
以地表位移推估不安定土砂量體方法之
研究

**Research on estimating landslide
volume based on the ground surface
velocity
(成果報告)**

執行單位：台灣科技大學營建系

執行期間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：盧之偉 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月



以地表位移推估不安定土砂量體方法之研究

摘要

坡地防減災工作推動的過程中，坡地災害的規模及其影響範圍推估，滑動面的資訊扮演著重要角色。然而，透過地質調查及地表監測以獲得潛在滑動面資訊的方式，相當耗時且成本高昂。受益於近年來航遙測技術的發展，地表變形資訊之取得品質佳和監測頻率逐漸提高，又執行成本相對較低。因此，近年來已發展出許多基於地表監測資料的滑動面推估方法，向量傾角法(Vector Inclination Method, VIM) 便是其中之一。然而，此方法的適用性尚未被完整詳細探討。因此，本研究透過數值模式取得崩塌過程中完整之地表變形與地中變形資訊，並利用 Python 開發自動化資料處理程序，對向量傾角法的推估滑動面和數值模擬滑動面進行一致性評估，量化其準確性，以此驗證向量傾角法之使用情境；並探討在不同幾何情境下的適用性與限制，並提出改善方案。結果顯示向量傾角法在預測崩塌邊界和區分地表位移原因方面存在局限性，故本研究提出位移角度與速度兩個門檻條件的改進方法，並輔以敏感度分析獲得最佳門檻條件配置，顯著提高向量傾角法的推估成效，同時亦驗證了該方法在不同幾何情境下的適用性。根據研究結果，本文證實了向量傾角法在推估潛在滑動面的可行性，並為實務應用情境中提出相關改善策略，透過引入門檻條件與敏感度分析優化參數，精進滑動面推估的準確度。

關鍵字：崩塌、向量傾角法、滑動面、材料質點法

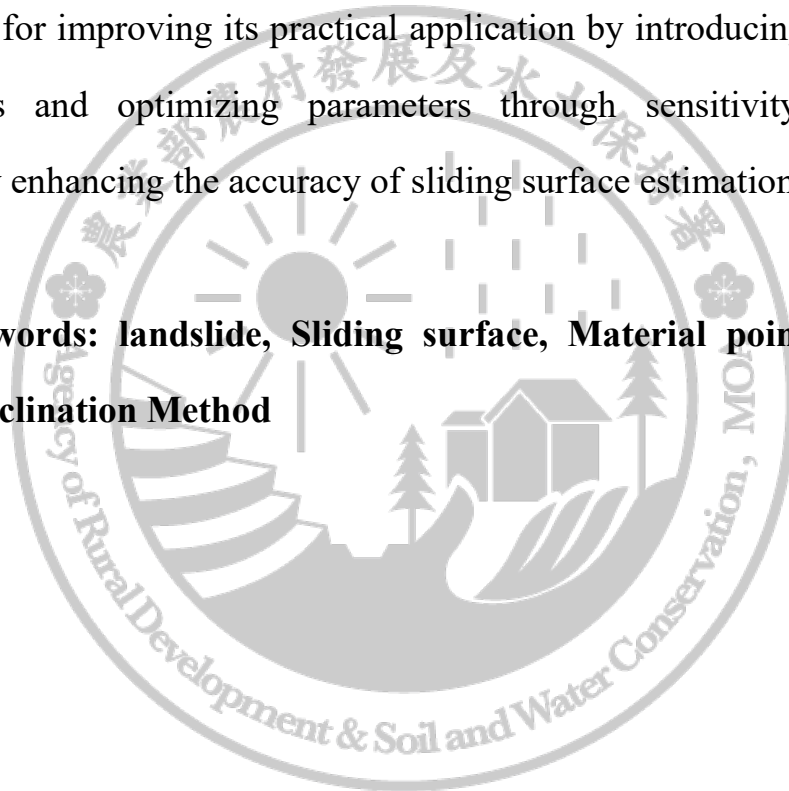
Research on estimating landslide volume based on the ground surface velocity

Abstract

In the process of promoting slope disaster prevention and mitigation efforts, estimating the scale and impact range of slope disasters plays a crucial role, where information about the sliding surface is of paramount importance. However, obtaining potential sliding surface information through subsurface investigations and monitoring is time-consuming and costly. Benefiting from the recent advancements in remote sensing technologies, the quality and frequency of ground surface data acquisition have significantly improved, and the associated costs are relatively lower. Consequently, numerous methods for estimating sliding surfaces based on ground monitoring data have been developed in recent years, one of which is the Vector Inclination Method (VIM). However, the applicability of this method has not been comprehensively and thoroughly investigated. Therefore, this study obtained comprehensive information on ground and subsurface deformations during landslide processes through numerical simulations. Subsequently, an automated data processing procedure was developed using Python to assess the consistency between the sliding surfaces estimated by VIM and those simulated numerically, quantifying the accuracy of VIM. This allowed for validating the VIM approach and exploring its applicability and limitations under different geometric conditions while proposing improvement strategies. The results revealed

that the original VIM has limitations in predicting landslide boundaries and distinguishing the causes of ground displacements. Consequently, this study proposed an improved method incorporating displacement angle and displacement rate threshold conditions, complemented by sensitivity analysis to obtain optimal threshold configurations, significantly enhancing the estimation effectiveness of VIM. Simultaneously, the applicability of this method under different geometric scenarios was validated. Based on the research findings, this study demonstrated the feasibility of using VIM to estimate potential sliding surfaces and proposed strategies for improving its practical application by introducing threshold conditions and optimizing parameters through sensitivity analysis, ultimately enhancing the accuracy of sliding surface estimation.

Keywords: landslide, Sliding surface, Material point method, Vector Inclination Method



目次

摘要	I
Abstract	II
目次	IV
表次	IX
圖次	XI
第一章 緒論	1
第一節 研究動機	1
第二節 研究目的	3
第二章 文獻回顧	1
第一節 邊坡滑動面調查及推估方法	1
一、 現地調查	1
二、 經驗法	6
三、 數值分析	9
第二節 應用材料質點法之案例	19
一、 研究案例-臺灣光華崩塌地	19
二、 研究案例-臺灣國道三號崩塌事故	24
三、 研究案例-美國 Oso 大規模崩塌事件	28

四、 研究案例-義大利 Senise 大規模崩塌事件 (Senise landslide)	32
第三節 自動化數據處理方法回顧	38
一、 Python 簡介	38
二、 Python 數據處理庫	39
三、 Python 優勢與劣勢	44
第四節 一致性評估方法回顧	45
一、 Pearson product-moment correlation coefficient (PPMCC)	45
二、 Concordance Correlation Coefficient (CCC)	47
三、 Spearman's correlation coefficient	48
四、 Kendall correlation coefficient	50
第三章 研究項目與執行方法	1
第一節 分析流程與架構	1
第二節 數值模擬方法	3
一、 材料質點法 (Material Point Method, MPM)	3
二、 數值模式介紹	7
三、 模擬情境及參數設定	11
四、 地表位移取得方法和地中變形判讀方法	18
第三節 向量傾角法原理與精進	22

一、 向量傾角法說明	22
二、 向量傾角法的改良方法	25
第四節 向量傾角法推估成效評估方法	28
第五節 自動化數據處理方法及流程	30
一、 數值模擬滑動面取得	32
二、 地表資訊取得	34
三、 向量傾角法計算	35
四、 一致性評估	37
五、 敏感度分析	38
第四章 結果與討論	1
第一節 邊坡破壞模擬結果及探討	1
一、 不同坡度之數值模擬結果	1
二、 不同坡高之數值模擬結果	6
第二節 滑動面推估成效評估	11
一、 向量傾角法假設驗證	12
二、 不同坡度之滑動面推估結果	15
三、 不同坡高之滑動面推估結果	19
四、 不同追蹤點數量之滑動面推估結果	23
五、 不同追蹤點分布之滑動面推估結果	29

六、 向量傾角法錯誤樣態說明·····	35
第三節 向量傾角法改善方案·····	37
一、 錯誤樣態改善方法說明·····	37
二、 不同坡度之推估結果改善·····	42
三、 不同坡高之推估結果改善·····	45
第四節 向量傾角法修正成效·····	50
一、 不同坡度之推估結果改善成效·····	50
二、 不同坡高之推估結果改善成效·····	55
三、 不同追蹤點數量之推估結果改善成效·····	59
四、 小結·····	63
第五章 結論與建議·····	1
第一節 結論·····	1
第二節 建議·····	2
參考文獻·····	1
附錄·····	1
附錄一、計劃書之內容審查意見暨回覆辦理情形·····	1
附錄二、期中書面審查意見及回覆辦理情形·····	5
附錄三、期末書面審查意見及回覆辦理情形·····	8



表次

表 2-1 數值分析方法比較表	2-17
表 2-2 滑動面推估方法比較表	2-18
表 2-3 材料參數表 (Yeh et al., 2021).....	2-26
表 2-4 不同介面之附著力 (改自 Yerro et al., 2019)	2-30
表 2-5 不同滑動體之土壤參數表 (改自 Yerro et al., 2019)	2-30
表 2-6 建築物參數表 (Conte et al., 2019).....	2-36
表 2-7 土壤參數表 (Conte et al., 2019).....	2-36
表 2-8 os 套件中常用指令 (改自 STEAM 教育學習網)	2-39
表 2-9 一致性評估指標	2-52
表 3-1 土壤參數表	3-13
表 3-2 Anura3D 計算過程設定	3-15
表 4-1 坡度的初始條件參數表	4-3
表 4-2 坡高的初始條件參數表	4-7
表 4-3 不同坡度的推估成效	4-18
表 4-4 不同坡高的推估成效	4-22
表 4-5 不同追蹤點數量的推估成效	4-28
表 4-6 不同追蹤點分布之推估成效	4-34

表 4-7 不同坡度之推估成效	4-53
表 4-8 不同坡高之推估成效	4-58
表 4-9 不同追蹤點數量之推估成效	4-62



圖次

圖 2-1 大地工程分析金三角 (Keaton, 2013).....	2-4
圖 2-2 地質模型示意圖	2-4
圖 2-3 邊坡自動化監測系統 (圖片來源：大地工程研究中心).....	2-5
圖 2-4 傾斜儀觀測成果 (Uhlemann et al., 2016)	2-5
圖 2-5 對數螺線滑動面示意圖 (Jaboyedoff et al., 2016)	2-8
圖 2-6 以地表位移推估潛在滑動面示意圖 (Carter and Bentley, 1985)	2-9
圖 2-7 以曲線擬合法推估潛在滑動面 (Jaboyedoff et al., 2020).....	2-9
圖 2-8 切片法示意圖 (修改自 Ning Lu, 2012).....	2-11
圖 2-9(A) Fellenius 切片法，(B) Bishop 簡易切片法，(C) Janbu 簡易切片法，(D) Morgenstern-Price 切片法 (修改自 Ning Lu, 2012)	11
圖 2-10 邊坡模型與穩定性分析結果 (Khan et al., 2017)	2-13
圖 2-11 軟弱岩層破壞過程 (Tian et al., 2021)	2-15
圖 2-12 光華崩塌地 (農水署，2021)	2-22
圖 2-13 光華崩塌地數值模型配置圖(模式三) (楊國鑫，2023)	2-22
圖 2-14 不同時期 DEM 與分析結果比對(模式三) (楊國鑫，2023) ..	23
圖 2-15 地表監測點位與分析結果比對(模式三) (楊國鑫，2023) .	2-24
圖 2-16 地層分類 (Yeh et al., 2021).....	2-25

圖 2-17 不同分區追蹤點歷時資料 (a)位移歷時圖 (b)速度歷時圖 (Yeh et al., 2021)	2-26
圖 2-18 不同分區滑動路徑 (Yeh et al., 2021).....	2-26
圖 2-19 Oso 崩塌事件滑動體 (Yerro et al., 2019).....	2-29
圖 2-20 數值模型配置圖(Yerro et al., 2019)	2-30
圖 2-21 不同時間之模擬結果 (Yerro et al., 2019)	2-31
圖 2-22 土層分布 (Conte et al., 2019).....	2-34
圖 2-23 數值模型 (Conte et al., 2019).....	2-34
圖 2-24 Senise landslide 演變過程(a) $t = 1.5$ sec (b) $t = 2.5$ sec.....	2-35
圖 2-25 追蹤點歷時圖 (a) 位移歷時圖 (b) 速度歷時圖	2-37
圖 2-26 NumPy 應用範疇 (圖片來源： https://numpy.org/)	2-41
圖 2-27 Matplotlib 支援圖表類型 (圖片來源：STEAM 教育學習網)	2-43
圖 2-28 邊坡累計位移與水庫水位及雨量變化關係圖	2-46
圖 2-29 CCC 示意圖 (參考來源：Lin, 1989).....	2-48
圖 3-1 分析流程與架構圖	3-2
圖 3-2 材料質點法解算概念圖 (Conte et al., 2020).....	3-6
圖 3-3 材料點與相態的配置關係圖 (Anura3D 手冊，2019).....	3-7
圖 3-4 GiD 網格示意圖	3-7

圖 3-5 土壤材料設定示意圖	3-9
圖 3-6 材料點配置示意圖	3-9
圖 3-7 邊坡崩塌模擬結果	3-10
圖 3-8 追蹤材料點示意圖	3-10
圖 3-9 數值模型土層配置	3-12
圖 3-10 邊界條件示意圖	3-13
圖 3-11 不同計算階段之模擬現象示意圖	3-15
圖 3-12 應力分布示意圖	3-17
圖 3-13 邊坡速度場示意圖	3-17
圖 3-14 設置追蹤點示意圖	3-19
圖 3-15 地表隨時間之演變	3-20
圖 3-16 數值模擬結果示意圖	3-21
圖 3-17 數值模擬之滑動面示意圖	3-21
圖 3-18 數值模擬之滑動面隨時間之演變	3-21
圖 3-19 向量傾角法示意圖	3-24
圖 3-20 向量傾角法推估結果	3-24
圖 3-21 向量傾角法錯誤推估結果概念圖	3-27
圖 3-22 邊坡土體變形(崩塌+潛變)	3-27
圖 3-23 一致性評估示意圖	3-29

圖 3-24 自動化數據處理流程圖	3-31
圖 3-25 數值模擬滑動面取得流程圖	3-33
圖 3-26 地表資訊取得流程圖	3-35
圖 3-27 向量傾角法計算流程圖	3-36
圖 3-28 一致性評估流程圖	3-37
圖 3-29 敏感度分析流程圖	3-39
圖 4-1 坡度崩塌穩定狀態的說明圖	4-3
圖 4-2 邊坡崩塌運動過程 ($\beta_1 = 60^\circ$)	4-4
圖 4-3 不同坡度數值模擬結果	4-4
圖 4-4 不同坡度之崩塌行為差異概念圖 (a)坡度緩 (b)坡度陡	4-5
圖 4-5 無因次滑動範圍/距離變化圖	4-5
圖 4-6 坡高崩塌穩定狀態的說明圖	4-7
圖 4-7 邊坡崩塌運動過程($H = 200\text{ m}$)	4-9
圖 4-8 不同邊坡高度數值模擬結果	4-10
圖 4-9 不同邊坡高度之崩塌行為差異概念圖	4-10
圖 4-10 邊坡高度與滑動範圍/距離關係圖	4-10
圖 4-11 滑動面比較示意圖	4-12
圖 4-12 CCC 隨時間變化圖	4-12
圖 4-13 不同假設下的滑動面推估結果差異	4-14

圖 4-14 不同坡度之滑動面推估結果.....	4-17
圖 4-15 不同坡度之滑動面推估成效歷時圖	4-18
圖 4-16 不同坡高之滑動面推估結果.....	4-21
圖 4-17 不同坡高之滑動面推估成效歷時圖	4-22
圖 4-18 不同追蹤點數量之分佈	4-25
圖 4-19 不同追蹤點數量之滑動面推估結果.....	4-27
圖 4-20 不同追蹤點數量之滑動面推估成效歷時圖	4-28
圖 4-21 不同追蹤點分布形式	4-31
圖 4-22 不同追蹤點分布之滑動面推估結果.....	4-33
圖 4-23 不同追蹤點分布之推估成效歷時圖	4-34
圖 4-24 滑動區域外之追蹤點位移角度隨時間變化圖	4-36
圖 4-25 向量傾角法錯誤推估結果概念圖	4-36
圖 4-26 不同臨界位移量之模擬滑動面示意圖	4-38
圖 4-27 應用移動速度門檻於向量傾角法之改良概念圖	4-39
圖 4-28 應用移動速度門檻於向量傾角法之改良概念圖	4-40
圖 4-29 應用門檻條件之推估滑動面差異示意圖	4-41
圖 4-30 臨界位移量之敏感度分析結果	4-42
圖 4-31 位移角度比之敏感度分析結果	4-43
圖 4-32 移動速度之敏感度分析結果	4-44

圖 4-33 臨界位移量之敏感度分析結果.....	4-45
圖 4-34 位移角度比之敏感度分析結果.....	4-46
圖 4-35 移動速度之敏感度分析結果.....	4-47
圖 4-36 臨界位移量與邊坡高度關係圖	4-48
圖 4-37 不同坡高之門檻條件設定建議.....	4-49
圖 4-38 不同坡度之滑動面推估結果.....	4-53
圖 4-39 不同坡度之滑動面推估成效歷時圖	4-53
圖 4-40 不同坡高之滑動面推估結果.....	4-57
圖 4-41 不同坡高之滑動面推估成效歷時圖	4-58
圖 4-42 不同追蹤點數量之滑動面推估結果.....	4-61
圖 4-43 不同追蹤點數量之推估成效歷時圖	4-62



第一章 緒論

第一節 研究動機

台灣位於環太平洋地震帶，地震發生頻繁，且多山區地形，使得崩塌事件在台灣相對常見。雨季來臨時，山區常受大量降雨影響，容易出現土石流和崩塌現象。由於台灣地理狹小，山區有眾多道路和建築物，這些基礎設施在崩塌事件發生時容易受到嚴重威脅。因此，準確預測崩塌行為並評估其對基礎設施的潛在危害至關重要。在考量大崩塌發生時的影響區域時，滑動塊體的體積最為關鍵，決定了大規模崩塌的傳播特性與崩塌潛勢區的範圍大小，而影響滑動塊體體積的主要因素，即是滑動面的位置。

根據國內外多項研究顯示，初步估算滑動體的體積時，主要需考慮崩塌地的表面積與深度。一般而言，取得這些資料需要透過鑽探、監測儀器，甚至發展完整的監測系統。然而，上述方法往往耗時且耗費昂貴，使得資料蒐集面臨極大的挑戰。隨著科技進步，InSAR 與 UAV 等工具技術發展逐漸成熟，不僅可以簡化資料蒐集的流程，並在資料精度上取得一定的進步。透過這些新興科技的應用，獲得高精度的地表資料，可改善地中資料獲取不易的缺點，並以此預測滑動面的位置。Carter and Bentley (1985)在適當的假設下，提出以地表位移資

訊推估潛在滑動面位置的方法，又稱為向量傾角法(Vector Inclination Method, VIM)，且近年來已有學者將其應用於現地案例，然而，目前為止的相關研究並未深入探討該方法於現地應用的適用性與限制，殷鑑於此，探討向量傾角法於現地的適用性與限制遂成為本研究之動機。



第二節 研究目的

本論文的研究目的在於探討向量傾角法於不同幾何情境下的適用性與限制。受限於地表及地底調查資料的不連續性，故本研究選用材料質點法(Material Point Method, MPM)模擬邊坡滑動行為，取得動態過程中完整之地表變形與地中變形資訊，改善資料的不連續性，並透過 Python 進行資料處理，將向量傾角法之預測滑動面與數值模擬之真實滑動面進行比較，以相關係數量化向量傾角法的準確性。透過不同坡度及坡高的崩塌現象差異，進一步分析向量傾角法在不同幾何情境中的適用性與限制。同時，本研究亦提出了相應的修正方法，以回饋實務操作上的建議。



第二章 文獻回顧

本研究透過材料質點法進行數值模擬分析，並結合向量傾角法來推估邊坡滑動面的位置。除此之外，本研究亦需進行自動化數據處理與一致性評估。因此，本章將針對滑動面推估方法、材料質點法應用案例、自動化數據處理方以及一致性評估方法進行回顧。

第一節 邊坡滑動面調查及推估方法

為探討邊坡的破壞形式，邊坡滑動面的位置與幾何形狀是相當重要的資訊，亦可以此推估滑動體體積時，而滑動面位置可以透過許多方式來判定，如現地調查、經驗法及數值分析等方法。

一、現地調查

Burland 於 1987 年提出大地工程分析金三角(Burland, 1987)，如，包含地質模型(Geologic Model)、地面模型(Ground Model)與大地工程模型(Geotechnical model)。地質模型表達現地與工程計畫相關之地質環境(地質構造、地表變化、岩性層界與地下水等)；地面模型係以地質模型為基礎，加上相關地工參數資料；大地工程模型則是以地面模型為基礎，針對基礎試驗、荷重及性能要求等數據，繪製預測模型(Keaton, 2013)。其中，地質模型是工程、地下環境及地質災害之分析、

模擬與評估時之基礎(董家鈞，2020)。透過現地調查可以得知一個區域的地質資訊，建構地質模型，如所示，對於地質災害的預測與分析相當重要。

Juang et al.(2019)亦指出地質模型的不確定性，嚴重影響大地工程規劃設計。因此，透過現地調查，以各式各樣的儀器獲取地質資訊，掌握邊坡安全狀況的細微變化，提供防災預警功能與坡地災害整治之依據。常見的監測方式如透過鑽孔進行岩土層取樣，獲得地層資料，以了解該區域的地層概況；透過水位計、雨量計等儀器，監測地下水位的變化情形；也可以透過傾斜儀 (inclinometer)、伸縮計 (extensometer)、裂縫計(crackmeter)等儀器，監測地層位移情形，搭配鑽探岩心判斷潛在滑動面位置。

隨著科技進步，自動化監測系統於近年逐漸興起，如所示。目前可應用於邊坡之自動化監測項目，包含地表及地中變形、水文、雨量等項目，坡面上之結構物則可監測其受力與變位行為。Lollino et al. (2002)在邊坡上安裝自動傾斜測量系統(automatic inclinometric system, AIS)，確定了滑動面的深度；Jaboyedoff et al. (2020)曾利用無人機在崩塌發生時進行航拍，並以此產製正射影像圖與數位地表模型(DSM)，進行該崩塌事件的分析；Jiao et al. (2022) 則將 InSAR 技術與無人機結合，獲得高精度的地表變形資料，從而分析崩塌發生的機制與特性。

在地球物理方面，Lebourg et al. (2005)利用地電阻探勘的方式，獲得深層滑動面及垂直排水斷層的資訊；Rainone and Torrese (2007)利用震波反射的方式重建不穩定邊坡的地質剖面，其中 P 波於岩石層的表現較佳，而 SH 波則在多孔隙材料的表現較佳。然而，監測儀器的特性不一，所適用的情境也有所不同。Uhlemann et al. (2016)採用全球定位系統(GPS)、傾斜儀、加速度感應矩陣(Shape Acceleration Array, SAA)、主動波導(Active waveguide, AEWG)、水壓計(piezometer)等工具建立一套監測系統。首先，利用 GPS 的高空間解析度特性，設置多個監測點以監控邊坡整體的位移情況，輔以傾斜儀，以判斷潛在滑動面位置，如所示，再應用加速度感應矩陣與主動波導於不穩定區域以取得高時間解析度的地表地中位移資料，補足 GPS 在時間解析度的不足。

綜上所述，透過現地調查能夠獲取地質相關資料，建立地質模型，不僅可以精確地掌握關於潛在滑動面的資訊，亦有利於後續災害防治工程的設計規劃。然而，現地調查通常需要較長的施行時間、耗費金額龐大，且在邊坡上的施作可行性與準確性有待評估，無法全面地進行施作。

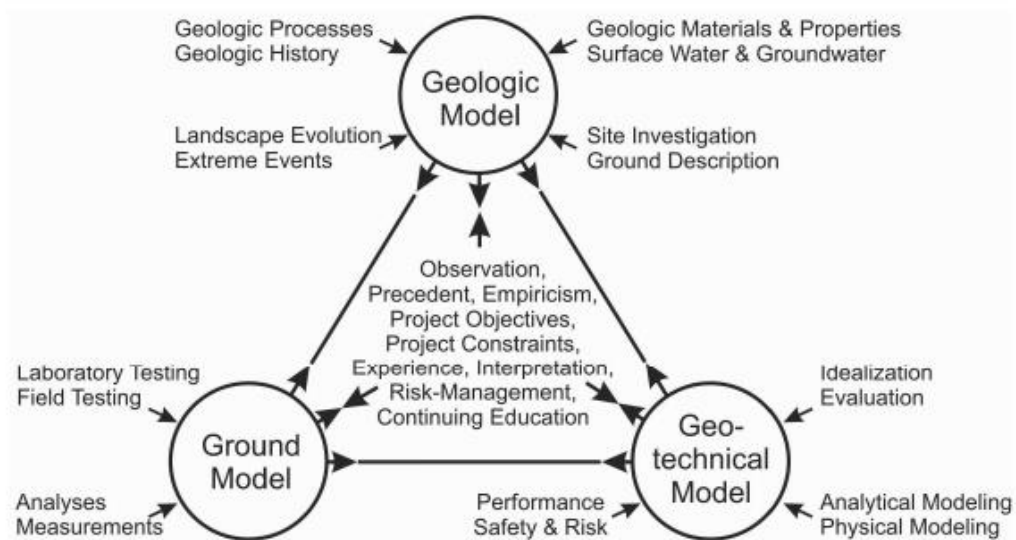


圖 2-1 大地工程分析金三角 (Keaton, 2013)

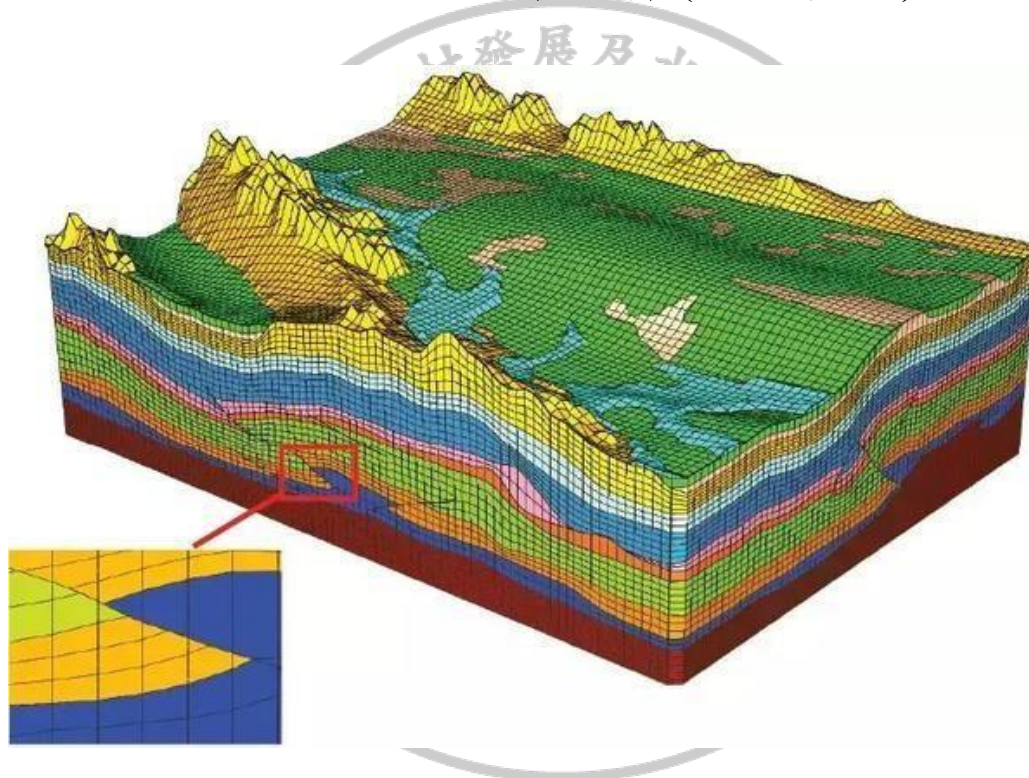


圖 2-2 地質模型示意圖

(圖片來源: <https://kknews.cc/other/6alkppp.html>)

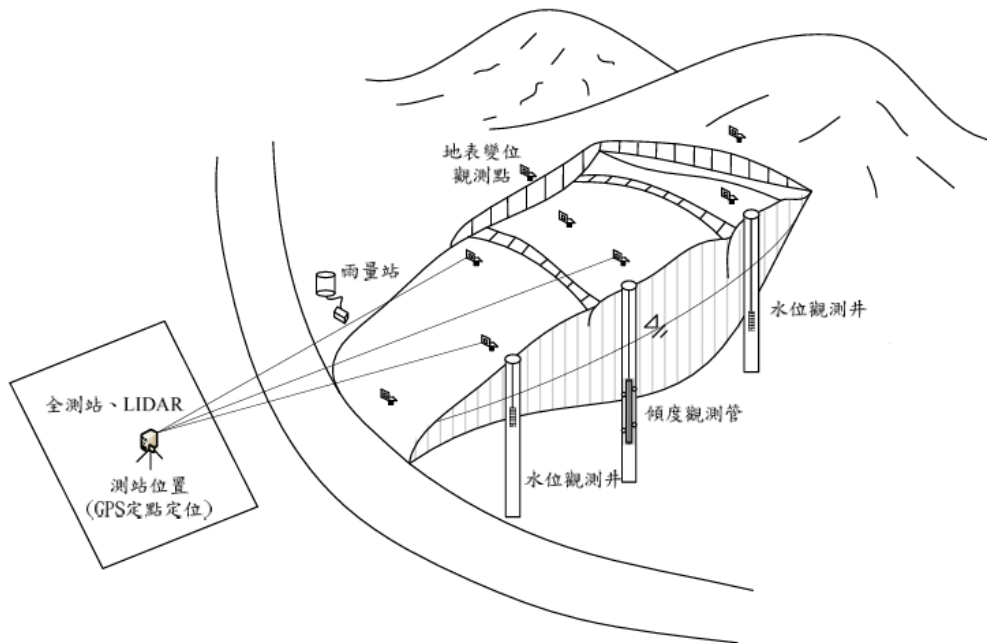


圖 2-3 邊坡自動化監測系統 (圖片來源：大地工程研究中心)

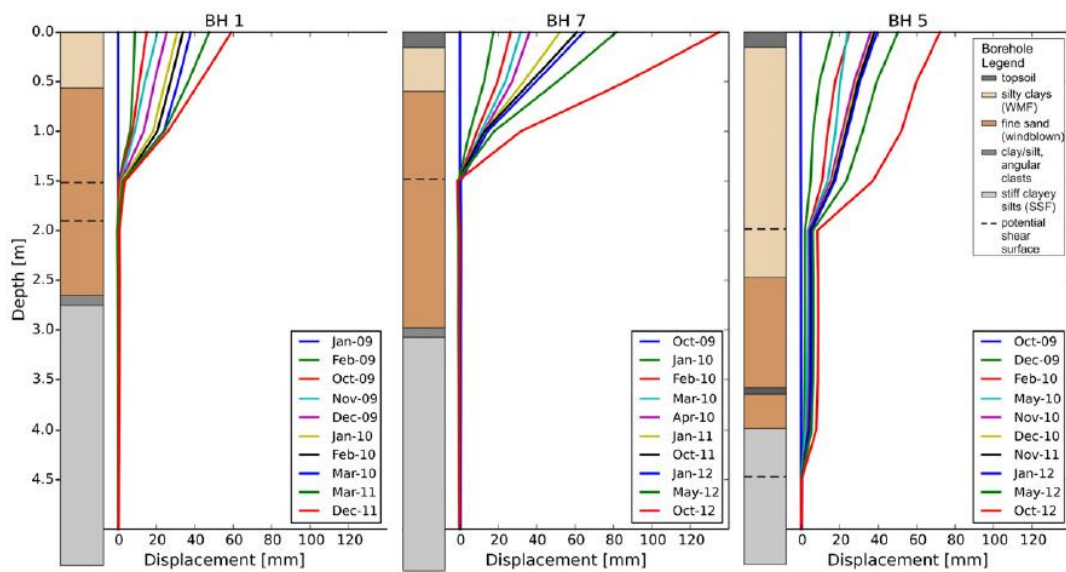


圖 2-4 傾斜儀觀測成果 (Uhlemann et al., 2016)

二、經驗法

經驗法常透過適當的假設來簡化複雜的物理方程式，基於此優點下，使用者較易直接使用現地調查獲得的資料來推估滑動面的位置，但缺點的上，通常需要透過大量資料驗證假設是否恰當。

以靜力平衡機制來發展的邊坡穩定方程式部分，前人常以切片法分析滑動面，如 Bishop 法、Janbu 法及 Spencer 法等，透過對各切片進行力平衡與力矩平衡來分析滑動面位置。為簡化切片法的計算需求，前人研究基於不同假設條件下提出不同的經驗法。其中，圓形常被用於滑動面剖面的假設，Skempton and Hutchinson (1969)提出在旋轉型滑動(rotational slide)的案例， D_r/L_r (邊坡最大垂直深度/滑動長度)介於 0.15~0.33 之間。另外，Chen (1975)提出在均質材料的情境下，假設滑動面剖面為對數螺線的經驗式，如式 二-1 所示。

$$r(\theta) = r_0 e^{\theta \tan \varphi} \quad \text{式 二-1}$$

其中， $r(\theta)$ 為距離坡頂角度 θ 的滑動面半徑，該半徑等於 r_0 ， φ 為沿著滑動面的內摩擦角，如所示。Ning Lu (2012)提出一種基於庫倫應力和由降雨滲透導致的應力狀態向失敗方向的轉變概念來量化安全係數(FS)的方法。邊坡內的每一點的 FS 稱為局部安全係數 (F_{LFS})，定義為在當前應力狀態下的庫倫應力與在 Mohr-Coulomb 破壞準則下潛在破壞狀態的應力比，如式 二-2 所示。

$$F_{LFS} = \frac{\tau^*}{\tau} = \frac{2 \cos \varphi'}{\sigma'_1 - \sigma'_3} \left[c' + \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \tan \varphi' \right] \quad \text{式 二-2}$$

其中， σ'_1 和 σ'_3 代表最大主應力與最小主應力， c' 和 φ' 代表有效凝聚力與有效摩擦角。此方法可以有效改善極限平衡法的限制，較為完整地推估潛在滑動面的位置。

前人亦有以不同物理機制為基礎，經假設條件來得到用於推估滑動面位置的經驗式。Carter and Bentley (1985)假設地層中僅存在單一潛在滑動面、滑動體將作為剛體移動，且地表位移與潛在滑動面平行，並透過監測點的地表位移推估潛在滑動面的位置，如所示，其預測結果可將誤差控制在 2% 以內。Booth et al. (2013) 納入流變學的觀點，假設邊坡滑動的材料為流體，以此推估潛在滑動面的深度，並獲得良好的預測結果。Wang et al. (2013)利用克利金插值法，結合鑽孔資料來推估潛在滑動面。Jaboyedoff et al. (2015)採用曲線擬合法(Spline method)，根據邊坡不穩定區域的剖面與兩端點的坡度來推估滑動面的位置，並與 DUTI (1986)根據鑽孔資料判釋所得出的滑動面位置進行比較，如所示，發現具有良好的一致性。Jaboyedoff et al. (2019)透過 SLBL 法(slope local base level)結合日本塔拉斯颱風前後的數值高程模型(DEM)來推估潛在滑動面位置，獲得不錯的預測結果。綜上所述，經驗法在適當的假設下，僅需要少數的關鍵參數即可應用並快速評估滑動面，獲得滑動面的相關資訊，然而，經驗法大多只適用於較

理想化的情境，對於較複雜的土層或幾何狀況可能無法適用，需進一步探討在不同情境下的適用性。

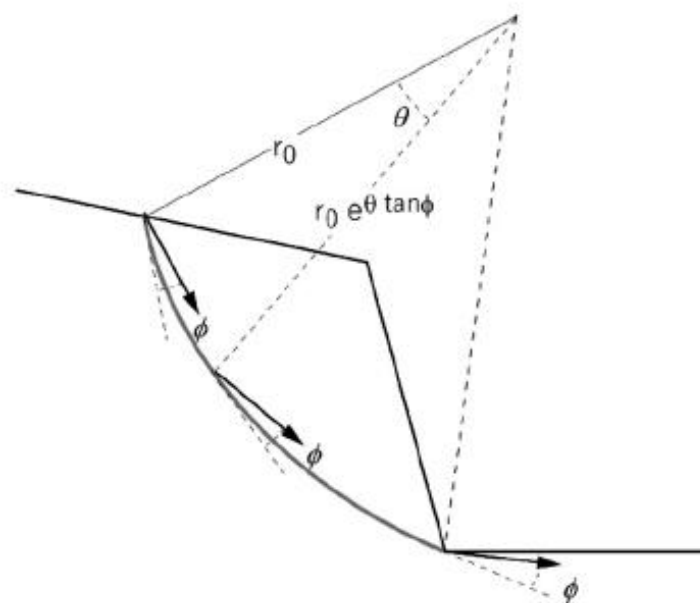


圖 2-5 對數螺線滑動面示意圖 (Jaboyedoff et al., 2016)

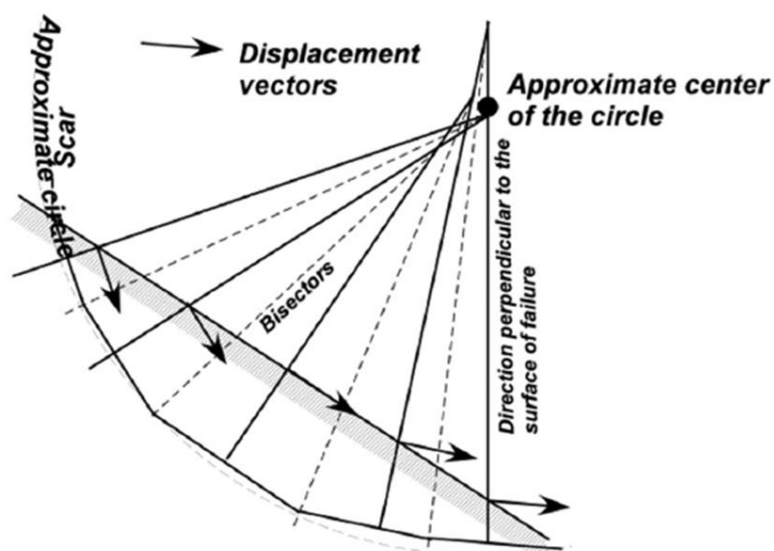


圖 2-6 以地表位移推估潛在滑動面示意圖 (Carter and Bentley, 1985)

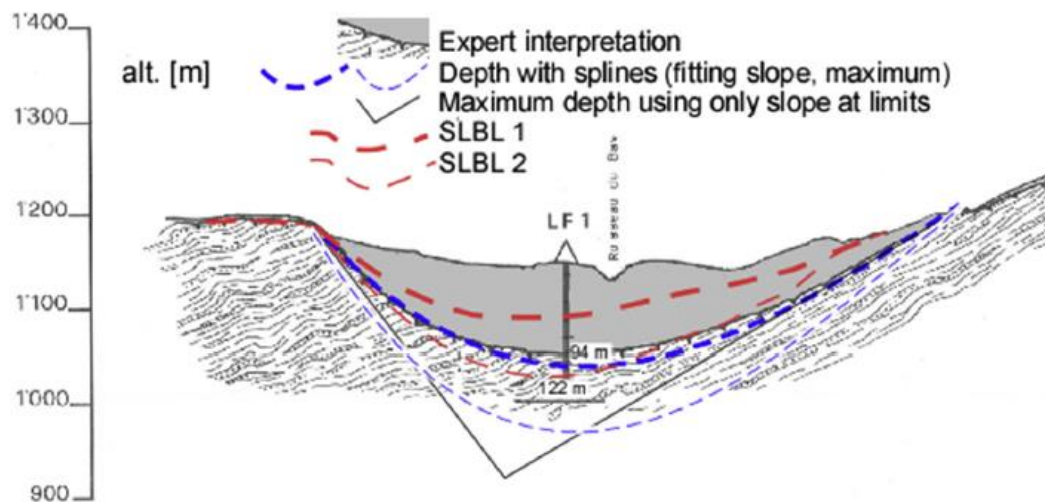


圖 2- 7 以曲線擬合法推估潛在滑動面 (Jaboyedoff et al., 2020)

三、數值分析

數值分析方法，不同於經驗法僅能適用於簡化情境的缺點，其方法能夠模擬更為複雜的土層及幾何情境。若能與現地調查結果搭配，即可用來推估缺乏調查資料地區的可能結果。然而，數值分析方法種類繁多，包括極限平衡法（Limit Equilibrium Method, LEM）、有限元素法（Finite Element Method, FEM）、離散元素法（Discrete Element Method, DEM）以及材料質點法（Material Point Method, MPM）等，需考量不同方法各自的優缺點，依照模擬的情境選擇適用的數值分析方法。

極限平衡法常用於初步評估邊坡穩定性，通常假設滑動面為弧形或楔型，評估邊坡上的塊體受到的剪應力是否超過抗剪強度，透過此

方法可以獲得邊坡的安全係數(factor of safety, FS)，即抗剪強度與剪應力的比值，如式 二-3 所示

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_D} \quad \text{式 二-3}$$

其中， τ_R 為抗剪強度， τ_D 為剪應力。此外，可以透過安全係數判斷潛在滑動面位置。而前人常用切片法來進行分析，係將邊坡土體切成數個片狀塊體，如所示，並計算片狀塊體與滑動面交界上的剪應力與抗剪強度，如所示。其中又可以根據是否將不同作用力納入計算而細分成數種切片法，如 Fellenius 法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法等。為不同切片法的示意圖。Fellenius (1927)假設滑動面為圓弧形，僅考慮力矩平衡，此方法又稱為普通切片法(Ordinary method of slice)，由於此方法的過度簡化，準確度相對其他方法較低。Bishop (1955)則在普通切片法的基礎上，將側向的作用力平衡納入計算，忽略切片間的剪力，此方法改善了普通切片法在孔隙水壓較高的情境下進行有效應力分析，準確度會出現明顯下降的問題。Janbu (1954)僅考慮水平向的力平衡，取代普通切片法的力矩平衡，且忽略切片間的剪力。Morgenstern and Price (1965)整合上述學者提出的切片法，將切片間的正向力與剪力納入力平衡與力矩平衡的計算中，進一步提升準確度。雖然極限平衡法使用上相對簡易，可快速判斷邊坡是否穩定，但無法提供破壞機制及破壞後行為的解釋。

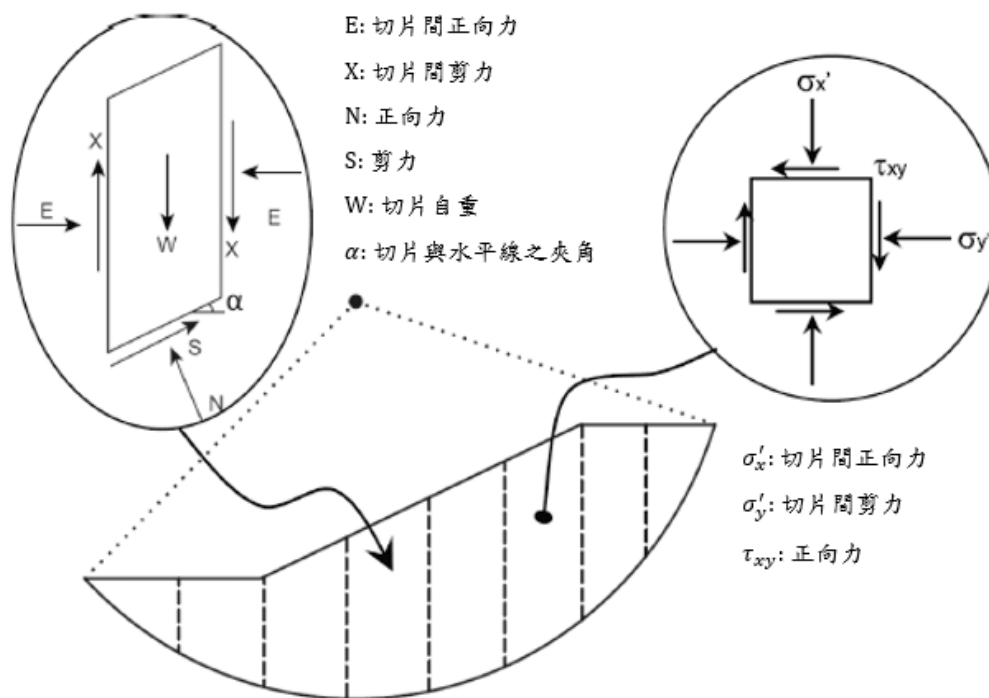


圖 2-8 切片法示意圖 (修改自 Ning Lu, 2012)

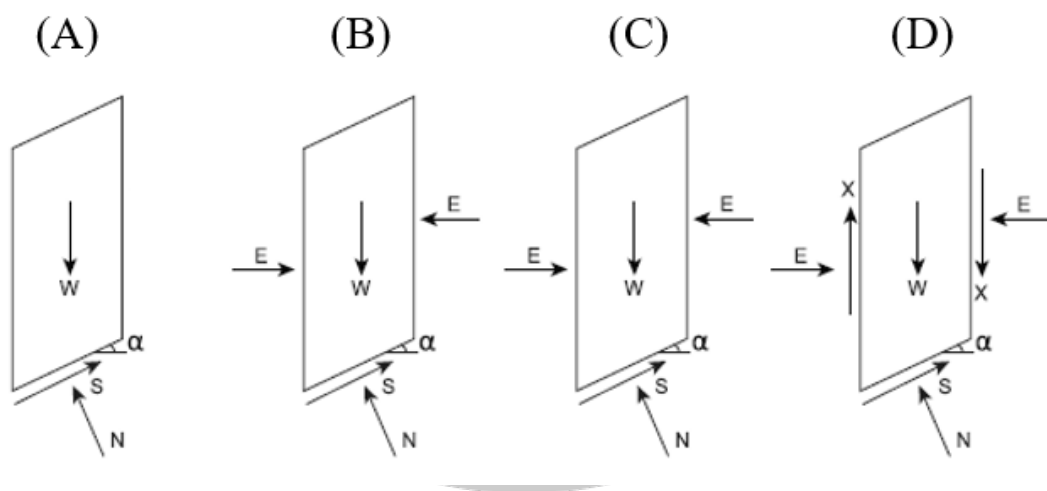


圖 2-9(A) Fellenius 切片法，(B) Bishop 簡易切片法，(C) Janbu 簡易切片法，(D) Morgenstern-Price 切片法 (修改自 Ning Lu, 2012)

有限元素法通過將一個大的系統或者連續體分割成數量有限、形狀簡單的子區域（稱為元素），在每個元素中，原問題的解會被假設為簡單函數的形式。換句話說，有限元素法是一種求解微分方程組或積分方程組數值解的數值方法。有限元素法可根據不同材料特性選用相應的土壤模型，適用於各種幾何形狀的模型，可以深入探討邊坡的力學與變形行為，如 Khan et al. (2017) 以 PLAXIS 2D 探討高塑性黏土邊坡的破壞機制，發現降雨以及土壤熱漲冷縮，使得邊坡強度下降進而導致破壞，如所示。然而，在有限元素法在模擬邊坡破壞時，網格變形過大會導致計算無法收斂，因此其僅適用於分析邊坡破壞的小變形階段。



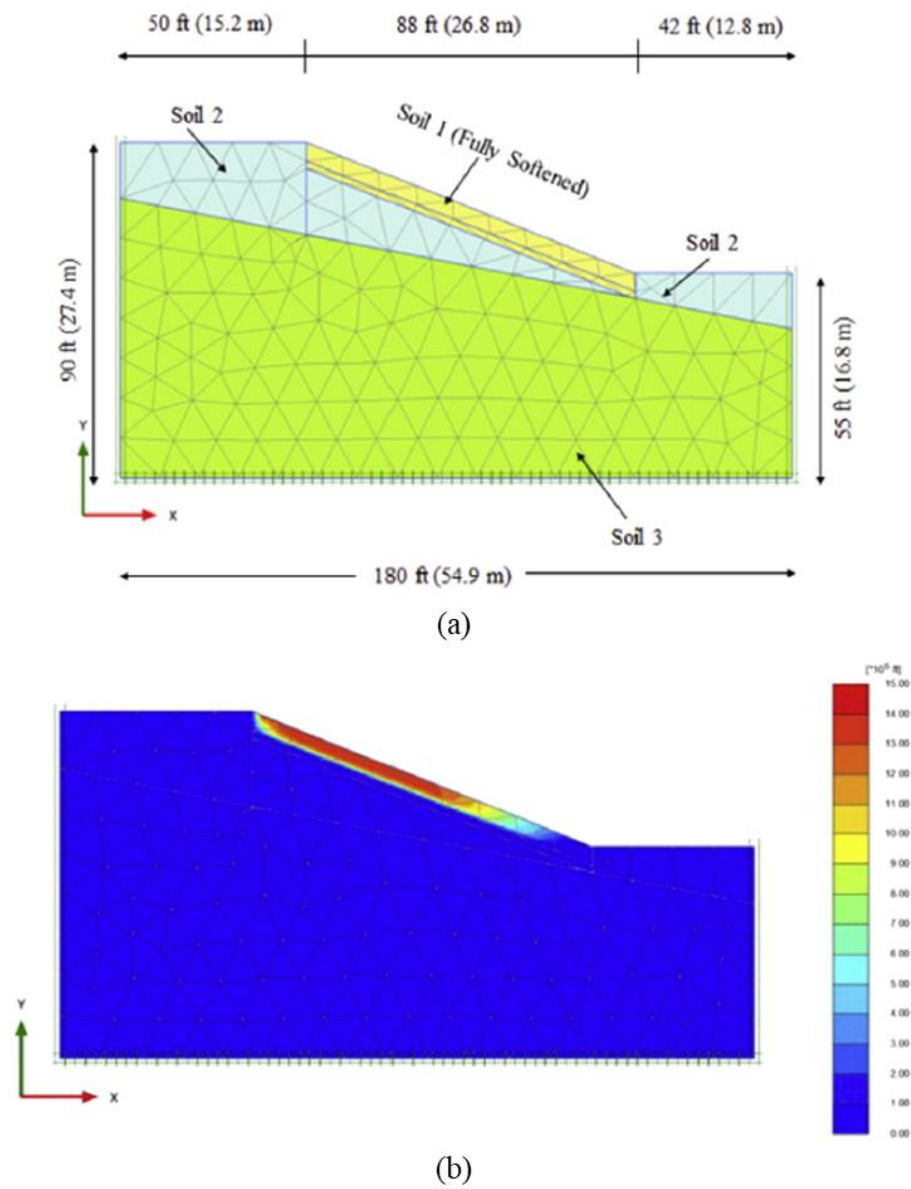


圖 2-10 邊坡模型與穩定性分析結果 (Khan et al., 2017)

