

東南亞地區持續的經濟成長帶來人口快速膨脹及基本建設的擴充皆促使地形落差擴大也更加不穩固。此外，休閒活動的發展則把人群帶入高危險性的地區；因此針對此地區未開發土地的地形進行評估並描繪災害發生的情況實有其必要性與急迫性。本文說明了應用地貌繪圖沿中部橫貫公路評估天然災害的可能性。這條公路為一重要的交通動線，且隨著經濟成長而日顯重要，同時亦是名聞遐邇的重要觀光據點之一，每年來此的觀光客人數高達兩百萬人次以上。此公路係沿著位處新地體構造、地形變化激烈環境的深邃大理石峽谷開發。目前地貌繪圖已證實是一個評估危險性的重要工具，並可藉以改善基本建設使其更符合成本效益、有效且順應環境生態。

新地體構造環境

新地體構造區內的地形組織一向處在極不穩定的狀態（Brunsden 1987）。高速的垂直活動造成基準面變動快速，頻繁的地震亦使得邊坡普遍不穩定。然而假設地殼運動比率接近常數，地形有可能處於動態平衡的狀態，不過仍對擾動非常的敏感（Petley et al. 1997）。氣候的變化、地體構造比率的變動，或猛烈的暴風雨等皆可能對此地形組織造成重大的影響。再者，砍伐森林或底層削切邊際不穩定的坡地等各項人類活動均使得新地體構造地區易受影響。

故在新地體構造區的地形常有一些特性，包括（Brunsden 1987後修改）：

- (1) 伴隨高度剝蝕及河川切割的快速水平及垂直地殼運動；
- (2) 快速的基準面變動，伴隨著地形變化；
- (3) 大型氣候變化機率高；
- (4) 大型地震活動機率高；
- (5) 全面性的地質脆弱，包括斷裂、不連續及斷層；
- (6) 地下水及邊坡水的大型變動；
- (7) 地形對人類的活動敏感。

新地體構造地帶的陡坡通常有極高的最大上升率、高機率的侵蝕能量、強烈的消能及具邊際穩定度的陡坡（Brunsden 1987）。在熱帶氣候中則常出現酷熱的的氣溫、豐沛的年降雨量及極高的雨量。故此種地形常使工程師及土地使用規劃人員面臨極大的挑戰，造成建設計畫難以進行，且完成結構體的損壞及消耗率非常高。

台灣即是如此的環境。碰撞活動作用地區造成的高度地殼上揚率使得陡峭地形含有脆弱、有許多節理的岩石且經常發生地震。本文將研討如何應用地貌繪圖來評估東台灣太魯閣峽谷內的中部橫貫公路 (CCH) 的相關危險性。

實質環境

台灣的地體構造及地質環境非常的複雜 (Ho 1987; Teng 1996)。本島位於激烈碰撞中的歐亞板塊 (大陸型) 及菲律賓海板塊 (海洋型) 的交會處 (圖一)。自中世紀起菲律賓海板塊便朝歐亞板塊的西北方移動。最初一般認為菲律賓海板塊 (海洋型) 隱沒於歐亞板塊 (大陸型) 底下, 而推起的變質岩塊形成了今日台灣的中央山脈 (圖一)。於 4 Ma BP 時隱沒的極性倒轉過來, 而銜接菲律賓海板塊下的歐亞板塊邊境的海底 (島弧) 地殼則開始隱沒 (Ho 1987)。目前台灣南方的歐亞板塊隱沒於菲律賓海板塊之下, 而台灣東方菲律賓海板塊則隱沒歐亞板塊之下。雖然板塊仍以 7 cm p.a. 的速度持續移動但台灣地區本身的隱沒則已停止 (Ho 1987; Petley et al. 1997), 而琉球島弧地體構造組織亦正往南潛移 (Teng 1996)。

因這些持續性的碰撞, 台灣遭受北北東-南南西軸向的擠壓, 形成地殼增厚及滑走斷層, 進而引發頻繁的輕微地震 (Tsai et al., 1987) 及 5 至 9 mm p.a. (Brunsden and Lin 1991) 的上揚率 (表一), 促成中央山脈的隆起。這個山脈為一個沿著軸向及高度成長的褶皺-逆衝帶 (Harris and Audley-Charles 1987), 最高峰達 4000m 左右。大部份的高度增長發生於更新世的中葉或後期, 但當最近的剝蝕率估計約為 5-6 mm p.a. (Li 1976; Lin 1991; Brunsden and Lin 1991), 相當於上揚率, 地形大幅抬升的局面不再復見。此一測得的剝蝕率異常的高, 即使是在熱帶環境, 這個數字通常也只在 0.007 至 0.5 mm p.a. 之間 (Meybeck 1976; Summerfield 1991; Goudie 1995)。舉例來說 Meybeck (1976) 在亞馬遜流域記錄了 0.07 mm p.a. 的剝蝕率, 在印度河流域記錄了 0.271 mm p.a. 的剝蝕率。於台灣測得的高數據可能是小流域、弱地質及高地能的混合結果, 但有部分反應出頻繁的熱帶季風 (颱風)。台灣平均每年直接受到 3.5 個大型熱帶季風影響 (Hung 1987, Petley 1995)。熱帶季風通常在夏秋兩季於關島附近的太平洋海面形成, 然後以每小時 20km 的速度往西北方向移動 (Simpson 1981)。暴風會發展成一個自我維持的結構, 直到達緯度較高、海面較冷的地區, 或與受陸地阻隔才會快速的消散。熱帶暴風本地俗稱「颱風」, 一般由環繞著一個低壓力眼的高速旋風所構成, 其最高記錄風速達每小時 400km (或每秒 111m)。強風本身已是個災害, 但在沿岸低窪地區更是一個威

脅 (Simpson 1981)，而其挾帶的豪雨更容易造成更大的傷亡，在山地的降雨量廿四小時內達1200 mm 及每小時亦可達100 mm的情況稀鬆平常。例如：在1991年十月三十一日侵襲台灣的琳恩颱風即在山地降下了1900 mm 的雨量，24小時最高降雨量達1100 mm (Longley et al., 1992)。如此滂沱大雨可能造成山崩、落石及淹水，故以地形演化的角度來看，颱風所帶來的雨量比其本身的強風更有影響力。

太魯閣峽谷

太魯閣峽谷是位於台灣東界東經121° 40'、北緯24° 0' (圖一) 的一個世外桃源 (圖一與二)，包括一個於更新世地殼上揚時遭立霧溪沖刷而成，深1000m及寬17km的大理石峽谷。當地地質主要由二疊紀變質底層所組成，為歐亞板塊的代表，包括大理石、綠色片岩、黑色、砂質的片岩，及獨立的片麻岩體 (圖三) (Yen et al. 1951; Ho 1987)。一般結構是因東西向壓擠所造成的複雜的褶皺及逆衝帶，其中混雜著一些大型已移位之逆衝及斷層，與一些錯離的 (岩石) 單位。大理石為此處主要的岩石，雖然其中有因強烈的局部性地構變形及快速的地殼上升而導致的張力節理及斷層，但仍為大塊狀及厚層狀，大部分山地均由此構成且其有較大的風化抗力。具明顯斷口的黑色片岩因較柔軟，較易風化形成小且多角的碎片。綠色片岩非常柔軟，在大理石層中可發現最大15m厚的石層。最後是在岩層中的片麻岩，此類岩石在中生代後期為入侵變質及後續變質而成的獨立花崗石塊。在堅固的地質上尚有局部的第四紀的沉積層，包括由山坡沖下的崩積物，及水流的沉積物。有些在谷底層800m以上的坡地上發現，顯示了當地高度的地層上揚情況。

