計畫編號：SWCB-106-054

以崩塌面積與頻率關係推估集水區土砂生產量之研究

Basin sediment budget estimation using landslide area-frequency relationship

執 行 單 位：國立嘉義大學土木與水資源工程學系

執 行 期 間：106 年 02 月 20 日至 106 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：陳建元 教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 106 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）


行政院農業委員會水土保持局
Soil & Water Conservation Bureau, COA

以崩塌面積與頻率關係推估集水區土砂生產量之研究

摘要

近年來全球氣候變遷，造成更多的天然災害，台灣因地質環境屬活動較頻繁之板塊交界帶，容易產生地震，因地理位置較特殊，容易受到颱風之影響，造成崩塌事件頻傳。崩塌所產生之大量土石會造成水庫淤積更迅速，也會減少水庫的壽命，對人民的生活產生許多不便。

因此本研究針對 2008 年至 2012 年間颱風對石門水庫集水區所產生之崩塌地進行密度探討。利用地理資訊系統 ArcGIS 對三個不同颱風降雨事件造成崩塌的 LiDAR 製作地形高程進行套疊相減以估計正確崩塌土方量，並依崩塌滑動土層厚度比較進行討論，建立崩塌滑動體積的評估公式，作為集水區簡易崩塌土方量推估的依據。

研究結果顯示，研究區域雖然同在石門水庫集水區但屬不同颱風降雨事件，所回歸之崩塌面積與崩塌體積關係卻不相同，而崩塌體積在大型崩塌時，利用回歸公式估計會有高估的現象產生。本研究將崩塌依不同滑動深度進行分析，再對較淺崩塌面積以 1,000m^2 分段，可以更準確的回歸出崩塌面積與崩塌體積之關係式，並嘗試利用崩塌頻率與崩塌面積之關係式利用上述回歸公式推估集水區崩塌土方量。

關鍵詞：崩塌面積、崩塌體積、崩塌規模、頻率分析、石門水庫

Basin sediment budget estimation using landslide area-volume scaling relationship

Abstract

Landslides reduce reservoir life as they produce large quantities sediments and rock deposits. The relationship of area and volume of landslides at Shihmen Reservoir Watershed in 2009 to 2012 were studied. The methodologies include geomorphology analysis by LiDAR produced digital elevation models (DEMs) before and after three landslide events using GIS spatial analysis. The project formulates regression equations for landslide area and volume from the changes of DEMs. Results of the analysis show that the regression equations for landslide area and volume are different at the watershed and landslide volume estimation by its average depth can improve the precision of estimation. Regression equations by different slip depths are proposed to avoid miss estimating volumes of landslides. Landslides are also separated by area for smaller and larger than 1,000 m^2. Landslide volume is also estimated by the landslide frequency-area distribution. The proposed equations can be used to estimate landslide volume using a simple landslide area-volume scaling relationship with reasonable results and for landslide induced sediment budget planning.

Keywords: Landslide, Landslide area-volume scaling relationship, Shihmen reservoir watershed

目次

摘要.....**I**

Abstract.....**II**

目次.....**III**

表次.....**V**

圖次.....**VI**

第一章　緒論.....**1-1**

第一節　崩塌類型與影像判釋.....1-1

第二節　崩塌規模與頻率關係.....1-6

第三節　崩塌面積與體積關係.....1-7

第四節　崩塌土層厚度估計.....1-10

第五節　崩塌土方量估計方法.....1-12

第二章　工作執行方法與步驟.....**2-1**

第一節　工作執行方法.....2-1

第二節　研究區域.....2-4

第三章　結果與討論.....**3-1**

第一節　研究成果.....3-1

第二節　討論與驗證.....3-34

第三節　以崩塌面積-頻率關係推估崩塌體積.....3-42

第四章　工作進度與交付項目.....**4-1**

第一節　計畫甘特圖.....4-1

第二節　計畫交付項目.....4-2

第五章　結論及建議.....**5-1**

第一節　結論.....5-1

第二節　建議.....5-2

參考文獻.....參-1

附錄.....附錄-1

附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附錄-1

附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附錄-4

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

表次

表 1-1 崩塌分類表 1-2

表 1-2 各國深層崩塌的定義 1-5

表 1-3 崩塌面積與土壤厚度關係表 11

表 1-4 國內外回歸之崩塌體積與面積經驗公式 1-14

表 3-1 現地調查人工手鑽邊坡坡度與土層厚度關係(1/4) 3-6

表 3-1 現地調查人工手鑽邊坡坡度與土層厚度關係(2/4) 3-7

表 3-1 現地調查人工手鑽邊坡坡度與土層厚度關係(3/4) 3-8

表 3-1 現地調查人工手鑽邊坡坡度與土層厚度關係(4/4) 3-9

表 3-2 本研究與相關文獻崩塌頻率與體積關係式 3-18

表 3-3 崩塌面積與平均滑動深度比較表 3-38

表 3-4 崩塌面積-頻率關係推估崩塌體積結果 3-43

表 3-5 本研究估計崩塌體積與大規模崩塌案例體積之差異比較 .. 3-46

圖次

圖 1-1 崩塌破壞型式..... 1-3

圖 1-2 崩塌地相似特性圖 1-8

圖 1-3 義大利 UMBRIA 地區崩塌體積與面積之關係圖..... 1-9

圖 1-4 土體滑動之坡度與土壤厚度之關係示意圖 1-11

圖 1-5 發生崩塌及未發生崩塌風化層厚度與平均坡度關係圖 1-12

圖 2-1 沖刷區與堆積區示意圖 2-3

圖 2-2 研究範圍位置圖 2-6

圖 2-3 研究區域圖..... 2-7

圖 3-1 石門水庫集水區行政區界圖 3-2

圖 3-2 石門水庫集水區土地分區圖 3-3

圖 3-3 石門水庫集水區農委會公佈 1705 條土石流潛勢溪流分佈圖

..... 3-4

圖 3-4 石門水庫集水區地質分布圖 3-5

圖 3-5 人工手鑽調查邊坡坡度與土層厚度關係圖 3-10

圖 3-6 案例一 2009 年間崩塌區域與高程變化圖 3-12

圖 3-7 案例一 2009 年間崩塌面積、體積與次數關係圖 3-13

圖 3-8 案例二 2010-2011 年間崩塌區域與高程變化圖..... 3-14

圖 3-9 案例二 2010-2011 年間崩塌面積、體積與次數關係圖..... 3-15

圖 3-10 案例三 2011-2012 年間崩塌區域與高程變化圖 3-16
圖 3-11 案例三 2011-2012 年間崩塌面積、體積與次數關係圖 3-17
圖 3-12 案例一 2009 年間崩塌面積與頻率關係圖 3-19
圖 3-13 案例一 2009 年間崩塌體積與頻率關係圖 3-20
圖 3-14 案例二 2010-2011 年間崩塌面積與頻率關係圖 3-21
圖 3-15 案例二 2010-2011 年間崩塌體積與頻率關係圖 3-22
圖 3-16 案例三 2012-2011 年間崩塌面積與頻率關係圖 3-23
圖 3-17 案例三 2012-2011 年間崩塌體積與頻率關係圖 3-24
圖 3-18 案例一至案例三共同區域非累積崩塌頻率與面積關係圖 3-25
圖 3-19 案例一至案例三共同區域非累積崩塌頻率與體積關係圖 3-26
圖 3-20 案例一 2009 年間崩塌面積與體積關係圖 3-27
圖 3-21 案例二 2010-2011 年間崩塌面積與體積關係圖 3-28
圖 3-22 案例三 2011-2012 年間崩塌面積與體積關係圖 3-29
圖 3-23 案例一 2009 年間淺層與深層崩塌面積與體積關係圖 3-31
圖 3-24 案例二 2010-2011 年間淺層與深層崩塌面積與體積關係圖
..... 3-32
圖 3-25 案例三 2011-2012 年間淺層與深層崩塌面積與體積關係圖
..... 3-33
圖 3-27 案例一 2009 年間不同地質區崩塌面積與體積關係圖 3-34
圖 3-28 案例二 2010-2011 年間不同地質區崩塌面積與體積關係圖

..... 3-35

圖 3-29 案例三 2011-2012 年間不同地質區崩塌面積與體積關係圖

..... 3-36

圖 3-30 案例一 2009 年間不同地質區崩塌面積與體積關係圖 3-37

圖 3-31 石門水庫集水區三個不同時期之崩塌體積與面積之回歸方程式比較..... 3-39

圖 3-32 石門水庫集水區三個不同時期之深層崩塌(滑動深度超過 2M)之崩塌體積與面積之回歸方程式比較 3-40

圖 3-33 國內外崩塌面積與體積關係式比較 3-41

圖 3-34 崩塌面積-頻率關係推估崩塌體積計算流程圖 3-42

圖 3-35 崩塌面積與體積關係式與國內大規模崩塌體積估計公式比較

..... 3-45

圖 4-1 本計畫研究進度甘梯圖 4-1

第一章　緒論

台灣總面積約為三萬六千平方公里，山坡地佔總面積 73.81%，約為台灣的三分之二，造成需要大量的開發坡地等問題。近年來全球氣候異常，各地災害頻傳，而過度的開發坡地使台灣的邊坡災害頻繁，危害人民生命財產安全，所以山坡地的使用及保護為重要課題之一。

本研究評估崩塌面積與崩塌體積之關係與其特性，再判斷崩塌體積與發生之頻率關係，藉由崩塌面積與崩塌土層厚度可以用來估計其崩塌體積，並以石門水庫集水區作為研究區域，利用數值高程取得其崩塌面積與崩塌體積，再對其關係進行分析。

第一節　崩塌類型與影像判釋

目前崩塌的分類並沒有統一標準，但目前最廣為大部份學者接受的分類方法是根據崩塌的運動型態與材料類型分為:墜落、傾覆、滑動、側滑、流動與複合式運動等六類(Varnes, 1978)，如表 1-1 及圖 1-1 所示。

表 1-1 崩塌分類表(Varnes, 1978)

塊體移動之型態 (Type of Movement)		塊體移動物質之種類		
		岩盤 (Bedrock)	工程土壤(Engineering Soils)	
			粗粒為主	細粒為主
墜落 (Falls)		岩石墜落 (Rock Fall)	岩屑墜落 (Debris Fall)	土墜落 (Earth Fall)
傾覆 (Topples)		岩石傾覆 (Rock Topple)	岩屑傾覆 (Debris Topple)	土傾覆 (Earth Topple)
滑動 (Slides)	轉動 (Rotational)	岩石崩移 (Rock Slump)	岩屑崩移 (Debris Slump)	土崩移 (Earth Slump)
	移動 (Translational)	岩塊滑動 (Rock Block Slide) 岩石滑動 (Rock Slide)	塊岩屑滑動 (Debris Block Slide) 岩屑滑動 (Debris Slide)	土塊滑動 (Earth Block Slide) 土滑動 (Earth Slide)
側落 (Lateral Spreads)		岩石側落 (Rock Spread)	岩屑側落 (Debris Spread)	土側落 (Earth Spread)
流動 (Flows)		岩石流動 (Rock Flow)	岩屑流動 (Debris Flow)	土流動 (Earth Flow)
複合運動 (Complex)		複合兩種或兩種以上之運動方式		

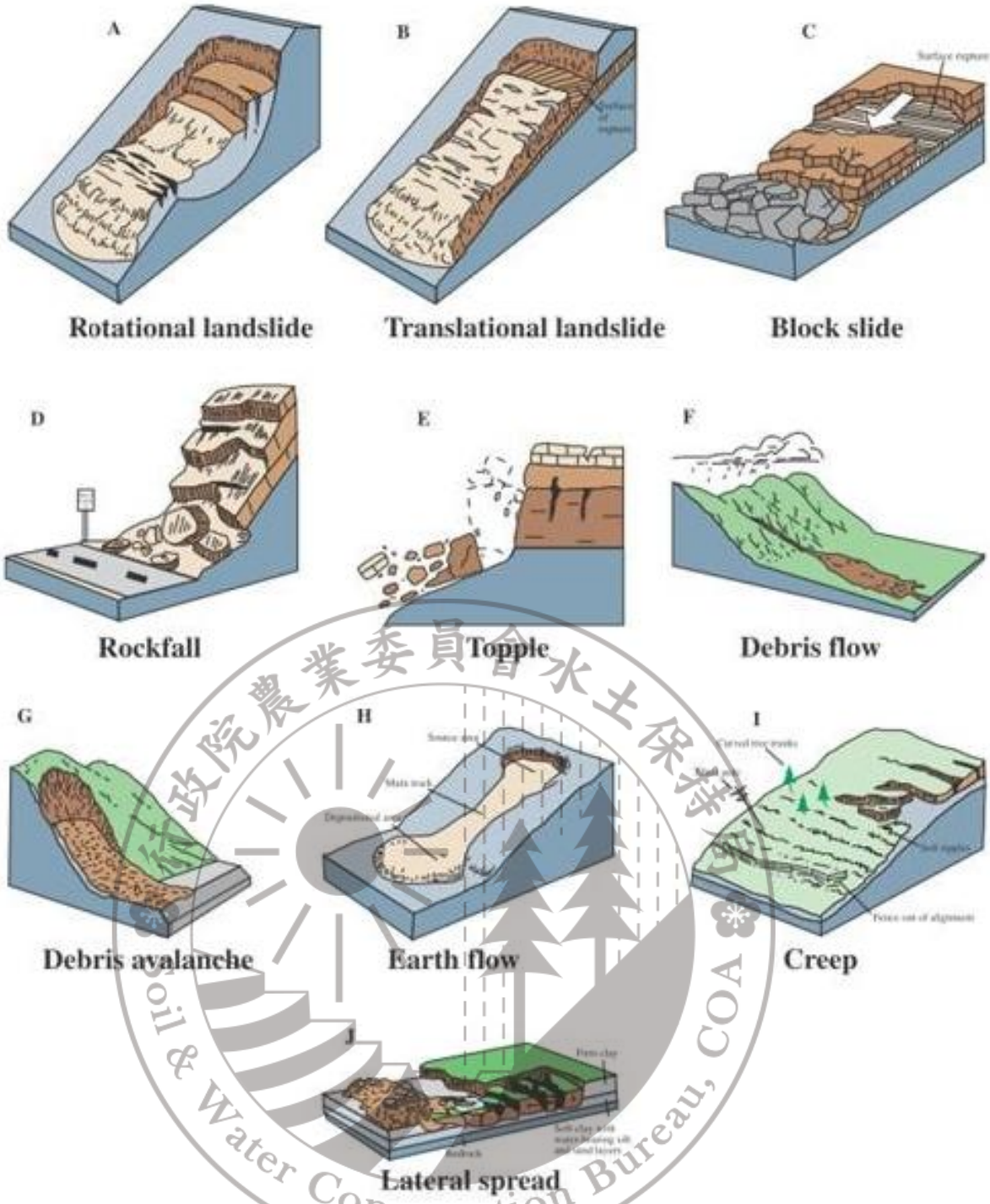


圖 1-1 崩塌破壞型式(Varnes, 1978)

崩塌可根據其滑動深度分為深層與淺層崩塌，淺層崩塌為表土的崩落，而深層崩塌一般以落石的方式崩落（池谷浩，1980）。各國深層崩塌的定義如表 1-2，台灣地質調查所定義深層崩塌的滑動面積常大於 1 公頃、平均厚度約為 5～10m，坡面長 100m 的斜面崩落、深

度約在 5 公尺以上且崩塌土砂量約為 10,000m^3。美國則定義為深度大約於 1.8～3.0m 的崩塌。Van Asch et al. (1999）進行降雨型崩塌地之研究發現，降雨後所造成的淺層崩塌深度約為 1～2m，係降雨後土壤水飽和導致土體抗剪強度下降所造成。深層崩塌深度約為 5~20m。根據「國有林地崩塌處理」報告(黃宏斌，2009)中指出，一般台灣淺層及深層崩塌以崩塌深度 2m 為判別基準，深度在 2m 以內認定為淺層崩塌；深度在 2m 以上為深層崩塌。

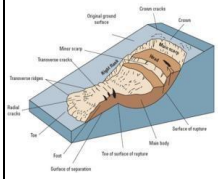
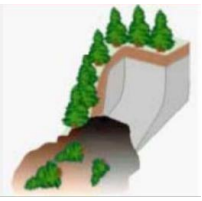
雖然各國對於深層崩塌的滑動深度定義不同，但仍共同可歸類出，若崩塌材料牽涉到底岩岩盤時，則可認定為深層崩塌，又根據 Larsen et al. (2010)分析世界多處的崩塌資料，發現許多滑動土壤與底岩型崩塌的深度相似。因此，相同深度的崩塌地（0.1～10m）也可能為土壤型或底岩型崩塌。所以，藉由崩塌材料類型的判釋，較符合崩塌的物理性質，亦符合 Varnes (1978)的崩塌分類。

王雁平(2008)針對石門水庫集水區之三光村、秀巒村及玉峰村做現地調查 48 個崩塌地，依其特性和崩塌機制可分為土量多且未崩至岩層、崩至岩層、順向坡崩塌及表層崩塌等四類，其中第一類屬深層圓弧型崩塌，以至於崩塌深度會隨著面積增大而變深，而其他三類崩塌地上方的風化層土砂量較少或已崩至堅硬岩層。

崩塌地面積判釋對於大範圍地區室內坡地災害調查較常用的方法則是使用衛星影像自動判釋崩塌地，相較於人工的判釋方法，自動分析使用明確的判釋準則，使得成果具有相當的一致性，可在短時間內處大範圍的資。與傳統採用之航照判釋相較，雖航照影像之解析（航照約 50cm，福衛二號全色態影像可達 2 公尺）較高，然而人工耗時費且所需成本較高。由於本計畫為研究型，因此將採精確度較高之人

工判釋加災、前後 DEM 高程差異處為崩塌地之範圍。

表 1-2 各國深層崩塌的定義(陳樹群，2010)

單位	台灣地質調查所	台灣水土保持局	日本	美國
移動物質	基岩	不考慮移動物質	岩盤	高密度崩積土或獨立岩石移動
示意圖		-		
坡地災害名稱 (法規) (深層)	-	崩塌/地滑/土石流(水土保持法)	急傾斜地の崩壊、土石流、地すべり、河道閉塞による湛水(土砂災害防止法)	Landslide (deep-seated landslide)
大規模定義	滑動面積常在 1 公頃以上、平均厚度約為 5~10m 以上、規模滑動深度較深	-	大面積崩落，為坡面長、寬皆 100m 的斜面崩落、深度約在 5m 以上、崩塌土砂量約 $105m^3$	深度大於 1.8~3.0m

第二節　崩塌規模與頻率關係

Bak et al. (1987)提到地震規模與發生頻率關係的乘冪是自組織臨界性（self-organized criticality）的結果，而自組織臨界性最著名的例子為砂錐模型(Bak et al., 1987)，其出現的可能特徵為系統內某一現象的事件大小與其頻率之間呈現冪函數關係。其中自組織臨界態為大量相互作用成分組成的系統會自然地向自組織臨界態發展，當一系統達到自組織臨界態的現象時，即使小的干擾事件也可能引起發生一系列變化。根據許多學者的研究顯示，地震與山崩的規模與頻率關係符合冪次定律(power law)。此外，河岸的崩塌規模與頻率亦呈冪次定律分布(Fonstad and Marcus, 2003)。隨著這些相關理論的研究與應用，自組織臨界態觀點可應用於建立集水區災後狀況評估指標以判別集水區現況及臨界指標的建立(Chen, 2009)。

Bak et al. (1987)提到冪次行為是自組織臨界性的結果，即為砂錐模型。並以砂錐模型推求崩塌面積與累積出現頻率關係符合冪次定律(power law)，如(1-1)式

$$-N_L=\gamma A_L^{-\alpha} \tag{1-1}$$

其中 N_L 為崩塌累積個數，A_L 為崩塌面積，γ、α 為常數。而為了比較砂錐模型與真實崩塌，許多研究將崩塌發生規模與頻率，轉換為非累積統計，定義非累積分佈即為累積分佈的微分取負值，如式(1-2)所示(Crosta et al., 2003)。

$$-N'_L = - dN_L/dA_L = \alpha\gamma A_L^{-(\alpha+1)} \tag{1-2}$$

根據 Bak et al. (1988)，Pelletier et al. (1997)，Crosta et al. (2003)及 Turcotte and Malamud (2004)研究顯示，崩塌地的規模與頻率關係符合乘冪定律，其關係式如下(1-3)式:

$$N_L = - dN_L/dV_L = \alpha\gamma V_L^{-(\alpha+1)} = C'V_L^{-\beta} = f(V_L) = N_{tot}P(V_L) \tag{1-3}$$

V_L 為崩塌地體積，N_L 代表大於該體積的崩塌地累積個數。於(1-3)式的 C'及 β 皆為待定參數，被認為與崩塌誘因、地形特性及崩塌歷史相關，也可反映在該場崩塌研究事件中，及大崩塌及小崩塌所佔比例何者為多(Weissel et al., 2001)。其中 $C'=\gamma\times\alpha$，表示崩塌面積頻率雙對數曲線之截距；β 為次方係數且 $\beta=\alpha+1$，表示崩塌面積頻率雙對數曲線之直線段斜率，由於區域性環境條件的差異性，而有所不同。

第三節　崩塌面積與體積關係

一、崩塌體積形貌特徵關係

國際上有許多研究皆指出崩塌有自我相似的特性(self-similar behavior)，陳樹群(2005)利用颱風前期 DEM 與後期光達資料分析不同崩塌坡度可能引發之崩塌深度，Guzzetti et al. (2009)研究義大利 Umbria 地區之崩塌地，皆發現崩塌地面積與體積呈現冪次關係，意指大面積之崩塌與小面積之崩塌形狀相似，因此可藉由此假設推導出崩塌面積與體積之關係式。如圖 1-2 所示兩個不同大小，而形狀相似之三角形的崩塌地，圖 1-2 左為小崩塌地的長軸、短軸與最大深度分別為 l、w、d；則圖 1-2 右的大崩塌的長軸、短軸與最大深度分別為 n_l、n_w、n_d。因自我相似的特性，崩塌的長、寬和深度相互成正比，則崩塌面積的 0.5 次方與深度成正比，而崩塌體積又等於其面積與深度的乘積，因此在崩塌呈現完整的自我相似的特性時，崩塌體積與其面積的 1.5 次方成正比(Hovius et al., 1997).，如式(1-4)、(1-5)、(1-6)。

$$d\propto l,\ d=\varepsilon_1\cdot l \tag{1-4}$$

$$d\propto A^{0.5},\ d=\varepsilon_2\cdot A^{0.5} \tag{1-5}$$

$$V_L=l\cdot w\cdot d=A\cdot d=\varepsilon_2\cdot A^{1.5} \tag{1-6}$$

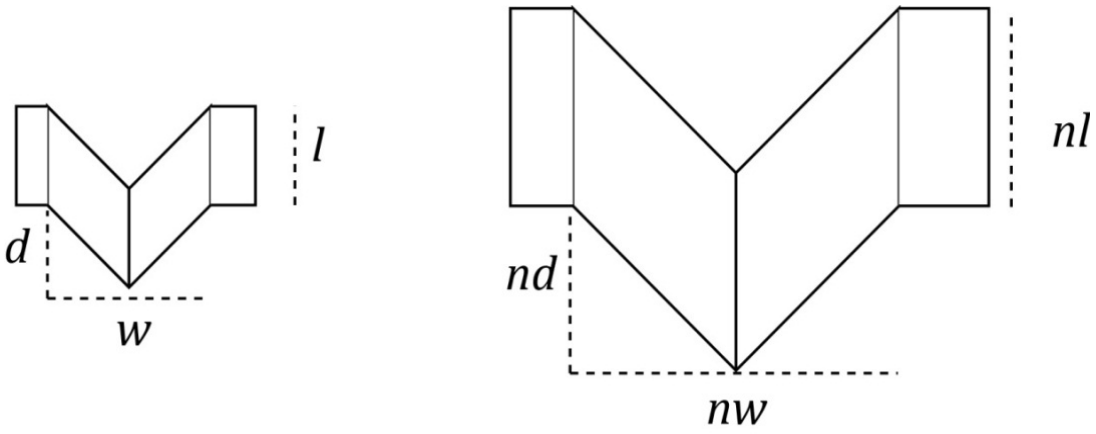


圖 1-2 崩塌地相似特性圖(Hovius et al., 1997)

其中，V_L 為崩塌體積(m^3)、l 為崩塌長度(m)、w 為崩塌寬度(m)、d 為崩塌深度(m)、A 為崩塌面積(m^2)、ε 為率定係數。

Hovius et al. (1997)發現崩塌地各大小與其發生頻率呈現冪次關係(power law)，該研究定義崩塌面積與崩塌累積個數間之關係式，應用於推估紐西蘭南阿爾卑斯山與台灣東部山脈內之崩塌地土砂產量，認為崩塌的深度與長軸的長度相關，因此崩塌深度(t)可以表示為：$t(l)=\varepsilon \cdot l$。其中，l 為崩塌長軸的長度(m)、ε 為率定係數，在南阿爾卑斯山之 $\varepsilon=0.05\pm0.02$。

二、崩塌面積與體積關係

陳毅青(2012)研究台灣石門水庫集水區、曾文水庫集水區及高屏溪流域在 24 場颱風事件的崩塌規模與頻率關係，研究顯示崩塌體積(V_L)與面積(A_L)呈冪次關係，並因為地質分佈不同，將台灣分為北部地區與南部地區，關係式為 $V_L=0.517\times A_L^{1.077}$ 與 $V_L=0.202\times A_L^{1.268}$。

許多研究已證實崩塌規模與頻率的關係式具有物理意義，關係式的係數受到崩塌類型或土壤特性不同而有所改變，微小的改變將會導致很大的誤差，因此在使用上需特別注意區域性的差異與其不確定

性。

Guzzetti et al. (2009)研究義大利 Umbria 地區之崩塌地，發現崩塌地面積與體積呈現冪次關係，關係式為 $V_L=0.047\times A_L^{1.45}$，相關係數為 0.97，冪次定律指數為 1.45，如圖 1-3，並且與世界各國研究結果比較，發現崩塌面積與體積關係式的趨勢相似。部分微小的差異是因為樣本數目與採樣的崩塌面積不同，導致係數有些微差異，認為該係數與集水區地文因子相互獨立。

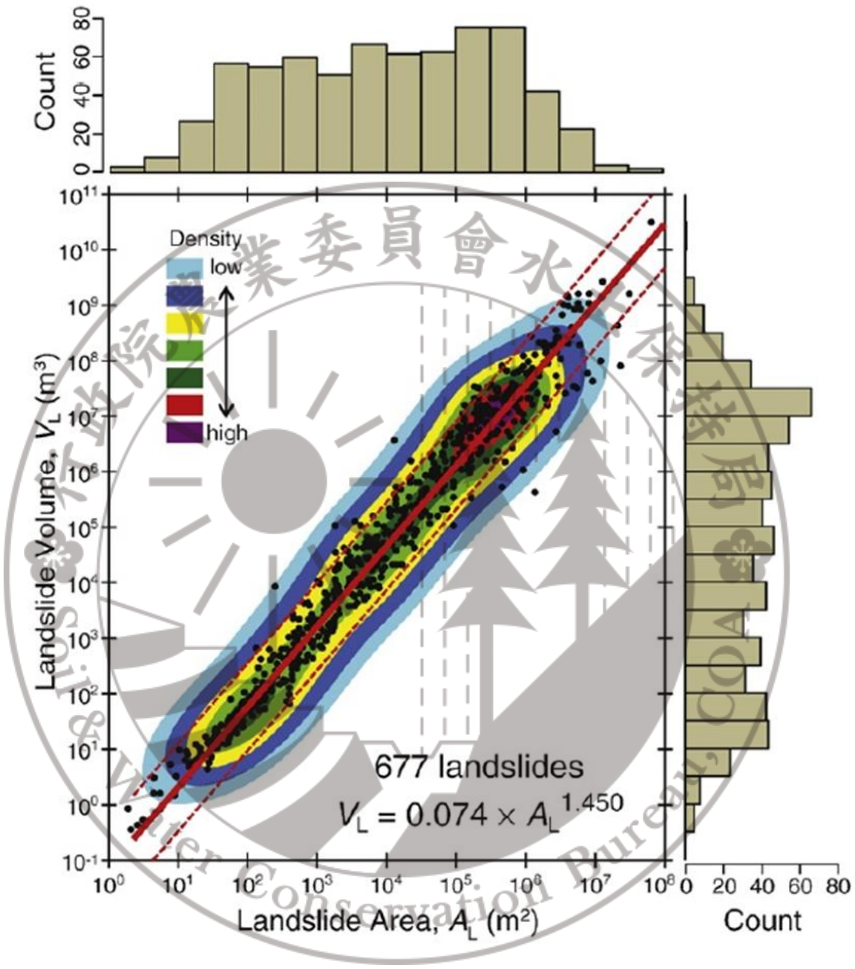


圖 1-3 義大利 Umbria 地區崩塌體積與面積之關係圖

(Guzzetti et al., 2009)

