



降雨條件下以數值方法比較接觸式與非接觸式變位資訊探討大規模崩塌預警門檻值

Study on early warning thresholds of the large-scale landslide by comparing contact and non-contact displacements using the numerical method under rainfall conditions

(成果報告書)

執行單位：國立中興大學

執行期間：112年02月08日至112年12月31日

計畫主持人：張光宗 教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

目次

目次.....	I
表次.....	II
圖次.....	III
第一章 緒論.....	1
第一節 動機與目的	1
第二節 相關研究	4
第二章 研究方法	13
第一節 光華邊坡模型	15
第二節 數值方法	18
第三節 設計降雨	24
第四節 接觸式、非接觸式變位和預警方法的比較	27
第三章 結果與討論	28
第一節 降雨期間邊坡安全係數變化	28
第二節 不同預警方法應用於光華崩塌地	32
第四章 結論.....	40
第五章 建議.....	41
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-1
附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-2
附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄-3

表次

表 1 PLAXIS 材料與水力參數	17
表 2 初始 EDEM 微觀參數	22
表 3 區域性 24 小時降雨延時設計雨型分布	25



圖次

圖 1 由位移計算邊坡的應變	8
圖 2 材料的潛變行為	9
圖 3 大規模崩塌發生潛勢和應變速率與應變的關係	11
圖 4 杉井法.....	12
圖 5 基於警戒正切角的四級多重警報標準	12
圖 6 研究流程.....	14
圖 7 光華地區.....	17
圖 8 Hertz-Mindlin (no slip) 兩顆粒球型接觸模型的示意圖	19
圖 9 Hertz-Mindlin with bonding 模型示意圖	20
圖 10 擬合有限元素與分離元素簡單直剪力學試驗	22
圖 11 光華邊坡 EDEM 模型	23
圖 12 台灣北部地區長延時雨型均一區	26
圖 13 設計降雨 (雨型為北三區；重現期距為 100 年；降雨延時為 24 小時)	26
圖 14 光華監測儀器配置圖	27
圖 15 降雨影響下邊坡安全係數變化	29
圖 16 光華邊坡常時地下水分布	30
圖 17 光華邊坡常時地下水分布狀態時的安全係數及其滑動面	31
圖 18 降雨條件影響下光華邊坡安全係數變化	32
圖 19 滑動體長度、滑動方向與傾角	33
圖 20 探討點位.....	34
圖 21 崩塌前坡頂局部點的位移較坡趾局部點大	35
圖 22 崩塌後局部點移動情形	35
圖 23 K21-G1、K21-G2 和坡面點位平均的比較	36

圖 24 利用 K21-G2 探討杉井法和 Xu 提出之警戒正切角法	36
圖 25 光華地表伸縮計變位資料應用杉井法	38
圖 26 光華 GPS 變位資料應用杉井法	38
圖 27 不同弱面方位邊坡變形區應變 (弱面間距均為 9mm).....	39
圖 28 比較 7 日內與 1 日內平均應變速率曲線變化 (藍線為 7 日內， 黃線為 1 日內).....	39



第一章 緒論

第一節 動機與目的

台灣的邊坡地形陡峭且常常可以在岩體中發現地質弱面，岩坡坡面的岩屑層或土層遇豪雨或地震等促崩因子影響後常有土石流或崩塌的發生，邊坡深處岩體受促崩因子影響後也有破壞的可能性，可能造成地滑或甚至大規模深層崩塌，其中這幾十年來多起大規模崩塌案例，由於其產生的崩塌量體較大且運移速度較快已造成很大的危害與多人死傷，若能對大規模崩塌發生的可能性或時間加以預測，將能減低山坡地居住或活動的風險。

大規模崩塌泛指面積大於 10 萬平方公尺、崩塌深度在 10 公尺以上或崩塌體積超過 10 萬立方公尺之崩塌地。大規模坡地崩塌可為大面積大範圍但較淺層的崩塌，通常為岩屑層的淺層崩塌，例如九九峰在集集地震時有大面積的淺層崩塌；或如大規模崩塌潛勢地區屏東縣-霧臺鄉-T002(阿禮)，區域內滑動面積較大但較淺層，該地區分為多個子區塊的淺層滑動。另一種狀況為較深層的崩塌，滑動面通常位於邊坡深處與岩體的破壞行為有關，例如九份二山崩塌、廬山邊坡滑動；或如大規模崩塌潛勢地區桃園市-復興區-T002(光華)，光華的主要滑動區可看出明顯的坡頂崩崖與坡腹隆起的情況。另外還有受坡趾淺層崩塌影響而可能進一步造成更大規模崩塌者如新竹縣-尖石鄉-

T001(秀巒)，坡趾受蝕溝向源侵蝕作用崩塌，造成邊坡上方岩屑層穩定性降低再度崩落，使得崩塌面積擴大。

地質弱面因為位態、延續性、粗糙度與強度等不同而對岩坡造成不同的影響。較深層的大規模崩塌破壞面易發生於弱面延續性較良好的岩體，如中央山脈變質岩層常見延續性良好的葉理面，西部麓山帶的沉積岩層則常見延續性良好的層面，所以可發現已發生崩塌的案例如九份二山、草嶺、小林村、國道三號邊坡，或已有滑動現象但尚未完全崩塌者如梨山、廬山、霧社水庫邊坡、光華邊坡等均屬於上述兩種岩層之一。然而，曾經有滑動跡象的邊坡不一定代表有立即的危險，邊坡局部的滑動後可能進入一個穩定期，例如板岩的劈理發達，在板岩邊坡露頭或鑽探岩芯常看到彎折或錯動的劈理，這顯示了這個板岩邊坡在過去的地質歷史中，陸陸續續經歷了變形或滑動，造成了地底下板岩劈理許多的彎折和錯動的現象，但邊坡仍未崩塌。從過去的已崩塌案例或現存的大規模崩塌潛在地中我們發現，大規模崩塌的案例中有些邊坡崩塌發生前並未聽說有明顯的滑動狀況，如九份二山、小林村、國道三號案例，這些是屬於砂頁岩的地層。有些則是幾十年來陸陸續續滑動或邊坡變形但未完全崩塌如梨山、廬山、光華等案例，屬於板岩層或硬頁岩層，有各自的邊坡滑移歷史。沉積岩層的順向坡滑動，滑動面通常一大部分沿著弱面或不同材料的界面，如砂岩和頁

岩的界面，且沉積岩層較變質岩層材料強度弱，破壞時候的剪應變較小，當沿著弱面產生一些剪應變，地表面尚未產生大量的位移即完全崩塌。板岩劈理面通常較陡，常出現斜交坡和逆向坡的情況，材料強度也較強，邊坡滑動面沿著弱面的比例較小，所以完全崩塌前坡體可承受較大量的應變。

目前水土保持局利用接觸式與非接觸式監測儀器來監視的大規模崩塌潛勢地區的狀況，考慮儀器變位警戒值和雨量警戒值來發布警戒資訊。[張光宗 \(2022\)](#) 水保局創新研究計畫—應用大規模崩塌潛勢與漸進破壞程度，研究成果發現具不同弱面位態的邊坡其崩塌前可承受的累積應變量不同，弱面低傾角的順向坡的可累積應變量最小，這類邊坡若有滑動跡象或不穩定，發生崩塌的機率較高，而弱面高傾角的逆向坡其崩塌前可承受的累積應變量則較大。邊坡的局部地表、地中或較廣域的 InSAR 監測到滑動跡象不一定代表有立即的危險，此外局部破壞往往造成儀器的讀值變動過大，常有誤判立即危險性的可能；較廣域的 InSAR 分析也不能即時得到變位資訊，因此立即危險的警訊究竟該何時發布是一項重大的課題。

對於邊坡崩塌預警的研究大致可分為現場監測數據研究、實驗室力學試驗以及數值方法模擬，對於已發生崩塌案例的現場監測數據往往不夠，所以較難利用過往的經驗訂出合理的預警值；實驗室力學試

驗雖然通常可以表現出實際的邊坡運動行為，但是由於尺度問題以及需要適度的簡化，較難反映出實際的情況以供了解，如邊坡微地形等；數值方法的好處在於可以較易建立出實際邊坡的模型進行分析，若給定合理的參數，邊坡的運動行為也會類似實際邊坡情況。

本研究以光華邊坡為例，利用數值方法來探討光華邊坡在降雨事件下的安全係數變化，並使材料局部變位，逐步折減數值參數使材料變位加大，直到材料承受不住滑出。數值方法中模擬接觸式儀器於實際中的分布狀況，監測地表或地中變位，也模擬非接觸式（如 InSAR）觀測坡面範圍的地表變位，可探討接觸式與非接觸式變位的差異。進一步利用本研究成果來比較不同的預警方法的差異，如杉井法和 Xu 提出之警戒正切角（ α ）法等，成果可針對光華大規模崩塌潛在地監測與警戒發布提供資訊。

第二節 相關研究

2.1 數值方法

數值方法大致上可分為連續體方法與不連續體方法，連續體方法如有限元素法、邊界元素法及有限差分法等具有接觸單元或滑動邊界的方法，各自發展出各式各樣的本構模型(Constitutive model)來模擬自然邊坡材料具有的非均質性與異向性，如 [Romer and Ferentinou \(2019\)](#) 利用有限元素法軟體 RS2 中擴展有限元法 (XFEM) 來建立不

同弱面間距與延續性的節理網絡，探討節理岩坡的穩定性。[Yeh et al. \(2022\)](#) 利用有限元素軟體 PLAXIS 中的岩體節理異向性模型（類似於 FLAC 中 Ubiquitous model）探討不同弱面位態岩坡的穩定性。不連續體方法如分離元素法，雖然比起分離元素法，有限元素法較容易考慮自然邊坡材料具有的非均質性與異向性，也可以在某種程度上模擬不連續的材料，但也通常受到一些限制，如當單元使用過多相交的接觸邊界時，邏輯可能會崩潰；單元之間也無法自動識別新的接觸邊界；以致於模型的運動方程式只能限制在較小的位移及旋轉條件下。分離元素法 (DEM, Discrete Element Method)，利用顯性積分法求解，是繼有限元素法 (FEM, Finite element method) 之後另一種用於解決物質的系統動力學問題的數值分析方法，善於描述不連續體的力學行為，允許單元之間完全分離並自動識別新的接觸邊界，因此對於模擬邊坡的變形與崩塌行為來說，分離元素法可能較為適合。[莊凱麟 \(2004\)](#) 以 3DEC 配合現地調查的地表與地質特性、降雨資料來模擬邊坡降雨前後的地下水位變化、位移及變形量，其結果表明節理間距越密集處受地下水位上升的影響越明顯，位移及變形量越大。[丁璇 \(2014\)](#) 利用 UDEC 模擬岩坡破壞，包含一組規則節理岩坡之傾倒與順向坡滑動破壞，探討其漸進式破壞過程與力學行為。[Meng et al.](#)

(2018) 利用 PFC 模擬邊坡破壞與崩落之漸變過程，包括破壞發生時出現張力裂縫，以及後續發展成滑動面等過程。

然而，邊坡變形崩塌的觸發因子通常可分為地震或降雨，降雨後雨水入滲到地下，經過不飽和區域到達飽和區域會使地下水位升高。這個過程在不飽和區域使基質吸力下降，飽和區域有效應力下降，都使得地質材料的強度降低，降低邊坡穩定性。許多研究指出延時短降雨強度大易引發淺層崩塌，延時長累積雨量大則易造成深層崩塌 (Aleotti, 2004; Crosta, 2004; Zezere et al., 2005)。降雨造成邊坡破壞的現象在有限元素法中相對容易實現，在過去國內已經有許多相關之研究，如林經捷 (2006) 以有限元素法軟體 PLAXIS 對九份地滑地進行穩定分析，依據監測資料所得結果，針對降雨造成的各種現象例如地下水位上升、砂頁岩浸水軟化等進行數值分析，並比對現地監測數據，期望突顯出降雨的強度與九份地滑地位移的關係。Calvello et al. (2008) 採用數值方法，預測一邊坡因降雨而造成的滑動速率。他們用有限元素法滲流分析，計算降雨時的地下水壓力，並輸入到極限平衡法軟體，計算邊坡的安全係數，並建立安全係數和滑動速率的經驗關係，如此即可由降雨預測沿已存在滑動面的滑動速率。Yeh et al. (2020) 採用三維有限元素數值方法，研究降雨入滲地下水位上升狀況下弱面位態

對邊坡穩定的影響，指出幾種不利的弱面位態，並強調了降雨過程中孔隙水壓力擴散較慢對邊坡的影響，邊坡穩定性的降低會有遲滯現象。

2.2 邊坡變形預警方法

邊坡在長期的地質歷史中由於重力的關係會慢慢變形，尤其豪雨或地震更可能引致邊坡變形甚至崩塌，對於影響邊坡穩定的因子直接監測分析，將有利於邊坡穩定性的評估。一般對於邊坡的現場監測包括：位移、位移速率、雨量、地下水位等，其中位移與位移速率顯示了邊坡不穩定的直接證據。

邊坡變形在地表或地底下會產生位移，當累積位移量或變形達到邊坡可承受限度時，邊坡就會崩塌。邊坡可以承受的位移量受很多因素影響，包括邊坡規模大小、滑動面的深度、長度與形狀、邊坡材料強度等。為了排除邊坡尺寸的影響，可以依下式計算邊坡變形區域的平均應變 (Chigira, 2009)：

$$\bar{\varepsilon} = \frac{d}{L}$$

其中， $\bar{\varepsilon}$ 表示邊坡滑動體的平均應變(即變形區應變)， d 表示坡頂冠部的位移， L 表示滑動體沿坡面方向的長度 (圖 1)。由上式可知要計算現場邊坡的平均應變，需要預估滑動體的長度，而這在邊坡崩塌前並非容易的事。此外 Chigira (2009) 對幾個大規模崩塌事件進行研究，

提到發生崩塌前的應變值範圍為 1% 至 16%。

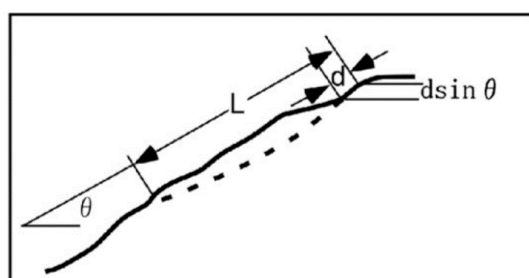


圖 1 由位移計算邊坡的應變 (Chigira, 2009)

地表的位移可能暗示邊坡淺層或深層的滑動，地下深處的位移代表了深層滑動的可能性。一般而言強度小的材料，破壞時的應變較小；強度大的材料，破壞時的應變較大。淺層崩塌的材料通常為崩積表土層，強度較小，所以若邊坡可能發生淺層崩塌，監測到地表的位移即應提高警覺。深層崩塌若非屬崩積層材料，一般屬於岩體其強度較大；對於深層崩塌而言，若只是監測到邊坡地表或地下局部位置發生位移，邊坡立即崩塌的急迫性並不高，但若是位移的位置或範圍變大，則應提高警覺。

岩石破壞與破裂面的傳播有關(fracture propagation)，類似於岩石破壞，深層崩塌若屬岩體材料，崩塌前會經歷滑動面的延伸，邊坡變形的過程可能是相當長的地質時間，當應變量達到邊坡的極限時，崩塌就會發生。然而因為無法看到邊坡的變形剖面，邊坡地下的應變狀況難以掌握，於是我們定義了如上式的應變概念做為邊坡應變程度的

