

摘 要

本研究以玉山國家公園境內的新中橫公路段之道路邊坡為研究的對象，透過現地破壞情況調查、地質資料與地形資料的調查，並利用立體投影圖分析法與各種內在性質的統計，探討研究路線中道路邊坡的落石的形成原因，及各內在因子對於落石現象的影響。

經由調查研究的結果顯示：研究路線的道路邊坡之破壞型式以落石（Rockfall）為主，其它尚有岩屑滑落（Debris slide）、土石崩落（Slump）、圓弧型破壞（Circular failure），以及上述之複合型破壞等型式。落石邊坡的內在形成原因，依照其數量與影響程度來看，其重要性依序為：大地構造運動所產生的不連續面切割岩體、道路開挖所產生的解壓節理、砂頁岩互層所導致的差異侵蝕作用、及道路開挖時炸路所產生的炸孔與爆炸破裂面。

由各項內在因子的分析與統計結果中顯示，研究路線中對於落石的形成有較大影響的內在因子是：構造線（中視褶皺軸、斷層線）的存在、不連續面位態與坡面的空間組合關係、不連續面組數、邊坡角度等因子。而對落石破壞危害規模有較大影響的內在因子有：不連續面間距與不連續面密度（ J_v 值）、邊坡高度、邊坡長度等因子。

目 錄

中文摘要	i
目 錄	ii
表目錄	v
圖目錄	vii
照片目錄	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與研究目的	1
1.2 落石的定義與性質	2
1.3 前人研究	5
1.3.1 落石之相關研究	5
1.3.2 研究區域已有之相關研究	10
第二章 研究區域概況	12
2.1 地理位置與交通概況	12
2.2 地形概況	12
2.3 地質概況	15
2.4 氣候概況	18
2.5 地震	18
第三章 研究方法	21
3.1 航照判釋	21
3.1.1 航照判釋的目的	21
3.1.2 航照判釋的方法與步驟	21
3.2 野外調查方法與項目	23
3.2.1 現地破壞現象的調查	24
3.2.2 地質資料調查	24
3.2.3 地形資料調查	33
3.3 穩定性分析工作	35

3.3.1	立體投影分析法的適用性	36
3.3.2	可能破壞型式的判斷	39
3.3.3	穩定趨勢分析	44
3.4	內在因子的統計	47
第四章	工作結果	49
4.1	航照判釋結果	49
4.2	野外調查結果	49
4.2.1	現地破壞情形	49
4.2.2	地質資料方面	54
4.2.3	地形資料方面	62
4.3	穩定性分析結果	62
4.4	內在因子統計結果	64
4.4.1	地質因子統計結果	65
4.4.2	地形因子統計結果	68
第五章	討論	97
5.1	落石形成原因的提出	97
5.2	岩性對於落石的影響	99
5.3	構造對於落石的影響	100
5.4	不連續面對於落石的影響	101
5.4.1	不連續面的組數對於落石的影響	102
5.4.2	不連續面的間距對於落石的影響	102
5.4.3	不連續面持續性對於落石的影響	103
5.4.4	不連續面內寬對於落石的影響	104
5.4.5	不連續面密度與岩塊幾何形狀對於 落石的影響	104
5.5	地形對於落石的影響	104
5.5.1	坡角對於落石的影響	104

5.5.2	邊坡外形對於落石的影響	105
5.5.3	邊坡型式對於落石的影響	105
5.6	風化程度對於落石的影響	106
5.7	落石潛感的評估	106
5.8	外在因子對於落石的可能影響	112
5.9	落石防治的建議	113
5.10	研究延伸性之建議	115
第六章	結論	118
參考文獻		120
照片		127
致謝		136
自述		137
著作權聲明		138
附錄		139

圖 目 錄

圖一	落石的發生型態	4
圖二	邊坡平均傾斜度與落石發生率的關係（日本建設省）	8
圖三	基盤岩地質與落石發生率的關係（日本建設省）	9
圖四	連續雨量與落石次數關係圖（日本建設省）	9
圖五	雨量強度與落石次數關係圖（日本建設省）	9
圖六	研究區域地理位置圖	13
圖七	研究區域地形圖	14
圖八	研究區域地質概況圖	17
圖九-a	研究區域氣候統計圖	19
圖九-b	臺灣地震分區圖	20
圖十	研究方法流程圖	22
圖十一	岩坡破壞型式分類圖	37
圖十二	露出包絡圈示意圖	41
圖十三	Dip Vector 示意圖	41
圖十四	平面形破壞投影示意圖	42
圖十五	楔型破壞投影示意圖	43
圖十六	翻覆型破壞投影示意圖	43
圖十七	安全係數計算法示意圖	48
圖十八	研究區域航空照片航線與航號示意圖	50
圖十九	研究區域線形分佈圖	51
圖二十	研究區域線形玫瑰圖	52
圖二十一	研究路線邊坡破壞分佈圖	55
圖二十二	研究路線之路線地質圖	57
圖二十三	落石邊坡穩定趨勢分析結果圖	63
圖二十四	岩性比例統計圖	86
圖二十五	風化程度統計圖	87
圖二十六	不連續面組數統計圖	88

圖二十七	不連續面間距統計圖	-----	89
圖二十八	不連續面持續性統計圖	-----	90
圖二十九	不連續面內寬統計圖	-----	91
圖三十	不連續面密度 (J _v) 統計圖	-----	92
圖三十一	坡角統計圖	-----	93
圖三十二	坡面傾向統計圖	-----	94
圖三十三	邊坡外形統計圖	-----	95
圖三十四	邊坡型式統計圖	-----	96
圖三十五	落石潛感評估總分統計圖	-----	110
圖三十六	研究路線落石潛感圖	-----	111

表 目 錄

表一	山崩型式分類表（一）（Sharpe,1938）-----	3
表二	山崩型式分類表（二）（Varnes,1983）-----	3
表三	不連續面組數等級劃分標準-----	27
表四	不連續面間距等級劃分標準-----	28
表五	不連續面持續性等級劃分標準-----	29
表六	不連續面內寬等級劃分標準（一）（ISRM,1981）-	29
表七	不連續面內寬等級劃分標準（二）-----	30
表八	不連續面密度與岩塊幾何形狀等級劃分標準-----	31
表九	不連續面滲水情況等級劃分標準-----	32
表十	風化程度等級劃分標準-----	33
表十一	落石邊坡GPS資料-----	56
表十二	研究路線落石邊坡地形資料、現地破壞狀況、穩定 性分析結果與形成原因說明-----	70
表十三	研究路線落石邊坡之地質資料-----	75
表十四	研究路線落石邊坡之不連續面資料-----	79
表十五	落石防治措施適用性參考表-----	116

照片目錄

- 照片一 台二十一號公路139.9k之嚴重落石現象-----127
- 照片二 台二十一號公路133k附近之嚴重落石現象----127
- 照片三 台十八號公路85k之尖頂褶皺現象-----128
- 照片四 台二十一號公路大勇橋南側之一系列連續而
緊密之褶皺-----128
- 照片五 台二十一號公路139.9k之斷層現象-----129
- 照片六 台二十一號公路139.9k斷層附近發達的不
連續面現象，顯示岩體非常的破碎。-----129
- 照片七 台二十一號公路147k附近的不連續面現象，
顯示不連續面相當的發達且具有規則性。----130
- 照片八 台二十一號公路148.8k附近之解壓節理。可
見傾角近乎垂直且內寬極大-----130
- 照片九 台二十一號公路148k附近之解壓節理。可見
其平行坡面、傾角近乎垂直、且內寬極大。--131
- 照片十 台二十一號公路137k附近之炸孔現象。可見
呈放射狀的爆炸破裂面，炸孔中心附近岩體極
破碎。-----131
- 照片十一 呈平面形破壞的岩塊，沿著朝向外側的不連續
面向下滑落。-----132
- 照片十二 呈楔型破壞的岩塊，沿著兩不連續面交線的方
向朝下滑落。-----132
- 照片十三 砂頁岩互層所造成的差異侵蝕現象，頁岩易受
風化而被侵蝕，其上方的砂岩塊即失去支撐而
懸空。-----133
- 照片十四 臺十八號公路85k處的落石邊坡。邊坡中可見緊密褶
皺與明顯斷層。-----133
- 照片十五 臺二十一號公路139.5k處之落石邊坡遠照，可見破
壞規模非常龐大。邊坡上明顯可見數條斷層通過。

且此邊坡掉落之岩塊沿坡面滾落後，正好落於
127.8k(明隧道)處，使後者的落石災害更形雪上加
霜。-----134

照片十六 臺二十一號公路132.6k處之落石邊坡。此處為一緊
密褶皺通過之處，坡上岩體破碎的非常嚴重。
-----134

照片十七 台二十一號公路127.8k處之落石邊坡。可見隧道上
方恰為一背斜的東南翼，岩塊極易沿著層面下滑，
此外，河流的切蝕造成解壓節理、上方139.5k處掉
落的岩塊，都是造成此處落石災害極為嚴重的原
因。-----135

照片十八 夫妻樹景觀點停車場所面對的公路邊坡現象。
可見落石相當的明顯。-----135

第一章 緒論

1.1 研究動機與研究目的

台灣位處於菲律賓海板塊與歐亞陸板塊的交界處，地質構造運動頻繁，岩層受應力作用後，破裂面、斷層、以及褶皺等構造現象極為發達，而存在於岩體中的不連續面，常將岩層分割為破碎的岩塊；加上台灣的地形條件是山地多而平地少，地形陡峻，而且雨水充沛，先天上就相當有利於山崩（landslide）的發生。而在山崩的種類之中，落石（rock fall）是運動速度最快的一種，且常在發生之前並沒有任何的徵兆，故一旦發生落石災害之際，常常造成重大的損失或傷亡。落石災害發生的地點，包括有山區道路、山坡地、隧道、礦場、山地風景區等地方，分佈相當廣泛。

本研究以玉山國家公園內之新中橫路段為研究之範圍，其動機為：新中橫公路位處於構造現象頻繁的西部麓山帶的最東緣，先天上就相當有利於山崩運動的產生，加以由於新中橫公路自民國八十年元旦正式完工通車以來，至今只短短數年，許多公路旁的邊坡仍處於不穩定的狀態，落石現象極為頻繁（照片一、照片二）。也由於公路開通未久，岩層露頭相當清晰，解壓作用與炸路之痕跡仍相當明顯，有利於觀察不連續面的情形。故新中橫公路是觀察、研究落石現象的良好地點。

同時新中橫公路是連接嘉義縣阿里山鄉與南投縣信義鄉的重要連絡道路，也是通往玉山國家公園西北側的唯一道路，而玉山國家公園又身負著觀光、遊憩、保育的功能，不論就交通的暢通、遊客的安全、及自然景觀保育的考量上，落石災害都具有相當大的危險性。故對於此路線的落石災害做一探討，有其必要性。也希望本研究對於落石災害的防治與道路邊坡的保育有所助益。

在造成山崩的因素中，可以分爲外在環境所帶來的外在因子（誘因）與邊坡本身所具有的內在因子（素因）。因爲外在因子（如降雨、降雪、地震等）與落石的關係相當複雜而且很難將之明確地定量化（黃景川,1984），且外在因子產生的時機與程度皆是人類的知識所難以準確預測的，故本研究將探討落石與其內在因子之間的關係，並從而探討落石的形成原因。

1.2 落石的定義與性質

邊坡上的物質，包括岩屑、岩塊、土壤、出露的岩層等沿著山坡向下方移動的運動現象，稱爲 "塊體運動" (mass movement) 或 "斜坡運動" (slope movement)。快速的斜坡運動一般統稱爲山崩 (landslide)。造成斜坡運動的唯一驅動力是重力，至於其它的外力如：水力、風力、地震等，扮演的只是觸發與加速斜坡運動發生的角色，故在月球上沒有水、風的情況下，斜坡運動一樣可以進行。

在眾多對於山崩運動的分類中，各有不同的分類依據，故有不同的分類型式。目前最通用的山崩分類方式有 Sharpe (1938) 與 Varnes (1978) 兩種，此兩種分類法詳見表一與表二。此二學者的分類方式是依照 "運動體的組成物質" 與 "運動型式" 兩個分類依據來區別的。依照此方式，落石的組成物質是 "基岩" (bed rock)，其運動型式是 "掉落" (fall)，故本研究落石的基本定義是：岩層中的岩塊，沿坡面掉落或滾落的塊體運動。

(表 一 與 表 二)

(圖 一)

日本的學者曾對落石的型態加以區別，將之分為拔落型落石（轉石型）與剝離型落石（浮石型）兩類（見圖一），較為不同的是，在轉石型中的崖錐堆積物型，因其組成物為崖錐堆積物，性質應與崩積層或風化層的土石崩落（slump）相同，與其它的破壞型態分類法略有重疊或混淆之處。而本文中所述的落石現象其物質是以基岩為限。

落石在脫離原有位置後，在運動路徑上的運動方式，依其和坡面接觸的關係有下列四種：(1)自由落體 (2)躍動 (3)滾動 (4)滑動（黃鎮臺，1989），故落石對於其它物體的危害一般是以"撞擊"的方式進行，在落石發生處的道路、護欄、坡旁建築物等常有遭擊毀之虞。而且，落石的運動速度是所有斜坡運動中最快的一種，正因如此，落石的產生多無徵兆，較難以監測，發現落石時岩塊已是快速向下坡運動之中，令現場人車常來不及逃離現場，故落石常造成極大的危害。如數年前的太極峽谷落石，便是一個造成極大傷亡的例子。

由於發生落石時，危害已可能隨即來臨，難以補救，故目前對於落石災害的防治，多是針對已有落石產生的邊坡或具有落石潛能的邊坡，事先施以各種預防工法或防護工法，做為防治的對策。

1.3 前人研究

1.3.1 落石之相關研究

有關於落石成因的探討有相當多的案例，一般可以將其形成因素分為外在因子與內在因子兩方面，雖然說外在與內在因子與落石關係的論述相當多，但是至今仍沒有一套較為

完整的影響關係，以及各因子間的權重關係可為參考。以下將與本研究所討論因子有關的前人研究略加概述。

在內在因子方面，Abele (1972) 調查發現幾乎所有的岩性（從花崗岩到泥岩）都可以產生落石，同時透過室內的岩石強度試驗，發現在落石與岩石強度之間，似乎並沒有簡單的對比關係。日本建設省亦曾調查日本境內發生過落石的地點，也發現可以產生落石的岩性非常多，並不侷限在某些特定的岩性當中（如圖三）。

Riek and Currie (1974) 和 Cruden (1975) 調查岩坡破壞時，認為岩石邊坡中的不連續面（或節理面）對於岩石邊坡的穩定性有相當大的影響。

Muller & Hofmann (1970) 和 Hofmann (1974) 則在室內利用一個個塊體堆疊而成的模型，模擬野外岩坡上的岩塊，並改變堆疊的方式與角度，進行一連串的實驗，結果發現岩坡上岩塊的穩定程度與岩坡上節理或層理的位態 (attitude) 有關。

Hoek and Bray (1977) 則進一步利用力學上的計算證明了岩塊的穩定性與邊坡的不連續面的位態有關，且不同的不連續面位態組合會有不同的破壞行為，同時說明了岩塊的穩定程度亦與不連續面間的凝聚力 and 摩擦力有關，並發展出一套利用投影圖來分析岩坡破壞型式與計算安全係數的方法。

日本建設省曾調查日本境內89個曾在5年內發生落石的邊坡，討論邊坡的坡度，基盤岩性與落石發生率的關係，其結果如圖二與圖三。

在國內方面，林銘郎 (1992) 在調查台灣太魯閣峽谷的解壓節理時，認為解壓節理的存在可能造成落石坍方災害的發生，且其破壞模式有下列三種：（1）岩板滑動破壞模式 (slab sliding failure)。（2）岩板挫屈破壞模式

(slab buckling failure)。(3) 岩板倒懸破壞模式 (slab overhanging failure)。

黃鎮臺和夏龍源(1989)在調查北濱公路南雅里路段之岩坡崩塌時，認為當地岩坡破壞之原因計有：地勢陡峭、節理面形成順向坡、不連續面延續性佳、節理面傾角大於其摩擦角而小於其坡角、及坡趾節理面透空引發上邊坡岩塊掉落。

在外在因子方面，多位學者如 Bjerrum & Jorstad (1968)、Grove (1972) 都提到落石與氣候有關。尤其是冰凍-融解的過程，由於造成急劇的體積變化與溫度變化，導致裂隙發育與風化加劇，被認為是高山或寒冷地區落石形成的主因之一 (Ives, 1973; Johnston, 1973)。

日本建設省以落石發生次數與連續降雨量、降雨強度做對比研究，其結果顯示降雨對於落石的發生有明顯的促發效應，但卻難以顯示落石次數與雨量、降雨強度間有明顯的對應關係(如圖四、圖五)。

另外，在災害防治方面，黃鎮臺(1989)在落石災害的防治研究中，認為落石危害度的評估可由落石規模、目前保護措施的有效性、曾發生之災害率、道路交通量、及觀光人數等方面來考量，並提出各種防治措施的參考表。

陳宏宇等(1993)在蘇花公路某一邊坡的處理方式探討中，由整個邊坡裂縫可能延伸之距離、落石衝擊之動能、以及影響整個地區範圍，作為整治處理的重點，認為"攔截落石"的方式最為經濟可行。並以數學計算分別模擬岩塊跳動與滾

(圖 2)

(圖三.四.五)

動的可能運動軌跡，據以作為設計壕溝、防護牆的位置與大小等的資料。

張義隆等（1991，1993）則以衝擊機制來尋求最佳的落石緩衝材料。經由室內實驗結果發現，緩衝材料以儘量採用低勁度（ k ），且回復係數 $e = 0.422$ 者為最佳。

