

應用向量傾角法推估滑動面演變之適用性探討

李威霖^{[1]*} 盧之偉^[2] 林子聖^[2] Nadila Ayu Novanti^[2] 林郁峰^[2]

摘 要 獲取大規模崩塌滑動面位置資訊相當困難且成本高昂，通常需要昂貴的地面調查。近年來，有多種基於地表位移監測資料的滑動面推估方法被開發，其中之一為向量傾角法 (Vector Inclination Method, VIM)。然而，僅透過現地調查驗證向量傾角法的方法受到資料不確定性的限制，使其適用性評估受到影響。本研究利用數值模擬生成崩塌過程中的地表位移和滑動面資訊，以此驗證向量傾角法，探討其適用性和限制性，並提出改善方案。結果顯示，現有的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。提出的改進方案顯著提高向量傾角法的表現，並證明了其有效性，其相關係數表現從 0.6 上升至 0.9。透過本研究得以掌握向量傾角法推估滑動面的可行性，未來可回饋至相關的崩塌防治工作應用中。

關鍵詞：崩塌、滑動面、材料質點法、向量傾角法。

Applicability of the Vector Inclination Method in Estimating the Evolution of Slip Surfaces

Wei-Lin Lee^{[1]*} Chih-Wei Lu^[2] Tzu-Sheng Lin^[2] Nadila Ayu Novanti^[2] Yu-Feng Lin^[2]

ABSTRACT Identifying the locations of large-scale landslide slip surfaces is extremely difficult and costly, typically requiring expensive ground surveys. Various methods based on surface displacement monitoring data have been developed to estimate slip surfaces, including the Vector Inclination Method (VIM). However, the VIM has only been validated through field surveys; such surveys are prone to inaccuracies in the data, primarily due to the inherent uncertainties in the monitoring equipment, uninvestigated areas, and the randomness of soil composition. These factors contribute to the overall uncertainty of the survey data and limiting their applicability. Thus, this study conducted numerical simulations to determine surface displacements and slip surface locations during landslides. The data obtained from numerical simulation were used to evaluate and improve on the VIM. This study's improvements to the VIM yielded an increase in the VIM's correlation coefficient, from 0.6 to 0.9.

Key Words: landslide, slip surface, material point method, vector inclination method.

一、前 言

臺灣板塊活動活躍致使地勢陡峻及地質破碎，以及梅雨與颱風等事件引致豪雨事件頻繁，再加上氣候變遷加劇極端降雨事件發生之尺度。自 2009 年莫拉克風災過後，大規模崩塌災害防治成為我國天然災害重要的課題之一 (陳德偉等人 2023)。為減少災害發生或防止災害擴大，各級政府與權責機關得進行災害潛勢、境況模擬與風險評估等調查分析工作，並適時之公告。基於此，為能評估大規模崩塌災害的發生規模與影響範圍等資訊，如何有效掌握潛在滑動區域的資訊，成為重要的研究課題 (Jakob 2005, von Ruetten et al. 2016)。透過地面下調查來掌握潛在滑動區域，例如鑽井、地球物理量測等，係為最直接且常見的方法。但是，調查工作受限於地形環境限制和執行成本等難以克服因素，使得潛在滑動區域資料獲取受到限制，進而導致大規模崩塌災害防治

工作推動的困難 (Jaboyedoff et al. 2020；吳昱葵 2020；楊國鑫等人 2023)。然而，隨著近代航遙測技術的快速發展，目前已能透過多元載具 (例如衛星影像、無人機) 搭載多元感測器 (例如光學、光達、合成孔徑雷達等) 來取得高解析度數值地形或點雲等資料，地表隨時間和空間變化的詳細資料已能更有效地掌握 (Jaboyedoff et al. 2020)。殷鑑於此，本研究回顧近年來利用地表數據反演滑動區域的相關研究，期望能發展一套較有效率的潛在滑動區域推估方法。

回顧地表數據反演滑動區域的相關研究，國內被最常見的方法係 Guzzetti et al. (2009) 提出的崩塌面積-體積關係式，因為崩塌面積僅需衛星影像即可得到，當崩塌面積得到後，即可透過此關係式來評估崩塌區域的平均崩塌深度 (Guzzetti et al. 2009)。另外一種係透過兩期地形變化資料來推估的方法，此類方法係先假設滑動面的近似形狀，例如橢圓形或矩形，然後再藉由地表積和體積的關係來得到滑動區

[1] 國家災害防救科技中心
National Science and Technology Center for Disaster Reduction, Taipei, Taiwan

[2] 國立臺灣科技大學營建工程系
Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan

* Corresponding Author. E-mail:

域的概估法 (WP/WLI 1990; Cruden and Varnes 1996; Bishop 1999)。當地表的位移量和方向已知的時候，例如傾斜儀、伸張計、合成孔徑雷達影像等，則可透過形態學來推估滑動區域的縱剖面（又稱之為向量傾角法，Vector Inclination Method，以下簡稱為 VIM）(Carter and Bentley, 1985; Intrieri et al. 2020)，亦或是基於質量守恆方程式和彈性錯位理論來發展的推估方法 (Booth et al. 2013; Okada 1985)。在利用地表運動資訊推估滑動區域的方法中，例如在義大利山區崩塌案例研究中，研究人員通常使用合成孔徑雷達影像來估計地表運動資訊，然後應用 VIM 來推估滑動區域 (Intrieri et al. 2020; Donati et al. 2021)；又如，林冠璋等人 (2023) 以桃園光華大規模崩塌區為例，利用多期無人機影像來推估地表運動資訊，然後應用 Booth et al. (2013) 的方法來推估滑動區域；林俊廷 (2021) 以南投廬山大規模崩塌區為例，利用合成孔徑雷達影像推估地表運動資訊，然後應用 Okada (1985) 的方法來推估滑動區域。然而，現有研究中鮮少討論方法的適用性和限制性，主要受限於地面下調查資料的精度不足，且 VIM 亦較少有國內學者的研究。因此，為了更好地了解基於地表運動資訊推估滑動區域的研究方法，本研究通過數值模擬結果來替代地面下調查資料，作為方法驗證的依據，以探討滑動區域推估方法的適用性和限制性。

回顧崩塌現象數值模擬研究，過往常用有限元素法為基礎的數值模式來探討邊坡破壞現象，受限於網格容許變形量的限制，使得邊坡破壞後近似土石流出的大變形現象無從進行模擬 (Liu et al. 2019)。為克服上述問題，學者於數值解算過程中結合拉格朗日法 (Lagrangian Approach) 和歐拉法 (Eulerian Approach)，藉此來避免網格過度變形引致數值無法求解之問題，例如材料質點法 (Material Point Method, MPM) (Sulsky et al. 1994, 1995)。因此，近年來越來越多以材料質點法為基礎開發的數值模式，例如 MPM3D (Li et al. 2021; Liu et al. 2019)、Anura3D (He et al. 2023; Ceccato et al. 2021; Troncone et al. 2023)。並且，成功應用到各種崩塌和邊坡破壞相關研究，例如開挖引致邊坡破壞 (Liu et al. 2022)、崩塌現象 (He et al. 2023; Llano-Serna et al. 2016; Yerro et al. 2016; Conte et al. 2019)、降雨促崩機制 (Ceccato et al. 2021; Bandara and Soga 2015; Wang et al. 2018; Lee et al. 2021) 等。其中，Anura3D 是一個的開源軟體，可應用於土體大變形現象及水土交互耦合現象探討的數值模式。Anura3D 從 2008 開始發展，2019 年成為 LGPL 開源軟體 (Lesser General Public License)，2022 年後的開源碼已可支援未飽和土壤現象、降雨促崩現象等情境模擬 (Anura3D MPM Research Community 2022a, 2022b)。因此，本研究擬用 Anura3D 做為邊坡破壞現象模擬的數值模式，擬透過數值模擬結果來替代地面下調查資料，作為滑動區域推估方法驗證的依據。

為提供更多的滑動區域推估方法做為大規模崩塌防治工作的參考依據，本研究將探討 VIM 的限制性和適用性，研究分析的執行流程如圖 1 所示。由於 Anura3D 具有良好的崩塌與邊坡破壞模擬能力，因此將使用其數值模擬結果來替代地面下調查資料，以驗證滑動區域推估方法的有效性。

於本文的第二章中，其第一小節將介紹 Anura3D 模式及模擬採用理論，然後於第二小節中說明邊坡破壞模擬情境及相關參數設定，最後於第三小節說明模擬滑動面和模擬地表位移等成果的取得方法。模擬得到的地表位移將做為 VIM 的輸入參數，然後即可得到 VIM 的推估滑動面結果，其 VIM 推估滑動面的方法說明於本文的第三章中。Anura3D 模擬滑動面成果將做為 VIM 推估滑動面的驗證資料，推估成效的評估方法說明於本文的第四章中。透過滑動面推估成效分析，本研究即可探討 VIM 推估滑動面時遇到的錯誤樣態，然後針對錯誤樣態產生的原因，本研究提出改進方法，藉此來提高 VIM 滑動面推估方法的可靠性和實用性。

