

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

Validation of Slope Community Intelligent Disaster Prevention System - Estimation of Community Integrated Monitoring Instrument Safety Management Value Large Size Test Model Construction

主管單位：內政部建築研究所

郭治平¹

鄧福宸²

謝佑明²

吳晉維¹

Kuo, Chihping¹ Teng, Fucheng² Hsieh, Yoming² Wu, Chinwei¹

¹明新科技大學防災技術產學研究中心

²國立臺灣科技大學營建工程學系

摘要

台灣地區因為地狹人稠，居住用地不斷往山坡地擴展。既有之坡地社區開發時間已久，當時之擋土工法與材料不見得能夠適應目前之極端氣候，其設計之服務生命週期恐怕比預期短很多；加上並無相關之檢測工作與監測設備，居民只能透過自主目視巡檢方式自保，然而隱藏在結構物或地層中之變化，實在無法透過人力觀測得到，因此進行週期性檢測與監測勢在必行。本所多年來不斷針對「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。然而實務操作上，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，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。結果顯示，於明新科大校園建置一座 2M 寬、4M 長、3M 高之土槽，於內回填現地夯實土壤，模擬自然邊坡與人工擋土邊坡，並進行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、裂縫變化等。結果顯示，在模擬降雨過程中，地下水位會不斷蓄積至一個程度後，邊坡才開始滑動，相當符合實際狀況，這個時間差可以做為未來應變預警的一個參考。另外本實驗採用相高紀錄頻率監測邊坡與擋土設施變化，皆可完整記錄，顯示儀器之穩定度相當高。

關鍵詞：坡地社區、邊坡安全監測、大尺寸模型試驗、坡地安全管理

Abstract

In Taiwan, because of the small area and dense population, the residential land has been expanding to the hillside. The existing hillside communities have been developed for a long time, and the retaining method and material at that time may not be able to

adapt to the current extreme climate, and the service life cycle of the design may be much shorter than expected; in addition, there is no relevant inspection work and monitoring equipment, and the residents can only protect themselves by independent visual inspection, but the hidden changes in the structures or strata cannot be detected by human observation, so periodic inspection. Therefore, it is imperative to conduct periodic inspection and monitoring. For many years, the Institute has been conducting a series of studies on the feasibility study of hillside community intelligent disaster prevention system, and the results of hardware development are very fruitful. However, the practical operation is limited by the fact that in recent years, the demonstration sites have not been subjected to major natural disasters such as rainfall or earthquakes, and the demonstration sites are all located in the community, so large-scale damage experiments cannot be conducted, and the relevant damage parameters cannot be obtained, which is one of the biggest problems faced by this series of studies. 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, so it is important to conduct large scale tests for estimating the safety management value of community monitoring equipment. The results showed that a 2M-wide, 4M-long, 3M-high soil tank was built on the campus of Ming Shin University of Science and Technology and backfilled with compacted soil in situ to simulate natural slopes and artificial retaining slopes, and rainfall simulation and related slope safety data monitoring were conducted, including rainfall, groundwater level, ground level change, retaining wall slope, and crack change. The results show that during the rainfall simulation, the groundwater level will accumulate to a certain level before the slope starts to slide, which is quite in line with the actual situation, and this time difference can be used as a reference for future contingency warning. In addition, the experiment used a high recording frequency to monitor the changes of the slope and retaining facilities, and all of them can be recorded completely, which shows that the stability of the instrument is very high.

