

坡地社區應用大尺寸模型驗證整合監測設備研究

Study of Applying Large-scaled Testing Model for Proving Disaster Prevention System on Slope Land Community

主管單位：內政部建研所

郭治平¹ 鄧福宸² 陳宏燦³ 吳晉維¹ 劉美君¹

¹明新科技大學防災技術研究中心

²國立臺灣科技大學營建工程學系

³蘭陽技術學院建築與室內設計系

摘要

近年極端降雨事件頻傳，邊坡監測及防災預警實為山坡地社區安居之重要議題，山坡地社區開發需施作擋土設施，周緣邊坡也存在崩塌威脅，然以往山坡地社區監測多以人工定時記錄，常遭遇山坡地社區局部降雨及邊坡位移資訊無法即時協勤防災管理。鑑此，基於內政部建築研究所(以下簡稱建研所)委託本團隊執行之前期計畫「坡地社區智慧防災系統研發驗證—推估社區整合型監測儀器安全管理值大尺寸試驗模型建置」、「坡地社區減災營造與智慧防災系統整合研發—預力地錨破壞監測及整體系統穩定性之強化」、「山坡地社區智慧防災系統精進—人工邊坡智能感測器研發與雲端系統擴充應用」成果，已研發適用各種邊坡之土壤邊坡智能感測器與人工邊坡智能感測器，係整合微機電感測器、無線傳輸技術與雲端分析技術，建構適合山坡地社區邊坡智慧防災監測儀器，提升邊坡災害預防及應變作為，將山坡地社區防災層面提升至人工邊坡局部危害徵兆觀測精度與建立智慧防災網絡。結果顯示，本研究以大尺寸模型試驗，克服過去在示範社區無法驗證整合型監測儀器之問題。首先以常用市售邊坡安全穩定分析軟體進行可能邊坡滑動安全性，規劃出 2M 寬、4M 長、2M 高之土槽容量，模擬自然邊坡與人工擋土邊坡，並進行模型土槽降雨模擬與相關邊坡安全數據監測，包括降雨量、地下水位、地層變位、擋土牆傾斜度、裂縫、土壤水分等。經過多次模擬不同降雨情境造成之邊坡失穩滑動行為、擋土牆變位等監測，足以驗證本系統之穩定性，並供後續訂定管理對策之參考。

關鍵字：坡地社區、監測、大尺寸模型試驗、邊坡維護修繕管理值

Abstract

Over the years, the Architecture and Building Research Institute, ABRI has continuously conducted a series of studies on the "Feasibility Study of Smart Disaster Prevention System for Hillside Community". The results of hardware development are quite fruitful, and related results have received positive responses from community residents and the industry. However, in terms of practical operation, due to the fact that the demonstration sites have not suffered heavy rainfall or earthquakes and other natural disasters in recent years, and the demonstration sites are all located in communities, large-scale destructive experiments cannot be carried out, and relevant damage parameters cannot be obtained. Become one of the biggest issues facing this series of research. On the other hand, due to the high cost of existing monitoring equipment in the market, the weather resistance of self-developed monitoring equipment must also be tested. Therefore, it is very important to conduct large-scale tests to estimate the safety management value of community monitoring equipment. Since the relevant tests can obtain a lot of operating parameters from customized conditions, the expected derivative results will also be quite critical, such as verifying the monitoring and management values of artificial slopes and natural slopes, building the Internet of Things for disaster prevention on slopes, and visual advocacy, etc. However, the model is close to full size, including slopes, retaining facilities, rainfall facilities, loading facilities, etc. Considering the time and period of construction to obtain representative results, it will be implemented in two years. In 2020, the field selection and model setting, installation of related instruments have been completed, and the load has been increased and the actual earth stress has been simulated. In 2021, non-destructive testing and high-speed destructive tests will be carried out to obtain the physical and mechanical behavior before and after the failure. During the period, three-dimensional images and videos were taken to reproduce the appearance of slope damage in a realistic manner; the aforementioned results were integrated to formulate and verify the management values of monitoring instruments in various situations, and large-scale seminars were held to promote the series of research and development results.

Keyword: Hillside Residential Communities, Monitoring, Large-scale Model Test, Monitoring Threshold Values Evaluation

一、前言

近年極端降雨事件頻傳，邊坡監測及防災預警實為山坡地社區安居之重要議題，山坡地社區開發需施作擋土設施，周緣邊坡也存在崩塌威脅，然以往山坡地社區監測多以人工定時記錄，常遭遇山坡地社區局部降雨及邊坡位移資訊無法即時協勤防災管理。

鑑此，基於內政部建築研究所(以下簡稱建研所)委託本團隊執行之前期計畫「坡地社區智慧防災系統研發驗證—推估社區整合型監測儀器安全管理值大尺寸試驗模型建置」、「坡地社區減災營造與智慧防災系統整合研發—預力地錨破壞監測及整體系統穩定性之強化」、「山坡地社區智慧防災系統精進—人工邊坡智能感測器研發與雲端系統擴充應用」成果，已研發適用各種邊坡之土壤邊坡智能感測器與人工邊坡智能感測器，係整合微機電感測器、無線傳輸技術與雲端分析技術，建構適合山坡地社區邊坡智慧防災監測儀器，提升邊坡災害預防及應變作為，將山坡地社區防災層面提升至人工邊坡局部危害徵兆觀測精度與建立智慧防災網絡。

在前期計畫執行過程中發現，如何兼顧提升儀器耐候性與降低開發、維運成本，方可順利推廣給坡地社區。因此開發低功耗與低成本之感測器與傳輸技術以降低設置與電力消耗成本，為本研究案於工程技術上之重要成果；藉由政府公部門或產險事業等單位推行給坡地社區居民使用，為本研究案於產品商轉技術上之重要課題。為使坡地社區監測項目更趨完善，除了過去已經開發之降雨量、地層變位量、裂縫變化量、土壤含水量、結構物傾斜量、結構物(或地表)加速度之感測與監測、降雨量、地下水位(地下水壓)與地錨荷重變化等監測項目。上述之監測成果除彙整至建研所已開發建置之防災資訊平台外，並進行回饋分析，已提出監測物理量對應之管理值，供社區管理單位與居民面臨邊坡產生微變化而至於巨大變化前，尋求工程技術支援之參考依據。過去相關之研究實驗過程多藉由示範社區進行，雖然大部分社區願意配合，然而倘若實驗過程造成既有擋土設施損害，可能非研究單位與經費所能復原。但是實際地破壞或災害卻是各種監測數據與模式驗證之重要依據，因此在各種研究方法與成果皆備階段，若能藉由大尺寸模型試驗進行相關研究成果之驗證，相信能使這些研究成果更具可信度與應用性，對於推廣也更有助益。