1.3.2 研究區域已有之相關研究

本研究區域過去曾有若干學者做過地質調查與道路工程的調查。在地質方面包括有：張麗旭等（1960）、詹新甫與耿文傳（1962,1968）、畢慶昌（1969）、劉占江（1971,1976）張郁生（1984）、程延年（1988）、劉桓吉等（1989）、邱紹康等（1992）、劉景仁（1993）等人。在道路工程方面則有王鑫和林耀源（1982），王鑫和楊建夫（1987），王鑫等（1991）等人的報告。

張麗旭等（1960）在對阿里山地區做煤田調查時發現，阿里山附近之南莊層的主要岩性為淺灰色厚砂岩、砂頁岩所組成的砂頁岩薄互層、和深灰色頁岩。

詹新甫等人（1962）在調查本區地質時則認為，阿里山地區的平移斷層有兩組，其中一組為走向西微北或西北西之右移斷層，均橫切走向北東-西南的構造線；另一組為走向北西微北之斷層，其數有二，斜切縱向構造及前一組斷層，至少其中之一呈左移狀態。

畢慶昌（1969）則認為阿里山岩冪所屬的中新世岩層，可能原來都沉積在今日中央山脈的古第三紀岩層之上，後來受到了造山運動的影響，這些岩層被抬升舉起，再因重力俯衝作用而形成岩冪狀。

劉占江（1971，1976）調查此區之構造高區及油氣生成評估，認為本區之中新世地層構造主要是以和社背斜為主，

東側與同富山向斜，西側與鹿窟山向斜相毗連。和社背斜被數個斜滑移斷層 (diagonal slip fault) 所截切，這些斷層的傾斜滑距 (dip slip) 可能皆大於其走向滑距 (strike slip)。上述斷層在研究區域出現者由北至南分別有：神木斷層、十八折坑斷層、兒玉斷層三者。邱紹康等 (1992) 並依出露地層及構造關係推測，神木斷層應為斷面向南之正斷層，並伴有少量右移運動，斷面傾角亦甚陡，斷層走向約呈東西方向。

張郁生 (1984) 曾對研究區域中的礦產蘊藏做一調查，指出阿里山區的中新世沉積岩區，屬於淺海濱海相的陸棚堆積環境，因此有出產煤、石油、天然氣的潛能，但在調查之中，只發現數公釐厚的泥炭夾在頁岩層中，沒有發現任何可供開採的露頭，故認為阿里山區不可能有豐富的煤礦蘊藏。

程延年等 (1988) 則對玉山國家公園中的地質現象的解說加以規劃。劉景仁 (1993) 則對阿里山至同富山之間的路段做構造地層學的研究，其依照野外構造現象的不同，輔以岩層岩石力學性質的差異，將阿里山至同富山沿線分成四個構造地層單位。

在道路工程方面，王鑫和林耀源 (1982)，王鑫和楊建夫 (1987)，王鑫等 (1991) 則針對新中橫公路的開闢，分為施工前、施工中、施工後三個時期，研究道路開挖工程對於邊坡穩定性的影響，並檢討施工方式與水土保持工法的適宜性。依其研究顯示：本區道路開挖工程對於邊坡穩定與景觀的衝擊、破壞非常大，尤其大迴頭彎段是破壞最嚴重的地方。

第二章 研究區域概況

2.1 研究區域的地理位置與交通狀況

本研究的研究區域位於嘉義縣阿里山鄉與南投縣信義鄉境內（如圖六所示），西側為阿里山森林遊樂區，東側以沙里仙溪為界，南側為鹿林前山。研究路線是由台十八號公路自忠至塔塔加遊客中心，以及台二十一號公路塔塔加遊客中心至125k處，全長約為四十公里。台十八號公路與台二十一號公路在塔塔加遊客中心處相連接，一般將此二條公路合稱為新中部橫貫公路。研究路線大部份位於玉山國家公園境內，包括台十八號公路91k處，向西北方向至台二十一號公路125k處，皆為國家公園的保育範圍。

研究路線是連接嘉義縣阿里山鄉與南投縣信義鄉的唯一道路，同時也是貫穿玉山國家公園西北側的唯一道路，距離阿里山森林遊樂區亦只七公里之遙，故交通運輸量相當龐大，每當星期假日之時，車輛絡繹不絕。

2.2 地形概況

縱觀本研究區域的地形（圖七），東側為沙里仙溪與郡大山山脈，郡大山山脈以東即屬於脊樑山脈區；西側為阿里山山脈，南側為鹿林山山脈，為玉山山脈的支脈，鹿林山山脈以南即為楠梓仙溪上游集水區；北側有同富山山脈，在塔塔加遊客中心北方尚有東埔山山脈。幾個較主要的山峰有：自忠山（標高2606公尺）、鹿林前山（標高2895公尺）、東埔山（標高2782公尺）、同富山（標高2285公尺），整

page 13

page 14

個地勢呈現南高北低的狀態。而由於區內山峰林立，故地形相當的陡峭。

研究路線沿著鹿林山山脈、東埔山山脈、同富山山脈蜿蜒而行，公路的高度在最西側的自忠為2360公尺，塔塔加遊客中心為公路面的最高點，標高有2610公尺，而公路面的最低點在最北側的台二十一號公路125k處，標高約為1400公尺。整個研究路線基本上是隨著山勢起伏，呈現南高北低的狀態。

在研究區域中的水系（見圖六）主要是和社溪與沙里仙溪，都是陳有蘭溪的支流。研究路線由自忠至台二十一號公路146k處都屬於和社溪的流域，其餘則為沙里仙溪的流域。由於研究區域的地形陡峭，公路沿線附近的河流多很急促，河流斷面細小且比降很大。而研究區域是台灣中南部數大河流的主要集水區，且由氣象測站的雨量資料可以看出年降雨量相當大，水量充沛，故沖刷能力相當強。

切過研究路線的溪流多半是細小而陡急，其中烏乾坑溪是最大的一條溪流，在大迴頭彎段穿過公路面，此段是研究路線歷年來崩塌最多次，亦最嚴重的路段。

2.3 地質概況

研究區域位於西部麓山帶的最東緣，整個區域以和社背斜與同富山向斜（或稱東埔山向斜）為大架構，同富山向斜的東側以陳有蘭溪斷層與古第三紀的新高層相接觸。

研究區域中的岩性為中新世的南莊層，屬於未變質的沉積岩，主要分佈於和社背斜東翼至同富山向斜兩翼的部份。阿里山地區的南莊層主要的岩性為淺灰色厚砂岩、砂岩和頁岩所組成的條狀薄紋層、和深灰色頁岩（張麗旭,1960）。其中砂岩主要為細粒砂岩，成分以石英顆粒為主，顆粒大小在0.1mm左右，而膠結物則以黏土礦物和

碳酸鹽類爲主，並有少數的長石與板岩碎屑，且由阿里山至同富山間的砂岩岩性皆大致相同（劉景仁,1993）。南港層的岩性則以深灰色頁岩爲主，夾有灰色薄層砂岩。

劉桓吉（1989）調查此區地質時發現南莊層中具有海豆芽化石（*liqula sp.*）及牡蠣化石帶，並且有 *Ophiomorpha*、砂棒（sandpipe）、波痕（ripple mark）、交錯層（cross bedding）等淺海相的生痕化石與原生沉積構造，故認爲此區域的南莊層屬於淺海相的沉積環境。

根據劉占江等（1976）、劉紹康等（1992）、以及中國石油公司（1986）所發表的十萬分之一嘉義圖幅（圖八）等的區域地質資料顯示，研究區域的主要構造線是和社背斜與同富山向斜。和社背斜軸呈北北東-南南西走向，東側的同富山向斜軸約呈南北走向，在兩個褶皺軸之間尚有數條延伸較小的背斜、向斜構造，走向亦呈北北東-南南西的方向。另外，在研究區域中有數條近乎東西向的斷層，截切過和社、同富山等褶皺軸，由斷層兩側地層及構造關係推測，這些斷層應爲斜滑移斷層（oblique-slip fault）。

何春蓀（1986）指出西部麓山帶自漸新世（約三千五百萬年前）開始沉積，而在上新-更新世初期的蓬萊造山運動（約五百萬-三百萬年前），使盆地內的沉積岩產生強烈的變形與縮短的作用，研究區域中的構造現象即是此期造山運動所形成。

(圖 8)

2.4 氣候概況

在研究區域附近的氣象站有阿里山氣候測站（海拔2406公尺）與和社氣象站（海拔981公尺）兩個氣象站。根據王鑫（1991）由中央氣象局1933-1985年間此兩個氣象站所蒐集的資料分析顯示：年均溫在阿里山站為10.6℃，在和社站為20℃；月均溫在阿里山站為5-15℃，在和社站為14-25℃。研究區域的年雨量平均為1681mm（和社站）-4129mm（阿里山站）之間，且各月雨量皆在30mm以上，最高者可達800mm以上（如圖九-a）。雨量多極中在5-9月，其中5、6月為梅雨期，降雨強度雖不大，但降雨時間較長，可以連綿數日不斷，累積雨量仍相當可觀；7-9月則為颱風時期，可帶來高強度、高降雨量的雨水。

2.5 地震

臺灣位處於海陸板塊相碰撞的地方，因此地震活動相當的頻繁，例年來因為地震而造成的災害時有所聞，故對於地震所可能帶來的危險不可忽略。地震是構成地殼的岩體破裂時所引發的震動，地震產生時斷層的移動可以直接造成災害，震波引起的水平振動最易使地表缺乏抵抗橫向剪力作用的邊坡或是結構物崩壞或損害。地震對公路工程環境的危害，主要是由斷層、山崩、地裂、地陷等現象所引起。

地震強度與當地的岩層構造、岩石強度、及地形有密切的關係。在較深的土坡，或是鬆軟的土層、填方地區，所受到的震動通常比在堅硬的岩盤上要強烈的多。因此，容易發

(圖九 .page19)

生地震災害的地區包括有：斷層地帶、地質破碎不穩定地帶、崩積區、填方區、及棄土區等。

震區的劃分對於工程建設的防震設計非常重要。根據徐明同、蔡義本、及茅聲燾（1980）的建議，在現行建築技術規則中將臺灣劃分為強震區、中震區、與弱震區。它們的分佈如圖九-b所示。這種劃分主要是根據過去的地震記錄與災害分佈研判做出的，由其結果看出：強震區集中在苗栗至臺中、嘉南、以及花東三區，而本研究區則屬於中度震區。

第三章 研究方法

研究方法主要分爲航照判釋、野外調查、穩定性分析、與內在因子統計等四項。整個研究的進行方式與順序，見下頁的研究方法流程圖（圖十）。

3.1 航照判釋

3.1.1 航照判釋的目的

航照判釋的工作是判釋研究區域中航空照片所顯示的影像所具有的特徵。航照判釋的工作須在野外調查展開之前完成，初步的航照判釋不僅提供了規劃野外工作的基本資料，也減少了相當大的野外工作量，經由航空照片的判讀可以進行適當的路線規劃，以及應實地核對的地區及適當的剖面，以節省調查的時間。

航照判釋工作的第二個目的是針對研究區域中的地質條件，地形條件做概略性的判讀。判讀的項目包括：河流流向、水系分佈、地形起伏、坡度、坡向、岩層出露範圍、崩塌範圍等項。如此，研究區域中有關地質、地形的全域性概念在野外工作之前即可獲得。

航照判釋的第三個目的是做線型（lineament）的判釋。由於研究區域幅員廣闊，山勢高峻且植生密佈，以航空照片做線型的判釋，可以了解全區構造線的分佈趨勢，作爲進一步探討構造型態及應力來源的資料。

3.1.2 航照判釋的方法與步驟

航空照片判釋的方法與步驟如下：

（圖10）

(1) 選擇適當重疊比例的照片對。航照判釋首先要選取涵蓋研究區域的航空照片，且這些航空照片必須能夠組成適當重疊比例的照片對，一般以選用重疊80%左右的照片，較適合高山深谷地區。

(2) 在選取適當的照片對後，將照片置於帶有目鏡的反射式立體鏡 (mirror stereoscope) 下，調整照片的位置以獲得立體影像，並開始判讀區域性的地形、地質、崩塌狀況。詳細的判讀項目如工作目的中所述。

(3) 線型的描繪。在航空照片上覆以透明膠片，並將立體影像中判讀的線型以油性簽字筆描繪於透明膠片上。

(4) 線型的轉繪。由於每一張航空照片的拍攝高度並不完全相同，各張照片的比例已有誤差，且同一張照片的中央往四周會有誇張放大的現象 (具有 relief displacement 的現象)，故須將判讀的線型轉繪於地形圖上。轉繪的方法是在判讀時描繪出數個已知點的位置，如山峰頂點、河流交會點、村落建築等，做為控制點，再量測照片中兩控制點的距離，並和地形圖中的距離做比較，即可得知轉繪時放大或縮小的比例。轉繪後可得到研究區域的線型分佈圖。

(5) 線型位態的量測與玫瑰圖的投影。在線型轉繪於地形圖之後，以量角器量測線型的走向，並輸入個人電腦中，以司密特投影網 (Schmidt net) 加以投影，投影後得到線型玫瑰圖 (Rose Diagram of Lineament)。

3.2 野外調查方法與項目

野外調查的三個大項目分別為：現地破壞現象的調查、地質資料的調查、與地形資料的調查。將上述三種資料列為調查範圍的原因是：(1) 本研究的研究主題為落石現象，而落石只是諸多斜坡運動中的一種，則故對研究路線中的邊坡破壞型式自然需要加以調查與區別。同時，邊坡破壞的規模、大小，與落石的危

害程度有所關連，對於未來的災害防制治有所助益，故亦一併調查。（2）前人研究中（洪,1979;潘,1986;徐,1992等）多已提及邊坡上的組成物質、地質構造、地形等因素，皆會影響斜坡運動（包括落石）的穩定性。故將上述因素區分為地質條件與地形條件兩大方面，再針對各項因子詳細調查，以做為後續分析工作中的基本資料。

3.2.1 現地破壞現象的調查

現地破壞現象的調查，目的為調查研究路線中具有邊坡破壞現象（即處於不穩定狀態）的邊坡的位置與範圍，同時針對邊坡的組成物質、破壞特徵、破壞體的運動方式等項，加以區分各不穩定邊坡的破壞型式。屬於落石破壞型式的邊坡，則為後續調查項目的調查重點。同時，所調查出的落石邊坡的破壞情形，如岩塊是否突懸、運動路徑是否產生散射、破壞的規模大小等項，與未來落石災害的防治有關，故亦一併列為調查項目。

3.2.2 地質資料方面

地質資料可以分為區域性的地質狀況與各個落石邊坡的詳細地質性質。區域性的地質狀況指的是整個研究路線中的地層、岩性、主要構造型態與構造現象的分佈，採用一般的路線地質調查方式來完成，以便了解全區的構造特性；各個落石邊坡的詳細地質資料則是針對每個落石邊坡詳細量測，量測的項目有下列：

（1）岩性方面

a. 各個落石邊坡出露岩石的名稱、岩層的組成狀況。

b. 岩性比例。上一項岩性資料為描述性的資料，為了獲得較明確的量化資料，故增加岩性比例這一項；鑑於研究路線中出露的地層皆為以砂頁岩為主的南莊層，故將邊坡的砂岩與頁岩的

比例作一測量以得到此項資料。在調查時須注意的是：由於同一邊坡的岩性比例在不同位置亦會略有變化，故量測時以邊坡中較主要的岩性比例出露位置為量測的位置，並在同一邊坡中測量數個位置後取平均值為採用的數據。量測方法是以皮尺在垂直層面方向上量測，計數砂岩出露的總厚度與頁岩出露的總厚度，兩者的比例即為砂頁岩比例。

c. 層態。記錄層態的變化趨勢，才能對應沿線的構造延伸狀態。同時，層面亦為不連續面之一，故層態亦作為穩定性分析時的基本資料之一。

d. 岩層厚度。岩層的厚度和落石產生的岩塊規模有關，且岩層厚度即為層面的間距資料。

(2) 構造現象方面

構造現象是地質資料中重要的一環，不同的構造現象對於邊坡組成物質的各項性質有重大影響，且研究區域位於西部麓山帶的最東緣，構造運動頻繁，更顯得構造現象的重要性。

(3) 不連續面方面

完整的岩體之所以會被分割、破碎而產生獨立的岩塊，都是由於不連續面的存在。若沒有不連續面，岩體強度相當高，不易產生破壞，故不連續面為邊坡破壞的重大影響因素之一。

1. 不連續面的定義：不連續面指的是分開兩岩石塊體的任何平面，在此平面的兩側，岩體材料不再是緊密膠結的，岩體的許多物理性質、力學性質等都產生不連續的情況，故通過不連續面，岩體的諸多力學性質都會降低，所以不連續面在工程上亦稱為"弱面" (weak plane)。

2. 不連續面對邊坡的影響：不連續面穿過岩體，使原本完整的岩體形成許多單一岩塊的組合體，許多岩體的工程性質已經改變，其影響有下列幾種：

a. 岩體的強度降低，剪阻角降低，變形性增加，部份不連續面的凝聚力甚至為零。

b. 岩體的透水性增加。水份易沿著裂面深入岩體之中，提高透水性與滲透率。

c. 風化作用。不連續面使得岩體接觸外表的水分和空氣等風化因子的表面積增加，不連續面愈多，表面積增加愈多，風化作用得以更盛行。

d. 岩坡的穩定性。不連續面切過岩體，產生了體積有限的岩塊，而此不連續面又正是其可能的脫離面，再加上述的三項影響，不連續面對於岩坡穩定性影響極大。

3. 不連續面的性質分項與分級：

不連續面性質的描述項目與分級的標準，參照國際岩石力學學會（ISRM，1981）所建議的標準：

a. 不連續面的種類與位態（attitude）。不連續面的種類可以分為原生（primary）不連續面與次生（secondary）不連續面。原生不連續面有：層面、不整合面；次生不連續面有：斷層（fault）、節理面（joint）、剪裂帶（shear zone）、劈理（cleavage）、片理（schistosity）、裂隙（fissure）、張裂縫（tension crack）、葉理（foliation）等。

