

計畫編號：113 保發-5.1-保-01-06-001(41)

---

**資料驅動下的隨機物質點法與崩塌地監  
測模式 - 以光華崩塌地為例**  
**Data-driven Stochastic Material Point  
Method and Landslide Monitoring Model  
– a Case Study in Guanghai**  
**(成果報告書)**

---

執行單位：國立臺灣大學生物環境系統工程學系

執行期間：中華民國 113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：廖國偉 教授

**農業部農村發展及農村水保署 編印**

**中華民國 113 年 12 月**

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)



## 摘要

邊坡穩定分析是山坡地治理規劃與防災極為重要的工作，分析結果可能作為工程設計和邊坡監測的依據。在邊坡穩定分析及崩塌潛勢判釋上，過去研究與實務多由極限平衡法和有限元素法之計算結果判斷，並以此計算安全係數作為邊坡穩定的指標。但由於極限平衡法和有限元素法無法完整的模擬邊坡的運動過程，因此，本研究採用物質點法模擬崩塌地破壞之過程，並結合蒐集到的現地資料且透過物理機制進行二維數值模型之模擬，以探討崩塌發生的機制、運動過程、影響範圍以及物質點法模擬對崩塌地監測之後續應用。除此之外，本研究以創新的角度，分析影響崩塌地致災之不確定性，進而針對崩塌引致因子（如地下水位等）進風險分析；同時，也藉由數值模型的模擬分析，回應現地監測儀器常因坡地滑動造成破壞以及管理的相關問題。

**關鍵詞：**大規模崩塌、物質點法、警戒值、監測儀器、不確定性

## **Abstract**

The stability analysis of slopes is critical in hillside management planning and disaster prevention, with analysis results often serving as a basis for engineering design and slope monitoring. Traditionally, both research and practice in slope stability analysis and landslide potential assessment have relied on the calculated outcomes of the limit equilibrium method (LEM) and finite element method (FEM), using the safety factor derived from these methods as an indicator of slope stability. However, as LEM and FEM cannot fully simulate the slope's movement processes, this study adopts the Material Point Method (MPM) to model the failure process of landslide-prone areas. By integrating field data and simulating a two-dimensional numerical model through physical mechanisms, the study investigates the mechanisms of landslide occurrence, movement processes, impact zones, and potential applications of MPM for subsequent monitoring of landslide sites. Additionally, this research takes an innovative approach to analyze the uncertainties influencing landslide hazards and conducts risk analyses of triggering factors (such as groundwater levels) related to landslides. Through numerical model simulations, it also addresses issues related to monitoring equipment frequently damaged by slope movements and the challenges in slope management.

**Keywords:** large-scale collapse, Material Point Method (MPM), warning values, monitoring instruments, uncertainty

# 目錄

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 摘要.....               | i   |
| Abstract .....        | ii  |
| 目錄.....               | iii |
| 表目錄.....              | vi  |
| 圖目錄.....              | vii |
| 第 1 章 前言.....         | 1   |
| 1.1 緣起與目的 .....       | 2   |
| 1.2 工作項目.....         | 3   |
| 第 2 章 工作執行方法 .....    | 6   |
| 2.1 背景.....           | 6   |
| 2.2 工作執行方法 .....      | 6   |
| 2.3 相關文獻蒐集 .....      | 7   |
| 第 3 章 研究區域現況資料 .....  | 15  |
| 3.1 地理基本資料 .....      | 15  |
| 3.2 地形基本資料 .....      | 16  |
| 3.3 地質狀況.....         | 18  |
| 3.4 光華崩塌地歷史災害事件 ..... | 19  |
| 3.5 現地監測設備 .....      | 22  |
| 3.6 地質鑽探結果 .....      | 24  |
| 第 4 章 數值方法介紹 .....    | 28  |
| 4.1 物質點法介紹 .....      | 28  |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 4.2 控制方程式 .....         | 29 |
| 4.3 物質點法之數值計算 .....     | 33 |
| 4.4 運算流程.....           | 35 |
| 4.5 Anura 3D 軟體介紹 ..... | 37 |
| 4.6 機率式邊坡穩定分析 .....     | 38 |
| 第 5 章 數值模型的建立 .....     | 42 |
| 5.1 挑選欲研究剖面 .....       | 42 |
| 5.2 建立邊坡幾何模型 .....      | 44 |
| 5.3 土壤參數.....           | 46 |
| 5.4 邊界條件.....           | 48 |
| 5.5 土壤表面之初始條件 .....     | 50 |
| 5.6 網格設定.....           | 50 |
| 5.7 剖面模型.....           | 52 |
| 第 6 章 數值模擬結果 .....      | 62 |
| 6.1 數值模擬結果驗證 .....      | 62 |
| 6.2 崩塌臨界位移 .....        | 66 |
| 6.3 可靠度分析中的變數挑選 .....   | 68 |
| 6.4 可靠度分析結果 .....       | 72 |
| 6.5 在不同情境下的崩塌風險 .....   | 80 |
| 6.6 監測儀器佈設之建議 .....     | 83 |
| 6.7 崩塌警戒值之訂定策略 .....    | 87 |
| 第 7 章 結論與討論 .....       | 90 |
| 第 8 章 工作進度與交付項目 .....   | 92 |
| 8.1 計畫甘特圖 .....         | 92 |

|                     |    |
|---------------------|----|
| 8.2 計畫交付項目 .....    | 93 |
| 參考文獻.....           | 95 |
| 附錄一 期中審查意見與回覆 ..... | 97 |
| 附錄二 期末審查意見與回覆 ..... | 99 |

## 表目錄

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 表 5-1 建立物質點法模型之土壤參數 .....         | 46 |
| 表 5-2 剖面 B-B'和剖面 C-C'之土壤參數 .....  | 56 |
| 表 6-1 常用變形量應變管理準則 .....           | 67 |
| 表 6-2 文獻中摩擦角的變異性 .....            | 71 |
| 表 6-3 文獻中凝聚力的變異性 .....            | 71 |
| 表 6-4 岩屑層 1 的隨機變數與統計數值 .....      | 72 |
| 表 6-5 岩屑層 2 的隨機變數與統計數值 .....      | 72 |
| 表 6-6 破碎頁岩層的隨機變數與統計數值 .....       | 72 |
| 表 6-7 岩屑層 1 的隨機變數與統計數值 .....      | 77 |
| 表 6-8 岩屑層 2 的隨機變數與統計數值 .....      | 77 |
| 表 6-9 破碎頁岩層的隨機變數與統計數值 .....       | 77 |
| 表 6-10 各剖面各關注點之可靠度分析結果 .....      | 78 |
| 表 6-11 不同地下水位之可靠度分析結果 .....       | 83 |
| 表 6-12 剖面 A-A'不同關注點之可靠度分析結果 ..... | 84 |
| 表 6-13 不同剖面不同關注點之可靠度分析結果 .....    | 87 |
| 表 6-14 不同門檻值之可靠度分析結果 .....        | 88 |
| 表 8-1 本計畫甘特圖 .....                | 92 |
| 表 8-2 計畫交付項目 .....                | 93 |

## 圖目錄

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 圖 2-1 工作流程圖 .....                        | 7  |
| 圖 3-1 光華崩塌潛勢區位置圖(BigGIS，2024).....       | 16 |
| 圖 3-2 光華崩塌潛勢區地形圖 .....                   | 17 |
| 圖 3-3 光華崩塌潛勢區地勢與保全對象圖 .....              | 17 |
| 圖 3-4 光華崩塌潛勢區地質圖 .....                   | 18 |
| 圖 3-5 光華崩塌潛勢區歷史山崩範圍(BigGIS，2024).....    | 19 |
| 圖 3-6 光華崩塌潛勢區空拍圖 .....                   | 20 |
| 圖 3-7 光華崩塌潛勢區歷史災害空拍圖 .....               | 22 |
| 圖 3-8 光華崩塌潛勢區監測儀器配置圖 .....               | 23 |
| 圖 3-9 (a)~(d) K19-1BW 鑽孔地質柱狀圖 .....      | 26 |
| 圖 3-10 (a)~(f) K19-1BW 鑽探岩芯照片 .....      | 27 |
| 圖 4-1 物質點法流程圖 (Soga, et al., 2016) ..... | 29 |
| 圖 5-1 光華崩塌地監測儀器設置圖(青山工程，2021).....       | 43 |
| 圖 5-2 選用剖面及鄰近監測儀器 .....                  | 43 |
| 圖 5-3 最初僅有高程資料的模型外觀 .....                | 45 |
| 圖 5-4 數值模型材料分布設定 .....                   | 45 |
| 圖 5-5 固體相邊界條件 .....                      | 49 |
| 圖 5-6 液體相邊界條件 .....                      | 49 |
| 圖 5-7 土壤表面初始條件 .....                     | 50 |
| 圖 5-8 本研究使用之數值模型網格 .....                 | 51 |
| 圖 5-9 數值模型之物質點分布(單位:m) .....             | 52 |
| 圖 5-10 剖面位置圖 .....                       | 53 |
| 圖 5-11 剖面 B-B' 高程資料的模型外觀 .....           | 54 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 圖 5-12 剖面 C-C' 高程資料的模型外觀.....         | 55 |
| 圖 5-13 剖面 B-B' 模型材料分布設定 .....         | 55 |
| 圖 5-14 剖面 C-C' 模型材料分布設定 .....         | 56 |
| 圖 5-15 剖面 B-B' 固體相邊界條件 .....          | 57 |
| 圖 5-16 剖面 C-C' 固體相邊界條件 .....          | 58 |
| 圖 5-17 剖面 B-B' 液體相邊界條件 .....          | 58 |
| 圖 5-18 剖面 B-B' 液體相邊界條件 .....          | 59 |
| 圖 5-19 土壤表面初始條件 .....                 | 59 |
| 圖 5-20 剖面 B-B' 數值模型網格 .....           | 60 |
| 圖 5-21 剖面 C-C' 數值模型網格 .....           | 61 |
| 圖 6-1 光華崩塌地 2019/2022 剖面高程比較.....     | 63 |
| 圖 6-2 K19-1BW 傾斜管紀錄(青山工程，2021).....   | 65 |
| 圖 6-3 數值模型初始滑動時深度與位移關係圖 .....         | 65 |
| 圖 6-4 大規模崩塌之應變-時間曲線(Saito,1965) ..... | 66 |
| 圖 6-5 剖面 A-A' 的關注點 .....              | 74 |
| 圖 6-6 剖面 B-B' 的關注點 .....              | 75 |
| 圖 6-7 剖面 C-C' 的關注點 .....              | 76 |
| 圖 6-8 關注點 Point 3 位置圖.....            | 82 |
| 圖 6-9 剖面 A-A' 的關注點 .....              | 84 |
| 圖 6-10 三剖面位置圖 .....                   | 86 |

# 第1章 前言

根據國家災害防救科技中心(NCDR)所提出的「大規模崩塌災害防治行動綱領」，大規模崩塌的定義為崩塌面積超過 10 公頃或土方量達 10 萬立方公尺或崩塌深度在 10 公尺以上的崩塌地，而這類型的深層崩塌，類似於高速運動的地滑。大規模崩塌造成的災害除了大量的土石運移或堆積直接造成的土砂災害，還可能產生如向源侵蝕、河道淤積、堰塞湖潰壩之洪水災害等衍生災害，甚至是導致人命傷亡，建築物、橋梁、公共設施毀損，造成生命或財產損失和危害。

基於上述，邊坡穩定分析成為了山坡地治理規劃與防災極為重要的工作，分析結果可能作為工程設計和邊坡監測的依據。在邊坡穩定分析及崩塌潛勢判釋上，過去研究與實務多由極限平衡法和有限元素法之計算結果判斷，並以此計算安全係數作為邊坡穩定的指標。但由於極限平衡法和有限元素法無法完整的模擬邊坡的運動過程，導致分析上無法更精確的描述。因此，本研究將使用可模擬大規模崩塌的物質點法作為邊坡分析的工具並將此方法的分析結果加以應用在監測及管理策略上。本計畫結合所收集的資料，並統整資料建立基於物質點法的數值模型。

本計畫期望透過物質點法的數值模型結合監測資料，建立符合光華崩塌地現況及物理機制的模式，並以此模式為出發點，依序進行臨界崩塌位移量的分析、分析崩塌致災因子在不同情境下的危害程度，最終藉由研究成果提出現地監測儀器佈設及崩塌警戒值建議，提供管理單位更多元的防災參考依據。

## 1.1 緣起與目的

臺灣因有地勢陡峭、地質脆弱、降雨集中等特性，使得發生坡地災害的機率極高。近年來氣候變遷使得極端降雨造成的坡地災害愈趨頻繁，因此，了解山坡地崩塌之機制、運動過程以及影響範圍，成為防災預警與災害評估中非常重要的參考依據。

綜合上述，本研究採用物質點法模擬崩塌地破壞之過程，蒐集現地資料並且透過物理機制進行二維數值模型之模擬，以探討崩塌發生的機制、運動過程、影響範圍以及物質點法模擬對崩塌地監測之後續應用。除此之外，本研究以創新的角度，分析影響崩塌地致災之不確定性，進而針對崩塌引致因子（如地下水位等）進行敏感度分級；同時，也藉由數值模型的模擬分析，回應現地監測儀器常因坡地滑動造成破壞以及管理的相關問題。為驗證上述想法，本計畫選擇桃園市復興區光華崩塌地為研究地點，依地形特徵可將此崩塌地分為（分區一）的上邊坡與（分區二）的下邊坡。根據 1980~2018 年的遙測影像紀錄可比對出光華地區於颱風或降雨事件中常有會明顯的活動性，且於 2021 年初發生加速滑動的現象（楊國鑫等，2023），因此需更加密切的關注。光華地區待解決的問題主要由上邊坡極高的活動性所造成，例如接觸式監測儀器易受破壞、管理值不易參考其他案例經驗訂定，以及致災位移量或位移速率並不明確，造成防災上的評估困難等等，未來若滑動塊體持續運動將有引發大規模滑動災害之虞。基於存有較高風險且此處監測資料紀錄較為豐富，故本計畫選定此處為研究區域，並嘗試開發與應用機率式坡地預警模型於此處，期能解決此區域現存之待解問題。

## 1.2 工作項目

本計畫之實施依所規劃的 5 個重要工作項目，分別敘述如下。

### 1.2.1 建立光華崩塌地之物質點法模型

首先針對當地崩塌潛勢區的地質狀況及可能致災原因進行資料蒐集，並參考過去文獻中使用的地層剖面資料、地下水位監測資料、土壤材料參數作為建立數值模型的資料來源。另外，將以農村水保署及國家災害防救中心取得之 UAV 空拍、光達資料作為建立地形模型的重要參考資料。其次，參考楊國鑫等人（2023）之地形條件配置與參數設定建立初始光華崩塌地之物質點法模型；再依上述最新地形資料與參數值做模型細節調整與更新。最後，除了基於過去參考資料所建立的二維數值模型，本研究將會使用 2021 年底至今的現地資料建立二維數值模型，進一步進行模式的資料更新，將挑選變位較明顯的剖面，建立新的地形模型，以供後續應用上能有更多的模擬資料進行分析比對以及達到精進模型的效果。本計畫擬採用 Anura 3D 軟體進行數值模擬，計畫進行時將驗證模型與現場數據之準確性。

### 1.2.2 分析崩塌臨界條件位移/速率

本計畫將根據崩塌地形定義與物質點法位移模擬分析崩塌發生之臨界位移量，並建立位移量對時間的變化關係圖。透過物質點法對光華崩塌地進行位移模擬，並依陳語晞等人（2023）之結論可透過坡體位移量對時間變化之運動過程探討符合條件的位移量，並將其訂為「臨界位移量」，當坡體變位大於此值時，即代表崩塌即將發生。

### 1.2.3 監測儀器佈設之建議

為了能記錄邊坡滑動之趨勢與相關資訊，在坡地現場設置監測儀器是一個即時且有效的方法，然而地表或地下監測儀器容易因為坡地塊體之移動造成儀器損害和失效，導致後續監測上的困難。物質點法所產出之模擬結果可繪製出位移量在坡體中的分佈狀況，因此可根據此結果選取在崩塌臨界狀況中，變位量相對較小的點位做為接觸式監測儀器的建議佈設位置，降低儀器損壞的機率。

### 1.2.4 分析崩塌致災因子在不同情境下的危害程度

由於崩塌引致因子的敏感程度應為坡地系統交互作用後的結果，因此需將崩塌引致因子如降雨延時與強度、地下水位等以不同情境條件輸入所建置之機率式崩塌地物質點模式，計算出各情境下引發之相應位移量，並定義該情境下的致崩敏感度，並依照崩塌引致因子在不同狀況下所造成之敏感程度，提供管理上之建議（如地下水位抬升至某高度時會造成較高脆弱度，即將此條件視為需要關注的對象）。值得一提的是，不同情境下的機率式分析通常需要較高的計算成本，本團隊已成功開發反應曲面(surrogate-based)機率式演算法，該演算法在不犧牲準確率的狀況下，大幅減低計算成本，未來將運用這項研發於光華坡地的物質點模型中，以順利完成敏感度的分析。

### 1.2.5 提出崩塌地警戒值之建議

減災、避災以及防災人員應變操作仰賴各地區所制訂的警戒值，並據以進行預警、疏散避難的判斷標準。在警戒量的訂定策略上，若是採用太過保守的數值，則容易發布警戒，可能造成社會成本的增加

或後續民眾不易接受；相反的，若是採用較嚴格的數值，可能導致準備時間不足而增加災害風險。因此，能否取得準確的崩塌臨界值以訂定合適的警戒值，為防災預警上的重要課題。農村水保署已針對光華地區訂定監測警戒值，並以現地監測資料進行滾動修訂，但礙於未能清楚掌握造成崩塌的坡地臨界位移量，在警戒值的訂定作業上需要花費較多時間或是必須要有比過往位移量大且未導致崩塌的狀況出現才能修改，因此本計畫預計透過機率式崩塌模式，交叉探討出合適且具有預警意義的光華崩塌地位移量管理值；具體而言，本計畫將運用既有的理論與計畫產出檢討與建議管理值，例如所取得的臨界位移量、所建立的機率式物理模型、極限方程式的概念、超越機率的概念與貝氏資料更新的概念，滾動修正崩塌地警戒值。

## 第2章 工作執行方法

### 2.1 背景

本研究室近年來持續投入相關人力於水土保持領域的相關研究，今年所提計畫主要係使用物質點法對邊坡進行分析，並利用分析結果作為後續監測管理的參考基礎。對於這個主題，本團隊過去累積的經驗，應可提供足夠的執行基礎。

本計畫接續本研究室於地工技術 178 期(2023 年 12 月)「地工與地質模型不確定性之探討與應用」專輯中開發之坡地穩定物質點分析模型（陳語晞等人，2023），進一步將其拓展應用至光華崩塌地之監測模式，期望能從物理模式與現地資料的角度出發，提供適用於光華崩塌地之監測管理建議。

### 2.2 工作執行方法

本計畫執行流程如圖 2-1 所示，本計畫首先以光華崩塌潛勢區歷年的研究、DEM 及現地資料作為建立數值模型之參考，另透過蒐集物質點法相關研究案例和文獻，建立光華崩塌地之物質點法模型，待模型驗證後，模擬分析此處的崩塌臨界值，再進一步探討崩塌警戒值和儀器佈設的建議。詳細流程如圖 2-1。

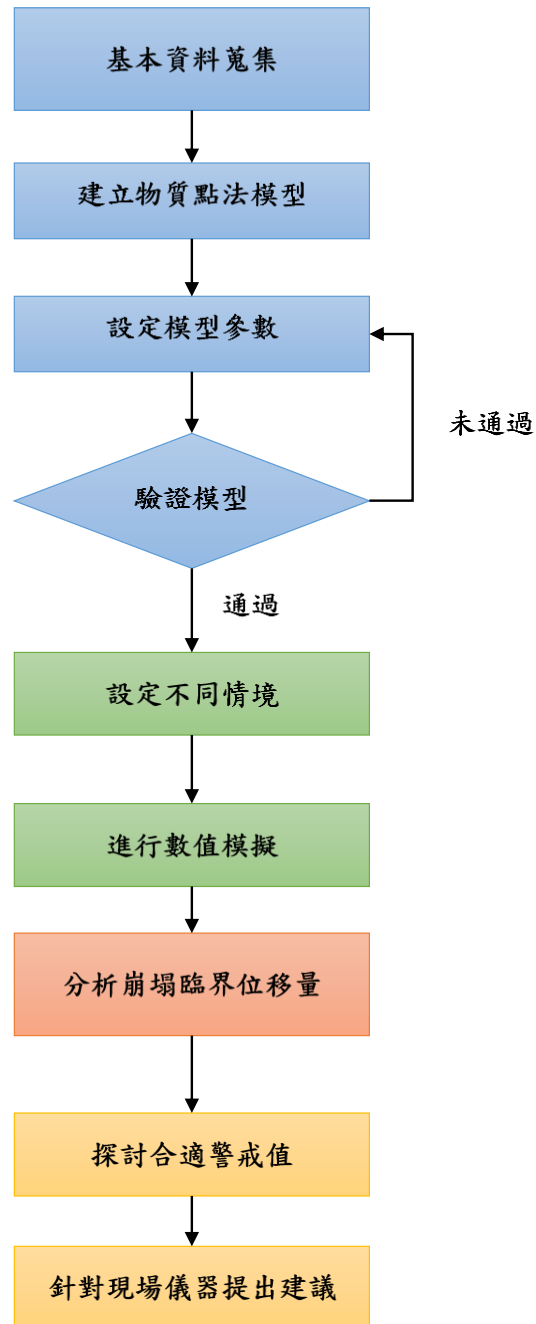


圖 2-1 工作流程圖

## 2.3 相關文獻蒐集

透過蒐集整理國內外專家學者相關的文獻資料，包含物質點法相關研究及物質點法應用案例，作為本次計畫研究基礎。

### 2.3.1 物質點法相關研究

#### 2.3.1.1 Soga, et al. (2016)

有限元素法 (FEM) 和有限差分法 (FDM) 等基於網格的拉格朗日方法，雖然能模擬變形問題，但進行複雜的重新劃分網格和重映射變量會導致在模擬大變形問題時引入額外的誤差。與拉格朗日有限元素法不同，尤拉有限元素法中的計算網格在材料隨時間變形時保持空間固定。尤拉描述法能夠處理大變形而不會出現網格扭曲的問題。

在此文獻中，物質點法(MPM) 被認為是對大規模崩塌問題進行建模分析的首選方法，主要原因有：

- (1)適用於經歷大變形的大規模失效分析，因為物質點法是基於使用歐拉－拉格朗日方法的連續介質流動描述
- (2)對比於有限元素法（FEM），物質點法的執行過程較直觀
- (3)可以結合土壤組成律模型
- (4)由於存在背景網格，其邊界條件在模擬滑坡運動的複雜力學行為（包括失效、傳播和沉積階段）中的應用比其他無網格方法更直接

#### 2.3.1.2 Yerro, et al. (2016)

物質點法 (MPM) 被認為是合適的計算方法，因為它能夠模擬動態環境中的大位移。連續體透過一組拉格朗日質點進行離散化。MPM 允許結合地質、幾何、水力和岩土特徵，以了解土石流的穩定性。此外，動態公式允許在統一計算中分析運動過程、失效和失效後行為。

物質點法 (MPM) 通常被歸類為介於無網格方法和經典有限元素方法 (FEM) 之間的方法。物質點法透過一組拉格朗日點 (即所謂的物質點) 對連續體進行離散化。每個物質點代表介質的一個子域並攜帶所有資訊 (例如質量、體積、位置、速度、應變、應力)，此外，控制方程式在背景計算網格的節點處求解，背景計算網格在整個計算過程中保持固定並覆蓋問題的整個區域，標準節點內插函數提供了每個時間步長的材料點和網格之間的關係。這種結合尤拉描述法和拉格朗日描述法雙重描述避免了網格糾結、變形，並允許在不重新劃分網格的情況下模擬大位移。

### 2.3.1.3 Vaucorbeli, et al. (2020)

物質點法 (MPM) 是一種數值方法，專門用於解決連續介質力學問題。在 MPM 中，連續介質通過拉格朗日粒子進行離散化，這些粒子在一個固定的歐拉背景網格上移動。這種方法使得處理大變形問題和接觸問題變得非常直接，因為粒子的運動與背景網格無關，從而避免了傳統方法中的網格糾纏問題。自從 Sulsky 團隊首次開發出 MPM 以來，該方法經歷了多次改進，並在許多領域中取得了成功應用，特別是在土木工程、大地工程以及結構工程等方面。

文中提及了 MPM 的優點包括：

**無網格糾纏問題：**由於物質點在背景網格上移動，因此避免了傳統有限元素法(FEM)中可能在大變形情況下出現的網格扭曲或糾纏現象。

**實現無滑移、無穿透接觸算法：**MPM 自帶的接觸處理算法能夠自動處理物體之間的接觸，無需花費額外的計算成本，並能防止物體之間的滑移或穿透，這在多體接觸問題中尤其重要。

**高效處理摩擦接觸問題：**由於 MPM 使用背景歐拉網格，在處理包含複雜接觸條件的問題時，使得接觸的問題更加簡單和高效。

**簡單的計算實現：**與許多其他無網格方法相比，MPM 的實現更為簡單，並且易於進行平行計算。MPM 算法的平行化處理非常高效，能夠通過對計算域的分解從而顯著提高計算效率。

#### **2.3.1.4 Więckowski (2004)**

物質點法 (MPM) 是一種結合拉格朗日與歐拉方法優勢的數值技術，尤其適用於處理大變形與接觸問題，並在工程領域中顯示出其優點。傳統的有限元素法 (FEM) 在大變形問題中會遭遇網格失真，這使得計算精度降低，甚至可能無法繼續。網格重劃技術雖可解決此問題，但會引入額外的誤差且運算較為繁瑣。而物質點法則透過固定的背景網格和移動的粒子來解決這些問題，避免了網格失真與穿透問題，並能夠有效地處理顆粒流動和自由表面等複雜情況。此外，MPM 還能像 FEM 一樣簡單地施加邊界條件，並且可以施加外力在計算網格的節點或物質點上。雖然物質點法的計算耗時較長，但可以通過平行計算技術來減少時間消耗。

此研究為了證明物質點法是處理複雜工程問題的有效工具，也展示了一些工程上應用，例如：筒倉卸料與填充、擋土牆失效以及金屬成形問題等。最後也證實與傳統的有限元素法相比，物質點法能夠以較簡單的方式解決顆粒流動和自接觸等問題，並在分析其他大應變問題，如雪崩運動和土方移動等模擬中顯示出很大的潛力。

#### **2.3.1.5 Anderson, et al. (2010)**

此文獻使用了一個基於物質點法 (MPM) 拓展的廣義插值物質點法 (GIMP)，應用在滑坡數值模型模擬崩塌。在研究中，將具有簡化幾何結構和初始彈性材料行為的邊坡建模，並透過降低土壤強度來使坡度變得不穩定。模擬出結果與有限元素法 (FEM) 分析的結果相符。

拉格朗日材料描述和歐拉網格的結合使得可以分析大變形的彈塑性材料模型。此外，不同材料之間的相互作用被自動處理，這使得可以模擬崩塌的土壤坡度與建於坡邊的房屋之間的相互影響。

## 2.3.2 國內、外物質點法應用案例

### 2.3.2.1 吳昱葵 (2020)

研究中挑選了兩處位於台北市文山區木柵的邊坡，在民國 97 年 9 月因薔密颱風帶來的超大豪雨導致邊坡崩塌，崩塌影響範圍長 230 公尺，寬 20~80 公尺，崩塌面積約 1.17 公頃，崩塌影響範圍和潛在崩塌範圍包括貓空纜車 T-16 塔柱，造成貓空纜車暫停營運。