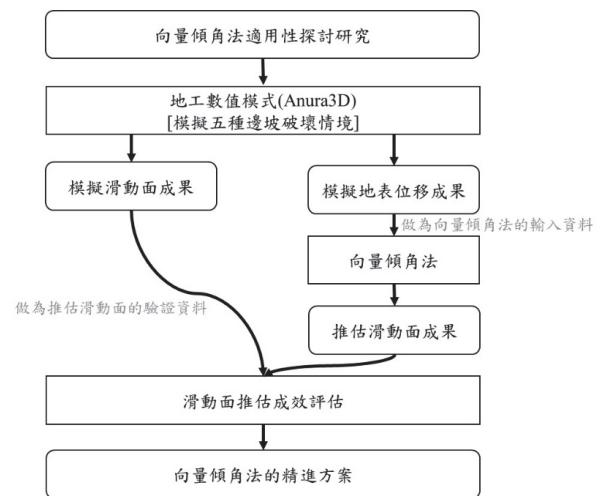


圖 1 向量傾角法適用性探討流程圖

Fig.1 Flowchart of Investigating the Applicability of the VIM

二、崩塌現象模擬方法

為探討崩塌的運動行為及滑動面發育過程之間的關係，本研究選用地工數值模式產製滑動面發育過程中對應之地表位移變化過程，並以此做為後續 VIM 推估滑動面發育之適用性和限制性探討的依據。選用地工數值模式 (Anura3D MPM Software v2022) 常被應用來重現崩塌現象，相關研究成果已被大量實驗和現場數據來校正與驗證 (Anura3D MPM Research Community, 2022a; Yerro et al. 2016a, 2016b, 2018; Lee et al. 2019; 吳昱葵, 2020; Cuomo, 2019; Nguyen et al. 2021; Soga et al. 2016; 楊國鑫等人 2023)。以下就模式之介紹及原理、模擬之情境及相關設定、和地表位移和滑動面取得方法等做說明。

1. 模式之介紹及模組理論

本研究選用的地工數值模式，係基於材料質點法發展之大變形分析 (Large Deformation Analysis) 工具，此數值解算方法可結合歐拉法與拉格朗日法的特性，並應用來解決網格過度變形扭曲導致計算無法收斂的問題，是故可有效分析大規模的邊坡變形 (Sulsky et al. 1994, 1995)。圖 2 為材料質點法的解算概念，計算開始前以節點 (node) 和網格 (element)

生成情境模擬的範圍，然後擇定模擬材料的配置區域，並於區域內生成材料點 (Material Point, MP)，然後將材料的初始資訊儲存於材料點之中。為求解模擬現象之加速度場、速度場和位移場，材料點將所儲存之純量、向量及張量等資訊傳遞給網格上的節點，並於節點處求解動量方程式。於節點

處求解後的結果將投射回材料點上，並重置節點位置為初始狀態。然後材料點則依據新得到之位移場來更新座標位置，並於材料點處求解連續方程式，以及更新材料點資訊。透過以上流程即可完成一個週期的材料質點法解算 (Lee et al. 2021)。

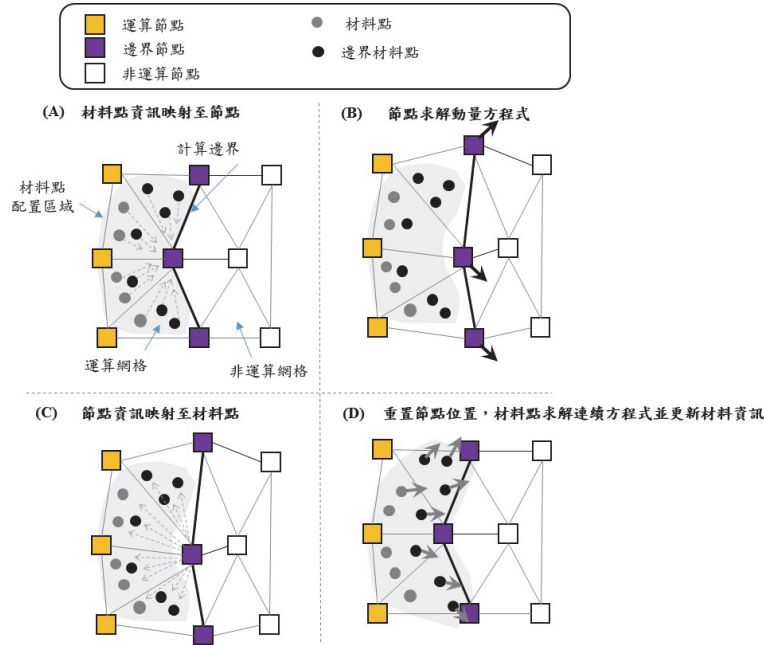


圖 2 材料質點法解算概念圖

Fig.2 Conceptual Schematic of Material Point Method Solution

本研究探討之崩塌現象僅於單一固相，是故採用單相單點 (single phase-One point) 的模組，其質量和動量守恆方程式分別可表示為

$$\frac{d}{dt}\rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v}_s = 0 \quad (1);$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \rho \mathbf{b} \quad (2);$$

式中 t 、 ρ 、 $\mathbf{v}_s$ 、 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 和 $\mathbf{b}$ 分別為時間、密度、速度、應力張量和物體力 (Anura3D MPM Research Community, 2022a)。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 ($d\boldsymbol{\sigma}_s$)，其式可表示為

$$d\boldsymbol{\sigma}_s = \mathbf{D} \cdot d\boldsymbol{\varepsilon}_m + \boldsymbol{\sigma}_s \mathbf{W}^T - \mathbf{W} \boldsymbol{\sigma}_s \quad (3);$$

式中 $\mathbf{D}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_m$ 、 $\mathbf{W}^T$ 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)。崩塌破壞條件則依循摩爾庫倫破壞準則，其臨界函數的表示式為

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

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)。

2. 模擬情境、參數設定暨模擬結果

本研究擬探討 VIM 推估滑動面演變於不同坡度邊坡破壞之適應性，是故建置不同坡度之二維平面邊坡模型，並模擬不同情境下的邊坡破壞過程。模擬過程中的地表變形資訊將做為 VIM 的輸入參數，其 VIM 推估得到之滑動面位置，

將與模擬得到之地中變形資訊比對，最後從兩者之間的差異來說明 VIM 推估滑動面演變的適用性。以下將介紹數值模型之邊坡幾何模型、網格配置、邊界條件、初始條件以及土壤參數等設定做說明。

模型之幾何、網格和邊界等條件如圖 3 所示。模型設計一個坡高 30 [m] 和坡頂長度 60 [m] 的梯形邊坡 (Column)，其坡底長度配合邊坡坡度 (θ) 調整，本研究共設計有 30°、45°、60°、75° 和 90° 等五種情境。此梯形邊坡座落於底部長度 160 [m] 和底部高度 10 [m] 的底板 (Base)，因此破壞後的邊坡土體得以沿著底板移動直到運動停止為止。所以，數值模式的計算範圍 (Calculation Domain) 長度為 160 [m] 及高度為 50 [m]。模式計算範圍以三角網格來進行網格配置，網格切割最大尺寸為 2 [m]，網格配置數量共計有 4282 [element]。有關材料點數量配置方面，本研究於每個網格中設定 3 個材料點，是故材料點數量共計有 6171 [MPs]。模式邊界條件部分，左右邊界設定為滾接支撐 (Roller) 且僅允許垂直方向移動，而下邊界則設定為鉸接支撐 (Hinge)，透過上述設定來確保土體滑移僅發生於計算區域之內。

材料參數設定部分，梯形邊坡 (Column) 材料採用摩爾庫倫模組 (Mohr-Coulomb)，土體為乾土且假設不具有凝聚力 (cohesion = 0 kPa)。本研究以實驗室常見土壤材料參數為參考，設定孔隙率 (Porosity) 為 0.4 [-]，土體密度 (Solid density) 為 1900 [kg/m³]，楊氏模式 (Young's modulus) 為 100000 [kPa] 和柏松比 (Poisson ratio) 為 0.3 [-]。為確保模

