

太魯閣國家公園崇德地區 坡面裂縫處理方式之研究

執行單位：中國地質學會

計劃主持人：陳宏宇

共同主持人：陳榮河

黃燦輝

太魯閣國家公園管理處印製

中華民國八十一年五月

目 錄

	頁數
目 錄	1
附圖目錄	2
附表及照片目錄	3
摘要	4
第一章 前言	6
第二章 研究概況	7
2.1 研究內容及方法	7
2.2 本研究完成之工作	9
第三章 地質概況	12
3.1 交通位置	12
3.2 地質分布	12
3.3 地質資料分析	14
第四章 地貌表徵	18
4.1 A-A'剖面	20
4.2 B-B'剖面	22
4.3 C-C'剖面	22
第五章 處理方案研究	26
5.1 方案研究	26
5.2 方案評估	30
第六章 本研究建議之處理方案	32
6.1 落石的運動軌跡與滾落影響範圍	32
6.2 防護設施	48
6.3 案例參考	49
第七章 結論	54
參考文獻	55

附 圖 目 錄

	頁數
圖2.1 本研究計劃之研究流程	8
圖3.1 不連續面極點投影圖	15
圖3.2 岩石邊坡破壞模式分析	16
圖4.1 現場地貌圖	19
圖4.2 A-A'剖面圖	21
圖4.3 B-B'剖面圖	23
圖4.4 C-C'剖面圖	24
圖5.1 方案(A)示意圖	27
圖5.2 方案(B)示意圖	28
圖5.3 方案(C)示意圖	29
圖6.1 影響落石滾動之各種示意圖	33
圖6.2 描述落石跳動軌跡之參數	35
圖6.3 能量折減係數示意圖	37
圖6.4 整體座標與局部座標之關係	38
圖6.5 落石運動軌跡分析結果	40
圖6.6 建議處理方案(3)剖面位置圖	50
圖6.7 建議處理方案(3)平面配置圖	51

附表目錄

	頁數
表2.1 研究工作進度	10

照片目錄

	頁數
照片6.1 防護牆之模式	52
照片6.2 攔截落石實驗	53

摘 要

民國七十一年三月十七日，花蓮縣秀林鄉北迴鐵路西北側之一處已開採之石礦場的上方，發生岩塊崩落的事件，由於崩落之岩塊較為臨近蘇花公路及北迴鐵路的崇德火車站，使得鄰近的鐵、公路交通和居民的生命財產安全受到相當大的威脅，因此，太魯閣國家公園管理處為防止再一次類似事件的發生，以及在環境景觀的維護和鄰近區域的安全性等雙重原則的考量之下，便委託中國地質學會，希望對於目前正現存於岩壁坡面上的裂縫的整治以及防護措施等工作能以更詳實、謹慎的態度來加以研究探討，並提出此防治方案的具體規劃措施。整個研究計劃大體上分成五個階段來進行，並以一整年日曆天的時間來完成。

整個研究之工作項目包括有：岩石邊坡穩定處理方式的文獻彙集，本研究計劃區域的地貌量測和坡面裂縫及各岩層不連續面位態的現場量測等工作。同時，將現場所量測之各項調查資料整理後，繪製成地貌圖、切割剖面圖以及不連續面位態之立體投影圖等各種不同方式的圖形，以作為坡體在處理方案上的分析之用。根據本研究工作現場調查的結果顯示：在地貌方面，本區域大致可劃分成三階平坦地，目前出露之坡面裂縫的坡向為北偏西 45° ，坡面傾角相當陡峭，大致上為介於 70° 至 80° 之間並且向北傾斜，與最近之蘇花公路的距離約在 150 公尺左右。在地層組合方面，本區岩層為屬於先第三紀大南澳片岩之變質石灰

岩，其岩層之走向爲北偏東 50° 、傾角爲 40° 向北傾斜。節理共有三組，其位態分別爲北偏東 82° 、傾角 60° 向南傾斜；北偏東 12° 、傾角 72° 向東傾斜以及北偏東 58° 、傾角 65° 向北傾斜。

在處理方案的研究上，其著眼點主要是從整個坡面裂縫可能延伸之距離，可能產生掉落於地面上的面積，落石衝擊之動能以及影響整個地區的範圍作爲本研究計劃在整治處理上的重點。本研究工作共提出了 3 個防災、整治處理的規劃方案來一一探討其優缺點，最後以最具安全性、時效性、可行性及經濟性之"攔截落石"的方式來作爲建議本區之處理方案，以提供太魯閣國家公園管理處作爲整治規劃之參考。

第一章 前 言

本研究計劃的起因，主要是因爲在民國七十一年三月十七日位於花蓮縣秀林鄉北迴鐵路西北方一處緊臨正大石礦場上邊坡的石灰岩地層發生了岩塊崩落事件，由於此採石礦場的東側緊鄰著本島東部的重要鐵、公路幹線－北迴鐵路及蘇花公路，因此，爲避免再一次類似事件的發生所可能波及到附近鐵公路的行車安全及鄰近居民的生命財產，太魯閣國家公園管理處除了督促各相關單位做好相對的防範、警戒措施外，也隨即著手進行此岩壁坡面裂縫之根本整治、防護的研討處理工作。由於該採石礦區又恰巧位於太魯閣國家公園景觀保護區之內，爲了保護區內的自然景觀，一些可能冒然直接從事人爲整治方式之工程穩定性處理方案都將謹慎予以考慮，才可使得現場免於產生更巨大的崩坍破壞現象。因此，太魯閣國家公園管理處便委請中國地質學會來進行更進一步的現場調查研究工作，其目的便是希望能由各種不同的觀點及想法，使目前坡面上的裂縫在採行穩定處理方式之同時也可以兼顧到交通設施、景觀維護及基地安全等三方面的需求來做好現地的整治、規劃工作，也即以更詳細而審慎的態度來研究其處理方案，以達成最有利於整體的目標。

第二章 研究概況

2.1 研究内容及方法

本研究工作之內容便是針對現場已發生破壞之正大採石礦場的上邊坡岩盤露頭著手，進行現場工程地質的調查量測工作，以推求各岩盤間之不連續面或目前坡面出現之裂縫所可能產生岩塊崩落事件的機制，進而分析及推估此坡體再次發生類似事件，其落石可能產生的最大衝擊力及其可能影響現場的範圍，最後本研究工作也提出目前坡面裂縫在防災整治上最佳之穩定性處理建議方案。

本計劃之研究方法主要是分成六個階段來進行（參見圖 2.1）：

1. 資料收集：彙集國內外對於岩石邊坡穩定性整治、處理的相關性文獻，以及本研究區域內正大石礦場有關開挖之各項地質資料。同時，對於本研究區鄰近區域之地質分布概況也一併列入相關資料的參考。
2. 地質調查：在本研究區域內進行地層層面、節理面、地形坡面及現有坡面裂縫等不連續面之位態資料的量測和檢核工作。有關於現場上、下邊坡及其鄰近區域之地貌特徵也一併予以記錄及繪製。
3. 調查資料整理：將現場進行地質及地貌調查量測所得到

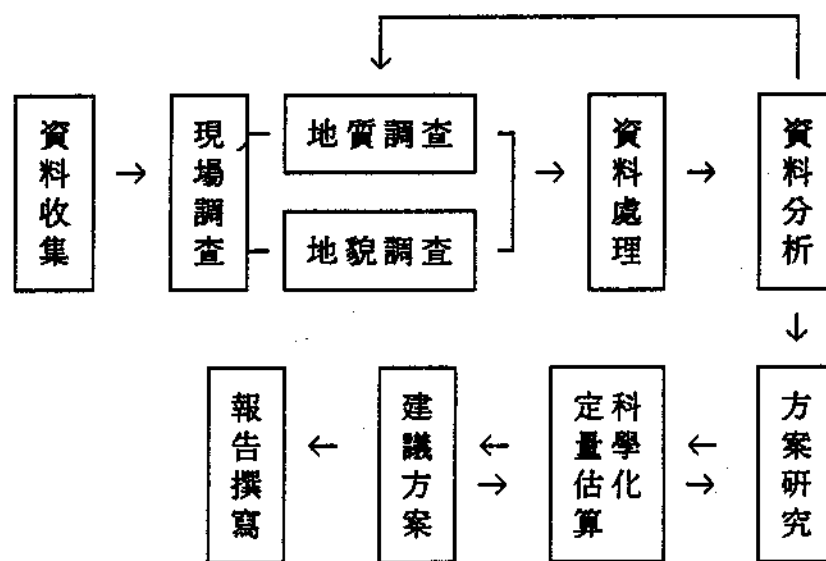


圖 2.1 本研究計劃之研究流程

的各項定量化資料，加以分門別類的歸納整理。

- 4.地質資料分析：將整理過後屬於不連續面位態的調查結果輸入電腦，並繪製成立體幾何投影圖，同時並將此立體投影圖繪製所形成之幾何圖形，然後用來分析本採掘礦場各不連續面間所組合成之岩塊是否會產生一些新的破壞型式。
- 5.處理方案研究：針對現行坡面可能產生之破壞型式加以探討，以科學化的估算方式來考量未來崩落之岩塊可能會影響的區域範圍，並提出各種不同而適當的穩定性防災、整治處理方式。
- 6.建議方案：由幾個不同處理方案的研究結果中，提出最適合本研究計劃的處理建議方案，以供防災整治的參考。

2.2 本研究完成之工作

本研究計劃預計以一年的時間完成之(參見表 2.1)，全部工作已按照預定之進度及計劃上的要求完成了岩石邊坡穩定處理相關文獻的彙集、現場的地質概況及地貌特徵的調查工作。對於本研究區域岩層露頭的層面、節理面等不連續面的位態量測、地形坡面和坡面裂縫的方向性以及

表2.1 研究工作進度

時間(月)	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二
工作內容	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二
資料收集												
地質調查												
調查結果 整 理												
地質資料 分 析												
處理方案 研究及建議												
報告撰寫												
預定進度 (%)	5	10	15	25	40	50	55	65	75	85	95	100

地表面採石礦場腹地延伸距離等量測工作也全部完成。另外相關於本研究區之各種不同而具參考性之處理方案，也在本計劃工作中一一提出探討，應用科學化的定量估算方式，來評估其屬於最合理、最安全的整治措施，並一併提出此研究結果之建議處理方案。

第三章 地質概況

3.1 交通位置

本研究區域所包括之正大採石礦場為位於花蓮縣秀林鄉崇德火車站之西北側，與火車佔彼此相距約 200公尺。本研究區之東側有北迴鐵路通過，介於正大採石礦場和北迴鐵路崇德火車站之間則有寬約10公尺之蘇花公路經過，因此本研究區就交通位置而言，可以說是非常的便利。本研究區域內之採石礦場的位置為位於中橫公路太魯閣入口處較為偏北位置，採石礦場與太魯閣入口處的距離約有十分鐘的車程。由於本研究區為屬於本島東部較為陡峭之山嶺，和東側海岸線的距離僅有數百公尺之遙，其腹地較為狹窄，因此自從本研究區採石礦場的上邊坡發生採掘面的岩塊掉落、崩塌事件之後，便使得與本區域緊鄰的北迴鐵路及蘇花公路的交通設施和鄰近居民的生命財產遭受了潛在性的威脅。

