

# 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

080105

骨牌玄機－骨牌倒下的原理與影響因素之探討

學校名稱：高雄市三民區東光國民小學

作者：  小六 許逸群  小六 潘辰瑜  小六 陳奕臻  小六 曾英澤  小六 林蔚典	指導老師：  楊宜倫  廖素禎
---	-----------------------------

關鍵詞：骨牌、重心、轉動角度

# 骨牌玄機—骨牌倒下的原理與影響因素之探討

## 摘要：

本研究深入探討影響骨牌倒下的原理，發現要使骨牌倒下，施給骨牌的外力(F)×擊中點高度(h)，其力矩要大於重力G×底面厚度的一半(1/2 S)，也就是  $F \times h > mg \times 1/2 S$ 。另外，經過高速攝影機的拍攝分析，我們了解每塊骨牌倒下時，具有的動能都比前一塊骨牌大，速度也會越來越快，且就單塊骨牌來說，轉動速度也是越來越快的。撞擊力道越強，倒下的總時間越短，但撞擊力道會被每塊骨牌的抗力所抵銷，在骨牌 3 撞擊 4 之後即不受撞擊力道影響。骨牌越重，倒下時產生的力矩越大，倒下時間越短。骨牌大小比例以 6:3:1 最好，可以兼具速度與穩定性。重心降低、間距縮小，是爬坡成功的主要關鍵。間距為前一塊骨牌高度 0.35 倍~0.75 倍，足以推倒實驗中不同質量的骨牌，其中間距為 0.5 倍高度產生的力矩最大。

## 壹、研究動機：

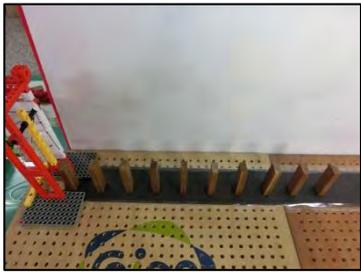
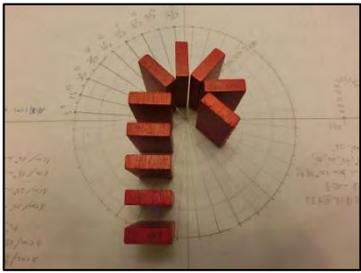
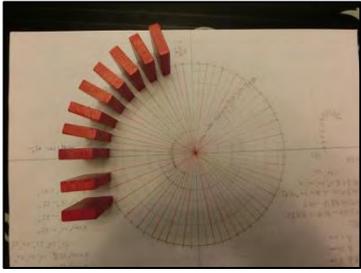
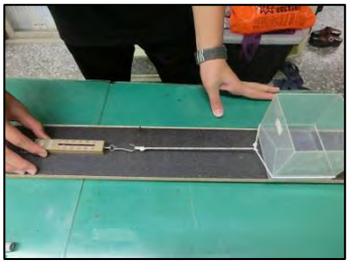
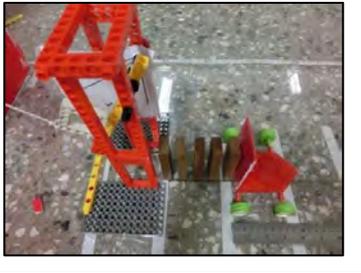
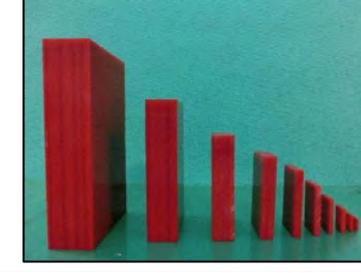
有一天，我們在網路上看到日本小孩骨牌大賽的影片，有一件用心排列且非常精采的作品，卻在小骨牌推大骨牌時突然停止，眾人的心血結晶頓時化為零，令人十分扼腕。究竟，骨牌要怎樣推，才能以快速又穩健的方式前進，排骨牌有什麼秘訣？骨牌裡又藏著什麼樣的玄機？我們心裡充滿了疑問，老師說，骨牌跟槓桿原理有關，而這正是我們自然課目前正在上的課程，於是就藉由這次的研究來一探究竟。

## 貳、研究目的：

- 一、藉由觀察測量探討讓骨牌倒下的原理。
- 二、探討骨牌間距與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係。
- 三、探討單塊骨牌倒下時，其轉動的速度如何變化？
- 四、探討骨牌形式與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係。
- 五、探討敲擊力道、敲擊位置與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係。
- 六、探討骨牌高度、高寬厚比例與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係。
- 七、探討接觸面與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係。
- 八、探討斜坡、階梯、角度、錯位等因素如何影響骨牌成功與失敗。
- 九、探討由小到大排列的不同質量骨牌，其間距如何影響骨牌倒下產生的力。
- 十、嘗試以研究出來的技巧，排一次精彩壯觀的骨牌秀。

## 參、實驗器材與設備：

		
鐵尺、GiGo 積木底座	高速攝影機	錄影、判讀用電腦

		
砂紙、壓克力	木質骨牌	多米諾骨牌
		
木板(斜坡)	磅 秤	自製角度測量器
		
透明盒、彈簧秤	加速度測量器、數據判讀機	
		
自製小滑車	質量 1.5 倍骨牌	質量 2 倍骨牌

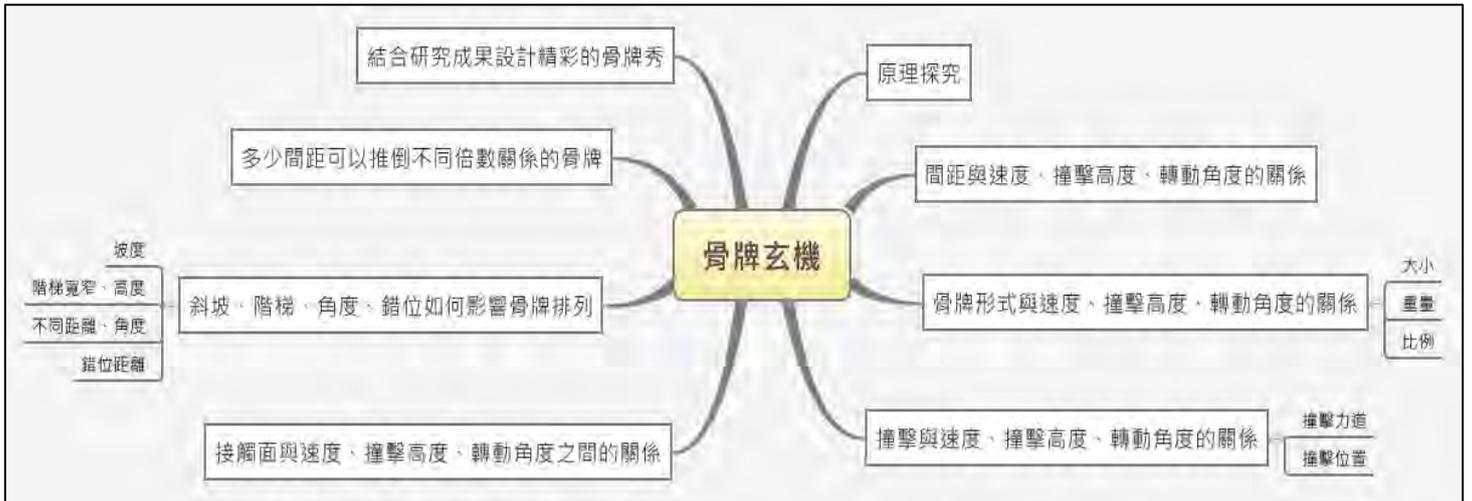
※實驗說明：我們自製單擺角度發射台，將單擺拉至不同角度，放開之後擺錘撞擊骨牌，角度越大撞擊力量越大。

自製單擺角度發射台 →



肆、研究過程與結果：

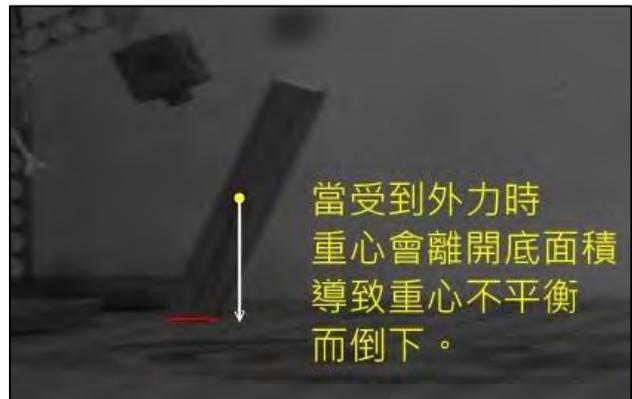
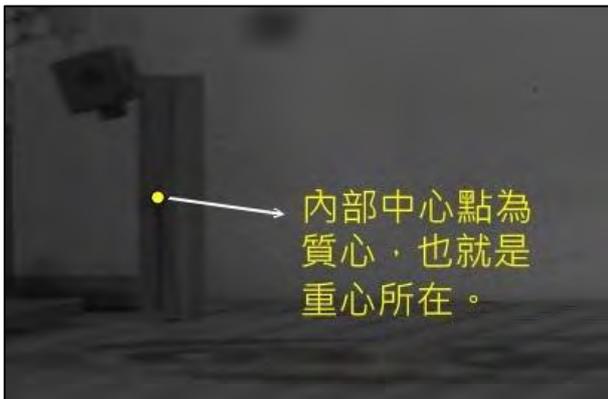
※ 研究流程：



**研究一、藉由觀察測量探討讓骨牌倒下的原因**

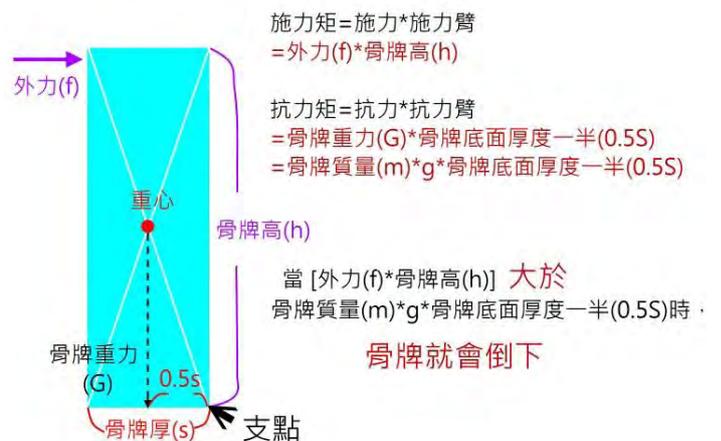
方法：以單擺 30° 推動骨牌，並以高速攝影機拍攝記錄過程，再加以分析骨牌倒下的原因。

結果(一)：以單塊骨牌來說：



發現：骨牌之所以能夠倒下，是因為外力推動骨牌，使位於中心點的重心移到底面積之外，就在骨牌傾斜重心鉛垂線離開底面積的一瞬間，骨牌開始失去平衡而倒下。

※思考(一)：因為重心只要超過底面積一半就會傾倒，所以要使骨牌倒下，應該是施給骨牌的外力(F)×擊中點高度(h)，其力矩要大於骨牌重力(G)×底面厚度一半(0.5S)的抗力矩，也等於骨牌質量(m)×g×底面厚度一半(0.5S)。



結果(二)：以多塊骨牌來說：



發現：骨牌豎著時，重心較高，倒下時重心下降，倒下的過程中，其重力位能會轉化為動能，倒在第二塊骨牌上，這個動能就轉移到第二塊骨牌上，第二塊骨牌會將第一塊骨牌轉移來的動能和自已倒下過程中由本身具有的重力位能轉化來的動能之和，再傳到第三塊骨牌上.....，所以每塊骨牌倒下時，具有的動能都比前一塊骨牌大。

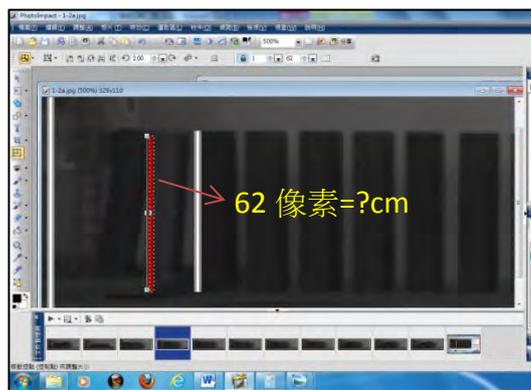
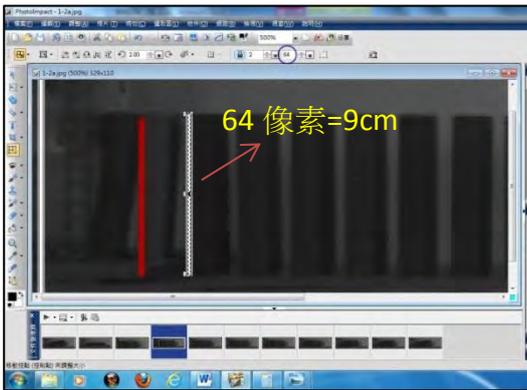
**研究二、探討骨牌間距與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係**

方法：以 21 克、高×寬×厚為 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 10 塊，排成各種不同間距，並用單擺 30° 撞擊骨牌上方，以高速攝影機拍下行進過程，共實驗五次，之後以 photoimpact 軟體測量撞擊高度，以尺測量轉動角度，並記錄時間做平均分析。

※實驗說明：

(一)時間計算：是以高速攝影機拍攝後，找到骨牌撞擊的每個點，再以後一塊骨牌撞擊的時間，減去前一塊骨牌撞擊的時間來計算。

(二)高度計算：骨牌 9cm=64 像素，撞擊高度 62 像素等於  $9 \times 62 / 64 = 8.71875 \approx 8.7188\text{cm}$