第四節 崩塌土層厚度估計

邊坡坡度與可移動土層厚度估計，目前可採用等值法、力學法、面積法或坡度法進行邊坡可移動土層厚度估計。

(一) 等值法

將土壤厚度等值均化，假定為定值，目的為求簡易快速估算，尚無法考量崩塌地規模與崩壞程度，及反應不同地形變化差異。石門水庫管理局於 1968 年至 1976 年間委託林務局農林航空測量隊於石門水庫集水區崩塌地調查，調查方式係以衛星影像為主，配合航空照片及野外調查為輔，並將歷年崩塌深度與坡度調查成果統計彙整。

(二) 力學法

此法則是利用邊坡崩塌塊體之力平衡概念，用以反推土壤厚度值。Dymond et al.（1999）當邊坡發生滑動時，土體剪應力（$F_g = \rho g \sin\theta$）與抗剪強度（$F_s=S/h$）應為相等（如圖 1-4），故土壤厚度（h）與坡度（θ）之關係式可建立如下(1-7)式：

$$h = S/(\rho g \sin\theta) \qquad (1\text{-}7)$$

(三) 面積法

此法係為災害事件前後衛星影像之判釋崩塌地圖層結合數值地形模型（DEM），並將崩塌面積規模加以分區，計算其土壤平均厚度。中央地調所根據全台灣過往崩塌案例，考量崩塌規模與土壤厚度之關係，建議崩塌面積與土壤厚度關係，如表 1-3。此法僅適用於大尺度流域，應用小型集水區崩塌量估算有過度高估之現象（水土保持局，2009）。

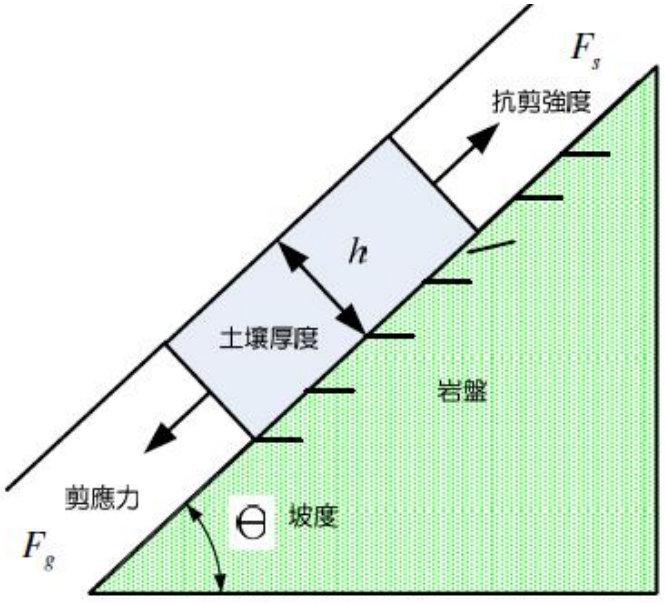


圖 1-4 土體滑動之坡度與土壤厚度之關係示意圖

(中興工程顧問，2011)

表 1-3 崩塌面積與土壤厚度關係表（中央地質調查所）

崩塌面積(ha)	土壤平均厚度(m)
0-0.1	1.0
0.1-1	2.0
1-10	5.0
>10	10.0

(四) 坡度法

此法則是利用坡度分區或坡度回歸經驗式，推估土壤厚度，為目前廣為採用經驗式類型(圖 1-5)。Iida and Okunishi（1983）針對日本愛知縣崩塌地研究發現，認為若崩塌地分布之邊坡太緩，因無法產生足夠之剪力促發崩塌之現象；反之，若太陡峭的邊坡，則因表層風化

層太薄，因無法產促崩力量，亦不會發生崩塌，意指淺層崩塌必定發生於某一特定坡度區間內。

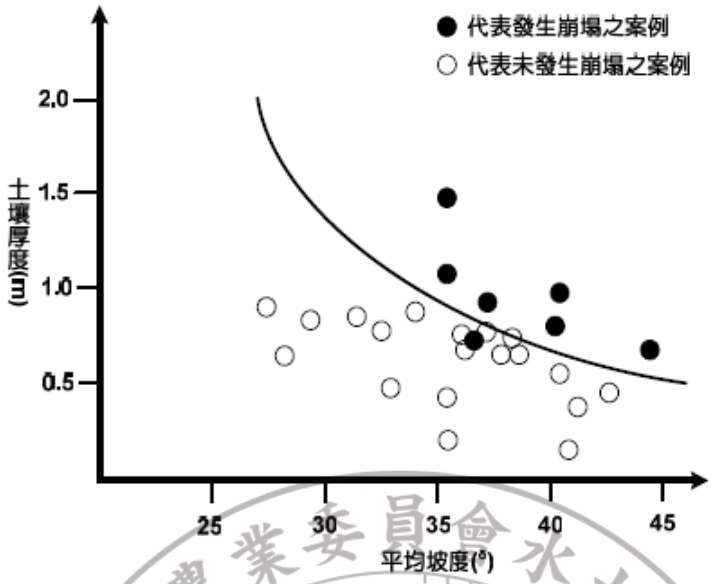


圖 1-5 發生崩塌及未發生崩塌風化層厚度與平均坡度關係圖

(中興工程顧問，2011)

第五節 崩塌土方量估計方法

空載光達（Light Detection and Ranging，LiDAR）是藉由儀器發射一束脈衝雷射對測量目標進行掃描，得到並紀錄距離等參數。空載光達主要包含定位定向系統、雷射掃描儀及控制器等三個部分，其中雷射掃描儀固定於飛行載具上，以每秒高達 60,000~150,000Hz 的頻率由空中向地面發射雷射光束，並記錄脈衝雷射波之發射角度及接收之時間差與回波，轉換為量測之距離與反射之強度。每一次掃描接建立雷射掃描儀至地面反射點之空間向量，整合飛行過程之距離、位置、座標等資料，進而描繪出地面投影之三維座標。

由於空載光達訊號具有“多重反射（multiple echoes）”能力，發

射單一脈衝最多能接收四個反射回波訊號，因此能同時量測獲得地表及樹頂甚至樹幹的點位。也因為空載光達有多重反射特性可提高準確率及穿透率，在垂直方向的準確度約 10~15 公分，水平方向的準確度則約 50~100 公分。也因雷射發射頻率可達每秒數萬次，所以可在很短的時間內收集到非常高密度的資料，這些資料可以呈現量測目標的微小變化，如山崩造成的 1~2 公尺的微小地形落差，故可廣泛應用於各類地形調查、量測。但應用空載光達技術量測地表所得之反射回訊，獲得三維座標的量測值後，其量測值包括了地形面以及非地面兩種量測值(如建物、樹木植披)。為了產製數值地形模型（Digital Terrain Model，DTM），地物的雷射量測點需進一步過濾或分類出來，留下地形面的雷射量測點，進而繪製成數值地形模型，惟過濾山區的植被量測點，應避免過份平滑濾除，導致地形特徵如山脊、裂隙等無法真實呈現(彭淼祥，2005)。

而藉由空載光達技術，本研究採用目標區域空載光達高精度數值所產製之數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)進行分析，並利用地理資訊系統(Geographical Information System, GIS)運算比對兩時期前後崩塌地之變化，進一步估計滑動土體的體積規模及滑動現象。目前在國土觀測紀錄、地質分析、水土保持、都市計畫、災害防治、森林資源調查等領域應用廣泛。中央地質調查所於 2013 年利用 LiDAR 觀測全台灣，是世界第三個以 LiDAR 完成國土掃描的國家。國內空載光達技術及應用於地形分析尚包括史天元等（2002）、顏宏宇（2005）、彭淼祥(2005)、黃紹東等(2008)、蕭震洋等(2009)、冀樹勇(2011)、風承甫(2015)、王鐘緯(2017)等。王晉倫（2009）利用空載光達技術產製之數值地形與判釋之崩塌地區域，並為評估溪流臨岸之土砂生產，建立可快速且準確運用之臨溪崩塌土砂運移經驗式。

由於 LiDAR 的觀測成本較高，目前已可利用無人載具(UAV 或 UAS)配合航空測量或軟體來進行 DEM 之產製(蘇柏軒等(2013)、陳靜茹等(2016))但仍有費時、費工且以小規模區域為主之缺陷。大規模及大區域集水區之土砂規模估計以過去崩塌資料所建立之經驗公式可提供快速且簡便之初期評估模式。表 1-4 列出國內外所提出之建議公式。

表 1-4 國內外回歸之崩塌體積與面積經驗公式

文獻	資料來源	A_L (m^2)	方程式 (V_L, m^3)
Guthrie and Evans (2004)	124 landslides	7.0×10^2~1.2×10^5	$V_L = 0.155 \times A_L^{1.09}$
Korup (2005)	23 large landslides	$> 1.0 \times 10^6$	$V_L = 0.00004 \times A_L^{1.95}$
Imaizumi and Sidle (2007)	51 shallow landslides	1.0×10^1~3.0×10^3	$V_L = 0.390 \times A_L^{1.31}$
Imaizumi et al. (2008)	11 landslides	5.0×10^1~4.0×10^3	$V_L = 0.190 \times A_L^{1.19}$
Griswold and Iverson (2008)	64 debris flows and 143 rock avalanches	1.0×10^2~1.6×10^9	$V_L = 0.011 \times A_L^{1.5}$
Guzzetti et al. (2008)	539 landslides	1.0×10^1~1.0×10^9	$V_L = 0.084 \times A_L^{1.43}$
Guzzetti et al. (2009)	677 landslides	2.0×10^0~1.0×10^9	$V_L = 0.074 \times A_L^{1.45}$
Larsen et al. (2010)	1,785 landslides	1.0×10^0~1.0×10^8	$V_L = 0.224 \times A_L^{1.26}$ (for soil-based) $V_L = 0.234 \times A_L^{1.41}$ (for bedrock)
Omidvar and Kavian (2011)	442 landslides	1.23×10^2~1.085×10^6	$V_L = 0.974 \times A_L^{1.18}$
Tseng et al. (2013)	371 landslides	1.1×10^2~2.0×10^5	$V_L = 0.452 \times A_L^{1.24}$
Hadian-Amri et al. (2014)	142 landslides	1.8×10^2~9.0×10^5	$V_L = 0.476 \times A_L^{1.24}$

第二章　工作執行方法與步驟

第一節　工作執行方法

一、GIS空間分析

地理資訊系統（GIS，Geographic Information System）為一門綜合性學科，結合地理學和地圖學，已經廣泛的應用在不同領域，是用於建立、匯入、查詢、製圖、分析和顯示地理數據的計算機系統。

ArcGIS 是 ESRI（Environmental Systems Research Institute, Inc.）公司所開發的地理資訊軟體，以功能區分為桌上型 GIS（Desktop GIS）、嵌入型 GIS(Embedded GIS)、伺服器型 GIS(Server GIS)及行動型 GIS(Mobile GIS)。其中 ArcGIS Desktop 提供了空間資料操作、分析的功能，如空間查詢與測量、疊圖分析、水文分析、網路分析和其他空間統計或是拓撲關係分析等，並俱備多種延伸模組，針對各種不同功能進行運用。可儲存大量的資料，並支援多種資料庫格式，轉換不同格式的圖檔，具有強大的地理空間資訊功能（張玉良，2011）。

本研究使用 ESRI 的 ArcGIS 10.0 版本。利用 GIS 的空間資料處理及 ArcMap 來分別針對石門水庫集水區的高程、崩塌地位置、崩塌地面積、崩塌地體積、崩塌深度、座標等資訊作統整分析。

(一) 空間資料處理

數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM）是以數值方式來儲存，即是以向量式或網格式的資料，表現地表的起伏，內容有橫坐標、縱座標和高程值，依空間地形的複雜度而改變解析度樣本點的取捨，地形崎嶇處的取樣較多，對地形劇烈變化的表示較佳。GIS 分析研究區域的 DEM 地形資料，能夠獲得流域的許多重要參數，包括坡度、

坡向、集水面積、水系密度、河道寬度量測及邊坡單元等。

本研究所使用之空載雷射掃瞄製作 5m×5m 數值地形資料如下:

(1).水土保持局(2009)，「石門水庫集水區高精度地形量測及地形貌變化歷程之研究」。主要為 2008 年薔蜜颱風造成風災前後之數值地形。

(2).水土保持局(2010)，「石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討」。主要為 2009 年莫拉克颱風造成風災前後之數值地形。

(3).水土保持局(2011)，「石門水庫集水區土砂災害歷程分析」。主要為 2010 年梅姬颱風造成風災後之數值地形。

(4).水土保持局(2012)，「石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估」。主要為 2011 年南瑪都颱風造成風災後之數值地形。

上述數值高程精度，因地面型光達精度優於 10 公分，空載光達對比於地面型光達之高程誤差量比對之平均差異量約介於 6 至 50 公分，隨坡度增加而差異越大(蕭震洋等，2009)。

本計畫以崩塌面積-頻率關係曲線推估集水區境內崩塌土方量模式建立，以上述步驟結合坡度與可移動土層厚度及崩塌面積-體積關係建立以崩塌面積-頻率關係曲線推估集水區境內不同滑動深度崩塌土方量模式，有別於傳統採單一回歸公式估計模式，並可藉由衛星影像之崩塌面積判釋即可藉由模式估計崩塌土方量。

(二) 地形分析

透過 ArcGIS 的空間分析功能，對 DEM 進行地理資料的處理，可獲得等高線、坡度用來表示地形的陡峭程度，坡度、坡向可以探討邊坡穩定的議題，曲率和剖面圖可以描述地形地貌特徵等。近年來

ESRI 發展 ArcGIS 空間分析功能，為網格數據和矢量數據提供豐富的空間分析和建模工具，例如常使用的距離分析（Distance）、密度分析（Density）、提取分析(Extraction)、水文分析(Hydrology)、表面分析（Surface Analysis），以及區域性空間統計（Zonal Statistics）等功能，藉由不同空間資料的分析，得到研究所需的結果和訊息，以應用在不同面向的空間相關研究。

二、崩塌地之判釋

利用 Surface Analysis 功能裡的 Cut/Fill 將石門水庫崩塌地在不同時期的 DEM 進行套疊，可分析出沖刷區與堆積區，如圖 2-1。以地形變化區範圍為崩塌地，並取沖刷區之土方量為崩塌地之土方量，再對此地區之崩塌資訊做進一步之分析。考量 LiDAR 製作 DTM 之精度與誤差，本計畫剔除平均崩塌深度小於 10cm，及面積小於 50m^2 之網格。

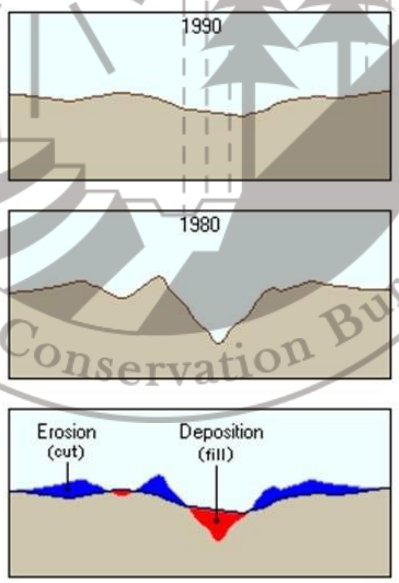


圖 2-1 沖刷區與堆積區示意圖(摘自 ArcGIS 網頁)

三、崩塌地之分析

根據 Guzzetti et al. (2009)與不同學者之研究分析出石門水庫集水區之崩塌面積與崩塌體積之關係，對崩塌體積與崩塌頻率之關係進行分析，討論深、淺崩塌對崩塌面積與崩塌體積之影響。可移動土層厚度估計本計畫採用等值法及坡度法進行邊坡坡度與可移動土層厚度估計。並利用水土保持局在石門地區之鑽孔資料，做坡度法與面積法之分析邊坡坡度與土層厚度關係。面積法係利用災害事件前後衛星影象之判釋崩塌地圖層結合數值地形模型（DEM），並將崩塌面積-規模加以分區，計算其土壤平均厚度。坡度法則是利用坡度分區或坡度回歸經驗式，推估土壤厚度，為目前較廣為採用經驗式類型。

第二節　研究區域

本研究區域位於石門水庫集水區，地理位置居於東經 120^{o} 10'15" ~ 121^{o} 23'10"，北緯 24^{o} 25'45"~24^{o} 51'20"之間，總集水區面積約 763.4 平方公里，屬淡水河支流大漢溪上游集水區，內轄桃園縣復興、大溪、龍潭、新竹縣尖石、關西、五峰、及宜蘭縣大同鄉等行政鄉鎮為主要區域界限。區域內之地形地勢均為山岳地帶，地勢起伏由海拔 135m（石門水庫壩址）變化至 3,500m，以南端之品田山為最高，全區地形自東南向西北傾斜，而呈南北向之狹長腰形。

石門水庫集水區面積 760 平方公里，海拔高程從 3,524 公尺的品田山至大壩 225 公尺，平均坡度約 30.5 度，年平均雨量約 2,400 毫米，其中約 70%集中在五月至九月的夏半季(經濟部水資源局，2008)。地表覆蓋有 92%為森林地，其餘的 8%為耕地與建地。地質主要為始新世石英砂岩、始新世至漸新世片岩與板岩、中新世硬頁岩與板岩、中新世至上新世砂岩與頁岩，石門水庫集水區之岩石單壓強度則介於

5~100 MPa(中央地質調查所，2012)。根據石門水庫淤積測量報告與其上游主要防砂壩的淤積量，自從水庫興建完成的 1963 年至集集大地震前的 1998 年的淤積量，換算為集水區年平均侵蝕速度約為 1.51mmyr^{-1}。

本研究針對 2008 年至 2012 年間颱風對石門集水區的不同崩塌影響進行探討，對高義、玉峰、泰平、三光等地區之 DEM 進行分析與討論，研究範圍如圖 2-2 及圖 2-3 所示。

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

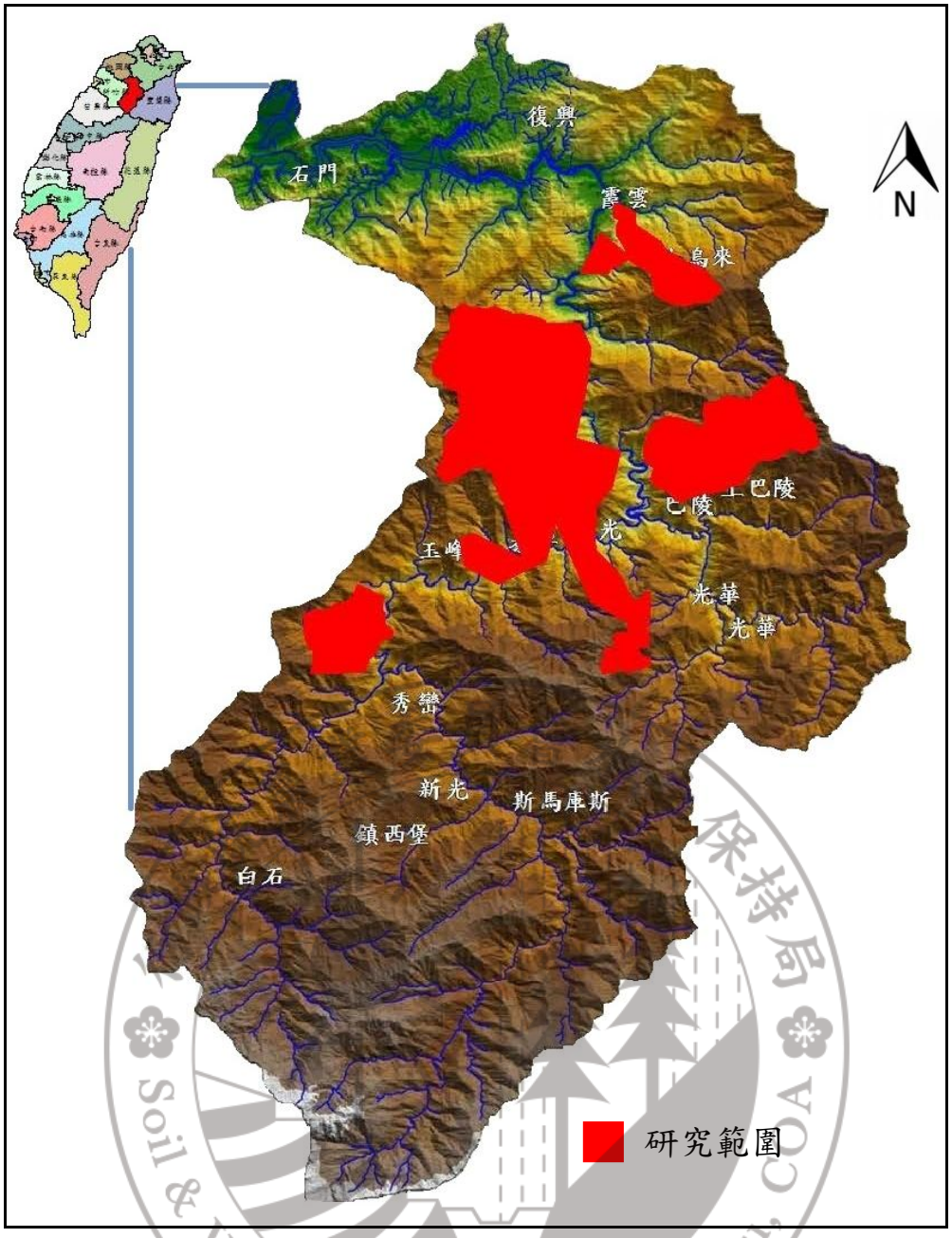


圖 2-2 研究範圍位置圖

Soil & Water Conservation Bureau, COA 保持局

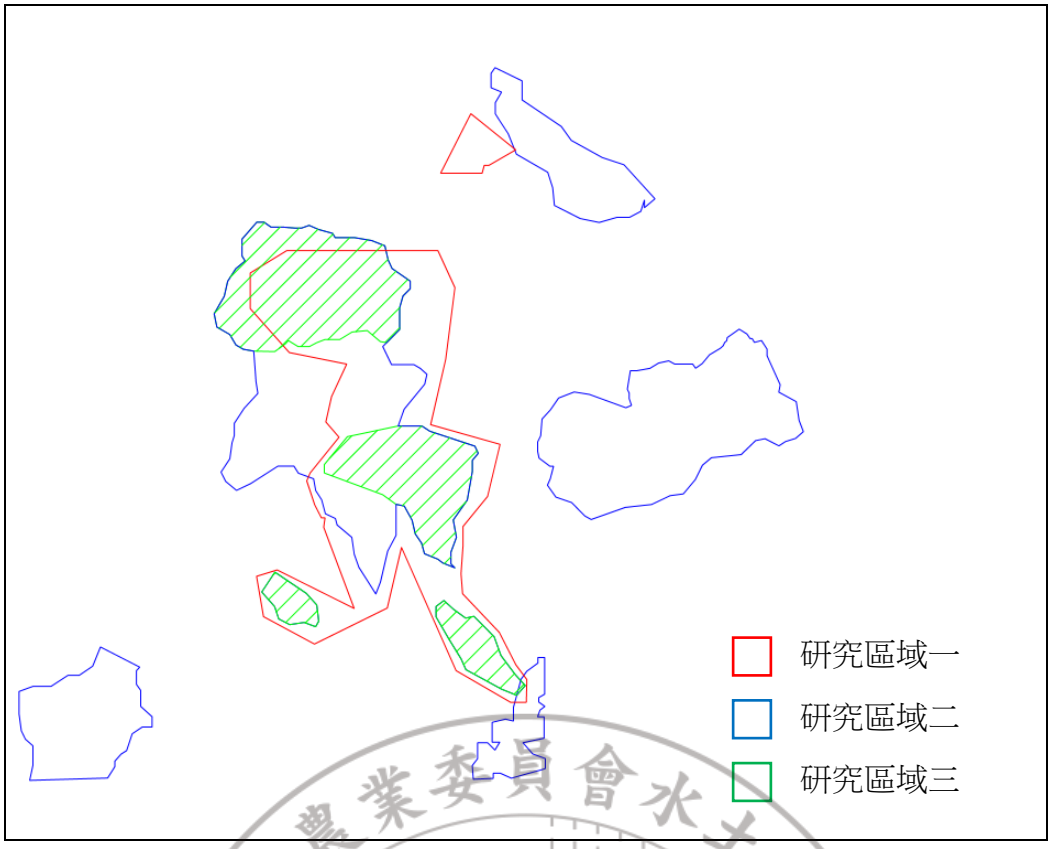


圖 2-3 研究區域圖

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA


行政院農業委員會水土保持局
Soil & Water Conservation Bureau, COA

第三章　結果與討論

第一節　研究成果

(一) 研究地點石門水庫集水區基本資料蒐集

本計畫研究地點位於石門水庫集水區，屬大漢溪流域，集水區面積達 76,340 公頃，蓄水範圍長約 16.5 公里。在行政區域劃分上，上游屬新竹縣尖石鄉，中游則主要位於桃園縣復興等鄉內，共計七個鄉鎮(圖 3-1)。集水區內人口約 1 萬八千人，其中原住民約佔 1 萬 1 千人。集水區內土地分區中，國有林班地佔 71%，23%屬原住民保留地，公私有山坡地佔 4%，僅餘 2%為水庫蓄水範圍及保護帶(圖 3-2)。集水區內農業使用面積則達 3,964 公頃。

在土地利用方面，石門水庫集水區內高山農業面積達 3,106 公頃，主要以種植果樹為主，以水蜜桃為大宗，另竹林、高冷蔬菜、茶園、檳榔等亦佔大部分比例。

集水區境內有農委會公布 1705 條土石流潛勢溪流 53 條，其中被列為高潛勢者有 12 條，中潛勢者有 37 條，低潛勢者 4 條，如圖 3-3 所示。53 條潛勢流中，位於林班地者有 29 條，位於山坡地者 24 條。其中位於大漢溪下游對水庫可能有直接影響者計有 29 條。

在集水區地質材料方面，下游水庫集水區主要為砂岩及頁岩，中游則為硬頁岩、砂頁岩、板岩等夾雜小部分火山岩層，上游地區地層則較為破碎複雜，有硬頁岩、板岩、石英岩及煤質頁岩等(圖 3-4)。

