
**以實際案例、模型試驗與數值方法探討
大規模崩塌預警值
Study on the early warning thresholds
for large-scale landslides through
practical cases,model tests,and
numerical methods
(期末報告書)**

執行單位：國立中興大學

執行期間：113 年 02 月 07 日至 113 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 113 年 11 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)



摘要

一、前言

對於山坡地的安全，建立完善的預警機制顯得格外重要。本研究旨在透過實際案例、模型試驗和數值方法，來探討大規模崩塌的預警值，並提出有效的預測方法。

二、研究方法

本研究透過三種主要方法，實際案例、模型試驗和數值方法，來分析大規模崩塌的預警條件。研究主要涵蓋以下兩大方面：

（一）雨量的預警：

蒐集數個發生過大規模崩塌的降雨事件資料，包括小林村、土場、猴硐崩塌等事件。透過分析各事件中雨量參數曲線和崩塌時間的關係，並利用數值方法建立不同滑動面深度，並考慮不同雨型、不同重現期距和不同降雨延時情況下，得出適合各類情境的雨量預警模型。

（二）變位的預警：

利用實驗室小尺度邊坡物理模型進行實驗，探討不同邊坡弱面位態對於邊坡變形與崩塌行為的影響。以石膏板建立多種不同弱面位態的邊坡，並分析邊坡在不同傾角、不同荷重下的變形速率和應變量。同時，針對實際案例探討不同弱面位態的

邊坡的應變量。再進一步使用數值方法進行，考慮不同滑動面深度探討邊坡崩塌時的應變門檻。

三、 研究成果與討論

（一） 雨量參數與預警值：

透過實際崩塌案例和數值方法的研究分析，顯示滑動面深度、降雨延時和雨型皆會顯著影響崩塌的發生機率。而在邊坡穩定中，安全係數是預測崩塌的關鍵指標。當降雨導致安全係數下降至 1 或低於 1 時，邊坡可能發生不穩定並崩塌。研究結果得出適合各種滑動面深度的雨量參數與崩塌雨量門檻值（警戒值），分為下列說明：

1. 滑動面深度為 100m（深層崩塌）：

在 48 小時降雨延時中，適用於 30 小時雨量參數，雨量門檻值為 735mm；在 72 小時降雨延時中，適用於 52 小時雨量參數，雨量門檻值為 670mm。

2. 滑動面深度為 25m（淺層崩塌）：

在 48 小時降雨延時中，適用於 24 小時雨量參數，雨量門檻值為 352mm；在 72 小時降雨延時中，適用於 24 小時雨量參數，雨量門檻值為 362mm。

研究得出，淺層崩塌通常與短時間降雨強度較大的降雨事件相關，而

深層崩塌則與降雨延時較長的累積雨量有關。這表示崩塌門檻值會隨滑動面深度而增加，且降雨時間越長，所需的崩塌雨量值越高。

(二) 邊坡崩塌時的應變量

1. 模型試驗:

以實驗室小尺度邊坡物理模型依不同弱面位態進行試驗，施加荷重於邊坡坡頂，直至崩塌，並根據 GOM Correlate 影像分析崩塌時的位移，來計算滑動體的平均位移，再以下式 1 計算平均應變($\bar{\varepsilon} = d/l_0$)， $\bar{\varepsilon}$ 為滑動體的平均應變(即變形區應變)， d 為滑動體的平均位移， l_0 為滑動體沿坡面方向的長度。結果顯示其邊坡崩塌前累積的平均應變由大到小為，逆向坡弱面傾角 60°、逆向坡弱面傾角 30°、順向坡弱面傾角 60°、順向坡弱面傾角 40°。

2. 實際案例:

針對地礦中心圈定的 48 例大規模崩塌地中的 22 例有明顯陡崖及滑動面特徵的崩塌地進行調查比較，計算其平均應變，定義與前述模型試驗計算平均應變的定義不同，在實際案例中 d 為邊坡崩崖的長度， l_0 同樣為沿著坡面的滑動面長度。實際案例的結果展現的平均應變雖與模型試驗的意義稍有不同，但都顯示了相同的趨勢，即逆向坡的平均

應變大於順向坡的平均應變。

3. 數值方法:

透過 PLAXIS 3D 有限元素法軟體來推測邊坡的三維滑動面並在 EDEM 分離元素法軟體建立三維模型來進行變位分析。研究發現，滑動面深度與崩塌時的平均應變量有明顯的正相關，滑動面深的邊坡能承受較大的變形量且崩塌延遲時間較長；滑動面淺的邊坡能承受的變型量較小且崩塌延遲時間較短。另外發現崩塌時不同監測區域的平均累積位移量也不同，滑動體上部表層 > 滑動體表層 > 整塊滑動體，可知滑動體上部位移量明顯大於下部，且表層的位移相較於深層的位移較顯著。

四、 結論

本計畫分別探討雨量與位移在邊坡崩塌的預警，透過實際案例與數值方法，分析邊坡崩塌預警適用的雨量參數與雨量門檻值，另一方面由模型試驗、實際案例與數值方法，分析邊坡崩塌預警適用的平均應變量，並考量滑動面深度、降雨重現期、雨型及降雨延時等因素：

(一) 雨量參數與預警值

1. 用之雨量參數受降雨重現期影響較小，受不同雨型影響較大。

2. 降雨延時影響深層滑動適用的雨量參數較大，對淺層滑動影響較小。
3. 崩塌雨量門檻值受不同雨型、降雨延時影響較大，受降雨重現期影響較小。

（二）邊坡崩塌時的應變量

1. 實際案例顯示，未崩塌地邊坡中逆向坡的平均應變量高於順向坡。
2. 模型試驗顯示，邊坡崩塌時的應變量由大到小為逆向坡弱面傾角 60° 、逆向坡弱面傾角 30° 、順向坡弱面傾角 60° 、順向坡弱面傾角 40° 。
3. 數值方法顯示滑動面深度越深，崩塌時的應變量越大。



目次

摘要.....	I
目次.....	VI
表次.....	VII
圖次.....	VIII
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	11
第一節 雨量的預警	11
第二節 變位的預警	15
第三章 雨量參數與預警值	19
第一節 實際案例	19
第二節 不同滑動深度適用之雨量參數	21
第三節 不同滑動深度適用之雨量預警值	28
第四章 邊坡崩塌時的應變量	37
第一節 模型試驗	37
第二節 實際案例	39
第三節 數值模擬	40
第五章 結論.....	49
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期初審查會議記錄暨回覆辦理情形	附錄-1
附錄二、期中審查會議記錄暨回覆辦理情形	附錄-3
附錄三、期末審查會議記錄暨回覆辦理情形	附錄-6

表次

表 1 邊坡穩定性分級	5
表 2 邊坡模型之參數	21
表 3 邊坡模型不飽和參數	22
表 4 不同降雨延時及重現期雨量	24
表 5 深層滑動面最適合之雨量時間參數	25
表 6 淺層滑動面適用之雨量時間參數	26
表 7 深層滑動面適用之雨量時間參數	27
表 8 淺層滑動面適用之雨量時間參數	28
表 9 深層滑動面之崩塌雨量	29
表 10 淺層滑動面之崩塌雨量	31
表 11 滑動面適用之崩塌雨量門檻值	34
表 12 實際案例之平均應變	39
表 13 PLAXIS 材料與水力參數	41
表 14 初始 EDEM 微觀參數	44

圖次

圖 1 目前大規模崩塌雨量預警值	3
圖 2 研究流程圖	4
圖 3 由崖長計算邊坡的應變	6
圖 4 大規模崩塌發生潛勢和應變速率與應變的關係	8
圖 5 杉井法.....	9
圖 6 基於警戒正切角的四級多重警報標準	10
圖 7 中二區雨型安全係數最小時間點和不同降雨重現期的關係 ...	12
圖 8 適用與不適用於預警之雨量時間參數曲線	13
圖 9 雨量時間參數曲線與崩塌之雨量門檻值	14
圖 10 試驗配置.....	16
圖 11 荷重和時間的關係.....	17
圖 12 四種弱面位態的邊坡模型	18
圖 13 平均應變的計算方式	18
圖 14 不同雨量時間參數曲線和崩塌時間的關係	20
圖 15 簡單邊坡模型	22
圖 16 邊坡初始地下水位	23
圖 17 邊坡的滑動面深度	23
圖 18 不同雨型之降雨百分比	24
圖 19 降雨使地下水位上升之範例	24
圖 20 可能崩塌雨量範圍	33
圖 21 雨量時間參數和滑動面深度的關係	35
圖 22 崩塌門檻值和滑動面深度的關係	36
圖 23 影像分析邊坡變形量	38
圖 24 各弱面為態邊坡變形區應變	38

圖 25 本研究數值邊坡模型	41
圖 26 PLAXIS 計算出之滑動面	42
圖 27 岩屑層有限元素法與分離元素法簡單直剪試驗的擬合	43
圖 28 光華邊坡 EDEM 模型	45
圖 29 監測點位.....	46
圖 30 平均累積位移與折減次數關係圖	48



第一章 緒論

第一節 動機與目的

大規模崩塌常造成人們財產和生命的重大損失，所以若能對坡地崩塌潛勢做評估，或大規模崩塌的發生做預警，將能減低這些災害造成的損失和山坡地居住或活動的風險。邊坡的穩定狀況通常以其安全係數做為參考，以整個滑動面來說安全係數可定義為 $F=R/D$ ， R 為滑動面的阻抗， D 為下滑的驅動力。邊坡材料強度越大滑動面的阻抗越大，而邊坡坡度越陡下滑的驅動力越大。當安全係數小於 1 時即會產生不穩定的狀況，此時邊坡可能會產生有限的位移(邊坡位移後又達到平衡狀態)或崩塌(邊坡位移後無法達到平衡狀態而垮掉)。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。板岩的劈理發達，在板岩邊坡露頭或鑽探岩心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。

國內幾個著名的案例中，邊坡崩塌造成重大災難如林肯大郡、國道三號、九份二山、草嶺與小林村，崩塌發生前並未聽說有明顯的滑動狀況，這些是屬於砂頁岩的地層；另外幾十年來已陸陸續續滑動或邊坡變形的如光華、梨山、廬山與霧社水庫，目前尚未整個崩塌，其中光

華屬於硬頁岩與板岩，其他屬於板岩層。這些大規模崩塌案例中，林肯大郡、國道三號、九份二山、草嶺屬於沉積岩的順向坡；小林村為沉積岩的斜交坡但兩組弱面交線出露；光華屬於硬頁岩及板岩的逆向坡；梨山屬於板岩的逆向坡；廬山與霧社水庫屬於板岩的斜交坡；顯然弱面位態在邊坡的變形和崩塌行為扮演了重要的角色。

除了強震，豪雨是引致深層崩塌的可能原因，而雨水入滲到坡體內的量是影響邊坡穩定的主要因素。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)。降雨強度、累積降雨量，降雨延時常被用於預測邊坡崩塌的因子之一。淺層崩塌受地下水位的影響較小，甚至滑動面可能在地下水位之上，深層崩塌受地下水位上升的影響較大。延時長的降雨通常會使地下水位明顯上升，降雨造成地下水位上升的歷程受很多因素影響，如降雨大小和雨型、不飽和與飽和的滲透係數等，而不飽和的滲透係數會隨著含水量提高而變大。

雨量、邊坡材料的水力參數影響地下水位的變化，目前預警的方式多以雨量為主，地下水位的監測為輔，除了因局部地下水位變化較

難代表整體邊坡的情況以外，也因為雨量可由雷達技術來預測，相較於地下水位，由雨量來預警較能超前部屬。許多崩塌的預警以降雨強度(mm/hr)和累積雨量(mm)作為預警值，如中橫公路降雨若超過8mm/hr 就會封路。但深層崩塌與地下水位上升比較有關，降雨入滲到地下水位上升需要比較久的時間，太大的降雨強度無法全部入滲成為地下水而形成逕流，所以用一小時降雨強度(mm/hr)對深層崩塌進行預警並不是很適合。目前水保局通常以雨量 250~650mm/24hr 做為第一型大規模崩塌預警的參考，600~900mm/24hr 做為第二型大規模崩塌預警的參考(圖 1)。



圖 1 目前大規模崩塌雨量預警值 (土石流及大規模崩塌防災資訊網, 2023)

目前為了得知大規模崩塌潛勢邊坡的變位情況，設置許多監測儀器或進行大範圍監測，崩塌地的變位時有所聞並且獲得關注，但是崩塌地仍未完全崩塌，因此關於邊坡崩塌的預警需要進一步探討。本研究考慮地質弱面位態和崩塌深度，分析實際案例和實驗室邊坡模型試

驗資料，並利用數值方法探討雨量和變位的預警，研究流程如圖 2。

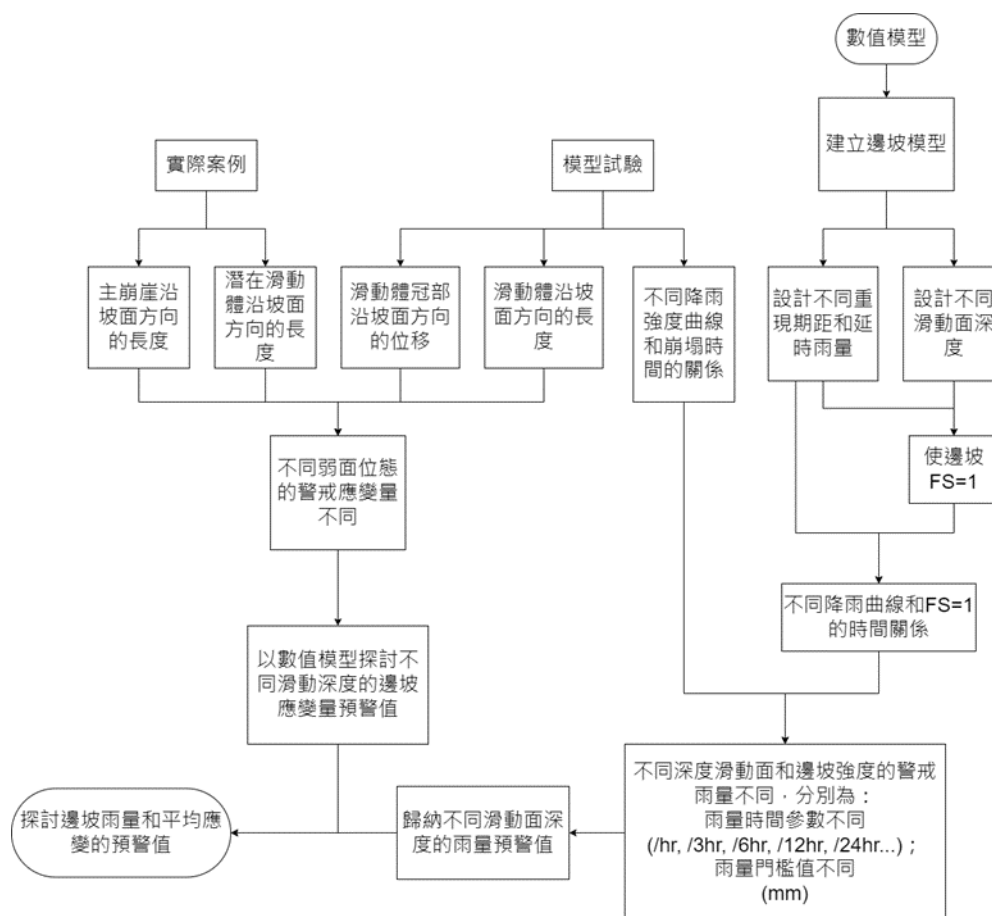


圖 2 研究流程圖

第二節 相關研究

邊坡崩塌的觸發因子通常可分為地震或降雨，降雨造成邊坡破壞的現象，已經有許多相關之研究(林經捷，2006；Calvella et al., 2008)。

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。

弱面會使岩體的力學行為產生異向性，採用三維有限元素數值方法，考慮一組弱面，研究弱面位態對邊坡穩定的影響，可發現幾種安全係數較低的弱面位態(Yeh et al., 2020; Yeh et al., 2022)。依照水土保持技術規範順向坡、斜交坡、逆向坡的定義，可歸納如表 1。弱面出露的順向坡安全係數最小；弱面與坡面一致的順向坡及弱面高角度的順向坡與逆向坡安全係數也較小。

