中華民國第54屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組　生活與應用科學科

030806

過來『橋』一下～利用市售義大利麵來探討桁架橋樑結構對其負重情形之影響

學校名稱：彰化縣立陽明國民中學

作者：	指導老師：
國二 黃寶慧 國二 許珈蓁 國二 黃美綺	韓顏吉 謝長志

關鍵詞：義大利麵橋、桁架橋、

West point bridge design

利用市售義大利麵來探討桁架橋樑結構對其負重情形之影響

摘要

本研究利用電腦程式 West point bridge design 模擬橋樑結構的穩定性，並使用義大利麵充當桁架實際來搭橋，藉此了解結構對橋樑負重的重要性。研究中發現：

1、Warren 的結構最經濟實惠，Pratt 結構次之，Howe 結構負重效率最差。

2、橋樑結構中的每個桿件受力情形不同，因此**根據受力情形來加以設計橋樑結構能提高經濟效益**，例如：Pratt 結構與 Howe 結構雷同，但是 Pratt 結構所承受的壓力是落在較短的垂直桿件，因而提高了 Pratt 結構的負重性能。

3、藉由結構的設計，使得原本負重效率約為 65(gw/根)的義大利麵條，提高到 99(gw/根)，約增加了 1.5 倍。

此外，藉由 West point bridge design 軟體設計橋樑結構，並以義大利麵實際搭建橋樑，且測試其負重能力，可發展成完整的教學流程，**極適合國中學生學習建築結構等相關課程**。

壹、研究動機

本組在書上看到國立自然科學博物館 921 地震教育園區曾經舉辦「**決戰天崩地裂～義大利麵造屋競賽**」，此活動是由英國 Bristol 大學的地震工程學研究中心(EERC)發起的教育活動，是利用義大利麵、綿繩和紙板來製作房屋模型，讓參加者瞭解房屋防震結構和材料的運用，了解結構抗震的觀念，寓教於樂。

圖 1 義大利麵造屋競賽

後來，在網路上看到一篇關於義大利麵橋世界錦標賽的報導，採用義大利麵來搭建橋樑，更驚人的是如此脆弱的義大利麵橋樑竟然可以支撐 570kg 的重量，這實在是太神奇了。到底是何原因使得義大利麵所搭成的橋樑能夠支撐如此巨大的重量，因此本組便想利用此次的科展機會實際搭建義大利麵橋。

圖 2 義大利麵橋世界錦標賽

接著，在查找相關的研究發現，大部分關於橋樑的研究都著重在橋墩受到河流沖刷的情形，只有少部分在探討橋樑的負重情形，其主要原因是無法找到合適的搭橋方法，來模擬橋樑真實負重情形，且在全國科展的研究報告中，只看到利用黏土、保麗龍……等材料來搭橋，且研究偏向預力混泥土橋樑，而本組認爲**利用義大利麵(Spaghetti)及利用 West point bridge design 軟體來設計且搭建桁架橋是非常適合來探討其結構對負重情形的影響，並了解如何有效的增減材料來增加橋樑的負重效率。**

貳、研究目的

一、利用電腦程式模擬桁架橋的搭建情形。

二、研究義大利麵材料的強度。

三、研究各種桁架結構義大利麵橋負重情形。

參、研究設備與材料

實驗材料：

【正逢】義大利麵-直麵 (A 廠牌)	【Arbella】義大利麵-直麵 (B 廠牌)	【San Remo】義大利麵-直麵 (C 廠牌)
電子秤	拉力計(20kgw)	熱熔膠槍

游標尺	積木塊	冰棒棍
棉線	紙杯	一元硬幣

肆、研究原理與步驟

一、研究原理

(一) 義大利麵特性

義大利麵統稱 Pasta，原意是經搓揉過的生麵糰，名爲 Pasta Alimentari，最早的義大利麵約成型於西元 13 至 14 世紀』，Pasta 是可以隨著加入的香料以及材料的不同和烹調的方式不同而讓吃起來的感覺也有大大不同的一種麵。 其中廣爲人知的傳統義大利麵條(細長、圓柱狀) **Spaghetti**，必須用品種叫做杜蘭小麥粉加水製成。

義大利麵和我們一般常吃的白麵條都是由麵粉製成，然而製作義大利麵所使用的杜蘭粗粒麵粉（semolina）是研磨自杜蘭小麥（Durum wheat），屬於硬質麥，這種小麥的麥粒結構、成份與一般小麥不同，例如杜蘭粗粒麵粉的蛋白質含量很高，而且其中的小麥穀蛋白（glutenin）以低分子量爲主，不同於一般麵粉是高分子量佔多數，因而**杜蘭小麥麵筋彈性較差，也就是麵塊拉伸或按壓後回復到原來狀態的能力較差。**

圖 3 不同種類義大利麵。

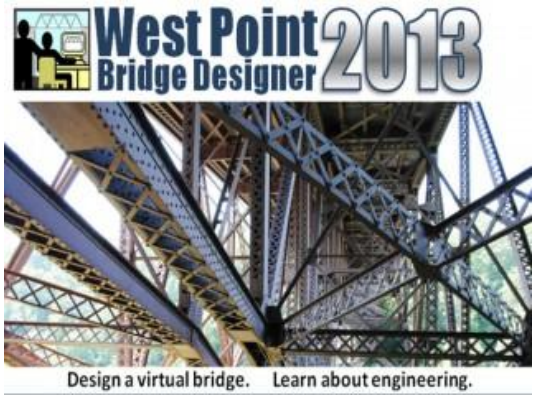
Spaghetti 原料：

杜蘭小麥粉　　水　　義大利麵(spaghetti)

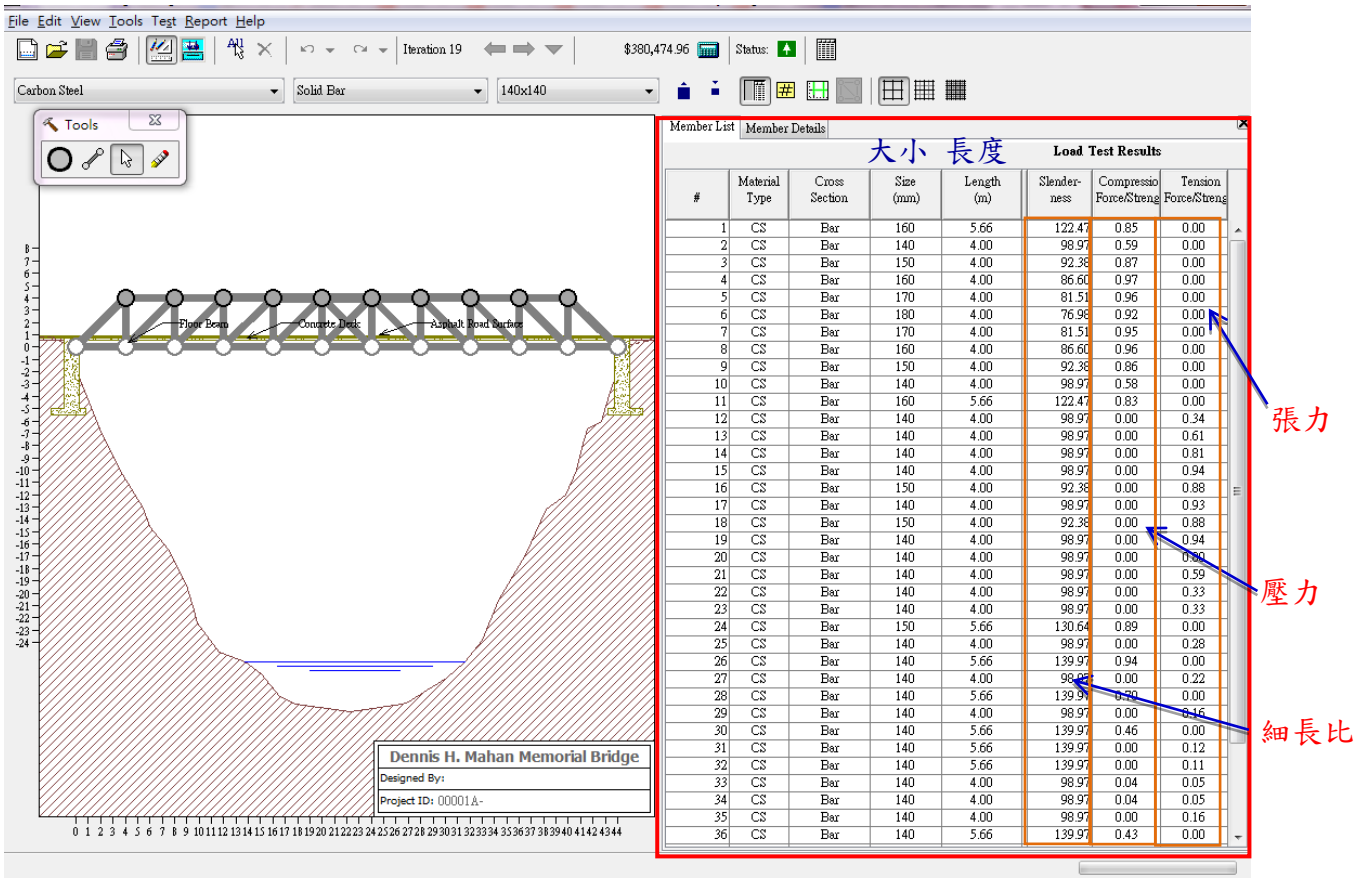
Spaghetti 作法：

揉製麵糰	擠出麵條	乾燥

(二) West point bridge design 2013



<u>West point bridge design</u> 是一款造橋模擬軟體，藉由軟體執行，可實際體驗造橋工程所需考量之資源需求，且透過最佳化的調整與修正，去發掘安全、經濟與優美三者間的矛盾與衝突，進而找到最適合的橋樑形式。*<u>其設計是從桁架(truss)概念爲基礎，以三角形爲結構單元，預設節點受力爲 0，即結構的強度由結構造形本身，桿件與桿件間相互制衡的效果來支撐外力，因此每個節點周圍的桿件的排列組合，應能讓上下合力爲零、左右合力爲零。</u>*爲增加材料的效益，可妥善運用材料測試的屬性表，掌握材料長度、徑度、形式對張力與壓力反應之影響，進而找到最佳材料配置。



#	Material Type	Cross Section	Size (mm)	Length (m)	Slender-ness	Compressio Force/Streng	Tension Force/Streng
1	CS	Bar	160	5.66	122.47	0.85	0.00
2	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.59	0.00
3	CS	Bar	150	4.00	92.38	0.87	0.00
4	CS	Bar	160	4.00	86.60	0.97	0.00
5	CS	Bar	170	4.00	81.51	0.96	0.00
6	CS	Bar	180	4.00	76.98	0.92	0.00
7	CS	Bar	170	4.00	81.51	0.95	0.00
8	CS	Bar	160	4.00	86.60	0.96	0.00
9	CS	Bar	150	4.00	92.38	0.86	0.00
10	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.58	0.00
11	CS	Bar	160	5.66	122.47	0.83	0.00
12	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.34
13	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.61
14	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.81
15	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.94
16	CS	Bar	150	4.00	92.38	0.00	0.88
17	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.93
18	CS	Bar	150	4.00	92.38	0.00	0.88
19	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.94
20	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.90
21	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.59
22	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.33
23	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.33
24	CS	Bar	150	5.66	130.64	0.89	0.00
25	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.28
26	CS	Bar	140	5.66	139.97	0.94	0.00
27	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.22
28	CS	Bar	140	5.66	139.97	0.79	0.00
29	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.16
30	CS	Bar	140	5.66	139.97	0.46	0.00
31	CS	Bar	140	5.66	139.97	0.00	0.12
32	CS	Bar	140	5.66	139.97	0.00	0.11
33	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.04	0.05
34	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.04	0.05
35	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.16
36	CS	Bar	140	5.66	139.97	0.43	0.00

設計時可增減節點及桿件，並調整其位置角度等，且可選擇不同形式之材料。測試後還可以參考報表，以了解各個桿件受力的種類及大小，如壓力或張力，此外還給出細長比(slenderness ratio)，以避免使用太長的桿件而浪費材料。

