

## 探討莫拉克颱風後降雨量與土石流出量之關聯性

賴承農<sup>1</sup> 陳建宏<sup>1</sup> 辜炳寰<sup>1</sup> 張玉舜<sup>1</sup> 冀樹勇<sup>1</sup> 陳振宇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心

<sup>2</sup>農委會水土保持局土石流防災中心

### 摘要

本研究探討土石流堆積長度之推估方法，經比對選用池谷浩公式計算與現地量測結果比對，池谷浩公式此推估法常高估達3倍以上。且為更進一步瞭解對於土石流堆積長度值之影響因子，除探討流動段的坡度及集水區面積等因子對土石流堆積長度值之影響，並加入降雨量進行迴歸分析。由分析結果顯示，利用莫拉克颱風災後所蒐集土石流災害目錄，所建置之土石流出量與降雨量經驗式，可有效降低推估誤差值。

**關鍵字：**土石流潛勢溪流、土石流出量、池谷浩公式、降雨量

### 一、研究區域概述

台灣南部山區受到莫拉克颱風挾帶暴雨之影響，發生嚴重崩塌、土石流及淹水等災情，其中高雄縣甲仙鄉、那瑪夏鄉、桃源鄉深山地區，經由報導，皆屬較為嚴重災情，災害類型則非單一災害，屬於複合型災害，且根據計算，這些區域其降雨重現期皆超過200年以上，且多已有研究及專業人員投入，反觀在台南縣淺山丘區域及嘉義縣西南側低海拔麓山地區，亦發生多起土石流災害，反而尚未能針對土石流災害範圍進行瞭解，緣此，本研究選定嘉義縣、台南縣等淺山丘陵地區以低海拔麓山地區，一共選定55條土石流潛勢溪流(內含39個土石災害事件)作為土石流堆積長度之分析對象，研究區域鄉鎮詳如表1所示，研究鄉鎮內之55條土石流潛勢溪流分布圖則如圖1所示。

### 二、基本資料蒐集

為瞭解此區域可能之土石流災害範圍，本研究進行蒐集土石流潛勢溪流之有效集水區面積、土石流出量，溪床平均坡度、地層岩性地文因子，希望能藉由統計方法瞭解上述因子對於推估土石流出量公式之影響。

此外本研究蒐集之土石災害範圍作為探討合理劃設土石流扇狀地之方式，因而建立了土石流災害目錄，所記錄之災害事件為包含自86年賀伯颱風至98年莫拉克颱風之間，惟經訪談紀錄、航照紀錄或現地調查，掌握之相關土石流潛勢溪流災害資料仍以97至98年間最為詳實。

## 2.1 歷史災害調查

於現地土石流易致災調查過程中，除針對目標土石流潛勢溪流，利用航照判別災害前後地形貌之差異，並於以及現地圈劃災害範圍及蒐集歷年土石災害資料；針對本研究室內分析地形參數資料及現地檢核，採用GIS軟體進行計算及更新，其相關參數包含有效集水區面積( $A_C$ )、土石流出量( $V_d$ )、溪床平均坡度( $S_0$ )、土石流堆積區平均坡度( $S$ )等四項，分述如下。

### 2.1.1 有效集水區面積( $A_C$ )

土石流潛勢溪流之集水區大約介於3至5000公頃(0.03至50平方公里)，在豪雨期間，集水區面積越大，集水區出口處匯集洪水量愈大，所以集水區面積大小與尖峰流量具有關聯性。

且土石流堆積區之起點(溢流點)位置之集水區面積應較整個集水區小，因此有必要修正溢流發生位置作為有效集水區之出口。發生土石流之集水區面積大小範圍在0.4到0.7平方公里之間(詹錢登, 2000)；而張東炯、謝正倫(1996)於調查台灣東部地區發生土石流之溪流，發現約63%集水區面積在0.1到1.5平方公里之間。