(三)角度計算：找出每塊骨牌撞擊時的畫面，並用量角器測量倒下時的的角度。

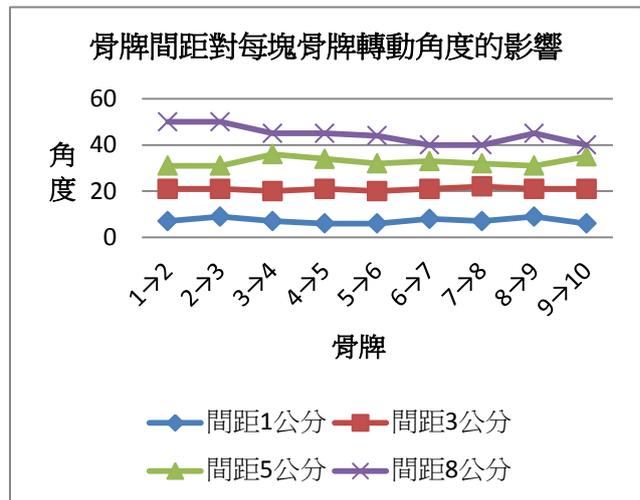
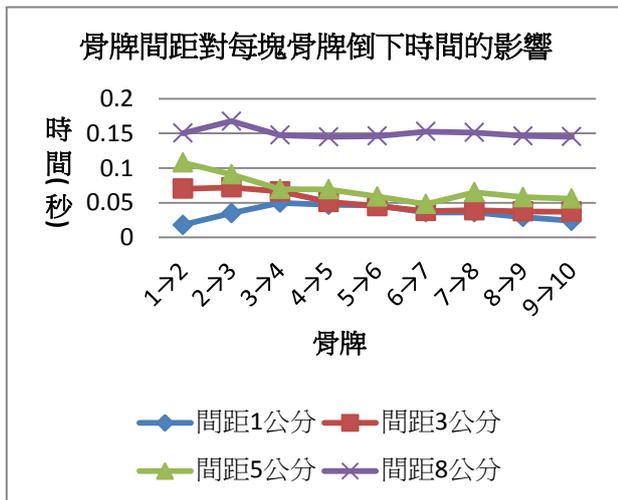
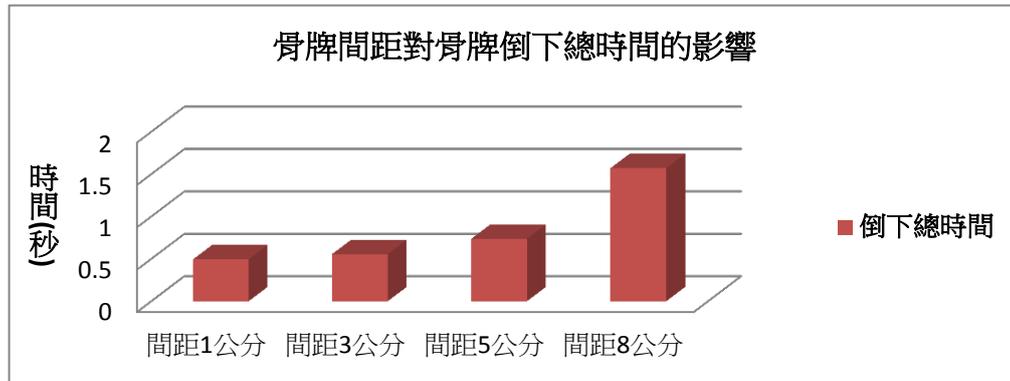


結果：

	間距 1 公分			間距 3 公分			間距 5 公分			間距 8 公分		
	撞擊點	角度	時間									
1→2	8.7188	7	0.0180	8.2125	21	0.0702	7.0435	31	0.1080	5.8696	50	0.1522
2→3	8.7188	9	0.0350	8.2125	21	0.0720	7.0437	31	0.0910	5.8696	50	0.1720
3→4	8.7188	7	0.0500	8.2125	20	0.0662	7.0435	36	0.0698	6.4565	45	0.1580
4→5	8.7188	6	0.0470	8.2125	21	0.0510	7.0435	34	0.0692	6.4565	45	0.1472
5→6	8.7188	6	0.0460	8.2125	20	0.0450	7.0435	32	0.0600	6.2607	44	0.1470

6→7	8.7188	8	0.0360	8.2125	21	0.0380	7.0437	33	0.0562	6.2607	40	0.1470
7→8	8.7188	7	0.0360	8.3250	22	0.0390	7.0435	32	0.0562	6.2607	40	0.1460
8→9	8.7188	9	0.0292	8.2125	21	0.0374	7.5326	31	0.0560	6.2607	45	0.1444
9→10	8.7188	6	0.0240	8.2125	21	0.0370	6.7500	35	0.0560	6.0652	40	0.1380
1→10			0.4862			0.5568			0.7372			1.571

單位：撞擊點(cm)、角度(°)、倒下時間(秒)

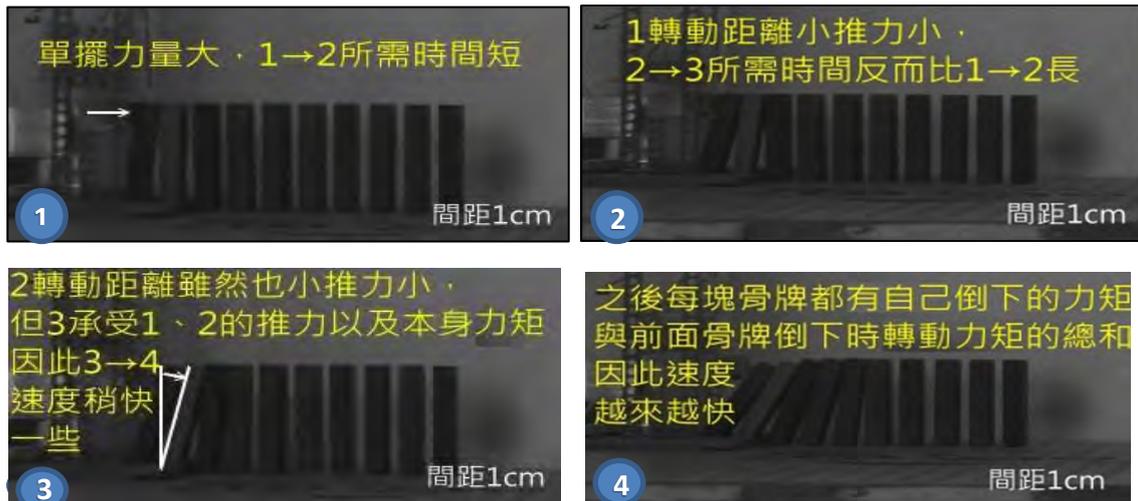


發現：

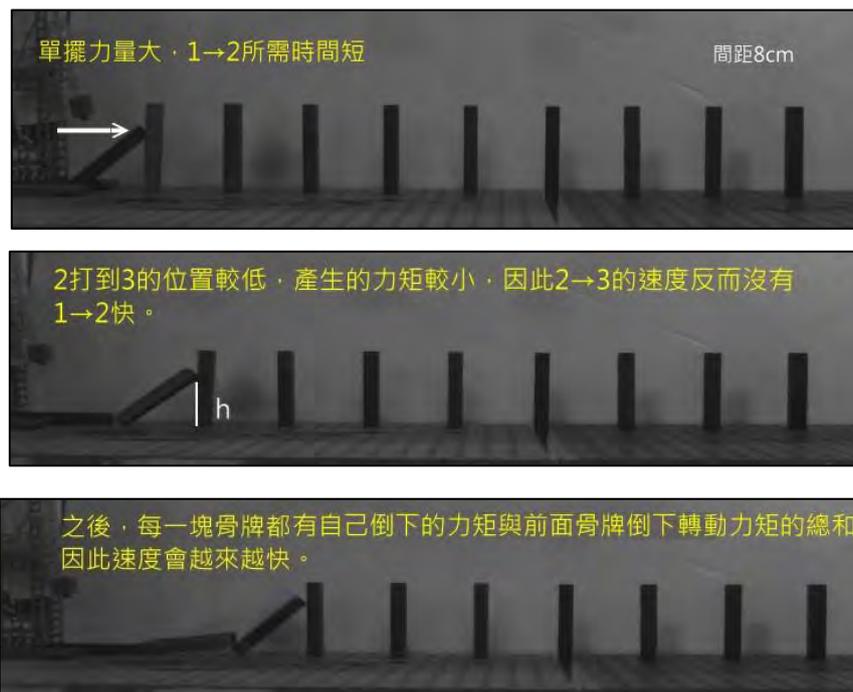
- (一) 每塊骨牌倒下的速度不一，除了間距 1cm、3cm、8cm 的第二塊時間略微變長外、其餘大致有速度越來越快的趨勢。
- (二) 骨牌間距越小，骨牌倒下時轉動的角度越小，撞擊高度越高，會較穩定，倒下所需的總時間越短。其中 1cm 的骨牌明顯有壓擠的現象。
- (三) 骨牌間距越寬，轉動的角度越大，撞擊高度越低，會較不穩定，倒下所需總時間越長。

※思考與推論：

- (一) 第一塊骨牌倒下的力量，來自於以單擺 30° 角度撞擊的外力，當骨牌為間距 1cm、3cm 時，第二塊骨牌承受的撞擊力，會大於第三塊骨牌承受的推力，因此 1→2 的速度會比 2→3 的速度來得快。第三塊骨牌倒下時，除了自己本身的重力外，也承受前一塊骨牌倒下時轉動的力量，但因為第二塊骨牌轉動的距離太短，產生的力太小，所以倒下來的時間反而比 1→2 長。到了 3→4 以後，因為前面的骨牌越來越多，產生的推力也越來越大，因此倒下的速度會越來越快。

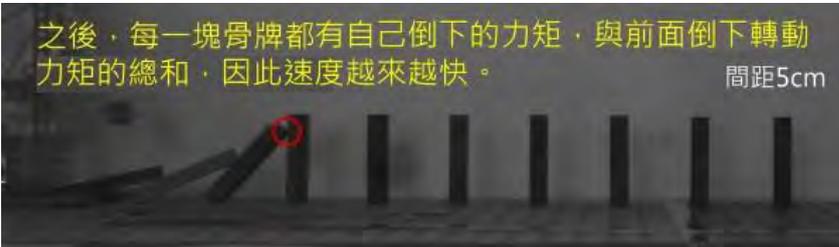


(二)間距 8cm 時，第一塊骨牌受外力推動，產生力量大因此時間短速度快；第二塊骨牌因為撞擊高度較低，根據  $F \times h$ ，得到的力矩較小，因此 2→3 倒下的速度比 1→2 慢。而之後的每塊骨牌均受前面的推力總和與自己本身倒下時的力矩，因此速度會越來越快。但是，由於間距 8cm，前面骨牌轉動的角度較大，產生的力量也較大，因此容易將骨牌往前推，導致撞擊高度升高，速度呈現不穩的狀態。



(四) 間距 5cm 時，因為撞擊高度高，骨牌本身得到的力矩較大，且前面骨牌轉動的角度也大，產生的推力較大，因此沒有像間距 1、3、8cm 時，2→3 倒下的速度比 1→2 慢的現象。





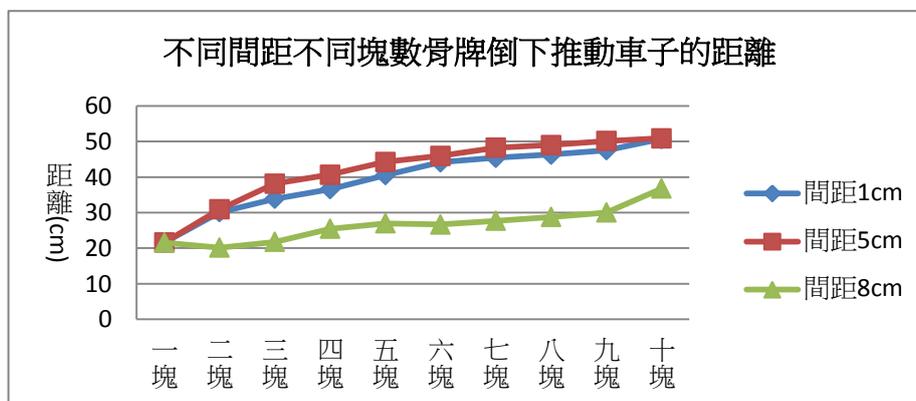
### 研究三、探討不同間距每塊骨牌產生的力有多大？

方法：自製小滑車置於壓克力箱，以單擺 90° 撞擊不同塊數、不同間距的骨牌，測量骨牌倒下時滑車所移動的距離(做五次求平均)。

結果：

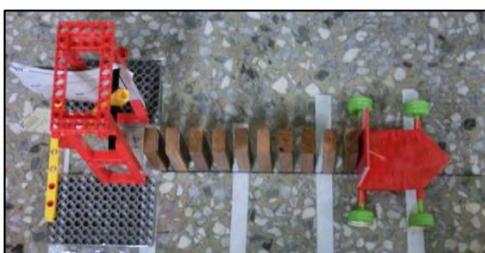
距 離 間 距	塊 數	一塊	二塊	三塊	四塊	五塊	六塊	七塊	八塊	九塊	十塊
間距 1cm		21.6	30.125	33.875	36.575	40.525	44.15	45.425	46.325	47.5	50.725
間距 5cm		21.6	30.9	38.15	40.675	44.225	45.925	48.225	49	50.125	50.9
間距 8cm		21.6	20.15	21.775	25.45	26.95	26.65	27.675	28.75	30	36.75

單位：cm



發現：1.骨牌間距 5cm 與間距 1cm，車子推動的距離最遠，間距 8cm 則明顯較近，骨牌倒下的力道較小。

2.間距 1cm 時，最後骨牌是堆疊在一起瞬間推動車子的，因此車子會一下子衝得很遠。



推論：間距 5cm 時因為骨牌轉動角度大，撞擊高度也高，一開始產生的力量就較大，到第十塊時推動的距離都是最遠的。而間距 1cm 只有兩、三塊時，轉動角度小產生的力量較小，直到四塊以後骨牌倒下時堆疊在一起的力量會瞬間變大，因此一下子車子就會被推得較遠。