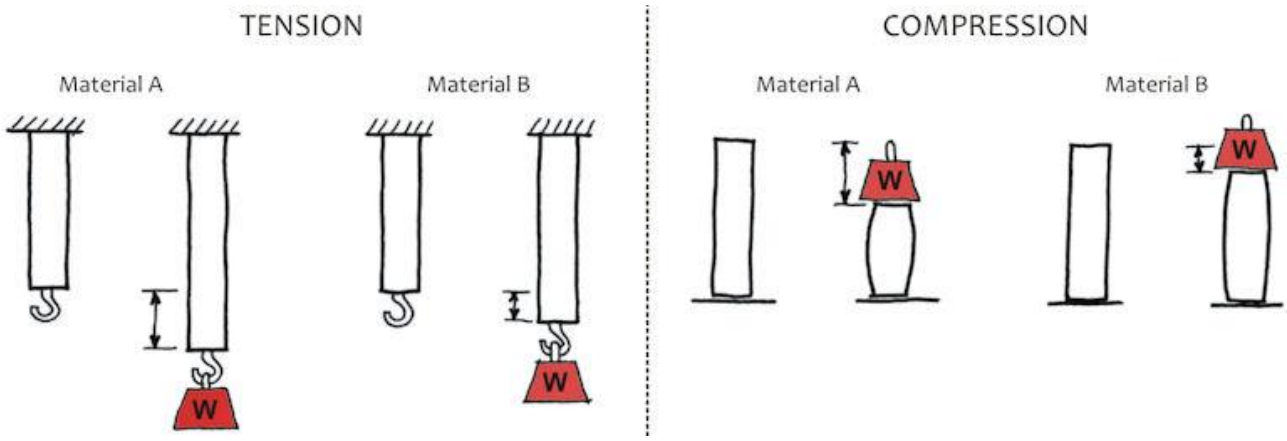
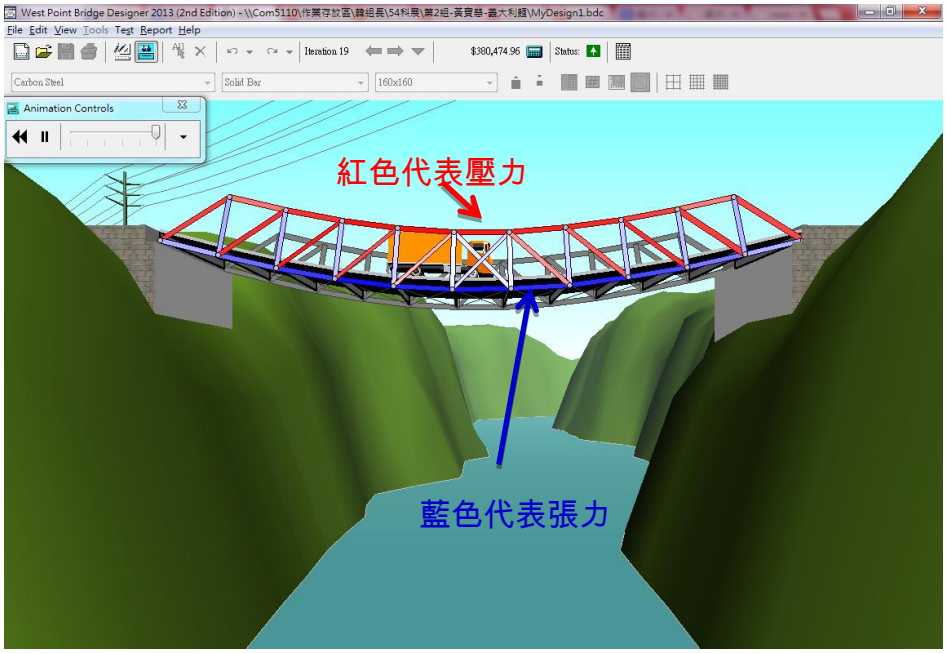


圖 4 材料受張力及壓力影響後變化之示意圖。

模擬測試

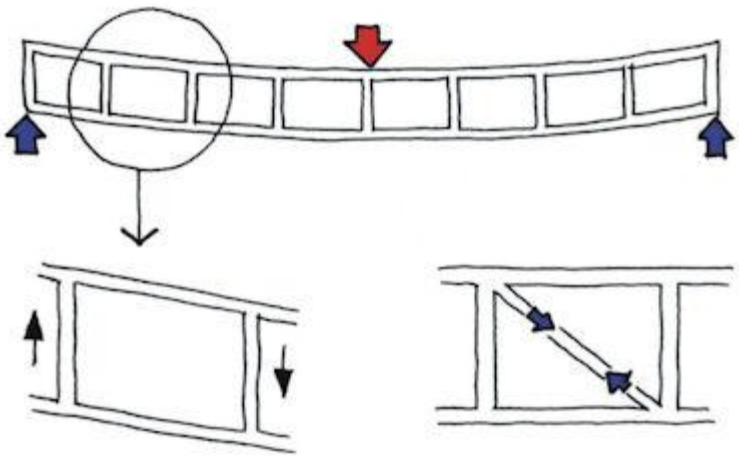


當設計好橋樑後，藉由測試，可以了解橋樑的受力情形，並且知道橋樑需補強之處。

(三) 橋樑結構

金字塔到大教堂，從彈弓到水車都是結構，而結構設計的目標：安全、優美與經濟，因此如何蓋一棟房子不會垮，如何建一座橋而無倒塌之虞，方法就是建造符合其需求的結構物。而在搭建橋梁時，有一種常見的建構法式，稱之爲桁架(truss)，因爲橋樑通常是由公部門發包建造的，所以成本的考量尤其重要，才比較容易標到建案。

桁架(truss)：框架單元爲三角形，再加以串接而成，適用於長跨度結構而空間設計不是很重要的構造，如橋樑、高塔、起重機吊臂等。受力時，基本假設外力作用於節點上，桿件只傳遞拉力和壓力。



框架結構必須形成三角形，結構才不會扭曲變形，此爲設計的重點。

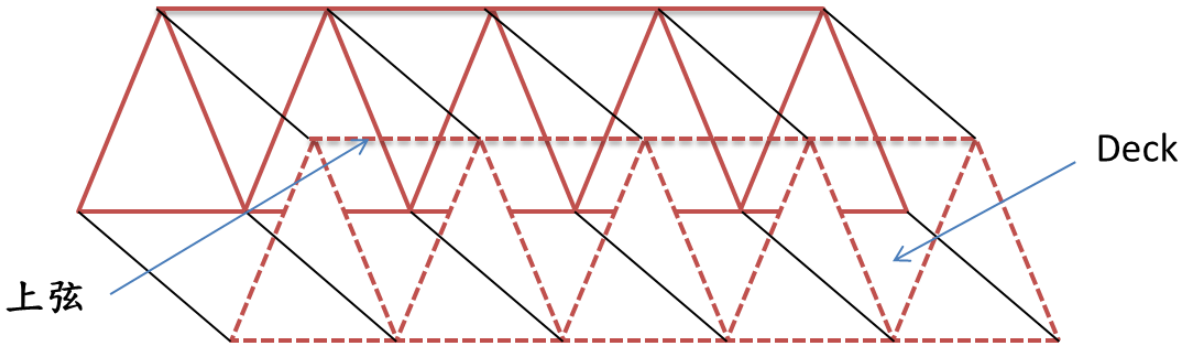
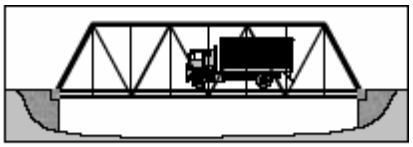
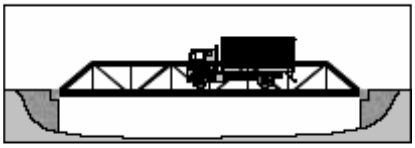
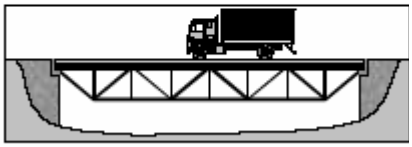
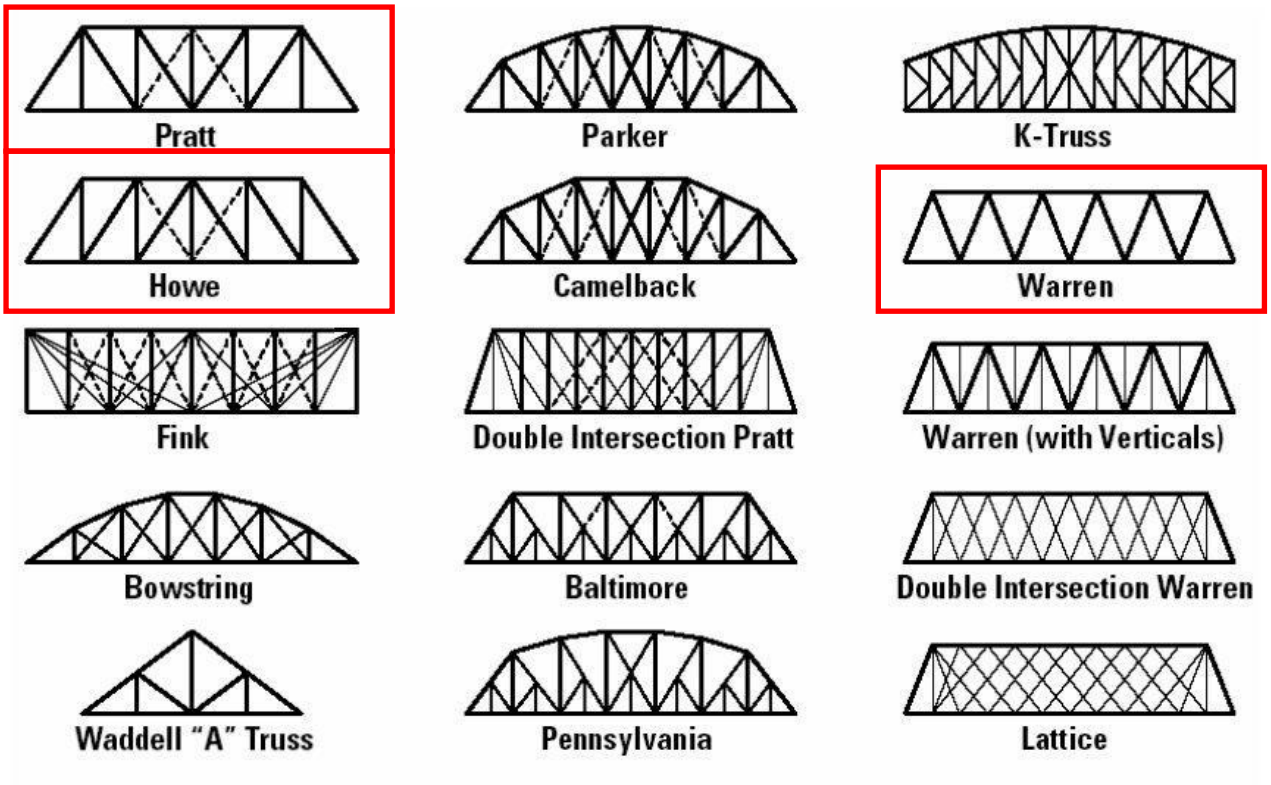


圖 5 橋樑各部位名稱。

各式桁架橋

		
Through truss	Pony truss	Deck truss
橋面在下弦位置	橋面下弦位置，但上弦比車子低。	橋面在上弦位置



紅色標示爲本實驗主要研究之結構，也最簡單且常見。

桁架橋樑工程介紹

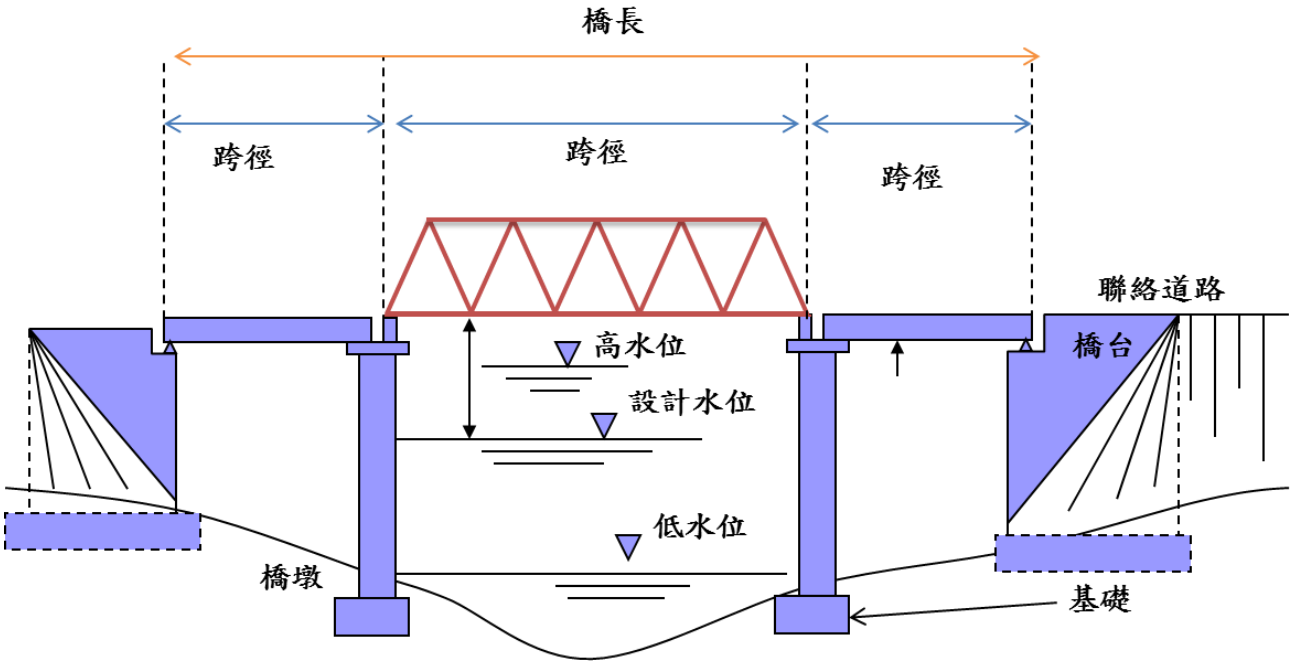


圖 6 簡易橋樑建造示意圖

依據使用材料分類可以分爲預力混泥土橋樑及鋼結構橋樑，在 70 年代之前台灣主要的橋種多爲預力混泥土橋樑，但自從 1977 年產生鋼料後(1971 年 11 月 12 日成立中國鋼鐵公司)，採用鋼結構橋樑案例逐漸增多。