擬之梯形邊坡發生破壞，其摩擦角必須小於邊坡角度，是故摩擦角 (Friction angle) 設定為 25° 。底板 (Base) 材料則採用彈性體模組 (Linear Elasticity)，同樣為不含水材料，除楊氏模為 1000000 [kPa] 外，其孔隙率、土體密度和柏松比等參數保持與梯形邊坡一致。最後，材料參數得整理如表 1 所示。初始條件設定上，梯形邊坡 (Column) 的初始應力以準靜態 (quasi-static condition) 過程來生成。邊坡破壞模擬結果如圖 4 所示。

3. 模擬地表位移和滑動面取得方法

數值模式重現邊坡破壞現象之後，模擬過程中，地表位移資訊將做為 VIM 推估滑動面的輸入資料，以及模擬得到之滑動面結果將做為 VIM 推估得到滑動面的比對依據。以下就模擬地表位移和模擬滑動面取得的方法來進行說明。

(1) 模擬地表位移取得方法

數值模式可指定任意材料點為追蹤點，如圖 5(左) 所示，並將此材料點的座標及材料性質等隨時間變化資訊彙整後輸出。圖 5 為邊坡坡度 45° 的模擬結果，圖 5(左) 為追蹤點的設置位置，任意時間追蹤點的連線即可得到任意時間地表的高程剖面，如圖 5(右)，可見邊坡坡度 45° 經破壞後，上邊坡地表高程下降，以及下邊坡坡趾沿著水平方向向右移動。透過輸出後的資料，即可將任意時間之追蹤點位置進行

連線，便能得到任意時間之地表位置。隨著崩塌發生到結束，模擬地表變形隨時間變化的結果如圖 5(右) 所示。

表 1 模式材料參數配置表

Table 1 Material properties of the slope model.

Material	Column	Base
Material type	Dry material	Dry material
Porosity [-]	0.4	0.4
Solid density [kg/m ³]	1900	1900
Material model	Mohr-Coulomb	Linear Elasticity
Young's modulus [kPa]	100000	1000000
Poisson ratio [-]	0.3	0.3
Cohesion [kPa]	0	-
Friction angle [°]	25	-

(2) 模擬滑動面取得方法

數值模式可透過展示軟體 (ParaView) 來呈現模擬崩塌現象隨時間變化之過程，以位移量分布的模擬結果為例，如圖 6 (左) 所示。本研究參考 Ceccato et al. (2021) 取得滑動面位置方法，定義位移量超過 0.1 [m] 之區域視為不穩定土體，以此做為判斷的門檻值來找出不穩定土體和穩定土體的分界線，如圖 6(右) 中的紅線處。透過上述方法，本研究可以得到模擬滑動面位置隨時間變化的結果。

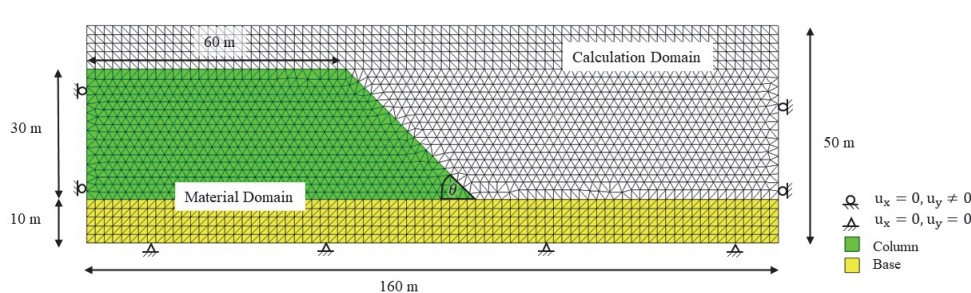
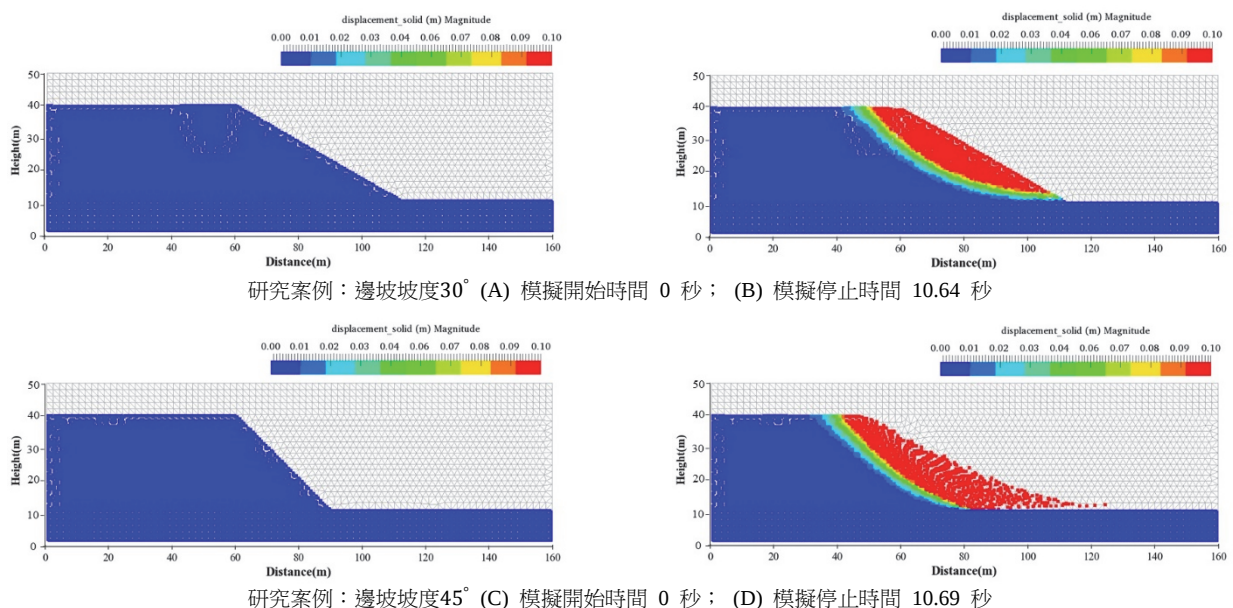


