

石門水庫土壤厚度之鑽掘資料與空間分布特性探討

許振崑^[1*] 林伯勳^[2] 邱世宜^[3] 鍾啟榮^[3]

摘要 本文透過現地鑽掘試驗，針對石門水庫集水區主河道及重要支流邊坡，進行全域性土壤厚度調查，並彙整境內歷年相關研究報告資料，依「不同區域」、「不同坡形」與「不同地質岩性」三種分類方式，建立石門水庫集水區具代表性土壤厚度經驗式，藉以探討石門水庫集水區土壤厚度空間分布特性；該項結果，可於某一災害事件發生時，用以快速估算崩塌之對應厚度值，以評估潛在土方量或可能落入河道之供砂量，將有助於相關單位進行災後復建工程及保育治理規劃之參考。

關鍵詞：土壤厚度、崩塌量、保育治理。

Using Investigated Soil Depth Data to Evaluate Spatial Soil Depth Distribution Characteristics in Shih-Men Reservoir Watershed

Chen-Kun Hsu^[1*] Bor-Shiun Lin^[2] Shih-Yi Chiu^[3] Chi-Rung Chung^[3]

ABSTRACT This study collected soil depth data from the main stream and its tributaries in Shih-Men watershed to establish reliable empirical equations for soil-depth associated with regional topological characteristics, including the geographical characteristics of terrain zoning, geologic zoning and terrain curvature. Using a well-investigated complete soil-depth distribution map, these equations can be utilized in the estimation of rainfall-induced landslide volumes of the Shihmen Reservoir Watershed at the time of a disaster event. Mitigation strategies can be improved by utilizing these equations to assess probable landslide volumes, damage levels and effects on infrastructure. These equations can also be utilized in soil conservation and management programs in response to sediment-related disasters through out the entire watershed.

Key Words: Soil-depth, landslide volume, Conservation and Management.

一、前言

近年高強度及長延時暴雨颱風事件頻仍，易引致集水區崩塌發生，崩塌土石伴隨地表逕流落入河道，構成集水區土砂供應料源；其中崩塌量計算，除受制於崩塌規模大小，亦與對應土壤厚度有關，故若能有效掌握土壤厚度空間變異性，將有助合理推估集水區崩塌量(林伯勳等人，2011)。近年國內相關研究機關及學者為求能精確估算上游崩塌產量，提供合理數據於政府轄管單位用以防砂策略擬訂，故進行相關集水區土壤厚度研究課題。崩塌量則與土壤厚度有密切關係(地調所，2008)。一般而言，宜於坡腹調查土壤厚度，用以代表該區平均厚度。土壤厚度不僅與坡度有直接關係，且深受地形曲率影響。目前土壤厚度求取方式，可利用現地土壤鑽掘調查或採用擴散數學模式 (diffusion model) 結

[1] 中興工程顧問社防災科技研究中心 副工程師 (* 通訊作者 E-mail: kungbsa@sinotech.org.tw)

Associate Engineer, Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc. Taipei 114, Taiwan

[2] 中興工程顧問社防災科技研究中心 正研究員兼組長

Senior Researcher, Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc. Taipei 114, Taiwan

[3] 行政院農業委員會水土保持局

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Nantou 540, Taiwan

合土壤生成函數(Kirkby, 1971; Wilkinson and Humphreys, 2005)分析之，並假設土壤厚度與生成函數呈丘型(humped model)曲線或指數遞減型(exponential decline model)曲線關係圖，如圖 1 所示。若採後者數學函數推估，雖可模擬土壤生成率並考量現地參數之變異性，其輸入參數仍需率定後始能分析，同時還需由地質學家詳盡調查以判定地質生成年代再進一步估算其土壤厚度，過程冗長且繁複，故實務應用性不高；目前國內研究常用土壤厚度鑽掘(soil auger)於集水區主河道邊坡及各重要支流進行全域性土壤厚度調查，即能涵蓋地形高程變化及結合上、中及下游量測數據，再利用統計迴歸方法(regression method)建立與現地影響參數關係式，據以估算重大災害事件發生後不同支流對於土砂產量之貢獻度。爰此，若能充分掌握集水區土壤厚度空間變異性，實有助於崩塌量估算及邊坡崩塌潛勢分析工作；並做為各式水文地質、邊坡等分析模式輸入參數。

鑑於上述，本文透過現地鑽掘試驗，針對石門水庫集水區主河道及重要支流邊坡，進行全域性土壤厚度調查，並彙整境內歷年相關研究報告資料，蒐集現地土壤厚度調查值，依地域特性建立「地形分區」、「地質分區」與「地形曲率」三種分類方式之淺層崩塌區域之土壤厚度經驗式，藉以探討石門水庫集水區土壤厚度空間分布特性。最後，展繪土壤厚度空間分布圖藉以迅速且合理估算災害後坡面崩塌量。

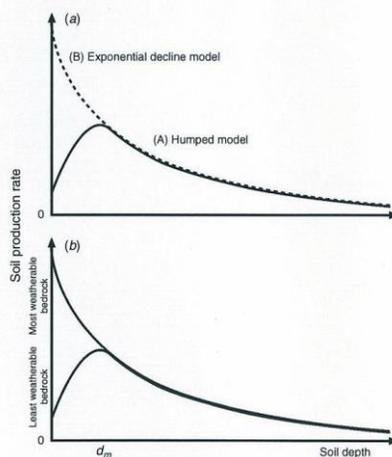


圖 1 土壤厚度與土壤生成函數圖(摘自 Wilkinson and Humphreys, 2005)