表 1 邊坡穩定性分級

分級	安全係數	弱面與坡面的相對位態
A	較小	順向坡，弱面出露
B		順向坡，弱面與坡面一致 順向坡，弱面極高傾角 80° - 90° 逆向坡，弱面極高傾角 70° - 90°
C	較大	其它

岩石破壞與破裂面的傳播有關(fracture propagation)，深層崩塌通

常屬於岩體的破壞，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。

Chigira (2009)為了排除滑動體尺寸的影響，提出下式計算邊坡變形區域的平均應變：

$$\bar{\varepsilon} = \frac{d}{L} \quad (1)$$

其中， $\bar{\varepsilon}$ 表示邊坡滑動體的平均應變(即變形區應變)， d 表示滑動體冠部沿坡面方向的位移(崖長度)， L 表示滑動體沿坡面方向的長度(圖 3)。

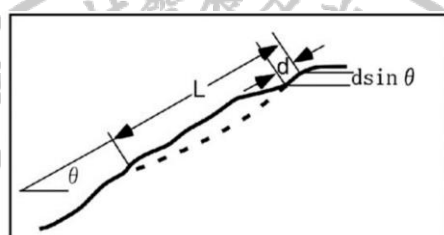


圖 3 由崖長計算邊坡的應變 (Chigira, 2009)

邊坡過去的歷史中或多或少已累積了一些應變，可參考累積的應變量評估邊坡崩塌的潛勢；Chigira (2009)得到崩塌案例的臨界應變在 1-16%，累積應變量越大邊坡越可能崩塌。此外，邊坡的應變速率越大且累積應變越大，崩塌越可能發生，圖 4 中的路徑為一邊坡崩塌前可能的路徑。位移速率是常用的預警方法之一，如福圓輝旗 (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崩塌。通過設置在模型上

的伸縮計監測表面位移，其結果發現了邊坡累積位移過程中，運動規律與位移速率的倒數有關。[Jaboyedoff et al. \(2012\)](#)提到邊坡的應變速率越大且累積應變越大，崩塌越可能發生(圖 4)；[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 5)，然後，在圖 5 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。[Xu et al. \(2020\)](#)提出位移速率與平均位移速率的比值來計算正切角(α)，並表明已對 14 處黃土邊坡崩塌成功地預警。他們將 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 6)。

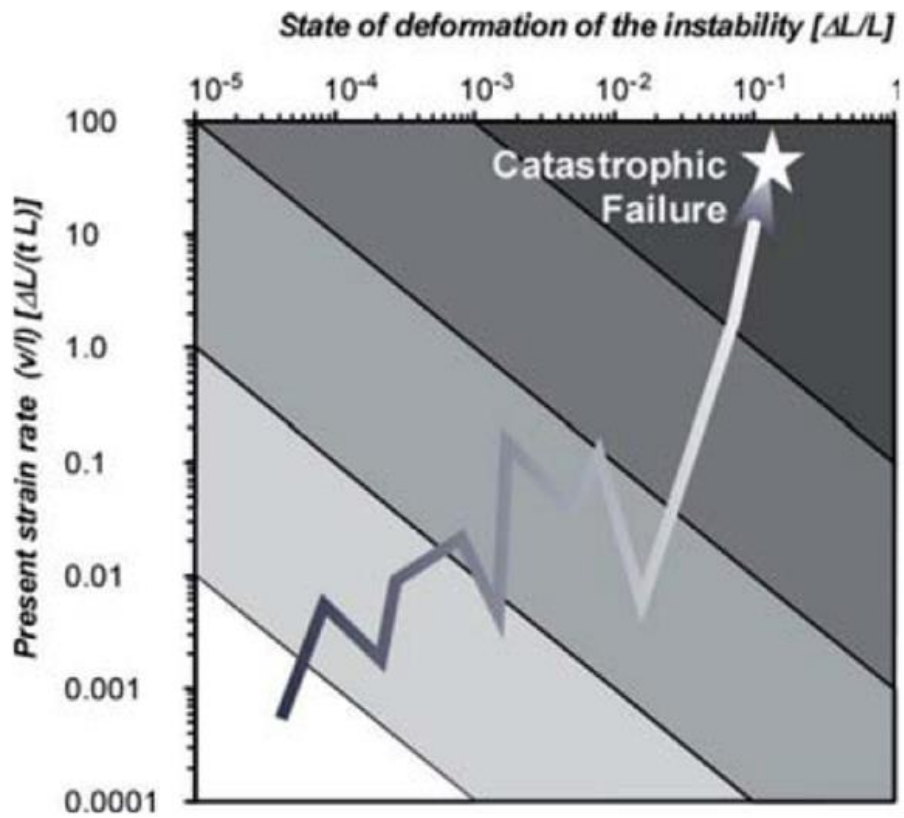


圖 4 大規模崩塌發生潛勢和應變速率與應變的關係 (深色區域代表崩塌潛勢大的區域) (Jaboyedoff et al., 2012)

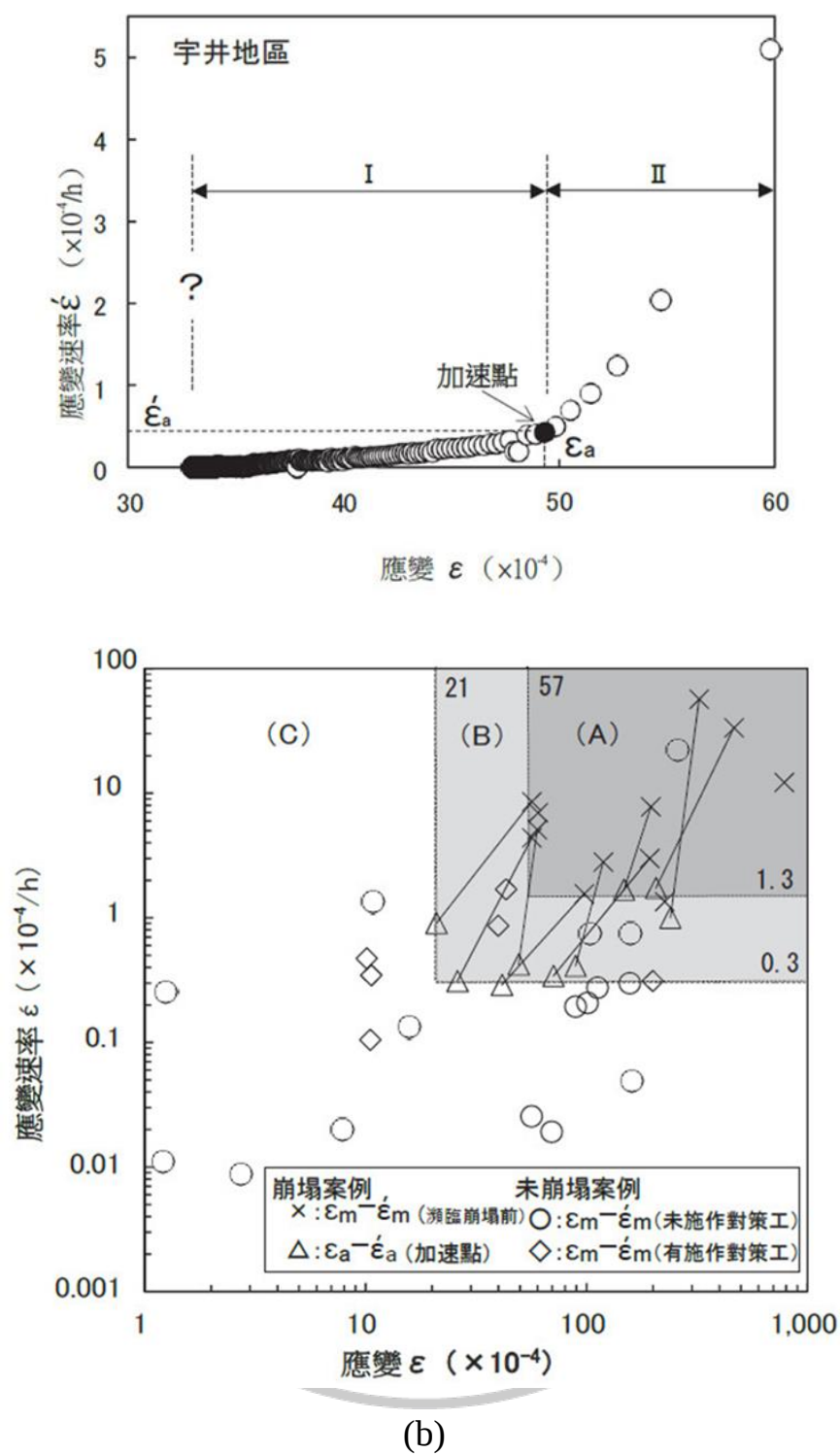


圖 5 杉井法 (a) 加速點讀取方式之一例 (b) 平均應變與應變速之關係

(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)

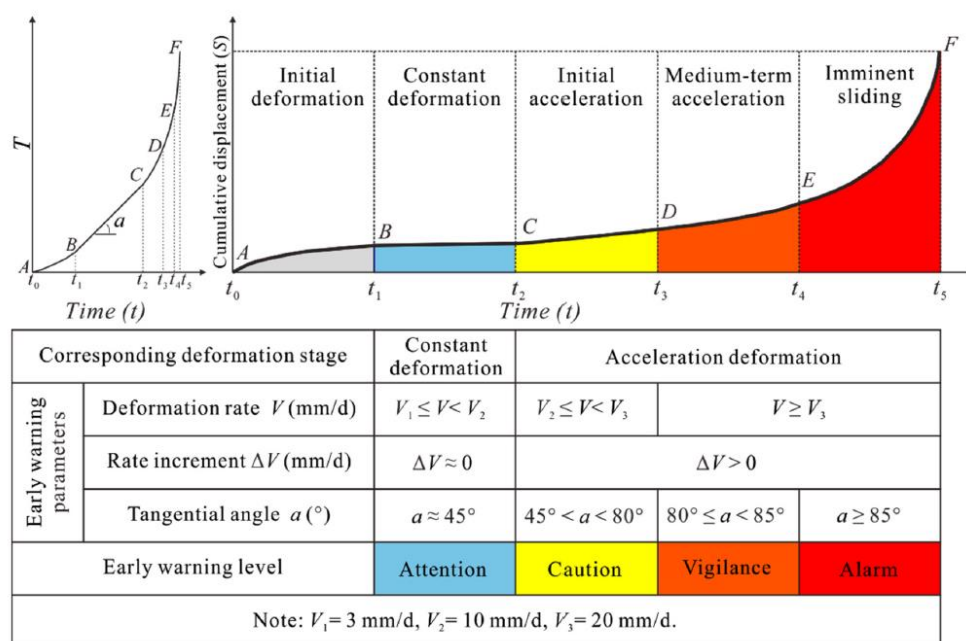


圖 6 基於警戒正切角的四級多重警報標準 (Xu et al., 2020)



第二章 研究方法

第一節 雨量的預警

本研究蒐集降雨觸發已崩塌案例，包括小林村、土場、猴硐崩塌事件資料，探討不同雨量時間參數曲線和崩塌時間的關係。另外利用軟體 PLAXIS LE 建立邊坡模型，設計不同滑動面深度，考慮在不同雨型、不同重現期距和延時雨量情況下，雨量參數曲線和安全係數等於 1 或安全係數最小時的時間關係。一般常見的雨量資料為每小時雨量(mm/hr)與總累積雨量隨時間的變化，本研究進一步考慮不同雨量參數與崩塌時間點的關聯。所謂的雨量參數，是指在降雨事件中，挑選一時間間隔作為累積之長度，並自降雨事件開始起，逐時累計到降雨事件結束之累積雨量圖；即 3 小時雨量參數為前 3 小時之累積降雨；1 小時雨量參數則與每小時降雨之降雨組體圖無異。

不同深度滑動面適用於警戒的雨量參數(/hr, /3hr, /6hr, /12hr, /24hr...)與雨量門檻值(mm)可能不同。以中二區雨型(水文設計手冊，2001)為例，在相同材料強度、滑動面深度，降雨延時 48 小時，但不同降雨重現期的情況下，如圖 7，可以發現對於 4 種降雨重現期之降雨，安全係數最小值發生之時間點均為第 38 小時。若該場降雨未在此安全係數最小值發生的時間點前發生崩塌，在此之後由於安全係數上升也不可能崩塌。由於在同一雨型、不同重現期狀況下，能觀察安全

係數最小時間點相同，但此時安全係數未必已小於 1 的狀況，為確保雨量時間參數及雨量警戒值能適用於該雨型之所有重現期降雨，本研究將以安全係數最小值發生的時間點，作為雨量參數(/hr, /3hr, /6hr, /12hr, /24hr...)選定的依據；另外安全係數等於 1 的時間點，對應到的雨量作為警戒值(mm)選定的依據。

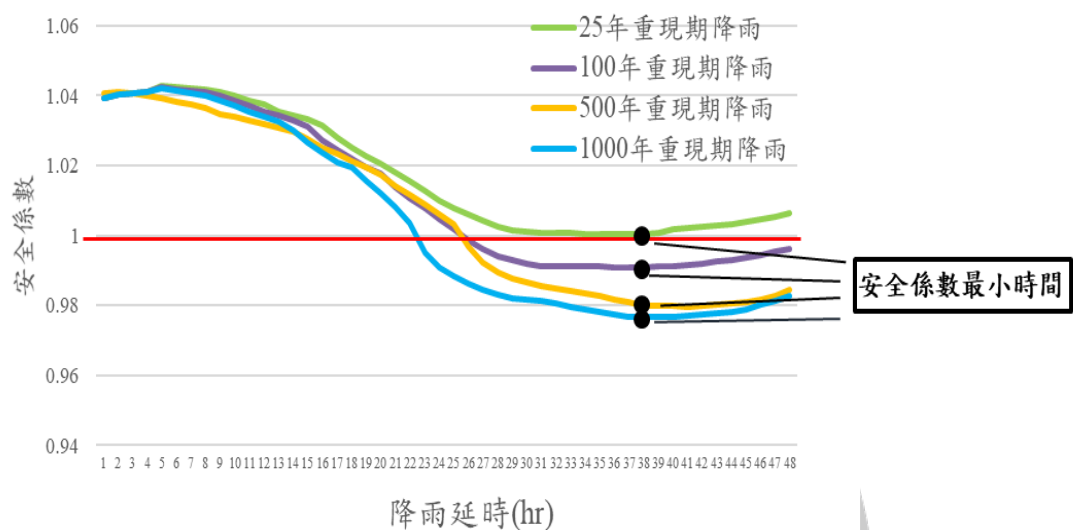


圖 7 中二區雨型安全係數最小時間點和不同降雨重現期的關係

選定適用之雨量時間參數時，應選擇雨量參數曲線在安全係數最小值發生時尚未到達峰值者。下圖 8 是以中二區雨型，25 年降雨重現期為例，安全係數最小值約為 1；若選定圖中 12 小時曲線建立崩塌預警值，會發現對應安全係數最小值發生時的累積雨量為 170mm，當累積雨量第一次到達該值時(第 18 小時)尚未發生崩塌，因此 12 小時雨量參數曲線不適合作為崩塌的預警曲線，反觀 30 小時雨量參數曲線，由於累積雨量峰值在安全係數最小值發生之後，因此 30 小時

及以上之雨量參數曲線能作為崩塌的預警曲線。

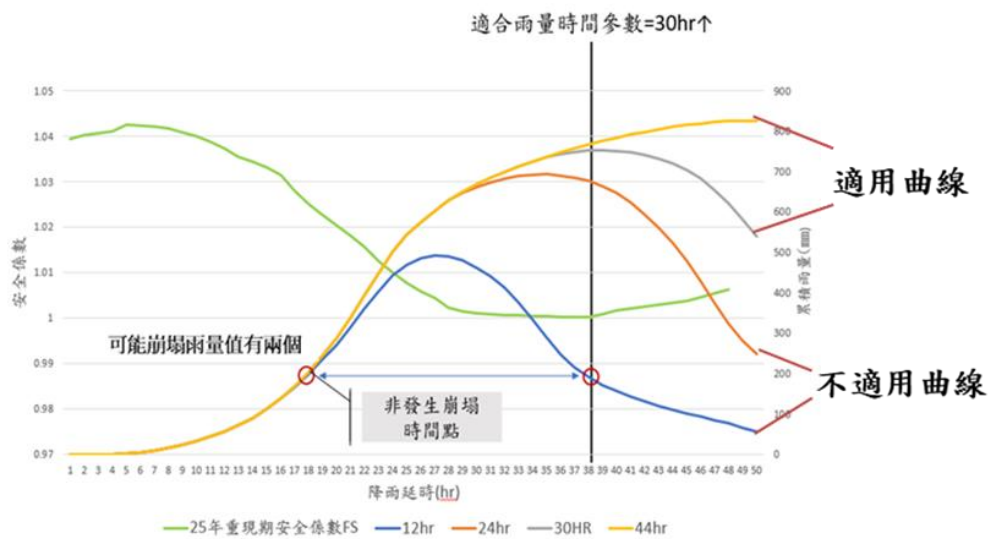


圖 8 適用與不適用於預警之雨量時間參數曲線
(中二區雨型，25 年重現期降雨)