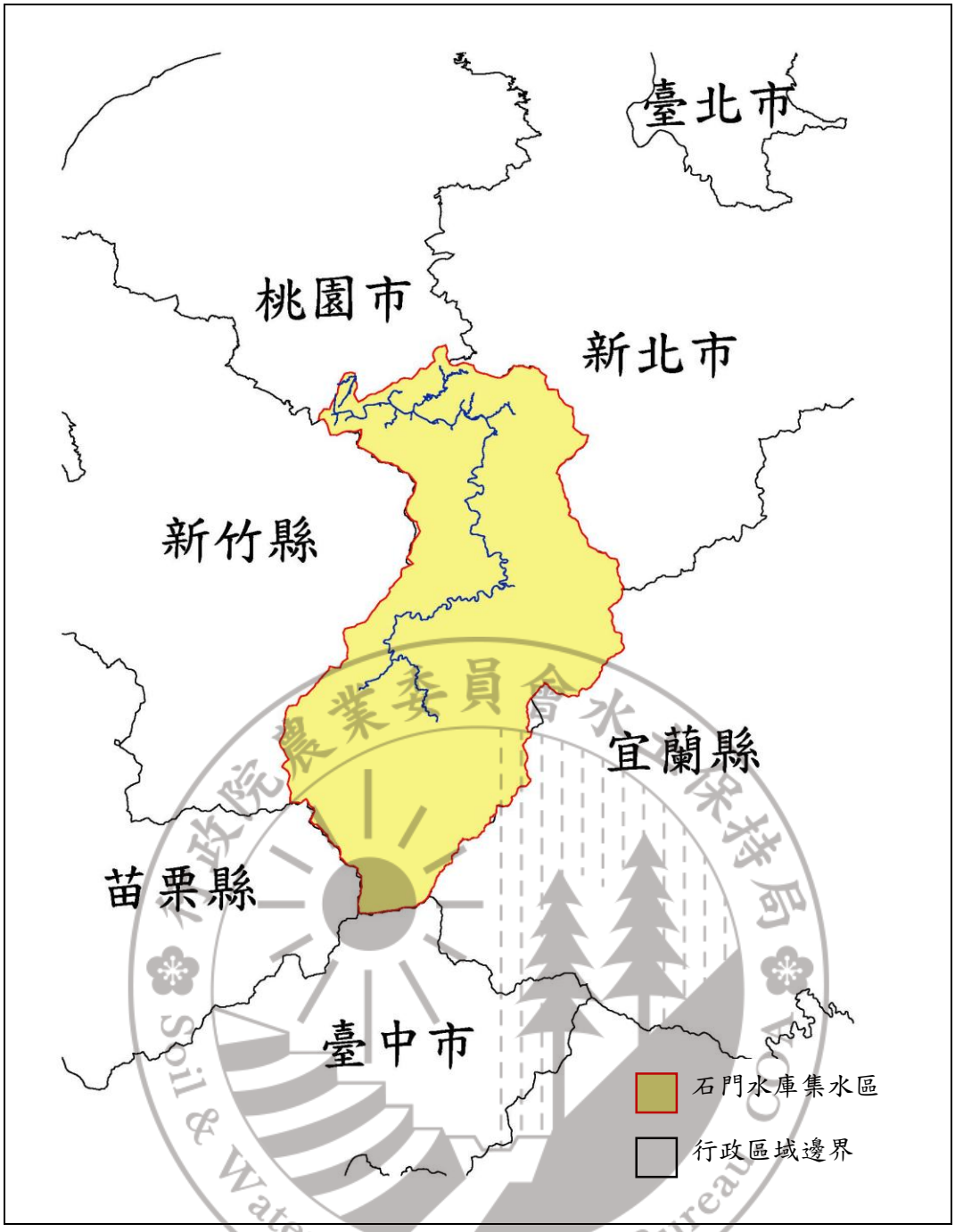


圖 3-1 石門水庫集水區行政區界圖

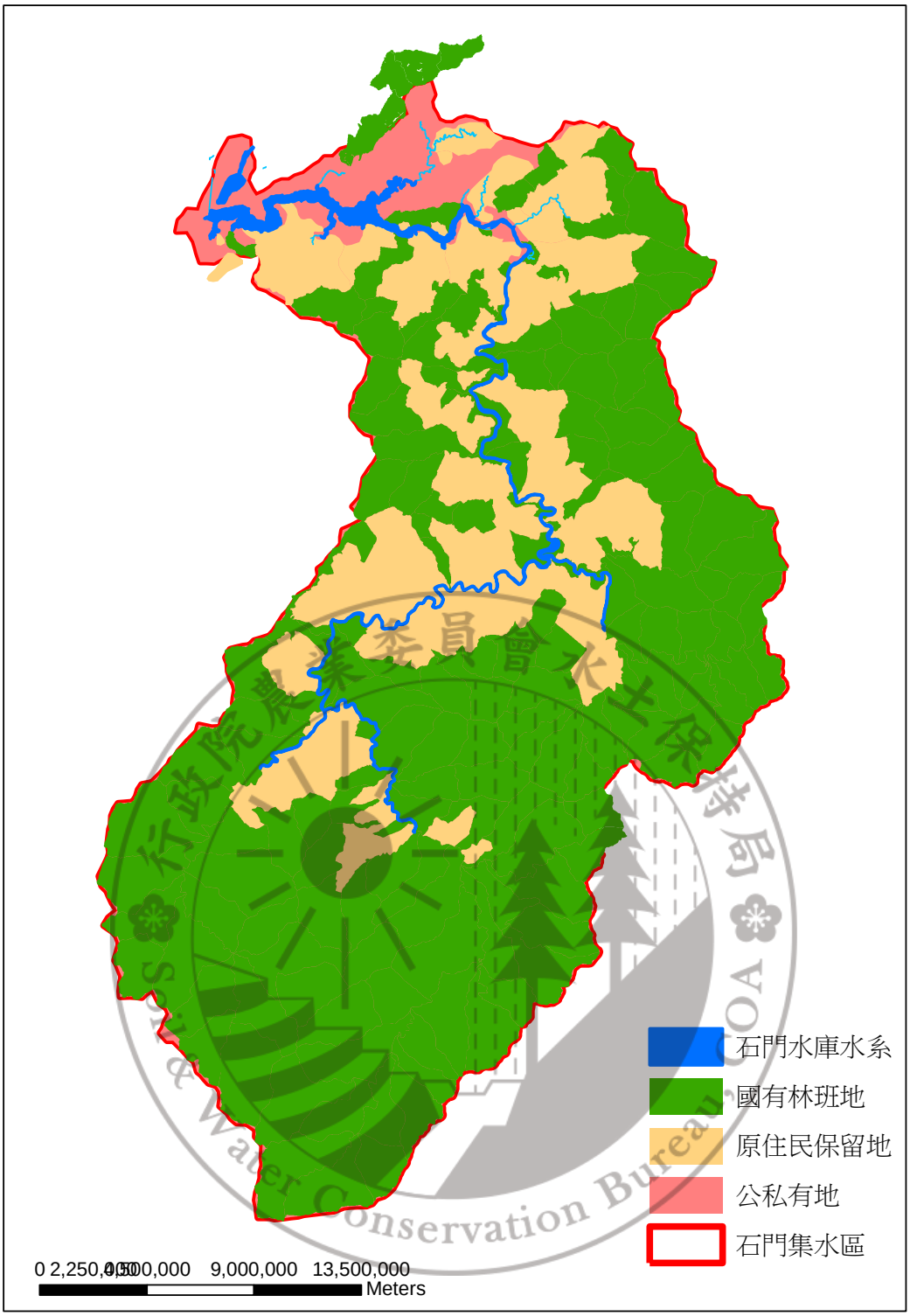


圖 3-2 石門水庫集水區土地分區圖

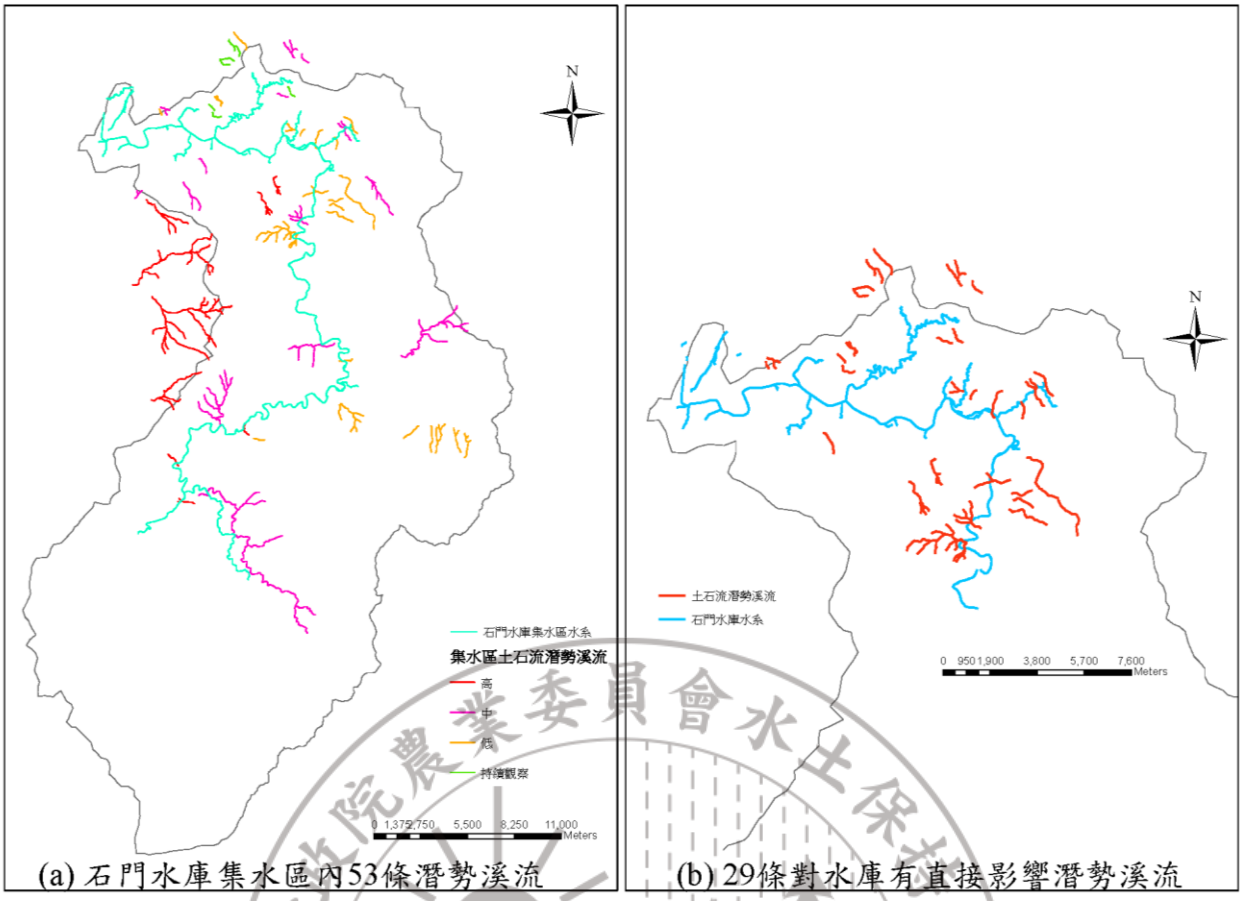


圖 3-3 石門水庫集水區農委會公佈 1705 條土石流潛勢溪流分佈圖

(資料來源：水土保持局)

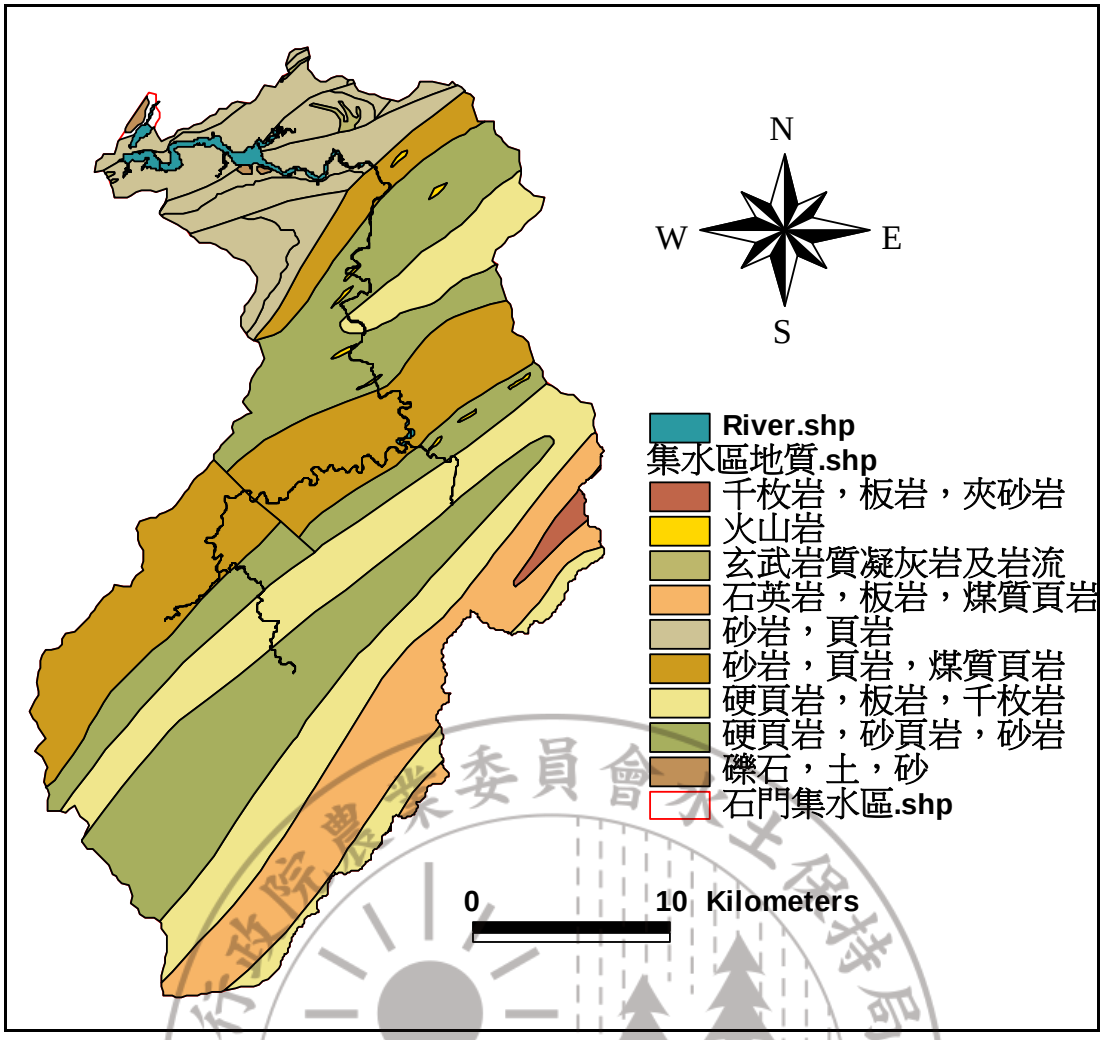


圖 3-4 石門水庫集水區地質分布圖(資料來源：中央地質調查所)

農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA 行政院

(二) 邊坡坡度與可移動土層厚度關係建立

本研究共計有 100 處測站紀錄，如表 3-1 所示，圖 3-5 為邊坡坡度與土層厚度關係圖。

表 3-1 現地調查人工手鑽邊坡坡度與土層厚度關係(1/4)

測站編號	五大分區	重要水系	坡度(度)	坡度分級	地質	量測厚度(cm)	X	Y
1	庫區集水區	義興溪	8	二級坡	巴陵層	95	287960	2742255
2	庫區集水區	義興溪	43	六級坡	巴陵層	45	287872	2742091
3	庫區集水區	義興溪	32	六級坡	巴陵層	110	287823	2741826
4	庫區集水區	義興溪	42	六級坡	巴陵層	41	287830	2741653
5	庫區集水區	匹亞溪	26	五級坡	木山層	95	283023	2737163
6	庫區集水區	匹亞溪	24	五級坡	木山層	59	283029	2737195
7	庫區集水區	匹亞溪	46	七級坡	木山層	32	283198	2737299
8	庫區集水區	寶里苦溪	34	六級坡	巴陵層	70	285074	2734511
9	庫區集水區	寶里苦溪	38	六級坡	巴陵層	50	285096	2734465
10	庫區集水區	蘇樂溪	44	六級坡	巴陵層	25	286075	2732701
11	庫區集水區	蘇樂溪	32	六級坡	巴陵層	90	286027	2732716
12	庫區集水區	蘇樂溪	28	五級坡	巴陵層	110	285983	2732673
13	庫區集水區	蘇樂溪	34	六級坡	巴陵層	65	-	-
14	庫區集水區	卡拉溪	47	七級坡	木山層	13	-	-
15	庫區集水區	卡拉溪	29	六級坡	木山層	74	-	-
16	庫區集水區	卡拉溪	29	六級坡	木山層	87	-	-
17	庫區集水區	卡拉溪	30	六級坡	木山層	62	-	-
18	庫區集水區	卡拉溪	23	四級坡	木山層	127	-	-
19	庫區集水區	卡拉溪	49	七級坡	木山層	27	-	-
20	庫區集水區	卡拉溪	26	五級坡	木山層	107	-	-
21	庫區集水區	卡拉溪	34	六級坡	木山層	52	-	-
22	庫區集水區	卡拉溪	49	七級坡	木山層	15	-	-
23	三光集水區	萱源溪	32	六級坡	巴陵層	61	-	-
24	三光集水區	萱源溪	29	六級坡	巴陵層	110	-	-
25	三光集水區	萱源溪	23	四級坡	巴陵層	134	282535	2728312
26	三光集水區	萱源溪	45	七級坡	巴陵層	20	282600	2728395

資料來源：水土保持局

表 3-1 現地調查人工手鑽邊坡坡度與土層厚度關係(2/4)

測站編號	五大分區	重要水系	坡度(度)	坡度分級	地質	量測厚度(cm)	X	Y
27	三光集水區	萱源溪	34	六級坡	巴陵層	35	282542	2728401
28	三光集水區	萱源溪	31	六級坡	巴陵層	50	286316	2728326
29	三光集水區	萱源溪	35	六級坡	巴陵層	37	286389	2728562
30	三光集水區	萱源溪	35	六級坡	巴陵層	26	277219	2725444
31	三光集水區	萱源溪	45	七級坡	巴陵層	19	277395	2725415
32	三光集水區	把加灣山溪	25	五級坡	巴陵層	100	277469	2725408
33	三光集水區	把加灣山溪	37	六級坡	巴陵層	45	278423	2722104
34	三光集水區	把加灣山溪	27	五級坡	巴陵層	93	278529	2722151
35	三光集水區	把加灣山溪	40	六級坡	巴陵層	17	278514	2722094
36	三光集水區	把加灣山溪	38	六級坡	巴陵層	28	278360	2722183
37	三光集水區	把加灣山溪	32	六級坡	巴陵層	58	276568	2720390
38	三光集水區	把加灣山溪	38	六級坡	巴陵層	29	276577	2720393
39	三光集水區	把加灣山溪	34	六級坡	巴陵層	29	276735	2720399
40	三光集水區	把加灣山溪	23	四級坡	巴陵層	125	277121	2720490
41	三光集水區	新興溪	29	六級坡	巴陵層	89	277257	2720480
42	三光集水區	新興溪	37	六級坡	巴陵層	41	277290	2720758
43	三光集水區	新興溪	32	六級坡	巴陵層	48	277221	2720621
44	三光集水區	新興溪	28	五級坡	巴陵層	101	280197	2721172
45	三光集水區	新興溪	37	六級坡	巴陵層	33	280332	2721151
46	三光集水區	新興溪	31	六級坡	巴陵層	59	280371	2721162
47	三光集水區	新興溪	34	六級坡	巴陵層	50	280233	2721419
48	三光集水區	新興溪	36	六級坡	巴陵層	31	280270	2720128
49	玉峰集水區	砂崙仔溪	22	四級坡	大寮層	130	280209	2719954
50	玉峰集水區	砂崙仔溪	39	六級坡	大寮層	30	280282	2720151
51	玉峰集水區	砂崙仔溪	12	三級坡	大寮層	200	280242	2720054
52	玉峰集水區	砂崙仔溪	40	六級坡	大寮層	25	279660	2717423
53	玉峰集水區	砂崙仔溪	43	六級坡	大寮層	25	279791	2717473
54	玉峰集水區	泰平溪	35	六級坡	木山層	20	279995	2717410
55	玉峰集水區	泰平溪	42	六級坡	木山層	150	281390	2718432

資料來源：水土保持局

表 3-1 現地調查人工手鑽邊坡坡度與土層厚度關係(3/4)

測站編號	五大分區	重要水系	坡度(度)	坡度分級	地質	量測厚度(cm)	X	Y
56	玉峰集水區	泰平溪	32	六級坡	木山層	70	280195	2717324
57	玉峰集水區	泰平溪	30	六級坡	大寮層	20	280042	2717108
58	玉峰集水區	下文光野溪	34	六級坡	打鹿頁岩層	100	279789	2716899
59	玉峰集水區	下文光野溪	38	六級坡	北寮層	100	280225	2717834
60	玉峰集水區	下文光野溪	28	五級坡	打鹿頁岩層	90	280361	2718095
61	玉峰集水區	下文光野溪	12	三級坡	北寮層	20	280892	2718289
62	玉峰集水區	下文光野溪	34	六級坡	北寮層	130	281135	2718440
63	玉峰集水區	抬耀二號野溪	44	六級坡	木山層	200	286353	2728345
64	玉峰集水區	抬耀二號野溪	28	五級坡	木山層	60	286208	2728405
65	玉峰集水區	抬耀二號野溪	24	五級坡	木山層	67	286094	2728396
66	玉峰集水區	抬耀二號野溪	28	五級坡	木山層	105	290374	2727826
67	玉峰集水區	抬耀二號野溪	30	六級坡	木山層	69	291435	2732175
68	玉峰集水區	百歡溪	41	六級坡	打鹿頁岩層	30	290385	2732133
69	玉峰集水區	百歡溪	39	六級坡	打鹿頁岩層	50	291331	2732035
70	玉峰集水區	百歡溪	42	六級坡	石底層	20	291300	2732030
71	白石集水區	秀錦溪	32	六級坡	巴陵層	65	291448	2732230
72	白石集水區	秀錦溪	35	六級坡	巴陵層	47	291123	2732253
73	白石集水區	秀錦溪	40	六級坡	巴陵層	40	291293	2731927
74	白石集水區	秀錦溪	43	六級坡	巴陵層	39	290939	2731929
75	白石集水區	延老溪	34	六級坡	巴陵層	74	291244	2731920
76	白石集水區	延老溪	28	五級坡	巴陵層	101	290077	2727952
77	白石集水區	延老溪	45	七級坡	巴陵層	40	290066	2727941
78	白石集水區	延老溪	24	五級坡	巴陵層	72	290126	2727925
79	白石集水區	延老溪	36	六級坡	巴陵層	43	290184	2727792
80	白石集水區	延老溪	21	四級坡	巴陵層	110	290318	2727701
81	白石集水區	延老溪	38	六級坡	巴陵層	67	290257	2727958
82	泰崗集水區	泰岡一號溪	38	六級坡	巴陵層	30	290356	2728067
83	泰崗集水區	泰岡一號溪	41	六級坡	巴陵層	35	290300	2728101
84	泰崗集水區	泰岡一號溪	43	六級坡	巴陵層	40	290120	2727870

資料來源：水土保持局

表 3-1 現地調查人工手鑽邊坡坡度與土層厚度關係(4/4)

測站編號	五大分區	重要水系	坡度(度)	坡度分級	地質	量測厚度(cm)	X	Y
85	泰崗集水區	泰岡一號溪	34	六級坡	巴陵層	55	289741	2726600
86	泰崗集水區	泰岡二號溪	32	六級坡	巴陵層	60	289774	2726663
87	泰崗集水區	泰岡二號溪	42	六級坡	巴陵層	40	289864	2726850
88	泰崗集水區	泰岡二號溪	30	六級坡	巴陵層	70	289813	2726600
89	泰崗集水區	泰岡二號溪	30	六級坡	巴陵層	70	289861	2726617
90	泰崗集水區	葛樂喜溪	32	六級坡	巴陵層	75	289945	2726671
91	泰崗集水區	葛樂喜溪	30	六級坡	巴陵層	69	290065	2726697
92	泰崗集水區	葛樂喜溪	41	六級坡	巴陵層	35	290392	2726587
93	泰崗集水區	葛樂喜溪	33	六級坡	巴陵層	63	289770	2726670
94	泰崗集水區	葛樂喜溪	32	六級坡	巴陵層	91	289930	2724255
95	泰崗集水區	葛樂喜溪	27	六級坡	巴陵層	77	290008	2724423
96	泰崗集水區	葛樂喜溪	35	六級坡	巴陵層	67	290113	2724700
97	泰崗集水區	葛樂喜溪	31	六級坡	巴陵層	72	290226	2724812
98	泰崗集水區	葛樂喜溪	28	五級坡	巴陵層	71	290244	2724810
99	泰崗集水區	葛樂喜溪	30	六級坡	巴陵層	59	290356	2724833
100	泰崗集水區	葛樂喜溪	40	六級坡	巴陵層	55	290215	2724840

資料來源：水土保持局

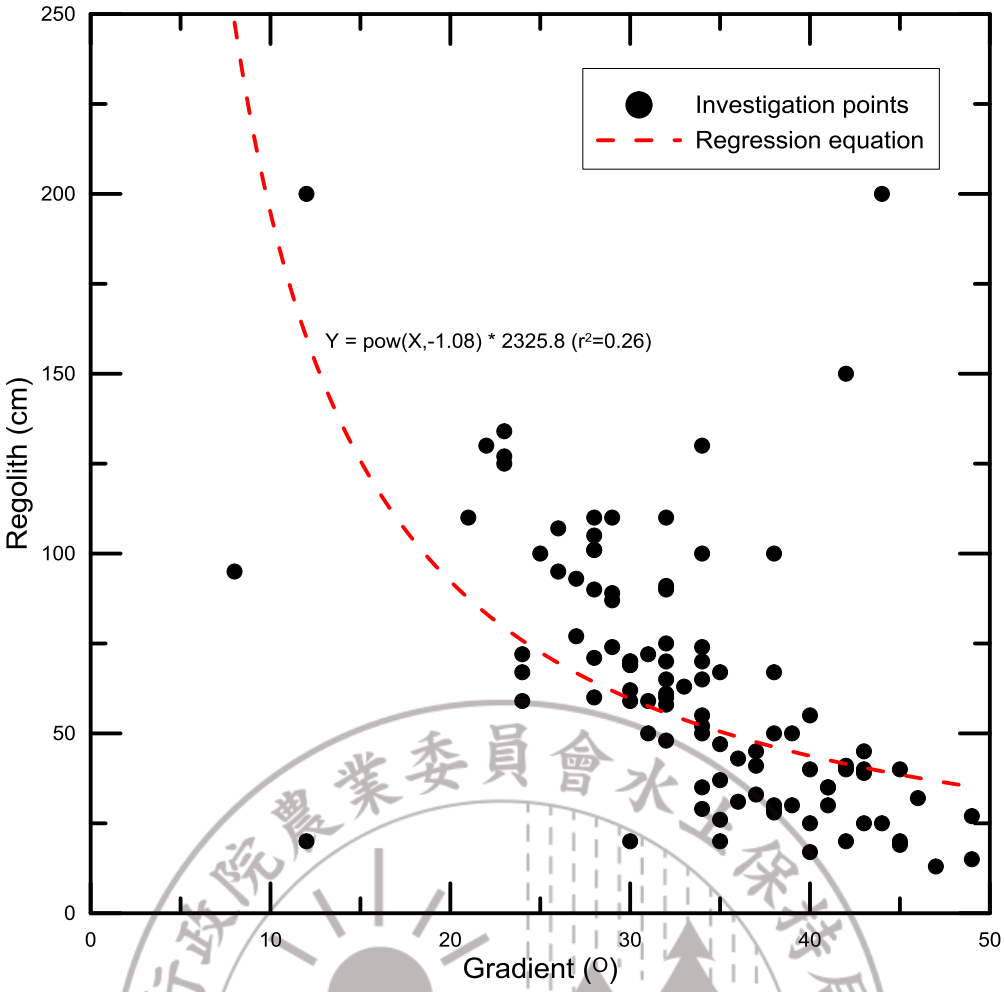


圖 3-5 人工手鑽調查邊坡坡度與土層厚度關係圖

(資料來源：水土保持局)

經由表 3-1 中 100 個測站資料，回歸出邊坡坡度與土層厚度關係，如式(3-1)所示

$$R = 2326S^{-1.08} \quad (r^2 = 0.26) \qquad (3\text{-}1)$$

其中 R 為土層厚度(cm)，S 為邊坡坡度。

(三) 崩塌地面積判釋

本研究崩塌地面積判釋計有三個時期的空載光達影像所製作 5m 地形變化 DEM，案例一為水土保持局(2009)，「石門水庫集水區高精度地形量測及地形貌變化歷程之研究」8 月及 11 月地形相減成果；案例二為水土保持局(2010)，「石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討」及水土保持局(2011)，「石門水庫集水區土砂災害歷程分析」兩計畫地形相減成果；案例三為水土保持局(2011)，「石門水庫集水區土砂災害歷程分析」及水土保持局(2012)，「石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估」兩計畫地形相減成果。

分析結果如圖 3-6 至 3-11。本研究針對石門水庫集水區 DEM 進行分析其崩塌地高程變化，案例一之崩塌數量為 7194 處，總崩塌面積為 2299175 m^2，總崩塌體積為 1838288 m^3；案例二之崩塌數量為 20442 處，總崩塌面積為 7761850 m^2，總崩塌體積為 11188466 m^3；案例三之崩塌數量為 8945 處，總崩塌面積為 5526750 m^2，總崩塌體積為 4425907 m^3。

統計結果顯示前 10%大的崩塌體積分別佔個案例總崩塌體積的 78.1%、80.5%、78.5%，前 20%的大崩塌體積佔總崩塌體積之 87.0%、88.3%、86.8%，顯示大型的崩塌事件會影響集水區境內崩塌體積的估計結果，小型的崩塌事件數量雖佔大部份，但總體積卻不到總崩塌體積的 15%，對總崩塌體積之估計影響甚小。

