

第十二屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA12-078

作品名稱：急流不勇退~水棲昆蟲急流環境適應機制之探討

姓名：董丞哲

關鍵字：水棲昆蟲、急流、表面微結構、生活應用

目 錄

一、研究題目	2
二、研究動機	2
三、研究目的	2
四、研究方法	3
1.實驗規劃設計說明	3
2.實驗原理	4
3.研究設備與器材	4
4.實驗方法	4
(1) 第一階段 (前實驗-水棲昆蟲分級)	4
(2) 第二階段 (不同等級的昆蟲其急流適應之機制)	5
(3) 第三階段 (建立水棲昆蟲急流環境適應機制的模型)	16
五、參考資料	19
六、附錄	21

一、研究題目

水棲昆蟲急流環境適應機制（以下簡稱本實驗）

二、研究動機

每當假日出遊踏青，在青山綠水間循河岸散步時，總會因為被清澈的溪流吸引而下水。沿河流漫溯，在上游處，水面上下生機盎然，因為上游溪水的含氧量豐富，水面下擁有多樣的水棲昆蟲。這時問題在我腦中浮現，這些小小的昆蟲是如何在湍急的溪水中固定不被沖走？而如果善用它們適應急流的機制，是不是可以用來改善我們的日常生活？因為抱持著這樣的想法，我進行了這一次的研究，希望藉由研究這些水面下的小生命，為我們的生活添加一些新的想法。

三、研究目的

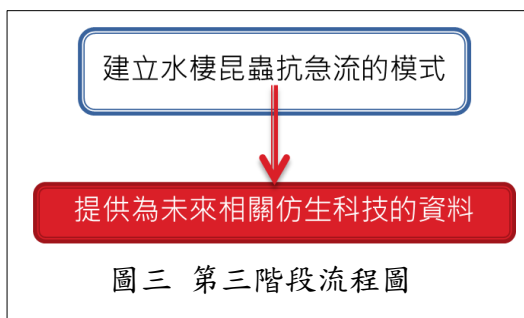
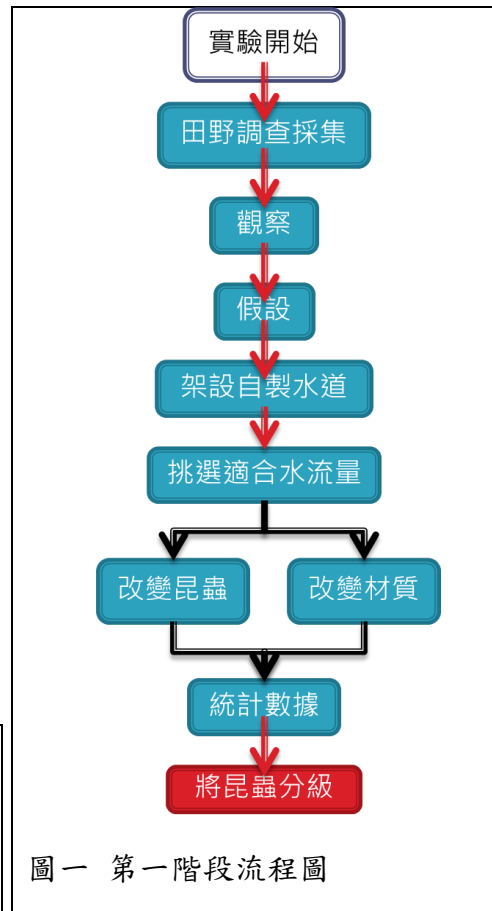
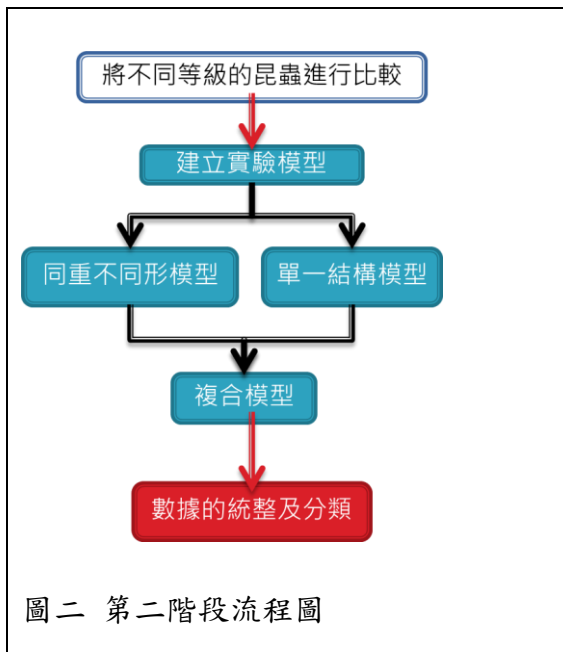
- 尋找能適應急流環境之水棲昆蟲。
- 研究水棲昆蟲急流環境的適應機制原理。
- 建立適應機制模型，提供做為未來相關仿生科技之參考。

四、研究方法

1. 實驗規劃設計說明

本研究共分為三個階段，第一階段是以水棲昆蟲的分類為主，先由野外實際觀察，並採集急流區之水棲昆蟲，帶回實驗室進行基本測量後，再依抗急流之能力加以分級，以作為後續的實驗材料，其實驗設計流程如圖一所示。

第二階段主要是分析不同抗急流等級之水棲昆蟲的型態與構造，試著找出其抗急流之機制，並以模型加以驗證。其實驗設計流程如圖二所示。



第三階段則是結合上述之實驗結果，建立抗急流之可能模型，以作為後續仿生科技實驗之參考。其實驗設計流程如圖三所示。

2. 實驗原理

水棲昆蟲適應急流環境的適應主要取決於蟲體在流體中所受的阻力與蟲體和固體介面附著力的大小。若阻力大於附著力，則蟲體被沖走，若阻力小於附著力，則蟲體可流於原位。因此本實驗室以探討蟲體或模型在流體中，阻力與附著力的合力變化為主，方法是將模型綁於一個固定的重量上，再觀察模型置於流體中，對於原來重量的變化，以減輕的重量來測量流體阻力與附著力的合力淨值。

3. 研究設備與器材

- 自製可變流速組（可變材質：各號砂紙、出水口粗細）
- 抽水馬達
- 筆記型電腦及光學顯微鏡（可拍照及紀錄數據）
- 電子顯微鏡（感謝清大材研所提供幫助）
- 各類水棲昆蟲
- 自製水棲昆蟲生存環境
- 酒精（昆蟲死亡時製作標本以供研究）
- 黏土（製作各類形狀模型）
- 鐵釘.....等 DIY 材料（製作各類形狀模型）



圖四 自製可變流速水道組 Ver.3.0

4. 實驗方法

(1) 第一階段（前實驗-水棲昆蟲分級）

I. 實驗步驟

- 甲、進行田野調查採集，採集急流環境中的水棲昆蟲，將採集到的水棲昆蟲帶回實驗室。
- 乙、以自製之水道進行水棲昆蟲抗急流之能力測量。並依測量結果將水棲昆蟲分級。以做為後續實驗之參考。