離散元素法為基於顆粒擬態法(Particle-Based Methods, PBMs)發展出的數值分析方法，由 Cundall 於 1979 年提出，用以分析岩石和其他顆粒性材料的相互作用和運動。其原理為將材料轉換成大量的小型顆粒。每個顆粒都被視為一個獨立的元素，以牛頓運動定律與虎克定律計算元素間的相互作用，以元素的微觀特性模擬材料的巨觀物理性質，可用於探討大地工程議題，如大規模崩塌、土石流，隧道岩盤穩定性分析等。常見軟體有 PFC3D、3DEC 與 UDEC 等，常用於分析岩石力學相關的工程議題，如 Tian et al. (2021)以 PFC3D 建立水平層狀軟弱岩體模型，透過分析在地震時的動態穩定性與破壞模式，如所示，探討其破壞機制。其優點在於可以準確模擬顆粒間的相互作用與複雜的動態過程，然而，離散元素法對初始條件的設定非常敏感，且難以應用於多尺度模擬，增加了使用上的難度。

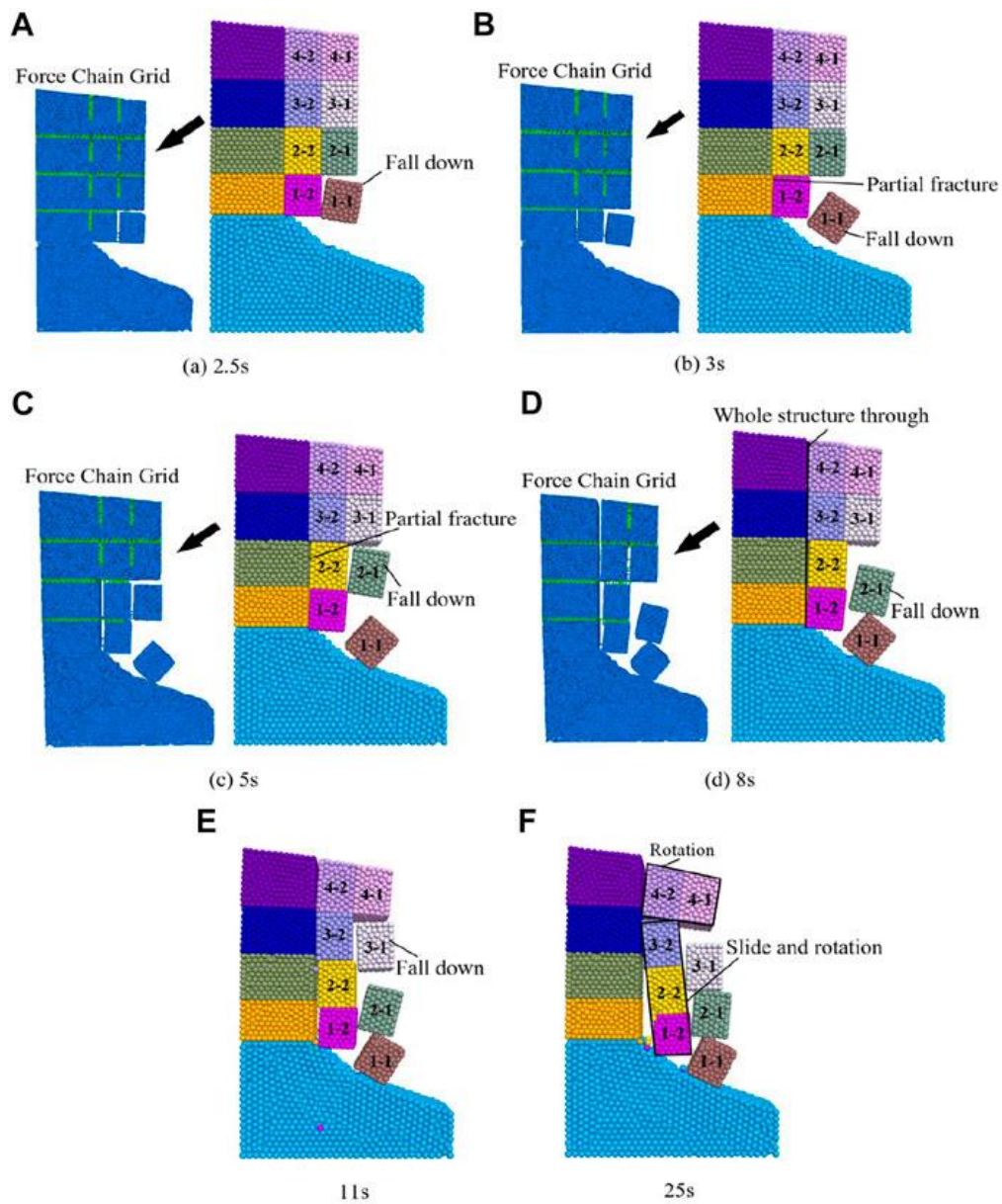


圖 2-11 軟弱岩層破壞過程 (Tian et al., 2021)

近年來，材料質點法被廣泛應用於模擬大變形問題，結合尤拉法與拉格朗日法的特性，以材料點(MPs)組成材料，以牛頓運動定律計算其運動行為，使材料點於網格中移動，實現在網格不變形的情況下模擬大變形問題，適用於模擬邊坡崩塌、土石流等災害現象，但相對地需要較長的計算時間，針對材料質點法的詳細介紹，可參閱 3-2 節的邊坡滑動數值模擬方法。

上述數值分析方法之優缺點彙整如所示。數值分析方法能夠模擬較為複雜的情境，提供完整的資料，如潛在滑動面的形成。然而，數值分析的結果仍需要實際案例佐證，以確保其可信度。經過驗證後，可以利用數值分析方法探討不同變因的影響。

為本節滑動面推估方法整理。現地調查可最為精確地確定潛在滑動面的位置，但需耗費較多時間與成本；經驗法雖能快速推估滑動面位置，但由於過度簡化的特性，需結合實際案例探討其適用性；數值模擬相較於現地調查，花費較少時間即可獲得滑動面資訊，但模擬結果仍需透過實際案例驗證其正確性。

表 2-1 數值分析方法比較表

數值分析方法	優點	缺點	軟體名稱
極限平衡法	快速判斷邊坡是否穩定	無法解釋邊坡破壞機制 與破壞後的行為	SLOPE/W
有限元素法	可模擬邊坡內部的力學 與變形行為	無法模擬邊坡破壞後的 行為	PLAXIS
離散元素法	可模擬邊坡的破壞機制 與破壞後行為	對於初始參數較為敏感	PFC3D
材料質點法	可模擬邊坡的破壞機制 與破壞後行為	計算所需時間較長	Anura3D

表 2-2 滑動面推估方法比較表

推估方法	特性	優點	缺點
現場調查	利用實際監測資料準確判斷滑動面位置	準確判斷滑動面位置	耗時長且昂貴 需依場址狀況判斷是否可行
經驗法	透過簡易計算快速推估滑動面位置	僅需要少量參數 時間成本低	僅適用單一情境 需大量資料驗證其準確性
數值分析	以材料特性模擬其行為並探討滑動面位置	根據材料特性模擬其變形行為 可模擬較複雜的情境 時間成本相對於現地調查低	需要較詳細的參數 需考量情境決定分析方法 需要實際案例驗證模擬的合理性
向量傾角法 (Carter 法)	透過地表位移資訊推估滑動面位置	僅需要地表位移資訊 時間成本低	無法得知滑動面的起始點與終點 適用情境需進一步探討
Booth 法	透過地表位移資訊推估滑動面深度	僅需要地表位移資訊 時間成本低	需有明顯位移才能獲得較佳結果

第二節 應用材料質點法之案例

近年來，材料質點法已被廣泛應用於邊坡滑動案例分析，因其在模擬邊坡大變形行為方面上，得以克服傳統有限元素面臨到的網格過度變形問題，此特點成為材料質點法的優勢。本節將介紹國內外學者使用材料質點法進行的邊坡滑動案例分析，並彙整探討其研究成果及應用成效。

一、研究案例-臺灣光華崩塌地

光華崩塌地位於桃園市復興區華陵里，地形西高東低，按照坡度可將其分為上下邊坡，上邊坡坡度約 20 ~ 30 度，相對較緩，下邊坡坡度約 30 ~ 55 度，相對較陡，坡趾前緣是地勢較低的谷地，呈束口狀地形，如所示。自 2001 年起，該區域開始出現崩塌地地形特徵，包括頭部崩崖及兩側蝕溝發育，到了 2021 年，主要滑動區出現顯著下移的現象，造成位於崩塌地頭部之農路中斷，並影響崩塌地下方道路交通安全。光華地區主要出露地層為巴陵層(PI)，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。

透過地質調查結果研判光華地區崩塌機制包含：岩屑層內滑動、岩屑層與岩層交界面滑動及岩層破碎夾泥處滑動。由地質鑽探結果得

知，該地區具有層厚不一的岩屑層，厚度約 15 ~ 40 m 不等，根據傾斜管監測結果顯示，岩屑層內的滑動深度約位於地表下 5 ~ 27 m 處，與岩層交界處的滑動深度約位於地表下 55 m 處。而岩層破碎夾泥處的滑動，由於傾斜觀測管於地表下 5 ~ 27 m 因邊坡滑動遭剪斷，無法得知是否存在更深層滑動。

楊國鑫等人(2023)以光華崩塌地為例，利用監測資料結合材料質點法的分析結果，探討邊坡的滑動面深度，並以此預測邊坡的後續運動趨勢。由於該崩塌地複雜的滑動機制與深層滑動面的不確定性，該研究採用材料質點法進行水力耦合分析(couple hydro-mechanical)模擬光華崩塌地案例。邊坡幾何模型以二維平面應變狀態建立，選擇現地滑動塊體主要變形方向作為分析剖面，如所示。採用三角網格形式，並於土壤材料的網格內配置 3 個材料點岩屑層與破碎岩層考慮孔隙水壓對土壤或破碎岩塊的影響，以雙相單點之材料點進行分析。完整岩盤則假設不排水材料，使用單相單點之材料點。邊界條件的設定上，左右邊界設定為滾接支撐 (Roller)，下邊界設定為鉸接支撐 (Hinge)。此外，該研究假設三種破碎岩層分佈模式，模式一為假設岩層皆為完整岩盤，無破碎岩層分佈；模式二為假設下邊坡於深度 30 m 內為破碎岩層；模式三為假設上邊坡岩屑層下方 30 m 內為破碎岩層，並延伸至下邊坡。

根據分析結果，比對傾斜管數據、多期數值地形模型 DEM 與地表監測變位量後發現，三種假設模式的變形樣態皆與傾斜管觀測資料相符。顯示在 DEM 比對中，模式三的分析結果顯示上邊坡區有明顯下陷，下邊坡區則有隆起的趨勢，符合 DEM 剖面顯示的地形變化。在地表監測變位量的比對中，模式三的位移趨勢與實際情形最為符合，如所示。

根據模式三的分析結果，本研究探討了光華崩塌地的崩塌機制和運動趨勢。研究發現光華崩塌地的崩塌過程可分為三個階段，首先是初期階段，分區一岩屑塊體內形成了第一道剪裂帶，岩屑材料沿著此滑動面發生位移。其次是中期階段，在破碎岩層中形成了第二道和第三道剪裂帶，推動岩屑層和破碎岩層兩個滑動塊體的運動趨勢趨於一致。最後是後期階段，整體滑動塊體受山谷地形阻擋，邊坡整體運動行為趨緩，深層滑動趨勢停止。這與現地觀察到的光華崩塌地在 2021 年下半年變形逐漸趨緩的現象相符。此外，研究指出，當地下水位高於地下 7 米時，岩屑層可能再次發生滑動。若地下水持續影響，岩屑層的位移將持續增加。

該研究證明了材料質點法能夠完整地模擬邊坡滑動現象。在邊坡災害防治中，除了進行全面的現地調查以了解邊坡變形行為外，還需要進一步結合數值模擬來研究崩壞機制和後續運動趨勢，以補充現地

調查的局限性，並根據分析結果改進整體的整治工法和防災規劃。



圖 2-12 光華崩塌地 (農水署，2021)

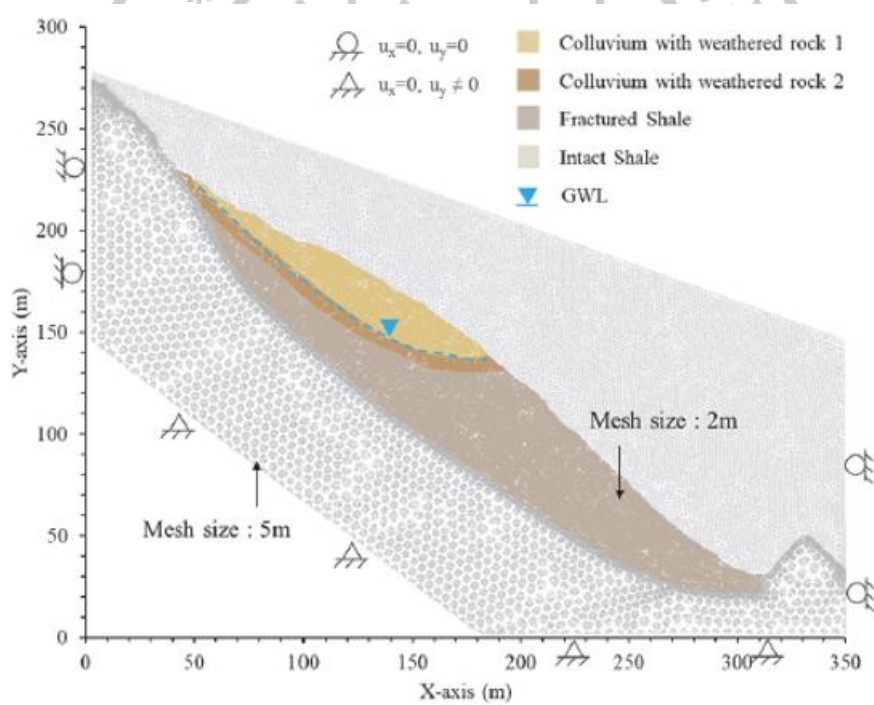


圖 2-13 光華崩塌地數值模型配置圖(模式三) (楊國鑫，2023)

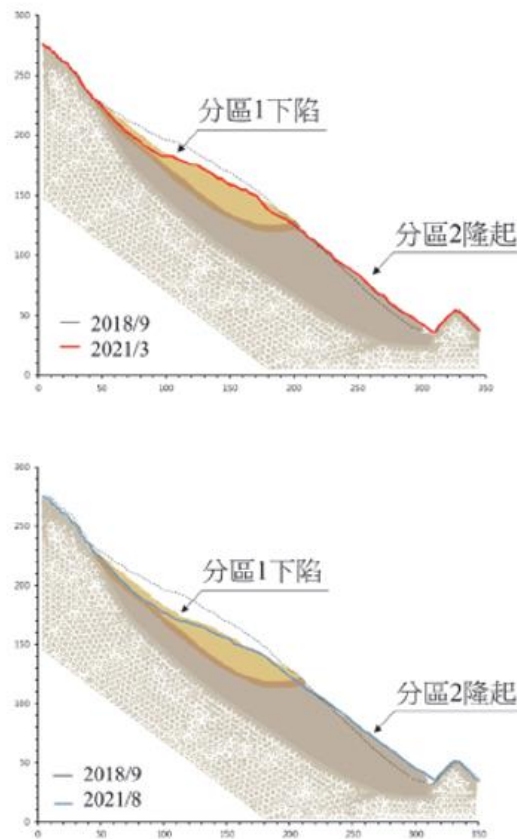


圖 2-14 不同時期 DEM 與分析結果比對(模式三) (楊國鑫，2023)

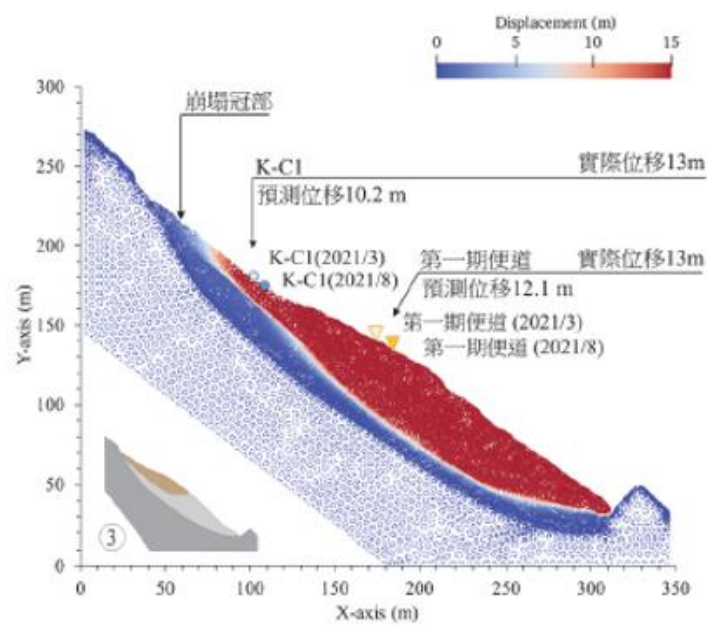


圖 2-15 地表監測點位與分析結果比對(模式三) (楊國鑫，2023)

二、研究案例-臺灣國道三號崩塌事故

2010 年 4 月 25 日，國道三號高速公路 3.1 公里處發生了一起大規模崩塌事件。大量的滑動塊體在短時間內移動，覆蓋了高速公路的所有六條車道。發生崩塌後，邊坡的最高高度下降了 15.8 公尺。岩石和土壤塊體在高速公路上堆積了約 15 ~ 20 公尺高。沿著滑動方向的地質情況分類如下，從邊坡表面到最深層：砂岩 (SS)、砂岩/頁岩互層 (SS/SH) 和頁岩層 (SH)，初步判斷滑動面位於砂岩/頁岩互層 (SS/SH) 和頁岩層 (SH) 之間。根據現地調查結果顯示，該區域的砂岩層已經風化，存在節理與垂直向裂縫，使得水通過砂頁岩互層區，隨著地下水位升高，逐漸減弱砂頁岩互層區的強度。此外，該用於穩定邊坡的大部分地錨因地下水滲漏而生鏽，將近 90% 的地錨出現破裂，亦被認為是發生崩塌的原因之一。

Yeh et al. (2021) 利用材料質點法分析國道三號大規模崩塌行為，將分析結果與崩塌發生前後的數值地形模型 (Digital terrain models, DTM) 進行比對，以驗證其適用性。根據現地調查，土層分類如所示，詳細土層參數如所示。在數值模型中，SS 與 SS/SH 兩地層採用乾土材料 (Dry material) 的莫爾庫倫模型 (M-C model)，而 SH 地層採用乾土材料的莫爾庫倫應變軟化模型 (M-C strain softening, MCSS)。數值模型

採用三角網格，並於每一網格給定一個材料點。此外，該研究考量地錨均已破壞，故模型中並無加入地錨系統，並在砂頁岩互層區透過強度折減的方式模擬地下水位逐漸升高的情形，模擬不同強度下的最大位移與滑動體堆積情形。

分析結果顯示，當凝聚力 $c = 0$ 、內摩擦角 $\varphi = 10^\circ$ 時，滑動距離與崩塌發生後的DTM最為吻合，基於這組參數配置，進一步探討大規模崩塌的運動行為。為了深入了解崩塌的動態特性，該研究透過追蹤不同分區的材料點，獲得了詳細的位移與速度歷時資料，分析材料點在滑動過程中的運動行為，如所示。此外，通過追蹤材料點的座標，該研究展示了不同分區的滑動路徑，如所示，為了解崩塌機制提供了重要資訊。

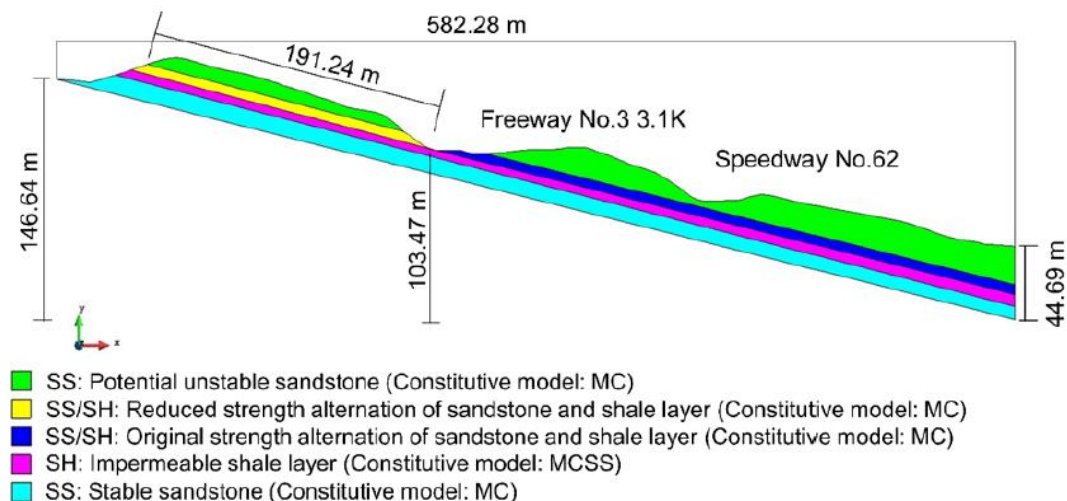


圖 2- 16 地層分類 (Yeh et al., 2021)

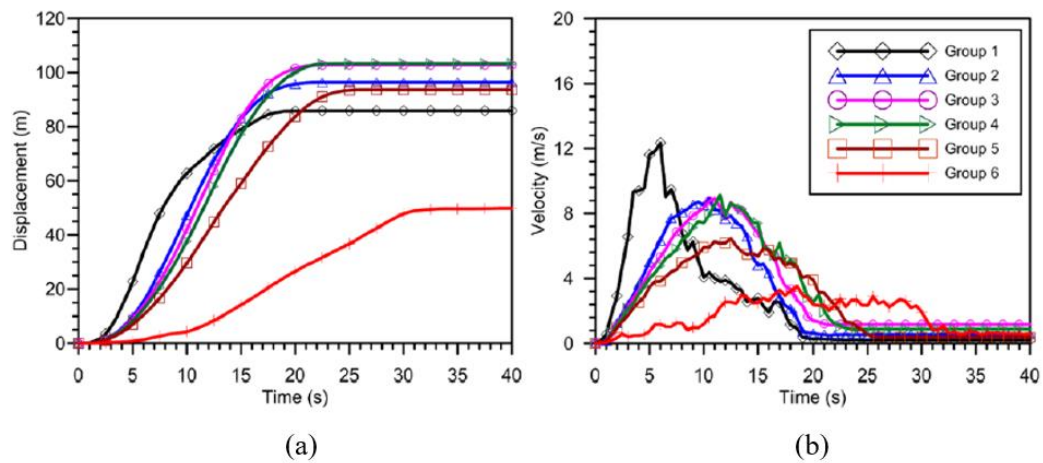


圖 2- 17 不同分區追蹤點歷時資料 (a)位移歷時圖 (b)速度歷時圖
(Yeh et al., 2021)

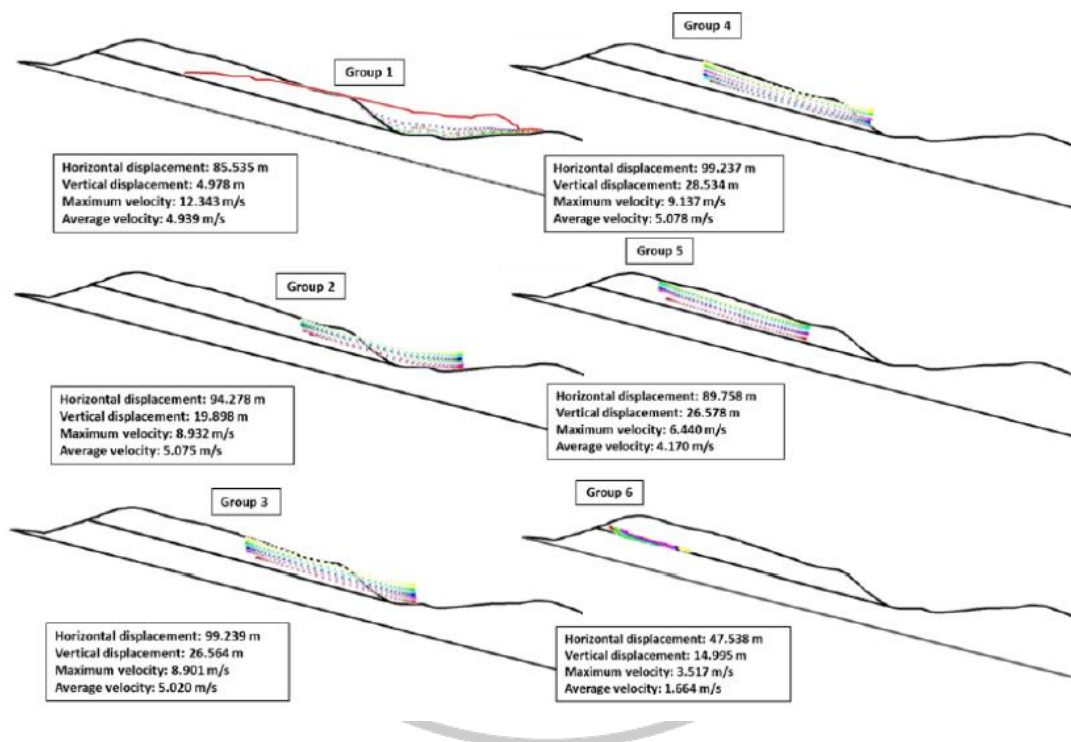


圖 2- 18 不同分區滑動路徑 (Yeh et al., 2021)

表 2- 3 材料參數表 (Yeh et al., 2021)

Layers	SS	SS/SH		SH
Constitutive model	Dry material: Mohr-Coulomb (MC)	Dry material: Mohr-Coulomb (MC)		Dry material: Mohr-Coulomb Strain Softening (MCSS)
Initial porosity	0.3	-		-
Density of solid (kg/m ³)	2600	2600		2600
Young's modulus (kPa)	4×10^6	2×10^6		2×10^6
Poisson ratio	0.25	-		-
Cohesion (kPa)	30	0	10	-
Residual cohesion (kPa)	-	-	-	-
Friction angle (°)	-	6 ~ 12	20	-
Residual friction angle (°)	-	-	-	-
Dilatancy angle (°)	-	0	0	-
Note		Reduced	Original	

三、研究案例-美國 Oso 大規模崩塌事件

Oso 大規模崩塌事件(Oso landslide)為 2014 年 3 月 22 日發生於美國華盛頓州的大規模崩塌，該事件中，大約八百萬立方公尺的冰川沉積物與土石移動超過 1 公里，造成 43 人罹難，為美國最嚴重的邊坡災害之一 (Wartman et.al., 2016)。在崩塌發生前，有一段長達 3 周的強降雨期，使得邊坡強度降低下降，整體較穩定。除此之外，該地區曾發生多次小規模的崩塌，造成邊坡趾部的破壞，且顯示具有後退式破壞行為，近期較為發生在 2006 年的崩塌事件為 Hazel 崩塌事件，該事件中的滑動體阻塞了河道，造成一定規模的災害。根據前人研究結果(Pyles et al., 2016)，發現 Oso 崩塌事件的崩塌行為分為兩個階段與三個主要滑動塊體，如所示。其中，Hazel 事件中的滑動體，包含塊體一(M1)與岩屑材料(debris)，與邊坡中部的塊體二(M2)在第一階段以土石流的型態沿著舊的滑動面快速滑動，造成嚴重的災害，第二階段，邊坡發生圓弧形破壞，塊體三(M3)沿著新的破壞面滑動，於坡中形成一個深達 90 公尺的峭壁。

Yerro et al. (2019)利用材料質點法分析 Hazel 與 Oso 大規模崩塌事件的破壞歷程，比對現地調查結果，如滑動距離與趨勢，以此驗證材料質點法的適用性。該研究以二維平面應變狀態進行分析，數值模

型如所示。網格設定採用三角網格，並於每一網格配置四個材料點，並於不同滑動塊體間給定介面附著力以控制滑動行為，如所示。由於Oso崩塌事件的崩塌速度極快，故採用不排水分析，土壤參數如所示。

不同時間的模擬結果如所示，在第一階段，M2 推動 M1 並向岩屑堆積層滑動，最大速度達 30 m/s；第二階段($t = 25$ 秒)開始，M3 轉為不穩定，並推動 M2 持續滑動，並於 80 秒時塊體停止滑動，最終計算得到的滑動距離為 1040 公尺，與現地觀測結果相近。

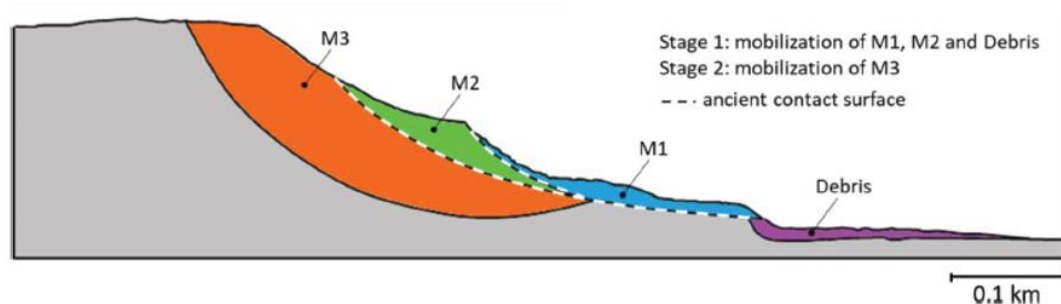


圖 2- 19 Oso 崩塌事件滑動體 (Yerro et al., 2019)

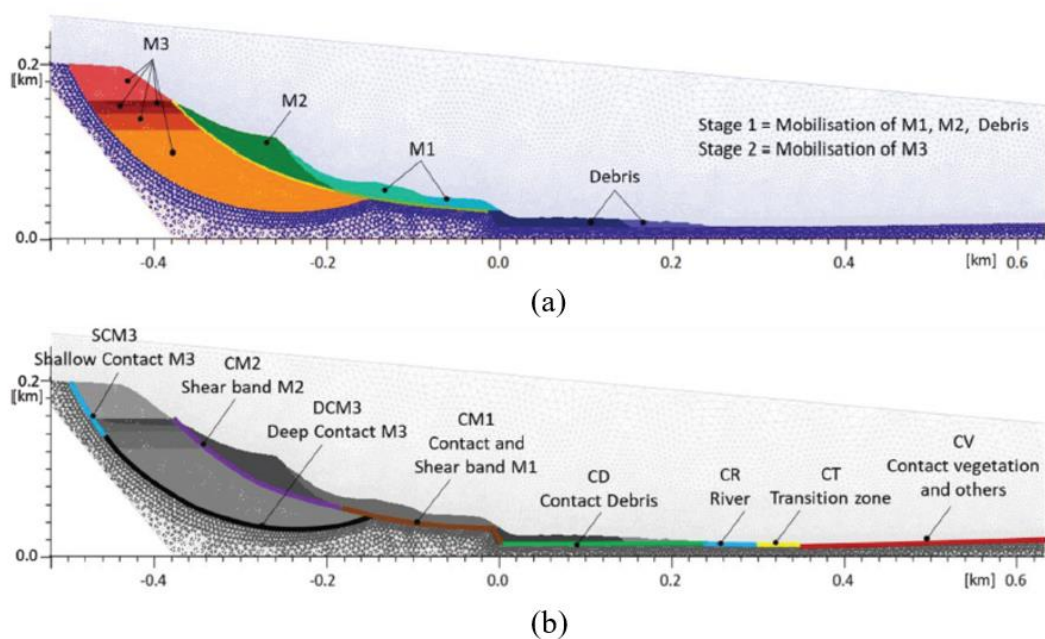


圖 2-20 數值模型配置圖(Yerro et al., 2019)

表 2-4 不同介面之附著力 (改自 Yerro et al., 2019)

	Contact adhesion or shear band strength (kPa)							
	SCM3	DCM3	CM2	CM1	CD	CR	CT	CV
Stage 1	500	500	25	25	10	0	0→10	10
Stage 2	0	150	25	25	10	0	0→10	10

表 2-5 不同滑動體之土壤參數表 (改自 Yerro et al., 2019)

	Undrained shear strength (kPa)			
	M3	M2	M1	Debris
Stage 1	500	50	50	10
Stage 2	200	50	50	10

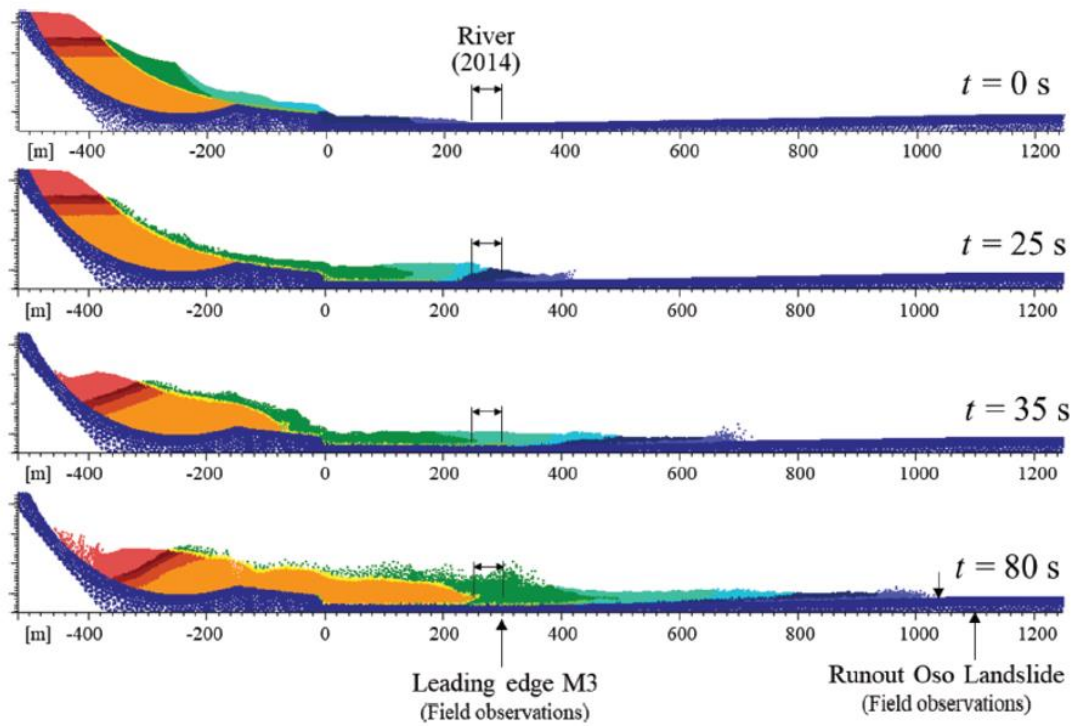


圖 2- 21 不同時間之模擬結果 (Yerro et al., 2019)



四、研究案例-義大利 Senise 大規模崩塌事件 (Senise landslide)

Senise 大規模崩塌事件為 1986 年 7 月 26 日發生於義大利南部的大規模崩塌災害，該事件的滑動體寬度約為 150 公尺，長度約為 230 公尺，滑動面最大深度達 14 公尺，根據 Hungr et al. (2014) 的研究，此崩塌事件可被歸類為極快速的平面型滑動。根據現地調查的結果，該地區的地層主要由黃色緊密砂組成，中間夾帶數層平行於坡面的黏土質粉砂，如所示，土層與水平面夾角約為 18 度。土層的強度參數則是由試驗得到，根據 Troncone (2005)，砂土的最大內摩擦角為 43 度、最大凝聚力為 37 kPa，黏土質粉砂的最大內摩擦角為 30 度、最大凝聚力為 15 kPa。此外，兩土層皆會出現明顯的應變軟化行為(strain-softening behavior)。根據傾斜計與開挖溝渠，發現最深滑動面位於邊坡中部地下 14 公尺深的位置，第二滑動面則位於平均深度約 10.5 公尺的位置，皆位於黏土質粉砂的位置。

Troncone (2005)與 Troncone et al. (2014)已針對破壞前(Pre-failure)階段與破壞(failure)階段進行完整的分析，判斷位於邊坡中部的開挖作業導致該事件的發生，在開挖作業期間，剪裂帶逐漸往上方與側向延伸，最終引發邊坡全面崩塌。由於數值分析方法的限制，針對破壞後(Post-failure)階段研究尚無人進行研究，而 Conte et al. (2019)應用材

料質點法針對此事件進行探討，採用二維平面應變進行分析，數值模型如所示，採用三角網格，並於每一網格配置四個材料點，此外，將邊坡中部的兩棟建築物納入數值模擬的考量，以符合現地情境，土壤與建築物參數則參考前人研究，如、所示。

分析結果顯示，邊坡滑動的模擬結果與實際地形非常吻合，其中，滑動距離、滑動區與堆積區與現地調查結果幾乎重合，最大誤差約 2 公尺。從可以得知 Senise 崩塌事件的演變過程，此事件為平面型滑動，滑動體沿著位於不同深度的兩個黏土質粉砂層移動，由(c)可看出，沿著上滑動面的滑動體先撞擊上方擋土牆與建築物，使其完全倒塌，接著撞擊下方擋土牆與建築物，並將其覆蓋，與實際結果相符。展示了不同高度追蹤點的位移與速度歷時圖，整體趨勢與破壞後階段一致。位移隨崩塌發生而增加，邊坡穩定後則持平，速度隨崩塌發生而出現加速，達最大速度後逐漸下降，直至邊坡穩定，從開始滑動到停止的時間約 9 秒，與崩塌發生時間一致。

該研究考量傾斜管之監測結果，建立存在兩個滑動面的數值模型進行分析，分析結果亦說明了上方滑動面對崩塌的行為與建築物倒塌造成決定性的影響。該研究補足了對崩塌發生後之運動行為的研究，準確的模擬實際發生的崩塌過程，讓針對此事件的研究更加完整。

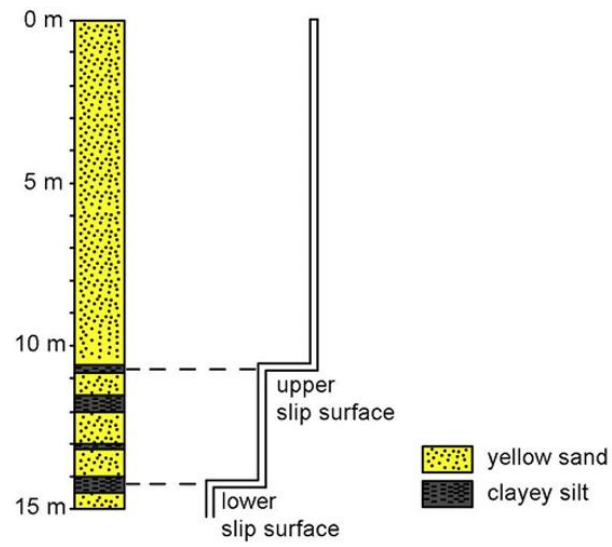


圖 2- 22 土層分布 (Conte et al., 2019)

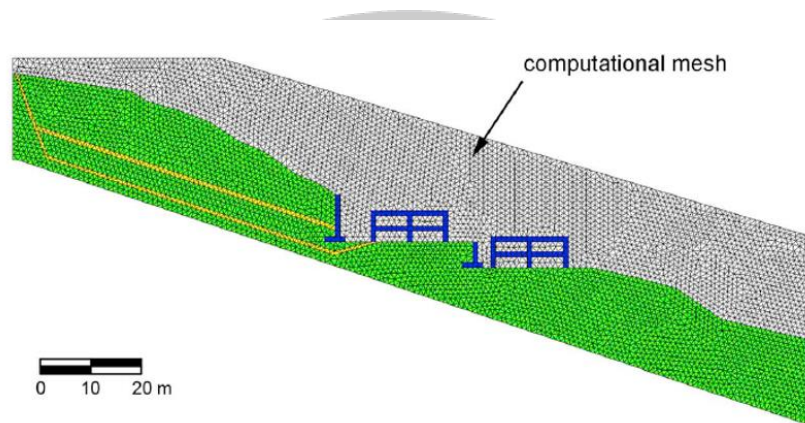


圖 2- 23 數值模型 (Conte et al., 2019)

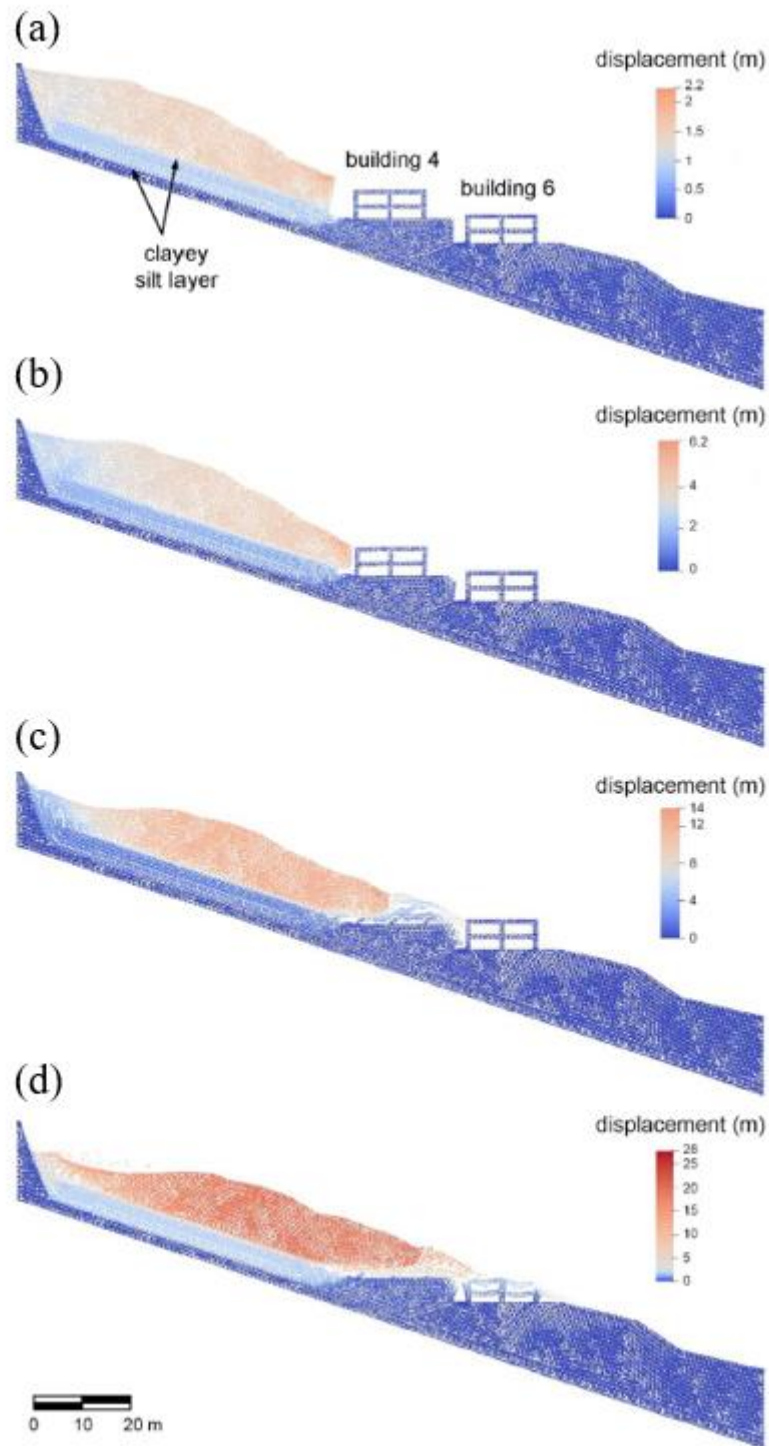


圖 2- 24 Senise landslide 演變過程(a) $t = 1.5 \text{ sec}$ (b) $t = 2.5 \text{ sec}$
(c) $t = 5 \text{ sec}$ (d) $t = 12 \text{ sec}$ (Conte et al., 2019)

表 2- 6 建築物參數表 (Conte et al., 2019)

γ_c (kN/m ³)	c_c (kPa)	φ_c (°)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	ν_c
24	513	35	750	27,264	0.20

表 2- 7 土壤參數表 (Conte et al., 2019)

Material	Yellow sand	Clayey silt
γ (kN/m ³)	20	20
c'_p (kPa)	37	15
φ'_p (°)	43	30
c'_r (kPa)	0	0
φ'_r (°)	34	10.5
ψ (°)	0	0
E' (MPa)	70	25
ν'	0.25	0.25

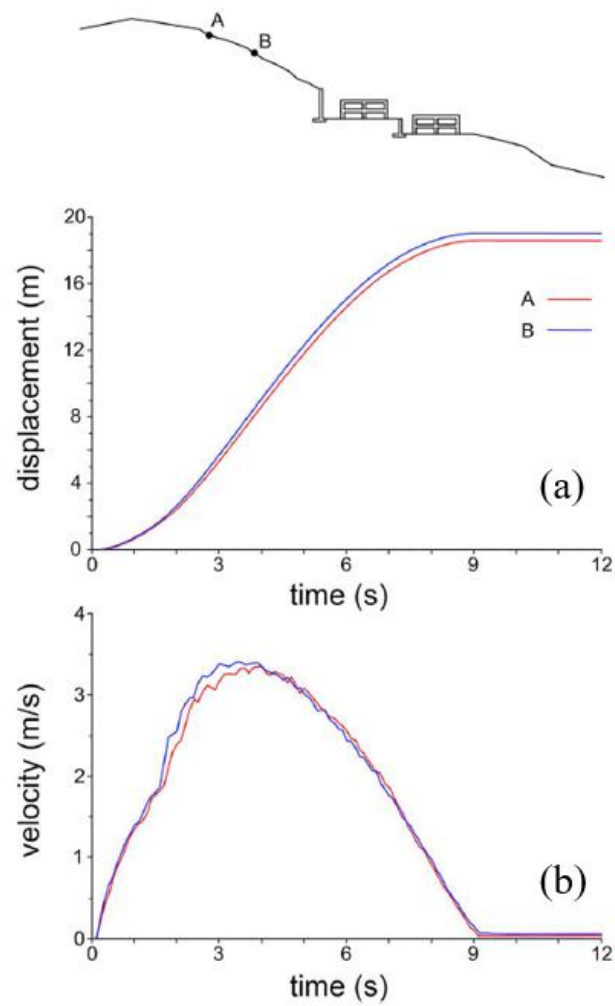


圖 2-25 追蹤點歷時圖 (a) 位移歷時圖 (b) 速度歷時圖
(Conte et al., 2019)

第三節 自動化數據處理方法回顧

本研究有大量數據處理的需求，須將數值分析輸出的追蹤點資料轉換成向量傾角法所需的輸入資料，經過計算獲得崩塌過程中向量傾角法推估出的滑動面，並評估其與數值模擬之滑動面的相關性。然而，數值分析輸出的資料龐大，以人工方式進行向量傾角法的適用性探討相當耗時且存在人為誤差風險，故本研究選用 Python 程式語言進行大量資料處理，透過數據自動化處理，可以快速進行資料比對，評估其相關性，探討向量傾角法的適用性。本節將針對 Python 程式語言與其中的常用套件進行介紹。

一、Python 簡介

Python 是一種廣泛使用的程式設計語言，常用於軟體開發、資料分析、科學計算等各個領域。在軟體開發領域，Python 用於建立多種應用，包括但不限於網站、桌面應用和遊戲開發。其豐富的標準庫和模組化設計，可以快速開發各種軟體。在資料分析領域，Python 提供了如 Pandas 和 NumPy 等強大的套件，這些套件提供了高效的資料結構和數據處理工具，大大簡化了數據操作和分析過程。例如，Pandas 提供了 DataFrame 和 Series 數據結構，支援數據的快速讀取、整理和過濾等操作。科學計算是 Python 的另一強項，它支援各種高級計算

和技術模擬。Python 的 Matplotlib 和 Plotly 等套件允許使用者進行複雜的數據可視化，而 SymPy 和 SciPy 等套件則支持符號計算和科學計算的需求。此外，OpenCV 這類套件提供了先進的影像處理功能，廣泛應用於計算機視覺研究和實際應用中。Python 相對簡單直觀，類似英語的基本語法，易於學習和使用。此外，Python 擁有靈活的數據結構，如列表 (List)、元組 (Tuple)、字典 (Dict) 和集合 (Set)，這些都是處理和儲存數據的有力工具。總而言之，Python 的廣泛應用和強大功能，結合其龐大的第三方庫生態系統，使其成為廣泛應用於軟體開發和數據科學領域。

二、Python 數據處理庫

本研究常使用的套件有：os、Pandas、NumPy 和 Matplotlib，主要用於匯入資料、資料整理與數學計算、資料視覺化等方面。以下將介紹各個套件的功能與應用場景：

(一) os

os 為 Python 中內建的檔案管理套件，可以針對檔案進行呼叫、重新命名、編輯、刪除等操作，在資料管理中相當實用，常用 os 套件中常用的指令與其相關說明如所示。

表 2- 8 os 套件中常用指令 (改自 STEAM 教育學習網)

方法	參數	說明
getcwd()		取得目前程式的工作資料夾路徑
chdir()	path	改變程式的工作資料夾路徑
makedirs()	folder	建立資料夾
rmdir()	folder	刪除空資料夾
listdir()	folder	列出資料夾的內容
open()	file, mode	開啟檔案
write()	string	將內容寫入檔案
rename()	old, new	重新命名檔案
remove()	file	刪除檔案
stat()	file	取得檔案的屬性
close()	file	關閉檔案
path		取得檔案的各種屬性

(二) NumPy

NumPy是Python的一個第三方套件，開發於2005年。不僅支援大量維度的陣列與矩陣運算，也具備大量的數學與統計函式，可以很有效的進行科學運算和資料數據分析，應用範疇如所示其主要特色有：

1. 使用多維陣列(N-dimensional array object)代替 Python 內建的串列(list)，儲存同類型元素的大量數據，可提升資料運算的

速度。

2. 適合處理多維度資料
3. 可定義任意的數據型態(Data type)，使其與 Pandas、SciPy、Matplotlib 等擴充套件整合良好
4. NumPy 與 MATLAB 同樣是利用 BLAS 與 LAPACK 來提供高效率的線性代數運算。
5. 可整合 C/C++及 Fortran 的程式碼

此外，Python 的許多知名套件，如 Pandas、SciPy、SymPy、Matplotlib、TensorFlow 等，幾乎都是架構在 NumPy 基礎上做應用，因此 NumPy 是非常重要的套件。