立霧溪的流域約有60 000公頃，全在太魯閣國家公園中 (圖二)。透過河川流量記錄的分析顯示此流域的年洩洪量為 $2.710 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$ ，其中大部份在夏秋颱風侵襲時發生。峽谷中的河床在天祥的坡度約為1/23，在溪口處為1/115，混雜著洪水帶來的岩屑，當流量約在20-30cumecs時，沉積層幾乎沒有移動。在颱風期間流量暴增：例如在1990年六月二十一至二十二日歐菲麗颱風直襲台灣時，每小時106 mm的尖峰雨量持續5個小時帶來了1580cumecs的最大流量，(圖四)。連續7個小時的流量在1000cumecs以上，而後在尖峰流量後的20小時則急速降到400cumecs以下，70個小時後則降到120cumecs。故流量在這140個小時的監控過程中雖緩慢的下降，卻沒有回復到基準面的狀態。

研讀立霧溪的沉積記錄顯示此溪每年運輸8085 tonnes km⁻²的沉積物，其中95%以上的活動發生於大量降雨期間或之後。這些數據顯示地表的年平均剝蝕率約為4.90 mm yr⁻¹。這個流量及沉積物量足以對未防範的管路系統造成局不重大的損壞。

峽谷岩壁高出河床1000m，局部高度更達2500m amsl以上。坡度因岩石種類不同出現20°至90°落差的峽谷峭壁係由經常留下水流冲刷痕跡的岩壁及有大量植被的地區組成。由片岩所構成的地區可能有成熟的植被，甚至有局部作物生長，有很豐富的斷層及逆衝斷層，及一些大移位的滑走斷層。

位於峽谷底部的中部橫貫公路（CCIH），為本島一個主要的交通幹線。台灣的人口集中於狹長的西海岸帶，東岸則有少數人口聚集。這些聚集點之間的連繫因橫亘全島的中央山脈（圖一）而有所阻隔，亦使橫貫公路的建造困難重重；目前只有三條道路可橫跨中央山脈，而中部橫貫公路即是其中之一，連接中西岸如台中市，至東部的濱海公路，串連鄰近的花蓮市（圖一）。此路東段沿著太魯閣的底部綿延約18km，位於離河床約15至50 m 高處，由一連串的岩架、橋樑及隧道所構成。此路的使用頻繁且是台灣的重大策略建設之一。沿路優美的風景使此地區成為台灣的主要觀光地點之一，而於1989年設立太魯閣國家公園後更成為熱門景點。由野外檢測顯示此公路及其相關建設對當地的地形系統已造成相當大的干擾，更是引起山崩、流域改變及數條河道遷移的主因。峽谷中的小攔沙壩在枯水期阻擋大量水流進入河道，使此地的情況更形嚴重。

地貌繪圖及災害評估

危險性評估的界定一向爭議頗多。雖然許多人嘗試建立一套界定的語彙，唯目前尚無任何統一定義存在。例如在山崩災害方面Varnes（1984）、Hunt（1984）、Walter et al.（1985）、Einstein（1988）、Morgan et al.（1992）、Fell（1994）及其它人曾提出許多的定義。主要的問題即出於「危險」一詞的使用，有各種不同的說法，故多避免使用此一字彙。但其在形容某些導致危險的現象及其規模、發生率時相當有用。這個定義與受害的物體無關（Fell 1994），且在穩定的環境及工程狀況下較不隨時間而變動。但仍缺乏可描述危險現象的語彙；故「地形組織災害」引用這個詞彙，係形容在地貌繪圖上標示出來的山崩或落石等現象，即無規模及發生率的詳細描述。故危險

的定義包含了災害及特定項目之脆弱性的意思。這個系統可算簡明，但仍不斷出現其它問題。尤其災害的規模及頻率的評估因大自然的現象一般為續發性（如豪雨引發坍方及落石）而成問題，此項推算需要有一系列獨立及非獨立變數才能進行。然而目前要迴避這個問題相當困難，卻又不可讓這個問題影響到危險性層級的推估。

故在本文中詞彙的定義將以 Fell (1994) 為坍方災害評估所提出的定義為基準，1 並略為修改因應本研究之災害範圍需求。這些簡明精準的定義與 Varnes (1984) 提出的類同，但另加「地形組織災害」一詞。

本文內引用的名詞定義如下：

發生率 (Probability P)：在特定期間（通常一年）內發生特定災害的機率；

地形災害 (Geomorphological Hazard)：災害的類型及地形環境描述；

災害 (Hazard H)：災變發生之型態、規模及機率說明；

脆弱性 (Vulnerability V)：受災變影響的地區之特定項目或一組特定項目損失的程度；

特定危險 (Specific Risk R_s)：等於發生的或然率乘以一特定項的脆弱性；

危險物體 (Element at Risk E)：可能受災變影響的地區之人口、財產及經濟活動；

總危險度 (Total Risk R_t)：預估的傷亡人口、財產損失、經濟活動或環境的損失。故
$$R_t = E \times H \times V。$$

故欲評估一特定項目的總危險度或特定地區的危險程度，需先決定危險物件的總數、脆弱性、及災害的特性。首先需掌握一個危險性評估，例如一個災害形成的過程、其規模強度及頻率/或然率。為達到這個目的，Brabb (1984) 提出針對山崩可繪製一張危險性分布圖，上面標示過去及現在災害發生的地點，及未來發生的或然率。此圖可包括這些活動的力量、比率及再發生的間隔、預定的活動方向、不穩定質量的厚度等。但目前很少有坍方方佈圖達到這個標準。

地貌繪圖記錄了地形的分布，坡度、土壤及排水條件並提供了可供工程描述及設計使用的野外描繪 (Hearn 1995)。運用此技術可很快掌握大地區全貌並適當地提供有關表土特性及地下的過程、材質、地形及穩定度的資訊。惟此技術受限於其過於主觀、地下特性及過程細節的缺乏，並缺乏解譯時間性的缺點。故地貌繪圖可提供一個災害相關的地點、種類、規模強度及概略的發生率資訊。

地形組織災害評估因未對災害的一些特定項目脆弱性加以分析，故不可與一般的危機評估相混淆（例Dearman 1991; Brabb 1984）。但地形災害評估提示了自然災害過去發生及/或未來可能發生的地點、災害的特性、其規模強度及發生的頻率。故配合脆弱性分析圖提供基本資料可繪製危險評估圖。另此評估亦讓企劃單位得以找出未來資源的分配模式，及獲知何處是危險區、何處為「安全」的地區。

以往係選用地形分析來作災害分區，相關的研究包括Hearn及Fulton（1987）所作的研討；Bryant（1972）於科羅拉多艾斯本；Rybar（1978）於捷克漢諾瓦；Radbruch及Crowther（1973）於加州；法國賽弗耶地區的ZERMOS專案（Humbert 1977）；Stephens等人（1988）及Trustum等人（1990）於索羅門島；Hearn（1992）及Hearn（1995）於巴布新幾內亞之歐克泰帝；Moon等人（1992）及Fell（1992）於東澳州；Anbalagan（1992）及Gupia及Anbalagan（1997）於印度；Gerrard（1994）於喜馬拉雅山。另過去亦曾針對坍方、地震、擴張性土壤、洪水及其它自然災害製作過危險評估圖（例如Wiggins, Slosson及Krohn, 1978; Petak, Atkisson及Gleye, 1978; Legg, Eguchi及Wiggins, 1980; Petak及Atkisson, 1982; Cook et al. 1995; Reynolds 1995.）。一般來說災害評估可透過下列方法求得：