參考。然而即使我們精準的監測到邊坡地表或地下的位移，以上式計算的邊坡應變並無法代表邊坡目前的應變狀態。在邊坡過去的歷史中或多或少已累積了一些應變，以監測到的位移計算的應變為應變增加量。對於邊坡崩塌與否的評估，可參考累積的應變量，累積應變量越大邊坡越可能崩塌，然而要評估邊坡目前的累積應變量是很困難的事。

自然邊坡在重力場下雖然降雨與地震狀況會稍微改變邊坡內的應力狀態，但以邊坡的地質歷史來說，其應力大小可視為固定不隨時間而改變。如同岩石的潛變試驗，在固定的垂直應力下，材料破壞時會有應變速率加快的現象，即圖 2 中的第三期潛變，所以應變速率或位移速率常被用來做為預警的參數之一。

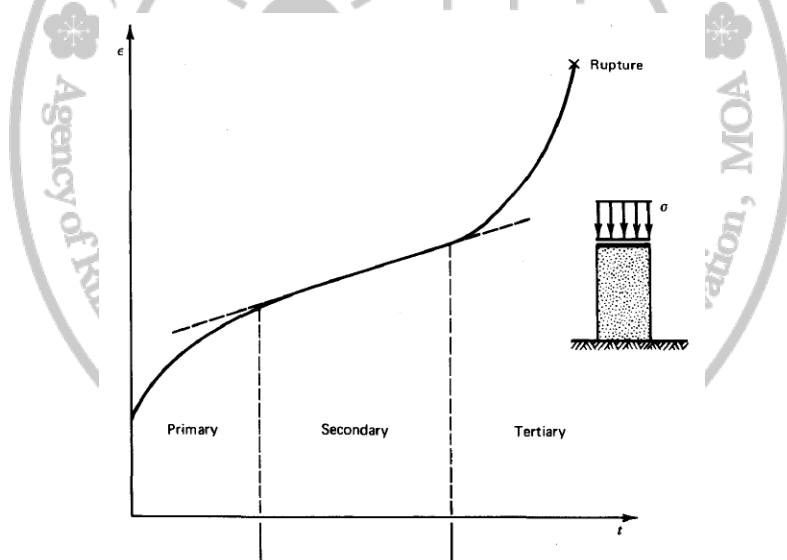


圖 2 材料的潛變行為 (Goodman, 1989)

邊坡崩塌預警方法是許多年來的研究重點，福圓輝旗 (1985) 為

了研究強降雨引起的邊坡破壞過程，設計一些大型的土砂材料邊坡模型，並且對這些模型進行人工降雨直到發生大規模故障。通過設置在模型上的伸縮計監測表面位移，其結果發現了邊坡破壞過程中的運動規律與位移速率的倒數有關；[Jaboyedoff et al. \(2012\)](#) 利用應變速率對應變關係圖應用至幾個不穩定岩坡的變形，邊坡的應變速率越大且累積應變越大，崩塌越可能發生，表明可以用來預警崩塌的發生（[圖 3](#)）；[杉井良平等 \(2017\)](#) 也提出相似的方法，針對過去日本 34 個地滑案例之平均應變與應變速率，調查各崩塌案例中平均應變與應變速率關係之歷時變化，讀取應變與應變速率急速增加點為「加速點」（[圖 4](#)），然後，在 [圖 4](#) 上展繪各崩塌案例所讀取之加速點與瀕臨崩塌前之量測值，分別劃分出瀕臨崩塌前的分布範圍（區域 A）、加速點分布範圍（區域 B）及其他範圍（區域 C）。除此之外，杉井等也針對各崩塌案例，說明以鄰近預測法與移動速度倒數法實施的適用性調查的結果，發現若使用加速點以後之觀測值所得出之破壞預測時間之可信賴度將相對提高。換句話說，確認應變與應變速率之歷時變化，可能可以評估地滑目前潛變階段是否為鄰近預測法與移動速度倒數法量測之信賴度較高階段。[Xu et al. \(2020\)](#) 提出基於應變速率與平均應變速率的比值來計算警戒正切角 (α)，並表明已對 14 處黃土邊坡崩塌成功地預警。此外將 α 分為四個階段， α 約等於 45° 時須注意； $\alpha > 45^\circ$ 時邊

坡變形進入初始加速階段； $\alpha > 80^\circ$ 時邊坡進入加速變形階段； $\alpha > 85^\circ$ 時邊坡進入高速加速階段，即將崩塌（圖 5）。

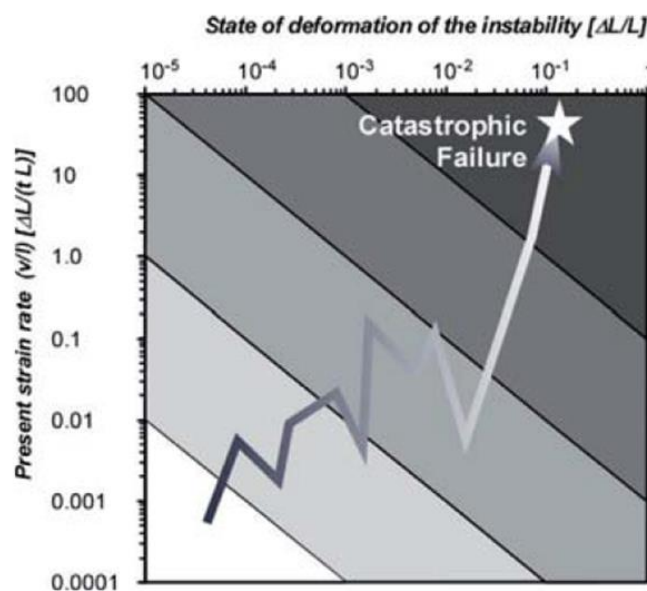
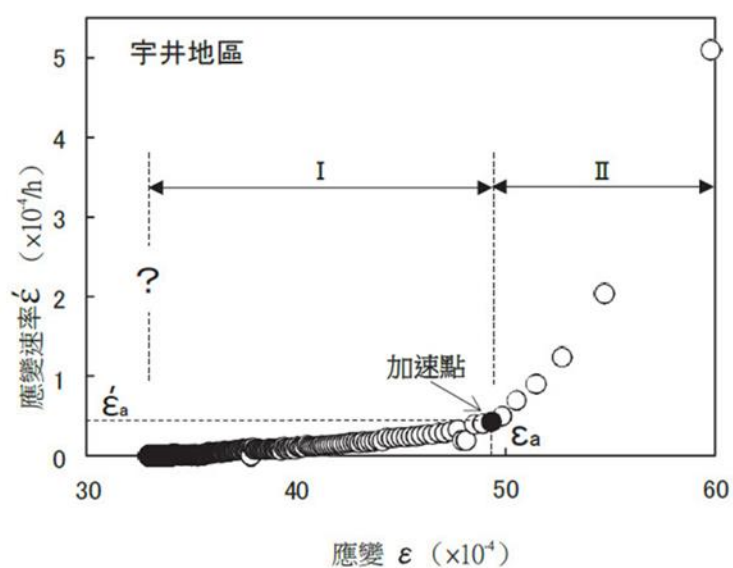
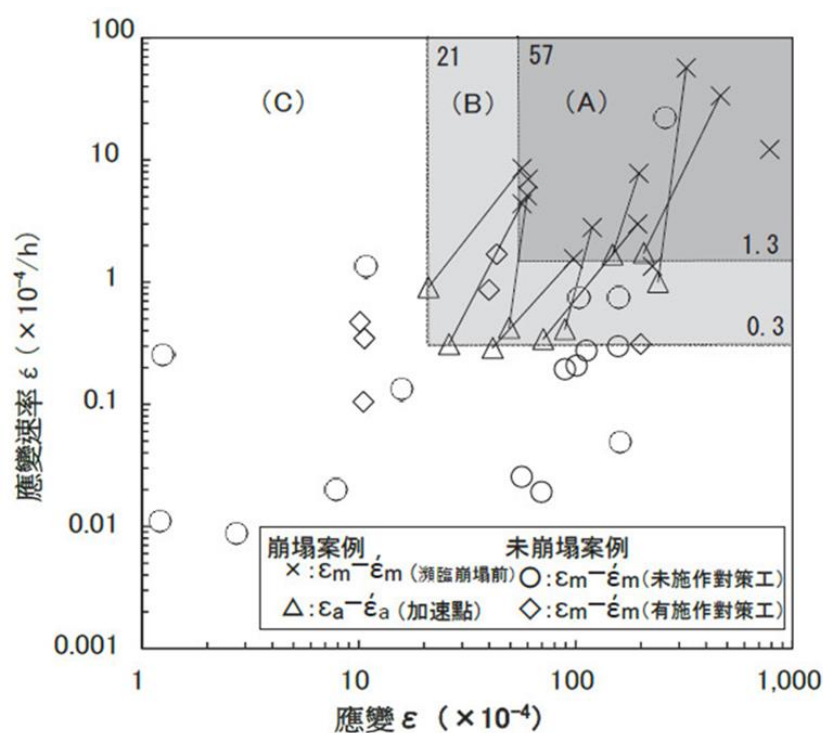


圖 3 大規模崩塌發生潛勢和應變速率與應變的關係（深色區域代表崩塌潛勢大的區域）(Jaboyedoff et al., 2012)



(a)



(b)

圖 4 杉井法 (a) 加速點讀取方式之一例 (b) 平均應變與應變速之關係 (實線: 連結相同案例之加速點與瀕臨崩塌前量測值的線; 虛線: 加速點與瀕臨崩塌前之臨界值)

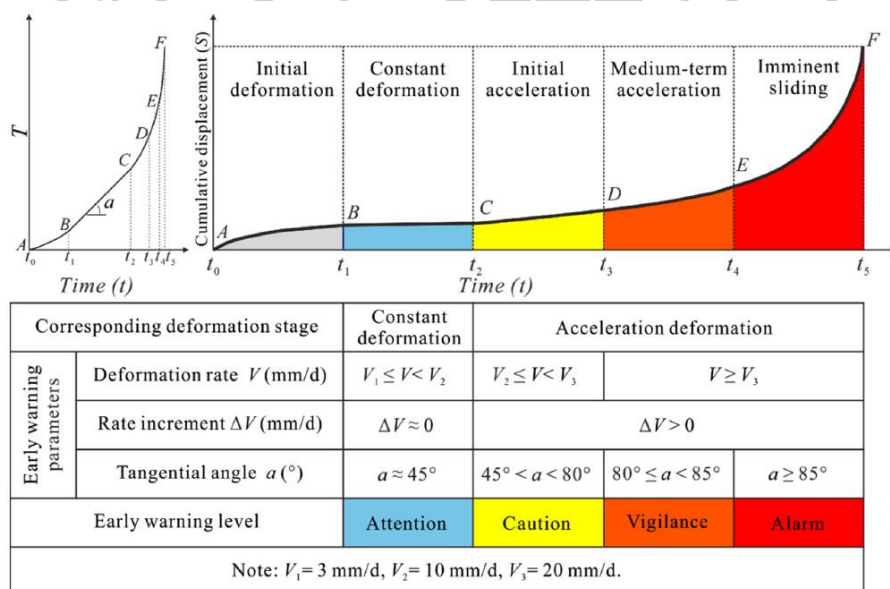


圖 5 基於警戒正切角的四級多重警報標準 (Xu et al., 2020)

第二章 研究方法

本研究以光華邊坡為例，首先利用有限元素法軟體 PLAXIS 建立光華邊坡模型，考慮現地岩體材料參數，利用常時地下水位計算邊坡常時安全係數，然後將有限元素法中的整體材料強度與分離元素法中的微觀參數利用數值力學試驗擬合，得到初始微觀參數。接著考慮 2021 年彩雲颱風降雨事件和設計降雨，找到安全係數為 1 的情況，利用數值力學試驗擬合得到 FS=1 時的微觀參數及其折減方式。然後利用分離元素法軟體 EDEM 進行材料變位模擬，微觀參數折減至邊坡材料承受不住崩塌滑出，藉此探討邊坡的局部或廣域平均變位情形。

分離元素法中模擬接觸式儀器於實際中的分布狀況，監測地表或地中變位，也模擬非接觸式（如 InSAR）觀測坡面範圍的地表變位，可探討接觸式與非接觸式變位的差異。進一步利用本研究成果來比較不同的預警方法的差異，如杉井法和 Xu 提出之警戒正切角 (α) 法等，成果可針對光華大規模崩塌潛在地監測與警戒發布提供資訊。研究流程如圖 6 所示。

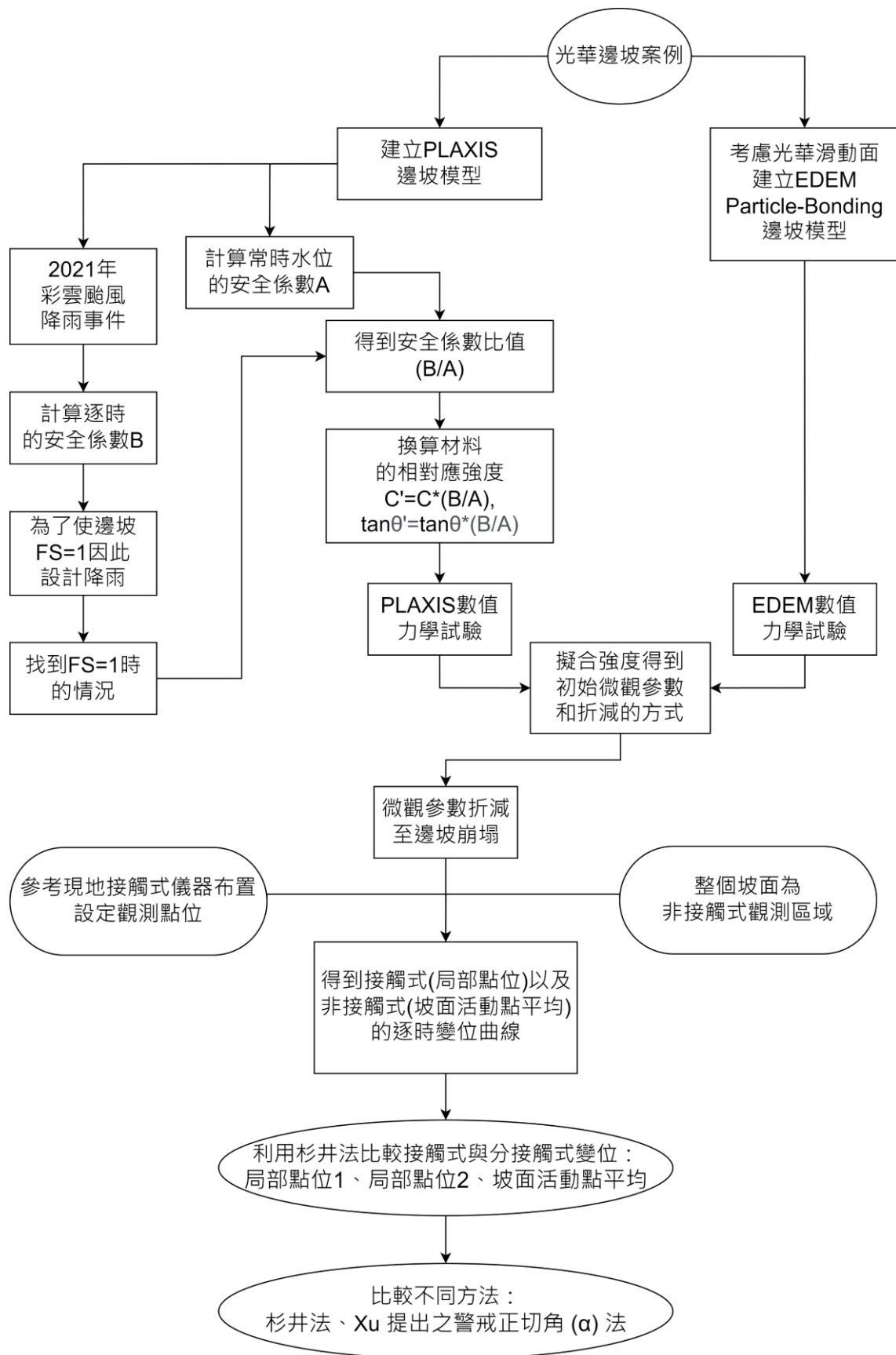
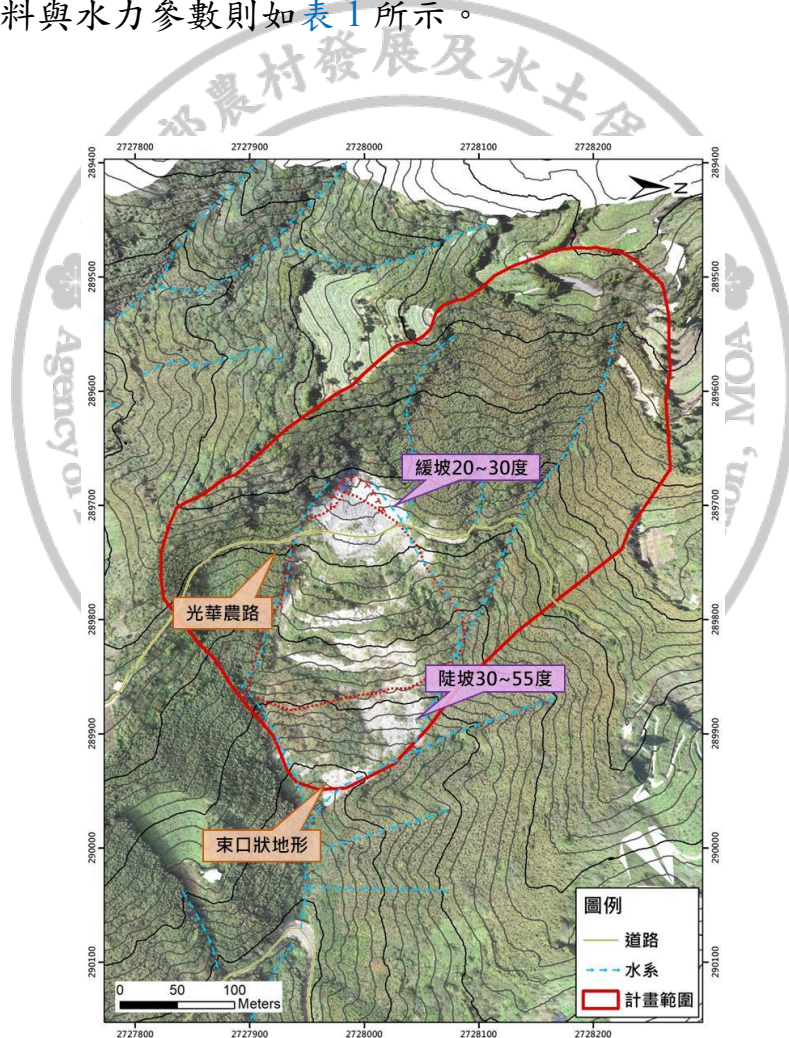


