

降雨滲流現象對邊坡穩定之時變分析

Analysis of Time-dependent Stability of Slopes under Rainfall Infiltration

張德鑫 蔡西銘

Chang, T. H. Tsai, S. M.

摘要：目前對於邊坡穩定之探討，僅著重於在某特定土壤狀態與環境條件下之分析，因此僅能得知該邊坡於某條件下是否安全；但如得知此邊坡在某種條件下會破壞時，此種分析並未能顯示於何時會發生崩塌。因此邊坡穩定之時變性分析實為必要，因為此種分析方法可以預測在某種特定土壤與環境條件下，邊坡可能於何時發生破壞，並據以做為建立邊坡安全預警制度之參考。

一般邊坡之破壞，常於降雨過程或降雨後某段時間內發生，造成此結果之主要原因為降雨所產生之雨水入滲現象。雨水入滲除使地下飽合層水位升高外，亦增加非飽合層土壤之單位重量，此兩者均增加邊坡土體之下滑應力。其次由於土壤顆粒含水量之逐漸增加，亦可能使得某些土壤之抗剪強度降低，此三者於不同時間下之交互變化作用，使得邊坡於降雨發生後於某脆弱面發生破裂變形，甚至發生滑動破壞。本研究目的即分析在降雨現象下，綜合考慮隨時間改變之土壤單位重、地下水水面升降及土壤抗剪強度變化等過程，於邊坡穩定之時變性分析。

本計畫已完成降雨滲流與邊坡安全時變分析之模擬，得知邊坡之安全係數會因降雨而有所改變，依此可建立邊坡安全之預警制度。其次於現場試驗中，已可持續獲得降雨與土壤含水量變化之資料。根據目前所獲得資料初步分析可知，當降雨量在 2 mm 以下對 10 cm 深之土壤，以及降雨

量在 3 mm 以下，對 20 cm 深之土壤含水量增加幾無影響。

（關鍵詞：邊坡穩定、數值方法、降雨入滲）

Summary : The traditional analysis of slope stability has been carried out using unchanged values of soil and hydrological parameters. The time of slope failure is not obtained from such type of analysis. It is preferred to have an idea on the time when a slope would fail. Such information can be used for warning of potential slope stability problems. There, time-dependent slope stability problem is worthy of study.

Many slopes failed during or after heavy rainfalls. The mechanisms responsible for the slope failure, in this case, may include infiltration of water into subsurface. The infiltration results in an increase in unit weight of soil and a decrease in strength of soil. The objectives of this research program are to study the infiltration characteristics of rainfall on slopes, to determine properties of unsaturated soils obtained from test site, and to develop a methodology for analysis of time-dependent slope stability under rainfall conditions.

The model analysis of relation between

計劃編號：91 農科-1.3.1-保-S1(7)

執行機關：中原大學土木工程系

rainfall infiltration and slope stability has been finished in this project, so that the factor of safety of a slope relating to the rainfall can be determined. Information on variation of soil water content related to amount of rainfall is obtained in field tests. According to the present data, this is no difference between a 10cm deep soil with 2 mm rainfall and 20 cm deep soil with 3 mm rainfall.

(Keywords: Slope stability, Numerical method, Rainfall infiltration)

一、前言

台灣地區由於人口逐年增加，加上都市、交通、工商業與交通用地需求不斷擴張，目前平坦地區之土地利用已日趨飽和，迫使人們往都市周邊附近之山坡用地開發，因此衍生山坡地開發與坡地安全之問題。另一方面，由於台灣是個多山的島嶼，加上地勢陡峻、地質脆弱、河川短促、地震頻繁，故每逢颱風豪雨，山坡地極易引發沖蝕、山崩、地滑及土石流等自然災害。

土石流之發生條件有所謂三多，即「雨量（水）多」、「河床堆積物多」以及「坡度陡（多）」，因此台灣地區土石流之發生，多為暴雨過後之河川型土石流，或有大量土石堆積物之坡面型土石流。暴雨不僅提供土石流發生三多之「雨量（水）多」條件，暴雨所發生之坡地崩坍、滑動也間接提供土石流發生三多其二之「河床堆積物多」等條件。

根據本計畫於桃園縣境土石流潛勢溪流之現地勘察中，發現其中有數處土石流潛勢溪流其發生之重要機制，即為河床附近坡地崩坍所形成之大量土石材料堆積，如桃園縣大溪鎮義和里、龜山鄉樂善村嶺頂場址皆有此種情形。因此探討降雨延時、強度，其對坡地滲流以及造成坡地沖刷或破壞，對土石流危害潛勢評估與建立預警制度有相當之助益。

