111技研小組seminar專題討論分享

坡面崩塌量體引致坡面型土石流事件之量化評估方法-以高屏溪為例

陳天健

國立屏東科技大學

Dec. 10. 2021

內容大綱

一、研究目標

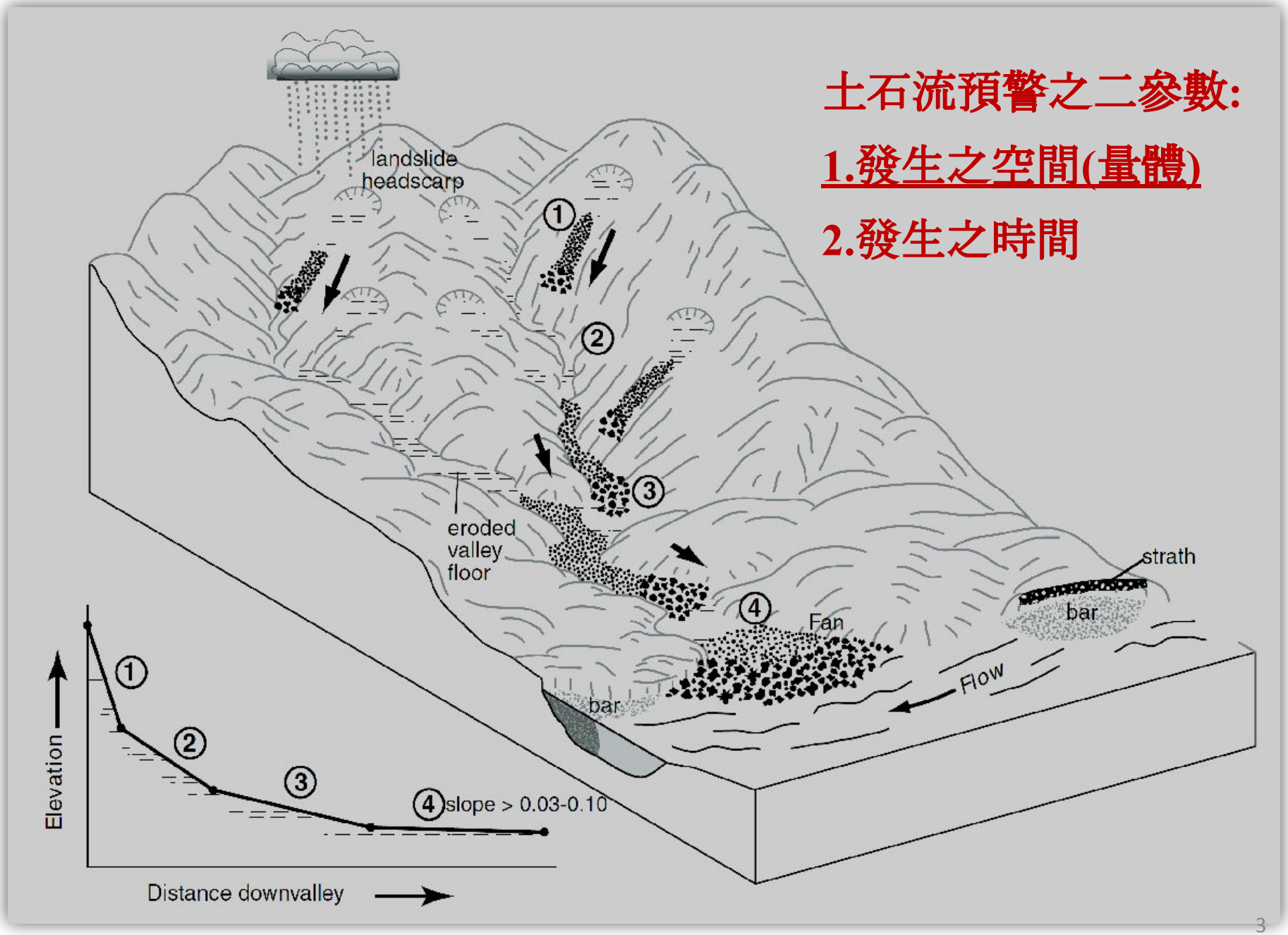
二、認識淺崩、坡面型土石流、土壤厚度

三、分析資料庫

四、表土及崩積層厚度研究

五、坡面型土石流啟動之崩塌地形及量體門檻模式

六、結論



土石流預警之二參數:

1.發生之空間(量體)

2.發生之時間

一、研究目標

1. 近年全球氣候變遷，強降雨長延時之降雨事件逐漸增加，此種降雨型態造成更易於致生淺層崩塌及坡面型土石流災害。

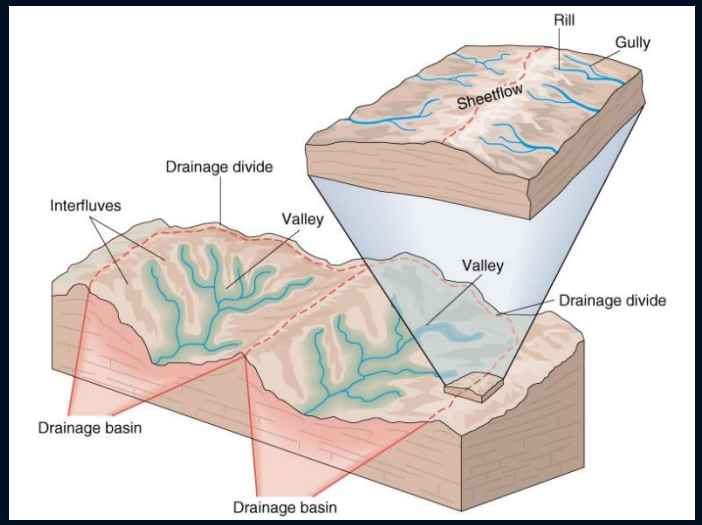
2. 本研究建立高屏溪流域坡面型土石流啟動之崩塌地形(空間位置)及量體評估模式，提供提升土石流預測能力，逐步作為災害預警之參酌，提高災害管理效能，以因應極端氣候之防災預警。

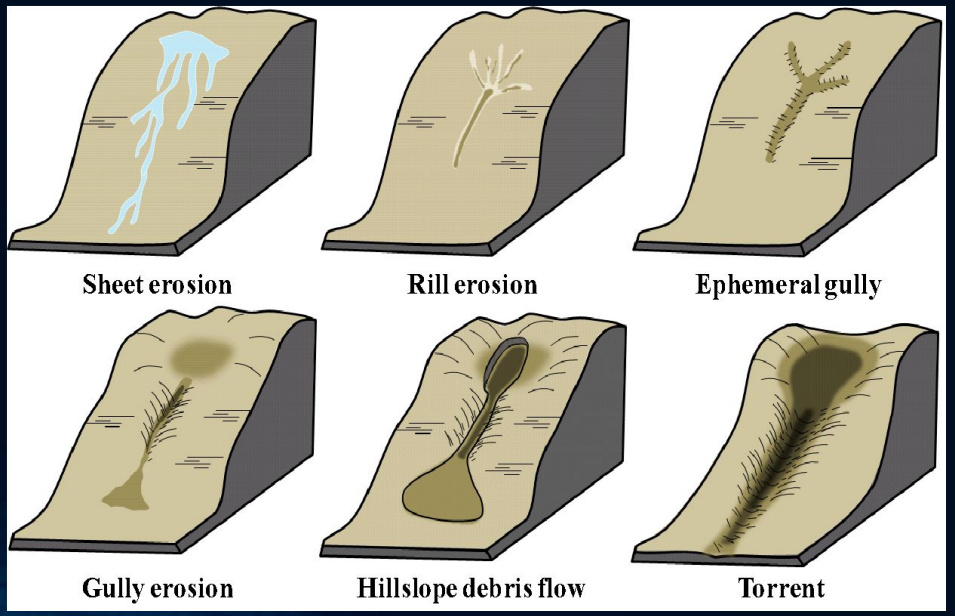
3. 研究團隊收集高屏溪200處之坡面型土石流案例及崩塌案例，配合微地型、及地文及侵蝕特性等分析工作，進一步研訂坡面型土石流啟動之崩塌面積及崩塌量體門檻(threshold)。

二、淺層崩塌、坡面型土石流之型態與土壤厚度基本認識

土砂生產及運移定義及類型

- 野溪集水區土砂之生產，主要來是邊坡破壞及坡面沖蝕等二種地質侵蝕作用。
- 依水土保持手冊(水土保持局，1992)分類，台灣常見之崩塌類型可分為山崩、地滑、潛移、土石流與沖蝕等五類型。。







- **未飽和—**
  岩屑及風化岩-岩屑崩滑

淺層崩塌相關研究

- Dietrich et al.(2008)淺層崩塌之破壞位置和大小與土壤厚度、地形、植生、地下水等因素有很大關係，**大多位於土壤與岩盤交接處。**
- Casadei et al. (2003)發表淺層崩塌預測模式，此模式預測**崩塌寬度會隨著植物根系強度及坡度的降低而增加**，而當土壤越乾燥時，崩塌寬度越高。且模式結果與野外資料指出崩塌規模被土壤厚度、植物根系及地形區位之土壤飽和度所控制。
- Renwick et al. (1982)指出當滑動面出現於風化岩盤或土壤覆蓋之地區，深度較小，通常伴隨土石流、岩屑崩滑等災害。主要影響因子為土壤內之**孔隙水壓，當高強度降雨在短時間入滲至土層內，飽和土壤因抗剪力降低，沿著岩盤產生滑動稱為淺層崩塌。(?)**

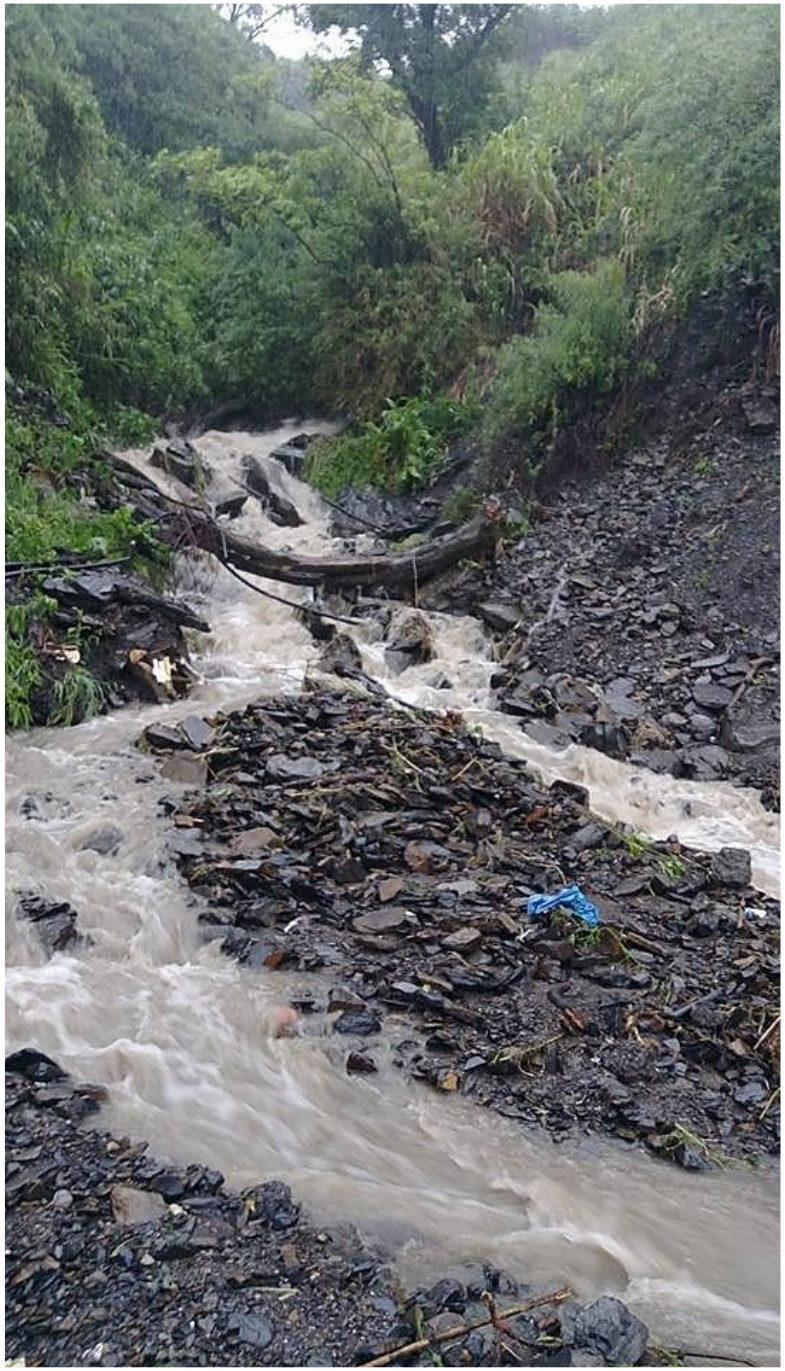
淺層崩塌深度

- 崩塌依其規模、面積可粗略分為深層崩塌與淺層崩塌。**本研究著重於淺層崩塌。**
- 淺層崩塌主要界定為發生於岩盤上部風化層及表層崩積層的土壤，因此定義上，**在深度在5公尺以下及岩盤上之土壤擾動則被劃定為淺層崩塌**(黃宏斌，2010；Jonathan Peter McKenna，2011；Dietrich，2008)
- **崩塌地深度估算模式**方面，詹勳全等(2015)整理 Khazai and Sitar，(2000)、歐陽元淳(2003)、國家災害科技研究中心(2004)成果如表所示。

坡面坡度 (度)	Khazai and Sitar (2000)	歐陽元淳 (2003)	國家災害科技研究中心 (2004)
<30	2.0	0.9	5.0
30~40	1.5	0.9	4.0
40~60	1.0	0.9	3.0
>60	0.5	0.9	2.0

飽和—小量土砂
土壤沖蝕





飽和—大量岩屑匯集>1.5公頃+逕流

坡面型土石流



多起大規模—

- 高含沙水流
- 溪流型土石流



坡面型土石流->溪流型土石流

土石流之類型

- 溪流型、坡面型?!