使用鋼結構橋樑的優點如下：

1、克服跨距問題，因此大部分需要較長跨距的橋梁皆以此設計，尤其是跨海大橋。

2、突破樑深限制，可使都市高架化。

3、橋樑靜負載輕量化，因此適用於各種地盤，建造限制條件較低。

4、耐震性高，鋼材具強度足、強度變異小、延性足、韌性佳、耐層狀撕裂性夠、銲接性佳等高性能，對於遭受到力的作用時容易吸收震動的能量。

5、橋形變化多，極具美觀。

6、施工便利，且易擴建，結構各部位連接容易，尤以焊接爲甚。且廢棄後鋼材可回收。

缺點：

1、不耐高溫，鋼結構的表面溫度在 200℃以內時，強度變化仍算是小，但是到 300℃~400℃以後，鋼結構的強度和彈性模數便會明顯下降，到了 600℃時幾乎降至零，因此對於耐

火性的要求較高，更必須格外注意保護之措施。

2、耐蝕性低，鋼材抗腐蝕性的性能比較差，若在沒有侵蝕性介質的環境中，構件經過徹底除鏽並塗上適合的油漆，可以減輕腐蝕的現象。因此鋼結構必須長期的維護，且維護的費用也比鋼筋混凝土結構來的高。

3、容易挫屈，設計時應注意細長比及側向支撐。

4、殘留應力高，在設計或施工時，容易殘留應力，而改變鋼材的力學強度。

5、施工的專業性與精密度較高。

基於上述之考量，在施工前的設計是非常重要的，因此本組認爲先以程式模擬橋樑之架設，再以義大利麵來搭建測試，可以降低設計錯誤的風險。

台灣的桁架橋

西螺大橋

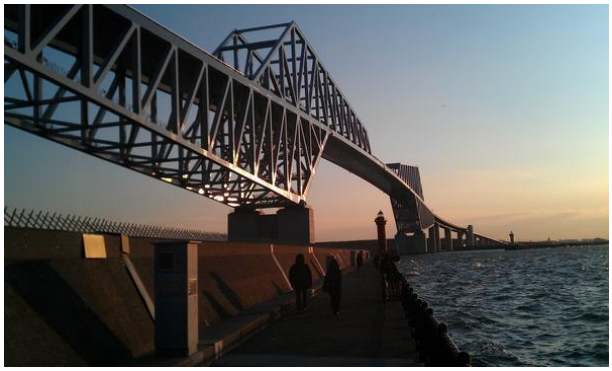
高雄市六龜區新發大橋

下淡水溪鐵橋

長春鐵橋

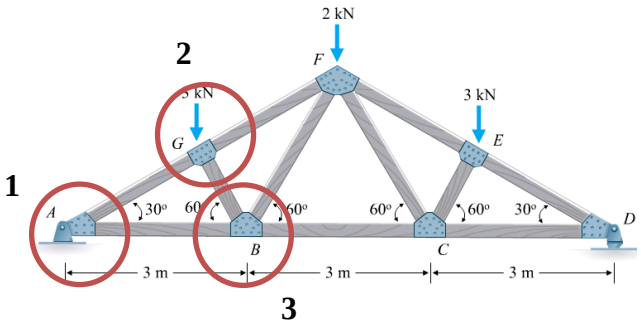
台灣的桁架橋大部分都建於日據時代，最主要是爲了鋪設鐵道而建立，且因建造便利，因此多分佈在山間，以方便火車來載送資源。

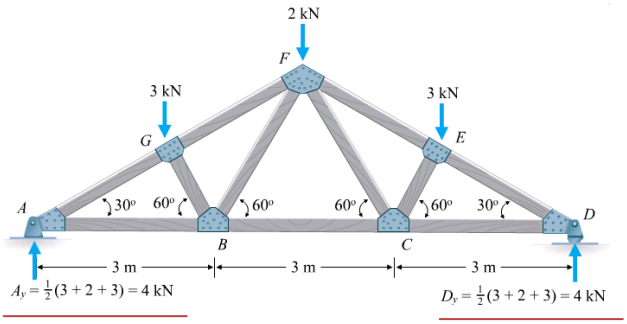
世界著名桁架橋

Quebec Bridg，主跨 549m，加拿大。	Forth Rail Bridge，主跨 512m，英國
Minato Bridge，主跨 510m，日本。	Commodore Barry Bridge，主跨 501m，美國。
Crescent City Connection，主跨 486m，美國。	Howrah Bridge，主跨 457m，印度。
	
Veterans Memorial Bridge，主跨 445m，美國。	Tokyo Gate Bridge，主跨 440m，日本。

(四) 靜力學結構分析

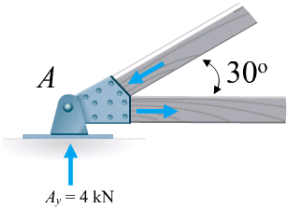
節點法

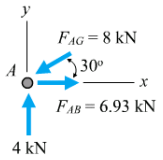




先求反作用力

1



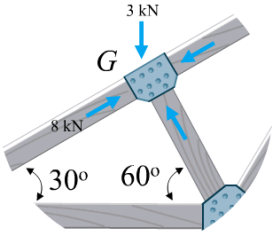


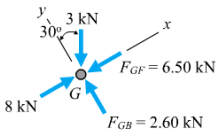
Joint A

$+\uparrow\Sigma F_y = 0;\quad 4 - F_{AG}\sin 30^\circ = 0 \quad F_{AG} = 8$ kN (C)

$\overset{+}{\rightarrow}\Sigma F_x = 0;\quad F_{AB} - 8\cos 30^\circ = 0 \quad F_{AB} = 6.93$ kN (T)

2



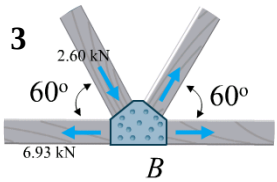


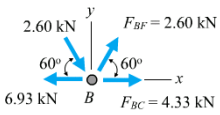
Joint G

$+\nwarrow\Sigma F_y = 0;\quad F_{GB} - 3\cos 30^\circ = 0 \quad F_{GB} = 2.60$ kN (C)

$+\nearrow\Sigma F_x = 0;\quad 8 - 3\sin 30^\circ - F_{GF} = 0 \quad F_{GF} = 6.50$ kN (C)

3





Joint B

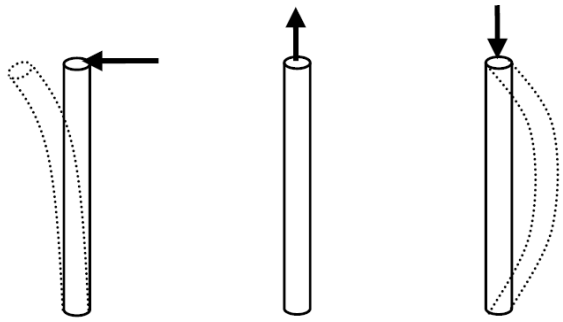
$+\uparrow\Sigma F_y = 0;\quad F_{BF}\sin 60^\circ - 2.60\sin 60^\circ = 0$

$F_{BF} = 2.60$ kN (T)

$\overset{+}{\rightarrow}\Sigma F_x = 0;\quad F_{BC} + 2.60\cos 60^\circ + 2.60\cos 60^\circ - 2.60 = 0$

$F_{BC} = 4.33$ kN (T)

(五) 材料受力影響情形。



彎曲　　張力　　壓力

1、要破壞材料結構，施力方式以張力最難，壓力最簡單。

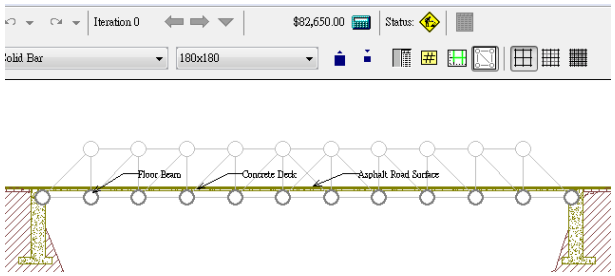
2、但是如果將材料變短，則抗壓強能力會增加，甚至難以破壞，而抗拉強度沒有影響。所以桿件的細長比也必須加以考慮。