在野外除了記錄邊坡中所出露的不連續面種類，並以傾斜儀量測其位態，但由於不連續面的數量極多，各位態並不十分一致，為了取得具有代表意義的主要位態資料，並避免因取樣造成位態量測的誤差，則在野外量測數十至百組的位態資料，回到室內將位態資料輸入電腦中的司密特投影網（Schmidt net）程式中，繪出不連續面的等密度投影圖，由等密度投影圖中判讀主要的位態，同時可判別不連續面的組數；而不採用在野外現地直接觀察後量測位態的方式，以避免人為主觀判斷的誤差。同時為了使量測的位態資料能具有統計上的代表意義，野外量測時注意使量測樣本平均分佈於邊坡上，並且同一個邊坡的數量要達數十或至百組資料以上。

b.不連續面的組數 (number of sets)：不連續面的組數愈多，則代表岩體中不連續面的位態分佈愈廣泛，岩體被切割而成的岩塊的空間組合方式更多變化，岩塊的可能脫離面也愈多。雖然研究路線中的不連續面具有相當的規則性，但為求數據的客觀性，減少人為觀察與主觀判斷的誤差，採用繪製等密度投影圖的方式，由圖中不連續面位態的分佈趨勢，來判定其組數。野外樣本測量的方法與不連續面等密度圖的繪製，皆如上述量測位態的方法中所述。組數的等級劃分則如下所示：

表三 不連續面組數等級劃分標準 (ISRM,1981)

描述	等級
塊狀岩體,只有少數不規則不連續面	一級
具有一組不連續面	二級
具有一組不連續面,另加少數不規則不連續面	三級
具有二組不連續面	四級
具有二組不連續面,另加少數不規則不連續面	五級
具有三組不連續面	六級
具有三組不連續面,另加少數不規則不連續面	七級
具有四組以上不連續面	八級
極破碎,似土方	九級

c.不連續面的間距 (spacing)：岩體中兩條屬於同一組規則性不連續面的垂直距離，稱為間距。量測的方法是選定一條定長的測線，將測線垂直於不連續面的方向，計數測線內的不連續面的數目，以正交的測線長度除此數目，即得相鄰不連續面中心距的平均值。

為了減少測量的人為誤差並取得具代表意義的資料，量測時要注意：(1)在同一應力場、同一岩性的岩層中，不連續面發育的間距和岩層的厚度有關；岩層厚度大者，其間距較大，厚度較小者，間距也較小。為了減少此項差異，讓不同邊坡得到的間

距數據具有比較意義，量測時應針對某一固定厚度範圍的岩層來量測。故選定全線出現較多的 30-50 cm 厚度左右的砂岩層，來做為間距量測的對象。（2）同組或不同組的不連續面間距亦會不同，故在同一邊坡要在不同位置施測多次，求取平均值，以取得能夠代表這個邊坡不連續面間距的數據。

量得不連續面的間距之後，可依 ISRM（1981）的建議加以分級，其分級標準如下：

表四 不連續面等級劃分標準（ISRM,1981）

描述術語與等級	間距大小
極密（一級）	< 2cm
很密（二級）	2 - 6cm
密（三級）	6 - 20cm
中度（四級）	20 - 60cm
疏（五級）	60 - 200cm
很疏（六級）	2 - 6m
極疏（七級）	> 6m

d. 不連續面的持續性（persistence）：由坡面上觀察不連續面，通常只能看到一條線，因此，只能由坡面上所看到的線長來加以評估。量測時仍採用在邊坡不同位置多次量測，取得平均值的範圍。持續性等級的劃分標準如下：

表五 不連續面持續性等級劃分標準（ISRM,1981）

線持續性	長度	等級
很低	< 1m	一級
低	1 - 3m	二級
中度	3 - 10m	三級
高	10 - 20m	四級
很高	> 20m	五級

e. 不連續面的內寬(opening)：不連續面的內寬愈大其岩體的變形性愈大，透水性也愈大，若無充填物膠結，則不連續面的凝聚力也消失。且岩塊的周圍也將具有可供移動的空間，岩塊鬆動的可能性也愈高。ISRM對不連續面的內寬等級劃分如下：

表六 不連續面內寬等級劃分標準(一)(ISRM,1981)

內寬大小	說明
< 0.1mm	很緊閉
0.1-0.25mm	緊閉
1.25-0.5mm	半開
0.5-2.5mm	張開
2.5-10mm	中寬
> 10mm	寬
1-10cm	很寬
10-100cm	極寬
> 1m	很空洞

但配合在野外的實際觀察測量發現到，當不連續面的內寬在1mm以下時，精確的內寬測量有其困難，意即內寬大小由<0.1mm到0.5mm的三個等級在實際的野外測量中很難分別出其中的差異，故爲了配合這項測量的進行，將國際岩石力學學會的劃分標準略爲修改，把<0.5mm者劃分爲同一級，做爲本研究的劃分標準（如表七所示）。

表七 不連續面內寬等級劃分標準(二)(修改自ISRM)

內寬大小	說明	等級
< 0.5mm	緊閉至半開	一級
0.5-2.5mm	張開	二級
2.5-10mm	中寬	三級

> 10mm	寬	四級
1 - 10cm	很寬	五級
10 - 100cm	極寬	六級
> 1m	很空洞	七級

f. 不連續面密度與岩塊的幾何形狀：不連續面的平均密度與岩塊的體積規模大小有關，由單位體積的不連續面數，可以估計邊坡岩塊的大小。單位體積的不連續面數（volumetric count of discontinuities）一般又稱為單位體積節理數（volumetric joint count, J_v ）：

$$J_v = (N_1/L_1) + (N_2 / L_2) + (N_3 / L_3) + \dots + (N_n / L_n)$$

(N_n 為第n組不連續面，在 L_n 長度中的條數。)

(L_n 為第n組不連續面的調查長度，須垂直走向。)

由單位體積的不連續面數，可用以簡單估計邊坡岩塊的大小，由ISRM所建議的關係如下：

表八 不連續面密度與岩塊體積之關係 (ISRM, 1981)

J_v (條/公尺)	說明	等級
< 1	岩塊很大	一級
1 - 3	岩塊大	二級
3 - 10	岩塊中等	三級
10 - 30	岩塊小	四級
> 30	岩塊很小	五級
> 60	粉碎岩石	六級

g. 不連續面的軟弱夾心（filling）：不連續面間軟弱夾心的存在對於其摩擦角的影響非常大，尤其當軟弱夾心為斷層泥、

斷層碎屑時，摩擦角可能相當的低。除了斷層泥、斷層碎屑外，其它可能成爲軟弱夾心者尚有黏土、方解石、石膏等，在野外調查時以說明種類和數量爲主。

h. 不連續面滲水情形：滲水狀況對於岩坡安定性相當有影響。ISRM對於岩石不連續面滲水的分級如下頁表九所示：

(4) 風化程度：風化現象是邊坡材料的抵抗侵蝕能力與外在風化動力兩者相互作用下，邊坡所呈現的外觀。岩石的風化程度影響岩石顆粒間之緊密程度，一般而言，風化程度較高者，顆粒間較爲疏鬆，亦較不穩定。根據國際岩石力學學會所建議的岩石風化程度分級標準，可將風化程度分成六級，分級的詳細描述，詳見表十。

表九 不連續面滲水情況等級劃分標準 (ISRM, 1981)

1. 不含軟弱夾心的不連續面

滲水分級	滲水情況
一級	極緊閉、乾燥，不可能滲水者
二級	乾燥，無滲水跡象
三級	乾燥但有滲水跡象
四級	潮濕，但無流水
五級	滲水，偶有水滴但無連續流水
六級	連續流水

2. 含軟弱夾心的不連續面

滲水分級	滲水情況
一級	軟弱夾心爲高度過份壓密者，透水性低，不易有顯著滲流。

二級	軟弱夾心潮溼，尙無流水。
三級	軟弱夾心潮濕，偶有水滴。
四級	少部份軟弱夾心被水沖失，水流連發。
五級	部份軟弱夾心被水沖失，顯著水流。
六級	軟弱夾心全部沖失，挖開之初水壓很高。

表十 風化程度等級劃分標準（ISRM,1981）

風化等級	風化現象
一級	新鮮至極微風化。岩石材料未見到風化跡象或不連續面上稍見褪色。
二級	微風化。全部岩材均已變色。
三級	中度風化。一半以下的岩材分解或崩解為土壤。
四級	高度風化。一半以上的岩材分解或崩解為土壤。
五級	全風化。所有岩材均已分解或崩解為土壤，但岩層原結構仍清晰可見。
六級	土壤。所有岩材均已變為土壤，岩層原結構已不復見。

3.2.3. 地形資料方面

本研究中野外調查的地形因子有下列數項：

（1）.邊坡坡面的走向：相同狀況的岩坡，也會因開挖面的方向不同，造成不同的破壞型態，也造成穩定性的差異。同時坡面走向也是穩定性分析時的基本資料。

在野外測量坡面走向時，應注意到坡面凹凸不平所可能產生的誤差，此時不宜直接在坡面上量測，應在邊坡走向延伸的方向且距離邊坡一小段距離的地方，利用一平板模擬邊坡，採用間接測量的方法來量測其走向，才能使所得資料能代表整體邊坡的走向。若邊坡走向隨著公路轉彎而變化很大時，應將邊坡分段，以使每一段邊坡能較接近平面形，所量得的走向才不會誤差太大。

(2) .邊坡的傾向：邊坡的坡面傾向會影響到坡面接受盛行風的情形、接受日照的程度、接受雨量的程度，所以會影響到邊坡上的組成物質的風化情形、以及植生的情形，因為風化作用除了和邊坡本身組成物質的抗風化能力有關之外，亦和風力、雨量、日照情況有關；而植生亦和風向、雨量、日照程度有關。對邊坡的穩定性而言，風蝕、雨蝕、日照、植生等因素，都會對邊坡的穩定性產生影響，故邊坡的傾向自然也對穩定性有某種程度的影響。

邊坡傾向的量測方法延續上述走向量測的方法，傾向與走向相差90度。

在野外調查坡面傾向時，將傾向分成八類，分別為：

N：337.5度-22.5度。

EN：22.5度-67.5度。

E：67.5度-112.5度。

ES：112.5度-157.5度。

S：157.5度-202.5度。

WS：202.5度-247.5度。

W：247.5度-292.5度。

WN：292.5度-337.5度。

(3) .邊坡的坡角：坡角的大小影響到坡面上的物質向下運動的趨勢，坡角愈大，則物體沿坡面向下的分力就愈大。故對於崩積物質所組成的邊坡而言，一般是坡角愈大者，穩定性愈差；但對於塊體所組成的邊坡而言，尚牽涉到塊體的堆疊方式，情形較為複雜。在野外工作中，將邊坡的坡角依十度一個等級，平均分為九個等級，做為坡角的分級標準。

坡角的量測要注意使量得的資料能代表整體邊坡的狀況，一般以坡趾到邊坡破壞處頂端的平均坡度為準。

(4) .邊坡的外形：邊坡的外形與坡面集水的情形有關，自然會影響到邊坡的穩定狀況。在調查邊坡外形時，可將邊坡外形分成水平方向上的形狀與垂直方向上的形狀。在水平方向上的形

狀可以分爲凹形、凸形、平面形三種，在垂直方向上也可以分爲同樣三種，將兩個方向上的外形組合起來，便可得到九種不同的外形組合。此九種組合即爲邊坡外形的分類，若將水平方向的外形寫在前，垂直方向的外形寫在後，則此九種坡形分別爲：凹凹坡形、凹平坡形、凹凸坡形、平凹坡形、平平坡形、平凸坡形、凸凹坡形、凸平坡形、凸凸坡形。

(5) .邊坡的型式：依照坡面與岩層位態的空間關係，可將邊坡的型式分爲順向坡、逆向坡、斜交坡三種。岩層的傾向與坡面的傾向夾角在45度以內者，稱爲順向坡；夾角在45度至135度以內者，稱爲斜交坡；夾角在135度至180度以內者，稱爲逆向坡。

3.3 穩定性分析工作

落石形成的第一個先決條件是：原本完整的岩體因不連續面的存在而被分割爲許多體積有限而獨立的岩塊。然而有不連續面的存在的岩體並不見得一定會進一步的產生破壞而掉落，因爲每一個獨立的岩塊脫離原有位置的趨勢並不相同，其脫離坡面的方式也不一樣。爲了明瞭研究路線中各個具有落石破壞現象的邊坡其產生破壞的方式，與坡上岩塊掉落的可能性，故需要進一步做穩定性分析的工作。

本研究穩定性分析法是採用立體投影圖 (stereo net) 分析法 (Hoek & Bray ,1977) 。

3.3.1 立體投影分析法的適用性

立體投影圖較早期多被用於構造地質與結晶學上，後來亦逐漸被工程地質學上所採用，其用途可用於岩體分類法 (Biniawski,1974,1976) 、地下開挖工程 (Hoek & Brown,1980) 、及岩坡工程 (Hoek & Bray,1977) 。立體投影圖

之所以被廣泛採用，其原因是立體投影圖可以使複雜的不連續面問題變成迅速可行，使立體空間的問題簡化為兩度空間的平面問題，使複雜的岩坡穩定問題能迅速的加以評估。

Hoek & Bray (1977) 將岩坡的破壞型式分為四種破壞型式，分別為：平面形破壞、楔形破壞、翻覆形破壞、與圓弧形破壞（如圖十一）。

(1) 平面型破壞 (plane failure)：破壞的塊體沿一平面向下滑動產生破壞。

(2) 楔型破壞 (wedge failure)：破壞塊體受兩不連續面共同切割，呈一楔形狀，而沿兩不連續面的交線或其中一個平面向下滑動產生破壞。

(3) 翻覆型破壞 (toppling failure)：破壞塊體向坡外的方向翻覆掉落。

(4) 圓弧型破壞 (circular failure)：在岩坡發生的機率很小，僅出現於節理特別發達的地區，性質類似於均質的土壤，可用土壤力學的觀念和方法加以處理。即使採用立體投影圖法，不連續面的投影點（極點，pole）亦會呈現均勻分佈的狀態，無法找到較集中的地區。

上述四種岩坡的破壞型式，各有其外形上或不連續面組合方式上的特徵，表現在立體投影圖中，則其不連續面的投影點各

圖十一 .page35

有其不同的分佈型式。由投影點的分佈特徵，在投影圖上可以很快的判斷岩坡可能的破壞型式，並且進一步分析其安全係數。

其實，前人對於落石的定義與Hoek & Bray 區分破壞型式的區分觀點並不相同，故有不同的區別方式，而本研究採用Hoek & Bray 的分析方法，來探討落石的機制，有下列幾點理由：

(1) 本研究落石的定義是：基岩上的岩塊，脫離坡面直接掉落，或沿坡面滾落。故落石產生的第一要件是：是否有"獨立的岩塊"可供脫離坡面。這項要件取決於邊坡上不連續面的空間組合方式，若用立體投影圖分析方法，正可以分析出岩坡上的岩塊是否具有可能的破壞型式。

(2) 當岩坡上的不連續面的組合方式，已構成了可能的破壞型式時，並不代表這些岩塊一定會破壞，故需要有一方法來分析這些岩塊破壞的趨勢如何。而立體投影圖分析方法正是一個相當迅速而方便的分析方法。

(3) 在落石的定義中，落石的運動方式為"掉落" (fall)，但事實上，岩塊的運動方式並不是絕對單純的掉落。在岩塊脫離坡面的那一瞬間，事實上岩塊很可能是滑動而脫離原有位置，或向外翻覆而脫離坡面，故落石的運動方式在落石已脫離坡面之後，將是以掉落、滾落、滑落為運動方式，而在落石正形成的當時則是包含有滑動、翻覆等的運動方式。就落石生成到落至地面的整段過程而言，其運動仍是以掉落或滾落為主，並不違背以往的定義。

而本研究之目的在探討落石形成的原因，故將著眼重點放在岩塊即將或正要脫離邊坡的時刻，若岩塊已脫離坡面而向下運動，則此時已不是探討形成原因的時刻，而是與防治的探討較為有關了。而前面已經提到，岩塊脫離坡面的運動方式可能是滑動、翻覆、或直接掉落等方式，這些情況與Hoek & Bray的分析方法相當一致，故採用立體投影分析法是非常可行的。

3.3.2 可能破壞型式的判斷

根據Hoek & Bray(1977)的研究顯示：岩石邊坡上的岩體是否具有可能的破壞型式可導致岩塊的脫離坡面，決定於岩坡上不連續面的位態與坡面的位態，即兩者組成的空間關係。因此，判定岩坡是否有破壞型式可由投影圖中不連續面的分佈狀態來著手。一般採用的步驟有不連續面的分析與破壞型式的研究。

(1) 不連續面分析：不連續面分析指的是對邊坡上眾多的不連續面統計了解其集中的狀態。統計的方法是利用司密特等面積投影圖 (Schmidt equal area net)，利用下半球投影法將所有量得的不連續面投影至司密特投影圖上，找到一個或數個中心，這些中心點的位態即代表出現頻率最高的不連續面位態。這個步驟現都以電腦來進行。事實上，在野外調查不連續面位態時，即是用此方法判讀取得主要位態資料。