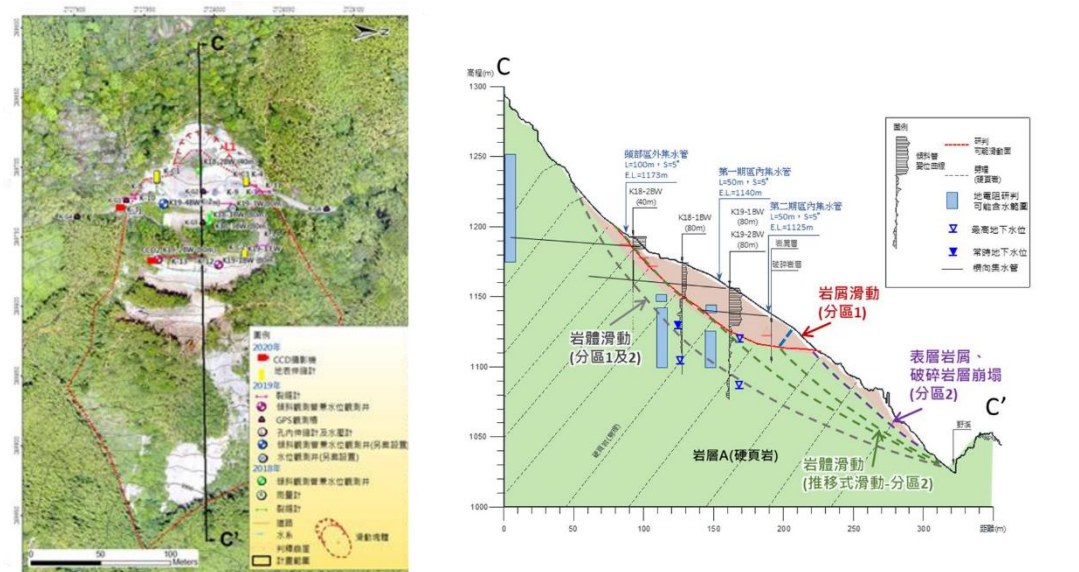
圖 6 研究流程

第一節 光華邊坡模型

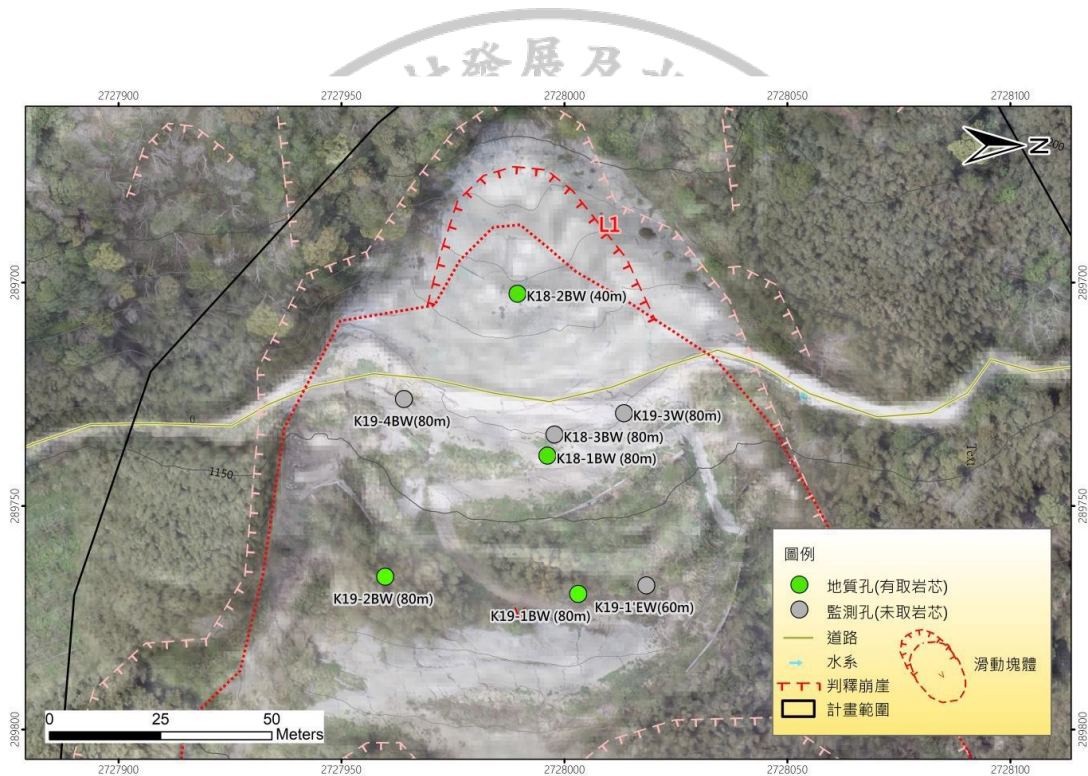
參考彭逸蘋 (2022) 與水土保持局 (2023) 111~112 年度雪霧鬧、光華、義興及上巴陵等地區潛在大規模崩塌調查監測計畫利用光華地形、地質與地下水觀測井來建立具有滑動面的三維數值邊坡模型 (圖 7)，本研究設定的水力條件如圖 7d 所示，坡體內依據現場地下水位觀測井設定常時水頭控制，模型四周設定水力邊界條件，其中 PLAXIS 中 Close 表示地下水無法進出該邊界，Open 表示地下水可以進出該邊界，材料與水力參數則如表 1 所示。



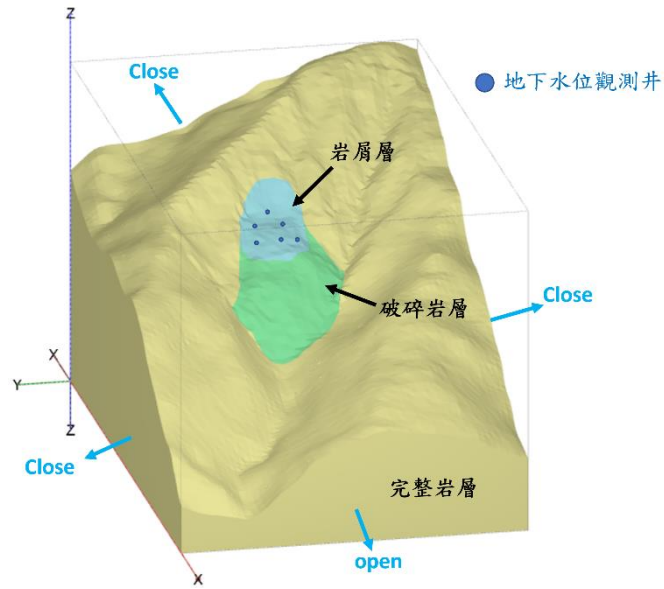
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 7 光華地區 (a) 主要滑動區位置 (b) 剖面位置與剖面圖 (c) 地下水觀測井分布 (d) 本研究數值邊坡模型 (水土保持局 109~110 年度雪霧關及光華地區潛在大規模崩塌調查監測計畫)

表 1 PLAXIS 材料與水力參數 (修改自彭逸蘋, 2022)

	單位	岩屑層	破碎岩層	完整岩層
組成律模式		Mohr Coulomb		Linear elasticity
孔隙率		0.3	0.3	0.3
單位重	kN/m ³	20.1	26.5	26.5
凝聚力	kPa	60	85.7	
摩擦角	°	30	27	
柏松比		0.3	0.3	0.3
楊氏模數	kPa	7x10 ³	1.2x10 ⁶	6.9x10 ⁶
飽和滲透係數	m/s	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴

第二節 數值方法

PLAXIS 岩土有限元素計算軟體，可應用於大地工程相關之應力應變、穩定性、滲流等分析。此外能依據岩土體的非線性、時間相關性、各向異性及流-固相互作用等複雜特性進行考慮。在很多工程中需類比土體本身的力學行為、三維空間中的結構以及土和結構之間的相互作用，而 PLAXIS 能很好地解決上述問題。本研究建立光華邊坡模型，首先進行塑性計算 (Plastic)，設定常時水位並計算常時水位下的安全係數 $FS_{initial}$ ，接著設定降雨進行降雨滲流位移耦合計算分析 (Fully coupled flow-deformation)，再利用強度折減法計算安全係數 FS' ，如圖 6 研究流程，得到安全係數的比值 B/A，可換算材料的相對應強度 (c' , $\tan \phi'$)，如下式：

$$c' = c_{initial} \times \frac{FS'}{FS_{initial}}$$
$$\tan \phi' = \tan \phi_{initial} \times \frac{FS'}{FS_{initial}}$$

EDEM 於 2006 年由 DEM Solutions Ltd. 發展並推出，用來模擬和分析顆粒系統、顆粒處理流程、和顆粒相關生產或研發等等。此外 EDEM 已被全球 300 多家學術機構用於研究當中。EDEM 模擬運算的四大要素包括 Particle、Contact、Equipment、Factory，可以用來模擬和分析顆粒行為，並為顆粒、流體和機械力學提供一個整合的平臺。EDEM 除了可以建立球形的固體顆粒，也可以匯入真實顆粒的 CAD

模型來準確描述它們的形狀，並通過添加力學性質、材料特性等等來迅速建立一個參數化的模型，並進行有關顆粒系統的分析。此外，EDEM 內部強大的顆粒接觸模型，使得 EDEM 能廣泛處理各個尺度與不同黏滯程度顆粒性質，接觸模型的物理碰撞或能量損耗行為發生於顆粒間以及顆粒與機械幾何之間。Hertz-Mindlin (no slip) 模型為 EDEM 接觸模型中的基本型，是基於 Hertz 接觸理論以及 Mindlin-Deresiewicz 的研究 (Hertz, 1882; Mindlin, 1949; Mindlin and Deresiewicz, 1953)，分別定義出法向力與切向力的部分，法向力和切向力都具有阻尼分量且其中阻尼係數與恢復係數有關，此外，切向摩擦力遵循庫倫摩擦定律，而滾動摩擦被視為有方向性的定轉矩模型，與接觸無關，其粒子接觸模型的示意圖如圖 8 所示，而 Hertz-Mindlin (no slip) 模型所使用的函式被詳細定義在 EDEM 的理論手冊 (DEM Solutions Ltd., 2014)。

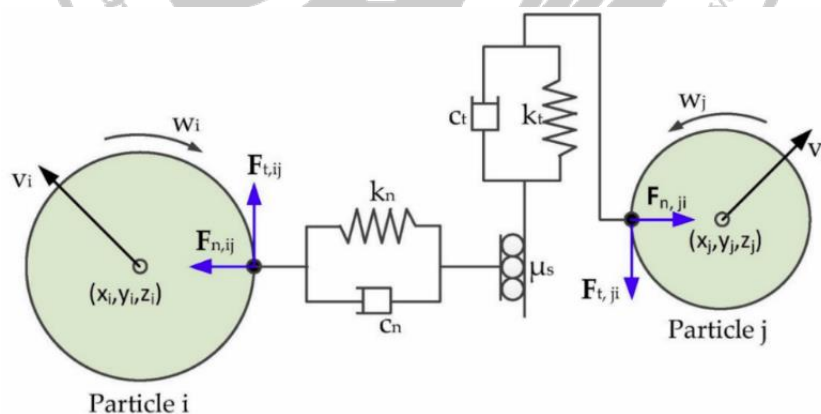


圖 8 Hertz-Mindlin (no slip) 兩顆粒球型接觸模型的示意圖 (Li et al., 2017)

由於大規模崩塌的破壞模式往往與邊坡岩體的破碎、斷裂等狀況有關，因此本研究選用 Hertz-Mindlin with bonding 模型來進行 EDEM 的建模。當兩顆粒子間具有 Bonding 可用於抵抗切向和法向運動，直到所設定的最大法向應力和最大切向應力為止，這時 Bonding 被打斷，然後粒子作為剛體進行運動，Potyondy and Cundall (2004) 提到此模型在混凝土和岩石結構中特別有用，示意圖如圖 9。

