



結合空間推論與天候資料佈設 坡地崩塌 預警系統感測器 （邊坡種子）之初探

許瑋庭／國立成功大學測量與空間資訊學系 研究助理

郭佩棻／國立成功大學測量與空間資訊學系 助理教授

陳 佑／國立成功大學交通管理科學系 研究助理

張大緯／國立成功大學資訊工程系 教授

李威勳／國立成功大學交通管理科學系 教授

降雨型邊坡崩塌為全球主要災害之一。極端氣候、頻繁天災與人為不當開發，如賀伯颱風及 921 大地震，導致邊坡災害頻傳，而設置相關預警系統逐漸受到各界重視。目前預警系統多以大範圍地質概況、短時間強降雨及長時間累積雨量建立門檻值。然而，超過 60% 的邊坡災害在低於降雨門檻值下發生，難以達到有效預警功能。本研究先使用空間推論技術及鄰近雨量觀測站資料，推估研究區內雨量大小。再以 GIS 系統將降雨高風險區，結合敏感地質與邊坡災害清單，決定實驗區域。最後以場址特性與邊坡位移預測值，將感測器及通訊結點分群後最佳配置以預測風險。後續可透過邊坡種子蒐集實際邊坡崩塌位移量，並套疊交通路網與社經資料（如人口與老年比）評估影響範圍與族群，提供地方政府疏散資訊。

關鍵詞：邊坡種子、空間推論、克利金法、邊坡崩塌

前言

在世界各國中，與颱風、豪雨及洪水相關災害（如降雨型邊坡崩塌），佔全部災害類型之 74% [1]。其中，全球因自然災害死亡人數中，有 17% 因邊坡崩落造成。從 1993 年到 2002 年，邊坡崩塌災害每年導致約 940 人死亡 [2]。另外，超過一半崩塌事件發生在極端降雨地區 [3]；也因極端降雨頻度增加，導致邊坡崩塌次數與規模也隨之增加 [4]，亞洲尤為好發地區。因此，世界各國對於此災害的預警及應變措施之研究實有其必要性及迫切性。目前研究主題包含：對崩塌災害事件的定義、崩塌災害的相關因子、災害風險與即時預警系統及其相關規範等。

國際間，對於大型災害的定義依據國際緊急災害資料庫（Emergency Events Database, EM-DAT）定為：

(1) 超過 10 人死亡，(2) 超過 100 人受影響，(3) 政府發布緊急狀態，(4) 政府呼籲國際援助，滿足上述任一點，即屬重大災害事件。如 2011 年 1 月 11 日及 12 日在巴西里約熱內盧，因鋒面過境造成當地 24 小時累積雨量高達 260 毫米，崩塌造成大量土石掩埋居民、房屋與道路，共 884 人死亡。世界各國對於崩塌災害風險則依其當地之氣候條件、地理位置與地質結構，有各自之規則和衡量標準。如香港、英國以及澳大利亞對於已開發地區之可容忍坡地災害風險為：個人年死亡機率為 10^{-4} ，未開發地區則為 10^{-5} [5]。而各級政府針對高、中、低風險之崩塌影響範圍，決定其相應之建築或土地利用的限制條件，形成風險分級制度以管理坡地開發。

在國內部分，因台灣位於環太平洋地震帶，受季

風亞洲氣候影響，複雜多變的地形、東北和西南的迎風面及多雨環境都是造成邊坡位移的自然誘因。而人為因素，如森林濫墾濫伐、山坡地不當開發與山區道路開闢等皆形成大量鬆散土石，為引發崩塌災害發生的前置因子（predisposing factor）。

綜上所述，崩塌災害的發生在台灣是主要的天然災害；崩塌經常突然爆發、歷時短且來勢兇猛、流動速度快、泥砂濃度高、衝擊力大，不僅對環境產生破壞，也嚴重危害人類生命財產之安全。在崩塌造成的災害中，公路橋樑常因遭到崩塌災害的影響，使路面坍塌、地基掏空，運輸系統及往來通行的人車遭受損失及威脅。以新中橫公路為例^[6]，該公路為政府十二項重大建設之一。此公路於開挖期間與後續颱風侵襲下，公路沿線多處邊坡坍塌、路面裂隙、路基流失。若能設置邊坡監測系統，在最少成本下取得最大即時資訊量，對於此類自然災害，可發展即時的應對措施。

然而，目前多數邊坡預警系統的門檻值建立多是基於大範圍區域的地質概況、短時間的降雨強度（3 小時）以及長時間的累積雨量（24 小時）。然而，有超過 60% 的邊坡災害發生在低於雨量預警標準時；只使用雨量監測作為邊坡災害預測的單一影響因子仍不夠完善^[6]。因此，本研究配合業務單位初步規劃選地，將以中寮隧道為實驗區域，設置邊坡形變感測器，後續可結合雨量及感應器位移監測資料，更準確預測邊坡崩塌風險。

本研究流程有三：(1) 整合鄰近中央氣象局觀測站之降雨資料，以空間推論方法，如反距離權重法（Inverse Distance Weighting, IDW）、平滑曲面法（Spline）或克利金法（Kriging）等，預測研究區域內降雨風險區域。(2) 再以地理資訊系統（Geographic Information System, GIS），匯入遙測影像或數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM）資料，評估區內地質、微觀地形，輔以崩塌災害歷史紀錄，建立敏感性崩塌目錄。(3) 依實驗區域特性（如面積、植被與形狀等），於通訊範圍內佈設規劃邊坡種子與節點。

本研究成果可依此崩塌目錄設置邊坡種子與崩塌災害預測系統，並套疊路網圖層、結合交通系統之輔助，使此預警、救災系統更加全面及完善，如圖 1 所示。災難發生前，利用即時監控高敏感性崩塌回傳的資料，結合其他相關資料，如即時降雨量或未來預估雨量等，做邊坡崩塌風險的分析。視覺化的災害風險分析使得高風險崩塌好發地區更容易辨識，政府單位



圖 1 崩塌預警與救災管理需求

或救援機構等可依事先預測災害將發生時所影響的範圍，擬定疏散策略。當災害發生後則可以救災管理系統，派遣與並引導救災車輛及相關機具，以最佳路徑規劃優先通行以加速救災過程，掌握救災狀態以控制災情。GIS 系統除可視覺展示該邊坡災害影響範圍，亦可將邊坡清單與道路層級、交通號誌、居住人口等資訊疊圖分析，對受影響的災區道路進行暫時性的封閉或管制、評估優先救援或疏散區域，並協助規劃替代道路或防、救災路線。可協助預警模型將災前與災後所需資訊有效整合，提供大眾及政府單位一個即時、視覺化的引導介面。

崩塌災害相關因子，預警系統及感測器佈設應用

土石流與邊坡崩塌的預警系統和防災技術發展備受重視。許多學者研發以精確儀器，如遙感探測、空載光達或航空攝影測量，或以 GIS 軟體、結合數學或物理模型協助，建立更精確之邊坡風險模型。實務單位亦將蒐集資訊視覺化後增加其易讀性，使得災前預警疏散以及災後迅速救災的目的能夠更加有效的被執行。

早期的崩塌災害預警系統可以溯及 1977 年香港土力工程處針對 1972 年至 1976 間多人死亡之崩塌災難事件建立之系統^[6]。該系統將人口數、人口密度、氣候環境、降雨量與地質特徵等因素納入建置考量。其他國家如美國、加拿大、巴西、哥倫比亞、印尼、孟加拉、台灣與義大利等，亦設有崩塌預警系統。各國採用的考量指標不一，細節及數值詳^[6]。目前台灣之崩塌預警相關研究，多使用降雨量門檻值作為建立預測崩塌災害發生的風險指標，在豪雨及颱風期間為相關單位進行疏散的參考基準^[6]。以下為崩塌風險模型、相關因子及感測器配置相關文獻。

