

台灣二〇〇五年國際科學展覽會

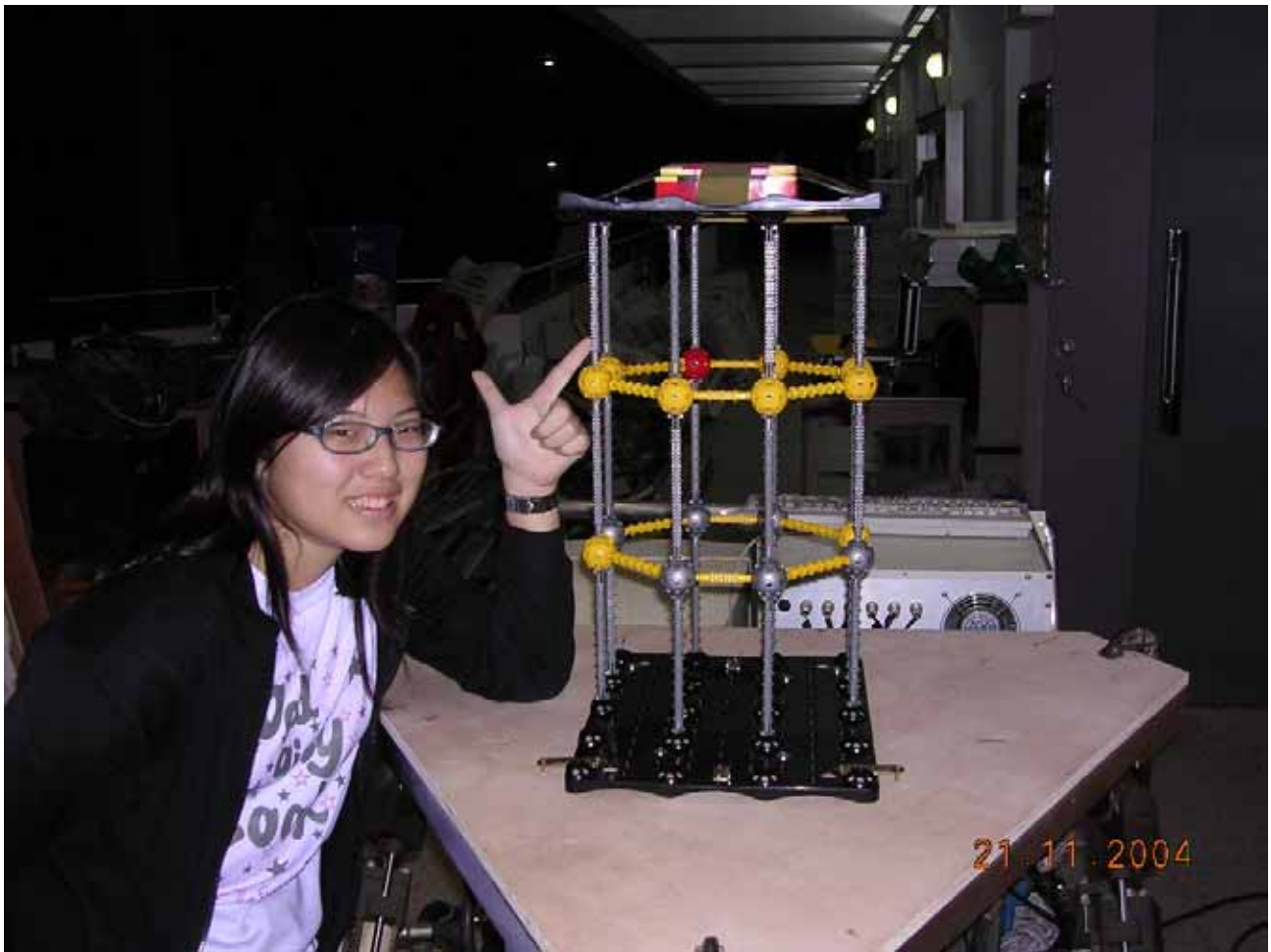
科 別：地球與太空科學

作品名稱：建築結構拓樸對不同地震波形之耐震研究

學 校：臺北市私立衛理女子高級中學

作 者：李宜家

作者簡介：



李宜家，聽起來應該是個溫柔內向的女孩子，但我偏偏是個活潑好動、古靈精怪的好動寶寶，據說還有些聒噪！曾經一位英文老師說我是『知識缺乏恐懼症』，什麼事都想試，什麼都想學！我的興趣很廣泛，有文學、科學、手工藝、音樂…。不知怎麼的，就是想要把所有的東西給學會！期待著自己能夠有相當充實的生活，每天都要充滿通戰鬥力！衝吧~IKEA！

摘要

三軸向六自由度動感平台（六軸平台）或稱史都華平台，最常見的用途是做為訓練用途的飛行模擬器或是娛樂用途的動感電影院。然而較鮮為人知的也被用於模擬地震來作為防震研究。六軸平台利用六支線性致動器的伸縮來控制平台姿態與加速度以製造出地震模擬波動來模擬地震。地震研究和人類生活最直接關係的就是房子的耐震研究。耐震取決於建築結構形狀及所使用之材料；結構決定了整個房子吸收或消除震盪能量的方式。本專題即是利用平台模擬集集地震和阪神地震來測試各種材料相同但結構不同之建築結構拓樸，以控制變因法來分析討論各種結構拓樸的耐震能力，把結構所能承受的最大相對振幅為數據做分析。本專題之部份研究亦參與 2004 年國家地震研究中心所舉辦之抗震盃競賽。

Abstract

Three Axis Six Degree Of Freedom Motion Platforms, also named the Stewart Platform, are usually used for flight simulator in training purpose or for motion-theater in entertainment. Yet, the use of motion platform in earthquake simulation is rarely known in public. The motion platform uses 6 linear actuators to control position and acceleration to simulate earthquake. The direct connection between human life and earthquake research is to study quake-resistance of buildings. The quake-resistance depends on the structure and the material of the buildings. The structure decides how the building absorbs and/or eliminates the shaking energy. This project studies how different structure topologies stand in the simulated earthquake generated by a motion platform. Controlling factors method is utilized to discuss the quake-resistance of different structures. Data of the maximal resisted acceleration are also analyzed. A part of this research also participates in “IDEERS” contest held by the National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE).

壹、研究動機

我跟動感平台有一種揮之不去的緣分，小時後第一次看到太空梭模擬機是在國外的百貨公司遊樂場，爸爸還把下面的布簾打開觀察。之後爸爸從事有關模擬機與動感平台的工作使我常常接觸和平台有關的機器：太空梭，動感電影以及地震體驗屋。其中在地震體驗屋中，我們可以藉由動感平台來作地震模擬演習，感覺就像是歷經真正的地震一樣！不禁讓我懷疑，它是隨便搖一搖，還是完全跟真的地震一樣呢？如果它是『認真的』模擬地震，那可不可以把建築物放在上面搖？能不能藉此做地震的研究呢？便在腦海中開始譜出我的其幻狂想曲『平台+地震

=?』就這樣陷入了地震還動感平台的世界。小小的小靈感造成了我無限大的好奇心，竟一發不可收拾…

貳、研究目的

- 一、1.集集地震和阪神地震兩種不同的地震波波形對建築結構影響之差異
2.各種底面的建築結構在相同地震波形所受破壞差異
- 二、1.建築結構內在施力在地震時對結構本身的影響
2.建築結構耐震能力與對外力處理方式的關係