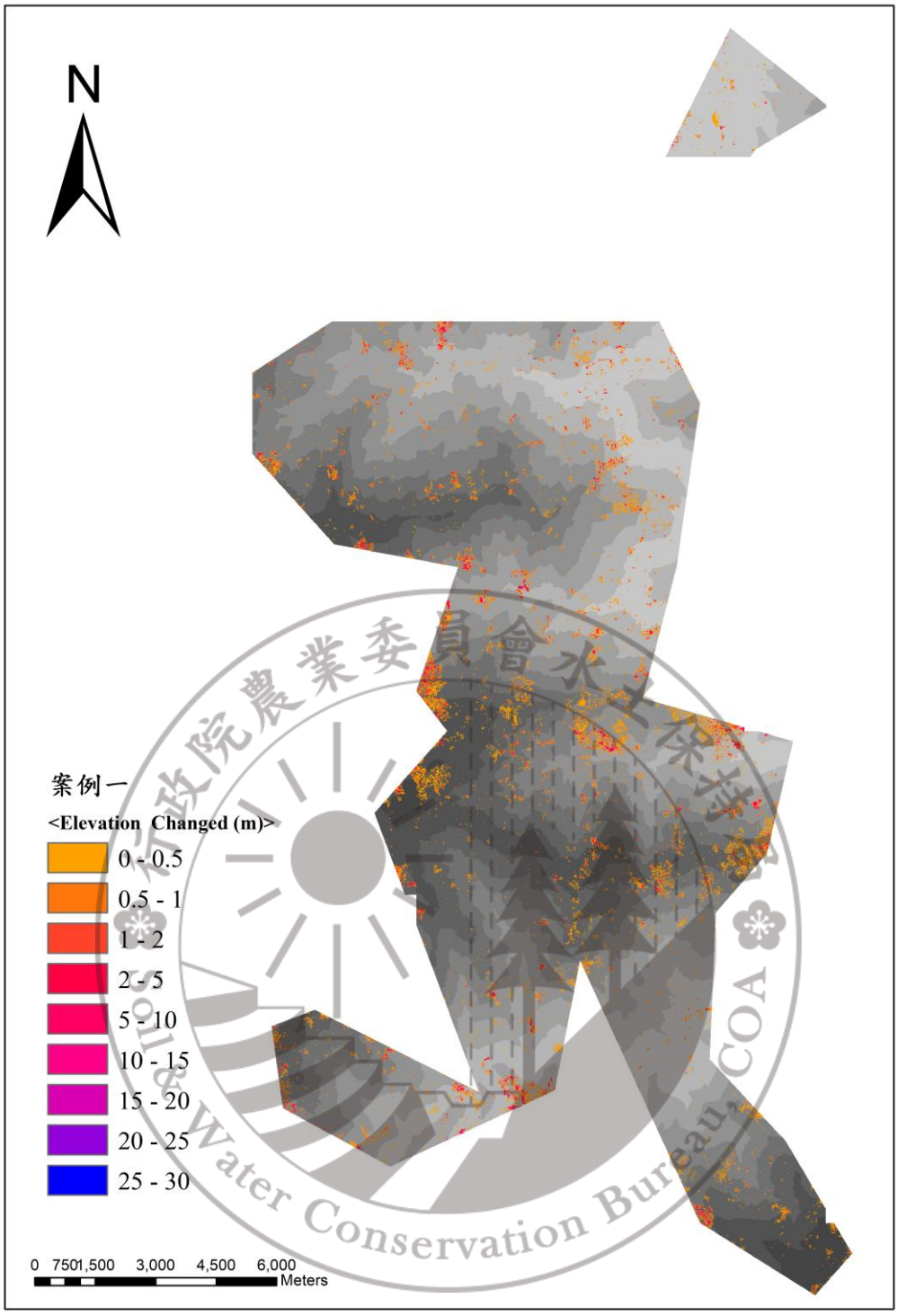


圖 3-6 案例一 2009 年間崩塌區域與高程變化圖

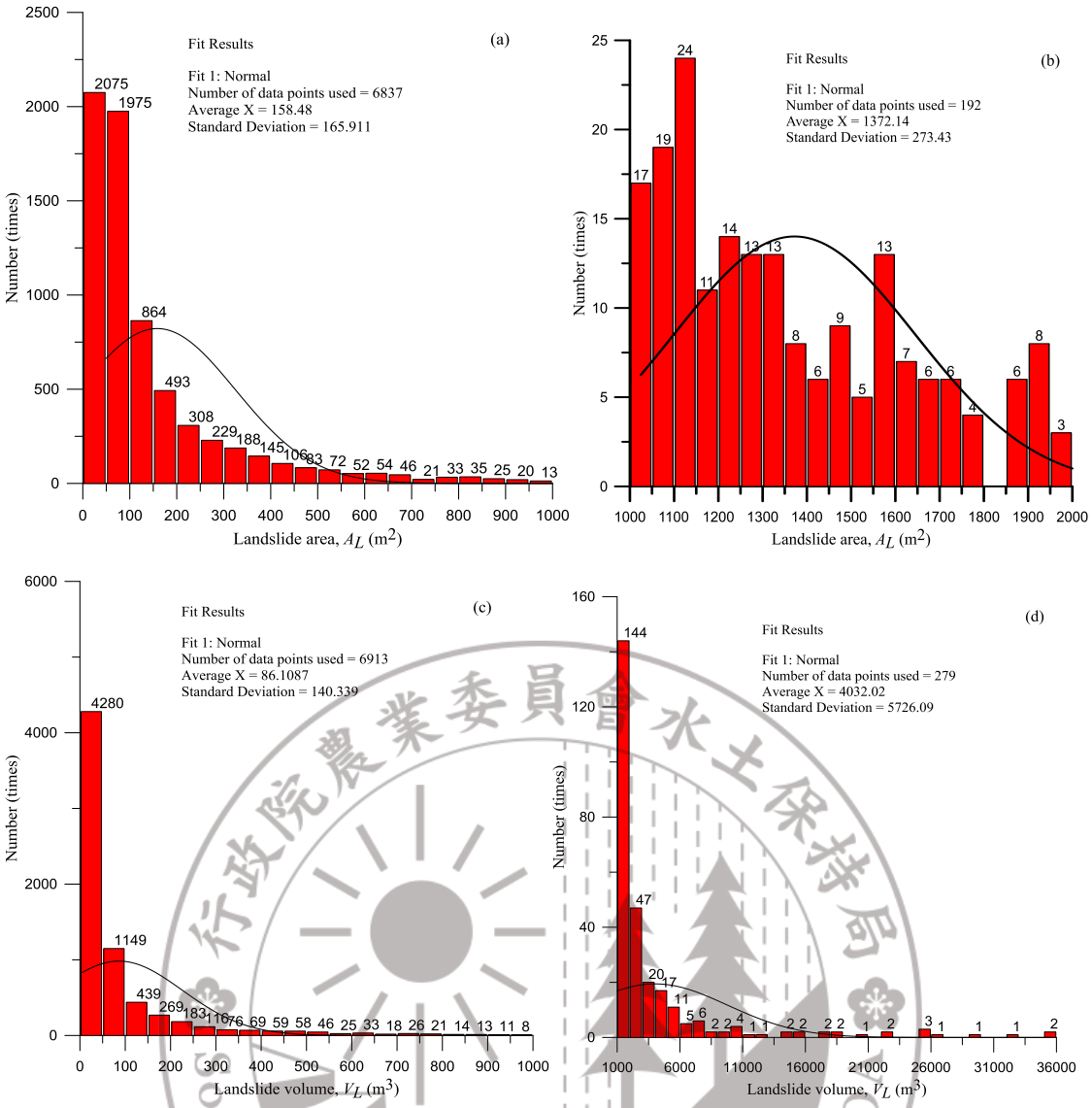


圖 3-7 案例一 2009 年間崩塌面積、體積與次數關係圖

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

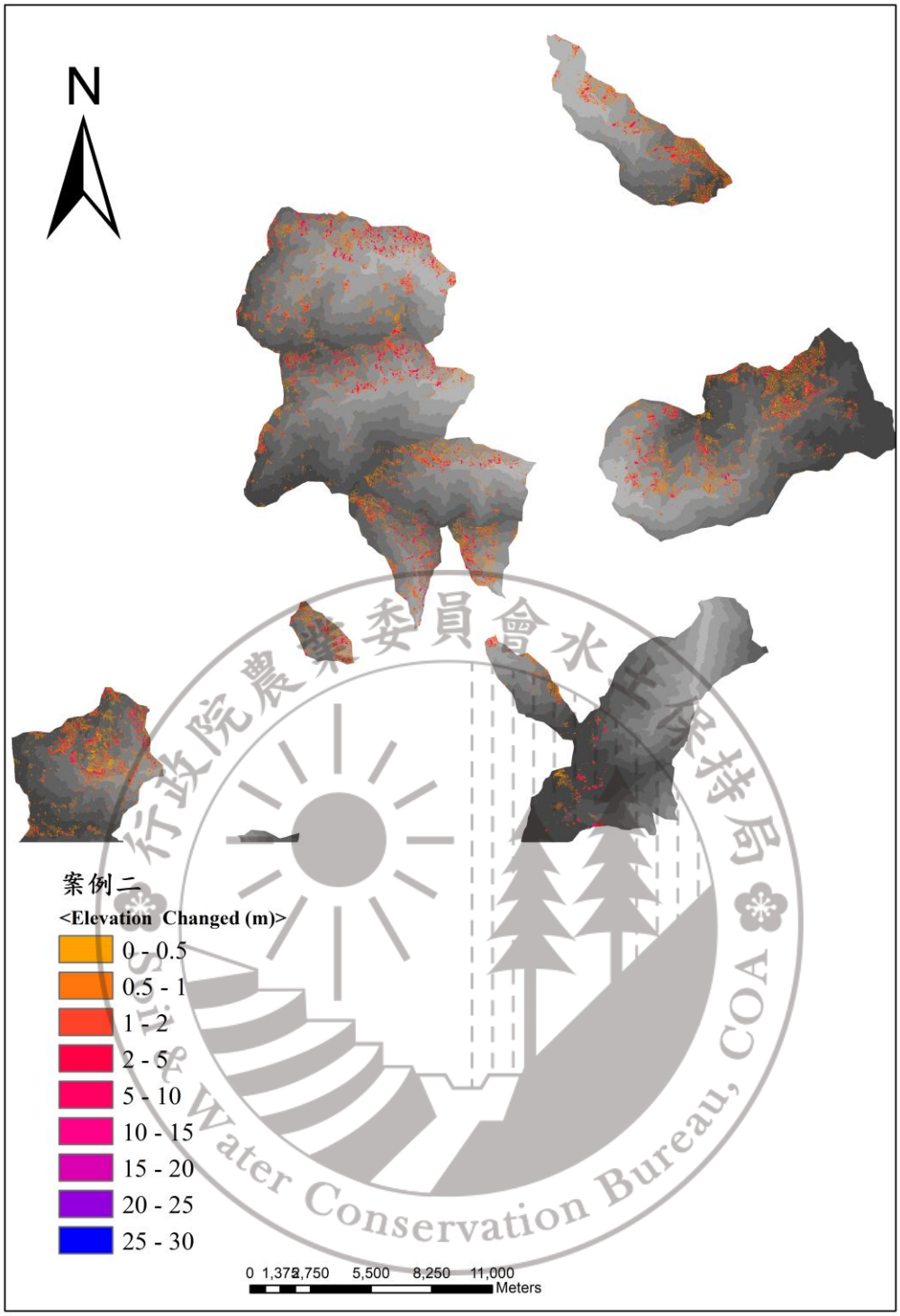


圖 3-8 案例二 2010-2011 年間崩塌區域與高程變化圖

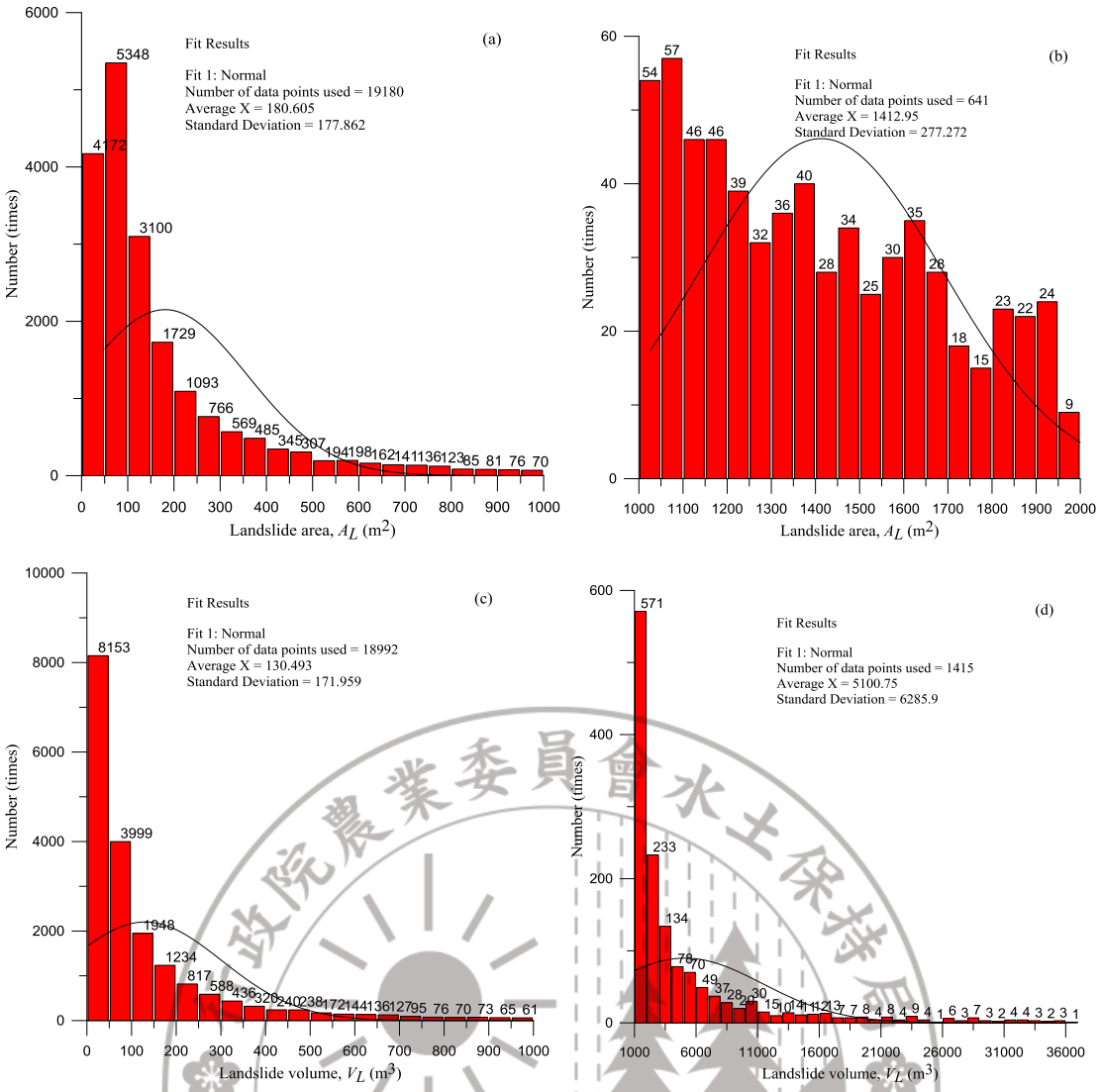


圖 3-9 案例二 2010-2011 年間崩塌面積、體積與次數關係圖

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

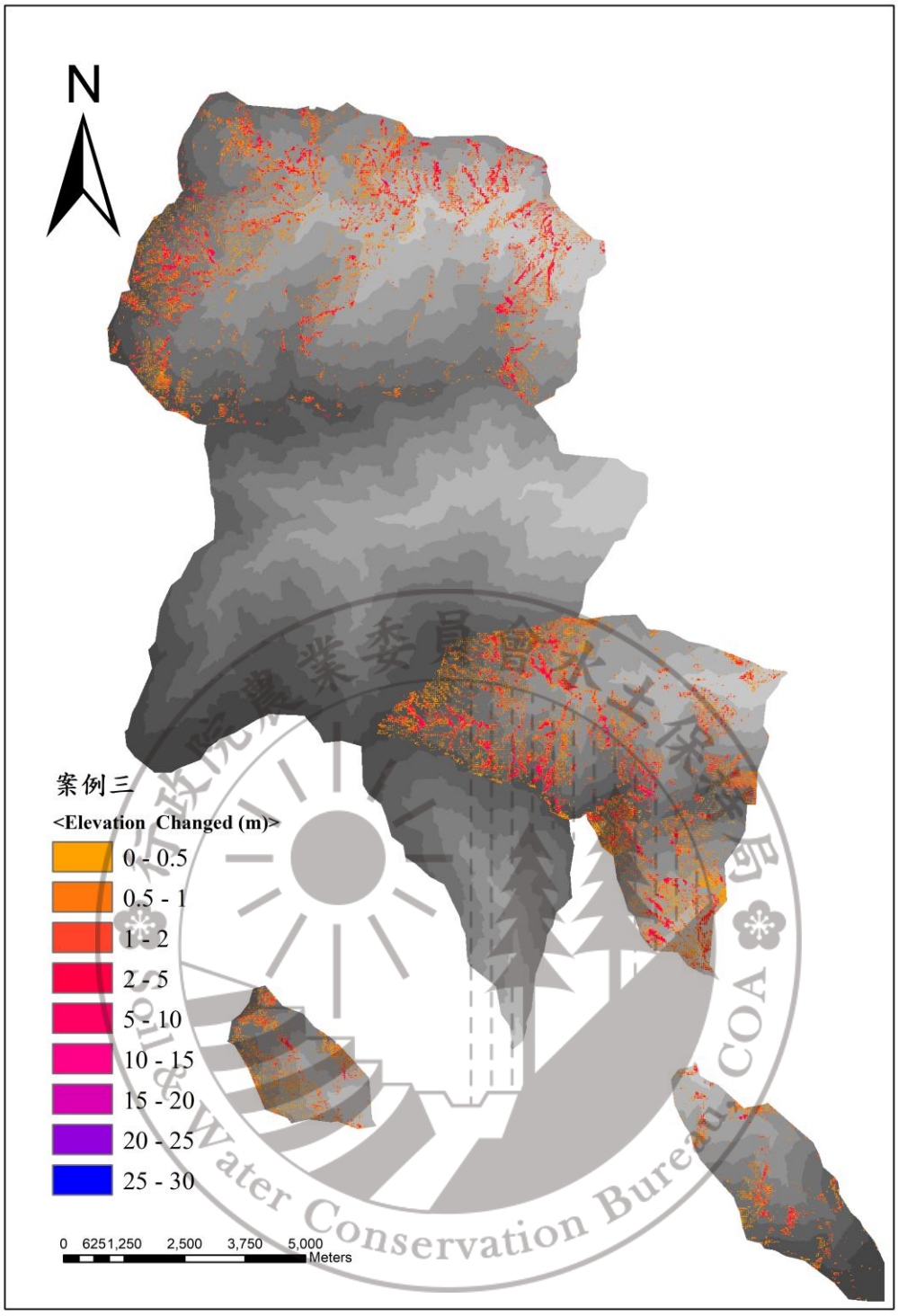


圖 3-10 案例三 2011-2012 年間崩塌區域與高程變化圖

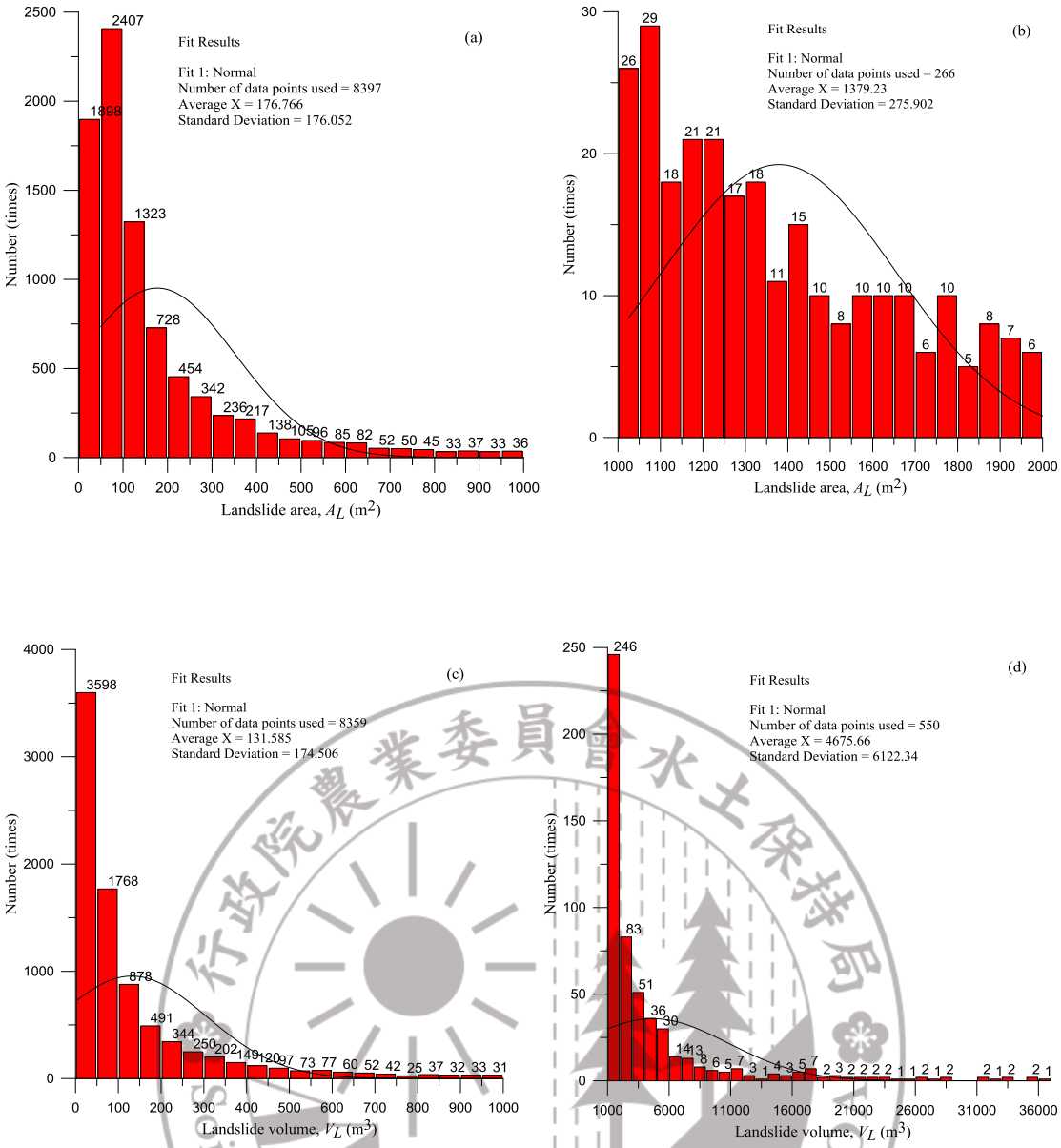


圖 3-11　案例三 2011-2012 年間崩塌面積、體積與次數關係圖

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

(四) 崩塌規模與頻率分析

本研究以石門水庫集水區為例，討論其崩塌地之斜率值，首先取各試區之崩塌累積個數作微分後轉成非累積個數機率密度函數(Crosta et al., 2003)，再以各崩塌體積(m^3)為橫座標，以非累積個數(m^{-3})為縱座標，作於雙對數座標圖上，可得到崩塌體積與非累積個數間之冪次關係，如圖 3-12 至圖 3-17 所示。

表 3-2 本研究與相關文獻崩塌頻率與體積關係式

研究來源	研究區域	崩塌量(m^3)	規模(體積)與頻率關係式
本研究	石門水庫集水區	5.2×10^{0}—5.2×10^{4} (2009) 5.1×10^{0}—7.0×10^{4} (2010-2011) 5.2×10^{0}—6.2×10^{4} (2011-2012)	$N_L=13{,}280V_L^{-1.57}$ (2009) $N_L=114{,}969V_L^{-1.65}$(2010-2011) $N_L=16{,}280V_L^{-1.57}$ (2011-2012)
Fujii(1969)	日本	4×10^{2}—1×10^{6}	$N_L=10^{5.49}V_L^{-0.85}$
Dai and Lee(2001)	香港	1×10^{-2}—1×10^{5}	$N_L=2.33V_L^{-0.41}$
Hungr et al.(1999)	Highway, British Columbia	1×10^{-2}—2×10^{4}	$N_L=1.36V_L^{-0.70}$
Dussauge-Peisser et al. (2002)	Grenoble, France	5×10^{-1}—1×10^{6}	$N_L=4.2V_L^{-0.41}$
Dussauge-Peisser et al. (2002)	Yosemite, USA	1×10^{0}—1×10^{6}	$N_L=4.5V_L^{-0.46}$

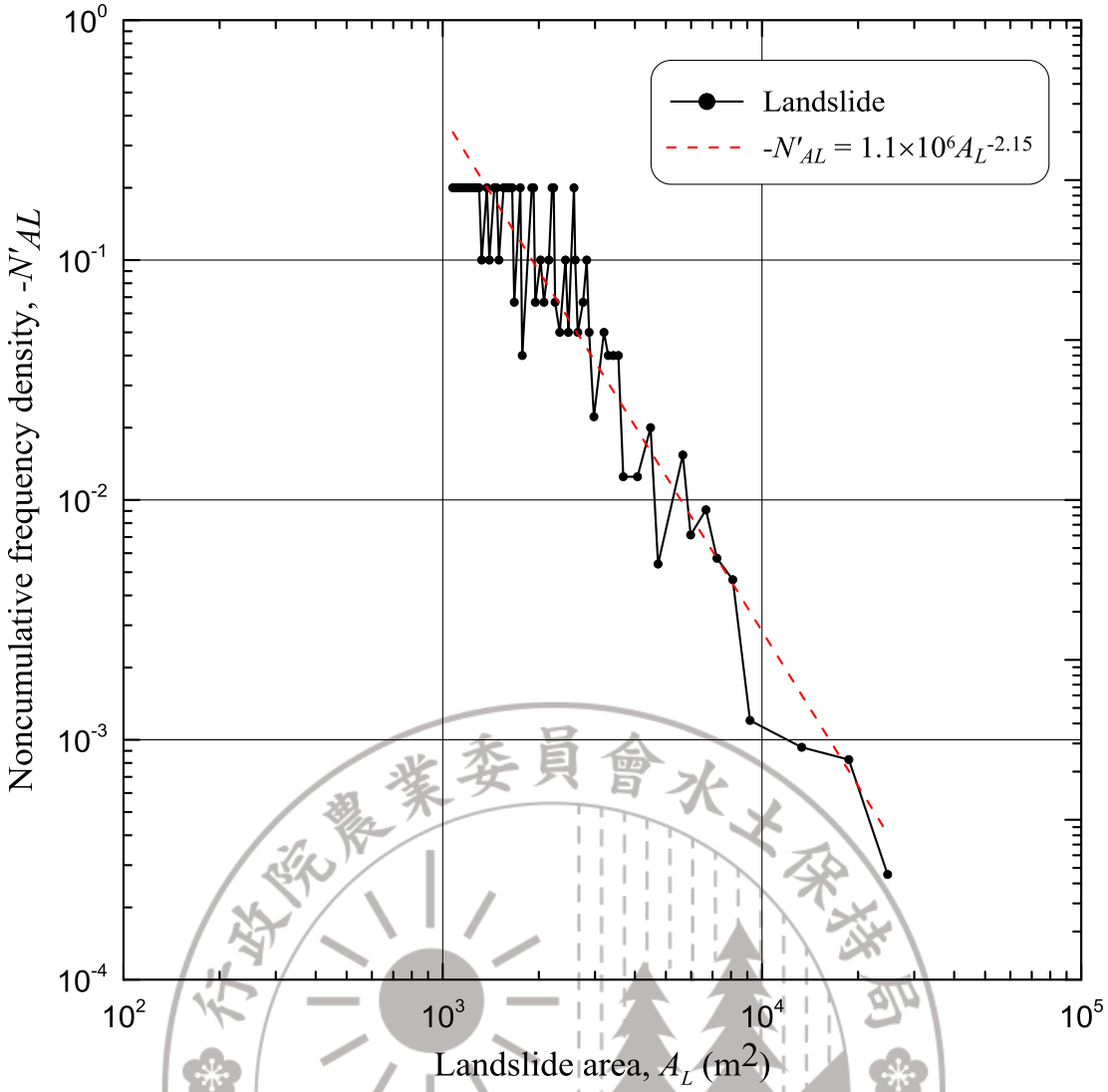


圖 3-12 案例一 2009 年間崩塌面積與頻率關係圖

$$-N'_{AL} = 1.1 \times 10^{6} A_L^{-2.15} \quad (r^2 = 0.89) \qquad (3\text{-}2)$$

