情況下，第一層樓、第二層樓的柱子分布位置有 5 種形式，如表 8-1。

表 8-1：使用 6 根柱子建造二層樓房屋時，其第一、二層樓柱子分布位置一覽表

樓房型式名稱	6-第一型	6-第二型	6-第三型	6-第四型	6-第五型
樓房型式照片					
第二層樓 柱子分布型式	2-平	3-直角三角形	3-非直角三角形 (平行)	3-非直角三角形 (垂直)	3-中心集中型
第一層樓 柱子分布型式	4-頂點型	3-非直角三角形 (垂直)	3-非直角三角形 (垂直)	3-非直角三角形 (垂直)	3-非直角三角形 (垂直)

2. 將「6-第一型」房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，在樓頂板上依序放置 0 公克、10 公克、20 公克……的砝碼，啟動「烈震」模式 30 秒鐘，觀測該種房屋模型架構能支撐多少時間才倒塌。每種重量實驗 3 次，取其倒塌所需時間之平均值。
3. 再依序將其他二層樓型式房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，重複步驟 2。
4. 只要 1 根柱子倒塌即停止計時。若 30 秒鐘內無倒塌，則記錄「無」。

(二)研究結果：

表 8-1：使用 6 根柱子建造二層樓房屋時，其第一、二層樓柱子分布位置與其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子總數	砝碼重量 平均倒塌時間(秒) 柱子分布位置	砝碼重量									
		0 公克	10 公克	20 公克	30 公克	40 公克	50 公克	60 公克	70 公克	80 公克	90 公克
6		無	無	17.3	1.47	0.00					
		無	無	無	無	無	16.57	11.31	7.87	0.00	
		無	無	無	無	無	21.82	9.87	7.35	0.00	
		無	無	無	無	無	無	18.85	13.9	5.51	0.00
		無	無	無	無	無	16.86	9.70	5.36	0.00	



(三)研究發現：

1. 當承載重量相同，樓房模型柱子分布位置不同時，烈震發生，房屋倒塌所需時間也不相同。以承載 60 公克的砝碼來說，房屋倒塌所需時間由多至少為：



2. 【6-第四型】樓房模型是所有模型中承載最大砝碼重量(60 公克)，在經歷烈震 30 秒的水平震動後依然屹立在平台上的。推測【6-第四型】有此優質的支撐力是否與其第一、二層樓柱子是連貫著的有關?這尚待下個子題加以證明。

【主要實驗五】：使用 9 根柱子建造三層樓的房屋時，柱子的分布位置如何影響房屋的支撐力?

(一)研究方法：

1. 依據【主要實驗四】實驗結果中支撐力最佳的柱子分布情形，思考只能使用 9 根柱子建造三層樓房屋的情況下，第一層樓、第二層樓、第三層樓的柱子分布位置有 3 種形式，如表 9-1。

表 9-1：使用 6 根柱子建造三層樓房屋時，其第一~三層樓柱子分布位置一覽表

樓房型式名稱	9-第一型	9-第二型
樓房型式照片		
第三層樓柱子分布型式	3-非直角三角型(平行)	3-非直角三角型(垂直)
第二層樓柱子分布型式	3-非直角三角型(垂直)	3-非直角三角型(垂直)
第一層樓柱子分布型式	3-非直角三角型(垂直)	3-非直角三角型(垂直)

2. 先將「9-第一型」房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，並在第三樓層頂樓的樓板上依序放置 0 公克、10 公克、20 公克……的砝碼，啟動「烈震」模式 30 秒鐘，觀測該種房屋模型架構能支撐多少時間才倒塌。每種重量實驗 3 次，取其倒塌所需時間之平均值。
3. 再將「9-第二型」房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，重複步驟 2。
4. 只要 1 根柱子倒塌即停止計時。若 30 秒鐘內無倒塌，則記錄「無」。

(二)研究結果：

表 9-2：使用 9 根柱子建造三層樓房屋時，其第一~三層樓柱子分布位置與其不同載重時的樓層倒塌時間一覽表

柱子總數	砝碼重量 平均倒塌時間(秒) 柱子分布位置	砝碼重量									
		0 公克	10 公克	20 公克	30 公克	40 公克	50 公克	60 公克	70 公克	80 公克	90 公克
9		無	無	無	24.51	12.29	6.44	0.00			
		無	無	無	無	17.74	11.28	3.85	0.00		

