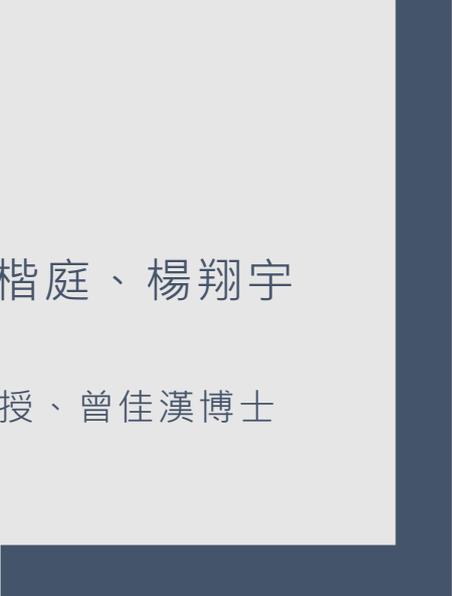




台灣地震山崩之探討

沈楷庭、楊翔宇

指導老師：董家鈞教授、曾佳漢博士



壹、研究背景

一、921 集集大地震概述

1999 年 9 月 21 日凌晨 1 點在大家熟睡時發生了台灣地震史上傷亡第二多的「集集大地震」，這場威力等同於 46 顆原子彈的自然災害造成兩千多人死亡，一萬多人受傷，甚至有十萬間房子受損，財產損失相當慘重，為現今全世界自然災害損失第十三名。

這場地震震央位於南投縣集集，震源深度只有 8 公里為極淺層地震，芮氏規模 7.3，震源附近最大震度更是高達 7 級如圖 1.1.1，搖晃時間更是長達 102 秒造成此次地震為車籠埔斷層，斷層走向為 $N18^\circ E$ ，傾角 19° ，震源機制解為一個低角度逆斷層加上一點走向滑移的分量，地震矩能量為 $1.77 \pm 0.4 \times 10^{20} N - m$ ，在斷層北邊埤豐橋產生高達 12 公尺的滑移量如圖 1.1.2。

全台灣因為 921 地震造成的災害不計其數，又以九份二山和草嶺山崩塌最為嚴重。九份二山位於南投縣國姓鄉，在未崩塌前，岩層即因為撓曲滑動褶曲作用而發生錯動，因為地震的關係造成大面積的山崩，整個順向坡岩體沿層理面脫離破裂而下，崩塌平均深度為 34 公尺，崩塌面積為 102.5 公頃，形成了兩座堰塞湖，分別為韭菜湖溪與澀仔坑溪兩處堰塞湖，不幸的是，九份二山的崩塌造成 39 人死亡、228 頭台灣水鹿遭活埋，這無疑是個嚴重的人財損失；草嶺山位於雲林縣古坑鄉草嶺村，草嶺山地形的因素常常因為一場強降雨或是颱風地震就造成山崩，此地為東北向西南傾斜 15 度的順向坡，砂頁岩互層有不連續面，位在錦水頁岩層加速水分入滲，加上清水溪不斷侵蝕坡腳讓上方的岩體失去支撐，最後就因為降雨或地震導致崩塌，草嶺山崩也有 36 人因此罹難。

二、研究動機與目的

台灣是由歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊兩大板塊聚合擠壓而形成的島嶼，又位在環太平洋火山地震帶上，地震頻繁，每天的無感地震就多達 100 個，對於地殼來說，能承受的壓應力比張應力大許多，因此逆斷層通常會帶來較大的地震災害，也因為發生了 921 的大事件，造成台灣許多的損失，對於地震災害的防治也有越來越多的團隊研究，因此我們希望透過羅吉斯回歸，找到關於地震誘發山崩的因子，再畫出山崩潛勢圖，並在第一時間地震發生地當下，就可以做出山崩警報，並利用主震算出新地回歸式，將可能發生的餘震代進去做計算，做更進一步的預防，以減少人員或是財產上的損失。