Fig 1 Soil depth and soil generating function diagram

二、文獻回顧

崩塌誘發因素可分為潛因(inherent causes)與誘因(initiating causes)等兩類(李三畏, 1984)；潛因是指坡地本身的基本條件，主要由地質與地形特性所組成，許多學者認為崩塌易發生在坡度較陡之邊坡，吳久雄等人(1989)發現臺灣的崩塌多發生於 30~60 度之間，劉盈劭(2001)分析陳有蘭溪之崩塌多發生於 20~50 度間，張政亮(2002)則指出蘭陽地區崩塌多數發生於 30~50 度間，Dymond et al. (1999)以力學為基礎提出崩塌深度定義中，坡度與崩塌深度呈現反比，Iida and Okunishi(1983)、Khazai and Sitar(2000)、國家災害防救科技中心(2004)、鍾欣翰(2008)、地調所(2008)、水保局(2009, 2010, 2011^a, 2011^b, 2012)等皆以實測資料發現崩塌深度與坡度呈現反比；另外，誘因泛指可誘發崩塌之外在因素，係以降雨、地震及人為擾動等因素。

一般而言，崩塌量體估算可利用傳統地形測量至現地量測堆積面積及高程，以估算現場崩塌地堆積體積，但傳統地形測量過於耗費人力且耗時，無法提供即時數據；水土保持技術規範(2014)第二章第五節「泥砂生產調查」之第 38 條規定：「崩塌量調查方法，應由實測或部分配合推估實施之。新增崩塌地得利用實際勘查或利用航照圖判斷，亦得利用衛星影像分析，以進行崩塌量之調查」，故可藉由不同時間歷史衛星影像判釋之崩塌地，將所獲得總崩塌面積乘上平均土壤厚度或利用數學積分計

算，獲得單場或特定時期之崩塌量（陳信雄，1995；Khazai and Sitar, 2000；蕭震洋等，2009），彙整全臺地區不同推估土壤厚度與崩塌體積之方法，如表 1。

由於表中係彙整各研究學者，依據蒐集資料統計回歸方式予以建立土壤厚度推估式，原則上建議應根據分析區域環境地域特性，選擇適宜之推估方法，供以未來應用參考；另可再配合衛星影像判釋崩塌面積，即可快速有效估算水庫集水區崩塌產量。

表 1 常見使用推估坡面崩塌深度與崩塌體積之方法

Table 1 Common methods of estimate the soil depth for landslide volume

編號	參考文獻	適用地區	推估方式
1	臺灣省石門水庫管理局(1976)	石門水庫集水區	平均崩塌深度 3 米
2	Khazai and Sitar(2000)	San Francisco Bay	坡度(°) <30 崩塌深度(m) 2 30-40 1.5 40-60 1 >60 0.5
3	陳煥璇(2002)	南投縣溪頭地區	h=-0.11*S+10
4	歐陽元淳(2002)	石門、翡翠水庫	h=土壤滑動深度(m); S=坡度(°)
5	國家災害防救科技中心(2004)	石門水庫集水區	平均崩塌深度 1 米 坡度(°) <30 崩塌深度(m) 5 30-40 4 40-60 3 >60 2
6	陳本康(2005)	石門水庫集水區	h=-0.0716*S+5.66
7	地調所(2006)	臺灣地區	h=淺層崩塌深度(m); S=坡度(°) 崩塌面積(ha) <0.1 崩塌深度(m) 5 0.1-1 4 1-10 3 >10 2
8	水利署(2006)	石門水庫集水區	坡度(°) <20 崩塌深度(m) 0.69 20-30 2.02 30-40 4.36 40-50 2.47 50-60 0.46 >60 0.21
9	鍾欣翰(2008)	石門水庫匹亞溪	h=-1.2163*lnS+5.3683
10	地調所(2008)	石門水庫臺七線沿線	h= 淺層崩塌深度(m); S=坡度(°) h=-0.9133*lnS+3.8294
11	Guzzetti et al(2009)	義大利 Umbria 地區	h= 淺層崩塌深度(m); S=坡度(°) V _L =0.074 A _L ^{1.450}
12	水保局(2009)	石門水庫九子集水區	h=-1.4249*lnS+5.7105
13	水保局(2009)	石門水庫主流綜合	h= 淺層崩塌深度(m); S=坡度(°) h=-0.9596*lnS+4.0072
14	王晉倫(2010)	石門水庫泰平子集水區	全新 既有 既有外擴 裸露地集合 面積法 面積坡度法 ΔV=0.403 A _L ^{0.96} ΔV=0.496 A _L ΔV=0.55 A _L ^{0.968} ΔV=0.4233 A _L ΔV=0.992 A _L ^{0.985-0.437} S ^{0.437} ΔV=土砂產量(m³); A=崩塌地面積(m²); S=前期坡度(°) V _L =0.015 A _L ^{1.606}
15	陳樹群(2010)	玉峰集水區	L/W < 1, Hn = 0.04 L + 2.31 L/W = 1~2, Hn = 0.03 L + 1.39 L/W = 3~5, Hn = 0.03 L + 0.74 L/W > 5, Hn = 0.01 L + 2.46
16	水保局臺北分局(2011)	臺灣西部易淹水地區上游集水區	L=長軸投影長; W=短軸投影長; Hn=崩塌深度 h=75.32e ^{-2.51S} h=31.6e ^{-26.66S} h=49.95e ^{-16.94S} h=57.83e ^{-8.69S} h=61.46e ^{-14.44S}
17	水保局(2011 ^a)	庫區集水區 玉峰集水區 三光集水區 白石集水區 泰崗集水區	h=淺層崩塌深度(m); S=坡度(°) h=439.69e ^{-0.0205S}
18	水保局(2011 ^b)	曾文水庫集水區	以平均坡度 30 度計，採崩塌平均代表深度 1.55 公尺
19	林務局(2011)	石門水庫集水區	ΔV=0.068A ² +4.929A ΔV=滑動體積(10 ³ m³); A=滑動面積(10 ³ m²)
20	國家災害防救科技中心(2014)	臺灣地區	地質分區 V _L =0.099 A _L ^{1.356} V _L =0.238 A _L ^{1.188} V _L =0.607 A _L ^{1.073} V _L =0.351 A _L ^{1.132} V _L =0.337 A _L ^{1.147} V _L =0.240 A _L ^{1.191} V _L =崩塌體積(10 ⁴ m³); A _L =崩塌面積(ha)
21	林務局(2013)	西部麓山地區 雪山山脈帶 脊樑山脈帶 中央山脈東翼地區 海岸山脈地區 全區	地質分區 V _L =0.0332 A _L ^{1.36} V _L =0.0875 A _L ^{1.438} V _L =0.0202 A _L ^{1.555} V _L =0.2116 A _L ^{1.283} V _L =0.03 A _L ^{1.51}
22	水保局(2013)	板岩區 阿里山塊 海岸山脈及縱谷 高山區 變質岩區	崩塌形狀分類 V _L =0.049 A _L ^{1.2057} V _L =0.0407 A _L ^{1.5003} V _L =0.0325 A _L ^{1.545} V _L =0.0203 A _L ^{1.5985} Δh=1.63×A _L ^{0.05} ×S ^{-0.127}
23	水保局(2014)	曾文水庫	0.7 ≤ Δh ≤ 7.6 (Δh 為崩塌深度(m); 16 ≤ A ≤ 11,503.2 (A 為新增崩塌面積 m²); 3.5 ≤ S ≤ 60.5 (S 為前期坡度)