為了確定選用的數值分析方法及分析軟體的準確性以及適用性，此研究在進行研究樣區建模、分析前，先利用 Moriwaki et al. (2004) 進行邊坡受降雨破壞之大型物理試驗進行數值模擬，透過數值分析結果與物理實驗結果進行比對驗證。透過破壞後之邊坡剖面、剪裂帶之發展、滑動速度、地表位移進行比對，已確立數值模型之分析正確性以及使用軟體 Anura3D 對於物質點法模擬、分析之適用性。

藉由地形、地質概況、現地地質鑽探資料、地層剖面圖建立邊坡數值模型，並設定各土層的材料參數設定，以及設定網格及邊界條件、初始條件即可進行物質點法之數值模擬。

由物質點法分析結果比對，土壤運移距離僅超過實際崩塌距離 2.9 公尺，土壤堆積高度僅高於實際高度 3.2 公尺，考慮到二維模式堆積結果會稍高估實際狀況下，此模擬結果是具參考價值的，物質點法能有效分析邊坡的大變形行為，且能依模擬結果分析其崩塌機制。

為了能進一步知道可否將短時長的崩塌事件視為不排水狀態模擬，該研究將前述水力耦合模型與不排水模型的分析結果進行比對。結果顯示不排水分析的運算時間遠小於水力耦合分析，但其模擬結果與實際測量數據有 33% 的誤差。因此建議使用物質點法進行邊坡破壞分析時，盡可能使用水力耦合分析進行模擬。

#### **2.3.2.2 Yerro, et al. (2018)**

發生於 2014 年 3 月 22 日的華盛頓州 Oso 山坡崩塌事件是美國歷史上最嚴重的山崩災害之一，大約有 8106 立方公尺的冰川沉積物位移超過 1 公里，一共造成了 43 人罹難。被推測可能是因為在災害發生前，該地區經歷了長達三週的強降雨，因此使山坡不穩定，導致山崩災害。為了能更進一步了解崩塌發生的原因和機制，此研究針對 Oso 進行了物質點法的分析。

此研究將崩塌事件區分成三個主要滑動塊體(M1、M2、M3)，三者具有不同的土壤參數。可透過觀察物質點法分析 Oso 山坡在各個時間點的位移和堆積的狀態，由此推測 M1、M2、M3 三個主要滑動塊體失效的先後順序以及在失效時對其他塊體的影響，並將各滑動塊體停止時的位移 1040 公尺與現場觀測結果比對，兩者的結果相近。透過各時間點的軸差應變分析，可以觀察出 M1、M2 底部形成剪裂帶，且剪裂帶隨時間擴大，在滑動後期 M3 底部也形成剪裂帶，並推擠 M2

造成進一步滑動，與現地觀察結果相似。

### **2.3.2.3 Conte, et al. (2019)**

1986 年 7 月 26 日位於義大利南部的 Senise 在經歷長時間的乾旱後發生了大規模崩塌，滑動塊體長約 230 公尺、寬約 150 公尺、滑動最大深度約 14 公尺，造成房屋倒塌以及 8 人罹難。

為了進一步了解此災害事件的邊坡破壞過程進行分析，此研究透過現地調查資料及先前關於 Senise 邊坡的研究建立兩個物質點法模型，分別具有一個和兩個滑動面，並將土壤分成兩層。

具有兩個滑動面的數值模型模擬出的結果與現地調查資料較相似，位移與邊坡破壞後輪廓僅相差幾公尺，並找出造成邊坡破壞的原因是來自於上層的薄黏土層，在使用物質點法 MPM 分析前是未被分析到的。

為了更精進此模型，在原有模型加上了人工構造物。其模擬出的結果較未增加人工構造物更精準，誤差僅有 2 公尺。

### **2.3.2.4 楊國鑫、彭逸蘋等 (2023)**

此研究針對光華崩塌地進行分析，該崩塌地自 2001 年以來逐步發生滑動，並因邊坡持續不穩定，導致部分農路中斷，且邊坡下方有一條重要的交通要道。因此，農業部農村水土保持署已將此區列為大規模崩塌潛勢區。為了解崩塌地的運動機制與行為，此研究綜合運用了現場調查資料、監測資料及數值模擬方法，並利用物質點法進行數值分析。

研究首先根據現場監測所收集的資料與數值模擬結果進行比較，驗證了數值模型的合理性與參考性。確定模型的可行性後，進一步對

數值模擬結果進行詳細分析，探討光華崩塌地的崩塌機制、運動行為以及崩塌過程中的動態變化。在崩塌機制的分析中，物質點法顯示出其優勢，不僅能有效呈現崩塌過程中的特徵，還能針對特定物質點進行細緻的觀察與分析，進一步提高了解釋結果的準確性與易懂性。

通過物質點法的分析，研究團隊驗證了岩層分佈的設定，並深入探討了光華崩塌地地表位移的力學機制。模擬結果顯示，崩塌過程中，位移、速度與軸差應變隨著滑動階段的不同而變化。進一步調整地下水位的設定後，研究推論出當地下水位上升至高於 -7 公尺時，岩屑層的位移將會持續增加，這可能成為促使崩塌擴大的一個重要因素。

## 第3章 研究區域現況資料

本計畫為掌握光華崩塌潛勢區潛在風險及災害，瞭解現況問題，本計畫將以光華崩塌潛勢區為研究目標並進行現況資料蒐集，主要項目包含基本的地理資料、地形資料、地質狀況、歷史災害、現地監測設備以及地質鑽探結果等，依據蒐集結果進行彙整與說明，做為後續分析之參考。

### 3.1 地理基本資料

光華崩塌地位於桃園市復興區華陵里，崩塌區位處於爺亨聚落與嘎拉賀部落之間，潛勢區影響範圍包含坡趾的光華道路，該道路為連接北邊聚落、台 7 線以及南邊光華國小、嘎拉賀部落的聯外道路(圖 3-1)。光華崩塌區的區位，可沿台 7 線行駛通過巴陵大橋後，至 46K+900 附近右轉至爺亨道路，再銜接至光華道路及光華農路抵達。

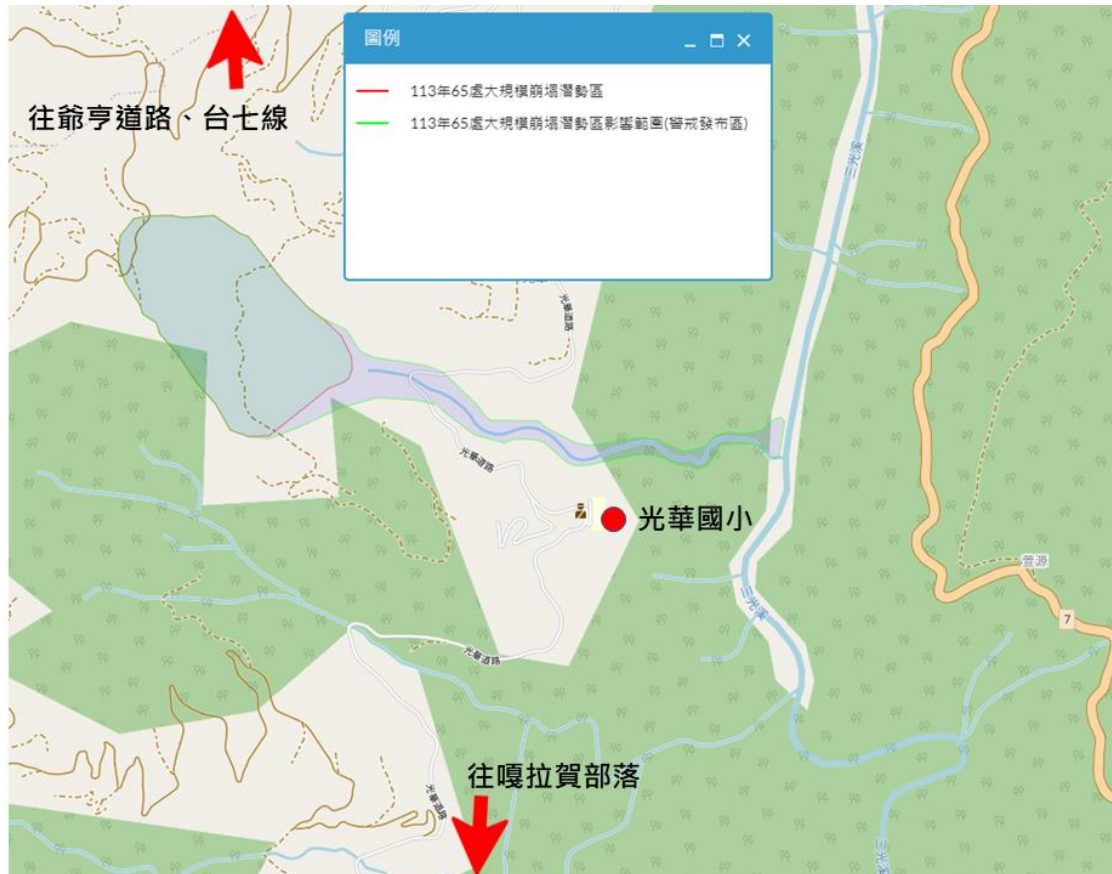


圖 3-1 光華崩塌潛勢區位置圖(BigGIS，2024)

### 3.2 地形基本資料

地勢由西向東漸低，坡向大致朝東，坡度上緩下陡，上邊坡(分區 1)坡度約 20~30 度較緩，下邊坡(分區 2)坡度約 30~55 度較陡，到了坡趾前緣則為地勢相對較低之谷地，呈束口狀地形。水系方面，光華地區兩側各有一條蝕溝發育，於光華地區趾部束口處會合後，再繼續往下匯流至三光溪，三光溪再往下游則為大漢溪。(如圖 3-2 與圖 3-3 所示)



圖 3-2 光華崩塌潛勢區地形圖  
(農村發展及農村水保署資料管理平台，2024)



圖 3-3 光華崩塌潛勢區地勢與保全對象圖  
(農村發展及農村水保署資料管理平台，2024)

### 3.3 地質狀況

光華崩塌地位於地層主要為巴陵層(P1)，區域地質構造則有無名背斜及檜山斷層(圖 3-4)。

(1) 地層：光華地區主要出露地層為巴陵層(P1)，其岩性以暗灰色至灰色之硬頁岩及板岩組成為主，下段偶含灰色細粒泥質薄層砂岩，砂岩中偶可見交錯層構造。新鮮硬頁岩為塊狀，組織頗堅緻，部分略呈葉理；風化後之碎片呈球狀風化或鉛筆狀構造。

(2) 地質構造：主要為無名背斜及檜山斷層

(i)無名背斜:位於光華崩塌東側約 80m，為一東北-西南走向之逆斷層。

(i)檜山斷層：位於光華地區西側約 1,000~2,000 m，為一東北-西南走向之逆斷層。檜山斷層上、下盤皆為巴陵層。

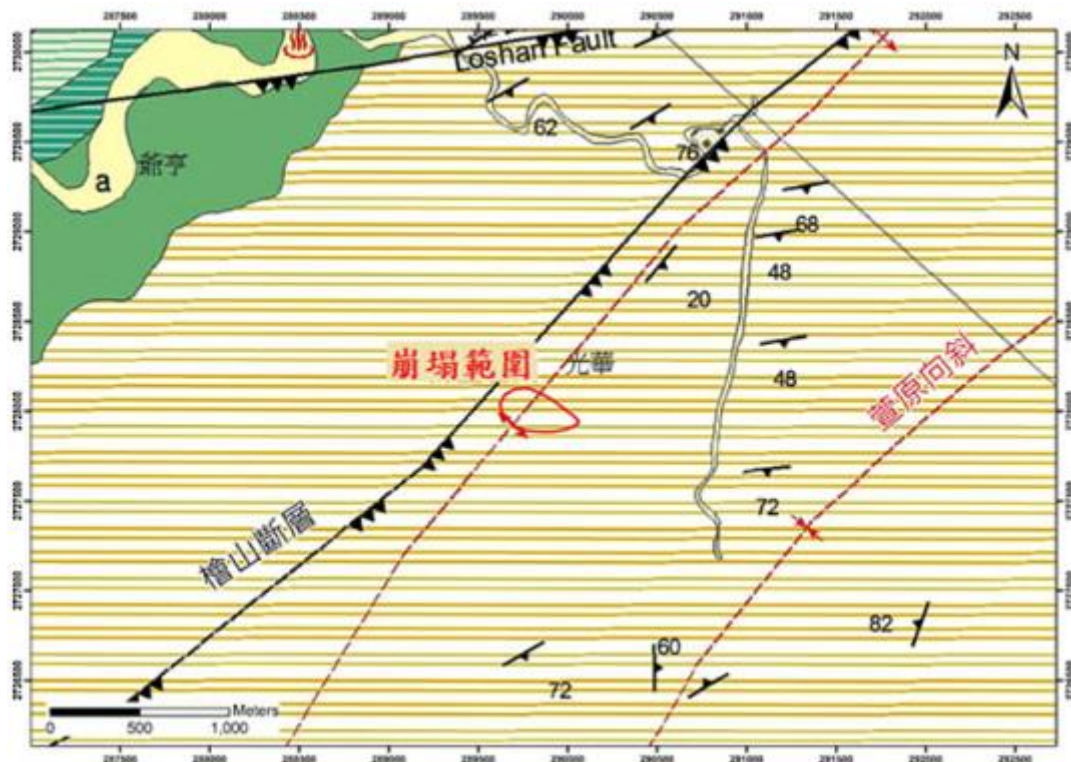


圖 3-4 光華崩塌潛勢區地質圖  
(農村發展及農村水保署資料管理平台，2024)

### 3.4 光華崩塌地歷史災害事件

自民國 2006 年薔薇颱風後，開始有局部、小規模崩塌跡象。農業部農村發展及農村水保署於 2018 年開始進行現地調查，逐步建置各類現地監測設備，並納入大規模崩塌潛勢區，編號「桃園市-復興區-T002」，該潛勢區範圍 12.3 公頃，其中 2021 年崩塌加速滑動範圍約 3.4 公頃，造成位於崩塌地頭部之光華農路中斷，並影響崩塌區域下方光華道路交通安全(圖 3-6)。

藉由 BigGIS 的疊圖分析功能，將 2004 年至 2014 年共 5 期的歷史山崩目錄套疊比對，如(圖 3-5)，可以發現在這 10 年間光華崩塌潛勢區的崩塌面積是隨著時間有擴大的趨勢，影響範圍亦是如此。

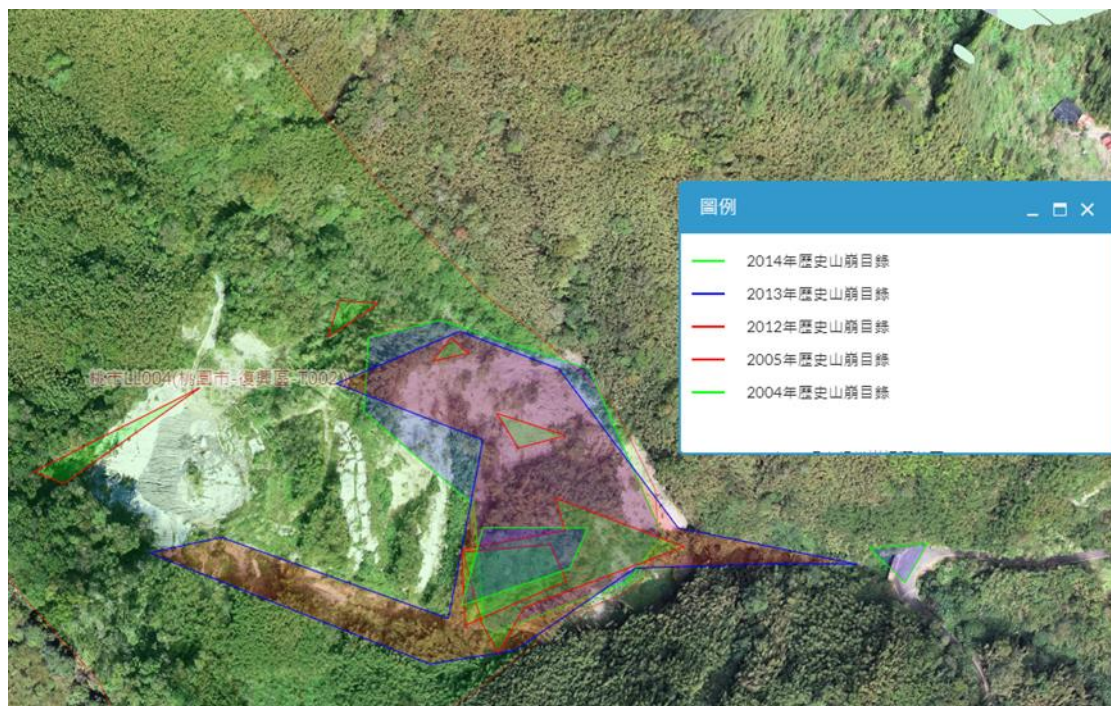


圖 3-5 光華崩塌潛勢區歷史山崩範圍(BigGIS，2024)



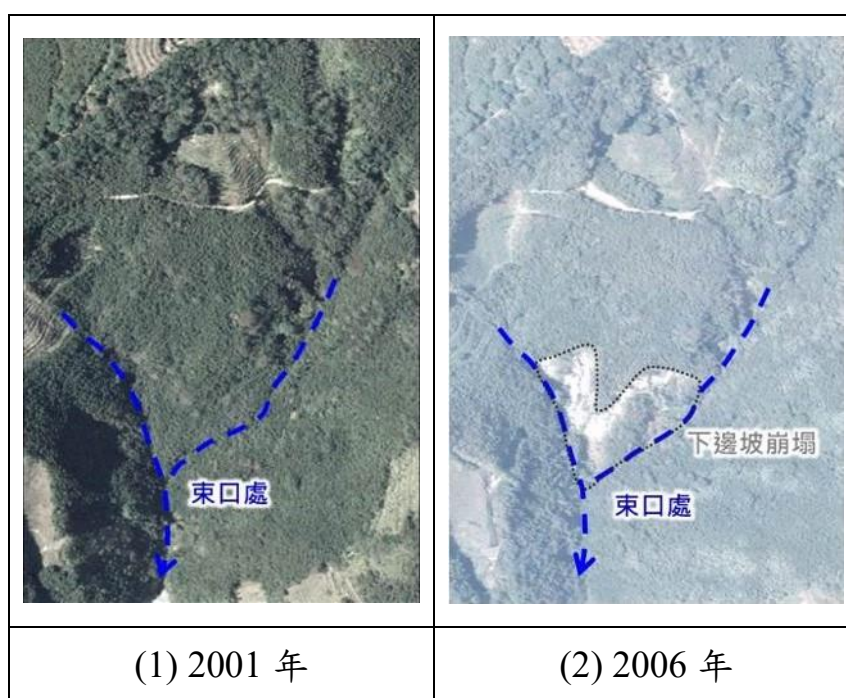
**圖 3-6 光華崩塌潛勢區空拍圖**  
(農村發展及農村水保署資料管理平台，2024)

為了解更詳細的崩塌發展過程，以下針對此區域的空拍圖說明(圖 3-7):

- (1) 2001 年: 現今崩塌區尚未有崩塌狀況發生，邊坡也未有崩塌裸露痕跡，但可見崩塌區兩側具蝕溝線型，並在坡趾形成一束口。
- (2) 2006 年: 下邊坡明顯有崩塌，上邊坡第一期農路有下滑情

況。

- (3) 2019 年：上邊坡農路持續有下滑情況，也因為要實施集水管工程，開設第一期便道。下邊坡崩塌裸露的範圍也持續擴大。
- (4) 2020 年 6 月 12 日：上邊坡農路持續有下滑情況，因為要實施集水管工程，開設第一期和第二期便道，下邊坡的崩塌範圍擴大至第二期便道。
- (5) 2021 年 2 月 2 日：上邊坡農路及施工便道皆持續下滑，蝕溝也有上溯的情況，上、下邊坡的滑動速率有增加的趨勢。
- (6) 2021 年 8 月 9 日：上、下邊坡皆持續下滑，上邊坡除了先前就有的主滑動面外，兩側側崖也有崩塌。



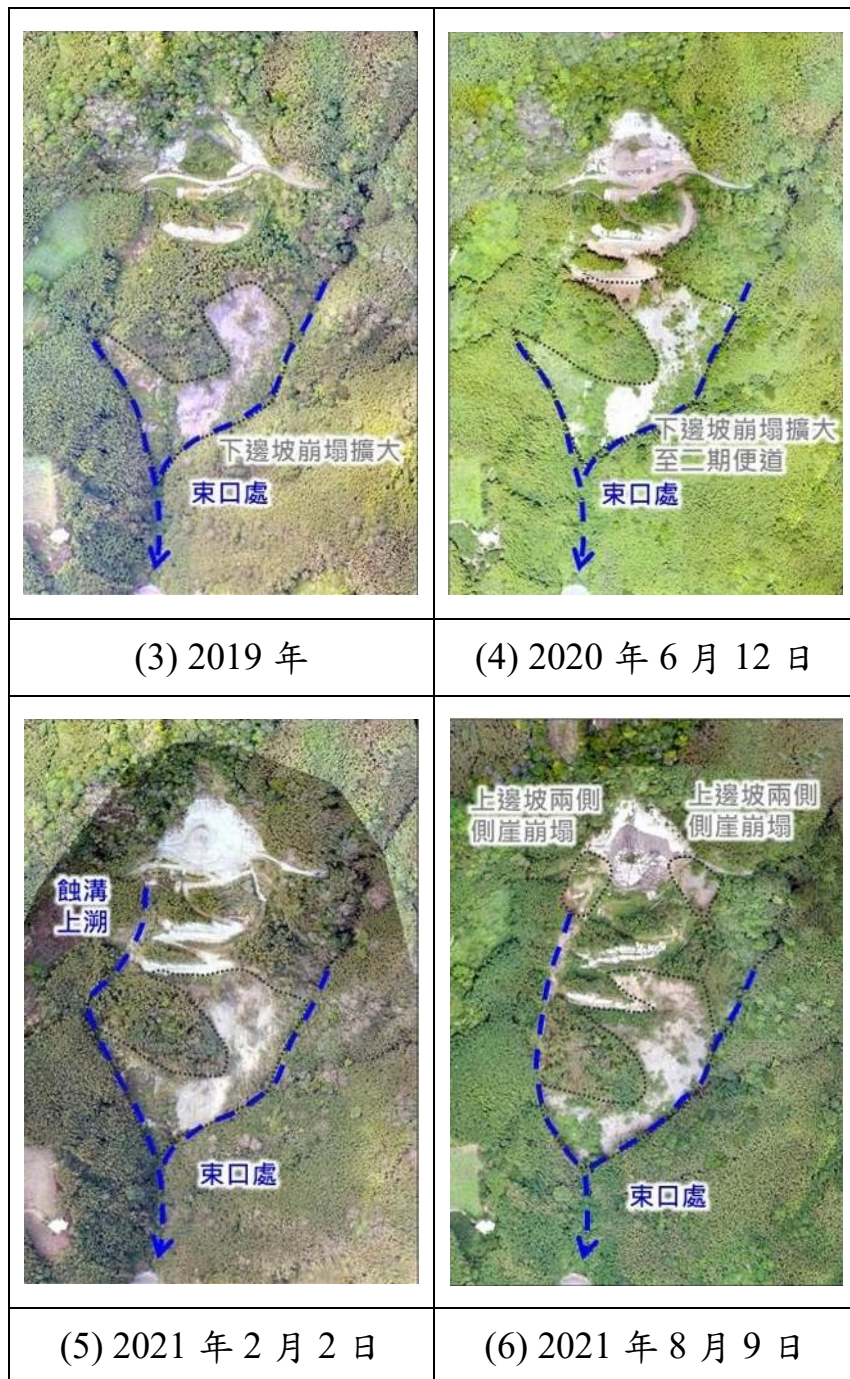


圖 3-7 光華崩塌潛勢區歷史災害空拍圖  
(農村發展及農村水保署資料管理平台，2024)

### 3.5 現地監測設備

崩塌潛勢區下方有連接光華地區與省道 7 號的道路，上邊坡則有農路，若發生大規模崩塌，可能會造成附近居民交通不便和用路安全的問題。因此，為了能了解該地區在地形地貌上的變遷及崩塌趨勢

以掌握災害的風險，農村水保署持續針對本崩塌潛勢區進行監測，並訂定相關應變措施。民國 111 年光華崩塌潛勢區的監測儀器如下(圖 3-8):

- (1) 孔內伸縮計: 1 處
- (2) 地表伸縮計: 5 處
- (3) 封層水壓觀測井: 1 處
- (4) CCD 攝影機: 3 處
- (5) GNSS: 4 處
- (6) 雨量計: 2 套
- (7) 地表傾斜計: 5 套
- (8) 單頻 GPS 位移: 6 處

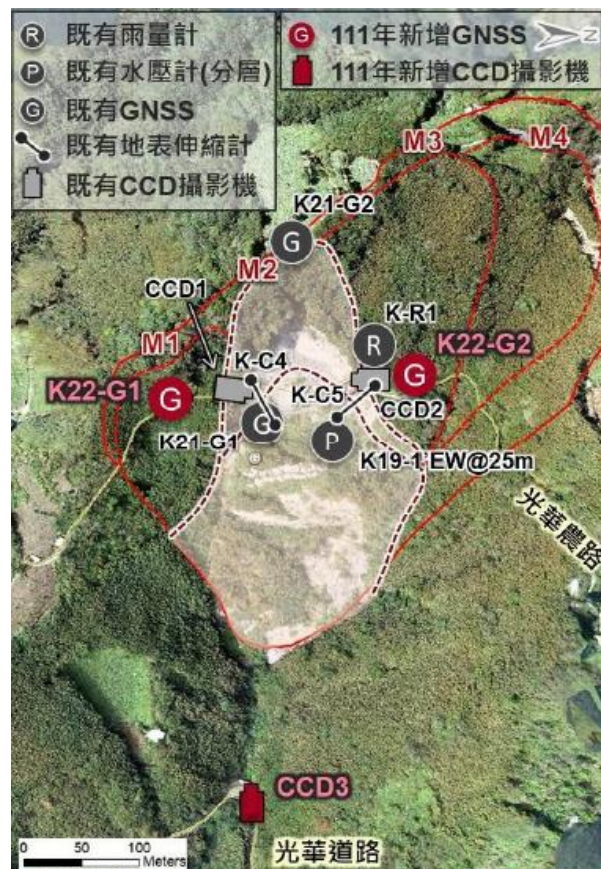


圖 3-8 光華崩塌潛勢區監測儀器配置圖  
(農村發展及農村水保署資料管理平台，2024)

### 3.6 地質鑽探結果

為了解地下岩層的分布，本崩塌區域在民國 108 年實施地質鑽探，根據工程地質探勘資料庫查詢系統的資料，搜尋到光華崩塌潛勢區範圍內兩處岩芯之地質鑽孔資料，鑽孔編號分別是 K19-1BW 及 K19-2BW。兩處的鑽探深度皆為 80 公尺。由這兩處的地質鑽孔地質柱狀圖能判斷地下有兩種不同性質的岩層(圖 3-9 與圖 3-10):

- (1) 岩屑層：黃褐色，由岩屑、土壤、粒徑大小不等的硬頁岩岩塊組成。深度約為 23 公尺～25.5 公尺。
- (2) 硬頁岩：深灰色，愈淺層的硬頁岩愈破碎，且具有高角度裂隙，角度約 40 度～70 度不等，部分深度有泥質填充物。29.8～33.5 公尺有黃褐色銹染，25.5～28.1 公尺、35.7～36.3 公尺、38.3～40.0 公尺則具有剪裂帶。