(2) 露出 (daylight) 的觀念：

理論上，一個完整、無限延伸的岩體，因其體積無限，是不可能形成破壞的。要產生體積有限的岩塊，並具有向下運動的驅動力（岩塊的重力在坡面上具有向下的分力），則必須有不連續面"露出"於坡面上。所謂"露出"指的是不連續面與邊坡有相同的傾向，且其與邊坡的交線會出現於坡面上。此"露出"的觀念很重要，因為不連續面"露出"雖然不一定代表邊坡必然發生破壞，但它卻是劃分力學原理上可能破壞的分界。若不連續面不露出 (no daylight) 時，理論上邊坡即不產生破壞，這些不連續面可不予考慮。也因此，當一個"不露出"的邊坡仍有破壞現象產生時，則產生這些破壞的機制已不是不連續面，而是另有原因了。

不連續面露出與否，可由"露出包絡圈" (daylight envelope) 加以研判。露出包絡圈的作法是先將坡面以大圓表示於投影圖上，然後在投影圖上找到與此大圓上任何一點相距90度的點的軌跡，這個橢圓形的軌跡即是露出包絡圈（如圖十二）。極點 (pole) 位於圈內的任何線或面都會露出於邊坡上，而相對

的，極點位於圈外的任何都不會露出於邊坡上，或雖露出於邊坡卻與邊坡呈反向傾斜。

除了露出包絡圈的方法，亦可由不連續面大圓的中點（dip vector）位置來判定（圖十三）。若不連續面的大圓中點落於坡面大圓與摩擦圓所圍成的範圍中則為"露出"，反之，若位於圈外則為不露出。

（3）破壞型式判定：

a. 平面破壞：將不連續面分析中所得的不連續面主要位態，與坡面的位態皆畫入投影圖中，若不連續面極點位於露出包絡圈中，則此不連續面有造成平面破壞的可能性（如圖十四）。

b. 楔型破壞：不連續面除了本身單獨存在時可能造成平面破壞之外，任何兩組不連續面還可以切割岩體成楔狀，而沿此兩平面的交線向下滑，故任何兩組不連續面的交線都應加以研判。若兩不連續面的交點落於露出包絡圈內，則有可能產生楔形破壞（如圖十五）。

c. 翻覆型破壞：翻覆型破壞是四種岩坡破壞中最難分析的一種，因為翻覆型破壞的力學方法是墜落，或墜落與滑落的混合體，而到目前為止，能夠分析的岩體移動問題只有滑動，對於墜落與流動還沒有有效的安全係數分析方法。雖然如此，翻覆型破壞是否發生仍可由不連續面分析中加以預估。一般認為，可能發

圖 12.13

圖 14

圖 15.16.page42

生翻覆破壞的露出範圍在與邊坡傾向夾20至30度內的不安定帶，即表示不連續面與邊坡有大致相同的傾向，且呈高角度傾斜，且其傾角與邊坡相反，這是構成翻覆型破壞的必要條件（如圖十六）。

d.圓弧型破壞：圓弧型破壞在岩坡發生的情況很少，僅出現於節理特別發達的破碎區域，由於其不連續面的特徵是非常密集且不具規則性，在投影圖中呈現極點很多且分佈很廣而均勻的現象。一般多以土壤力學的理論來處理圓弧型破壞的現象。

在判定出岩坡是否具有可能破壞型式之後，倘若岩坡不具有可能的破壞型式，則代表不連續面並不會造成岩坡的破壞，若真有破壞產生，則應是其它的原因所形成；若分析結果是岩坡具有可能的破壞型式，則代表不連續面的存在已使岩坡具有破壞的潛能，可使岩塊後續脫離墜落而形成落石，故其為落石的主要形成原因。不過，每個具有可能破壞型式的岩坡的穩定程度並不會相同，代表不同邊坡上的不連續面的影響程度有所差異，為了明白這個差異，需進一步進行穩定趨勢的分析工作。

3.3.3 穩定趨勢分析

在立體投影分析法中，可利用投影圖來表達力學上的數據，據以求得安全係數（safety factor）。安全係數的定義是：

$$S.F. = (\text{抗滑力}) / (\text{下滑力})$$

在不考慮不連續面凝聚力、外在作用力（水壓力、地震力等）的基本情況下：

$$\begin{aligned} S.F. &= (W \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi) / (W \cdot \sin \theta) \\ &= \tan \varphi / \tan \theta \end{aligned}$$

(φ : 不連續面間之摩擦角)

(θ : 坡面傾斜角度)

若考慮不連續面間的凝聚力時 :

$$\begin{aligned}\tan \varphi_a &= (R_f + R_c) / N \\ &= \tan \varphi + (C \cdot A) / (W \cdot \cos \theta)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}S.F. &= (W \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi_a) / (W \cdot \sin \theta) \\ &= (\tan \varphi / \tan \theta) + (C \cdot A) / (W \cdot \sin \theta)\end{aligned}$$

(C : 凝聚強度)

(A : 面積)

(φ_a : apparent friction angle)

若再考慮水壓力時 :

$$\begin{aligned}S.F. &= (W_e \cdot \cos n \cdot \tan \varphi_a) / (W_e \cdot \sin n) \\ &= (\tan \varphi_a) / (\tan n)\end{aligned}$$

(W_e : 有效總壓力)

(n : W_e 與垂直坡面方向的夾角)

由於確切的安全係數計算與坡面的水壓力與不連續面的凝聚力有關，但由於本研究的目的並不在於計算確切的安全係數，而是要了解在不連續面的控制之下，岩塊脫離坡面的趨勢如何，故在計算之時採用較簡單的一些假設，成爲一種較爲簡化的計算，所得結果也與確切的安全係數略有不同。也因如此，本研究步驟不稱爲"計算安全係數"，而稱爲"計算穩定趨勢"，是爲了做一區別。計算時的基本假設有下列數點：

(1) 不連續面間的凝聚力爲零。因爲在力學觀點上，認爲不連續面是完全切開岩體，所以岩體間的凝聚力已被破壞。同時由

野外的觀察發現，絕大部份的不連續面都沒有充填物，亦沒有再膠結的現象，所以將不連續面間的凝聚力視為零。

(2) 不連續面間的水壓力分為完全乾燥、飽和水位兩種臨界狀態來分析。水壓力的存在雖影響甚大，但水壓力會隨著氣候、降雨而改變極大，在野外調查期間，天氣晴朗，坡面乾燥，但在雨季之時坡面的水份又可能極多，故變化極大，難以取一定量，故在分析中將不連續面間的水壓力分為完全乾燥、飽和水位兩種臨界狀態，分別加以分析。由於真實的水壓力雖然變化極大，但一定會位於兩個臨界狀況之間，故真實的安全係數將會位於由兩臨界狀態分析所得的結果之間。

同時根據Hoek & Bray (1977) 認為平面型破壞中，邊坡為全排水時其安全係數約為飽和含水時的1.5倍；而在楔型破壞中，若採用"忽略不連續面間凝聚力與水壓力"的假設來分析，所得的安全係數將會偏高，約為實際狀況的二倍。故在本研究中，將乾燥邊坡的安全係數除以2，做為飽和含水（滿水位）時的安全係數。

(3) 摩擦角的大小。由於研究路線中出露的岩性皆是以砂岩為主、頁岩為輔，故只考慮砂岩與頁岩的摩擦角，做為計算時採用的摩擦角。根據 Ripley & Lee (1961) 實驗所得的砂岩的自然裂面的摩擦角在27至36度之間，頁岩的自然裂面摩擦角在24至35度之間，由此看來，砂、頁岩自然裂面的摩擦角相差並不大，且兩者的平均摩擦角都約為30度左右，故取30度為分析計算時的摩擦角。

要說明的是，由於上述的基本假設，所得的計算結果必然與確切的安全係數有所差異，但已足以比較出各個邊坡的岩塊穩定趨勢如何；即使上述的數據略有改變，也不致對於穩定趨勢的判斷有太大的影響。

穩定趨勢的計算方式因破壞型式的不同而有差異，其計算方式如下：

(1) 平面破壞：如圖十七a所示：

$$S.F. = (\tan \varphi) / (\tan n)$$

(2) 楔形破壞：如圖十七b所示：

$$S.F. = (\tan \varphi_i) / (\tan n)$$

3.4 內在因子的統計方法

此步驟是延續野外調查工作中所得的邊坡各項內在因子性質，以統計的方法來了解各項內在因子的影響程度。如此，不僅可以明白落石邊坡的各種內在性質多是位於什麼程度之內，同時可以進一步將其與全線邊坡的性質做一比較，將可明白各項內在因子與落石發生率的對應關係，得到各項內在因子對於產生落石的影響程度。

(圖 17)

第四章 研究結果

4.1 航照判釋結果

航空照片的判釋工作，是借用工研院能資所的航空照片完成。所使用的航空照片的航線與航號，如圖十八所示。

航空照片的過程，主要針對研究區域的交通狀況、地形條件等做一了解，並做航照線形的判釋，以便對全區的主要構造線型態與分佈有一概略性了解。線型判釋所得到的研究區域線型分佈圖如圖十九所示，再經由線形方位的量測與線形玫瑰圖的投影後，可得到研究區域線型玫瑰圖，如圖二十所示。

由線型判釋的結果中顯示：整個研究區域中的線型以東南-西北方向者最多，而北偏西50~70度者為次之；前者似與研究區域中褶皺軸的大架構方向相近，而後者又以同富山山脈至以西的地區最為明顯，似與此區的數個斜滑移斷層走向相近。而以最接近研究路線的區域（圖十四中的69,71,216,357四個區域）來看，則除了東北~西南方向的線型之外，尚有一組近乎東西方向或北偏西70~90度的線形，與靠近此區的斜滑移斷層的走向極為接近，應與其有關。

4.2 野外調查結果

野外調查的路線全長約為四十公里，調查的內容主要可以分為：現地的破壞情形、地質狀況、與地形條件三方面。

4.2.1 現地破壞情形

(圖 18)

(圖 19)

(圖 20)

由野外調查中發現研究路線中的裸露邊坡有115處，這115個邊坡包含有裸岩邊坡（有基岩（bed rock）出露）與由崩積物質或風化物質堆積而成的崩積層邊坡，其中，裸岩邊坡有66個，由崩積物質所組成或覆蓋的邊坡有49個。這些裸露邊坡經過現地的觀察後，發現其絕大部份都具有或多或少的邊坡破壞的現象，這些破壞型式有：落石、岩屑滑落、土石崩落、與崩積層的圓弧形破壞等型式，以及上述幾種破壞型式的複合型。

其中，屬於落石破壞型式（包括含有落石破壞的複合型式）的邊坡計有五十一個。這五十一個落石邊坡的分佈廣佈於全線，只有在石山－塔塔加遊客中心段較少出現，其原因為此段的公路極為接近鹿林山山脈稜線，邊坡高度比較小，且崩積層在此路段的分佈較廣，大部份的邊坡破壞型式以土石崩落與圓弧形破壞為主。

其中，有部份邊坡上殘留有許多的大小岩塊於坡面上，這一類破壞邊坡的性質與日本學者所提出的拔落型落石中的崖錐堆積物（參看圖一）相當類似，但也與土石崩落的型式很接近，其再次產生破壞的原因為：坡上細粒的砂土經風、雨的侵蝕而流失，或受到外力（如地震）的震動，而使這些岩塊沿坡面滾落；與岩層中岩塊掉落的方式截然不同，故在本研究中仍將其列為土石崩落的破壞型式。

上述數種破壞型式的破壞特徵分別為：

（1）落石：本路線最常見的崩塌型式，是岩層中的岩塊其支撐點受到風化作用或外來震動的破壞，而產生岩塊直接的掉落或跳落，岩塊的大小可由小至數公分至數公尺直徑的大塊岩石。

（2）岩屑滑落：岩體受到風化侵蝕作用形成碎屑狀岩屑而滑落。

（3）土石崩落：在表土風化層中相當容易發生的一種土壤、岩塊、崩積物等大小不一的物質，因荷重、失去支撐而滾落坡面。

(4) 圓弧型破壞：發生在軟弱的岩層、土壤或崩積層中，因其破壞面幾何形狀成一圓弧型，故以為名。

各個破壞邊坡的分佈狀況參看圖二十一之破壞邊坡位置分佈圖。同時為了求得野外調查時的精確位置，玉山國家公園管理處提供了"全球定位系統"(GPS)儀器做為協助精確位置調查之用，研究路線中各主要里程數的精確位置詳見表十一。

在野外調查施行時，亦針對落石邊坡的落石狀況，調查其邊坡上的岩塊是否有突懸(overhang)，落石掉落時的路徑是否會產生散射。因為岩塊的突懸與否、落石的路徑與災害的防治有關，可做為未來防治災害時的參考。有關落石邊坡的詳細破壞情形，詳見表十二之現地破壞情形部份。

同時，為了明瞭野外調查所得的破壞邊坡在過去以來的破壞次數與破壞紀錄，本研究搜集整理了省公路局在過去數年中的研究路線邊坡破壞與土石方清除紀錄，做為邊坡破壞情況的參考，其結果如附錄一所示。其中，臺十八號公路的資料摘自高申錡(1994)所整理的資料，臺二十一號公路的部份則直接整理自省公路局第七工務段所提供的資料。而由於這些資料只記錄了土石方清除量，由資料中並無法分別出各邊坡的破壞型式。

4.2.2 地質資料方面

地質資料的蒐集是採用路線地質調查的方法，所得結果繪成路線地質圖(如圖二十二)。

(1) 岩性方面

(圖 21)

(表 11)

(圖 22)

整個研究路線中所出露的岩層皆為中新世的南莊層。南莊層的分佈區域包括有和社背斜的東翼及同富山向斜的兩翼，以及和社背斜東南傾沒的部份。

南莊層的岩性主要為淡灰至青灰色緻密細粒砂岩與灰色至深灰色頁岩所組成的互層，各層厚薄不一，砂岩的含量一般多於頁岩，在公路的上邊坡所出露的現象有：層狀砂岩、層狀砂岩偶夾薄層頁岩、薄層砂頁岩互層等三種。砂岩層的厚度自數公分至十數公尺不等，在台二十一號公路148公里處砂岩層的厚度達到最大，有十數公尺厚。砂岩中厚數公分至十數公分者，常具有紋層構造（laminated structure），且此深黑色紋層多由碳物質組成。在薄層砂頁岩互層的地方，亦可見到薄互層在一公分以下而形成帶狀構造（banded structure）。

（2）構造方面

研究區域主要位於和社背斜東翼與同富山向斜的兩翼部份，和社背斜軸呈北北東走向，同富山向斜呈南北走向，皆為較寬廣而緩和的褶皺構造。其中，同富山向斜於台二十一號公路150公里附近切過公路面，故研究路線在台二十一號公路的部份都在同富山向斜的軸部—東翼的部份蜿蜒而行，台十八號公路則屬於同富山向斜西翼至和社背斜東翼的部份。由於此二個褶皺構造位於台灣中部麓山帶構造區最東緣，東側受陳有蘭溪斷層的推擠，故岩層受到擠壓而產生的變形與破碎相當嚴重，呈現出頻繁的褶皺與破裂。

在公路沿線的上邊坡所出現的構造現象，以中視規模（mesoscope）下的褶皺、斷層、不連續面為最多。中視規模的構造現象，指的是由手掌大小的標本（hand specimen）至整個露頭範圍尺度內的構造現象（Spencer, 1968）。中視規模下的構造現象在研究路線中的分佈非常廣範而且密集，除了由崩積物所堆成的邊坡見不到露頭之外，所有的裸岩邊坡都有中視構造現象的存在。

主要的中視褶皺的位置有：台十八號公路的83.5k、85.0k、87.5k、90.0k、92.2k，台二十一號公路的144.4k、132.6k、130.5k、127.8k等處。其中，85.0k、87.5k、132.6k、130.5k、127.8k等位置，都是一系列緊密而連續的中視褶皺（照片三、照片四），此現象與當地岩性為薄層砂頁岩互層有很大的關連。上述這些中視褶皺的露頭岩層厚度都不大，多在數公分至數十公分的範圍內，故所見到的褶皺現象都是波長小而緊密的尖頂褶皺。這些褶皺的褶皺軸延伸方向多在北偏東30度至北偏西20度的範圍中，與研究區域中和社背斜、同富山向斜等大架構的褶皺軸方向相當一致。

主要的斷層的位置有：台十八號公路的85k、87.5k、台二十一號公路的148k、146.7k、139.9k、139k、138.5k等處。其中，85k與87.5k處的斷層皆與中視褶皺同時出現，有明顯斷層泥，由露頭觀察判斷，應是褶皺發生時為了調整材料的空間而產生的斷裂；148k處的斷層面為北偏西70度，向西傾斜60度，且規模不大；146.7k處的斷層面為北偏西20度，向東傾斜60度，是一正斷層；139.9k處的斷層面為北偏西54度，向西傾斜64度，具有五公分厚的斷層泥，且有明顯擦痕，由斷面的拖曳現象可看出具有正斷層的分量，再由擦痕的方向可判斷其為一斜滑移斷層，且在斷層兩側與斷層同位態的破裂面相當多，為一明顯的錯動帶（照片五）；139k處的斷層面為東西向，向北傾斜40度，由拖曳現象亦可看出具有正斷層的分量。由於研究路線內的南莊層的岩性相當接近，對比不易，故難以估計這些斷層的落差規模。