三、研究區域概述及研究資料

3.1 研究區域概述

石門水庫集水區水系發源於雪山山脈，主流大漢溪為淡水河第一大支流，全長約 94.01km，由泰崗溪、白石溪、三光溪、卡拉溪、寶里苦溪、匹亞溪等支流匯合而成。集水區出露之岩層大部分為沉積岩及輕度變質岩，斷層構造大多呈東北-西南走向，坡度以六級坡（坡度介於 55%至 100%之間）所佔比例最高。另就石門水庫集水區土壤分布而言，其西北部丘陵地為黃棕色紅壤，於此冷濕廣大山區，雖適合土壤灰化作用，惟區內大部分山地因地勢陡峭又多風雨，表層沖蝕劇烈，因此土壤皆為石質土，僅少部分山岳、丘陵交界區，化育成紅黃色準灰壤；各河岸及山谷緩坡，則多屬沖積土，土壤分布如圖 2 所示。另一方面，根據北水局所提供之 1958 年至 2007 年共 50 年雨量資料，可見近 10 年石門水庫集水區內之降雨有明顯增強之趨勢，歷年石門水庫年平均降雨趨勢詳見圖 3。由歷年颱風事件發生時間及降雨量可知，石門水庫近年來發生風災事件頻率增加，且高流量發生頻率時間縮短，故土壤沖蝕情形勢比較往常嚴重，其所引致土砂產量及濁度升高問題更不容忽視。

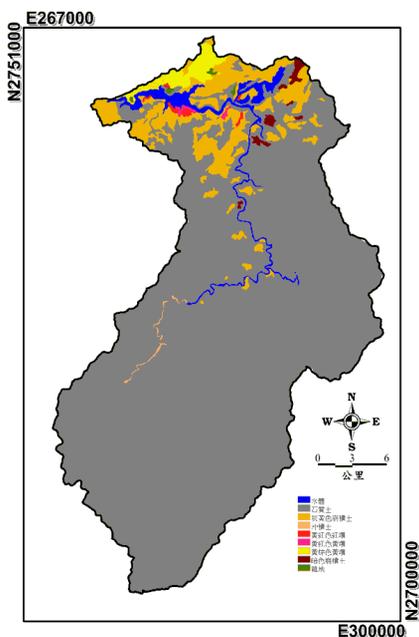


圖 2 石門水庫集水區土壤分布圖(摘自 水保局，2008)

Fig 2 Geographical maps of soil in Shih-Men Reservoir Watershed

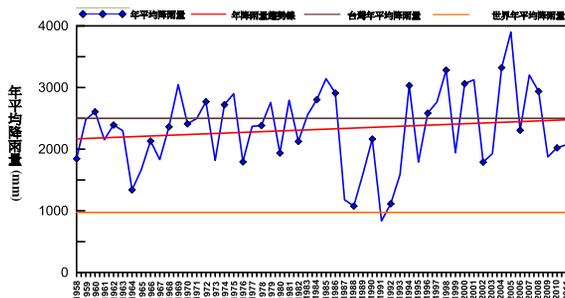


圖 3 石門水庫歷年雨量趨勢圖

Fig.3 Annual trend of rainfall in Shih-Men Reservoir Watershed

3.2 調查作業方式

大致上，各研究報告調查作業方式，係依現地實際狀況評估，若為緩坡，則考慮採機械傳動式土鑽；若為陡坡則攜帶人工土鑽施作，雖鑽掘較費力且耗時，但仍能獲得真實土壤厚度大小。現場調查方法則無論坡度狀況，一律採垂直於坡面方向鑽入，儘量鑽入至岩盤並確定無法鑽進為止，而單一處至少鑽取 2~3 次，用以確定土壤厚度。於野外調查時必須記錄地質、坡度與量測結果等資訊於調查表中，其調查作業流程如圖 4 所示。