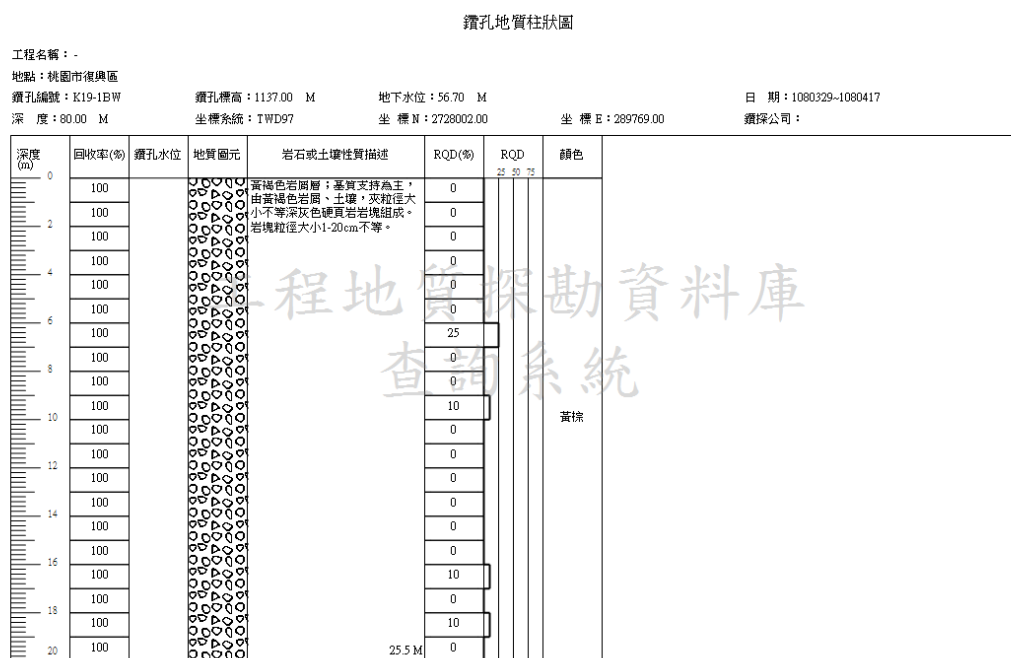


圖 3.9 (a)

鑽孔地質柱狀圖

工程名稱：-

地點：桃園市復興區

鑽孔編號：K19-1BW

深度：80.00 M

鑽孔標高：1137.00 M

坐標系統：TWD97

地下水位：56.70 M

坐標 N：2728002.00

坐標 E：289769.00

日期：1080329-1080417

鑽探公司：

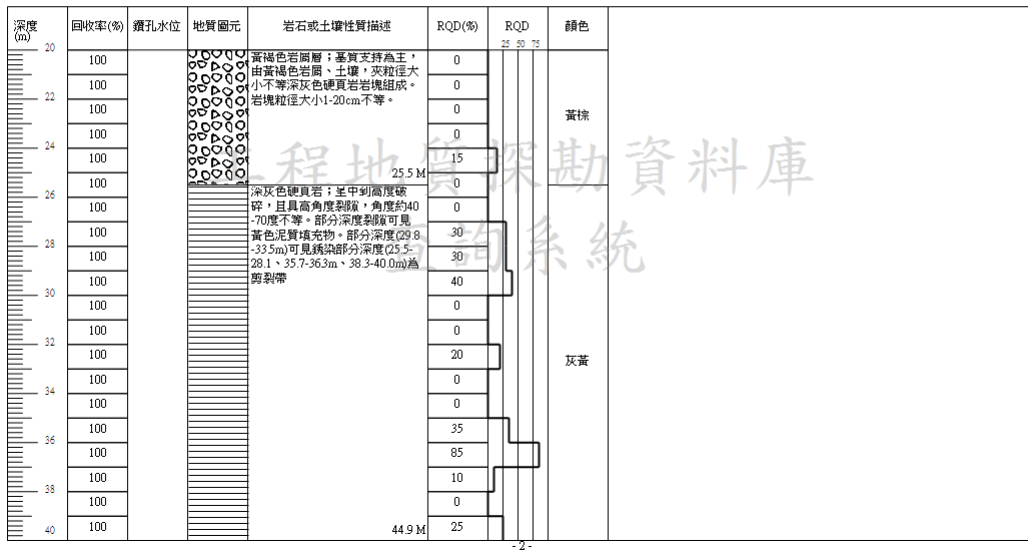


圖 3.9 (b)

鑽孔地質柱狀圖

工程名稱：-

地點：桃園市復興區

鑽孔編號：K19-1BW

深度：80.00 M

鑽孔標高：1137.00 M

坐標系統：TWD97

地下水位：56.70 M

坐標 N：2728002.00

坐標 E：289769.00

日期：1080329-1080417

鑽探公司：

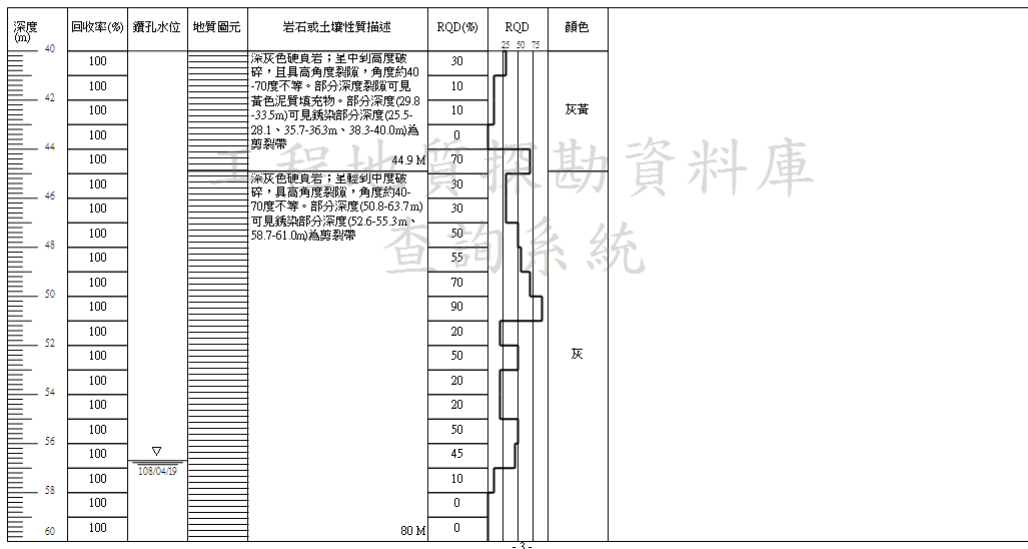


圖 3.9 (c)

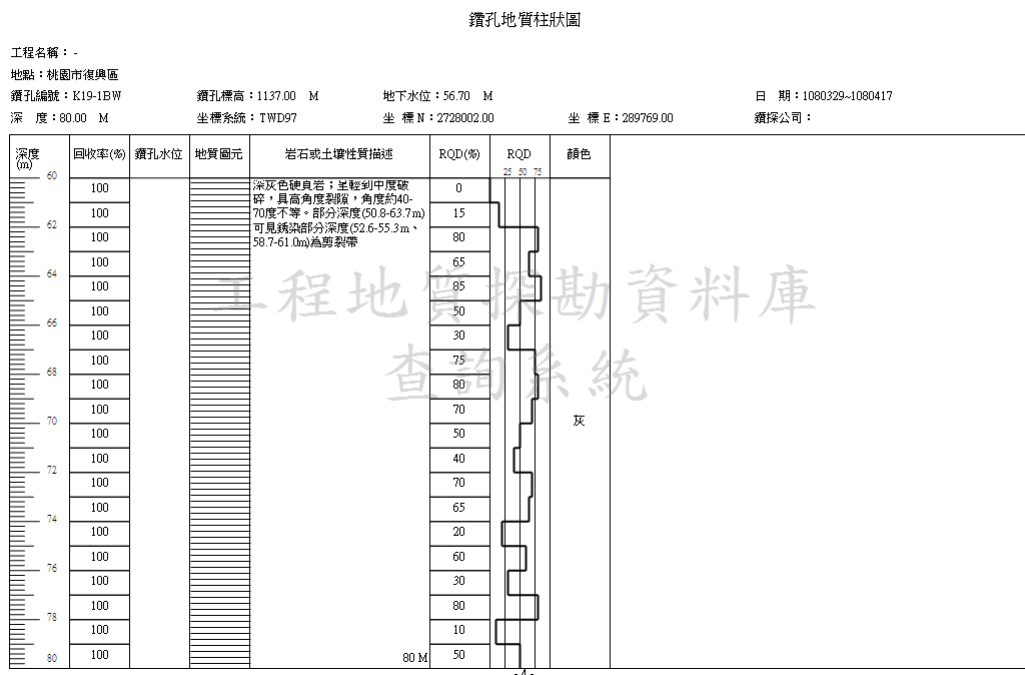


圖 3.9 (c)

圖 3-9 (a)~(d) K19-1BW 鑽孔地質柱狀圖  
(工程地質探勘資料庫查詢系統，2024)



圖 3.10 (a) 0~4 公尺



圖 3.10 (b) 24~28 公尺

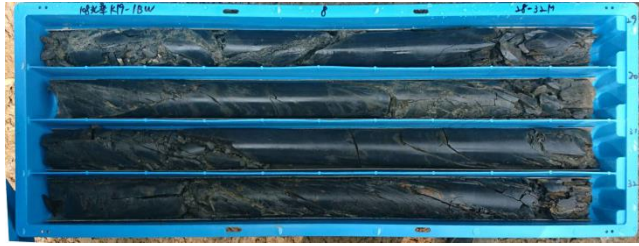


圖 3.10 (c) 28~32 公尺



圖 3.10 (d) 32~36 公尺



圖 3.10 (e) 40~44 公尺



圖 3.10 (f) 44~48 公尺

圖 3-10 (a)~(f) K19-1BW 鑽探岩芯照片  
(工程地質探勘資料庫查詢系統，2024)

## 第4章 數值方法介紹

### 4.1 物質點法介紹

物質點法 (Material Point Method, MPM) 是由 Sulsky 在 1994 年提出的一種數值方法，此數值方法可以用於模擬固體、氣體、液體及多相(固-液-氣)材料介質。物質點法同時結合了尤拉描述法(Eulerian approach) 與拉格朗日描述法 (Lagrangian approach) 的概念，在運算過程中每個物質點都附著在實體骨架上移動，這方面提供了連續體的拉格朗日描述；為了求解控制方程，將物質點投影在網格上，背景網格在整個模擬過程中通常保持不變形，並且不攜帶任何資訊，網格在建構時必須覆蓋模擬期間材料點預計移動的整個空間，這部分則是運用了尤拉描述法的概念。以下是物質點法的運算概念和方法(圖 4-1):

- (1) 將物體離散為空間網格中的物質點，每個物質點中皆會儲存該物質點的質量、位置、加速度、應力等物理性質資料。
- (2) 將物質點透過形狀函數投影至網格的節點上，接著在網格上進行控制方程式的運算。
- (3) 解出節點之加速度，並將運算過後的加速度、位置透過網格上的節點映射回物質點上儲存。
- (4) 物質點資料更新後，將網格重置為初始形狀，再進行下一次計算，同時也避免發生網格變形過大的情況，有助於處理大變形問題。

物質點法不僅改善了尤拉法中網格固定、不易分析多相物體的缺點，並且改善了拉格朗日法中解決大變形問題時網格過度變形造成數值求解困難的問題，因此在分析處理固體-流體相互作用、大變形和

自由表面流體等問題時，比起其他數值方法更具有優勢。

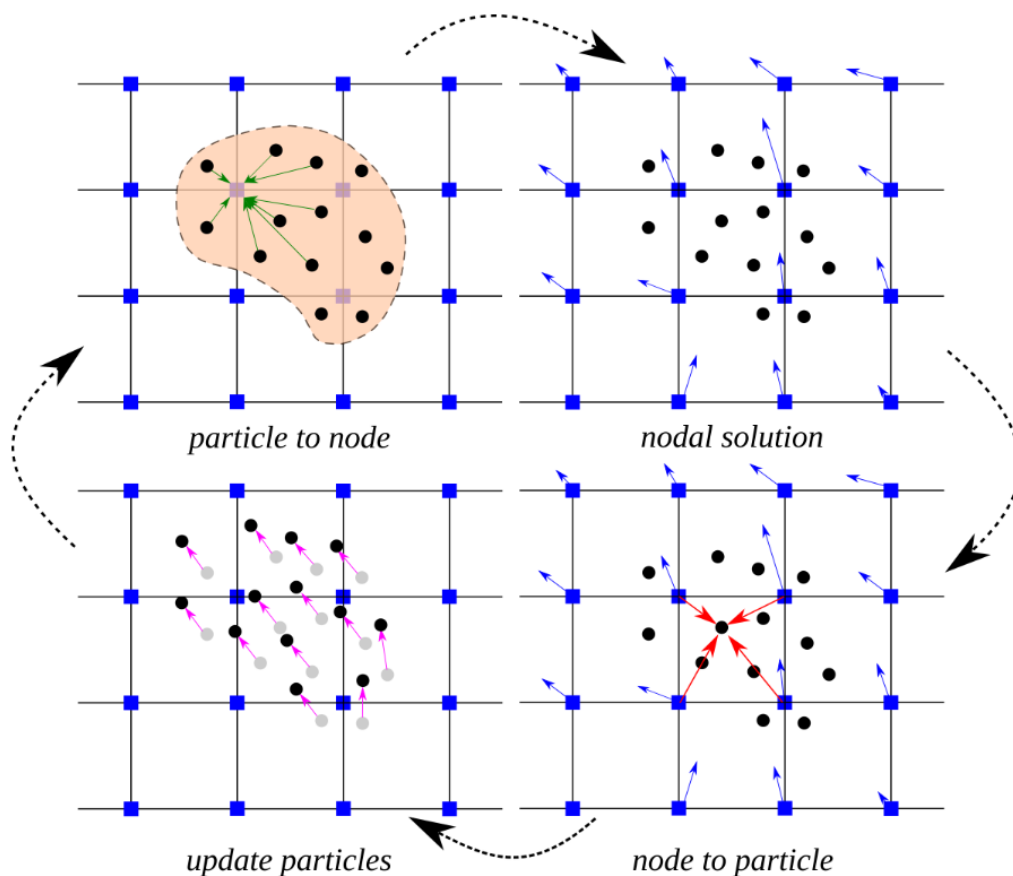


圖 4-1 物質點法流程圖 (Soga, et al., 2016)

## 4.2 控制方程式

用於求解耦合動態兩相問題，包含質量守恆以及每個相混合物的動量守恆。本章以使用到的雙向單點分析 (Two-phase Single-point formulation)方法進行說明。

### 4.2.1 質量守恆方程式

固態相的質量守恆方程式可以表示成：

$$-\frac{d}{dt}[(1-n)\rho_s] + (1-n)\rho_s \nabla \cdot \mathbf{v}_s = 0 \quad (\text{式 4.1})$$

其中  $v_S$  是固相的速度向量， $\rho_S$  是固體密度， $n$  是固態顆粒的孔隙率。

將液相的速度向量表示成，液相的質量守恆可以表示成：

$$\frac{d}{dt}(n\rho_L) + n\rho_L \nabla \cdot v_L = 0 \quad (\text{式 4.2})$$

其中  $v_L$  是液相速度向量， $\rho_L$  是液體密度。

在考慮不可壓縮固體顆粒時，可以不考慮密度和孔隙率的空間變化，可以將固相和液相質量守恆的表達式簡化為：

$$-\frac{d}{dt}n + (1-n)\nabla \cdot v_S = 0 \quad (\text{式 4.3})$$

$$\rho_L \frac{d}{dt}n + n \frac{d}{dt}\rho_L + n\rho_L \nabla \cdot v_L = 0 \quad (\text{式 4.4})$$

將(式 4.3)替換為(式 4.2)時，可以消除  $\frac{d}{dt}n$ ：

$$(1-n)\nabla \cdot v_S + \frac{n}{\rho_L} \frac{d\rho_L}{dt} + n\nabla \cdot v_L = 0 \quad (\text{式 4.5})$$

當液體為可壓縮材料時，液體的有效體積應變 $\bar{\varepsilon}_L$ 為：

$$\frac{d}{dt}\bar{\varepsilon}_L = -\frac{1}{\rho_L} \frac{d}{dt}\rho_L \quad (\text{式 4.6})$$

將(式 4.5)與(式 4.6)整合，則能得到飽和土壤的質量守恆方程式：

$$\frac{d}{dt}\bar{\varepsilon}_L = \frac{1}{n} [(1-n)\nabla \cdot v_S + n\nabla \cdot v_L] \quad (\text{式 4.7})$$

## 4.2.2 動量方程式

固態相的動量方程式可以表示成：

$$(1-n)\rho_S \frac{d}{dt} v_S - \nabla \sigma' - (1-n)\nabla \rho_L - (1-n)\rho_S g - \frac{n^2 \rho_L g}{k} (v_L - v_S) = 0 \quad (\text{式 4.8})$$

液態相的動量方程式可以表示成：

$$n\rho_L \frac{d}{dt} v_L - n\nabla \rho_L - n\rho_L g + \frac{n^2 \rho_L g}{k} (v_L - v_S) = 0 \quad (\text{式 4.9})$$

其中  $(v_L - v_S)$  為液體與固體的相對速度， $k$  為達西滲透係數，可以用滲透係數  $\kappa$  和液體動態黏滯度  $\mu_d$  表示：

$$k = \kappa \frac{\rho_L g}{\mu_d} \quad (\text{式 4.10})$$

將固態相和液態相的動量方程式相加即可得到混合物之動量方程式：

$$(1-n)\rho_S \frac{d}{dt} v_S + n\rho_L \frac{d}{dt} v_L = \nabla \cdot \sigma' + \rho_{sat} g \quad (\text{式 4.11})$$

## 4.2.3 邊界條件

雙向單點分析之邊界條件必須是以下的聯集： $\Omega$

$$\partial\Omega = \partial\Omega_u \cup \partial\Omega_\sigma = \partial\Omega_{VL} \cup \partial\Omega_p \quad (\text{式 4.12})$$

其中  $\partial\Omega_{VL}$  和  $\partial\Omega_p$  為液態相速度與壓力邊界， $\partial\Omega_u$  為固態相邊界， $\partial\Omega_\sigma$  為總應力邊界。

同時需滿足以下條件：

$$\partial\Omega_u \cap \partial\Omega_\sigma = \emptyset \text{ 和 } \partial\Omega_{VL} \cap \partial\Omega_p = \emptyset \quad (\text{式 4.13})$$

#### 4.2.4 弱解 (weak form)

在離散化之前，控制方程的強形式必須轉換為弱形式。

$$\int_{\Omega} \delta t \rho_L \frac{dv_L}{dt} d\Omega = \int_{\Omega} \delta t \nabla \rho_L d\Omega + \int_{\Omega} \delta t \rho_L g d\Omega - \int_{\Omega} \delta t \frac{n \rho_L g}{k} (v_L - v_S) d\Omega \quad (\text{式 4.14})$$

$$\int_{\Omega} \delta t (1-n) \rho_S \frac{dv_S}{dt} d\Omega = \int_{\Omega} \delta t \nabla \cdot \sigma' d\Omega + \int_{\Omega} \delta t \rho_{sat} g d\Omega - \int_{\Omega} \delta t n \rho_L \frac{dv_L}{dt} d\Omega \quad (\text{式 4.15})$$

再引入散度理論和牽引力邊界條件，即能得到最終弱解：

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta t \rho_L \frac{dv_L}{dt} d\Omega \\ &= \int_{\Omega} \delta t \rho_L \overline{\rho_L} dS - \int_{\Omega} \delta t \rho_L d\Omega + \int_{\Omega} \delta t \rho_L g d\Omega \\ & \quad - \int_{\Omega} \delta t \frac{n \rho_L g}{k} (v_L - v_S) d\Omega \end{aligned} \quad (\text{式 4.15})$$

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta t (1-n) \rho_S \frac{dv_S}{dt} d\Omega \\ &= \int_{\partial\Omega_\sigma} \delta t \tau dS - \int_{\Omega} \delta t \nabla \sigma d\Omega + \int_{\Omega} \delta t \rho_{sat} g d\Omega \\ & \quad - \int_{\Omega} \delta t n \rho_L \frac{dv_L}{dt} d\Omega \end{aligned} \quad (\text{式 4.16})$$

(式 4.15)的左側代表慣性，右側第一項表示施加在邊界處的外部載重，第二項表示內力，第三項表示重力，(式 4.15)最後一項為拖曳力 (式 4.16)最後一項表示液體慣性，並考慮到了孔隙率。

### 4.3 物質點法之數值計算

說明物質點法如何計算控制方程式，並以雙相單點為例。

#### 4.3.1 離散化

雙相單點混合物之弱解為：

$$\begin{aligned} \delta \hat{v}_S^T \int_{\Omega} \bar{N}^T t \cdot n d\partial\Omega - \delta \hat{v}_S^T \int_{\Omega} \bar{B}^T \sigma d\Omega + \delta \hat{v}_S^T \\ + \int_{\Omega} \bar{N}^T \rho g d\Omega - \delta \hat{v}_S^T \left[ \int_{\Omega} \bar{N}^T n \rho_L \bar{N} d\Omega \right] a_L \quad (\text{式 4.17}) \\ - \delta \hat{v}_S^T \left[ \int_{\Omega} \bar{N}^T (1-n) \rho_S \bar{N} d\Omega \right] a_S = 0 \end{aligned}$$

對應於(式 4.17)，離散化方程式為：

$$f^{ext} - f^{int} - \bar{M}_L \hat{a}_L = M_S \hat{a}_S \quad (\text{式 4.18})$$

$$f^{ext} = \int_{\Omega} \bar{N}^T t \cdot n d\partial\Omega + \int_{\Omega} \bar{N}^T \rho g d\Omega \quad (\text{式 4.19})$$

$$f^{int} = \int_{\Omega} \bar{B}^T \sigma d\Omega \quad (\text{式 4.20})$$

$$\bar{M}_L = \int_{\Omega} \bar{N}^T n \rho_L \bar{N} d\Omega \quad (\text{式 4.21})$$

$$M_S = \int_{\Omega} \bar{N}^T (1 - n) \rho_S \bar{N} d\Omega \quad (\text{式 4.22})$$

上述方程式中， $f^{ext}$ 為節點外力向量， $f^{int}$ 為節點內力向量， $\bar{M}_L$ 為液相節點質量矩陣， $M_S$ 為固相節點質量矩陣。

### 4.3.2 計算內力

內力計算公式：

$$f^{int} = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \int_{\Omega_{el}} \bar{B}^T \sigma d\Omega = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \int_{\Omega_{el}} \bar{B}^T \sigma |J| d\bar{\omega} \quad (\text{式 4.23})$$

其中 $\Omega_{el}$ 為大座標系中元素  $el$  的面積， $no_{elm}$ 為活動元素的數目， $\bar{\omega}$ 為元素體積， $d\bar{\omega}$ 是元素系統中無窮小之體積， $|J|$ 為 Jacobian 行列式。

在物質點法中，物質點攜帶所有資訊包含應力，因此物質點的內力可以由下列公式計算：

$$f^{int} = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \sum_{i=1}^{no_{Node,el}} \sum_{k=1}^{no_{MP,el}} B_i^T (\xi_{MP}) \sigma_{MP} \Omega_{MP} \quad (\text{式 4.24})$$

其中 $no_{Node,el}$ 是元素  $el$  內的節點數量， $no_{MP,el}$ 是元素  $el$  中物質點的數量。

### 4.3.3 計算外力

外力的計算可以分成兩個部分：由重力加速度產生的體積力，以及分布在物體上的外部載重。

體積力公式：

$$f^{int} = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \int_{\Omega_{el}} \rho \bar{N}^T g d\Omega = \sum_{el}^{no_{elm}} \int_{\bar{\omega}} \rho \bar{N}^T g |J| d\bar{\omega} \quad (\text{式 4.25})$$

外部載重公式：

$$f^{ext, trac} = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \int_{\partial\Omega_{el}} \bar{N}^T t \cdot n d\partial\Omega \quad (\text{式 4.26})$$

應用物質點積分，完整外力方程式即為：

$$\begin{aligned} f^{ext} = & \sum_{el=1}^{no_{elm}} \sum_{i=1}^{no_{Node,el}} \sum_{MP=1}^{no_{MP,el}} m_{MP} N_i^T(\xi_{MP}) g \Omega_{MP} \\ & + \sum_{el=1}^{no_{elm}} \sum_{i=1}^{no_{Node,el}} \sum_{MP=1}^{no_{MP,el}} N_i^T(\xi_{MP}) f_{MP}^{ext, trac} \end{aligned} \quad (\text{式 4.27})$$

## 4.4 運算流程

物質點法在每個時間步驟(timestep)的演算法如下：

- (1) 藉由形狀函數將物質點資訊映射至節點上，同時在節點上計算內力與外力。
- (2) 求解動量方程式

$$\hat{a}_L^t = M_L^{t,-1} [f_L^{ext,t} - f_L^{int,t} - f^{d,t}] \quad (\text{式 4.28})$$

$$\hat{a}_S^t = M_S^{t,-1} [-f^{ext,t} - f^{int,t} - \bar{M}_L^t a_L^t] \quad (\text{式 4.29})$$

- (3) 使用節點之加速度和形狀函數，更新物質點的速度

$$\hat{v}_{L,MP}^{t+\Delta t} = \hat{v}_{L,MP}^t + \sum_{i=1}^{n_{en}} \Delta t N_i(\xi_{MP}) \hat{a}_{L,i}^t \quad (\text{式 4.30})$$

$$\hat{v}_{S,MP}^{t+\Delta t} = \hat{v}_{S,MP}^t \sum_{i=1}^{n_{en}} \Delta t N_i(\xi_{MP}) \hat{a}_{S,i}^t \quad (\text{式 4.31})$$

(4) 更新節點動量，並且更新節點速度

$$P_{L,i}^{t+\Delta t} = \hat{M}_L^t \hat{v}_L^{t+\Delta t} \approx \sum_{MP=1}^{n_{MP}} m_{L,MP} N^T(\xi_{MP}^t) \hat{v}_{L,MP}^{t+\Delta t} \quad (\text{式 4.32})$$

$$P_{S,i}^{t+\Delta t} = \hat{M}_S^t \hat{v}_S^{t+\Delta t} \approx \sum_{MP=1}^{n_{MP}} m_{S,MP} N^T(\xi_{MP}^t) \hat{v}_{S,MP}^{t+\Delta t} \quad (\text{式 4.33})$$

(5) 整合節點速度，計算節點增加位移

$$\Delta \hat{u}_L^{t+\Delta t} = \Delta t \hat{v}_L^{t+\Delta t} \quad (\text{式 4.33})$$

$$\Delta \hat{u}_S^{t+\Delta t} = \Delta t \hat{v}_S^{t+\Delta t} \quad (\text{式 4.34})$$

(6) 計算應變，再用組成律轉換成應力

$$\Delta \varepsilon_{L,MP}^{t+\Delta t} = B(\xi_{MP}^t) \hat{v}_L^{t+\Delta t} \Delta t \quad (\text{式 4.35})$$

$$\Delta \varepsilon_{S,MP}^{t+\Delta t} = B(\xi_{MP}^t) \hat{v}_S^{t+\Delta t} \Delta t \quad (\text{式 4.36})$$

