

山坡地社區落石災害防治研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十五年十二月

PG9501-1103

095-301070000G3-201

山坡地社區落石災害防治研究

受委託者：財團法人中興工程顧問社

研究主持人：顧承宇

協同主持人：高憲彰

研究員：翁孟嘉

研究助理：林金成

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十五年十二月

ARCHITECTURE AND BUILDING RESEARCH INSTITUTE

MINISTRY OF THE INTERIOR

RESEARCH PROJECT REPORT

Study on Rockfall Hazard Mitigation for Hillside
Resident Communities

BY

KU, CHENG YU

KAO, HSIEN CHANG

WENG, MENG CHIA

LIN, CHIN CHENG

December 15, 2006

目次

表次	.....
圖次	.....
摘要	.....XI
英文摘要	.....XVII
第一章 緒論	.....1
第一節 前言	.....1
第二節 研究方法	.....6
第三節 研究內容與流程	.....9
第二章 山坡地落石災害評估準則	.....11
第一節 前言	.....11
第二節 山坡地落石災害評估準則	.....18
第三章 山坡地社區落石災害分析模式建立	.....27
第一節 落石問題特性	.....27
第二節 相關研究現況	.....34
第三節 坡地社區落石分析模式	.....37
第四章 快速地形量測技術建立	.....67
第一節 概述	.....67
第二節 地形測量 DEM	.....75

第三節	落石邊坡掃描成果	83
第五章	防護方式與工法研究	105
第一節	落石防治工法之一般性原則	105
第二節	山坡地社區落石防治工法	111
第六章	山坡地社區落石案例分析	123
第一節	落石案例評估	123
第二節	美的世界坡地社區落石案例分析	131
第三節	南雅里社區落石案例分析	145
第四節	落石問題對山坡地社區建築物退縮距離之檢討	155
第七章	結論與建議	159
附錄一	三維雷射掃描儀器規格	163
附錄二	現行有關退縮距離之法令	169
附錄三	回彈參數建議表	173
附錄四	第一次專家座談意見	179
附錄五	第二次專家座談意見	183
附錄六	期中審查意見	189
附錄七	期末審查意見	195
參考書目		201

圖次

圖 1-1	基隆中山二路落石，壓毀 3 棟民宅(1998 年 09 月 04 日).....	4
圖 1-2	台北縣瑞芳南雅里社區落石(時間不詳).....	4
圖 1-3	台北市信義區松山路美的世界社區落石(時間不詳).....	5
圖 1-4	石碇落石災害，3 棟民宅，2 部車輛受損(2006 年 06 月 03 日).....	5
圖 1-5	研究流程圖.....	10
圖 2-1	簡易現地坡高估計法.....	19
圖 3-1	常見三種落石運動型態(Ritchie, 1963).....	28
圖 3-2	落石崖錐之 (F)與 (M).....	29
圖 3-3	落石之速度分布.....	31
圖 3-4	落石之彈跳高度.....	32
圖 3-5	球度與圓度估計圖.....	32
圖 3-6	落石之衝擊力.....	33
圖 3-7	CRSP 程式分析落石示意圖.....	36
圖 3-8	Ritchie 等人落石防護設施建議.....	36

圖 3-9	塊體間之接觸力學示意圖	37
圖 3-10	回彈係數示意圖	39
圖 3-11	R_n 回彈係數試驗結果(Chau, 2002)	41
圖 3-12	R_t 回彈係數試驗結果(Chau, 2002)	41
圖 3-13	分離元素法之發展歷程	46
圖 3-14	DDA 之理論架構示意圖	50
圖 3-15	DDA 之運算架構	53
圖 3-16	單一塊體於邊坡上之幾何模型	59
圖 3-17	DDA 與極限平衡法安全係數計算結果比較	61
圖 3-18	DDA 於計算至安全係數小於 1 時之塊體發生滑動情形	61
圖 3-19	單一塊體於邊坡上之幾何模型	63
圖 3-20	DDA 與極限平衡法安全係數計算結果比較	65
圖 3-21	DDA 於計算至安全係數小於 1 時之塊體發生滑動情形	65
圖 3-22	DDA 法計算結果與 Ritchie 等人落石試驗之結果比較	66
圖 4-1	數值地形模型之表示方法	71
圖 4-2	以衛星影像立體對進行 DTM 製作之示意圖	73
圖 4-3	航照影像 DTM (5 m 解析度)	74
圖 4-4	衛星影像 DTM (5 m 解析度)	74
圖 4-5	雷射掃瞄運作方式	79
圖 4-6	崩塌地三維雷射掃描位置	80

圖 4-7 後方固定孔鑽設(左圖)與固定點反射鏡安裝(右圖).....	81
圖 4-8 高精度 GPS 定位施測	81
圖 4-9 邊坡三維雷射掃描反射點資料.....	82
圖 4-10 邊坡三維雷射掃描位置空照圖.....	84
圖 4-11 美的世界社區全景.....	85
圖 4-12 美的世界社區崩塌地三維雷射掃描位置	85
圖 4-13 美的世界社區高精度 GPS 定位施測.....	86
圖 4-14 美的世界社區邊坡三維雷射掃描反射點資料	87
圖 4-15 美的世界社區高解析度數值地形模型.....	88
圖 4-16 落石邊坡之二維地形剖面資料(第一處邊坡)	89
圖 4-17 落石邊坡之二維地形剖面資料(第二處邊坡).....	90
圖 4-18 南雅里社區第一處邊坡三維雷射掃描位置空照圖	93
圖 4-19 南雅里社區第二處邊坡三維雷射掃描位置空照圖	93
圖 4-20 第一處邊坡位置現地照片	94
圖 4-21 第一處邊坡現場施作情形	95
圖 4-22 GS200 雷射掃描儀(左圖)與 GPS 定位(右圖).....	96
圖 4-23 第一處邊坡現場落石照片	96
圖 4-24 第一處邊坡現場落石照片(近照).....	96
圖 4-25 第一處邊坡數值地形模型全景	97

圖 4-26	第一處邊坡數值地形模型疊合照片影像	97
圖 4-27	第一處邊坡旁落石原始三維雷射掃描點	98
圖 4-28	第一處邊坡旁落石原始三維雷射掃描點疊合照片影像	98
圖 4-29	第二處邊坡位置現地照片	99
圖 4-30	第二處邊坡原始三維雷射掃描點	100
圖 4-31	第二處邊坡數值地形模型	100
圖 4-32	第一處邊坡落石邊坡之二維地形剖面資料	101
圖 4-33	第二處邊坡落石邊坡之二維地形剖面資料	102
圖 5-1	落石防護之工法	108
圖 5-2	落石防護工法整體示意圖	110
圖 5-3	防落石柵於落石防治之現況應用(基隆碧砂漁港)	119
圖 5-4	南雅里社區內之防落石柵	119
圖 5-5	石碇一民房建築物前之防落石柵設置	120
圖 5-6	防落石柵堆滿落石後之情景	121
圖 6-1	美的世界社區附近山勢地形	132
圖 6-2	美的世界社區落石來源區之弱面調查	132
圖 6-3	美的世界社區過去落石掉落情形	133
圖 6-4	美的世界社區社區第一處邊坡落石分析邊坡幾何(近圓形落石)	138
圖 6-5	美的世界社區社區第一處邊坡落石分析結果(近圓形落石)	138
圖 6-6	美的世界社區社區第一處邊坡落石分析邊坡幾何(近方形落石)	139

圖 6-7	美的世界社區社區第一處邊坡落石分析結果(近方形落石).....	139
圖 6-8	美的世界社區社區第二處邊坡落石分析邊坡幾何(近圓形落石)....	140
圖 6-9	美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(近圓形落石)	140
圖 6-10	美的世界社區社區第二處邊坡落石分析邊坡幾何(近方形)	141
圖 6-11	美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(近方形落石)	141
圖 6-12	美的世界社區社區第一處邊坡落石分析結果(集塊質量法)	142
圖 6-13	美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(集塊質量法)	142
圖 6-14	美的世界社區社區第一處邊坡落石分析結果(下方防落石柵).....	143
圖 6-15	美的世界社區社區第一處邊坡落石分析結果(上方防落石柵).....	143
圖 6-16	美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(下方防落石柵).....	144
圖 6-17	美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(上方防落石柵).....	144
圖 6-18	南雅里社區第一處邊坡位置.....	146
圖 6-19	南雅里社區第一處邊坡落石與建築物位置示意圖	146
圖 6-20	南雅里社區第一處邊坡落石分析邊坡幾何	148
圖 6-21	南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(DDA).....	149
圖 6-22	南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(Rocfall)	149
圖 6-23	南雅里社區第二處落石分析邊坡幾何(左)與分析結果	150
圖 6-24	南雅里社區第二處邊坡落石分析結果(Rocfall)	150
圖 6-25	南雅里社區第一處邊坡落石分析結果.....	152

圖 6-26	南雅里社區第二處落石(近方形)分析邊坡幾何(左)與結果	153
圖 6-27	南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(Rocfall)	153
圖 6-28	南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(考慮防護設施)	154
圖 6-29	南雅里社區第二處邊坡落石分析結果(考慮防護設施)	154
圖 6-30	Ritchie 等人對於 35 公尺以下之邊坡所提之防護建議	156
圖 6-31	依據 262 條之二退縮距離之計算結果	157
圖 6-32	落石簡化分析案例幾何設定	158

摘 要

關鍵詞：落石、雷射掃描、數值模擬、落石防護

一、研究緣起

台灣位於歐亞板塊與菲律賓板塊交接處，地處造山運動之板塊邊緣，因此台灣之自然環境特性多為地形陡峻、地質破碎、節理發達，再加上民國 88 年間之 921 大地震後，使得岩坡表面之開裂節理鬆動，在颱風、地震或豪雨過後常發生落石災害。行政院國家科學委員會於 921 大地震後進行全面性勘災調查顯示，針對坡地崩塌類型之統計結果以岩石滑移、岩屑崩滑所發生之次數最多，共計 218 處，佔總普查筆數之 63%。其次為落石、翻轉型破壞，共計 77 處，佔總普查筆數之 23%。由上統計資料可發現，岩坡落石災害對於山坡地區域所造成之影響實不容忽視。因此有必要針對落石災害對山坡地社區之影響及防治方法進行研究，期降低其危害。

二、研究方法及過程

本計畫針對落石災害對山坡地社區之影響進行研究，首先建立山坡地社區落石災害評估準則，針對現有山坡地社區可能之落石災害風險提出量化之評估標準，之後就現有之落石分析方法及防護技術進行彙整及評估其適用性，最後選擇具有高度落石災害風險之山坡地社區進行落石防護及落石分析方法之案例研究。各研究項目分述如下：

一、山坡地社區落石災害評估準則之研擬

台灣地區落石災害經常性發生地點甚多，落石災害分布之位置廣泛且不確定，如何避免或是進一步防治這些潛在之落石災害，或提供山坡地社區民眾有效及直接的資訊，以減少災害損失，應是首要之課題。由於國內以往於落石災害之防治管理方面，多以各維護單位的經驗為主要依據，並沒有一套

量化的標準可供依循。故本研究研擬山坡地社區落石災害之評估準則，將影響山坡地落石風險之各種因子予以量化，訂定危險度分級標準。並依照山坡地社區可能發生落石坍方之機率，及對社區居民之危險性，以危險度分級的方式表示。

山坡地社區落石災害評估準則建立後，其研究成果可對於現有山坡地社區可能之落石災害風險提出量化之評估標準，本研究針對2處山坡地社區進行成果應用。研究成果除供各專業機構結合山坡地社區管委會用以評估其社區內發生落石之可能地點外，亦可事先防範於未然以減低落石之潛在風險，而量化之評估流程亦可作為日後落石防護設施及相關單位進行防治優先順序評定之參考。

二、落石分析模式建立

本研究計畫先收集國內外有關落石防護及分析方法之研究資料，檢討現有之落石防護與分析技術之方法，之後再建立落石分析模式。目前常見之落石分析方法之相關研究可概分為三種：現場試驗法、數學分析法及經驗法。這些方法主要是找出落石之能量及軌跡，或者是量化之落石速度、衝擊能量及彈跳高度，以提供設計者決定落石保護措施之方式。因落石運動之力學機制屬不連續體力學領域中之大變位計算，主要係考慮落石間相互之接觸與碰撞，及與自然邊坡之碰撞等，故分析方法多採如集塊質量法或是分離元素法中之個別元素法或是不連續變形分析法等進行分析。因此本研究結合集塊質量法與不連續變形分析法理論進行落石問題之分析模擬，以提供山坡地社區相關單位評估是否需增設落石防護設施，同時亦可檢核落石防護設施之效果。

三、快速地形量測技術建立

由於實際落石情形受地表地形之影響甚大，如何準確的將地表地形條件反映在落石分析中是落石分析之關鍵問題。對於特定邊坡之落石分析設計時

需採用大比例尺之地形圖或是直接進行地面測量獲取地表地形，惟絕大多數現有邊坡均無法獲取其原始地表地形資料，且間隔相當時間之後，由於地表植生或是其他因素，邊坡地形亦可能大幅變化，故本研究採用目前最新發展之三維雷射掃描測距儀進行特定地點之現地測量工作。雷射掃描觀測儀是利用儀器發射的近紅外光，量測對於測定對象的往返時間及發射角度，藉由儀器在已知之三維座標點上，自動測量地形的三維座標點數據並保存於記憶體中，可提供平距、斜距、方位角、俯仰角、坡度與坡度百分比、現地多邊形面積與二維及三維空間任意兩點間之距離測量，可長時間的觀察與周期性的監測地形變化並精密的偵測出地表輕微的移動，可觀測範圍十分的廣泛，是一種非常適合於危險地形或是坡面掃描的高精度系統。

本研究利用三維雷射掃描技術進行坡地地形現地測量，針對測量結果加值應用於落石分析之邊坡幾何剖面之製作，並提供高解析度之數值地形模型，之後再整合分析模式進行分析，期真實反應現地之邊坡地形並提昇本研究落石模擬與預測之準確度。

四、防護方式與工法研究

有關山坡地社區落石防護部分，目前主要可為「預防」、「防護」及「警戒」等三種防護方式。本研究彙總上述現有之落石防護方式與相關工法並檢討上述各落石防護於山坡地社區之適用性，之後再結合落石分析模式探討落石防護工法之效能，以提出合適之落石防護工法。惟在實際應用上，最佳對策方法之選定應視現地之狀況，就其耐久性、維護管理難易度、施工難易度、可信度和經濟性等效果詳加檢討，再決定採用之工法。

五、現地驗證及案例分析研究

本研究結合上述山坡地社區落石災害分析模式與快速地形量測技術進一步針對山坡地社區進行實地調查與案例分析工作，總計進行二個社區四處落石邊坡之案例分析研究。

三、重要發現

本研究結合目前國內外最新可應用於山坡地社區落石災害問題之理論分析技術與三維雷射地形量測技術，進行坡地社區落石問題之分析與應用，期提昇坡地社區落石災害之防治技術。依據本研究所獲致之成果可歸納結論如下所述。

1. 山坡地社區落石災害之評估準則

經由對山坡地社區之實地調查與資料蒐集後，本研究參考針對道路落石坍方之美國傳統方法及國內之相關研究成果，提出適於台灣地區之山坡地社區落石坍方危險度評估準則。本研究所提出之評估準則與一般道路落石災害之主要防治對象有所差異，其主要考量並非行車風險，而應與建築物的退縮距離及人員出入量有關，結果顯示，本研究所建議之評估準則可作為提供山坡地社區落石災害初步評估使用。

2. 山坡地社區落石災害分析模式建立

本研究針對國內外有關落石問題之理論分析方法進行廣泛之收集與研究，除檢討現有之落石分析理論外，亦結合分離元素法中之不連續變形分析法理論基礎進一步發展落石分析技術。案例分析結果顯示，本研究所發展之山坡地社區落石災害分析模式除可對於落石行進軌跡與掉落位置進行預測外，亦可考慮落石幾何影響與防護設施之效果，對於山坡地社區內特定邊坡之落石防治與後續工法選擇有相當之助益。

3. 快速地形量測技術建立

本研究為改進傳統地形測量方法及現有 DEM 因取樣間距不易詳細描繪落石之自然邊坡形狀之限制，本研究特別結合目前最新發展之三維雷射掃描技術進行落石邊坡快速地形量測技術之建立。成果顯示，本研究所採用兩款不同形式之雷射掃描儀，分別為 Trimble 公司之 GS200 與 Riegl

公司之 LPM-2K，兩款雷射掃描儀均可於短時間約 2 至 3 小時內獲取極高精度之落石自然邊坡地形，特別是 Trimble 公司之 GS200 所掃描之地形資料精度甚至可分辨邊坡上之岩體弱面，可有效提供後續落石問題分析評估之重要邊坡幾何資訊。

4. 現地驗證及分析工作

本研究結合上述山坡地社區落石災害分析模式與快速地形量測技術，進一步針對山坡地社區進行實地調查與案例分析工作，總計進行四處落石邊坡之分析工作，分別位於台北市信義區美的世界社區及台北縣瑞芳南雅里社區。案例分析結果顯示，本研究除可供各專業機構結合山坡地社區管委會用以評估其社區內發生落石之可能地點外，亦可事先防範於未然以減低落石之潛在風險，而量化之評估流程亦可提供日後落石問題詳細分析及防護設施設計之參考。

四、主要建議事項

根據研究發現，本研究針對行政檢查業務委託民間辦理處理的法制化，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議、及長期性建議加以列舉。

(一)立即可行建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部、經濟部、交通部、及水土保持局

1. 建議利用本研究所研擬之山坡地社區落石災害評估準則對更多山坡地社區潛在之落石災害進行評估，建立相關資料庫，達到防災減災之目的。
2. 建議利用遙測資料建立大尺度範圍之山坡地社區落石災害之潛勢分析，建立相關資料庫，作為後續進行防治優先順序之依據。

(二)中長期建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部、經濟部、交通部、及水土保持局

1. 台灣地區近年來因平地發展飽和，山坡地社區開發之建築行為將無可避免，然而隨踵而來之山坡地社區災害實有必要加以防範，尤其是台灣西部麓山帶地質區，多含所謂之「單面山」，其一面是順向坡，而背面是倒插坡（或稱逆向坡），倒插坡常是一個較陡的斷崖而易發生落石災害。因此，建議未來可利用本研究所研擬之山坡地社區落石災害評估準則對更多山坡地社區進行落石災害潛勢之評估，以提高山坡地社區之安全並減少相關災害損失，達到防災減災之目的。
2. 本研究已完成山坡地社區落石災害分析模式之建立，惟目前仍侷限於二維分析，而三維分析為目前國際上研究之趨勢，建議未來可進一步結合3維雷射掃描技術辦理三維落石災害分析模式之研究。
3. 本研究針對建築物因落石問題所需退縮距離分析成果顯示，現行法規在陡坡情形下，坡度由80度趨近90度時，其退縮距離趨近於0，對於有落石潛勢之陡坡之退縮距離明顯不足。本研究成果顯示對於有落石災害風險之陡坡(坡度73.3度)而言，若邊坡為40公尺高度，而無任何落石防護設施之情形下，建築物安全退縮距離約為10至11公尺。若邊坡為80公尺高度，建築物安全退縮距離約為14至18公尺。建議未來可對於有落石潛勢邊坡之退縮距離進行廣泛之討論，以訂定更周詳之建築物退縮距離。

ABSTRACT

Keywords: Rockfall, Laser scanning, Numerical modeling, Rockfall protection.

Taiwan is an active mountain belt created by the oblique collision between the northern Luzon arc and the Asian continental margin. The inherent complexities of geological natural creates numerous discontinuities through rock masses in this area, which exist in many forms such as fissures, cleavages, beddings, joints, and even faults. Accordingly, rockfall hazards triggered by earthquake activities and heavy rainfalls occur frequently in Taiwan along the past decades. Especially after the 921 earthquake in 1999, considerable damages of rockfall hazards in hillside resident areas and along engineered slopes are increasing dramatically in which the rockfall hazards become a major obstacle for engineers to deal with. Accordingly, the study on rockfall hazard mitigation for hillside resident communities was proposed herein.

The aims of the study are (1) to establish a rockfall hazard rating system for hillside resident communities, (2) to develop a numerical model for analyzing rockfall problems, and (3) to verify the developed rockfall model and to evaluate the problems of rockfall hazards.

The results obtained are concluded as follows.

1. Establishment of a rockfall hazard rating system for hillside resident communities.
2. Evaluation of the possible risk of the rockfall hazard for hillside resident communities.
3. Development of the rockfall modeling technique
4. Establishment of the 3D laser scanning technique for hillside resident areas.

5. Evaluation of the possible rockfall protection technique.
6. Providing the appropriate information for further modification of the distance between buildings and slope for hillside resident communities.

第一章 緒 論

第一節 前言

一、坡地災害類型

台灣地區近年來因平地發展飽和，導致山坡地開發建築行為日漸興盛，然而坡地地質脆弱常因不當之建築開發行為而導致災害發生。規模較大者如民國 78 年及 83 年之淡水米蘭山莊二次崩塌、民國 84 年之三峽白雞山莊住宅滑動、民國 85 年賀伯颱風所造成之土石流事件，以及民國 86 年溫妮颱風過境時發生之林肯大郡災變等，均讓人記憶猶新。

依據文獻及災害案例資料整理，屬脆弱地質所產生之坡地災害類型，大致可分為以下七類災害類型(中央地質調查所，2001)。

1. 順向坡災害類型：如汐止林肯大郡、台北虎山；
2. 落石災害類型：為數眾多之落石災害與陡坡風化土壤、節理發達之區域；
3. 崩積土坡災害類型：：如外雙溪之中央社區；
4. 紅土坡災害類型：如林口台地之嘉寶村；
5. 填方坡地災害類型：如米蘭山莊、頂好花園城、與白雞山莊；
6. 泥岩坡地災害類型：如西南部泥岩地區；
7. 谷口沖積扇(土石流區)災害類型：如花蓮銅門社區、信義鄉郡坑口。

二、山坡地社區落石災害案例

台灣位於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊交界之聚合帶，在板塊持續聚合的情況下，造山運動發達，岩層受此大地應力作用之後，造成破裂面、斷層、褶皺等大地構造極為發達。另一方面，台灣位於西太平洋熱旋區，每年平均降雨量達 2500 公釐，尤以颱風季節，單月降雨量常達 600 公釐以上，往往造成邊坡破壞，落石災害相繼產生。此外，自從民國 88 年 921 大地震後，由於岩坡表面之節理開裂鬆動，在颱風、地震或豪雨過後落石災害更是時有所聞。

整理近年來相關落石災害可知，除了造成道路交通中斷外，落石災害亦嚴重威脅山坡地社區居民之安全(如表 1.1 及圖 1.1 至圖 1.4 所示)，落石災害不只造成房屋損壞，亦造成人命損失。如何避免且防治這些潛在之落石災害，並進一步提供山坡地社區民眾有效及直接的資訊，以減少災害損失，是目前山坡地社區防災首要之課題。

表 1-1 山坡地社區落石災害案例整理

時間	事件
1986 年 05 月 25 日	太極峽谷落石災害，死亡人數達 28 人
1998 年 09 月 04 日	基隆中山二路落石，壓毀 3 棟民宅
1992 年 09 月 09 日	觀音山凌雲禪寺落石災害
1993 年 05 月 30 日	內雙溪聖人瀑布落石災害
1999 年 06 月 30 日	石碇落石災害，1 人死亡
2002 年 09 月 22 日	八斗子民宅落石災害
2003 年 09 月	台北縣汐止市秀山路山坡地社區落石災害
2005 年 01 月 13 日	雲林林內晴天土崩，持續落石未停
2005 年 04 月 03 日	花蓮文山溫泉落石，六名遊客受傷
2006 年 06 月 03 日	石碇落石災害，3 棟民宅，2 部車輛受損
時間	事件(資料來源：台北市坡地災害資料庫及本計畫蒐集)
無紀錄	台北市信義區松山路 677 之 3 號(美的世界社區)
	台北市南港區舊莊街 2 段 245 巷 2 號
	台北市內湖區康寧路 3 段 189 巷 42 號
	台北市內湖區金湖路 172 之 1 號
	台北市士林區至善路 460 巷 3 弄 15 號
	台北市士林區中社路 185 巷 2 弄 2 號
	台北市北投區泉源路 110 號、行義路 101 號、紗帽路 21 號、紗帽路 85 號
	台北縣瑞芳台二線南雅里社區、台二線鼻頭角社區

(資料來源：地調所及本研究整理)

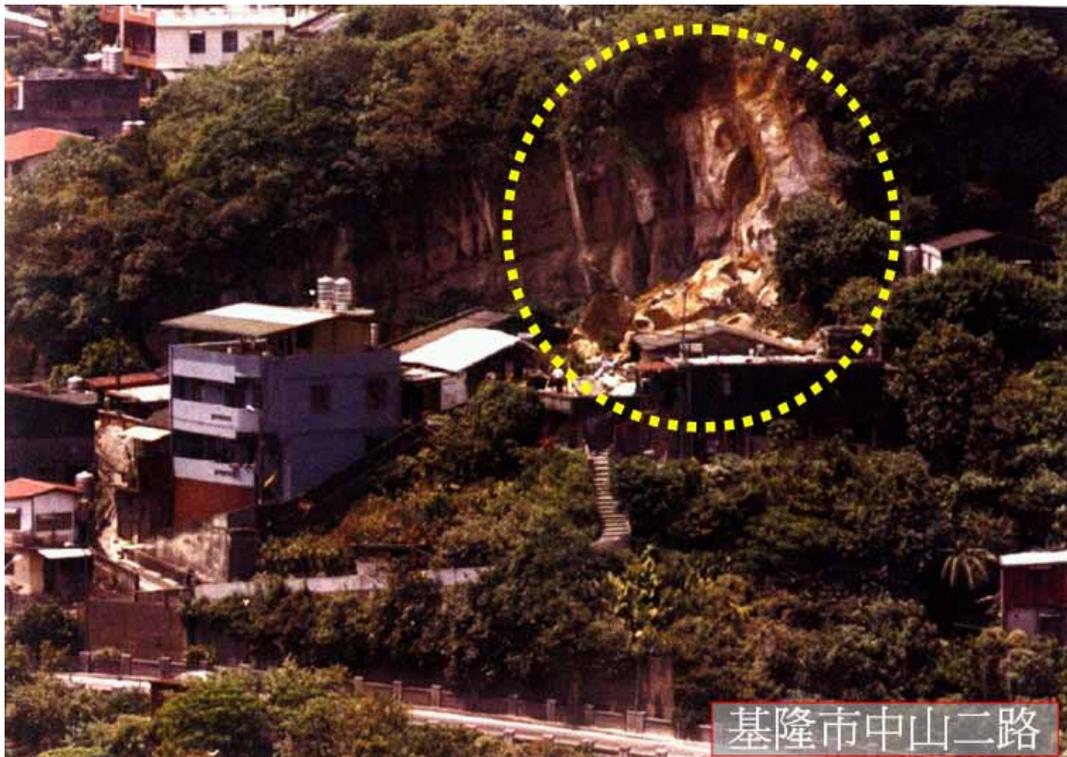


圖 1.1 基隆中山二路落石，壓毀 3 棟民宅(1998 年 09 月 04 日)

(資料來源：本研究整理)



圖 1.2 台北縣瑞芳南雅里社區落石

(資料來源：本研究整理)



圖 1.3 台北市信義區松山路美的世界社區落石

(資料來源：本研究整理)



圖 1.4 石碇落石災害，3 棟民宅，2 部車輛受損(2006 年 06 月 03 日)

(資料來源：本研究整理)

第二節 研究方法

本計畫針對落石災害對山坡地社區之影響進行研究，首先建立山坡地社區落石災害評估準則，針對現有山坡地社區可能之落石災害風險提出量化之評估標準，之後就現有之落石分析方法及防護技術進行彙整及評估其適用性，最後選擇具有高度落石災害風險之山坡地社區進行落石防護及落石分析方法之案例研究。本研究之流程詳圖 1.3，以下詳述各關鍵議題之研究方法。

一、山坡地社區落石災害評估準則之研擬

台灣地區落石災害經常性發生地點甚多，落石災害分布之位置廣泛且不確定，如何避免或是進一步防治這些潛在之落石災害，或提供山坡地社區民眾有效及直接的資訊，以減少災害損失，應是首要之課題。由於國內以往於落石災害之防治管理方面，多以各維護單位的經驗為主要依據，並沒有一套量化的標準可供依循。故本研究研擬山坡地社區落石災害之評估準則，將影響山坡地落石風險之各種因子予以量化，訂定危險度分級標準。並依照山坡地社區可能發生落石坍方之機率，及對社區居民之危險性，以危險度分級的方式表示。

山坡地社區落石災害評估準則建立後，其研究成果可對於現有山坡地社區可能之落石災害風險提出量化之評估標準，本研究針對 2 處山坡地社區進行成果應用。研究成果除供各專業機構結合山坡地社區管委會用以評估其社區內發生落石之可能地點外，亦可事先防範於未然以減低落石之潛在風險，而量化之評估流程亦可作為日後落石防護設施及相關單位進行防治優先順序評定之參考。

二、落石分析模式建立

本研究計畫先收集國內外有關落石防護及分析方法之研究資料，檢討現

有之落石防護與分析技術之方法，之後再建立落石分析模式。目前常見之落石分析方法之相關研究可概分為三種：現場試驗法、數學分析法及經驗法。這些方法主要是找出落石之能量及軌跡，或者是量化之落石速度、衝擊能量及彈跳高度，以提供設計者決定落石保護措施之方式。因落石運動之力學機制屬不連續體力學領域中之大變位計算，主要係考慮落石間相互之接觸與碰撞，及與自然邊坡之碰撞等，故分析方法多採如集塊質量法或是分離元素法中之個別元素法或是不連續變形分析法等進行分析。因此本研究結合集塊質量法與不連續變形分析法理論進行落石問題之分析模擬，以提供山坡地社區相關單位評估是否需增設落石防護設施，同時亦可檢核落石防護設施之效果。

三、快速地形量測技術建立

由於實際落石情形受地表地形之影響甚大，如何準確的將地表地形條件反映在落石分析中是落石分析之關鍵問題。對於特定邊坡之落石分析設計時需採用大比例尺之地形圖或是直接進行地面測量獲取地表地形，惟絕大多數現有邊坡均無法獲取其原始地表地形資料，且間隔相當時間之後，由於地表植生或是其他因素，邊坡地形亦可能大幅變化，故本研究採用目前最新發展之三維雷射掃描儀進行特定地點之現地測量工作。雷射掃描觀測儀是利用儀器發射的近紅外光，量測對於測定對象的往返時間及發射角度，藉由儀器在已知之三維座標點上，自動測量地形的三維座標點數據並保存於記憶體中，可提供平距、斜距、方位角、俯仰角、坡度與坡度百分比、現地多邊形面積與二維及三維空間任意兩點間之距離測量，可長時間的觀察與周期性的監測地形變化並精密的偵測出地表輕微的移動，可觀測範圍十分的廣泛，是一種非常適合於危險地形或是坡面掃描的高精度系統。

本研究利用三維雷射掃描技術進行坡地地形現地測量，針對測量結果加值應用於落石分析之邊坡幾何剖面之製作，並提供高解析度之數值地形模型，之後再整合分析模式進行分析，期真實反應現地之邊坡地形並提昇本研

究落石模擬與預測之準確度。

四、防護方式與工法研究

有關山坡地社區落石防護部分，目前主要可為「預防」、「防護」及「警戒」等三種防護方式。本研究彙總上述現有之落石防護方式與相關工法並檢討上述各落石防護於山坡地社區之適用性，之後再結合落石分析模式探討落石防護工法之效能，以提出合適之落石防護工法。惟在實際應用上，最佳對策方法之選定應視現地之狀況，就其耐久性、維護管理難易度、施工難易度、可信度和經濟性等效果詳加檢討，再決定採用之工法。

五、現地驗證及案例分析研究

本研究結合上述山坡地社區落石災害分析模式與快速地形量測技術進一步針對山坡地社區進行實地調查與案例分析工作，總計進行二個社區四處落石邊坡之案例分析研究。

第三節 研究內容與流程

一、研究內容與執行時程

由於國內以往於山坡地社區落石災害之防治管理方面，多以各維護單位的經驗為主要依據，並沒有一套量化的標準可供依循，亦缺乏有系統之研究。故本研究首先將研擬：（一）山坡地社區落石災害之評估準則，將影響山坡地落石風險之各種因子予以量化，訂定危險度分級標準，並依照山坡地社區可能發生落石坍方之機率，及對社區居民之危險性，以危險度分級的方式表示。其次進行（二）落石防護及分析方法之研究，本部分工作內容包含：(1)分析模式建立、(2)快速地形量測技術建立、與(3)防護方式與工法研究三大部分，期提昇坡地社區落石災害之防治技術。最後進行（三）現地驗證及分析工作

本研究之內容與執行時程說明如下：

表 1-2 本研究執行時程表

月次 工作項目	第一 月	第二 月	第三 月	第四 月	第五 月	第六 月	第七 月	第八 月	第九 月	第十 月	第十一 月	第十二 月	備註
資料蒐集	■												
坡地社區落石災害評估準則之研擬			■										
落石分析模式建立				■									
防護方式與工法研究						■							
三維雷射掃描儀現地測量								■					
現地驗證及案例分析									■				
報告撰寫					■						■		
專家座談					■					■			

（資料來源：本計畫整理）

二、研究流程

本研究之研究流程如下：

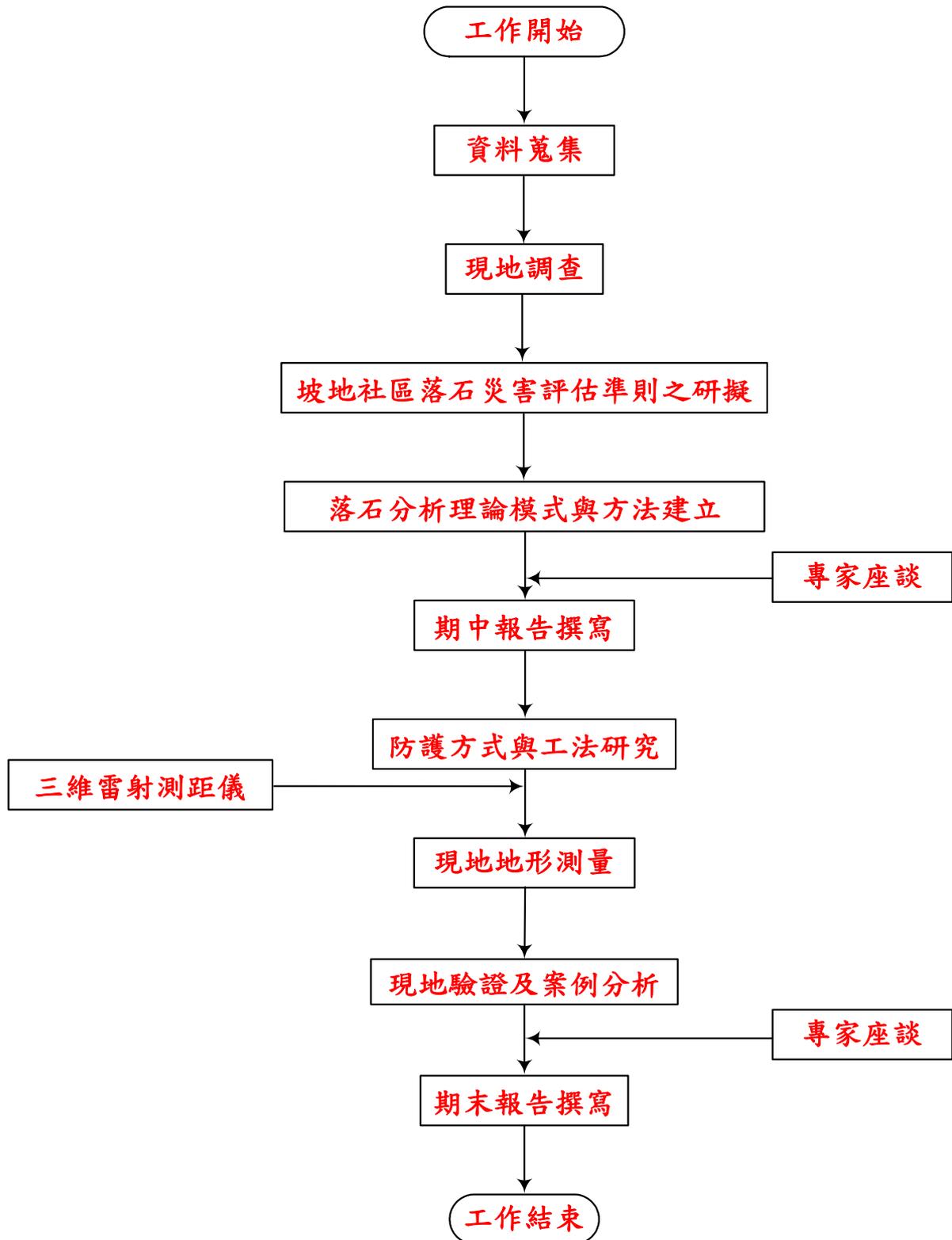


圖 1.5 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 山坡地落石災害評估準則

第一節 前言

落石 (rockfall) 為山崩 (landslide) 中崩落速度最快的一種。落石評估依其性質可分為兩類：定性分析法與定量統計法，定性分析法是由專家學者依經驗來判斷，就一般現場調查落石易發生的情況，對各落石因子作相對的排序，並對於各因子給予一評分值。此方法的優點為權重給定容易，對評分方式不須作其他處理，而且能夠較符合現地調查的結果；而定量分析法則為利用統計分析的方式，統計已發生災害的各個落石邊坡的資料，以統計或多變量分析的方式計算各因子的評分或組合之權重。此法雖提供了較為客觀的評分方式，但由於需大量資料進行分析，較不適合本研究所要求的落石災害快速評估。因此，本研究選擇定性分析法作為山坡地社區落石災害評估準則研擬之出發點。目前國外對於落石災害定性評估準則一般可分為三大類，簡述如下：

(1) 僅考慮岩體性質之準則

包含 RQD 法(Deere, 1969)、RMR 法(Bieniawski, 1984)、Q 法(Barton, 1974)等方法，主要用於岩石工程。Romana(1985)將 RMR 法改良為 SMR 法，為進行岩石邊坡評分之專屬評估準則。

(2) 考慮岩體性質及外力驅動因子之準則

Hudson(1992)提出岩石工程系統 (Rock Engineer System, RES)，此方法在國外已有許多使用案例；Jiao 與 Hudson(1995)曾將模糊集觀念結合 RES 使

用；而 Yang 與 Zhang (1998) 則將類神經網路的方法與 RES 做了一個結合。在應用方面，也多用於邊坡的使用，Hudson(1992)使用 20 個常考慮的影響因子對邊坡的危險度做了判斷；Castaldini 等人(1998)則利用 RES 將地體構造、地震學、地質學、水文地質學、地形學、土壤力學及岩石力學等學門之研究結合對地震誘發之地表效應進行探討，以期能表現影響岩石邊坡靜態及動態穩定狀況的各種影響因子的複雜關係。此外，Ali & Hasan(2002)發展使用於岩石邊坡評分上，其除考量岩體性質外，而將降雨、地震等外力驅動因子變納入評分，較第一類準則更為週詳。

(3) 考慮岩體性質、外力驅動因子及被保護對象之準則

加拿大太平洋鐵路(Canadian Pacific Rail, CPR)Brawner and Wyllie 於 1976 年首先發展出一套可系統化之評估大範圍之落石危害度評估系統，其利用英文字母 A~F 以定量之評估落石危害度，其中”A”為災害最嚴重之落石邊坡且需立即加以整治，而”F”為災害最輕微之落石邊坡。CPR 系統隨後變成 Pierson 於 1990 年所發展之奧瑞岡州落石危害度評估系統之基礎，而奧瑞岡州之落石危害度評估系統也隨後成為美國聯邦高速公路管理局(Federal Highway Administration, 簡稱 FHWA) 發展 RHRS (Rockfall Hazard Rating System)系統之基礎。

RHRS 係由美國國家高速公路組織(National Highway Institute, NHI)於 1980 年末在 FHWA 之贊助下所開始加以發展，在 NHI 所發展之落石危害度評估系統中，NHI 之 RHRS 包含以下六步驟，說明如下：

1. 落石邊坡與地形資料庫
2. 大範圍之初步評估落石災害潛勢
3. 依據大範圍之初步評估結果對高潛勢落石邊坡進行詳細評分
4. 對於高潛勢落石邊坡進行初步整治之設計與經費評估

5. 確定需進行落石整治之邊坡

6. 年度維護與修訂資料庫

NHI 之 RHRS 隨後成為美國各州與之後世界各國發展落石危害度評估系統之基礎，目前世界上所使用之落石危害度評估系統如表 2-1 所示，Pierson (1993)提出之落石危害度評估系統 (Rockfall Hazard Rating System, RHRS) 為其代表，如表 2-2 所示，此套準則亦為美國公路單位所引用，經多年道路落石之研究經驗，將地形特徵、地質概況、氣象、落石尺寸、規模大小落石歷史及防護等，進行道路危害度評估，成效良好，以下則針對 RHRS 落石危害度評估系統進行詳細說明。

RHRS 落石危害度評估系統主要包含初步評分和細部評分兩大部分。其中初步評分的重點在於推測落石落在公路上的潛能，將落石路段分為 A、B、C 三級，A 級危害潛能較高，B 級次之，C 級則最低，執行時初步只對 A 級進行細部評分，若時間及經費允許，可包含 B 級路段；至於 C 級，則不再進一步評估。

細部評分方面則包含數項，包括潛在因子及誘發因子，並考慮山崩落石對人的危害程度，主要選擇項目如下：

1. 地形（坡度、坡型等）
2. 地質（構造、節理、差異侵蝕等）
3. 石尺寸與規模
4. 氣象（降雨量與震度）
5. 近三年平均落石歷史
6. 行車風險（坡長、日平均交通輛、車輛種類等）

7. 道路寬度與腹地有無

8. 防護措施成效等

每個項目評分用 3^x 大致分為四級， $x=1\sim4$ ，每個項目依等級分為 3、9、27、81 分，因子分級方式則依據專家經驗給定，如遇特殊狀況，有落於四個等級之間者，則評分值分別為 5、16、47 分，這種分級方式的優點是可以將因子介於瀕臨破壞（81 分，遠大於 27 分或 9 或 3 分）之危險度明顯展示出來，當各因子項目之評分加總，總分越高者，代表邊坡危害度越大，必須優先處理。

由於在國外應用成果良好，近年來國內也陸續參考 RHRS 法，給予評估項目修正分級並考慮符合台灣現況的影響因子，如陳榮河等（1997）進行台二線之落石危害度評估時，則將道路腹地有無、路寬、交通狀況、防護設施成效等加以納入，考慮了人的因素以評估其危害度，共十大項加以進行分析；謝正倫等（1999）對台十一線及台二十一線也使用其方法，將評估準則依岩盤崩塌、礫石層崩塌、崩積層地滑及落石四種不同的崩塌型態給予不同的評估標準，可進一步讓邊坡共同比較危害程度；另外吳傳威等（2001）針對南橫公路，以類神經網路之分析模組替代傳統之權值，除了可有助於對傳統型式準則的修訂，在另一方面亦可獨立應用，以增進道路落石坍方危險度判定之準確性，提供道路維護與災害防治之正確資訊。

根據 Pierson 及近年國內參考 RHRS 之法修正符合台灣現況的影響因子歸納結果，目前國內針對公路山崩落石研究之考量因子主要包括坡度、降雨、震度、土地利用等，其研究與引用情況如表 2-3 所示。

表 2-1 世界上所使用之落石危害度評估系統一覽表

Organization	Rating/Management System	Number of Sites	Reference
Oregon DOT	NHI	3000+	Pierson et al., 1990 ODOT, 2001
Utah DOT	NHI	1099	Pack & Boie, 2002
New York DOT	Modified NHI & Wyllie	1700	Hadjin, 2002; GEM-15, 1996
New Hampshire DOT	Modified NHI & Wyllie	85	Fish & Lane, 2002
Missouri DOT	Modified NHI & Ontario MORFH RS	300	Maerz et al., 2004 & 2005
Idaho DOT	Modified NHI, HiSIMS	950	Miller, 2003
North Carolina DOT	NHI	1 (20Mile setion)	Kuhne, 2002
Washington State DOT	Unstable Slope Management System	2500	Ho & Norton, 1991
Kentucky DOT	NHI	1800	Hopkins et al., 2001
Tennessee DOT	Modified NHI	194	3 Vandewater, 2002
British Columbia	MOTH* NHI	1 (480-m in 8 sections)	Bunce et al., 1997
Canadian Pacific Rail	Brawner & Wyllie	N/A	Brawner & Wyllie, 1975; Mackay 1997
Ontario	MOTH* RHRON	N/A	Franklin & Senior, 1987a
Italy	Modified NHI	7	Budetta, 2004
Hong Kong Geotechnical Engineering Office	New Priority Classification System	1400	Wong, 1998
Scottish Office Industry Department;	Roads Directorate Rock Slope Hazard Index System	N/A	McMillan & Matheson, 1998

(資料來源：本研究整理)

表 2-2 落石危險度評分系統(RHRS , Pierson, 1993)

Category	RATING CRITERIA AND SCORE			
	POINT3	POINT9	POINT27	POINT81
SLOPE HEIGHT	25feet	50feet	75feet	100feet
DITCH EFFECTIVENESS	Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment
AVERAGE VEHICLE RISK	25%of the time	50%of the time	75%of the time	100%of the time
PERCENT OF DECISION SIGHT DISTANCE	Adequate sight distance, 100%of low design value	Moderate sight distance, 80%of low design value	Limited sight distance, 60%of low design value	Very limited sight distance 40%of low design value
ROADWAY WIDTH INCLUDE PAVED SHOULEDE	44 feet	36 feet	28 feet	20 feet
GEOLOGIC CHARACTER				
STRUCTURAL CONDICTION	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
ROCK FRICTION	Rough, irregular	Undulating	planar	Clay infilling, or slickensided
DIFFERENCE IN EROSION RATES	Small difference	Moderate difference	Large difference	Extreme difference
BLOCK SIZE	1 foot	2 feet	3 feet	4 feet
VOLUME OF ROCKFALL EVENT	3 cubic yards	6 cubic yards	9 cubic yards	12 cubic yards
CLIMATE AND PRESENCE OF WATER ON SLOP	Low to moderate precipitation ; no freezing periods ; no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope	High precipitation an long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods
ROCK FALL HISTORY	Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls

(資料來源：本研究整理)

表 2-3 歷年各專家學者危險度評估準則考量因子一覽表

研究者 考量因子	Pierson (1992)	張義隆 (1995)	陳榮河 (1997)	謝獻仁 (1998)	吳傳威 (1999)	鐘光榮 (1999)	王淑慧 (2000)	引用 次數
坡高	★	★		★	★	★	★	6
坡度			★	★	★	★	★	5
坡形			★					1
地質構造	★	★	★	★	★	★	★	7
地質材料	★	★	★	★	★	★	★	7
侵蝕程度	★	★	★	★	★			5
突懸				★				1
穩定程度				★				1
雨量		★	★		★	★	★	5
震度		★	★		★	★	★	5
降雨積雪	★							1
地下水滲入				★				1
土地利用				★	★	★	★	4
落石尺寸	★	★	★		★			4
落石規模	★		★		★			3
落石歷史	★	★	★		★		★	5
坡長			★					1
日平均交通量	★		★		★			3
主要車輛種類			★		★			2
道路寬度腹地有無	★	★	★		★			4
防護設施成效			★		★			2
劃分為 4 等級	★	★	★	★	★			5
劃分為 5 等級						★		1

(資料來源：援引自魏震東 2001)

第二節 山坡地落石災害評估準則

本研究主要針對山坡地社區落石災害防治進行評估準則之研擬，與一般道路落石災害之主要防治對象有所差異，其主要考量因子並非行車風險，而應與建築物的退縮距離及人員出入量等因子有關。因此本研究針對山坡地社區經過實地調查與資料蒐集後，參考針對道路落石坍方之美國傳統方法及國內之相關研究成果，提出適用於台灣地區之山坡地社區落石災害評估準則，評估項目包括：

1. 山坡地之地形特徵（坡度、坡高等）

坡度是代表邊坡平緩度之指標因子。水保技術規範對山坡地坡度定義係指一坵塊土地之平均傾斜比。而坡度分級如下：

表 2-4 山坡地坡度分級表

坡度級別	級序	坡度(S)範圍	備註
一級坡	1	S ≤ 5%	2.86 度
二級坡	2	5% < S ≤ 15%	2.86~8.53 度
三級坡	3	15% < S ≤ 30%	8.53~16.7 度
四級坡	4	30% < S ≤ 40%	16.7~21.8 度
五級坡	5	40% < S ≤ 55%	21.8~28.8 度
六級坡	6	55% < S ≤ 100%	28.8~45 度
七級坡	7	S > 100%	>45 度

(資料來源：水保技術規範)

由於水保技術規範中之坡度分級係針對可開發之坡度而言，並不適用於落石邊坡之分級。因此本研究根據「台北市坡地災害資料庫」及「公路總局落石路段資料庫」，篩選北部部分曾發生過落石災害之社區及道路邊坡，經現地勘察後，其坡度均極為陡峭，約在 45° 以上，而邊坡坡高一般均在 10 m 以上。因 Ritchie 等人對落石問題之研究亦僅針對 45° 以上之陡坡進行，故本研究於坡度指標劃分為四級，分別為 45 以下、45 至 60 度、60 至 70 度、與 70 度

以上邊坡，如表 2-5 所示。

表 2-5 本研究坡度指標劃分

評分因子		評分準則與分數			
		3	9	27	81
坡度(度)		45 以下	45~60	60~70	70 以上

(資料來源：本研究整理)

坡高代表落石掉落之能量大小，坡高愈高則其能量愈大，風險度愈高，因此其所估之危險度評分愈高。至於簡易現地坡高之估計方法如圖 2-1 所示。坡高之分級則參考 RHRS 之分級方法分為四級，分別為 5~15 公尺、15~25 公尺、25~35 公尺、與 35 公尺以上邊坡，如表 2-6 所示。

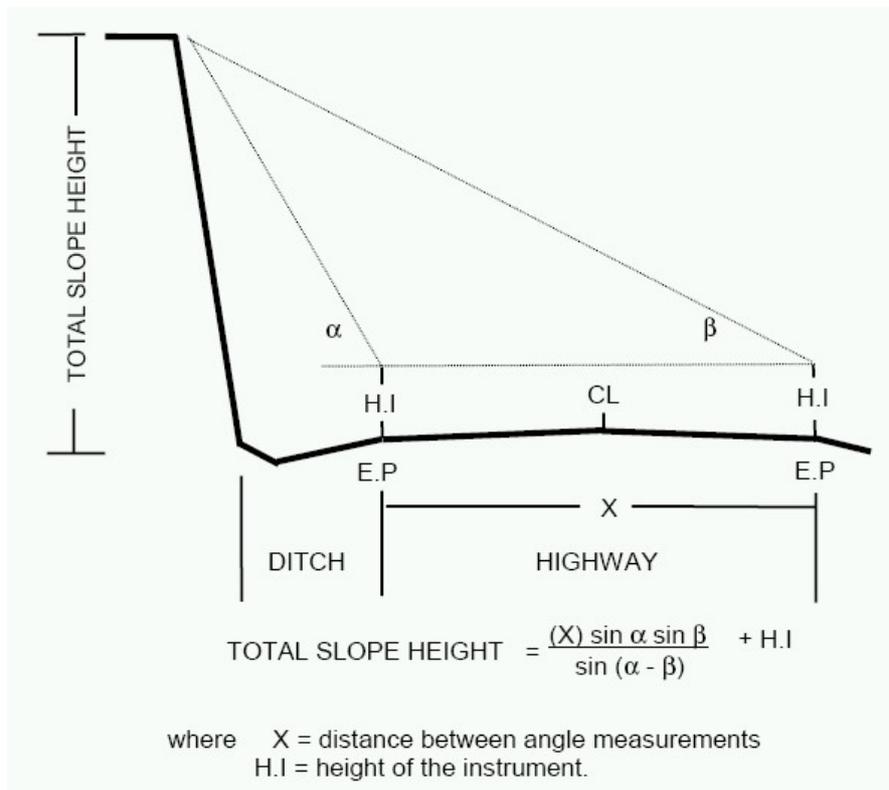


圖 2-1 簡易現地坡高估計法

(資料來源：本研究整理)

表 2-6 山坡地坡高分級表

評分因子		評分準則與分數			
		3	9	27	81
坡高(m)		5~15	15~25	25~35	35 以上

(資料來源：本研究整理)

2. 山坡地之地質狀況

在地質情形因子之評分方法可分為兩大類情形，每一類情形又可分為兩項評分，每項評分分為四級，分別為 3、9、27、與 81 分。因此每一類情形之最高總分可達 162 分，最後兩大類之分數擇較高分者為最後之總分。每一類情形評分方式分述如下：

每一類情形：第一類主要針對構造特性與弱面狀況進行評分，而構造特性分為構造組數與是否有不利方位進行評分，弱面狀況則包含節理面開口程度、節理面粗糙度、風化鏽染程度、節理面填充材料及節理間距連續性進行合併考量。

第二類情形：第二類主要針對邊坡地質材料抗差異性侵蝕能力與差異侵蝕率，加以統計分級，差異侵蝕情形依現地抗差異侵蝕能力及差異侵蝕率兩項加以評分。

由於差異侵蝕可能造成邊坡型態更為陡峭、邊坡上形成未支撐之岩塊、或是邊坡上形成暴露岩塊等，而形成落石災害，因此乃依據 Hoek(1995)之描述其將抗差異侵蝕能力之分級分為四級：(1) 少數差異侵蝕特徵、(2) 部分偶發之差異侵蝕特徵、(3) 許多差異侵蝕特徵、(4) 有主要差異侵蝕特徵等，故依據上述抗差異侵蝕能力之分級可將邊坡分為依序為良好、好、差、極差等四類，評分分別為 3、9、27、與 81 分。

另陳榮河等（1997）之研究針對消散耐久性試驗結果之參數差值建議抗差異侵蝕能力之分級方式如表 2-7 所示。因此 Hoek(1995)描述抗差異侵蝕能力之分級亦可結合有室內試驗成果之邊坡以表 2-7 方式使用。

表 2-7 抗差異侵蝕能力分級

級數分類	消散耐久試驗之差值
1	7以下 (包含7)
2	7至14 (包含14)
3	14至21 (包含21)
4	21至28 (包含28)