參、研究方法

控制變因法：

1. 尋找適當之強度相同建築結構組件（連結點、連結柱等等），取其材料強度相等之特性來製作建築結構。並且利用此種結構做出各幾何形狀（底面的形狀），相同高度的結構以爲實驗之試體。因試體之材料強度相同而結構型式不同而稱爲『建築結構拓樸』。
2. 將集集地震波及神戶地震波之最大振幅調成相當，並以動感平台控制電腦依振幅倍數調整以爲實驗。（電腦控制部份由爸爸代勞）

工具：

1. 六自由度動感平台（由國立交通大學電機與資訊學院提供）。
2. 地震波資料取自 1999 年台灣 921 集集地震，以及 1995 年日本神戶地震等兩種地震三方向(x、y、z)單位加速度。取兩個地震波資料之主要震動部份爲代表，此部份之二者時間皆約 1 分鐘。
3. 建築結構拓樸：用同樣材料強度之建築結構組件，來組合成不同之建築結構(正方形、十字、凹形、H 形、L 形、八角形)。





三軸向六自由度動感平台，及控制操作方式。(爸爸在右下照片)

肆、研究步驟

- 一、以組合式結構零件架構出各種不同幾何結構（正方、三角、L 字、凹字、十字、H 字、八角）。
- 二、將地震波(集集地震、阪神地震)資料輸入動感平台，控制電腦並調整相對振幅係數(1-10)。
- 三、將建築結構固定於動感平台之飛行平台上。



將建築結構固定於平台(螺絲釘、C 形夾、架上建築結構)

四、啟動平台

五、紀錄建築結構之破壞狀況，以及破壞時所受的相對振幅

伍、研究過程

(一)、研究步驟：

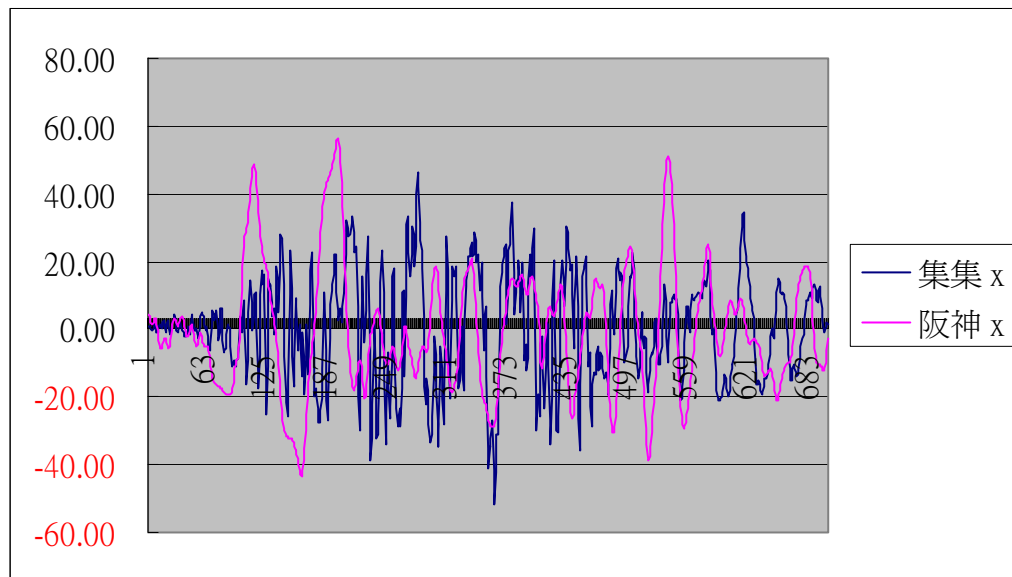
利用組合式結構組裝出各種平面不同的建築結構模型固定在六軸平台上；調整集集地震及阪神地震模擬波形之相對震幅系數；啓動平台分別測試。記錄結果、拍照並錄影過程。

(二)、研究過程

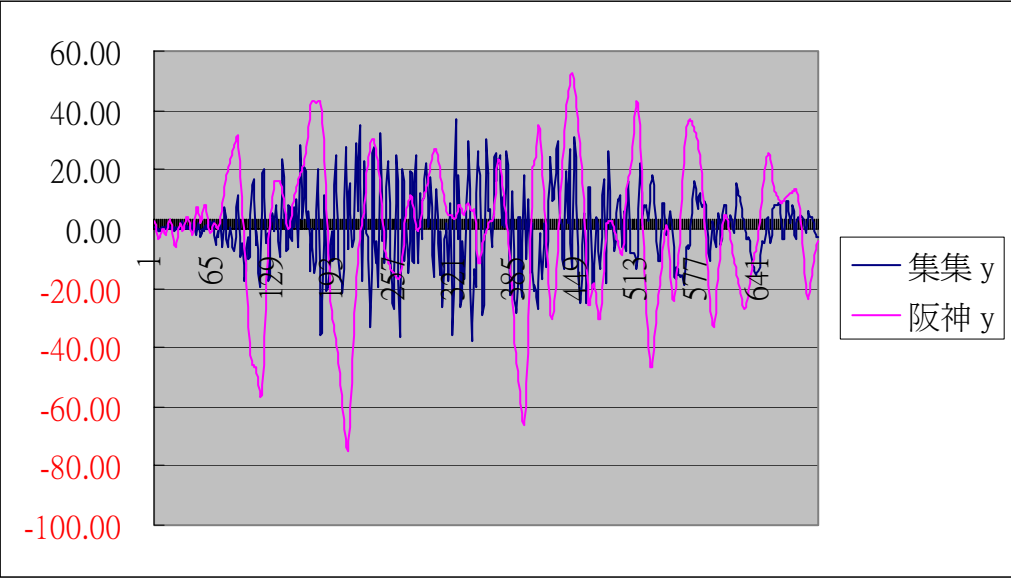
1. 以正方（方型底面建築）爲先導測試（Pilot Test）取得適當之頂端加載重量。以 500 克爲起始負載結果至最大極限振幅時也不倒塌。測試時發現十（十字型底面建築）、H（H 型底面建築）、八角（八角型底面建築）以 500 克負載之集集與阪神地震的極限振幅測試時皆不倒塌，而 L（L 型底面建築）則不毀於阪神地震的極限振幅測試。因此決定在結構上方增加負載重量至 1000 克。
2. 依研究步驟以 1000 克爲負載重量進行實驗。
3. 記錄實驗結果取得分析資料。（並以數位相機及 Mini DV 記錄實驗過程與結果）。
4. 分析實驗結果並歸納推論與結論。