#### 研究四、探討單塊骨牌倒下時，其轉動的速度是一樣的嗎？

方法：將間距 5cm 與間距 8cm 所拍攝的骨牌倒下照片，依每隔 0.02 秒測量角度，每塊骨牌倒下時，單位時間內轉動的角度是否一致？

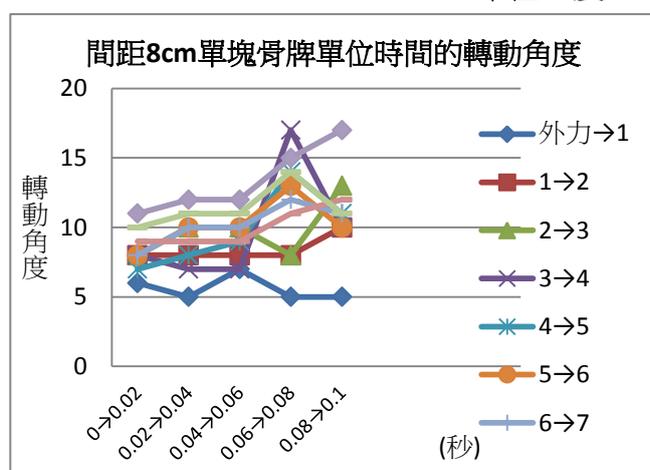
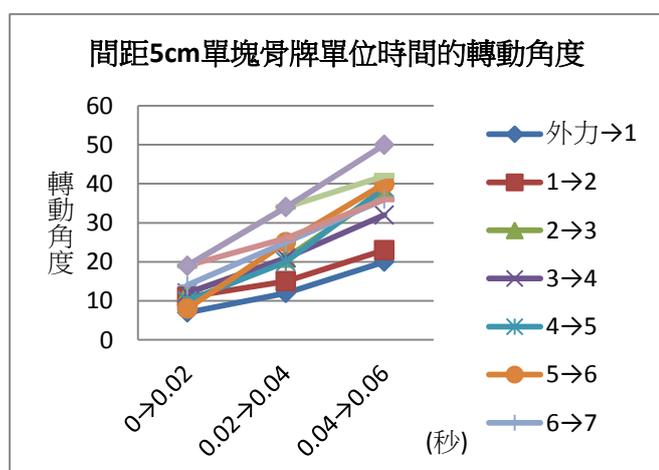
說明：1. 由於間距 5cm 的骨牌倒下的時間是越來越快的，0.06 秒以後，骨牌大多已經撞到目前骨牌，因此僅以前面三塊來看角度改變的趨勢。

2. 間距 8cm 的骨牌倒下時間較長，因此可以測量到 0.1 秒；至於間距 1cm，由於倒下速度太快，單位時間內多數已經撞到下一塊骨牌，只好作罷。

結果：

間距	間距 5cm			間距 8cm				
單位時間	0→0.02	0.02→0.04	0.04→0.06	0→0.02	0.02→0.04	0.04→0.06	0.06→0.08	0.08→0.1
外力→1	7	12	20	6	5	7	5	5
1→2	11	15	23	8	8	8	8	10
2→3	12	21	38	8	10	10	8	13
3→4	12	21	32	8	7	7	17	10
4→5	10	20	39	7	8	9	14	11
5→6	8	25	40	8	10	10	13	10
6→7	14	25	36	8	10	10	12	11
7→8	19	26	36	9	9	9	11	12
8→9	19	34	42	10	11	11	14	11
9→10	19	34	50	11	12	12	15	17

單位：度



發現：單位時間內單塊骨牌倒下時轉動角度越來越大，代表單塊骨牌倒下時速度是越來越快的。

討論：間距 8cm 容易偏移，因此骨牌角度呈現不穩狀態，但仍可看出是越來越快的趨勢。

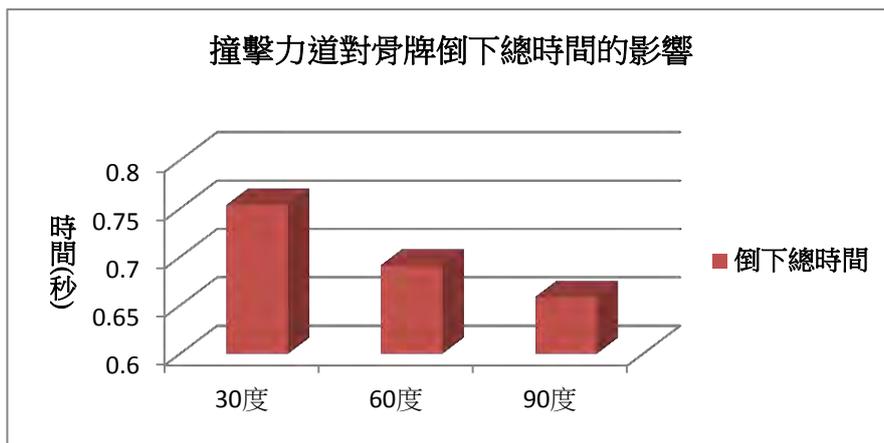
**研究五、探討撞擊力道與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係**

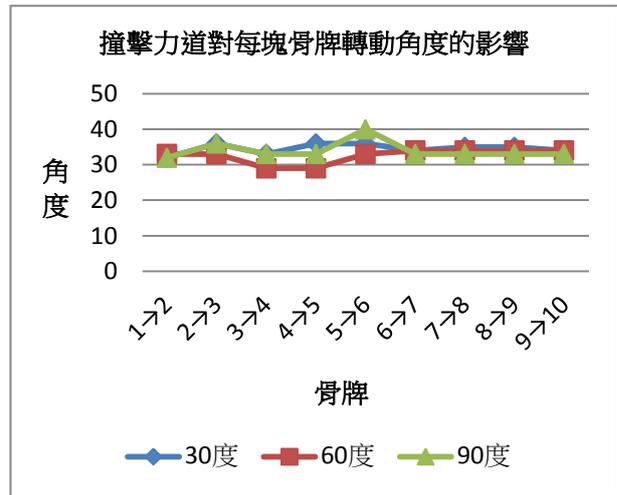
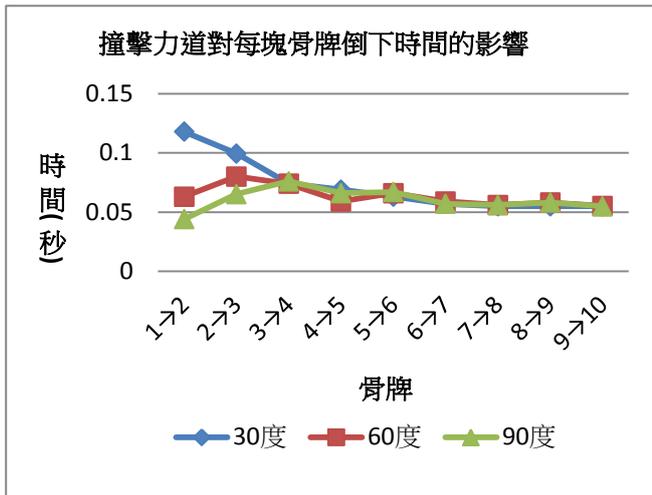
方法：以 21 克、高×寬×厚為 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 10 塊，5cm 的間距，用不同力道(改變單擺角度)在珍珠板上撞擊骨牌上方。

結果：

	30 度			60 度			90 度		
	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間
1→2	7.4508	32	0.1180	7.050	33	0.0630	7.7143	32	0.0440
2→3	7.0082	36	0.0994	7.350	33	0.0800	7.3361	36	0.0652
3→4	7.3082	33	0.0742	7.350	29	0.0740	7.6387	33	0.0760
4→5	7.0082	36	0.0690	7.350	29	0.0590	7.3361	33	0.0660
5→6	7.2295	36	0.0630	7.350	33	0.0660	7.2730	40	0.0670
6→7	7.2295	34	0.0570	7.575	34	0.0590	7.6387	33	0.0570
7→8	7.2295	35	0.0550	7.725	34	0.0560	7.3770	33	0.0560
8→9	7.2295	35	0.0550	7.575	34	0.0580	7.3361	33	0.0580
9→10	7.2295	34	0.0550	7.800	34	0.0552	7.3361	33	0.0550
1→10			0.7538			0.6914			0.6586

單位：撞擊點(cm)、角度(°)、倒下時間(秒)



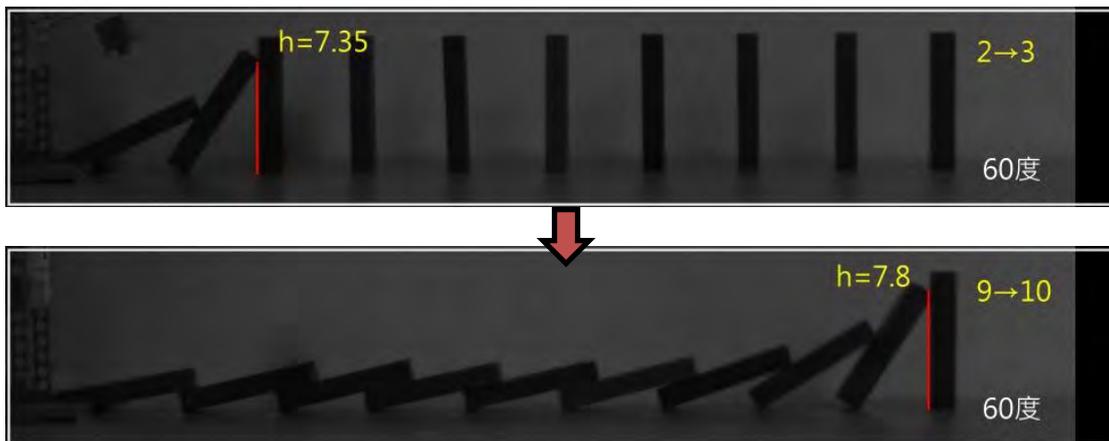


發現：

- (一) 撞擊力道越強，骨牌倒下的總時間越短。
- (二) 單擺 60°、90° 撞擊力道較強，導致 2→3 倒下的時間比 1→2(純粹受外力影響)長，而以單擺 30° 撞擊，因為間距 5cm(大約骨牌的一半)，如前所述撞擊位置高，前面骨牌倒下時轉動角度也大，因此 2→3 倒下的時間並沒有增加的現象。
- (三) 撞擊力道會被每塊骨牌的抗力所抵銷，因此無論單擺 30°、60°、90°，在 3→4 之後即不受撞擊力道影響，骨牌倒下的速度趨勢一致，越來越快。
- (四) 單擺 60°、90° 撞擊力道較強，撞擊高度有上升的趨勢。
- (五) 單擺 90° 撞擊力道太強，骨牌容易不穩，導致撞擊高度上下起伏較明顯。

※思考與推論：

當撞擊的力道太大，骨牌容易往前推動，因此撞擊高度會上升，骨牌本身產生的力矩也越大，倒下的速度也越快；而塊塊相連的結果，骨牌倒下總時間會越短。

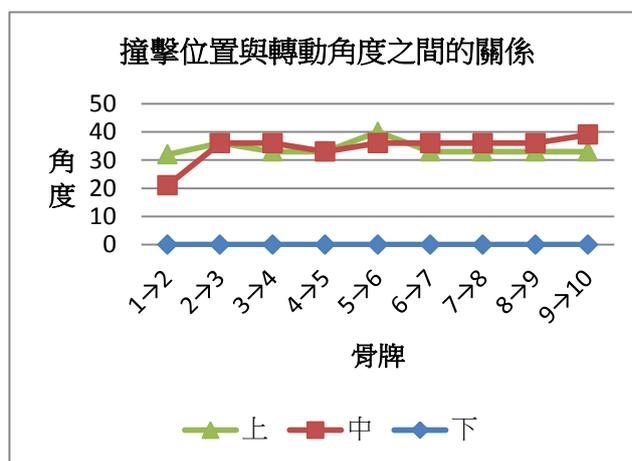
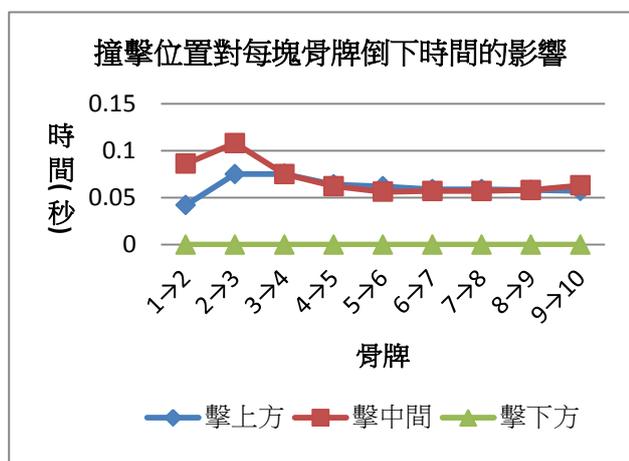
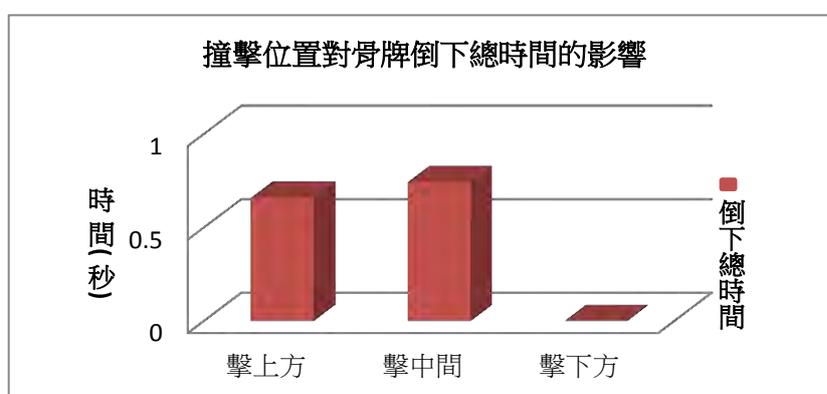


### 研究六、探討撞擊位置與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係

方法：以 21 克、高×寬×厚為 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 10 塊，5cm 的間距，用單擺 90° 撞擊骨牌的上方、中間、下方。

	上			中			下		
	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間
1→2	7.3178	32	0.0420	8.3208	21	0.0862	x	x	x
2→3	7.7383	36	0.0750	7.4717	36	0.1080	x	x	x
3→4	7.4019	33	0.0752	7.5566	36	0.0750	x	x	x
4→5	7.4019	33	0.0640	7.8113	33	0.0622	x	x	x
5→6	7.4019	40	0.0620	7.5566	36	0.0562	x	x	x
6→7	7.4019	33	0.0590	7.6415	36	0.0570	x	x	x
7→8	7.4019	33	0.0590	7.6415	36	0.0570	x	x	x
8→9	7.4860	33	0.0580	7.4717	36	0.0580	x	x	x
9→10	7.4019	33	0.0570	7.4717	39	0.0630	x	x	x
1→10			0.6586			0.7426			

