

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

佳作

080103

「冰」不厭「炸」－冰棒棍骨牌的研究

學校名稱：彰化縣溪州鄉水尾國民小學

作者： 小五 鐘于琇 小五 魯姣茵 小六 鐘珮綺	指導老師： 林碧珊 吳建儒
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：冰棒棍、骨牌、彈力

摘 要

本研究首先探討井字型、田字型、沙漏型與雙三角型等四種冰棒棍骨牌結構的彈開效果(音量、彈開高度和反應時間)。發現井字結構效果最好，且骨牌彈開高度會呈現遞增到一定高度後不再增加。接著研究井字型結構的疏密度、厚度、在不同材質上彈開以及兩端為起點等變因，對彈開效果的影響，結果顯示：(1)骨牌的疏密度 1.40 公分時，彎曲高度最高，彈開效果最好；(2)厚度 2.0mm 骨牌的彎曲高度大，彈開效果較好；(3)地面材質平坦且堅硬時，骨牌彈開效果較佳；(4)以兩端為起點施放骨牌，能量的釋放具有方向性。我們並首創了「彈力點分析法」，可以有效的解析彈開效果。最後研究骨牌結構間的銜接，讓骨牌可以做到轉彎、分岔等動作，也製作了兩組環保鞭炮。

壹、研究動機

一次聖誕節的活動中，老師教我們在籃球場上用冰棒棍排骨牌，在全校同學的期待下，骨牌進行的並不順利，卡住了好幾次，這讓我們興起了想要研究的念頭：「**為什麼冰棒棍能彈得那麼高呢？裡面有哪些物理的原理？要怎麼編排才能讓骨牌順利前進？**」我們希望能先透過研究冰棒棍骨牌的結構排列找到一些規則，並在生活的情境中做實際運用，玩出冰棒棍骨牌的新創意。

作品與教材相關性：

自然與生活科技領域：康軒版第九冊力與運動

自然與生活科技領域：南一版第六冊力的大小和方向

貳、研究目的

- 一、探討四種不同**結構**冰棒棍骨牌的彈開效果。
- 二、探討以不同**疏密度**編排井字型冰棒棍骨牌的彈開效果。
- 三、探討以不同**厚度**冰棒棍編排井字型骨牌的彈開效果。
- 四、探討在不同**材質**上井字型冰棒棍骨牌的彈開效果。
- 五、探討井字型冰棒棍骨牌分別從**兩端**開始的彈開效果。
- 六、冰棒棍骨牌的實際應用。

參、名詞解釋

- 一、冰棒棍骨牌：也被稱為 Stick Bomb(炸彈棒)，主要是利用冰棒棍的彈性，把它組裝在一起，只要拉掉其中 1 根，破壞平衡的力量，整個結構就會崩毀，來讓冰棒棍一路飛舞，製造出奇特的視覺效果。

二、冰棒棍骨牌結構：我們將查到的資料整理出來(註 2)，一共有七個可以連續組裝的結構，依據形狀將它做命名(圖 1)，嘗試組裝後發現，有四個結構可以做直線的連續組裝，分別是井字型、沙漏型、田字型、雙三角型，這將在接下來的實驗中做深入的探討。

三、彈力點: 每支被彎曲的冰棒棍而言，其中間是最高點，兩端是最低點，則稱最高點為彈力點。(圖 2)

四、彎曲高度：在彈力點上，最高點與兩端水平面的高度差。(圖 3)

五、骨牌效應：在一個相互聯繫的系統中，一個很小的初始能量就可能產生一連串的連鎖反應。(註 1)

六、彈開效果：在本研究中，彈開效果包含最大音量、彈跳高度以及反應時間。

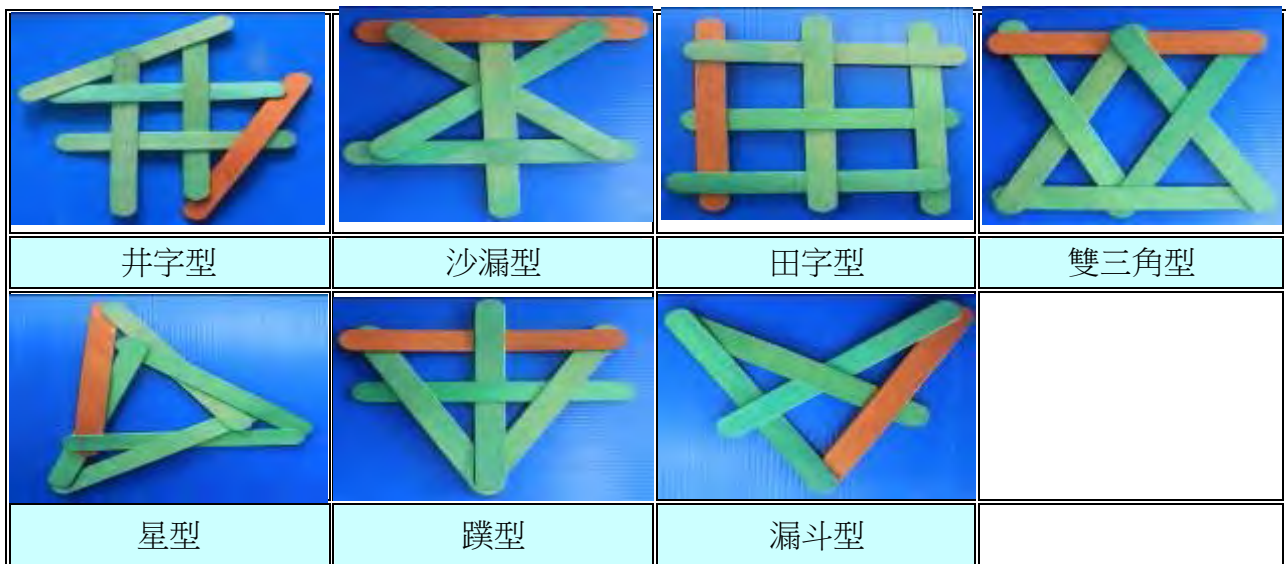
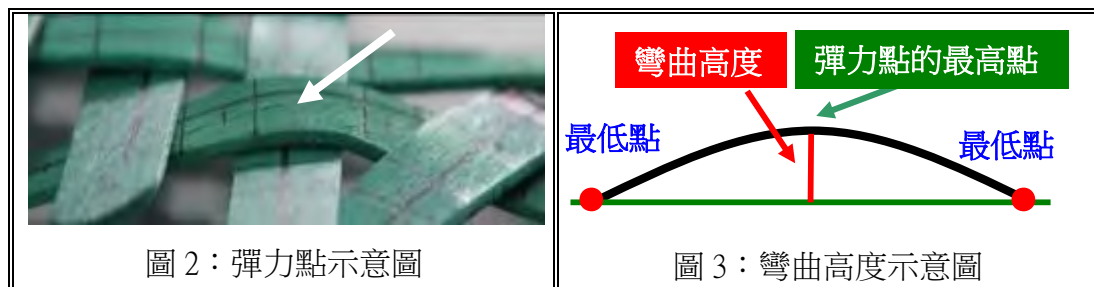



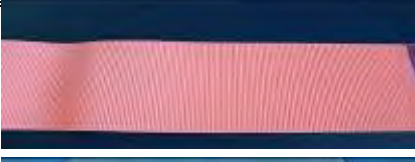






圖 1：七種骨牌結構命名結果示意圖



肆、研究設備及器材

<p>工具</p>	<p>膠帶、美工刀、剪刀、捲尺、三角板、 熱熔槍、三秒膠、地板蠟、塑膠線、 勾尺</p>		
<p>電子設備</p>	<p>數位攝影機、數位相機、腳架、 筆記型電腦、智慧型手機</p>		
<p>實 驗 用 具</p>			
<p>健康步道 (塑膠墊、 塑膠圓球)</p>		<p>瓦楞紙</p>	
<p>墊布</p>		<p>玻璃</p>	
<p>冰棒棍</p>	<p>長：15cm、寬：1.8cm、厚：1.5mm 長：15cm、寬：1.8cm、厚：2mm</p>		

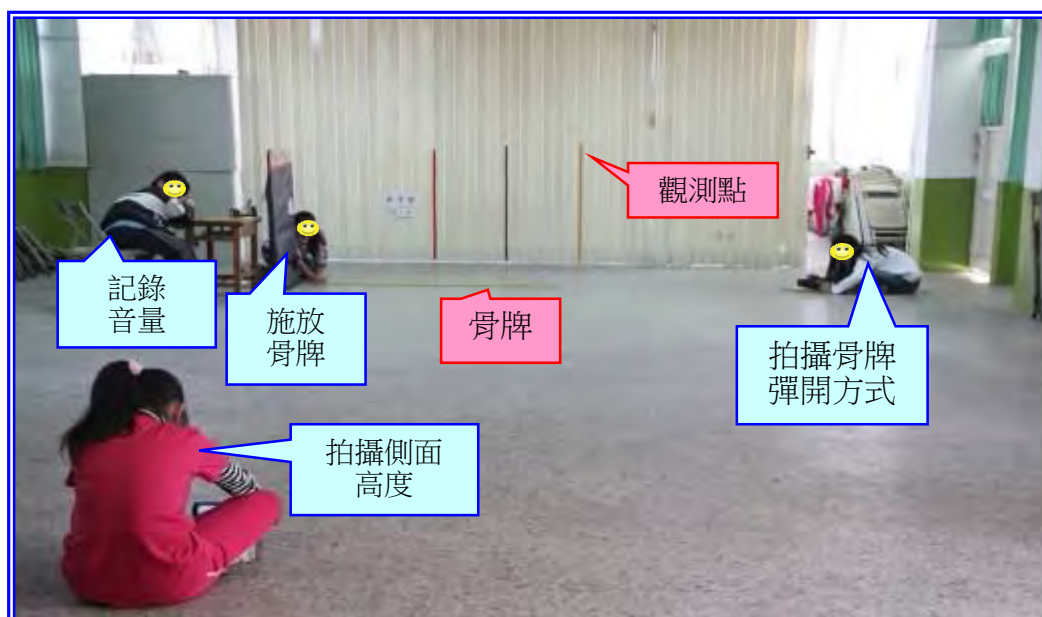


圖 4：實驗場地位置示意圖

伍、研究過程、結果與討論

實驗一：探討四種不同結構冰棒棍骨牌的彈開效果

◎ 1-1 探討四種不同結構冰棒棍骨牌的彈開音量

(一)變因控制：

- 1.操縱變因：四種排列結構的冰棒棍骨牌
- 2.不變變因：
 - (1)地面材質是磨石子地；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目；(4)控制環境音量；
 - (5)每次實驗測量音量位置相同。
- 3.應變變因：冰棒棍骨牌的彈開音量

