

國立臺灣大學生物資源暨農學院

生物環境系統工程學研究所



碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's thesis

物質點法輔助崩塌監測預警系統-以光華崩塌地為例

Development of a Landslide Early Warning System Using

the Material Point Method:

A Case Study of the Guanghua Slope

林秉諺

Ping-Yen Lin

指導教授：廖國偉 博士

Advisor: Kuo-Wei Liao, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July 2025



誌謝

在發表之際，我首先要感謝我的指導教授廖國偉教授加博士先生，在我碩士這兩年給予我指導，不論我在研究過程中遇到什麼困難都耐心的與我討論解決方法並提供寶貴的建議，讓我的研究能更順利。除此之外，也謝謝老師提供我參加國際研討會的機會，讓我能到國外參與學術交流。真的非常感謝老師這兩年不斷的鼓勵與指導，我才能完成本研究。

同時感謝研究室的大家，謝謝 John 學長在研究上幫助我很多，也都特別撥時間和我討論。謝謝語晞在當初計畫提案幫忙了很多，也一起做了物質點法的研究。謝謝毓庭、尚融、品傑一起當了六年的同學，留下很多美好的回憶。謝謝智強、研寧、柏村、瑞彬，在有你們的研究室真的很歡樂。

還有謝謝梓鈞、恩嘉、煌全、靖瑀一直找我去土研徹夜做研究或是到校外移地學術討論。衷心感謝孟辰、邦聖、彥廷，這兩年的陪伴還有各種支持，太挺了。謝謝一路以來支持我的所有人。

最後，真的非常感謝我的家人，不論我做什麼決定，都一直給予我支持，成為我最強大的後盾。

僅此向所有曾經幫助過我、陪伴過我的人，致上最誠摯的感謝。



摘要

邊坡穩定性評估是山坡地治理與防災規劃的核心工作，其分析結果往往直接影響後續工程設計與現場監測策略。傳統上，學界與工程師多利用極限平衡法（Limit Equilibrium Method, LEM）或有限元素法（Finite Element Method, FEM）來計算安全係數，並據此判斷邊坡是否穩定。然而，這兩種方法皆無法全面再現邊坡從初始變形到破壞的整個運動過程。

為了克服此問題，本研究採用物質點法（Material Point Method, MPM）進行二維數值模擬，基於實地地質調查、既有文獻地層剖面與高解析度 DEM，建立物質點法模型，並提出「崩塌臨界位移」概念，作為坡面失效的判定門檻。接著透過 MPM 數值模擬分析主滑動面位移分佈，並據此制定伸縮計、傾斜管及 GPS 等監測儀器的最佳佈設策略，以確保關鍵區域能在變形初期即時掌握異動。

除此之外，也提出動態調整警戒門檻（ $20\text{ mm}/\text{日至 }40\text{ mm}/\text{日}$ ）之建議，以兼顧實用性與應變效率。比較二維與三維模型在坡度（ $30.96^\circ\text{--}34.44^\circ$ ）與長寬比條件下的相似度分析，則指出在特定 L/D 範圍內，二維模擬可在 5% 誤差內替代三維計算，從而在資源受限時提供快速模擬；當條件不適合時，則需採用三維模型以捕捉更全面的滑動機制。

本研究所提出的 MPM 模型構建流程、監測佈設策略、地下水位情境分析及二維/三維模型適用性比較，不僅為光華崩塌地的預警與應急決策提供了全面的技術框架，也將大幅提高現場監測與防災效率，為類似山坡地區的災害風險管理提供重要參考。

關鍵字：大規模崩塌、物質點法、警戒值、監測儀器、不確定性

Abstract



Slope stability assessment is fundamental to hillside management and disaster mitigation, directly informing engineering design and field monitoring strategies. Traditionally, Limit Equilibrium Method (LEM) and Finite Element Method (FEM) have been used to compute safety factors, but neither captures the full kinematic evolution from initial deformation to failure. To address this limitation, this study employs the Material Point Method (MPM) for two-dimensional numerical simulations. We integrate field geological surveys, published stratigraphic profiles, and high-resolution digital elevation models to build a detailed MPM representation of the Guanghua landslide site, introducing the concept of a “critical collapse displacement” as a failure threshold.

Using MPM, we analyze displacement distributions along the primary sliding surface and derive an optimized layout for extensometers, inclinometers, and GPS stations to ensure early detection of anomalous movements in high-risk zones. We also recommend dynamically adjusting the warning threshold from 20 mm/day to 40 mm/day to balance practical constraints with timely response. A comparative study of two- and three-dimensional models—across slopes of 30.96° – 34.44° and varying length-to-width ratios—indicates that, within a specific “L/D range”, two-dimensional simulations can reproduce three-dimensional results within 5% error, enabling rapid screening when computational resources are limited; outside this range, three-dimensional modeling is necessary to capture the full sliding mechanism.

Overall, the methodology presented—encompassing MPM model development, instrument deployment strategies, groundwater-level scenario analysis, and two- versus three-dimensional model applicability—provides a comprehensive technical framework for real-time warning and emergency decision-making at Guanghua and serves as a

valuable reference for landslide risk management in analogous mountainous terrains.



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

目次



誌謝	i
摘要	ii
Abstract.....	iii
目次	v
圖次	viii
表次	xi
1. 第一章 前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目標	2
1.3 研究架構與流程	5
2. 第二章 文獻回顧與數值方法介紹	7
2.1 相關文獻回顧	7
2.1.1 大規模崩塌相關研究	7
2.1.2 物質點法相關研究	8
2.1.3 國內、外物質點法應用案例	11
2.2 物質點法介紹	14
2.3 物質點法之控制方程式	15
2.3.1 質量守恆方程式	16
2.3.2 動量方程式	17
2.3.3 邊界條件	17
2.3.4 弱解 (weak form)	18
2.4 物質點法之數值計算	19
2.4.1 離散化	19



2.4.2 計算內力	20
2.4.3 計算外力	21
2.5 物質點法運算流程	21
2.6 Anura3D 軟體介紹	24
2.7 機率式邊坡穩定分析	24
2.7.1 可靠度分析	25
3. 第三章 研究區域現況	27
3.1 光華崩塌地位置基本資料	27
3.2 地形基本資料	28
3.3 地質基本資料	30
3.4 光華崩塌地歷年災害資料	31
3.5 光華崩塌地現地監測設備	34
3.6 地質鑽探結果	36
4. 第四章 研究方法	40
4.1 挑選欲研究剖面	40
4.2 建立二維邊坡幾何模型	42
4.3 土壤參數	44
4.4 邊界條件	45
4.5 初始條件	47
4.6 網格設定	47
4.7 剖面 B-B' 剖面 C-C' 模型	49
4.8 三維模型的建立	58
4.9 邊坡可靠度分析-克里金代理模型	63
5. 第五章 數值模擬結果	70
5.1 數值模擬結果驗證	70



5.1.1 邊坡外型變化趨勢比對	70
5.1.2 現地監測資料比對	71
5.2 崩塌臨界位移	73
5.3 可靠度分析中的變數挑選	75
5.4 可靠度分析結果	79
5.4.1 挑選各剖面上的關注點	79
5.4.2 各關注點之分析結果	82
5.5 不同情境下的崩塌風險	86
5.6 監測儀器佈設之建議	89
5.7 崩塌警戒值之訂定策略	92
5.8 三維物質點法模擬結果	94
6. 第六章 結論與建議	111
7. 參考文獻	114

圖次



圖 1-1 研究流程圖	6
圖 2-1 物質點法概念流程圖 (Soga, et al., 2016)	15
圖 3-1 光華崩塌潛勢區範圍 (BigGIS , 2024)	28
圖 3-2 光華崩塌潛勢區地形圖	29
圖 3-3 光華崩塌潛勢區與保全對象位置圖	29
圖 3-4 光華崩塌潛勢區地質圖	30
圖 3-5 光華崩塌潛勢區歷史山崩範圍(BigGIS , 2024)	31
圖 3-6 光華崩塌潛勢區空拍圖	32
圖 3-7 光華崩塌潛勢區歷史災害空拍圖	34
圖 3-8 光華崩塌潛勢區監測儀器配置圖	35
圖 3-9 (a)~(d) K19-1BW 鑽孔地質柱狀圖	38
圖 3-10 (a)~(f)K19-1BW 鑽探岩芯照片	39
圖 4-1 光華崩塌地監測儀器圖(青山工程 , 2021)	41
圖 4-2 A-A'剖面與鄰近儀器相對位置	41
圖 4-3 A-A' 剖面的高程幾何模型	43
圖 4-4 數值土層材料分布設定	43
圖 4-5 固態邊界條件	46
圖 4-6 液態邊界條件	46
圖 4-7 土壤表面初始條件	47
圖 4-8 本研究使用之數值模型網格	48
圖 4-9 數值模型之物質點分布(單位:m)	49
圖 4-10 三剖面在光華崩塌地的相對位置	50
圖 4-11 剖面 B-B'的高程幾何模型	51

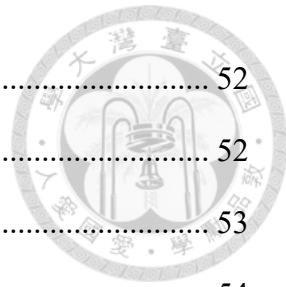


圖 4-12 剖面 C-C' 的高程幾何模型	52
圖 4-13 剖面 B-B' 土層材料分布設定	52
圖 4-14 剖面 C-C' 土層材料分布設定	53
圖 4-15 B-B' 剖面固態邊界條件	54
圖 4-16 C-C' 剖面固態邊界條件	55
圖 4-17 B-B' 剖面液態邊界條件	55
圖 4-18 C-C' 剖面液態邊界條件	56
圖 4-19 剖面 C-C' 之土壤表面初始條件	56
圖 4-20 B-B' 數值模型網格	57
圖 4-21 C-C' 數值模型網格	58
圖 4-22 二維模型幾何	59
圖 4-23 三維模型幾何	59
圖 4-24 二維模型材料分布設定	60
圖 4-25 三維模型材料分布設定	60
圖 4-26 固體相邊界條件	62
圖 4-27 固體相邊界條件	62
圖 4-28 三維數值模型網格	63
圖 5-1 光華崩塌地 2019/2022 剖面高程比較	71
圖 5-2 K19-1BW 傾斜管紀錄(青山工程，2021)	72
圖 5-3 模擬結果初始滑動時深度與位移關係圖	73
圖 5-4 大規模崩塌之應變-時間曲線	74
圖 5-5 A-A' 上關注點位置	80
圖 5-6 B-B' 上關注點位置	81
圖 5-7 C-C' 上關注點位置	82
圖 5-8 關注點 Point 3 之位置圖	87

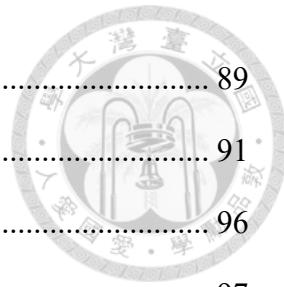


圖 5-9 A-A'上關注點位置	89
圖 5-10 光華崩塌地各剖面位置圖	91
圖 5-11 三維模型破壞過程	96
圖 5-12 二維模型破壞過程	97
圖 5-13 三維模型中較大位移分布位置(俯視)	98
圖 5-14 不同角度三維模型破壞樣態比對	99
圖 5-15 30.96°邊坡位移前 0.5% 物質點分布位置俯視圖	101
圖 5-16 34.44°邊坡位移前 0.5% 物質點分布位置俯視圖	102
圖 5-17 30.96°邊坡在不同寬度 D 下的模擬結果	104
圖 5-18 30.96°邊坡在不同寬度 D 下的位移前 0.5% 的物質點分布位置	105
圖 5-19 34.44°邊坡在不同寬度 D 下的模擬結果	106
圖 5-20 34.44°邊坡在不同寬度 D 下的位移前 0.5% 的物質點分布位置	107
圖 5-21 30.96°邊坡 2D/3D 結果相似度	109
圖 5-22 30.96°邊坡 2D/3D 結果相似度	110



表次

表 1-1 各種數值方法之比較	2
表 4-1 建立物質點法模型之土壤參數	44
表 4-2 剖面 B-B'和剖面 C-C'模型之土壤參數	53
表 4-3 建立三維模型之土壤參數	61
表 5-1 常用位移量應變管理準則	75
表 5-2 參考資料中摩擦角之 COV	77
表 5-3 參考資料中凝聚力之 COV	77
表 5-4 岩屑層 1 的統計參數	78
表 5-5 岩屑層 2 的統計參數	78
表 5-6 破碎頁岩層的統計參數	78
表 5-7 岩屑層 1 的統計參數	83
表 5-8 岩屑層 2 的統計參數	83
表 5-9 破碎頁岩層的統計參數	83
表 5-10 剖面上各關注點之失效機率	84
表 5-11 不同地下水位情境下失效機率	88
表 5-12 剖面 A-A'上各關注點的失效機率	90
表 5-13 剖面上各關注點之失效機率	92
表 5-14 不同門檻值的失效機率	93
表 5-15 30.96°邊坡二維與三維模型模擬結果	100
表 5-16 34.44°邊坡二維與三維模型模擬結果	101
表 5-17 30.96°邊坡在不同寬度 D 下的模擬結果	104
表 5-18 34.44°邊坡在不同寬度 D 下的模擬結果	106



第一章 前言

1.1 研究動機

由於臺灣地形多山且地質相對脆弱，再加上降雨往往集中而急促，坡地災害的發生頻率非常高。近年來的氣候變遷導致極端暴雨事件更頻繁，引發了更多坡地崩塌，這也讓山坡崩塌的成因、運動方式與潛在影響範圍成為災害預警與風險評估中不可或缺的核心課題。

邊坡穩定性評估是山坡地治理與防災規劃的核心工作，其分析結果往往直接影響後續工程設計、潛在危險區域的界定以及現場監測策略的部署。傳統上，學界與工程師多倚賴極限平衡法 (Limit Equilibrium Method, LEM) 與有限元素法 (Finite Element Method, FEM) 計算安全係數，並以此作為邊坡是否穩定的主要指標。然而，這兩種方法在面對大變形、接觸破壞與動態過程時，皆無法完整再現邊坡由初始微小變形至最終破壞的全過程（見表 1-1 比較）。

為了突破上述限制，本研究引入物質點法 (Material Point Method, MPM) 進行二維數值模擬，並將現地蒐集的高解析度地形資料、地質剖面與監測數據整合進模型中。透過一系列模擬，我們可以利用物質點法適合模擬大位移問題的優勢，刻畫崩塌觸發機制、滑動演變歷程，並進一步在模擬結果中分析土塊大位移區域。與此同時，我們能創新性地將「不確定性」納入分析架構，針對土壤強度參數等多個因子加入討論，以更客觀的方式評估邊坡失效機率，並據此提出管理和儀器佈設的優化建議，以提升現場伸縮計、傾斜管等接觸式監測儀器的監測效率。

為驗證上述方法與模型的可行性與適用性，本研究選定桃園市復興區光華崩塌地作為實驗場域。根據 1980 – 2018 年間的遙測影像，此處在颱風及豪雨過程中多次出現明顯塌陷和滑動跡象，且於 2021 年初觀測到加速滑動 (楊國鑫等, 2023)，尤其上邊坡活動劇烈，常導致接觸式監測器具受損，警戒值參考困難，關鍵位移與速率門檻未曾明確定義，整體防災評估充滿挑戰。



基於這些考量與本區域相對完備的監測資料，我們選擇以光華崩塌地進行研究，針對上述問題提出優化策略並提升整體防災預警的精確度與可靠性。

表 1-1 各種數值方法之比較

	LEM	FEM	DEM	MPM
Factor of safety	○	○	×	×
Failure surface	○	○	○	○
Deformation process	×	○	○	○
Large deformation	×	×	○	○
Post-failure process	×	×	○	○
Kinematic behavior	×	×	○	○
Coupled hydro-mechanical	×	○	×	○
Constitutive model	M-C	Advanced	Complex	Advanced
Computation cost	Low	Medium	High	High
Software	GeoStudio	PLAXIS	PFC3D	Anura3D

1.2 研究目標

本研究具 6 個主要目標，如下列各項：

建立光華崩塌地之物質點法模型

本研究首先對光華崩塌潛勢區的地質背景與潛在致災機制進行全面資料蒐集。我們參考國內外相關文獻中所提供的地層剖面資料、地下水位監測紀錄以及岩土材料參數，並結合農村水土保持署與國家災害防救中心提供的 UAV 空拍影像與 LiDAR 點雲數據，構築高精度的三維地形基礎模型。接著，根據楊國鑫等人(2023)所提出的地形配置與材料參數設定，完成光華崩塌地的初始二維物質點法(MPM)模型，然後再依據最新取得的地形與監測資料，對模型進行細部校正與參數更新，



確保其能夠反映現地實況。

接著，本研究將採用 Anura 3D 軟體執行一系列數值模擬，並以現場實測的位移與數據對模型輸出進行交叉驗證，驗證其在再現滑動行為與失效機率方面的精確性與穩定性，為後續風險評估與預警策略提供堅實的技術支撐。

分析崩塌臨界條件位移/速率

本研究將利用崩塌地形特徵與物質點法位移模擬，來界定崩塌發生的「臨界位移量」。我們首先對光華崩塌地進行物質點法模擬，記錄坡體在各時間步長的位移變化；隨後，依據陳語晞等人（2023）的研究，藉由分析位移—時間曲線中運動階段的轉折點，找出符合崩塌前兆條件的關鍵位移值，並將其定義為「臨界位移量」。當現場監測到的坡體位移超過此門檻，即可視為崩塌即將發生。

監測儀器佈設之建議

為了能在滑動發生時迅速捕捉精準數據並評估崩塌風險，現場佈設地表或地下監測儀器是一種行之有效的措施。這些儀器應聚焦於位移量較大且坡面活動頻繁的關鍵區域，才能即時反映坡體運動狀態，為預警決策提供可靠依據。因此，選擇最適合的監測點在提升預警效率及保障區域安全方面扮演著關鍵角色。

分析崩塌致災因子在不同情境下的危害程度

坡地崩塌往往是各種誘因在系統內複雜交互作用的結果，因此我們需將主要致災因子如降雨強度與持續時間、地下水位變化等，分別置輸入所建立的機率式崩塌物質點模型中，模擬不同情境下的崩塌機率。根據邊坡破壞機率，可為管理單位提出針對性建議，例如當地下水位上升至某一臨界高度時，即應列為重點監控對象，以減少脆弱性。值得一提的是，傳統的機率式敏感度分析往往需要龐大計算資源；本團隊已開發出 surrogate-based 代理模型演算法，能在不犧牲預測準確度的前提下，



顯著降低運算成本。

提出崩塌地警戒值之建議

減災、避災與防災應變工作，都依賴各地設定的警戒值來決定預警與疏散標準。在制定這些門檻時，若數值過於保守將引發頻繁警報，不僅增加社會成本也易讓民眾疏於配合；但若標準過於嚴格，則可能錯失應有的準備時間，反而提高災害風險。因此，精確掌握崩塌的臨界位移量，並以此訂定合適的警戒值是提升預警效能的關鍵。目前，農村水保署已根據光華地區的現場監測資料，不斷滾動修訂監測門檻；然而，由於缺乏對坡體失效臨界位移的深入理解，警戒值的調整往往需待觀測到超過既有位移卻未崩塌的情況後才得以修正，極為耗時。為破解此一瓶頸，本階段研究將引入機率式崩塌模型，綜合利用已確定的臨界位移量、建立的物理機率模型、極限狀態方程、超越機率與貝氏資料更新等理論工具，動態優化光華崩塌地的位移管理值，從而滾動修訂警戒標準達到更快且更具預警意義的防災效果。

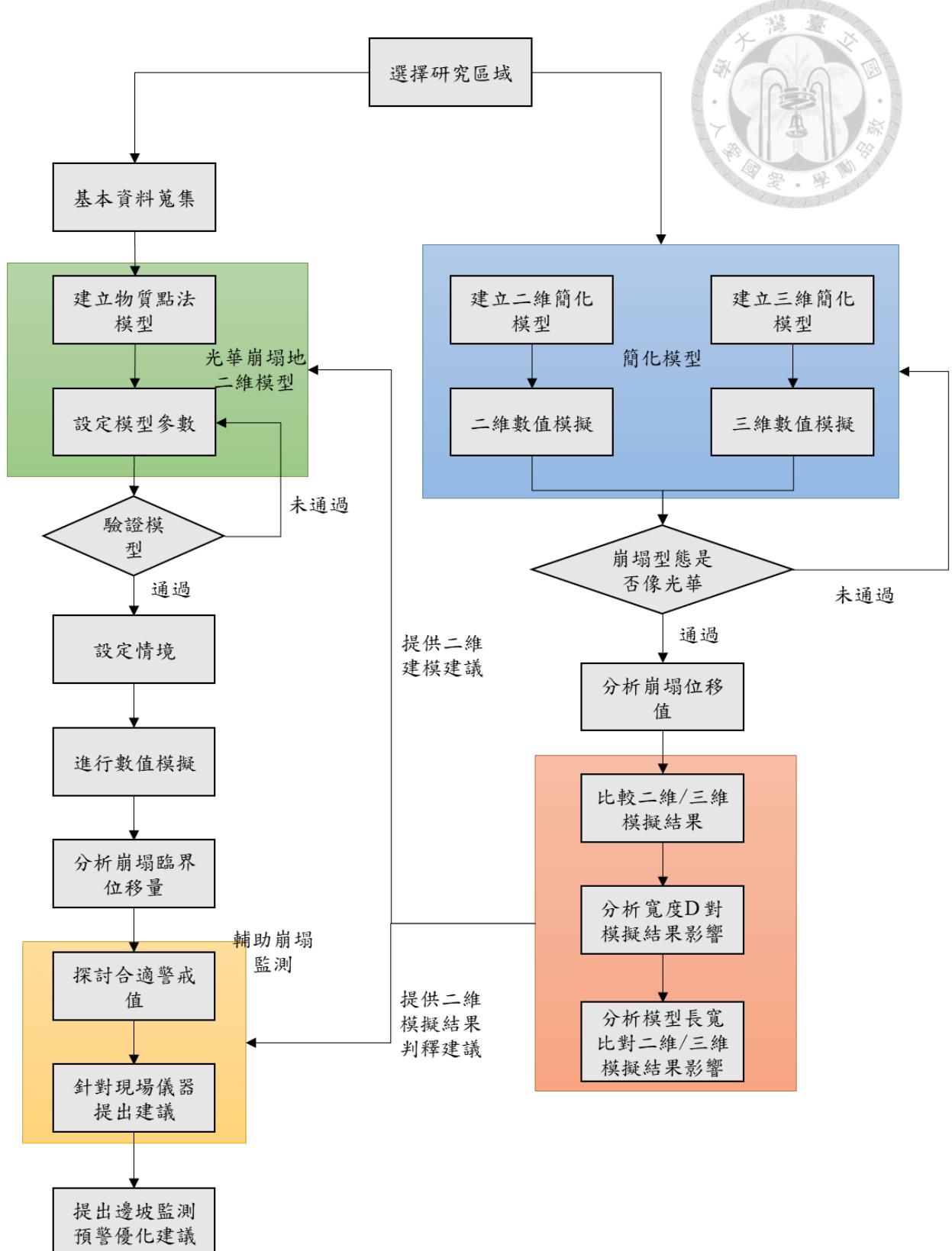
三維物質點法模擬

在這個研究目標中，會先建立簡化的二維及三圍模型，並經由多組模擬結果比較，確認後續分析模型的崩塌型態類似光華崩塌地，接著比較二維/三維模擬結果，並進一步分析寬度 D 對模擬結果的影響，最後分析模型長寬比對二維/三維模擬結果相似度的影響。最後，將上述關於模型維度與幾何參數對模擬精度之影響的研究結論，反饋至光華崩塌地物質點法模型的各項分析項目中，以期為未來的建模策略調整與監測預警系統優化提供具體且可操作的參考依據。



1.3 研究架構與流程

本研究整體流程如圖所示，首先以光華崩塌潛勢區的歷年調查成果、數值地形模型（DEM）及實地監測資料，作為建立初始數值模型的基礎，同時參考現有物質點法（MPM）研究案例與相關文獻，驗證光華崩塌地的物質點法模型。模型完成驗證後，我們將依據模擬結果界定崩塌臨界位移，並進一步提出崩塌警戒值與儀器佈設的具體建議。接著進行二維/三維簡化模型的建立，比較其模擬結果、分析坡面寬度 D 對模擬結果影響以及模型長寬比對二維/三維模擬結果相似度的影響。最後，將二/三維簡化模擬討論出的結論與建議反饋回光華崩塌地之物質點法模型，以利未來建模及監測預警系統的優化。詳細流程如圖 1-1。



第二章 文獻回顧與數值方法介紹



2.1 相關文獻回顧

藉由蒐集整理國內外專家學者撰寫的相關文獻資料，包含物質點法相關研究及物質點法應用案例，作為本研究的理論基礎。

2.1.1 大規模崩塌相關研究

(1) Van Asch et al. (2007)

在探討滑坡災害之數值模擬時，Van Asch 等人（2007）對滑坡行為的特性與建模挑戰提出了系統性的綜論。該研究指出，滑坡屬於時間與空間皆極為複雜的地質動態系統，其生成與演變受地形、地質、氣候與人為因素交互影響。傳統滑坡模擬方法多以工程經驗與地貌判斷為基礎，然而面對實際地形與水文條件的變異，純粹經驗式分析往往難以捕捉滑坡前兆與動態行為。因此，作者強調應透過以物理為基礎之數值模型，結合地形、地貌、水文與地工資訊，建構能夠反映不同滑動階段（前兆、破壞與破壞後）的模擬系統。在前兆階段，滑坡潛勢的演化常與岩體裂隙發展、風化作用及孔隙水壓變化密切相關。研究中引入損傷力學與脆性蠕變模型，有助於理解裂縫的擴展機制與破壞前的微震訊號行為。至於破壞觸發方面，降雨滲流導致的孔隙壓升高被視為最常見且具主導性的動力因素，尤其在淺層土壤中，基質吸力的消散亦足以造成滑動。文中指出水文模擬的品質往往比地工模型更影響預測準確性，並呼籲加強對非飽和區、裂隙流與植物蒸散的整體耦合建模。破壞後行為則區分為慢速滑動與快速流動兩大類。慢速滑動的行為複雜，常因裂隙幾何變化、應力反應與孔隙壓的延遲效應導致運動遲滯與突發加速現象。相關研究強調應考慮壓密與擴張導致的強度恢復或削弱效應，並建議使用彈一黏一塑性材料模型



模擬其變速特性。相對地，快速滑動如泥流與碎屑流則涉及液化、剪縮壓密與動能轉換等複雜機制，文中提出應強化實驗設計、實地監測與流變參數的量測，以提升流程模擬的現實性與可靠度。此外，針對區域尺度的滑坡風險分析，作者建議整合統計方法與物理模型，以突破傳統敏感性分析僅具空間分佈卻缺乏時間預測力的限制。透過引入機率密度函數（PDF）與 Monte Carlo 模擬，可將氣象、土壤與幾何變異納入災害模擬中，進而推估發生機率與潛在損失。最後，地貌學亦被視為連結現地觀察與模型概念化的關鍵橋梁，其不僅有助於辨識潛在滑動區與滑動階段，也提供 DEM 資料以強化模擬初始條件與邊界設定。整體而言，該文獻提供一套兼顧物理機制與多尺度應用的滑坡模擬架構，並指出當前模擬在預測時效、參數不確定性與水文系統理解上的瓶頸。未來研究應聚焦於多物理耦合建模、資料整合與監測技術的進一步發展，以提升滑坡災害預測與風險評估之科學基礎。

2.1.2 物質點法相關研究

(1) Soga et al. (2016)

在大變形問題的數值模擬中，傳統的基於網格的拉格朗日方法，如有限元素法（FEM）與有限差分法（FDM）雖然能夠描述材料的形狀變化，卻常因需反覆重劃網格與重映射變量會導致累積誤差隨變形幅度增大而劇烈上升。相對地，在純尤拉框架下的方法，計算網格在模擬運動時仍固定於空間中，不隨物體運動而扭曲，因而適合處理大位移與大變形問題。

因此在此文獻中，物質點法（MPM）被視為是對大規模崩塌問題進行建模分析的首選方法，主要優勢有：

(1) MPM 採用歐拉—拉格朗日混合策略，物質點隨材料運動而更新其物理狀態，而背景網格則維持不變，能穩定處理從失效初期到崩體運動的整個過程。

(2) 對比於有限元素法（FEM），物質點法的執行過程較直觀



- (3) 在物質點上可直接施加各種土壤組成律(如 Mohr - Coulomb、Linear 等)，讓用戶依據不同土體特性替換或校準模型
- (4) 由於背景網格存在，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
- 綜合而言，MPM 在模擬土壤—水—結構耦合的大規模崩塌問題時，不僅保留了拉格朗日方法的材料追蹤精度，也享有尤拉方法的數值穩定性，因而成為研究與工程實務中建模此類極端變形現象的最佳選擇。

(2) Yerro, et al. (2016)

物質點法 (Material Point Method, MPM) 之所以被廣泛認可為模擬大位移動態環境的有效工具，關鍵在於它能將連續介質以一組拉格朗日質點進行離散化，並同時結合地質、幾何、水文及岩土特性，從而精準評估如土石流等複雜現象的穩定性。這些質點攜帶質量、體積、位置、速度、應變與應力等完整物理量，在動態推進中能同步反映材料的運動、破壞及失效後的行為，達到從觸發到完全破壞過程的整體分析。

從方法論角度而言，MPM 位於無網格方法與傳統有限元素法 (FEM) 之間，它透過物質點追蹤材料歷程，又以一張固定不變形的背景網格來求解質量守恆與動量守恆等控制方程。這種拉格朗日 - 尤拉混合策略，不僅避免了因大變形而導致的網格扭曲與重劃，還能在無需重新劃分網格的前提下，穩定地處理極端形變與破壞後的複雜動態行為。

(3) Vaucorbel, et al. (2020)

物質點法 (Material Point Method, MPM) 是一種針對連續介質動力學問題而設計的數值模擬技術。在此方法中，將連續介質分割成一系列隨材料運動的拉格朗日粒子，同時利用一張固定不變形的歐拉背景網格來進行方程求解。由於粒子本身攜



帶質量、位置、速度與應力等資訊，而背景網格在整個運算中保持靜止，MPM 天然避免了有限元素法（FEM）在大變形模擬時常見的網格扭曲或糾纏問題。自 Sulsky 等人於 1994 年首創此法以來，經過多次優化與擴展，已在土木工程、大地工程及結構工程等領域獲得廣泛應用。

文獻中強調 MPM 的幾項關鍵優勢：

- (1) 無網格糾纏問題：粒子與背景網格獨立運行，故即使材料大幅變形，也不會出現網格節點重疊或扭曲的現象。
- (2) 內建無滑移與無穿透接觸算法：MPM 自帶的接觸處理機制能自動辨識並處理粒子間的碰撞，確保不同物體在接觸時既不滑移也不互相穿透，特別適合多體接觸問題。
- (3) 高效處理摩擦接觸問題：由於使用尤拉背景網格，MPM 能以相對簡便的方式處理複雜的摩擦與接觸條件，計算流程更為流暢。
- (4) 簡單的計算實現：與其他無網格方法相比，MPM 的演算法結構較為簡單，也較易進行計算域分解與平行計算，大幅提升運算效率。

(4) Więckowski (2004)

物質點法（Material Point Method, MPM）是一種同時兼具拉格朗日與歐拉兩種描述優勢的數值模擬方法，特別適合大變形與物體間接觸問題的研究。傳統有限元素法（FEM）在面對大幅度變形時，常因網格扭曲而喪失精度，甚至無法繼續計算；雖然可採用網格重劃來緩解，但此舉不僅增加了誤差來源，也大幅複雜化運算流程。MPM 則以不會變形的背景網格負責偏微分方程的求解，同時利用能自由移動的物質點攜帶質量、速度、應力等場量，從根本上避免了網格扭曲與穿透問題。

在邊界條件的施加方面，MPM 與 FEM 類似，不論是固定、活動邊界或外力作用，都能靈活地指定於背景網格節點或物質點上，而在模擬顆粒流動、自由表面演化或多體接觸時 MPM 能以更簡潔的方式自動處理粒子間碰撞與摩擦行為。雖



然相比傳統方法，MPM 的單次計算開銷較大，但透過領域分解與平行運算技術能有效縮短整體分析所需時間。

此篇研究旨在驗證 MPM 在複雜工程場景中的適用性，並透過多項案例（如筒倉卸料與填充過程、擋土牆失效模擬以及金屬成形分析）展示物質點法應用潛力。結果證實與 FEM 相比，MPM 在處理大應變、顆粒流動、自接觸等問題上展現出不錯的穩定性與精度，為未來高難度地質與結構模擬提供了可靠的新選擇。

(5) Anderson, et al (2010)

在這篇文章中作者選用了從物質點法 (MPM) 延伸而來的廣義插值物質點法 (GIMP)，專門用於滑坡崩塌的數值模擬。研究過程中，先以簡化幾何邊坡及初始彈性材料特性建立模型，並透過降低土體強度參數使其達到失穩狀態。模擬結果顯示 GIMP 對崩塌過程的預測與傳統有限元素法 (FEM) 分析所得結果高度契合，驗證了方法的可靠性。

GIMP 的核心優勢在於結合了拉格朗日物質點的動態捕捉能力與歐拉背景網格的固定結構，能在同一框架中穩定得處理彈塑性大變形問題。此外，該方法可自動識別並演算不同材料單元之間的相互作用，這使得能夠精準模擬崩塌土體與坡邊建築之間的相互影響。

2.1.3 國內、外物質點法應用案例

(1) 吳昱葵 (2020)

此研究文獻選取台北市文山區木柵兩處邊坡作為研究樣區，這些邊坡在民國 97 年 9 月因薔蜜颱風所帶來的極端豪雨發生崩塌，據資料顯示崩塌長度約 230 m、寬度介於 20 – 80 m 之間，面積約 1.17 ha，影響範圍甚至延伸至貓空纜車 T-16 塔柱，迫使纜車暫停營運。



在進行數值模擬與驗證之前，此研究首先利用 Moriwaki et al. (2004) 於實驗室中完成的大型邊坡降雨破壞物理試驗做對照，將實驗中記錄的崩塌剖面、剪裂帶發展、滑動速率與地表位移等關鍵指標，套入同一數值模型並與模擬結果進行比對，藉此確認所選用方法與軟體的準確性與適用性。

接著，根據現地地形、地質概況、鑽探取樣資料與地層剖面圖建立數值坡面模型，設定各土層之材料參數、網格劃分、邊界及初始條件後，即可運用物質點法進行模擬。模擬結果與實測對照發現，土壤滑移距離僅超出現場觀測值 2.9 m，堆積高度僅高估 3.2 m，考量到二維模型易稍微高估堆積量，此誤差範圍相當合理，充分顯示該方法在再現邊坡大變形行為與分析崩塌機制上的可行性。

此外，此研究還將水力耦合模型與不排水條件模型的模擬結果進行比較，儘管不排水假設可大幅縮短運算時間，但其與實測資料相比卻出現約 33 % 的誤差，因此建議在邊坡破壞模擬中，仍以水力耦合模型為主，以兼顧計算效率與結果準確度。

(2) Yerro,et al. (2018)

2014 年 3 月 22 日發生於華盛頓州 Oso 的山坡崩塌，堪稱是美國史上最嚴重的山崩災害之一，大約有 8,106 m³ 的冰川沉積物滑移逾 1 km，造成 43 人不幸罹難。事後調查認為，連續三週的強降雨極大地削弱了坡體穩定性，最終引發崩塌。為深入解析此事件的觸發原因與崩塌機制，此研究採用物質點法 (MPM) 對 Oso 山坡展開數值模擬。

此研究中將崩塌體劃分為三個主要滑動塊體——M1、M2 與 M3，並分別賦予不同的土壤參數，通過追蹤各物質點在不同時間節點的位移與堆積情況，重建了三塊體失效的時間序列與相互作用。模擬結果顯示 M1 先失效，其底部出現剪裂帶並逐步擴展，隨後 M2 剝離並加劇了整體滑動，後期 M3 底部亦形成剪裂帶，並對 M2 施加推擠導致連鎖滑動，各塊體停止時的最大滑移距離約 1,040 m，與



現地測量值高度吻合。這些發現與實地觀察所得的剪裂帶發展及滑動順序相符，有力地驗證了物質點法在複雜山崩過程分析中的可靠性。

(3) Conte, et al.(2019)

1986 年 7 月 26 日，義大利南部 Senise 地區在長期乾旱後發生大規模崩塌，滑體長約 230 m、寬約 150 m，最深滑動深度接近 14 m，導致多棟民宅倒塌並造成 8 人不幸罹難。

為了剖析這起邊坡破壞的具體過程，此研究文獻依據現地調查資料與先前對 Senise 邊坡的學術報告，建立了兩組 MPM 數值模型，一組假設單一滑動面，另一組則包含兩個滑動面，並將土層分為上層軟黏土與下層基岩兩部分。模擬結果顯示雙滑動面模型在現地實測位移與崩塌後地形輪廓方面，誤差僅在數米範圍內；同時，亦發現原本未被考量的上層薄黏土帶是引發邊坡失穩的關鍵因素，並在加上了人工構造物後的優化模型得到更精準的結果。

(4) 楊國鑫等 (2023)

此研究文獻聚焦於光華崩塌地，自 2001 年起光華崩塌地邊坡即出現持續滑動現象，並曾導致部分農路中斷，同時威脅下方作為重要聯外幹道的光華道路之用路安全。由於該地區邊坡持續不穩定，農業部農村水土保持署已將其劃為大規模崩塌潛勢區。為全面了解其運動機制與演變行為，此研究文獻結合現地勘查、長期監測資料與物質點法 (MPM) 數值模擬，建立並驗證了崩塌過程的數值模型。