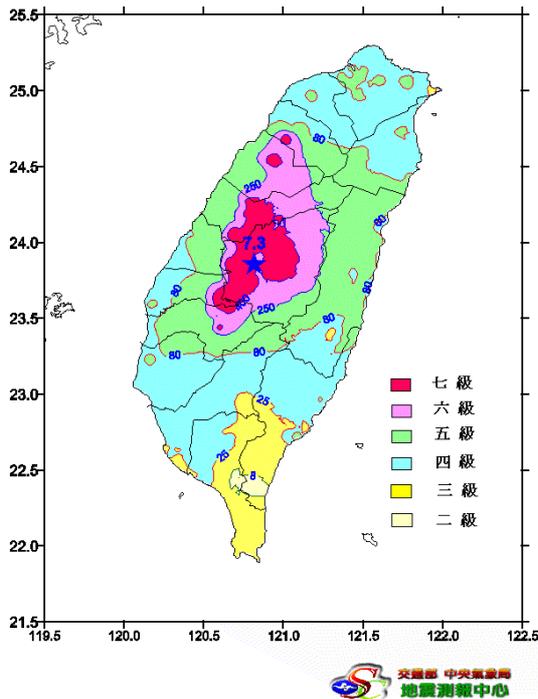


圖 1.1.1 921 集集地震震度分布圖

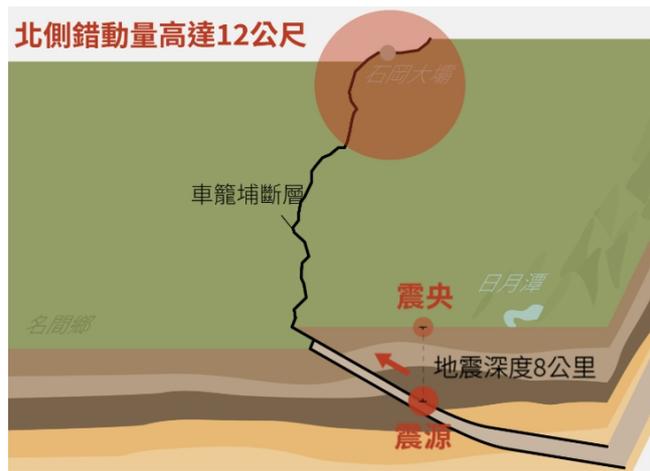


圖 1.1.2 車籠埔斷層運動方式(資料來源：中央氣象局、EDREaM)

貳、研究方法

一、研究工具

1. 羅吉斯回歸

一般在資料分析中的回歸方法有很多種，通常又以「線性回歸」和「邏輯斯回歸」最為常見，前者通常用在自變數為連續變數且得到的結果沒有上下限時，想要知道數據的走向而用的，而後者可用在自變數為類別變數或是連續變數的事件，通常會用在計算「會發生」或「不會發生」上，而羅吉斯回歸將超過 1 與低於 0 的部分平滑化，算出來為一個機率值，大於 0.5 可視為發生機率較高，低於 0.5 可以視為發生機率較低。在羅吉斯回歸中：

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta x_i)}} = \frac{e^{\alpha + \beta x_i}}{1 + e^{\alpha + \beta x_i}}$$

$$1 - P_i = 1 - \frac{e^{\alpha + \beta x_i}}{1 + e^{\alpha + \beta x_i}} = \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta x_i}}$$

P_i 為第 i 個案例事件發生的機率， $1 - P_i$ 為事件不發生的機率，其中是由變數 x_i 組成的非線性函數， x_i 是將要挑選因子的值， β 為個因子的權重值，如果有很多因子，羅吉斯函數可以展開成：

$$P_i = \frac{e^{\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki}}}{1 + e^{\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki}}}$$

得到羅吉斯回歸模型為：

$$\ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki}$$

2. ArcGIS

本次研究用到的因子，坡度、坡度變率、坡向、地形粗糙度、高程、岩性、震度皆是用 Arcmap 計算以及擷取出來的，藉由裡面的 Toolbox 可以做許多相關的計算，再用裡面的 Extraction 以及 Intersect 工具可以擷取出本次研究所有資料點的數值。