崩塌風險與預警模型

崩塌風險地圖可分為定性法（qualitative approach）

以及定量法 (quantitative approach) 兩種 [7]。定性法常以專家意見作為區內地質及地貌的判斷依據，適用於小範圍研究。另可結合崩塌影響因子排序或權重分析，作為半定量方法。至於定量法，則可以分為：確定性定量方法和統計方法。前者需以區內詳細崩塌相關數據，如地質材料係數或安全係數等，決定邊坡穩定性。後者結合崩塌環境因素與崩塌歷史紀錄，以雙變量或多元統計方法建立模型。近來亦有其他學者使用機器學習方法，輸入大量崩塌樣本進行多次訓練 [8]。

除上述數值資料外，亦可利用衛星影像、航照、LIDAR 或現地調查，分析土地利用或自然條件對邊坡災害的影響。如 [9] 使用 ETM+、Aster 及 SPOT 衛星影像，結合 ISO data 非監督式分類以及三時期航照對宜蘭縣大同鄉邊坡進行土地利用類型分類與變遷分析。或以 worldview-2 以及林務局彩色航照，判釋台 9 線 104.75 k 至 130.50 k 處之崩塌敏感性類型 [10]。其判斷標準主要依據影像特徵表現，如：有明顯反曲點、滑坡體、河道方向突然變化、向前侵蝕、人為開挖。崩塌組成區可分為低、中、高危險的敏感性滑坡。

此外，有不少研究分析影響崩塌發生的因子，如 Yang 等人 [11] 以降雨、土壤濕度和孔隙壓力（土壤吸

力）等因素，建立一多參數門檻值模型，以預測因降雨誘發的邊坡活動。其他類似研究則將相關因子區分為：內在潛因及外在誘因。潛因為邊坡本身的條件，例如地質、地形、環境等要素；誘因則為誘發邊坡破壞的外在因素，包含降雨、地震、人為擾動等。文獻中影響因子最多可達 64 種，如坡度、岩性、高程、植被密度、平均濕度、斷層距離、河道距離等 [7,9,10]。然而，許多因子難以取得、量化不易，或因因子間具有高相關性，因此影響因子數量並非越多越好。李承玫 [9] 以容忍值 (tolerance, TOL) 大於 0.4，與變異膨脹係數 (variance inflation factor, VIF) 小於 2 作為崩塌影響因子共線性分析的參考標準。換言之，變數選擇原則以可被解釋比例 (TOL) 越大，共線性越低 (VIF) 尤佳。另外，T-test 或 ROC 曲線也可作為共線性的篩選方式 [9]。

Lee 等人 [10] 提出以 3 小時平均降雨強度 (I_3) 與 24 小時累積雨量 (R_{24}) 降雨指標以建立崩塌敏感度模型，作為淺層崩塌的早期預警機制 (圖 2) [10]。其中， $I_3 - R_{24}$ 降雨指標代表降雨情形，如降雨強度、持續時間和累積雨量，並蒐集過去的崩塌案例相互比較，作為該研究區域之閾值。Lee 也發現：在台灣，3 小時平均降雨強度 (I_3) 以及 24 小時累積雨量 (R_{24}) 為引起

| | | 降雨門檻值 (T) | | | | | | | |
|-----------|------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|
| | | T _{90%} | | T _{60%} | | T _{30%} | | T _{15%} | |
| | | I_3 | R_{24} | I_3 | R_{24} | I_3 | R_{24} | I_3 | R_{24} |
| 崩塌 敏感性 | 高敏感性 | 70 (68) | 750 (745) | 55 (56) | 600 (610) | 40 (40) | 450 (438) | 30 (27) | 300 (291) |
| | 中敏感性 | 60 (61) | 650 (657) | 45 (46) | 500 (498) | 35 (34) | 350 (368) | 20 (22) | 250 (236) |
| | 低敏感性 | 50 (50) | 550 (539) | 40 (40) | 450 (430) | 30 (29) | 300 (316) | 15 (15) | 200 (167) |

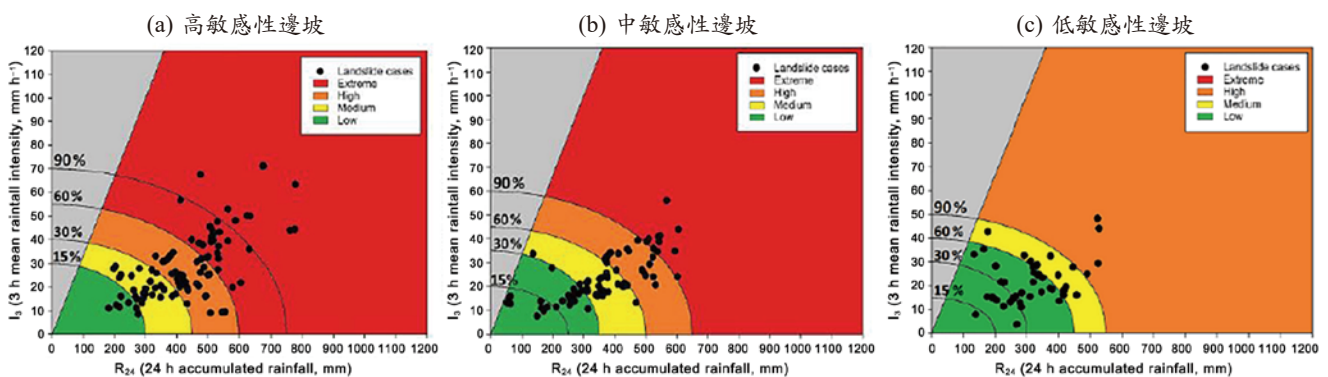


圖 2 崩塌清單依其敏感性 (高、中、低)、降雨強度 (I_3) 及累積雨量 (R_{24}) 設有不同閾值，使不同敏感性的崩塌有其各自對應的預警發布標準 [10]。

崩塌最重要因子。以坡度單位，將崩塌區分為高、中、低敏感性三個等級。透過降雨指標以及崩塌敏感性的門檻值確定，即形成一個危險係數的矩陣，用以協助崩塌預警模型之建立，不同敏感性的崩塌設有不同的門檻值，可減少災害預警上高估或低估的情況產生。在崩塌預警模型的驗證上，多半以建立權矩陣計算得分的方式，分別計算研究成果之命中率（POD）、錯誤率（POFD）以及錯誤偵測率（POFA）進行驗證^[12]。

此外，Chung 與 Fabbri^[13] 提出速率曲線（SRC）和預測速率曲線（PRC），並利用曲線下方的面積（AUC）作為描述模型的預測能力，較高的 AUC 值表示較好的崩塌預測模型。AUC 值介於 0 至 1 之間。若 AUC 值為 0.5，表示該模型預測崩塌的發生的能力沒有比隨機方法更佳。該研究成果中，訓練和驗證的 AUC 數值分別為 0.745 和 0.691，表示成果皆可接受。該研究使用 2016 年的 3 次災難性淺層崩塌和 2 次歷史颱風的崩塌進行驗證。以歷史資料檢驗後，該模型有約九成的命中率，且有偵錯的能力，表示該預警模型可有效地用於崩塌預警^[12]。