### 2.1.2 土石流出量( $V_d$ )

土石災害發生後，土石流出量基本上可經由歷史災害資料加以建立，經由民國95~98年間之土石流潛勢溪流現地調查，可獲得歷年土石流災害範圍，並藉由現地訪談、土石流殘痕跡可實際記錄及量測土石堆積高度，而土石流出量基本上應由上游崩塌地提供，但並非上游崩塌地崩落土石皆全部轉為土石流流出量，部分會堆積於沿線河道，僅部分土石泥流經由河道排出，此部分排出土石量則為主要為溢流土石流量，蔡元芳(1999)曾以台灣地區10餘處土石流災害事件，估算出土方量與集水區面積關係，並且與日本地區經驗式比較，結果顯示台灣地區土石流潛勢溪流集水區之平均流出量較日本地區為大。

### 2.1.3 溪床平均坡度( $S_0$ )

由於土石運動形態與坡度有密切關係，且溪床坡度隨縱斷面由上游至下游皆有變化，故採溪床平均坡度作為考量因子，而於本研究定義之溪床平均坡度，其所計算溪床平均坡度皆換算成坡度百分比 $S$ ， $S=(\text{溪流上下游之高程差}/\text{溪流水平投影長})\times 100$ ，(詹錢登, 2000)。

### 2.1.4 土石流堆積區平均坡度( $S$ )

考量主流堆積區之坡度的大小亦可決定土石之運動形態，也易影響土石流發生堆積與否，理論上來說溪床坡度越陡，其驅動土石流能量越高，但根據詹錢登(2000)研究發現，溪床坡度越大，崩落之土石越容易被地表逕流帶走，故不易形成土石堆積，故發生土石流堆積就會降低，但整體來說，土石流堆積區平均坡度亦會影響到土石流堆積行為，故將其納為其中一個影響因子。

## 2.2 水文概述

莫拉克颱風期間，蒐集研究區域內之氣象局以及水利署雨量站，首先採用警戒值雨量站，選擇雨量站之方法，這部分考量降雨驅動指標(RTI)及地文綜合指標(GI)作為雨量站選定要素。

### 2.2.1 雨量站分布情形

本計畫蒐集雨量站，包含中央氣象局及水利署雨量站，其中各研究區域鄉鎮之雨量站選取，主要參考水保局現行警戒雨量站之雨量站選定(李明熹,2006)，研究區域內總共有13處氣象局雨量站，以及5處水利署雨量站，分布位置詳圖2所示，其中有二站山豬湖(C1K380)及頭凍(C1M600)均屬氣象站2002年設站，有效紀錄尚不足10年，僅可作為參考，而無法納入分析，而其他選定之雨量站，則設站時間皆達10年以上，共計有18處雨量站，各氣象站之分布詳如圖2所示，氣象站之基本資料詳表2。

### 2.2.2 莫拉克颱風期間雨量站記錄重現期分析

一般水文分析關於重現期分析，於水利署公告之水文分析手冊共有六種制式分析方法，表3係將莫拉克颱風期間，各雨量站最適宜之公式所計算之重現期距、相關管轄單位、記錄年資料一併列出。

表1 研究區域55條土石流潛勢溪流列表

項次	縣市	鄉鎮	村里	數目	項次	縣市	鄉鎮	村里	數目
1	台南縣	六甲鄉	大丘村	1	13	嘉義縣	中埔鄉	東興村	2
2	台南縣	白河鎮	大林里	3	14	嘉義縣	中埔鄉	瑞豐村	1
3	台南縣	白河鎮	六溪里	1	15	嘉義縣	竹崎鄉	內埔村	1
4	台南縣	白河鎮	仙草里	2	16	嘉義縣	竹崎鄉	文峰村	2
5	台南縣	白河鎮	關嶺里	5	17	嘉義縣	竹崎鄉	桃源村	2
6	台南縣	東山鄉	青山村	2	18	嘉義縣	竹崎鄉	塘興村	1
7	台南縣	東山鄉	南勢村	11	19	嘉義縣	竹崎鄉	緞繻村	3
8	台南縣	東山鄉	高原村	3	20	嘉義縣	梅山鄉	圳南村	1
9	雲林縣	古坑鄉	桂林村	1	21	嘉義縣	梅山鄉	安靖村	1
10	雲林縣	古坑鄉	華山村	2	22	嘉義縣	番路鄉	下坑村	1
11	嘉義縣	中埔鄉	中崙村	2	23	嘉義縣	番路鄉	公興村	4
12	嘉義縣	中埔鄉	石弄村	2	24	嘉義縣	番路鄉	觸口村	1