單位：撞擊點(cm)、角度(°)、倒下時間(秒)



發現：

- (一) 骨牌倒下的時間，撞擊上方比撞擊中間時間來得短，尤其撞擊第一塊時撞擊上方的時間只有撞擊中間的一半。
- (二) 撞擊點在中間時，骨牌容易翻轉，撞擊高度會不穩；撞擊點在下方時，骨牌會向後倒。

※思考與推論：

當骨牌撞擊上方，產生的力矩大，骨牌倒下的時間短。

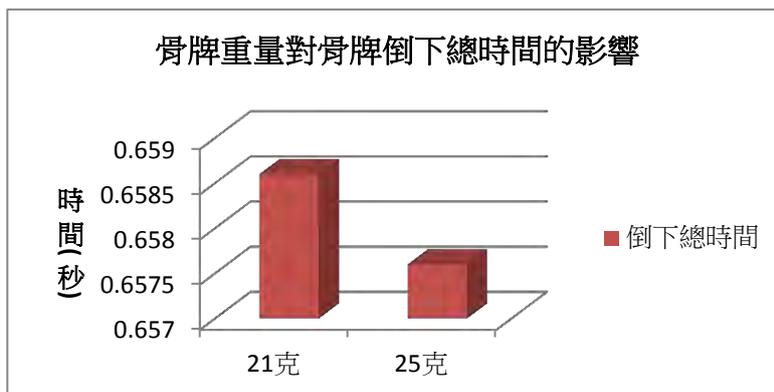


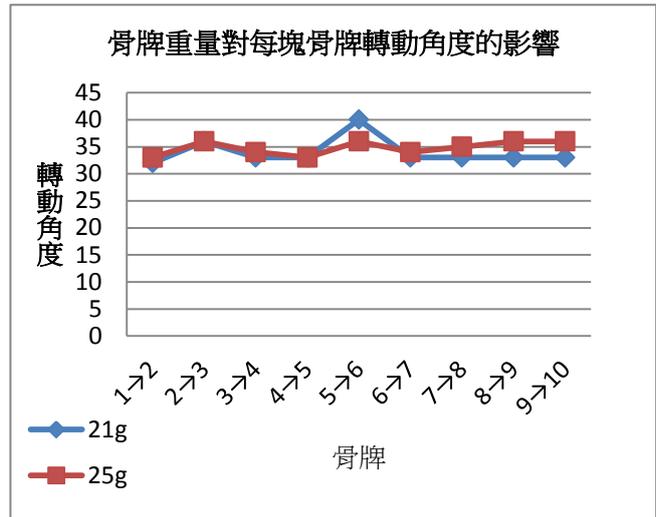
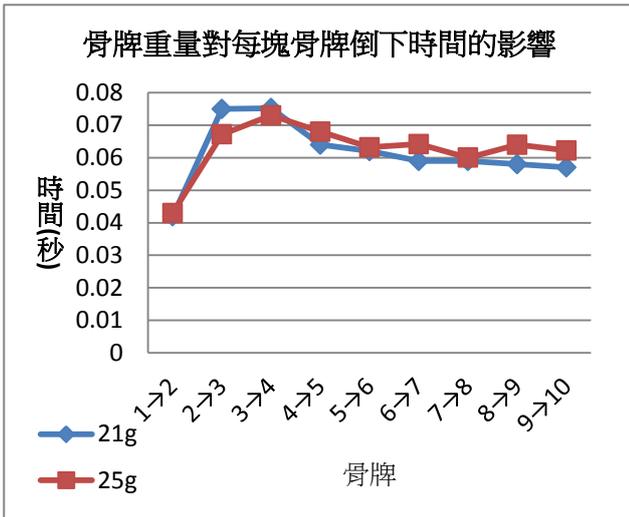
**研究七、探討骨牌重量與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係**

方法：以不同重量(21g、25g) 高×寬×厚為 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 10 塊，5cm 的間距，用單擺 90° 撞擊骨牌上方。

	21g			25g		
	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間
1→2	7.3178	32	0.0420	7.2336	33	0.0430
2→3	7.7383	36	0.0750	7.2336	36	0.0672
3→4	7.4019	33	0.0752	7.4860	34	0.0730
4→5	7.4019	33	0.0640	7.2336	33	0.0680
5→6	7.4019	40	0.0620	7.4019	36	0.0632
6→7	7.4019	33	0.0590	7.4019	34	0.0642
7→8	7.4019	33	0.0590	7.4019	35	0.0600
8→9	7.4860	33	0.0580	7.4019	36	0.0640
9→10	7.4019	33	0.0570	7.4019	36	0.0622
1→10			0.6586			0.6576

單位：撞擊點(cm)、角度(°)、倒下時間(秒)





- (一) 25g 的骨牌轉動角度比較大，倒下所需的總時間較短一些。
- (二) 21g 的骨牌較輕，2→3 時有被推動的現象，因此撞擊高度明顯提高，撞擊時間也會變快。
- (三) 21g 的骨牌較輕，骨牌較不穩，轉動角度變化也比較大。

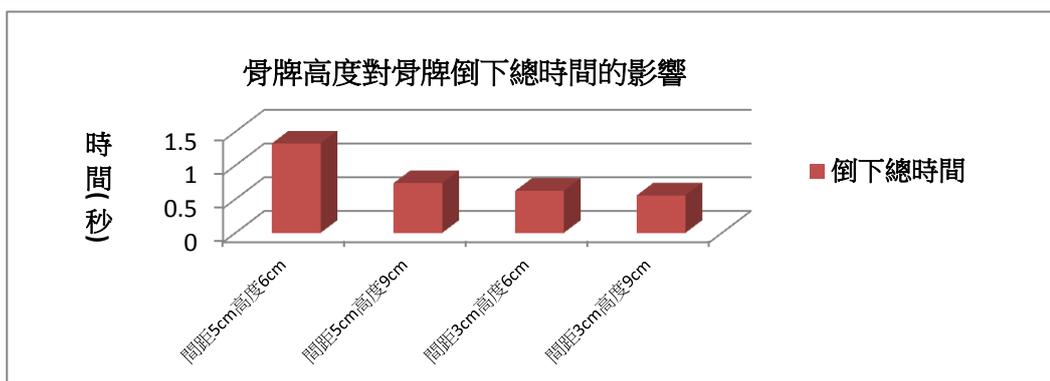
※思考與推論：

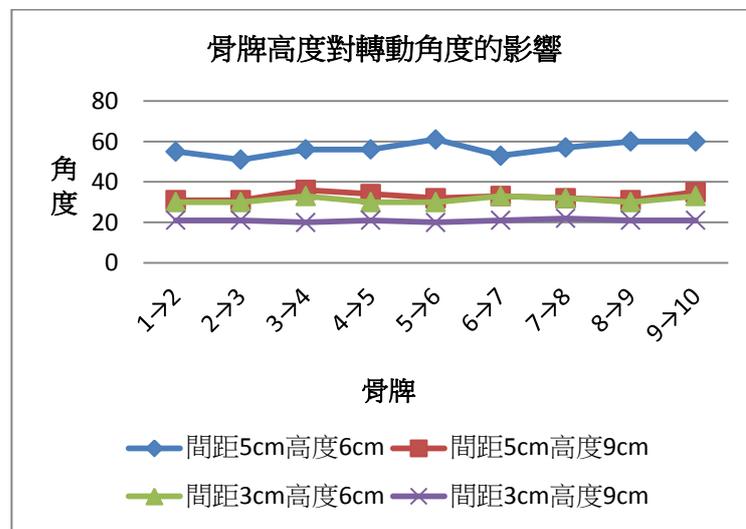
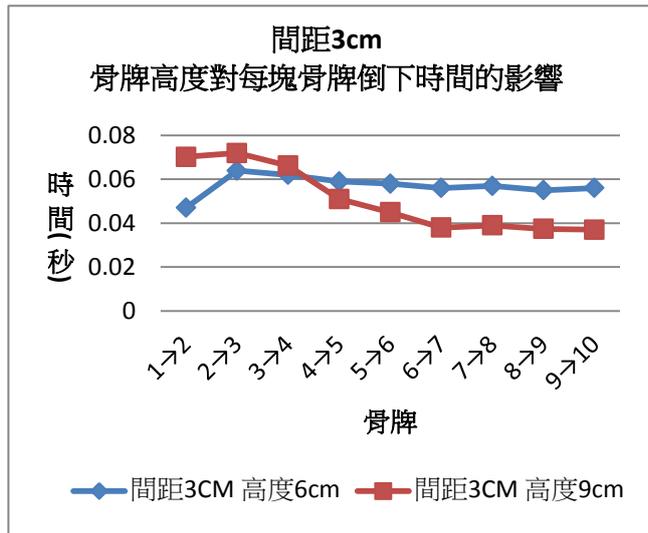
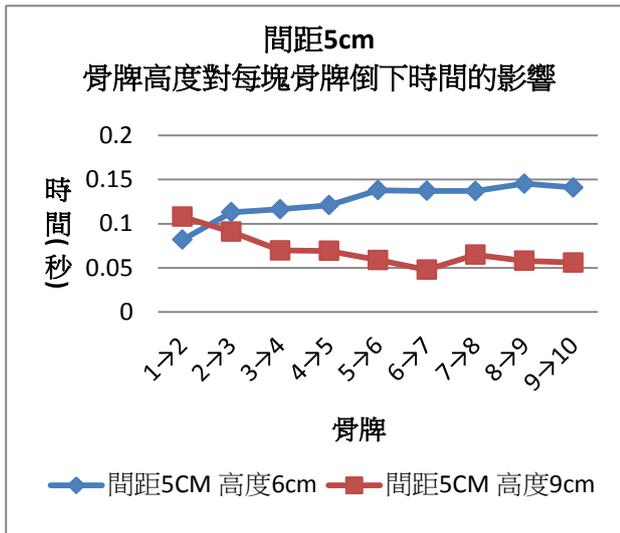
- (一) 骨牌越重，骨牌倒下時產生的力矩越大(轉動的力量越大)，因此倒下的總時間越短。
- (二) 因為骨牌重轉動時產生的力量大，倒下時轉動的角度較大。

**研究八、探討骨牌高度與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係**

方法：不同高度(6cm、9cm) 高×寬×厚為 6cm×2.75cm×1.3cm 與 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 10 塊(重量為 13g、21g)，分別以 5cm 與 3cm 的間距，用單擺 30° 撞擊骨牌上方。

	間距 5cm 高度 6cm			間距 5cm 高度 9cm			間距 3cm 高度 6cm			間距 3cm 高度 9cm		
	撞擊點	角度	時間									
1→2	5.6060	55	0.0820	7.0435	31	0.1080	5.6000	30	0.0820	8.2125	21	0.0702
2→3	6.4918	51	0.1130	7.0437	31	0.0910	5.6000	30	0.1130	8.2125	21	0.0720
3→4	5.0164	56	0.1164	7.0435	36	0.0698	5.6000	33	0.1164	8.2125	20	0.0662
4→5	5.0164	56	0.1210	7.0435	34	0.0692	5.6000	30	0.1210	8.2125	21	0.0510
5→6	5.0164	61	0.1380	7.0435	32	0.0600	5.4667	30	0.1380	8.2125	20	0.0450
6→7	5.7541	53	0.1372	7.0437	33	0.0562	5.2667	33	0.1372	8.2125	21	0.0380
7→8	5.3115	57	0.1370	7.0435	32	0.0562	5.2667	32	0.1370	8.3250	22	0.0390
8→9	5.3115	60	0.1454	7.5326	31	0.0560	5.2667	30	0.1454	8.2125	21	0.0374
9→10	4.7213	60	0.1410	6.7500	35	0.0560	5.6000	33	0.1410	8.2125	21	0.0370
1→10			1.327			0.7372			0.6232			0.5568





發現：

- (一) 相同間距時，骨牌越高，倒下的時間越短。
- (二) 同樣高度的骨牌，間距越短，倒下所需的時間越短。
- (三) 高度 6cm 的骨牌，間距太大(5cm)時，撞擊高度呈現不穩定的狀態。
- (四) 骨牌越密(間距小)，轉動角度越小。

※思考與推論：

- (一) 在相同間距時，骨牌如果越高，本身的質量越大，轉動的力量越大，產生的力矩也越大，倒下的時間就越短。



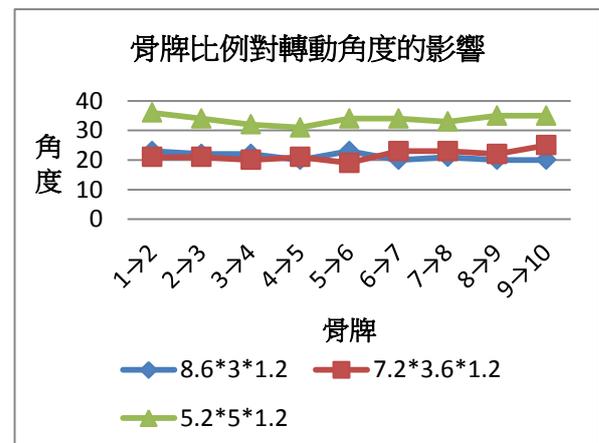
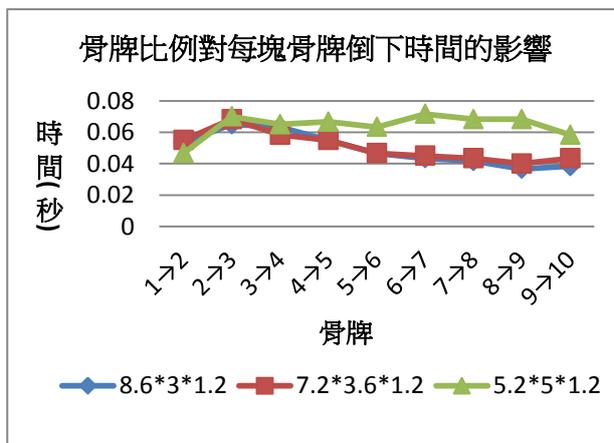
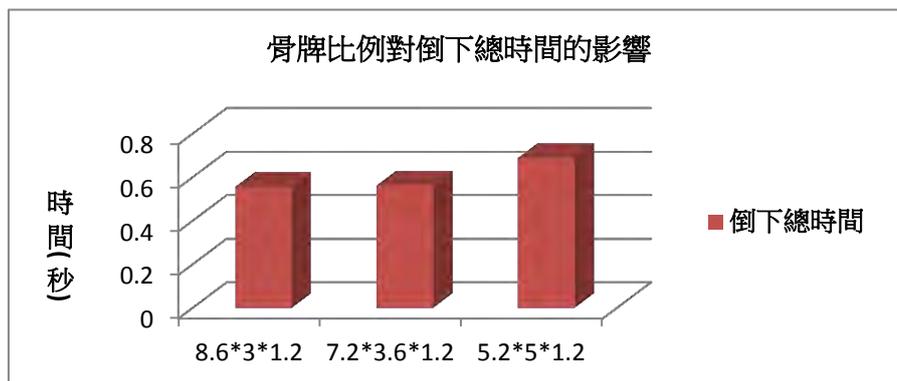
- (二) 當間距太大到接近骨牌時，則轉動的力量過大，容易產生位移，且擊中的位置過低，本身倒下的力矩過小，因此倒下所需時間較長，且不穩定。

