

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 地球科學科

第三名

030508

紅色警戒

學校名稱：花蓮縣立花崗國民中學

作者： 國二 賴真吾 國二 李博生 國二 陳柔妤	指導老師： 張志堅 林佳鋒
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：土石流、發生區坡度、條件因子

紅色警戒

摘要

土石流依土石組成的粒徑特性可分類為礫石型土石流、一般型土石流及泥流型土石流。研究結果顯示礫石型土石組成吸水性差，激發此類型土石流的主因是瞬間的豪雨快速匯集河道產生強烈推力而非含水量；一般型土石流具相當程度的吸水性，同時因土體間隙較大水分下滲較泥流型為快，當含水量達到飽和時會出現土體下滑現象，此時若有較大雨勢即可能在 30° 坡度引發土石流，含水量愈多發生區坡度愈小；泥流型土石流有最大的吸水性及飽和含水量，因土體間隙較密水分下滲較慢，前期雨量(累積雨量)為激發泥流型土石流的主因。

本次研究五條潛勢溪流除新社東興溪屬泥流型外，其餘四條皆屬偏礫石型。根據第九河川局所提供潛勢溪相關地文資料進行礫石型土石流條件因子分析，結果顯示大興南清水溪再度發生嚴重土石流機會仍為最高，而與花蓮市民生活最親近的七腳川溪河川推力與土石含量皆不小，應是需加強監控與大雨優先撤離的潛勢溪流。

一、研究動機

在台灣，土石流是一個經常可聽到的名詞，每逢颱風或豪大雨，新聞上便常出現哪裏哪裏發生土石流。一直以來對土石流並沒有太深刻的感受，直到 2009 年 8 月 8 日莫拉克造成成全台嚴重水災，特別是小林村 9~18 鄰全被土石流掩埋，幾近滅村死亡人數近 500 人，電視上不斷播放土石流的鏡頭與小林村土石流前後的景像，才第一次感受到土石流的可怕與震撼。2010 年 10 月 21 日梅姬颱風造成蘇花公路土石流，土石流除掩埋在白雲寺躲雨的 9 人，更將行駛在公路上載滿大陸遊客的巴士直接沖下懸崖，搜救結果只找到支離破碎車輛與人體的部分殘骸。嚴重的傷亡一再上演，引發了我們想去瞭解土石流的動機，因此作為這次科展探討的主題。

二、研究目的

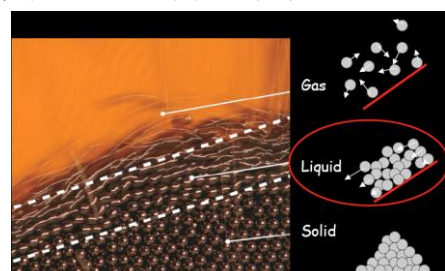
- (一)、透過土石含水量與發生區坡度實驗，認識各類型土石流的發生條件與特徵。
- (二)、配合實地考察與河川相關資料分析，瞭解光復大興南清水溪 DF118、鳳義里鳳林溪 DF127、新社東興溪 DF101 此三條土石流發生頻率最高的主要原因。
- (三)、配合實地考察與河川相關資料分析，瞭解花蓮市近郊銅門野溪 DF010 與七腳川溪 DF153 兩條常在豪雨期間發出紅色警戒的主因。

三、文獻探討

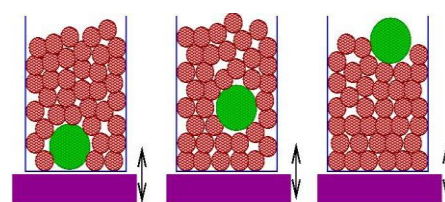
(一)、土石流基本性質：

「土石流」為泥、砂、礫石與水混合而成的高含砂流體，受重力作用而沿自然坡面、溝渠或溪床所形成的流動現象，常突然發生於坡陡的山區，具有土體濃度高、能量大、沖蝕力強、搬運能力強及破壞力大等特性，是一種快速均夷作用的自然現象。

土石流的啟動機制如圖一所示：當重力分量足夠克服傾斜面上的顆粒間的磨擦力後，顆粒在表面開始滑動，形成彈跳性強烈的「氣化區」(如同空氣分子間碰撞的行為)及下方流動較一致的「流體區」。流動後愈底部的地方因承載較高的重量具有較大的磨擦力，故土石流表面流速較快，愈底部流速愈慢。除了阿基米德浮力外，巨石週遭泥石流漿體的剪應力提供了更大的浮力，加上巴西豆效應(如圖二)，當土石流發生時，巨大石頭也因此將



圖一 顆粒流動啟動機制
(France, CNRS, Aix-Marseille University)



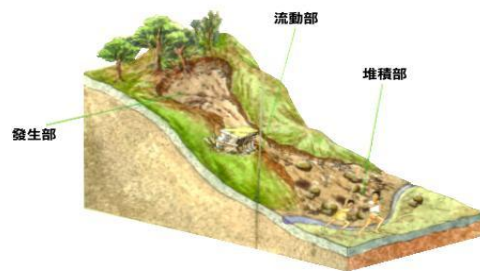
圖二 巴西豆效應
(農委會水土保持局網站擷取)

被抬升至混合體之表面，因此相較於底床的小顆粒擁有更高的重力位能，而填充空隙的小顆粒，提供大顆粒一個比滑動摩擦更省力的滾動接觸。因此土石流發生時常見大至數公尺直徑的巨石順土石流被搬運至下游沖積扇。

(二)、土石流的地形特徵：

一場土石流過程包含有發生區、流動區及堆積區(如圖三)。

- 1、發生區：出現在上游谷壁崩坍的碎屑會大量堆積的地方，受重力作用下切地表，形成橫剖面形狀多為V字形，而四周的植被常顯得相當稀疏。
- 2、流動區：為土塊與水侵蝕坡面後留下，通常位於山溝河谷流域的中下游，剖面較成U字形，河床上會有河谷兩岸崩坍下來的碎屑物。
- 3、堆積區：多發現於溪流下游出口處，常形成沖積扇狀的平坦地形，表面與前緣多巨大的岩塊堆積，下方填充顆粒大小層狀分佈的土砂。



圖三 土石流過程
(農委會水土保持局網站擷取)