(7) 更新物質點的水壓力

$$\Delta \varepsilon_{L,MP}^{-t+\Delta t} = \frac{1}{n_{MP}^t} [(1 - n_{MP}^t) \Delta \varepsilon_{S,MP}^{t+\Delta t} + n_{MP}^t \Delta \varepsilon_{L,MP}^{t+\Delta t}] \quad (\text{式 4.37})$$

$$p_{L,MP}^{t+\Delta t} \approx p_{L,MP}^t + K_{L,MP} \Delta \varepsilon_{L,MP}^{-t+\Delta t} \quad (\text{式 4.38})$$

(8) 計算總應力

$$\sigma_{MP}^{t+\Delta t} = \sigma'_{MP}{}^{t+\Delta t} + \delta \sigma_{MP}^{t+\Delta t} \quad (\text{式 4.39})$$

(9) 藉由體積應變增加量更新物質點的體積

$$\Omega_{MP}^{t+\Delta t} = (1 + \Delta \varepsilon_{vol,S,MP}^{t+\Delta t}) \quad (\text{式 4.40})$$

(10) 藉由固態相位移更新物質點的位置

$$x_{MP}^{t+\Delta t} = x_{MP}^t + \sum_{i=1}^{n_{nodes}} N_i(\xi_{MP}) \Delta \hat{u}_{S,i}^{i+1} \quad (\text{式 4.41})$$

(11) 物質點在位置更新後即代表該時間步驟 (timestep) 的運算已完成，物質點將儲存更新後的資訊，接下來會進行下一步的運算。因此，會將該時間步驟的計算網格重置與初始化，以便於下一步的運算。

## 4.5 Anura 3D 軟體介紹

Anura 3D 是由 Anura 3D MPM Research Community 開發的數值模擬軟體，主要用於解決與大地工程相關的問題。此軟體的特點為採用物質點法進行運算，能夠模擬多相材料（乾燥、飽和、非飽和土壤）和自由表面水，並使用完全耦合的流體力學方法來模擬完全和部分飽

和的多孔介質中土壤、水和氣相之間的相互作用，因此適用於模擬涉及土壤-水-結構相互作用和大變形問題的物理過程。

使用 Anura 3D 進行數值模擬的基本流程如下：

- (1) 使用 GiD 軟體建置模型及輸入土壤參數設定
- (2) 將建置完成的模型進行 Anura 3D 模擬運算
- (3) 使用 ParaView 軟體將模擬結果視覺化並輸出，作為後續分析的依據。

## 4.6 機率式邊坡穩定分析

傳統上，多習慣以單一的安全係數 ( $F_s$ , factor of safety) 來衡量邊坡是否處於穩定狀態。然而，邊坡實際上是個相當複雜的系統，其土壤參數、地下水位與地質條件都包含著許多因空間分佈變異、量測誤差等因素而導致的不確定性 (Christian et al., 1994)。這些不確定性來自於參數狀況與不同分析模式，導致邊坡存在崩塌的風險特性 (李等人, 2009)。單一的安全係數雖然簡單明瞭，但往往無法充分反映邊坡實際的穩定狀況，因為它忽略了系統內在的複雜性和多變性。

為了對所關注的邊坡安全性有更加完整和準確的了解，引入可靠度 (reliability) 概念的「機率式邊坡穩定分析」顯得尤為重要。這種分析方法不僅能更明確地量化上述不確定性，還能進一步分析各項參數對整體系統可靠度的影響與靈敏程度。透過機率式分析，我們能夠識別出哪些參數對邊坡穩定性影響最大，進而制定更有針對性的防治措施。

可靠度分析的目的是「量化安全的程度」。與傳統的安全係數相比，可靠度分析能提供更深入的風險評估，詳細說明邊坡「有多安全」。

例如，安全係數只能告訴我們邊坡是否在一個安全範圍內，而可靠度則能提供一個具體的安全概率，讓我們知道在特定條件下邊坡穩定的機率有多大。這種精確的風險量化方法不僅對邊坡管理具有重要意義，還能為工程設計提供更明確的參考標準，使得設計更為科學合理，確保工程的長期安全和穩定。

傳統的安全係數方法固然有其簡單易行的優點，但在面對複雜的邊坡系統時，其局限性也十分明顯。透過引入機率式邊坡穩定分析，我們能更全面地掌握邊坡的穩定狀況，為邊坡管理和工程設計提供更加科學、準確的依據，最終達到更高的安全保障。

#### 4.6.1 可靠度分析

可靠度分析方法首先會透過「極限方程式 (limit-state function)」來定義何謂系統的失效狀態。極限方程式中包含容量 (C, capacity) 與需求 (D, demand)，當 C 大於 D 時表示系統為安全；反之，當 C 小於 D 則表示系統已失效。不同的極限方程式會包含特定的變數，這些變數可以藉由迭代的方式生成輸入變量，從而判斷系統是否已經失效。例如，在可靠度分析中常見的蒙地卡羅分析 (Monte Carlo analysis)，首先需要完成極限方程式的定義，接著輸入變量的統計分布以及樣本數大小，並確保產生的變數符合原隨機變數的機率分布之值。透過生成多次樣本並將其帶入極限方程式，可以計算出系統的總失效次數，進而得出失效機率。

以邊坡穩定分析為例，這個失效機率代表著崩塌發生的機率。蒙地卡羅分析的具體操作過程包括以下幾個步驟：首先，設定樣本數，例如一萬次或更多，然後隨機生成這些樣本的輸入變量。這些變量可

能包括土壤強度、地下水位、地震力等。每次生成的樣本都會代入極限方程式，判斷該次情況下邊坡是否穩定。經過多次模擬後，計算出系統在所有模擬中失效的次數，這些次數除以總模擬次數，就能得到失效機率。此外，可靠度分析還可以利用其他方法，例如一次二次矩法 (First-Order Second-Moment Method, FOSM) 或反向變量法 (Inverse Transform Method) 等，這些方法各有其適用範圍和優缺點。FOSM 通常適用於線性或近似線性的極限方程式，而反向變量法則常用於需要精確控制輸入變量分布的情況。

可靠度分析通過量化系統失效的可能性，提供了一種更加科學和精確的風險評估方法。這種方法不僅可以用於邊坡穩定分析，還廣泛應用於結構工程、地震工程、以及其他需要評估系統可靠性的領域。通過可靠度分析，我們能夠更好地了解系統的弱點和風險，進而制定更有效的防範措施，確保工程和設施的安全與可靠。

#### 4.6.2 克里金代理模型

然而，蒙地卡羅方法需要大量樣本的計算才能取得較精確的結果，這會導致計算上的負擔。引入克里金法 (Kriging) 等空間插值技術則可有效改善這一問題。克里金法利用統計學中的空間相關性原理，通過極少數的樣本點來推算出整個系統的行為。其方法簡述如下。

首先，將極少數量的隨機變數帶入極限方程式內，獲取這些變數是否會導致系統失效的數據。接著，使用這些輸入輸出關係數據集建立初步的 Kriging 代理模型 (surrogate model)，這個代理模型是一個連續的函數，可以近似真實的極限方程式。代理模型的建立過程包括對已有數據的擬合，以及對未知區域的預測。建立初步模型後，接下

來可通過最佳化選取新的隨機變數樣本點，以進一步更新 Kriging 模型。這一過程會持續進行，直到代理模型的精確度達到預期標準為止。在這個過程中，最佳化選取新的隨機變數樣本點的策略將直接影響極限方程式的呼叫次數，進而影響可靠度分析的計算效率。

最佳化策略通常考慮兩個主要因素：一是新的樣本點越接近極限方程式，即系統失效的邊界，這代表著最佳化的 exploit 概念；二是新的樣本點具有高度的不確定性，即預測誤差較大的區域，這代表著最佳化的 explore 概念。這兩種策略的結合可以有效地減少極限方程式的呼叫次數，同時提升模型的準確性。在自適應克里金可靠度分析中，這兩種最佳化目標的選擇至關重要。exploit 策略旨在深入挖掘極限方程式的邊界，確保模型在關鍵區域的準確性；而 explore 策略則側重於探索未知區域，降低模型的不確定性。通過這樣的雙重策略，可以在最小化計算量的同時，最大化模型的精度。

Kriging 模型的優勢還在於其能夠提供對預測結果的不確定性估計，這使得我們可以有針對性地選擇需要進一步模擬的樣本點。這種自適應樣本選取的方法不僅提高了計算效率，也增強了模型的穩健性。克里金法通過建立高效的代理模型，極大地減少了直接使用蒙地卡羅方法所需的大量計算，從而提高了可靠度分析的效率和準確性。這種方法在工程實踐中具有廣泛的應用前景，尤其適用於需要大量計算且具有高度不確定性的系統分析。本研究將嘗試結合自適應克里金法與物質點法以更貼近真實的數值模型描述邊坡行為。

## 第5章 數值模型的建立

此章節將會介紹建立光華崩塌地之物質點法數值模型的方法，並說明數值模型的邊坡幾何模型、材料參數、邊界條件以及初始條件。

### 5.1 挑選欲研究剖面

本研究選用 Anura 3D 為模擬軟體，在使用該軟體進行物質點法的運算及分析前，需搭配 GiD 軟體建立初始邊坡幾何模型。邊坡數值模型以二維平面應變分析，因此，在 GiD 軟體上建立初始邊坡幾何模型前，必須挑選出欲研究的邊坡剖面。

由於本研究的其中一個目標是希望能藉由物質點法之分析結果研擬出對崩塌警戒的參考值，加上需要現地監測資料以便於進行模型的驗證，便參考章節 3.5 介紹的現地監測儀器設置的位置以及青山工程於 2021 年統整之監測儀器設置圖(圖 5-1)，最終將研究的邊坡剖面挑選在鄰近多種現地監測儀器 A-A'上。

剖面 A-A'的位置與相鄰監測儀器之位置如圖 5-2。剖面 A-A'通過孔內伸縮計 K19-1E 以及封層水壓觀測井 K19-1EW@25m，並且鄰近地表伸縮計 KC-2、KC-3 與 KC-5，而最近的單頻 GPS 位移觀測點則為 FST02-G6。

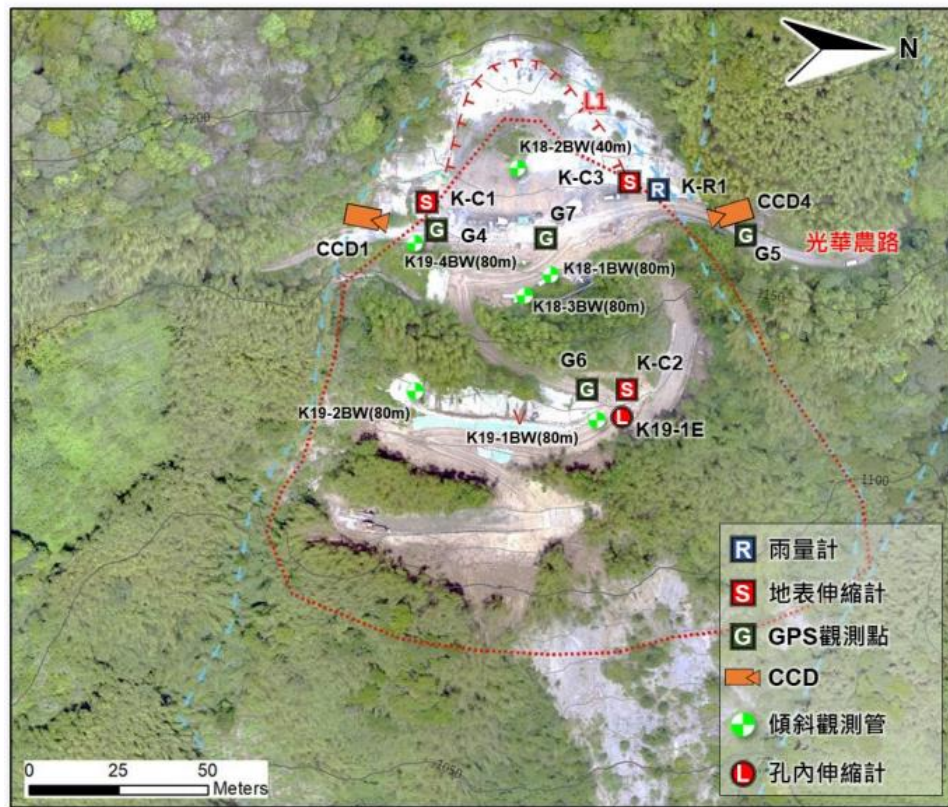


圖 5-1 光華崩塌地監測儀器設置圖(青山工程，2021)

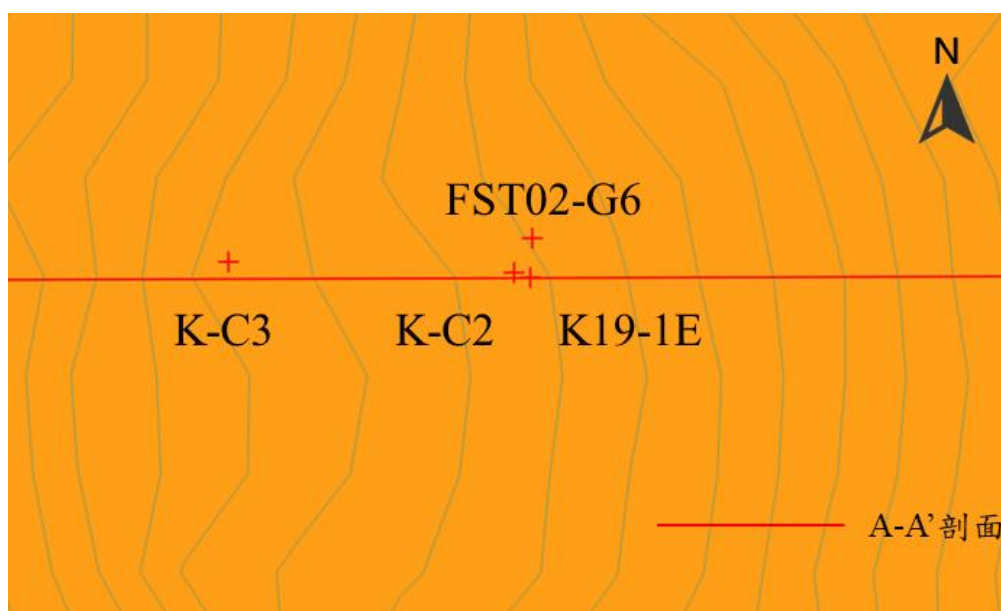


圖 5-2 選用剖面及鄰近監測儀器

## 5.2 建立邊坡幾何模型

採用 2019 年全臺灣 20 公尺網格數值地形模型(DEM)作為地表高程的資料，結合前一步驟挑選出的邊坡剖面，建立最初的模型外觀，如圖。

接著依據 3.6 節地質鑽探資料與參考文獻(彭逸蘋，2022)中的資料，設定該剖面的地下岩層和土壤材料之分布。據 K19-1BW 的地質鑽探結果圖可觀察出此邊坡下至少有一處剪裂帶，即是岩屑層與頁岩層交界處，除此之外，邊坡內部尚可能還具有其他處剪裂帶，影響整體土壤結構強度，進而造成較深層的潛在滑動面。因此參考(彭逸蘋，2022)中的建模方法，將硬頁岩層分成上方強度較弱的破碎頁岩層以及下方完整頁岩層兩個種類。另外，岩屑層也會再細分成有無受地下水影響的兩類。最後，在幾何模型中將光華崩塌地區的岩層大致區分成 4 層，由地表上至下依序為無地下水影響之岩屑層、有地下水影響之岩屑層、破碎頁岩層、完整頁岩層，後續再針對各岩層的深度及分布進行調整，以符合實際狀況和監測資料。

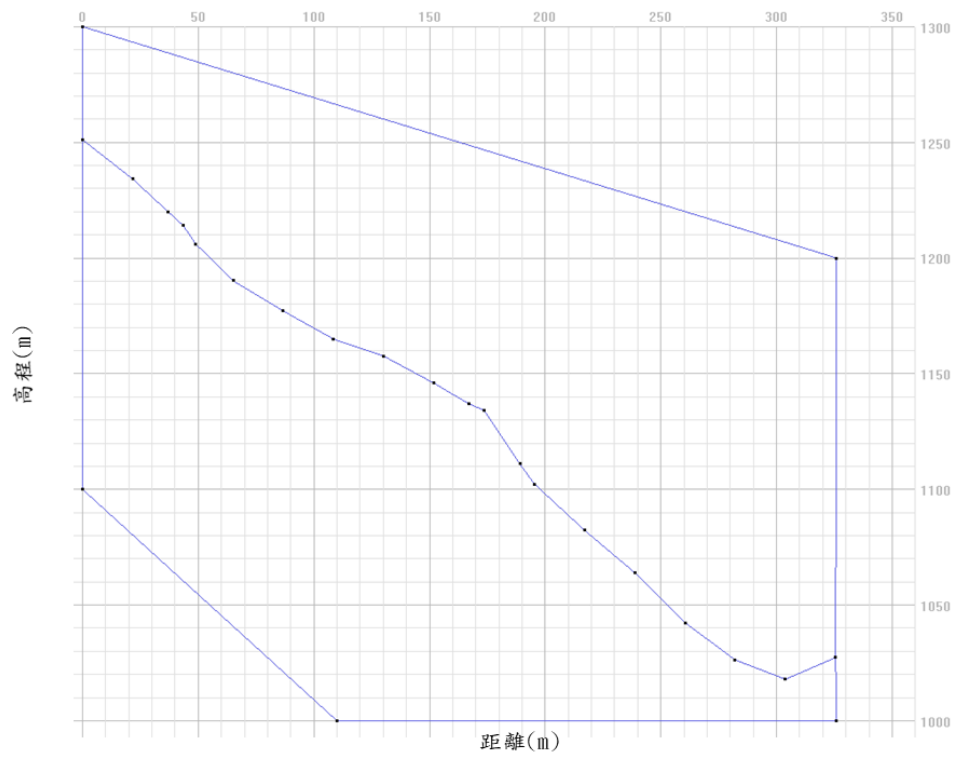


圖 5-3 最初僅有高程資料的模型外觀

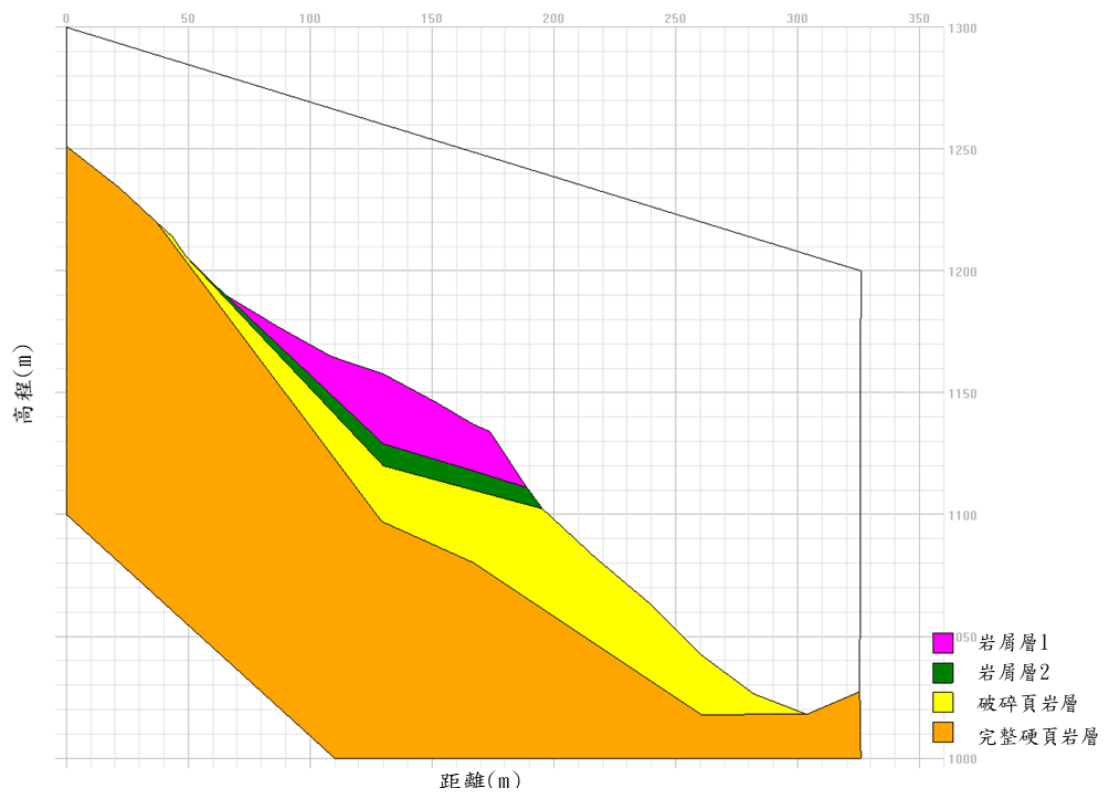


圖 5-4 數值模型材料分布設定

### 5.3 土壤參數

在建立幾何模型後，需要指定對應的土壤材料參數給模型中的各區域。本研究將參考「以物質點法探討光華崩塌地滑動面深度與運動行為」(彭逸蘋，2022) 中的各土壤參數，以作為模型建構的初始值。參考的土壤參數如表 5-1。

表 5-1 建立物質點法模型之土壤參數

| 土壤參數   | 單位                | 岩屑層 1            | 岩屑層 2              | 破碎頁岩層              | 完整硬頁岩層 |
|--------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------|
| 材料種類   |                   | 飽和材料<br>水力耦合分析   | 飽和材料<br>水力耦合<br>分析 | 飽和材料<br>水力耦合分<br>析 | 乾燥材料   |
| 組成率模型  | -                 | 莫爾-庫倫            | 莫爾-庫倫              | 莫爾-庫倫              | 線彈性    |
| 初始孔隙率  | -                 | 0.3              | 0.3                | 0.3                | 0.3    |
| 單位重    | kN/m <sup>3</sup> | 20.1             | 20.1               | 26.5               | 26.5   |
| 水力傳導係數 | m/s               | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-3</sup>   | 10 <sup>-3</sup>   | -      |
| 有效浦松比  | -                 | 0.3              | 0.3                | 0.3                | 0.3    |
| 有效楊氏模數 | Mpa               | 7                | 7                  | 1200               | 6900   |
| 有效凝聚力  | kPa               | 65               | 55                 | 85.7               | -      |
| 有效摩擦角  | -                 | 30               | 30                 | 27                 | -      |

在剪力強度參數的設定上，根據鑽探岩心所進行的直接剪力試驗結果，岩屑層的凝聚力 (c) 被確定為 65 kPa，而摩擦角 ( $\varphi'$ ) 則為 30°，這些數據來自水保局臺北分局 (2018) 的研究結果。需要注意的是，岩屑層分為兩個區域：岩屑層 1 代表未受地下水影響的岩屑層，而岩屑層 2 則代表受地下水影響的岩屑層。岩屑層 1 與岩屑層 2 的分界線可以視為地下水位，通常地下水位以下的區域，即為岩屑層 2。

這一區域的土壤處於飽和狀態，並且失去了基質吸力對剪力強度的貢獻。當岩屑層處於地下水位以下（即岩屑層 2）時，土壤處於飽和狀態，這使得土壤不再具有基質吸力，並且凝聚力會受到地下水的影響。因此，這時的土壤凝聚力需要根據視凝聚力（Apparent Cohesion）來重新計算。

$$c = c' + (u_a - u_w) \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \quad (\text{式 5.1})$$

在不飽和狀況下，土壤的總凝聚力可以通過公式進行估算（Vanapalli et al., 1996）。該公式同時考慮了土壤真凝聚力（即公式右側的第一項）與視凝聚力（即公式右側的第二項）兩個因素的綜合影響。土壤的總凝聚力  $c$ （即 65 kPa）是指在土壤完全飽和的情況下的凝聚力，而土壤在飽和狀態下的真凝聚力  $c'$  則是指在去除了基質吸力的情況下，土壤的內部凝聚力。基質吸力由孔隙空氣壓力（ $u_a$ ）與孔隙水壓力（ $u_w$ ）之間的差值計算得出，即  $u_a - u_w$ 。根據相關文獻（Yang et al., 2017; Nguyen et al., 2022; Lin et al., 2019），推估粉質土壤的現地基質吸力為  $u_a - u_w = 25 \text{ kPa}$ 。進一步根據土壤的體積含水量進行估算，土壤的體積含水量  $\theta$  為 0.25，殘餘土壤體積含水量  $\theta_r$  為 0.1，而飽和土壤體積含水量  $\theta_s$  則為 0.3。通過公式計算，可以計算出岩屑層 2 在飽和條件下的真凝聚力  $c'$ ，結果為 55 kPa。

模型材料設定及分佈對於模擬具有決定性的影響，由於 Anura3D 軟體的限制，材料在空間中的分佈將無法以連續的狀態呈現，在單一範圍內僅能分配一種土壤材料性質，且彼此間的界線非常明確。因此，材料在空間中的分配必須參考地質鑽探孔等資料，界定材料的大略位

置及深度，以此作為模型的設定。因為地下鑽探資料有限，在未有完整地下資料的區域，需做適當的假設，因此在後續還需要針對模型進行驗證，以評估模型設定的合理性。此外，模型材料的特性並未隨時間而改變，皆與初始的土壤狀態一致。

## 5.4 邊界條件

在 Anura 3D 中，邊界條件的設定會對模型帶來極大的影響，可設定的邊界條件包括:固定邊界的固/液/氣相位移條件、載重條件、水文條件、指定節點速度(prescribed velocities)。在本研究中，使用到的邊界條件為邊界位移的固定，固體相與液體相的邊界條件皆設定一致，固體相的邊界條件如圖 5-5，液體相的邊界條件如圖 5-6。在模型完整硬頁岩層的最下方以及模型最左側處設定鉸支承(hinge)，以固定邊界的位移。除此之外，也在模型的最右側與左上方設定滾支承(roller)，使模型邊界的水平方向位移固定。