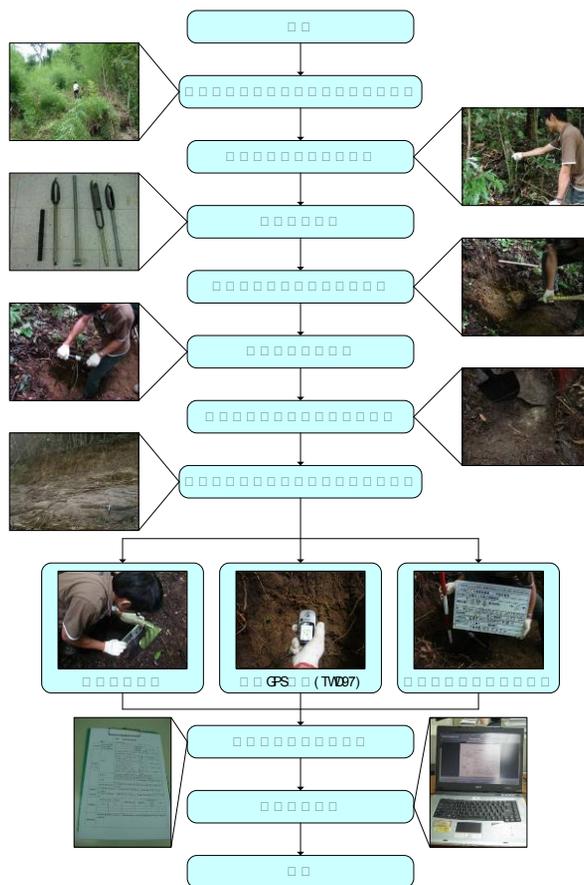


圖 4 土壤厚度調查流程圖

Fig.4 A procedure of measuring soil depth

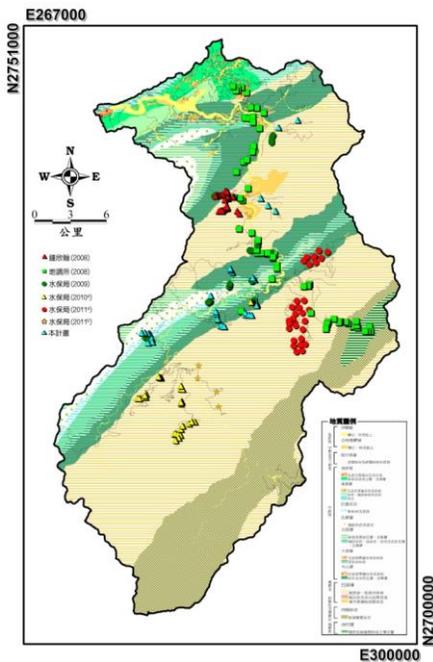
3.3 研究資料

本文調查對象皆為自然且未崩塌邊坡土壤厚度值，非為崩塌且裸露之邊坡，故調查結果屬風化層之厚度，係指土壤厚度。針對石門水庫集水區主河道邊坡及重要支流進行全域性土壤厚度調查，並彙整石門水庫集水區境內歷年相關研究報告資料(地調所，2008；鍾欣翰，2008；水保局 2009；水保局，2010；水保局，2011a；水保局，2011b)，共計 177 處，將各研究報告調查年份、鑽掘方式以及數量等資訊，分別統計列於表 2 中。表中顯示以地調所(2008)調查數量最多，共計 67 處，其餘均低於 40 處。由表可知，所有土壤厚度調查大致遍及石門水庫中五大集水區(庫區、玉峰、三光、白石及泰崗等，其調查方式以人工鑽掘為主。此外，調查處與地質、坡度空間分布，繪製如圖 5 所示。此外，若就不同地質及坡度分級，統計調查數量並繪製如圖 6 所示。由圖可知，調查點位以巴陵層、木山層與大寮層為主；坡度則以五、六級坡居多，約佔總數之 50%。

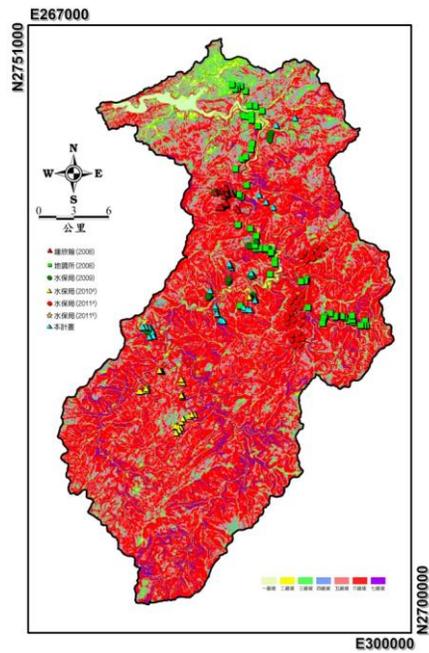
表 2 石門水庫集水區土壤厚度施測區域彙整表

Table 2 Investigated slope types and its characteristic in Shih-Men Reservoir Watershed

出處	年份	鑽掘方式	施作區域	數量
地調所	2008	機械鑽掘	大漢河流域	67 處
鍾欣翰	2008	人工鑽掘	匹亞溪	38 處
水保局	2009	人工鑽掘	庫區及玉峰集水區	32 處
水保局	2010	人工鑽掘	抬耀溪、白石及泰崗集水區	33 處
水保局	2011 ^a	人工鑽掘	卡拉溪、三光集水區	35 處
水保局	2011 ^b	人工鑽掘	司馬庫斯地區	4 處
水保局	2012	人工鑽掘	庫區、玉峰集水區、義興地區及雪霧 鬧地區	35 處



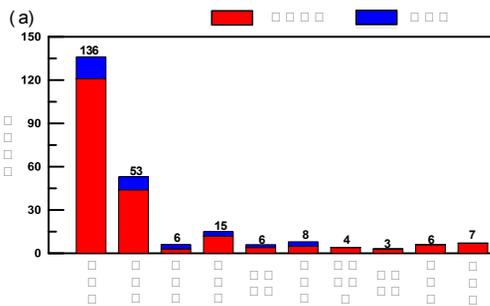
(a) 土壤厚度調查點位與地質分布圖



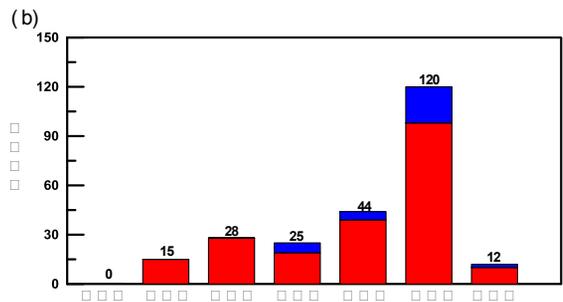
(b) 土壤厚度調查點位與坡度分布圖

圖 5 石門水庫歷年土壤厚度調查點位與坡度分布圖

Fig 5 Geographical maps of soil depth measurement sites in Shih-Men Reservoir Watershed