II. 實驗結果

- 甲、採集到之水棲昆蟲有水蠶、石蛉(水蜈蚣)、石蠅、石蠶蛾、扁泥蟲、及一種不知名的小蟲（推測為某種鞘翅目甲蟲的幼蟲，以下簡稱為未知小蟲）。

<p>水蠶</p>	<p>石蛉</p>	<p>石蠅</p>
<p>石蠶蛾</p>	<p>扁泥蟲</p>	<p>不知名小蟲</p>

乙、我們發現水棲昆蟲如：水蠶、石蠅、石蠶蛾，在越粗糙的表面能承受相同水流流速（水量相同）的時間越長。而石蛉(水蜈蚣)也是在粗糙面攀附能力較好，但因為其本身為大型肉食性水棲昆蟲擁有較好的運動能力，在製作的儀器中，是不會被沖走的。扁泥蟲在所有預備實驗材質(各號砂紙)中皆可長時間附著不被沖走，後追加木板及壓克力板兩種材質，在木板上仍可長時間附著，但在壓克力板上則會被緩慢的沖走，而其他種類的水棲昆蟲在壓克力板上則完全無法抓附。

丙、將第一階段觀察的昆蟲進行一個「抗急流」能力的初步分級，將水棲昆蟲的抗急流能力分為三級，扁泥蟲及未知小蟲最強屬於甲級；石蛉屬乙級；水蠶、石蠅、石蠶蛾屬丙級。

III. 結論

水棲昆蟲之抗急流機制確實與體型有關，愈扁平、愈細長，抗急流效果愈好。也與接觸介面有關，表面愈粗糙，抗急流效果愈好。

(2) 第二階段（不同等級的昆蟲其急流適應之機制）

1. 形態、構造觀察

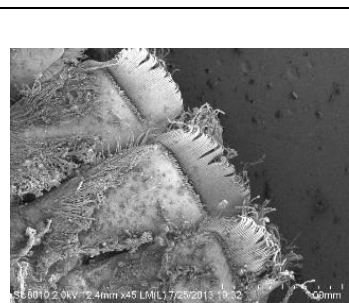
甲、實驗步驟

觀察不同抗急流等級之水棲昆蟲，並記錄其形態和構造。

乙、實驗結果

不同抗急流等級的昆蟲形態、構造比較表

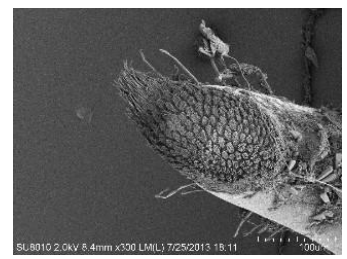
	甲級昆蟲: 扁泥蟲	甲級昆蟲: 未知小蟲	乙級昆蟲: 石蛉	丙級昆蟲: 水蠶	丙級昆蟲: 石蠅	丙級昆蟲: 石蠶蛾
體型	圓、扁	長、扁	長、扁	長、扁	長、扁	長、管狀
軀幹	殼邊緣附毛	有小剛毛	光滑有剛毛	光滑有剛毛	光滑有剛毛	光滑
蟲肢	有剛毛	腳有剛毛， 前端有以一 堆4微米短 毛構成的墊 片	有剛毛也 有幾丁質 構成的刺	有剛毛也 有幾丁質 構成的刺	有剛毛也 有幾丁質 構成的刺	有剛毛
尾部	無	有腳	有尾爪	無特殊附 著構造	有刺	有可控制 的尾足
其他	身體圓扁 似吸盤	有類似吸 盤的構造	為大型水 棲昆蟲	無	會將尾部 貼附於石 頭上	與其他水 棲昆蟲較 不同



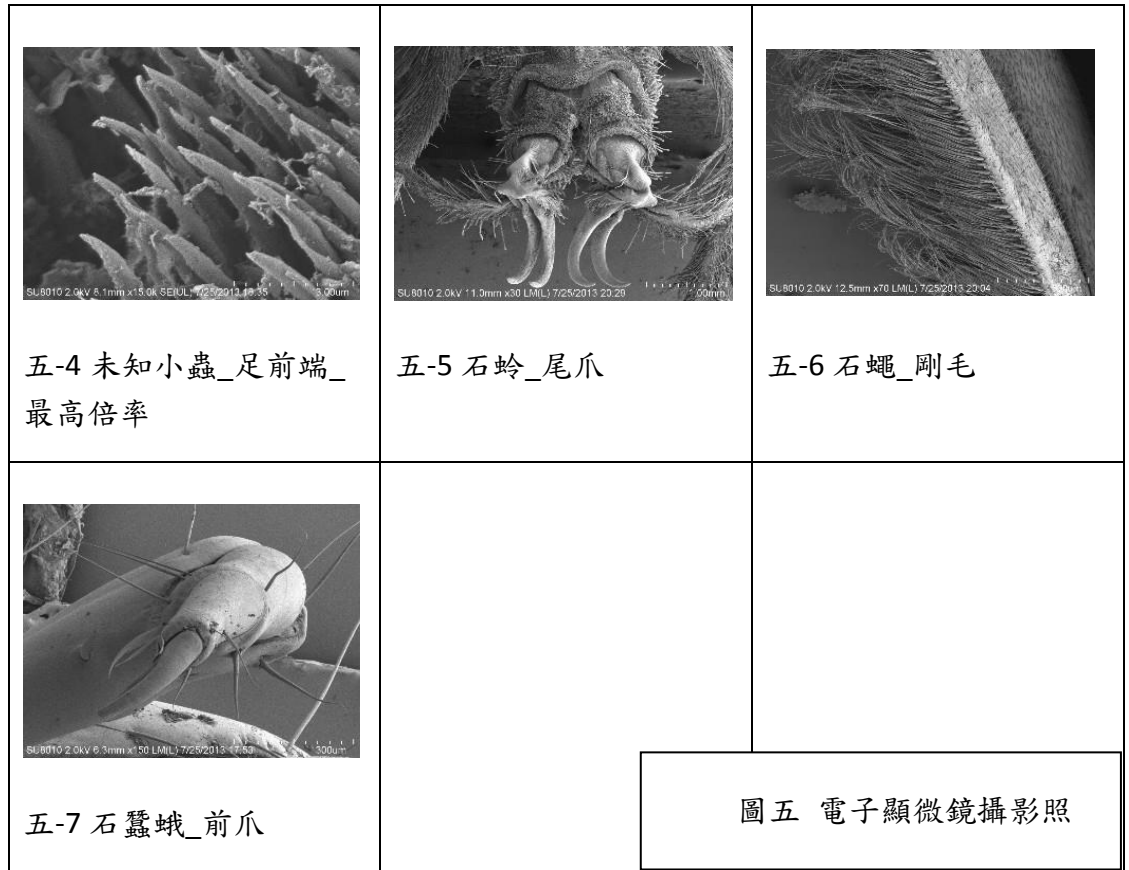
五-1 扁泥蟲_殼邊緣



五-2 未知小蟲_吸盤勾爪



五-3 未知小蟲_足前端



丙、結論

- 大部分的水棲昆蟲體型都呈現扁平（符合流體力學）。
- 蟲肢上附有剛毛（增加摩擦力），附著力最強的未知小蟲甚至在腳的前端還有一堆4微米短毛構成的墊片（感謝清大材料科學工程學系提供電子顯微鏡）。
- 有一些昆蟲的尾部附有幾丁質構成的刺。
- 被分為甲級抗急流能力的昆蟲身上都有類似吸盤的構造（在電子顯微鏡下觀察，發現其類似吸盤的構造為圓形之“肉墊”，上面附有微米等級的爪，並非本來所想的吸盤）。