(二)實驗步驟：

- 1.冰棒棍骨牌放到固定的位置上，將分貝計、相機定位完畢。
- 2.錄下骨牌彈開時分貝計音量變化的情形。
- 3.影片傳到電腦，並將每次音量的最大值記錄在表 1-1。
- 4.重覆以上步驟三次。

(三)實驗結果：四種結構骨牌的最大音量平均值為井字型 > 沙漏型 > 雙三角型 > 田字型。

表 1-1：不同結構骨牌彈開音量最大值一覽表

結構	次數			平均音量 (分貝)
	第一次	第二次	第三次	
井字型	70.9	72.8	73.5	72.4
雙三角型	67.2	64.5	67.3	66.3
田字型	66.5	66.1	66.0	66.2
沙漏型	72.0	70.2	70.2	70.8

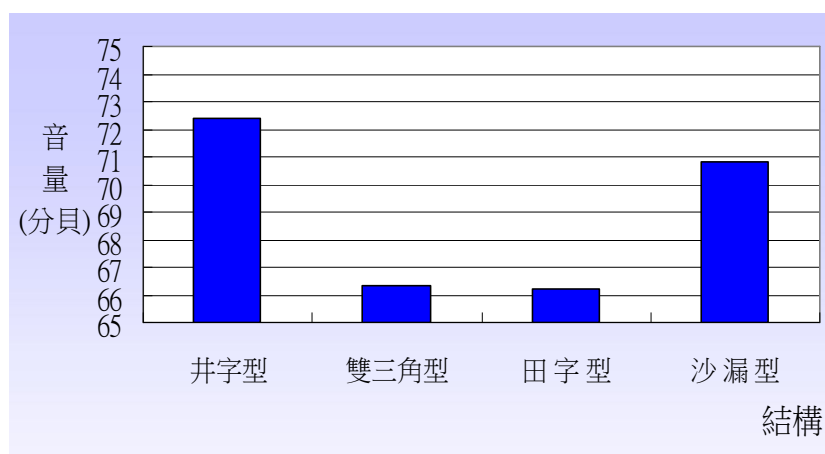


圖 1-1：不同結構骨牌最大音量平均值直條圖

◎1-2 探討四種不同結構冰棒棍骨牌彈開時的高度

(一)變因控制：

1.操縱變因：四種排列結構的冰棒棍骨牌

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地板；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目；(4)四個觀測點的位置；(5)攝影機拍攝位置；(6)固定攝影機拍攝畫面。

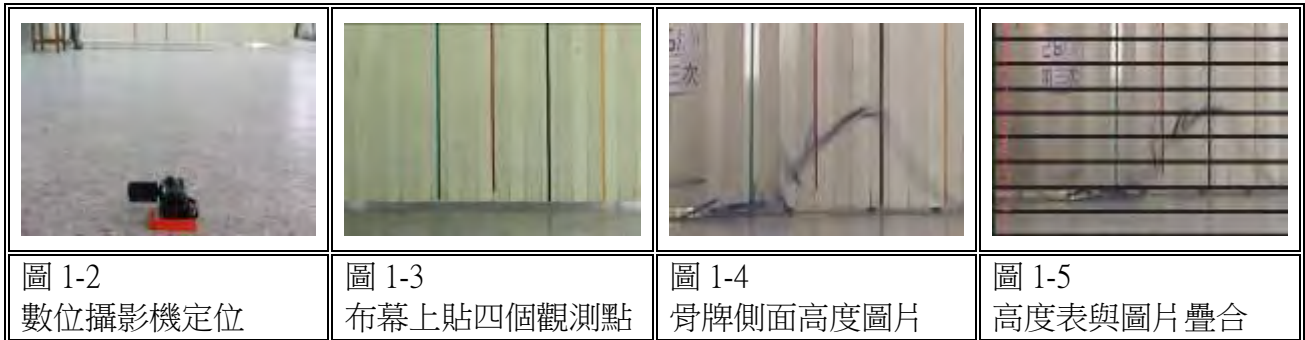
3.應變變因：冰棒棍骨牌的彈開高度

(二)實驗步驟：

1.將冰棒棍骨牌放到固定的位置上，將四種不同顏色的膠帶貼在後方布幕上當作觀測點，再把攝影機定位。

2.錄下骨牌彈開過程，將影片傳到電腦裡，用軟體擷取四個觀測點的圖片。

3.製作一個高度表，與擷取的圖片做疊合，來判斷彈跳高度，並將高度紀錄在表 1-2。



(三)實驗結果：四種結構骨牌中平均高度最高的是井字型。

表 1-2:不同結構骨牌彈開的平均高度一覽表

結構	次數			平均高度 (格)
	第一次	第二次	第三次	
井字型	5.5	5.8	5.5	5.6
雙三角型	4.3	4.0	4.0	4.1
田字型	4.0	3.5	3.5	3.7
沙漏型	4.3	4.3	4.3	4.3

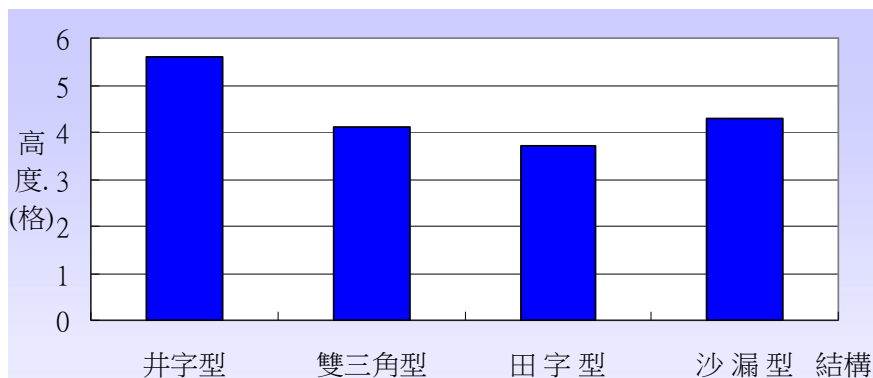


圖 1-6：不同結構骨牌的平均高度直條圖

◎1-3 探討四種不同結構冰棒棍骨牌彈開的反應時間

(一)變因控制：

- 1.操縱變因：四種排列結構的冰棒棍骨牌
- 2.不變變因：
(1)地面材質是磨石子地板；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目
- 3.應變變因：冰棒棍骨牌彈開的反應時間

(二)實驗步驟：

- 1.將長度一致的冰棒棍骨牌放到固定的位置上，再把攝影機定位至可以拍到骨牌的全部彈開過程。
- 2.錄下骨牌彈開過程，並將影片傳到電腦裡。
- 3.用軟體讀取第一根骨牌彈開到最後一根骨牌彈開，兩個時間差為反應時間，並將結果紀錄在表 1-3。

(三)實驗結果：骨牌彈開反應時間最長的是井字型。

表 1-3：不同結構骨牌彈開的反應時間一覽表

結構	次數			反應時間 (秒)
	第一次	第二次	第三次	
井字型	0.15	0.20	0.19	0.18
雙三角型	0.09	0.10	0.07	0.09
田字型	0.09	0.14	0.14	0.12
沙漏型	0.12	0.09	0.15	0.12

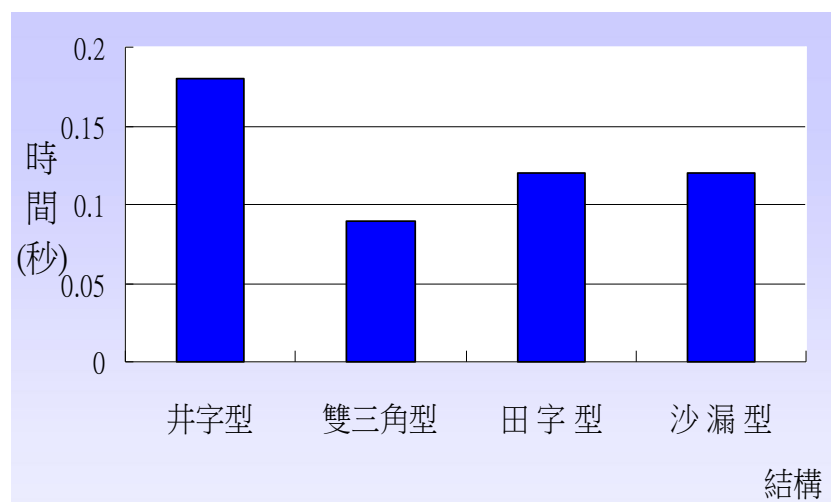


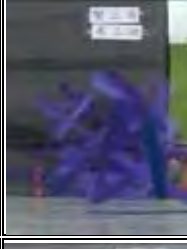







圖 1-7：不同結構骨牌彈開的反應時間直條圖

◎實驗一之發現與討論：

- (一)由實驗 1-1 和 1-2 的結果，可看出當高度越高時，所產生的音量也最大，我們推測音量的產生，主要是冰棒棍彈起時撞擊產生的聲音，與冰棒棍彈力有關。
- (二)觀察骨牌彈開時正面與側面的影片，我們將不同結構的彈開方式，整理在表 1-4，由表中發現，井字型骨牌彈開時速度較慢，但高度較高，這與其他三種結構有明顯不同，和實驗 1-2、1-3 的數據吻合，於是，我們試著找出一種方法用來解釋這些差異。

表 1-4：不同排列結構彈開方式一覽表

結構	文字描述	正面圖片	側面圖片
井字型	冰棒棍行進時並沒有 一次就彈開，高度越來 越高，到尾端時，從四 面八方彈開。		
雙三角型	全部冰棒棍先向上彈 起，再猶如開花般向外 彈開，高度不高。		
田字型	彈開後全部冰棒棍直 接向上快速彈起，高度 不高。		
沙漏型	彈開後全部冰棒棍直 接向中間軸快速彈起。		

- (三) **彈力點分析法**：將結構中的彈力點找出，再依彈開的先後次序編號，繪製成彈力點的路徑圖，以路徑圖來預測實驗結果與分析實驗數據，我們稱之為彈力點分析法。我們使用相同根數冰棒棍(20 根)編排四種結構骨牌，並從四種結構上找出彈力點，再繪製成彈力點路徑圖，結果如圖 1-8。