(三)、發生土石流的基本條件：

形成土石流之基本要件包括豐富的鬆散土石、充份的水份及足夠大之坡度。豐富的鬆散土石提供形成土石流所需之固態物質；充份的水份潤滑土石流內固態物質並降低固態物質間的摩擦力與凝聚力，促使固態物質液化以助於流動；足夠大之坡度供給土石流流動動力，使土石流克服其內部之摩擦力與凝聚力後繼續向低處流動，在流動過程中促使泥石與水高度混合並增加其流動性。

(四)、土石流的分類：

土石流按其物質的組成可分為：

- 1、泥石流型：土石流中土體物質主要由黏土、粉土和砂所組成，很少礫石及卵石顆粒，其中 0.1mm 以下泥砂佔 50%以上(台灣省水保局,1992)或 2mm 以上粗顆粒小於 2%(熊剛,1996)。
- 2、一般型：土石流中土體物質的顆粒分佈很廣，由黏土、粉土、砂、礫石甚至巨石等各種顆粒所組成，其中粒徑 0.1mm 以下之泥砂含量在 10%~50%之間(台灣省水保局,1992)或 2mm 以上粗顆粒介於 2%~80%(熊剛,1996)。
- 3、礫石型：土石流中土體物質主要由大量的砂、礫石及卵石所組成，很少黏土及粉土顆粒，其中粒徑 0.1mm 以下之泥砂含量佔 10%以下(台灣省水保局,1992)或 2mm 以上粗顆粒大於 80%(熊剛,1996)。

(五)、花蓮土石流的形成背景：

台灣島位於板塊運動的交界，構造運動顯著，形成多山地區，地形陡峻，地震頻繁，岩體破碎，加上地處颱風豪雨地區，具備上述(三)發生土石流所需的所有基本條件，所以每當豪雨發生時，全台各地便紛紛發出紅色警戒，連上土石流防災資訊網，近年來數十筆重大的土石流災害記錄，幾乎土石流每年都會對台灣帶來嚴重的傷亡。特別是我們生活的地方-花蓮，海岸山脈與中央山脈佔了花蓮縣幅域的大部分面積，地形陡峭河道短促落差坡度大，單在花蓮受監控的土石流潛勢溪便高達 163 條。又處於颱風豪雨的迎風面，發生強降水的機會特別高，出現土石流的機會更加為高。數十筆的重大土石流災害記錄中單花蓮縣就佔了十幾筆，民國 79 年 6 月 23 日歐菲莉颱風銅門野溪土石流帶走了 29 條人命、6 人失蹤、多人受傷、68 人無家可歸；民國 83 年 7 月 10 號提姆颱風新社東興部落土石流死亡失蹤者超過 50 餘人；民國 90 年 8 月 1 日光復大興村土石流幾近滅村 150 戶遭土石掩埋，27 人死亡、15 人失蹤、多人受傷...。更有甚者，花蓮十幾筆重大土石流災害幾乎都集中在光復大興、鳳林鳳義里及新社東興部落等處。

四、研究之器材設備

傾斜儀、實驗槽、升高吊架、烘箱、篩網、量筒、塑框、數位相機



五、研究過程與方法

(一) 實地考察採集與河川資料收集：

鎖定花蓮縣內嚴重土石流發生頻率最高的三條溪流（光復大興南清水溪 DF118、鳳義里鳳林溪 DF127、新社東興溪 DF101）及花蓮市近郊銅門野溪 DF010、七腳川溪 DF153 進行實地考察及採集，考察內容為土石流發生地形拍照、岩性、植被狀況及河床礫石分佈特徵，並採集發生區或流動區土石流土石（實驗分析用）；考量安全、工具及能力，有關溪流長度、集水面積、發生區坡度及集水區崩塌規模，行文向第九河川局申請相關資料，依據這些資料，就發生土石流三大條件進行綜合性分析，比對分析結果與實際土石流次數的相關性，以期進一步瞭解豪雨期間花蓮市近郊每每被提及的銅門野溪與七腳川溪發生土石流的可能性。

(二) 實驗設計：

文獻探討中提及形成土石流之基本要件包括豐富的鬆散土石、充份的水份及足夠大之坡度。豐富的鬆散土石為土石流的基本條件，本次研究首先想瞭解不同土石比在發生土石流時其含水量與坡度之間的關係，再以所得關係分析標的河川的特徵。

實驗 1、指標型土石流的含水量與發生區坡度實驗

綜合台灣省水保局(1992)及熊剛(1996)對土石流的分類標準，選定泥流型土石組成為 0.1mm 佔 50%，2mm 以上佔 2%，其餘 48% 為 0.1mm~2mm；一般型土石組成為 0.1mm 佔 30%，2mm 以上佔 40%，其餘 30% 為 0.1mm~2mm；礫石型土石組成為 0.1mm 佔 10%，2mm 以上佔 80%，其餘 10% 為 0.1mm~2mm，依序進行下述實驗。

實驗 1-1：泥流型土石流含水量與發生區坡度實驗

(a)、取 4 公斤泥流型土石與 400cc 的水充分攪拌，置於實驗槽以塑形框沱成厚 5 公分之土石磚由 0° 開始慢拉動吊繩觀察是否有流動現象，直到出現大規模崩塌或流動現象，記錄角度。實驗重複進行 3 次確認結果是否一致。

(b)、逐次增加 100cc 的水重做上述實驗直到角度不再變化為止。

實驗 1-2：一般型土石流含水量與發生區坡度實驗

(a)、取 4 公斤一般型土石與 400cc 的水充分攪拌，置於實驗槽以塑形框沱成厚 5 公分之土石磚由 0° 開始慢拉動吊繩觀察是否有流動現象，直到出現大規模崩塌或流動現象，記錄角度。實驗重複進行 3 次確認結果是否一致。

(b)、逐次增加 100cc 的水重做上述實驗直到角度不再變化為止。

實驗 1-3：礫石型土石流含水量與發生區坡度實驗

(a)、取 4 公斤礫石型土石與 400cc 的水充分攪拌，置於實驗槽以塑形框沱成厚 5 公分之土石磚由 0° 開始慢拉動吊繩觀察是否有流動現象，直到出現大規模崩塌或流動現象，記錄角度。實驗重複進行 3 次確認結果是否一致。