Table 2.1. Key terms for mass movement in the "flows" category according to Varnes (1978).

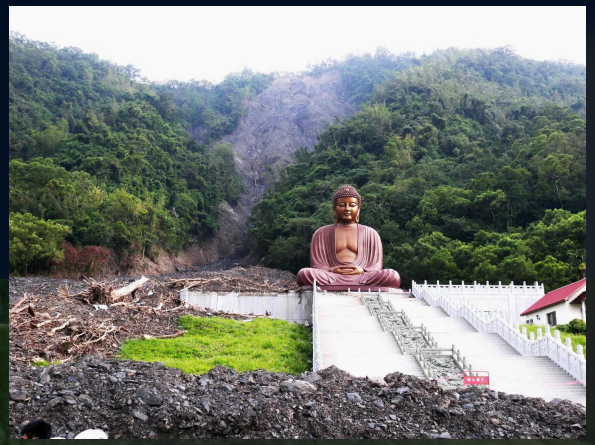
Rate of movement	Bedrock	Debris (<80% sand and finer)	Earth (>80% sand and finer)
Rapid and higher (>1.5 m/day)	Rock flow (creep, slope sagging)	Debris flow Debris avalanche	Wet sand and silt flow Rapid earth flow Loess flow Dry sand flow
Less than rapid (<1.5 m/day)		Solifluction Soil creep Block stream	Earth flow

1	Takahashi	1981	Slope type debris flow
2	VanDine	1985	(Open) (planar unconfined hillslope) Channelized / unchannelized debris flo


Debris flow

Hillslope type debris flow





Debris flow

Hillslope
Debris flow

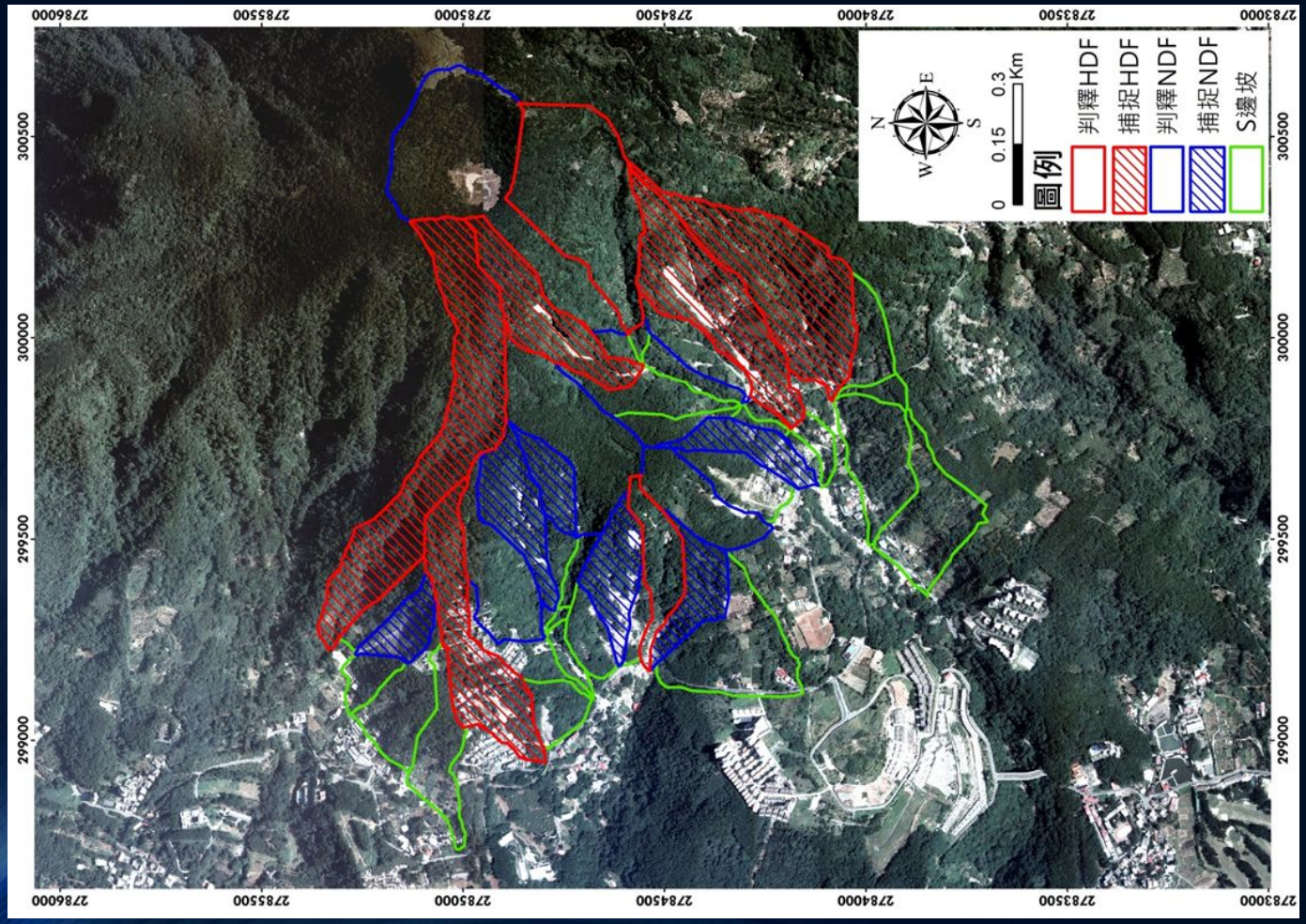
坡面型土石流

1. 坡面型土石流**發生於主要谷地兩側邊坡上(河岸)**，規模較小，站在主要谷地中可以一覽全貌，其流動的土石在主河谷邊緣堆積成土石堆積扇，堆積體坡度較其他崩塌形態的堆體平緩，且主軸較長(呂岡侃與徐美玲，2004)；

2. 坡面型土石流主要發生於暴雨時或過後，**斜坡上的鬆散物質與逕流因重力作用混和**，而迅速下坡運動之現象。

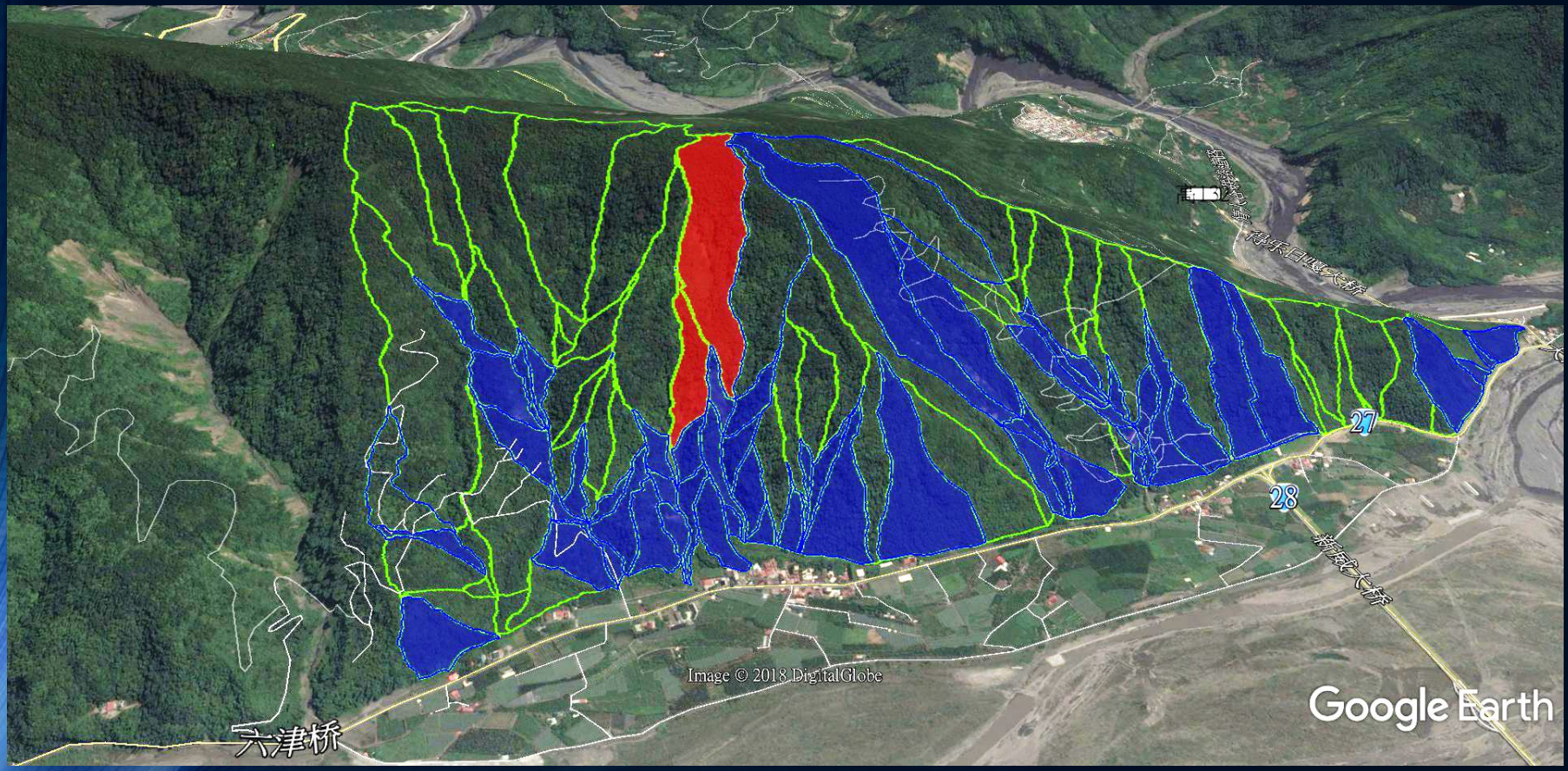


- 陳天健等人(2016)提出**坡面型土石流地形判釋方法**，其採以次集水區觀念劃分坡面型土石流分析單元如圖所示，結果可提供山坡地區域進行潛勢評估，標定高風險集水區。