- 1.詳細的地貌繪圖及/或航照圖解析，以確定災害的地點、規模與形態；
- 2.災害的頻率/發生率分析；
- 3.災害的規模並為每個災害劃定等級。

為協助太魯閣國家公園管理處而設計地形災害分區需具備下列功能：

- 獨立評估太魯閣峽谷內的土地及災害狀況，並以清楚易懂的形式表達；
- 可重新檢視或解析國家公園員工曾發現的災變及其影響；
- 針對太魯閣峽谷發展一套依危險性程度分級的系統；
- 提供工程地質、過程或地形演化一個更詳細的研究架構。

這些需求與Hearn（1995）所提出的類似，災害繪圖的目的亦與Hansen（1984）及Varnes（1984）等人提出的相近。本專案研究與以往研究不同之處係在計劃作業過程中密集進行，而非停留在規劃階段或因應大型災變的發生。故本研究之成果可補強管理策略，而非變更設計。

研擬災害圖所用的技術請參閱圖五。首先進行偵察測量，確定山谷的特性、災害的種類（Petley 1995; Petley et al. 1997）。主要界定的災害包括：

- 不同規模的落石，從零星到2000m³以上的落石；
- 土壤或地表覆蓋地區的坍方；
- 鄰近山坡地的瀑布水流，也許還挾帶礦物質及碳化物殘渣；
- 立霧溪及支流洪水

地貌繪圖的製作運用了最新式、高品質、1:10 000 的比例圖。採用的作法與Brunsden 等人（1975）於尼泊爾達蘭達庫塔公路使用的方法相似；主要依觀察到的地形建構一個地貌繪圖，然後以此為基礎，進行形態生化及目前作用過程的研析。首先沿著公路步行而取得資料，將地形組織套繪於基本圖上；繪製的重點包括峽谷岩壁及周遭地形的形態，及峽谷底部的特徵。大致來說，這些特徵都可一目瞭然，故繪圖時採用目測及運用如三角測角法等基本的測量技術。但地形形勢包含相當多的獨立特徵，相關位置可參考繪圖資料。坡度的資訊則透過標準技法（例如Pitts 1979; Hearn 1995; Kersisz 1979）取得，但因其本身的侷限性，故有些坡度僅能運用基本圖上的測量數據略估並補充不足之處。在Doornkamp等人（1979）也有類似的方法說明。從航照圖上可獲得更多的資訊，但在最陡的山谷上並不見得適用。

界定地形災害地點、形態及發生率的過程中經當地公路管理單位的協助取得搜集的資料，由Longley et al.（1992）及Petley（1995）分析公路上落石的規模及發生頻率。這些資料雖然只限於較大規模的落石，卻可提供主要的落石地點資料，使災害圖得以如Brabb（1984）所提出的方式改良。

除了說明災害的形態與發生地點外，災害的界定另需對災變的規模強度及發生率提出概估數據。運用地圖及/或照片的解析可計算災害的面積，但這並不一定能反應出實際災害情形。職是之故，僅就災害形式配合分級列出和災害評等中的公路預定區（即可能受到災變影響的區域）之災害規模強度加以分類。道路及地形分析顯示可以下列分式進行災害分級：

f: 流到路上的水量，通常來自路旁的邊坡或坑道。此類水流具危險性因岩屑可藉著水流到路上，長期的流水可能造成岩屑的堆積，進而阻礙道路或侵蝕路面。總岩屑屯積量原則上為每10m公路 1 m^3 以下。

F: 從主要河道及支流氾濫造成的淹水，會阻礙公路的通行，沉積量每10m公路超過 1 m^3 (圖三)。

r: 從邊坡及坑道落到路上的零星落石，每次的沉積量為每10m公路不超過 1 m^3 。這種落石不會阻斷高速公路的通行，但對接近此區的人員車輛可能造成危險：

R: 大量的落石，但無明顯路面斷裂，沉積量每10m公路達 1 m^3 以上 (圖四)。此類落石通常發生於豪雨期間，且在豪雨過後仍有小規模的落石出現，對公路使用者造成明顯的危險，且可能造成長期的交通阻斷。

L: 大量的落石且有明顯的路面斷裂痕跡，沉積量每10m公路達 1 m^3 以上。雖然其活動可能比未造成路面斷裂的落石更為緩慢，但此類坍方對高速公路的使用者造成明顯的危險，也可能造成長期的交通阻斷。

這些災害的種類及強度分級只能與發生率結合使用。此類災害的發生有兩種假設：颱風過境帶來大量雨水及大規模地震，而兩種情況均做了災變頻率的估計。1981-1996年間立霧溪的每日降雨量及河川流量研究分析顯示立霧流域每年會遭遇到1.9個颱風侵襲 (表二)，每一次都會造成上述的災害。每次平均約有兩天的連續豪雨，造成每年3.8天的「災害日」。同時亦推測強度超過 $ML=6.0$ 的地震足以引起山崩 (基於Keefer 1984的數據)，此類地震週期約每隔12.5年會發生一次 (Petley, Murphy and Inkpen, 1997)。

故落石及山崩災害的分級係根據每年平均約有四天颱風引起的災害及每12.5年中有一天是地震帶來的災害頻率而得。洪水很明顯的與地震無關。因此我們運用了ZERMOS災害機率專案研究計畫中坡地不穩定性繪圖劃分的五個等級 (Olivier and Renet 1976) 劃分區域。本計畫除聯接道路的公路位置外並未包括脆弱性評估，因此不屬危險性評估。此分級係分析地形災害與起因發生率的關係求得。每一個地形災害分級都以災變為基礎：

- 沒有地形災害的地區；
- 可能發生地形災害的地區，除劇烈災變外，較不會受到颱風及地震影響（非常高強度/低頻率的災變，又或颱風與地震同時發生）。
- 可能因強度6.0以上的地震或颱風而引發地形災變的地區，即每年颱風帶來的災害約有4天而地震引發的災害則每12.5年有一天。
- 可能因震度6.0以下的地震或小於颱風挾帶的雨量而引發地形災變的地區，即每年有4天以上的災害。
- 可在任何時間發生地形災變的地區，指隨時都可能出現災害。

利用這個災害頻率分級，可將本地區分級如下：

零 級 災害發生率低的地區。這些地區並無任何發生地形災變的徵兆。

第一級 含少數發生地形災變徵兆的地區，但研判除非遭遇到極低頻率/高強度的災變，災害不易發生。

第二級 中度災害地區。在遭遇颱風豪雨或大型地震侵襲時很明顯會發生地形災變。故此地區每年颱風帶來的災害約有4天而地震引發的災害則每12.5年有一天。

第三級 高度災害地區。此地區常因小於颱風帶來的降雨量或小型地震（例：震度6.0以下的地震）引發地形災變。

第四級 極度災害地區。隨時都會發生地形災變。

故確定每段道路的地形災變情況後，便可劃分其規模強度及形式，此外也可評估其發生率。因此每一個路段都標示分級，如'3Fr'代表此地區的災害可能因受到規模小於颱風帶來的降雨量及/或6.0以下的地震所引發。道路災害有兩種地形現象，較需注意的是水流的沖刷，可能帶來每10m公路達 1 m³以上的沉積物並造成損壞。其次為從鄰近山坡地及坑道落到路上的零星落石，每次的沉積量每10m公路均在 1 m³以下。這種落石不會阻斷高速公路的通行，但對接近此區的人員車輛可能造成危險。