二、研究步驟

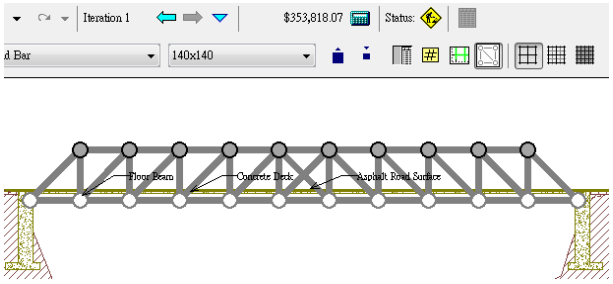
(一) 利用電腦程式模擬桁架橋的搭建情形。

1、一共模擬三種結構(Howe、Pratt、Warren)及兩種不同形式的橋樑結構(Through、Deck)。

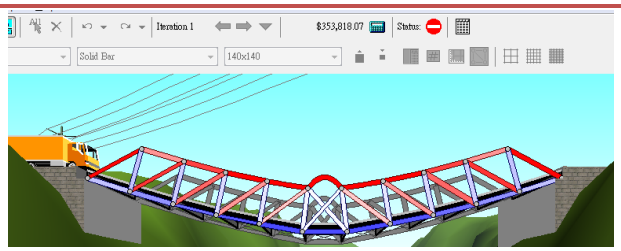
2、 研究步驟如下表所列：



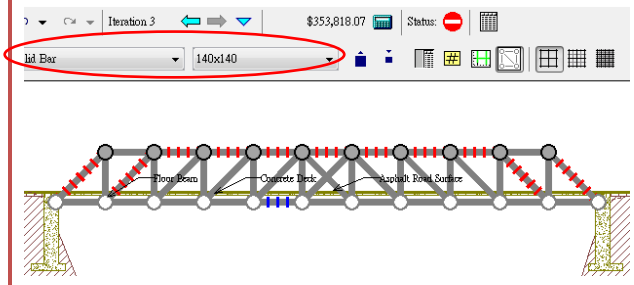
內建基本初始架構



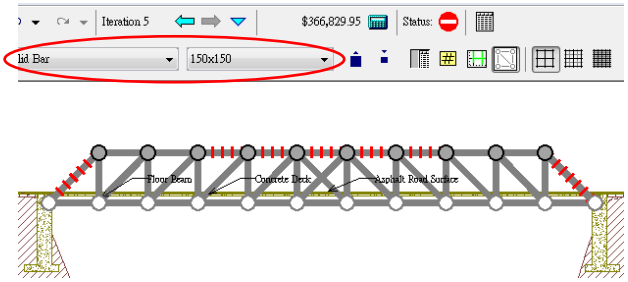
先以最細的材料來搭橋

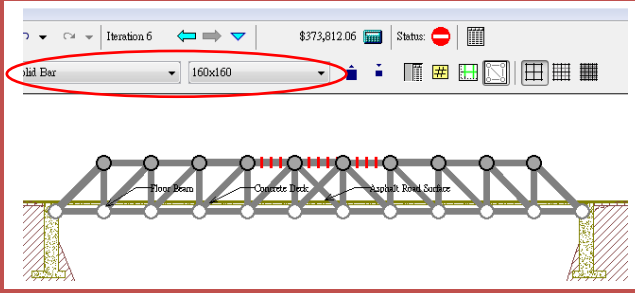


模擬測試，結果橋垮了

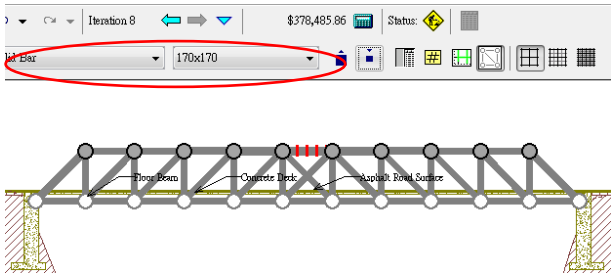


顯示不足之處，紅色代表壓力太大，藍色代表拉力太大，桿件無法支撐。

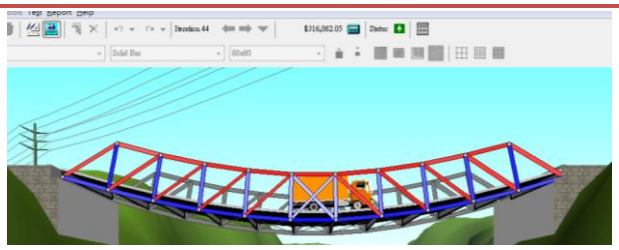




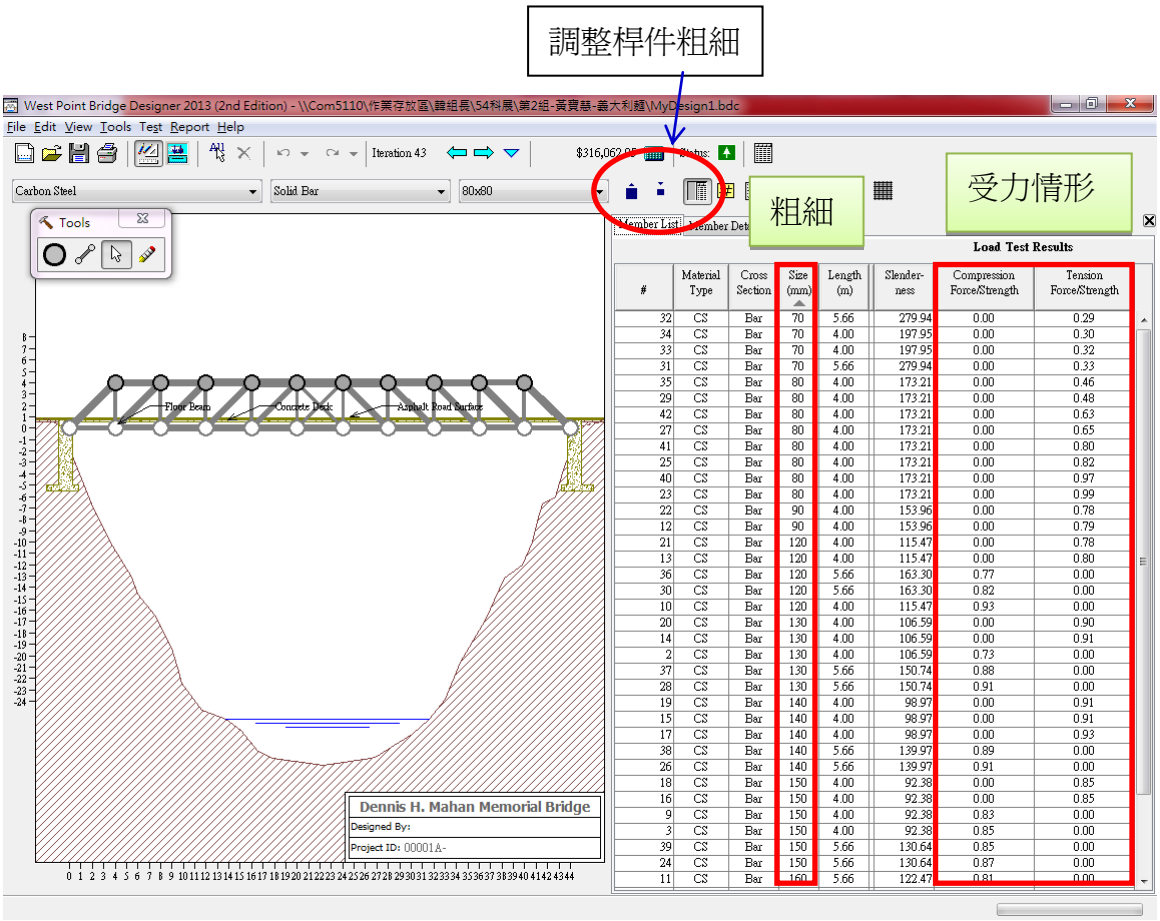
將標示處的桿件持續慢慢加粗



最後加粗到 170，就只剩中央紅色標示處不足



完成模擬示意圖



#	Material Type	Cross Section	Size (mm)	Length (m)	Slender-ness	Compression Force/Strength	Tension Force/Strength
32	CS	Bar	70	5.66	279.94	0.00	0.29
34	CS	Bar	70	4.00	197.95	0.00	0.30
33	CS	Bar	70	4.00	197.95	0.00	0.32
31	CS	Bar	70	5.66	279.94	0.00	0.33
35	CS	Bar	80	4.00	173.21	0.00	0.46
29	CS	Bar	80	4.00	173.21	0.00	0.48
42	CS	Bar	80	4.00	173.21	0.00	0.63
27	CS	Bar	80	4.00	173.21	0.00	0.65
41	CS	Bar	80	4.00	173.21	0.00	0.80
25	CS	Bar	80	4.00	173.21	0.00	0.82
40	CS	Bar	80	4.00	173.21	0.00	0.97
23	CS	Bar	80	4.00	173.21	0.00	0.99
22	CS	Bar	90	4.00	153.96	0.00	0.78
12	CS	Bar	90	4.00	153.96	0.00	0.79
21	CS	Bar	120	4.00	115.47	0.00	0.78
13	CS	Bar	120	4.00	115.47	0.00	0.80
36	CS	Bar	120	5.66	163.30	0.77	0.00
30	CS	Bar	120	5.66	163.30	0.82	0.00
10	CS	Bar	120	4.00	115.47	0.93	0.00
20	CS	Bar	130	4.00	106.59	0.00	0.90
14	CS	Bar	130	4.00	106.59	0.00	0.91
2	CS	Bar	130	4.00	106.59	0.73	0.00
37	CS	Bar	130	5.66	150.74	0.88	0.00
28	CS	Bar	130	5.66	150.74	0.91	0.00
19	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.91
15	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.91
17	CS	Bar	140	4.00	98.97	0.00	0.93
38	CS	Bar	140	5.66	139.97	0.89	0.00
26	CS	Bar	140	5.66	139.97	0.91	0.00
18	CS	Bar	150	4.00	92.38	0.00	0.85
16	CS	Bar	150	4.00	92.38	0.00	0.85
9	CS	Bar	150	4.00	92.38	0.83	0.00
3	CS	Bar	150	4.00	92.38	0.85	0.00
39	CS	Bar	150	5.66	130.64	0.85	0.00
24	CS	Bar	150	5.66	130.64	0.87	0.00
11	CS	Bar	160	5.66	122.47	0.81	0.00

根據受力情形來調整桿件粗細，減少材料的浪費，降低成本。

3、持續上述的步驟，找出每種橋樑架構最佳的材料設計。

(二) 研究義大利麵材料的強度。

義大利麵橋的跨度對其最大負重能力之影響

1、實驗方式如下圖，義大利麵長度爲 24cm，木塊間的距離爲 21cm，也就是跨度爲 21cm。

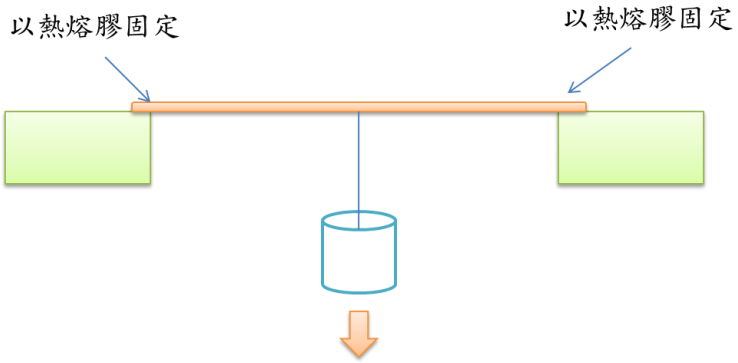


圖 7 義大利麵跨度實驗室意圖。

2、將義大利麵穿過綁著棉線的寶特瓶，並均勻放置於兩木塊間。

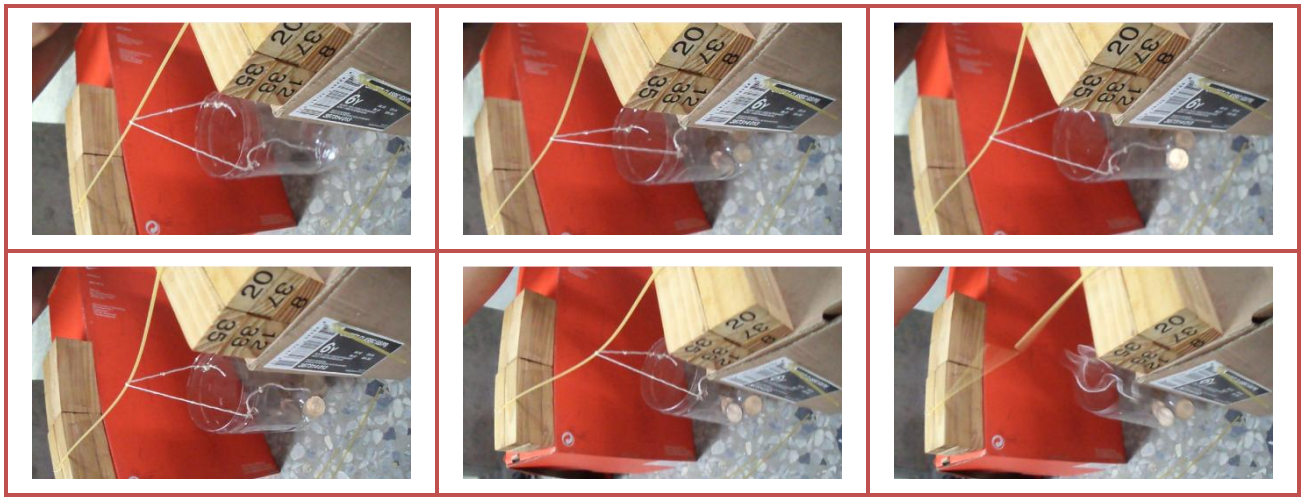
3、將義大利麵兩端以熱熔膠固定。

4、持續加入一元硬幣，直到義大利麵斷裂，並記錄之。

5、重複實驗 10 次。

6、改變義大利麵跨度爲 18cm、17cm、14cm、13cm、10cm、9cm、6cm，重新實驗。

實驗情形：



義大利麵的根數對其最大負重能力之影響

1、改測試兩支義大利麵的強度，先將兩根義大利麵對齊，並以熱熔膠將其頭尾黏起來。

2、將義大利麵橋的跨度設定爲 21cm，並將保特瓶吊筒懸掛在義大利麵橋中央處。

3、逐漸將一元硬幣放入吊筒內，直至義大利麵橋斷裂。

4、改以三根義大利麵進行實驗，排成三角形 ，並重複上述之步驟。

5、改以四根義大利麵進行實驗，排成平行四邊形 ，並重複 1~3 之步驟。

(三) 研究各種結構義大利麵橋負重情形。

1、根據程式模擬的結果，使用義大利麵來搭橋。

2、共分別設計了 Howe 三種、Pratt 兩種、Warren 一種，合計六種結構。以 Howe 爲例，其下弦可分爲 2 段、4 段及 6 段不同形式。

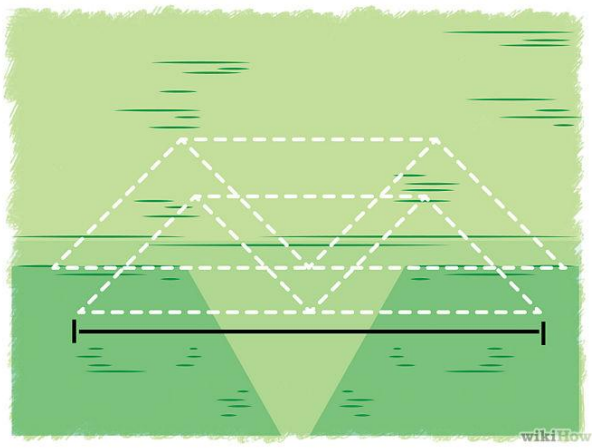
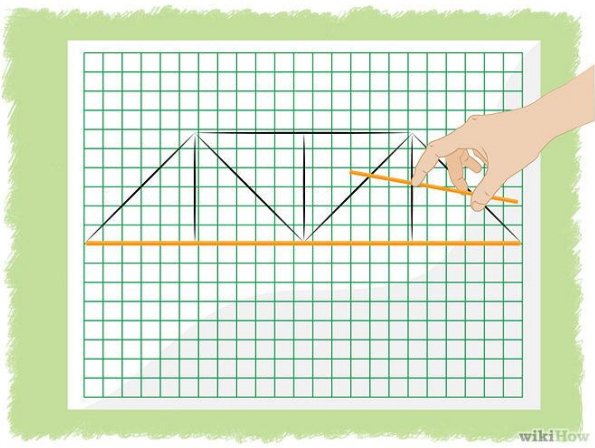
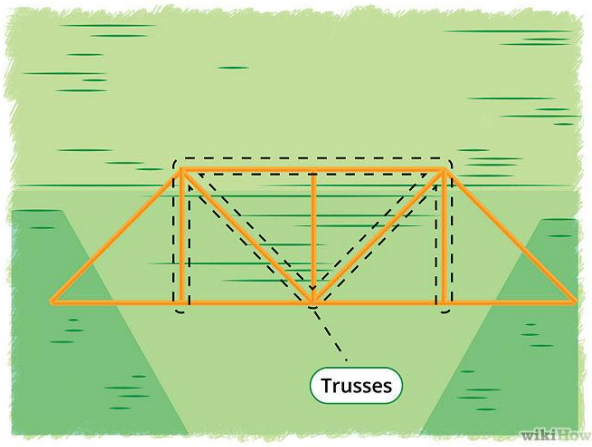
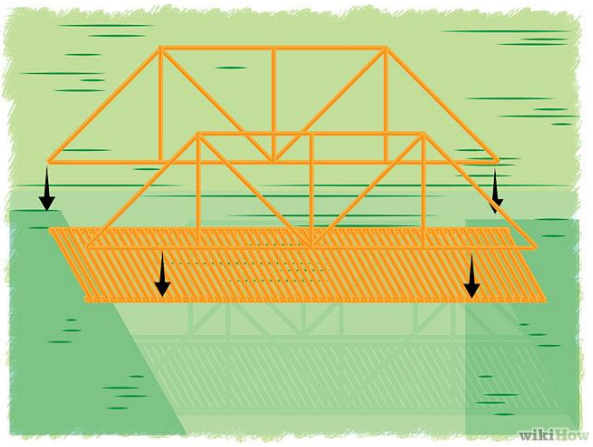
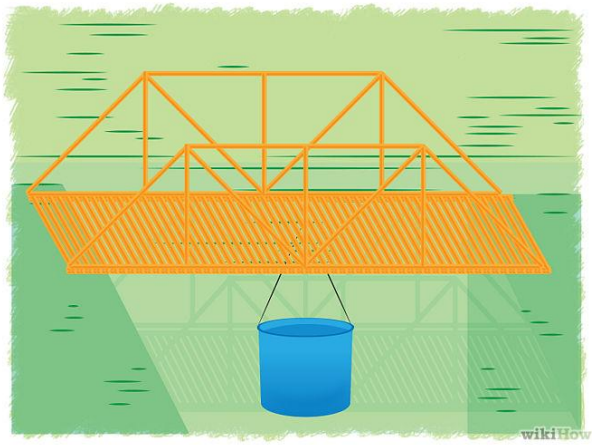
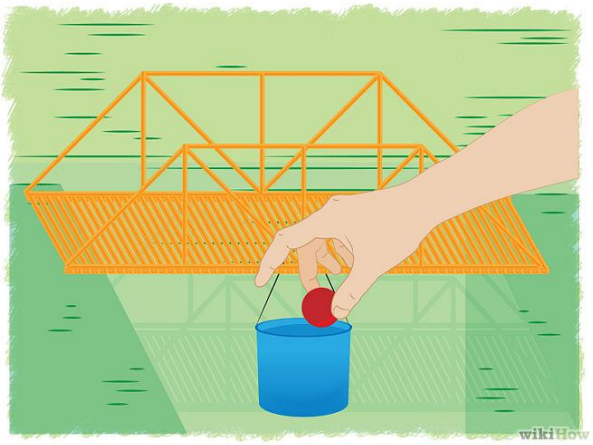
3、橋長 24cm，橋高 4cm，橋面寬 5cm，跨度爲 21cm。