二、研究目標

建研所多年來不斷針對「山坡地社區智慧防災系統可行性研究」進行一系列研究，硬體開發之成果相當豐碩，且成果已獲得社區居民與業界之正面回響，但仍需要更具體之機制與管理模式。實務操作上，受限於近年來因示範場址無遭受較大之降雨或地震等天災事件，且示範場址皆位於社區，無法進行大尺度之破壞型實驗，亦有破壞原擋土設施功能之虞，導致相關之破壞參數無法取得，成為本系列研究面臨之最大課題之一。另一方面由於市面既有之監測設備成本高，自行開發之監測設備耐候性亦須受檢驗，因此進行用於推估社區監測儀器安全管理值之大尺寸試驗相當重要。去年(109 年度)首度以大尺寸土槽模型進行智慧防災系統之驗證，確認在致災因子導入後，至發生大規模滑動階段與擋土設施變形期間，確實有可以做為制定管理機制之參考，因此本年度將精進過去實驗方式，進一步求取在不同邊坡失穩情況下，監測儀器搭配之管理值。最後並將相關資訊導入防災資訊平台。

邊坡之致災因子，如強降雨、地震、地下水等，近年來成為研究邊坡滑動或崩塌之熱門關鍵議題，對於瞭解破壞機制有重要助益。然而，實際邊坡崩坍災害發生時機及區塊難以預測，對於保護邊坡周遭居民之生命財產安全，即時的示警系統仍是必須。鑑於邊坡發生前常有局部危害徵兆，如能藉由自動化智能監測網絡，偵測危害徵兆並針對該區域發布示警，將可使居民免於災害威脅。而上述之工作，有賴於大尺寸模型試驗之實驗參數取得後回饋分析並進行管理值訂定方法驗證，才能使管理值更接近實際應用需求。

三、大尺寸試驗模型之建置

1. 研究場域概述

明新科大校園行政區位位於新豐鄉，地理區位位於湖口台地、鳳山溪右岸，占地約 35 公頃，校園西南隅沿著鳳山溪右岸為湖口台地南緣，預定使用校地中間置之停車場做為實驗用地。本年度預定精進方式為：選擇可以改變層面角度的土槽，如此可以獲得下列助益：(1)更靈活填裝與清除不同土樣、(2)可隨時改變層面角度、(3)相較於混凝土可減低側壁之摩擦、(4)地下水可蓄積等。如可同時改變上述參數，可獲得不情況下之土層與擋土設施間之互制行為，進一步推估滑動機制與取得管理值。經過多方向思考，並考慮能靈活改變層面角度，本計畫模型採用 20 呎貨櫃進行改良，土槽實際長寬高尺寸分別約為 2.4m×2.4m×6m，其中結構由柱以及上下樑構成框架，再由波浪形鋼板封為完整貨櫃。為方便坡面施工進行、雨量直裝置與監測儀器之設置，上方裁切後僅保留中央約 20cm 寬鋼板支承防止變形，貨櫃內底部以不透水帆布鋪設，以模擬自然邊坡與人工邊坡於降雨後之水位變化，內部改良後情形如圖 1 所示。

進行土槽內部填土前，為使傾斜管之變化情形可真實反映邊坡實際破壞，另一方面也較符合其底部裝設於不動點之意義。在邊坡監測中，原則上水位觀測井與傾斜觀測管安裝於不同鑽孔內，故本研究將一處設置兩孔傾斜管，一孔作為自動化監測使用，另一孔則開篩並包覆紗網做水位觀測井使用，邊坡本體設置完成如圖 2 所示。



圖 1 土槽內部鋪設不透水帆布，上方保留 20cm 鋼板。



圖 2 大尺寸試驗模型傾斜管埋設完成

2. 不同地層材料、層面與坡面配置

- (1). 為模擬不同地層材料在本研究之行為，分別選用明新科大校園在地土壤與調配至接近過去致災歷史土壤(台北市文山區萬壽路 75 巷政大御花園蕃蜜風災土石崩塌鑑定報告)之兩種土壤進行實驗，其中外來土方購自新竹地區合法砂石場；
- (2). 為模擬不同坡面植生狀態對入滲與邊坡穩定之影響，分別採用自然植生、鋪蓋草毯與完全裸坡等情境進行；
- (3). 為模擬不同層面對邊坡穩定影響，採用千斤頂頂昇土槽；
- (4). 為模擬不同形式之邊坡，採用自然邊坡(無砍坡腳如圖 3a、砍坡腳如圖 3b)與人工構造邊坡(如圖 3c)。



(a)未砍坡腳自然邊坡



(b)砍坡腳自然邊坡



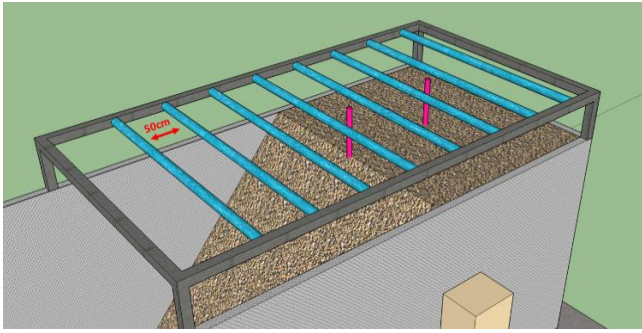
(c)人工邊坡

圖 3 模擬不同形式邊坡

3. 不同降雨情境之入滲設施

為研究不同降雨強度延時與地層下之影響，本研究預計延續以霧化噴頭模擬降雨水源，架設於試驗土槽上方，如圖 4 所示。為使試驗邊坡範圍內可均勻降雨，本研究採用可調整噴灑模式之霧狀灑水噴頭，在霧狀模式下，經測試後將噴頭間距調整為 30cm、高度大於 50cm 時，噴灑範圍可完整覆蓋，且無過多重疊。圖 4(a)左下所示為裝設一支示意圖，每支為 7 組霧狀灑水噴頭，再以 50cm 間隔共 8 支排列於土槽上方，總噴頭設置為 7x8 陣列，數量共 56 組。經前述土槽模擬邊坡的建置、邊坡上方監測儀器安裝，與降雨模擬裝置組裝與測試後，隨即對人工邊坡進行降雨模擬破壞試驗。