(資料來源：本研究整理)

差異侵蝕率之分級依據 Hoek(1995)之描述，同樣可分為四級，分別為：

(1) 侵蝕率差異小、(2) 侵蝕率差異中等、(3) 侵蝕率差異大、(4) 侵蝕率差異及大等，另結合交通部科技顧問室之研究報告成果，進一步將差異侵蝕率之分級描述如表 2-8。

表 2-8 差異侵蝕率之分級

編號	分級	描述	評分
1	第一級差異侵蝕率	差異侵蝕小至無	3
2	第二級差異侵蝕率	局部有，差異侵蝕量 < 1m	9
3	第三級差異侵蝕率	局部有，差異侵蝕量 > 1m	27
4	第四級差異侵蝕率		81
		a. 許多地方有，差異侵蝕量 > 1m	
		b. 倒懸岩塊，左右節理已形成，底部坡面有銹染	
		c. 坡趾附近局部有差異侵蝕達 1m 以上者	
		d. 局部坡為陡坡，上有崖錐巨礫 (>3m) 者	

(資料來源：本研究整理)

3. 氣象 (降雨量與地震)

一般引起邊坡落石災害之氣象因素主要為豪雨及地震兩大類，尤其台灣

地區位處環太平洋地震帶且一般雨季時降雨集中，故對於這兩項因素，可擇一加以評分。

降雨之致災根據氣象局之氣象資料顯示，落石事件發生主要與前期累積降雨量有關，累積降雨量會影響落石事件之發生，因此經統計及評估後，考慮採用連續降雨累積降雨量加以分級，依據連續降雨累積降雨量之大小分為 60 公釐以下、60~139 公釐、140~200 公釐及 200 公釐以上等分為四級。

考慮地震因素所致之落石災害，是以當地震度為分析依據，因此地震因素之考量，則以震度作為評分之參數，以因地震而引起之落石事件為基本資料，並自中央氣象局地震預報中心所查詢之震度值加以統計，依震度分為 2 以下、2-2.49、2.5-3.5 及 3.5 以上等四級。

4. 近三年平均落石歷史

邊坡落石災害常發生於同一區域，因此，落石發生頻率愈高之路段，其危險性亦隨之增高。因所收集之落石事件僅限於近三年，且落石路段之危險以近期之影響較為顯著，故採用近三年平均落石歷史為參數。

5. 落石尺寸與規模

由於同一落石高度時，落石尺寸愈大，掉落之能量愈高，衝擊力亦愈大，其危險度愈高，因此依據以往發生過之落石事件，評定落石掉落之最大尺寸，並將落石尺寸分為 0.3m 以下、0.6m、0.9m 及 1.2m 以上等四級。

在落石規模方面，由發生過之落石事件，可統計累積之落石土石方量規模。土石方量愈大，所造成之社區危害影響愈大，對社區房屋結構與人員之危險程度亦愈高，其分級依落石土方量 200m^3 以下、 $200\sim 499\text{m}^3$ 、 $500\sim 1000\text{m}^3$ 及 1000m^3 以上等四級。

落石尺寸及規模採二者合併評分，取兩項之平均值。因為在落石尺寸雖小但所掉落之土石方量多時，仍可造成相當程度之危害，而若個別之落石則

其危險度相對可能較低。

6. 邊坡及坡頂之土地利用及植生狀況

由於邊坡是否曾經被開發過、坡頂之土地利用是否被過度利用以及坡面與周圍之植生狀況均將影響邊坡之穩定性，因此在邊坡覆蓋及土地利用方面評定分為(1)林地保護、坡頂未開發利用；(2)短根植披、坡頂未開發利用；(3)坡面裸露、坡頂未開發利用；(4)坡面裸露、坡頂被開發利用等四級。

7. 建築物退縮距離與人員出入量

建築物退縮距離遠近，亦即結構物與邊坡間之腹地大小，可提供建築物遭落石撞擊之緩衝帶，而人員出入量的多寡，亦是人員是否遭落石擊中機率之重要因素。因此建築物退縮距離愈遠、人員出入愈低時，落石直接擊中建築物及人員之危險愈低。由於這兩項因子均影人員之生命財產，故採用合併評分之方式，其中評定建築物退縮距離採 25 以上, 15~25, 5~15, 5 以下等四級；人員出入量及分為 50 以下、51~200、201~500 及 500 以上等四級。

建築物退縮距離及人員出入量採二者合併評分，取兩項之平均值分級情形如表 2.9 所示。

8. 防護措施成效等

落石路段如有防護設施均可有效降低落石災害之風險，其風險之降低情形又受到防護設施之項數與成效之直接影響，此一項目之分級情形包括(1)有兩項防護設施且成效良好、(2)有一項防護設施且效果佳、(3)有一項防護設施但效果不佳及(4)無防護設施等四級防護措施成效。

根據上述評估項目，本研究訂定之山坡地社區落石危險度評估因子及評分表如表 2-9 所示。表 2-9 之評分若每分項均得最高分，則總分可達 810 分。然而落石危險度評估得分範圍與危險分級之判別則需因地制宜，由於台灣地區目前並無相關山坡地社區落石危險度評分之資料庫，因此本研究對於危險

度分級之評分區隔係參考國內外現有研究成果加以檢討。美國公路單位所採用危險度分級之評分區隔係由 Pierson 所提出之 RHRS 評估準則[1, 2]，目前以 110 分為分隔區間，共分為五級，如表 2-10 所示。Hoek (1995)亦提出美國 Oregon 州之分隔區間，其指出 300 以下為低風險，而 500 以上為高度風險。Virginia 運輸部(2006)則定義 300 以上為需投入整治經費進行落石防治。

國內部分依據前人研究「台灣區道路落石坍方之危險度分級準則」，其危險度分級之評分區隔則以高風險、中風險、與低風險表之，其評分區隔分別為 400 以下、400~500、與 500 以上。本研究初步以具台灣地區經驗之後者作為評分區隔之準則，惟此評分區分未來仍應持續依據資料庫之增加與經驗之累積及實際於應用時管理單位之反應及社區安全要求等狀況加以調整。

表 2-9 山坡地社區落石危險度評估因子及評分

評分因子		評分準則與分數				
		3	9	27	81	
A.地形(兩項平均)						
	坡高(m)		5~15	15~25	25~35	35 以上
	坡度(度)		45 以下	45~60	60~70	70 以上
B.地質(第一類或第二類擇一，分數高者)						
第一類	B1. 構造特性	弱面組數	2 組	3 組	2 組	3 組
		弱面傾角	無不利方位	無不利方位	有不利方位	有不利方位
	B2. 弱面狀況	弱面間距	2m	>2m	2~3m	3m
		閉合情形	閉合	閉合、不平	夾泥	開口、平坦
		風化程度	無銹染	無銹染	有銹染	有銹染
第二類	B1.抗差異侵蝕能力		良好	好	差	極差
	B2.差異侵蝕量		第一級	第二級	第三級	第四級
C.土地利用與植生狀況		林地保護、坡頂未開發利用	短根植披、坡頂未開發利用	坡面裸露、坡頂未開發利用	坡面裸露、坡頂被開發利用	
D.氣象(兩項選一，分數高者)						
	累積降雨量		60 以下	60~139	140~200	200 以上
	震度		2 以下	2~2.49	2.5~3.5	3.5 以上
E.近三年落石歷史			1 次以下	1~1.9 次	2~3 次	3 次以上
F.落石尺寸與規模(兩項平均)						
	落石尺寸(m)		0.3	0.6	0.9	1.2
	規模大小(m ³)		200 以下	200~499	500~1000	1000 以上
G.社區狀況(兩項平均)						
	建物退縮距離(m)		25 以上	15~25	5~15	5 以下
	平均出入人數/日		50 以下	51~200	201~500	500 以上
H.防護設施成效加權						
防護設施成效		有兩項防護設施且防護設施成效良好	有一項防護設施且防護設施成效佳	有一項防護設施且防護設施成效不佳	無防護設施	

(資料來源：本研究整理)

表2-10 落石坍方危險度評估分析表

危險等級	評分	危險度
第一級	~109	暫不需處理
第二級	110~219	適時處理
第三級	220~329	第二優先處理
第四級	330~439	第一優先處理
第五級	440 以上	立即優先處理

(資料來源：美國公路單位)

第三章 山坡地社區落石災害分析模式建立

第一節 落石問題特性

邊坡破壞之類型依據運動型態區分為六種(Varnes, 1978)，分別為落石(Falls)、傾倒(Topples)、滑動(Slides)、側滑(Lateral spreads)、流動(Flows)、與複合型(Composites)等，而落石問題係屬於邊坡運動而至破壞之現象之一。落石之定義可詳述為為靜置於自然或人工所形成坡面上之岩石，受降雨、乾燥、凍結融解、地表逕流、風、地震等自然風化作用影響，由岩盤之裂紋剝離或由表層堆積物、火山噴出物、固結性低之砂礫層等中之岩塊、石礫浮出表面，沿著坡面滾落或滑落之現象。

一、落石運動型態

落石依其成因之形態可分為滾動型與剝離型，分述如下。

1. 滾動型：表層土或固結於土層中含有卵石、礫石、岩塊等因受地表水的沖蝕、地下水的滲透與滲蝕而浮出表面，並使周圍之土壤軟化，致使失去平衡而落下。滾動型落石大多因降雨、融雪時發生。
2. 剝離型：節理發達之岩層，因風化、地表水、或地下水滲入岩層裂縫，降低岩石之結合力，或水受凍結致使裂縫擴大，終而剝離落下。同樣也受地震及樹根侵入岩石裂縫影響。

根據 Ritchie(1963)等人之研究，落石運動之機制可分三種，分別為(1) 邊坡角度小於 45 度之滾動模式(Rolling mode)，(2) 邊坡角度介於 45 度至 75 度之跳動模式(Bouncing mode)，(3) 邊坡角度大於 75 度之掉落模式(Falling

mode)，三種落石運動之機制如圖 3-1 所示。

對於落石掉落後所形成之崖錐，Evans 與 Hungr (1993) 等人之研究提出落石崖錐之最小安息角理論(如圖 3-2 所示)，其理論發現落石崖錐最小安息角多介於 22 至 30 度之間，而 Evans 與 Hungr 在加拿大英屬哥倫比亞調查 16 處落石崖錐發現最小安息角為 27.5 度。

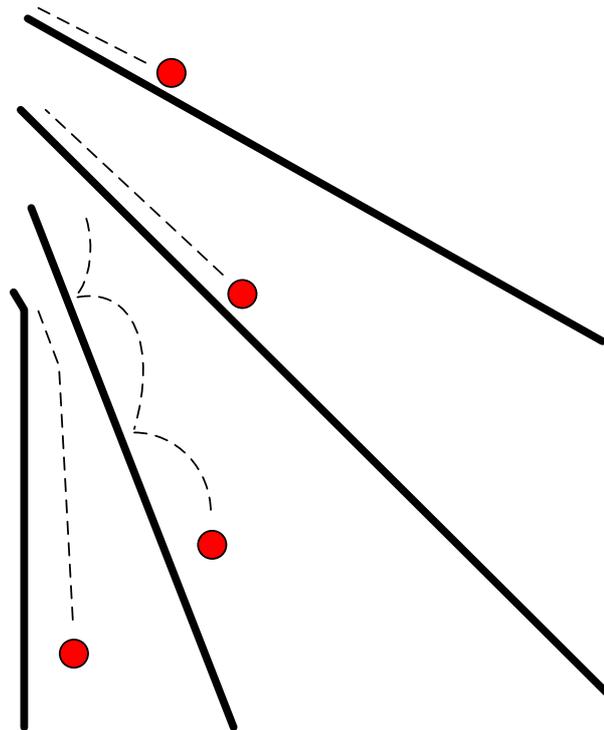


圖 3-1 常見三種落石運動型態

(資料來源：Ritchie, 1963)

Roll

Ro

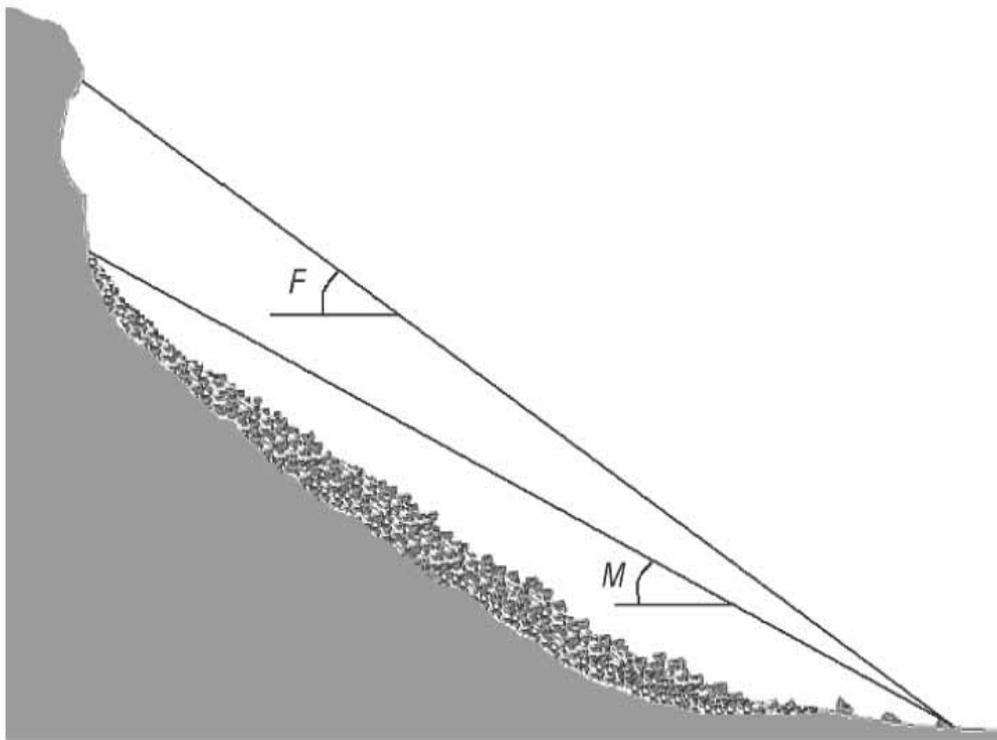


圖 3-2 落石崖錐之 Fahrboschung (F)與 minimum shadow angle (M)

(資料來源：本研究整理)

二、落石運動特性

進行落石分析設計及後續相關落石之防護對策，首先需瞭解落石運動之特性諸如：落石之能量及軌跡，落石之行進速度、落石之衝擊能量及彈跳高度，以提供後續決定落石保護措施之方式。以下便依據目前相關文獻中所提出估計上述落石運動特性之方法進行簡述。

1. 落石行進速度

落石掉落速度可參考自由落體公式加以考慮，因此落石掉落速度公式可表如下。

$$V = \alpha \times \sqrt{2gH}$$

其中 V 為落石掉落速度， $\sqrt{2gH}$ 為自由落體速度， α 為殘存係數， H 為落下高度。圖 3-3 顯示日本方面研究以現地試驗所得之落石行進速度之分布，由現地試驗之結果可發現落石最終之行進速度多在 40 m/sec 以內。

2. 落石彈跳高度

落石運動機制若是屬於跳動(Bouncing)模式，其沿著邊坡面之最大彈跳高度可提供落石防護工(如防護柵)之設計。由日本現地試驗所得之結果(圖 3-4)顯示落石於邊坡上之彈跳高度百分之 80 至 85 多不超過 2 公尺。惟落石之幾何形狀亦影響落石彈跳高度與其軌跡，Sloss (1963)提出球度與圓度估計圖(圖 3-5)，可用於作為落石外形分析之參考。

3. 落石衝擊力

落石衝擊力之大小直接影響落石防護工之強度設計，因此需推估防護工受到撞擊時之衝擊力大小，基於 Hertz 理論可推估落石最大衝擊力公式如下：

$$P_{\max} = 2.108 \times (m \times g)^{2/3} \times \lambda^{2/5} \times H^{3/5}$$

其中 P_{\max} 為落石之衝擊力(kN)， m 為落石之質量(ton)， g 為重力加速度(m/sec²)， H 為落下高度， λ 為撞擊體係數，撞擊體材質非常軟弱時， λ 為 1000 kN/m²。撞擊體材質為軟弱時， λ 為 3000 至 5000 kN/m²。撞擊體材質為堅硬時， λ 為 10000 kN/m²。另圖 3-6 顯示日本方面研究以 1 噸、3 噸與 5 噸之落石質量進行衝擊試驗，5 噸之落石在 30 公尺之落下高度所得之最大衝擊力為 4500 kN 左右。

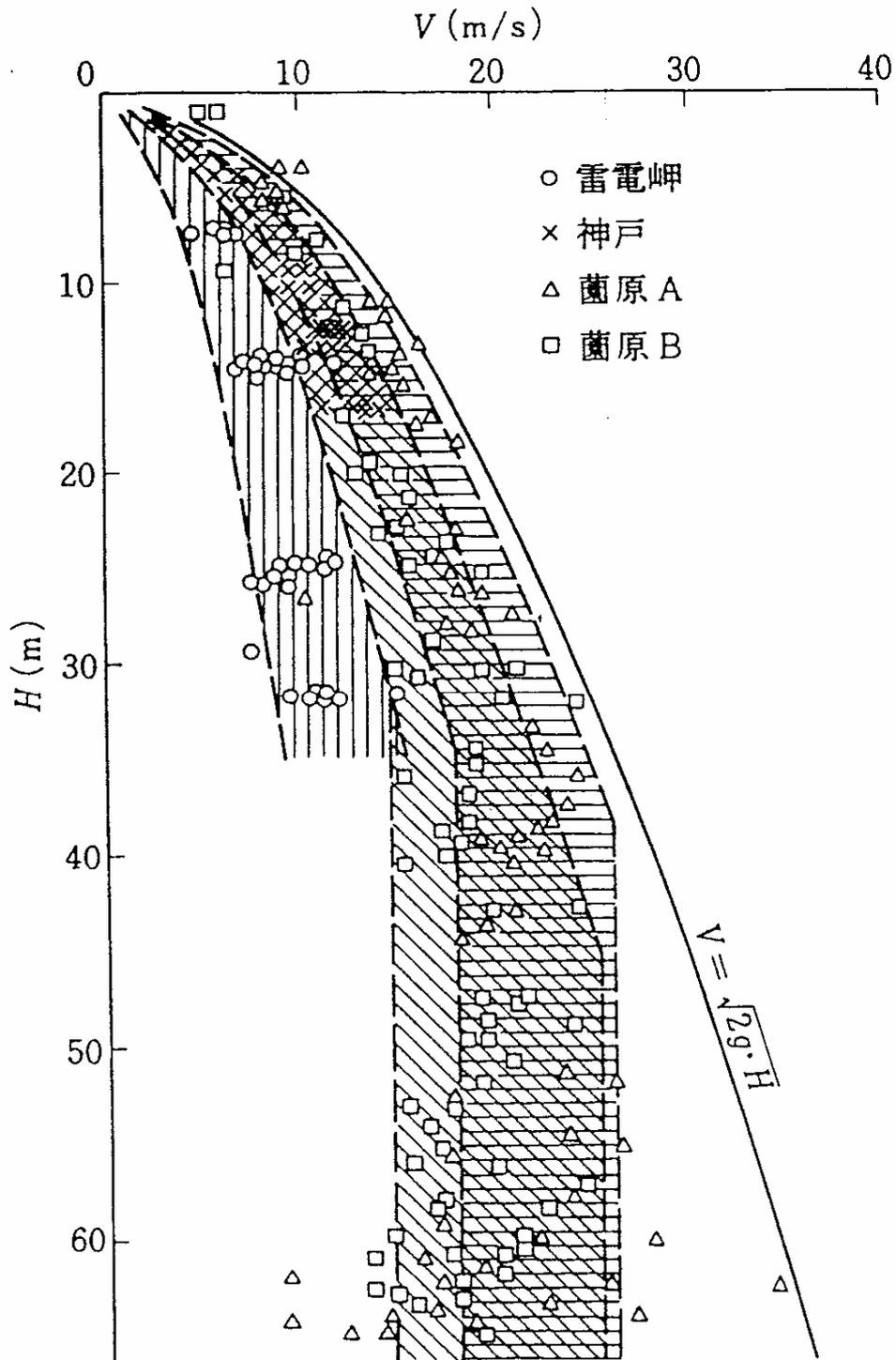


圖 3-3 落石之速度分布

(資料來源：落石對策便覽，日本道路協會)

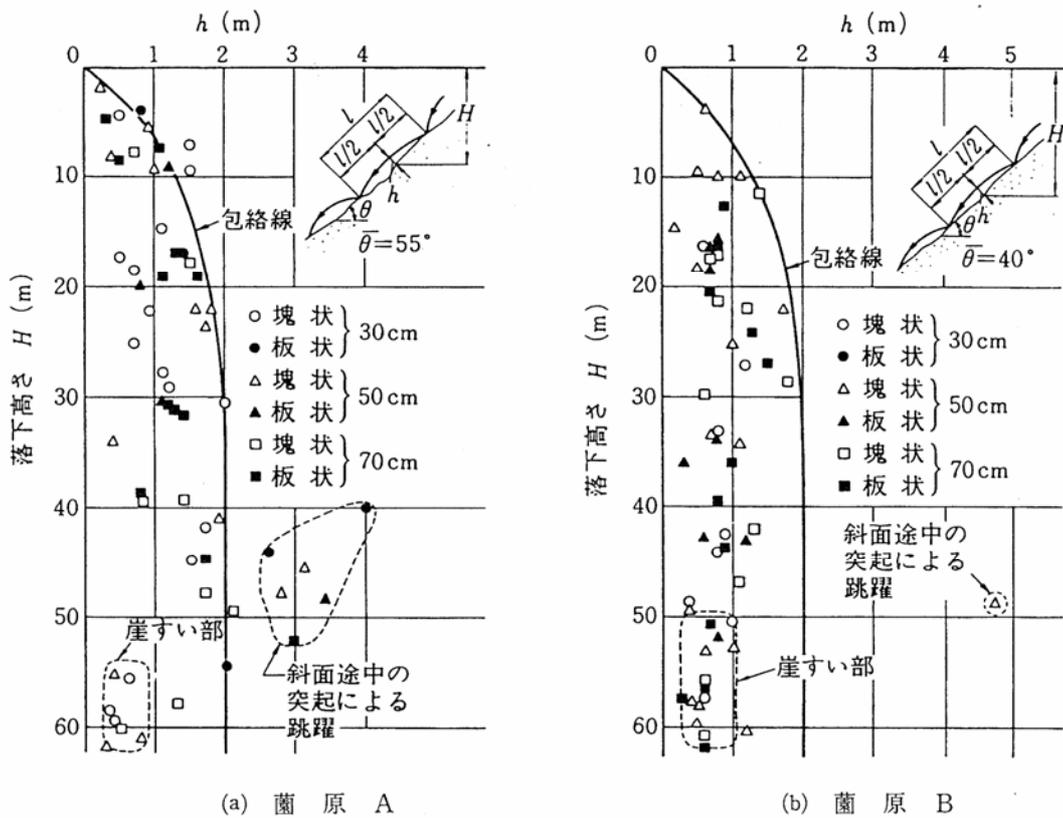


圖 3-4 落石之彈跳高度

(資料來源：落石飛砂對策，山海堂)

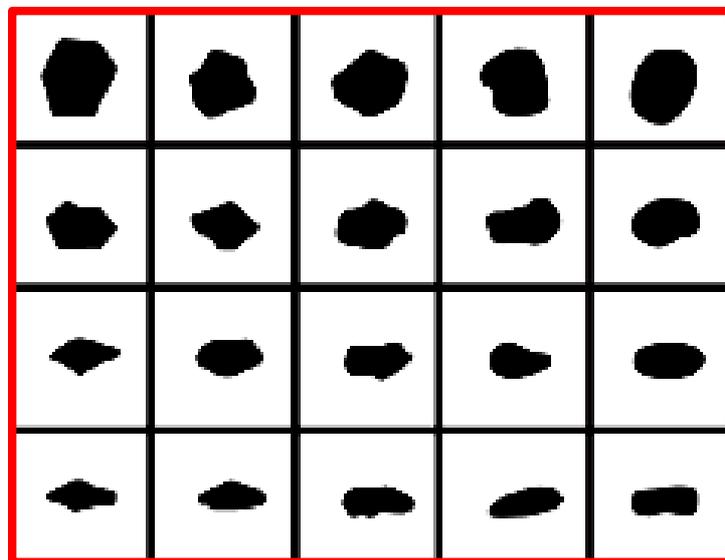


圖 3-5 球度與圓度估計圖

(資料來源：Sloss, 1963)

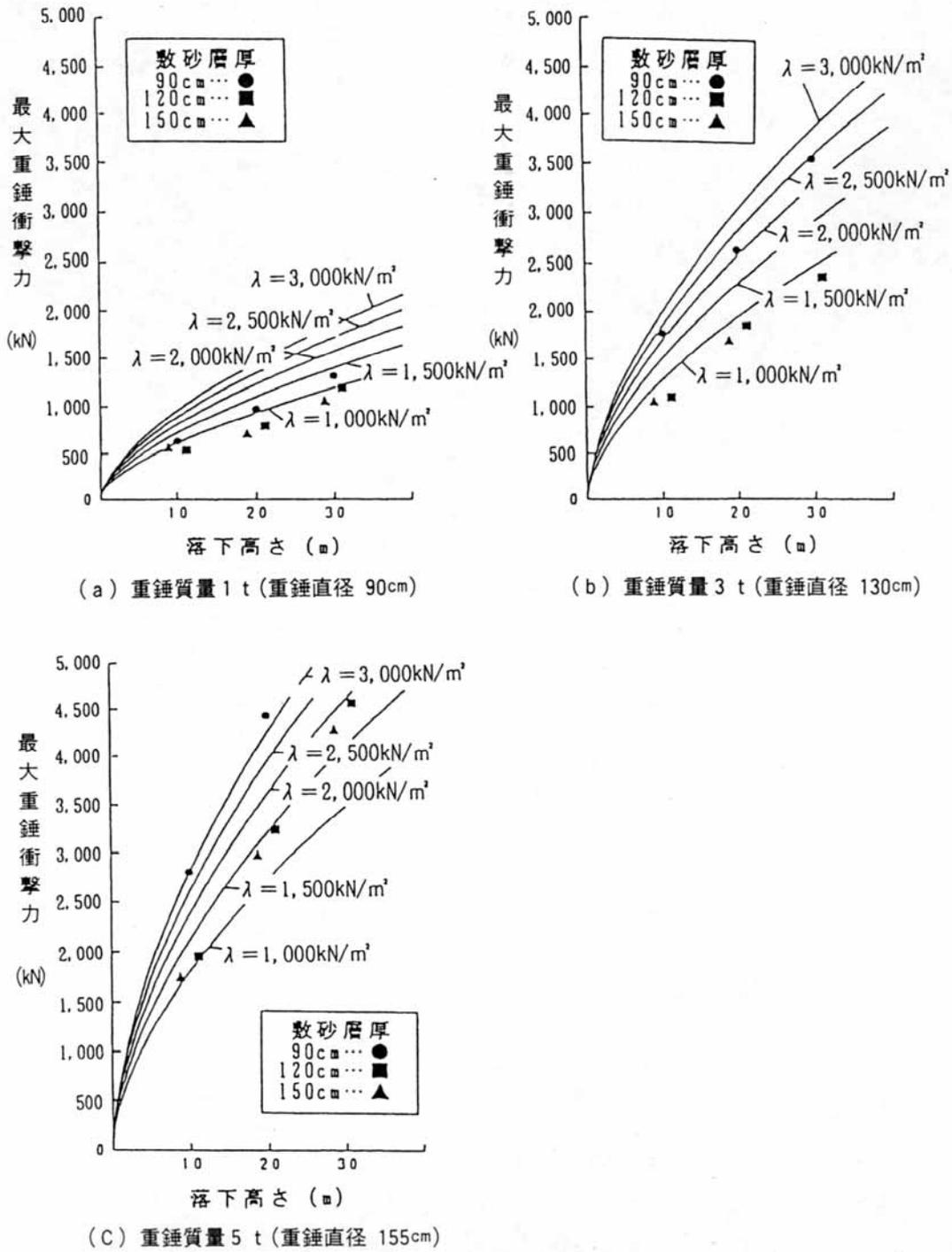


圖 3-6 落石之衝擊力

(資料來源：落石飛砂對策，山海堂)

第二節 相關研究現況

目前常見之落石分析方法之相關研究可概分為三種：現場試驗法、數學分析法及經驗法。這些方法主要是找出落石之能量及軌跡，或者是量化之落石速度、衝擊能量及彈跳高度，以提供設計者決定落石保護措施之方式。以下便對這些分析方法與相關研究做一簡述。

一、現場試驗法(Field testing)

一般而言，現場試驗法是分析案例地點落石軌跡最為準確的方法，但其受限於安全性、經費與時間因素而較少採用。一般可能有落石危害之既有道路邊坡位置，往往亦無法長時間封閉交通施行落石試驗，而使其在施作上有限制。此種情況替代方案為找一處無安全顧慮且岩坡坡度及岩性相當之位置進行試驗，由於試驗之過程包含落石之準備、試驗邊坡之選定及試驗資料之量測等，其經費需求較其他方法為高，且需花較長之時間才能獲致結果。

二、數學分析法(Mathematical analysis)

數學分析法主要是以計算機為工具結合力學之理論基礎，發展模擬落石問題之數值分析程式。由於數值分析程式僅需配合現場之地質與地形資料，再加上合理之評估即可分析落石問題，所以為一最省時、經濟且立刻可提供資訊給設計者之分析方法。目前已經有許多數值程式被發展出來，如 North Carolina Department of Transportation (1985)、Evert Hoek (1987)、Colorado Department of Highway (1988)等均有發展落石數值程式。目前在美國最為廣泛使用的落石數值程式為 CRSP(Colorado Rockfall Simulation Program, 1989)，如圖 3-7 所示。但因其僅利用簡單之單一質點自由落體重力加速度公式與能量守恆定律描述落石之運行軌跡，並未考慮落石間相互碰撞之因素，故其限制為無法模擬落石在掉落過程中相互碰撞之影響。

三、經驗分析法(Empirical analysis)

在經驗分析法的部份，以往之學者做了大量之試驗研究以試圖歸納出落石及岩坡角度、高度間之經驗關係式(諸如:岩坡角度與岩坡高度對落石軌跡之影響等)，其中最有名之研究便是 Ritchie(1963)等人，Ritchie 基於低彈跳或滾動為主之設計理念，提出岩坡高度 30 公尺以下之落石防護設施建議，如圖 3-8 所示。然而台灣之落石災害多半超出 50 公尺以上，應用 Ritchie 之建議圖表有其限制，此外，經驗分析法大多僅能觀察落石運動之基本力學行為，但對大範圍及數量較多之落石則無法考慮。如日本「落石對策便覽」內提出落石防護設施之設計與落石速度、落石彈跳高度、落石高度、邊坡角度及摩擦角等有關。但實際落石受邊坡地形之影響甚大，經驗法則因無法考慮此類因素而常造成困擾。

上述各方法由於受限於結果之可應用性與經費之考慮，故目前之研究多以數學分析法為之。因落石運動之力學機制屬不連續體力學領域中之大變位計算，主要考慮落石間相互之接觸與碰撞(如圖 3-9 所示)，及與自然邊坡之碰撞等，故分析方法多採如集塊質量法或是分離元素法中之個別元素法或是不連續變形分析法等進行分析。

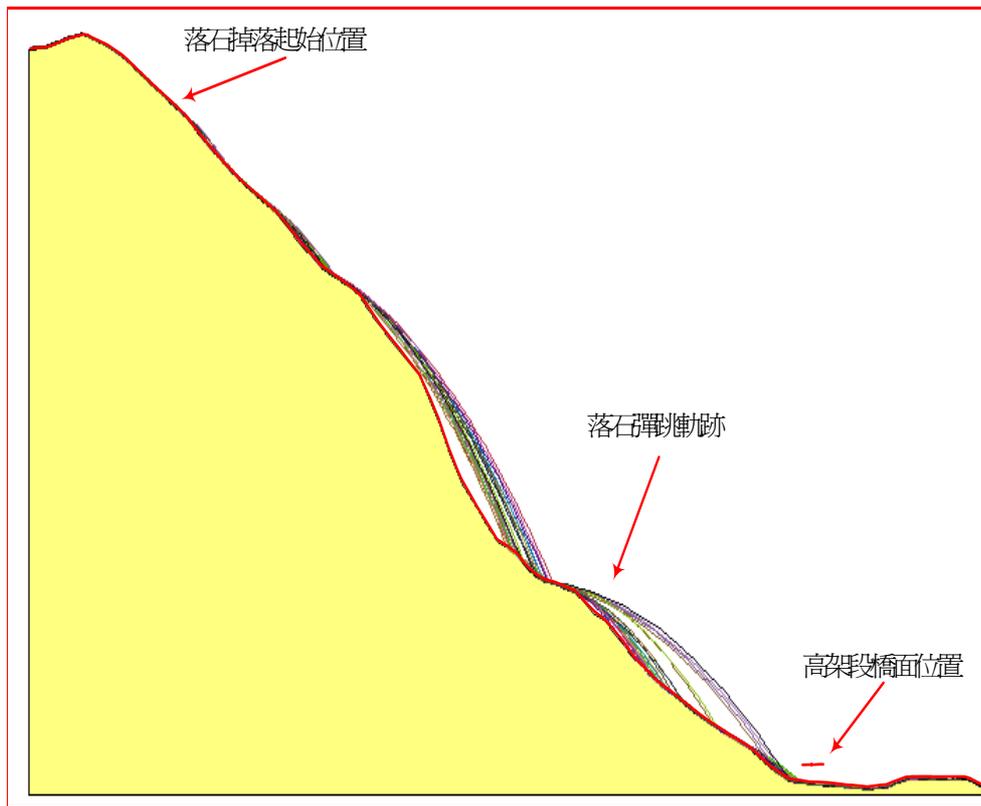


圖 3-7 CRSP 程式分析落石示意圖

(資料來源：本研究整理)

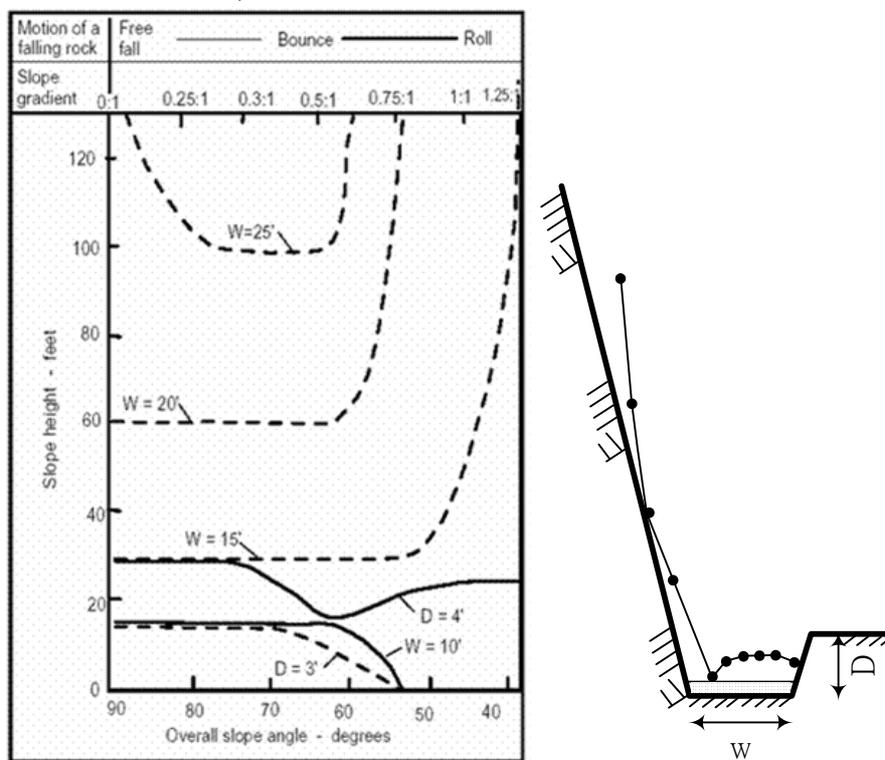


圖 3-8 Ritchie 等人落石防護設施建議

(資料來源：本研究整理)

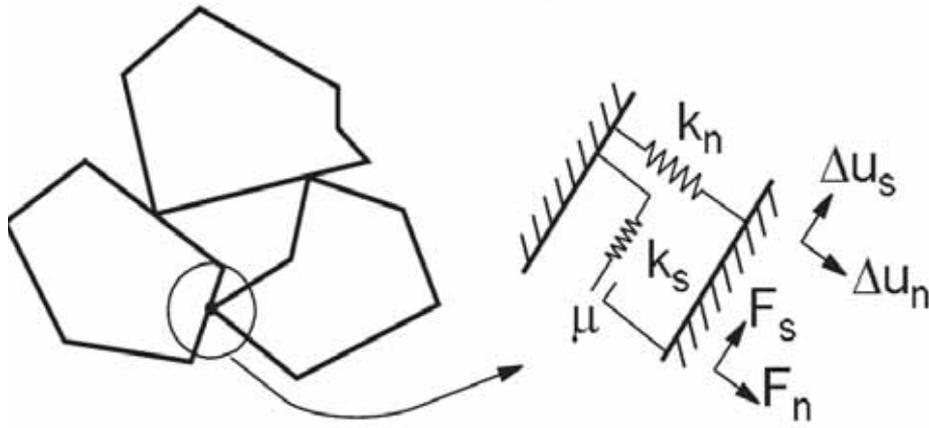


圖 3-9 塊體間之接觸力學示意圖

(資料來源：本研究整理)

第三節 坡地社區落石分析模式

一、集塊質量法

集塊質量法在 1976 年由 Piteau 與 Clayton 首先提出，程式名稱為 Computer Rockfall Model，其將落石模擬成一無限小之質點，考慮速度並加上回彈係數，以模擬碰撞後之速度折減，忽略它的形狀及尺寸的貢獻，可處理自由落體、彈跳、滾動及滑動四種運動模式。之後有許多學者與相關研究單位利用集塊質量法發展落石分析程式，如 SASS-MASSI (Bozzolo and Pamini, 1986), CADMA (Azzoni et al., 1995), RocFall (Steven, 1998), CRSP (Pfeiffer and Bowen, 1989), Mobyrock (Paronuzzi and Artini, 1999) 與 CRSP 4.0 (Jones et al., 2000) 等，相關研究可參閱表 3-1。這些分析模式中又以 Rockscience 公司所發展之商程式 RocFall 及美國科羅拉多州州政府於公路落石分析所使用之 CRSP 程式為發展較成熟之程式。

考量落石在移動區與坡面發生撞擊行為，將導致能量的消耗，為了有效顯示出能量耗損的程度，因而定義出回彈係數 (Coefficient of restitution)。回彈係數以碰撞後沿坡面法向及切向之速度分量除以碰撞前之沿坡面法向及切向之速度分量 (如圖 3-10 所示)，當此值趨於 1 時，表示為完全彈性體碰撞，在碰撞的過程中沒有能量的損失。一般而言，地質材料的回彈係數值均落於

0 與 1 之間。回彈係數可表示如下(Chau, 2002)：

$$R_n = \frac{V_m}{V_{in}}$$

$$R_t = \frac{V_{rt}}{V_{it}}$$

其中

R_n 為法向回彈係數。

R_t 為切向回彈係數。

V_{it} 為碰撞前沿坡面切向之速度。

V_{in} 為碰撞前沿坡面法向之速度。

V_{rt} 為碰撞後沿坡面切向之速度。

V_m 為碰撞後沿坡面法向之速度。

另一常用之回彈係數表示方式亦可寫為：

$$R_v = \frac{V_r}{V_i}$$

其中

V_r 為碰撞後之速度。

V_i 為碰撞前之速度。

上式之各速度分量可分別表示為：

$$V_{in} = \left(\frac{H}{T_1} + \frac{1}{2}gT_1\right)\cos\alpha - \frac{s}{T_1}\sin\alpha$$

$$V_{it} = \left(\frac{H}{T_1} + \frac{1}{2}gT_1\right)\sin\alpha + \frac{s}{T_1}\cos\alpha$$

$$V_m = \left(\frac{h}{T_2} + \frac{1}{2}gT_2\right)\cos\alpha - \frac{L}{T_2}\sin\alpha$$

$$V_n = \left(\frac{h}{T_2} + \frac{1}{2} g T_2 \right) \sin \alpha + \frac{L}{T_2} \cos \alpha$$

其中

$$H = y_1 - y_2, \quad h = y_2 - y_3, \quad s = x_1 - x_2 \quad \circ$$

$$L = x_2 - x_3, \quad T_1 = t_2 - t_1, \quad T_2 = t_3 - t_2 \quad \circ$$

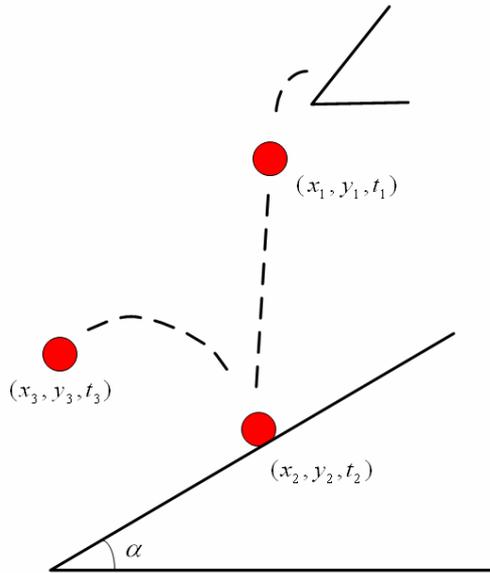


圖3-10 回彈係數示意圖

(資料來源：本研究整理)

回彈係數多以室內試驗、現地試驗、或是經驗方法推估而得，Chau 等人利用室內試驗所推得之結果如圖 3-11 與圖 3-12 所示，其結果發現以圓球試驗之法向回彈係數介於 0.4 至 0.6 之間，而切向回彈係數介於 0.6 至 1.0 之間。依據前人研究針對不同岩坡面推估之回彈係數加以整理，結果如表 3-2 所示。

表3-1 利用集塊質量法於落石問題之相關研究

Year	Author(s)	Program name	Dimensions	Approach	Probabilistic
1976	Piteau and Clayton	Computer Rockfall Model	2-D	Lumped mass	Partly
1982-86	Bozzolo and Pamini	SASS—MASSI	2-D	Hybrid	Yes
1985	Bassato et al.	Rotolamento Salto Massi	2-D	Lumped mass	No
1987	Descouedres and Zimmermann	Eboul	3-D	Rigid body	No
1989-91	Pfeiffer and Bowen Pfeiffer et al.	CRSP	2-D	Hybrid	Yes
1990	Kobayashi et al.	NA	2-D	Rigid body	No
1991-95	Azzoni et al.	CADMA	2-D	Hybrid	Yes
1991	Scioldo	Rotomap	3-D	Lumped mass	No
1998	Stevens	RocFall	2-D	Hybrid	Yes
1999	Paronuzzi and Artini	Mobyrock	2-D	Lumped mass	Yes
2000	Jones et al.	CRSP 4.0	2-D	Hybrid	Yes
2002	DAMOCLES project	STONE	3-D	Lumped mass	Yes

(資料來源：本研究整理)

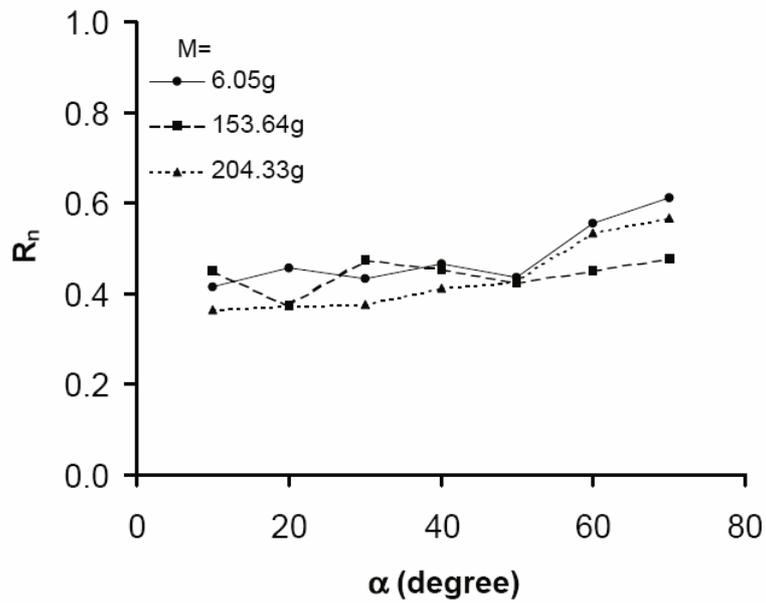


圖 3-11 R_n 回彈係數試驗結果(Chau, 2002)

(資料來源：本研究整理)

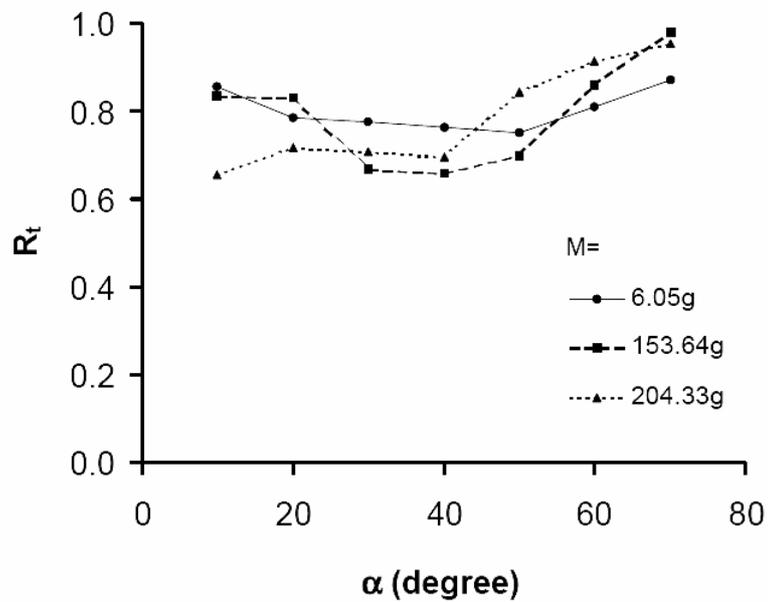


圖 3-12 R_t 回彈係數試驗結果(Chau, 2002)

(資料來源：本研究整理)

表 3-2 回彈參數建議值

Reference	Value for R_v	Value for R_n	Value for R_t	Type of material on slope surface
Piteau and Clayton (from Pasquero (1987))		0.65 - 0.75	0.8 - 0.9	Solid rock
		0.45 - 0.65	0.5 - 0.8	Detrital material mixed with large rock boulders
		0.35 - 0.45	0.4 - 0.5	Compact detrital material mixed with small boulders
		0.2 - 0.3	0.2 - 0.4	Grass covered slopes
Hoek (1987) (based on unpublished information from DOT in USA)		0.53	0.9	Clean hard bedrock
		0.40	0.90	Asphalt roadway
		0.35	0.85	Bedrock outcrops with hard surface, large boulders
		0.32	0.82	Talus cover
		0.32	0.80	Talus cover with vegetation
Pfeiffer, Bowen, (1989) T.J., T.D.		0.37 - 0.42	0.87 - 0.92	Hard surface paving
		0.33 - 0.37	0.83 - 0.87	Bedrock or boulders with little soil or vegetation
		0.3 - 0.33	0.83 - 0.87	Talus with little vegetation
		0.3 - 0.33	0.8 - 0.83	Talus with some vegetation
		0.28 - 0.32	0.8 - 0.83	Soft soil slope with little vegetation
		0.28 - 0.32	0.78 - 0.82	Vegetated soil slope
Robotham, M.E., Wang, H., Walton, G. (1995)		0.315	0.712	Limestone face
		0.303	0.615	Partially vegetated limestone scree
		0.315	0.712	Uncovered limestone blast pile
		0.251	0.489	Vegetated covered limestone pile
		0.276	0.835	Chalk face
Budetta, P., Santo, A.		0.2	0.53	Dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus desposits
		0.1	0.2	Remolded pyroclastic from the terraces

(資料來源：本研究整理)

表 3-2 回彈參數建議值(續)

		0	0.24	Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff
Chau, K.T., Wong, R.H. C., Lee, C.F. (1996)	0.393			Soil
	0.453			Shotcrete
	0.487			Rock slope
Giani, G.P. (1992)	0.5			Bedrock
	0.35			Bedrock covered by large blocks
	0.3			Debris formed by uniform distributed elements
	0.25			Soil covered by vegetation
Pfeiffer, T.J., Higgens, J.D. (1990)		0.37 - 0.42		Smooth hard surfaces and paving
		0.33 - 0.37		Most bedrock and boulder fields
		0.3 - 0.33		Talus and firm soil slopes
		0.28 - 0.3		Soft soil slopes
			0.87 - 0.92	Smooth hard surfaces such as pavement or smooth bedrock surfaces
			0.83 - 0.87	Most bedrock surfaces and talus with no vegetation
			0.82 - 0.85	Most talus slopes with some low vegetation
			0.8 - 0.83	Vegetated talus slopes and soil slopes with sparse vegetation
Hungr, O. Evans, S.G. (1988)		0.5	0.8	Sparsley forested slope is covered by a veneer of very fine weathered talus derived from weak shistose units underlying the limestone cap.
		0.5	0.8	Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments with a modal size of 5 cm.
		0.7	0.9	Rectangular bolder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf.