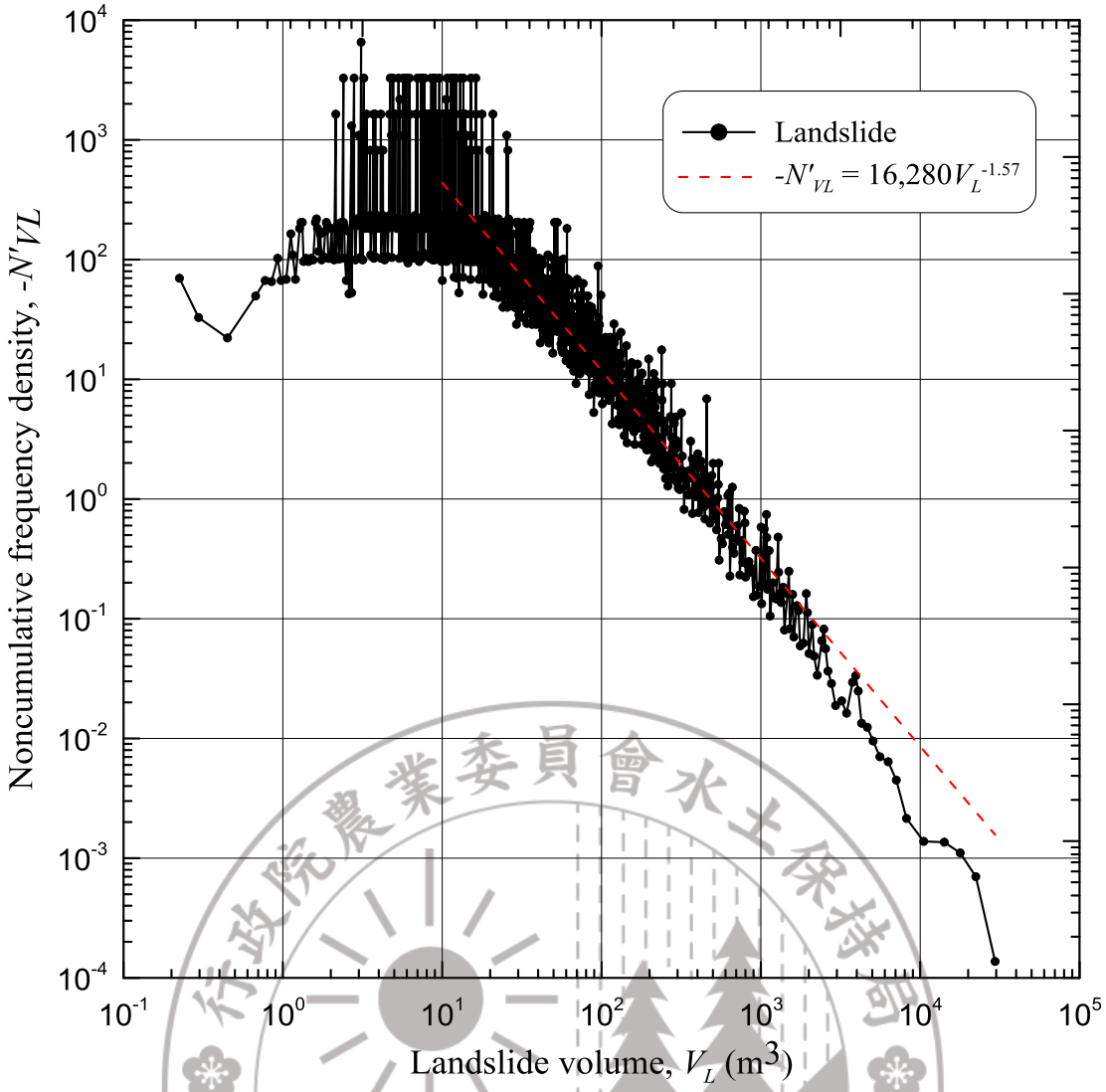


圖 3-13 案例一 2009 年間崩塌體積與頻率關係圖

$$-N'_{VL}=16{,}280V_L^{-1.57} \quad (r^2 = 0.92) \qquad (3\text{-}3)$$

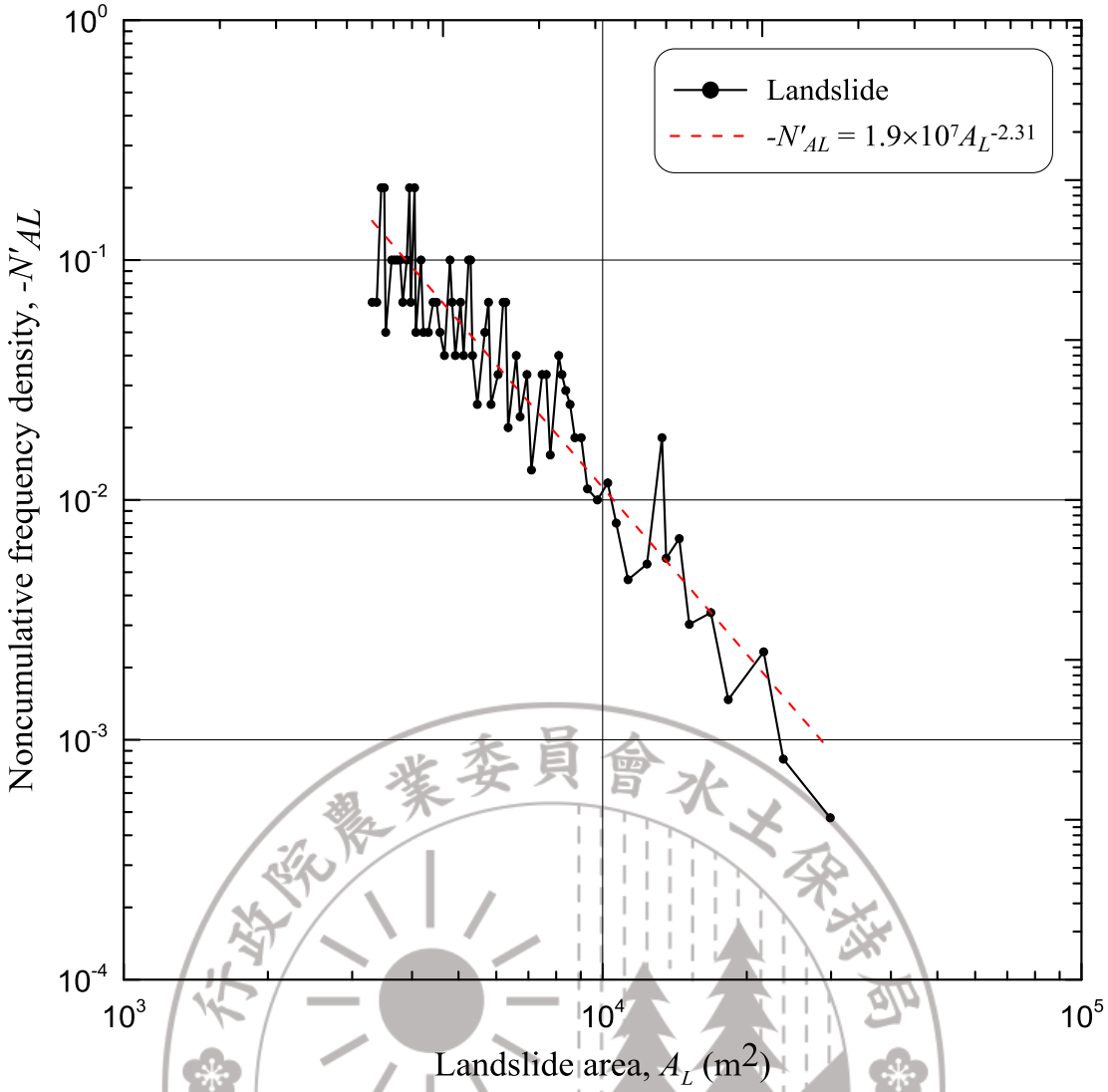


圖 3-14 案例二 2010-2011 年間崩塌面積與頻率關係圖

$$-N'_{AL}=1.9\times10^{7}A_{L}^{-2.31}\ (r^{2}=0.87) \qquad (3\text{-}4)$$

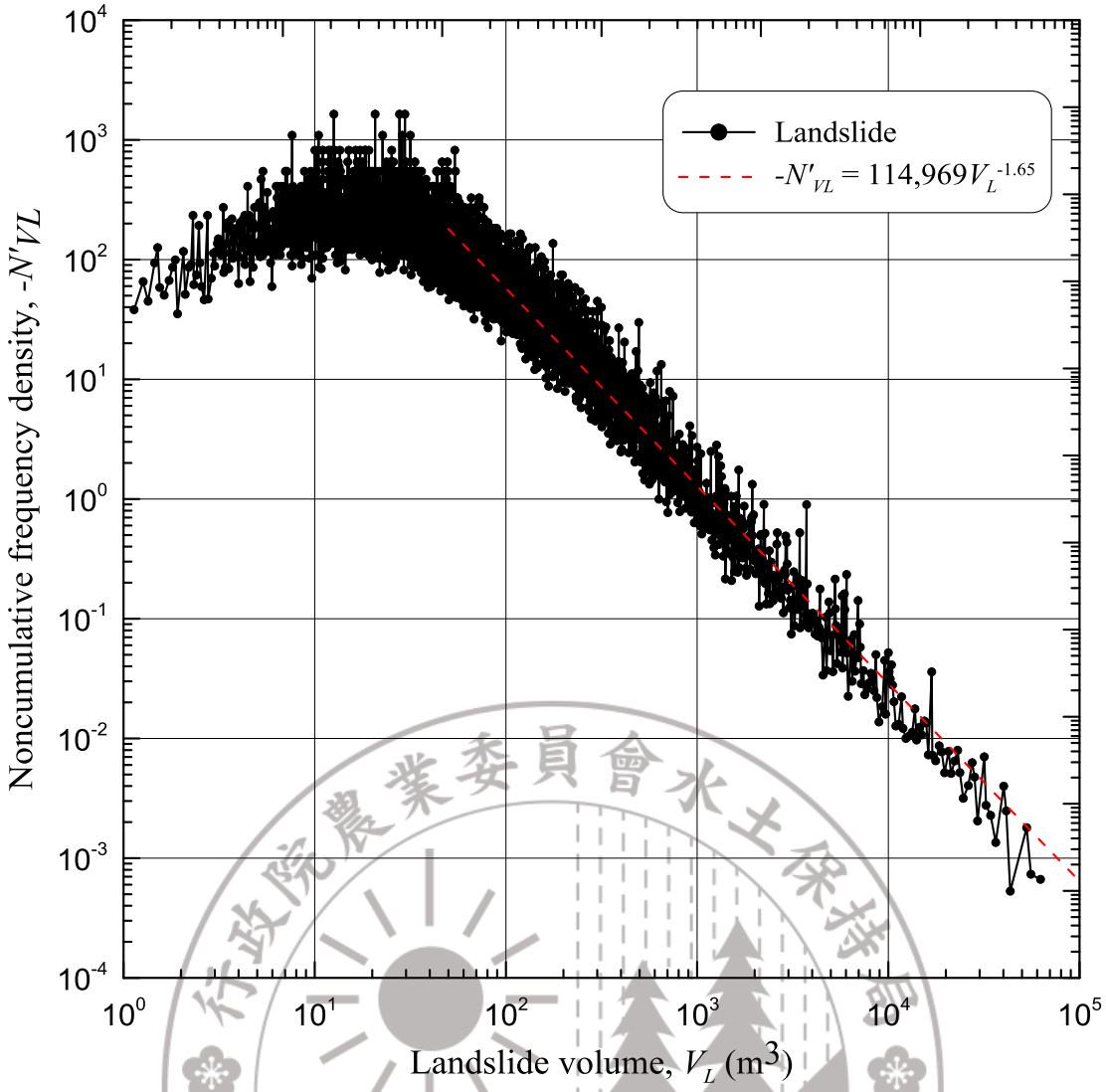


圖 3-15 案例二 2010-2011 年間崩塌體積與頻率關係圖

$$-N'_{VL} = 114{,}969 V_L^{-1.65} \quad (r^2 = 0.95) \qquad (3\text{-}5)$$

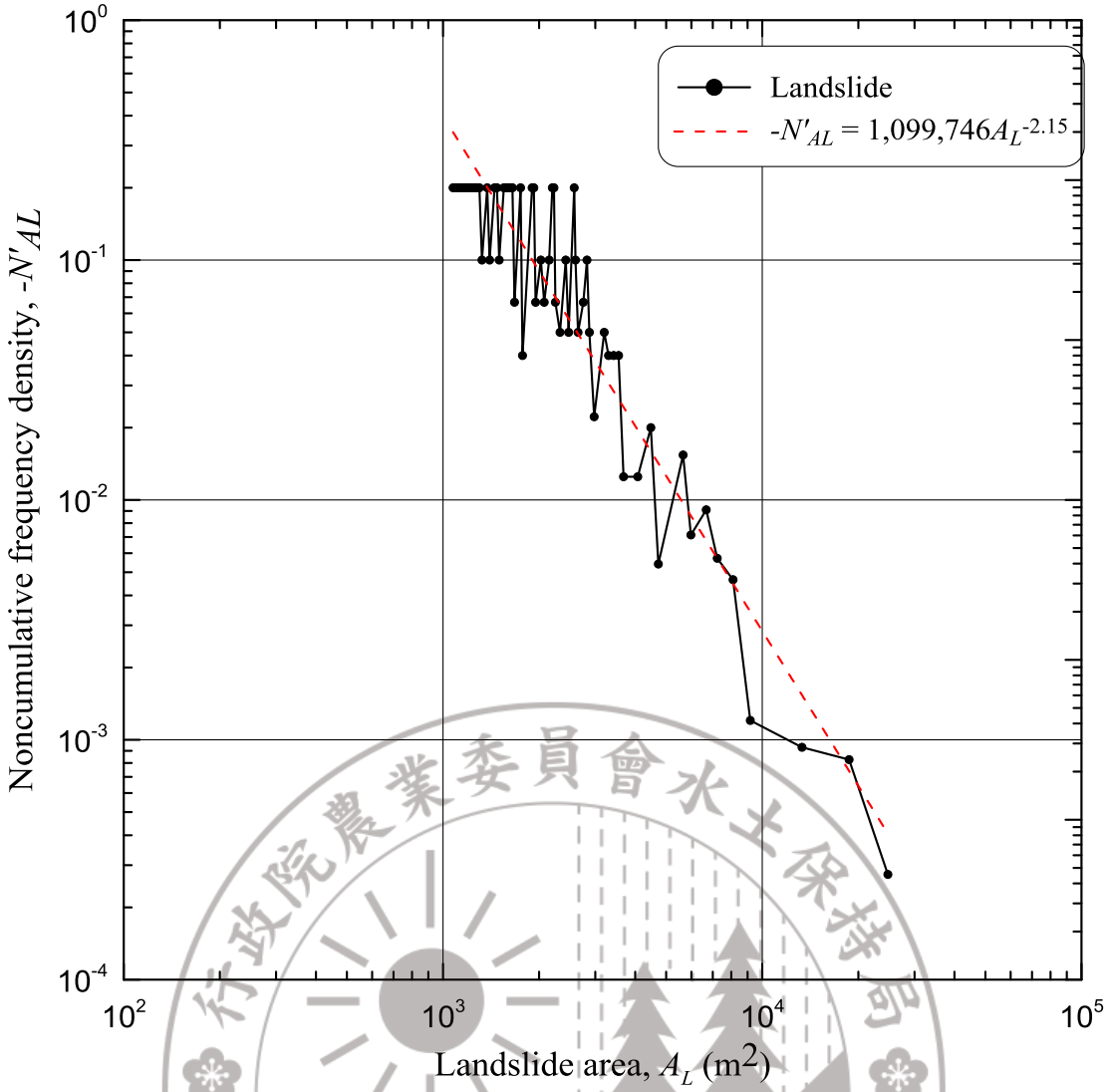


圖 3-16 案例三 2012-2011 年間崩塌面積與頻率關係圖

$$-N'_{AL}=1{,}099{,}745A_L^{-2.15} \quad (r^2 = 0.89) \qquad (3\text{-}6)$$

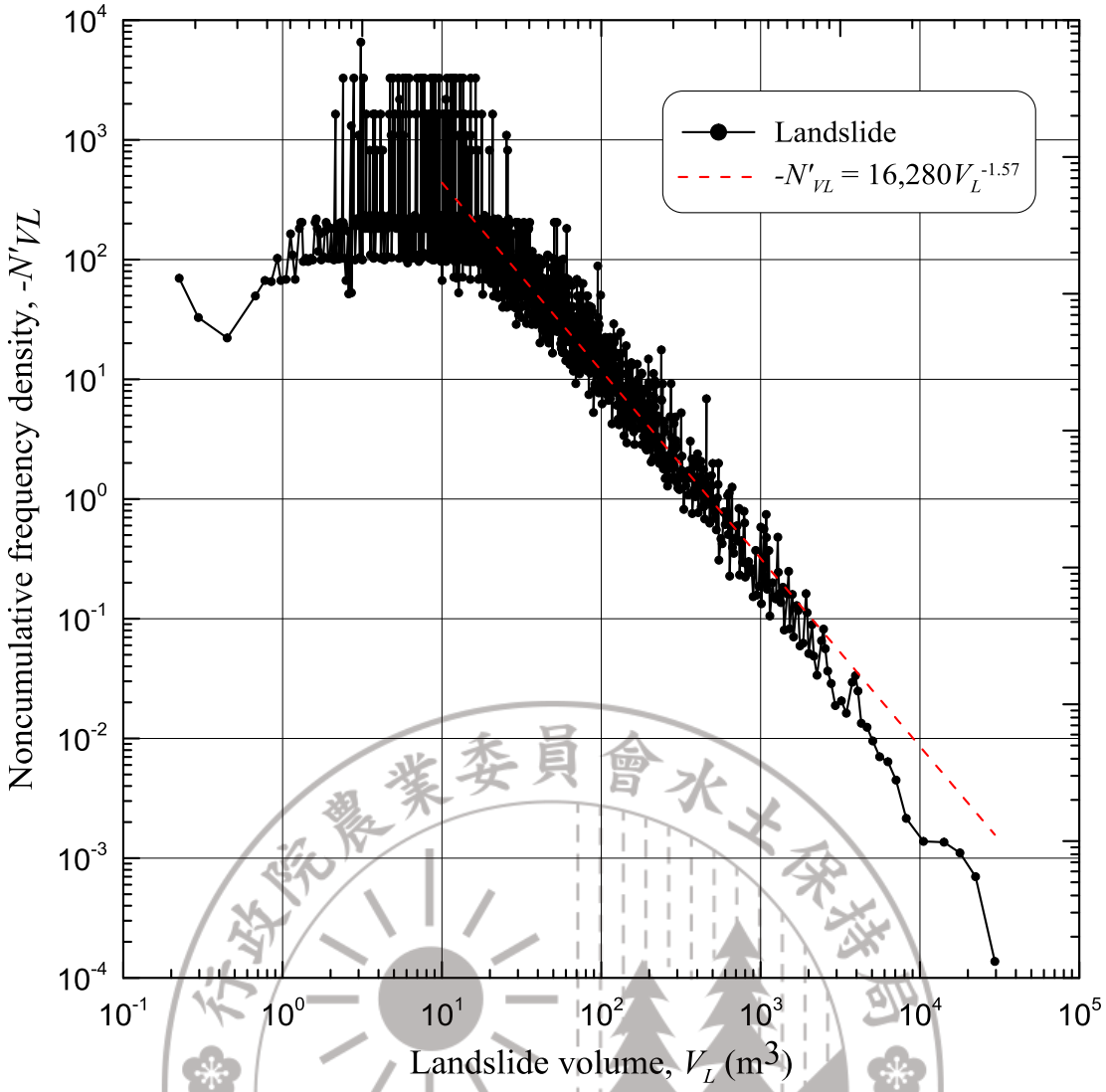


圖 3-17 案例三 2012-2011 年間崩塌體積與頻率關係圖

$$-N'_{VL}=16{,}280V_L^{-1.57} \quad (r^2 = 0.92) \qquad (3\text{-}7)$$

為了解計畫研究區域崩塌頻率與規模關係之變化情形，本研究針對三個案例之共同區域分別繪製共同區域非累積崩塌頻率與面積關係圖(圖 3-18)及非累積崩塌頻率與體積關係圖(圖 3-19)。分析結果顯示案例一(2009 年)之崩塌數量較少，而案例三(2011-2012 年)在小規模

崩塌之頻率較案例二(2010-2011 年)略高。在崩塌頻率與體積關係式亦有相同之趨勢，若能採適當之內差方法配合總累積雨量，有助於建立總降雨量與崩塌體積之估計。

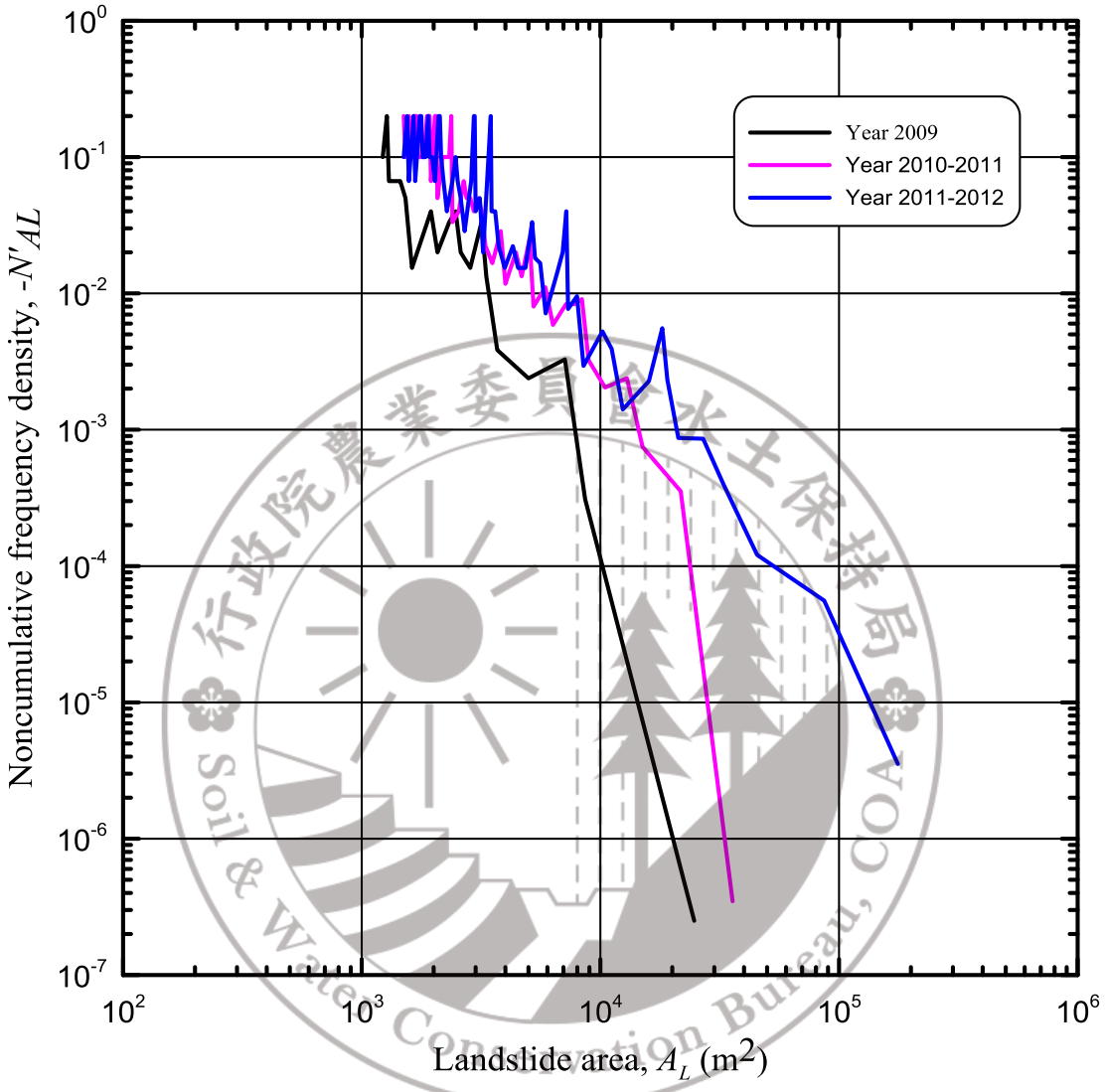


圖 3-18　案例一至案例三共同區域非累積崩塌頻率與面積關係圖

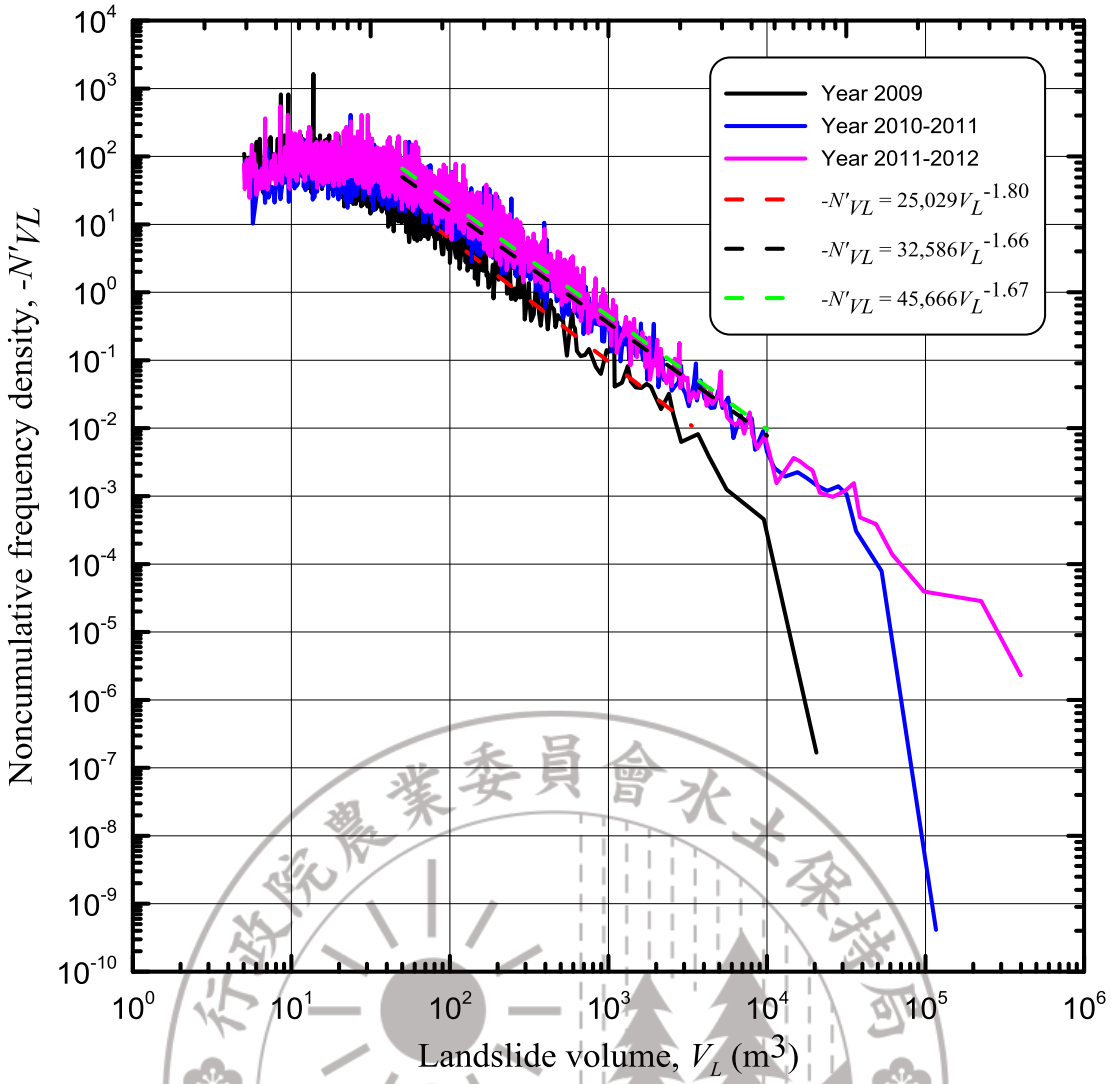


圖 3-19 案例一至案例三共同區域非累積崩塌頻率與體積關係圖

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

(五) 崩塌面積與體積關係建立

各案例之崩塌體積及面積之回歸圖形與關係式分別如下圖 3-20 至圖 3-22 所示。公式(3-8)(3-11)(3-14)為各案例崩塌數據回歸分析後的關係式，公式(3-9)(3-12)(3-15)為個案例中崩塌面積小於 1,000m^2 的回歸公式，公式(3-10)(3-13)(3-16)則為崩塌面積大於 1,000m^2 的回歸公式。

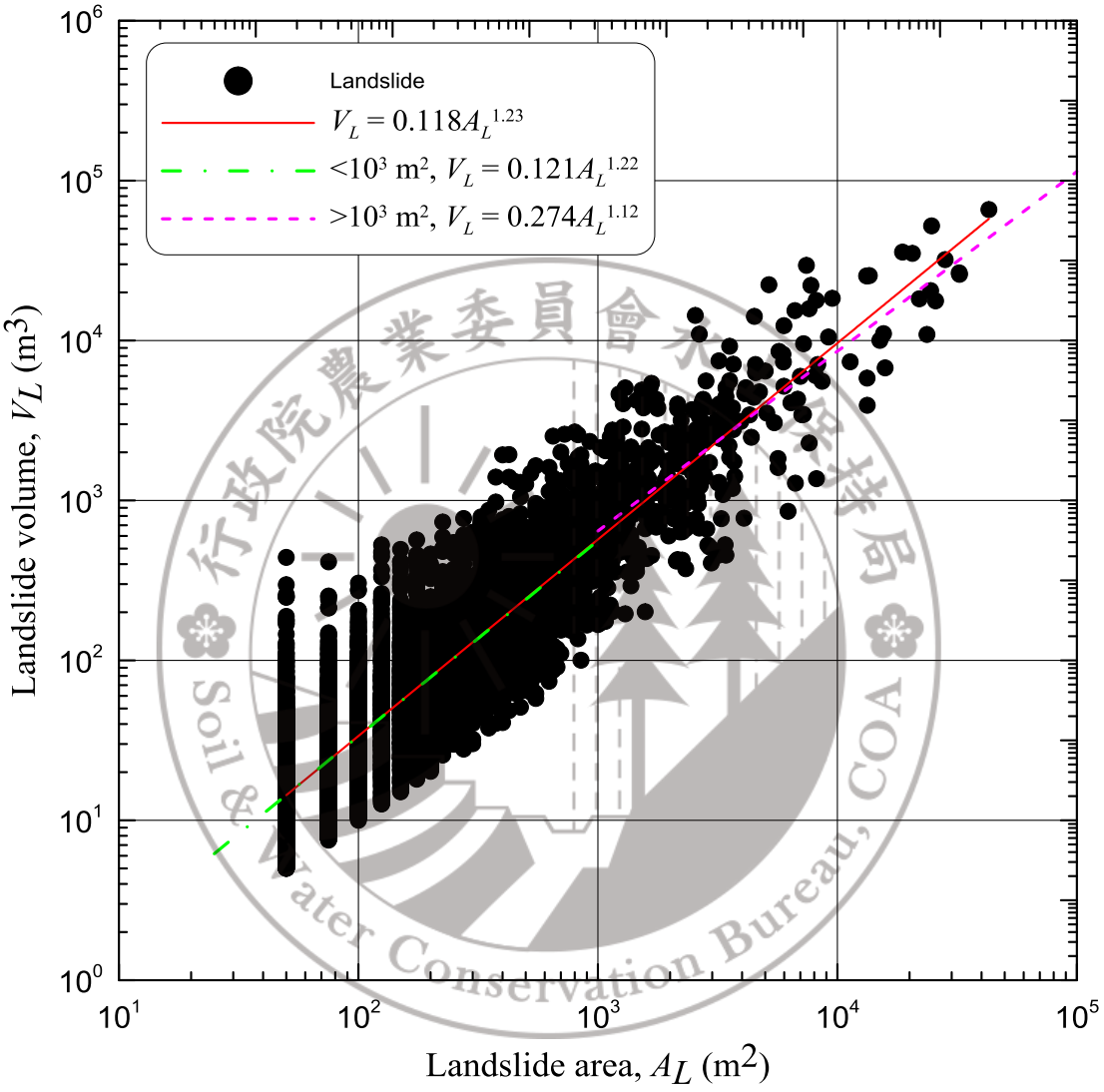


圖 3-20 案例一 2009 年間崩塌面積與體積關係圖

$V_L = 0.118A_L^{1.23}$ (for all data, r^2=0.76) (3-8)