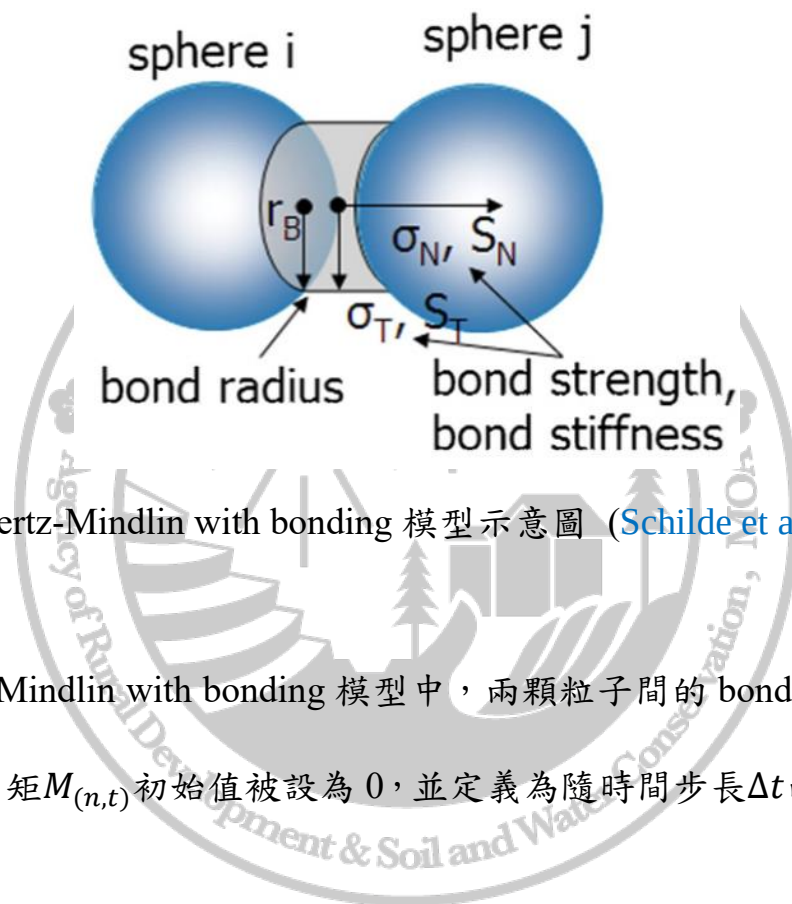


圖 9 Hertz-Mindlin with bonding 模型示意圖 (Schilde et al., 2014)

在 Hertz-Mindlin with bonding 模型中，兩顆粒子間的 bonding 作用力 $F_{(n,t)}$ 和力矩 $M_{(n,t)}$ 初始值被設為 0，並定義為隨時間步長 Δt 而改變，如下式：

$$\Delta F_n = -v_n S_n A \Delta t$$

$$\Delta F_t = -v_t S_t A \Delta t$$

$$\Delta M_n = -\omega_n S_t J \Delta t$$

$$\Delta M_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \Delta t$$

其中 v_n 、 v_t 分別為法向速度與切向速度， ω_n 、 ω_t 分別為法向速度與切向速度 (圖 8)， S_n 、 S_t 分別為 bond 的法向勁度與切向勁度 (圖 9)， A 為 bond 的橫截面積， J 為極慣性矩，分別表示如下式：

$$A = \pi r_B^2$$

$$J = \frac{1}{2} \pi r_B^4$$

然後設定當法向應力或切向應力達到預定義的值時 bond 會斷裂，預定義的值可被定義如下式：

$$\sigma_{n,max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J} r_B$$

$$\sigma_{t,max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{2M_n}{J} r_B$$

另外，如圖 9 所示，此 Hertz-Mindlin with bonding 模型是基於 Hertz-Mindlin 基本型的擴展，為了讓兩顆粒子間在沒有物理接觸時才產生 bonding 作用力，因此應該設定 bond 的接觸半徑大於粒子的半徑。

強度擬合方面則利用 PLAXIS 有限元素法的力學試驗與 EDEM 的分離元素力學試驗進行擬合，使兩種方法的強度參數可以相對應，數值力學試驗可參考 Asadzadeh and Soroush (2016) 進行簡單直剪試驗 (Simple Shear Test) 等，由於 PLAXIS 中已計算材料的相對應強度 (c' , $\tan \phi'$)，利用此方法可以得到 EDEM 微觀參數。以常時地下水位的初始邊坡狀態為例，利用表 1 的材料與水力參數，擬合結果如圖 10 所示並得到初始的 EDEM 微觀參數(表 2)，其中。

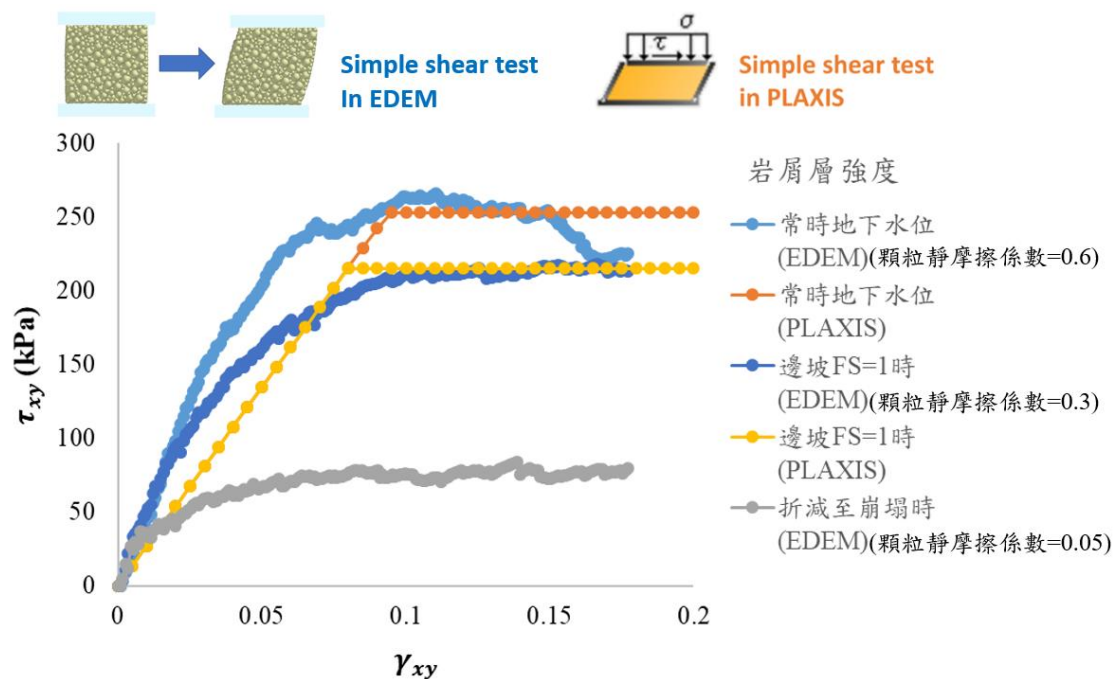


圖 10 擬合有限元素與分離元素簡單直剪力學試驗

表 2 初始 EDEM 微觀參數

岩屑層		破碎岩層	
球型顆粒直徑 (m)	4~12	球型顆粒直徑 (m)	4~12
孔隙率	0.3	孔隙率	0.3
顆粒密度 (kg/m ³)	2010	顆粒密度 (kg/m ³)	2650
顆粒有效楊氏模數 (kPa)	3.5×10^9	顆粒有效楊氏模數 (kPa)	3.5×10^9
柏松比	0.3	柏松比	0.3
顆粒恢復係數	0.5	顆粒恢復係數	0.5
顆粒靜摩擦係數	0.6	顆粒靜摩擦係數	0.5
顆粒滾動摩擦係數	0.025	顆粒滾動摩擦係數	0.025
鍵結法向勁度 (N/m ³)	4.4×10^8	鍵結法向勁度 (N/m ³)	4.4×10^8
鍵結切向勁度 (N/m ³)	3.1×10^8	鍵結切向勁度 (N/m ³)	3.1×10^8
鍵結法向強度 (Pa)	2×10^6	鍵結法向強度 (Pa)	2×10^7
鍵結切向強度 (Pa)	1×10^6	鍵結切向強度 (Pa)	1×10^7
完整岩層			
牆密度 (kg/m ³)	2650	牆恢復係數	0.5
牆有效楊氏模數 (kPa)	6.9×10^9	牆靜摩擦係數	0.6
		牆滾動摩擦係數	0.025

分離元素法的優勢在於材料可以大變形，而有限元素法則不行。

參考張光宗 (2021) 利用分離元素法軟體 EDEM 建立具有滑動面的廬山北坡模型來模擬邊坡崩塌滑落，本研究建立光華的 EDEM 邊坡模型用於後續的變位分析，如圖 11 所示，初始微觀參數如表 2 所示。

考慮光華崩塌地滑動面尚未切穿坡趾，加上本研究旨在比較接觸式、非接觸式變位資訊和不同預警方法的差異，故簡化僅透過折減岩屑層微觀參數來使邊坡崩塌，這裡必須說明的是，實際上坡趾破碎岩層仍有受剪斷裂導致邊坡崩塌滑出的可能性，本研究的設定僅能代表一種崩塌的可能性。另外微觀參數的折減僅針對岩屑層顆粒靜摩擦係數和完整岩層的牆靜摩擦係數，同步折減，然後固定其他微觀參數 (圖 10)。

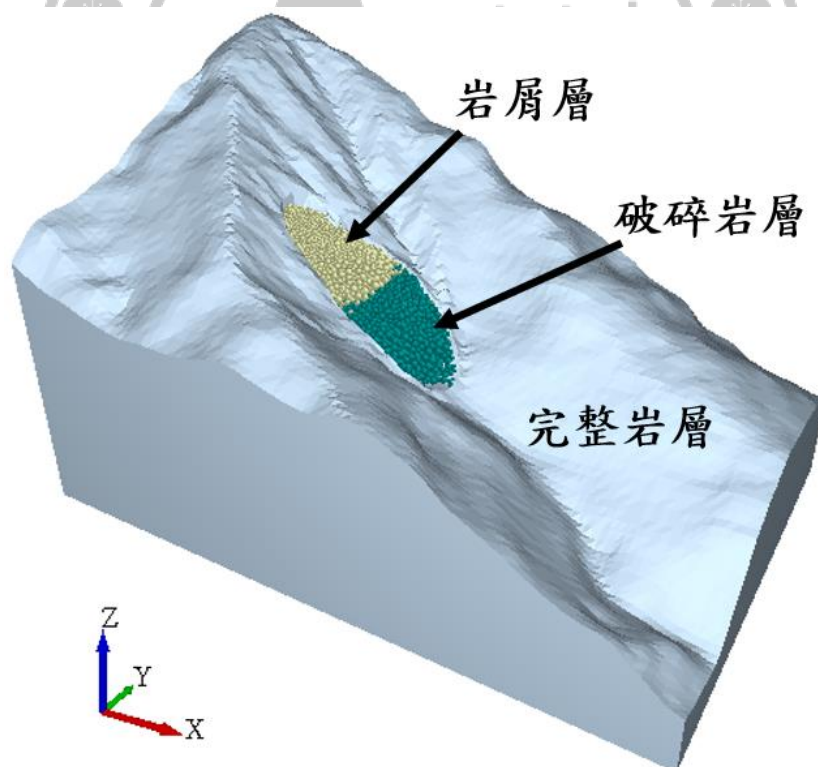


圖 11 光華邊坡 EDEM 模型

第三節 設計降雨

本研究期望了解降雨事件對光華邊坡之影響，但因水文歷程具有不確定性，導致水文之隨機性變化大，特別是極端事件，故參考[水文設計應用手冊 \(2001\)](#) 提出之方法，設計一系列之降雨。而這設計降雨為某種重現期距與設計延時狀況下之虛擬降雨，是由設計降雨深度 (design depth) 、設計雨型 (design hyetograph) 兩部分所組成。

設計降雨深度為利用雨量觀測資料來進行不同降雨延時之雨量頻率分析，以推導最大降雨強度—延時—頻率 (Maximan Rainfall Intensity-Duration-Frequency, 簡稱 IDF) 曲線或公式，來推估不同降雨延時，不同重現期距之雨量強度。而再將此結果代入一時間分布函數，如常態分布、三參數對數常態分布、極端值一型分布...等，以得到降雨量在時間上的分佈情形，此分布函數便稱為設計雨型。

簡單尺度不變性高斯馬可夫雨型 (Simple Scaling Gauss-Markov, 簡稱 SSGM)，為一符合隨機碎形特性與高斯馬歷程的無因次雨型。此雨型以非定常性一階高斯馬可夫歷程 (nonstationary first-order Gauss-Markov process) 描述無因次年最大值事件，其符合尖峰降雨百分比之統計特性，且降雨量之時間分布兩年最大暴雨事件之歷程特性一致，而經過適當之尺度轉換後，雨型可適用於不同延時之設計暴雨 ([水文設計應用手冊, 2001](#))。

根據水文設計應用手冊 (2001) 以水利處全台歷史及 179 個雨量站之無因次 SSGM 設計雨型將台灣分成北中南東四大區，在各區中劃分二到三個代表雨型。區域性 24 小時降雨延時設計雨型分布如表 3 所示。光華位於北三區，故選用北三區之雨型 (圖 12)，本研究考慮區域性 24 小時降雨延時，設計 100 年重現期距的降雨強度對光華邊坡進行條件控制 (圖 13)。

表 3 區域性 24 小時降雨延時設計雨型分布

(水文設計應用手冊，2001)

降雨時序	降雨百分比										
	北一區	北二區	北三區	中一區	中二區	中三區	南一區	南二區	東一區	東二區	東三區
1	0.753	0.582	0.649	0.000	0.413	0.511	0.591	0.419	0.501	0.542	0.701
2	1.562	1.359	1.353	0.000	1.154	0.950	1.357	0.952	1.316	1.419	1.433
3	1.813	1.696	1.642	0.955	1.647	1.327	1.861	1.491	2.042	1.846	1.780
4	2.200	1.998	1.784	1.326	1.924	1.323	2.291	1.839	2.638	2.133	2.085
5	2.482	2.533	2.267	2.253	2.433	2.007	2.766	2.262	3.182	2.499	2.447
6	2.791	2.985	2.439	3.291	2.620	2.356	3.233	2.585	3.834	2.994	2.714
7	3.159	3.150	2.609	4.165	3.166	2.729	3.916	3.041	3.887	3.153	3.032
8	4.014	3.369	3.000	6.256	3.714	3.095	4.498	3.369	4.545	3.501	3.296
9	5.422	4.091	3.293	8.778	4.693	3.764	5.581	4.028	5.916	4.130	3.627
10	7.070	5.366	3.732	10.346	6.201	4.110	7.975	4.880	8.146	5.257	4.005
11	11.026	7.712	4.754	13.694	8.242	5.501	11.512	6.301	12.891	6.568	4.339
12	13.871	10.728	6.528	12.804	11.275	6.794	13.464	8.459	9.479	8.672	4.965
13	7.544	14.720	8.13	7.818	12.211	9.985	7.815	13.157	6.785	13.206	6.690
14	6.062	8.486	12.818	5.739	8.997	13.064	5.989	11.439	5.174	10.222	9.473
15	5.554	6.265	10.683	4.573	6.980	11.186	4.673	8.602	4.589	6.475	12.463
16	4.867	5.241	9.029	3.641	5.237	7.680	3.961	6.592	4.106	5.423	8.774
17	4.230	4.044	6.219	2.984	4.108	5.399	3.256	4.458	3.902	4.414	6.382
18	3.756	3.547	4.850	2.658	3.524	4.350	3.053	3.519	3.618	3.488	4.910
19	3.249	3.074	3.856	2.284	2.985	3.170	2.679	2.995	3.264	3.301	4.178
20	2.820	2.716	3.243	1.873	2.438	2.674	2.492	2.589	2.929	2.885	3.641
21	2.171	2.092	2.788	1.670	2.176	2.645	2.178	2.281	2.634	2.676	3.029
22	1.705	1.734	2.046	1.395	1.779	2.302	2.115	2.064	1.814	2.288	2.645
23	1.203	1.529	1.431	0.959	1.310	1.743	1.710	1.709	1.658	1.833	2.145
24	0.739	1.046	0.945	0.693	0.836	1.097	1.096	1.034	1.212	1.137	1.310