3.2 地質分布

本研究區域為位於本島中央山脈東翼之太魯閣地帶，本區出露之岩層包含有中生代至古生代的變質岩，其變質程度為屬於低度至中、高度變質。此中央山脈東翼之太魯閣地帶組成之岩層由蘇澳南方約十公里處，沿著太平洋沿岸

分佈，相當廣泛，長度約 240公里，平均寬度則在20公里以下(王，1991)。

就出露之岩性而言，除了現生或古河床及崖錐之堆積物外，全部皆屬於變質岩。本區域主要之岩性包括有石英片岩、石英雲母岩、綠色片岩、大理岩、片麻岩及花崗片麻岩。在地層的分層工作方面，曾有多位學者進行這方面的研究(Ogasawara, 1936; Yen, 1960; Chen, 1963; Wang Lee, 1982)，王執明(Wang Lee, 1982, 1991)依據野外極易辨視的岩性，將其分層並稱之為開南岡層、九曲層、長春層及天祥層等幾種。開南岡層以片麻岩及片岩為主，野外分佈之外形並不規則，約有大小二十多個岩體，分佈在源頭山、飯包尖山、開南岡(和仁)、崇德、溪畔等地。九曲層以具有灰白相間條帶構造之大理岩為主，主要分佈在台灣東部變質岩出露地區之北段，於蘇花公路和平一帶出露，並向南延伸經大清水山、越沙卡嚕溪上游再繞經大斷崖至九曲洞一帶，呈東北－西南向分佈。長春層的岩石種類繁多，以綠色岩為主，夾有大理岩、石英之薄層。長春層分佈之區域頗多，但大多是零星出現，並以外來岩塊的方式出現在天祥層或玉里層的泥質岩中。天祥層以片岩、千枚岩為主，夾有少量數十公分至數公尺厚的變質砂岩層，且地層的延續性不佳。天祥層是台灣東部變質岩中分佈最廣的岩層，北起蘇花公路 9公里處，南到南橫公路，都有天祥層的出露。

本研究區之岩層為先第三紀大南澳片岩中的變質石灰

岩所組成。一般而言，大南澳片岩在組成主要的石灰岩帶中，發育最爲良好的應該是屬於分佈在和平溪和花蓮市之間的地帶，即蘇花公路中段的沿線區域，而本研究區內之採石礦場即位在此範圍之內。本研究區內石灰岩的顏色爲呈淺灰色至深灰色。在野外調查的露頭量測中，本區岩層的走向大致爲北偏東 50° ，傾角爲 40° 向北傾斜，此外，節理在本區內相當發達，經量測後大致上可得到下列三組的分布，其位態分別爲北偏東 82° ，傾角 60° 向南傾斜；北偏東 12° ，傾角 72° 向南傾斜以及北偏東 58° ，傾角 65° 向北傾斜，各項不連續面量測資料之結果繪製於圖 3.1。

3.3 地質資料分析

採石礦場內的岩層走向爲北偏東 50° ，傾角爲 40° 向北傾斜，而現場岩壁裂縫的坡向爲北偏西 45° ，坡度平均在 70° 至 80° 之間，因此根據岩層位態與崩坍面坡向的資料判斷，此處並非屬於順向坡的破壞模式。但是由節理面量測的結果並配合坡面走向的資料來看(參見圖 3.2)，位態爲屬於北偏東 12° ，傾角 72° 向東傾斜以及北偏東 58° ，傾角 65° 向北傾斜的兩組節理面的組合，可能會造成兩組楔型的破壞模式，其中一組楔形岩塊的滑動方向大約爲北偏東 30° ，屬於向北的滑動方位。而另外一組的滑動方向大約爲北偏東 20° ，也是屬於向北的滑動方位。根據岩壁裂縫量測資料顯示，其位態似乎爲屬於一個獨立之不連續的型

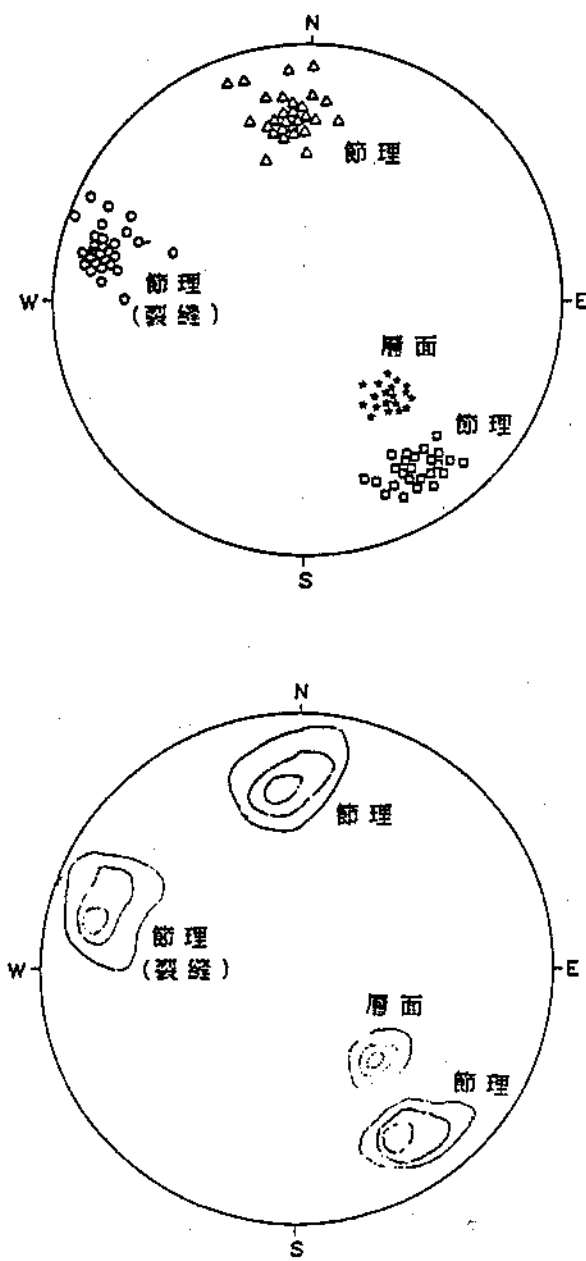


圖 3.1 不連續面極點投影圖

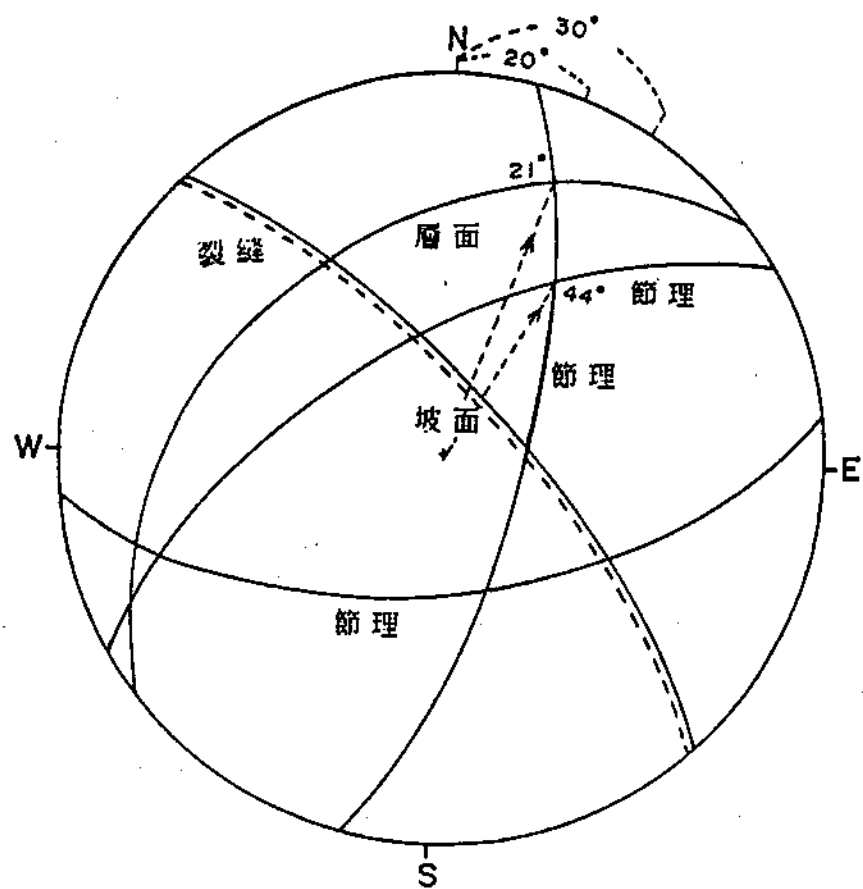


圖3.2 岩石邊坡破壞模式分析

態，再根據一些文獻資料(林及洪，1992)顯示，此裂縫型態為可能擬似一種坡體經解壓後所形成另一組獨立的節理，由於解壓型態的研究於本地區尚未相當廣泛，因此，本研究區之坡體是否具有此特色則仍需密切的加以觀察研究。

第四章 地貌表徵

根據本研究區採石礦場上邊坡採掘面所量測到的坡向位態爲北偏西 45° ，其坡面近乎垂直，坡角平均分布約在 70° 至 80° 之間，向北傾斜。現場之配置大致可分成三階平坦地(參見圖 4.1)。首先，在最接近石礦場上邊坡採掘面較爲南側的坡址處，是一長約 105公尺，寬約 17公尺的擬似人工堆石場，堆置有直徑平均在 30 至 80 公分左右的石灰岩塊，在此擬似人工堆石場的南側有一寬約 5 公尺的聯絡道路，其道路坡度的分布大約在 3% 左右，由此聯絡道路向東側可下至第二階平坦地。第二階平坦地，長約 100 公尺，寬度約 45 公尺，其北側爲樹林、雜草及岩塊堆石混合區，此一平坦地爲現地正大採石礦場主要的工作場所，設有幾間廠房及運搬岩塊之輸送帶，此工作場所內並有幾部運土機，主要在搬運廠房內所搗製成的碎石渣，而此碎石渣泰半都堆置在此平坦地的東側，形成一堆石塊小丘，佔有約 1000 立方公尺的體積。再往東側(往下坡延伸)，爲屬於最低一層的平坦地，則設置有該採石礦場基地的辦公室及地磅等結構體，其寬度大約佔有 40 公尺的距離，而緊鄰於辦公室結構體側邊的便是蘇花公路的通過。在第二階平坦地的北側有一寬約 4 公尺左右的聯絡便道，此聯絡便道的長度約在 140 公尺左右。此便道主要是通往北側屬於一人工開闢出來的平坦地，此平坦地之上下邊坡處皆堆置著白色的礦砂，此白色礦砂於目前基地形成之休止角約在 35° 。