Keywords : Hillside Residential Communities, Monitoring, Large-scale Model Test

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。

台灣為一高山島，人口眾多，土地資源卻十分有限，在地狹人稠的人口壓力之下，有限的國土資源往往過度開發利用。平原與盆地地區的開發無法滿足國人生活需求的情況下，乃擴張至丘陵山區開發。但在需求甚殷之下，往往過度地擴張，許多山坡地不當地開發為建地，破壞了原有的水土保持，進而對台灣自然環境與台灣民眾生命財產造成重大衝擊與危害。此外，因為山坡地大自然的條件屬於破碎地質，加上地震與颱風的誘因，所以山坡地的開發所形成的聚落，成為重要的保全對象。因此，如何兼顧國土開發利用與環境保育，以維護台灣自然山林生態以及確保民眾生命財產安全，已成為台灣社會當前最重要的環境課題。台灣地質構造複雜為全世界地殼變動最激烈地區之一，頻繁的地震、每年頻繁之颱風侵襲加上人為土地開發不當，經常造成山崩、地層滑動、地盤下陷、房屋傾斜龜裂、土石流等嚴重災害，導致人民生命財產嚴重的傷害與損失。1999年921地震等重大災害後，凸顯出防災科技研究對防減災工作之重要性。依據世界銀行在2005年發行的Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis報告中指出，台灣約有73%的面積及人口暴露在三種以上的天然災害危險當中。

鑑此，基於前期計畫「山坡地社區智慧防災系統可行性研究—邊坡智能感測暨雲端運算」、「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」、「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」成果，已研發自然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課題；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微降雨量、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外，本年度增加降雨量、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、研究方法

根據中華民國大地工程學會-山坡地監測準則(2016)建議，山坡地監測儀器種類繁多，包括量測氣候、水文、邊坡位移及構造物應力或變形等各類儀器。其量測所得之物理量不同，於不同型態邊坡災害之適用性亦有所不同，監測系統規劃時應根據研判之可能災害類型加以選擇。

監測儀器設備的選擇，應單純而不複雜、能在所埋置的監測環境中有最好的耐久性、對氣候溫度、溼度的變化有最小的敏感性、材料零件不致因施工機具、水、塵土或其他化學作用之影響，依然能夠正常運作等之特性者為佳。相同監測儀器種類，其精度、重複性、量測範圍、適用溫度等可能有所差異。監測系統設計者應先依據山坡地之特性，研判山坡地環境及待測物理量可能分布範圍，據以選擇最適之儀器規格。而對於採自動監測之電子式儀器，亦需考量感測器、資料擷取設備、資料傳輸設備之耗電量。