圖 3 邊坡模型與相關設定配置圖

Fig.3 Geometry of slope model and its assignment



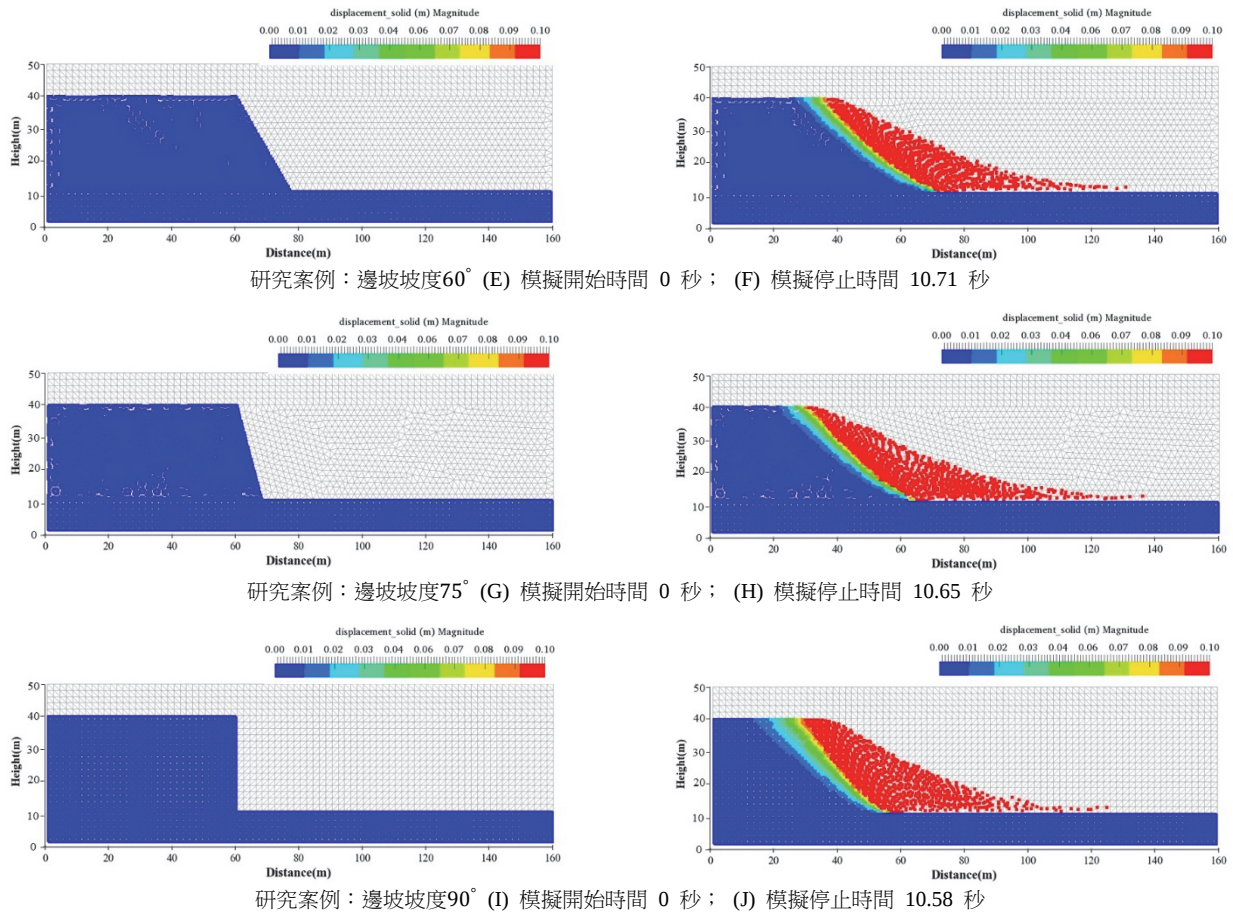


圖 4 數值模擬邊坡位移結果圖

Fig.4 The numerical simulation results

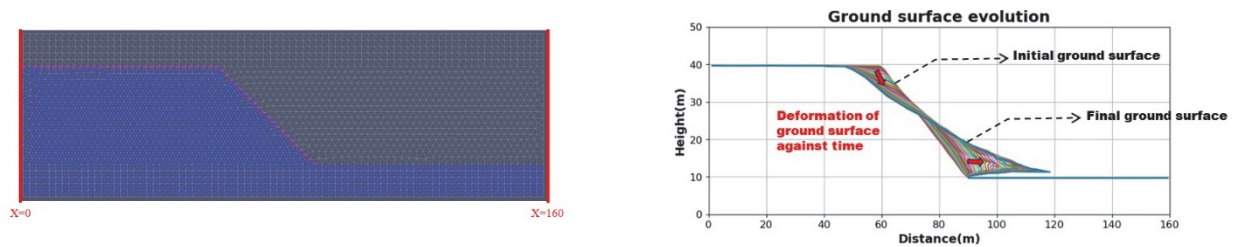


圖 5 邊坡追蹤點配置 (左) 和模擬地表變形隨時間變化 (右) 圖

Fig.5 Assignment of tracking points (left) and evolution of simulated ground surface(right)

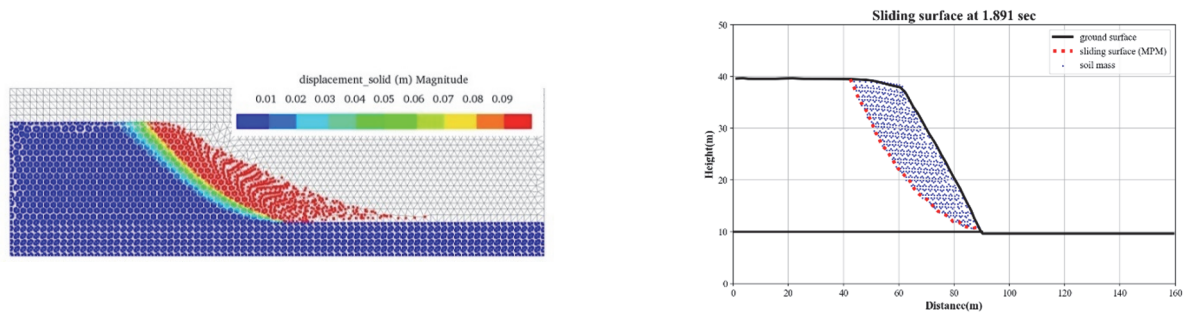


圖 6 位移量分布模擬結果 (左) 和模擬滑動面位置結果 (右) 圖

Fig.6 Distribution of simulated displacement (left) and location of simulated sliding surface (right)

三、滑動面推估方法

透過 VIM，僅需地表位移資訊即可用來推估滑動面位置 (Carter and Bentley, 1985)。本研究將模擬地表位移資訊做為 VIM 的輸入條件，即可得到滑動面位置隨時間變化的推估結果，以下就滑動面推估的計算方法進行說明。首先，比對任意兩個時刻之地表位置及其追蹤點，如圖 7 所示，即可找出 VIM 的起算和結束位置，以及各對應追蹤點的運動方向。接著，對每一個追蹤點畫一條垂直於移動方向的線，如圖 7 中灰色實線，並從任意連續兩個追蹤點拉出中垂線，如圖 7 中灰色虛線。然後從起算位置開始拉一條平行下一追蹤點運動方向的線，如圖 7 中紅色虛線，並將其連接至中垂線後結束。然後，以剛剛與中垂線的連結點為起點，重複上述步驟直到紅色虛線連接至結束位置。VIM 先以上邊坡為起點來推估一次滑動面位置，然後再從下邊坡為起點來推估一次滑動面位置，兩次推估得到的滑動面位置取平均為最後的推估結果。

四、滑動面推估成效評估方法

本研究透過數值分析可得到任意時刻的模擬滑動面位置，以及透過 VIM 可得到任意時刻推估滑動面位置，如圖 8 所示，透過兩者之間比較，藉此來說明 VIM 推估滑動面位置的合理性。本研究利用相關係數 (Concordance Correlation Coefficient, CCC) 來量化推估滑動面與模擬滑動面位置的

相似程度，如圖 8 所示，於任意水平位置來看，模擬滑動面和推估滑動面有各自的垂直位置，如果兩者間整體的垂直位置相差不大，即為相似。本研究分別以 x 和 y 做為模擬滑動面和推估滑動面的下標符號，因此模擬滑動面所有垂直位置的平均數和變異數可分別表示為 σ_x 和 μ_x ，同理， σ_y 和 μ_y 為推估滑動面所有垂直位置的平均數和變異數。於上述定義下，相關係數 (ρ_c) 的公式可以表示為

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

相關係數 (ρ_c) 為介於 0 至 1 的值，值越接近 1 代表相似程度越高 (Carrasco et al., 2009)。

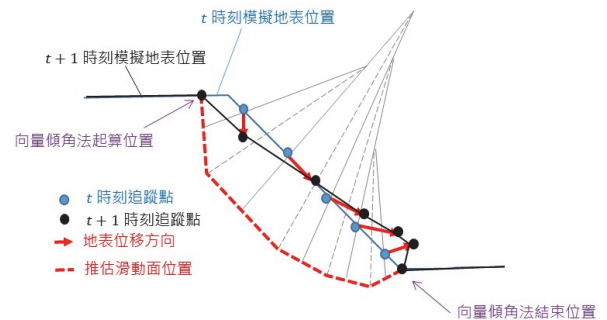


圖 7 VIM 推估滑動面位置概念圖

Fig.7 Schematic of Estimating Sliding Surface Using Vector Inclination Method

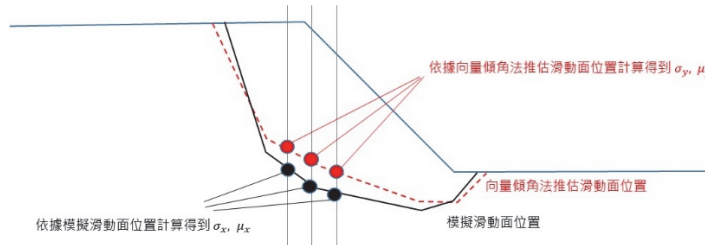


圖 8 VIM 推估滑動面和數值模擬滑動面比較分析概念圖

Fig.8 Schematic for comparative analysis of estimating sliding surface using vector inclination method and simulated sliding surface using numerical model

五、結果與討論

本研究將針對 VIM 推估滑動面位置的適用性來進行探討。首先，本研究將探討不同邊坡坡度條件下 VIM 的滑動面推估結果，並透過相關係數來說明 VIM 的適用範疇；接著，因為 VIM 的計算相當仰賴追蹤點的資料，包括分布位置和運動方向等，因此本研究將設計不同追蹤點的分布位置，並用來推估滑動面位置，同樣透過相關係數來說明追蹤點選用差異對 VIM 推估結果的影響。

1. VIM 於不同邊坡坡度條件下推估滑動面的成果探討

數值模式分別模擬 30°、45°、60°、75°和 90°等五種邊坡坡度的破壞情境，如圖 9 所示，圖中紅色虛線為 VIM 推估滑動面的位置，以及圖中藍色虛線為 MPM 模擬滑動面位