(資料來源：本研究整理)

二、 分離元素法(Discrete Element Method)

落石問題之分析方法由於其特殊性，以致傳統以連續體觀點所發展之數值分析方法如有限元素法或是有限插分法等，並無法適用之。因此以往對於落石相關分析與設計大多採用較簡單之顆粒形狀(無限小之質點)、自由落體公式，以估計其掉落之速度及距離(Piteau and Clayton, 1977 等)。但對於掉落中石塊相互間之碰撞、顆粒運動之軌跡、及不規則之邊坡與落石幾何形狀、防護設施之強度等則無法模擬，因此現階段大部分之落石防護設施設計，仍需仰賴以往之經驗來推估。

由於落石分析主要係考慮落石間相互之接觸與碰撞，及與自然邊坡之碰撞等，故需採用以不連續體為觀點所發展之數值分析方法，如分離元素法(Discrete Element Method, DEM)中之個別元素法(Distinct Element Method)或是不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA) 等，目前國內外有關不連續體之分析方法之理論可大致分為四類(Cundall and Hart, 1989)，分別為 Discrete Element Method、Modal method、Discontinuous Deformation Analysis 及 Momentum-Exchange method。各方法基礎理論各不相同，僅就目前較常採用之分離元素法(Discrete Element Method, DEM)與不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)進行簡述。

1. 分離元素法由 Peter Cundall (1971) 所創，其以顯式時間插分方法(explicit time-marching scheme)求解運動方程式。Cundall and Hart (1989)提出對分離元素法的定義包含以下兩點，分別為(1) 允許個體產生有限的位移及旋轉，包括個體間完全分離；(2) 運算過程中，必須能自動識別接觸點之發生。分離元素法之元素可為剛性體或可變形體，目前已發展出之相關程式有 TRUBAL (Cundall and Strack, 1979), UDEC (Cundall, 1980; Cundall and Hart, 1985), 3DEC (Cundall, 1988; Hart et al., 1988), DIBS (Walton, 1980), DSHEAR (Walton et al., 1988), 與 PFC(Itasca, 1995)等。分離元素法之發展歷程可參考圖 3-13 所示，目前本方法多已被包裝成商

用程式，不易對其程式碼進行修改。

2. 不連續變形分析法由石根華博士於 1984 年所提出，其基於位移法，利用最小勢能法之架構，配合塊體運動學理論(block kinematics)所發展出之一不連續體力學數值動力分析方法。不連續變形分析法與目前廣泛使用之有限元素法頗為類似，兩法最主要之差異，在於將各單位元素視為連續或可分離之塊體，有限元素法以節點保持位移之連續性，元素可發生變形但不可分離。而不連續變形分析法則允許塊體元素可變形且可分離，可模擬不連續體之力學行為，且能處理離散塊體間之接觸碰撞行為及大變位。目前已發展出之相關程式有 DDAD (Ke and Bray, 1995)，剛性 DDA (Ku 等人, 1998)，Berkeley DDA for Windows (Sitar, 2001)等。

茲針對其中個別元素法(Distinct Element Method)、不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)分述如下：

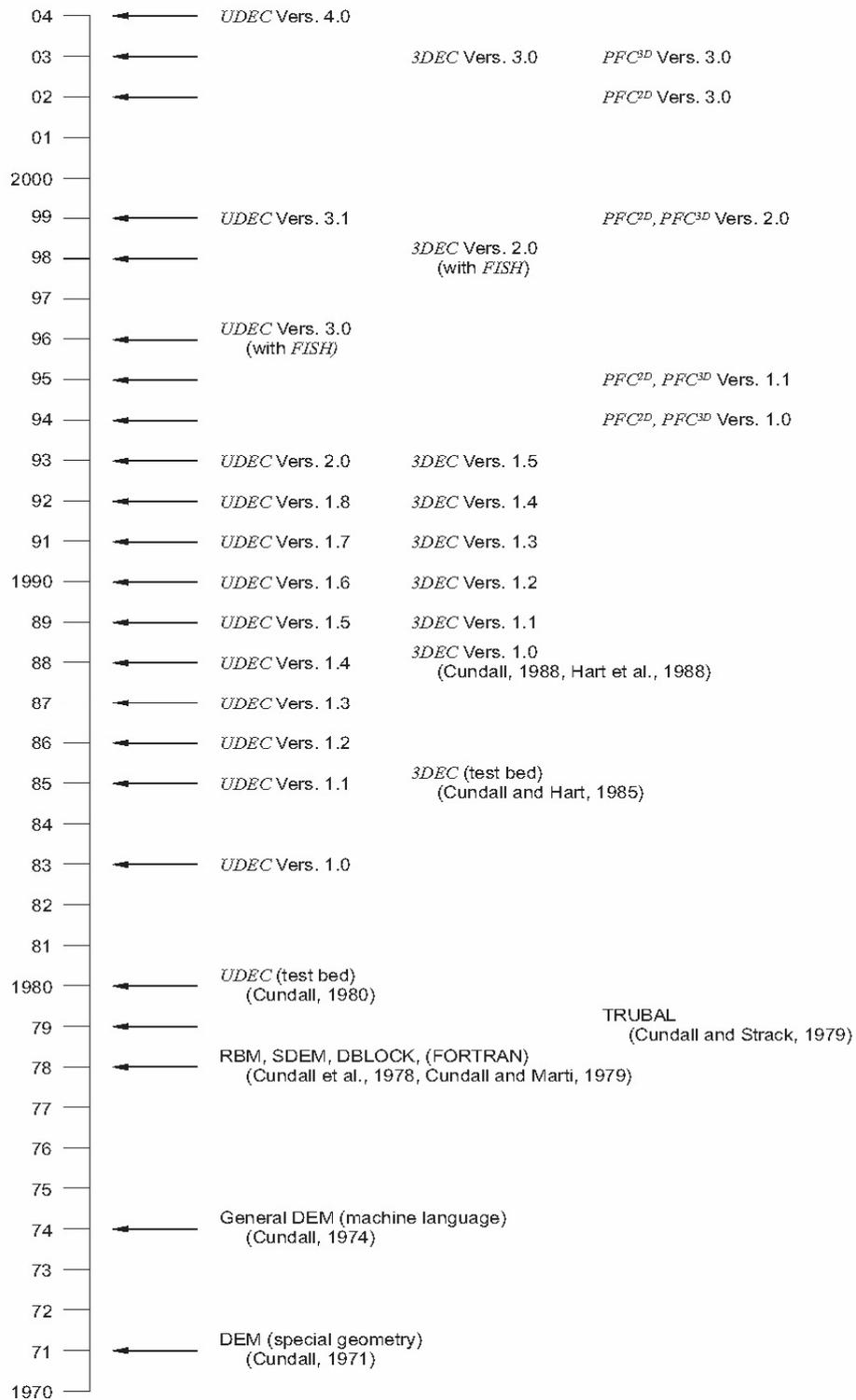


圖 3-13 分離元素法之發展歷程

(資料來源：本研究整理)

(一)、個別元素法(Distinct Element Method)

個別元素法是為了解決材料性質或形體等不連續的問題而發展出來的數值分析方法，適用於分析任何具不連續面材料（節理岩體）和顆粒性材料之力學行為。1989 年 Cundall 定義 DEM 至少還有兩個特點：(1)允許個體間產生有限的位移及轉動，包括允許個體完全地分離。(2)程式在運算過程中能自動辨別新的接觸點，並能消去分離之接觸點。

DEM 法主要之理論背景可以下列進行說明：

1. 不連續塊體間之接觸方式

塊體間的接觸方式可分為柔性接觸及剛性接觸二種，柔性接觸考慮能量在塊體間傳遞被消耗，允許塊體變形，接觸方式係以接觸勁度來表示力與位移的關係；而剛性接觸假設塊體本身為剛性體，其運動過程中無能量之損耗。

2. 塊體之材料性質

塊體的材料性質可分為剛性體及可變形體二種，早期的應用分析為求簡化及方便性，假設塊體為剛性體，故塊體之位移量均兩塊體間不連續面之相對移動量。但若塊體為可變形體，則除不連續面之相對移動量外，尚有塊體本身之變形量。

3. 塊體間接觸型態之偵測

塊體間接觸型態之偵測分為點、邊或面的型態彼此接觸。

根據 Hart 等人(1987)所述之通用個別元素法(Universal Distinct Element Code, 簡稱 UDEC)係根據分離元素法理論所寫成的，此法將岩體詮釋為由許多個別的塊體組合而成，塊體間由節理或不連續面所分開，節理可視為塊體間的界面或邊界條件，此與以往在有限元素法中將不連續面視為特殊界面元素(Interface element)之方式有相當大之不同，同時也突破了界面元素僅能容許小變形之限制。

分離元素法理論係假設岩塊系統是為數眾多之分離岩塊所組成，各個岩塊間之界面視為節理等不連續面，故不連續面即為分析域中之邊界條件。各個岩塊間之互制可藉由岩塊各接觸界面之位移及接觸力計算而得，整體岩塊系統處於外在荷載與岩塊自重之力學平衡狀態，故分離元素法屬於動力平衡分析(Dynamic analysis)型之運算架構。

UDEC 依據系統所受之外在荷載情形，計算任一時階下岩塊之速度與位移，配合力-位移定律計算岩塊間不連續面之接觸力(Contact force)，而不連續面計算所得之接觸力即為下一時階中岩塊所受的邊界外力。岩塊本身之運動可藉由牛頓第二運動定律及岩塊所受的邊界外力計算而得，若岩塊為可變形體時，UDEC 便自動將各個岩塊劃分為許多三角形元素，並分別計算三角形元素各節點的位移量，再配合材料組合律計算元素內部網格點之應力、應變、合力、與加速度等。若岩塊為剛體，則根據輸入之邊界條件計算剛體形心處之合力及力矩，進一步計算下一時階岩塊系統之力平衡。

(二)、不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)

傳統落石問題之分析方法侷限於分析工具之限制，大多採用較簡單之顆粒形狀(無限小之質點)、自由落體公式，以估計其掉落之速度及距離(諸如 Piteau and Clayton, 1977 等)。但對於掉落中石塊相互間之碰撞、顆粒運動之軌跡、及不規則之邊坡與落石幾何形狀、防護設施之強度等則無法模擬，因此大部分之落石防護設施設計，仍需仰賴以往之經驗來推估。

不連續變形分析法為石根華博士於 1988 年所提出，其基於位移法，利用最小勢能法之架構，配合自創之塊體運動學理論(block kinematics)所發展出之數值分析方法。塊體運動學之基本理論如下：(1) 每一個分析元素(即塊體)均可平移、旋轉、及分離，(2) 塊體與塊體隨著計算過程自動尋找塊體之接觸位置，(3) 塊體間需滿足無貫入與無張力之限制條件，故每一時間步長均需進行開閉疊代運算，(4) 塊體與塊體間接觸點位置以一勁度極高之正向與剪力彈簧模擬接觸力之傳遞，(5) 任一時間步長均滿足動力平衡(dynamic equilibrium)，(6) 接觸問題之計算採取懲罰法(penalty method)。

1. 理論背景

DDA 法係由岩石工程分析之塊體力學所發展，其與目前廣泛使用之有限元素法(FEM)頗為類似，唯兩種分析法最主要之差異，在於將求解區域離散化後所形成之元素(element)視為可分離之塊體或連續體之作法有所不同。一般而言，FEM 以元素結點之位移內插函數維持連續體位移之連續性，而元素可發生變形但不可分離；另者，DDA 則允許塊體元素可變形且可分離，以模擬不連續體之力學行為。此外，DDA 亦能處理塊體群在離散過程中，各塊體間之接觸碰撞及大變位行為。

不連續變形分析理論最早可回溯至 1984 年之 DDA 反算模式(Backward calculation model)，反算模式將某些非共線固定點所得之觀測位移量及應力狀態作為輸入資料，再利用最小平方理論反算固定點之位移量直至位移量與其

最終之變形量吻合為止，並求得當時之塊體材料參數。石根華博士於 1988 年提出了分析二維不連續體力學系統之 DDA 正算模式(Forward calculation model)，正算模式乃利用最小能量法來進行聯立方程式之組構，進而求解各塊體元素之應力、位移與變形之數值運算分析方法。若大幅增強塊體間接觸點之聯結彈簧(coupling spring)之勁度(stiffness)，DDA 亦可對連續體之力學行為作相當近似的模擬，DDA 之理論架構如圖 3-14 所示。

由於現階段不連續體顆粒分析理論均侷限於圓形或橢圓形顆粒形狀，如 PFC^{2D}，PFC^{3D} 等程式，其對於顆粒性材料之不規則顆粒形狀之模擬有其限制。而 DDA 程式並無顆粒形狀之限制。

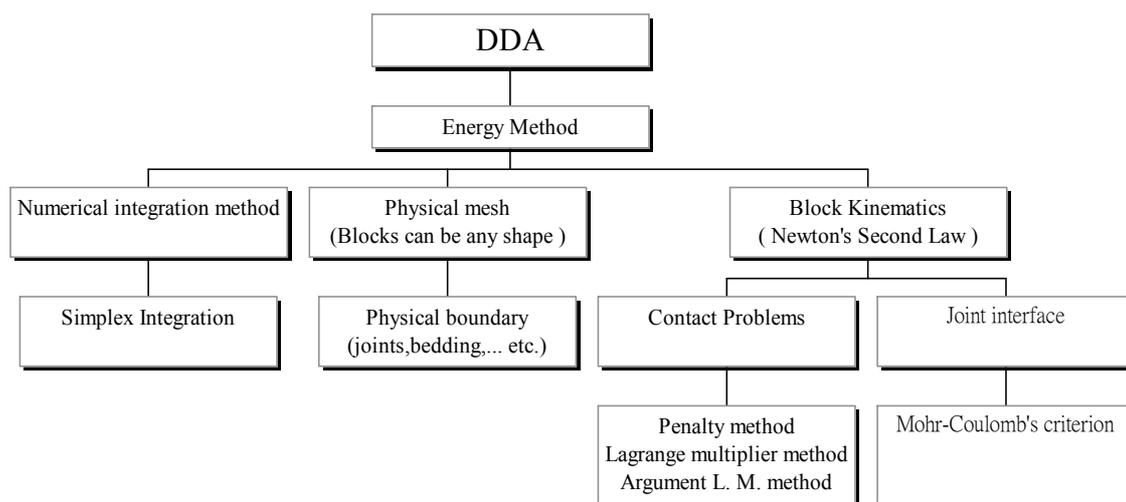


圖 3-14 DDA 之理論架構示意圖

(資料來源：本研究整理)

2. 不連續變形分析之運算架構

DDA 主要發展之目的是用於模擬岩石塊體系統(Block system)之力學機制，其理論包含正向與反向模式，同時也具擬靜態與動態分析之能力。DDA 之主要特點可歸納如下：

(1) 正算與反算計算模式

DDA 理論包含了完整之正算與反算計算模式，其正算模式是將欲模擬之邊界條件，塊體之材料特性與受力狀況輸入，進而計算出位移與應力狀態。而反算計算模式則是將對於某固定點所得之觀測位移量及應力狀態當作輸入資料，再利用最小平方理論反算至吻合其最終之變形量後，而求得塊體之材料參數。

(2) 靜態與動態分析

DDA 具有靜態與動態之分析能力，在動態分析部分，由於 DDA 引入了運動學中之慣性力，可考慮加速度之作用，故可模擬塊體運動之動態行為，在動態模式中，其速度為每一時間步長(time step)之累加值。在靜態分析部分，其速度在每一時間步長均假設為零。

(3) 基於隱式法之推導

在 DDA 中，欲求解之未知量為每一塊體之位移與應變。DDA 同時利用最小能量法推導組構聯立控制方程式，因此在每一時間步長均需求解聯立方程組，並在達到總體平衡狀態下，求取每一塊體之未知量，。

(4) 直接法或疊代法求解聯立方程式

由於採用隱式法之推導方式，因此需要求解系統之聯立方程組。DDA 目前可採用直接法中之高斯消去法或疊代法中之鬆弛疊代法(Successive Over-Relaxation, SOR)進行求解計算。

(5) 任意時間步長均為平衡狀態

由於 DDA 基本上為一動態分析模式，為滿足塊體間之相互不貫入條件，DDA 發展了開閉疊代運算分析模式，即在每一時間步長，塊體群均滿足塊體間相互不貫入之平衡狀態，故任意時間步長之運算結果皆在平衡狀態下所求得。

(6) 塊體可為任意形狀

由於 DDA 採用 Simplex 積分，與以往數值積分法之高斯積分不同，其積分不侷限於固定形狀(如三角形或四邊形)，因 Simplex 積分可對任意形狀作積分，故在 DDA 之計算中，塊體可為任意形狀。

(7) 可計算大變位問題

因 DDA 引入牛頓第二運動定律及採用 Lagrangian approach，與傳統之有限元素法侷限於小變位之分析不同，其各個塊體可作大變位之運動而不受限制。

(8) 完整之塊體運動理論

由於 DDA 屬於一處理不連續體運動之數值模式，且必須具備偵測塊體碰撞接觸狀態之機制，因此 DDA 發展了一套塊體運動理論，利用最先進之入線理論，以判斷塊體是否處於接觸狀態，再進一步採用此接觸資訊作為塊體開閉疊代運算之起始輸入資料。綜上所述，DDA 之運算架構可以圖 3-15 表示：

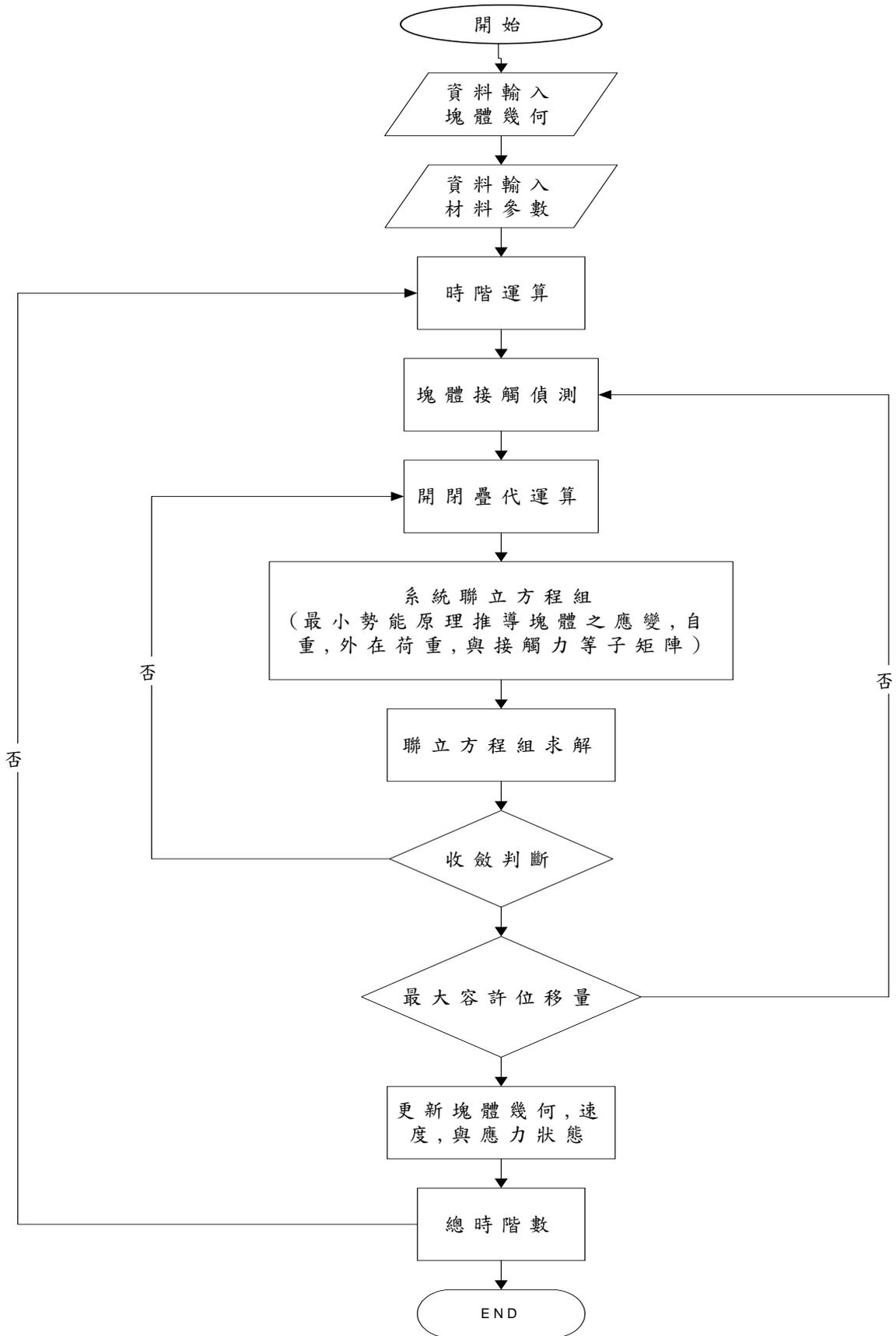


圖 3-15 DDA 之運算架構

(資料來源：本研究整理)

3. 不連續變形分析法之理論介紹

(1) 位移函數

DDA 法係採用線性位移函數進行位移內插運算，故各塊體內之應力及應變均為常數分布，在 DDA 法中每一個塊體之未知量為 $(u_0, v_0, r_0, \varepsilon_x, \varepsilon_y, r_{xy})$ ，其中 u_0, v_0 表示剛體平移量， r_0 表示塊體轉動量， $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 表示正向應變， r_{xy} 表剪應變。DDA 法中之線性位移函數可以下式表示：

$$u = a_1 + a_2x + a_3y$$

$$v = b_1 + b_2x + b_3y$$

若某一點之座標為 (x_0, y_0) ，則其位移量 (u_0, v_0) 可表為

$$u_0 = a_1 + a_2x_0 + a_3y_0$$

$$v_0 = b_1 + b_2x_0 + b_3y_0$$

將上兩式相減，利用應變及位移量之關係與變數變換，整理後可得下式：

$$u = \varepsilon_x(x - x_0) + \left(\frac{1}{2}\gamma_{xy} - r_0\right)(y - y_0) + u_0$$

$$v = \left(\frac{1}{2}\gamma_{xy} + r_0\right)(x - x_0) + \varepsilon_y(y - y_0) + v_0$$

再利用應變及位移量之關係與變數變換可得下式：

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_2 \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_3 \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) = \frac{1}{2}(b_2 + a_3) \\ r_0 = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) = \frac{1}{2}(b_2 - a_3) \end{cases}$$

解上式後兩項可得：

$$b_2 = \frac{1}{2}\gamma_{xy} + r_0$$

$$a_3 = \frac{1}{2}\gamma_{xy} - r_0$$

將解得之 a_2 、 a_3 、 b_2 、 b_3 代入線性位移函數中，整理可得下式：

$$u = \varepsilon_x(x - x_0) + \left(\frac{1}{2}\gamma_{xy} - r_0\right)(y - y_0) + u_0$$

$$v = \left(\frac{1}{2}\gamma_{xy} + r_0\right)(x - x_0) + \varepsilon_y(y - y_0) + v_0$$

再整理成矩陣型態為：

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = [T_i][d] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y - y_0) & (x - x_0) & 0 & \frac{1}{2}(y - y_0) \\ 0 & 1 & (x - x_0) & 0 & (y - y_0) & \frac{1}{2}(x - x_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

其中，塊體變形矩陣 $[T_i]$ 為

$$[T_i] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y - y_0) & (x - x_0) & 0 & (y - y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x - x_0) & 0 & (y - y_0) & (x - x_0)/2 \end{pmatrix}$$

而 $[d]$ 為塊體之未知量。

由於 DDA 是基於最小勢能原理來進行推導，故作用在塊體上之所有能量均可經由微分後而得到其最小勢能矩陣，接著將所有作用在塊體上之最小勢能矩陣相加，即可得到個別塊體之 $[k]$ 矩陣及 $[f]$ 矩陣。再利用塊體運動部份之接觸彈簧的作用，可將各個單獨塊體之 $[k]$ 矩陣及 $[f]$ 矩陣組合成總體之勁度矩陣及總體之載重矩陣。DDA 理論中之最小勢能矩陣包含點載重、線載重、體積載重、慣性力、固定點、岩錨及接觸彈簧等(如表 3-3 所示)，由於其推導過程極為繁瑣，因此僅就點載重矩陣之推導進行說明如下：

(2) 點載重矩陣

由點載重 (F_x, F_y) 對第 i 個塊體所產生之應變能可表示如下:

$$\Pi_p = -(F_x u + F_y v) = -[u \quad v] \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = -[D_i]^T [T_i]^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}$$

經由微分，可求得最小勢能矩陣為:

$$f_r = -\frac{\partial \Pi_p}{\partial d_{ri}} = [T_i]^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}, \quad r = 1 \dots 6$$

此部分為加入相對應之載重矩陣 $[f]$ 。

將上述點載重、線載重、體積載重、慣性力、固定點、岩錨等所推導出勁度矩陣與載重矩陣加入相對應之矩陣，再考慮塊體系統中大小不同之個別塊體以及塊體間之位移與運動造成塊體之接觸碰撞，則整個塊體系統透過最小能量法與系統之邊界條件等，可組成下式之系統方程式。

(3) 系統方程式

$$\begin{bmatrix} [k]_{11} & [k]_{12} & \cdots & [k]_{1n} \\ [k]_{21} & [k]_{22} & \cdots & [k]_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [k]_{n1} & [k]_{n2} & \cdots & [k]_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [d]_1 \\ [d]_2 \\ \vdots \\ [d]_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [F]_1 \\ [F]_2 \\ \vdots \\ [F]_n \end{bmatrix}$$

其中 $[F]_i$ 為 6×1 之載重矩陣，代表第 i 個塊體所承受之外力； $[k]_{i,j}$ 為勁度矩陣，在原程式中，假設塊體為線彈性體，接觸彈簧則為彈塑性體，降伏破壞則遵循莫爾庫倫(Mohr-Coulomb)破壞準則。

表 3-3 DDA 次矩陣 $[K_{ij}]$ 及 $[F_i]$ 摘錄表

能量來源	能量形態	次矩陣 $[K_{ij}]$ 及 $[F_i]$
塊體變形	$\Pi_e = \frac{S}{2} [D_i]^T [E_i] [D_i]$	$[K_{ii}] = S [E_i]$
初始應力	$\Pi_\sigma = -S [D_i]^T [\sigma_0]$	$[F_i] = S [\sigma_0]$
點荷重	$\Pi_p = -[D_i]^T [T_i]^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix}$	$[F_i] = [T_i]^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix}$
體荷重	$\Pi_w = -[D_i]^T \iint [T_i]^T dx dy \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix}$	$[F_i] = \iint [T_i]^T dx dy \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix}$
錨桿束制	$\Pi_b = \frac{S}{2l} [D_i]^T [E_i] [E_i]^T [D_i]$ $- \frac{S}{l} [D_i]^T [E_i] [G_i]^T [D_i]$ $+ \frac{S}{2l} [D_i]^T [G_i] [G_i]^T [D_i]$	$[K_{ii}] = \frac{S}{l} [E_i] [E_i]^T$ $[K_{ij}] = -\frac{S}{l} [E_i] [G_i]^T$ $[K_{ji}] = -\frac{S}{l} [G_i] [E_i]^T$ $[K_{jj}] = \frac{S}{l} [G_i] [G_i]^T$
慣性力	$\Pi_b = [D_i]^T \iint [T_i]^T [T_i] dx dy$ $\times \left(\frac{2M}{\Delta^2} [D_i] - \frac{2M}{\Delta} [V_0] \right)$	$[K_{ii}] = \frac{2M}{\Delta^2} \iint [T_i]^T [T_i] dx dy$ $[F_i] = \frac{2M}{\Delta} \left(\iint [T_i]^T [T_i] dx dy \right) [V_0]$
黏滯力	$\Pi_v = [D_i]^T \iint [T_i]^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} dx dy$	$[F_i] = -\frac{\mu}{\Delta} \iint [T_i]^T [T_i] [D_i] dx dy$ $[K_{ii}] = \frac{\mu}{\Delta} \iint [T_i]^T [T_i] dx dy$
方向上的 位移束制	$\Pi_c = \frac{p}{2} [D_i]^T [C_i] [C_i]^T [D_i]$ $- p\delta [D_i]^T [C_i] + \frac{p}{2} \delta^2$	$[K_{ii}] = p [C_i] [C_i]^T$ $[F_i] = p\delta [C_i]$
點位移束制	$\Pi_m = \frac{p}{2} [D_i]^T [T_i]^T [T_i] [D_i]$	$[K_{ii}] = p [T_i]^T [T_i]$

(資料來源：整理自 Shi, 1989)

三、不連續變形分析法有效性驗證

1. 單一塊體在坡面上之運動

(1) 規則形狀塊體

本驗證例為單一規則三角形塊體於坡度 45 之坡面上之力平衡進行檢核，其幾何模型建構如圖 3-16 所示，塊體共分割為二塊，其中三角形塊體之面積為 4.5 平方英尺，分析之材料參數輸入值如表 3-4 所示。本驗證例亦可利用極限平衡法分別計算正向力、滑動力、剪力強度與安全係數等，如表 3-5 所示。

由於 DDA 程式本身並無計算安全係數之功能，本研究另行依據大地工程常用之安全係數表示方式，將 DDA 程式之計算結果以安全係數之型式表示，其中安全係數可表如下：

$$FS = \frac{S}{\tau}$$

而

$$S = \sum_{i=1}^m (k_n \cdot \Delta u_n \cdot \tan \phi + C)$$

$$\tau = \sum_{i=1}^m (k_s \cdot \Delta u_s)$$

式中， m 為塊體接觸點之數量， Δu_n 為正向位移量， Δu_s 為切向位移量， k_n 為正向彈簧勁度， k_s 為切向彈簧勁度， C 為塊體接觸面之凝聚力， ϕ 為塊體接觸面之摩擦角， S 為塊體接觸面之剪力強度， τ 為塊體接觸面所受之剪力。

經由模擬得到塊體於坡度 45° 之坡面上，考量不同摩擦角分別為 38 至 62 度，每隔 1 度即進行上述正向力、滑動力、剪力強度與安全係數等之計算，所得到之結果與極限平衡法比較如表 3-5 所示，其安全係數之比較如圖 3-17

所示。結果顯示當摩擦角小於坡角($\varphi < \alpha$)時安全係數小於或等於 1，而當摩擦角大於坡角($\varphi > \alpha$)時，塊體的安全係數大於 1，顯示摩擦角越大塊體越穩定。DDA 與極限平衡法之計算結果在正向力與滑動力之數值幾乎完全相同，而安全係數在大於 1 之情形下兩者之計算結果也完全相同，惟當安全係數在小於 1 時，因 DDA 具非連續體計算之特性，上方三角形塊體已開始滑動，如圖 3-18 所示，而極限平衡法因無法反映非連續體分析之特性，其僅能以安全係數小於 1 之結果顯示塊體具滑動之趨勢，此結果亦顯示 DDA 具模擬塊體破壞前至破壞後行為之能力，突破傳統分析方法都僅能分析破壞前之力學行為。

表 3-4 分析之材料參數輸入值

塊體	單位重	123 lb/ft ³
	楊式模數	157000 lb/ft ²
	柏松比	0.25
接觸面	內摩擦角 φ	38°~62°
	凝聚力	0
	張力強度	0

(資料來源：本研究整理)

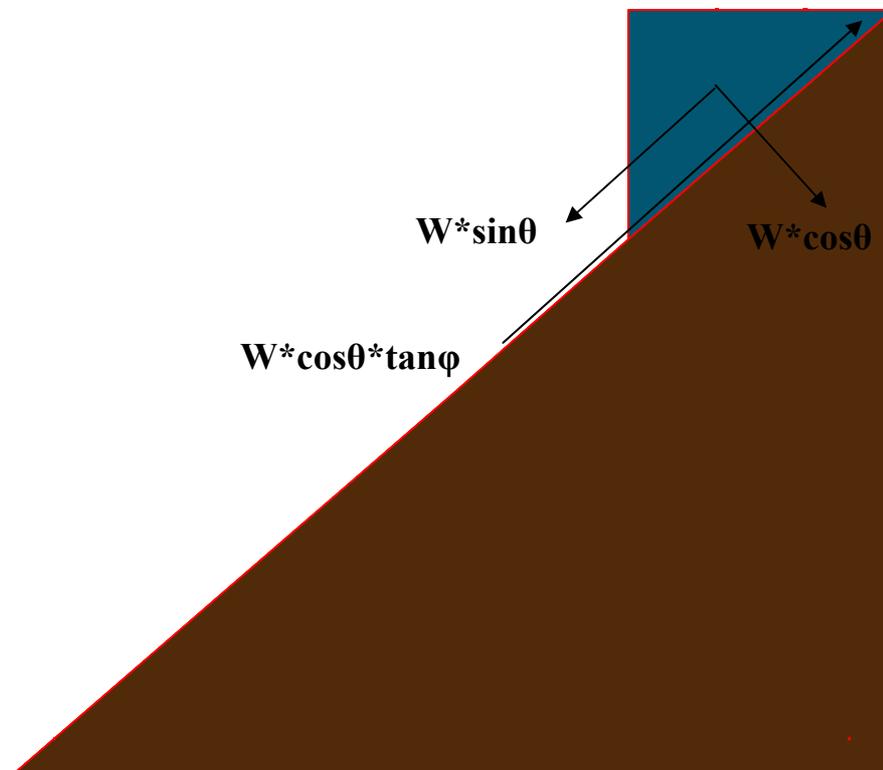


圖 3-16 單一塊體於邊坡上之幾何模型

(資料來源：本研究整理)

表 3-5 DDA 與極限平衡法分析結果之比較

摩擦角(度)	極限平衡法		剪力強度 (lb)	安全係數 (極限平衡法)	DDA		安全係數 (DDA)
	正向力 (lb)	滑動力 (lb)			正向力 (lb)	滑動力 (lb)	
62.00	391.38	391.38	736.09	1.88	391.10	391.23	1.88
61.00	391.38	391.38	706.08	1.80	391.48	391.08	1.81
60.00	391.38	391.38	677.90	1.73	391.50	391.06	1.74
59.00	391.38	391.38	651.37	1.66	391.50	391.06	1.67
58.00	391.38	391.38	626.35	1.60	391.50	391.06	1.61
57.00	391.38	391.38	602.68	1.54	391.50	391.06	1.55
56.00	391.38	391.38	580.25	1.48	391.50	391.06	1.49
55.00	391.38	391.38	558.95	1.43	391.50	391.06	1.43
54.00	391.38	391.38	538.69	1.38	391.50	391.06	1.38
53.00	391.38	391.38	519.38	1.33	391.50	391.06	1.33
52.00	391.38	391.38	500.95	1.28	391.50	391.06	1.29
51.00	391.38	391.38	483.32	1.23	391.50	391.06	1.24
50.00	391.38	391.38	466.43	1.19	391.50	391.06	1.20
49.00	391.38	391.38	450.24	1.15	391.50	391.06	1.16
48.00	391.38	391.38	434.68	1.11	391.50	391.06	1.12
47.00	391.38	391.38	419.71	1.07	391.50	391.06	1.08
46.00	391.38	391.38	405.29	1.04	391.50	391.06	1.04
45.00	391.38	391.38	391.38	1.00	臨界狀態		
44.00	391.38	391.38	377.95	0.97	391.41	377.27	1.00
43.00	391.38	391.38	364.97	0.93	391.41	365.00	1.00
42.00	391.38	391.38	352.40	0.90	391.42	352.44	1.00
41.00	391.38	391.38	340.22	0.87	391.42	340.27	1.00
40.00	391.38	391.38	328.41	0.84	391.42	328.45	1.00
39.00	391.38	391.38	316.94	0.81	391.43	316.98	1.00
38.00	391.38	391.38	305.78	0.78	391.45	305.84	1.00

(資料來源：本研究整理)

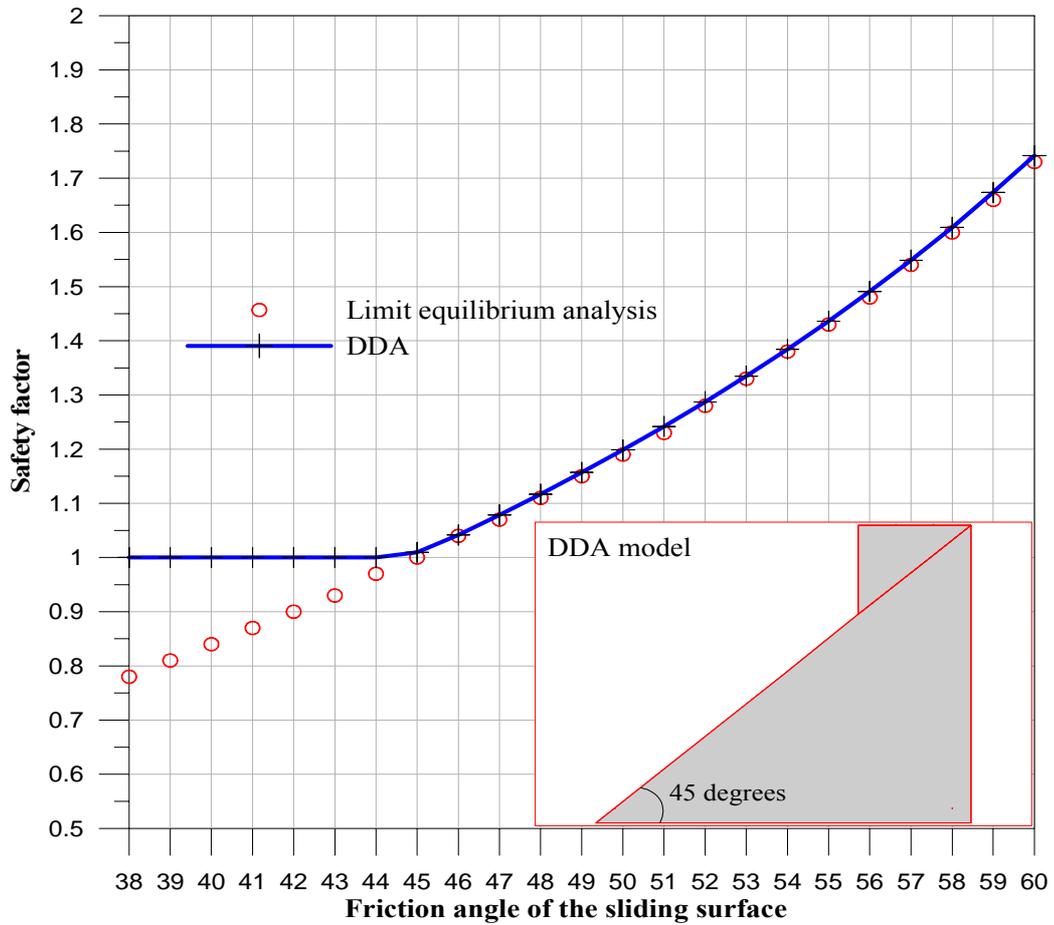


圖 3-17 DDA 與極限平衡法安全係數計算結果比較

(資料來源：本研究整理)

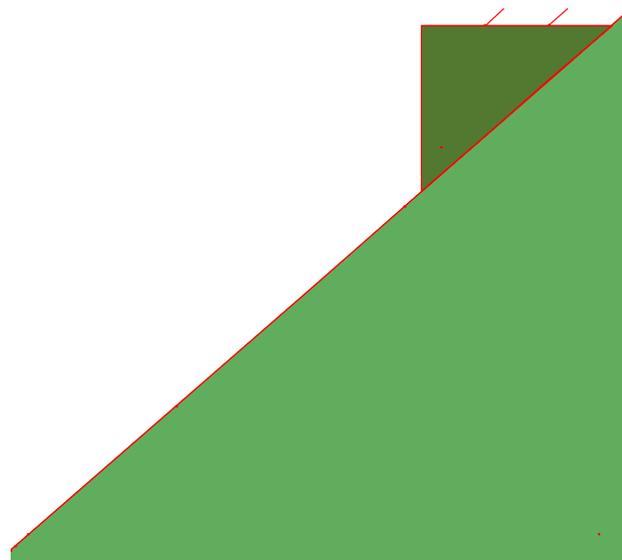


圖 3-18 DDA 於計算至安全係數小於 1 時之塊體發生滑動情形

(資料來源：本研究整理)

(2) 近圓形不規則形狀塊體

本驗證例為單一近圓形不規則形狀塊體於坡度 30 之坡面上之力平衡進行檢核，其幾何模型建構如圖 3-19 所示，塊體共分割為二塊，其中近圓形不規則形狀塊體之面積為 0.394106 平方公尺，分析之材料參數輸入值如表 3-6 所示。本驗證例亦可利用極限平衡法分別計算正向力、滑動力、剪力強度與安全係數等，如表 3-7 所示。

經由模擬得到塊體於坡度 30°之坡面上，考量不同摩擦角分別為 15 至 45 度，每隔 5 度即進行上述正向力、滑動力、剪力強度與安全係數等之計算，所得到之結果與極限平衡法比較如表 3-7 所示，其安全係數之比較如圖 3-20 所示。由於本例未考慮凝聚力，以極限平衡法分析之結果顯示當摩擦角小於坡角($\phi < \alpha$)時安全係數小於或等於 1，而當摩擦角大於坡角($\phi > \alpha$)時，塊體的安全係數大於 1，而臨界摩擦角為 30°，即於摩擦角為 30°其安全係數為 1。

極限平衡法係假設塊體之重量作用於正中心，惟本例塊體形狀為一不規則近圓形塊體，其形心位置並非在塊體之正中心處，以 DDA 分析結果發現，本例之臨界情形界於摩擦角為 33 度至 37 度間，較極限平衡法所分析之 30°略大，此結果顯示形狀效應亦影響邊坡之安全係數值。

DDA 與極限平衡法之計算結果於摩擦角大於等於 38 度時之正向力與滑動力之數值幾乎完全相同，惟當安全係數在小於 1 時，因 DDA 具非連續體計算之特性，上方不規則形狀塊體已開始滑動，如圖 3-21 所示，而極限平衡法因無法反映非連續體分析之特性，其僅能以安全係數小於 1 之結果顯示塊體具滑動之趨勢。

表 3-6 分析之材料參數輸入值

塊體	單位重	26.46 kN/m^3
	楊式模數	157000 kN/m^2
	柏松比	0.25
接觸面	內摩擦角 ϕ	$15^\circ \sim 45^\circ$
	凝聚力	0 kN/m^2
	張力強度	0 kN/m^2

(資料來源：本研究整理)

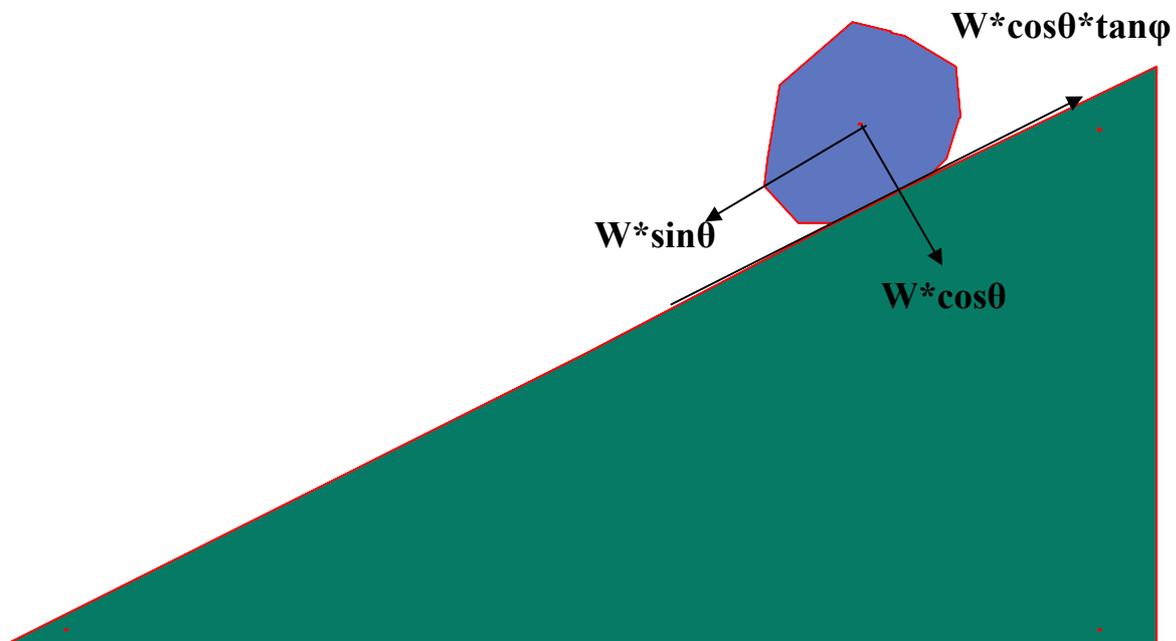


圖 3-19 單一塊體於邊坡上之幾何模型

(資料來源：本研究整理)

表 3-7 DDA 與極限平衡法分析結果之比較

摩擦角(度)	極限平衡法		剪力強度 (lb)	安全係數 (極限平衡法)	DDA		安全係數 (DDA)
	正向力(lb)	滑動力(lb)			正向力(lb)	滑動力(lb)	
20	9.03	5.21	3.29	0.63	8.95	3.26	1.00
25	9.03	5.21	4.21	0.81	9.03	4.21	1.00
30	9.03	5.21	5.21	1.00	9.03	5.21	1.00
32	9.03	5.21	5.64	1.08	9.03	5.21	1.00
38	9.03	5.21	7.06	1.35	9.02	5.21	1.35
40	9.03	5.21	7.58	1.45	9.03	5.21	1.45
45	9.03	5.21	9.03	1.73	9.03	5.21	1.73

(資料來源：本研究整理)

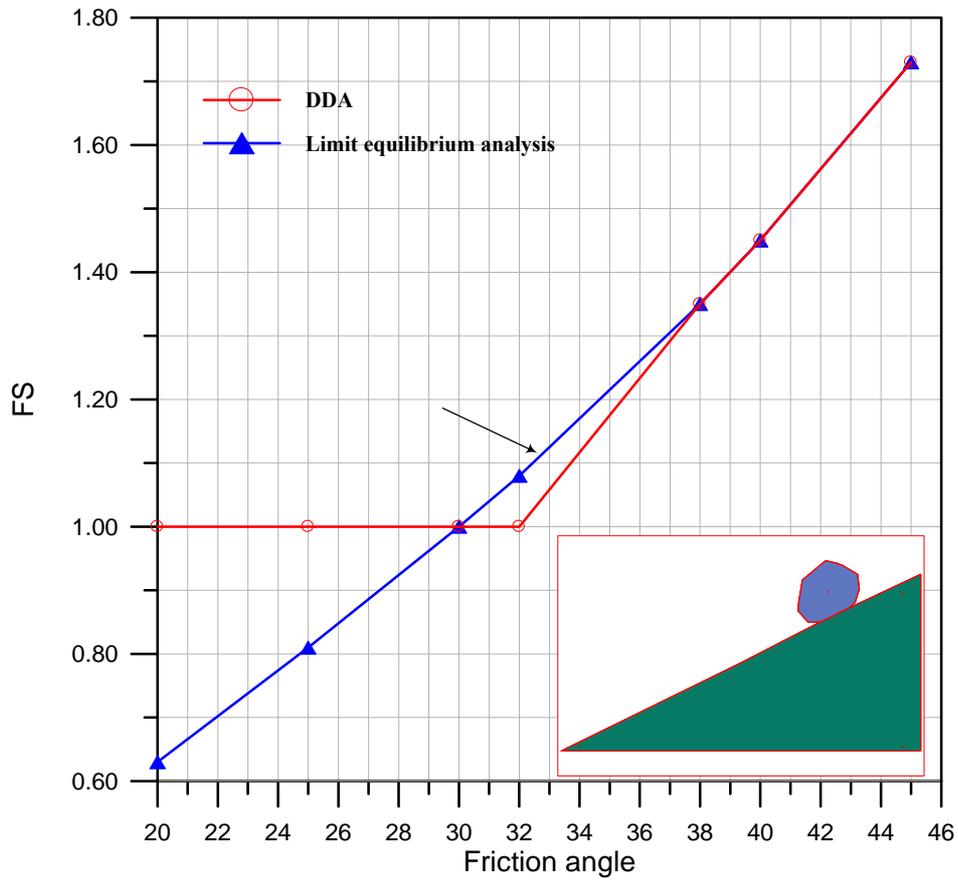


圖 3-20 DDA 與極限平衡法安全係數計算結果比較 塊體形狀效應差

(資料來源：本研究整理)

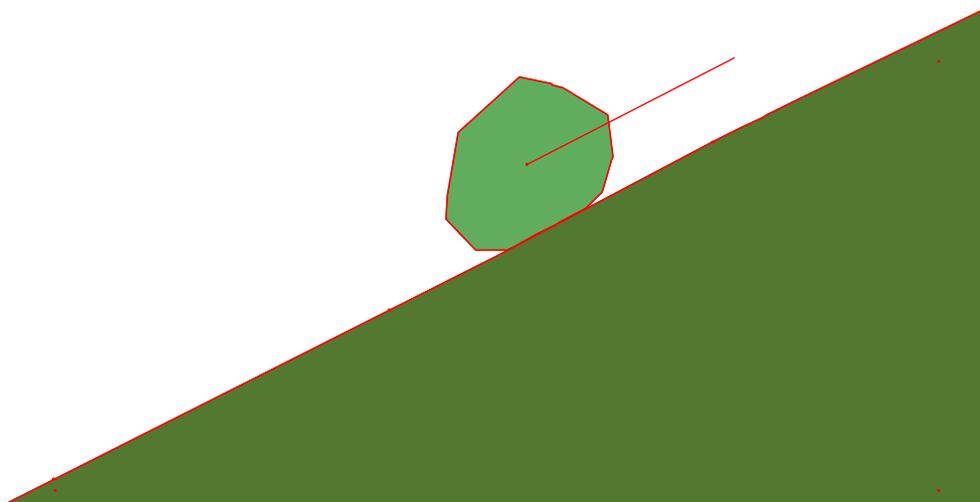


圖 3-21 DDA 於計算至安全係數小於 1 時之塊體發生滑動情形

(資料來源：本研究整理)

2. 落石運動機制驗證

為進一步確認 DDA 法模擬落石問題之正確性，分別利用本研究所發展之模式驗證 Ritchie (1963) 等人根據試驗結果所提之單一落石於三種岩坡落石運動機制，計算結果如圖 3-22 所示，而 Ritchie 等人之試驗結果如圖 3-22(d) 所示。結果中顯示，本研究所發展之模式模擬岩坡落石之運動機制，包括：滾動、跳動、與掉落模式均與 Ritchie 等人之試驗結果一致。

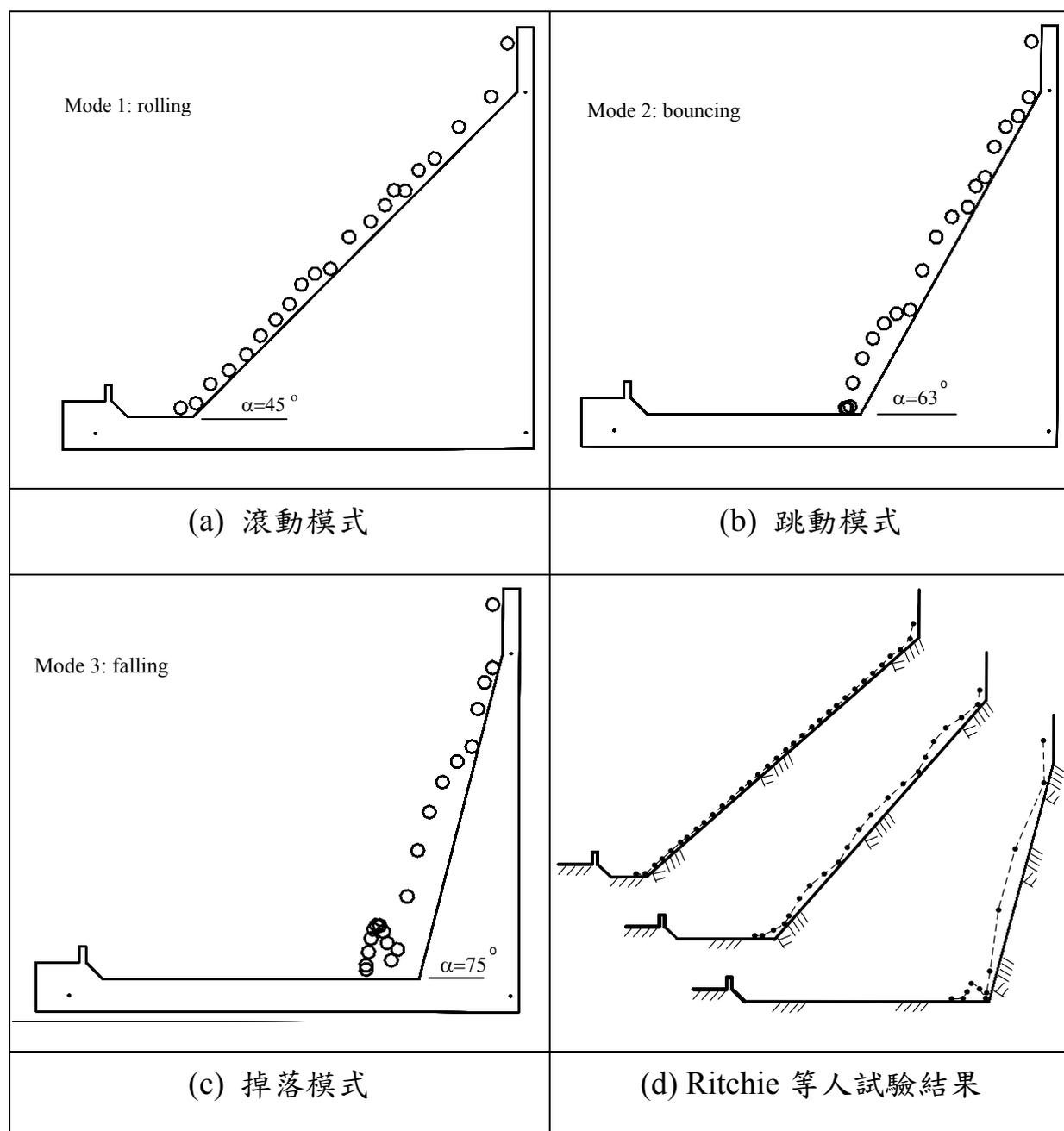


圖 3-22 DDA 法計算結果與 Ritchie 等人落石試驗之結果比較

(資料來源：本研究整理)

第四章 快速地形量測技術建立

第一節 概述

一、落石邊坡地表地形資料

由於實際落石情形受地表地形之影響甚大，如何準確的將地表地形條件反映在落石分析中是落石分析之關鍵問題。對於特定邊坡之落石分析設計時需採用大比例尺之地形圖或是直接進行地面測量獲取地表地形，惟絕大多數現有邊坡均無法獲取其原始地表地形資料，因此多採用目前國內最普及的大比例尺地形圖，如農林航空測量所五千分之一像片基本圖，然而像片基本圖之精度不足，且間隔相當時間之後，由於地表植生或是其他因素，邊坡地形亦可能大幅變化，常無法真實呈現場邊坡的地形變化，故多採用現地地形測量方法。

現地邊坡剖面繪製是選擇落石撞擊路面處為剖面起點，向落石可能掉落的軌跡為方向，測製該方向之地形剖面，其原理是使用電子掃描儀量測邊坡至地面之距離，並量測上述邊坡點與水平面之夾角，應用三角法繪製現地邊坡地形剖面，但若增加邊坡剖面數目則需增加測量點，所得結果亦不易呈現完整邊坡地形之三維變化，因此數值地形模型提供了落石邊坡分析評估時所需地表地形之快速有效資訊。

本研究以下分別針對各不同資料來源所製作之數值地形模型進行介紹，並對其於山坡地社區落石災害防治之應用性與適用性進行檢討。

二、數值地形模型

落石邊坡之三維地表地形可由數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)或數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)表示,其中數值高程模型係源自美國地質調查所(U. S. Geological Survey, USGS)所製作之網格式高程資料,而數值地形模型則泛指任何表達地形的的方法,如:數值等高線、不規則三角網(Triangular Irregular Network, TIN),因此DTM較DEM更抽象及廣義(Burrough, 1986)。數值地形模型一般多以網格式(Raster)之資料表示,亦可以向量式(Vector)之資料表示,如圖4-1所示。唯兩者之表示方式各有優缺點,Zeiler (1999)之研究曾對兩者進行比較如表4-1所示。

DTM的資料來源可分成三種,分別為:(1)衛星或航照資料獲取(Photogrammetric data capture,如圖4-2所示)、(2)地面測量(Ground survey)、及(3)現有資料之數化處理。地面測量相對上較其他二者精準,但成本也比較高。航照資料產生的DTM品質,受限於資料樣本的抽樣方式及影像品質的影響。地形圖數化處理生產之DTM由於等高線的離散疏密不一,無法呈現細的地形起伏。上述三種不同來源DTM之取決在於預算之多寡、精度需求、與資料之可取得性等。

(1) 衛星或航照資料

衛星或航照DTM將用於廣域之大範圍落石區域之分析使用,主要原因係現有衛星DTM資料利用高解析度影像對(High Resolution Stereoscopy, HRS)所能達到之最佳垂直高程之精度約10 m (SPOT 5, Spot image company),對實際落石防護結構之工程分析設計而言,其精度無法達到要求。因此對於特定邊坡之落石分析設計時仍需採用大比例尺之地形圖或是直接進行地面測量獲取DTM。

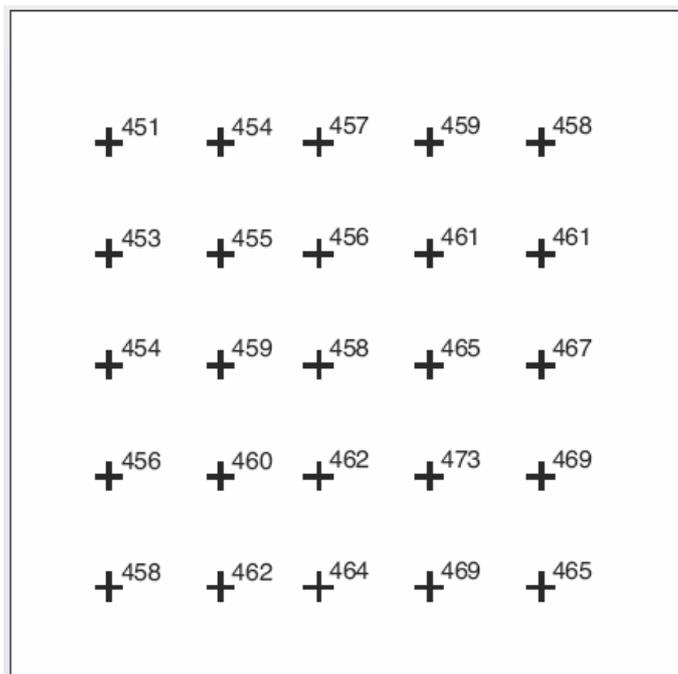
衛星影像立體對製作 DTM 之精度受限於衛星遙測影像解像度(如表 4-2 所示)，衛星影像 DTM 精度仍落後於航空影像立體對(尤其在高程精度)，但其有製作時程短以及可完成較廣面積 DTM 的優勢，因此應以分析精度之需求分別採用衛星或航照數值地形模型。而影響衛星影像立體對 DTM 精度之關鍵在於：