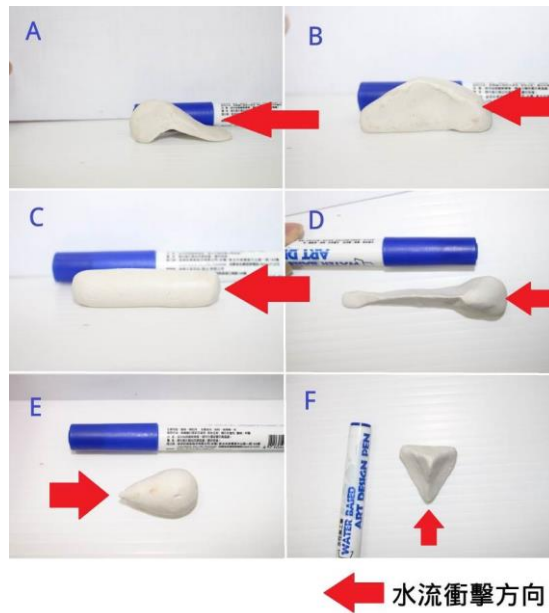
II. 模型探討

甲、形態比較

i. 實驗步驟：

- 以相同重量的油性黏土，仿照水棲昆蟲的外型特徵捏成不同的形狀。

- 測量不同外形模型的水阻力大小（少一點不動、多一點沖走）。
- 模型的設計理念
 - A 模型：未知小蟲活著時頭緊貼地面的樣子
 - B 模型：水蠶的體形
 - C 模型：石蛉狹長的身形
 - D 模型：石蠶蛾狹長但頭部較大的身形
 - E 模型：扁泥蟲肥短的身形
 - F 模型：水蠶的頭部

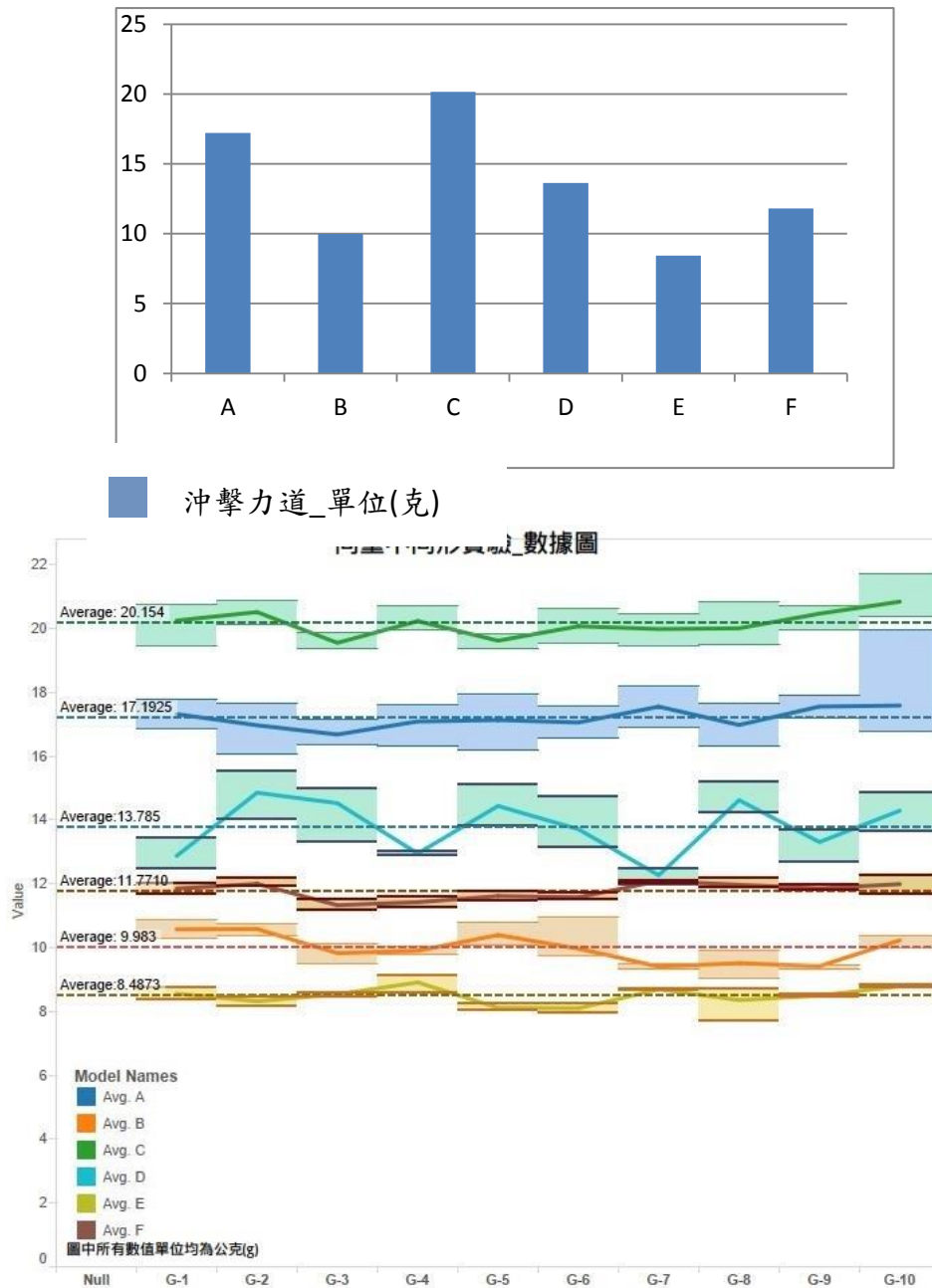


圖六 六種體型模型照

ii. 實驗結果

六個模型之流體阻力大小如下所示，其原始測量數據其參看附錄資料。

	A	B	C	D	E	F
平均	17.21g	9.99g	20.16g	13.63g	8.44g	11.80g



圖七 同種不同型數據圖

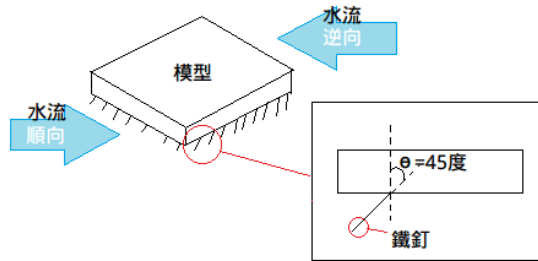
iii. 結論

能抵抗較強水流的模型：C、A、D，都呈現長條型，這和我們觀察到在自然中生活的水棲昆蟲體型是一致的，再更進一步分析此三模型可以承受較大的水流衝擊的原因：

- C：長條型、迎水面積小。
- A：長條型、利用斜面降低水流衝擊。
- D：長條型、利用較大的頭切開水流。

而分析 E、B、F，三模型承受能力較小原因，則有兩個共同點：短胖及受水面積大。

乙、單一附加構造探討：我們在固定的模型上添加大頭釘，模擬水棲昆蟲的刺之作用。其模式圖如下所示。



圖八 鐵釘仿刺實驗示意圖

i. 實驗步驟

- 以相同重量、相同形狀（正方形）的油性黏土，以鐵釘仿照水棲昆蟲身上的刺。
- 測量擁有不同角度的刺的模型之水阻力大小。

ii. 實驗數據及分析

六個模型之流體阻力大小如下所示，原始測量數據其參看附錄資料。

※無法測得定義：1. 小於 4 克，值太小不準。

2. 大於最大閾值，測不到數值。

	60cw_90	60cw_60 順	60cw_60 逆	60cw_45 順	60cw_45 逆	60cw_30 順	60cw_30 逆
平均	9.052g	過小無法測得	過大無法測得	過小無法測得	過大無法測得	過小無法測得	過大無法測得