3. SPSS

計算羅吉斯回歸的方法有很多種，最常見的就是用 Excel 或是 Python 或是統計用的 IBM SPSS 來做運算，Excel 在處理數據上需有較多繁瑣的計算步驟，對大量數據的運算也需要一點時間，剛開始我們使用 Python 進行我們的回歸測試，但由於後來在修改參數時太花時間，決定先做初步的運算測試其結果，之後考慮在計算地震發生時山崩潛感值上再使用，最後我們本次實驗使用 SPSS 進行我們的回歸分析。

SPSS 是由 IBM 公司開發的一個做統計分析的付費軟體，因此我們使用中央大學免費軟體中的 SPSS，先將山崩與非山崩數據在 Excel 整理好之後再一起匯入 SPSS 用裡面的二元 Logistic 進行計算得到我們想要的結果。

二、資料來源

本次研究使用 Arcmap 計算我們研究區域的潛在因子，包括：坡度、坡度變率、坡向、地形粗糙度、高程、岩性、震度做進一步的邏輯斯回歸分析，因此我們需要一些基本的地質資料取我們需要的因子。

1. 數值地形高程模型 (Digital Elevation Model , DEM) : 採用內政部的解析度為 20x20 公尺的全台灣模型來用 Arcgis 計算我們需要的因子，
2. 全台岩性分布圖：使用地調所的全台岩性圖
3. 921 集集地震震度分布圖：使用中央氣象局的集集地震分布圖
4. 921 山崩資料庫：採用李錫堤老師蒐集的山崩資料庫
5. 現地調查資料點：採用人工現地調查的資料點，但由於我們在 Arcgis 中只取點的座標資料再自行計算各因子的值，因此不影響因子的誤差。

三、因子選取

引發山崩發生有很多因素，在山崩因子中可分為潛在因子和促崩因子，潛在因子是指在某一地區的環境特性，不會因為事件的發生而改變的因子，包括地形地質等因素，例如：坡向、坡度、高程等等；促崩因子是指一事件發生導致山崩的因子，可能是地震或是颱風，例如：震度、規模、最大時雨量、總雨量等等。

1. 潛在因子

在過去有做過相關實驗的文獻中，曾被拿出來討論過的因子就多達五十

多種，但選取這麼多因子很容易造成計算量過於龐大耗時過久，而且並不是每個因子的數值都容易測量，我們根據過去的文獻，先挑出較多人使用且好取得的因子，總共有 6 個：坡向、坡度、坡度變率、高程、地形粗糙度、岩性。

(1) 坡向：為一個山坡的傾向，也就是法線投影到平面的方位，即為坡向，坡向影響山坡地的風化程度，由於台灣位在季風氣候，長時間季風吹拂下，固定坡向的風化程度較高，可能較易產生山崩，在 Arcgis 中用 Aspect 工具即可直接計算出各山坡的坡向，結果如圖 3.3.1。

(2) 坡度：表示一山坡的傾斜程度，分為兩種表示方法，一種為角度，一種為百分比，在本實驗我們選擇用角度來計算，角度越大，坡則越陡。坡度直接影響岩層的斜面下滑力，斜面下滑力為重力的正切值，若是坡度越大，越容易引發山崩，在 Arcgis 中用 Slope 工具即可直接計算出各山坡的坡度，結果如圖 3.3.2。

(3) 坡度變率：表示坡度的變化，可以透過數值觀察是否有陡坎，數值越大，坡度變化越大，在 Arcgis 中用把算好的坡度圖層在做一次 Slope 即可直接計算出坡度變率，結果如圖 3.3.3。

(4) 高程：為一地點從海平面算起的高度，在 Arcgis 中 DEM 中的數值已為高程，直接用 Intersect 擷取高程數值即可直接得到山坡高程，結果如圖 3.3.4。

(5) 地形粗糙度：直接反映地表起伏的程度，為山坡的曲面面積在其水平面上的面積比，結果如圖 3.3.5。

$$R = \frac{S_{\text{曲面}}}{S_{\text{水平}}} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\text{Slope} \times \pi}{180}\right)}$$