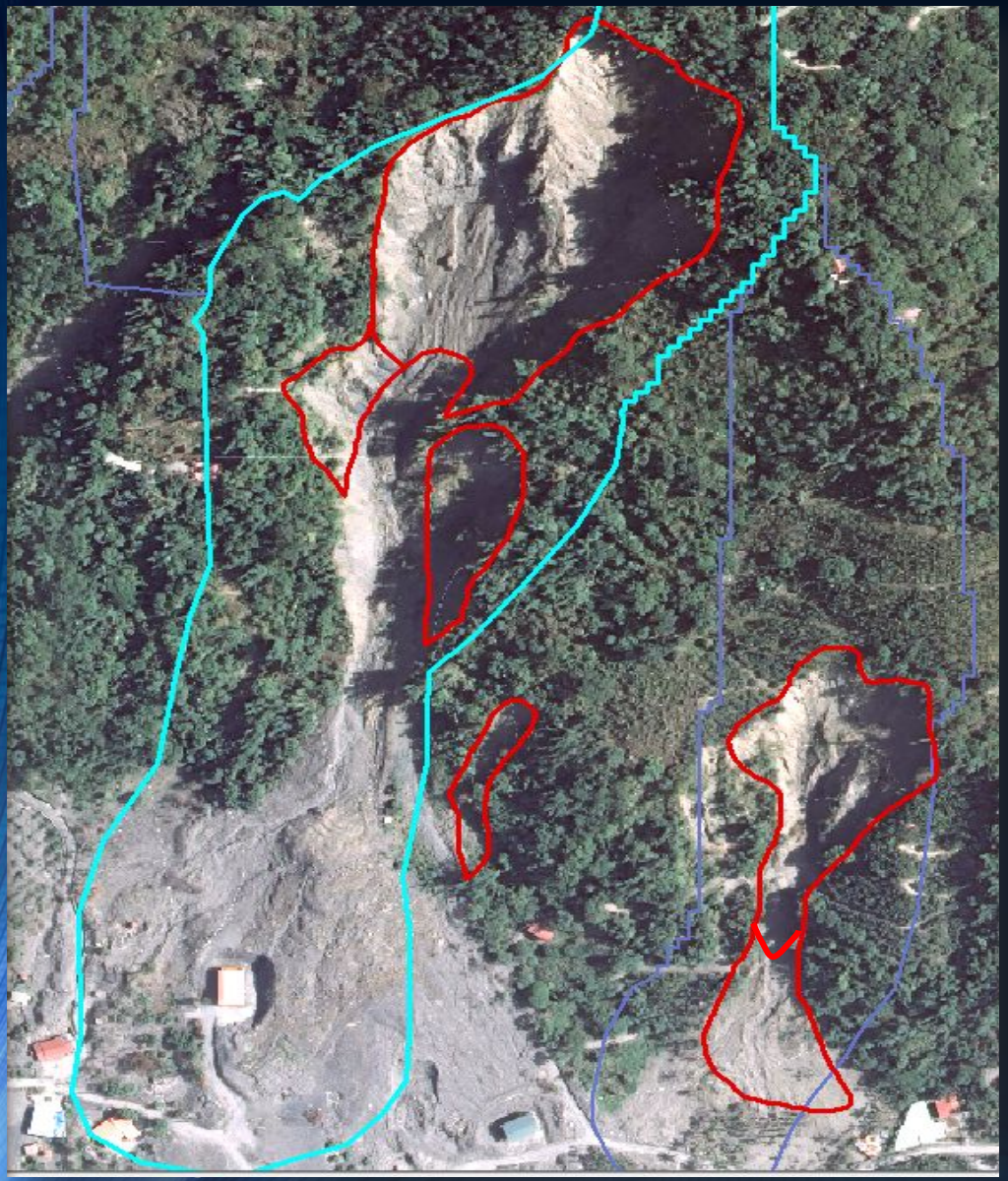


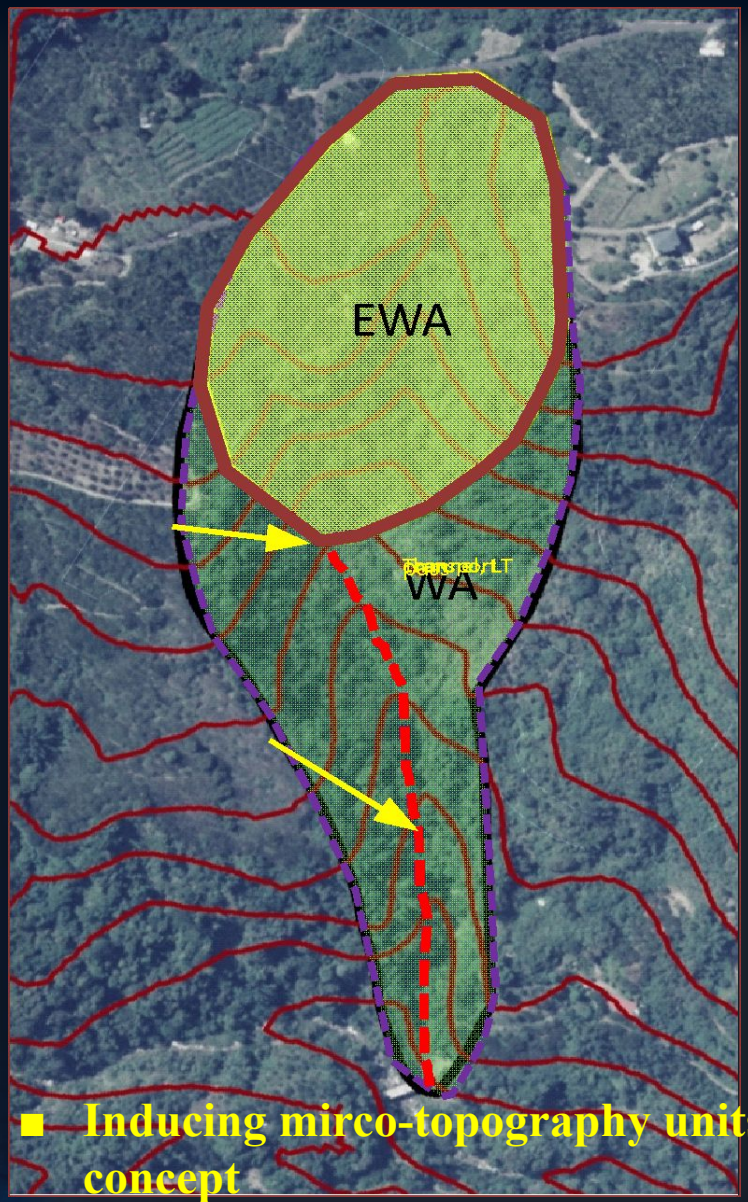
● 坡面型土石流發生位置判釋方法

- 如何從一坡面 判釋坡面型土石流?



□ HDF/淺層崩塌之微地形分析方法





- Inducing mirco-topography units concept

HDF判釋模式建立方法

- 共收集52處坡面型土石流事件。採隨機選出31筆之坡面型土石流事件作為分析及驗證樣本。
- 土石流樣本數21(模式)+10(驗證)=31
- 隨機選取坡面型土石流+崩塌各21筆(共42案例)。
- 隨機選各10筆(共20筆)作為驗證。

特性因子	使用代號
集水區面積*	WA
有效集水指標*	EWAI
形狀係數比*	FR
集水區平均寬度*	W
隘口高程比*	DHPR
崩塌潛感面積*	LSA
崩塌潛感面積比	RLSA
集水區坡面平均坡度*	HASW
發生區坡面平均坡度比*	HASR
發生區形狀係數*	FI
發生區平均寬度*	WI
發生段深寬比*	HARI
發生區坡面平均坡度*	HASI
發生區起伏比*	TRI
流動段長度*	LT
流動段高程差*	DHT
流動段平均坡度*	AST
流動段起伏比*	TRT

HDF判釋模式

板岩區判別模式標準化區別函數如下:

- **y=0.4197*X*1-0.5192*X*2+0.637*X*3-0.807*X*4+0.842*X*5-0.228*X*6**
- y: 區別函數，X1崩塌潛感面積比(RLSA)，X2為形狀係數比(FFR)，X3發生區形狀係數(FFI)，X4流動段深寬比(DRT)，X5流動段長度(LT)，X6集水區坡面平均坡度(AGW)。

沉積區判別模式標準化區別函數如下:

- **$y=0.12X_1+0.581X_2+0.011X_3+0.509X_4+0.501X_5-0.461X_6+0.186X_7$**
- y: 區別函數，X1集水區坡面平均坡度(AGW)、X2集水區平均寬度(AW)、X3發生區深寬比(DRI)、X4流動段長度(LT)、X5流動段深寬比(DRT)、X6崩塌潛感面積比(RLSA)、X7形狀係數比(FFR)。

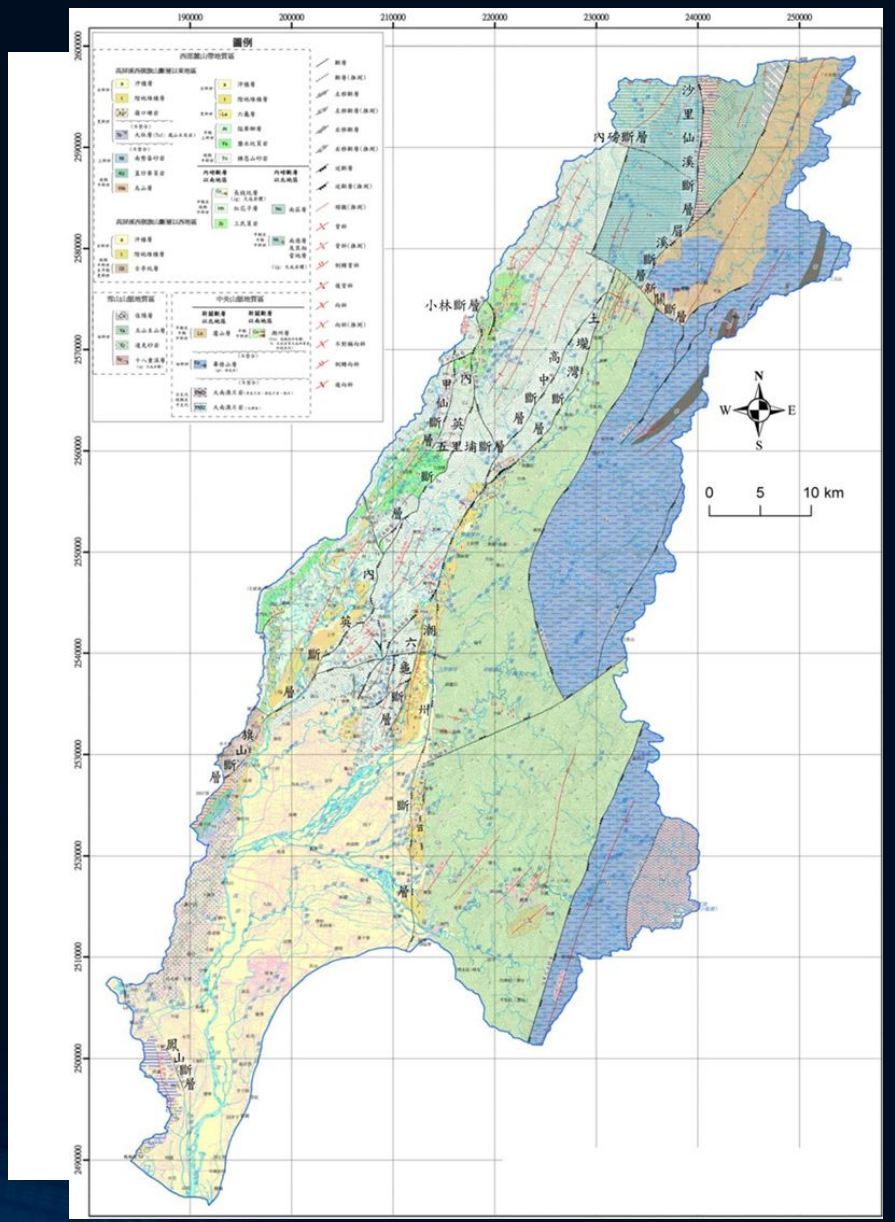
正判率為83.3%，驗證區正判率為80%。

三、分析資料庫

─研究區─

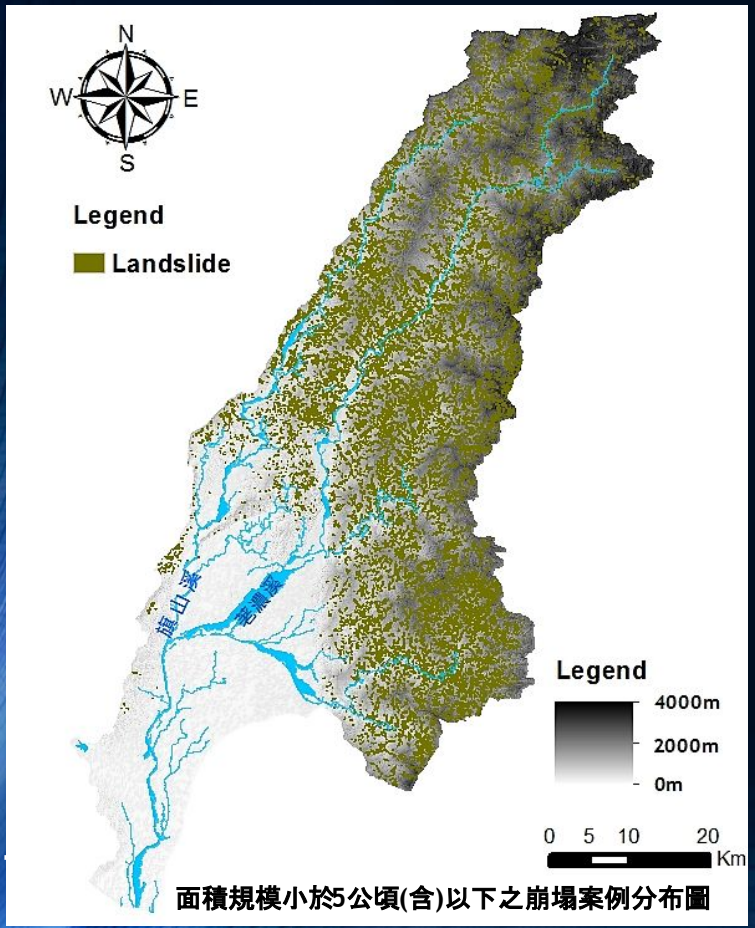
本年度研究區域主要針對高屏溪流域，高屏溪流域位於臺灣南部，主流全長約171公里，流域總面積約3,305 平方公里，為全臺第二長之河川。

高屏溪流域跨越高雄市及屏東縣，包含旗山溪、荖濃溪、濁口溪及隘寮溪四條支流，其中荖濃溪與旗山溪為兩大主要支流。

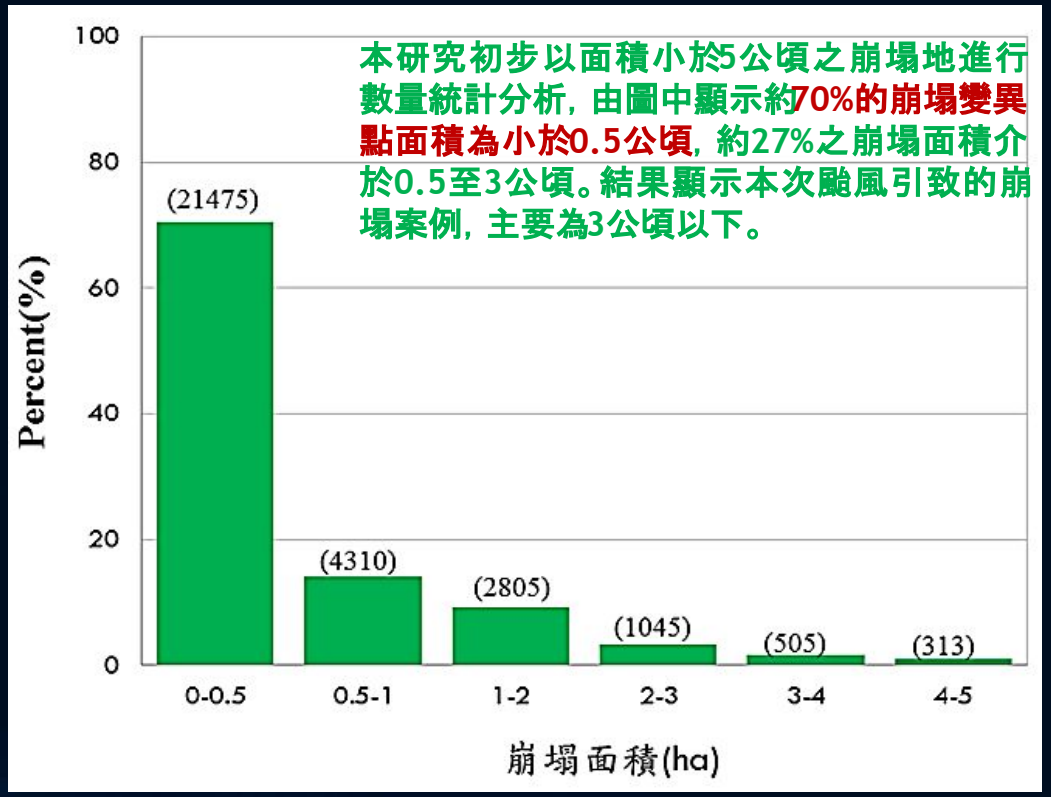


小規模崩塌之地形特性分析

- 2009颱風崩塌圖資，研究小規模崩塌與地形之關係。篩選面積規模小於5公頃(含)以下之崩塌案例，總數超過3萬多筆。**約70%的崩塌變異點面積為小於0.5公頃**，約27%之崩塌面積介於0.5至3公頃。崩塌變異點主要分布於河岸及東側山區陡峭邊坡。



