

由野外調查評估卵礫石層強度性質

張光宗 鄭敏杰* 陳樹群

摘要 卵礫石層的強度過去多以室內或現地試驗評估，本研究調查卵礫石層邊坡的地質與地形特性，探討地質因子與卵礫石層強度的關聯性，以評估卵礫石層強度性質。由數值高程資料量取邊坡的坡高與坡度可定義強度指標，結果區分出調查區域卵礫石層強度由大到小依序為草湖溪、九九峰、筆石、大肚、新山、與八卦。此外由野外量測卵礫石層粒徑分佈、卵礫石面積百分比、基質強度與卵礫石強度地質特性，使用線性複迴歸分析可建立這些地質因子和卵礫石層強度指標的關係；並得知影響卵礫石層強度的因子，重要性依序是卵礫石含量 (CG)、基質強度 (qM)、粒徑大小 (D30) 與卵礫石強度 (qG)。

關鍵詞：卵礫石層、地形、強度。

Assessment of the Strength Properties of Gravel Formations by Field Investigation

Kuang-Tsung Chang Min-Chieh Cheng* Shu-Chun Chen

ABSTRACT The strength of gravel formations has long been studied by laboratory or insitu experiments. In this study, geological and topographical characteristics of gravel formations were examined to correlate geological factors and their strength. The topographical features of slopes such as height and inclination that define the strength indices of gravel formations were measured from the data of digital elevation models. Then, the strengths of the study areas were distinguished. The relationship between the strength index and the measured geological factors including the grain size distribution, area concentration of gravels, matrix strength, and gravel strength was established. The geological factors affecting the strength index from greatest to least were gravel content (CG), matrix strength (qM), particle size (D30), and gravel strength (qG).

Key Words : Gravel formation, topography, strength.

一、前言

卵礫石層在台灣有廣泛的分布，許多的開發與工程建設，都已進入卵礫石堆積層所覆蓋的盆地、台地或丘陵地，卵礫石層邊坡崩塌或土石流是值得重視的問題。本文調查卵礫石層邊坡的地質與地形特性，建立地質因子與卵礫石層強度的關聯性。

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的邊界上，在

中新世晚期由於菲律賓海板塊向西北移動，將歐亞板塊邊緣的岩層擠壓而抬升出海面，稱為「蓬萊造山運動」。此時山脈的快速隆起，也釋出了大量的岩礫，不斷滑落的岩塊，經河流搬運、堆積，最後岩礫相互壓密膠結，漸漸發育成卵礫石層。台灣的卵礫石層主要分布於河谷、平原、台地與丘陵區，從北部的林口台地，中部的大肚台地、台中盆地，南部的西南平原，到東部的花東縱谷，都能發現卵礫石層的蹤跡（鄧屬予，

1996)。

卵礫石層現場調查、試驗與分析的方法很多，但還沒有一套標準規範(褚炳麟等，1996)。在工程上，為了求取卵礫石層的抗剪強度一般透過大型室內試驗，如大型三軸試驗(林耀隆，2007)，或現地試驗，如大型現地直剪試驗(林昀葦，2006)、平鈹載重試驗(楊麗文，2000)；卵礫石材料室內試驗由於大型力學試驗儀器昂貴且不普遍，所以相關室內實驗並不多，而大型現地試驗可以減少試體擾動及重模試體製作之困難，所以目前工程界常以現地直剪試驗與平鈹載重試驗來推估卵礫石層的各项參數(董家鈞等，1996)。壽克堅等(2000)利用影像分析、施密特錘與土壤貫入儀，針對卵礫石層進行分類，配合隧道工程，以合理化評分權重。Shou(2000)進行大肚、八卦台地野外調查，發現邊坡多屬於淺層破壞與圓弧滑動。

卵礫石層強度往往需要透過室內大型實驗或大型現地試驗才能獲得，既耗時也耗力，本研究希望由野外調查資料直接推估卵礫石層強度指標，並建立地質因子與卵礫石層強度的關聯性，應用於礫石層坡地災害防治。首先調查野外各地質、地形因子，並透過 5m DEM (digital elevation model) 資料與 Arc GIS 地理資訊系統量取台地、河階地邊坡地形特性坡度與坡高，找出其對應之強度包絡線與強度指標 A 值，最後利用統計方法將調查參數和強度指標做分析，建立之間關係。

二、卵礫石層的地形特色

1. 研究區位概述

本調查樣區分別有紅土台地堆積層的大肚台地、八卦台地，頭嵙山層火炎山相的草湖溪、九九峰與沖積扇階地的陳有蘭溪河階地，主要集中在台灣中西部，每處地區有不同的地質特性，以下簡述樣區特色：

大肚台地在地圖上成北北東-南南西走向，台地西側較高陡，東面較低緩，南北兩側分別被大肚溪與大甲溪切割，形成一個長方形台地，總長約 20 公里，平均寬度約七公里。由於板塊擠壓，造成台地周圍有摺曲、斷層地形，例如大度背斜、龍井斷層等；台地上層因為高溫多雨、酸性環境及排水良好，導致紅土生成，而下部地層多數為大小不一之卵礫石堆積而成。八卦台地在地形與地質上都與大肚台地類似，是一個位於大肚溪與濁水溪之間的狹長台地，東西寬 4-7 公里，南北長約 32 公里(林朝棨，1957)，都屬於更新世紅土