如邊坡發生不穩定時，將使得構築於邊坡上之構造物應力改變、變形或傾斜，因此可加以監測，研判邊坡之穩定性。

2.1 實驗場域

本計畫之研究區域選定位於明新科技大學之後停車場進行(圖1)，以下對於此區域的氣象、地質、社區概況及監測之人工邊坡等進行說明。

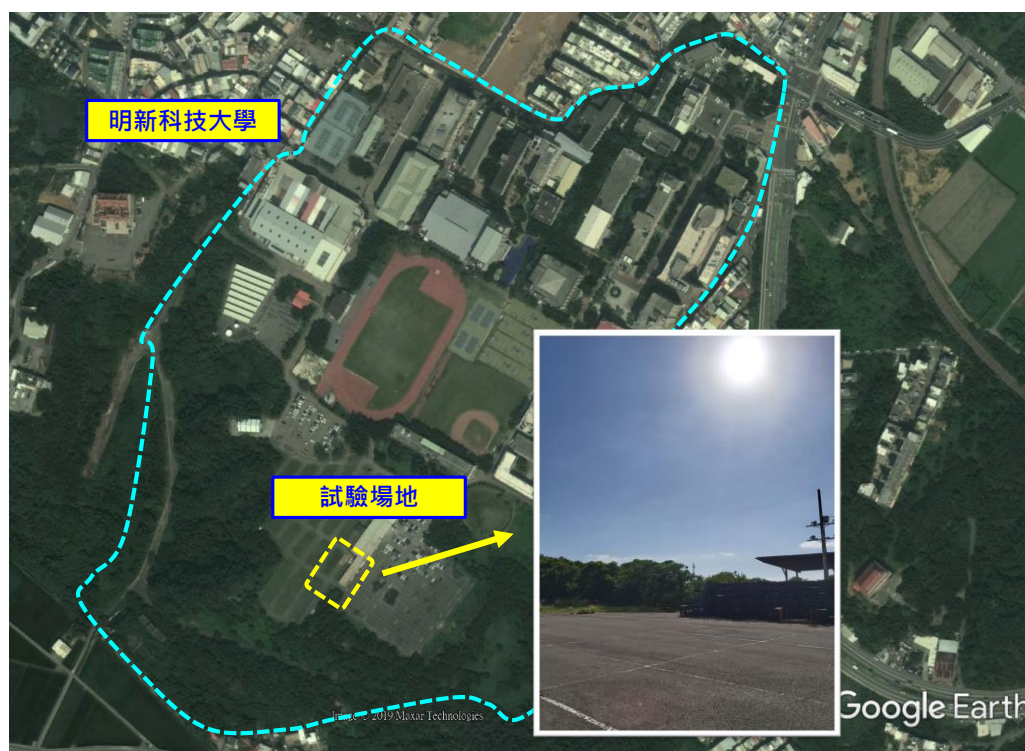


圖 1 實驗場域位置圖

2.2 試驗現場配置

本研究設置一內部長寬高分別為 2x4x3m 混凝土塊組成之大型土槽，其混凝土塊內部即設置人工邊坡進行模擬(圖 2)。人工邊坡設計分做三層，由下而上分別是填充層、防水帆布以及預設滑動的崩積層。填充層部分利用碎石及土壤堆疊內部底層為一 1/3 坡面。防水帆布是模擬邊坡經降雨造成水位蓄積之現象，覆蓋於填充層上方，最後再填上試驗所需土壤達到預定尺寸並進行初部壓密集即完成邊坡部分。另外為量測土中的變形量，再設置人工邊坡時便一併將傾斜管埋入其中，埋設深度為表面向下至帆布層的位置，成果如圖 3 與圖 4 所示。

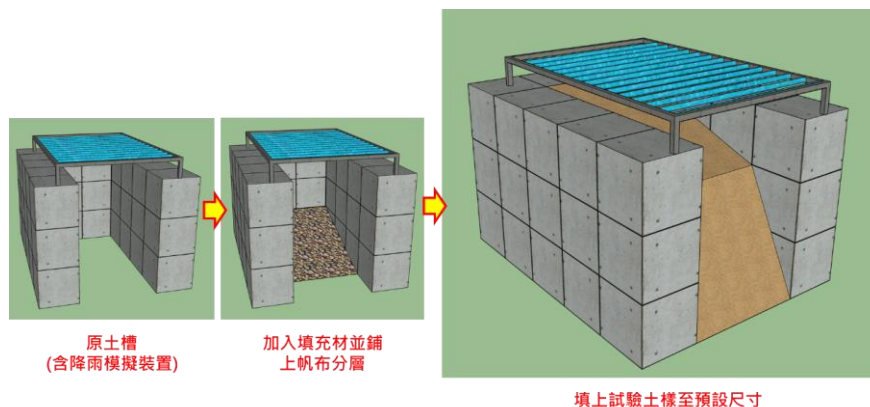


圖 2 土槽配置示意圖



圖 3 土槽現場配置情形



圖 4 現場人工邊坡鋪設完成情形

2.3 實驗儀器

以下針對本計畫設置之感測器進行簡要說明：

1.構造物傾斜計(Tiltmeter)：安裝於擋土構造物或建物之表面，用以監測擋土牆或建築結構體，因邊坡變位導致構造物產生之傾斜變化情形。構造物傾斜計型式可分為盤式及電子式二類型。

(1)盤式傾斜計：將傾斜觀測盤安裝於待測之構造體表面上，傾斜觀測盤上具有四個外凸銅柱，監測方式為以人工方式攜帶測傾儀量測，測傾儀需確實倚靠銅柱，以進行四個方向之傾斜量監測。

(2)電子式傾斜計：以電子感測原件製作之測傾儀器，一般於自動化監測系統使用。測傾感測器之型式甚多，例如電漿式、振弦式、MEMS 等，不同感測器型式之量測範圍、精度、反應時間、功率等規格均不相同，設計者需依據推估構造物之可能傾斜變化量、資料擷取系統及電源供應系統等綜合考量。本案中分別以電子式雙軸傾斜儀與三軸加速度計進行差異變位量之推估依據。