### 研究九、探討骨牌高寬厚比例與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係

方法：以不同比例(體積接近)的骨牌 10 塊，5cm 的間距，用單擺 30° 撞擊骨牌的上方。

	8.6*3*1.2 7:3:1 30.96 立方公分			7.2*3.6*1.2 6:3:1 31.104 立方公分			5.2*5*1.2 4:4:1 31.2 立方公分		
	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間
1→2	7.6851	23	0.053333	6.7407	21	0.055000	4.0857	36	0.046667
2→3	7.8681	22	0.065000	6.7407	21	0.068333	4.0857	34	0.070000
3→4	7.9596	22	0.063333	6.7407	20	0.058333	4.1786	32	0.065000
4→5	7.9596	20	0.055000	6.5872	21	0.055000	4.1786	31	0.066667
5→6	7.9596	23	0.046667	6.6638	19	0.046667	4.1786	34	0.063333
6→7	7.9596	20	0.043333	6.7407	23	0.045000	4.1786	34	0.071667
7→8	7.9596	21	0.041667	6.7407	23	0.043333	4.1786	33	0.068333
8→9	8.1426	20	0.036667	6.8170	22	0.040000	3.9929	35	0.068333
9→10	8.1426	20	0.038333	6.6638	25	0.043333	4.1786	35	0.058333
1→10			0.555333			0.561667			0.688333

單位：撞擊點(cm)、角度(°)、倒下時間(秒)

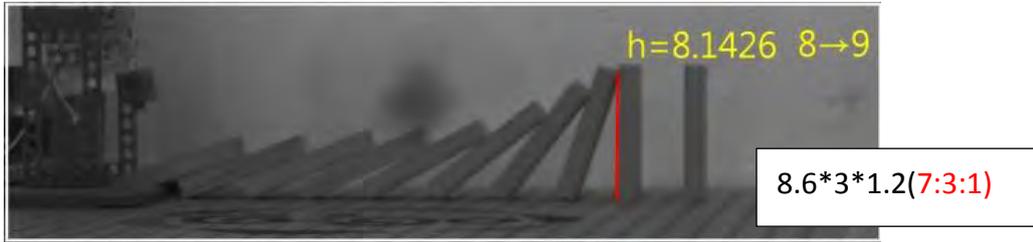


發現：

- (一) 倒下總時間以 8.6\*3\*1.2(7:3:1)最短，7.2\*3.6\*1.2(6:3:1)其次，5.2\*5\*1.2(4:4:1)最長。
- (二) 8.6\*3\*1.2(7:3:1)、7.2\*3.6\*1.2(6:3:1)撞擊的速度較快，5.2\*5\*1.2(4:4:1)則明顯較慢。

※思考與推論：

一塊骨牌要被推倒，所需的外力×高度要大於重力×二分之一底面積的厚度。在本實驗中，三塊骨牌厚度相同(皆為 1.2cm)、體積接近(重力也接近)。以同樣的外力撞擊，**8.6\*3\*1.2(7:3:1)**高度高，骨牌力矩大，倒下的速度比 **7.2\*3.6\*1.2(6:3:1)**快了 0.006334 秒。但網路上大家都建議骨牌的最佳比例應該要 **6:3:1** 最好，我們覺得應該是以這樣的比例來說，底面積會大一點，重心較穩，排起來可以兼具速度與穩定性。

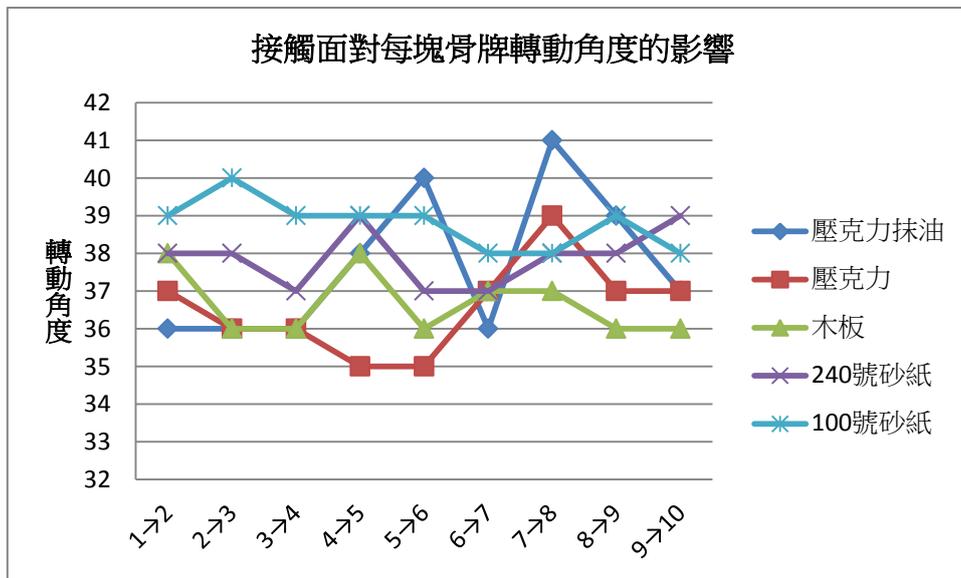
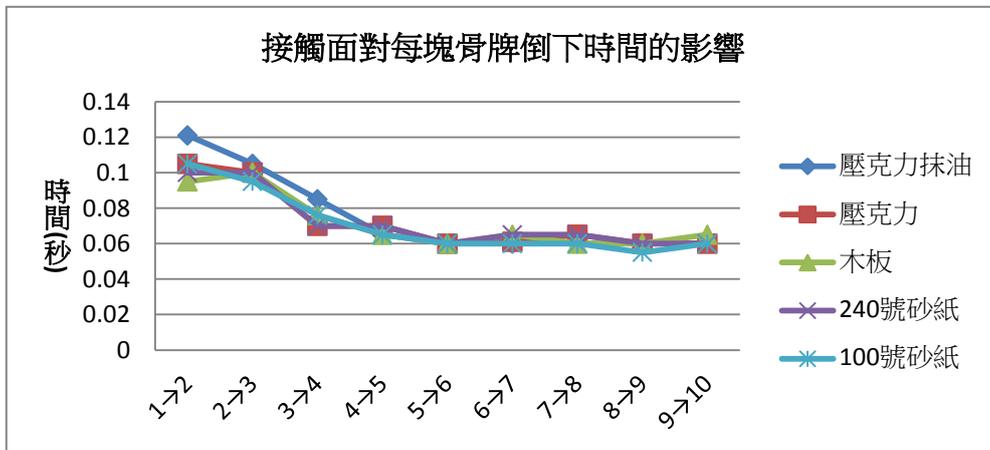
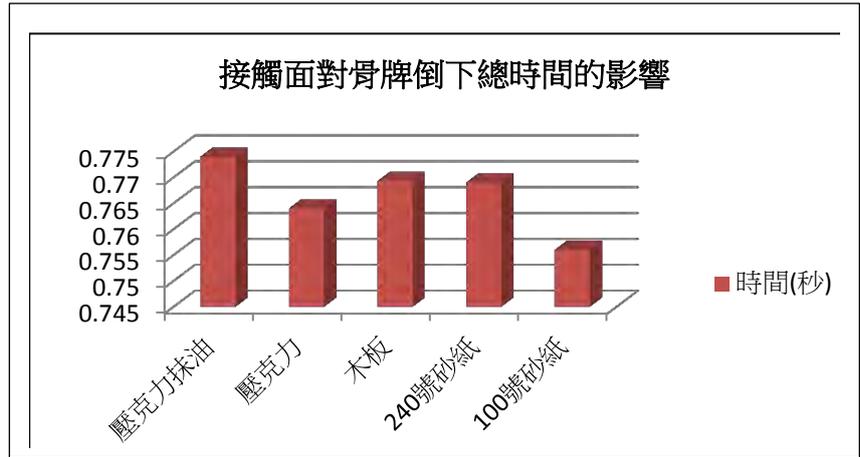


**研究十、探討接觸面與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係**

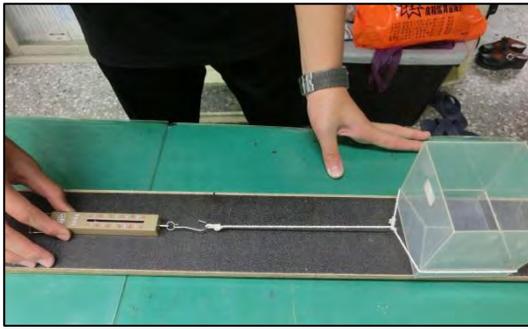
方法：以 25 克、高×寬×厚為 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 10 塊，5cm 的間距，用單擺 30° 撞擊骨牌上方。

	壓克力抹油			壓克力			木板			240 砂紙		
	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間
1→2	7.272	36	0.121	7.2	37	0.105	7.746	38	0.095	7.68	38	0.1
2→3	7.545	36	0.105	7.537	36	0.1	7.86	36	0.1	7.56	38	0.1
3→4	7.272	36	0.085	7.65	36	0.07	7.86	36	0.076	7.68	37	0.07
4→5	7.363	38	0.065	7.762	35	0.07	7.86	38	0.065	7.32	39	0.07
5→6	6.909	40	0.06	8.775	35	0.06	7.746	36	0.06	7.44	37	0.06
6→7	7.363	36	0.06	7.425	37	0.061	7.632	37	0.065	7.44	37	0.065
7→8	6.909	41	0.06	8.887	39	0.065	7.746	37	0.06	7.44	38	0.065
8→9	6.09	39	0.06	7.65	37	0.06	7.518	36	0.06	7.44	38	0.06
9→10	6.09	37	0.006	7.425	37	0.06	7.405	36	0.065	7.44	39	0.06
1→10			0.7740			0.7640			0.7693			0.7690

	100 號砂紙		
	撞擊點	角度	時間
1→2	7.372	39	0.105
2→3	7.372	40	0.095
3→4	7.277	39	0.076
4→5	7.277	39	0.065
5→6	7.372	39	0.06
6→7	7.468	38	0.06
7→8	7.66	38	0.06
8→9	7.277	39	0.055
9→10	7.564	38	0.06
1→10			0.7560



※進一步探究：究竟不同的接觸面其摩擦力是如何呢？我們以自然課學過的方法進行測試：

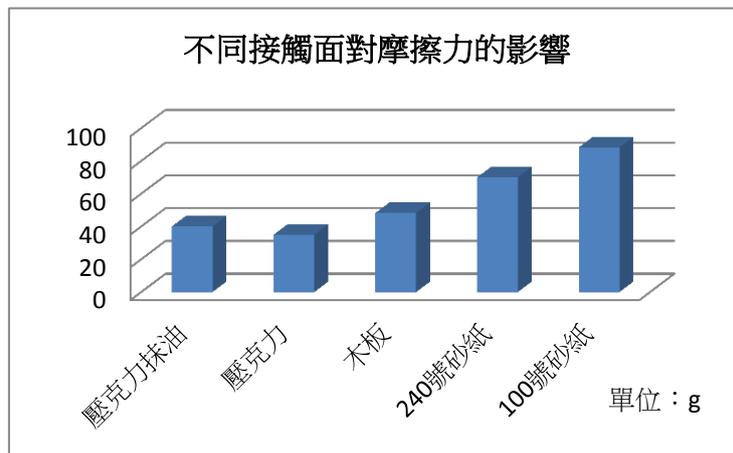


實驗說明：將 10.4cm×10.4cm×10.2cm 重量為 97.3g 的壓克力空盒放在不同接觸面上，並綁上棉繩以彈簧秤往前拉，觀察空盒移動時彈簧秤的數值。

結果：

	壓克力抹油	壓克力	木板	240 號砂紙	100 號砂紙
1	40	35	50	70	90
2	40	35	45	70	90
3	40	35	50	70	85
平均	40	35	48.3	70	88.3

單位：g



※發現與推論：

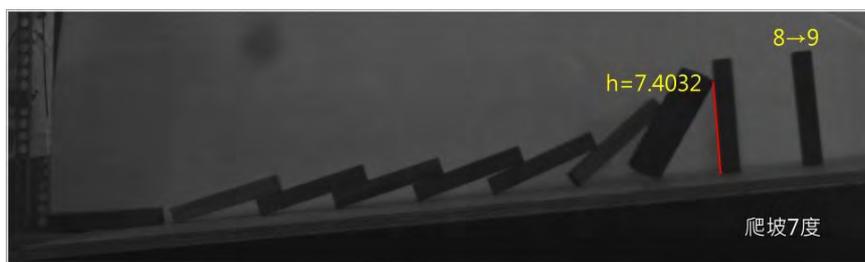
- (一)不同接觸面摩擦力的大小依序為：100 號砂紙 >240 號砂紙 >木板>壓克力抹油>壓克力；而骨牌倒下總時間的長短依序為：壓克力抹油>木板 >240 號砂紙 >壓克力>100 號砂紙。
- (二)壓克力抹油在拉動空盒的實驗中，彈簧秤比壓克力多拉了 5g，我們推測是因為塗上了油產生吸附力而造成。
- (三)100 號砂紙摩擦力最大，但倒下總時間卻最短，我們推測是因為骨牌倒下主要的因素是重心位移，只要骨牌站得穩，受撞擊使重心離開底面積，骨牌就會倒下，底部摩擦力反而不是影響倒下時間的主要原因。
- (四) 壓克力抹油容易使骨牌滑動導致骨牌位移，使撞擊高度與轉動角度呈現不穩狀態，骨牌倒下時間增長。
- (五) 100 號砂紙摩擦力最大，骨牌站最穩，受外力撞擊時第一塊骨牌轉動角度也最大，整體說來，因為不易位移，轉動角度也最平穩。