在土石流野外調查之地形參數，即指土石流發生區的坡度、面積、高程、長度、寬度、深度等基本資料，這些數值可以代表該區的地形特徵。Crozier (1973)研究崩山時曾提出地形指標 (Morphometric Index)，並將基本地形特徵組合提出分類指數(Classification)、擴張指數(Dilation)、薄度指數(Tenuity)、流動指數(Flowage)、黏滯指數(Viscous Flow)、移動指數(Displacement)、含水指數(Fluidity)等地形指數，用以區分山崩型態。其中分類指數，可根據原地表面與崩塌體底部滑動面間的最大深度，佔整個土石流發生區全長的百分比，用以區別地表滑動(Surface Slip)、深層弧形滑動(Deep Rotational Slip)和淺層地滑(Slump)。此值與其他與土體含水量有關之指數值，常影響到坡地之穩定性與破壞型式。

如前所述，一般邊坡破壞常於降雨期間或降雨後某段時間後發生，在坡度緩之坡地於降雨破壞主要為地表面之沖刷蝕溝破壞，在坡度陡之情況，主要因降雨入滲造成之崩落或滑動。本研究主要在探討因降雨入滲造成邊坡之滑動破壞，造成此結果之原因，為降雨所產生之雨水入滲現象。雨水入滲除使地下水位升高外，亦增加坡地表層非飽合層土壤之單位重量，此兩者均增加土體之下滑應力；更由於土壤含水量之增加，亦使得土壤抗剪強度降低（弱化現象）此三者於不同時間下之交互變化，使得邊坡會於某脆弱面發生破裂變形，甚至發生滑動破壞。本計畫將根據降雨入滲條件、隨時間變化之土壤單位重、地下水水面升降、坡地滲流面位置及土壤抗剪強度變化等，採逐時分析各階段之坡地安全係數；配合後續現地埋設之土壤水分計之資料回饋修正分析模式，據以推估邊坡破壞之時間。掌握對坡地破壞之徵兆保持敏感度與警覺性，進而迅速採取適當防護與應變措施，可達到防災之目的。

在工作內容方面，本研究根據降雨入滲以及模擬坡地各層含水量隨時間變化情況下，考慮隨時間改變之土壤單位重、地下水水面升降及土壤抗剪強度變化等。配

合後續現場資料回饋，以推估邊坡可能破壞之時間，以爭取應變時間，並建立完善之邊坡安全預警制度。為達成計畫總目標，本計畫以三年時間從下列三方面著手，進行邊坡穩定之時變性分析，經由數值模擬配合現地試驗，逐步建立邊坡安全分析法之預警制度。降雨特徵分析與入滲率探討，包括資料收集、理論分析、現地試驗等。第一年（本年度）主要進行地表水文分析，包括探討不同降雨強度、延時、頻率、坡面坡度、坡形及坡長等情況之降雨入滲率，以做為土體內水滲流之源頭。第二年進行地下水滲流分析，包括探討入滲雨水於地下非飽合層及飽合層之因時流動狀況，並根據計算出之非飽合層水頭反推估不同深度之土壤含水量，及計算飽合層之地下水水面與邊坡滲流面位置等。第三年進行邊坡穩定分析，包括根據地下水滲流所算出之不同深度土體含水量及地下水位與邊坡滲流面，配合試驗分析所得之相對應土壤單位重與剪力強度（弱化效應），進行某特定時間之邊坡穩定性時變分析，據以建立完整之邊坡穩定安全預警制度。

前項分年分期實施方式，本研究兼顧現地試驗所需器材與達穩定所需時間，並參酌審查委員意見，調整部份工作之先後實施順序，以期在第一年即達成初步之預期成效。其內容部份調整如：(1)進行邊坡穩定之時變分析，先進行坡地滲流模擬與邊坡穩定時變分析。(2)由室內試驗著手，以簡化過多影響因子。因此本計畫先行進行實驗室儀器率定，以及現地農工中心場址之土壤水份計埋設與觀測。

二、 文獻回顧

在土石流發生與地下水或土壤水份相關之文獻方面，有林美聆等(1999)、陳晉琪等(1999)、黃宏斌(1993)等。可知土壤水份之改變或地下水位之升降，為土石流發生之機制之一。為達成計畫目的，首先本研究將分別介紹有關降雨入滲、坡地滲流