2.裂縫計(Crackmeter)：安裝於構造物之裂縫二端，以監測裂縫寬度變化。裂縫計型式可分為機械式及電子式二類型。

3.水分計：以電容式水分感測器為例，此型感測器由三個電極所組成，其功能就像是一個電容器。量測時插入土壤中，四周土壤形同電介質，利用振盪器去驅動電容器產生一個正比於土壤介電常數的訊號。由於水的介電常數大於土壤礦物質及有機質，因此含水量的變化可透過感測電路進行立即性的偵測。量測之單位為體積含水量 VWC(%) (Volumetric Water Content)，VWC 代表一定體積的土壤中水與土壤的體積比(%)，在飽和狀態下相當於土壤孔隙所佔的百分率。此型感測器使用簡便，不需要太多維護工作，配合記錄器能長期監測、記錄土壤水分變動的趨勢。

4.雨量計：雨量為目前國內邊坡防災預警工作中，最容易取得之管理值，可讓社區居民直接有感。圖 5 為預定裝設之雨量筒規格、照片與搭配水壓變化成果展示

示意圖。將以市售之低成本輕量化高耐候性(塑鋼材質)之雨量筒，作為未來推廣給社區之首要安裝監測儀器。

	量測範圍	200 mm
	系統精度	1.5mm @ 50 mm
	感測器型式	傾倒式雨斗
	取樣頻率	10 min
	紀錄頻率	30min
	輸出格式	JPEG

圖 5 本研究採用之雨量監測系統

5.水壓計：地層中超額孔隙水壓之消長為邊坡穩定之主要因素之一，故掌握地下水頭之變化為邊坡監測之重要課題，因此本研究規劃於既有之水位觀測井安裝全自動連續自記式水壓計。圖 6 為本計畫採用之水壓計、模組與之規格。

		量測範圍	0-6 bar (0-61 m)
		感測器型式	壓阻式薄膜
		系統精度	1 cm (水頭壓力)
		線長	60 m (PVC)

圖 6 本研究採用之自動化連續記讀水壓觀測計模組

6.地層變化監測：主要用於量測邊坡鑽孔中水平及垂直位移，其原理為將感測器按照一定間距排列連成一串，經由滑輪固定於傾度管中，精度約為 ± 0.01 (± 2 arc sec)，如圖 7 所示 7。



圖 7 定置型傾斜儀

2.4 模擬設備

本研究以霧化噴頭模擬降雨水源，架設於試驗土槽上方。此降雨模擬裝置分為蓄水、加壓供水以及灑水三個部分，蓄水部分，是以一 5000L 之蓄水塔，以確保在

進行人工降雨時，有持續穩定且充足的水源供應，並經由 1 英吋管輸出。另於水源處加裝加壓馬達，以維持噴頭輸出時的水壓(圖 8)，其加壓馬達最大壓力 $4.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 、最大水量 $48\text{L}/\text{min}$ ，輸出端以一球型閥控制水流輸出，可依需求調整為不同雨量，在分接成 4 組 4 分管供應。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，如圖 9 左下所裝設為一支，每支為 7 組霧狀灑水噴頭，再同樣以 30cm 間隔共 12 支排列於土槽上方，總噴頭設置為 7×12 陣列，數量共 84 組，架設完成結果如圖 10。