(6) 岩性：岩性不同會影響山崩發生的機率，在不同環境下生成，會產生不同的礦物組成或是節理，而導致岩石強度的不同，山坡可能會沿著岩石的弱面而滑動造成山崩，由於對於蒐集全台灣岩石強度是很困難的，因此我們先用大規模的台灣地質圖，然後用 Arcmap 中的 Intersect 萃取山崩區域的岩類，但同是砂岩或頁岩也會有不同的岩石強度，所以我們用地層來分，例如：錦水頁岩層、打鹿頁岩層等等，結果如圖 3.3.7。

2. 促崩因子

(1) 震度：依照地震造成一地的地動加速度來分，分為 0 級到 7 級，一般以

| 震度 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 弱 | 5 強 | 6 弱 | 6 強 | 7 |
|-------------------------------|------|---------|---------|--------|-------|--------|---------|---------|---------|------|
| PGA (cm/sec ²) | <0.8 | 0.8~2.5 | 2.5~8.0 | 8.0~25 | 25~80 | 80~140 | 140~250 | 250~440 | 440~800 | >800 |

震度較能表現地震對當地的破壞程度，震度越大，越容易導致山崩，結果如圖 3.3.6。

(2) 地震波與坡向夾角：地震波傳遞的方向與坡向的夾角會影響山崩發生的可能，本實驗採用 TWD97 座標表示法，先計算山崩相對於震央的方位

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right)$$

$$\Delta X = x - x_{epi} = \quad , \quad \Delta Y = y - y_{epi}$$

α 為震央與山崩的夾角、 (x,y) 為山崩的座標、 (x_{epi},y_{epi}) 為 921 集集地震的座標，但因為坡向的角度表示方式為正北是 0° 正南是 180° ，而我們算出來的 α 為正東是 0° 正西是 180° ，所以需要做角度轉換

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = 90 - \alpha \cdot \Delta X > 0, \Delta Y > 0 \\ \beta = |\alpha - 90| \cdot \Delta X > 0, \Delta Y < 0 \\ \beta = 270 - \alpha \cdot \Delta X < 0, \Delta Y < 0 \\ \beta = |\alpha - 270| \cdot \Delta X < 0, \Delta Y > 0 \end{array} \right.$$