此研究首先將模擬所得的位移分布與現場監測數據進行比對，確認模型具備合理性與參考性後，透過 MPM 對各物質點的追蹤，分析崩塌起始、加速與穩定階段中位移、速度及軸差應變的空間時間演變特徵，並且進一步探討地下水位對崩塌動態的影響後，研究發現當水位上升至高於 -7 m 時，覆蓋於頁岩之上的岩屑層位移明顯加劇，顯示潛在水壓變化極可能是推動崩塌擴大的關鍵因子，此結果不僅

驗證了原先岩層分布設定的合理性，也為未來排水與邊坡穩定對策提供了科學依據。



2.2 物質點法介紹

物質點法 (Material Point Method, MPM) 最早由 Sulsky 等人在 1994 年提出，能夠有效模擬固體、液體、氣體及多相（固 - 液 - 氣）介質之間的行為。此方法將材料分解為一系列可隨動的離散物質點，每個物質點攜帶質量、位置、速度、應力等物理屬性，並依照拉格朗日描述法 (Lagrangian approach) 隨材料骨架運動；同時為了求解質量守恆與動量守恆等控制方程，將這些物質點上的資訊藉由形狀函數映射至一張固定且不隨變形的背景網格上，體現了尤拉描述法 (Eulerian approach) 網格不變形的優勢，而背景網格在整個模擬過程中保持靜止，只要覆蓋物質點可能出現的運動範圍就能為數值運算提供穩定的節點平台。這種結合拉格朗日和尤拉的混合策略不僅兼顧了材料追蹤的精準度，也避免了大變形時網格扭曲所帶來的數值失效。

物質點法核心流程可分為以下四個步驟(如圖 2-1)：

- (1) 將整體結構離散為空間中大量承載物理性質的物質點 (material points)，每個物質點記錄質量、體積、位置、速度、加速度及應力等狀態變量資料。
- (2) 利用形狀函數 (shape functions) 將物質點的質量和動量投影到背後的固定網格節點上，此步驟對應尤拉描述法中網格的承載角色，背景網格在整個模擬過程中不發生形變，只用於進行控制方程式的運算。
- (3) 在網格節點上求解出動量守恆方程，計算出加速度與位置，並將這些更新後的數值反向投影回物質點，以更新其速度、位置與應力資料。
- (4) 為避免網格因大變形而產生扭曲，進行完一個時間步 (time-step) 的運算後將網格恢復初始形狀，再進行下一步迭代。此網格重置機制使得 MPM 能夠在保持



高精度的同時，有效處理固體破壞、流體衝擊或多相界面演化等複雜問題。

相比傳統純尤拉或純拉格朗日方法，MPM 在處理大變形、大位移、自由表面以及固-流耦合問題時，既保留了網格不失真的穩定性，也兼顧了材料點追蹤的優勢，因此成為近年來數值分析領域中極具發展潛力的方法。

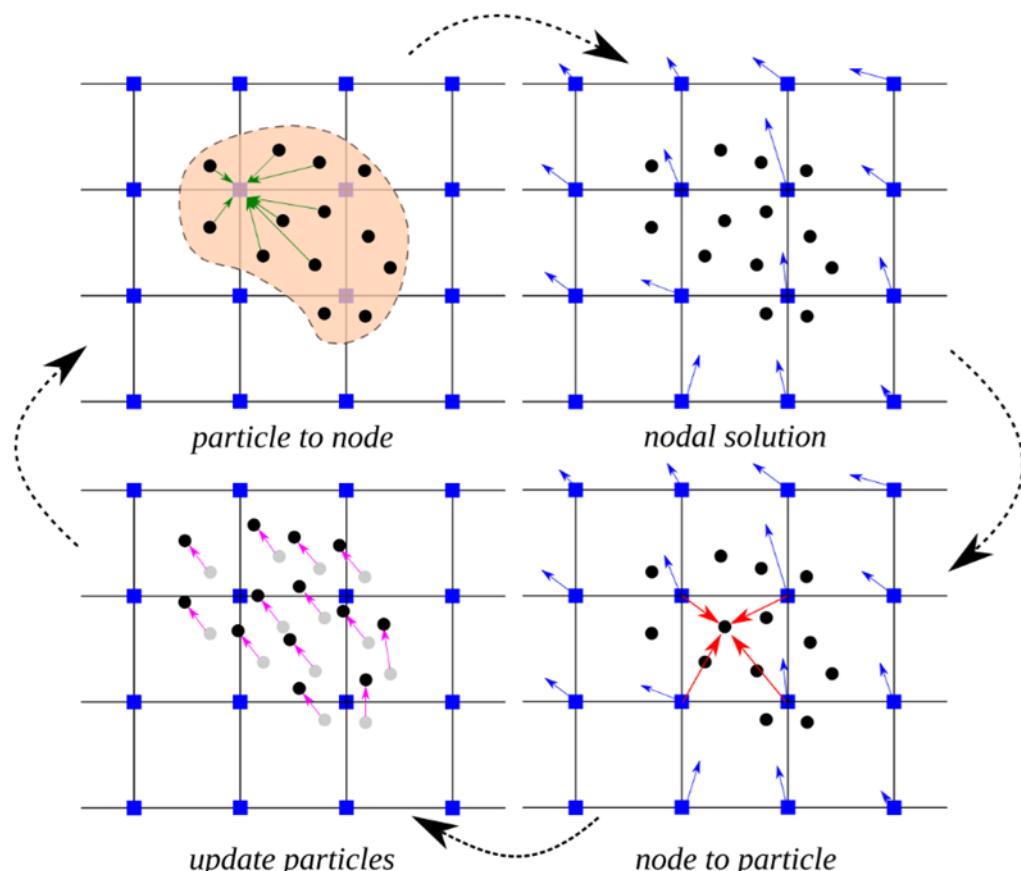


圖 2-1 物質點法概念流程圖 (Soga, et al., 2016)

2.3 物質點法之控制方程式

本節所述方法專門針對動態耦合的兩相流現象，既考慮整體系統的質量守恆，又兼顧各相混合物的動量守恆。後續內容將聚焦於所選用的雙向單點分析（Two-phase Single-point Formulation）介紹其基本原理與步驟。



2.3.1 質量守恆方程式

固態相的質量守恆方程式可以表示成：

$$-\frac{d}{dt}[(1-n)\rho_s] + (1-n)\rho_s \nabla \cdot v_s = 0 \quad (\text{式 2.1})$$

其中 v_s 代表固相的速度向量， ρ_s 代表固體密度， n 代表固態顆粒的孔隙率。

液相的質量守恆可以表示成：

$$\frac{d}{dt}(n\rho_L) + n\rho_L \nabla \cdot v_L = 0 \quad (\text{式 2.2})$$

其中 v_L 是液相速度向量， ρ_L 是液體密度。

假定固相顆粒不可壓縮，且密度與孔隙率在空間上保持恆定，則可省略其變化項，將固相和液相的質量守恆方程簡化為：

$$-\frac{d}{dt}n + (1-n)\nabla \cdot v_s = 0 \quad (\text{式 2.3})$$

$$\rho_L \frac{d}{dt}n + n \frac{d}{dt}\rho_L + n\rho_L \nabla \cdot v_L = 0 \quad (\text{式 2.4})$$

將(式 2.3)替換為(式 2.4)時，可以消除 $\frac{d}{dt}n$ ：

$$(1-n)\nabla \cdot v_s + \frac{n}{\rho_L} \frac{d\rho_L}{dt} + n\nabla \cdot v_L = 0 \quad (\text{式 2.5})$$

若將液相視為可壓縮介質，其有效體積應變 $\bar{\varepsilon}_L$ 可變為：

$$\frac{d}{dt}\bar{\varepsilon}_L = -\frac{1}{\rho_L} \frac{d}{dt}\rho_L \quad (\text{式 2.6})$$

將(式 2.5)與(式 2.6)整合，則能得到飽和土壤的質量守恆方程式：



$$\frac{d}{dt}\bar{\varepsilon}_L = \frac{1}{n}[(1-n)\nabla \cdot v_s + n\nabla \cdot v_L]$$

(式 2.7)

2.3.2 動量方程式

固態相的動量方程式可以表示成：

$$(1-n)\rho_s \frac{d}{dt}v_s - \nabla\sigma' - (1-n)\nabla\rho_L - (1-n)\rho_sg - \frac{n^2\rho_Lg}{k}(v_L - v_s) = 0 \quad (\text{式 2.8})$$

液態相的動量方程式可以表示成：

$$n\rho_L \frac{d}{dt}v_L - n\nabla\rho_L - n\rho_Lg + \frac{n^2\rho_Lg}{k}(v_L - v_s) = 0 \quad (\text{式 2.9})$$

其中 $(v_L - v_s)$ 表示液相相對於固相的流速差，而 Darcy 滲透係數 k 為達西滲透係數，則可透過介質的滲透率 κ 和液體動態黏滯度 μ_d 表示：

$$k = \kappa \frac{\rho_L g}{\mu_d} \quad (\text{式 2.10})$$

透過將固相與液相的動量守恆方程式疊加，即可導出整體混合物的動量守恆方程式：

$$(1-n)\rho_s \frac{d}{dt}v_s + n\rho_L \frac{d}{dt}v_L = \nabla \cdot \sigma' + \rho_{sat}g \quad (\text{式 2.11})$$

2.3.3 邊界條件

雙向單點分析之邊界條件必須是以下的聯集： Ω

$$\partial\Omega = \partial\Omega_u \cup \partial\Omega_\sigma = \partial\Omega_{VL} \cup \partial\Omega_p \quad (\text{式 2.12})$$



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：

$$\partial\Omega_u \cap \partial\Omega_\sigma = \emptyset \text{ 和 } \partial\Omega_{VL} \cap \partial\Omega_p = \emptyset \quad (\text{式 2.13})$$

2.3.4 弱解 (weak form)

於展開離散化運算前，需先將控制方程由強形式表述轉換為弱形式。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta t \rho_L \frac{dv_L}{dt} d\Omega \\ &= \int_{\Omega} \delta t \nabla \rho_L d\Omega + \int_{\Omega} \delta t \rho_L g d\Omega \\ & - \int_{\Omega} \delta t \frac{n\rho_L g}{k} (v_L - v_S) d\Omega \end{aligned} \quad (\text{式 2.14})$$

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta t (1-n) \rho_S \frac{dv_S}{dt} d\Omega \\ &= \int_{\Omega} \delta t \nabla \cdot \sigma' d\Omega + \int_{\Omega} \delta t \rho_{sat} g d\Omega - \int_{\Omega} \delta t n \rho_L \frac{dv_L}{dt} d\Omega \end{aligned} \quad (\text{式 2.15})$$

結合散度定理與牽引力邊界條件後，便可導出最終的弱解表達式：

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta t \rho_L \frac{dv_L}{dt} d\Omega \\ &= \int_{\Omega} \delta t \rho_L \bar{\rho}_L dS - \int_{\Omega} \delta t \rho_L d\Omega + \int_{\Omega} \delta t \rho_L g d\Omega \\ & - \int_{\Omega} \delta t \frac{n\rho_L g}{k} (v_L - v_S) d\Omega \end{aligned} \quad (\text{式 2.16})$$



$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} \delta t (1-n) \rho_S \frac{dv_S}{dt} d\Omega \\
 &= \int_{\partial\Omega_\sigma} \delta t \tau dS - \int_{\Omega} \delta t \nabla \sigma d\Omega + \int_{\Omega} \delta t \rho_{sat} g d\Omega \\
 &\quad - \int_{\Omega} \delta t n \rho_L \frac{dv_L}{dt} d\Omega
 \end{aligned} \tag{式 2.17}$$

在式 (2.16) 中，等號左邊項對應於整體的慣性效應；等號右邊依序包括：作用於邊界的外部載荷項、描述材料內部應力的內力項，以及重力項；而該式末項則代表固一液相間的阻力（拖曳力）。對應地，式 (2.17) 的最後一項則反映了液相自身的慣性，並已將孔隙率對該慣性效應的影響納入考量。

2.4 物質點法之數值計算

說明物質點法如何計算控制方程式，並以雙相單點方法為範例加以說明。

2.4.1 離散化

雙相單點混合物之弱解為：

$$\begin{aligned}
 & \delta \hat{v}_S^T \int_{\Omega} \bar{N}^T t \cdot n d\Omega - \delta \hat{v}_S^T \int_{\Omega} \bar{B}^T \sigma d\Omega + \delta \hat{v}_S^T + \int_{\Omega} \bar{N}^T \rho g d\Omega \\
 & - \delta \hat{v}_S^T \left[\int_{\Omega} \bar{N}^T n \rho_L \bar{N} d\Omega \right] a_L \\
 & - \delta \hat{v}_S^T \left[\int_{\Omega} \bar{N}^T (1-n) \rho_S \bar{N} d\Omega \right] a_S = 0
 \end{aligned} \tag{式 2.18}$$

對應於(式 3.18)，離散化方程式為：

$$f^{ext} - f^{int} - \bar{M}_L \hat{a}_L = M_S \hat{a}_S \tag{式 2.19}$$



$$f^{ext} = \int_{\Omega} \bar{N}^T t \cdot nd\partial\Omega + \int_{\Omega} \bar{N}^T \rho gd\Omega \quad (\text{式 2.20})$$

$$f^{int} = \int_{\Omega} \bar{B}^T \sigma d\Omega \quad (\text{式 2.21})$$

$$\bar{M}_L = \int_{\Omega} \bar{N}^T n \rho_L \bar{N} d\Omega \quad (\text{式 2.22})$$

$$M_S = \int_{\Omega} \bar{N}^T (1-n) \rho_S \bar{N} d\Omega \quad (\text{式 2.23})$$

在此方程式中， f^{ext} 表示節點處的外部作用力向量， f^{int} 為內部力向量，而 \bar{M}_L 與 M_S 分別代表液相與固相在節點上的質量矩陣。

2.4.2 計算內力

內力計算公式：

$$f^{int} = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \int_{\Omega_{el}} \bar{B}^T \sigma d\Omega = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \int_{\Omega_{el}} \bar{B}^T \sigma |J| d\bar{\omega} \quad (\text{式 2.24})$$

在上述符號中， Ω_{el} 代表大座標系中元素 el 的面積， no_{elm} 表示活動元素的總數， $\bar{\omega}$ 為單元素體積， $d\bar{\omega}$ 是該元素系統中無窮小之體積， $|J|$ 為 Jacobian 行列式。在物質點法中，每一物質點都攜帶包括應力在內的所有場量，因此其內力可依下述公式進行計算：

$$f^{int} = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \sum_{i=1}^{no_{Node,el}} \sum_{k=1}^{no_{MP,el}} B_i^T(\xi_{MP}) \sigma_{MP} \Omega_{MP} \quad (\text{式 2.25})$$

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



2.4.3 計算外力

計算外力時，可將其分為兩類：一類是由重力加速度所引起的體積載荷，另一類則是施加於結構表面的外部載荷。

體積力公式：

$$f^{int} = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \int_{\Omega_{el}} \rho \bar{N}^T g d\Omega = \sum_{el}^{no_{elm}} \int_{\bar{\omega}} \rho \bar{N}^T g |J| d\bar{\omega} \quad (\text{式 2.26})$$

外部載重公式：

$$f^{ext,trac} = \sum_{el=1}^{no_{elm}} \int_{\partial\Omega_{el}} \bar{N}^T t \cdot nd \partial\Omega \quad (\text{式 2.27})$$

應用物質點積分，完整外力方程式即為：

$$\begin{aligned} f^{ext} &= \sum_{el=1}^{no_{elm}} \sum_{i=1}^{no_{Node,el}} \sum_{MP=1}^{no_{MP,el}} m_{MP} N_i^T(\xi_{MP}) g \Omega_{MP} \\ &\quad + \sum_{el=1}^{no_{elm}} \sum_{i=1}^{no_{Node,el}} \sum_{MP=1}^{no_{MP,el}} N_i^T(\xi_{MP}) f_{MP}^{ext,trac} \end{aligned} \quad (\text{式 2.28})$$

2.5 物質點法運算流程

物質點法在每個時間步驟 (timestep) 的演算法如下：

- (1) 透過形狀函數將各物質點的物理量投影至網格節點，同時在節點上計算內力與外力。
- (2) 在網格節點上對動量守恆方程進行離散求解

$$\hat{a}_L^t = M_L^{t,-1} [f_L^{ext,t} - f_L^{int,t} - f^{d,t}] \quad (\text{式 2.29})$$



$$\hat{a}_S^t = M_S^{t,-1} [-f^{ext,t} - f^{int,t} - \bar{M}_L^t a_L^t] \quad (\text{式 2.30})$$

(3) 力用節點之加速度結合形狀函數，更新物質點的速度

$$\hat{v}_{L,MP}^{t+\Delta t} = \hat{v}_{L,MP}^t + \sum_{i=1}^{n_{en}} \Delta t N_i(\xi_{MP}) \hat{a}_{L,i}^t \quad (\text{式 2.31})$$

$$\hat{v}_{S,MP}^{t+\Delta t} = \hat{v}_{S,MP}^t + \sum_{i=1}^{n_{en}} \Delta t N_i(\xi_{MP}) \hat{a}_{S,i}^t \quad (\text{式 2.32})$$

(4) 根據更新後的物質點資訊更新節點動量，並且更新節點速度

$$P_{L,i}^{t+\Delta t} = \hat{M}_L^t \hat{v}_{L,i}^{t+\Delta t} \approx \sum_{MP=1}^{n_{MP}} m_{L,MP} N^T(\xi_{MP}^t) \hat{v}_{L,MP}^{t+\Delta t} \quad (\text{式 2.33})$$

$$P_{S,i}^{t+\Delta t} = \hat{M}_S^t \hat{v}_{S,i}^{t+\Delta t} \approx \sum_{MP=1}^{n_{MP}} m_{S,MP} N^T(\xi_{MP}^t) \hat{v}_{S,MP}^{t+\Delta t} \quad (\text{式 2.34})$$

(5) 將節點速度整合，以求得節點在本時間步的增加位移

$$\Delta \hat{u}_L^{t+\Delta t} = \Delta t \hat{v}_L^{t+\Delta t} \quad (\text{式 2.35})$$

$$\Delta \hat{u}_S^{t+\Delta t} = \Delta t \hat{v}_S^{t+\Delta t} \quad (\text{式 2.36})$$

(6) 根據位移更新節點的應變，再透過材料組成律將應變轉換為應力



$$\Delta\varepsilon_{L,MP}^{t+\Delta t} = B(\xi_{MP}^t)\hat{v}_L^{t+\Delta t}\Delta t \quad (\text{式 2.37})$$

$$\Delta\varepsilon_{S,MP}^{t+\Delta t} = B(\xi_{MP}^t)\hat{v}_S^{t+\Delta t}\Delta t \quad (\text{式 2.38})$$

(7) 更新物質點的水壓力

$$\Delta\varepsilon_{L,MP}^{-t+\Delta t} = \frac{1}{n_{MP}^t} [(1 - n_{MP}^t)\Delta\Delta\varepsilon_{S,MP}^{t+\Delta t} + n_{MP}^t\Delta\varepsilon_{L,MP}^{t+\Delta t}] \quad (\text{式 2.39})$$

$$p_{L,MP}^{t+\Delta t} \approx p_{L,MP}^t + K_{L,MP}\Delta\varepsilon_{L,MP}^{-t+\Delta t} \quad (\text{式 2.40})$$

(8) 結合有效應力與水壓力，計算出混合物的總應力

$$\sigma_{MP}^{t+\Delta t} = \sigma'_{MP}^{t+\Delta t} + \delta\sigma_{MP}^{t+\Delta t} \quad (\text{式 2.41})$$

(9) 依據體積應變增加量更新物質點的體積大小

$$\Omega_{MP}^{t+\Delta t} = (1 + \Delta\varepsilon_{vol,S,MP}^{t+\Delta t}) \quad (\text{式 2.42})$$

(10) 藉由固態相位移更新物質點的位置，完成當前時間步的空間更新

$$x_{MP}^{t+\Delta t} = x_{MP}^t + \sum_{i=1}^{n_{no_nodes}} N_i(\xi_{MP})\Delta\hat{u}_{S,i}^{i+1} \quad (\text{式 2.43})$$



- (11) 當所有物質點的位置與狀態更新完成後，表示該時間步(timestep)運算結束：系統將保存物質點的新資訊，並重置背景網格以初始化下一個時間步驟的計算。

2.6 Anura3D 軟體介紹

Anura 3D 是由 Anura 3D MPM Research Community 開發，專門用於大地工程領域的數值模擬工具。此軟體以物質點法為基礎，不僅能再現乾燥、飽和與非飽和土壤的多相行為，也能模擬自由表面水與材質之間的互動，並透過完全耦合的流體力學演算法模擬完全或部分飽和的多孔介質中土壤、水和氣相之間的相互作用，因此能準確捕捉土壤、水分與氣相在多孔介質中的動態互動，在土 - 水 - 結構耦合與大變形過程的模擬中具有明顯優勢。

使用 Anura 3D 軟體進行數值模擬的大致步驟如下：

- (1) 模型建立與參數設定：在 GiD 平臺中繪製地形與結構幾何，並匯入各種土壤物理參數
- (2) 數值運算：將已完成的模型檔案載入 Anura 3D，執行物質點法運算以獲得內部應力與變形結果
- (3) 結果後處理：利用 ParaView 將模擬輸出資料進行可視化，並匯出圖表或動畫，以供後續的可靠度分析與報告撰寫之用

2.7 機率式邊坡穩定分析

傳統上，邊坡的穩定性通常是通過單一的安全係數 (F_s ，安全因子) 來進行評估。然而，實際的邊坡系統相當複雜，因為土壤特性、地下水位和地質結構等因素會因空間變異和測量誤差而產生不確定性 (Christian et al., 1994)，這些不確定性在不同的參數設定和分析方法下，使得邊坡可能面臨崩塌的風險 (李等人，2009)。儘管安全係數簡單易懂，但常常無法充分反映系統的多樣性和複雜的相互作用。



為了更全面和準確地了解邊坡的安全狀態，機率式邊坡穩定分析引入了可靠度 (reliability) 的概念，這種方法不僅能量化上述不確定性，還能通過敏感度分析評估各參數對整體可靠度的影響。這樣一來，我們可以明確分辨出哪些因素最容易影響邊坡的穩定性，並根據具體情況制定防治策略。

可靠度分析的核心目標在於「安全程度的量化」，這與僅告訴我們邊坡是否達到安全標準的傳統 F_s 相比，可靠度分析結果指標能進一步提供具體的可靠機率，說明在特定環境條件下邊坡保持穩定的可能性。這種定量評估不僅有助於風險管理，還能為工程設計提供更具參考價值的標準，從而提高防災和治理方案的適用性和參考性。

雖然單一安全係數方法以其簡便性著稱，但在面對包含多重不確定性和複雜交互作用的邊坡系統時，其適用性明顯有限。通過機率式分析，我們能更深入理解邊坡行為，並為管理和設計提供更為嚴謹和可靠的依據，以便達到更高層次的安全保障。

2.7.1 可靠度分析

以極限方程式 (limit-state function) 定義系統的失效標準是可靠度分析的核心。極限方程式 (limit-state function) 中包含容量(C , capacity) 和需求(D , demand)，當 $C > D$ 時，系統處於安全狀態；但如果 $C < D$ ，表示系統已達到失效條件。因此，每個極限方程式都會針對特定問題整合適用的隨機變數，並利用這些變數進行多次隨機抽樣，以評估失效情況。

在邊坡穩定分析問題中，以最常見的蒙地卡羅模擬為例，首先明確極限方程式的形式，並設定各個輸入變量（例如土體抗剪強度、地下水位、地震加速度）的統計分布和抽樣數量。系統會根據這些分布隨機生成大量樣本，並將每組樣本帶入極限方程，以判斷模擬是否失效。將所有模擬中失效的次數除以樣本總數，即可得到邊坡失效的機率，也就是發生崩塌事件的可能性。



除蒙地卡羅方法外，可靠度分析還常常應用一次二次矩法(First-Order Second-Moment, FOSM)或反向變量法 (Inverse Transform Method)。FOSM 適用於極限方程近似線性或線性的情況，可快速估算失效機率；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。

透過這些方法，不僅可以實現邊坡穩定性的量化風險指標，也廣泛應用於結構安全性、抗震設計以及其他必須精確評估系統可靠度的領域。通過失效機率評估，我們能夠明確確定關鍵的脆弱構件，並據此制定預防和加固策略，確保工程和設施在各種工況下均能達到預期的安全水準。

第三章 研究區域現況



為掌握光華崩塌潛勢區的潛在風險與災害特性，在本章節將針對光華崩塌潛勢區蒐集並整理以下資訊：地理位置及地形基本資料、區域地質剖面、歷史災害紀錄、現場監測儀器配置，以及岩土鑽探所得之地質樣本，依據這些蒐集資料，進行彙整與分析，作為後續風險評估模型建立的重要參考依據。

3.1 光華崩塌地位置基本資料

光華崩塌地位在桃園市復興區華陵里，坐落於爺亨聚落與嘎拉賀部落之間，其潛勢影響範圍延伸至坡腳的光華道路，該道路連接北側聚落及台 7 線，並通往南側的光華國小與嘎拉賀部落，是當地重要聯外道路。若欲前往崩塌區，可自台 7 線經巴陵大橋，於 46K+900 處右轉進入爺亨道路，接續行駛光華道路及光華農路即可抵達(圖 3-1)。光華農路在過去主要供當地農業使用，然而大規模崩塌事件導致農路中斷，並影響下方光華道路的交通安全。

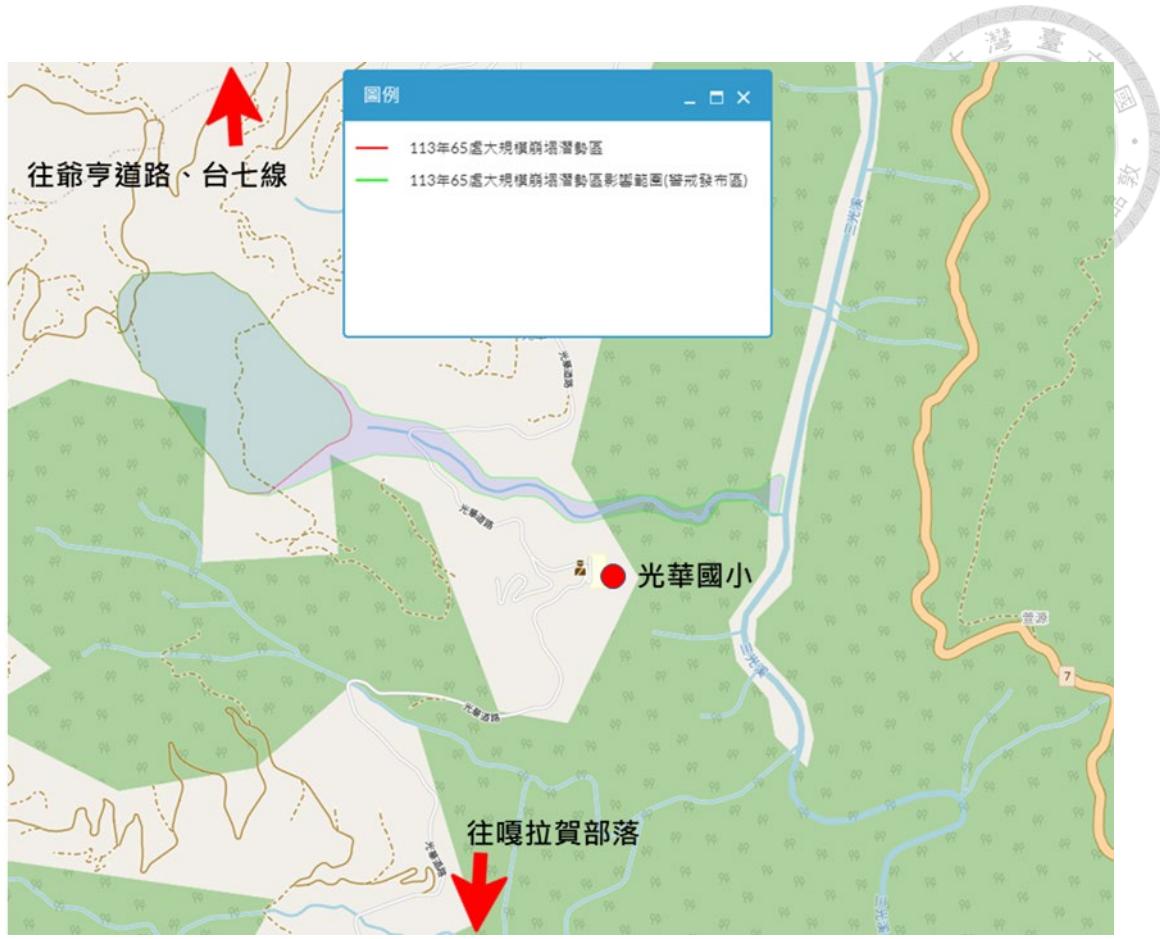


圖 3-1 光華崩塌潛勢區範圍 (BigGIS, 2024)

3.2 地形基本資料

光華崩塌地的地勢自西向東逐漸下降，主坡面的上半部分較緩，下半部分較陡峭。上緣區（分區 1）坡度約 $20 - 30^\circ$ ，屬於緩坡；下緣區（分區 2）坡度則達 $30 - 55^\circ$ ，呈現明顯陡坡。在坡趾前端地勢由陡坡轉為低窪的谷地，形成東口狀地形。水系方面，崩塌區兩側各有一條蝕溝，匯流於谷地東口處後，水流沿三光溪向下游流，最終匯入大漢溪。（如圖 3-2 與圖 3-3）

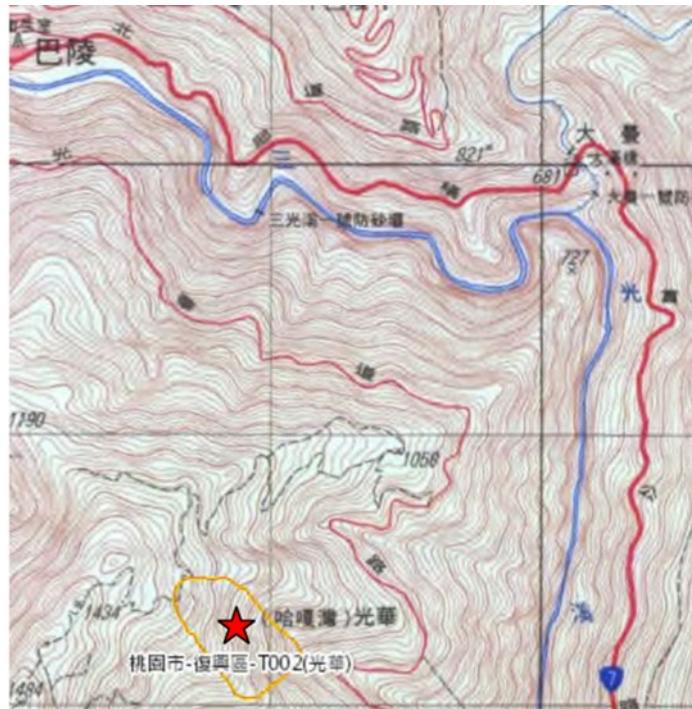


圖 3-2 光華崩塌潛勢區地形圖

(農村發展及水土保持署資料管理平台，2024)



圖 3-3 光華崩塌潛勢區與保全對象位置圖

(農村發展及水土保持署資料管理平台，2024)



3.3 地質基本資料

光華崩塌地所在區域之地層以巴陵層(Pl)為主，其岩性由暗灰至灰色的硬頁岩與板岩構成，下部偶有夾帶灰色細粒泥質薄層砂岩，砂岩中可見交錯層理。新鮮硬頁岩呈塊狀且組織緻密，部分帶有葉理；硬頁岩在風化後則發展為球狀或鉛筆狀的剝離構造。

在構造上，區內出現一處無名背斜與檜山斷層(圖 3-4)：

- (1) 無名背斜：位於崩塌區東側約 80 公尺，走向為東北—西南，是一條逆斷層
- (2) 檜山斷層：分布於西側約 1,000 至 2,000 公尺範圍，同樣走向東北—西南，且上下盤均為巴陵層，走向也是東北—西南的一條逆斷層

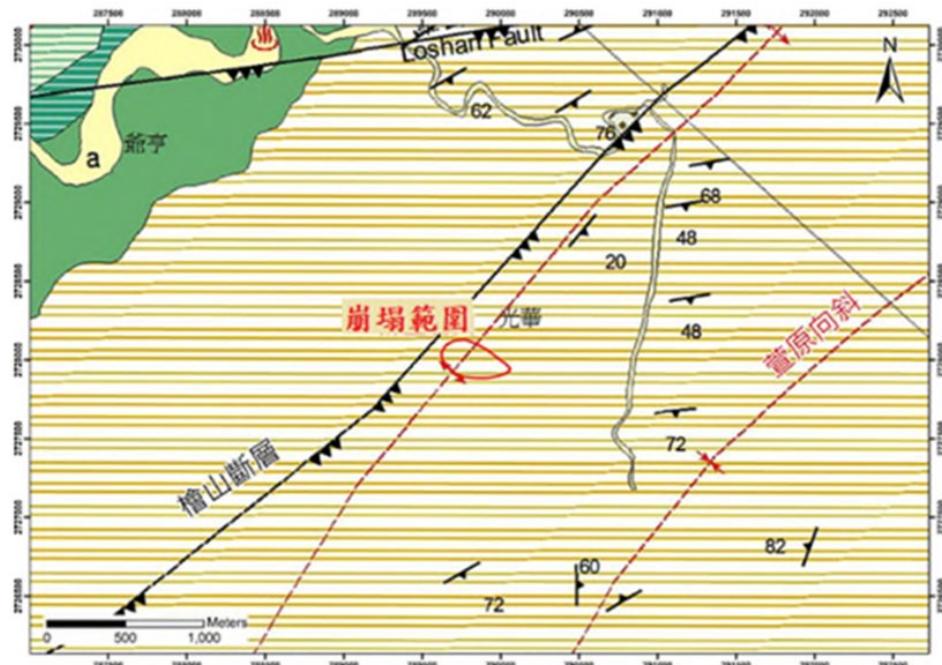


圖 3-4 光華崩塌潛勢區地質圖

(農村發展及水土保持署資料管理平台，2024)



3.4 光華崩塌地歷年災害資料

自從民國 95 年薑歲颱風之後，該光華崩塌地區已陸續出現零星的小規模崩塌，因此自 107 年起農業部農村發展及水土保持署陸續在現地展開詳細調查、分階段佈設各類監測儀器，並且將此區劃編為「桃園市-復興區-T002」大規模崩塌潛勢區，潛勢區範圍約 12.3 公頃。在 2021 年時約有 3.4 公頃大小的範圍滑動速率明顯加快，導致位於崩塌頂部的光華農路中斷，並進一步威脅下方光華道路的通行安全(圖 3-5)。

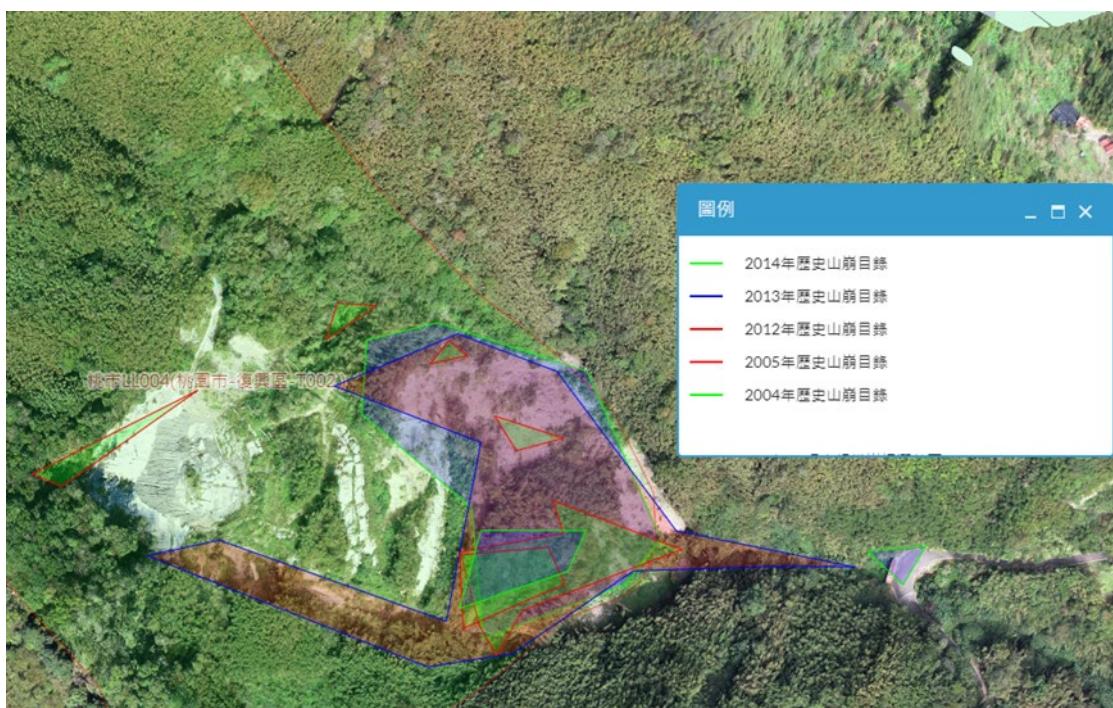


圖 3-5 光華崩塌潛勢區歷史山崩範圍(BigGIS, 2024)