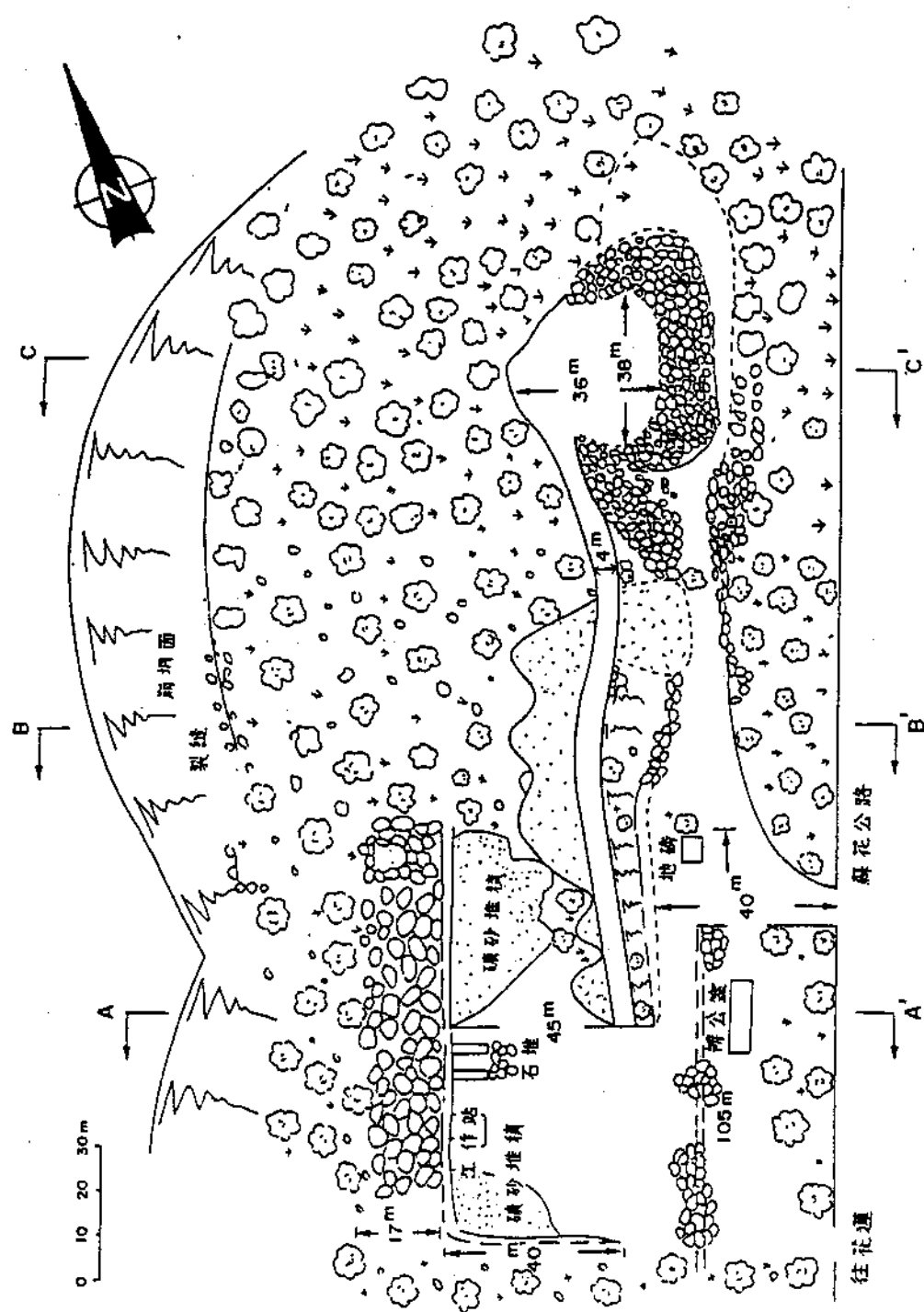


圖 4.1 現場地貌圖

左右。此人工修築之平坦地在外形上近似於橢圓形，其長度約在38公尺，寬度約在36公尺左右，平坦地北、東、南三側為灰黑色大理石碎塊所組成的斜坡，坡角約 40° ，其高度約在13公尺左右。由現場地貌表徵調查結果顯示，此一便道及人工修築之平坦地應該是於先前岩塊崩落事件所形成之崩積層岩塊之上。

爲了更進一步了解本研究區坡地及坡址腹地內（包括此採石礦場）的分佈狀況，特別以現場量測地形所切割之A-A'，B-B'及C-C'剖面來加以說明：

4.1 A-A'剖面（參見圖 4.2）

此一切割剖面分布在本研究區之最南側。靠近本研究區半山腰坡面的裂縫處下方有大量碎石岩塊的堆積，在此堆積的碎石岩塊中則生長有大量茂密的樹林及雜草。然後緊接著東側區域（即順坡而下），是一寬約17公尺的疑似人工塊石堆石場，堆置有白色的石灰岩塊，其大小分布不一，平均約在50公分左右。由堆石場至第二階平坦地，是一個坡度約 45° 至 55° 向東傾斜（向下傾）的斜坡，此第二階平坦地的寬度約有50公尺的距離，而置於此平坦地上的碎石岩塊其堆積所形成小丘之傾角則大約在 30° 左右，另外與蘇花公路相近的採石礦場辦公室，其座落區域的平坦地，寬度大約分布在40公尺左右，其西側分布的小丘陵邊坡的坡度傾角則大約在 45° 左右，高度約在2公尺左右。

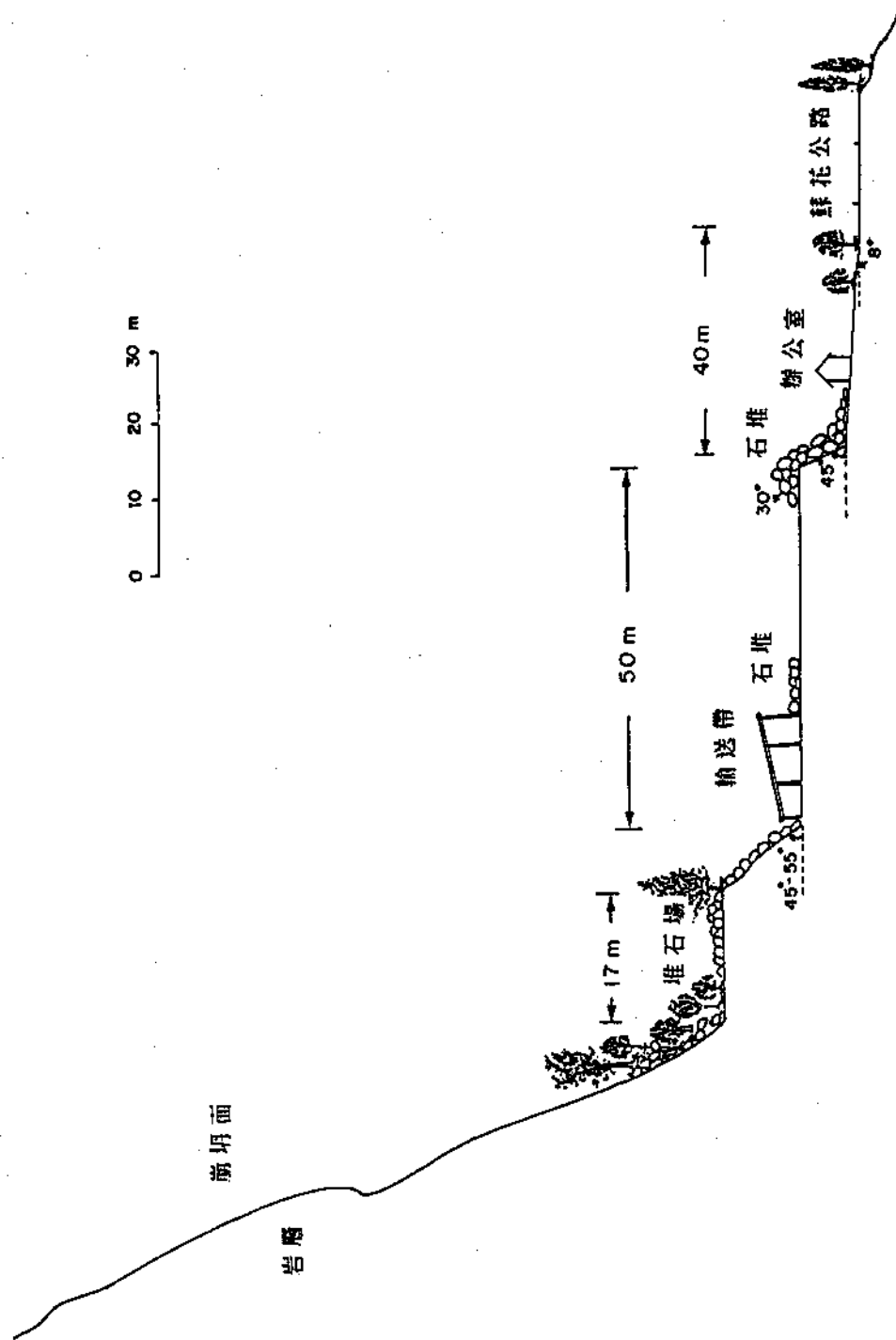


圖 4.2 A-A' 剖面圖

4.2 B-B'剖面 (參見圖 4.3)

此一切割剖面分布在本研究區之北側，主要為屬於崩落的碎石及岩塊堆積分布，在岩塊碎石間已生長有許多樹木及雜草，各種植生作物雜亂分布於其間。本切割剖面除了靠近西側採石礦場上邊坡之坡度較為陡峭之外(傾角不小於 50°)，其餘地區則較為平坦，由於本剖面範圍與其北側範圍內已有大量之樹、草叢生，並已堆置著大小獨立之岩塊，使得此區域範圍內之地貌特色很難讓工作人員進入一窺究竟。因此，只得利用礦石廠在本切割剖面北側崩積層近下坡處所先前開闢的一寬約 4公尺左右的聯絡便道，及聯絡便道北側一新開闢的平坦台地，作為地貌觀察的立腳石。不過此剖面從西側邊坡之坡址處與剖面東側之蘇花公路的距離僅有 150公尺之隔。

4.3 C-C'剖面 (參見圖 4.4)

本切割剖面位於礦區的最北側，其地表主要仍是以岩塊崩落事件所形成之崩積層為主要的構成單元，由於先前發生的崩坍事件至今已有多數年，崩積層之上已長出茂密的樹林及雜草。採石礦廠方在鄰近於崩積層下坡處新闢了一個平坦地，其寬度約為36公尺，長度則約在38公尺左右，此平坦地之外形略呈橢圓形。與平坦地南側銜接部份有一寬約 4公尺左右的便道，可通往B-B'剖面及A-A'剖面之堆石平台。此一平台由灰黑