面積規模小於5公頃(含)以下之崩塌案例分布圖

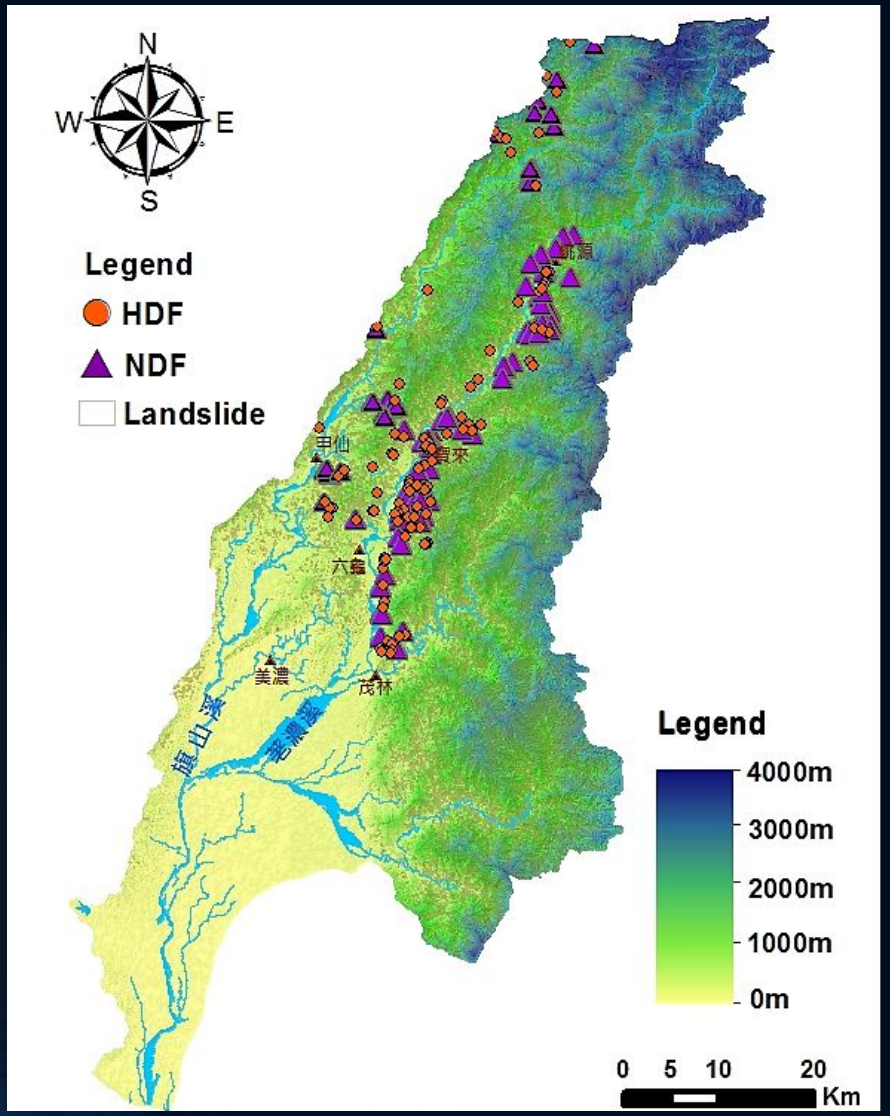


坡面型土石流及崩塌案例

1. 收集97處坡面型土石流案例
2. 103處崩塌案例







HDF Events

(HDF inventories induced by typhoon events.)





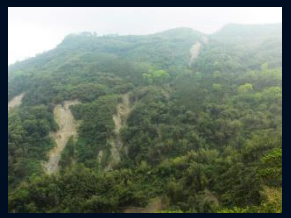
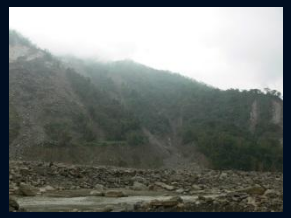






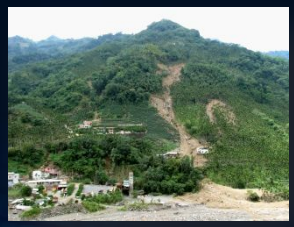










- 國內坡面型土石流災害
六龜區新發里(2009-2021)



四、表土及崩積層厚度研究



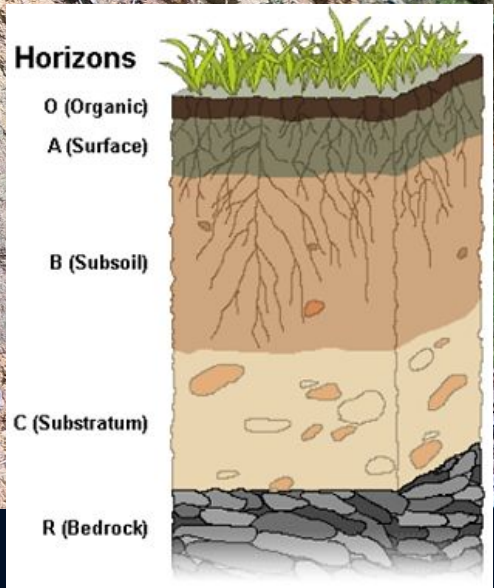
TC.Chen

崩積層




崩積層

土壤化育層

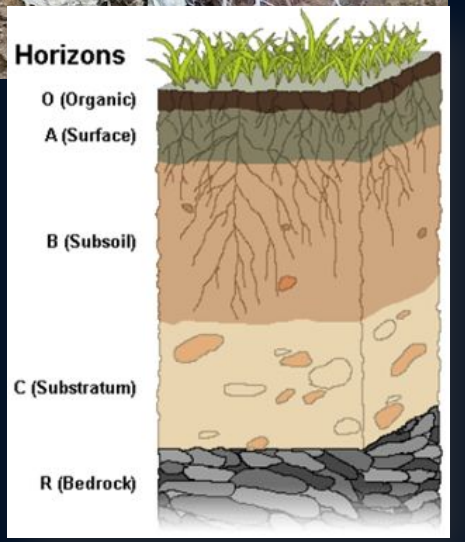


TC.Chen

土壤層



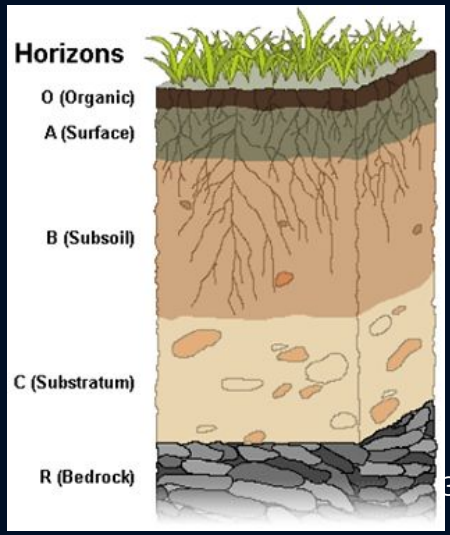



Horizons
O (Organic)
A (Surface)
B (Subsoil)
C (Substratum)
R (Bedrock)

TC.Chen

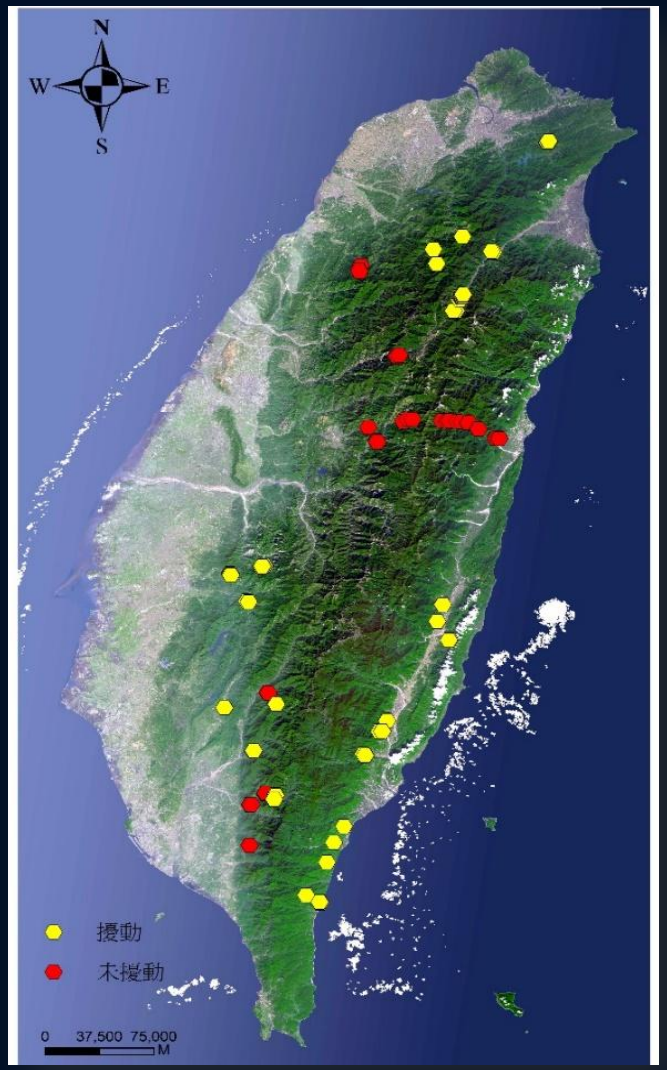
土壤層




Horizons
O (Organic)
A (Surface)
B (Subsoil)
C (Substratum)
R (Bedrock)

鑽探資料庫

1. 本研究收集水保局34處大規模崩塌地監測計畫、
2. 地調所工程地質探勘資料庫、及其他單位之崩塌地鑽探資料。
3. 總計全台地區177處鑽孔,

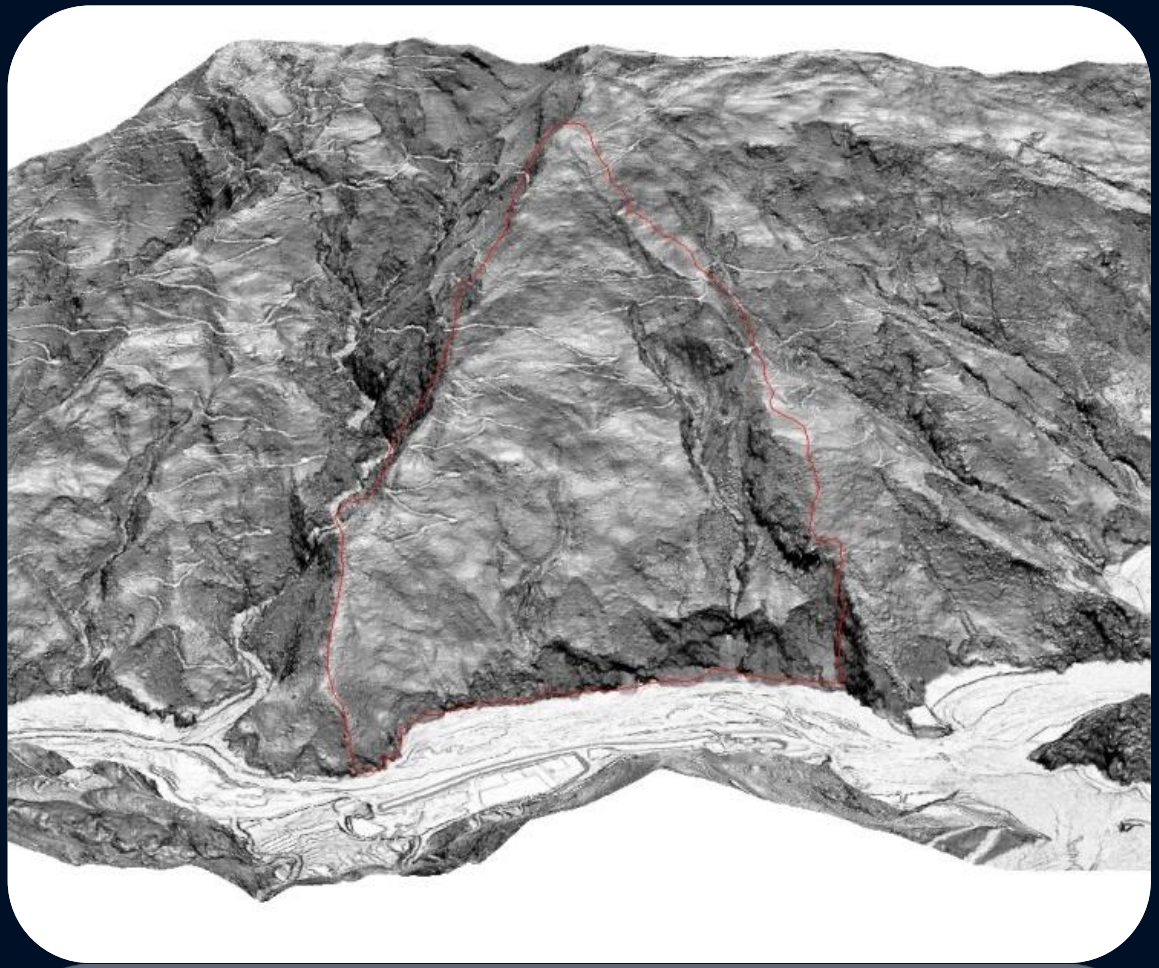




177孔鑽探分布圖(每一點代表一專案工程)