配合前人所調查的地質資料，發現兒玉斷層的最東側末端位置相當接近於台二十一號公路149k附近，但在野外詳細的露頭觀察中並沒有發現斷層的存在，推測兒玉斷層並沒有切過公路面，其延伸最遠處只達公路的西側；另在139.9k處的大迴頭彎的北端，另發現一具有明顯擦痕的斷層，由擦痕可以看出此斷層具有左移的斜滑運動，加上與其相鄰數十公尺的斷層亦為一斜滑移斷

層，且附近岩層錯動明顯，由於此位置與十八折坑斷層的位置相當接近，推測應為十八折坑斷層或其附近的錯動帶。

在中視構造中分佈最廣的是不連續面（照片六、照片七），在所有的裸岩邊坡中都有存在，其種類主要有：層面、節理面（破裂面）、斷層面三種，由於斷層面只出現於有斷層出露的位置，故前兩者的數量遠多於斷層面。其中在節理面的部份又分為大地構造運動所造成的節理面、道路開挖或河谷切蝕所形成的解壓節理、道路開挖工程中炸山所產生的放射狀破裂面，三者之中，大地構造運動所產生的節理面最為發達，數量最多，影響也最大。要說明的是，由現地觀察發現在節理面中，由大地構造運動所形成的節理面，其數目遠遠大於解壓節理面或爆炸破裂面，故在投影後所顯示的主要位態已看不出後二者的存在。故由等密度投影圖中所判讀出之主要位態，可以說全部都是因大地構造運動所形成的節理面的位態。

在野外調查時，除了對全線的地質狀況做詳細調查，以求了解全線的地質狀況，並針對具有落石破壞現象的邊坡，做各項有關的地質因子的詳細記錄，以求明白各個落石邊坡的地質情況，並進一步探討可能造成落石的原因。這些詳細計錄的因子包括有：岩石種類、砂頁岩比例、岩層厚度、層態、中視構造現象、風化程度等，結果詳見附表十三。

（3）不連續面的詳細性質

由於岩體的破裂是因為不連續面的切割所造成，故不連續面的各項性質極可能也是影響岩坡安定性的原因之一，故野外調查時將不連續面的各項性質詳細記錄並予以分級，所得結果詳見表十四。同時由於解壓節理、炸孔破裂面兩者與大地構造運動產生的節理的成因完全不同，特性也不相同，故在表中分開加以說明。

（4）解壓節理的特性

在現地觀察具有落石破壞現象的五十一個邊坡中，有二十個邊坡有解壓節理的存在（照片八、照片九），經過詳細的觀察，發現這些解壓節理都具有下列的性質：

（a）與坡面平行或接近平行，傾向和坡面相同。

（b）傾角很大，都在75度-90度之間。

（c）內寬（opening）很大，多在數公分至十數公分的範圍，屬於”很寬”的等級。

由於這些解壓節理的位態皆平行或接近平行於開挖坡面或路面，而實際上，大部份的公路是沿著河谷的方向修築的，因此這些解壓節理應都為河流下切時所產生的河谷解壓節理，或是公路修築時開挖山壁所造成的解壓節理。

（5）爆炸破裂面的性質

在五十一個落石邊坡中，有十七個邊坡上可以見到殘留的而明顯的炸孔與放射狀的破裂面，由現地的觀察，發現這些放射狀破裂面具有下列的特徵（照片十）：

（a）延續性不佳，在很低（ $< 1\text{m}$ ）-低（ $1-3\text{m}$ ）的等級中。

（b）密度極高，且愈接近炸孔中心，岩體受擾動而產生位移的情況愈明顯，破裂面密度也愈大。

（c）位態沒有一致性，靠近外圍的破裂面呈放射狀，而接近炸孔中心的破裂面則非常不規則。

4.2.3 地形資料方面

在地形方面，針對產生落石的邊坡，調查坡面的走向、邊坡坡度、邊坡坡面的傾向、邊坡外形、邊坡型式、邊坡的規模（長度×高度）等地形資料，一一做記錄，所得結果見表十二中的地形資料部份。

4.3 穩定性分析結果

在野外調查工作完成之後，爲了明白各個落石邊坡上受不連續面所切割而形成的岩塊，其掉落的可能性或趨勢爲何，故施行穩定性分析的工作。穩定性分析時所採用的不連續面資料，是根據野外調查時所量測的不連續面位態資料，加以做等密度投影之後，所研判出的不連續面主要位態。

在以Hoek and Bray (1977) 所提出的投影分析方法來分析各個落石邊坡岩塊的穩定性之後，將所得的穩定趨勢列於表十二之中。同時將各個邊坡的穩定趨勢加以統計，其結果如下頁圖二十三所示。由結果中，可將全線各落石邊坡的穩定趨勢區分爲三個範圍：

(1) $0 < S.F. < \text{或} = 1$ 。有28個落石邊坡位於這個範圍中。由於其穩定趨勢是小於1或很接近1，可見不連續面所切割而成的岩塊，在與開挖面所形成的空間關係中，其向下滑動的趨勢非常大，即岩塊向下滑動的分力已大於摩擦力。由於岩塊向下滑動的分力與其滑動面的傾角有關，而滑動面又由不連續面位態、以及開挖面位態，整體的空間組合方式所控制，在這種情形之下，

(圖 23)

不連續面的空間關係（即不連續面的位態）是造成落石的主要原因。這些邊坡的分佈位置由其以台二十一號公路127k-140k路段最爲明顯集中。

（2） $1 < S.F. < 4$ 。有12個邊坡位於這個範圍。這個範圍內的邊坡的穩定趨勢雖然大於1，但是由於分析時所採用的資料有所限制，若考慮下列二個原因，則這些邊坡仍相當危險：

a. 不連續面的位態是經由等密度投影之後所研判出來的主要位態，其具有統計上的多數意義，但仍有少數不連續面的位態是較不規則性的，而不在統計出的位態之列。若這些少數而不規則的不連續面位態位於露出包絡圈之內，亦會產生破壞。不過，由於這些不規則的不連續面而產生破壞的岩塊應該不多，因爲這些不連續面本來就是少數。

b. 在雨季來臨時，荷重的增加、摩擦力的減少、坡面中地下水出現，都會使得安全係數大爲降低，而生破壞。

因此，整個來說，這個範圍內的落石邊坡在天氣晴朗而坡面乾燥時，其產生落石的趨勢比第一個等級的邊坡要來的小，且落石的數量亦較少。但在雨季之時，非常可能因爲大量的雨水而產生落石。

（3） $S.F. > 4$ 或No Daylight。這個範圍內的邊坡有11個。由於安全係數遠大於1，甚至不連續面沒有位於露出包絡圈中，表示這些邊坡中岩塊下滑的分力是遠小於摩擦力，甚或下滑的分力是朝向坡內的，這種情況下，不連續面恐已不是造成岩塊脫離原有坡面的主要原因。再經由現地的研判，發現其它最有可能造成落石的原因，將是差異侵蝕作用與解壓節理的存在，詳細的原因討論，將在第五章中說明。

4.4 內在因子的統計結果

在本研究中，將內在因子分爲地質因子與地形因子兩大方面。一般認爲，邊坡的組成物質、組成狀況、地質構造、地形等

因素，皆會影響塊體運動（包括落石）的穩定性（梁、1978；洪、1979；潘、1986；黃、1989）。在野外工作施行之時，即針對地質、地形方面的各項因素加以分別調查，並予以分級，並在回到室內之後加以統計各項因素性質的等級狀況。施以統計的因子在地質方面有：岩性比例、風化程度、邊坡上不連續面的組數、不連續面的間距、不連續面的持續性、不連續面的內寬、不連續面中的充填物、不連續面滲水情況、不連續面密度與岩塊幾何形狀等九項；在地形方面的因子有：邊坡坡度、邊坡傾向、邊坡外形、及邊坡型式等四項。統計之結果除可用以明白本研究區域之地質、地形各項因素性質趨勢外，並作為探討落石形成原因的基本資料。

統計的樣本分為兩部份，一部份是落石邊坡的性質，由其統計中可以看出研究路線中的落石邊坡所具有的特性；另一部份是研究路線中所有裸岩（有岩層出露）邊坡的特性，將之與前一項相比較，即可得知各項因子中各個等級產生落石的比例。

例如：

屬於某因子某等級的落石邊坡數目

屬於某因子某等級的裸岩邊坡數目

= 某因子某等級產生落石的比例

= 某因子某等級的落石發生率

在此先討論所有落石邊坡的內在因子的統計結果，而各因子中的產生落石的比例留待第五章中再詳細討論。

4.4.1 地質因子的統計結果

（1）在岩性比例方面：由野外調查得知，研究路線中所出露的地層全為南莊層，岩性全為砂岩與頁岩，但砂頁岩組合而成的狀態與比例會有變化。故可將邊坡上砂岩與頁岩出現的比例平均區分為十等分。由結果顯示：絕大部份的落石邊坡的岩性砂岩都

佔有50%以上，其中又以砂岩佔90-100%者為最多（見圖二十四）。

（2）風化程度方面：由統計之結果（見圖二十五）顯示：風化程度屬於1級（新鮮至極微風化）者有18個，屬於2級（微風化）者有27個，屬於三級（中度風化）者有6個。在屬於中度風化的邊坡中，由於已有部份的岩石分解為土壤，這些被風化分解的露頭的母岩皆為頁岩，在此情況下，明顯的差異侵蝕已經產生，將會造成被侵蝕的頁岩上方砂岩岩塊因失去支撐而落下。

（3）不連續面組數：依照 ISRM（1981）所建議，組數之分級可以分為9級。將各邊坡的組數等級出現的頻率做一統計時，得到的結果如圖二十六，結果中組數多位於5~8級的程度，顯示組數皆相當高，可見各個落石邊坡的岩層皆相當破碎。

（4）不連續面的間距：野外調查所得的間距，再依 ISRM（1981）所建議之分級標準分為七級，再依各等級出現的次數統計，結果如圖二十七。由結果顯示有86%的邊坡的間距分級位於3-4（6cm~60cm）的範圍內，屬密-中密的程度。

（5）不連續面的持續性：由統計結果（圖二十八）中顯示：不連續面的持續性屬於等級"很低"（<1m）者有30%，屬於等級"低"（1-3m）者有56%，屬於等級"中度"（3-10m）者有16%，其餘等級皆沒有出現。可見全線不連續面的持續性並不佳，其原因是全線出露的岩層是砂頁岩互層，層理極多，且破裂面組數也極多，應力的傳遞會因已存在的不連續面而中斷，故持續性較差。

（6）不連續面的內寬：由統計的結果顯示（圖二十九），各有五分之一的落石邊坡的內寬分級在<0.5mm與2.5~10mm之間，有44%在0.5~2.5mm，為最多見者；另有14%>10mm，可見全線

的不連續面內寬大多不是緊閉狀態。由於不連續面多具有開口，則岩塊的周圍具有容許位移的空間，更易於鬆動而脫離原有位置，產生落石。其中，內寬較大（ $>10\text{mm}$ ）的邊坡多是因為解壓節理的存在。

（7）不連續面密度與岩塊幾何形狀的統計結果：由圖三十中的統計結果顯示，研究路線中的落石邊坡的不連續面密度，若以 J_v （單位體積中的節理數）來表示的話，以六級者為最多，佔36%；五級、四級為次之，各佔20%；三級、一級各依序次之，分佔14%、10%；而二級者則沒有。

由不連續面密度與岩塊大小的對應關係來看，顯示研究路線中落石岩塊的體積大多不大，屬於粉碎岩石至小岩塊的範圍內的邊坡共有76%，相對的落石岩塊的數目就相當多。故研究路線中屬於體積小但數量龐大的落石是本路段的主要落石型態，這與研究區域中的構造現象頻繁導致岩體的破碎有很大的關連。

（8）不連續面中的充填物：研究路線中落石邊坡的不連續面中絕大部份都沒有充填物的存在，只有在少數邊坡的某些位置上可見到有石英的充填，且厚度皆不大；故在整個邊坡上隨機取樣的統計結果中，所有邊坡的不連續面充填性，都以沒有充填物的存在為主。

（9）不連續面滲水情況：不連續面的滲水狀況，一般受氣候降雨的影響頗大，在野外調查期間，都以天氣晴朗之時為工作的時間，所觀察的邊坡的不連續面滲水狀況，都屬於乾燥而沒有滲水的情形，也就是分級中的第一級。也就是說，所有邊坡的滲水性質在統計結果中都沒有差異，無法做一區別。

要說明的是，不連續面滲水的狀況受氣候降雨的影響非常大，一旦雨季來臨時，平時乾燥的邊坡可能滲水極明顯。因此，這項性質應是外在因子與內在因子的共同效應，在氣候季節的影

響下，也較難以明確的定量化。但實際上，許多落石都是在豪雨之後產生的，也就是說滲水對於落石的影響相當大，若在分析時不考慮水壓力的存在，恐怕分析的結果會與實際的情況有一段差距。因此，雖然野外調查的結果是沒有滲水，在穩定性分析時仍將水壓力列入考慮，並採用滿水位的臨界狀況做為考慮的內容。

4.4.2 地形因子的統計結果

(1) 坡角方面：經由野外調查的結果，將邊坡的坡角依十度一個等級分成九個等級，並統計各個等級中邊坡的個數，所得到的結果如圖三十一所示。由圖中顯示，具有落石破壞現象的邊坡，其坡角以60~69度的等級為最多，約佔30%；50~59度及70~79度的等級次之；40~49度及80~90度又次之。整個圖形呈鐘形分佈。

(2) 在坡面傾向方面：將野外量得的邊坡傾向，依每45度為一個區間，劃分為八個區間，並統計傾向位於各區間的邊坡數目，得到的結果如圖三十二所示。由結果顯示，大部份的落石邊坡的坡向多位於W~N~E的範圍之內（86%）。但這並不是表示傾向為ES、S、WS的邊坡就不容易發生落石，而是因為新中橫公路在開發之時，即是沿著河谷或稜線的方向進行，在地形因素的控制之下，才導致上述的結果。由於這項結果並不能表達落石與坡面傾向的關係，故也不再進一步統計其落石發生率。

(3) 在邊坡外形方面：在野外觀察具有落石現象的邊坡，由於坡面會隨著公路的轉彎而彎曲，故同一個落石邊坡會具有多個外形，此時須將屬於單一個外形的邊坡獨立出來，才能計算坡形的趨勢。統計的結果如圖三十三。

由結果顯示：在將每一個單一外形的邊坡區分出來之後，共得到73個坡形的資料。其中以平平坡形者為最多（佔40%），凸

平坡形（21%）與凹平坡形（16%）是出現個數次之的兩種外形。

（4）在邊坡型式方面：由野外調查結果顯示：屬於順向坡者有9個，屬於斜交坡者有24個，屬於逆向坡者有14個（如圖三十四）。

表十二 研究路線落石邊坡地形資料、現地破壞情形、分析結果與形成機制說明

編號	坡面走向	邊坡角度	坡面傾向	邊坡外形	邊坡型式	邊坡大小 (長×高)	突懸性質 (註一)	運動路徑 是否散射	落石顆粒 大小
02	N74W	52	N	凹凹坡形	逆向坡	10×10	無或極少	否	岩塊小
03	N70W	44	N	凸凸坡形 凸平坡形	斜交坡	50×20	少部份	是	岩塊中等
06	N24E	62	ES	平平坡形	-----	15×12	少部份	否	岩塊小
08	N58E	44	NW	平平坡形	順向坡	50×30	少部份	否	粉碎岩石
09	N32E	45	NE	平平坡形	斜交坡	35×20	少部份	否	岩塊小
11	N20E	46	E	平平坡形	順向坡	50×10	無或極少	否	岩塊中等
12	N22E	56	E	平平坡形 凹凹坡形	順向坡	70×20	無或極少	否	岩塊很小
13	N20W	40	E	平平坡形	斜交坡	60×40	少部份	否	岩塊中等
14	N45W	75	NE	凸凸坡形	-----	50×25	相當明顯	是	岩塊中等
15	N45W	60	NE	平平坡形 凸凸坡形	逆向坡- 斜交坡	30×10	相當明顯	是	岩塊中等
16	N75W	60	N	平平坡形	斜交坡	100×20	少部份	否	岩塊大
20	N20E	60	W	平平坡形 凹平坡形 凸平坡形	逆向坡	50×10	相當明顯	是	岩塊小
22	N50E	50	NW	平平坡形	逆向坡	40×25	相當明顯	否	岩塊中等
24	N22W	60	W	平平坡形 凸平坡形	逆向坡	70×10	相當明顯	是	岩塊小
25	N35E	80	NW	平平坡形	斜交坡	90×30	少部份	否	岩塊很小
26	NS	50	W	平平坡形 平凹坡形	斜交坡	40×40	少部份	否	岩塊很小
27	N20W	70	W	凸平坡形	逆向坡	70×20	少部份	是	岩塊很小
29	N10W	50	E	平平坡形	斜交坡	20×8	無或極少	否	岩塊小