台地堆積層，受到斷層影響東面陡峭，西面平緩，台地上多種植鳳梨、茶等相關耐酸植物。基質均是高風化之紅土、粉土與黏土，基質強度較小沒有明顯成岩作用，卵礫石形狀、大小沒有太大變化，多數為圓滑之礫石，另外此區調查地點由於人口密集，多數為人工開挖之邊坡。

草湖溪與九九峰地理位置相近，草湖溪位於台中市太平竹子坑，是烏溪眾多支流之一，而九九峰則位於南投縣草屯鎮，其南面有烏溪和省道台 14 甲線經過，在地質上同屬於頭嵙山層火炎山相，由於車籠埔逆斷層通過，將身處地底下之頭嵙山層擠壓上來，經過長時間的成岩作用，已漸漸變成礫岩，礫石淘選度不佳，形狀皆成光滑橢圓卵礫石，基質強度高，膠結良好。在形成時間上，草湖溪與九九峰有稍微不同，由於車籠埔斷層的逆衝，將地質年代老的向上抬升，造成斷層左右地質時間差異大；再來草湖溪與九九峰雖屬相同地層，但兩者之間夾一層頭嵙山層香山相，並無連續相接，可以判斷草湖溪的礫岩較九九峰早形成，基質強度也相對較大。另一個差異在於草湖溪受河道影響而九九峰受雨水沖刷，所以在地貌上表現出不同特色。圖 1 為草湖溪與九九峰地質圖，可以看到兩地間夾一層香山相，兩地地層應該是不同時期形成的。

陳有蘭溪集水區呈南寬北窄狹長的流域，由南向北流，溪流流經於南投縣信義、水里、鹿谷鄉境內，主流發源於玉山北峰八通關的金門峒大斷崖，海拔 3910 公尺。流域面積約 448 平方公里，主流長度約 42 公里，主流平均坡降約 6.75%，為濁水溪本流之 3.7 倍

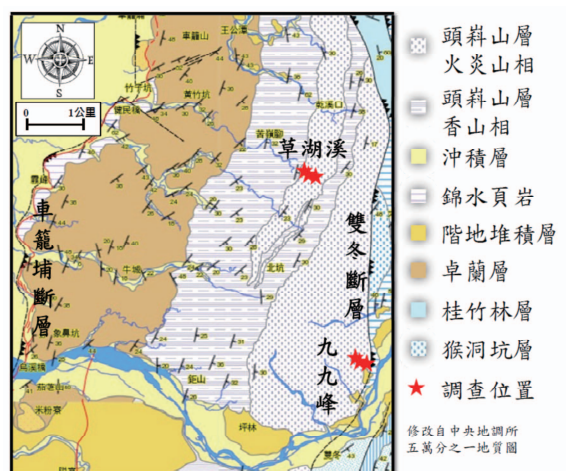


圖 1 草湖溪、九九峰地質圖

Fig. 1 The geological map of the caohu stream and jioujiou mountain

(林基源等, 2009)。陳有蘭溪為濁水溪主要支流之一, 主要沿著陳有蘭溪斷層發育, 為一斷層線縱谷。其所在位置正位於台灣的重要構造線上, 形成河道兩岸截然不同的地形及地質特徵。在組成物上, 卵礫石強度變化大, 卵礫石形狀不一致, 有圓形、方形及不規則形狀, 卵礫石種類多樣, 基質大多為細砂, 剖面上有穿插粒徑較大的卵礫石, 另外和其他樣區一樣, 都可以看到明顯之層狀分布, 受堆積作用而成。

2. 坡度與坡高

本研究利用 Arc GIS 地理資訊系統並配合 5m DEM 資料, 在各樣區共找出 237 個坡度、坡高值。圖 2 與圖 3 是切 DEM 剖面最常遇到的, 通常進行邊坡穩定分析會使用圖 2 為模型, H 是坡高, β 是坡度, 但自然界並非如此簡單, 像圖 3 這種難以決定坡高、坡度情況相當常見, 實線是原始剖面, 虛線為調整後的剖面, 假如坡頂、坡底直接連線會過於保守, 低估其強度, 坡度不變, 延伸至坡頂又會高估強度, 所以, 就需由其他方法解決。本研究採用固定坡度 β , 坡高 H 利用 $H_1 - H_2 / 2$ 求出, 依循這個方法獲得坡度、坡高, 排除選取資料因方法不同所造成之誤差, 建立選取規則。