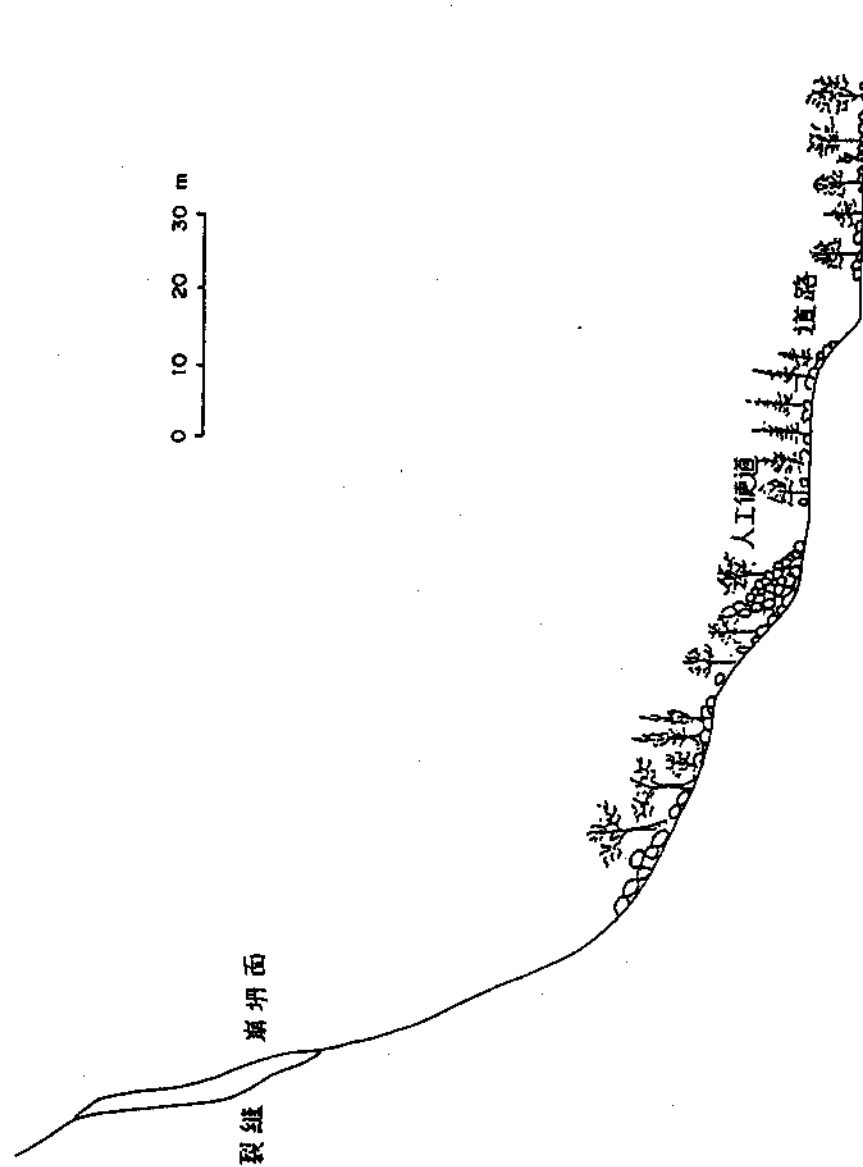


圖 4.3 B-B' 剖面圖

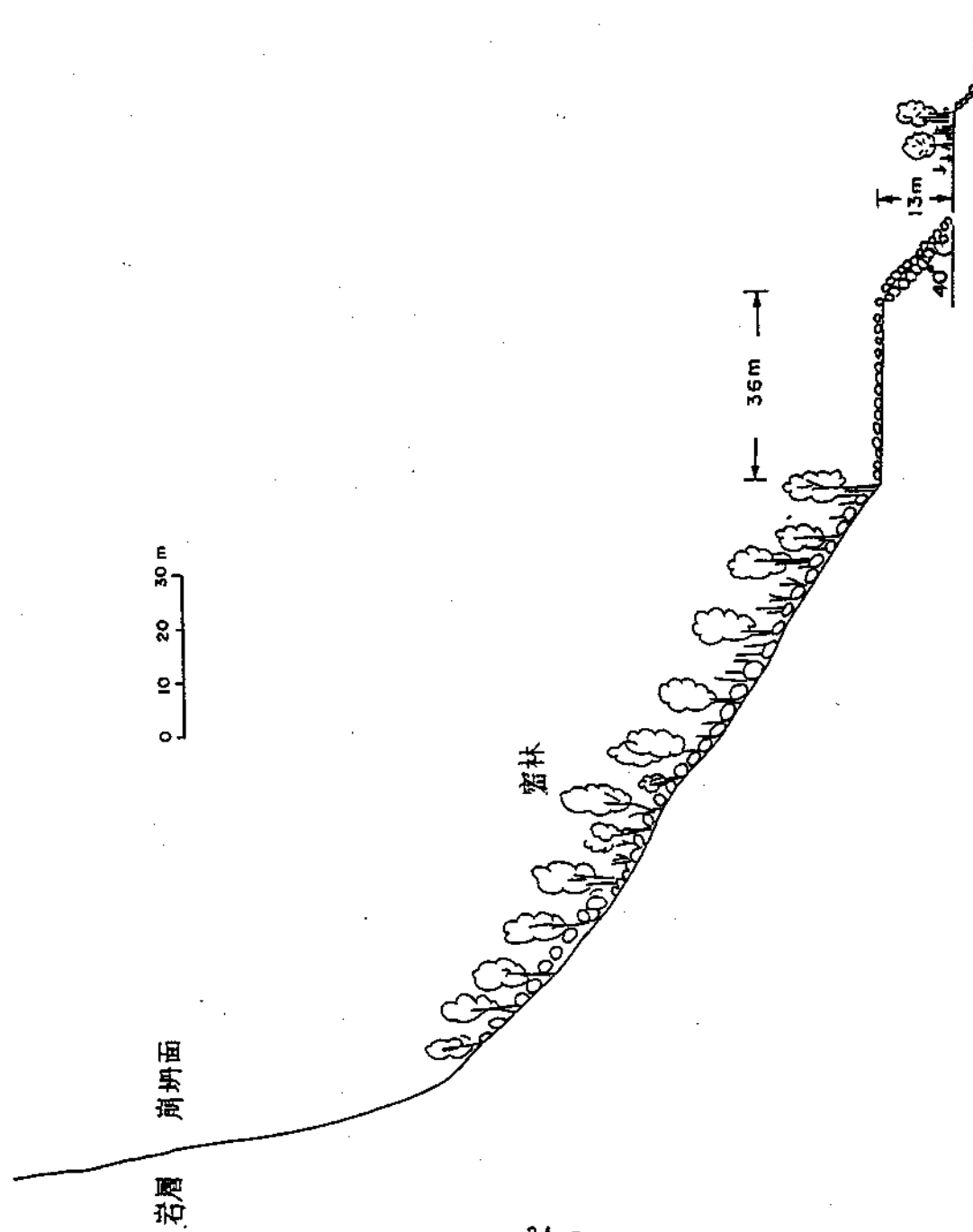


圖 4.4 C-C' 剖面圖

色的大理岩塊所構成，岩塊堆積的休止角約在 40° 左右。平台的高度較東側的蘇花公路高出約15公尺，兩者之距離約為20公尺。

綜合以上資料，本研究區坡址之腹地(包括採石礦場)，其縱深約150公尺，寬約200公尺。腹地分布有三個不定形之台階平坦地，現場除了北側區域為現有採石礦場之作業廠房外，其餘地面皆為植生作物及塊石所堆積。

第五章 處理方案研究

5.1 研究方案

依據第三章地質概況及地質資料的分析結果顯示，本研究區域之岩壁坡面內有兩組潛在性的不穩定岩楔存在，此不穩定岩楔可能會因滑動而造成落石的現象，對於本研究區而言，這些落石將可能挾著巨大的動能，危害至坡腳下之蘇花公路與北迴鐵路的交通設施。因此，為防患未然，實在有必要以審慎的態度評估整治的對策，並提出有效之處理方案。

對本研究區而言，處理此潛在性不穩定坡體的整治方案，大致上，可整理出下列幾種：

方案(1)，固定鬆動岩塊 (fixed loose rocks on the slope)：針對現場目前已裸露鬆動之岩塊，以預力岩錨的方式來固定之，並配合著岩壁噴漿措施以防止岩壁內的裂隙，因受風化作用的關係而繼續擴大(見圖5.1)。

方案(2)，移除鬆動岩塊 (removing loose rocks)：針對現有存在的坡面，以階梯的開挖方式，逐步將目前已於岩壁上形成鬆動的岩塊移除，如此，將可得到一新鮮而穩定的坡面(見圖5.2)。

方案(3)，攔截落石 (intercepting falling rock)：根據目前地形分布之狀況，於坡址之地表面上放置多道的壕溝 (ditch)及防護牆 (fence)，或於坡面上吊掛鐵絲網 (wire mesh)，攔截落石於坡面之內側，如此將可避免岩塊繼續滾落坡腳，進而危害既有設施(見圖5.3)。