圖 9 則是以中二區雨型，500 年重現期降雨為例，安全係數等於 1 的時間點在第 26 小時，較圖 8 25 年重現期安全係數等於 1 的時間點還早；因此單就 500 年重現期降雨，可以選擇 12、24、30 小時雨量參數曲線作為預警的依據，但為確保雨量參數及其雨量警戒值能適用於該雨型之所有重現期降雨(如 25 年重現期距)，所以雨量參數之選擇，仍必須根據重現期 25 年雨量，安全係數最小值發生的時間(第 38 小時)，選取適合的雨量參數，即 30 小時雨量參數，而不能使用 12 小時或 24 小時雨量參數。降雨警戒值部分，在確定採用 30 小時以上之雨量參數曲線後，在曲線上對照安全係數等於 1 時之時間點(第 26 小時)，可得雨量值 735.2mm，該值即可作為重現期 500 年之降雨量

的雨量預警值。

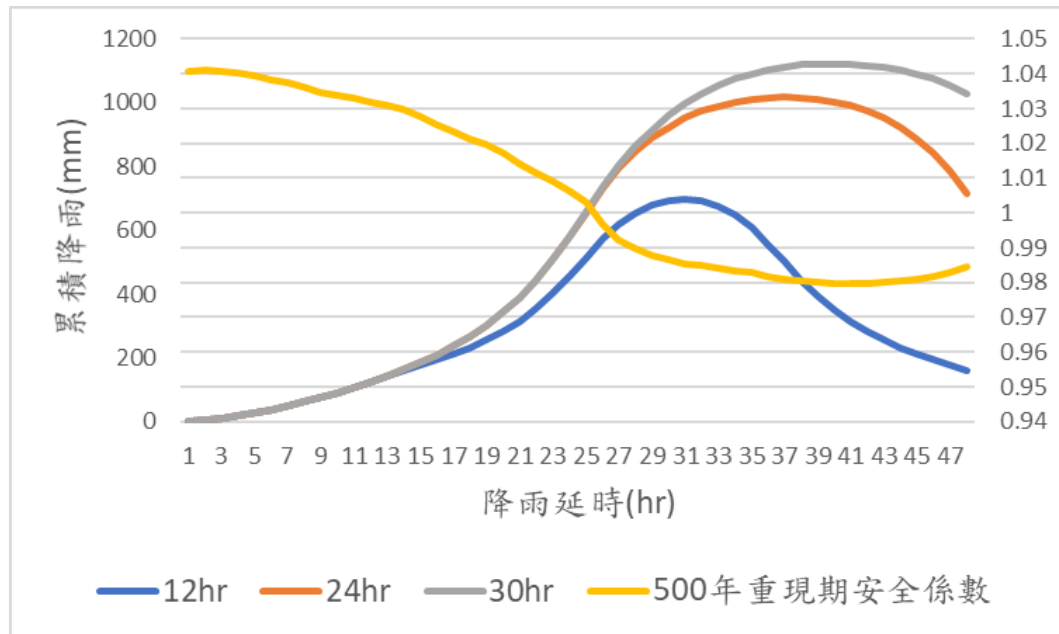


圖 9 雨量時間參數曲線與崩塌之雨量門檻值

(中二區雨型，500 年重現期降雨)

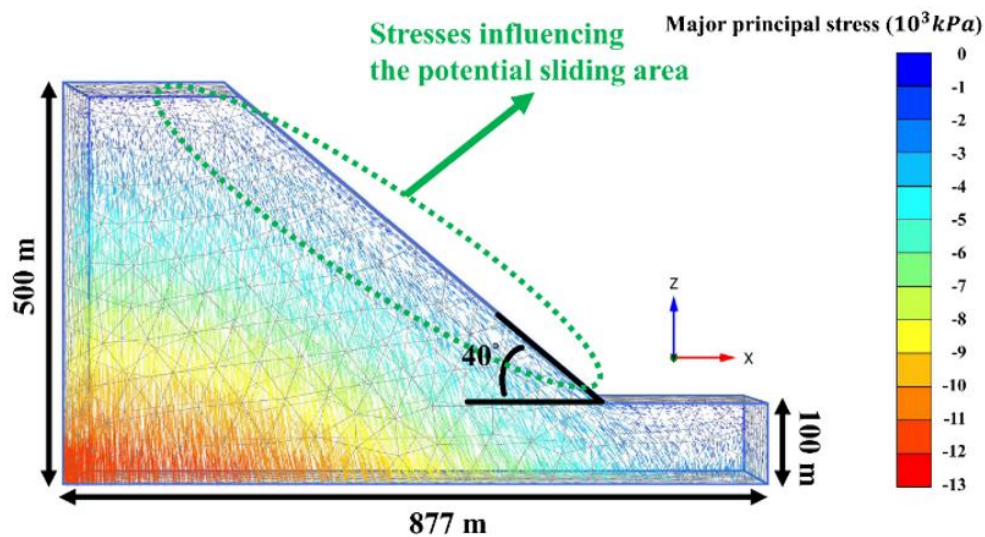
本研究在討論雨量參數與崩塌時間關係的模擬中，會考量不飽和土體在降雨後基質吸力下降，導致安全係數的降低，因此在 PLAXIS LE 軟體的邊坡模型中，材料參數部分需要使用 Unsaturated Phi-b 模式定義地質材料的強度。在不飽和土壤中，基質吸力($u_a - u_w$)會增加不飽和土壤的抗剪強度，因此在 PLAXIS LE 中以線性近似不飽和剪力強度。線性的不飽和土壤抗剪強度方程式如下式：

$$\tau = C' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

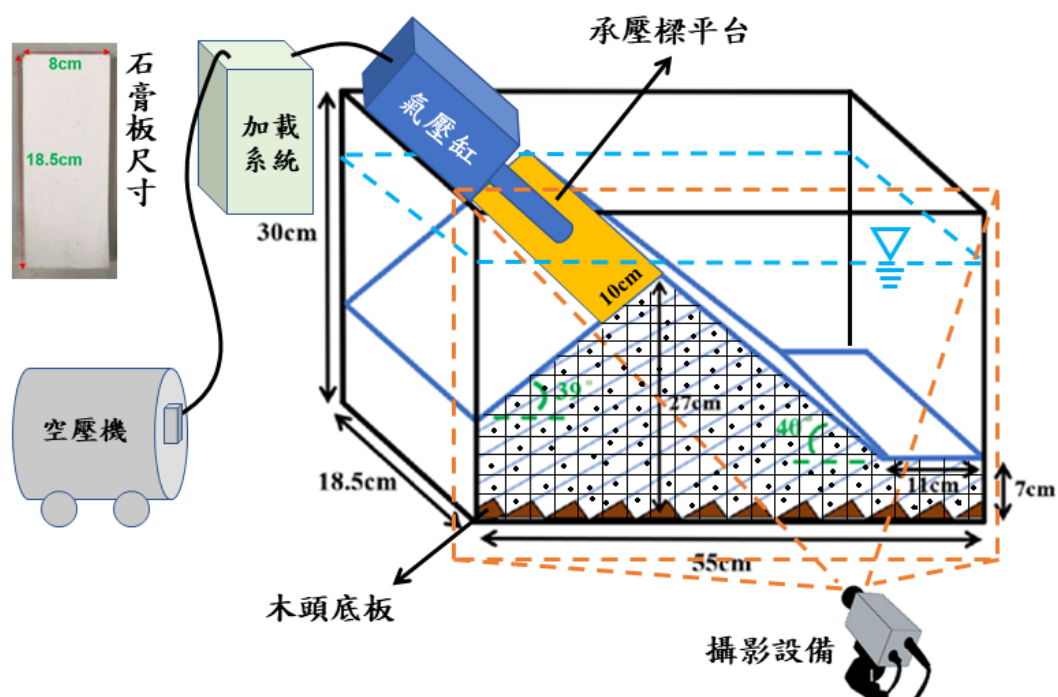
其中 τ 為剪力強度， C' 為有效凝聚力， ϕ' 為有效摩擦角， ϕ^b 反應因基質吸力導致的剪力強度增加量， σ_n 為正向應力， u_a 為孔隙空氣壓力， u_w 為孔隙水壓力。

第二節 變位的預警

我們以實驗室小尺度的邊坡物理模型探討不同弱面位態對邊坡變形與崩塌行為的影響，將石膏板切割成每塊長寬為 18.5cm×8cm 的試體，接著將每塊試體浸水弱化約二十天，再取出用於試驗，並使用約 140 塊石膏板試體堆疊成坡高 20 公分、坡面傾角 40°、模型寬度 18.5 公分之邊坡。以數值模擬實際邊坡重力下的主應力，將可能崩塌的區域的主應力方向取平均，可以得到主應力的平均方向與垂直夾角 39°，為施予坡頂傾斜荷重，將坡頂切削成傾角 39°、長 10 公分之平面，並使用角度測量儀確認坡頂的傾斜角度，邊坡模型底部放置精準雷射雕刻製成的各位態木頭底板，防止模型底部滑動影響結果，並依照底板角度堆疊不同位態之邊坡，試驗配置如圖 10。



(a)



(b)

圖 10 (a)數值模擬實際邊坡示意圖 (b)實驗室物理模型試驗配置(李應辰，2022)

接著施加荷重於邊坡模型坡頂，並透過壓力比例閥每 30 分鐘自動增加荷重，當加壓至最大加壓值時，氣壓不再隨時間增加，初始荷

重為 35kgf，每 30 分鐘增加約 20.4kgf，最大加壓為 975kgf，如圖 11。

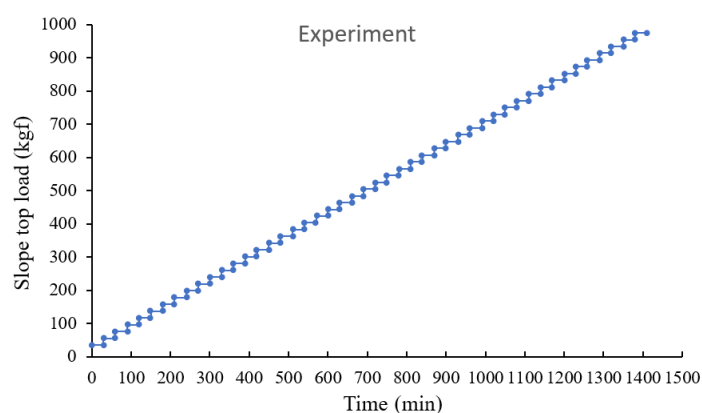
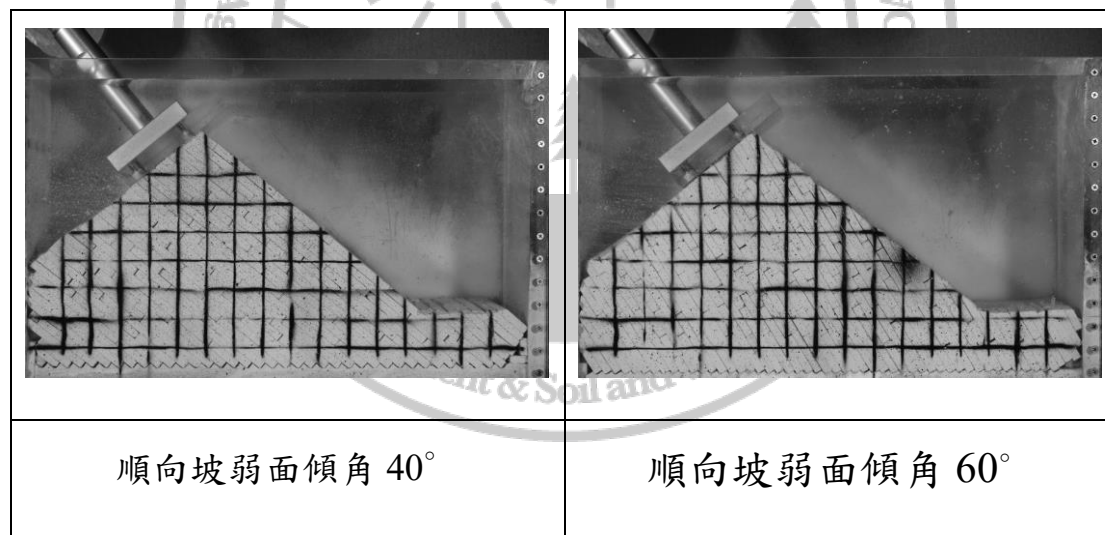


圖 11 荷重和時間的關係

為探討弱面位態邊坡變形行為的影響，本研究之順向坡邊坡模型採用弱面傾角 40° 及 60° ，分別代表弱面與坡面傾角平行之邊坡及弱面較陡之邊坡；逆向坡邊坡模型採用弱面傾角 30° 及 60° ，分別代表與弱面傾角較緩及較陡之邊坡，如圖 12。



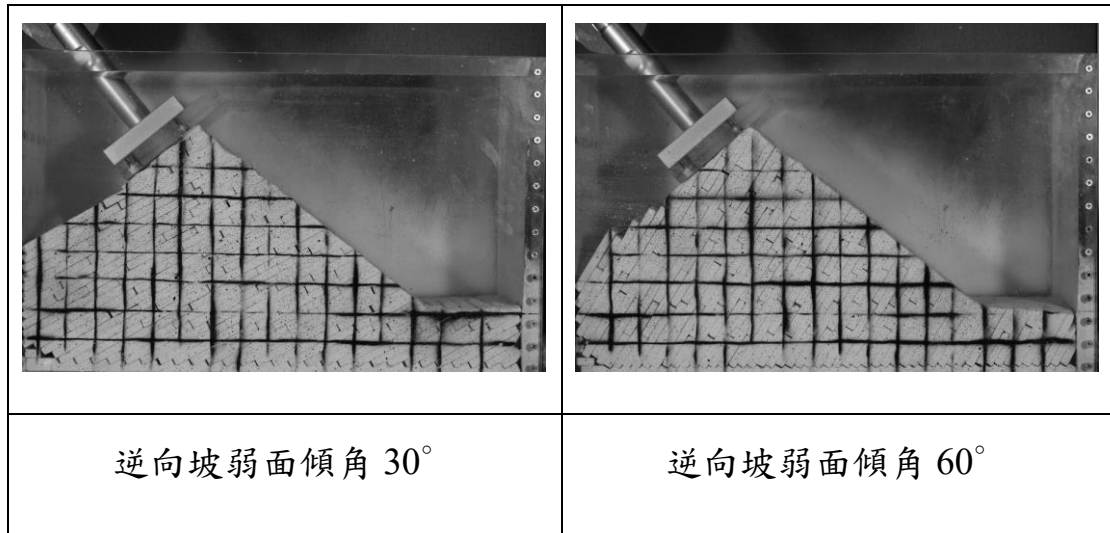


圖 12 四種弱面位態的邊坡模型

透過邊坡崩塌前後的相片確定邊坡主要變形區域，以 GOM Correlate 影像分析邊坡的變形量，透過前後兩張照片的變化，計算位移。參考 Chigira(2009)我們以下式計算邊坡變形區域的平均應變：

$$\bar{\varepsilon} = \frac{d}{l_0} \quad (2)$$

其中， $\bar{\varepsilon}$ 表示滑動體的平均應變(即變形區應變)， d 為滑動體的平均位移， l_0 表示滑動體沿坡面方向的長度(圖 13)。

