

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

團隊合作獎

080116

修正教科書的「摩」力觀點-摩擦力跟接觸面積
真的有關係

學校名稱：新北市三重區五華國民小學

作者： 小六 張瑋真 小六 鄭郁錡 小六 陳韋如 小六 鄭琬誼 小六 葉姿妤	指導老師： 董大鋼
---	------------------

關鍵詞：最大靜摩擦力、接觸面積、介面性質

摘要

自然課本在摩擦力單元提示三個概念，分別是一、「粗糙面的摩擦力比光滑面大」；二、「水會降低介面間的摩擦力」；三、「介面接觸面積大小與摩擦力大小無關」。本研究發現這些概念與生活物理現象不完全相同，故進行實證研究，歸納研究結論如下：

- 一、微觀角度中，介面間實際接觸面積越大，摩擦力越大。
- 二、在無塵且無水分的前提下，兩接觸介面的摩擦力為「光滑/光滑」介面大於「光滑/粗糙」介面。「粗糙/粗糙」介面大於「光滑/粗糙」。
- 三、兩接觸介面間若有灰塵存在，通常會降低摩擦力。
- 四、兩接觸介面間大量水分会降低摩擦力；少量水分反而會增加摩擦力。
- 五、粗糙介面的紋路若不連貫無法排水，在多水情境時防滑效果較差。

壹、研究動機

五年級自然課程學習摩擦力單元時，課本提到「介面越粗糙，摩擦力越大，所以運動鞋、輪胎、保特瓶蓋等生活物件均設計成粗糙紋路以增加摩擦力」。可是，國語課程學到〈拔一條河〉這篇拔河隊的文章時，我們意外發現：「需要最大靜摩擦力的拔河鞋與拔河道，竟然都是光滑平坦介面，而非自然課本所提到的粗糙介面」！查詢相關文獻（江玉棻，2004）發現，真的有研究指出光滑的拔河鞋摩擦力較大！我們還進一步發現，F1 賽車為了增加摩擦力，竟然也是運用平滑的輪胎！

再者，課本提到水分会降低摩擦力，造成天雨路滑的現象。但是，我們發現老師在數考卷時，會沾一點手水，增加手和紙張間的摩擦力啊！課本的描述和生活物理現象有所矛盾？

第三，自然老師說，國中理化課本會提到一個很有趣的觀念：「接觸面積與摩擦力無關」。老師拿了一個立方體讓我們測試不同底面積的摩擦力，結果發現摩擦力竟然大約相同？！但是，我們總隱約覺實驗方法不合理。

故我們懷疑自然教科書將摩擦力簡單介紹為「粗糙介面會使摩擦力增加」、「水會降低介面間摩擦力」、「摩擦力與接觸面積無關係」太過武斷，影響摩擦力的因素應該更為複雜，因此進行後續實證研究，想瞭解影響摩擦力的相關因素。



圖 1-1 光滑表面的拔河鞋與 F1 賽車車胎圖

附註：作品與教材相關性

康軒版自然與生活科技領域 五下第四單元 力與運動-摩擦力

貳、研究目的

基於前述研究動機，本研究企圖探究接觸介面的「材質、粗糙程度、硬度、介面間灰塵有無、介面間水分多寡」等變因對「最大靜摩擦力」（以下簡稱摩擦力）的影響，期望達成以下研究目的：

一、接觸介面粗糙與平滑程度，對物體最大靜摩擦力的影響為何？

- (一) 兩接觸介面「平滑/平滑」和「粗糙/平滑」相較，何者摩擦力較大？
- (二) 兩接觸介面「粗糙/粗糙」和「粗糙/平滑」相較，何者摩擦力較大？

二、不同接觸介面材質，對物體最大靜摩擦力的影響為何？

- (一) 砂紙、塑膠墊、木板、紙板、玻璃、珍珠板等不同介面材質，對摩擦力有何影響？
- (二) 接觸介面的軟硬度，對摩擦力有何影響？

三、接觸介面間的灰塵，如何影響物體最大靜摩擦力？

- (一) 接觸介面間若有灰塵存在，對摩擦力有何影響？
- (二) 粗糙與平滑兩種接觸介面相較，灰塵對何者的摩擦力影響較大？

四、接觸介面間的水分，如何影響物體最大靜摩擦力？

- (一) 接觸介面間水分的多寡，對摩擦力有何影響？
- (二) 粗糙與平滑兩種接觸介面相較，水分對何者的摩擦力影響較大？

附註：本研究主題聚焦於「最大靜摩擦力」，動摩擦力部分留待後續研究進行。全文中提到之摩擦力，均為最大靜摩擦力的簡稱。

參、研究設備及器材

一、摩擦力接觸介面材質與變項

本研究以生活中常見的材質作為摩擦力研究的接觸介面，包括玻璃、塑膠墊（PVC）、巧拼墊（EVA）、珍珠板（PS）、砂紙、木板、瓦楞紙板、紙張等，並針對不同介面材質的粗糙程度、灰塵有無、接觸面積、水分多寡、軟硬度等研究變項進行交叉分析。相關接觸介面材質與研究變項，詳列於表 3-1。

表 3-1 摩擦力接觸介面材質與研究變項一覽表

接觸介面材質	研究變項	軟硬度
玻璃	粗糙程度、接觸面積（微觀）、灰塵有無、水分多寡	硬質
塑膠墊（PVC）	粗糙程度、接觸面積（微觀）、灰塵有無、水分多寡	軟質
巧拼墊（EVA）	粗糙程度、接觸面積（微觀）、灰塵有無、水分多寡	軟質
珍珠板（PS）	粗糙程度、接觸面積（微觀）、灰塵有無、水分多寡	軟質
砂紙	粗糙程度、接觸面積（微觀）、灰塵有無	硬質
木板	粗糙程度、接觸面積（微觀）、水分多寡	硬質
美耐板	粗糙程度、接觸面積（微觀）	硬質
瓦楞紙板	粗糙程度、接觸面積（微觀）	軟質
紙張	接觸面積（巨觀）	

二、測量工具與研究器材

（一）測量工具：1.彈簧秤、2.量角器、3.電子秤、4.邵氏硬度計、5.EXCEL 統計軟體。

（二）研究器材：1.滴管、2.粉筆灰、3.筆記本、4.自製重物盒、5.各種介面材質。

肆、研究過程或方法

一、名詞定義

(一) 摩擦力

目前各界對摩擦力研究的相關定義大同小異，諸如教育部教育百科（2018）：「阻礙一物體在另一物體表面上運動的阻力」；維基百科（2018）：「固體表面之間的靜摩擦力的原因有兩個：固體表面原子、分子之間相互的吸引力和它們之間的表面粗糙所造成的互相之間卡住的阻力」；黃福坤（2006）則認為「摩擦力是兩物體之間的交互作用力來自於兩者之間的牽扯與吸引其作用為阻止兩物體的相對運動」；休伊特（2008）認為是「一個物體在另一個物體表面滑過時，要不翻越不平整的隆起，要不刮擦這些隆起，這些都需要力量，就是摩擦力」。

因此，本研究歸納相關學者想法，將摩擦力定義為「阻礙一物體在另一物體表面上相對運動的力，包括原子間吸引力、粗糙面卡住等各種自發力量」。

(二) 介面間接觸面積

黃福坤（2007）認為，中學自然課本界定影響摩擦力的介面接觸面積並非指的是兩表面的實際接觸面積，而是指接觸面對應的底面積，摩擦力和「實際接觸面積」有關，但是和外觀看到的接觸面底面積無關。鄭劭家（2014）認為，介面間的接觸面積是以原子的平均接觸面積與有接觸的原子總數的乘積，即所謂的「真實接觸面積」。因此，本研究將介面間接觸面積定義為：「微觀角度中兩介面的原子與原子間實際的接觸的總面積。」然而，肉眼所見巨觀接觸面積的大小對於微觀實際接觸面積大小，多少會有所影響。

二、研究架構

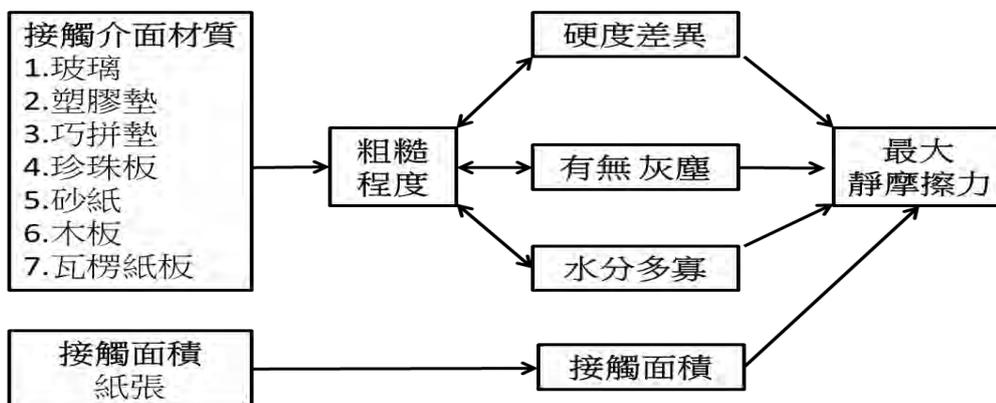


圖 4-1 研究架構圖

本研究在探究相關文獻之後，以接觸介面材質、接觸介面粗糙程度、接觸介面間灰塵有無、接觸介面間水分多寡、介面接觸面積為操作變因，形成下列研究架構圖，如圖 4-1。

三、研究工具與測量

(一) 相關文獻對於摩擦力的測量方法

1. 不同接觸介面間摩擦力的測量方式

- (1) 彈簧秤拉動法：中央大學物理學實驗講義（2013 年）與南一版自然課本（2007）對摩擦力測量方式建議為，將置物台上放置相同重量的重物，並在不同接觸介面中以彈簧秤拉動置物台，當置物台移動的瞬間，觀測彈簧秤數據以取得最大靜摩擦力。如圖 4-2。



圖 4-2 彈簧秤拉動法（取自南一版教科書；亦類似中央大學物理學研究講義）

- (2) 物體滑動速度法：翰林版自然與生活科技課本（2017）提到，在斜坡上鋪設不同材質的接觸介面，斜坡上放置硬幣當作滑落物進行滑落實驗，並以滑落速度換算摩擦力大小。



圖 4-3 物體滑動速度法（取自翰林版教科書） 圖 4-4 物體滑動遠近法（取自康軒版教科書）

- (3) 物體滑動遠近法：康軒版自然與生活科技課本（2017）提到，設置一斜坡令滑落物滑下，底面處黏貼不同接觸介面，並以滑落物在底面滑行距離，換算摩擦力大小。

綜合與分析上述研究方法發現，「物體滑動速度法」、「物體滑動遠近法」以滑落速度與距離進行摩擦力換算，在精確度上無法掌握與換算。再者，此二測量方法主要測量動摩擦力，對本研究之靜摩擦力測量較無法適用。

2.不同介面接觸面積與摩擦力的關係之測量方式

中學物理教科書中關於接觸面積與摩擦力關係之實驗，測量方式是將一立方體以不同面積的底面接觸地面，再以彈簧秤拉動，以測量不同摩擦力，如圖 4-5。然而本研究認為，此測量方法會使每一單位面積承受的正向力不相同。例如 A 的底面接觸面積為 100 平方公分，物體重量即正向力 200 公克，故單位面積正向力為 2 公克；反之，B 的接觸面為 40 平方公分，物體重量即正向力也是 200 公克，但是單位面積正向力卻為 5 公克。因此，在操作變因為「不同接觸面積」時，單位面積正向力卻不相同，故在比較上無法顧及公平。是故，本研究捨棄此接觸面積與摩擦力關係之測量方法。

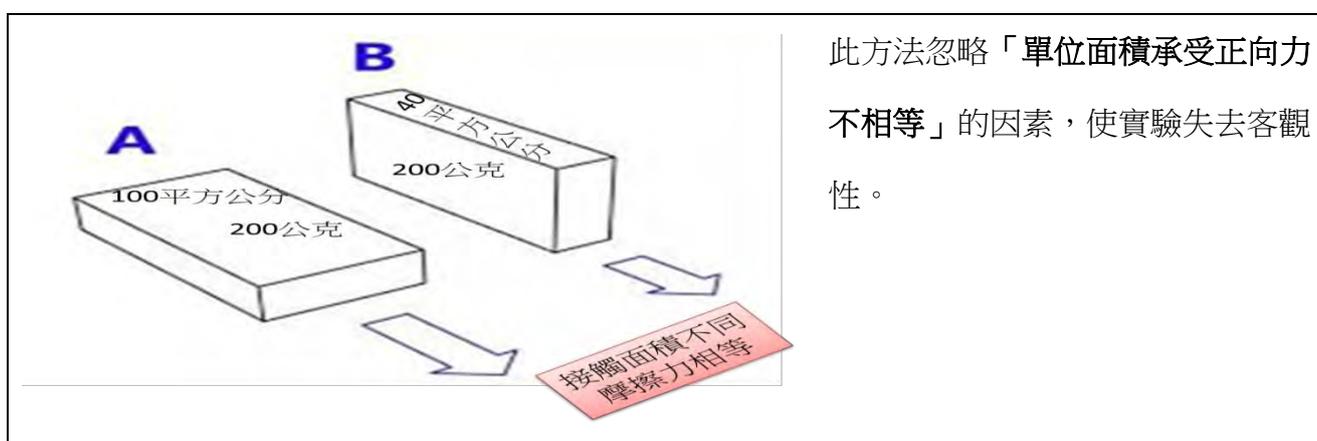


圖 4-5 中學課本關於接觸面積與摩擦力關係之測量方式（研究者自繪）

（二）本研究採取的最大靜摩擦力測量方式：

1. 滑動角度三角函數換算法：

將 200 公克的置物台放置於斜坡，逐漸提升坡度角度，觀察置物台移動瞬間的斜坡坡度。再將斜坡坡度以三角函數換算正向力與下滑力，下滑力數據即為最大靜摩擦力，如圖 4-6。此研究方法能以緩慢速度提升坡度，精確掌握置物台滑動的坡度角，獲得較精確的最大靜摩擦力數據。故本研究多數實驗採用此方式測量摩擦力。

例如，100 公克的重物在 30 度的坡度中，經過三角函數計算可知下滑力（最大靜摩擦力）為 50 公克。（ $100g \times \sin 30^\circ = 100g \times 0.5 = 50$ ）

2. 彈簧秤拉動法：

在「介面間水分多寡對摩擦力之影響」實驗中，前述「滑動角度三角函數換算法」無法適用，因為介面間水分会隨著坡度流失，影響實驗精準度。故在「介面間水分多寡對摩擦力之影響」實驗中，本研究採用「彈簧秤拉動法」進行最大靜摩擦力測量。

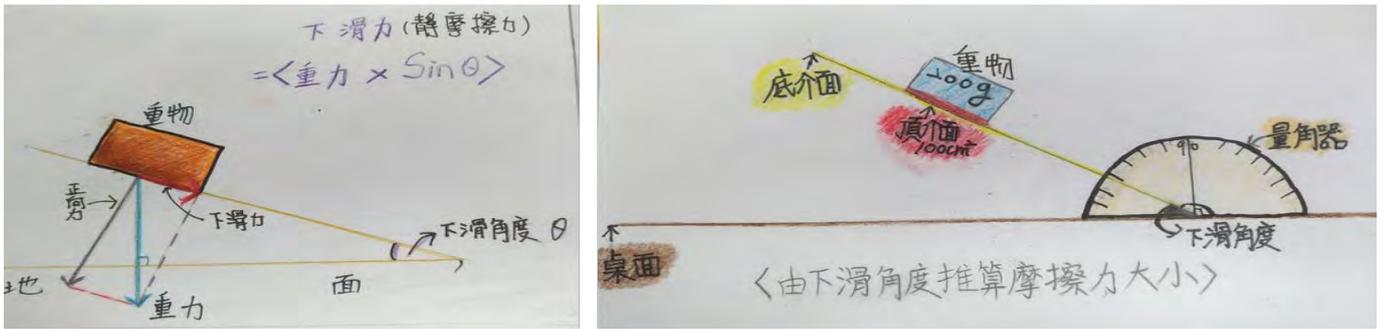


圖 4-6 滑動角度三角函數換算法 (研究者自繪)

(三) 介面接觸面積與摩擦力關係的測量方式

本研究以筆記本進行頁面交錯堆疊，並以彈簧秤拉動使兩筆記本鬆脫，筆記本鬆脫時的彈簧秤數據，就是不同接觸面積下，筆記本頁面間的最大靜摩擦力，如圖 4-7 所示。



圖 4-7 本研究接觸面積與摩擦力關係之測量方式

四、介面硬度測量方法

本研究利用邵氏硬度與莫氏硬度兩種概念進行介面硬度的測量。首先以邵氏硬度計測量讀數大於 100 度者，本研究稱為稱為「硬質介面」；低於 100 度者稱為「軟質介面」。其中硬質介面再利用莫氏硬度互相刻畫的概念，比較出硬度差異。各種介面的硬度差異如表 4-1。

表 4-1 研究介面硬度差異比較表

介面名稱	砂紙	玻璃	美耐板	木板	塑膠墊	珍珠板	紙板	巧拼墊
邵氏硬度	>100	>100	>100	>100	92	78	70	57
硬度比較	8	7	6	5	4	3	2	1
硬度分類	硬質				軟質			

(附註：本研究將 1 定義為最軟 8 為最硬)