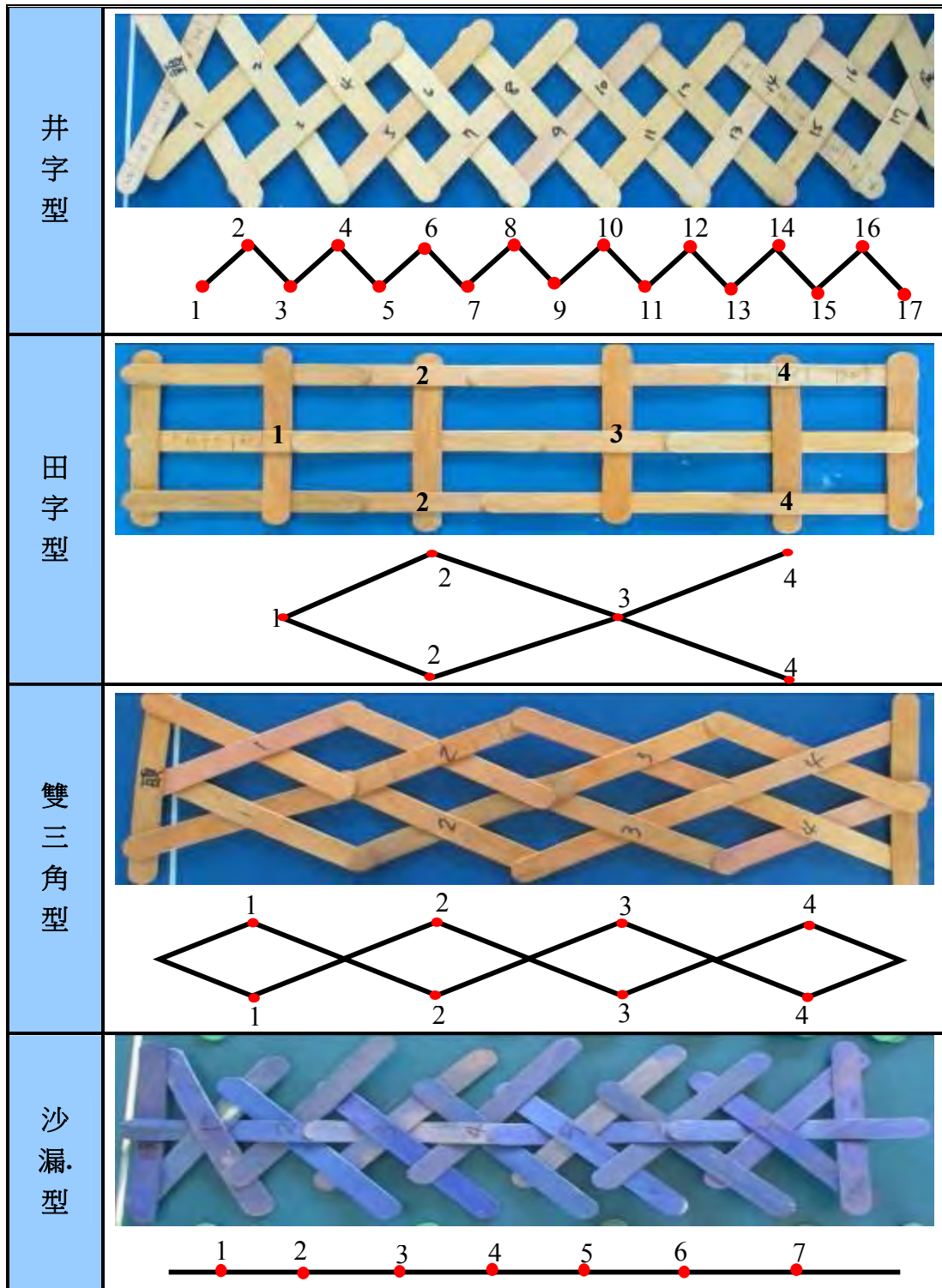


圖 1-8：四種結構骨牌的彈力點路徑圖

從彈力點路徑圖中可見：

- 1.井字型的彈力點分布最密集，所以彈開高度會最高，且音量會最大。
- 2.井字型其彈力點路徑呈波浪狀，路徑最長，其反應時間也最長，所以在視覺效果上呈現連續彈開，其他三種結構其彈力點路徑是直線型，反應時間較短，約為井字型的一半，在視覺效果上呈現瞬間彈開。

3.將實驗 1-2 中四個觀測點的平均高度記錄於表 1-5，並做成折線圖(見圖 1-9)，從圖 1-9 中可發現，井字型和沙漏型彈開高度為遞增，我們認為應與彈力點路徑是單一路線有關。

表 1-5：不同結構骨牌在四個觀測點的平均高度一覽表

結構	觀測點			
	1	2	3	4
井字型	4.3	5.0	6.0	7.0
雙三角型	4.0	4.0	4.3	4.0
田字型	4.0	3.7	3.3	3.7
沙漏型	3.7	4.0	4.3	5.0

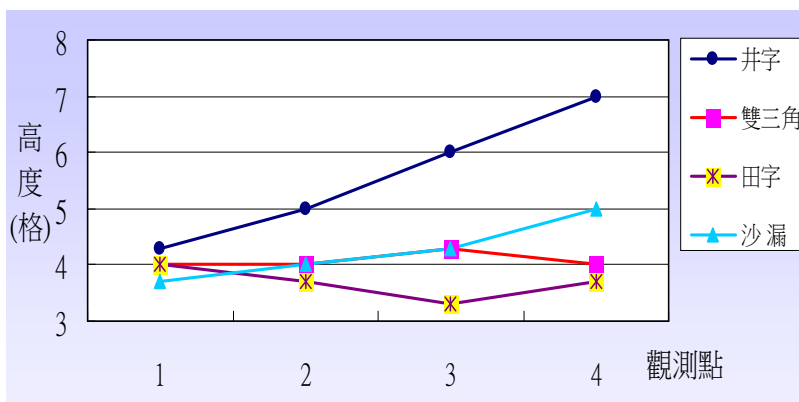


圖 1-9：不同結構骨牌在四個觀測點的平均高度直條圖

(四)由實驗一的四個子實驗中發現，井字結構骨牌彈開高度最高、音量最大，且在製作時不容易失敗，又方便移動，其效果最符合我們的需求，所以在下面的實驗中我們將以「井字型」做為研究的主要結構。

(五)在做以上實驗過程中發現，當我們以同樣的編排方式製作井字型骨牌，不同的人編骨牌時，骨牌之間的空隙也會大小不一。因此，我們想在實驗二中去探討：骨牌之間的距離(即疏密度)是否會影響彈開的效果。

實驗二：探討以不同疏密度編排井字型冰棒棍骨牌的彈開效果

疏密度：在井字結構中每一枝冰棒棍都會與四根冰棒棍相交，形成兩個正方形的間隙，我們以這兩個正方形的大小來決定疏密度，正方形越大則越疏，越小則越密。我們依照冰棒棍的長度與寬度，計算出五種方式，如圖 2-1。

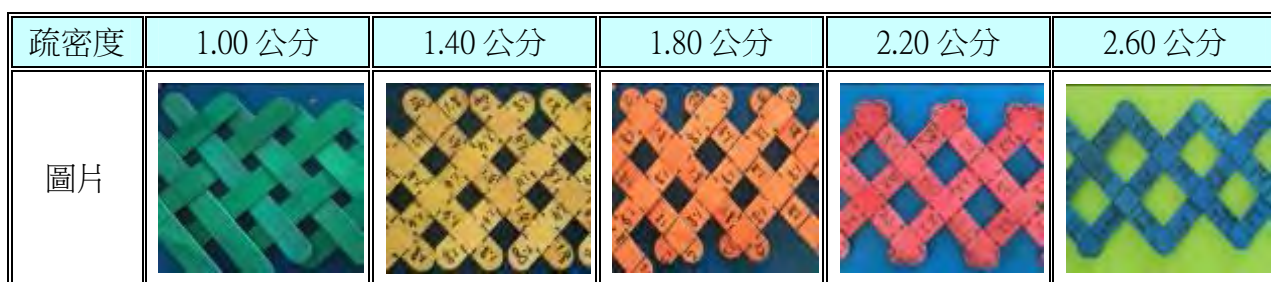


圖 2-1：不同疏密度骨牌示意圖

◎2-1 探討以不同疏密度編排井字型冰棒棍骨牌的彈開音量

(一)變因控制：

1.操縱變因：冰棒棍骨牌編排的疏密度

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地板；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目；(4)控制環境音量

(5)每次實驗測量音量位置相同

3.應變變因：冰棒棍骨牌彈開時的音量

(二)實驗結果：較密的骨牌平均音量高於較疏的骨牌。

表 2-1：不同疏密度的骨牌彈開音量最大值一覽表

疏密度	次 數			平均音量 (分貝)
	第一次	第二次	第三次	
1.00 公分	74.2	72.7	75.7	74.2
1.40 公分	73.9	72.5	72.5	73.0
1.80 公分	69.3	70.9	71.3	70.5
2.20 公分	68.1	68.2	69.1	68.5
2.60 公分	67.5	70.9	68.7	69.0

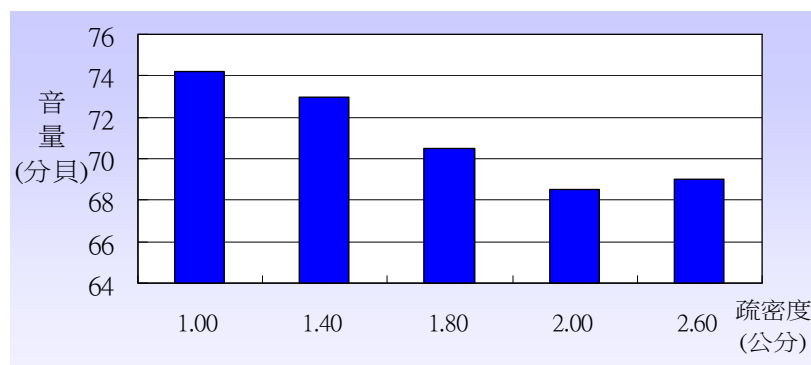


圖 2-2：不同疏密度的骨牌彈開音量直條圖

◎2-2 探討以不同疏密度編排井字型冰棒棍骨牌的彈開高度

在實驗一中，用彈力點分析法分析四種不同結構骨牌的彈開高度，但在實驗二中發現不同疏密度的井字型骨牌，只有彈力點路徑長度不同(如圖 2-3)，無法推測骨牌彈開高度變化，因此，我們找出不同疏密度骨牌各個彈力點的彎曲高度，用彎曲高度來代表該點的彈力大小，在實驗 2-2 中將驗證彈力點彈力大小是否與彈跳高度有關。