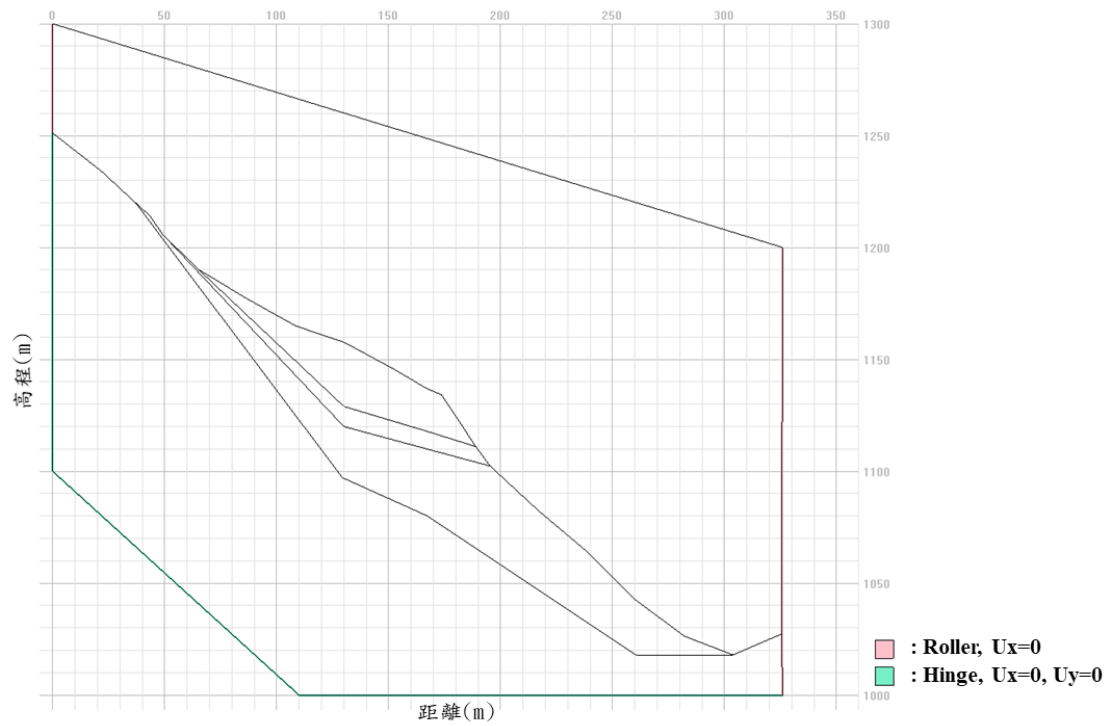


圖 5-5 固體相邊界條件

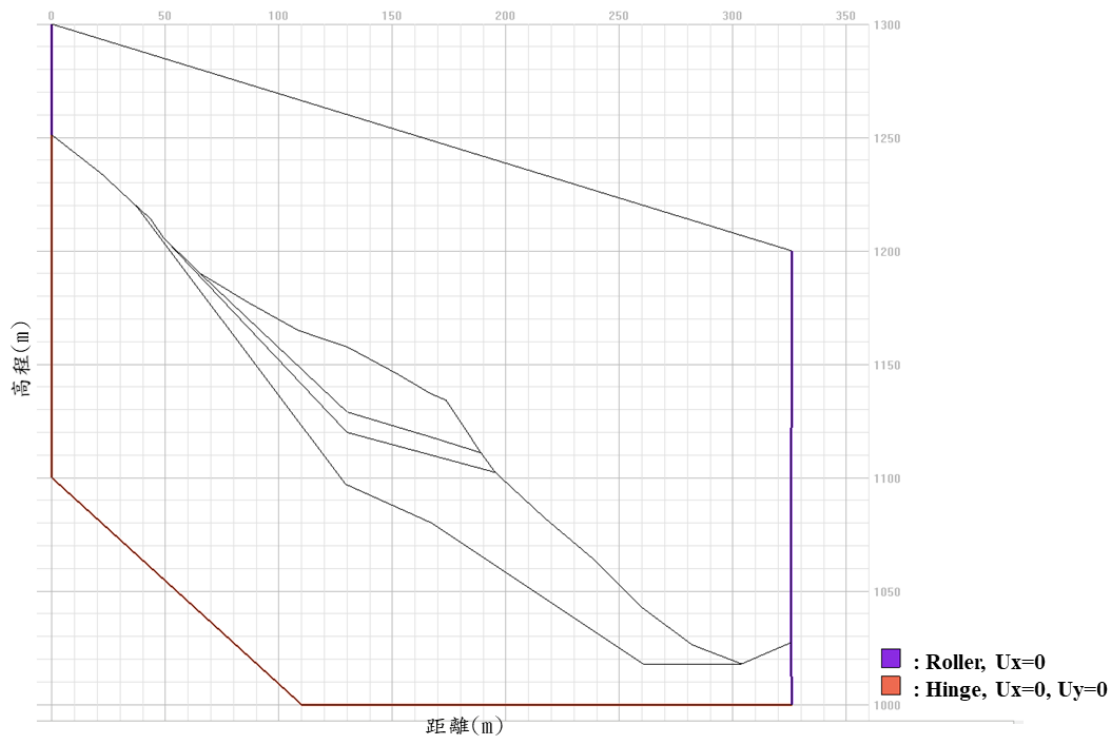


圖 5-6 液體相邊界條件

## 5.5 土壤表面之初始條件

數值模型中土壤表面(soil surface)之初始條件 的位置分布，如圖 5-7 所示。

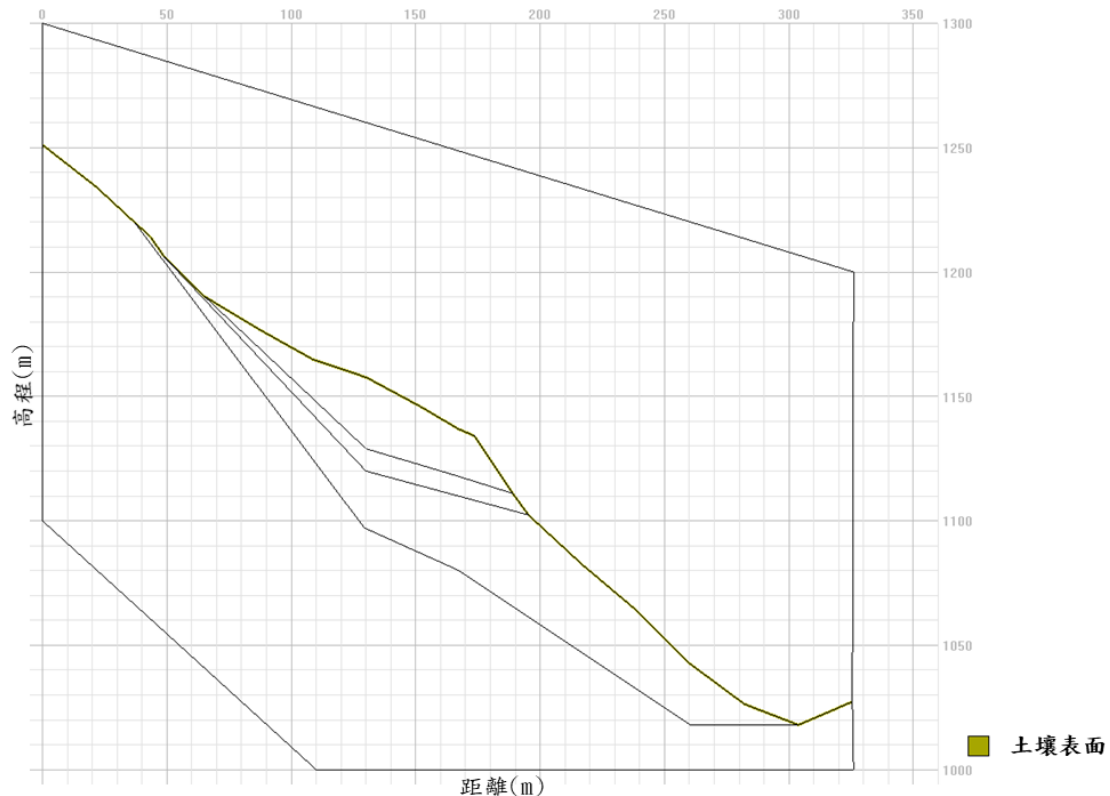


圖 5-7 土壤表面初始條件

## 5.6 網格設定

建立物質點法的最後一個步驟是設定計算網格種類以及大小，使演算法能在網格內生成物質點。本研究建立的數值模型使用的計算網格種類是由三個節點組成的三角形網格，由於網格尺寸大小會影響到模擬花費的計算時間長度與每個物質點代表的塊體大小，也就是越大的計算網格在物質點法演算法中所花費的時間成本越少，但相對的，

同時每個物質點代表的塊體越大，模擬出的解析程度也會較差。在計算時間成本和邊坡模擬解析度的考量下，決定將計算網格的大小分成兩種尺寸，深層的完整硬頁岩層未受邊坡滑動，因此設定 8 公尺的網格尺寸，而完整硬頁岩層以上的研究關注區域，可能會因為邊坡破壞、滑移而產生位移及行為，因此設定為 2.5 公尺的網格尺寸。依照此設定，數值模型會由 13,689 個三角形網格、6,977 個節點以及 10,271 個物質點，如圖 5-8 所示。在此模型的物質點設定為一個數值網格具有 3 個物質點，在網格完成後，有材料分佈的網格將會生成物質點，並被賦予材料性質，而每個物質點會記錄著該點的資訊；若該網格未被分配材料(即該網格範圍無物體)，則不會生成物質點，如圖 5-9 所示。

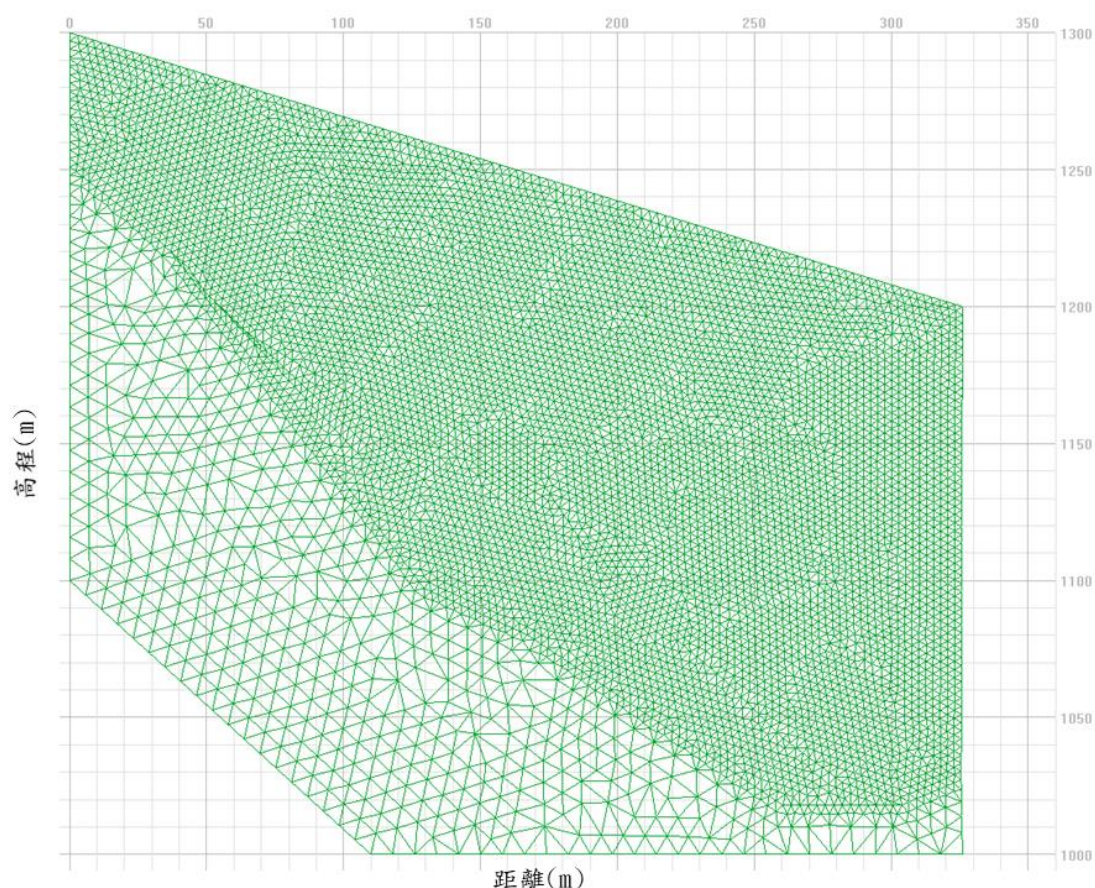


圖 5-8 本研究使用之數值模型網格

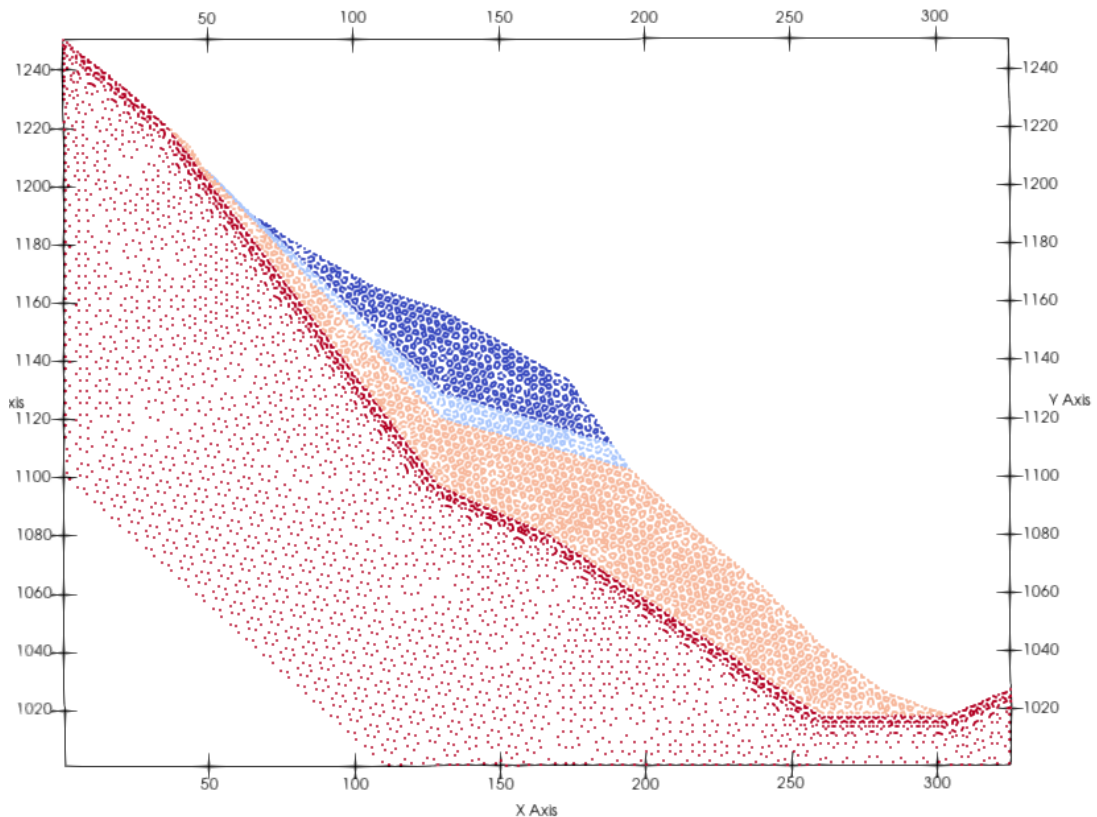


圖 5-9 數值模型之物質點分布(單位:m)

## 5.7 剖面模型

為了能全面評估光華崩塌地的穩定性與潛在風險，以便為後續監測儀器的佈設提供具體建議，本研究計劃選取崩塌潛勢區內的三個剖面進行建模、物質點法模擬及後續分析。

光華崩塌地因滑動風險高而備受關注，特別是主要滑動面，同時根據過往研究資料和現地已設置的監測儀器可以確認滑動面是監測重點所在，多數現地儀器也集中佈設於該區域。針對此研究，我們將對主要滑動面的剖面進行詳細建模分析，透過模擬該剖面上的滑動行為，了解其穩定性，並針對該區域的監測儀器佈設提出具體建議。此外，為了進一步探討主要滑動區域外的地質穩定性與儀器佈設效益，本研究還選取了另外兩個位於滑動面外的剖面，藉由分析這三個剖面之間的穩定性差異，可以更全面地比較各剖面上儀器

佈設的效益，從而最佳化整體監測系統的布局。

選取這三個剖面的原則為：首先，一個位於主要滑動面、具備現地探勘資料的剖面作為主要觀測剖面；其次，選取兩個剖面位於主要滑動面外，以涵蓋監測區域的多樣性，並確保現有大多數儀器位於這兩個剖面的中間，達到最佳的空間覆蓋效果。這樣的剖面選擇與分析設計，能夠提供不同地質條件下的有效數據，並為未來光華崩塌地的持續監測提供更加精確且科學的參考依據。

除了在第六章介紹之剖面 A-A' 外，剖面 B-B' 及剖面 C-C' 位置皆位於光華崩塌潛勢區內，剖面 A-A' 的位置處於光華崩塌地中位移最明顯的主崩塌面，而剖面 B-B' 所處之位置在剖面 A-A' 之南方，起始於(121.3923, 24.6572)，結束於(121.3944, 24.6583)，剖面經過單頻 GPS 位移 FST02-G3，剖面線方向與潛勢區南側邊界相同。而剖面 C-C' 位於剖面 A-A' 之北方，起始於(121.3994, 24.6583)，結束於(121.3943, 24.6587)。三個剖面的相關位置如圖 5-10 所示。

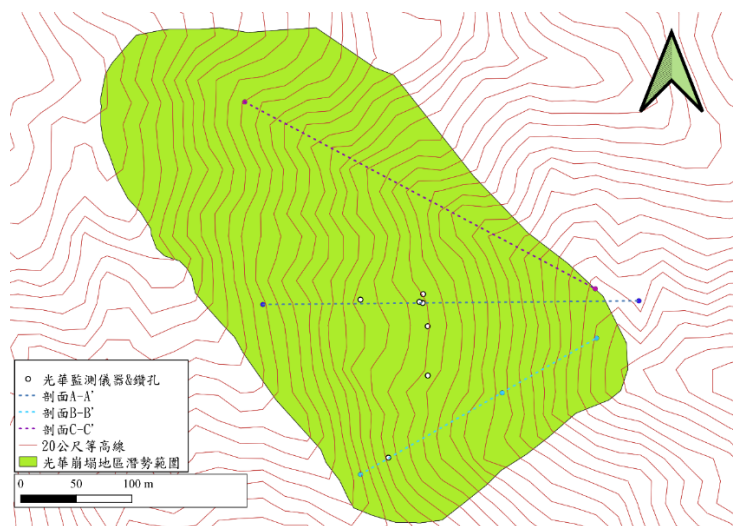


圖 5-10 剖面位置圖

由於剖面 B-B' 和剖面 C-C' 並未進行任何地下鑽孔，也沒有其他

地下探勘資料和土壤採樣，因此缺乏提供土壤參數計算所需的數據。然而，根據光華崩塌潛勢區的地質圖和地質資料整合查詢平台的資料可知，整個光華崩塌潛勢區皆位於巴陵層。巴陵層的地層結構主要由頁岩、板岩和砂岩組成。由於剖面 A-A'位於同一地層且具備已知的土壤材料參數，基於相同的地質背景和材料組成，我們合理假設剖面 B-B'和剖面 C-C'的土壤材料參數與剖面 A-A'相同。這一假設能夠在缺乏實地土壤採樣的情況下，為剖面 B-B'和剖面 C-C'提供有效的土壤參數參考，以便進行更準確的潛在崩塌風險評估。

剖面 B-B'和剖面 C-C'採用 2019 年全臺灣 20 公尺網格數值地形模型(DEM)作為地表高程的資料建立最初的模型外觀，如圖 5-11 與圖 5-12。接著必須將剖面 B-B'和剖面 C-C'兩數值模型進行土壤材質的分配，並且需設定不同材質分佈位置及參數。分佈設定完成後會如圖 5-13 和圖 5-14 所示。

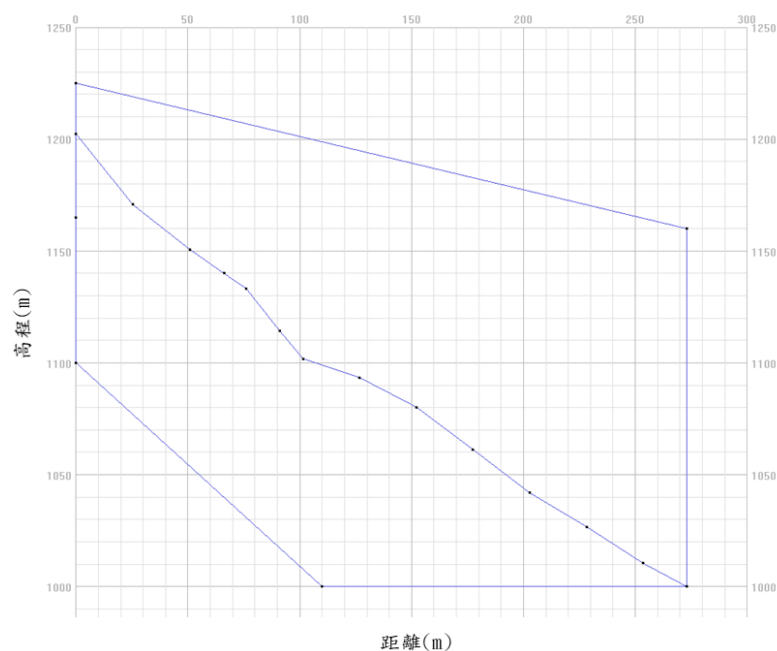


圖 5-11 剖面 B-B'高程資料的模型外觀

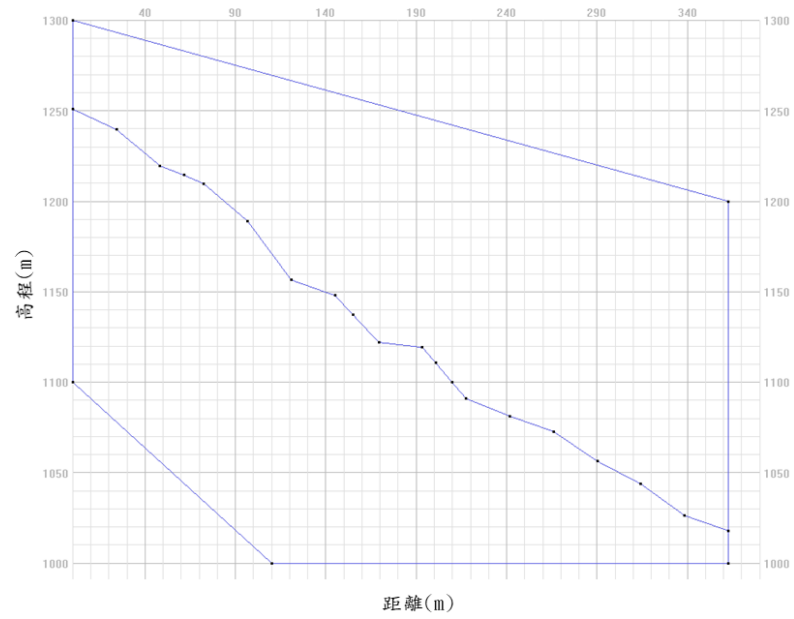


圖 5-12 剖面 C-C' 高程資料的模型外觀

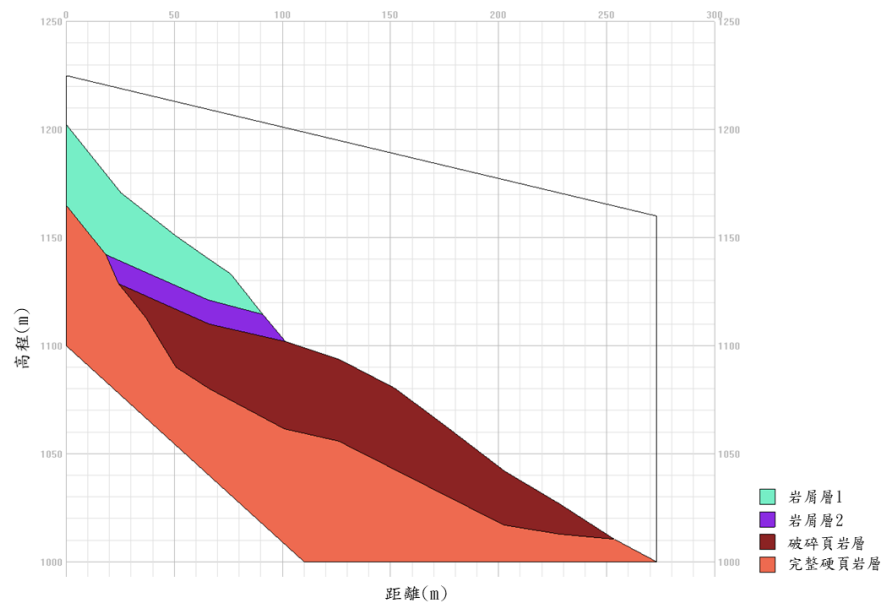


圖 5-13 剖面 B-B' 模型材料分布設定

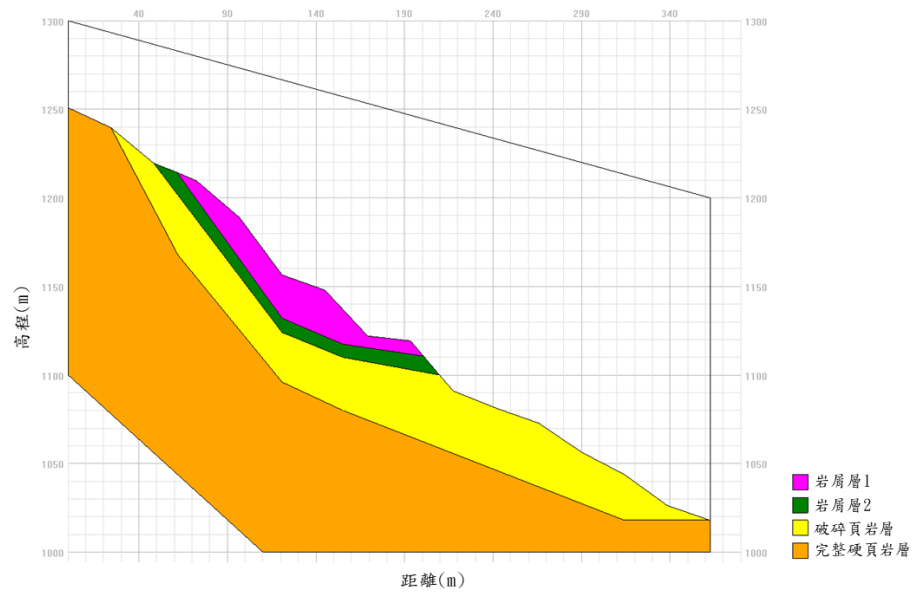


圖 5-14 剖面 C-C' 模型材料分布設定

剖面 B-B'和剖面 C-C'的初始土壤參數與剖面 A-A'相同，將參考彭逸蘋（2022）中的各土壤參數，以作為模型建構的初始值。參考的土壤參數如表 5-2 剖面 B-B' 和剖面 C-C' 之土壤參數。

表 5-2 剖面 B-B' 和剖面 C-C' 之土壤參數

| 土壤參數   | 單位                | 岩屑層 1            | 岩屑層 2            | 破碎頁岩層            | 完整硬頁岩層 |
|--------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------|
| 材料種類   |                   | 飽和材料<br>水力耦合分析   | 飽和材料<br>水力耦合分析   | 飽和材料<br>水力耦合分析   | 乾燥材料   |
| 組成率模型  | -                 | 莫爾-庫倫            | 莫爾-庫倫            | 莫爾-庫倫            | 線彈性    |
| 初始孔隙率  | -                 | 0.3              | 0.3              | 0.3              | 0.3    |
| 單位重    | kN/m <sup>3</sup> | 20.1             | 20.1             | 26.5             | 26.5   |
| 水力傳導係數 | m/s               | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-3</sup> | 10 <sup>-3</sup> | -      |
| 有效浦松比  | -                 | 0.3              | 0.3              | 0.3              | 0.3    |
| 有效楊氏模數 | Mpa               | 7                | 7                | 1200             | 6900   |
| 有效凝聚力  | kPa               | 65               | 55               | 85.7             | -      |
| 有效摩擦角  | -                 | 30               | 30               | 27               | -      |

完成數值模型的材料分佈設定後，接下來需要為模型設定適當的邊界條件。在 Anura3D 中，可設定的邊界條件包括固定邊界的固體、液體與氣體相位移條件、載重條件、水文條件以及指定節點速度（prescribed velocities）等。在本研究中，主要使用了邊界位移的固定條件，並針對固體相與液體相分別設定了一致的邊界條件。固體相的邊界條件如圖 5-15 與圖 5-16 所示，液體相的邊界條件則依據圖 5-17 與圖 5-18 示進行設置。在模型的最下方硬頁岩層與最左側邊界處，設定了鉸支承(hinge)以限制邊界的垂直位移，從而固定其位置。此外，為了限制模型在水平方向的位移，還在模型的最右側及左上方設置了滾支承（roller），使邊界在水平方向上保持固定。