(b)、逐次增加 100cc 的水重做上述實驗直到角度不再變化為止。

實驗 2、花蓮縣高頻率潛勢溪流土石含水量與發生區坡度實驗

分別將光復大興南清水溪 DF118、鳳義里鳳林溪 DF127、新社東興溪 DF101 及花蓮市近郊銅門野溪 DF010、七腳川溪 DF153 的土石採樣烘乾後以篩網過濾分析土石組成顆粒大小。並依序取各溪流 4 公斤採樣土石重複進行上述實驗。

實驗 3、指標型土石流與降雨特性關係實驗


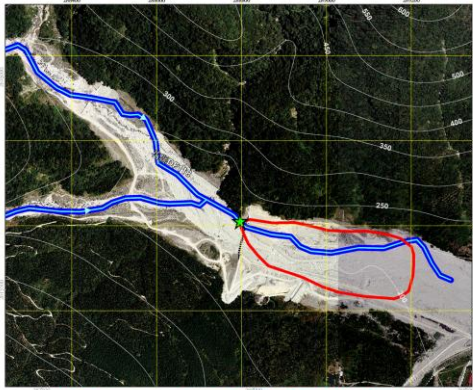



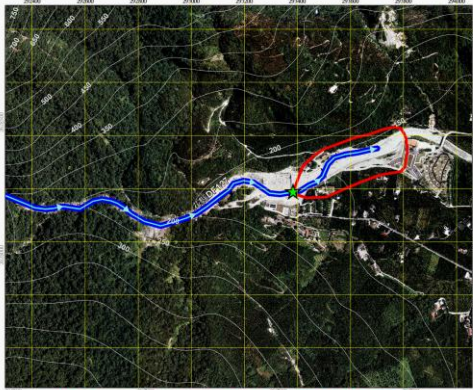
實驗 1 與實驗 2 是將水與土石充分攪拌均勻後進行實驗，然而真實環境並非如此，想瞭解降雨特性對各類型土石的影響因此設計此實驗。

分別取 4 公斤乾燥泥型土石比、一般型土石比、礫石型土石比置於 30° 傾斜的實驗槽，先加 400cc 水後每隔 5 分鐘以橡皮管約在 100 秒左右將 100cc 的水緩慢均勻淋灑在 25cmx15cm 面積土石上，直到發生土石流動現象為止，記錄所澆水量。

六、結果

(一) 實地考察採集與河川資料收集：

本次科展所探討的 5 條溪流皆被評定處理順序「高」，當我們實地考察時皆已完成防治工程，主要的防治工程大多為流動區的防治處理。

<p>南清水溪 DF118</p>		 <p>花縣DF118土石流潛勢溪流位置圖</p>
<p></p>		
<p>概略敘述：設有土石流觀測站，溪流上游處仍有多處崩塌地，移動區河道仍有未下移之大粒徑土石材料，北支與南支皆已施作梳子壩等防治工程</p>		
<p>鳳義里鳳林溪 DF127</p>		 <p>花縣DF127土石流潛勢溪流位置圖</p>

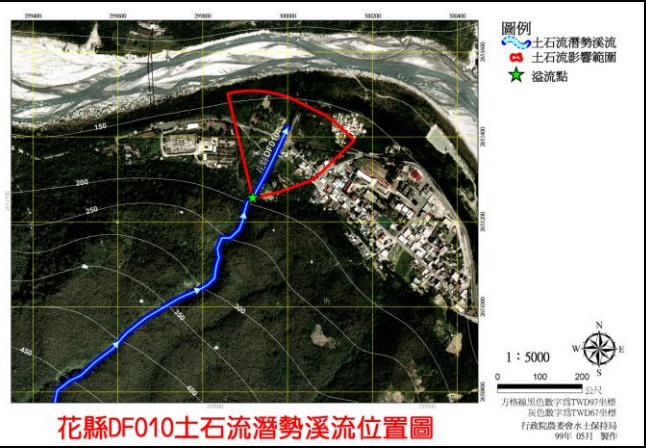


概略敘述：設有土石流觀測站，為間歇河，發生區地型如文獻探討所提橫剖面形狀為V字形，發生區坡度大河道窄小佈滿大粒徑土石材料，河道兩側植物茂密已不復見當年土石流痕跡，由河道較低處攔砂壩上泥砂的堆積情形，土石流的移動路徑呈現直進式而不像水流當遇上阻礙物會沿側向較低處繞流。



概略敘述：河道坡度較緩，上遊集水區有多處嚴重崩塌區，有部分整治復育工程正在進行，由河床堆積材料看不見到較大型的礫石，土石堆積材料明顯與其他標的潛勢溪不同。

銅門野溪 DF010

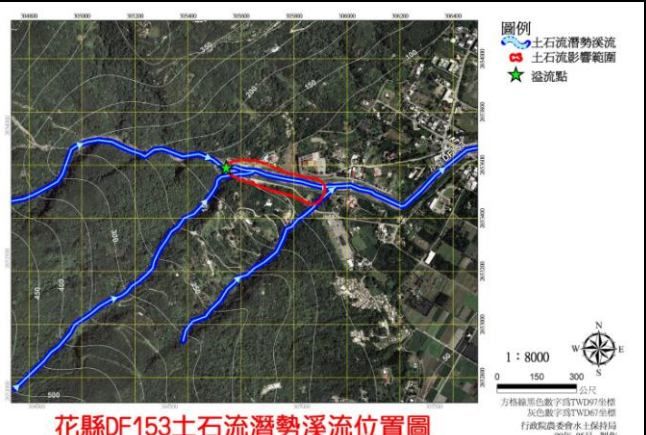


花縣DF010土石流潛勢溪流位置圖



概略敘述：發生區植物茂密，需撥開大量植生才可辨視河道所在，中下游防護工程已建置完畢河道內佈滿植生，無顯堆積材料，集水區植物茂密無明顯崩塌區，當年土石流受災戶皆已遷離