圖 8 降雨模擬裝置之加壓馬達

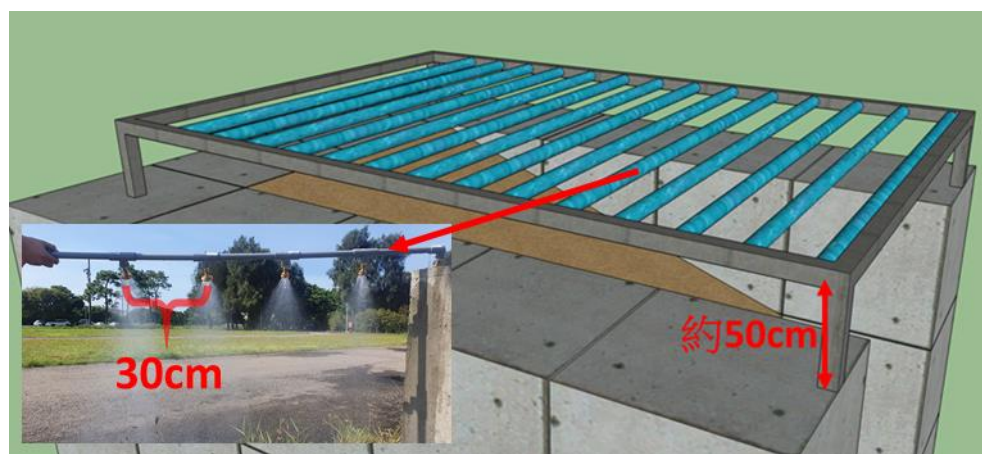


圖 9 降雨模擬裝置示意圖



圖 10 架設完成後現場灑水測試

2.5 大尺寸邊坡降雨模擬破壞試驗

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。在降雨模擬開始前，為避免人工降雨量大時，造成大量逕流水沖刷邊坡表面，較難達到預期的破壞，便於邊坡表面以長草覆蓋，模擬在有植生保護之邊坡情境(圖 11)。降雨部分，先將噴灑量調整為最大，並持續 1 小時時間，一來為了測試此降雨模擬裝置可產生之最大降雨量，二來使邊坡破壞速度加速，即可由監測所得成果進行分析比對，試驗過程以錄影及拍照方式記錄，圖 12 左為降雨模擬開始，右為降雨 1 小時後情形。



圖 11 邊坡整體配置完成結果



圖 12 邊坡模擬降雨開始與結束

在降雨結束後靜置一段時間後，肉眼觀察表面整體並無明顯變化，但再翻開覆蓋草皮後，可明顯看到許多張力裂縫以及沉陷的跡象(圖 13)，裂縫大小與沉陷量大約為 4-6cm，其結果顯示降雨已對此邊坡有潛在的破壞發生。



圖 13 草皮下方裂縫發展情形三 邊坡穩定模擬與數值分析

本研究進行大尺寸邊坡穩定模型示意圖如圖 14 所示，並以此進行邊坡穩定分析。

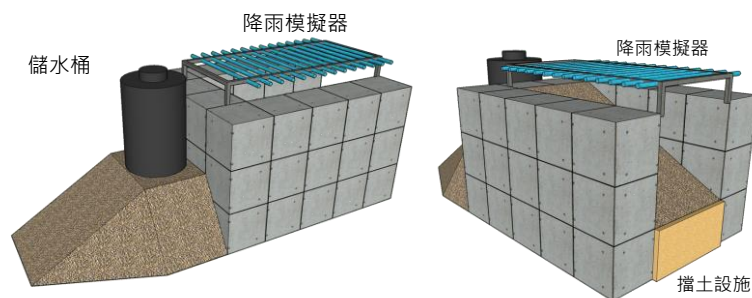


圖 14 大尺寸邊坡模型示意圖

三、研究成果

3.1 邊坡穩定模擬方式

由於近年來邊坡災害層出不窮，所以在邊坡開發前，應審慎評估邊坡安全性，故邊坡穩定分析是不可或缺的過程。一般工程界分析邊坡穩定問題，大致可分為極限平衡法與數值分析法，極限平衡法為土壤在極限狀態下計算力或力矩之平衡方法，與土壤組合律無關；另外則為採用土壤應力-應變關係之數值分析方法，如有限元素法、有限差分法等。

以極限平衡方法評估邊坡穩定已有相當多年的歷史，其主要假設為所考慮的可能滑動土體範圍內均達極限塑性狀態，以尋求力、力矩或能量之平衡。極限平衡方法之所以能為工程界所接受並加以使用，主要是其簡易且可得到不錯之結果。但該法無法確切反應邊坡之行為，除非邊坡已接近臨界狀態，即安全係數接近或甚至小於 1.0。隨著數值分析方法之演進及計算能力之提昇，極限平衡方法之有效性逐漸受到存疑。實務工程設計常使用極限平衡法，因可快速求得安全係數與可能滑動面。而安全係數一般可由力平衡或力矩平衡求得，但由於極限平衡法假設沿邊坡滑動面上的每一點均同時達到極限狀態，即滑動面上每一點安全係數均相同，與實際邊坡破壞並不相符。其所假設與分析之適用性均有不盡合理的地方，因此，極限平衡法在使用上有其限制。