五、統計方法

(一) 平均數比較法：以多次實驗數據計算平均數，比較各種情境下摩擦力大小。

(二) 相關係數：瞭解接觸面積與摩擦力的相關性，並計算決定係數。

五、研究變項與實驗方法

(一) 研究一：接觸介面粗糙程度與摩擦力之間的關係為何？

本研究選用玻璃、木板、塑膠 PVC 墊、巧拼 EVA 板、砂紙、珍珠板 PS 等不同介面材質，將介面分為粗糙與平滑兩種，分別置於斜坡中進行下滑測試，並進行下滑角度量測，企圖瞭解相同介面材質情況下，介面粗糙程度對摩擦力的影響。如圖 4-8、4-9 所示。



圖 4-8 不同材質接觸介面，粗糙與平滑之對比圖



圖 4-9 量測置物平台滑落的坡度角，推算最大靜摩擦力

(二) 研究二：兩接觸介面間硬度差異與摩擦力之間的關係為何？

1.研究 2-1：兩不同接觸介面均為粗糙面時，硬度對摩擦力有何影響。

2.研究 2-2：兩不同接觸介面均為平滑面時，硬度對摩擦力有何影響。

3.研究 2-3：兩不同接觸介面為粗糙面 / 平滑面時，硬度對摩擦力有何影響。

本研究想瞭解，兩接觸介面的軟硬程度差異是否對摩擦力大小有所影響。故以邵氏硬度計將不同接觸介面區分為軟質（塑膠墊、巧拼板、珍珠板）、硬質（砂紙、玻璃、木板）兩類，交叉比較兩接觸介面間的硬度差異，是否對摩擦力有所影響。

(三) 研究三：接觸介面間的灰塵對摩擦力之影響為何？

1.研究 3-1：介面間的灰塵會增加或減少摩擦力？

2.研究 3-2：灰塵對於粗糙與平滑兩不同的接觸介面的摩擦力，何者影響較大。

我們在研究過程中發現，若未能將接觸介面進行完整的清潔與擦拭，得到的摩擦力數據出現矛盾與不一致。因此進一步研究發現，介面間的灰塵等對於摩擦力可能有所影響。

在研究方法上，我們將不同接觸介面進行清潔擦拭，徹底清除灰塵後置於斜坡上，再以「滑動角度三角函數換算法」測量兩介面的最大靜摩擦力。取得無灰塵的介面最大靜摩擦力後，再將固定 1ml 的粉筆灰灑入兩置物平台介面之間，將置物平台置於斜坡，以「滑動角度三角函數換算法」測量兩介面的最大靜摩擦力，以比較灰塵對摩擦力的影響。如圖 4-9 所示。



圖 4-10 接觸介面間灰塵對摩擦力影響關係實驗示意與假設圖（研究者自繪）

(四) 研究四：接觸介面間的水分多寡，對摩擦力的影響為何？

1.研究 4-1：接觸介面間含有少許水分，會增加或減少摩擦力？

2.研究 4-2：接觸介面間含有大量水分，會增加或減少摩擦力？

3.研究 4-3：大量水分對於粗糙與平滑兩不同的接觸介面的摩擦力，何者影響較大。

自然課本提到「天雨路滑」，水分會降低摩擦力，因此地板有未擦乾的水漬、潮濕有水的浴室、雨後的馬路，均會降低摩擦力，造成滑倒的危險。但是，本研究小組發現，爸媽數鈔票時會將手指頭沾濕，增加手指摩擦力使數鈔票更容易。我們皮膚在炎熱天氣流汗時，皮膚較為黏，似乎摩擦力較大；冬天皮膚不流汗時，皮膚反而光滑，似乎摩擦力較小。因此懷疑課本所言「水分會降低摩擦力」的觀點過於武斷，故進行進一步探究，如圖 4-10。

研究方法方面，我們捨棄「滑動角度三角函數換算法」，改用「彈簧秤拉動法」。因為若以「滑動角度三角函數換算法」測量摩擦力，水分會受重力影響從兩個介面間流失，使實驗之操作變因（水分多寡）不易操作，故改以「彈簧秤拉動法」測量摩擦力。



圖 4-11 接觸介面間水分多寡對摩擦力影響關係實驗示意圖（研究者自繪）

（五）研究五：介面接觸面積對摩擦力的影響為何？

1.研究 5-1：接觸介面間面積大小與摩擦力之關係為何？

本研究小組將兩本筆記本重疊交錯，同樣給予 200 公克的正向力，每個交疊頁固定在 200 平方公分，兩個交疊頁則有 400 平方公分的接觸面積，依此類推。並用彈簧秤測量分開兩本筆記本需要多大力量，測量接觸面積與摩擦力的影響。（如圖 4-7 所示）

伍、研究結果

本研究經多次實驗，對實驗數據進行交叉統計分析，數據與結果析述如下。

一、**研究結果 1**：接觸介面粗糙程度與摩擦力之間的關係為何？

（一）**研究結果 1-1**：兩接觸介面為「平滑/平滑」的摩擦力，大於「平滑/粗糙」介面。

本研究發現，兩接觸介面為「平滑/平滑」時，摩擦力通常較「平滑/粗糙」介面來得大。

如圖 5-1、5-2、5-3、5-4 所示。

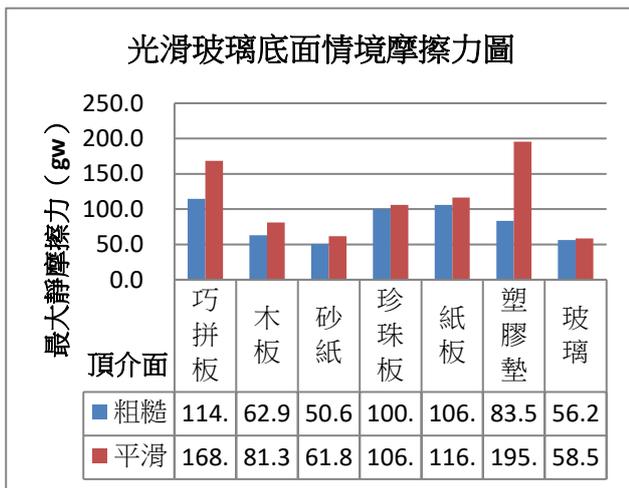


圖 5-1 光滑玻璃底面情境摩擦力圖

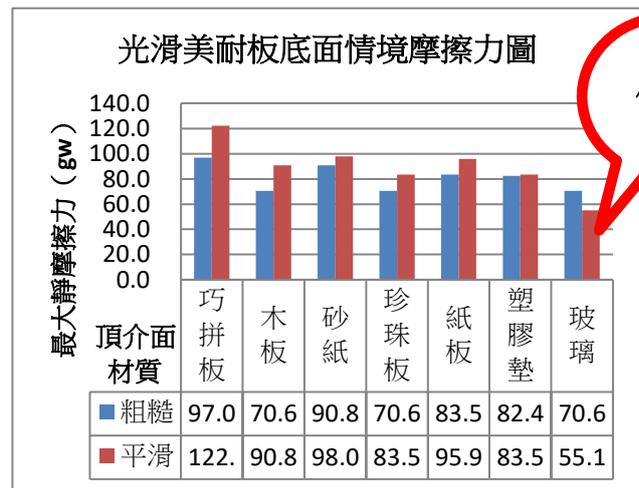


圖 5-2 光滑美耐板底面情境摩擦力圖

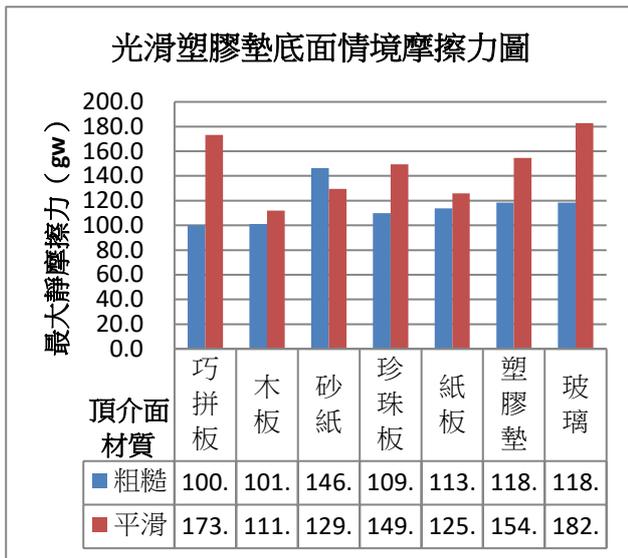


圖 5-3 光滑塑膠墊底面情境摩擦力圖

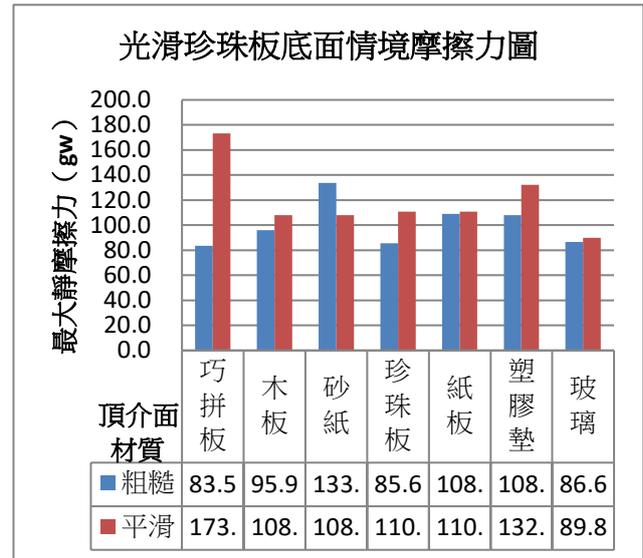


圖 5-4 光滑珍珠板底面情境摩擦力圖

(二) 研究結果 1-2：兩接觸介面為「粗糙/粗糙」的摩擦力，通常大於「平滑/粗糙」介面。

1. 「粗糙/粗糙」介面的摩擦力通常大於「平滑/粗糙」，但仍有下列例外。詳如圖 5-5、5-6、5-7、5-8、5-9、5-10 所示。
2. 「粗糙/粗糙」介面的紋路性質無法互相卡住，則摩擦力降低(例如粗糙紙板/粗糙巧拼板)。
3. 「硬質粗糙面/軟質平滑面」會增加摩擦力(例如粗砂紙/平巧拼板；粗砂紙/平塑膠墊)。