60cw 砂紙上單一結構鐵釘仿刺實驗數據

	100cw_90	100cw_60 順	100cw_60 逆	100cw_45 順	100cw_45 逆	100cw_30 順	100cw_30 逆

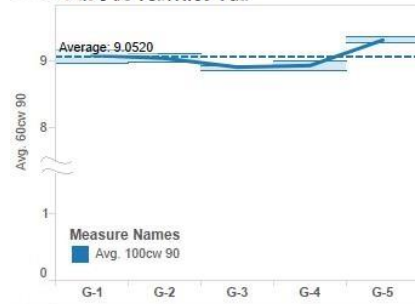
平均	8.527g	5.986g	14.591g	過小無法測得	10.6472g	過小無法測得	過大無法測得
----	--------	--------	---------	--------	----------	--------	--------

100cw 砂紙上單一結構鐵釘仿刺實驗數據

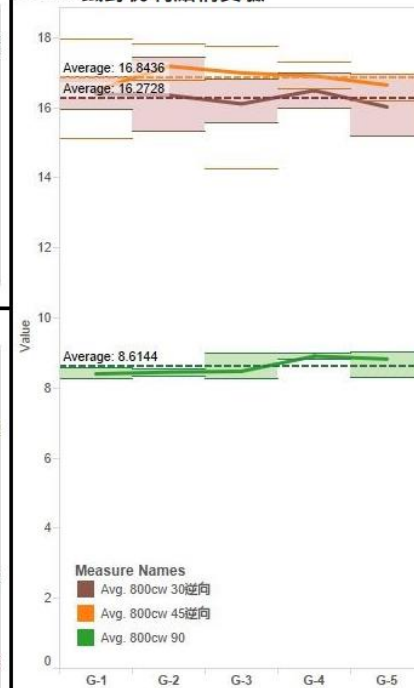
	800cw_90	800cw_60 順	800cw_60 逆	800cw_45 順	800cw_45 逆	800cw_30 順	800cw_30 逆
平均	8.6144g	過小無法測得	過小無法測得	過小無法測得	16.8436g	過小無法測得	16.2768g

800cw 砂紙上單一結構鐵釘仿刺實驗數據

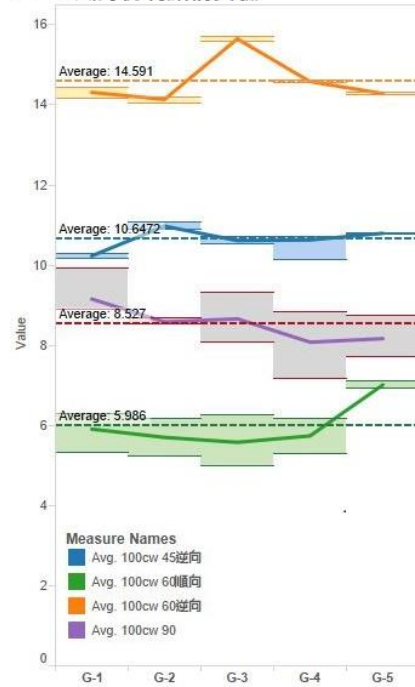
60cw 鐵釘仿刺結構實驗



800cw 鐵釘仿刺結構實驗



100cw 鐵釘仿刺結構實驗



圖九 單一結構_鐵釘仿刺結構實驗數據圖

● 單一結構鐵釘仿刺實驗說明及分析

本實驗以鐵釘配合不同的角度模擬水棲昆蟲身上的幾丁質刺。刺，水棲昆蟲以之抵住岩石表面的細縫及泥土（interlock）作為抵抗水流衝擊的方法，藉由模型理解刺的作用方式及測得數據。

- 60cw 砂紙：因為砂紙號數小代表比較粗糙，除了九十度的鐵釘有數據以外，順水流方向的所有模型都會被最小閾值的水流沖走，無法測得數據；逆水流方向的所有模型，都不會被最大閾值的水流沖走，無法測得數據。
- 100cw 砂紙：順水流方向的所有模型，除了六十度以外的模型，都會被最小閾值的水流沖走，無法測得數據；逆水流方向的模型中，鐵釘夾 30 度的模型在閾值開到最大時不會被沖走，無法測得數據，可以測得的數據中，抵抗水流的能力強弱為：60 度逆向>45 度逆向>90 度>60 度順向，由數據可以發現，逆水流方向的刺可以提供較強的沖擊適應能力，這和直接在溪流中觀察到的現象相符。
- 800cw 砂紙：為最細的砂紙號數，只有 30 度逆向、45 度逆向及 90 度可以撐得住，其餘模型都會被最小閾值的水流沖走，無法測得數據。

在可以觀測的數據中，60cw 砂紙上，30 度逆向抗急流能力最好（以手拖拉增加沖擊力道，因為不科學所以沒有紀錄）；100cw 砂紙上 60 度逆向鐵釘抗急流能力最好；800cw 砂紙上，45 度逆向抗急流能力最好。

iii. 結論

可觀測數據中，各號砂紙抗急流能力最好者：

- 60cw：30°逆向
- 100cw：60°逆向
- 800cw：45°逆向

不一定角度越大或越小對於攀附能力就有一定的幫助，不同號數的砂紙都有其對應的、比較好的角度，這和我們在觀察水棲昆蟲實體時發現其上方擁有許多不同角度的刺可能有相當的關係（昆蟲需要適應不同的接觸介面）。