*地震波資料：

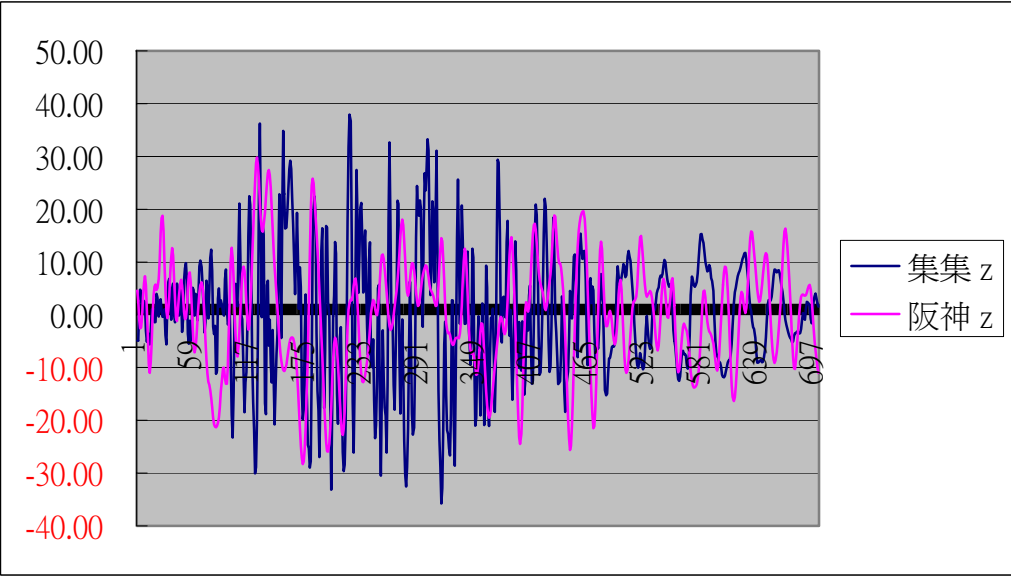
集集地震與阪神地震之 EW（東西）向地震波比較圖如下：



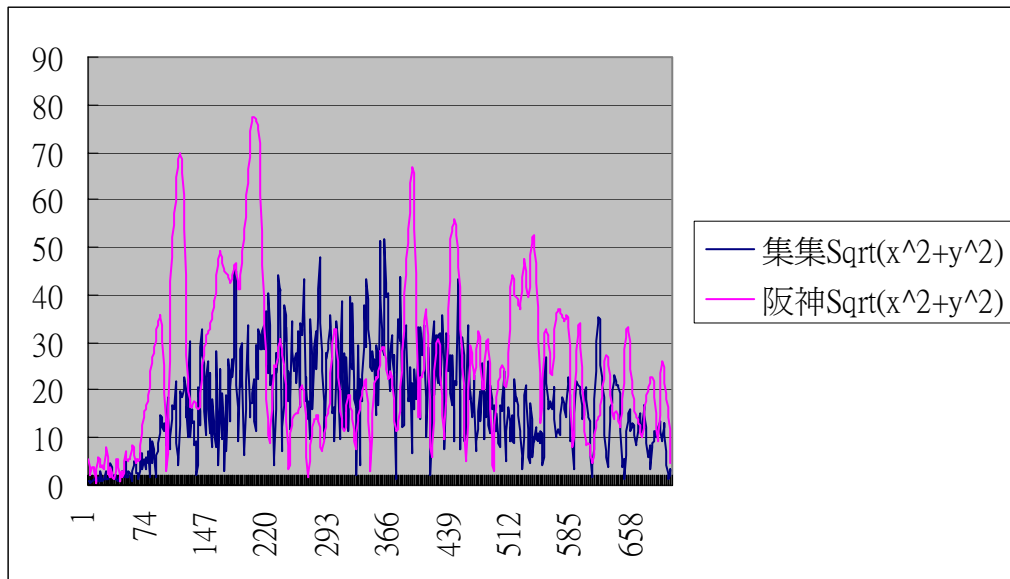
NS（南北）向地震波比較圖如下：



UD（垂直）向地震波比較圖如下：



而水平向之波形則以 EW 與 NS 之幾何平均數（即 $\text{SQRT}(X^2+Y^2)$ ）來作總合比較：



由以上波形比較得知雖然二個地震階為規模 7，但集集地震波變化較快（頻率較高）而阪神地震波擺幅較大（振幅較大）。因此它們對不同建築結構之影響應該不同。

測驗結果

(表一)921 集集地震波

	倒塌時相對振幅	建築狀況	柱子個數
正方形	4.0	500 克	4
三角形	4.0	500 克	3
三角形	5.0	500 克增一柱(a)	4
十字型	4.0	1000 克	8
L 字型	7.0	500 克	6
H 字型	6.0	1000 克	12
H 字型	5.0	1000 克減四柱(b)	8
凹字型	7.0	500 克	8
八角形	10 ↑ (c)	1000 克	8

(表二)阪神地震波

	倒塌時相對振幅	建築狀況	柱子個數
正方形	4.0	500 克	4
三角形	1.0	500 克	3
三角形	2.0	500 克增一柱(a)	4
十字型	7.0	1000 克	8
L 字型	4.0	1000 克	6
H 字型	x(b)	1000 克	12
H 字型	3.0	1000 克減四柱(b)	8
凹字型	10.0	1000 克	8
八角形	10 ↑ (c)	1000 克	8

- (a) 三角形為直角三角形，負載 500 公克在阪神地震中，平台一啟動立即倒塌，不易觀察，故在結構斜邊上再加一支垂直柱補強再測試。
- (b) 阪神地震中，H 字結構負載 1000 公克直到平台相對振幅最高(10)亦未倒塌，在不改變底面幾何形狀之下將中間四肢柱子移除再測試。
- (c) 八角形結構，加重 1000 克在兩種地震波振幅均至 10 都沒有倒塌(但集集地震中底層有一柱脫落)，判定八角形結構耐震再振幅 10 以上。

(表三)集集地震 V.S.阪神地震比較

	集集地震		地震破壞力	阪神地震	
倒塌時的	相對振幅	結構等級	大小比較	相對振幅	結構等級
正方形	4.0	2	=	4.0	2
三角形	4.0	2	<	1.0	2
三角形+1	5.0	2	<	2.0	2
十字型	4.0	4	>	7.0	4
L 字型	7.0	2	>	4.0	3
H 字型	6.0	3	>	10.0 ↑	3
H 字型-4	5.0	4	<	3.0	4
凹字型	7.0	2	>	10.0	3

* 建築結構等級劃分

1. 負載量 0 克，不減柱。
2. 負載量 500 克，不減柱。
3. 負載量 1000 克，不減柱。
4. 負載量 1000 克，減柱。

* 比較順序方法：

依據實驗的步驟，故先比較結構等級，等級小者，則破壞力強；若結構等級相等，則比較相對振幅，振幅較小則破壞力大。

相同柱子個數(表四)

4 支柱子(表四-1)

	集集地震		阪神地震	
倒塌時的	相對振幅	負載重量	相對振幅	負載重量
正方形	4.0	500g	4.0	500g
三角形	5.0	500g	2.0	500g

8 支柱子(表四-2)

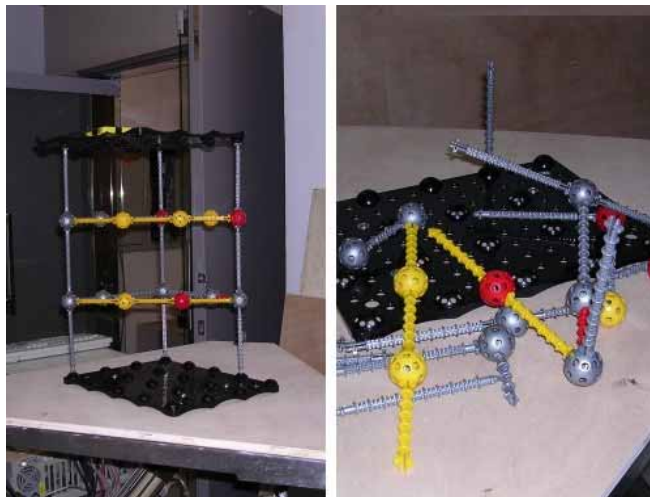
	集集地震		阪神地震	
倒塌時的	相對振幅	負載重量	相對振幅	負載重量
十字形	4.0	1000g	7.0	1000g
H 字型	5.0	1000g	3.0	1000g
凹字型	7.0	500g	10.0	500g
八角形	10.0 ↑	1000g	10.0 ↑	1000g