(a)地質狀況統計圖



(b)坡度分級統計圖

圖 6 石門水庫集水區之土壤厚度調查處地文因子統計圖

Fig 6 Charts of geographical of soil depth measurement sites in Shih-Men Reservoir Watershed

四、土壤厚度與坡度關連性

根據謝正倫(2008)於國科會研究報告中指出石門水庫集水區崩塌地多半分布於玉峰及白石等集水區，且地質岩性大多為巴陵層、木山層及大寮層等，且依本文文獻回顧可知，大多顯示土壤厚度與坡度有顯著關連。鑑此，本文利用石門水庫集水區水保局山坡地範圍內，人工鑽掘所進行之 177 處土壤厚度調查資料，利用統計迴歸方法(Regression Method)，依「不同區域」、「不同坡形」與「不同地質岩性」三種分類方式，用以建立石門水庫集水區具代表性土壤厚度經驗式。分別說明如下：

(一) 不同區域

圖 7 為土壤厚度與坡度關係圖，經本文蒐集歷年水保局石門水庫集水區山坡地支流範圍內土壤厚度資料，另針對庫區與玉峰集水區提高土壤厚度調查樣本數，分析後發現，其坡度與厚度相關性均達 70% 以上；此外，由圖可知，五大集水區各迴歸曲線約交叉於坡度 25 度至 30 度間；若以此坡度區間做為分界點，探討不同集水區土壤風化程度大小。當坡度小於 25 度時，以庫區集水區風化程度最高，而以泰崗集水區及白石集水區較低；另外，若坡度大於 30 度時，以庫區集水區風化程度最高，而以三光集水區最低。此項觀察顯示，石門水庫集水區內中、下游集水區(庫區、玉峰、三光)與上游集水區(白石、泰崗)之土壤風化程度有所差異；另外，若觀察各集水區於相同坡度下之對應土壤厚度，並非一致，似乎又反應集水區風化速率亦隨坡度而不同。

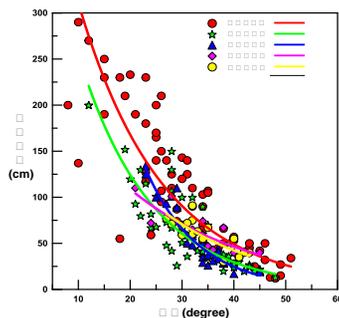


圖 7 土壤厚度與坡度迴歸曲線

Fig 7 Regression curve of soil depth related to slope

(二) 不同坡形

本文利用 5m 網格大小之數值地形計算集水區地形曲率，另將歷史調查資料進行坡形分類，並將不同坡形調查點位之土壤厚度與坡度進行迴歸，以探討石門水庫集水區「坡形條件」土壤厚度與坡度之相關性，繪製如圖 8 所示。由圖可觀察出，石門水庫集水區調查範圍內地形反曲點約落於 30 度附近，坡度低於 30 度時，凹坡因除坡地自有風化層厚度外，其地形易因重力潛移效應加速土壤生成作用，故相較於凸坡坡形之土壤厚度值為大。反之，當坡度大於 30 度時，凹坡坡形之土壤厚度值相較凸坡小，惟其差異不大。

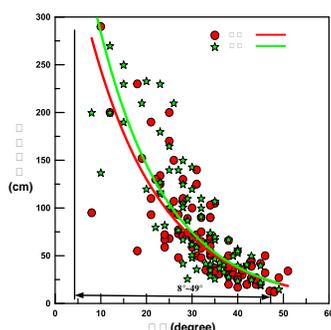


圖 8 不同坡形之土壤厚度與坡度迴歸曲線

Fig 8 Regression curve of soil depth related to slope shape

(三) 不同地質岩性

本文透過歷年土壤厚度調查資料統計後，大致上將地質岩性分為巴陵層、木山層與大寮層及其他地層等四類，前三者屬石門水庫集水區內易致災岩性，佔集水區大多數面積；本文根據上述四類不同地質岩性之土壤厚度與坡度進行統計迴歸分析，另將不同岩性土壤厚度與其對應坡度值加以繪製，如圖 9；由圖可知，不同地層岩性下土壤厚度與坡度關係，亦呈現不同曲線型式且值域亦有所差異。以下茲針對不同地層岩性土壤厚度與坡度關係之觀察現象，說明如次：

- (1) 巴陵層：以暗灰色至灰色硬頁岩與板岩為主，局部含細粒泥質薄砂岩，於石門水庫集水區內佔 60 % 之分布面積，由圖 9(a)可知，巴陵層主要土壤厚度值，多分布 100cm 以下，且多集中於坡度 25 至 40 度之間。
- (2) 木山層：以白灰色、黃灰色及白色，細粒砂岩至粗粒砂岩為主，局部偶有砂岩與頁岩互層。由圖 9(b)可知，木山層主要土壤厚度值分布較廣，可達 150cm 以上，而多集中於坡度 25 至 35 度之間。
- (3) 大寮層：以暗灰色至黑色頁岩組成，頁岩中偶有薄層細粒砂岩分布。其頁岩風化後多呈洋蔥狀構造。由圖 9(c)可知，大寮層主要土壤厚度資料多集中於坡度 15 至 25 度以及 35 至 45 度之間，大於 40 度以上土壤厚度則相對較薄，推測與其頁岩易遇水膨脹軟化，隨地表逕流搬運移而攜出有關。
- (4) 其它地層：其它地層包含西村層、四稜砂岩、石底層、南莊層與打鹿頁岩等地層。由圖 9(d)可知，本文針對其它各地層之樣本分析統計後發現，土壤厚度資料主要分布於坡度 25 至 45 度之間。另因目前蒐集各地層資料較少且混雜多種地層岩性之樣本，故導致迴歸分析成果不佳。