圖 5-15 剖面 B-B'固體相邊界條件

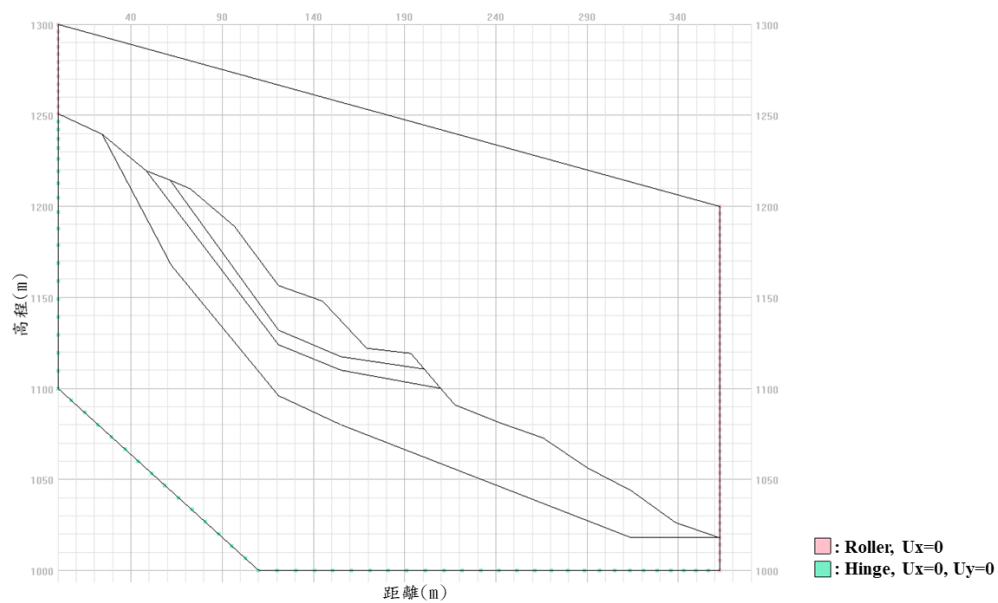


圖 5-16 剖面 C-C' 固體相邊界條件

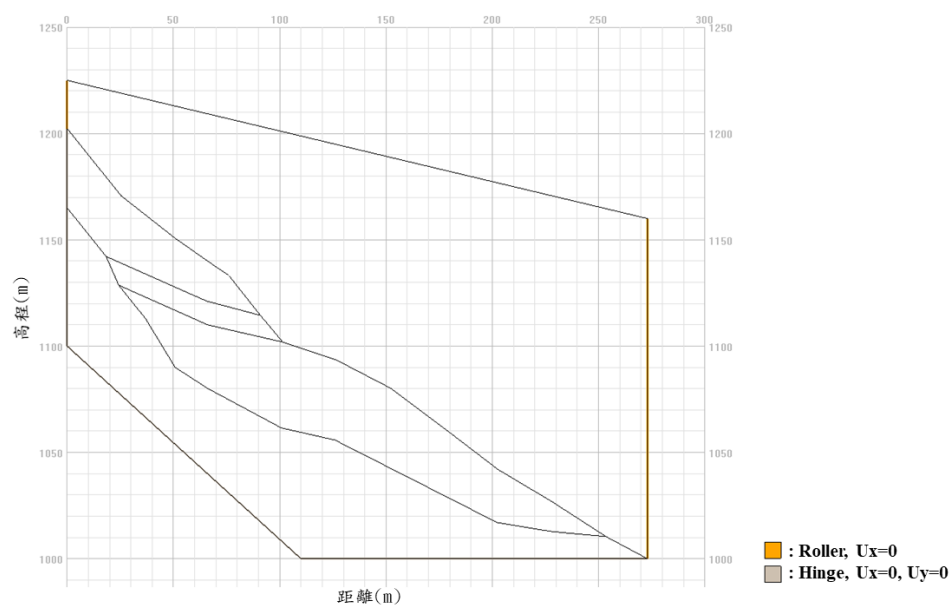
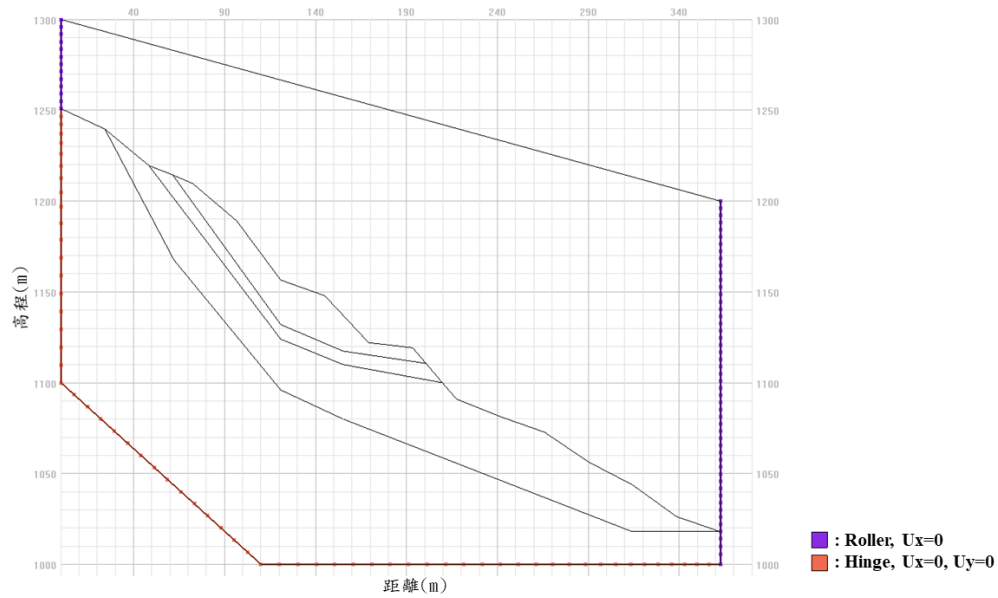
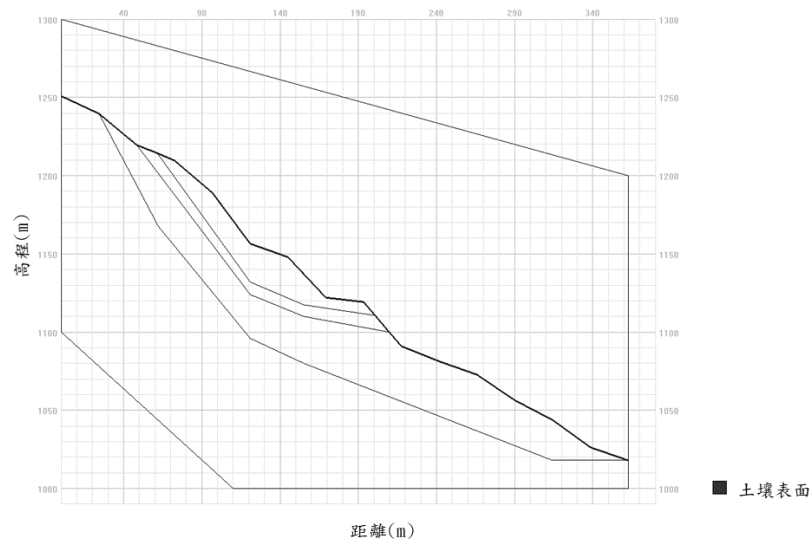


圖 5-17 剖面 B-B' 液體相邊界條件



**圖 5-18 剖面 B-B'液體相邊界條件**

剖面 C-C'之初始條件設定為定義土壤表面(soil surface)的位置分布，如圖 5-19 所示。



**圖 5-19 土壤表面初始條件**

在考慮計算時間成本與邊坡模擬解析度的平衡後，本研究決定將計算網格的尺寸設定為兩種不同的大小。對於位於深層的完整硬頁岩

層，該區域未受到邊坡滑動的影響，因此我們將其網格尺寸設定為 8 公尺。而位於完整硬頁岩層以上的研究關注區域，則由於可能會發生邊坡破壞與滑移，這些區域會出現顯著的位移與行為變化，因此該區域的網格尺寸設為 2.5 公尺。剖面 B-B'和剖面 C-C'生成網格後如圖 5-20 和圖 5-21 所示。

在此模型中，每個計算網格對應到 3 個物質點。物質點會在網格建立後自動生成，並賦予相應的材料性質。每個物質點都會記錄其位置和其他相關訊息。

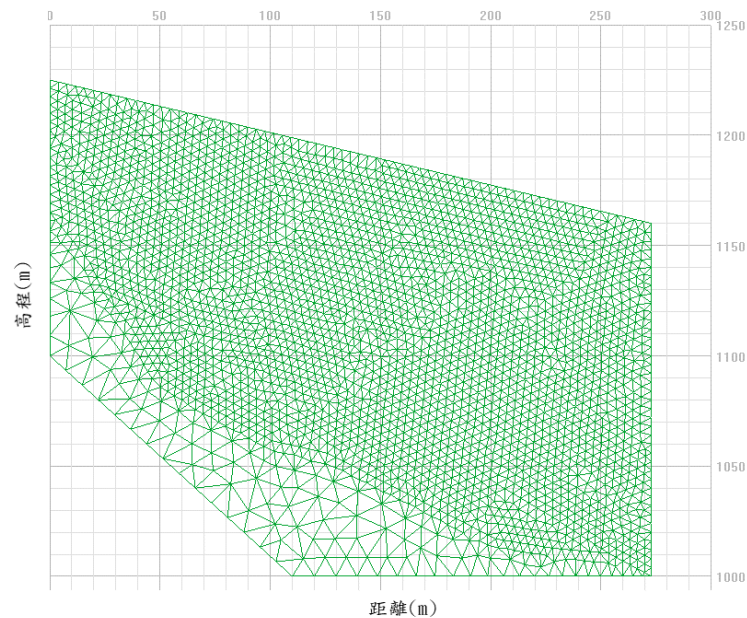


圖 5-20 剖面 B-B'數值模型網格

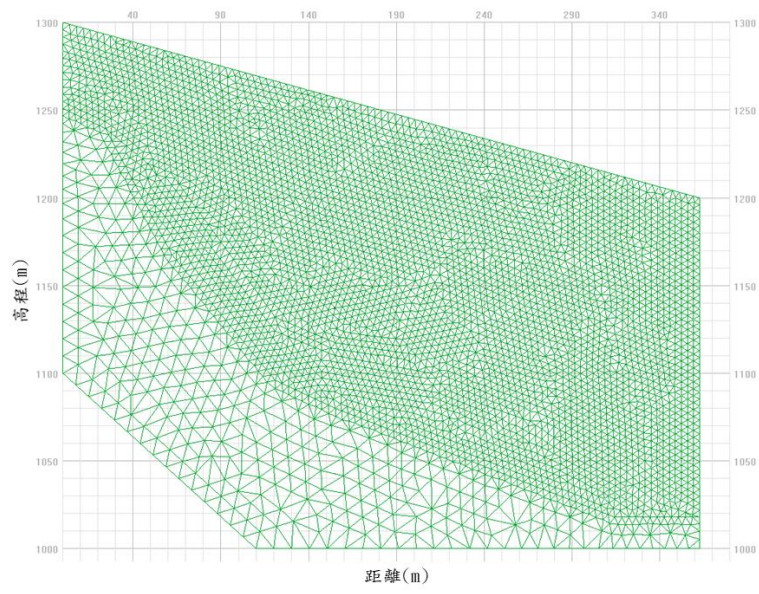


圖 5-21 剖面 C-C'數值模型網格

## 第6章 數值模擬結果

### 6.1 數值模擬結果驗證

此章節將針對所建立之光華崩塌地的數值模擬結果進行驗證與討論，在本研究中，模型驗證的方法主要能分為兩種比對項目，第一種是以 20 公尺網格數值地形模型(DEM)比對邊坡模擬結果的外型樣態，以進行驗證。第二種項目是以現地監測資料與模擬結果進行比較。

#### 6.1.1 數值地形模型(DEM)與邊坡外型樣態比對

本研究以 2019 年全臺灣 20 公尺網格數值地形模型(DEM)作為建立光華崩塌地之初始資料，同時也以 2022 年的 20 公尺網格數值地形模型(DEM)作為另一項參考資料，針對所選用的邊坡剖面進行不同時期的地形比對分析，如圖 6-1。由 2019、2022 的地形比較，在光華崩塌地的上邊坡即光華農路和便道通過位置有明顯的下陷，而下邊坡則有高程增加的狀況，依 3.4 節的歷年災害中的坡地空拍圖也能發現此為光華崩塌的一項特徵，因此，將上下邊坡外型的改變趨勢作為比對項目。

根據物質點法的模擬結果，模型在地表滑動位移時，也是由上邊坡先開始產生位移，岩屑層的位置隨著滑動持續進行而向下運移，導致上邊坡下陷；而下邊坡也隨著時間慢慢堆積上方滑動下來的土，因此坡腳處高程會增加。此兩個現象與 DEM 比較結果符合。

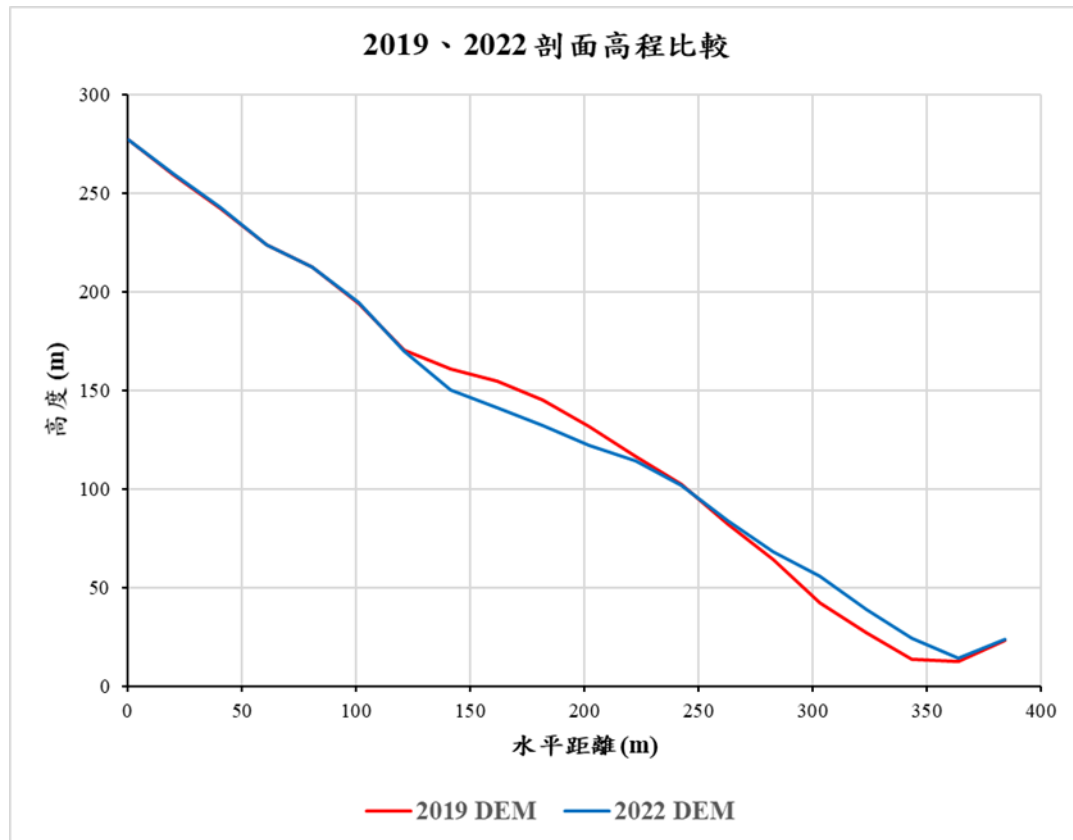


圖 6-1 光華崩塌地 2019/2022 剖面高程比較

### 6.1.2 現地監測資料比對

本研究以現地監測數據為其中一項比對項目，並以初期滑動位移量在各深度之分布為比較對象，檢驗數值模型在地表下模擬結果與實際狀況是否相似。依照 5.1 節提及之邊坡剖面選取的原則，其一就是選取鄰近監測儀器的剖面，如圖 5-1 所示，本研究選取的剖面與鑽孔 K19-1EW 非常接近，但鑒於 K19-1EW 未具有能記錄單一垂直面上位移分布的傾斜管，因此選取具傾斜管且距離剖面最近的 K19-1BW，並找出 K19-1BW 在數值模型上相對應的垂直切面，將該垂直面上模擬之初期位移垂直分布對比傾斜管記錄的位移垂直分布(如圖 6-2 所示)。

由圖 6-1 可觀察出這一垂直面上在滑動初期的位移分布，重點整理如下：

1. 最大位移約 65 公分。
2. 起始滑動深度約在地面下 27 公尺處，此現象也可以對照 3.6 節的地質鑽探結果，推測是因為在深度 25~30 公尺處存在一剪裂帶，導致剪裂帶以上的土體皆滑動，以下則未在初期滑動中受影響。
3. 位移量隨深度增加而減少，但在 10 公尺處有反彈現象。

比對此次模擬結果初始滑動狀態，如圖 6-3 所示，其中，

1. 最大位移約 71 公分。
2. 起始滑動深度約在地面下 27 公尺處。
3. 同樣的在較淺層的區域有較大的位移，位移量隨深度增加而遞減後，在深度 25~30 公尺以下幾乎不動，數值模型模擬結果與傾斜管紀錄趨勢相符，但存有兩點差異如下：

1. 在 10 公尺處無反彈現象。
2. 現場最大位移處約在地面下 2 公尺，數值模型的最大位移則均勻分布於地面下 8-22 公尺處。

推測相異的原因為：

1. 現地地質並非如模型所假設的均勻，尤其是 10 公尺範圍的部分。
2. 物質點法一旦形成剪裂帶，剪裂帶上方的運動行為有類似剛體運動的狀況。

雖然如此，在趨勢跟最大位移量部分，所見模型仍可捕抓到破壞時的關鍵點，本計畫將基於所建模型繼續後續的研究。

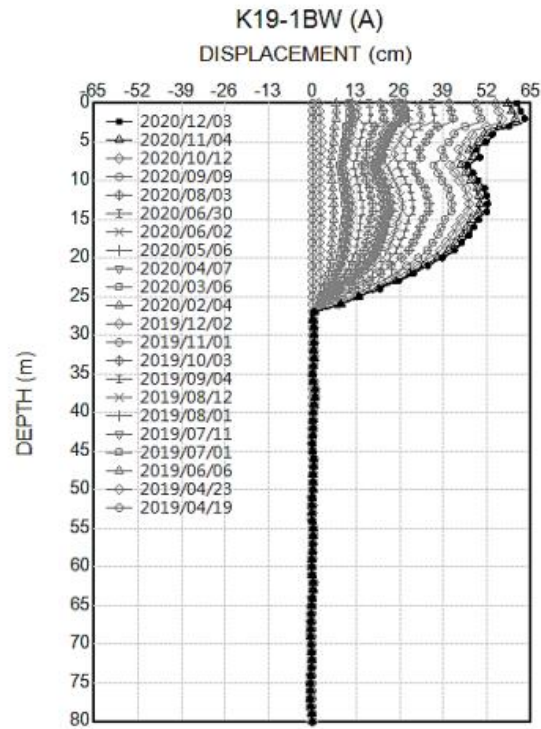


圖 6-2 K19-1BW 傾斜管紀錄(青山工程，2021)

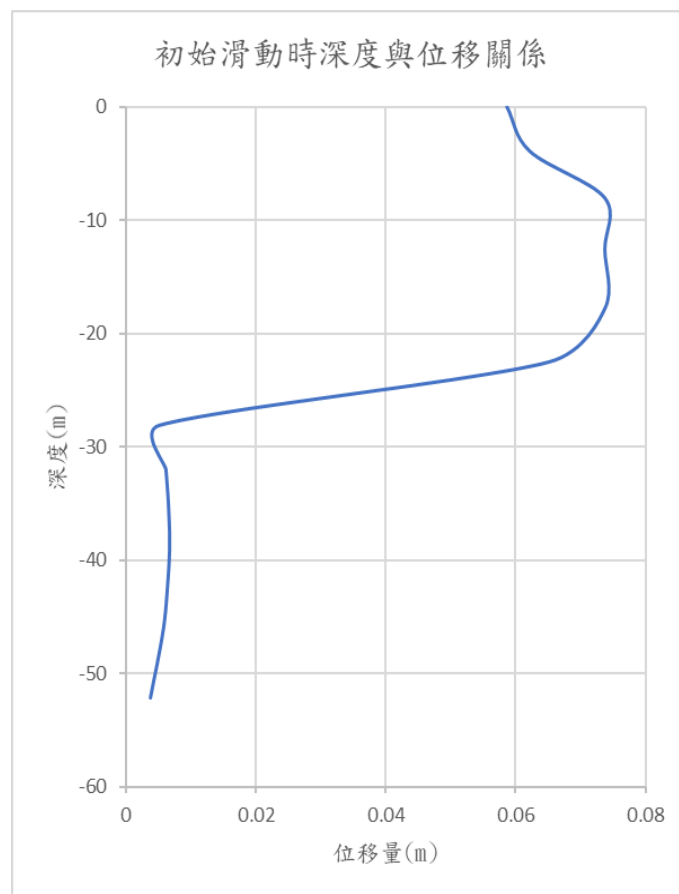


圖 6-3 數值模型初始滑動時深度與位移關係圖

## 6.2 崩塌臨界位移

在進行可靠度分析及崩塌風險評估之前，首先必須界定「崩塌」的定義。當坡面發生滑動並且位移量超過某一臨界門檻值時，才可認為該坡面已經失效，並存在崩塌風險。因此，對於坡面變形的監測與判斷尤為重要。根據 Saito(1965)的研究，當發生大規模崩塌事件時，可以根據坡面變形的速度將其劃分為三個階段：減速變形、等速變形與加速變形。這三個階段的變形過程可以通過應變-時間曲線來進行表達，並且應變隨時間推移而增大，直到達到破壞點。

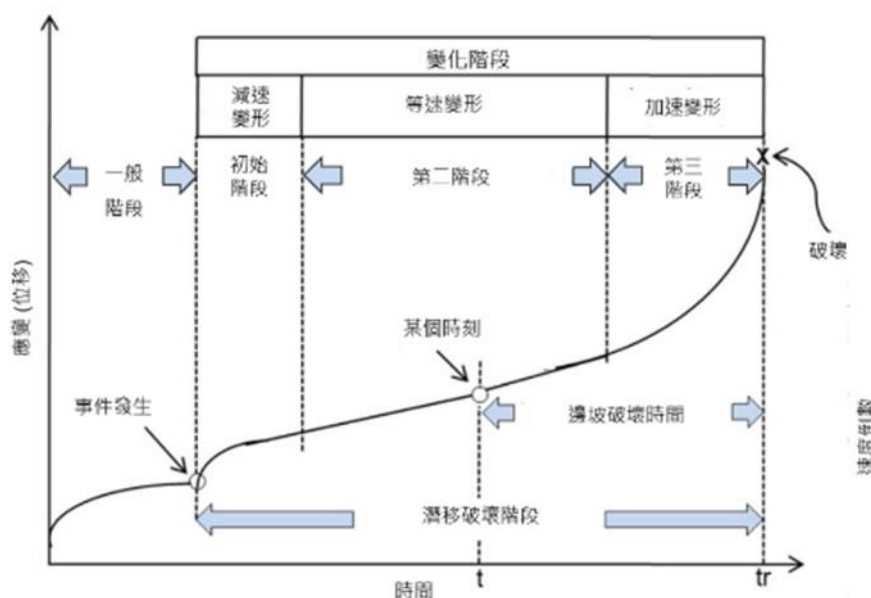


圖 6-4 大規模崩塌之應變-時間曲線(Saito,1965)

在這段從變形階段到破壞的過渡期中，如果能夠有效地利用適當的指標來預測災害的發生，則有助於提高對崩塌事件的警覺性，從而在災害發生之前做出有效的應對。在未進入顯著變形階段、仍處於穩定狀態的坡面區域，可以使用雨量、地震等外部因素作為早期的應變指標來監控其潛在風險。相反，對於如光華崩塌地等已經顯示出變形

和位移的區域，則可利用現場的監測數據，譬如地表位移量等，作為更為精確的風險評估依據。

根據農村水保署大規模崩塌防災資訊網的資料彙整表，可得知針對地表伸縮計紀錄之監測警戒基準值約為每日變形量 0.5mm 至 20mm，這些數據有助於界定何種程度的變形可以被視為潛在崩塌的警示指標。基於此，本研究選擇將地表位移量 20mm/日作為判斷坡面是否存在崩塌風險的門檻值(如表 6-1 所示)。在此基準下，若觀測到的位移量超過該門檻，則可判斷該區域存在較高的崩塌風險。

在使用 Anura3D 進行物質點法模擬時，由於運算時間的成本及計算效益的考量，無法直接將模擬的時間長度設定為 24 小時，並以此觀察物體位移是否超過 20mm 的門檻來判斷崩塌的發生。因此，為了提升計算效率，將崩塌判斷的門檻值從每日 20mm 的位移換算為每秒的位移量。具體來說，20mm/日的門檻相當於 20mm 除以 86400 秒(一天的總秒數)，計算後得到的結果為  $2.3 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 。這樣的換算方法不僅能縮短模擬所需的時間，還能提高計算過程中的效能，從而使得模擬過程更加高效。

表 6-1 常用變形量應變管理準則

| 常用變形量應變管理準則 |                                                                  |                                                        |
|-------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 監測項目        | 應變管理基準                                                           | 使用單位                                                   |
| 地表伸縮計       | 依平均變形量進行潛勢區之活動度分級，包含每日變形量(0.5mm/日~20mm/日)或每月變形量(0.5mm/月~300mm/月) | 中華水土保持學會，1999<br>日本高速公路調查會，1988<br>日本道路公團土質地質調查要領，1992 |
| 地表傾斜儀       | 5sec/日~50sec/日                                                   | 中華水土保持學會，1999                                          |

|       |                |                                                            |
|-------|----------------|------------------------------------------------------------|
|       |                | 日本高速公路調查會，<br>1988<br>日本道路公團土質地質調查要領，1992                  |
| 管內傾斜儀 | 0.5mm/日~10mm/日 | 中華水土保持學會，1999<br>日本高速公路調查會，<br>1988<br>日本道路公團土質地質調查要領，1992 |

## 6.3 可靠度分析中的變數挑選

在前述章節中已提到，工程中所採用的可靠度分析方法能夠將可能影響分析結果的各種不確定因素以隨機變數的形式來進行表達。因此，本研究將選擇一些對坡地崩塌風險影響較為顯著的因素，針對相關參數進行調整，並以隨機變數的形式進行可靠度分析及崩塌風險評估。

在 Anura3D 軟體中，影響模擬結果的主要因素包括幾何模型、土壤材料參數及邊界條件。在本研究中，對於目前建立的模型而言，幾何模型的數值高程模型 (DEM) 和邊界條件已大致確定，因此，這些部分的變化較小，主要的不確定性來源於土壤材料參數。土壤材料參數可以細分為若干項，包括土壤密度 (density)、楊氏模數 (Young's modulus)、泊松比 (passion ratio)、有效凝聚力 (effective cohesion)、有效內摩擦角 (effective friction angle) 等。

根據先前的建模經驗以及測試結果，我們發現改變凝聚力和內摩擦角這兩個參數對模擬結果有顯著影響。因此，這兩項參數被認為對坡地穩定性分析中具有較大的敏感性。

此外，根據陳語晞等（2023）在「自適應克里金坡地穩定可靠度分析」中的研究結果，該研究通過物質點法與克里金法結合進行可靠度分析，並進行了多種參數的敏感度分析。研究結果顯示，在所有參數中，土壤的凝聚力和內摩擦角對邊坡失效機率的影響最大。因此，本研究也將重點關注這兩項土壤材料參數，並進一步評估其對坡地崩塌風險的影響。