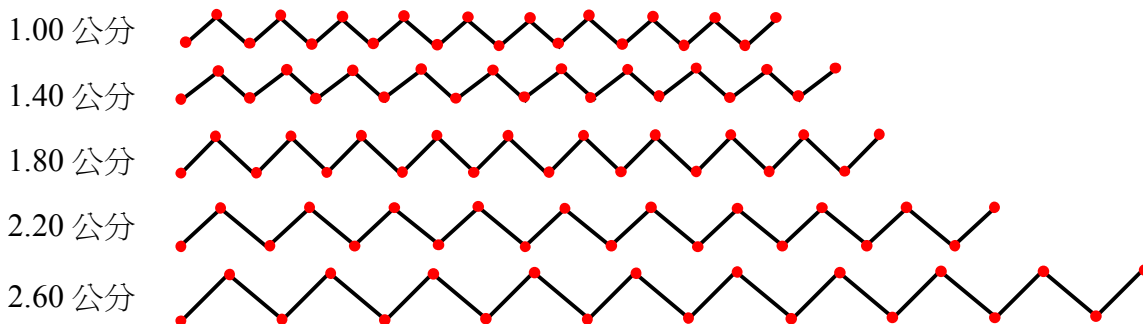
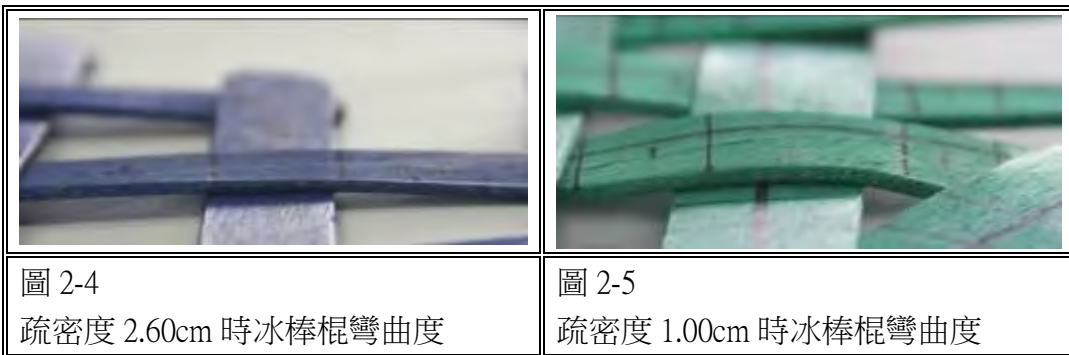
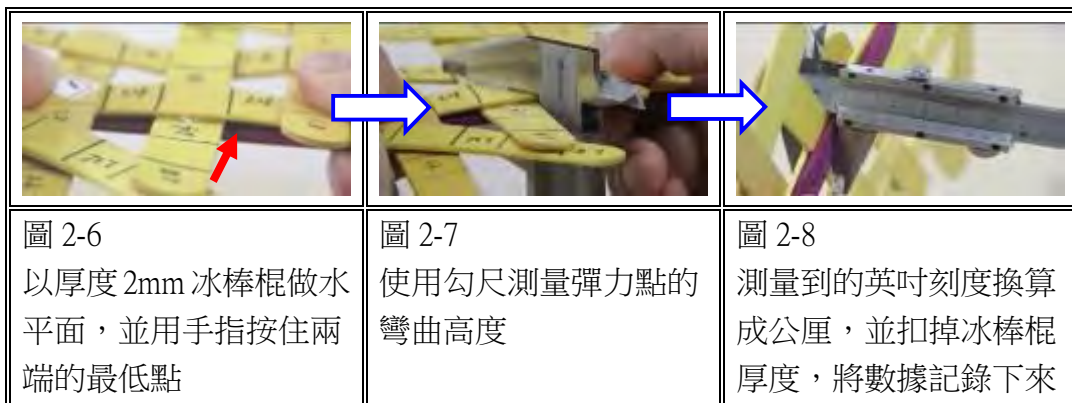


圖 2-3：五種不同疏密度骨牌的彈力路徑圖

從下圖中可看出，不同疏密度骨牌的冰棒棍形變的情形有明顯差異，因此，我們要找出彈力點的彎曲高度，以代表該點的彈力大小。



我們各用 10 根冰棒棍編排五種不同疏密度的骨牌，共有七個彈力點，運用下面的方式，找出各彈力點的彎曲高度。



我們將測量出的彎曲高度平均值，記錄在表 2-2，發現骨牌在疏密度 1.40cm 時有最大值。

表 2-2：五種疏密度骨牌的彎曲高度

疏密度(cm)	1.00	1.40	1.80	2.20	2.60
彎曲高度(mm)	0.81	1.03	0.58	0.40	0.31

(一)變因控制：

1.操縱變因：冰棒棍骨牌編排的疏密度

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地板；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目；(4)四個觀測點的位置；
(5)攝影機拍攝位置；(6)固定攝影機拍攝畫面

3.應變變因：冰棒棍骨牌的彈開高度

(二)實驗結果：疏密度 1.00 公分和 1.40 公分的骨牌彈跳高度最高，2.20 和 2.60 公分的彈跳高度為最低。骨牌排得越密，彈跳高度越高，但疏密度小於 1.40 公分後，彈開高度就不會再增加。

表 2-3：不同疏密度骨牌的平均高度一覽表

疏密度	次 數			平均高度 (格)
	第一次	第二次	第三次	
1.00 公分	6.5	5.8	5.8	6.0
1.40 公分	6.3	5.8	6.0	6.0
1.80 公分	6.0	5.3	5.8	5.7
2.20 公分	5.0	5.3	5.5	5.3
2.60 公分	5.3	5.0	5.5	5.3

◎2-3 探討以不同疏密度編排井字型冰棒棍骨牌彈開的反應時間

(一)變因控制：

1.操縱變因：冰棒棍骨牌編排的疏密度

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地板；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目

3.應變變因：冰棒棍骨牌彈開後的反應時間

(二)實驗結果：疏密度 1.40 公分的骨牌反應時間最短，但這五種不同疏密度骨牌的反應時間，介於 0.15~0.20 之間，時間差非常小，差異並不大。

表 2-4：不同疏密度骨牌彈開的反應時間一覽表

疏密度	次 數			反應時間 (秒)
	第一次	第二次	第三次	
1.00 公分	0.16	0.15	0.16	0.16
1.40 公分	0.14	0.16	0.15	0.15
1.80 公分	0.19	0.19	0.18	0.19
2.20 公分	0.19	0.19	0.20	0.19
2.60 公分	0.18	0.22	0.19	0.20

◎實驗二之發現與討論：

- (一)由實驗 2-1 可以得知當骨牌排得較密，彈開的聲量較大，我們推測是冰棒棍密集排列，產生的彈力較強，同樣時間冰棒棍撞擊的機會增加，因此產生較大的音量。這樣的聲音讓我們聯想到，或許可以應用在製作環保鞭炮上。
- (二)由實驗 2-2 發現，當骨牌在彈力點的彎曲高度越高，彈跳高度也會越高，彈力點的彈力與彈開高度有相關性，但並不是排得越密就彈得越高，太過密集反而會超過冰棒棍的彎曲極限，其變化如圖 2-9 和圖 2-10。

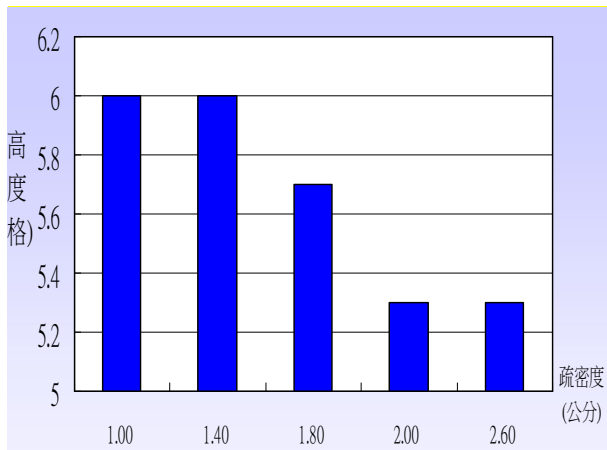


圖 2-9：不同疏密度骨牌的平均高度直條圖

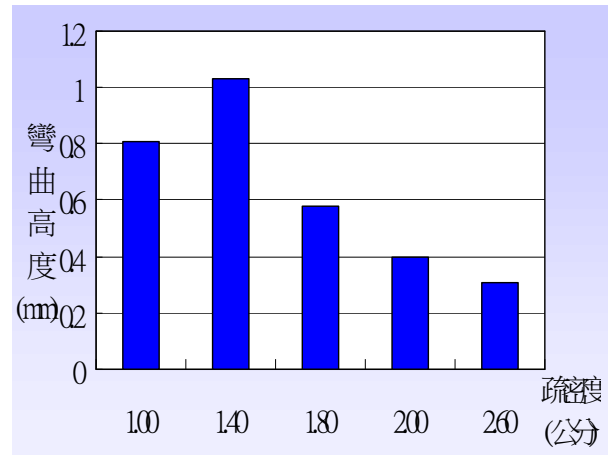


圖 2-10：不同疏密度骨牌的彎曲高度直條圖

- (三)依照彈力點路徑，路徑的長短會決定反應時間，但這五種疏密度的反應時間相差不大，我們認為是因為骨牌根數太少，所以無法有差異，若能增加骨牌長度，反應時間的差距會變大。
- (四)由實驗得知，井字型骨牌無論在直線或曲線上前進，彈開高度都會呈現遞增，到最高點再炸開。如果將骨排長度增長，則高度仍然會持續遞增嗎？我們將骨牌根數增加，以 50 根、100 根、150 根為例，發現在相同的條件下，井字結構的骨排彈開高度都會呈現遞增，到最後趨緩到一個相同的定值，不再增加，這是令我們感到很有興趣的地方，有待日後再做探討。