表2 研究區域氣象站之基本資料

項次	雨量站名	站號	高程(m)	管轄單位	紀錄年限
1	大埔	C0K300	369	中央氣象局	1993/3/1~
2	瀨頭	C1M390	1090	中央氣象局	1988/12/1~
3	中坑	C1M450	132	中央氣象局	1993/3/1~
4	樟腦寮	C1M480	798	中央氣象局	1993/3/1~
5	內埔	C1M490	130	中央氣象局	1993/3/1~
6	小公田	C1M540	768	中央氣象局	1993/3/1~
7	大湖	C1M570	722	中央氣象局	1993/3/1~
8	曾文	C0O810	207	中央氣象局	1988/12/1~
9	王爺宮	C1O840	144	中央氣象局	1988/12/1~
10	大棟山	C1O870	1246	中央氣象局	1988/12/1~
11	楠西	C1O920	150	中央氣象局	1988/12/1~
12	白河	C1X030	33	中央氣象局	1993/3/1~
13	東原	C1X040	232	中央氣象局	1993/3/1~
14	小公田(2)	01L360	680	水利署	1979~1987,1989~1992, 1994~2008
15	大湖山	01L390	725	水利署	1960~1971,1974~1979, 1981~1992, 1994~2008
16	樟腦寮(2)	01L480	545	水利署	1962~1967,1969~2008
17	關子嶺(2)	01O070	350	水利署	1959~1959,1964~1987, 1989~2008
18	北寮	01O200	360	水利署	1981~2008