- (a) 原始影像的解析度：必需篩選良好之影像。
- (b) 地表控制點：衛星影像的 DTM 精度仍必需搭配航測製作過程中的 DTM 資訊始能提升精度，尤其地表控制點的校正。GCP 的使用與否將影響區域座標系統的精準度，若無 GCP 將難以與現有的其他 GIS 資訊套疊，容易出現座標偏移的情形。
- (c) 山區樹高修正與地表現地檢核：樹高修正及地表地形特徵與高程變化，需以地表調查進行檢核後再予以修正。惟部分地區之交通不便，現地勘查人員難以到達，故山區樹高的扣除仍以航照獲取之資訊較為可靠且有效率。

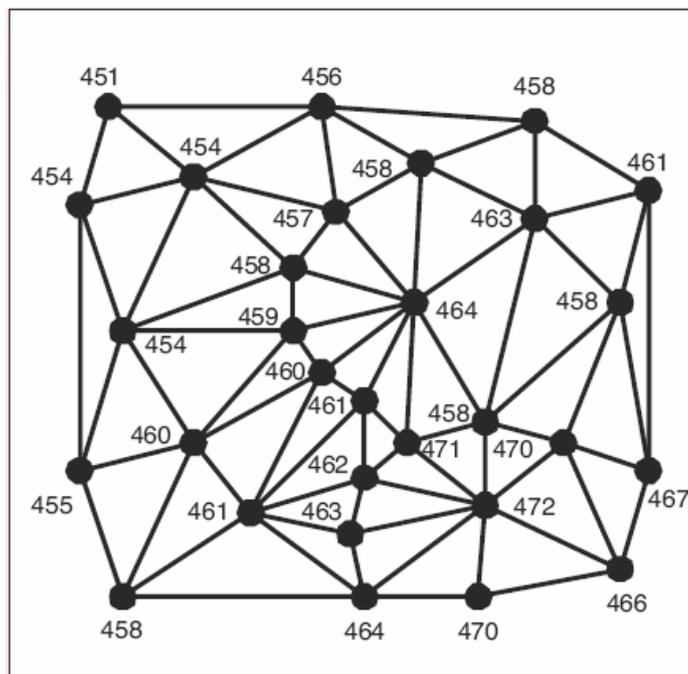
台灣地區的國家數值地形模型資料，目前由農委會委託農林航空測量所測製，採用解析航測法在航照立體相對上數化高程點，以每 40 公尺等間距的規則網點取樣，產生之數值地形模型檔則以 1/5000 基本圖幅分檔，每幅約 4800 點，台灣地區共有 5441 個檔案，山區部分則因長年雲霧覆蓋和地形陡峭等因素仍缺一些圖幅。由於農林航測所製作台灣地區之 DTM 已有相當時日，對於特定區域較新時期之 DTM 可以航拍方式另行製作。

圖 4-3 與圖 4-4 為利用影像匹配技術所製作之 DTM，本研究分別以 5 m 解析度之衛星影像 DTM 與航照影像 DTM 進行比較，可發現相同解析度之航照影像 DTM 較衛星影像 DTM 更為細緻，且三維幾何細部較為明顯可分辨。故航照影像 DTM 提供分析大範圍落石問題時之良好地形幾何資料，若有同一處不同時期之航照影像 DTM，相關落石岩

坡之變遷亦可透過 DTM 之差異比較加以分析，對於實際岩坡落石問題之特性瞭解提供相當助益。惟航照或衛星影像 DTM 適用於大範圍之落石問題特性分析，且製作成本高，對於特定邊坡之 DTM 一般多以實際地形測量行之，由於目前測量儀器之進步快速，本研究於下節針對三維雷射掃描技術製作特定邊坡之 DTM 進行介紹，同時亦對其於落石問題之應用進行討論。



(a) 網格式(Raster)表示 DTM



(b) 不規則三角網(TIN)格式表示 DTM

圖 4-1 數值地形模型之表示方法

(資料來源：本研究整理)

表 4-1 網格式格式與不規則三角網格式 DTM 之比較(Zeiler, 1999)

數值地形之精度(Accuracy of surface model)	
DTM	TIN
若欲增加精度，需以高精度數值地形重新產生全部數值地形模型	若欲增加精度，可局部增加格點密度完成
地表地物之精度(Fidelity of surface features)	
DTM	TIN
由於格點間距固定，山峰或是山脊稜線之精度於格點外時較差	溪流、山峰、或是山脊稜線之精度較佳
應用性	
DTM	TIN
<ol style="list-style-type: none"> 1. 小尺度之數值地形模型 2. 污染物傳輸模擬 3. 集水區之劃分 4. 集水區水文分析 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 道路設計之體積計算 2. 土地開發之排水研究 3. 高精度之等高線產生 4. 地表建築物之展示

(資料來源：本研究整理)

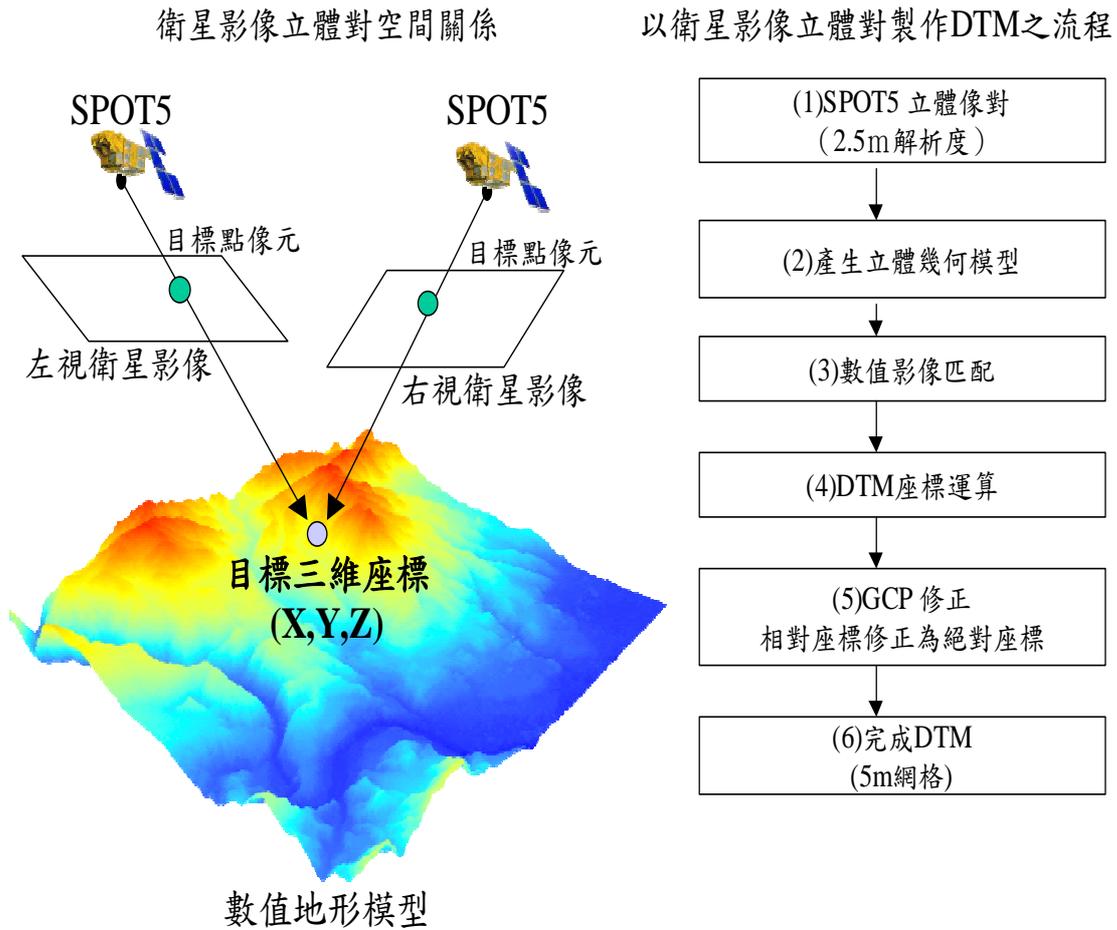


圖 4-2 以衛星影像立體對進行 DTM 製作之示意圖

(資料來源：本研究整理)

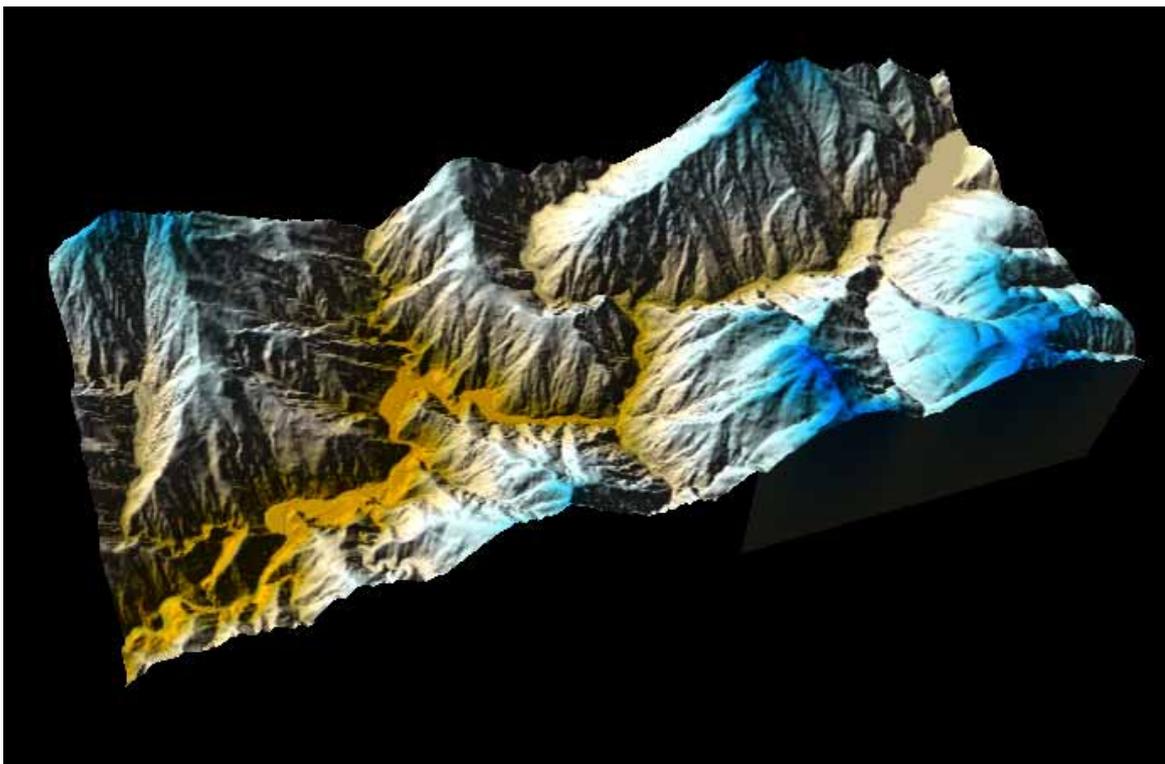


圖 4-3 航照影像 DTM (40 m 解析度)
(資料來源：本研究整理)

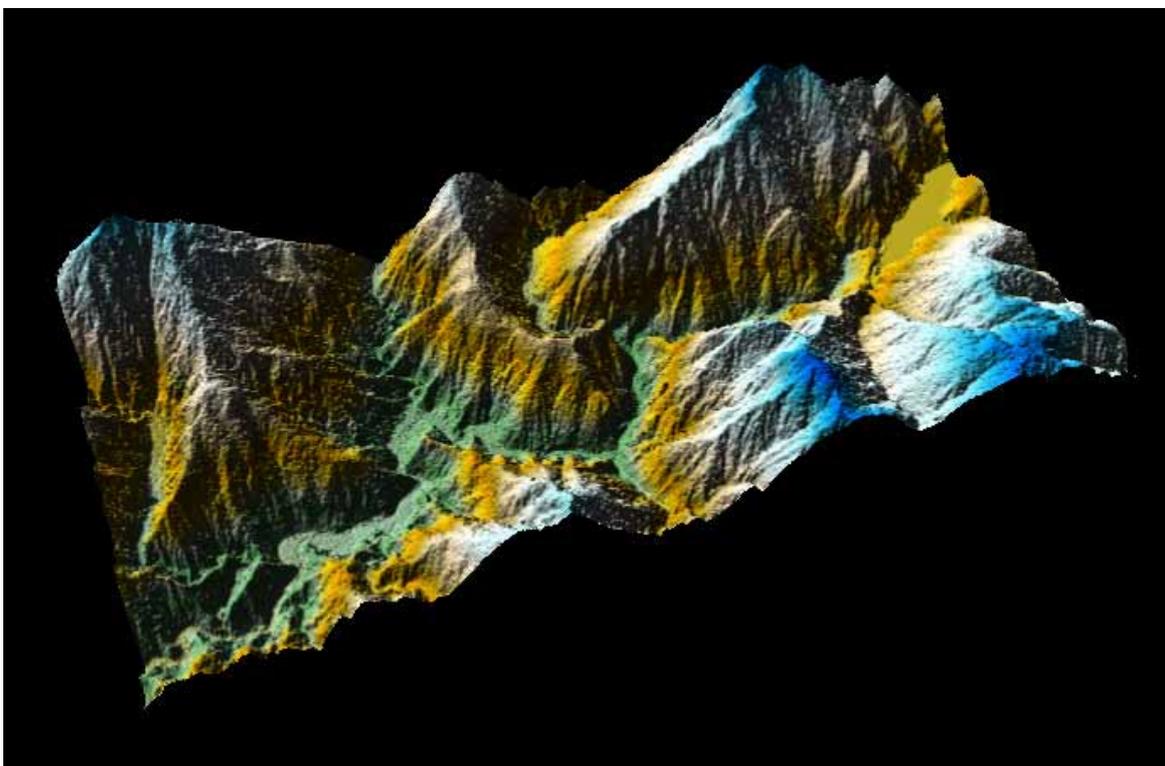


圖 4-4 衛星影像 DTM (5 m 解析度)
(資料來源：本研究整理)

第二節 地形測量 DEM

一、 概述

地面測量、衛星或航照資料獲取、及現有資料之數化處理均可用以製作 DEM。上述三種不同來源 DEM 之取決在於預算之多寡、精度需求、與資料之可取得性等，在落石分析應用適用性與新發展之三維雷射掃描技術比較如表 4-2 所示。衛星或航照 DEM 多用於廣域之大範圍落石區域之初步評估，主要原因係現有衛星 DEM 資料利用高解析度影像對(High Resolution Stereoscropy, HRS)所能達到之最佳垂直高程之精度約 10 m (SPOT 5, Spot image company)，對實際落石防護結構之工程分析設計而言，其精度無法達到要求。因此對於特定邊坡之落石分析設計時仍需採用大比例尺之地形圖或是直接進行地面測量獲取較高精度之 DTM。

表4-2 三維雷射掃描DTM、航照DTM、與SPOT DTM之比較

DTM 來源	三維雷射掃描	航照影像	衛星影像	備註
涵蓋範圍	特定邊坡	約 2-3 公里(1 圖幅)	約 60 公里	
成本	低	高	高	與三維雷射 DTM 比較結果
精度	極佳	佳	差	與三維雷射 DTM 比較結果
施測製作時間	短	長	長	航照與衛星 DTM 需由影像再進行後製作
資料可及性	易	困難	易	航照製作需配合天候進行，衛星則有雲遮蔽之限制

(資料來源：本研究整理)

二、 地面測量之必要性

台灣西部麓山帶地質區，尤其是丘陵地帶的沈積岩地帶，多含所謂之「豚背構造」或俗稱「單面山」，其一面是順向坡，而背面是倒插坡（或稱逆向坡），倒插坡常是一個較陡的斷崖下接以一個較平緩的崖錐堆積或崩積層，而落石災害之地形背景多發生於倒插坡。故落石邊坡一般而言多甚為陡峭。前述衛星或航照資料所製作之 DEM 一般均以水平面間距作為其解析度要求，如台灣地區的國家數值地形模型資料，採用解析航測法在航照立體相對上數化高程點，以每 40 公尺等間距的規則網點取樣。目前最新製作之數值地形模型(民國 95 年)，則以每 5 公尺等間距的規則網點取樣，然而落石邊坡往往在水平面距離 20 至 50 公尺內其垂直高程便可陡降數十公尺，甚至上百公尺。上述每 40 公尺等間距取樣之 DEM 對一落石邊坡而言僅包含 1 至 2 個高程取樣點，若以最新製作每 5 公尺等間距取樣之 DEM 也僅包含 4 至 10 個高程取樣點。因此空載製作之 DEM 因取樣間距限制而不易詳細描繪落石之自然邊坡形狀。

地面測量方式是目前取得詳細且高精度之邊坡形狀之唯一方法，因地面測量可近垂直於落石邊坡之坡面進行，因此取樣點可垂直於邊坡坡面，若搭配地面 LIDAR 之測量方式，對於落石自然邊坡之形狀可進行極詳細之描繪。

三、 三維雷射掃描技術

LIDAR (Light Detecting and Raging) 具有快速獲取高精度且密集的地表點位資料能力，密集的 LIDAR 點位資料能夠非常精細地描述地表平面以及地物表面起伏的狀況，使地形測繪工作邁入一嶄新的境界。有別於空載 LIDAR 技術，本研究所採用之三維雷射掃描技術係屬

於地面 LIDAR，三維雷射掃描技術為近年來新發展之雷射掃描觀測技術，其可長時間的觀察與周期性的監測地形變化並精密的偵測出地表輕微的移動，是一種非常適合於危險地形或是坡面掃描的高精度系統，可觀測範圍十分的廣泛。

為進一步瞭解不同三維雷射掃描於落石邊坡地形製作之適用性與精確度，本研究分別採用兩款不同形式之雷射掃描儀分別為法國 Trimble 公司所製作之 GS200 雷射掃描儀與奧地利 Riegl 公司所製作之 LPM-2K 長距離雷射掃描儀進行掃描。

本研究中地面測量 DEM 之製作係利用雷射掃描儀進行特定地點之現地測量工作，雷射掃描儀可提供平距、斜距、方位角、俯仰角、坡度與坡度百分比、現地多邊形面積與二維及三維空間任意兩點間之距離測量。測量時可直接於 PDA 上之衛星定位儀(GPS)連線同時進行衛星定位，因此可得到精度足夠之現地數化之數值地形資料供後續之力學分析使用。

本研究所採用之兩款雷射掃描系統儀器簡介如下：

(A) 儀器概述

雷射掃描儀是利用儀器發射的近紅外光，量測對於測定對象物的往返時間及發射角度，藉由儀器在已知之三維座標點上，自動測量地形的三維座標點數據並保存於記憶體中。

本計畫所使用之三維雷射掃描儀係利用計算雷射撞擊待測點反射回感應器之往返飛行時間求得掃描頭至待測點之距離觀測量，據此計算待測點之坐標位置，雷射掃描運作方式如圖 4-5 所示。

(B) GS200 短距離雷射掃描儀器規格

1. 掃描距離：可掃描距離 700 公尺，最佳掃描距離 1 至 200 公尺
2. 解析度在 100 公尺掃描下，有 3 mm 之誤差
3. 精度在 50 公尺掃描下，有 1.5 mm 之誤差
4. 掃描速度：每秒 5000 點
5. 雷射形式：脈衝式綠光雷射

(C) LPM-2K 長距離雷射掃描儀器規格

1. 掃描距離：最遠至 2,500 公尺
2. 精度：正負為 50 mm 左右
3. 解析度：10 mm
4. 波長：0.9 um

(D) 作業步驟

1. 選定崩塌地之掃描區域(需通視，如圖 4-6 所示)
2. 選定 4 個後方固定點(如圖 4-7 所示)以進行 GPS 定位(如圖 4-8 所示)
3. 設定儀器並開始掃描，掃描步驟分別為先掃描後方 4 個固定點(距離測定)後再行掃描於步驟所設定之崩塌地區域(掃描點如圖 4-9 所示)

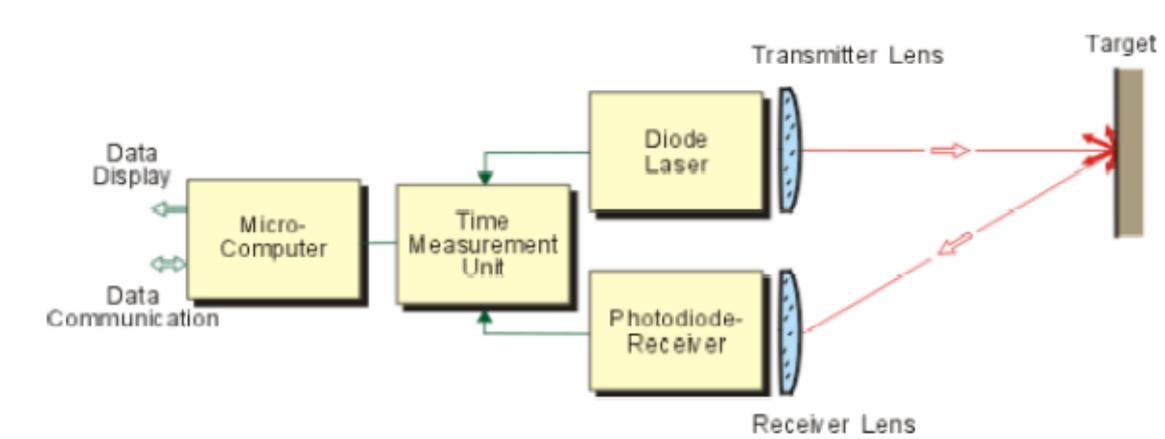


圖 4-5 雷射掃描運作方式

(資料來源：本研究整理)

本研究採用上述兩款短距離與長距離雷射掃描儀進行針對台北市信義區美的世界社區與台二線南雅里社區進行掃描，掃描成果如下節所述。

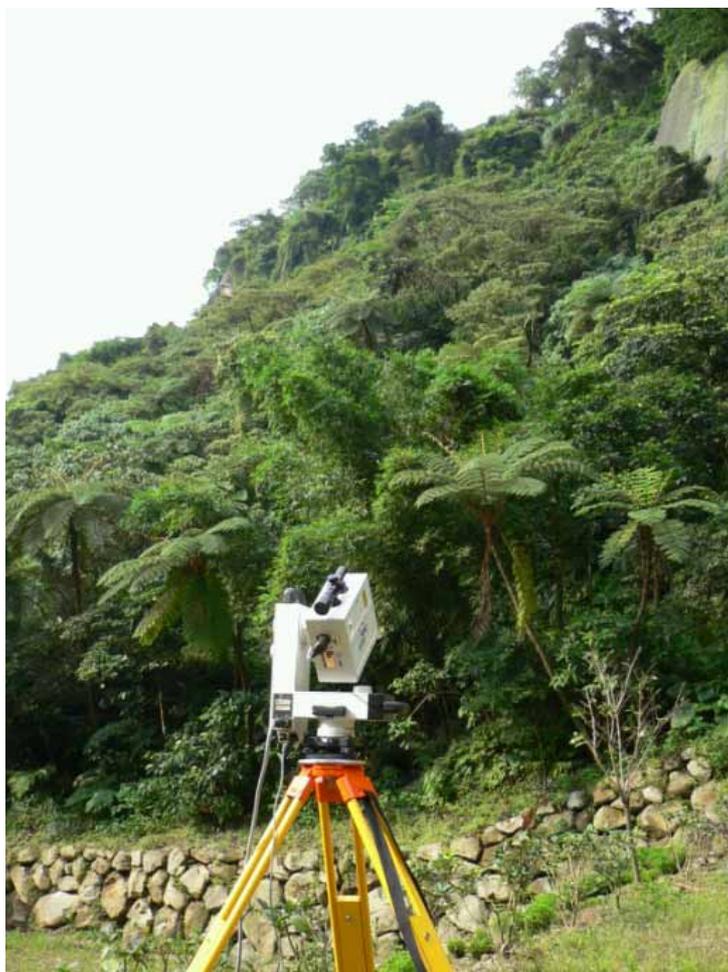


圖 4-6 崩塌地三維雷射掃描位置
(資料來源：本研究整理)



圖 4-7 後方固定孔鑽設(左圖)與固定點反射鏡安裝(右圖)
(資料來源：本研究整理)



圖 4-8 高精度 GPS 定位施測
(資料來源：本研究整理)

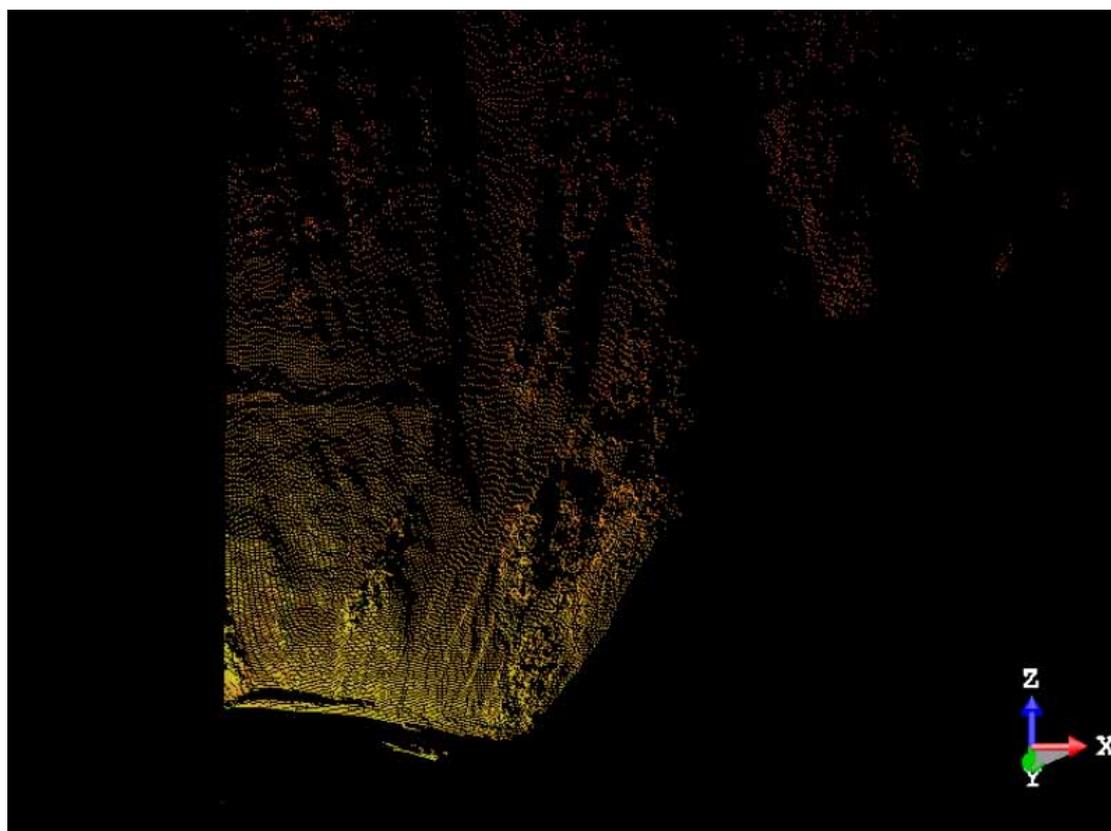


圖 4-9 邊坡三維雷射掃描反射點資料

(資料來源：本研究整理)

第三節 落石邊坡掃描成果

本研究總計進行四處落石邊坡掃描工作，四處邊坡分別為台北市信義區美的世界社區兩處及台北縣瑞芳南雅里兩處，落石邊坡掃描成果如下所述。

一、 美的世界社區

台北市信義區美的世界社區兩處落石邊坡掃描位置如圖 4-10 所示，由圖 4-10 衛星影像可知兩處落石邊坡均位於四獸山邊緣之陡坡，美的世界社區則坐落於山谷凹處，鄰近上有多處社區依山而建。該處社區過去曾有落石災害發生，落石災害發生位置如圖 4-10 中所示。圖 4-11 則為現地勘查時於該社區上方制高點所拍攝該社區與台北市之相對位置，照片中同時亦可見岩盤露頭與可能落石來源區。本社區三維雷射掃描係採用奧地利 Riegl 公司所製作之 LPM-2K 長距離雷射掃描儀進行掃描，掃描過程說明如下：

1. 選定崩塌地之掃描區域(需通視，如圖 4-12 所示)
2. 選定 4 個後方固定點(如圖 4-13 所示)以進行 GPS 定位(如圖 4-13 所示)
3. 設定儀器並開始掃描，掃描步驟分別為先掃描後方 4 個固定點(距離測定)後再行掃描於步驟所設定之崩塌地區域(掃描點如圖 4-14 所示)。

本社區兩處落石邊坡之位置正好落於山谷之中，因此掃描時先分別針對左邊坡與右邊坡進行，之後再將左右邊坡之掃描成果加以合併即成三維之空間點座標資料，如圖 4-14 所示。之後再利用內插方式將

三維雷射掃描完成之空間點座標資料進一步製作成高解析度之數值地形模型，空間點座標資料轉製為高解析度數值地形模型係以美國 Golder 公司所發展之 Surfer 商業軟體進行，數值地形模型之製作成果如圖 4-15 所示，之後再依據數值地形模型於接近落石邊坡之位置進行剖面切割，以得到落石邊坡之二維地形資料，如圖 4-16 與圖 4-17 所示，此二維地形剖面資料除提供落石邊坡之基本資訊如坡高、坡度、與邊坡之粗糙度等，亦可作為後續落石分析最重要之邊坡幾何基本資料。



圖 4-10 邊坡三維雷射掃描位置空照圖

(資料來源：本研究整理)



圖 4-11 邊坡三維雷射掃描位置空照圖
(資料來源：本研究整理)

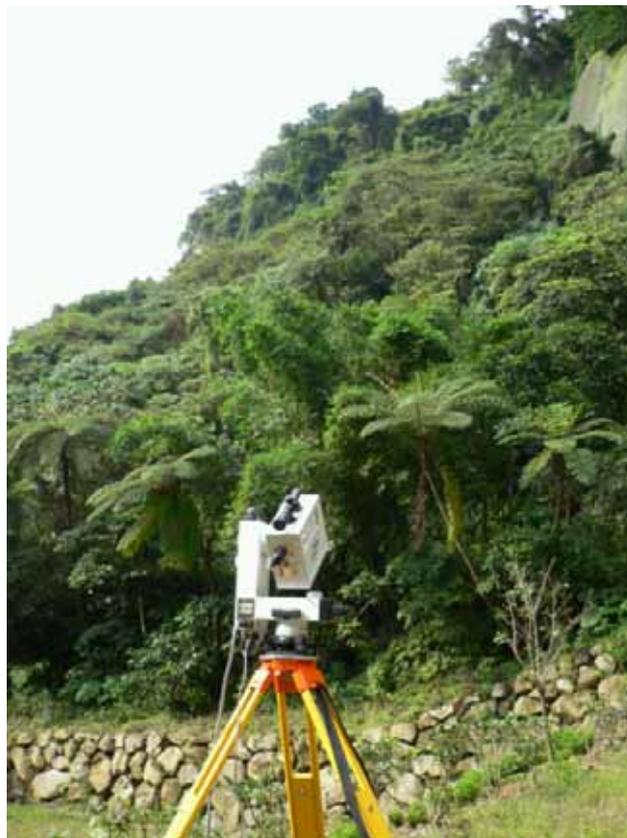


圖 4-12 崩塌地三維雷射掃描位置
(資料來源：本研究整理)



圖 4-13 高精度 GPS 定位施測

(資料來源：本研究整理)

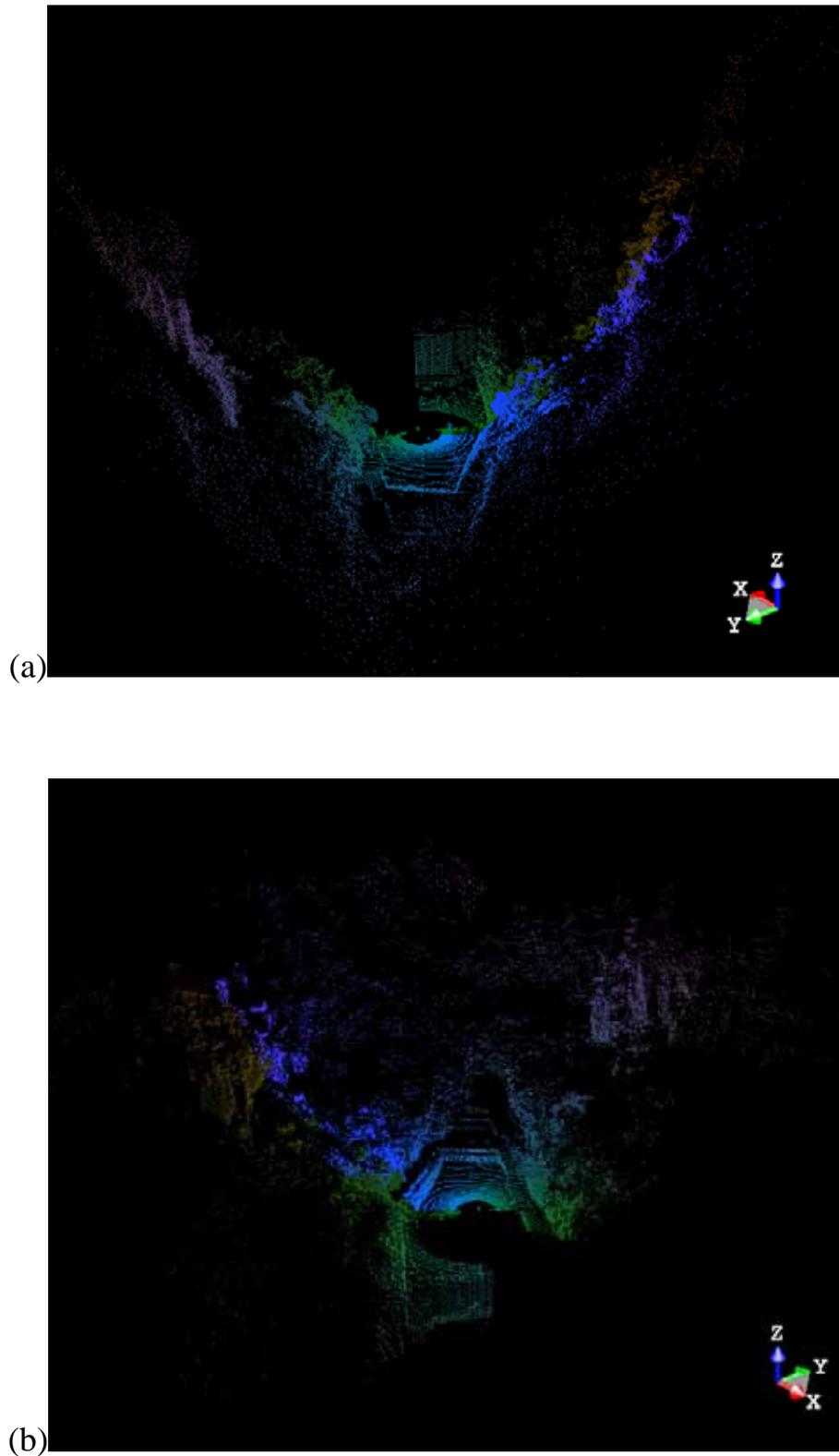
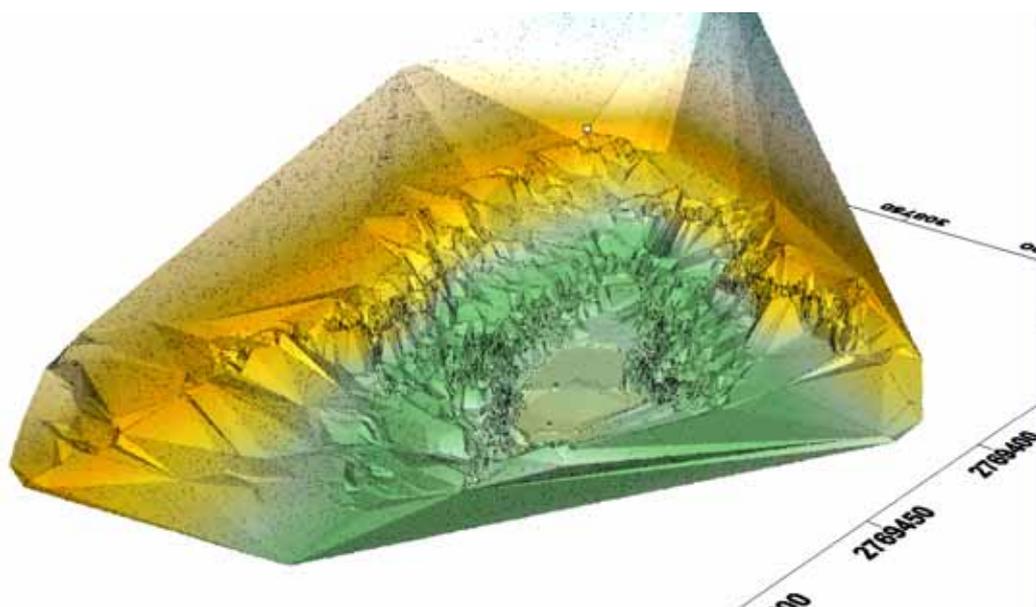
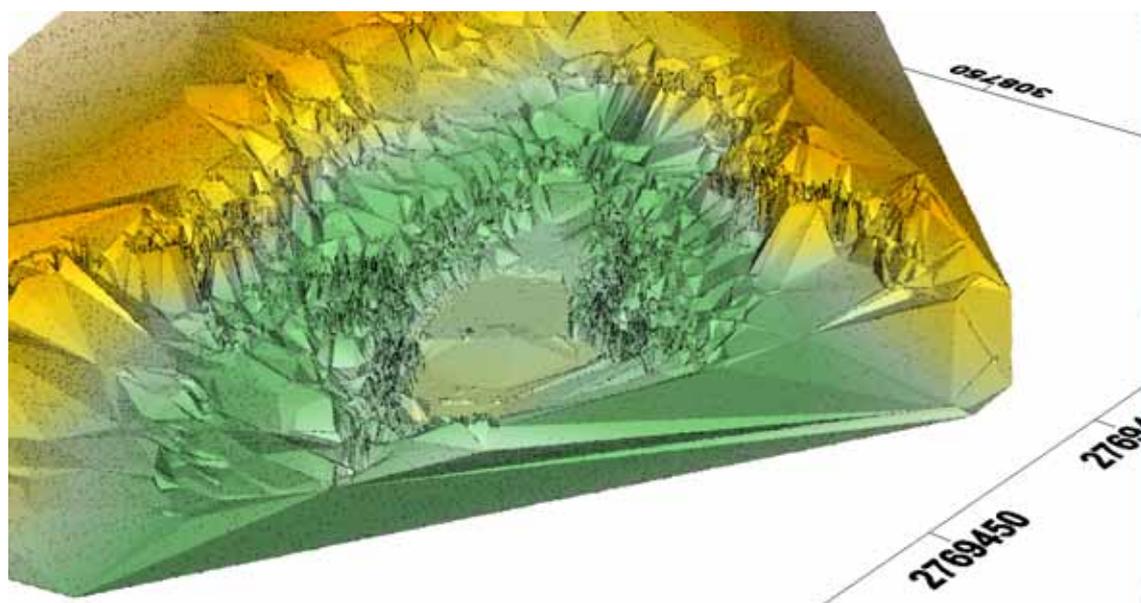


圖 4-14 邊坡三維雷射掃描反射點資料

(資料來源：本研究整理)



(a) 美的世界數值地形模型全景



(b) 美的世界數值地形模型全景(放大顯示)

圖 4-15 美的世界社區高解析度數值地形模型

(資料來源：本研究整理)

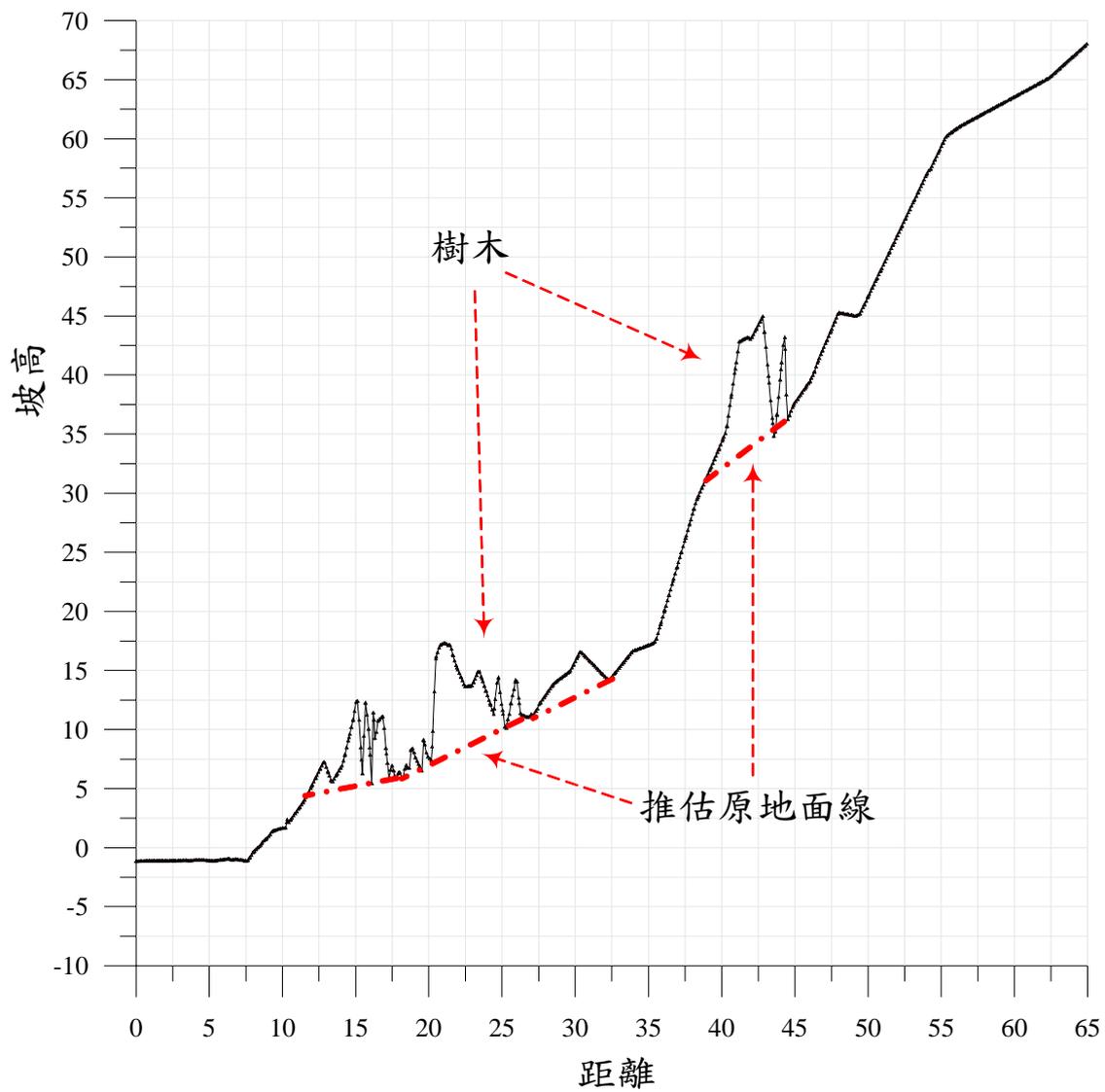


圖 4-16 落石邊坡之二維地形剖面資料(第一處邊坡)

(資料來源：本研究整理)

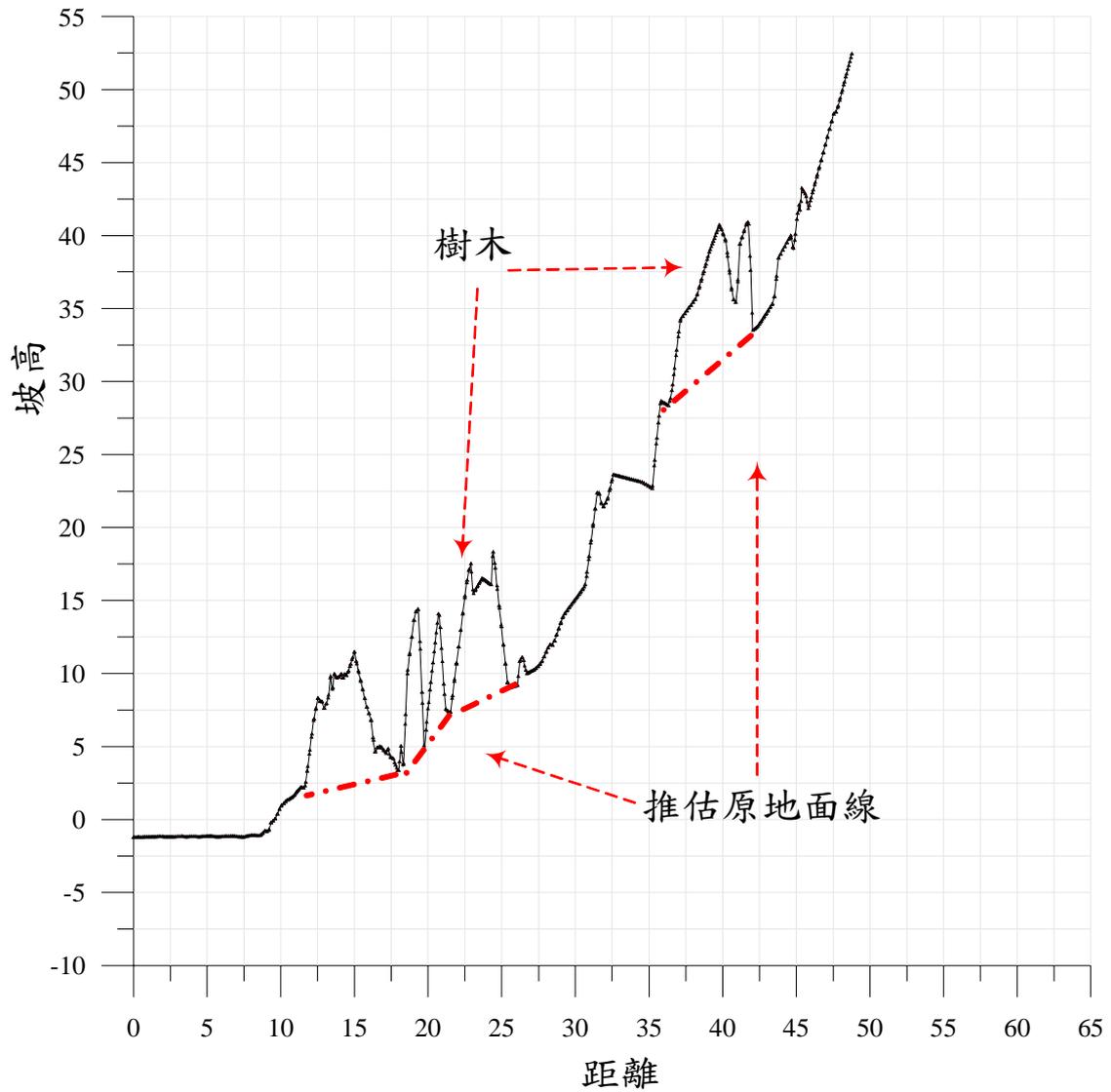


圖 4-17 落石邊坡之二維地形剖面資料(第二處邊坡)

(資料來源：本研究整理)

二、瑞芳南雅里社區

本研究第二處邊坡掃描位置係位於台二線約 88.8 公里之南雅里社區，由圖 4-18 衛星影像可知南雅里社區近似一三角形，該社區內除一般住宅房舍外，尚有學校、商店、警察局等公共建築物，社區依山傍海，而近山側之邊坡有潛在落石邊坡，社區過去曾有落石災害發生，現勘亦發現多個巨型落石於邊坡坡址處，本研究於本社區選定兩處邊坡掃描之位置如圖 4-18 與圖 4-19 所示。

本社區之三維雷射掃描係採用法國 Trimble 公司所製作之 GS200 雷射掃描儀進行掃描，GS200 有別於前述之 Riegl 之 LPM-2K 長距離雷射掃描儀，其掃描距離較短，約 200 公尺內，但可提供非常高精度與高密度之掃描點資料，掃描過程說明如下：

1. 選定崩塌地之掃描區域(需通視，如圖 4-20 所示)
2. 選定 4 個後方固定點(如圖 4-21 所示)以進行 GPS 定位(如圖 4-22 所示)
3. 設定儀器並開始掃描，掃描步驟分別為先掃描後方 4 個固定點(距離測定)後再行掃描於步驟所設定之崩塌地區域。

本社區兩處落石邊坡之分別位處山側與海側，因此掃描時分別針對兩處不同邊坡進行。圖 4-23 顯示第一處邊坡旁之落石位置與其放大之近景照片(如圖 4-24 所示)，為確認本部掃描儀器之精度，本次掃描另行增作本處落石之高精度掃描，同時與現場之落石型態與落石面上之弱面進行比較。

GS200 全部掃描時間約 2 至 3 小時，其三維雷射掃描完成之空間點座標資料進一步製作成高解析度之數值地形模型，如圖 4-25 至圖

4-28 所示，之後再整合分析模式進行後續之分析。

第二處邊坡位處海側，如圖 4-29 所示，其三維雷射掃描完成之空間點座標資料將進一步製作成高解析度之數值地形模型，如圖 4-30 與圖 4-31 所示。之後再利用內插方式將三維雷射掃描完成之空間點座標資料將進一步製作成高解析度之數值地形模型，如圖 4-32 所示，空間點座標資料轉製為高解析度數值地形模型係以美國 Golder 公司所發展之 Surfer 商業軟體進行，再依據數值地形模型於接近落石邊坡之位置進行剖面切割，以得到落石邊坡之二維地形資料，圖 4-33 至圖 4-34 所示，此二維地形剖面資料除提供落石邊坡之基本資訊如坡高、坡度、與邊坡之粗糙度等，亦可作為後續落石分析最重要之邊坡幾何基本資料。



圖 4-18 南雅里社區第一處邊坡三維雷射掃描位置空照圖

(資料來源：本研究整理)



圖 4-19 南雅里社區第二處邊坡三維雷射掃描位置空照圖

(資料來源：本研究整理)



圖 4- 20 第一處邊坡位置現地照片

(資料來源：本研究整理)



圖 4-21 第一處邊坡現場施作情形

(資料來源：本研究整理)



圖 4-22 GS200 雷射掃描儀(左圖)與 GPS 定位(右圖)

(資料來源：本研究整理)



圖 4-23 第一處邊坡現場落石照片圖

(資料來源：本研究整理)



4-24 第一處邊坡現場落石照片(近照)

(資料來源：本研究整理)

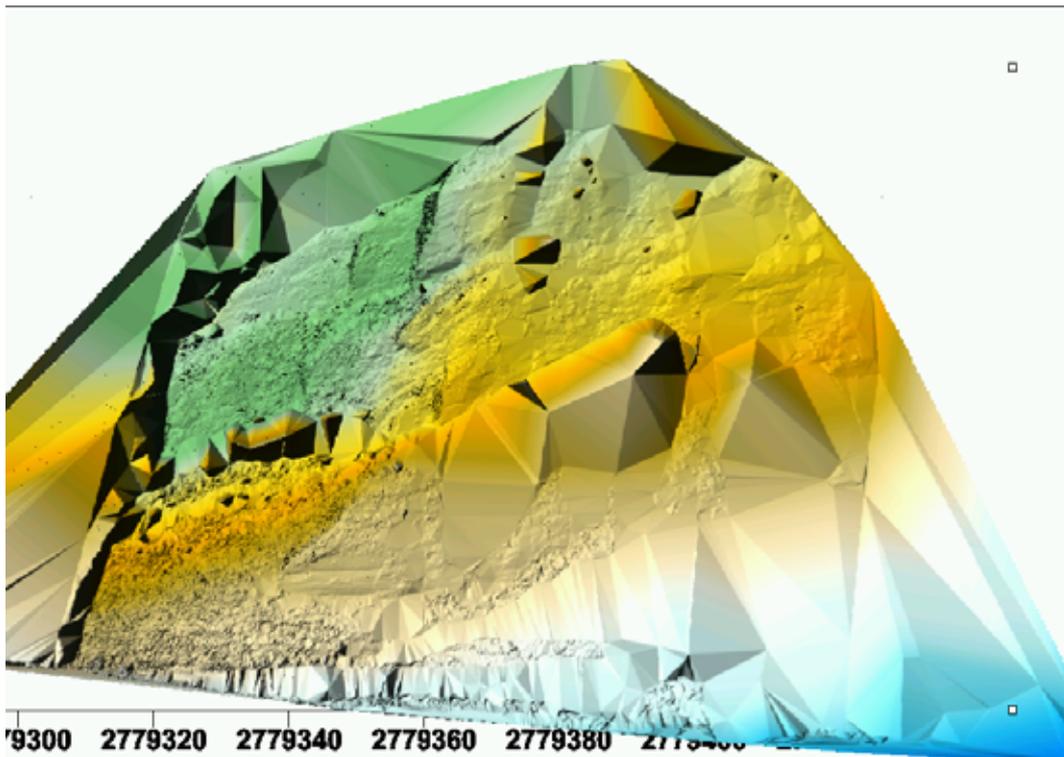


圖 4-25 第一處邊坡數值地形模型全景

(資料來源：本研究整理)