TC.Chen

■ 34處大規模崩塌鑽探成果加值



屏東縣來義鄉T001(來義)立體航照及坡度圖

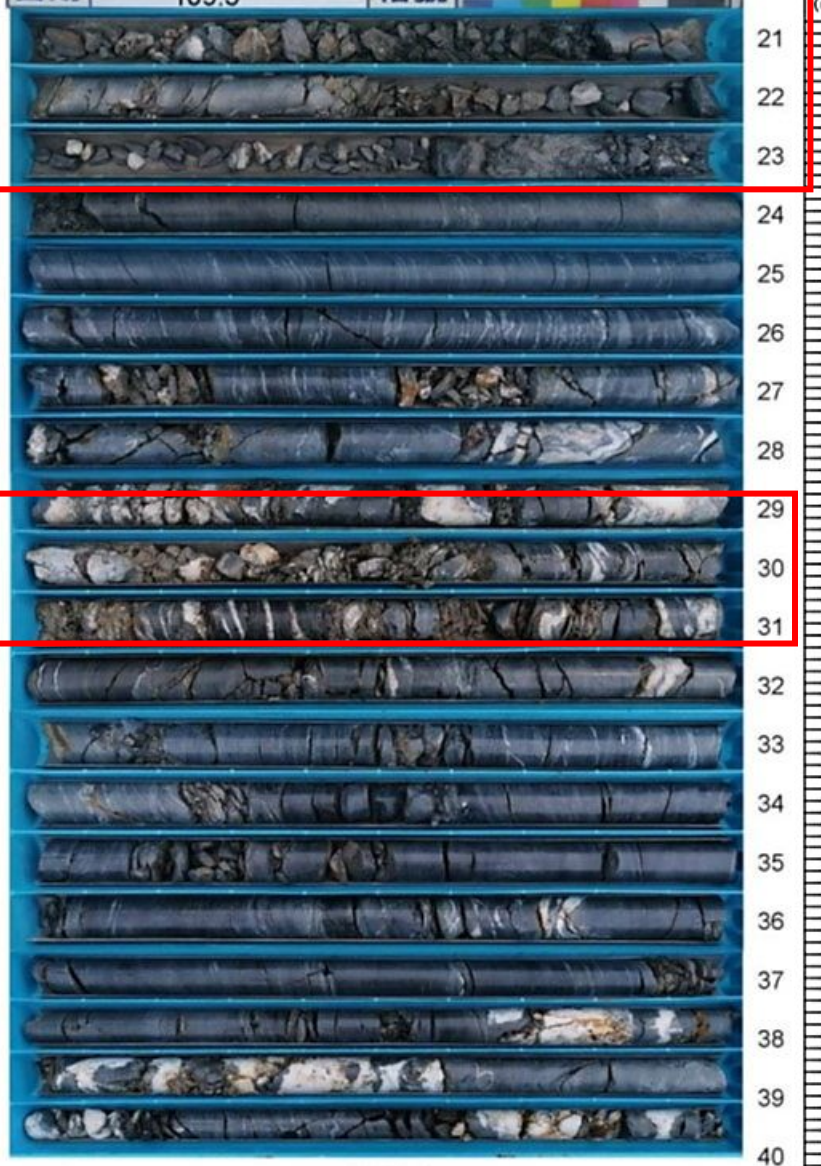


TC.Chen

青山工程顧問有限公司

工程名稱：109年臺東大規模崩塌潛勢地區監測維運計畫

孔號	Y20BW03(40m)	深度	20~40m
日期	109.5	箱號	



鑽探完成

工程名稱：鹿寮集水區(臺東縣-延平-D002大規模崩塌區及加開崩塌地)災害調查及治理策略

地點：臺東縣延平鄉　　日　期：1090513~1090523

鑽孔編號：Y20BW03　鑽孔標高：411.00 M 地下水位：35.00 M 專業技師：陳昭雄　輸入人員：陳永霆

深　度：40.00 M 座標系統：TW97　座　標 N：2541514.00 座　標 E：261581.00 鑽探公司：青山工程顧問股份有限公司

深度(m)	回收率(%)	鑽孔水位	地質圖元	岩石或土壤性質描述	RQD(%)	顏色	取樣記錄	標準貫入	統一土壤分類()	透水係數
20	100			基質支持，黃色土壤及岩塊，夾深灰色板岩岩塊及灰白色變質砂岩岩塊，岩塊粒徑約1~50cm。	0	灰黃				
21	100				0					
22	100				0					
23	100			灰黑色板岩與灰白色變質砂岩互層，輕度破碎，裂隙普遍具銹染情形，25.4~26.0m處有石英脈填充。	70	灰灰				
24	100				60					
25	100				50					
26	100			灰黑色板岩間夾灰白色變質砂岩，中至高度破碎，裂隙普遍具銹染情形，26.5~32.0m、35.7m、27.7~40.0m處有石英脈填充，29.0~30.6為剪裂帶。	0	灰灰				
27	100				25					
28	100				15					
29	100				0					
30	100				0					
31	100				10					
32	100				25					
33	100				30					
34	100				25					
35	100	▽ 109/05/20			20					
36	100				55					
37	100				0					
38	100				30					
39	100				0		W-2			1210
40	100									

青山工程顧問有限公司

工程名稱：109年臺東大規模崩塌潛勢地區監測維運計畫

孔號	Y20BW03(40m)	深度	0~20m
日期	109.5	箱號	



工程名稱：鹿寮集水區(臺東縣-延平-D002大規模崩塌區及加崁崩塌地)災害調查及治理策略

地點：臺東縣延平鄉　　日　期：1090513~1090523

鑽孔編號：Y20BW03　鑽孔標高：411.00 M 地下水位：35.00 M 專業技師：陳昭雄　輸入人員：陳永霞

深　度：40.00 M 座標系統：TW97　座　標 N：2541514.00 座　標 E：261581.00 鑽探公司：青山工程顧問股份有限公司

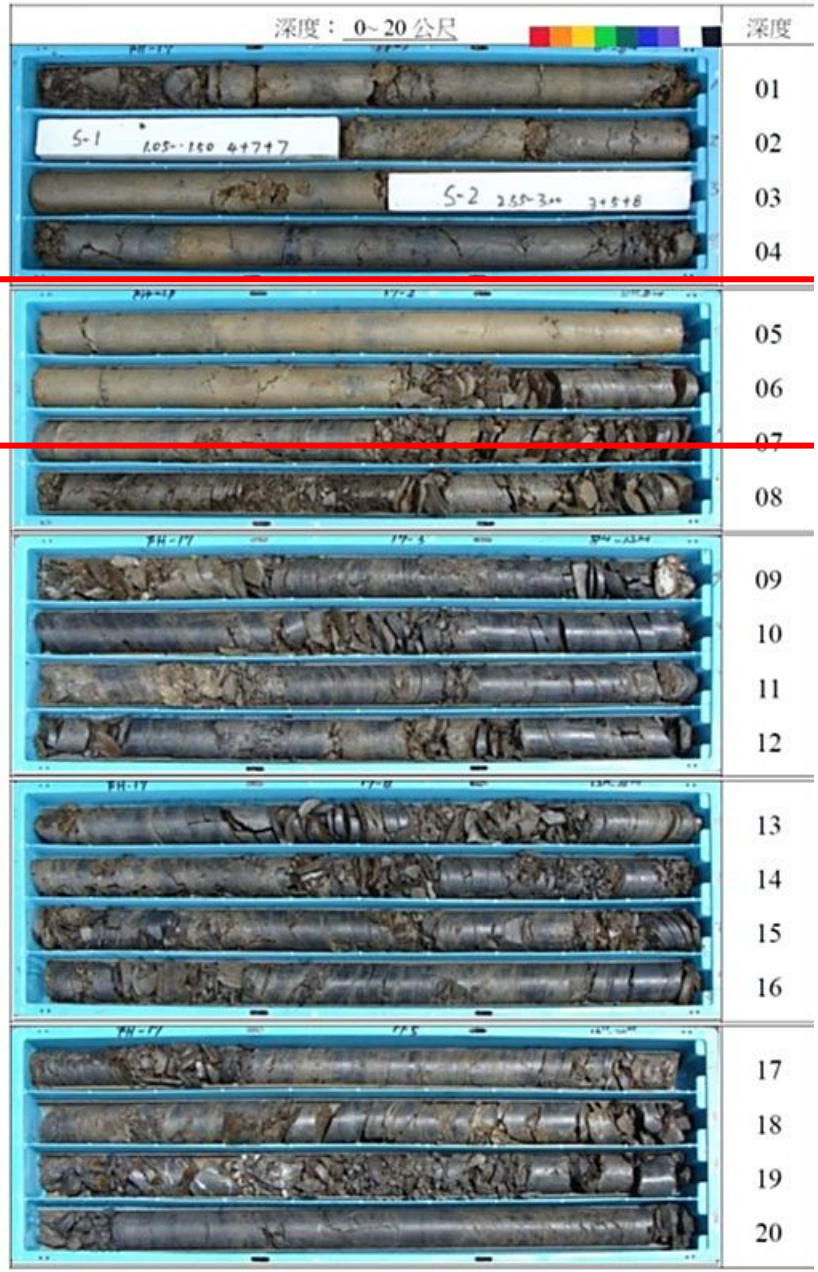
深度(m)	回收率(%)	鑽孔水位	地質圖元	岩石或土壤性質描述	RQD(%)	顏色	取樣記錄	標準貫入	統一土壤分類()	透水係數 (0)(10⁻⁴cm/s)
0	100			基質支持，黃色土壤及岩屑，夾深灰色板岩岩塊及灰白色變質砂岩岩塊，岩塊粒徑約1~50cm。	0	灰黃				
	100				0		S-1-0	1+1+2		
2	100				0					
	100				0		S-2-1	7+6+11		
4	100				20					
	100				0		S-3-1	4+6+9		
6	100				0					
	100				0					
8	100				25					
	100				0					
10	100				2.5					
	100				0					
	100				0					
12	100				0					
	100				0					
14	100				0					
	100				0					
16	100				15					
	100				15					
18	100				0					
	100				0					
20										

計畫名稱：易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第 2 期 98 年

—高雄縣桃源鄉藤枝調查範圍水文地質鑽探調查工作 —

共 3 頁，本頁第 1

鑽孔地點：高屏溪流域(藤枝調查範圍) 鑽孔編號：FH-17 總深度：



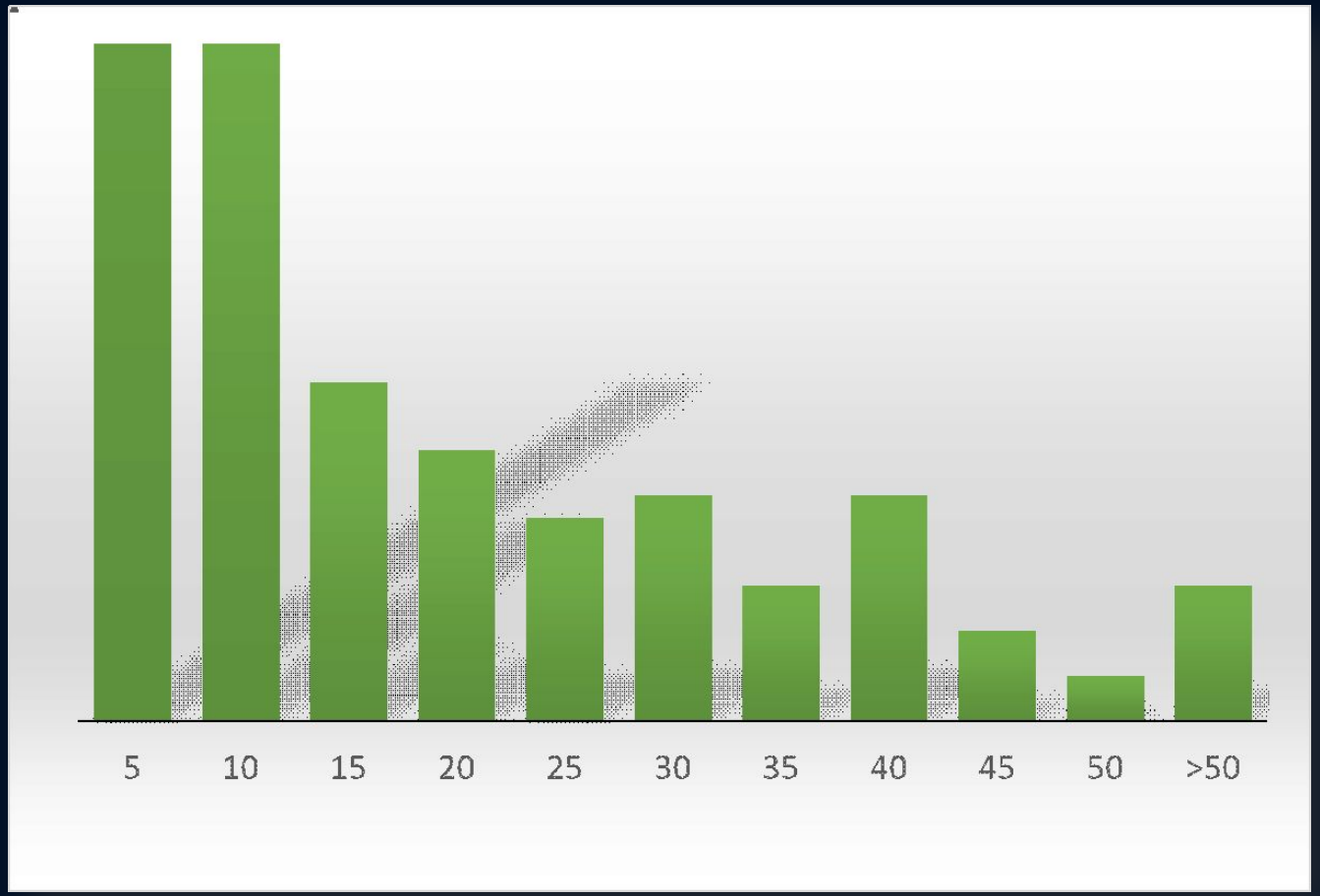
工程名稱：「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置(第2期98年度)」含鑽探調查與及藤枝調查範圍地質鑽探工程 日期：0980704~098