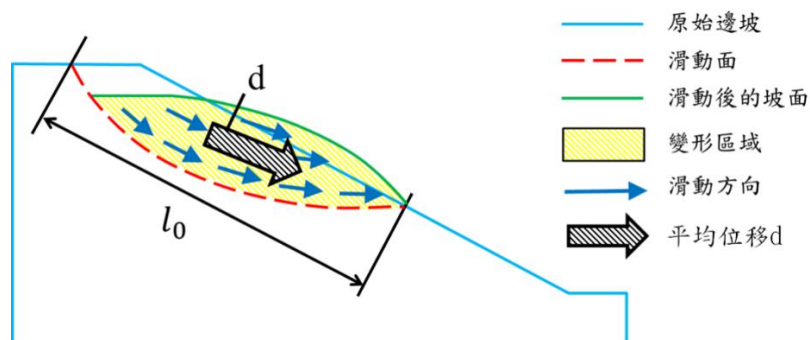


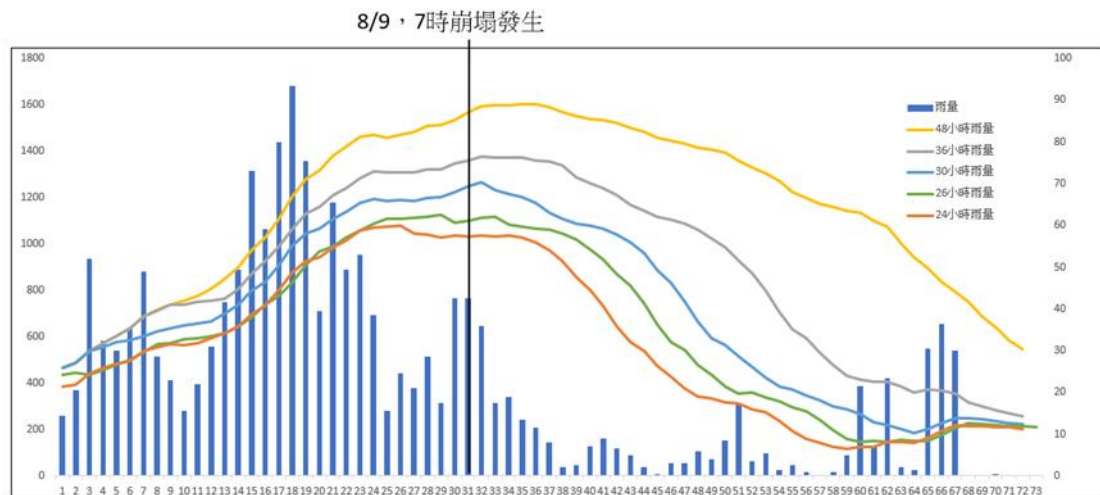
圖 13 平均應變的計算方式

第三章 雨量參數與預警值

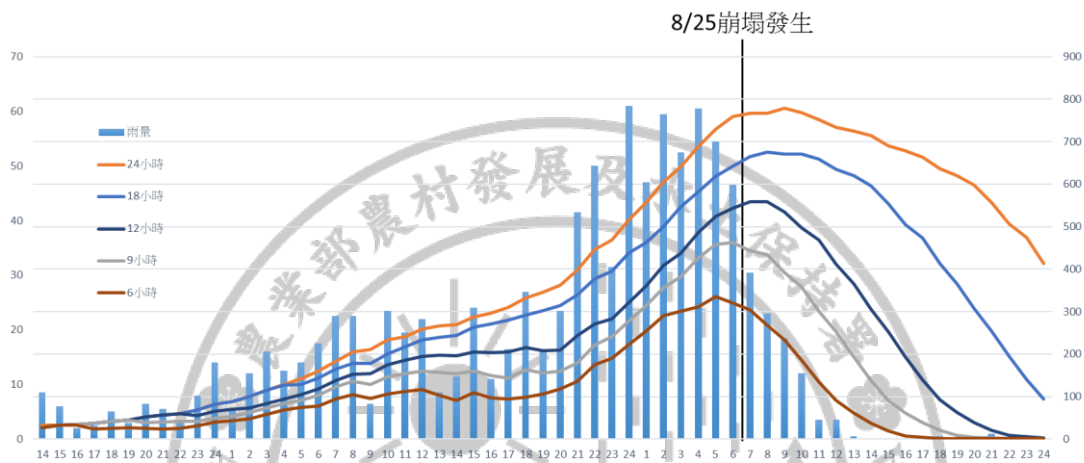
第一節 實際案例

關於雨量的預警，我們蒐集 2009 莫拉克颱風時小林村附近的雨量、2004 年土場之豪雨崩塌，以及 2021 年猴硐之崩塌事件，分析不同降雨參數曲線與崩塌時間點的關係。

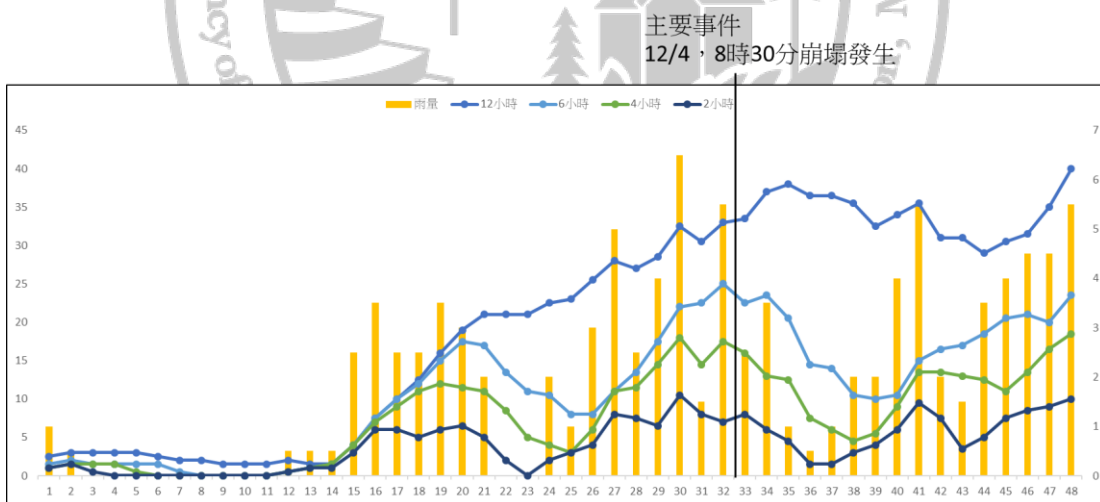
在研究中發現由於小林村崩塌深度為 86.2m，土場崩塌深度為 20~30m，猴硐崩塌深度為 10m，根據圖 14(a)，小林村崩塌在 30 小時雨量參數曲線峰值前崩塌，則 30 小時雨量可稱為小林村的雨量參數。另外，此時的雨量值落在 1230mm，也就是小林村的雨量預警值可以用 1230mm/30hr 來當作參考。根據圖 14(b)，土場則在 18 小時雨量參數曲線峰值前崩塌，則 18 小時雨量可稱為土場的雨量參數。另外，此時的雨量值落在 664.5mm，也就是土場的雨量預警值可以用 664.5mm/18hr 來當作參考。根據圖 14(c)，猴硐則在 12 小時雨量參數曲線峰值前崩塌，則 12 小時雨量可稱為猴硐的雨量參數；另外，此時的雨量值落在 33mm，也就是猴硐的雨量預警值可以用 33mm/12hr 來當作參考，因此本計畫將以此為出發點，探討雨量參數、崩塌雨量預警值。



(a)



(b)



(c)

圖 14 (a)小林村、(b)土場(c)猴硐不同雨量參數曲線和崩塌時間的關係

第二節 不同滑動深度適用之雨量參數

利用 Plaxis LE 探討雨量參數，簡單邊坡模型尺寸參考廬山邊坡作為設定依據，長寬高分別為 843m, 900m, 500m，坡度 30 度之邊坡，其表層黃色部分為 30m 厚之風化層(圖 15)，並建立初始地下水之水位，坡頂之初始地下水位設為 250m 深，而坡趾之地下水位則與坡趾同高，設為 100m，其餘邊界除坡面外均設為無流量。在 Plaxis LE 軟體中地下水模式運算出地下水穩態時的水位分布如圖 16，以此穩態水位做為降雨前之初始條件，並控制滑動面產生兩種不同崩塌深度(圖 17)，作為本研究的邊坡基本條件假設。

在 PLAXIS LE 軟體的邊坡模型中，如果要考量不飽和材料強度對安全係數的影響，需要使用 Unsaturated Phi-b 模式定義地質材料強度。此模式在軟體中需輸入之參數包含凝聚力(C')、有效摩擦角(ϕ')、不飽和剪力強度角(ϕ^b)、土壤單位重、飽和傳導參數(k)等。參數部分參考(Chang and Huang 2015)對廬山邊坡之設定，而 ϕ^b 在無其他實驗資料推估的狀況下，預設為 0.5 倍的摩擦角(ϕ')。輸入之參數值如表 2。

表 2 邊坡模型之參數

崩積層凝聚力(c)(kPa)	3
崩積層摩擦角(ϕ')(deg)	22
崩積層飽和剪力強度角(ϕ^b)(deg)	11

岩層凝聚力(c)(kPa)	28
岩層摩擦角(ϕ')(deg)	27
岩層飽和剪力強度角(ϕ^b)(deg)	13.5
土壤單位重(kN/m ³)	26.4
飽和傳導係數 k(m/hr)	0.056

不飽和水力參數部分，則參考林唯庭(2019)論文內之不飽和水力參數值，在軟體中以 Van Genuchten Fit 模式定義不飽和地下水的流動，輸入之參數值如表 3。

表 3 邊坡模型不飽和參數

avg(1/kPa)	0.002
nvg	1.3
mvg	0.2308
Residual VWC	0.286

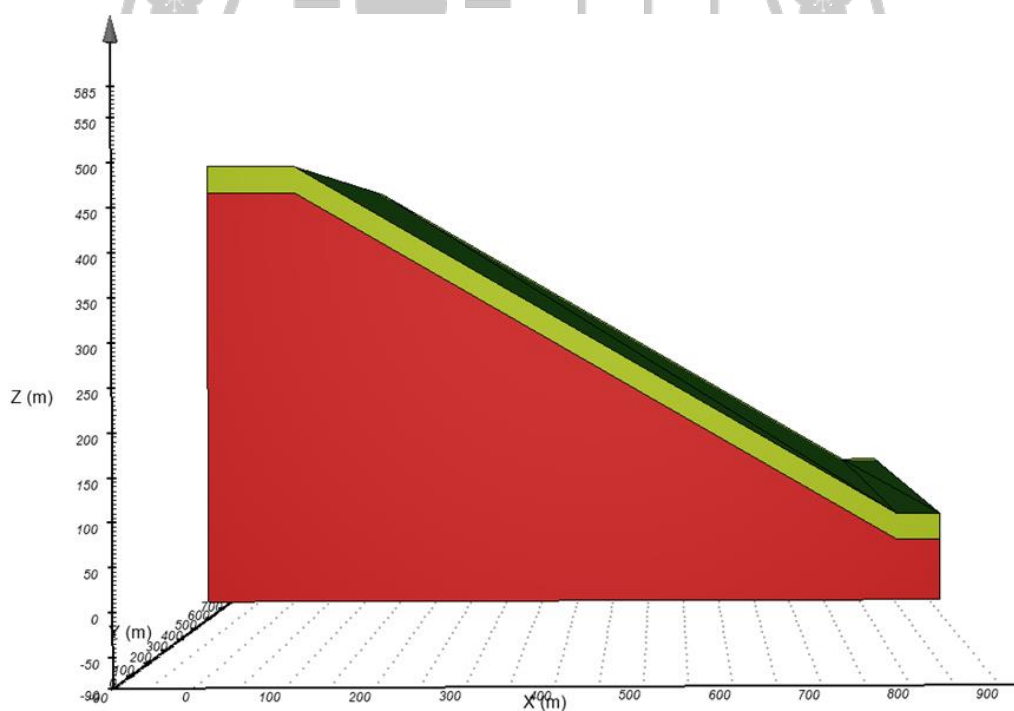


圖 15 簡單邊坡模型

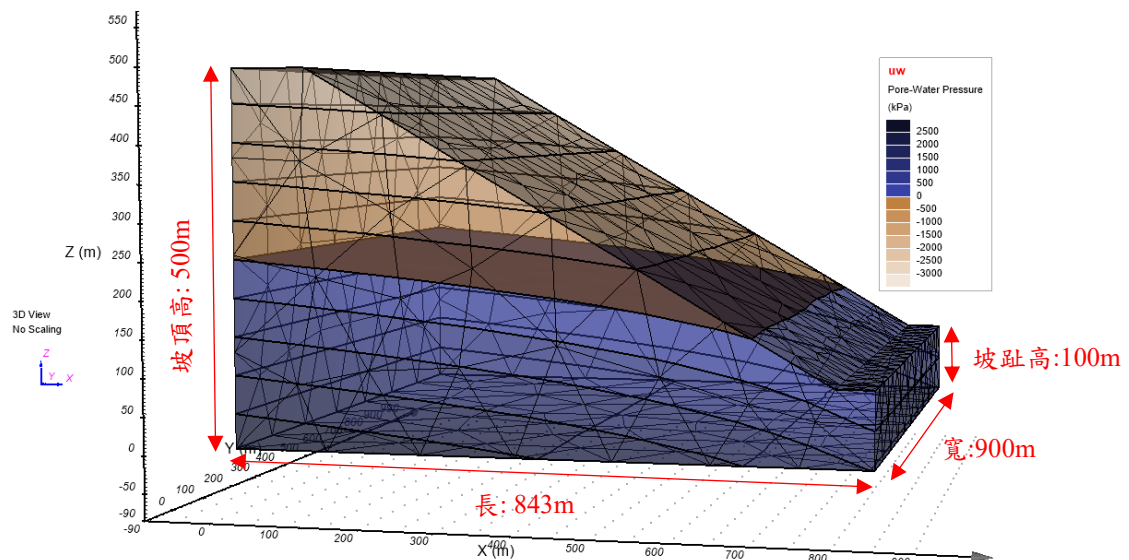
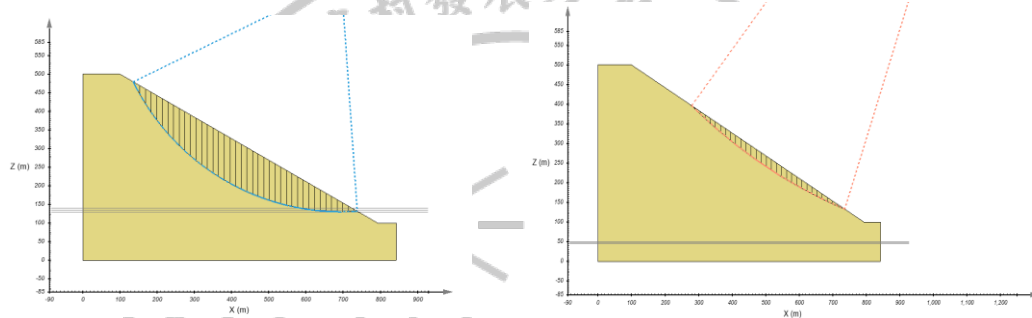


圖 16 邊坡初始地下水位



滑動面 100m 深之滑動面

滑動面 25m 深之滑動面

圖 17 邊坡的滑動面深度

分別以 48 小時及 72 小時降雨延時之 100、500 年重現期距之降雨量如表 4 所示，套用三種不同(前峰、後峰、中二區) 雨型，降雨百分比如圖 18，進行邊坡穩定分析。初始水位經過上述模擬降雨後，地下水位上升(圖 19)，會使安全係數下降。