丙、同角度不同號數砂紙實驗

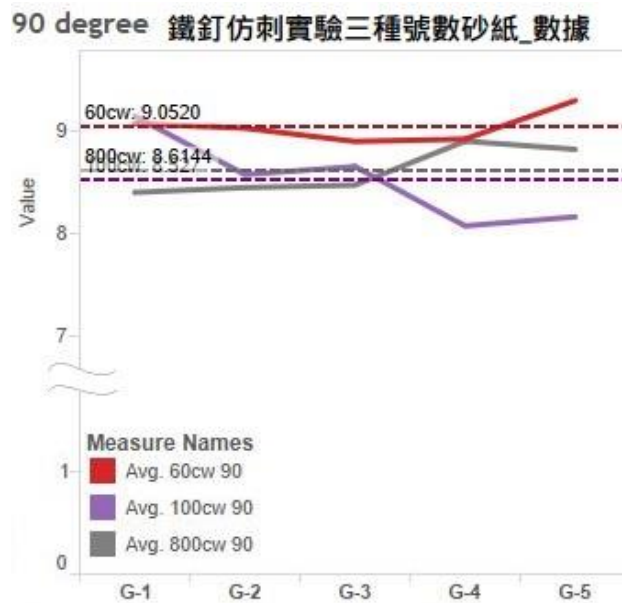
i. 實驗步驟

- 以相同重量、相同形狀（正方形）的油性黏土，以鐵釘仿照水棲昆蟲身上的刺。
- 測量擁有同角度的刺的模型在不同號數砂紙上之水阻力大小。

ii. 實驗數據及分析

同個模型之流體阻力大小如下所示。

	60cw	100cw	800cw
平均	9.0520g	8.527g	8.6144g



圖十 以相同角度測驗不同號數砂紙（鐵釘與模型夾 90 度）

- 100cw 及 800cw 的數據沒有很大的區別，推測是對於砂紙上的突起及隙縫來說，鐵釘的尖端都無法穩定的卡在縫中，也就是所謂的尺度問題導致。

iii. 結論

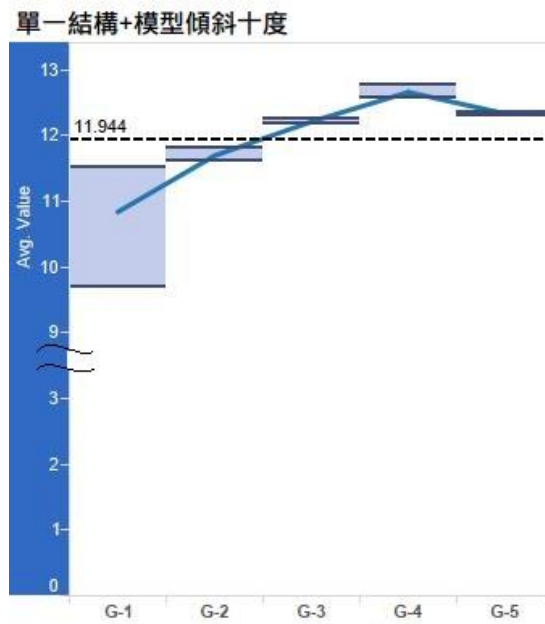
- 在砂紙號數最低時（最粗時），抗急流能力最好。

丁、單一結構鐵釘仿刺 45 度順向加模型本體傾斜十度

i. 實驗步驟

- 製作一個鐵釘與模型夾 45 度順向加上模型本體傾斜十度的模型，與單一結構鐵釘仿刺 45 度順向在 100cw 砂紙上做比較（本來單一結構鐵釘仿刺 45 度順向在 100cw 砂紙上根本撐不住）。
- 測量本模型在 100cw 砂紙上之水阻力大小。

ii. 實驗數據及分析



圖十一 鐵釘與模型夾 45 度順向，模型與水道夾十度在 100cw 砂紙上

- 鐵釘與模型夾 45 度（順向），在 100cw 的砂紙上本來是會被沖走的（所以在 100cw 的數據圖上沒有被顯示），但在模型本身以迎水面低、背水面高，傾斜十度的狀況下，能夠抵抗的衝擊力道有所提升，可以再一次的驗證前面的同重不同形的實驗結果

iii. 結論

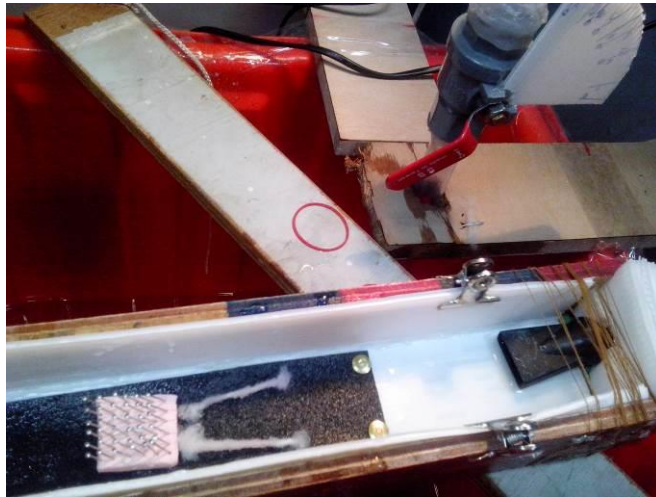
- 本模型與模型夾 45 度（順向）在 100cw 的砂紙上相比，抗急流能力有顯著的提升（平均能抵抗 11.944

克的沖擊力道)，可以得知體型及結構的合成對於抗急流能力是有所幫助的。

戊、複合模型（刺加傾斜十度加兩根纏繞棉的鉤子）

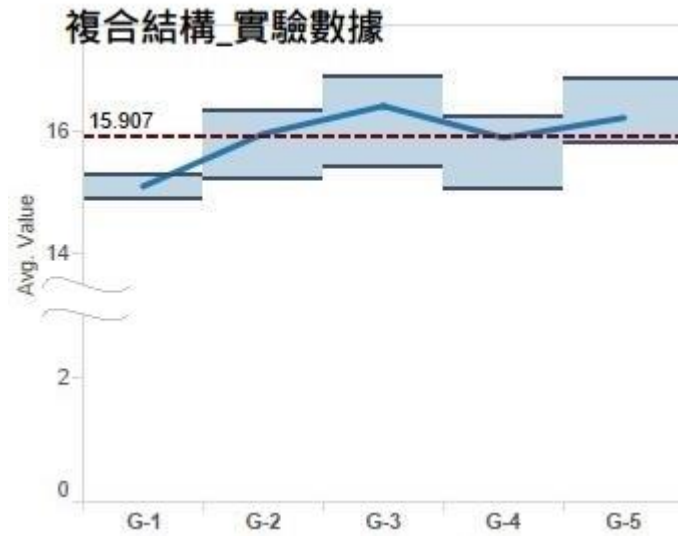
i. 實驗步驟

- 本複合實驗模型應用了上一個實驗模型（鐵釘與模型夾 45 度順向，且模型與水道夾十度在 100cw 上），在此模型上增添了兩根纏繞了棉的鉤子（以三根細鐵絲互相纏繞模擬昆蟲的足以及爪，纏繞時混入棉來模擬昆蟲腳上的剛毛）。
- 與鐵釘與模型夾 45 度（順向）比較。



圖十二 複合模型照片

ii. 實驗數據及分析



圖十三 複合結構模型實驗數據

- 實驗發現新增添的結構能有效增加模型的耐沖擊能力（約 4 克），而且在模型被水流給沖起時，新增添的“勾爪”及上面的“剛毛”可以勾住砂紙，就像我們在沖真的水棲昆蟲時一樣，所以我們可以知道新增加的結構是有用的。
- 在我們觀察實際的昆蟲蟲體時，我們可以發現一隻水棲昆蟲身上一定不會只有一種適應急流的機制。以大型水棲昆蟲石蛉為例，石蛉擁有爪子及尾爪（對應我們實驗中的鉤子）幫助牠固定在岩石上，牠在牠的腹部、足、以及尾部也都是一些刺及剛毛（對應實驗中的鐵釘及棉），而當牠遇到極強的水流沖擊時，會把自己的頭壓低、胸部往上推，製造出一個斜面（模型體與砂紙面的夾角），把水切開，讓身體後半部所受的水阻減小。

iii. 結論

- 與“單一結構鐵釘仿刺 45 度順加模型本體傾斜十度”比較，複合模型增加了仿製的勾以及剛毛，承受能力平均增加了 3.963 克，等於增加了 33.17% 承受能力，顯示新增添的仿製抗急流結構是有效的。

(3) 第三階段（建立水棲昆蟲急流環境適應機制的模型）

I. 建立水棲昆蟲急流適應的模式

實驗步驟

- a. 利用觀察結果，和陸生生物提高附著力之模式(壁虎效應) 進行比較，以找出水中生物提高附著力之可能模式。
- b. 推論水中急流適應的可行性模型。

結果與結論

- a. 良好的急流適應體型為扁平、流線型的。如果在迎水面有可以將水切開的構造，水的沖擊會減少。
- b. 勾、刺、剛毛、尾巴、爪，這些長在水棲昆蟲上的構造在經過實驗後可以得知對於增加急流適應能力是有效的。如果擁有額外的動力來源可以將攀附部位、身體、以及攀附表面抓在一起，適應急流能力將更有效率（活的水棲昆蟲與水棲昆蟲標本的差異）。
- c. 與陸上生物的表面微結構（奈米等級）相比，水棲昆蟲的表面微結構（微米等級）尺度相對比較大，原因應該是因為使用的原理不同，陸生生物可以利用奈米等級的微結構來增加凡德瓦力，以提升附著力的大小。但水中生物會因為水分子表面張力的影響，而無法利用凡德瓦力，因而結構大多為微米等級，所以應該是以毛細作用為主。