經過轉換後皆為正北為 0° 因此將震央與山崩的夾角與坡向互減取正的銳夾角是我們要的「地震波與坡向夾角」，如圖 3.3.8

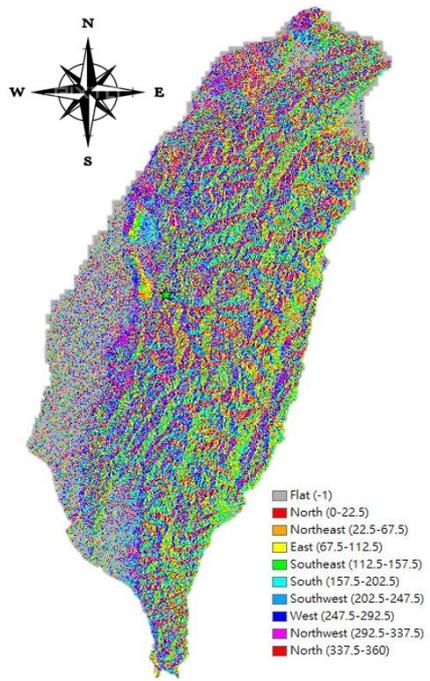


圖 3.1 坡向

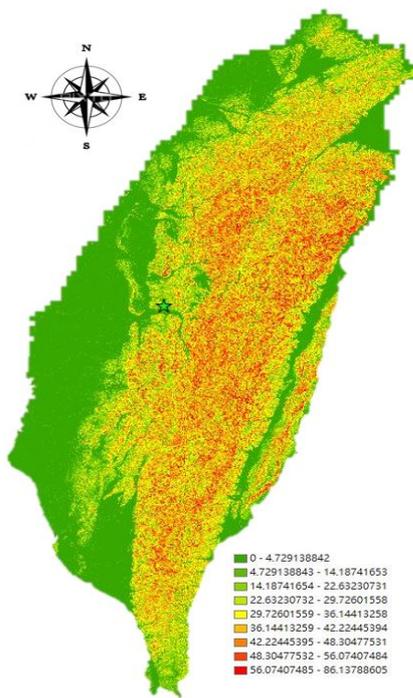


圖 3.2 坡度

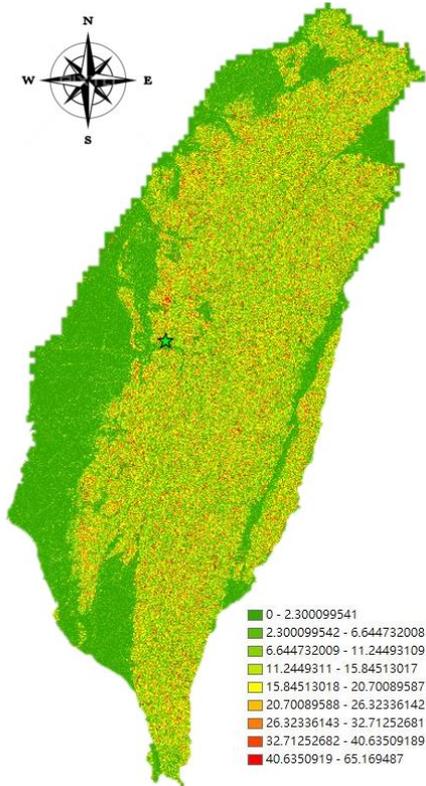


圖 3.3 坡度變率

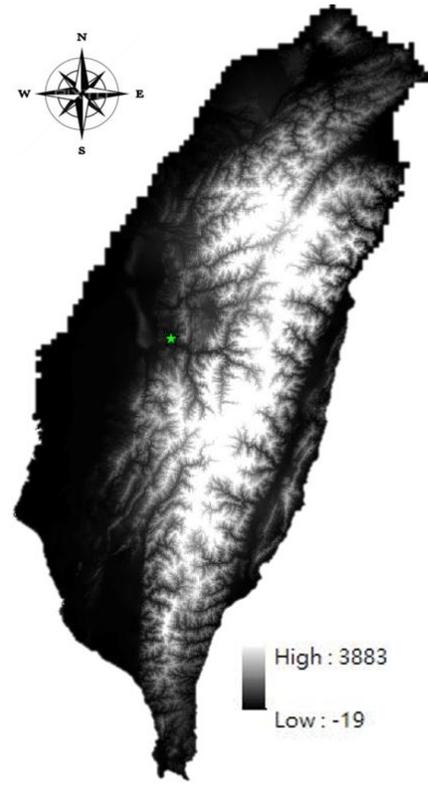


圖 3.4 高程

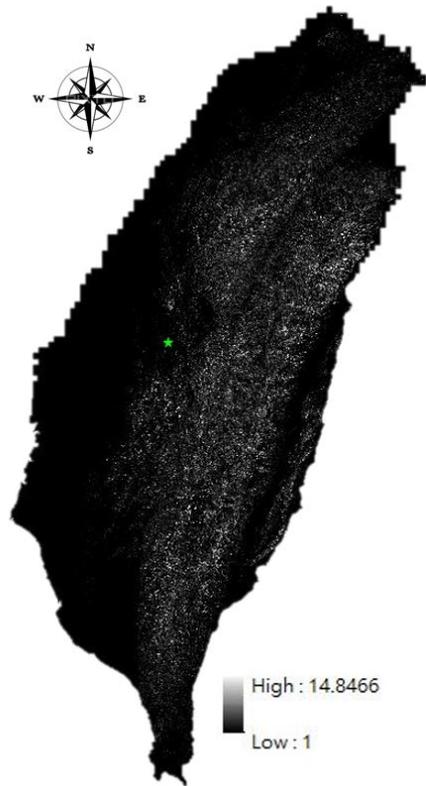