Wei 等人^[8] 使用多層級評估方式，納入環境地質圖、岩體評估系統、遙測技術以及空載光達等，建立崩塌風險清單。這些技術可協助判釋地貌變化。該研究針對台九線之自然坡以及人造斜坡為主要監測項目。Wei 等以遙測技術大範圍地掃描以判釋過去、現在等不同時期影像，以定義懸崖、陡峭山坡之崩塌位置；而空載光達可產製出高解析度的數值高程模型（DEM）或數值地表模型（Digital Surface Model, DSM），並以 GIS 軟體建立坡度、坡向、等高線、輪廓、山頂陰影圖等微觀地貌^[8]。該研究將不同規模的災害記錄、遙測影像地形判釋以及地貌特徵有效的整合，辨識出該條公路上的危險路段，並分析高解析度地 DTM 產生之微觀地形，協助評估崩塌類型和規模，經由長期驗證，該模型預測高度崩塌敏感之準確性高達 91%。

感測器與邊坡監測系統

崩塌風險模型與警告系統的準確性有賴於研究區內即時資訊量測、取得與更新，使邊坡狀態能及時回傳。台灣邊坡防治工程常用傾斜管、水位觀測井、傾度盤等監測系統，以掌握崩塌潛勢區的位移深度、速率、規模、地下水變化、結構物變化及路基下陷資料，做為安全與否、檢驗邊坡治理成效及進行水土保持工法的判斷依據^[14]。

影響崩塌發生的因子眾多，然而監測系統基本應有檢測崩塌環境突然變化的能力，包含溫度、水流量或運動速度等。傳統常以傾斜計、水位計等量測儀器，進行地表位移測量的監測方式，安裝在地勢陡峭的位置，缺點為人力難以進入安裝及大範圍維護。另外，崩塌災害發生及破壞範圍較大，使用傳統方式或有線網路設備監測成本較高，且有線網路設備可能受自然現象破壞斷線^[15]。另外，遙感探測方法，如衛星影像或光達之高解析度影像，可用於監測崩塌變遷、評估觸發災害原因與恢復過程，然而高設備成本、安裝需求精度高及校正費時亦造成應用上的限制^[16]。

無線感測器網絡（wireless sensor network, WSN）監測方式成本低，適用於大面積、惡劣環境的研究區，惟需要注意功率消耗、長期監控能源損耗成本稍高之缺點。單一感測器節點對資料處理以及儲存能力的有限，多使用數據壓縮、低耗能架構、取樣頻率調整等為解決方案。WSN 常以多個感測器節點、一個或多個基站及一組終端伺服器組成，並根據特定拓撲類型運作（圖 3）。Giorgetti 等^[16] 及 Thuy 等^[17] 以 WSN 建立邊坡監測預警系統（monitoring and early warning system, MEWS）^[15,18]。感測器可為加速度計、GPS 設備、土壤濕度計、地震檢波器、張力計、傾斜計、雨量計等^[15,18]。感測器節點將收集監測數據，使用多次跳頻傳輸技術（multihopping transmission），擴展網絡範圍；再將傳送數據至其他節點，最終到達基站。基站將蒐集並處理由感測器節點傳輸而來的數據，將處理後數據結合無線通訊模組（long-term evolution, LTE）傳送至終端伺服器。但 WSN 在資料傳輸距離有一定的限制，需將感測器分群。黃俊維等人^[19] 將比較使用 K-means 及基因演算法分群並比較何者為準確性較佳，結果基因演算法限制每個分群感測器數量相同，讓接收器的分配較平均；K-means 雖分群不均使接收器耗電量較多；但結果尚可接受。另外，感測器放置位置若位於位移最大處，可達預測準確性最高。

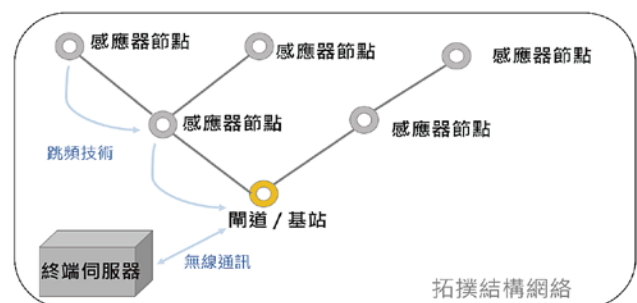


圖 3 無線感測器網絡系統

感測器網絡拓撲型態多樣，相關研究多依照佈設範圍、邊坡特性、氣候水文、感測器性能、監測資料需求等採用其合適的拓撲構型。Jeong 等人^[15] 在於韓國首爾市的崩塌監測系統中，以崩塌敏感性、樹木密度及地表視域綜合分析，產生最佳網絡構型。Thuy 等人^[17] 結合星型與樹型幾何拓撲應用於降雨型邊坡崩塌監測。該研究將星形幾何結構用於基站周邊的感測器，其餘感測器則採樹形拓撲，依邊坡情況不同改變其運作模式。當邊坡穩定、天氣良好時，使用樹形拓撲；邊坡安全係數（FOS）小於 1，則運行星形拓撲，以提高採樣率及傳輸速率。另外，感測器節點僅在有限的時間內處於活動狀態，一旦邊坡安全係數再度穩定，即進入空閒模式以節省能量、延長網絡壽命。該研究結果顯示，樹形結合星形拓撲的性能優於僅使用二者其中之一，其配置方式具靈活性，可節省能源消耗。

綜上，雨量和崩塌敏感性為崩塌災害預測模型常用因子。崩塌風險可由歷史災害紀錄、航拍影像與地質資料等建立。其中，降雨強度及降雨時間更是崩塌災害的主要關鍵。因此，本研究將使用 3 小時（高降雨強度）及 24 小時（長降雨時間）之雨量資料，配合地質地貌資料與社會經濟資料庫建立崩塌預警模型。並以 GIS 技術規畫設置邊坡形變感測器。後續可有效蒐集地表形變數據及即時雨量觀測數據，為崩塌模型門檻值提供預警依據。

研究資料與方法

本研究方法概分為三：(1) 利用鄰近雨量觀測站協助取得長期監控雨量資料，針對累積雨量及短時間強降雨設立不同的邊坡風險門檻值，建立邊坡風險危險圖。(2) 以遙測影像或 GIS 資料，評估研究區域內之地質狀態、微觀地形，輔以崩塌災害歷史紀錄，建立邊坡風險清單。(3) 依研究面積與前述資料於通訊程度良好的位置埋設邊坡形變感測器，以利後續長期監測中寮隧道之邊坡位移情形。這些不同的門檻值和警報級別可以為地方政府提供決定是否疏散居民的關鍵信息，以達到災前預警之目的。

本研究之流程規劃與所需資料概述如下（圖 4）。

內插法判斷形變及雨量資料

本研究之崩塌預警系統主要由雨量以及形變量作為門檻值之設定依據。雨量資料來源主要來自中寮隧

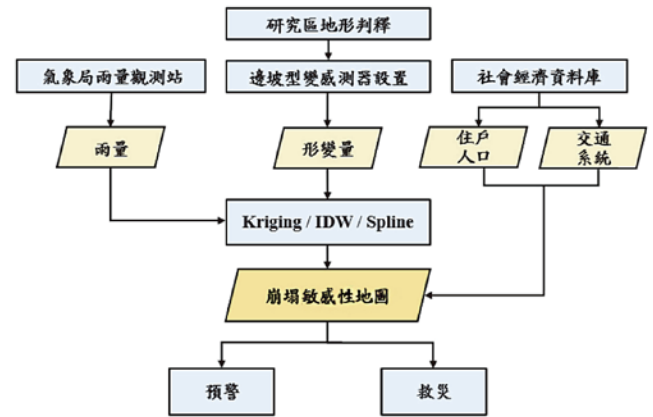


圖 4 研究流程圖

道鄰近之氣象局雨量觀測站，3 小時的強降雨以及 24 小時累積雨量台灣為引起崩塌的重要因子^[10]。本研究將蒐集鄰近雨量觀測站之雨量資料，以空間統計的方式，將所得數據內插為一連續面之雨量分布情形。