透過 BigGIS 平臺的多期疊圖功能，將 2004 至 2014 年間共五期的山崩目錄資料套疊比對(圖 3-6)，我們發現該潛勢區的崩塌範圍在十年間持續擴張，並且影響範圍也隨之增大，足以顯示該地區的動態變化趨勢。



圖 3-6 光華崩塌潛勢區空拍圖

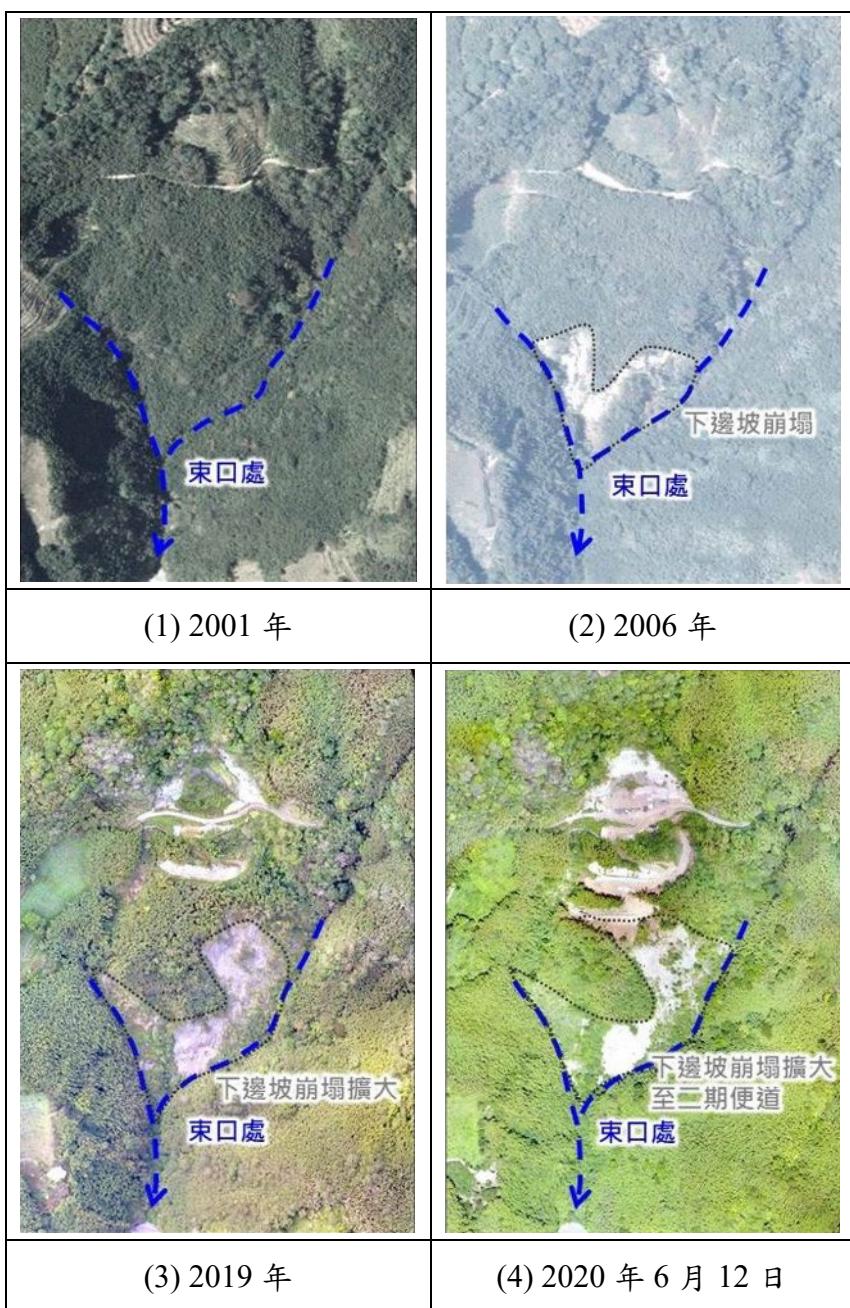
(農村發展及水土保持署資料管理平台，2024)

為了解更詳細的崩塌發展過程，下面將針對此區域的空拍圖(圖 3-7)說明：

- (1) 2001 年：當時並未發現任何崩塌或裸露面，但崩塌區兩側已有沖蝕溝，且坡腳處形成狹窄收口地形。
- (2) 2006 年：下邊坡出現明顯崩塌痕跡；同時上邊坡的第一期農路開始發生輕微下滑。
- (3) 2019 年：上邊坡農路持續下滑，為了實施集水管工程，開闢第一期施工便道；下邊坡的裸露崩塌面也在逐步擴大。



- (4) 2020 年 6 月 12 日：為了要實施集水管工程，開闢第一期和第二期便道；上邊坡農路呈現下滑狀態，下邊坡崩塌範圍進一步擴張至二期便道位置。
- (5) 2021 年 2 月 2 日：不僅上、下邊坡依然活躍，蝕溝更出現向坡頂方向的上溯狀況，上下兩區塊的滑動速率皆明顯提升。
- (6) 2021 年 8 月 9 日：上下邊坡滑動現象持續發生；除了原有主滑動面外，側崖兩側也陸續發生新的崩塌。



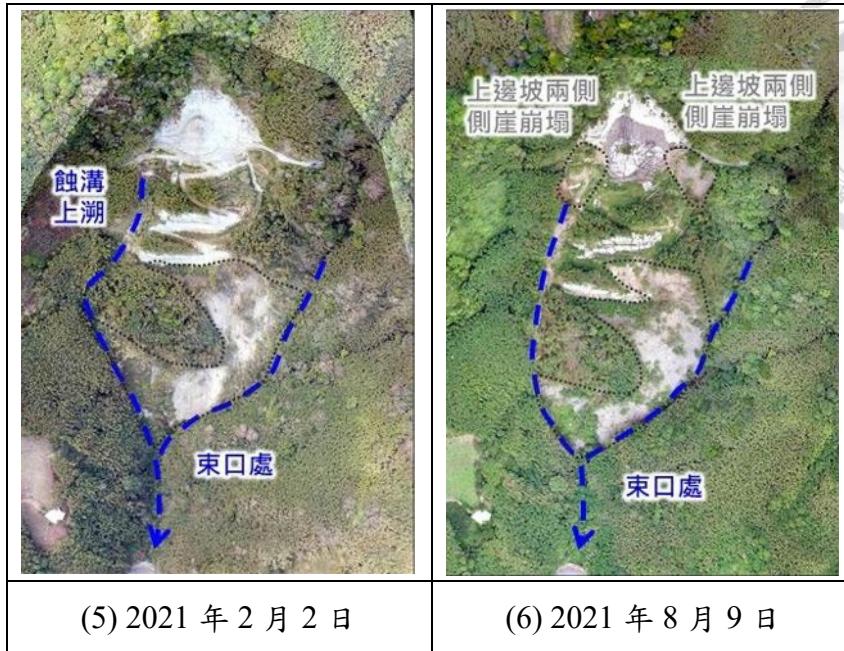


圖 3-7 光華崩塌潛勢區歷史災害空拍圖

(農村發展及水土保持署資料管理平台，2024)

除此之外，根據（林冠璋等，2023）研究中結合了數位影像相關法（DIC）與崩塌厚度反演方法，推算出光華崩塌地的崩塌塊體體積約為 58.5 萬立方公尺，最大深度約為 54 公尺，以及現今潛勢區範圍 12.3 公頃，皆已達到大規模崩塌之定義標準。

3.5 光華崩塌地現地監測設備

光華崩塌潛勢區下方的道路不僅連接當地聚落，也是通往省道 7 號的重要聯絡道路，若此處發生大規模崩塌，周邊住戶將面臨交通中斷與行車安全風險。為深入掌握本區域地形與崩塌演變趨勢，以評估潛在災害危險和即時應變，水土保持署持續佈設監測儀器(如圖)，同時制訂相應的應變措施。

以下為民國 111 年於光華崩塌潛勢區佈設之監測設備清單：

- (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

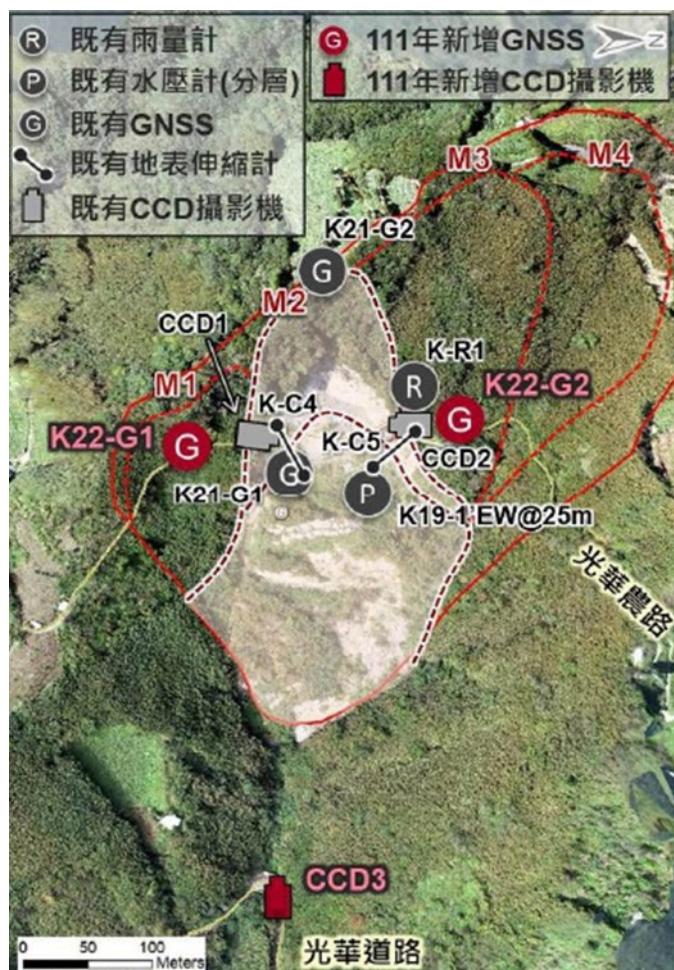


圖 3-8 光華崩塌潛勢區監測儀器配置圖

(農村發展及水土保持署資料管理平台，2024)



3.6 地質鑽探結果

為了探究光華崩塌潛勢區下方岩層分布情況，本區域於民國 108 年在現場進行了兩處深 80 公尺的岩心鑽探（鑽孔編號 K19-1BW、K19-2BW）。由工程地質探勘資料庫提供的鑽孔柱狀圖可區分出兩大地層（圖 3-9 與圖 3-10）：

- (1) 岩屑層：呈黃褐色，由粒徑不一的硬頁岩碎屑與土壤混合而成，顯示出明顯的崩積沉積特徵。此岩層深度約為 23 公尺～25.5 公尺。
- (2) 硬頁岩：呈深灰色，越淺層的硬頁岩越破碎，且具有高角度裂隙（角度約 40 度～70 度不等），部分裂隙內有泥質填充物。硬頁岩層在不同的深度有不同的特徵，可透過這些特徵辨別剪裂帶的分布，如 25.5～28.1 公尺、35.7～36.3 公尺、38.3～40.0 公尺皆有剪裂帶，而在 29.8～33.5 公尺處則出現黃褐色鑄染現象。



圖 3-9 (a)

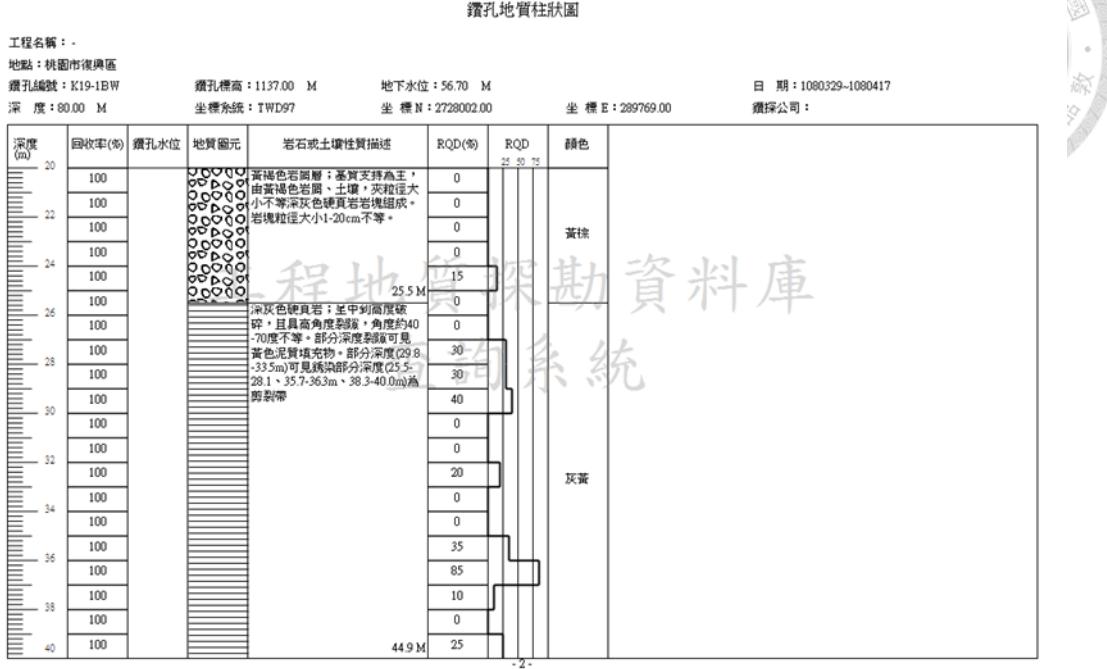


圖 3-9(b)

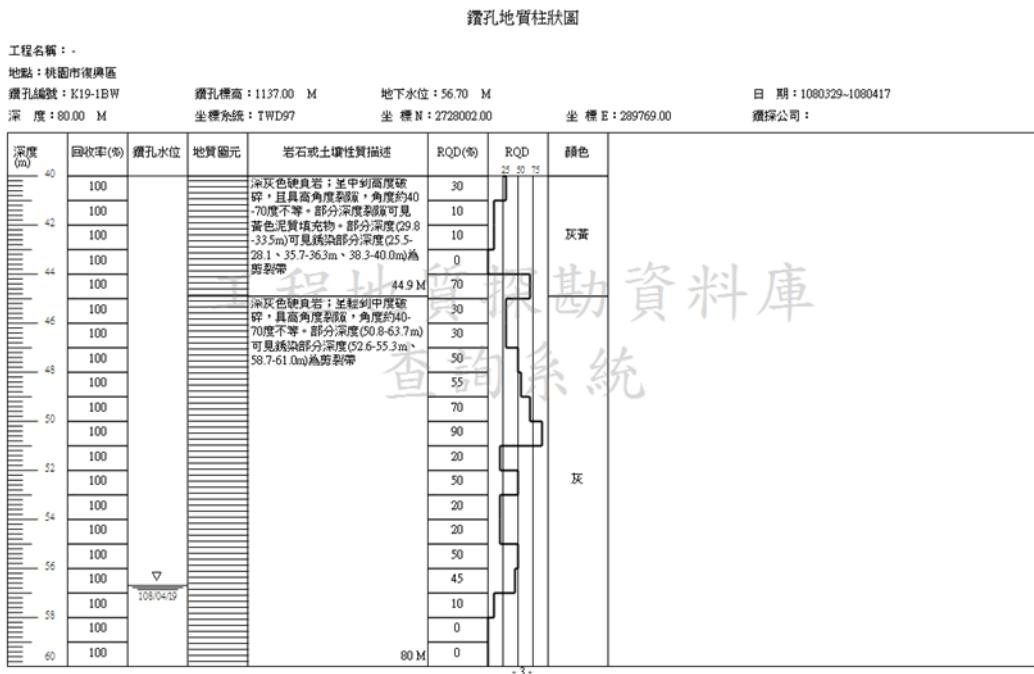


圖 3-9 (c)



鑽孔地質柱狀圖

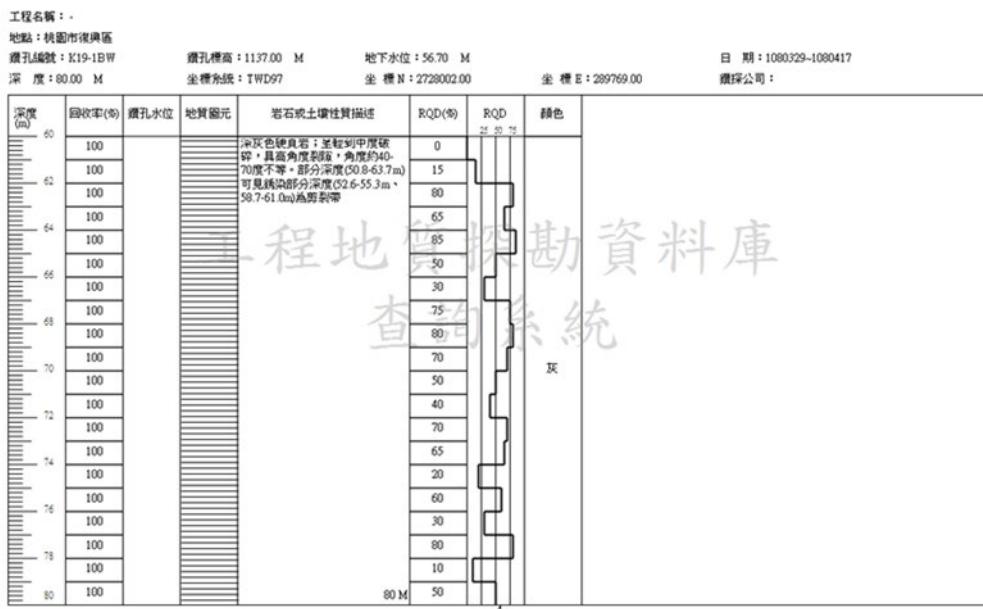




圖 3-10(c) 28~32 公尺



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)

第四章 研究方法



本章將說明如何為光華崩塌地構建物質點法（MPM）數值模擬框架，並依序介紹模型的邊坡幾何形狀、所用材料參數、各類邊界條件及初始狀態設定。

4.1 挑選欲研究剖面

在本研究中，我們選用 Anura 3D 作為數值模擬平臺，並以物質點法進行二維平面應變分析。在啟動 Anura 3D 運算之前，需先利用 GiD 軟體繪製初始邊坡幾何模型，因此必須先選取研究範圍內的剖面位置。

由於本研究目標之一是透過 MPM 模擬結果擬定崩塌警戒參考值，且需倚賴現地監測資料驗證模型，因此參考第 3.5 節所述的監測儀器布局以及青山工程於 2021 年整合的儀器配置圖（圖 4-1），最終選取 A-A' 剖面，該剖面鄰接多組監測裝置。

如圖 4-2 所示，剖面 A-A' 通過孔內伸縮計 K19-1E 與封層水壓觀測井 K19-1EW@25 m，並接近地表伸縮計 KC-2、KC-3 及 KC-5，距離最近的 GPS 單頻位移觀測點為 FST02-G6。

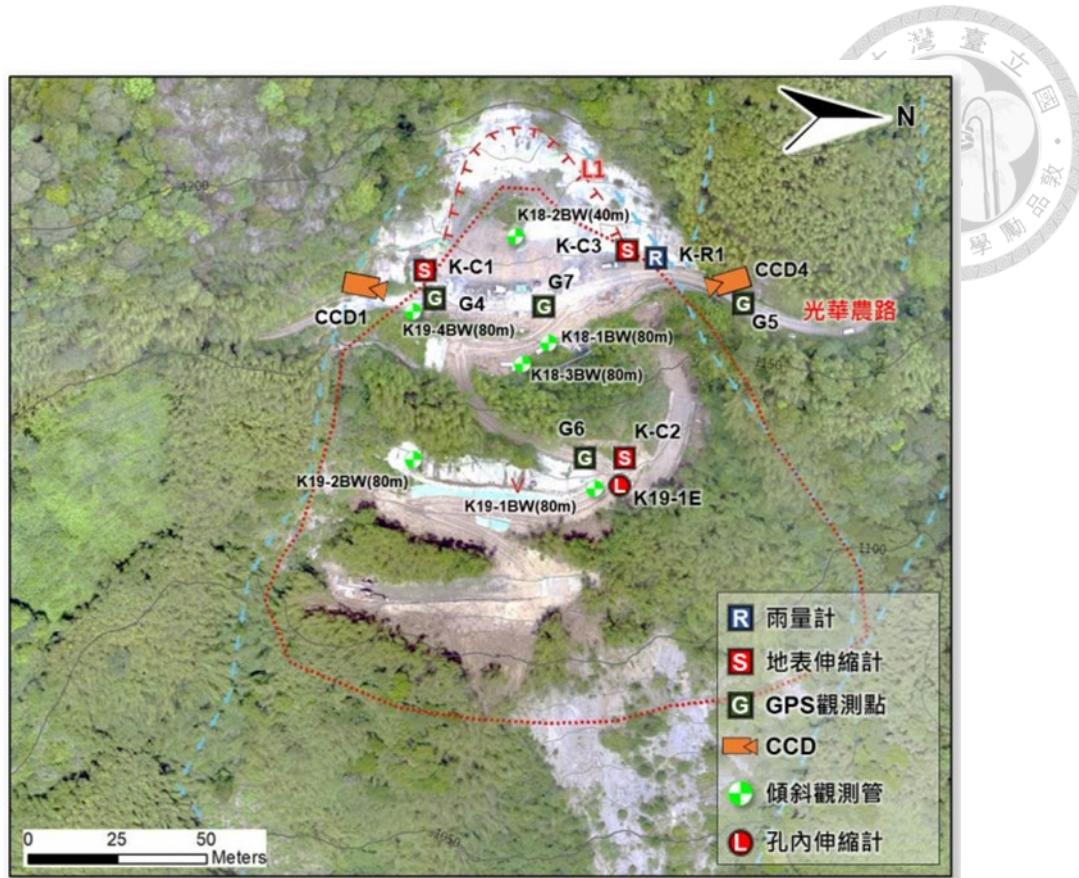


圖 4-1 光華崩塌地監測儀器圖(青山工程，2021)

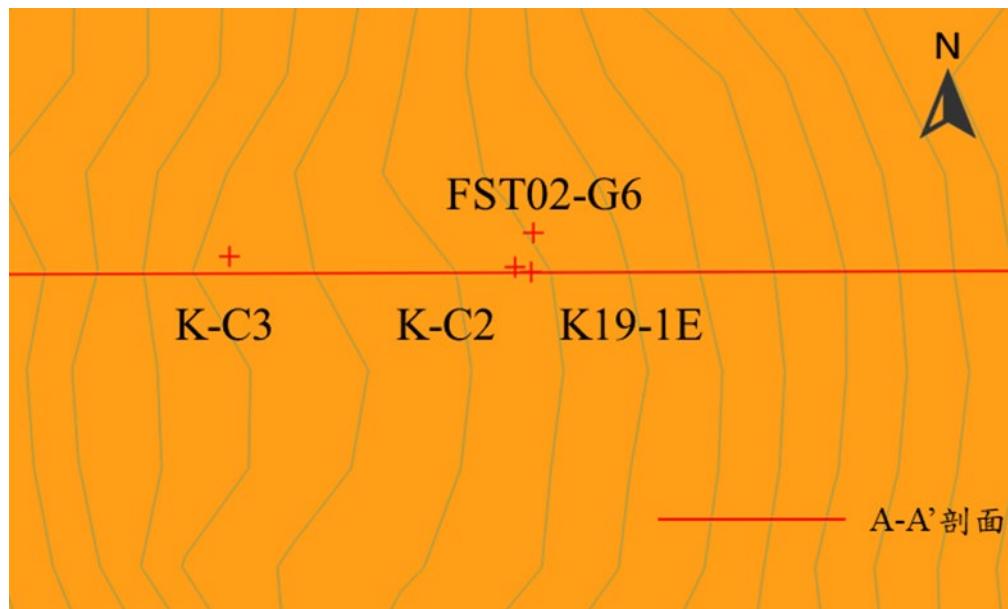


圖 4-2 A-A'剖面與鄰近儀器相對位置



4.2 建立二維邊坡幾何模型

本研究首先採用 2019 年全臺 20 m 網格數值地形模型 (DEM) 作為地表高程基礎，並依據先前選定的 A-A' 剖面，建構初始邊坡幾何外觀(如圖 4-3 所示)。接著根據第 3.6 節的地質鑽探資料與(彭逸蘋，2022) 的研究成果，我們對剖面下方的岩層與土壤進行分層設定。

由 K19-1BW 鑽孔柱狀圖可見，覆蓋在頁岩之上的岩屑層與下方頁岩層交界處存在剪裂帶。此外，坡體內部很可能還分布著其他剪裂帶，這些弱面會削弱整體結構強度，並形成深層潛在滑動面。參考(彭逸蘋，2022) 的方法，我們將頁岩層細分為上部強度較低的破碎頁岩層和下部較為完整的頁岩層。同時，依岩屑層是否受地下水浸潤，又進一步區分為「無地下水影響」與「受地下水影響」兩種狀態。

最終，邊坡剖面在幾何模型中分為四層(如圖 4-4 所示)，自地表向下依序為：

- (1) 無地下水影響的岩屑層
- (2) 受地下水影響的岩屑層
- (3) 破碎頁岩層
- (4) 完整頁岩層

後續則根據監測資料與實地觀測，微調各層的厚度與分布範圍，以確保數值模型能確實反應現實的地質條件。

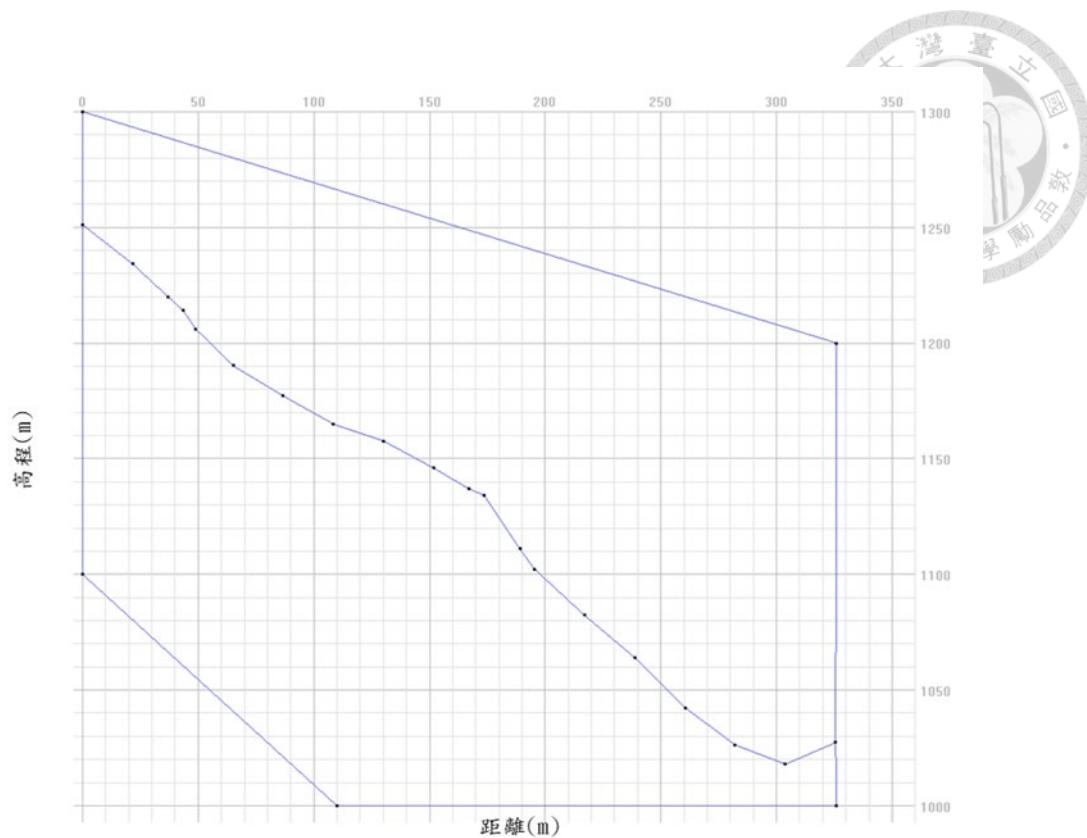


圖 4-3 A-A' 剖面的高程幾何模型

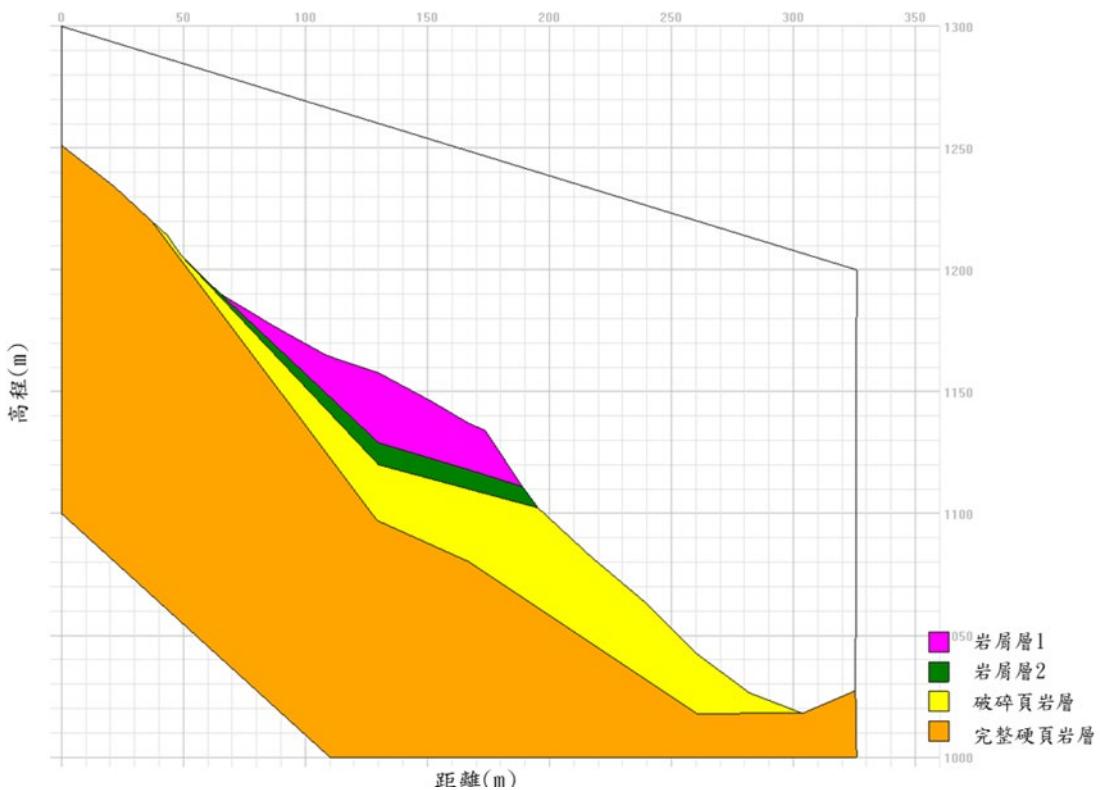


圖 4-4 數值土層材料分布設定



4.3 土壤參數

完成幾何模型後，需為各岩石土層配置相對應的物理與力學參數，本研究將採用（彭逸蘋，2022）於「以物質點法探討光華崩塌地滑動面深度與運動行為」一文中所列之土壤參數作為初始設定，具體數值彙整於表 4-1，作為後續數值模擬的參考基礎。

表 4-1 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 水力耦合分析	飽和材料 水力耦合分析	飽和材料 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 ³	20.1	20.1	26.5	26.5
水力傳導係數	m/s	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	-
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	-

在設定剪力強度參數時，依據鑽探岩心的直接剪力試驗結果將岩屑層的固有凝聚力 (c) 訂為 65 kPa，內摩擦角 (φ') 設為 30°，資料來源為水保局臺北分局 2018 之研究結果。考量地下水對土體力學性質的影響，岩屑層又細分為兩個子區域：岩屑層 1 (位於地下水位以上，未飽和) 與岩屑層 2 (位於地下水位以下，處於飽和狀態)。在飽和區域中基質吸力消失，土壤剪力強度需以視凝聚力 (Apparent Cohesion) 重新計算，以反映地下水對凝聚力的削弱作用。



$$c = c' + (u_a - u_w) \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi' \quad (\text{式 4.1})$$

在不飽和狀況下，土壤的總凝聚力可參考 (Vanapalli et al., 1996) 所提出的經驗公式進行估算，該公式同時考慮了真凝聚力與視凝聚力兩項貢獻。其中，真凝聚力 c' 代表在完全飽和且去除基質吸力後土壤內部維持的凝聚力；視凝聚力（即公式右側的第二項）則由孔隙空氣壓力 (u_a) 與孔隙水壓力 (u_w) 之差值所決定。我們以總凝聚力 $c = 65 \text{ kPa}$ 為基準，並採用文獻推估之基質吸力 $u_a - u_w = 25 \text{ kPa}$ (Yang et al., 2017 ; Nguyen et al., 2022 ; Lin et al., 2019)，同時測定土壤體積含水量 $\theta = 0.25$ 、殘餘土壤體積含水量 $\theta_r = 0.10$ 及飽和土壤體積含水量 $\theta_s = 0.30$ 。將這些數值代入後，可得岩屑層 2 在飽和條件下的真凝聚力約為 55 kPa 。

4.4 邊界條件

在 Anura 3D 中，邊界條件的設定對數值模型具有極大的影響，邊界條件包括：固-液-氣三相的位移約束、載重施加、水文條件以及指定節點速度 (prescribed velocities) 等選項。本研究中，我們對固體相與液體相均採用相同的位移固定邊界條件：於模型最下緣及最左側設置鉸支承 (hinge)，以鎖定垂直與水平方向位移；並於模型最右側與左上方設置滾支承 (roller)，僅固定水平方向位移而允許垂直方向自由變動。固體相邊界條件示於圖 4-5，液體相邊界條件示於圖 4-6。