圖 3.5 坡度粗糙度

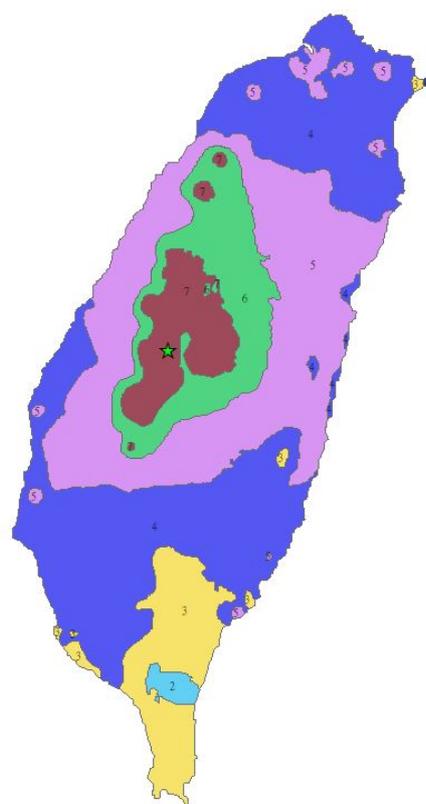


圖 3.6 集集地震震度分布

四、數據分析

本次實驗選取了 9305 件山崩事件如圖，9245 件非山崩事件如圖，在 gis 中山崩資料的型態為多邊形，需先把其轉為點，再從點資料去擷取我們需要分析的資因子，雖然在原先的山崩資料屬性表中，已經有一些基本的數據，但為了減少變因和資料的誤差，我們選擇統一用解析度 20 公尺的 DEM 計算。此次非山崩的數據點是來自於現地調查的資料點，我們使用已經建構好 GIS 的數據進行使用，因為有少數資料點與山崩區域重合，因此需要先把重合的點扣除才不會有計算錯誤的發生。