(三)研究發現：

1. 當承載重量相同，樓房模型柱子分布位置不同時，烈震發生，房屋倒塌所需時間也不相同。以承載 40 公克的砝碼來說，房屋倒塌所需時間由多至少為：

9-第二型

9-第一型



>



2. 【9-第二型】樓房模型是所有模型中承載最大砝碼重量(30 公克)，在經歷烈震 30 秒的水平震動後依然屹立在平台上的。
3. 【9-第二型】支撐力最好，且其第一~三層樓的柱子是連貫著，恰可印證上個子題的結果。

【主要實驗六】：在現有的材料下，怎樣的改良可增加房屋的支撐力？

(一)研究方法：

想法一

延續【主要實驗五】，【9-第二型】(圖 10-1)樓房模型是所有三層樓房模型中承載最大砝碼重量(30 公克)，在經歷烈震 30 秒的水平震動後依然屹立在平台上的。我們想設法使用科學遊戲競賽所提供的限量物品(樓板、木棍、魔術黏土)中來改良，使【9-第二型】的三層樓房承載更大的重量!



▲圖 10-1：
【9-第二型】模型

想法二

扣除已使用的木棍、樓板，能彈性運用的就只有「魔術黏土」了!

實際做法

1. 原每根木棍上、下是各用 2 糰 0.2 公克魔術黏土將其固定於上、下樓板，現嘗試改成以下 2 種模式，如表 10-1。

表 10-1：改良木棍上下方之魔術黏土重量分布一覽表

模式名稱	上下等重版(原始)	上輕下重版	上重下輕版
木棍上方 魔術黏土重量	0.2 公克	0.2 公克	0.3 公克
木棍下方 魔術黏土重量	0.2 公克	0.3 公克	0.2 公克

2. 依序將魔術黏土「上輕下重版」、「上重下輕版」的【9-第二型】房屋模型置於【第四代地震模擬平台】上，並在第三樓層頂樓的樓板上依序放置0公克、10公克、20公克……的砝碼，啟動「烈震」模式30秒鐘，觀測該種房屋模型架構能承載的最大重量。

(二)研究結果：

表 10-2：不同模式的魔術黏土重量改良其房屋架構能承載的最大重量一覽表

模式名稱	上下等重版(原始)	上輕下重版	上重下輕版
木棍上方 魔術黏土重量	0.2 公克	0.2 公克	0.3 公克
木棍下方 魔術黏土重量	0.2 公克	0.3 公克	0.2 公克
能承載的 最大重量	30 公克	50 公克	40 公克

(三)研究發現：

1. 在木棍上增加魔術黏土的重量確能增加【9-第二型】樓房模型在水平震動中的支撐力。
2. 承1，而「上輕下重版」又比「上重下輕版」能的支撐力更優!
3. 「上輕下重版」比「上下等重版」能在水平震動中多承載20公克的重量!

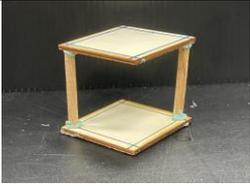
伍、結論

一、柱子的數量及分布位置會影響房屋的支撐力。

(一)每層樓柱子的數量越多對房屋的支撐力越好!

在【主要實驗一~三】中可得知，第一層樓頂點處架設2~4根柱子時，在30秒烈震中，房屋不倒塌下能承載的最大砝碼重量大幅增加，且每根柱子能承受的平均重量越大!(如表10-3)

表 10-3：柱子分布型式與其能承載的最大砝碼重量一覽表

柱子分布型式	2-外對角型	3-直角三角型	4-頂點型
柱子分布照片			
能承載的最大砝碼重量	10 公克	40 公克	110 公克
每根柱子能承受的平均重量	8 公克	15.33 公克	29 公克

(二)柱子的分布方式與地震的走向會影響柱子的傾斜角度。

在【主要實驗一~三】中可得知，柱子在一樓層中不同的分布位置，其與水平震動的地震走向將會導致柱子不同程度的傾斜角度，傾斜角度愈大，其對房屋的支撐力越小。

以不同根數柱子在樓層不同的分布位置時，承載相同重量下，同一時間柱子傾斜角度表現如表 10-4~10-6。

表 10-4：2 根柱子分布型式(承載 30 公克)與受震第 1 秒鐘時傾斜角度一覽表

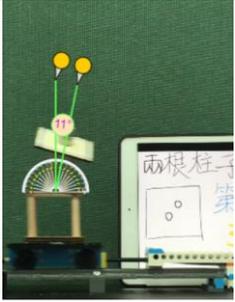
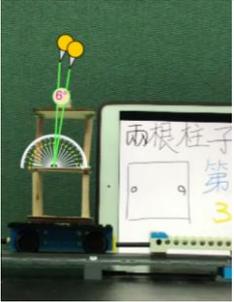
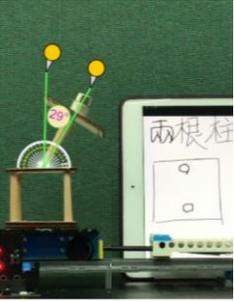
柱子分布	2-外對角型	2-內對角型	2-平行	2-垂直
照片				
傾斜角度	13 度	11 度	6 度	29 度
最後能承載的最大重量	16 公克	0 公克	26 公克	0 公克