II. 將本實驗模型提供給相關仿生科技做為參考

- 本實驗提供了一個在高中生的能力範圍之內可以做到的水棲昆蟲急流適應能力探討。
- 因為實驗設備的製作過程不夠精細，如：抽水馬達只能買水族箱用的，出水量不夠穩定、閥門不夠精細、滑輪組有阻力會增加誤差、出水口及水管的銜接因為是自己加熱而不是一體成形所製成，有時候會小漏水、實驗器材會因為其他同學的經過甚至小碰撞而出現誤差.....，本實驗定性的意義大於定量。
- 未來如果有人要繼續相關研究，建議先從試驗器材建構起，另外，在這一次的實驗中本來想要加入實際的水棲昆蟲抗急流能力定量實驗，但因為昆蟲是活的，很難去控制牠往所需的方向走，最後定量實驗做不出來，這是未來要克服的。
- 這次的模型實驗中發現勾、刺可以提供攀附力，而剛毛可以起很大的

攀附輔助效果，建議接下來的實驗應加強勾、刺、以及剛毛的複合結構實驗。

- 憑高中生的資源無法充分觀察、實驗到微米級結構，但依照壁虎、蜘蛛等類的文獻可以知道，表面微結構是增加攀附、吸附能力的重要環節，建議接下來的實驗透過與大學或產業界的結合，加強研究這一方面。
- 以傳統製程而言，勾、刺、剛毛、尾巴、爪這些巨觀的結構是比較好製作、應用的，但是在這次的實驗中因為有幸可以跟清大的材料研究所合作，看到了許多水棲昆蟲身上的微米級表面微結構，經討論後覺得這些微米級表面微結構，透過毛細現象（我們自己的推測）所產生的效應有其研究價值，應與新的製程結合進行發展。
- 本實驗中所探討的元素（勾、刺、剛毛、尾巴、爪、表面微結構.....等），可以應用在水面下的接著方式的改進及研發，例如：有些水面下的器具需要可撕黏式的結合方式，但魔鬼氈在水面下的接合能力沒有陸上好，可以改進、又或者透過微米級的表面微結構研發出方便黏附於潮濕壁面上的貼片.....等。
- 本實驗提供了一個基本的研究方法及研究方向，希望未來還能有更多人來將它完善，成為一個更具有科學研究精神的實驗方式。

五、參考資料

摩擦力

- 一、丁振卿 (2011)。摩擦力 Frictional Force。
<http://cct.me.ntut.edu.tw/ccteducation/chchting/aiahtm/statics/lecture2010-2/friction.pdf>
- 二、奧克斯雷德 (2011)。摩擦力和阻力。哈爾濱：哈爾濱工業大學出版社

靜力學

- 一、張超群、劉成群 (2011)。靜力學。台北：新文京

流體力學

- 一、安德森 (2010)。計算流體力學入門。北京：清華大學出版社
- 二、李祥 (2010)。流體力學觀念剖析(上)(10版)。台北：鼎茂
- 三、李祥 (2010)。流體力學觀念剖析(下)(9版)。台北：鼎茂

水棲昆蟲

- 一、田佩玲、徐崇斌。水棲昆蟲分類與鑑定。
<http://www.community-univ.org.tw/empowerment/download/water.pdf>
Lab Insect Conservation Dept Entomology,NTU
- 二、林春吉 (2011)。台灣水生與濕地植物生態大圖鑑(上)+(中)+(下)。
台北：天下文化
- 三、Stanislav Gorb (2011)。Attachment Devices of Insect Cuticle。
Kluwer Academic publishers
- 四、福山植物園水棲昆蟲網
http://aqua.weddingart.us/?page_id=326
- 五、水質優劣的重要指標—水棲昆蟲 (Aquatic insects)

http://life.nthu.edu.tw/~labtcs/Salmon/life_cycle/water_worm.htm

六、水棲昆蟲

<http://www.tmps.tyc.edu.tw/bio/course52.html>

六、附錄

附錄一：實驗數據

說明：由於馬達每次的出水量並不是非常的穩定，為了取得較穩定之數據，所以採用在適當時間多次測量的方式。方法是先將模型置於水流中沖擊兩分鐘以求到達穩定狀態後，然後每十秒紀錄一次讀數，連續紀錄十次後得到一組數據即為 G-1。然後將馬達電源關掉而不改變閥值，也就是出水量，重置模型，一樣沖擊兩分鐘達穩定狀態後，每十秒紀錄一次，再得一組數據稱為 G-2，如此反覆紀錄，即得到 G-1、G-2……等數據，單位為公克。

1. 同重不同型~水流衝擊實驗

A 模型

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
1	17.80	17.64	17.14	17.63	17.96	17.58	18.19	17.65	17.93	19.94
2	17.73	17.34	16.89	17.43	17.61	17.34	18.09	17.34	17.82	18.58
3	17.60	17.23	16.82	17.39	17.34	17.24	17.90	17.28	17.76	17.63
4	17.40	17.06	16.82	17.22	17.29	17.13	17.75	17.21	17.75	17.63
5	17.35	17.05	16.67	17.08	17.16	17.04	17.64	17.17	17.63	17.27
6	17.20	16.91	16.59	17.04	17.01	17.03	17.44	16.86	17.56	17.15
7	17.20	16.88	16.56	17.03	16.96	16.97	17.32	16.81	17.34	17.02
8	17.04	16.79	16.56	16.87	16.96	16.94	17.28	16.73	17.32	16.98
9	17.00	16.73	16.39	16.87	16.86	16.71	17.03	16.42	17.25	16.90
10	16.86	16.07	16.36	16.33	16.19	16.59	16.89	16.32	17.20	16.79
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
Average	17.32	16.97	16.68	17.09	17.13	17.06	17.55	16.98	17.56	17.59
Max	17.80	17.64	17.14	17.63	17.96	17.58	18.19	17.65	17.93	19.94
Min	16.86	16.07	16.36	16.33	16.19	16.59	16.89	16.32	17.20	16.79
Std Dev.	0.317	0.419	0.240	0.364	0.474	0.289	0.437	0.423	0.262	0.978
Average-M&m	17.21									
Max-M&m	17.80									
Min-M&m	16.54									

B 模型

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
1	10.29	10.76	9.59	10.06	10.07	10.01	9.51	9.92	9.33	10.00
2	10.46	10.68	9.50	10.00	10.79	10.96	9.46	9.03	9.42	10.38
3	10.33	10.65	9.49	9.96	10.51	9.95	9.41	9.46	9.47	10.32
4	10.90	10.59	9.51	9.90	10.50	9.92	9.41	9.38	9.45	10.28
5	10.77	10.55	10.11	9.91	10.46	9.87	9.39	9.36	9.43	10.22
6	10.68	10.53	10.03	9.88	10.41	9.82	9.42	9.78	9.41	10.22
7	10.65	10.51	10.06	9.85	10.38	9.83	9.41	9.60	9.41	10.26
8	10.58	10.49	10.03	9.85	10.32	9.78	9.37	9.57	9.45	10.24
9	10.56	10.71	9.99	9.82	10.27	9.78	9.36	9.53	9.39	10.21
10	10.52	10.38	9.98	9.80	10.26	9.77	9.34	9.52	9.44	10.19
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
Average	10.57	10.59	9.83	9.90	10.40	9.97	9.41	9.52	9.42	10.23
Max	10.90	10.76	10.11	10.06	10.79	10.96	9.51	9.92	9.47	10.38
Min	10.29	10.38	9.49	9.80	10.07	9.77	9.34	9.03	9.33	10.00
Std Dev.	0.188	0.116	0.267	0.082	0.191	0.357	0.049	0.242	0.039	0.100
Average-M&m	9.99									
Max-M&m	10.27									
Min-M&m	9.72									