再來由 DEM 得到的坡高、坡度, 經過整理、繪圖區分出六組坡度-坡高包絡線, 包絡線是指這個地區會出現的最大坡度、坡高曲線, 類似安全係數等於 1 之情形。強度包絡線之選取, 是計算強度指標 A 與選用適當的坡度、坡高點, 而選點要件, 第一, 選擇高度、坡度都大的點位, 但是要去除極值。第二, 點位必須分布在包絡線上, 換句話說, 就是指標 A 值必須相近。每一條包絡線, 坡高在 10-20 公尺之間, 都會有一個轉折點, 在這個範圍以下坡度變化明顯; 高度大於 20 公尺, 坡度變化趨於平緩。其中, 陳有蘭溪河階地因為坡高、坡度有明顯不同, 可區分出兩組不同特色的地方, 利用坡度-坡高包絡線來代表樣區中卵礫石層的臨界坡度、坡高, 再配合 Baker (2004) 提出之非線性破壞準則, 找出對應之強度包絡線與強度指標 A 值, 圖 4 中虛線代表著不同地區臨界之坡度-坡高包絡線, 隨著包絡線由高到低, 相對應的強度指標 A 也跟著遞減, 可以發現草湖溪強度最高, 其值是 2.58, 而八卦山台地最低是 0.89, 反映出礫岩強度大於台地、河階地堆積層; 另外除了大肚台地與八卦台地外, 其他地方坡度-坡高點分布沒有很集中。

3. 卵礫石層強度與坡高、坡度之關係

本文利用非線性破壞準則與坡高和坡度定義卵礫石層的強度。Mohr-Coulomb (MC) 破壞準則是我們定義土壤和岩石強度的常用方法, 然而在許多前人研究中, 資料結果通常是非線性的破壞曲線, 特別在應力

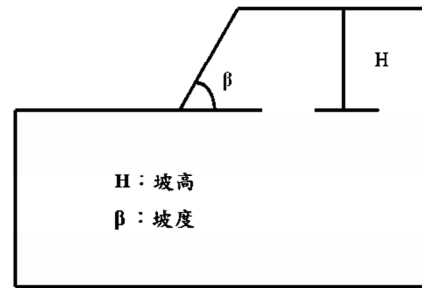


圖 2 邊坡模型 (一)

Fig.2 Slope model (1)

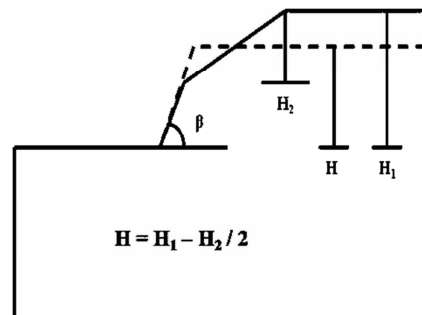


圖 3 邊坡模型 (二)

Fig.3 Slope model (2)

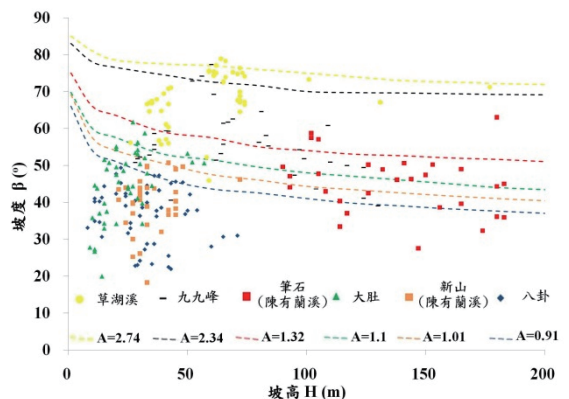


圖 4 全點位坡度 (β)-坡高 (H) 分布圖

Fig.4 All of the slope - height distribution

程度 (stress level) 小的時候最明顯。面對這問題，前人文獻 (Nusier et al., 2008, Baker, 2004, 2006) 利用簡單的力學公式 $\tau = A \sigma^n$ 來描述這條破壞包絡線，Hoek and Brown (1980) 透過 (1) 式來介紹岩體的經驗強度準則，學者 Baker (2004) 經由三軸實驗，證實 (1) 式非線性破壞準則與實驗資料有良好的一致性，可以有效解決線性 MC 之問題，

$$\tau = P_a A \left(\frac{\sigma}{P_a}\right)^n \quad (1)$$

τ 、 σ 分別為作用於破壞面上之剪應力與正向應力， P_a 代表大氣壓力而 A 與 n 均代表無因次強度指標，指標 A 主要控制剪力強度大小，而 n 控制破壞線之曲率。

Baker (2005) 將 (1) 式做修正，其定義如下：

$$F_n = F_n(\beta, n) \equiv \frac{F_s}{A} \left(\frac{\gamma H}{P_a}\right)^{1-n} \quad (2)$$

F_n 定義為一個正規化的安全係數，是坡度 β 與參數 n 的函數， F_s 是安全係數， γ 與 H 分別為單位重和坡高。本研究欲找出強度指標 A 值，首先要有坡度 β 與參數 n ，坡度由 5m DEM 可得知，再來卵礫石層邊坡大多屬於淺層崩塌，在決定參數 n 時需要找應力程度小的資料， n 值根據前人現地直剪試驗與三軸試驗繪圖、計算求得 (褚炳麟等 1996、林昀葦 2006、楊麗文 2000)，如圖 5，藉由非線性回歸式 $\tau = A(\sigma + T)^n$ ，誤差平方和 (最小平方方法) 與偏微分計算獲得，如 (3)、(4) 式：