綜以上述，有關「不同區域」、「不同坡形」及「不同地質岩性」等土壤厚度迴歸式結果歸納整理如表 3 所示。

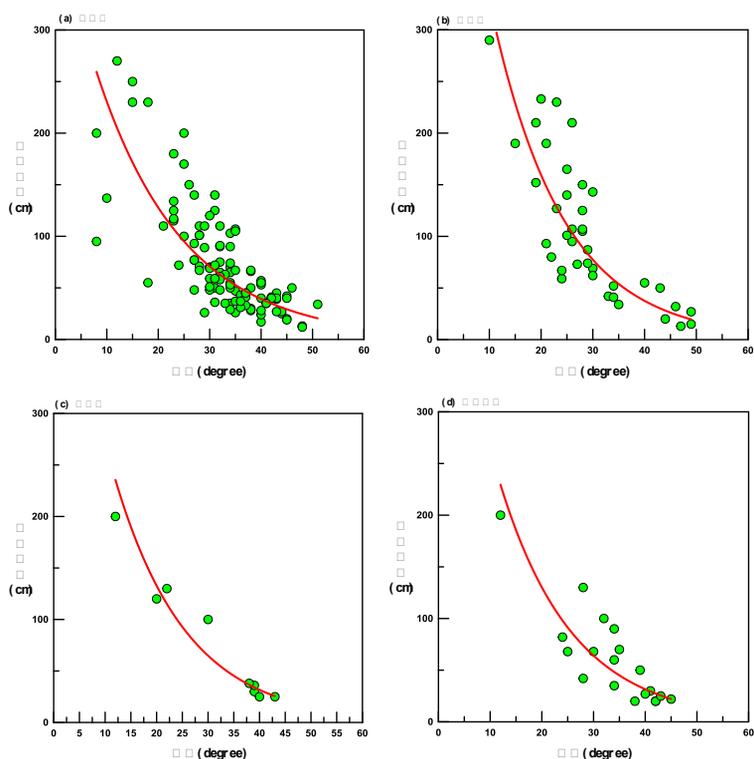


圖 9 不同地質岩性之土壤厚度與坡度迴歸曲線

Fig 9 Regression curve of soil depth related to geological rock property

表 3 土壤厚度與發育影響因子迴歸分析結果表

Table 3 Investigated data of soil depth on different slope types

區域特性	迴歸式	土壤厚度迴歸式		適用坡度區間	
		相關係數	樣本數		
不同區域	庫區集水區	$y=575.95e^{-0.062\theta}$	$R^2=0.74$	$n=65$	$8^\circ \leq \theta \leq 51^\circ$
	玉峰集水區	$y=522.78e^{-0.072\theta}$	$R^2=0.76$	$n=52$	$12^\circ \leq \theta \leq 48^\circ$
	三光集水區	$y=1243.64e^{-0.098\theta}$	$R^2=0.86$	$n=26$	$23^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
	白石集水區	$y=255.21e^{-0.043\theta}$	$R^2=0.73$	$n=11$	$21^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
	泰崗集水區	$y=327.22e^{-0.051\theta}$	$R^2=0.68$	$n=23$	$27^\circ \leq \theta \leq 43^\circ$
分析樣本總數		177			
不同坡形	凹坡	$y=460.50e^{-0.063\theta}$	$R^2=0.67$	$n=94$	$8^\circ \leq \theta \leq 49^\circ$
	凸坡	$y=553.97e^{-0.067\theta}$	$R^2=0.70$	$n=83$	$8^\circ \leq \theta \leq 49^\circ$
	分析樣本總數		177		
不同地質岩性	巴陵層	$y=416.07e^{-0.059\theta}$	$R^2=0.62$	$n=110$	$8^\circ \leq \theta \leq 51^\circ$
	木山層	$y=676.57e^{-0.072\theta}$	$R^2=0.76$	$n=39$	$10^\circ \leq \theta \leq 49^\circ$
	大寮層	$y=556.43e^{-0.074\theta}$	$R^2=0.94$	$n=9$	$12^\circ \leq \theta \leq 43^\circ$
	其它地層	$y=537.36e^{-0.071\theta}$	$R^2=0.70$	$n=19$	$12^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
	分析樣本總數		177		