除了基於上述原因外，為了確保可靠度分析過程的順利進行，也考慮到了運算過程中的現實限制。在進行可靠度分析時，若隨機變數過多，可能會使得極限狀態函數變得過於複雜，從而影響運算結果的準確性與穩定性。為了避免這種情況發生，本研究在分析過程中對隨機變數的選取做出了合理的限制。具體而言，在一次可靠度分析中，我們選擇了針對三層不同的土壤材料進行研究，包括岩屑層 1、岩屑層 2(受地下水影響折減的岩屑層)，以及破碎頁岩層。每一層土壤材料中，我們挑選了兩個關鍵的隨機變數進行分析。這樣不僅能夠使模型具合理的複雜度，還能確保分析過程中的計算穩定性，同時避免過多隨機變數導致的運算困難。

因此本研究主要關注的土壤參數為凝聚力和內摩擦角，並將這兩個參數視為隨機變數進行可靠度分析。為了進行有效的可靠度分析，首要目標是確定隨機變數的分佈型態 (Distribution)、平均值 (Mean) 以及共變異數 (COV)。這些參數的選擇將直接影響分析結果的準確性和可靠性。

根據 Kayser & Gajan (2014) 一文中的整理資料，歷年來不同文獻中在地質力學的機率分析中，對摩擦角和凝聚力的 COV 值進行了廣泛討論。從這些文獻資料中可以看出，內摩擦角的 COV 通常大約

在 10%左右，而凝聚力的 COV 則通常落在 10%至 40%之間。這些 COV 值為本研究提供了參考依據，因此，本研究決定根據這些數據設定內摩擦角的 COV 為 0.1，凝聚力的 COV 則設定為 0.25。這樣的設定將作為本研究進行初步可靠度分析的隨機變數基準。

除了設定 COV 值之外，內摩擦角和凝聚力的平均值將根據前述章節中所提供的設定如表 6-2 至表 6-6 所示。這些平均值參考自現有文獻資料，以確保能夠真實反映土壤的特性。

在隨機變數的分佈型態選擇上，為了避免在分析過程中出現不合理的結果，本研究選擇了對數常態分佈 (Lognormal distribution) 作為內摩擦角和凝聚力的分佈型態。這樣的分佈不僅能夠反映土壤參數的實際變異性，還能夠確保在進行迭代分析時，這些隨機變數不會出現小於零的負值，從而避免引發運算問題或產生不合理的結果。對數常態分佈能夠有效限制這些隨機變數在物理意義上的合理範圍，保證分析結果的可行性。

表 6-2 文獻中摩擦角的變異性

| <b>Typical COV values of friction angle of soil</b> |                  |              |
|-----------------------------------------------------|------------------|--------------|
| <b>Source</b>                                       | <b>Soil Type</b> | <b>COV/%</b> |
| Lacasse & Nadim (1996)                              | Sand             | 2~5          |
| Phoon & Kulhawy (1999a,1999b)                       | Sand             | 5~15         |
| Phoon & Kulhawy (1999a,1999b)                       | Clay             | 6~15         |
| Srivastava & Babu (2009)                            | Clay             | 11           |
| Wolff et al. (1996)                                 | Sand             | 4~10         |
| Harr (1977)                                         | Gravel           | 6            |
| Harr (1977)                                         | Sand             | 6            |
| Raychowdhury (2009)                                 | Silty Sand       | 10           |
| Most & Khabe (2010)                                 | Clay             | 29           |

表 6-3 文獻中凝聚力的變異性

| <b>Typical COV values of cohension of soil</b> |                  |              |
|------------------------------------------------|------------------|--------------|
| <b>Source</b>                                  | <b>Soil Type</b> | <b>COV/%</b> |
| Lumb (1996)                                    | Marine Clay      | 18           |
| Lumb (1996)                                    | London Clay      | 16           |
| Lacasse & Nadim (1996)                         | Clay             | 5~35         |
| Lacasse & Nadim (1996)                         | Clayey Silt      | 10~30        |
| Phoon & Kulhawy (1999a,1999b)                  | Clay             | 10~45        |
| Duncan (2000)                                  | Clay             | 13~40        |
| Srivastava & Babu (2009)                       | Clay             | 39           |
| Wolff et al. (1996)                            | River Clay       | 40           |

|                 |      |       |
|-----------------|------|-------|
| Meyerhof (1951) | Clay | 20~50 |
|-----------------|------|-------|

表 6-4 岩屑層 1 的隨機變數與統計數值

| 土壤材料 | 岩屑層 1 |      |           |
|------|-------|------|-----------|
| 隨機變數 | 平均值   | COV  | 分佈型態      |
| 凝聚力  | 65    | 0.25 | Lognormal |
| 內摩擦角 | 30    | 0.1  | Lognormal |

表 6-5 岩屑層 2 的隨機變數與統計數值

| 土壤材料 | 岩屑層 2 |      |           |
|------|-------|------|-----------|
| 隨機變數 | 平均值   | COV  | 分佈型態      |
| 凝聚力  | 55    | 0.25 | Lognormal |
| 內摩擦角 | 30    | 0.1  | Lognormal |

表 6-6 破碎頁岩層的隨機變數與統計數值

| 土壤材料 | 破碎頁岩層 |      |           |
|------|-------|------|-----------|
| 隨機變數 | 平均值   | COV  | 分佈型態      |
| 凝聚力  | 85.7  | 0.25 | Lognormal |
| 內摩擦角 | 27    | 0.1  | Lognormal |

## 6.4 可靠度分析結果

本研究將針對三個位於光華崩塌潛勢區內的三個剖面進行可靠度分析及崩塌風險評估，藉由物質點法結合自適應克里金法，計算邊坡失效機率，以得到邊坡上關注點的崩塌風險，並透過這些模擬結果

作為後續監測建議的依據。

#### 6.4.1 挑選各剖面上的關注點

本研究此階段的目的是識別出適合進一步分析的點，特別是針對具有崩塌風險的區域進行關注。在某些區域，物質點在邊坡上的位移變化非常明顯，並且存在達到臨界崩塌位移的潛在風險，這些區域因此被視為崩塌的高風險區域。此外，某些物質點的位置值得討論，因此這些區域的物質點將被確定為特別監測的關注點。

本研究採用了 GiD 軟體進行數值建模，並設定了相應的土壤參數與邊界條件，接著生成網格模型，為後續的模擬準備資料。使用 Anura3D 進行模型模擬後，會生成 vtk 格式的檔案。透過後處理軟體 Paraview，這些 vtk 檔案能夠幫助我們詳細觀察坡面滑動的情況，並且查看各個物質點的位移相關資料。

在三個剖面的模擬結果完成後，我們將根據 vtk 檔案中物質點在水平方向（x 方向）上的位移量進行排序。透過位移量的大小，我們能夠識別出位移最大的物質點，這些點將被優先關注。同時，位移量次大或者其他值得討論的區域，也將被選為下一步分析的關注點，進一步進行詳細的風險評估和防災策略的制定。

##### 剖面 A-A'的關注點

挑選的關注點是: Point 3、Point 43、Point 789 共三點，詳細位置如圖 6-5 所示。Point 3 所處位置鄰近於孔內伸縮計 K19-1E，因此值得關注。而 Point 43、Point 789 所處區域的滑動較其他地方明顯。

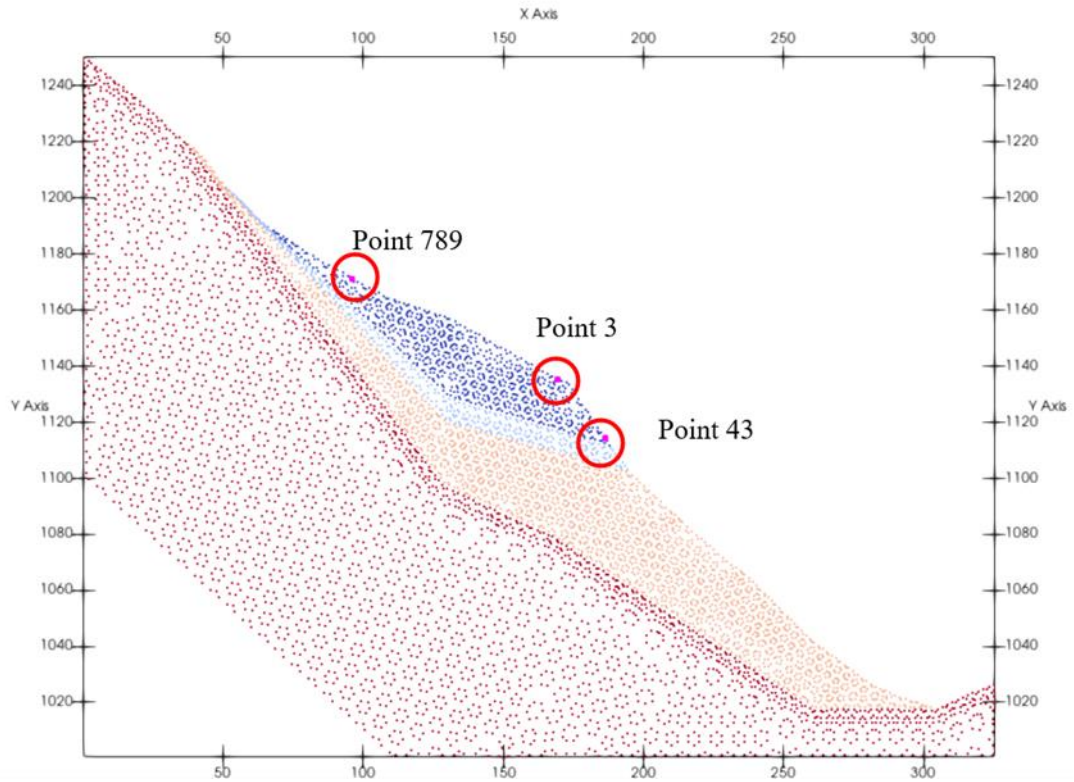


圖 6-5 剖面 A-A'的關注點

### 剖面 B-B'的關注點

挑選的關注點是: Point 831、Point 1873、Point 333 共三點，如圖 6-6 所示。挑選這三點的原因是基於物質點法模擬後，這三點所處的區域，在此剖面上位移量是比較大的。

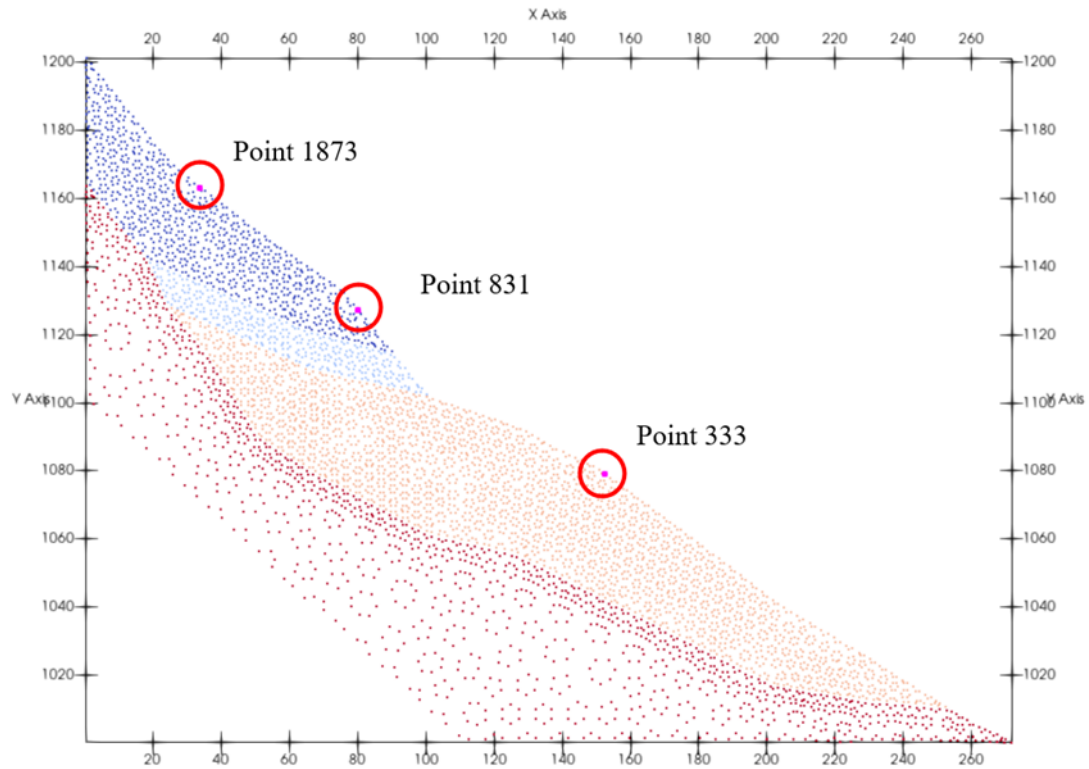


圖 6-6 剖面 B-B'的關注點

#### 剖面 C-C'的關注點

挑選的關注點是: Point 8048、Point 7267、Point 7951 共三點，如圖 6-7 所示。挑選這三點的原因是基於物質點法模擬後，這三點所處的區域，在此剖面上位移量是比較大的。

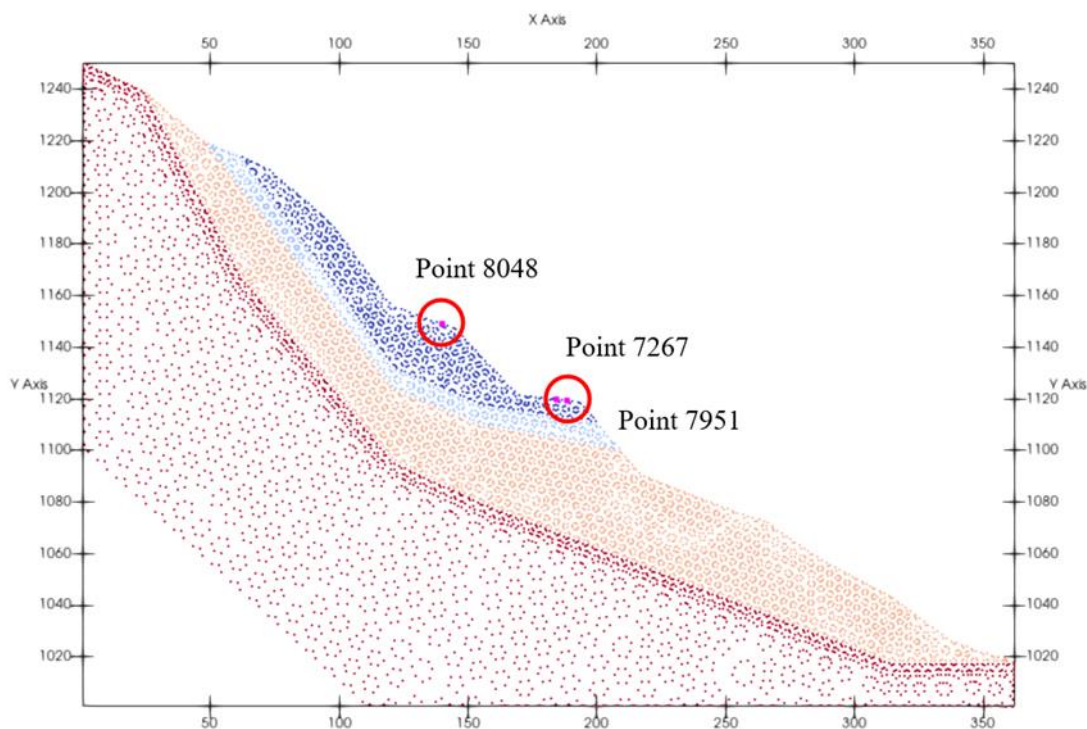


圖 6-7 剖面 C-C' 的關注點

#### 6.4.2 關注點之分析結果

在挑選完三個剖面上各自的 3 個關注點後，則針對這 9 個關注點進行第一次的可靠度分析。結果顯示並未有任何一個關注點達到失效機率，這與真實的位移發生情況存在明顯的差異。研判可能是與隨機變數的分佈型態 (Distribution)、平均值 (Mean) 以及共變異數 (COV) 設定值有關。由於平均值是沿用模型設定之參數，因此，重新調整隨機變數分佈型態與 COV。將分佈型態由原本的對數常態分佈改為常態分佈；凝聚力 COV 由原本的 0.25 上調至 0.75，內摩擦角 COV 維持 0.1，調整後的隨機變數相關設定如表 6-7 至表 6-9 所示。原 0.25 數值來自於外國文獻，經判斷 0.25 的變異性對於凝聚力而言，有低估的狀況，因此往上調升。依此方式調整後，隨機變數分佈的範圍較調

整前大，而非集中在平均值附近導致多次迭代後仍無失效樣本產生，因此這一調整策略有助於提升可靠度分析的效率。

表 6-7 岩屑層 1 的隨機變數與統計數值

| 土壤材料 | 岩屑層 1 |      |        |
|------|-------|------|--------|
| 隨機變數 | 平均值   | COV  | 分佈型態   |
| 凝聚力  | 65    | 0.75 | Normal |
| 內摩擦角 | 30    | 0.1  | Normal |

表 6-8 岩屑層 2 的隨機變數與統計數值

| 土壤材料 | 岩屑層 2 |      |        |
|------|-------|------|--------|
| 隨機變數 | 平均值   | COV  | 分佈型態   |
| 凝聚力  | 55    | 0.75 | Normal |
| 內摩擦角 | 30    | 0.1  | Normal |

表 6-9 破碎頁岩層的隨機變數與統計數值

| 土壤材料 | 破碎頁岩層 |      |        |
|------|-------|------|--------|
| 隨機變數 | 平均值   | COV  | 分佈型態   |
| 凝聚力  | 85.7  | 0.75 | Normal |
| 內摩擦角 | 27    | 0.1  | Normal |

### 調整隨機變數相關設定後的結果

重新調整隨機變數相關設定後，對這 9 個關注點進行第二次的可靠度分析，以求得各關注點的失效機率( Failure Probability, Pf )。

剖面 A-A' 的關注點包括 Point 3、Point 43、Point 789，這些點在經過不同次數的迭代後，對應的失效機率分別如下：

- (1) Point 3 在經過 54 次迭代後，失效機率為 0.9999 (99.99%)
- (2) Point 43 在經過 54 次迭代後，失效機率為 0.9998 (99.98%)
- (3) Point 789 在經過 74 次迭代後，失效機率為 0.2016 (20.16%)

剖面 B-B' 的關注點包括 Point 831、Point 1873、Point 333，這些點在經過不同次數的迭代後，對應的失效機率分別如下：

- (1) Point 831 在經過 62 次迭代後，失效機率為 0.0000215 (0.00215%)
- (2) Point 1873 在經過 170 次迭代後，失效機率為 0.00 (0%)
- (3) Point 333 在經過 170 次迭代後，失效機率為 0.00 (0%)

剖面 C-C' 的關注點包括 Point 8048、Point 7267、Point 7951，這些點在經過不同次數的迭代後，對應的失效機率分別如下：

- (1) Point 8048 在經過 54 次迭代後，失效機率為 0.989 (98.9%)
- (2) Point 7267 在經過 52 次迭代後，失效機率為 0.9705 (97.05%)
- (3) Point 7951 在經過 54 次迭代後，失效機率為 0.96 (96%)

上述關於各剖面模擬後得到的失效機率，整理如表 6-10 所示。

表 6-10 各剖面各關注點之可靠度分析結果

|         | 最大點      | 2nd    | 3rd    |
|---------|----------|--------|--------|
| 剖面 A-A' | 99.99%   | 99.98% | 20.16% |
| 剖面 B-B' | 0.00215% | 0%     | 0%     |
| 剖面 C-C' | 98.90%   | 97.05% | 96%    |

由各剖面模擬後得到的失效機率可以發現：

剖面 A-A' 在 Point 3、Point 43 皆具有極高的失效機率，分別為 99.99% 和 99.98%。而 Point 789 的失效機率為 20.16%，相較於其他兩個點，失效風險顯著較低，但仍需關注。

剖面 B-B' 中的 Point 831 顯示出非常低的失效機率（0.00215%），而其他兩點 Point 1873 和 Point 333 顯示出的失效機率均為 0%，說明這些點在分析中基本上不會失效。

剖面 C-C' 在這三個關注點皆具有較高的失效機率，崩塌的風險較大。

透過對各關注點進行失效機率的計算後，我們發現光華崩塌地的主滑動面（剖面 A-A'）顯示出顯著的位移現象，並且該區域的失效機率極高，這與過去監測資料所顯示的情況高度吻合。因此，根據這些結果，我們認為這一模擬結果是合理且可靠的，與現地情況保持一致。這也進一步證實了主滑動面在崩塌過程中的重要性，並顯示該區域的崩塌風險是不可忽視的。然而，除了 Point 3 和 Point 43 外，第三個關注點（Point 789）在失效機率上顯示出了不同的結果，我們將在後續章節對其進行詳細討論。

另一方面，位於主滑動面以外的剖面 B-B' 顯示出非常微小的失效機率，該區域的結果都表現得非常一致，這顯示該區域的崩塌風險相對較低。從這一結果可以推測 B-B' 剖面所在區域的穩定性相對較好，這也使得該區域在未來的坡地穩定性分析中可以被視為相對安全的區域。

在剖面 C-C' 中，雖然高程較高的關注點（Point 8048）並未位於主

滑動面的範圍內，但其失效機率依然非常高。儘管如此，前三大位移點（即失效機率最大的三個關注點）之間的失效機率仍然存在些微差異，這可能是由於模擬過程中使用的可靠度演算法存在一定誤差，或是模擬模型本身在某些情境下無法完全捕捉到實際地形的變化。此外，儘管剖面 C-C' 的部分區域位於主滑動面範圍之外，但它們的失效機率仍顯示出較高的風險，這一現象值得進一步分析。這可能是由於模擬過程無法完全還原現地的實際情況，例如實際現場可能存在的植被覆蓋。植被具有穩固土壤的作用，能夠有效提高土壤的抗剪強度和水土保持能力，而這些因素未能完全納入模擬中。此類情況顯示，雖然模擬結果顯示某些區域的失效機率較高，但這些區域的實際風險可能受到一些未考慮因素的影響，像是植被或其他環境條件等。雖然以現場實地狀況來看，崩塌風險似乎不如剖面 A-A' 明顯，但不排除仍具有潛在的風險。

## 6.5 在不同情境下的崩塌風險

為了了解光華崩塌地在不同情境下可能產生的風險，本研究將在本節中說明所設定的不同情境及其相對應的評估結果，並對這些結果進行討論。

對於較脆弱的山坡地而言，許多自然或人為因素可能會導致邊坡位移，進而引發邊坡滑動、崩塌，甚至引發災害。這些因素可能包括強降雨、地震、土壤鬆動等環境因素，而這些情況往往會對坡地的穩定性造成不利影響。在這些事件發生時，地下水位通常會隨之變化，這是影響坡地穩定性的關鍵因素之一。例如，強降雨會迅速抬升地下

水位，進而降低抗剪強度，從而降低坡體的穩定性，這可能會促使邊坡崩塌或滑動。因此，本階段研究選擇將地下水位作為一個主要變因，通過設計不同地下水位情境來探討其對山坡地崩塌風險的影響，並分析不同情境下坡地失效的機率如何變化。

根據過去的監測資料，光華崩塌地的主滑動面是位移現象最為顯著的區域，並且大部分的監測儀器都設置在這一區域。因此，在本研究中，將聚焦於主滑動面上的 A-A'剖面，並基於該剖面構建的物質點法模型，進行情境分析。通過調整模型中的相關設定，模擬和分析不同情境（如不同地下水位）對崩塌風險的影響，並評估這些情境對山坡地穩定性和崩塌風險的具體影響。

確定將本研究的關注對象集中於 A-A'剖面後，我們決定選擇該剖面上特定點（即前述章節中的 Point 3）作為分析對象，並針對其失效機率進行評估。

在不同地下水位情境的設定中，本研究考慮了兩種主要情境。第一種情境是常時地下水位，即依照前面章節所設定的基準地下水位作為參考條件；第二種情境則是假設無地下水位存在，即將地下水位設置為零，以探討其對邊坡穩定性的影響。

由於本研究的模擬精度受限，無法直接模擬地下水的水力作用，因此我們選擇將地下水對土壤穩定性影響的效果簡化為對凝聚力的調整。具體而言，我們通過調整岩屑層土壤的凝聚力大小及其分佈，來模擬地下水位變化對土壤穩定性的影響。這一方法可有效代替地下水對土壤凝聚力的潛在影響，並使我們能夠比較不同地下水情境下，邊坡上關注點（Point 3，如圖 6-8 所示）的失效機率變化。

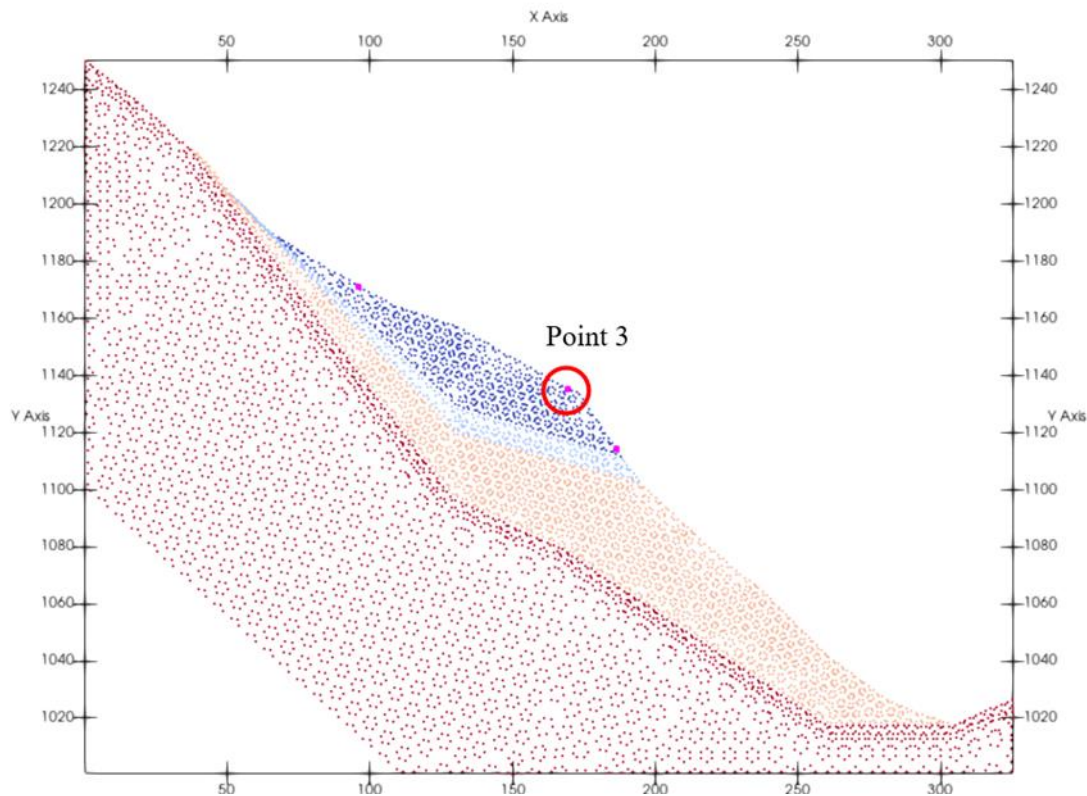


圖 6-8 關注點 Point 3 位置圖

在 A-A'剖面上，針對 Point 3 進行正常地下水情境設定後，透過可靠度分析，我們發現當地下水位處於常時設定時，該區域的失效機率達到了 99.9999%(如表 6-11 所示)，這顯示出極高的崩塌風險。相較之下，無地下水位的情境下，失效機率為 99.9979%。儘管在這兩種地下水情境下，失效機率都接近 1，幾乎可以認為該區域的穩定性極低，但兩者之間仍然存在微小差異。進一步比較這些差異，我們可以推斷在無地下水位情境下，坡地的穩定性稍微高於正常地下水位情境。這可能是由於地下水位上升時會增加土壤內部水的滲透壓力，從而降低土壤的凝聚力，進一步加劇坡地的不穩定性。相比之下，無地下水位的情境，土壤的凝聚力較未受影響，從而稍微提高了坡體的穩定性。