$S(A, T, n) = \text{誤差平方和} =$

$$\sum_{i=1}^m [\tau_i - A(\sigma_i + T)^n]^2 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial A} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial T} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

計算結果如圖 5 所示， A 值為 1.49， n 值為 0.87，張力強度 T 為 1.6 kPa，由於參數 T 很小，本研究忽略這個參數，令其值為零，滿足 Baker (2006) 之假設。 β 與 n 值已知，利用圖 6 將 F_n 求出來，再來把各參數 F_n 、 F_s 、 n 、 γ 、 H 與 P_a 代入 (2) 式，求強度 A 值。安全係數 F_s 假設為 1，代表邊坡破壞瞬間之狀況。表 1 為固

定參數輸入值， γ 是卵礫石層單位重，根據學者張吉佐 (1996) 文獻推估出 23 kN/m³， P_a 表 1 大氣壓。

三、野外調查

本研究於 2010 年 3/29、5/27、12/19 以及 2011 年 1/28、1/30 共五天，調查了大肚台地、八卦台地、草湖溪、九九峰與陳有蘭溪河階地共 22 個點位，每個點位至少選取五處做分析，總計野外調查超過 110 處。

表 1 參數輸入值

Table 1 Input parameter values

Fs	n	γ (kN/m ³)	P_a (kPa)
1	0.87	23	100

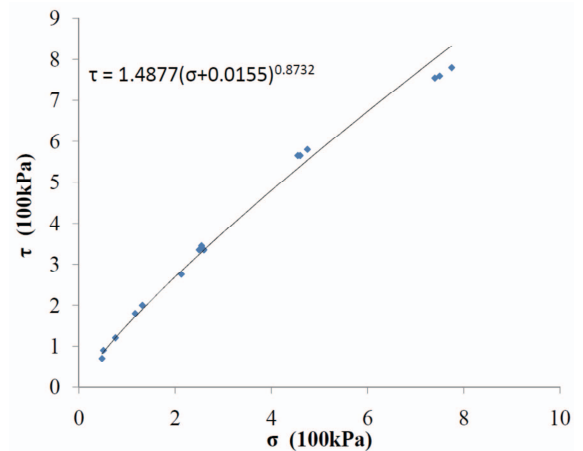


圖 5 n 值繪圖

Fig.5 The digram for N value

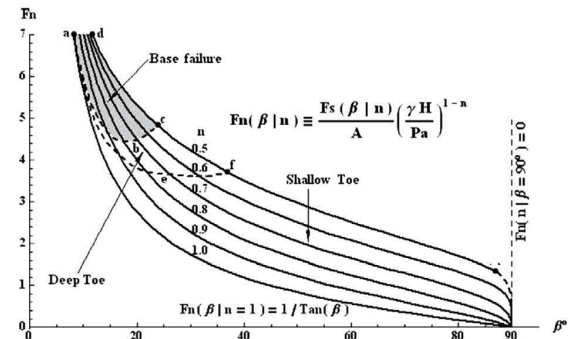


圖 6 F_n - β 對照圖 (Baker, 2006)

Fig.6 F_n - β comparison chart

進行野外調查時，首先選擇靠近路旁或河床旁方便量測的露頭，再根據地貌與地質材料分別做調查，調查的項目有卵礫石強度、基質強度及照相，本研究分別利用兩種混凝土試驗錘量測卵礫石強度與基質強度，本研究拍照的目的是為了用影像分析找尋卵礫石含量及做出粒徑分佈曲線（卵礫石： $>4.75\text{mm}$ ，基質： $<4.75\text{mm}$ ），將各地區調查資料平均，用以代表區域內之參數。

圖 7 為草湖溪現地卵礫石層照片，在現地有明顯層狀堆積，礫石粒徑並沒有特別大的參雜其中，另外坡度近乎垂直，表示有足夠大的凝聚力支撐，圖 9、10 為野外調查點位。表 2 為各點位調查資料，表 3 是平均資料，由表 3 可知，經過成岩作用時間長的草湖溪，強度指標 A 值明顯高於其他地區，另外，可以發現基質強度與 A 值有正比關係。表 4 為 A 值相對應之 c 、 ϕ 值，因為卵礫石層崩塌多屬淺層破壞，所以訂定的應力程度在 100 kPa 至 500 kPa 之間；另外， c 、 ϕ 值計算，首先透過 Baker (2004) 公式 (5)、(6) 轉換成平

均正應力 p (mean normal stress) 與平均軸差應力 q (mean deviator stress) (參數 T 是無因次抗張強度，本文假設其值為 0)，將 σ_1 、 σ_3 分別求出，再藉由 (7) 式求出 c 、 ϕ 值，當 A 值越大 c 、 ϕ 也隨著變大， c 的範圍在 40.3 - 128.7 kPa 之間， ϕ 則在 31.7-60.5 度之間，下列表示計算公式：

$$\begin{aligned} p &\equiv \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \sigma + \tau \tan(\phi) \\ &= \sigma + P_a n A^2 \left(\frac{\sigma}{P_a} + T \right)^{(2n-1)} \\ &\equiv p(\sigma | A, n, T) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} q &\equiv \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau \sec(\phi) = \tau \sqrt{1 + \tan^2(\phi)} \\ &= P_a A \left(\frac{\sigma}{P_a} + T \right)^n \sqrt{1 + (An)^2 \left(\frac{\sigma}{P_a} + T \right)^{2(n-1)}} \\ &\equiv q(\sigma | A, n, T) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sigma_1 = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (7)$$