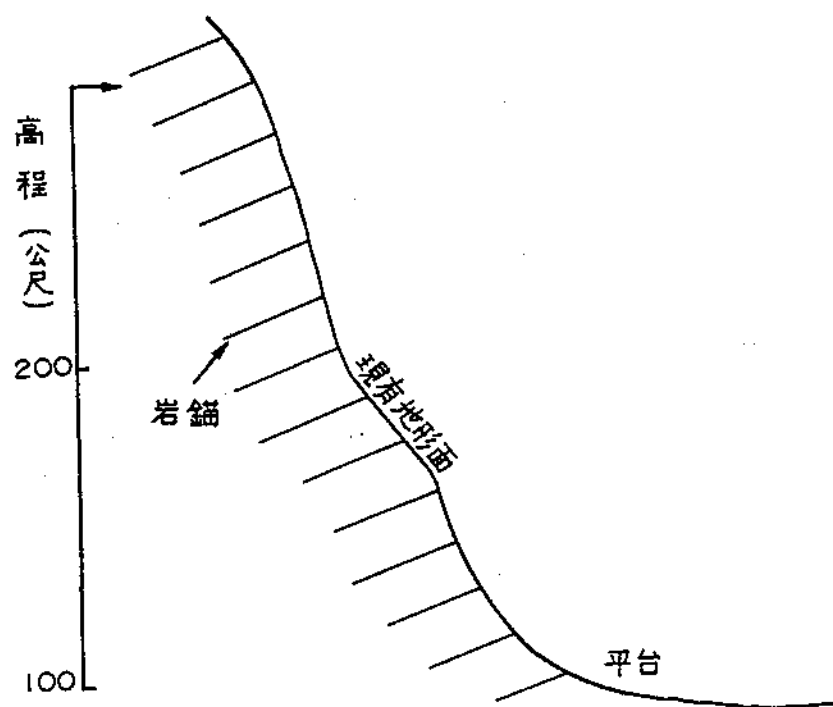


圖5.1 方案(A)示意圖

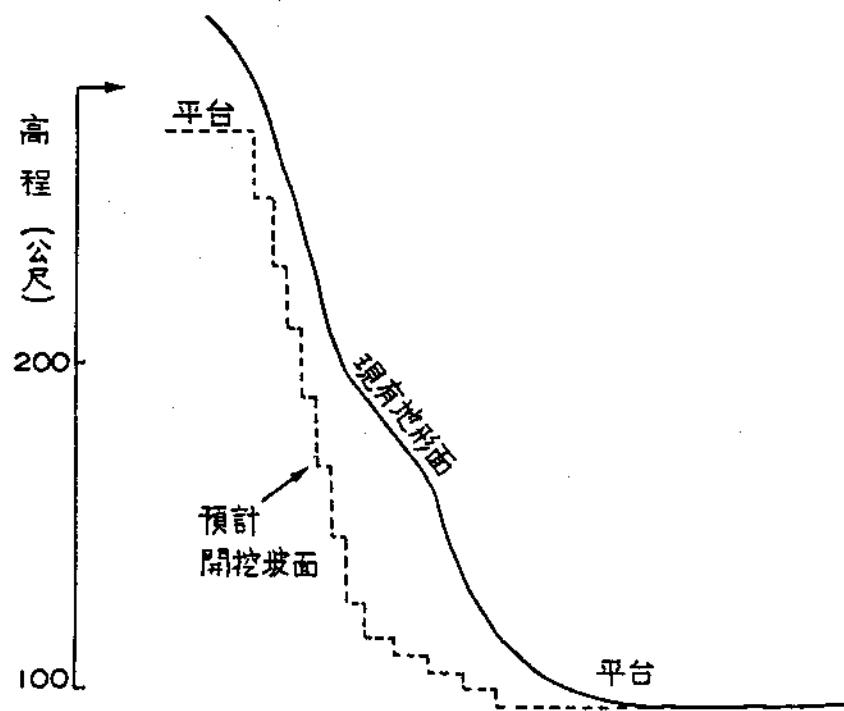


圖 5.2 方案 (B) 示意圖

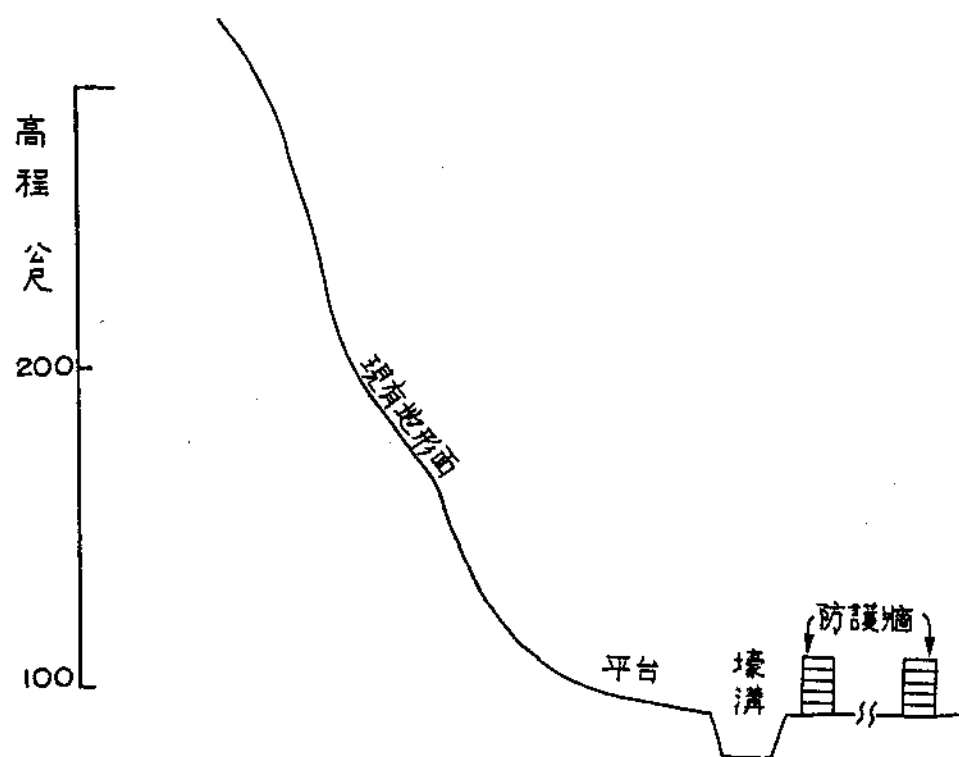


圖 5.3 方案 (C) 示意圖

5.2 方案評估

由於本地區坡面較為陡峭，垂直落差在 160公尺左右，如果欲以方案(1)或方案(2)來處理，則由於岩壁陡峻，無足夠施作空間，在施工上較為困難，不僅工期冗長，而且岩錨施作之工程款及階梯式開挖之大量岩方費用，將使整個工程費大大提高許多，更甚者，這些措施將嚴重破壞現有的自然景觀。又依據上述現場地質調查結果顯示：走向為北偏西 45° ，傾角為向北傾斜 70° 之岩石裂縫似乎為屬於「解壓節理」的一種。因為根據研究指出，一般解壓節理常遍存於峭壁內，其節理的末端通常是停止於岩盤中，不會出露於自由面(即岩盤之外側)，此解壓節理之延伸深度分布不一，大部份在肉眼的觀察中是屬於閉合的，即節理消失於岩盤內，一旦受到風化及滲水的作用，就會自動形成張開之裂縫，致使原已"鬆動"之岩塊會持續擴大其節理(裂縫)之範圍與深度，此種現象將隨時間的增長而加劇。因此，假若現場之岩壁裂縫屬於解壓節理的一種，則方案(1)或(2)的岩錨固定方式或岩塊移除方式，在長期安全上的考慮仍有不足之處，因此方案(1)及方案(2)屬於較不可行之方式。

綜合上述之分析，方案(3)似為本研究區最佳的處理方案。方案中以吊掛鐵絲網的方式來阻止落石的對外擴散，僅對於小塊落石具有較大之功效，而對於本地區可能產生之大規模落石則恐怕將難以發揮具體之效益。因此，本研究計劃也同時建議以設置壕溝與防護牆的方式，來提供給

巨大落石的消能及堆置，此兩者合一的方式可以作為本地區坡面處理方案的原則。

再者，此一處理方案對於原地形之破壞程度可以減低至最小的地步(即無任何的開挖破壞措施)，實際上，對坡面而言，是屬於“零處理”方式，而且整個施工工期與工程施作費用將相對的降低許多。由現場彙集資料的結果顯示：崩坍事件發生迄今已逾十年的時間，現場未再發生任何大型岩塊的崩落事件，顯然目前坡面局部性之穩定性仍然還高，因此，該岩壁應該儘量避免人為之擾亂破壞。一旦落石無意間發生，以壕溝及防護牆之攔截方式將可大大的減少落石之衝擊力，進而可減低交通、財物及生命上的損失，如此防患於未然，方為整治防災處理方案的最上策。

第六章 本研究建議之處理方案

根據第五章之建議，就設置壕溝與防護牆之處理原則下，本章節將以科學化的質點運動學與能量學的觀點，來推估落石可能之運動軌跡以及其可能影響的範圍，再根據這些實際運算的結果，提出本研究建議處理方案中之壕溝與防護牆設施之大小及位置。

6.1 落石之運動軌跡與滾落影響範圍

6.1.1 落石之運動模式

當岩塊由裂縫開始剝離而且順著坡面向下運動時，是屬於滾動之型式 (rolling rockfall mode) 落下；若為自由落體之方式，則此落石將會發生跳動之型式 (bouncing rockfall mode)。本節將先就此兩種模式之分析方法作一概括性的說明，其次再利用分析之模式，推算落石可能掉落之範圍，然後提出建議防治之對策。

(一) 滾動模式

當岩塊於滾動時，坡面將對岩塊產生一牽制力 (drag force)，此力量與正向應力成正比，其關係以一摩擦係數表示之。圖 6.1 即為表示作用在落石上之各種力的示意圖。由圖 6.1 上可知，落石沿邊坡滾下之淨加速度為 a

$$\begin{aligned} a &= g \sin \theta - \mu g \cos \theta \\ &= g(\sin \theta - \mu \cos \theta) \quad \text{------(1)} \end{aligned}$$

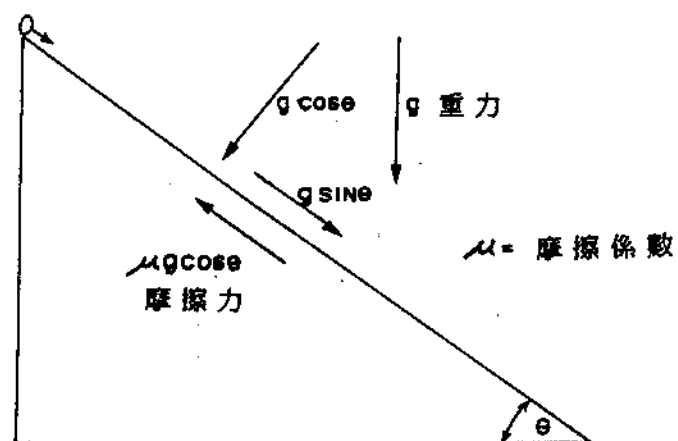


圖 6.1 影響落石滾動之各種示意圖

式中 g 為重力加速度， θ 為坡角， μ 為摩擦係數。在時間 t 時之速度 V 及距離 d 為：

$$V = V_0 + at \quad \text{-----}(2)$$

$$d = V_0 t + 0.5at^2 \quad \text{-----}(3)$$

式中 V_0 為初始速度。

而落石滾動距離 d 所須之時間及終端速度可以式(4)、(5)計算之：

$$t = -\frac{V_0}{a} + \sqrt{\left(\frac{V_0}{a}\right)^2 + \frac{2d}{a}} \quad \text{-----}(4)$$

$$|V| = \sqrt{V_0^2 + 2ad} \quad \text{-----}(5)$$

式(5)中，若 $2ad \leq -V_0^2$ 時，則岩塊將因摩擦力之影響而停止運動。

(二)跳動模式

落石跳動之示意圖，如圖 6.2所示。若岩塊由高度 $(H + h_0)$ 處以初速度 (V_x, V_y) 落下，則其運動之軌跡可以式(6)、(7)描述之。

$$x = V_x t \quad \text{-----}(6)$$

$$y = (H + h_0) + V_y t - \frac{1}{2}gt^2 \quad \text{-----}(7)$$

將式(6)代入式(7)，得：

$$y = (H + h_0) + V_y/V_x x - \frac{1}{2}(g/V_x^2)x^2 \quad \text{----}(8)$$

式(8)即為一拋物線之落石運動軌跡。而邊坡坡面之方程式為：

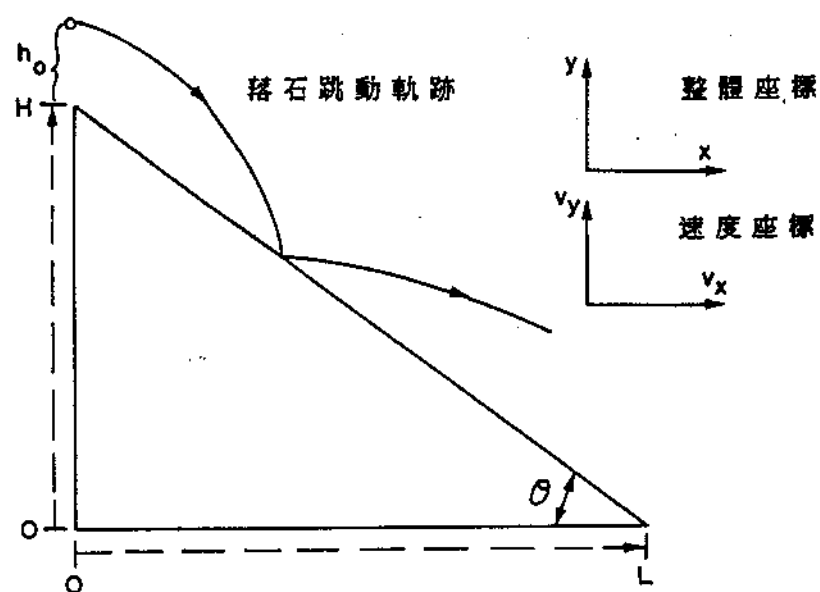


圖 6.2 描述落石跳動軌跡之參數

$$y = H - x \tan \theta \quad \text{-----}(9)$$

則拋物線與坡面之相交點為 x^* ，

$$x^* = A + \sqrt{A^2 + 2V_x^2(h_0/g)} \quad \text{-----}(10)$$

式中 $A = (V_y/V_x + \tan \theta) V_x^2/g$

- ① 若 $x^* > L$ ，則相交點落於該坡段之外，落石在該坡段最低處正上方之速度及高度(h_0')為，

$$V_x' = V_x \quad \text{-----}(11)$$

$$V_y' = V_y - \frac{g}{V_x} L \quad \text{-----}(12)$$

$$h_0' = (H+h_0) + \frac{V_y}{V_x} L - \frac{1}{2} g \frac{L^2}{V_x^2} \quad \text{----}(13)$$