### 研究十一、探討斜坡與速度、撞擊高度、轉動角度之間的關係

方法：以 25 克、高×寬×厚為 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 10 塊，5cm 的間距，用單擺 90° 在不同坡度的接觸面上撞擊骨牌上方。

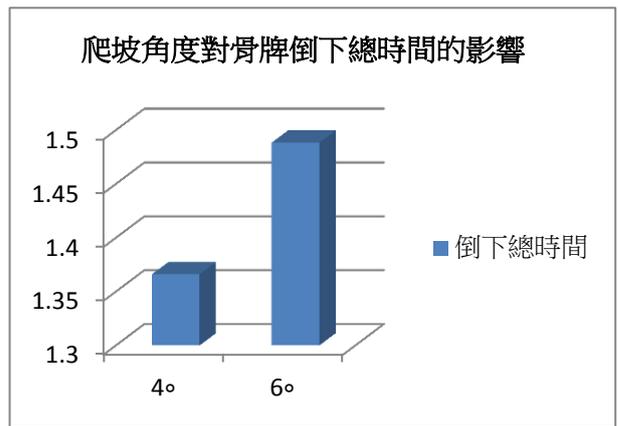
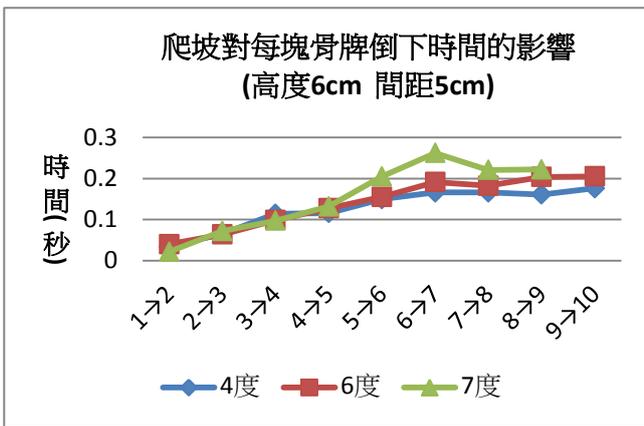
骨牌 9cm 間距 5cm	4°			7°			8° (失敗)		
	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間
1→2	7.4032	35	0.050	7.4758	35	0.045	X	X	X
2→3	6.8226	40	0.060	7.4758	35	0.060	X	X	X
3→4	7.3306	33	0.070	7.4758	35	0.080	X	X	X
4→5	7.6210	34	0.070	7.4758	35	0.070	X	X	X
5→6	7.5483	35	0.065	7.6210	35	0.065	X	X	X
6→7	7.4032	34	0.055	7.6210	36	0.060	X	X	X
7→8	7.4758	35	0.065	7.6210	35	0.065	X	X	X
8→9	7.4758	36	0.060	7.4032	35	0.055	X	X	X
9→10	7.5484	36	0.060	7.6210	35	0.070	X	X	X
1→10			0.670			0.740			

發現：大骨牌 9cm×2.75cm×1.3cm 重心高，只能在 7° 左右的斜坡站立，且到了骨牌 8 時，由於力道不足，骨牌會翻轉，導致骨牌 9 倒下時間增長。斜坡增為 8° 時則完全無法站立。



※討論：重心高，在斜坡上站立不易，改換小骨牌 6cm×2.75cm×1.3cm 試試看。

骨牌 6cm 間距 5cm	4°			6°			7°		
	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間
1→2	5.2615	32	0.034	4.5231	53	0.04000	5.3438	29	0.0214
2→3	3.6000	52	0.065	4.3385	48	0.06375	4.3125	48	0.0722
3→4	3.6000	51	0.114	3.6000	53	0.09875	3.9375	51	0.0974
4→5	3.4154	52	0.116	3.6000	55	0.12775	3.5625	54	0.1320
5→6	3.6000	57	0.15	3.8769	53	0.15525	3.4688	54	0.2052
6→7	3.8789	57	0.1662	3.8769	51	0.19125	3.9375	50	0.2620
7→8	3.4154	55	0.1662	3.4154	56	0.18250	3.6563	54	0.2210
8→9	3.7846	52	0.161	3.6923	53	0.20375	3.7500	51	0.2220
9→10	3.7846	56	0.1762	3.6000	56	0.20525	3.7500	49	X
1→10			1.3660			1.48825			

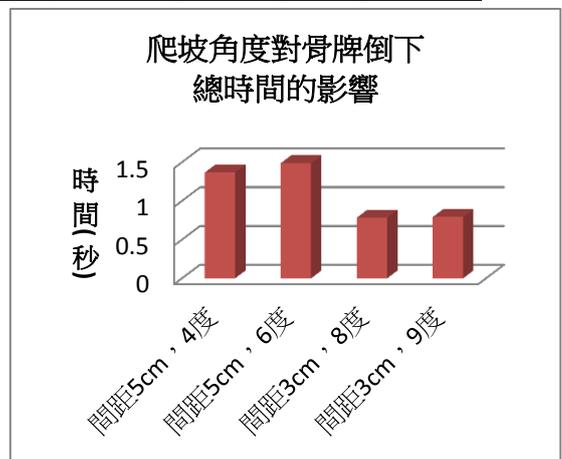
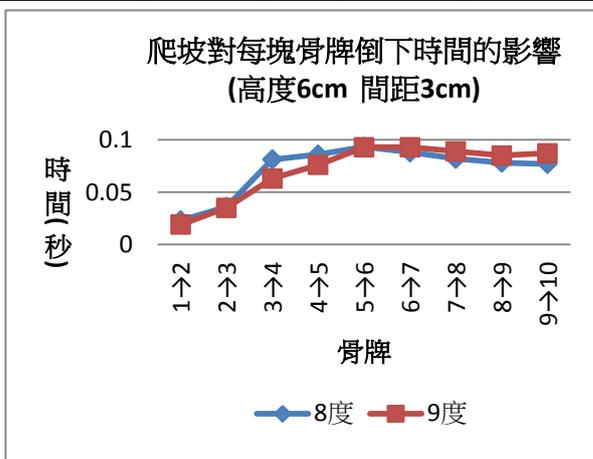


發現：(一)斜坡角度越大，骨牌倒下所需時間越長。  
 (二)由於間距太大，即使小骨牌可以站穩，但到了7°的9→10，爬坡仍失敗。



※討論：間距太大爬坡效果不好，如果縮短間距會如何？

骨牌 6cm 間距 3cm	8°			9°			10(失敗)		
	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間	撞擊點	角度	時間
1→2	5.4462	28	0.023	5.9077	17	0.019	X	X	X
2→3	5.1692	29	0.036	5.7231	13	0.035	X	X	X
3→4	5.0769	28	0.0812	5.8154	15	0.063	X	X	X
4→5	5.0769	29	0.086	4.9846	13	0.076	X	X	X
5→6	5.0769	29	0.0932	5.8154	18	0.093	X	X	X
6→7	5.2615	30	0.088	5.8154	16	0.093	X	X	X
7→8	5.2615	29	0.082	5.7231	11	0.089	X	X	X
8→9	5.3538	30	0.0782	5.7231	11	0.085	X	X	X
9→10	5.1692	30	0.077	5.8154	14	0.0872	X	X	X
1→10			0.7838			0.7924			



- 發現：(一)把間距縮小，骨牌可以爬坡的角度會多 $2^{\circ}$ 。
- (二)把間距縮小，即便斜坡角度較大，倒下總時間卻更短。
- (三)爬坡時跟平面一樣，間距越小撞擊高度越高，產生的力矩越大，所需時間越短。
- (四)爬坡角度越大，倒下時轉動的角度越小。

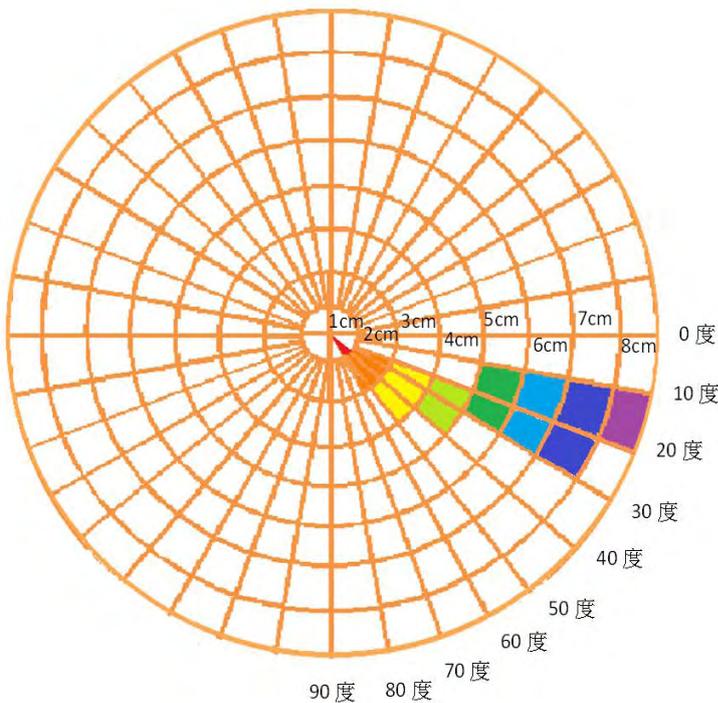
※思考與推論：

- (一)骨牌重心若太高，在斜坡角度過大時容易倒下，能爬坡的角度較小。
- (二)骨牌縮短，重心降低，可以站立的斜坡角度增加；但若間距太大，撞擊的高度太低，倒下時形成的力矩不夠，再加上斜坡要克服的地心引力增加，因此爬坡不易成功。
- (三)重心降低、間距縮小，是爬坡成功的主要關鍵。
- (四)角度越大，倒下時轉動的角度越小，形成的力矩越小，因此倒下的時間越長。

**研究十二、探討轉彎角度如何影響骨牌的成功與失敗？**

方法：以 4.52 克、高×寬×厚為 4.4cm×2.2cm×0.7cm 的骨牌 10 塊，用自製的角度測量器以不同寬度的圓弧、不同角度的排列位置，以單擺  $30^{\circ}$  撞擊，進行骨牌推倒實驗，並觀察記錄骨牌推倒成功與否。

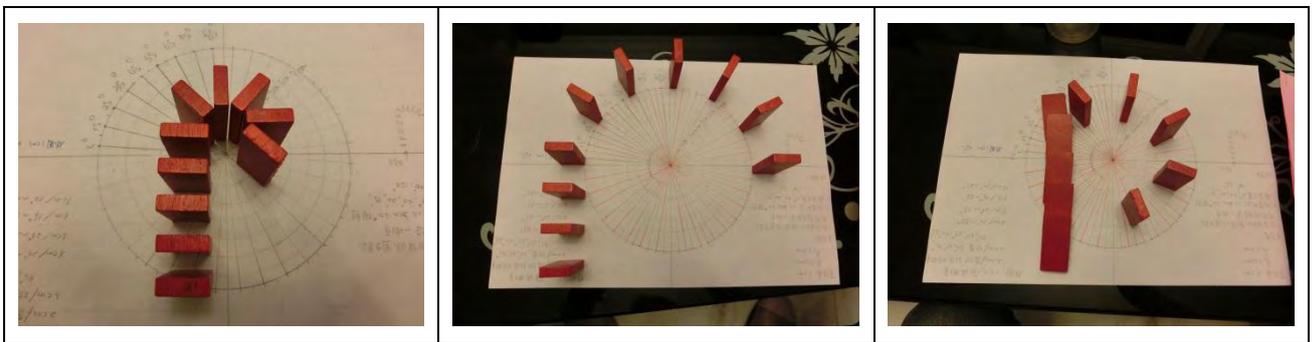
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1CM	✕排不進去	✕排不進去	✕排不進去	○	○	○	✕	✕	✕
2CM	✕太緊推不倒	○	○	○	○	○	✕	✕	✕
3CM	✕太緊推不倒	○	○	○	○	✕	✕	✕	✕
4CM	✕太緊推不倒	○	○	○	✕	✕	✕	✕	✕
5CM	○	○	○	✕	✕	✕	✕	✕	✕
6CM	○	○	○	✕	✕	✕	✕	✕	✕
7CM	○	○	○	✕	✕	✕	✕	✕	✕
8CM	○	○	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕



發現：因骨牌只有 4.4cm 當線圈，以 1cm 為對準基點，骨牌可推倒的角度範圍為 40 度至 60 度。  
 2cm 為對準基點，骨牌可推倒的角度範圍為 20 度至 60 度。  
 3cm 為對準基點，骨牌可推倒的角度範圍為 20 度至 50 度。  
 4cm 為對準基點，骨牌可推倒的角度範圍為 20 度至 40 度。  
 5cm 為對準基點，骨牌可推倒的角度範圍為 10 度至 30 度。  
 6cm 為對準基點，骨牌可推倒的角度範圍為 10 度至 30 度。  
 7cm 為對準基點，骨牌可推倒的角度範圍為 10 度至 30 度。  
 8cm 為對準基點，骨牌可推倒的角度範圍為 10 度至 20 度。

※思考與推論：

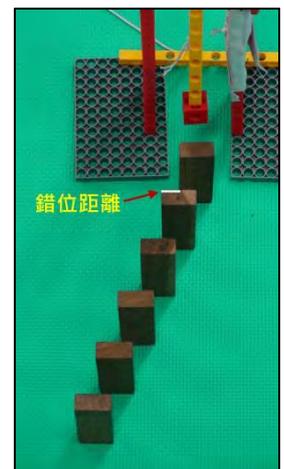
- (一)線圈半徑太小(1cm)若角度太小，骨牌太擠排不進去，因此能夠排列的角度為 40~60 度。
- (二)當線圈半徑太大(8cm)若角度太大，骨牌倒下的位置不在下一塊骨牌的方向上，打不到下一塊骨牌，自然會失敗。