表 2 各點位調查資料

Table 2 Data from field investigation

點位	卵礫石強度 q_G (MPa)	基質強度 q_M (MPa)	卵礫石含量 C_G (%)	粒徑 D_{30} (mm)
草湖溪 N1	65.4	13.6	85.4	19.97
草湖溪 N2	60.6	4.9	75.3	8.41
草湖溪 N3	64.5	10.8	77.8	9.15
九九峰 N1	64.8	4.2	83.7	12.91
九九峰 N2	68.2	3.7	86.3	16.97
九九峰 N3	63.0	7.7	80.4	10.77
大肚台地 N1	75.3	2.0	86.5	19.84
大肚台地 N2	79.1	1.3	91.0	33.26
大肚台地 N3	71.6	3.2	81.5	11.70
大肚台地 N4	73.6	3.6	85.7	21.19
大肚台地 N5	80.8	1.4	75.0	7.63
八卦台地 N1	53.9	1.6	70.6	4.95
八卦台地 N2	54.7	1.4	72.3	5.73
八卦台地 N3	47.9	2.4	86.1	14.31
八卦台地 N4	54.7	1.8	71.1	5.25
八卦台地 N5	52.2	2.1	80.5	11.53
陳有蘭溪 N1	59.9	1.5	83.8	15.66
陳有蘭溪 N2	59.7	2.2	81.5	11.42
陳有蘭溪 N3	54.3	2.4	80.1	10.58
陳有蘭溪 N4	56.6	3.1	74.3	11.11
陳有蘭溪 N5	63.8	3.5	83.4	14.17
陳有蘭溪 N6	51.7	3.5	81.1	11.34

註 1. 卵礫石 ($>4.75\text{mm}$)、基質 ($<4.75\text{mm}$)

註 2. 卵礫石含量為面積累積百分比

註 3. 筆石、新山皆為陳有蘭溪河階地

1. 儀器介紹

本研究進行野外調查，使用 Matest 混凝土測試錘測量卵礫石強度，量測時均垂直於樣體，一個地點隨機挑選五處以上做試驗，每處最少相隔 3 公分以上，記錄反彈讀數並由圖表推估卵礫石強度（本儀器由義大利製造之 Matest 混凝土測試錘）。用混凝土試驗錘量測坡面之基質強度，首先在坡面上的基質中製造出一垂直平面，將試驗錘調整至適當位置並量測數值，經由圖表換算可得基質強度，每一地點至少選取五處，除去極值加以平均代表這個地點的基質強度（本試驗錘由瑞士 PROCEQ 公司製造，型號 Type P）。

2. 粒徑分析

本研究拍攝現地照片，使用影像分析軟體 (Image J)，將照片灰階化再透過進階影像處理為黑白之二值化圖形，並且決定顆粒邊緣，用來分析照片中顆粒粒徑、顆粒面積。影像分析範圍均固定成 50 公分*50 公分，排除受分析範圍大小之影響，藉由電腦的判定，簡化傳統現地粒徑分析繁複程序。由於影像軟體是分析 2D 圖形面積，所以粒徑分佈曲線是用面積累積百分比與粒徑大小做成的。圖 8 是影像分析軟體 (Image J) 之操作介面，透過判定黑色區域找出顆粒粒徑與面積。圖

11 為各地區之粒徑分佈曲線，可以發現各地曲線並沒有太大變化，最大粒徑都在 20 公分以下，可能原因是本研究調查之點位皆在中部，且將一百多筆調查資料按照地理位置分別平均成草湖溪、九九峰、筆石、大肚、新山、與八卦等六筆資料，是粒徑曲線集中的原因。卵礫石含量由粒徑分佈曲線推估而得，其範圍在 70.6%至 91.0%之間，與張吉佐等 (1996) 台中、大肚台地與八卦台地現地卵礫石含量 65%~91%相吻合。



圖 7 野外礫石層照片

Fig.7 The picture of the field gravels formation

表 3 各點位平均調查資料

Table 3 Data averaged for 6 classified areas

點位	強度指標A值	卵礫石強度 q_G (MPa)	基質強度 q_M (MPa)	卵礫石含量 C_G (%)	粒徑 D_{30} (mm)
草湖溪	2.58	63.5	9.8	80.7	12.13
九九峰	2.32	65.3	5.2	84.5	14.18
筆石	1.3	57.7	3.5	82.2	12.27
大肚台地	1.13	76.1	2.3	85.7	20.85
新山	0.98	57.6	2.3	80	11.27
八卦台地	0.89	53	1.8	80.8	10.28

表 4 強度對照表

Table 4 Strength indices for 6 classified areas

強度指標	草湖溪 A=2.58	九九峰 A=2.32	筆石 A=1.3	大肚台地 A=1.13	新山 A=0.98	八卦台地 A=0.89
c (kPa)	128.7	115.2	61.5	52.8	45	40.3
Φ (°)	60.5	57.9	41.9	37.9	34.1	31.7