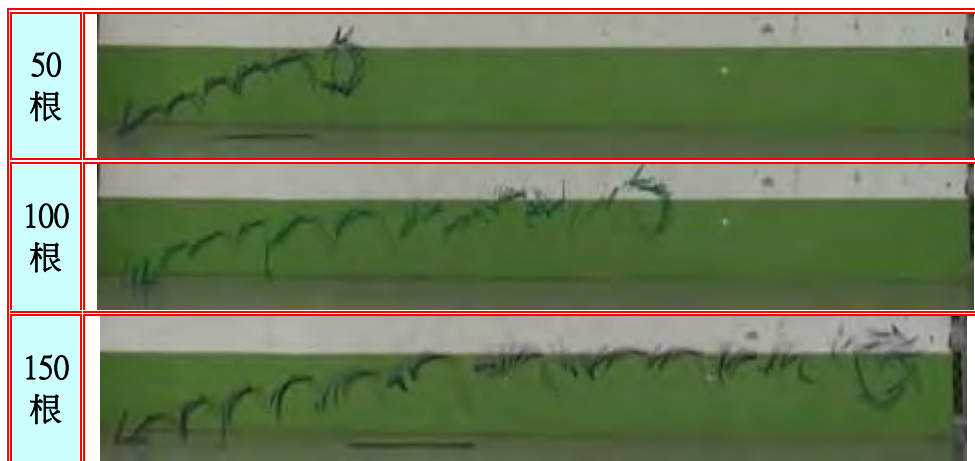


圖 7：三種不同根數骨牌的連續彈開圖

實驗三：探討以不同厚度冰棒棍編排井字型骨牌的彈開效果

◎3-1 探討以不同厚度冰棒棍編排井字型骨牌的彈開音量

(一)變因控制：

1.操縱變因：冰棒棍的厚度

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地板；(2)冰棒棍的長寬；(3)冰棒棍的數目；(4)控制環境音量

(5)冰棒棍之間的疏密度；(6)每次實驗測量音量位置相同

3.應變變因：冰棒棍骨牌彈開時的音量

(四)實驗結果：2.0mm 的冰棒棍彈開時的音量會大於 1.5mm 的冰棒棍骨牌。

表 3-1：不同厚度骨牌彈開音量最大值一覽表

厚度 (mm)	次 數					平均音量 (分貝)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	
1.5	73.1	72.3	71.3	72.7	71.0	72.1
2.0	73.6	75.5	74.8	73.8	75.1	74.6

◎3-2 探討以不同厚度冰棒棍編排井字型骨牌的彈開高度

(一)變因控制：

1.操縱變因：冰棒棍的厚度

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地；(2)冰棒棍長寬；(3)冰棒棍的數目；(4)冰棒棍之間的疏密度；

(5)四個觀測點的位置；(6)攝影機拍攝位置；(7)固定攝影機拍攝畫面。

3.應變變因：冰棒棍骨牌的彈開高度

(二)實驗結果：厚度 2.0mm 的骨牌，彈跳平均高度明顯高於 1.5mm 的骨牌。

表 3-2：不同厚度骨牌彈開平均高度一覽表

厚度 (mm)	次 數					平均高度 (格)
	一	二	三	四	五	
1.5	4.0	4.8	4.8	5.0	5.0	4.7
2.0	6.5	6.8	7.0	6.8	7.0	6.8

◎3-3 探討以不同厚度冰棒棍編排井字型骨牌彈開的反應時間

(一)變因控制：

1.操縱變因：冰棒棍的厚度

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地；(2)冰棒棍的長寬；(3)冰棒棍的數目；(4)冰棒棍之間的疏密度

3.應變變因：冰棒棍骨牌彈開的反應時間

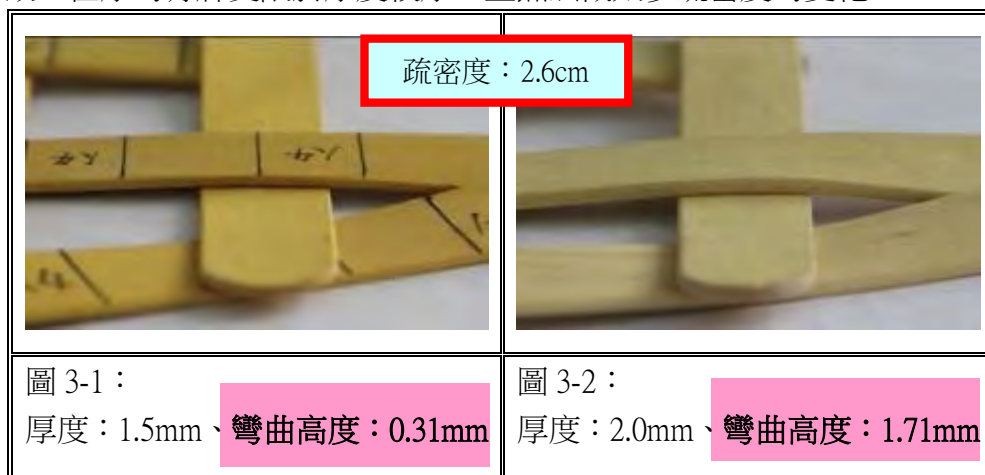
(二)實驗結果：厚度 2.0mm 的骨牌反應時間較短。

表 3-3：不同厚度骨牌彈開的反應時間一覽表

厚度 (mm)	次 數					反應時間 (秒)
	一	二	三	四	五	
1.5	0.23	0.21	0.19	0.21	0.20	0.21
2.0	0.10	0.10	0.13	0.11	0.11	0.11

◎實驗三之發現與討論：

(一)比較兩種不同厚度骨牌的彈開效果，可以發現厚的骨牌在最大平均音量、彈跳高度和反應時間表現都優於較薄者，我們認為是厚的骨牌在彈力點的彎曲度高度較大，產生比較大的彈力所致，但厚的骨牌受限於厚度較厚，並無法做太多疏密度的變化。



(二)厚的骨牌雖然編排比較費力，但是在移動時不容易爆掉，所以，在之後的應用需要有爬升動作時，使用較厚的冰棒棍較適合。

(三)市面上的冰棒棍，只有兩種厚度規格，我們原本將兩根 1.5mm 的冰棒棍疊起來想要貼成第三種厚度，但是實在太厚了，無法編排，所以在厚度實驗中只使用兩種規格。

實驗四：探討在不同材質地面上井字型冰棒棍骨牌的彈開效果

◎4-1 探討井字型冰棒棍骨牌在不同材質上的彈開音量

(一)變因控制：

1.操縱變因：地面的材質

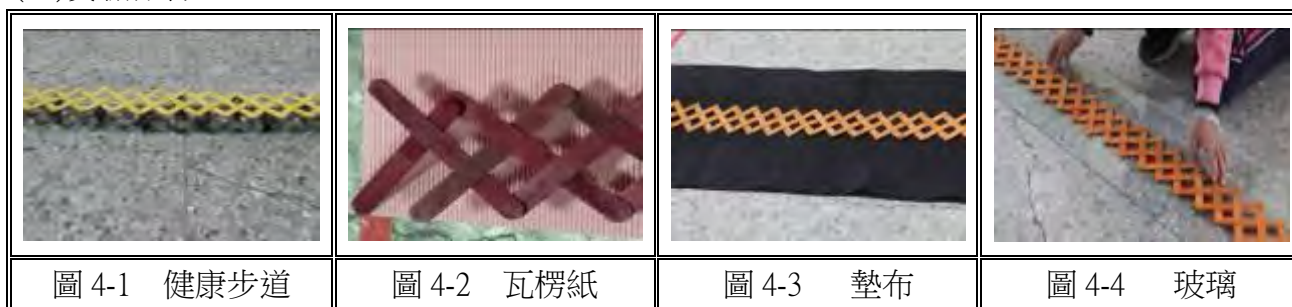
2.不變變因：

(1)冰棒棍的規格；(2)冰棒棍的數目；(3)冰棒棍之間的疏密度；(4)控制環境音量；

(5)每次實驗測量音量位置相同。

3.應變變因：冰棒棍骨牌彈開時的音量

(二)實驗器材：



(三)實驗結果：骨牌開時，玻璃材質的地面最大平均音量值是最佳的；而墊布材質則是五種材質中平均音量最小的，

表 4-1：在不同材質上骨牌彈開音量最大值一覽表

材 質	次 數					平均音量 (分貝)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	
健康步道	72.1	72.8	70.6	71.2	73.1	72
瓦楞紙	72.6	72.5	71.6	69.7	73.6	72
墊布	61.2	61.6	66.6	68.4	66.5	64.9
玻璃	75.3	72.3	74.9	74.3	72.8	73.9
磨石子地	69.8	69.0	69.3	69.0	69.8	69.4

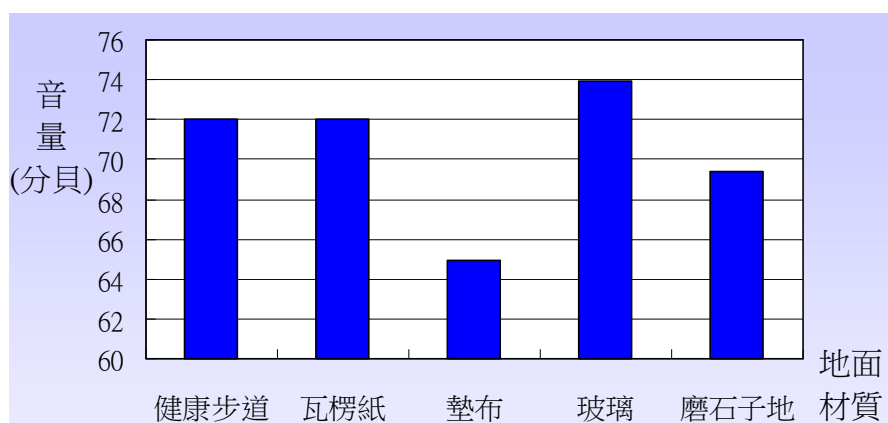


圖 4-5：不同材質地面上骨牌彈開音量直條圖

◎4-2 探討井字型冰棒棍骨牌在不同材質地面的反應時間

(一)變因控制：

1.操縱變因：地面的材質

2.不變變因：

(1)冰棒棍的規格；(2)冰棒棍的數目；(3)冰棒棍之間的疏密度；(4)四個觀測點的位置；(5)攝影機拍攝位置；(6)固定攝影機拍攝畫面。

3.應變變因：冰棒棍骨牌的彈開時間

(二)實驗結果：骨牌彈開過程速度最快是在「玻璃」材質的地面上，其次為「磨石子地」，而「墊布」材質則是速度最慢的。

表 4-2：骨牌在不同材質上彈開時間一覽表

材 質	次 數					平均時間 (秒)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	
健康步道	0.15	0.12	0.12	0.13	0.09	0.12
瓦楞紙	0.12	0.14	0.14	0.17	0.12	0.14
墊布	0.2	0.15	0.14	0.14	0.14	0.15
玻璃	0.08	0.13	0.12	0.09	0.15	0.11
磨石子地	0.12	0.13	0.14	0.11	0.1	0.12