12 支柱子(表四-3)

	集集地震		阪神地震	
倒塌時的	相對振幅	負載重量	相對振幅	負載重量
十字型	10.0 ↑	1000g	10.0 ↑	1000g
H 字型	6.0	1000g	10.0 ↑	1000g

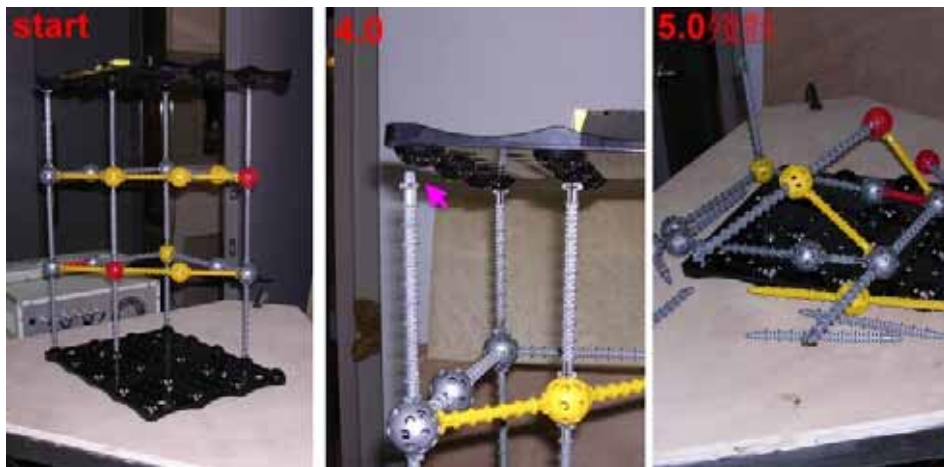
集集地震

圖(一)



三角形(3 支柱)：負載 500 克集集地震 4.0 倒塌

圖(二)

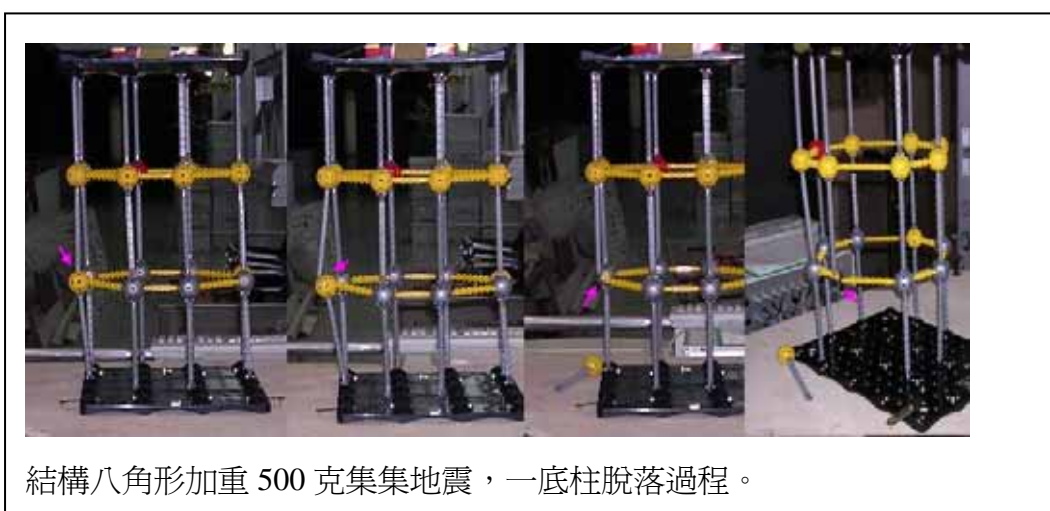


三角形(4 支柱)：負載 500 克集集地震 6.0 倒塌

圖(三)

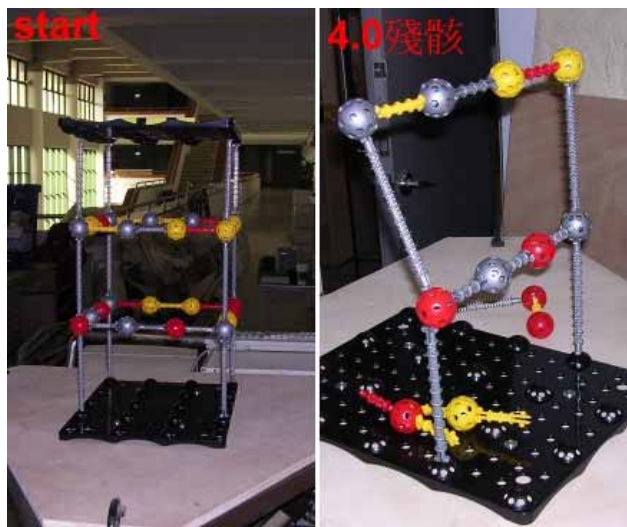


圖(四)



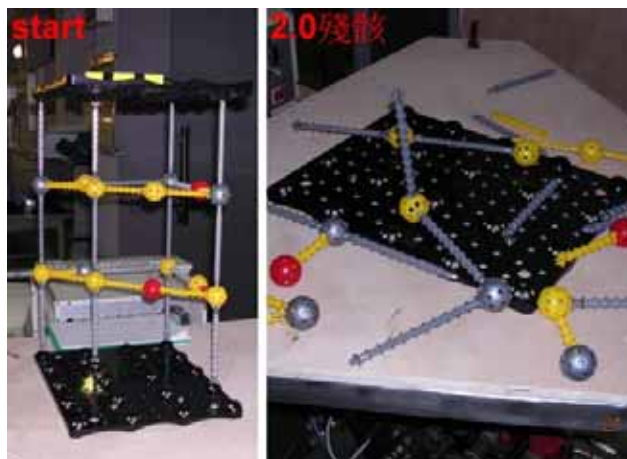
阪神地震

圖(五)



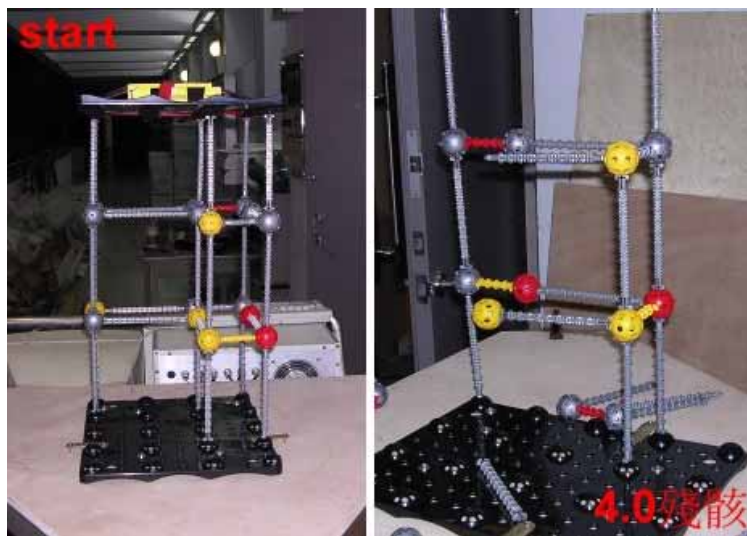
正方形：負載 500 克阪神地震 4.0 倒塌

圖(六)