模擬不同降雨強度與延時部分，本計畫將於人工降雨裝置之總水閥加入流量計，以便於控制端直接調整水流輸出量，將可使用流量、降雨量兩者進行降水量之比對，更精確掌握實際降水情形。根據中央氣象局(2015)對於雨量分級定義，本計畫預定持續以此進行不同分級降雨模擬，以測試邊坡地層對應之破壞。對於不同降雨情境對於土壤入滲達到飽和與地下水位上升相關實驗與研究皆發現，最困難者為地下水位上升與降雨組體圖間之關係，其關係對於本研究推估地層滑動機制與安全監測管理值影響甚大。圖 5 為本系列研究於 109 年度透過現地實驗取得之成果，相當寶貴，需透過模式建立與驗證後，方可回饋至上述之數值模擬中。

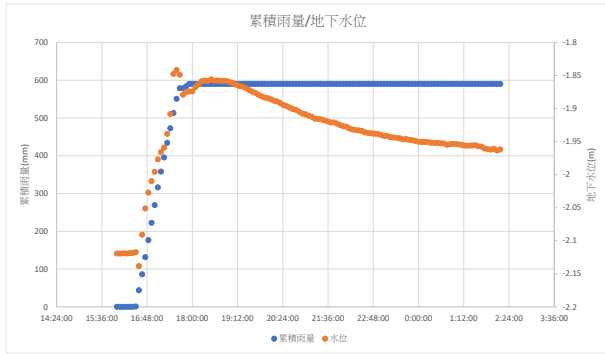


(a)灑水裝置共 8 組，間隔 50cm

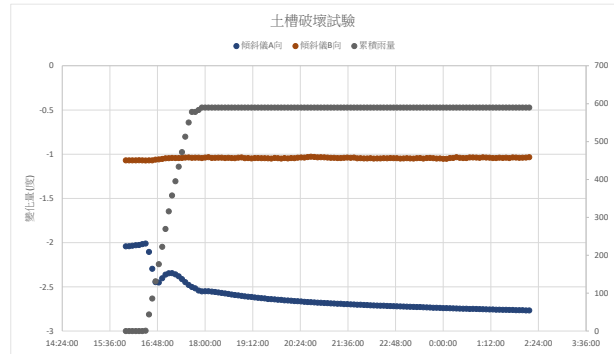


(b)專用灑水頭

圖 4 設置模擬不同降雨情境之灑水設施



(a)降雨與地下水位關係



(b)降雨與各儀器監測值關係

圖 5 109 年度大尺寸邊坡模型試驗模擬降雨後之地層反應

4. 精進與持續本系列研究之儀器

本年度研究採用之監測儀器為定置型傾斜管、結構物傾斜計、裂縫計、土壤水分計、水壓計、雨量計等監測設備，並可即時監測與回傳至後端，並檢討其可靠性及精確性。為因應未來於社區推廣本監測系統時之用電成本，本次計畫於試驗模型中採用低功耗無線傳輸技術 WSN，連接現場之水壓計、裂縫計、傾斜儀以及雨量筒，設備配置情形如圖 6~8 所示，回傳至儀器箱之 WSN Gateway，IPI 則因資料量較大，目前另以 Data Logger 連結，最後與 4G 連結回傳至本中心資料庫。