地點：高雄縣桃源鄉

鑽孔編號：FH-17 鑽孔標高：1521.00 M 地下水位：18.35 M 地質技師：楊貴政

深度：65.00 M 座標N：2551760 座標E：224798 鑽探公司：

深度(m)	鑽孔水位(m)	取樣記錄	標準貫入(N值)	岩石或土壤性質描述	地質圖元	RQD(%)
0				崩積層,黃棕色粘土夾灰黑色板岩屑		
		s-1-2	4+7+7			
2						
		s-2-2	3+5+8			
4						
				5.6M		
6				灰黑色中度風化板岩夾薄層剪裂泥,劈理面發達		
8						
10						
12						0
14						
16						
18						
20				53M		



- 鑽探資料中，其中位於未擾動地層之案例56孔，已擾動地層案例121孔。表土及崩積層厚度統計如圖所示。
- 圖中將近50%之孔位崩積層厚度大於20m，最大可深達80m。而崩積層厚度小於10m者共51處，僅總數之42%。顯示現階段鑽探調查位置之崩積層厚度大致偏大。

□　土層厚度研究方法

土壤厚度之估算模式，國內外學者主要使用數種地形因子建立土壤厚度推求的空間關係，其使用因子模型主要包括：

(a) 與高程的線性相關性；

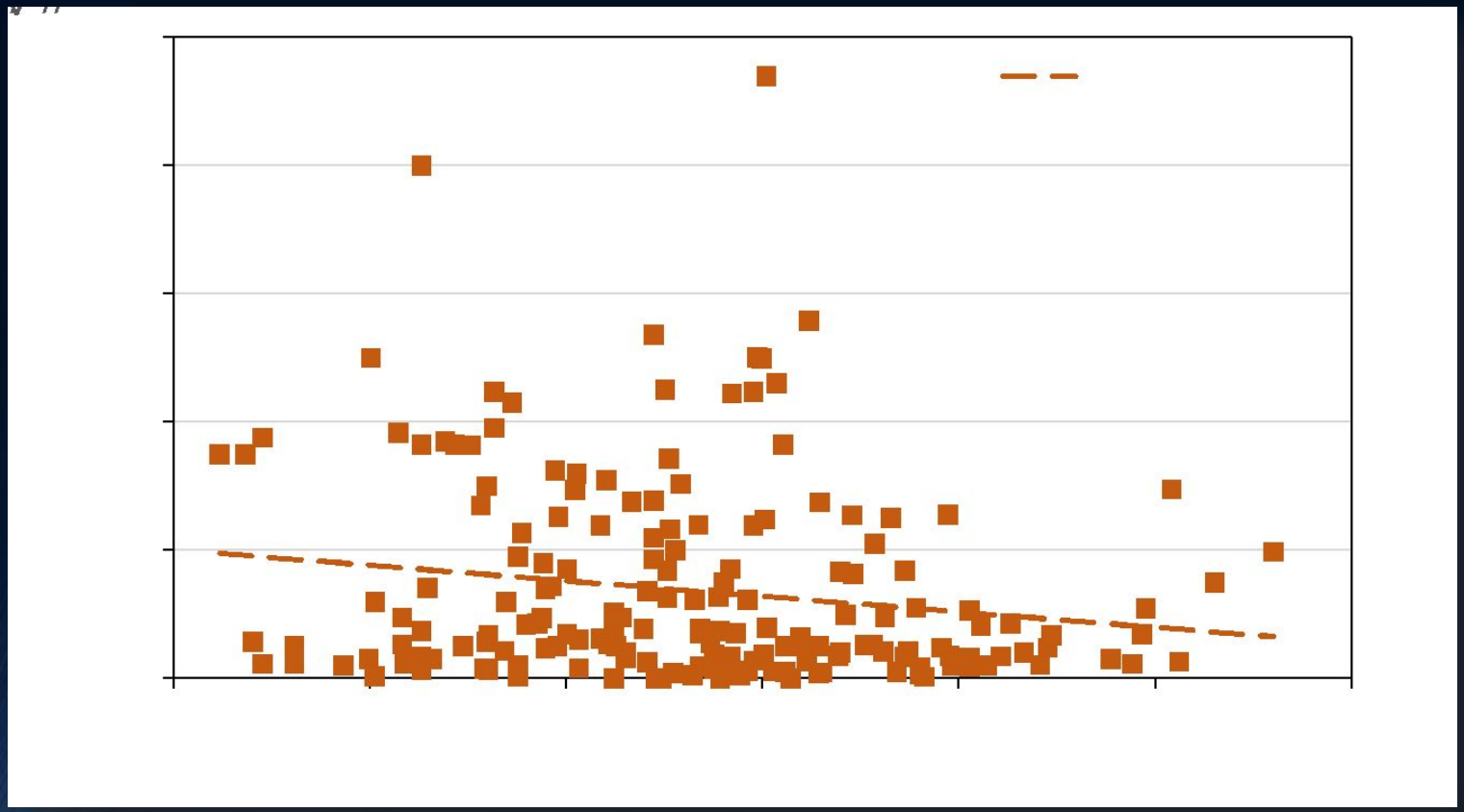
(b) 與坡度梯度的線性相關性；

(c) 與坡度梯度的指數相關性；

(d) 曲率、沿山坡剖面的位置和坡度的組合；

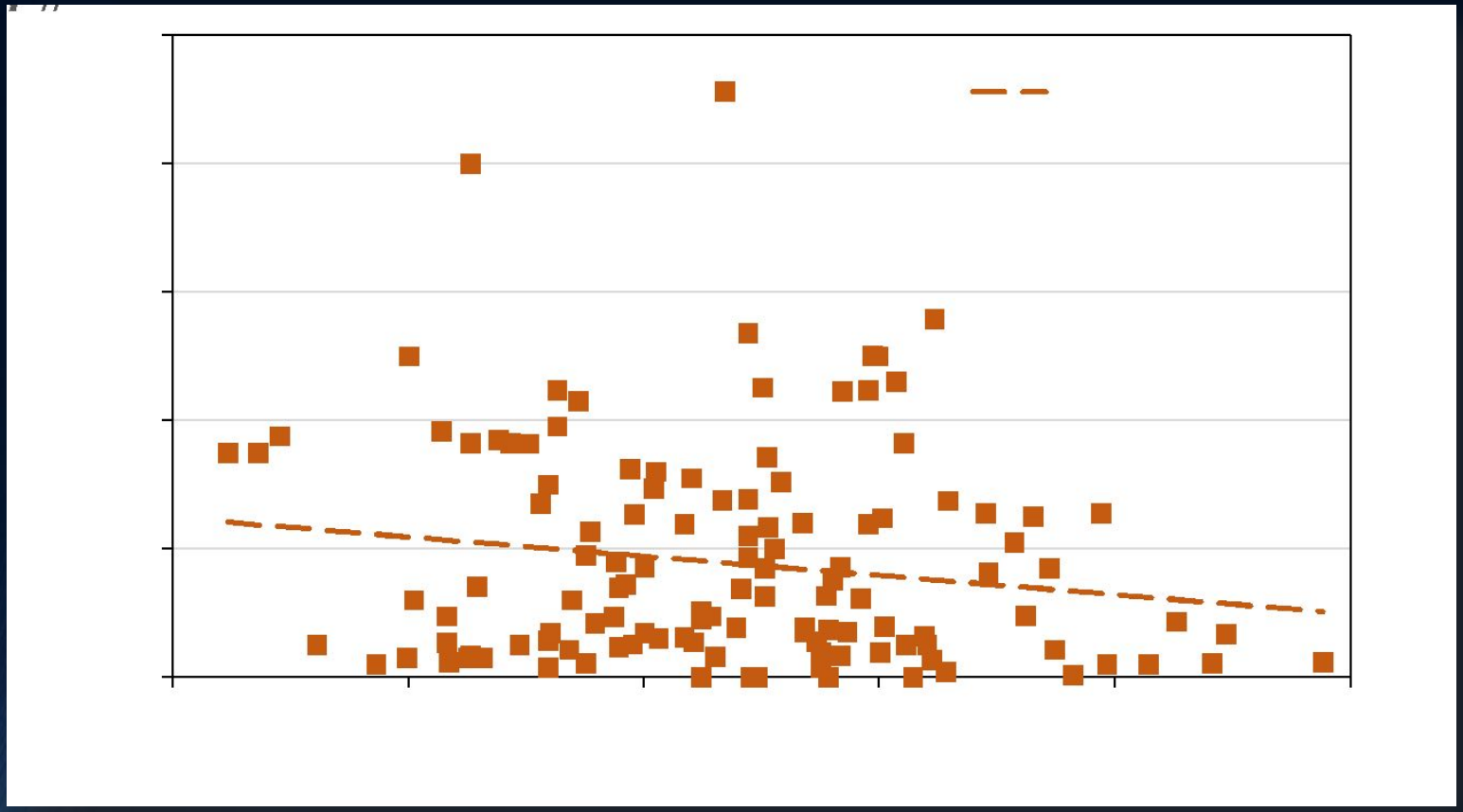
(e) 一個更複雜的模型，使用與前一個模型相同的地形屬性並結合地質和地貌因素。

鑽探成果之表土及崩積層厚度數量統計



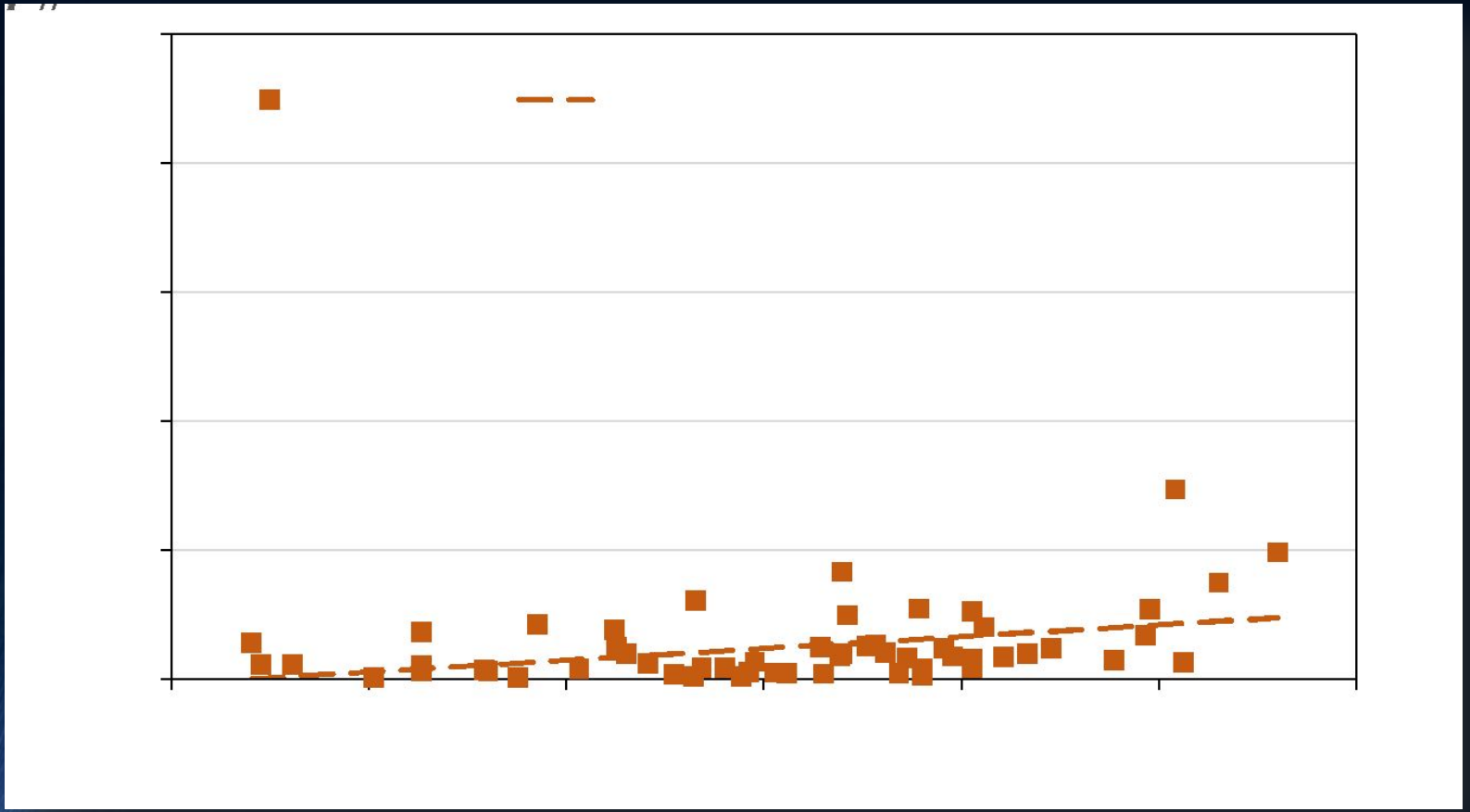
1. 鑽探未擾動地層之案例56孔，已擾動地層案例121孔。
2. 崩積層厚度小於10m者共51處，僅總數之42%。另近50%之孔位崩積層厚度大於20m，最大可深達80m。
3. 顯示現階段鑽探調查位置之崩積層厚度大致偏大。