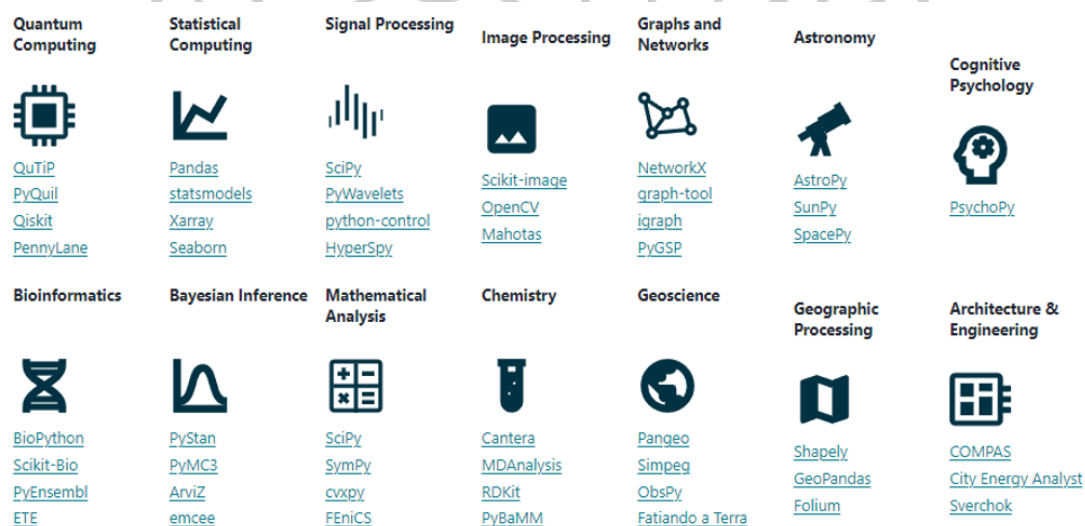


圖 2- 26 NumPy 應用範疇 (圖片來源：<https://numpy.org/>)

(三) Pandas

Pandas是Python的一個數據分析模組，2009年底開源出來，提供高效能、簡易使用的資料格式(DataFrame)讓使用者可以快速操作及分析資料，Pandas強化了資料處理的方便性也能與處理網頁資料與資料庫資料等，主要提供三種資料結構供使用：

1. DataFrame：用來處理結構化(Table like)的資料，有列索引與欄標籤的二維資料集，可以透過 Dictionary 或是 Array 來建立，也可以利用外部的資料來讀取後來建立，例如關聯式資料庫、CSV 等等。
2. Series：用來處理時間序列相關的資料(如感測器資料等)，主要為建立索引的一維陣列，不局限於 0、1、2、3 數值形式，也能增加日期、文字索引，並能透過索引方式進行資料切片，也可使用函數對值進行運算。
3. Panel：用來處理有資料及索引、列索引與欄標籤的三維資料集，相對較少使用。

(四) Matplotlib

Matplotlib是Python的一個第三方套件，是相當重要且受歡迎的資料視覺化套件，Matplotlib可以根據數據資料，繪製直方圖、元餅圖、折線圖等各種圖表，也能和其他Python的資料處理套件(NumPy、Pandas等)互相搭配，進行更複雜的視覺圖表繪製，Matplotlib支援上百種圖表類型，從簡單的2D折線圖、圓餅圖、長條圖等，甚至各種統計軟體會使用的進階圖表，例如3D直方圖、螺旋圖、雷達圖、散佈圖等，如所示。

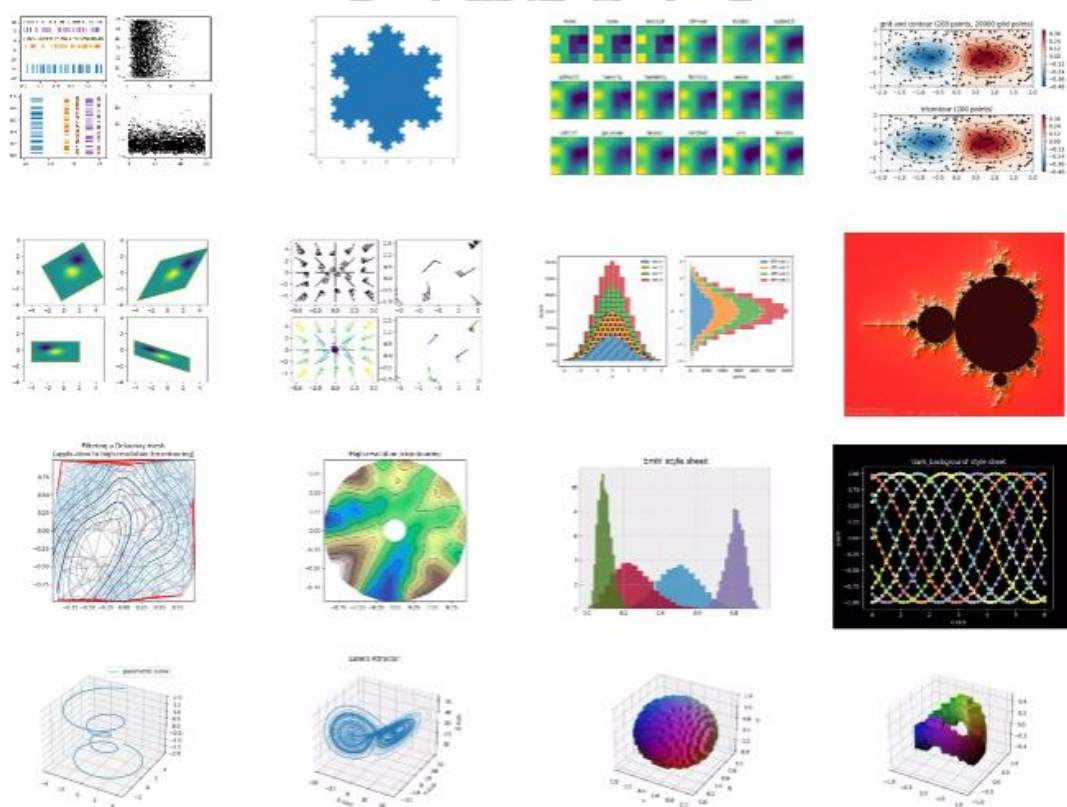


圖 2- 27 Matplotlib 支援圖表類型 (圖片來源：STEAM 教育學習網)

三、Python 優勢與劣勢

數據自動化處理在現代科學和工程領域中扮演著重要的角色，而 Python 作為一種靈活且功能豐富的程式語言，已被廣泛應用於數據處理和分析中。Python 擁有豐富的第三方套件，如 NumPy、Pandas，這些套件提供了強大的數據結構和高效的數據操作功能，使得數據自動化處理變得更加容易和高效，且 Python 簡潔易讀的特性，使得使用者可以更快速地進行開發和維護。此外，Python 支持多種操作系統，可以在不同平台上運行，使得數據處理應用更具靈活性和通用性。

然而，Python 在處理大規模數據時性能可能不如 C++ 或 Java 等語言。首先，Python 在進行運算時，僅能利用單個線程，無法同時運行多個線程。其次，Python 的動態類型特性意味著程式需要為每個變數保留足夠的空間，導致須動用大量記憶體與計算時間，因此，在處理大型數據集或需要高效運算的場景中，Python 的性能和效率可能受到限制。

儘管如此，Python 仍然是一種廣泛使用且受歡迎的程式語言，特別是在快速原型開發、數據探索和小規模應用方面。對於需要高效率和高性能的應用場景，可以通過優化代碼、使用特定的套件等方法來提高 Python 的處理效能。

第四節 一致性評估方法回顧

本研究透過數值模擬與向量傾角法獲得兩個不同的滑動面。為了比對不同滑動面的相關性，需要引入一個參數來量化向量傾角法的推估準確度，此參數與相關係數 (correlation coefficient) 的概念相符。相關係數在統計學上用於評估兩個變數之間的關聯程度，然而，不同方法用於評估變數之間相關性的參數也不同，故本節將介紹不同評估數據相關性的方法。

一、Pearson product-moment correlation coefficient (PPMCC)

由 Karl Pearson 提出，又稱皮爾森相關係數，用於度量兩組數據的變量 X 和 Y 之線的線性相關的程度。其概念為兩個變量的共變異數(Covariance)與其標準差(Standard deviation)的乘積比，如式 二-4 所示。本質上為共變異數的正規化，因此其值域與共變異數相同，介於 -1 ~ 1 之間。

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad \text{式 二-4}$$

Song et al. (2018) 為了探討中國三峽大壩在雨季與抽水期間發生的水位波動對於邊坡穩定性之影響，透過長期監測以調查邊坡變形行為，發現邊坡累計位移呈階梯狀增加，且位移急速增加皆於雨季與水庫抽水期發生，如所示。為了確認誘發位移增加的主因，該研究應用

皮爾森相關係數的概念，分別針對移動速度與水位變化速度及降水量的相關性進行探討，發現水庫水位下降與累計位移呈正相關，確認其為累計位移急速增加的主因。

Hong et al. (2020) 設計兩種人工智慧模型，名為 LADT-Bagging 與 FPA-Bagging，用於探討中國重慶市油坊溝區的邊坡發生崩塌的機率。為了訓練模型，該研究蒐集該區域的地理資料，並給定 14 個影響因子。為確認影響因子是否具有多重共線性(Multicollinearity)，避免影響後續分析的準確性，該研究應用皮爾森相關係數，檢驗影響因子間的相關性，發現最大值約為 0.69，小於 0.7(一般認為高於 0.7 即為高度相關)，證明影響因子間並沒有高度相關性。

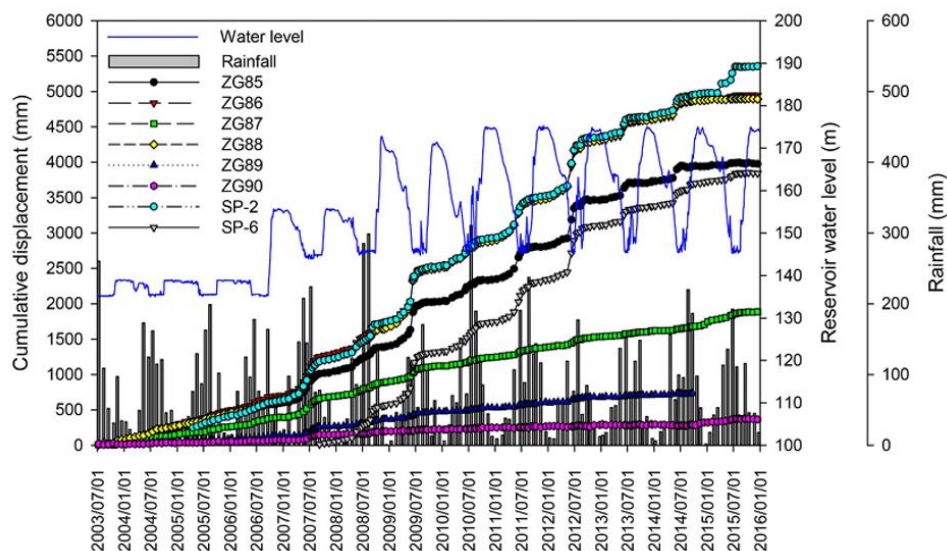


圖 2- 28 邊坡累計位移與水庫水位及雨量變化關係圖

(Song et al., 2018)

二、Concordance Correlation Coefficient (CCC)

CCC 是由 Lawrence Lin 於 1989 年提出，是一種基於皮爾遜相關係數的一致性評估方法，同時考慮數據的平均值、方差和斜方差，計算公式如式 二-5 所示。

$$\rho_c = \frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\mu_x - \mu_y)^2} \quad \text{式 二-5}$$

其中， μ 為平均數， σ 為變異數， ρ 為皮爾森相關係數，表示兩組數據間線性相關的程度。此方法不僅評估數據間的相關性（線性關係的強度），還考慮了數據點是否靠近 45 度角的斜直線，從而提供了數據一致性的全面評估，如所示。然而，此方法對於離群值較為敏感，在評估一致性時需針對離群值做適當處理。本研究採用此相關係數評估向量傾角法推估的滑動面與數值模擬得出的滑動面之間的一致性，從而量化向量傾角法的準確度。

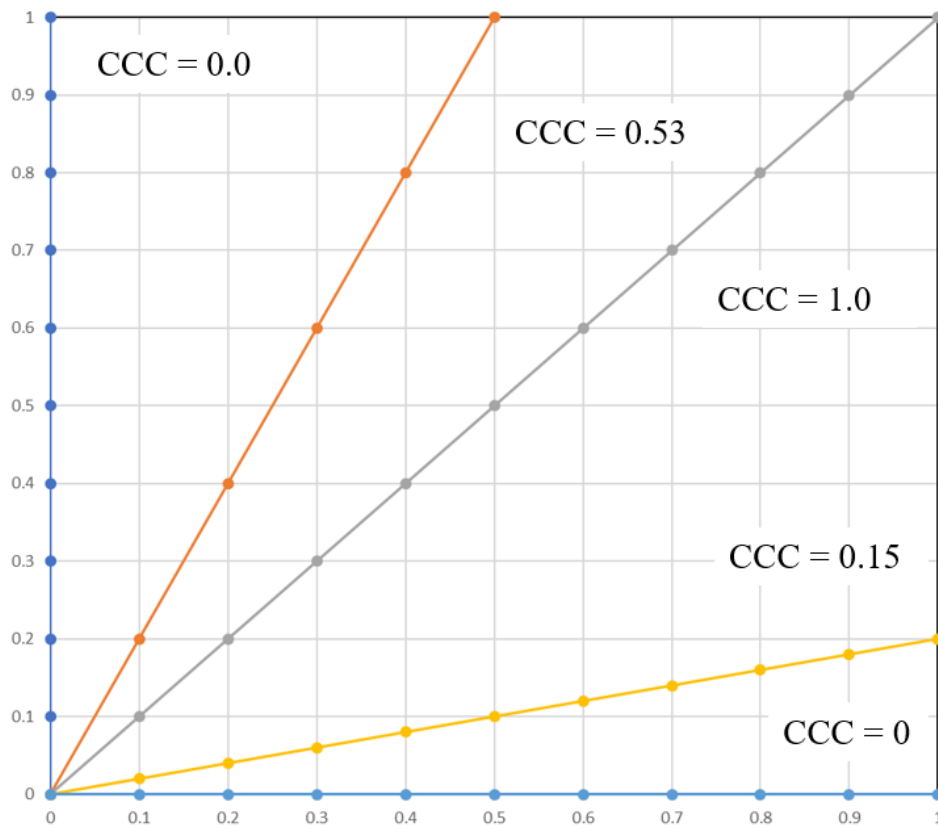


圖 2-29 CCC 示意圖 (參考來源：Lin, 1989)

三、Spearman's correlation coefficient

由 Charles Spearman 於 1904 年提出，又稱斯皮爾曼等級相關係數，用於評估兩個變數的依賴關係是否為單調關係，不同於皮爾森相關係數，斯皮爾曼等級相關係數不假設變數間具有線性關係或兩個變數都符合常態分佈。因此，它特別適用於分析順序尺度的數據或非常態分佈的數據。在計算相關係數前，先將 n 個原始數據 X_i, Y_i 轉換成等級數據 $R(X_i), R(Y_i)$ ，相關係數計算如式 二-6 所示。

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{式 二-6}$$

其中 d_i 為 $R(X_i)$ 與 $R(Y_i)$ 的差值，即兩個變數在第 i 的數據點上的等級差值， n 為樣本數。斯皮爾曼等級相關係數的值域為 $-1 \sim 1$ ，藉由此參數可以看出兩個變數間的單調關係，代表只要其中一個變數的值增加(或減少)，另一個變數的值也會以任何方式增加(或減少)。斯皮爾曼相關係數的優點在於不需要假設數據為常態分布，此外，由於斯皮爾曼相關係數將數據分等，使得其對離群值較不敏感。然而，斯皮爾曼相關係數僅能用於檢測變數間的單調關係，對於更複雜的相關性判定較不適用。



四、Kendall correlation coefficient

由 Maurice Kendall 於 1938 年提出，又稱為肯德爾等級相關係數，用於評估兩個變數等級相關性的指標，與斯皮爾曼相關係數類似，不依賴數據的分布形式，在分析皮爾森相關係數不適用的非常態分佈數據相當適合，其計算公式如式 二-7 所示。

$$\tau = \frac{M - N}{\frac{1}{2}n(n^2 - 1)} \quad \text{式 二-7}$$

其中，n 為樣本數，M 為和諧數對(concordant pairs)的數量，N 為不和諧數對(discordant pairs)的數量。和諧數對指的是兩個變數的變化趨勢相同的情況(同時增加或同時減少)，而不和諧數對則指兩個變數的變化趨勢相反的情況。斯皮爾曼等級相關係數的值域亦介於-1~1。其主要優點在於不依賴數據的分布形式，對於等級型的數據與非線性關係的數據具有較好的適用性，然而，此方法的計算較為複雜，使用門檻相對較高。

為前述相關性評估指標整理與比較。不同的評估指標有其適用範圍，皮爾曼相關係數是用於評估線性相關數據的相關程度；一致性相關係數可用於評估兩變量的相關性與一致性，但計算較為複雜，使用門檻較高；斯皮爾曼等級相關係數可用於評估非線性相關數據的相關程度，且不受離群值之影響，但僅適用於評估數據間的單調關係，難

以評估較複雜的相關性；肯德爾等級相關係數與斯皮爾曼相關係數相似，但僅適用於小樣本數據，且計算較為複雜，使用上有一定門檻。而本研究著重於數據間的一致性，故選用一致性相關係數 (Concordance Correlation Coefficient, CCC) 作為評估指標，用以判斷推估滑動面與數值模擬滑動面的一致性，量化向量傾角法的評估成效。



表 2-9 一致性評估指標

方法	公式	備註
Pearson product-moment correlation coefficient	$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$	優點：適合用於評估兩變量的線性相關程度 缺點：易受離群值影響，且無法評估非線性關係
Concordance Correlation Coefficient	$\rho_c = \frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\mu_x - \mu_y)^2}$	優點：可用於評估兩變量的相關性與一致性 缺點：計算較複雜，且評估非線性關係的效果較差
Spearman's correlation coefficient	$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$	優點：假設較簡易，可用於評估兩變量的非線性相關程度，且不受離群值影響 缺點：僅能評估變量間的單調關係，無法評估較複雜的相關性
Kendall correlation coefficient	$\tau = \frac{M - N}{\frac{1}{2}n(n^2 - 1)}$	優點：適用於評估等級型數據的相關性 缺點：計算複雜，不適用於樣本數量大的案例

第三章 研究項目與執行方法

第一節 分析流程與架構

為探討向量傾角法(Carter and Bentley, 1985)於不同幾何情境下推估潛在滑動面的準確性，本研究擬以材料質點法為基礎發展的數值模式來產製邊坡滑動過程中對應之地表位移和地中變形資料，然後透過自動化數據處理的方式，對向量傾角法推估滑動面和數值模式模擬滑動面進行一致性的評估，藉此來探討向量傾角法的適用性與限制性。針對向量傾角法的限制性，本研究將提出修正方案，並說明修正成效。相關研究成果，將有助於向量傾角法於未來潛在滑動面推估相關實務應用的推動。本研究分析流程與架構如，詳細流程說明如下。

首先說明，本研究如何透過數值模式(Anura3D MPM Software v2022)模擬分層土壤的崩塌行為。情境設定上，將根據不同坡度及坡高建立數值模型，模擬邊坡崩塌行為，並於模擬後生成地表位移與滑動面的演變資訊。接著，透過材料點追蹤材的座標、位移歷時等資料作輸出，並將其作為向量傾角法的輸入參數，並藉此來推估潛在滑動面。為能與向量傾角法的推估滑動面進行一致性探討，本研究透過臨界位移的設定來判釋邊坡穩定區域與不穩定區域的交界線，藉此獲得模擬滑動面的演變資訊。最後，將向量傾角法的推估滑動面與數值模

式的模擬滑動面進行一致性評估，以 CCC(Concordance Correlation Coefficient)作為評估指標，分析探討不同崩塌情境下向量傾角法的推估成效，並歸納出向量傾角法的適用情境與限制。

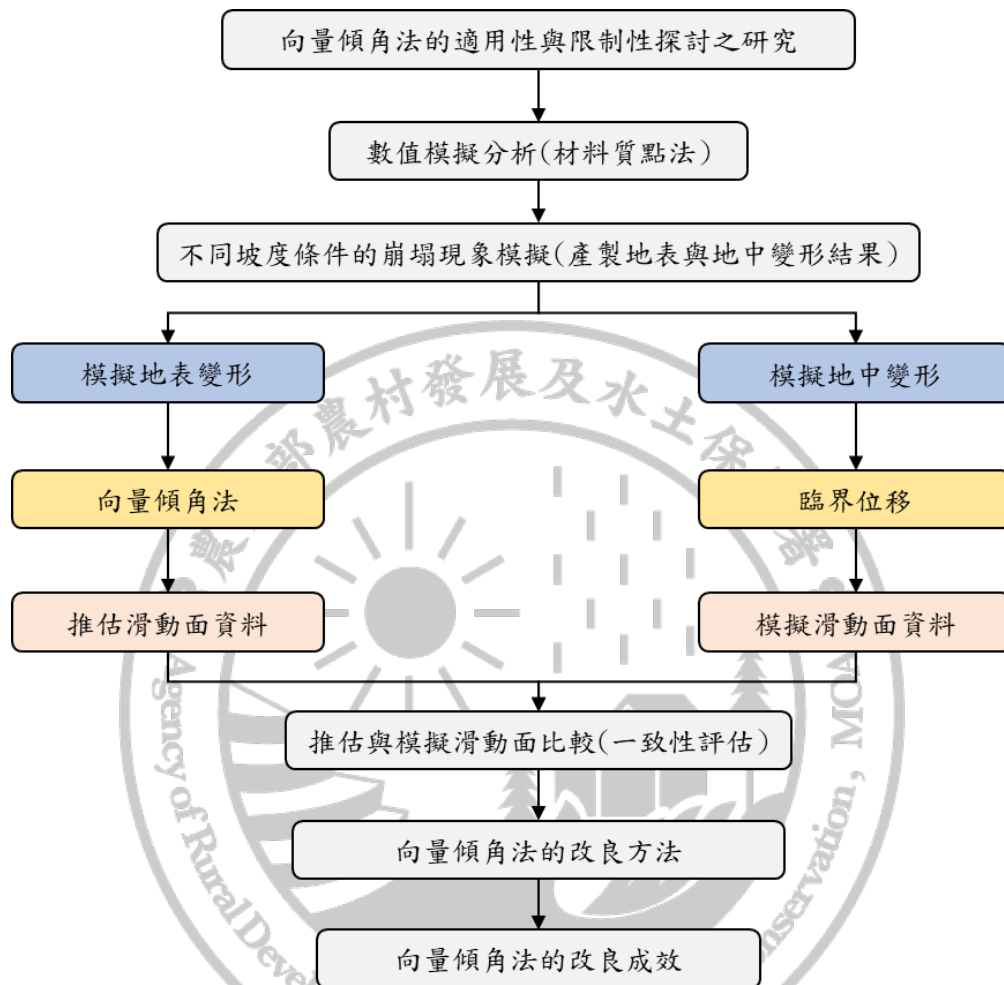


圖 3-1 分析流程與架構圖

第二節 數值模擬方法

本研究透過以材料質點法發展之數值模式來模擬邊坡崩塌行為，以此來重現滑動面形成過程中地表位移的演變過程，並藉此掌握崩塌運動與滑動面發育之間的關聯性。數值模式產製之地表和地中變形的結果，將作為向量傾角法適用性和限制性評估的依據。本節將依序說明材料質點法、數值模式介紹、數值模型設定，並說明地表位移取得方法與地中變形判讀方法。

一、材料質點法 (Material Point Method, MPM)

材料質點法具有無網格法(Mesh-free)的概念，由 Sulsky 等人於 1994 年提出，旨在解決材料大變形問題，此數值解算方法結合尤拉法(Euler Approach)與拉格朗日法(Lagrangian Approach)的特性，能夠解決網格過度扭曲而造成計算無法收斂的問題，適合應用於分析大規模的邊坡變形。

材料質點法的計算流程如所示。在計算開始前，依據情境模擬的範圍建置節點(Node)和網格(Element)位置。然後，從中選定材料配置區域，並給定材料參數與材料點(Material Point, MP)，接著，將材料的初始資訊儲存於材料點中。計算時，先利用形狀函數(Shape unction)將材料點儲存資訊(純量、向量及張量等)傳遞至網格上的節點，再於

節點求解動量方程式，將求解後之結果回傳至材料點並重置網格變形，使節點回到初始狀態；而材料點則根據位移資訊更新其座標位置，並於材料點處進行連續方程式求解，更新材料點的資訊。

在大地工程中，土壤材料根據含水量不同，可分為乾燥土壤、飽和土壤與非飽和土壤。材料質點法根據材相態(Phase)提出不同的理論解析方法，包括有單相、雙相與三相等不同解析方法，模式的三相態分別有固體、液體與氣體。單一材料點可代表單一或多個相態，如所示，在探討不同的大地工程問題時，材料點與相態的配置也會有所不同。本研究旨在探討不同幾何情境之邊坡崩塌行為對於向量傾角法的影響，因此僅先考慮單一相態問題，是故採用單相單點(One-point Single-phase)的模組進行數值模擬，模擬乾燥土壤材料之力學行為。



連續體可以透過一組微分方程描述其行為，其控制方程式包含質量守恆(Mass Conservation)、動量守恆(Momentum Conservation)、能量守恆及相應的邊界條件(Boundary Conditions)，而連續體的材料特徵則藉由應力應變關係(Stress-strain relationship)之組成律模型來反映。質量與動量守恆方程式如式 三-1、式 三-2 所示。

$$\frac{d}{dt}\rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v}_s = 0 \quad \text{式 三-1}$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \rho \mathbf{b} \quad \text{式 三-2}$$

式中 t 、 ρ 、 $\mathbf{v}_s$ 、 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 和 $\mathbf{b}$ 分別代表時間、密度、速度、應力張量與物體力 (Anura3D Scientific Manual, 2022)。為模擬崩塌發生前邊坡彈性變形過渡到崩塌發生後土體塑性變形的過程，模式採用之耀曼應力率 (Jaumann stress rate) 來計算材料應力的增量($d\boldsymbol{\sigma}_s$)，如式 三-3 所示。

$$d\boldsymbol{\sigma}_s = \mathbf{D} \cdot d\boldsymbol{\varepsilon}_m + \boldsymbol{\sigma}_s \mathbf{W}^T - \mathbf{W} \boldsymbol{\sigma}_s \quad \text{式 三-3}$$

其中， $\mathbf{D}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_m$ 、 $\mathbf{W}^T$ 和 $\mathbf{W}$ 分別為彈性模數矩陣、應變張量、速度梯度張量轉置矩陣和速度梯度張量 (Bandara, 2013; Andersen and Andersen, 2010)。崩塌破壞則依莫爾庫倫準則，其臨界函數如式 三-4 所示。

$$F = \frac{1}{2}(\sigma_{s,1} - \sigma_{s,3}) - \frac{1}{2}(\sigma_{s,1} + \sigma_{s,3})\sin\phi + c\cos\phi \quad \text{式 三-4}$$

式中 $\sigma_{s,1}$ 和 $\sigma_{s,3}$ 分別代表垂直和水平軸向應力， c 為凝聚力， ϕ 為摩擦角 (Vermeer and De Borst, 1984)。

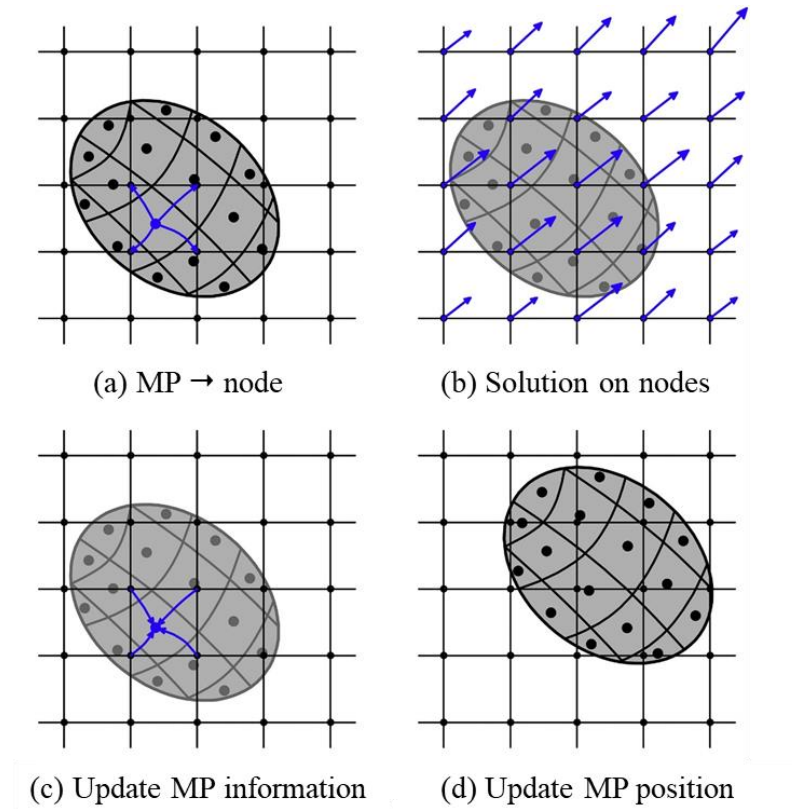


圖 3- 2 材料質點法解算概念圖 (Conte et al., 2020)

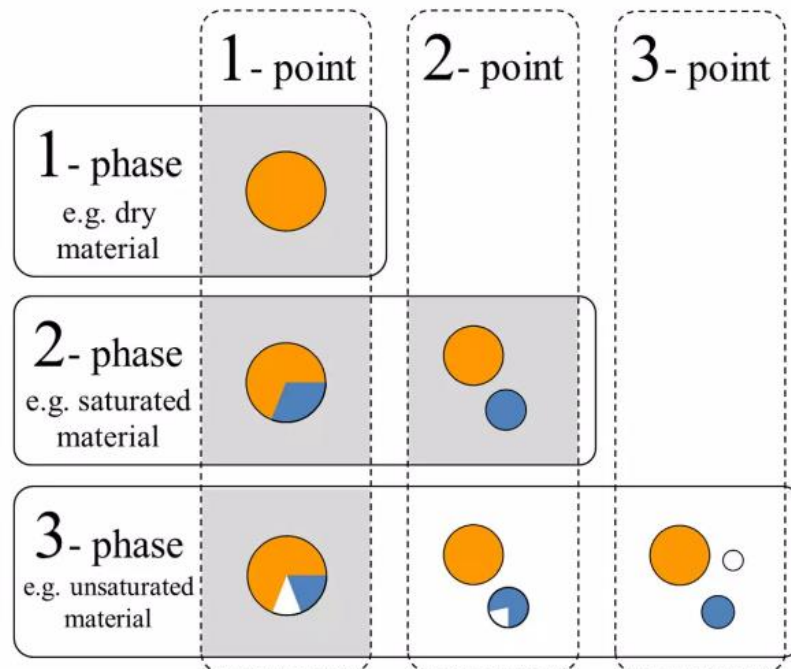


圖 3- 3 材料點與相態的配置關係圖 (Anura3D 手冊，2019)

二、數值模式介紹

本研究使用的軟體包括 GiD、Anura3D 與 ParaView，分別負責前處理(Pre-Process)、分析計算(Analysis)與後處理(Post-Process)的任務。

本小節將依據介紹上述軟體與其在本研究中的功能。

(一) 前處理軟體：GiD

GiD是一款全方位的前後處理軟體，常用於科學與工程領域的數值模擬，可以提供2D/3D數值模式建模。本研究主要應用此軟體於前處理，即建置幾何模型與生成網格，如所示。此外，GiD可導入Anura3D模組，並於介面中進行材料質點法的計算設定，如材料參數，材料點配置、邊界條件設定與分析計算設定等。(Anura3D手冊，2019)

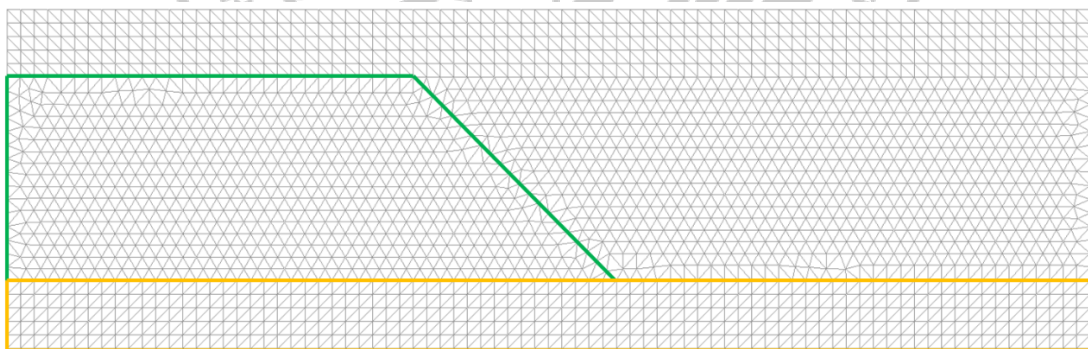


圖 3- 4 GiD 網格示意圖

(二) 執行軟體：Anura3D

Anura3D是由Anura3D MPM Research Community開發的開源軟體，專為大地工程的數值分析設計。此軟體基於Fortran程式語言，支援二維和三維的材料質點法分析，主要應用於土壤、水體與結構間的相互作用以及處理大規模變形問題。Anura3D自2008開始發展，至今仍持續開發中，透過Anura3D MPM Research Community的努力，2022年後的版本已可進行未飽和土壤現象、降雨促崩現象等情境模擬。本研究主要應用此軟體於分析計算，模擬邊坡崩塌行為。利用GiD建置模型與網格後，導入Anura3D模組，進行材料參數、材料點配置、邊界條件、輸出材料點編號與計算方法等設定，如、所示，並輸出專案檔進行材料質點法的分析計算。(Anura3D手冊，2019)

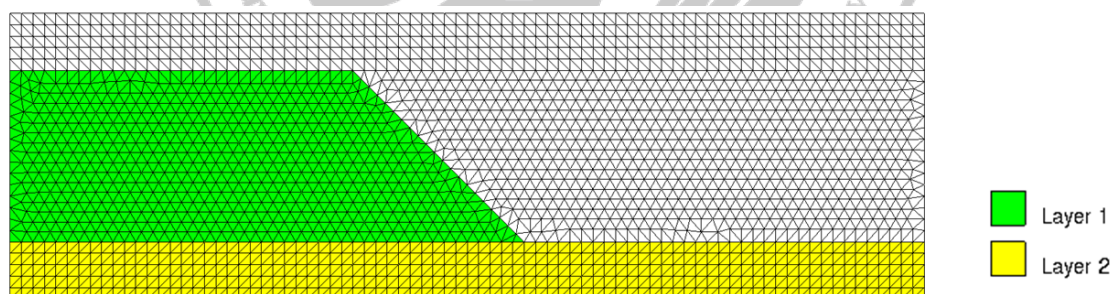


圖 3- 5 土壤材料設定示意圖

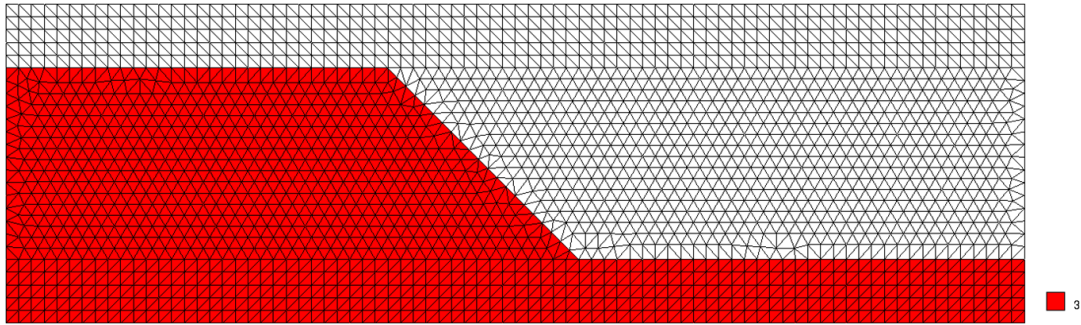


圖 3-6 材料點配置示意圖

(三) 後處理軟體：ParaView

ParaView是一款開源且支援多平台的科學資料分析和視覺化工具，廣泛應用於科學計算領域，能夠處理極大規模的數據集並進行三維可視化。在本研究中，ParaView主要用於可視化材料質點法的分析結果，如所示，並在邊坡地表設置追蹤材料點(中粉紅色點)，獲得追蹤材料點編號，輸入Anura3D以取得輸出材料點資訊。ParaView可以輸出所有材料點資料，用以確定數值模擬的滑動面位置。(Anura3D手冊，2019)

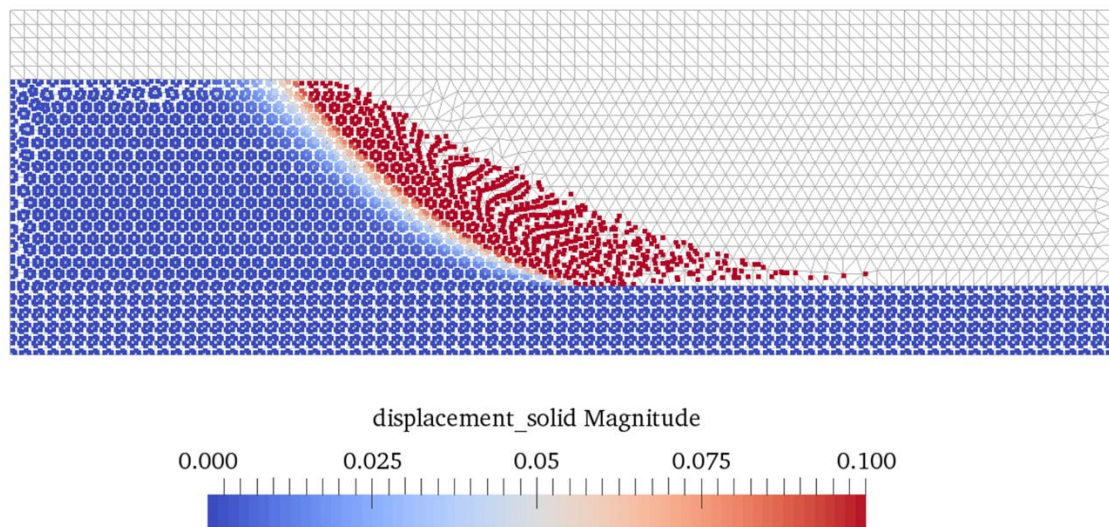


圖 3- 7 邊坡崩塌模擬結果

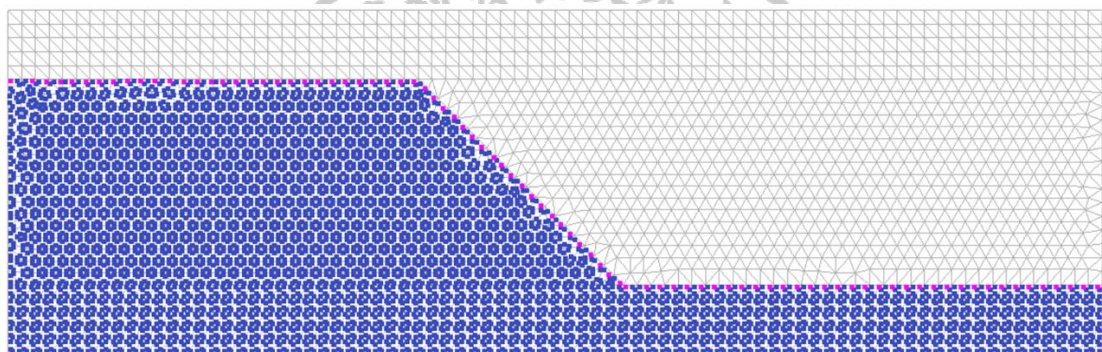


圖 3- 8 追蹤材料點示意圖

三、模擬情境及參數設定

(一) 模擬情境介紹

本研究設計的邊坡情境為梯形邊坡，並座落於矩形底板上。其中梯形邊坡高度(H)為30 m，頂部長500 m，底部長度則隨坡度而變化，而矩形底板厚度($Base$)為10 m，底板長度(L)隨邊坡規模延伸， D 則代表邊坡高度(H)與底板厚度($Base$)的總和。模型初始設定如上所述，後續將根據數值模擬結果調整模型，以取得較為精確的模擬資訊。值得說明的是，本研究僅針對崩塌現象進行模擬，不包括崩塌前的穩定階段，隨著坡度、坡高與內摩擦角的變化，邊坡本身的穩定性也會受到影響。

地層部分，採用雙層土壤配置，上層土壤(Layer 1)為無凝聚性土壤(滑動體)，下層土壤(Layer 2)為岩盤(彈性體)或無凝聚性土壤(滑動體)，以探討向量傾角法於分層土壤的適用性，如所示。

本研究首先探討坡度變化對向量傾角法的影響，坡度分別為 30° 、 40° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° ，並選取推估成效最佳的坡度案例，再來探討坡高變化對向量傾角法的影響，坡高分別為30m、100m、200m、300m、400m，並選取推估成效最佳的坡高案例，去除不參與崩塌運動的區域，聚焦於實際發生崩塌的範圍，並探討地表

追蹤點數量及分布變化的影響。

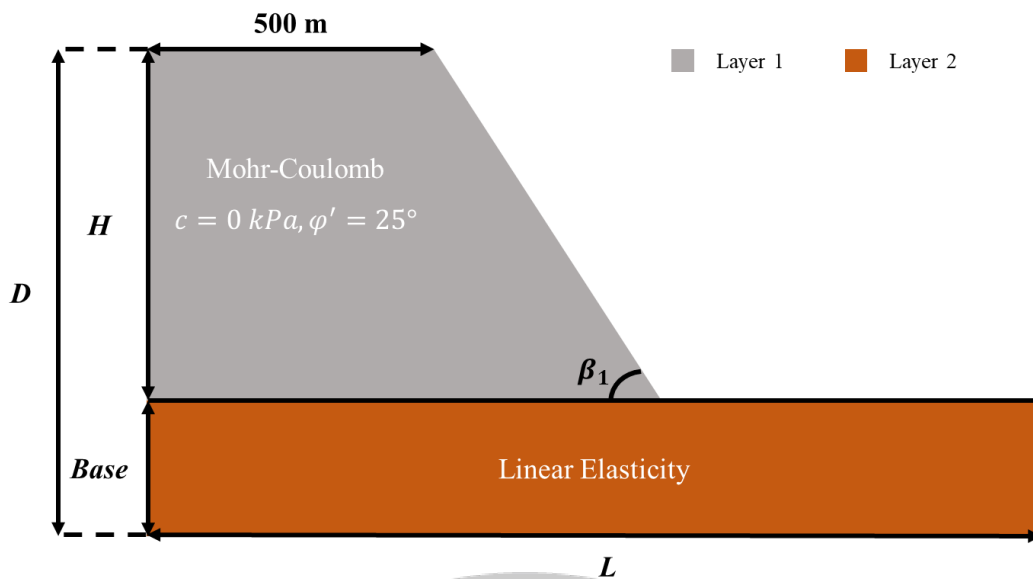


圖 3-9 數值模型土層配置

(二) 分析相關設定介紹

本研究採用三角形來生成網格，如前述所示，網格尺寸為 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，材料點數量配置方面，於土壤材料區域每個網格配置3個材料點，如前述所示。邊坡幾何形狀會隨坡度變化，根據不同坡度案例，網格數量介於4,000 ~ 9,404個，節點數量介於2,106 ~ 4,903個，材料點數量介於5,100 ~ 14,157個。

為邊界條件設定示意圖，其中，左右邊界設定為滾接支撐(Roller)，使水平向固定，上邊界亦設定為滾接支撐(Roller)，使垂直向固定，而下邊界則設定為鉸接支撐(Hinge)，使數值模型底部

邊界為完整固定，透過上述設定來確保土體滑移僅發生於計算區域之內。

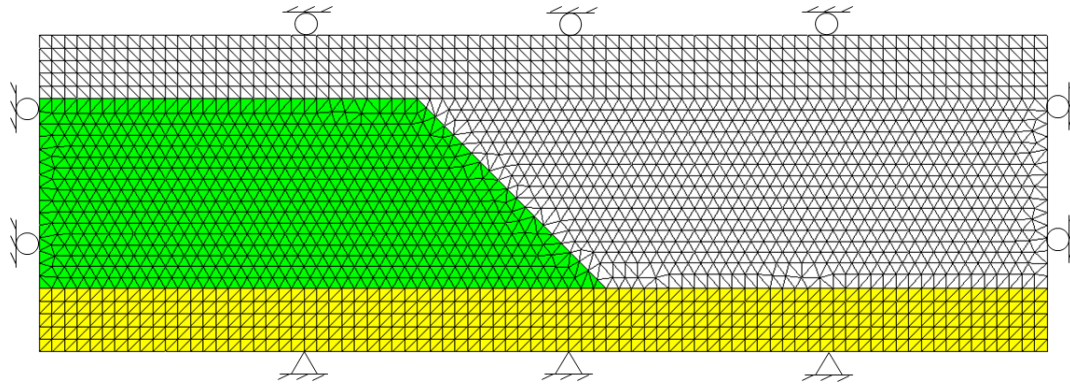


圖 3- 10 邊界條件示意圖

(三) 土壤參數設定

本研究之數值模型土壤材料共兩種，分別為無凝聚性土壤 (Cohesionless soil) 與岩盤 (Bedrock)。無凝聚性土壤採用莫爾庫倫模組 (Mohr-Coulomb)，岩盤則採用線彈性模組 (Linear Elasticity)，兩者皆以單相單點之乾燥材料進行模擬。土壤參數依據 Liu et al. (2019) 進行設定，詳細參數如所示。本研究設計的土壤參數配置為滑動體與彈性體組合，用以模擬滑動體與岩盤交互作用下的崩塌行為。

表 3- 1 土壤參數表

Layer	Layer 1	Layer 2
-------	---------	---------

Material	Dry material	Dry material
Model	Mohr-Coulomb	Linear Elasticity
ρ (kg/m ³)	1900	1900
e_0	0.4	0.4
ν'	0.3	0.3
E' (kPa)	100000	1000000
Phase 1	Gravity loading (Peak)	
c' (kPa)	0	-
ϕ' (°)	38	-
Phase 2	Landslide (Residual)	
c' (kPa)	0	-
ϕ' (°)	25	-

(四) 計算過程說明

為本研究進行數值模擬的計算設定，採用二維平面應變狀態進行分析，計算過程可分為兩階段(Phase)，如所示。第一階段為初始應力生成階段(Gravity loading)，設定計算步數為1步，時間間距為1秒，施加準靜態收斂與環境阻尼等功能，提高環境阻尼(Local damping)並給予束制(Fixities)，以限制數值模型的變形，使其達到重力平衡，而材料點將根據給定材料參數生成初始應力場，展示重力生成階段後的應力分布情形。第二階段為邊坡崩塌階段(Landslide failure)，計算設定部分，增加計算步數，將時間間距

調整為0.2秒，關閉準靜態收斂功能，並將環境阻尼降低至0.05，並將束制移除，使模型開始出現明顯變形。土壤參數部分，降低土層的內摩擦角至 25° ，使土體強度下降，從而導致邊坡出現不穩定狀態並開始滑動。此階段的模擬將持續至整體材料點的速度接近0為止，如所示。

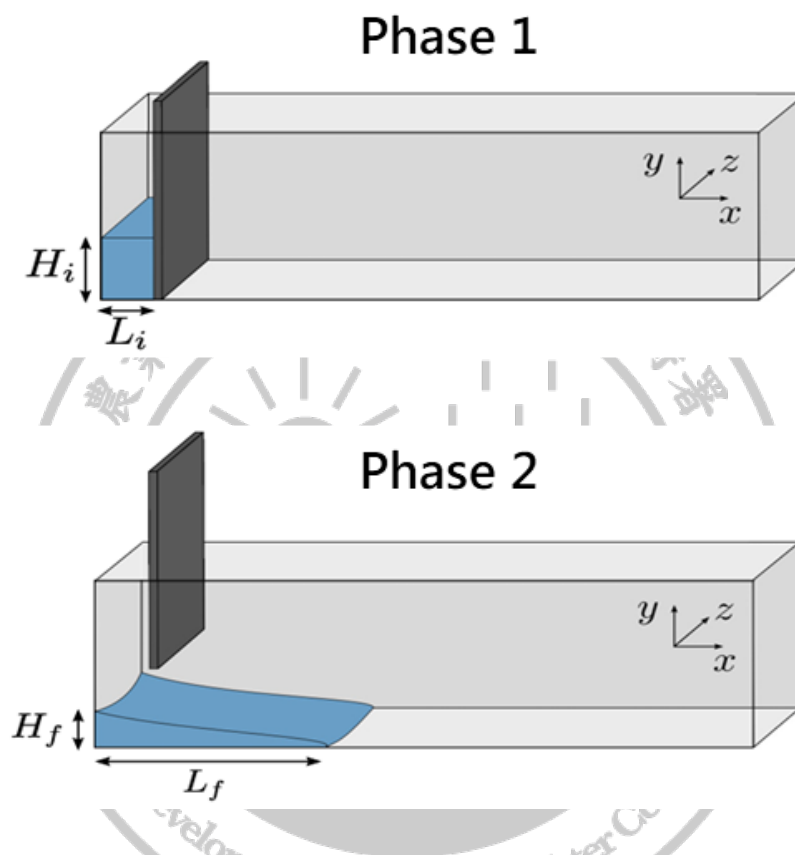


圖 3- 11 不同計算階段之模擬現象示意圖

表 3- 2 Anura3D 計算過程設定

Dimension	2D-plane strain
Computation method	MPM-mixed integration
Calculation Data	

Calculation step	1
Time per calculation step (s)	1
Courant number	0.98
Gravity Data	
Gravity acceleration (m/s^2)	9.81
Gravity load	Apply gravity loading-stepwise
Quasi-Static Convergence	
Quasi-static convergence	Apply convergence criteria
Tolerated error solid energy/force	0.01
Tolerated error liquid energy/force	0.01
Homogeneous Local Damping	
Homogeneous local damping	Apply homogeneous local damping
Local damping coefficient	0.75
Fixities	
Solid/Liquid/Gas	Keep fixities/ Keep fixities/ Keep fixities
K0-procedure	No K0-procedure
Submerged calculation	No submerged calculation
Objective stress	Do not use objective stress
Degree of filling	0.9