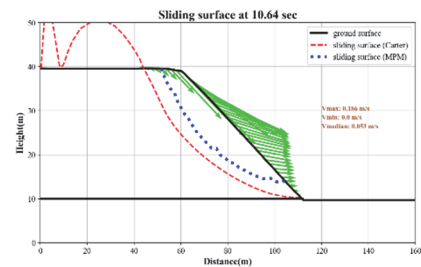
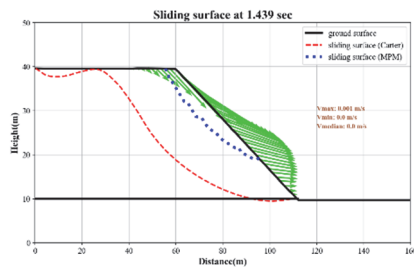
置，本研究發現追蹤點設定的起始和結束位置對於 VIM 推估滑動面結果造成關鍵的影響。

首先看到邊坡 30°條件下模擬滑動面和推估滑動面等位置的比較結果，如圖 9(A) 和 (B)，無論在邊坡破壞的初始階段 (模擬時間 1.439 秒) 或是土體趨於穩定的結束階段 (模擬時間 10.64 秒)，VIM 受限於追蹤點位置的限制，因此 VIM 推估滑動面的起始位置被鎖在最左側 ($x = 0$ m)，以及 VIM 推估滑動面的結束位置被鎖在坡腳的轉折處。此外，由於邊坡角度僅有 30°，土體變形的速度相對緩慢，且位於邊坡頂部的追蹤點並未記錄到足夠大的變形速度，使得此區域無法透過 VIM 得到合理的推估滑動面形狀。儘管受到如此的限制，當土體趨於穩定的階段 (模擬時間 10.64 秒)，VIM 推估滑動面的形狀和位置開始貼近模擬滑動面的結果。殷鑑於此，本研究將五種邊坡坡度的相關係數隨運動過程間的變

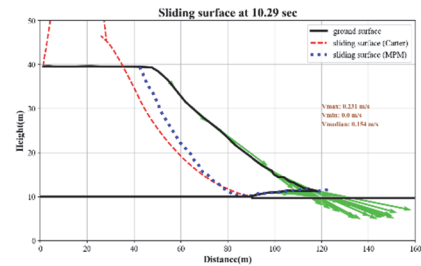
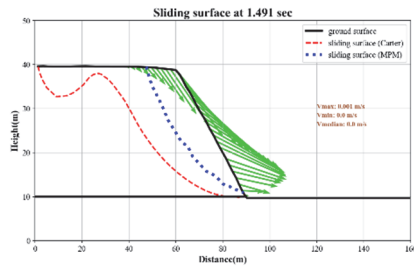
化，繪製如圖 10(左) 所示。從圖 10 可知，邊坡角度 30° 條件下，當模擬時間超過 4 sec 後，VIM 推估滑動面和模擬滑動面的相關係數維持在 0.9 以上，直到模擬時間結束。接著，看到圖 9 (C) 和 (D)，其所顯示的為邊坡 45° 的結果。相似的問題亦發生於邊坡 45° 的條件，包括追蹤點位起始和結束的鎖定、邊坡頂部追蹤點無法透過 VIM 推估合理滑動面形狀。相關係數隨時間變化的表現上，如圖 10(左) 所示，其模擬時間 2~6 secs 之間，VIM 推估合理滑動的形狀和位置接近模擬滑動面結果，此時的相關係數同維持 0.9 之間，唯當模擬時間 6 sec 後，隨著滑移土體滑移出邊坡並往前堆積超過 10 m，VIM 推估滑動面的形狀與位置開始與模擬滑動面出現差異，所以模擬時間 6 sec 後的相關係數開始下降並震盪。從圖 9 (D) 可以看出，當滑動土體離開邊坡範圍後，受限於追蹤點起始位置被鎖定於最左側處 ($x = 0$ m)，使得 VIM 推估滑動面的形狀被往上邊坡拉扯，進行導致 VIM 推估滑動面和模擬滑動面的誤差增加。追蹤點受限的問題，同

樣出現在邊坡 60° 、 75° 和 90° 等條件中，如圖 9(E) 至 (J)。因此，從相關係數隨時間的變化圖 10 (左) 可見，上述條件於模擬時間 3 sec 後的相關係數降至 0.6 左右。

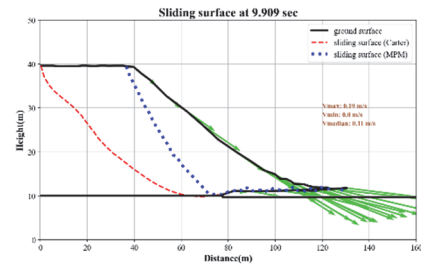
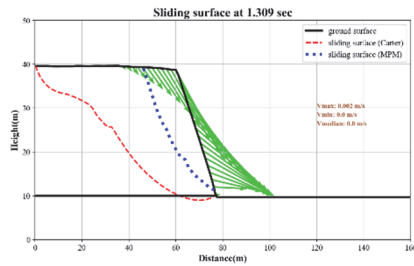
基於上述，本研究認為 VIM 推估滑動面時追蹤點的選用對結果非常敏感，必須跟著滑移土體的區域來做動態條件，如圖 10 (右) 提出的錯誤樣態。透過本研究發現，邊坡土體的變形未必全部來自邊坡破壞的現象，其上邊坡土體亦可能因著重力而有向下的潛變現象，因此在追蹤點的選用上速度過小的變形不應納入 VIM 的計算使用。其二，邊坡破壞引致的土體運動方向與滑動面的發育形狀有著相關性，因此追蹤點的移動角度不應該與坡面角度相差太多，而上邊坡潛變引致的移動角度跟坡面角度近乎垂直，因此，本研究認為追蹤點移動角度和坡面角度的比值不應該過大。接下來，本研究將制定一套自動調整追蹤點的門檻條件，藉此來精進 VIM 推估滑動面的成果。



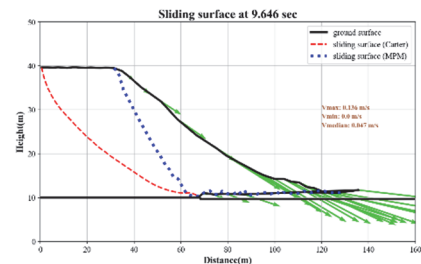
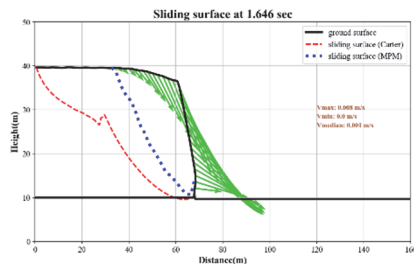
研究案例：初始邊坡坡度 30° (A) 模擬時間 1.439 秒； (B) 模擬時間 10.64 秒



研究案例：初始邊坡坡度 45° (C) 模擬時間 1.491 秒； (D) 模擬時間 10.29 秒



研究案例：初始邊坡坡度 60° (E) 模擬時間 1.309 秒； (F) 模擬時間 9.909 秒



研究案例：初始邊坡坡度 75° (G) 模擬時間 1.646 秒； (H) 模擬時間 9.646 秒

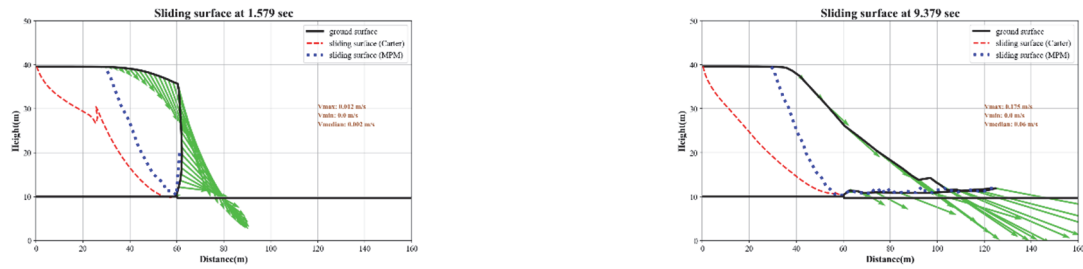
研究案例：初始邊坡坡度 90° (I) 模擬時間 1.579 秒；(J) 模擬時間 9.379 秒

圖 9 VIM 推估滑動面和數值模擬滑動面比較分析結果圖

Fig.9 Comparative analysis of estimating sliding surface using VIM and simulated sliding surface