航遙測技術判釋地貌

航、遙測技術廣泛用於大範圍的地貌判釋，藉由高空大範圍的取像，可快速獲得人們無法涉足之處的資訊。比較不同時期的影像，可概略了解研究區域內的地貌變遷情形，以供過去、現在、未來進行相互對照。另外，崩塌、落石等災害好發於特定區域，亦即歷史事件發生處仍有高機率再度發生相同災害^[10]。航遙測影像的蒐集可以協助判釋明顯為敏感性崩塌之位置及分布，協助建立初步的崩塌目錄，並且依照多種不同影像來源，如不同解析度或不同衛星（SPOT-5 或 Landsat）的影像等，對研究區進行檢視，評估不同崩塌之敏感性程度。

產生 DEM 並設置邊坡感測器

前項航遙測技術除了可取的大範圍影像協助研究區域判釋外，在此階段則會使用高解析度的無人載具取得研究區內影像，並利用 GIS 軟體協助建立數值高程模型（DEM），在建立 DEM 的過程中會產生如等高線、坡度、坡向、陰影圖等微觀地貌，同時也可將地表逕流等潛在因子一併納入考量分析。另外，邊坡感測器的設置位置及數量由上述所蒐集之航遙測影像進一步分析，考量邊坡感測器能夠發送訊號的能力及其穩定性，地表土壤型態、林蔭遮蔽、透空及通視程度皆為感測器之位置設置要點。

崩塌監測主要目的為保護居民、重要結構物以及交通建設。儘管監測系統可以覆蓋大範圍發生崩塌的區

域，但部分崩塌區域人跡罕至、地勢危險，系統安裝與維護困難。因此，崩塌監測應以邊坡災害會影響到人類生命財產安全為主，無需在所有高風險崩塌區域佈設監測系統。未來本研究在規劃感測系統佈設時，將套疊社會經濟資料，配合現地調查、居民訪談成果，決定涵蓋範圍，使崩塌監測系統發揮其最大效用。

未來當邊坡種子安裝正式啟用後，形變量數據可由邊坡感測系統回傳，感測器所在經緯度、時間及位移情形。透過回傳的位移資訊中可分析 x 、 y 、 z 三個方向的形變分量數據，將所得地表形變資料內插成一連續面。此長期形變監測成果可進行中寮隧道之崩塌敏感性評估，並分析崩塌位移情形是否隨時間增加而使地貌結構更加鬆散。

而在雨量空間推估部分，本研究使用 ArcGIS 軟體中的反距離權重法 (IDW)、平滑曲面法 (Spline) 以及克利金法 (Kriging)。這些不同的內插方式各有其適用之情形，可協助建立研究區內雨量與形變的分布，預測出未設有邊坡感測器位置的形變量或降雨量。以下為三種內插方式。

反距離權重法 (IDW)

反距離權重法將針對鄰近已知點 (雨量觀測站或邊坡感測器) 的觀測數據，對研究區域內的未知數值進行估計。而該未知數值受鄰近已知點數值之影響程度與距離成反比，即未知點與已知點的距離越遠，受影響程度越小。其公式如 (1) 所示：

$$z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N w(d_i) z_i}{\sum_{i=1}^N w(d_i)} \quad (1)$$

其中， $z(x, y)$ 為未知點數值；

$w(d_i)$ 為權重矩陣，權重由 d_i 之反比決定；

z_i 為第 i 個已知點之數值；

d_i 為 i 點到未知點之間的距離。

平滑曲面法 (Spline)

平滑曲面法之特色為先選擇樣本點，利用多項式進行內插，以產生平滑曲面。相較一般多使用單一多項式進行內插，此法使用多個多項式進行擬和，較不受到低次多項式的限制影響，同時，因內插估計產生的誤差也減小。其公式如 (2) 所示：

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \quad (2)$$

其中， $S(x, y)$ 為未知點數值；

N 為點數；

λ_j 為方程式解之係數；

r_j 為 (x, y) 到點第 j 點之距離。

$T(x, y)$ 與 $R(r_j)$ 為曲面函數。

克利金法 (Kriging)

克利金法以空間統計為基礎之推估方式，其推估式為最佳線性不偏估計量 (best linear unbiased estimates)。此推估值與真值同，且具最小推估變異數。在一般統計模型中，樣本數據是隨機過程；而克利金法在產出模型的過程中納入不確定性，例如水資源、礦產的數值非由隨機過程導致。因此，此法可以未知點的相對位置估計其不確定性，常用於自然現象模型或數值高程模型等。其公式如 (3)：

$$r(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^N (z(x_i) - z(x_i + h))^2 \quad (3)$$

其中， $r(h)$ 為未知點數值；

h 為樣本點之間的距離；

z 為屬性值；

x_i 為第 i 個預測位置；

n 為被 h 分出的成對樣本數。

若樣本點間存在空相依性，則 $r(h)$ 隨 h 增加而增加。

研究成果

研究區域

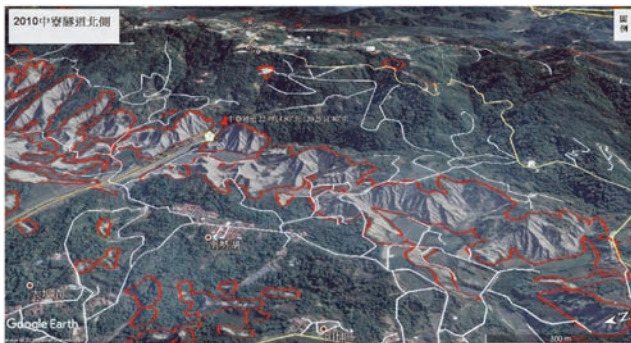
中寮隧道位處高雄市燕巢區國道三號田寮收費站及燕巢系統交流道之間，以貫穿中寮山而得名，為南台灣高速公路最長的隧道。該地為由泥岩組成的惡地地形，植被難以附著生長。受到龍船斷層及旗山斷層活動影響，地質環境惡劣。其中，旗山斷層每年相對抬升 8 公分，龍船斷層每年相對水平擠壓達 6 公分，地表變位明顯^[19]。

本研究以中寮隧道周邊為主，範圍由單幅 1/5000 航照圖幅組成，面積共約 7.3 平方公里。海拔標高約 69.78 至 379.81 公尺，屬於丘陵地形。坡度介於 0° 至 55° 之間，地勢起伏變化極大。