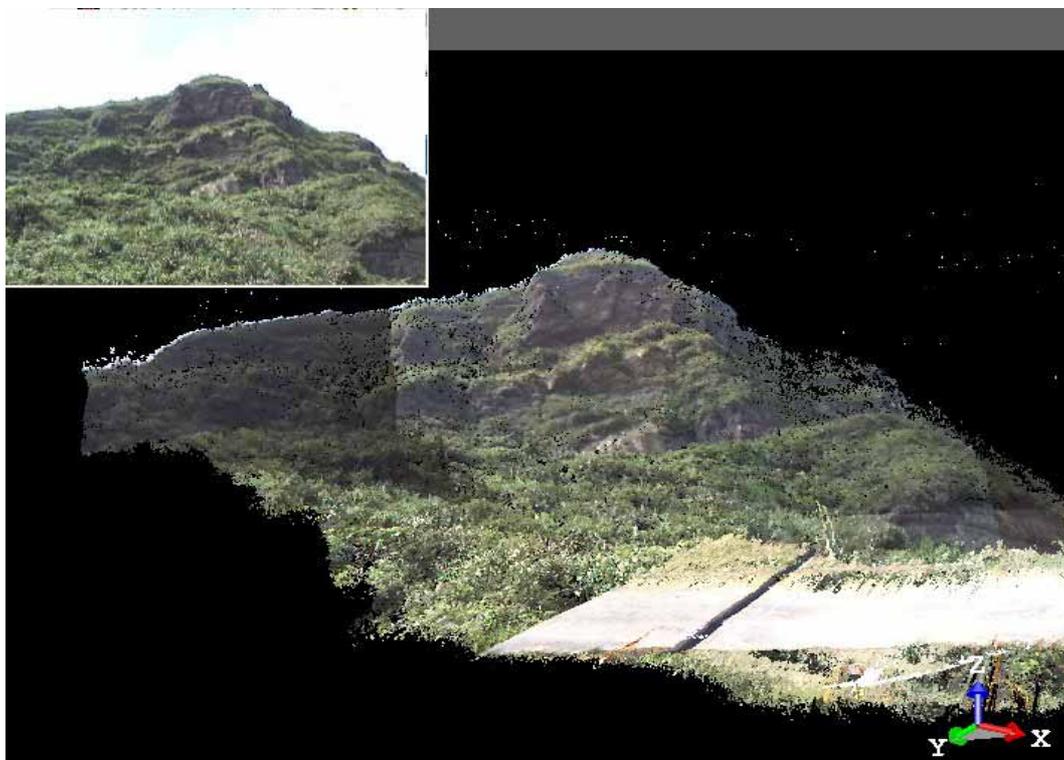


圖 4-26 第一處邊坡數值地形模型疊合照片影像

(資料來源：本研究整理)

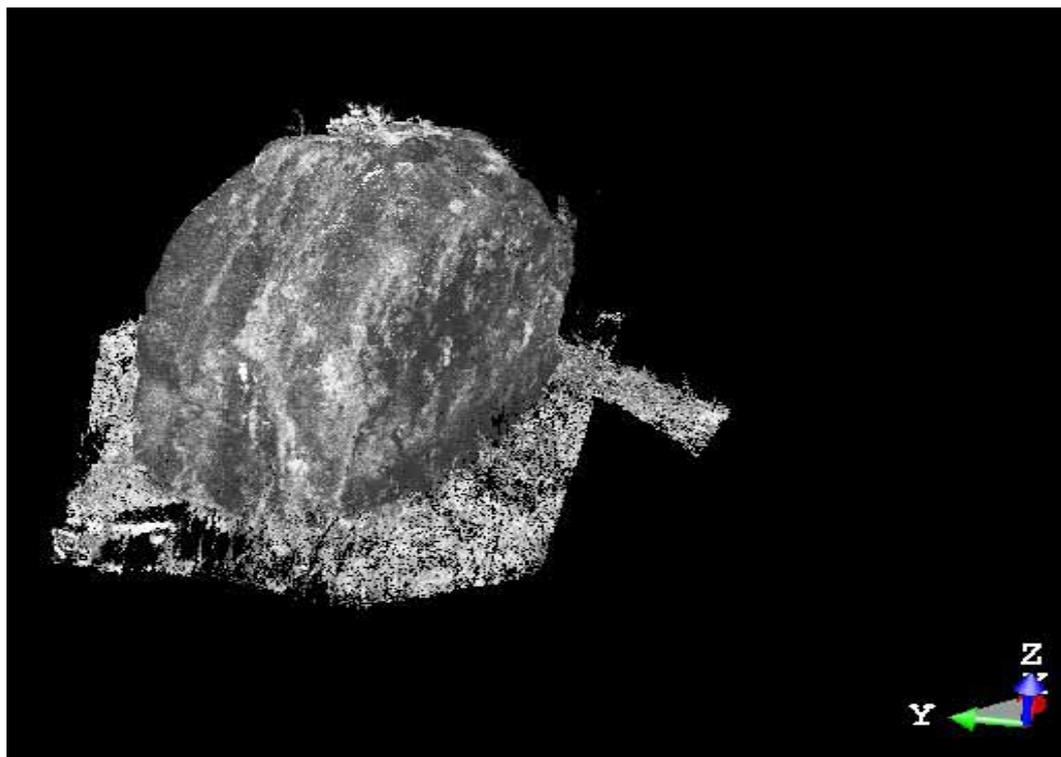


圖 4-27 第一處邊坡旁落石原始三維雷射掃描點

(資料來源：本研究整理)



圖 4-28 第一處邊坡旁落石原始三維雷射掃描點疊合照片影像

(資料來源：本研究整理)

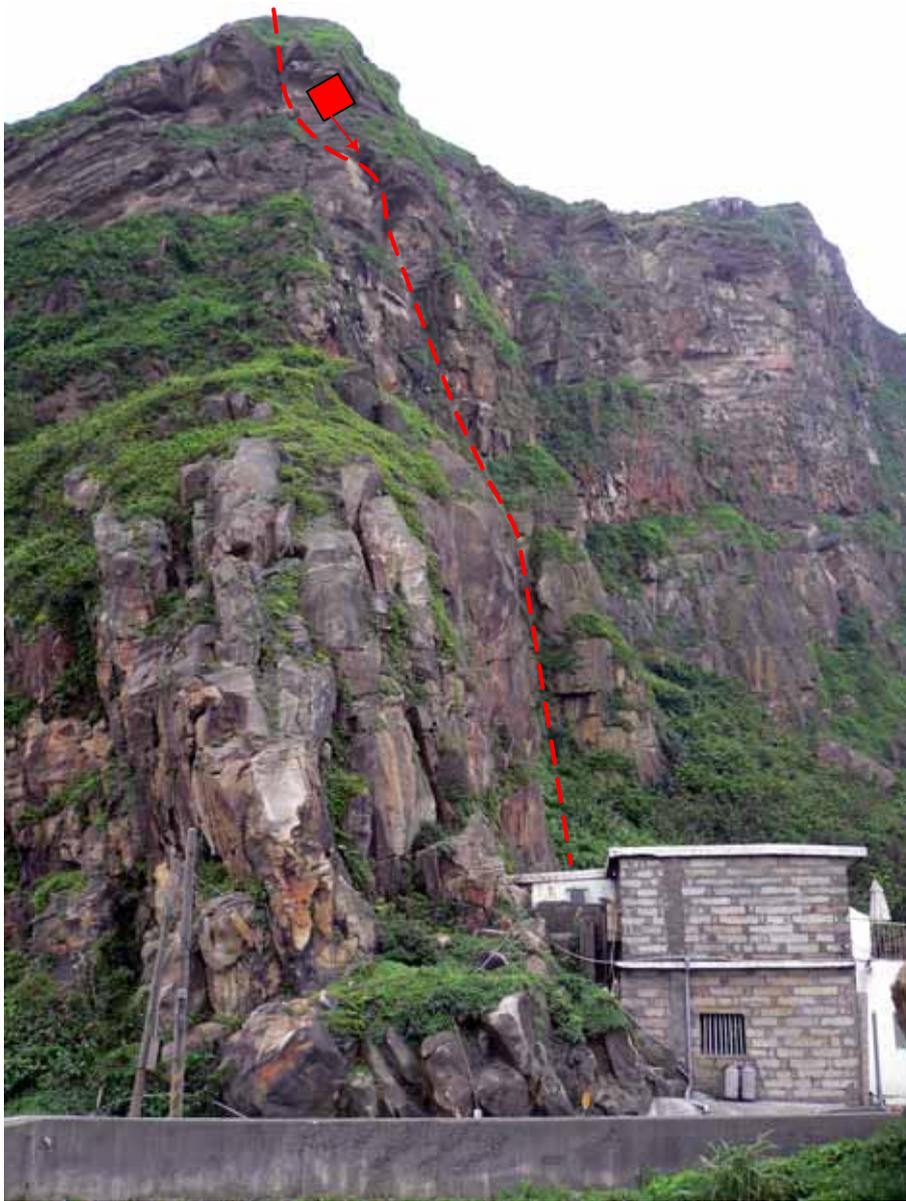


圖 4-29 第二處邊坡位置現地照片

(資料來源：本研究整理)

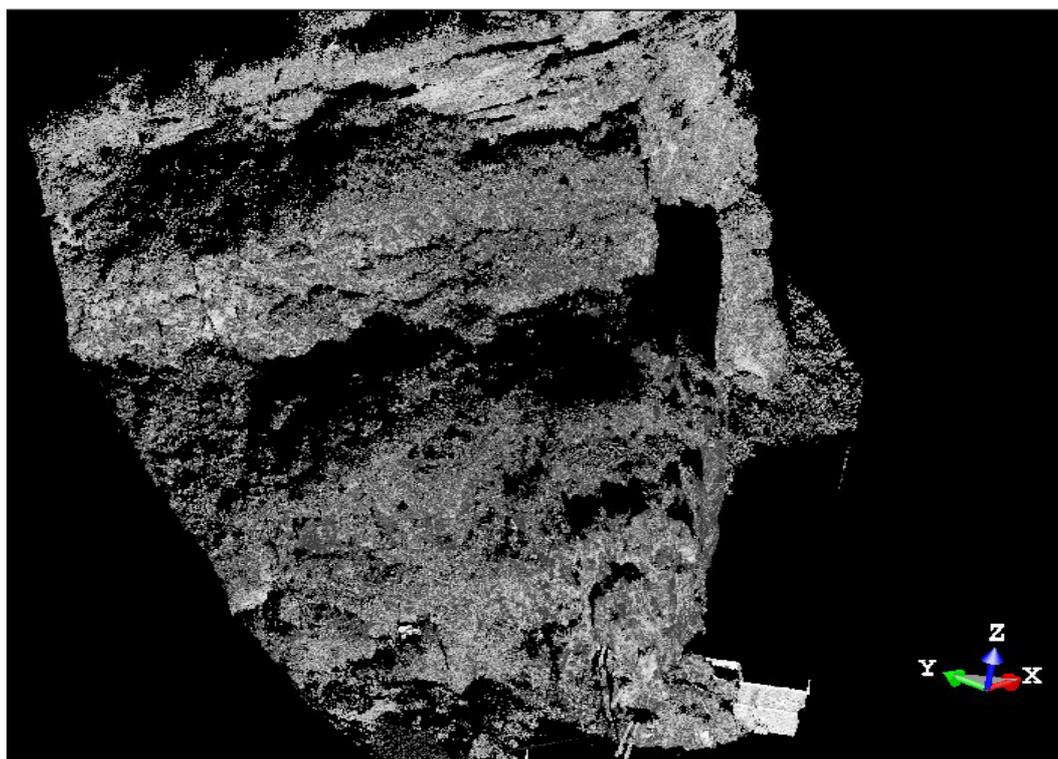


圖 4-30 第二處邊坡原始三維雷射掃描點

(資料來源：本研究整理)



圖 4-31 第二處邊坡數值地形模型疊合照片影像

(資料來源：本研究整理)

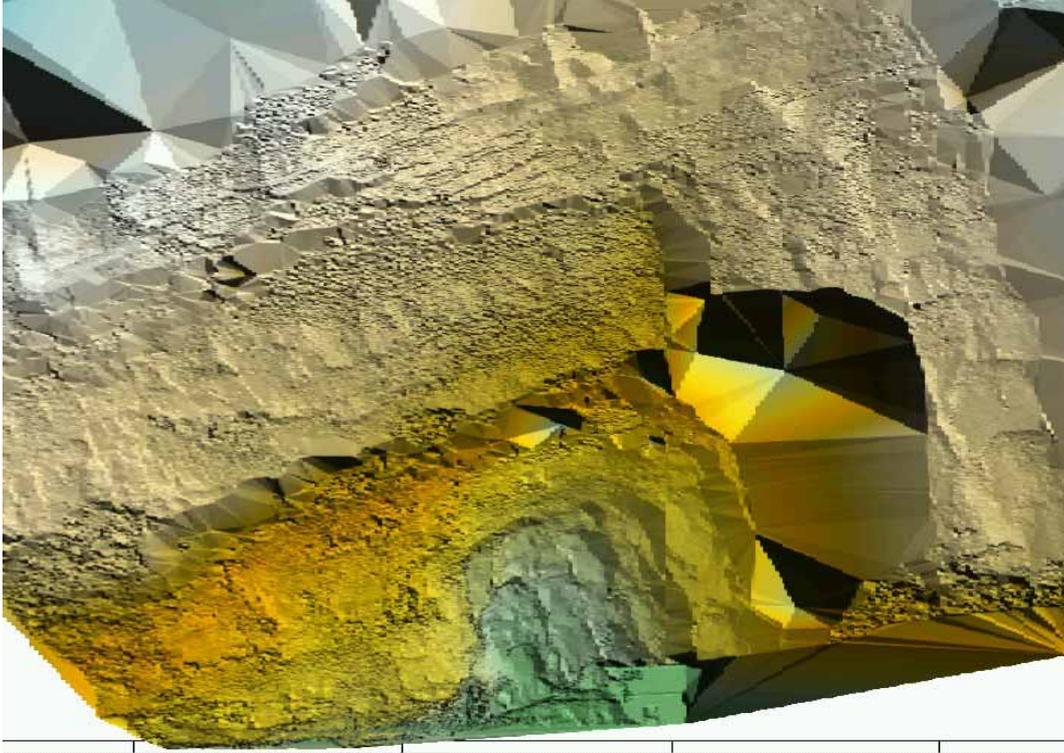


圖 4-32 第二處邊坡數值地形模型

(資料來源：本研究整理)

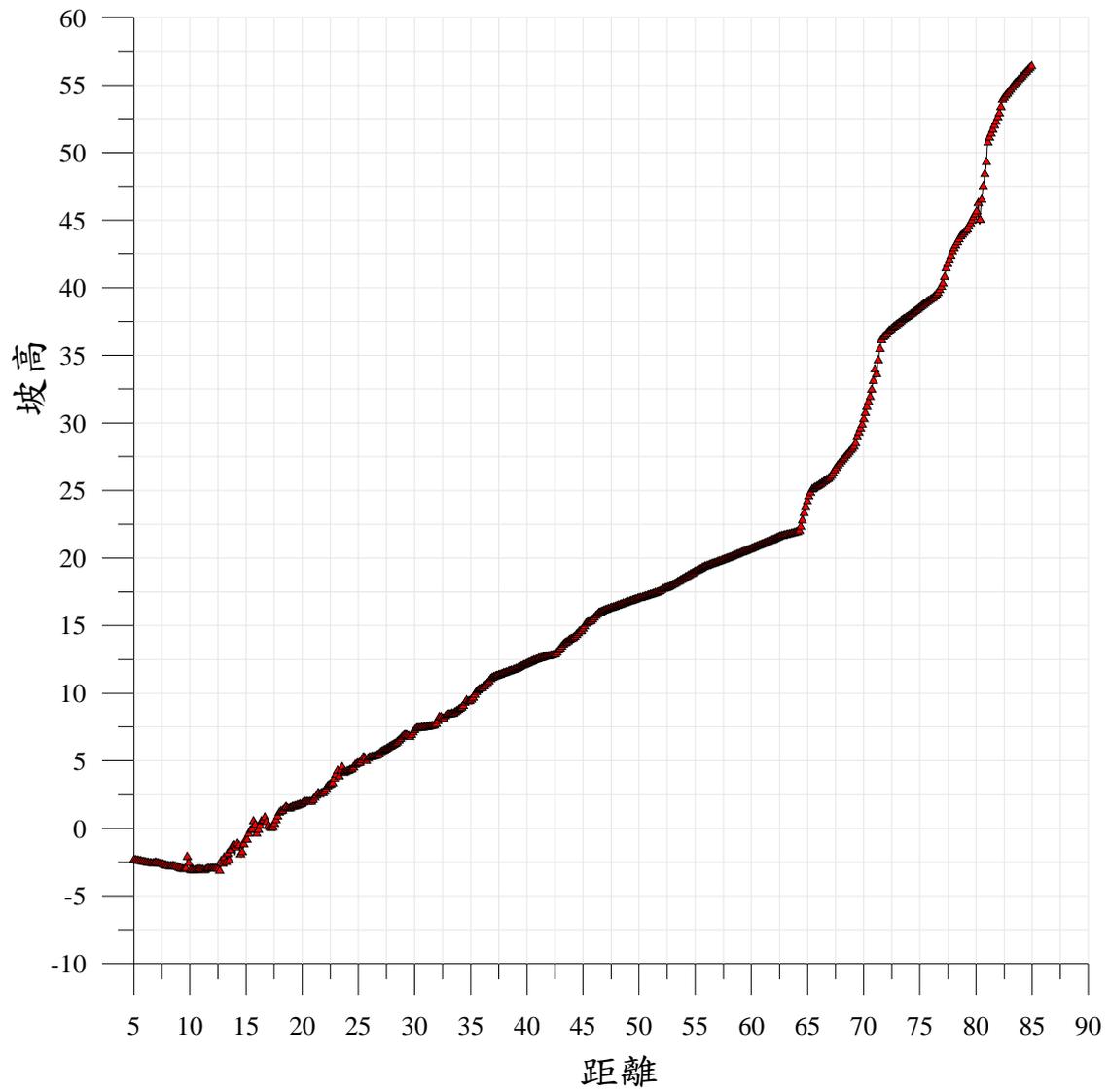


圖 4-33 第一處邊坡落石邊坡之二維地形剖面資料

(資料來源：本研究整理)

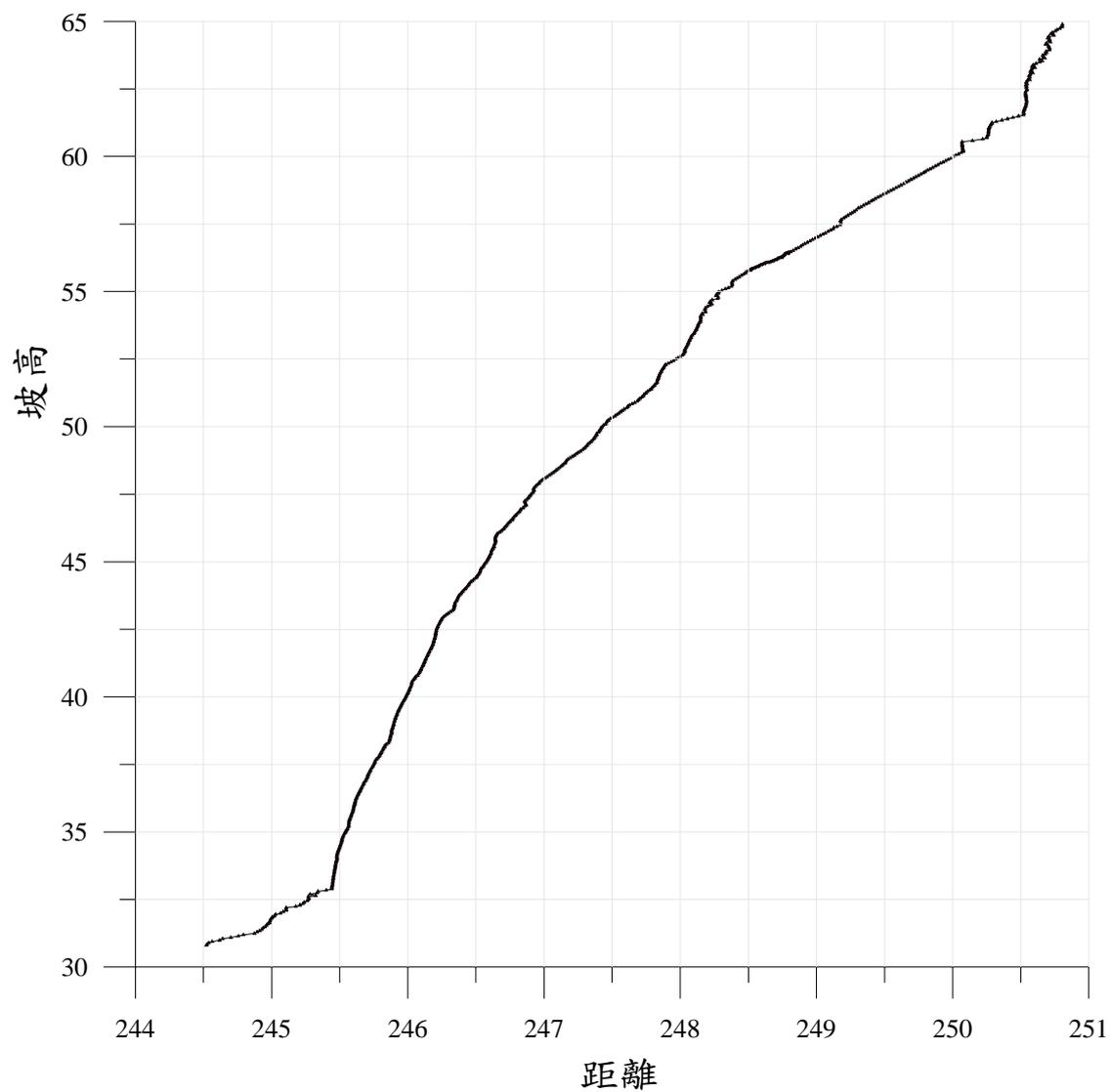


圖 4-34 第二處邊坡落石邊坡之二維地形剖面資料

(資料來源：本研究整理)

第五章 防護方式與工法研究

第一節 落石防治工法之一般性原則

落石之防護設施主要是考量對落石發生來源之對策，形成發生原因之風化侵蝕防治或防止落石發生之工法，日本方面於 1983 年所編之「落石對策便覽」曾提出以下各種防護工法。

1. 坡面整治：修整發生落石之坡面及調整坡度，用以排除造成落石之原因。
2. 浮石整砌：將浮凸出之轉石及節理發達有可能剝落之岩塊，移至安全坡面並堆砌成梯形台階狀或蛇籠、方籠等，以增加其穩定性。
3. 坡面排水：由於降水滲入地表下後將形成地下水壓造成額外之荷重作用於岩塊上，利用坡面排水工將地表逕流量加速排除，以增加坡面穩定性。
4. 表面被覆：在岩層裂縫較多之坡面或易風化剝落成粒狀之(泥)岩面，以各種工法覆蓋其表面，用以防止坡面受水分滲入、岩石風化、及裂縫擴大。
5. 穩固大岩塊：將不穩定岩塊之基部及其周圍以各種工法加以穩固。
6. 打設岩栓：將坡面上較大之浮石或轉石以岩栓固定在其穩定之岩層上，防止其剝離下落。
7. 落石防護林：可防止坡面受地表逕流沖蝕，增加地表之束縛力，

緩和地表之溫度變化，緩和落石之衝擊力。

8. 防落石網：在較陡峭易有零星落石發生之坡面，以鋼絲網或合成纖維網及鋼索等輕質材料，構成網狀全面覆蓋坡面，以防止落石或讓落石沿網面而下直接滾落地面。
9. 防落石柵：在容易發生落石之斜坡面最下方或中段以鋼製支柱、鋼絲網及鋼索等材料設置成攔截柵阻止落石繼續直接滾落，傷及行人、車輛、房舍及公路設施。
10. 明隧道：在道路或公共設施之上方以隧道狀或蓬狀建構屋頂板方式，如此可以承受坡面落石之衝擊、使落石停滯其上、或繼續滾落。

Spang 等人於 1987 年亦提出各種不同之落石防護設施，防護結構之種類有攔石台階、攔石溝、攔石牆、攔石網、明隧道等(如圖 5-1 所示)。

綜合上述目前常見之落石防護設施，可將以上落石防護設施歸納為主動與被動工法兩種。主動防護又稱為穩定工法，經由落石來源區之潛能評估後，進而選擇開挖、修坡、排水、噴漿、岩釘及系統護網等將來源區予以穩定。而被動防護工法，則於威脅區上緣選擇防護設置點及進行所需之防護結構，如圖 5-2 所示。

台灣地區較常使用的被動防護工法是防落石柵、防落石網、落石防止牆、明隧道等。山區最常見的防止柵多以 H 型鋼為支柱，另外，配合鐵絲網、鋼索或橫木板條及廢輪胎等加以消能，以剛性的支柱抵抗落石塊體之下滑能量。惟其缺點是無法阻擋大石塊或較高動能的石塊。另在台灣地區由於落石頻繁加上系統之維護不易，長期防護效果明顯降低。

對於落石規模較大之邊坡，落石防護設施之設計過去多以剛性落石護欄或以全面性掛網噴漿之方式加以應對，其經費較高且在受損後維修之施工性

及經濟性不佳，故目前位於歐洲阿爾卑斯山區國家諸如瑞士與奧地利，亞洲國家諸如日本等，多推廣以柔性高消能環狀防護網之方式進行落石防護。柔性防護網觀念係利用消能阻尼器構置的落石防護網，在支撐鋼柱與防護鋼網的連接點設置消能阻尼器，一旦遇到下落、彈跳能量較大的落石，由防護網接收的衝擊能就傳遞到阻尼器中，阻尼器利用變形來吸收衝擊能，此種工法不但可以阻止較大直徑的落石，更可更換消能裝置，可收長期使用之效果。

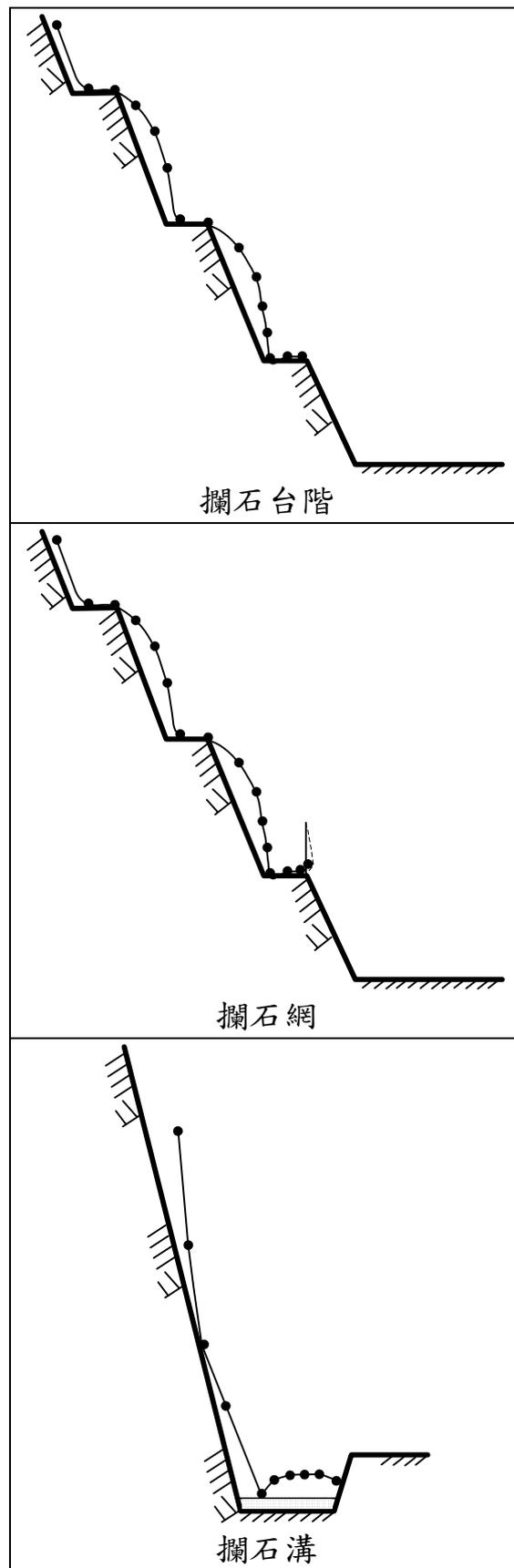


圖 5-1 落石防護之工法

(資料來源：Spang, 1987)

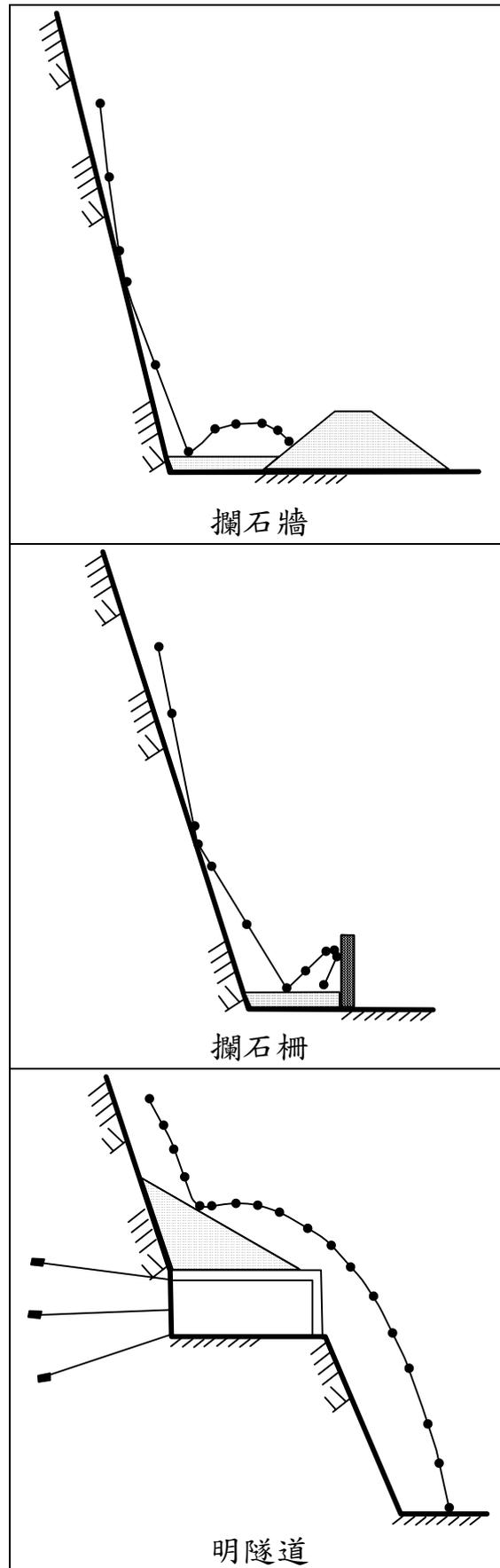


圖 5-1 落石防護之工法 (續)

(資料來源：Spang, 1987)

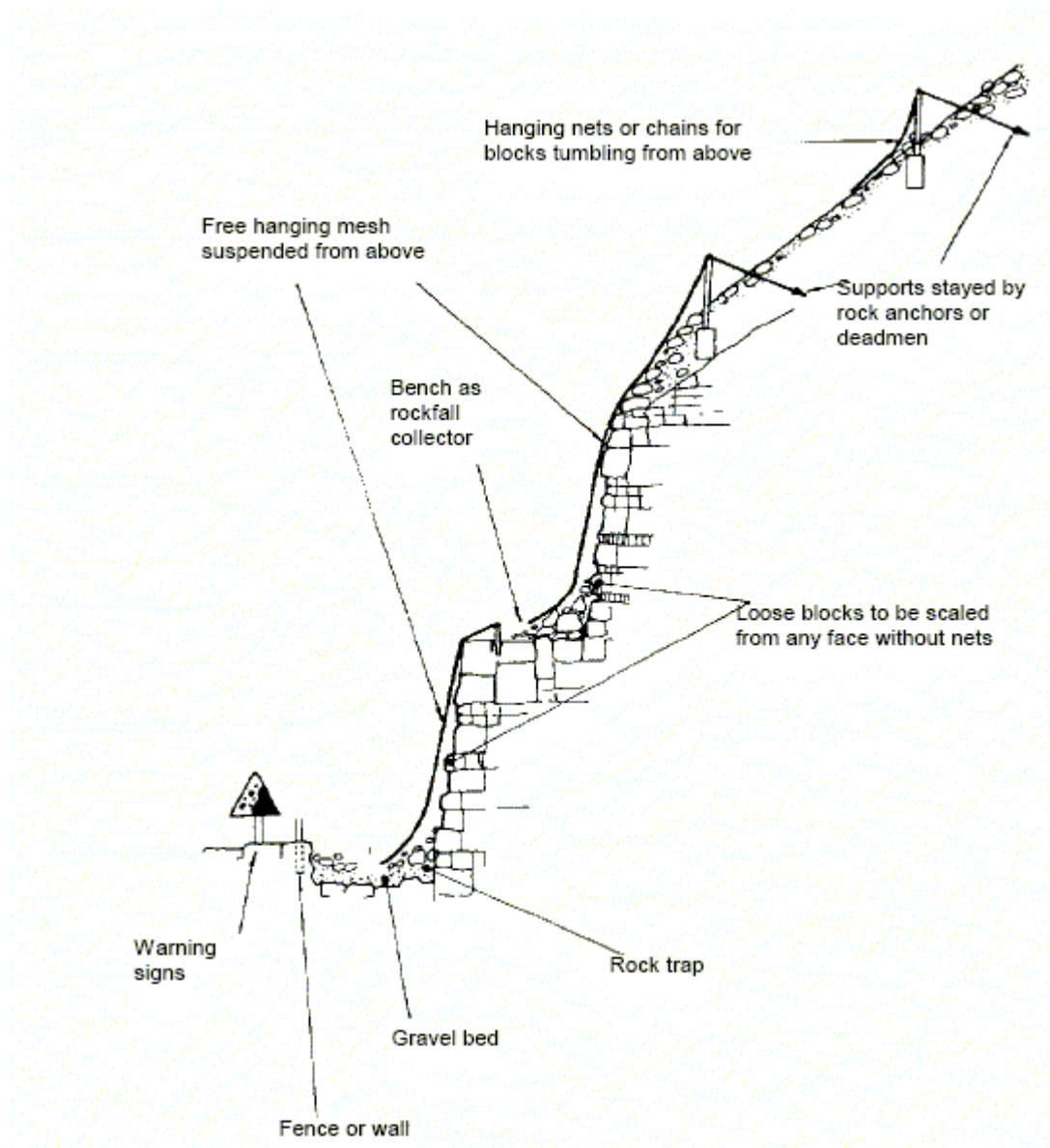


圖 5-2 落石防護工法整體示意圖

(資料來源：本研究整理)

第二節 山坡地社區落石防治工法

上節係針對落石防護工法之一般性原則進行簡述，以下即針對有關山坡地社區落石防治工法進行詳述。山坡地社區落石防治工型態主要有二，(1) 穩定工法，使不穩定邊坡及岩塊維持穩定狀態者稱之；(2) 保護工法，保護社區內建築物及通達道路之車輛與社區居民等不被落石傷受害者稱之。穩定工法之精神為(1) 移除或改善不穩定因子及(2) 加強邊坡及岩塊之抵抗力；保護工法的目地則是：(1) 使落石遠離建築物或社區通達道路及(2) 使建築物遠離落石區。

依據上述原則，以下將先說明目前常用工法之功能及用途，以使工程師在構思防治對策時，找到適切合用的防治工法。

一、目前常用工法之功能及用途

(1) 剝除法

功能：除去坡面上有可能掉落之岩塊。

用途：

- (A). 去除風化易掉落或不穩定之岩塊，直接免除落石危險。
- (B). 去除坡面風化層，以便於其它工法實施，如噴凝土。
- (C). 以人工引發較小規模之落石，避免大規模不可控制之落石發生。
- (D). 美化景觀。

可改善之風險因子：可降低防護設施之需求，減小落石最大尺寸。

(2) 邊坡植生

功能：

(A).避免坡面直接曝露於降水、強風與日曬，增進坡面穩定性。

(B).降低岩石風化、碎裂速率。

用途：於風化破碎坡面之保護，並兼具改善景觀之效果。

可改善之風險因子：可改善差異侵蝕量、抗差異侵蝕能力與降低防護設施之需求。

(3) 垛牆與擋土牆

功能：負擔邊坡或岩塊之部份重量以增加穩定性。

用途：

擋土牆：穩定邊坡、岩塊之穩定工法。

垛 牆：較針對某單一岩塊之穩定工程。

可改善之風險因子：(1).構造特性。(2).節理狀況。(3).落石最大尺寸。(4).防護設施成效。

(4) 岩釘與岩樁(Dowel)

功能：增加節理面或滑動面上之抗剪力，防止岩塊或岩層沿節理或潛在滑動面破壞或繼續滑動。

用途：

(A).有滑動之虞的危岩。

(B).不利位態傾斜岩層之表層。

(C).破碎表層岩塊之固定

(D).支撐岩塊。

可改善之風險因子：節理面狀況，防護設施成效。

(5) 岩栓

功能：

- (A).可增加節理面或滑動面上之抗剪力。
- (B).增加岩體之強度。

用途：

- (A).穩定巨大不穩定岩塊。
- (B).穩定表層及表層附近不穩定岩盤。
- (C).穩定底部有差異侵蝕之岩塊。
- (D).軟弱岩層之補強。
- (E).束制解壓節理之繼續張裂。
- (F).固定開裂岩塊及補強。
- (G).配合鏈式網，一方面提供深層之穩定力量，同時穩定表層剝落岩塊。

可改善之風險因子：(1).構造特性。(2).節理面狀況。(3).落石最大尺寸。(4).防護設施成效。

(6) 束縛鋼索

功能：

- (A).提供束制岩塊壓力，以防止或減低岩塊進一步破壞。
- (B).能暫時性阻留岩塊於原位，或稍改變岩塊掉落路徑，避免直接落於道路上。

用途：

- (A).倒懸岩塊之補強。

(B).束制或穩定巨大岩塊。

(C).穩定鬆動或開裂之岩塊。

可改善之風險因子：構造特性、落石最大尺寸與防護設施成效。

(7) 錨繫鋼索

功能：適用於較小如直徑 1.5m 至 2.4m 之岩塊。

用途：

(A).倒懸岩塊之補強。

(B).束制或穩定巨大岩塊。

(C).穩定鬆動或開裂之岩塊。

可改善之風險因子：節理面狀況、落石最大尺寸與防護設施成效。

(8) 噴凝土

功能：保護不穩定坡面，防止岩石表面風化與剝落。

用途：

(A).風化坡面之保護。

(B).破碎岩坡之坡面穩定及保護。

(C).防止地表逕流入滲岩體。

(D).配合排水系統，形成完整之邊坡截水系統。

(E).景觀之修整。

可能改善之風險因子：差異侵蝕量，抗差異侵蝕能力與防護設施成效。

(9) 覆網

功能：將岩塊包覆於網內使岩塊不致掉落。但需定期清石、維護與更新。

用途：

(A).破碎風化岩坡之落石保護。

(B).幫助坡面植生。

(C).景觀之修整。

可能改善之風險因子：防護設施成效。

(10) 攔石土堤與土丘

功能：使落石遠離建築物或社區通達道路。

用途：適用於較大型岩塊或規模較大之落石。但需要相當之腹地與空間。

可能改善之風險因子：防護設施成效。

(11) 截石溝

功能：攔截且收集落石使之不及建築物或社區通達道路。

用途：依溝之寬度與深度，可截之落石大小可由岩屑至大型岩塊不等。

可能改善之風險因子：防護設施成效。但惟寬度足夠之截石溝方可算是防護設施。

(12) 攔石柵

功能：阻擋落石到建築物或社區通達道路。

可能改善之風險因子：防護設施成效。

(13) 防護柵欄與防護網

功能：

(A).阻留小落石，以免落石掉落。

(B).減低大型落石動能，降低其傷害。

用途：

(A).可防護小至中型尺寸岩塊，耐衝擊能量由 25~2000 呎-噸，視防護柵欄之設計容量而定。

(B).視落石型態彈性地設置於邊坡上。

(C).可設置於高坡處，以減低落石之衝擊能。

可能改善之風險因子：防護設施成效。

(14) 掛式攔網

功能：攔截彈跳之落石，減低其掉落速度與衝擊動能。

用途：

(A).落石路徑狹窄落石防護。

(B).保護經過彈跳落石區之建築物或社區通達道路。

可能改善之風險因子：防護設施成效。

(15) 護欄或護牆

功能：

(A).阻止落石掉落。

(B).減低落石衝擊道路之能量。

用途：

(A)防護落石傷害建築物或社區通達道路。

(B)置於建築物或社區通達道路內側以增加截石溝之容量。

可能改善之風險因子：防護設施成效。

二、綜合討論

以上已針對各個工法之功能及用途加以詳細說明，惟其於台灣地區之山坡地社區落石災害防治上之應用仍需加以檢討，故本研究針對北部實際發生落石災害之坡地社區進行現地實際察訪與勘查。現地實際察訪社區為台北縣汐止市馥記山莊社區，經與其社區管委會聯繫後，與該社區管委會人員實際勘查社區內一處落石防護設施，該防護設施係以防落石柵方式進行防治，經討論其採用防落石柵之原因主要有二，分別為：(1) 工程施作經費之考慮，(2) 工程施作之便利性。其中工程施作經費之考慮佔重要之比重，主要原因為社區自行施作落石防護設施，其經費多由住戶管理費中自行支出或由建商支出，以馥記山莊社區一例，其原建商已倒閉，因此經費係由住戶自行吸收，故施作經費係社區施作落石防護設施之主要考慮。

本研究同時亦現地勘查北部石碇區內一落石邊坡之落石防護設施與南雅里社區之防護設施，亦發現使用防落石柵作為落石防護，如圖 5-3 與圖 5-6 所示。參考日本道路協會落石對策便覽針對落石防護之對策方法之適當性評比，如表 5-1 所示，可發現若以施作經費之考慮為主軸，則山坡地社區落石防護設施有以下數種工法可供參考，如落石防護林、多段防落石柵、落石誘導柵、防落石壁(或護牆)、防落石柵、與防落石網工法等，惟落石防護設施實際應用上除經濟性外，其功能與防護效果仍需結合專業機構之詳細評估與設計方能達到最佳之組合。

表 5-1 落石防護之對策方法之適當性評比

類別	工法	對策之功能						對策之效果				
		防止風化浸蝕	防止發生	方向變更	能量吸收	抵抗衝擊	兼防雪崩	耐久性	維護難易度	施工難易度	可信度	經濟性
預防 工法	落石防護林					○		○			○	
	坡面整治								○			○
	浮石整砌							○	○		○	○
	穩固大岩塊	○						○	○	○		○
	打設岩栓									○		○
	表面被覆		○							○		○
防護 工法	落石防護林					○		○			○	
	多段防落石柵									○	○	○
	落石誘導柵								○		○	
	防落石壁				○			○			○	
	防落石柵								○		○	
	防落石網		○		○			○	○		○	
	防落石蓬											
	落石防阻牆								○		○	○
落石防阻土堤								○		○	○	

註： 良好
○ 好
較差

(資料來源：日本道路協會落石對策便覽, 1983)

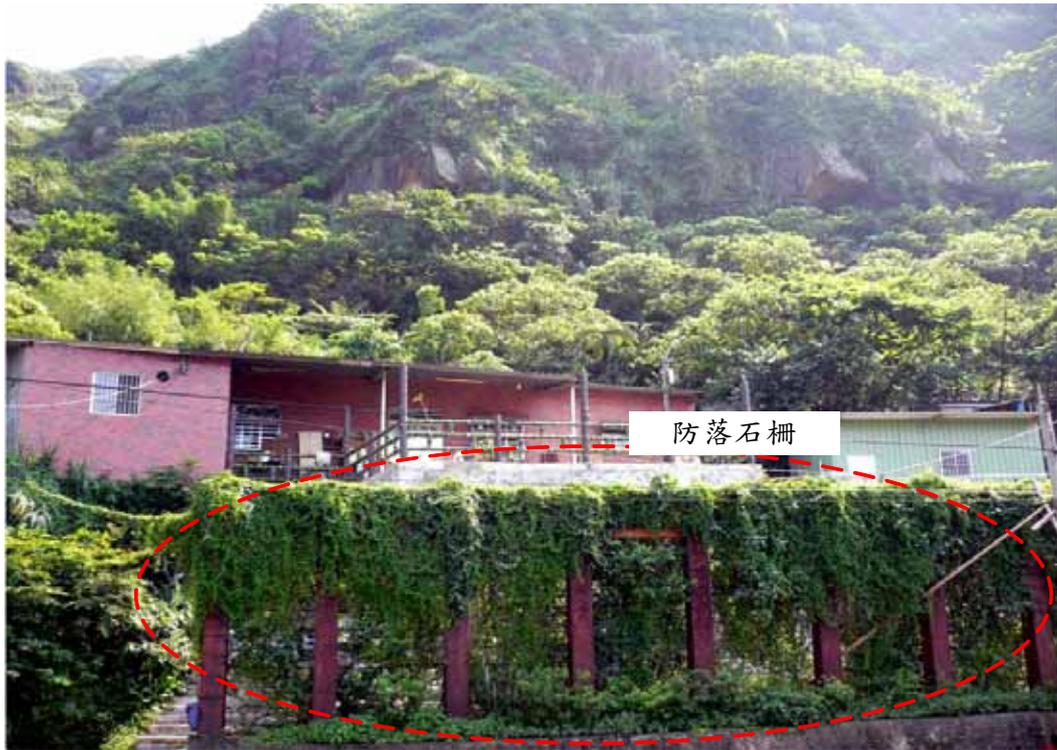


圖 5-3 防落石柵於落石防治之現況應用(基隆碧砂漁港)

(資料來源：本研究整理)



圖 5-4 南雅里社區內之防落石柵

(資料來源：本研究整理)



圖 5-5 石碇一民房建築物前之防落石柵設置(上：設置前，下：設置後)
(資料來源：本研究整理)

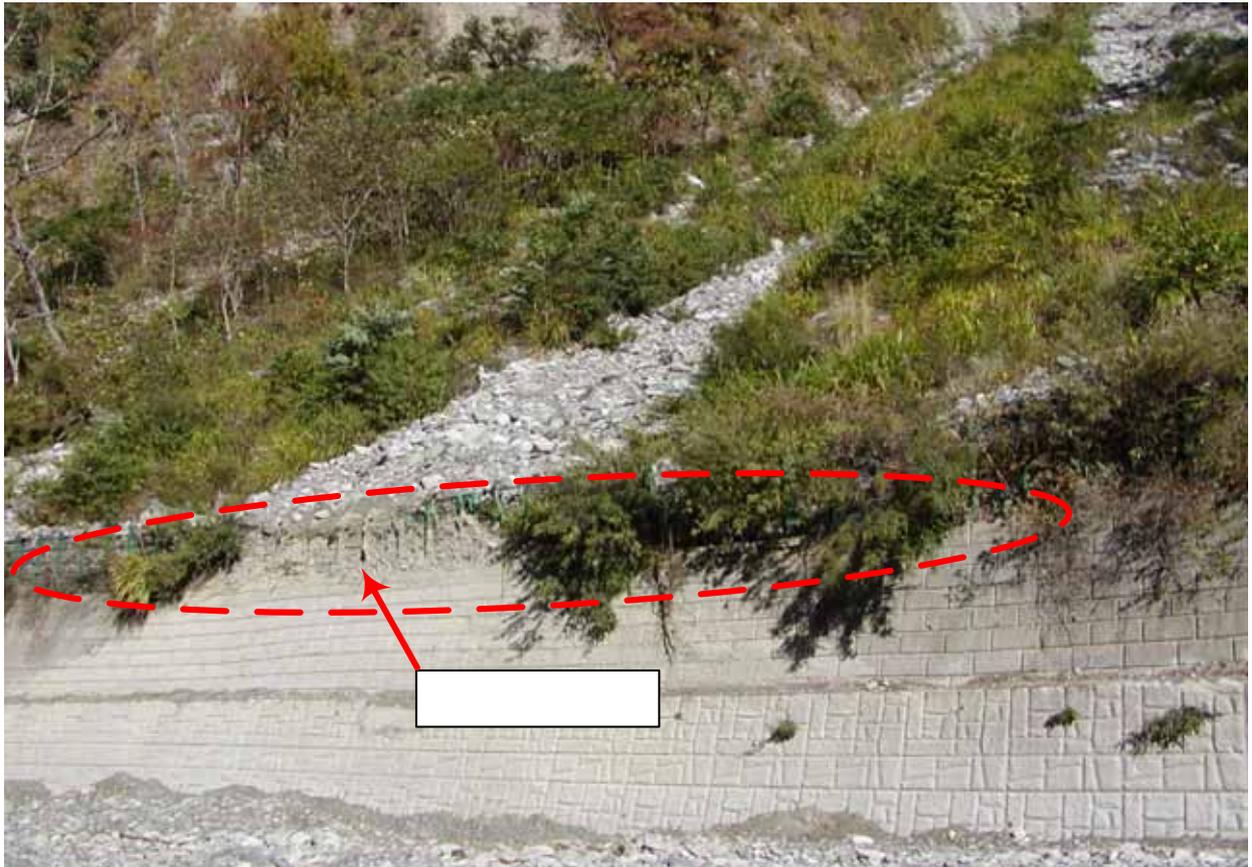


圖 5-6 防落石柵堆滿落石後之情景

(資料來源：本研究整理)

H 型鋼支

第六章 山坡地社區落石案例分析

第一節 落石案例評估

一、初步評估

為進行現地驗證及案例分析，以檢核本計畫模式之正確性，並展示本研究之成果。本研究根據「台北市坡地災害資料庫」及「公路總局落石路段資料庫」，初步篩選出 12 處曾發生過落石災害邊坡(如表 6.1 所示)，經現地勘察後，發現部分落石災害邊坡主要為臨道路邊坡之土石流滑落，與本研究所探討之山坡地社區落石型態不一致，因此本研究選出 2 處合適社區，分別為台北市信義區美的世界社區及台北縣瑞芳南雅里，並依據表 2.2 山坡地社區之落石災害評估準則進行評估。

二、細部評分

1. 評估案例一

本案例位於台北市信義區松山路 677 之 3 號(美的世界社區)，進行落石風險評估，其細部評分如下：

表 6.1 社區邊坡落石災害調查

編號	地點	岩層	評估結果
1	台北市信義區松山路 677 之 3 號 (美的世界社區)	石底層 砂頁岩互層	◎
2	台北市南港區舊莊街 2 段 245 巷 2 號	木山層 砂頁岩互層	×
3	台北市內湖區康寧路 3 段 189 巷 42 號	沖積層	×
4	台北市內湖區金湖路 172 之 1 號	—	×
5	台北市士林區至善路 460 巷 3 弄 15 號	木山層 砂頁岩互層	△
6	台北市士林區中社路 185 巷 2 弄 2 號	五指山層 砂頁岩互層	△
7	台北市北投區泉源路 110 號	凝灰角礫岩	△
	台北市北投區行義路 101 號		×
8	台北市北投區紗帽路 21 號	凝灰角礫岩	×
9	台北市北投區紗帽路 85 號	安山岩	×
10	台北縣瑞芳	厚層砂岩	△
11	台北縣瑞芳 台二線南雅	厚層砂岩	
12	台北縣瑞芳 台二線鼻頭角	厚層砂岩	

×表不適合， △表部份適合， ◎表適合

(資料來源：本研究整理)

A. 地形因子評分

地形評分包含坡度與坡高兩項，其中本案例之坡度為 50~55 度，評分結果為第二級 9 分。而本案例為坡高達 70 公尺之凸型坡，評分結果為第四級 81 分。取二者之平均值，得分為 45 分。

B. 地質因子評分

此區域屬石底層，岩層種類以砂岩為主。在構造特性方面，其具有三組節理，包括一組解壓節理，岩層被弱面切割後極易產生楔型破壞，進一步因地形陡峻造成岩塊直接翻落而形成落石災害，為不利之方位；而在節理狀況方面，其節理長度超過 3 公尺，故在構造特性及節理狀況兩個項目均給予 81 分。因其差異侵蝕量僅為第二級，故在此採用第一類地質特性所得分數作為代表，得分為 162 分。

C. 土地利用及植生狀況因子評分

在土地利用及植生狀況項目中，本案例邊坡屬坡面裸露、坡頂被開發利用，故在此採用第四級所得分數作為代表，得分為 81 分。

D. 氣象因子評分

地形評分包含累積降雨量與震度，本案例落石事件發生主要為前期累積降雨量達 305mm，故在此採用第四級所得分數作為代表，得分為 81 分。由於雨量因子已為最高分數，故此項以雨量為主要因子，得分為 81 分。

E. 近三年平均落石歷史因子評分

本案例落石邊坡在 83 年至 85 年之間，共發生過 2 次落石事件，平均每年發生 2.33 次，故在此採用第三級所得分數作為代表，得分為 27 分。

F. 落石尺寸及規模因子評分

本案例落石最大尺寸為 0.6 立方公尺，故在此採用第二級所得分數作為代表，得分為 9 分。而落石事件累積之土石方量推估為 90 立方公尺，故在此採用第一級所得分數作為代表，得分為 3 分。取上述兩項之平均分數，得分為 6 分。

G. 社區狀況因子評分

本案例建築物退縮距離約為 5 公尺以下，故在此採用第四級所得分數作為代表，得分為 81 分。人口出入量約 50 人以下，採用第一級所得分數作為代表，得分為 3 分。取上述兩項之平均分數，得分為 42 分。

H. 防護設施成效因子評分

本案例社區無防護設施，故在此採用第四級所得分數作為代表，得分為 81 分。

本案例評分結果如表 6.2 所示，社區落石風險評估結果為 525，屬高度落石風險社區。由於本社區第二處邊坡與第一處邊坡各因子情形相仿，故第二處邊坡之評分結果與第一處相同均為 525。

表 6-2 美的世界社區落石風險評估結果

編號	評分因子	評分描述	評分
A	坡度	50~55°	45
	坡高	70 m	
B	第一類	3組有不利方位 >3m	0
	構造特性		81
	節理狀況		81
C	土地利用及植生狀況因子評分	坡面裸露、坡頂被開發利用	81
D	累積降雨量(mm) (季節)	2130	81
E	近三年平均落石歷史 (次/年)	2.33	27
F	落石尺寸(m)	0.6以下	6
	規模大小(m ³)	90	
G	社區狀況	退縮距離約為5公尺以下	42
H	防護設施成效	無	81
		總分	525

(資料來源：本研究整理)

2. 評估案例二

本案例位於東北角台二線近 88K 附近之南雅里社區，其細部評分如下：

A. 地形因子評分

地形評分包含坡度與坡高兩項，其中本案例之坡度為 72 度，評分結果為第四級 81 分。而本案例之坡高達 70 公尺之凸型坡，評分結果為第四級 81 分。取二者之平均值，得分為 81 分。

B. 地質因子評分

南雅里社區出露之岩層多為砂岩及頁岩之互層，地質年代為中新世之南莊層，其岩性以白色塊狀至厚層細至粗粒砂岩為主。第一類：在構造特性方面，此路段之邊坡具有三組節理，有不利之方位，且為楔形破壞。而在節理狀況方面，其節理長度超過 3m，有開口，且夾泥，故在構造特性及節理狀況兩個項目均給予 81 分。因第一類所得總分已達最高，故在此採用第一類地質特性所得分數作為代表，得分為 162 分。