圖六為本研究所製作的一個地貌繪圖範例，圖七為其附屬的公路災害評估圖。

討 論

危險性分布圖及實際災害影響的比較

地貌繪圖是一個經證實的、搜集災害發生地點特性及地形災害特性的方法。災害的地形跡象可由地形及其所造成的沉積物收集獲得。但因繪圖過程通常都在氣候良好或引發災害的災變停止後進行，這個方法採用了相當靜態的觀點。為此，本研究將災害圖與葛樂禮及賀伯颱風襲台時長期的暴雨所造成的影響相比較。這兩個颱風於1996年七月與八月橫掃台灣，在十天之內帶來了550 mm以上的雨量。並透過直接觀測方式將太魯閣峽谷中的地形活動詳細記錄下來。這些使用每日落石、山崩、淹水及其它災害發生後公路上岩屑殘留的位置圖補充本資料的不足。圖八為高速公路受損程度的範例，為颱風過後公路上受到災害影響的地區與危險性分布圖互相比較。

災害圖及直接觀測比較結果顯示地貌繪圖是評估地區危險性的良好方法。有明顯災害及公路經常受損的地區中有95%被列為第二級以上（中度災害地區，易受到颱風豪雨或大型地震影響爆發）。列為第二級以上的地區約有20%並未發生豪雨引起的任何損害，這個數字應算合理，因為某些地形災害可能在豪雨期間並未出現。值得注意的是，所有列為零級（極少災害）的地區並無災害發生，可列為安全地區保障人民免受大型災害威脅。但於1997年八月一個被列為第一級（災害不易發生除非遭遇到極低頻率/高強度的異變）的地區遭強度颱風引發的土石流摧毀。直接觀測的結果，此地區約有4%重新劃分等級，而重新繪圖及重新分級的工作日後仍將持續進行。

故本研究所作的災害評估可說相當成功，而此方法的可行性也獲得驗證。於災害發生過程中進行觀測著重於提供發生過程等級及形式的不同觀點參考。

太魯閣地區危險性評估

雖然貫穿太魯閣的中橫公路為策略性的重大建設且太魯閣本身位處具明顯危險性的環境中，但本研究首度以專業且系統化的方式釐清可能對公路使用者造成危險的碎屑溝渠位置，及可能造成公路受損的邊坡不穩定地點。本研究旨在於協助太魯閣國家公園管理處及公路管理單位發展一套可以減低公路使用者危險、交通阻斷及/或道路全

面損毀的策略。太魯閣國家公園管理處面對一個兩難的抉擇：允許公路開發以提昇其安全性並縮短災變發生時封閉道路的時間，或維護台灣最重要的幾個天然美景之一。近年來公路交通流量增加，幾個沿著公路的工程對視覺景觀造成極大的破壞卻沒有重大的效益。其中一例是位於太魯閣國家公園管理處附近的一個旁通隧道，這個工程目前已停工，只因設計者未注意到這條公路通過一脆弱的砂礫層，而另一個位於九曲洞附近的新隧道入口則在一個溝渠系統下方，且靠近天祥的展示中心則位於另一溝渠系的前方。故地貌及災害繪圖提供了兩個功能：

- 可確認多災害地區的地點，故資源可集中，並可促進現有資源的有效利用，且避免在風景優美地區進行不必要的開發。
- 當計畫施工時，可考量地形災害的特性，例如隧道入口不應設於一個溝渠系統下方。

危險性評估之地貌繪圖

處於地構活躍區域中的地形有較大的動能且對震動較為敏感，尤其當遭受到強烈氣候情況時，此類的環境發生災害通常較可能發生災害。本文顯示地貌繪圖可提供一個快速、具成本效益及實用性的技術搜集並解析新地構活動帶中自然災害的資訊，且只需少數人力或支援。

根據步行測量調查結果製成的危險性分布圖顯示這個方法的精確度相當高。很明顯的，自然活動、地形災害、災害的強度及發生率可能有許多變化；而每個研究人員所使用的不同界定、檢驗及分級方法可能使這個問題更加明顯。故如Hearn (1995) 所說，「需要一個比目前使用的方法更正規的方法準則」(p.A15)。另一個障礙則是目前所有的地貌繪圖中其危險性分級都是以狀況的定質評估為主，故從分析觀點來看，這個方法缺少傳統災害繪圖採用的精確統計方法，或甚至如Hearn (1995) 所採取更具定質化的「問卷」模式。但在一個如太魯閣峽谷的地區，搜及詳細的地質及環境資料幾乎不可能；舉例來說，根本無法達到位在500 m 高垂直崖壁的節理組點。由於此緣故，過去落石的資料非常的重要，而地表或近地表的地形特徵是相當重要的應用資料。

這個方法的另一個缺點在於其繪圖的侷限性；亦即到目前為止都沒有偵測到如大型落石等極大規模的跡象。這些跡象有可能存在，且若存在即代表應有其它相關連的

災變可能性存在。雖然透過檢驗河內及河旁的沉積等地質跡象可獲知此類的災變並不常發生，但這個議題卻值得深究。本研究釐清且表列了人量的小型不穩定活動，且認為目前道路施工中極可能出現大型災害。

在此必需強調本文中所使用的危險性分級法並不是決定性的。每一個獨立的案例必需依其測得的地形狀況、自然活動的特性及可能發生災變的規模強度研訂一套全新的、適當的危險性分級法。本文的分級法提供了一個強有力的理論基礎以做到合理明顯的分區。當取得更多的資訊或觀測結果時，此一架構須再改善得更合理完善。

結 論

本研究使用的地貌繪圖方法堪稱完整且提供了一個良好的架構可製作災害繪圖。本文所提到的技巧說明如何修正這些技術俾對可能發生地形災害的地區進行評估。此技法並不能取代採用的標準量化技法的工程地質繪圖。但對新地構活動帶及/或茂密的森林地區等通行不易的地區卻是個有用的工具，同時亦是一個能在攀爬困難峽區快速搜集資料的方法。

銘 謝

感謝太魯閣國家公園管理處處長員工的協助，以及浦茲茅斯大學及桑德蘭大學對此研究的全力支持，還有英國文化協會（British Council）（香港）、浦茲茅斯大學地質學系、及太魯閣國家公園管理處提供的野外調查工作之經費贊助與協助。另感謝 Sharon Reid 對原稿的校閱。最後要感謝 Fan, Chen-Hui 博士、Mervyn Jones 教授、Maia Ibsen, Mark Pendry, Dave North-Lewis 及 Emma Longley 等人的協助。感謝這些人士在 1991 年撥冗製作地貌繪圖。最後作者要特別感謝兩位不具名人士提供意見使本文的撰寫更臻完善。