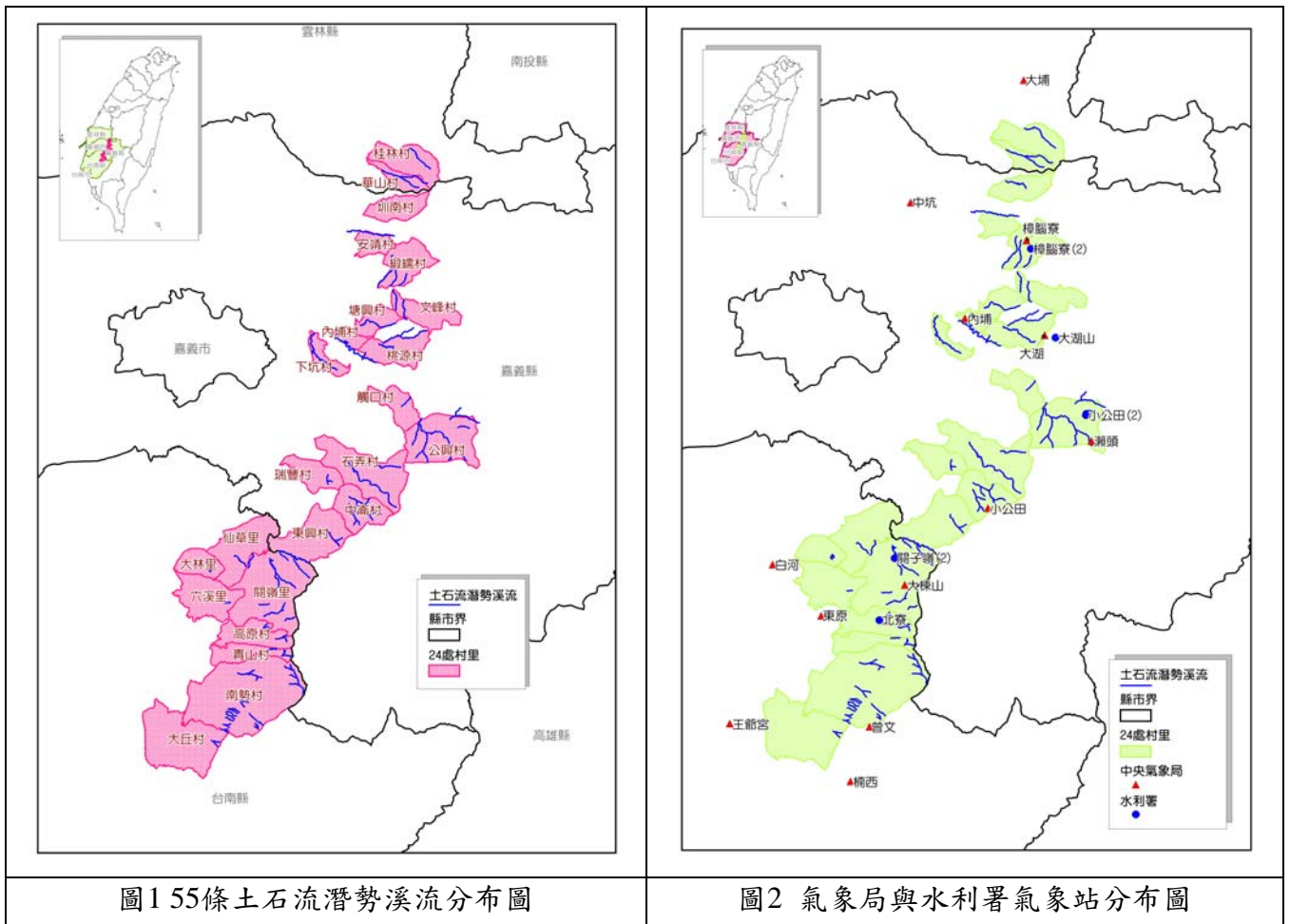


圖1 55條土石流潛勢溪流分布圖

圖2 氣象局與水利署氣象站分布圖

表 3 研究區域 18 處氣象站之頻率分析結果

項次	雨量站名	代號	分布	24 小時	10	20	25	50	100	200	R.T.
1	大埔	C0K300	LPTIII	230.5	278.0	334.9	354.4	418.8	490.1	569.4	5
2	瀨頭	C1M390	LPTIII	1217.5	691.9	850.7	904.4	1080.5	1272.3	1481.7	83
3	中坑	C1M450	PTIII	495.5	321.9	360.8	372.5	406.8	438.9	469.3	>200
4	樟腦寮	C1M480	PTIII	653.5	664.9	764.7	794.9	884.1	967.8	1047.5	9
5	內埔	C1M490	PTIII	790.5	481.1	578.1	609.0	704.6	799.8	895.0	94
6	小公田	C1M540	LPTIII	1123.0	513.7	690.1	757.0	1003.5	1322.2	1734.6	66
7	大湖	C1M570	PTIII	1077.0	746.0	863.4	899.0	1004.5	1104.1	1199.2	105
8	曾文	C0O810	LPTIII	1088.5	634.1	814.4	878.7	1101.6	1364.2	1674.0	48
9	王爺宮	C1O840	PTIII	671.5	436.4	531.8	562.7	659.6	757.6	857.0	55
10	大棟山	C1O870	LPTIII	757.0	417.2	505.4	535.9	638.0	753.0	883.0	102
11	楠西	C1O920	PTIII	744.0	519.6	636.3	674.5	795.1	918.4	1044.4	37
12	白河	C1X030	LPTIII	619.0	425.8	516.0	545.9	642.3	744.5	853.2	42
13	東原	C1X040	PTIII	774.0	483.4	606.0	646.0	771.9	900.1	1030.8	51
14	小公田(2)	01L360	PTIII	1330.0	712.0	839.3	879.0	999.7	1117.5	1233.3	>200
15	大湖山	01L390	PTIII	1329.0	753.0	890.6	933.3	1062.2	1186.6	1307.8	>200
16	樟腦寮(2)	01L480	PTIII	868.0	578.0	670.8	699.2	783.9	864.9	943.1	103
17	關子嶺(2)	01O070	PTIII	1098.0	560.0	673.9	710.7	824.9	939.6	1055.0	>200
18	北寮	01O200	PTIII	1008.0	572.0	689.6	727.1	843.4	959.5	1075.7	134

## 2.3 地文概述

現地評估土石流發生是否具有足夠條件即為針對河道堆積不穩定土石方量以及河道兩側易沖刷土石料源，以及源頭區勘查匯水盆地，由於上述調查項目均已將地質岩性視為崩塌之基本要素，因此擬依據地調所二萬五千分之一之地質資料，從中取得分析模式之重要參數，以期現地勘查核對土石流潛勢溪流集水區之地文評析條件。

### 2.3.1 研究區域之地質特性

本研究區之地質特性資料，係參考中央地質調查所二萬五千分之一「臺灣都會區及周緣坡地環境地質圖說明書」；其中包含了「岩性組合」、「岩體強度分級」、「岩體組構」與「岩石單壓強度」等四項分類資料，主要作為劃分地質區域之準則，現地調查人員可據此快速地取得綜合性地質資料。