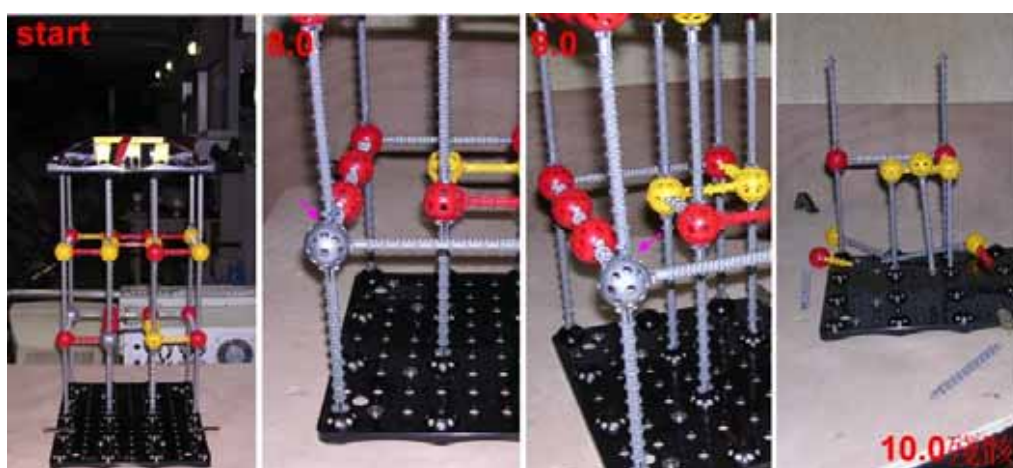
三角形(4 支柱)：負載 500 克阪神地震 2.0 倒塌

圖(七)



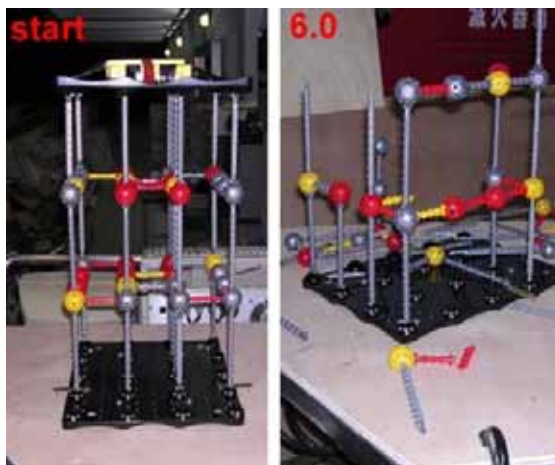
L 字型：負載 1000 克阪神地震 4.0 倒塌

圖(八)



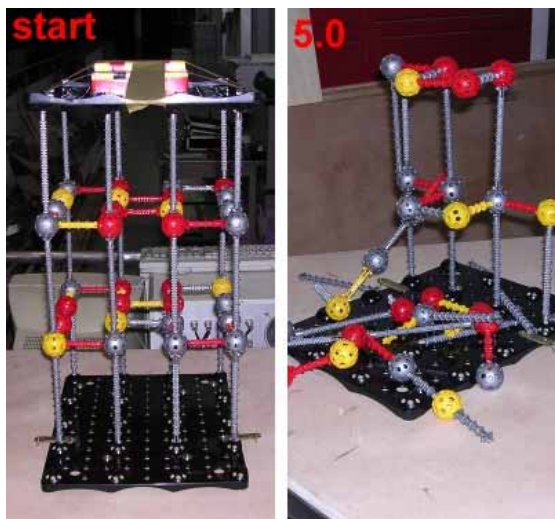
凹字型：負載 1000 克阪神地震 10.0 倒塌

圖(九)



H 字型(12 柱)：負載 1000 克阪神地震 6.0 倒塌

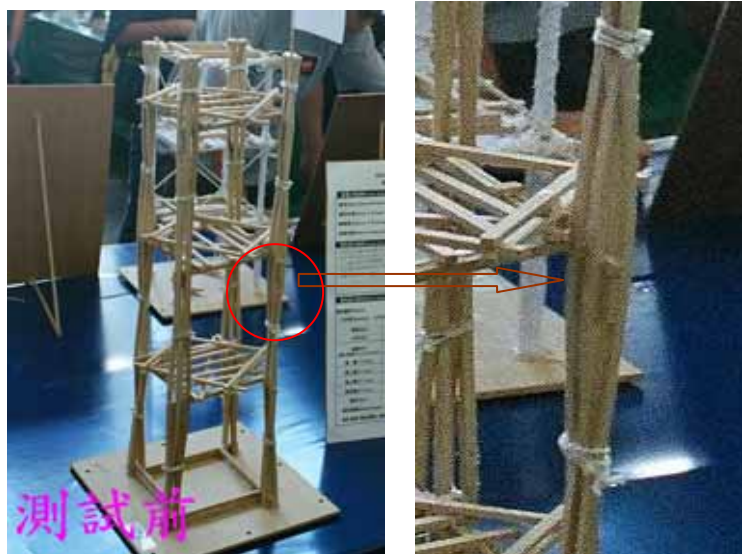
圖(十)



H 字型(8 柱)：負載 1000 克阪神地震 5.0 倒塌

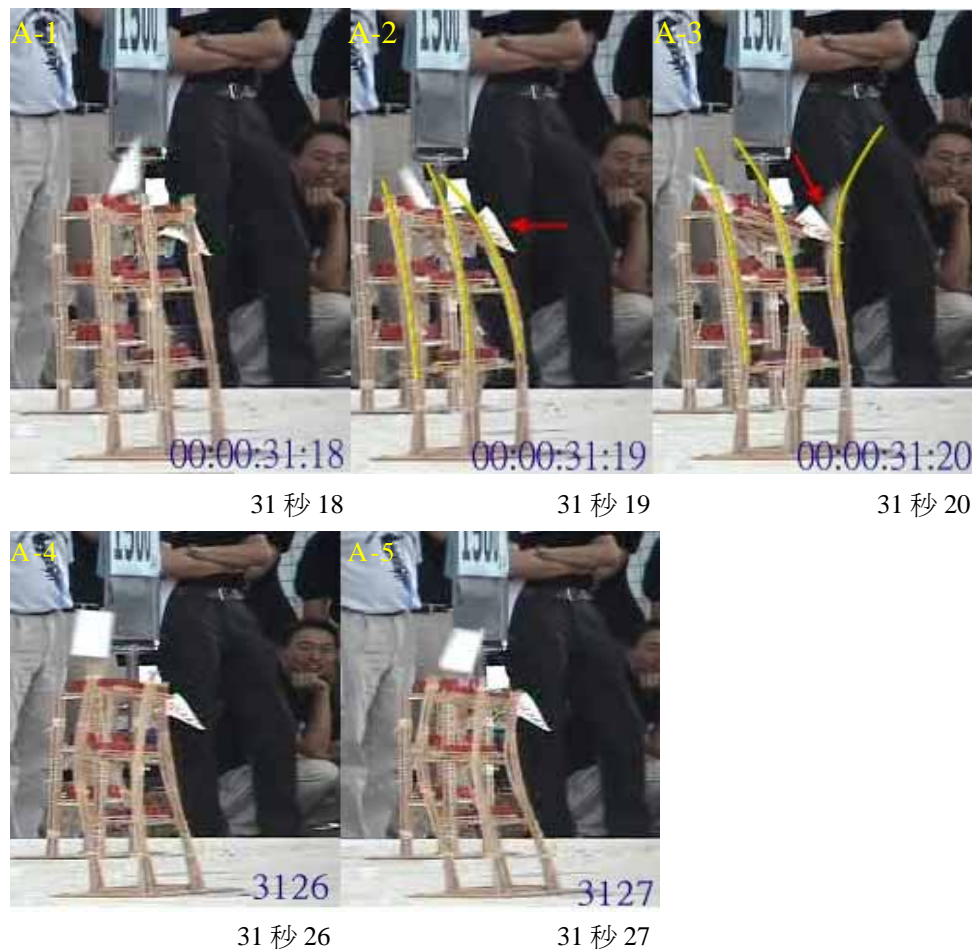
(三)、2004 抗震盃之研究討論：以 DV 拍下測驗過程，利用影片編輯軟體(繪聲繪影)將瞬間照片(1/30 秒)一一取出研究。