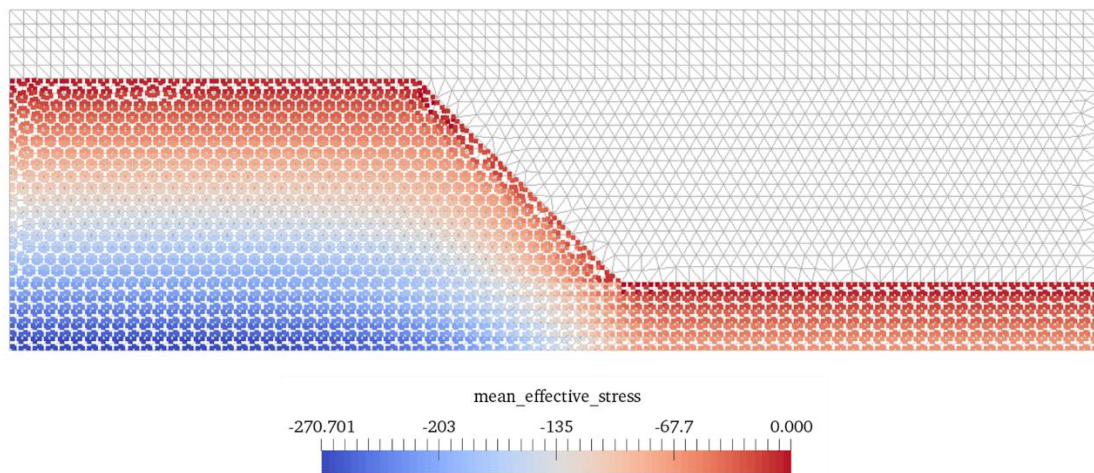


圖 3- 12 應力分布示意圖

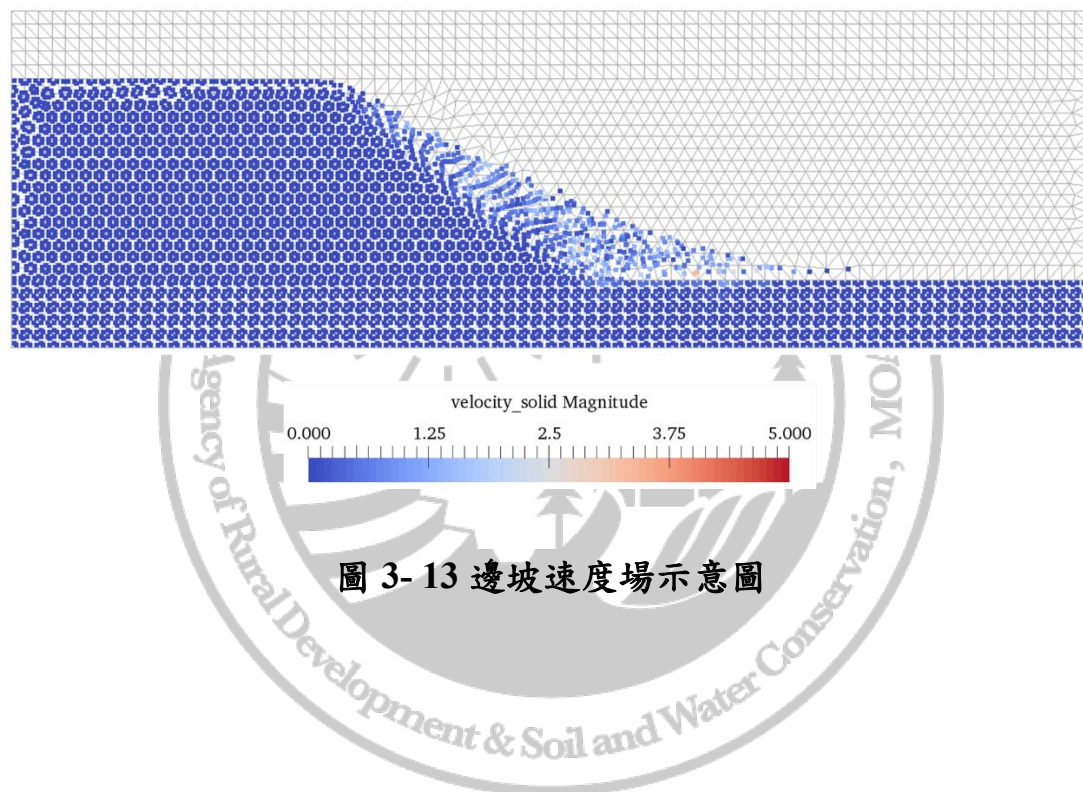


圖 3- 13 邊坡速度場示意圖

四、地表位移取得方法和地中變形判讀方法

本研究透過數值模式(Anura3D)生成邊坡崩塌過程中的地表位移與地中滑動面位置的動態資訊。其中，地表位移資訊將用作向量傾角法推估滑動面的輸入參數，而數值模擬得到的滑動面將作為向量傾角法之推估滑動面的比對基準。以下將分別說明地表位移取得方法與地中變形判讀方法

在地表位移部分，主要透過數值模式輸出材料點資訊取得。在數值模式中可選定任意材料點作為追蹤點，即粉紅色圓點，獲得對應的材料點編號，於數值模式前置設定輸入指定編號，便可藉此取得追蹤點的詳細資料，如座標、位移、應力、應變與孔隙水壓等隨時間變化的數據。透過輸出的追蹤點數據，取得追蹤點隨時間變化的座標，並將所有追蹤點連線，即可獲得崩塌過程中地表演變過程的資訊，具體如所示。

而地中變形判讀部分，在數值模擬結束後，可透過 ParaView 展示邊坡崩塌隨時間之演變過程，如所示，圖中紅色區域的位移量皆大於 0.3 m，此區域的下半部包絡線即為數值模擬之滑動面。本研究透過 ParaView 輸出所有材料在不同模擬步數的位移數據，並設定特定位移量作為臨界位移，定義位移量大於臨界位移之區域為不穩定區域

(棕色點)，並以穩定區域與不穩定區域的交界線作為數值模擬之滑動面位置(藍色虛線)。透過上述流程，即可獲得數值模擬之滑動面在任一時間的位置，如所示。然而，需要注意的是，不同規模的邊坡對臨界位移量的敏感度各異。對於較大規模的邊坡，同樣的位移量可能仍屬於穩定範圍，而對於較小規模的邊坡則可能已是不穩定狀態。這表明在不同的幾何條件下，尋找最適臨界位移量有其必要性。因此，本研究將針對不同邊坡尺寸的案例進行敏感度分析，以探討各種條件下的最佳臨界位移值。

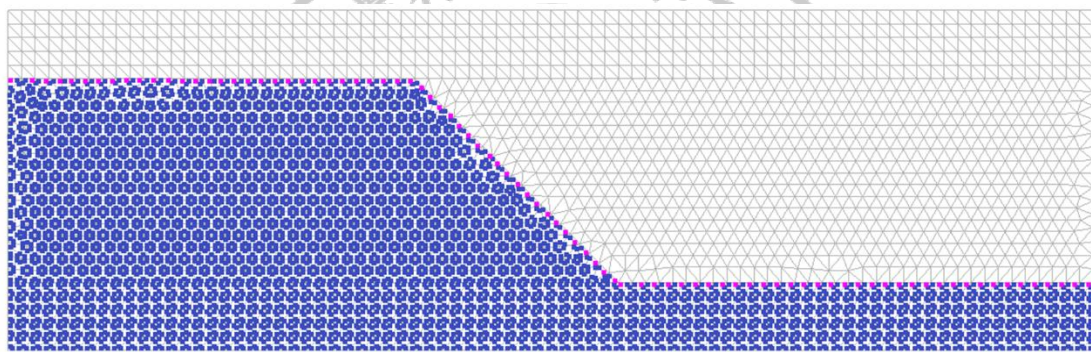


圖 3-14 設置追蹤點示意圖

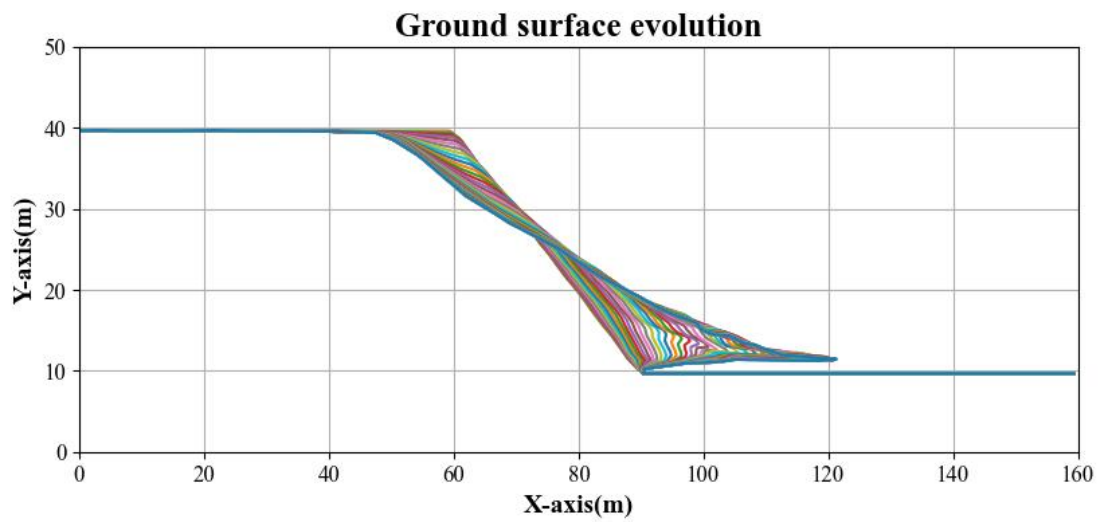


圖 3- 15 地表隨時間之演變

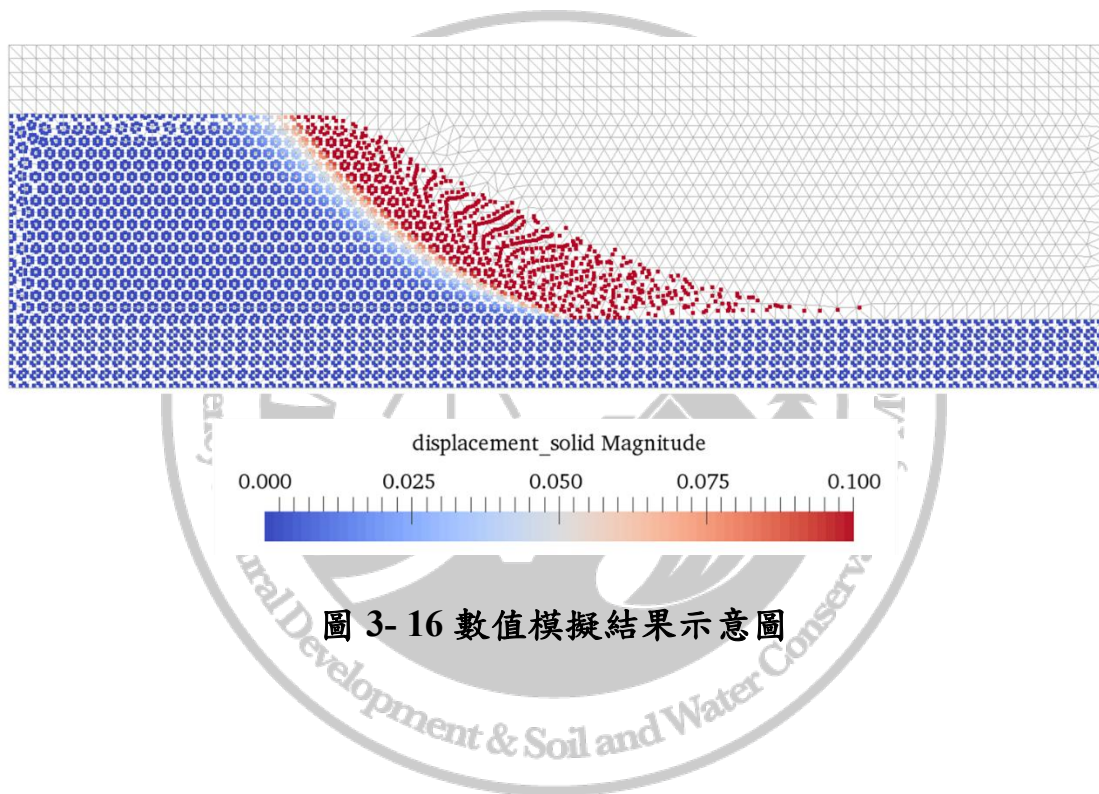


圖 3- 16 數值模擬結果示意圖

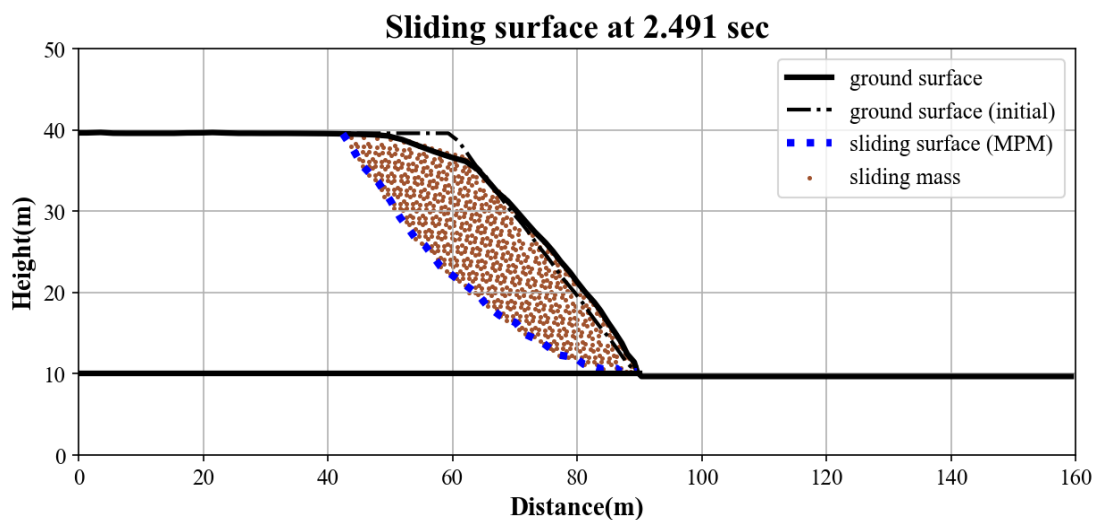


圖 3- 17 數值模擬之滑動面示意圖

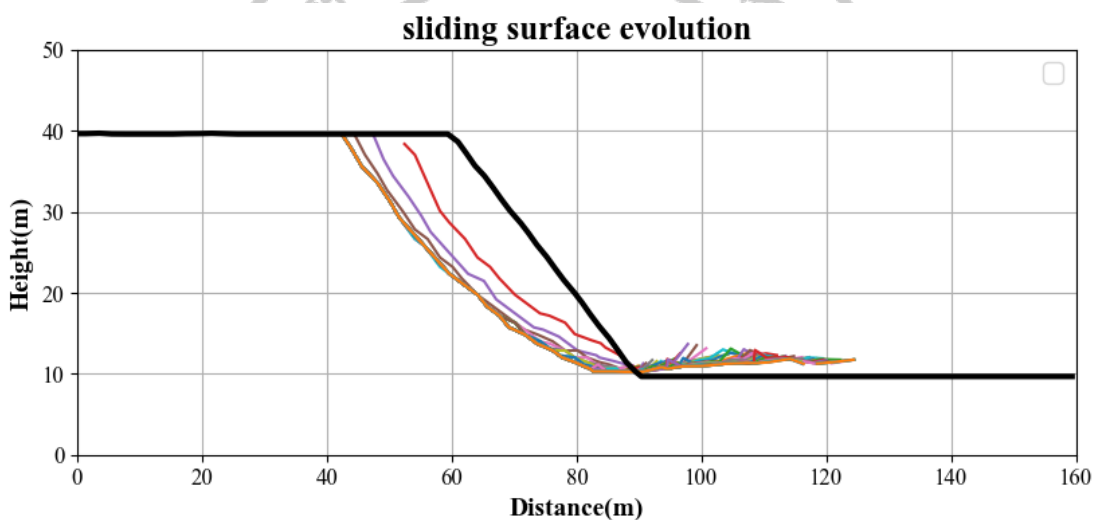


圖 3- 18 數值模擬之滑動面隨時間之演變

第三節 向量傾角法原理與精進

本節將詳細介紹向量傾角法的基本假設、計算步驟以及應用上的限制，並提出改良方法以精進其推估潛在滑動面的成效。

一、向量傾角法說明

向量傾角法(Vector Inclination Method)由 Carter and Bentley 於 1985 年提出，其主要目的是利用地表監測點獲得地表位移資訊來推估潛在滑動面位置。此方法的基本假設為：

1. 滑動區域下方僅存在一個滑動面；
2. 滑動土體作為剛體移動；
3. 滑動面之斜率與地表位移方向平行。

根據以上假設，即可利用地表位移資訊(追蹤點座標、位移方向)作為輸入參數，推估潛在滑動面位置，如所示，具體步驟以下說明：

1. 繪製滑動區域的地形剖面，註明上邊坡裂縫處(Backscar)和邊坡趾部(Toe)的位置，作為向量傾角法的起算與結束位置，比對任意兩個時間點的追蹤點位置，以了解追蹤點座標變化及其對應的位移方向。
2. 在每個追蹤點位置，繪製一條與其位移方向垂直的線(灰色

實線)，並從兩條垂直線的交點繪製角平分線（灰色虛線）。

3. 以趾部作為起始點，繪製一條與其相鄰追蹤點之位移方向平行的線，延伸至與相鄰追蹤點的角平分線相交。依此方法連接後續的交點，形成第一個滑動面（Uphill）。

4. 以上邊坡裂縫處為起始點，重複步驟 3 的流程，繪製第二個滑動面(Downhill)。

5. 透過兩組不同起始點獲得兩組交點後，對兩組交點取加權平均，獲得推估滑動面的最終位置(紅色虛線)。

值得說明的是，根據向量傾角法，在執行步驟 3、4 時繪製的兩組滑動面會隨著與起始點的距離增加而出現愈來愈大的推估誤差，這一現象如所示。因此，Carter and Bentley(1985)假設滑動面上半部以 Downhill 繪製的滑動面較為準確，下半部則以 Uphill 的滑動面較為準確。根據這一假設，可以獲得更精確的滑動面推估結果。

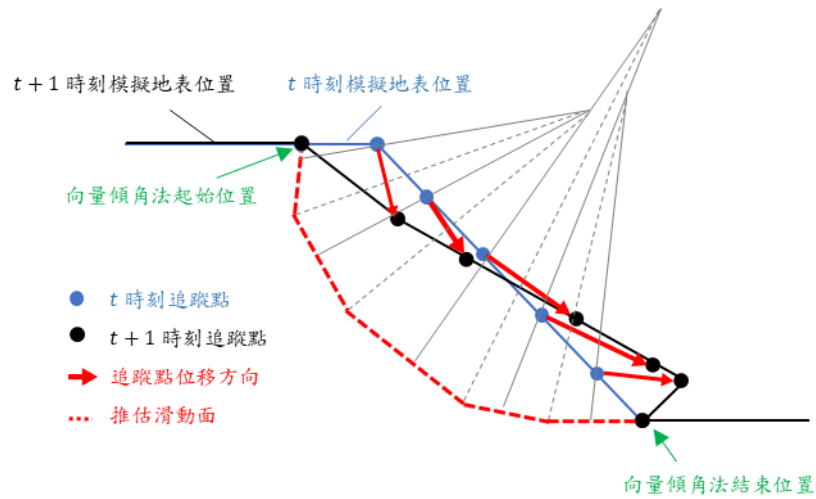


圖 3- 19 向量傾角法示意圖

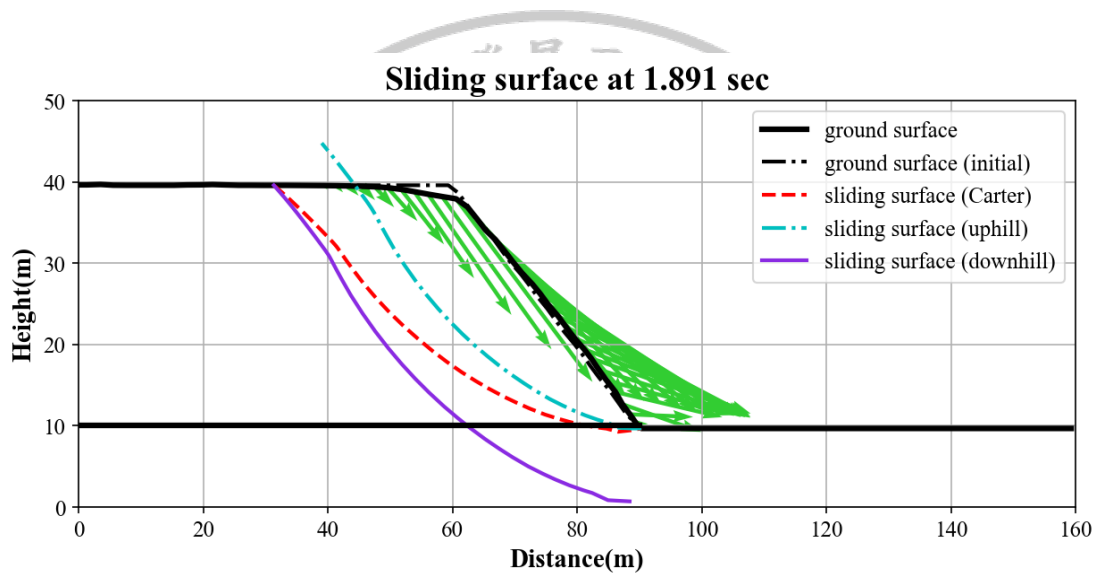


圖 3- 20 向量傾角法推估結果

二、向量傾角法的改良方法

向量傾角法是透過地表位移資訊來推估潛在滑動面的位置，因此追蹤點的選擇對結果的準確性影響甚鉅。本研究在數值模擬中沿著地表設置了追蹤點，這些追蹤點覆蓋了整個數值模型，然而，邊坡的不穩定區域因邊坡幾何形狀和地層構造而異，潛在滑動面的位置也會有所變化。因此，需要建立一套改良機制，動態調整追蹤點的選擇，以避免產生錯誤的推估結果，如所示。

為此，本研究提出兩個門檻條件作為追蹤點動態調整的依據。首先是追蹤點的移動速度。根據數值模擬的結果，如所示，可以發現邊坡土體的變形不僅受到邊坡破壞的影響，也可能因受重力作用而產生向下的潛在變形。若將出現任意大小移動速度的區域皆納入向量傾角法計算，勢必導致其推估結果與實際不穩定區域存在明顯差異。因此，透過設定合理的移動速度門檻值，可有效篩選出應納入向量傾角法的合格追蹤點資料。第二，是追蹤點的位移角度與坡度的比值。潛在滑動面的形成與邊坡土體運動方向密切相關，上邊坡潛變區的追蹤點位移角度通常與當地坡度存在較大差異；而下邊坡追蹤點由於受到滑動土體的推擠，其位移角度也會與坡度產生明顯偏差。鑑於向量傾角法的基本假設是滑動面與地表位移方向平行，直接納入上邊坡潛變區及

下邊坡異常位移資料將導致錯誤估算滑動面形態。因此追蹤點的位移角度與坡度的比值不宜過大。因此，在應用向量傾角法時，宜設置位移角度與坡度比值的合理門檻值，篩選掉比值過大的追蹤點資料，避免這些異常數據引入誤差，以獲得更為準確的滑動面推估結果。

在不同幾何條件下，邊坡的破壞形式也會有所不同，應用向量傾角法時應選用不同數值的門檻條件，本研究將透過敏感度分析的方式探討最佳門檻值配置，以獲得最準確的滑動面推估結果。



上下邊坡追蹤點速度及位移方向

- 速度過小，不應納入VIM計算
- 向下變形引致位移方向，不應納入VIM計算
- 滑動土體推擠導致下邊坡追蹤點出現向上位移，不應納入VIM計算

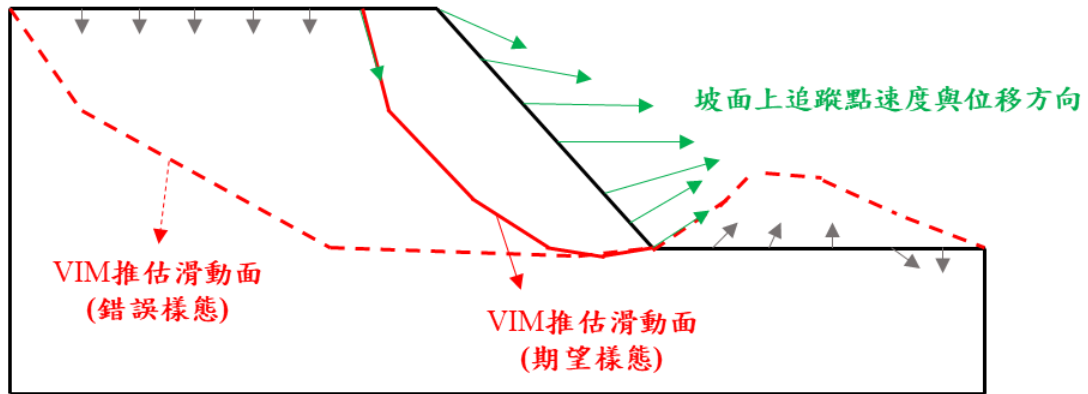


圖 3- 21 向量傾角法錯誤推估結果概念圖

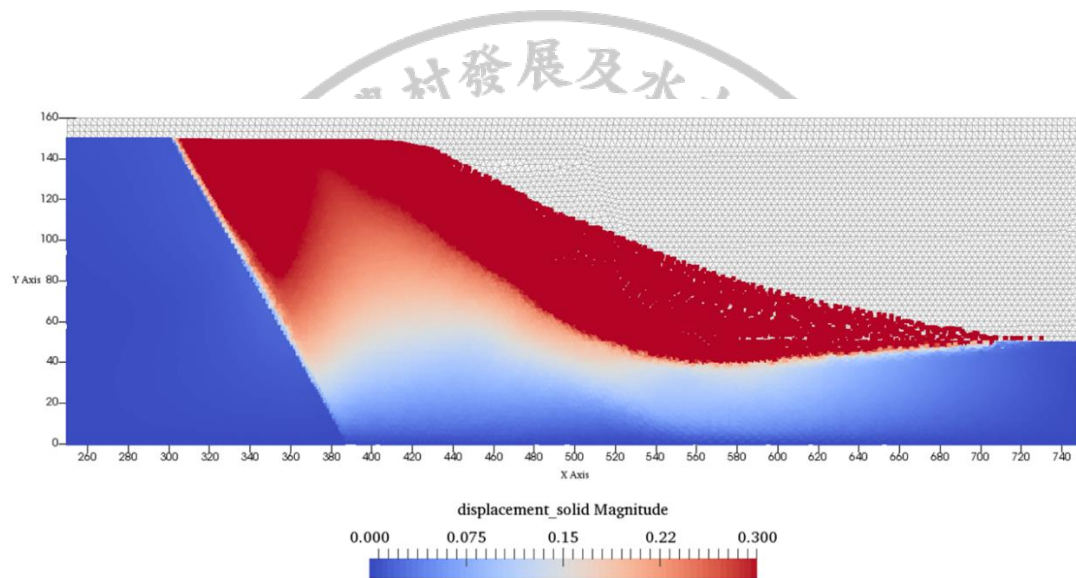


圖 3- 22 邊坡土體變形(崩塌+潛變)

第四節 向量傾角法推估成效評估方法

完成 3-2、3-3 兩節的分析後，可以取得兩組滑動面資訊，分別為根據地表位移之推估滑動面位置與根據地中變形之模擬滑動面位置。為量化推估滑動面與模擬滑動面的差異，本研究選用 Lawrence Lin (1989)年提出的 Concordance Correlation Coefficient (CCC)作為一致性評估指標。以下將說明利用 CCC 評估向量傾角法推估成效之流程。

顯示了推估滑動面與模擬滑動面的一致性評估概念。在相同水平位置(x 座標)，兩個滑動面會有不同的垂直位置(y 座標)，若垂直位置越接近，則推估成效越好。本研究分別以 x 和 y 作為推估滑動面與模擬滑動面的下標符號，分別以 μ_x 、 σ_x 表示推估滑動面的垂直位置的平均數與變異數，以 μ_y 、 σ_y 表示模擬滑動面的垂直位置的平均數與變異數。透過式 二-5 進行計算出相關係數，以評估兩滑動面的一致性。

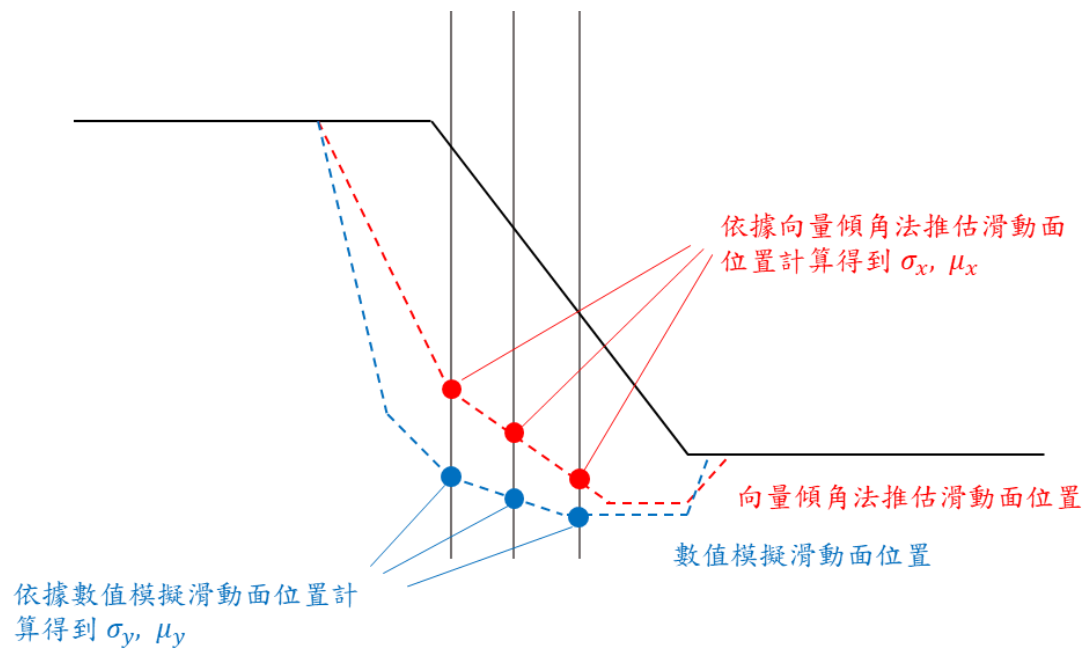


圖 3-23 一致性評估示意圖



第五節 自動化數據處理方法及流程

本研究透過數值模式產置邊坡崩塌過程的動態資訊，資料數量相當龐大。為了有效處理大量數據，本研究選用 Python 程式語言進行數值模式輸出數據的自動化數據處理，展示了自動化數據處理的流程圖，該流程分為四個主要部分，分別為程式(1)、(2)、(3)與(4)，每執行一輪即可獲得一次向量傾角法推估結果及其準確度。此外，本研究在分析完成後，會透過敏感度分析來執行部分程式碼，探討向量傾角法的最佳門檻值配置。接下來，將分別詳細說明自動化數據處理與敏感度分析的執行流程與邏輯。



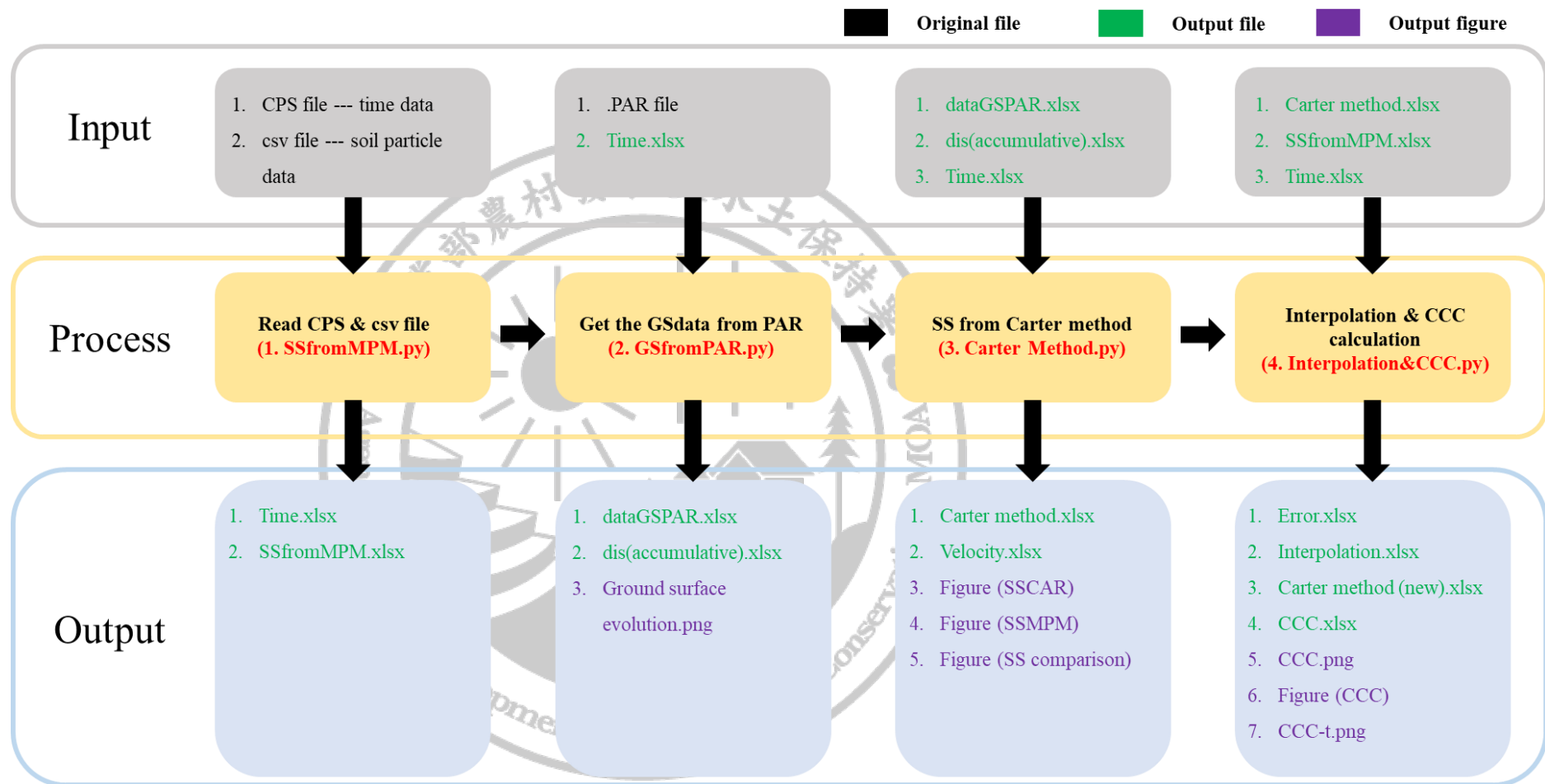


圖 3-24 自動化數據處理流程圖

一、數值模擬滑動面取得

為取得數值模擬滑動面的流程圖，又可將程式(1)分為兩個子程式，分別用於擷取數值模擬的真實時間資料和滑動面資料。首先，讀取時間資料文件(.CPS 格式)，從中提取每一計算步數對應的真實時間，並將其輸出儲存為 Excel 文件格式(Time.xlsx)。接著，讀取從 ParaView 輸出的數值模擬資料(.csv 格式)，從中擷取材料點的座標與對應的位移量，透過比較材料點位移量與臨界位移量，判斷該材料點是否穩定，以此確定不穩定土體的區域。後在此區域以設定網格大小作為篩選區間大小，透過比較材料點的座標位置來找到各個區間的最低點(Grid Screening Method)，並將這些材料點連線，得到此計算步數的數值模擬之滑動面。透過讀取不同計算步數的材料點資料，並按照相同流程，逐步取得所有計算步數的滑動面，並將資料輸出儲存為 Excel 文件格式(SSfromCSV.xlsx)。

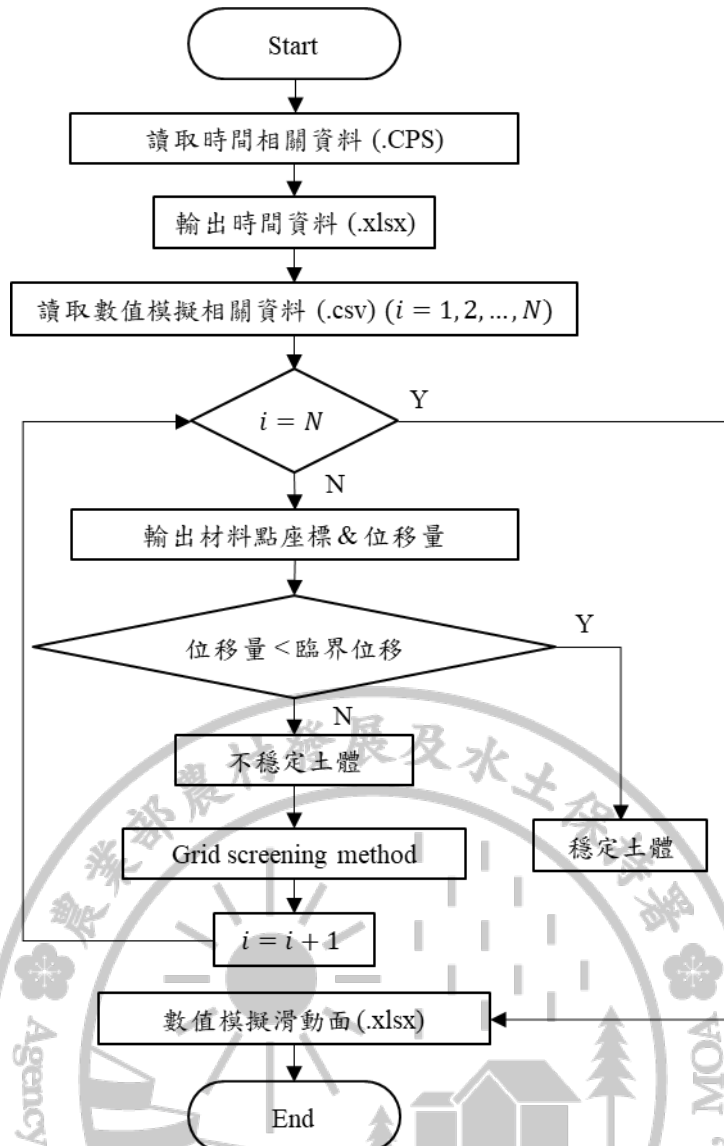


圖 3- 25 數值模擬滑動面取得流程圖

二、地表資訊取得

為取得地表資訊的流程圖，程式(2)主要用於取得輸出追蹤點的座標資料與其位移資訊。首先，讀取從 Anura3D 輸出的追蹤點資料文件(.PAR 格式)與上一個程式輸出的時間資料，逐個擷取不同追蹤點在對應時間的座標位置與累計位移量。獲得所有追蹤點在對應時間的資料後，將其按照座標排序，水平方向由小到大，垂直方向由大到小，接著，分別輸出儲存為 Excel 文件格式 (dataGSPAR.xlsx 與 dis(accumulative).xlsx)。

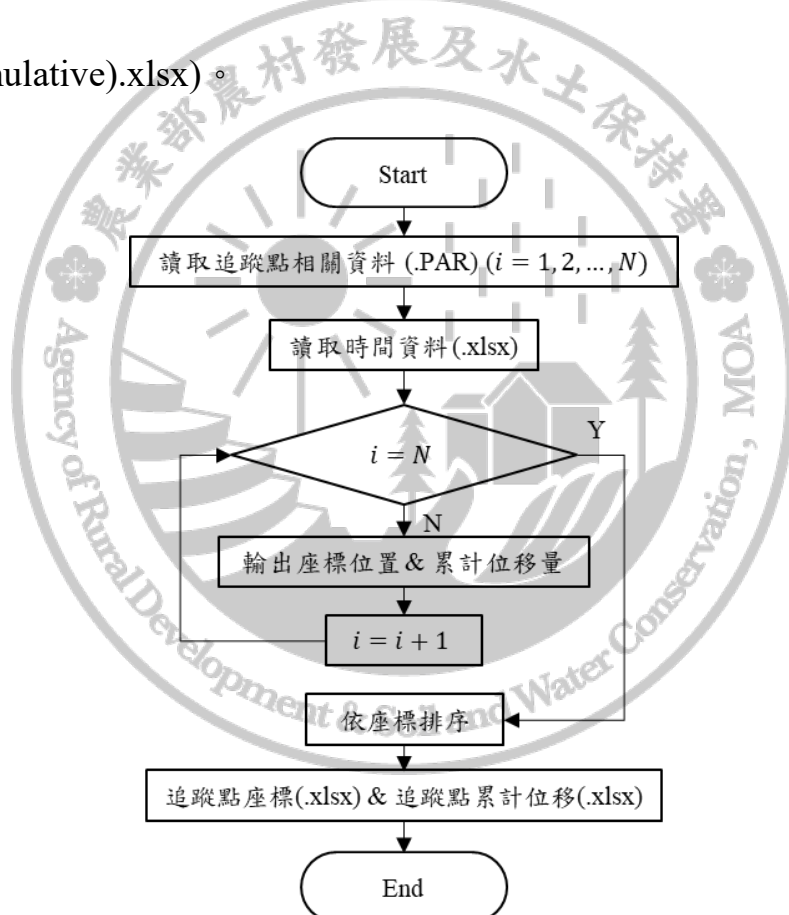


圖 3- 26 地表資訊取得流程圖

三、向量傾角法計算

為向量傾角法計算流程圖，程式(3)主要用於計算追蹤點在不同時間的位移角度與速度，以及向量傾角法的計算。首先，讀取時間與累計位移量，計算不同時間追蹤點的位移角度與速度。接著，讀取追蹤點座標，滿足向量傾角法的輸入參數條件，透過設定門檻值篩選追蹤點後，計算不同時間的向量傾角法推估滑動面，最後輸出儲存為Excel 文件格式(Carter method.xlsx)。



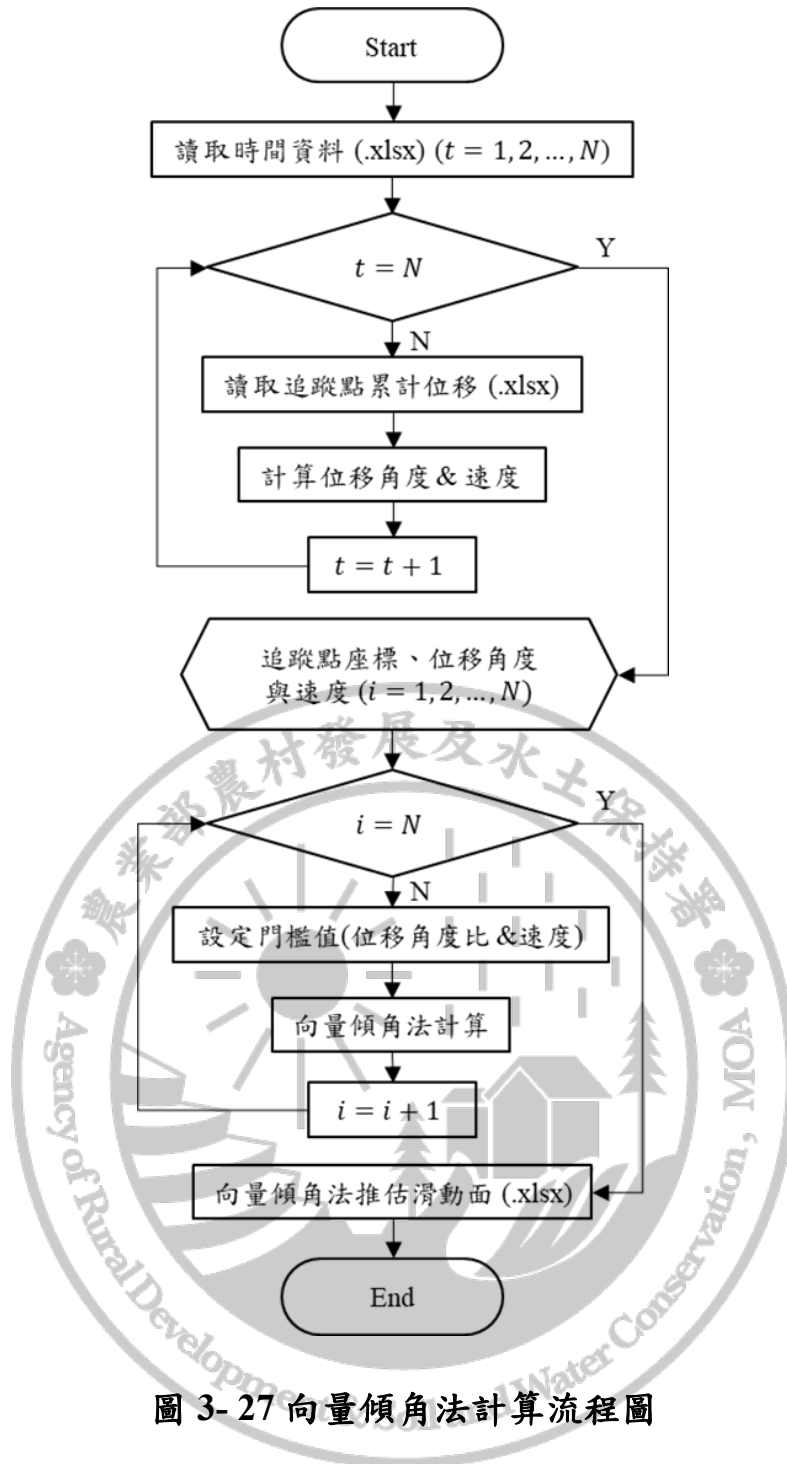


圖 3- 27 向量傾角法計算流程圖

四、一致性評估

為一致性評估的流程圖，程式(4)主要對兩個不同滑動面進行內插，以及一致性評估指標 CCC 的計算。在前述流程中，已取得數值模擬與向量傾角法的滑動面資訊，為評估兩筆資料的一致性，將兩筆資料的水平位置(x 座標)設為一致，並以內插的方式計算對應的垂直位置(y 座標)，並以此進行一致性評估指標的計算。

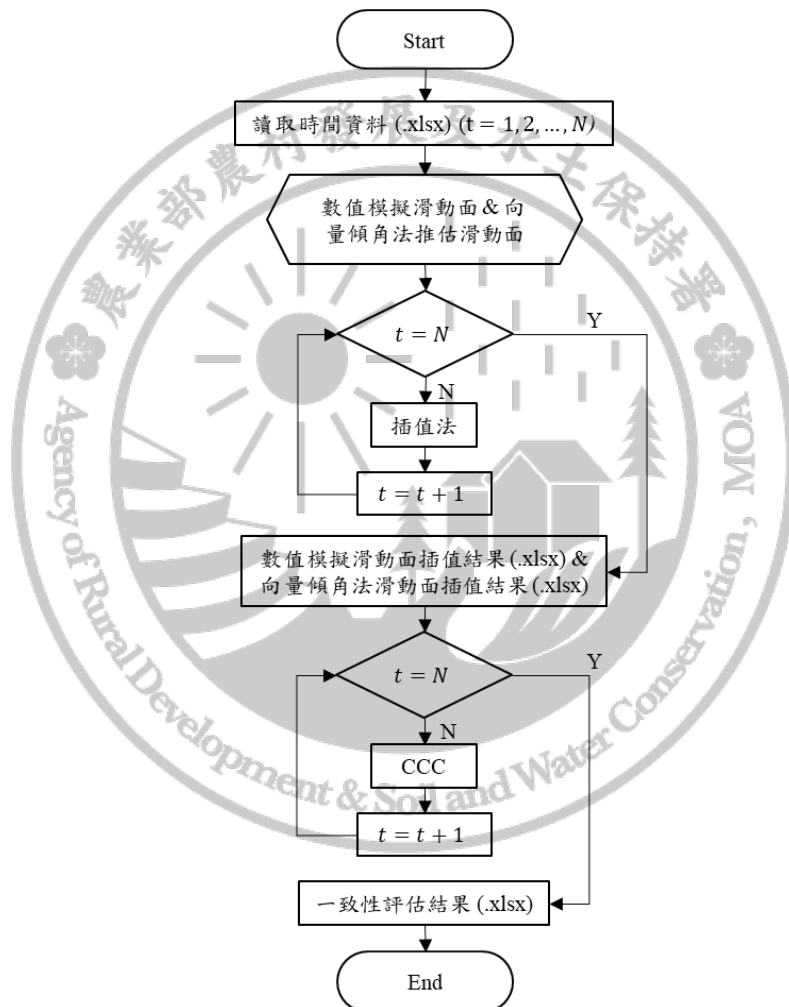


圖 3- 28 一致性評估流程圖

五、敏感度分析

為敏感度分析的流程圖。本研究將針對三個不同參數進行敏感度分析，分別為位移量、移動速度和位移角度與坡度比。其中，位移量主要針對數值模擬滑動面，探討在不同邊坡規模的臨界位移量最適值，而移動速度和位移角度比則是針對向量傾角法推估滑動面，探討不同門檻值配置對推估結果之影響。

三個參數的敏感度分析操作流程皆相同，建立列有不同參數範圍的文字檔(.txt)，透過程式讀取文字檔內部資料，以此修改原始程式(程式(1)或(3))的指令內容，後儲存為暫存程式檔(temp.py)並執行，接著，執行計算一致性評估指標的程式(4)，獲得此參數配置的一致性評估指標。按照此流程，逐步獲得不同參數配置下的一致性評估指標(CCC)。

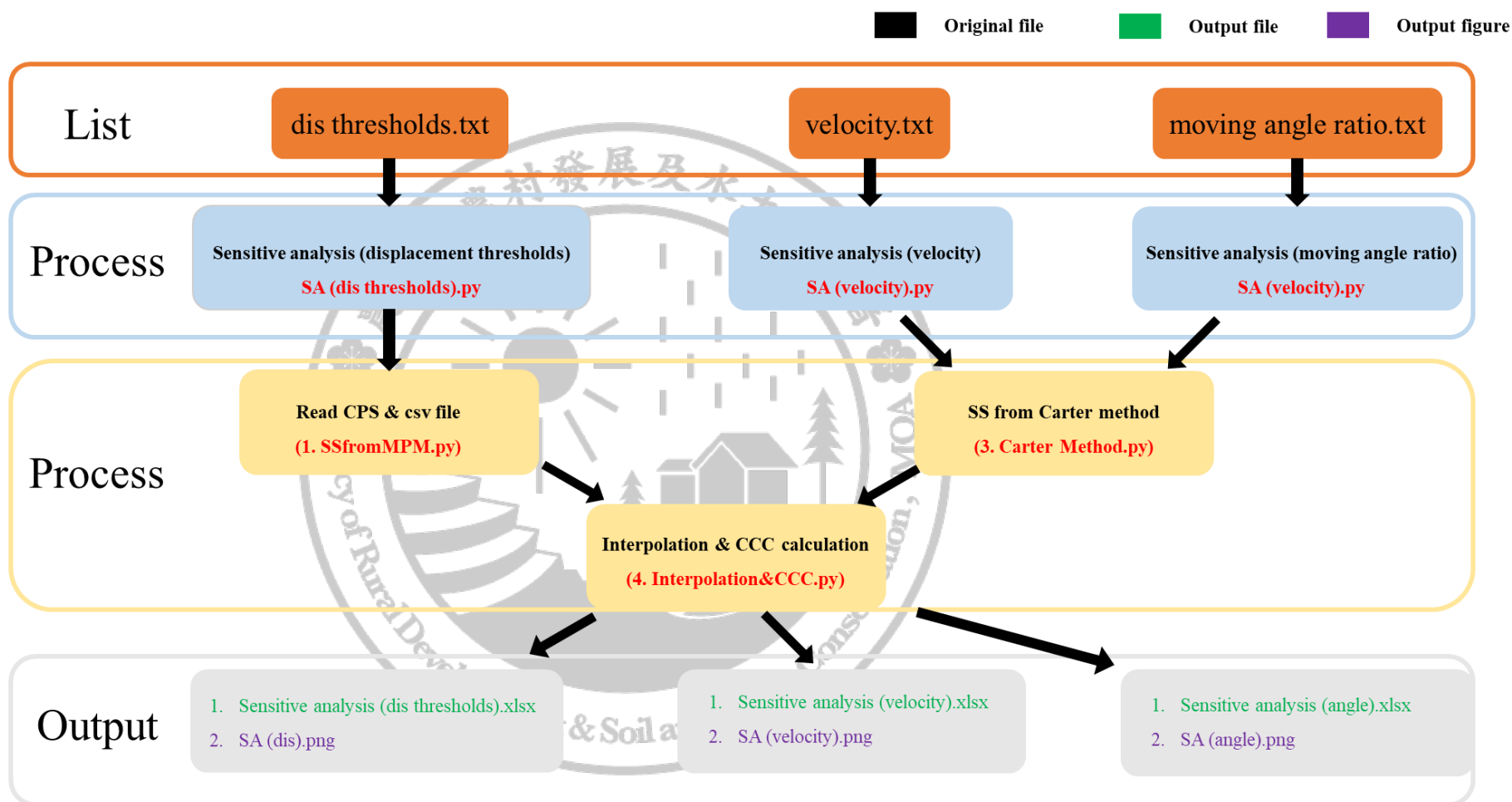


圖 3- 29 敏感度分析流程圖

第四章 結果與討論

本研究為探討向量傾角法的適用性與限制性，透過數值模式來產製崩塌過程中地表和地中變形的動態過程，以補足現地調查資料空間和時間解析度不足的問題，並作為向量傾角法的驗證依據。於本章節中，將先說明各情境模擬的結果及崩塌的行為特性，接著依據模擬結果來檢視向量傾角法的適用性與限制性，然後，根據分析結果提出改善方案，最後，探討本研究所提方案的改善成效。基於此，本章的小節標題依序為邊坡破壞模擬結果及探討、滑動面推估成效評估、向量傾角法改善方案和向量傾角法修正成效。