四、統計分析

本文利用統計方法中的複迴歸分析 (Multiple Regression Model) 來做運算, 其簡單關係為自變數兩個以上, 依變數一個, 基本算式為 (8) 式所表示:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \beta_3 \times x_3 + \dots + \beta_k \times x_k + \varepsilon \quad (8)$$

y = 依變數

x_k = 第 k 個自變數

β₀ = 常數項、截距

β₁~β_k = 回歸式的參數

ε = 隨機變數

本文利用 Excel 內的資料迴歸分析, 將野外調查參數當作自變數, 依變數為 5m DEM 資料所推估出的 A 值, 兩種變數進行複迴歸分析 (表 3 為迴歸資料), 建立之間關係, 並找尋地質因子影響強度的相對重要性。

在一般統計分析中, 判定係數 R² 用來判別迴歸式中的適合度, 判定係數越大則解釋迴歸式的能力越好, 但是, 有時由於樣本數太少或自變數較多, 會導致自由度降低, 可能讓方程式解釋能力下降, 但判定係數 R² 並不會反映出來, R² 會有高估情形產生, 所以建議使用調整後的 R² 值, 去解釋迴歸方程式, 調整後的 R² 計算方法如 (9) 式所示。表 5 中調整後的 R² 為 0.98, 代表回歸式判別能力強; 再來 P 值可以看出地質因子在迴歸式中的相對重要性, 當值越小表示這個因子越重要。影響強度指標 A 值大小依序是, 卵礫石含量 (C_G)、基質強度 (q_M)、粒徑大小 D₃₀、卵礫石強度 (q_G)。

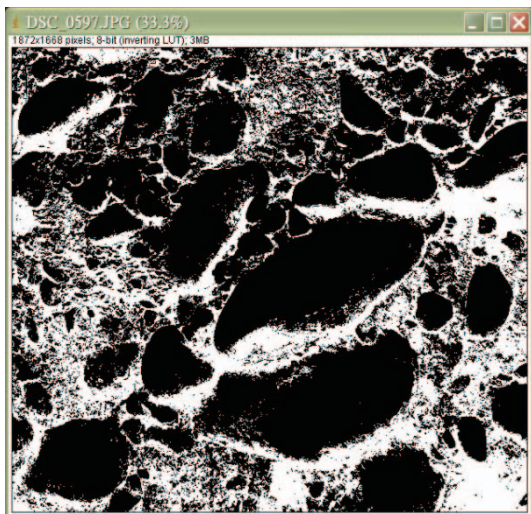


圖 8 影像分析軟體操作介面

Fig.8 The image analysis software user interface

表 5 複迴歸分析 (一)

Table 5 Multiple Regression Model

R ² 值	0.997	變項	迴歸係數	P值
調整後的R ² 值	0.984	常數項	-22	0.1
顯著值	0.08	基質強度 (q _M)	0.2	0.11
		卵礫石強度 (q _G)	0.06	0.4
樣本數	6	卵礫石含量 (C _G)	0.27	0.1
		粒徑大小 D ₃₀	-0.23	0.22

註: 基質強度 (MPa)、卵礫石強度 (MPa)、卵礫石含量 (%)、粒徑大小 (mm)

表 6 複迴歸分析 (二)

Table 6 Multiple Regression Model

R ² 值	0.991	變項	迴歸係數	P值
調整後的R ² 值	0.977	常數項	-21	0.04
顯著值	0.0019	基質強度 (q _M)	0.24	0.005
樣本數	6	卵礫石含量 (C _G)	0.28	0.04
		粒徑大小 D ₃₀	-0.12	0.06

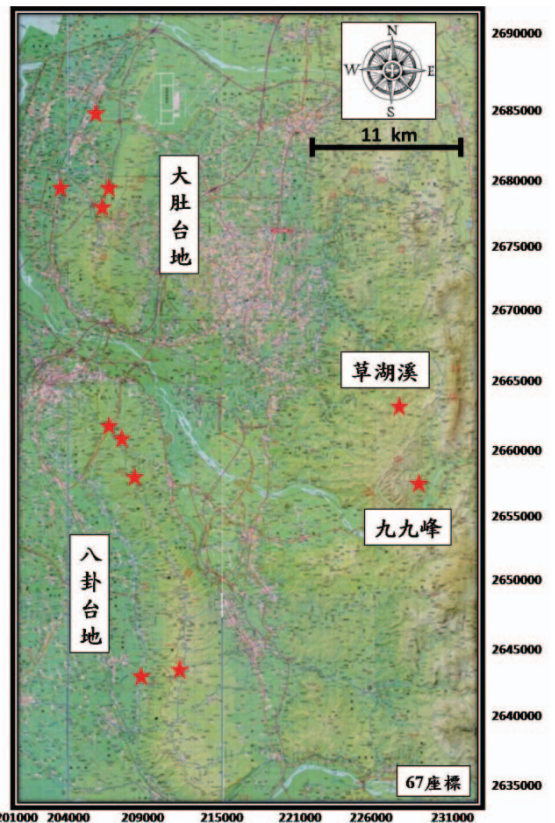


圖 9 野外調查點位 (一)