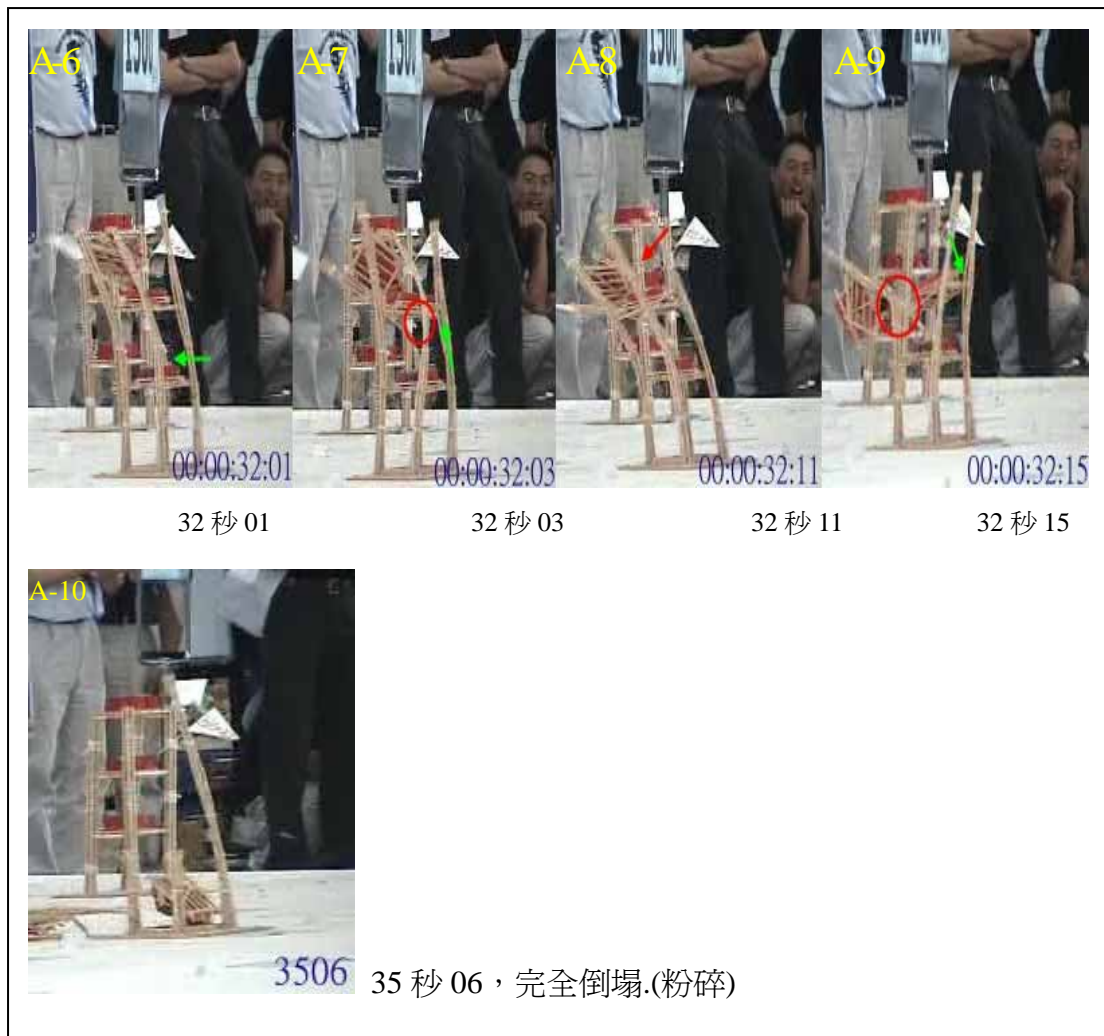
1. 高雄鳳山高中代表隊(2004 抗震盃第三名)，耐震度 1500gal。



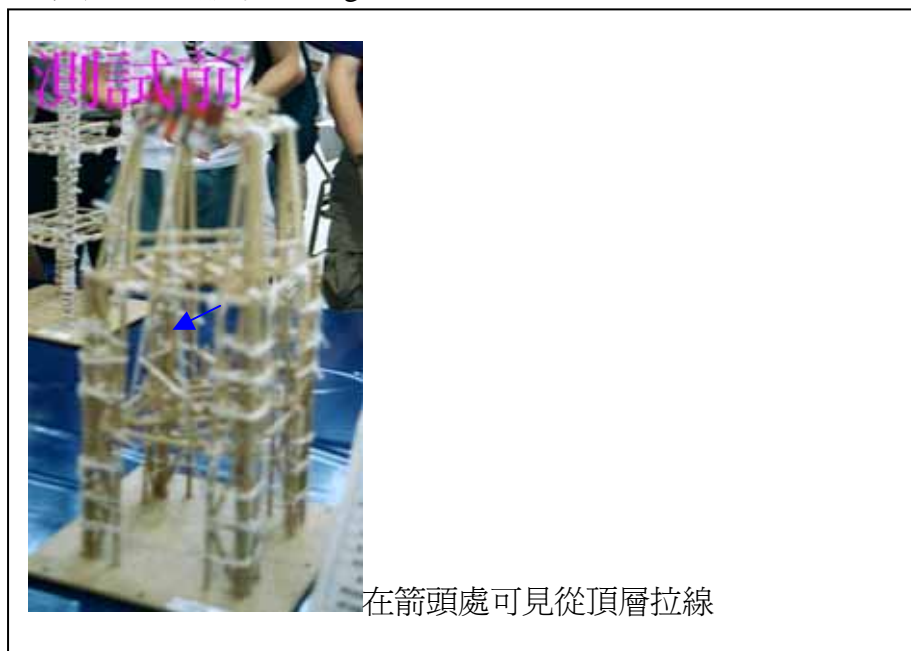
※此隊使用卡鎖式的柱子，且用柱子把梁卡住並用棉線固定

1500gal 始被破壞

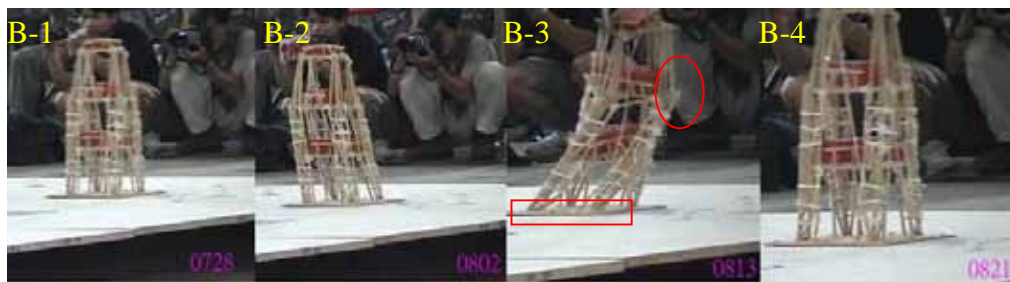




2.英國代表隊，耐震度 1300gal



14/30 秒



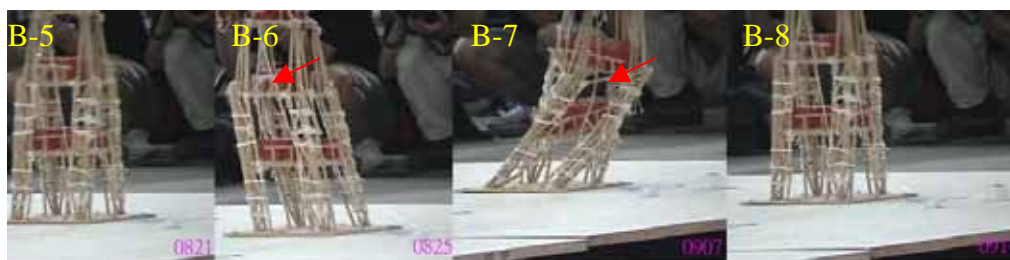
7 秒 28

8 秒 02

8 秒 13

8 秒 12

23/30 秒



8 秒 21

8 秒 25

9 秒 07

9 秒 14



樓層不穩，遭淘汰

陸、研究結果與討論

一、建築結構拓樸之耐震研究

	柱子個數	集集地震	阪神地震
正方形	4	加重 500 克後，系數 3.0 搖搖欲墜，4.0 時因前後擺動導致柱子從底層連接處斷裂。	加重 500 克後，系數 4.0 時亦是由柱子與底板連接處開始被破壞，但破壞原因是因旋轉的扭力，與集集地震有所不同
三角形	3	加重 500 克後，4.0 倒塌，從底層一柱子開始破壞，但是最後底層另外兩個柱子沒有脫離底板。	加重 500 克後，1.0 即倒，但在梁結構之角落處結構並未分離。
三角形 (加一柱)	4	加重 500 克後 2.0 有啪聲 3.0 連續啪聲，但無見結構分開 4.0 中間層有一結構接合點脫離。 5.0 由底部倒塌。	加重 500 克後，2.0 經連續幾聲啪啪聲，後倒塌，在梁結構之角落處結構並未分離
十字型	8	(1) 加重 1000 克，7.0-10.0 無破壞，但結構發生啪聲。 (2) 將中間四支柱子移除後，4.0 底層開始脫落，而頂層和結構分開，倒塌。其中直角梁(有接柱)部分結構未脫離。	(1) 加重 1000 克，1.0-10.0 無破壞。 (2) 將中間四支柱子移除後，在 7.0 時倒塌