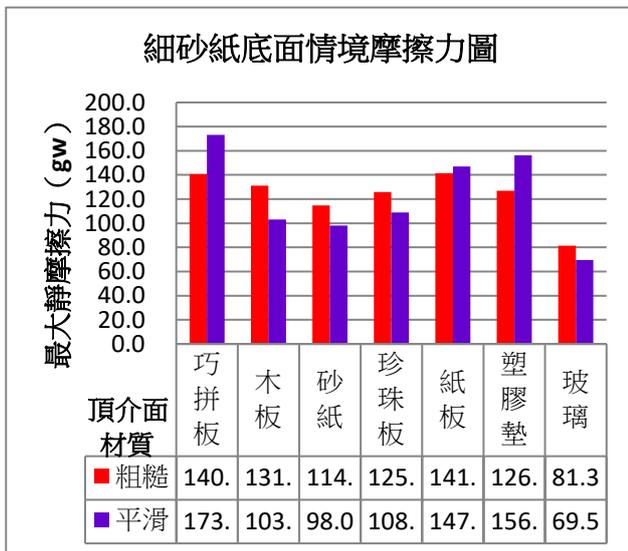


圖 5-5 粗糙細砂紙墊底面情境摩擦力圖

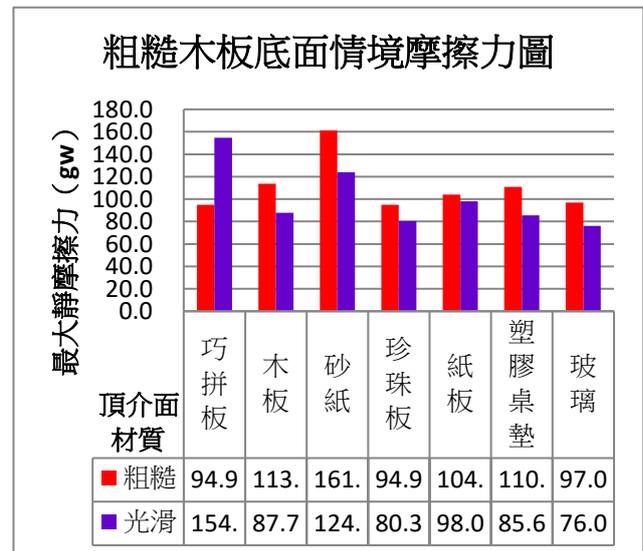


圖 5-6 粗糙木板底面情境摩擦力圖

附註：圖 5-5 與 5-6 顯示，平滑巧拼板、平滑塑膠墊、平滑紙板的摩擦力反而比較大。可能是硬質粗糙面像一個釘子，釘入軟質平面，所以增加摩擦力。

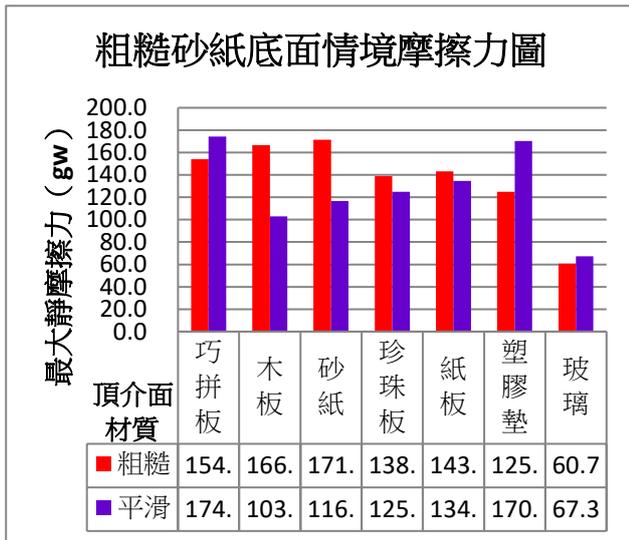


圖 5-7 粗糙砂紙底面情境摩擦力圖

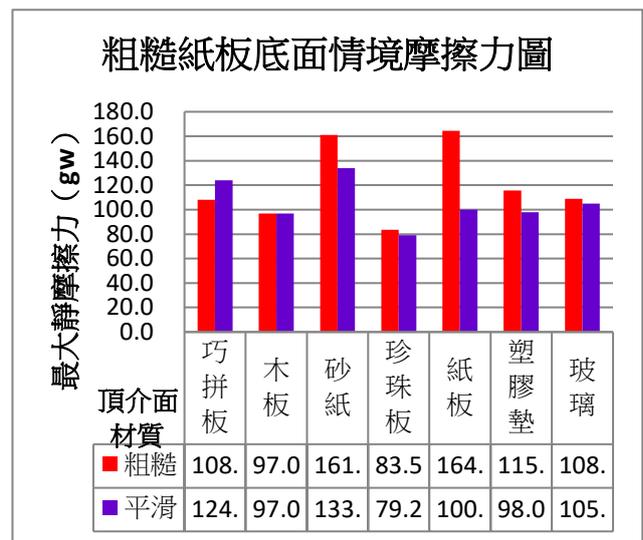


圖 5-8 粗糙紙板底面情境摩擦力圖

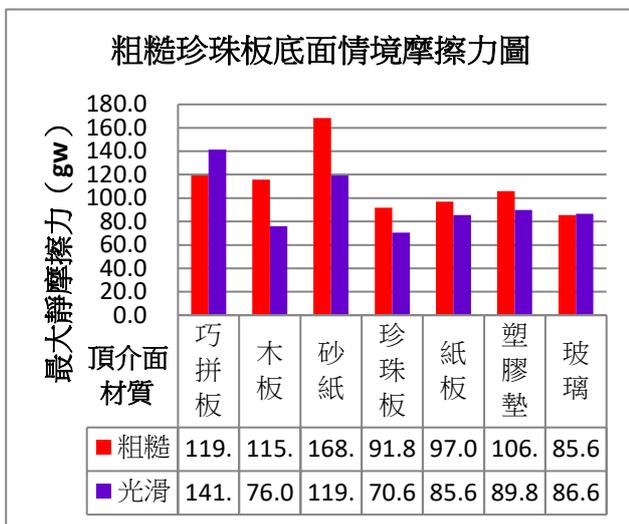


圖 5-9 粗糙珍珠板底面情境摩擦力圖

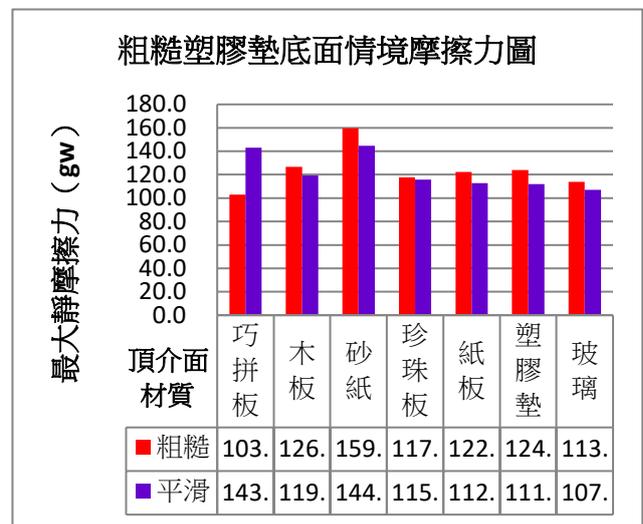


圖 5-10 粗糙塑膠墊底面情境摩擦力圖

二、研究結果 2：接觸介面硬度與摩擦力之間的關係為何？

(一) 研究結果 2-1：「粗糙/粗糙介面」（如圖 5-11 5-12）

(1) 兩接觸介面為「**硬質粗糙/硬質粗糙**」時，

若紋路能互相卡住，則摩擦力大；

若紋路無法互相卡住，則摩擦力小。

(2) 兩接觸介面為「**硬質粗糙/軟質粗糙**」時，會有較大摩擦力。



圖 5-11 粗糙紋路卡住與否示意圖

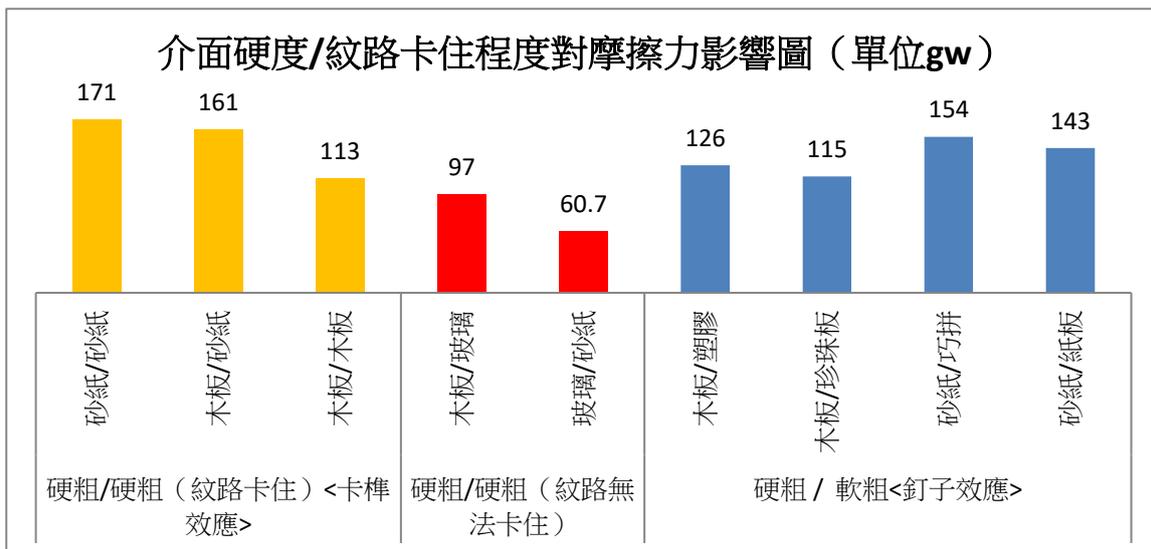


圖 5-12 粗糙介面與粗糙介面摩擦力影響長條圖

(二) 研究結果 2-2 : 「平滑/平滑介面」(如圖 5-13 5-14)

(1) 兩接觸介面為「硬質平滑/硬質平滑」時，摩擦力較小。

附註：推論兩平滑硬質介面因為硬度高，若有肉眼無法觀測 的小幅度彎曲，也會使介面無法貼齊，降低接觸面積，所以摩擦力較低。

(2) 兩接觸介面為「硬質平滑/軟質平滑」或「軟質平滑/軟質平滑」時， 摩擦力較大。

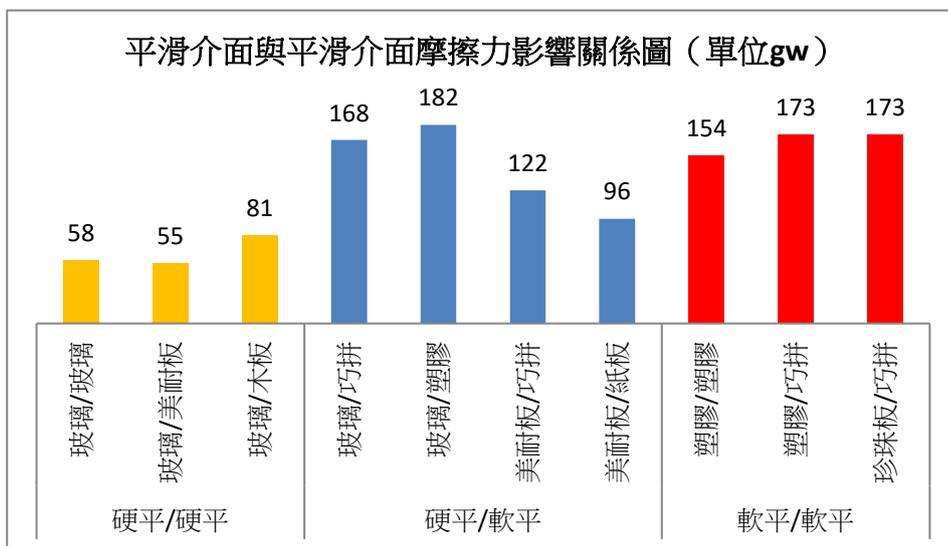


圖 5-13 平滑介面與平滑介面摩擦力影響關係圖

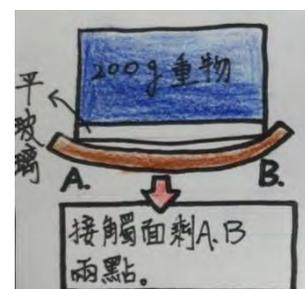


圖 5-14 硬質介面微幅彎曲示意圖

(三) **研究結果 2-3**：「粗糙/平滑介面」(如圖 5-15 5-16)

- (1) 兩接觸介面為「**硬質粗糙/軟質平滑**」時，摩擦力較大。
- (2) 兩接觸介面為「**軟質粗糙/硬質平滑**」時， 摩擦力較小

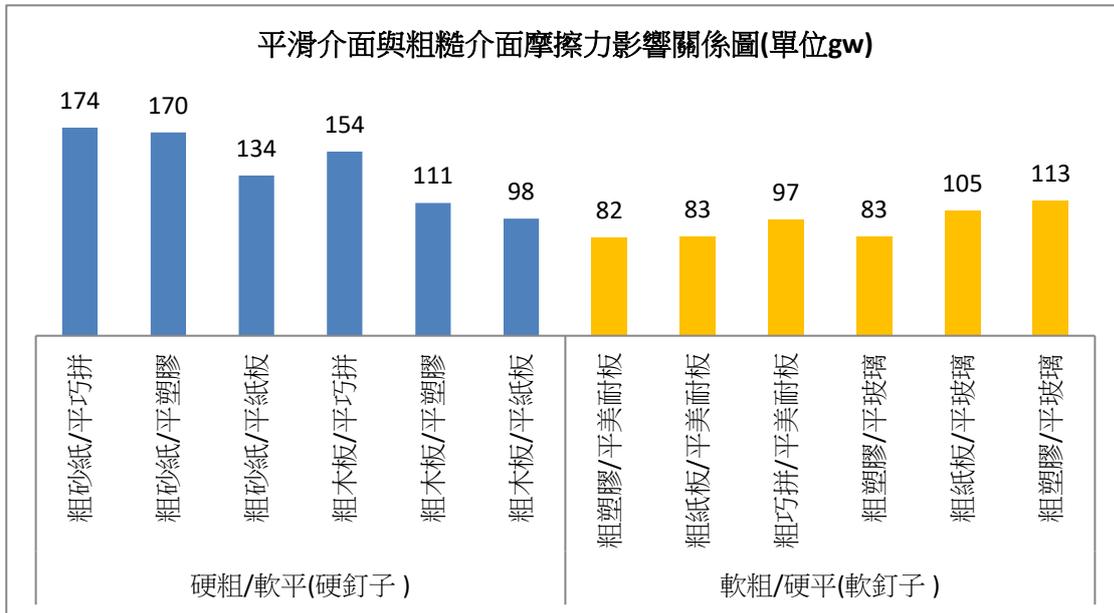


圖 5-15 平滑介面與粗糙介面摩擦力影響關係圖



圖 5-16 硬釘子與軟釘子示意圖

三、**研究結果 3**：接觸介面間的灰塵，對摩擦力的影響為何？(圖 5-16 至 5-22)

- (一) **研究結果 3-1**：不論接觸介面材質與粗糙程度為何，灰塵幾乎都會減少摩擦力。

本研究發現，自然界的灰塵似乎對摩擦力會有影響，故以粉筆灰作為模擬粉塵，進行對照實驗。實驗發現，在不同材質、不同粗糙程度的接觸介面中，粉塵幾乎會使所有組合的摩擦力下降。然而，「美耐板/玻璃」「粗木板/粗巧拼」介面情境中，卻能不受灰塵影響，逆向增加摩擦力，較為不同。

附註：「美耐板/玻璃」介面情境因灰塵而增加摩擦力，推論是因為此兩介面均為硬質介面，可能因為些許彎曲使接觸面積減少而摩擦力下降，灰塵正好填補此些許空間，進而增加摩擦力。此外，「粗木板/粗巧拼」在有灰塵時摩擦力反而增加，可能是因為兩介面本來無法互相卡住，灰塵卡入兩介面空隙，反而增加接觸面積，如圖 5-16。

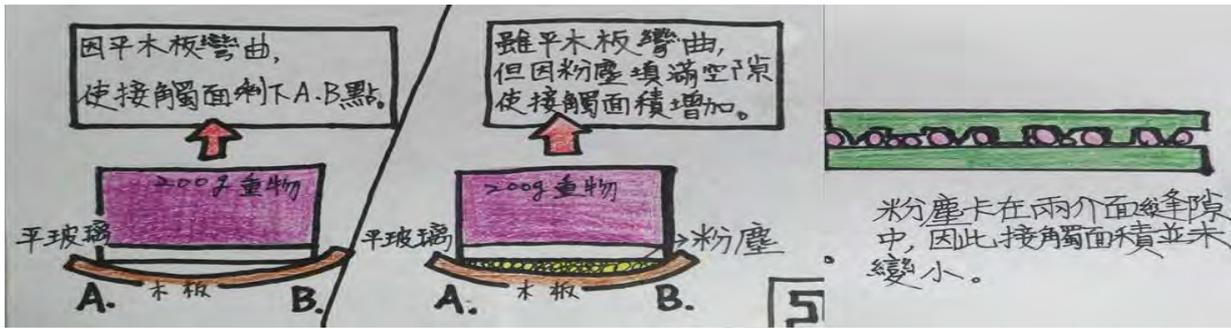


圖 5-16 例外解釋：灰塵增加摩擦力示意圖

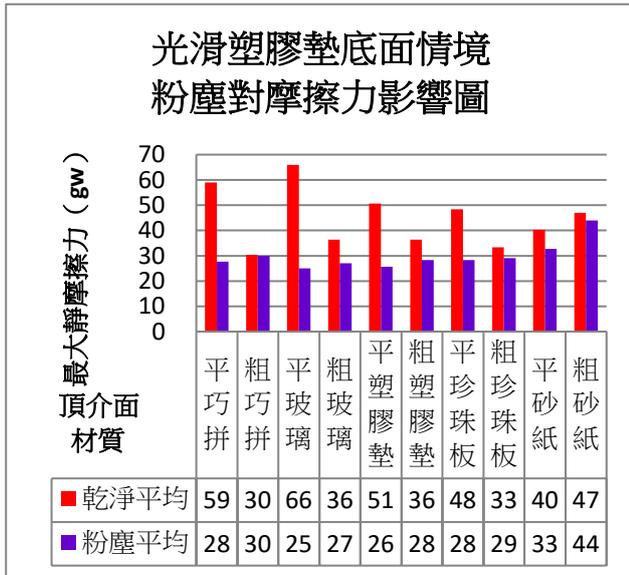


圖 5-17 光滑塑膠墊底面情境粉塵對摩擦力影響圖

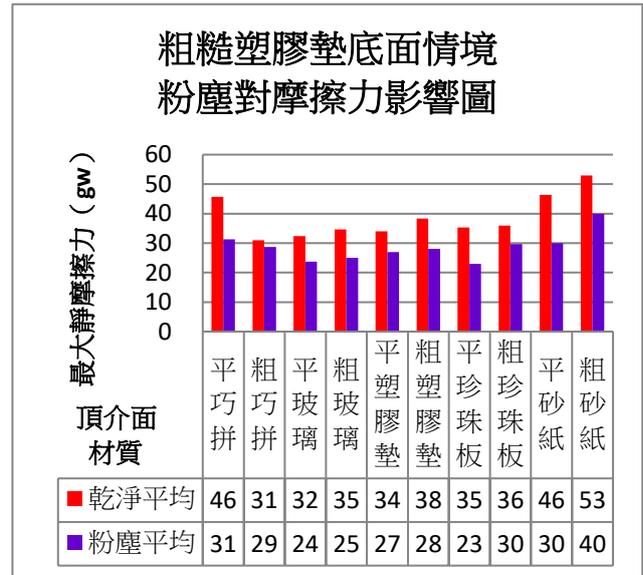


圖 5-18 粗糙塑膠墊底面情境粉塵對摩擦力影響圖

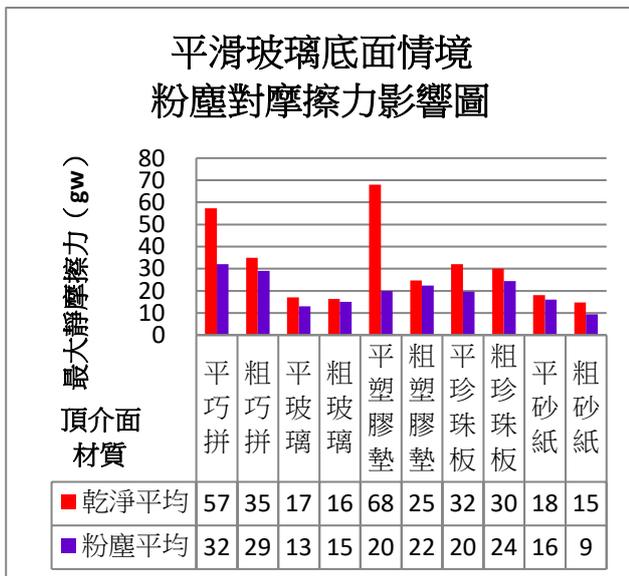


圖 5-19 平滑玻璃底面情境粉塵對摩擦力影響圖

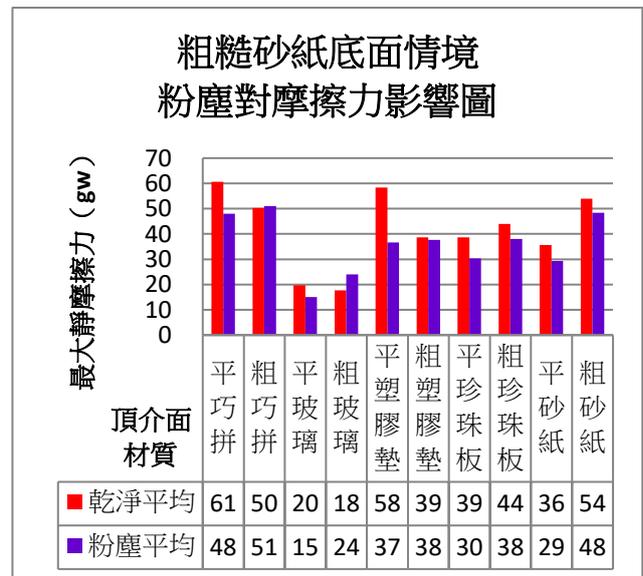


圖 5-20 粗糙砂紙底面情境粉塵對摩擦力影響圖

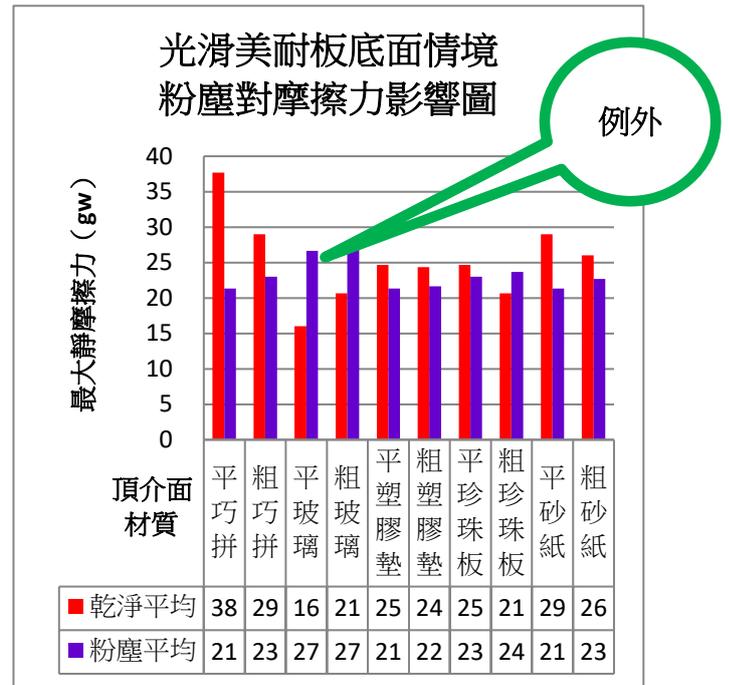
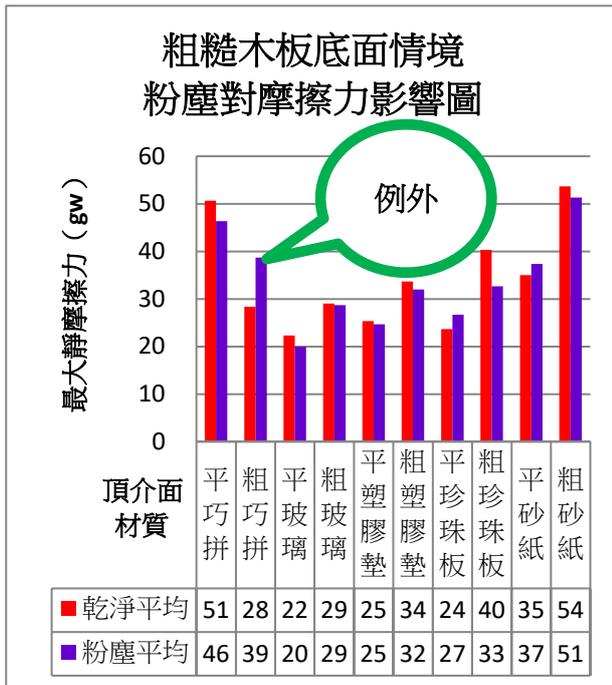