第一節 邊坡破壞模擬結果及探討

本節將探討在不同坡度及坡高條件下的邊坡破壞模擬結果。在不同坡度及坡高的邊坡滑動現象中，其土體滑動方向與滑動速度也會不同。本研究在邊坡高度(H)為 30 m，矩形底板厚度($Base$)為 10 m 的幾何配置下，設計共六個不同坡度，分別為 30° 、 40° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° ，並另以邊坡高度為 30 m、100 m、200 m、300 m、400 m 之不同條件模擬破壞，以探討由緩坡至陡坡對於向量傾角法推估結果的影響。

一、不同坡度之數值模擬結果

展示了不同坡度情境下模擬的初始條件，初始條件的參數請參考，展示了邊坡崩塌的運動過程。由於土體的內摩擦角已經小於坡面坡度，因此，土體在模擬一開始即出現部分不穩定區域，並接著開始滑動。

在 2.2 秒時，邊坡出現明顯變形，滑動範圍擴大。隨著時間推移，上邊坡滑動區域向後延伸，崩塌土體持續位移，滑動速度先上升後下降，直至崩塌過程結束。整個過程中，可以觀察到土體從初始不穩定到大規模滑動的演變過程。

展示了不同坡度的數值模擬結果。在坡度 30° 的案例中，由於土體的內摩擦角與坡度相近，土體穩定度相對較高，僅出現表層土體滑落的現象，滑動現象較輕微。而在其他坡度的案例中，由於土體強度不足，出現了明顯的滑動現象，邊坡整體發生顯著變形，滑動至彈性體後沿其表面移動。隨著坡度增加，可以發現上邊坡的滑動區域（Influenced Area）逐漸向後延伸，滑動面位置也逐漸後移，滑動距離（Run-out Distance）也逐漸增加，如所示，說明坡度增加導致土體穩定性降低，滑動速度增加，使得滑動範圍和滑動距離增大。展示了坡度與內摩擦角之比值與滑動範圍與滑動距離的關係。

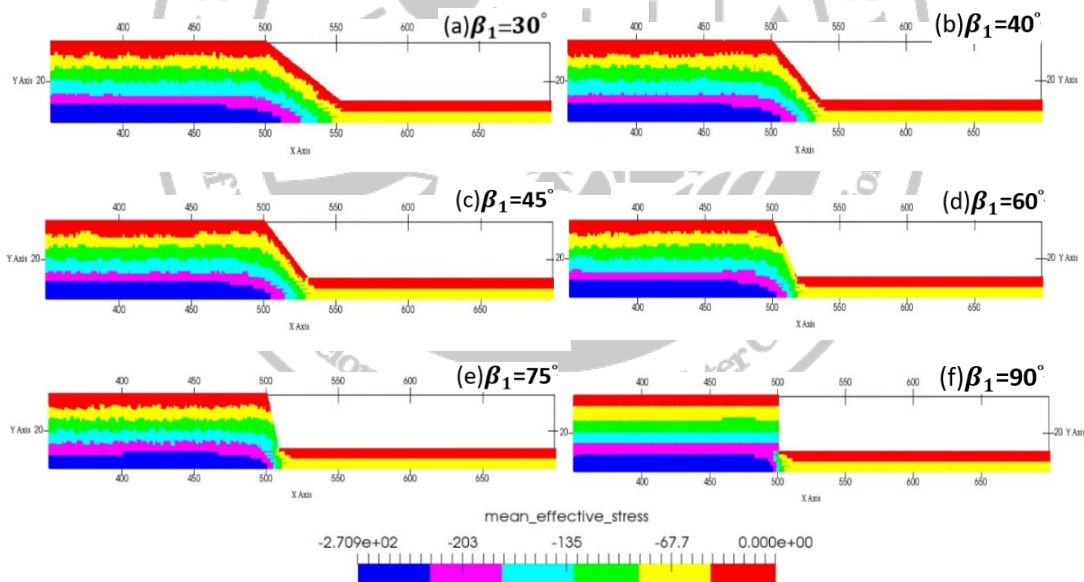


圖 4-1 坡度崩塌穩定狀態的說明圖

表 4-1 坡度的初始條件參數表

	Layer 1	Layer 2
material type	dry material	dry material
initial porosity	0.4	0.4
density solid	1900	1900
K0-value	0.0	0.0
material model solid	Mohr-Coulomb	Linear Elasticity
effective Poisson ratio	0.3	0.3
effective Young modulus	1000000	1000000
effective cohesion	0.0	0.0
effective friction angle	$\beta_1 = 30^\circ$	Set 40°
	$\beta_1 = 40^\circ$	Set 50°
	$\beta_1 = 45^\circ$	Set 60°
	$\beta_1 = 60^\circ$	Set 70°
	$\beta_1 = 75^\circ$	Set 80°
	$\beta_1 = 90^\circ$	Set 100°
effective dilatancy angle	0.0	0.0
tensile strength	0.0	0.0

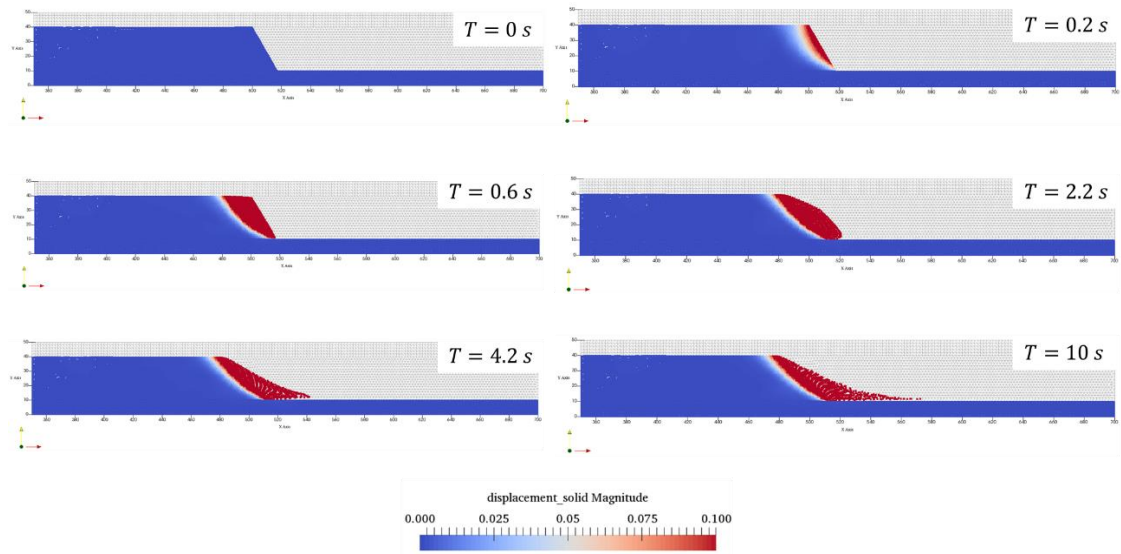


圖 4-2 邊坡崩塌運動過程 ($\beta_1 = 60^\circ$)

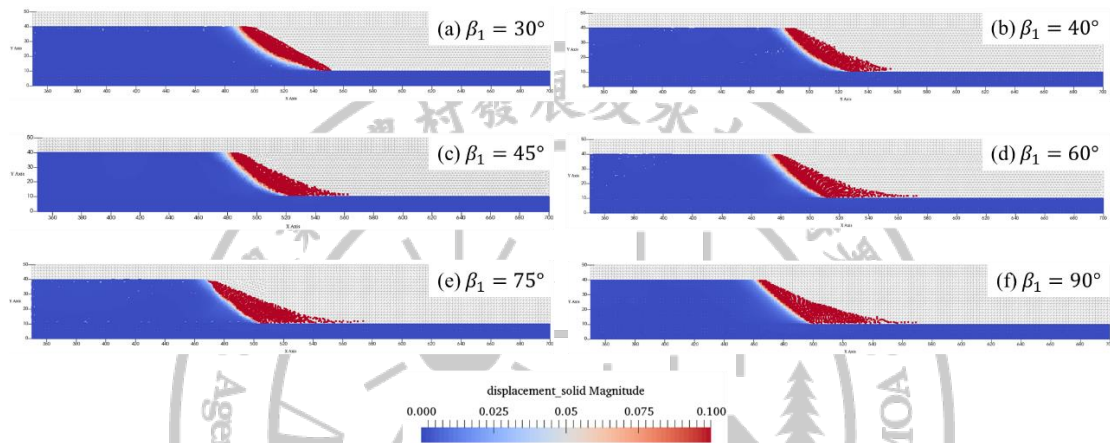


圖 4-3 不同坡度數值模擬結果

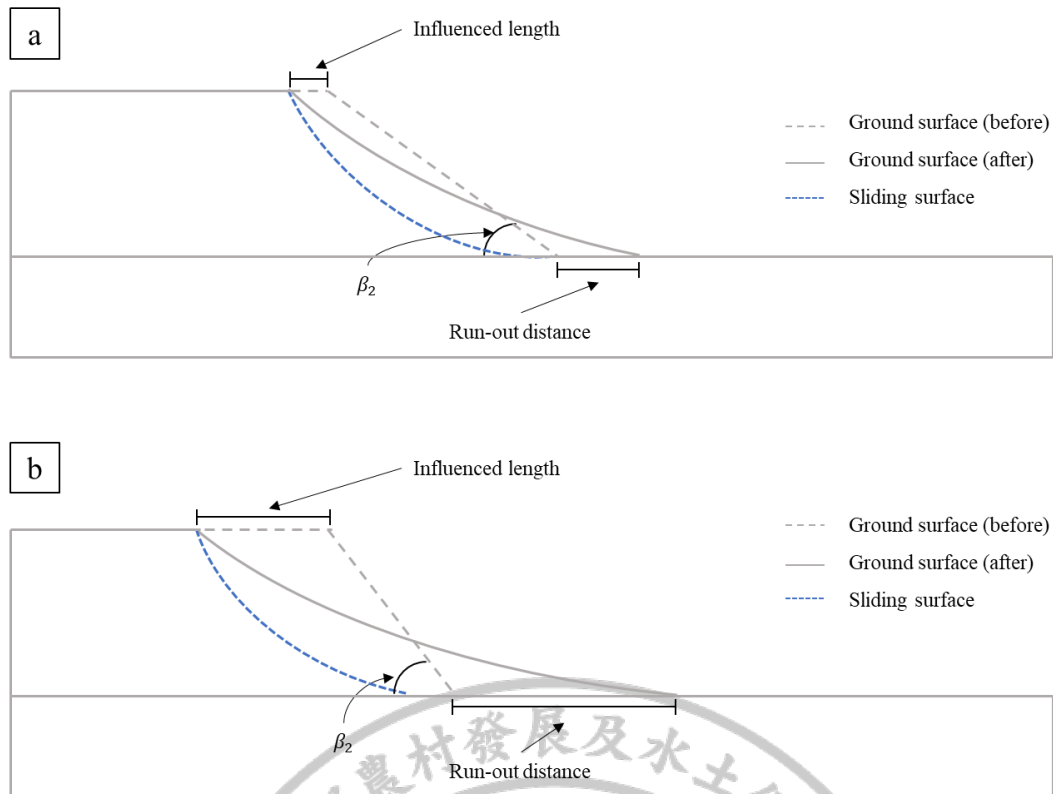


圖 4-4 不同坡度之崩塌行為差異概念圖 (a)坡度緩 (b)坡度陡

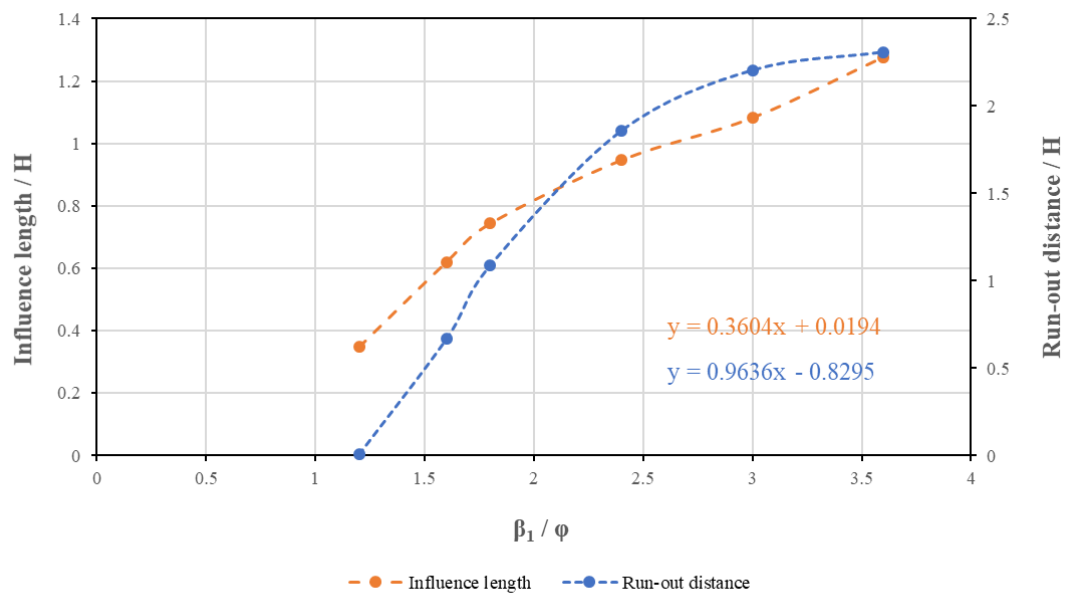


圖 4-5 無因次滑動範圍/距離變化圖

二、不同坡高之數值模擬結果

展示了不同坡高情境下模擬的初始條件，初始條件的參數請參考，接下來以邊坡高度 200m 的情境接續說明。展示了邊坡高度為 200 m 的崩塌運動過程。由於土體的內摩擦角與坡度之間存在一定差異，土體在初期即出現部分不穩定區域並開始滑動，隨後不穩定區域逐漸向後延伸。隨著時間推移，不穩定區域的滑動現象變得更加明顯，邊坡出現明顯變形，滑動土體逐漸向右方推進，直至崩塌過程結束，滑動距離約達 400 m。

展示了不同邊坡高度的數值模擬結果，可以看出滑動現象大致相同。然而，隨著邊坡高度的增加，上邊坡的不穩定區域和滑動距離也隨之增加。不穩定區域的範圍最大達約 300 m，滑動距離最大值接近 1.1 km。值得注意的是，在中，臨界位移量設定為 1 m。當邊坡規模較大時，邊坡滑動現象伴隨著內部向下的位移，如(e)。若以 1m 的臨界位移量來定義數值模擬中的滑動面，會影響滑動面的形狀。這說明在不同邊坡規模下，臨界位移量的設定需要調整。對於較大規模的邊坡，相同的位移量可能仍屬於穩定範圍，而對於較小規模的邊坡，則可能已是不穩定狀態。因此，不同規模的邊坡對臨界位移量的敏感度各異，設定時需考量此因素，故後續將透過敏感度分析探討臨界位移量的最適值。

展示了不同坡高條件下的崩塌行為差異，可以發現，當邊坡高度增加，上邊坡滑動區域逐漸向後延伸，滑動面位置也逐漸後移，滑動距離也逐漸增加。根據數值模擬的結果，將不同邊坡高度之上邊坡滑

動區域與滑動距離整理並繪製邊坡高度與滑動範圍及滑動距離之關係圖，如所示

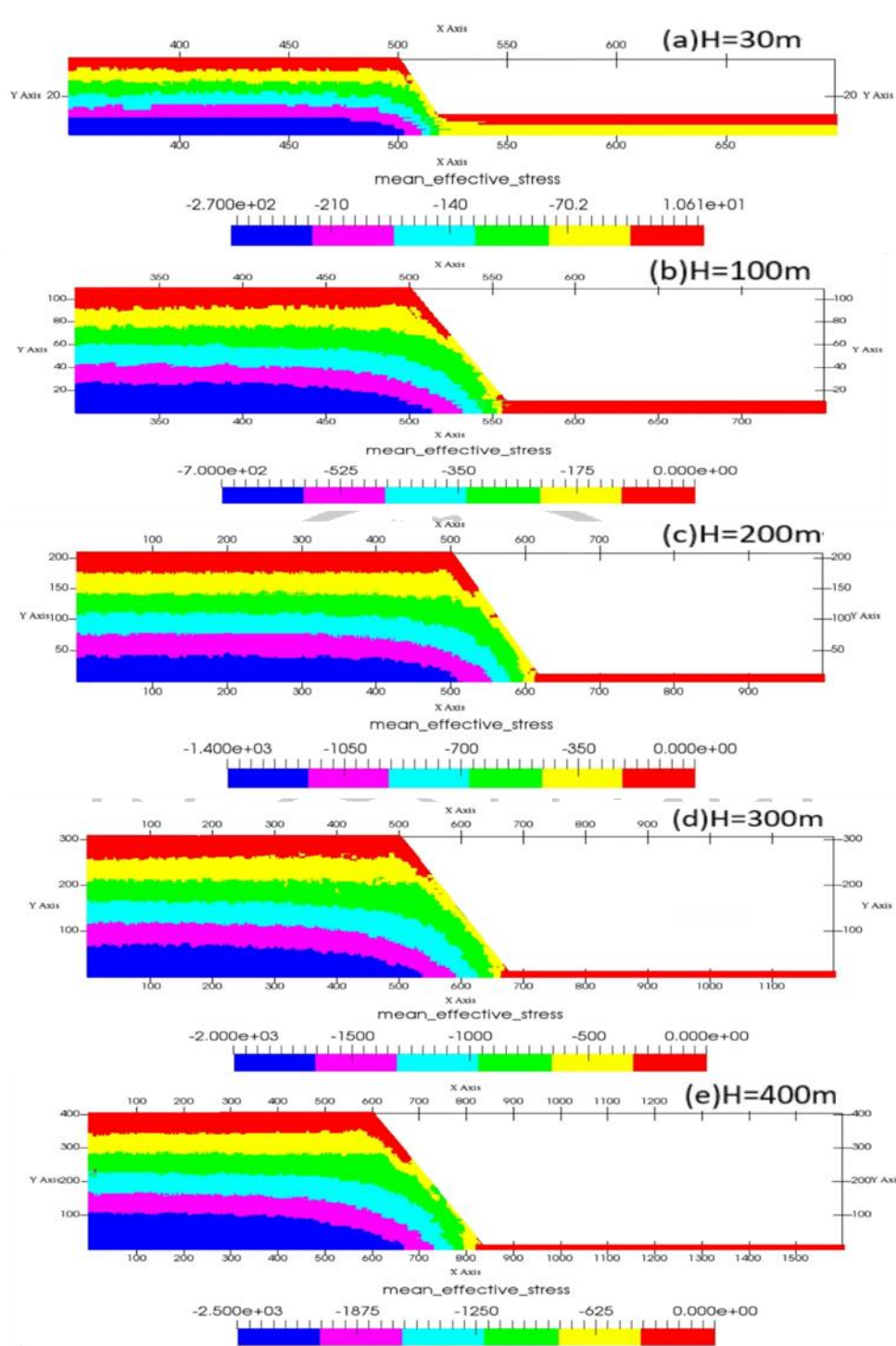
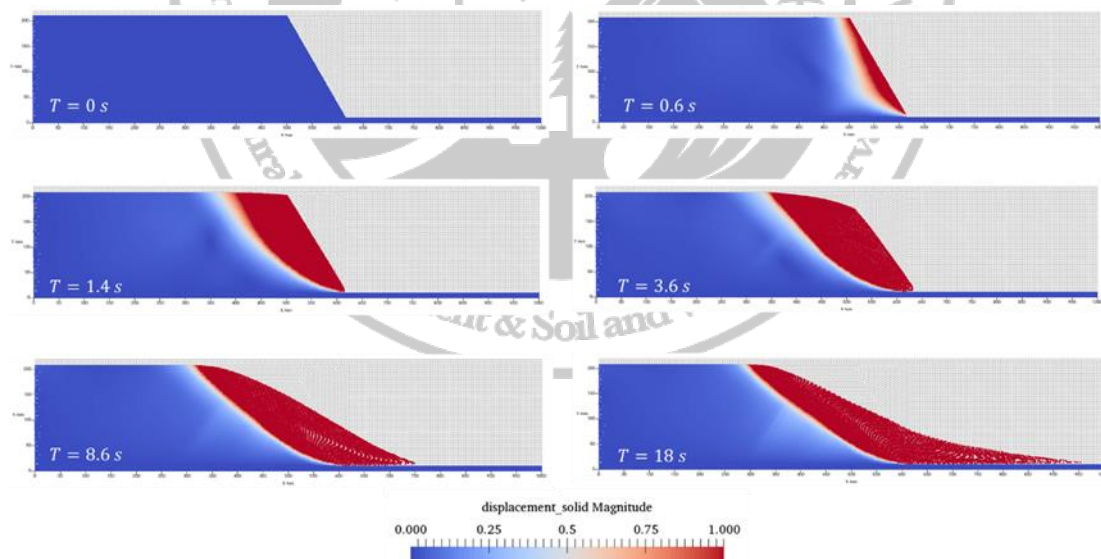


圖 4-6 坡高崩塌穩定狀態的說明圖

表 4-2 坡高的初始條件參數表

	Layer 1	Layer 2
material type	dry material	dry material
initial porosity	0.4	0.4
density solid	1900	1900
K0-value	0.0	0.0
material model solid	Mohr-Coulomb	Linear Elasticity
effective Poisson ratio	0.3	0.3
effective Young modulus	1000000	1000000
effective cohesion	0.0	0.0
effective friction angle	$\beta_1 = 60^\circ$ Set 70°	0.0
effective dilatancy angle	0.0	0.0
tensile strength	0.0	0.0

圖 4-7 邊坡崩塌運動過程($H = 200$ m)

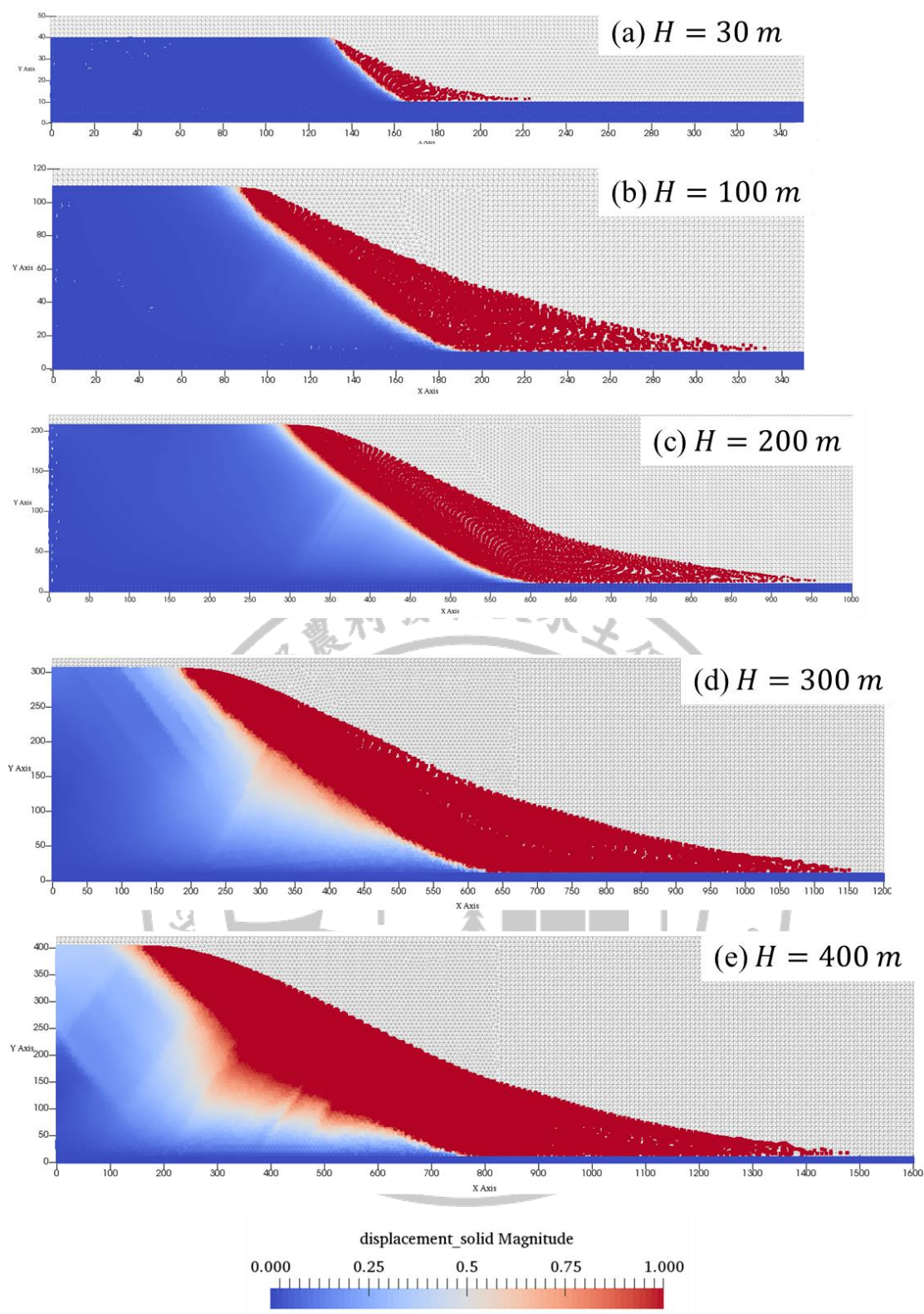


圖 4-8 不同邊坡高度數值模擬結果

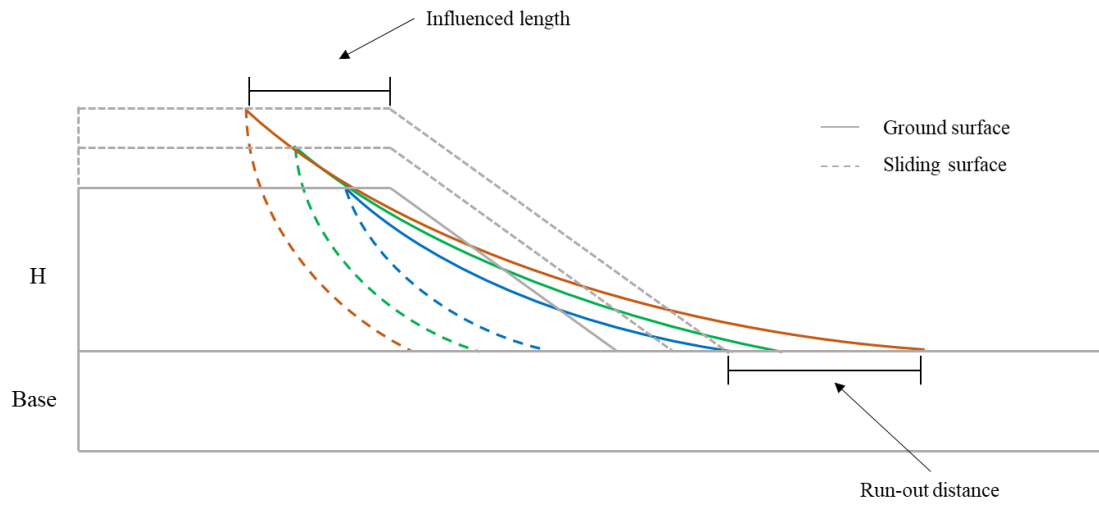


圖 4-9 不同邊坡高度之崩塌行為差異概念圖

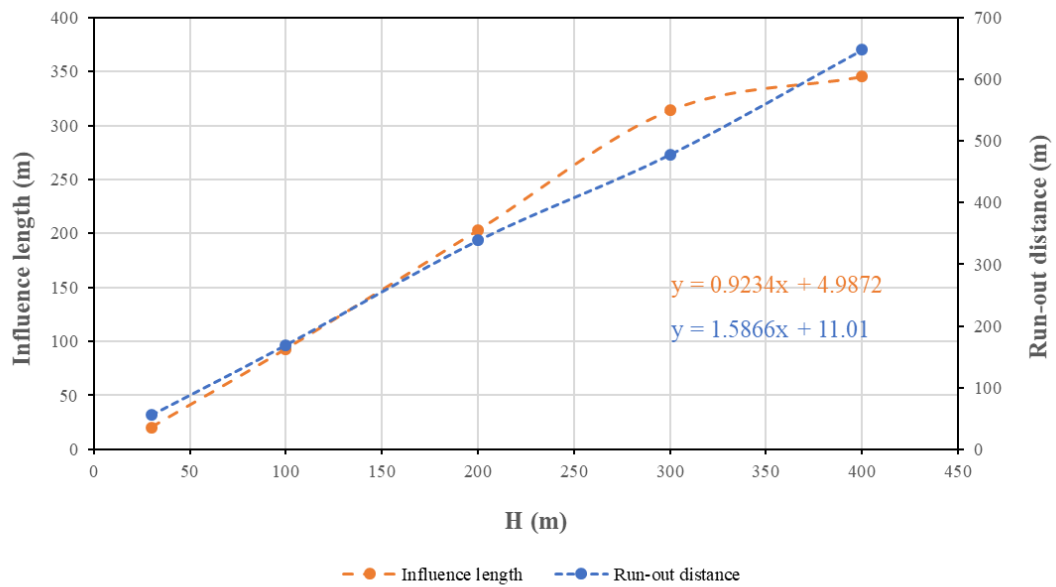


圖 4-10 邊坡高度與滑動範圍/距離關係圖

第二節 滑動面推估成效評估

本研究已進行不同坡度條件下的邊坡破壞模擬，透過 Python 的數據自動化處理，動態過程中，模擬滑動面和推估滑動面的比較結果可繪製如所示，其中藍色虛線代表數值模擬滑動面，紅色虛線則代表向量傾角法推估滑動面，綠色實線箭頭則是各追蹤點的平均速率及方向。由於，邊坡崩塌屬於動態過程，向量傾角法的推估成效亦會隨時間而有所變化，因此，可以透過一致性評估指標 (Concordance Correlation Coefficient, CCC) 隨時間變化圖，觀察向量傾角法在崩塌過程中的推估成效變化，如所示。本節將依序展示在不同幾何情境下應用向量傾角法的滑動面推估結果與成效評估，並詳細說明原始向量傾角法所產生的錯誤樣態及其原因。

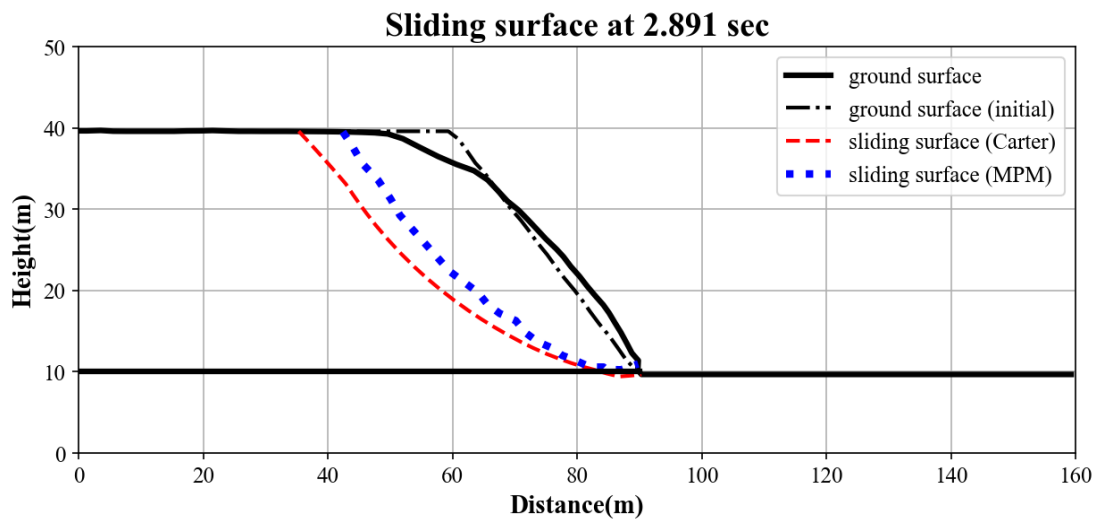


圖 4- 11 滑動面比較示意圖

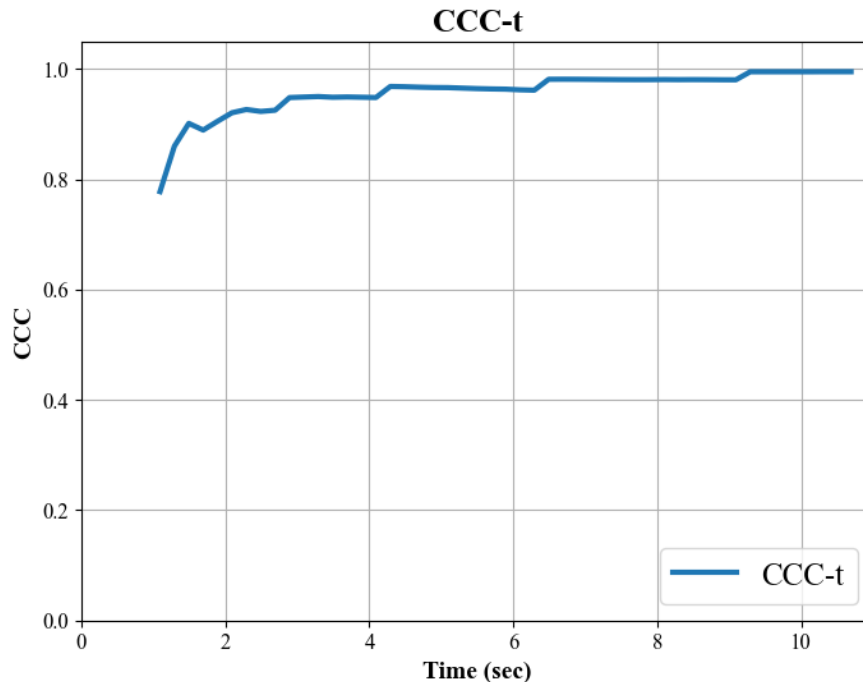


圖 4-12 CCC 隨時間變化圖

一、向量傾角法假設驗證

Carter and Bentley (1985)在應用向量傾角法推估滑動面時，因其起算點位置的不同而有所差異，如圖 4-13 不同假設下的滑動面推估結果差異

(a)所示，當起算點位於上邊坡時，其方法又可被稱為 Downhill 法(紫色實線)，當起算點位於下邊坡時，其方法又可被稱為 Uphill 法(青色虛線)。由於起算點位置不同導致推估滑動面的位置不同，因此，Carter and Bentley (1985) 給予兩個方法不同權重來得到一個合併結果。般鑑於此，本研究透過變換權重，觀察不同假設下的推估結果差異。

首先，**Carter and Bentley (1985)**認為上半部以 Downhill 繪製的滑動面較為準確，下半部以 Uphill 的滑動面較為準確，所以於上半部給予 Downhill 較大的權重，以及下半部給予 Uphill 較大的權重，推估結果如圖 4-13 不同假設下的滑動面推估結果差異

(a)所示。此假設的推估結果與模擬滑動面出現較好的相似性，說明 Carter and Bentley (1985)假設的合適性。

接著，本研究假設上半部以 Uphill 繪製的滑動面較為準確，下半部以 Downhill 的滑動面較為準確，所以於上半部給予 Uphill 較大的權重，以及下半部給予 Downhill 較大的權重，推估結果如圖 4- 13 不同假設下的滑動面推估結果差異

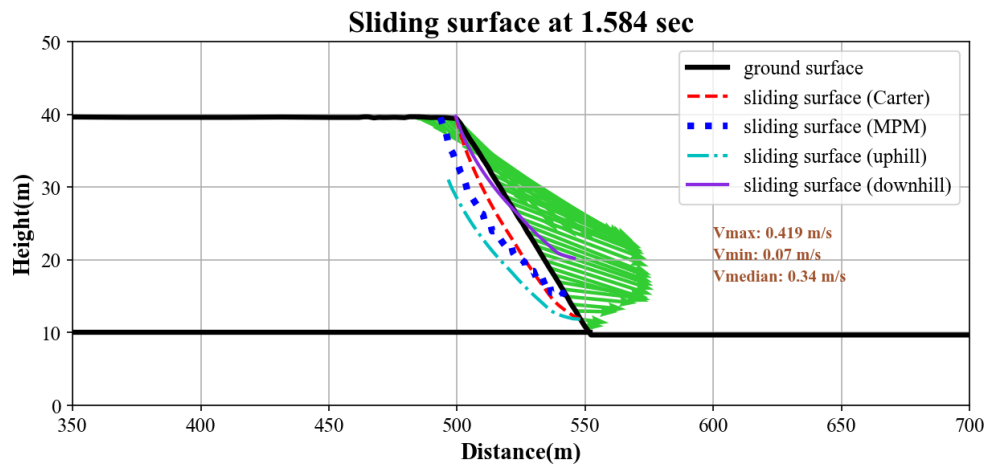
(b)所示。此假設的推估結果與模擬滑動面出現較大的差異，且出現滑動面凸出地表的不合理現象，說明此假設並不合適。

最後，將 Uphill 與 Downhill 的權重假設為相等，即對兩個方式的滑動面位置取平均，推估結果如圖 4- 13 不同假設下的滑動面推估結果差異

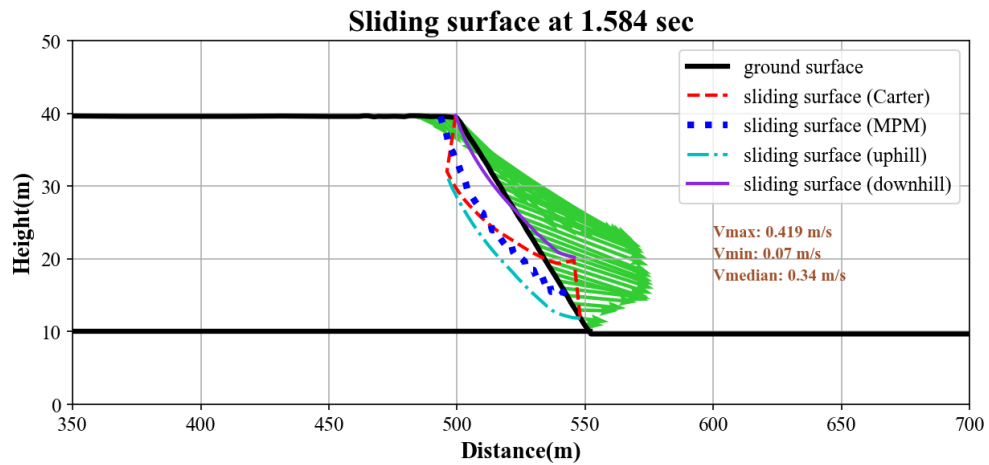
(c)所示。雖然此假設下的推估結果雖與模擬滑動面相近，但仍出現滑動面凸出地表的不合理現象，說明此假設亦不完全合適。

由圖 4- 13 不同假設下的滑動面推估結果差異

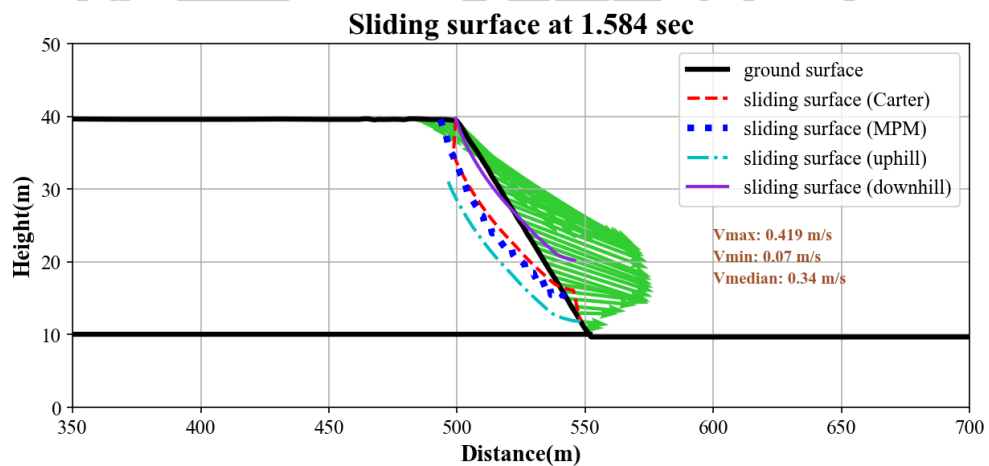
也可以得知，以 Uphill 方法推估的滑動面，其誤差會隨著向上推估而逐漸增加；Downhill 方法則相反，誤差隨向下推估而逐漸增加，推估結果甚至會凸出地表。因此，將兩個不同方法準確度較高的區域結合為一個滑動面是合理的，說明 Carter and Bentley (1985)提出的原假設具有其合理性。



(a) 上半部：Downhill，下半部：Uphill



(b) 上半部：Uphill，下半部：Downhill



(c) Uphill & Downhill 權重相等時的推估結果

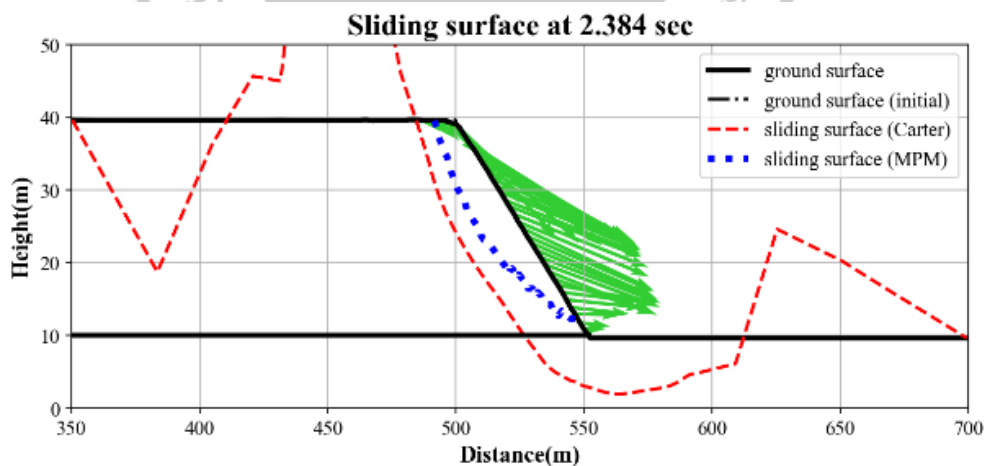
圖 4- 13 不同假設下的滑動面推估結果差異

二、不同坡度之滑動面推估結果

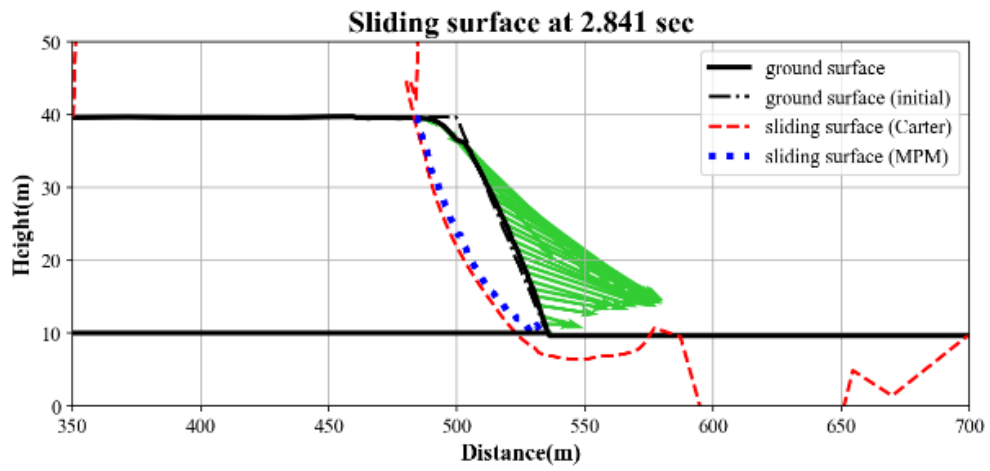
不同坡度(β_1)之滑動面推估結果如圖 4- 14 不同坡度之滑動面推估結果

所示，設定臨界位移量為 0.1 m 來決定數值模擬滑動面的位置。結果顯示，不論在坡度為何，原始向量傾角法的推估結果與數值模擬滑動面均存在明顯差異，並出現滑動面凸出邊坡表面與延伸至彈性體區域等不合理的現象，僅有參與滑動區域的推估結果與模擬滑動面有較好的一致性。

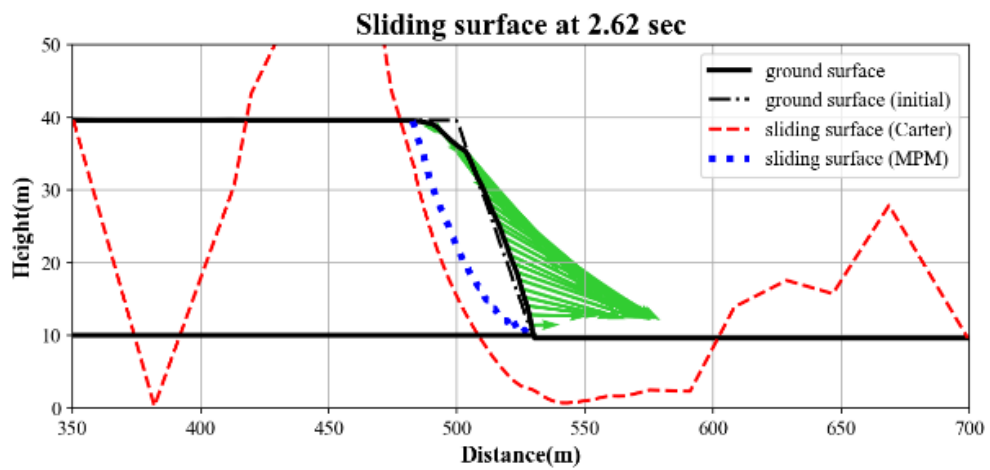
由可得知不同坡度條件下的成效評估結果，CCC 在隨時間而出現上下波動，範圍相當大，說明原始向量傾角法的推估成效相當不穩定。此外，在崩塌過程中，CCC 最大值接近 0.9，此為評估指標計算上的限制，除發生崩塌運動的區域外，其餘區域不應納入成效評估的計算，因此，實際的滑動面推估結果仍需進一步修正。不同坡度的推估成效統整如，當坡度為 45° 與 60° ，整體推估成效相對較佳，其餘案例的推估結果與模擬滑動面的一致性皆低於 0.3，說明向量傾角法在不同坡度條件下的適用性存在局限。