七腳川溪 DF153



花縣DF153土石流潛勢溪流位置圖



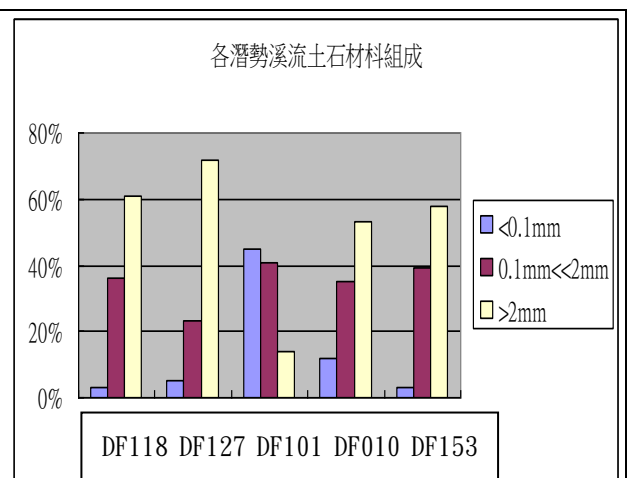
概略敘述：集水區植生茂密，中下游設置防治工程，出谷區河道有部分中小型土石材料堆積，出谷處有數顆巨型土石材料被擋於疏子壩前，階梯式攔砂壩已有相當的堆積量，出谷處左側有三戶人家，建築物所在位置為當年土石流嚴重漫流區，此溪流為五條標的潛勢溪中最靠近人口密集區域的一條。出谷不遠處即為大山社區，河川中下游更流經人口密集的花蓮市

溪流名稱	溪流長度	集水區面積	地質岩性	主流溪床平均坡度(%)	發生區坡度	集水區崩塌率(%)	集水區植被	河道平均寬度
南清水溪 DF118	4273 公尺	1429 公頃	片岩	28.2	50°~30°	6.4	自然林中等稀疏	30m
鳳義里鳳林溪 DF127	1536 公尺	746 公頃	片岩	23.7	>50°	3.7	自然林中等稀疏	30m
新社東興溪 DF101	1666 公尺	83 公頃	頁岩	19.2	>50°	8.3	自然林中等稀疏	4.5m
銅門野溪 DF010	1869 公尺	83 公頃	片岩	33.3	50°~30°	1.0	植被密集	15m
七腳川溪 DF153	3216 公尺	422 公頃	片岩少量石英	22.2	50°~30°	0.7	植被密集	10m

表二、標的土石流潛勢溪相關資料(第九河川局提供)

溪流名稱	粒徑 <0.1mm	0.1mm<粒徑 <2.0mm	粒徑 >2.0mm	類型
南清水溪流動區 DF118	3%	36%	61%	一般型偏礫石
鳳義鳳林溪發生區 DF127	5%	23%	72%	礫石型
新社東興溪流動區 DF101	45%	41%	14%	泥流型
銅門野溪流動區 DF010	12%	35%	53%	一般型偏礫石
七腳川溪出谷流動區 DF153	3%	39%	58%	一般型偏礫石

表一、標的潛勢溪採集土石樣本粒徑特徵



圖四標的潛勢溪土石樣本粒徑組成條狀圖

(二) 實驗結果：

實驗 1、指標型土石流的含水量與發生區坡度實驗：

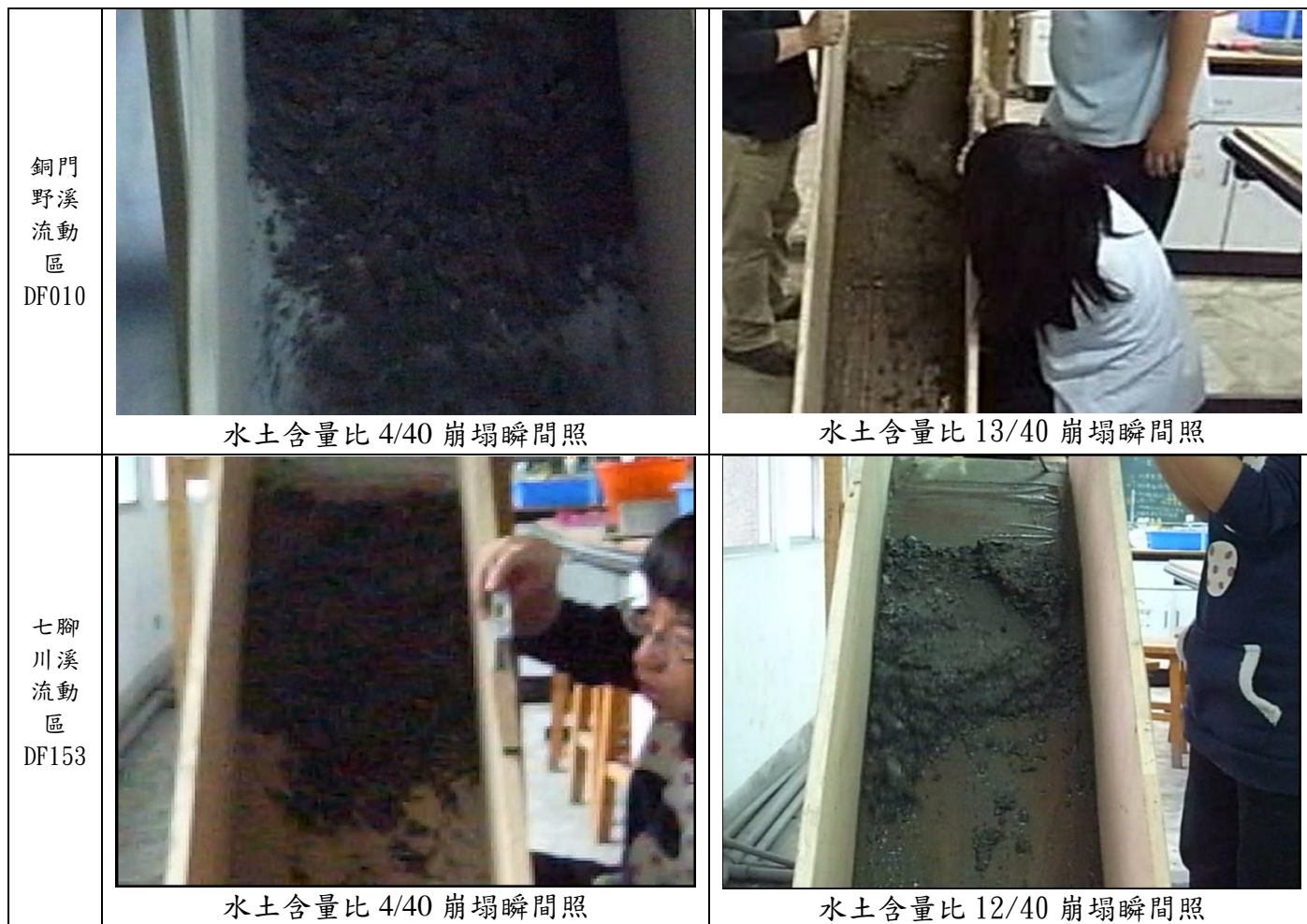


水土比 \ 發生區坡度	4/40	5/40	6/40	7/40	8/40	9/40	10/40	11/40	12/40	13/40
礫石型	38.0	39.0	40.0	40.0	40.0	40.0	※	※	※	※
一般型	42	45	49	62	65	44	39	28	24	16
泥流型	34.0	40.0	44.0	53.0	65.0	85.0	75.0	50.0	26.0	12.0