本案採用 GeoStudio 套裝軟體中之 SLOPE/W 模組進行邊坡穩定分析。GeoStudio 由加拿大 Calgary 大學研發，經過數十年時間，已成為國際間廣為採用之的邊坡穩定性分析軟體，適合於分析模擬土壤、岩石等大地材料的力學行為。SLOPE/W 模組主要運用極限平衡理論，針對不同土壤類型、複雜地層和各種滑動面形狀的邊坡，孔隙水壓力分布狀況進行建構模式分析。分析方法包括 Morgenstern-Price、GLE、Spencer、Bishop、Ordinary、Janbu、Sarma、Corps of Engineering、Lowe-Karafiath 等分析方法。土壤強度破壞準則包含莫耳庫倫(Mohr-Coulomb)模式、雙線性(Bilinear)模式、不排水(Undrained)模式、非等向性(Anisotropic)模式、Hoek and Brown 模式等。孔隙水壓力模型包括 R_u 係數、壓力線、等壓力線、水力梯度值、透過有限元素計算的壓力和壓力水頭。滑動面分析可透過同心圓和半徑線、滑移面前端的塊體或全部指定的形狀定義搜尋可能滑移面；針對各種土體特性和承載條件的分布函數來進行隨機近似分析。

針對本案，SLOPE/W 模組使用於邊坡穩定分析時，可達到之目的為針對岩盤上覆蓋軟弱土層在坡頂有張力裂縫，複合式滑動面等各種情況下，可使用 Spencer、Ordinary、Bishop、Janbu 及 Morgenstern-Price 等切片法分析邊坡穩定的安全係數。另外對於邊坡穩定治理方法中，適用於有外力荷重，地錨、土工織物補強及坡趾穩定工等情況的邊坡進行穩定分析。

3.2 邊坡變形模擬

有限元素法基於連體力學原理，滿足力平衡及變形之連續性，並且可依據不同材料組合律及破壞準則，適當模擬材料受力與變形行為。由於大地材料有非均質、異向性及與應力歷史相關等特性，提高邊坡穩定分析之難度。極限平衡法常忽略或無法考慮上述特性，而有限元素法則能考慮土壤之應力-應變行為，並對於土壤之應力歷史與非均質性都能適當模擬，故有限元素法能更深入探討邊坡實際力學與變形行為。土壤之應力-應變關係為有限元素分析中重要的一環，如何選擇一個合適的土壤應力應變關係，以達到既簡易又能適切反應土壤力學行為是相當重要，至於選用何種模式通常依分析情況與分析目的不同而有所改變。雖然採用較複雜的應力應變關係來模擬土壤行為，應該可得到較為合理的結果，但有時以較簡易的組合律也可能得到可接受的結果。

本計畫地層變形模擬採用有限元素數值模擬程式 PLAXIS 進行二維模型建置，PLAXIS 於 1987 年在荷蘭公共工程與水源管理部的推動下，由 Delft 科技大學完成初步的成果。此後由於程式不斷的發展並逐漸受到重視，因此於 1993 年成立一家名為 Plaxisbv 的公司，作進一步的研發與改良。本計畫所使用的版本為 Plaxis 9.0，此版本除了增加原程式之操作功能外，更增加許多功能，使程式之使用範圍更為廣泛。使用有限元素法求取滑動面安全係數，一般採用強度折減法，其定義首先由 Zienkiewicz 等人 (1975) 提出，剪力強度折減之觀念為逐步折減剪力強度參數，使邊坡地層材料抗剪強度無法承受自重，產生大變形之臨界狀態。