4、義大利麵之間的節點處以熱熔膠黏接。

5、將木棍橫黏於下弦(Bottom Chord)之上，以硬幣來測量橋樑的負重情形。

6、改用拉力計取代一元硬幣的測量方式，並重新實驗。

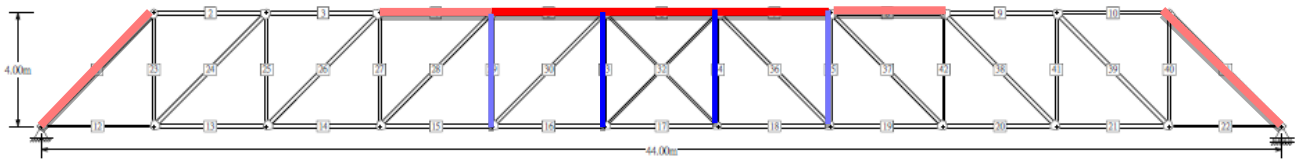
搭橋步驟：

	
1.先決定橋樑的跨度。	2.在紙上畫出設計圖，並排上義大利麵。
	
3.將義大利麵黏牢。	4.加上橋面。
	
5.懸掛吊桶。	6.放入重物測試。

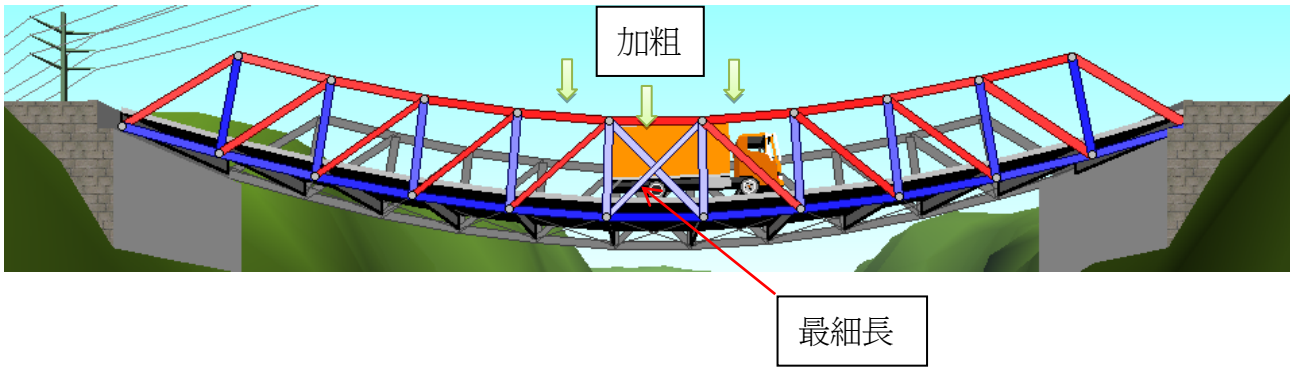
伍、研究結果與討論

一、利用電腦程式模擬桁架橋的搭建情形。

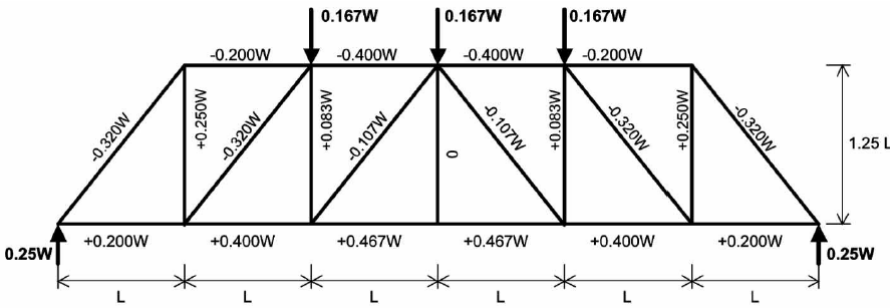
Through Truss – Howe



經由模擬測試，並在以紅色標示出來的地方加粗(顏色越深越粗)，能夠提升橋樑的負重能力，所以如果橋樑斷裂通常會發生於這幾處。而藍色標示出來的部分則是變細，可減少不必要的材料浪費。



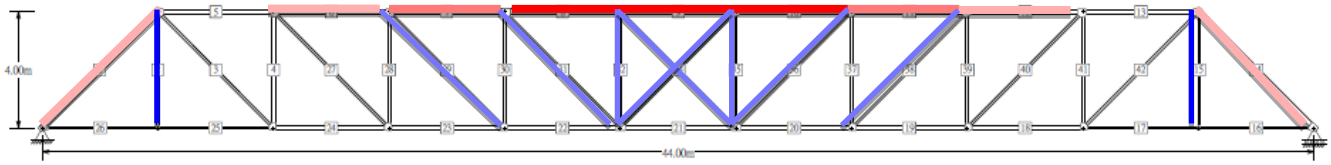
圖中是模擬貨車經過，橋樑的受力情形，**紅色代表壓力強度(Compression strength)**，**藍色代表張力強度(Tension strength)**。由此可知橋梁下方的結構是受到拉長的，而上方的結構則是擠壓。而中間部分，斜向結構是受到擠壓，垂直結構則是受到拉伸。而由顏色的深淺變化可以知道受力之大小。



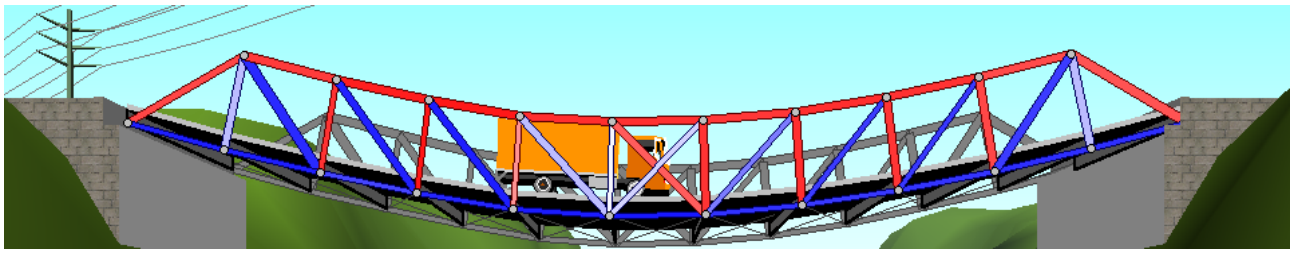
-號代表壓力，+號代表張力(註:該軟體使用說明的附錄B- *"A Gallery of Structural Analysis Results"*)

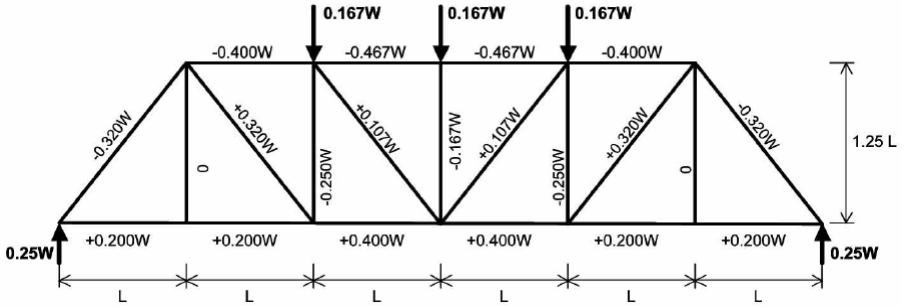
由簡單的靜力分析結果得知，橋樑受力主要集中在上、下弦，且越中央受力越大，因此在實務上必須增加上下弦的強度，才能有效地增加橋樑負重情形。此外由文獻得知，擠壓的方式較易造成義大利麵或鋼材斷裂。

Through Truss – Pratt



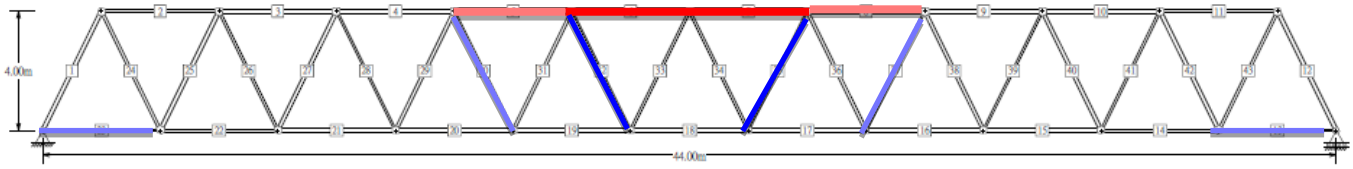
必須補強的地方與 Howe 結構雷同。

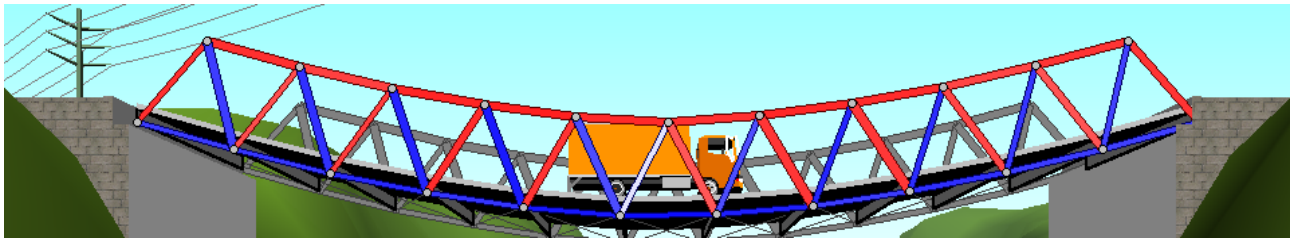




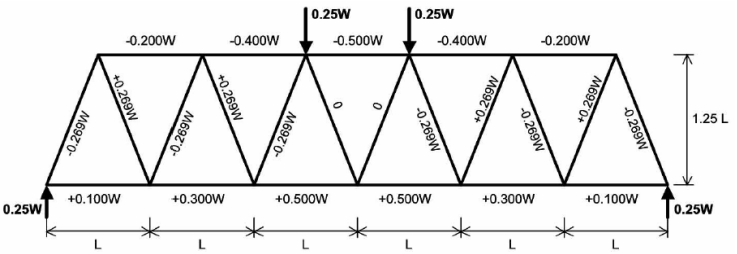
但是，Pratt 與 Howe 的受力情形正好相反，對角線桿件受到的是張力，垂直桿件則是壓力，且不受力之垂直桿件在橋的兩端。