REFERENCES

- ANBALAGAN, R., 1992, Landslide and hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Eng. Geol.*, 32, 269-77.
- BRABB, E.E., 1984, Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. *International Symposium on Landslides* (Toronto, Canada), 1, 307-323.
- BRUNSDEN, D., 1987, Principles of hazard assessment in neotectonic terrains. *Mem. Geol. Soc. China* 9, 305-334.
- BRUNSDEN, D., DOORNKAMP, J.C., FOOKES, P.G., JONES, D.K.C. and KELLY, J.M.H., 1975, Large scale geomorphological mapping and highway engineering design. *Q. Jl. Engng Geol.* 8, 227-253.
- BRUNSDEN, D., and LIN, J-C., 1991, The concept of topographic equilibrium in neotectonic terrains. In: Cosgrove, J. and Jones, M.E. (Editors), *Neotectonics and Resources*, Bellhaven, London, 409pp.
- BRYANT, B., 1972, Map showing areas of selected geologic hazards in the Aspen Quadrangle, Pitkin County, Colorado. *Map I-758-A*, US Geological Survey, Washington.
- CHEN, C-H, 1979, Geology of the east-west cross-island highway in central Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China* 3, 219-236.
- COOK, J.R., MCGOWAN, A., HURLEY, G., and CHOY, L-E., 1995, The role of Engineering Geology in the hazard zonation of a Malaysian highway. In Maund, J.G., Penn, S., and Culshaw, M.G., *Proceedings of the International Conference on Geohazards and Engineering Geology*, 345-356.
- DEARMAN, W.R., 1991, *Engineering Geology Mapping*. Butterworth Heinemann, Oxford, 376pp.
- DOORNKAMP, J.C., BRUNSDEN, D., JONES, D.K.C., COOKE, R.U., and BUSH, P.R., 1979, Rapid geomorphological assessments for engineering. *Q. Jl. Engng Geol.*, 12, 189-204.
- EINSTEIN, H.H., 1988, Special Lecture: Landslide risk evaluation procedure. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, July 10-15, 1988 Lausanne. Ed. Bonard, C., A.A. Balkema, Rotterdam, pp.1075-1090.
- FELL, R., 1992, Some landslide risk zoning schemes in use in Eastern Australia and their application. In *Proc. 6th Australia - New Zealand Conference on Geomechanics*, Christchurch, the New Zealand Geomechanics Society, Christchurch, New Zealand, pp. 505-512.
- FELL, R., 1994, Landslide risk assessment and acceptable risk. *Can. Geotech. J.*, 31, 261-272.
- GERRARD, J., 1994, The landslide hazard in the Himalayas: geological control and human action. *Geomorphology*, 10, 221-30.
- GOUDIE, A., 1995, *The Changing Earth: Rates of Geomorphological Processes*. Blackwell, Oxford, 302pp.

GUPTA, P. AND ANBALAGAN, R., 1997, Slope stability of Tehri Dam Reservoir area, India, using landslide hazard (LHZ) mapping. *Q. Jl. Engng Geol.*, 30, 27-36.

HANSEN, M.J., 1984, Landslide hazard analysis. In Brunsden, D. and Prior, D.B. (eds.), *Slope Instability*, Wiley Chichester, 523-602.

HARRIS, R.A., AND AUDLEY-CHARLES, M.G., 1987, Taiwan and Timor neotectonics, A comparative Review. *Mem. Geol. Soc. China* 9, 305-334.

HEARN, G.I., and FULTON, A. 1987, Landslide hazard assessment techniques for planning purposes; a review. In: Culshaw, M.G., Bell, F.G., and Cripps, J.C., O'Hara, M. (eds.) *Planning and engineering geology*. Engineering Geology Special Publication, 4; 303-310 Geological Society of London. London.

HEARN, G.J., 1992, Terrain hazard mapping at Ok Tedi Mine, Papua New Guinea. *Proceedings of the International Symposium on Landslides*, 6, 971-976. Balkema, Rotterdam.

HEARN, G.J., 1995, Landslide and erosion hazard mapping at Ok Tedi copper mine, Papua New Guinea. *Q. Jl. Engng Geol.*, 28, 47-60.

HO, C.S., 1987, A synthesis of the geological evolution of Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China* 9, 305-334.

HUMBERT, M., 1977, La cartographie en France des zones exposees a des risques lies aux mouvements du sol - Cartes ZERMOS. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16, 80-82.

HUNG, J.-J., 1987, Landslides and related researches in Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China* 9, 23-44.

HUNT, R.E., 1984, geotechnical engineering investigation manual. McGraw-Hill, New York.

KEEFER, D. K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95., 406-421.

KERSISZ, A., 1979, The representation of the morphology of slopes on engineering geomorphological maps with special reference to slope morphometry. *Q. Jl. Engng Geol.*, 12, 235-241.

LEGG, M.R., EGUCHI, R.T. and WIGGINS, I.H., 1980, *US Building Exposure, County Data File - Users Manual*, J.H. Wiggins Co., Redondo Beach, California.

LI, Y.H., 1976, Denudation of Taiwan Island since the Pliocene Epoch. *Geology*, 105-6.

LIN, J.-C., 1991, The structural landforms of the Coastal Range of eastern Taiwan. In: Cosgrove, J. and Jones, M.E., (Editors) *Neotectonics and Resources*. Bellhaven, London, 409pp.

LONGLEY, E., FAN, C.-H., IBSEN, M.-L. NORTH-LEWIS, D., PENDRY, M., and PETLEY, D.N., 1991, *The Environmental Impact of Tropical Cyclones*. Final report of the University of London Expedition to Taiwan.

MEYBECK, M., 1976, Total mineral dissolved transport by world major rivers. *Hydrol. Sci. Bull.* 21, 265-84.

MOON, A.T., OLDS, R.J., WILSON, R.A., BURMAN, B.C., 1992, Debris from flow risk zoning at Montrose, Victoria. In Bell, D.H., *Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides*, 2, 1015-1022. Balkema Rotterdam.

MORGAN, G.C., RAWLINGS, G.E. and SOBKOWICZ, J.C., 1992, Evaluating total risk to communities from large debris flows. *Geotechnique and Natural Hazards*, 225-236, BiTech Publishers, Vancouver B.C.

OLIVIER, G. and RENET, J.P., 1976, Essai de cartographie des risques lies a des mouvements de terrain dans la region de Saint- Martin-de-Belleville. Stabilité des talus, i- Versants naturels, Special Number 11, *Bulletin Liaison des Laboratoires des Ponts et Xhausees*, Paris, 40-55.

PETAK, W.J., and ATKISSON, A.A., 1982, *Natural Hazard Risk Assessment and Public Policy*, New York, Springer-Verlag, 489pp.

PETAK, W.J., ATKISSON, A.A. and GLEYE, P.H., 1978, *Natural Hazards - A Public Policy Assessment*. J.H. Wiggins Company, Redondo Beach, California.

PETLEY, D.N., 1995, Engineering hazards in Taroko Gorge; eastern Taiwan. In Maund, J.G., Penn, S., and Culshaw, M.G., *Proceedings of the International Conference on Geohazards and Engineering Geology*, 261-270.

PETLEY, D.N., LIU, C-N., and LIOU, Y-S., 1997, Geohazards in a Neotectonic Terrain, Taroko Gorge, eastern Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 40, 135-154.

PETLEY, D.N., INKPEN, R., and MURPHY, W., 1997, Context and change: the significance of history and contingency in understanding change in geomorphic systems. *Abstract Volume*, BGRG Annual Conference, Dundee.

PITTS, J., 1979, Morphological mapping in the Axemouth-Lyme Regis Undercliffs, Devon. *Q. Jl. Engng Geol.*, 12, 205-217.

RADBRUCH, D.H. and CROWTHER, K.C., 1973, Map showing areas of estimated relative amounts of landslides in California. *US Geological Survey Map I-747*, scale 1:1000000, Washington.

REYNOLDS, J.M., 1995, High altitude glacial lake hazard and mitigation: a Himalayan Perspective. In Maund, J.G., Penn, S., and Culshaw, M.G., *Proceedings of the International Conference on Geohazards and Engineering Geology*, 79-88.

RYBAR, J., 1978, Engineering geological maps of landslide areas. *Abhandlungen der Zentralen geologischen Instituts*, Berlin, 14, 109-114.

SIMPSON, R.H., 1981, *The hurricane and its impact*. Blackwell, Oxford, 398pp.