表三、指標型土石組成崩塌或發生區坡度與混合水量驗關係實驗數據

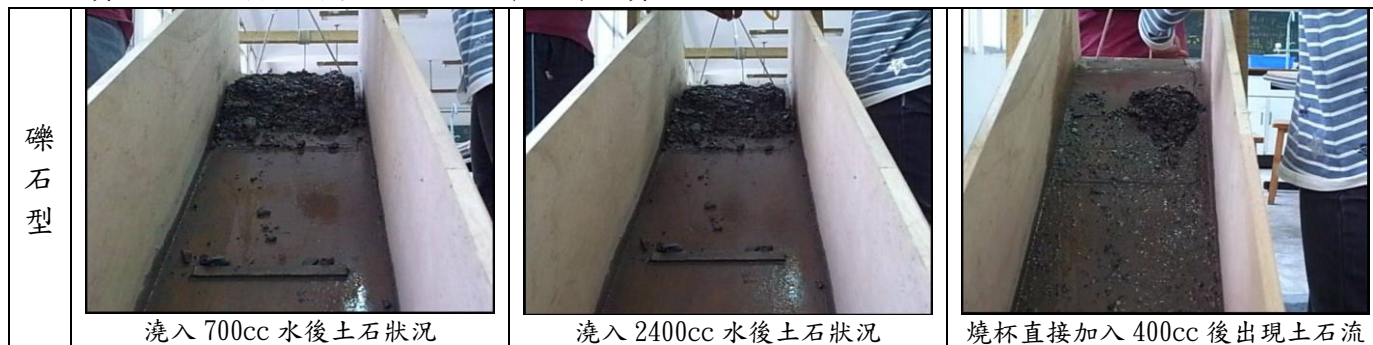
實驗 2、花蓮縣高頻率潛勢溪流土石含水量與發生區坡度實驗：




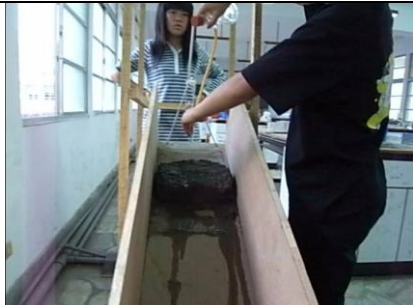


<p>南清 水溪 流動 區 DF118</p>	 <p>水土含量比 4/40 崩塌瞬間照</p>	 <p>水土含量比 12/40 崩塌瞬間照</p>
<p>鳳義 鳳林 溪發 生區 DF127</p>	 <p>水土含量比 4/40 崩塌瞬間照</p>	 <p>水土含量比 10/40 崩塌瞬間照</p>
<p>新社 東興 溪流 動區 DF101</p>	 <p>水土含量比 4/40 崩塌瞬間照</p>	 <p>水土含量比 10/40 具極大的黏滯性(88°)</p>



水土比 發生區坡度	水土比									
	4/40	5/40	6/40	7/40	8/40	9/40	10/40	11/40	12/40	13/40
南清水溪流動區 DF118	39.0	43.0	44.0	45.0	48.0	46.0	45.0	45.0	44.0	44.0
鳳義鳳林溪發生區 DF127	39.0	42.0	45.0	44.0	43.0	43.0	43.0	43.0	42.0	42.0
新社東興溪流動區 DF101	41.0	43.0	48.0	52.0	62.0	86.0	88.0	68.0	28.0	22.0
銅門野溪流動區 DF010	42.0	43.0	49.0	52.0	50.0	48.0	47.0	47.0	46.0	46.0
七腳川溪水流動區 DF153	41.0	42.0	43.0	46.0	51.0	50.0	48	47.0	46.0	46.0

表四、標的溪流土石樣本崩塌或發生區坡度與混合水量關係實驗數據
實驗 3、激發指標型土石流的降雨特性實驗：



一般型	 <p>澆入 700cc 水後土石狀況</p>	 <p>澆入 900cc 水後土石狀況</p>	 <p>澆入 1200cc 水後土石狀況</p>
泥流型	 <p>澆入 700cc 水後土石狀況</p>	 <p>澆入 1100cc 水後土石狀況</p>	 <p>澆入 1500cc 水後出現土石流</p>

七、分析與討論

(一) 實驗結果分析：

1、指標型土石流特徵分析

實驗 1-1 礫石型：

礫石型組成的吸水性差，加入 400cc 水後，置於實驗槽尚未傾斜，土石底部即有水滲出，加入水愈多底部滲水情形愈嚴重，實驗顯示不同水土含量比礫石型組成皆在 40° 左右出現崩落下滑的現象，顯示礫石型的土石吸水性差含水量並不因不同的混合水量大小而有明顯的差異，而崩落過程中皆可先觀察到實驗土體先產生龜裂再發生大規模崩落現象，整個實驗中無法觀察到土石的流動現象。由結果我們推測在發生區激發礫石型土石流動的主因在於流水的推力而非土石間的含水量，可進一步合理推測礫石型土石流的發生當是強降水後大量雨水快速匯集至堆滿土石材料的河床，在強大流水推力下產生，因此短時間內的累積雨量當是決定礫石型溪流是否會發生土石流主要指標。

實驗 1-2 一般型：

一般型土石組成由於黏土、粉土含量較多，吸水性明顯較礫石型土石好很多，實驗結果顯示水土含量比在 $4/40 \sim 5/40$ 之間時，一般型土石如同礫石型土石一樣僅出現崩落下滑現象，此時屬含水量未飽和狀態，泥石間的黏滯性也不高，未能出現土石流。

當水土含量比達到 $6/40$ 時，攪拌過程中初次出現部分黏稠狀泥巴外觀，實驗時土石泥石間的黏滯性進一步增加，直到 49° 才出現崩落下滑現象。含水量比達 $6/40 \sim 7/40$ 時，由崩塌角度可知此時泥石間的黏滯性達到最大值，此後崩塌角度逐漸下滑，顯示吸水性良好的一般型土石當含水量超過飽和值時黏滯性會受水稀釋而減弱。由於重量關係，高位處的泥石在傾斜 40 幾度時上層土石已有前傾跡象，含水量愈多愈顯，因仍具有一定的黏滯性而未下滑，但崩落下滑角度已較飽和時為小。