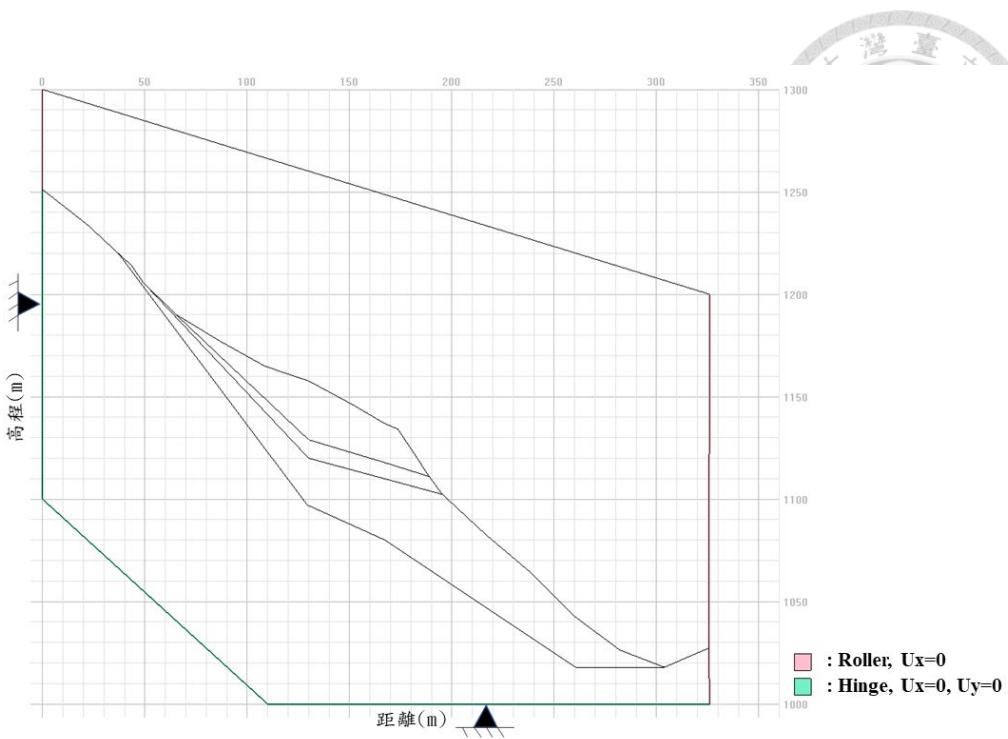


圖 4-5 固態邊界條件

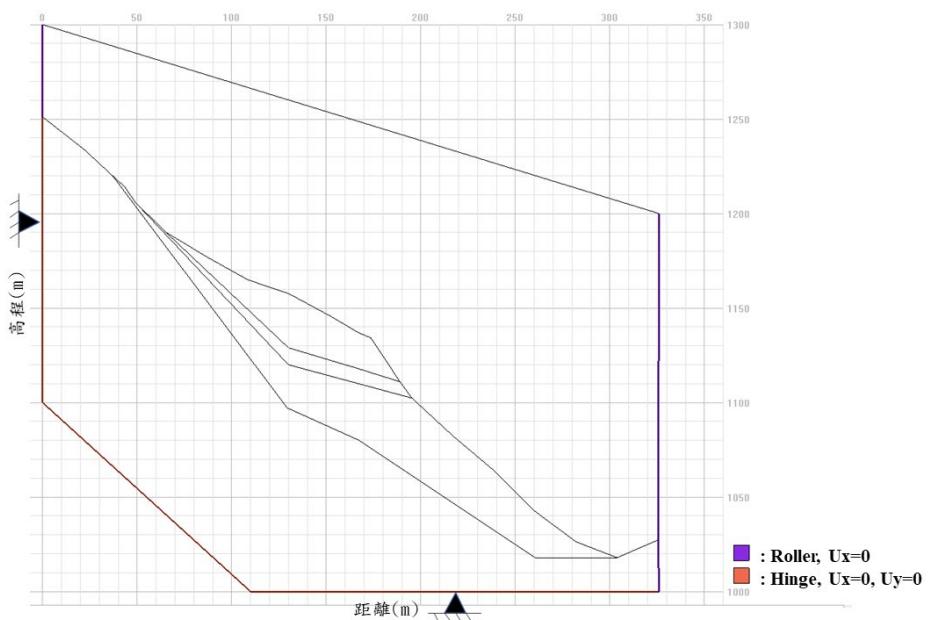


圖 4-6 液態邊界條件



4.5 初始條件

在初始條件設定中，需要確定模型土體表面(soil surface)幾何輪廓的位置分佈，具體如圖 4-7 所示。

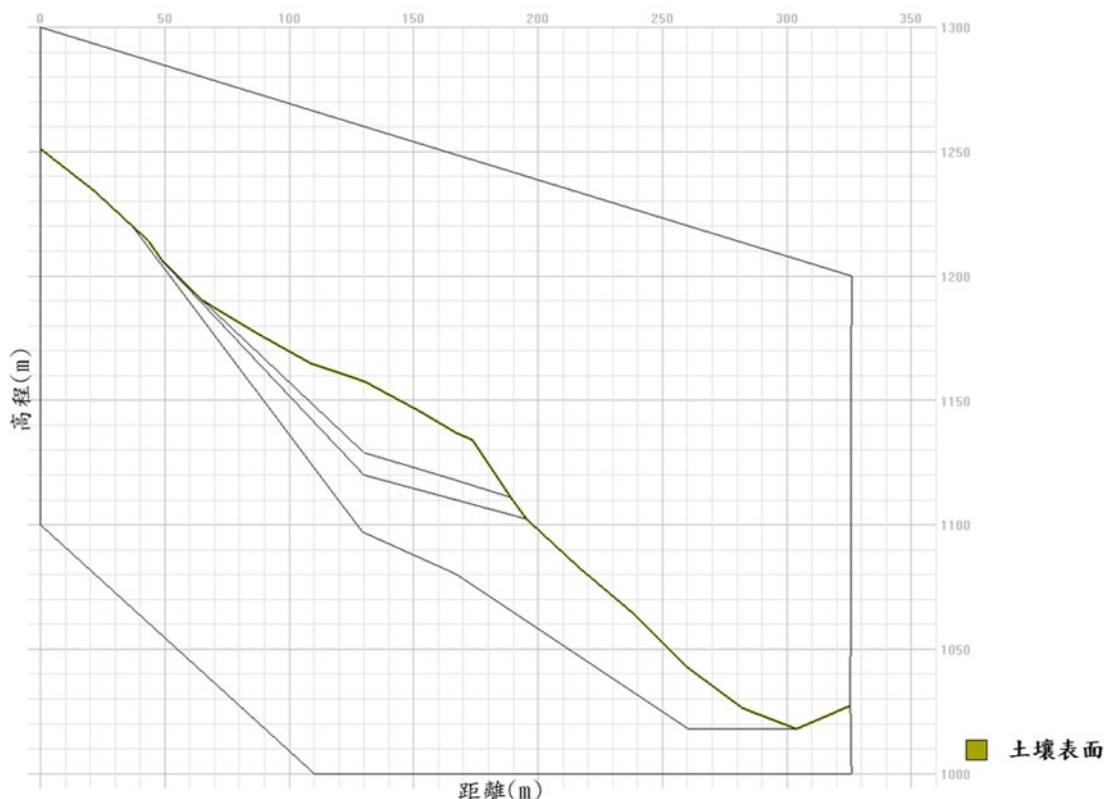


圖 4-7 土壤表面初始條件

4.6 網格設定

在完成邊界條件設定後，物質點法數值模型的最後一步是建立並配置計算網格，以便在每個網格單元內生成對應的物質點。本研究採用由三個節點構成的三角形網格，其尺寸設計需在模擬解析度與計算成本之間取得平衡，對於位於深層且未受滑動影響的完整硬頁岩層，我們將網格邊長設定為 8 m，以減少對這一穩定區域的計算負擔，而在完整硬頁岩層以上的活躍區段，因邊坡變形與滑移行為更為明顯，則採用較細的 2.5 m 網格以提升模擬解析度。依此配置，整體模型由 13,689 個三



角形網格單元、6,977 個節點以及 10,271 個物質點組成（圖 4-8）。在網格生成後，系統會在每個被賦予材料屬性的網格單元內配置三個物質點，並由這些物質點記錄質量、應力、速度等狀態資訊，未被指定材料層性的網格則不生成物質點（如圖 4-9）。

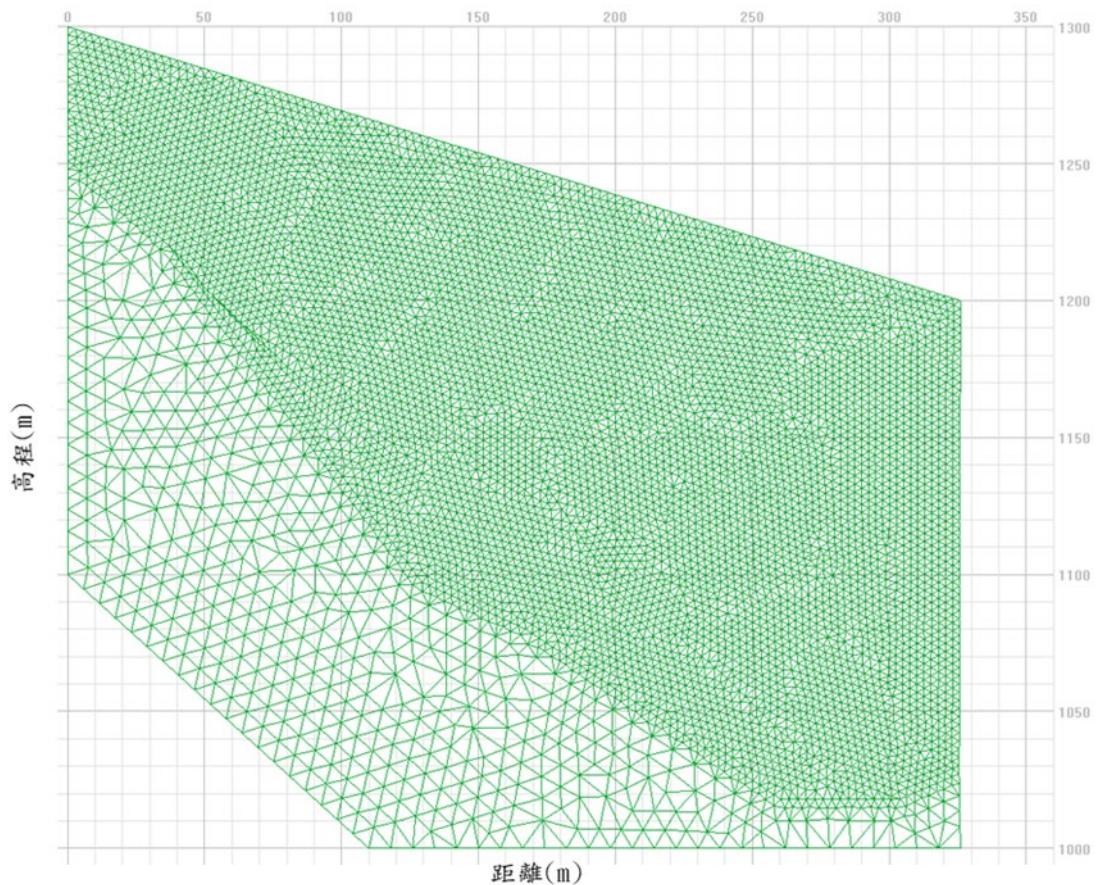


圖 4-8 本研究使用之數值模型網格

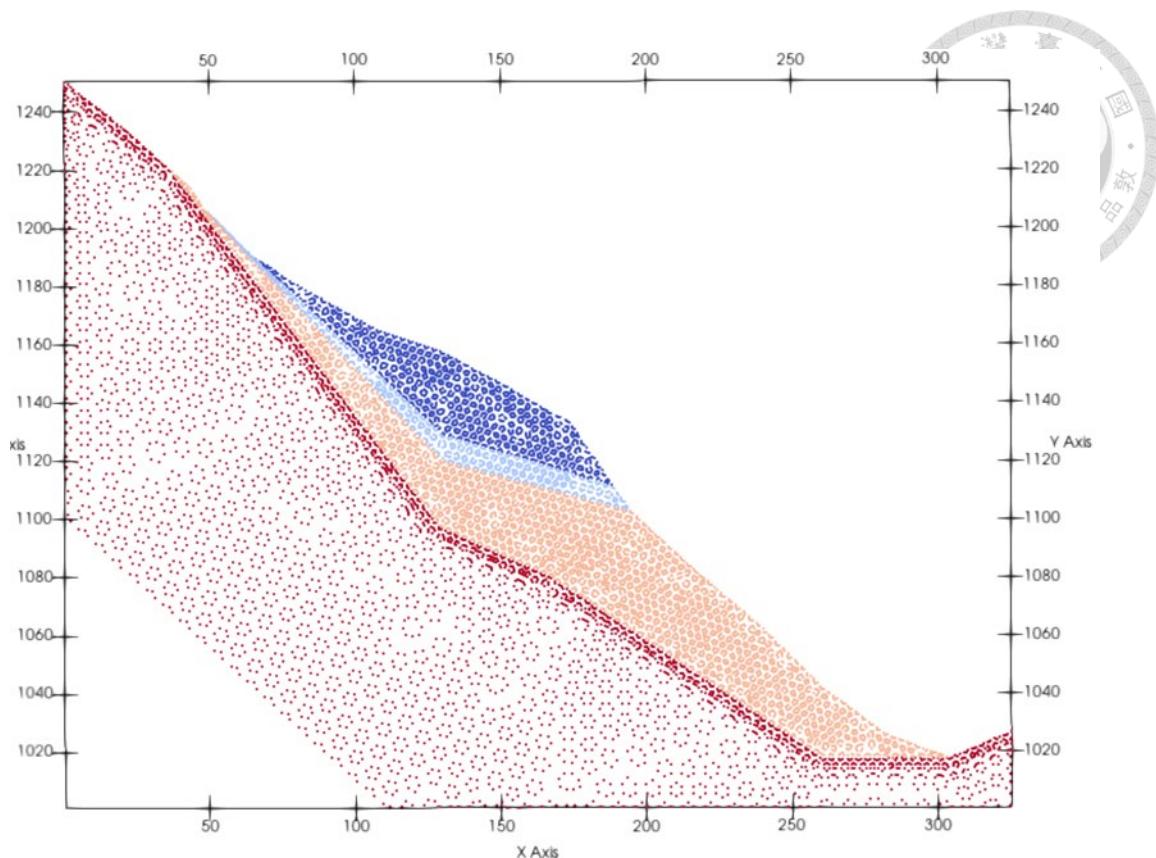


圖 4-9 數值模型之物質點分布(單位:m)

4.7 剖面 B-B'剖面 C-C'模型

為了全面評估光華崩塌地的穩定性並優化後續監測儀器的佈設，本研究將在崩塌潛勢區內精選三條具有代表性的剖面進行詳細建模與物質點法（MPM）數值模擬。

光華崩塌地因滑動風險極高一直以來是監測與研究的焦點，其中最關鍵的即為主要滑動面的位置與行為。根據歷年現地監測資料包括多組地表伸縮計、孔隙水壓計與單頻 GPS 位移以及既有研究對該滑動面的推估結果，我們已可確認此處不僅是地表最先出現異常位移的區域也是各類監測儀器最集中布設之處，因此本研究將以貫穿此主要滑動面之剖面為核心，建立二維 MPM 數值模型。除了核心剖面之外，為了評估邊坡整體的空間差異和監測佈網效益，本研究另選取兩條剖面位於主要滑動面之外，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，從而優化整體監測系統的布局。

本研究依據以下原則選取三條剖面以兼顧監測需求與空間覆蓋：首先，剖面 A-A' 貫穿主要滑動面，該處不僅位移最為明顯，且擁有豐富的現場探勘與監測數據，因而被指定為重點觀測剖面；其次，為了涵蓋崩塌潛勢區內不同地質條件並測試儀器佈設效益，我們再選取兩條位於主要滑動面外的剖面，確保既有大多數監測站點落於這兩條剖面的中間位置，以達到最優的空間監測覆蓋。

除先前所述之 A-A' 剖面外，本研究還選取了位於光華崩塌潛勢區內的 B-B' 與 C-C' 兩條(圖 4-10)。其中剖面 A-A' 對應於光華崩塌地中位移最明顯的主滑動面，而 B-B' 剖面則位於剖面 A-A' 的南側，起始座標為(121.3923, 24.6572)，終點為(121.3944, 24.6583)，該剖面經過單頻 GPS 位移 FST02-G3，剖面線平行於潛勢區南側邊界。而剖面 C-C' 則位於剖面 A-A' 之北方，起始座標為(121.3994, 24.6583)，終點為(121.3943, 24.6587)。

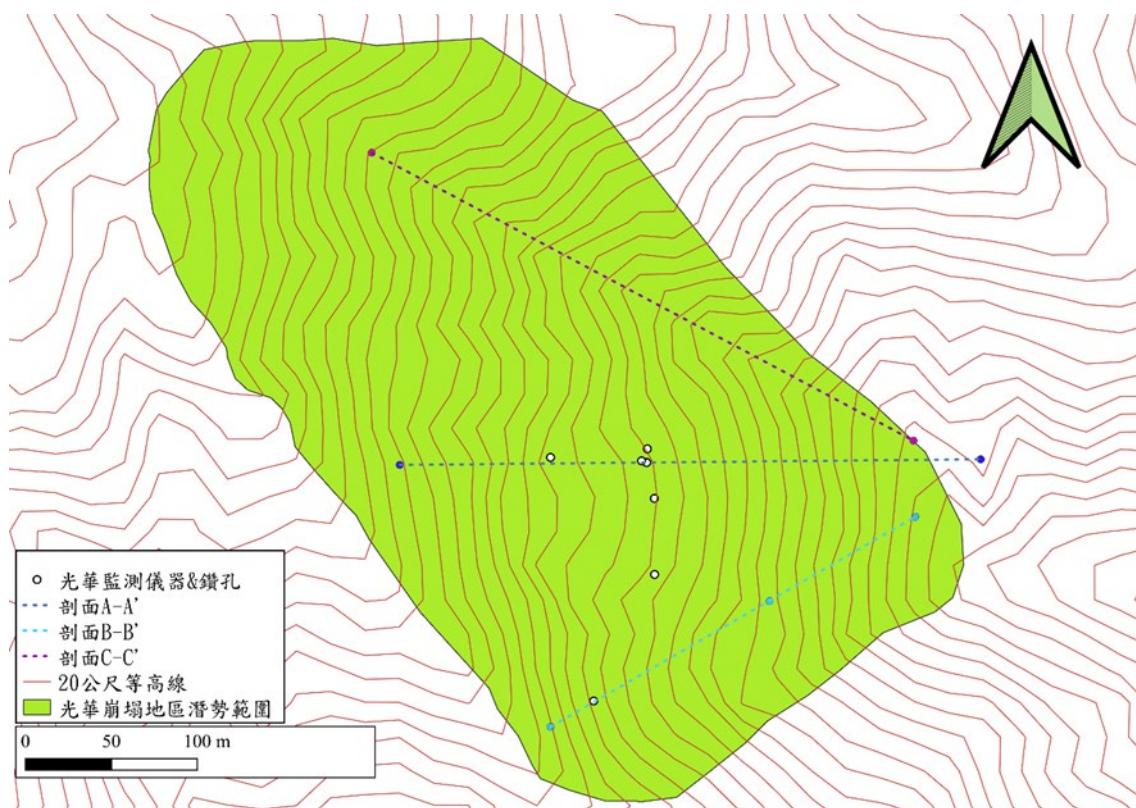


圖 4-10 三剖面在光華崩塌地的相對位置



由於剖面 B-B' 與 C-C' 尚未進行實地鑽探或土壤採樣，缺乏直接取得土壤強度與物性參數的依據，我們便借助整體地質調查結果來補足這一空缺。根據地質資料整合查詢平台的資料指出，整個光華崩塌潛勢區均屬於巴陵層，其岩性以頁岩、板岩與砂岩為主，而由於剖面 A-A' 已有完整的鑽孔試驗與剪力試驗數據，因此在相同地層背景下合理地將 A-A' 取得的土壤材料參數套用於 B-B' 及 C-C'。此一假設雖有簡化之虞，卻能在無地表採樣條件下為後續 MPM 模擬提供一致且可比較的土壤參數基礎，確保各剖面間的潛在崩塌風險評估具備可行性與相對精確性。剖面 B-B' 與 C-C' 的模型外觀如圖 4-11 與圖 4-12，而材料分布如圖 4-13 與圖 4-14。

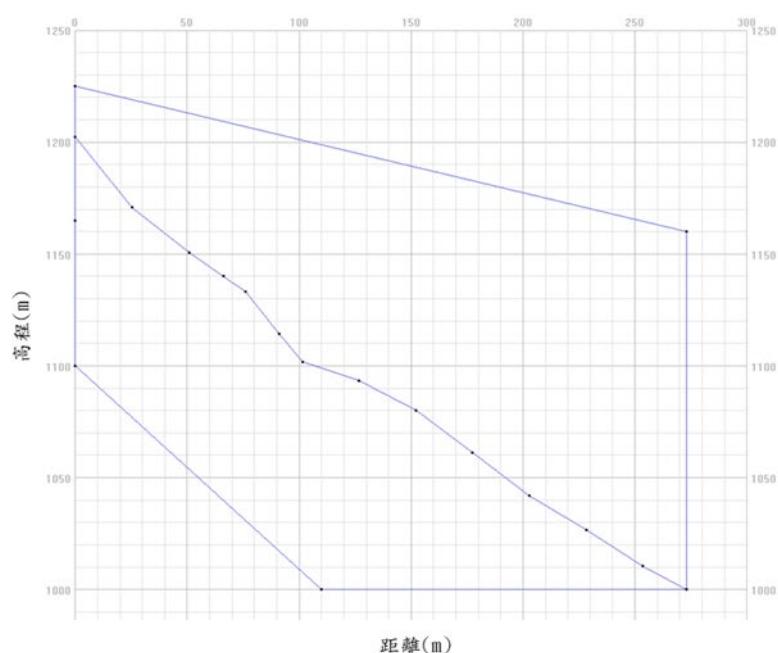


圖 4-11 剖面 B-B' 的高程幾何模型

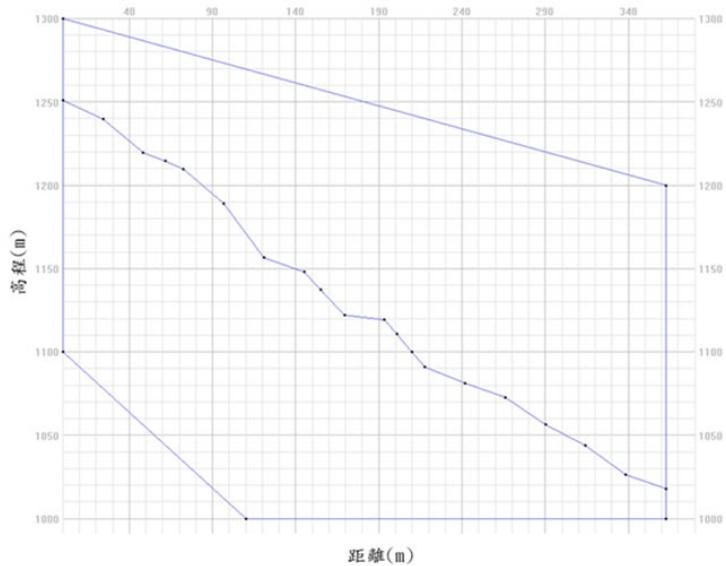


圖 4-12 剖面 C-C' 的高程幾何模型

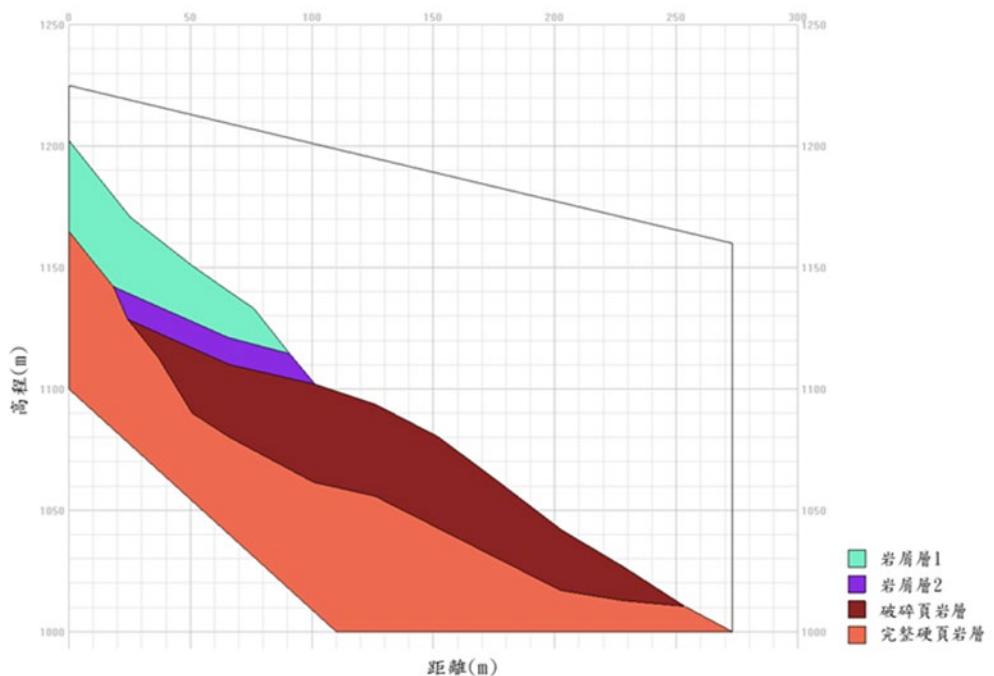


圖 4-13 剖面 B-B' 上層材料分布設定

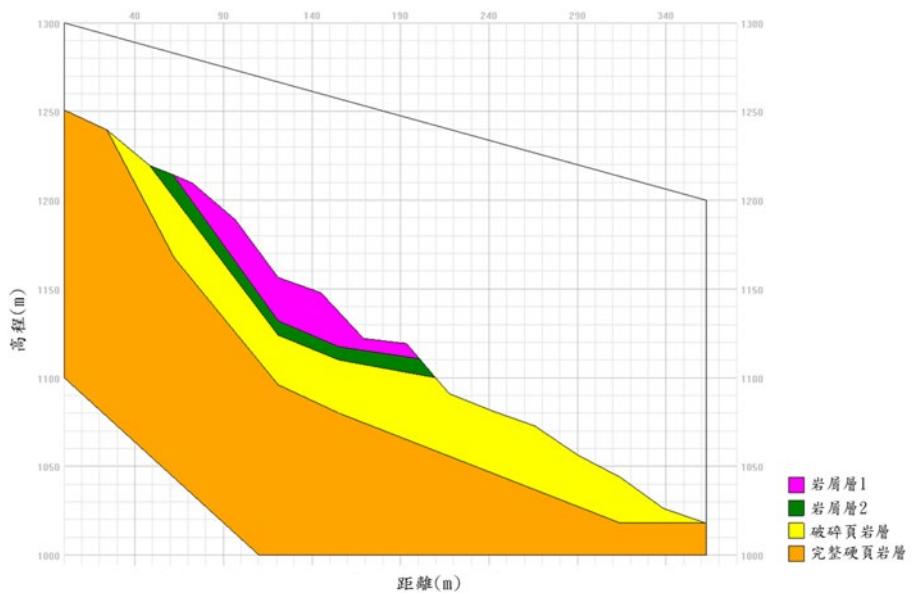


圖 4-14 剖面 C-C' 土層材料分布設定

剖面 B-B'和剖面 C-C'設定的初始土壤材料參數與剖面 A-A'相同，皆參考「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) 中的各土壤材料參數，以作為模型建構的值。參考的土壤參數如表 4-2。

表 4-2 剖面 B-B'和剖面 C-C'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 水力耦合分析	飽和材料 水力耦合分析	飽和材料 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 ³	20.1	20.1	26.5	26.5
水力傳導係數	m/s	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	-
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	-



完成材料分佈設定後，下一步即為模型施加適當的邊界條件。在 Anura 3D 中，可設定的邊界條件涵蓋固-液-氣三相的位移限制、外部載荷、水文邊界以及節點速率控制等。本研究選用固定邊界的方法，並對固體相與液體相採取一致的邊界佈置（如圖 4-15、圖 4-16、圖 4-17、圖 4-18）：於模型最下方的完整硬頁岩層底部及最左側邊界處設置鉸支承（hinge），以鎖定垂直位移；同時，於模型最右側與左上方配置滾支承（roller），僅約束水平方向移動而允許垂直自由變形。此種邊界條件能模擬地層固定支撐，又可防止模型整體水平滑移，確保數值模擬結果的穩定性與可靠度。



圖 4-15 B-B'剖面固態邊界條件

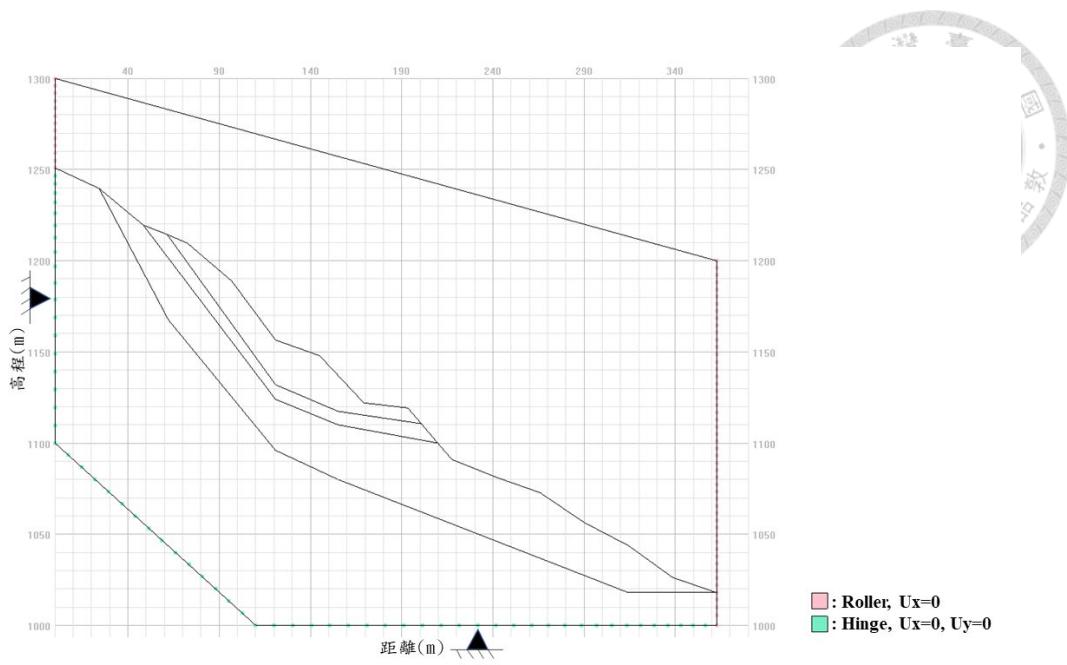


圖 4-16 C-C'剖面固態邊界條件

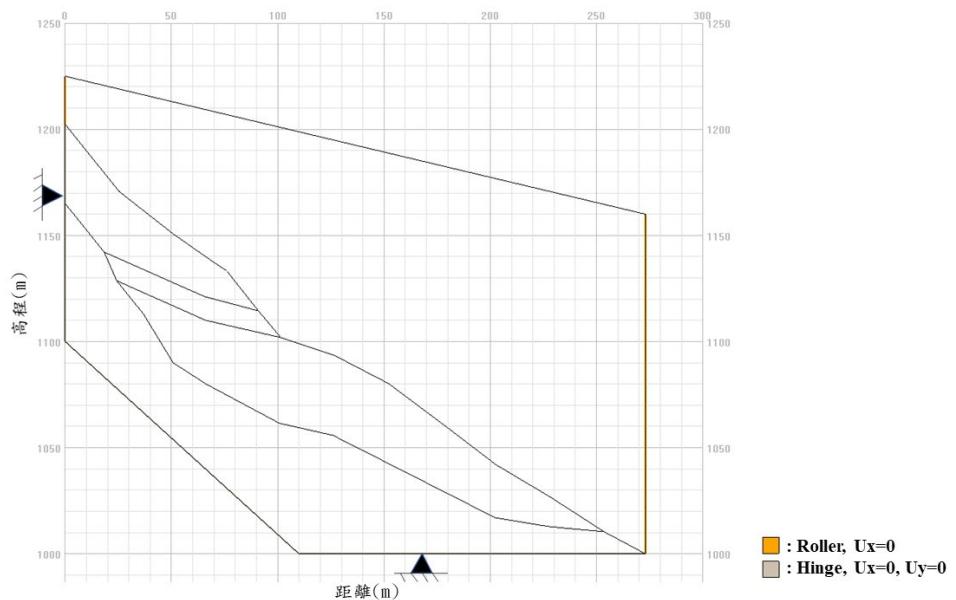


圖 4-17 B-B'剖面液態邊界條件

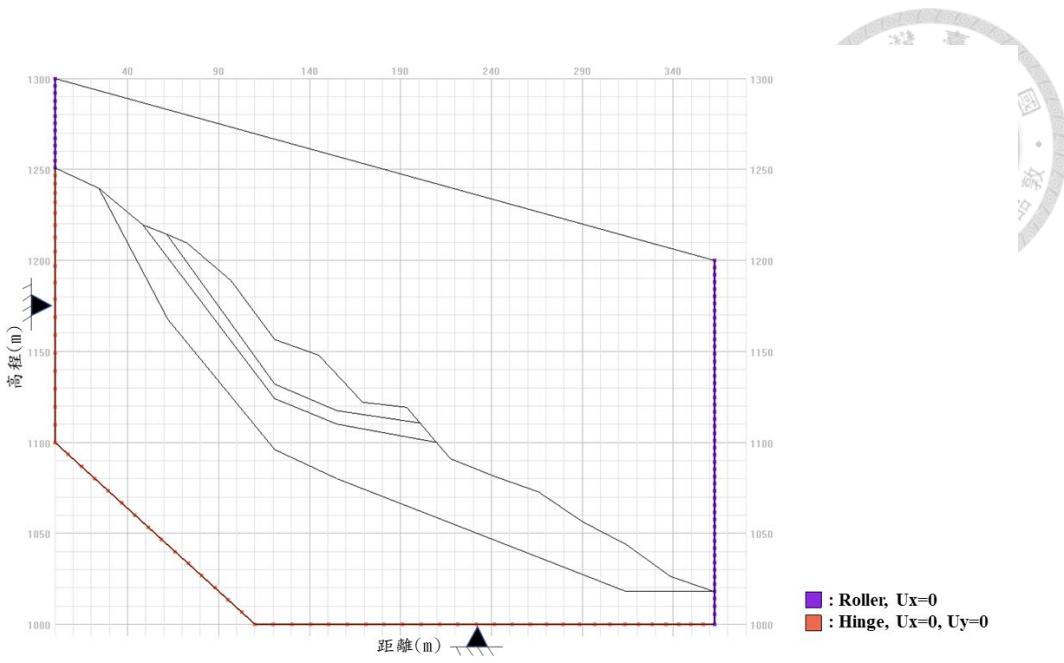


圖 4-18 C-C'剖面液態邊界條件

如圖 4-19，我們將剖面 C-C'的土壤表面訂為此模型的初始條件。

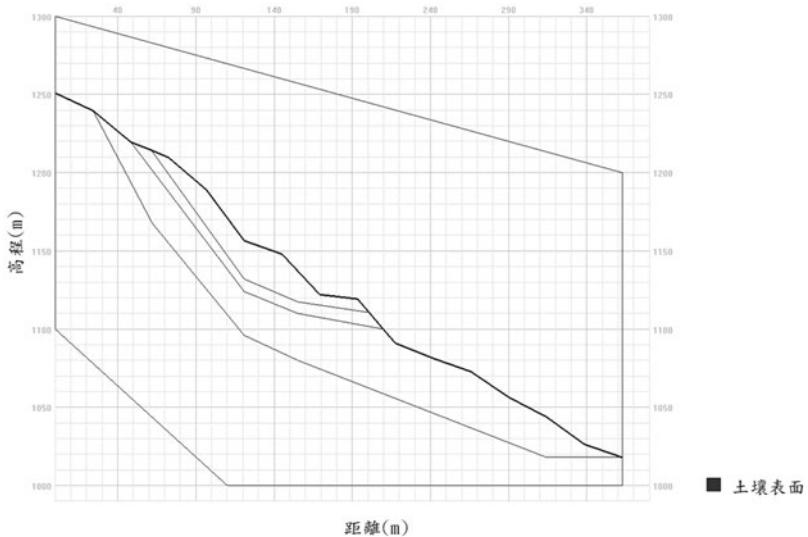


圖 4-19 剖面 C-C'之土壤表面初始條件

為在有限的計算資源下兼顧模擬解析度與運算效率，我們針對模型中不同土層特性採用兩種網格尺寸策略，對於位於底部、未受崩塌滑動影響的完整硬頁岩層，因其形變極小且結構相對穩定將三角形單元邊長設定為 8 公尺，以降低此區域的計算負擔；而對於位於其上方、易發生破壞與顯著位移行為的土層研究區域，則採



用更精細的 2.5 公尺網格，以確保關鍵變形與應力集中區域的模擬精度，網格生成後如圖 4-20 和圖 4-21。此一網格劃分方式既能有效節省整體模擬時間，又能在重點區域保有足夠的空間解析度，達到計算效率與結果可靠性的最佳平衡。

在本模型中，每一個三角形單元均對應生成三個物質點，系統在完成網格劃分後會自動於各單元內配置這些物質點，並依據其所屬的岩土層性質賦予對應的材料參數。每個物質點會完整記錄自身的位置、質量、速度、應力等狀態變量，以供後續運算使用；若某一網格單元未被指定任何材料屬性，則該單元將不會生成物質點。

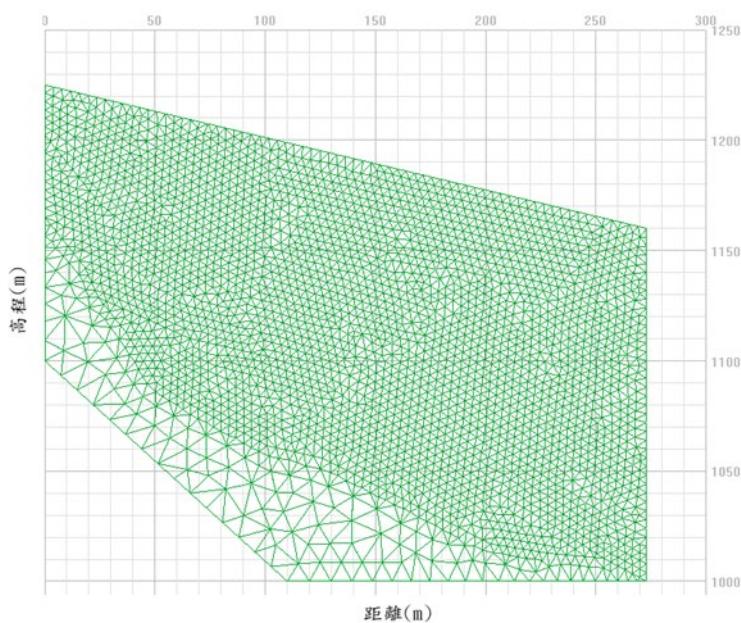


圖 4-20 B-B' 數值模型網格

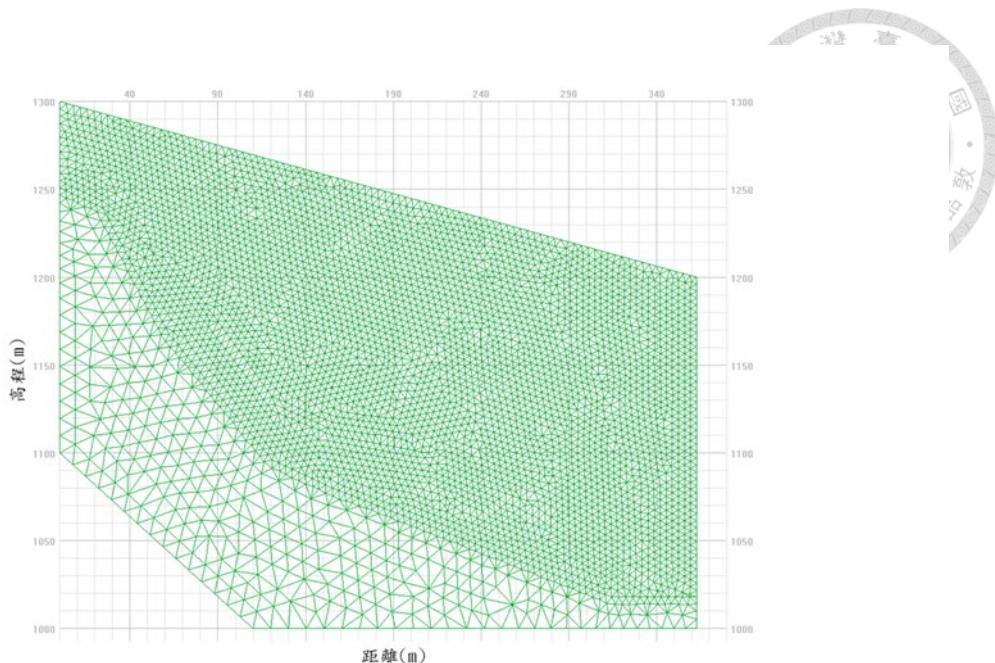


圖 4-21 C-C' 數值模型網格

4.8 三維模型的建立

在完成二維物質點法模型（MPM）建構後，本研究擬進一步發展三維模擬能力。相較於僅能呈現單一剖面行為的二維分析，三維模型具備同時解析不同土層間空間交互作用之能力，能更全面地剖析崩塌事件的成因、作用機制與時空演變歷程。此外，三維模擬亦可精確重現崩塌後之堆積體形貌與變形特徵，提升災害評估與風險預測之準確性與應用價值。此外，將二維與三維模擬結果加以對比，不僅有助於驗證哪種方法對現場情況的擬合度更高，也能在模擬精度與運算成本之間做出最具效益的取捨。透過比較二維模型與三維模型在重現滑動、位移分布、剪裂帶生成深度等特徵上的差異，可評估二維假設對複雜地質構造的簡化程度，同時三維模型卻可能因物質點數量大幅增加而導致運算時間與計算需求大幅上升，透過這樣的對比分析，能助於在模擬精度與運算成本之間做出最具效益的取捨。