圖 5-21 粗糙木板底面情境粉塵對摩擦力影響圖

圖 5-22 光滑美耐板底面情境粉塵對摩擦力影響圖

(二) 研究結果 3-2：粗糙介面較能抗拒粉塵所造成的摩擦力減少效應（防滑）

(圖 5-22 至 5-27)

本實驗中模擬粉塵的粉筆灰灑入不同的接觸介面後，不論粗糙或平滑介面，多數呈現摩擦力下滑的趨勢。然而，摩擦力下滑的幅度有所差異，平滑介面下降幅度較多；粗糙介面下降幅度較少。不過，也有少部分情境有所差異，出現平滑介面比較能抗拒「粉塵使摩擦力下滑」的狀況；或是粉塵反而增加摩擦力的現象。

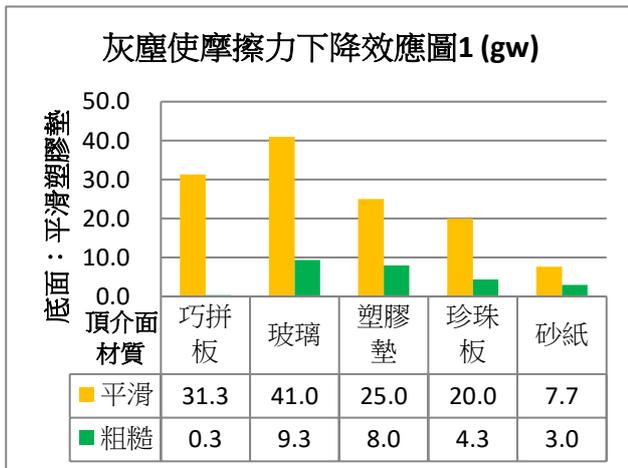


圖 5-22 灰塵使摩擦力下降效應圖（底面平塑膠）

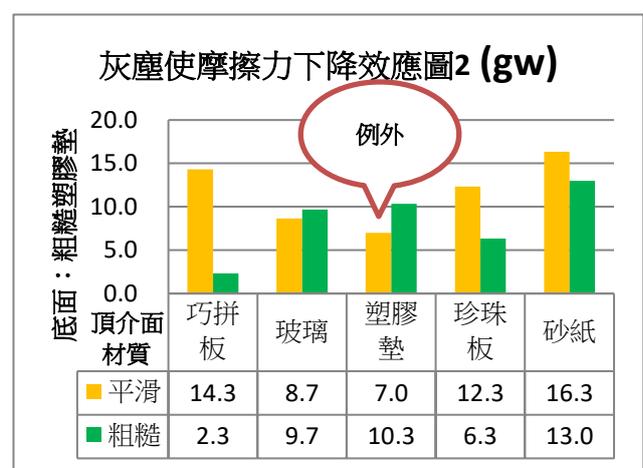


圖 5-23 灰塵使摩擦力下降效應圖（底面粗塑膠）

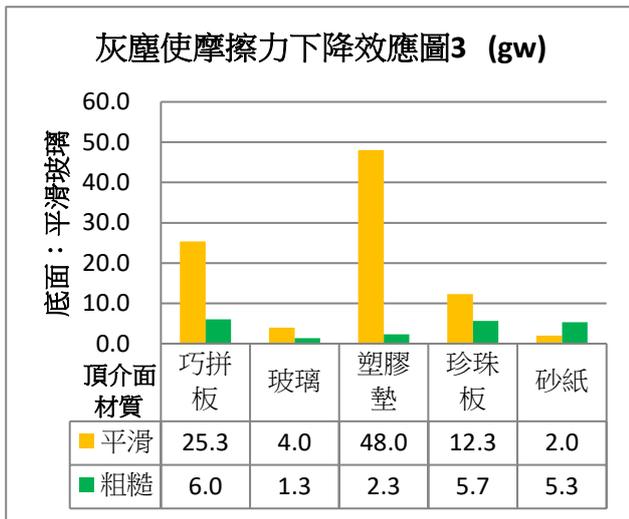


圖 5-24 灰塵使摩擦力下降效應圖 (底面平玻璃)

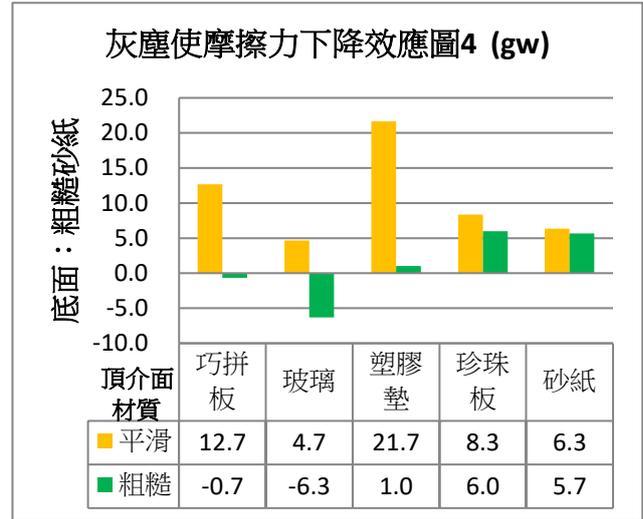


圖 5-25 灰塵使摩擦力下降效應圖 (底面粗砂紙)

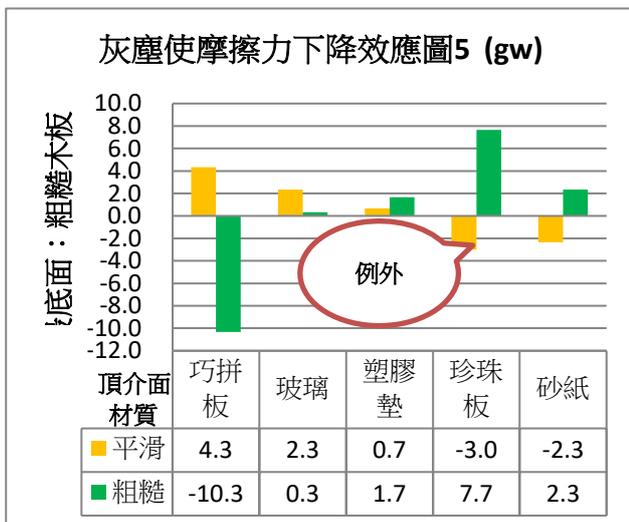


圖 5-26 灰塵使摩擦力下降效應圖 (底面粗木板)

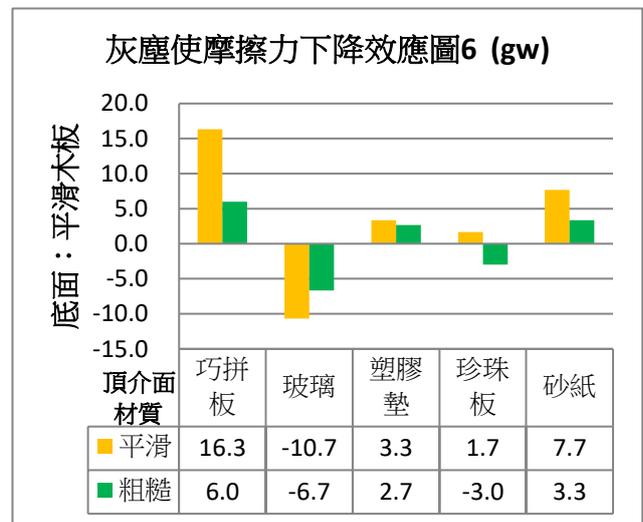
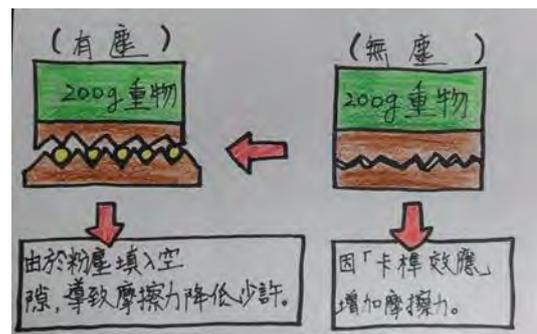


圖 5-27 灰塵使摩擦力下降效應圖 (底面平木板)

附註：

「粗珍珠/粗木板」「粗塑膠/粗塑膠」本為紋路能互相卡住使摩擦力增加的介面，但是，灰塵可能會使互相卡住的程度降低，因此有摩擦力下降效應。

圖 5-28 例外解釋 粗糙面遇到灰塵摩擦力下降示意圖



研究結果 4：接觸介面間的水分多寡，對摩擦力之的影響為何？ (圖 29-34)

- (一) 研究 4-1：接觸介面間含有「少許」水分，摩擦力會增加。
- (二) 研究 4-2：接觸介面間含有「大量」水分，摩擦力會減少。

本研究發現，傳統觀念中認為「水分会減少摩擦力造成濕滑」的現象不一定存在，少

量的水分反而會增加摩擦力；但是，大量水分則會減少摩擦力，印證「天雨路滑」的觀念。

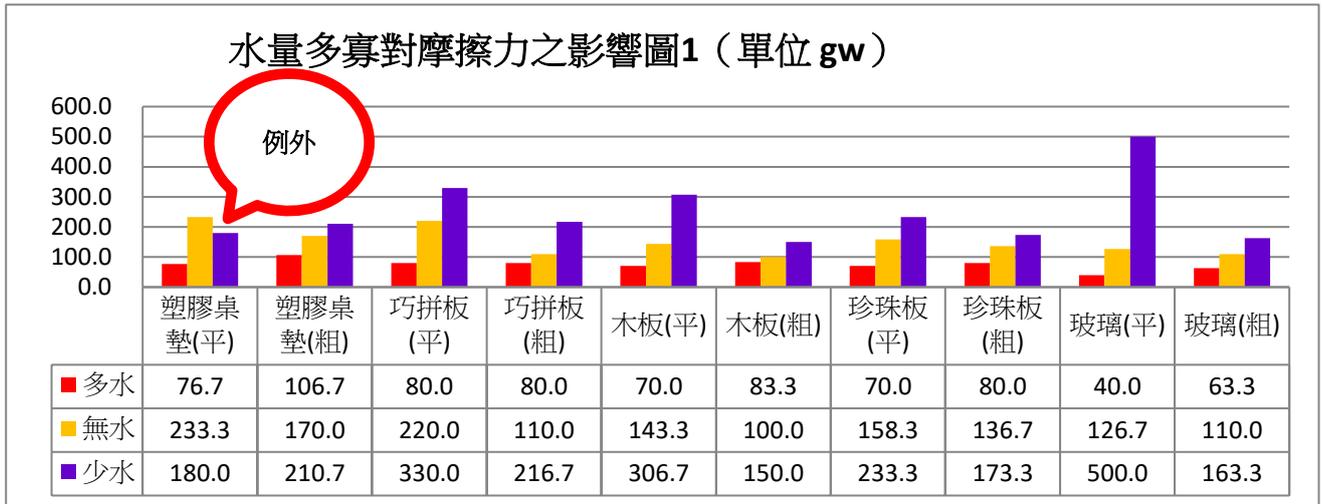


圖 5-29 水量多寡對摩擦力之影響圖 1 (平滑塑膠墊底面)

附註：塑膠墊為聚氯乙烯材質，本身因為氯原子較大具有極性，推論因此因素，使無水情境的塑膠墊摩擦力更大。(聚氯乙烯保鮮膜黏性也是非常高)

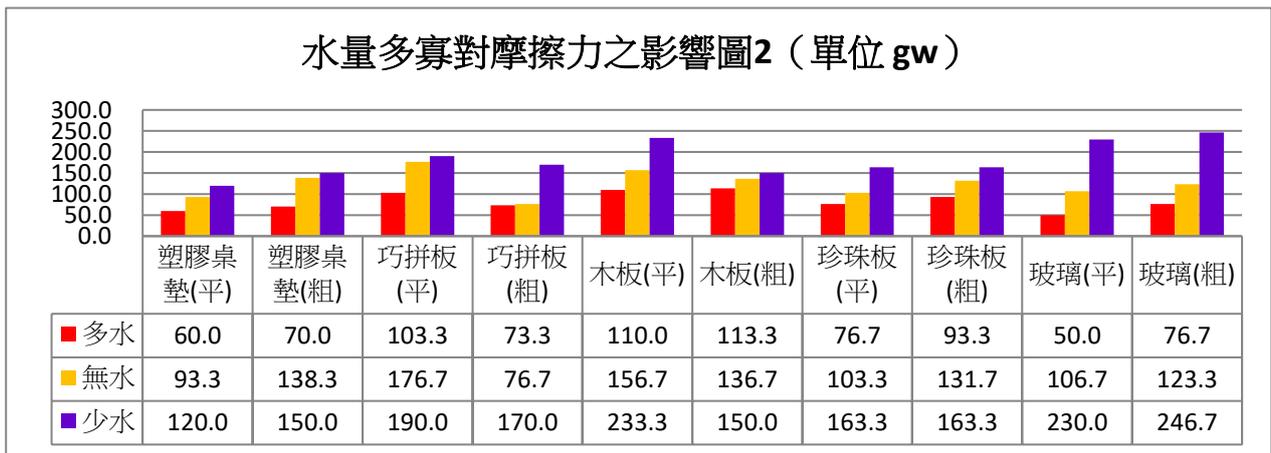


圖 5-30 水量多寡對摩擦力之影響圖 2 (粗糙塑膠墊底面)

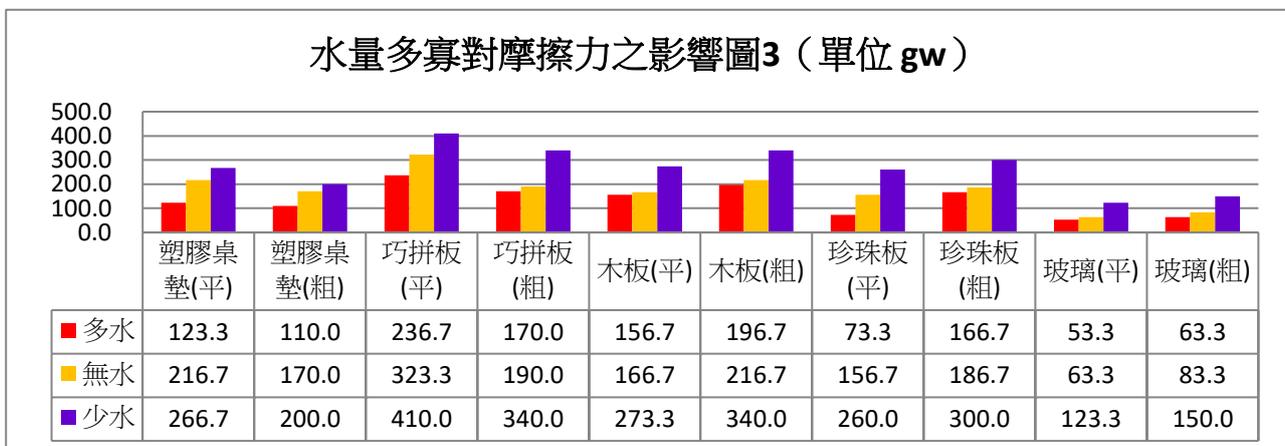


圖 5-31 水量多寡對摩擦力之影響圖 3 (粗糙砂紙底面)

水量多寡對摩擦力之影響圖4 (單位 gw)

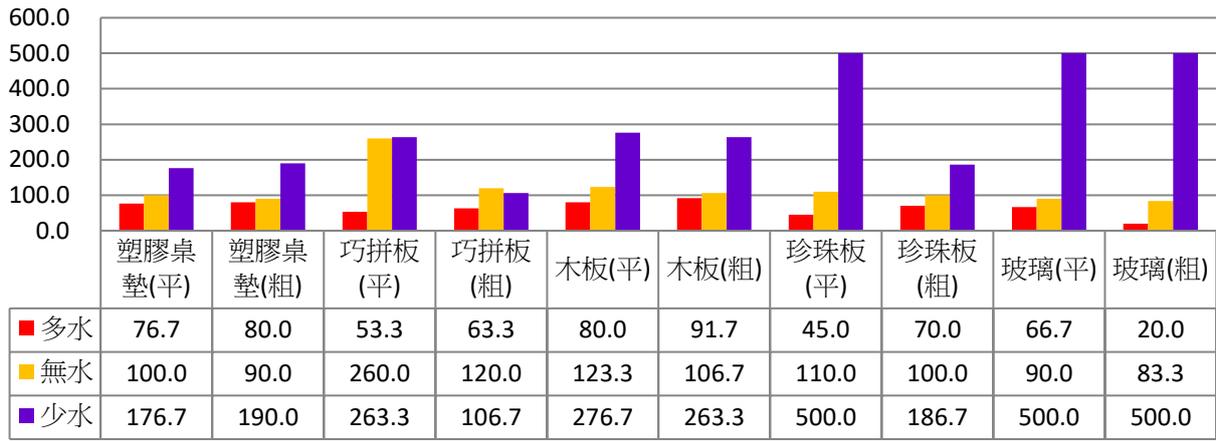


圖 5-32 水量多寡對摩擦力之影響圖 4 (平滑玻璃底面)