Fig.9 Investigation locations at Dadu tableland

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \times \frac{n-1}{n-k-1} \quad (9)$$

\bar{R}^2 = 調整後的 R^2 值

n = 觀察值數量

k = 自變數個數

本研究將野外調查因子與 DEM 推估之 A 值進行迴歸 (表 5)，迴歸方程式為下列 (10) 式所示：

$$A = -22 + 0.27 \times C_G + 0.2 \times q_M - 0.23 \times D_{30} + 0.06 \times q_G \quad (10)$$

A 為強度指標、 C_G 是卵礫石含量、 q_M 是基質強度、粒徑大小 D_{30} 、 q_G 是卵礫石強度，在迴歸係數方面，根據表 5 所獲得，其中，只有粒徑大小與常數項的係數為負，表示與強度指標 A 有負相關，而其他因子則是正相關。

為了達到簡單判定野外邊坡強度，本研究將上述方程式 (10) 去除最不important因子 q_G 再做一次複迴歸分析，結果為表 6 所示，調整後的 R^2 為 0.98，重要性 P 值排序為基質強度 (q_M)、卵礫石含量 (C_G)、粒徑大小 D_{30} ，迴歸方程式如下面 (11) 式所列：

$$A = -21 + 0.24 \times q_M + 0.28 \times C_G - 0.12 \times D_{30} \quad (11)$$

五、結 論

本研究透過野外調查與 DEM 資料，分別對草湖溪、九九峰、大肚、八卦台地與陳有蘭溪河階地進行調查與分析，蒐集現地地質與地形資料配合室內分析，探討卵礫石層強度性質，並且針對調查之地質因子與卵礫石層強度指標建立關係。

在地質資料分析中，草湖溪與九九峰屬於頭嵛山層火炎山相之礫岩，大肚台地與八卦台地屬於紅土台地堆積層，還有沖積扇河階地的陳有蘭溪河階，其強度指標 A 值各有不同，依序是草湖溪 2.58，九九峰 2.32，筆石 1.3，大肚 1.13，新山 0.98 與八卦 0.89。

在地形分析方面，相對其他地區而言，大肚台地與八卦台地坡度-坡高點位較集中，礫石間之基質多為黏土、粉土等小顆粒，再來，陳有蘭溪河階地基質多屬細砂，比較像河流裡石塊間磨擦的殘留物，而草湖溪與九九峰之礫岩，由於經過成岩作用時間長，其基質強度強，整體強度比其他地區大。

本研究根據野外調查資料與地形資料進行複迴歸分析，比較不同地質因子影響強度指標的相對重要性，並建立評估強度指標的迴歸式。本研究發現影響強度指標 A 值的重要性依序為卵礫石含量 (C_G)、基質強度 (q_M)、粒徑大小 D_{30} ，最後是卵礫石強度 (q_G)，而 (10) 和 (11) 式提供一個由野外簡易地質調查評估強度指標的方法，進一步可轉換成凝聚力 and 摩擦角。

誌 謝

本研究承國立中興大學農資學院實務技藝薪傳計畫經費補助，僅此誌謝。

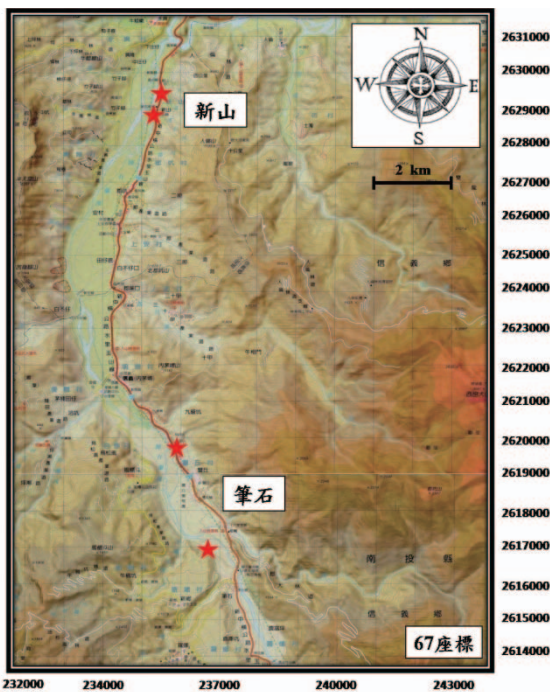


圖 10 野外調查點位 (二)