C. 土地利用及植生狀況因子評分

在土地利用及植生狀況這個項目中，本案例邊坡屬坡面裸露、坡頂被未開發利用，故在此採用第三級所得分數作為代表，得分為 27 分。

D. 氣象因子評分

地形評分包含累積降雨量與震度，本案例由於缺乏累積降雨量及地震震度等資料，故於此項採用季節來評分，此落石事件發生於夏季，得分為 81。

E. 近三年平均落石歷史因子評分

本案例落石邊坡在 83 年至 85 年之間，共發生過 1 次落石事件，平均每年發生 0.33 次，得分為 3。

F. 落石尺寸及規模因子評分

本案例落石最大尺寸為平均直徑約在 1.5 公尺，故在此採用第四級所得分數作為代表，得分為 81 分。而落石事件累積之土石方量推估為 200 立方公尺以下，故在此採用第一級所得分數作為代表，得分為 3 分。取上述兩項之平均分數，得分為 42 分。

G. 社區狀況因子評分

本案例建築物退縮距離約為 15~25 公尺，故在此採用第二級所得分數作為代表，得分為 9 分。人口出入量約 50 人以下，採用第一級所得分數作為代表，得分為 3 分。取上述兩項之平均分數，得分為 6 分。

H. 防護設施成效因子評分

本案例社區無防護設施，故在此採用第四級所得分數作為代表，得分為 81 分。

本案例評分結果如表 6.2 所示，社區落石風險評估結果第一處邊坡為 447，屬中度落石風險社區。而第二處邊坡之坡度較陡且退縮距離約 5 公尺以下，故評分較第一處高，得分為 486，同屬中度落石風險社區。

表 6-3 南雅里社區落石風險評估結果

a. 第一處邊坡

編號	評分因子	評分描述	評分	
A	坡度	72°	81	
	坡高	70 m		
B	第一類	3組有不利方位 >3m	0	
	構造特性		81	
	節理狀況		81	
C	土地利用及植生狀況因子評分	坡面裸露、坡頂被未開發利用	27	
D	累積降雨量(mm) (季節)	推估豐水季降雨	81	
E	近三年平均落石歷史 (次/年)	0.33	3	
F	落石尺寸(m)	1.5 公尺	6	
	規模大小(m ³)	200 m ³ 以下		
G	社區狀況	退縮距離約為15~25公尺	6	
H	防護設施成效	無	81	
			總分	447

b. 第二處邊坡

編號	評分因子	評分描述	評分	
A	坡度	53°	45	
	坡高	70 m		
B	第一類	3組有不利方位 >3m	0	
	構造特性		81	
	節理狀況		81	
C	土地利用及植生狀況因子評分	坡面裸露、坡頂被未開發利用	27	
D	累積降雨量(mm) (季節)	推估豐水季降雨	81	
E	近三年平均落石歷史 (次/年)	0.33	3	
F	落石尺寸(m)	1.5 公尺	6	
	規模大小(m ³)	200 m ³ 以下		
G	社區狀況(房舍旁鄰近主要幹道故 平均出入人數/日500以上)	退縮距離約為5公尺以下且 平均出入人數/日500以上	81	
H	防護設施成效	無	81	
			總分	486

(資料來源：本研究整理)

第二節 美的世界坡地社區落石案例分析

一、 案例介紹

1. 案例位址

本案例位於台北市信義區松山路巷內之美的世界社區，該社區係依附於松山區四獸山下，四獸山包含象、虎、豹、與獅山，而美的世界社區即位於象山之下(如圖 6-1 所示)，象山為南港山系的側稜延伸，海拔標高 183 公尺，山勢不高但於美的世界社區山側地形陡峻。

2. 地形與地質

本研究案例位於台北市信義區，屬於台北盆地東南丘陵的一部分，臺北盆地四面環山，北側（北投及士林地區）為以安山岩為主之大屯火山群，局部有第三紀地層分佈，西側為以礫石為主之林口臺地，東側及南側係雪山山脈西部麓山帶，以砂岩、頁岩為主之第三紀地層，岩層走向大致呈東北-西南，向南傾斜。本區位於台灣西部褶皺衝斷帶上，主要構造線包括褶皺軸及斷層線等皆呈北東或北東東走向，岩層受來自東南方造山運動壓力的推擠，造成逆斷層，由東南向西北逆掩，其走向多與本區地層及褶皺之走向一致，斷面傾向東南。本區附近主要的地質構造為台北斷層，距離約 1 公里處之台北斷層為一逆斷層，走向北東東，沿基隆河谷南側截斷八堵向斜之東南翼，然後進入台北盆地，更向西南延經中和、清水坑至三峽。本斷層兩側尚多小斷層與褶曲，故其兩側出露地層隨地區而有不同。本斷層之南部，如在三張犁至松山一帶，石底層逆覆於桂竹林層之上。

出露於象山的地層，是由 2,100~1,950 萬年前的海相沈積大寮層，與 1,950~1,800 萬年前的濱海相沈積石底層所組成，皆是由華南古陸塊沖刷沈積而來的古老地層，以石底層的分布較廣。蓬萊造山運動將古老地層推擠出地面，因西北側巨大節理崩落，裸露出石底層底部壯觀的厚層砂岩，形成近乎

垂直的陡峭岩壁，現勘結果顯示，當地不連續弱面可分二至三組節理及一組解壓節理(如圖 6-2 所示)，岩層被弱面切割後極易形成楔型岩塊，進一步因地形陡峻造成岩塊直接翻落而形成落石災害(如圖 6-3 所示)。



圖 6-1 美的世界社區附近山勢地形

(資料來源：本研究整理)

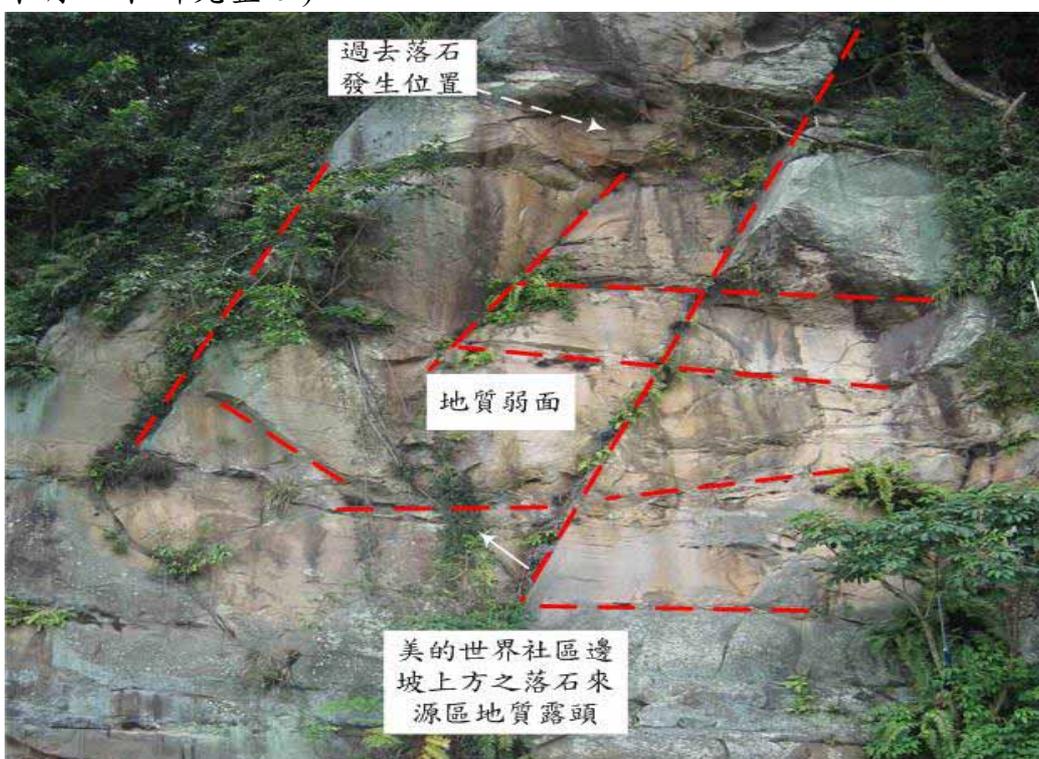


圖 6-2 美的世界社區落石來源區之弱面調查

(資料來源：本研究整理)



圖 6-3 美的世界社區過去落石掉落情形

(資料來源：本研究整理)

二、 案例分析

本案例之分析流程如下：

1. 分析邊坡幾何

本案例之分析邊坡幾何係依據第四章之三維雷射掃描所得之數值地形模型，落石分析剖面之決定係依據數值地形模型所得之等高線圖、現地勘查之可能落石路徑、與過去落石掉落之位置等加以研判，再由數值地形模型切割二維落石分析所需之分析剖面幾何，如圖 6-4 與圖 6-8 所示。

2. 分析參數

本研究落石分析所需之分析參數可分成三部分，分別為落石材料本身之

分析參數、落石與邊坡間之界面參數、與落石與邊坡間之速度折減參數(或回彈參數)，其中各分析參數多以前人研究之試驗資料或是經驗值推估而得，如表 6-4 至表 6-6 所示。其中本研究之石材密度取砂岩 2.3 t/m^3 ，而速度折減參數依據本社區邊坡之植生情形取表 6-6 中之 Type 4。

表 6-4 各類石材密度

石材種類	$\gamma_s (\text{t/m}^3)$
玄武岩	2.9
花崗岩	2.6
硬石灰岩	2.6
砂岩	2.3
軟石灰岩	2.2
凝灰岩	1.7

(資料來源：水土保持手冊-生態工法篇 23 章)

表 6-5 分析之材料參數輸入值

塊體	單位重	23 (kN/m ³)
	彈性模數	3.57×10^6 (kN/m ²)
	柏松比	0.25
接觸界面	內摩擦角 ϕ	30°
	凝聚力	0
	張力強度	0

(資料來源：本研究整理)

表 6-6 回彈參數輸入值

Type	Value for R_n	Value for R_t	Type of material on slope surface
1	0.4	0.9	Asphalt
2	0.35	0.85	Bedrock outcrops
3	0.53	0.99	Clean hard bedrock
4	0.3	0.8	Soil with vegetation
5	0.32	0.82	Talus cover
6	0.32	0.8	Talus with vegetation

(資料來源：附錄 3)

3. 分析程式

本研究落石分析分別採用第三章所介紹之基於集塊質量法與不連續變形分析法所發展之 RocFall 與 Rig_DDA 程式進行分析，其中 Rig_DDA 程式之有效性驗證詳第三章所述。

4. 分析結果

依據前述所決定之落石分析邊坡幾何、分析參數、與分析程式進行分析，本研究美的世界社區共計分析兩處邊坡，落石分析之成果如圖 6-5、圖 6-7、圖 6-12、與圖 6-13 所示。分析成果顯示，落石之掉落停止位置與現勘發現之落石位置接近，惟 RocFall 係以 Monte Carlo 模擬 50 次所得之結果，其落石停止位置非一“定值”而是以停止範圍表示，而 Rig_DDA 程式為定性分析 (Deterministic analysis) 之結果，故落石分析結果僅有一固定落石位置。兩方法均有其優缺點，以 RocFall 程式而言，其假設落石唯一無限小之顆粒，故無法考慮落石顆粒形狀之因素。而 Rig_DDA 程式為定性分析程式，無法考慮機率分析之不確定性，惟分析成果之正確性最終仍取決於分析參數之正確使用及詳細現地邊坡地形幾何之取得，故本研究利用三維雷射掃描技術與廣泛蒐集相關落石回彈參數之資料以增加落石分析之準確性。本研究另進行有關落

石幾何影響與防護設施效果評估，分析成果詳述如下。

5. 落石幾何影響

前述分析結果顯示，RocFall 程式無法考慮落石顆粒形狀之因素，故本研究以 Rig_DDA 程式進行不同落石形狀對分析結果之影響，於分析中考慮一接近圓形之落石與一接近方形之落石，第一處邊坡之分析結果如圖 6-5 與圖 6-7 所示，而第二處邊坡之分析結果如圖 6-9 與圖 6-11 所示。結果顯示，在所有分析條件均相同之情形之下，僅落石形狀由近圓形改變為近方形，分析結果差異甚大。對第一處邊坡而言，在落石形狀為近圓形之情形下，落石可由上方處直接落至邊坡底部。而為近方形之情形下，落石僅掉落至第一階邊坡邊停止運動。而對第二處邊坡而言，落石形狀對最終停止位置之影響不大，對其運動軌跡則有相當影響。此結果亦反映實際落石問題之不確定性極高，實際落石之軌跡與掉落位置因初始條件之不同造成極大差異，分析應考量各種不同情形，始可較完整之掌握該區落石運動之特性。

6. 防護設施效果評估

依據現地實際察訪與現地勘查發現(詳第五章)，國內山坡地社區常見之落石防護設施多採用防落石柵作為防護措施，主要原因係防落石柵之施作成本較低(依據汐止秀山路之山坡地社區實際察訪結果其施作費用約數十萬)且較易施作，因此以下分析即針對防落石柵之效果進行評估。評估方法主要係於邊坡不同位置設置防落石柵，防落石柵之高度則設定為 3 公尺。圖 6-12 與圖 6-13 顯示第一處與第二處邊坡不考慮防落石柵情形下之分析結果。圖 6-14 與圖 6-15 顯示第一處邊坡考慮上方與下方位置之防落石柵之分析結果，而圖 6-16 與圖 6-17 顯示第二處邊坡考慮上方與下方位置之防落石柵之分析結果。

圖 6-14 至圖 6-17 係考慮於不同位置設置防落石柵之分析結果，分析成果顯示，防落石柵若能建置於落石彈跳軌跡之反曲點位置時，其防護效果為最佳，此外，防落石柵若能建置於近落石發生處，則其防護效果亦相當良好，

惟近落石發生處一般因地形因素而無法進行防落石柵之設置，故防落石柵之設置仍需合併考慮現地施作之可行性，方可設計出最佳之建置位置。

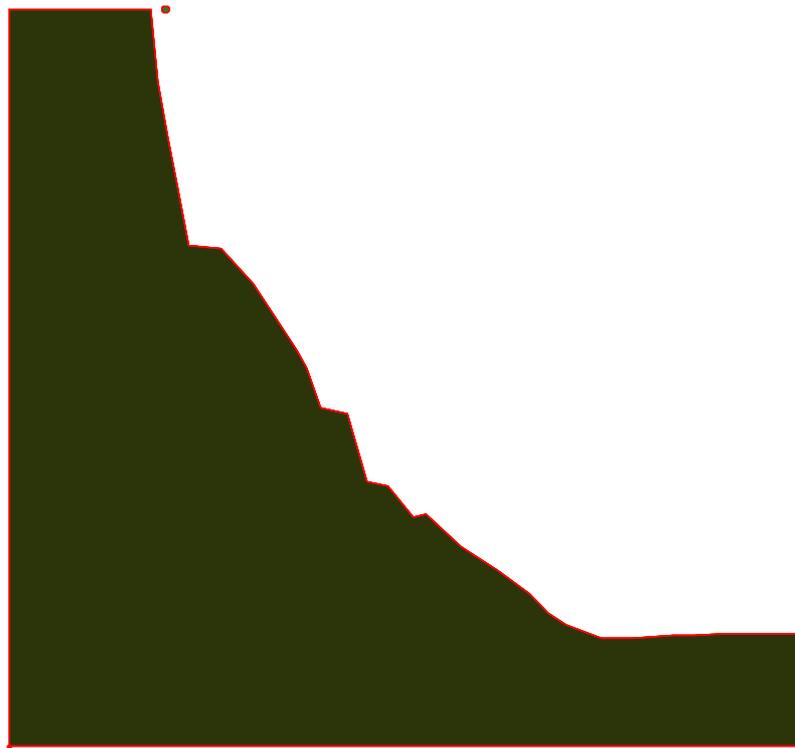


圖 6-4 美的世界社區第一處邊坡落石分析邊坡幾何

(資料來源：本研究整理)

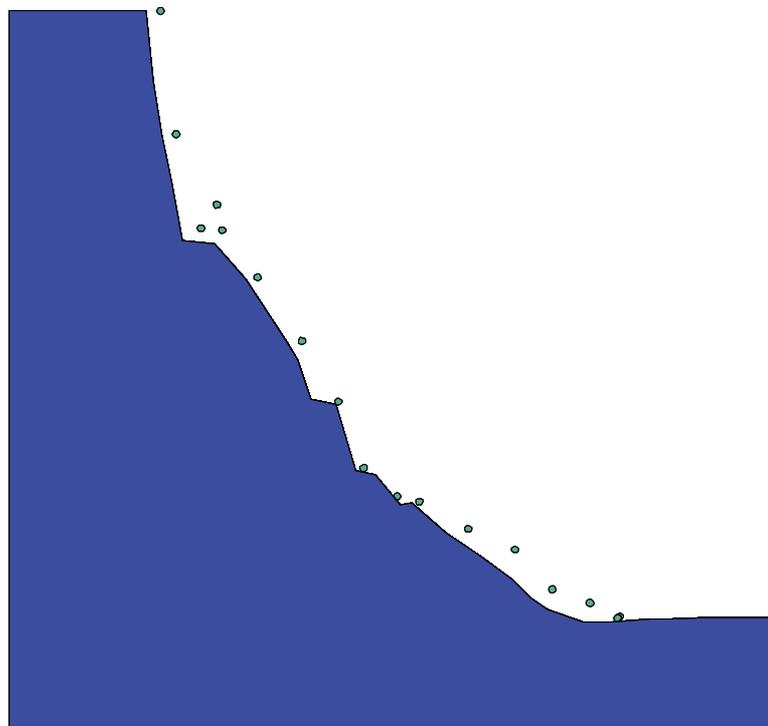


圖 6-5 美的世界社區第一處邊坡落石分析結果(近圓形落石)

(資料來源：本研究整理)

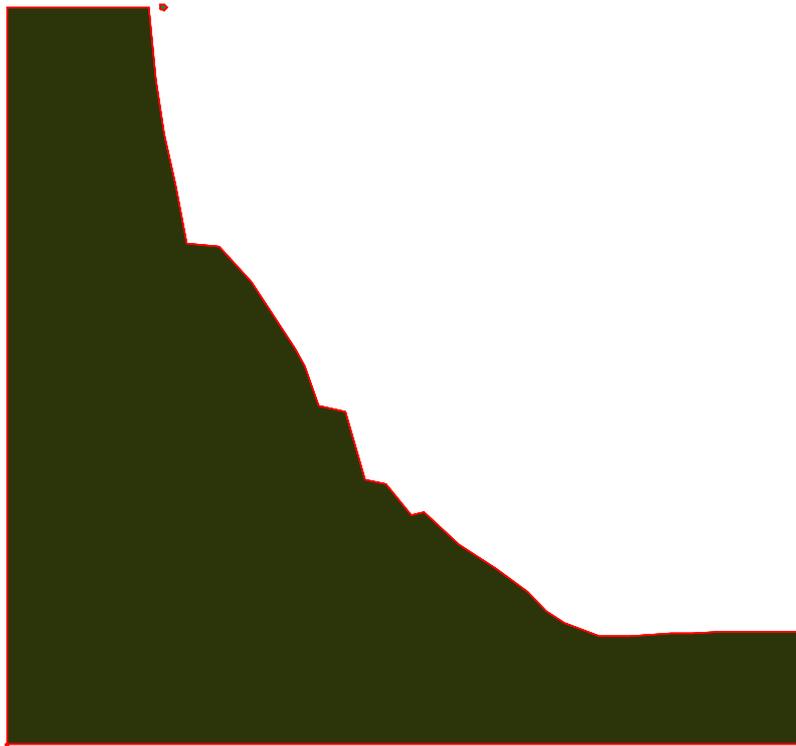


圖 6-6 美的世界社區第一處邊坡落石分析邊坡幾何(近方形落石)

(資料來源：本研究整理)

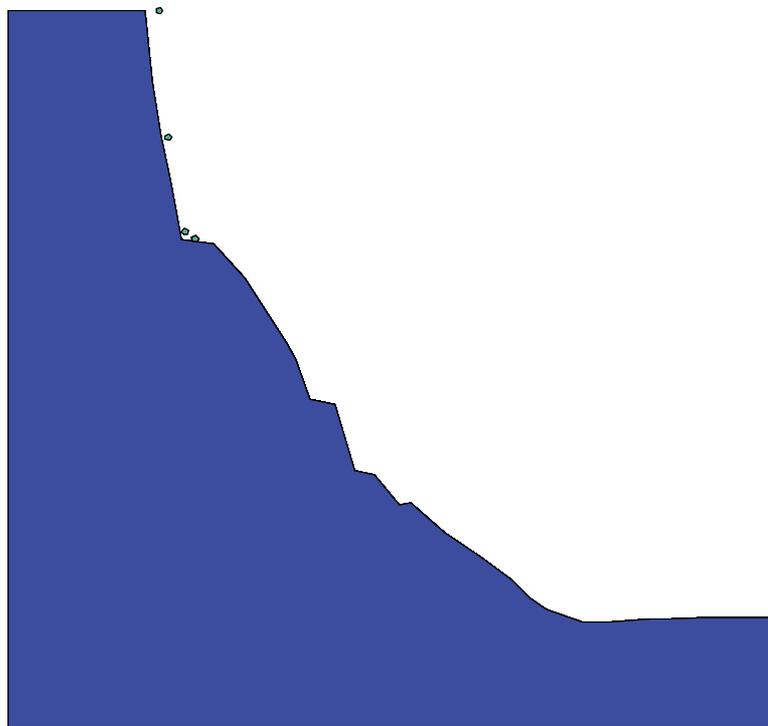


圖 6-7 美的世界社區第一處邊坡落石分析結果(近方形落石)

(資料來源：本研究整理)

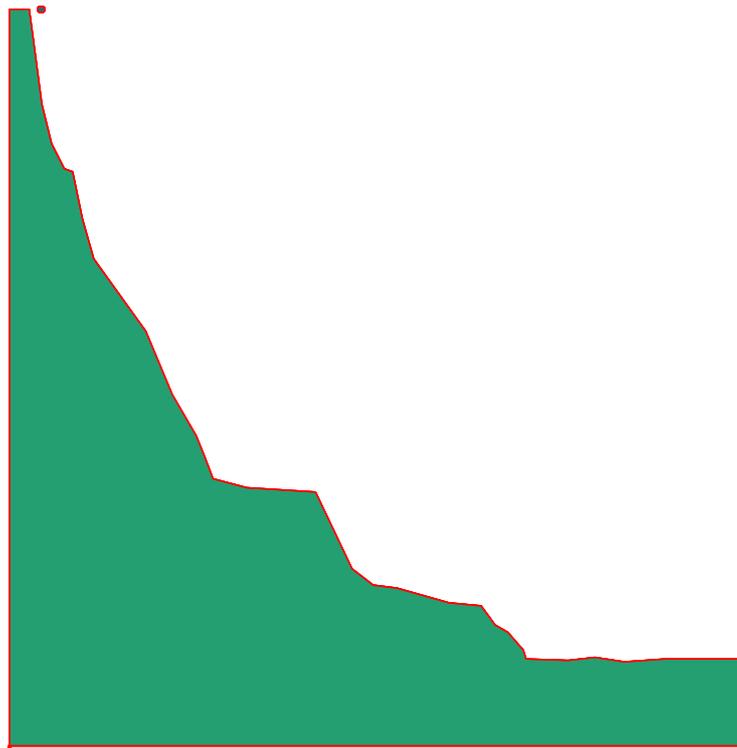


圖 6-8 美的世界社區社區第二處邊坡落石分析邊坡幾何(近圓形落石)

(資料來源：本研究整理)

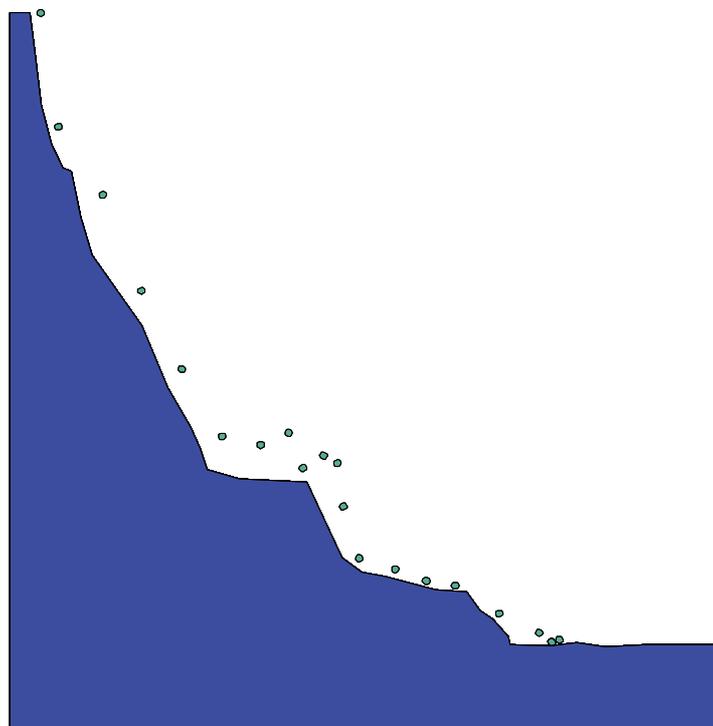


圖 6-9 美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(近圓形落石)

(資料來源：本研究整理)

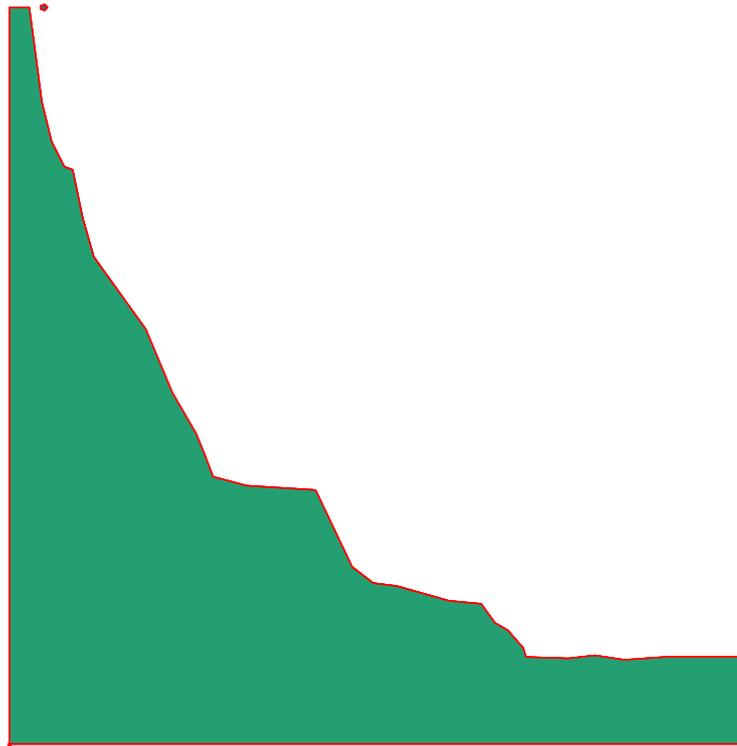


圖 6-10 美的世界社區社區第二處邊坡落石分析邊坡幾何(近方形落石)

(資料來源：本研究整理)

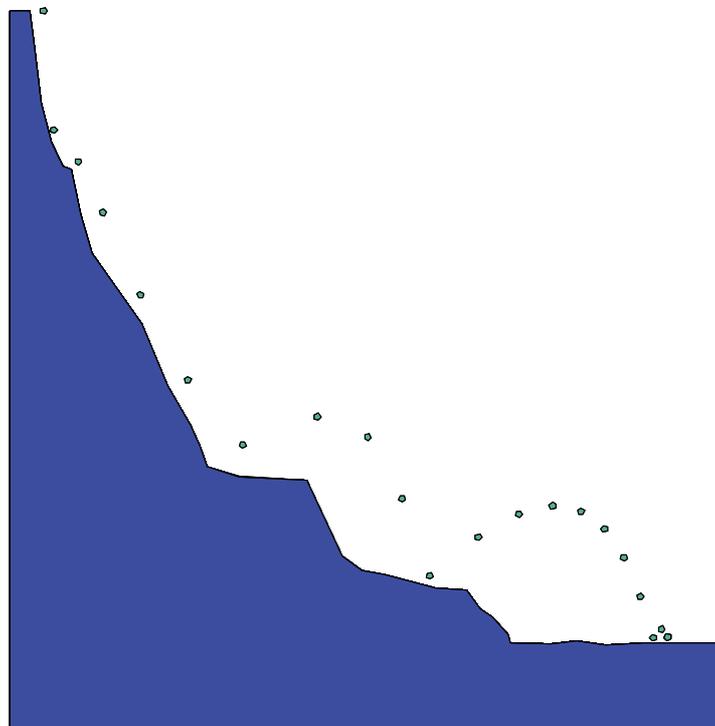


圖 6-11 美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(近方形落石)

(資料來源：本研究整理)

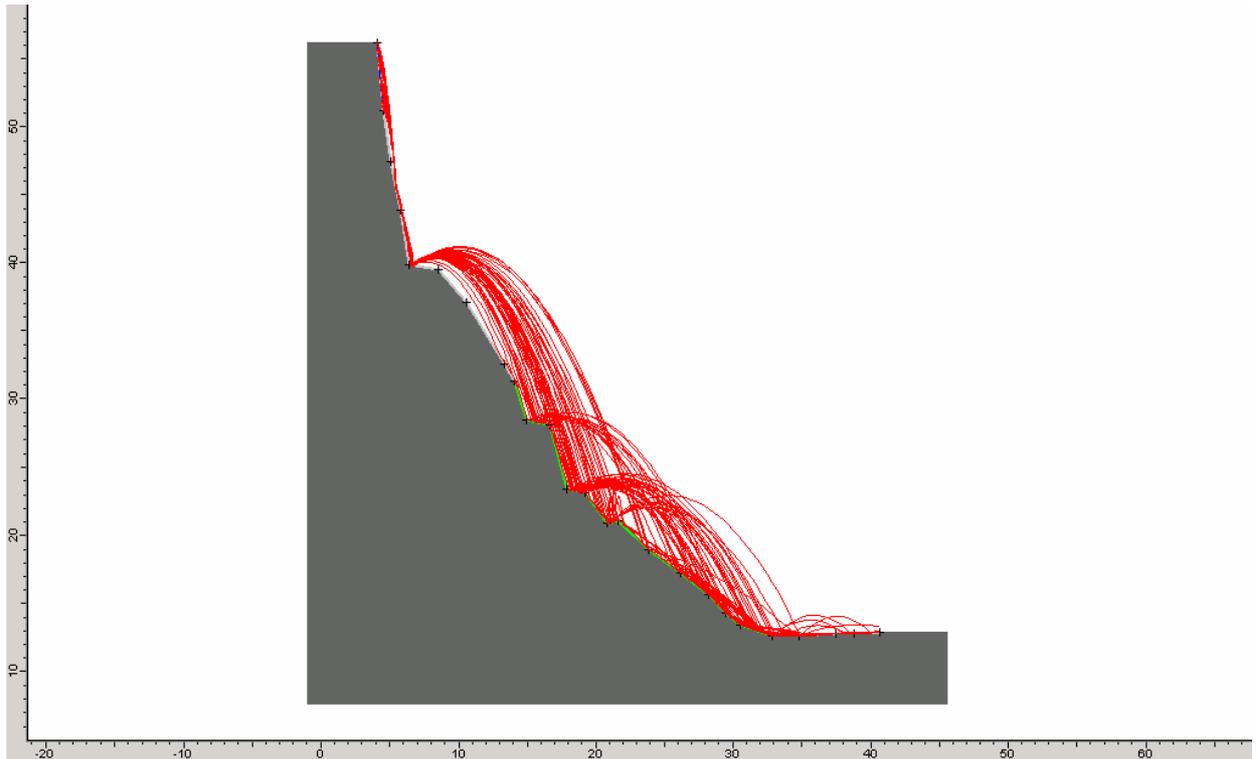


圖 6-12 美的世界社區第一處邊坡落石分析結果(集塊質量法)

(資料來源：本研究整理)

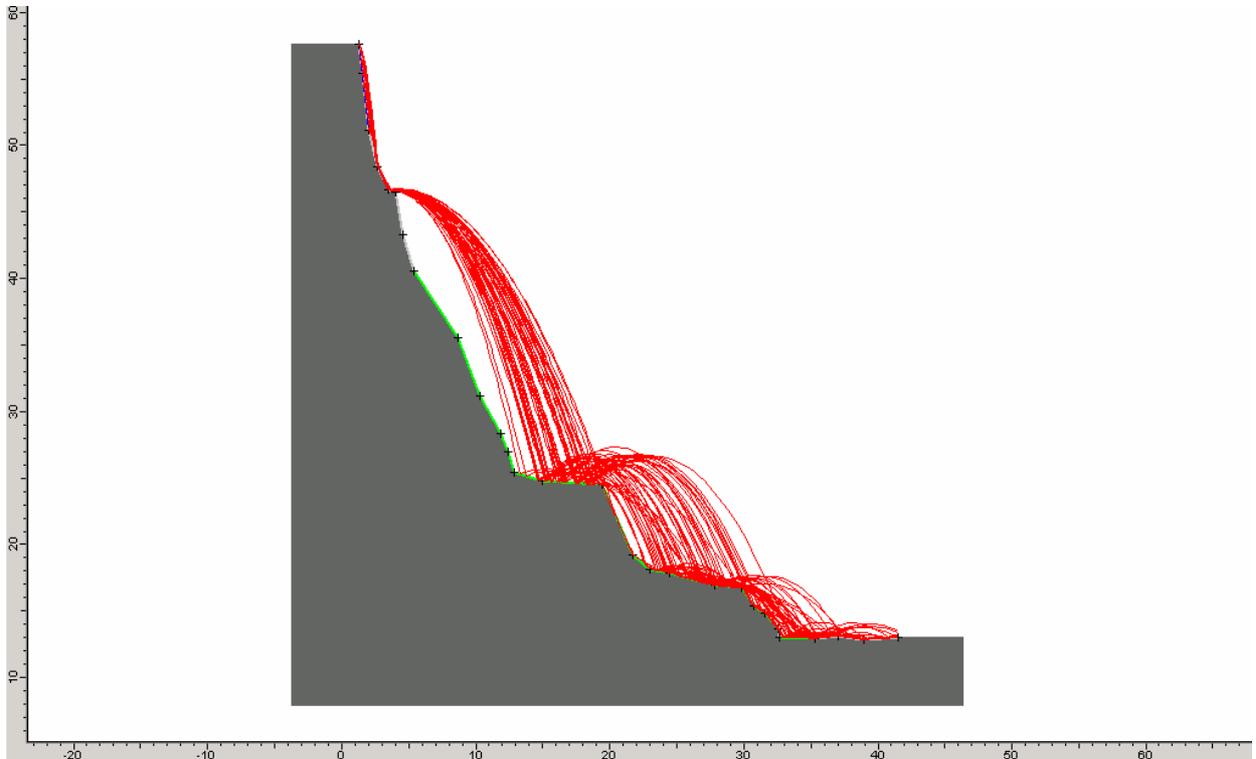


圖 6-13 美的世界社區第二處邊坡落石分析結果(集塊質量法)

(資料來源：本研究整理)

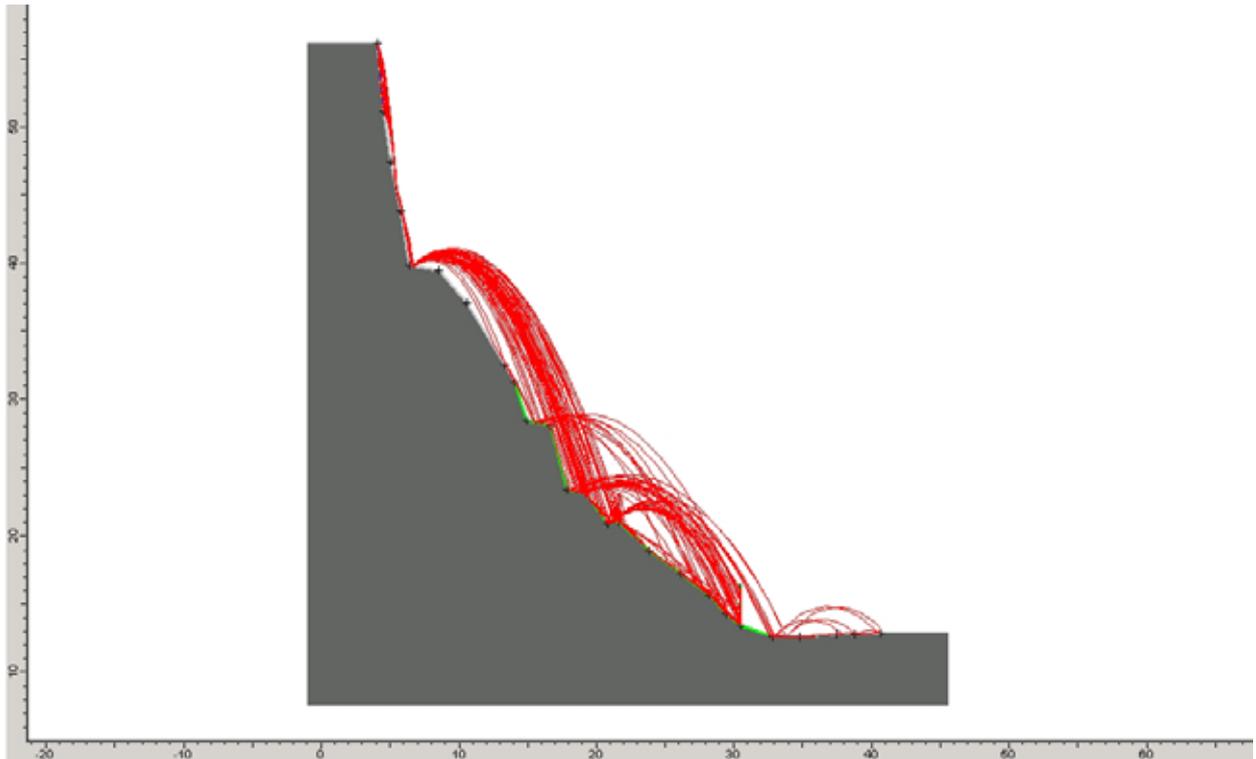


圖 6-14 美的世界社區第一處邊坡落石分析結果(考慮下方防落石柵)

(資料來源：本研究整理)

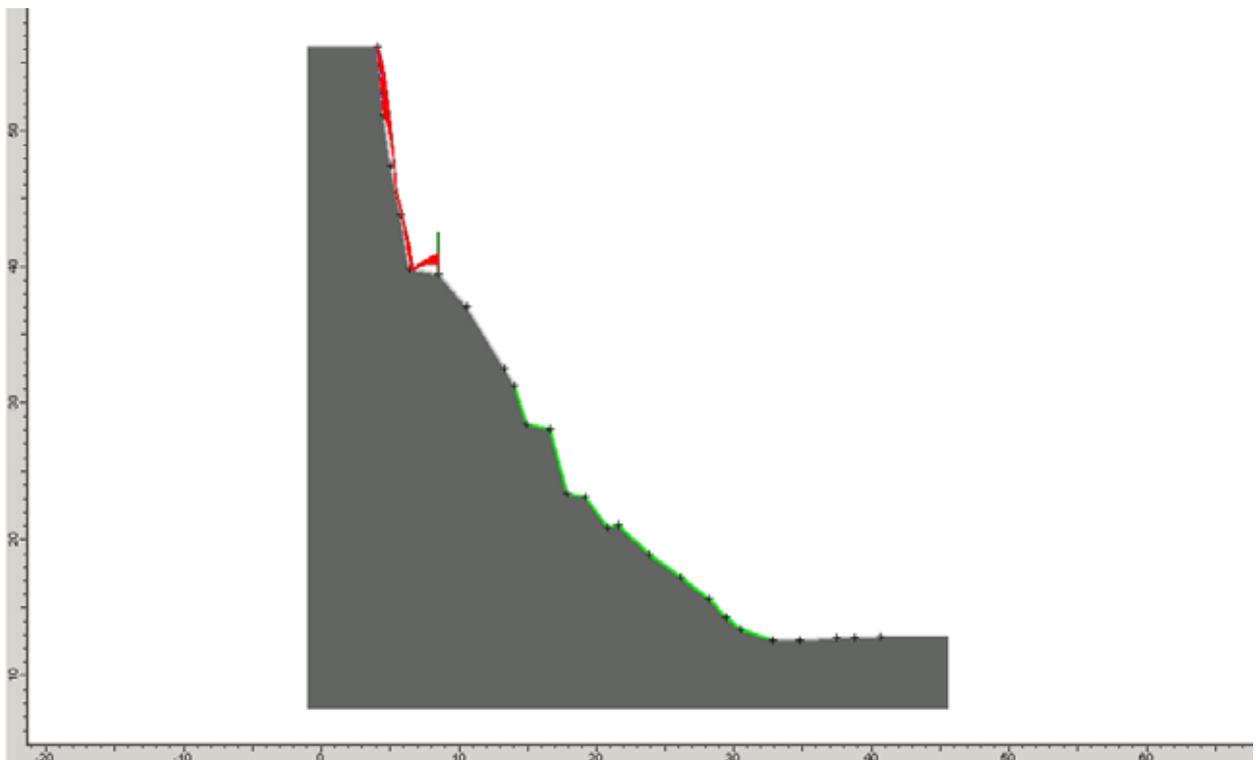


圖 6-15 美的世界社區第一處邊坡落石分析結果(考慮上方防落石柵)

(資料來源：本研究整理)

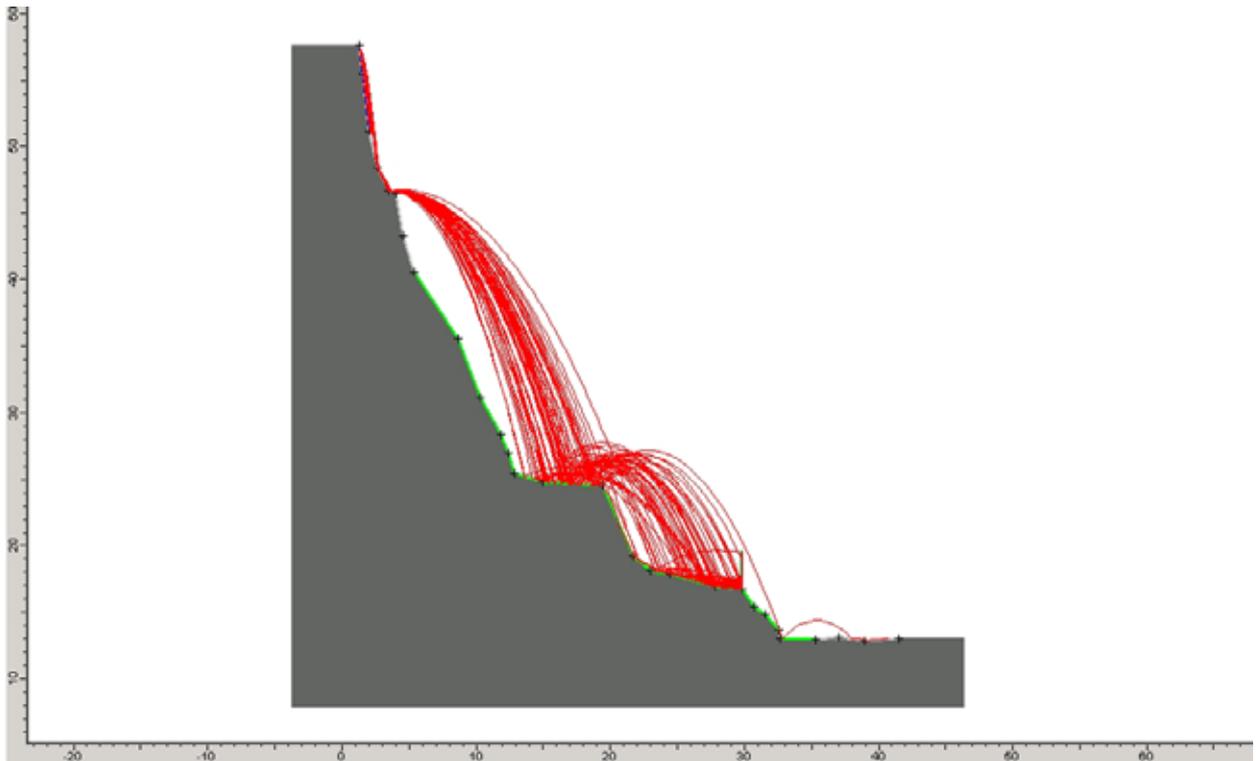


圖 6-16 美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(考慮下方防落石柵)

(資料來源：本研究整理)

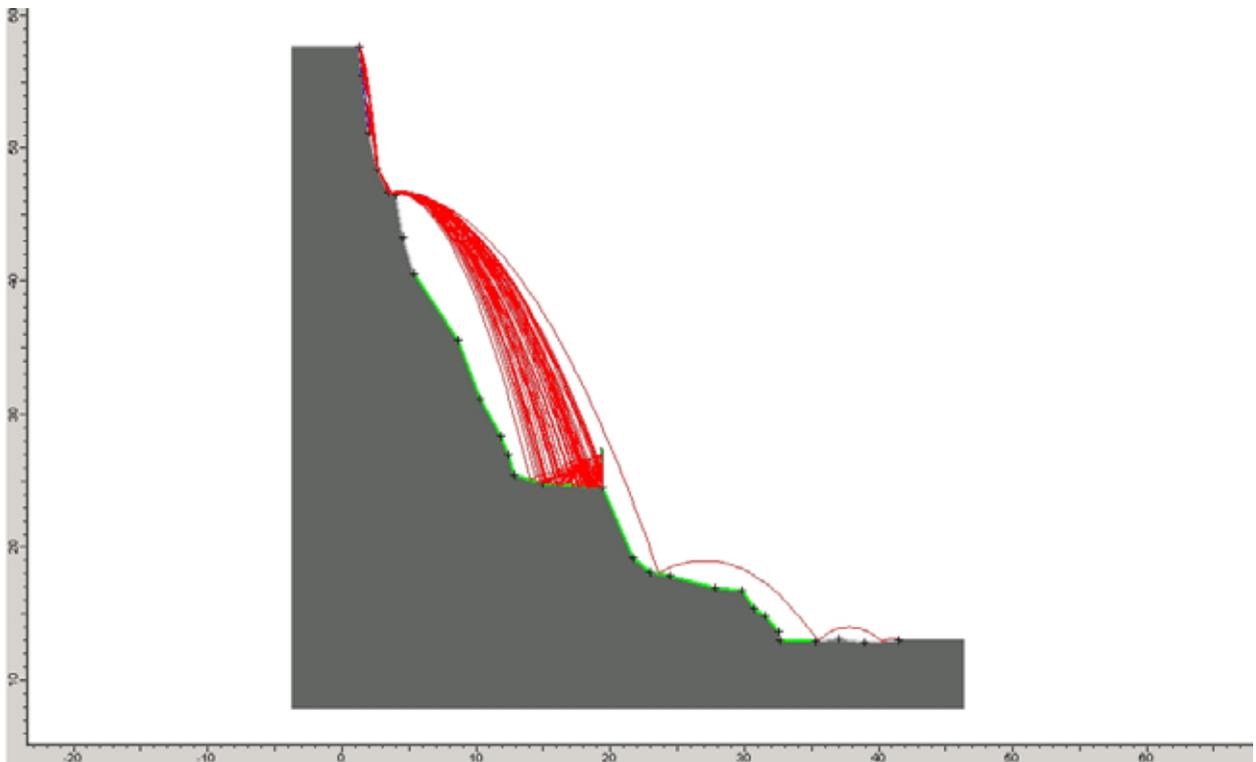


圖 6-17 美的世界社區社區第二處邊坡落石分析結果(考慮上方防落石柵)

(資料來源：本研究整理)

第三節 南雅里社區落石案例分析

一、 案例介紹

1. 案例位址

本案例位於東北角台二線即北部濱海公路近 88K 附近之南雅里社區，因該社區於過去十餘年間落石災害頻傳，本研究因此選擇此社區作為研究之對象。

2. 地形與地質

南雅里社區依山傍海，臨山側之邊坡多為陡峭的山崖，高度約有 150 公尺，坡度向北傾斜 $35^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。出露之岩層多為砂岩及頁岩之互層，地質年代為中新世之南莊層，其岩性以白色塊狀至厚層細至粗粒砂岩為主(地調所)。南雅里社區附近重要之地質構造有鼻頭向斜、龍洞斷層、與金瓜石斷層等。現勘結果顯示，當地不連續弱面可分三至四組節理及一組層面，岩層被弱面切割後極易產生楔型岩塊，進一步因地形陡峻造成岩塊直接翻落而形成落石災害，現場勘查所發現之最大落石有達到 1~2 公尺左右，如圖 6-18 與圖 6-19 所示，落石塊體體積龐大，所造成之破壞力亦強大。

二、 案例分析

本案例之分析流程如下：

1. 分析邊坡幾何

本案例之分析邊坡幾何係依據第四章之三維雷射掃描所得之數值地形模型，落石分析剖面之決定係依據數值地形模型所得之等高線圖、現地勘查之可能落石路徑、與過去落石掉落之位置等加以研判，再由數值地形模型切割二維落石分析所需之分析剖面幾何，如圖 6-20 與圖 6-23 所示。



圖 6-18 南雅里社區第一處邊坡位置

(資料來源：本研究整理)



圖 6-19 南雅里社區第一處邊坡落石與建築物位置示意圖

(資料來源：本研究整理)

2. 分析參數

本研究落石分析所需之分析參數可分成三部分，分別為落石材料本身之分析參數、落石與邊坡間之界面參數、與落石與邊坡間之速度折減參數(或回彈參數)，其中各分析參數多以前人研究之試驗資料或是經驗值推估而得，如表 6-4 至表 6-6 所示。其中本研究之石材密度取砂岩 2.3 t/m^3 ，而速度折減參數依據本社區邊坡之植生情形取表 6-6 中之 Type 2(第一處邊坡)與 Type 3(第二處邊坡)。

3. 分析程式

本研究落石分析分別採用第三章所介紹之基於集塊質量法與不連續變形分析法所發展之 RocFall 與 Rig_DDA 程式進行分析，其中 Rig_DDA 程式之有效性驗證詳第三章所述。

4. 分析結果

依據前述所決定之落石分析邊坡幾何(其中第一處邊坡如圖 6-20 所示，而第二處邊坡如圖 6-23 所示)、分析參數、與分析程式進行分析，本研究南雅里社區共計分析兩處邊坡，落石分析之成果如圖 6-21 至圖 6-24 所示，結果顯示，所得之落石掉落位置與現勘發現之落石位置均相當接近。第一處邊坡因坡度約 45 度，故其落石掉落機制主要以滾動為主；而第二處易證實所採同分析方法之可靠性。邊坡因坡度約 75 度，屬陡坡，故其落石掉落機制主要以掉落為主，僅出現 2~3 次與邊坡接觸之彈跳。惟 RocFall 係以 Monte Carlo 模擬 50 次所得之結果，其落石停止位置非一定值而以停止範圍表示，而 Rig_DDA 程式為定性分析(Deterministic analysis)之結果，故落石分析結果僅有一固定落石位置。兩方法均有其優缺點，以 RocFall 程式而言，其假設落石唯一無限小之顆粒，故無法考慮落石顆粒形狀之因素。而 Rig_DDA 程式為定性分析程式，無法考慮機率分析之不確定性，惟分析成果之正確性最終仍取決於分析

參數之正確使用及詳細現地邊坡地形幾何之取得，故本研究開發三維雷射掃描技術與廣泛蒐集相關落石回彈參數之資料以增加落石分析之準確性。本研究另進行有關落石幾何影響與防護設施效果評估則，分析成果詳述如下。

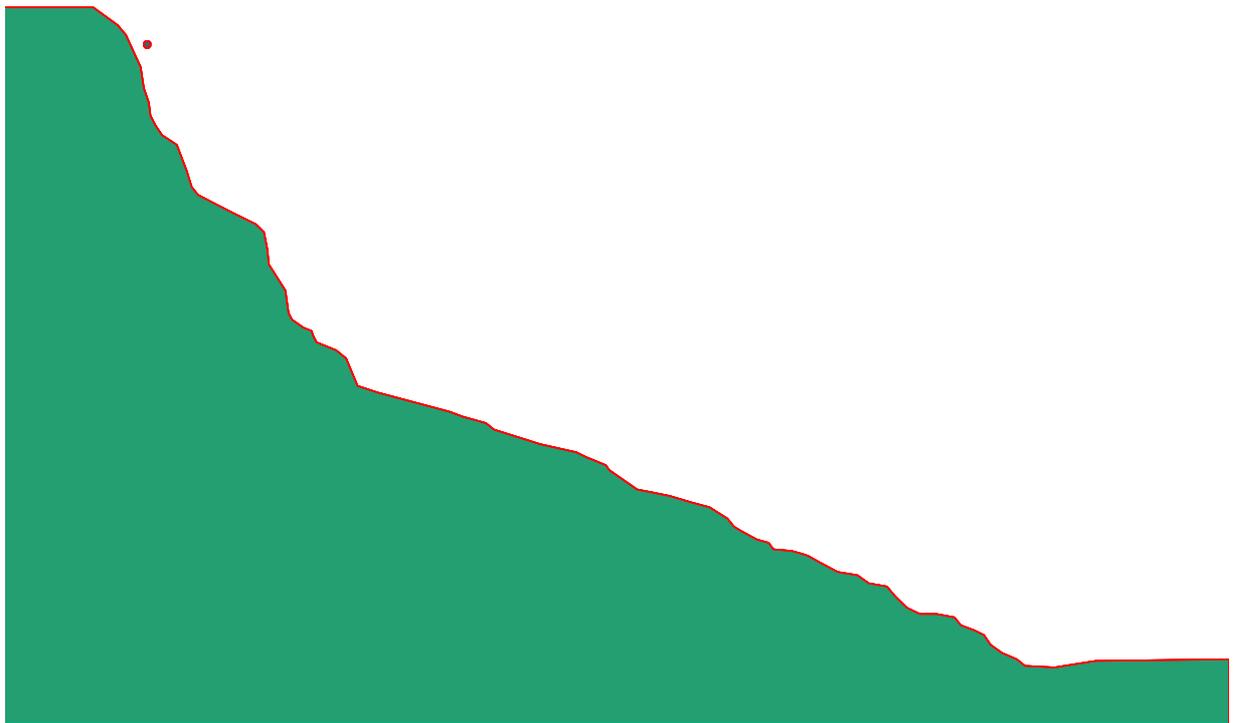


圖 6-20南雅里社區第一處邊坡落石分析邊坡幾何

(資料來源：本研究整理)