L 字型	6	加重 500 克 5.0 始聽到啪聲； 6.0 則是連續啪聲未見破壞； 7.0 有一柱結構接點分開，後即倒塌。	(1) 加重 500 克，1.0-10.0 毫髮無傷。 (2) 加重 1000 克，則在 4.0 倒塌。
H 字型	12	(1) 加重 500 克無法倒塌。 (2) 加重 1000 克，4.0 始有啪聲；6.0 先後在兩角落結構接合處脫離，接這側邊中間層梁結構和柱分離，隨後倒塌。	加重 1000 克均不倒 >>>減柱，見下欄
H 字型 (減柱)	8	加重 1000 克，3.0 倒塌	加重 1000 克，5.0 才倒塌

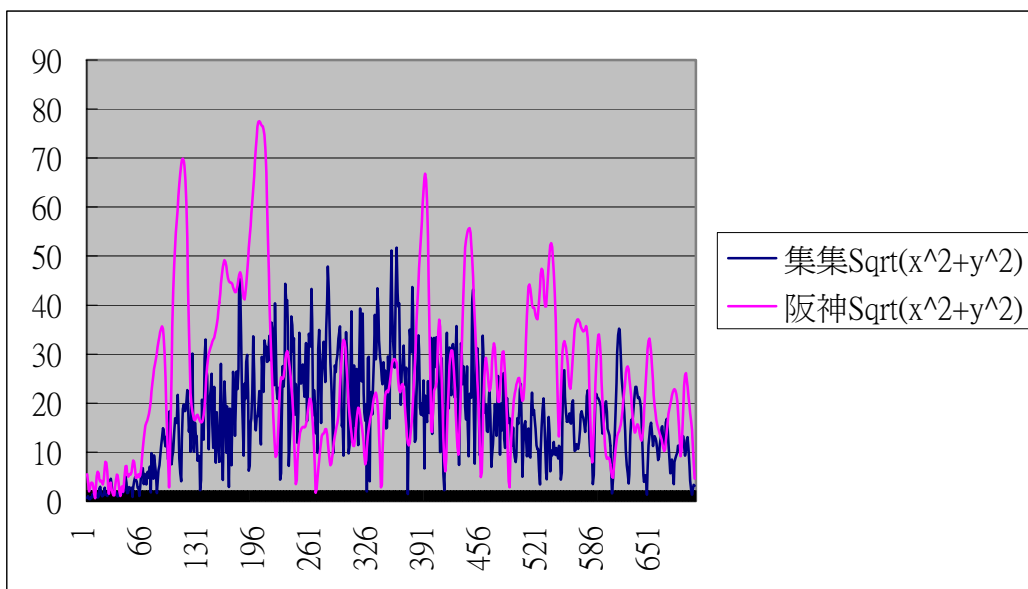
凹字型	8	加重 500 克， 3.0 一個結構接點脫離； 4.0 二個結構接點脫離； 5.0 和 6.0 均是四個結構接點脫離，7.0 由底部倒塌。	(1)加重 500 克毫髮無傷。 (2)加重 1000 克，8.0-9.0 均是一個連結點發生脫落。 10.0 才倒塌。
八角形	8	(1)加重 500 克， 9.0 時連結點一處分開 10.0 一底柱飛出，但其他部分未見破壞 (2)加重 1000 克，只見 6.0-10.0 有聽到啪聲，但沒有破壞。	加重 500 克，未見破壞 加重 1000 克，8.0-10.0 可聽到啪聲，但均無破壞。

正常情況下，啪聲是在結構條脫離結構柱時才會有的聲音，但在實驗中常常聞聲不見影。聽到”啪啪”聲都是在到達倒塌相對振幅前的測驗可見到此現象。

二、集集地震與阪神地震

- 1.集集地震波中，多數建築結構因為單方向(水平)的加速度施力而倒塌；而在阪神地震中，多數建築結構是因為雙向的水平加速度所造成的扭力行程破壞。
- 2.在實驗中發現，集集地震的來回震動頻率較阪神大，但單就單位時間位移來說，阪神的動作較大。