### 研究十三、探討錯位距離如何影響骨牌的成功與失敗？

方法：25 克、高×寬×厚為 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 6 塊，以不同的錯位、間距 3cm、5cm 的方式排列，並以單擺 30°、90° 撞擊，並觀察記錄骨牌推倒成功與否。

錯位距離	以 30 度撞擊		以 90 度撞擊	
	間距 3cm	間距 5cm	間距 3cm	間距 5cm
0.4cm	○	○	○	○
0.8cm	○	○	○	○
1.6cm	○	○	○	○
2.4cm	○	○	○	○
2.6cm	×	○	○	○
2.7cm	×	×	○	○
2.8cm	×	×	×	×



發現：

- (一)骨牌寬度 2.75cm 只要撞擊方向沒有偏掉，即便只有打到 0.05cm 依舊會使骨牌順利倒下。
- (二)力量越大，錯位能倒的範圍也越大。
- (三)以 30° 撞擊時，間距 5cm 產生的力矩比間距 3cm 大，因此錯位能倒的範圍比較大。

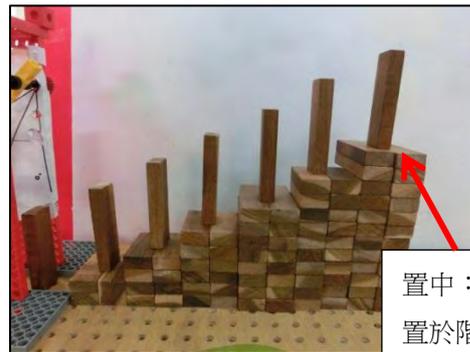
※思考與推論：

錯位能否順利倒下，影響關鍵在於 1.施力方向要正確，不得偏離。2.力量要夠，增加撞擊力與間距適中(大約骨牌的一半距離)都可以增加倒下的力矩。

### 研究十四、探討階梯寬窄如何影響骨牌的成功與失敗？

方法：21 克、高×寬×厚為 9cm×2.75cm×1.3cm 的骨牌 10 塊，以置前、置中、置後三種方式放在不同寬窄的階梯上，並以單擺 30° 撞擊，觀察記錄骨牌推倒成功與否。

	置 前					置 中				置 後			
	高度 1.3	高度 2.6	高度 3.9	高度 5.2	高度 6.5	高度 1.3	高度 2.6	高度 3.9	高度 5.2	高度 1.3	高度 2.6	高度 3.9	高度 5.2
寬度 2.75	O	O	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X
寬度 5.50	O	O	O	O	X	O	O	X	X	O	X	X	X
寬度 8.25	O	O	O	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X



發現：

- (一) 骨牌立在階梯的前端，倒下時能轉動的範圍較大，較容易成功；立在後端則容易被階梯卡住，撞不到下一個骨牌。
- (二) 階梯高度 5.2cm 是骨牌 9cm 的 0.578 倍，在寬度 5.5cm(骨牌高的 0.61 倍，太寬 8.25cm 或太窄 2.75cm 都不行)時，骨牌置於前面還可以推倒下一個骨牌。階梯若太高，則骨牌倒下時會卡住，無法觸及下一個骨牌。
- (三) 只要階梯高度不要太高(3.9cm 約骨牌的 0.43 倍)，階梯寬度為骨牌的 0.917 倍(8.25cm)時，置前都還可以打得到下一張骨牌；但置中或置後則不能。

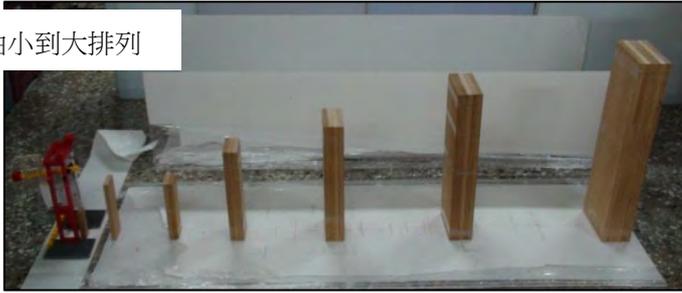
### 研究十五、探討骨牌撞擊的力量到底有多大呢？

※說明：我們很想知道骨牌一塊一塊倒下，力矩越來越大，能推倒的骨牌究竟有多大？

又不同的間距推倒骨牌的力量是否一樣？於是在爸爸的協助下，我們取得加速度測量儀，老師教我們  $F=ma$ (力=質量×加速度)的物理原理，利用骨牌質量(體積×密度)乘上第七塊骨牌倒下時的瞬間加速度，計算最後一塊骨牌倒下時的力有多大。

方法：以高度 9cm、18cm、27cm、36cm、45cm、54cm 重量 15g、120g、425g、1000g、1700g、3300g 的骨牌、由小到大用不同的間距排列，再以單擺 90° 撞擊，並以加速度測量器測第七塊大骨牌倒下時的加速度，重複實驗五次求平均，再利用  $F=ma$  的公式計算第七塊大骨牌倒下時的力有多大？

骨牌由小到大排列



測量儀可顯示加速度的數值



加速度測量器測量第七塊骨牌倒下時的瞬間加速度

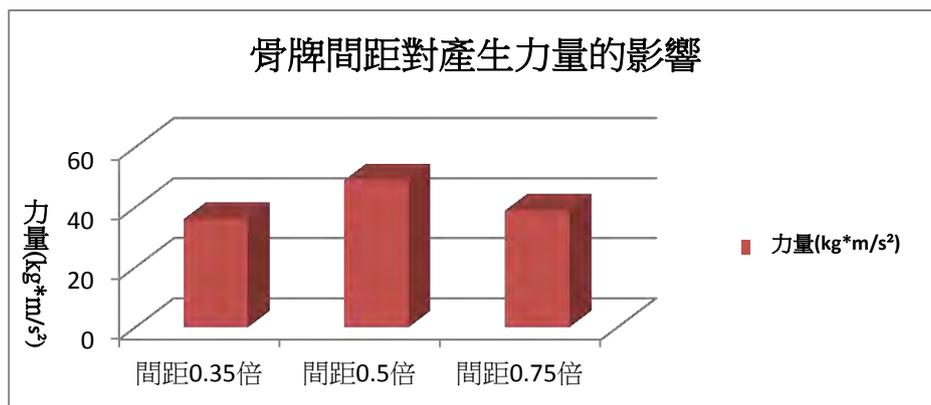
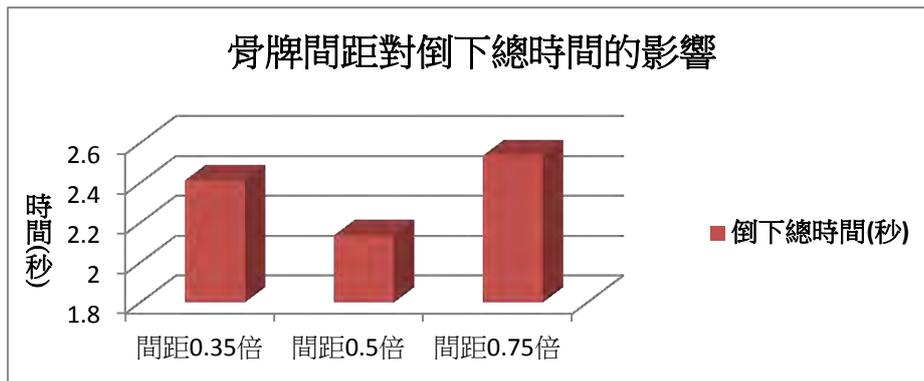
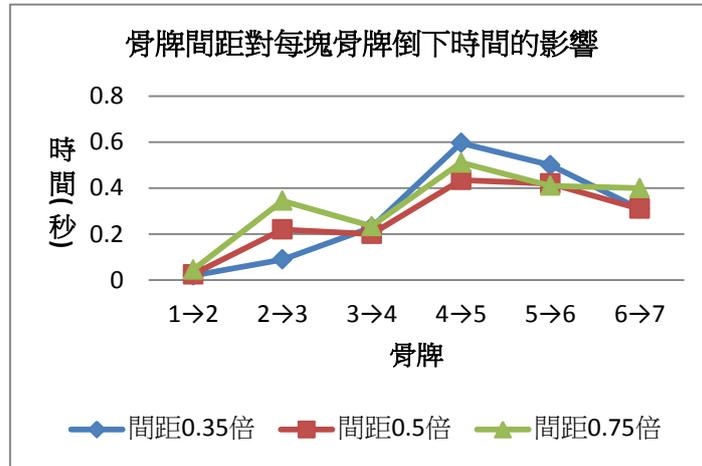


	間距 0.35 倍	間距 0.5 倍	間距 0.75 倍
1→2	0.020	0.025	0.045
2→3	0.090	0.220	0.345
3→4	0.230	0.201	0.235
4→5	0.596	0.435	0.511
5→6	0.500	0.420	0.410
6→7	0.310	0.310	0.400
倒下總時間(秒)	<b>2.412</b>	<b>2.137</b>	<b>2.537</b>
平均加速度(m/s <sup>2</sup> )	13.36	<b>18.18</b>	14.42

※說明：我們選用的材料是南檜，查得它的密度是 0.4g/cm<sup>3</sup> 左右，因此質量等於體積×0.4

	體積 cm <sup>3</sup>	密度 g/cm <sup>3</sup>	質量 g	質量倍數		重量 gw
第一塊	29.1600	0.4	11.664	2/1	4	15gw
第二塊	116.640	0.4	46.656			59gw
第三塊	213.840	0.4	85.536	3/2	1.83	124gw
第四塊	905.034	0.4	362.0136	4/3	4.232	425gw
第五塊	2433.60	0.4	973.44	5/4	1.83	1000gw
第六塊	3110.40	0.4	1244.16	6/5	1.278	1700gw
第七塊	6735.96	0.4	<b>2694.384</b>	7/6	2.166	3300gw

第七塊骨牌	間距 0.35 倍	間距 0.5 倍	間距 0.75 倍
質量 kg	2.694384	2.694384	2.694384
加速度(m/s <sup>2</sup> )	13.36	18.18	14.42
力量(kg*m/s <sup>2</sup> )	35.9969702	48.9839	38.8530173
倒下總時間(秒)	2.412	2.137	2.537



發現：

- (一) 我們以不同的間距測試骨牌能推倒的範圍，發現在本實驗中只有以前一塊骨牌高度 0.35 倍~0.75 倍之間距，足以推倒這七塊不同質量的骨牌。
- (二) 在所有能推倒的間距中，0.5 倍(前面骨牌高度一半的距離)的間距，產生的加速度最大，骨牌倒下的時間也最短。

※思考與推論：

- (一)骨牌 0.5 倍 的間距，就如同研究二、三探討間距的實驗一樣，當骨牌為 9cm、間距 5cm(接近一半)時，骨牌撞擊的位置高，且前一塊骨牌轉動的角度也大，產生的力矩最大，因此倒下的力量最大，所需的時間最短。
- (二)照理說，間距越短，行進的距離越短，倒下所需的時間也應該越短才對。但在本實驗中，由於骨牌質量不斷增加，以 0.35 倍的間距倒下時的力矩要推動後面的骨牌較吃力(前一張骨牌倒下時轉動角度小)，以至於增加了全部倒下的總時間。

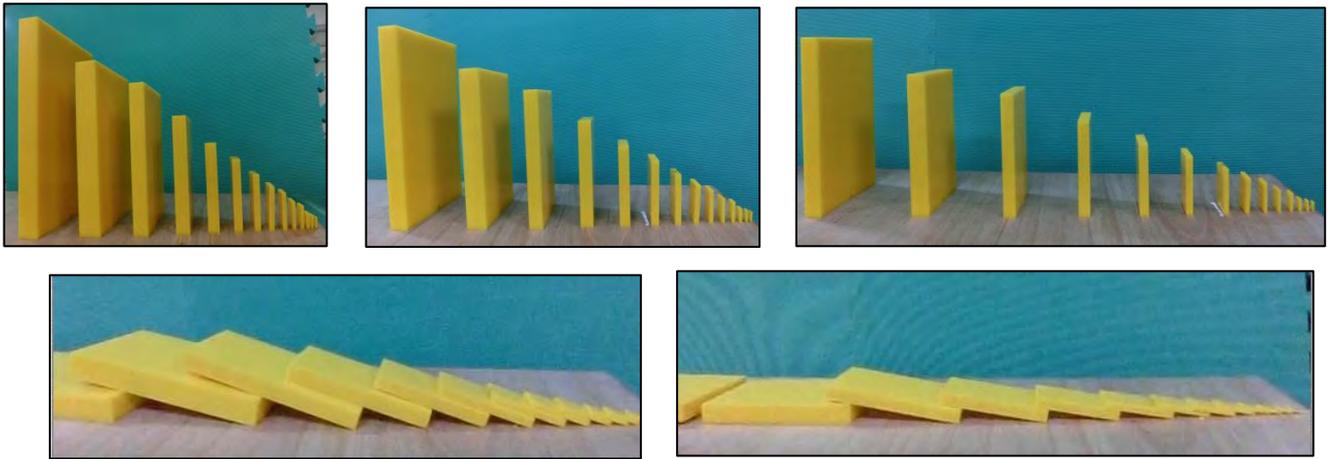
※思考：前面的實驗每塊骨牌之間質量並沒有固定的倍數關係，如果把骨牌以固定倍數增加質量，當間距不同時，被推倒的情形又是如何？

※說明：我們在中央大學物理研究室網頁中看到以小撞大的方式，可以將質量 1.5 倍的骨牌全數撞倒，但實驗中並未明確指出間距，僅提及骨牌可打到的範圍皆可。為了進一步驗證，我們也訂做一組質量 1.5 倍的骨牌，以不同間距來試試看。