儘管如此，在完成建立光華崩塌地的三維物質點法模型後，在 Anura 3D 的運算過程中，無法如預期般完整重現現地的崩塌狀況，便先以 Anura 3D 操作手冊中



的簡易二維模型案例為參考，確認正確性後以此為基礎拓展成三維模型。圖 4-22 是二維模型案例的幾何外觀，在延伸成三維模型後，如圖 4-23 的樣子。

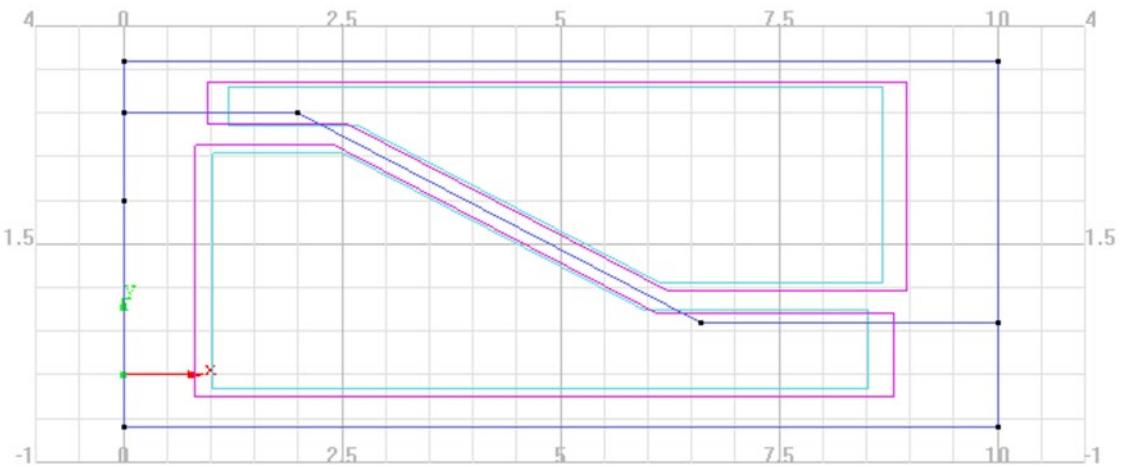


圖 4-22 二維模型幾何

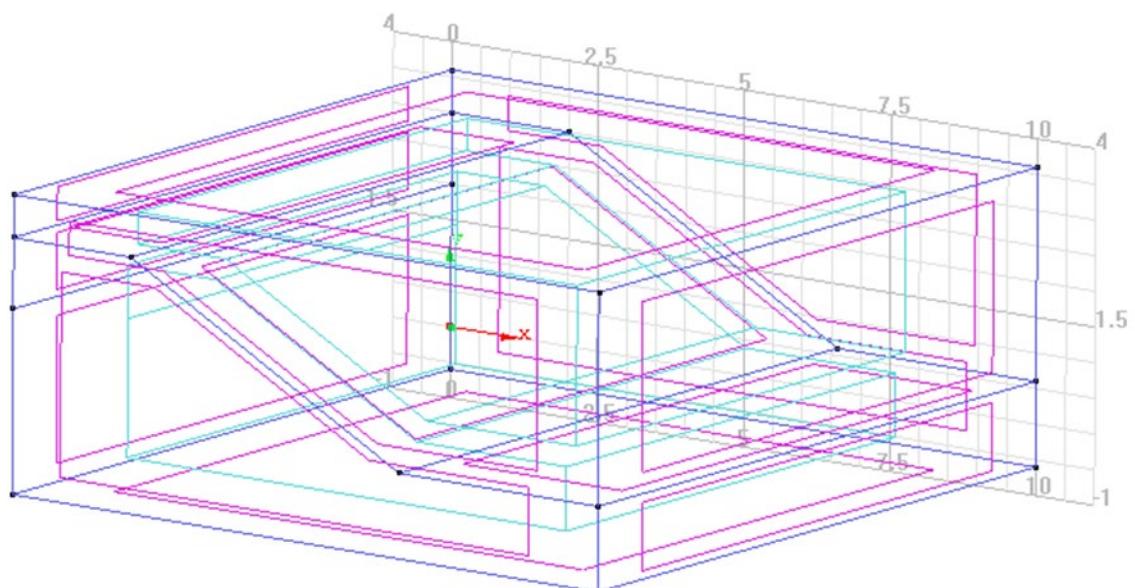


圖 4-23 三維模型幾何

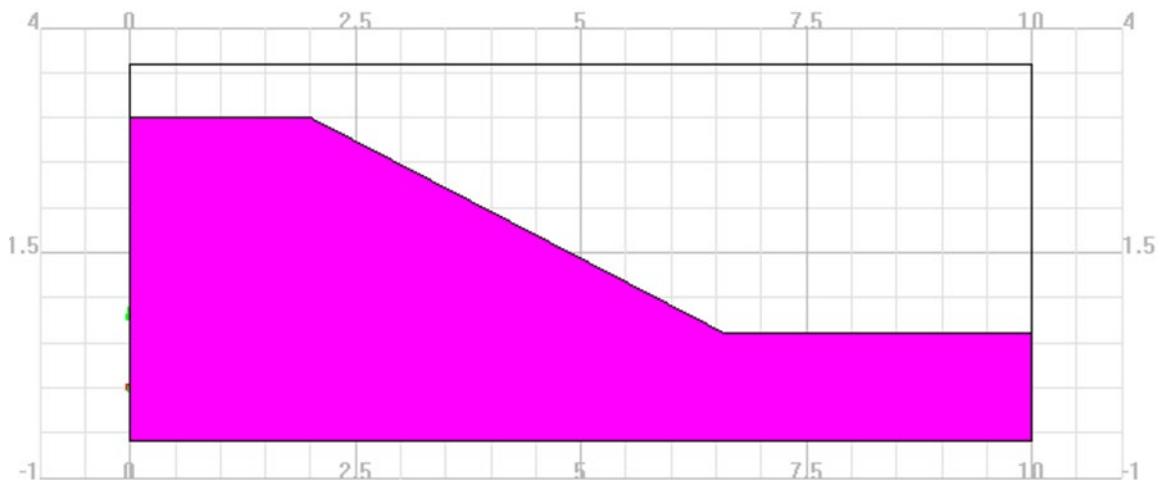


圖 4-24 二維模型材料分布設定

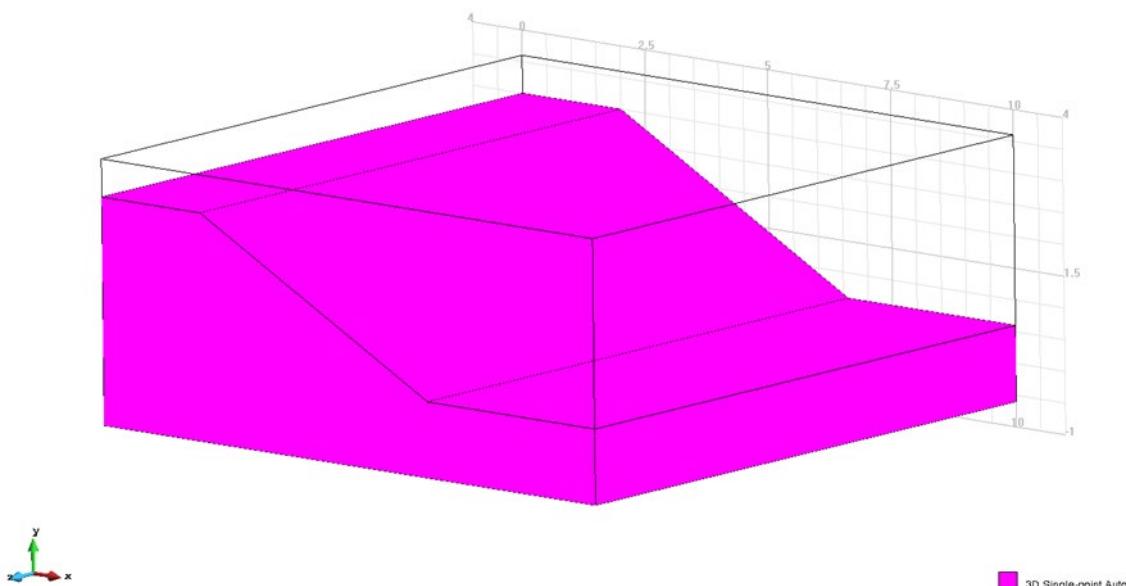


圖 4-25 三維模型材料分布設定

完成模型幾何後，參考二維案例分配材料分布位置，土壤材料定義如圖 4-24 和圖 4-25 中桃紅色區域。建立此三維模型的各項土壤參數如表 4-3 所示。

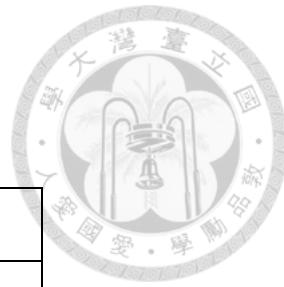


表 4-3 建立三維模型之土壤參數

土壤參數	單位	
組成率模型	-	莫爾-庫倫
初始孔隙率	-	0.3
單位重	kN/m ³	26
水力傳導係數	m/s	1.00 x 10 ⁻³
有效浦松比	-	0.3
有效楊氏模數	Mpa	30
有效凝聚力	kPa	0.5
有效摩擦角	°	27

完成材料分佈設定後，下一步即為模型施加適當之邊界條件。在 Anura3D 中，邊界條件設定涵蓋固、液、氣三相的位移限制、外部載重、水文邊界條件，以及節點速率控制等多種形式。本階段所建構之三維模型採用固定邊界的設定方式，考量本模擬尚未納入複雜水文條件，因此未對液相部分施加固定邊界限制，僅針對固相施作必要之位移約束，以確保模型穩定性與初步模擬結果之可靠性，如圖 4-26 與圖 4-27。固態的邊界條件於模型最下方的土壤底部設置鉸支承 (hinge)，以鎖定位移；同時，於模型其他邊配置滾支承 (roller)，僅約束一個方向移動而允許自由變形。此種邊界條件能模擬地層固定支撐，又可防止模型整體滑移出邊界，確保數值模擬結果的可運算性與穩定性。

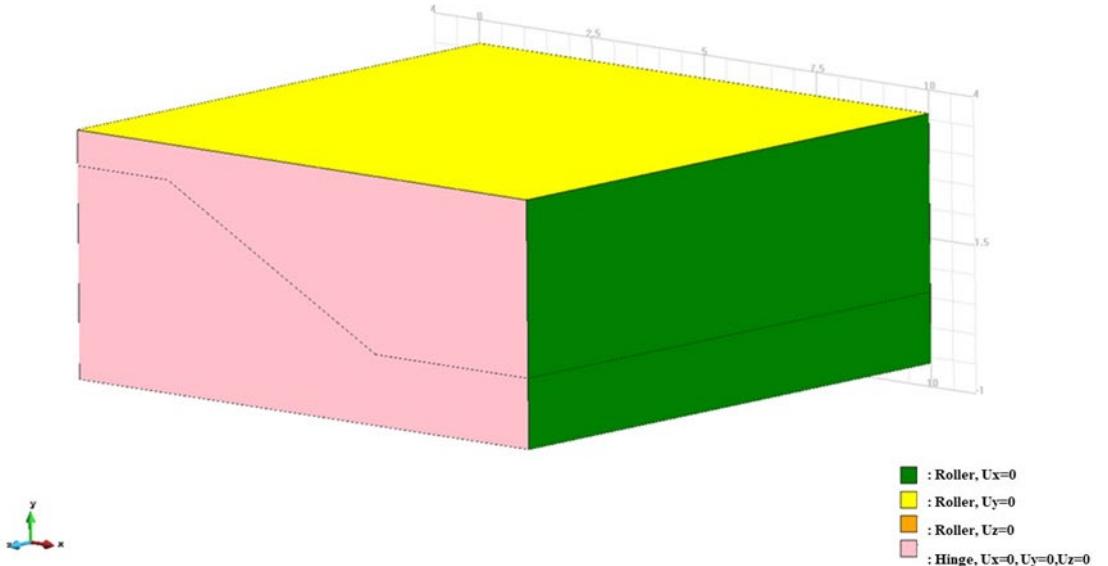


圖 4-26 固體相邊界條件

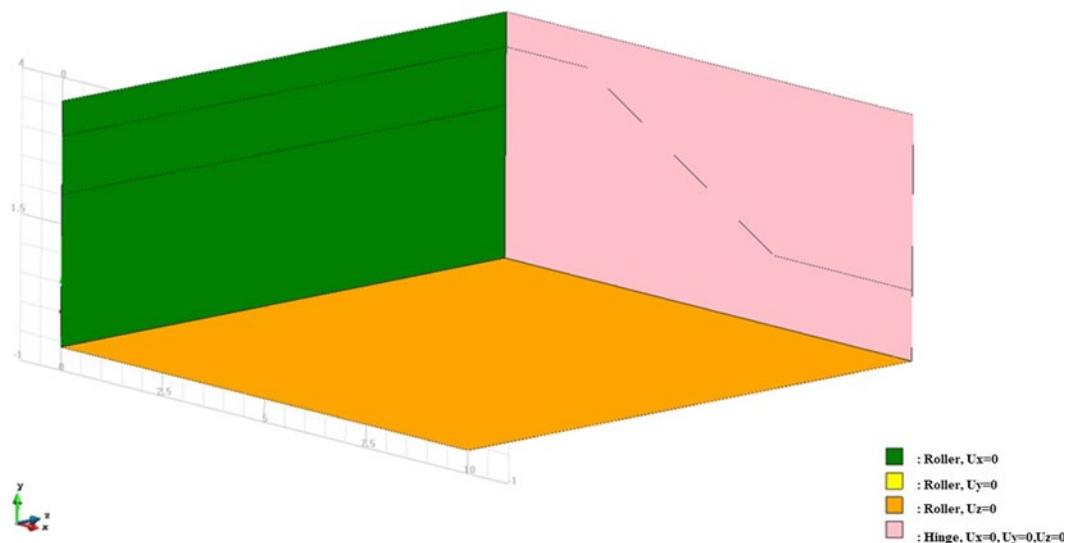


圖 4-27 固體相邊界條件

在本模型中，為了確保網格尺寸同時能兼顧精度及計算效率，因此將網格尺寸設定為 0.5m (圖 4-28)。接著設定每一個三角體單元均對應生成四個物質點，系統



在完成網格劃分後會自動於各單元內配置這些物質點，並依據所屬的土壤層性質給予對應的材料參數。每個物質點會完整記錄自身的位置、質量、速度、應力等狀態變量，以供後續運算使用；若某一網格單元未被指定任何材料屬性，則該單元將不會產生物質點。

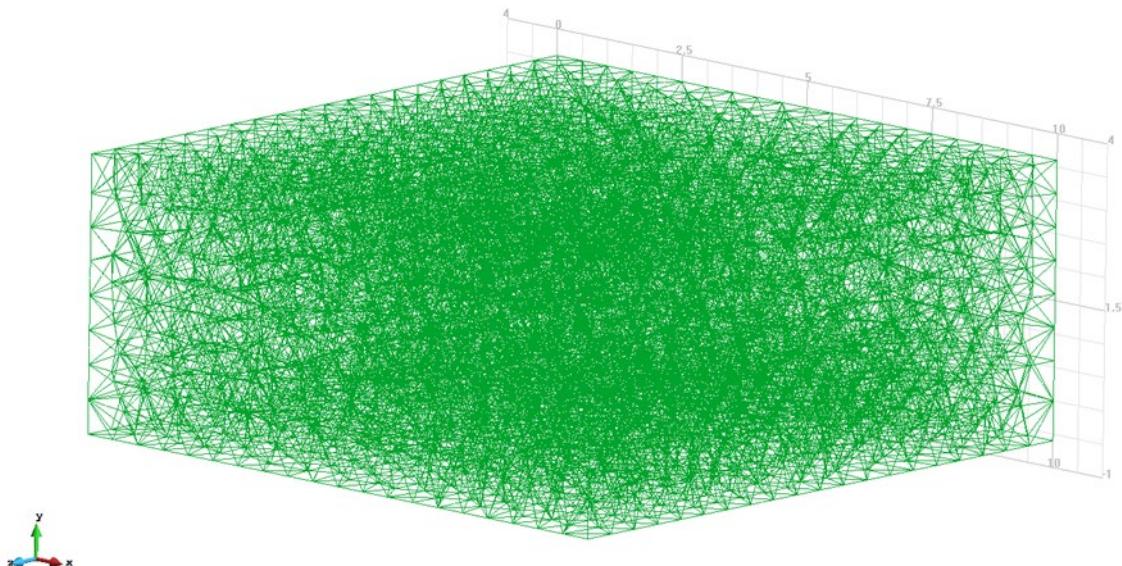


圖 4-28 三維數值模型網格

4.9 邊坡可靠度分析-克里金代理模型

傳統的蒙地卡羅方法往往需要透過成千上萬次隨機取樣才能獲得穩定的失效機率，對計算資源和時間造成不小的壓力。為了緩解這一個挑戰，我們可以引入克里金法 (Kriging) 等代理模型技術，利用統計的空間相關性原理，僅以少量樣本就能重新推算系統整體的行為。

首先隨機選取數組隨機變數代入極限方程式內，計算它們在極限狀態函數下是否失效。接著將這些「輸入 - 輸出」資料作為建立 Kriging 代理模型 (surrogate model) 的參考數據，建立一個近似真實極限方程式的連續函數。建立初步模型後，



接下來可藉由最佳化選取新的隨機變數樣本點，用來進一步更新 Kriging 模型。這樣的迭代取樣—更新流程將持續進行，直到代理模型的預測精度達到預先設定的標準為止。得注意的是，每一次新樣本的選擇都會直接決定極限方程式被呼叫的次數，並最終影響整體可靠度分析所需的計算效率。

在自適應 Kriging 可靠度分析中，我們在選擇新樣本點時通常會結合兩個概念：其中一個是最佳化的 exploit 概念，即是挑選那些最有可能落在失效邊界附近的樣本，以確保模型的準確性；另一個是最佳化的 explore 概念，預測誤差最大的區域作為新樣本，藉此降低代理模型在未知區域的不確定性。將這兩種策略交替或並用，一方面能大幅減少對原始極限方程式的呼叫次數，另一方面也能同步提升模型的整體準確度。

透過 Kriging 的高效代理架構，原本需數萬、甚至上百萬次蒙地卡羅抽樣才能完成的可靠度評估，如今只要幾百至幾千個精心選取的樣本即可達到相同的精度；由此不僅節省了大量運算時間，也提升了失效機率估算的可靠性。在工程應用中，特別是那些既需要高精度又受限於計算資源的複雜系統，自適應 Kriging 法展現出廣泛的發展潛力。

本研究採用的可靠度分析方法為 AK-PSO-HHs (Adaptive Kriging Adopting PSO with Hollow-Hypersphere Space)，中文可解釋為「結合粒子群優化與中空超球空間的自適應 Kriging 方法(AK-PSO-HHs)」。這個可靠度分析方法的基礎類似於 AK-MCS 相似的自適應 Kriging 方法，但以此做了數項改良優化，特點如下：

- (1) AK-MCS 中的樣本池設計常被認為是一大缺點，當 P_f 極小時會造成記憶體錯誤與運算時間增加，且由於 P_f 是在可靠度評估前無法得知的資訊，導致 AK-MCS 即便在低維度問題中也會效率不佳。因此，AK-PSO-HHs 方法在尋找 Kriging 模型最佳訓練樣本點時，改採用粒子群優化(PSO)這類最佳化演算法。相較於傳統需要求解複雜數學函數的方法，PSO 能夠避免這類繁複運算。雖然



其計算成本通常高於梯度法，但因能找到接近全域最佳解，所以在實務上被廣泛接受。在 AK-PSO-HHs 方法中，每次迭代中皆使用 PSO 來尋找最佳樣本。

- (2) AK-PSO-HHs 亦採用一種針對標準常態空間的特殊搜尋空間縮減技術，稱為中空超球空間縮減法 (Hollow-Hypersphere Space Reduction，簡稱 HHs)。多數現有方法僅透過單一指定半徑的超球體來限制搜尋範圍，但靠近原點的區域通常屬於安全域，可自搜尋空間中排除。因此，此方法引入同時具備外半徑與與極限狀態函數相交之內半徑的雙重邊界設定，以構成中空超球空間，進一步提升搜尋效率。
- (3) 透過此可靠度分析方法所提出的 PSO 與 HHs 結合方式，其在極限狀態函數評估方面之效率與現有方法相當或略優，而在 Kriging 函數評估方面則有顯著效率提升。
- (4) 由於結合了 PSO 與 HHs，此方法完全移除了對樣本池的依賴，因此無論失效率 P_f 的大小為何，皆不影響其運作。換言之，所提出的 Kriging 基礎可靠度評估方法，其計算成本與 P_f 無關。

綜上所述，AK-PSO-HHs 結合了多項關鍵技術以提升可靠度分析的整體效率與可行性。為有效實現這些特性，此方法設計了一套分階段的運作流程。AK-PSO-HHs 的主要流程可以分為 5 個階段，各階段的說明如下：

(1) 初始化 (Initialization) :

本階段的目標為建立初始的 Kriging 替代模型，並透過中空超球空間 (Hollow-Hypersphere, HHs) 框架來定義搜尋區域，一個良好的初始模型將有助於後續的自適應樣本更新與整體最佳化程序的收斂效果。在本方法中，初始模型是透過少量樣本建立，樣本數設定為隨機變數數量 (n_{RV}) 的五倍，以兼顧建模效率與代表性。這些樣本由拉丁超立方體抽樣 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 所產生，藉以確保樣本點能在標準常態空間中均勻分佈，提



升整體空間的覆蓋效率。此外，與粒子群最佳化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 相關的參數亦於此階段設定，其中 PSO 的迭代次數建議設定為 $5 \times nRV$ ，而粒子數量則設定為 $15 \times nRV$ ；兩者均應依據極限狀態函數之非線性程度與問題的維度進行調整，以確保搜尋效率與收斂品質。HHS 框架下的搜尋空間也於本階段初始化，外半徑 β_1 建議設定為一個足夠大的值（例如 $\beta_1 = 8$ ）以涵蓋潛在的失效區域；內半徑 β_2 則可設定為常見的可靠度指標值（例如 $\beta = 3$ ），或根據先驗資訊預估的最可能失效點（Most Probable Point, MPP）之距離。

(2) 使用 PSO 搜尋訓練樣本並更新 Kriging :

本階段的目標是利用粒子群最佳化演算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)，在中空超球空間 (Hollow-Hypersphere, HHS) 中搜尋對 Kriging 模型最具貢獻性的樣本點，藉此強化模型在極限狀態函數附近的預測能力，同時減少不必要的函數評估次數。與傳統的自適應 Kriging 結合蒙地卡羅模擬方法 (AK-MCS) 不同，後者仰賴預先建立的樣本池進行挑選，本研究提出改以 PSO 動態搜尋樣本位置，並建立一套雙層迴圈的最佳化架構：外層迴圈用於判斷整體 Kriging 模型是否已達收斂條件，內層則透過 PSO 尋找當前最適合加入的訓練樣本點。為導引 PSO 搜尋方向，此方法設計了兩種可選用的目標函數，並以機率策略進行調控。第一種為 REIF-2 (Refined Expected Improvement Function-2) 目標函數，透過綜合考量預測均值、標準差與樣本密度能有效提升模型對潛在失效區域的辨識能力；第二種則為專門針對尋找最可能破壞點 (Most Probable Point, MPP) 所設計的距離型目標函數，有助於聚焦於極限狀態附近的樣本搜尋。在初始化階段 (Level 0) 中，選擇距離型目標函數的機率設定為 30%，而隨著模型逐漸收斂，該機率會逐步下降至 15%。為避免產生重複樣本點，在 PSO 過程中加入樣本間最小距離的限制條件，並將搜尋區域嚴格限制在 HHS 所定義的 β_1 與 β_2 之間。每當一組最優樣本點



被選出，即可立即用來更新 Kriging 模型，進一步提升其局部精度與整體預測能力。

(3) 線性搜尋與中空超球半徑更新：

本階段的目標是透過線性搜尋法（Line Search）精確找出最可能破壞點（Most Probable Point, MPP），並根據該結果動態更新中空超球空間（HHS）的內外半徑 β_2 與 β_1 ，使搜尋重心更聚焦於對可靠度影響最大的區域。在每一次 Kriging 模型更新後，系統首先會檢查目前所有訓練樣本中是否已有落入失效區域（即極限狀態函數值小於零）的樣本點，若未發現任何失效樣本，則會重新執行外層最佳化迴圈，以進一步提升模型的準確性與覆蓋度。一旦偵測到存在失效樣本，系統便會針對所有訓練樣本執行線性搜尋操作。具體而言，該搜尋方式是從原點出發，向每個訓練樣本點畫出一條假想直線，並在該直線上尋找使 Kriging 模型預測值等於零的位置，此點即視為 MPP 候選點。對於位於失效區域內的樣本，搜尋方向為朝原點遞減距離，而對於位於安全區域的樣本，則朝遠離原點的方向搜尋。在所有候選點中，距離原點最短者即被視為新的 MPP。確定 MPP 位置後，將其徑向距離設定為內半徑 β_2 ；至於外半徑 β_1 ，則依據該 MPP 的位置與當前 Level 編號，透過預設公式進行調整與更新。此一動態更新機制可確保搜尋空間逐步收斂至與可靠度結果高度相關的核心區域，從而有效提升評估效率與模型穩健性。

(4) 系統停止準則（Stopping Criteria）：

本階段的目標是建構一套嚴謹且具彈性的停止準則機制，以判斷外層最佳化程序何時應該終止，從而確保 Kriging 替代模型已具備足夠的預測能力，能準確執行後續的可靠度分析。整體程序是以「Level」為階段單位進行，從 Level 0 開始，每當特定條件滿足時，則進入下一層（Level +1），直到達到最大階數，即 $2 \times nRV$ （其中 nRV 為隨機變數的個數）為止。為了確保每一階



段的推進具備理論依據與數值穩定性，此方法設計了四項作為進入下一階段的條件 (R1 ~ R4)：

條件 R1：MPP 收斂性判斷

當最近五次所計算出的最可能破壞點 (Most Probable Point, MPP) 與當前最新的 MPP 間相對差異低於 2% 時，即視為 MPP 已收斂。

條件 R2：失效樣本數達標

當目前樣本集中，落於失效區域的樣本數量達到 $2 \times nRV$ ，即視為具有足夠資訊可描繪失效區域。

條件 R3：模型已無新增資訊潛力

當連續 N 次迭代中，所有候選樣本的 U 函數值皆大於 5，且 REIF-2 值皆低於 0，表示目前模型已無明顯資訊增益潛力。其中 N 定義為 $\max(10, nRV^2 - 15)$ ，以適應不同問題規模。

條件 R4：樣本貢獻趨於飽和

當連續兩次迭代中所有候選樣本的 U 值皆大於 1.4，且 REIF-2 值皆小於 0.05，亦可視為模型已趨穩定。

在 Level 0 階段，本研究的主要任務是尋找穩定且準確的 MPP，因此以 R1 為主要進階依據，而 R2 至 R4 則作為輔助條件，尤其在失效樣本難以取得的情況下，能避免模型停留於無效搜尋，提升整體效率與穩健性。

(5) 透過 Kriging-RBIS 進行可靠度評估：

本階段的目標是利用已建構完成的 Kriging 模型，結合徑向基礎重要性抽樣法 (Radial-Based Importance Sampling, RBIS)，以精確且高效率地估算失效率 P_f 。此方法旨在確保預測精度的前提下，大幅降低評估所需的計算成本。當前述所有外層最佳化迴圈與 Kriging 模型更新程序皆已完成，即代表該 Kriging 模型已具備足夠的逼近能力，可有效替代實際的極限狀態函數進行可靠度分析。與傳統的 AK-MCS 方法不同，本研究不重複使用訓練過程中的樣

本點，而是重新產生一組專門用於 RBIS 的樣本集。這些樣本分佈於以最可能破壞點（Most Probable Point, MPP）為中心的球體外部，並可透過卡方分布（Chi-square distribution）進行樣本生成，以模擬標準常態空間下的徑向分佈特性。為了提升樣本對失效區域的覆蓋效率，此方法進一步將 MPP 的徑向距離乘以 0.9，作為實際 RBIS 的球體半徑，使樣本更集中於高失效風險區域。透過此設計，結合 Kriging 模型的高預測準確性與 RBIS 方法的抽樣效率，能有效完成最終的可靠度評估，達到降低計算成本與提升精度的雙重目標。

綜合上述五個階段，AK-PSO-HHs 方法成功整合了粒子群最佳化（Particle Swarm Optimization, PSO）、中空超球空間（Hollow-Hypersphere, HHs）、雙層最佳化架構，以及具層級設計的停止準則，建構出一套高效率且具高度自適應性的可靠度評估流程。此方法透過 PSO 替代傳統自適應 Kriging 方法中對預建樣本池的依賴，不僅大幅減少記憶體需求，亦降低了不必要的 Kriging 評估次數；HHs 結構進一步縮限搜尋範圍，使樣本選擇聚焦於潛在失效區域，有效提升模型訓練的效率與準確度。線性搜尋機制則提供一種精確且動態的方式以辨識最可能破壞點（Most Probable Point, MPP），並可即時調整 HHs 的內外半徑設定，加快模型的收斂速度。而設計良好的分層式停止準則則確保 Kriging 模型在達到預定精度後即停止訓練，避免資源浪費與過度擬合的風險。透過上述機制的協同運作，AK-PSO-HHs 方法不僅兼顧評估效率與模型精度，更具備處理高維度參數空間與低失效率問題的潛力，為應用於複雜工程系統中的可靠度分析提供一套實用且穩健的解決方案。

第五章 數值模擬結果



5.1 數值模擬結果驗證

本節將對此光華崩塌地數值模型的模擬結果進行驗證與討論。為了評估模型的可靠性與適用性，本研究採取了兩大類驗證指標：1) 利用 20 m 網格 DEM 與 MPM 模擬所得的崩塌後地形外型進行比對，檢視模型對主要崩塌輪廓的還原度；2) 將現地監測儀器所記錄的數據與模擬結果做對應比擬，以驗證模型在動態行為上的精度。

5.1.1 邊坡外型變化趨勢比對

本研究以 2019 年與 2022 年之全臺 20 m 網格數值地形模型（DEM）作為初始地形參考，針對先前選定之邊坡剖面進行多時相地形比對，如錯誤！找不到參照來源。。結果顯示，上邊坡即光華農路與便道經過之處在此三年間出現明顯下陷，相對地，下邊坡則出現局部高程增長。這種「上陷下堆」的地形演變，亦可在第 3.4 節所述之歷年空拍影像中清楚辨識，成為光華崩塌地典型的地表變形特徵。因此，本研究將上下邊坡外型的變化趨勢作為 DEM 驗證的主要指標，以評估模型對崩塌與堆積過程的再現能力。

依據物質點法模擬，滑動過程始於上邊坡，位於岩屑層的物質點首先發生下移，並沿坡面向下位移，最終導致上緣區域明顯下陷；同時，這些下滑的土體在到達坡腳後堆積，推升了下邊坡的高程。這種「上陷下堆」的變形模式，不僅與 2019 - 2022 年 DEM 的地形演變結果相似，也與現地空拍影像所觀察到的崩塌特徵相符，進一步驗證了模型對崩塌模擬的可信度。

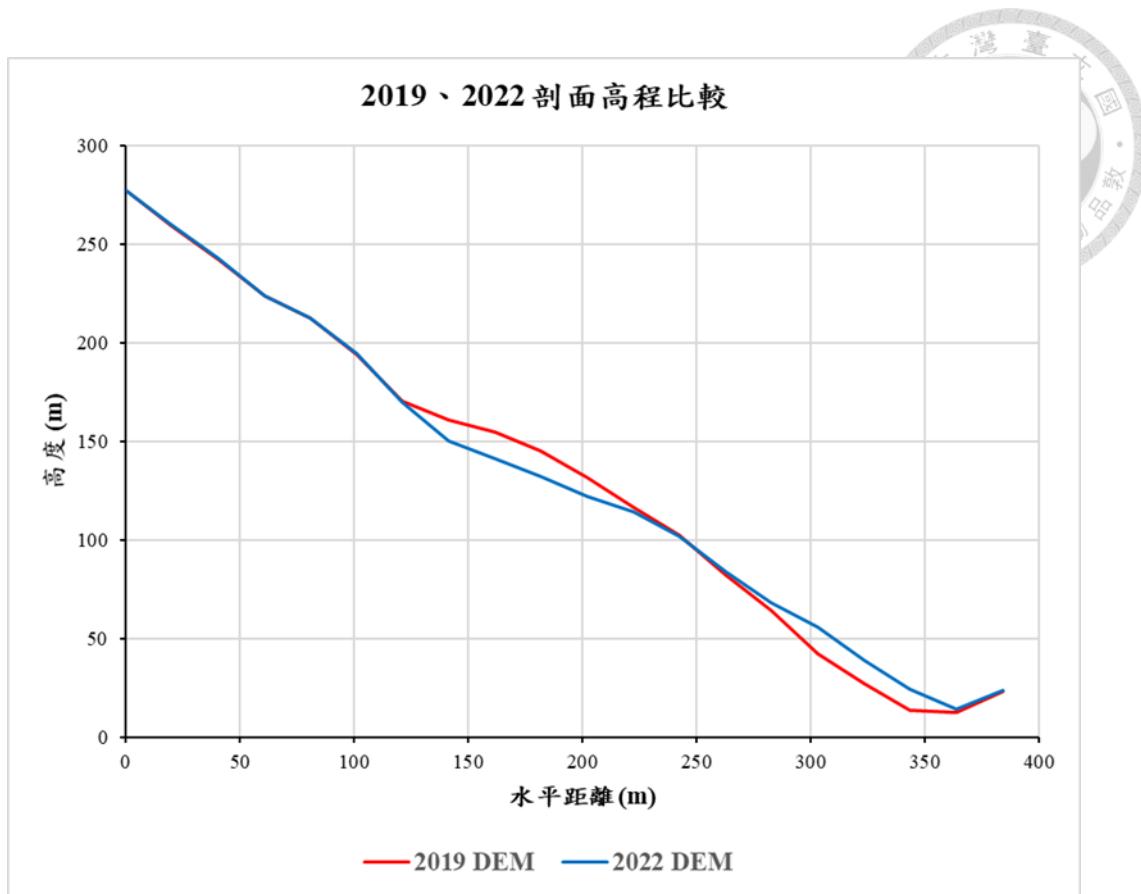
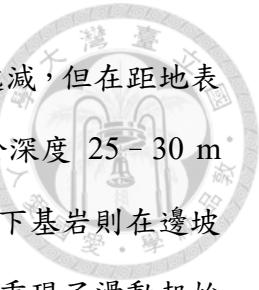


圖 5-1 光華崩塌地 2019/2022 剖面高程比較

5.1.2 現地監測資料比對

本研究將現地監測數據作為模型驗證的另一重要依據，並聚焦於初期滑動位移量在不同深度的分布情形。依據第五章第一節中提及的剖面選取原則，我們選擇了鄰近監測儀器的剖面 A-A' 進行對比（圖 5-1），雖然鑽孔 K19-1EW 距離剖面最近，卻因缺乏能記錄單一垂直面位移分布的傾斜管，故改採距離次近且配置有傾斜管的 K19-1BW 作為驗證基準。我們將剖面 A-A' 上模擬得到的初期位移隨深度變化曲線，與實際傾斜管所測得的位移分布進行對比（如圖 5-2 所示），評估模型對滑動初期行為的重現能力，用以檢驗此物質點法模型的設定是否能反映真實現況。

如圖 5-2 所示，滑動初期的位移分布呈現以下特徵：最大位移約 65 cm，且滑



動起始深度集中在距地表 27 m 左右，且位移幅度隨深度增加而遞減，但在距地表 10 m 處出現一次小幅回彈，這可以推測與 4.6 節鑽探結果中位於深度 25–30 m 的剪裂帶有關係，導致剪裂帶以上的岩屑層容易滑動，而剪裂帶以下基岩則在邊坡破壞初期保持穩定。與之對比，MPM 模擬（圖 5-3）在初期同樣重現了滑動起始深度與位移隨深度遞減的趨勢，且最大位移達 71 cm。然而在模擬中並未出現 10 m 處的回彈現象，且最大位移位置分布在距地表 8–22 m 間，相較於現場記錄的地表下 2 m 處存在差異。我們推測造成此差異的主要原因包括：