- ② 若 $x^* < L$ ，則落石與該坡段相交、碰撞彈起，故

$$V_x' = V_x$$

$$V_y' = V_y - \frac{g}{V_x} x^* \quad \text{-----}(14)$$

碰撞後之速度 V'' ，須考慮能量損耗之影響，此可以在垂直及平行坡面的方向上各假設一能量折減係數 R_n 及 R_t （折減係數由0至1，表示能量完全損失或沒有損失，參見圖6.3），故反彈後之速度可以數學式表式如下：

$$\begin{Bmatrix} V_x'' \\ V_y'' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_t & 0 \\ 0 & R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x' \\ V_y' \end{Bmatrix} \quad \text{---}(15)$$

上式係先將整體座標(global coordinates)轉換至局部座標(local coordinates，參見圖6.4)，以考慮折減係

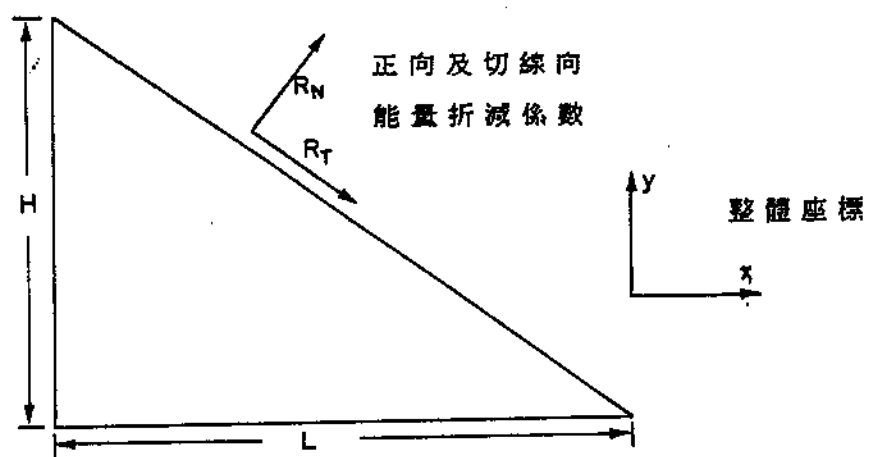


圖 6.3 能量折減係數示意圖

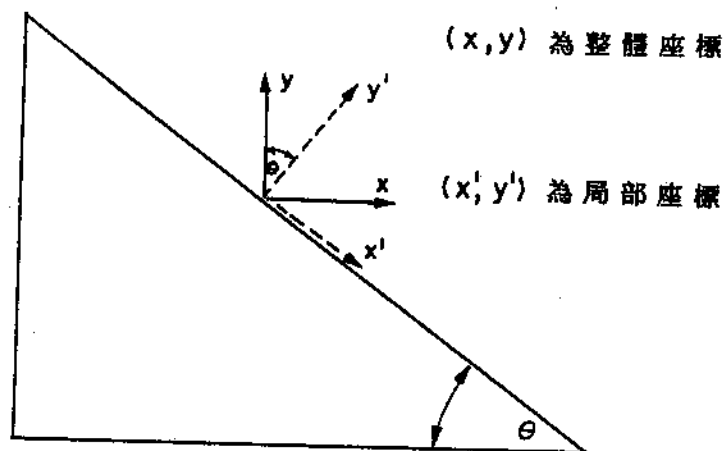


圖 6.4 整體座標與局部座標之關係

數之影響後，再轉回整體座標。上式簡化後可寫成下式：

$$V_x'' = \cos \theta A_1 - \sin \theta A_2 \quad \text{-----}(16)$$

$$V_y'' = -\cos \theta A_2 - \sin \theta A_1 \quad \text{-----}(17)$$

$$\text{式中 } A_1 = R_t(\cos \theta V_x' - \sin \theta V_y')$$

$$A_2 = R_n(\sin \theta V_x' + \cos \theta V_y')$$

此後，可以新的高程 H' 及水平距離 L' (見下式(18)與(19))來重複以上的步驟，並繼續分析。

$$H' = H - \frac{L}{H} X^* \quad \text{-----}(18)$$

$$L' = L - X^* \quad \text{-----}(19)$$

6.1.2 落石影響距離的估算

落石影響距離之估算將考慮上述之滾動及跳動兩種運動型態。茲以剖面B-B'為例，如圖 6.5所示，該邊坡大致可分成三段，上段坡坡度為 68° ，中段坡坡度為 30° ，下段坡坡度為 45° ；各坡段之斜長為 $d_1=42\text{m}$ ， $d_2=34\text{m}$ ， $d_3=15.5\text{m}$ 。滾動分析所須之摩擦係數，於上段坡取 $\mu_1 = \tan 30^\circ = 0.58$ ；中、下段坡則由其安息角(約 $35^\circ \sim 40^\circ$)估算摩擦係數，即

$$\mu_2 = \mu_3 = \tan 35^\circ = 0.7$$

(一) 滾動距離推估

① 上段坡 ($\theta_1 = 68^\circ$)

由式(1)、(5)，得

$$a_1 = g(\sin 68^\circ - 0.58 \cos 68^\circ) \approx 0.71g$$

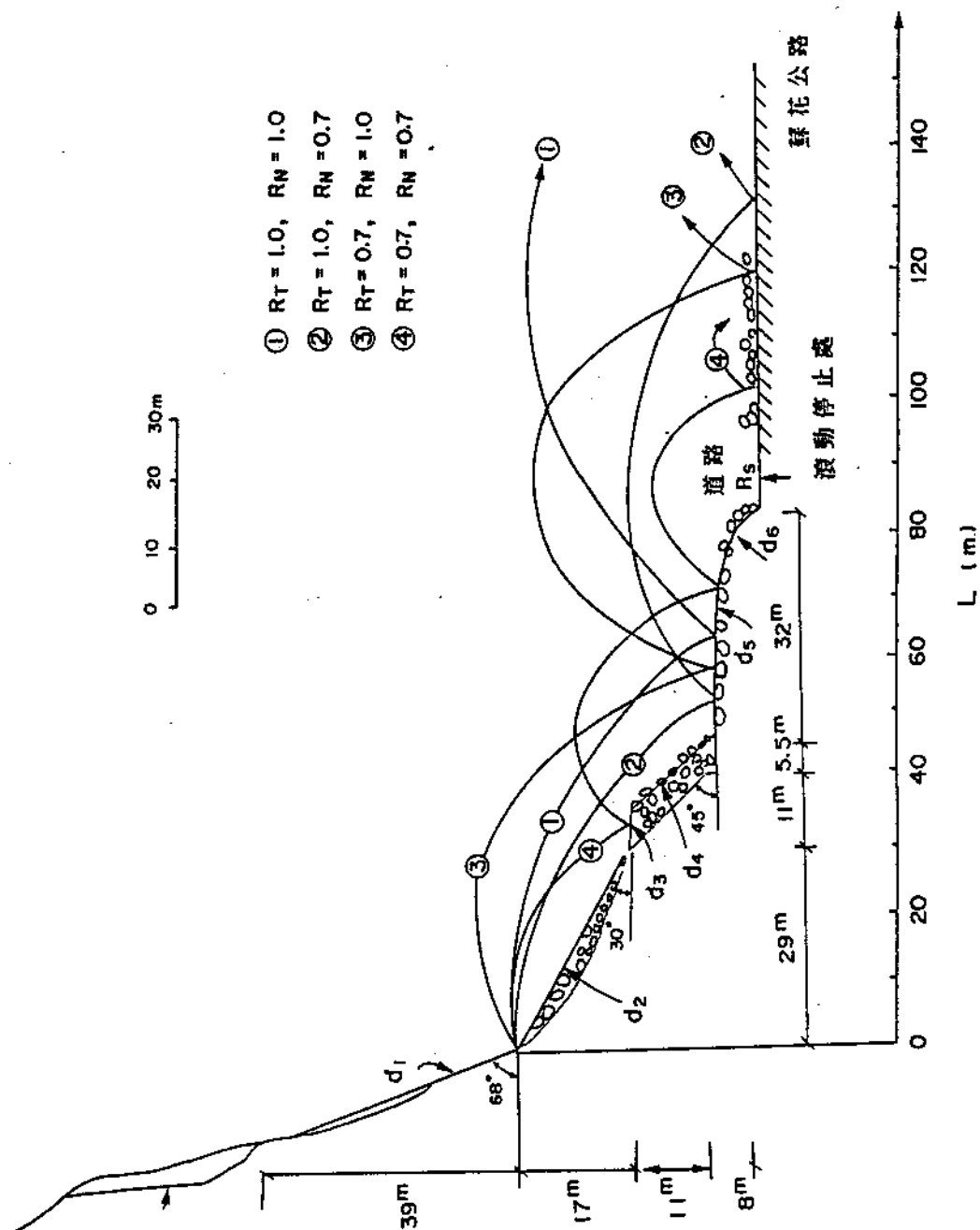


圖 6.5 碎石運動軌跡分析結果

$$\begin{aligned}
 v_1 &= \sqrt{v_0^2 + 2a_1d_1} \\
 &= \sqrt{0 + 2 \times (0.71 \times 9.8) \times 42} \\
 &= 24 \text{ m/sec}
 \end{aligned}$$

② 中坡段 ($\theta_2 = 30^\circ$)

$$a_2 = g(\sin 30^\circ - 0.7 \cos 30^\circ) = -0.11g$$

$$\begin{aligned}
 v_2 &= \sqrt{v_1^2 + 2a_2d_2} \\
 &= \sqrt{24^2 + 2 \times (-0.11 \times 9.8) \times 34} \\
 &= 22.4 \text{ m/sec}
 \end{aligned}$$