水量多寡對摩擦力之影響圖5 (單位 gw)

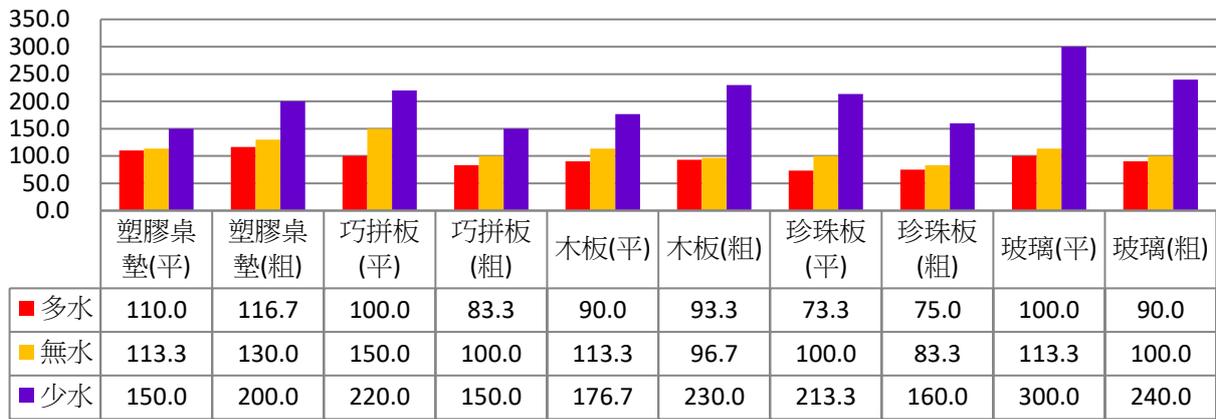


圖 5-33 水量多寡對摩擦力之影響圖 5 (平滑珍珠板底面)

水量多寡對摩擦力之影響圖6 (單位 gw)

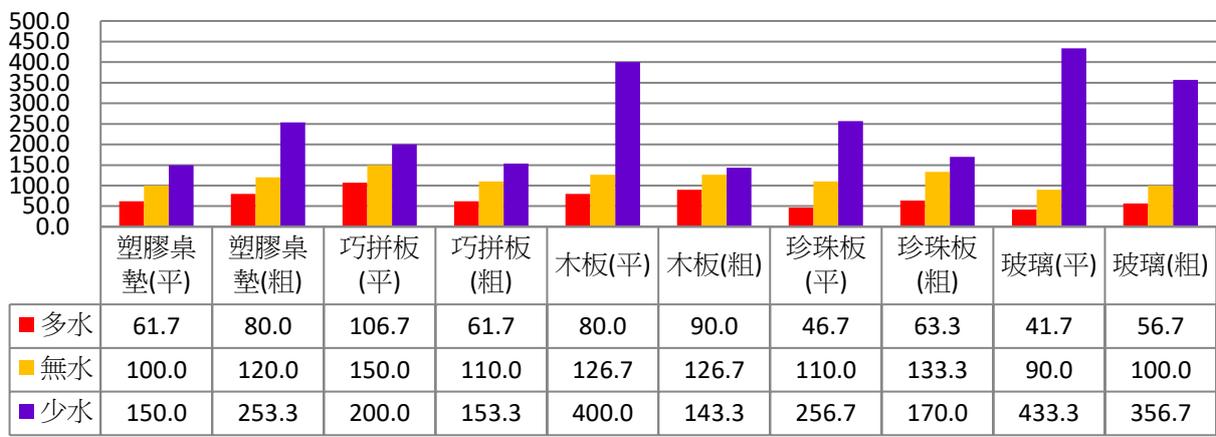


圖 5-34 水量多寡對摩擦力之影響圖 6 (粗糙珍珠板底面)

(三) 研究 4-3：粗糙介面較能抗拒大量水分造成的摩擦力減少效應（防滑）。

研究發現，當水分量增加時，介面間摩擦力會大幅下降。然而，粗糙介面較能抗拒大量水分所造成的摩擦力下降影響，也就是說，在大量水分的情境中，粗糙介面會有較大的摩擦力。但是，軟質巧拼板與玻璃的實驗結果大為不同，平滑巧拼板介面在多數多水的情境，反而能提供較大的摩擦力；大量水分時「平滑玻璃/平滑玻璃」的摩擦力也比「平滑玻璃/粗糙玻璃」大。

附註：推論粗糙介面在大量水分情境能減少摩擦力下滑的效應，應來自於粗糙面「排水」的功能，巧拼板與玻璃的粗糙紋路，均非連續紋路，無排水功能，所以無法抗拒多水造成的摩擦力下滑效應。

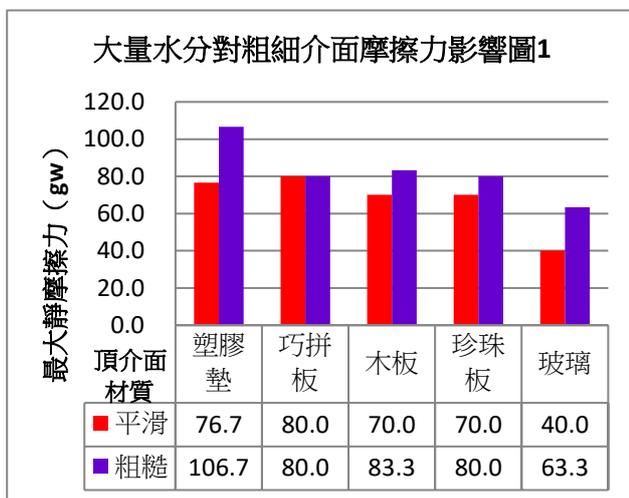


圖 5-35 大量水分對粗細介面摩擦力影響圖 1
(底面：平滑塑膠墊情境)

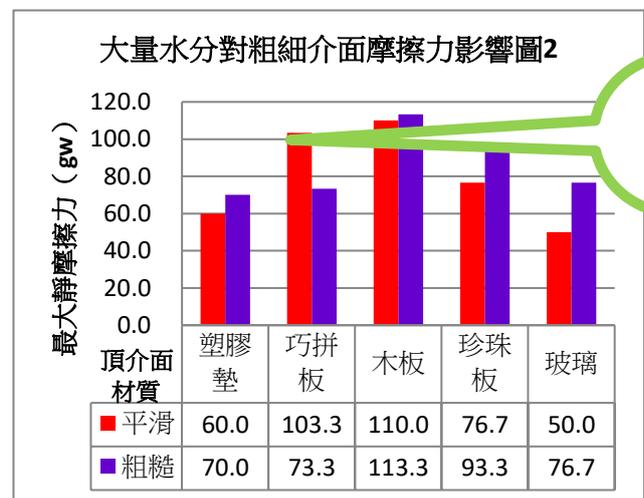


圖 5-36 大量水分對粗細介面摩擦力影響圖 2
(底面：粗糙塑膠墊情境)

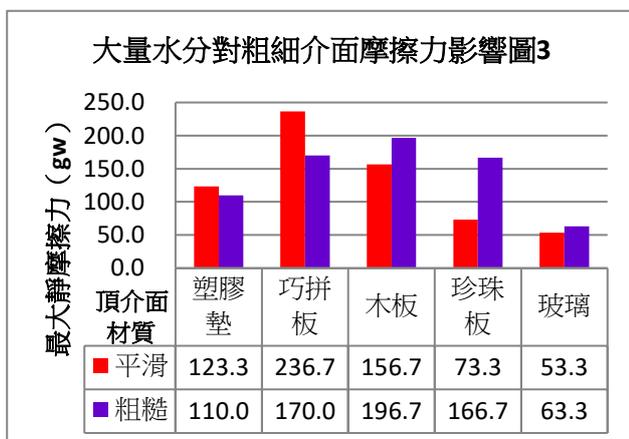


圖 5-37 大量水分對粗細介面摩擦力影響圖 3
(底面：粗糙砂紙情境)

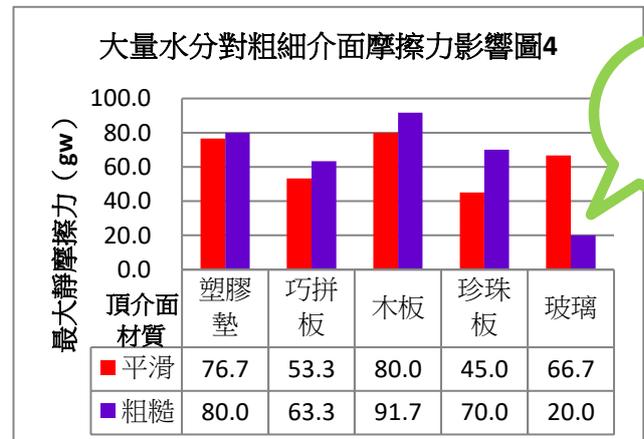


圖 5-38 大量水分對粗細介面摩擦力影響圖 4
(底面：平滑玻璃情境)

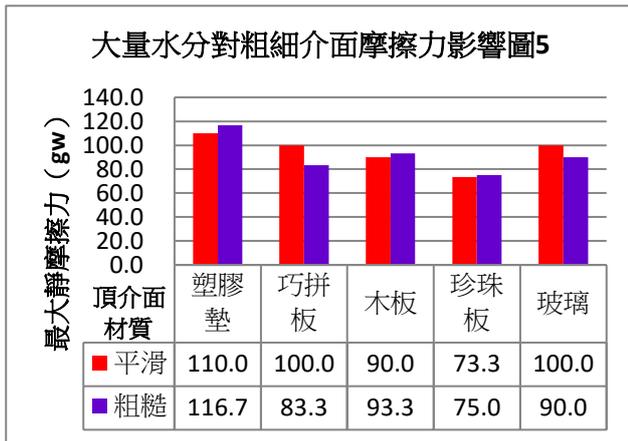


圖 5-39 大量水分對粗細介面摩擦力影響圖 5
(底面：平滑珍珠板情境)

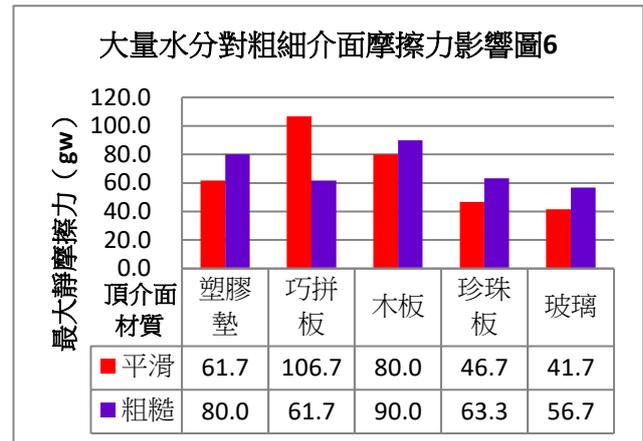


圖 5-40 大量水分對粗細介面摩擦力影響圖 6
(底面：粗糙珍珠板情境)

四、**研究結果 5**：在單位正向力不減少的前提下，介面接觸面積越大，摩擦力越大，兩者呈現正相關。

研究發現，交疊的筆記本交疊頁數越多，意即頁面接觸面積越大則摩擦力越大，兩者呈現正相關，決定係數達到 **0.948**。我們將此研究結果延伸，將筆記本每頁均交疊製造最大接觸面積，經過測試簡單的筆記本竟能產生 100 公斤以上的摩擦力，如圖 4-7、5-41、5-42，可見接觸面積與摩擦力確實有正相關關係。

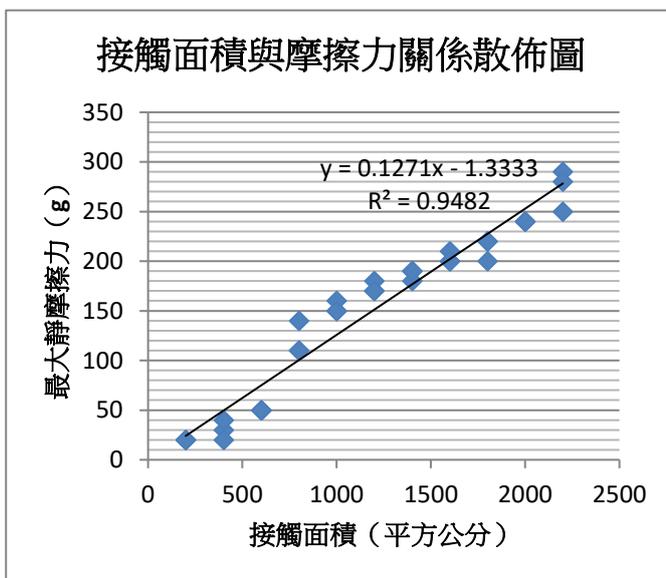


圖 5-41 接觸面積與摩擦力關係散佈圖



圖 5-42 交疊筆記本摩擦力負重實驗

利用交疊的筆記本製造最大頁面接觸面積，進而提高摩擦力。

摩擦力負重可達 100 公斤以上。

陸、討論

本研究動機來自於質疑自然課本關於摩擦力的說明，包括「接觸面積與摩擦力無關」、「水分會造成摩擦力減少」、「粗糙介面有較大的摩擦力」等，此與許多生活經驗不盡相同，因此進行研究與討論。經過一連串縝密研究後發現，影響摩擦力的因素眾多，其中最大影響因素可能就是「實際接觸面積」。

所謂的實際接觸面積要從「微觀」角度探討。兩介面可視的「觀察接觸面積」如果一樣大，但是微觀及細小的層面「實際接觸面積」其實並不相同。例如滿載的卡車與空卡車，肉眼觀察輪胎與柏油路的「觀察接觸面積」均相同；但微觀層次觀察，滿載卡車的重量會使輪胎與柏油路兩介面之間更緊密接觸，微觀原子層面的接觸面積也就增加，因此會有更多「實際接觸面積」。此想法與黃福坤（2007）與鄭劭家（2014）的觀點相似。

故本研究在歸納實驗數據後提出：「微觀與實際接觸面積越大，摩擦力越大」的推論，並以此假設為主軸，嘗試解釋相關數據的合理性；並進一步解釋課本理論與生活現象差異的可能原因。

一、**討論 1**：接觸介面粗糙程度對摩擦力有影響。

（一）**討論 1-1**：為何兩介面為「平滑/平滑」時，摩擦力大於「平滑/粗糙」介面？

實驗證實，「平滑/平滑」兩個介面能互相貼合，實際接觸面積幾乎等於介面的面積，故摩擦力較大；反之，「粗糙/平滑」兩個介面中，接觸面積反而大為減少，故摩擦力下降，這也說明了拔河比賽中，拔河道與拔河鞋均為平滑材質，以大量接觸面積產生最高摩擦力。如圖 6-1 所示。

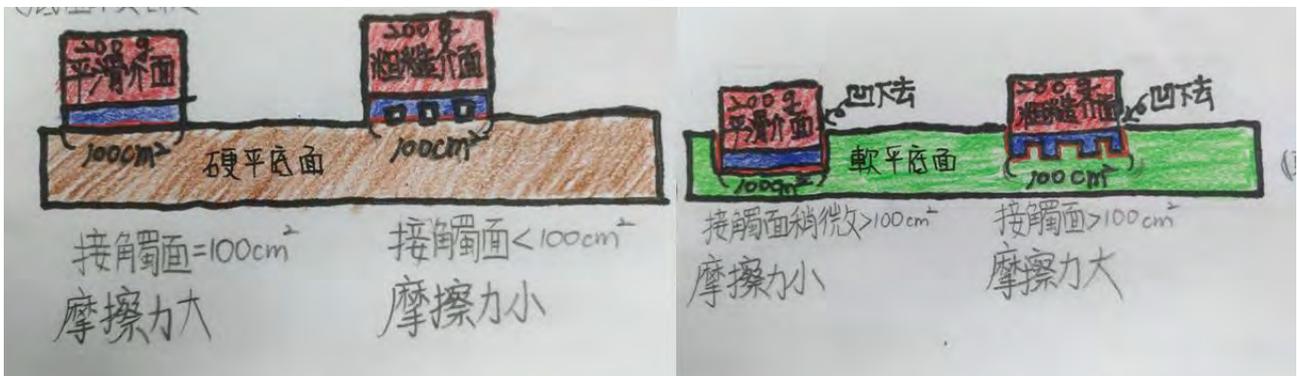


圖 6-1 介面粗糙程度與接觸面積示意圖（研究者自繪）

(二) **討論 1-2**：為何兩介面為「粗糙/粗糙」時，摩擦力大於「平滑/粗糙」介面？

再者，在「粗糙/粗糙」介面中，如同自然課本所述，摩擦力較大。我們認為，硬質粗糙介面間如同一根根卡榫有機會互相卡住，並在卡住過程中增加了接觸面積，故增加摩擦力，就像中國古建築利用卡榫，能以高摩擦力穩定建築物一樣，本研究稱之為「卡榫效應」。

此外，兩粗糙介面一軟一硬時，硬質粗糙介面如同釘子一般，嵌入軟質介面，製造更多接觸面積，也相對增加摩擦力，就像是穿釘鞋在草皮奔跑有高摩擦力一樣，我們稱之為「釘子效應」。如圖 6-2 所示