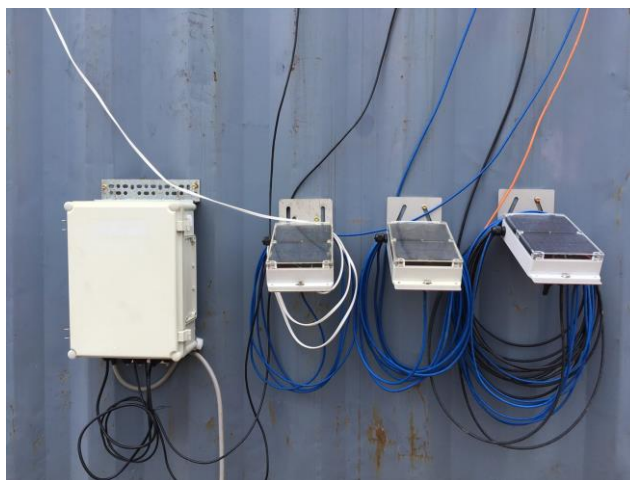


圖 6 本研究採用之整合感測器現場安置完畢照片

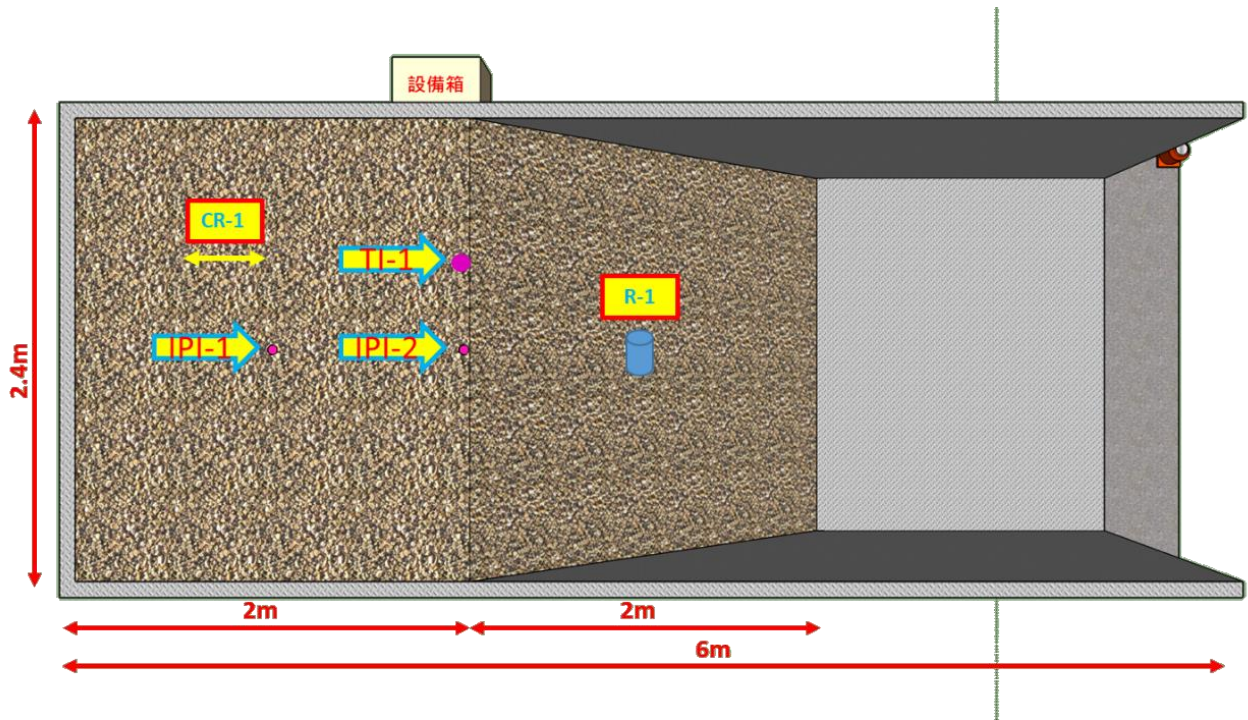


圖 7 大尺寸邊坡模型配置圖



圖 8 各項監測設備現場裝設位置

5. 不同情境下邊坡穩定模擬成果

本研究針對不同土層材料、降雨條件、邊坡形式、層面角度、坡面植生、坡腳型態等條件進行多種情境模擬，本節僅摘錄發生明顯邊坡變化與破壞案例中之自然邊坡與人工邊坡兩案例進行說明。