③ 中坡段下方之平台 ($\theta_3 = 0^\circ$)

$$a_3 = -0.7g$$

$$\begin{aligned}
 v_3 &= \sqrt{(22.4)^2 + 2 \times (-0.7 \times 9.8) \times 5.5} \\
 &= 20.6 \text{ m/sec}
 \end{aligned}$$

④ 下坡段 ($\theta_4 = 45^\circ$)

$$a_4 = g(\sin 45^\circ - 0.7 \cos 45^\circ) = 0.21g$$

$$\begin{aligned}
 v_4 &= \sqrt{v_3^2 + 2a_4d_4} \\
 &= \sqrt{(20.6)^2 + 2 \times (0.21 \times 9.8) \times 15.5} \\
 &= 22.1 \text{ m/sec}
 \end{aligned}$$

⑤ 大平台 ($\theta_5 = 0^\circ$)

$$a_5 = g(\sin 0^\circ - 0.7 \cos 0^\circ) = -0.7g$$

$$\begin{aligned}
 v_5 &= \sqrt{(22.1)^2 + 2 \times (-0.7 \times 9.8) \times 32} \\
 &= 7.0 \text{ m/sec}
 \end{aligned}$$

⑥大平台下方小斜坡 ($\theta = 45^\circ$)

$$\begin{aligned} V_6 &= \sqrt{(7)^2 + 2 \times (0.21 \times 9.8) \times 11.3} \\ &= 9.8 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

⑦落石停止距離，由式(5)計算得

$$d_7 = \frac{(9.8)^2}{2 \times 0.7 \times 9.8} = 7 \text{ m}$$

即約為 $L=90\text{m}$ 處 (參見圖 6.5, R_s 點)，亦即圖上所示之道路處。

(二)跳動距離推估

落石沿上段坡滾動而下，遇中段坡時，因坡角改變，可能會產生跳動之運動型態，故本節亦將嘗試推估跳動之距離。分析時，折減係數將採用幾種可能之組合。

由 2.1 節之分析，落石滾動至上段坡末端之終端速度為 $V_1=24 \text{ m/sec}$ (向下)。

$$\text{由此 } V_x' = V_1 \cos 68^\circ = 9 \text{ m/sec}$$

$$V_y' = -V_1 \sin 68^\circ = -22.2 \text{ m/sec}$$

①設能量折減係數 $R_t=R_n=1$

由式(16)、(17)計算第一次反彈後之速度，

$$\begin{aligned} A_1 &= R_t (\cos \theta V_x' - \sin \theta V_y') \\ &= (9 \cos 30^\circ + 22.2 \sin 30^\circ) \\ &= 18.9 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_2 &= R_n (\sin \theta V_x' + \cos \theta V_y') \\ &= -14.7 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

$$V_x'' = \cos \theta A_1 - \sin \theta A_2 \quad (\theta = 30^\circ)$$

$$= 0.866(18.9) - 0.5(-14.7)$$

$$= 23.8 \text{ cm/sec}$$

$$V_y'' = -\cos \theta A_2 - \sin \theta A_1$$

$$= -0.866(-14.7) - 0.5(18.9)$$

$$= 3.3 \text{ cm/sec}$$

$$\lambda_1 = \tan^{-1} \left(\frac{V_y''}{V_x''} \right) = 8^\circ$$

以上之 V_x'' , V_y'' 爲落石碰到上段坡後之反彈速度，反彈後落石之反射角 λ_1 爲與水平成 8° 向上，並以自由落體之方式落下。經試算後，落石約落在下段坡下方之大平台上，(參見圖 6.5 上①之軌跡)，其距離之估算如下。假設大平台之高度爲 8m，則由式 (13)，設 $h_0' = 8\text{m}$ ， $H + h_0 = 36\text{m}$ ， $V_x = V_x''$ ， $V_y = V_y''$ ，則

$$8 = 36 + \frac{3.3}{23.8} L_1 - 0.5(9.8) \left(\frac{L_1}{23.8} \right)^2$$

$$L_1 = 66\text{m}$$

落石達大平台之速度計算如下(利用式 (11)、(12))

$$V_x' = V_x'' = 23.8 \text{ m/sec}$$

$$V_y' = V_y'' - L_1 g / V_x''$$

$$= 3.3 - (9.8/23.8) \times 66$$

$$= -23.8 \text{ m/sec}$$

計算第二次反彈之速度

$$A_1 = R_t (\cos \theta V_x' - \sin \theta V_y') \quad (\theta = 0^\circ)$$

$$= 23.8 \text{ m/sec}$$

$$\begin{aligned} A_z &= R_n(\sin \theta V_x' + \cos \theta V_y') \\ &= -23.8 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_x'' &= \cos \theta A_1 - \sin \theta A_z \\ &= 23.8 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_y'' &= -\cos \theta A_z - \sin \theta A_1 \\ &= 23.8 \text{ m/sec} \end{aligned}$$

落石再以 $V_x'' = 23.8 \text{ m/sec}$, $V_y'' = 23.8 \text{ m/sec}$, $\lambda_z = 45^\circ$ 反彈經自由落體至 $h_0' = 0$ 時, 則其水平距離 L_z 為

$$\begin{aligned} 0 &= 8 + L_z(23.8/23.8) - 4.9(L_z/23.8)^2 \\ L_z &= 123 \text{ m} \end{aligned}$$

故第二次落點為第一次水平距離 $L_1 = 66\text{m}$ 與第二次水平距離 $L_z = 123\text{m}$ 之和, 即 189m 為第二次落點處。

第二次拋物線之軌跡, 達最高點之時間為 $t_{\max}$,

$$t_{\max} = 23.8/9.8 = 2.4 \text{ sec}$$

最高點 $h_{\max}$ 為

$$\begin{aligned} h_{\max} &= 8 + 23.8 \times 2.4 - 4.9(2.4)^2 \\ &= 37 \text{ m} \end{aligned}$$

② 設能量折減係數 $R_t = 1$, $R_n = 0.7$

第一次反彈 ($\theta = 30^\circ$) 之速度及反射角為

$$A_1 = 18.9 \text{ m/sec}$$

$$A_z = -10.3 \text{ m/sec}$$

$$V_x'' = 21.5 \text{ m/sec}$$

$$V_y'' = -0.5 \text{ m/sec}$$

$$\lambda_1 = 13^\circ (\text{朝下})$$

第一次反彈後自由落體之速度及落距為

$$V_x = V_x'' = 21.5 \text{ m/sec}$$

$$V_y = V_y'' = -0.5 \text{ m/sec}$$

$$L_1 = 49 \text{ m}$$

$$V_x' = V_x'' = 21.5 \text{ m/sec}$$

$$V_y' = V_y'' - L_1 g / V_x'' = -22.8 \text{ m/sec}$$

第二次反彈 ($\theta = 0^\circ$) 後之速度、反射角、及落距為

$$A_1 = 21.5 \text{ m/sec}$$

$$A_2 = -16.0 \text{ m/sec}$$

$$V_x'' = 21.5 \text{ m/sec}$$

$$V_y'' = 16.0 \text{ m/sec}$$

$$L_2 = 80 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 37^\circ (\text{朝上})$$

$$L = L_1 + L_2 = 129 \text{ m}$$

$$t_{\max} = 1.6 \text{ sec}$$

$$h_{\max} = 21 \text{ m}$$

此種情況之運動軌跡，如圖6.5上之②所示。

③ 設能量折減係數 $R_t = 0.7$ ， $R_n = 1$

第一次反彈 ($\theta = 30^\circ$) 之速度及反射角為

$$A_1 = 13.2 \text{ m/sec}$$

$$A_2 = -14.7 \text{ m/sec}$$

$$V_x'' = 18.8 \text{ m/sec}$$

$$V_y'' = 6.1 \text{ m/sec}$$

$$\lambda_1 = 18^\circ (\text{朝上})$$

第一次反彈後自由落體之速度及落距為

$$V_x = V_x'' = 18.8 \text{ m/sec}$$

$$V_y = V_y'' = 6.1 \text{ m/sec}$$

$$L_1 = 56\text{m}$$

$$V_x' = V_x'' = 18.8 \text{ m/sec}$$

$$V_y' = V_y'' - L_1 g / V_x'' = -23 \text{ m/sec}$$

第二次反彈 ($\theta = 0^\circ$) 後之速度、反射角、及落距為

$$A_1 = 13.2 \text{ m/sec}$$

$$A_2 = -23 \text{ m/sec}$$

$$V_x'' = 13.2 \text{ m/sec}$$

$$V_y'' = 23.0 \text{ m/sec}$$

$$\lambda_2 = 60^\circ (\text{朝上})$$

$$L_2 = 66\text{m}$$

$$L = L_1 + L_2 = 122 \text{ m}$$

$$t_{\max} = 2.34 \text{ sec}$$

$$h_{\max} = 35 \text{ m}$$

此種情況之運動軌跡，如圖6.5上之③所示。

④ 設能量折減係數 $R_t = 0.7$ ， $R_n = 0.7$

第一次反彈 ($\theta = 30^\circ$) 之速度及反射角為

$$A_1 = 13.2 \text{ m/sec}$$

$$A_2 = -10.3 \text{ m/sec}$$

$$V_x'' = 16.6 \text{ m/sec}$$

$$V_y'' = 2.3 \text{ m/sec}$$

$$\lambda_1 = 80^\circ (\text{朝上})$$

第一次反彈後自由落體之速度及落距為

$$V_x = V_x'' = 16.6 \text{ m/sec}$$

$$V_y = V_y'' = 2.3 \text{ m/sec}$$

$$L_1 = 35\text{m}$$

$$V_x' = V_x'' = 16.6 \text{ m/sec}$$

$$V_y' = V_y'' - L_1 g / V_x'' = -18.4 \text{ m/sec}$$

第二次反彈 ($\theta = 0^\circ$) 後之速度、反射角、及落距為

$$A_1 = 11.6 \text{ m/sec}$$

$$A_2 = -12.9 \text{ m/sec}$$

$$V_x'' = 11.6 \text{ m/sec}$$

$$V_y'' = 12.9 \text{ m/sec}$$

$$\lambda_1 = 48^\circ (\text{朝上})$$

$$L_2 = 38 \text{ m}$$

$$t_{\max} = 1.3 \text{ sec}$$

$$h_{\max} = 27 \text{ m}$$

$$V_x' = V_x'' = 11.6 \text{ m/sec}$$

$$V_y' = V_y'' = V_y'' - L_2 g / V_x'' = -19.2 \text{ m/sec}$$

第三次反彈 ($\theta = 0^\circ$) 後之速度及落距為

$$A_1 = 8.1 \text{ m/sec}$$

$$A_2 = -13.4 \text{ m/sec}$$

$$V_x'' = 8.1 \text{ m/sec}$$

$$V_y'' = 13.4 \text{ m/sec}$$

$$L_3 = 26 \text{ m}$$

$$t_{\max} = 1.4 \text{ sec}$$

$$h_{\max} = 17 \text{ m}$$

$$V_x' = 8.1 \text{ m/sec}$$

$$V_y' = -18 \text{ m/sec}$$

第四次反彈 ($\theta = 0^\circ$) 後之速度及落距為

$$A_1 = 5.7 \text{ m/sec}$$

$$A_2 = -12.6 \text{ m/sec}$$

$$V_x'' = 5.7 \text{ m/sec}$$

$$V_y'' = 12.6 \text{ m/sec}$$

$$L_4 = 15 \text{ m}$$

$$t_{\max} = 1.3 \text{ sec}$$

$$h_{\max} = 8 \text{ m}$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 114 \text{ m}$$