已擾動案例表土層厚度與坡度



- 若邊坡已具有崩崖、滑動體等特徵，將之歸類於已擾動案例。
- 已擾動崩塌地之崩積層厚度與坡度分布關係相當散亂。其雖具有崩積層厚度隨坡度增加而下降之趨勢，但厚度可由數米變動之8om之深度，此一結果於實務上無法應用，尚待進一步研究。

□ 未擾動案例表土層厚度與坡度

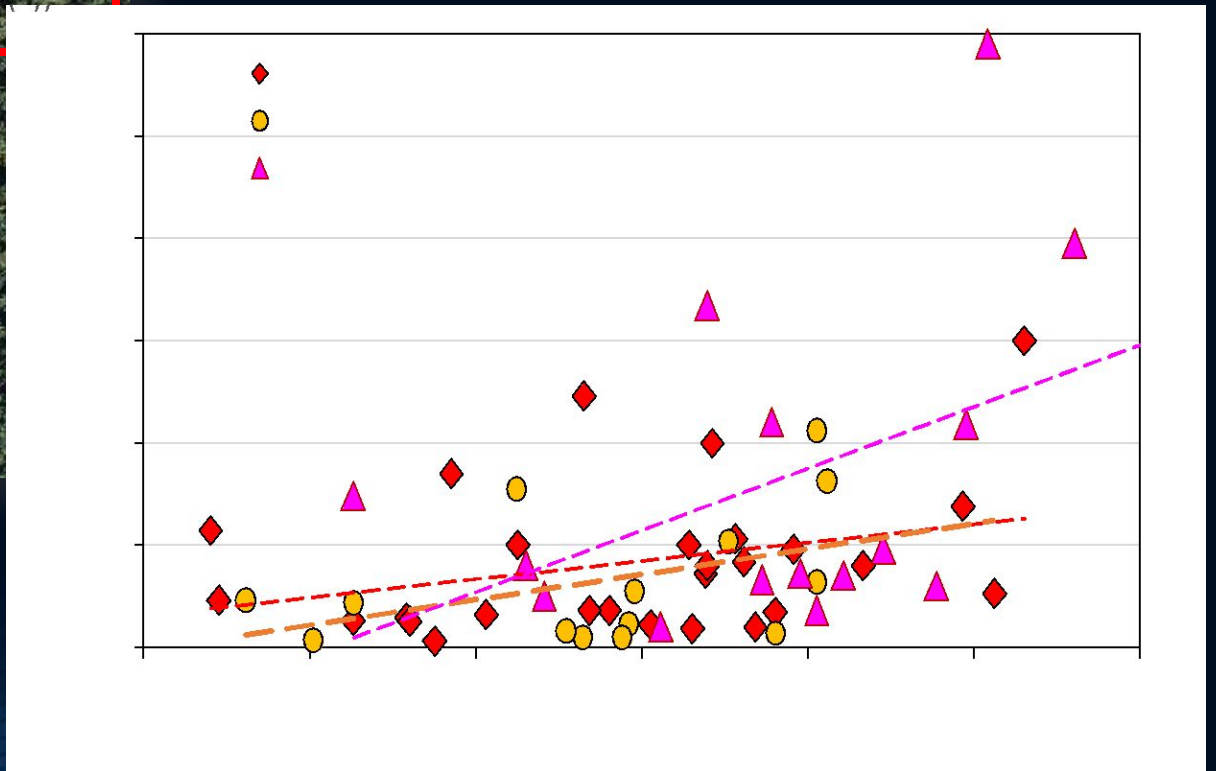


- 圖中顯示表土及崩積層厚度較具良好分布關係，崩積層厚度隨地形坡度稍有增加，但其厚度主要分布於15m以下，最深達30m，平均厚度約為5.0 m。

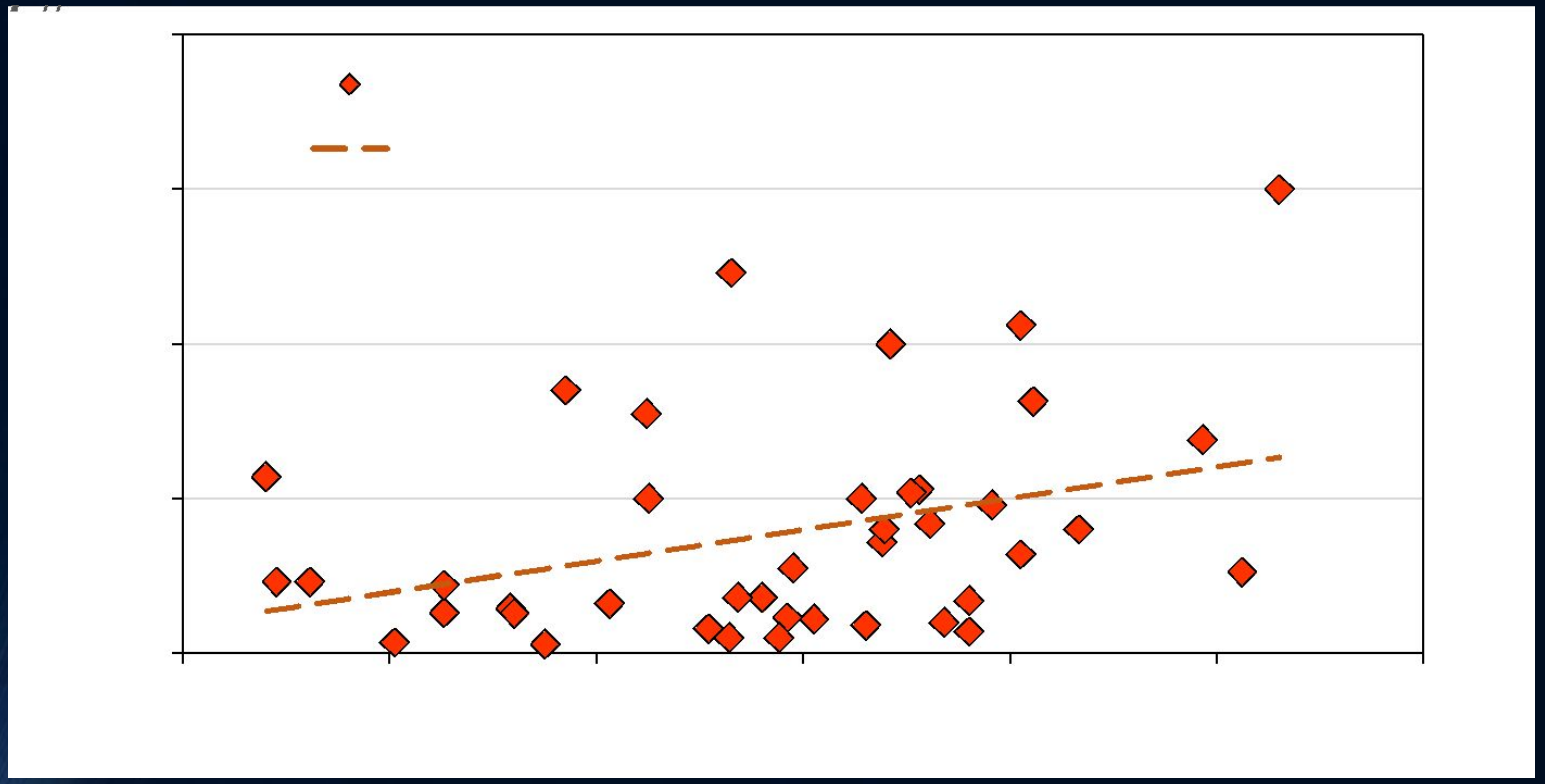
未擾動案例表土及崩積層厚度與區位分布



- 坡面依其坡長分為三等分，分為上邊坡、中邊坡及坡腳
- 圖中顯示上邊坡及中邊坡之土層厚度有不錯之規律性，而坡腳區位之土層厚度變動較大。因坡腳主要為堆積扇或崖錐堆積處，因此崩積層厚度變動大。



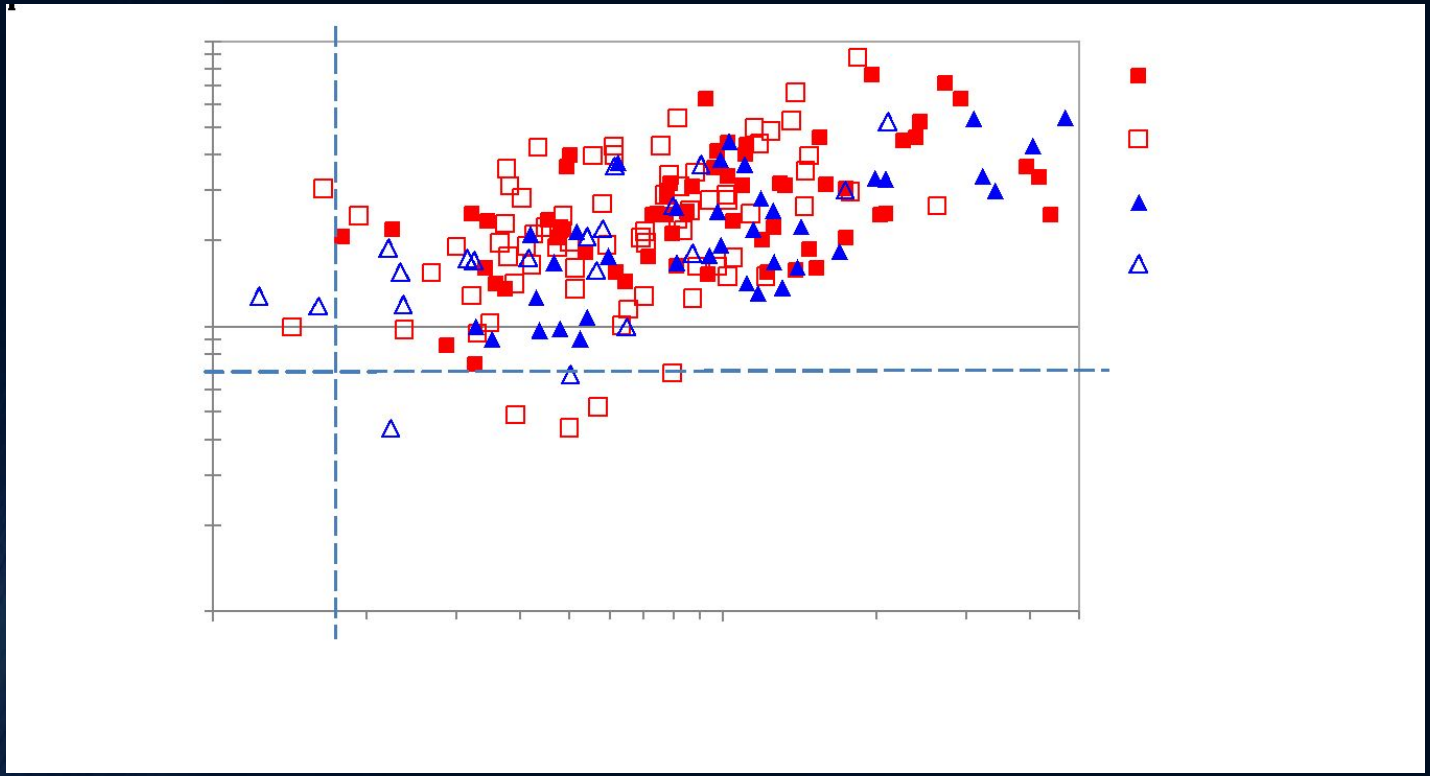
上邊坡或中邊坡區位土層厚度



- 上邊坡或中邊坡位置具有良好規律性，厚度主要集中在5m下，平均厚度約為3.9 m。
- 厚度隨坡度略為增加，厚度y與坡度x (度)之線性關係為 $y = 0.1015\,\theta + 0.9718$。