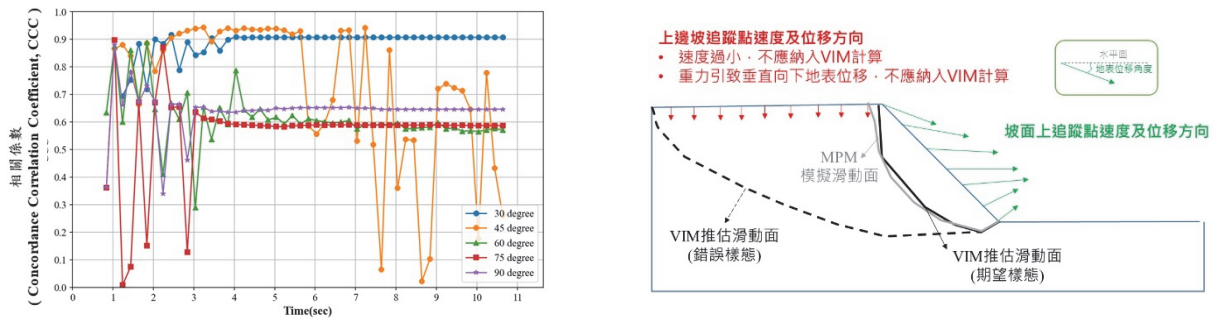


圖 10 VIM 於不同邊坡角度條件下推估滑動面的成效分析 (左) 和錯誤樣態 (右) 圖

Fig.10 CCC analysis of VIM in estimating sliding surface under different slope angle conditions (left) and error patterns (right)

2. VIM 推估滑動面的精進方法與探討

本研究提出兩個門檻值做為追蹤點位的調整依據，其一為地表位移速度 (ground surface velocity) 的門檻值，其數據來自於追蹤點位水平和垂直速度分量合的結果，其用意是要濾掉潛變現象所引致的緩慢地表位移區域；其二為地表位移角度和坡面角度比 (ratio of movement angle to slope angle) 的門檻值，承如錯誤樣態的描述，如圖 10(右)所示，本研究認為邊坡破壞現象引致的地表位移角度未必與坡面角度差距太大，反之，潛變現象引致的地表位移角度可能與坡面角度相差將近 90° ，因此提出地表位移角度和坡面角度比做為第二個追蹤點的調整依據，坡面角度為已知條件，而地表位移角度則可從追蹤點位的水平和垂直速度分量資訊計算得到。

基於上述的精進方法，本研究設定 0.01 m/s 做為地表位移速度的門檻值，以及設定 1.5 做為地表位移角度和坡面角度比的門檻值，然後重新以 VIM 來推估 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 等五種邊坡坡度的滑動面發育過程，其結果如圖 11 所示。以邊坡 30° 條件為例說明，如圖 11(A) 和 (B)，因著追蹤點篩選門檻值的設定，於 VIM 計算的過程中，地表位移速度過小的追蹤點將不被納入考慮，所以 VIM 推估滑動面的起始和結束位置將會隨著崩塌運動的過程而改變。如圖 11(A) 所示，於模擬時間 1.439 sec 時，VIM 推估滑動面的起始位置為 $x = 40$ m 處，以及結束位置靠近 $x = 110$ m 處。隨著模擬時間推移，如圖 11(B) 所示，亦即模擬時間 10.64 sec 時，VIM 推估滑動面的起始位置調整為 $x = 50$ m，以及結束位置調整靠近至 $x = 105$ m 處。此時，VIM 推估滑動面的形狀，如圖 11(B) 中的紅色虛線，相當貼齊 MPM 模擬滑

動面的位置，如圖中的藍色虛線處。此外，比較圖 9(B) 和圖 11(B)，未設定門檻值時，VIM 推估滑動面位置會超過地表高程，此主要原因在於用於 VIM 計算的追蹤點地表位移角度不合理所導致，透過門檻值的篩選，不合理的追蹤點將不會納入 VIM 計算當中，所以精進後的 VIM 得以排除推估滑動面超過地表高程的錯誤。從圖 11(C) 至 (F) 可知，本研究所提的 VIM 推估滑動面精進方法亦可確實作用於邊坡角度 45° 、 60° 、 75° 和 90° 等條件下，說明本研究所提的門檻值適用於不同邊坡角度的案例。

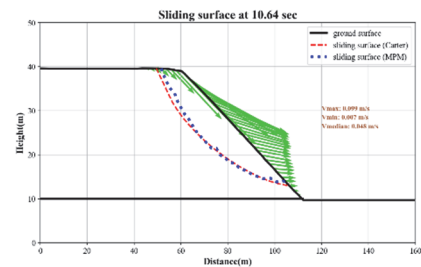
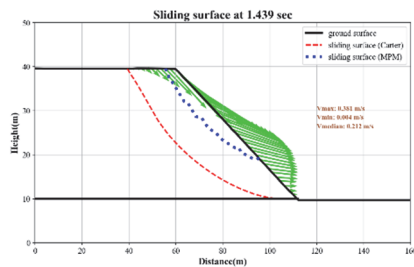
相關係數是本研究用來檢驗 VIM 推估滑動面成效的指標，所以精進方法分析後的結果同樣透過相關係數來檢視改善成效，相關結果繪製如圖 12 所示。首先，設定門檻值後的 VIM 推估滑動面成果，普遍於模擬時間 3 sec 後的相關係數皆可超過 0.9，換言之，精進後的 VIM 已經能相當合理的推估模擬時間 3 sec 後的崩塌現象。比較圖 10 和圖 12，精進後 VIM 於邊坡 60° 、 75° 和 90° 等條件下的滑動面推估結果顯著改善，從原本相關係數小於 0.7 上升至相關係數大於 0.9；此外，設定門檻值後的 VIM，其相關係數隨崩塌運動的過程相當穩定，相較於沒有設定門檻值的 VIM，如圖 10，相關係數時好時壞，此結果說明精進方法有助於 VIM 隨崩塌運動過程中掌握滑動面的位置。

本研究亦進一步去探討門檻值變化對於 VIM 推估滑動面的影響。探討採用敏感度分析的方法，首先對地表位移速度門檻值進行分析，於此分析中，固定地表位移角度和坡面角度比門檻值 1.5，然後變動地表位移速度門檻值從 10^{-5} m/s 至 3 m/s，並點繪各邊坡條件模擬過程中最大相關係數值，其結果如圖 13(左)。從圖中可以看到，不同的地表位移速度

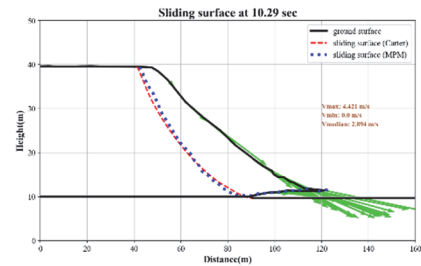
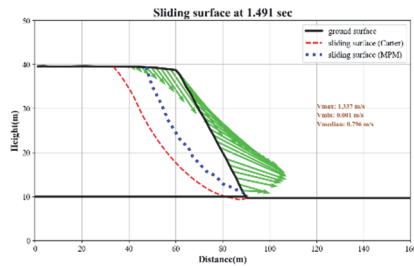
門檻值取用對於 VIM 推估滑動面有顯著的影響，當地表位移速度門檻值取用過小或過大的時候，其最大相關係數會降至 0.5 以下的結果。從分析的結果中，如圖 13(左)，研究發現地表位移速度門檻值在 0.008 m/s 至 0.01 m/s 之間，所有邊坡案例的最大相關係數皆可超過 0.9。多數的邊坡角度條件係於地表位移速度門檻值設定超過 0.05 m/s 後，才會出現最大相關係數下降的情形，唯邊坡 30° 條件於地表位移速度超過 0.01 m/s 後即開始下降，是故於本研究中地表位移速度門檻值設定為 0.01 m/s 是最適合所有邊坡角度條件的。接著，對地表位移角度和坡面角度比門檻值進行敏感度分析，於此分析中，將地表位移速度門檻值固定為 0.01 m/s，然後變動地表位移角度和坡面角度比門檻值從 0.1 至 3.0，其結果如圖 13(右)。從圖中亦可看到，不同地表位移角度和坡面角度比門檻值取用對於 VIM 推估滑動面有顯著的影響，從分析可知，追蹤點地表位移角度超過 1.5 倍坡面角度時必須拿掉，如此各邊坡條件下 VIM 推估滑動面的結果才得以得

到最大相關係數超過 0.9 的結果。進一步看到圖 13(右)的結果，當邊坡角度越大的時候，容許追蹤點地表位移角度超過坡面角度的倍數越小，例如 75° 和 90° 等條件下的容許倍數是 0.5 倍，換算得到的追蹤點容許地表位移角度介於 32.5° 到 45° 之間；隨著邊坡角度越小，容許追蹤點地表位移角度超過坡面角度的倍數越大，但以 30° 條件的容許倍數 1.5 倍換算的話，此條件下追蹤點容許地表位移角度為 45°。換言之，透過敏感度分析可知，以本研究模擬之邊坡條件下，崩塌現象引致的地表位移角度不應當超過 45°。