◎實驗四之發現與討論：

(一)由實驗 4-1 可得知：骨牌在質地堅硬的材質上(如玻璃)，彈開時與地面材質接觸會產生較大的撞擊聲；健康步道與瓦楞紙材質會架空骨牌，但從數據中可發現，音量大小與玻璃差距不大，有可能是撞擊時產生了共鳴效應；而質地較柔軟的墊布，音量大小明顯相差很大，而且還會產生靜電，因此，在實際應用骨牌時，要避免類似材質上進行。

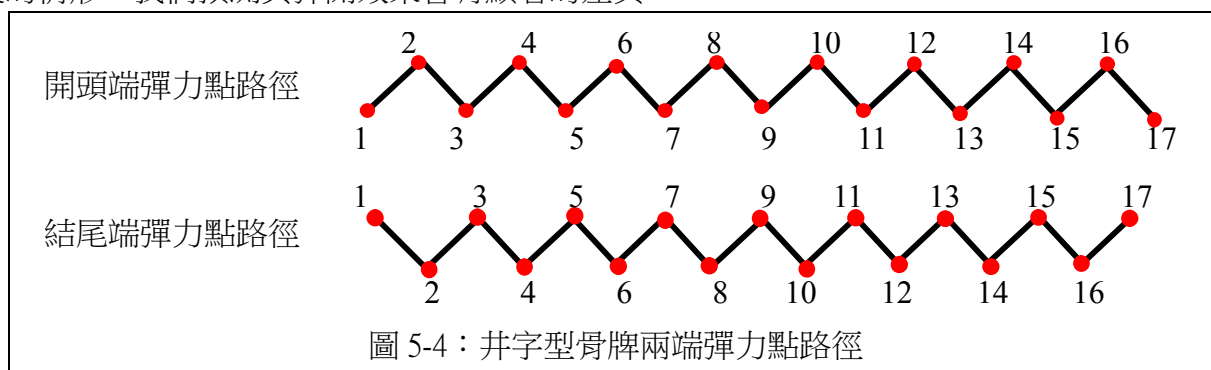
(二)在實驗 4-2 中，我們測量反應時間而不測量彈開高度，主要是因為地面材質高度不一，彈跳高度誤差太大，所以，我們改為測量骨牌反應時間，來瞭解骨牌在不同材質上行進時的流暢度。由結果得知，材質越平坦的行進越流暢，失敗率也越低。但在高低不一的材質上進行時，就容易實驗失敗，因此，我們將在實際應用上嘗試在不同地形、地面，找出最適合的結構、厚度和疏密度來達到骨牌的效果。

實驗五：探討井字型冰棒棍骨牌從兩端開始的彈開效果

在實驗當中，我們有幾次不小心把頭尾端顛倒，彈開後發現，行進的方式不同，因此，想要在這個實驗當中探討骨牌從「開頭端」與從「結尾端」彈開有何不同的效果。



從彈力點路徑圖中可發現，看似對稱的井字結構，由不同端施放時，其路徑呈現方向相反的情形，我們預測其彈開效果會有顯著的差異。



◎5-1 探討井字型冰棒棍骨牌從兩端開始的音量

(一)變因控制：

1.操縱變因：骨牌彈開的起點

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目；(4)冰棒棍之間的疏密度；
(5)每次實驗測量音量位置相同；(6)控制環境音量

3.應變變因：冰棒棍骨牌彈開的音量

(二)實驗結果：不同端開始的骨牌，兩者所產生的最大音量平均值差距僅 0.4 分貝，相差並不多。

表 5-1：不同起點骨牌彈開音量最大值一覽表

起點	次 數					平均音量 (分貝)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	
開頭端	70.6	73.2	71.2	72.1	72.1	71.8
結尾端	73.2	73.8	72.1	70.5	71.5	72.2

◎5-2 探討井字型冰棒棍骨牌從兩端開始的彈開高度

(一)變因控制：

1.操縱變因：骨牌彈開的起點

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目；(4)冰棒棍之間的疏密度；
(5)攝影機拍攝位置；(6)固定攝影機拍攝畫面

3.應變變因：冰棒棍骨牌的彈開高度

(二)實驗結果：當骨牌起點在開頭端時，骨牌的高度是以遞增在進行；而起點在尾端時，高度則是以遞減在進行。

表 5-2：不同起點骨牌在四個觀測點的平均高度(格)一覽表

起點	觀 測 點			
	1	2	3	4
開頭端	5.2	6.8	9	10.4
結尾端	10.6	9.8	8	5.6

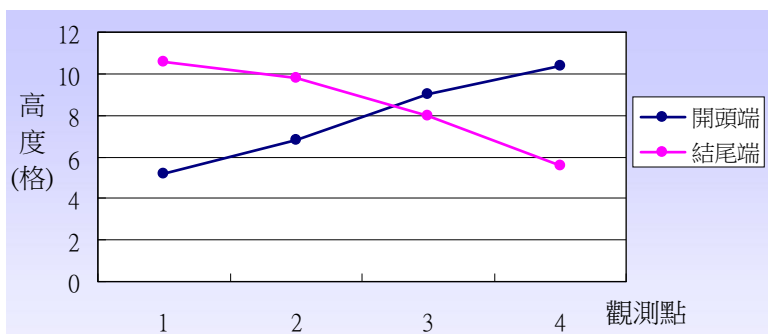


圖 5-5：不同起點骨牌在四個觀測點的平均高度直條圖

◎5-3 探討井字型冰棒棍骨牌從兩端彈開的反應時間

(一)變因控制：

1.操縱變因：骨牌彈開的起點

2.不變變因：

(1)地面材質是磨石子地；(2)冰棒棍的規格；(3)冰棒棍的數目

3.應變變因：冰棒棍骨牌彈開的反應時間

(二)實驗結果：當骨牌起點在開頭端時，反應時間明顯比結尾端當起點的骨牌短。

表 5-3：不同起點骨牌彈開的反應時間一覽表

起點	次 數					反應時間 (秒)
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	
開頭端	0.08	0.07	0.08	0.09	0.07	0.08
結尾端	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13	0.14

◎實驗五之研究討論：

- (一)由實驗五的結果可以得知：從「開頭端」彈開與從「結尾端」彈開音量差距不大，但高度變化和反應時間卻有很大的差異。從「開頭端」彈開後的骨牌，高度越來越高，速度也比較快，而從結尾端彈開的骨牌，高度越來越低，速度也比較慢，這符合彈力點分析法的預測，所以，我們認為井字結構骨牌的排列方式是有方向性的。
- (二)依據井字型骨牌的方向性，我們試著將兩段骨牌相互銜接，發現在下列三種組合方式中，只有開頭端與結尾端的組合才能銜接成功。


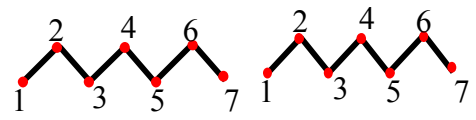

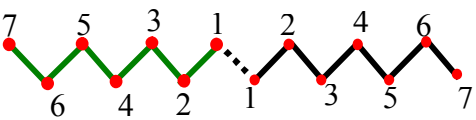

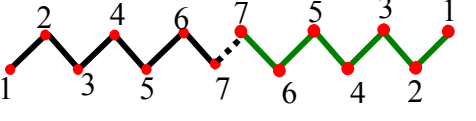
方式	實際圖片	彈力點路徑圖	結果
尾接頭			成功
頭接頭			失敗
尾接尾			失敗

圖 5-6：兩段骨牌銜接方式示意圖





















- (三)在實驗五中，當骨牌起點分別為開頭端和結尾端時，彈開高度分別呈現遞增、遞減情形，但從表可見，彈力點的彎曲高度在頭尾兩端並沒有明顯差距，顯示一開始的彈力相差不大，但以結尾端為起點的骨牌為何一開始彈開高度可以這麼高？是否是因為井字結構的方向性，彈力與能量累積在後端，所以當尾端彈開時，力量立即被釋放，造成高度遞減的現象，這有待日後做實驗證實。

實驗六：冰棒棍骨牌的實際應用

◎6-1 冰棒棍骨牌在不同地形地物上行進

由以上實驗，我們接著想嘗試在日常生活的情境裡，讓井字型冰棒棍骨牌在各種地形、地物上都能夠順利前進，我們將實驗成功的結果呈現在表 24 中：

表 6-1：不同地形上骨牌行進一覽表

地形 地物	厚度 疏密度	行進前	行進中	地形 地物	厚度 疏密度	行進前	行進中
草地	1.5 2.6			跑道	1.5 2.6		
樹籬	1.5 2.6			球網	1.5 2.6		
塑膠 滑梯	1.5 2.6			拱形 鐵架	1.5 1.8		
長頸 鹿	2.0 2.6			平衡 木	1.5 2.6		
圍牆	1.5 2.6			波浪 屋頂	1.5 2.6		

◎討論：

由實驗結果可得知，在比較平坦的地形上，使用厚度 1.5mm，疏密度 2.6cm 的規格來編排，都可以成功讓骨牌前進，如果是有高低落差或是骨牌面需要彎曲的地形，就必須採用厚度 2.0mm 的骨牌，或是將骨牌疏密度調密。

◎6-2 冰棒棍骨牌也能做到的骨牌效果

(一)轉彎

我們想知道井字型骨牌能不能在平面上做曲線前進，達到轉彎的效果。所以，我們使用厚度 2.0mm 的冰棒棍來做曲線的排列，用兩種不同顏色的冰棒棍來做排列，可觀察出冰棒棍角度的變化，從實驗結果中可發現，冰棒棍骨牌可編成左彎和右彎，結合起來做 S 型，甚至可以編成圓圈。