$V_L = 0.121A_L^{1.22}$ ($A_L \leqq$ 1,000 m^2, r^2=0.65) (3-9)

$V_L = 0.274A_L^{1.12}$ (A_L > 1,000 m^2, r^2=0.58) (3-10)

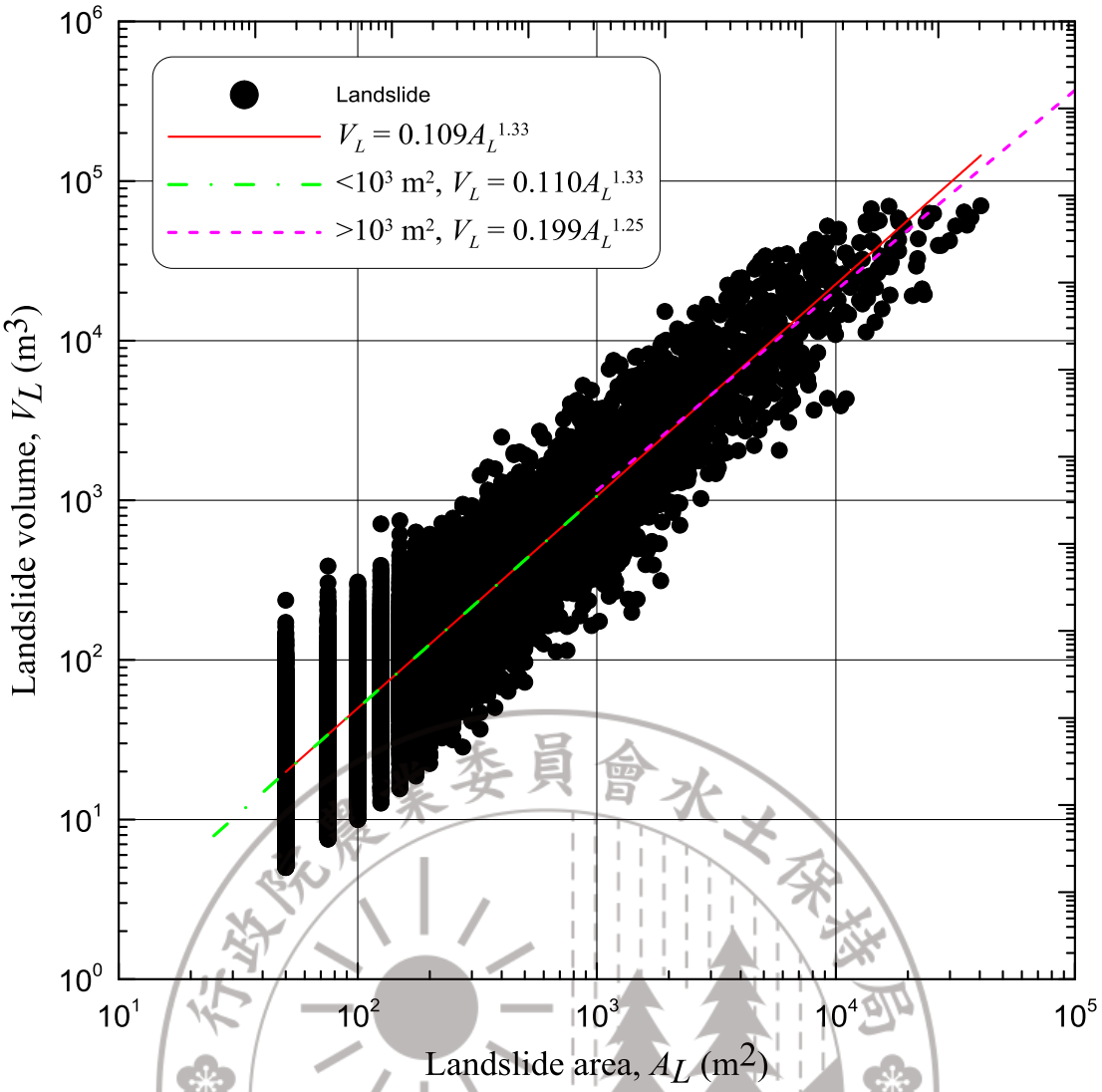


圖 3-21 案例二 2010-2011 年間崩塌面積與體積關係圖

$$V_L = 0.109A_L^{1.33} \text{ (for all data, } r^2=0.83) \quad (3\text{-}11)$$

$$V_L = 0.110A_L^{1.33} \text{ } (A_L \leqq 1{,}000 \text{ m}^2, \quad r^2=0.73) \quad (3\text{-}12)$$

$$V_L = 0.199A_L^{1.25} \text{ } (A_L > 1{,}000 \text{ m}^2, \quad r^2=0.68) \quad (3\text{-}13)$$

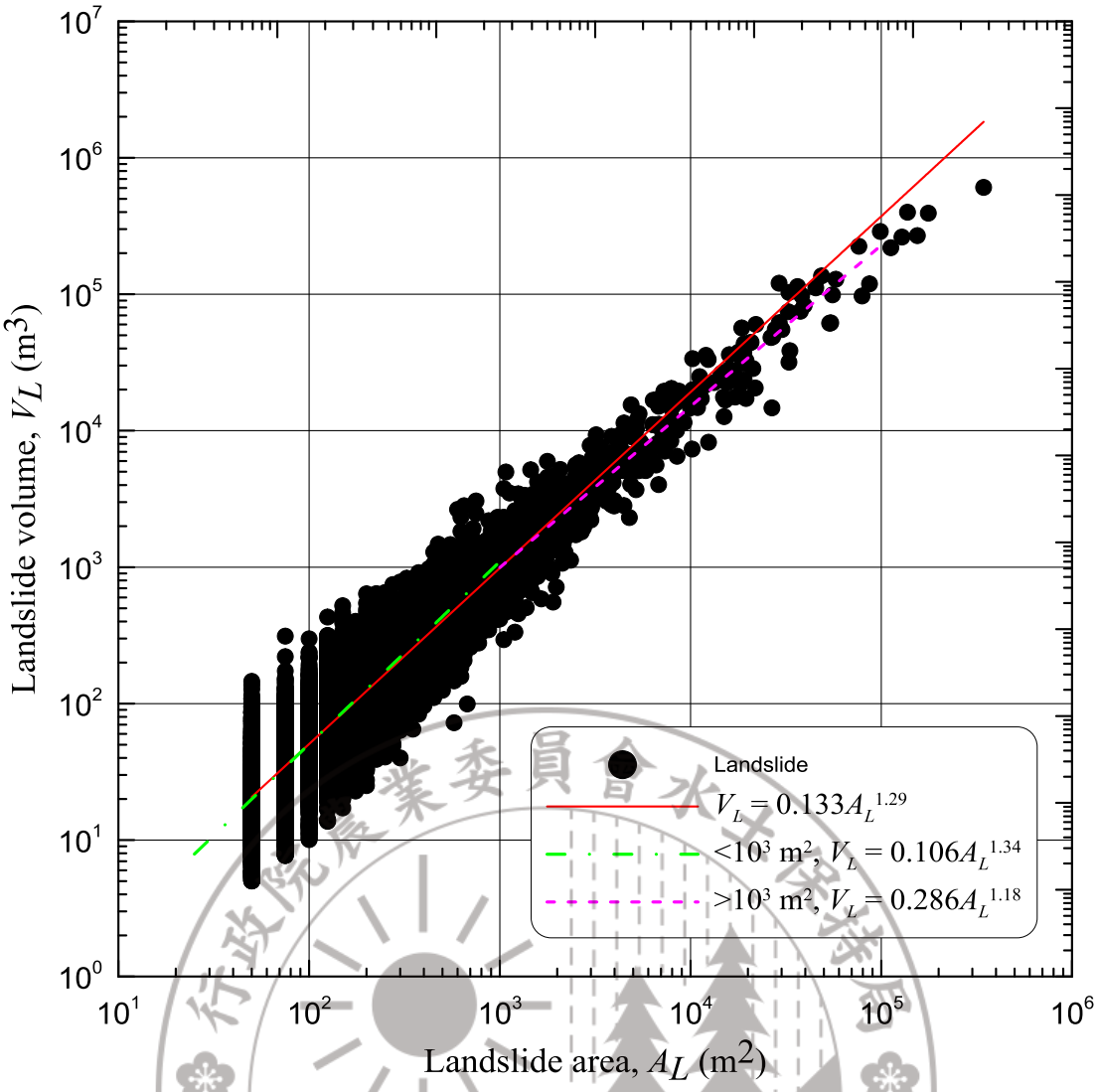


圖 3-22　案例三 2011-2012 年間崩塌面積與體積關係圖

$V_L = 0.133A_L^{1.29}$ (for all data, r^2=0.86)　　(3-14)

$V_L = 0.106A_L^{1.34}$ ($A_L \leqq$ 1,000 m^2, r^2=0.76)　　(3-15)

$V_L = 0.286A_L^{1.18}$ (A_L > 1,000 m^2, r^2=0.89)　　(3-16)

整理各崩塌數據後可由此假設推導出崩塌面積與體積之關係式。因自我相似的特性，崩塌的長、寬和深度相互成正比，則崩塌面積的 0.5 次方與深度成正比，而崩塌體積又等於其面積與深度的乘積，因此在崩塌呈現。

由上述案例得知，本研究所回歸之直線在大範圍的崩塌(約大於 1,000m^2)會高於實際所測量值，因少數崩塌地體積遠高於該面積回歸線之上，造成誤差增加，在實際的應用上有高估的可能，故本研究忽略這些數據，但在估計小面積的崩塌地(小於 1,000m^2)由於資料較分散，變異性亦較大。

許多研究指出崩塌有自我相似的特性，崩塌地的長、寬和深度相互成正比，當崩塌呈現完整的自我相似的特性時，崩塌體積與其面積的 1.5 次方成正比，即 $V_L = \varepsilon_2 \cdot A^{1.5}$，本研究三個案例結果分別為 1.23、1.33 及 1.29 次方，顯示大部分崩塌地不完全具自相似性。

進一步討論深層與淺層崩塌，前 10%的崩塌體積分別佔個案例總崩塌體積的 78.1%、80.5%、78.5%，前 20%的大崩塌體積佔總崩塌體積之 87.0%、88.3%、86.8%，由此可知較大型的崩塌事件會影響崩塌體積的估計結果，小型的崩塌事件數量雖佔大部份，但總體積卻不到總崩塌體積 15%，對總崩塌體積之影響甚小。

各案例之崩塌體積及面積之關係可再依不同平均滑動深度進行回歸，回歸圖形與關係式分別如下圖 3-23 至圖 3-25 所示。並依平均崩塌深度>2m、1-2m、0.5-1m，及崩塌面積大於 1,000m^2 及小於 1,000m^2 的各案例崩塌數據回歸分析後的關係式。

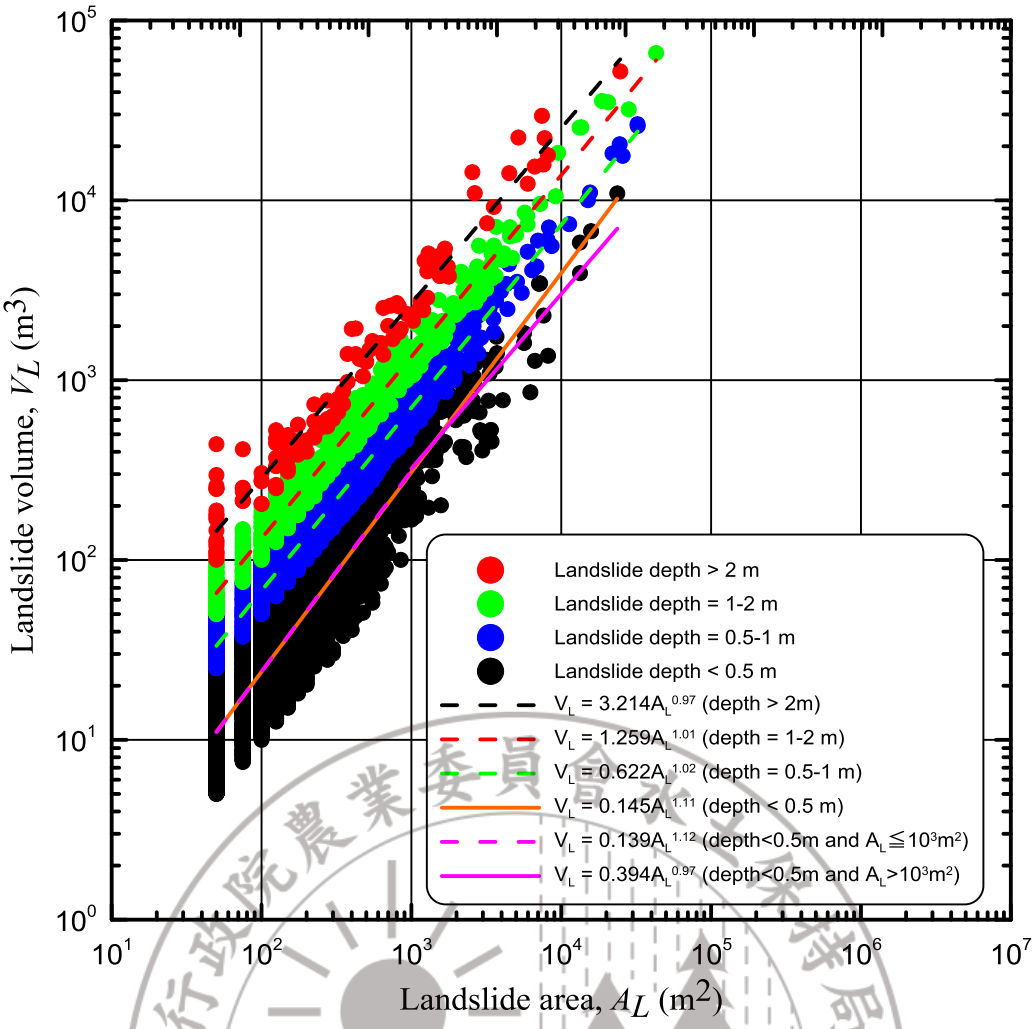


圖 3-23　案例一 2009 年間淺層與深層崩塌面積與體積關係圖

$V_L = 3.214A_L^{0.97}$ (depth $\geqq$ 2 m, $r^2 = 0.96$)　(3-19)

$V_L = 1.259A_L^{1.01}$ (depth =1-2 m, $r^2 = 0.98$)　(3-20)

$V_L = 0.622A_L^{1.02}$ (depth =0.5-1 m, $r^2 = 0.97$)　(3-21)

$V_L = 0.145A_L^{1.11}$ (depth < 0.5 m, $r^2 = 0.83$)　(3-22)

$V_L = 0.139A_L^{1.12}$ (depth < 0.5 m and $A_L \leqq$ 1,000 m^2, $r^2 = 0.79$)　(3-23)

$V_L = 0.394A_L^{0.97}$ (depth < 0.5 m and A_L > 1,000 m^2, $r^2 = 0.73$)　(3-24)

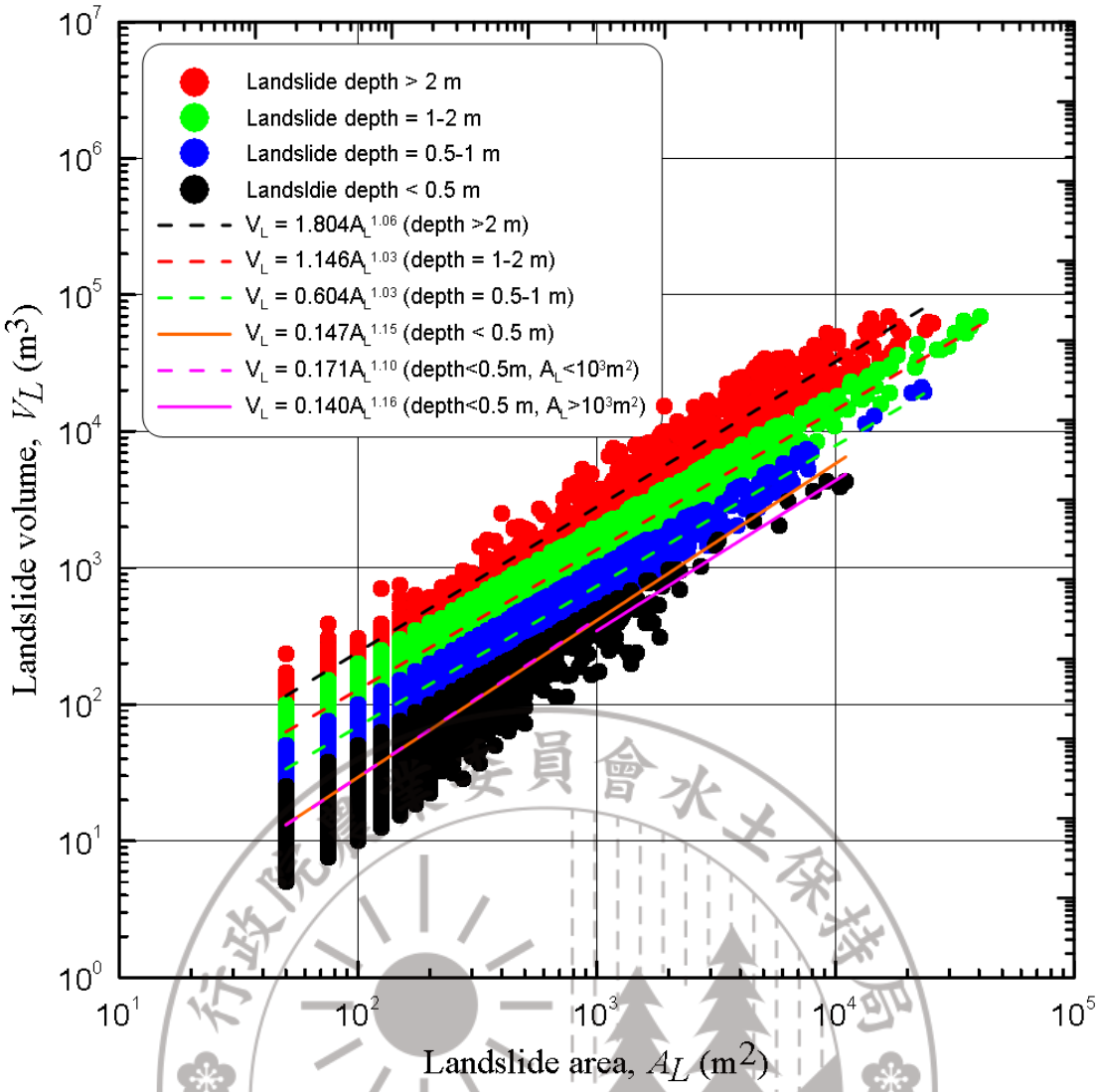


圖 3-24 案例二 2010-2011 年間淺層與深層崩塌面積與體積關係圖

$V_L = 1.804A_L^{1.06}$ (depth ≧ 2 m, $r^2 = 0.98$) (3-25)

$V_L = 1.146A_L^{1.02}$ (depth = 1-2 m, $r^2 = 0.98$) (3-26)

$V_L = 0.604A_L^{1.03}$ (depth = 0.5-1 m, $r^2 = 0.96$) (3-27)

$V_L = 0.147A_L^{1.15}$ (depth < 0.5 m, $r^2 = 0.81$) (3-28)

$V_L = 0.140A_L^{1.16}$ (depth < 0.5 m and A_L ≦ 1,000 m^2, $r^2 = 0.79$) (3-29)

$V_L = 0.171A_L^{1.10}$ (depth < 0.5 m and A_L > 1,000 m^2, $r^2 = 0.82$) (3-30)

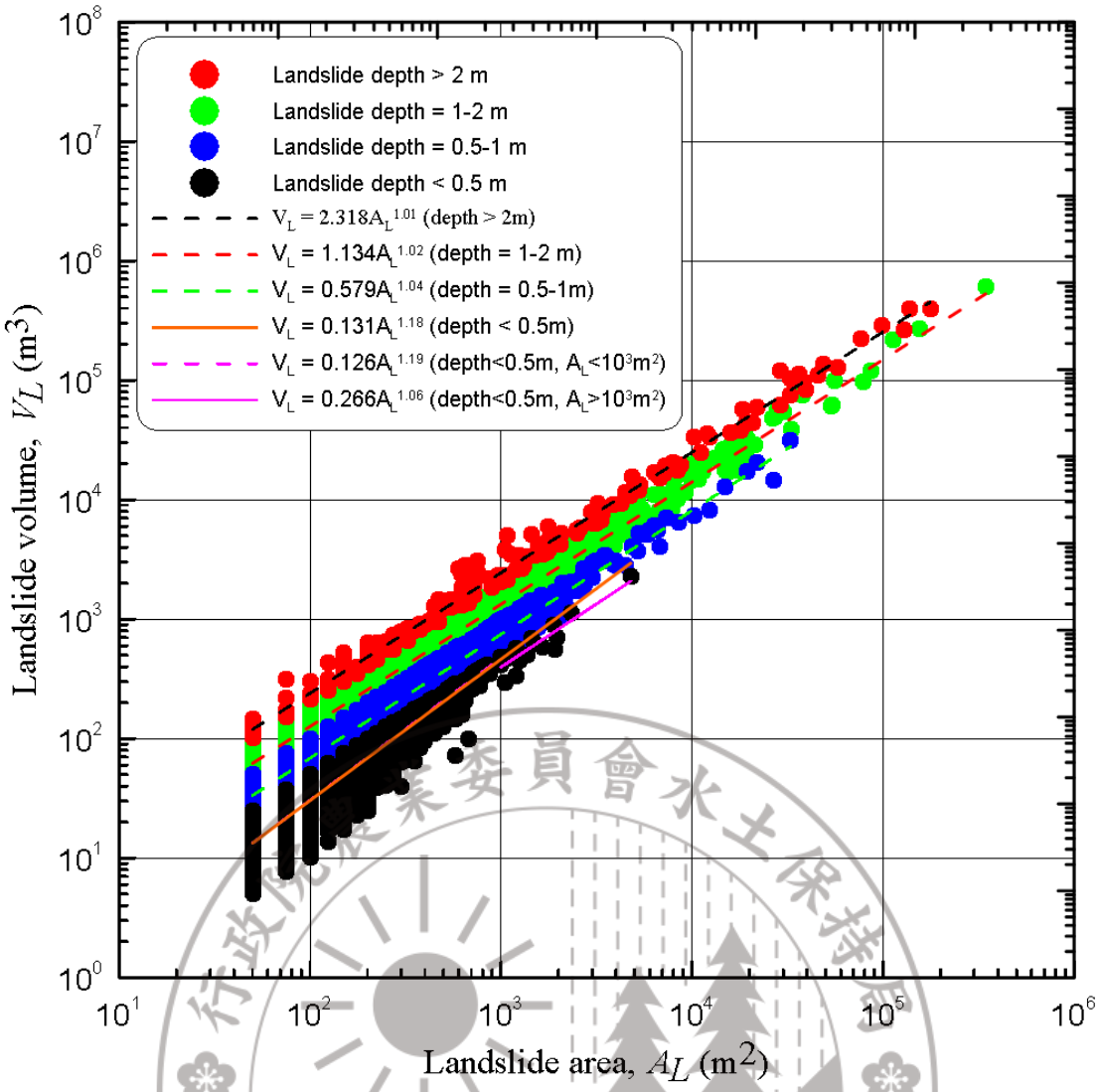


圖 3-25　案例三 2011-2012 年間淺層與深層崩塌面積與體積關係圖

$V_L = 2.318A_L^{1.01}$ (depth ≧ 2 m, $r^2 = 0.99$)　(3-31)

$V_L = 1.134A_L^{1.02}$ (depth =1-2 m, $r^2 = 0.98$)　(3-32)

$V_L = 0.579A_L^{1.04}$ (depth =0.5-1 m, $r^2 = 0.96$)　(3-33)

$V_L = 0.131A_L^{1.18}$ (depth < 0.5 m, $r^2 = 0.80$)　(3-34)

$V_L = 0.126A_L^{1.19}$ (depth < 0.5 m and A_L ≦ 1,000 m², $r^2 = 0.79$)　(3-35)

$V_L = 0.266A_L^{1.06}$ (depth < 0.5 m and A_L > 1,000 m², $r^2 = 0.83$)　(3-36)

第二節 討論與驗證

1. 地質條件之影響

為了解地質條件對崩塌面積-體積關係之影響，本計畫針對研究區內三個主要地質區砂岩/頁岩/煤質頁岩、硬頁岩/板岩/千枚岩、硬頁岩/砂頁岩/砂岩，之影響進行比較。分析結果顯示(圖 3-27~圖 3-29)，僅在 2009 年間之硬頁岩/板岩/千枚岩地質區較其他區域之它體積較高，但在後續年度皆趨近於一致;即不同地質區對崩塌面積-體積關係之影響並不顯著。

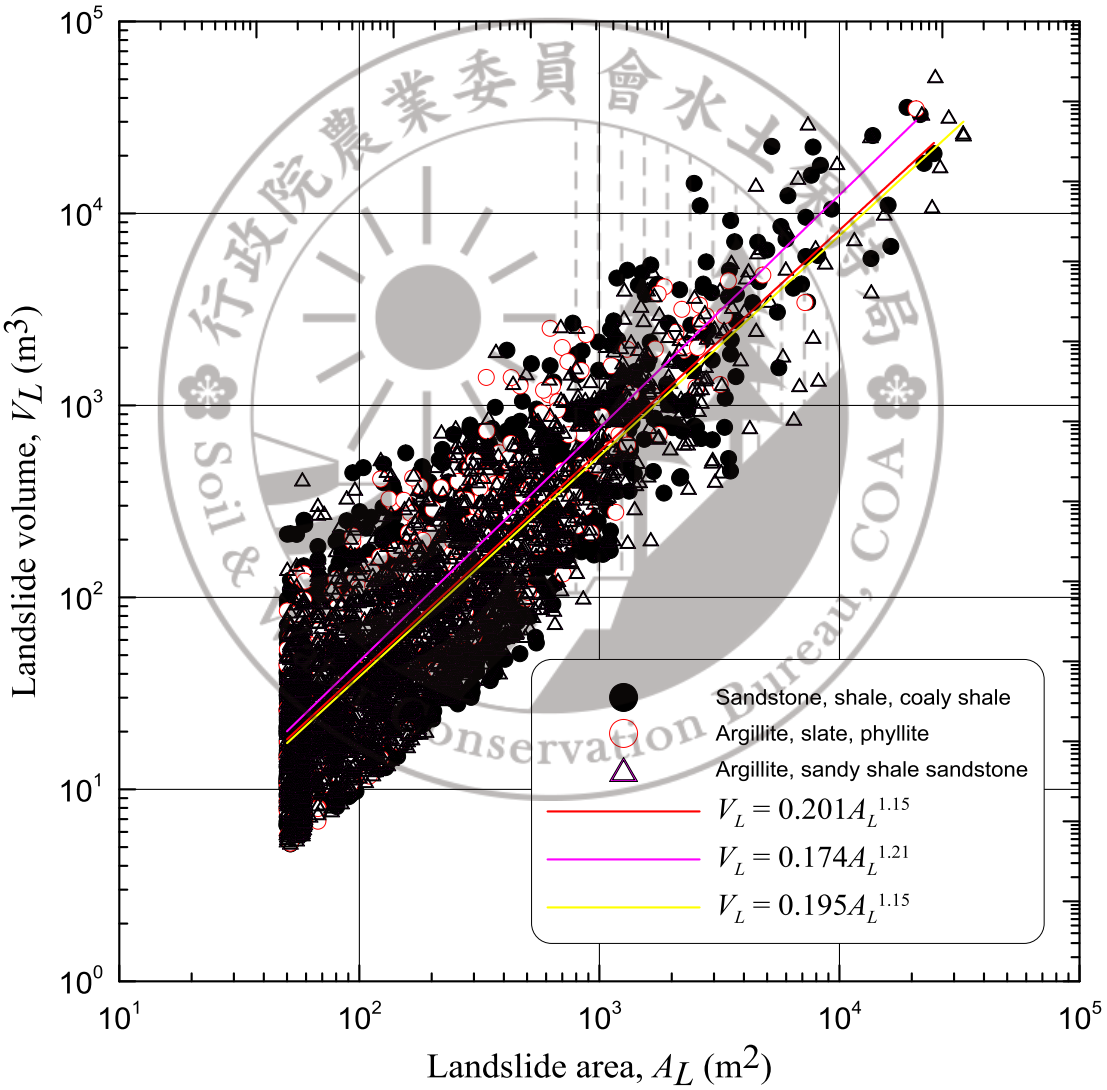


圖 3-27 案例一 2009 年間不同地質區崩塌面積與體積關係圖

$V_L = 0.201A_L^{1.15}$ (砂岩，頁岩，煤質頁岩, $r^2 = 0.74$)　　(3-37)