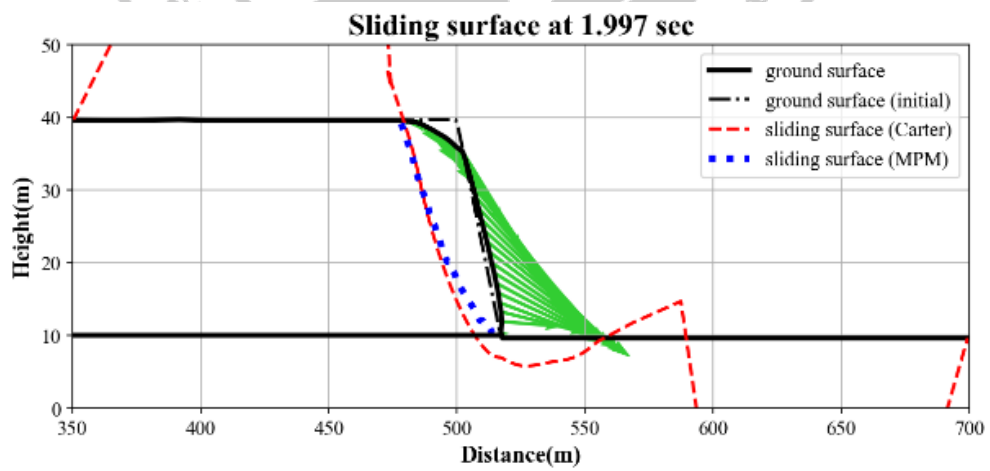
(a) $\beta_1 = 30^\circ$



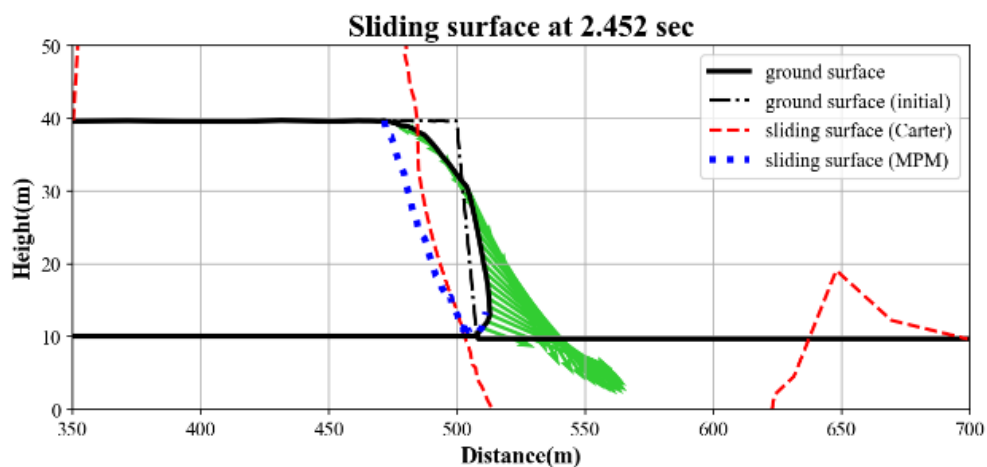
(b) $\beta_1 = 40^\circ$



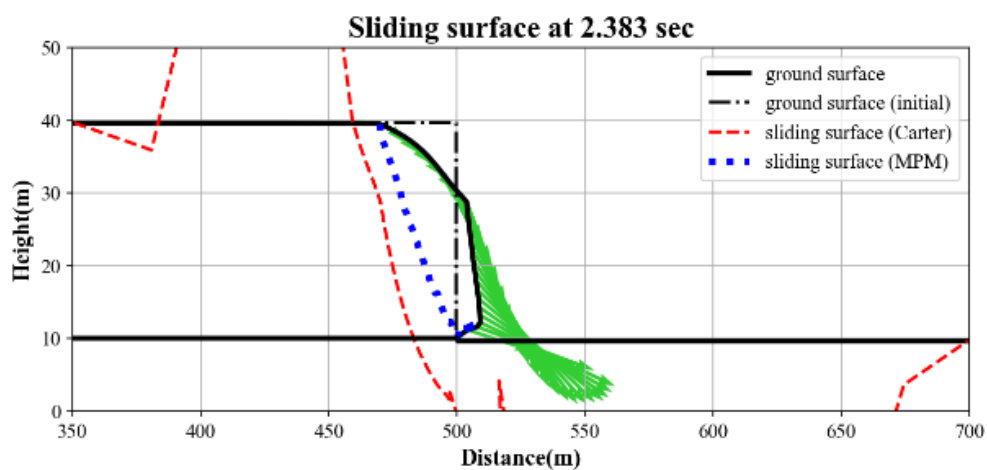
(c) $\beta_1 = 45^\circ$



(d) $\beta_1 = 60^\circ$



(e) $\beta_1 = 75^\circ$



(f) $\beta_1 = 90^\circ$

圖 4-14 不同坡度之滑動面推估結果

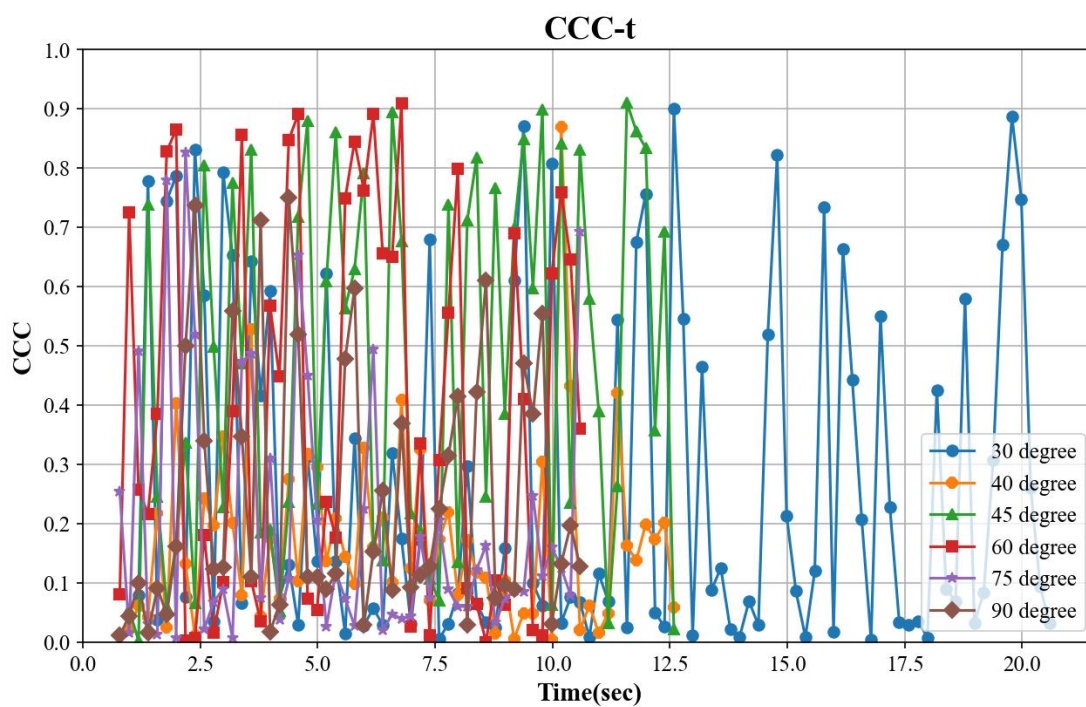


圖 4-15 不同坡度之滑動面推估成效歷時圖

表 4-3 不同坡度的推估成效

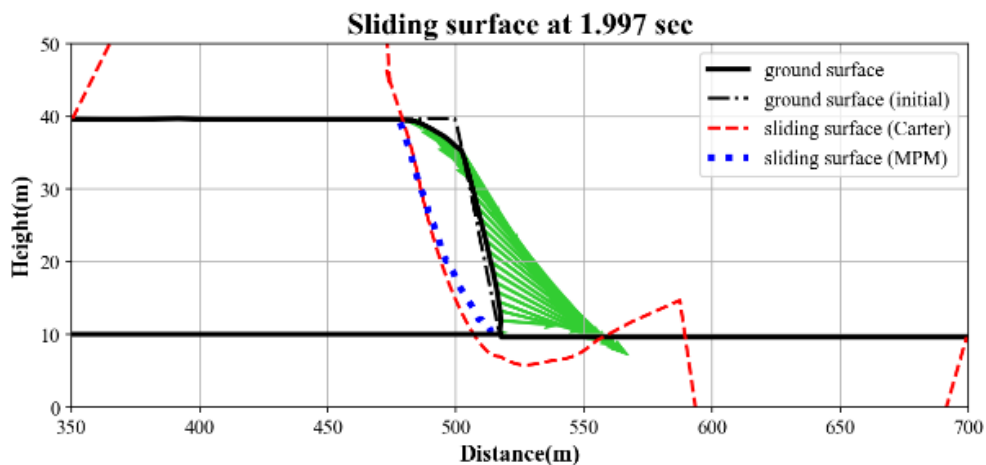
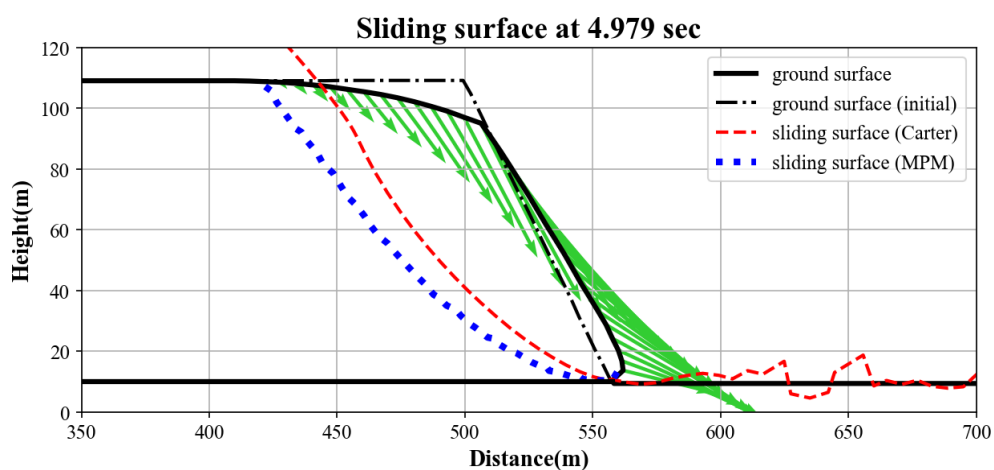
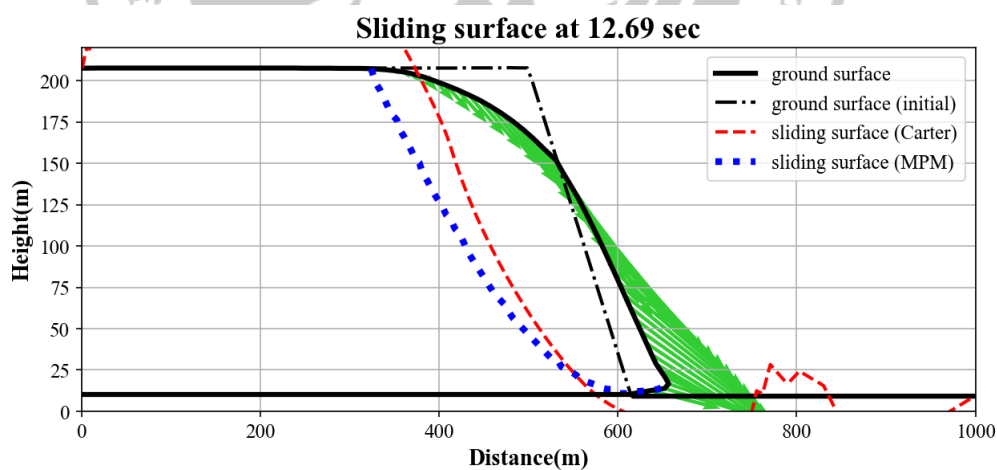
邊坡坡度 β_1 (°)	CCC (mean)
30	0.2785
40	0.1749
45	0.4655
60	0.3939
75	0.194
90	0.2459

三、不同坡高之滑動面推估結果

不同坡高(H)的滑動面推估結果如圖 4-16 不同坡高之滑動面推估結果

所示。設定臨界位移量 0.3m 來決定數值模擬滑動面的位置。由結果可知，原始向量傾角法的推估結果仍有明顯差異，僅在滑動區域的推估結果與模擬滑動面有一定的一致性。然而，隨著邊坡高度增加，崩塌規模也會隨之增大，滑動區域會向上邊坡後方延伸，使得參數崩塌運動的區域擴大，且多數追蹤點的位移方向皆為向下，推估滑動面上下起伏的現象減少，整體差異相對較小。

顯示不同邊坡高度條件下的推估成果，與前述案例相同，CCC 隨時間出現上下波動，波動範圍相當大。在此情境下，向量傾角法的推估成效非常不穩定。不同邊坡高度條件的整體成效評估統整如，可以發現，當邊坡整體規模增加，向量傾角法的整體推估成效較佳。由於邊坡高度提高，崩塌運動的規模也會隨之增加，使得滑動區域增加，逐漸逼近數值模型的左邊界，使得向量傾角法的起算點間接得到修正，提升其準確度。然而，當邊坡高度大於 200 m 後，推估成效出現明顯下降，原因應出自於臨界位移的設定，當邊坡規模增加，臨界位移應做出動態調整，以消除不同邊坡規模對臨界位移的敏感度問題。

(a) $H = 30 \text{ m}$ (b) $H = 100 \text{ m}$ (c) $H = 200 \text{ m}$

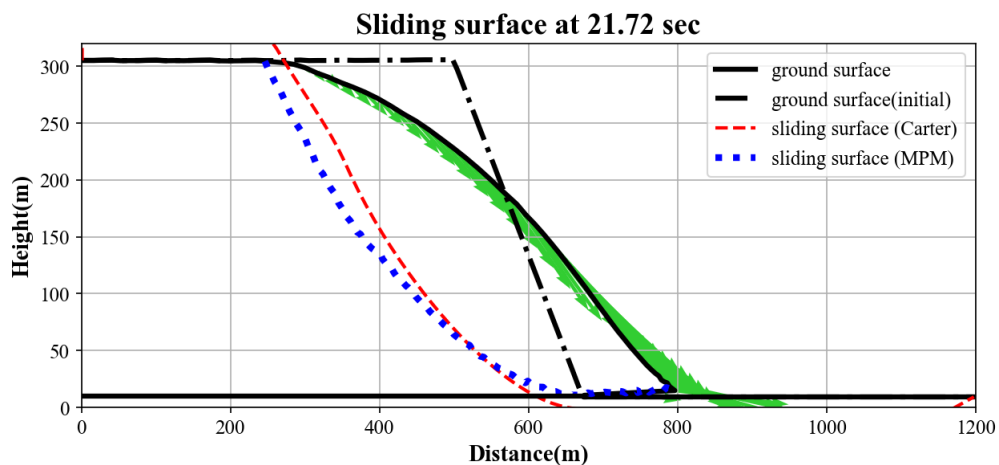
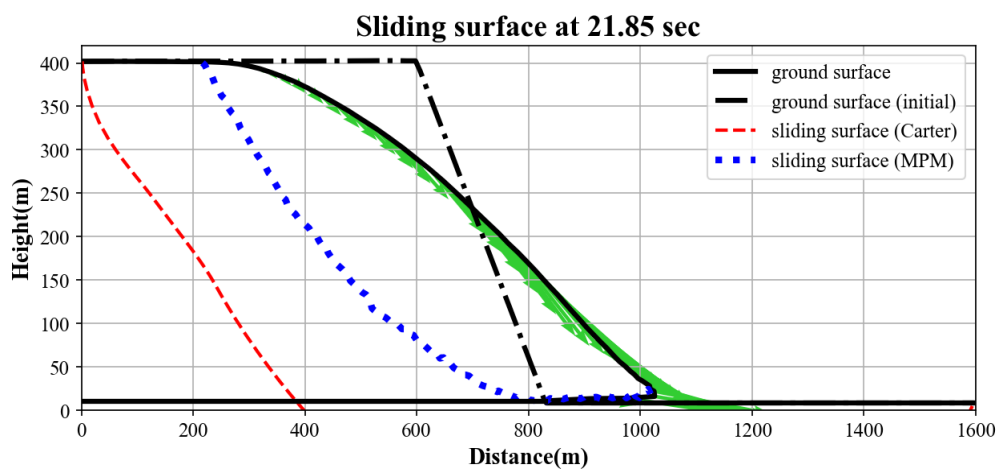
(d) $H = 300$ m(e) $H = 400$ m

圖 4-16 不同坡高之滑動面推估結果

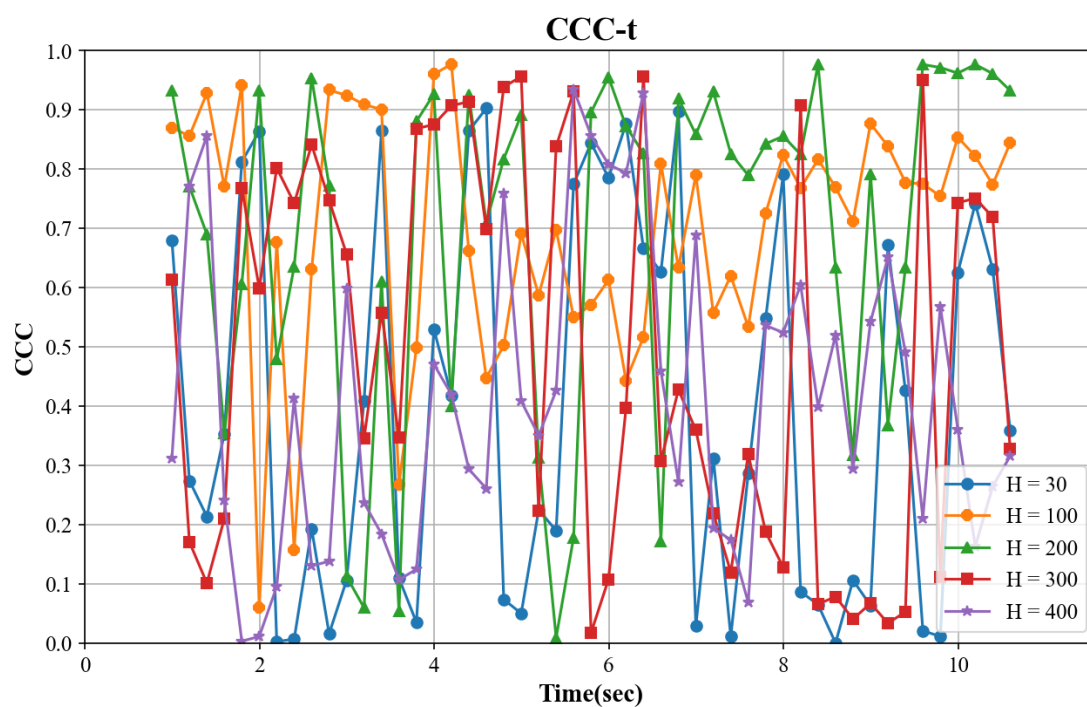


圖 4-17 不同坡高之滑動面推估成效歷時圖

表 4-4 不同坡高的推估成效

邊坡高度 H (m)	CCC (mean)
30	0.3939
100	0.7399
200	0.7694
300	0.5967
400	0.5707

四、不同追蹤點數量之滑動面推估結果

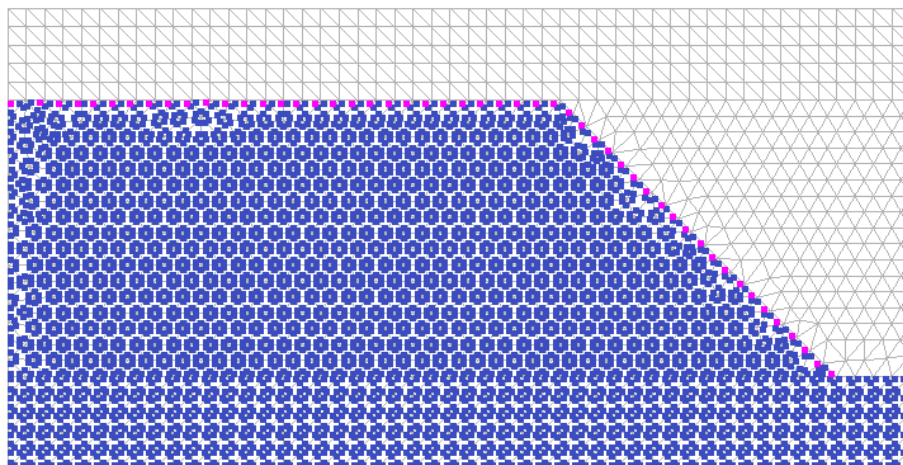
在 Carter and Bentley (1985) 中，建議地表監測點數量至少為 6 點。為探討不同數量的地表監測點數，即追蹤點數量對於向量傾角法之影響，本研究自前述案例中選取坡度 45° 的案例，逐步減少地表追蹤點數量，依序為 51、25、11、6 與 4 個，追蹤點之間為等距分布，如圖 4-18 不同追蹤點數量之分佈

所示，並觀察向量傾角法在不同追蹤點數量下的推估成效變化。

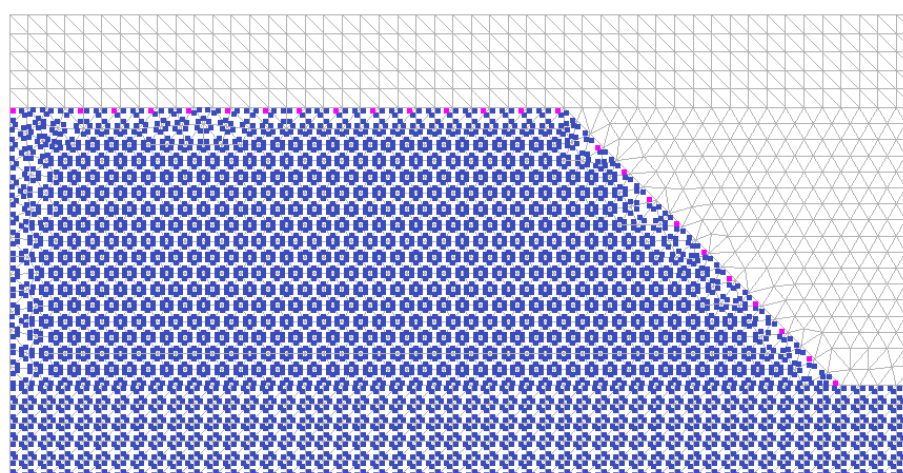
圖 4-19 不同追蹤點數量之滑動面推估結果

為不同追蹤點數量的滑動面推估結果。可以發現，當追蹤點數量為 51 與 25 點時，推估結果差異不大，皆為平滑曲線；當追蹤點數量減少至 11 點時，推估滑動面出現明顯轉折。隨著追蹤點逐漸減少，推估結果出現轉折現象更加明顯，誤差亦逐漸增加。

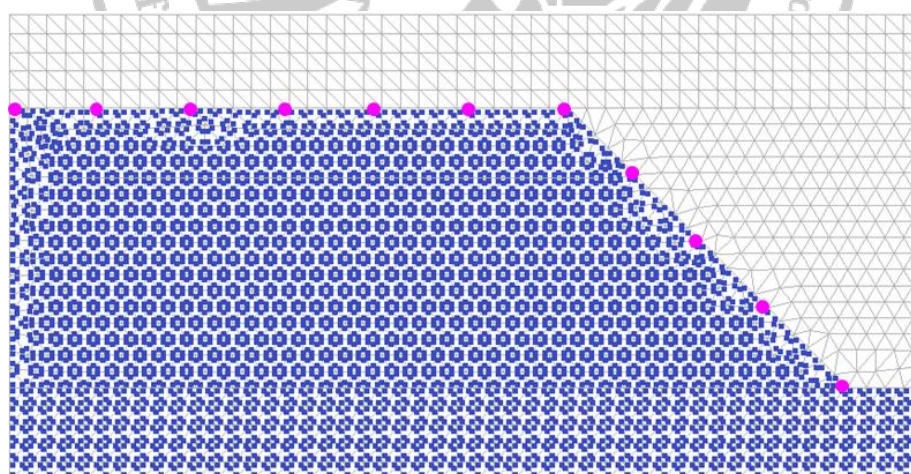
展示了不同追蹤點數量下的推估成效歷時圖。在較多追蹤點的情境下，CCC 隨時間變化的幅度相當大，但隨著追蹤點數量逐漸減少，變化幅度亦有減小的趨勢，且略顯失去準確度。原因在於，隨追蹤點數量減少，地表資訊量亦會降低，向量傾角法無法反映出潛在滑動面隨時間變化的特性，且追蹤點可能分布在相對穩定區域，與模擬滑動面維持一定誤差，故 CCC 變化幅度降低。不同追蹤點數量的推估成效差異整理如所示，在追蹤點數量大於 6 點時，CCC 可維持在 0.7 以上，當追蹤點數量減少至 4 點時，CCC 略微降低至 0.64。之所以 CCC 差異不大，原因在於推估結果仍存在前述的錯誤推估現象，故整體 CCC 僅有些微差異。



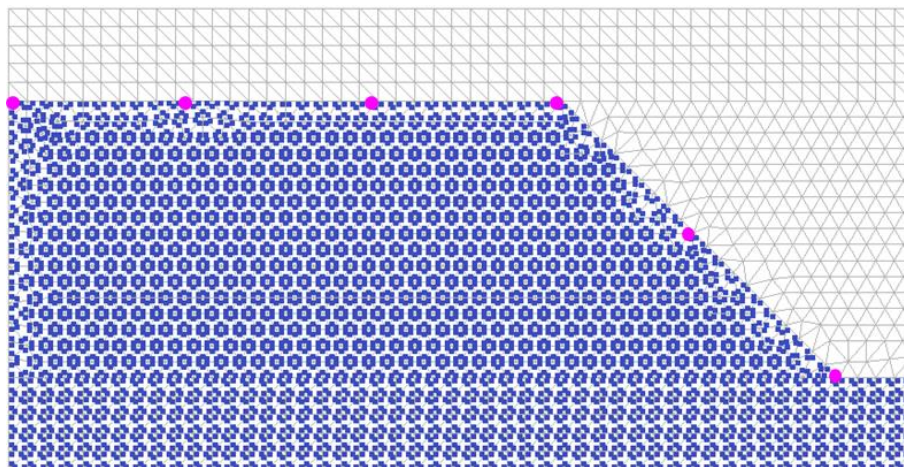
(a) 51 個追蹤點



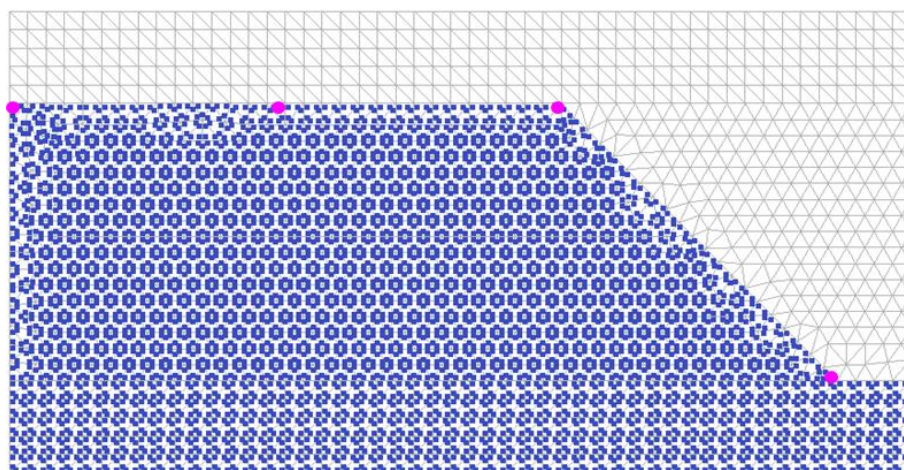
(b) 25 個追蹤點



(c) 11 個追蹤點

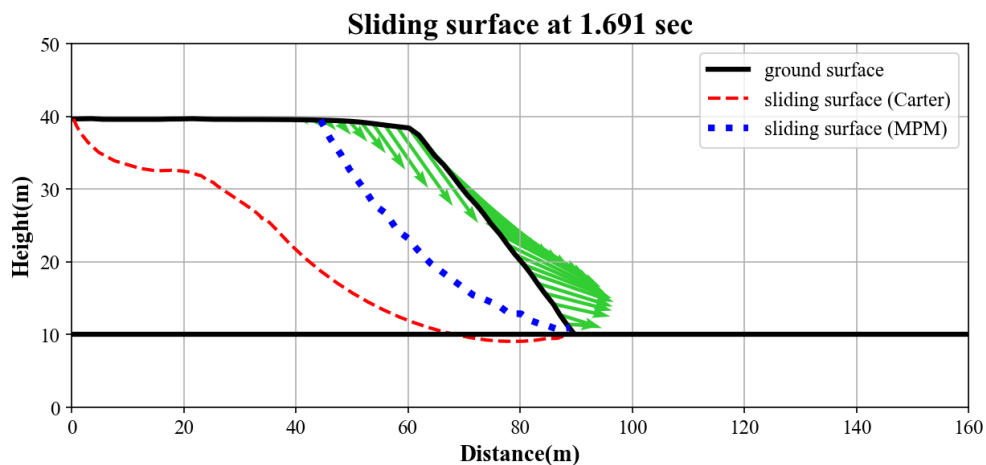


(d) 6 個追蹤點

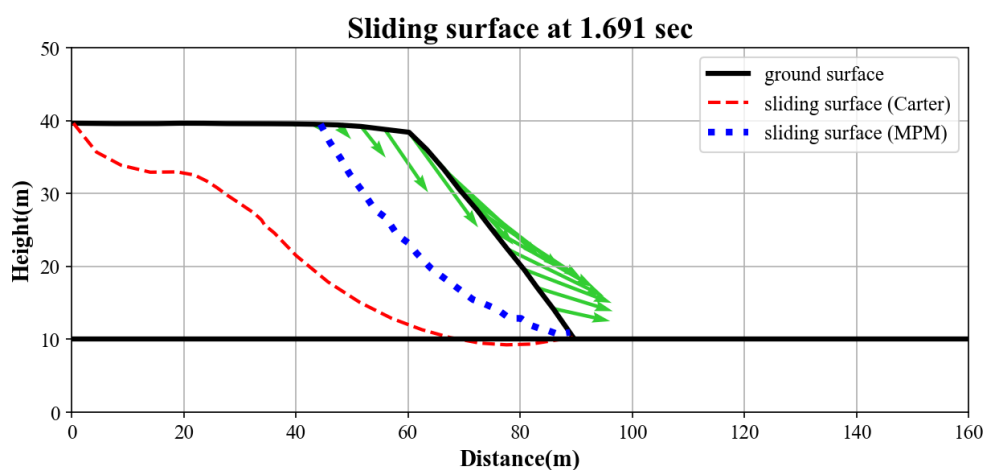


(e) 4 個追蹤點

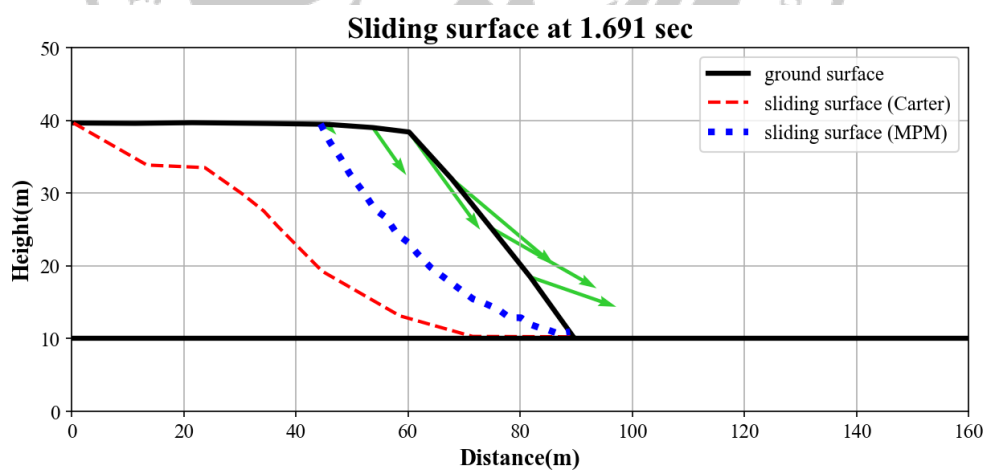
圖 4-18 不同追蹤點數量之分佈



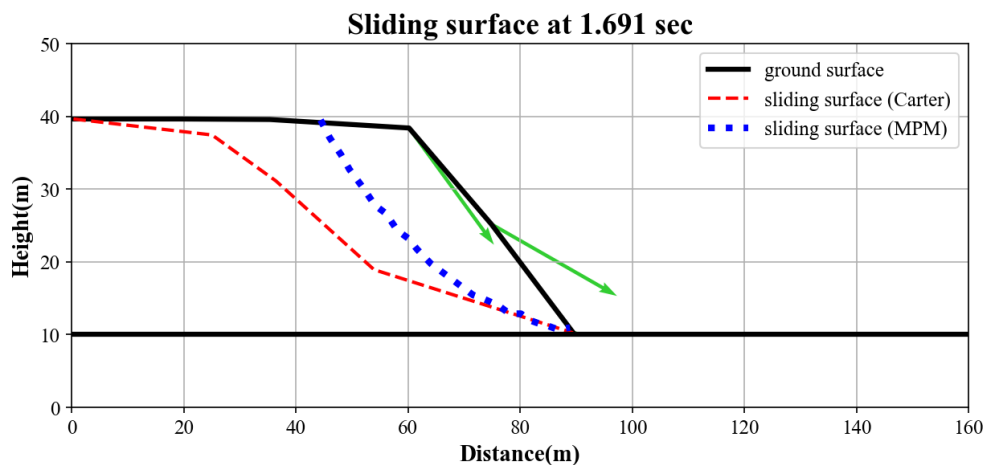
(a) 51 個追蹤點



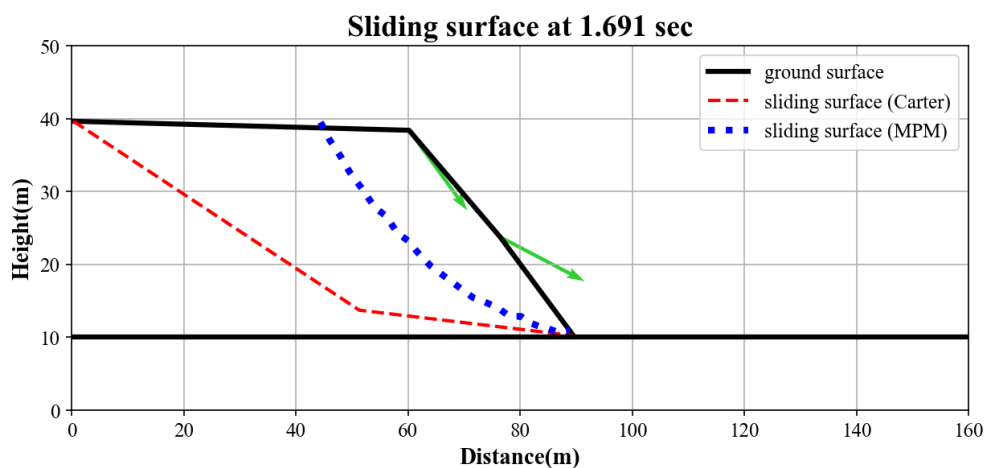
(b) 25 個追蹤點



(c) 11 個追蹤點



(d) 6 個追蹤點



(e) 4 個追蹤點

圖 4- 19 不同追蹤點數量之滑動面推估結果

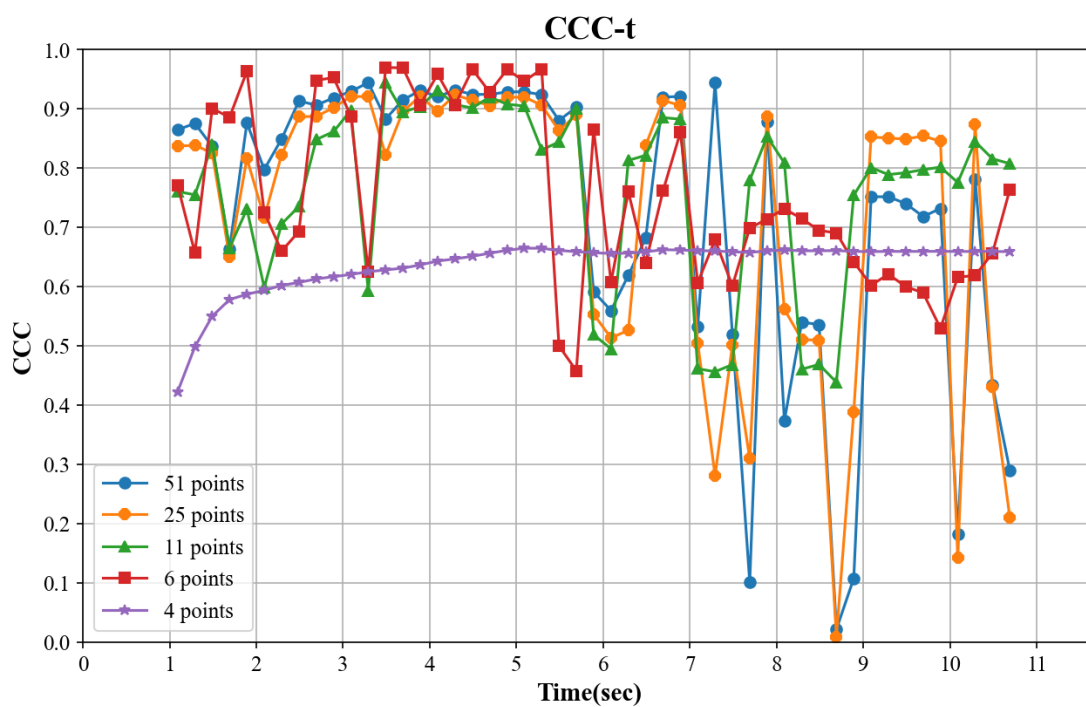


圖 4-20 不同追蹤點數量之滑動面推估成效歷時圖

表 4-5 不同追蹤點數量的推估成效

追蹤點數量	CCC (mean)
51	0.7251
25	0.7232
11	0.7629
6	0.7549
4	0.6371

五、不同追蹤點分布之滑動面推估結果

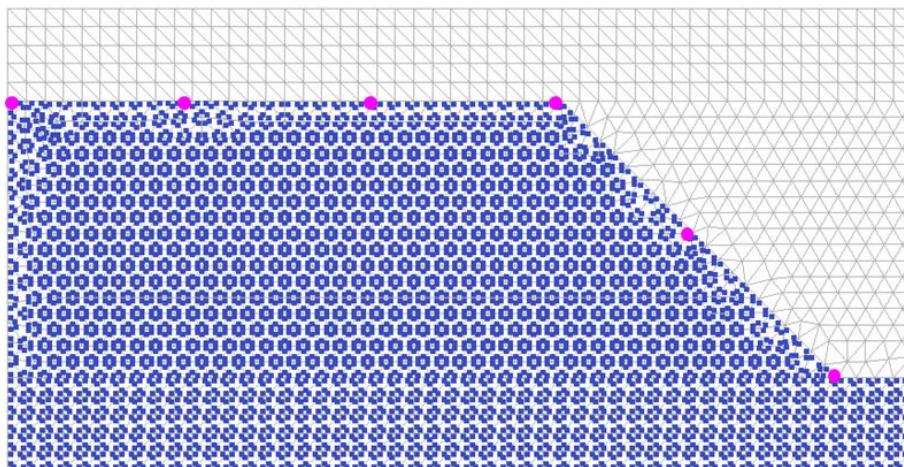
在 Carter and Bentley (1985) 中，建議地表監測點的分布情形為等距分布。為探討不同追蹤點分布情形對於向量傾角法之影響，本研究自前述案例選擇坡度 45° 、追蹤點數量為 6 點的案例，設計共六種不同的分布形式，如圖 4-21 不同追蹤點分布形式

所示，探討不同追蹤點分布的影響。

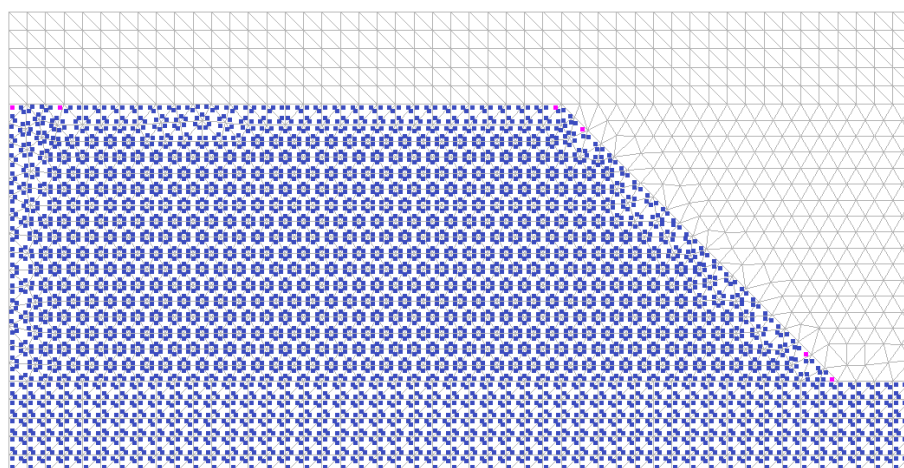
不同追蹤點分布的滑動面推估結果如圖 4-22 不同追蹤點分布之滑動面推估結果

所示。可以發現，整體仍有出現前述的錯誤推估現象。然而，當追蹤點為均勻分布時(Type A)，滑動面上半部雖仍有明顯誤差，但下半部有較佳一致性；當追蹤點集中於中、下邊坡時(Type E & F)，由於該區域出現明顯位移，將有助於獲得較精確的地表位移資訊，獲得較好的推估結果。

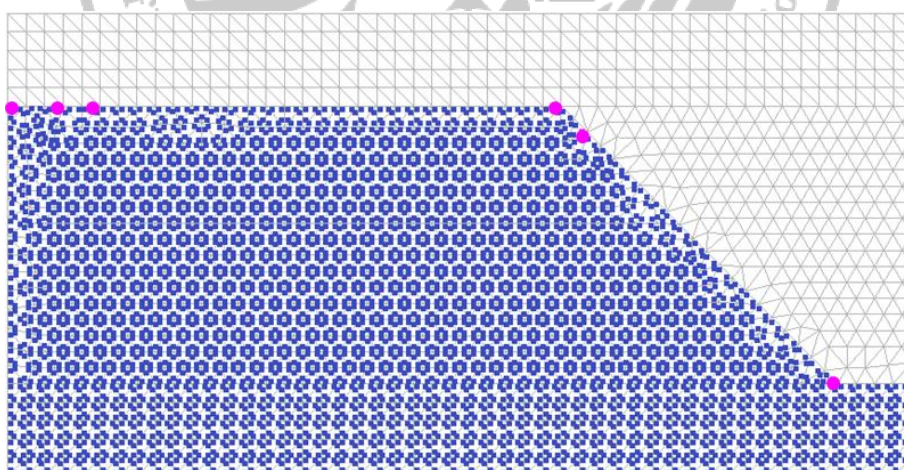
展示了不同追蹤點分布形式的推估成效歷時圖。可以發現，多數分布形式的推估成效起伏較大，其中，追蹤點均勻分布時的推估成效較佳(Type A)。而追蹤點集中於中、下邊坡(Type E & F)時，由於推估滑動面下半部與模擬滑動面有較好的一致性，而上邊坡缺乏地表位移資訊，故維持一定誤差。整體推估成效彙整如所示，結果顯示，當多數追蹤點分布在出現明顯位移的區域，能有效掌握地表位移資訊，應用原始向量傾角法獲得的推估結果較佳，但推估滑動面的上半部仍存在一定誤差，需進一步修正向量傾角法的機制。



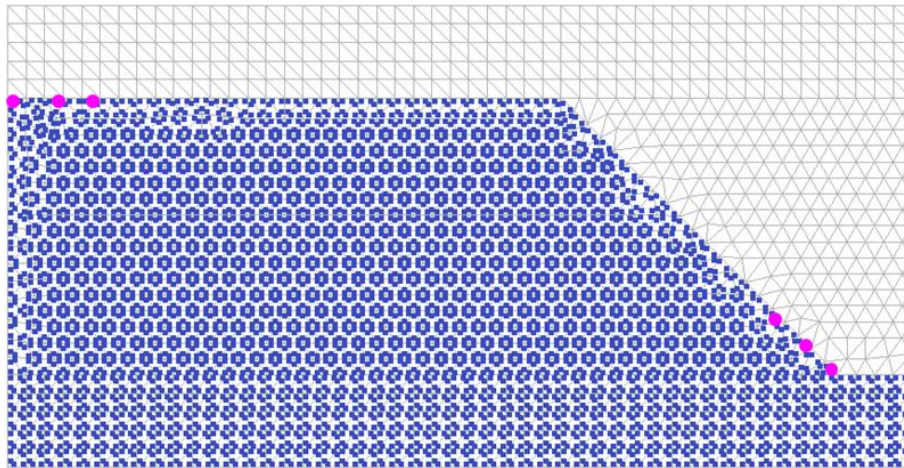
(a) Type A：均勻分布



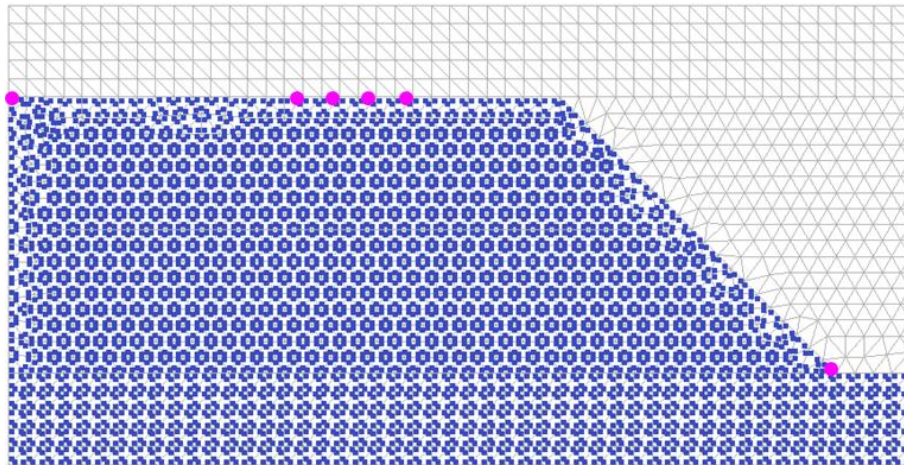
(b) Type B：上、中、下邊坡各 2 點



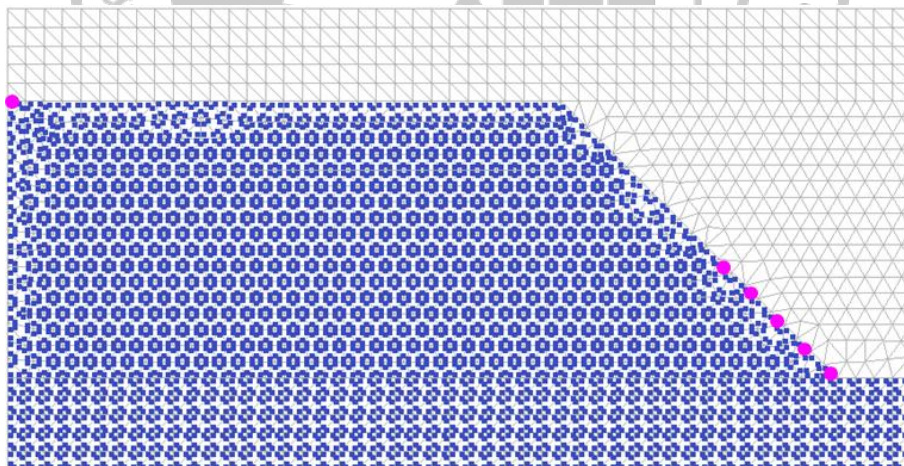
(c) Type C：上、中、下邊坡遞減



(d) Type D：集中於上下邊坡

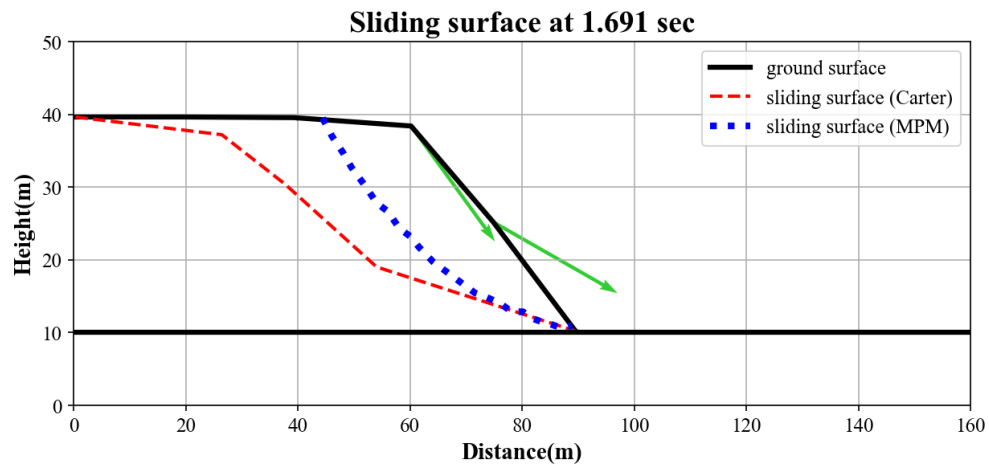


(e) Type E：集中於中邊坡

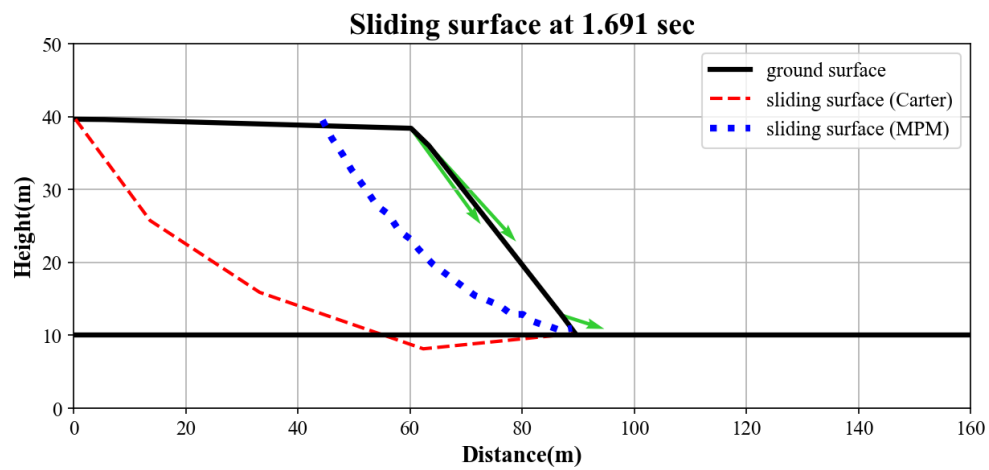


(f) Type F：集中於下邊坡

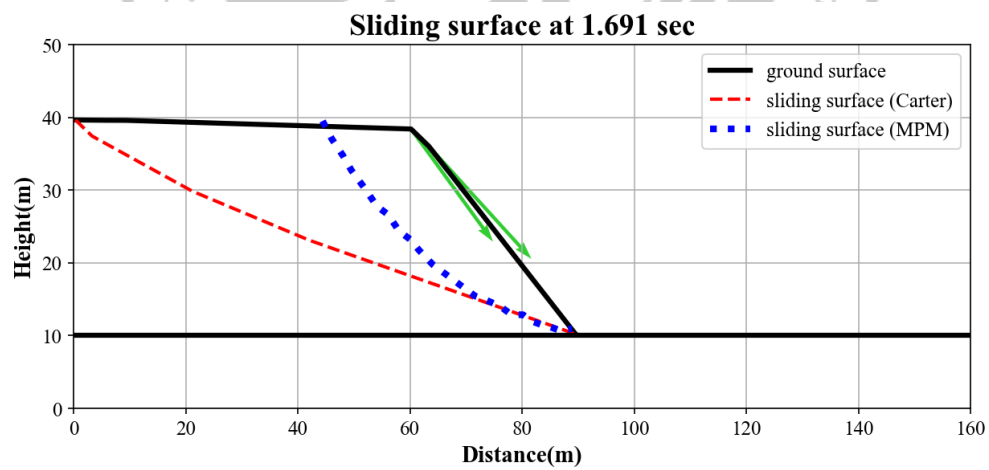
圖 4- 21 不同追蹤點分布形式



(a) Type A



(b) Type B



(c) Type C

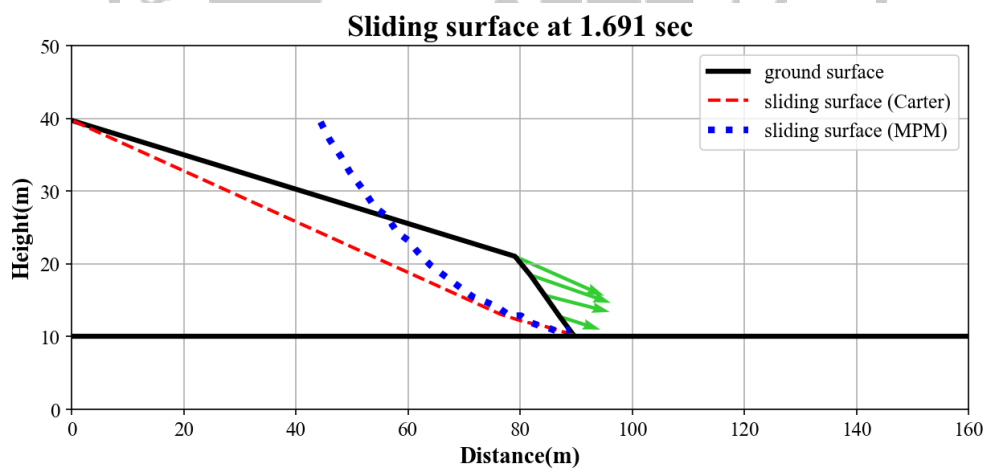
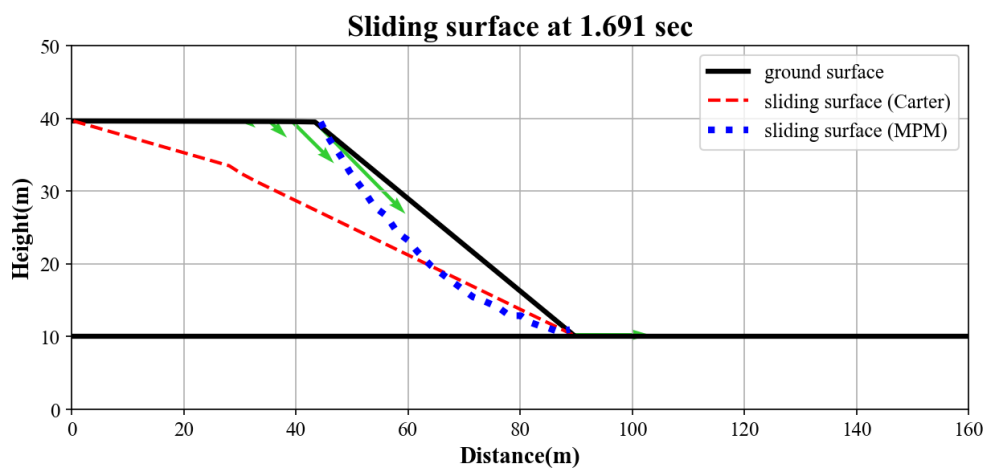
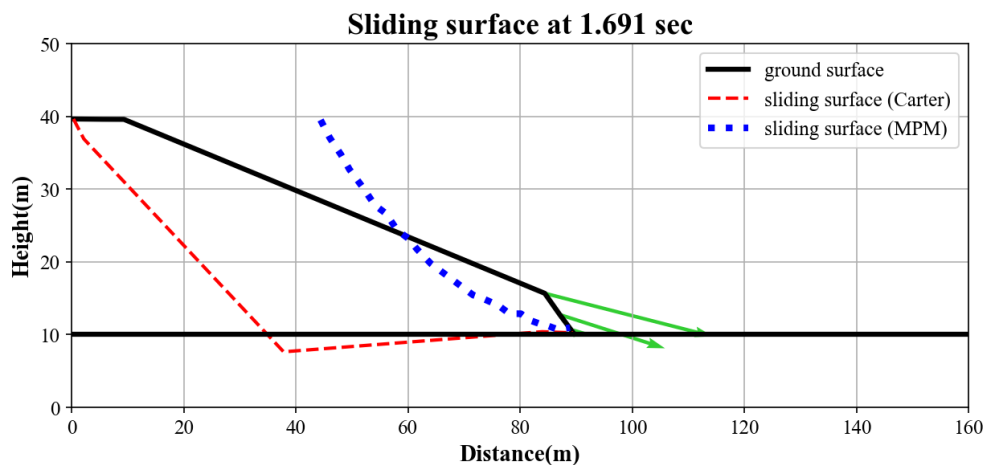