Through Truss – Warren

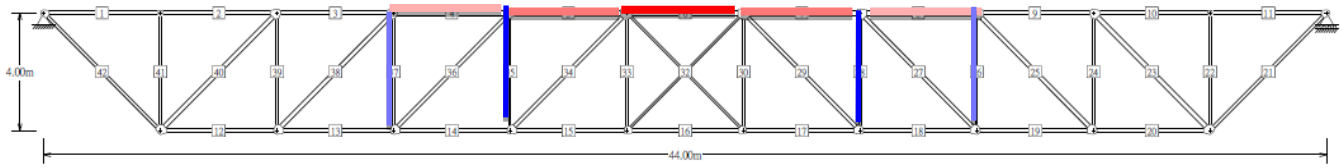


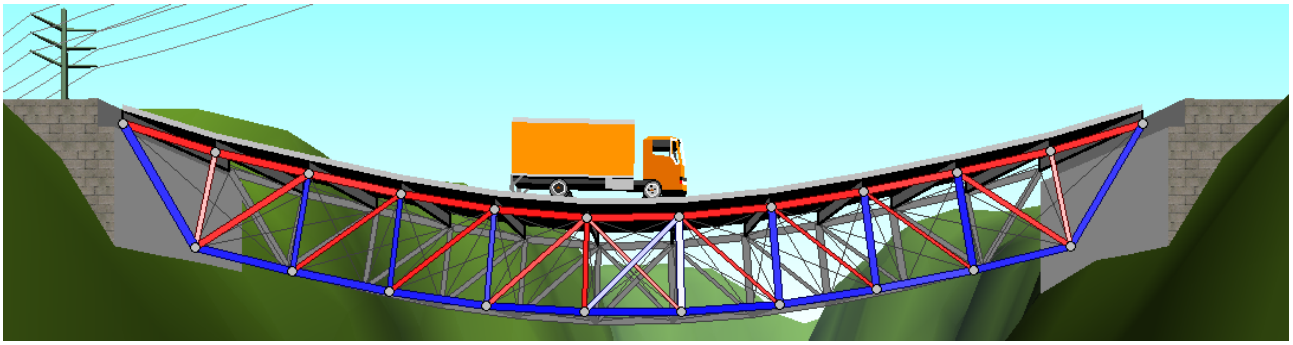


Warren 結構與上述兩種結構不同之處在於，當大卡車行經整個橋面時，其上下弦之間的斜向桿件所受張立及拉力情形會一直變換。

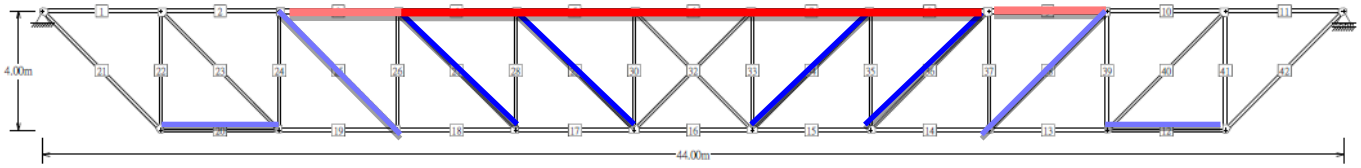


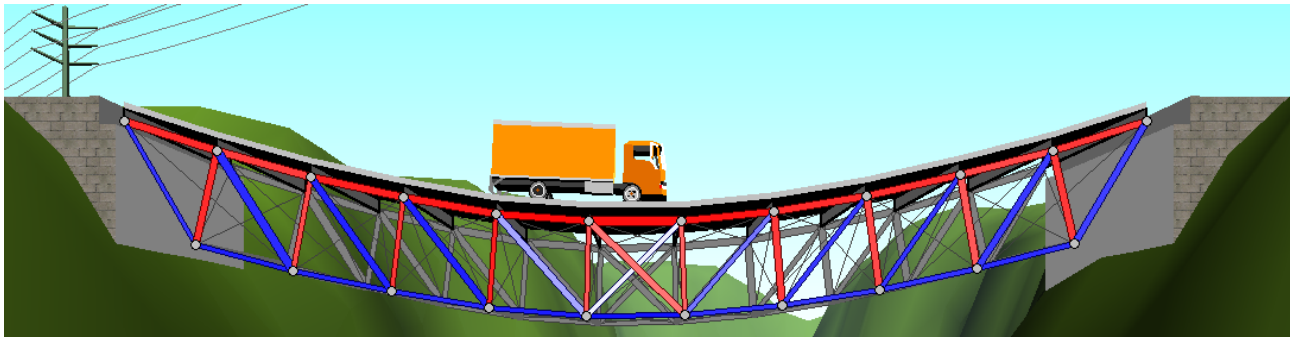
Deck Truss – Howe



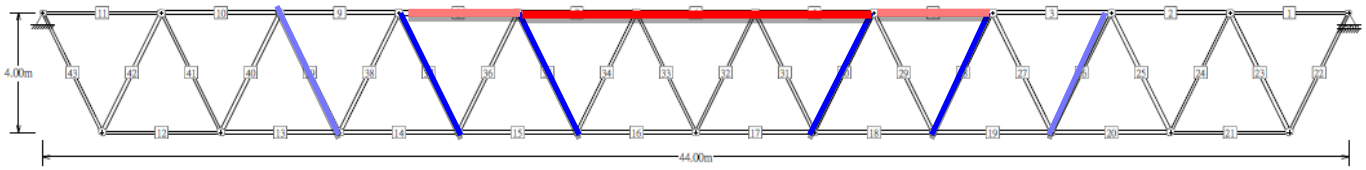


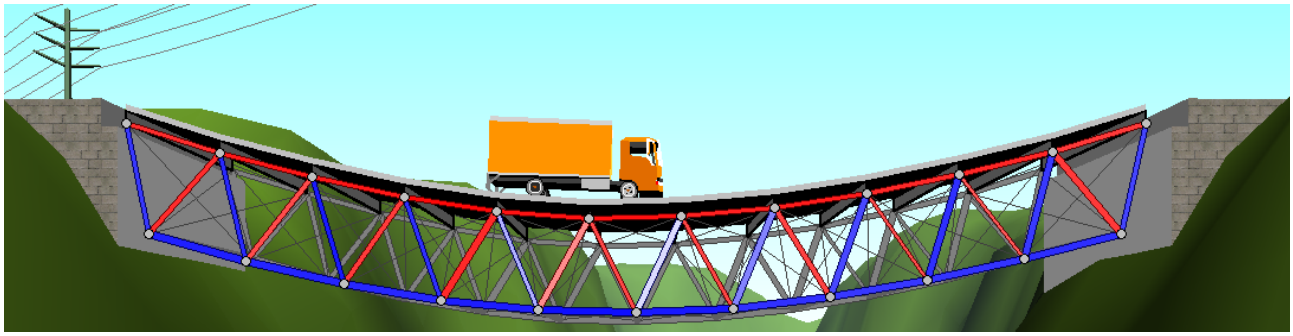
Deck Truss – Pratt





Deck Truss – Warren





由整個程式模擬發現，雖然橋樑設計改到下方，但重點是其力量的傳導方式，我們發現上方基本上是受到壓力作用，而下方則是受到拉力作用，因爲上弦受到擠壓，下弦受到拉長。

模擬結果：

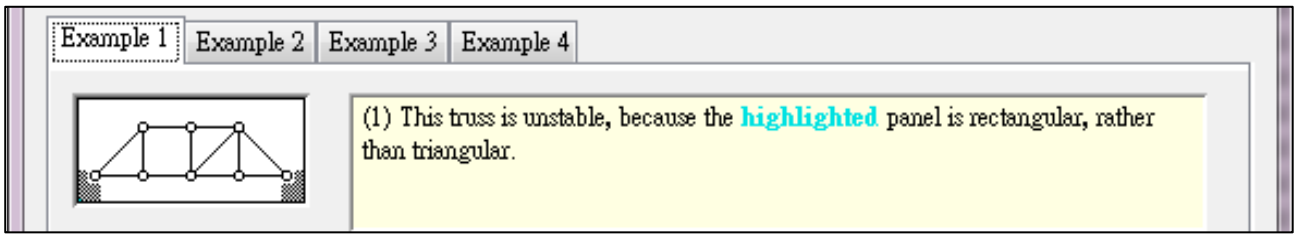
根據程式內建基本橋樑，找出該橋樑建造後，可供大卡車通行的最低需求，得出搭建一座跨度 44m 的橋樑所需最少的鋼材重量及最低造價。其結果如下表所示：

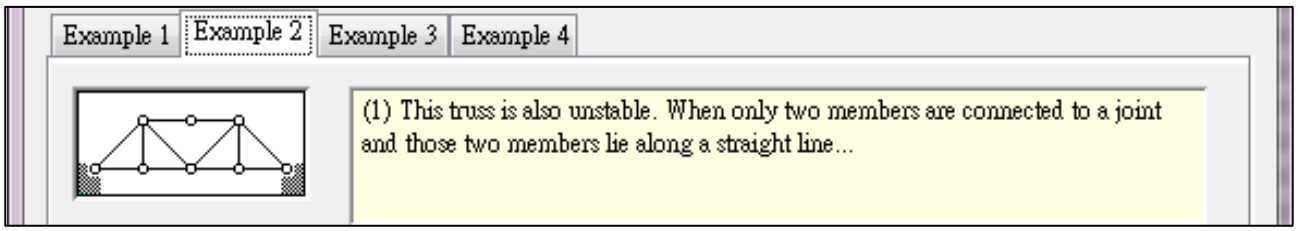
結構種類	總重(kg)	造價($)
Through Truss – Howe	22,903	312,785
Through Truss – Pratt	19,692	282,881
Through Truss – Warren	19,433	281,551
Deck Truss – Howe	22,071	307,289
Deck Truss – Pratt	20,002	283,673
Deck Truss – Warren	19,458	280,771

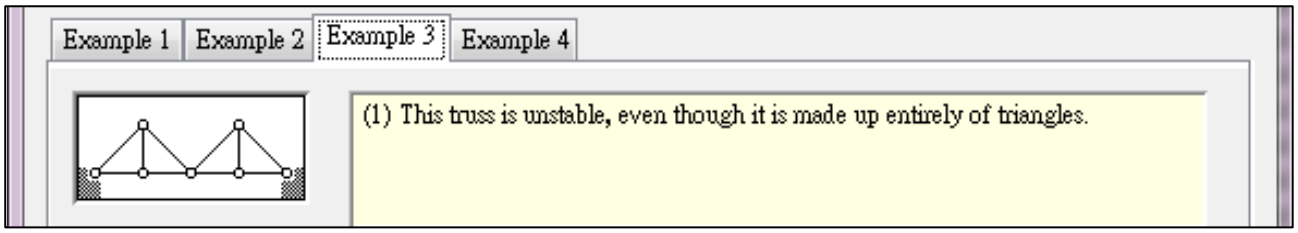
1、由表中發現 Howe 結構所需耗材較多且造價也較高，我們認爲這是桿件在處理張力及壓力不同所致，根據理論，當桿件加長或變短時，所能承受之最大張力是不變的，但是所能承受之最大壓力會因加長而變小，所以讓壓力施加在較短的桿件是比較符合經濟效益的，因此 Howe 結構的壓力是施加在對角線桿件上是不經濟的，因此其造價及耗材會比較多。

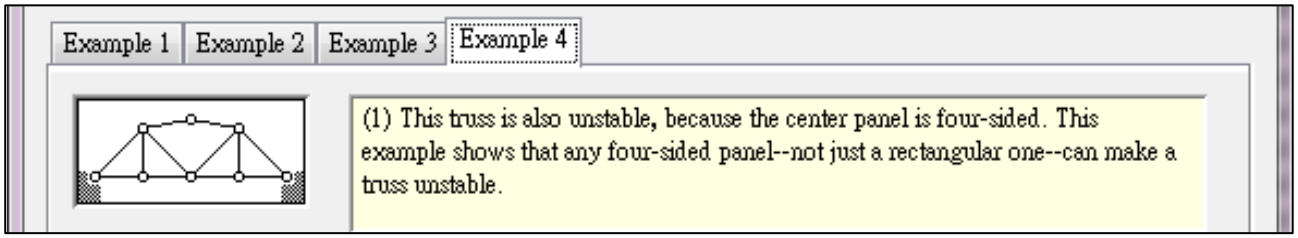
2、此外，發現 Warren 的結構在同樣條件下，耗材較少，這是因爲此設計排除垂直桿件，由三角形的小結構構成，受力可以 ⋁⋀⋁⋀的形式有效傳遞，也因爲這樣台灣所建造的橋樑多數是以 Warren 的方式來設計，其中最有名的就是西螺大橋。

橋樑設計注意事項









在使用模擬設計的過程，大致會出現四種常見的結構問題，因此在利用義大利麵搭橋時應盡量避免，其原則就是節點間必須形成三角形，因爲對每一節點來說較易形成三力平衡狀態，使節點的受力更容易傳導；而對結構而言，三角形的結構最穩定，不易轉換成其他幾何形狀。

二、研究義大利麵材料的強度。

本組選用三種不同廠牌的義大利麵，並以 A、B、C 廠牌作爲代號。

測量 10 根義大利麵特性並取平均：

廠牌	【正逢】 義大利麵-直麵 (A 廠牌)	【Arbella】 義大利麵-直麵 (B 廠牌)	【San Remo】 義大利麵-直麵 (C 廠牌)
成份	精選杜蘭沙粒粉、水	100%杜蘭小麥粉	100%杜蘭粗粒小麥粉
長度	24cm	24cm	24cm
直徑	1.82 mm	1.83 mm	1.92 mm
重量	0.907 g	0.949g	1.066g
密度	0.363 gw/cm^3	0.376 gw/cm^3	0.384 gw/cm^3

實驗方式如下圖所示：

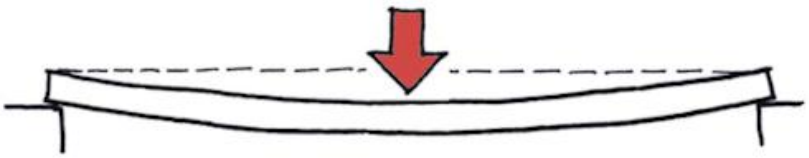


圖 8 義大利麵測試受力方式示意圖。

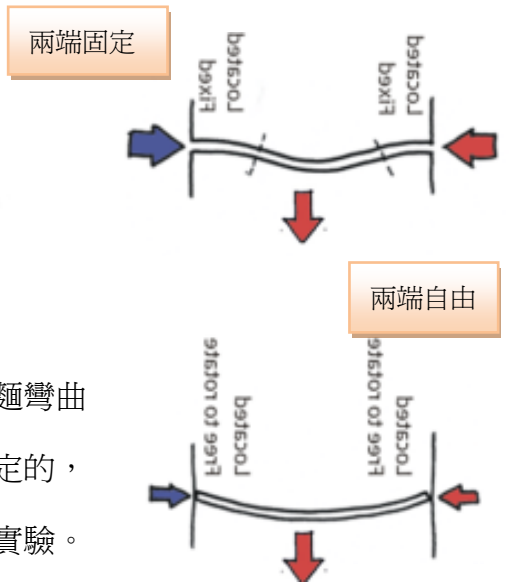


圖 9 義大利麵強度測試，兩端連結情形示意圖。

由實驗得知，義大利麵兩端是否固定，會造成義大利麵彎曲情形不同，所以考量搭橋時，義大利麵兩端是以熱熔膠固定的，因此在測試義大利麵強度時，皆以兩端固定的方式來進行實驗。