C 模型

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
1	20.47	20.35	19.53	20.46	19.64	19.54	20.48	19.76	20.68	20.58
2	20.04	20.11	19.69	20.25	19.57	19.79	19.81	20.84	19.97	20.75
3	19.45	20.75	19.62	20.08	19.67	19.59	19.47	19.83	20.47	21.23
4	20.44	20.68	19.38	20.59	19.62	20.04	19.84	19.68	20.54	20.36
5	20.75	20.32	19.4	20.19	19.39	20.64	20.24	20.45	20.42	21.43
6	20.26	20.38	19.88	19.97	19.84	20.27	19.78	19.93	20.27	20.95
7	20.47	20.45	19.57	20.07	19.46	19.84	19.99	20.08	20.72	20.44
8	20.54	20.89	19.45	20.71	19.58	20.64	20.25	20.04	20.56	21.72
9	20.28	20.8	19.59	20.06	19.77	20.36	19.89	19.48	20.31	20.48
10	19.81	20.43	19.41	19.94	19.66	20.01	20.09	19.99	20.72	20.48
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
Average	20.25	20.52	19.55	20.23	19.62	20.07	19.98	20.01	20.47	20.84
Max	20.75	20.89	19.88	20.71	19.84	20.64	20.48	20.84	20.72	21.72
Min	19.45	20.11	19.38	19.94	19.39	19.54	19.47	19.48	19.97	20.36
Std Dev.	0.387	0.250	0.155	0.267	0.132	0.397	0.290	0.392	0.236	0.473
Average-M&m	20.16									
Max-M&m	20.67									
Min-M&m	19.63									

D 模型

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
1	12.86	14.02	13.31	12.99	13.81	13.13	12.25	14.82	12.67	13.65
2	12.77	14.78	14.32	13	14.09	13.31	11.97	14.91	13.25	13.76
3	12.86	15.03	14.61	13	14.35	13.4	12.18	15.2	13	14.01
4	12.83	15.12	14.81	12.95	14.35	13.5	12.14	14.67	13.28	14.19
5	12.62	14.55	14.84	12.92	14.43	13.65	12.25	14.46	13.42	14.47
6	12.49	14.31	14.88	12.92	14.37	13.9	12.29	14.23	13.31	14.16
7	13.09	15.54	14.66	12.94	14.34	13.72	12.3	14.57	13.39	14.86
8	12.83	14.79	14.47	12.95	14.55	13.81	12.43	14.4	13.44	14.68
9	12.97	15.2	14.39	12.94	15.09	13.95	12.49	14.45	13.66	14.41
10	13.44	15.21	14.99	12.9	15.02	14.75	12.38	14.51	13.67	14.74
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
Average	12.88	14.86	14.53	12.95	14.44	13.71	12.27	14.62	13.31	14.29
Max	13.44	15.54	14.99	13.00	15.09	14.75	12.49	15.20	13.67	14.86
Min	12.49	14.02	13.31	12.90	13.81	13.13	11.97	14.23	12.67	13.65
Std Dev.	0.259	0.461	0.482	0.035	0.383	0.450	0.150	0.285	0.298	0.411
Average-M&m	13.63									
Max-M&m	14.15									
Min-M&m	13.19									

E 模型

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
1	8.37	8.21	8.58	8.58	8.24	7.98	8.7	7.77	8.55	8.77
2	8.35	8.17	8.58	9.13	8.2	7.96	8.72	7.69	8.51	8.75
3	8.54	8.46	8.59	9.04	8.18	8.24	8.71	8.23	8.5	8.73
4	8.49	8.41	8.58	9.01	8.15	8.2	8.72	8.71	8.48	8.77
5	8.74	8.38	8.55	8.97	8.13	8.16	8.71	8.6	8.47	8.84
6	8.69	8.36	8.5	8.92	8.08	8.15	8.71	8.53	8.46	8.78
7	8.65	8.32	8.52	8.88	8.04	8.12	8.68	8.51	8.5	8.81
8	8.59	8.31	8.53	8.88	8.02	8.1	8.66	8.51	8.51	8.82
9	8.58	8.29	8.48	8.87	8.06	8.06	8.65	8.49	8.5	8.81
10	8.57	8.28	8.46	8.84	8.03	8.03	8.67	8.52	8.5	8.8
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
Average	8.56	8.32	8.54	8.91	8.11	8.10	8.69	8.36	8.50	8.79
Max	8.74	8.46	8.59	9.13	8.24	8.24	8.72	8.71	8.55	8.84
Min	8.35	8.17	8.46	8.58	8.02	7.96	8.65	7.69	8.46	8.73
Std Dev.	0.127	0.088	0.046	0.148	0.078	0.092	0.026	0.351	0.025	0.034
Average-M&m	8.44									
Max-M&m	8.60									
Min-M&m	8.31									

F 模型

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
1	11.80	12.16	11.39	11.43	11.47	11.70	12.10	11.93	11.95	12.11
2	11.80	12.06	11.24	11.36	11.51	11.68	12.09	11.89	11.90	12.06
3	11.83	12.00	11.39	11.31	11.57	11.61	12.10	11.89	11.88	12.12
4	11.82	11.93	11.28	11.28	11.74	11.56	12.08	11.87	11.86	11.68
5	11.66	11.97	11.18	11.27	11.69	11.55	12.10	11.92	11.89	11.74
6	11.90	11.95	11.24	11.29	11.47	11.55	12.07	11.95	11.82	12.13
7	11.99	12.01	11.33	11.56	11.68	11.52	12.03	11.91	11.83	12.16
8	11.96	11.99	11.49	11.60	11.69	11.54	12.10	12.17	11.82	11.89
9	11.93	11.97	11.28	11.60	11.69	11.57	12.09	12.04	11.82	11.78
10	11.83	11.95	11.49	11.56	11.65	11.51	12.10	12.13	11.82	12.25
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
Average	11.85	12.00	11.33	11.43	11.62	11.58	12.09	11.97	11.86	11.99
Max	11.99	12.16	11.49	11.60	11.74	11.70	12.10	12.17	11.95	12.25
Min	11.66	11.93	11.18	11.27	11.47	11.51	12.03	11.87	11.82	11.68
Std Dev.	0.096	0.068	0.107	0.141	0.102	0.065	0.022	0.106	0.045	0.201
Average-M&m	11.80									
Max-M&m	11.93									

2. 單一結構_鐵釘仿刺實驗

60cw 90

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	9.16	9.11	8.92	8.99	9.32
2	9.13	9.06	8.86	8.98	9.31
3	9.12	9.06	8.93	8.95	9.3
4	9.09	9.04	8.89	8.94	9.29
5	9.09	9.03	8.87	8.93	9.28
6	9.12	9.04	8.91	8.87	9.36
7	8.96	9.04	8.92	8.93	9.27
8	9.01	8.98	8.93	8.95	9.34
9	9.09	9	8.93	8.86	9.28
10	9.05	9	8.9	8.89	9.32
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	9.08	9.04	8.91	8.93	9.31
Max	9.16	9.11	8.93	8.99	9.36
Min	8.96	8.98	8.86	8.86	9.27
Std Dev.	0.060	0.037	0.025	0.044	0.029
Average-M&m	Max-M&m	Min-M&m			
	8.90	8.93	4.69		