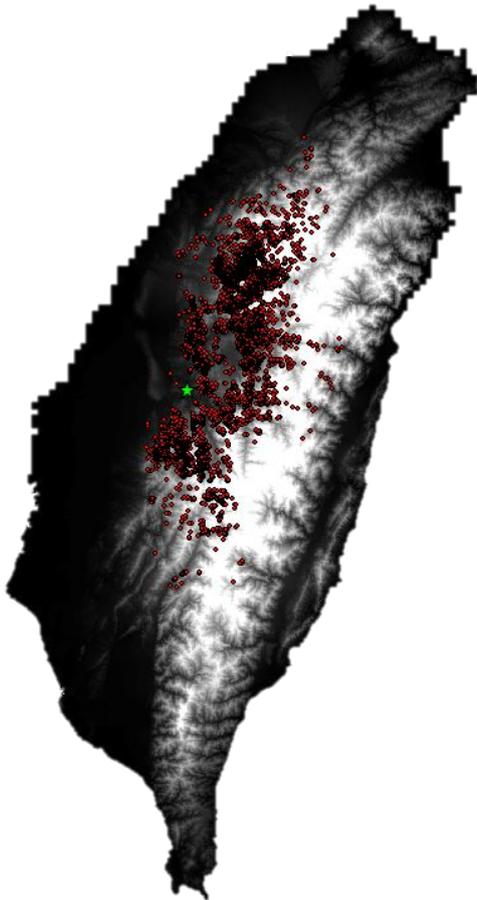


圖 3.8 地震波與坡向的夾角

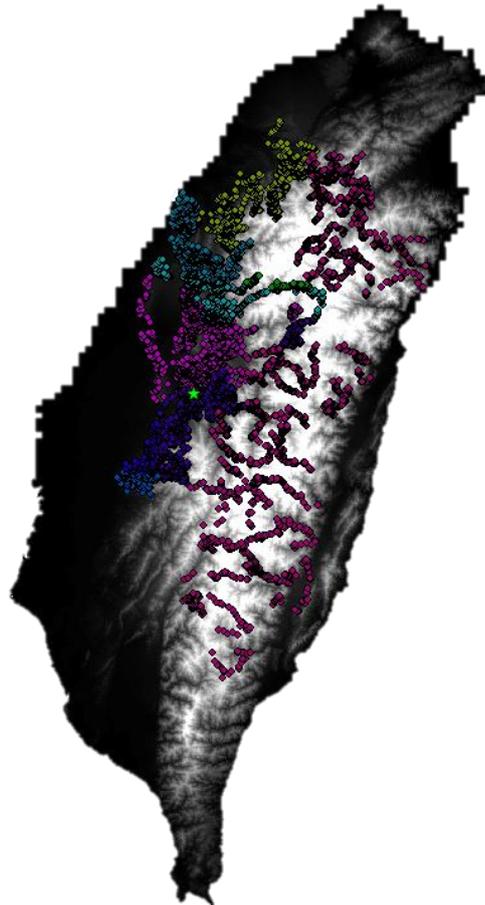


圖 3.8 地震波與坡向的夾角

參、研究結果與討論

一、全台山崩回歸結果

| | B 之估計值 | Wals | 顯著性 p-value | Exp(B) | EXP(B) 的 95% 信賴區間 | |
|-------|--------|---------|----------------|--------|-------------------|-------|
| | | | | | 下界 | 上界 |
| 坡度 | .073 | 223.971 | .000 | 1.076 | 1.066 | 1.086 |
| 地形粗糙度 | 1.173 | 23.258 | .000 | 3.230 | 2.006 | 5.202 |

| | | | | | | |
|------------|--------|---------|------|-------|-------|-------|
| 坡向sin | .117 | 15.510 | .000 | 1.124 | 1.060 | 1.191 |
| 坡向cos | -.083 | 7.762 | .005 | .920 | .868 | .976 |
| 高程 | .001 | 236.309 | .000 | 1.001 | 1.001 | 1.001 |
| 震度 | .981 | 635.901 | .000 | 2.666 | 2.471 | 2.877 |
| 地震波與坡向夾角 | -.003 | 14.897 | .000 | .997 | .995 | .998 |
| 九曲大理岩 | -6.394 | 26.926 | .000 | .002 | .000 | .019 |
| 十八重溪層 | -4.098 | 12.242 | .000 | .017 | .002 | .165 |
| 十四股層 | -3.488 | 8.831 | .003 | .031 | .003 | .305 |
| 大禹嶺層 | -5.197 | 19.784 | .000 | .006 | .001 | .055 |
| 水長流層巴陵層 | -2.775 | 5.711 | .017 | .062 | .006 | .607 |
| 北寮層 | -3.919 | 11.009 | .001 | .020 | .002 | .201 |
| 四稜砂岩白冷層 | -2.161 | 3.469 | .063 | .115 | .012 | 1.120 |
| 打鹿頁岩 | -4.004 | 11.143 | .001 | .018 | .002 | .191 |
| 玉山主山層 | -4.350 | 13.545 | .000 | .013 | .001 | .131 |
| 白楊片岩 | -5.112 | 17.010 | .000 | .006 | .001 | .068 |
| 石底層 | -3.461 | 8.798 | .003 | .031 | .003 | .309 |
| 石門層 | -3.453 | 8.672 | .003 | .032 | .003 | .315 |
| 汶水層 | -3.291 | 7.922 | .005 | .037 | .004 | .368 |
| 沖積層 | -3.182 | 7.378 | .007 | .042 | .004 | .412 |
| 谷園片岩 | -6.753 | 18.671 | .000 | .001 | .000 | .025 |
| 佳陽層 | -3.533 | 9.226 | .002 | .029 | .003 | .286 |
| 卓蘭層 | -4.703 | 16.214 | .000 | .009 | .001 | .089 |
| 長枝坑層 | -2.050 | 2.916 | .088 | .129 | .012 | 1.354 |
| 南莊層 | -2.710 | 5.445 | .020 | .067 | .007 | .648 |
| 炭寮地頁岩 | -1.640 | 1.890 | .169 | .194 | .019 | 2.010 |
| 盆地堆積層 | -1.952 | 1.961 | .161 | .142 | .009 | 2.182 |
| 眉溪砂岩 | -4.564 | 14.705 | .000 | .010 | .001 | .107 |
| 紅土地堆積層 | -1.939 | 2.666 | .103 | .144 | .014 | 1.475 |
| 桂竹林層 | -3.380 | 8.399 | .004 | .034 | .003 | .335 |
| 桂竹林層十六份頁岩段 | -2.168 | 3.356 | .067 | .114 | .011 | 1.164 |
| 桂竹林層大窩砂岩段 | -3.104 | 7.108 | .008 | .045 | .005 | .439 |
| 桂竹林層魚藤坪砂岩段 | -2.754 | 5.582 | .018 | .064 | .006 | .625 |
| 桂竹林層關刀山砂岩段 | -2.130 | 3.351 | .067 | .119 | .012 | 1.163 |
| 高嶺片岩 | -5.106 | 17.826 | .000 | .006 | .001 | .065 |
| 深坑砂岩 | -2.125 | 3.249 | .071 | .119 | .012 | 1.204 |
| 畢祿山層 | -5.063 | 18.420 | .000 | .006 | .001 | .064 |
| 猴洞坑層 | -2.579 | 4.751 | .029 | .076 | .007 | .771 |
| 階地堆積層 | -2.540 | 4.583 | .032 | .079 | .008 | .807 |