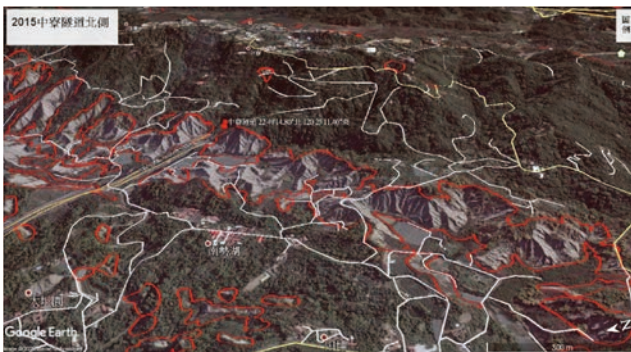
遙測影像判釋

本研究以 Google earth 影像對中寮隧道周邊進行初步判釋。研究區範圍內有許多大面積裸露地，其中以中寮隧道口兩側最為密集。因泥岩鬆散的地質型態，使植

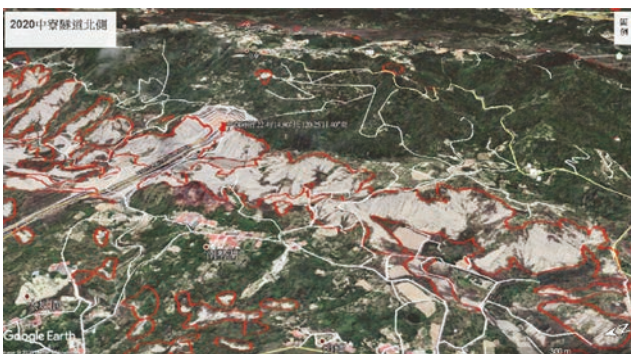
被難以附著生長，無植生覆蓋加劇地表侵蝕。圖 5 中的變遷影像，從 2010 年到 2020 年約 10 年間許多地表大面積裸露的區域正在不斷擴大。植生分布範圍逐漸向上退縮，甚至原本植被覆蓋的地方，也出現裸露情形。無植被覆蓋的地表，地質材料附著能力差，容易受到降雨或地震等誘發因素，產生地表侵蝕等災害。



(a) 2010 年



(b) 2015 年



(c) 2020 年

圖 5 中寮隧道北側地表變遷

崩塌影響因子分析

影響崩塌發生的災害影響因子主要可以潛因及誘因區分^[9]。其中，潛因可包含地質、地形、環境等本身條件，誘因則為降雨、地震或人為擾動等。本研究將依此探討影響崩塌發生的影響因子，並監測可能誘發邊坡災害的相關數據，建立崩塌災害清單以及崩塌監測系統。

本研究使用政府資料開放平台所提供之 20 公尺網格數值地形模型資料，產製微觀地形特徵，進行初步地表判釋。

坡度

坡度是許多崩塌預警系統會考量的首要影響因子^[7,8]。多數邊坡災害發生集中在坡度 30° 到 50° 之間，坡度更是誘發淺層崩塌的主要因素之一^[9]。Wei 等人在建立台灣南部崩塌預警模型的研究中，將坡度因子，分高、中、低三個崩塌感性等級^[8]。考量行政院農委會台灣山坡地土地可利用分類之分級查定基準規定，是將坡度分為 3° 以下、4° ~ 9°、10° ~ 16°、17° ~ 22°、23° ~ 29° 以及 30° 以上共 6 類。因此，本研究單獨切出坡度 30° 以上的區域，作為發展崩塌災害清單。

坡向

坡向為山坡下降的方向。坡向將山坡地分為迎風面及背風面。台灣為處季風亞洲，盛行風造成的降雨型態依不同坡向有所區別，同時也影響土壤濕度及植被分布。中寮山大致成東北西南走向，與台灣季風盛行風向一致，為海拔不足 500 公尺的低海拔丘陵地形。推估盛行風對該地坡向無顯著影響。本研究將坡向分為 0° ~ 45°、45° ~ 90°、90° ~ 135°、135° ~ 180°、180° ~ 225°、225° ~ 270°、270° ~ 315° 以及 315° ~ 360°，共 8 類。

等高線

本研究將等高線每 10 公尺分為一個等級，可用來判斷研究區範圍內的特徵線，包含山谷、蝕溝等低地以及山稜線、山脊線等。其中，山谷與蝕溝常為水、土、砂材料移動的通道，收集山坡兩側不穩定的地質材料，侵蝕並搬運至下游形成災害。等高線亦可協助判斷集水區等土砂蒐集的範圍，作為規劃佈設邊坡形變感測器網絡架構之參考。

不規則三角網 (TIN)

不規則三角網以三角形為基本組成單位，將鄰近地形點連接。三角網格的大小表示地形破碎程度，單一三角形網格面積越小、分布越密集，表示該處地形複雜、地勢起伏劇烈；反之則地形平坦。本研究區以中寮山為主，地勢低窪處常呈完整連續面，地表型態簡單；山丘主體及坡腳部分則由細小不規則三角形組成繁複地貌。

暈渲圖

山體受重力作用造成之地表塊體滑落，地表可能產生多重山稜線、圓滑形裂隙或蝕溝等特徵。這些可能造成邊坡災害的移動塊體，常因地表植被或構造物覆蓋而難以直接判釋。因此，以 DEM 建立暈渲圖結合多方位光源，崩塌滑動體產生之裂隙或山稜線在暈渲圖上會出現深色帶狀陰影，可協助判斷滑動塊體之確切位置及範圍。

除上述使用 20 公尺 DEM 之地形圖外，本研究亦參考經濟部中央地質調查所提供的山崩地滑敏感區圖層。該圖層以航照、衛星影像（SPOT 及福衛二號影像）以及光達判釋土石崩塌歷史事件的空間位置。將曾發生土石崩塌的「近期山崩與地滑區」與有山崩或地滑發生的「順向坡」之兩類資料聯集並外擴 5 公尺產生環域範圍，作為本研究「山崩與地滑地質敏感區」圖層的組成。主要考量原因是，曾發生崩塌災害處可能再度發生類似崩塌災害 [7,8]。因此，本研究結合地質、邊坡災害歷史事件以及坡度，套疊高雄山崩地滑敏感區圖層以及坡度 30° 以上圖層，作為初級崩塌清單。

實驗區場址

套疊坡度、地質、重要道路，並配合微觀地貌分析，本研究擬定中寮隧道北隧道口西側為前導實驗區（圖 6）。坡度 30° 以上且同時為地質敏感區的範圍，災害發生時抵抗能力較差，當降雨強度或累積降雨等誘因達到門檻值，發生崩塌災害機會也大幅提升。在降低傷亡損失的大前提下，評估災害影響範圍為首要目標，人車往來頻繁、據交通地位的避難救災交通要道都在選定實驗區的考量範圍。其他重要結構物單以遙測影像難以判釋，可配合現地調查方式考量保全對象，如可能受到波及的周遭住戶、對外聯絡道路或橋梁等。實驗區面積為 498,602 m²，鄰近國道三號，坡度 30° 以上地面積總和占台灣山坡地土地利用 6 項分級中最高（表 1），同時也涵蓋大範圍的地質災害敏感區，地勢起伏大且具表塊體滑落痕跡（圖 7）。不穩定地地表型態也造成了破碎的地貌，土砂材料的位移，加劇中寮山的侵蝕。

崩塌監測系統

降雨門檻值為目前多數崩塌預警系統採用的預警機制，其運作成效有賴於監測數據的取得。本研究以降雨量及地表位移量為主要監測數據，長期監測邊坡位移情形，並以 3 小時強降雨、24 小時累積降雨兩