圖 4- 22 不同追蹤點分布之滑動面推估結果

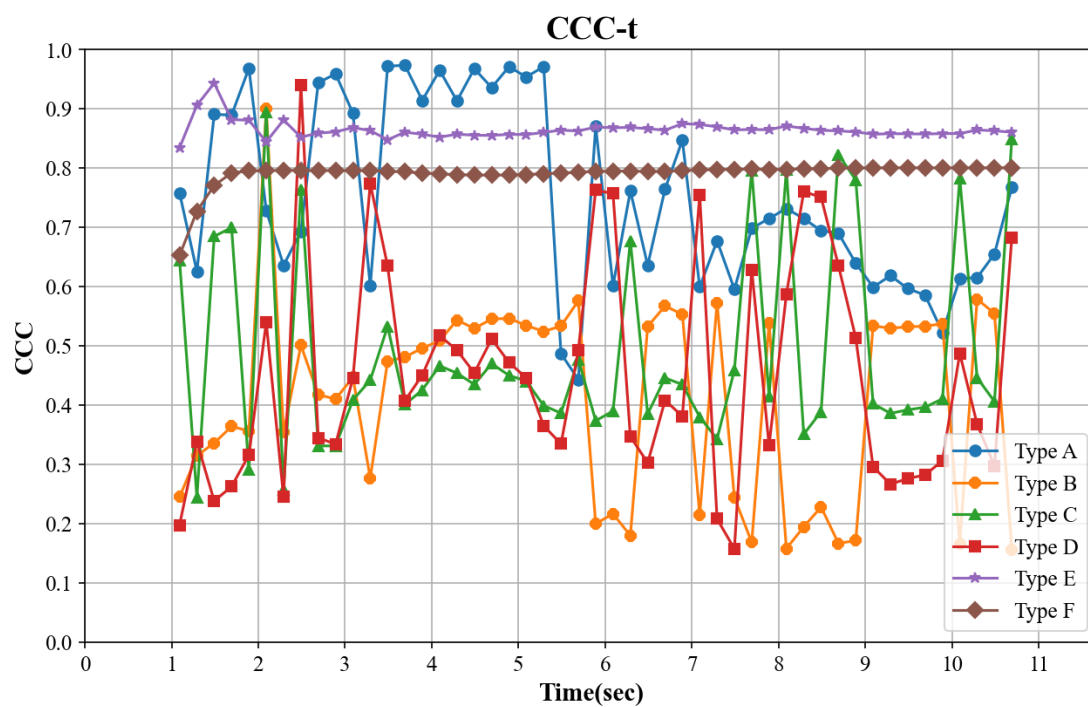


圖 4-23 不同追蹤點分布之推估成效歷時圖

表 4-6 不同追蹤點分布之推估成效

追蹤點分布形式	CCC (mean)
Type A	0.7526
Type B	0.4134
Type C	0.4909
Type D	0.4513
Type E	0.8650
Type F	0.7911

六、向量傾角法錯誤樣態說明

向量傾角法基於地表追蹤點資訊，推估潛在滑動面位置。因此，本研究沿邊坡表面設置追蹤點，以其座標與位移方向作為向量傾角法的輸入參數。然而，並非所有追蹤點皆參與崩塌運動，其中，位於滑動土體區域外的追蹤點會因為土顆粒間的作用力出現極小的位移，其移動速度與實際滑動區域有明顯差異，並未達到不穩定的程度。

另一方面，在上下邊坡的滑動區域外，追蹤點的位移方向大多為向下變形或因滑動土體推擠導致下邊坡追蹤點出現向上位移。以 $H_1 = 60$ m為例，分別在上下邊坡的滑動區域外一追蹤點，亦在滑動區域內選取一追蹤點，將追蹤點的位移方向隨時間之變化圖繪製如所示，可以發現，上邊坡的追蹤點(藍色實線)在崩塌初期的位移方向會出現明顯震盪，且整體運動趨勢為向上位移；而下邊坡的追蹤點(綠色實線)在崩塌初期的位移方向亦會出現大幅震盪現象，持續至崩塌運動結束；至於滑動區域的追蹤點(黃色實線)，其位移方向隨時間而出現變化，但整體運動趨勢一致，朝向下邊坡區域位移。根據上述結果，可以發現，位於滑動區域外的追蹤點，其位移方向常與滑動土體的移動方向差異甚大，又因向量傾角法假設推估滑動面與位移方向平行，若將地表追蹤點均納入向量傾角法的計算，將導致推估滑動面凸出地表或延伸至彈性體，出現不合理的滑動面推估結果。

如本節所示，推估結果大多高估了整體滑動面深度，甚至出現滑動面延伸至彈性體與凸出地表等現象。錯誤的滑動面推估樣態(紅色虛線)及合理的滑動面推估樣態(紅色實線)如所示。由上述結果可知，

追蹤點的選擇對於向量傾角法推估成效有著重大影響，需透過適當的篩選機制，選取實際參與崩塌運動的追蹤點，修正向量傾角法的起算位置與結束位置，才能獲得正確的向量傾角法推估結果。

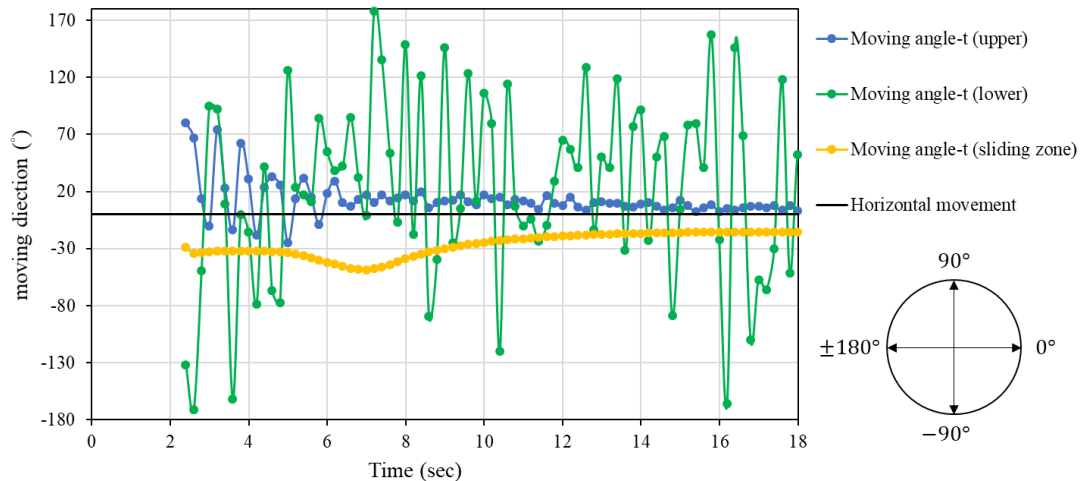


圖 4-24 滑動區域外之追蹤點位移角度隨時間變化圖

上下邊坡追蹤點速度及位移方向

- 速度過小，不應納入VIM計算
- 向下變形引致位移方向，不應納入VIM計算
- 滑動土體推擠導致下邊坡追蹤點出現向上位移，不應納入VIM計算

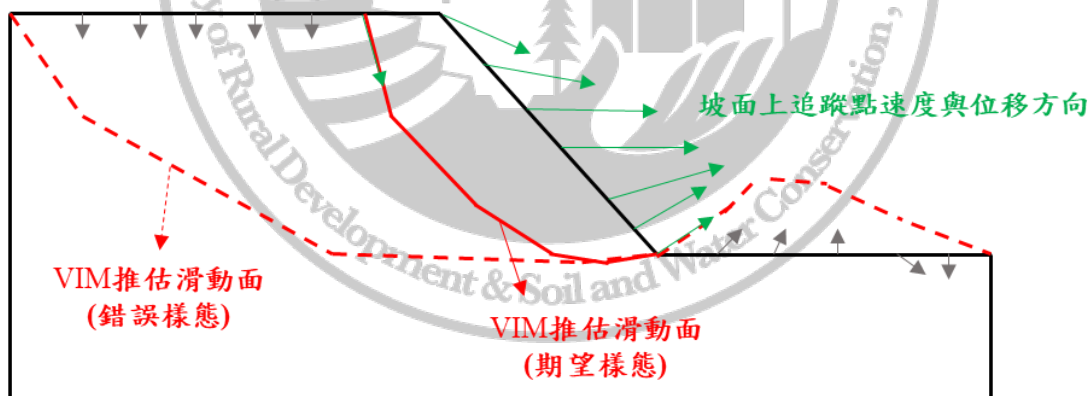


圖 4-25 向量傾角法錯誤推估結果概念圖

第三節 向量傾角法改善方案

本節將說明錯誤樣態的改善方法，並展示不同幾何情境下的門檻條件敏感度分析結果，最後提出適用於不同情境的改善方法建議。

一、錯誤樣態改善方法說明

本研究透過數值模式產製邊坡崩塌過程的動態資訊，以設定臨界位移的方式決定數值模擬滑動面，作為向量傾角法的適用性探討依據。然而，使用相同臨界位移量界定不同幾何情境的不穩定區域並不合適，且模擬滑動面作為推估滑動面的參考依據，須確定其位置以進行後續適用性探討。因此，本研究以敏感度分析的方式，透過變動臨界位移量，變動範圍介於 0.05 m~5 m，以 0.05 m 為間隔，來決定不同數值模擬滑動面位置，並與推估滑動面進行比較，如所示。觀察變動後的模擬滑動面與推估滑動面的一致性，並透過評估指標(CCC)來量化改善成效，以探討各情境的臨界位移量最適值。

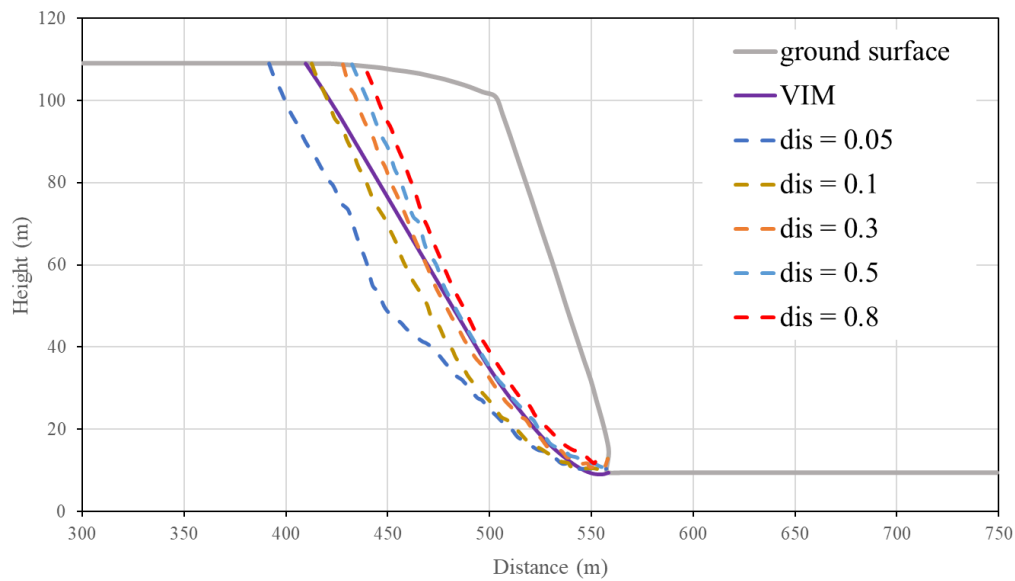


圖 4-26 不同臨界位移量之模擬滑動面示意圖

確定模擬滑動面的位置後，為了改善向量傾角法的錯誤滑動面推估結果，本研究透過兩個門檻條件：位移角度與坡度的比值及移動速度，修正向量傾角法的起算位置與結束位置，以獲得正確的推估結果。

向量傾角法假設滑動土體為剛性體，且滑動面與地表追蹤點的運動方向平行，說明地表的位移角度與滑動面的發展有一定的相關性。然而，邊坡變形的原因不僅僅是滑動，還包括土體膨脹、夯實及沉陷等現象。在多種變形行為同時發生的情況下，地表追蹤點的位移角度可能並非完全由邊坡滑動所導致，例如：土壤沉陷，其位移角度即與重力方向一致。因此，本研究提出邊坡滑動導致地表位移角度存在一個可能的範圍，如所示。因此，本研究透過敏感度分析的方式，探討地表位移角度與邊坡坡度比值對於向量傾角法推估成效的影響。

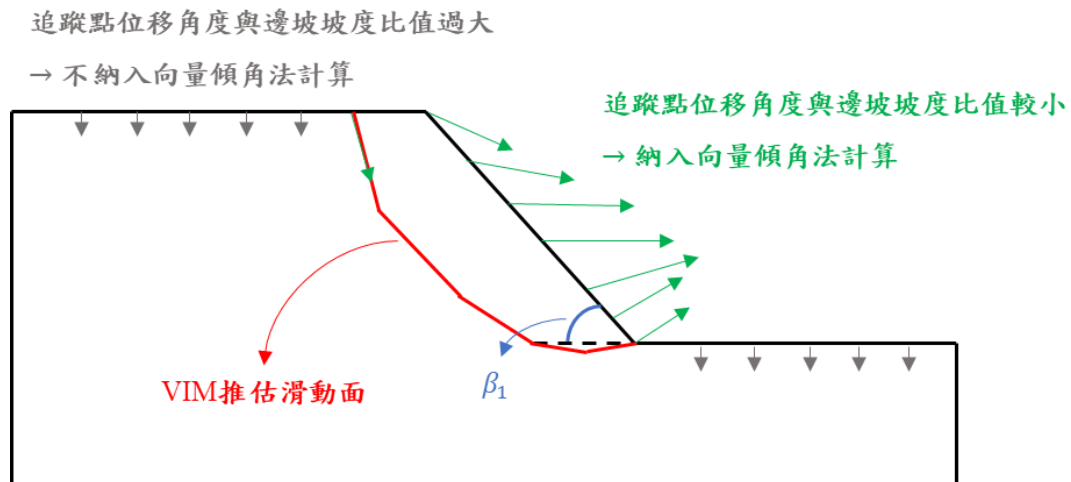


圖 4-27 應用移動速度門檻於向量傾角法之改良概念圖

此外，地表追蹤點的運動行為亦會對向量傾角法的推估成效造成直接的影響，而速度即是其中的關鍵參數。顯示，當追蹤點的速度過小，代表其位移量並不顯著，尚未達到不穩定狀態，故不納入向量傾角法的計算；當追蹤點的速度較大，代表該追蹤點出現明顯位移，屬於不穩定狀態，應納入向量傾角法的計算。設定移動速度門檻值後，只有移動速度大於或等於該門檻值才會被保留，並作為向量傾角法的輸入數據進行計算，其餘追蹤點則會被排除。在本研究中，將透過敏感度分析的方式，探討移動速度門檻值對於向量傾角法推估成效的影響。

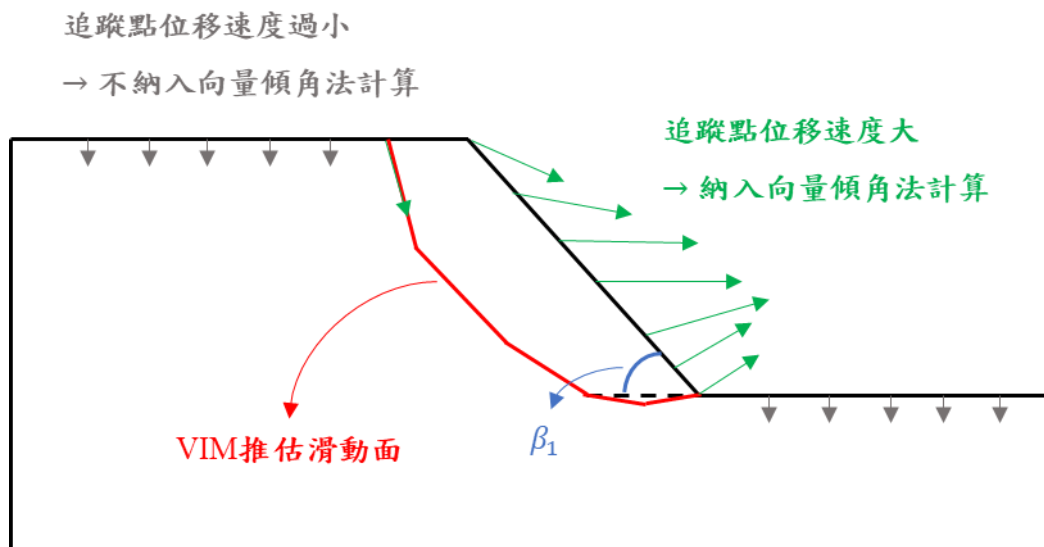


圖 4-28 應用移動速度門檻於向量傾角法之改良概念圖

顯示應用門檻條件前後的推估滑動面差異，原始推估滑動面(綠色虛線)將地表所有追蹤點資料納入向量傾角法的計算，上邊坡處呈現不合理的推估結果，且與模擬滑動面(藍色實線)仍有較大差異；透過應用位移角度門檻條件，僅將位移方向與邊坡坡度差異較小的追蹤點納入向量傾角法的計算，可以發現推估滑動面(黃色虛線)與模擬滑動面差異變小，但仍有不合理之處；後續加入移動速度門檻條件，進一步篩選出有明顯移動速度的追蹤點並納入向量傾角法的計算，發現推估結果(紅色虛線)與模擬滑動面具有良好的一致性，說明透過應用上述兩個門檻條件，可以有效的改善向量傾角法的錯誤推估樣態，獲得較合理的推估結果。

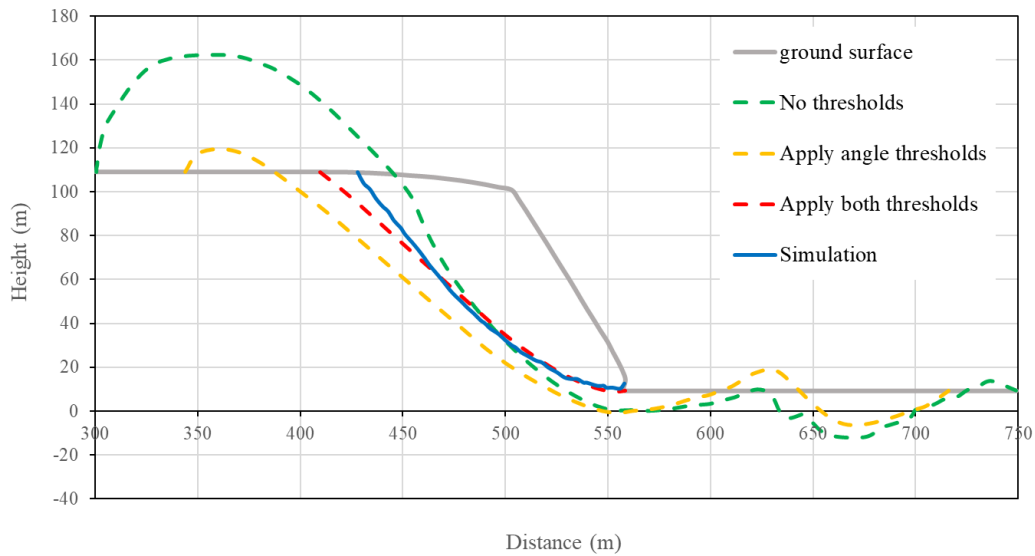


圖 4-29 應用門檻條件之推估滑動面差異示意圖

在不同的幾何條件下，門檻條件的適用值也會有所變化。因此，本研究以敏感度分析的方式來探討最佳門檻條件配置，其中，移動速度的變動範圍介於 $10^{-5} \text{ m/s} \sim 3 \text{ m/s}$ ，位移角度比的變動範圍為 $0.1 \sim 3.0$ ，以 0.1 為間隔。透過改變門檻條件，並以評估指標(CCC)量化不同配置下的推估成效，獲得最佳門檻條件配置。

值得說明的是，上述情形的追蹤點均設置遍布整體地表，再透過應用門檻條件來篩選符合條件的追蹤點，而本研究另針對不同追蹤點數量及分布形式的影響進行探討。兩者的差異在於，透過門檻條件篩選追蹤點屬於自動化篩選的範疇，而設定不同數量與分布形式則屬於人為的範疇，於實務上可將這兩種方法結合使用，降低監測所需成本。

二、不同坡度之推估結果改善

在探討不同坡度(β_1)對向量傾角法的影響時，初始設定臨界位移量為 0.1 m，位移角度門檻為 1.5，移動速度門檻為 0.1 m/s。

為臨界位移量的敏感度分析結果，顯示不同臨界位移量對於模擬滑動面的影響。其中，坡度 30°的案例，因情境設定的問題，滑動現象不明顯，土體的位移量較小，向量傾角法的推估滑動面較淺，故需要較大的臨界位移量來界定模擬滑動面，其臨界位移量最適值為 1.5 m，相當於邊坡高度的 2%；而其他案例的變化趨勢相近，推估滑動面較深，臨界位移量最適值介於 0.1~0.25 m，不超過邊坡高度的 1%。

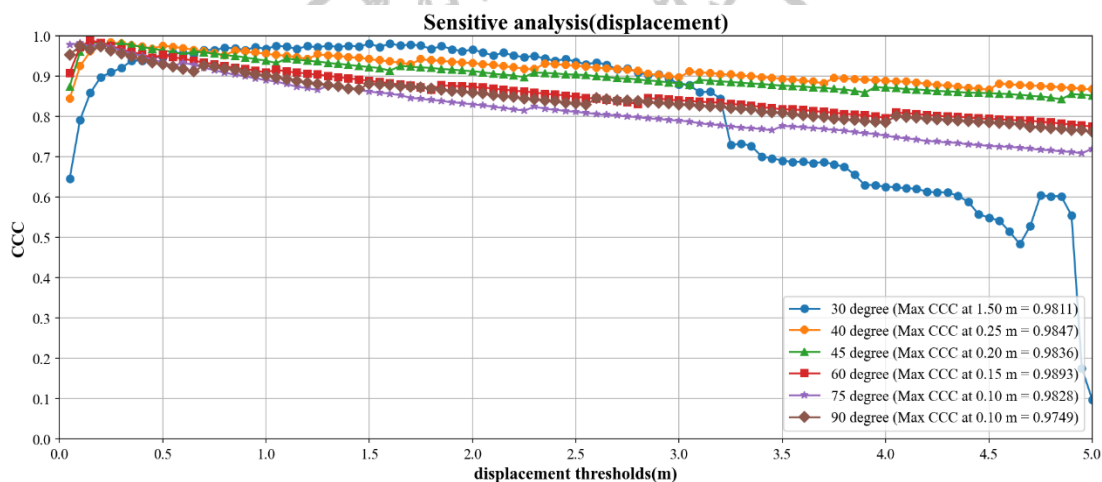


圖 4-30 臨界位移量之敏感度分析結果

展示位移角度門檻值的敏感度分析結果，顯示不同位移角度門檻值對於向量傾角法之推估結果影響甚鉅。在不同坡度的案例中，整體趨勢一致，不同滑動面的一致性隨位移角度門檻值增加而提升，隨後維持穩定。由於坡度的變化，不同案例的位移角度門檻值也會不同。可以發現，當邊坡角度越大，其位移角度與坡度的比值越小。將不同坡度的位移角度比門檻值換算成坡度，其中 30° 、 40° 、 45° 、 60° 的案例，將比值換算成實際地表位移角度後介於 $51^\circ \sim 54^\circ$ ，但坡度 30° 案例的推估成效出現明顯落差；而 75° 與 90° 的案例，位移角度與坡度比值為 0.6 時，推估成效可達 0.9，換算為實際位移角度後不超過 55° 。說明在不同坡度條件下，容許位移角度不超過 55° 。

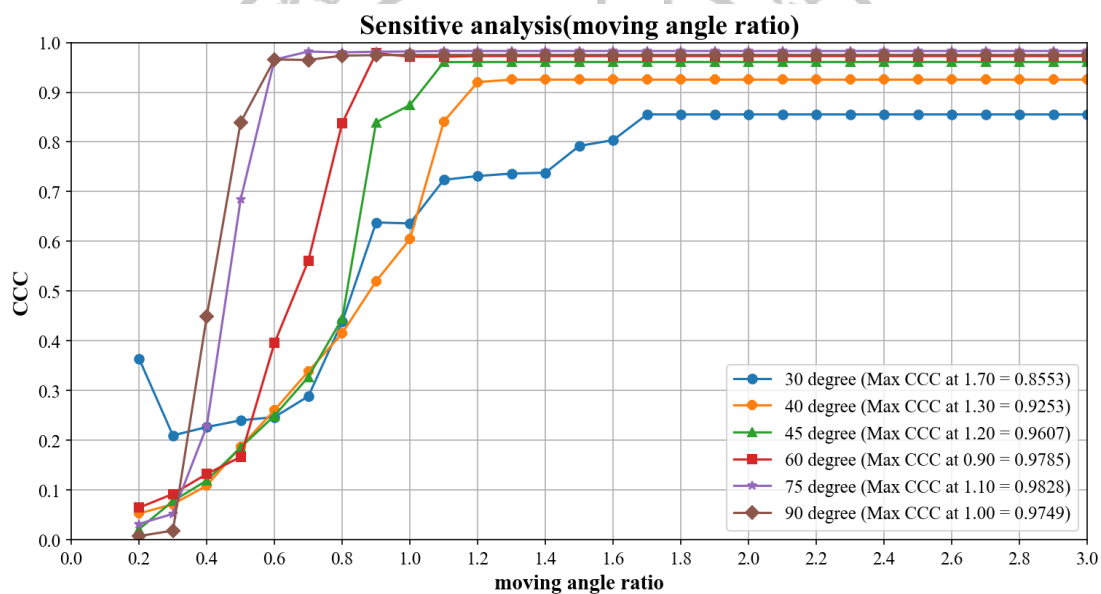


圖 4-31 位移角度比之敏感度分析結果

展示了不同移動速度門檻值之影響，顯示不同移動速度對於向量傾角法之推估結果有著重大影響，結果顯示移動速度門檻值在 0.01 m/s，所有案例的 CCC 皆可超過 0.9。多數的邊坡角度條件在移動速度門檻值設定超過 0.05 m/s 後，才會出現 CCC 下降的情形，只有 30° 的案例於地表移動速度超過 0.01 m/s 後即開始下降。

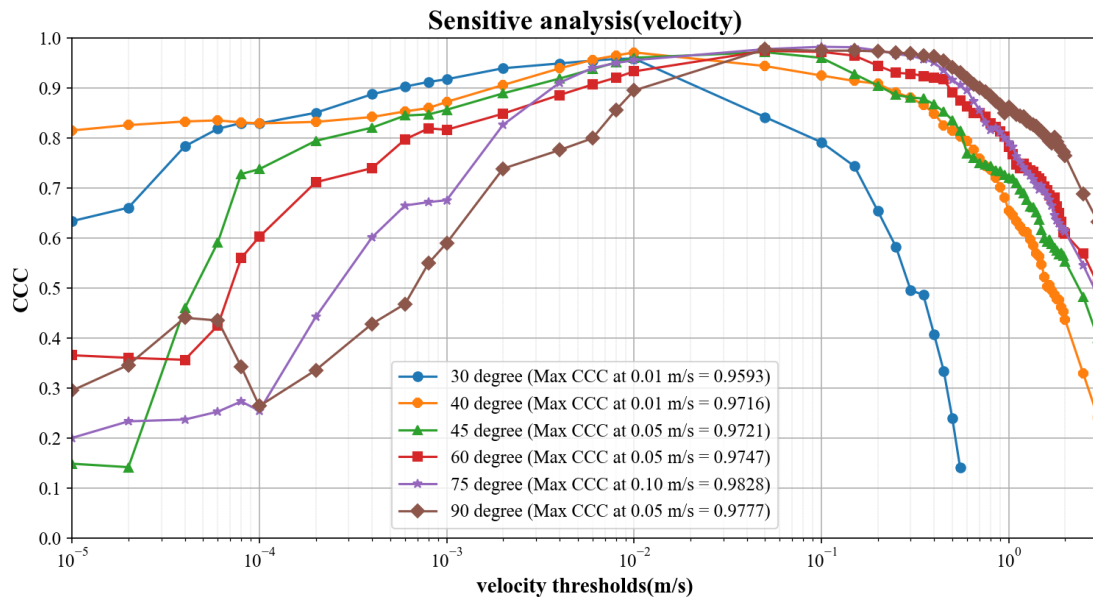


圖 4- 32 移動速度之敏感度分析結果

綜上所述，坡度變化不僅影響滑動土體的移動方向，也會影響移動速度。根據門檻值的敏感度分析結果，不同移動速度與位移角度兩個門檻條件的設定對於推估結果有很大的影響。因此，須根據實際情況調整門檻條件，以提高向量傾角法的推估精度。

三、不同坡高之推估結果改善

探討不同邊坡高度(H)對於向量傾角法的影響時，選用坡度 60° 案例，初始設定臨界位移量為 0.15 m ，位移角度門檻為 1.5 ，移動速度門檻為 0.1 m/s 。

為臨界位移量的敏感度分析結果，由於邊坡高度的變化，以同一臨界位移量決定模擬滑動面並不合適。從分析結果可以發現，隨著邊坡高度增加，圖中曲線逐漸右移，最佳臨界位移量也同時提高，臨界位移量與邊坡高度的比值約在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 的範圍內，CCC 也可達 0.9 以上。

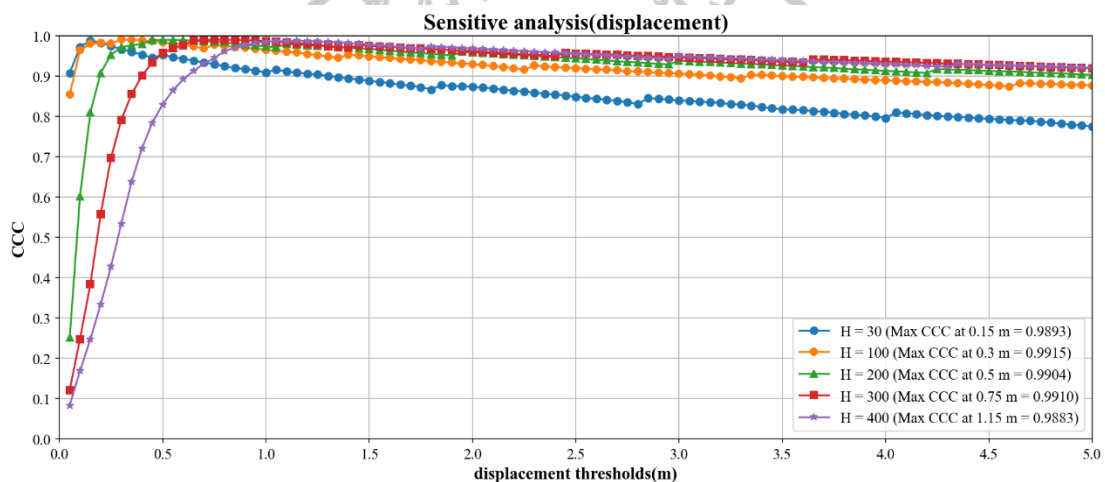


圖 4-33 臨界位移量之敏感度分析結果

為位移角度門檻值的敏感度分析結果，由於邊坡坡度不變，不同邊坡高度的位移角度門檻值變化趨勢相當一致。結果顯示位移角度門檻值在 0.9 時，所有案例的 CCC 皆達到最大值，與前述 60° 案例的結果一致。

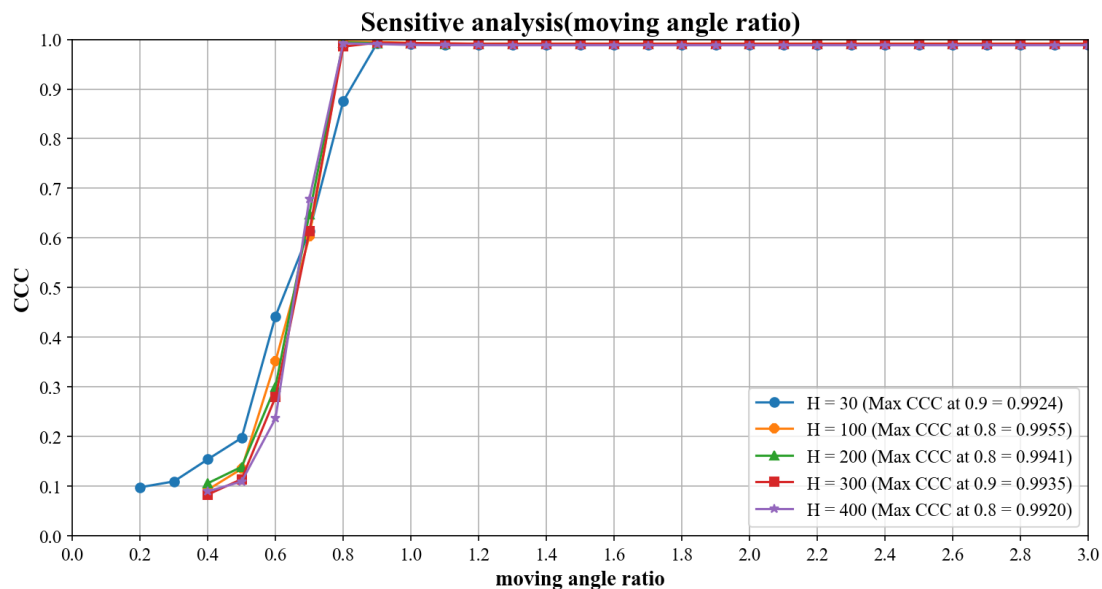


圖 4- 34 位移角度比之敏感度分析結果

移動速度的敏感度分析結果與位移角度門檻相似，從可以發現，不同邊坡高度的位移角度門檻值變化趨勢相似，且不同邊坡高度在移動速度門檻值達到 0.1 m/s 時，推估滑動面的成效最佳，與 60° 案例的結果一致。

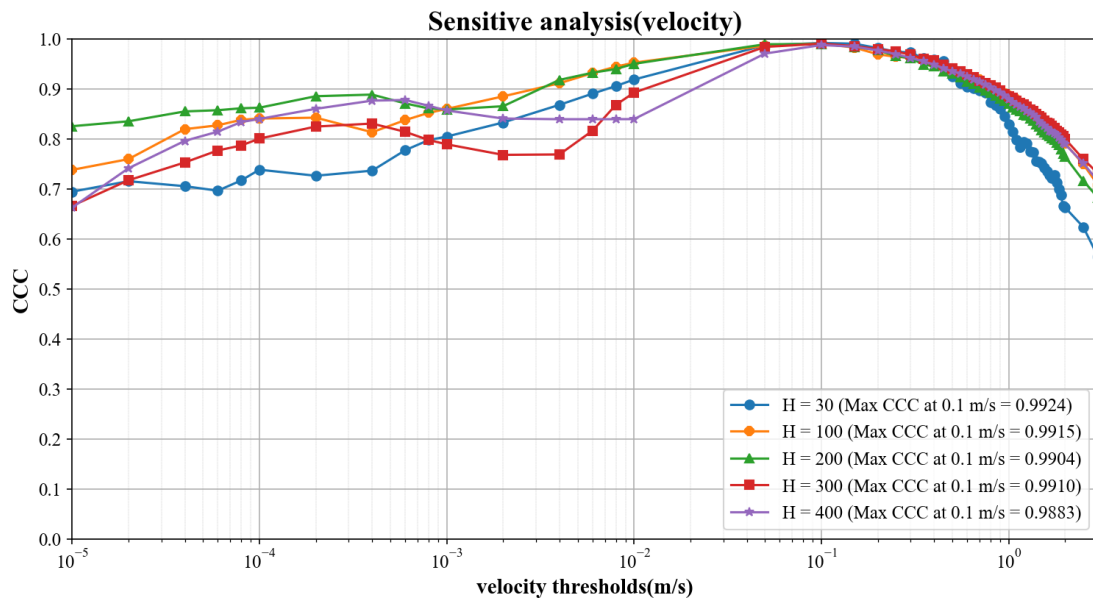


圖 4- 35 移動速度之敏感度分析結果

根據上述結果，說明在不同邊坡高度的情境下，臨界位移量影響甚鉅，須根據邊坡高度調整臨界位移量，臨界位移量與邊坡高度關係圖如所示，可以得知最佳臨界位移量約為邊坡高度的 0.0026 倍。調整不同邊坡高度的臨界位移量後，透過敏感度分析結果可以得知，向量傾角法在不同邊坡高度條件下，可採用同一門檻配置，獲得最佳滑動面推估結果，說明當邊坡規模增大時，門檻值條件不受其影響。具體門檻條件設定建議如所示。

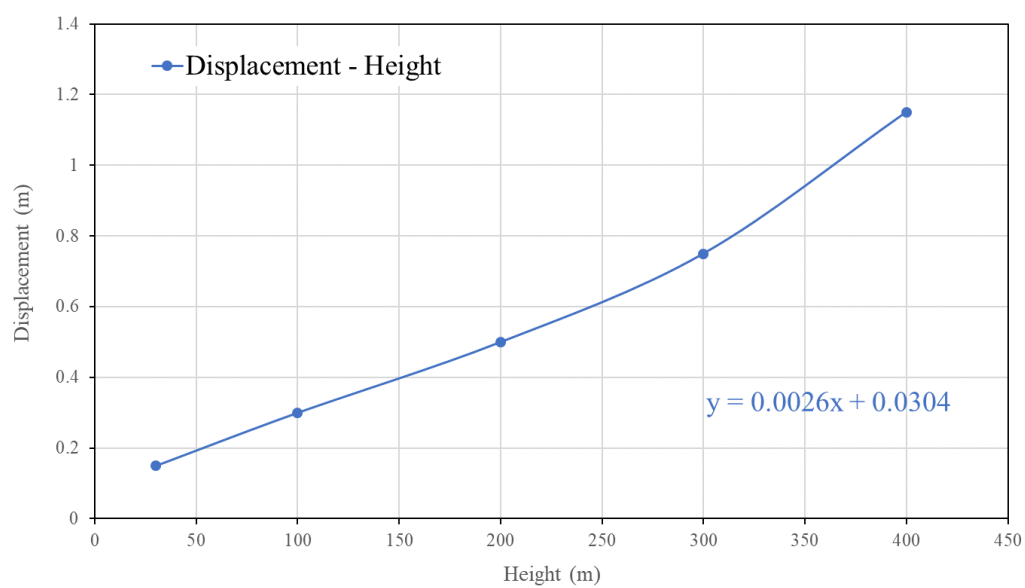
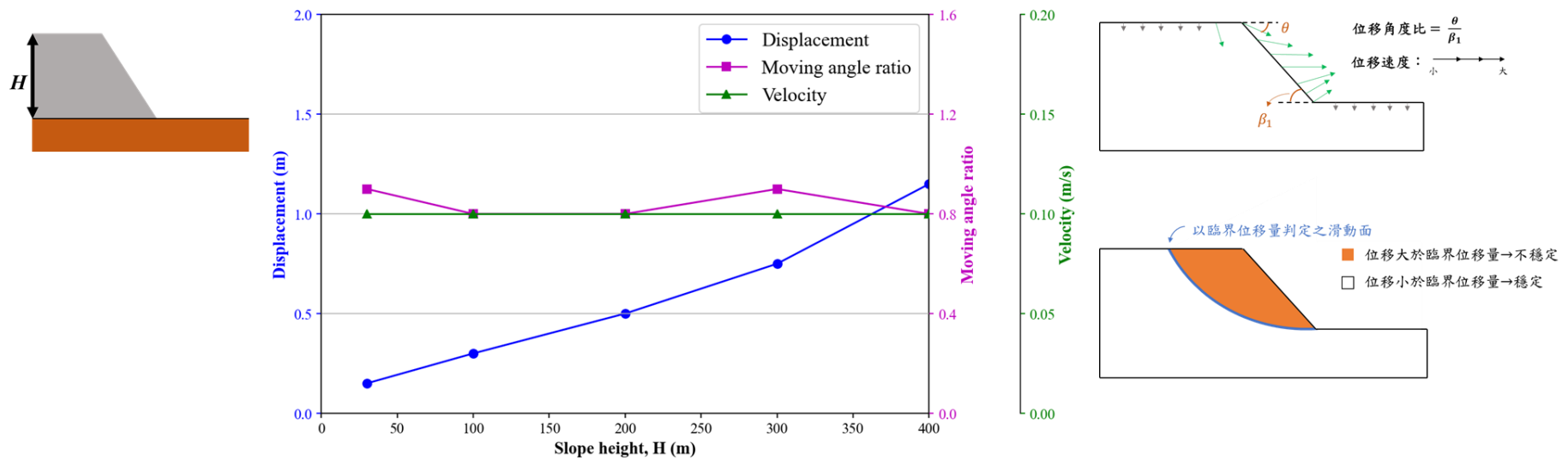


圖 4- 36 臨界位移量與邊坡高度關係圖





1. 坡度 $\beta_1 = 60^\circ$ 的案例進行探討。
2. 門檻值設定建議：
 - 位移角度比：0.9
 - 位移速度：0.1 m/s
 - 臨界位移量：需依坡高調整，約為坡高的 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 倍。

圖 4- 37 不同坡高之門檻條件設定建議

第四節 向量傾角法修正成效

本節將結合第三節的敏感度分析結果，應用臨界位移量、位移角度與移動速度在不同坡度條件下的最佳配置，並與原始向量傾角法的結果進行比較，評估改善方法的成效。

一、不同坡度之推估結果改善成效

不同坡度(β_1)的條件下，改善後的滑動面推估結果如圖 4- 38 不同坡

度之滑動面推估結果

所示。可以發現，當邊坡坡度與土層的內摩擦角差異較小時，如圖

4- 38 不同坡度之滑動面推估結果

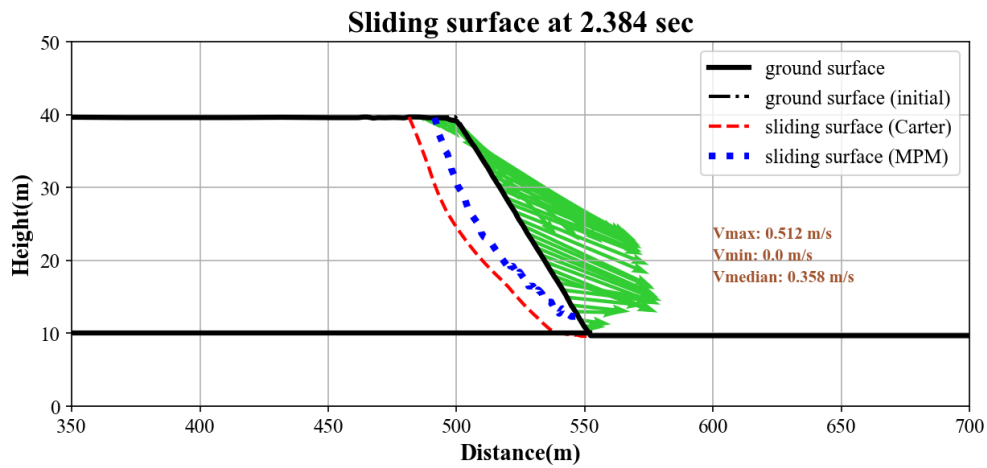
(a)、(b)，雖然地表追蹤點有出現位移，但實際滑動區域較小，導致向量傾角法高估了滑動面深度。然而，當邊坡坡度與土層有明顯差異時，如圖 4- 38 不同坡度之滑動面推估結果

(c)~(f)，實際滑動區域擴大，出現明顯崩塌現象，推估滑動面則與模擬滑動面有較好的一致性。

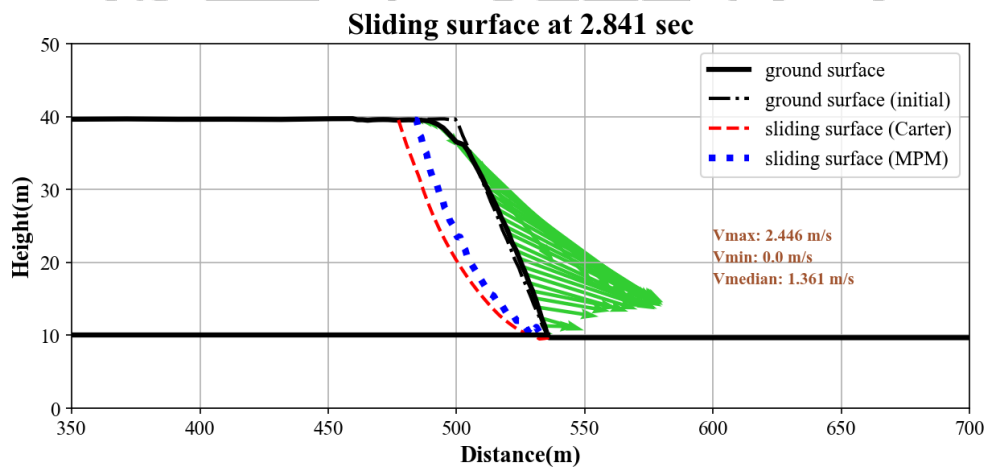
由可以得知向量傾角法在崩塌過程中的推估成效。崩塌運動初期，由於滑動區域尚未向後延伸，導致向量傾角法的推估結果與模擬滑動面有較大的差異，隨著時間推移，模擬滑動面向後發展，推估成效顯

著提升，且保持相當良好的一致性。顯示了整體的推估成效，當坡度較小時，滑動面推估成效相對較低；而當坡度較大時，整體的滑動面推估結果與模擬滑動面有相當好的一致性。

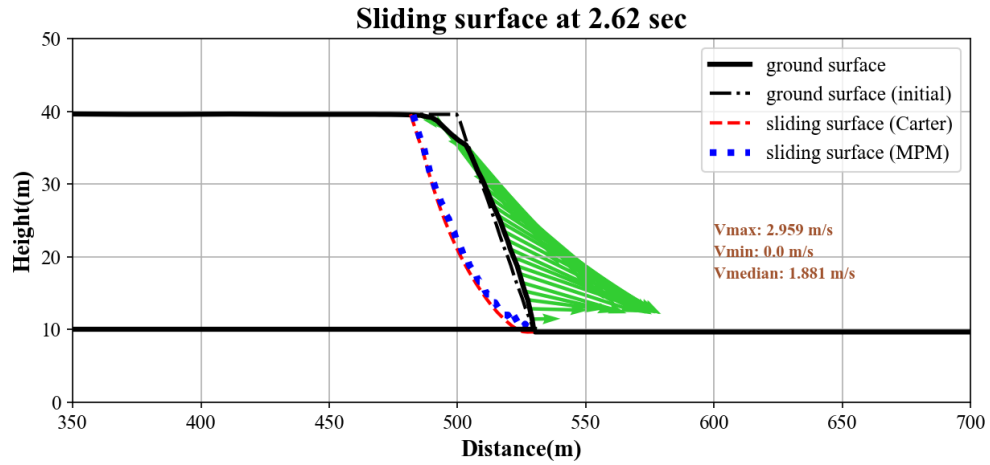
整體而言，雖然不同坡度條件下的推估成效有所差異，但 CCC 仍維持在 0.9 以上，說明透過應用門檻條件，向量傾角法的推估成效得到顯著提升。