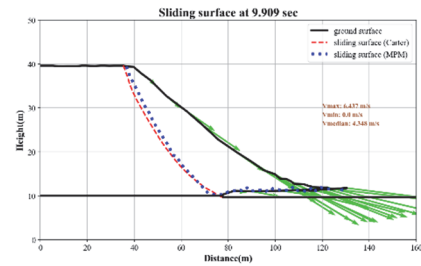
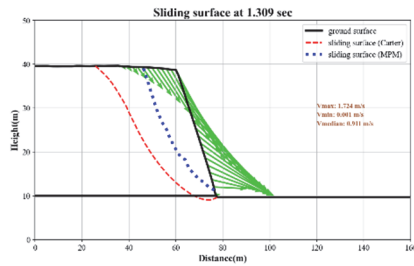
本研究提出一套精進 VIM 推估滑動面位置的方法，並以相關係數做為推估成效指標。從結果看來，本研究提出對追蹤點的兩個篩選條件相當有用，其條件分別為地表位移速度門檻值和地表位移角度和坡面角度比門檻值。基於本研究數值模擬呈現的邊坡案例，透過敏感度分析，分別可以知道地表位移速度的最適門檻值為 0.01 m/s 和地表位移角度和坡面角度比的最適門檻值為 1.5 倍。



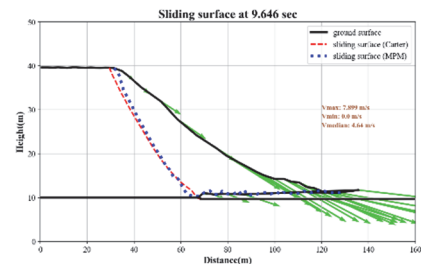
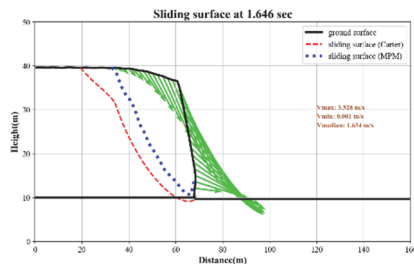
研究案例：初始邊坡坡度30° (A) 模擬時間 1.439 秒； (B) 模擬時間 10.64 秒



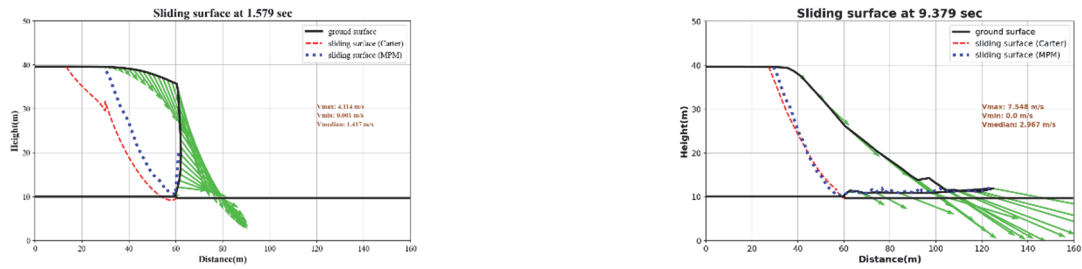
研究案例：初始邊坡坡度45° (C) 模擬時間 1.491 秒； (D) 模擬時間 10.29 秒



研究案例：初始邊坡坡度60° (E) 模擬時間 1.309 秒； (F) 模擬時間 9.909 秒



研究案例：初始邊坡坡度75° (G) 模擬時間 1.646 秒； (H) 模擬時間 9.646 秒



研究案例：初始邊坡坡度 90° (I) 模擬時間 1.579 秒；(J) 模擬時間 9.379 秒

圖 11 修正後 VIM 推估滑動面和數值模擬滑動面比較分析結果圖

Fig.11 Comparative analysis of estimating sliding surface using modified VIM and simulated sliding surface

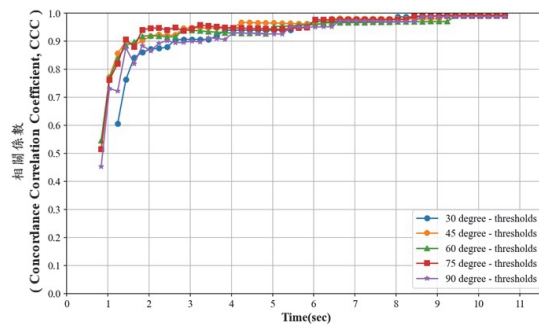


圖 12 修正後 VIM 於不同邊坡角度條件下推估滑動面的成效分析圖

Fig.12 CCC analysis of modified VIM in estimating sliding surface under different slope angle conditions (left) and error patterns (right)

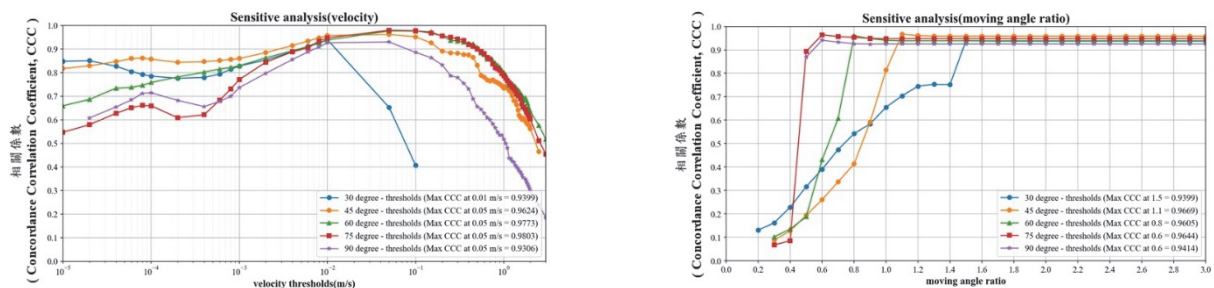


圖 13 敏感度分析圖：地表位移速度門檻值 (左) 和地表位移角度與坡面角度比門檻值 (右) 圖

Fig.13 Sensitivity analysis for ground surface velocity threshold value (left) and the ratio of movement angle to slope angle threshold value (right).

六、結 論

大規模崩塌滑動面位置資訊的取得相當不易，倘若要透過地面下調查成果來進行確認，其投入的執行經費和時間成本相當高昂。近年來發展有多種基於地表位移監測資料的滑動面推估方法，本研究採用的 VIM 即為其中一種。唯 VIM 此類以地表位移監測資料推估滑動面的方法，過去研究中僅透過現地調查結果來進行驗證，然而現地調查結果本身就存在著高度不確定性，以如此品質的資料來做為 VIM 的驗證，實難探討和掌握 VIM 的適用性與限制性。殷鑑於近年崩塌數值模式的發展成熟，例如以 MPM 為基礎發展的 Anura3D，已經被應用來探討現場崩塌案例。是故，本研究透過數值模

式產製崩塌過程中的地表位移和滑動面位置的動態資訊，並以此作為 VIM 推估滑動面的驗證資料，藉此來探討 VIM 的適用性和限制性，並提出改善方案。

本研究先以數值模式模擬五種不同邊坡角度下的崩塌現象，邊坡假設為均質土壤並遵守摩爾庫倫破壞條件，模擬得到的地表位移資料做 VIM 的輸入參數，然後比對 VIM 推估滑動面和 MPM 模擬滑動面的差異，並透過相關係數來評估 VIM 推估滑動面的成效。從分析結果顯示，既有的 VIM 需要預測崩塌發生區域的上下邊坡邊界，並無法隨著運動過程中進行調整。此外，既有的 VIM 無法判斷地表位移是否係崩塌現象引致，其他例如重力引致地表向下垂直位移等現象，在既有方法中無法自動篩選，進而導致 VIM 推估滑動

面的相關係數表現不佳。既有 VIM 於邊坡角度為 60° 、 75° 和 90° 等條件時，相關係數接近 0.6，其結果說明 VIM 推估滑動面的成效並不佳。基於上述，本研究提出 VIM 的精進方案，分別係透過地表位移速度和地表位移角度和坡面角度比等兩個門檻值來改善既有 VIM 推估滑動面方法的限制。透過精進方案，各邊坡角度條件下，VIM 推估滑動面的相關係數皆可超過 0.9，說明本研究提出的精進方法確實有效。此外，透過敏感度分析，本研究可給出地表位移速度的適用門檻值為 0.01 m/s，以及地表位移角度和坡面角度比的適用門檻值為 1.5 倍。透過本研究的探討，可有效回饋 VIM 推估滑動面的適用性和限制性，將有助於 VIM 於大規模崩塌防治工作實務上的應用。