$V_L = 0.174A_L^{1.21}$ (硬頁岩，板岩，千枚岩, $r^2 = 0.75$)　　(3-38)

$V_L = 0.195A_L^{1.15}$ (硬頁岩，砂頁岩，砂岩, $r^2 = 0.75$)　　(3-39)

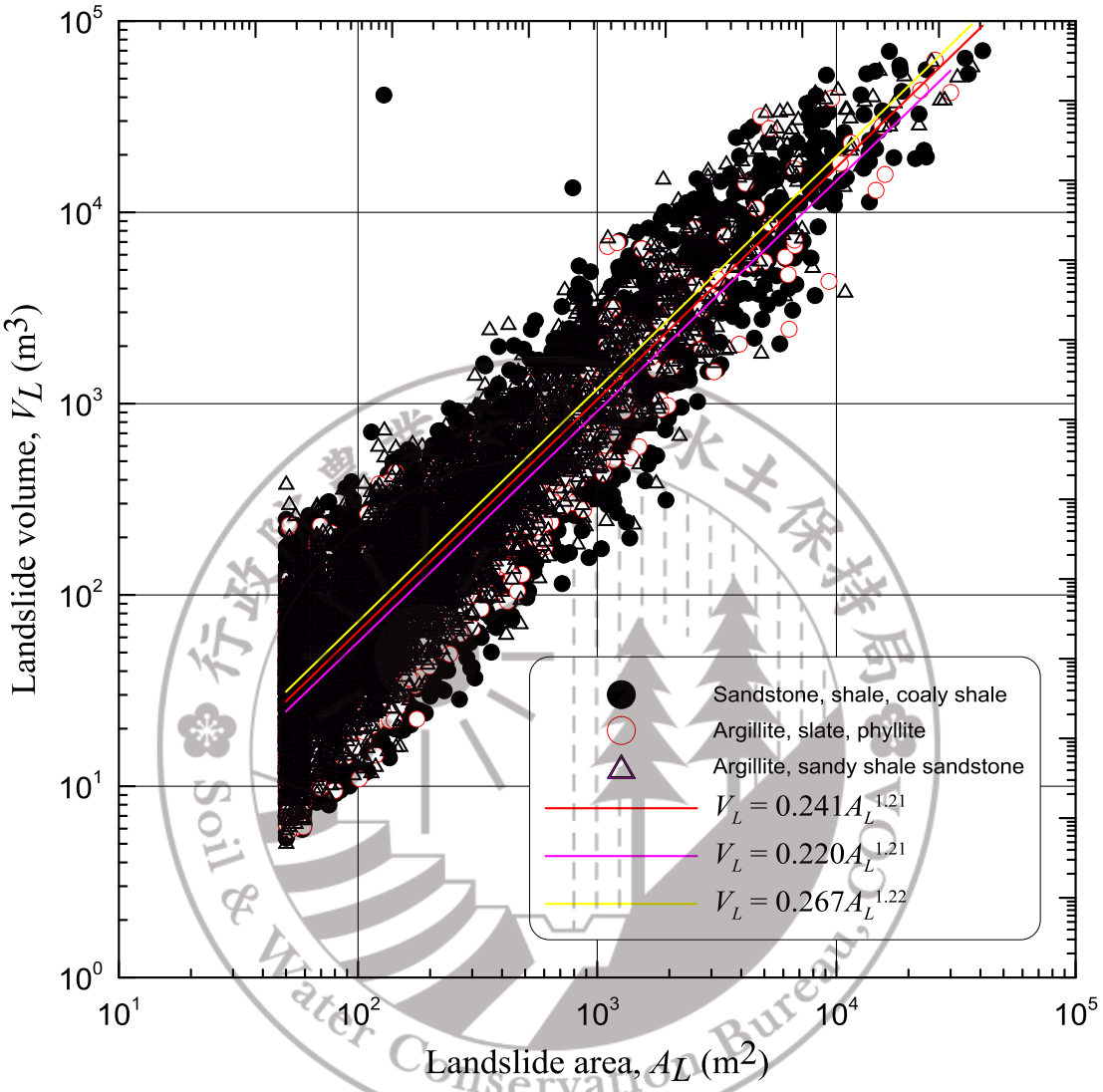


圖 3-28　案例二 2010-2011 年間不同地質區崩塌面積與體積關係圖

$V_L = 0.241A_L^{1.21}$ (砂岩，頁岩，煤質頁岩, $r^2 = 0.82$)　　(3-37)

$V_L = 0.220A_L^{1.21}$ (硬頁岩，板岩，千枚岩, $r^2 = 0.82$)　　(3-38)

$V_L = 0.267A_L^{1.22}$ (硬頁岩，砂頁岩，砂岩, $r^2 = 0.82$)　　(3-39)

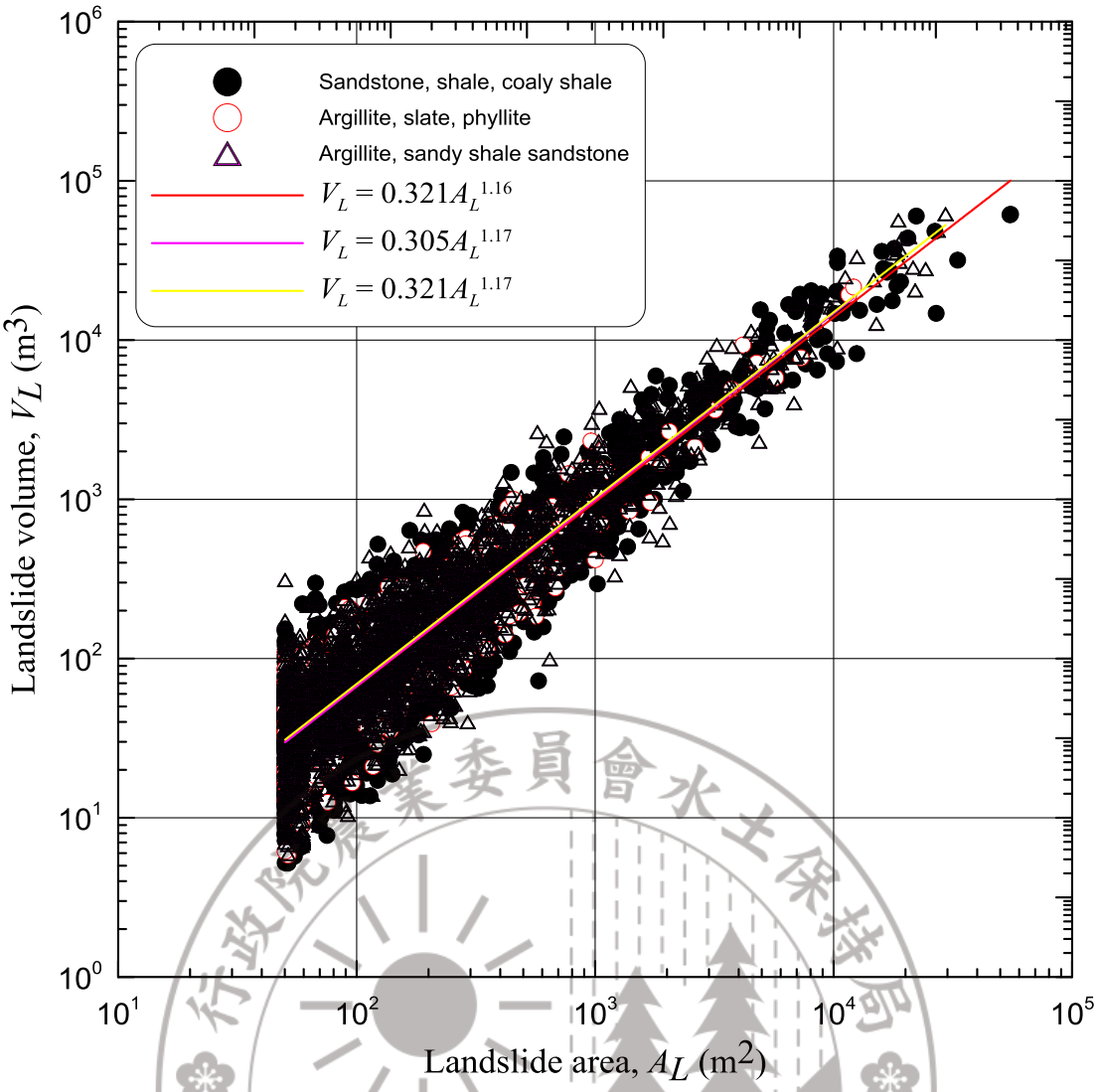


圖 3-29 案例三 2011-2012 年間不同地質區崩塌面積與體積關係圖

$V_L = 0.321A_L^{1.16}$ (砂岩，頁岩，煤質頁岩, $r^2 = 0.84$) (3-40)

$V_L = 0.305A_L^{1.17}$ (硬頁岩，板岩，千枚岩, $r^2 = 0.81$) (3-41)

$V_L = 0.321A_L^{1.17}$ (硬頁岩，砂頁岩，砂岩, $r^2 = 0.84$) (3-42)

2. 沖刷區與堆積區之差異

本研究針對崩塌面積之判釋採 DEM 相減後之沖刷區，若以 2009 年 DEM 資料為例，採堆積區回歸之方程式如下:

$$V_L = 0.174A_L^{1.20} \ (r^2 = 0.77, \text{ for all data}) \quad (3\text{-}43)$$

$$V_L = 0.199A_L^{1.17} \ (A_L \leqq 1{,}000 \text{ m}^2, r^2 = 0.60) \quad (3\text{-}44)$$

$$V_L = 0.237A_L^{1.17} \ (A_L > 1{,}000 \text{ m}^2, r^2 = 0.63) \quad (3\text{-}45)$$

由於沖刷區與堆積區體積之差異如同實方與鬆方體積，因此若採堆積區估計崩塌體積會比採沖刷區估計來的高，如圖 3-30。

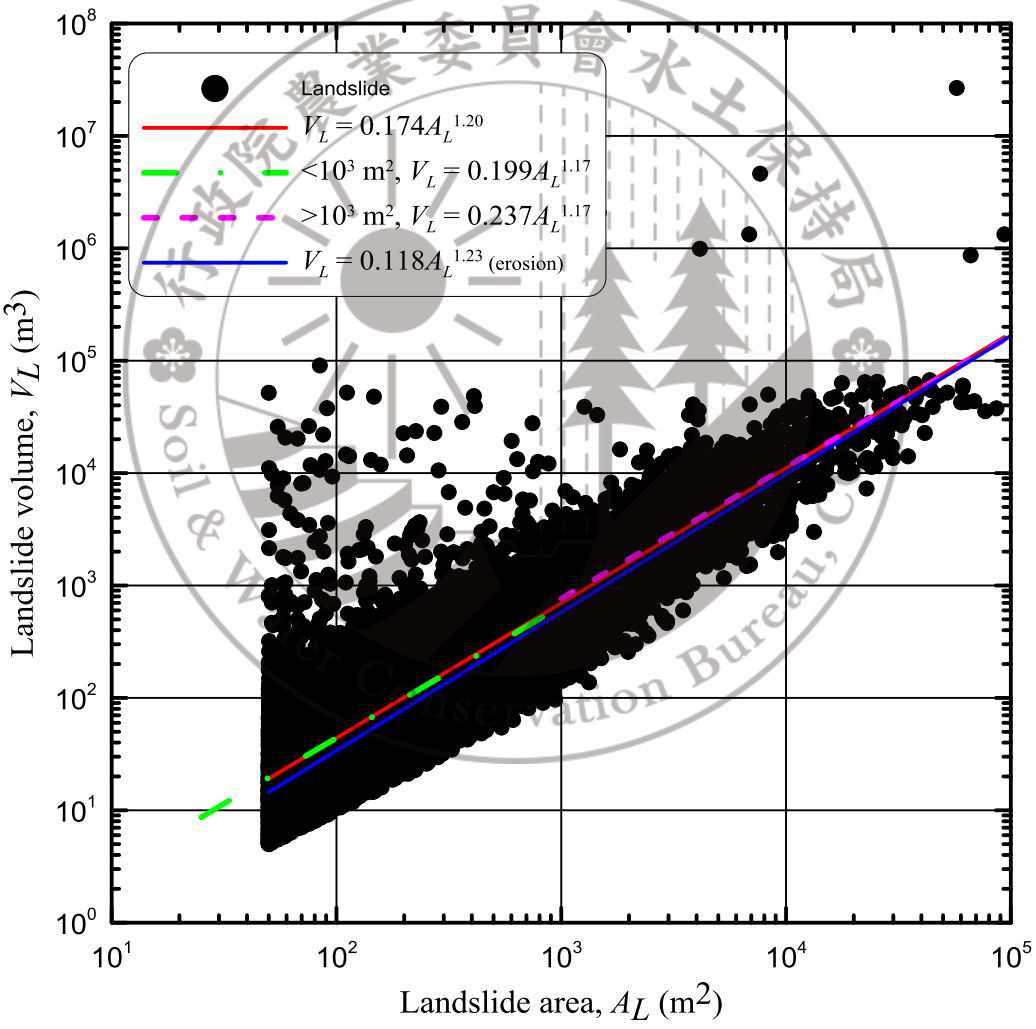


圖 3-30 案例一 2009 年間不同地質區崩塌面積與體積關係圖

3. 崩塌面積與平均滑動深度

中央地質調查所建議依崩塌面積大小採不同之的滑動深度估計崩塌體積(如表 3-3)。為求得計畫區之代表性崩塌滑動深度，本計畫依地調所崩塌面積之區隔，將該區域不同崩塌面積區間之平均崩塌深度(以每個崩塌體積除以面積之平均深度再依崩塌數目取平均值)比較。比較結果本區之崩塌深度皆較地調所建議值低，顯示用建議之平均代表深度來估計崩塌體積具極高之誤差性且偏高估。

表 3-3 崩塌面積與平均滑動深度比較表

滑動面積(ha)	平均代表深度(m)(地調所)	本計畫區域平均代表深度(m)		
		案例一(2009 年)	案例二(2010 -2011 年)	案例三(2011 -2012 年)
0-0.1	1	0.56	0.89	0.85
0.1-1	2	0.93	1.77	1.28
1-10	5	1.05	2.10	1.66
>10	10	-	-	-

4. 比較與驗證

比較本計畫石門水庫集水區三個不同時期之崩塌體積與面積之回歸方程式(圖 3-31)。其中 2009 年崩塌事件之回歸方程式較其他兩年度低，且其他兩年度之公式相近，本計畫建議採下列方程式作為石門水庫集水區之崩塌面積與體積估計方程式。

$$V_L = 0.13A_L^{1.30} \text{ (全區, } A_L < 10^5 \text{ m}^2\text{)} \quad (3\text{-}46)$$

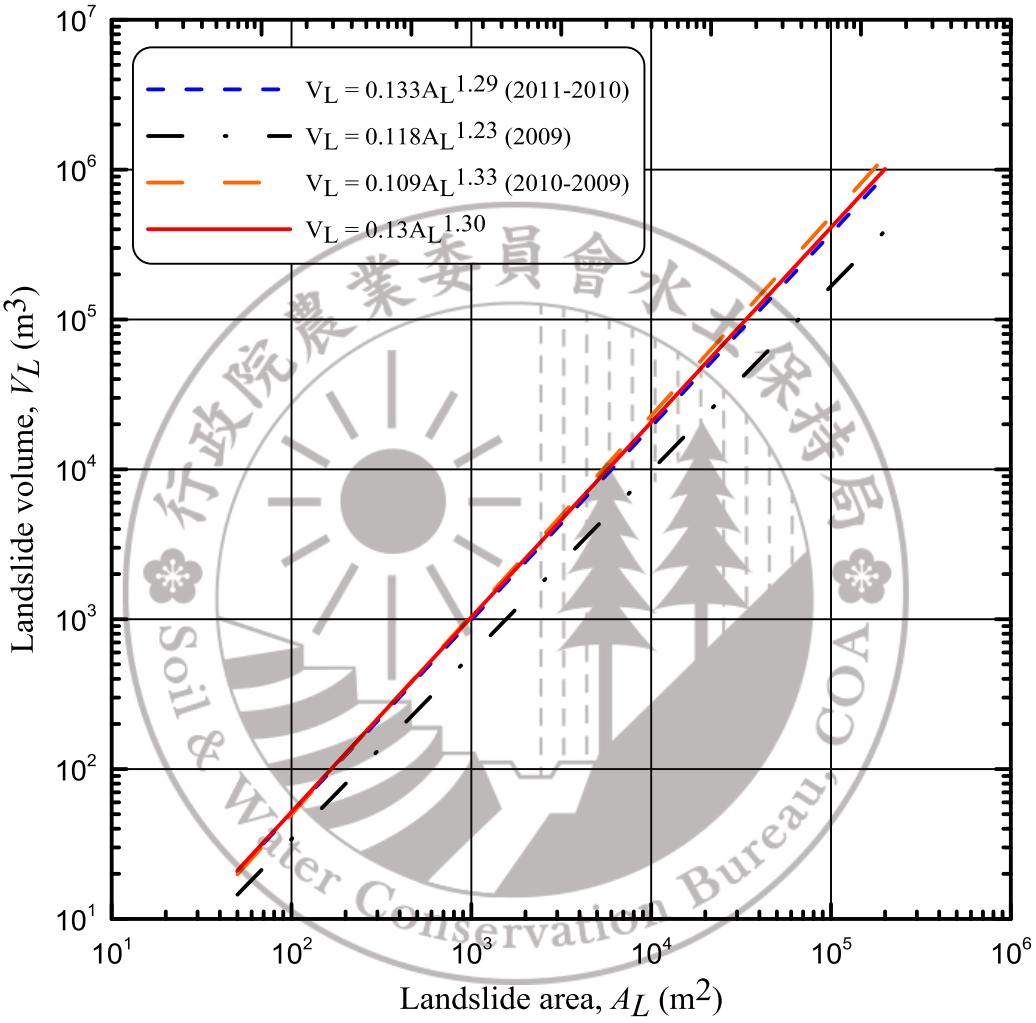


圖 3-31 石門水庫集水區三個不同時期之崩塌體積與面積之回歸方程式比較

圖 3-32 為石門水庫集水區三個不同時期之深層崩塌(滑動深度超過 2m)之崩塌體積與面積之回歸方程式比較。圖中顯示石門水庫集水區三個不同時期之崩塌體積與面積之回歸方程式皆相近。本計畫建議採下列方程式作為石門水庫集水區深層崩塌之崩塌面積與體積估計方程式。

$$V_L = 3.0A_L^{1.0} \text{ (崩塌深度超過 2m, } A_L < 10^5 \text{ m}^2\text{)} \quad (3\text{-}47)$$

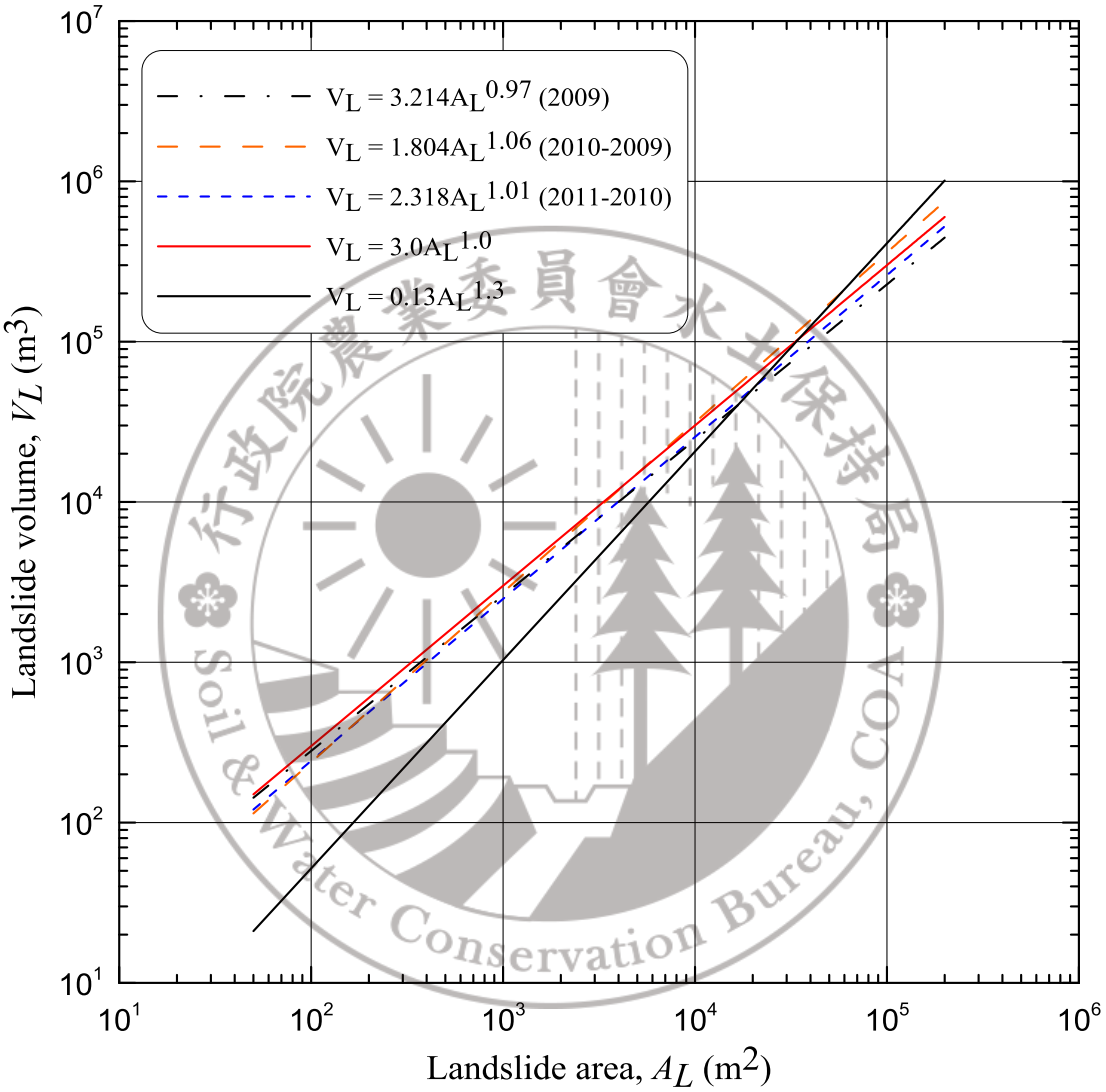


圖 3-32 石門水庫集水區三個不同時期之深層崩塌(滑動深度超過 2m)之崩塌體積與面積之回歸方程式比較

上述兩個建議公式若與國內外相關研究提出之公式比較(圖3-33)。全區之建議公式在相關公式範圍內，但深層崩塌之估計公式在面積小於 1000m^2 時較其他高，其原因為各國公式皆未依崩塌深度進行區分。

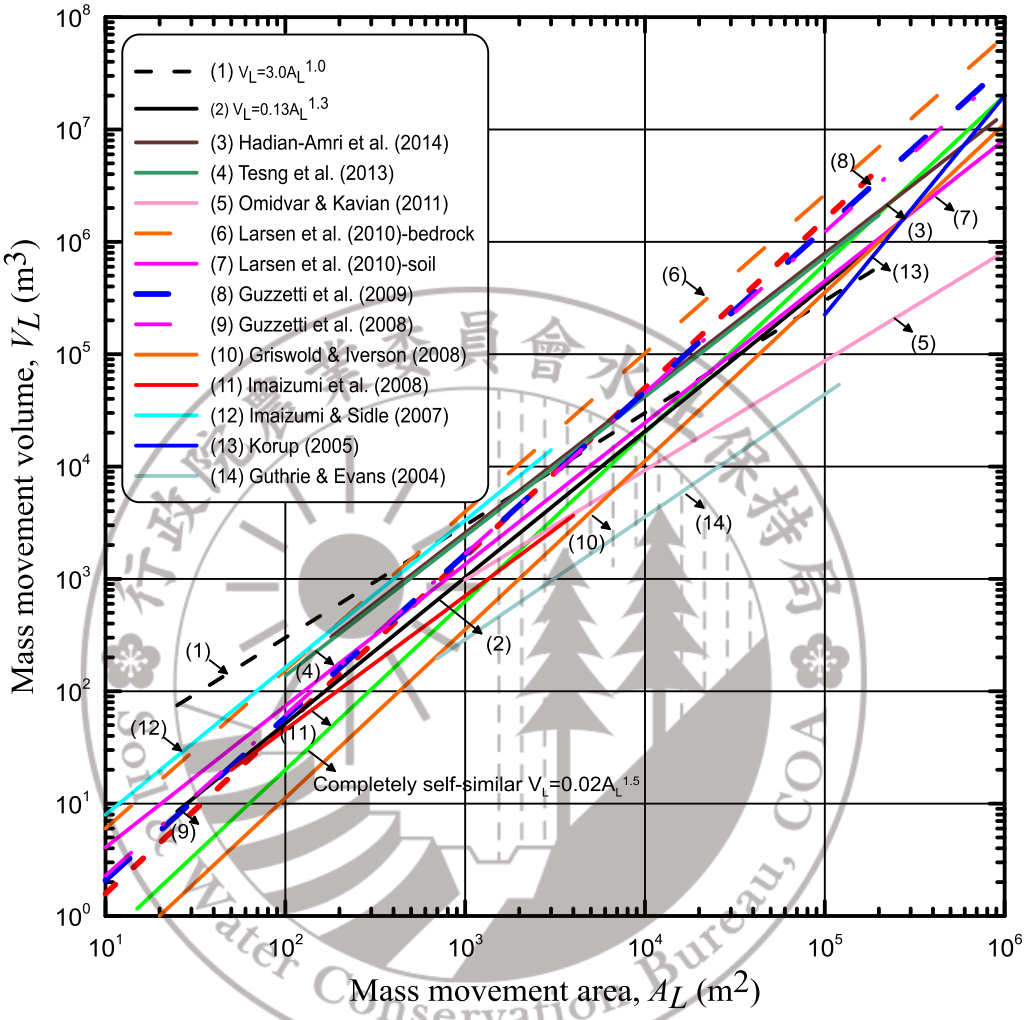


圖 3-33 國內外崩塌面積與體積關係式比較

第三節 以崩塌面積-頻率關係推估崩塌體積

本研究利用上述建立之崩塌頻率與面積之關係式，配合崩塌面積與體積之回歸公式，估計集水區之崩塌面積。在應用上只要利用衛星影像判釋出崩塌地面積即可利用上述建立公式快速評估崩塌總體積，其計算流程如圖 3-34 所示。估算結果與 DEM 相減成果比較如下表 3-4 所示，分析結果顯示用單一崩塌面積-體積回歸公式明顯高估崩塌體積，依不同滑動深度之崩塌面積-體積回歸公式僅略高於 DEM 成果，若採崩塌頻率-面積關係式依面積採不同滑動深度(表 3-3)計算僅略低估。

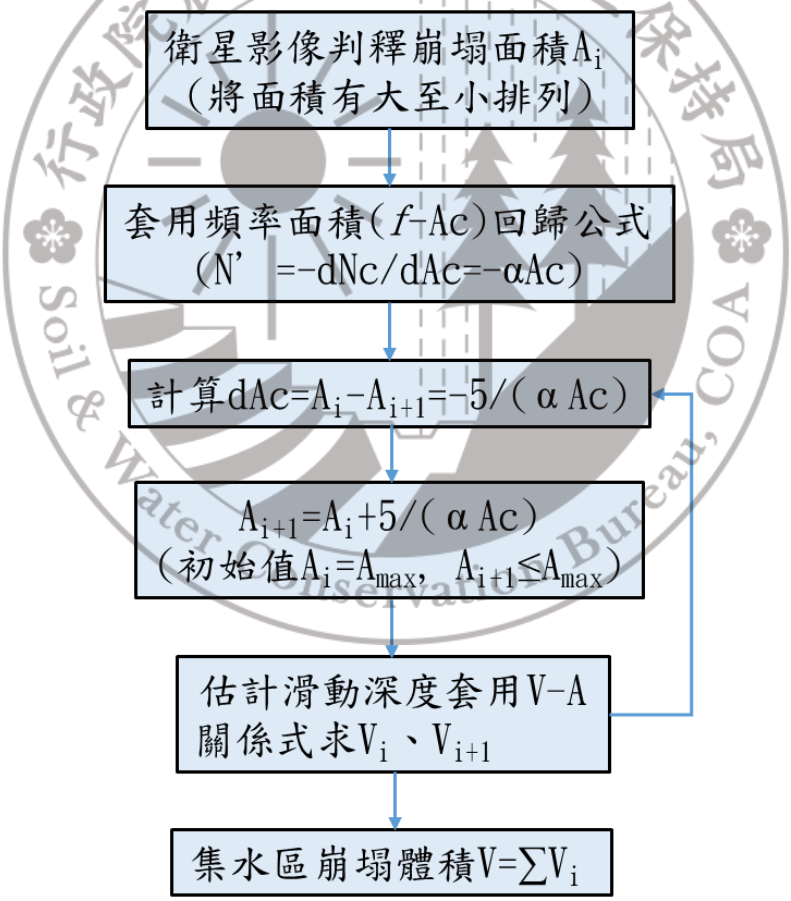


圖 3-34 崩塌面積-頻率關係推估崩塌體積計算流程圖

表 3-4 崩塌面積-頻率關係推估崩塌體積結果

案例	DEM (m^3)	利用單一V-A關係(不分深度)	誤差(%)	利用V-A關係(依不同滑動深度)	誤差(%)	利用f-Ac關係式	誤差(%)
案例一	1838288	7172297	+299%	1976146	+7.5%	1758438.97	-2.20%
案例二	11188466	139912717	+1147%	14162225	+26.6%	11856889.85	-5.70%
案例三	4425907	35980645	+722%	5087002	+14.94%	3874304.69	-8.98%