表 4，不同降雨延時及重現期雨量

重現期 降雨延時	100 年	500 年
48 小時	1049.6mm	1296.9mm
72 小時	1311.7mm	1623mm

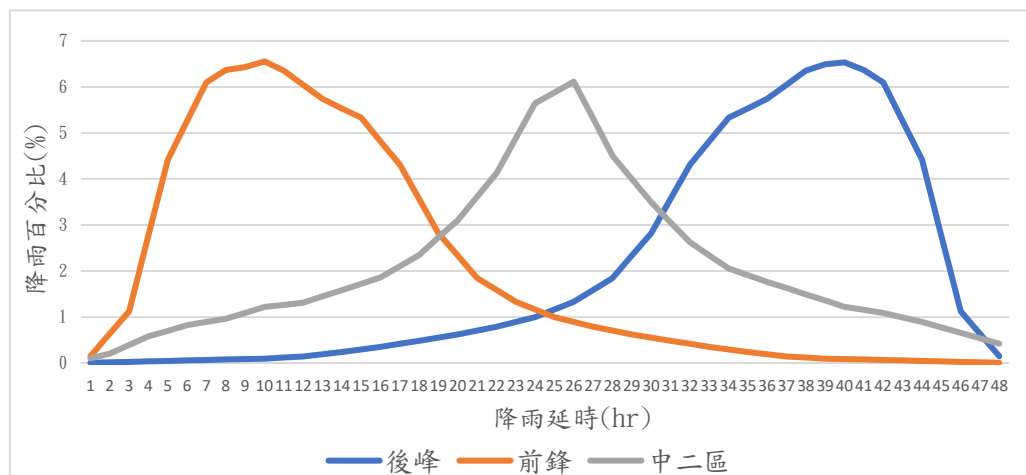


圖 18 不同雨型之降雨百分比

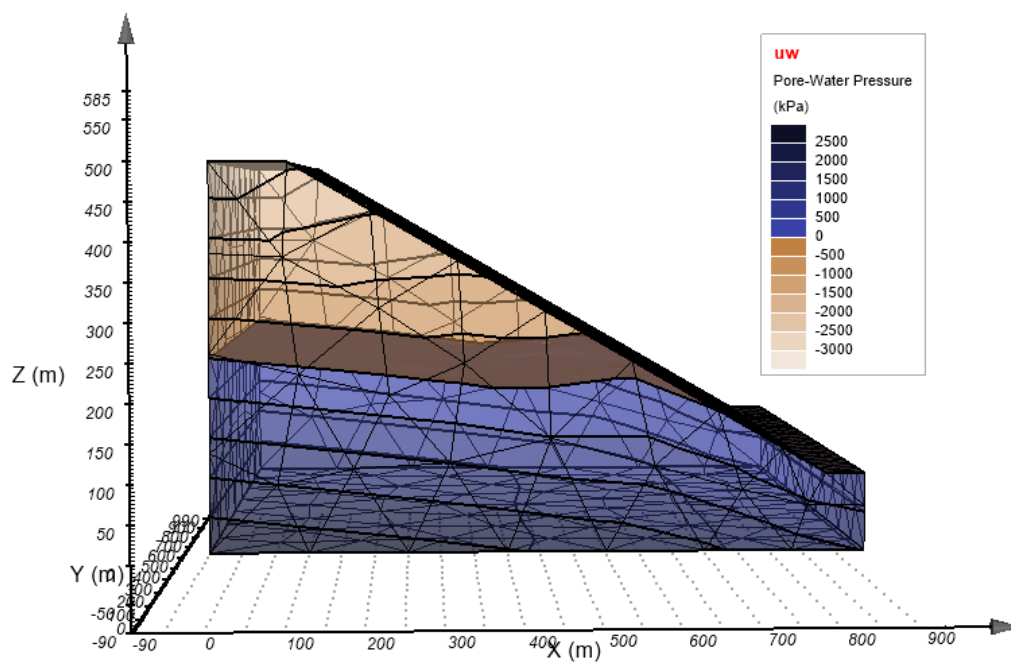


圖 19 降雨使地下水位上升之範例

數值模擬可得到 48 小時及 72 小時降雨延時，各雨型對於深層及淺層滑動面，最適合之雨量參數(表 5 與表 6)。

表 5 深層滑動面最適合之雨量時間參數(a)降雨延時 48 小時

(b)降雨延時 72 小時

(a)降雨延時 48 小時

中二區雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間(hr)
100	30	40
500	30	40
前峰設計雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間(hr)
100	24	21
500	24	21
後峰設計雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間(hr)
100	30	44
500	30	45

(b)降雨延時 72 小時

中二區雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間(hr)
100	36	56
500	40	58
前峰設計雨型降雨		

重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間 (hr)
100	52	41
500	52	41
後峰設計雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間 (hr)
100	36	66
500	36	66

表 6 淺層滑動面最適合之雨量時間參數(a)降雨延時 48 小時

(b)降雨延時 72 小時

(a)降雨延時 48 小時

中二區雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間 (hr)
100	16	32
500	16	32
前峰雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間 (hr)
100	24	20
500	24	19
後峰雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間 (hr)
100	12	43
500	16	44

(b)降雨延時 72 小時

中二區雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間(hr)
100	24	46
500	24	47
前峰雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間(hr)
100	24	28
500	24	28
後峰雨型降雨		
重現期(年)	最適合雨量時間參數	安全係數最小時間(hr)
100	24	64
500	42	64

將上表之各種情形，取得兩種崩塌深度在不同重現期降雨、不同雨型、不同降雨延時情況下，所適用之最適合雨量時間參數，整理如表 7 及表 8；選擇該深度之崩塌範圍所適用雨量參數的最大值，使該雨量參數能滿足各種不同重現期之降雨。在研究中發現，崩塌所適用之雨量參數受降雨重現期影響較少，但受不同雨型影響較大，並且深層滑動面也可觀察到受降雨延時影響較大。

表 7 深層滑動面適用之雨量參數

48 小時降雨延時			
雨型 重現期	中二區	前峰	後峰
100 年	30	24	30
500 年	30	24	30

最大值:30			
72 小時降雨延時			
雨型 重現期	中二區	前峰	後峰
100 年	36	52	36
500 年	40	52	36
最大值:52			

表 8 淺層滑動面適用之雨量參數

48 小時降雨延時			
雨型 重現期	中二區	前峰	後峰
100 年	16	24	12
500 年	16	24	16
最大值:24			
72 小時降雨延時			
雨型 重現期	中二區	前峰	後峰
100 年	24	24	24
500 年	24	24	24
最大值:24			

第三節不同滑動深度適用之雨量預警值

在第二節得到深滑動面降雨延時 48 小時使用 30hr 雨量參數、降雨延時 72 小時使用 52hr 雨量參數；淺滑動面則皆使用 24hr 雨量參數後，於本節利用該雨量參數曲線，分別進行 48 及 72 小時降雨延時

之 100、500 年重現期距，三種不同(前峰、後峰、中二區) 雨型之降雨模擬。當邊坡安全係數剛好等於 1 時，對應雨量參數曲線之雨量即為崩塌雨量。

本研究將上述各種情形，依照深層滑動面崩塌、淺層滑動面崩塌進行分類，可以得到各種情形適用之雨量參數，在安全係數剛好小於 1 時，雨量參數曲線之累積雨量(崩塌雨量)如表 9、表 10 所示。

表 9 深層滑動面之崩塌雨量(a)降雨延時 48 小時

(b)降雨延時 72 小時

(a)降雨延時 48 小時

中二區雨型降雨		
重現期(年)	30hr 雨量參數之崩塌雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	740	29
500	735	26
前峰設計雨型降雨		
重現期(年)	30hr 雨量參數之崩塌雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	761	16
500	799	14
後峰設計雨型降雨		

重現期(年)	30hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	735	39
500	741	37

(b)降雨延時 72 小時

中二區雨型降雨		
重現期(年)	52hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	731	39
500	773	37
前峰設計雨型降雨		
重現期(年)	52hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	694	27
500	702	22
後峰設計雨型降雨		
重現期(年)	30hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	670	47
500	684	42

表 10 淺層滑動面之崩塌雨量(a)降雨延時 48 小時

(b)降雨延時 72 小時

(a)降雨延時 48 小時

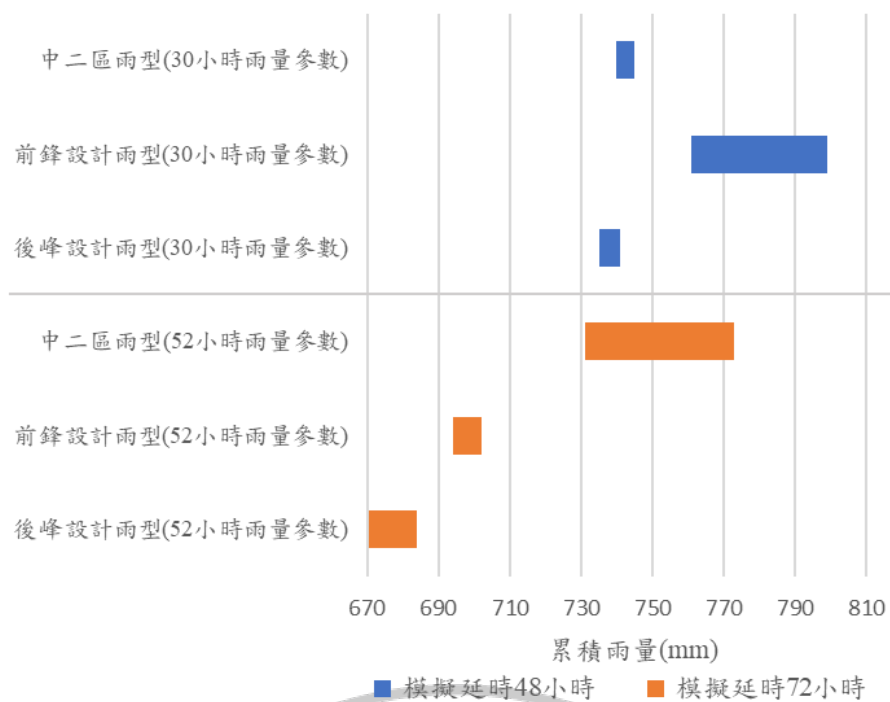
中二區雨型降雨		
重現期(年)	24hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	358	22
500	389	20
前峰設計雨型降雨		
重現期(年)	30hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	382	10
500	388	9
後峰設計雨型降雨		
重現期(年)	30hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	338	33
500	352	32

(b)降雨延時 72 小時

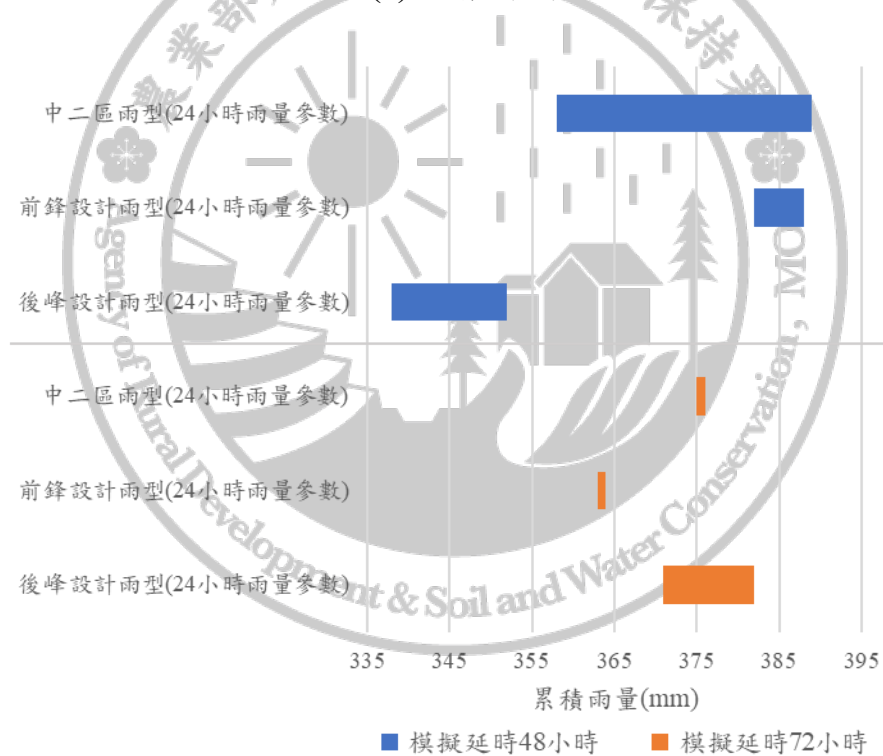
中二區雨型降雨		
重現期(年)	24hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	375	32
500	374	29

前峰設計雨型降雨		
重現期(年)	24hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	363	15
500	362	13
後峰設計雨型降雨		
重現期(年)	24hr 雨量參數之崩塌 雨量(mm)	FS=1 時間(hr)
100	371	47
500	382	31

將上表之可能崩塌雨量，在不同情形下之範圍整理如圖 20，並在不同深度滑動面的範圍中，為求保守選出最小值作為崩塌雨量警戒值（表 11）。本研究發現，崩塌雨量門檻值受降雨重現期影響較少，但受不同雨型、降雨延時影響較大。



(a)深層崩塌



(b)淺層崩塌

圖 20 可能崩塌雨量範圍(a)深層崩塌(b)淺層崩塌

表 11 滑動面適用之崩塌雨量門檻值(a)降雨延時 48 小時 (b)降雨延

時 72 小時

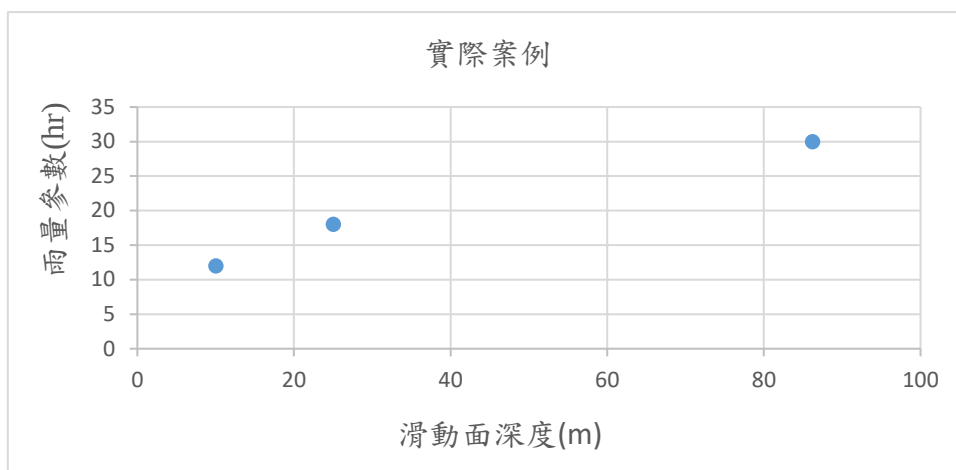
(a)降雨延時 48 小時

降雨延時 48 小時	深層崩塌	淺層崩塌
適用雨量時間參數	30	24
可能崩塌雨量範圍	735mm-799mm	352mm-389mm
雨量門檻值	735mm	352mm

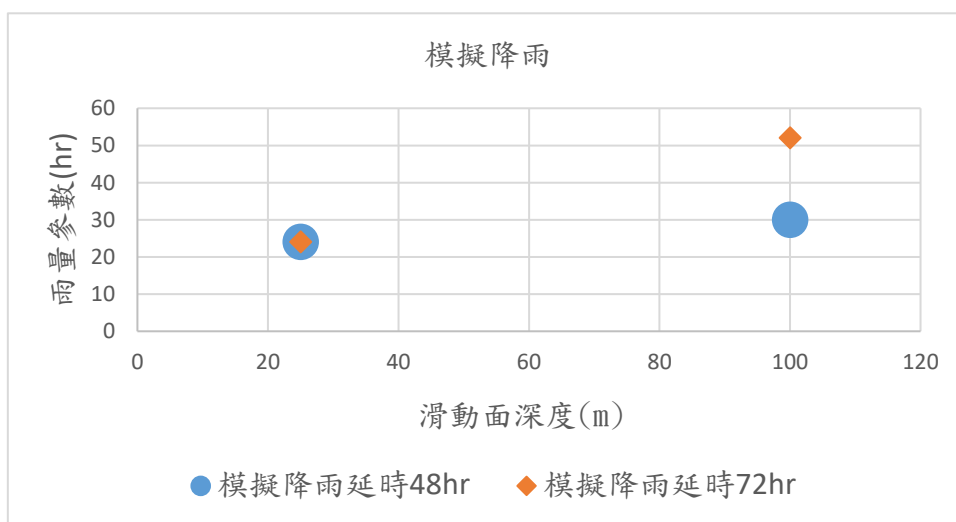
(b)降雨延時 72 小時

降雨延時 72 小時	深層崩塌	淺層崩塌
適用雨量時間參數	52	24
可能崩塌雨量範圍	670mm-774mm	362mm-382mm
雨量門檻值	670mm	362mm