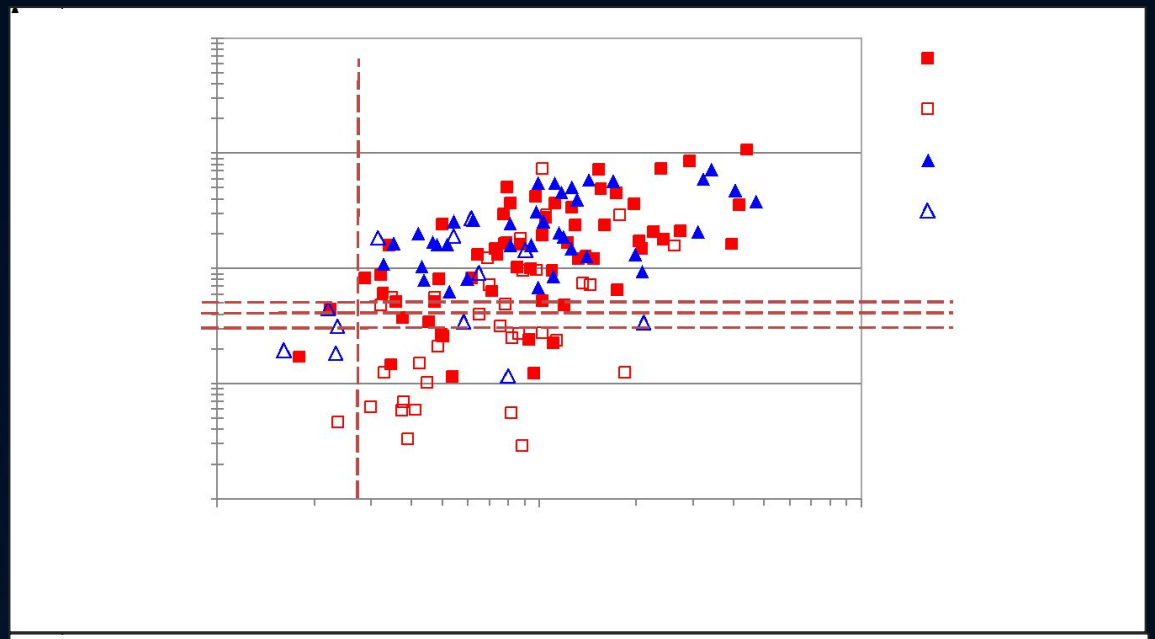
五、高屏溪流域坡面型土石流啟動之崩塌地形及量體評估模式

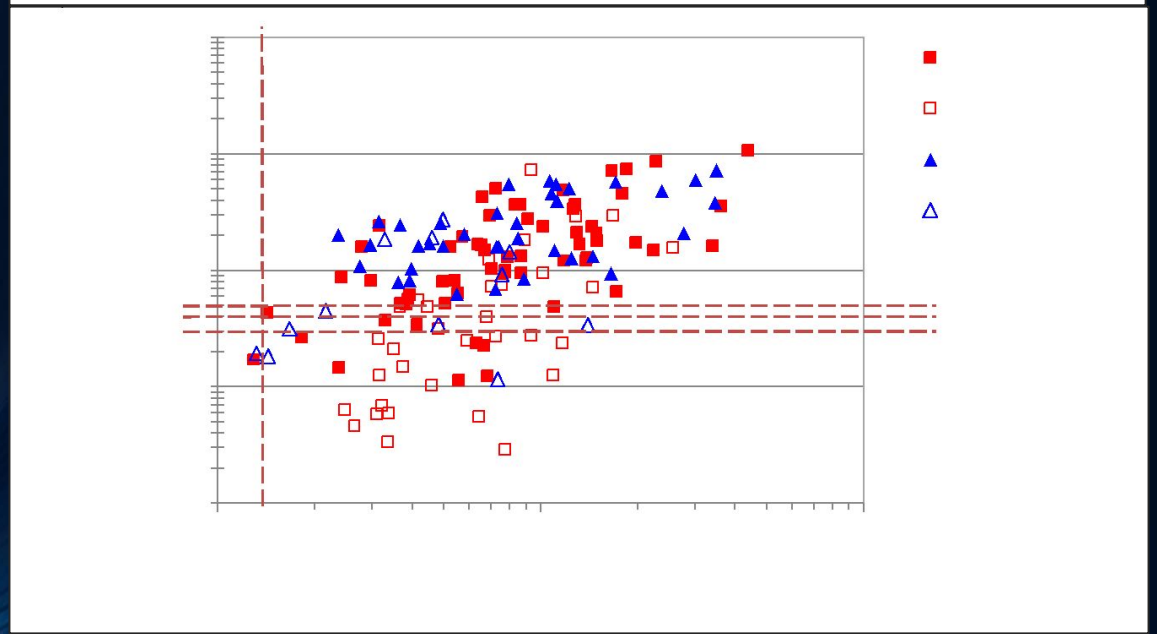
(一) HDF集水區崩塌地形(面積)門檻模式



1. HDF案例最小集水區為1.795公頃，因此本研究區以面積大於1.7公頃(17000m²)，方為可能發生坡面型土石流之單元。
2. 流動長度>70 m做為具發生坡面型土石流門檻值。

發生區面積vs.區內崩塌面積





HDF發生區面積(校正後)門檻

- 發生區內崩塌面積3000、4000、5000 m^2時三狀況分析:

1. 發生區內崩塌面積3000 m^2時，HDF之發生機率P為92.8%,為崩塌事件NDF亦未發生機率達69.2%，全正判率為81.4%。
2. 發生區內崩塌面積4000 m^2時，HDF之發生機率P為90.7%,為崩塌事件NDF亦未發生機率達74.7%，正判率約在83.0%以上。
3. 發生區內崩塌面積5000 m^2時，HDF之發生機率P為88.7%,為崩塌事件NDF亦未發生機率達78%，正判率約在83.5%以上。

- 第一門檻條件，流動長度>70 m，為發生坡面型土石流門檻值。
- 第二門檻條件，發生區內崩塌面積4000 m^2，其正判率約83%。此可符合實務操作需求。

崩塌面積與體積關係

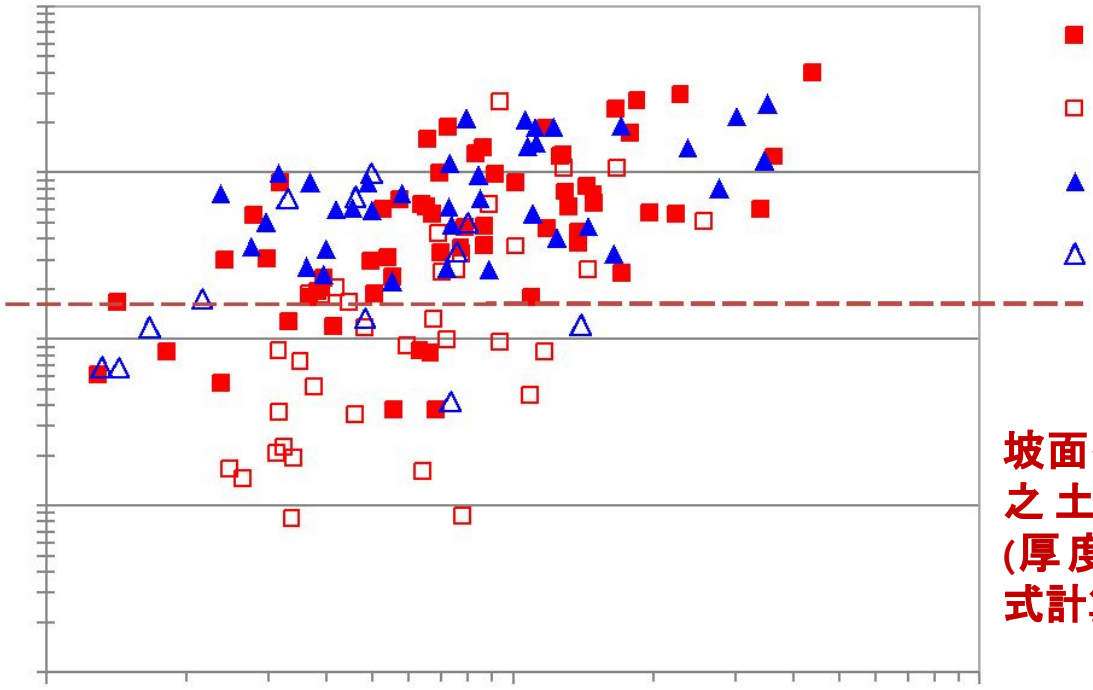
- 詹勳全等(2015)等學者以現場調查搭配資料蒐集之方式，獲取 921 地震後台灣山區181處淺層崩塌地之地形條件、物理尺寸、自然環境特性及誘發崩塌原因等資訊，並進一步推估崩塌面積與崩塌體積之關係。
- 崩塌面積與崩塌量體間呈一對數線性關係，關係式如下所示：

$$\ln V = 0.687 \ln A + 2.326$$

研究來源	研究區域	適用面積範圍	迴歸公式
陳樹群等 (2010)	石門水庫集水區	$10^2 < A < 10^5$	$V = 0.04\ A^{1.368}$
陳樹群等 (2010)	大甲溪集水區	$10^2 < A < 2x10^5$	$V = 1.92\ A^{1.10}$
Guzzetti et al. (2008)	義大利	$1 < A < 10^9$	$V = 0.0844\ A^{1.4324}$
Hovius et al. (1997)	紐西蘭	$10 < A < 10^6$	$V = 0.05\ A^{1.50}$

註：A 為崩塌地面積 (平方公尺)；V 為崩塌體積 (立方公尺)

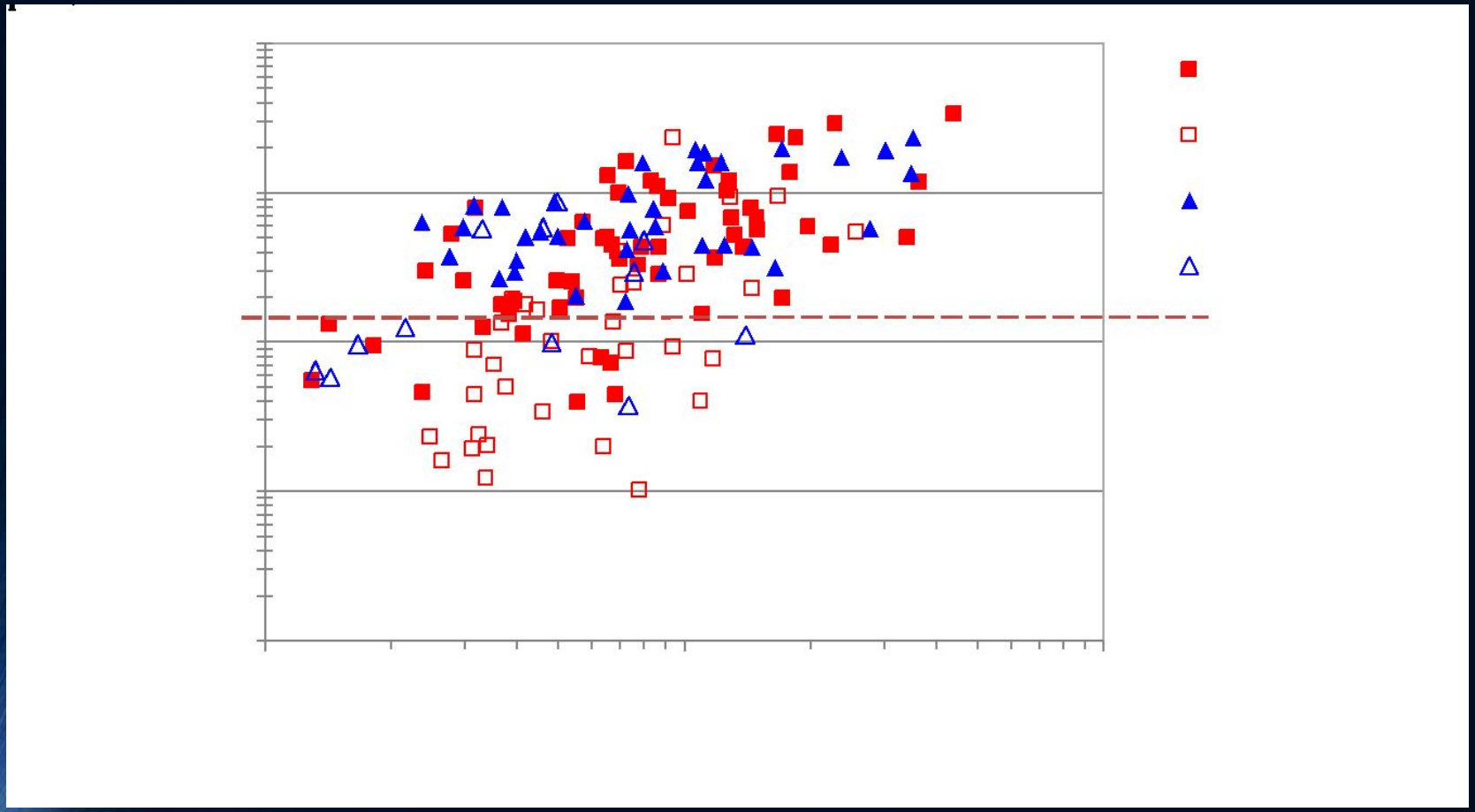
(二) HDF集水區崩塌量體門檻模式分析



坡面型土石流發生之土方量體門檻(厚度依坡度關係式計算)

- 量體為採發生區內崩塌面積乘以推估厚度，$y = 0.1015\,\vartheta + 0.9718$
- 採崩塌體積10000m³做為門檻，可得達78.2%的正判率。但採崩塌體積15000m³做為門檻，可獲得達8成以上的正判率。

坡面型土石流發生之土方量體門檻(採平均厚度3.9m)



- 採崩塌體積15000m³做為門檻，亦可獲得達8成以上的正判率。
- 因此本研究建議採發生區崩塌體積15000m³，為坡面型土石流之發生門檻值。

六、結論

1. 本研究進行坡面型土石流之發生啟動門檻分析，採用高屏溪流域97處坡面型土石流事件，及103處崩塌，共計200處案例作為分析樣本。
2. 為獲得可靠土壤表層或崩積層厚度資料，本研究收集水保局34處大規模崩塌地監測計畫及其他單位之崩塌地鑽探資料。總計全台地區177處鑽孔，進行表土及崩積層厚度與地形關係研究。
3. 未擾動地形鑽探案例分析結果顯示，上邊坡、中邊坡之土層厚度與坡度因子具有良好規律性，厚度主要分布於10m以下，最深達15m，主要集中在5m下，平均厚度約為3.9 m。厚度隨坡度略為增加，厚度y與坡度x (度)之線性關係為y = 0.1015x + 0.9718。

4. 坡面型土石流之面積發生門檻:

1) 第一門檻條件: 流動長度>70 m, 集水區面積發生門檻約大於1.7公頃。其主要及水面積多大於3公頃以上。

2) 第二門檻條件: 採以發生區內崩塌面積>4000 m^2, 其正判率約83%。以此門檻條件可獲得集水區面積門檻約20000 m^2, 亦即約2公頃。發生區面積(校正後)門檻約15000 m^2, 亦即約1.5公頃。前述門檻值符合實務應用需求。

5. 坡面型土石流之土方量體門檻: 崩塌體積>15000m^3, 可獲得達8成以上的正判率, 符合實務應用需求。

Thanks for your attention!