水土保持局(2015)對於大規模崩塌(面積超過10公頃)之建議崩塌體積估計公式為:

$$V_L = 0.1025A_L^{1.401} \quad (3\text{-}48)$$

若依水利署(2010)於高屏溪流域調查的 12 個案例資料，回歸出崩塌面積與體積的關係式如下式所示。

$$V_L = 0.2A_L^{1.3} \ (r^2 = 0.84) \quad (3\text{-}49)$$

劉哲欣等(2011)蒐集五個大規模岩體滑動案例實際的滑動體積與地調所及水利署之面積評估法結果比較，發現採地調所建議滑動深度及水利署建議公式所推估出之崩塌體積有明顯低估之情形。因此建議採下式回歸之二次多項關係推估出適合於大規模崩塌使用之簡易估計公式。

$$V_L = -0.0004A_L^2 + 0.4547A_L \ (r^2 = 0.97) \quad (3\text{-}50)$$

其中 A_L 崩塌面積之單位為公頃(ha)，V_L 崩塌體積之單位為百萬立方公尺(10^6 m^3)。

下圖(圖 3-35)比較本研究建議石門水庫集水區之崩塌面積與體積關係式與水土保持局、水利署及劉哲欣等(2011)建議大規模崩塌體積估計公式之比較。由於本計畫石門水庫集水區之崩塌面積多在 10 公頃以下，而劉哲欣等(2011)所蒐集之五個案例其崩塌面積皆超過 10 公頃。因此本計畫建議所採之公式並無法符合大規模崩塌體積之估計。建議大規模崩塌體積之估計應有別於一般崩塌規模，並予以分開考量。

本研究建議大規模崩塌(面積超過 10 公頃)體積之估計方程式採:

$$V_L = 551.8A_L^{0.81} \quad (r^2=0.96,\ A_L \geqq 10^5\ m^2) \qquad (3\text{-}51)$$

本研究估計 5 個實際崩塌體積與劉哲欣等(2011)估計結果之差異比較如表 3-5 所示。比較誤差率顯示，除紅菜坪案例外，其他案例採上述建議公式皆比劉哲欣等(2011)之估計式佳。

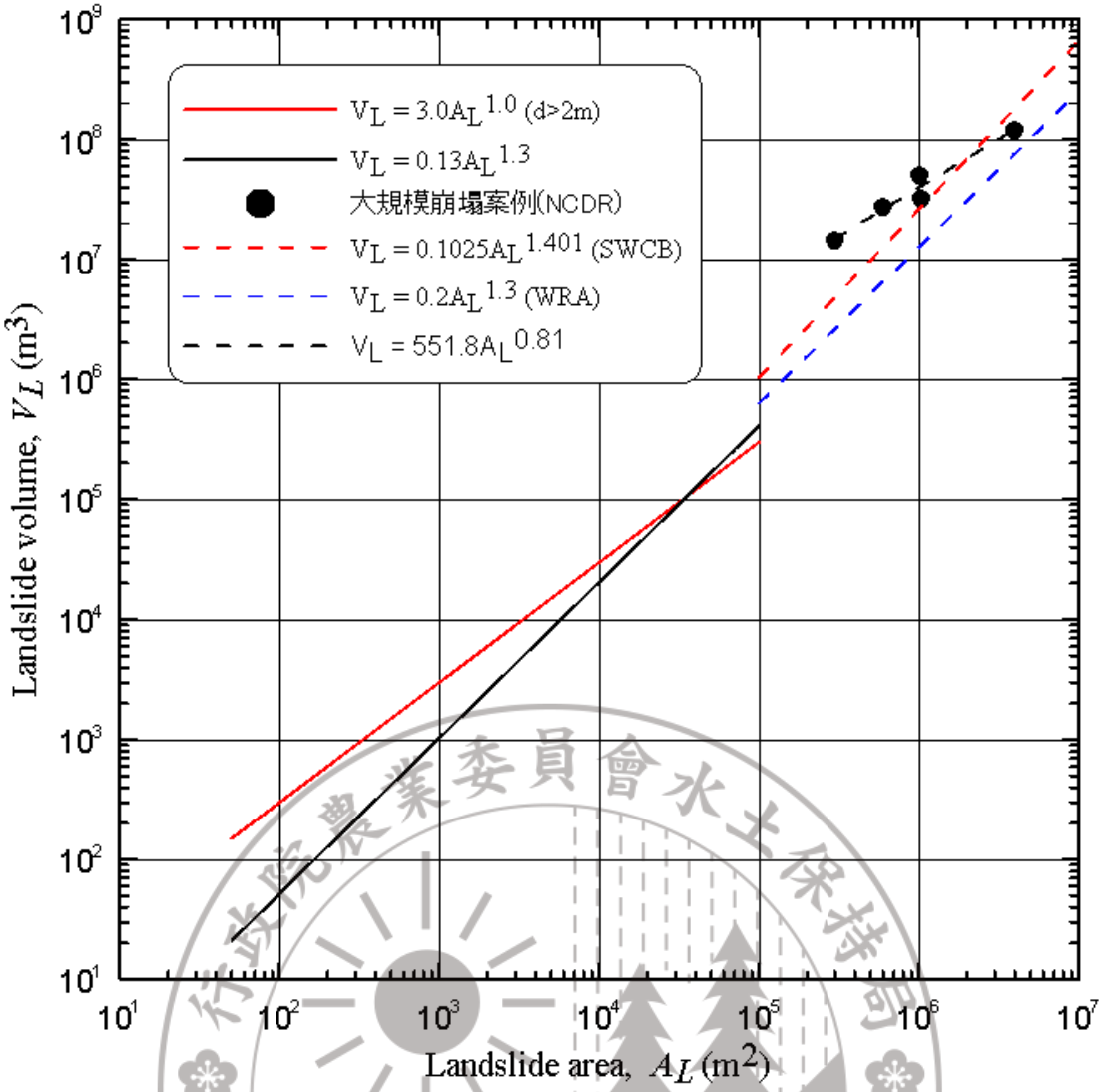


圖 3-35　崩塌面積與體積關係式與國內大規模崩塌體積估計公式比較

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

表 3-5 本研究估計崩塌體積與大規模崩塌案例體積之差異比較

編號	案例名稱	滑動面積 (ha)	DEM 土方量 (10^6m^3)	誤差率(%) (劉等，2011)	本研究計算之體積 (10^6m^3)	本研究誤差率(%)
1	廬山	30	14.37	-7.6	15.07	+4.9
2	小林村	59.2	27.12	-5.9	26.14	-3.6
3	紅菜坪	100.0	50.00	-17.1	39.97	-20
4	九份二山	102.5	32.85	+29.1	40.78	+24.1
5	草嶺	400.0	120.00	-1.8	122.87	+2.4

註：誤差率=[(經驗公式求得之體積-實際土方量)/實際土方量]×100；正值代表求出之體積量為高估；負值代表求出之體積量為低估

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

第四章　工作進度與交付項目

第一節　計畫甘特圖

本計畫預期進度規劃如下圖 4-1 所示:

圖 4-1 本計畫研究進度甘梯圖

年、月份 / 工作項目	106 年										
月份	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
研究區域基本資料蒐集		50	50								
邊坡坡度與可移動土層厚度關係建立		20	20	20	20	20					
崩塌地面積判釋				20	20	35		25			
崩塌規模與頻率分析			30	30	30		10				
崩塌面積與體積關係建立					50				50		
以崩塌面積-頻率關係曲線推估集水區境內崩塌土方量模式建立					30		35			35	
研究成果報告撰寫		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
整體進度累計百分比(%)	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

第二節　計畫交付項目

本計畫研究目的包括：

1.建立邊坡坡度與可移動土層厚度之關係

2.建立崩塌規模與頻率之關係

3.建立崩塌面積與崩塌體積之關係

4.淺層崩塌與深層崩塌土方量估計模式建立

5.建立以崩塌面積-頻率關係曲線推估集水區境內崩塌土方量模式

本計畫主要交付項目包括:

1.研究地點石門水庫集水區基本資料蒐集

2.邊坡坡度與可移動土層厚度關係建立

3.崩塌地面積判釋

4.崩塌規模與頻率分析

5.崩塌面積與體積關係建立

6.以崩塌面積-頻率關係曲線推估集水區境內崩塌土方量模式建立

7.研究成果報告

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

第五章　結論及建議

第一節　結論

本研究利用颱風發生後的崩塌資料，針對石門水庫集水區應用地理資訊系統(GIS)，進行分析討論，根據目前研究成果，茲歸納數點結論，供應用時之參考。

(1)本研究針對石門水庫集水區 DEM 進行分析其崩塌地高程變化，統計結果顯示前 10%的崩塌體積分別佔各案例總崩塌體積的 78.1%、80.5%、78.5%，前 20%的大崩塌體積佔總崩塌體積之 87.0%、88.3%、86.8%，顯示大型的崩塌事件會影響集水區境內崩塌體積的估計結果，小型的崩塌事件數量雖佔大部份，但總體積卻不到總崩塌體積的 15%，對總崩塌體積之估計影響甚小。

(2)本研究結果若採單一回歸之崩塌面積與體積關係線在崩塌體積估計上會明顯高估實際值，若改採依不同滑動之回歸線公式則結果較準確且誤差在可接受範圍內，滑動深度小於 0.5m 之崩塌地在崩塌體積估計上有較大差異。

(3)利用崩塌面積-體積關係式估計土方量時，區分深層崩塌、淺層崩塌、面積小於 1,000m^2 與大於 1,000m^2 的淺層崩塌回歸公式之相關係數(r^2)皆較未區分時提高估計準確度，且深層崩塌之回歸公式之

r^2 皆高於 0.9，可大幅提高深層崩塌體積估計之準確度。

(4)崩塌地有自我相似的特性，崩塌地的長、寬和深度相互成正比，當崩塌呈現完整的自我相似的特性時，崩塌體積與其面積的 1.5 次方成正比。本研究結果三個案例之崩塌體積與面積回歸方程式之次方分別為 1.23、1.33 及 1.29 次方，顯示大部分崩塌地不完全具自相似性。但滑動深度超過 0.5m 之崩塌體積與面積回歸方程式之次方皆接近 1.0，顯示淺層崩塌面積較深層崩塌面積具自相似性。

第二節　建議

本研究針對石門水庫集水區崩塌土砂量之建議估計公式如下:

$$V_L = bA_L^c \quad (5\text{-}1)$$

其中 b 為率定參數，c 為率定指數，建議 b 採 0.13，c 採 1.3。其中率定參數 b 隨滑動土層厚度增加而增大，建議當滑動深度超過 2m 時 b 採 3.0，c 採 1.0，即:

$$V_L = 3.0A_L^{1.0} \text{ (for slip depth} > 2 \text{ m，} A_L < 10^5 \text{ m}^2) \quad (5\text{-}2)$$

若為大規模崩塌(面積超過 10 公頃)，則建議可採下式估計:

$$V_L = 551.8A_L^{0.81} \text{ (for } A_L > 10^5 \text{ m}^2) \quad (5\text{-}3)$$

參考文獻

1. 水土保持局，2009。石門水庫集水區高精度地形量測及地形貌變化歷程之研究，成果報告書。
2. 水土保持局，2010。石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討，成果報告書。
3. 水土保持局，2011。石門水庫集水區土砂災害歷程分析，成果報告書。
4. 水土保持局，2012。石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估，成果報告書。
5. 水土保持局，2015。大規模崩塌防減災技術發展與應用，委辦計畫報告。
6. 史天元、彭淼祥、徐偉城，2002。應用空載雷射掃描儀進行地震災區變形研究，行政院農業委員會。
7. 顏宏宇，2005。LiDAR 直接量測數值地形資料精度分析與應用、國立成功大學地球科學系碩士班
8. 彭淼祥，2005。空載光達生產數值高程模型及其精度評估:國立交通大學土木工程系所博士論文
9. 風承甫，2015。比較地面光達與空載光達之高程精度-以道路邊坡為例宜蘭大學土木工程學系碩士論文

10. 王鐘緯，2017。應用空載光達技術於台 18 線五彎仔地滑區判釋之研究，國立嘉義大學土木與水資源工程學系碩士論文。

11. 黃紹東、徐明鎰、黃英婷、蘇惠璋，2008，應用空載光達（LiDAR）技術於國土利用調查資料庫建置之研究，第二十七屆測量及空間資訊研討會論文集，pp.393-403。

12. 蕭震洋，林伯勳，鄭錦桐，辜炳寰，許偉城，冀樹勇 (2009)，「應用光達技進行集水區土砂運移監測及攔阻率評估」，中興季刊，第 105 期，第 17 至 25 頁。

13. 王晉倫，2009，泰平溪集水區臨溪崩塌空間分佈及土砂量之研究，中興大學水土保持學系研究所博士論文。

14. 蘇柏軒、蕭宇伸、王傑民、陳樹群，2013，無人載具系統(UAS)航拍應於高精度製圖的可行性研究，社團法人中華水土保持學會 102 年度年會，1-12。

15. 陳靜茹、盧韋勳、李孟學、江文山、吳永基，2016，應用無人機於三維地形量測與正射影像精 度之探討-以綠島為例，第 38 屆海洋工程研討會暨科技部計畫成果發表會 論文集 國立臺灣大學 2016 年 12 月，503-508。

16. 王雁平，2008，崩塌因子對崩塌率及崩塌深度關係之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。

17. 冀樹勇，2011，集水區土壤厚度經驗式應用分析，中興工程季刊，第 111 期，第 35-45 頁。

18. 池谷浩，1980，土石流災害調查法，日本山海堂。

19. 陶林數值測量工程有限公司，2008。石門水庫集水區經營管理保育對策及建立集水區地理資訊系統資料庫建置，經濟部水利署北區水資源局，桃園，台灣。

20. 陳毅青，2012。降雨誘發崩塌侵蝕之規模頻率及其控制因子，國立臺灣大學工學院土木工程學系博士論文。

21. 陳樹群，2005。石門水庫集水區泥沙產量推估之研究(3/3)，經濟部水利署，成果報告書。

22. 陳樹群、翁愷翎、吳俊鋐，2010。玉峰溪集水區崩塌特性與崩塌體積之探討，中華水土保持學報，第 41 卷第 3 期，第 217-229 頁。

23. 劉哲欣、吳亭燁、陳聯光、林聖琪、林又青、陳樹群、周憲德，2011。臺灣地區重大岩體滑動案例之土方量分析，中華水土保持學報，第 42 卷第 2 期，第 150-159 頁。

24. 黃宏斌，2009，國有林地崩塌地處理，行政院農委會林務局。

25. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2010。氣候變遷下台灣南部河川流域土砂處理對策研究-以高屏溪為例(1/2)，成果報告書。

26. 經濟部中央地質調查所，2012。易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置，成果報告。

27. Bak, P., Tang, C. and Wiesenfeld, K., 1987. Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/*f* Noise, Physical Review Letters, 59, 381-384.

28. Bak, P., Tang, C. and Wiesenfeld, K., 1988. Self-Organized Criticality, Physical Review A, 38, 364-374.

29. Crosta, G.B., Imposimato, S. and Roddeman, D.G., 2003. Numerical Modelling of Large Landslides Stability and Runout, Nat. Hazards and Earth Syst. Sci., 3, 523-538.

30. Chen, C.Y., 2009. Sedimentary Impacts from Landslides in the Tachia River Basin, Taiwan, Geomorphology 105, 355-365.

31. Dymond, J.R., Jessen, M.R. and Lovell, L.R., 1999. Computer Simulation of Shallow Landsliding in New Zealand Hill Country, JAG, 1, pp. 122-131.

32. Dai, F.C., and Lee, C.F., 2001. Frequency-Volume Relation and Prediction of Rainfall-induced Landslides, Engineering Geology, 59, 253-266.

33. Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J.-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M. and Giraud, A., 2002. Probabilistic Approach to Rock Fall Hazard Assessment: Potential of Historical Data Analysis, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2, 15-26.

34. Fujii, Y., 1969. Frequency Distribution of Landslides Caused by Heavy Rainfall, J. Seismol. Soc. Japan, 22, 244-247.

35. Fonstad, M.A. and Marcus, W.A., 2003. Self-Organized Criticality

in Riverbank Systems, Annals of the Association of American Geographers, 93, 281-296.

36. Griswold, J.P., and Iverson, R.M., 2008, Mobility statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches (ver. 1.1, April 2014): U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5276, 59 p.
37. Guthrie RH, Evans SG. (2004) Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. Earth Surface Processes and Landforms 29(11): 1321-1339. https://doi.org/10.1002/esp.1095.
38. Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali M., Galli M., Reichenbach P. (2008). Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, Central Italy. Geomorphology, 96, 105-122.
39. Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D., 2009. Landslide Volumes and Landslide Mobilization Rates in Umbria, Central Italy, Earth and Planetary Science Letters 279, 222-229.
40. Hadian-Amri M, Solaimani K, Kavian A, Afzal P, Glade T. Curve Estimation Modeling between Area and Volume of Landslides in Tajan River Basin, North of Iran.ECOPERSIA. 2014; 2 (3): 651-665.
41. Hovius, N., Stark, C.P. and Allen, P.A., 1997. Sediment Flux from a Mountain Belt Derived by Landslide Mapping, Geology, 25, 231-234.
42. Hungr, O., Evans, S.G. and Hazzard, J., 1999. Magnitude and Frequency of Rock Falls and Rock Slides along the Main

Transportation Corridors of Southwestern British Columbia, Canadian Geotechnical Journal, 36, 224-238.

43. Iida, T. and Okunishi, K., Development of hillslopes due to landslides, in Okuda, S, Netto, A. and Slaymaker, O. (eds.), Extreme Land Forming Events, Zeitschrift für Geomorphologie,1983, 46, pp. 67-77.
44. Imaizumi, F. & Sidle, R. Linkage of sediment supply and transport processes in Miyagawa Dam catchment, Japan. J. Geophys. Res.112, F03012 (2007).
45. Imaizumi F, Sidle RC, Kamei R. (2008) Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. Earth Surface Processes and Landforms 33(6): 827-840. https://doi.org/10.1002/esp.1574.
46. Korup O (2005) Distribution of landslides in southwest New Zealand. Landslides 2(1): 43-51. https://doi.org/10.1007/ s10346-004-0042-0
47. Larsen, IJ, Montgomery, DR, and Korupp, O., 2010. Landslide erosion controlled by hillslope material. Nature Geoscience 3(4):247-251.
48. Malamud, B.D., Turcotte, D.L. and Guzzetti, F., 2004. Landslide Inventories and Their Statistical Properties. Earth Surface Process and Landforms, 29, 687-711.
49. Omidvar, E. and Kavian, A. Landslide volume estimation based on landslide area in a regional scale (case study: Mazandaran province). Journal of Range and Watershed Management (JRWM), Iran. J. Nat. Resour., 2011; 63(4): 439-455. (In Persian)

50. Pelletier, J.D., Malamud, B.D. and Blodgett, T., 1997. Scale Invariance of Soil Moisture Variability and Its Implications for the Frequency-Size Distribution of Landslide, Engineering Geology, 48, 255-268.
51. Tseng CM, Lin CW, Stark CP, et al. (2013) Application of a multi-temporal, LiDAR-derived, digital terrain model in a landslide-volume estimation. Earth Surface Processes and Landforms 38(13): 1587-1601. https://doi.org/10.1002/esp. 3454
52. Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
53. Van Asch, T.W.J., Buma, J. and van Beek, L.P.H., 1999. A view on some hydrological triggering systems in landslides. Geomorphology, 30(1-2): 25-32.
54. Weissel J.K., Stark C.P., 2001. Landslides triggered by the 1999 M_W 7.6 Chi-Chi Earthquake in Taiwan and their relationship to topography. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01, IEEE 2001 International, 2: 759-761.


行政院農業委員會水土保持局
Soil & Water Conservation Bureau, COA

附錄

附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	頻率分析可否考量相同區域位置？	目前計畫分析採三個時期之 LiDAR 影像，雖然三區皆屬石門水庫區域但三個時期影像位置並不完全相同，本計畫挑出重複區域進行崩塌規模與頻率關係之分析如圖 3-18 及圖 3-19 所示。由於重複區域面積較小，崩塌地亦較少，不建議僅考量相同區域位置。計畫採三個時期之 LiDAR 影像目的在比較所建立之經驗式是否具一般性，可通用於整個石門集水區。
2	2009 年至 2012 年三個案例之淺層與深層崩塌深度、面積與體積之關係分段後皆有不錯表現，而後續應用時公式之係數如何決定？	分析結果在崩塌深度超過 0.5m 時回歸公式皆有良好相關係數，其指數採 1.0，$V_L = aA_L^{1.0}$ (for depth > 0.5m)，當崩塌深度超過 2m 時率定參數 a 可採 2.0~3.0 估計，1-2 m 時率定參數 a 可採 1.1~1.2 估計，0.5-1 m 率定參數 a 可採 0.6 估計。小於 0.5m 則明顯具較高不確定性。
3	有頻率部份，建議可否與降雨作結合。	本計畫針對重複區域進行崩塌規模與頻率關係之分析，在崩塌面積與頻率關係之分析由於崩塌數量較少，並無法看出明顯趨勢，如圖 3-18。在崩塌體積與頻率關係之分析如圖 3-19。惟目前尚無法建立正確內插模式，尚無法與降雨事件導致崩塌之總降雨量結合。
4	坡度與土層厚度相關性不佳，是否考慮以地形曲度取代？(海洋大學李光敦教授曾以 wetness index	感謝委員建議，本計畫嘗試建立以崩塌面積與地形坡度推估崩塌土層厚度之三維模式，惟相關係數甚低。再比較本區平均厚度與地調所建議之平均厚度比對後差異大，因此不建議採面積或坡度與

項次	審查意見	回覆辦理情形
	回歸效果不錯)	土層厚度之關係式。
5	崩塌頻率係對同崩塌地重複崩塌的頻率，或是本計畫崩塌面積頻率關係？	本計畫針對重複區域進行崩塌規模與頻率關係之分析，在崩塌面積與頻率關係之分析由於崩塌數量較少，並無法看出明顯趨勢，如圖 3-18。在崩塌體積與頻率關係之分析如圖 3-19。
6	崩塌推估集水區土砂生產量的方法為何?	本研究建立以衛星影像判釋集水區崩塌面積，再藉由所建立崩塌面積與體積關係推估崩塌體積；並由所建立崩塌面積與頻率關係加上崩塌深度推估經驗式推估集水區總崩塌體積。
7	崩塌體積與面積關係，於地調所及林務局均有分析成果，是否有比較分析其差異。	地調所建議依崩塌面積大小採不同之的滑動深度估計崩塌體積比較如表 3-3，水土保持局(2015)對於大規模崩塌(面積超過 10 公頃)之建議崩塌體積估計公式如(3-48)式。水利署(2010)於高屏溪流域調查的 12 個案例資料，回歸出崩塌面積與體積的關係式(3-49)式。另 NCDR 劉哲欣等(2011)蒐集五個大規模岩體滑動案例實際的滑動體積與地調所及水利署之面積評估法結果比較圖 3-35。
8	由崩塌推估集水區土砂生產量時，對於崩塌量體及深度均屬極重要的因子。	感謝委員建議，崩塌量體估計惟本計畫目標，本計畫建議以衛星影像判釋崩塌地面積後，評估平均滑動深度後，可藉由崩塌面積與體積關係式，推估集水區總崩塌體積。
9	建議對崩塌頻率是如何定義又如何調查，應加以說明。	崩塌頻率定義如公式(1-1)，崩塌頻率之調查方法係以衛星影像判釋崩塌範圍計算面積，再統計相同面積之次數，取其倒數；惟本計畫採正規化之頻率進行分析如公式(1-2)。

項次	審查意見	回覆辦理情形
10	建議可再參考較新文獻，使用近年新科技方式(如無人機、LiDAR 等工具)能得到較精準之量化分析值。	近年新科技方式(如無人機、LiDAR 等工具)文獻回顧如報告第一章第五節 P1-12~1-13，惟本計畫有別於其他計畫利用衛星雷達影像產製數值地形應用於土砂生產分析，由於採無人機或 LiDAR 建立數值高程(DTM)所需費用較昂貴，本研究建議採所建立經驗模式作為推估集水區崩塌體積之簡易評估方法。
11	本局辦理「氣候變遷下大規模崩塌防減災計畫」內已定義大規模崩塌為面積 10 公頃以上，深度 10 公尺以上，崩塌量 10 萬立方公尺以上。	感謝委員建議，計畫成果與國內相關建議公式比較如圖 3-35。由於計畫內符合大規模崩塌較少，本計畫建議依不同崩塌深度分別建立崩塌面積與崩塌體積之經驗方程式。相關結果並與水保局等之大規模崩塌估計公式比較，如報告 P3-43~3-45。

附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	建議補充國內的相關研究成果。	感謝委員建議，本計畫比較水保局、水利署、地調所與 NCDR 等之成果(P3-45)，惟本計畫採用模式與國內外以圈繪崩塌地模式不同，係以 DEM 變異區之減少區為崩塌之面積與體積，不含堆積區之面積。
2	建議補充納入崩塌分析的數量式自由度。	感謝委員建議，於 P3-11 說明各案例之崩塌統計數量，並統計繪圖於圖 3-13、3-15、及 3-17。
3	目前水保局推估崩塌體積係以其面積為因子，故建議可以將本研究成果與之比較。	感謝委員建議，本計畫比較水保局、水利署、地調所與NCDR等之比較如P3-45圖 3-35。
4	由於崩塌數量有限，且面積較小，故式(3-46)、式(3-47)及式 (3-51) 之適用範圍，應具體表示。	感謝委員建議，於式(3-46)、式(3-47)及式(3-51)等後方加上適用面積範圍。
5	石門水庫各年的崩塌地具有一些相依性及變遷，這如何處理？	本計畫模式以 DEM 變動作為主要依據，考量單一致災事件，利用崩塌面積推估體積，不管是否相依或變遷。即藉由單一降雨崩塌事件之衛星影像判釋崩塌地後即可利用建立之經驗公式由裸露面積推估崩塌體積。
6	應詳實解釋資料之來源，調查方法及可信賴之誤差範圍，因目前對崩塌地之體積及面積調查原本就有存在誤差，甚至	感謝委員建議，本區 DEMs 係源自水土保持局委託計畫(P2-2)，依受委託單位中興顧問社執行本區之計畫報告，係採 LiDAR 製作 DEM 並與地面光達比較誤差平均約介於 6 至 50 公分，隨坡度增加而差異越大(蕭震洋等，2009)。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	有部分資訊仍採直接由面積及坡度推估體積而來，請詳加說明。	
7	可比較目前國內外已引用之面積、坡度、深度推估體積之方式及成果探討。	感謝委員建議，本計畫比較國內水保局、水利署、地調所與 NCDR 等之成果(P3-45)，與國外比較如 P3-41，圖 3-33 所示。惟本計畫採用模式與國內外以圈繪崩塌地模式不同，係以 DEM 變異區之減少區為崩塌之面積與體積，不含堆積區之面積。
8	經驗公式中僅考慮頻率，而無降雨(累積雨量及強度)資訊，是否可適用目前豪大雨量引致之崩塌，請說明。	由於每個崩塌地之降雨量促崩雨量不同，本計畫模式以 DEM 變動作為依據，考量單一致災事件，利用崩塌面積推估體積，不管降雨量資訊。即藉由單一降雨崩塌事件之衛星影像判釋崩塌地後即可利用建立之經驗公式由裸露面積推估崩塌體積。
9	本計畫研究區分為研究區域一、二、三，區域間有部分重疊(如圖 2-3)，請說明如此設計研究區的考量。若是三次不同崩塌則涵蓋了崩塌原址及擴崩區，其特性是否有不同？	感謝委員建議，本計畫欲了解石門水庫集水區崩塌面積與體積關係是否具一定關係，以作為後續崩塌土方量評估之公式。三區部分重疊由於面積較小，崩塌數量亦不足，因此未以共同區作為分析。由於推估公式以 DEM 變動作為依據，考量單一致災事件，利用崩塌面積推估體積，不管是否後續有擴崩情形。
10	崩塌地有自我相似性時，其崩塌體積與面積的 1.5 次方成正比，請說明其依據。	感謝委員建議，崩塌地有完全自我相似性時，其推導公式如 P1-7 公式(1-4)~(1-6)，其參考文獻補上為 Hovius et al. (1997).
11	請說明本計畫採用之 DEM 解析度為何？	本計畫採用之 DEM 解析度為 5m × 5m，補充如 P2-2。