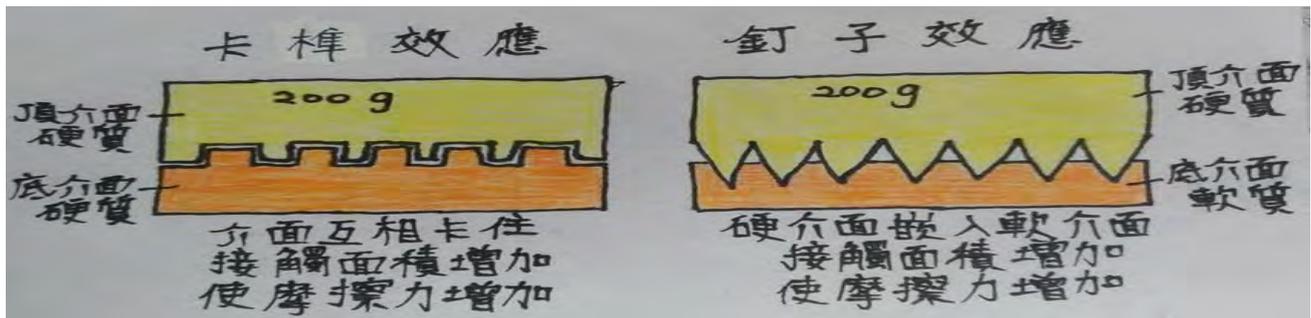


圖 6-2 卡榫效應與釘子效應想像圖（研究者自繪）

二、**討論 2**：接觸介面硬度、紋路對摩擦力的影響。

(一) **討論 2-1**：兩「粗糙」介面的硬度與紋路對摩擦力有何影響？

- (1) 「硬質粗糙/硬質粗糙」：紋路能互卡，則摩擦力大；紋路無法互卡，則摩擦力小。
- (2) 兩接觸介面為「硬質粗糙/軟質粗糙」時，會有較大摩擦力。

兩介面為硬質粗糙介面時，有機會產生「卡榫效應」，以互相卡住創造更大接觸面積，進而提升摩擦力；若無法互相卡住，接觸面積較少，摩擦力也較少。此外，介面硬度差異大時，粗糙面能產生「釘子效應」，釘入軟質介面，產生較多接觸面積與摩擦力。

(二) **討論 2-2**：兩「平滑」介面的硬度對摩擦力有何影響？

- (1) 為何「硬質平滑/硬質平滑」時，摩擦力較小。
- (2) 「硬質平滑/軟質平滑」或「軟質平滑/軟質平滑」時，摩擦力較大。

我們推論，兩介面均是平滑介面時，實際接觸面積應該最大。但是介面若不夠平整，即使只有 0.5 度的彎曲，會使硬質介面無法互相接觸，大幅降低接觸面積與摩擦力。這說明了「平滑美耐板/平滑玻璃」間的摩擦力很低，如圖 5-2 與 6-3。此外，若其中一個平滑介面是

軟質介面，會因為正向力導致軟質介面變形而增加接觸面積，使摩擦力增加。如圖 6-1 所示。

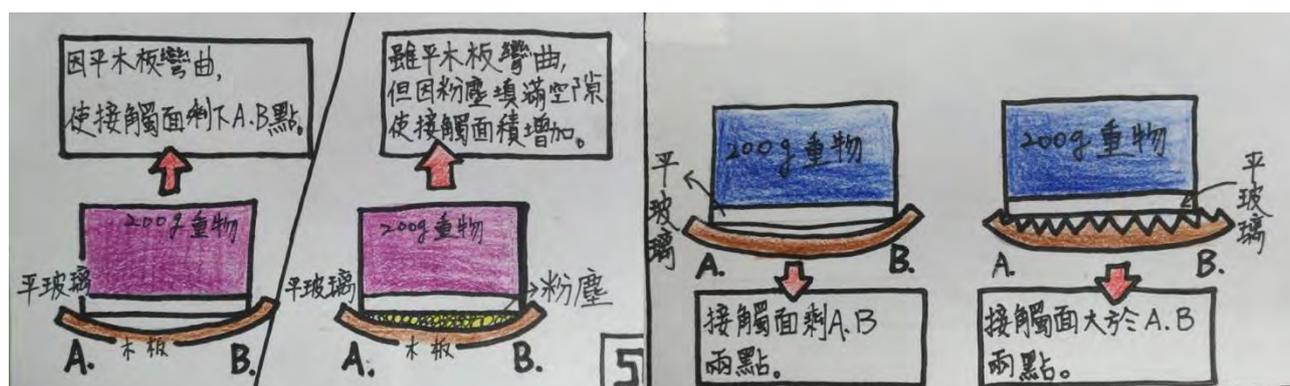


圖 6-3 「硬質玻璃/硬質美耐板」摩擦力下降原因想像圖（研究者自繪）

（三）討論 2-3：兩「平滑/粗糙」介面的硬度對摩擦力有何影響？

（1）兩接觸介面為「硬質粗糙/軟質平滑」時，摩擦力較大。

（2）兩接觸介面為「軟質粗糙/硬質平滑」時， 摩擦力較小

依據前述釘子效應，粗糙硬質介面像是釘子，會釘進軟質平滑介面，增加接觸面積，所以摩擦力較大。反之，粗糙軟質介面就像是軟釘子，無法有釘進平滑硬質介面的能力，因此摩擦力較低，如圖 6-4 所示。



圖 6-4 兩介面硬度差異與嵌入效應對摩擦力影響圖（研究者自繪）

三、討論 3：接觸介面間的灰塵，通常會降低介面間的摩擦力。（參見圖 6-5）

（一）討論 3-1：為何不論介面材質與粗糙程度為何，灰塵幾乎都會減少摩擦力？

我們用顯微鏡觀察粉筆灰後發現，微觀層面的灰塵像是一個個小圓點。清大物理系戴明鳳（2017）也表示，灰塵可視為小圓，會有「滾動軸承」的效應。因此，灰塵出現滾動現象，使摩擦力降低。此外，灰塵也會使兩介面接觸面積減少，使摩擦力下降。如圖 6-5 所示。

（二）討論 3-2：為何粗糙介面較能抗拒粉塵所造成的摩擦力減少效應（防滑）？

我們推論，灰塵在兩個粗糙介面中間時，介面間的粗糙凹洞剛好成為留置灰塵的空間，介面間接觸面積雖然因灰塵而減少，但程度有限。如圖 6-6 所示。



圖 6-5 灰塵對使介面摩擦力下降示意圖（研究者自繪）

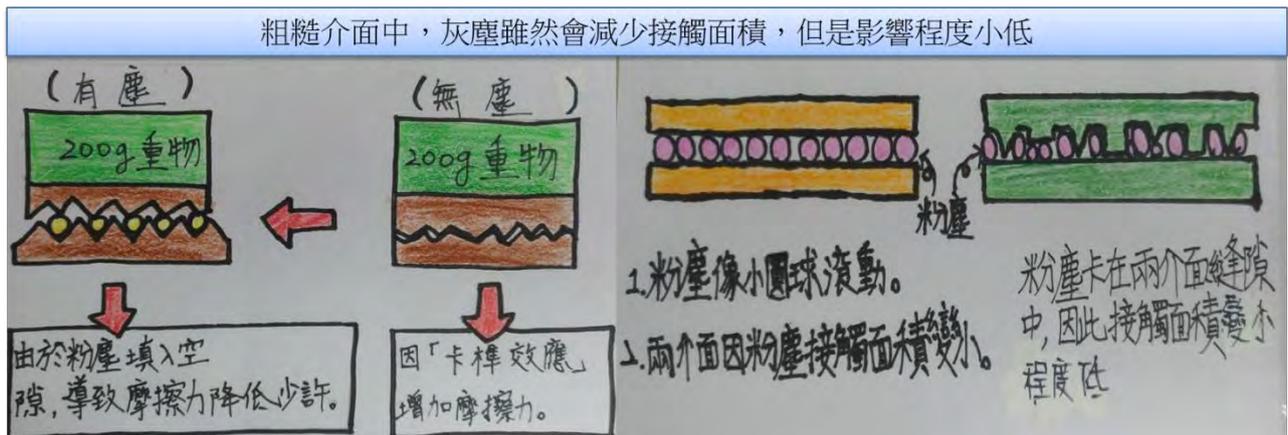


圖 6-6 粗糙介面較能抗拒粉塵所造成的摩擦力減少效應想像圖（研究者自繪）

四、討論 4：接觸介面間的水分多寡，對摩擦力有影響？

(一) 討論 4-1：為何接觸介面間含有少許水分，摩擦力會增加？

經過閱覽相關文獻發現，水分子屬於極性分子，不論對於介面材質與水分子間，均有吸引力（內聚力與附著力）。因此，少許的水分子也許填滿了介面間微觀的小縫隙，某種程度增加了整體接觸面積，並加上水分子的極性吸引，使摩擦力增加。此外，圖 5-28 顯示，平滑塑膠墊在少水情境，摩擦力並未上升，可能是聚氯乙烯 PVC 塑膠具有極性，互相吸引黏合的力量高過水的極性，因此，無水情境反而摩擦力更大。

(二) 討論 4-2：為何接觸介面間含有大量水分，摩擦力會減少？（參見圖 6-7）

探討文獻發現，師大物理系黃福坤教授（2006）認為，大量水分會區隔兩個接觸介面，因此兩個介面完全沒有接觸，因此根本沒有介面間的接觸面積與摩擦力，只剩下水分子間的滑動摩擦力（蔡志申，2010）。因此，本研究推論，兩介面僅存的摩擦力應該來自水分子極性的附著力，因此造成摩擦力下降。

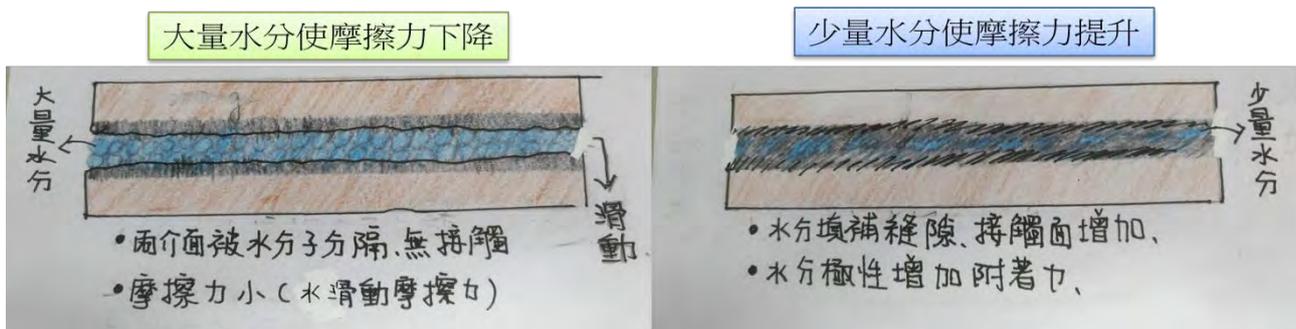


圖 6-7 水分對摩擦力的影響示意圖（研究者自繪）

（三）討論 4-3：為何粗糙介面較能抗拒大量水分造成的摩擦力減少效應（防滑）？

探討文獻發現，交通部交通安全入口網站（2016）提到，輪胎紋路有排水的作用。因此我們推論，F1 賽車晴天時使用接觸面積較大的平滑輪胎，雨天時會換有粗糙紋路的輪胎，用意並非粗糙輪胎摩擦力大，而是因為「粗糙輪胎能排水」。也可因此推論，粗糙介面的排水功能讓大量水分排出，故能抗拒大量水分所減少的摩擦力。這也說明圖 5-34 至 5-39 中，在多水的情境中，粗巧拼板因紋路不連貫失去排水功能，因此摩擦力反而低於平滑巧拼板，如圖 6-8。

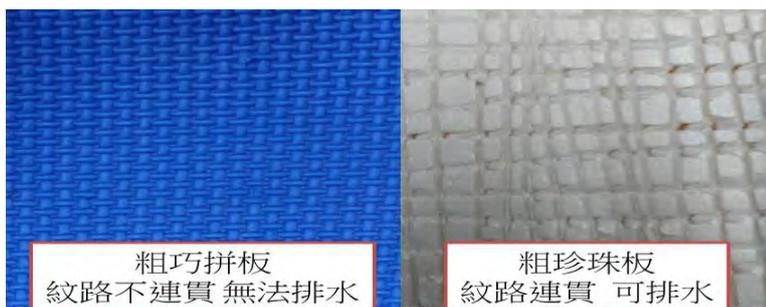


圖 6-8 粗糙紋路與排水效應對照圖

五、討論 5：為何介面接觸面積越大，摩擦力越大？此與國中課本實驗結論「接觸面積大小與摩擦力無關」的差異為何？

蔡志申（2010）認為，摩擦力是阻止物體沿介面間的正切方向相對運動的力，來自於帶電粒子之間的電磁力，包括電子、質子、原子和分子之間的作用力。因此本研究認為，國中物理實驗中，一個立方體以不同的面接觸底介面，雖然肉眼觀察的表面接觸面積大小有別，但是真正影響摩擦力的是，微觀層面原子尺度的「實際接觸面積」。因此，立方體以較小面積接觸底介面時，因為單位面積正向力增加，所以「微觀實際接觸面積」也增加，因此，摩擦力較不會因此減少，此與黃福坤（2007）的想法相似。

所以，當兩本筆記本交疊時，在單位面積正向力不變的情況下，增加了接觸面積，所以會產生巨大的摩擦力，再次證明「摩擦力與實際接觸面積有關係」！

柒、結論與建議

一、對於中小學自然領域教科書的建議與結論

教科書提到的幾個摩擦力概念，在多數情況下是正確的，但是部分情況有違生活物理經驗，建議應該寫得更周延，以更符合真實物理狀況，以免造成學生科學概念迷思，以下提供教科書內容改編淺見：

(一) 摩擦力與接觸面積大小無關 **修正為**→ 摩擦力受微觀層面的「實際接觸面積」影響：

在正向力（物體重量）不變的前提下，肉眼所見的接觸面積與摩擦力無明顯影響。然而，不同接觸面積會有不同的單位面積正向力，也會使微觀層面的「實際接觸面積」有所不同，使摩擦力造成差異。總結：摩擦力受巨觀與微觀兩層面共同的「實際接觸面積」影響。

(二) 水分會減少摩擦力 **修正為**→ 少量水分會增加摩擦力；大量水分會降低摩擦力。

天雨路滑是生活經驗也是教科書強調的物理現象。但本研究發現，手指沾水比較容易翻書；流汗的皮膚比較不光滑，少量水分在兩接觸介面間時，不但填補部分縫隙增加接觸面積，也因為水分極性附著力，增加介面摩擦力；只有在多水的情境，摩擦力才會降低。總結：少量水分會填補縫隙增加接觸面積，也因水具有極性附著力，所以少量水分會增加摩擦力。大量水分會讓兩接觸介面被分開，使介面間沒有接觸面積，所以降低摩擦力。

(三) 粗糙介面摩擦力較大 **修正為**→ 影響摩擦力的因素眾多，粗糙面在多數情境摩擦力較大，但並非絕對。

介面間實際接觸面積越大，摩擦力越大。粗糙介面在許多情境會製造較大接觸面積，例如介面粗糙突出物之間如卡榫互相卡住、粗糙突出物如釘子釘入另一介面，都會增加接觸面積，所以，粗糙介面常常會增加摩擦力。但是，在部分情境，兩介面都是平滑表面時，因接觸面積非常大，所以反而會有更大摩擦力。總結：粗糙介面與平滑介面何者會有較高摩擦力，應視介面間微觀與巨觀共同的「實際接觸面積」大小決定。

(四) 建議教科書 **新增**→ 自然界的粉塵會降低摩擦力

粉塵在微觀世界中如同小圓珠，會降低介面間接觸面積，也會出現「滾動軸承」的現象，因此使摩擦力下降。總結：多數情況下，粉塵會降低摩擦力。

二、對於生活世界的建議與結論

(一) 生活中增加摩擦力（防滑），仍應該優先選用粗糙介面

雖然實驗發現在無塵無水時，兩平滑介面間會有較高摩擦力，但是，在自然世界中介面千變萬化，有粗糙柏油路、光滑大理石地面、充滿灰塵泥土路、積水泥寧的路面。研究發現，粉塵與大量水分都會減少摩擦力，但是，粗糙介面較能抗拒積水與粉塵減少摩擦力的效應。F1 賽車雖然用平滑輪胎奔馳，但是遇到下雨，要立即更換能排水的粗糙輪胎；一般人的鞋子與輪胎，不可能遇到下雨更才換粗糙鞋子或粗糙輪胎，因此，為了因應性質多變的介面，選用粗糙材質製作鞋面、輪胎、路面防滑條，仍是摩擦力較佳的選擇。



圖 7-1 賽車在晴天與雨天使用輪胎材質對照圖

(二) 生活中常見的 EVA 巧拼板（乙酸乙烯酯）的粗糙面紋路不連貫，無排水功能，因此在多水的情境下，摩擦力反而很低。建議廠商設計具排水功能的連貫紋路，增加防滑性。

巧拼板（EVA）材質在實驗中發現，粗糙紋路面在多水情境摩擦力反而比平滑面低。推論發現，巧拼板紋路不連貫，沒有排水功能，因此反而聚積更大量水分在介面之間，摩擦力大為下降。因此，建議廠商設技巧拼板時，應設計成「有排水功能的粗糙連貫紋路」，增加安全性。一般家庭若仍使用舊式巧拼板，建議使用「平滑面」，反而會有較高摩擦力。此外，同樣以乙酸乙烯酯製作的便宜拖鞋，建議鞋底紋路需具備連貫性與排水性，才會增加更多摩擦力，強化防滑功能。