- (1) 現地地質並非如模型所假設的均勻，在地表下 10m 深的區域較模型複雜
- (2) 物質點法一旦形成剪裂帶，其上方土體會表現出類似剛體的整體運動行為

儘管存在這些差異，模型在捕捉滑動趨勢和最大位移量方面已展現關鍵破壞特徵，故本研究將以此模型為基礎，持續進行後續分析與參數微調。

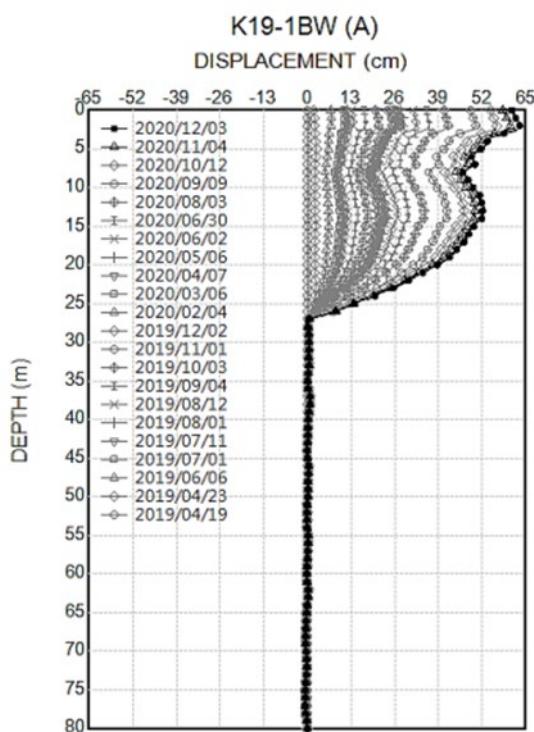


圖 5-2 K19-1BW 傾斜管紀錄(青山工程，2021)

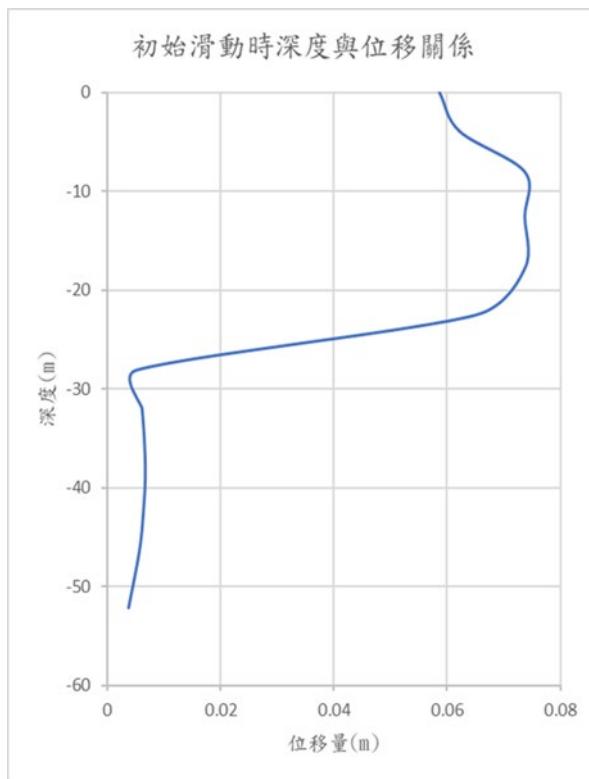


圖 5-3 模擬結果初始滑動時深度與位移關係圖

根據上述兩項驗證指標，可推得本研究建立之物質點法模型不僅能有效重現光華崩塌地之破壞行為，亦清楚反映其破壞特徵，顯示其具備作為後續模擬架構之基礎，並可進一步加以沿用與修正。

5.2 崩塌臨界位移

進行可靠度分析與崩塌風險評估前，首要工作是界定「崩塌」的判斷依據。通常只有在坡面發生滑動且累積位移超過預先設定的臨界值時，方能認定該坡體已經失效並進入崩塌風險狀態，所以對坡面位移的準確判讀至關重要。依據 Saito (1965) 之研究，大規模崩塌前的坡面變形，可分為三個階段：一開始的減速變形階段，接著進入一段近似等速的穩定滑動階段，最後進入加速變形階段直至破壞。這三個階段在應變-時間曲線上分別對應不同的斜率變化，應變持續累積並最終急劇上升至破壞點(圖 5-4)。

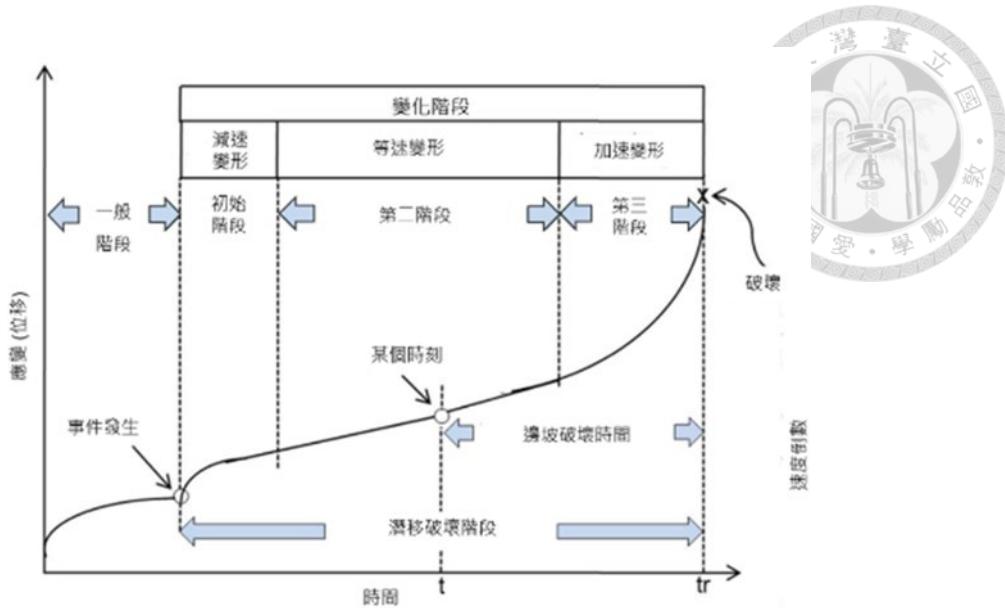


圖 5-4 大規模崩塌之應變-時間曲線

(土石流及大規模崩塌防災資訊網, 2024)

在坡體從緩慢變形進入破壞的轉折期，若能選用恰當的預警指標，就能大幅提升對潛在崩塌的警覺性，並在災害發生前及早採取防範措施。而對於尚未出現明顯位移、仍屬穩定的坡面，可透過降雨強度、累積雨量或地震加速度等外部觸發因子，作為早期應變監測的參考，但若在持續位移、已顯示變形趨勢的區域則應依據地表位移量、位移速率等現場監測資料制定更精細的風險評估標準，確保在位移加速前發出警報，為後續措施爭取足夠的應變時間。

依據農村水土保持署大規模崩塌防災資訊網所彙整之監測警戒基準，地表伸縮計的每日變形量介於 0.5 mm 至 20 mm 之間時即應提高警覺。因此本研究採用每日 20 mm 的地表位移量作為邊坡失穩的臨界門檻（見表 5-1），當實測位移超過此臨界值時，即可判定該坡面已達到高崩塌風險。

在 Anura 3D 中，若要在 24 小時內完整模擬並檢測是否發生超過 20 mm 的位移，不僅運算量龐大、耗時極長，甚至有可能無法在可行時間內完成。為了兼顧計算效率與判斷準確度，本研究將每日 20 mm 的崩塌警戒值轉換為等效的每秒位移速率。將 20 mm / 日的門檻值換算為 20 mm 除以 86400 秒（一天的總秒數），計



算後得到的結果為 2.3×10^{-7} m/sec，這使得我們在縮短模擬時間步長的同時，仍能以相同標準判斷崩塌風險且提升整體分析效率。

表 5-1 常用位移量應變管理準則

常用位移量應變管理準則		
監測儀器	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 日本高速公路調查會，1988 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，1988 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 日本高速公路調查會，1988 日本道路公團土質地質調查要領，1992

5.3 可靠度分析中的變數挑選

如前文所述，可靠度分析可將影響崩塌風險的各種不確定性以隨機變數的形式納入模型。本研究將對坡地崩塌風險影響最大的參數進行隨機變數的形式進行可靠度分析與風險評估。由於幾何模型的數值高程模型以及邊界條件已在前期大致確定，本階段主要關注土壤材料參數的不確定性，這些參數包括土體密度(density)、楊氏模數(Young's modulus)、泊松比(Poisson's ratio)、有效凝聚力(effective cohesion)與有效內摩擦角(effective friction angle)等參數。依照先前建模的經驗與試驗，發現有效凝聚力與有效內摩擦角對邊坡穩定性模擬結果具有



最明顯的影響，所以這兩項參數被認定為對邊坡穩定分析中具有較大的敏感性的因子。

依據陳語晞等（2023）在「自適應克里金坡地穩定可靠度分析」中的結論，當我們將物質點法（MPM）與自適應 Kriging 代理模型結合以進行邊坡可靠度分析與敏感度分析時，發現土壤的凝聚力（effective cohesion）與有效內摩擦角（effective friction angle）對失效機率的貢獻度遠高於其他參數。為了在本研究中考量到這兩項參數的不確定性對光華崩塌地風險的影響，同時又要顧及計算資源與模型穩定性的現實限制，我們在一次完整的可靠度模擬中選取三層關鍵土體：未受地下水影響的岩屑層 1、飽和後強度折減的岩屑層 2、岩屑層底下的破碎頁岩層，對於每一層土體僅納入凝聚力和內摩擦角這兩個隨機變數，以保持模型具有合理的複雜度，並且避免了隨機變數過多時導致的收斂與穩定性問題。

本研究將土體的有效凝聚力與有效內摩擦角作為核心隨機變數，所以必須為這兩項隨機變數設定合適的機率分布型態（如常態分布或對數常態分布）、平均值（Mean）與共變異數（Coefficient of Variation, COV），在分布型態、平均值與 COV 三者合理設定的前提下所得到的可靠度指標才具備穩定性與可比性。

根據 Kayser & Gajan (2014) 對多篇文獻中地質力學之機率分析所彙整的資料顯示，內摩擦角的變異係數（COV）普遍約為 10%；凝聚力的 COV 則多分布在 10% 至 40%。因此本研究在設定隨機變數時，將內摩擦角的 COV 定為 10%，凝聚力的 COV 則採用 25% 作為初步可靠度分析的基準。此外，內摩擦角與凝聚力之平均值則依據前文中表 5-2 至表 5-6 所列之參考數據選取，這些平均值均源自現有的試驗與文獻報告，以確保能真實反映崩塌地各土層的力學特性。

針對內摩擦角與凝聚力這兩項關鍵隨機變數，採用了對數常態分布（Lognormal distribution）當作分佈型態，此分佈型態不僅能真實反映土壤力學參數的真實變異特性，還可確保在數值模擬中抽樣所得的值始終大於零，避免出現負值導致的物理與運算異常。透過對數常態分布，我們限制了隨機變數在合理的物理



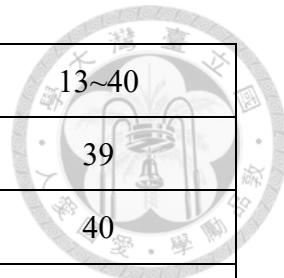
範圍內波動，也可兼顧平均值與變異係數(COV)的設定要求，從而保證後續可靠度分析過程既穩定又具可行性。

表 5-2 參考資料中摩擦角之 COV

Typical COV values of friction angle of soil		
Source	Soil Type	COV/%
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 5-3 參考資料中凝聚力之 COV

Typical COV values of cohesion of soil		
Source	Soil Type	COV/%
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 5-4 岩屑層 1 的統計參數

Material	岩屑層 1		
Random Variables	Mean	COV	Distribution
Cohesion	65	0.25	Lognormal
Friction Angle	30	0.1	Lognormal

表 5-5 岩屑層 2 的統計參數

Material	岩屑層 2		
Random Variables	Mean	COV	Distribution
Cohesion	55	0.25	Lognormal
Friction Angle	30	0.1	Lognormal

表 5-6 破碎頁岩層的統計參數

Material	破碎頁岩層		
Random Variables	Mean	COV	Distribution
Cohesion	85.7	0.25	Lognormal
Friction Angle	27	0.1	Lognormal



5.4 可靠度分析結果

本研究選取光華崩塌潛勢區內的三條代表性剖面，並結合物質點法 (MPM) 與自適應克里金代理模型，對每條剖面分別進行可靠度分析與崩塌風險評估。基於模擬所得的風險評估結果，我們將提出具體的監測儀器佈設建議。

5.4.1 挑選各剖面上的關注點

在此階段研究中，我們主要目標是從模擬結果中篩選出需進一步關注的關鍵點，尤其鎖定那些位移增長迅速且可能突破崩塌臨界位移門檻的高風險區域，透過分析物質點在不同剖面上的位移分布，我們識別出若干在滑動過程中位移變化尤為顯著的區段，這些區段因具備最先進入失效狀態的潛力，而被定義為崩塌高風險區。同時，對於位於這些高風險帶中、且模擬結果表現出特殊動態行為的個別物質點，我們將其設為重點監測的「關注點」。

本研究首先在 GiD 中建立邊坡的數值模型，並依序賦予各層土壤的材料參數與邊界條件，完成模型網格的生成後，即可輸出至 Anura 3D 進行物質點法模擬。模擬過程中 Anura 3D 會將運算結果以 VTK 檔案格式儲存以供後續的後處理分析，再利用 ParaView 讀取這些 VTK 檔案以直觀地呈現坡面變形與滑動演進並提取各物質點在不同時間步的位移量與分布。

在完成三條剖面的數值模擬並輸出 VTK 檔案後，也列出每一個物質點在水平方向 (X 軸方向) 上的位移量，並依其值大小進行排序。位移最大的前幾個物質點即代表該區塊具較大滑動趨勢，故被優先標記為重點關注對象，同時將位移次大的物質點則納入下階段分析的關注點，進一步進行更完整的邊坡失效風險評估與災防策略的優化。

剖面 A-A' 上的關注點



剖面 A-A' 挑選的關注點有 Point 3、Point 43、Point 789 共三點，位置如圖 5-5 所示。Point 3 的位置鄰近孔內伸縮計 K19-1E，因此值得關注。而 Point 43 與 Point 789 則因滑動幅度明顯高於周邊物質點，成為關注點。

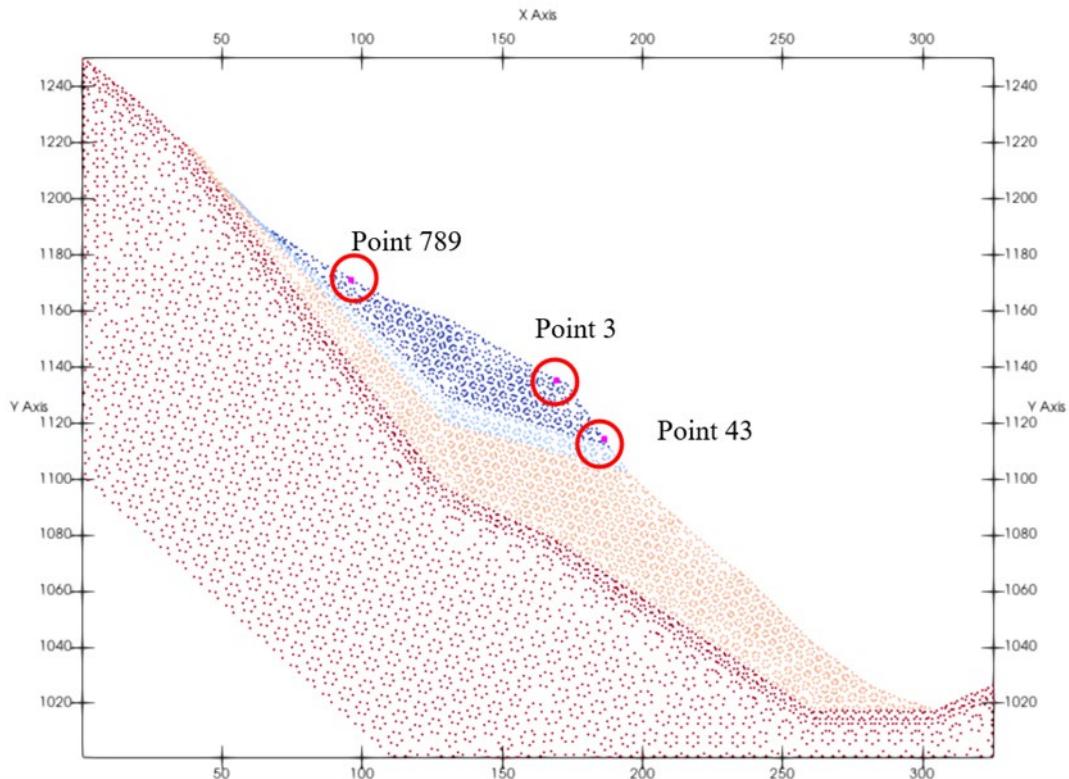


圖 5-5 A-A' 上關注點位置

剖面 B-B' 上的關注點

根據物質點法模擬結果，我們在剖面上識別出三個位移量最顯著的關注點，分別為 Point 831、Point 1873 及 Point 333（見圖 5-6）。選擇它們的主要依據是在這道剖面上，這三個物質點的水平滑動幅度遠超其他各點。

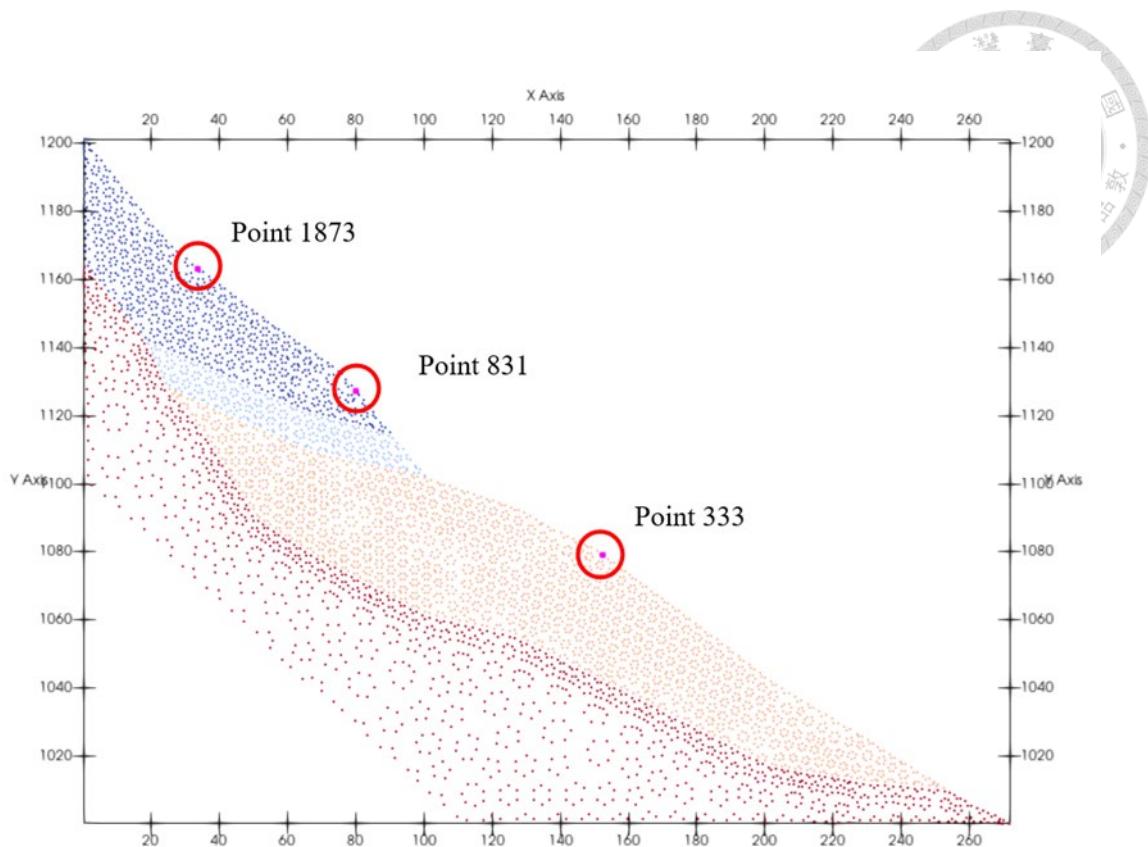


圖 5-6 B-B'上關注點位置

剖面 C-C'上的關注點

本剖面鎖定的三個重點位置為 Point 8048、Point 7267 及 Point 7951（見圖 5-7，選取它們的依據是物質點法模擬結果顯示，這些點所在區域在剖面上具有顯著的位移量。

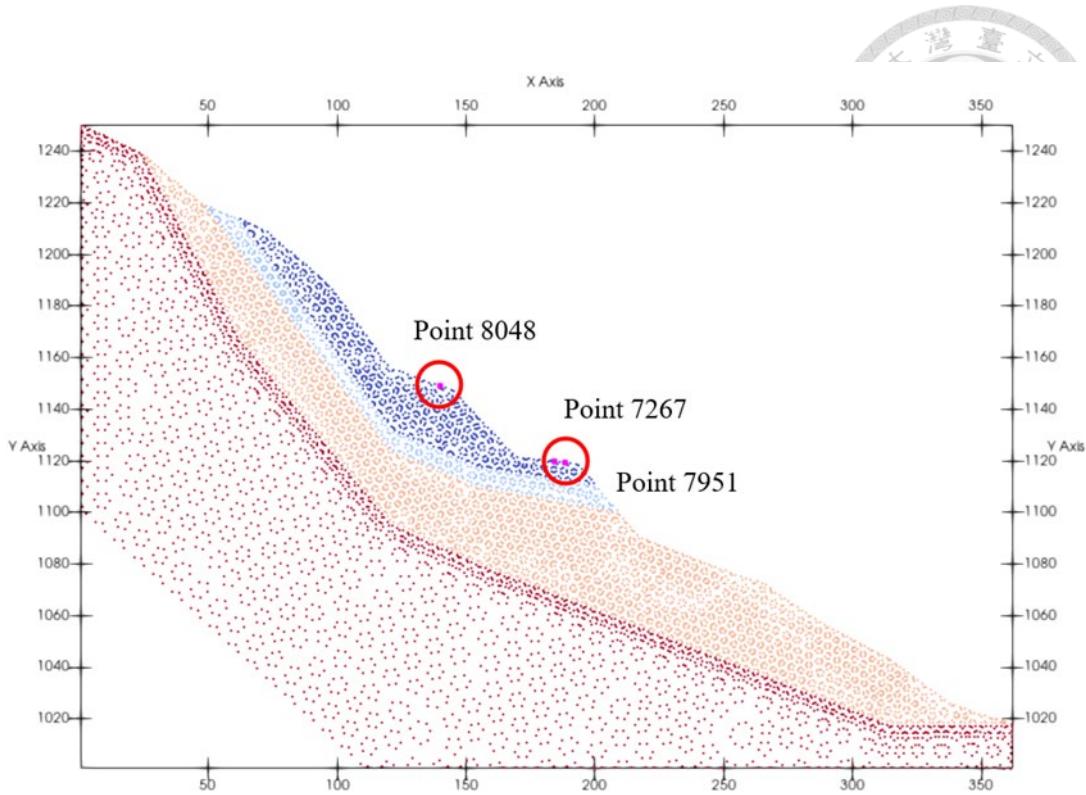


圖 5-7 C-C' 上關注點位置

5.4.2 各關注點之分析結果

對三條剖面上共 9 個關注點進行首次可靠度分析後，我們發現沒有任何一個點的失效機率達到可警式的水平，與實際觀測到的位移變化明顯不符。經研判這很可能源自於隨機變數的分布型態與變異係數設定不適用於此，原先採用的對數常態分布和凝聚力 $COV=0.25$ 導致抽樣值大多集中在平均值附近。因此我們將分布型態修正為常態分布，並將凝聚力的 COV 調高至 0.75，內摩擦角 COV 維持 0.10 不變，以擴大隨機變數的取值範圍。經判斷認為原文獻中 0.25 的 COV 低估了岩屑層內凝聚力的實際變異性，因此修正了新的統計設定(見表 5-7 至表 5-9)。調整後的隨機變數更能覆蓋材料參數值範圍，與此同時，也確認過了土壤參數皆為正值，無不合理的負值產生。這些改動有效加快了生成失效樣本的速率，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，從而顯著改善了整體分析效率。



與結果的合理性。

表 5-7 岩屑層 1 的統計參數

Material	岩屑層 1		
Random Variables	Mean	COV	Distribution
Cohesion	65	0.75	Normal
Friction Angle	30	0.1	Normal

表 5-8 岩屑層 2 的統計參數

Material	岩屑層 2		
Random Variables	Mean	COV	Distribution
Cohesion	55	0.75	Normal
Friction Angle	30	0.1	Normal

表 5-9 破碎頁岩層的統計參數

Material	破碎頁岩層		
Random Variables	Mean	COV	Distribution
Cohesion	85.7	0.75	Normal
Friction Angle	27	0.1	Normal

調整隨機變數設定後的結果

調整隨機變數的 COV 和分佈型態後，即對這 9 個關注點進行第二次的可靠度分析，以得出比第一次更符合現狀之各關注點失效機率(Failure Probability, Pf)。

在剖面 A-A'的可靠度分析中，三個關注點的失效機率 Pf 表現如下：

(1) Point 3: 經過 54 次迭代後，累積失效機率已達 0.9999 (99.99%)，顯



示該點極有可能發生崩塌失效

- (2) Point 43: 同樣在 54 次迭代後，失效機率為 0.9998 (99.98%)，與 Point 3 相似屬於極高風險區域；
- (3) Point 789: 經過 74 次迭代後，其失效機率為 0.2016 (20.16%)，雖明顯低於前兩者，但仍表示存在崩塌潛勢

剖面 B-B' 的可靠度分析中，三個關注點經過不同迭代次數後其失效機率 Pf 如下：

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

剖面 C-C' 的可靠度分析中，三個關注點經過不同迭代次數後其失效機率 Pf 如下：

- (1) Point 8048: 經過 54 次迭代後，其失效機率達到 0.989 (98.9%)，顯示該位置極有可能發生崩塌
- (2) Point 7267: 經過 52 次迭代後，失效機率為 0.9705 (97.05%)，同樣屬於高風險區域
- (3) Point 7951: 經過 54 次迭代後，失效機率達 0.96 (96%)，同樣屬於高風險區域

各剖面模擬後得到的失效機率，如表 5-10 所示。

表 5-10 剖面上各關注點之失效機率

	Max	2nd	3rd
Profile A-A'	99.99%	99.98%	20.16%
Profile B-B'	0.00215%	0%	0%

Profile C-C'	98.90%	97.05%	96%
--------------	--------	--------	-----



從三條剖面的可靠度分析結果來看，其崩塌風險分布呈現明顯的差異。對於剖面 A-A'來說，Point 3 和 Point 43 的失效機率分別高達 99.99% 與 99.98%，可推斷這兩處幾乎必定會發生滑動失效；而 Point 789 的失效機率為 20.16%，雖相對前兩點較低，但仍不容忽視。

剖面 B-B'則完全處於安全範圍，Point 831 的失效機率僅有 0.00215%，而 Point 1873 及 Point 333 均為 0%，表示在目前條件與材料參數組合下這兩處幾乎不會失效。

而剖面 C-C'的三個關注點：Point 8048、Point 7267 與 Point 7951 的結果均出現 96% 以上的高失效機率，皆屬高風險區域。

透過對三條剖面中關注點失效機率的計算，我們能看出主滑動面所在的剖面 A-A'，Point 3 與 Point 43 兩處均呈現極高的失效機率（99.99% 與 99.98%），這與歷年現地伸縮計與 GPS 位移數據中觀察到的位移趨勢極為一致，進一步驗證了模型的合理性與可靠性，也凸顯了該滑動面在整個崩塌過程中的關鍵角色。相比之下，Point 789 的失效機率僅為 20.16%，可推測其位置雖有潛在風險但相較 Point 3 與 Point 43 穩定，我們將在後續章節中探討以及評估是否需要針對性地調整監測與預警策略。

位於主滑動面外的 B-B'剖面中的三個關注點在第二輪可靠度分析中均呈現極低的失效機率，三點間的結果差異微小，這表示該剖面的穩定性較高，崩塌風險相對可忽略。因此在未來的邊坡監測與穩定性評估中，B-B'所在範圍可被視為相對安全的區域。

在剖面 C-C'中，儘管 Point 8048 並不位於主滑動面範圍內，其失效機率依然高達 98.9%，而 Point 7267 與 Point 7951 的失效機率也分別高達 97.05% 與 96%。這些數值顯示 C-C'剖面某些區段的崩塌風險與主滑動面相當接近甚至可能



更高。即便如此，前三大位移點之間失效機率的微小差異，這情況有可能是來自於可靠度演算法存在一定的誤差，也可能反映出模型未能完整重現現地條件（例如植被覆蓋對土壤剪力強度的加強作用）。雖然模擬結果顯示 C-C'部分區域具有明顯的風險潛勢，但考慮到野外的植被、根系及其他環境因素對坡體穩定性的正面影響，實際失效機率可能因為這些潛在因素使得比模擬結果低，導致即使模擬失效機率與剖面 A-A'接近，但以現場實地狀況來看崩塌情況仍不如剖面 A-A'顯著。C-C'區域仍需列為次高優先監測對象，並可透過實地觀測和補充性試驗，持續校正模型參數，以更精準地評估潛在崩塌危險。

5.5 不同情境下的崩塌風險

為了評估光華崩塌地在不同情境下可能產生的崩塌風險，在此階段設計了幾種情境以進行失效機率計算，並對這些結果進行討論。

邊坡穩定性在多數自然或人為因素的作用下容易受到削弱，其中最常見的原因包括強降雨、地震及土壤鬆動等，強降雨事件會迅速抬升地下水位，降低土體的抗剪強度，進而使坡體引發滑動或崩塌。由於地下水位的高低直接影響應力及水壓力，所以成為決定坡地安全性的關鍵參數之一。基於此原因，本研究特別選擇地下水位作為主要情境變因，用以量化不同地下水位條件下關注點的失效機率。

根據現有監測資料顯示，光華崩塌地的主滑動面是位移最為明顯、監測儀器最密集的區域，因此本研究將重點放在貫穿該區域的 A-A'剖面上，並以參考 A-A'剖面建立的物質點法模型進行不同的情境分析。透過在模型中調整特定參數（如地下水位高程），以模擬不同條件下坡體的穩定性變化，並計算各種情境下的失效機率。確定聚焦於 A-A'剖面後，進一步選取該剖面上位移最顯著的 Point 3 作為主要分析對象（位置如圖 5-8），評估在多種地下水位情境下的失效機率。

在本研究中，我們設計了兩種代表性地下水位情境以探討其對主滑動面（A-A'



剖面) 穩定性的影響，第一種為基準水位情境，即沿用先前章節所建立的常時地下水位，第二種則是無地下水位情境，假定地下水位為零，以模擬極端排水後或乾季條件下的邊坡行為。由於模擬過程中無法精準考慮地下水的水力作用，我們採用對凝聚力進行調整的方法來間接反映水位變化對土體強度的影響，透過在岩屑層中修改凝聚力與其分布範圍，分別代表飽和與非飽和條件下的土壤差異。在這兩種情境下對關注點 Point 3 執行物質點法結合自適應 Kriging 的可靠度分析，我們得以量化地下水位變化如何改變該點的失效機率，並從中評估乾濕交替對光華崩塌地滑動風險的敏感度。

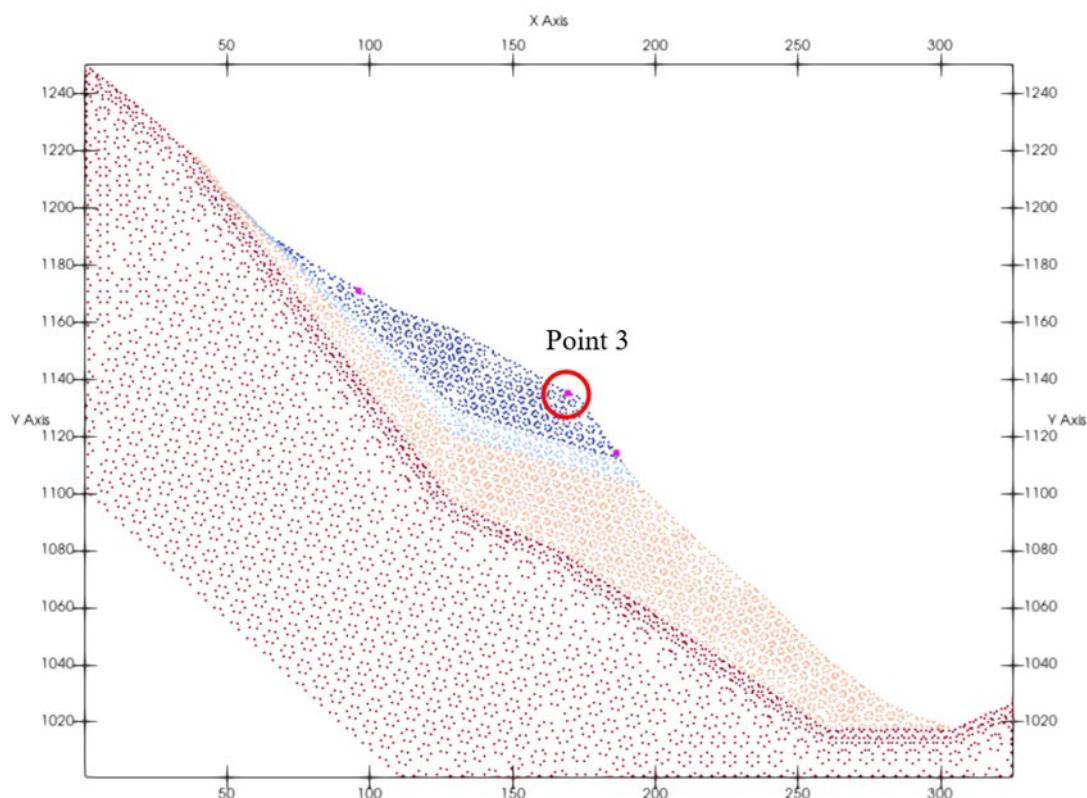


圖 5-8 關注點 Point 3 之位置圖

不同地下水位之可靠度分析結果如表 5-11 所示，在 A-A'剖面上針對 Point 3 進行可靠度分析後發現在常時地下水位情境下，其失效機率高達 99.9999%，而在



假設無地下水位的情境中，失效機率雖略有下降，仍高達 99.9979%。這兩種情境下的失效機率皆接近於 1，表示該區域穩定性極低，但無地下水位情境下坡地的穩定性還是相對略高，可能是因為地下水位上升會增加土體內部水的滲透壓力、降低凝聚力，進一步削弱坡體抵抗滑動的能力。而在去除地下水作用後，土壤凝聚力得以部分恢復，使坡體穩定性因此略有改善。這一結果證實了地下水對坡地穩定性的影響，也可以此建議在後續監測中必須持續關注對地下水位的監控。同樣在防災策略上，當水位異常抬升時，應及時啟動排水或其他工程措施，以減少孔隙水壓力對土壤強度的削弱，從而有效降低崩塌風險。

表 5-11 不同地下水位情境下失效機率

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

在眾多誘發大規模崩塌的因素中，地下水所引起之孔隙水壓上升為一項極為關鍵的控制因子。當降雨其他補注來源使地層內水分滲入造成孔隙水壓升高時，即使外部載荷不變，地層的有效應力將隨之降低進而導致抗剪強度下降，而且此機制在具有潛在滑動面或弱面(如剪裂帶、節理)之區域更為顯著，導致滑動面產生滑移。

此分析中兩組失效機率差距不大的原因有可能是由於初期滑坡觸發主因為地下水導致滑動面的孔隙水壓上升，但後期滑動的控制因子則可能轉變，將由初期水壓驅動轉為滑體結構與地形幾何變化導致的慣性影響。因此，兩者雖無特別明顯差異，地下水位仍是影響大規模崩塌的重要成因，仍需如一般大規模崩塌地持續監控地下水位。



5.6 監測儀器佈設之建議

在大規模崩塌潛勢區域進行監測時，儀器的佈設位置非常關鍵，必須集中在位移量大、坡面活動頻繁的區域，才能在發生位移滑動時迅速獲取精準數據，並及時評估崩塌威脅。由此可見，挑選最佳監測點對提升預警效率及保障區域安全具有極大的影響。

考量到崩塌潛勢區中最活躍的滑動帶集中於 A-A'剖面(圖 5-9)，且歷年監測數據皆顯示此處位移最為顯著，本階段選定該剖面作為重點分析對象。以往佈置的地表伸縮計、孔隙水壓計與 GPS 位移計均集中於主滑動面，並且成功蒐集到崩塌活動資訊，證明此處具備價值。

以此為基礎，將針對 A-A'剖面運用物質點法與可靠度分析相結合的方法，量化數個位置的崩塌機率並識別出高風險熱點，而這些經過篩選的高風險位置，將成為未來監測儀器佈設的首選以提升整體防災效率。