EW 與 NS 之幾何平均數（即 $\text{SQRT}(X^2+Y^2)$ ）來作總合比較：



三、抗震盔

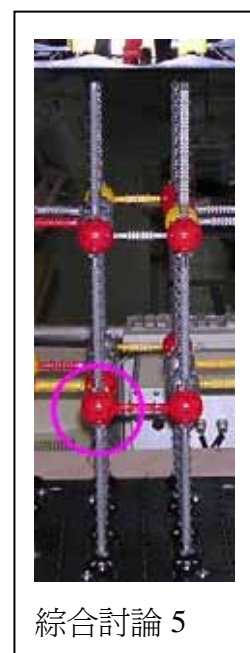
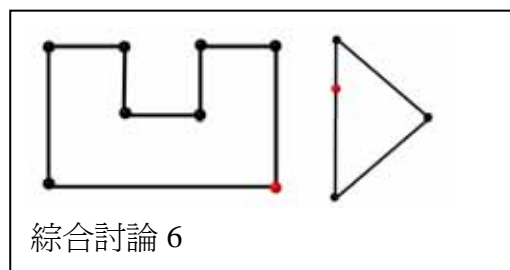
1. 高雄鳳山高中的結構柱子是將三個木條像編麻花般纏繞起來且把結構樑夾在三個木條中。在沒有施加外力之前，這些柱子因為纏繞產生了相當的張力。因為自己本身就已經有了力量，所以在震動時，就會去和地震波的能量作抵消已達到防震的功能。也因為這些力量使得結構本身有很高的彈性，(加速度 1500g)在圖 A-3 時雖然頂層部份已遭受破壞。但

到了圖 A-4、5 時候自動合回去就像是沒有被破壞一樣。到了圖 A-6 時，柱子結構已開始斷裂(綠色箭頭)；在圖 A-7，第二層樓板脫離柱子(紅圈處和綠色箭頭)；圖 A-8 頂層整個脫落，壓到第二層樓板(A-9 紅圈處)使得第二層也跟著掉落。最後整體結構瓦解。

2. 雖然上述結構有相當的彈性以維持結構的原狀(慣性)，但此結構個節點本身的張力並不均勻，導致結構出現某能量集中處，所以產生相當力量時，結構會由能量集中點散開，圖 A-2~A-3 中箭頭所指處即是能量集中點，易可以說是結構的脆弱點。
3. 英國代表隊的建築結構的每一個柱子都是四個木條組成梯子的形狀，在頂層面積縮小，頂層到第二層的柱子則是錐形。在每一面的立面結構中，各拉了一條由頂層至第四層柱子的線。當水平加速度產生時，棉線被拉緊產生張力(B-2,B-6)，但當反向的水平加速度產生時則放鬆了棉線，此時則失去了作用力而整個結構鬆散變形(B-3,B-7)。

四、綜合討論

1. 由正方形結構的破壞，阪神地震與集集地震在相同的相對振幅之下可以看出集集地震和阪神地震造成結構破壞的不同是在於：集集為單方向的水平加速度，而阪神地震是扭力所造成破壞。
2. 組合式建築結構在遭受地震破壞之前，所聽到的『啪啪』聲，是因建築結構已經超出它所能負荷的外力，但都不見到破壞或是連結點互相脫離且都不至於結構倒塌。此現象與上述討論(三)-1 中的建築結構有異曲同工之妙。均是靠著結構本身原有的彈力來維持原狀。
3. 由表(二)可歸納出，兩次地震所針對被破壞建築結構有所差異。集集地震波較易破壞十字型(8 支柱)、L 字型(6 支柱)、H 字型(12 支柱)、凹字型(8 支柱)；而阪神地震波易破壞三角形(3 支柱、4 支柱均有)、以及減柱的 H 字型(8 支柱)。
4. 形狀相同的 H 字型結構體，在減柱前後易受到破壞的地震形式分別是集集和阪神兩個不同的地震，且在集集未減柱的測驗中，出現了其他實驗中均未見的梁脫落，不過在 H 字型結構其他測驗倒塌主因均是因為結構柱脫落而引發一連串的破壞。
5. 地震造成結構脫落、分開但並未引起倒塌，脫落處多為底層和中間層柱子連接處上下(如圖紅圈處)，也有發生在等層柱子(如圖二)。
6. 下圖中實心點為結構柱子所在，而紅色則代表結構受地震作用時最常脫落處。發現紅色點均是柱子合力相對較小的地方。



柒、結論與應用

1. 阪神地震破壞加速度多為扭力，而集集地震的破壞加速度多是水平加速度。
2. 三角形的建築結構中，由破壞相對振幅可以看出阪神地震對於三角形結構的破壞力大於集集地震。
3. 建築結構的彈性程度影響結構的耐震能力，彈性越好則耐震能力越強。（但彈性好則擺幅大，人處在其內的感受須研究）
4. 建築彈性因產生和地震加速度相左的力道而達到抗震的效果，台北 101 大樓的避震球亦是利用相同的效果抗震。
5. 使用各連結力道強度相等的結構時，柱子個數越多(在相同的結構等級下)，而建築結構的抗震能力越強。
6. 就同一座建築結構而言，柱子排列的越緊密處越不易受到地震破壞，但在排列較疏鬆點卻重易形成結構的脆弱點，地震施予的能量變紛紛往脆弱點上集中，就很容易脫落。
7. 綜合以上兩點結論，一個好的耐震結構不單只是需要足夠的柱子來承受作用力，且結構柱要在整體結構中均勻分布。（八角形結構即是）
8. 承 6. 柱子與結構球脫落，或是整支柱子掉落時，建築結構較不會有連續性的整體倒塌。結構受力作用時，將小部份結構卸掉可以將能量解除釋放不至造成太大的損失。

捌、未來展望

藉著輸入地震波相對加速度用三軸向六自由度動感平台實現的地震波可以係繼續延伸許多地震研究和問題探討

1. 不同地震頻率對於建築結構的影響
2. 利用彈簧秤來測量各種建築結構連接方式用力大小與地震的影響
3. 測試各種不同的橋樑之耐震成度
4. 模擬地質，地震在不同德土壤溼度、生物、土質、人爲開發等變因對土壤液化的影響
5. 實現過去造成重大震災之地震，以及遭受到嚴重破壞之建築物，找出受破壞原因，以及如何補強之建築結構的方法

玖、參考文獻

1. 火山的故事大地怒吼 皇冠出版
2. 計算機概論 陳育毅、黃德成邊著
3. 地震大解剖 牛頓出版
4. 火山和地震 圖文出版社
5. 集集大震結構物播壞模式研討會
6. 牛頓科學雜誌 299 期
7. 牛頓科學雜誌 242 期

- 8.地震大怪獸(牛頓)
- 9.地震大解剖(牛頓)
- 10.結構學
- 11.高層建築抗震設計
- 12.瑞里地震建築災害調查研究分析<http://abri.gov.tw/News/news870728.htm>
- 13.工程資訊<http://www.twce.org.tw/info/技師報/203-3-1.htm>
- 14.九二一集集大地震建築物含軟弱第一層震害問題探討
<http://coe.cycu.edu.tw/%B9%EA%A7@%AC%E3%A8s%B1M%AE%D7%B3%F8%A7i%BDd%A8%D2.doc>
- 15.國家地震研究中心簡訊<http://www.ncree.gov.tw/ASP/Publish/NewsLatter.asp?page=1>
- 16.從九二一大地震談圖書館之建築與管理<http://publicl.ptl.edu.tw/publish/suyan/46/5.htm>
- 17.神戶地震<http://gis.geo.ncu.edu.tw/earth/school/ILO.HTM>
<http://www.nsc.gov.tw/pub/yearbook/yearbook89/down/3/4/5.htm>
- 18.台灣十大災害地震和地震系列震源參數一覽表
http://www.earth.sinica.edu.tw/921/921chichi_10big.htm

感謝

國立交通大學電機與資訊學院提供動感平台以供實驗。