STEPHENS, P.R., TRUSTRUM, N.A., and FLETCHER, J.R., DANITOFEA 1988, Reconnaissance mapping of erosion caused by Cyclone Namu, Solomon Islands. *Asia-Pacific Remote Sensing JI*, 1, 57-65.

SUMMERFIELD, M.A., 1991, *Global Geomorphology*. Longman, New York, 537pp.

TENG, L-S., 1996, Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt. *Geology* 24, 949-952.

TRISTRUM, N.A., WHITEHOUSE, I.E., BLASCHKE, P.M., and STEPHENS, P.R., 1990, Flood and landslide hazard mapping, Solomon Islands. *Proceedings of the Fiji Symposium on Research Needs and Applications to Reduce Sedimentation in Tropical Steeplands*. IAHS-AISH Publ. 192, 138-146.

TSAL, C-C., LOH, C-H., and YEH, Y. T., 1987, Analysis of earthquake risk in Taiwan based on seismotectonic zones. *Mem. Geol. Soc. China* 9, 413-446.

VARNES, D.J., 1984, Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards*, 3, UNESCO, Paris, 63pp.

WALKER, B.F., DALE, M., FELL, R., JEFFERY, R., LEVENTHAL, A., MCMAHON, M., MOSTYN, G., and PHILLIPS, A., 1985, Geotechnical risk associated with hillside development. *Australian Geomechanics News*, 10, 29-35.

WIGGINS, J.H., SLOSSON, J.E., and KROHN, J.P., 1978. *National hazards - Earthquake, Landslide, Expansive Soil Loss Models*. J.H. Wiggins Company Technical Report, Redondo Beach, California, 162pp.

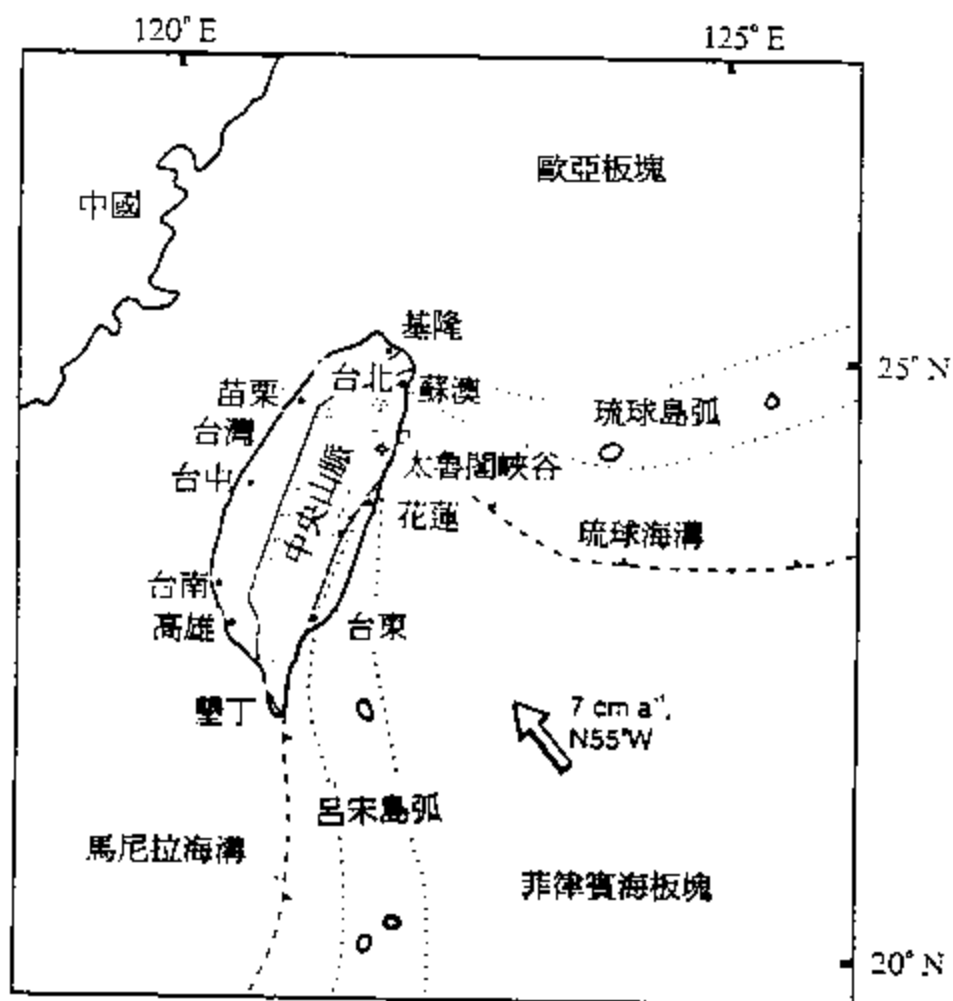
YEN, T.P., SHANG, C.G., and KENG, W.P., 1951, The discovery of Fusuline Limestone in the metamorphic complex of Taiwan. *Bull. Geol. Surv. Taiwan*, 3, 23-26.

表 1

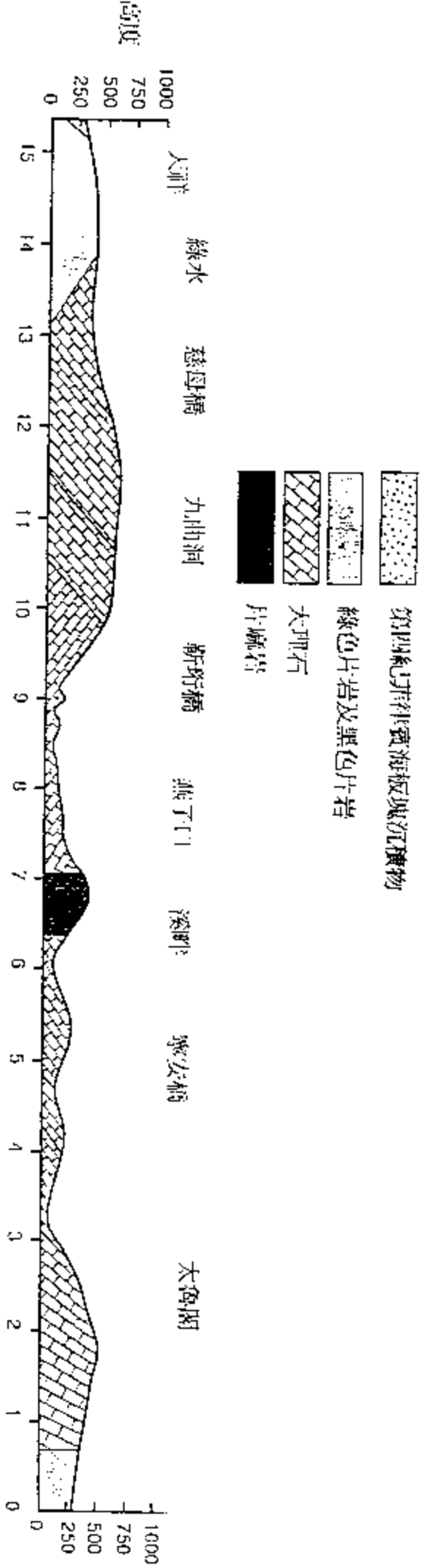
	時間帶	上揚率	剝蝕率	U-D差異	最大高度
	M.a.	近似值	近似值	Mm	差異
	BP	mm	mm	p.a.	m
		p.a.	p.a.		
中央山脈	3.0	~+0.1	~0.1	0.0	0
	2.0	~1.0	0.384	.616	616
	1.0	7.0	3.1	3.9	1950
	0.5	7.0	5.0	2.0	
		c5.5	5.0	.5	100
琉球 率	1.0	2.0	2.6		
目前 至				-0.6	-600
北台灣 目前		2.0	2.6		