註* : y 為土壤厚度, 單位: cm ; θ 為坡度, 單位: 度; R^2 為判定係數; n 為分析樣本數。

註** : 其他地層含西村層、四稜砂岩、石底層、南莊層與打鹿頁岩等地層。

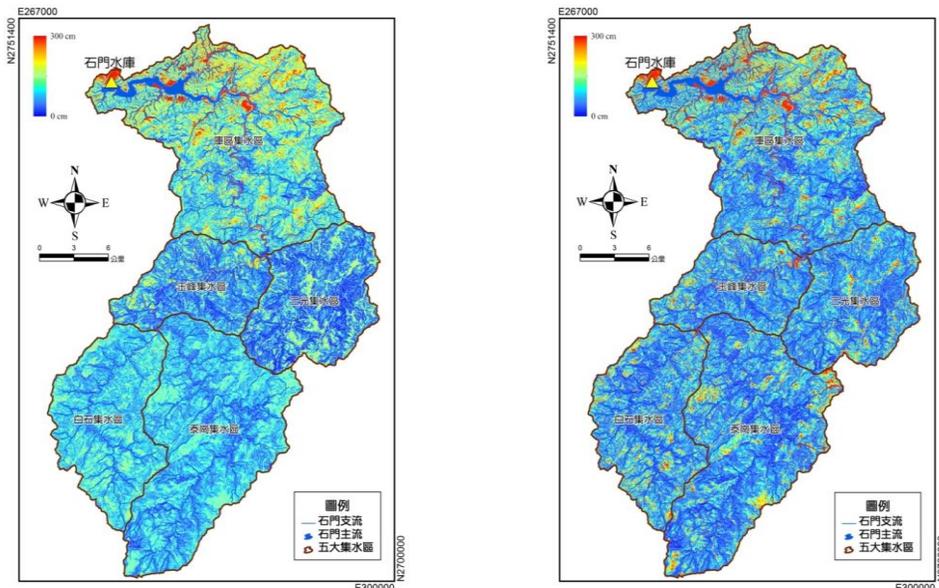
五、集水區土壤厚度空間分布

本文依地域特性建立並修正坡度、坡形及地質岩性等三種分類方式之淺層崩塌區域之土壤厚度經驗式, 為瞭解石門水庫集水區土壤厚度空間分布概況, 故以下利用本文所建立土壤厚度迴歸公式, 展繪石門水庫集水區土壤厚度空間分布圖, 並依「不同區域」、「不同坡形」以及「不同地質岩性」等三種分類方式, 探究石門水庫集水區土壤厚度空間分布概況及集水區上、下游平均土壤厚度差異; 其中「不同區域」以五大集水區處於不同區域條件且分居於大漢溪上、中及下游, 建立土壤厚度經驗式; 「不同坡形」依地形曲率將坡形概分為凹坡與凸坡兩類, 並分別建立所屬土壤厚度經驗式; 「不同地質岩性」包含巴陵層、木山層、大寮層及其他地層所建立土壤厚度經驗式, 相關公式詳表 3。本文依上述各類土壤厚度經驗模式, 利用 $5\text{m} \times 5\text{m}$ DEM 計算單位網格平均坡度值(河道區域不予計算); 再將每個網格代表平均坡度, 代入對應土壤厚度與坡度經驗推估式, 進以建置石門水庫集水區土壤厚度空間分布。最後, 展繪石門水庫集水區土壤厚度空間分布圖, 如圖 10 所示。

本文藉由土壤厚度鑽掘調查環境資訊, 分區可建立可信度較佳之土壤厚度經驗式, 其能掌握並建置集水區土壤厚度空間分布, 用以釐清地域性受風化作用程度差異, 並透過所建立之「不同區域」、「不同坡形」以及「不同地質岩性」之迴歸經驗式公式與空間分布, 可於某一災害事件發生, 針對災害區域內輸入任一淺層崩塌坡面之坡度值, 用以快速估算其對應厚度值, 再乘上對應之新增崩塌地水平投影面積, 即可獲得新增崩塌土方量或可能落入河道供砂量, 將有助於相關單位進行災後復建工程規劃及保育成效評估之參考, 計算公式及示意圖分別如式 1 與圖 11 所示。

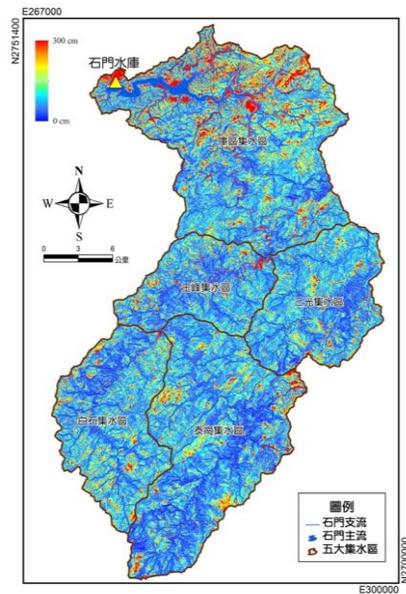
$$V = \Sigma a \times \sec\theta \times y(\theta) \quad (\text{式 1})$$

式中, V 為崩塌土方量或可能落入河道供砂量, a 為新增崩塌地之面積, θ 為崩塌地之平均坡度, $y(\theta)$ 為土壤厚度迴歸式, 屬為坡度函數。



(a) 不同區域土壤厚度空間分布圖

(b) 不同坡形土壤厚度空間分布圖



(c) 不同地質岩性土壤厚度空間分布圖

圖 10 依不同區域、坡形及地質岩性建置石門水庫集水區土壤厚度空間分布圖

Fig 10 Geographical maps of soil depth on different Situation

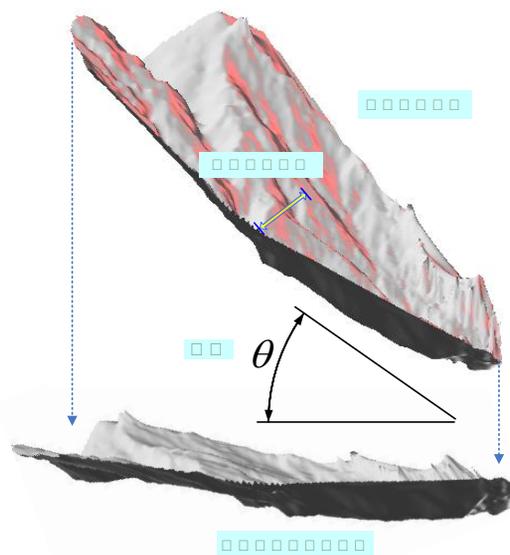


圖 11 崩塌水平投影面積與斜面積示意圖

Fig 11 Illustration of horizontal projection area and oblique area

六、結論

本文利用石門水庫集水區水保局山坡地範圍內，人工鑽掘所進行之 177 處土壤厚度調查資料，利用統計迴歸方法(Regression Method)，依「不同區域」、「不同坡形」與「不同地質岩性」三種分類方式，用以建立石門水庫集水區具代表性土壤厚度經驗式。最後，展繪石門水庫集水區土壤厚度空間分布圖，具體重點結論如下：