### 2.3.2 岩石單壓強度

岩石單壓強度乃瞭解材料力學性質特性指標之一。當岩體結構完整時，局部量測岩石的單壓強度，可視為岩體單壓強度。另外，本研究參考「國際岩石力學協會」ISRM (1981)，配合 Franklin(1975)之岩體分析方法，共分為 8 個級距，試圖瞭解研究區域岩石單壓強度區間分布與土石流潛勢溪流關連性，如表 4 所示。

表 4 岩石單壓強度分級表

岩石強度等級		單壓強度(MPa)	編碼
EW(極弱岩)		<1	H
VW(甚弱岩)	VW2	1~2.5	G
	VW1	2.5~5	F
W(弱岩)	W2	5~10	E
	W1	10~25	D
MS(中強岩)		25~50	C
S(強岩)		50~100	B
VS(甚強岩)		100~250	A

資料來源：強度分級係參考 ISRM (1981)

### 2.3.3 岩體結構類型

地調所(2006)曾以半定量評估方式將岩體結構類型分為六大類，分別為：(a) 整體結構、(b) 塊狀結構、(c) 塊狀裂隙、(d) 層狀結構、(e) 薄層結構、(f) 碎裂結構。

岩體結構越完整其不連續面(節理、裂隙、劈理)發育程度越低，反之越高，本研究嘗試據此量化指標，作為設定參數之用。

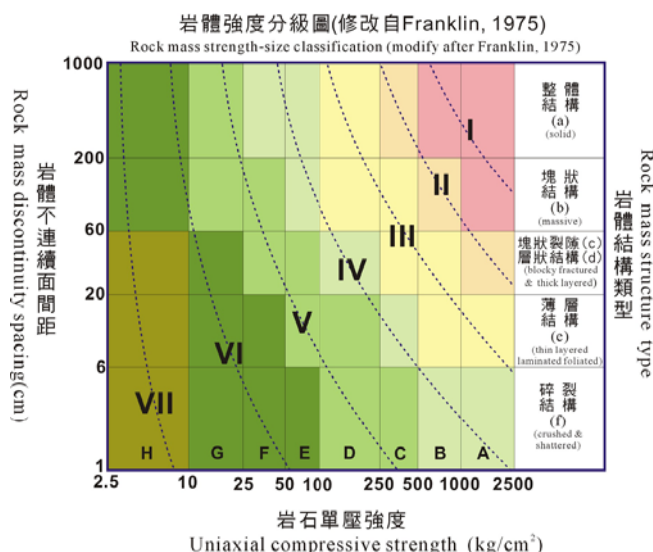


圖 3 岩體強度分級圖(中央地質調查所, 2006)

### 2.3.4 岩體強度分級

岩體強度分級：本計畫擬使用「臺灣都會區及周緣坡地環境地質圖說明書」中的「岩體強度分級」、「岩體組構」與「岩石單壓強度」資訊來區隔相同「地層岩性」的差異。採用Franklin(1975)之岩體強度分級(如圖 3 所示)。相同岩性下可依岩石單壓強度加以區隔劃分，例如五指山層、南莊層和大南灣層之砂岩，即可從岩石單壓強度之差異加以區隔開來。

## 三、研究方法

本研究進行溢流情形之土石流出量推估時，以下二項假設：(一)土石流災害範圍終點至溢流點之土石流災害範圍內，估計河道外溢之土石流出量(土石堆積量)，根據現場堆積塊石，研判最大堆積深度；(二)降雨重現期距採用警戒雨量站之分析資料，假設在颱風暴雨範圍內，分析的誤差；初步探討土石流出量與 24 小時降雨強度、地層岩性以及有效集水區面積之關聯性，研究流程圖，如圖 4 所示。