由第三節、第四節所獲得之結果，可以知道以雨量作為崩塌的預警，應考慮滑動面深度。滑動面深度大者，應使用大的雨量參數，崩塌雨量門檻值也越大，如圖 21、圖 22 所示。

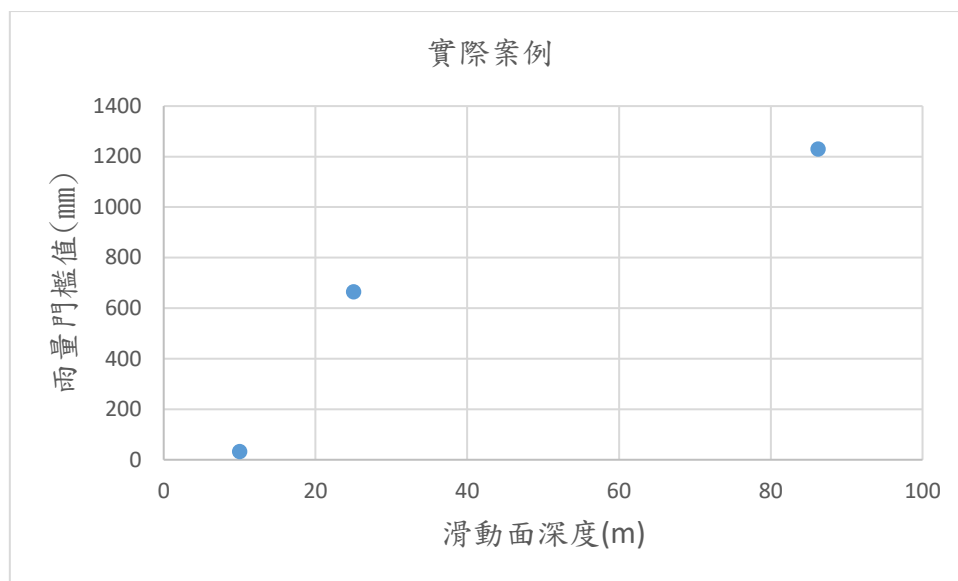


(a) 實際案例

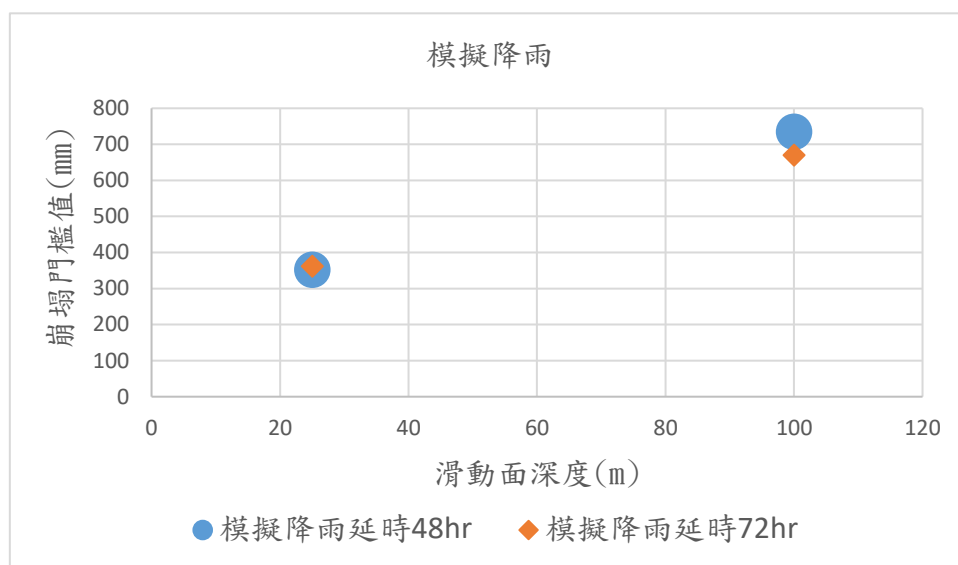


(b) 模擬結果

圖 21 雨量參數和滑動面深度的關係(a)實際案例(b)模擬結果



(a)實際案例



(b)模擬結果

圖 22 崩塌門檻值和滑動面深度的關係(a)實際案例(b)模擬結果

第四章 邊坡崩塌時的應變量

第一節 模型試驗

GOM Correlate 影像分析的結果如圖 23，深藍色代表較小的位移，隨著位移變大，顏色變為淺藍、綠或橘色。第四張照片代表邊坡已崩塌，第三張照片代表崩塌時的位移，計算滑動體的平均位移，以式 2 計算平均應變。圖 24 是邊坡變形區累積平均應變與時間關係，從圖中可以發現四個位態曲線大致上有相同的趨勢，可分為三個階段，第一階段，曲線凹向下，突然躍升的狀態，係邊坡初始受到荷重所造成較大的應變，第二階段，邊坡滑動發展期間呈現穩定緩慢增加的現象，第三階段，邊坡崩塌前應變斜率增大，形成凹向上的急速上升曲線。邊坡崩塌前累積的平均應變由大到小為：逆向坡弱面傾角 60° 、逆向坡弱面傾角 30° 、順向坡弱面傾角 60° 、順向坡弱面傾角 40° 。

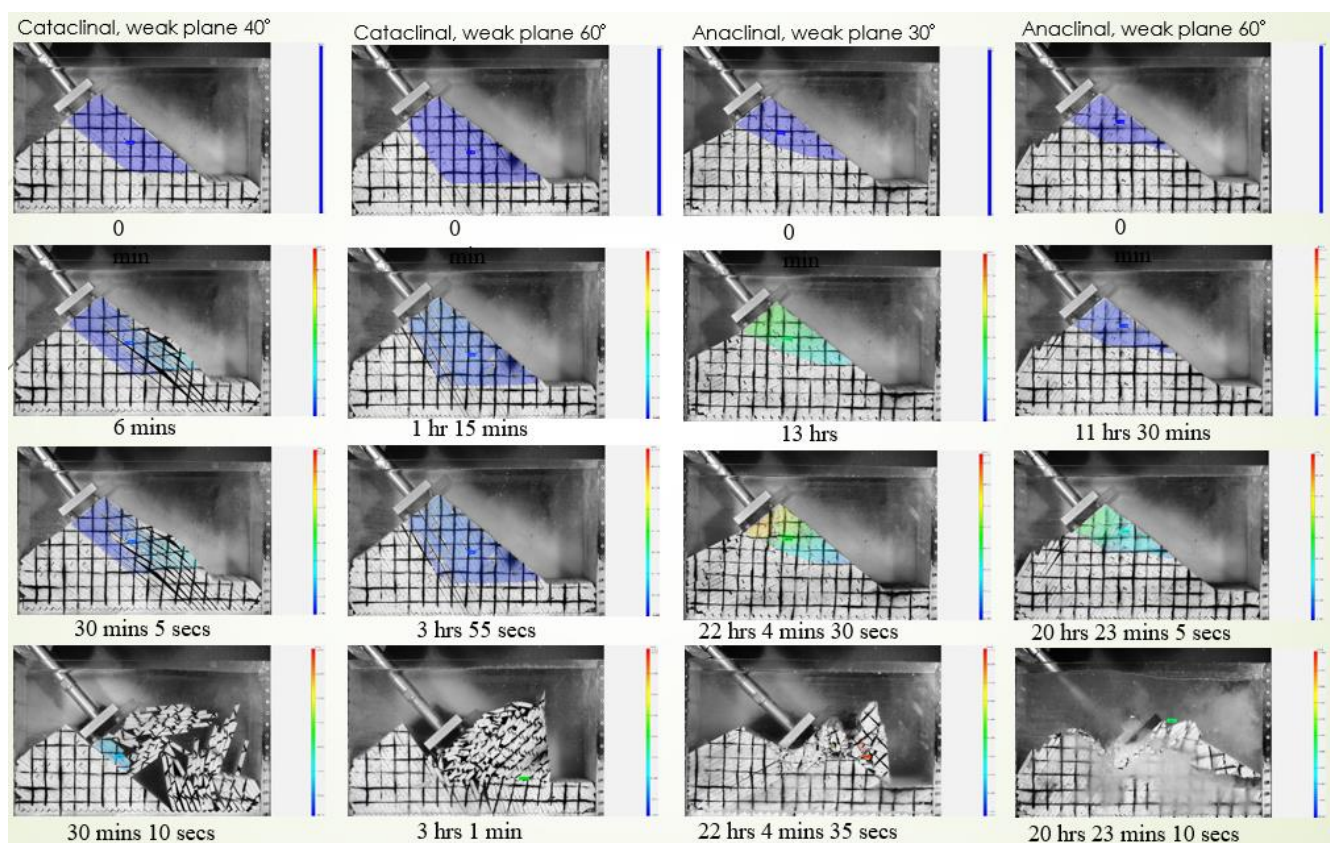


圖 23 影像分析邊坡變形量

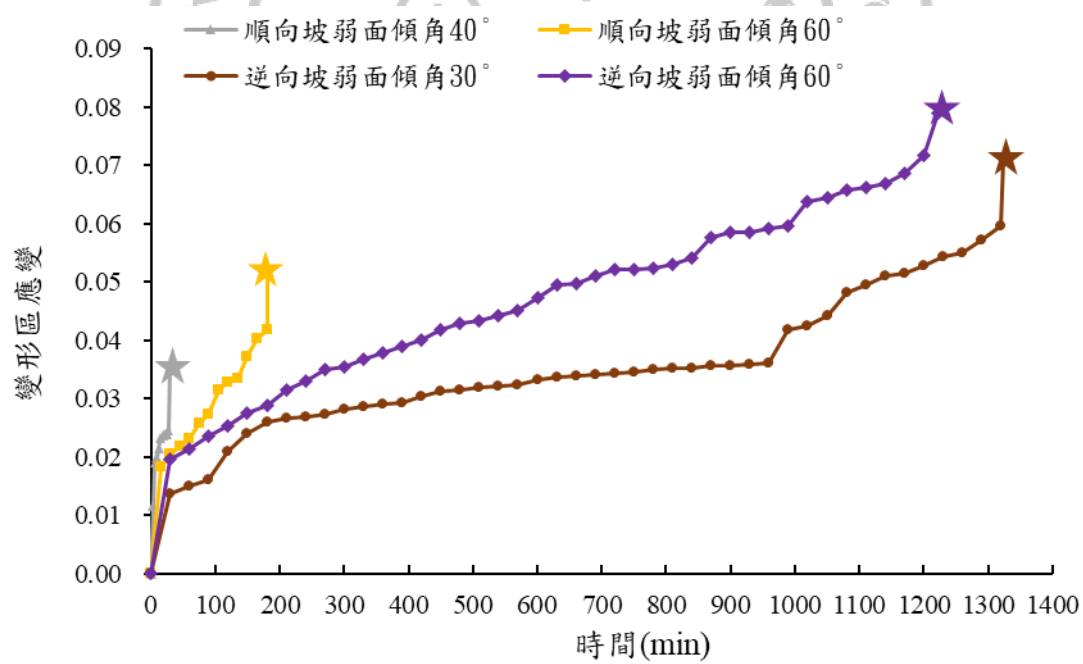


圖 24 各弱面為態邊坡變形區應變

第二節 實際案例

地礦中心已經圈定了許多潛在的大規模崩塌地(Lin et al., 2013) , 其中一些已經透過現場勘查、鑽孔和監測進行了調查。根據調查預測了潛在的滑動面, 在 48 例中, 22 例有明顯的陡崖和滑動面特徵。我們選擇順向坡和逆向坡的實際案例加以比較, 這些案例大多由硬頁岩、板岩及變質砂岩組成, 其中 6 個為順向坡, 5 個為逆向坡。根據 Chigira (2009)估計實際案例的平均應變, 其定義與前述實驗室邊坡模型計算平均應變的定義(式 2)略有不同, 在實際案例中, d 為邊坡崩崖的長度, l_0 同樣為沿著坡面的滑動面長度。實驗結果展現的是崩塌時的平均應變, 實際案例的結果(表 12)則顯示目前邊坡尚未崩塌的平均應變, 雖然意義稍有不同, 但都顯示了相同的趨勢, 即逆向坡的平均應變大於順向坡的平均應變。

表 12 實際案例之平均應變

序號	地點	坡面地形 *	弱面傾角 α	坡度	平均變形	岩性
1	光華	逆向坡	55°	37°	8.3%	硬頁岩及板岩
2	上巴陵 1	逆向坡	35°	34°	7.1%	硬頁岩夾變質砂岩
3	上巴陵 2	逆向坡	30°	34°	5.9%	硬頁岩夾細粒變質砂岩
4	清境	逆向坡	60°	26°	5.8%	板岩及變質砂岩
5	河頭	逆向坡	32°	40°	11%	砂岩
6	秀巒	順向坡	80°	30°	3.2%	硬頁岩及板岩
7	泰崗	順向坡	80°	30°	3%	硬頁岩及板岩

8	中心崙	順向坡	10°	20°	2.5%	泥質砂岩
9	廬山	順向坡	70°	23°	4.2%	板岩
10	新興	順向坡	29°	21°	2.2%	硬頁岩及板岩
11	西林	順向坡	23°	21°	2.1%	片岩

第三節 數值模擬

參考張光宗(2023)之研究，先以 PLAXIA 3D 有限元素法軟體推測光華邊坡的三維滑動面，再將三維的滑動面用於 EDEM 建立三維分離元素法模型。EDEM 可以產生大變形得到邊坡崩塌時的位移量，推估崩塌時的平均應變量。在 PLAXIS 3D 中，坡體內依據現場地下水位觀測井設定常時水頭控制，邊坡模型分成三個部分(圖 25)，分別為岩屑層、破碎岩層與完整岩層，材料與水力參數如表 13 所示，最後以強度折減法得到邊坡的三維滑動面。由強度折減的結果中，不同的 Incremental displacement 數值範圍可以定義出一淺和一深之滑動面，滑動面深度分別為 45m 與 70m，如圖 26。

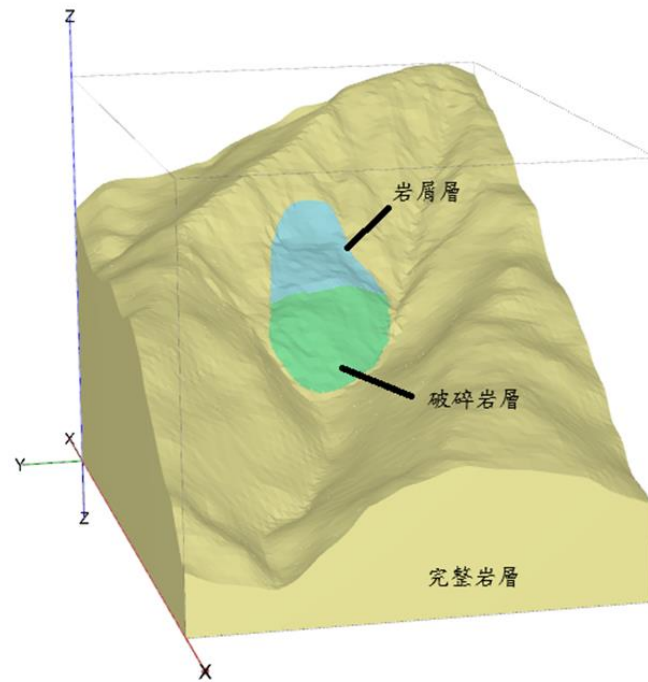
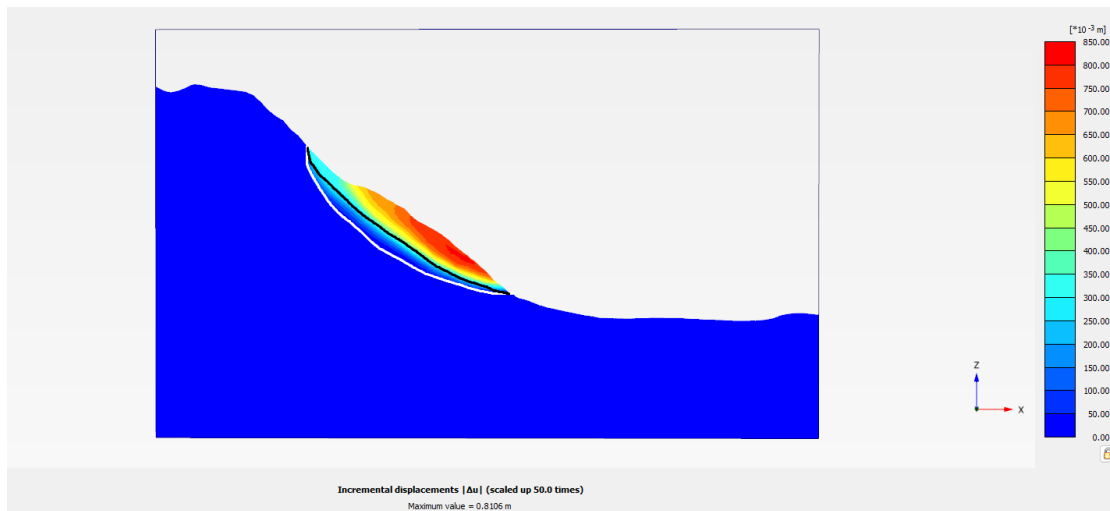