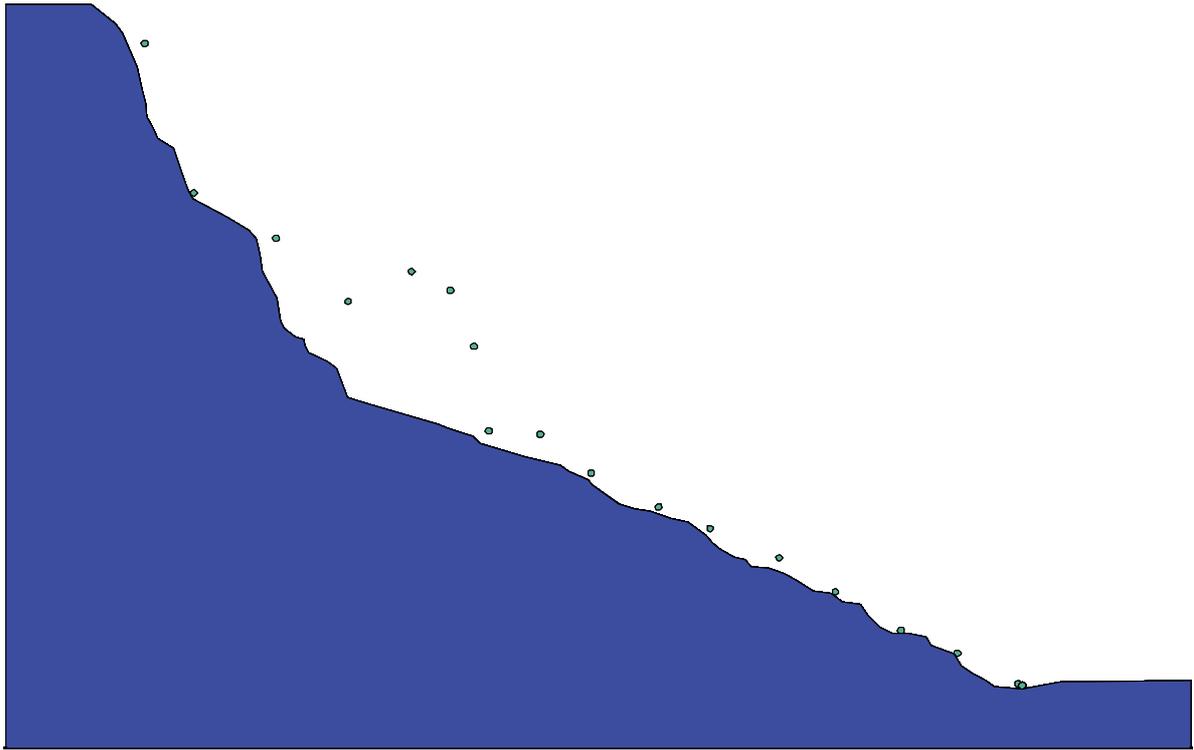


圖 6-21南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(DDA , 近圓形)

(資料來源：本研究整理)

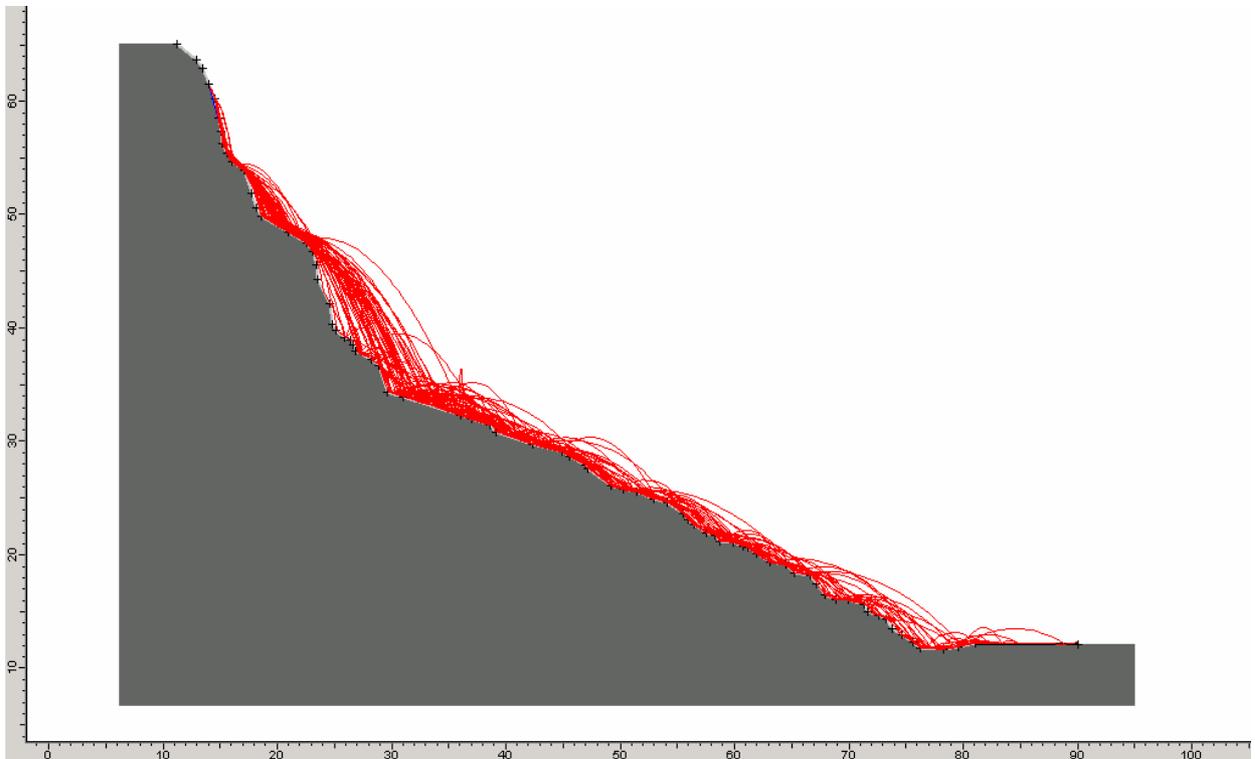


圖 6-22南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(Rocfall)

(資料來源：本研究整理)

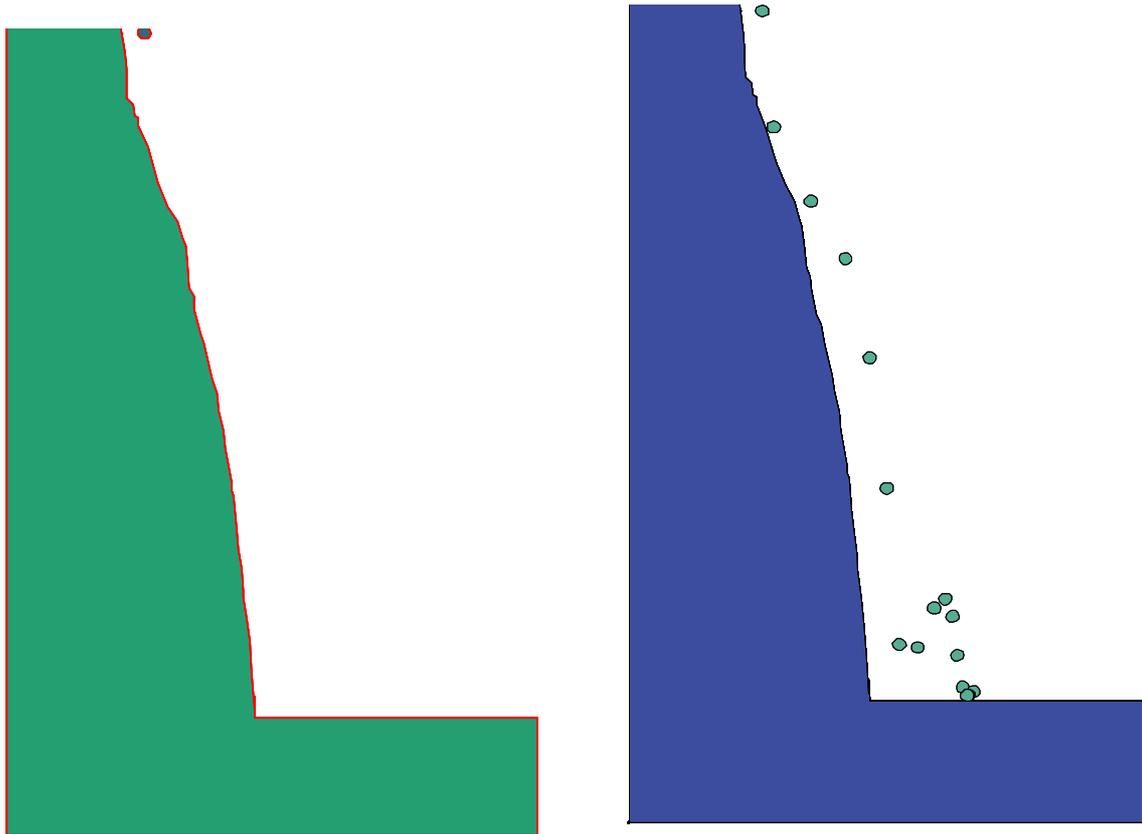


圖 6-23 南雅里社區第二處落石(近圓形)分析邊坡幾何(左)與結果(右, DDA)

(資料來源：本研究整理)

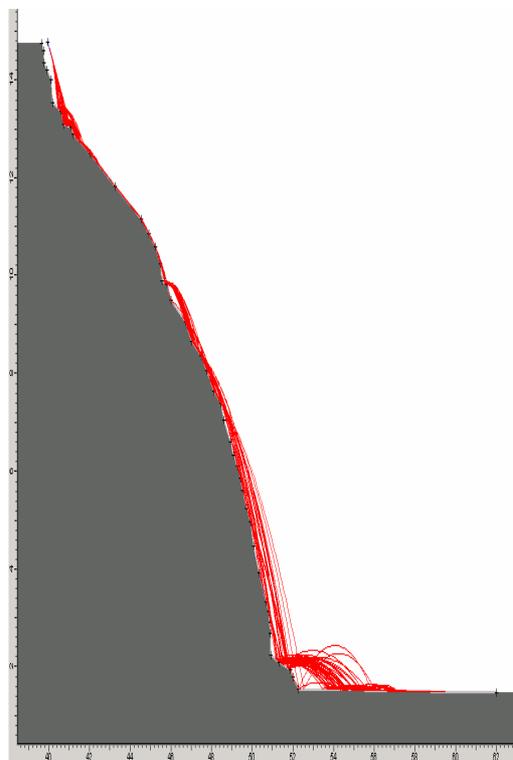


圖 6-24 南雅里社區第二處邊坡落石分析結果(Rocfall)

(資料來源：本研究整理)

5. 落石幾何影響探討

前述分析結果顯示，RocFall 程式無法考慮落石顆粒形狀之因素，故本研究以 Rig_DDA 程式進行不同落石形狀對分析結果之影響，於分析中考慮一接近圓形之落石與一接近方形之落石，分析結果如圖 6-21 至圖 6-26 所示。結果顯示，在所有分析條件均相同之情形之下，僅落石形狀由近圓形改變為近方形，第一處邊坡之分析結果差異甚大(如圖 6-21 與圖 6-25 所示)，而第二處邊坡之分析結果差異不甚明顯(如圖 6-23 與圖 6-26 所示)，主要原因係第一處邊坡坡度較緩(約 45 度)，落石之運動主要以滾動為主，近圓形之滾動較近方形之滾動能力為佳，故落石僅滾動至邊坡一半處即停止。而第二處邊坡坡度較陡，落石之運動主要以掉落為主，落石形狀之影響並不十分顯著。此結果亦反映實際落石問題之不確定性極高，實際落石之軌跡與掉落位置因初始條件之不同造成極大差異，分析應考量各種不同情形，始可較完整之掌握該區落石運動之特性。

6. 防護設施效果評估

而本研究於南雅里社區週邊亦發現落石柵之防護設施，因此以下分析即針對防落石柵之效果進行評估。評估方法主要係於邊坡不同位置設置防落石柵，防落石柵之高度則設定為 3 公尺。圖 6-27 與圖 6-28 顯示第一處邊坡考慮於不同位置設置防落石柵之分析結果，圖 6-29 顯示第二處邊坡考慮不同位置之防落石柵之分析結果。分析成果顯示，此外，防落石柵若能建置於落石彈跳軌跡之反曲點位置時，其防護效果為最佳，另分析成果亦顯示，防落石柵若能建置於近落石發生處，則其防護效果亦相當良好，惟防落石柵之設置仍需合併考慮現地施作之可行性，方可設計出最佳之建置位置。

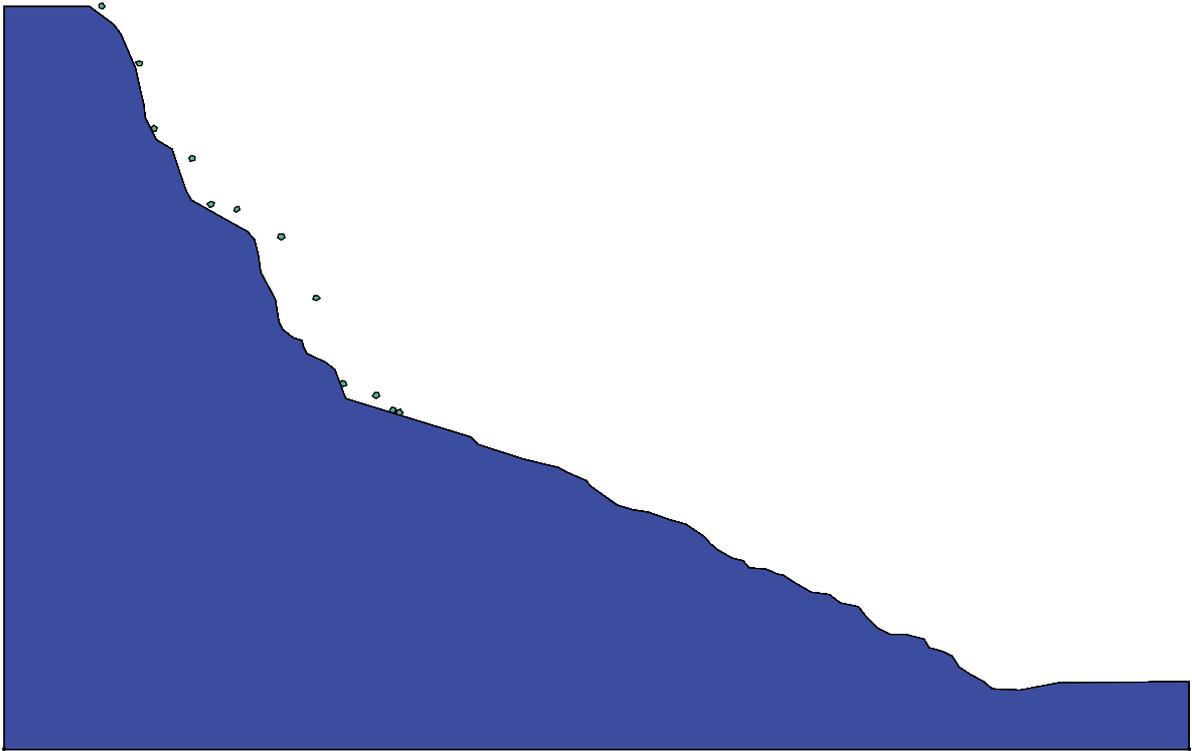


圖 6-25 南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(近方形)

(資料來源：本研究整理)

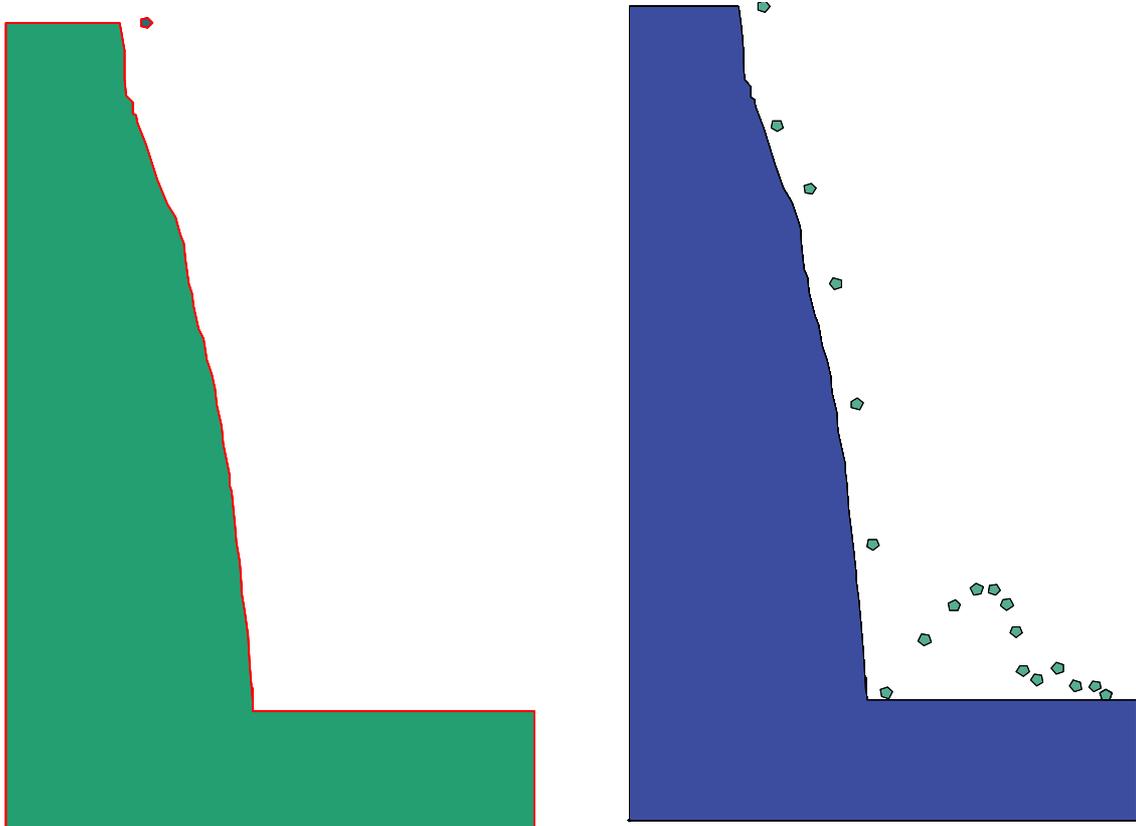


圖 6-26 南雅里社區第二處落石(近方形)分析邊坡幾何(左)與結果(右, DDA)

(資料來源：本研究整理)

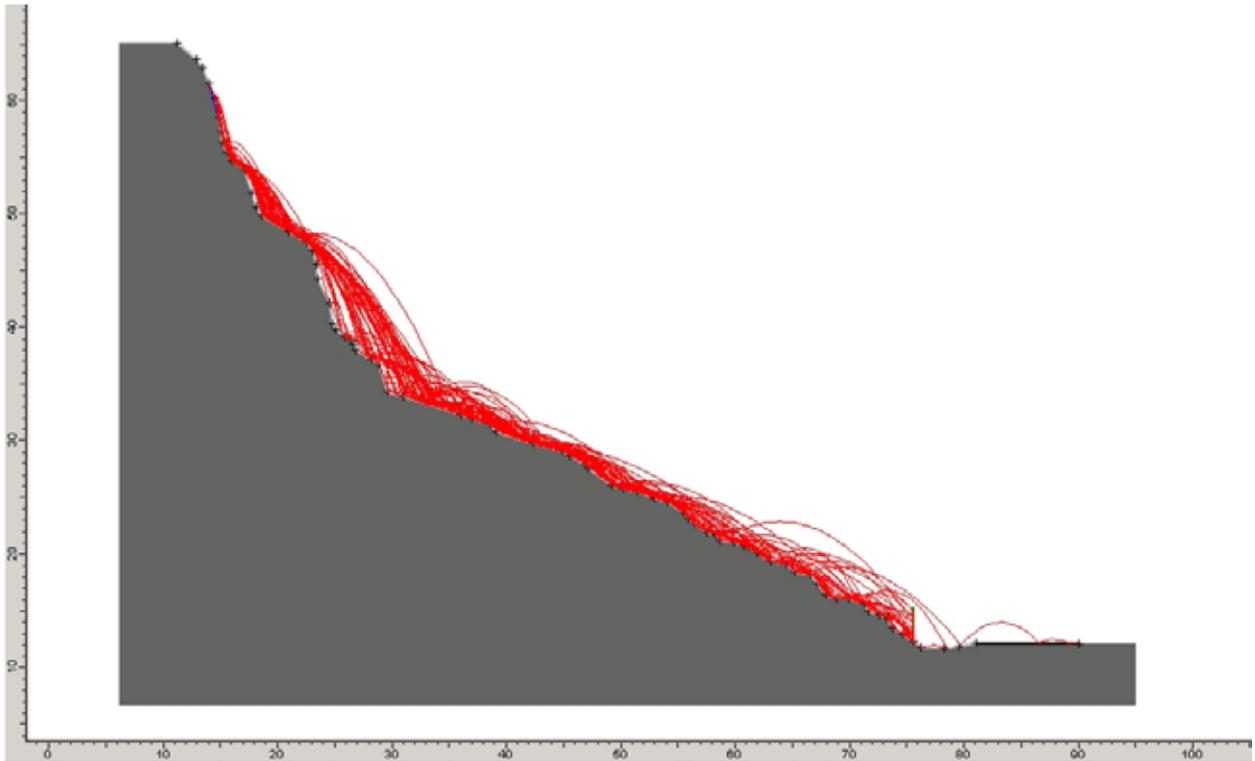


圖 6-27 南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(Rocfall)

(資料來源：本研究整理)

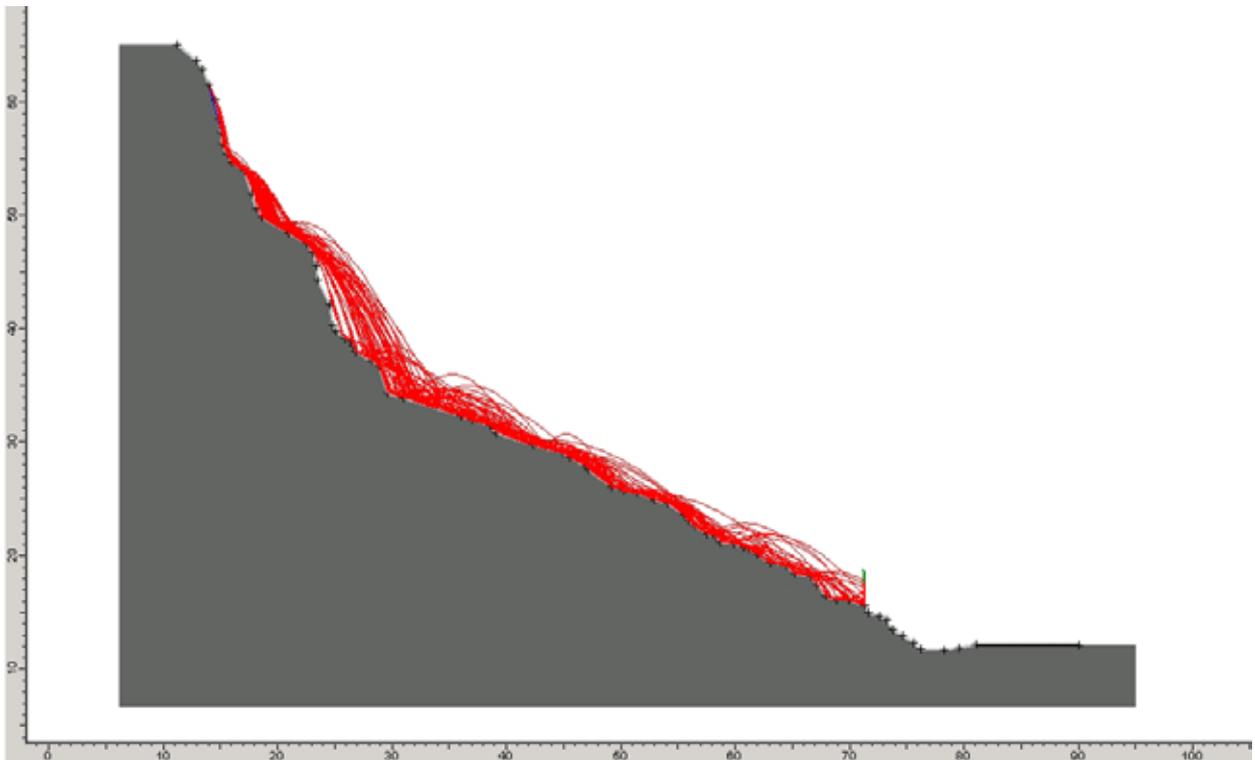


圖 6-28 南雅里社區第一處邊坡落石分析結果(考慮防護設施)

(資料來源：本研究整理)

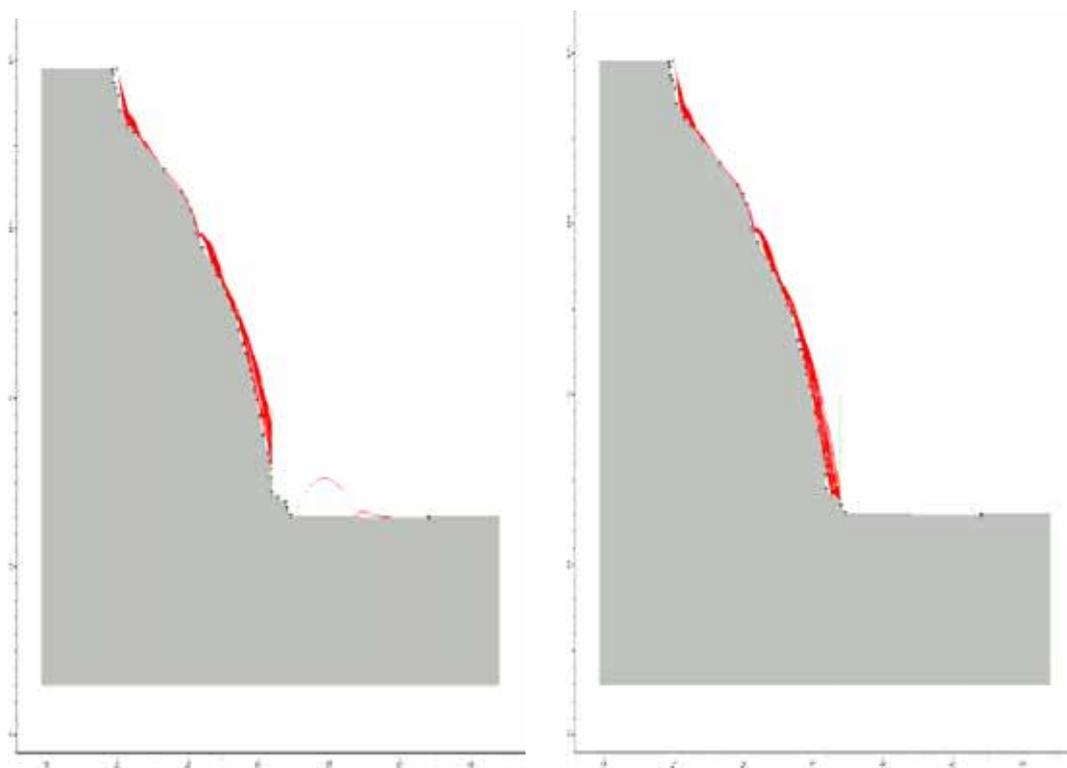


圖 6-29 南雅里社區第二處邊坡落石分析結果(考慮不同防護設施位置)

(資料來源：本研究整理)

第四節 落石問題對山坡地社區建築物退縮距離之檢討

一、 現行有關退縮距離之法令

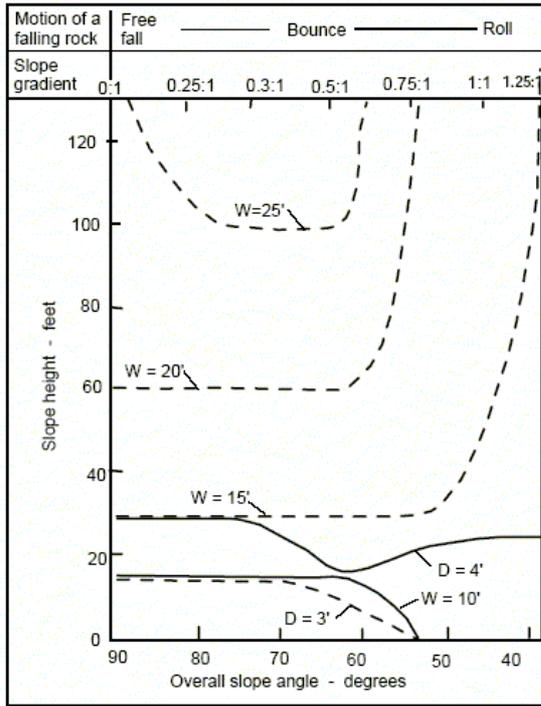
現行有關退縮距離之法令多考慮在山坡地之斜坡地形上設置擋土牆開發整地供建築及居住，萬一擋土牆因順向坡滑動而失敗時，其影響範圍有多大正是建築技術規則山坡地地專章 262、264 與 265 條顧慮的問題。其中各之詳細內容見附錄 2，上述法令雖已考量建築物之退縮距離，惟其考慮之方向係就擋土牆的失敗模式而言，涉及諸多參數，例如： c 、 ϕ 值、地震力、地下水壓力、地質構造弱面等，並未考慮逆向坡所可能產生之落石問題。

依據上述建築物退縮距離相關法規與計算方法進行不同坡度下建築物退縮距離之分析計算，結果如表 6-7 與圖 6-31 所示，分析結果顯示，當邊坡坡度趨近於 90 度與 10 度時，即陡坡或緩坡情形下，以 262 條之公式計算退縮距離之結果顯示，現有退縮距離公式之適用性尚有討論之空間。即當邊坡坡

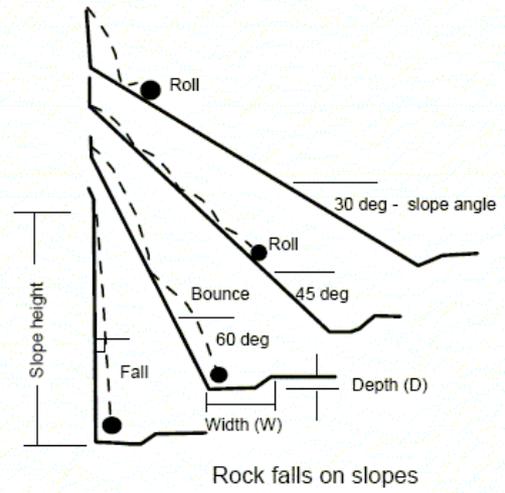
度由 20 度趨近 10 度時，退縮距離遽增 2 倍，然因此邊坡坡度於 10 度時，其發生滑動之潛勢降低，但所得之退縮距離不減反遽增，與實際邊坡穩定之力學行為相左，惟因 10 度緩坡一般不具落石發生之條件，故本研究不加以深入討論。而在陡坡情形下，即邊坡坡度由 80 度趨近 90 度時，退縮距離漸減為 0，此現象就順向坡問題而言並無不妥，然而陡坡一般多具落石災害發生之潛勢，因此有必要針對此點作進一步之探討。

本研究首先蒐集過去相關學者之研究成果，圖 6-30 為 Ritchie 等人於 1963 年所之研究，其成果顯示，當邊坡高度低於 35 公尺時，落石緩衝槽溝之寬度由 3 公尺至 7.62 公尺，落石緩衝槽溝之深度為 1.22 公尺。由於台灣地區發生落石災害之邊坡往往大於 35 公尺，有時甚至超過上百公尺，因此本研究針對 40 公尺與 80 公尺高度之邊坡於 3 個不同坡度條件下(0.75:1, 0.5:1, 與 0.3:1) 及 3 種不同坡面材料性質(光滑岩盤面坡面、岩盤面植生坡面、與風化土壤植生坡面)，進行計 18 個落石簡化案例分析，分析案例幾何設定如圖 6-32 所示，以分析各不同案例情形下之落石停止位置，分析成果如表 6-8 所示。結果顯示於 40 公尺高度之邊坡，落石停止位置約為 10 公尺至 20 公尺左右。而於 80 公尺高度之邊坡，落石停止位置約為 14 公尺至超過 20 公尺。上述分析係採保守分析，即假設落石邊坡之滑動面係為平面(無任何台階)，且落石由邊坡滾落後之地表也為平面(無任何衝槽溝深度設置)。

本分析成果顯示對於有落石災害風險之陡坡(坡度 73.3 度)而言，若邊坡為 40 公尺高度，而無任何落石防護設施之情形下，建築物安全退縮距離約為 10 至 11 公尺。若邊坡為 80 公尺高度，建築物安全退縮距離約為 14 至 18 公尺。上述分析結果可對於建築物退縮距離，尤其是針對有落石害風險之高陡邊坡提供未來進一步改進與檢討之空間。



Ditch Design Chart



Figures taken from FHWA Manual 'Rock Slopes' November 1991. USDOT Chapter 12 Page 19.

圖 6-30 Ritchie 等人對於 35 公尺以下之邊坡所提之防護建議

(資料來源：本研究整理)

表 6-7 依據 262 條之二退縮距離之計算結果

坡度	滑動面透空處高度 (公尺)			
	1 m	5 m	10 m	20 m
10	2.836	14.178	28.356	56.713
20	1.374	6.869	13.737	27.475
30	0.866	4.330	8.660	17.321
40	0.596	2.979	5.959	11.918
50	0.420	2.098	4.196	8.391
60	0.289	1.443	2.887	5.774
70	0.182	0.910	1.820	3.640
80	0.088	0.441	0.882	1.763
90	0.000	0.000	0.000	0.000

(資料來源：本研究整理)

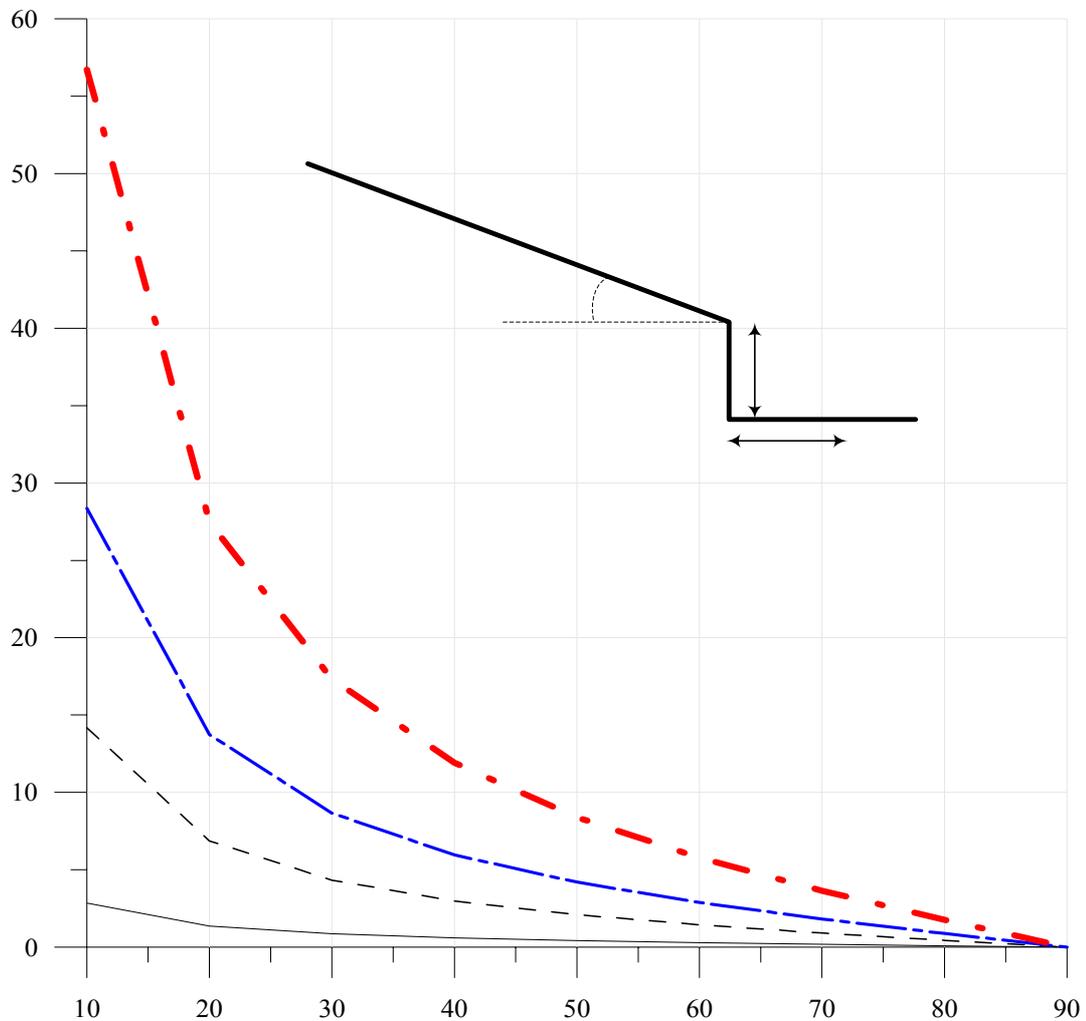


圖 6-31 依據 262 條之二退縮距離之計算結果

(資料來源：本研究整理)

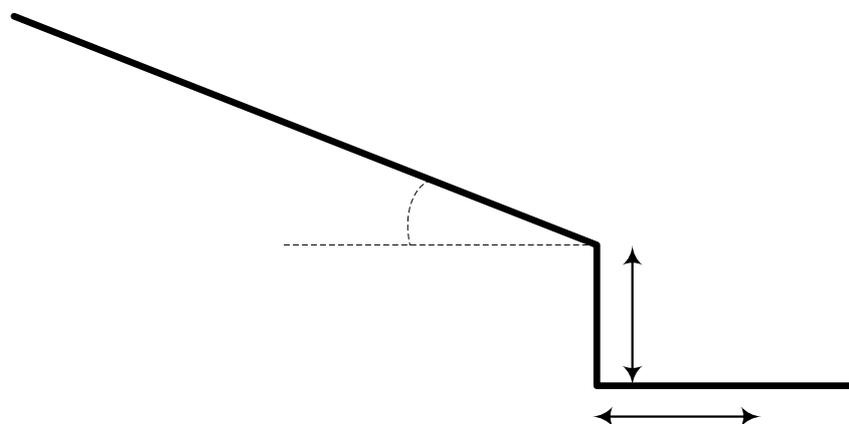


圖 6-32 落石簡化分析案例幾何設定

(資料來源：本研究整理)

表 6-8 本研究考慮落石問題退縮距離之計算結果

坡高 40 m	坡面材料性質 (光滑岩盤面)	坡面材料性質 (岩盤面植生)	坡面材料性質 (風化土壤植生)
坡度 53.1 度(0.75:1)	20 m	16 m	16 m
坡度 63.4 度(0.5:1)	20 m	15 m	12 m
坡度 73.3 度(0.3:1)	11 m	10 m	10 m
坡高 80 m	坡面材料性質 (光滑岩盤面)	坡面材料性質 (岩盤面植生)	坡面材料性質 (風化土壤植生)
坡度 53.1 度(0.75:1)	超過 20 m	超過 20 m	超過 20 m
坡度 63.4 度(0.5:1)	超過 20 m	超過 20 m	超過 20 m
坡度 73.3 度(0.3:1)	18 m	16 m	14 m

註：上述分析之擋土牆高約 5m，初始速度水平方向為 1 m/sec，垂直方向往下為 1 m/sec，惟擋土牆高與落石初始速度對結果影響不大。

(資料來源：本研究整理)

第七章 結論與建議

第一節 結論

本研究結合目前國內外最新可應用於山坡地社區落石災害問題之理論分析技術與三維雷射地形量測技術，進行坡地社區落石問題之分析與應用，期提昇坡地社區落石災害之防治技術。依據本研究所獲致之成果可歸納結論如下所述。

一、山坡地社區落石災害之評估準則

本研究針對山坡地社區經過實地調查與資料蒐集後，參考針對道路落石坍方之美國傳統方法及國內之相關研究成果，提出適用於台灣地區之山坡地社區落石災害評估準則。本研究所提出之評估準則與一般道路落石災害之主要防治對象有所差異，其主要考量並非行車風險，而應與建築物的退縮距離及人員出入量有關，結果顯示，本研究所建議之評估準則可作為提供山坡地社區落石災害初步評估使用。

二、山坡地社區落石災害分析模式建立

本研究針對國內外有關落石問題之理論分析方法進行廣泛之收集與研究，除檢討現有之落石分析理論外，亦結合分離元素法中之不連續變形分析法理論基礎進一步發展落石分析技術。案例分析結果顯示，本研究所發展之山坡地社區落石災害分析模式除可對於落石行進軌跡與掉落位置進行預測外，亦可考慮落石幾何影響與防護設施之效果，對於山坡地社區內特定邊坡之落石防治與後續工法選擇有相當之助益。

三、快速地形量測技術建立

本研究為改進傳統地形測量方法及現有 DEM 因取樣間距不易詳細描繪落石之自然邊坡形狀之限制，特別結合目前最新發展之三維雷射掃描技術進行落石邊坡快速地形量測技術之建立。成果顯示，本研究所採用兩款不同形式之雷射掃描儀，分別為 Trimble 公司之 GS200 與 Riegl 公司之 LPM-2K，兩款雷射掃描儀均可於短時間約 2 至 3 小時內獲取極高精度之落石自然邊坡地形，特別是 Trimble 公司之 GS200 所掃描之地形資料精度甚至可分辨邊坡上之岩體弱面，可有效提供後續落石問題分析評估之重要邊坡幾何資訊。

四、現地驗證及分析工作

本研究結合上述山坡地社區落石災害分析模式與快速地形量測技術進一步針對山坡地社區進行實地調查與案例分析工作，總計進行四處落石邊坡之分析工作，分別位於台北市信義區美的世界社區及台北縣瑞芳南雅里社區。案例分析結果顯示，本研究除供各專業機構結合山坡地社區管委會用以評估其社區內發生落石之可能地點進行評估外，亦可事先防範於未然以減低落石之潛在風險，而量化之評估流程亦可提供日後落石問題詳細分析及防護設施設計之參考。

第二節 建議

建議一

針對山坡地社區落石災害潛勢進行全面評估：立即可行建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部、經濟部、交通部、及水土保持局

建議利用本研究所研擬之山坡地社區落石災害評估準則對更多山坡地社區潛在之落石災害進行評估，建立相關資料庫，達到防災減災之目的。

建議二

利用遙測資料針對山坡地社區落石災害進行大尺度評估：立即可行建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部、經濟部、交通部、及水土保持局

建議利用遙測資料建立大尺度範圍之山坡地社區落石災害之潛勢分析，建立相關資料庫，作為後續進行防治優先順序之依據。

建議三

進行山坡地社區逆向坡落石災害潛勢評估：中長期建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部、經濟部、交通部、及水土保持局

台灣地區近年來因平地發展飽和，山坡地社區開發之建築行為將無可避免，然而隨踵而來之山坡地社區災害實有必要加以防範，尤其是台灣西部麓山帶地質區，多含所謂之「單面山」，其一面是順向坡，而背面是倒插坡（或稱逆向坡），倒插坡常是一個較陡的斷崖而易發生落石災害。因此，建議未來可利用本研究所研擬之山坡地社區落石災害評估準則對更多山坡地社區進行落石災害潛勢之評估，以提高山坡地社區之安全並減少相關災害損失，達到防災減災之目的。

建議四

結合 3 維雷射掃描技術辦理三維落石災害分析模式之研究：中長期建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部、經濟部、交通部、及水土保持局

本研究已完成山坡地社區落石災害分析模式之建立，惟目前仍侷限於二維分析，而三維分析為目前國際上研究之趨勢，建議未來可進一步結合 3 維雷射掃描技術辦理三維落石災害分析模式之研究。

建議五

建議進行落石危害邊坡建築物之退縮距離進行研究：中長期建議

主辦機關：行政院公共工程委員會

協辦機關：內政部、經濟部、交通部、及水土保持局

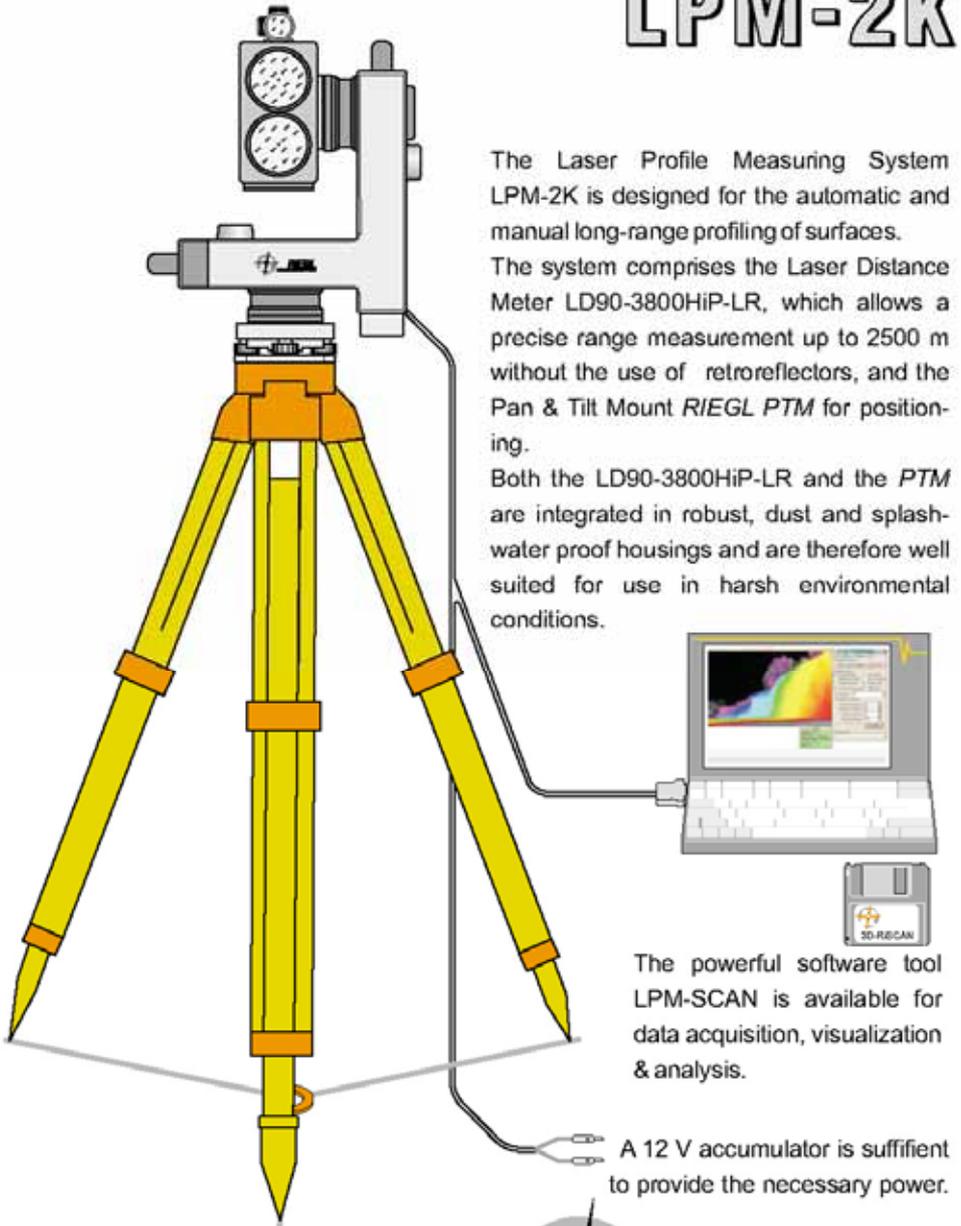
本研究針對建築物因落石問題所需退縮距離分析成果顯示，現行法規在陡坡情形下，坡度由 80 度趨近 90 度時，其退縮距離趨近於 0，對於有落石潛勢之陡坡之退縮距離明顯不足。本研究顯示對於有落石災害風險之陡

坡(坡度 73.3 度)而言，若邊坡為 40 公尺高度，而無任何落石防護設施之情形下，建築物安全退縮距離約為 10 至 11 公尺。若邊坡為 80 公尺高度，建築物安全退縮距離約為 14 至 18 公尺。建議未來可對於有落石潛勢邊坡之退縮距離進行廣泛之討論，以訂定更周詳之建築物退縮距離。

附錄一 三維雷射掃描儀器規格

1. 奧地利 Riegl 公司所製作之 LPM-2K 長距離雷射掃描儀器規格簡介

LONG-RANGE LASER PROFILE MEASURING SYSTEM LPM-2K



The Laser Profile Measuring System LPM-2K is designed for the automatic and manual long-range profiling of surfaces. The system comprises the Laser Distance Meter LD90-3800HiP-LR, which allows a precise range measurement up to 2500 m without the use of retroreflectors, and the Pan & Tilt Mount *RIEGL PTM* for positioning. Both the LD90-3800HiP-LR and the *PTM* are integrated in robust, dust and splash-water proof housings and are therefore well suited for use in harsh environmental conditions.

The powerful software tool LPM-SCAN is available for data acquisition, visualization & analysis.

A 12 V accumulator is sufficient to provide the necessary power.

visit our webpage
www.riegl.com



RIEGL
LASER MEASUREMENT SYSTEMS

Technical data *RIEGL* LPM-2K

Distance meter performance

Measuring range	depending on the reflection coefficient of the target ¹⁾
good, diffusely reflecting targets, $\rho \geq 80\%$	up to 2500 m
bad, diffusely reflecting targets, $\rho \geq 10\%$	>800 m
Reflecting foil ²⁾ or plastic cat's-eye reflectors	2500 m
Accuracy ³⁾	typically ± 50 mm
Resolution	10 mm
Measuring time ⁴⁾	0.25 up to 1 s
Beam divergence ⁵⁾	1.2 mrad
Telescope	magnification 3 x 20
Laser wavelength	0.9 μm (near infrared)
Eye safety class according to ⁶⁾ IEC60825-1:2001	



Pan & tilt mount performance

Scanning range	horizontally: $\pm 180^\circ$ vertically: $+135^\circ$ to -60° ⁷⁾
Positioning accuracy	typ. ± 0.01 gon ⁸⁾
Angle readout accuracy	± 0.01 gon ⁸⁾
Scanning speed	max. 40 gon/sec (horizontal and vertical)

Physical data

Main dimensions ⁹⁾ (LxWxH)	232 x 300 x 320 mm
Weight	approx. 14.6 kg
Protection class	IP64, dust and splash-water proof
Color	grey & black anodised
Power supply	11 - 18 V DC
Power consumption	approx. 15 W (standby) approx 50 W (both motors in operation)
Data interface	standard: RS232, adjustable up to 19.2 kBd or RS422, adjustable up to 38.4 kBd option: Ethernet TCP/IP interface, 10 MBit/sec

Temperature range

Operation	0 °C to +50 °C
Storage	-20 °C to +70 °C

¹⁾ typical values for average conditions. In bright sunlight, the operational range is considerably shorter than under an overcast sky. At dawn or at night the range is even higher.

²⁾ reflecting foil 3M 2000X or equivalent, minimum dimensions 0.45 x 0.45 m²

³⁾ standard deviation, plus distance depending error $\leq \pm 20$ ppm

⁴⁾ selectable via RS232

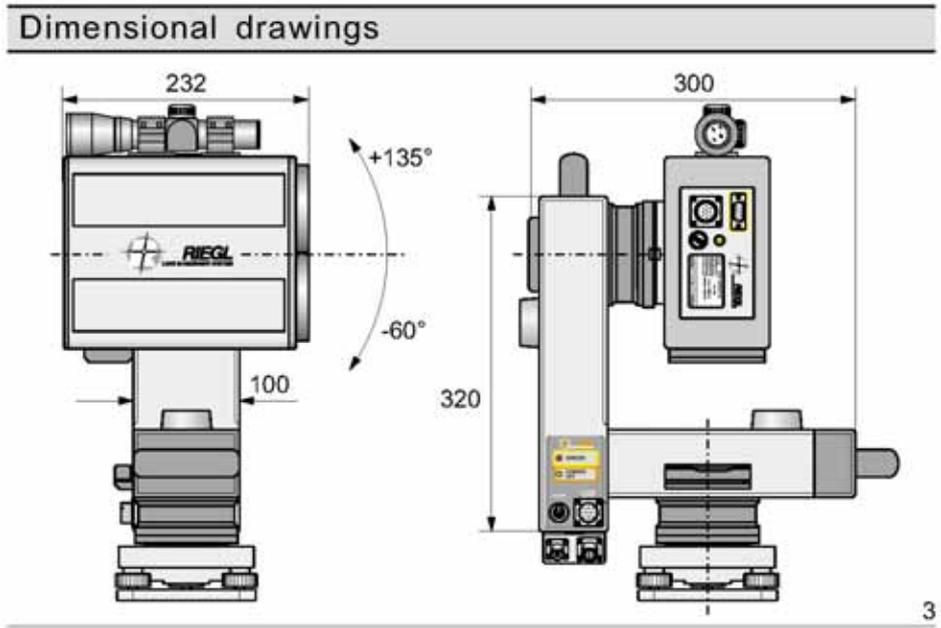
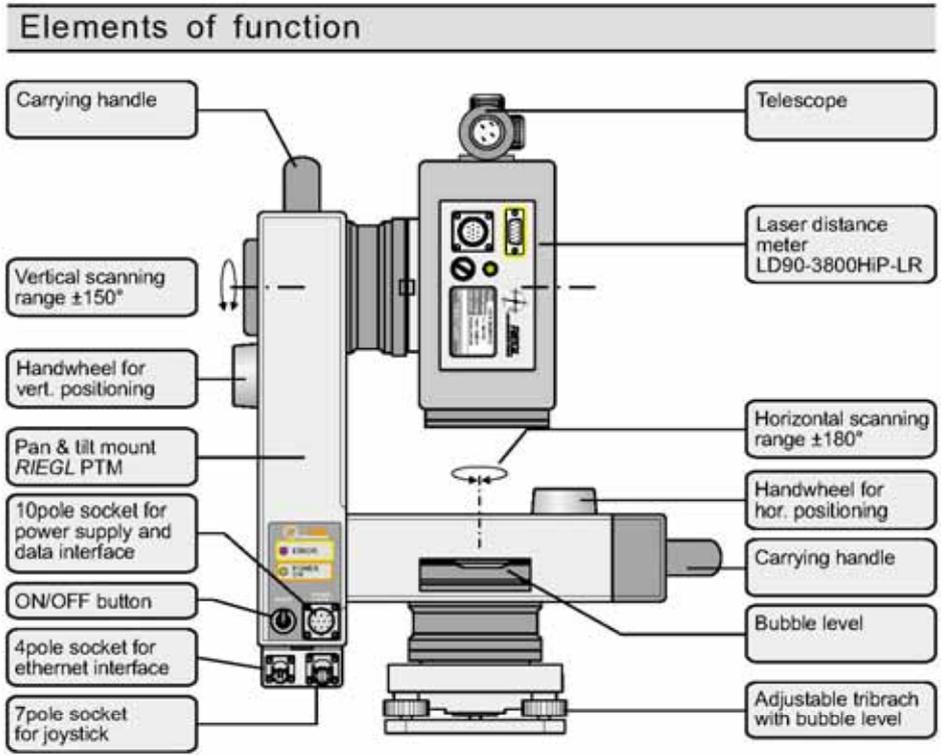
⁵⁾ 1 mrad corresponds to 10 cm beamwidth per 100 m of range

⁶⁾ for the unscanned laser beam only. For a scanned beam, eye-safety is achievable.