100cw 45 逆

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	10.29	11.07	10.72	10.71	10.82
2	10.27	11.09	10.66	10.68	10.82
3	10.26	11	10.63	10.71	10.8
4	10.3	10.97	10.63	10.68	10.79
5	10.23	10.96	10.63	10.7	10.78
6	10.21	10.94	10.58	10.67	10.77
7	10.23	10.95	10.6	10.67	1.78
8	10.18	10.91	10.54	10.67	10.79
9	10.16	10.92	10.57	10.14	10.8
10	10.18	10.9	10.56	10.65	10.79
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	10.23	10.97	10.61	10.63	9.89
Max	10.30	11.09	10.72	10.71	10.82
Min	10.16	10.90	10.54	10.14	1.78
Std Dev.	0.049	0.065	0.053	0.173	2.851
Average-M&m	Max-M&m	Min-M&m			
10.63	10.43	6.84			

100cw 60 逆

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	14.45	14.2	15.71	14.59	14.32
2	14.41	14.2	15.7	14.57	14.33
3	14.37	14.19	15.71	14.57	14.29
4	14.33	14.15	15.64	14.57	14.26
5	14.34	14.15	15.63	14.59	14.3
6	14.28	14.13	15.61	14.59	14.29
7	14.26	14.13	15.64	14.56	14.26
8	14.26	14.13	15.64	14.56	14.25
9	14.23	14.04	15.61	14.58	14.27
10	14.17	14.04	15.58	14.62	14.25
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	14.31	14.14	15.65	14.58	14.28
Max	14.45	14.20	15.71	14.62	14.33
Min	14.17	14.04	15.58	14.56	14.25
Std Dev.	0.086	0.058	0.045	0.018	0.029
Average-M&m	Max-M&m	Min-M&m			
15.65	14.59	7.18			

100cw 90

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	9.08	8.63	8.14	7.17	7.71
2	9.01	8.69	8.12	8.17	7.71
3	8.99	8.61	8.08	8.83	8.44
4	8.94	8.58	8.1	8.12	8.26
5	8.94	8.59	9.1	8.1	8.2
6	8.92	8.55	8.83	8.1	8.18
7	9.92	8.54	8.38	8.08	8.16
8	9.92	8.54	9.33	8.08	8.14
9	8.89	8.54	9.27	8.06	8.11
10	8.92	8.54	9.24	8.05	8.74
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	9.15	8.58	8.66	8.08	8.17
Max	9.92	8.69	9.33	8.83	8.74
Min	8.89	8.54	8.08	7.17	7.71
Std Dev.	0.408	0.050	0.545	0.395	0.304
Average-M&m	Max-M&m	Min-M&m			
8.71	8.00	4.52			

100cw 60 順

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	5.38	5.23	5.02	5.39	7.11
2	5.34	5.41	5	5.33	7.06
3	6.3	5.41	5.43	5.31	7.03
4	6.12	5.93	5.39	5.3	7.03
5	6.07	5.76	5.36	5.86	7.01
6	6.02	5.7	5.76	6.16	7
7	5.99	5.66	5.71	6.06	7
8	5.97	5.63	5.67	6.02	6.97
9	5.95	6.16	6.26	5.98	6.94
10	5.93	6.11	6.17	5.96	6.96
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	5.91	5.70	5.58	5.74	7.01
Max	6.30	6.16	6.26	6.16	7.11
Min	5.34	5.23	5.00	5.30	6.94
Std Dev.	0.308	0.304	0.425	0.357	0.050
Average-M&m	Max-M&m	Min-M&m			
5.63	5.73	3.58			

800cw 30 逆

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	16.05	15.33	16.12	16.38	15.84
2	16.87	15.98	16.18	16.57	16.26
3	16.77	15.97	15.88	16.08	15.64
4	16.14	16.47	15.61	16.91	16.94
5	16.15	16.94	16.58	16.75	16.09
6	16.34	17.44	16.59	16.6	15.19
7	16.27	17.13	15.89	16.98	15.79
8	16.46	16.24	15.56	16.57	16.19
9	15.96	15.58	15.86	15.99	15.87
10	16.87	16.48	16.82	16.08	16.39
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	16.39	16.36	16.11	16.49	16.02
Max	16.87	17.44	16.82	16.98	16.94
Min	15.96	15.33	15.56	15.99	15.19
Std Dev.	0.341	0.675	0.432	0.351	0.473
Average-M&m	Max-M&m	Min-M&m			
16.19	16.49	8.71			

800cw 45 逆

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	15.2	16.77	17.42	16.78	16.18
2	15.28	16.98	16.92	16.83	16.37
3	15.28	17.82	16.94	16.53	16.96
4	15.12	17	16.82	16.6	16.48
5	16.37	17.5	17.75	16.88	16.81
6	16.89	16.83	17.42	17.26	16.46
7	17.93	17.16	17.41	17.2	16.94
8	17.28	17.16	14.26	16.85	16.9
9	17.96	17.45	17.49	17.29	16.5
10	17.64	17.15	17.48	16.83	16.85
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	16.50	17.18	16.99	16.91	16.65
Max	17.96	17.82	17.75	17.29	16.96
Min	15.12	16.77	14.26	16.53	16.18
Std Dev.	1.194	0.325	1.006	0.264	0.278
Average-M&m	Max-M&m	Min-M&m			
16.01	16.91	8.62			

800cw 90

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	8.57	8.56	8.48	8.99	9.03
2	8.54	8.55	8.47	8.97	8.95
3	8.49	8.51	8.39	8.96	8.29
4	8.43	8.48	8.36	8.93	8.88
5	8.49	8.45	8.32	8.9	8.89
6	8.35	8.42	8.28	8.91	8.87
7	8.34	8.4	8.3	8.97	8.88
8	8.3	8.39	8.27	8.83	8.85
9	8.28	8.35	8.98	8.82	8.82
10	8.26	8.42	8.92	8.81	8.82
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	8.41	8.45	8.48	8.91	8.83
Max	8.57	8.56	8.98	8.99	9.03
Min	8.26	8.35	8.27	8.81	8.29
Std Dev.	0.113	0.070	0.260	0.068	0.199
Average-M&m	Max-M&m	Min-M&m			
8.63	8.90	4.61			

3. 複合結構實驗

單一結構+模型傾斜十度

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	9.70	11.80	12.24	12.77	12.34
2	9.69	11.78	12.23	12.72	12.33
3	11.51	11.74	12.20	12.68	12.34
4	11.23	11.69	12.23	12.68	12.34
5	11.15	11.71	12.20	12.63	12.34
6	11.10	11.66	12.22	12.66	12.33
7	11.05	11.68	12.21	12.61	12.33
8	11.00	11.63	12.18	12.64	12.32
9	10.98	11.61	12.20	12.60	12.33
10	10.94	11.61	12.17	12.58	12.30
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	10.84	11.69	12.21	12.66	12.33
Max	11.51	11.80	12.24	12.77	12.34
Min	9.69	11.61	12.17	12.58	12.30
Std Dev.	0.622	0.067	0.023	0.058	0.013
Average-M&m	11.88				
Max-M&m	12.11				
Min-M&m	11.69				

複合結構

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
1	15.07	15.21	16.82	15.55	15.83
2	14.87	16.17	16.38	15.81	16.10
3	14.95	15.86	16.87	15.88	16.22
4	15.07	15.99	16.51	15.84	16.10
5	15.17	16.31	15.39	16.05	16.25
6	15.23	16.08	16.83	16.22	16.25
7	15.08	15.71	16.61	16.15	16.82
8	15.03	16.01	16.22	15.06	16.40
9	15.20	15.83	16.53	16.12	15.79
10	15.29	16.31	15.83	16.15	16.31
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5
Average	15.10	15.95	16.40	15.88	16.21
Max	15.29	16.31	16.87	16.22	16.82
Min	14.87	15.21	15.39	15.06	15.79
Std Dev.	0.129	0.326	0.475	0.355	0.292
Average-M&m	15.78				
Max-M&m	16.16				