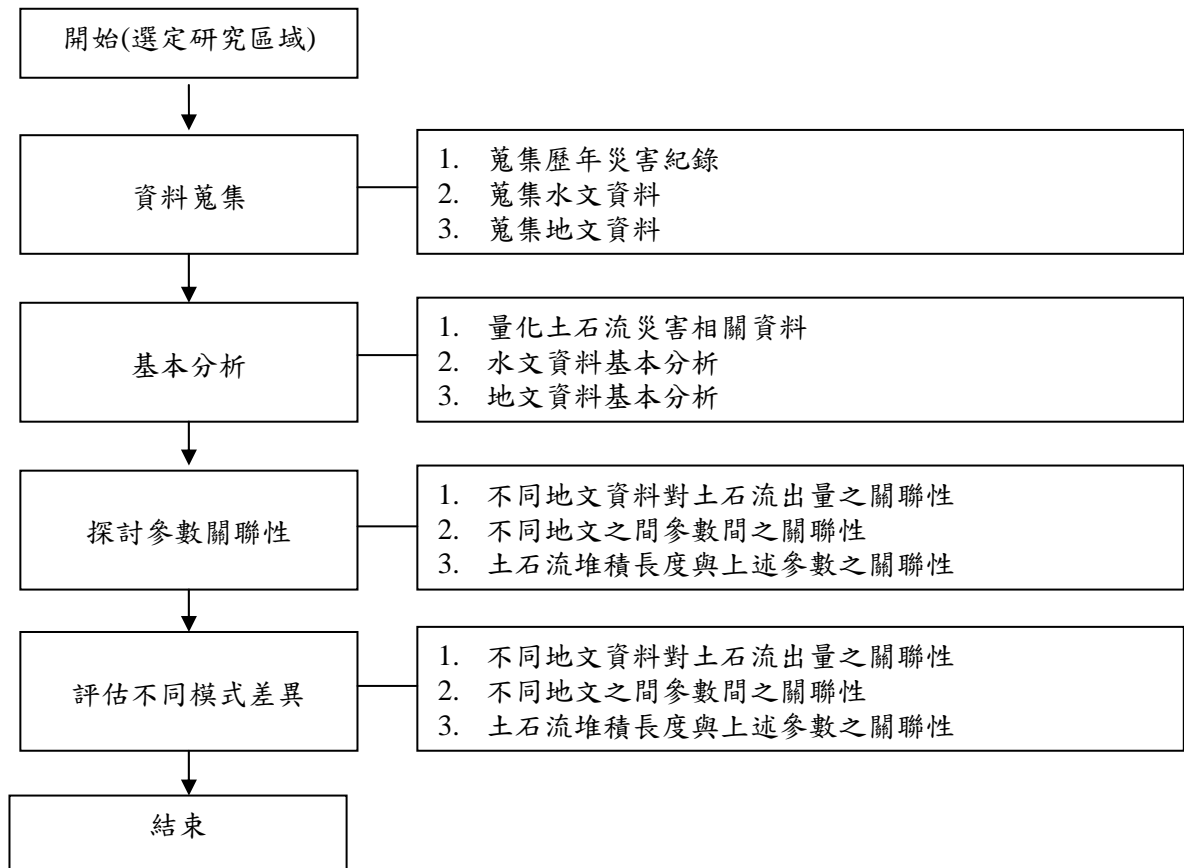


圖 4 本研究流程圖

## 四、結果與討論

在資料蒐集過程當中，其災害範圍以及調查記錄以 97 年卡玫基颱風與 98 年莫拉克颱風期間較為詳盡，因此採用此二場颱風之災害紀錄作統計分析。

### 4.1 修訂後公式之土石流出量差異

卡玫基颱風與莫拉克颱風之 14 處災害案例，進行土石流出量  $V$  與有效集水區  $A_C$ 、降雨強度  $I_{24}$  加以分析，得到下列公式：

$$V = 5.505A_C^{0.316} I_{24}^{-0.767} \sigma^{0.909} \quad (R=0.80) \quad \text{式 1}$$

其中， $V$ ：河道溢流土石量(m<sup>3</sup>)； $A_C$ ：有效集水區(m<sup>2</sup>)； $I_{24}$ ：最大 24 小時雨量(mm)； $\sigma$ ：單壓強度(kg/cm<sup>2</sup>)。

另外比較謝正倫(2000)公式推估之土石量值與現地調查之溢流土石量值平均高估約 6 倍左右，而推估莫拉克颱風事件之雲林縣古坑鄉華山村雲縣 DF002 土石量值幾乎相同，在嘉縣 DF015、嘉縣 DF007 以及嘉縣 DF035 則有明顯高估，詳表 4 所示。