⁷⁾ with respect to the horizontal line of sight

⁸⁾ 400 gon $\hat{=}$ 360°, 1 gon $\hat{=}$ 0.9°

⁹⁾ see dimensional drawings



Scope of delivery and accessories

Basic Configuration LPM-2K:

- **Laser Profile Measurement System LPM-2K**, comprising: laser distance meter LD90-3800HiP-LR, pan & tilt mount PTM for hand and motor operation, data interface, and power supply.
Comes with connection cables, adapter for tribrach, and user's manual.
- **Software License LPM-SCAN*** for configuration of the scanner system, data acquisition and filing, on-line false-color-encoded visualization of 3D images, data logging for off-line analysis, 3D image data storing, basic data analysis, runs on PC or Notebook with parallel port (WinNT / ECP-Port recommended).
* for operating system WINDOWS XP, 2000, NT4.0, and 95/98
- **Software License RiVIEW***, a compact and easy to use visualization utility for 3D point-cloud data (*.3dd or *.3pf files obtained by LPM-SCAN).
* for operating system WINDOWS XP, 2000, NT4.0, and 98

Options & Accessories:

- **Software License for Library RiScanLib*** for straightforward implementation of data acquisition in user applications, based on COM technology.
* for operating system WINDOWS XP, 2000, NT4.0, and 95/98, examples in Visual C++ and Delphi
- **Ethernet TCP/IP interface**, providing smooth integration of the LPM-2K data into a 10 MBit/sec, twisted-pair (TP) Local Area Network (LAN). The interface acts as a server allowing remote configuration and data acquisition via a platform independent TCP/IP interface. The Ethernet Interface comes fully integrated in the LPM-2K, with interface cable 6 m long.
- Joystick for fast manual positioning and alignment, cable length 3 m.
- Zoom telescope with 3 x 20 magnification.
- RS422 interface card, necessary when using a Desktop PCI or Notebook PCMCIA.
- Heavy-duty carrying case with 3 hinged handgrips and wheels, splash-water proof, foam-lined to fit shape of LPM-2K, battery, charger, and accessories.
Dimensions 820 x 520 x 290 mm
- Adjustable tribrach, extra stable quality, with bubble level, for mounting the LPM-2K on a tripod.
- Stable, professional tripod.
- Tripod star for smooth surfaces.
- Holding device for Laptop, adjustable, fitting onto tripod.
- PbGel rechargeable battery, 12 V, 12 Ah, with fuse.
- Adapter cable for power supply with plug for cigarette lighter and banana plugs.
- Automatic charger for PbGel rechargeable battery, 230 V or 110 V AC, display of charge status, short circuit proof.

Information contained herein is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by RIEGL for its use. Technical data are subject to change without notice. Data sheet, LPM-2K, 10/2002



RIEGL
LASER MEASUREMENT SYSTEMS

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, A-3580 Horn, Austria
Tel.: +43-2982-4211, Fax: +43-2982-4210, E-mail: office@riegl.co.at
RIEGL USA Inc., Orlando, Florida 32819, USA
Tel.: +1-407-248-9927, Fax: +1-407-248-2636, E-mail: info@rieglusa.com
RIEGL Japan Ltd., Tokyo 1640013, Japan
Tel.: +81-3-3382-7340, Fax: +81-3-3382-5843, E-mail: office@riegl-japan.co.jp
RIEGL Scandinavia AB, 64025 Julika, Sweden
Tel.: +46-150-91583, Fax: +46-150-91581, E-mail: swarovski-op3k@riegl.se

2. 法國 Trimble 公司所製作之 GS200 雷射掃描儀儀器規格簡介



KEY FEATURES

- Versatile, portable, and easy-to-use
- 360° indoor and outdoor scanning
- 700 m addressability
- Real-time true-color acquisition
- Integrated Surveying™ solution with GPS and optical total station data



BROADER BUSINESS OPPORTUNITIES

The Trimble® GS Series™ 3D Scanner captures coordinates and texture data through leading-edge technology and unique features, creating opportunities for surveying activities not possible with traditional methods or low-performance scanners. The GS Series offers extreme versatility to meet the challenges of many existing and new market opportunities. It guarantees data sets that underpin advanced and compelling deliverables via Trimble's 3D data-editing office software.

UNIQUE, POWERFUL FEATURES

Some of the powerful features offered by the GS Series include motorized indoor and outdoor scanning through 360°, and optimized performance up to 200 m (Trimble GS200™). Trimble's unique OverScan™ technology enables data capture up to 350 m (Trimble GS200).

On-board video technology provides real-time true-color acquisition, panoramic snapshot capability for enhanced scene framing, and multiple zoom factors for high-resolution image acquisition.

INCREASED PRODUCTIVITY

The GS Series' accuracy and speed, along with flexible automatic or user-definable scan parameters, can save up to 80% of time and labor resources in many surveying applications, particularly when combined with Trimble's 3D data-editing office software. With the GS Series' top adaptor, experience Trimble's Integrated Surveying solution, which combines scanning, GPS, and optical total station data for exceptional efficiency in the field and office.

Because it is compact and lightweight with fast set-up, the GS Series is extremely maneuverable in the field. One-person operation is possible, which saves labor costs even further.

The system is also WiFi-ready, and can be controlled by the Trimble Recon™ controller running the Microsoft® Pocket PC operating system. Run Trimble data collection software together with any other Pocket PC applications designed to enhance your business.

FAST RETURN ON INVESTMENT

The Trimble GS Series 3D Scanner is ideal for everyday use in a variety of applications, so you can achieve return on your investment quickly.

Further ensure your rate of return with industry-leading on-board intelligence. It offers enhanced data pre-processing, customizable parameter setting, auto-focus management, and dynamic filtering. And stay up-to-date on these and other functionalities with regular high-level firmware upgrades.



TRIMBLE GS SERIES 3D SCANNER

THE TRIMBLE GS200 AND TRIMBLE GS101 3D SCANNERS

Figures shown are for the Trimble GS200. Figures for the Trimble GS101™ are shown in parentheses.

GENERAL

Instrument type Long-range laser mapping system
 Metrology method Time of flight
 User interface Trimble Recon, Notebook PC
 Data interface Network TCP/IP, Wireless WiFi (optional)

SYSTEM PERFORMANCE

Addressability 700 m (400 m)
 Range using OverScan 2-350 m (200 m)
 Standard range 2-200 m (100 m)
 Scanning speed up to 5000 points per second
 Standard deviation

Trimble GS200 and Trimble GS101						
Range (m)	5	25	50	100	150*	200*
Typical value ² (mm)	1.4	1.4	1.4	2.5	3.6	6.5
99% albedo						

Multishot yes: user-definable number of shots per point
 Minimum resolution 3 mm @ 100 m (32 µrad)
 Field of view
 Horizontal 360°
 Vertical 60° (angle included)
 Laser type pulsed
 Laser color green
 Safety Class 2 (21 CFR §1041.10) / Class 3R (IEC 60825-1)
 Laser beam diameter 3 mm @ 50 m
 Autofocus yes
 On-board video 768 x 576 color resolution
 real-time video transmission
 Video zoom factor up to 5.5 times
 Video snapshot yes: automatic picture mosaic
 9 megapixels max. resolution
 Point capture modes X Y Z
 X Y Z, point orientation
 X Y Z, returned intensity (8 bits – 256 grayscale)
 X Y Z, RGB true color (8 bits per channel)
 X Y Z, orientation, returned intensity, RGB true color
 Geo-referencing yes: using standard surveying tripod

PHYSICAL

Scanner
 Dimensions 340 mm D x 270 mm W x 420 mm H including handles
 Weight 13.6 kg (29.9 lb)

Power Supply Unit
 Dimensions 105 mm D x 200 mm W x 65 mm H
 Weight 1.5 kg (3.3 lb)

Transportation Box
 Dimensions 645 mm D x 490 mm W x 435 mm H (airline checkable)
 Weight 12.8 kg (28.2 lb)

Environmental
 Operating temperature 0 °C to 40 °C
 Storage temperature -20 °C to 50 °C
 Sealing IP53
 Shock 2M2 / M3 transportation standard compliant
 Humidity non-condensing atmosphere

Electrical
 Power supply AC 90 V AC-240 V AC, 50 Hz-60 Hz
 DC 24 V, nominal

Standard Accessories

Transportation transportation case (airline checkable)
 Protective window cover
 Registration targets 50 Trimble reflective targets (adhesive)
 Power AC Power supply
 Cables AC and DC power cords
 Ethernet-to-Notebook or Ethernet-to-Trimble Recon
 Trimble 3D Scanner Field Software Kit³ Trimble Recon, Notebook PC

Options

Additional registration targets Pack of 10 Trimble reflective targets
 (adhesive)
 Car battery cable kit 10 m
 Backpack

Operating System Requirements

Trimble Recon³
 Operating system Microsoft Pocket PC
 Processor 400 MHz Intel PXA250 XScale CPU
 RAM 64 MB SDRAM, 128 MB Flash storage or higher
Notebook PC
 Operating system Microsoft Windows® XP
 (Professional or Home edition, SP1 or higher)
 Windows 2000 (SP2 or higher), Windows NT 4.0 (SP6)
 Processor 1 GHz Pentium III or similar
 (2 GHz Pentium IV or higher recommended)
 RAM 256 MB (1 GB or higher recommended)
 Display 64 MB 3D Open GL graphic board
 (128 MB or higher recommended)

© 2005, Trimble Navigation Limited. All rights reserved. Trimble and the Globe & Triangle logo are trademarks of Trimble Navigation Limited, registered in the United States Patent and Trademark Office and in other countries. GS101, GS200, GS Series and OverScan are trademarks of Trimble Navigation Limited. Sironi is a trademark of Tripod Data Systems, Inc., a wholly owned subsidiary of Trimble Navigation Limited. Microsoft and Windows are either registered trademarks or trademarks of Microsoft Corporation in the United States and/or other countries. All other trademarks are the property of their respective owners. Reorder #N02252-1134 (A805)

1 Trimble GS200 only. Not applicable to Trimble GS101.
 2 Figures given for standard data capture of four shots, on distance measurement.
 3 The software is also compatible with HP iPAQ Pocket PC with Netpass by Neat.

Specifications subject to change without notice.



NORTH AMERICA
 Trimble Engineering &
 Construction Group
 5475 Kellenburger Road
 Dayton, Ohio 45424-1099 • USA
 800-538-7800 (Toll Free)
 +1-937-245-5154 Phone
 +1-937-233-9441 Fax

EUROPE
 Trimble GmbH
 Am Prime Parc 11
 65479 Raunheim • GERMANY
 +49-6142-2100-0 Phone
 +49-6142-2100-550 Fax

ASIA-PACIFIC
 Trimble Navigation
 Singapore Pty Limited
 80 Marine Parade Road
 #22-06, Parkway Parade
 Singapore 449269 • SINGAPORE
 +65-6348-2212 Phone
 +65-6348-2232 Fax



附錄二 現行有關退縮距離之法令

建築技術規則內現行有關退縮距離之法令如下：

第二百六十二條

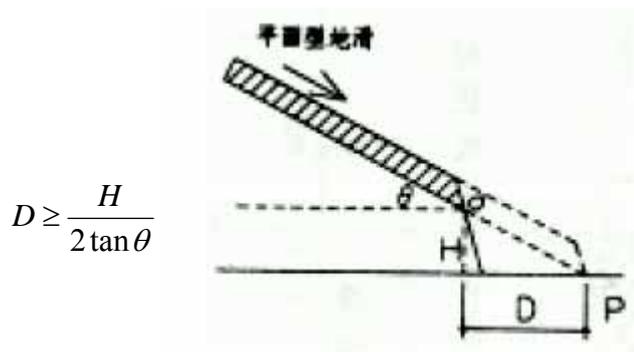
山坡地有左列各款情形之一者，不得開發建築。但穿過性之道路、通路或公共設施管溝，經適當邊坡穩定之處理者，不在此限：

一、坡度陡峭者：所開發地區之原始地形應依坵塊圖上之平均坡度之分布狀態，區劃成若干均質區。在坵塊圖上其平均坡度超過百分之三十者。但區內最高點及最低點間之坡度小於百分之十五，且區內不含顯著之獨立山頭或跨越主嶺線者，不在此限。

二、地質結構不良、地層破碎或順向坡有滑動之虞者：

(一) 順向坡傾角大於二十度，且有自由端，基地面在最低潛在滑動面外側地區。圖示如左：

(二) 自滑動面透空處起算之平面型地滑波及範圍，且無適當擋土設施者。其公式及圖式如左：



D ：自滑動面透空處起算之波及距離 (m)。

θ ：岩層坡度。

H ：滑動面透空處高度 (m)。

第二百六十四條

山坡地地面上之建築物至擋土牆坡腳間之退縮距離，應依左列公式計算：

一、擋土牆上方無構造物載重者：

$$D_1 \geq \frac{H}{2}(1 + \tan \theta)$$

二、擋土牆上方有構造物載重者：

$$D_2 \geq \frac{H}{2} \left(1 + \tan \theta + \frac{2Q}{r_1 H^2} \right)$$

三、擋土牆後方為順向坡者：

$$D_3 \geq \frac{H}{2} \left(1 + \tan \theta + \frac{2Q}{r_1 H^2} \right) + \frac{3L}{H} \left(\frac{2H \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} - C \right)$$

D_1 、 D_2 、 D_3 ：建築物外牆各點與擋土牆坡腳間之水平距離（m）。

H ：第一進擋土牆坡頂至坡腳之高度（m）。

θ ：第一進擋土牆上方邊坡坡度。

Q ：擋土牆上方 D_1 範圍內淺基礎構造物單位長度載重（t/m）。

r_1 ：牆背填土單位重量（t/m³）。

C ：順向坡滑動界面之抗剪強度（t/m²）。

L ：順向坡長度（m）。

第二百六十五條

基地地面上建築物外牆距離高度一點五公尺以上之擋土設施者，其建築物外牆與擋土牆設施間應有二公尺以上之距離。但建築物外牆各點至高度三點六公尺以上擋土設施間之水平距離，應依左列公式計算：

$$D \geq 2 + \frac{H - 3.6}{4}$$

H：擋土設施各點至坡腳之高度。

D：建築物外牆各點及擋土設施間之水平距離。

附錄三 回彈參數建議表

回彈參數建議表(Rocscience)

<i>RN (Normal)</i>				<i>RT (Tangential)</i>				<i>Type</i>	<i>Verification</i>
<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>Standard Deviation</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>Standard Deviation</i>		
0.370	0.420			0.870	0.920			Hard surface paving	Tested using simulated rockfalls of similar size and shape of a previous rockfall.
0.330	0.370			0.830	0.870			Bedrock or boulders with little soil or vegetation	
0.300	0.330			0.830	0.870			Talus with little vegetation	
0.300	0.330			0.800	0.830			Talus with some vegetation	
0.280	0.320			0.800	0.830			Soft soil slope with little vegetation	
0.280	0.320			0.780	0.820			Vegetated soil slope	
		0.315	0.064			0.712	0.116	Limestone face	Tested on restoration-blasting slopes made of four types of materials; blast-generated rock fragments, partially vegetated scree on berms, uncovered blast piles, and vegetated quarry waste.
		0.303	0.080			0.615	0.170	Partially vegetated limestone scree	
		0.315	0.064			0.712	0.116	Uncovered limestone blast pile	
		0.251	0.029			0.489	0.141	Vegetated covered limestone pile	
		0.276	0.079			0.835	0.087	Chalk face	
		0.271	0.018			0.596	0.085	Vegetated chalk scree	
		0.384	0.133			0.687	0.130	Wood platform slope at 45 degrees was used as a control for the field tests they did.	Tested as control parameters
		0.200				0.530		Dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus desposits	Consisted of hand made throws and free fall tests by fragmentation of rock using explosives, of dolomitic limestone boulders on

山坡地社區落石災害防治研究

		0.100				0.200	Remolded pyroclastic from the terraces situated at the base of the cliff	rocky surfaces and on talus deposit of the landslide fans. Also used back-analysis, and information from Urciuoli.
		0.000				0.240	Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff	
		0.393				0.567	Soil	Tested by dropping 3 to 5 cm cuboid and angular granite rock fragments onto slopes
		0.453				0.737	Shotcrete	
		0.487				0.910	Rock slope	
		0.500				0.950	Bedrock	Referenced from tests carried out by Barbieri et al.
		0.350				0.850	Bedrock covered by large blocks	
		0.300				0.700	Debris formed by uniform distributed elements	
		0.250				0.550	Soil covered by vegetation	
		0.530				0.990	Clean hard bedrock	
		0.400				0.900	Asphalt roadway	
		0.350				0.850	Bedrock outcrops with hard surface, large boulders	
		0.320				0.820	Talus cover	
		0.320				0.800	Talus cover with vegetation	
		0.300				0.800	Soft soil, some vegetation	
0.370	0.420						Smooth hard surfaces and paving	Developed by observation and literature review
0.330	0.370						Most bedrock and boulder fields	
0.300	0.330						Talus and firm soil slopes	
0.280	0.300						Soft soil slopes	

附錄三 回彈參數建議表

				0.870	0.920			Smooth hard surfaces such as pavement or smooth bedrock surfaces	
				0.830	0.870			Most bedrock surfaces and talus with no vegetation	
				0.820	0.850			Most talus slopes with some low vegetation	
				0.800	0.830			Vegetated talus slopes and soil slopes with sparse vegetation	
				0.780	0.820			Brush covered soil slope	
		0.530	0.040			0.990	0.040	Clean Hard Bedrock	a) rolled many rocks down the slope to verify used values b) comparison to historical rockfall events at site
		0.350	0.040			0.850	0.040	Bedrock outcrop	
		0.320	0.040			0.820	0.040	Talus cover	
		0.320	0.040			0.800	0.040	Talus with vegetation	
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving	
		0.530	0.040			0.990	0.040	Clean Hard Bedrock	default program values used
		0.350	0.040			0.850	0.040	Bedrock outcrop	
		0.480	0.190			0.530	0.170	Concrete	inverse calculation of paths - standard deviations seemed to large
		0.470	0.300			0.550	0.230	Weathered Rock	
		0.480	0.000			0.530	0.000	Concrete	inverse calculation of paths, roughness of 7.9 degrees for concrete, 9.3 for rock
		0.470	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock	
		0.850	0.000			0.530	0.000	Concrete	inverse calculation of paths
		1.000	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock	
		0.530	0.040			0.990	0.040	Bedrock	Estimation, block diameters 10 to 30 cm
		0.500	0.060			0.700	0.060	Blockfield	
		0.500	0.060			0.650	0.060	Blockfield with bushes and small trees	

山坡地社區落石災害防治研究

		0.500	0.060			0.500	0.060	Blockfield with forest	
		0.300	0.060			0.800	0.060	Top-soil with vegetation	
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving	
		0.350	0.040			0.850	0.040	Gravel road	
		0.500				0.800		Sparsley forested slope is covered by a veneer of very fine weathered talus derived from weak shistose units underlying the limestone cap.	Calculated from historic rockfall
		0.500				0.800		Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments with a modal size of 5 cm.	Calculated from historic rockfall
		0.700				0.900		rectangular bolder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf.	Calculated from historic rockfall

(資料來源：Rocscience)

回彈參數建議表(國外研究)

Reference	Value for R_v	Value for R_n	Value for R_t	Type of material on slope surface
Piteau and Clayton (from Pasquero (1987))		0.65 - 0.75	0.8 - 0.9	Solid rock
		0.45 - 0.65	0.5 - 0.8	Detrital material mixed with large rock boulders
		0.35 - 0.45	0.4 - 0.5	Compact detrital material mixed with small boulders
		0.2 - 0.3	0.2 - 0.4	Grass covered slopes
Hoek (1987) (based on unpublished information from DOT in USA)		0.53	0.9	Clean hard bedrock
		0.40	0.90	Asphalt roadway
		0.35	0.85	Bedrock outcrops with hard surface, large boulders
		0.32	0.82	Talus cover
		0.32	0.80	Talus cover with vegetation
Pfeiffer, Bowen, (1989) T.J., T.D.		0.37 - 0.42	0.87 - 0.92	Hard surface paving
		0.33 - 0.37	0.83 - 0.87	Bedrock or boulders with little soil or vegetation
		0.3 - 0.33	0.83 - 0.87	Talus with little vegetation
		0.3 - 0.33	0.8 - 0.83	Talus with some vegetation
		0.28 - 0.32	0.8 - 0.83	Soft soil slope with little vegetation
		0.28 - 0.32	0.78 - 0.82	Vegetated soil slope
Robotham, Wang, Walton, G. (1995) M.E., H.,		0.315	0.712	Limestone face
		0.303	0.615	Partially vegetated limestone scree
		0.315	0.712	Uncovered limestone blast pile
		0.251	0.489	Vegetated covered limestone pile
		0.276	0.835	Chalk face
Budetta, P., Santo, A.		0.2	0.53	Dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus desposits
		0.1	0.2	Remolded pyroclastic from the terraces

		0	0.24	Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff
Chau, K.T., Wong, R.H. C., Lee, C.F. (1996)	0.393			Soil
	0.453			Shotcrete
	0.487			Rock slope
Giani, G.P. (1992)	0.5			Bedrock
	0.35			Bedrock covered by large blocks
	0.3			Debris formed by uniform distributed elements
	0.25			Soil covered by vegetation
Pfeiffer, T.J., Higgins, J.D. (1990)		0.37 - 0.42		Smooth hard surfaces and paving
		0.33 - 0.37		Most bedrock and boulder fields
		0.3 - 0.33		Talus and firm soil slopes
		0.28 - 0.3		Soft soil slopes
			0.87 - 0.92	Smooth hard surfaces such as pavement or smooth bedrock surfaces
			0.83 - 0.87	Most bedrock surfaces and talus with no vegetation
			0.82 - 0.85	Most talus slopes with some low vegetation
			0.8 - 0.83	Vegetated talus slopes and soil slopes with sparse vegetation
Hungry, O. Evans, S.G. (1988)		0.5	0.8	Sparsely forested slope is covered by a veneer of very fine weathered talus derived from weak shistose units underlying the limestone cap.
		0.5	0.8	Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments with a modal size of 5 cm.
		0.7	0.9	Rectangular bolder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf.

(資料來源：本計畫蒐集)

附錄四 第一次專家座談會議記錄

財團法人中興工程顧問社

召開中興工程顧問社辦理內政部建築研究所『山坡地社區落石災害防治研究』專案計畫第一次專家座談會議。

一、主題：『山坡地社區落石災害防治研究』

二、時間：95年6月14日（星期三）上午10時正

三、地點：中興工程顧問社大地工程研究中心會議室

（台北市逸仙路26巷7號B1）

四、主持人：冀樹勇經理

五、記錄：翁孟嘉博士

六、出席學者專家：

內政部建築研究所：陳建忠組長、李怡先博士

專家學者：台灣大學土木系林銘郎教授

營建研究院李維峰副院長

中興社：李國榮研究員

七、主辦單位：財團法人中興工程顧問社

八、研究團隊：冀樹勇經理、高憲彰副理、顧承宇博士、翁孟嘉博士、林金成研究員

專家學者意見	回覆
<p>林銘郎教授</p> <p>(1) 計畫中所使用之「危險度等級」建議改為「健康等級」加以替代，以免造成社區住戶之困擾。</p> <p>(2) 台北市政府所進行之「30 個危險聚落之分期拆除」計畫，建議本計畫可進行其社區邊坡安全評估以增加其計畫之正當性。</p> <p>(3) 建議加強工程地質於邊坡落石問題之重要性。</p> <p>(4) 凌雲禪寺與內湖金龍寺之順向坡也有邊坡落石之問題，建議可加以參考。</p>	<p>(1) 遵照辦理，計畫中之「危險度等級」均使用「健康等級」一詞。</p> <p>(2) 本研究擬定完成之山坡地社區落石災害評估準則，後續將選擇部分台北市政府現有之危險聚落進行評估。</p> <p>(3) 遵照辦理，本研究將於後續報告中檢討落石邊坡之現存地質構造，並加強解釋地質構造與邊坡落石之關聯性。</p> <p>(4) 遵照辦理，本研究團隊將擇期進行現勘加以瞭解。</p>
<p>李維峰副院長</p> <p>(1) 本計畫之經費與執行時程相當短，工作量亦相當多，執行單位著屬不易。</p>	<p>(1) 感謝李副院長肯定本研究。</p> <p>(2) 遵照辦理，本研究將於後續報告中建立評估流程圖。</p>

<p>(2) 建議本計畫建立一評估流程，包含資料蒐集、風險評估、設計、防護工法等。</p> <p>(3) 本計畫所採用之 3D 雷射掃描建議依據使用手冊描述其掃描精度並與 Lidar, Total station 等加以比較。</p> <p>(4) 本計畫有關防護工法部分，營建研究院目前有 4 個案例，可供參考。</p>	<p>(3) 遵照辦理，本研究將於報告中描述其掃描精度並增列相關比較說明。</p> <p>(4) 感謝李副院長協助相關資料收集。</p>
<p>李怡先博士</p> <p>(1) 過去有關邊坡落石問題多與道路災害有關，建議本計畫內容應多強調過去社區落石災害案例。</p> <p>(2) 本計畫所擬定之評估準則應與道路所採用之準則有所區隔，準則需考慮台灣地區本土化之地質與地形特性。</p> <p>(3) 請加強本期工作成果與預期成果之關聯。</p>	<p>(1) 遵照辦理，本研究將於報告中加強收集台灣地區社區落石災害案例。</p> <p>(2) 遵照辦理，相關評估準則研擬將進行評估比較以擬定適用於台灣地區之準則。</p> <p>(3) 遵照辦理，本研究將於報告中加強工作成果與預期成果之關聯性描述。</p>

--	--

附錄五 第二次專家座談會議記錄

財團法人中興工程顧問社

召開中興工程顧問社辦理內政部建築研究所『山坡地社區落石災害防治研究』專案計畫第二次專家座談會議。

一、主題：『山坡地社區落石災害防治研究』

二、時間：95年10月14日（星期六）上午10時正

三、地點：中興工程顧問社大地工程研究中心會議室

（台北市逸仙路26巷7號B1）

四、主持人：冀樹勇經理

五、記錄：李國榮先生

六、出席學者專家：

內政部建築研究所：陳建忠組長、李怡先博士

專家學者：華梵大學環境設計與防災學系陳修主任

三合技術工程 蔡道賜博士

前聯合大地工程副總(土木技師)王文禮先生

中興社：冀樹勇經理、高憲彰副理、顧承宇博士、林金成研究員、李國榮研究員

七、主辦單位：財團法人中興工程顧問社

八、研究團隊：冀樹勇經理、高憲彰副理、顧承宇博士、翁孟嘉博士、林金成研究員

專家學者意見	回覆
<p>陳修主任</p> <p>(1) 本計畫內容豐富詳實，在僅十個月之執行時程內能加以完成，卓實不易。</p> <p>(2) 落石分析時之參數決定宜有一合宜之推估方法，如彈性係數之決定等。</p>	<p>(1) 感謝陳主任對本研究之肯定。</p> <p>(2) 本計畫因計畫屬性與經費規模並未編列相關現地或室內試驗以決定分析參數，惟各參數之決定多依循目前國內外相關現地或室內試驗之結果加以推估，另有關彈性係數之部分因落石本身之變形性極低，幾乎為剛性塊體，故本研究分析中所採用之彈性係數係以考慮砂岩之彈性係數加以分析。</p>
<p>王文禮先生</p> <p>(1) 本計畫之工作內容相當多，能在設定預算之內完成計畫，且內容十分完整，實屬不易。</p> <p>(2) 本計畫於落石來源勘查時，應建議加強工程地質於邊坡落石問題之重要性，並結合地質專業人員進行弱面方位之量測與地質判釋，如此對於該邊坡之落石災害潛勢與後續是否會持續產</p>	<p>(1) 感謝委員本研究之肯定。</p> <p>(2) 感謝委員之建議，本研究團隊對於加強工程地質於邊坡落石問題之議題亦有同感，因此於報告中對於各社區落石邊坡案例分析時，特別於區域地質與相關構造加以描述，另也於人員可及之情形下在現地落石來源之</p>

<p>生落石將有助益。</p> <p>(3) 本計畫三維掃描之精度似已可掃描出弱面之位置等相關資訊，是否可輔助地質判釋工作。</p> <p>(4) 本計畫之落石分析程式部分已可考量落石形狀之影響，惟目前仍屬二維分析，國外目前似乎已有三維分析程式，是否有機會能加以引進。</p>	<p>地質露頭進行地質勘查與拍照以評估落石災害潛勢。</p> <p>(3) 同意委員意見，本計畫三維掃描之精度已可輔助地質弱面位置之判釋工作，同時也已應用於本研究之案例分析之中。</p> <p>(4) 本計畫之落石分析程式係採用二維分析。有關三維分析程式目前國際上均屬發展階段且應用尚不十分普遍，本計畫係山坡地社區落石災害防治之前導性質計畫，限於執行時程與經費限制，故於本計畫階段並未提出三維之分析工作，惟未來若有機會將持續針對落石問題之三維分析加以引進與研究。</p>
<p>蔡道賜博士</p> <p>(1) 本計畫之經費與執行時程相當短，工作量亦相當多，執行單位著屬不易。</p> <p>(2) 山坡地社區防災問題，相當重要，相關坡地社區之資料庫之建立工作建議應於未來持續加以推動。</p>	<p>(1) 感謝委員本研究之肯定。</p> <p>(2) 同意委員意見，未來若有相關工作需求，中興社將持續提供服務以協助資料庫之建立。</p>

<p>陳建忠組長</p> <p>(1) 本計畫落石案例分析時是否應考慮邊坡粗糙度、落石形狀、邊坡形狀效應之影響。</p> <p>(2) 本計畫於三維掃描時若遭遇遮蔽，應如何加以解決。</p> <p>(3) 本計畫對於建築物退縮問題之研究已發現部分法規之不足(如 262 條等)，未來可持續針對此問題結合建研所加以廣泛討論與</p>	<p>(1) 感謝陳組長所提供之指正意見，有關邊坡粗糙度、落石形狀、邊坡形狀效應之影響說明如下。(a)邊坡粗糙度影響：本研究係藉由廣泛蒐集國內外有關回彈係數之試驗結果進行歸納，之後才將不同邊坡材質之回彈係數放入分析中進行分析。(b)落石形狀影響：本研究係以 DDA 程式進行分析，同時考慮不同落石形狀影響並進行結果比較與討論。(c)邊坡形狀影響：本研究係以三維雷射掃描建立邊坡幾何，並經後處理以得到高精度之分析剖面，所獲取之落石邊坡形狀應是目前現有技術所能達到之最佳精度。</p> <p>(2) 三維掃描時遭遇遮蔽時，若於必要情形下，本研究即將三維雷射掃描儀放置於不同位置再次掃描被遮蔽處之邊坡幾何。至於樹高遮蔽部分，本研究則利用製作完成之數值地形模型加以修正樹高，以得到真實之地形面。</p> <p>(3) 本研究之成果顯示，針對建築物因落石問題所需退縮距離分析，現行法規在陡坡情形下(坡度由 80 度趨近 90 度)，退縮距離趨近於 0，對於有</p>
--	--

<p>推動後續相關法規檢討工作。</p>	<p>落石潛勢之陡坡之退縮距離明顯不足。惟修訂與檢討法規工作並非本研究團隊之工作範圍，故對於建研所後續相關工作之推動，中興社之工作團隊將持續予以協助。</p>
<p>李怡先博士</p> <p>(1) 有關建築物退縮問題後續相關法規檢討工作，未來是否可請中興社協助推動相關技術支援工作。</p> <p>(2) 本計畫之結論與建議應結合原提出之工作項目加以對應。</p>	<p>(1) 同意委員意見，未來若有相關工作需求，中興社將持續協助推動相關技術支援工作。</p> <p>(2) 遵照辦理，本研究結論與建議已與原提出之工作項目加以對應結合。</p>

附錄六 期中審查意見

一、主題：『山坡地社區落石災害防治研究』

二、時間：95年7月3日（星期一）上午9時30分

三、地點：內政部建築研究所會議室

四、主持人：陳建忠組長

五、記錄：林金成先生

六、出席學者專家：

內政部建築研究所：陳建忠組長、李怡先博士

專家學者：

邱昌平教授

陳宏宇教授

陳建謀教授

中央地質調查所黃健政組長

國家災害房救科技中心張志新先生

台灣省大地技師工會傅文鵬先生

中興社：冀樹勇經理、高憲彰副理、顧承宇博士、葛文忠研究員、林

金成研究員

專家學者意見

丘顧問昌平：

1. p.26 中 DTM 是數值地形模型，DEM 是數值高程才對。(又，分離元素法也較 DEM?)
2. 本研究參考 RHRS，MORHRS，TennRMS.....等評估系統後，你選定合適之評估項目再建立一合適的落石災害危險度評估準則。建議區分簡易評估與詳細評估兩種。
3. 災害案例的調查，移有平面圖與剖面圖等之描繪。又，對建築物之危害與對出入道路之危害等宜分開評估。
4. P.36 表 3.1 中之評估結果◎、×、△意義為何？
5. 防護工法研究中宜加入①”易地為良”，②上坡或下坡面有沒有可能影響落石？工程施工？(需經查調查)

傅文鵬 (台灣省大地技師工會)：

1. 落石災害評估 RHRS 各項評分因子如何分級評分，可否進一步說明，且本計劃是以坡地社區為對象，其中對於保全對象之生命財產因子是否有列入考量？
2. 針對落石災害之防護方式與工法其適用與限制條件可否進一步說明。
3. 落實研究案例以台灣之特殊地質條件除常見之岩坡外，上有台地邊緣礫石邊坡之落石災害，研究之成果是否適用於台歪之地質特性，另是否有礫石邊坡落石之研究案例？

陳宏宇教授：

1. 文獻參考資料不足應補強

2. 數值模擬分析應與現地地貌表徵相互配合驗證
3. 沉積岩、火成岩、變質岩等不同岩性之落石災害應一並討論
4. 引用文獻應更嚴謹

黃健政組長(地調所)：

1. 請說明進行現地驗證 2 處社區如何選定
2. 請說明評估準則中有關地形、地質構造、土地利用等如何量化
3. 本研究是採集塊質量法不連續變形分析法或分離元素法請釐清
4. 報告章節編號沒有系統，應改編以加強可讀性

張志新先生(國家災害房救科技中心)：

1. 文獻資料收集完整且詳列於參考文獻中
2. 採用 3D 雷射測距儀建立精密 DTM，提供落石崩塌研究的重要基礎資料
3. 其中報告未見研究執行過程，只見 ch3 初步研究發現。應該補充說明
4. 落石危險度評分系統(RHRS) P.35 只見部分文獻回顧，應分析比較不同方法之優劣，建立合適之評分系統。另外建議『山坡地社區落石災害評估準則』能另編成冊提供參考使用
5. P.35 ch3 (2)評估項目應建立評估表格、評估方式、流程標準以提供潛在落石社區使用
6. ch3 (3) 由 13 處選中 2 處社區應詳述評估流程及標準
7. DDA 模式建立進度如何？應有 case 呈現；應用及評估方式
8. 3-D 雷射掃描的校核方式？

陳建忠組長 (建研所)：

1. 本所 96 年中科技計劃受國科會及專家詢及災害研究課題過於廣泛，宜有聚焦，本研究主題是山坡地社區，定位尚屬恰當，有關社區事宜以經發給開發許可或大型聚落住戶達一定數量以上者，其範圍可參考營建署在林肯大竣災後所建坡地社區之定義。
2. 而本案所示照片少具有上開社區落災者，反而是在河道公路，所提供的研究模擬亦多在公路，請移重點至社區及應用。
3. 有些坡地落石的案例，似乎是開挖後之影響評估。

陳建謀教授：

1. 研究報告在前言中提及單月降雨量達 600 公釐以上往往造成邊坡破壞，落石災害產生，顯示降雨因素為落石災害之重要影響成因，建議進一步蒐集國內外相關研究文獻進行參考，以便於細部評分時能更具體及量化，此外，降雨量帶來更直接影響落石災害產生的因素應與土壤含水量以及地下水位水頭高度有密不可分的關係，知名的林肯大郡災變即是因擋土牆地下水位水頭過高引發坍塌，故建議將土壤含水量以及地下水位水頭監控值列入細部評分並參考國內外文獻建立判斷災害發生臨界值。

審查委員意見之綜合回覆

中興社計畫主持人對於「山坡地社區落石災害防治研究」一案各審查委員所提出之寶貴意見表示感謝之意，相關審查意見之綜合回覆如下：

1. 對於審查委員提出有關參考文獻不完整之部分，中興社在期末報告時將加強補充各參考文獻之引用來源，另陳宏宇教授提到應以 SCI 期刊之引用為主，本研究後續也將遵照辦理。
2. 有關各審查委員提出報告文字勘誤之部分，如 DEM 與 DTM 之更正，本研究後續於期末報告中將加以修正。
3. 審查委員提出「山坡地社區落石災害評估準則」可以「山坡地社區落石災害危險度評估準則」取代，本研究後續將一委員意見辦理。
4. 審查委員提出「山坡地社區落石災害評估準則」是否可量化及如何量化，本研究後續也將詳列「山坡地社區落石災害評估準則」之量化標準與評分方法。
5. 審查委員提出本計畫之主題內容相當廣泛，可考慮分年執行之可能性，本研究也將進一步與建研所討論後續之可能研究方向。
6. 審查委員提出有關落石防護工法之資料可加強，本研究後續於防護工法部分將加強資料收集彙總。
7. 另建研所李博士提出本研究之研究進度是否合乎原規劃進度，中興社回覆本研究目前之執行進度與原規劃進度相符。

附錄七 期末審查意見

一、主題：『山坡地社區落石災害防治研究』

二、時間：95年11月14日（星期二）上午9時30分

三、地點：內政部建築研究所會議室

四、主持人：陳建忠組長

五、記錄：葛文忠先生

六、出席學者專家：

內政部建築研究所：陳建忠組長、李怡先博士

專家學者：

邱昌平教授

陳建謀教授

陳宗禮先生

台灣省土木技師工會施國欽先生

台灣省大地技師工會林衍竹先生

中興社：冀樹勇經理、高憲彰副理、顧承宇博士、葛文忠研究員

專家學者意見	回覆
<p>陳建謀教授</p> <p>(1) 本計畫參考文獻多集中於 2000 年以前，參考文獻建議加入近期研究論文如：黃柏維，「EPS 之防災應用性探討」，以提供新型落石防撞材料之應用。</p>	<p>(1) 遵照辦理，將更新近期研究文獻。</p>
<p>邱昌平教授</p> <p>(1) 本研究之重點在擬定落石災害評估準則、建立落石分析模式、建立快速地形測量技術(三維雷射掃瞄)並建立數值地形模型、提出一般防護與防治工法、辦理社區落石案例分析(四處)，最後有一些具體成果。</p> <p>(2) 山坡地落石災害之評估宜由簡入繁(如現場勘查、過去落石災害之調查、訪談、勘查範圍及評估範圍之界定、簡易評估方法及評估準則之建立等)，最後才是本研究之詳細評估方法及準則。建議繪製評估流程圖。</p>	<p>(1) 感謝委員本研究之肯定。</p> <p>(2) 感謝委員意見，山坡地落石災害評估流程圖已補充於報告內。</p>

<p>(3) 災害防治不僅是工法、危險度分析，應另有一些防治措施：如在特殊地形地質作建築開發時建築師或建管單位應有之對策等。</p>	<p>(3) 感謝委員指教，山坡地落石災害防治措施之建議亦補充於報告之結論與建議章節。</p>
<p>陳宗禮先生</p> <p>(1) 山坡地落石災害往往發生於瞬間令人措手不及，所謂「坡面滑動可以花錢克服，落石則可瞬間要人命」，而災變之預防若無法預知則必無法預防，此大自然之災害唯有閃避一途，本研究對於利用三維雷射掃瞄技術預測危險區域界定十分有效，研究內容與用心值得肯定。</p> <p>(2) 山坡地落石災害發生區域非僅由坡面角度岩質或退縮距離來決定而以，對於界定「落石潛在危險區域」易十分重要，希望本研究能做為界定落石災害區域之有效方法並據以規範山坡地社區建築物之迴避距離。</p>	<p>(1) 感謝委員本研究之肯定。</p> <p>(2) 感謝委員指教，本研究引入三維雷射掃瞄技術之主要目的除建立快速地形量測技術外，另一目的便是界定落石災害區域，本研究同時亦建立落石分析之方法，對於未來山坡地社區落石問題之防治應有助益。</p>

<p>施國欽先生(台灣省土木技師工會)</p> <p>(1) 落石分析是否可針對預防工法進行安全係數分析。</p> <p>(2) 表 2-9 評分內容建議修正如下</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 節理方位改為弱面傾角 2. 閉合情形之開口改為 81 分 3. 抗差異侵蝕能力及差異侵蝕量在現場不易定量，是否改為坡面凹陷或是岩塊懸空。 4. 落石尺寸最好以註明岩塊最大邊長。 5. 評分總分最好能控制在 100 分，在分級比較好記。 <p>(3) 針對 264 條專章加一項「邊坡有落石之虞者」退縮距離之公式或圖表。</p>	<p>(1) 本研究中安全係數分析係用以驗證落石之滑動機制，其應用範圍侷限於落石本身尚未發生大變位時。而預防工法因涉及落石撞擊與大變位後之行為，目前並不適合安全係數之分析。</p> <p>(2) 感謝委員指教，表 2-9 評分內容將依據委員意見進行修正。惟有關評分總分部分，因原評分方式係依據 RHRS 之方式進行，且目前國內外相關研究均以此評分原則為主，故本研究有關評分總分部分仍以前人之研究成果進行。</p> <p>(3) 感謝委員指教，本意見已補充於報告之結論與建議章節。</p>
<p>林衍竹先生(台灣省大地技師工會)</p> <p>(1) 表 2-9 評分內容節理間距愈小危險度愈低，是否合理請考量。有關坡度之評分是否為平均坡</p>	<p>(1) 同意委員意見，「節理面」一詞已改為「不連續面」以涵蓋層面。</p>

<p>度，請考量。建議將「節理面」一詞改為「不連續面」以涵蓋層面。</p> <p>(2) 地面 LIDAR 對於坡面上之植生所造成之地形誤判如何消除，請考量。3 維影像就展示而言頗為眩麗，惟工程之實用上仍以回歸地形圖(等高線)為宜，請考慮 DTM 轉繪為地形圖之便利性。</p>	<p>(2) 感謝委員指教，地面 LIDAR 對於坡面上之植生所造成之地形誤判已於第四章之圖 4-16 與 4-17 中說明。本研究之 DTM 成果亦已包含地形圖(等高線)部分。</p>
---	---

參考書目

中文部分

- (1) 王豐仁 (1994) 玉山國家公園新中橫公路段之落石邊坡調查研究, 國立成功大學地球科學研究所碩士論文, 第 140 頁。
- (2) 王鑫 (1988) 地形學, 聯經出版社, 第 134 頁。
- (3) 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。
- (4) 王鑫、雷鴻飛 (1990) 第二條高速公路邊坡穩定研究(中和- 土城段), 國科會防災科技研究報告, 77-07 號, 第 33 頁。
- (5) 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。
- (6) 行政院農業委員會 (1992) 水土保持手冊。
- (7) 吳秉儒、田永銘、李崇正 (1994) 落石風險評估及案例分析。1994 岩盤工程研討會, 第 671-682 頁。
- (8) 李彪、施國欽 (1995) 台灣地區變質岩單壓強度初步研究, 第六屆大地工程研討會論文集, 台灣, 阿里山, 第 655-664 頁。
- (9) 林銘郎 (1995) 北橫公路榮華壩址附近邊坡穩定 (I), 行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告。
- (10) 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, 第 13-41 頁。
- (11) 施國欽、李彪 (1994) 台灣地區沈積岩單壓強度初步研究, 1994 岩盤工

程研討會論文集，台灣，中壢，第 219-228 頁。

- (12)張石角 (1986) 太極峽谷風景區災變個案之研究，工程環境學會特刊，第一號，第 5-20 頁。
- (13)張石角 (1987) 工址地質與工程環境評估，工程環境學會特刊，第二號，第 11-21 頁。
- (14)許琦、李德河、莊長賢 (1989) 模糊集理論在山崩潛感性分析之應用，第三屆大地工程學術研究討論會論文專集，第 23-33 頁。
- (15)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 20 卷，第 1 期，第 19-30 頁。
- (16)陳振華 (1985) 環境地質與坡地開發，第一屆大地工程學術研究討論會論文專集，第 261-279 頁。
- (17)陳培源、楊昭男 (1985) 大屯火山群及北部濱海地質簡介，台灣省教育廳，科學教育資料叢書畫(X)，第 132 頁。
- (18)游中榮 (1996) 應用地理資訊系統於北橫地區山崩潛感之研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，第 192 頁。
- (19)黃鎮臺 (1989) 落石災害之防治，能源、資源與環境，第二卷，第二期，第 66-68 頁。
- (20)黃鎮臺 (1992) 台灣崩塌防治之探討，地質防災研討會論文集，第 3-12 頁。
- (21)黃鎮臺、夏龍源 (1990) 北部濱海公路南雅公路段邊坡崩坍個案之研究，礦冶，34/4，第 89-94 頁。

- (22)黃鑑水、劉桓吉 (1988) 雙溪地質圖幅及說明書，比例尺五萬分之一，經濟部中央地質調查所，第 51 頁。
- (23)鄭元振 (1992) 地理資訊系統在區域邊坡穩定分析之應用－中橫公路天祥至太魯閣段，國立成功大學礦冶及材料科學研究所碩士論文，第 89 頁。
- (24)簡李濱 (1992) 應用地理資訊系統建立坡地安定評估之計量方法，國立中興大學土木工程研究所碩士論文，第 118 頁。
- (25)羅俊雄、葉超雄、葉永田、蔡益超 (1992) 台灣地區地震危害度分析及其分析方法研究，國立台灣大學工學院地震工程研究中心，第 136-137 頁。
- (26)交通部科技顧問室 (1997) 台灣區道路落石坍方之危險度分級準則及防治改善工法研究，國立台灣大學土木工程學研究所。
- (27)李濬易，2002，ROCKPATH 程式剛體版之試驗驗證與應用，碩士論文，私立中原大學土木工程研究所，中壢。
- (28)魏鎮東 (2001) 南橫公路邊坡落石坍方可能性之探討，國立台北科技大學土木工程系碩士論文。
- (29)陳凱詳 (2006) 三維落石運動軌跡之模型試驗及現地試驗，國立雲林科技大學營建工程系碩士論文。
- (30)顧承宇、翁孟嘉、高憲彰、陳建忠、李怡先，2006，“三維雷射掃描技術於岩坡落石分析之應用”，岩盤工程研討會論文集，台南，台灣。

外文部分

- (31)American Society for Testing and Materials, (1991),"Standard Test

Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rock (D4644-87)," Soil and Rock, Dimension Stone : Annual Book of ASTM Standards 4.08,ASTM,Philadelphia.

- (32)Azzoni, A. and de Freitas, M. H., (1995), Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis. Rock Mech. & Rock Engrg., v. 28, no. 2, p. 111~124.
- (33)Azzoni, A., Barbera, G. L., and Zaninetti, A., (1995), Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. Int., J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 32, no. 7, p.709~724.
- (34)Badger, T. C. and Lowell S. M., (1992), Rockfall Control in Washington State, Rockfall Prediction and Control and Landslide Case Histories, Transportation Research Record, No.1343, National Academy, Washington D. C., p.14-19.
- (35)Bozzolo, D., Pamini, R. and Hutter, K., (1988), Rockfall analysis - a mathematical model and its test with field data. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, v. 1, p. 555~560.
- (36)Brawner, C. O. (1993), Manual of Practice on Rockfall Hazard Mitigation Methods, Federal Highway Administration, Washington D. C.
- (37)Brunsden, D., Doorkamp, 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. Engrg. Geol., Vol.8, p227-253.
- (38)Budetta, P. and Santo, A. (1994), Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania (Southern Italy). Engineering Geology, v. 36, p. 197~210.
- (39)Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., and

- Reichenbach, P. (1991) GIS Techniques and Statistical Model in Evaluating Landslide Hazard: Earth Surface Processes and Landforms, 16, p. 427-445.
- (40) Descoeurdes, F. and Zimmerman, T. H. (1987), Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, v. 1, p. 337~342.
- (41) Evans, S. G. and Hungr, O., (1993), The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. Can. Geotech. J., v. 30, p. 620~636.
- (42) Fookes, P. G. and Sweeney, M., (1976), Stabilization and control of local rock falls and degrading rock slopes. Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 9, p. 37~55.
- (43) Franklin, J. A. and Chandra, A. , 1972, The Slake Durability Test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.9, p.325-341.
- (44) Gamble, J. C. ,1971, Durability-Plasticity Classification of Shales and other Argillaceous Rock, Ph.D. Thesis, University of Illinois. (間接引用自 Franklin & Chandra ,1972)
- (45) Gupta, R. P., and Joshi, B. C. (1990) Landslide Hazard Zoning Using the GIS Approach - A Case Study from the Ramganga Catchment, Himalayas: Engineering Geology, 28, p. 119-131.
- (46) Hearn, G. J. (1995) Landslide and Erosion Hazard Mapping at Ok Tedi copper mine, Papua New Guinea: Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, p. 47-60.
- (47) Hoek, E. and Bray, J. W., (1980), Rock Slope Engineering., 3rd, E and SF SPON, London, p. 358
- (48) Hoek, E., (1994), Acceptable Risks and Practical Decisions in Rock Engineering, p. 43~68.

- (49)Hucka, V. ,(1965), A Rapid Method of Determining the Strength of Rock in Situ. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 2, p.127-134.
- (50)Hungr, O. and Evans, S. G., (1988), Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, v. 1, p. 685~690.
- (51)International Society for Rock Mechanics, (1981), Rock Characterization Testing and Monitoring , ISRM Suggested Methods (Edited by E. T. Brown), Pergamon Press, Oxford ,p.92-94,97-102.
- (52)International Society for Rock Mechanics ,1985, Suggest Method for Determining Point-load Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, No.2, p.53-60.
- (53)Kao, T.C., Guo, W. S. and Wang, C. H. (1986), Stabilization of a Legendary Hanging Cliff. 13th ARRB/5th REAAA, Vol.13, part 3, Construction, Pavements and Materials, p.107-114.
- (54)Kazi, A. and Al-Mansour, Z. R. ,1980,"Empirical Relationship between Los Angeles Abrasion and Schmidt Hammer Strength Test with Application to Aggregates around Jeddah," Q. J. Eng. Geol., Vol.13, p.45-52.
- (55)Legget, R. F. and Karraw, P. F., (1983), Handbook of Geology in Civil Engineering: Rockfalls, McGraw-Hill, p.40-1~40-24.
- (56)Lin, M. L. and Jeng, F. S. (1996), Field trip Guide to the Stress Release Joints and Rockfall Hazard, 3rd Sino-British Geological Conference, Field Guidebook, p.43-54.
- (57)Mudge, M. R., (1965), Rockfall-avalanche and rockslide-avalanche deposits at sawtooth ridge, Montana. Geological Society of America Bulletin, v. 76, p.1003~1014.

- (58)O'Neill, A. L., (1963), Slope failures in foliated rocks, Butte County, California. Highway Research Board Record, v. 17, p. 40~42.
- (59)Paronuzzi, P., (1989), Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers. Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 22, p. 175~183.
- (60)Pierson, L. A. (1992), Rockfall Hazard Rating System, Control and Landslide Case Histories, Transportation research Record, No.1343, National Academy, Washington DC, p.6-13.
- (61)Pierson, L. A. and R. V. Vickle (1993), Rockfall Hazard Rating System Participant's Manual, Federal Highway Administration, Washington D. C.
- (62)Piteau, D. R. and Peckover, F. L. (1978), Engineering of Rock Slopes in Schuster, R. L. and Krizek R. J. eds. Landslide Analysis and Control, Transportation, Res. Board Nat. Ac. Sci., Washington Spee. Rep., p. 176.
- (63)Richards, L. (1992), Slope Stability and Rockfall Problems in Rock Masses. Engineering in Rock Masses, F. G. Bell, Butterworth Heinemann Ltd, Oxford, p.217-230.
- (64)Ritchie, A. M., (1963), Evaluation of rockfall and its control. Highway Research Board Record, v. 17, p. 13~28.
- (65)Romana, M. and Izquierdo, F. A., (1987), Reinforcement of slopes under Denia Castle (spines). Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, v. 1, p. 485~489.
- (66)Smith, M. J., (1994), Inspection and stabilization of the Mid-levels cliff, Hong Kong. Engineering Geology, v. 37, p. 295~308.
- (67)Spang, R. M. and Rautenstruch, R. W., (1988), Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications.

Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, v. 2, p. 1237~1243.

(68)Spang, R. M., (1987), Protection against rockfall - stepchild in the design of rock slopes. Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, v. 1, p. 551~557.

(69)Whalley, W. B. (1984), Rockfalls in Brunnsden, D. and Prior, D. B. eds. Slope Instability, John Wiley and Sons.