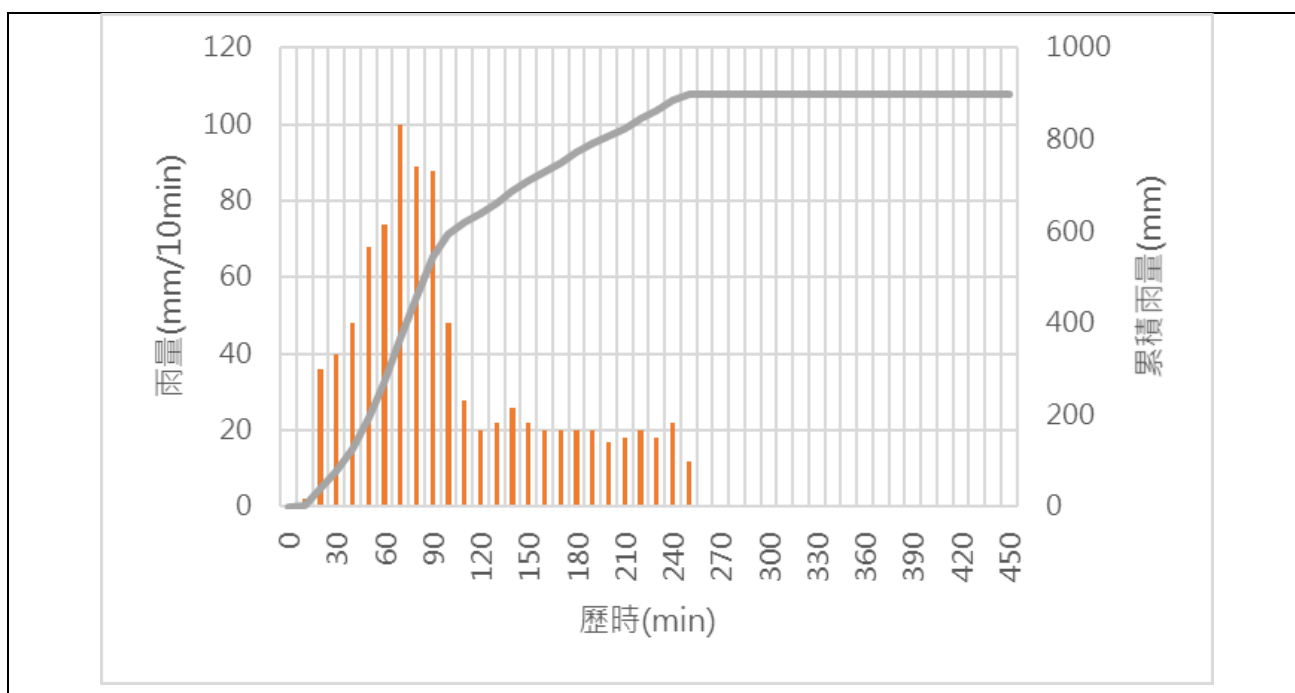
(1) 自然邊坡試驗條件：

- 土層材料：接近純粉土(模擬政大御花園後方邊坡土壤)
- 邊坡形式：自然邊坡
- 層面角度：約 11 度
- 坡面植生：裸坡
- 坡腳型態：砍腳呈垂直坡面

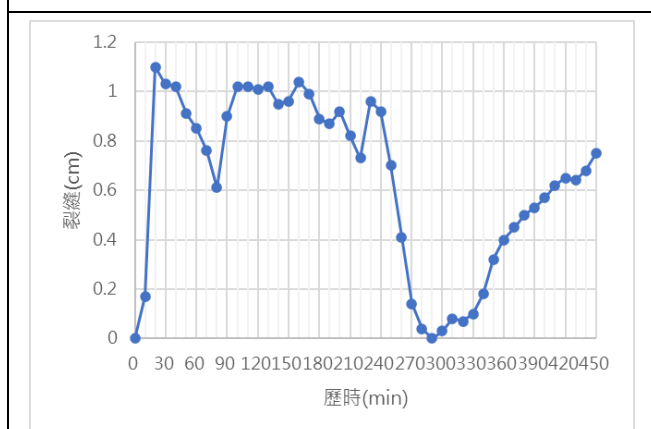
試驗照片如圖 9 所示，監測數據如圖 10 所示。



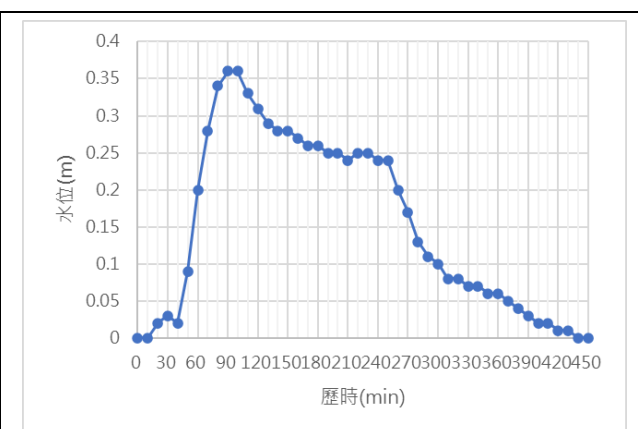
圖 9 邊坡滑動前後正視照片



(a)雨量紀錄與組體圖



(b)坡頂裂縫



(c)水位

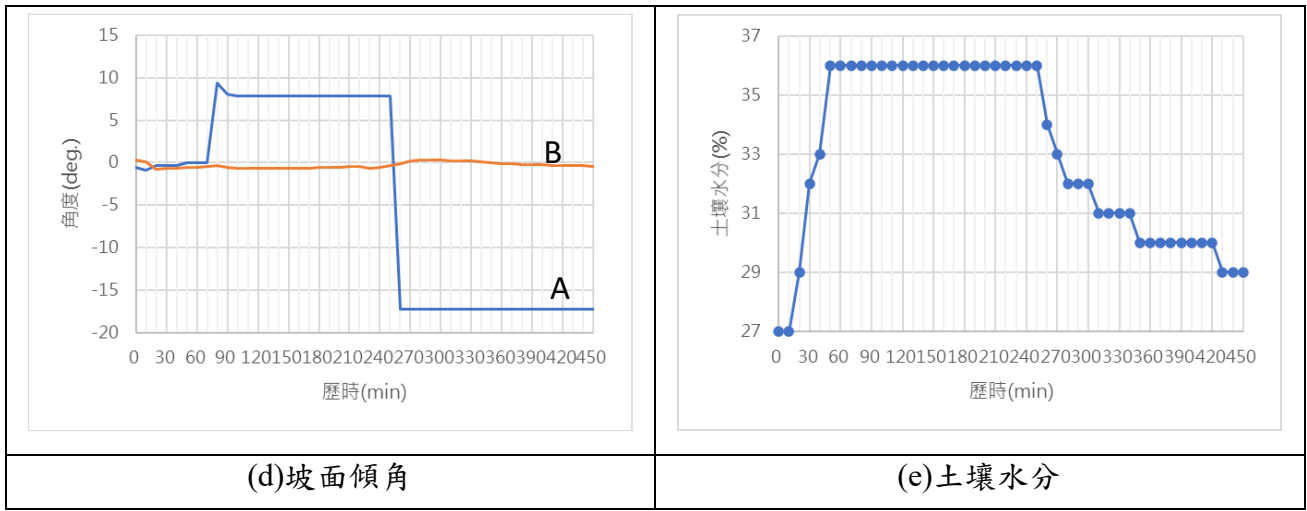


圖 10 邊坡滑動過程監測數據

(2) 人工邊坡試驗條件：

- 土層材料：接近純粉土(模擬政大御花園後方邊坡土壤)
- 邊坡形式：人工邊坡(砌磚並嵌入土壤，牆後可排水)
- 層面角度：約 11 度
- 坡面植生：裸坡
- 坡腳型態：砍腳呈垂直坡面