此種情況之運動軌跡，如圖6.5上之④所示。

6.1.3 分析討論

(1) 滾動模式分析結果得知，其滾動至 $L=90 \text{ m}$ 處停止，如圖6.5， R_s 點所示。

(2) 跳動模式之各種運動軌跡亦示於圖6.5，大體言之， R_t 及 R_n 等於 1.0 時，跳動最高及最遠(如①之軌跡)； R_t 小時(當 R_n 不變)，跳躍之距離較短，可控制距離之遠近(如③軌跡)。 R_n 小時(當 R_t 不變)，反彈高度較低，即 R_n 控制反彈之高度(如②之軌跡)。

(3) 由於落石碰撞地表，會有能量損失，且本地區坡面雜草遍生，故以圖6.5上④之軌跡(即 $R_t=R_n=0.7$) 較接近真實之情況。

(4) 上述分析之結果與目前殘留現地之落石堆積之位置頗為吻合。

6.2 防護設施

由上述 6.1 節，落石滾動與跳動模式分析結果得知：若在坡面最下方之大平台(見圖6.5上d5處)設置壕溝(ditch)，可以消化落石之能量，應為最有效且必要之措施

，另外在壕溝之外側設置一道防護牆，更能增強消能效果，如此，則所有滾動岩塊及大部份跳動岩塊可被攔截於防護牆前之壕溝內。第二關鍵之落石位置，約在距離上段坡(68°)之坡腳， $L=110\text{m}-130\text{m}$ 處(見圖 6.5)，可考慮設置第二道防護牆，以防止部份跳動岩塊逾越範圍破壞蘇花公路與北迴鐵路。其平面佈置示意圖與剖面示意圖(剖面B-B'爲例)可參見圖6.6與圖6.7。其中壕溝寬約4至6公尺，深約1.5至2.5公尺，內可堆置鬆砂或其他消能物品；防護牆則高約2至3公尺，寬約1.5至2公尺。

6.3 案例參考

美國科羅拉多州由於多山，公路常須穿越山嶺，由於公路上時有落石發生，險象環生，爲顧及人車之安全，科州交通局多年來即不斷進行落石防護對策之研究。據1991年7月下旬之現地試驗結果，證實柔性防護牆抵抗動態衝擊力之能力良好(見照片6.1-6.2)。他們的防護牆係就地取材，以木條構築之格條式防護牆(crib wall)，其內填塞夯實土壤，每層以地工織物加勁，可防止土壤由牆面漏出。此種防護牆施工簡便，修護容易，造價便宜。因此，本地區之防護牆宜採柔性結構，避免太過剛性，在配合自然景觀原則下，利用當地材料構築，以利於維護。必要時，可於坡腳、壕溝與防護牆周圍作植生綠化工作，除美化景觀外，尚可減少落石滾動之衝擊力。

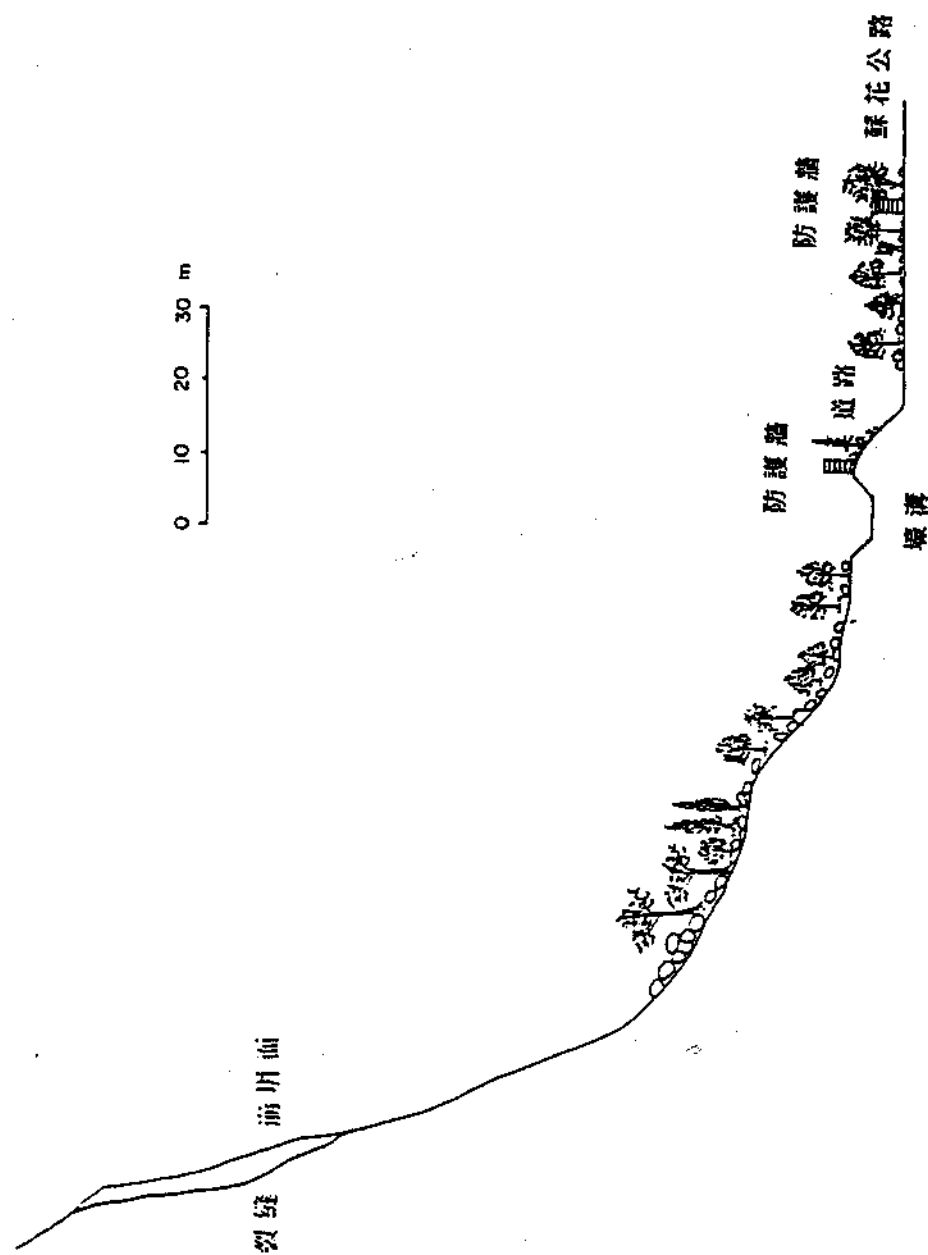


圖 6.6 建議處理方案(3)剖面位置圖

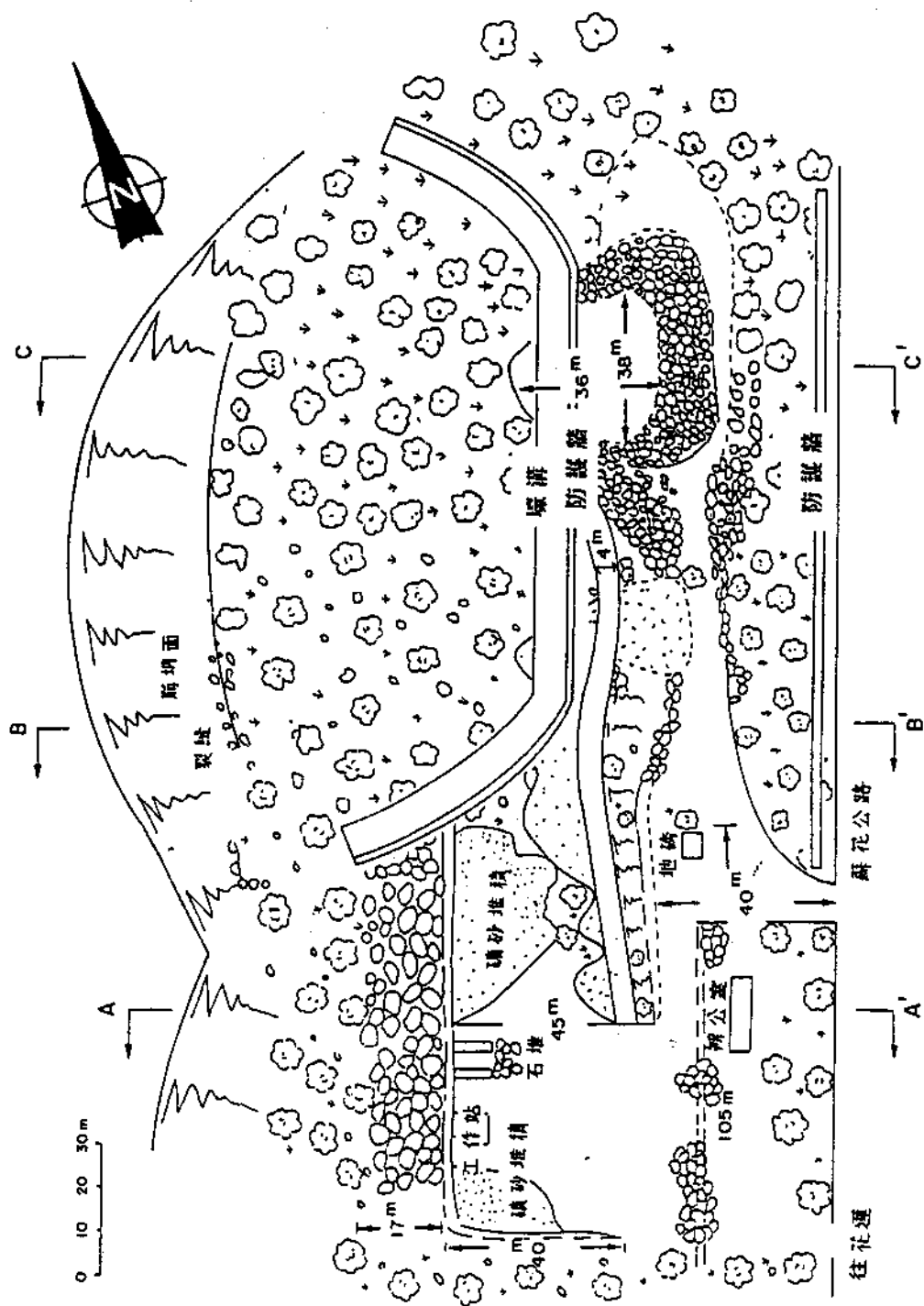


圖 6.7 建議處理方案③平面配置圖