圖 6-1：編排 S 型骨牌步驟

◎討論：

由以上的實驗結果發現：調整骨牌交錯的角度可以改變骨牌的方向，如果要讓井字型骨牌做漂亮的轉彎，就必須讓骨牌內側交錯的角度維持一定，這樣就可以編出半圓形或圓型來。

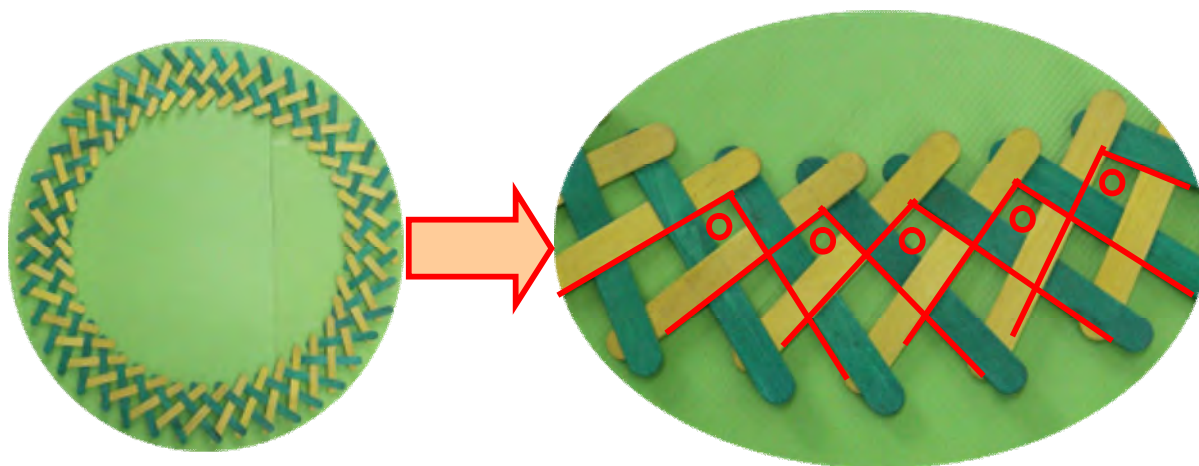


圖 6-2：圓形骨牌內側冰棒棍角度變化

(二)分岔

我們試著將井字結構和田字結構做結合，利用田字結構瞬爆以及可以做直角銜接的特性，產生可以將路線一分多，多合一的效果。

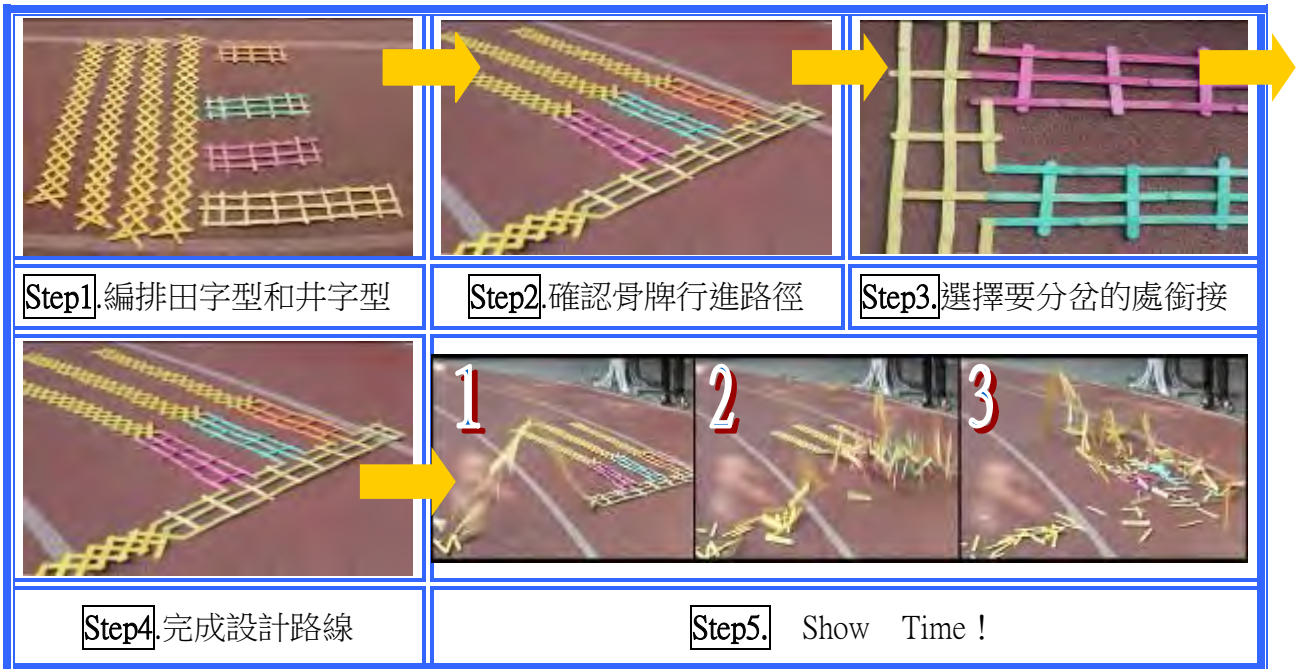


圖 6-3 井字型和田字型骨牌組合步驟

◎討論：

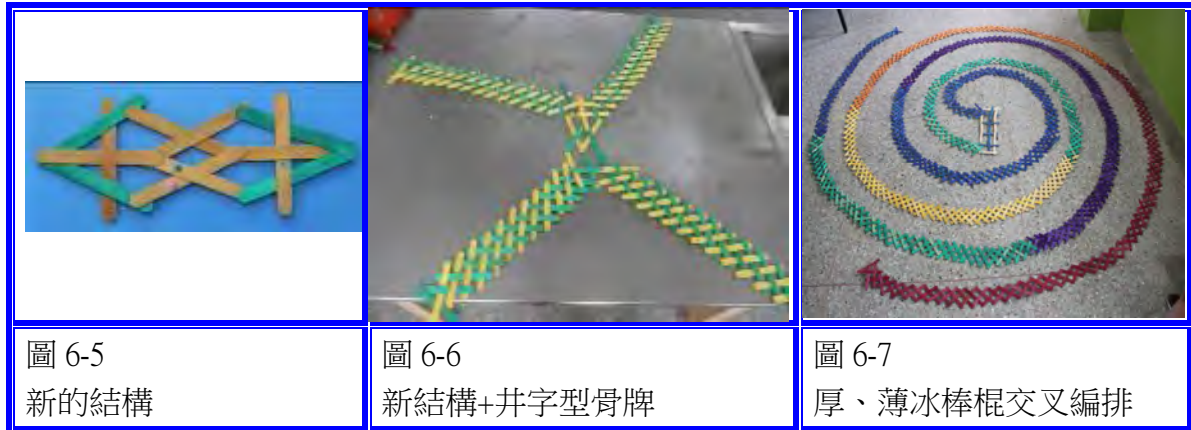
1. 在本實驗中成功的將井字結構與田字結構做連結，讓我們覺得各個結構都有不同的功能性，日後可更深入研究其他結構之間的連結方式，會讓骨牌效果的呈現更加多元。

結構	功能	步驟		
田字 + 田字	垂直分岔的功能			
田字 + 井字	兩種不同的彈開效果			
		尋找銜接點	拔除多餘的冰棒棍	固定銜接點

圖 6-4：兩種不同結構骨牌銜接步驟

2. 不同結構間可以互相銜接，每個結構的效果並不同，而我們也可以先透過彈力點路徑的繪製來研發新的結構，甚至可以預測施放效果，從中發現更多的樂趣。

3.在實驗的過程中發現，薄的冰棒棍較易編排，但容易脫落和變形，厚的冰棒棍編排較不易，但卻有比較好的彈性，編排完成後也不容易脫落造成失敗，,如果可以將不同厚薄度的骨牌交叉使用，作品的穩定性可能會更高，效果也會更好，值得我們再深入探討。