1. 石門水庫集水區內中、下游集水區(庫區、玉峰、三光)與上游集水區(白石、泰崗)之土壤風化程度有所差異；另外，觀察各集水區於相同坡度下之對應土壤厚度，並非一致，反應集水區風化速率亦隨坡度而不同。
2. 石門水庫集水區調查範圍內地形反曲點約落於 30 度附近，坡度低於 30 度時，凹坡除坡地自有風化層厚度外，其地形易因重力潛移效應加速土壤生成作用，故相較於凸坡坡形之土壤厚度值為大。
3. 巴陵層、木山層與大寮層及其他地層等四類土壤厚度與坡度關係，呈現不同曲線型式且值域亦有所差異，整體而言以木山層之土壤厚度值最大。
4. 利用已建立之土壤厚度經驗式，後續可於某一災害事件發生，針對災害區域內輸入任一淺層崩塌坡面之坡度值，用以快速估算其對應厚度值，再乘上對應之新增崩塌地水平投影面積，即可初估新增崩塌土方量或可能落入河道供砂量，將有助於相關單位進行災後復建工程規劃及保育成效評估之參考。

參考文獻

1. 水保局(2006),「石門水庫土砂評量與整治率評估模式建立」。
2. 水保局(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」。
3. 水保局(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」。
4. 水保局(2011a),「石門水庫集水區土砂災害歷程分析」。
5. 水保局(2011b),「曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估」。
6. 水保局(2012),「石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估」。
7. 水保局(2013),「水庫集水區環境資料及土砂災害風險評估(1/3)」
8. 水保局(2014),「水庫集水區環境資料及土砂災害風險評估(2/3)」。
9. 水保局(2014),「水土保持技術規範」。
10. 水利署(2006),「95 年度曾文、蘭潭、仁義潭、白河、南化、烏山頭、阿公店、澄清湖、鳳山及牡丹等 10 座水庫蓄水範圍及保護帶(含主要河川)治理規劃」。
11. 李三畏(1984),「台灣崩塌問題探討」,地工技術雜誌,第 7 期,第 43-49 頁。
12. 地調所(2008),「集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估計畫」。
13. 林伯勳、許振崑、冀樹勇(2011),「集水區土壤厚度經驗式應用分析」,中興季刊,第 11 期,第 35-45 頁。
14. 林務局(2011),「運用衛星影像於全島崩場地判釋與災害分析(2/3)」。
15. 林務局(2013),「運用衛星影像於全島崩場地判釋與災害分析」計畫成果。
16. 吳久雄、蔡銖華、胡錦地(1989),「台灣省山坡地崩坍調查報告」。
17. 王晉倫(2010),「泰平溪集水區臨溪崩塌空間分布及土砂量之研究」,中興大學水土保持學系,博士論文。
18. 歐陽元淳(2002),「水庫集水區土壤沖蝕之研究-以石門、翡翠水庫為例」,國立台灣大學地理環境資源學系研究所,碩士論文。
19. 國家災害防救科技中心(2004),「石門水庫淤積及上游集水區崩塌分析評估報告」,防災國家型科技計畫九十三年度成果報告。
20. 張政亮(2002),「地理資訊系統應用於蘭陽地區環境地質災害分佈之調查分析」,第五屆學術研討會論文,宜蘭研究,第 26 頁。
21. 陳本康(2005),「石門水庫集水區崩塌特性及潛勢評估研究」,國立中興大學水土保持學系研究所,碩士論文。
22. 陳信雄(1995),「崩場地調查與分析」。
23. 陳樹群、吳俊毅、王文江、謝政道、周伯愷(2010),「臺北水源特定區土砂保育健康診斷模式之建立」,中華水土保持學報,第 42 期,第 3 卷,第 207~218 頁。
24. 劉盈劭(2001),「陳有蘭溪四個小流域崩塌與土石流發生頻率之研究」,台灣師大地理研究報告 34 期,第 63~83 頁。
25. 蕭震洋、林伯勳、鄭錦桐、辜炳寰、徐偉城、冀樹勇(2009),「應用光達技術進行集水區土砂運移監測及攔阻率評估」,中興工程季刊,第 105 期,第 17~26 頁。
26. 鍾欣翰(2008),「考慮水文模式的地形穩定分析-以匹亞溪集水區為例」,國立中央大學應用地質研究所,碩士論文。
27. 謝正倫(2008),「水庫濁水現象之研究子計劃-水庫集水區細微土砂來源之空間分布特性之分析」,國科會研究成果報告,計畫編號 NSC 95-2625-Z-006-003。
28. Dymond, J. R., Jessen, M. R. and Lovell, L. R. (1999) Computer Simulation of Shallow Landsliding in New Zealand Hill Country, JAG, 1(2): pp 122-131

29. Dietrich, W. E. and Montgomery, D.R. (1995) A Process-Based Model for Colluvial Soil Depth and Shallow Landsliding Using Digital Elevation Data, *Hydrological Process*, 9: pp 383-40
30. GILBERT, G.K.(1877): Report on the Geology of the Henry Mountains. U.S. Government Printing Office, Washington D.C..
31. Iida T. and Okunishi K. (1983) Development of Hillslopes due to Landslides, *Geomorphology, Supplementband*, 46: pp 67-77
32. Khazai, B., Sitar, N. (2000), "Assessment of Seismic Slope Stability Using GIS Modeling", *Geographic Information Sciences*, 6(2), pp 121-128
33. Kirkby, M. J.(1971) Hillslope Process-Response Models Based on the Continuity Equation, *Institute of British Geographers, Special Publication*, 3: pp 15-30
34. Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. (2000) Remote sensing and image Interpretation, Wiley & Sons, New York, 724p
35. Wilkinson, M. T. and Humphreys, G.S.(2005) Exploring Pedogenesis via Nuclide-based Soil production and OSL-Based Bioturbation rates, *Australian Journal of Soil Research*, 43, p. 767-779