試驗照片如圖 11 所示，監測數據如圖 12 所示。



圖 11 邊坡滑動前後正視照片

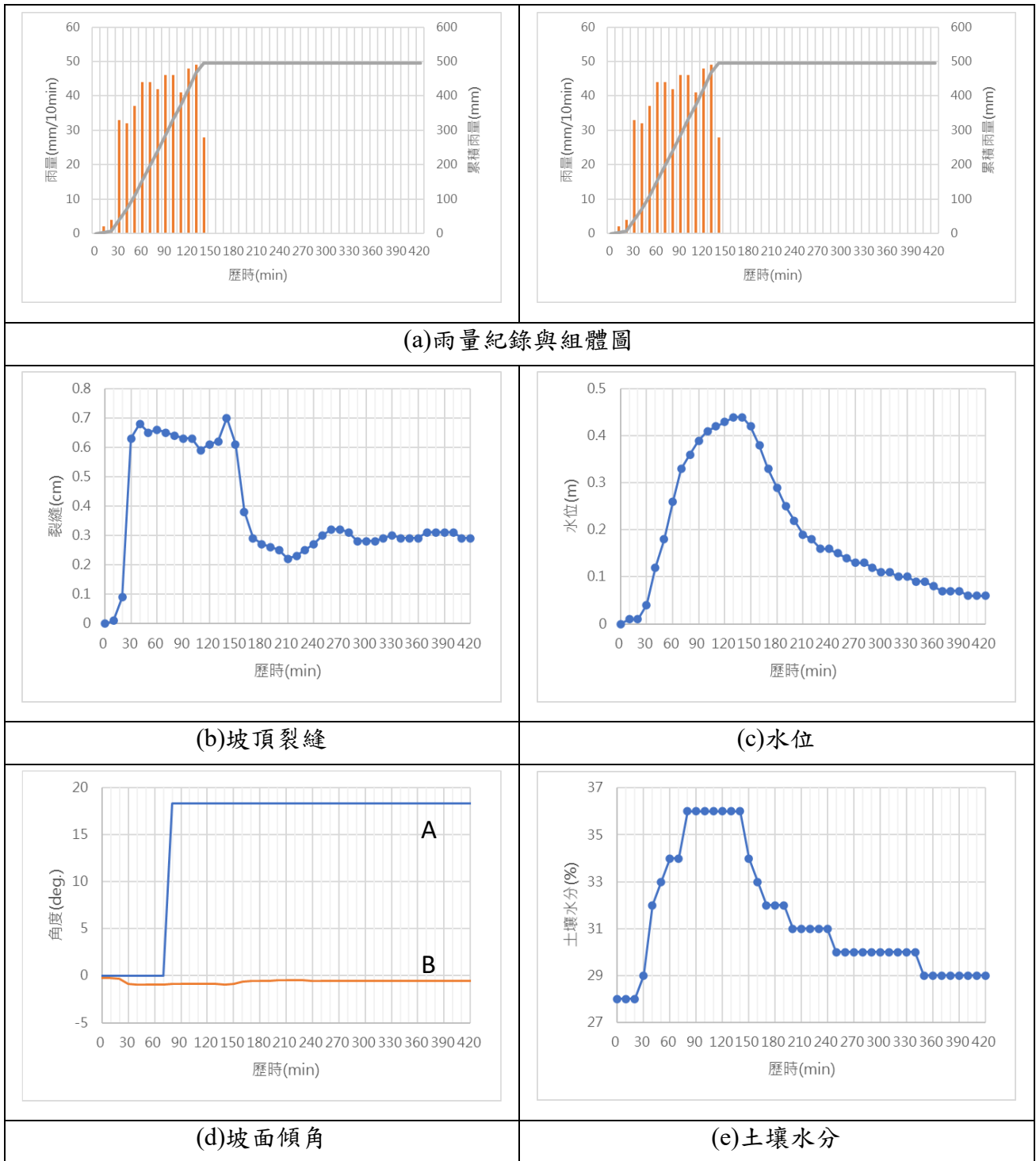


圖 12 邊坡滑動過程監測數據

四、管理值訂定方式

1. 案例探討

本研究關於後續研擬管理值訂定方式，以下列案例為例說明，並於後續之模型試驗進行驗證。該案例為台北市文山區貓空纜車系統之塔柱下方邊坡單元中 T16 塔柱邊坡。貓空纜車於 96 年營運，往返貓空與台北市動物園。本研究針對塔柱邊坡進行數值模擬分析。此案例以 plaxis 建立 T16 塔柱之幾何模型，進行數值模擬分析，如圖 13 所示。其材料參數參考「台北市文山區萬壽路 75 巷政大御花園蕃蜜風災土石崩塌鑑定報告」之土壤一般物理性試驗等數據，地層之材料參數如表 1 所示；邊界條件設定以左右水力邊界條件依據常時地下水位高度，定水頭邊界，使左右水頭差固

定；底部設定無流量邊界，防止滲流通過底部；坡面為降雨入滲邊界，依輸入之雨量資料，由坡面進行入滲，如圖 14 所示。

本研究參考「滲流與應力耦合分析探討降雨導致不飽和邊坡不穩定之機制」論文案例，以 PLAXIS 進行分析，分析結果可驗證數值模擬分析方法正確，如圖 15 所示，將以此方式執行後續案例分析。

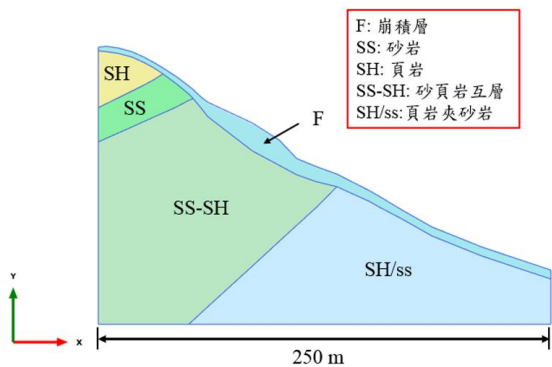


圖 13 T16 塔柱幾何模型

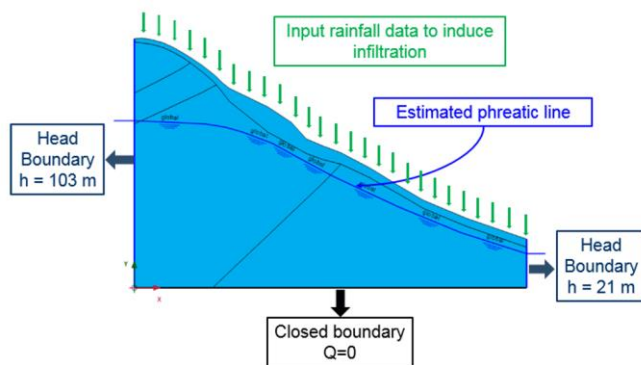


圖 14 水力邊界條件設定

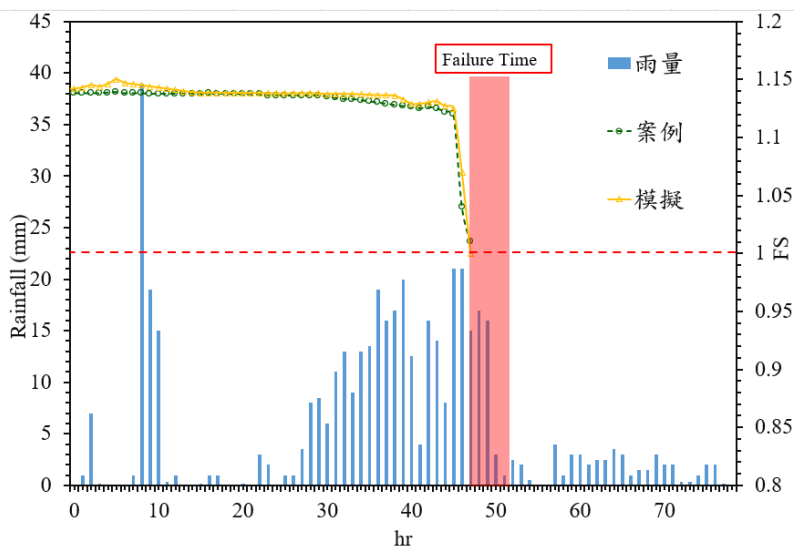


圖 15 降雨歷時安全係數變化

表 1 土壤參數

土/岩層	材料模式	孔隙比 e	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	柏松比 v	凝聚力 C'(kPa)	摩擦角 Φ' ($^{\circ}$)	水力傳導係數 k_x, k_v (cm/s)	E (kPa)
崩積層	Hardening Soil	0.616	19.5	20.1	0.3	6	27	$2.76 \cdot 10^{-4}$	$E_{50}=13750$ $E_{oed}=9625$ $E_{ur}=41250$
砂岩層	Mohr-Coulomb	0.15	24.6	25.4	0.25	679	36	$1 \cdot 10^{-5}$	$1.78 \cdot 10^6$
頁岩層	Mohr-Coulomb	0.14	23.6	24.5	0.27	256	27	$0.5 \cdot 10^{-12}$	$4.91 \cdot 10^5$
砂頁岩互層	Mohr-Coulomb	0.145	24.2	24.9	0.26	467	31.5	$0.2 \cdot 10^{-9}$	$1.14 \cdot 10^6$
頁岩夾砂岩	Mohr-Coulomb	0.148	23.8	24.9	0.26	306	30	$0.1 \cdot 10^{-10}$	$8.76 \cdot 10^5$