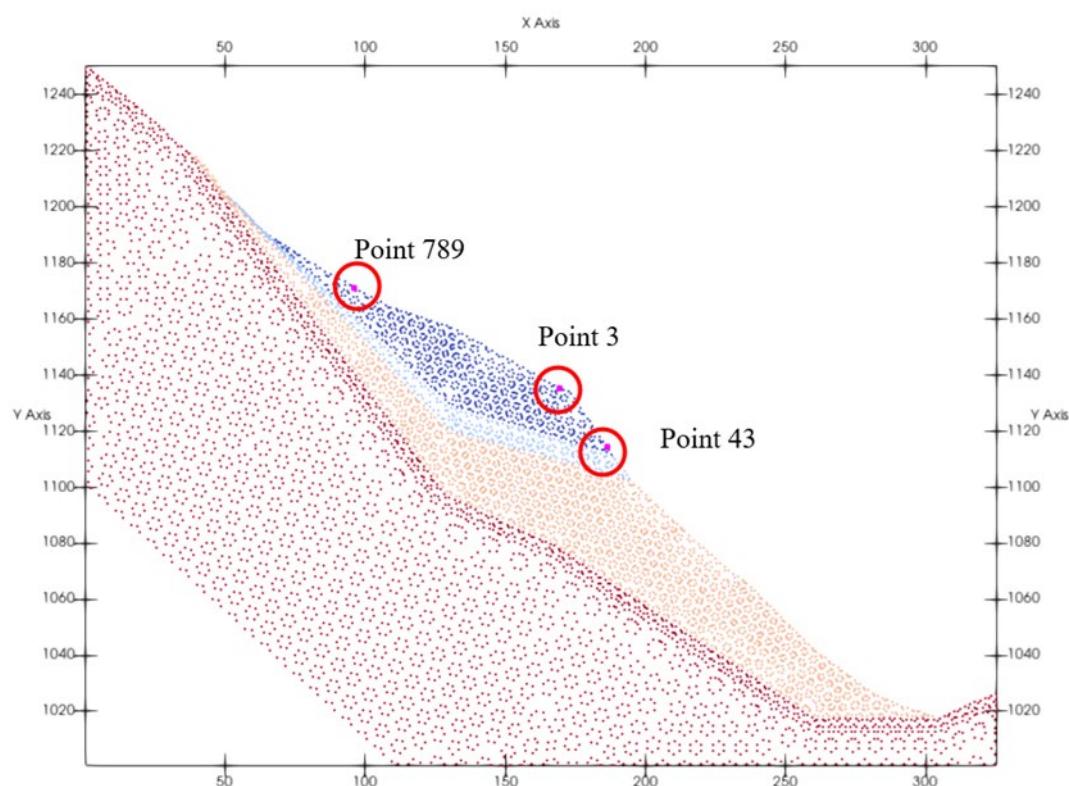


圖 5-9 A-A' 上關注點位置



表 5-12 剖面 A-A' 上各關注點的失效機率

	Point 3	Point 43	Point 789
失效機率(Pf)	99.99%	99.98%	20.16%

依據第 5.4 章（表 5-12）的失效機率計算結果，A-A' 剖面上三個關注點的失效機率存在明顯差異，這很可能和地形高程（DEM）及地下土壤材料分佈的變化有關。在邊坡穩定評估中，我們應優先關注位移與活動最劇烈的區域，所以對比這三點的風險高低即可提供關於儀器佈設的建議。

Point 789 的失效機率明顯低於 Point 3 和 Point 43，表示其所處範圍的崩塌潛勢相比其他兩者小，而 Point 3 與 Point 43 則分別擁有接近 100% 的失效機率，屬於極高風險點，因此在監測網絡佈設時應優先在 Point 3 和 Point 43 周邊增設監測儀器以便及時捕捉滑動徵兆。儘管 Point 789 的失效機率僅約 20%，但仍屬高風險範疇（實地的光華農路中斷也發生在附近），且該處已有多臺伸縮計（如 KC-3）在運行，所以也不可忽略，建議保留現有監測裝置並視需要適度增設。整體而言，這些模擬結果與現場儀器佈署趨勢相符，並可作為未來優化監測佈局的重要依據。

若要將單一剖面的分析成果擴展到整個崩塌潛勢區，必須在區域內劃出多條剖面重複物質點法模擬並計算各關注點的失效機率，進而繪製出空間風險分佈圖。藉由比較各剖面上失效機率最高的地段，以及這些高風險點在不同剖面交會區域的位置，就能聚焦整個區域中位移最顯著、最可能崩塌的位置，並將監測儀器優先部署於這些熱點上，以提升預警的精度與效率。此外，本研究並未採用三維物質點法（MPM 3D Simulation）進行模擬，主要考量在於：(1) 地質材料分佈本身存在高度不確定性，三維建模所需的精細地質資料難以全面掌握 (2) 3D MPM 會生成海量物質點，極大增加運算負荷，尤其在進行多次迭代的失效機率分析時，所需的計



算資源與時間成本將成為瓶頸，雖然三維模型能提供更豐富的空間資訊，但在效益與成本間需待驗證。

因此本研究選擇以三條代表性剖面(多組二維模型)的分析成果作為監測儀器佈設建議的依據，具體位置可參考圖 5-10 所示之全區域示意圖。此種做法相較於三維建模，不僅大幅縮短了計算所需時間，也減少了由三維地質分佈不確定性所帶來的複雜性。綜合考量後，我們認為二維模擬所得的風險分佈，仍能為優化佈設提供可靠且有效的建議。

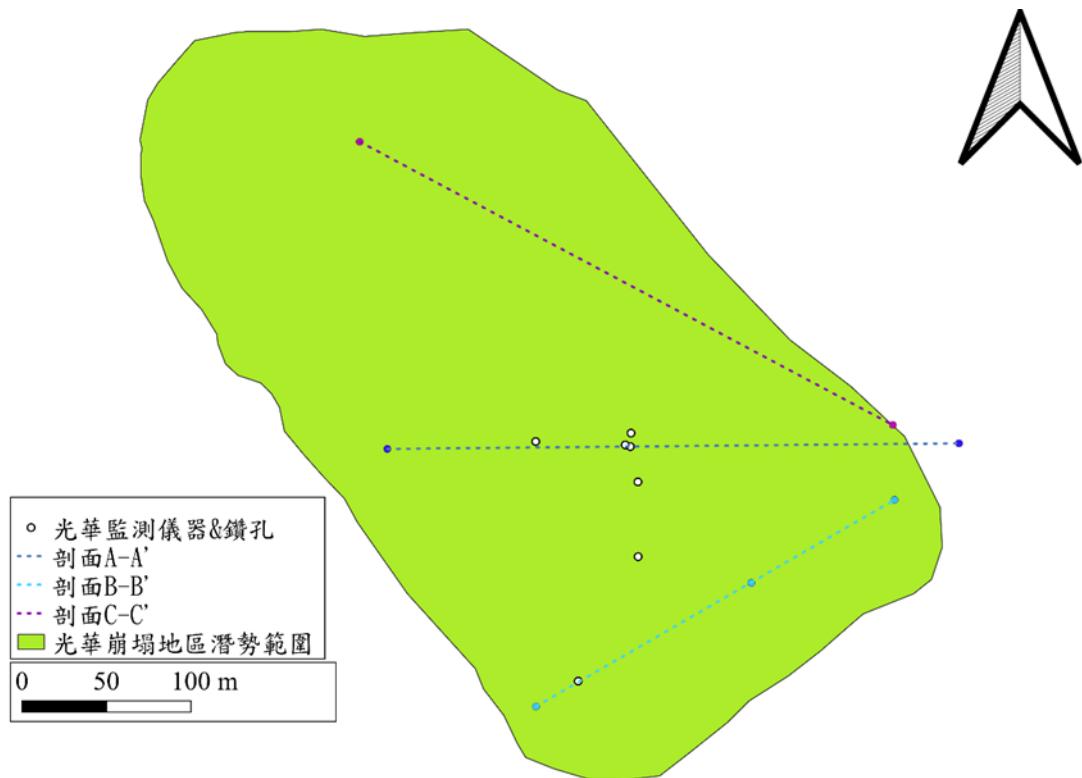


圖 5-10 光華崩塌地各剖面位置圖

表 5-13 中九個關注點的失效機率顯示，A-A'和 C-C'剖面上的風險明顯高於 B-B'剖面，而 B-B'則保持較低的失效可能性。由此可見，位於 A-A' 與 C-C'之間的區段最應優先考慮佈設監測裝置，以便及時捕捉任何滑動徵兆，相較之下，B-B'附近因失效機率較低，可將增設儀器的優先順序放在後。



表 5-13 剖面上各關注點之失效機率

	Max	2nd	3rd
Profile A-A'	99.99%	99.98%	20.16%
Profile B-B'	0.00215%	0%	0%
Profile C-C'	98.90%	97.05%	96%

透過上述的風險分析與區域比較，我們能夠依失效機率高低確定監測點的佈設優先順序，並檢驗當前儀器配置的合理性。換言之，這些評估結果有助於監測儀器佈設的優化，確保系統能在潛在崩塌發生前及時預警，進而提升整體防災效能。

5.7 崩塌警戒值之訂定策略

本研究依據機率式崩塌分析，討論如何建立一個具備實際預警意義的位移量門檻值，作為預警、疏散與避難的判斷標準。為了確立這一門檻值，我們參考了中華水土保持學會及國際水土保持相關單位慣用的管理標準，並將其應用於物質點法模擬分析中，與第 5.2 節所述的崩塌臨界位移概念相呼應。透過自適應 Kriging 代理模型計算不同位移門檻下的失效機率，可得知位移在某一特定值時坡面崩塌的風險程度。為了評估門檻值的適用性與靈敏度，我們選取了光華崩塌地的剖面 A-A'、剖面 B-B'與剖面 C-C'，針對不同的失效門檻值進行對比分析，從而檢驗所設管理值是否過於保守或嚴苛，以確保警戒值具及時性同時又能符合實地應用的需要。

在設定崩塌預警的門檻值時，我們採用了多組位移 - 速度換算標準。首先，我們將每日位移 20 mm 換算為約 2.3×10^{-7} m/s；同理，將每日 40 mm 位移換算為約 4.6×10^{-7} m/s。除此之外，還多增設另一組門檻值 5.0×10^{-7} m/s。針對這三種不同



的門檻值，分別進行失效機率分析，藉此比較各門檻值對崩塌風險評估與預警靈敏度的影響，進而找出何者較適合作為光華崩塌地區的警戒設定。

從表 5-14 的結果來看，當採用較嚴格的門檻值 $2.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (對應每日 20 mm 位移) 時，三條剖面的最大位移點均顯示出可觀的失效機率；然而，若將門檻值放寬至 $4.6 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (對應每日 40 mm 位移)，剖面 A-A' 的失效概率便下降至 35.65%，而剖面 B-B' 與剖面 C-C' 則未再出現任何失效樣本；當門檻再進一步放寬為 $5.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 時，剖面 A-A' 的失效機率更降至 8.19%，剖面 B-B' 與剖面 C-C' 依舊保持零失效機率。由此可見，門檻值的設定對崩塌風險評估具有明顯的影響，較嚴格的速率門檻雖能捕捉更多潛在失效情況，但也可能導致過度警戒；反之，寬鬆門檻可減少誤報，卻可能漏失早期崩塌徵兆。

表 5-14 不同門檻值的失效機率

Threshold	$2.3 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$	$4.6 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$	$5.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$
Profile A-A'	99.99%	35.65%	8.19%
Profile B-B'	0.00215%	0%	0%
Profile C-C'	98.90%	0%	0%

在實際應用中，崩塌警戒門檻的設定必須在風險偵測精度與防災動員成本之間取得平衡。若門檻過於保守，可能會將過多區域列為高風險區域，進而浪費人力與資源；相反地，若門檻過於寬鬆，則可能遺漏真正的潛在危險而降低預警系統的敏感度。因此選擇適切的位移警戒值，既要能及時捕捉到關鍵滑動前兆，又要避免對低風險區域過度監測。在光華崩塌地的案例中，若現有監測系統已充分覆蓋各個高風險點，則將每日位移門檻從 20 mm 放寬至 40 mm 甚至更高是可行的；但若剖面 C-C' 確實具備顯著的失效風險，那麼 20 mm/日的警戒標準仍屬必要，應持續沿用以維持足夠的預警度。



在未來的警戒值設定中，除了本研究所採用的「先以上述文獻常用值為基礎，再比較多組候選門檻值以決定最終標準」的方法外，亦可利用更加豐富的現場監測資料來優化門檻選擇。例如根據地表伸縮計記錄的日均與月均最大位移統計，篩選出最能反映本區位移特性的數值範圍，並將警戒值設在該範圍之內，這種作法不僅能避免採用過高門檻時未達標卻潛藏破壞風險，也可防止門檻過低導致觸發警戒值的頻率過高卻無實質破壞的誤報情況，進而提升預警判斷的可靠性與實用性。

5.8 三維物質點法模擬結果

在本研究階段，我們建立了一個簡化的三維物質點法模型，用以評估在相同邊界條件與材料參數設定下，其模擬結果與先前二維模型之間的差異。通過比對兩種模型在位移分佈、崩塌過程等指標上的表現，藉此衡量兩者的差異和特性。未來在選擇建模模式時，可依據此比較結果，在所需解析度、運算資源之間做出最佳取捨，以達到既符合實務需求又具成本效益的模擬方案。

以下是在相同條件下三維模型與二維模型的模擬結果。圖中不同的物質點顏色代表位移量的不同，越接近紅色表示位移量越大，兩者皆在模擬時間 5 秒後出現明顯的顏色差異(即位移明顯較大的區域)，透過比較兩者 $T = 5\text{ Sec}$ 到 $T = 8\text{ Sec}$ 這段時間的位移分布，可以發現在三維模擬結果中，位移量較大的區域集中在坡面表面(即土壤表層)；相反地，二維模擬結果顯示位移量較大的區域除了坡面表面外，來包含了坡面下的大量物質點，整體呈現的樣子類似於塊體滑動。

以下展示了在完全相同邊界條件與材料參數下，三維模型與二維模型於 $T = 5\text{ Sec}$ 秒至 $T = 8\text{ Sec}$ 秒期間的模擬結果比較。圖 5-11、圖 5-12 中各物質點的顏色對應位移大小，從藍色調（小位移）逐漸過渡到紅色調（大位移）。

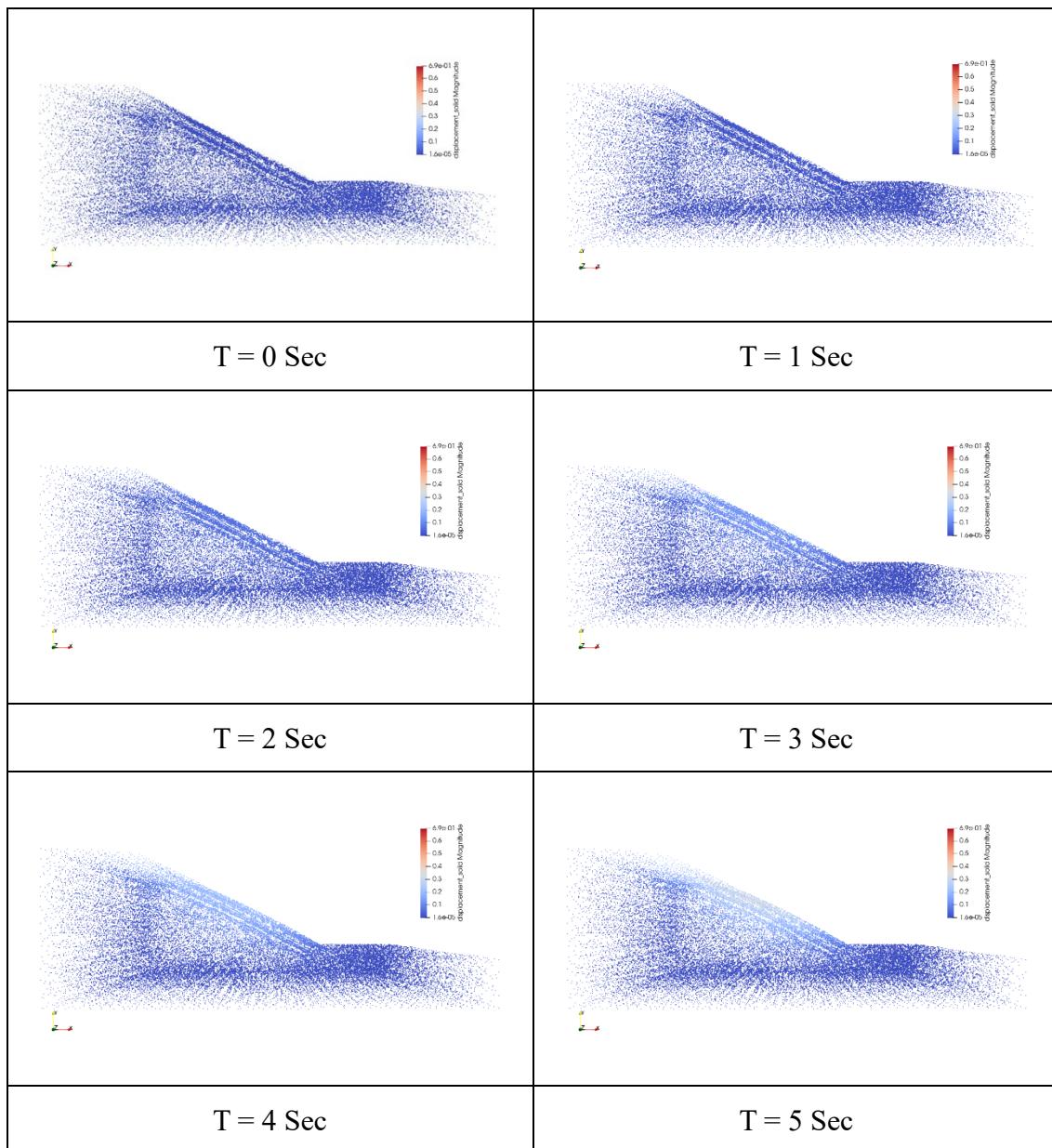
(1) 三維模型：位移最大的物質點主要集中於坡面最上層的土壤表層區域，這表示滑動始於地表，且崩塌破壞面在表層先行展開，而內部深層土體受地



表變形影響相對較弱。

(2) 二維模型：除了坡面表層之外，大量位於中層的物質點也顯示同等程度的明顯位移，呈現如崩塌塊體移動特徵。

兩種模型在同一時間段均出現顯著的紅色區域（大位移），但分佈位置和形態明顯不同。



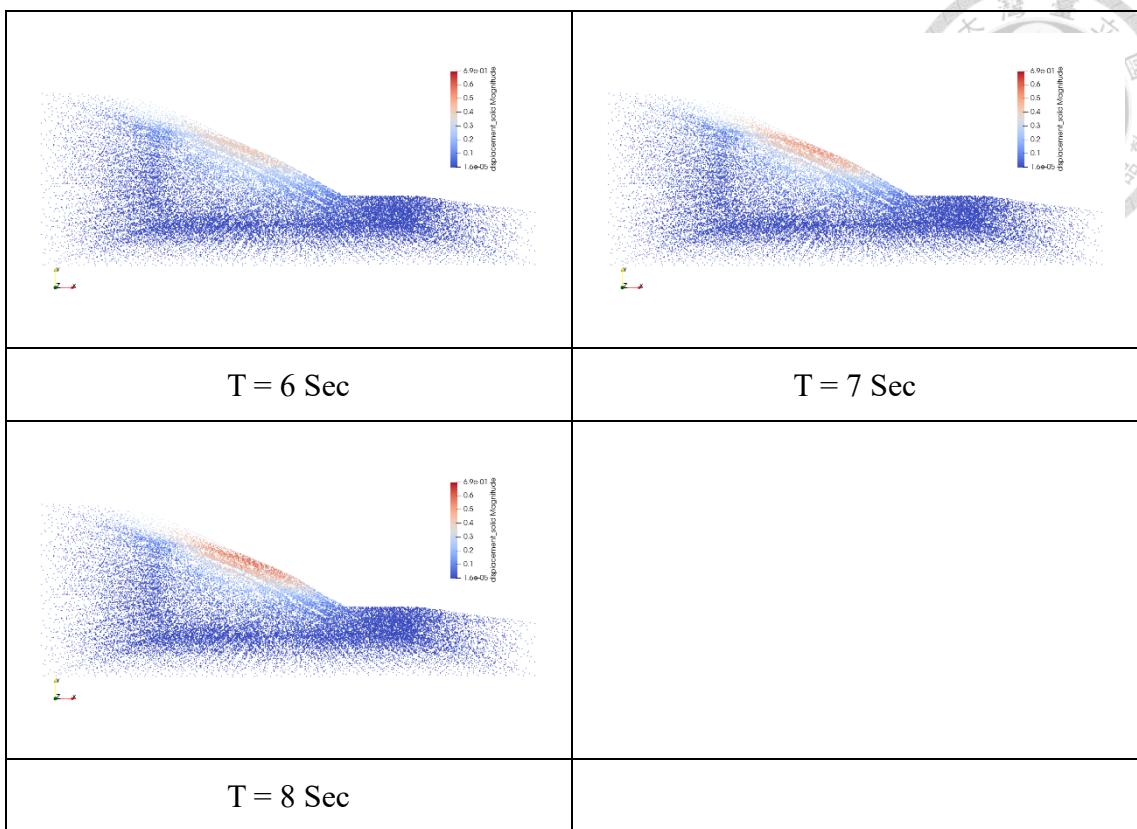
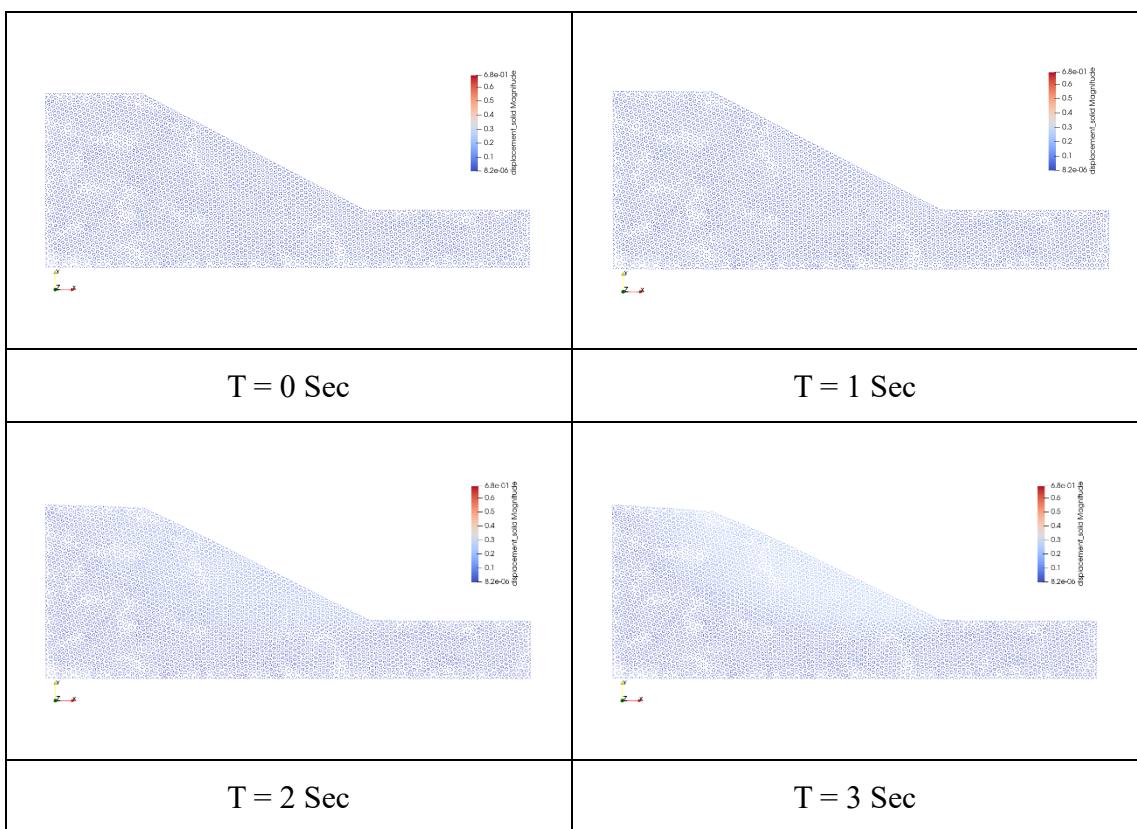


圖 5-11 三維模型破壞過程



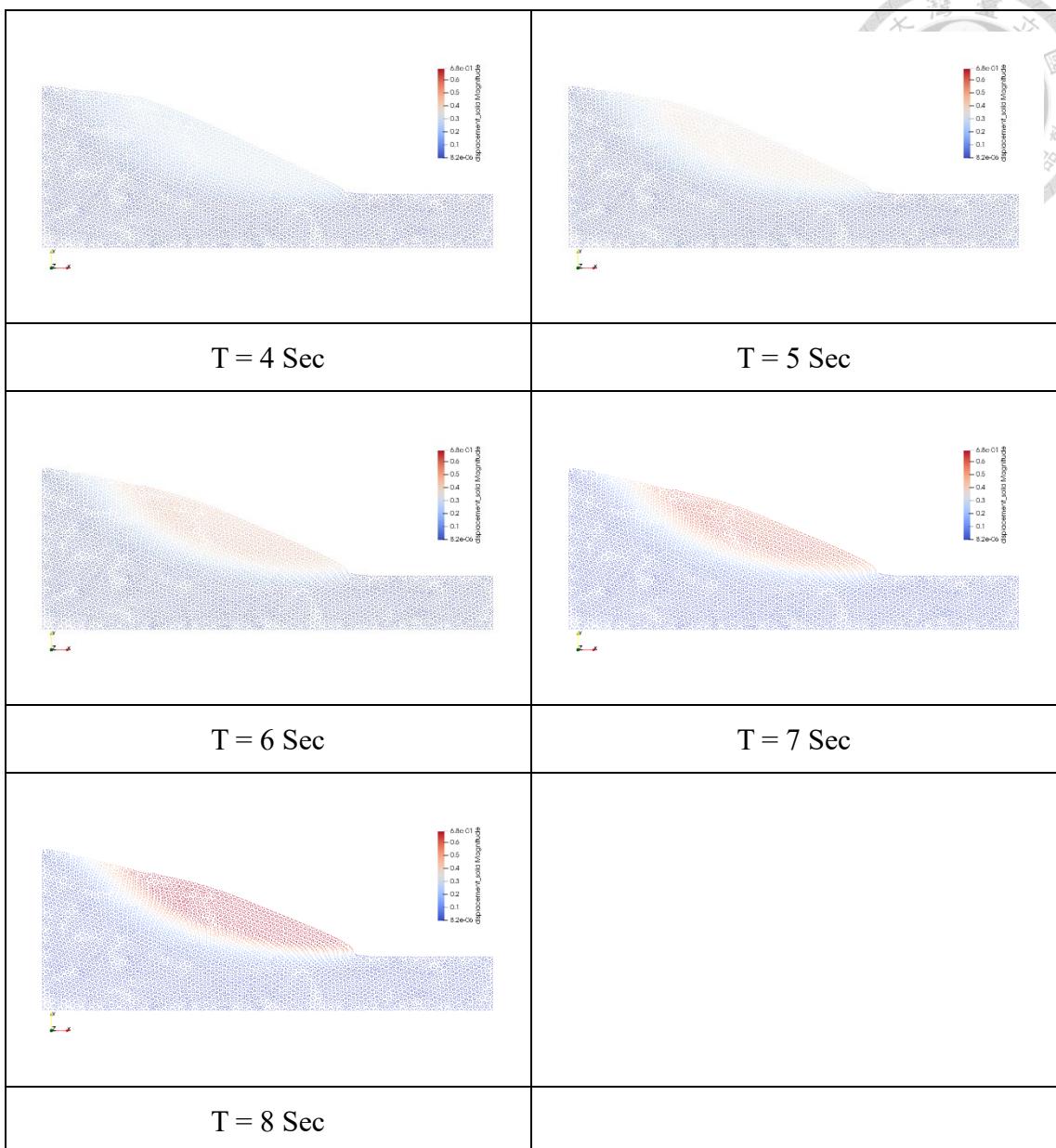


圖 5-12 二維模型破壞過程

而位移量的部分，若以模擬結束時間 $T = 8$ Sec 為標準討論兩種模式的最大位移量，我們發現三維模擬所得的最大位移為 0.6745 m ，而二維模擬則為 0.7364 m ，兩者相差 0.0619 m ，約 8% 的差異。差距可能來自二維模型在剖面深層也同時產生滑動位移，導致整體滑體似乎更大幅度地位移；而三維模型則將位移集中在表層，因而顯示較低的最大值。

進一步從三維模擬結果的俯視圖圖 5-13 來檢視位移分佈時，我們發現最顯著



的移動集中於模型中心區域。為了更直觀地呈現這一特徵，我們將所有物質點中位移量排名前 0.5%（約 160 個點）以桃紅色標記，如下圖所示，可以清楚看出，這些高位移點並非隨機分佈，而是集中成一個明顯的核心區。

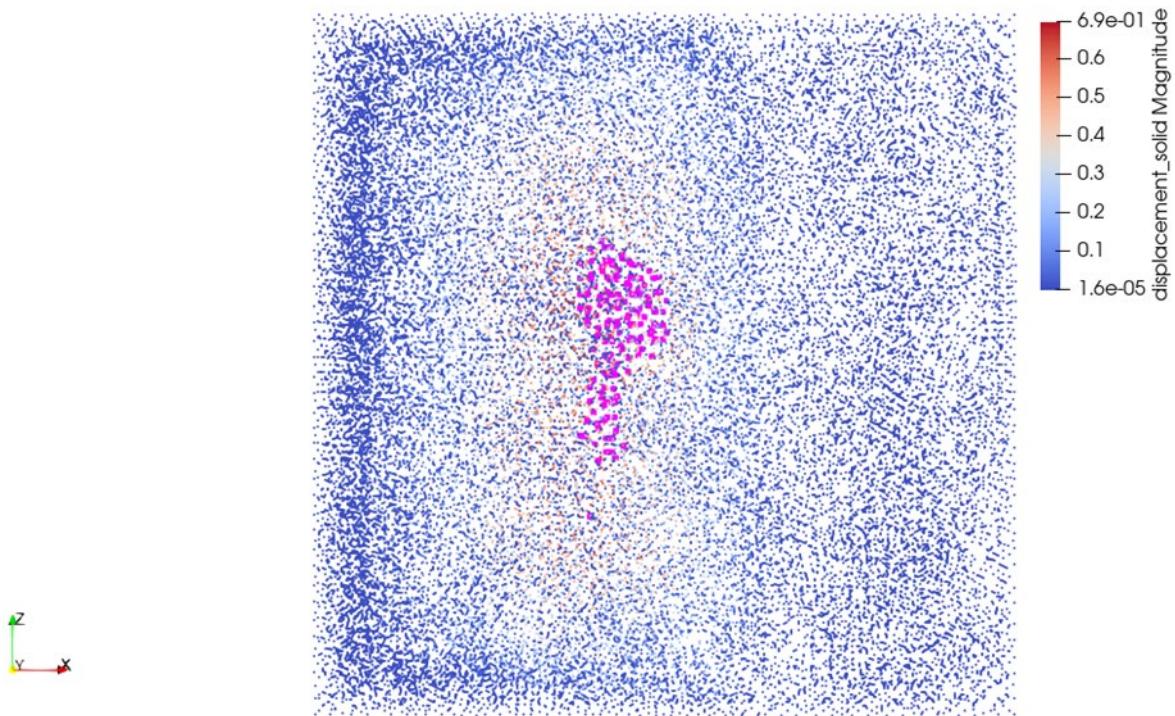


圖 5-13 三維模型中較大位移分布位置(俯視)

在比較二維與三維模擬結果後，我們發現目前的三維簡化模型所呈現的破壞形態與光華崩塌地實際滑動曲面的特徵仍有差距，若直接將這套三維設定與先前的二維模型進行討論，並不能有效反映實地的破壞狀況。因此，在保持土壤參數與邊界條件完全一致的前提下，決定僅對幾何形狀中的坡面傾角進行調整，透過建立多組不同坡度（例如 30° 、 34° 等）的二維簡易模型，再次執行物質點法模擬，並比對其滑動行為與真實崩塌曲面的吻合度，以找出能有效討論光華崩塌地的坡度設計。

透過比較三組不同坡面傾角下的模擬結果(如圖 5-14)，我們發現 $T=8$ 秒時破壞型態會呈現明顯差異。當坡度設為 30.96° 或 34.44° 時，不再僅出現淺層的表



面平移，而是在土層內部形成了清晰可見的破壞曲面，且破壞帶的發展深度大幅增加，顯示出更為典型的滑動機制。相對地，較小坡度（如 26° ）的模型依舊以表層平移為主，且滑動深度較淺。因此，將後續三維簡化模型相關分析所需之模型改以坡面角度 = 30.96° 、 34.44° 做設定，以得出更符合實際情況的討論。

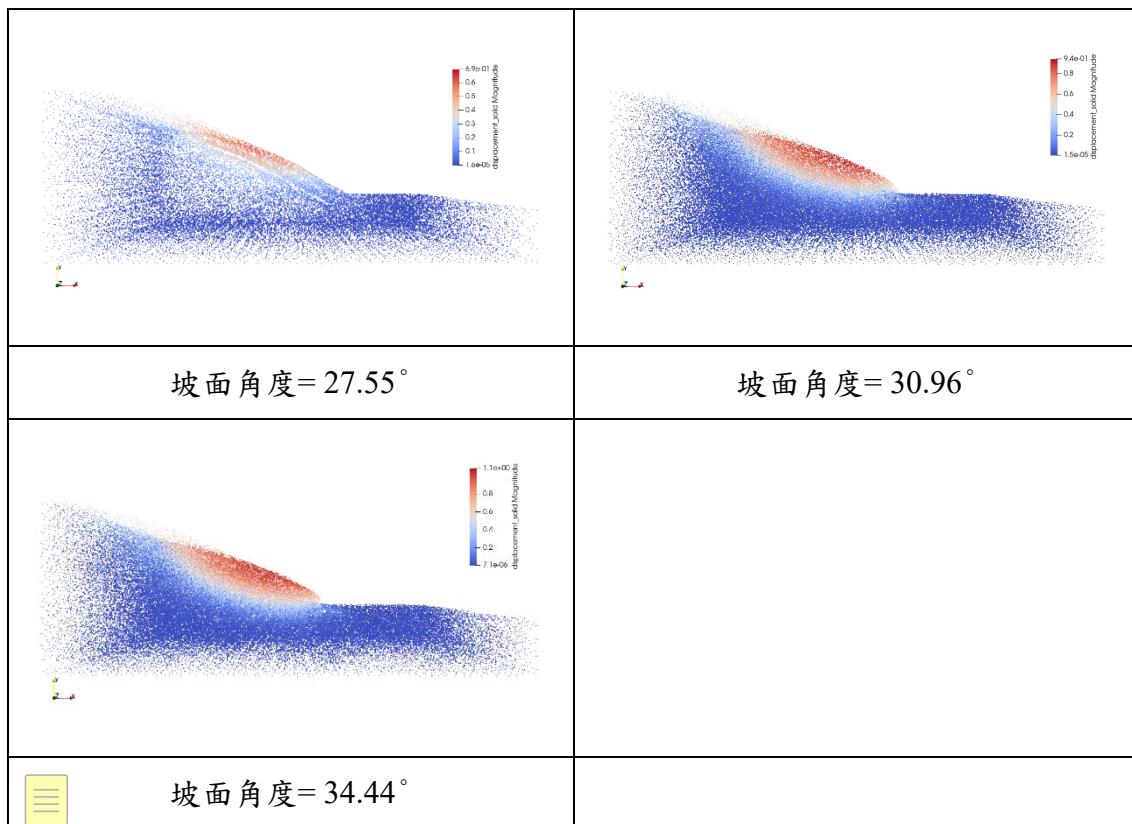


圖 5-14 不同角度三維模型破壞樣態比對

在確認了坡面傾角分別為 30.96° 和 34.44° 的二維簡化模型能夠較為真實地再現光華崩塌地的破壞曲面特徵之後，我們進一步在相同的土壤參數與邊界條件下對比了二維模型與三維模型的模擬結果。在此對比分析中，我們選取了兩個指標來量化模型性能：

- (1) 最大位移量：因為現地監測常以最大位移來表示破壞程度與臨界失效，故將每個模擬在末時刻 ($T=8\text{ Sec}$) 所產生的最大單點位移，作為最直觀的評估標準。



(2) 位移前 0.5% 的平均值：為了進一步捕捉高位移區域的整體行為，而非單一峰值，我們將所有物質點按位移大小排序，取排名前 0.5% 的位移值，計算其平均值，此指標能反映該模型對熱點區域（滑動核心帶）整體變形幅度的重現能力。

(3) 位移前 0.5% 的物質點分布位置：進一步分析這些高位移點在空間上的分佈情況，可檢驗二維與三維模型在捕捉破壞熱點位置上的差異，了解模型維度對滑動區域範圍與形態還原的影響。

以坡面角度 = 30.96° 為例

在坡面角度 = 30.96° 的邊坡模型中，我們將三維物質點法模型的邊坡寬度設定為 10 公尺，長度仍維持原本設定的 10 公尺；二維模型無寬度維度，長度保持原設定。

表 5-15 30.96° 邊坡二維與三維模型模擬結果

	最大位移量 (m)	位移前 0.5% 的平均值(m)
二維	0.834405	0.83045
三維 (寬度 D=10m)	0.952934	0.909744

由表 5-15 可以看出三維模型不論在最大位移量或是位移前 0.5% 的平均值這兩個指標中，皆明顯大於二維模型的模擬結果。由圖 5-15 俯視圖可觀察出，位移前 0.5% 物質點集中分布在坡面中央的橫向區域，也就是 z 軸寬度中間值區域，而非均勻分佈於整個坡體。