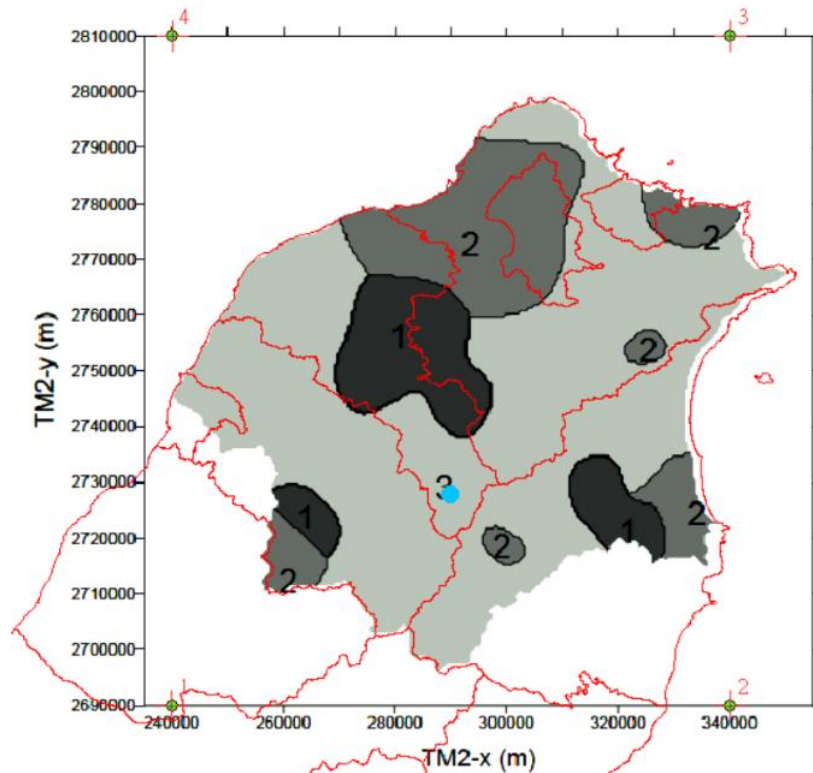


圖 12 台灣北部地區長延時雨型均一區 (藍點處為光華位置)

(修改自水文設計應用手冊，2001)

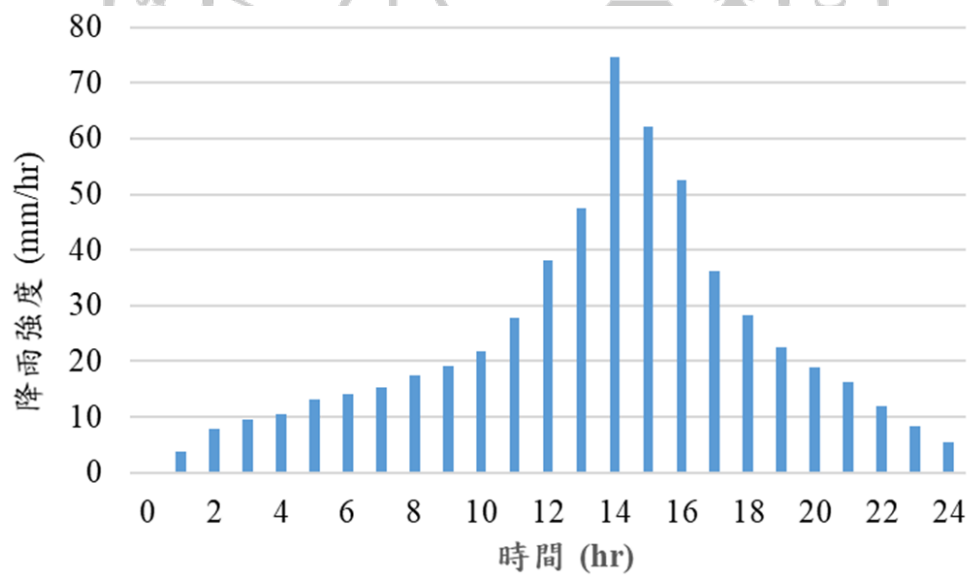


圖 13 設計降雨 (雨型為北三區；重現期距為 100 年；降雨延時為 24 小時)

第四節 預警方法的比較

分離元素法中模擬接觸式儀器於實際中的分布狀況 (圖 14), 監測地表或地中變位, 也模擬非接觸式 (如 InSAR) 觀測坡面範圍的地表變位, 可探討接觸式與非接觸式變位的差異, 一般 InSAR 分析點位為坡面活動點位, 接觸式點位則參考光華 GNSS 點位: K21-G1 和 K21-G2。本研究最後進一步探討不同的預警方法的差異, 如杉井法和 Xu 提出之警戒正切角 (α) 法等, 其中 α 的計算方法如下:

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$
$$\bar{\dot{\varepsilon}}_r = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_1}{t_i - t_1}$$
$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\dot{\varepsilon}_r}{\bar{\dot{\varepsilon}}_r}\right)$$

其中 $\dot{\varepsilon}_r$ 為應變率, 即為前後點位增加的應變量與時間差之比值; $\bar{\dot{\varepsilon}}_r$ 為平均應變率。

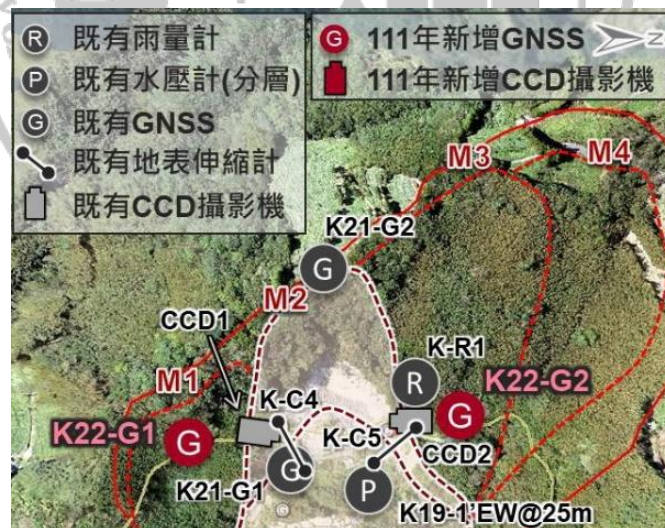


圖 14 光華監測儀器配置圖 (水土保持局 109~110 年度雪霧鬧及光華地區潛在大規模崩塌調查監測計畫)

第三章 結果與討論

本研究以光華邊坡為例，首先利用有限元素法軟體 PLAXIS 建立光華邊坡模型，考慮現地岩體材料和水力參數，利用 2021 年彩雲颱風降雨事件和設計降雨得到安全係數的變化，然後將有限元素法中的整體材料強度與分離元素法中的微觀參數利用數值力學試驗擬合，得到初始和安全係數為 1 時的微觀參數及其折減方式。接著利用分離元素法軟體 EDEM 進行材料變位模擬，折減微觀參數使光華邊坡崩塌滑出，藉此探討邊坡的局部或廣域平均變位情形，最後進一步探討預警方法：杉井法和 Xu 提出之警戒正切角 (α) 法的差異。

第一節 降雨期間邊坡安全係數變化

參考 Yeh et al., (2020) 利用簡單邊坡與真實事件雨型，探討不同傾角邊坡受降雨影響下安全係數的變化，其結果表明降雨條件下邊坡穩定性受孔隙水壓力擴散效應影響不斷改變。進一步研究得到如圖 15 的成果，整體而言，邊坡最小安全係數出現的時間（約 1.5T）會晚於最大降雨強度的時間（T），不過當中弱面高傾角邊坡會比弱面低傾角邊坡，最小安全係數出現的時間更接近最大降雨強度的時間，這表示當地下水向下滲流流動較順暢時，地下水位較易抬升並造成安全係數的下降。此外，降雨過後孔隙水壓力難以立即消散，會導致邊坡穩定

性處於較低的狀態，等到孔隙水壓力消散後才能恢復降雨前的穩定程度。

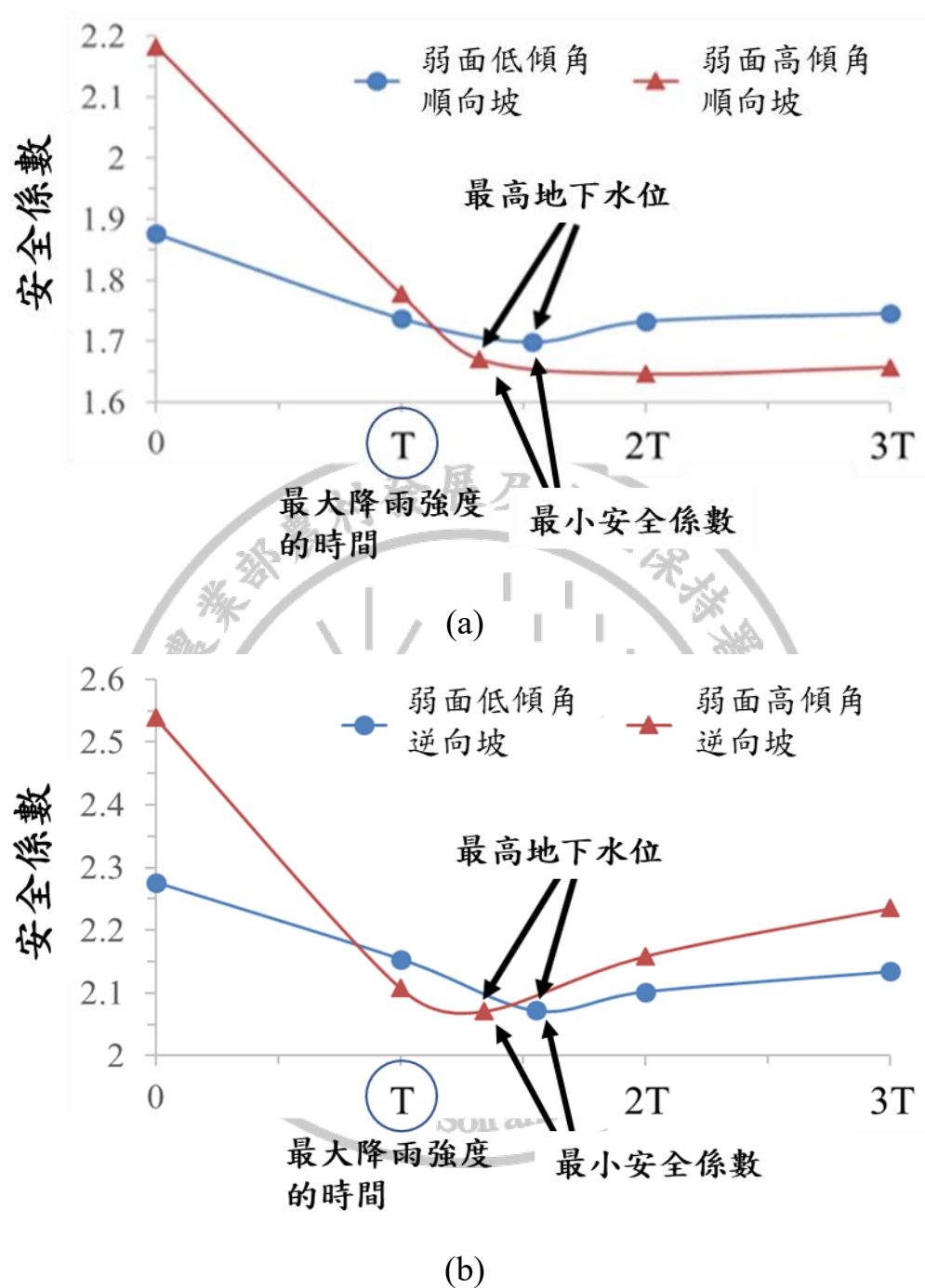


圖 15 降雨影響下邊坡安全係數變化 (a) 順向坡 (b) 逆向坡

本研究針對光華邊坡，利用 PLAXIS 數值模型，考慮現地岩體材料參數以及常時地下水位，首先計算邊坡常時地下水分布（圖 16），並利用強度折減法計算安全係數（圖 17），接著設定 2021 年彩雲颱風和設計之降雨，考慮暫態孔隙水壓力與地下水分布，計算邊坡安全係數變化，如圖 18 所示，結果發現當降雨強度增加時光華邊坡的安全係數隨即下降，且達到最大降雨強度的時間與最小安全係數出現的時間相近，這是由於光華邊坡屬於高傾角弱面的逆向坡且岩層破碎，所以本研究假設不飽和參數為 PLAXIS 中 Coarse Sand，加上表 1 中岩屑層的飽和滲透係數 10^{-3} ，導致一旦下雨可能造成基質吸力迅速變化，使安全係數較容易下降。不過可以發現彩雲降雨過後，邊坡安全係數的恢復需要一段時間。此外若用設計降雨，即可以發現安全係數的最小值在降雨峰值之後，可看出邊坡安全係數的變化和孔隙水壓力擴散行為有關，地下水壓力的傳遞或消散需要時間。