34	N25W	56	NE	凸平坡形	斜交坡	30×15	無或極少	是	岩塊很小
38	N40E	50	NW	平凹坡形 凸平坡形	逆向坡	100×20	少部份	是	岩塊中等
40	N54W	66	NE	平平坡形	斜交坡	50×20	相當明顯	否	岩塊中等
41	N18E	60	E	平平坡形 平凸坡形	順向坡	200×25	相當明顯	否	岩塊中等
43	NS	45	W	凹平坡形 凸平坡形	逆向坡	50×15	無或極少	是	岩塊中等
45	N20W	52	E	平平坡形	順向坡	160×8	無或極少	否	岩塊小
55	N20W	64	W	凸平坡形	斜交坡	100×10	無或極少	是	岩塊中等
59	N10W	50	W	凸平坡形	斜交坡	50×10	無或極少	是	岩塊小
62	N20E- N20W	70	W	平凹坡形 平凸坡形	斜交坡	140×20	少部份	否	岩塊中等
63	NS-N70E	60	W-NW	凹凹坡形 平凹坡形	逆向坡	100×25	少部份	否	岩塊很小
64	N22E	60	W	凹凹坡形 平平坡形	斜交坡	100×40	相當明顯	否	岩塊小
65	N24E	80	NW	平平坡形	順向坡	100×20	相當明顯	否	岩塊小
66	N10W	80	W	平平坡形	斜交坡	300×20	無或極少	否	岩塊中等
67	N28W	80	NW	凹凹坡形	斜交坡	100×50	相當明顯	否	岩塊中等
68	N20E	80	W	平平坡形	逆向坡	120×20	少部份	否	岩塊小
70	N20E-EW	70	NW-N	凸凸坡形	斜交坡	85×20	無或極少	是	岩塊小
71	N40E	70	NW	平平坡形	逆向坡	×30	相當明顯	否	粉碎岩石
73	N30W- N60E	80	W-NW	凹平坡形 凸平坡形	斜交坡	300×30	相當明顯	是	岩塊小
77	N34W	68	NE	凹平坡形	斜交坡	50×20	無或極少	否	岩塊中等
79	EW	70	N	平平坡形 凹平坡形	逆向坡	100×15	少部份	否	粉碎岩石
83	N40W	70	NE	凹平坡形	斜交坡	30×10	無或極少	是	岩塊中等

				凸平坡形					
89	EW-N50E	80	N-NW	凹平坡形 凸平坡形	逆向坡	100×20	少部份	是	岩塊小
93	NS-N10E	60	W	平平坡形	斜交坡	1000×70	少部份	否	粉碎岩石
97	EW	80	N	平平坡形	斜交坡	100×25	少部份	否	岩塊小
98	N80W	70	N	平平坡形	逆向坡	350×20	少部份	否	岩塊中等
99	N40E	75	ES	凸平坡形	順向坡	40×20	無或極少	否	岩塊很小
104	EW	60	N	凹平坡形	斜交坡	50×20	無或極少	否	岩塊中等
106	N80W	80	N	凹平坡形 凸平坡形	斜交坡	80×20	無或極少	是	岩塊很小
107	N45E	60	ES	凹平坡形 平平坡形	順向坡	75×15	相當明顯	否	岩塊很小
109	N70E	65	S	平平坡形	順向坡	100×30	相當明顯	否	岩塊中等
111	EW-NS	75	S-E	平凹坡形 凸平坡形	逆向坡	200×80	少部份	是	粉碎岩石
112	N45W	70	NE	凹平坡形 凸平坡形	斜交坡	500×50	少部份	是	岩塊小
115	EW	80	N	凹凹坡形 平平坡形	斜交坡	50×30	相當明顯	否	岩塊小

註一：突懸性質由野外現地觀察，可以分為三級：無或極少、少部份岩塊突懸、突懸相當明顯。

註二：穩定性分析結果中，P代表是平面形破壞；W代表是楔型破壞。

註三：形成機制說明中：1 代表是因大地構造運動所產生的不連續面的作用。

2 代表是解壓節理的作用。

3 代表是差異侵蝕的作用。

4 代表是炸孔與爆炸破裂面的作用。

表十三 研究路線之落石邊坡地質資料

編號	里程位置	岩性	砂頁岩比例	層態	岩層厚度	中視構造現象
02	83.5k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	8:2	N52W,40S	ss:20-30cm sh:5-10cm	節理面
03	83.55k	層狀砂岩	10:0	-----	ss:50-150cm	偃臥褶皺
06	83.8k	層狀砂岩	10:0	-----	ss:50-150cm	節理面
08	84.4k	厚層砂岩	9:1	N18E,66W	ss:50-200cm	節理面
09	84.5k	薄層砂頁岩互層	5:5	N70E,30N	ss:5-30cm	小斷層 節理面
11	84.694k	厚層砂岩	10:0	N28E,16E	ss:50-100cm	節理面
12	84.8k	薄層砂頁岩互層	6:4	N50E,40W	ss:10-30cm sh:5-10cm	一系列小斷層 節理面
13	84.98k	厚層砂岩	10:0	N40E,70E	ss:80-150cm	節理面
14	85k	層狀砂岩	9:1	-----	ss:30-60cm sh;10cm	尖頂褶皺 斷層 節理面
15	85,15k	厚層砂岩,偶夾薄層頁岩	8:2	N30E,40E	ss:30-300cm	尖頂褶皺 斷層 節理面
16	85.6k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	-----	ss:10-70cm	尖頂褶皺 節理面
20	86.4k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N50E,20S	10-50cm	節理面
22	86.8k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N70E,20S	50-100cm	節理面
24	87.3k	薄層砂頁岩互層	7:3	N28E,38E	10-50cm	小斷層 節理面
25	87.36k	砂頁岩互層	5:5	-----	10-40cm	尖頂褶皺 斷層 節理面
26	87.6k	砂頁岩互層	6:4	EW,15S	10-50cm	節理面
27	87.8k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N15E,16E	5-50cm	斷層 節理面
29	88.6k	砂頁岩互層	7:3	N60E,38E	5-50cm	節理面
34	89.6k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N34E,40W	30-40cm	節理面
38	90.2k	厚層砂岩	10:0	-----	30-50cm	節理面
40	90.45k	薄層砂頁岩互層	7:3	N34E,44E	6-30cm	小斷層 節理面

41	90.5k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N36E,44E	40-150cm	節理面
43	91k	砂頁岩互層	7:3	N10E,30E	10-100cm	節理面
45	91.5k	層狀砂岩	10:0	N12E,42E	20-30cm	節理面
55	95.1k	砂頁岩互層	8:2	EW,34N	40-60cm	節理面
59	150k	砂頁岩互層	8:2	N60E,22W	20-50cm	節理面
62	148.8k	厚層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N34W,14W	50-180cm	節理面
63	148.7k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N50E,18E	10-40cm	節理面
64	148.45k	極厚層砂岩	10:0	N54W,12W	50-400cm	節理面
65	148.3k	砂頁岩互層	6:4	N20W,12W	20-60cm	節理面
66	147.9k	砂頁岩互層	9:1	N50W,18W	ss:50-150cm sh:10cm	斷層 節理面
67	147.7k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N60E,22E	ss:20-200cm sh:20cm	節理面
68	147.37k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N60E,26E	ss:30-120cm sh:10-20cm	小斷層 節理面
70	147.2k	砂頁岩互層	6:4	N70E,20S	ss:10-100cm sh:5-10cm	節理面
71	146.75k	砂頁岩互層	7:3	N48E,24S	ss:30-40cm sh:10cm	小斷層 節理面
73	146.1k	砂頁岩互層	7:3	N34E,14E	ss:30-150cm sh:15-30	節理面
77	145.3k	砂頁岩互層	6:4	N50E,58W	ss:30-80cm sh:20-30cm	節理面
79	144.8k	砂頁岩互層	8:2	N58E,16E	ss:20-30 or 120-150cm sh:10-20cm	節理面
83	144k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N56E,36E	ss:30-100cm sh:10cm	節理面
89	141.7k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	EW,20S	ss:30-100cm sh:15cm	節理面
93	139.9k	砂頁岩互層 +厚層砂岩	7:3	N60W,18S	ss:5-150cm sh:5-15cm	正斷層 節理面
97	138.45k	砂頁岩互層	8:2	N10E,24W	ss:40-150cm sh:20cm	斷層 節理面
98	138k	層狀砂岩,偶夾薄層頁岩	9:1	N64W,12S	ss:50-150cm sh:15-20cm	節理面

99	136.9k	層狀砂岩	10 : 0	N44E, 20E	ss:50-200cm	節理面
104	134.4k	砂頁岩互層	7:3	N40E, 70E	ss:10-100cm sh:5-10cm	節理面
106	132.6k	薄層砂頁岩互層	5:5	-----	5-20cm	一系列緊密褶皺 節理面
107	132.5	厚層砂岩	10:0	-----	ss:100cm	節理面
109	132k	厚層砂岩	9:1	N40E, 60E	ss:40-100cm	節理面
111	131.5k	砂頁岩互層	5:5	-----	-----	一系列緊密褶皺 正斷層 節理面
112	130.1k	砂頁岩互層	5:5	N30E, 60E	ss:10-80cm sh:10-15cm	尖角褶皺 節理面
115	127.8k	砂頁岩互層	7:3		ss:20-100cm sh:10-20cm	一系列緊密褶皺 節理面

(圖 24)

第五章 討論

5.1 落石形成原因的提出

在完成穩定性分析工作之後，了解各個邊坡中不連續面對於破壞的影響，再配合全線詳細的地質、地形各因子的調查與統計分析，認為研究路線中形成落石的內在原因有下列：

(1) 有近80% 的落石邊坡，根據其坡面上所具有的大地構造運動所產生的不連續面所分析的結果，顯示這些邊坡都具有可能的破壞型式 (daylight)，且其中有55% 的邊坡的穩定趨勢是小於一或極接近一，顯示邊坡上這些不連續面的空間組合方式，不僅使得邊坡具有可能的破壞型式，也使得邊坡上岩塊掉落的趨勢非常大，相當的不穩定 (照片十一、照片十二)。

由於上述這些不連續面都是由於大地構造運動所產生的，顯示構造運動對於本區域的落石的形成影響極大；同時，將野外調查所得的落石崩塌位置與路線地質圖中的構造線 (褶皺軸、斷層線) 位置相對比，發現幾乎所有的構造線位置都有落石的產生，更印證了落石與構造線的密切關係。

除了上述所提的邊坡之外，尚有其它邊坡的不連續面的組合並不具有可能的破壞型式 (no daylight)，或者是雖具有可能的破壞型式，但其穩定趨勢卻是遠遠大於一；這些邊坡上的不連續面對其落石的產生所具有的影響相當的小，因此必定有其它的形成機制來主導落石的產生。經過現地的詳細調查，發現尚有下例數種原因會造成本研究路線落石的發生。

(2) 有40% 的落石邊坡具有解壓節理的存在。經由現地的觀察中發現，這些解壓節理都具有下列性質：

- a. 解壓節理的走向與坡面平行或接近平行。
- b. 傾角很大，多在75至90度之間。

c. 內寬很大，多在數公分至十數公分的範圍，屬於 ISRM 分級中 "很寬" 的等級。

由於解壓節理都具有上述三項性質，而這三項性質都相當有利於岩塊的破壞與掉落，其理由如下：（1）位於解壓節理外側的岩塊，會因解壓節理的走向極為接近坡面，而在穩定性分析中極易造成平面形破壞與翻覆型破壞。（2）由於解壓節理的傾角相當大，故不連續面外側的岩塊向下坡方向的分力非常大，遠遠大於不連續面上的摩擦力，下滑的力量將非常大；或因傾角接近垂直，岩塊向外側產生翻覆所需要的力矩相當小，向外側翻覆而落下的可能將相當大。（3）不連續面的內寬很大，則不連續面間的相連接觸而支撐岩塊重量的部份就相當的少，只要稍有外力作用，即可馬上產生掉落而形成落石。

這些解壓節理的走向都平行坡面，且有些不同位置的解壓節理的位態也隨著坡面的轉變而轉變，故這些解壓節理應是河谷解壓節理、或是道路開發時開挖山壁所形成的。由此可見，除了自然因素之外，人為的道路開發對於落石的發生影響非常的大。

（3）差異侵蝕作用。在研究路線中砂頁岩互層出現的比例相當的高，有 80% 的邊坡含有頁岩薄層的存在。由於砂岩和頁岩的抵抗侵蝕風化的能力相差很大，故很容易產生明顯的差異侵蝕，導致頁岩薄層上方的砂岩岩塊因失去支撐而落下（照片十三）。

因為差異侵蝕作用原因所形成的落石現象，由於頁岩被掏空的體積達某一程度之時，其上方之岩塊就會落下，通常不太會產生體積較大的岩塊。故這種機制所形成的落石的形態為體積小而數量多的落石形態，且其破壞現象常夾帶頁岩的岩屑滑落。

（4）炸路所產生的炸孔與破裂面的影響。研究路線中，有將近 32% 的落石邊坡上可見有明顯的炸孔，並由炸孔處延伸出許多放射狀的破裂面。這些放射狀的破裂面的特徵是：延續性不佳、但密度極高、且位態不具規則性。由於每個邊坡上的炸孔的數目

有限，只有數個之多，且所延伸出來的破裂面的延續性並不佳，多在2至3公尺以內，故所影響的範圍並不大。但在炸孔週圍2至3公尺的影響範圍內，因其極破碎，且受爆炸衝擊的擾動極大，故不規則岩塊落下的可能性極高。

這類原因所形成的落石的形態特性是：破壞範圍的規模小，岩塊外形呈不規則狀，且岩塊的體積亦較小。

同時根據各個落石邊坡的詳細性質，分別提出其落石形成的原因說明，併列於表十二之中。

由各項原因的數量和所影響的範圍與規模來看，研究路線中造成落石的主要原因的重要性依續為：大地構造運動所產生的不連續面、道路開發工程中開挖山壁所產生的解壓節理、砂頁岩互層的差異侵蝕作用、道路開發時炸山所產生的炸孔與爆炸破裂面。特別說明的是：上述原因並不一定是單一存在的，其通常是數個原因同時作用，所具有的影響力是並行存在的，只是在不同的地點中，各個原因的影響程度會有所變化。

同時，由此結果中可以看出：自然環境因素與人為因素對於落石的形成都具有相當的影響力，而二者中又以自然環境因素的影響力要比人為因素的影響力來的大。

5.2 岩性對於落石的影響

岩性對於落石現象的影響可以分為：對於產生落石的可能性的影響與對於落石破壞規模的影響。在對於產生落石的可能性的影響方面，我們可以根據各個內在因子與落石發生率的統計圖中，看出各個內在因子不同等級的落石比例；雖然這個數據的統計並不是單獨變因，落石的形成也不是某一個因素單獨造成的，而是同時受多重因素所影響的，但我們仍可以由各因素的落石比例，約略看出在同一因素中，不同等級的性質對於落石形成的影響程度。

由圖二十四中岩性比例與落石發生率的統計圖中顯示：砂岩比例在40% 以下時並沒有落石的產生；當砂岩比例在50% 至69% 時，落石發生的比例約在六成左右；當砂岩比例在70% 以上時，則落石發生率大幅提高到85% 以上。

在對於落石的破壞規模方面，岩性比例對於落石邊坡的大小與落石塊體的大小似乎沒有很明顯的影響，倒是岩層的厚度與落石塊體的大小有明顯的關係。岩層的厚度即為層面的間距--不連續面其中一組的間距，同時岩層厚度大者，在相同應力場下，節理面的間距會比岩層厚度小者來的大，在此效應之下，我們可以得知：岩層厚度大者，一般受不連續面切割而成的岩塊皆較大，將來若產生落石的塊體自然較大；而岩層厚度小者，受不連續面切割而成的岩塊較小，所形成的落石塊體自然較小。

此外，砂岩比例與邊坡破壞型式亦有影響。在砂岩比例小於40% 時沿線邊坡的破型式是以岩屑滑落型態為主的破壞型式，即使有岩塊的掉落也是極少數的。而落石的破壞型態多發生在砂岩比例較高的邊坡。

5.3 構造對於落石的影響

構造現象對於落石現象的影響，最主要在於落石發生率的影響。在野外調查結果中已經提到，研究路線中的構造現象包括有：中視褶皺、斷層、不連續面等項。其中不連續面的性質繁多，在下一節中專門討論，在此討論前二者的影響。

在將落石崩塌位置圖與研究路線地質圖相對照之後，發現幾乎所有的構造線（褶皺軸、斷層線）出露的位置，都有落石現象的發生，其重合的比例高達90% 以上。這樣的數據說明了兩者之間的相關性非常高。

在進行穩定性分析工作時發現，褶皺軸、構造線這兩種不同的構造線，其造成落石的原因也略有不同。在中視褶皺出露的邊坡，由於岩層有所轉折，其上的不連續面位態也隨著在轉變，故

在不連續面分析的結果中，通常其集中趨勢要差一些，組數也較多，在統計出的主要位態之外的不連續面亦較多；而不連續面的位態變化多，則在穩定性分析中"露出"（daylight）的可能性更大，這是中視褶皺易於造成破壞的主要原因。但其形成"露出"的邊坡範圍通常不大。

在斷層出露的邊坡，不連續面的數量極多、不連續面密度高（間距小）、岩層的破碎非常明顯，同時很重要的一點是：斷層出露的邊坡其岩體破碎而鬆動的情況較其它地方嚴重許多，岩塊的鬆動，使得岩塊受外力作用（降雨、風力）而產生位移的敏感度提高許多，故斷層位置的落石現象受外力作用的敏感度比其它地方都要來的高，很容易在颱風、下雨之時造成安全係數的急劇降低，而產生再一次的落石，這是斷層現象極易於產生落石的主要原因。在野外調查期間的長時間觀察，亦認同這個觀點。

5.4 不連續面對於落石的影響

在此將不連續面依性質分項來討論其對於落石的影響，討論的性質項目有：不連續面的組數、不連續面的間距、不連續面的持續性、不連續面內寬等項目。至於不連續面的滲水情況、不連續面間的軟弱夾心等項，由於資料中完全無法區別出等級的差異，故在此不予討論。

5.4.1 不連續面的組數對於落石的影響

由圖二十六不連續面組數與落石發生率的關係圖中，我們可以看出落石邊坡的不連續面組數多位於5級至8級的程度中，在這之中，落石發生率由5級往8級有漸增大的趨勢，顯示不連續面的組數愈多，落石的發生率也愈高。至於一級和四級的部份，由於樣本數皆只有一個，故無法下定論。