當水土含量比達到 $11/40$ 時，塑形框一移除上層土石即開始向下移動而無法塑形。傾斜至 28° 時出現土石的流動現象。此後水土含量比愈高，發生區坡度漸減。

從一般型土石流實驗中可歸納出三階特徵：當含水量不足時(水土含量比 $< 5/40$) 主要以崩落型態出現；當含水量趨於飽和時土石間的黏滯性大增，崩塌時仍以滑動崩落為主；當含水量超過飽和時，多出的水分可大幅減低土石間的黏滯性而出現流動現象(產生土石流)，此後水土含量比愈高發生區坡度愈小。

實驗 1-3 泥流型：

泥流型土石組成吸水性遠較礫石型及一般型好很多，在水土含量比為 4/40~6/40 之間時，同樣僅出現崩落下滑現象，由於泥流型的顆粒極細，在鬆散堆積下土體間摩擦力較礫石型及一般為小，在水土含量比為 4/40 時，即使經過充分攪拌下仍可看到部分乾燥的泥粉，故在 34° 時便已出現崩塌下滑現象，顯示含水量不高的泥流型土石比其他兩類型更容易崩落。

當水土含量比達 7/40 時，充分攪拌下整體土石開始出現泥巴狀雛形，此時泥土間黏滯性明顯增大，傾斜至 53° 時才出現崩塌下滑現象。此後隨著含水量增加土石泥巴狀愈加明顯，同時黏滯性隨著泥巴狀的黏稠程度大幅增加，當水土含量比為 9/40 時，泥巴黏稠度達到最大值，傾斜角度直幾近直角的 85° 才出現整塊土體快速崩落現象，此後隨著水量的增加黏稠度稀釋，崩落下滑角度開始遞減。水土含量比為 11/40 時，取下塑形框時泥漿呈現下層較粗的立體梯狀，傾斜到 50° 時，泥漿呈現較快速的層狀下滑，多次檢視錄影檔，確認主要仍為滑動現象，未具土石流的流動特徵，將其歸納為崩塌下滑，從之前的實驗經驗中可知此的含水量已達臨界點。

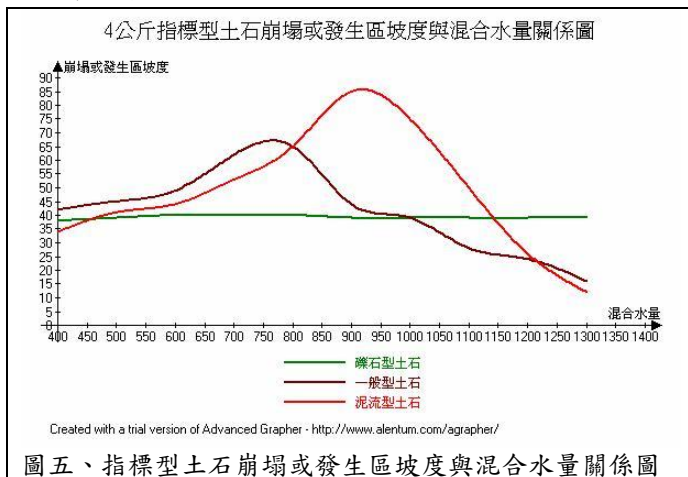
如預期當水土含量比超過 12/40 時泥流型土石在取出塑形框時已無法塑形，實驗時可觀察到土石流現象，與一般型土石組成相較下，泥流型的發生區坡度隨著含水量過飽和而快速下降，顯示泥流型土石流與含水量高度相關。因此前期長時間的降水成了泥流型土石流發生的重要原因。

2、標的土石流潛勢溪土石樣本實驗分析：

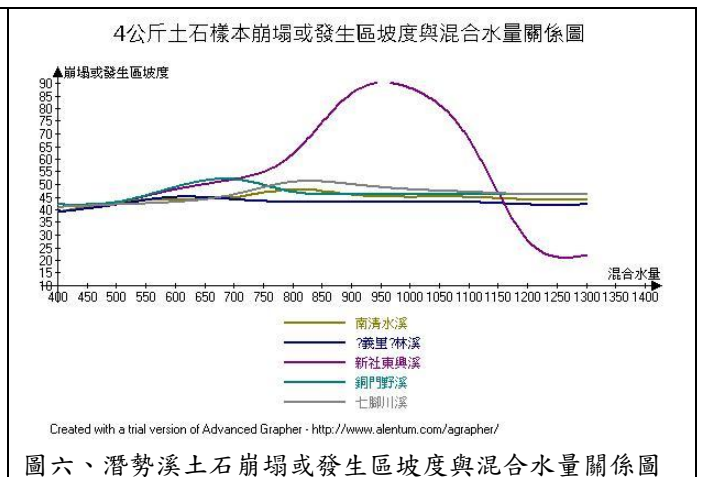
土石流的發生是自上游發生區河床上鬆散土石向下流動開始，因此發生區的土石組成可決定所發生的土石流屬於那一類型，由於實際考察的限制，除鳳義里水源地發生區可繞路到達外，其餘皆無法深入到發生區，考察時儘可能到達發生區與流動區的交界處取樣，所得樣本雖不是發生區的土石組成，應有該溪流發生區的特性，故仍以採樣土石的實驗結果做為潛勢溪流的主要特徵進行分析。

圖四清楚呈現五條標的潛勢溪流的組成特性，從組成粒徑分佈來看，鳳義里鳳林溪為礫石型組成；新社東興溪為泥流型組成，而其他三條潛勢溪屬一般型偏礫石，考量取樣地點這三條偏礫石型溪流皆在發生區與流動區交界附近所採樣，經過發生區摩擦壓碎的流動後，粒徑自然較發生區為小，因此將此三條溪流及鳳林溪歸類於偏礫石型溪流。