2. 模型驗證

本模擬以前述自然邊坡研究案例為對象，探討不同地下水位對邊坡的穩定性影響，進而了解邊坡發生破壞的時機。以 PLAXIS 進行邊坡穩定分析。在基準分析數值模型方面，需輸入不同之土層參數。另外，藉由輸入初始地下水位作模擬分析，以模擬不同水位歷程之安全係數變化。土壤參數部分，參考「台北市文山區萬壽路 75 巷政大御花園舊蜜風災土石崩塌鑑定報告」之土壤一般物理性試驗等數據。PLAXIS 分析所需之材料參數整理如表 2 所示。

表 2 材料參數

土/岩層	材料模式	孔隙比 e	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	柏松比 v	凝聚力 C'(kPa)	摩擦角 Φ' ($^{\circ}$)	水力傳導係數 k_x, k_y (cm/s)	E (kPa)
崩積層	Hardening Soil	0.616	19.5	20.1	0.3	6	27	2.76×10^{-4}	$E_{50}=13750$ $E_{osd}=9625$ $E_w=41250$

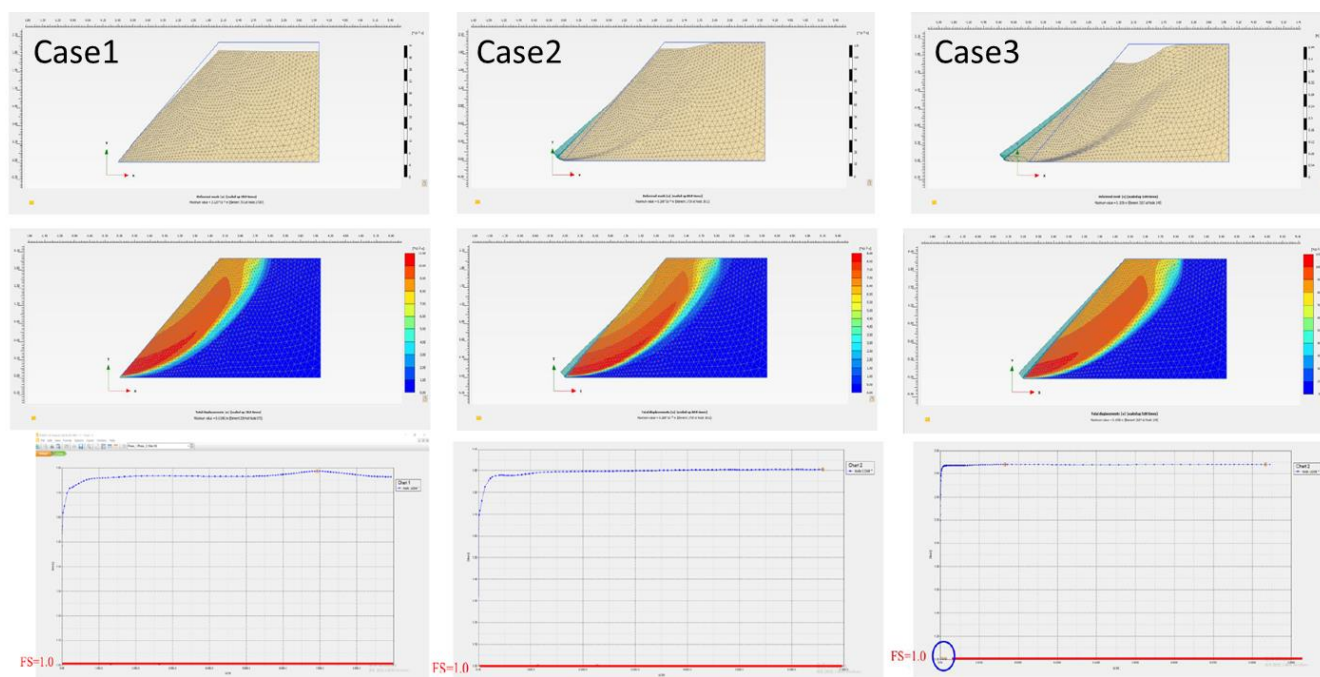


圖 16 不同地下水位狀況之邊坡分析結果

表 3 PLAXIS 分析設計結果

Case No.	Description	FS
1	地下水位面位於地表	1.5
2	地下水位面位於地表上 約 1M	1.3
3	地下水位面位於坡頂	0.998 (NG)

表 3 為不同地下水位狀況之邊坡分析結果。由表可知，如颱風豪雨發生造成雨水累積於邊坡內，將降低安全係數，影響穩定性；而若能有效的降低地下水位(如：採取良好之排水系統)，將可提高安全係數，並增加邊坡之穩定性。綜合上述，由本研究數值分析可知，颱風豪雨事件過後造成之雨水浸入邊坡內，地下水位面升高為造成破壞之原因。

3. 管理值訂定方式

圖 17 為模擬案例之實際狀況，可發現降雨發生後在第 46 小時安全係數急速降低，至第 48 小時達破壞，亦即僅有兩小時可行動。圖 18 與 19 為本研究實驗案例狀況，以坡面傾斜計監測值為例，若以傳統之管理方式，將有很長的警戒時間但直接邁入破壞階段；然而若可在有初步變化時即開始行動，亦即通知社區住戶請專業技師進行評估與維修補強，將有較充裕時間避災。