透過本研究發現，崩塌現象引致的地表位移特性與其他現象引致的地表位移特性，例如重力引致地表垂直向下位移等現象，並不相同，換言之，動態的地表位移資訊監測係可以用來推估各種邊坡變形機制。若未來能恰當的建立地表位移資訊和邊坡變形機制之間的關聯性，例如崩塌現象、地表向下位移現象等，對於相關領域的工作將非常有用。此外，本研究用來檢驗 VIM 的數值模擬情境相對地簡單，僅採用均質土壤條件、遵循摩爾庫倫破壞原則、以及規模邊坡幾何形狀等，未來可以本篇研究為基礎，持續對以地表位移資訊推估滑動面相關研究的適用性和限制性進行探討，並適當的提出精進方案。相信相關研究對於大規模崩塌防治工作的推進扮演著重要的角色。

參考文獻

- [1] 陳德偉、吳庭瑜、魏倫瑋、楊哲銘、曾佳漢、黃春銘、簡留玄、謝有忠、林錫宏 (2023)，「潛在大規模崩塌分級方法學初步研擬」，*土木水利*, 50(5), 40-48。 (Chen, T.W., Wu, T.Y., Wei, L.W., Yang, C.M., Tseng, C.H., Huang, C.M., Jian, L.X., Hsieh, Y.C., and Lin, H.H. (2023). "The Study of Potential Large-Scale Landslide Grading Method." *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 50(5), 40-48. (in Chinese))
- [2] 吳昱葵 (2020)，「物質點法分析邊坡崩塌過程與運動機制：以貓空邊坡為例」，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。(Wu, Y.K. (2020). *Material Point Method Analysis of Post-Failure Process and Kinematic Behavior of Landslides*, Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 楊國鑫、彭逸蘋、郭治平、李威霖、汪俊彥、陳昭維、朱世文、白朝金 (2023)，「以物質點法探討光華崩塌地滑動面深度與地下水之影響」，*中華水土保持學報*, 54(3), 185-196。(Yang, K.H., Peng, Y.P., Kuo, C.P., Lee, W.L., Wang, J.Y., Chen, C.W., Chu, S.W., and Pai, C.C. (2023). "Investigation of Failure Surface Depth and Groundwater Effects in Guanghai Landslide through Material Point Analysis." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 54(3), 185-196. (in Chinese))
- [4] 林冠瑋、劉哲欣、張志新、郭賢立. (2023)，「利用邊坡活動性反演崩塌滑動面幾何型態」，*土木水利*, 50(5), 27-31。(Lin, K.W., Liu, C.H., Chang, C.C., and Kuo, H.L. (2023). "Inferring Geometric Characteristics of Landslide Failure Surfaces through Slope Activity Inversion." *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, 50(5), 27-31. (in Chinese))
- [5] 林俊廷 (2021)，「以衛載雷達影像分析進行崩塌潛勢及潛在量體評估」，國立暨南國際大學土木工程學系博士論文。(Lin, J.T. (2021). *Study on the assessment of landslide potential and volume based on satellite radar data analysis*, Doctoral Dissertation, National Chi Nan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [6] Andersen, S., and Andersen, L. (2010). "Modelling of landslides with the material-point method." *Computational Geosciences*, 14, 137-147.
- [7] Anura3D MPM Research Community. (2022a). "Anura3D MPM Software Scientific Manual."
- [8] Anura3D MPM Research Community. (2022b). "Anura3D MPM Software Tutorial Manual."
- [9] Bandara, S.S. (2013). *Material point method to simulate large deformation problems in fluid-saturated granular medium*, Doctoral dissertation, University of Cambridge, Cambridge, UK.
- [10] Bandara, S., and Soga, K. (2015). "Coupling of soil deformation and pore fluid flow using material point method." *Computers and geotechnics*, 63, 199-214.
- [11] Bishop, K.M. (1999). "Determination of translational landslide slip surface depth using balanced cross sections." *Environmental & Engineering Geoscience*, (2), 147-156.
- [12] Booth, A.M., Lamb, M.P., Avouac, J.P., and Delacourt, C. (2013). "Landslide velocity, thickness, and rheology from remote sensing: La Clapière landslide, France." *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4299-4304.
- [13] Carter, M., and Bentley, S.P. (1985). "A procedure to locate slip surfaces beneath active landslides using surface monitoring data." *Computers and Geotechnics*, 1(2), 139-153.
- [14] Ceccato, F., Yerro, A., Girardi, V., and Simonini, P. (2021). "Two-phase dynamic MPM formulation for unsaturated soil." *Computers and Geotechnics*, 129, 103876.
- [15] Conte, E., Pugliese, L., and Troncone, A. (2019). "Post-failure stage simulation of a landslide using the material point method." *Engineering Geology*, 253, 149-159.
- [16] Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996). "Landslide types and processes." *Landslides: Investigation and Mitigation (Special Report)*. 247. National Research Council, Transportation and Research Board Special Report, Washington, DC, USA, pp. 36-75.
- [17] Donati, D., Rabus, B., Engelbrecht, J., Stead, D., Clague, J., and Francioni, M. (2021). "A robust sar speckle tracking workflow for measuring and interpreting the 3d surface displacement of landslides." *Remote Sensing*, 13(15), 3048.

- [18] Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., and Valigi, D. (2009). "Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy." *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3-4), 222-229.
- [19] He, K., Xi, C., Liu, B., Hu, X., Luo, G., Ma, G., and Zhou, R. (2023). "MPM-based mechanism and runout analysis of a compound reactivated landslide." *Computers and Geotechnics*, 159, 105455.
- [20] Intrieri, E., Frodella, W., Raspini, F., Bardi, F., and Tofani, V. (2020). "Using satellite interferometry to infer landslide sliding surface depth and geometry." *Remote Sensing*, 12(9), 1462.
- [21] Jaboyedoff, M., Carrea, D., Derron, M. H., Oppikofer, T., Penna, I. M., and Rudaz, B. (2020). "A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes." *Engineering Geology*, 267, 105478.
- [22] Jakob, M. (2005). "A size classification for debris flows." *Engineering geology*, 79(3-4), 151-161.
- [23] Lee, W.L., Martinelli, M., and Shieh, C.L. (2021). "An investigation of rainfall-induced landslides from the pre-failure stage to the post-failure stage using the Material Point Method." *Frontiers in Earth Science*, 9, 764393.
- [24] Li, X., Tang, X., Zhao, S., Yan, Q., and Wu, Y. (2021). "MPM evaluation of the dynamic runout process of the giant Daguanbao landslide." *Landslides*, 18, 1509-1518.
- [25] Liu, X., Wang, Y., and Li, D.Q. (2019). "Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods." *Computers and Geotechnics*, 111, 301-312.
- [26] Liu, L.L., Zhang, P., Zhang, S. H., Li, J.Z., Huang, L., Cheng, Y.M., and Wang, B. (2022). "Efficient evaluation of run-out distance of slope failure under excavation." *Engineering Geology*, 306, 106751.
- [27] Llano-Serna, M.A., Farias, M.M., and Pedroso, D.M. (2016). "An assessment of the material point method for modelling large scale run-out processes in landslides." *Landslides*, 13, 1057-1066.
- [28] Okada, Y. (1985). "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space." *Bulletin of the seismological society of America*, 75(4), 1135-1154.
- [29] Sulsky, D., Chen, Z., and Schreyer, H.L. (1994). "Application of a particle-in-cell method to solid mechanics." *Computer physics communications*, 87(1-2), 236-252.
- [30] Sulsky, D., Schreyer, H., Peterson, K., Kwok, R., and Coon, M. (1995). "Using the material-point method to model sea ice dynamics." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C2).
- [31] Troncone, A., Pugliese, L., Parise, A., and Conte, E. (2023). "A practical approach for predicting landslide retrogression and run-out distances in sensitive clays." *Engineering Geology*, 326, 107313.
- [32] Vermeer, P.A., and De Borst, R. (1984). "Non-associated plasticity for soils, concrete and rock." *HERON*, 29 (3).
- [33] Von Ruette, J., Lehmann, P., and Or, D. (2016). "Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances." *Landslides*, 13, 1097-1107.
- [34] Wang, B., Vardon, P.J., and Hicks, M.A. (2018). "Rainfall-induced slope collapse with coupled material point method." *Engineering Geology*, 239, 1-12.
- [35] Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI). (1990). "A suggested method for reporting a landslide." *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 41, 5-12.
- [36] Yerro, A., Alonso, E.E., and Pinyol, N.M. (2016). "Run-out of landslides in brittle soils." *Computers and Geotechnics*, 80, 427-439.

2024 年 05 月 09 日 收稿

2024 年 05 月 27 日 修正

2024 年 06 月 08 日 接受