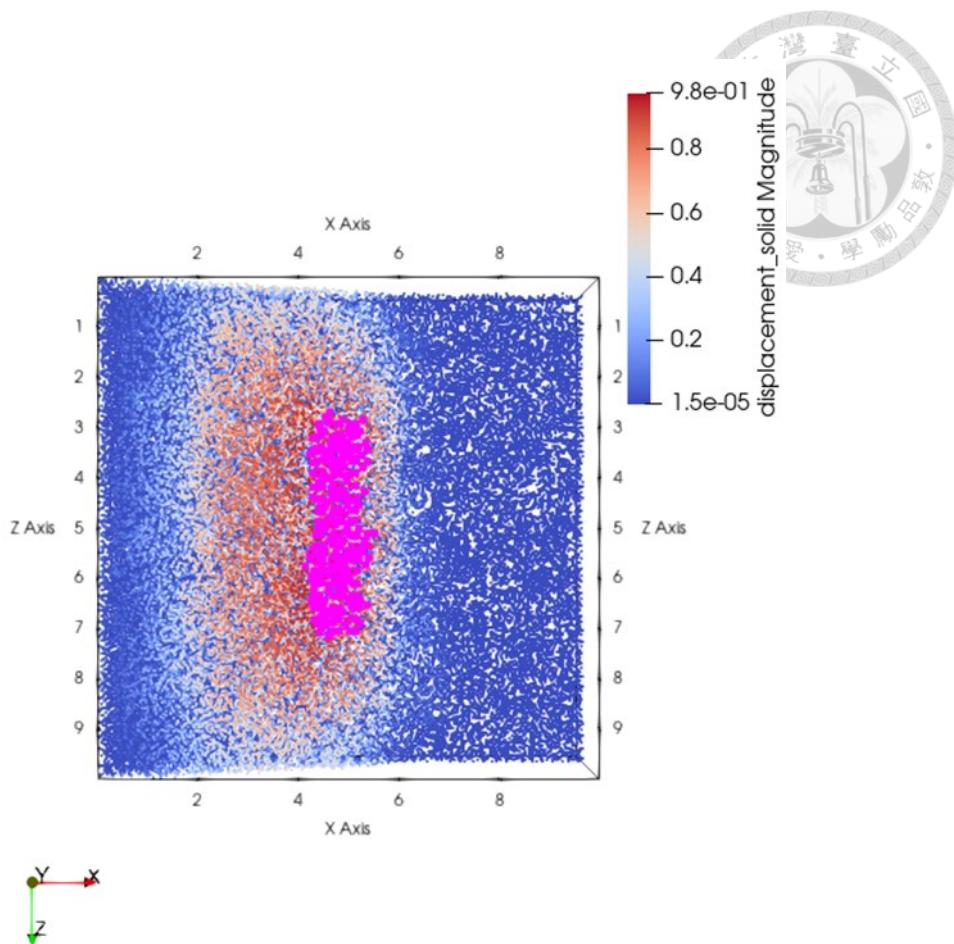


圖 5-15 30.96° 邊坡位移前 0.5% 物質點分布位置俯視圖

以坡面角度 = 34.44° 為例

如同上一組角度的設定，在坡面角度 = 34.44° 的邊坡模型中，我們再次將三維物質點法模型的邊坡寬度設定為 10 公尺，長度仍維持原本設定的 10 公尺；二維模型則無寬度維度，長度保持原設定。

表 5-16 34.44° 邊坡二維與三維模型模擬結果

	最大位移量 (m)	位移前 0.5% 的平均值(m)
二維	1.0126	1.007369
三維 (寬度 D=10m)	1.04258	0.997323



由表 5-16 可以看出三維模型在最大位移量這個指標中，明顯大於二維模型的模擬結果；但在位移前 0.5% 的平均值中，呈現與 30.96° 邊坡不同的趨勢，三維模型位移前 0.5% 的平均值反而小於二維模型結果。由圖 5-16 俯視圖可觀察出， 34.44° 邊坡與 30.96° 邊坡在位移前 0.5% 物質點分布位置這項指標上有類似的結果，位移前 0.5% 物質點集中分布在坡面中央的橫向區域，也就是 z 軸寬度中間值區域，而非均勻分佈於整個坡體。

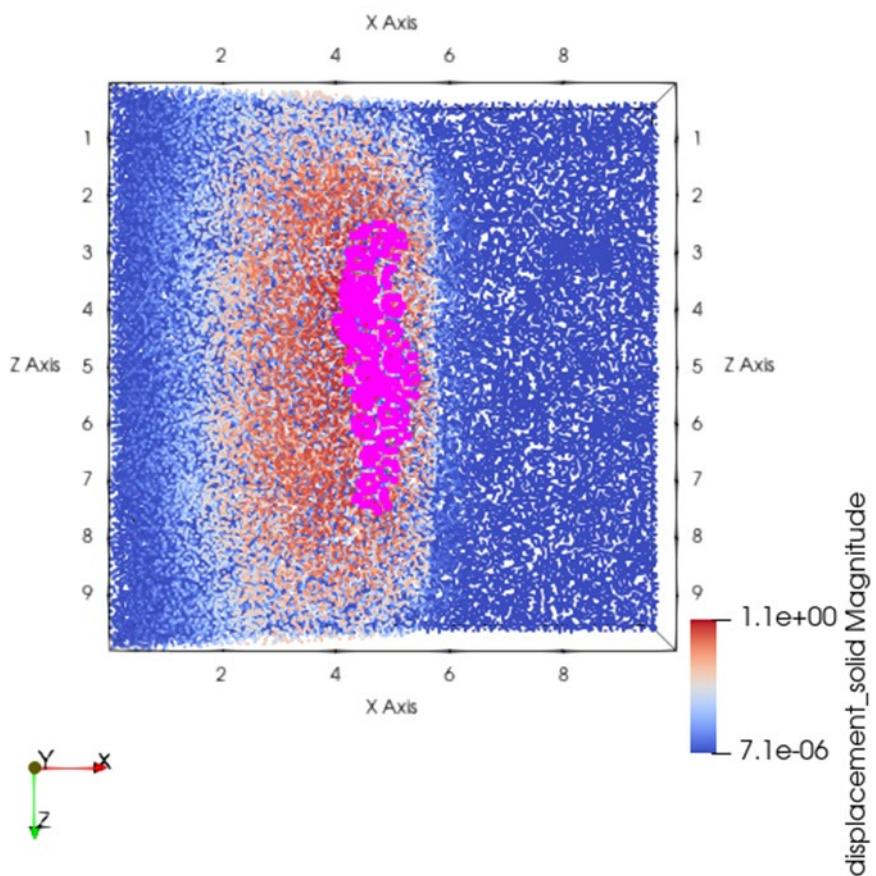


圖 5-16 34.44° 邊坡位移前 0.5% 物質點分布位置俯視圖

在對比坡面傾角分別為 30.96° 與 34.44° 的二維與三維物質點法模擬結果



時，我們注意到二維模型與三維模型在滑動模式與位移分佈上存在明顯差異。除了二維模型由於缺乏橫向（Z 軸）維度而無法捕捉坡體寬度方向上的約束與應力分佈外，這些差異也可能源於側邊界條件在二維與三維空間中限制方式的不同、單元網格與物質點配置密度的差異，以及材料異向性在多維度分佈的簡化處理。

為了進一步探討模型維度與幾何尺寸對模擬精度的影響，本研究在三維簡化模型中系統調整坡面寬度（Z 軸長度），並比較不同寬度設定下二維與三維模擬在最大位移量、位移前 0.5% 物質點平均值及其空間分佈等關鍵指標上的差異。透過對坡面寬度／坡面長度比例的分析，我們能夠評估不同橫向尺寸對滑動行為和位移分佈的影響，並辨識出在何種寬度範圍內模擬結果趨於穩定，以及寬度縮小或擴大時所展現的特有行為限制，從而為未來在二維與三維建模維度的選擇與設計提供科學依據。

在此研究階段，我們以 30.96° 與 34.44° 兩個模型為基礎，維持模型 X 軸方向長度並調整坡面寬度 D（Z 軸長度）為 5 m、10 m、15 m、20 m 共四種尺寸，進行物質點法模擬，並比較其最大位移量、位移前 0.5% 物質點的平均值以及這些高位移點的空間分佈。

以 30.96° 邊坡為例

如表 5-17 以及圖 5-17 所展示出的模擬結果，對於坡面傾角 30.96° 的案例而言，二維模擬($D=0$) 所得到的最大位移量最小，明顯低於各種三維寬度設定下的結果。從趨勢線可以觀察到，隨著模型寬度 D 越大時，會越可能出現更大的最大位移量；而位移前 0.5% 的平均值雖然在這組結果中並未有特別顯著的趨勢，其折線圖分佈明顯與最大位移量的走勢高度一致，當最大位移增大時，這一區域的平均位移也相應提升，反映出高位移熱點區的活動強度與峰值位移存在關係。

以圖 5-18 分析在不同寬度 D 下的位移前 0.5% 的物質點分布位置，可以發現位移前 0.5% 的物質點隨著 D 增加也會分布的更寬，有趣的是，當寬度 D 大於



10 公尺時，在三個不同寬度設定的結果分布皆與 Z 方向邊界保持一定的距離。



表 5-17 30.96° 邊坡在不同寬度 D 下的模擬結果

	最大位移量 (m)	位移前 0.5% 的平均值(m)
2D (D = 0 m)	0.834405	0.83045
D = 5 m	0.858333	0.8205
D = 10 m	0.952934	0.909744
D = 15 m	0.927958	0.895544
D = 20 m	0.938078	0.903986

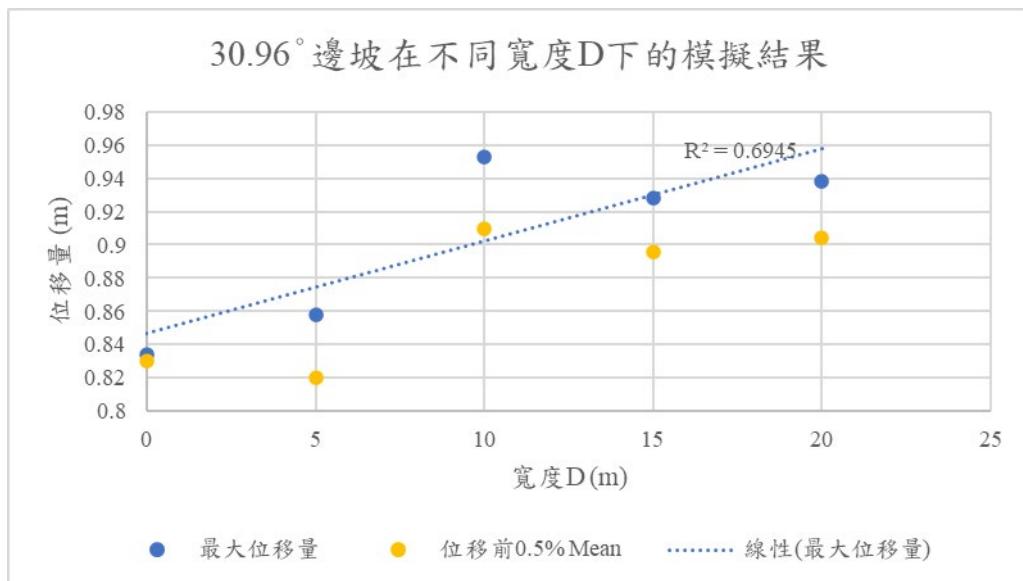


圖 5-17 30.96° 邊坡在不同寬度 D 下的模擬結果

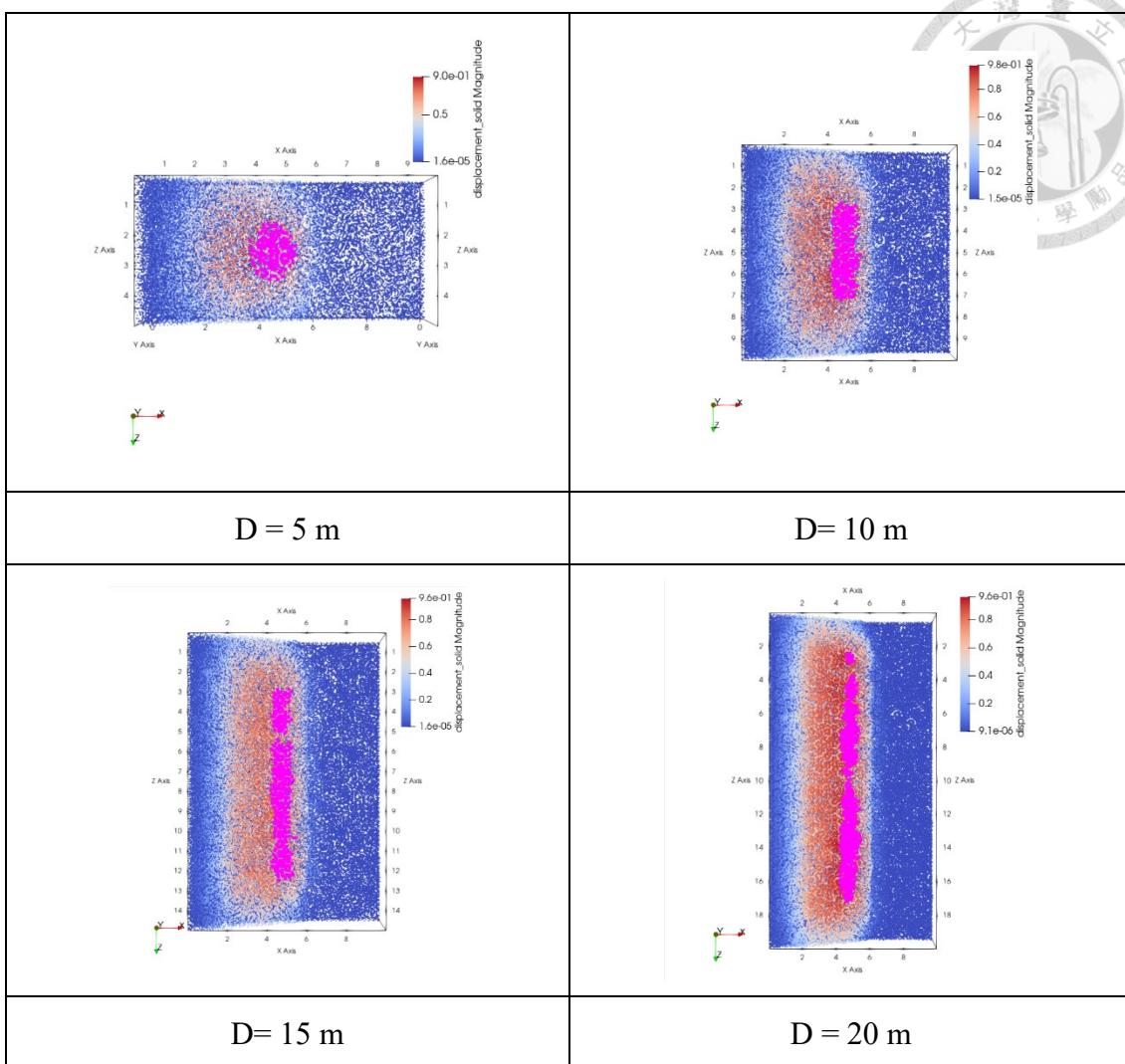


圖 5-18 30.96° 邊坡在不同寬度 D 下的位移前 0.5% 的物質點分布位置

以 34.44° 邊坡為例

如表 5-18 以及圖 5-19 所展示出的模擬結果，對於坡面傾角 34.44° 的案例而言，二維模擬($D=0$) 所得到的最大位移量並非最小，但仍低於大多數三維寬度的結果。但從趨勢線可以觀察到，隨著橫向寬度 D 越大時，由 5 m 逐步增加至 20 m，三維模型的最大位移量呈現明顯增大趨勢；而位移前 0.5% 的平均值雖然在這組結果中並未有特別顯著的趨勢，但此值與最大位移量的走勢高度吻合，每當最大位移量上揚時，高位移區域的平均位移亦同步提升。

圖 5-20 中可見，不同橫向寬度 D 下，位移排名前 0.5% 的物質點分佈位置



與先前情形相似，隨著 D 增大，這些高位移點的橫向範圍也隨之擴散。值得注意的是，當 D 超過 10 m 時，無論寬度設定為 15 m 還是 20 m，這些高位移物質點始終與 Z 軸邊界保持一定距離，並未緊貼模型邊緣。

表 5-18 34.44° 邊坡在不同寬度 D 下的模擬結果

	最大位移量 (m)	位移前 0.5% 的平均值(m)
2D ($D = 0$ m)	1.0126	1.007369
$D = 5$ m	0.975185	0.967232
$D = 10$ m	1.04258	0.997323
$D = 15$ m	1.05506	1.008736
$D = 20$ m	0.938078	1.019652

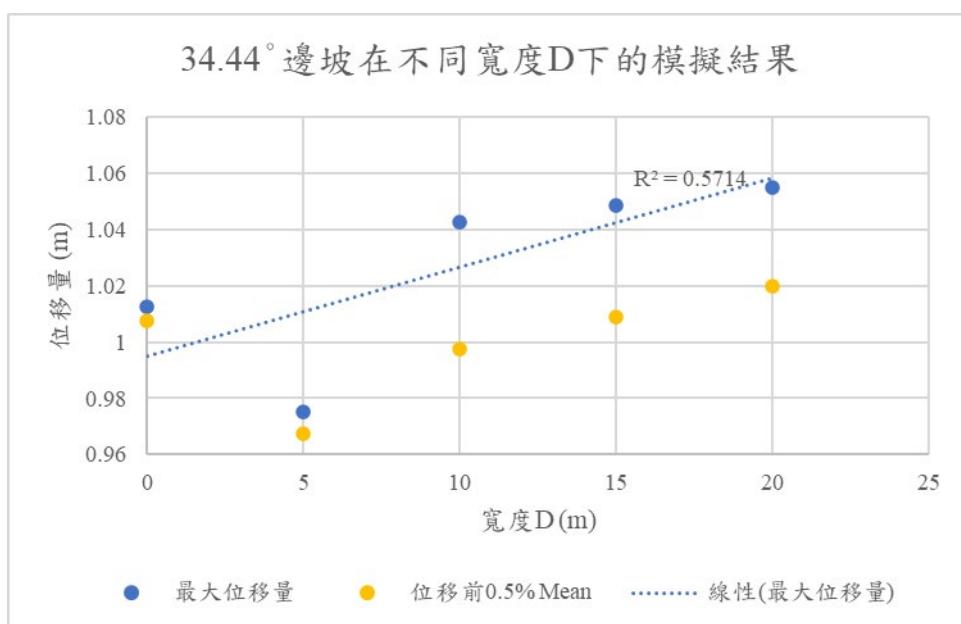


圖 5-19 34.44° 邊坡在不同寬度 D 下的模擬結果

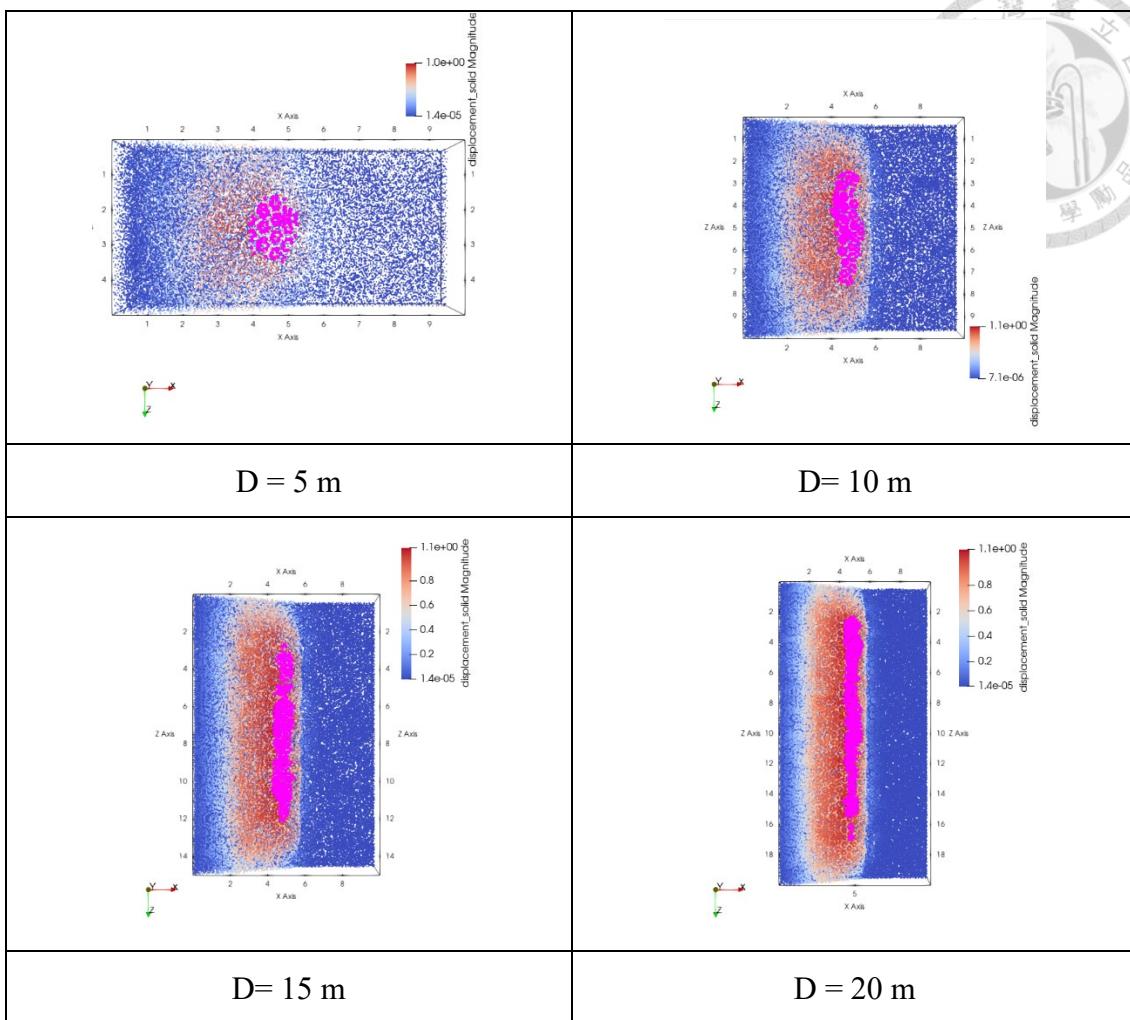


圖 5-20 34.44° 邊坡在不同寬度 D 下的位移前 0.5% 的物質點分布位置

由對比不同橫向寬度 D 設定下的最大位移量與位移前 0.5% 平均值變化可見，當坡面寬度從 5 m 逐步增加至 20 m 時，三維模型的最大位移量之趨勢線呈現上升。同時，位移前 0.5% 物質點的平均值亦與最大位移量的曲線走勢高度吻合，無論是在 $D=10\text{ m}$ 還是更大寬度時，這一平均值同步上揚，說明在更寬的剖面中，整體高位移區域的變形幅度也隨之增大。整體而言，這兩項指標的同步提升強調了模型橫向尺寸對模擬結果的影響，並提示在缺乏足夠寬度的情形下，滑動行為可能被低估；同時，過度寬化則會顯著增加計算成本卻未必顯著改進局部變形特徵的捕捉，因此在未來模型設計中需於精度與運算效率之間做出平衡。

在比較兩組邊坡在不同寬度 D 下的位移前 0.5% 的物質點分布位置後，我們



發現三維模型在不同橫向寬度 D 下，位移前 0.5% 的物質點空間分佈隨 D 增大而呈現明顯擴展。當坡面寬度從 5 m 延伸至 20 m 時，這些高位移點不再局限於中央細長帶，而是逐漸向兩側擴散，反映出橫向滑動核心帶範圍的擴張。更為有趣的是，一旦 $D > 10$ m，無論取 $D = 15$ m 或 $D = 20$ m，位移前 0.5% 的熱點區始終與 Z 軸邊界保持一定的安全距離，並未沿邊界貼邊擴張，這可能表明在超過某一臨界寬度後，邊界效應對滑動熱點的影響趨於飽和，高位移帶的外沿不再侷限於 Z 軸中間值區域。此結果暗示，為了避免數值模擬時出現邊界擾動帶來的影響，建議在三維模型設計時至少採用 10 m 以上的橫向尺寸，在捕捉坡面核心滑動行為的時候能減少人為邊界條件對分析精度的干擾。

為了進一步量化不同長寬比設定對於二維與三維模擬結果相似程度的影響，此階段使用了模型長寬比 (L/D) 與二維模擬結果與三維模擬結果之比值 ($2D/3D$) 兩個指標進行對比分析。其中 L 代表剖面長度、 D 為橫向寬度、 L/D 表示模型長寬比，而 $2D/3D$ 則計算在二維環境下與三維環境下所得到的最大位移量之比值，用以評估二維模型對三維模擬結果的擬合度。

如圖 5-21 與圖 5-22 所示，當將坡面傾角設為 30.96° 和 34.44° 時，兩種情境下的 $L/D - 2D/3D$ 相似度趨勢雖大致一致，但細節差異依然明顯。對於 30.96° 坡面，三維模型在四種 L/D 情境中，其最大位移均低於二維對應結果；特別是當 L/D 接近或小於 1 時，二維與三維之間的位移差距約達 10%。

相比之下，對於 34.44° 坡面，三維模擬結果在 L/D 位於 1.0 至 1.5 之間便已超越二維模擬值，表明在坡度較陡且橫向尺寸小幅度擴展時，三維模型更能放大峰值滑動。儘管如此，當 L/D 接近或低於 1.0 時，兩者的相似度仍超過 95%，反映在極窄的剖面情況下，即便簡化至二維亦能較準確地捕捉主要滑動特徵。

綜合上述分析，我們發現無論是在 30.96° 還是 34.44° 的坡面情境中，只要模型的長寬比 L/D 提高（即模型在橫向上更為窄長），二維與三維模擬結果的差



距便會逐步減小；反之，當 L/D 過小或過大時，二維簡化模型對三維空間效應的反映，則分別呈現出高估或低估滑動位移的趨勢。由於兩組模型唯一區別僅在於坡面傾角，這暗示坡面角度本身在模擬行為中扮演了關鍵角色。當坡度介於 30.96° 至 34.44° 之間時，二維與三維模型的相似度關係有所改變；若坡度超過此範圍，則可考慮僅使用二維模型以節省計算資源，並仍能維持較高的結果一致性；反之，若坡度低於此區間，則需更進一步驗證二維模型是否因為維度不足而無法完全替代三維模擬。此一發現為今後在二維與三維建模方案的選擇提供了明確依據，並可根據坡面傾角與可用計算資源，在調整 L/D 之餘兼顧模擬精度與運算效率。

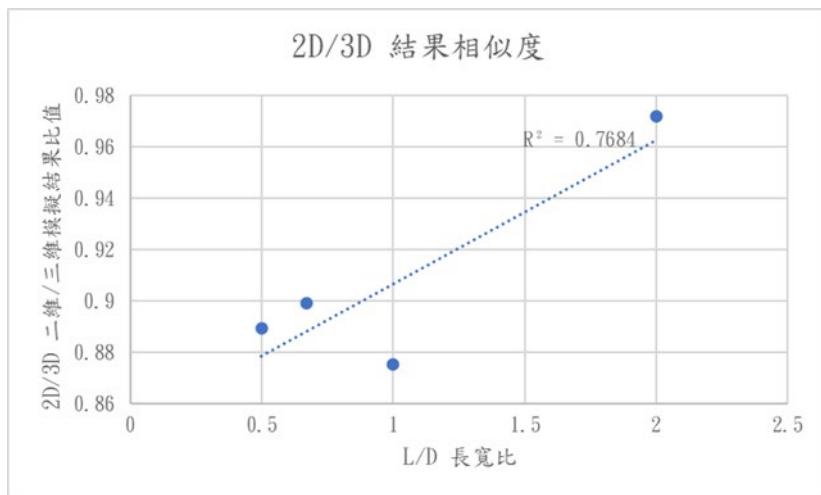


圖 5-21 30.96° 邊坡 2D/3D 結果相似度

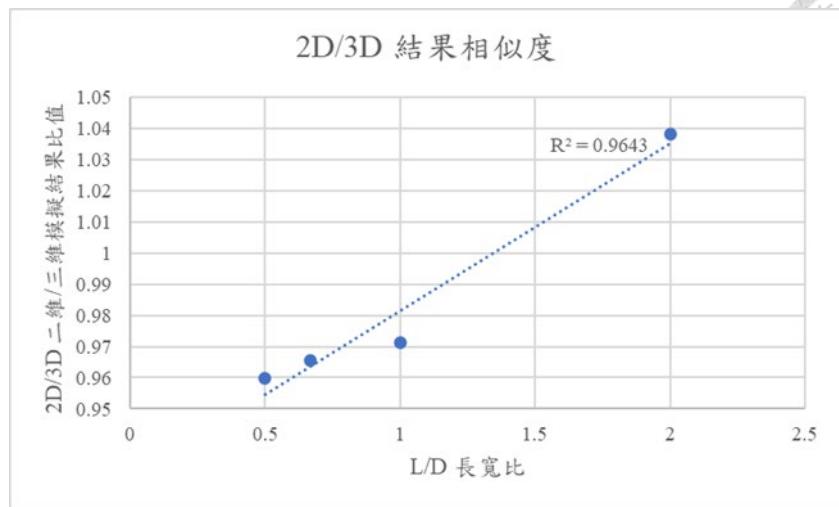


圖 5-22 30.96°邊坡 2D/3D 結果相似度



第六章 結論與建議

本研究以物質點法（MPM）為基礎，對光華崩塌地的風險評估與防災預警進行了數值模擬與分析。首先，我們透過實地地質資料與既有文獻中的地層剖面，精確構建了地形與土層模型，並明確提出「崩塌臨界位移」的概念作為判定坡面失效的依據。此一臨界位移門檻在後續的可靠度分析與警戒值設定中，發揮了核心作用。

在防災預警系統的設計層面，監測儀器的佈設是保障預警效能的關鍵。本研究根據 MPM 模擬結果，提出了一套選擇儀器佈設位置的策略，建議監測儀器(伸縮計、傾斜管與 GPS)應設置於位移和邊坡活動較顯著的主滑動面區域。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，確保任何微小變化都能被及時捕捉，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。同時對於分析之崩塌風險高但實際破壞狀況不明顯的區域，建議持續監控，以驗證其邊坡穩定安全，後續再根據監測成果動態調整儀器配置。

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，確保未來模擬能考慮到地下水因素。

本研究亦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。在光華崩塌地的案例



中，若現有監測系統已充分覆蓋各個高風險點，則將每日位移門檻從 20 mm 放寬至 40 mm 甚至更高是可行的；但若剖面 C-C' 確實具備顯著的失效風險，那麼 20 mm/日的警戒標準仍屬必要，應持續沿用以維持足夠的預警度。亦可利用更加豐富的現場監測資料來優化門檻選擇。

除此之外，本研究同時評估二維物質點法模擬與三維物質點法模擬的差異與近似程度，透過比較找出二維模擬的適用性，用以衡量兩者的差異和特性。未來在選擇建模模式時，可依據此比較結果，在所需解析度、運算資源之間做出最佳取捨，以達到既符合實務需求又具成本效益的模擬方案。當坡度介於 30.96° 至 34.44° 之間時，二維與三維模型的相似度關係有所改變；若坡度超過此範圍，則可考慮僅使用二維模型以節省計算資源，並仍能維持較高的結果一致性；反之，若坡度低於此區間，則需更進一步驗證二維模型是否因為維度不足而無法完全替代三維模擬。此一發現為今後在二維與三維建模方案的選擇提供了明確依據，並可根據坡面傾角與可用計算資源，在調整 L/D 之餘兼顧模擬精度與運算效率。

整體而言，本研究所提出的 MPM 模型構建流程、儀器佈設策略、地下水位情境探討及警戒值優化，以及二維/三維模型適用性比較，不僅為光華崩塌地的風險管理提供了能應用的優化策略，也能有效提升防災系統的運作效率與準確性，除了延續過去研究建立了物質點法模型以模擬現況的方法，也進一步延伸至邊坡風險管理的層面，為類似坡地災害的科學預警與決策制定提供了重要參考。未來工作可進一步整合實時監測資料與機器學習算法，構建「模擬監測校正」的機制，以持續提升預警準確度與運作效率。

未來研究建議：

1. 主滑動面所在的剖面 A-A'，Point 3 與 Point 43 兩處均呈現極高的失效機率（99.99% 與 99.98%），這與歷年現地伸縮計與 GPS 位移數據中觀察到的位移趨勢極為一致，需持續追蹤監測。

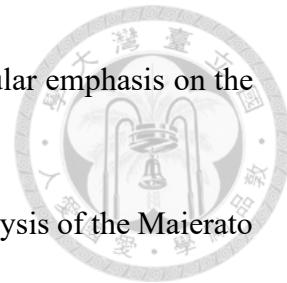


2. 位於主滑動面外的 B-B'剖面中的三個關注點在第二輪可靠度分析中均呈現極低的失效機率，這表示該剖面的穩定性較高，未來較不需針對此剖面進行模擬。
3. C-C'剖面某些區段的崩塌風險與主滑動面相當接近，需列為次高優先監測對象，並可透過實地觀測和補充性試驗，持續校正模型參數，以更精準地評估潛在崩塌危險。
4. 後續監測應將地下水位變化納入重點觀察指標，當監測資料顯示水位顯著上升，應迅速實施排水或工程干預，以降低孔隙水壓力對土體抗剪強度的削弱效應，減少崩塌風險。
5. 主滑動面上的 Point 3 與 Point 43 則分別擁有接近 100% 的失效機率，屬於極高風險點，因此在監測網絡佈設時應優先在 Point 3 和 Point 43 周邊增設監測儀器。
6. A-A'和 C-C'剖面上的風險明顯高於 B-B'剖面，而 B-B'的失效風險較低。因此，位於 A-A' 與 C-C'之間的區段最應優先考慮佈設監測裝置，以便及時捕捉任何滑動徵兆，相較之下，B-B' 附近因失效機率較低，可將增設儀器的優先順序放在後。
7. 若現有監測系統已充分覆蓋各個高風險點，則將每日位移門檻從 20 mm 放寬至 40 mm 甚至更高是可行的；但若剖面 C-C'確實具備顯著的失效風險，那麼 20 mm/日的警戒標準仍屬必要，應持續沿用以維持足夠的預警度。
8. 三維物質點法模擬在缺乏足夠寬度的情形下，滑動行為可能被低估；相反的，過度寬化則會顯著增加計算成本卻未必顯著改進局部變形特徵的捕捉。
9. 三維物質點法模型的長寬比 L/D 提高（即模型在橫向上更為窄長），二維與三維模擬結果的差距便會逐步減小；反之，當 L/D 過小或過大時，二維簡化模型對三維空間效應的反映，則分別呈現出高估或低估滑動位移的趨勢；未來進行物質點法模擬時，需評估模型長寬設定對模擬結果之影響。

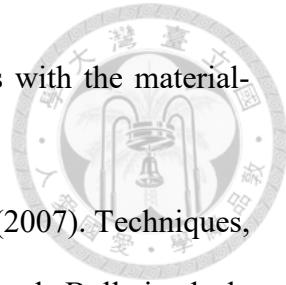


參考文獻

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. 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。
7. 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。
8. 林冠璋、劉哲欣、張志新、郭賢立 (2023)。利用邊坡活動性反演崩塌滑動面幾何型態。土木水利，50(5)，27-31。
9. 土石流及大規模崩塌防災資訊網 (2024)
10. 農業部農村發展及水土保持署 BigGIS 巨量空間資訊系統 (2024)
11. Anura3D MPM Software Tutorial Manual (2023)
12. 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.
13. 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.
14. Conte, E., Pugliese, L and Troncone, A. (2020) Post-failure analysis of the Maierato landslide using the material point method. *Engineering Geology*, 277 (2020).
 15. Thedy, J., & Liao, K. W. (2023). "Adaptive Kriging Adopting PSO with Hollow-Hypersphere space in structural reliability assessment." *Probabilistic Engineering Mechanics*, 103513
 16. 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.
 17. Yerro, A., Soga, K., & Bray, J. (2019). Runout evaluation of Oso landslide with the material point method. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(9), 1304-1317.
 18. Yerro, A., Alonso, E. E., & Pinyol, N. M. (2016). Run-out of landslides in brittle soils. *Computers and Geotechnics*, 80, 427-439.
 19. De Vaucorbeil, A., Nguyen, V. P., Sinaie, S., & Wu, J. Y. (2020). Material point method after 25 years: Theory, implementation, and applications. *Advances in applied mechanics*, 53, 185-398.
 20. Więckowski, Z. (2004). The material point method in large strain engineering problems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 193(39-41), 4417-4438.
 21. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian geotechnical journal*, 33(3), 379-392.
 22. Nguyen, T. S., Yang, K. H., Wu, Y. K., Teng, F., Chao, W. A., & Lee, W. L. (2022). Post-failure process and kinematic behavior of two landslides: case study and material point analyses. *Computers and Geotechnics*, 148, 104797.



23. Andersen, S., & Andersen, L. (2010). Modelling of landslides with the material-point method. *Computational Geosciences*, 14, 137-147.
24. Van Asch, T. W., Malet, J. P., van Beek, L. P., & Amitrano, D. (2007). Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard. *Bulletin de la Société géologique de France*, 178(2), 65-88.