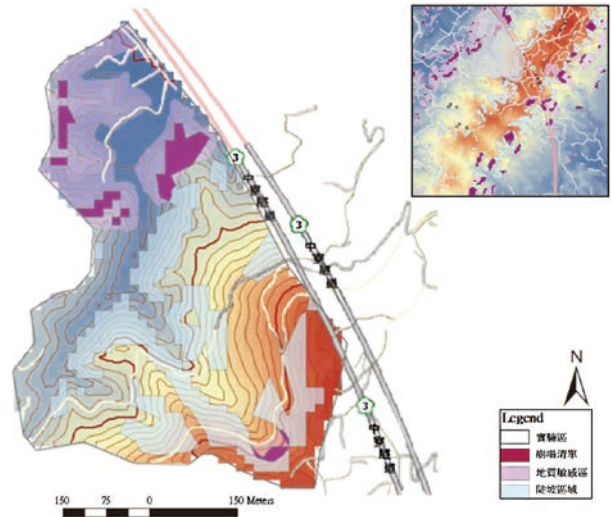


圖 6 實驗區：套疊地質敏感區與 30° 以上陡坡區域，作為崩塌災害清單。

表 1 實驗區坡度面積分布

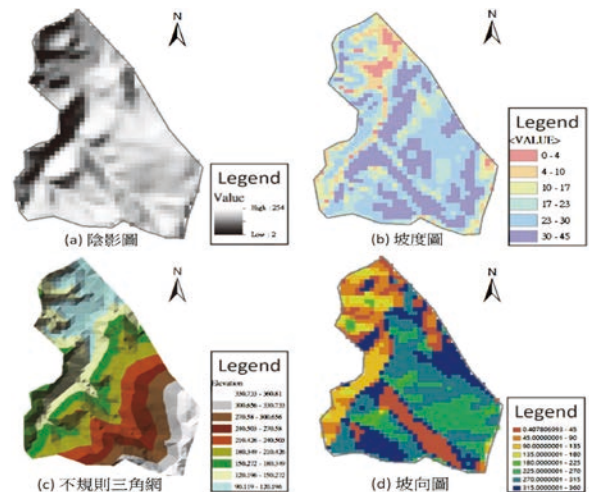
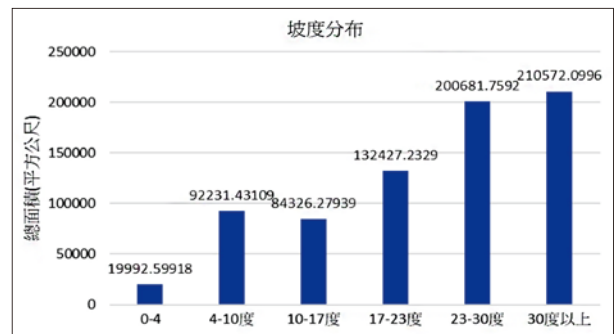


圖 7 微觀地形特徵

種降雨指標作為啟動預警地降雨門檻值。以氣象局雨量觀測站提供之各測站觀測資料及行政院環保署環境資源資料庫之測站觀測位置，包含高雄市內尖山、阿公店、溪埔、楠梓、大社、阿蓮、古亭坑、旗山、美濃，以及屏東縣內吉東、里港、九如，共 12 個測站資料，作為本研究雨量資料來源以及空間推估之依據。

地表位移將使用邊坡形變感測器進行長期滑坡監測。該感測器主要由九軸加速度計構成，與基站及終端伺服器組成無線感測器網絡系統。邊坡形變感測器雛形如圖 8 所示。感測器接收位移產生的加速度數值，積分後可得到地表位移速度以及位移分量。加速度計三軸經校正對齊局部水平座標框架 (E, N, U)，可取得東西向、南北向以及重力三個方向的位移分量。以實驗區內微觀地貌提供邊坡形變感測器的佈設規劃進行感測器埋設，包含埋設位址、網絡構型及傳輸方式等，接收回傳形變量數據，作為監測邊坡變化、即時預測以及校正預警模型之依據。

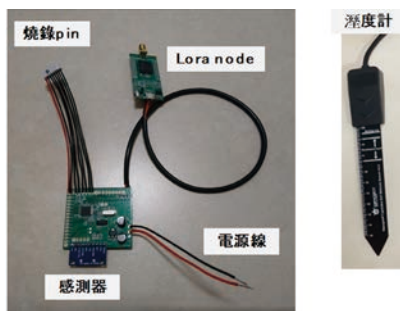


圖 8 邊坡形變感測器雛形

邊坡形變感測器佈點規劃

綜合實驗區之場址特性，中寮隧道周邊敏感性邊坡分布密集，且周遭地表型態不穩定。因此，本研究規劃佈設感測器時主要將採用拓撲型態為網形，具有感測器間距短、基站耗能低、監測範圍大等優點。網形拓撲通常僅需佈設單一基站，以多次跳頻技術確保通訊範圍，減少感測器與基站直接傳輸的數量及次數，使基站能量損耗降低。相較之下，星形拓撲需多設基站，感測器與基站的直接傳輸數量多，有較大能源需求。此類型拓撲適合敏感性邊坡範圍集中，電力來源及電量穩定，安全係數低且有即刻危險的邊坡。因此，網形拓撲將為本研究感測器系統的主要設計架構。

邊坡形變感測器的理想傳輸距離為 1 公里，感測器佈點將依此距離限制條件進行規畫。此外，為確保感測器間資料傳輸無虞，降低自然災害或其他意外使形變數據傳輸中斷，基站無法將監測數據回傳，網形拓撲設計將盡可能串聯鄰近感測器，減少通訊中斷之可能性。因此本研究使用 K-mean 分群方式並以各群中心作為節點位置。最後，考量地形條件，以集水區為感測器設置單元較以山丘為設置單元更能降低地形對監測系統造成的限制。首先，谷地為收集兩側山坡崩落地質材料的通道，同時監測兩側坡壁更能準確評估災害對下游造成的

影響。另外，若監測系統跨越山陵線兩側，地形曲折也會使感測器間的通訊限制增加。

圖 9 為實驗區邊坡形變感測器佈點規畫。崩塌災害敏感區為感測器節點的主要佈設區域，以取得地表變位之最大資訊量；另外，本研究也計算邊坡感測器之幾何中心佈設基站，基站耗能較大，需要穩定電源供應，因此在最低成本及耗能前提下取得最多有效資訊為邊坡形變感測器佈點的主要重點，以架設穩定、長期的邊坡監測系統，未來可依現地實際供電來源，調整基站佈設。儘管平地實驗數據顯示：相鄰感測器距離 1 公里內皆可傳輸數據，但現地仍可能因植被密度、微觀地形、其他訊號對感測器傳輸產生干涉、繞射、訊號衰減等干擾。因此，感測器間的環域須相互重疊外，感測器的佈設也需與周遭感測器通訊，確保數據能順利傳輸至基站，降低因自然現象破壞或單一感測器故障而使數據傳輸中斷之可能性。

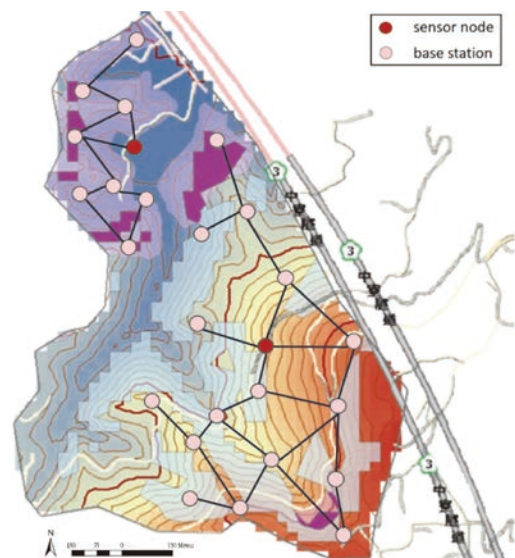
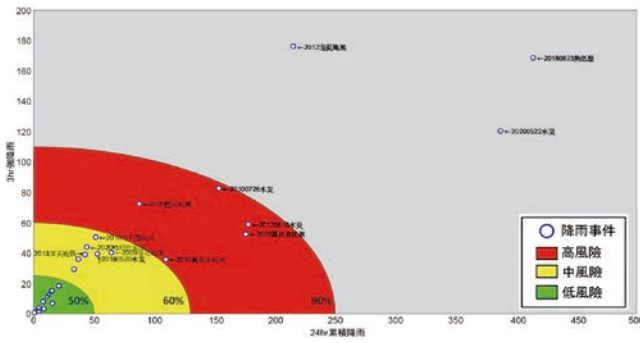