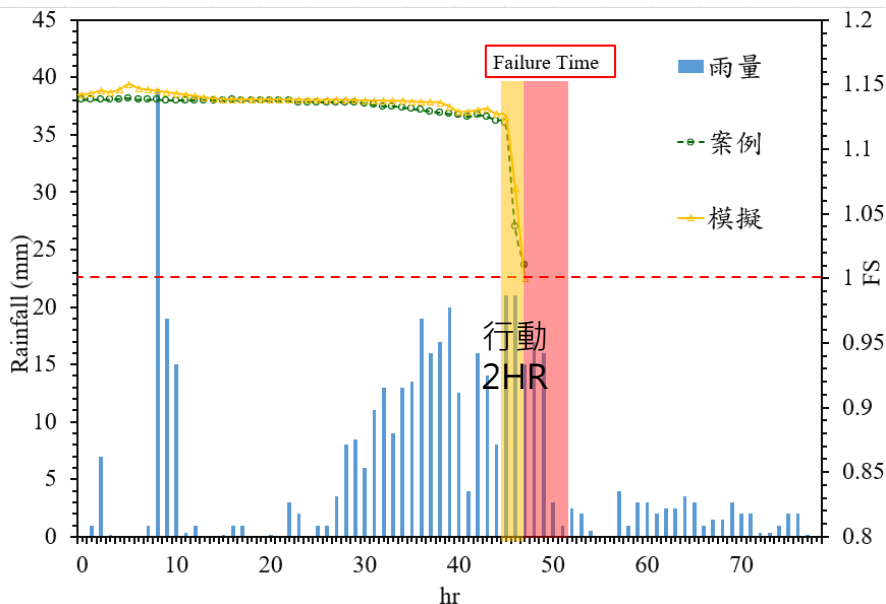


圖 17 政大御花園後方邊坡破壞行為時序

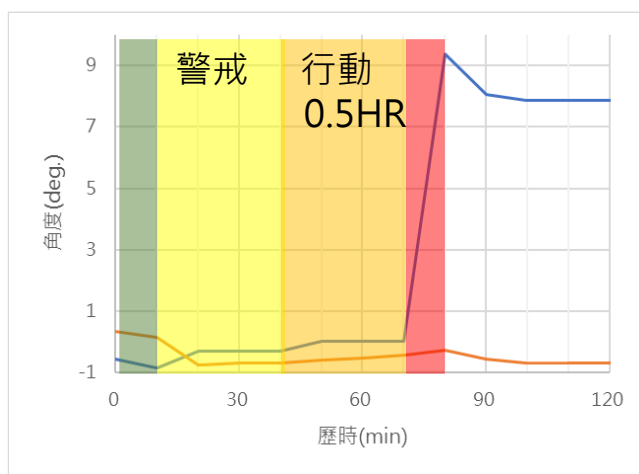
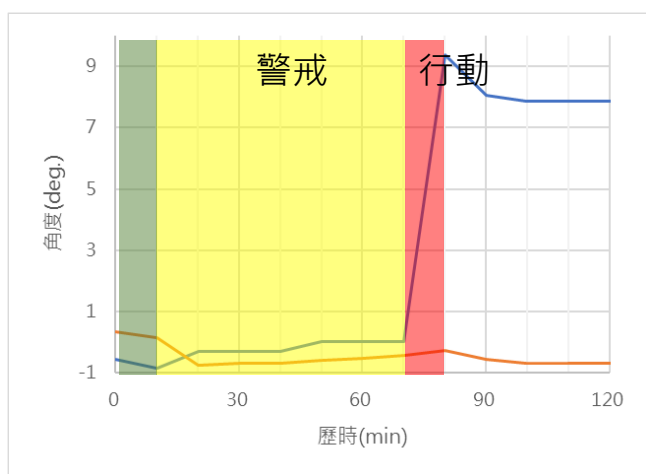


圖 18 本研究模擬案例以傳統管理思維劃分警戒與行動時間

圖 19 本研究模擬案例以新管理思維劃分警戒與行動時間

五、結論

前期計劃案成功整合各感測器至一個箱體內，除可節省現場建置成本外，也可降低維護與巡檢成本。而耐候性與擴充性在本年度獲得驗證。本計畫中建置了大尺寸之邊坡模型，以及人工降雨裝置，將同一監測裝置架設於邊坡模型外，並額外增加 IPI 等監測儀器，接著可依照需求進行簡易試驗環境重組，例如不同土壤性質、小範圍傾角變化(模擬層面傾角)、降雨量控制以及不同邊坡型式，以取得不同破壞型態分析，又相較於一般土槽試驗之尺寸效應，本研究之大尺寸邊坡試驗結果獲得較低的尺寸效應誤差，未來對於相關邊坡社區監測評估模擬更為完整。土槽模擬重大颱

風豪雨事件後，經現場破壞情形與量測結果來看，趨勢上有符合預期結果，符合監測需求順利作動，精度與耐候性可維持一定水準，並可進一步於各社區取得一定量之監測值後，客製並修正適合各社區之儀器安全管理值。

本研究經過比較 LoRa 與 NB-IoT 兩種通訊方式後，採用較為容易架設之 NB-IoT 通訊技術於本研究。該技術已廣為應用於都會區之精密廠房中，然而應用於野外防災監測之案例仍在起步中，從建置至今已經遭遇各種不同之問題，包括供電、漏失率與韌體調整等。故本研究為使社區邊坡監測裝置體積、功耗以及適用性，結合了低功耗無線傳輸系統，從資料品質與結果上可確定其高頻率的監測回傳，亦可維持低漏失率，在不同環境試驗下可立即反映出現地的變化情形，更增加推廣於社區邊坡監測的可行性。目前已確認可順利通訊，但漏失率部分需透過電信商一同合作處理改善，團隊已著手進行因應處理，實驗期間仍以 4G 傳輸為主，未來將進一步延伸應用於 5G 傳輸。

本平台以開源程式建立，提供使用者整合的場域即時監測資料以及簡潔且具有防災意義性的場域資訊。首先透過人工邊坡監測物聯網監測資料庫接收場域資料，如本案於過去示範社區與明新科大校園實驗場址的整合型感測器，建立相關資料。此外為讓本整合平台能提供使用者端更多元的服務，亦介接防救災相關公開資料，如氣象局即時雨量以及國家災害防救科技中心公開示警訊息。且此平台已連結納入建研所 105 年所建置「山坡地社區建築管理履歷資料庫平台」，以利應用。