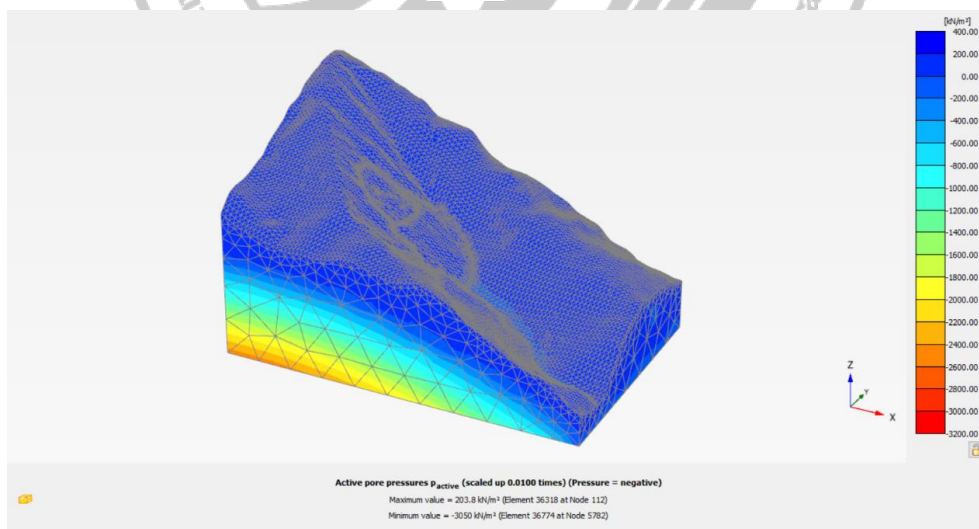
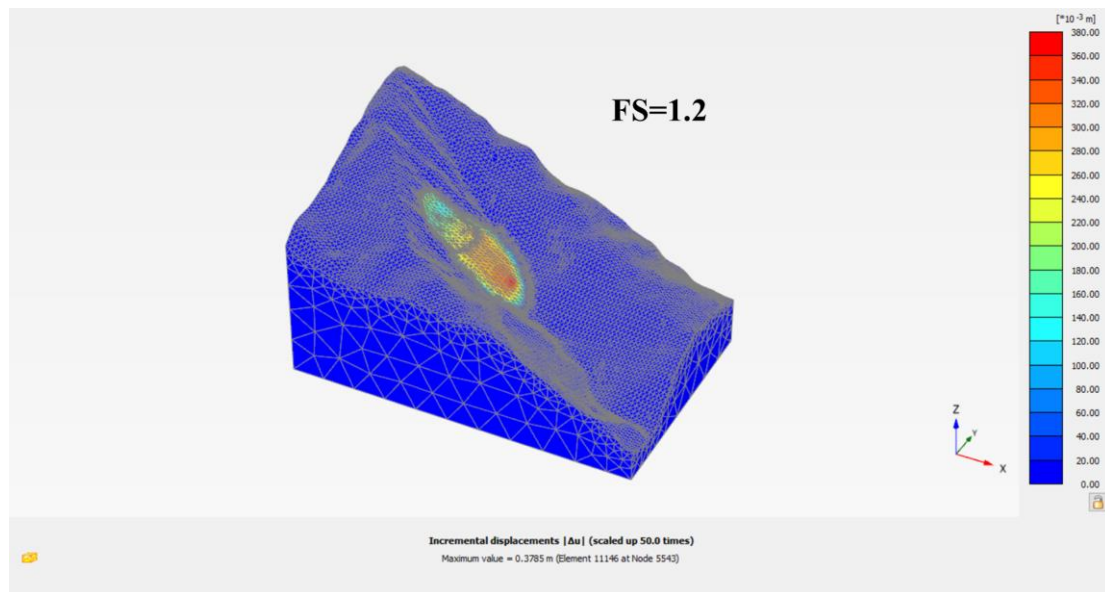
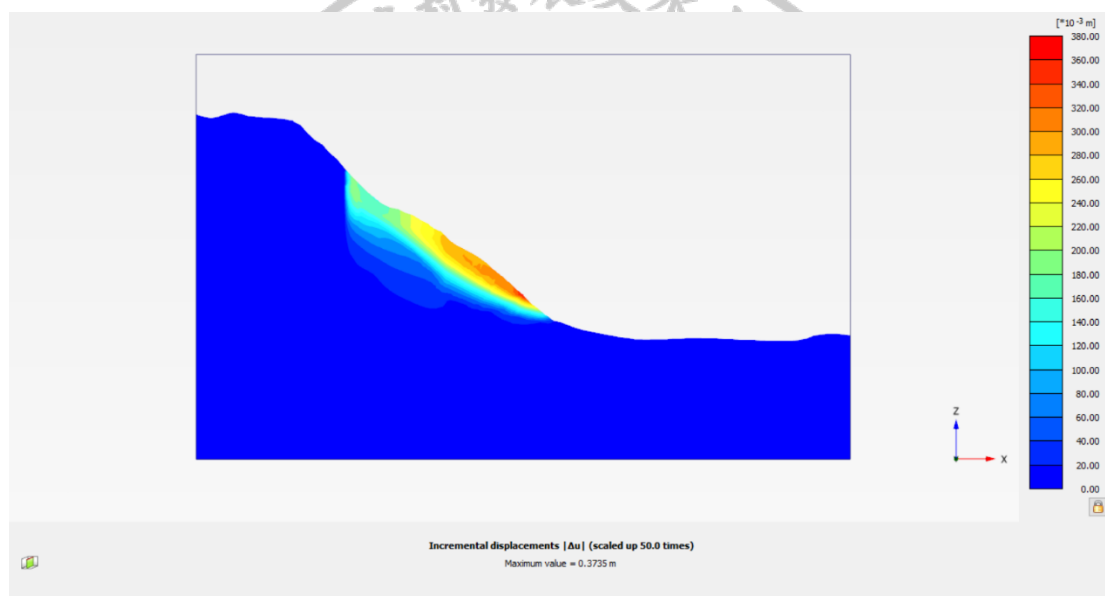


圖 16 光華邊坡常時地下水分布



(a)



(b)

圖 17 光華邊坡常時地下水分布狀態時的安全係數及其滑動面 (a)

側視圖 (b) 沿滑動方向剖面圖

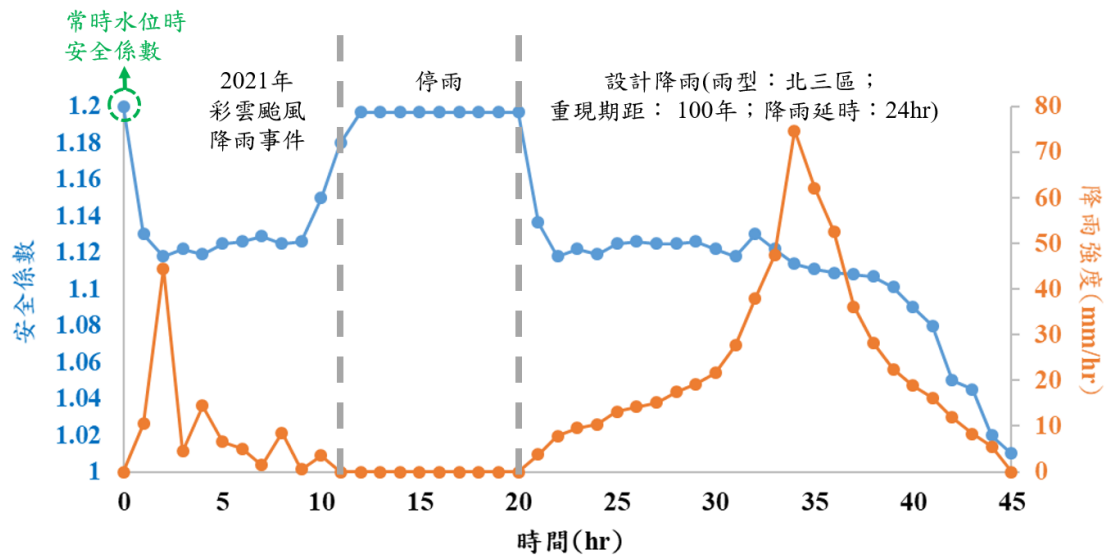


圖 18 降雨條件影響下光華邊坡安全係數變化

第二節 不同預警方法應用於光華崩塌地

本研究建立光華 EDEM 數值模型，透過折減岩屑層微觀參數至光華邊坡崩塌，比較接觸式和非接觸式變位資訊對於崩塌預警的影響，並進一步探討杉井法和 Xu 提出之警戒正切角 (α) 法的差異。考慮 Chigira (2009) 計算邊坡應變的方法 (d/L)，首先需要知道滑動體長度 (L)、滑動方向與傾角，如圖 19 所示，滑動方向大致朝東且傾角約 33 度，滑動體長度約為 310m。本研究利用局部接觸式點位或廣域非接觸式點位平均值，沿滑動方向的位移來表示 d ，計算杉井法中的應變和應變速率。探討點位如圖 20 所示，其中 K21-G1 和 K21-G2 參考光華崩塌地實際 GNSS 點位。本研究結果顯示邊坡崩塌前坡頂局部點的位移較坡趾局部點大 (圖 21)，邊坡崩塌時則不一定，如圖 22 所示，坡頂 K21-G2 滑移到坡腹即停止運移，而坡趾 K21-G1 運移到河道而不斷

移動。將 K21-G1、K21-G2 和坡面點位計算應變和應變速率應用杉井法繪製 (圖 23)，可以看出崩塌發生前，坡頂 K21-G2 的應變和應變速率較大，當 K21-G2 變位資訊從黃色警戒區移動至紅色警戒區，表示崩塌可能性大，能對崩塌預警及早提供資訊，而坡趾 K21-G1 或坡面點位平均值則上升較慢。此外也能看出本研究坡頂 K21-G2 受其他顆粒阻礙而使得應變和應變速率趨緩，若應變和應變速率預警門檻值決定的不好，則可能導致預警的失準，而過於保守則會導致不斷發布警訊，因此審慎決定出每個崩塌地的應變和應變速率門檻值相當重要。

另外本研究進一步利用坡頂 K21-G2 變位資訊來探討杉井法和 Xu 提出之警戒正切角(α)法的差異，成果雖然顯示兩種方法有一致的預警結果 (圖 24)，但是考慮應變速率預警門檻值可能受材料狀況或滑動面深度等影響而實務上較難決定，故考慮 α 角應是可行的方向。值得一提的是，本研究利用數值方法來探討 α 角，可以發現當 α 角 $> 70^\circ$ 時崩塌容易發生，這與李應辰 (2022) 的實驗室邊坡模型結果一致。

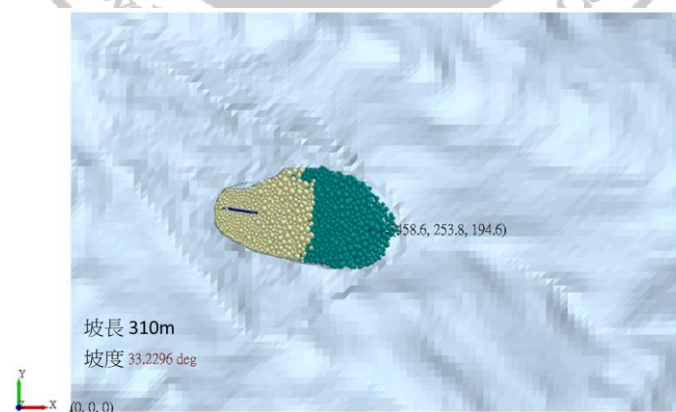
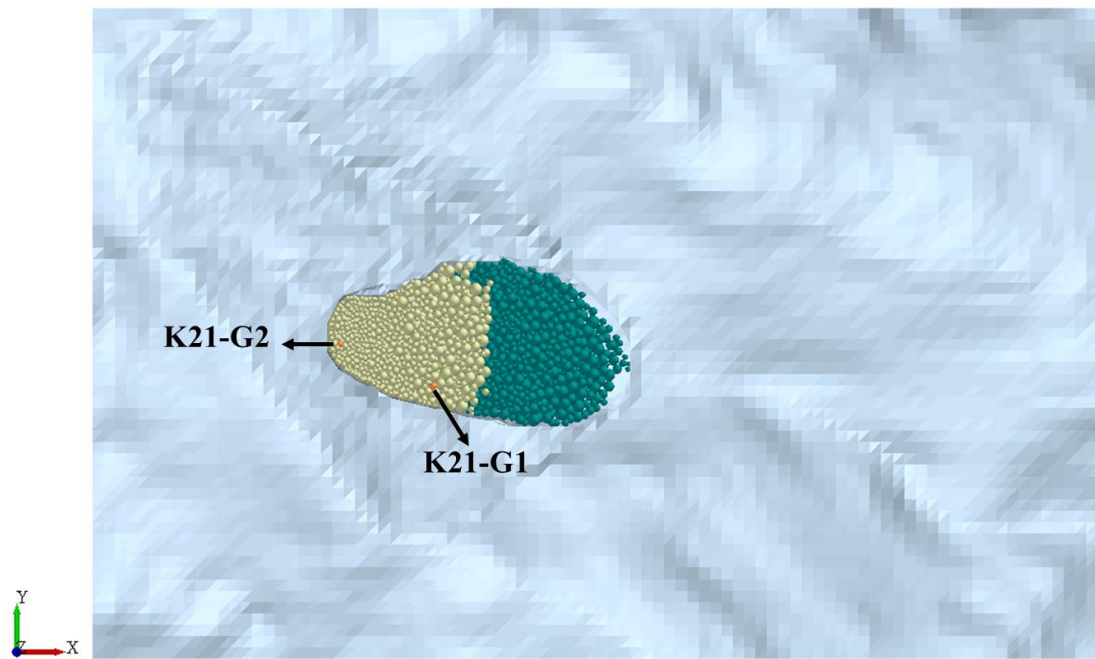
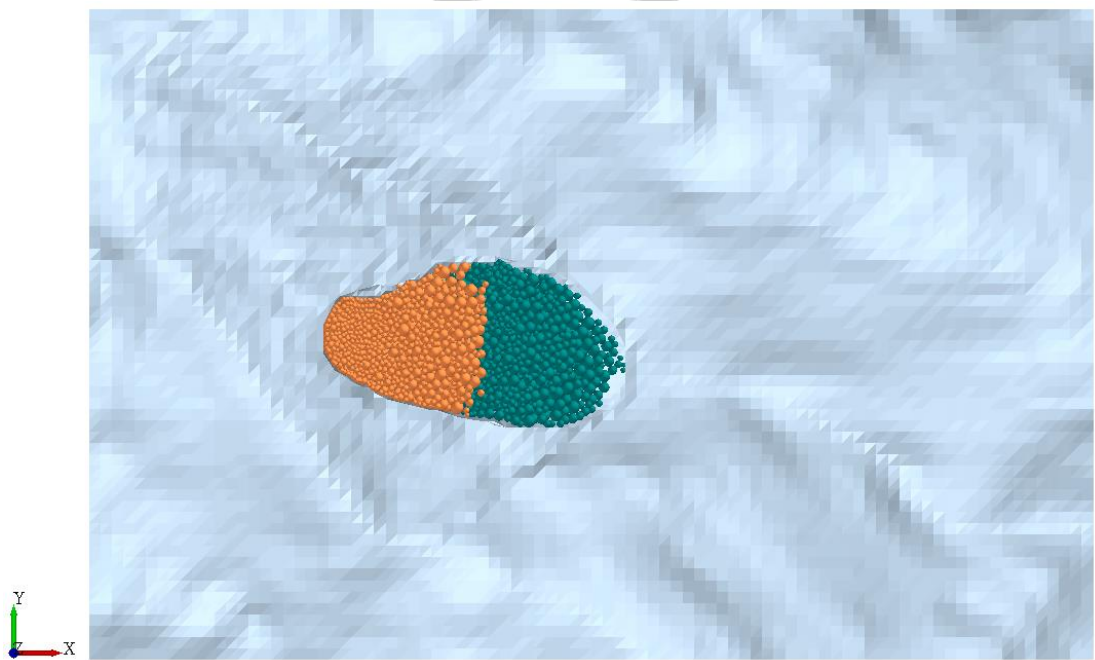


圖 19 滑動體長度、滑動方向與傾角



(a)



(b)