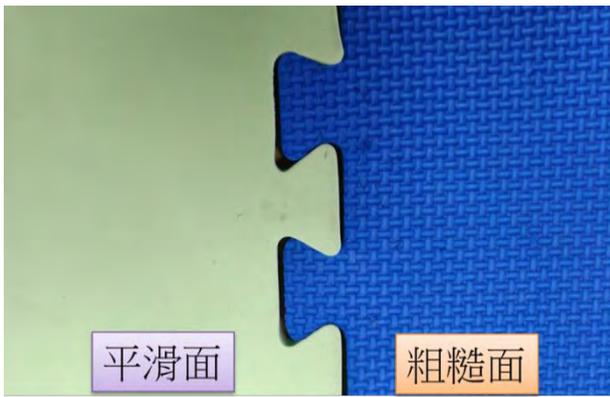


圖 7-2 紋路不連貫不能排水的巧拼板

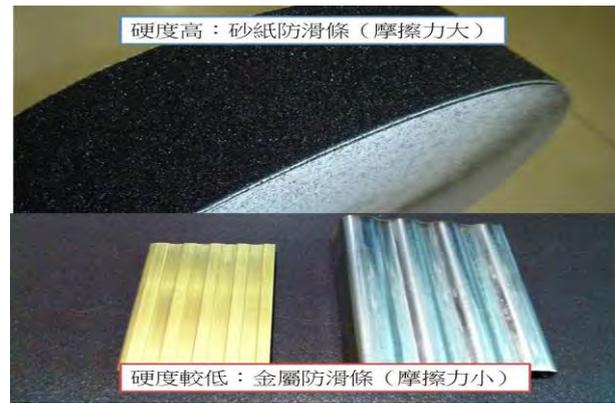


圖 7-3 不同款式的樓梯防滑條

（三）樓梯防滑條應以砂紙類防滑條取代金屬防滑條，方能有更大摩擦力

樓梯常見的防滑條有兩種，分別是砂紙類與金屬條類。依據研究結果 2-1 所示，兩粗糙介面屬於軟質與硬質時，會有釘子效應，增加摩擦力。砂紙與橡膠鞋底的硬度差異較大，因此，砂紙顆粒比較容易釘入橡膠鞋底，增加摩擦力。反之，金屬防滑條較不易釘入鞋底，且金屬防滑條紋路與鞋底紋路亦無法互相卡住，沒有卡榫效應，因此摩擦力較小。故本研究建議樓梯防滑條應改為砂紙材質。

（四）學校拔河比賽場地應從草皮改至 PU 跑道舉行

研究 1-1 發現，在無塵無水的情境下，平滑介面有最高摩擦力。但是學校拔河賽不可能為每個學生購置拔河鞋。學生穿著軟質運動鞋在草皮拔河常常打滑，從討論 1-2 可知「兩粗糙介面紋路若能互相卡住，摩擦力較高」。故粗糙介面的鞋底在粗糙 PU 跑道時，紋路可互相卡住，摩擦力應會大為提升。（附註：在草皮上奔跑最適合的鞋子是釘鞋，因為具有釘子效應。）

（五）馬路白色交通標線應該改為粗糙顆粒，增加摩擦力

依據研究結果 2-1 所示，兩粗糙介面屬於軟質與硬質時，會有釘子效應，增加摩擦力。柏油與橡膠輪胎的硬度差異較大，因此，柏油顆粒比較容易釘入橡膠輪胎，增加摩擦力。現況使用平滑的白色交通標線，無法釘入軟質輪胎，容易降低摩擦力，使汽機車打滑。若我們將碎石染為白色，鋪設為粗糙標線，如此符合「硬質粗糙面釘入軟質介面」的釘子效應與「粗糙紋路互相卡住」的卡榫效應兩條件，相信標線摩擦力會大增，增加行車安全。

三、對自己的期許-後續研究構思

（一）粉筆灰能降低介面摩擦力，其他硬度不同的灰塵例如塵土、細沙石等等，也會有相似

降低摩擦力的效果？粉塵的粒徑大小對摩擦力有所影響？有待後續研究。

(二) 粗糙介面的紋路連貫有排水性時摩擦力比較大，比較防滑。在生活世界中，輪胎或鞋子的紋路與排水性，使否也會在多水情境影響摩擦力？有待後續研究。

捌、參考資料及其他

認識輪胎與胎紋 (2016 年 8 月 3 日)。嘉義市：公路總局嘉義區監理所。取自

[http://168.motc.gov.tw/News_Content.aspx?n=ykP\\$IV7RO12xKedv!WxbWQ@@&s=NtBfyjQFNGHBkq\\$8I\\$Ee2w@@](http://168.motc.gov.tw/News_Content.aspx?n=ykP$IV7RO12xKedv!WxbWQ@@&s=NtBfyjQFNGHBkq$8I$Ee2w@@)

江玉棻、相子元 (2004)。國內常見拔河鞋之摩擦係數比較。《運動生物力學研究彙刊》。取自

<http://cjsb.org/paper/2002TSBS/15.pdf>

王美分 (2017)。《康軒版自然與生活科技課本第四冊》。台北：康軒。

休伊特 (2008)。《觀念物理》。台北：天下文化。

摩擦力 (無日期)。維基百科。2018 年 2 月 26 日取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%91%A9%E6%93%A6%E5%8A%9B>

摩擦力 (無日期)。教育百科。2018 年 2 月 26 日取自 <http://pedia.cloud.edu.tw/Entry/Detail?title=%E6%91%A9%E6%93%A6%E5%8A%9B&search=%E6%91%A9%E6%93%A6%E5%8A%9B>

<http://pedia.cloud.edu.tw/Entry/Detail?title=%E6%91%A9%E6%93%A6%E5%8A%9B&search=%E6%91%A9%E6%93%A6%E5%8A%9B>

陳秋民 (2017)。《翰林版自然與生活科技課本第四冊》。台北：翰林。

黃鴻博 (2017)。《南一版自然與生活科技課本第四冊》。台北：南一。

黃福坤 (2007 年 5 月 21 日)。摩擦力與接觸面積大小【討論訊息】(編號 2) 國中物理討論話

題話題：取自 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=17267>

黃福坤 (2006)。關於水與摩擦力【討論訊息】(編號 5) 國中物理討論話

題話題：取自 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=15510>

戴明鳳 (2017 年 5 月 4 日)《灰塵、摩擦力與滾動軸承的關係》，研究者私人訪問。

國立中央大學物理系教學實驗室 (2013)。《普通物理實驗講義》。取自

<http://uep.phy.ncu.edu.tw/general-physics/expcourse/>

鄭勁家 (2014)。微觀尺度下的摩擦力定律。《科學研習月刊》。取自

<https://www.ntsec.gov.tw/USER/Article.aspx?a=837&p=2>

蔡志申 (2010)。摩擦力簡介。取自 <http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=18756>

【評語】 080116

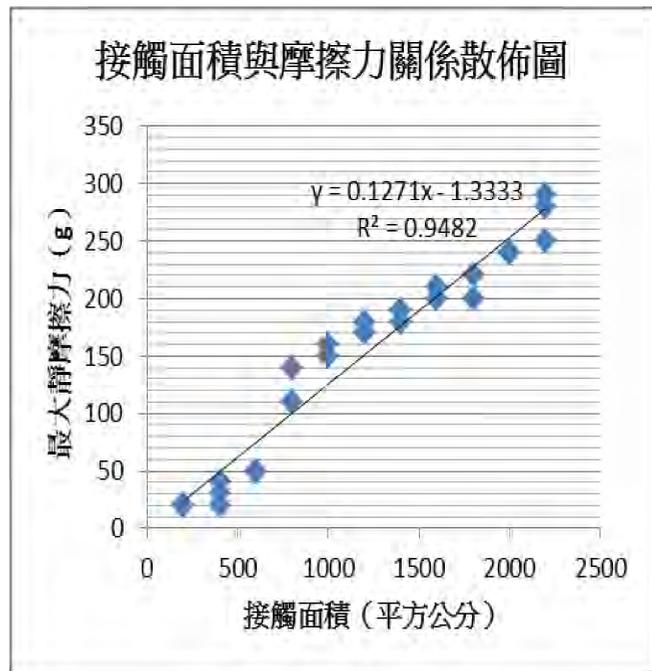
本研究為釐清教科書中有關摩擦力的敘述與作者生活經驗中“不一致”之處，提出了質疑，進而以作實驗來檢驗其疑問，是值得鼓勵之處，且又以微觀模型來解釋觀測到的現象，亦是值得肯定之處。若在此研究中，能將對於影響摩擦力影響的變因，由接觸面積的大小，轉為接觸面之狀況，且對動、靜摩擦係數的影響方面去作分析，應可解除原先不一致之處的質疑，並會成為一項不錯的研究作品。

壹、簡介

本研究發現，自然課本對於摩擦力的介紹太過概括，在「**介面粗糙程度**」、「**水分**」、「**介面接觸面積**」、「**灰塵**」等變項對摩擦力的影響之敘述上，多數情況下正確，但是部分情況有違生活中的物理現象，造成部分學生物理觀念迷思。本研究進行實證實驗後提出，「**摩擦力受微觀層面實際接觸面積大小影響**」的結論，提供課本修正建議。

貳、課本摩擦力觀念與生活世界現象的矛盾

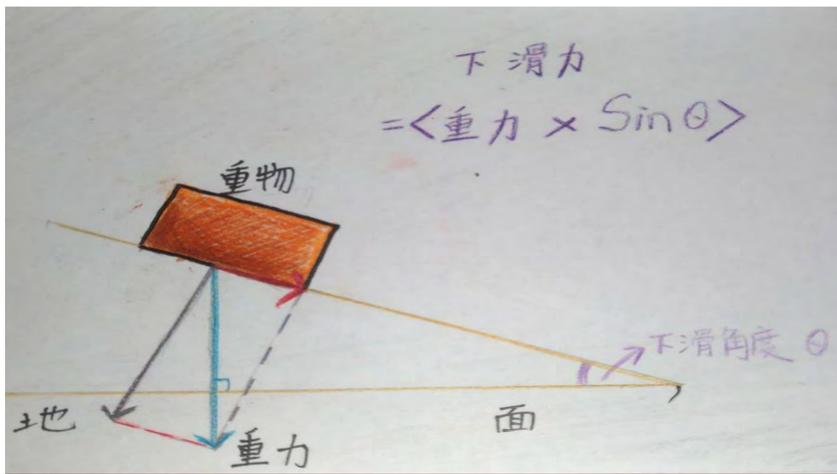
- 一、拔河鞋與拔河道的「平滑介面」摩擦力反而增加？
- 二、賽車選用「光滑無紋路」的車胎反而摩擦力更大？
- 三、少許水分似乎比較黏，摩擦力比較大？
- 四、筆記本頁面接觸面積越大，摩擦力會越大。為何課本認為「接觸面積與摩擦力無關？」



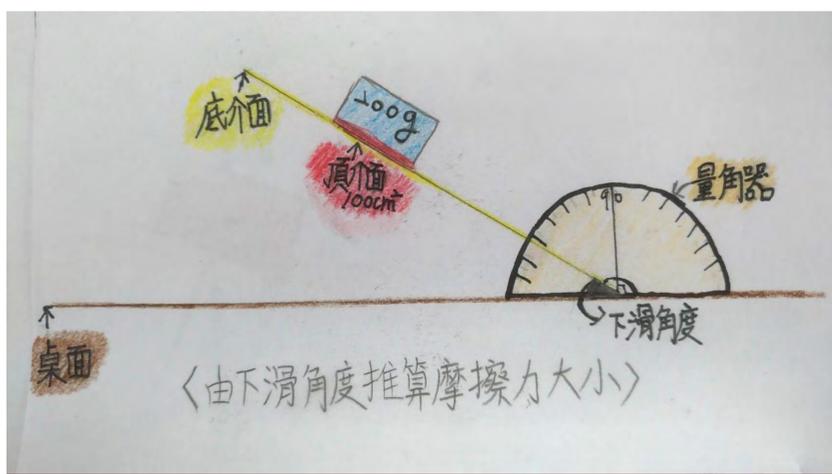
參、實驗方法：摩擦力的測量

一、滑動角度三角函數換算法 <最大靜摩擦力 = 物品重量 x Sinθ>

1. 將200公克的置物台放置於斜坡，逐漸提升坡度角度，載物平台會因為靜摩擦力作用，使載物平台不滑落。載物平台滑落的瞬間，下滑力數據即為最大靜摩擦力。
2. 以分力圖與三角函數換算最大靜摩擦力（以200公克重物於坡度30度時滑落為例）：
 $200\text{gw} \times \text{Sin}30^\circ = 200\text{gw} \times 0.5 = 100\text{gw}$



圖說：分力圖 / 以三角函數推算最大靜摩擦力



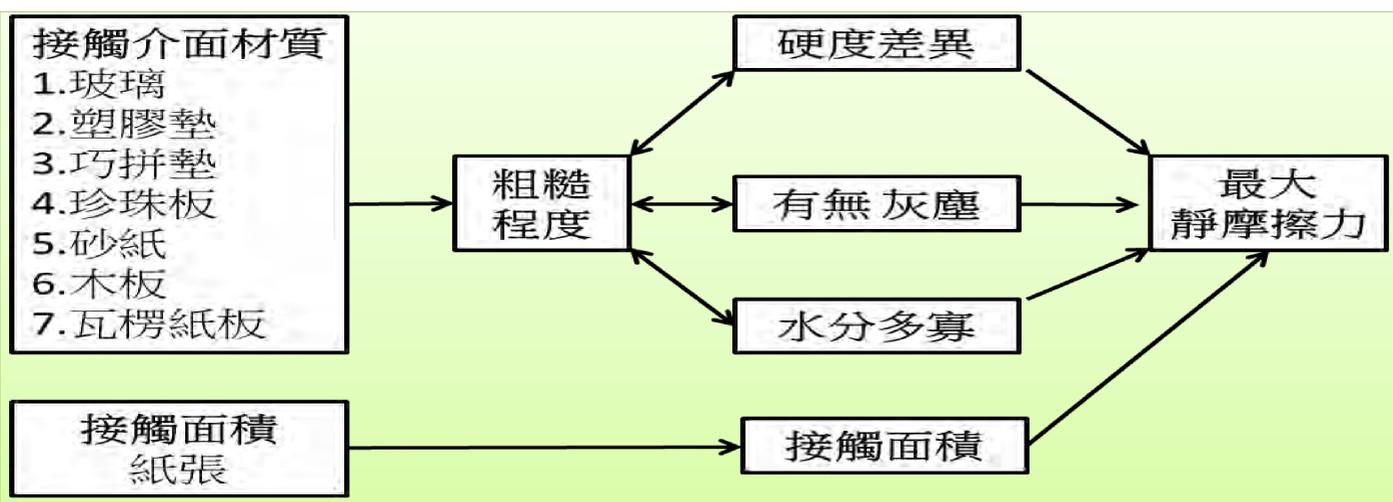
圖說：滑動三角函數換算法示意圖

二、彈簧秤拉動法

拉動彈簧秤測量置物台移動瞬間的**最大靜摩擦力**。使用在水分對摩擦力的影響實驗、筆記本頁面交疊實驗。



肆、研究架構圖

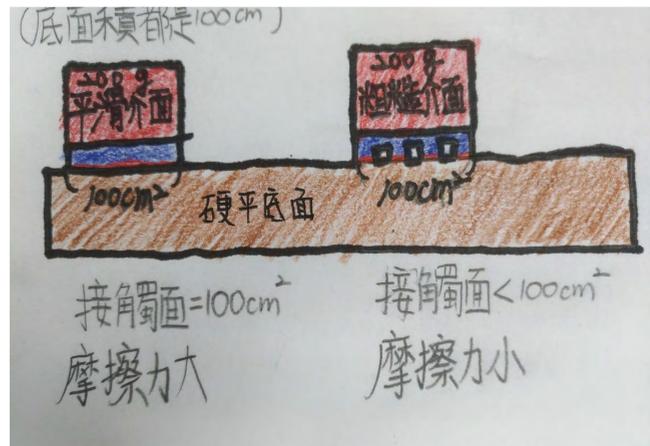


以筆記本頁面摩擦力掛鈎30公斤水桶

伍、實驗結果與發現

結果一：無塵無水的情境下「平滑/平滑介面」摩擦力大於「平滑/粗糙介面」

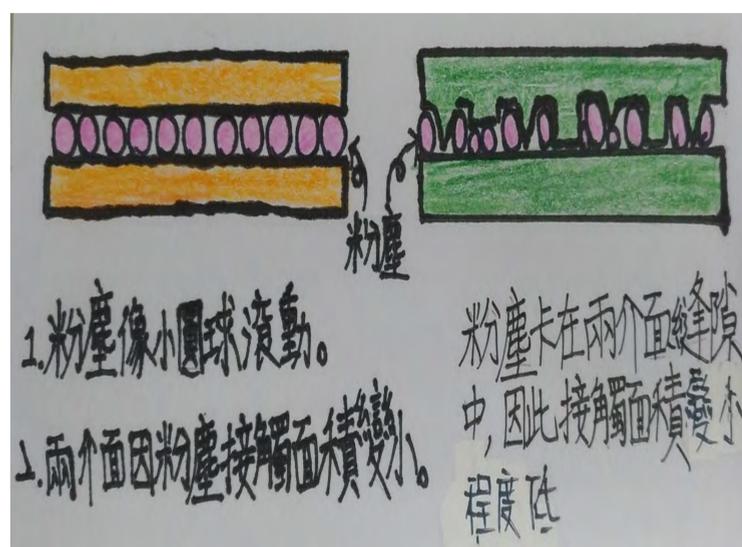
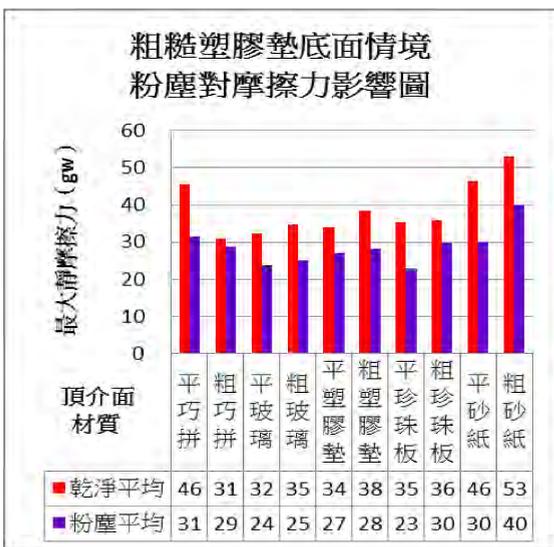
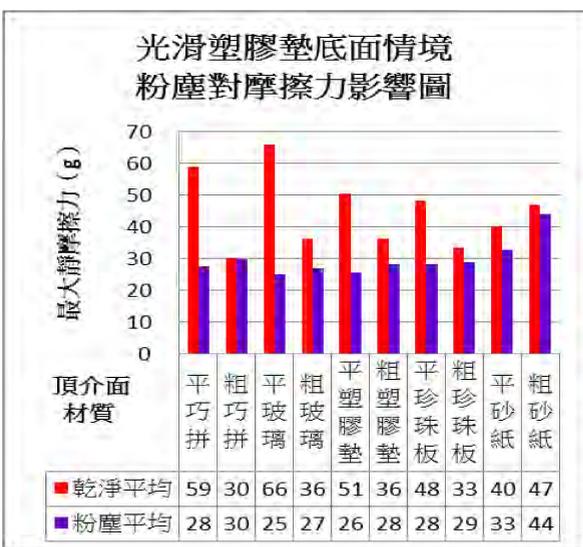
討論一：摩擦力與微觀的實際接觸面積有關！平滑介面的接觸面積較大，所以摩擦力比粗糙介面大。