圖 9 邊坡形變感測器佈點規畫

空間推估方法應用於降雨量估計

因缺乏邊坡崩塌歷史紀錄，故本研究使用自 2009 年以來，共 30 個降雨事件進行統計型崩塌預警模型建立，其中包含 2009 年莫拉克風災、2018 年 0823 熱低壓以及 2020 年 0522 梅雨等，並依據降雨事件涵蓋的比例設定預警門檻值（圖 10）。根據門檻值設定，給予各降雨事件風險評估，區分高、中、低三種降雨事件風險。並分別以冷暖色調表示降雨量的多寡。降雨量較多的地方以紅色表示，藍色部分則表示在該次降雨事件中的降雨量較少。

空間推估方法有克利金法、平滑曲面法與反距離權重法等多種內插方式，依研究區域降雨特性的不同，使



(a) 崩塌預警模型

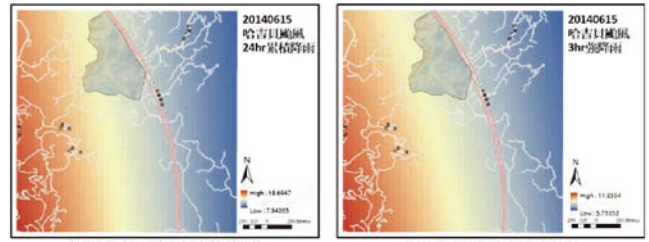
| | 降雨閾值 | | | | | | | |
|----------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|---------|-----|
| | 門檻值90% | | 門檻值60% | | 門檻值50% | | 門檻值50%↓ | |
| | R24 | I3 | R24 | I3 | R24 | I3 | R24 | I3 |
| 高滑坡敏感性區域 | 高危險 | 高危險 | 中危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 |
| 中滑坡敏感性區域 | 高危險 | 中危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 |
| 低滑坡敏感性區域 | 中危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 | 低危險 |

(b) 危險矩陣

圖 10 崩塌災害預警模型

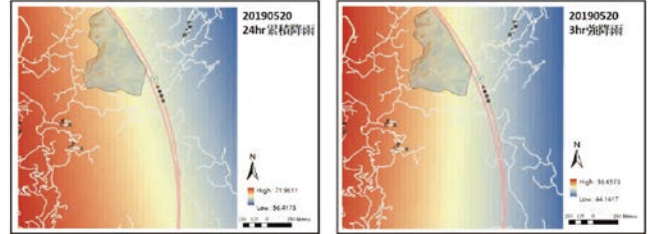
用合適的空間推估方式（圖 11 至圖 13）。考量本實驗區內無中央氣象局之雨量觀測站分布，且最近的雨量觀測站（尖山測站）距離實驗區有數十公里遠，雨量觀測站數量少，以平滑曲面法推估降雨量會使雨量估計誤差增大，內插效果不佳。從圖 12 中也可以看出當降雨量較低時，研究區內的降雨估計出現負值，與實際情況不符，表示此法在雨量推估上有較大誤差，不適用於本研究。

反距離權重法（圖 13）適合具有大量已知數據，且已知點包含極端值的情況。然而，本雨量觀測站數量有限，無大量降雨數據，加上實驗區內無雨量觀測站分布，恐無降雨事件極端值，造成區內雨量推估上的限制。另外，在計算過程中也因降雨數據在研究區內分布不均，出現牛眼（bull eyes）的現象，即已知點周圍形成同心圓狀的輪廓，造成內插結果與實際不符（圖 14）。由於雨量觀測站數量有限、無法均勻分布於實驗區內，且不一定包含降雨量極值，造成平滑曲面法與反距離權重法不適用。因此，本研究主要使用克利金法進行降雨量的推估，以改善已知資訊量不足與分布不均造成的估計誤差（圖 11）。此方法常用於台灣的降雨量估計，可消除空間自相關，提供降雨量的最佳無偏估計 [20-22]。綜合敏感性地質、陡坡等微觀地形以及推估歷史降雨事件之成果，中寮隧道北側地質脆弱，降雨熱區多集中於國道三號西側，本實驗區位於交通樞紐，有長期監測邊坡變位之需求。當強度降雨或累積降雨達到特定門檻值，以克利金法評估未知區域的雨量資訊，並依據危險矩陣提供疏散參考標準。另外，推估降雨量除了可以用來提供