圖 20 探討點位 (a) 局部接觸式點位 (b) 廣域非接觸式坡面點位

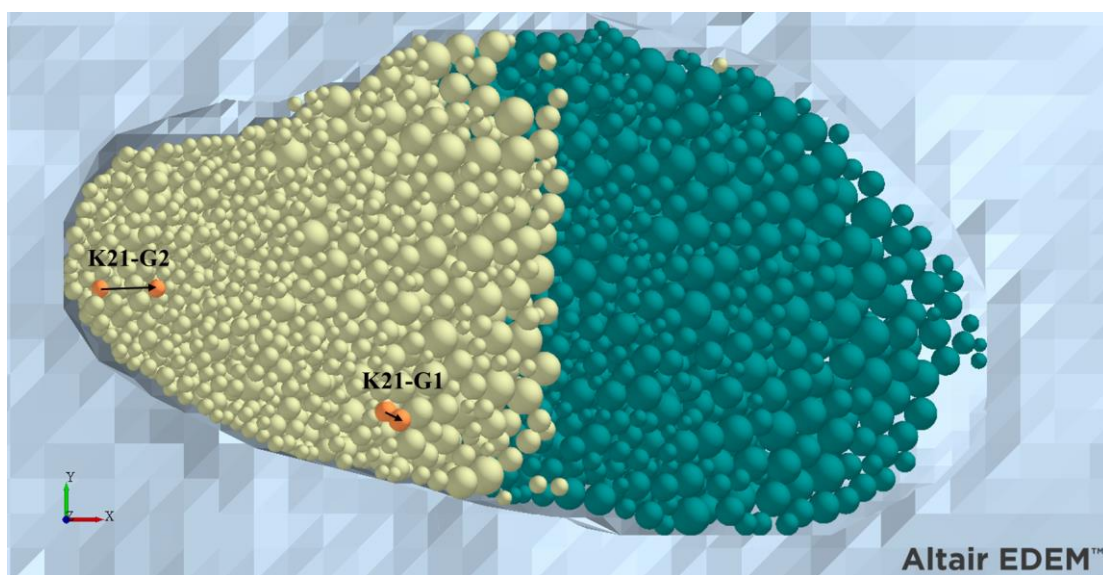


圖 21 崩塌前坡頂局部點的位移較坡趾局部點大

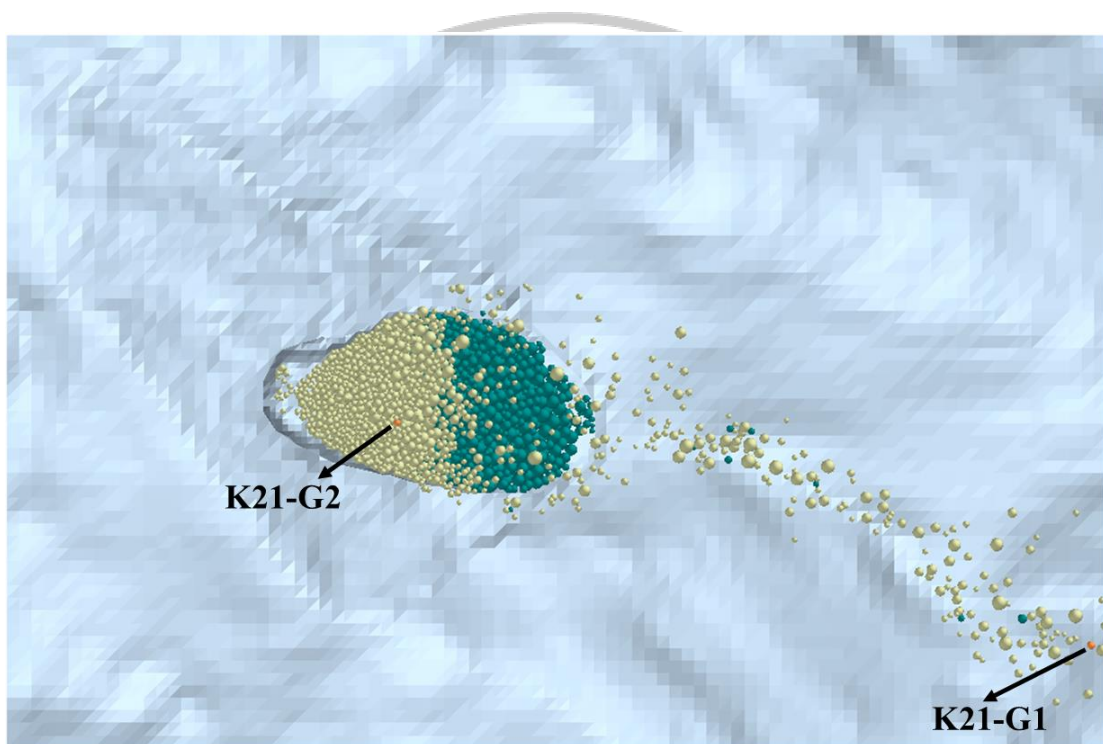


圖 22 崩塌後局部點移動情形

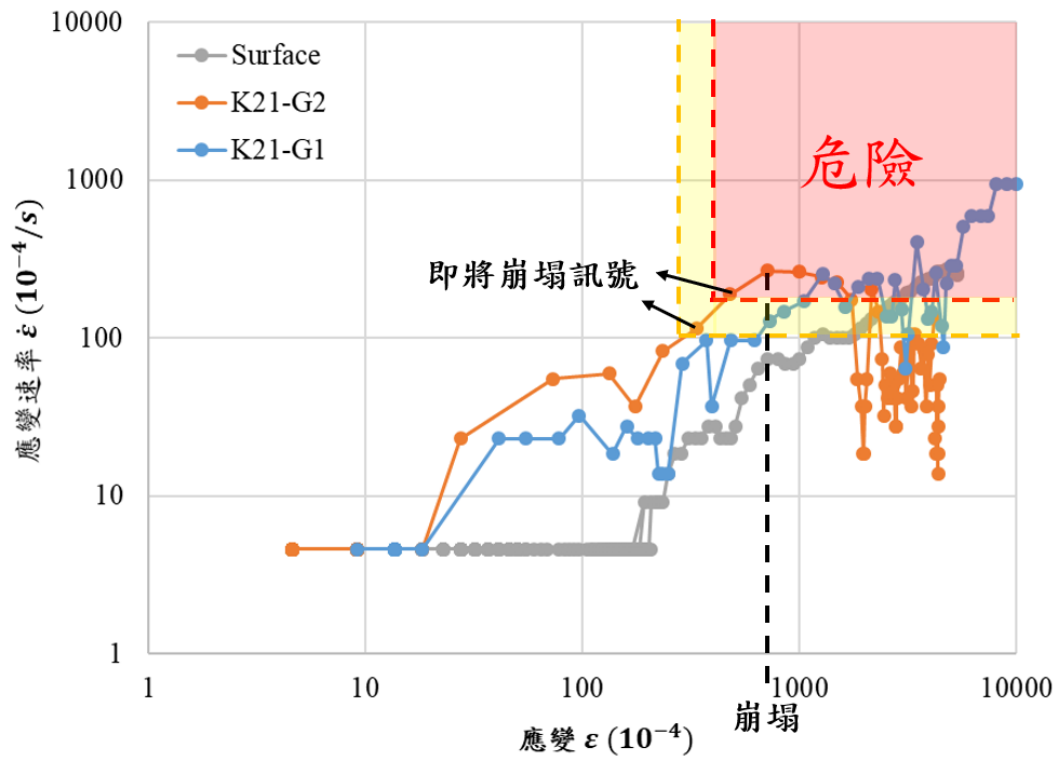


圖 23 K21-G1、K21-G2 和坡面點位平均的比較

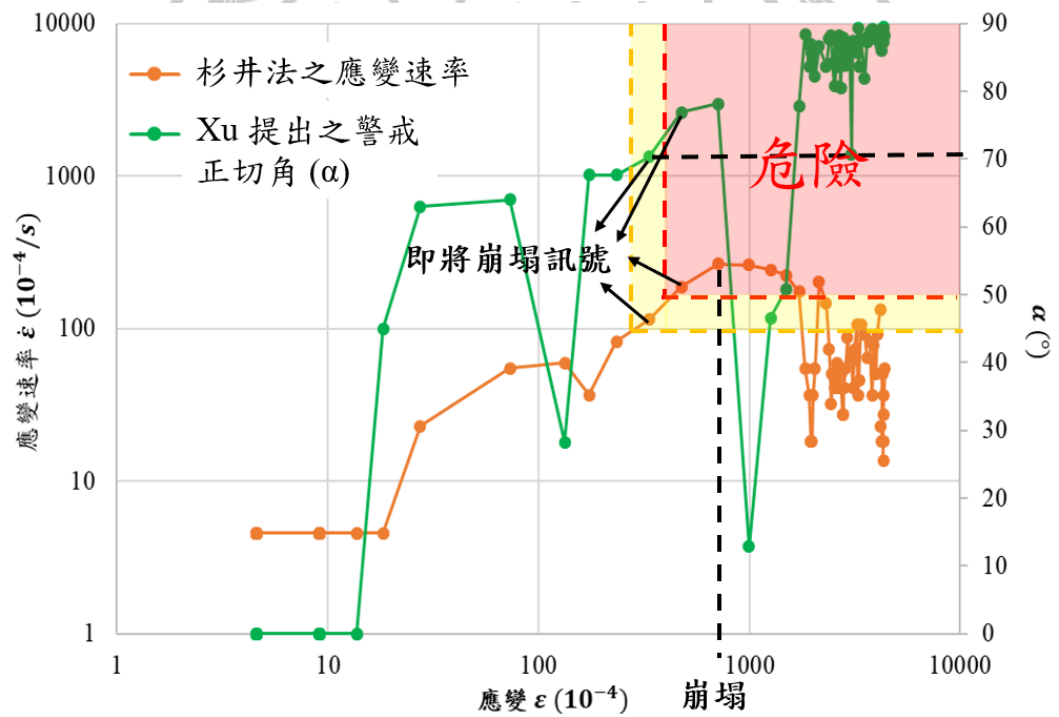


圖 24 利用 K21-G2 探討杉井法和 Xu 提出之警戒正切角法

另外，將杉井法應用於光華崩塌地，地表伸縮計變位資料自 2020/10/1 12:00:00 AM 到 2021/5/24 12:00:00 PM，其平均應變與應變速率之結果如圖 25，GPS 變位資料自 2021/1/30 到 2021/6/25，其平均應變與應變速率之結果如圖 26，其中 2021/2/2 與 2021/6/10 為變位劇烈的時間。整體上可以發現光華崩塌地偶有應變速率增加的現象但沒有加速至邊坡滑出，考慮李應辰 (2022) 和張光宗 (2022) 水保局創新研究計畫成果，分別使用實驗室邊坡物理模型和實際尺寸的數值模型對具有不同弱面方位的邊坡探討崩塌前最大可承受的累積應變量，均得到相同成果：逆向坡弱面高傾角>逆向坡弱面低傾角>順向坡弱面高傾角>順向坡弱面低傾角，光華屬於逆向坡弱面高傾角，所以崩塌前可承受的累積應變量較大，自然邊坡的運動行為很常見這種情形，雖然可能沒有立即的危險性，不過仍需要持續觀察，因為根據 Jaboyedoff et al (2012) 的描述，在某個臨界點過後邊坡可能會持續加速至滑出。考慮李應辰 (2022) 的實驗結果 (圖 27)，逆向坡的加速階段較長，順向坡的加速階段較短，因此針對光華逆向坡，可應用前 7 日內平均應變速率的觀測方法，與水保局雨量警戒所使用前 7 日有效累積雨量 ETR2 同步，如圖 28 所示，可看出 7 日內平均應變速率曲線變化會比 1 日內平均速率曲線變化來得平滑，可消除一般變位曲線之雜訊。倘若對順向坡，則可能建議使用前 7 小時內平均應變速率。

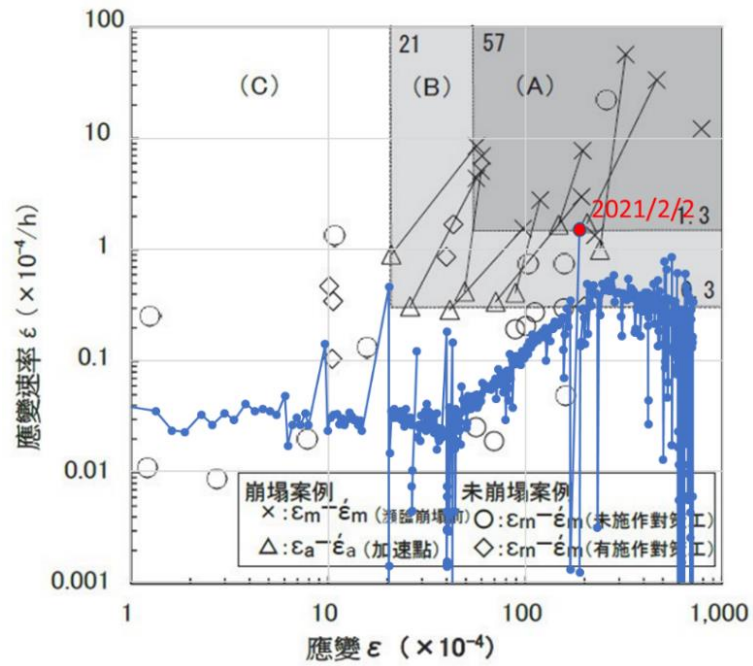


圖 25 光華地表伸縮計變位資料應用杉井法 (杉井良平等，2017)

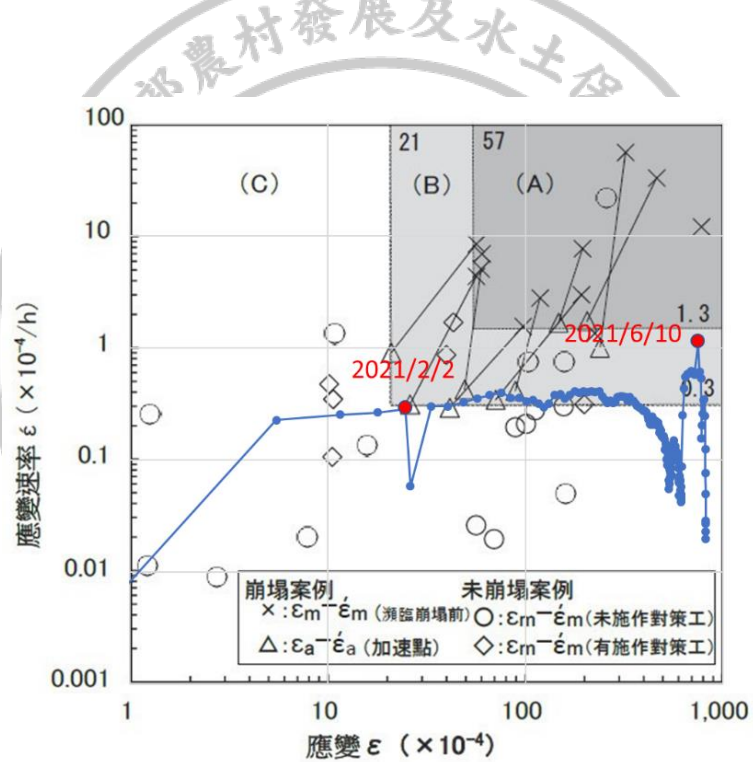


圖 26 光華 GPS 變位資料應用杉井法 (Jaboyedoff et al., 2012)

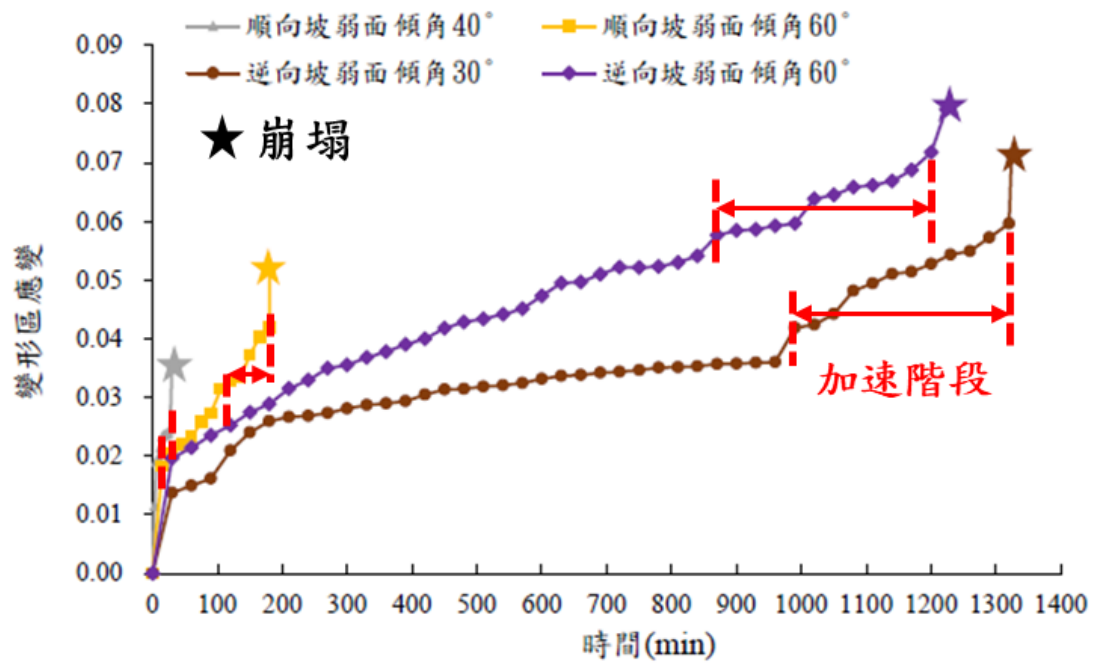


圖 27 不同弱面方位邊坡變形區應變 (弱面間距均為 9mm) (李應辰，2022)