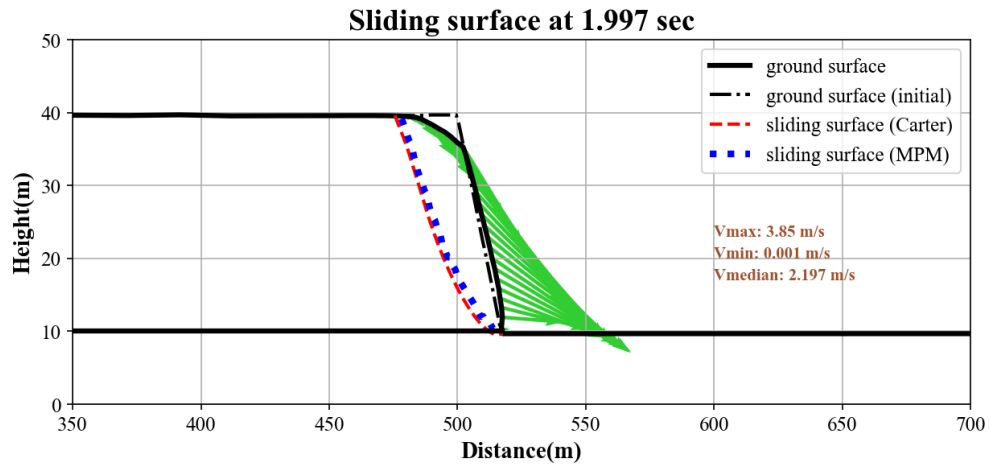
(a) $\beta_1 = 30^\circ$



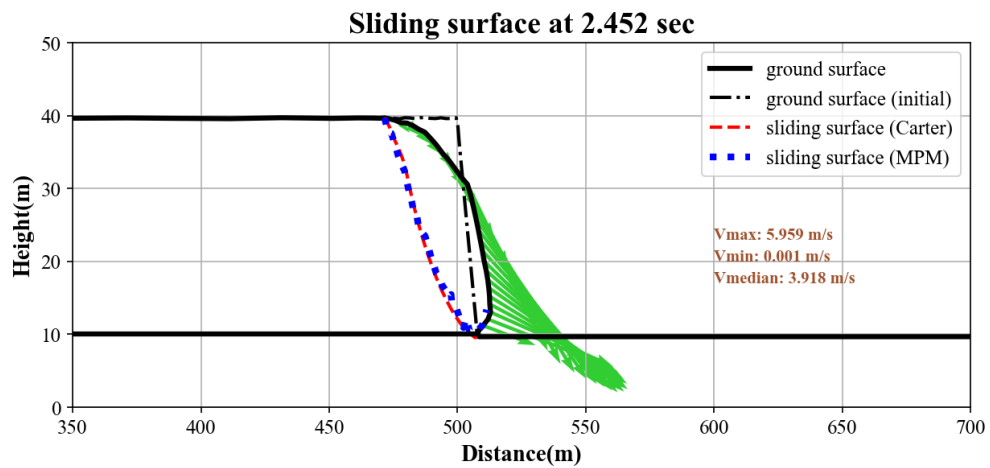
(b) $\beta_1 = 40^\circ$



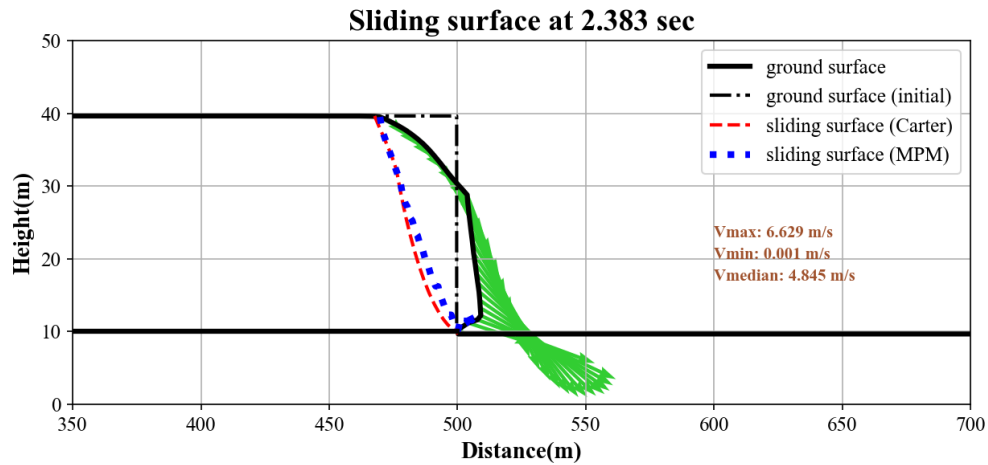
(c) $\beta_1 = 45^\circ$



(d) $\beta_1 = 60^\circ$



(e) $\beta_1 = 75^\circ$



(f) $\beta_1 = 90^\circ$

圖 4- 38 不同坡度之滑動面推估結果

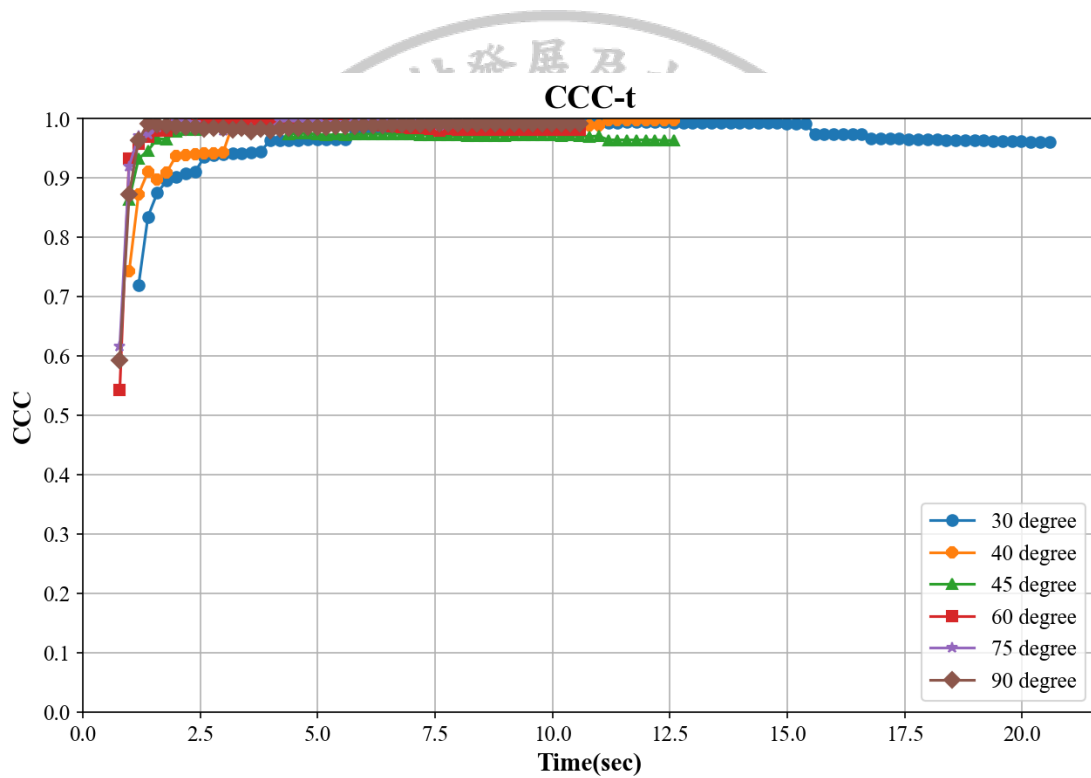


圖 4- 39 不同坡度之滑動面推估成效歷時圖

表 4-7 不同坡度之推估成效

邊坡坡度 β_1 (°)	臨界位移量(m)	位移角度比	移動速度(m/s)	CCC(mean)
30	1.5	1.7	0.01	0.9690
40	0.25	1.3	0.01	0.9755
45	0.2	1.2	0.05	0.9825
60	0.15	0.9	0.05	0.9770
75	0.1	1.1	0.1	0.9828
90	0.1	1.0	0.05	0.9777



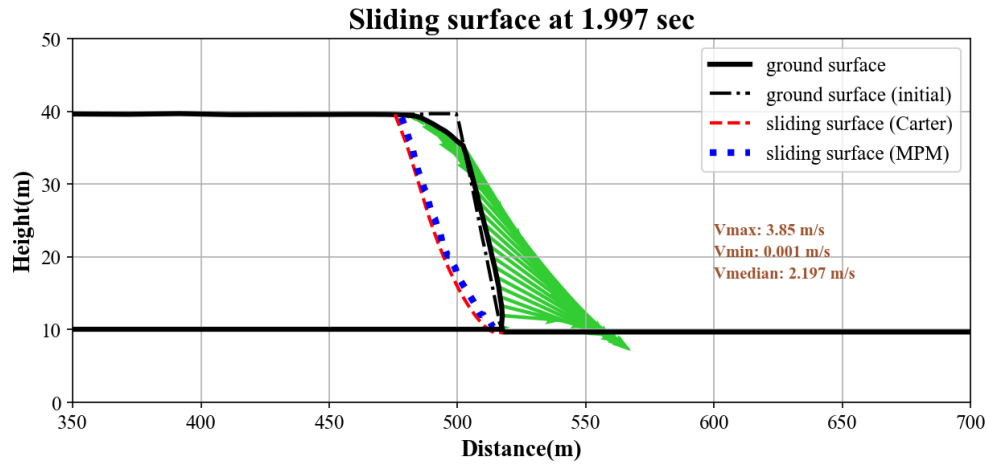
二、不同坡高之推估結果改善成效

不同邊坡高度(H)條件下，由於邊坡規模的提升，需針對臨界位移量進行調整，以邊坡高度的0.1 ~ 1%為基準，改善後的滑動面推估

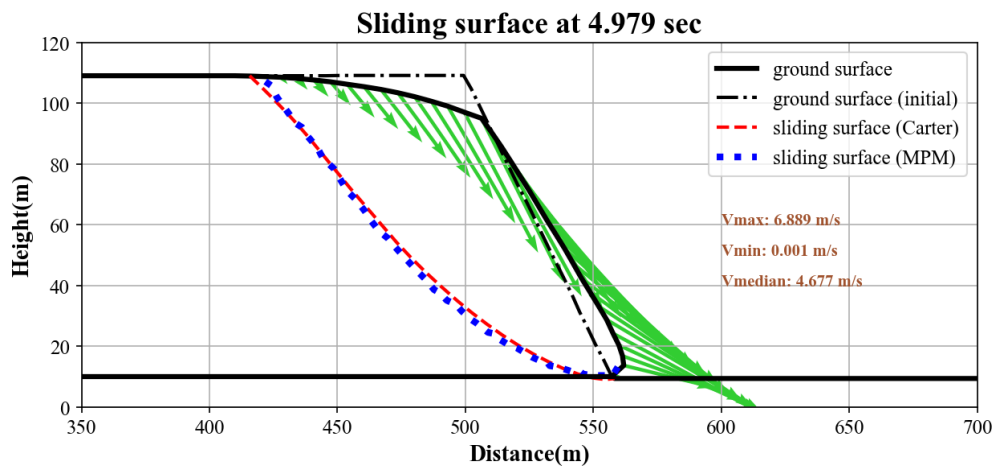
結果如圖 4- 40 不同坡高之滑動面推估結果

所示。可以發現，無論邊坡高度如何變化，向量傾角法的推估結果與模擬滑動面均有良好的一致性，說明以邊坡高度的 0.1 ~ 1% 作為臨界位移量，向量傾角法可以有效推估滑動面的位置。

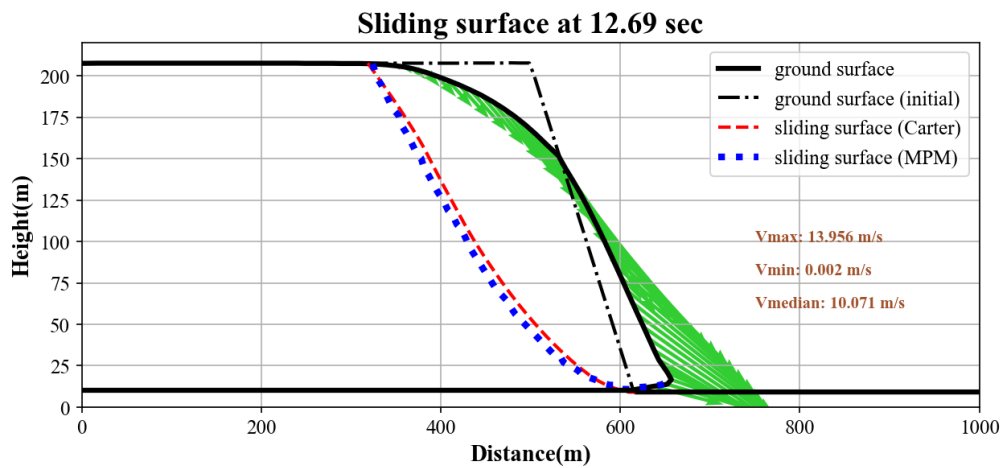
顯示不同坡高條件下，崩塌過程的滑動面推估成效。可以發現邊坡高度的變化對崩塌過程的推估成效不會造成影響，整體推估成效的變化趨勢一致，於崩塌運動初期仍會因為滑動面未發展完全而出現較大誤差，隨時間推移，推估成效提升並保持良好一致性。整體的推估成效如所示，顯示除了崩塌運動初期較大的誤差，後續崩塌過程的推估結果與模擬滑動面幾乎一致，CCC 可達 0.99。



(a) $H = 30$ m



(b) $H = 100$ m



(c) $H = 200$ m

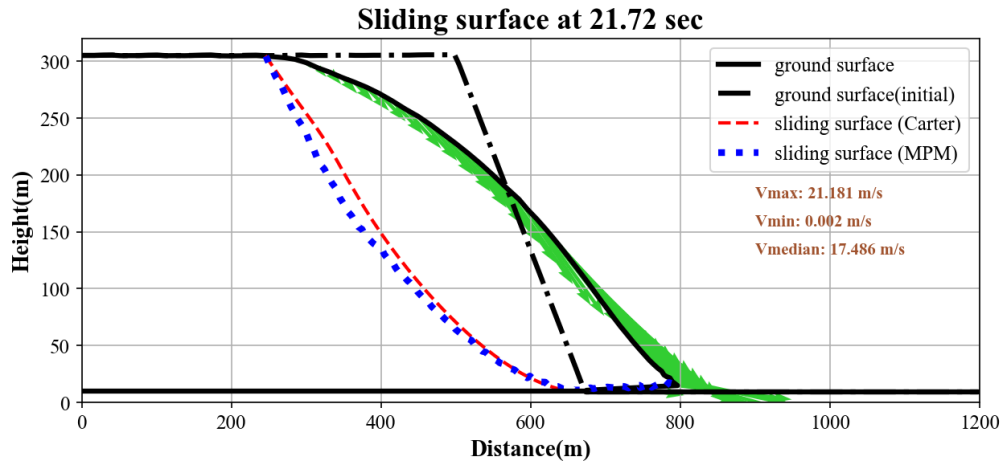
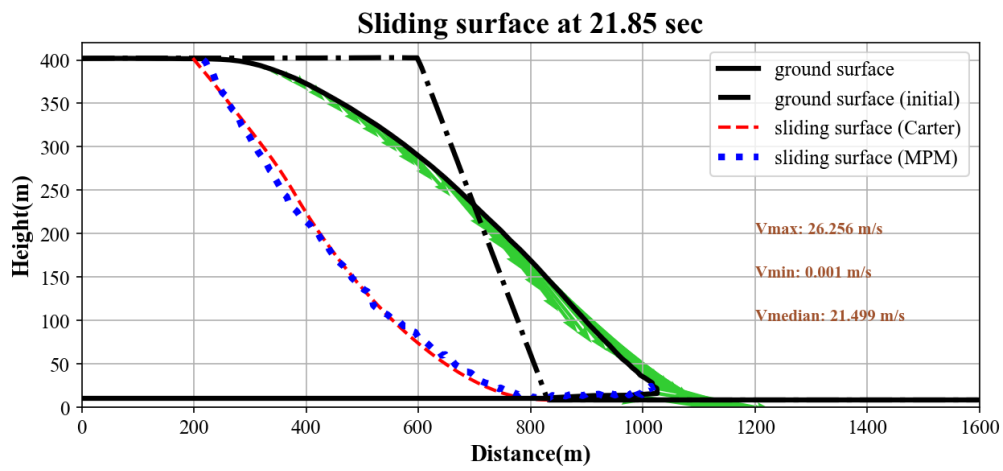
(d) $H = 300$ m(e) $H = 400$ m

圖 4-40 不同坡高之滑動面推估結果

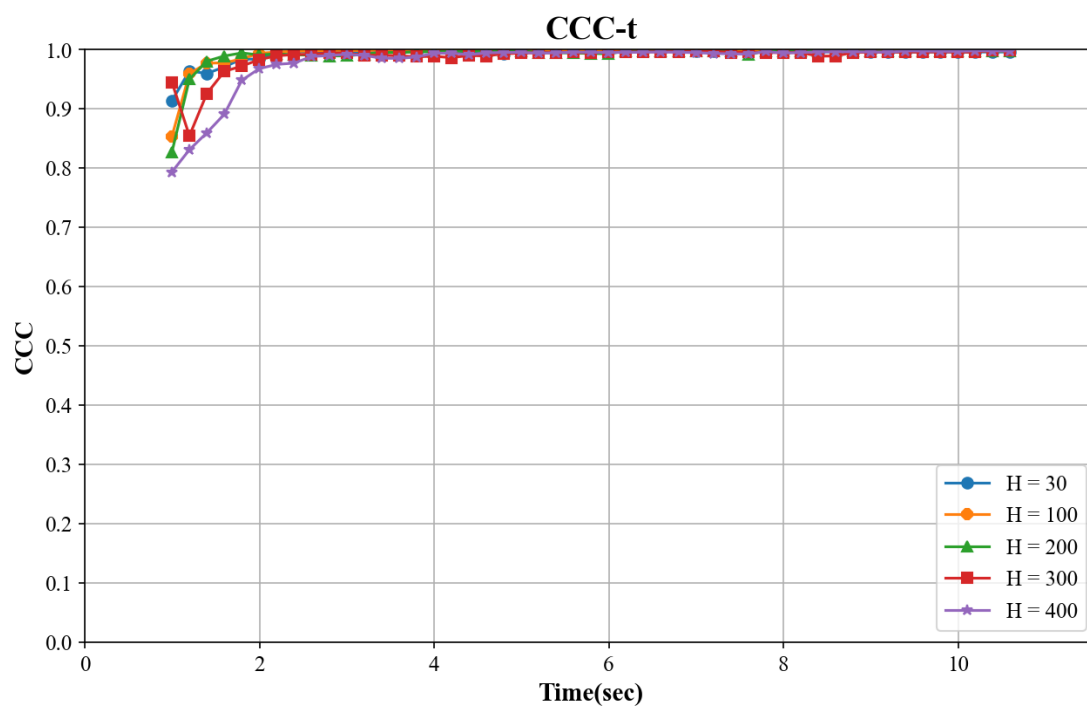


圖 4-41 不同坡高之滑動面推估成效歷時圖

表 4-8 不同坡高之推估成效

邊坡高度 H(m)	臨界位移量(m)	位移角度比	移動速度(m/s)	CCC(mean)
30	0.15	0.9	0.1	0.9924
100	0.3	0.8	0.1	0.9948
200	0.5	0.8	0.1	0.9925
300	0.75	0.9	0.1	0.9935
400	1.15	0.8	0.1	0.9908

三、不同追蹤點數量之推估結果改善成效

設定不同追蹤點數量，改善後的推估結果如圖 4-42 不同追蹤點數量之滑動面推估結果

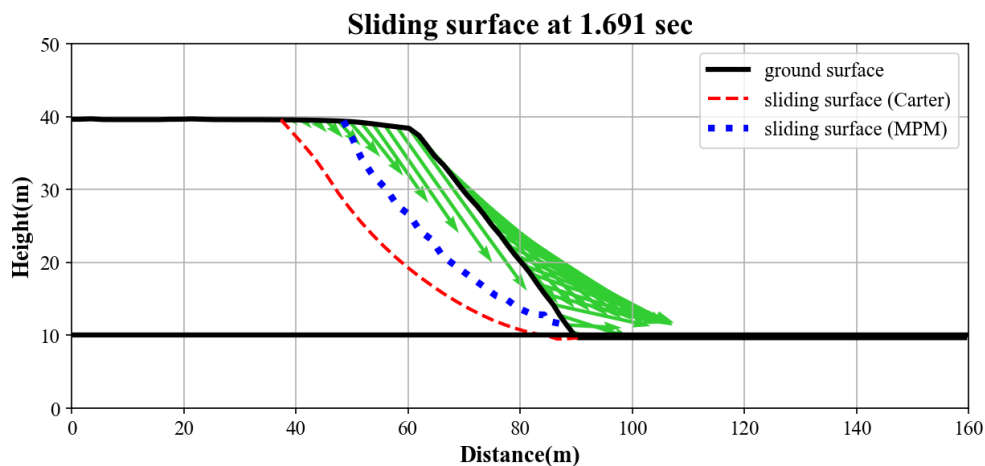
所示。結果顯示，應用改善方案後的推估滑動面與模擬滑動面的一致性出現明顯提升，雖仍有高估滑動面深度的現象，但整體趨勢相近。與前述結果相同，當追蹤點數量分別為 51 與 25 點時，推估結果並無明顯差異，說明可適當減少追蹤點數量，降低監測成本。然而，隨著追蹤點數量變少，推估滑動面開始出現明顯轉折，且誤差也逐漸增加，即使應用門檻條件也無法改善錯誤推估樣態。

展示了不同追蹤點數量的推估成效歷時圖。可以發現，隨著追蹤點數量減少，對地表位移資訊的掌握度下降，推估成效亦逐漸下降。當追蹤點數量大於 6 點時，整體的變化趨勢相近，當模擬滑動面發展完成，推估滑動面與其有著良好一致性；而追蹤點數量為 4 點時，整體推估成效低，推估結果與模擬滑動面維持一定誤差。

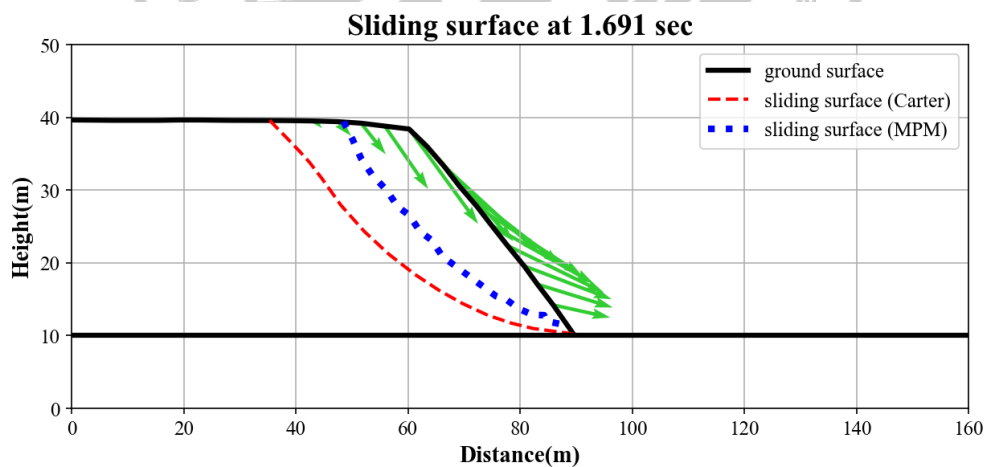
不同追蹤點數量的推估成效彙整如所示。結果顯示，當追蹤點數量大於 6 點時，應用門檻條件可以有效提升推估滑動面的準確性；當追蹤點數量為 4 點時，應用門檻條件後的推估成效反而下降。原因在於追蹤點數量較少時，對於地表位移資訊的掌握度下降，若搭配門檻

條件進行篩選，可能導致地表位移資訊更加不足，使得推估結果變差，甚至無法獲得推估滑動面。

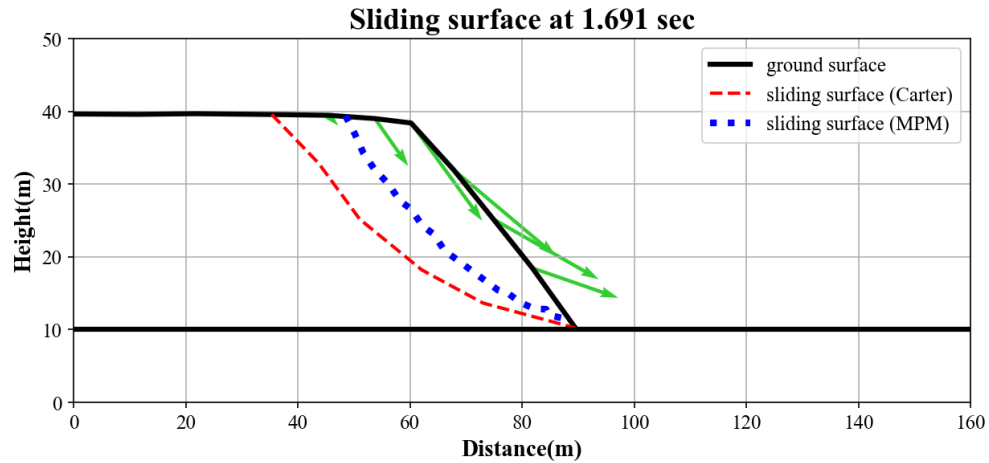
根據上述結果，需對邊坡整體位移情形有一定的掌握，應用門檻條件才能有效且精確地獲得較佳的滑動面推估結果。而根據研究結果，在設定至少 10 個追蹤點的前提下，應用門檻條件的效益較為顯著。若追蹤點數量不足，加上門檻條件的應用，會使得推估成效降低，甚至無法獲得推估滑動面。



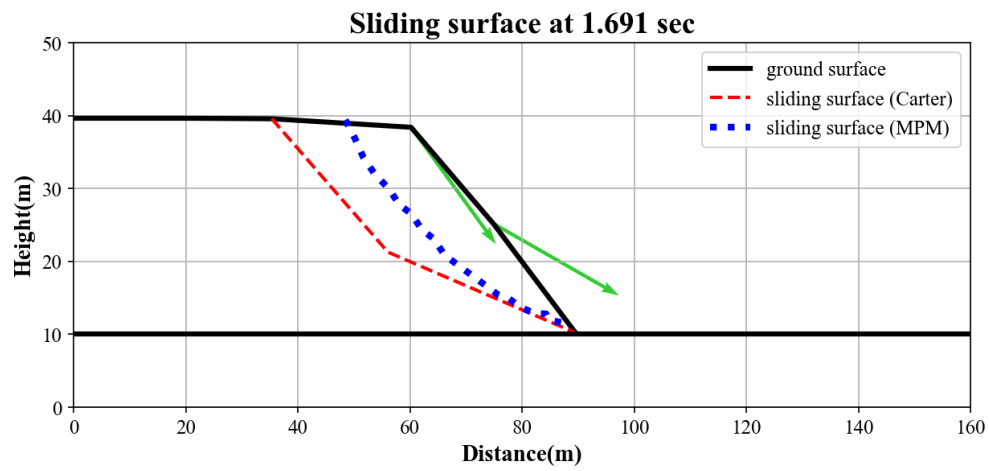
(a) 51 個追蹤點



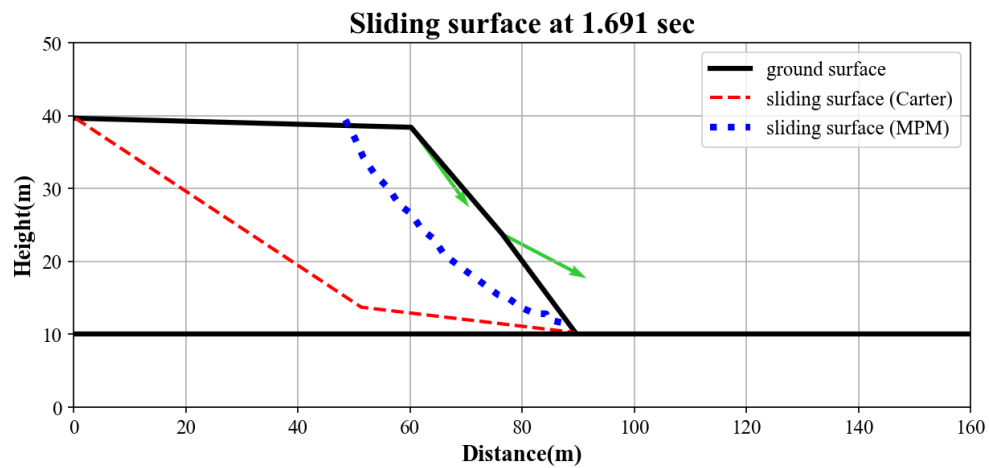
(b) 25 個追蹤點



(c) 11 個追蹤點



(d) 6 個追蹤點



(e) 4 個追蹤點

圖 4-42 不同追蹤點數量之滑動面推估結果

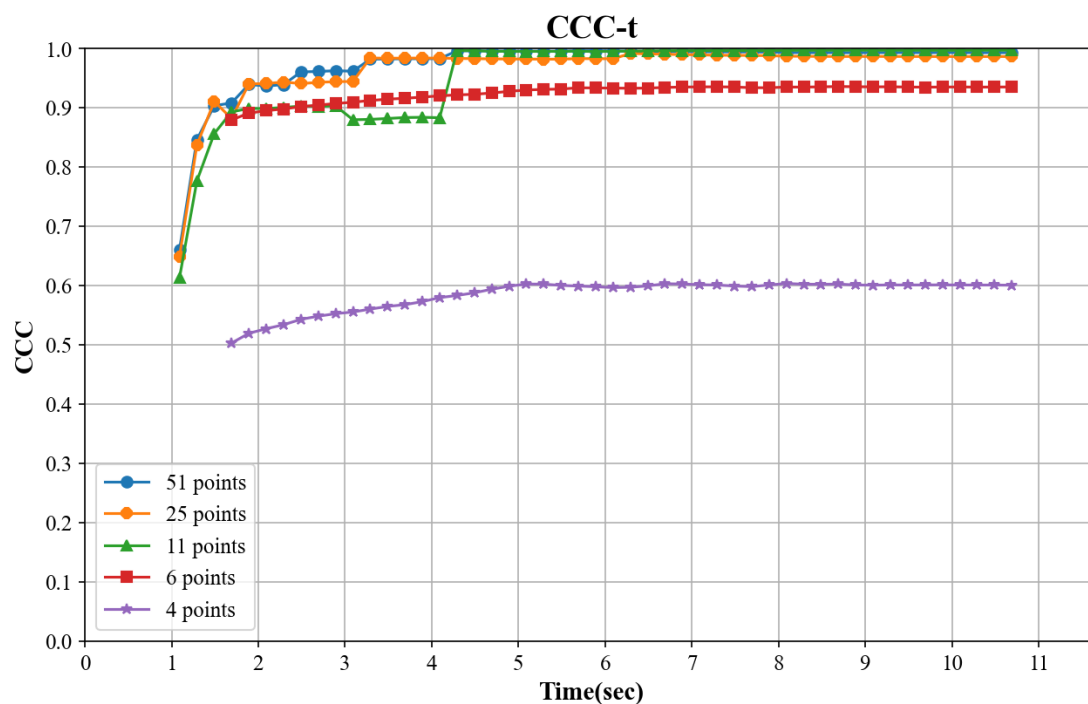


圖 4-43 不同追蹤點數量之推估成效歷時圖

表 4-9 不同追蹤點數量之推估成效

追蹤點數量	CCC (mean)
51	0.9740
25	0.9665
11	0.9539
6	0.9256
4	0.5854

四、小結

在應用門檻條件後，不同坡度條件下的推估成果獲得明顯改善，崩塌過程中的推估成效相當穩定，且與模擬滑動面有著良好一致性。由於坡度變化不僅影響滑動土體的移動方向，也會影響移動速度。根據門檻值的敏感度分析結果，移動速度與位移角度兩個門檻條件的設定對於推估結果有很大的影響。因此，須根據實際情況調整門檻條件，以提高向量傾角法的推估精度。

而不同追蹤點數量在應用門檻條件後，多數案例的推估成效獲得提升，但在追蹤點數量較少時，會出現因地表資訊不足導致誤差增加的情形。因此，需在設定足夠數量的追蹤點的前提下，建議至少 10 個追蹤點，應用門檻條件才能有效且精確地獲得較佳的滑動面推估結果。

由於應用門檻條件後，已能夠動態篩選適用的追蹤點，無須進一步探討不同追蹤點分布在應用門檻條件後的結果，然而，若因現地的限制，僅能設定有限數量的追蹤點，則可參考不同追蹤點分布的結果設置追蹤點位置，建議分布形式為均勻分布。

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究旨在探討向量傾角法在不同情境下推估崩塌滑動面的適用性與限制。本研究使用材料質點法(MPM)模擬不同條件下的邊坡滑動行為，獲取完整的地表與地中資訊，並透過 Python 進行自動化資料處理，探討向量傾角法在崩塌過程中的適用性與限制，並提出對應的修正方法，回饋實務操作上的建議。以下說明本研究所獲得之結果及未來研究方向的建議。

原始向量傾角法並未說明起算位置與結束位置的設定準則。本研究以地表追蹤點作為向量傾角法的輸入數據，由於並非所有追蹤點均參與崩塌運動，若將所有追蹤點資料納入向量傾角法之計算，會導致出現凸出邊坡表面或延伸至彈性體的錯誤推估結果。在坡度較緩的案例中，由於整體滑動規模較小，但地表追蹤點仍會出現位移，使得向量傾角法之推估結果高估滑動面深度。

透過應用門檻條件篩選追蹤點，可將實際參與崩塌運動的追蹤點納入向量傾角法的計算，從而修正推估結果。其中，建議設定臨界位移量為邊坡高度的 0.1~1%；容許位移角度不超過 55 度，並需根據坡度轉換為位移角度比值；移動速度門檻方面，與邊坡規模也有一定的

關連性。當邊坡規模較小時，如高度為 30 m 的邊坡，可以 0.01 m/s 作為移動速度門檻值；當邊坡規模提升時，需適當調整設定，當移動速度門檻值提升至 0.1 m/s 後，無需再進行調整。

本研究為探討向量傾角法的適用性，為避免真實邊坡複雜條件對適用性的重複影響，是故以理想邊坡來進行適用性的探討。透過單一控制變因來比對向量傾角法推估滑動面的差異，例如：坡度變化、坡高變化等，以此來掌握控制變因對推估結果的影響。基於如此，本研究成果未必適用所有真實邊坡條件，因為真實邊坡的破壞發生跟材料條件和地層構造條件等皆有關連，此為本研究的成果限制。

第二節 建議

本研究透過變換不同影響因子探討向量傾角法在不同幾何條件下的適用性與限制，並提出改善方法，提升向量傾角法的推估成效。

針對未來研究方向，提出以下建議：

1. 本研究透過改變邊坡的幾何條件、構造條件來探討向量傾角法的適用性與限制，但整體仍屬於較為理想的情境，未來可透過實際案例進行模擬，並測試向量傾角法的推估成效。

2. 除了向量傾角法外，仍有其他基於地表資訊的滑動面推估方法，未來可納入比較，探討不同方法在不同情境下的優勢與劣勢，提供更為多元的推估方法。



參考文獻

- [1] 董家鈞，2020，「知之為知之，不知為不知，是知也:淺談地質模型不確定性」，大地技師，第 20 期，第 72-83 頁。
- [2] 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影響」，中華水土保持學報，54 卷 3 期，第 185-196 頁
- [3] 鍾明劍、王金山、顧承宇、費立沅、李錦發、蘇泰維，2008，「山岳地區邊坡全自動監測系統建置與應用」，第六屆海峽兩岸山地災害與環境保育學術研討會，論文編號：D-05，台中，台灣
- [4] A.W. Skempton, J.N. Hutchinson, “Stability of natural slopes and embankment foundations.”, Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. & Found, Eng., Mexico (1969), pp. 291-340
- [5] A.M. Booth, M.P. Lamb, J.P. Avouac, C. Delacourt, “Landslide velocity, thickness, and rheology from remote sensing: La Clapière landslide, France.”, *Geophys. Res. Lett.*, 40 (2013), pp. 4299-4304, 10.1002/grl.50828
- [6] A. Yerro, K. Soga, J. Bray, “Runout evaluation of Oso landslide with the material point method.”, *Can. Geotech. J.*, 56 (2019), pp. 1304-1317
- [7] C. Wang, Ž. Arbanas, S. Mihalić, H. Marui, “Three dimensional stability analysis of the Grohovo landslide in Croatia.”, C. Margottini,

- P. Canuti, K. Sassa (Eds.), Proc. 2nd World Landslide Forum, Rome, 3–9 October 2011, Heidelberg, Springer (2013)
- [8] D. Sulsky, Z. Chen, H.L. Schreyer, “A particle method for history-dependent materials.”, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 118 (1–2) (1994), pp. 179-196
- [9] E. Conte, L. Pugliese, A. Troncone, “Post-failure stage simulation of a landslide using the material point method.”, *Eng. Geol.*, 253 (2019), pp. 149-159
- [10] E. Intrieri, W. Frodella, F. Raspini, F. Bardi, V. Tofani, “Using satellite interferometry to infer landslide sliding surface depth and geometry.”, *Remote Sens.*, 12 (9) (2020), p. 1462
- [11] G. Lollino, M. Arattano, M. Cuccureddu, “The use of the automatic inclinometric system for landslide early warning: the case of Cabella Ligure (North-Western Italy).”, *Phys. Chem. Earth*, 27 (36) (2002), pp. 1545-1550, 10.1016/S1474-7065(02)00175-4
- [12] H. Hong, J. Liu, A.-X. Zhu, “Modeling landslide susceptibility using LogitBoost alternating decision trees and forest by penalizing attributes with the bagging ensemble.”, *Sci. Total Environ.*, 718 (2020), Article 137231
- [13] I. Lawrence, K. Lin, 1989, “A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility.”, *Biometrics* (1989), pp. 255-268.
- [14] J.B. Burland, 1987, “The teaching of soil mechanics – a personal view.”, 3 (1987), pp. 1427-1447
- [15] J.R. Keaton, “Engineering geology: fundamental input or random

- variable?””, Proc. Geo-Congress March 3–7 2013 (2013), pp. 232-253
- [16] Juang, CH, Zhang, J, Shend, M, and Hu, J, “Probabilistic methods for unified treatment of geotechnical and geological uncertainties in a geotechnical analysis.”, *Eng. Geol.*, 249 (2019), 148-161
- [17] J. Xie, T. Uchimura, G. Wang, H. Selvarajah, Z. Maqsood, Q. Shen, G. Mei, S. Qiao, “Predicting the sliding behavior of rotational landslides based on the tilting measurement of the slope surface.”, *Eng. Geol.*, 2020, pp. 105554.
- [18] Jiao, Q.; Jiang, W.; Qian, H.; Li, Q. “Research on characteristics and failure mechanism of Guizhou Shuicheng landslide based on InSAR and UAV data.”, *Nat. Hazards Res.* 2021, 2, 17–24.
- [19] K. Soga, E. Alonso, A. Yerro, K. Kumar, S. Bandara , “Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method.”, *Géotechnique*, 66 (2016), pp. 248-273
- [20] K. Song, F. Wang, Q. Yi, S. Lu, “Landslide deformation behavior influenced by water level fluctuations of the Three Gorges Reservoir (China).”, *Eng. Geol.*, 247 (2018), pp. 58-68, 10.1016/j.enggeo.2018.10.020
- [21] M. Carter, S.P. Bentley, “A procedure to locate slip surfaces beneath active landslides using surface monitoring data.”, *Comput. Geotech.*, 1 (1985), pp. 139-153
- [22] M.L. Rainone, P. Torrese, “HR reflection surveys for seismic imaging of unstable slopes.”, Proceeding of SAGEEP 20th Annual Meeting,

- Denver, CO-USA, 1–5 April 2007 (2007), pp. 528-536
- [23] M. Jaboyedoff, M.-H. Derron, B. Rudaz, T. Oppikofer, I.M. Penna, S. Daicz, “A review of geometrical methods for determination of landslide volume and failure surface geometry.”, *GéoQuébec* 2015, the 68th Canadian Geotechnical Conference (2015)
- [24] M.S. Khan, S. Hossain, A. Ahmed, M. Faysal, “Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in Texas.”, *Eng. Geol.*, 219 (2017), pp. 118-129
- [25] M. Jaboyedoff, M. Chigira, N. Arai, M.H. Derron, B. Rudaz, C.Y. Tsou, “Testing a failure surface prediction and deposit reconstruction method for a landslide cluster that occurred during Typhoon Talas (Japan).”, *Earth Surf. Dynam.*, 7 (2) (2019), pp. 439-458, 10.5194/esurf-7-439-2019
- [26] M. Jaboyedoff, C. Dario, D. Marc-Henri, O. Thierry, P. Marin, R. Benjamin, “A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes.”, *Eng. Geol.*, 2020.
- [27] N. Lu, B. Şener-Kaya, A. Wayllace, J.W. Godt, “Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety.”, *Water Resour. Res.*, 48 (2012), Article W09524
- [28] Nguyen T.S., Yang K.H., Wu Y.K., et al. “Post-failure process and kinematic behavior of two landslides: Case study and material point analyses.”, *Comput. Geotech.*, 148 (2022), Article 104797
- [29] P.A. Cundall, “A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system.”, *Proceedings of the*

- International Symposium on Rock Mechanics (1971)
- [30] S. Bandara, A. Ferrari, L. Laloui, “Modelling landslides in unsaturated slopes subjected to rainfall infiltration using material point method.”, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2016, 40, pp. 1358-1380.
- [31] T. Lebourg, S. Binet, E. Tric, H. Jomard, S. El Bedoui, “Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4D evolution of the water pressure on part of a deep seated landslide.”, *Terra Nova*, 17 (5) (2005), pp. 399-406
- [32] Tian, Y., Wu, Y., Li, H., Ren, B., and Wang, H., “Earthquake Dynamic Failure Mechanism of Dangerous Rock Based on Dynamics and PFC3D.”, *Front. Earth Sci.* 9 (2021)., 1–14. doi:10.3389/feart.2021.683193
- [33] Uhlemann, S.; Smith, A.; Chambers, J.; Dixon, N.; Dijkstra, T.; Haslam, E.; Meldrum, P.; Merritt, A.; Gunn, D.; Mackay, J., “Assessment of ground-based monitoring techniques applied to landslide investigations.”, *Geomorphol.* 253 (2016), 438–451.
- [34] W.F. Chen, “Limit Analysis and Soil Plasticity. Developments in Geotechnical Engineering.”, Vol.7, Elsevier, Amsterdam (1975)
- [35] W.-L. Lee, M. Martinelli, C.-L. Shieh, “An investigation of rainfall-induced landslides from the pre-failure stage to the post-failure stage using the Material Point Method.”, *Front. Earth Sci.*, 9 (2021), 10.3389/feart.2021.764393
- [36] X. Liu, Y. Wang, D.Q. Li, “Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by

- random limit equilibrium and material point methods.”, *Comput. Geotech.*, 111 (2019), pp. 301-312
- [37] Yeh, F. H., Lai, Y. C., Ge, L., & Cheng, S. H., “Modeling The Post-Failure And Run-Off For a Translational Landslide In Taiwan By Material Point Method.”, (2021).
- [38] Y. Kang, Z. Lu, C. Zhao, W. Qu, “Inferring slip-surface geometry and volume of creeping landslides based on InSAR: A case study in Jinsha River basin.”, *Remote Sens. Environ.*, vol. 294 (2023), Article 113620.



附錄

附錄一、計劃書之內容審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	本計畫完全以數值模擬分析之方式進行 Carter 法之測試，建議加上實際資料之測試及驗證。	謝謝委員建議。本研究將持續蒐集和評估現場監測和調查資料的品質，倘若監測和調查資料的品質不符合本研究之需求，例如鑽井資料孔數不足、監測站數不足等因素，仍以數值分析資料為主來探討 Carter 法。
二	計畫中內外業，似乎是針對大規模崩塌，採用 Carter 法取決預測剛體滑動面、Anura3D 搭配數值見邊坡切片模型並模擬破壞過程（及滑動面）、現地調查與蒐集資料取得實測潛變區或已崩塌區資料及滑動面（推測），並比較三者關聯性與準確度（比較主體為	感謝委員的建議，目前已有諸多研究證明物質點法可有效模擬大規模崩塌之行為，本研究的目的即是以數值模擬之資料彌補現地監測資料的不足，並套用於 Carter 法，探討 Carter 法的適用情境及限制。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	Carter 法)？不論現地調查是否融入 Anura3D 建模，建議研究中可先界定有無地底調查資料，及大規模崩塌可能的啟動型態（土岩弱面、軟岩弱面、地下水影響、地震影響，以及是否為降雨事件觸發，或非降雨事件之地下水狀態改變所觸發）	
三	計畫內容中提到物質點法相關研究，有對降雨入滲情境作破壞過程模擬，建議研究中補充，是否採用水利耦合模式模擬破壞過程，若是，水利耦合模式見磨除搭配相關資料外，包括建模所需土岩參數，應該會與 Carter 法之簡化模型有概念上的差異，比較基礎尚須多加著墨，或納入已崩塌案例（及預測案例，以供未來驗證參考）	感謝委員的建議，本研究將先著眼於地形變化和地中構造等因素對於 Carter 法應用之影響，是故目前使用之模型僅考慮乾土材料。由於降雨入滲過程之中，崩塌之發生受到未飽和土壤條件、降雨條件和地下水條件等多重因素控制，擬將納入未來的研究範疇，本年度計畫暫不採用水利耦合模式來進行模擬和應用於探討 Carter 法的適用性。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	若採用無線邊坡穩定分析與水利耦合模式，建議可評估納入署內 IRIS 比較。	感謝委員的建議。未來研究若有採用無限邊坡穩定分析與水利耦合模式將與署內 IRIS 進行比較。
五	地表變形方向在不同時期可能不同，是否會影響到 Carter 法所求得之滑動面位置？	謝謝委員建議。誠如委員所言，滑動面發育為一個動態過程，是故地表變形的特性亦會隨著時間改變；本研究亦將探討 Carter 法於崩塌發生到停止過程之中的適用性。
六	以數值模擬成果做為 Carter 法之驗證方式，使否合理？	本研究使用數值模擬成果的原因即是為了彌補監測資料的連續性不足，而在諸多研究中已驗證物質點法可有效模擬大規模崩塌之行為，相信此方法具有一定的可行性。
七	所附圖表皆為基本理論介紹，未有小區域邊坡破壞情境之試作案例，若要應用於實務有其困難度，如何優化數值模擬過程及成果分析以適用於大規模崩塌預測及監測，應加強	感謝委員的建議。本研究所提之數值分析方法，國內已經發表有桃園光華大規模崩塌地模擬之應用案例，相關文獻將補充並說明於計畫書之中。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	思考。二、有關計畫書格式及經費審查部分：1. 本計畫請以補助經費 723 仟元調整編列。2. 本年度執行期限請修正為自 113 年 2 月 7 日至 113 年 12 月 31 日。(10.9 個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限 10.9 個月內編列。年終獎金亦配合計畫期程。	



附錄二、期中書面審查意見及回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	本研究目的(P. 1-3)之說明似不夠具體，所謂不同幾何情境之具體環境條件如何？是否可詳加說明，以利瞭解本研究目的之適用如何？	謝謝委員意見，本研究於期中先針對邊坡的坡度條件來探討滑動面推估方法的適用性，以及追蹤點設定條件不同對滑動面推估結果的差異性，於期中報告已經有初步的探討成果和滑動面推估方法的改善建議。未來，將於期末報告中新增以坡高作為變數的幾何條件來作探討。針對本研究目的(P. 1-3)說明不夠具體之處，相關文字已經重新進行調整。
二	採用材料質點法模擬邊坡滑動行為，惟由圖三-15 所示之地表演變過程所示，該等質點位移似屬一般所稱之表土沖蝕作用現象，屬地形漸變之過程，而崩塌、地滑等之運動機	謝謝委員意見，一般表土沖蝕深度僅有公分等級，且沖蝕現象誘發機制是由降雨現象所觸發。從圖三-15 所示之地表演變過程中，模擬滑動土體深度已經超過公尺等級，且模擬

項次	審查意見	回覆辦理情形
	制，較類似遽變型之演化，是否適合用來推估崩塌滑動面之位置？	過程中尚未施加降雨邊界條件，所以此案例是屬於邊坡達破壞臨界條件後的崩塌現象，因此適用本研究所提之滑動面推估方法。
三	依材料質點法數值模擬圖之示意(圖三-16)及隨時間演變之示意(圖三-15)所示，該等土體變位所形成之不穩定區與穩定區的界面視為滑動面，顯然圖三-15 係屬流動粒子之變位，何以形成滑動之位移變位？可否解釋？另，各滑動示意圖所示之質量平衡是否可滿足沖淤平衡之狀態？	謝謝委員意見，圖三-15和圖三-16為同一情境的崩塌模擬結果，其圖三-15所展示為此情境下地表高程隨時間變化的過程，而圖三-16所展示的為此情境下地中變形的最後結果。針對內文論述不夠詳細或讓讀者誤解之處，已經重新調整和撰寫。此外，本研究採用的模式遵循質量守恆法則，因此得以確保模擬任一時刻皆滿足質量守恆的條件，若不滿足模式將無法完成計算。
四	本研究嘗試新方法之應用作為推估土砂量體變位之研究，值得鼓勵，惟在管理上之嚴謹性似可再精緻探討之	謝謝委員意見與肯定，誠如委員所述現實邊坡的組成條件複雜，除邊坡的幾何條件需要考慮之外，還有地層的構成條

項次	審查意見	回覆辦理情形
		件和材料的組成條件等需考慮，由於尚待探討的條件繁雜，將視計畫的期程來盡可能的增加分析條件。
五	(P3-11)使用之軟體是否可重現崩塌前穩定狀態？包含參數變化情形？	謝謝委員意見，將於報告中新增崩塌穩定狀態的說明圖及設定參數表。
六	(P3-15)試問 3-11 與 3-15 提到之初始應力場差異？請補充說明。	謝謝委員意見，P3-11 內文所提及的初始應力場，即為圖 3-11(P3-15)中 Phase 1 的模擬結果，因為 Phase 1 的模擬目的是為了生成穩定邊坡的初始應力條件。針對內文敘述不清之處，已重新調整及撰寫。
七	(P4-14)是否可律定追蹤點數與 CCC(mean)出現的點數與值關係？請補充說明。	謝謝委員意見，表 4-2 為追蹤點數與 CCC(mean)之間的關係，結果說明本研究所提之滑動面推估方法至少要採用 6 處追蹤點，否則 CCC(mean)將顯著的下降。針對內文敘述不清之處，已重新調整及撰寫。

附錄三、期末書面審查意見及回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	材料是否有因應不同土體進行調整，才能讓其運用在實際的案例上？	謝謝委員建議。崩塌發生機制涉及的可能因子複雜，除本研究探討的邊坡幾何條件之外，委員提及之材料參數條件亦為影響結果的可能因素之一。除上述因素之外，地質構造的條件，例如層面厚度、順向坡、逆向坡等等，都可能是滑動面推估可能的因素。由於本研究的工作涉及大量數值模擬及向量傾角法的後續分析，受限於年度計畫的執行時間，故先著眼於 1. 坡度變化因素、2. 坡高變化因素、和 3. 向量傾角法追蹤點設置方法 等因素進行探討，並提出對應之修改建議。針對委員提及的材料因素，本研究選用的模式可在摩爾庫倫模組的土壤模型地下

項次	審查意見	回覆辦理情形
		來進行不同材料參數的模擬，包括有1.凝聚力變化因素 和 2. 摩擦角變化因素。建議納為未來的研究工作規劃之一。
二	建議在前期實驗架構上進行研究限制的設定	謝謝委員建議。針對本研究進行的限制，將於報告的結論部分進行補充說明和調整。