為方便比較將標準型土石組成與標的潛勢溪土石採樣的實驗結果分別繪成坡度與混合水量的係圖如下：



圖五、指標型土石崩塌或發生區坡度與混合水量關係圖



圖六、潛勢溪土石崩塌或發生區坡度與混合水量關係圖

如前面的分析，圖五顯示礫石型在不同的混合水量中黏滯性與土石間摩擦力沒有明顯的變化，一般型及泥流型土石組成都出現當含水量達到某一程度後，土石間的黏滯力突然增加許多，隨著含水量增加黏滯性會達到最大值，此後土石間黏滯性與摩擦力會隨著混合水量開始減小，當含水量超過一臨界值後便開始出現土石流動現象，一旦開始發生土石流動現象後，發生區的坡度隨著含水量愈多而快速減小。圖形也顯示小粒徑土石含量愈多其飽和含水量愈大，一旦超過飽和含水量黏滯性稀釋速度也愈快。

圖六顯示潛勢溪土石的實驗結果符合指標型實驗結果的特徵，新社東興溪為典型的泥流型土石組成，故有良好的吸水性，黏土含量高在飽和含水量時出現極大的黏滯性，如照片所示直到接

近垂直角度才出現崩落現象；其他四條偏礫石型溪流土石呈現礫石型組成特性，實驗中無法觀察到土石流的發生，崩塌角度多在四十幾度，圖六中此四條溪流的圖形與圖 2-1 礫石型有相似的特徵，其中銅門野溪因中小型粒徑總合達 47% 因此實驗中出現了部分的黏滯性。在指標型特性分析中，我們認為激發礫石型土石流動的主因在於流水的推力而非土石間的含水量。

3、激發指標型土石流的降雨特性實驗：

將 100cc 水量所澆灑時間及土石面積換算後，相當於約每小時 100 毫米的降雨量，如實驗 3 照片所示從開始淋水到加入 2400cc 的水礫石型土石幾乎沒什麼變化，直到改用燒杯緩慢持續淋入近 400cc 的水時才出現土石流。此結果與前面的分析推論相符，由於吸水性差所以前期降水影響不大，造成此類型土石流的主因在於瞬間的強降水；一般型土石當加水到 1200cc 時已出現表層土石的滑動現象但接下來並無明顯的改變，直到改以連續緩慢加入 200cc 的水時才出現土石流，顯示前期降水對一般型土石有一定程度的影響，但仍需有較大的降雨才能引發土石流；泥石流型土石在淋灑第 700cc 的水時即出現明顯的表面徑流，顯示泥石流型土石吸水性雖佳但因土體間隙較小，水量下滲過程所需時間較長，直到淋下第 1500cc 的水量時開始出現土石流，顯示前期降水對泥石流型土石的發生有著決定性的影響。

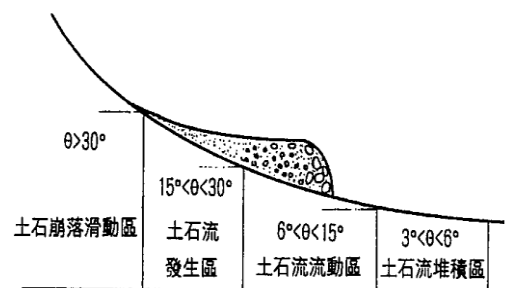
從以上降雨特性的實驗討論可發現與之前實驗 1 的結果分析有著高度的一致性，也使我們更進一步認識各類型土石流的發生機制，特別是礫石型與泥石流型。

(二) 第九河川局土石流潛勢溪資料分析：

右圖(圖七)為一般的土石流過程，發生區坡度主要在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之間，本次探討花蓮縣五條土石流潛勢溪的發生區坡全部大於 30° ，其中鳳義里鳳林溪 DF127 與新社東興溪 DF101 發生區坡度甚至 $>50^{\circ}$ ，顯示全符合發生土石流的坡度條件，過去這些地方發生多次土石流實屬必然。

從前面各項實驗中皆可推知泥石流型土石流的發生決定於土石含水量，因此由累積雨量(包含前期降水)約略可知新社東興橋再度發生土石流的可能性。本次科展所探討的五條土石流潛勢溪中除新社東興溪屬泥石流型外其餘皆屬偏礫石型。礫石型土石組成因含水量不高，激發土石流的發生是流速與流量所形成的推力決定；鬆散土石量可由集水區面積與崩塌率得到合理的量化，因此可結合所收集的潛勢溪資料，就推力與鬆散土石量的綜合分析比較 DF118、DF101、DF010、DF153 四條偏礫石型溪流發生土石流的可能性高低。

流速與河道平均坡度成正比而與河道平均寬度成反比；流量則與集水面積與豪雨機率相關。花蓮地區的豪雨常是颱風所造成，假設每次颱風的豪雨皆達到可能引發土石流的雨量，則可以氣象局的颱風路徑統計(圖八)當做豪雨的發生機率。引發土石流的另一關鍵因素鬆散土石量可由集水面積與崩塌率的乘積可得到大致特徵，依據第九河川局所提供資料可將四條偏礫石潛勢溪有關上述可能引發土石流的條件整理如下：



圖七、一般土石流過程(詹，1998)

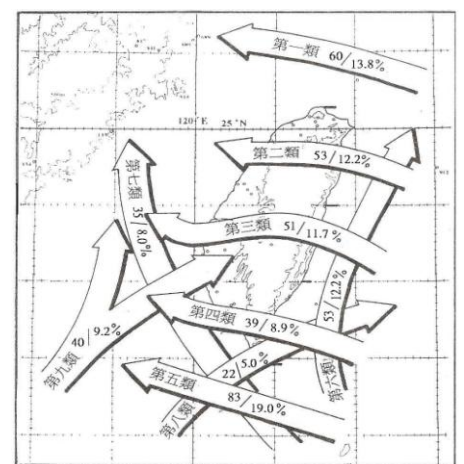


圖 3 1897-2007 年間侵台颱風分類及發生次數統計

圖八、近百年侵台颱風路徑分佈圖
(摘自氣象局網站)

土石流條件	潛勢溪代號	DF118	DF101	DF010	DF153
流速與流量	流速參數 (坡度/寬度)	28.2/30	23.7/30	33.3/15	22.2/10
	流速參數值	0.94	0.79	2.22	2.22
	流量參數 (有效集水面積×豪雨機 率)	1249×23.9%	746×23.9%	83×12.2%	422×12.2%
	流量參數值	298.51	178.29	10.12	51.48
	綜合推力參數值 (流速×流量)	280.60	140.85	22.47	114.29
	綜合推力比	12.49	6.27	1.00	5.09
鬆散土石量	土石量參數 (有效集水面積×崩塌率)	1249×0.064	746×0.037	83×0.01	422×0.007
	土石量參數值	79.94	27.6	0.83	2.95
	土石堆積量比	96.31	33.26	1.00	3.56