(a) 哈吉貝颱風累積降雨

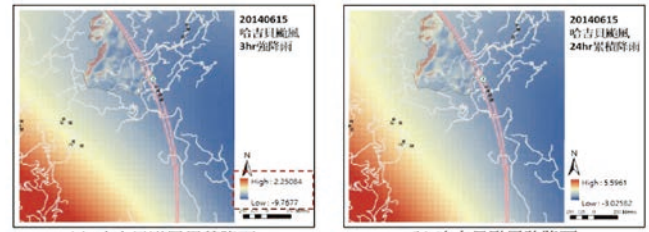
(b) 哈吉貝颱風強降雨



(c) 2019年0520豪雨累積降雨

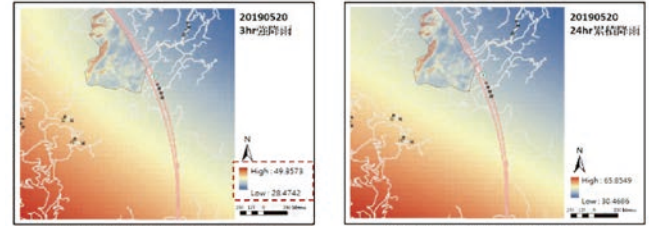
(d) 2019年0520豪雨累積降雨

圖 11 以克利金法推估歷史降雨事件



(a) 哈吉貝颱風累積降雨

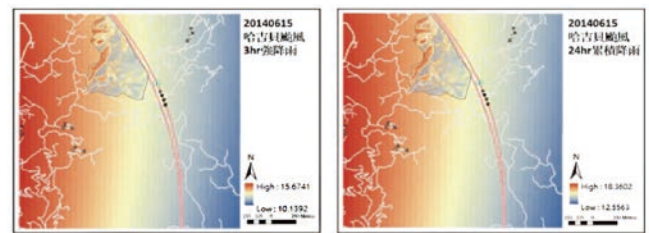
(b) 哈吉貝颱風強降雨



(c) 2019年0520豪雨累積降雨

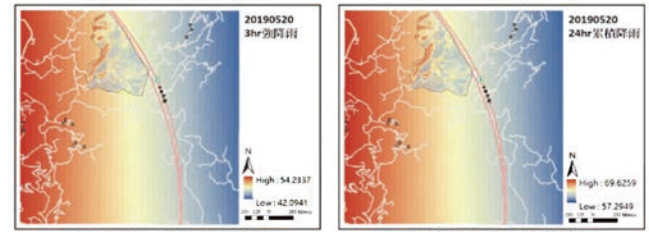
(d) 2019年0520豪雨累積降雨

圖 12 以樣條函數法推估歷史降雨事件



(a) 哈吉貝颱風累積降雨

(b) 哈吉貝颱風強降雨



(c) 2019年0520豪雨累積降雨

(d) 2019年0520豪雨累積降雨

圖 13 以反距離權重法推估歷史降雨事件

預警模型的警戒門檻值外，也能統計歷史事件的降雨熱區，並套疊邊坡敏感地圖作為密集佈設邊坡感測器的重點區域。

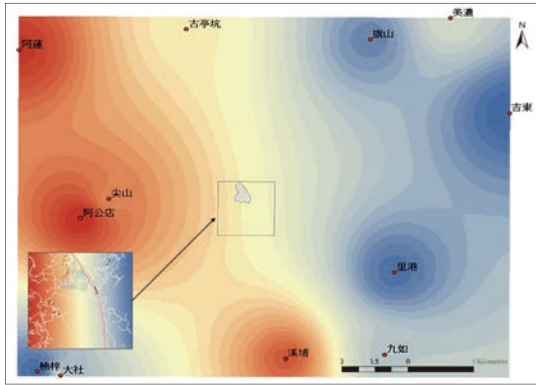


圖 14 反距離權重法推估降雨，因已知點數量不足及分布不均造成的牛眼現象，以 2019 年 0520 豪雨 24 小時累積降雨為例。

結論與建議

邊坡災害是台灣地區常見之嚴重天災之一。然而現有預警系統多以大範圍地質概況、短時間強降雨及長時間累積雨量建立門檻值。考量超過 60% 的邊坡災害在低於降雨門檻值下發生，單就現有系統難以達到有效預警功能^[6]。另外，邊坡崩塌相關研究雖多，但僅少數研究針對感測器（邊坡種子）安裝位置與配置進行探討，故本研究先使用空間推論技術及鄰近雨量觀測站資料，推估研究區內雨量大小。再以 GIS 系統將降雨高風險區，結合敏感地質與邊坡災害清單，評估邊坡種子布設規劃。最後以場址特性與邊坡位移預測值，將感測器及通訊結點分群後最佳配置以預測風險。後續可透過邊坡種子蒐集實際邊坡滑落位移量，同時納入交通路網與民生資料庫等資訊，為邊坡災害的發生提供防災及救災的參考。

在研究限制部分，本研究參考統計型預警模型，以歷史降雨事件作為建立模型的基礎。崩塌模型預警的準確性有賴於降雨事件的蒐集，近年來大型風災事件極少，降雨事件樣本的取得受到限制，故本研究僅供學術參考。預警模型或實際感測器布設規劃應持續蒐集並統計更多降雨事件，甚至是災害歷史事件，以提高模型的預測能力，並使用其他邊坡災害事件進行驗證，以提升邊坡災害預警的準確性。

另外，崩塌敏感性評估以及感測器布點規劃可納入現地調查方式，用於評估研究區內保全對象、植被密度、地形因素對感測器訊號傳輸造成之影響。同時以無人機或空載光達取得高解析度即時影像及 DSM、DEM，比較現地與遙測影像之多時期變遷差異，對感測器佈點位置進行調整，配合不同演算法使感測器的佈設在位置、數量以及耗能上最佳化。未來即時降雨資訊及感測器監測資料回傳，不僅能長期監測敏感性邊坡，也能為邊坡災害的防、救災規劃提供更詳細的資訊。

參考文獻

- 傅鐸璇、施虹如、張志新 (2019)。2018 年全球重大天然災害回顧。國家災害防救科技中心災害防救電子報，第 165 期。
- Lacasse, S., Nadim, F., and Kalsnes, B. (2005). Living with landslide risk. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 41(4). ISSN 0046-5828.
- Ubydul, H., Paula, F., Graziella, D., Jürgen, P., Bingxin, Z., Asmaa, K., Wahyu, W., Peter, A., Ping, L., Juneseok, L., Taro, Y., David, K., Jian, H.W., and Gregory E.G., The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995-2014). *Science of the Total Environment*, 682(10), 673-684.
- Leaning, J. and Guha-Sapir, D. (2013). Natural disasters, armed conflict, and public health. *New England Journal of Medicine*, 369(19), 1836-1842.
- 陳明賢、羅文俊、陳振宇 (2008)。土石流風險管理機制相關國外研究探討 Recent Development and Research of Debris Flow Risk Management。物業管理暨防災期刊 *Journal of Property Management and Disaster Prevention*，1，頁 37-54。
- Jeong, S., Ko, J., and Kim, J. (2019). The effectiveness of a wireless sensor network system for landslide monitoring. *IEEE Access*, 8, 8073-8086.
- Ayalew, L. and Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31.
- Wei, L.W., Huang, C.M., Chen, H., Lee, C.T., Chi, C.C., and Chiu, C.L. (2018). Adopting the I3-R24 rainfall index and landslide susceptibility for the establishment of an early warning model for rainfall-induced shallow landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1717-1733.
- 李承玖 (2014)。宜蘭縣大同鄉土地利用與邊坡崩塌之災害潛勢分析。
- Lee, C.F., Huang, W.K., Chang, Y.L., Chi, S.Y., and Liao, W.C. (2018). Regional landslide susceptibility assessment using multi-stage remote sensing data along the coastal range highway in northeastern Taiwan. *Geomorphology*, 300, 113-127.
- Zongji, Y., Wei, S., Jianping, Q., Dong, H., Hongling, T., Xiaoqin, L., and Taro, U. (2017). A multi-source early warning system of MEMS based wireless monitoring for rainfall-induced landslides. *Applied Sciences*, 7(12), 1234.
- Segoni, S., Picciullo, L., and Gariano, S.L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483-1501.
- Chung, C.J.F. and Fabbri, A.G. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(12), 1389-1399.
- 林中村、張寬勇、鄭光炎、林秀勇、陳昶華、吳重君 (2011)。邊坡監測設施介紹與應用—以藤枝林道地滑整治規劃為例。台灣林業，一〇〇年六月號，三十七卷，第三期。
- Jeong, S., Ko, J., and Kim, J. (2019). The effectiveness of a wireless sensor network system for landslide monitoring. *IEEE Access*, 8, 8073-8086.
- Giorgetti, A., Lucchi, M., Tavelli, E., Barla, M., Gigli, G., Casagli, N., and Dardari, D. (2016). A robust wireless sensor network for landslide risk analysis: System design, deployment, and field testing. *IEEE Sensors Journal*, 16(16), 6374-6386.
- Thuy, C.G. (2018). Flexible configuration of wireless sensor network for monitoring of rainfall-induced landslide. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 12(3), 1030-1036.
- Van Khoa, V. and Takayama, S. (2018). Wireless sensor network in landslide monitoring system with remote data management. *Measurement*, 118, 214-229.
- 黃俊維、洪士林 (2016)。使用 K-means 分群以及基因演算法建置最佳化無線感測網路系統。交通大學土木工程學系。
- 陳國隆、王吉杉、楊智堯、吳文隆、蕭秋安 (2018)。月世界地區隧道遭遇斷層之變位監測案例探討。中華技術季刊，106，No.119。
- Salciarini, D., Fanelli, G., and Tamagnini, C. (2017). A probabilistic model for rainfall-induced shallow landslide prediction at the regional scale. *Landslides*, 14(5), 1731-1746.
- Zúvala, R., Fišerová, E., and Marek, L. (2016). Mathematical aspects of the kriging applied on landslide in Halenkovice (Czech Republic). *Open Geosciences*, 8(1), 275-288. 