表 2

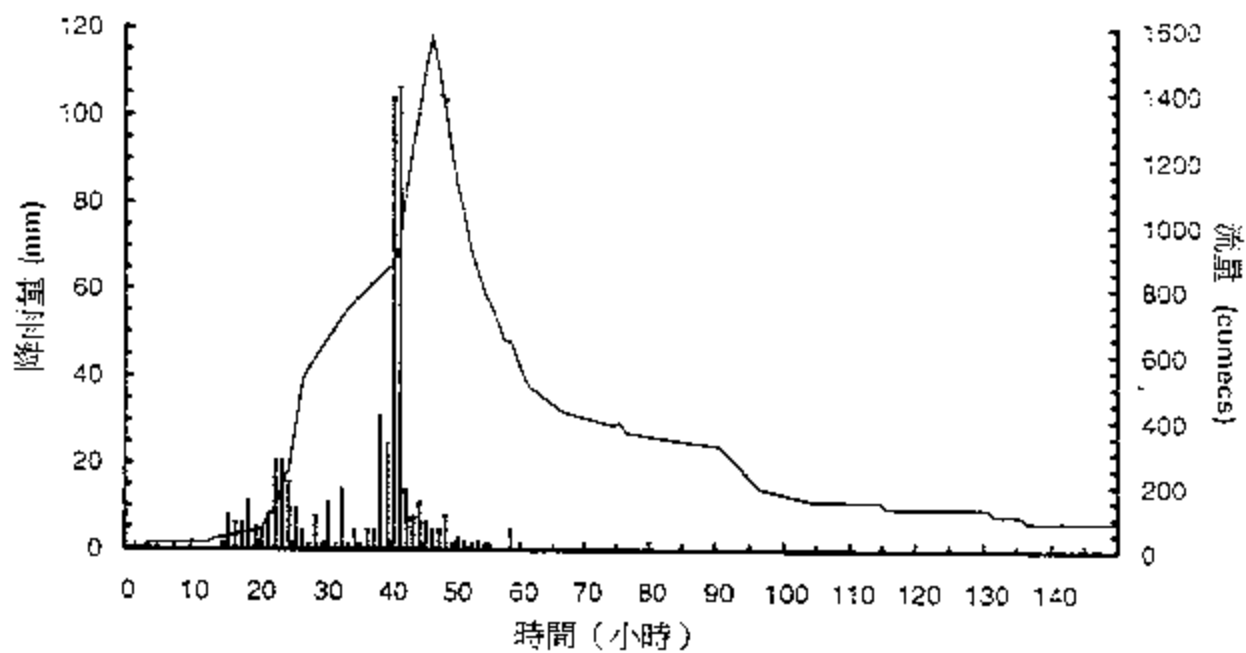
年度	颱風次數	年度	颱風次數
1981	3	1989	2
1982	2	1990	2
1983	0	1991	2
1984	1	1992	2
1985	4	1993	0
1986	3	1994	3
1987	2	1995	1
1988	1	1996	3
1981-1996年間 總颱風次數	31	每年颱風平均次數	1.94