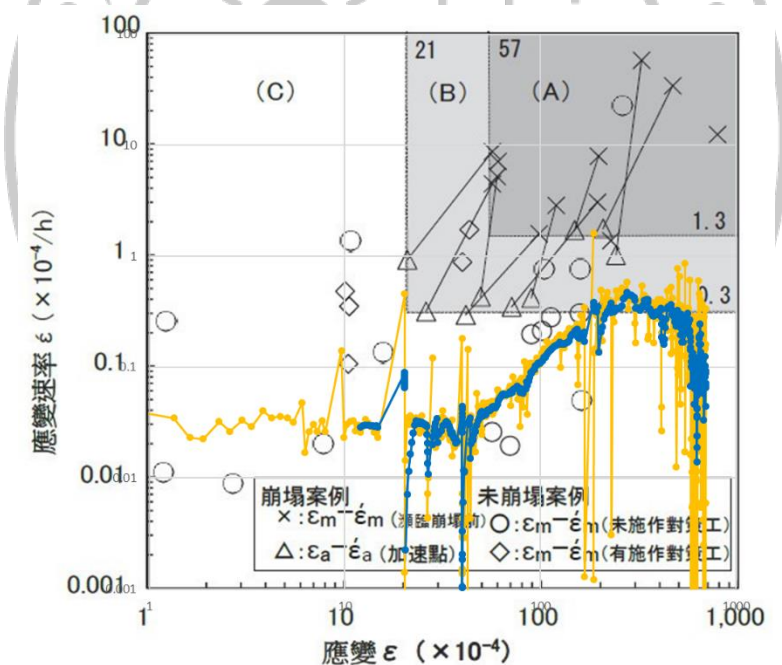


圖 28 比較 7 日內與 1 日內平均應變速率曲線變化 (藍線為 7 日內，黃線為 1 日內)

第四章 結論

本研究針對光華邊坡，考慮 Chigira (2009) 的應變概念計算的邊坡應變，利用數值方法探討接觸式與非接觸式變位的差異。進一步比較不同的預警方法的差異：杉井法和 Xu 警戒正切角 (α) 法，成果可針對光華大規模崩塌潛在地監測與警戒發布提供資訊，綜整如下：

1. 受到孔隙水壓力擴散行為影響，最高地下水位的時間可能在降雨峰值之後，邊坡安全係數最小值也可能出現在降雨峰值和最高地下水位的時間之後。
2. 崩塌發生前，坡頂局部點的變位較快且大，較能對崩塌預警及早提供資訊，坡趾局部點或坡面點位平均值則較慢。
3. 崩塌發生時，局部點訊號可能受崩積材料阻礙而使得變位和速率趨緩，導致訊號趨緩不一定是安全的徵兆，因此決定出每個崩塌地的應變和應變速率預警門檻值相當重要。
4. 本研究結果雖然顯示杉井法和 Xu 提出之警戒正切角(α)法有一致的預警結果，但是考慮應變速率預警門檻值可能受材料狀況或滑動面深度等影響而較難決定，故考慮 α 角是可行的方向。
5. 逆向坡的加速階段較長，因此針對光華逆向坡，可應用較長時間平均應變速率的觀測方法，可消除一般變位曲線之雜訊。順向坡的加速階段較短，則建議使用較短時間內平均應變速率。

第五章 建議

本研究旨在比較接觸式與非接觸式變位的差異，然後進一步比較不同的預警方法的差異：杉井法和 Xu 警戒正切角 (α) 法，成果可針對光華大規模崩塌潛在地監測與警戒發布提供資訊。然而本研究簡化僅透過折減岩屑層微觀參數來使邊坡崩塌，但是實際上坡趾破碎岩層仍有受剪斷裂導致邊坡崩塌滑出的可能性，所以本研究的設定僅能代表一種崩塌的可能性，建議後續可以同時折減岩屑層和破碎岩層參數來檢視另一種崩塌可能性的結果。另外關於微觀參數的折減，本研究為了加速數值邊坡崩塌滑出，參數的調降幅度較大造成邊坡崩塌滑出的速度較快，建議後續可以縮小微觀參數調降幅度，這意味著必須花更多的模擬時間，但可藉此模擬現地邊坡的實際情況，進一步探討現地邊坡的潛移現象和累積應變量。

參考文獻

1. 丁璇 (2014), 「山谷兩側兼具傾倒與順向坡構造之坍滑機制」, 國立台灣科技大學營建工程學系碩士學位論文。
2. 水土保持局臺北分局 (2020), 「109 年度雪霧鬧及光華地區潛在大規模崩塌調查監測計畫」。
3. 水土保持局臺北分局 (2021), 「110 年度雪霧鬧及光華地區潛在大規模崩塌調查監測計畫」。
4. 水土保持局臺北分局 (2023), 「111~112 年度雪霧鬧、光華、義興及上巴陵等地區潛在大規模崩塌調查監測計畫」。
5. 李應辰 (2022), 「弱面性質對荷重岩石邊坡崩塌行為的影響」, 國立中興大學水土保持學系碩士學位論文。
6. 杉井良平、西井稜子、石井靖雄 (2017), 「地すべりのひずみ及びひずみ速度の経時変化による崩壊の切迫性評価 (地滑應變與應變速度之歷時變化引致崩塌之迫切性評估)」, 日本地滑學會誌, Vol.54, No.6, pp.11-20。
7. 林經捷(2006), 「降雨對邊坡穩定性之影響— 以九份地滑地為例」, 國立台北科技大學土木與防災研究所碩士論文。
8. 莊凱麟 (2004), 「3DEC 應用於滲流岩坡穩定性之分析」, 國立臺北科技大學材料及資源工程系碩士學位論文。

9. 彭逸蘋 (2022) , 「以物質點法探討光華崩塌地滑動面深度與運動行為」, 國立臺灣大學土木工程學系碩士學位論文。
10. 張光宗 (2021), 「應用分段式與整合型數值方法探討大規模崩塌衍生之天然壩災害潛勢區位」, 水保局創新研究計畫, 編號: SWCB-110-029。
11. 張光宗 (2022), 「應用大規模崩塌潛勢與漸進破壞程度於坡地災害預警」, 水保局創新研究計畫, 編號: SWCB-111-038。
12. 福圓輝旗 (1985), 「表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法」, 地すべり, 22(2), 8-13_1。
13. 經濟部水資源局 (2001), 「水文設計應用手冊」。
14. Aleotti, P., 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. Eng. Geol. 73,(3-4), 247-265.
15. Asadzadeh, M., and Soroush, A. (2016). Fundamental investigation of constant stress simple shear test using DEM. Powder Technology, 292, 129-139.
16. Calvello M., Cascini L., and Sorbino G. (2008). A numerical procedure for predicting rainfall-induced movements of active landslides along pre-existing slip surfaces. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 32(4), 327-351.
17. Chang, K. T., & Huang, H. C. (2015). Three-dimensional analysis of a deep-seated landslide in central Taiwan. Environmental Earth Sciences, 74(2), 1379-1390.

- 18.Chigira, M. (2009). September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan. *Engineering Geology*, 108(1-2), 1-15.
- 19.DEM Solutions Ltd. (2014). EDEM 2.6 theory manual.
- 20.Crosta, G.B., 2004. Introduction to the special issue on rainfall-triggered landslides and debris flows. *Eng. Geol.* 3 (73), 191–192.
- 21.Goodman, R.E. (1989) *Introduction to rock mechanics*, Wiley.
- 22.Hertz, H. (1882). On the contact of elastic solids. *Z. Reine Angew. Mathematik*, 92, 156-171.
- 23.Li, T., Peng, Y., Zhu, Z., Zou, S., & Yin, Z. (2017). Discrete element method simulations of the inter-particle contact parameters for the mono-sized iron ore particles. *Materials*, 10(5), 520.
- 24.Meng, J. J., Wang, Y. X., Zhao, Y. L., Ruan, H., & Liu, Y. (2018). Stability analysis of earth slope using combined numerical analysis method based on DEM and LEM. *Tehnički vjesnik*, 25(5), 1265-1273.
- 25.Mindlin, R. D. (1949). Compliance of elastic bodies in contact. *J. Appl. Mech.*, ASME, 16, 259-268.
- 26.Mindlin, R. D. & Deresiewicz, H. (1953). Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *ASME*, 327-344.
- 27.Jaboyedoff, M., Derron, M. H., Pedrazzini, A., Blikra, L., Crosta, G. B., Froese, C. R., Hermanns, R.H., Oppikofer, T., Bohme, M., Stead, D. (2012), “Fast assessment of susceptibility of massive rock instabilities.”, In *Landslides and Engineering Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*, Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Banff, Canada (pp. 3-8).

28. Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(8), 1329-1364.
29. Romer, C., & Ferentinou, M. (2019). Numerical investigations of rock bridge effect on open pit slope stability. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(6), 1184-1200.
30. Schilde, C., Burmeister, C. F., & Kwade, A. (2014). Measurement and simulation of micromechanical properties of nanostructured aggregates via nanoindentation and DEM-simulation. *Powder technology*, 259, 1-13.
31. Xu, Q., Peng, D., Zhang, S., Zhu, X., He, C., Qi, X., Zhao, K., Xiu, D., & Ju, N. (2020). Successful implementations of a real-time and intelligent early warning system for loess landslides on the Heifangtai terrace, China. *Engineering Geology*, 278, 105817.
32. Yeh, P.T., Lee, K. Z.Z., & Chang, K.T. (2020). 3D Effects of permeability and strength anisotropy on the stability of weakly cemented rock slopes subjected to rainfall infiltration. *Engineering Geology*, 266, 105459.
33. Yeh, P. T., Chen, I. H., Lee, K. Z. Z., & Chang, K. T. (2022). Graphical comparison of numerical analysis, slope mass rating, and kinematic analysis for the effects of weak plane orientations on rock slope stability. *Engineering Geology*, 106900.
34. Zezere, J., Trigo, R.M., Trigo, I.F., 2005. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 5 (3), 331–344.

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

意見	回覆
1. 對於大規模崩塌潛勢地區的監測，目前國內外的趨勢都是從太空、天空、地面分別採用接觸式與非接觸式監測地表位移的方法來進行監測預警的作法。不同大規模崩塌潛勢地區的變形破壞機制不同，因此其預警門檻值應有不同，利用數值分析方法釐清降雨、地下水位升降、地表變位之間的關聯，找出主控變因及其物理變化趨勢，是訂定預警門檻值的重要依據，也是非常值得研究的課題，值得鼓勵。	感謝委員鼓勵。
2. 選用的光華案例，具三維束口狀地形，其滑動面深度、位置尚未真正了解，如何用 PLAXIS 建	謝謝委員意見，參數合理的情況下，強度折減法可以得到較合理的滑動面，本研究將考慮現地力

立合理可行的力學模型，是本研究未來的重大挑戰。	學參數建立較合理的數值力學模型。
3. 請加強說明預期成果之實用性及預警方法之限制條件。	謝謝委員意見，考慮對於一場崩塌或邊坡變位事件，不同預警儀器利用相同預警方法，或相同預警儀器利用不同預警方法，分析的結果往往出現差異。本研究預期成果可以加以比較，探討不同預警儀器較適合的預警方法，且將於後續報告書中加強說明預警方法的限制條件。
4. 目前水保局監測之大規模崩塌，以「新北市-汐止區-D003(鵠鵠崙)」最為活躍，建議研究地點由光華崩塌地改以鵠鵠崙崩塌地為研究之可行性，或納入鵠鵠崙崩塌地進行研究及比較。	謝謝委員意見，後續將考慮將鵠鵠崙崩塌地納入，進行研究及比較。

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

意見	回覆
1. 對於期中報告中的研究成果圖 17、圖 18、圖 19，請於期末報告時，仔細明其岩體材料參數、力學與水力學邊界條件及水力學參數，以及常時地下水位、颱風事件時所獲很的地下水流網成果，並在岩體中坡頂、坡腹及坡趾的地表及滑動面上下設置監測點，監測分析成果的地表變位曲線及地下水位歷時曲線。	感謝委員意見，已於期末報告書展現成果並說明。
2. 本案光華案例之接觸式與非接觸式變位資訊前人研究的相關研究成果，請進行蒐集與評析。本案利用三維數值分析，可以得到滑體表面位移的面狀位移場資料，如何與接觸式、非接觸式變位資訊(INSAR 或 UAV 之 PIV)	感謝委員意見，已於期末報告書展現成果並說明。

請在期末報告時，一併進行比對評析。	
3. P2, 地質弱面因為”的”位態，是否有多字？請留意修正。	感謝委員意見，已修正。
4. P16, 「111—112 年度查秀巒…」該監測計畫，請修正為水土保持局臺北分局。	感謝委員意見，已修正。
5. 參考文獻部分，請再確認為水土保持局或是水土保持局其他分局之成果，請一併修正。	感謝委員意見，已修正。



附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

意見	回覆
1. 模式建立時，採用之指標係彩雲颱風，其原因為何？崩塌涉降雨強度及累積雨量，採 24hr 延時，重現期 100 之依據為何？	感謝委員意見，因為 2021 年彩雲颱風期間造成光華邊坡滑移，因此本研究設定彩雲颱風的豪雨事件進行後續數值分析。另外採 24hr 延時，重現期 100 年為本研究的假設，目的為討論在此情形下的邊坡安全係數變化。
2. 坡頂位移監測值如何分析表層移動或整體移動？警戒需如何判定？	感謝委員意見，本研究考慮 Chigira (2009) 的應變概念計算的邊坡應變，若已知坡頂位移和滑動面長度，可估算整體邊坡應變。本研究旨在比較接觸式與非接觸式變位的差異，為比較型研究。結果顯示崩塌發生前，坡頂局部點的變位較快且大，較能對崩塌預警及早提供資訊，坡趾

	局部點或坡面點位平均值則較慢。
3. 報告書請納入建議章節，以作為後續運用參考。	感謝委員意見，已納入建議章節。
4. 崩塌可能發生在降雨峰值和最高地下水位時間之後，其中地下水位除降雨之入滲外，是否建議將初始地下水位納入研判資訊？	感謝委員意見，崩塌可能發生在降雨峰值和最高地下水位時間之後，而初始地下水位也會影響最高地下水位時間，因此初始地下水位建議可納入研判資訊。
5. 分析結果對於光華崩塌區目前安全條件為何？是否會發生二次崩塌？	感謝委員意見，光華邊坡目前安全條件應為不穩定，但是實際安全性應進一步對現地材料進行實驗室分析，加上準確測量滑動面位置。光華邊坡已經滑移過但尚未完全崩塌，後續再滑移的可能性極高，但是完全崩塌的可能性需要進一步評估。
6. 落實於實際應變作業運用的可行性研判評估。	感謝委員意見，本研究旨在比較接觸式與非接觸式變位的差異，

	然後進一步比較不同的預警方法的差異：杉井法和 Xu 警戒正切角 (α) 法，成果雖然顯示杉井法和 Xu 提出之警戒正切角(α)法有一致的預警結果，但是考慮應變速率預警門檻值可能受材料狀況或滑動面深度等影響而較難決定，故考慮 α 角是後續可行的方向。
7. 分析中使用的 K21-G2 變化速率較小，坡面中有另一 GNSS K21-G3 的變化量較大是否採用，如有，其變形量是否與分析符合。	感謝委員意見，K21-G3 應為新設的 GNSS，目前資料沒有相關資訊，後續取得資料將進一步分析與探討。