Fig.10 Investigation locations at Chen Yu Lan river terrace

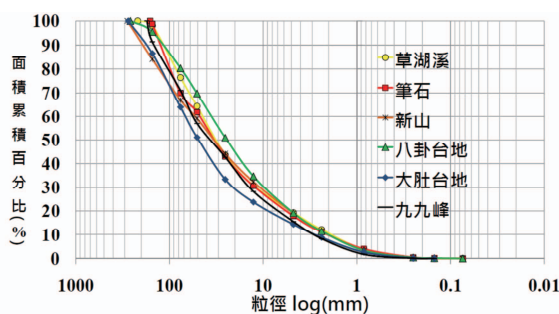


圖 11 粒徑分布曲線

Fig.11 Particle size distribution curve

參考文獻

- 林基源、楊明德、徐松圻、蔡佩勳、許世宗、賴俊仁、賴銘峰、壽克堅、黃富國、陳廣祥、許尚逸 (2009), 「陳有蘭溪流域坡地災害致災成因探討」, 地工技術, 第 112 期, 第 41-50 頁。(Lin, C.Y., Yang, M.T., Hsu, S.C., Tsai, P.H., Hsu, S.T., Lai, C.J., Lai, M.F., Shou, K.C., Huang, F.K., Chen, K.H., and Hsu, S.Y. (2009). "The Chen-You-Lan river basin genesis of landslides hazard." *Sino-Geotechnics*, 112, 41-50. (in Chinese))
- 林昀葦 (2006), 「台灣中部地區於崩積層抗剪強度之簡易現地試驗」, 國立中興大學土木工程研究所碩士論文。(Lin, Y.W. (2006). "The shear strength of colluvium in situ testing of the simple in central Taiwan." Master Thesis, Department of Civil Engineering National Chung-Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- 林朝榮 (1957), 「台灣地形—臺灣通志稿卷一土地誌地理篇」, 南投, 臺灣省文獻委員會。(Lin, C.C. (1957). "Taiwan topography -- annals of Taiwan issued volume 1 land topography geography articles." NanTou, Research commission of Taiwan province. (in Chinese))
- 林耀隆 (2007), 「以改良式三軸儀器探討卵礫石土之剪脹行為」, 國立中興大學土木工程研究所碩士論文。(Lin, Y.L. (2007). "Shear Dilation Behavior of Gravelly Soil by Using Modified Tri-axial Apparatus." Master Thesis, Department of Civil Engineering National Chung-Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- 張吉佐、陳逸駿、嚴世傑、蔡宜璋 (1996), 「台灣地區中北部卵礫石層工程性質及施工探討」, 地工技術, 第 55 期, 第 35-46 頁。(Chang, C.T., Chen, Y.C., Yen, S.C., and Tsai, Y.C. (1996). "Study of engineering properties and construction method for gravel formations in central and northern Taiwan." *Sino-Geotechnics*, 55, 35-46. (in Chinese))
- 褚炳麟、潘進明、張國雄 (1996), 「台灣西部卵礫石層現地之大地工程性質」, 地工技術, 第 55 期, 第 47-58 頁。(Chu, P.L., Pan, C.M., and Chang, K.H. (1996). "Field geotechnical engineering properties of gravel formations in western Taiwan." *Sino-Geotechnics*, 55, 47-58. (in Chinese))
- 董家鈞、黃安斌 (1996), 「礫石土材料之力學試驗現況與展望」, 地工技術, 第 55 期, 第 59-70 頁。(Tung, C.C., and Huang, A.P. (1996). "Laboratory and in-situ characterization of gravelly soils: current status and future development." *Sino-Geotechnics*, 55, 59-70. (in Chinese))
- 楊麗文 (2000), 「以顆粒材料力學探討卵礫石層強度性質之研究」, 國立中興大學土木工程研究所博士論文。(Yang, L.W. (2000). "A study of the strength of gravelly cobble deposit based on mechanics of granular materials." Department of Civil Engineering National Chung-Hsing University Doctoral Dissertation. (in Chinese))
- 壽克堅、吳家驄 (2000), 「卵礫石隧道地層分類之初步研究」, 2000 岩盤工程研討會, 台中, 第 181-192 頁。(Shou, K.J., and Wu, J.C. (2000). "The study of classification of gravel formations tunnels." *2000 Taiwan rock engineering symposium, Taichung*, 181-192. (in Chinese))
- 鄧屬予 (1996), 「台灣卵礫石層的地質背景」, 地工技術, 第 55 期, 第 5-24 頁。(Teng, C.Y. (1996). "Geological background of the gravel formations of Taiwan." *Sino-Geotechnics*, 55, 5-24. (in Chinese))
- Baker, R. (2005). "Variational slope stability analysis of materials with nonlinear failure criterion." *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Technion City.
- Baker, R. (2004). "Non-linear strength envelopes based on triaxial data." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 498-506.
- Baker, R. (2006). "A relation between safety factors with respect to strength and height of slopes." *Computers and Geotechnics*, 33, 275-277.
- Hoek, E., and Brown, E. T. (1980). "Empirical strength criterion for rock masses." *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(9), 1013-1035.
- Nusier, O.K., Almohd (Ayasrah), I.M., and Jaradat, R.A. (2008). "Nonlinearity of Shear Strength and Stress-Strength Behavior and induced stress predictions." *International Conference on Construction and Building Technology*, E, 43-52.
- Shou, K.J. (2000). "A Study on the Failure Mechanism of the Slopes of the Lateritic Terraces in Central Taiwan." *GEO2000*, Melbourne, Australia.

2011年03月22日 收稿

2011年07月12日 修正

2011年08月03日 接受

(本文開放討論至 2012 年 9 月 30 日)