表三、偏礫石型溪流土石流條件因子分析表

由上表土石流條件因子分析中可得知南清水溪不管是推力或是土石量皆遠高於其他三條潛勢溪，1989~2008 統計資料顯示，因颱風而發生的土石流事件高達 7 次之多；崩塌比例達 3.7% 的鳳義里野溪有 4 次；常在紅色警戒中出現的七腳川溪與銅門野溪由於河道相對較窄，流速在四條溪流中屬於較快的溪流，在統計資料中各只出現一次嚴重的土石流災害，且都是在 1980 年的歐菲莉颱風時發生。

若去掉防治工程單純就自然潛勢因子而言，這四條溪流再發生嚴重土石流機會仍以南清水溪為最高，其不僅綜合推力遠比其他三條溪流大上二倍以上，廣大的集水面積加上嚴重的崩塌率將持續快速累積足夠多的鬆散土石而在豪大雨發生下再爆發嚴重的土石流，防治工程僅能暫時治標而無法治本，推力因子不管如何在可預見的未來仍將是依舊很大，主要的防治工作應鎖定在崩塌率的改善，即加強復林與降低土利用以延緩鬆散土石的堆積週期；鳳義里野溪在土石流發生條件的推力上與七腳川溪相當類似，就發生次數來看，爆發嚴重土石流的次數與土石堆積量有著明顯的正相關，顯示即使是由流水推力做為激發土石流發生主因的偏礫石型土石流，在豪雨時發生土石流與否主要仍決定在鬆散土石的堆積量，實地考察此兩溪流如照片所示鳳義里水源地發生區河道佈滿大粒徑土石材料，七腳川溪河道上大粒徑土石材料不多見，現場考察與第九河川局相關資料分析結果相符。

從上表的土石流條件來看，銅門野溪自上次土石流災變後推力與土石堆積量都是四條溪流中相對穩定的一條，雖然河道較短、集水面積較小，但降雨量卻能較其他溪流更快地匯集在河道上，加上高流速特徵，相信瞬間豪雨下的水流推力應比資料分析結果要大上許多，推測應是茂密的植生大幅降低土石堆積，故 1990 年後未再傳出災變。與花蓮市民生活最相關的七腳川溪，土石流條件分析中推力與土石堆積量皆比銅門野溪高上許多，雖說防治工程早已完工且自 1990 年後未再發生土石流災變，但如考察時所見，階梯式攔砂壩已有相當的堆積量，攔砂壩功能已相對減弱，在颱風豪雨下發生土石漫流的機會相對增加，同時出谷處有住戶，移動區鄰近大山社區，七腳川溪應受到進一步的土石流監控。同時也應是當達到紅色警戒時優先撤離的地區。

八、結論

綜合以上各項土石流實驗的結果分析及對光復大興南清水溪、鳳義里鳳林溪、新社東興溪、銅門野溪與七腳川溪等五條潛勢溪土石流條件因子的分析比對，所得的結果可歸納如下：

- (一) 礫石型組成的吸水性差，在 40° 左右出現崩落下滑的現象，激發礫石型土石流主因在於流水推力，而非土石含水量，短時間內的累積雨量當是決定礫石型溪流是否會發生土石流主要指標。例如：鳳義里鳳林溪 (DF127) 為典型。
- (二) 一般型土石呈現三階段特徵：當含水量不足時主要以崩落型態出現；當含水量趨於飽和時土石間的黏滯性大增，崩塌時仍以滑動崩落為主；當含水量超過飽和時，多出的水分可大幅減低土石間的黏滯性而出現流動現象(產生土石流)，此後水土含量比愈高發生區坡度愈小。
- (三) 泥流型顆粒縫隙小，滲水慢，含水量高，但一超過飽和含水量，黏滯性因稀釋快速減小，發生區坡度快速下降。長時間累積水量為造成土石流關鍵。
- (四) 標的潛勢溪中南清水溪 (DF118)、鳳義里鳳林溪 (DF127)、銅門野溪 (DF010)、七腳川溪 (DF153) 皆屬偏礫石型溪流。激發土石流的主因應是瞬間嚴重降水。
- (五) 標的潛勢溪中新社東興溪(DF101)為屬泥流型，前期降水為其土石流的發生的重要原因。
- (六) 條件因子分析顯示，南清水溪 (DF118) 在水的推力及土石堆積量皆屬條潛勢溪中最大的一條，若不考慮已完成的防治工程，此條溪流再發生嚴重土石流機會最大。
- (七) 條件因子分析顯示，銅門野溪 (DF010) 目前溪流狀況相對穩定。
- (八) 條件因子分析顯示，鳳義里鳳林溪 (DF127) 與七腳川溪 (DF153) 推力相似，土石流發生次數與土石堆積量密切相關。
- (九) 條件因子分析顯示，七腳川溪 (DF153) 推力及土石堆積量皆較銅門野溪 (DF010) 大上許多，除了階梯式攔砂壩因泥砂堆積功能減弱，加上之前土石漫流區有建築物，豪雨期間應加強監控並優先撤離。

九、參考資料

- (一) 翰林書局，國中自然與生活科技，三下第四章，P. 108~P111，4-1(天然災害), 100 年 2 月修訂版。
- (二) 詹錢登(2004)。土石流發生與降雨特性之關係，科學發展月刊，第374 期。
- (三) 詹錢登(2000)。土石流概論，科技圖書股份有限公司出版。
- (四) 詹錢登(1998)。土石流的發生與運動，土木技術，第 1 卷，第 1 期。
- (五). 林廣平，(2007)， “ 土石流潛勢溪流特性分類” ，國立中央大學碩士論文。

十、謝誌

科展研究過程蒙多方人士與單位協助才得以順利進行，特別感謝第九河川局提供標的潛勢溪流重要資料；感謝農發處水保課吳明遠先生熱心提供潛勢溪流位置圖；還有那位熱心帶我們繞路找到鳳林溪發生區又獨自步行下山的老先生，在這裏一併致謝。

【評語】 030508

優點：主題與教材相關性高，能聚焦在問題之解決。

缺點：作品說明之內容過於艱深，明顯超過國中生的程度。

建議：野外實察過程之記錄，宜更詳盡。