3.3 概念模型

依據前述，數值模擬概念剖面如圖 15 所示，推估可能之材料參數如表 1，以此進行模擬並以觀測到之地層變形回饋至模型。

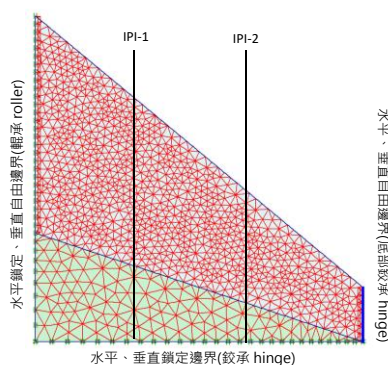


圖 15 數值模擬模型 AA'剖面圖

表 1 PLAXIS 數值模擬採用材料參數表

參數 \ 地層	土壤層	岩盤層
濕單位重 γ_{unsat} (kN/m ³)	17.0	22.0
飽和單位重 γ_{sat} (kN/m ³)	17.0	22.0
凝聚力 C (kPa)	0.1**	1000*
摩擦角 ϕ (°)	26	40*
膨脹角 ψ (°)	0	0
柏松比 ν	0.35*	0.18*
彈性模數 E(kN/m ²)	6300	10000

*為假設值 **為假設過程排水

3.4 模擬結果

1. 全區最大水平變位 14.5mm，發生在坡頂處，如圖 16 所示。

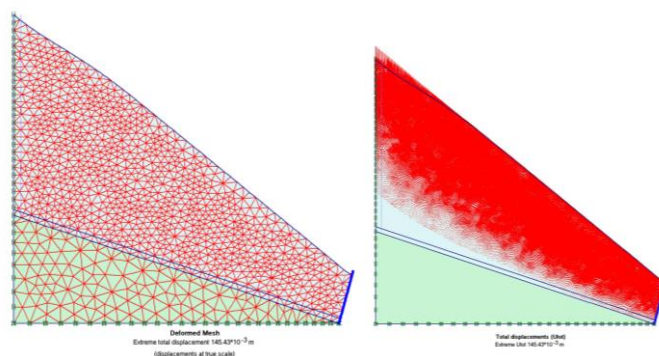


圖 16 有限元素法之水平變位分佈圖

2. 破壞點分佈圖(圖 17)，可看出表面大多發生張力裂縫，與實際觀察大之現象符合，如圖 18 所示。

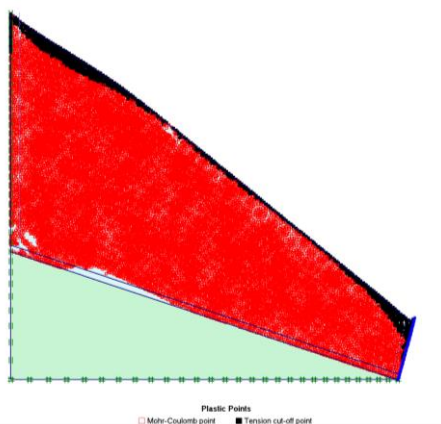


圖 17 有限元素法破壞點分佈圖



(a)坡面張力裂縫



(b)坡面張力裂縫



(c)坡頂張力裂縫



(d)坡面張力裂縫

圖 18 坡面張力裂縫照片

四、結論與建議

前期計畫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。

參考文獻

1. 中華民國大地工程學會，2017。山坡地監測準則 (TGS-SLOPEM106)。
2. 內政部建築研究所，(2018)，「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」。
3. 行政院農業委員會水土保持局，(2014)，「103年寶山潛在大規模崩塌地區調查監測系統維運與擴充計畫」。
4. 行政院農業委員會水土保持局，(2018)，「長距離低功耗廣域網路連結物聯網於監測資料傳遞應用上最佳化配置研發」。
5. Hoults, N.A., Bennet, P.J., Stoianov, I., Maksimović, C., Middleton, C.R., Graham, N.J.G. and Soga, K. (2009) : “Wireless Sensor Networks: creating ‘Smart Infrastructure’,” Proceedings of ICE, Civil Engineering, Vol. 162, August 2009, pp. 136–143
6. Hughes, J., Yan, J., Soga, K (2015): “Development of wireless sensor network using bluetooth low energy (BLE) for construction noise monitoring,” International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, Vol.8, No. 2, pp.1379-1405
7. Nawarz, S., Xu, X., Rodenas-Herr'aiz, D., Fidler, P., Soga, K. and Mascolo, C. (2016) : “Monitoring A Large Construction Site Using Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the 6th ACM Workshop on Real World Wireless Sensor Networks, pp. 27-30