### 4.2 災害案例集水區面積與河道斷面之關係

以卡玫基颱風與莫拉克颱風之 14 處災害案例，進行有效集水區  $A_C$  與河道斷面  $A_R$  加以分析，得到下列公式：

$$A_C = 9.660A_R^{1.357} \quad (R=0.83) \quad \text{式 2}$$

$A_C$ ：有效集水區(m<sup>2</sup>)； $A_R$ ：河道斷面(m<sup>2</sup>)

### 4.3 本研究推估土石流堆積長度與池谷浩公式之比較

以卡玫基颱風與莫拉克颱風之 14 處災害案例，進行土石流出量  $V$ 、溪床平均坡度加以分析，得到下列公式：

$$\text{Log}(L) = 1.436 + 0.090\text{Log}V - 0.062 \tan S_0 \quad (R=0.86) \quad \text{式 3}$$

其中， $L$ ：土石堆積長度(m)； $V$ ：河道溢流土石量(m<sup>3</sup>)； $S_0$ ：溪床平均坡度。

而與池谷浩公式推估之溢流土石堆積長度與調查值平均高估約 4 倍左右，而推估值在嘉義縣竹崎鄉塘興村嘉縣 DF015 則與莫拉克颱風事件幾乎相同，在台南縣東山鄉南勢村南縣 DF023 與雲林縣古坑鄉華山村雲縣 DF002 則有明顯高估，詳表 5 所示。

於分析過程中，發現台南縣六甲鄉大丘村南縣 DF028 之災害紀錄對於整個研究區域以及統計分析產生相當大的誤差，由於南縣 DF028 集水區較屬於上游沖蝕溝，後續若針對沖蝕溝

類型，可進一步探討其土石流出經驗式。

表 4 本研究區現調之土石流出量與謝正倫(2000)推估值之比較

項次	溪流編號	有效集水區 $A_c(m^2)$	事件日期	河道斷面 $A_R(m^2)$	降雨量 $I_{24}(mm)$	單壓強度 $\sigma(kg/cm^2)$	調查溢流量 $V(m^3)$	謝式推估值 $(m^3)$	本研究推估值
1	南縣 DF023	129,200	2009/8/8	6.0	1088.5	250	11,000	20,374	7,164
2	南縣 DF024	495,100	2009/8/8	30	1088.5	250	8,700	46,235	10,955
3	嘉縣 DF036	2,918,300	2009/8/8	24	1123	500	54,333	136,439	35,184
4	嘉縣 DF017	2,478,500	2009/8/8	21	790.5	250	12,300	49,189	14,460
5	嘉縣 DF015	2,237,900	2009/8/8	30	790.5	50	7,000	116,041	5,226
6	嘉縣 DF009	1,156,300	2009/8/8	16	653.5	250	28,740	77,568	21,190
7	嘉縣 DF012	848,000	2009/8/8	30	653.5	250	30,000	43,766	15,752
8	嘉縣 DF007	4,210,100	2009/8/8	52.5	495.5	250	15,000	170,619	39,429
9	雲縣 DF002	2,693,400	2009/8/8	24	230.5	250	120,000	129,925	61,600
10	南縣 DF019	117,700	2008/7/18	4.0	671	250	9,500	19,248	10,084
11	南縣 DF017	255,100	2008/7/18	6.0	671	250	5,175	30,853	12,877
12	南縣 DF016	555,600	2008/7/18	10	671	250	11,577	49,604	16,470
13	南縣 DF018	150,600	2008/7/18	11.25	671	250	12,000	22,371	10,901
14	嘉縣 DF035	4,709,300	2008/7/17	45	383	100	18,000	182,689	21,648