這一結果顯示，地下水對坡地穩定性有影響，並且在不同的地下

水情境下，坡地的崩塌風險存在一些變數。因此，這些模擬結果不僅驗證了地下水對坡地穩定性的影響，也為未來的坡地監測與災害防治提供了重要依據。在後續的坡地監測工作中，應強化對地下水位的監測，及時了解地下水位的變化情況。尤其是在地下水位異常升高的情況下，應該考慮採取有效的工程措施，如設置排水設施，以降低地下水對坡地穩定性的負面影響，從而減少崩塌風險。在工程許可的範圍內，這些措施將有助於提升坡地的穩定性，從而更有效地進行災防規劃與風險管理。

表 6-11 不同地下水位之可靠度分析結果

| 情境       | 正常地下水位   | 無地下水     |
|----------|----------|----------|
| 失效機率(Pf) | 99.9999% | 99.9979% |

## 6.6 監測儀器佈設之建議

在大規模崩塌區域的監測設計中，如何合理配置監測儀器的位置是一個關鍵問題。監測儀器的有效擺設必須位於那些位移和邊坡活動較顯著的區域，這樣才能夠在發生變化時，及時獲取準確的數據，從而對崩塌風險作出快速反應。因此，選擇合適的監測點，對於提高預警能力和保障區域安全至關重要。

基於這一概念，本研究決定依據過去的監測資料和現場的實際情況，選擇在 A-A'剖面上進行研究。根據前期研究，光華崩塌地的主滑動面是該區域位移現象最為明顯且活動最為頻繁的部分。過去的監測結果顯示，大多數的監測儀器也集中設置在這一區域，並且這些儀器

成功捕捉到崩塌活動的重要數據。因此，本研究選擇聚焦於 A-A'剖面，以便深入分析該區域的失效風險。

在此基礎上，本研究將進一步針對 A-A'剖面上的不同區域進行風險評估，尋找出那些潛在失效風險較高的區域。這些區域將作為建議監測儀器設置的主要目標位置。

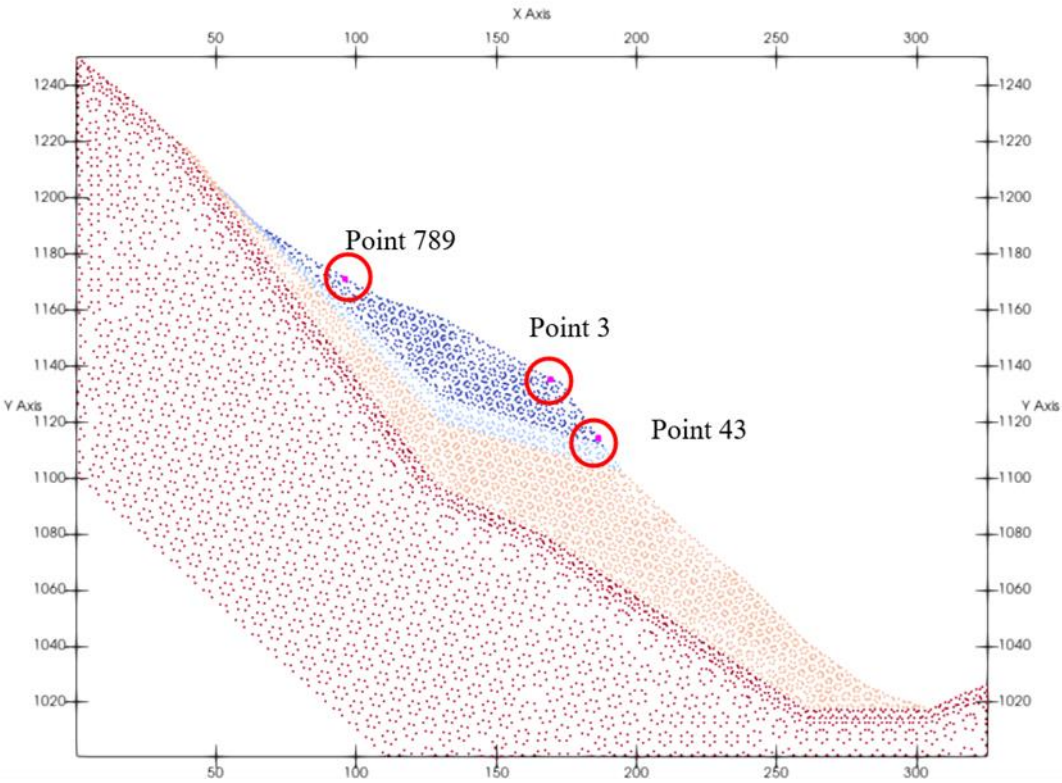


圖 6-9 剖面 A-A'的關注點

表 6-12 剖面 A-A'不同關注點之可靠度分析結果

|      | Point 3 | Point 43 | Point 789 |
|------|---------|----------|-----------|
| 失效機率 | 99.99%  | 99.98%   | 20.16%    |

根據 6.4 章所提及的失效機率計算結果（如表 6-11 所示），可以觀察到在 A-A' 剖面上，不同關注點的失效機率仍然存在顯著差異。這些差異可能與地表數值高程模型（DEM）及地下土壤材料分佈的不

同。由於在邊坡安全評估中，優先關注的是那些位移和邊坡活動最為顯著的區域或關注點，因此，通過比較 A-A' 剖面上三個關注點的失效機率差異，我們可以獲得有價值的結論。

具體而言，Point 789 的失效機率顯著低於 Point 3 和 Point 43。這意味著 Point 789 所在區域的潛在活動性和崩塌風險較低，而 Point 3 和 Point 43 則顯示出較高的風險。這一結果顯示，在進行監測儀器的布設時，應該優先選擇 Point 3 和 Point 43 周邊的區域進行監測，因為這些區域的崩塌風險較高，對邊坡穩定性的潛在威脅較大。Point 789 雖然失效機率低於 Point 3 和 Point 43，但 Point 789 周圍的監測儀器也不少(Point 789 的位置大約在圖 5-1、圖 5-2 圖中的 KC-3 附近)，實際觀察其崩塌情況並不亞於 Point 3 和 Point 43(斷掉的光華農路位於 Point 789 附近)。雖然 Point 789 的失效機率低於其他兩點，但失效機率 20%在坡地穩地分析中仍屬高風險地區，因此，計算結果與目前實際布設的監測儀器趨勢相同。

若以單剖面的結果為基礎，將其延伸至整個空間範圍來討論監測儀器的佈設，我們可以透過對多個剖面的物質點法分析及失效機率的計算來評估不同區域的崩塌風險，能幫助我們確定在哪些剖面上崩塌風險較高，並且可以在多個高失效機率點集中或位於多個高風險剖面交匯的區域，優先選擇那些潛在位移較大、崩塌風險較高的區域來進行監測儀器的設置。這樣的策略有助於提高監測精度，並能更有效地識別出可能發生崩塌的關鍵區域。

本計畫未選擇使用三維物質點法來進行分析的理由如下:雖然三維物質點法能夠更精確地描述空間中的物質分佈和變化，但其建立過程中存在一些挑戰。首先，地質材料的分佈本身具有較大的不確定性，

這會增加三維建模的難度。此外，若使用三維模型，生成的物質點數量通常較為龐大，增加模擬運算的時間，尤其是在進行失效機率計算時，可能會消耗大量的計算資源和時間，儘管三維模型能提供更為細緻的空間訊息，但仍需驗證其效益。

因此本研究中我們選擇使用三個剖面（即二維模型）的分析結果來討論監測儀器的佈設建議，其位置可參考圖 6-10 三剖面位置圖。這樣的方法不僅能夠縮短計算時間，還能減少因為三維建模帶來的複雜性和不確定性。基於這些考量，二維分析結果仍然能夠為監測儀器的佈設提供可靠的參考依據。

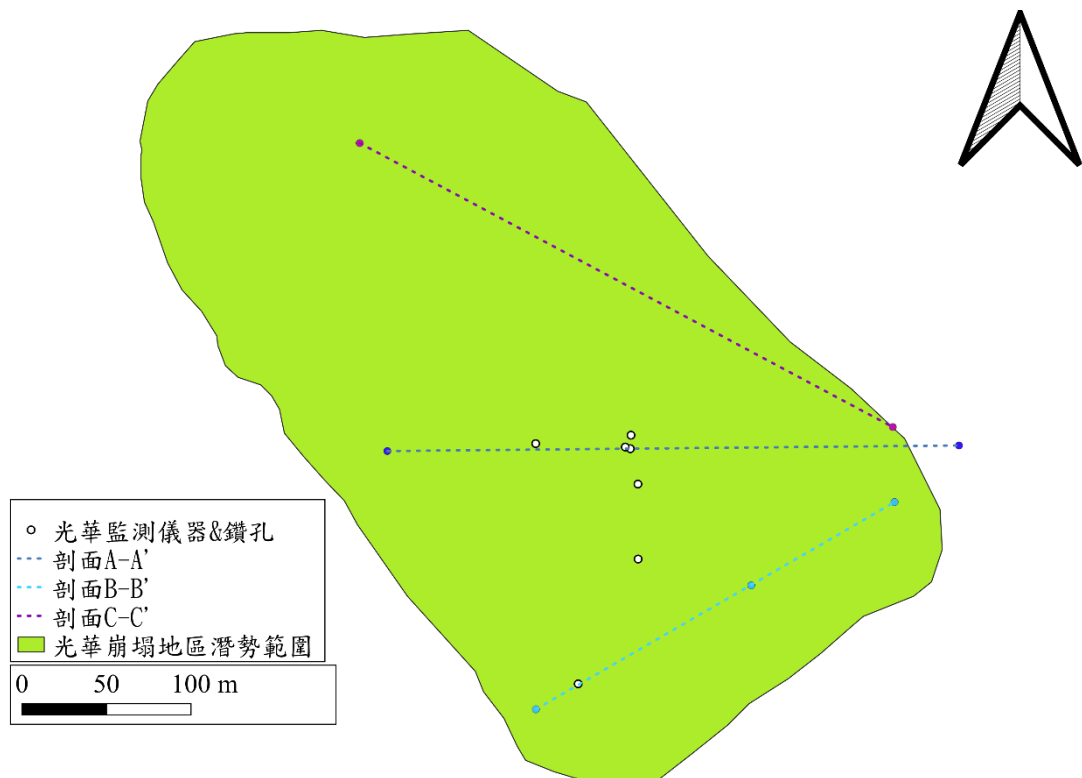


圖 6-10 三剖面位置圖

表 6-13 為 9 個關注點的失效機率，從數據中可以看出，剖面 A-A'和剖面 C-C'的失效機率相對較高，顯示出這些區域的崩塌風險較大，而剖面 B-B'則顯得相對較為穩定。根據前述的監測儀器佈設建議，位於高失效機率剖面 A-A'和剖面 C-C'之間的區域，極有可能存在較高的崩塌風險。因此，建議在這些區域進行進一步的分析，並且根據結果建議在這些高風險區域安裝監測儀器。相較之下剖面 B-B'周圍的失效機率可能沒這麼高，在增設監測儀器的優先度上應低於剖面 A-A'和剖面 C-C'之間的區域。

表 6-13 不同剖面不同關注點之可靠度分析結果

|         | 最大點      | 2nd    | 3rd    |
|---------|----------|--------|--------|
| 剖面 A-A' | 99.99%   | 99.98% | 20.16% |
| 剖面 B-B' | 0.00215% | 0%     | 0%     |
| 剖面 C-C' | 98.90%   | 97.05% | 96%    |

通過上述的分析與比較，不僅能夠確定監測儀器的擺設位置優先級，還可以有效評估儀器佈設的合理性。換句話說，這些結果有助於確保監測系統有效運作，並對於可能的崩塌危險區域提供及時的預警，從而提高整體防災應對的效果。

## 6.7 崩塌警戒值之訂定策略

本研究通過機率式崩塌模式，討論了適合且具有預警意義的位移量管理值，該管理值可用於預警、疏散與避難的判斷標準。為了討論這一管理值，本研究參考了過去中華水土保持學會及國外水土保持相關單位所使用的管理值，並在建立物質點法模型後，將此管理值作為

判斷坡面是否失效的門檻值。這一做法與 6.2 節所討論的崩塌臨界位移概念相似，透過進行克里金法的失效機率計算，來確定當位移量達到某一特定值時，坡面可能發生崩塌的風險。

討論崩塌警戒值的主要目的是評估所設定的管理值是否過於保守，或者是否過於嚴格，從而影響到預警的及時性與實用性。因此，本研究選擇了光華崩塌地的三個剖面：剖面 A-A'、剖面 B-B'、剖面 C-C'，對這些剖面進行不同失效門檻值的分析。這些剖面涵蓋了不同的地形和地質條件，有助於全面評估崩塌風險。

在設定崩塌判斷門檻值時，本研究選用了多組位移量對應的速度換算值。首先，將每日 20mm 的位移換算為每秒位移量  $2.3 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ ，並將每日 40mm 的位移換算為每秒位移量  $4.6 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 。此外，還設定了另一組位移門檻值，即每秒位移量為  $5.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 。這幾組門檻值將分別用來進行分析，通過對不同門檻值下的崩塌風險計算，我們可以更好地評估各種警戒值對崩塌預警的影響。

由表 6-14 的數據可看出，使用較保守的值  $2.3 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$  作為門檻值時，所有三個剖面（剖面 A-A'、剖面 B-B'、剖面 C-C'）的最大位移點都計算出了相應的失效機率。然而，使用較寬鬆的門檻值  $4.6 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$  時，剖面 A-A' 的失效機率下降至 35.65% 的失效機率，而剖面 B-B'、剖面 C-C' 則未顯示出任何失效機率；同樣的再將門檻值調整至更寬鬆  $5.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ ，剖面 A-A' 的失效機率再次下降，僅剩 8.19% 的失效機率，而剖面 B-B'、剖面 C-C' 仍無失效機率的計算結果。

表 6-14 不同門檻值之可靠度分析結果

| 門檻值 | $2.3 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ | $4.6 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ | $5.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ |
|-----|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|-----|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|

|         |          |        |       |
|---------|----------|--------|-------|
| 剖面 A-A' | 99.99%   | 35.65% | 8.19% |
| 剖面 B-B  | 0.00215% | 0%     | 0%    |
| 剖面 C-C' | 98.90%   | 0%     | 0%    |

在進行實際應用時，選擇適當的崩塌警戒值(門檻值)至關重要，過於保守的門檻可能會導致過多區域被判定為高風險，造成資源的浪費；而過於嚴苛的門檻則可能會忽略某些潛在的風險區域，降低預警的敏感性。因此，對門檻值的選擇需要平衡風險識別的精確度和資源分配的合理性，確保監測系統的有效運作。若假設目前現場監測儀器的布設符合需求，則每日 20mm 的位移的警戒值顯得過於保守，應可考慮將其放寬至 40mm 或更高；反之，如果剖面 C-C'確實存有高度風險，則每日 20mm 的位移的警戒值應屬恰當。

在設定警戒值時，除了如同本研究操作方法，先參考過去普遍使用的警戒值作為初步的門檻值，再藉由多個設定門檻值相互比較決定門檻值的方法以外，在未來，也能使用更多監測儀器紀錄的數據，如：地表伸縮計得到之當地日均最大位移量、月均最大位移量等，整理出最符合研究區域位移的數值區間，將門檻值設定在此區間可以避免在分析過程中模型位移未達到此值或持續超過此值且未發生大變形，導致後續訂定的警戒值過於保守或過於寬鬆。

## 第7章 結論與討論

本研究針對光華崩塌地的風險評估與防災預警，採用了物質點法模型進行數值模擬，並在此基礎上提出了一系列的建議與分析，旨在提升崩塌風險識別與預警準確性。首先，在建立光華崩塌地的物質點法模型的過程中，我們蒐集並分析了當地的地質資料，並參考過去相關文獻中的地層剖面資料，這些資料為後續建立精確的地形模型提供了依據。通過蒐集資料，也界定了「崩塌臨界位移」的概念，即當坡面發生滑動並且位移量超過某一臨界門檻值時，該坡面即視為失效並存在崩塌風險，這一定義對後續的風險評估和監測工作至關重要。

在防災預警系統的設計上，監測儀器的佈設是保障預警效能的重點。本研究根據物質點法模擬結果，提出了一套選擇儀器佈設位置的策略，監測儀器應設置於那些位移和邊坡活動較顯著的區域。這樣的佈設方式有助於在位移發生變化時，能夠及時獲取數據，從而對崩塌作出反應。若監測儀器能夠集中在這些關鍵區域，便可在崩塌發生前獲得有效的位移監測數據，進一步提高預警的精確度與及時性，從而為可能受影響的區域提供充分的防災準備時間，進而減少潛在的災害損失。

此外，本研究通過設計不同的地下水位情境，探討了地下水位變化對山坡地崩塌風險的影響。通過模擬不同情境並計算相應的失效機率，我們能夠得知在不同情境條件下坡地失效的可能性。這一分析能夠在實際應用中幫助調整監測策略和防災措施。

最後，本研究針對崩塌地的警戒值提出了具體建議。在警戒值的訂定過程中，過於保守的警戒值可能會引發過早的警報，增加社會成

本和民眾的不滿；而過於嚴格的警戒值則可能使得崩塌事件來臨時，防災準備不足，導致風險的增加。因此，如何根據精確的數據來設定警戒值是提升防災準確性與效率的關鍵。通過物質點法模型的模擬與數據分析，我們能夠確定合適的警戒值範圍，這不僅有助於減少不必要的警報發佈，也能在崩塌風險迫近時提供及時、準確的預警。

綜上所述，本研究所提出的物質點法模型與風險分析方法，對於光華崩塌地的風險評估提供了參考。提出的監測儀器佈設策略、地下水位情境分析以及警戒值的建議，都能有效提升防災系統的運作效率與準確性，對於後續的崩塌風險預警與防災決策具有重要的應用價值。

## 第8章 工作進度與交付項目

### 8.1 計畫甘特圖

本計畫之甘特圖如表 8-1 所示，由表中可知，本計畫擬在 113 年上半年完成的工作項目包含相關文獻蒐集、二維數值模型的建立與驗證、期中報告書撰寫，並在期中報告書完成後，於 7 月開始著手分析崩塌臨界位移與速率、監測儀器的佈設建議這兩個項目，在 10 月開始進行崩塌警戒值之訂定策略、期末報告書撰寫，最後在 12 月完成口頭報告暨修正。目前執行進度符合規畫行程。

表 8-1 本計畫甘特圖

|              | 二月 | 三月 | 四月 | 五月 | 六月 | 七月 | 八月 | 九月 | 十月 | 十一月 | 十二月 |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| 相關文獻蒐集       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 二維數值模型的建立與驗證 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 期中報告書撰寫      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 分析崩塌臨界位移與速率  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 監測儀器的佈設建議    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 崩塌警戒值之訂定策略   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 期末報告書撰寫      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 口頭報告暨修正      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |

## 8.2 計畫交付項目

本計畫重要交付工作項目與經費如表 8-2 所示，重要工作項目計有建立光華崩塌地之物質點法模型、分析崩塌臨界條件之位移/速率、監測儀器佈設之建議、分析崩塌引致因子在不同情境下的危害程度、崩塌地警戒值之建議，各工作項目均符合規畫期程。

表 8-2 計畫交付項目

| 重要工作項目              | 工作數量 |                       |          |             | 預算金額(千元)    |          | 實施地點      |
|---------------------|------|-----------------------|----------|-------------|-------------|----------|-----------|
|                     | 單位   | 113/02<br>~<br>113/12 | 累計<br>成果 | 本年度<br>預定目標 | 水保<br>局經費   | 其他<br>經費 |           |
| 建立光華崩塌地之物質點法模型      | 式    | 1                     | 0%       | 100%        | 200         | 0        | 臺灣大學      |
| 分析崩塌臨界條件之位移/速率      | 式    | 1                     | 0%       | 100%        | 187.08<br>7 | 0        | 臺灣大學、桃園光華 |
| 監測儀器佈設之建議           | 式    | 1                     | 0%       | 100%        | 150         | 0        | 臺灣大學、桃園光華 |
| 分析崩塌引致因子在不同情境下的危害程度 | 式    | 1                     | 0%       | 100%        | 200         | 0        | 臺灣大學、桃園光華 |

|               |   |   |    |      |     |   |                   |
|---------------|---|---|----|------|-----|---|-------------------|
| 崩塌地警戒值之<br>建議 | 式 | 1 | 0% | 100% | 200 | 0 | 臺灣大<br>學、桃<br>園光華 |
|---------------|---|---|----|------|-----|---|-------------------|

## 參考文獻

1. 楊國鑫、彭逸蘋、郭治平、李威霖、汪俊彥、陳昭維、朱世文、白朝金 (2023)。以物質點法探討光華崩塌地滑動面深度與地下水之影響。中華水土保持學報，54(3)，185-196。
2. 彭逸蘋(2022)。以物質點法探討光華崩塌地滑動面深度與運動行為。國立臺灣大學工學院土木工程學系碩士論文。
3. 農村發展及農村水保署資料管理平台大規模崩塌開放資料專區 (2024)
4. 農村發展及農村水保署(2021)。桃園市-復興區-T002(光華)大規模崩塌潛勢區應變措施階段報告。
5. 吳昱葵(2020)。物質點法分析邊坡崩塌過程與運動機制：以貓空邊坡為例。國立臺灣大學工學院土木工程學系碩士論文。
6. Anura3D MPM Software Tutorial Manual (2023)
7. Jassim, I., Dieter, S., and Pieter, V. (2013) Two-phase dynamic analysis by material point method. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* ,37(15) 2502-2522.
8. Soga, K., Alonso, E., Yerro, A., Kumar, K., and Bandara, S. (2016) Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method. *Géotechnique* ,66(3),248-273.
9. Conte, E., Pugliese, L and Troncone, A. (2020) Post-failure analysis of the Maierato landslide using the material point method.

*Engineering Geology*, 277 (2020).

10. 陳語晞，陳嘉村，Thedy, J., 廖國偉 (2023)。自適應克里金坡地穩定可靠度分析。地工技術，178，59-70。
11. Thedy, J., & Liao, K. W. (2023). “Adaptive Kriging Adopting PSO with Hollow-Hypersphere space in structural reliability assessment.” *Probabilistic Engineering Mechanics*, 103513
12. Christian, J. T., Ladd, C. C., and Baecher, G. B. (1994). “Reliability applied to slope stability analysis.” *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(12), 2180–2207.
13. 李雅芬、李德河、紀雲曜 (2009)，「機率式邊坡穩定分析方法之研究」，*中國土木水利工程學刊*，第 21 期，第 1 卷，第 91-103 頁。

## 附錄一 期中審查意見與回覆

|   | 審 查 意 見                                                                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                             |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | P4 監測儀器布設之建議一節提及”可於變位量相對較小的點位作為接觸式監測儀器的建議布設位置，降低儀器損壞的機率”因大崩邊坡崩塌常有許多大小區塊，一般儀器反而傾向裝在活動較大區塊以第一時間掌握邊坡活動情形，與團隊建議恰好相反，故用字請再斟酌。 | 感謝委員意見，在期末報告的內容有針對此建議作相對應的修改，在「監測儀器佈設之建議」章節有詳細說明。我們建議在風險較高或較不穩定的區域，應優先設置監測儀器，以便及早發現可能的崩塌風險，並及時採取有效的應對措施。            |
|   | 審 查 意 見                                                                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                             |
| 2 | P43 內文提及將地層分為四層，其中有地下水影響之岩屑層之定義為何？是位於地下水位下或其他狀況？請補充說明。                                                                   | 感謝委員意見，在 5-3 有增加更詳細的定義與敘述。其中有地下水影響之岩屑層之定義是地下水位以下的岩屑層。岩屑層 1 (無地下水影響)與岩屑層 2 (有地下水影響)的分界線可以視為地下水位，通常地下水位以下的區域，即為岩屑層 2。 |
|   | 審 查 意 見                                                                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                             |
| 3 | P51 粗體文字有誤。                                                                                                              | 感謝委員意見，本計畫將再更仔細檢查錯字，謝謝提醒。                                                                                           |
|   | 審 查 意 見                                                                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                             |
| 4 | P52 上下兩張圖可看出對於岩屑層 1 之模擬均與現況有明顯差異，再請團隊分析原因。                                                                               | 感謝委員意見，岩屑層 1 之模擬結果與現況有明顯差異，這主要是因為模擬所使用的剖面 A-A' 與比較的 DEM 屬於不同的剖面。針對這一點，我們已經進行了相應的修正。                                 |
|   | 審 查 意 見                                                                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                             |
| 5 | 本計畫僅在一個剖面上進行分析，能否反應整體坡面滑動情形，請團隊再補充說明。                                                                                    | 感謝委員意見，為了能更加瞭解坡面的滑動情形，除了期中完成的一個剖面建模和模擬，期末也增加了另外兩個剖面的模擬，並針對這三個剖面進行崩塌風險的分析。                                           |
|   | 審 查 意 見                                                                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                             |

|   |                                                                                                                   |                                       |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 6 | <p>期末報告需補足的部分包括:地下水的初始條件設定。目前只有液相邊界條件，可見於 5-6；臨界條件位移與速率；監測儀器佈設之建議；致災因子不同情境下的危害程度 parametrical study；建議崩塌地警戒值。</p> | <p>感謝委員意見，已將需補足的部分完成，並將成果呈現在報告書上。</p> |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|

## 附錄二 期末審查意見與回覆

|   | 審 查 意 見                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                                                         |
|---|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 物質點法在評估邊坡穩定上，主要取決於有材料特性，本研究對於材料特性隨時間及空間變化如何設定，請補充說明。                     | 感謝委員意見，材料的隨機性可見章節 6.3 的內容。目前隨機變數並未直接考慮時間與空間的變異性，時間方面：土壤參數隨時間的變異性若忽略，所引致的誤差，相對於空間而言，應該比較小；空間方面：雖然本計畫並未直接考量空間的變異性，但間接地以三個剖面分析其影響，詳細內容可參見 6.4.1 節。 |
|   | 審 查 意 見                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                                                         |
| 2 | 本研究在如何平衡崩塌警戒值的設定上，除由物質點法演算之崩塌危害程度，如何搭配現地監測儀器之資訊來避免警戒值過度反應或是過度保守問題，請補充說明。 | 感謝委員意見，若假設目前現場監測儀器的布設符合需求，則每日 20mm 的位移的警戒值顯得過於保守，應可考慮將其放寬至 40mm 或更高；反之，如果剖面 C-C' 確實存有高度風險，則每日 20mm 的位移的警戒值應屬英數恰當。此部分將在章節 6.7 補充說明並回覆。           |
|   | 審 查 意 見                                                                  | 意 見 回 覆                                                                                                                                         |
| 3 | 未來可增加實際案例分析，以增加崩塌預測準確度。                                                  | 感謝委員意見，未來進行更深入的研究時，將會參考其他崩塌預測方法，採納其他方法的優點與本研究的模式結合，以精進預測準確度，也會增加案例分析，以提升未來使用上的精確度。                                                              |