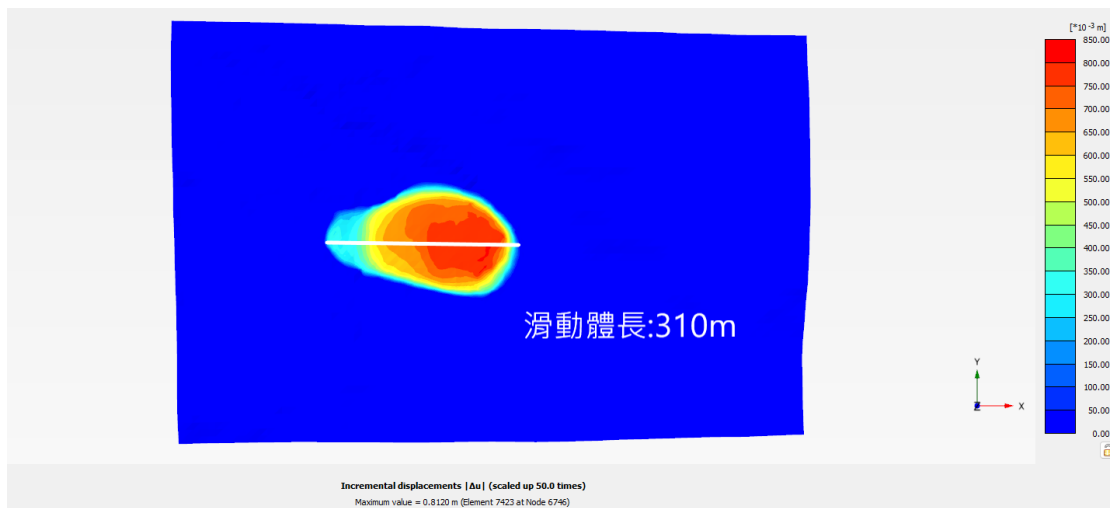
圖 25 本研究數值邊坡模型

表 13 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



(a)



(b)

圖 26 PLAXIS 計算出之滑動面 (a) 剖面圖中，黑色為較淺滑動面 (深度 45m)，白色為較深滑動面 (深度 70m) (b) 滑動體上視圖，淺和深兩者滑動面範圍相同

接著在 EDEM 中建立兩種不同深度 (45m 和 70m) 的滑動面，來模擬邊坡崩塌之情形，藉此探討不同滑動深度所能承受的平均應變量。

EDEM 模型中，滑動體的微觀參數必須反應現場邊坡或 PLAXIS 3D

模型的力學行為。在 PLAXIS 3D 與 EDEM 中，分別進行數值簡單直剪試驗 (Simple Shear Test) 擬合應力-應變曲線 (Asadzadeh and Soroush, 2016)，使 EDEM 模型中滑動體的力學行為可以代表現場的狀況。以常時地下水位的初始邊坡狀態為例，利用表 13 的材料與水力參數，擬合結果如圖 27 所示，當強度折減後會使邊坡安全係數等於 1 甚至崩塌，得到初始的 EDEM 微觀參數如表 14。

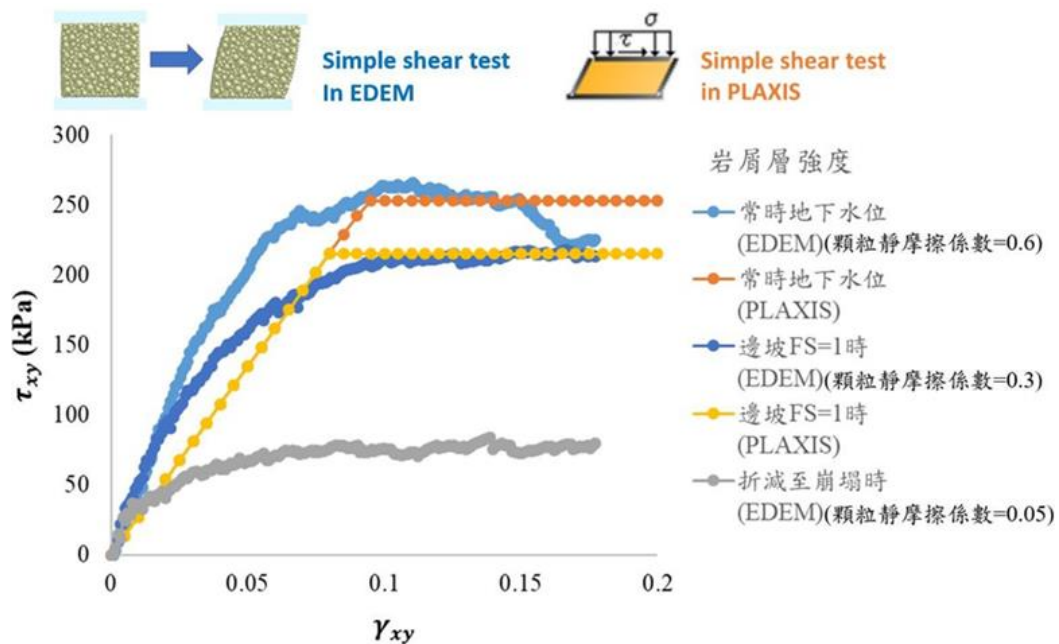


圖 27 岩屑層有限元素法與分離元素法簡單直剪試驗的擬合 (張光宗, 2023)

表 14 初始 EDEM 微觀參數 (張光宗, 2023)

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 (Pa)	3.5×10^9	顆粒有效楊氏模數 (Pa)	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

EDEM 45m 與 70m 滑動面的邊坡模型如圖 28 所示，來進行變位分析模擬，初始微觀參數如表 14 所示，透過折減微觀參數使邊坡變形最後崩塌，選擇同步折減岩屑層顆粒靜摩擦係數、破碎岩層顆粒靜摩擦係數及牆(滑動面)靜摩擦係數，每次折減幅度為 0.02。邊坡模型監測點位分為 3 種，分別為整塊滑動體、滑動體表層與滑動體上部表層，如圖 29 所示。

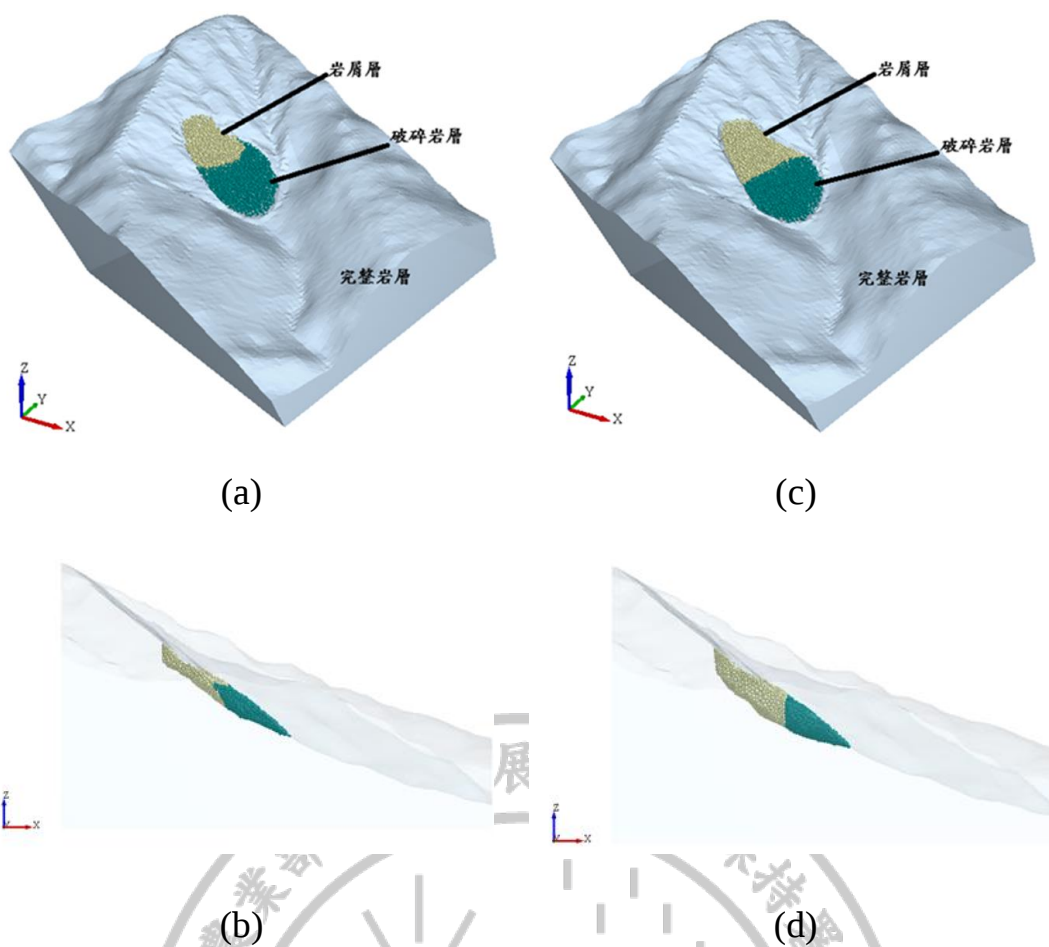
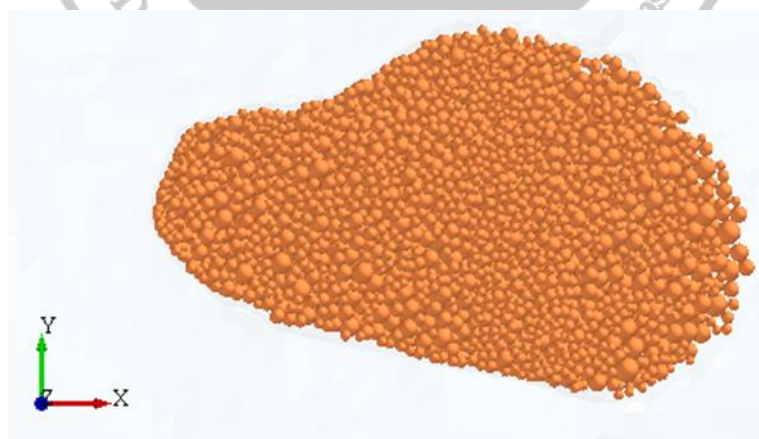
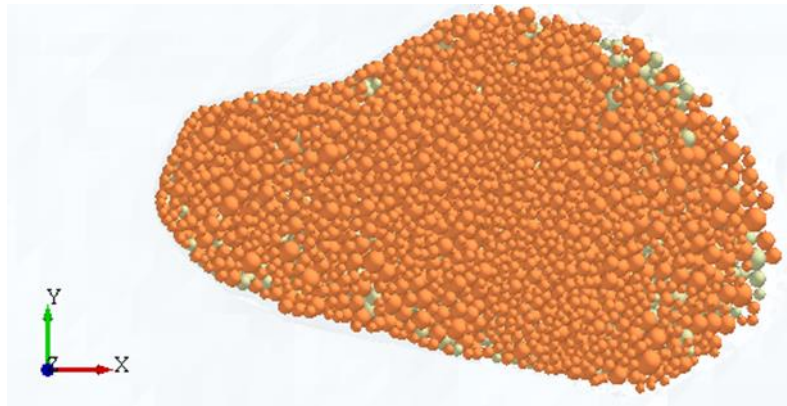


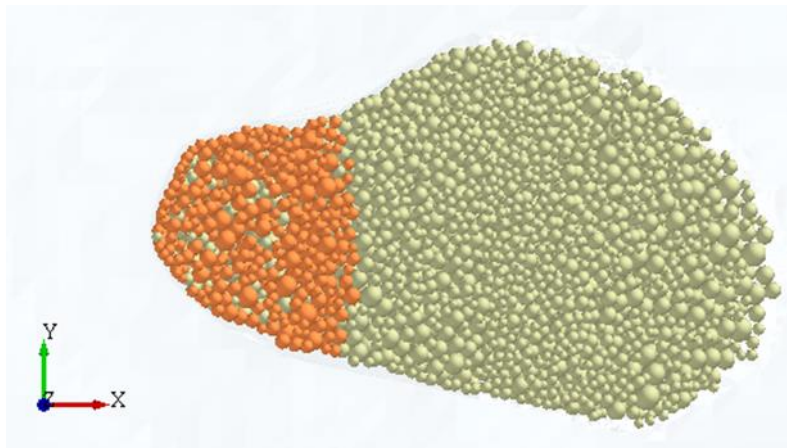
圖 28 光華邊坡 EDEM 模型 (a) 深度 45m 之滑動體
(b) 深度 45m 之滑動體剖面圖 (c) 深度 70m 之滑動體
(d) 深度 70m 之滑動體剖面圖



(a)



(b)

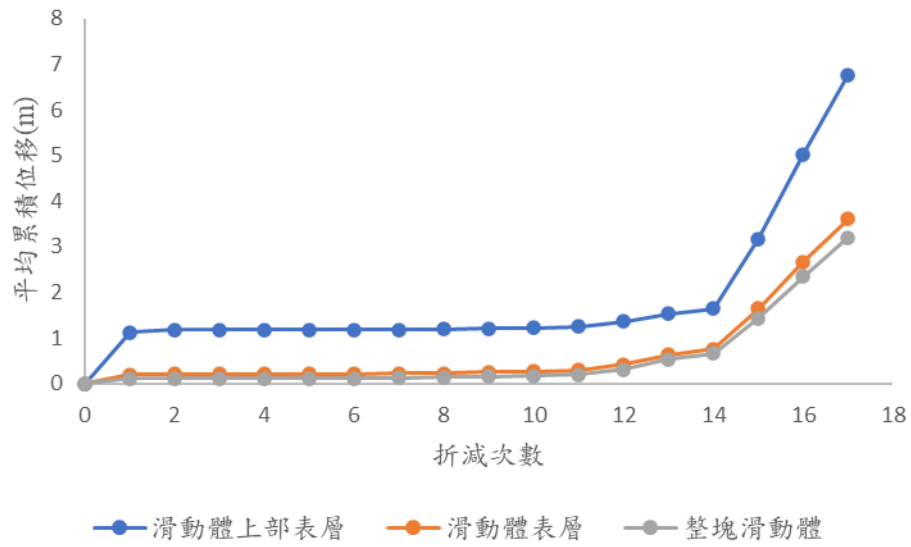


(c)

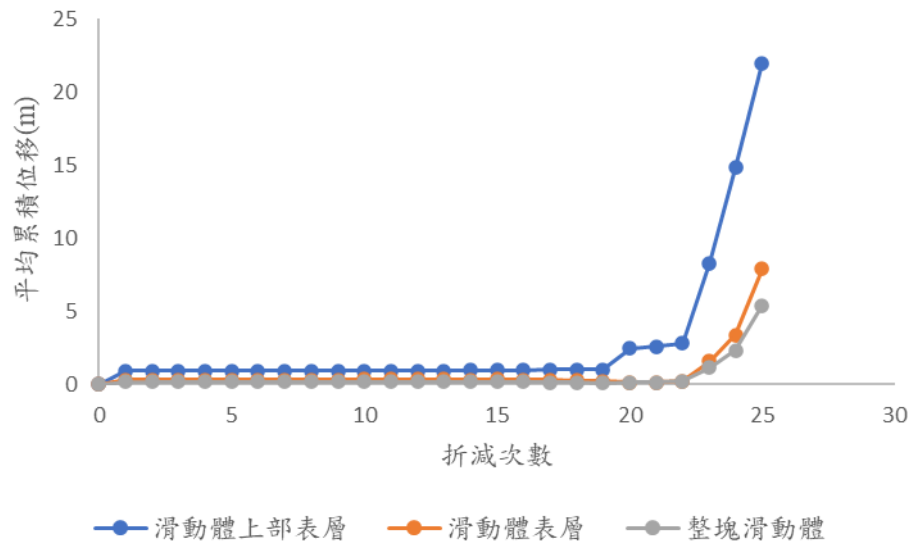
圖 29 監測點位 (a)整塊滑動體 (b)滑動體表層 (c)滑動體上部表層

模擬結果如圖 30 所示，45m 與 70m 深之滑動體整體趨勢相近，曲線大致上可分為三階段，第一階段為第一次折減時，平均累積位移明顯上升，接著中間則維持一段穩定狀態為第二階段，最後平均累積位移量急速上升為第三階段，直至崩塌。另外，崩塌時不同監測區域的平均累積位移量：滑動體上部表層 > 滑動體表層 > 整塊滑動體。可得知滑動體上部位移量明顯大於下部，與現地觀察的結果一致；且表層的位移相較於深層的位移較顯著。