改變義大利麵跨度，逐漸增加硬幣(負重)，了解義大利麵抗彎曲強度。

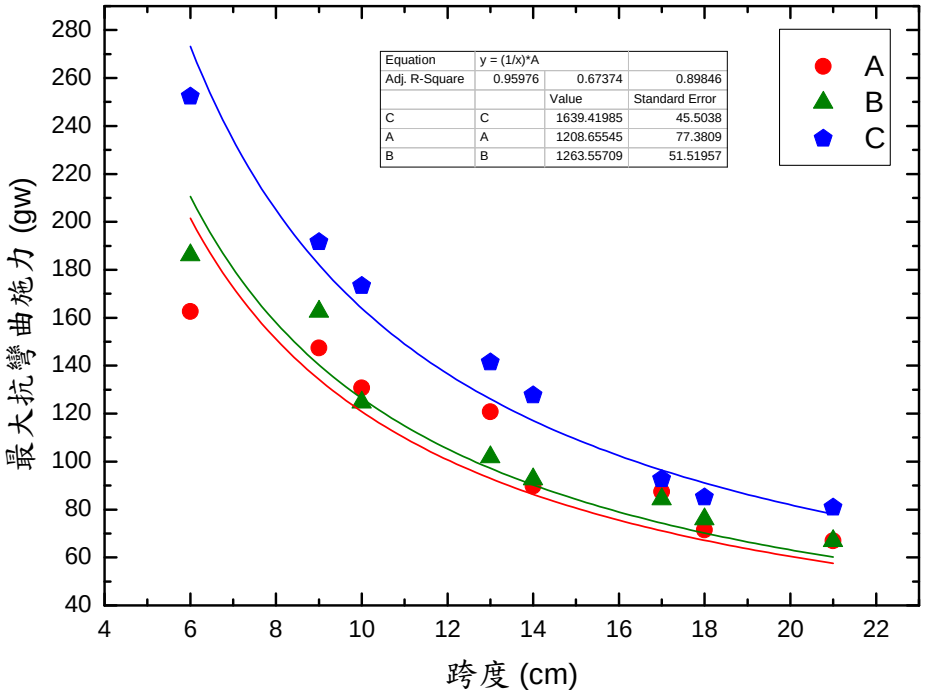


圖 10 不同廠牌義大利麵，跨度與最大抗彎曲施力之關係圖。

說明與討論：由圖 10 可以看出當跨度越大時，義大利麵所能承受之最大抗彎曲施力也就越小，這是因為力矩的關係，相同施力，力臂越大，則力矩越大，且呈正比關係。因此，本組認為，C 廠牌的義大利麵抗彎曲強度最大，且跨度與最大抗彎曲施力之關係較接近反比關係，也就是材料性質較均勻，所以選用 C 廠牌的義大利麵來進行實驗。

改變義大利麵根數。

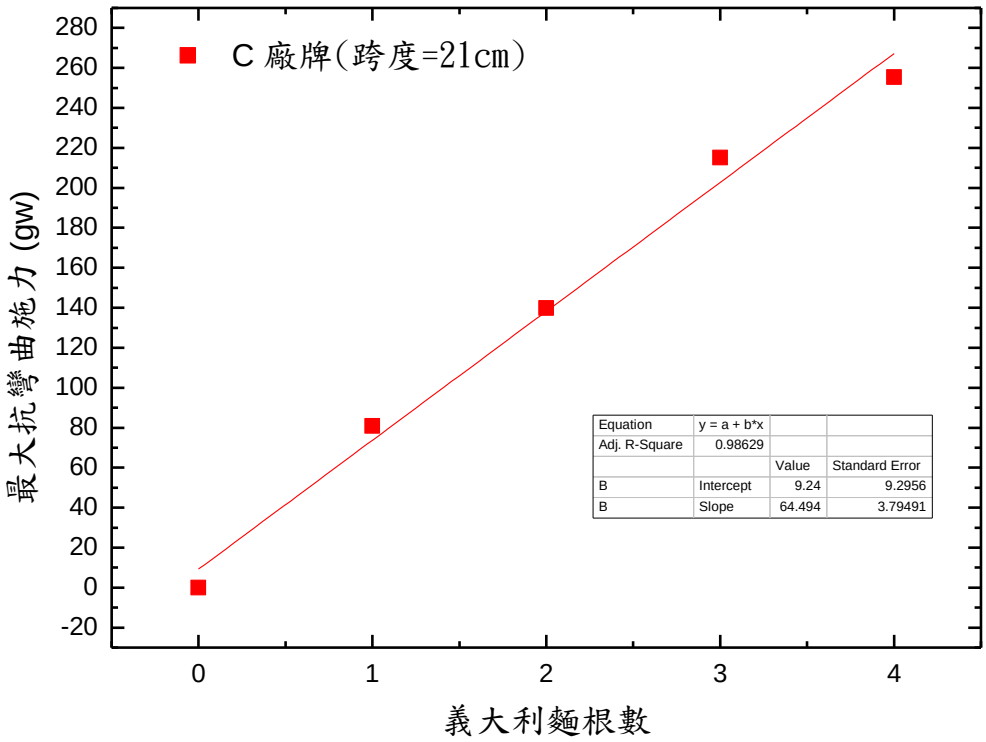


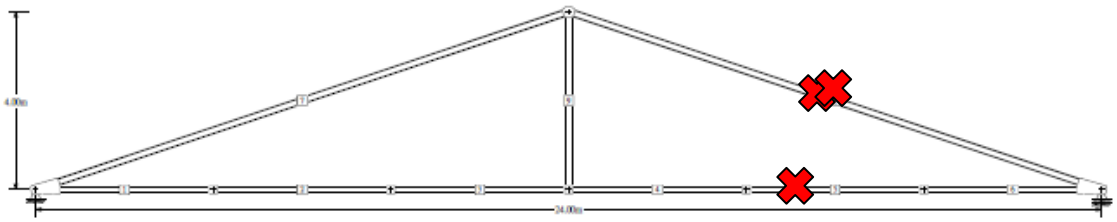
圖 11 義大利麵數多寡與最大抗彎曲施力關係圖。

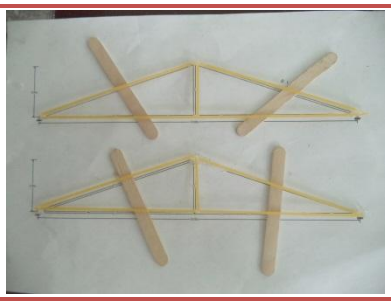
說明與討論：由圖 11 可以發現，平均最大負重與義大利麵的根數成正比，也就代表義大利麵越多根，其結構越堅固，越不易損壞，負重能力就越強。此外，每增加一根義大利麵，負重便增加約 65gw，負重效率約爲 65 gw/根。

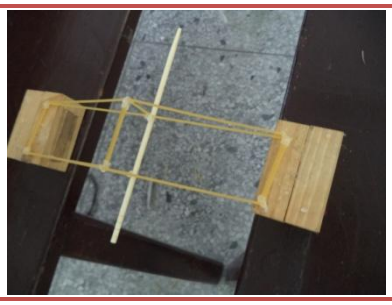
三、利用義大利麵搭建桁架橋來探討結構負重能力。

橋樑大小皆為跨度 21cm，寬度 5cm。 ✖ 代表斷裂處。(實驗三次取平均)

A 結構-Howe (2 段)

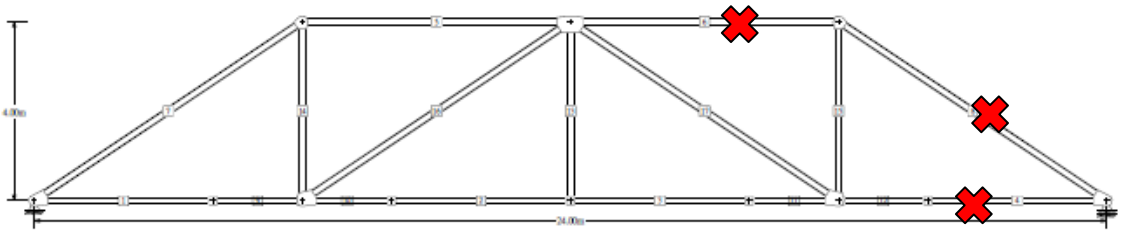


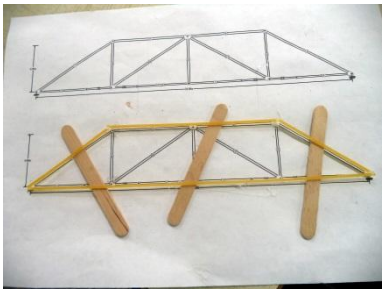


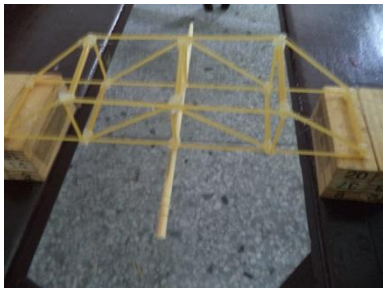


材料長度=53.3*2 cm，約 4.43 根義大利麵長，最大負重=360gw，**負重效率：81.26 gw/根。**

B 結構-Howe (4 段)

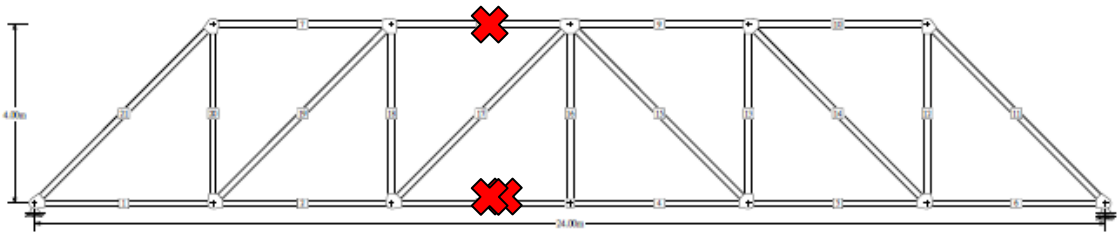


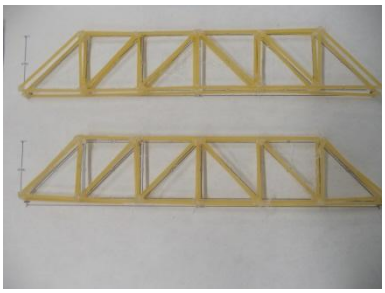


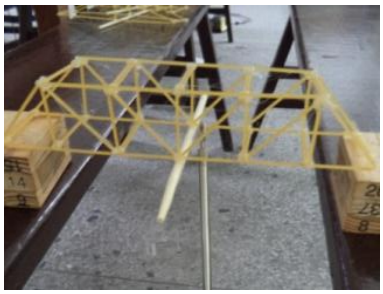


材料長度=76.8*2 cm，約 6.4 根義大利麵長，最大負重=530gw，**負重效率：82.81 gw/根。**

C 結構-Howe (6 段)

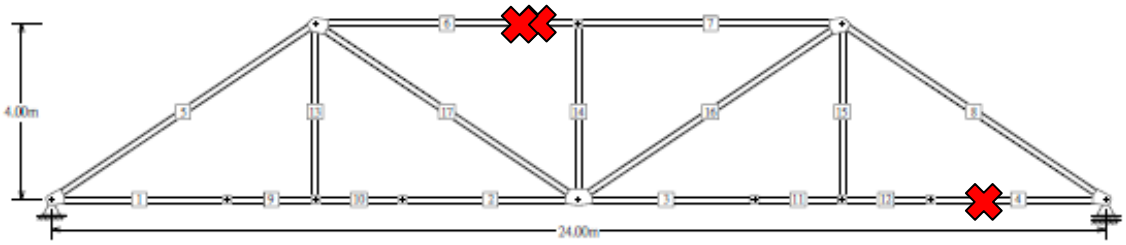


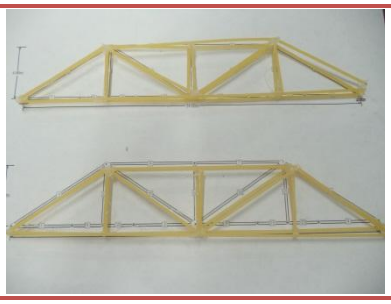


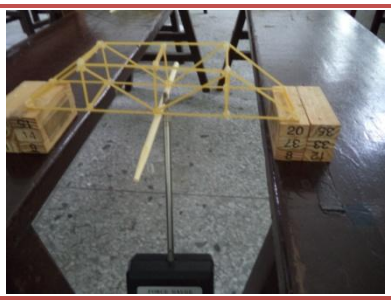


材料長度=93.9*2 cm，約 7.83 根義大利麵長，最大負重=730gw，**負重效率：93.24 gw/根。**

D 結構-Pratt (4 段)