圖說：同樣的材質分別以粗糙面、平滑面進行摩擦力測試，發現平滑面摩擦力均較大。

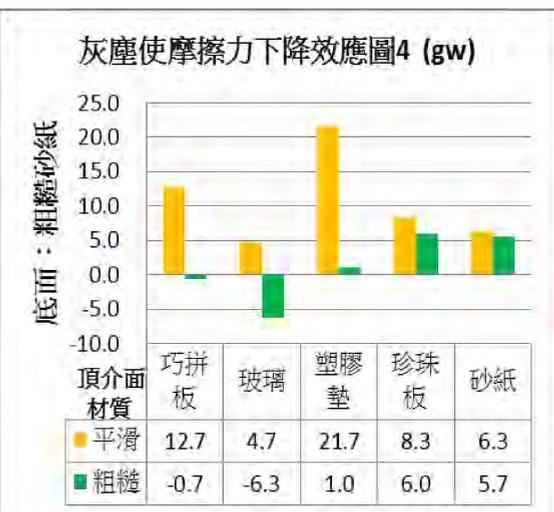
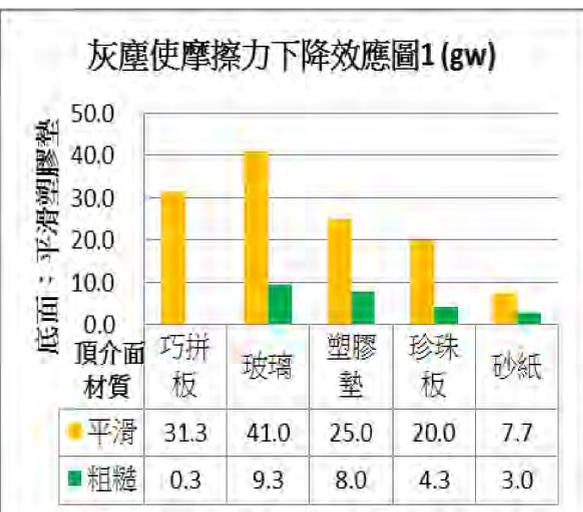
結果二：灰塵會降低介面間的摩擦力

討論二：灰塵使介間接觸面積變小；也像小圓珠造成的「滾動軸承」的效應，因此降低摩擦力！



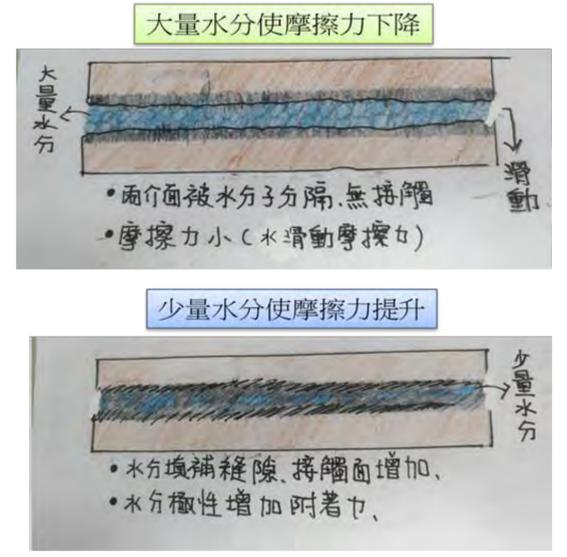
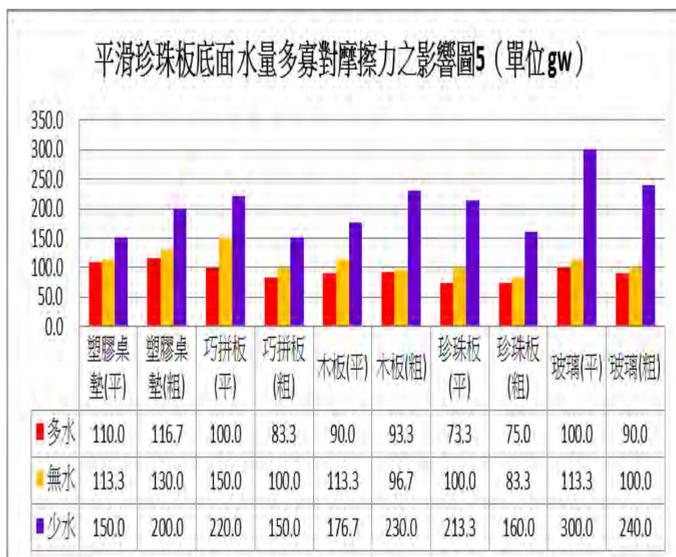
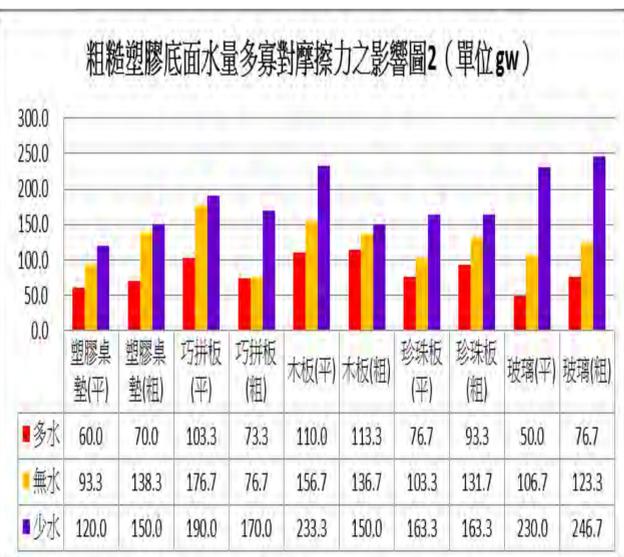
結果三：有灰塵時，粗糙介面摩擦力比較大（比較防滑）

討論三：粗糙介面空隙的灰塵，增加介面接觸面積！灰塵改變紋路結構，像小釘子把兩介面互相卡住



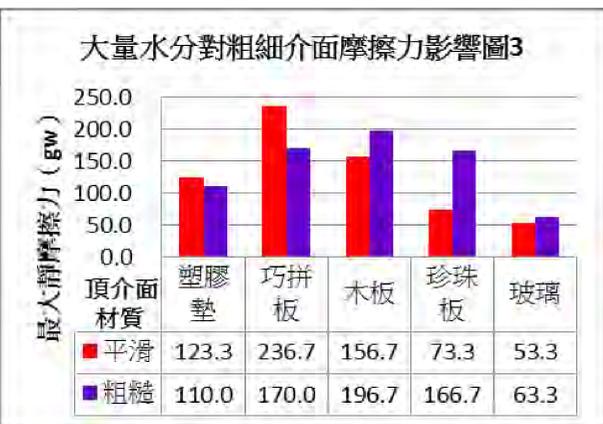
結果四：大量水分会降低摩擦力、少量水分卻會增加摩擦力

討論四：1. 大量水分使介間接觸面積變小，只剩下水分間的滑動摩擦力，所以摩擦力下降。
 2. 水是極性物質，對不同物質有高度附著力，因此少量水分反而會增加摩擦力。

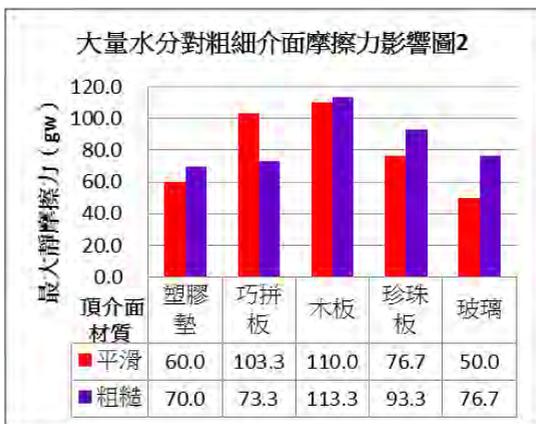


結果五：在多水情境中，粗糙介面的紋路連貫摩擦力大；紋路不連貫摩擦力小。

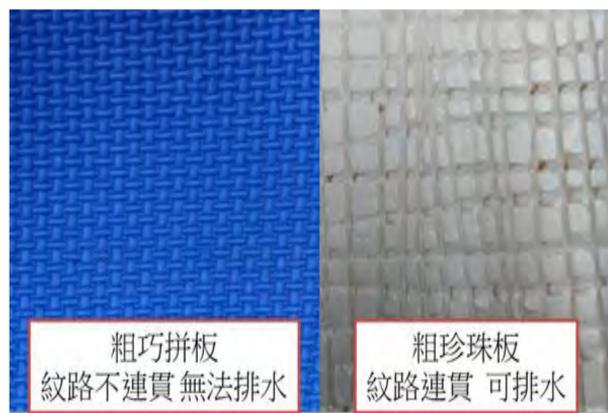
討論五：1. 紋路連貫有排水功能，水分排除後呈現「多水變成少水」現象，增加摩擦力。
2. 紋路不連貫的粗糙面（EX 巧拼板）無法排水，摩擦力較為低。



底介面：粗糙砂紙

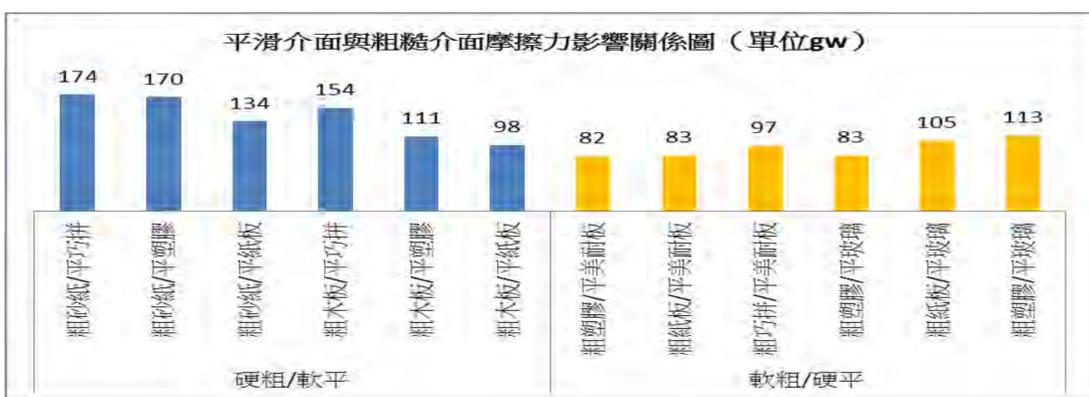


底介面：粗糙塑膠



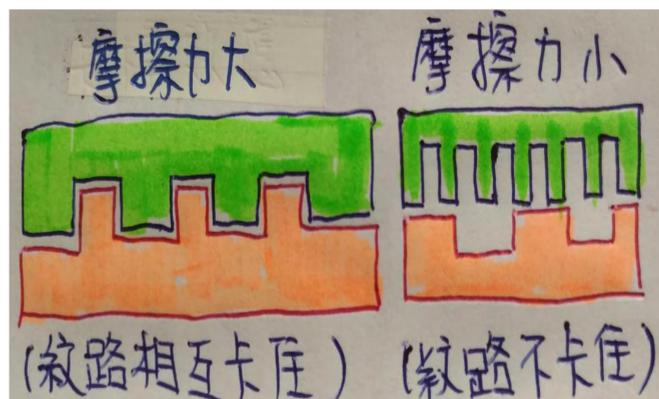
結果六：「硬質粗糙面/軟質平面」摩擦力較大；「硬質平面/軟質粗糙面」摩擦力較小

討論六：「釘子效應」硬質粗糙介面若能像釘子釘進軟質介面，會增加接觸面積與摩擦力。



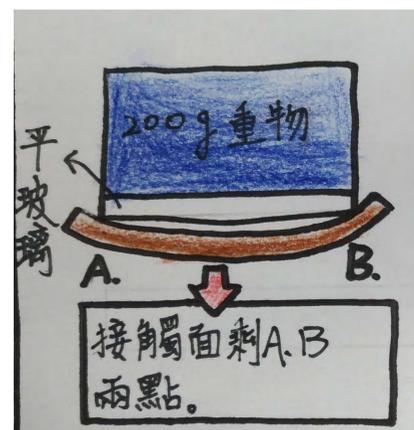
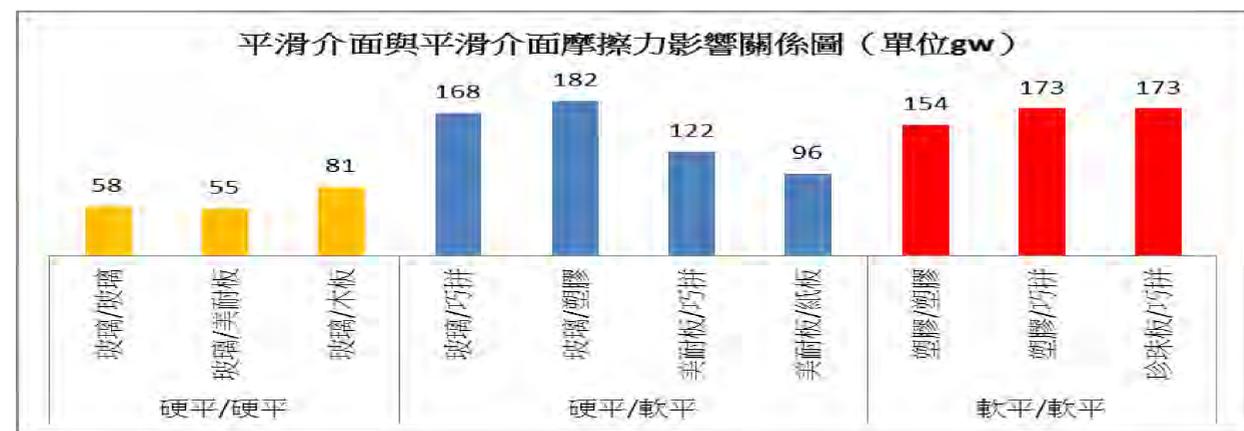
結果七：「硬質粗糙面/硬質粗糙面」紋路若卡住摩擦力較大。紋路無法卡住摩擦力小。

討論七：「卡榫效應」兩粗糙介面若能互相卡住會增加接觸面積，因此摩擦力變大。



結果八：「硬質平面/硬質平面」摩擦力較小。「軟質平面/硬質平面」摩擦力較小。

討論八：硬質平面若有肉眼無法觀測的小幅度彎曲，會使介面無法貼齊，反使接觸面積變小，進而減少摩擦力



六、對教科書的修正建議 (代總結)

1. 微觀的實際接觸面積越大，摩擦力越大！
2. 在無塵無水的情境下，平滑介面的摩擦力比粗糙介面大。
3. 灰塵與大量水分都會降低摩擦力；但是，少量水分反而會增加摩擦力。
4. 粗糙介面在有灰塵與大量水分時，比較能防滑。
5. 粗糙介面的紋路要連貫有排水功能，才能有防滑的效果。

結語：雖然摩擦力與肉眼所見接觸面積無明顯關係，但與微觀接觸面積有關，希望自然課本不要只是簡單以「接觸面積與摩擦力無關」解釋，以免讓同學產生迷思