不連續面組數與落石發生率的關係，可由穩定性分析的過程來加以說明。不連續面的組數愈多，在立體投影圖中所顯示的組合狀態就愈多（dip vector 與交點I都將增加），位於"露出"區域中的機會自然也隨著增加；將之推演到實際狀況下，代表不連續面的組數愈多，其所形成的岩塊的空間組合關係就愈多種，岩塊的可能脫離面也隨著增加，故落石發生率也隨著提高。

5.4.2 不連續面間距對於落石的影響

由圖二十七不連續面間距與落石發生率的關係圖中顯示：不連續面間距愈大、密度愈小時，落石發生率雖有變化，但並沒有規則的變化可循，且不連續面的間距大小並不會影響破壞型式的發生與否，可見岩體的不連續面間距對於落石的發生率並沒有明顯的穎響。

此外，不連續面間距與落石的塊體大小有所關連。不連續面間距愈大者，所切割而成的岩塊自然就較大，將來若形成落石的時候，掉落的衝擊力自然就較大，所帶來的危害也較大。而事實上，不連續面的間距與不連續面的密度（Jv值）兩個因子有直接的關係，所代表的意義是非常類似的，故兩者對於落石的影響也是相同的。

5.4.3 不連續面持續性對於落石的影響

由圖二十八的不連續面持續性與落石發生率的關係圖來看，當不連續面的持續性由一級往三級增加時，落石的發生率也隨著由55% 漸次增加至100% 。

但是，由野外觀察中亦發現：不連續面的持續性與岩層厚度有相當大的關連，當岩層為砂頁岩薄互層時，邊坡中的層面數目很多，不連續面持續性一般皆較小，而在較厚層的砂岩邊坡中，不連續面持續性一般皆較大。砂頁岩薄互層的邊坡易受差異侵蝕

作用的影響，且在調查結果中發現屬於砂頁岩薄互層的落石邊坡亦相當的多，其落石發生率並不小於層狀砂岩的邊坡；故即使砂頁岩薄互層的邊坡的不連續面持續性皆較小，其落石發生率並不見得小。由此可知，上述不連續面持續性與落石發生率的關係似乎沒有很好的理由說明，但至少在數據上的統計結果是如此。

5.4.4 不連續面內寬對於落石的影響

由圖二十九的不連續面內寬與落石發生率的關係圖來看，當不連續面內寬由一級向四級增加時，落石發生率由100%漸次降至50%左右。這個結果相當特殊，因為一般認為當不連續面內寬增加的時候，不連續面兩側岩體的相連接程度應該減小，連接兩側岩體而支撐岩塊重量的部份也會相對減小，岩塊的穩定程度也隨之降低才是；但資料的統計結果並不支持這個說法。一個可能的解釋是：由於落石的發生是同時受到多種因素同時影響的，並非只有不連續面內寬有所影響，故在本研究路線中，不連續面內寬性質對於落石形成的影響較小，或是不具有明顯的影響，其影響程度已被其它較重要的因素所覆蓋而顯現不出來。

5.4.5 不連續面密度與岩塊幾何形狀對於落石的影響

由圖三十中不連續面密度（ J_v ）與落石發生率的關係圖中顯示，當不連續面密度改變時，落石發生率的變化完全沒有規則可循，表示單位體積中的不連續面數目對於落石發生率並沒有明顯的影響。因為岩坡的破壞除了要有不連續面的切割之外，不連續面的位態組合必須有利於破壞的發生，才能對岩坡的破壞產生作用；單純只有不連續面的切割並不足以使岩坡產生落石的發生，須在位態的輔助之下才會產生效用。故不連續面數目多者並不一定會有較高的落石發生率。

由於單位體積的不續面數目與其所切割而成的岩塊大小有直接而密切的關係，在ISRM中的調查建議中已有提出一個不連續面密度與所切割而成的岩塊大小的對應關係（如表八）。當不連續面密度愈高（ J_v 值愈大）時，單一岩塊的體積愈小；不連續面密度愈小（ J_v 值愈小）時，則所切割而成得岩塊體積愈大。故不連續面密度對於落石的影響，並不在於對其形成可能性的影響，而主要在於對其所產生的岩塊的體積大小的影響。因此，利用不連續面密度（ J_v 值）的調查估算，有助於了解落石塊體的大小，進一步可做為落石防治上的考量。

5.5 地形對於落石的影響

5.5.1 坡角對於落石的影響

由邊坡角度與落石發生率的關係圖（圖三十一）顯示：坡角在40度至79度之間時，落石發生率的變化趨勢並不明顯，約在65%至80%之間；而坡角大於80度時，落石發生率大幅提升至100%。

此外，根據臺灣山坡地崩塌調查統計，山坡地發生山崩現象最多的邊坡角度在30度至40度之間，在山地部份則以40度至60度的邊坡角度為最多（山地農牧局，1989）。而由野外資料的統計結果顯示，研究路線中的落石邊坡中有66%的邊坡的角度大於或等於60度。對比於上述山地農牧局的資料，可知在山崩運動（斜坡運動）中，產生落石破壞型態的邊坡的坡角，明顯要比其它破壞型態的邊坡度來的大許多。

5.5.2 邊坡外形對於落石的影響

由圖三十三的邊坡外形與落石發生率關係圖中顯示：邊坡外形在轉變時，落石發生率並沒有規則的變化可循，尤其是落石邊

坡數目最多的平平坡形，其落石發生率沒有特別的突出。因此，初步認為，邊坡的外形對於落石發生率似乎沒有很大的影響。

一般而言，邊坡外形對於邊坡破壞的影響，主要是外形的差異導致在邊坡集水性質、接受日照性質、與接受風蝕性質上的差異，其中最重要者應為集水性質的差異。但在研究路線的道路邊坡中，邊坡都為道路開挖所成，面積並不大，集水能力有限，導致邊坡集水情況顯現不出差異，這應是本路段邊坡外形因子對於落石形成無法顯現影響程度的原因。

5.5.3 邊坡型式對於落石的影響

由圖三十四的邊坡型式與落石發生率的關係圖中顯示，順向坡與逆向坡的落石發生率明顯要比斜交坡來的高。其中，又以順向坡的落石發生率為最高，但順向坡與逆向坡兩者的差異其實並不大，兩者落石發生率都在90% 以上。

5.6 風化程度對於落石的影響

由圖二十五的風化程度與落石發生率的關係圖來看，風化程度在一級至二級的落石發生率相當的高，風化程度為三級者的落石發生率則明顯下降為37%，風化程度四級以上者為零。這個數據並不是說風化程度高者不會破壞形成落石，而是因為研究路線中的邊坡的風化程度並沒有四級以上者；而且在風化程度屬於三級的十六個邊坡中，有十個是以岩屑滑落為主要的破壞型態，這個現象是因為在頁岩比例較高的邊坡中，因頁岩軟弱而較易風化，同時又易於生成頁岩岩屑的滑落。

因此我們可以了解，風化程度高的邊坡因其岩體遭受相當大的侵蝕風化，相當容易產生邊坡破壞的情形，但其破壞型式岩屑滑落、圓弧形破壞等型式為主，而不會以落石現象為主。

5.7 落石潛感的評估

地質災害的潛感度，代表一個災害發生的可能性；潛感度高者，代表此災害發生的可能性就愈高；潛感度低者，其災害發生的可能性就較低。因此，"潛感分析"常是現在用以預測災害發生的一種分析方法。

落石的潛感度，可以代表在自然狀態下落石發生的可能性。由於落石的產生，是包括許多外在因子、內在因子所共同作用下的產物，而外在因子的發生時機、發生程度都是人類所難以預測的，故亦無法作出絕對準確的落石發生機率預測；但在以潛在環境做為考慮的範圍之下，仍可由地質條件、地形條件等因素中，評估出在內在因子影響之下的落石發生潛感度。例如岩體評分法（RMR法）、岩體品質法（Q法）、岩石構造評分法（RSR法）、工研院能資所出版的山崩潛感圖等，都是主要利用各項內在因子的評分來做為災害發生預測或工程設計參考的一種評估方式。而由於前人研究中所常採用的一些評分或預測方法，其考慮之發生對象多是包含所有的破壞現象，且其評分所考慮的因子和本研究路線的主要形成原因差異蠻大的，故並不適合套用在本路段的落石潛感評估上。所以本研究嘗試提出一個新的評估方式，來做為本研究路線落石潛感評估的方法。

本研究的落石評估方法是以造成落石形成的內在原因為評估的項目，因為落石形成的內在原因是根據落石邊坡的地質條件、地形條件等內在因子，並配合現地破壞狀況觀察而提出的，足以代表內在環境對於落石形成的主要影響，且"落石潛感"是指其發生的可能性，用"形成原因"來評估之是很合理的。在決定以落石形成原因做為評估的項目之後，根據各原因的影響程度提出評分的原則如下：

（1）在形成原因中，"不連續面切割岩體使其成為獨立岩塊"被認為是最重要的形成原因，且是最先要具有的成因，其它的成

因影響都是在此成因已存在的情況下繼續作用。所以有關不連續面的成因評分權重要比其它的成因來的大。

(2) 在構造運動所產生的不連續面中，由穩定趨勢分析結果中即可看出不連續面具有的破壞趨勢大小。故將穩定趨勢分析結果分為三級： $S.F. < 1$ 或級接近1者，給予4分； $1 < S.F. < 4$ 者，給予2分； $S.F. > 4$ 或No Daylight者，給予0分，代表不具影響力。分數愈高者，表示其影響力愈大，潛感度愈高。

(3) 在解壓節理方面，由於解壓節理具有平行坡面、傾角大、內寬大的特性，若以投影圖法分析之亦會使定趨勢相當的小，故和構造運動形成的不連續面具有類似的影響程度。由野外調查得知解壓節理的出現狀況可分為明顯、少數、無三個等級，故將解壓節理明顯者給予4分；具少數解壓節理者給予2分；不具解壓節理者給予0分。

(4) 差異侵蝕作用方面：在研究路線中，差異侵蝕作用多半扮演一個輔助的角色，其影響程度較前二者為小，故將岩性為砂頁岩薄互層、易於產生差異侵蝕現象者，給予2分；岩性為層狀砂岩偶夾薄層頁岩者，給予1分；岩性為層狀砂岩而不含頁岩者，不會有差異侵蝕作用的現象，給予0分。

(5) 炸孔與爆炸破裂面，在研究路線中的出現情形可以分為三種：炸孔與爆炸破裂面明顯、具有少數炸孔與爆炸破裂面、及沒有炸孔與爆炸破裂面的存在。由於爆炸破裂面也是切割岩體的不連續面之一，但其位態不規則，不一定會產生"露出(daylight)"的情形，且影響範圍只有在炸孔週圍2至3米之內，影響程度較小。故將炸孔與爆炸破裂面明顯者給予2分；具少數者給予1分；而不具炸孔與爆炸破裂面者給予0分。

(6) 當同一邊坡具有數個成因同時作用時，將其評分相加，代表其共同作用下的影響程度。

(7) 由於這是一個對於落石潛感評估的新方法，對於不同成因之間的權重比例恐不是絕對準確的。如前二項成因的評分是後二項成因的兩倍，並不見得前二項成因的影響力恰好就是後兩項

成因的兩倍，而是表示前二者的影響力確實是大於後二者。由評分數值之間的關係，我們無法確定數值與影響力之間有明確的正比關係，但由數值之間的大小關係，是可以約略分別出其影響程度的大小順序，也由此分別出各個落石邊坡的落石潛感度順序。

特別說明的是：上述的落石潛感評估方法，是針對研究路線的落石邊坡的性質而提出的一種評估方法，並不見得也適用於其它地區的落石潛感評估，或其它破壞型式的潛感評估。

由上述的評估原則，將研究路線中的所有落石邊坡性質做一計分，其結果如圖三十五之潛感評估總分統計圖。評估總分高的邊坡，代表其發生落石的可能性愈高。由圖中將所有落石邊坡的潛感值略分為三區，潛感值在8以上者，為高度潛感區，發生落石的可能性最大；潛感值在8到4之間的邊坡，為中高度潛感區，發生落石的可能性略低於前者；潛感值小於4者為中度潛感區，發生落石的可能性又次之。

若以整個研究路線而言，上述三者以外的地區可算是同一個潛感區，為低度潛感區，發生落石的可能性相當的低。將整個研究路線的落石潛感值表達於圖上，可得"研究路線落石潛感圖"（如圖三十六）。由圖中，我們可以區別出研究路線中各個邊坡發生落石災害的相對可能性，並可針對潛感度最高的數個邊坡進行落石災害的防治考量。

由落石潛感圖中顯示：研究路線中最易於發生落石災害的地點主要有臺十八號公路的85k、87.5k，臺二十一號公路的139.5k（迴頭彎）、132.6k、127.8k（明隧道）等幾個地點，此與野外的現地觀察相當符合（參看照片十四、十五、十六、十七）。可見上述的潛感評估原則雖只是初次的嚐試，但仍具有相當的合理性。而這幾個高度潛感的落石邊坡，也是整條研究路線中最需要密切監測並做好落石防治設施的地方。

圖 35

圖 36

5.8 外在因子對於落石的可能影響

雖然本研究並沒有將外在子列為研究的內容而加以討論，但外在因子對於邊坡破壞的影響是非常大不容忽視的。故在此以研究區域當地的外在因子特性為根據，討論其對落石形成的可能影響。以研究區域中外在因子的特性來看的話，外在因子對於落石形成的影響有下列：

由於研究區域的海拔相當高，雖然月均溫都在 0°C 以上，但在冬季之時，深夜和清晨的溫度可以達到 0°C 以下，此現象可由野外調查期間在冬天清晨見到路面結冰與邊坡面結冰或結霜得到證實；而當陽光直射時，路面或坡面的冰霜即會融解。反覆冰凍－融解的過程中，岩體的體積會因為溫度的變化而呈現反覆的熱脹冷縮；不連續面中的水份在結凍時體積會膨脹而產生向外的壓力；這兩個過程都會促使岩石的風化加劇、裂隙延伸，已被證實為高山地區造成落石的重要因素。故冰凍－融解的過程應是研究區域中影響落石形成的重要外在因子，尤其在十二月至二月的冬季期間特別顯的重要。

另外，依照王鑫（1991）所統計的研究區域月雨量、累積雨日、颱風次數資料中，可以看出研究區域的降雨量集中在五月至九月，其中五、六月是梅雨期，七至九月是颱風期，同時研究區域是臺灣中南部數大河流、水庫的主要集水區，年降雨量相當大。大量的降雨與長時間的降雨對於邊坡穩定性的效應有：直接的侵蝕沖刷帶走軟弱的頁岩屑，使差異侵蝕效應更形嚴重；水份存於坡中增加邊坡物質的荷重；邊坡中的孔隙壓力增加，使岩體抗剪強度下降；水份潤滑邊坡上的不連續面，使摩擦力下降等等。這些效應都將使得平時乾燥氣候下暫時穩定的邊坡，在降雨時安全係數大為降低，而產生破壞現象。

上述兩項因子應是研究區域中對於落石形成最具影響力的外在因子，其中冰凍-融解的過程在十二月至二月之間較為明顯；而降雨的主要影響期間為五月至九月之間，影響期間較長。

此外，由於臺灣位處於海陸板塊碰撞的位置，屬於環太平洋地震帶，地震對於邊坡上物質所帶來的震動，極可能引發落石的產生。根據徐明同等（1980）認為本研究地區是屬於中度地震區，地震對於落石的引發能力不容忽視。而且，一旦地震發生時，其所影響的範圍通常很大，甚至涵蓋整個研究區域。

5.9 落石防治之建議

由於本研究區域位於玉山國家公園境內，國家公園管理處也設立了相當多的觀景、遊憩、停車地點，因此除了公路本身的運輸暢通是管理重點之外，上述地點是遊客、車輛聚集的地方，對於落石災害更應特別留意。因此，文中將就玉山國家公園境內之數個重要遊憩地點，特別說明其落石的危害程度與應特別防治的地點，以利於國家公園的管理與災害防治措施。另外，針對全線的落石災害，也提出一套落石防治措施適用性的參考表，以利於各個災害地點的防治工法選擇。

在野外調查工作執行之時，已將玉山國家公園境內之各項設施地點的落石情形加以調查，其結果如下：

（1）玉山口停車場（86k）：玉山口停車場前之公路邊坡相當安定，坡高只有數米，平緩，為一林木繁生之處，應無落石之危險。

（2）石山工作站：石山工作站前的道路邊坡為一裸岩與崩積層混合出現的邊坡，故其可能破壞型式包括有落石、岩屑滑落、土石崩落等型式。邊坡的坡高並不高，只有數米高，且有數個路旁空地可為緩衝帶，故落石進入路面、停車場的可能數量並不大。但此處崩積層佔有當相當大的部份，仍應嚴加注意崩積層的土石崩落現象。

（3）上東埔休憩區（95k）：由於此點恰為往楠溪林道與鹿林山莊的分叉點，叉路沿公路邊坡而上，故大部份的坡面都已有

擋土牆護坡，加以出露的邊坡物質都是崩積層居多，故可能的破壞型式為少量的土石崩落。

(4) 塔塔加遊客中心停車場：此段路線為於山脊稜線位置，坡高很小只有數米，且邊坡物質以崩積層居多，只有少數岩層出露，故整個而言邊坡的破壞型式是較細粒的土石崩落，且量不大。