表 10-5：3 根柱子分布型式(承載 70 公克)與受震第 5 秒鐘時傾斜角度一覽表

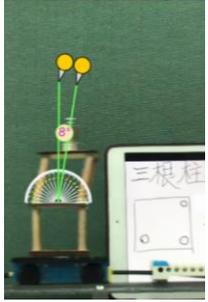
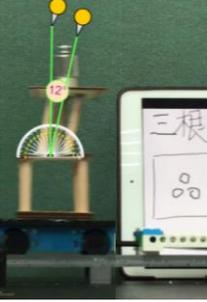
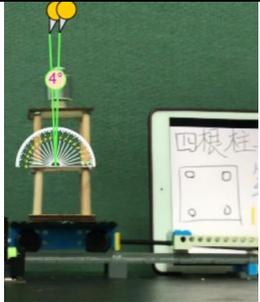
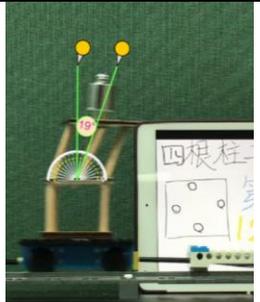
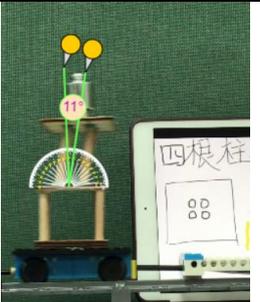
柱子分布	3-直角三角型	3-非直角三角型 (平行)	3-非直角三角型 (垂直)	3-中心集中型
照片				
傾斜角度	8 度	13 度	6 度	12 度
最後能承載的 最大重量	46 公克	56 公克	66 公克	56 公克

表 10-6：4 根柱子分布型式(承載 120 公克)與受震第 3 秒鐘時傾斜角度一覽表

柱子分布	4-頂點型	4-邊型	4-中心集中型
照片			
傾斜角度	4 度	19 度	11 度
最後能承載的 最大重量	116 公克	86 公克	96 公克

(三)不同樓板間柱子的連續性會對支撐力造成影響

在【主要實驗四~五】中得知，最後我們僅用 9 根木棍搭建 3 層樓的樓房，且可承重 30 公克的重量，其每層樓的柱子分布即是連貫型的樣式(如圖 10-2)。



▲圖 10-2：
【9-第二型】支撐力最好，且其第一~三層樓的柱子是連貫著

(四)強化柱子的底端有助於支撐力增加

在【主要實驗六】中得知，在每根木棍底端增加魔術黏土的份量有助於增強柱子的支撐力，可見堅固的柱子對房屋的穩定性非常重要！

二、成功自行研發能模擬地震左右搖晃且能調控水平震動強度的平台

在【前置實驗】中，我們使用 Lego 系列馬達及零件組裝，不斷地測試、發現問題、加以改良，其優化過程中，改良的缺點包含變換方向時出現的停頓問題(第二代)、需費時更換旋桿長度才能變換水平震動頻率及位移的問題(第三代)、撥動開關的旋桿很容易脫落的問題(第三代)，最後成功研發【第四代 Lego 馬達驅動式程式編碼型地震模擬平台】(簡稱第四代地震模擬平台)。

【第四代地震模擬平台】能流暢的左右搖晃，且每次左右搖晃的週期、位移數值非常穩定，又能利用程式編碼輕易地調控平台水平震動的頻率！

陸、參考資料

- 一、中央氣象署數位科普網 <https://edu.cwa.gov.tw/PopularScience/>。
- 二、國家地震工程研究中心官網 <https://www.ncree.narl.org.tw/home>。
- 三、全國第 56 屆科展國小組物理科作品~形不行？差很大-形狀及方向對抗彎變形之研究。
- 四、全國第 58 屆科展國小組物理科作品~天「柱」我也。
- 五、全國第 59 屆科展國小組地球科學科作品~Hold 得住嗎？~不同耐震補強方式對改善建築。
- 六、全國第 61 屆科展國小組地球科學科作品~天搖地動~耐震屋研究。