| | | | | | | |
|----------|--------|--------|------|------|------|-------|
| 黑岩山層 | -6.454 | 27.976 | .000 | .002 | .000 | .017 |
| 達見砂岩 | -2.327 | 3.962 | .047 | .098 | .010 | .965 |
| 隘寮腳層 | -4.395 | 11.160 | .001 | .012 | .001 | .163 |
| 碧靈頁岩 | -3.757 | 10.042 | .002 | .023 | .002 | .239 |
| 福隆園層 | -1.597 | 1.802 | .179 | .203 | .020 | 2.084 |
| 樟湖坑頁岩 | -3.026 | 6.443 | .011 | .049 | .005 | .502 |
| 潮州層 | -1.768 | 2.154 | .142 | .171 | .016 | 1.809 |
| 糖恩山砂岩 | -3.381 | 7.332 | .007 | .034 | .003 | .393 |
| 錦水頁岩 | -3.949 | 10.560 | .001 | .019 | .002 | .209 |
| 頭崙山層火炎山段 | -1.563 | 1.799 | .180 | .209 | .021 | 2.057 |
| 頭崙山層香山段 | -3.606 | 9.535 | .002 | .027 | .003 | .268 |
| 廬山層 | -3.934 | 11.448 | .001 | .020 | .002 | .191 |
| 鹽水坑頁岩 | -5.106 | 9.484 | .002 | .006 | .000 | .156 |
| 觀音山砂岩 | -4.317 | 13.029 | .000 | .013 | .001 | .139 |
| 常數 | -7.926 | 43.771 | .000 | .000 | | |

表4.1全台山崩羅吉斯回歸結果

伍、結論

透過最後全台山崩邏輯斯回歸結果，可以觀察因子對地震誘發山崩的影響能力，B 值是回歸式的係數，首先可以看到岩性的 B 值，B 值越小代表該類岩性越不容易發生山崩，其中以九曲大理岩 (-6.394)、谷園片岩 (-6.753)、黑岩山層 (-6.454) 最小；再來是顯著性 (p-value) <0.05 代表其有預測能力，再從 exp(B) 的值大小，可以看出選取該因子預測山崩的能力會增加幾倍，所以像高程 (1.001) 就沒有這麼顯著，在之後做回歸的時候可能就會將其移除，加上其他更顯著的因子，相對的，地形粗糙度 (3.230) 與震度 (2.666) 是對於全台回歸最顯著的因子，就可以列為地震誘發山崩的重要因子。

陸、未來展望

這次的專題研究我們主要是從過去學者所做的研究中去學習，綜合各個學者所挑選出的因子，進而建立我們自己的邏輯斯回歸式。就這次的研究成果來說，可能會再考慮坡向因子的選取，我們總共取了坡向、坡向的 \cos 、坡向的 \sin ，從回歸結果來看，應該選取其中一個就可以了，再來是高程，似乎沒有太大的顯著性，還有岩性的分布，之後會希望依照五大地質區劃分，就各區的岩石單軸壓縮強度來做更進一步的回歸，及再將區域縮小，先將預測的模型確定好，再慢慢的擴張區域，且這次的因子選取還沒有如此全面，雨量及 PGA 皆是重要的因子，但由於資料的取得不易，便沒有將其加入我們的回歸式中，之後也希望能做到更多新因子的加入，像是岩石弱面的判斷與量化，相信也能使預測山崩的模型更加準確。

柒、參考文獻

應用邏輯斯迴歸於崩塌時間與空間預測的探討(碩論)

ACRS2000