(5) 夫妻樹遊憩點：此地點是所有遊憩點中最有落石危險的一個。公路邊坡破壞型式以落石為主，兼有岩層的滑落。由穩定趨勢分析結果與現地的研判來看，此邊坡以前的落石現象即已相當明顯，未來發生落石的可能性也很高。而且此處邊坡的高度相當的高，一旦有落石產生，公路面、夫妻樹、停車場等位置都是可能被撞擊、波及的範圍；尤其是夫妻樹南面的停車場，所面對的邊坡位置恰是破壞最嚴重的部份，危險性也最大（照片十八）。因此建議應密切注意這個遊憩點的邊坡狀況，並應施予一防治工法。

除了夫妻樹遊憩點之外，在落石潛感評估結果中所提到的幾個列為高度潛感區的落石邊坡，也應該密切的加以監測，並施以適當的落石防治設施。

在落石防治措施方面，一般可以分為消極做法與積極做法，消極做法指的是警戒性的方式；積極做法又可分為預防工法與防護工法兩方面，預防工法是在落石發生前以防止其發生為目的，防護工法則是提供一設施以便在落石發生時可以保護人車的安全為目的。在各種措施的選擇考慮上，考慮的因素也包括對策工法的效果、耐久性、維護管理難易程度、施工難易程度、經濟性等因素。日本學者曾提出一個落石防治措施適用性參考表（表十五），可做為防治措施的選擇參考。

落石防治措施的選擇尤須考慮落石岩塊運動軌跡下方坡底的現地狀況，邊坡緊臨路面與坡底具有緩衝區，兩種情況在防治措施的選擇上就有極大不同。一般而言，坡底若有空地、窪地、緩傾斜面等可做為落石岩塊緩衝之地區，是相當有利於防護工法的設立。

5.10 研究延伸性之建議

本研究對玉山國家公園新中橫公路段的道路邊坡的破壞情形做了一系列的調查，再針對其中的落石邊坡作了詳細的野外調查與室內分析，提出了落石的主要形成原因，且由各邊坡的內在性質統計，試著去討論各內在性質中不同等級與落石的關係，以求明白各個內在性質對於落石的影響。但對於不同的內在因子的影響程度，在此只能約略分出何者為主要、何者為次要，若想進一步了解各個因子的影響權重，則需要更了解各個因子之間的相互關係，以及其所扮演的角色，才能有所突破。

本研究所討論的範圍，限於地質、地形等內在因子，但除了內在因子之外，降雨、風力、地震等外在因子對於落石的影響力也很大，這些外在因子對於落石的"誘發"力量不容忽視，由颱風季節有許多落石的發生可以得到證明。若想明白外在因子對於落石的影響，可能需要多方設立降雨、風力、地震等的野外現場監測儀器，或搜集其與落石發生情況之間的關係，才能進一步討

(表15)

論。但要在野外設立足夠的監測儀器並得到足夠的資料，可能需要相當大的經費與較長的時間才能做到。

在落石潛感評估方面，由於前人較常採用的幾種評分方式都不適用於本路段的落石潛感評估，故在本研究中試著提出一套新的潛感評估原則，且所得到的結果與野外的觀察相當的符合。但這套評估原則只是一個初次的嚐試，所給予的權重分數並不見得是非常正確（只能說是接近）。爲了使潛感評估原則能更接近於野外真實的狀況，研究過程中曾嚐試以公路局的道路邊坡破壞次數與清除記錄來對比，以便修正權重分數。但後來發現公路局的資料是包含所有的邊坡破壞情形，並無法分別出不同的破壞型式，因而無法直接拿來對比。因此，未來若能得到更詳細的各個破壞型式的邊坡破壞記錄，或者是直接進行長期的邊坡破壞情況監測，應該可以得到各個落石邊坡長期的破壞記錄，將之與目前的潛感評估結果相對照，應該有助於修正權重分數，得到更正確的落石潛感評估原則。

第六章 結論

1.玉山國家公園新中橫公路段的道路邊坡，其邊坡的破壞型式以落石爲主，其餘之破壞型式尚有岩屑滑落、風化層的土石崩落、與崩積層的圓弧形破壞等型式，以及上述幾種破壞型式的複合型。

2.配合投影圖分析結果、野外破壞現地的觀察、地質、地形各項因子的詳細調查，認爲本研究路線中造成落石現象的主要內在成因有下列數項：大地構造運動所產生的節理面、層面、斷層面等不連續面切割岩體使成爲獨立岩塊；河流下切所產生的河谷解壓節理與新中橫公路開發時開挖山壁所產生的解壓節理，其具有走向平行坡面、傾角很大、內寬很寬的特性；砂頁岩互層中因抵抗侵蝕風化的能力相差很大而產生的差異侵蝕作用，使風化頁岩層上方的砂岩塊因懸空、失去支撐而掉落；公路開發時因採用爆炸方式開挖山壁，而產生的炸孔、爆炸破裂面、及爆炸時的擾動作用。

3.由各項成因的數量和所影響的範圍與規模來看，研究路線中造成落石的主要成因的重要性依續爲：大地構造運動所產生的不連續面、河谷解壓或道路開發工程中開挖山壁所產生的解壓節理、砂頁岩互層的差異侵蝕作用、道路開發時炸山所產生的炸孔與爆炸破裂面。同時，由此結果中可以看出：自然環境因素與人爲因素對於落石的形成都具有相當的影響力，而二者中又以自然環境因素的影響力要比人爲因素的影響力來的大。

4.由各項內在因子的分析與統計結果中顯示，研究路線中對於落石的形成有較大影響的內在因子是：構造線（中視褶皺軸、斷層線）的存在、不連續面位態與坡面的空間組合關係、不連續面組數、邊坡角度等因子。

而對落石破壞危害規模有較大影響的內在因子有：不連續面間距與不連續面密度（ J_v 值）、邊坡高度、邊坡長度等因子。

參考文獻

- 中國石油公司臺灣油礦探勘總處（1986），十萬分之一"嘉義"幅地質圖。
- 王文能（1992），臺灣中部板岩區風化岩邊坡滑動機制研究。一九九二岩盤工程研討會論文專集，pp265-274。
- 王鑫，林耀源（1982）。新中橫公路水里支線的自然與工程環境。國立台灣大學地理學系研究報告，第十一期，pp15-31，
- 王鑫，李光中（1988），新開挖道路邊坡之穩定性預測及追蹤查證。國科會防災科技研究報告77-21號。
- 王鑫等（1991），山地道路工程對邊坡的影響（新中橫公路東埔段）。國科會防災科技研究報告80-23號。
- 台灣省交通處公路局第二工程處第七工務段內部資料(1994)。
- 李三畏（1984），臺灣崩塌問題探討。地工技術雜誌，第七期，pp43-49，1984。
- 李振誥、張瑞麟、李森吉、陳時祖（1992），岩體內不連續面組數之估計及其位態與頻率之探討。地工技術雜誌，第三十九期，pp64-76。
- 李德河（1992），日本地質災害調查及整治技術。地質防災研討會論文集。
- 李錫堤（1986），電腦在節理統計分析上之應用。地工技術雜誌，第十五期，pp20-28。
- 李錫堤（1989），半球投影及單位向量在地質及岩石工程上之應用。中興工程雜誌，第二十四期，pp73-97。

- 何春蓀（1982），臺灣地體構造的演變-臺灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所，台北，153頁。
- 何春蓀（1986），臺灣地質概論-臺灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所，台北，163頁。
- 何春蓀（1981），普通地質學。五南圖書出版公司，台北，pp201-222
- 邱紹康等（1992），南投縣和社構造核查報告。中國石油公司內部報告。
- 林銘郎，洪如江（1992），峽谷地區河谷解壓節理與落石災害。地質防災技術研討會論文集，pp13-41。
- 洪如江等（1989），變質岩順向坡力學性質與穩定性之研究（報告之一）。國科會防災科技研究報告77-47號。
- 洪如江（1991），中橫公路地質斷裂構造與岩坡穩定性之研究（二）。國科會防災科技研究報告79-47號。
- 洪如江（1991），初等工程地質學大綱。財團法人地工技術研究發展基金會。
- 洪如江（1992），中橫公路岩坡安定科技綜合報告。國科會防災科技研究報告80-57號。
- 徐明同、蔡義本、茅聲燾（1980），建築技術規則中震區劃分之修定建議。土木水利月刊，第六卷，第四期，pp101-105。
- 耿文溥（1974），臺灣西南部之南莊層。臺灣省地質調查所彙刊，第二十四號，pp75-78。
- 徐鐵良（1991），地質與工程。中國工程師學會，第九版。

- 翁作新（1987），淺談岩石邊坡分析。地工技術雜誌，第十七期，pp19-25。
- 高申錡（1994），阿里山公路沿線公路邊坡崩塌與雨量關係之研究。國立成功大學資源工程研究所碩士論文。
- 陳宏宇，陳榮河，黃燦輝（1993），岩石邊坡裂縫處理方式之探討。土木水利雜誌，第二十卷，第一期，pp19-30。
- 陳榮河（1984），坍方類型之現地研判。地工技術雜誌，第七期，pp13-19。
- 畢慶昌（1969），俯衝作用在臺灣地體構成中的作用。臺灣省地質調查所彙刊，第二十號，pp1-39。
- 張郁生（1984），臺灣嘉義-玉山-水里公路沿線之地質。中央地質調查所特刊第三號。
- 張湧元（1990），半球投影圖解法與電腦應用於岩坡與基礎滑動安定分析。土木水利雜誌，第十七卷，第三期，pp51-75。
- 張麗旭、詹新甫、李朝雄（1960），阿里山煤田地質。臺灣省地質調查所彙刊，第十二號，pp1-18。
- 張寶堂（1984），南投縣東埔溫泉區地質。經濟部中央地質調查所特刊，第三號，pp91-102。
- 黃景川（1984），落石災害之預知與對策。山坡地開發專輯（一）（二），營建世界雜誌社，pp284-290。
- 黃鎮臺（1988），坡地工程之應用。地工技術雜誌，第二十一期，pp74-82。
- 黃鎮臺（1989），落石災害之防治。能源、資源與環境，第二卷，第二期，pp66-68。

- 黃鎮臺、夏龍源（1990），北部濱海公路南雅里路段邊坡崩塌個案之研究。礦冶，34/4，pp89-94。
- 黃鎮臺（1992），臺灣崩塌防治之探討。地質防災研討會論文集。
- 程延年、葉貴玉、劉進金、盧佳遇（1988），玉山國家公園東埔玉山區地質調查與解說規劃報告。內政部營建署玉山國家公園管理處出版。
- 經濟部中央地質調查所（1988），玉山國家公園關山地區地質調查暨解說規劃調查報告書。內政部營建署玉山國家公園管理處出版，pp69-90。
- 經濟部中央地質調查所（1989），玉山國家公園關山地區地質調查南橫公路地質潛在危險區的研究分析。內政部營建署玉山國家公園管理處出版，pp33-159。
- 劉占江（1971），臺灣南投縣和社背斜之地質。臺灣石油地質，第九號，pp107-121。
- 劉占江等（1976），南投縣和社構造地質（覆查）報告。中國石油公司內部報告。
- 劉桓吉、方中權、莊德永（1989），臺灣新中橫公路嘉義觸口至塔塔加鞍部沿線地質。中央地質調查所彙刊，第五號，pp19-31。
- 劉景仁（1993）。新中橫公路阿里山到同富山間南莊層之構造地層研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，1993。
- 潘國梁（1992），山坡地地質分析。科技圖書有限公司，共208頁。
- 蔡潘鰲（1971），工程地質。三民書局。
- 賴典章（1984），立體投影圖在岩坡工程上的應用。地工技術雜誌，第七期，pp74-79。

- 賴典章（1986），蘇花公路擴寬工程地質調查研究。地工技術雜誌，第十六期，pp63-79。
- 謝敬義（1989），立體投影網的應用。地工技術雜誌，第二十五期，pp84-97。
- 顏滄波、吳景祥、莊德永（1984），臺灣中部橫貫公路（玉山線）沿線地質。中國地質學會專刊，第九號，pp1-27。
- 鍾振東、李春生、游芳松（1975），新中部橫貫公路踏勘報告。礦業技術，第十三卷，第十二期，pp506-513。

Reference

- Barton Nick & Stephansson Ove (1990).(Editors). Rock Joints, Wiley, New York.
- Brummer Richard (1990)(Editor), Static and Dynamic Considerations in Rock Engineering.
- Denys Brunsten & David B. Prior (1984)(Editors), Slope Instability, Wiley, New York .
- Evert Hoek & John Bray (1977), Rock Slope Engineering, 2nd edition, pp42-49, Wiley , New York .
- Goodman Richard E.(1989) , Introduction to Rock Mechanics ,2nd edition, Wiley, Ney York.
- Goodman Richard E.(1978) , Methods of Geological Engineering in Discountinuous Rocks.
- Goodman Richard E. & Shi Gen-hua (1985), Block Theory and Its Application to Rock Engineering.
- Grove,J.M.(1972). The incidence of landslides, avalanches and floods in western Norway during the Little Ice Age. Arct. Alp. Res.,4, 131-138.
- Hans Peter Rossmannith (Editor), Mechanics of Jointed and Faulted Rock.
- Hofmann,H.(1974).Zum Verformungs und Bruchverhalten regelmassig geklufteter Felsboschungen. Rock Mech . ,Suppl3,31-43.
- Hutchinson John N. (1987), Mechanism Producing Large Displacements in Landslide on Pre-existing Shears, Memoir of the Geological Society of China, no.9,pp175-200.
- Hung Ju-Jiang (1987), Landslide and Related Researches in Taiwan,Memoir of the Geological Society of China, no.9,pp23-44.
- Hunt Roy E.(1984), Geotechnical Engineeringg Investigation Manual, McGraw-Hill,Inc.
- Ives,J.D.(1973).Arctic and Alpine Geomorphology--a review of current outlook and notable gaps in our knowledge. In :Research in Polar and Alpine geomorphology,3rd Guelph Symp. on Geomorphology(B.D.Fahey and R.D.Thomson,Eds.) Geo. Abstracts,Norwich, 1-10.
- Johnston,J.H.(1973). Salt weathering processing in the

- McMurdo dry valley regional of South Victoria Land, Antarctica, NZ J. Geol. Geophys.,16,221-224.
- Mervyn S. Paterson(1978), Experimental Rock Deformation ---The Brittle Field, pp16-69, Springer-Verlag, New York.
- Muller, L., and Hofman, H.(1970). Selection, compilation and assessment of geological data for the slope problem. Proc. Sym. Open Pit Mining, Johannesburg, 153-170.
- Lama R.D., Vutukuri V.S.(1978), Handbook on Mechanical of Rocks, Volume 2.
- Lama R.D., Vutukuri V.S.(1978), Handbook on Mechanical of Rocks, Volume 3.
- Lama R.D., Vutukuri V.S.(1978), Handbook on Mechanical of Rocks, Volume 4.
- Priest S.D.(1985), Hemispherical Projection Methods of in Rock Mechanics, George Allen & Unwin Ltd, London.
- Pferiffer T.J., Hrggins J.D. & Turner A.K.(1990), Computer Aided Rockkfall Hazard Analysis.
- Reik, G., and Currie,J.B.(1974). A study of relations between rock fabric and joints in sandstones. Canad. J. Earth Sci., 11, 1253-1268.
- Ronald A. Nelson, Geologic Analysis of Naturally Fractured Reserviors.
- Vutukuri V.S., Lama R.D., Saluja S.S.(1978), Handbook on Mechanical of Rocks, Volume 1.
- Whalley W.B.(1984), RockFalls. (Edited by Denys Brunsten & David B. Prior), Wiley, New York.
- Zaruba Q. & Mencl V.(1969) Landslide and Their Control.

照片一 台二十一號公路139.9k之嚴重落石現象

照片二 台二十一號公路133k附近之嚴重落石現象

照片三 台十八號公路85k之尖頂褶皺現象

照片四 台二十一號公路大勇橋南側之一系列連續而緊密之褶皺

照片五 台二十一號公路139.9k之斷層現象

照片六 台二十一號公路139.9k斷層附近之發達的不連續面現象，顯示岩體非常的破碎

照片七 台二十一號公路147k附近的不連續面現象，顯示不連續面相當的發達且具有規則性。

照片八 台二十一號公路148.8k附近之解壓節理。可見傾角近乎垂直且內寬極大

照片九 台二十一號公路148k附近之解壓節理。可見其平行坡面、傾角近乎垂直、且內寬極。

照片十 台二十一號公路137k附近之炸孔現象。可見呈放射狀的爆炸破裂面，炸孔中心附近岩體極破碎。

照片十一 呈平面形破壞的岩塊，沿著朝向外側的不連續面向下滑落。

照片十二 呈楔型破壞的岩塊，沿著兩不連續面交線的方向而向下滑落。

照片十三 砂頁岩互層所造成的差異侵蝕現象，頁岩易受風化而被侵蝕，其上方的砂岩塊即失去支撐而懸空。

照片十四 臺十八號公路85k處的落石邊坡。邊坡中可見緊密褶皺與明顯斷層。

照片十五 臺二十一號公路139.5k處之落石邊坡遠照，可見破壞規模非常龐大。邊坡上明顯可見數條斷層通過。且此邊坡掉落之岩塊沿坡面滾落後，正好落於127.8k(明隧道)處，使後者的落石災害更形雪上加霜。

照片十六 臺二十一號公路132.6k處之落石邊坡。此處為一緊密褶皺通過之處，坡上岩體破碎的非常嚴重。

照片十七 台二十一號公路127.8k處之落石邊坡。可見隧道上方恰為一背斜的東南翼，岩塊極易沿著層面下滑，此外，河流的切蝕造成解壓節理、上方139.5k處掉落的岩塊，都是造成此處落石災害極為嚴重的原因。

照片十八 夫妻樹景觀點停車場所面對的公路邊坡現象。可見落石相當的明顯。