### 研究十六、質量固定倍數時，不同間距對骨牌倒下情形的影響。

方法：以中央大學在網路上提供的 1.5 倍骨牌規格表訂製小到大骨牌一組 14 塊，分別以不同間距在第一塊骨牌前方由同一人吹一口氣，試試其倒下的情形。

編號	厚(mm)	寬(mm)	高(mm)	體積(mm <sup>3</sup> )	重量(g)
1	2.0	8.0	16.0	256	0.3
2	3.0	9.2	18.5	511	0.6
3	4.0	11.3	22.6	1022	1.2
4	4.0	16.0	32.0	2048	2.4
5	5.0	20.2	40.5	4091	4.7
6	6.0	26.1	52.3	8190	9.4
7	8.0	32.0	64.0	16384	18.8
8	10.0	40.5	81.0	32805	37.7
9	12.0	52.3	104.5	65584	75.4
10	16.0	64.0	128.0	131072	150.7
11	20.0	81.0	161.9	262278	301.5
12	24.0	104.5	209.0	524172	602.9
13	32.0	128.0	256.0	1048576	1206
14	40.0	161.9	323.8	2096929	2412



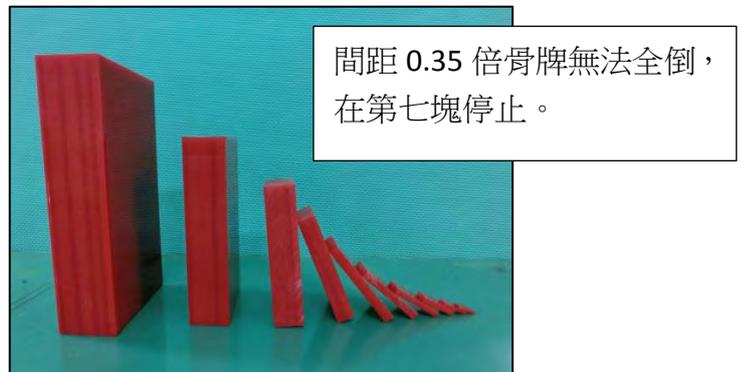
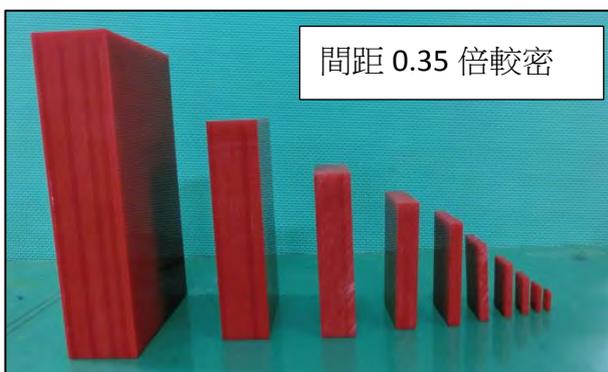
發現：以這樣的方式製作 1.5 倍的骨牌，真的不管任何間距(即使小到前一塊骨牌 0.5 倍間距或大到 0.98 倍)，都可以把骨牌推倒。

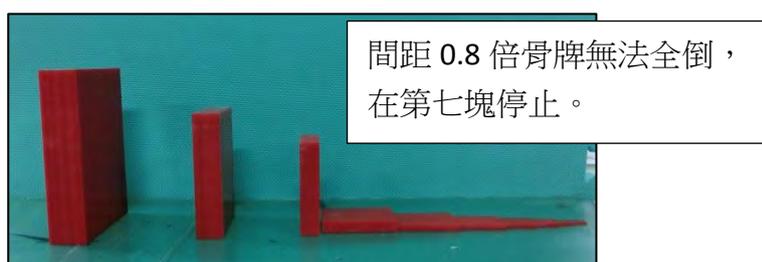
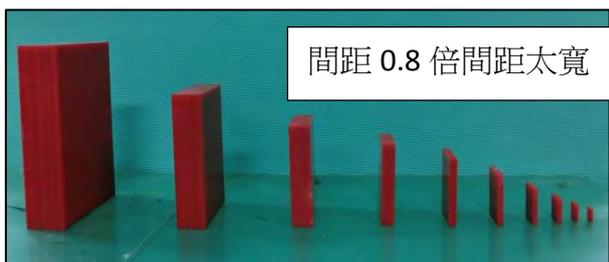
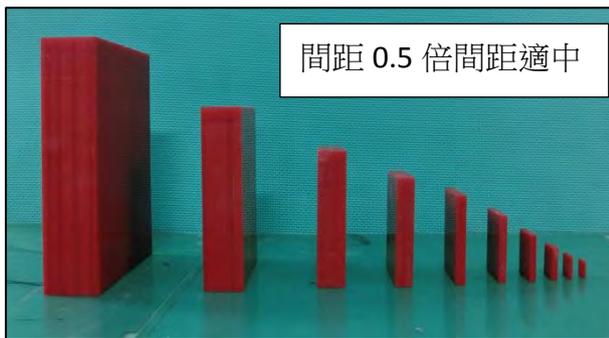
※思考：那如果把骨牌質量增為 2.5 倍，其倒下情形又是如何呢？

※說明：1.在訂製這套骨牌時，由於經費限制，我們只能做到第十塊。

2.因為骨牌材質一樣，所以體積比即為質量比。設計骨牌倍數時，有些數字無法整除，因此我們儘量取接近 2.5 倍的體積來製作，規格表如下所示：

編號	厚(mm)	寬(mm)	高(mm)	體積( $mm^3$ )	體積倍數
1	2	8	16	256	2.5
2	3	10.3	20.7	640	2.50156
3	4	14	28.6	1601	2.5026858
4	5	20	40	4000	2.5013214
5	6	28.8	57.9	100005.12	2.5030404
6	9	37.3	74.6	25043.22	2.5018627
7	15	45.7	91.4	62654.7	2.499988
8	24	57	114.5	156636	2.4992765
9	34	75.8	151.9	391476.68	2.5004574
10	46	103	206.6	978870.8	2.5068476





發現：質量成 2.5 倍的骨牌，倒下的間距範圍更小了，經過我們反覆嘗試，發現真的只有間距為前一塊骨牌 0.5 倍的距離可以讓骨牌全倒，否則都在第七塊骨牌左右停下。

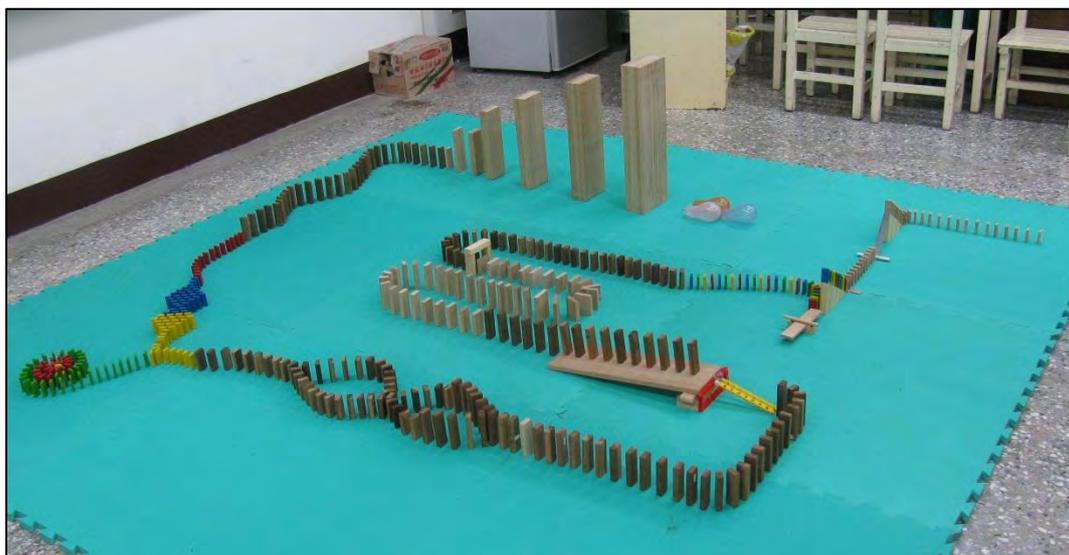
推論：我們又再一次證實，當骨牌間距為前一塊骨牌 0.5 倍高度時，骨牌倒下的力量是最大的，如前面實驗所說，這是因為轉動角度夠大，且撞擊高度較高的緣故。

### 研究十七、嘗試以研究出來的技巧，排一次精彩壯觀的骨牌秀。

說明：為了驗證我們所研究出來的結果是否正確，我們花了五個小時的時間排了一場骨牌秀，內容包含爬坡、上階梯、轉彎、錯位、小撞大等，並運用創意設計機關，期盼給大家一場精彩又刺激的視覺享受。



結果：這是我們用心排列的成果，在大家的掌聲中，創意骨牌秀成功了！！



## 伍、結論：

- 一、重心只要超過底面積一半骨牌就會傾倒，所以要使骨牌倒下，應該是施給骨牌的外力  $F \times$  擊中點高度  $h$ ，其力矩要大於重力  $G \times$  底面厚度一半  $1/2S$  的力矩(抗力)，也就是骨牌質量  $m \times g \times$  底面厚度一半  $1/2S$  的力矩(抗力)。
- 二、每塊骨牌倒下時，具有的動能都比前一塊骨牌大，速度也會越來越快。
- 三、就單塊骨牌來說，每塊骨牌倒下的速度不一，速度是越來越快的。
- 四、間距大約是骨牌高度一半時，因為撞擊高度高，骨牌本身得到的力矩較大，且前面骨牌轉動的角度也大，產生的推力較大。
- 五、撞擊力道越強(角度大、位置高)，骨牌倒下的總時間越短，但力道太強骨牌容易位移，造成骨牌呈現不穩定的現象。
- 六、撞擊力道會被每塊骨牌的抗力所抵銷，在 3→4 之後即不受撞擊力道影響，骨牌倒下的速度趨勢一致，越來越快。
- 七、骨牌越重，骨牌倒下時產生的力矩越大(轉動的力量越大)，因此倒下的時間越短。
- 八、在相同間距時，骨牌如果越高，本身的質量越大，產生的力矩越大，倒下的時間就越短。但當骨牌的間距大到接近骨牌，則轉動的力量過大，容易位移，且擊中的位置過低，本身倒下的力矩過小，因此倒下所需時間較長，且不穩定。
- 九、骨牌大小比例以 6:3:1 最好，可以兼具速度與穩定性。
- 十、骨牌倒下主要的因素是重心位移，只要骨牌站得穩，受撞擊使重心離開底面積，骨牌就會倒下，底部摩擦力反而不是影響倒下時間的主要原因。。
- 十一、重心降低、間距縮小，是爬坡成功的主要關鍵。
- 十二、骨牌倒下的位置要在下一塊骨牌行進的方向上，否則會打不到下一塊骨牌。
- 十三、錯位能否順利倒下，影響關鍵在於 1.施力方向要正確，不得偏頗。2.力量要夠，增加撞擊力與間距適中(大約骨牌的一半距離)都可以增加倒下的力矩。
- 十四、骨牌立在階梯的前端，倒下時能轉動的範圍較大，較容易成功
- 十五、前一塊骨牌高度 0.35 倍 ~0.75 倍之間，足以推倒實驗中不同質量的骨牌，其中間距 0.5 倍產生的力矩最大。
- 十六、質量 1.5 倍的骨牌(以中央大學提供的規格表)，真的任何間距都可以推倒骨牌；但當質量增加為 2.5 倍時，只有間距為前一塊骨牌高度 0.5 倍時，才能夠將骨牌全部推倒。

## 陸、討論：

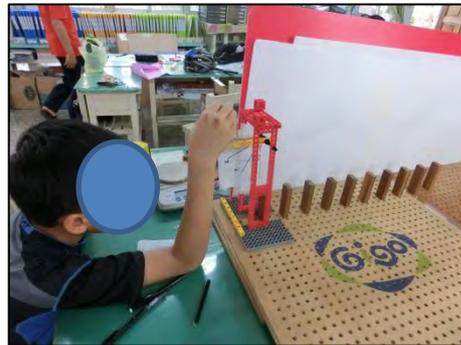
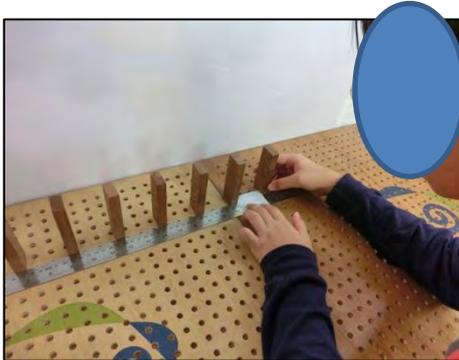
- 一、即便是同一種材質裁切出來的骨牌，質量仍無法完全相同，我們在實驗前均以磅秤測量挑選相同重量的骨牌，但仍不免略有些微的差異，這一點可能是骨牌倒下時間上下起伏的原因。
- 二、在排骨牌時我們儘可能以長尺來協助排列，以求骨牌撞擊位置與時間的準確性。
- 三、我們運用學過的資訊軟體 photoimpact 來計算骨牌的高度，像素的判定上要力求精準，才不會有實驗誤差。
- 四、其實骨牌的長、寬、高與厚度比都會影響骨牌被推倒與否，尤其厚度更是重要的關鍵。關於這一點，我們受限於經費，沒辦法做各種規格的嘗試，未來如果有足夠的預算，或許可以再改變不同的規格試試看。

## 柒、參考資料：

- 一、Domino & Taguchi 一骨牌效應與極速最佳因子研究 中華民國第51屆科學展覽
- 二、多米諾骨牌模型的研究及其推廣(徐天辰 楊嘉旗 李晨楊) 杭州外國語學校論文
- 三、凸眼大金魚的骨牌部落格 <http://blog.sina.com.tw/200power/>
- 四、中央大學物理研究室：<http://demo.phy.tw/>

## 捌、心得感想：

沒想到小小的骨牌，竟蘊含這麼多的學問，要如何讓骨牌排得成功，透過這次反覆的實驗，我們終於找到了答案！感謝爸爸協助我們取得高速攝影機與加速度測量儀，讓我們大開眼界，也真正明白骨牌倒下的細節與過程，對於我們的研究有莫大的幫助。另外，從最後的實驗中我們發現骨牌是一種積少成多的能量機制，這樣的機制未來可以應用在相關的機械上，讓需要花很大力量才能推動的機械，改成一長串微小力量的轉動來取代，這樣一定會是人類的一大貢獻喔！



## 【評語】 080105

利用科學的方法，有系統的將數據整理分析，並藉探討物理的碰撞、轉動及槓桿原理，增加骨牌遊戲的趣味性，若能多討論骨牌的重心對碰撞運動的影響，會使研究工作更完備。