表 5 本研究現調之土石流堆積長度與池谷浩公式推估值之比較

項次	溪流編號	調查溢流量 $V(m^3)$	溪床平均坡度 $S$	現調堆積長度(m)	災害範圍 $(m^2)$	池谷浩推估值(m)	本研究推估值(m)
1	南縣 DF023	11,000	39	90	8200	822	97
2	南縣 DF024	8,700	34	110	5800	569	127
3	嘉縣 DF036	54,333	12	325	12340	597	249
4	嘉縣 DF017	12,300	16	200	8249	369	178
5	嘉縣 DF015	7,000	11	200	3500	242	163
6	嘉縣 DF009	28,740	16	200	19160	527	212
7	嘉縣 DF012	30,000	20	200	11670	607	208
8	嘉縣 DF007	15,000	11	220	5000	334	191
9	雲縣 DF002	120,000	14	240	30000	898	290
10	南縣 DF019	9,500	40	90	3784	836	82
11	南縣 DF017	5,175	36	90	3450	501	104
12	南縣 DF016	11,577	29	90	3859	534	153
13	南縣 DF018	12,000	38	150	7756	797	109
14	嘉縣 DF035	18,000	15	200	13300	419	194



## 五、謝誌

本研究特別感謝所有參與「98年莫拉克颱風後土石流潛勢地區易致災因子調查」案相關人員，中興社大地工程研究中心以及水保局土石流防災中心簡志凱、楊永祺工程員等。

## 參考文獻

1. Franklin, J. A., (1975) Safety and Economy in Tunneling. Proc. 10th Can. Rock Mech. Symp., pp. 27- 53, Queens Univ. , Kingston, Canada,
2. ISRM, 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring, ISRM suggested methods. ed. E.T. Brown. publ. Pergamon Press, Oxford, pp. 211.
3. Miller, Daniel J., Burnett, Kelly M. (2008), "A probabilistic model of debris-flow delivery to stream channels, demonstrated for the Coast Range of Oregon, USA, " *Geomorphology* 94, 184-205.
4. Mukhlisin, M., (2007) "Travel distance and extent deposition of motion of debris flow as effect of soil porosity", *Wahana Teknik Sipil* Vol. 12 No. 1 April 2007: 24-41.
5. Takahashi, T.(1977), "A Mechanism of Occurrence of Mud-Debris flow and Their Characteristics in Motion." *Annuals, Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto University*, No. 20B-2, pp. 405-435 (in Japanese).
6. 中央地質調查所(2006) 都會區及周緣坡地環境地質資料庫圖集。
7. 中興工程顧問股份有限公司 (2008), 「重大土石災區即時現勘與整治對策研擬」, 行政院農業委員會水土保持局委託成果報告。
8. 水土保持局, 行政院農業委員會水土保持局全球資訊網。上網日期: 2010.06.30、網址: <http://www.swcb.gov.tw/>。
9. 李明熹(2006), 土石流發生降雨警戒分析及其應用, 國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
10. 池谷浩、水山高久 (1982), 「土石流の流動と堆積に関する研究」, 土研報, 第 157 號, pp.88~153。
11. 財團法人中興工程顧問社 (2009), 「98年土石流潛勢地區易致災調查與危害頻率分析」, 行政院農業委員會水土保持局委託成果報告。
12. 財團法人中興工程顧問社 (2010), 「98年莫拉克颱風後土石流潛勢地區易致災因子調查」, 行政院農業委員會水土保持局委託成果報告。
13. 張東炯、謝正倫, 1996, 「東部蘭陽地區土石流現場調查與分析」, 中華水土保持學報, 第 27 卷第 2 期, 139~150 頁。
14. 詹錢登(2000), 土石流概論, 科技圖書股份有限公司出版。
15. 蔡元芳 (1998), 「土石流扇狀地形狀特性之研究」, 博士論文, 國立成功大學水利及海洋工程研究所。
16. 謝正倫(2000) 謝正倫(2000), 九二一震災系列調查(二)-土石流危險溪流調查計畫, 行政院農委會。
17. 謝正倫(2000), 土石流危險溪流調查與危險等級判定, 第二屆(2000)全國治山防災研討會。

## ABSTRACT

The most commonly used method for the estimation of the debris flow deposition length is the Takahashi empirical formula. Compared with the filed investigation, the estimated value from Takahashi empirical formula often overestimated 3 times. To further understand the influence factor of the debris flow deposition length, both the geomorphologic parameter (slope and watershed area) and the rainfall factor are considered for the regressed analysis. Results show that the relationship between the deposited volumes of debris flow and rainfall factor can be established through the Morakot disaster inventory. The error can be reduced efficiently.

**Keywords:** debris flow, deposited volumes, Takahashi formula, runout distance, rainfall