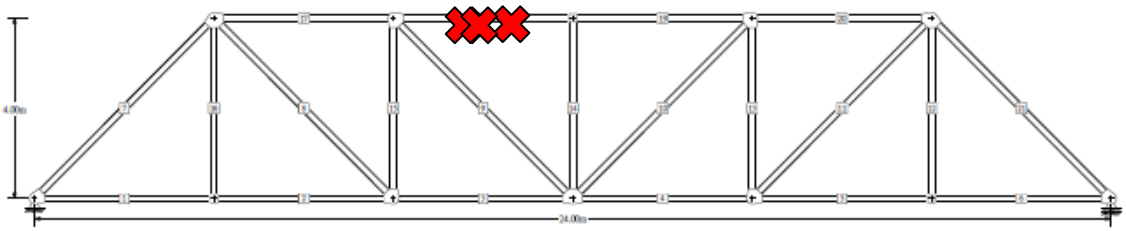


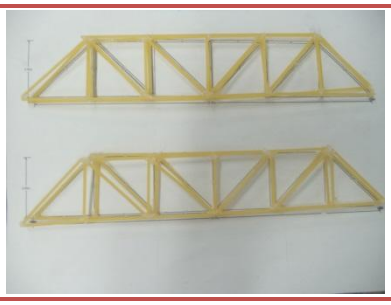


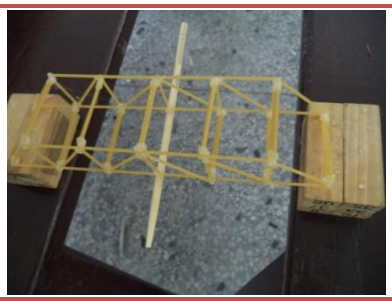


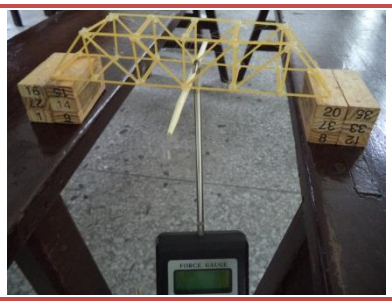
材料長度=76.8*2 cm，約 6.4 根義大利麵長，最大負重=550gw，**負重效率：85.93 gw/根。**

E 結構-Pratt (6 段)



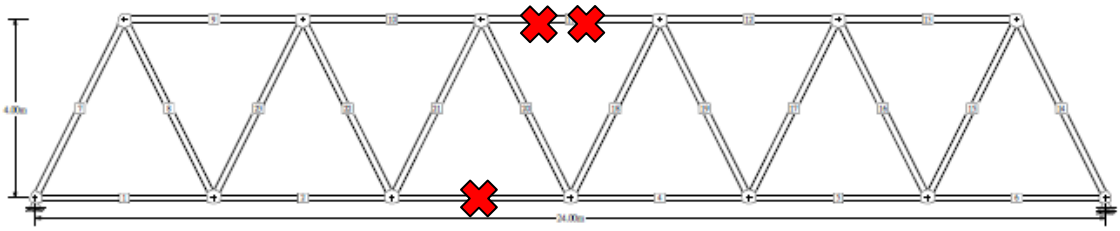


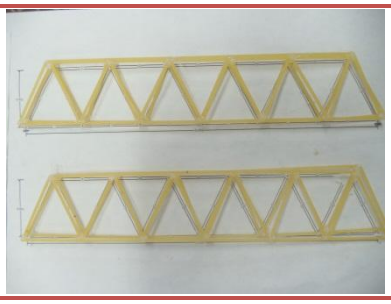


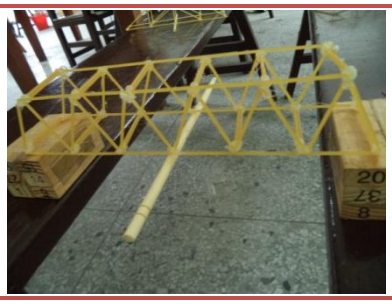


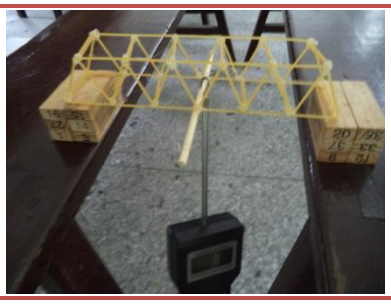
材料長度=93.9*2 cm，約 7.83 根義大利麵長，最大負重=750gw，**負重效率：95.79 gw/根。**

F 結構-Warren (6 段)

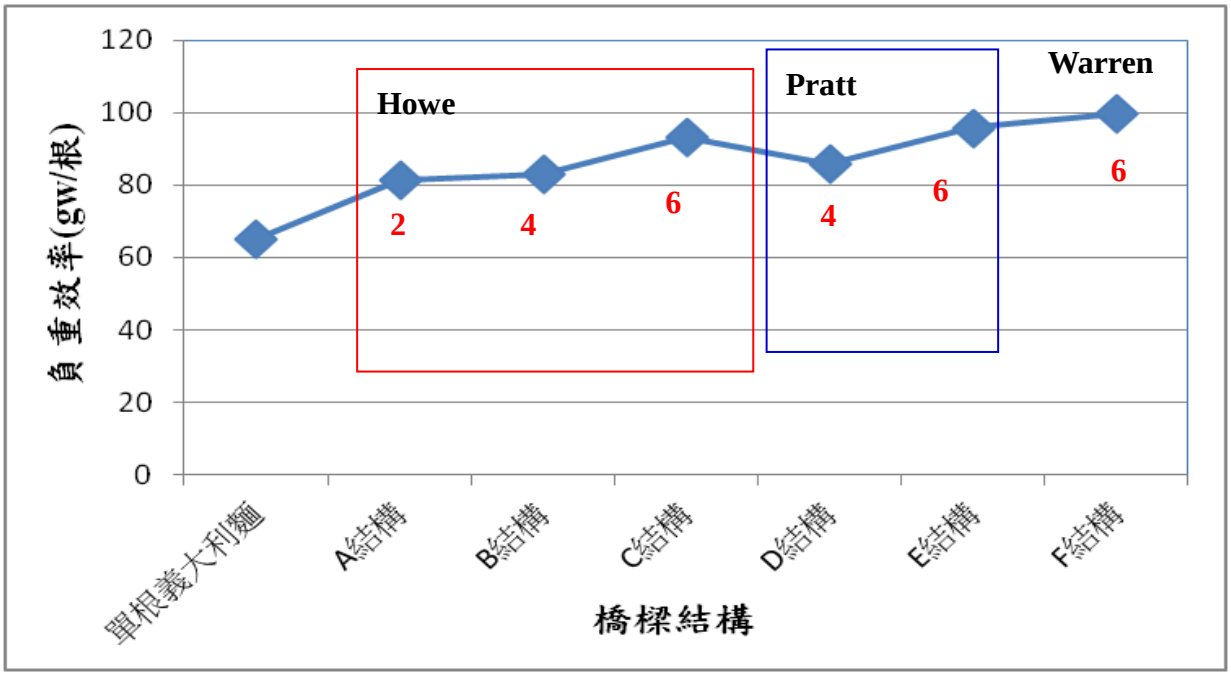








材料長度=97.7*2 cm，約 8.14 根義大利麵長，最大負重=810gw，**負重效率：99.51 gw/根。**



紅色數字代表下弦的段數

圖 12 各種不同橋樑結構，其負重效率情形。

說明與討論：

1、以 A 結構來做說明，原則上桁架結構的設計會事先排除受力矩作用而使桿件彎曲而斷裂，因此由右圖靜力分析可以看出每個桿件的合力矩皆爲零，只單純受張力及壓力作用。雖然壓力相對於彎矩較易破壞材料結構(材料較長時)，但因爲桁架的設計關係，相對減小各桿件的長度，反而會使的桿件不易受壓力而破壞，因此在設計上，長桿件盡量受到張力作用，短桿件受到壓力作用，是最符合經濟效應的。

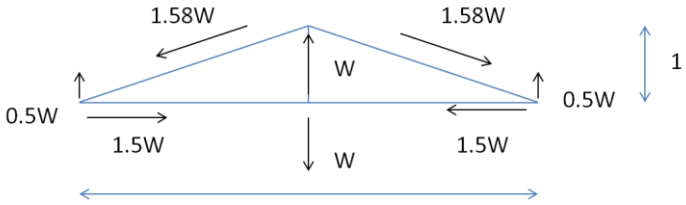


圖 13 A 結構靜力分析圖。

2、下弦分段越多，所需材料也越多，但是負重效率卻越高，這是因爲桿件越長越容易破壞，所以分段越多桿件就越短，就不易被破壞。但是在實際搭橋上，若分越多段，節點也越多，施工複雜，且鋼樑過於密集會增加橋樑本身重量，因此反而降低橋樑負重效率，所以良好的桁架設計是可以減少許多不必要的浪費。

3、經由實際以義大利麵來搭橋測試，確實也如程式模擬的結果一樣，Warren 結構最佳，而 Pratt 結構優於 Howe 結構設計。

陸、結論

一、不管造橋的材料爲何，運用的結構概念是不變的。會讓結構損壞的可能性有三：

1、材料極限：世上沒有那種所謂絕對堅固的結構體，所以就算是對結構強度要求非常嚴格的核電廠，也不會建造成「完全」堅固。爲何不設計一個絕對不會倒的結構體？這就是科技創造的一種限制，科學理論可以很理想，科技與工程則常常在諸多的條件限制下妥協產生的，而「成本」便是這個無法達到「理想」境界的最大阻礙。

2. **設計不良**：撇除材料極限的問題，設計不良應該是導致損壞的主要原因。

3、**材料分配不當**：上弦與端柱太長而壓斷，或是下弦設計太細而拉斷。**長度是壓力最大的致命點，儘可能縮短壓力桿的長度，增加節點設計以支撐**。然而，最大的矛盾也是在材料分配上，爲了有更好的強度，所以需要更多的材料，而材料即成本的意義，如何將材料做最適當的分配，設計者在建造結構體之前，應先就內力分佈有清晰輪廓，何者爲壓力？爲拉力？爲彎矩？哪根壓力大？哪根拉力大？節點是否有剪力？就力的大小與形態來分配材料，故就整個研究而言，能在建造前先做好模擬計算及材料測試會有助於橋樑的搭建。

二、在設計上，較長的桿件承受張力，較短的桿件承受壓力是最佳的選擇，因此雖然 Howe 結構與 Pratt 結構相似，所需材料一樣多，但是因爲各桿件受力狀況不同，較長的桿件承受到壓力，因此造成 Howe 的負重效率較差。

三、根據模擬及實際以義大利麵來搭橋，驗證 Warren 的結構最經濟實惠，Pratt 結構次之，Howe 結構負重能力最差。也因此台灣的桁架橋多半是 Warren 式橋，以西螺大橋最著名。

四、使用桁架結構可以提高材料的負重效率，經由實驗發現單根義大利麵的負重效率爲 65gw/根，而改以桁架結構來搭橋時，其負重效率提高到 81~99 gw/根，最多可提高 1.5 倍。

五、本研究界由 West point bridge design 軟體來設計橋樑結構，並以義大利麵實際搭建橋樑，並測試其負重能力，可發展成完整的教學流程，適合國中學生學習建築結構等相關課程。

柒、參考資料

1、王鈞等，(2008)，”「橋」遍全世界”，中華民國第 **48** 屆中小學科學展覽會國中組理化科，國立台灣科學教育館，臺北。

2、廖加凱等，(2009)，”搭橋 GO！GO！GO！”，中華民國第 **49** 屆中小學科學展覽會國小組物理科，國立台灣科學教育館，臺北。

3、藍立琳等，(2003)，” 橋樑的最佳斷面選擇—紙橋”，中華民國第 **43** 屆中小學科學展覽會高職組土木科，國立台灣科學教育館，臺北。

4、吳智偉等，(1996)，”拱橋”，中華民國第 **36** 屆中小學科學展覽會高中組物理科，國立台灣科學教育館，臺北。

5、洪珮菁，(2009)，”鐵路鋼桁架橋設計分析之研究”， 中華科技大學土木防災工程研究所，碩士論文。

6、尤丁玫，”土木結構基本概念”，引用自 http://b0.rimg.tw/msdog/8ebea9b8.pdf。

7、尤丁玫(2004)，”土木結構概念(下)”，引用自 http://203.71.24.7/upload/%AE%EC%AC%5B%B5%B2%BAc%B7%A7%A9%C0%C1%BF%B8q.pdf。

8、”An Introduction How to Building Structures.”， http://www.uwe.port.ac.uk/commercial_new/structures/index.htm。

9、” Garrett's Bridges”， http://www.garrettsbridges.com/。

10、” Structural Types | Structurae”， http://structurae.net/structures/stype/。

11、”How to Build a Spaghetti Bridge”， http://www.wikihow.com/Build-a-Spaghetti-Bridge。

【評語】030806

利用 Wast Point Bridge Design 2013 模擬靜力結構，各式結構有相關分析結果及比較分析，使用義大利麵以膠接方式搭出與軟體相近之靜力結構並實驗測試，已初具大學機械系大一水準，唯仍具可再發揮的空間，例如可以軟體直接依膠接之義大利麵尺寸分析，更能達到分析模擬與實驗比較之效。未來在接點條件上可再加強學習。