(三)溜滑梯

我們試著在磨石子溜滑梯上呈現骨牌效果，首先為克服斜坡的挑戰，須結合直線與轉彎的技巧，因此，分別編排兩直線骨牌和一曲線骨牌，路線設計為先爬坡→轉彎→下坡。

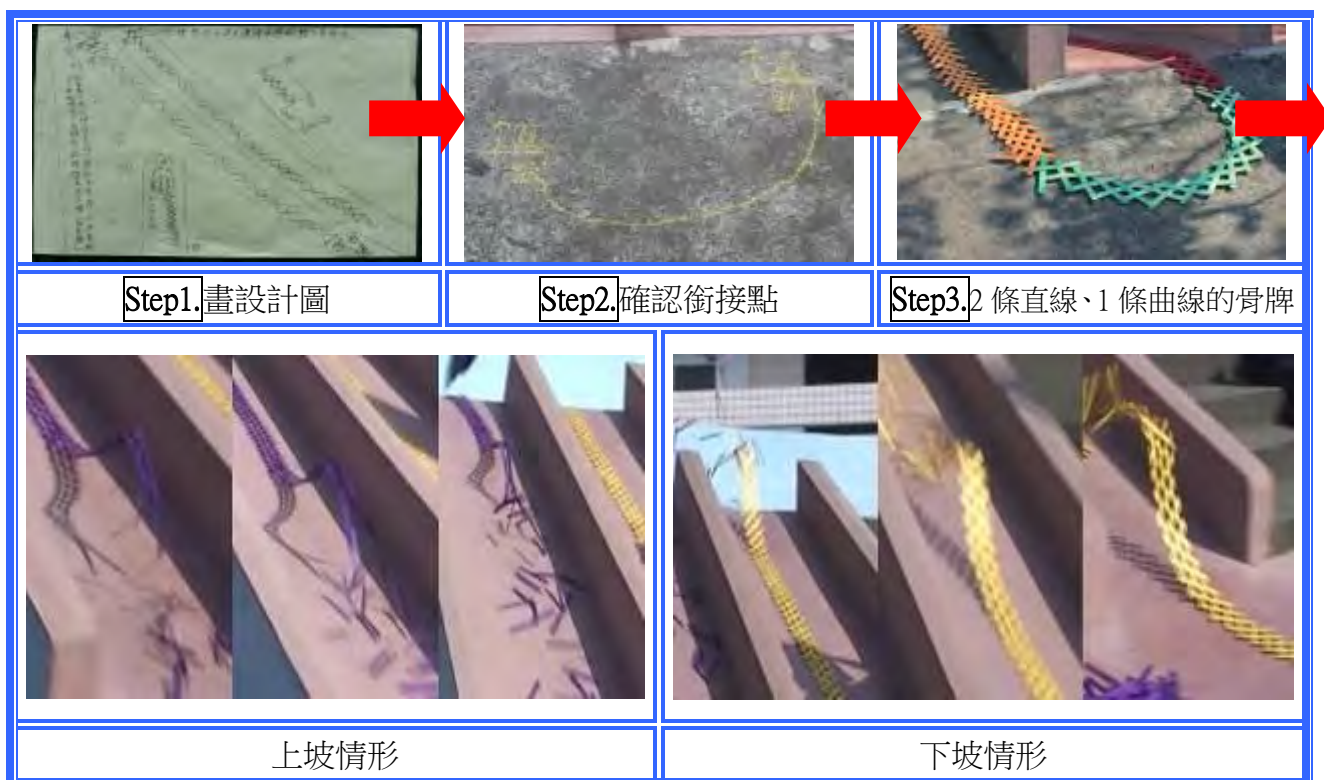


圖 6-8：在溜滑梯組裝骨牌步驟

◎討論

- 1.在溜滑梯排骨牌須克服因坡度造成骨牌向下擠壓，使得骨牌的結構變形，容易在編排過程中失敗，所以使用厚度較薄的冰棒棍可以減輕重量，而且要在適當距離設置防火牆，避免一個不小心骨牌就爆開來，另外在正式引爆骨牌時也要將最尾端的骨牌作固定，才不會還沒彈到尾端的時候結尾端的骨牌已經爆開了。
- 2.冰棒棍會彈性疲乏：隨著實驗次數的增加，或編完之後如果放了比較久的時間，我們發現冰棒棍的彈性會產生疲乏，有些甚至受力之後會變形，可能影響實驗進行。
- 3.在實驗過程中，我們發現排好的冰棒棍在陽光下長時間曝曬，冰棒棍的材質會變脆，容易折斷，也會扭曲變形、褪色，造成實驗失敗。

(四) 180 度微笑彎道

我們試著挑戰地心引力，呈現多米諾骨牌做不到的效果，以圓形窗戶當軌道讓直線骨牌做繞圈特技。

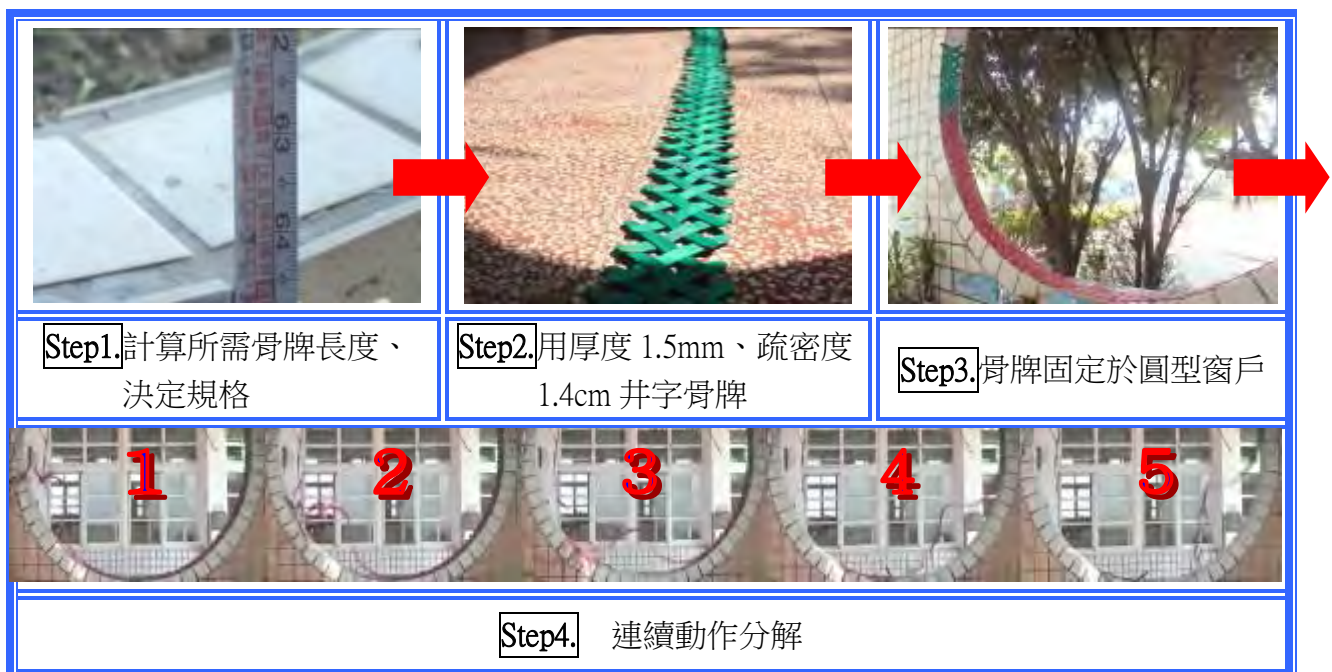


圖 6-9：組裝微笑彎道骨牌的步驟

◎討論：

- 1.在實驗過程中，原先設計骨牌要繞圓型窗戶一圈，做 360 度的轉彎，但是骨牌行進到最上方的時候，會因為重量而脫離原本的路線灑下來，導致實驗失敗，目前只有完成一百八十度的繞彎。我們認為如果能找到適當的開頭位置，加上適當的支撐，應該可以克服骨牌會因為重力直接落下的問題。

2.從連續動作分解圖中可發現，在相同高度上，骨牌行進的波形有明顯的不同，顯示井字型骨牌在曲線前進時，彈開高度仍然呈現遞增的情形。



圖 6-10
骨牌受重力影響，行進時落下



圖 6-11 微笑彎道骨牌行進分解圖

◎6-3 利用冰棒棍骨牌製作環保鞭炮

(一)直線鞭炮

我們以厚度 2.0mm、疏密度 2.6cm 的井字型冰棒棍骨牌排成一直線，一端懸掛起來，再由另一端來引爆，看看引爆的效果是否與傳統炸藥鞭炮相似。

◎討論:

直線型的環保鞭炮，我們嘗試用開頭端和結尾端兩種不同的方式來引爆，結果發現由結尾端引爆的鞭炮，效果比較接近傳統鞭炮，如果可以克服編排時間較長的缺點，那將有很大的實用性。



圖 6-12 直線鞭炮示意圖

(二)螺旋形鞭炮

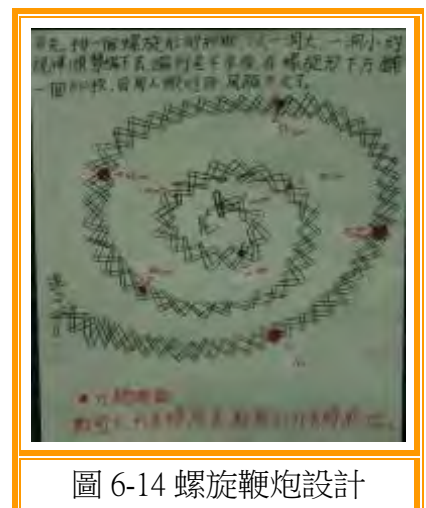
我們以厚度 2.0mm 冰棒棍排成曲線的井字型骨牌，讓它由外而內呈現螺旋狀，再將結尾端懸掛起來，形成一個立體的螺旋形鞭炮。



圖 6-13：組裝螺旋型鞭炮步驟

◎討論

螺旋型鞭炮的視覺效果很華麗，我們使用細繩和鉤子在幾個點作支撐，使鞭炮能懸掛在空中。我們將螺旋型鞭炮的規格、支撐用的細繩長度和位置做成一張設計圖，以供之後有興趣的夥伴一起來研究。



陸、結論

- 一、使用彈力點分析法，可以有效說明四種不同骨牌結構的彈開效果，並找出效果最佳的為井字結構：
 - (一)彈力點為單一路徑，骨牌彈開高度會呈現遞增到一定高度便不再增加。
 - (二)彈力點分布最密集，彈跳高度最高。
 - (三)彈力點的路徑最長，反應時間最長，骨牌呈現連續彈開。
- 二、當骨牌的彈力點路徑一樣時，可用彎曲高度來判斷彈力大小，疏密度 1.40 公分的井字型骨牌彎曲高度最高，彈開高度也最高。
- 三、兩種不同厚度的冰棒棍中，厚度 2.0mm 的骨牌彎曲高度大，彈開效果也較好。
- 四、井字型冰棒棍骨牌在不同材質上進行實驗，發現當材質平坦且堅硬時，骨牌彈開效果較佳。
- 五、井字型骨牌分別從「開頭端」和「結尾端」行進時，兩條彈力點路徑方向性相反，因此，高度分別呈現「遞增」和「遞減」的情形，表示在井字型結構中能量的釋放是有「方向性」的。
- 六、冰棒棍骨牌搭配不同的厚度和疏密度，能在室內和室外場地都有不錯的彈開效果；另外發現冰棒棍骨牌除了能以直線排列之外，也能讓骨牌轉彎、分岔、上下坡和 180 度直立轉彎。
- 七、以冰棒棍利用直線與轉彎的效果可以編排出兩款環保型鞭炮，不僅可以重複使用，也具有聲音與爆炸效果。

在研究之前，很難想像冰棒棍可以有這麼多變化，等到一頭栽進去，就發現越玩越多，欲罷不能，經過這次長時間的研究，我們對這一根根跳動的冰棒棍有更深入的认识，由最初單純的想讓骨牌跑順一點，後來發現各種組合，研究疏密度、厚薄度、地面材質，再到校園的各個角落做地形克服，最後設計環保鞭炮，當中實際操作各種工具，學得不少力學和數學的知識，當看著骨牌完美的表演，贏的大家掌聲的那一刻，覺得好有成就感喔！冰棒棍骨牌有很棒的視覺效果，再搭配其他材料，如骨牌、小機關……，可以呈現出一場完美的秀，會讓人一玩就上癮呢！

柒、參考資料

- 1.維基百科。2013 年 1 月 4 日 <http://zh.wikipedia.org/wiki/多米諾骨牌效應>
- 2.Kinetic King 影音分享。2013 年 1 月 4 日 <http://www.youtube.com/watch?v=0lTmFXOkcOc>

【評語】 080103

藉由不同方式排列的冰棒骨牌，本作品探討各種結構的彈開效果，提供冰棒骨牌在生活中一些新的創意，若能在科學性上再略作加強，本作品必能有更好的表現。