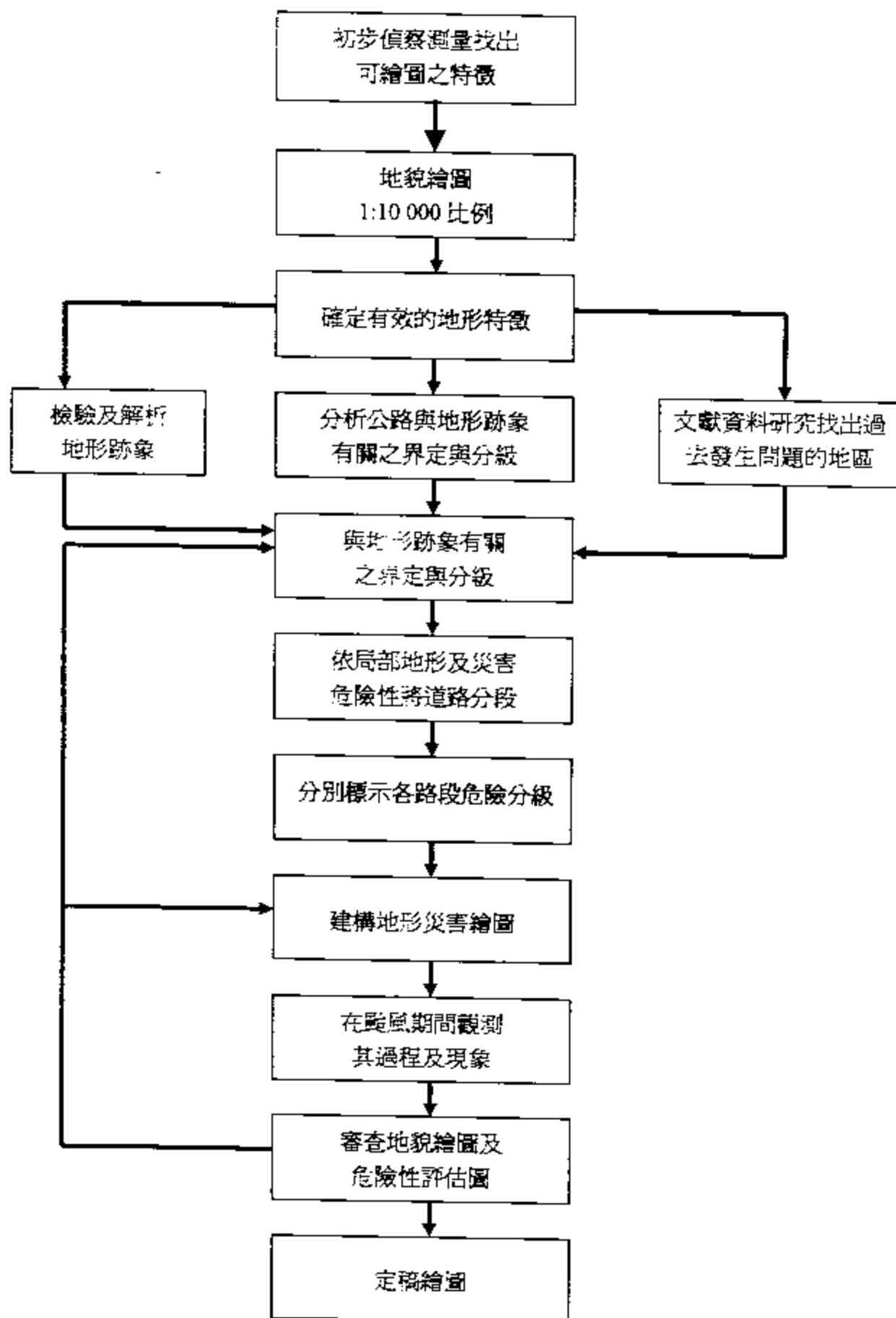
圖一



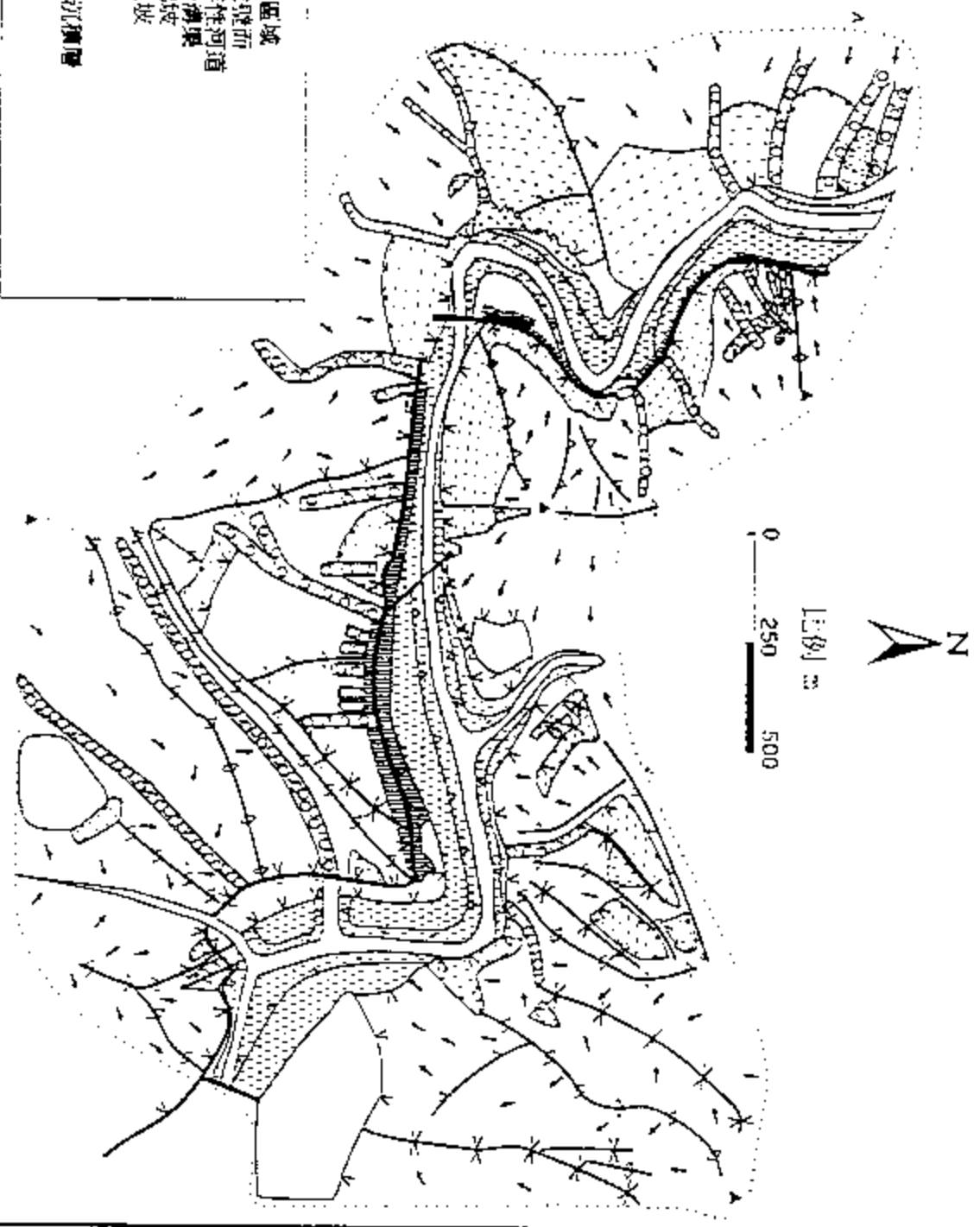
圖三



圖四



圖三



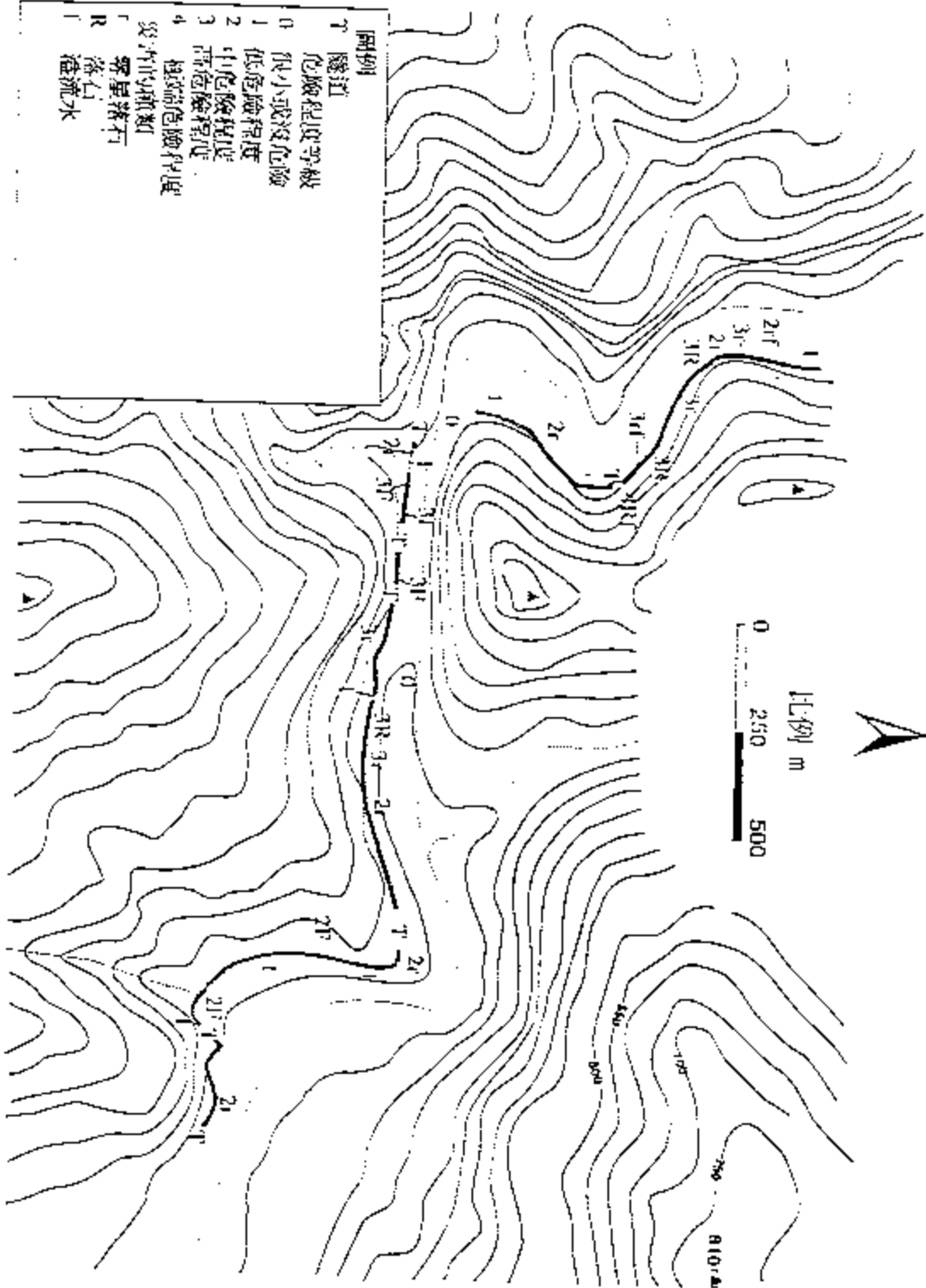
圖六



比例 m

0 250 500

- 圖例
- T 隧道
 - 0 危險程度等級
 - 1 低危險程度
 - 2 中危險程度
 - 3 高危險程度
 - 4 極端危險程度
 - 變質岩類
 - R 零星落石
 - I 溢流水





比例 m