在此數值模擬中，深度是影響平均累積位移量的因素，由圖 30 可見，45m 深之滑動體在折減次數第 15 次時，平均位移明顯增加；在折減第 17 次時，平均位移量已逐漸達到此邊坡極限，並崩塌；平均累積位移量根據不同監測區域大約在 3m~7m。70m 深之滑動體在折減第 23 次時，平均位移明顯增加；並在第 25 次折減時崩塌，平均累積位移量根據不同監測區域大約在 5m~22m。滑動面淺的滑動體長與滑動面深的滑動體長皆為 310m，計算其崩塌時的平均應變量。深度 45m 滑動體，以上部表層計算滑動體的平均位移，平均應變為 2.2%；以整塊滑動體計算滑動體的平均位移，平均應變為 1%。深度 70m 滑動體，以上部表層計算滑動體的平均位移，平均應變為 7.1%；以整塊滑動體計算滑動體的平均位移，平均應變為 1.7%。值得一提的是數值模型未考慮現地邊坡有弱面造成的異向性且為逆向坡，所以相較於模型試驗和實際案例的結果，崩塌時的平均應變量較小。總結來說，滑動面深度較深者，崩塌時的平均應變量應該較大，且邊坡能夠承受變形直至崩塌的時間也比較久。



(a)



(b)

圖 30 平均累積位移與折減次數關係圖 (a) 深度 45m 之滑動體 (b) 深度 70m 之滑動體

第五章 結論

本計畫分別探討雨量和位移在邊坡崩塌的預警，由實際案例與數值模擬，分析邊坡崩塌預警適用的雨量參數與雨量值，另一方面由模型試驗、實際案例、與數值模擬，分析邊坡崩塌預警適用的平均應變量。適用之雨量參數除了受滑動深度影響，其他影響因素包括降雨重現期、雨型和降雨延時。預警適用的雨量參數與雨量值結論如下：

1. 模擬降雨延時 48 小時，發現淺層滑動面邊坡(25m)適用 24 小時雨量參數，警戒值為 352mm，深層滑動面邊坡(100m)，適用 30 小時雨量參數，警戒值為 735mm。
2. 模擬降雨延時 72 小時，發現淺層滑動面邊坡(25m)適用 24 小時雨量參數，警戒值為 362mm，深層滑動面邊坡(100m)，適用 52 小時雨量參數，警戒值為 670mm。
3. 適用之雨量參數受降雨重現期影響較小，受不同雨型影響較大。
4. 降雨延時影響深層滑動適用的雨量參數較大，對淺層滑動影響較小。
5. 崩塌雨量門檻值受不同雨型、降雨延時影響較大，受降雨重現期影響較小。

邊坡長時間在重力場下多少會變形，當累積的變形或應變達到可承受限度時，邊坡就會崩塌。邊坡可以承受的應變量受很多因素影響，

包括邊坡弱面的位態、弱面的位置、滑動面的深度、地質材料強度等。

本研究得到的結論如下：

1. 由實際案例尚未崩塌的邊坡，其平均應變量逆向坡通常會大於順向坡。
2. 模型試驗結果顯示，邊坡崩塌時的應變量由大到小為：逆向坡弱面傾角 60° 、逆向坡弱面傾角 30° 、順向坡弱面傾角 60° 、順向坡弱面傾角 40° （即坡面和弱面平行）。
3. 數值模擬顯示滑動面越深，崩塌時的應變量越大。

由實際案例與數值模擬可知，邊坡所適用之雨量參數，與崩塌之滑動面深度有關，當滑動面深度越深，所適用之雨量參數越大；崩塌雨量門檻值也有同樣的趨勢。

淺層崩塌及坡面與弱面平行的順向坡，崩塌時的平均應變量較小，若有監測到位移應提高警覺。其他的深層崩塌滑動面位於岩體，若只是監測到邊坡局部位置發生位移，邊坡立即崩塌的急迫性並不高，但若是位移的範圍變大，則應提高警覺。

參考文獻

1. 土石流及大規模崩塌防災資訊網，2023/10
https://246.swcb.gov.tw/Landslide/Landslide_Release
2. 王兆譽 (2021)，「以物理模型探討弱面位態與間距對邊坡變形的影響」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
3. 水土保持局 (2017)，「以嶄新 3D 地形表現技術(H.O.S.T.地圖)輔助地形判釋」。
4. 水土保持局 (2020)，「立體地形圖 HOST MAP 及 CS MAP 判釋參考指引」。
5. 水土保持局 (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」。
6. 水土保持局 (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」。
7. 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。
8. 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。

9. 經濟部水資源局(2001)，「水文設計應用」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
10. 經濟部中央地質調查所(2004)，全面清查山崩危機戶防止土場山崩災變重演
11. 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。
12. 高治喜 (2015)，「運用遙測技術協助判釋大規模崩塌潛勢區域微地形特徵之研究」，水保局創新研究計畫，編號：SWCB-104-066。
13. 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。
14. 張光宗 (2023)，「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」，水保局創新研究計畫，編號：ARDSWC-112-047。
15. 葉柏村 (2020)，「考慮弱面影響的大規模崩塌潛勢之分級」，國立中興大學水土保持學系博士論文。
16. 柳鈞元、黃韋凱、李璟芳、翁孟嘉(2021)，工程案例回顧與熱門議題報導-臺鐵猴硐崩塌事件特別報導，地工技術 No.167
17. 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。

18. Aleotti, P., 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Eng. Geol.* 73,(3-4), 247-265.
19. Asadzadeh, M., and Soroush, A. (2016). Fundamental investigation of
constant stress simple shear test using DEM. *Powder Technology*,
292,

129-139.
20. 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.
21. Chang, K.T. and H.-C. Huang (2015). "Three-dimensional analysis of a deep-seated landslide in central Taiwan." *Environmental Earth Sciences* 74(2): 1379-1390.
22. 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.
23. Crosta, G.B., 2004. Introduction to the special issue on
rainfall-triggered landslides and debris flows. *Eng. Geol.* 3 (73),
191–192.
24. Chang, K. T., Ge, L. and Lin, H. H. (2015) Slope creep behavior:
observations and simulations, *Environmental Earth Sciences*, 73

(1), 275-287.

25. Ching-Ying Tsou, Zheng-Yi Feng and Masahiro Chigira, 2011, Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shiaolin, Taiwan, *Geomorphology*, Vol. 127
26. Goodman, R.E. (1989) *Introduction to rock mechanics*, Wiley.
27. Haneberg, W.C. (1991) Observation and analysis of pore pressure fluctuations in a thin colluvium landslide complex near Cincinnati, Ohio. *Eng. Geol.* 31 (2), 159–184.
28. Lin, C. W., Tseng, C. M., Tseng, Y. H., Fei, L. Y., Hsieh, Y. C., and Tarolli, P. (2013). Recognition of large scale deep-seated landslides in forest areas of Taiwan using high resolution topography. *J. Asian Earth Sci.* 62, 389–400. doi:10.1016/j.jseaes.2012.10.022
29. Reid, M.E. (1994) A pore-pressure diffusion model for estimating landslide-inducing rainfall. *J. Geol.* 102 (6), 709–717.
30. Varnes, D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes, in *Landslides: Analysis and Control*, Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 12-33.
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.目前本署及各分署轄內幾個局部破壞較明顯區域，建議後續均可選擇納入計畫內研究。	感謝委員意見，後續考慮納入光華案例進行分析探討。
2.數值分析中如何從雨量到地下水的分析過程與模型參數校正、驗證的方法等，如果能夠進一步補充說明，計畫書內容就更完整了。	感謝委員意見，期末報告將補充 PLAXIS LE 不飽和地下水流動的理論。
3.本計畫對不安定土砂區域判釋上有無技術延伸，若有則效益為何？	感謝委員意見，本研究對不安定土砂區域判釋上無技術延伸，但成果可對大規模崩塌的變位和雨量預警值提供資訊。
4. 請將計畫內容校稿，P10(僅提供本"局"施政參考)及 P25(水"報"局)。	已修正。
5. 降雨部分，並未建立入滲模式，無法探討在不同的地形、地質(土壤與岩石導水度/飽和與非	

飽和)狀況下，不同強度、延時降雨入滲量與土壤岩石含水量變化或地下水水位變化條件，建議納入後續精進內容。	地下水流動的理論。
6. 「蒐集降雨觸發已崩塌案例資料，探討不同降雨強度曲線和崩塌時間的關係」為水保署本身與其他如國科會多年補助或委辦研究計畫的主題，已經累積許多成果，建議參考並納入文獻回顧內容。	感謝委員意見，後續將參考納入。
7. 至於與各現地相關的「崩塌地的弱面位態和崩塌深度」，前者必須有較詳細的地質圖資或現地調查資料，後者必須有現地的調查資料，針對目前已經發生過的幾處大規模崩塌，亦已有相當多的研究成果。建議參考比較相關內容。	感謝委員意見，後續將進一步參考比較。

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

意見	回覆
1.期中報告如期如質完成，值得肯定。對於大規模崩塌受雨量、雨型、地下水位、岩體特性、潛在崩塌滑動深度等促崩因子、內在因子都可能影響邊坡雨量作為預警值設定有明確的說明，強調以實際案例作為簡化模型試驗與數值方法變因的作法，也是正確的方向，已有的研究成果所歸納出的岩體特性、潛在崩塌滑動深度等支持本計畫在方法學上能集中精神在以降雨變因與滑動深度主控變因，討論其對雨量預警值的影響，因而在期中有不錯的初步成果。	感謝委員鼓勵
2. 報告中P24 對於PLAXIS LE 模型的尺寸、邊界條件、材料參數、初始條件等簡化地盤模型及不同降雨重現期的決定方法等資訊缺乏交待，建議在期末時應好好補充說明。	感謝委員意見，PLAXIS LE 模型的尺寸、邊界條件、材料參數、初始條件補充於 21-23 頁。100，500 年的重現期距為假設狀況，而 100 年及 500 年重現期距之降雨量也已補充於表 4。

3.相較於淺層崩塌，大規模崩塌受不飽和土壤表層的影響可能比較小，而邊坡初始地下水位影響可能比較大，初始地下水位的決定是否有所依據，請補充說明。	感謝委員意見，初始地下水位為假設條件。
4.P33-34 安全係數最小時間的安全係數值是多少?坡面上是否可以加設地表位移觀測站、地中的滑動面位置與深度是否也請列表表示? 配合表7，是否對於此一預警值時的地表位位移值或是平均應變指標也有可能有所建議? 建議在期末時應好好說明	感謝委員意見，Plaxis LE 為極限平衡法軟體，無法得到位移量，所以無法建議位移量和平均應變。滑動面位置與深度如圖 17。安全係數最小時間點的安全係數，在本研究中所有模擬結果均小於 1。安全係數最小時間點僅用來選取雨量參數，安全係數最小時間點的安全係數並非本研究的重點。
5. 對於沒有真正發生大規模崩塌的潛在大規模崩塌而言，滑動深度的決定是非常困難的事，有沒有什麼建議的方法?	如委員意見，若邊坡尚未崩塌其滑動面深度不易預測，由地下變位的監測推測是較好的方法，另外地表變位也可參考，通常地表變位範圍越大，滑動面可能越深；當然配合現場地形地質的數值模擬也可扮演一些角色。
6. 報告書之章節(第四章預期成果或後續工作規劃)，請依農村水	遵照辦理

保署規定格式辦理。	
7. P43表9滑動面適用之崩塌雨量門檻值，深層崩塌及淺層崩塌其崩塌雨量均在680~788mm及崩塌門檻值688左右這個區間，與實務運作有落差，請在補充說明原委。	感謝委員意見，已修正數值模型，地表增加一層強度較弱的崩積風化層，可得到較合理的成果。
8. 封面郵遞區號有誤，請配合修正。	感謝委員意見已修正
9. P21-22想詢問實驗室物理模型試驗是否有施作包含地下水影響的條件考量？	感謝委員意見，相較於模型材料強度甚強，地下水壓甚小，但浸水後會降低一些模型材料的強度，所以模型試驗無考慮地下水的影響。
10. P24是否可以提出PLAXIS模式的簡易使用公式與邏輯和使用參數，另25年重現期及1000年重現期實際雨量為何？	感謝委員意見，不飽和土體強度公式已補充於第 14 頁。另外，已補充 100 及 500 年重現期距雨量於表 4，本研究未分析 25 及 1000 年重現期距雨量。

附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

意見	回覆
1. 在本研究中雨量預警模型的準確性受到不同因素影響，如反應於滑動面深度或坡面變形量，另在降雨延時和雨型則是影響雨量預警模型準確性的主要因素。目前對於在不同雨量門檻值下，能否對應崩塌後可能發生災害，其預測結果將可幫助提高預警系統的可靠性與後續防災應變規劃。	感謝委員意見，本研究提出淺層崩塌適用較小的雨量參數，雨量門檻值較低；深層崩塌適用較大的雨量參數，雨量門檻值較大；此結論暗示當降雨達到較大的雨量門檻值時，可能發生較深層的崩塌，即崩塌量體較大災害也會較嚴重。災害程度主要與崩塌後堆積範圍有關，可以數值方法模擬預測，非本研究的範圍。
2. 在本研究中對於位移預警方法在不同邊坡條件下的適用性為何？因目前考量為順、逆向坡部分，對於土坡或岩坡的差異會否影響預測準確性？	感謝委員意見，(1)本研究以應變探討崩塌的預警，可以去除崩塌體尺度的影響；因為淺層崩塌可承受的位移較小，深層崩塌可承受的位移較大。淺層崩塌及坡面與弱面平行的順向坡，崩塌時的平均應變量較小，若有監測到位移應提高警覺。 (2)大規模崩塌通常崩塌深度大，主要受岩體力學性質的影響，土坡的崩塌通常屬於淺層崩塌。邊坡可以承受的應變量受很多因素影響，包括邊坡崩塌深度、地

	質材料強度、弱面的位態、弱面的位置等。若要為不同的邊坡訂定應變預警值，則需要針對個案做深入的研究。
3. 雨量值與應變量值的驗證比對差異?針對不同天氣系統或降雨行為，大規模肇生預警值的判斷又為何差異特徵?	感謝委員意見，(1)雨量與應變在崩塌的預警在本研究屬於趨勢或定性上的研究，若要建立個案的雨量參數、雨量門檻值、應變門檻值，則需要對針對個案做深入的研究。 (2)雨量預警用的雨量參數和雨量門檻值，主要受崩塌深度的影響，另外雨型和降雨延時也有一些影響。模擬降雨延時48小時，發現淺層滑動面邊坡(25m)適用24小時雨量參數，警戒值為352mm；深層滑動面邊坡(100m)，適用30小時雨量參數，警戒值為735mm。模擬降雨延時72小時，發現淺層滑動面邊坡(25m)適用24小時雨量參數，警戒值為362mm；深層滑動面邊坡(100m)，適用52小時雨量參數，警戒值為670mm。

農村水保署根據雨量的監測發布警戒已有初步的成果，但不同的崩塌深度，適用的雨量參數和雨量門檻值差別很大；若要精進警戒值的訂定，對於不同的崩塌潛勢區應該要有深入的研究，掌握可能的滑動深度和機制，才能進一步決定適當的雨量參數和雨量門檻值，提升政府防災作為的有效性。