與邊坡穩定等各種分析方法與應用情形之相關文獻，及其各種不同分析方法特性，做為本計畫進行之理論依據，茲將收集資料分別整理如後。

1. 降雨入滲分析相關文獻

在影響降雨入滲因子探討方面，根據水文學之知識，可知影響入滲現象之因子很多，且互為因果關係。其因子包括有降水特徵、土壤種類、土壤含水量、土壤化學作用、土壤內膠質、生物作用、地表覆蓋、地形及土地利用等。因此理論分析上有 Kostiakov (1932)、Lewis (1937)、Gardner & Widstoe (1921)、Horton (1940)、Philip (1954)、Huggins and Monke (1966)等學者，分別提出不同之入滲公式。但前述學者所提出之公式，僅針對地表較為平坦之地表入滲容量。由於影響入滲量大小之因子複雜，故很難有具代表性之入滲量推估模式，可一體適用於各種不同場址其降雨量與入滲量之估算。

在降雨入滲現場試驗方面，則有所謂入滲計(Infiltrimeter)及人工模雨計法(Rainfall simulator)兩種。國內則有徐美玲等(2000)、黃誌川等(1997)等之現地試驗資料。其他如許瑞昌等(1997)、周立銘(1993)則採數值模擬計算降雨後，其土壤之一維入滲現象。

在土壤含水量與降雨入滲探討方面，過去有不少學者都曾在實驗室或現場量測水力傳導係數、含水量與壓力水頭間關係，再利用所提出之經驗公式以迴歸方法求得此公式參數，如 Brooks & Corey (1964)、Campbell (1974)，以及 Mualem (1976)都曾提出不同經驗公式來描述壓力水頭與含水量的關係。其他如 Burdine(1953)、Verma & Brutsaert (1970)、Mualem (1976,1978)、Genuchten

(1980)和 Huyakorn 等(1984), 及 Russo (1988)等學者, 亦在水力傳導係數與含水量的關係上有深入探討。

2. 坡地滲流分析相關文獻

在理論分析方面, 國外研究邊坡地下水水流最早溯至 Pavlovsky (1956), 以非拘限含水層之地下水流理論分析, 假設座標系統與自由水面為一夾角, 因而形成坡地地下水流理論; 另 Childs (1971)則修正地下水坡度與自由水面線平行, 而以岩盤與水面基準之交角為坡度角; 而 Youngs (1971)則利用變換座標系統研究坡地地下水情形, 以上學者多考慮坡地地下水條件為一自由含水層, 且底部為不透水傾斜岩層。Rulon & Freeze (1985)針對多層坡地滲流面進行試驗研究, 並考慮滲漏含水層存在。國內則以劉長齡及許榮庭(1988, 1989)等, 進行坡地地下水流出及入滲數學模式之相關研究。

在邊坡水流之實驗室實驗與現場試驗研究方面, 大致可分為海蕭爾(Hele-Shaw)模型試驗與砂箱模型試驗(Sand Box)。前者利用黏滯性液體在一狹窄之空間流動, 以模擬水在土壤中流動, 而地下水重要參數如水力傳導係數, 乃靠黏滯性液體與窄壁摩擦推導而出。後者砂箱模型試驗, 則利用一透明裝砂之箱子使水在其中流動, 以模擬地下水流動情形, 其中之水力傳導係數值, 可靠實驗砂箱模型試驗模擬與計算。有關實驗或現場試驗方面, 如 Marei and Towner (1975)、Jaiswal and Chauhan (1975)等, 以 Hele-Shaw 模型模擬底盤為斜坡之地下水水流。由於 Hele-Shaw 模型無法反應真實土壤中水份之毛細現象或遲滯現象等, 因此近年來大多採用砂箱模型模擬, 如 Nieber

& Walter (1981)利用砂箱模型模擬坡地非拘限含水層降雨時土壤孔隙之水流, Rulon & Freeze (1985)在研究多層滲漏層時, 均以砂箱模型做為試驗的工具。國內劉長齡等(1989)、蘇苗彬和王智澤(1990)、張博文等(1991)、洪堅仁(1992)、陳進發(1990)、陳聰海(1991)等也都以砂箱模型實驗做為輔助研究之工具。

在與坡地滲流現象相類似分析之數值模擬方面, 國內有薛仲修(1989)、郭哲昆(1995)、黃任賢(2000)等, 利用邊界積分法或有限元素法, 分析土壩之滲流現象。

3. 邊坡穩定分析相關文獻

在邊坡穩定分析方面, 有「傳統之極限平衡法」及「有限元素法」兩類。在傳統極限平衡法於邊坡穩定分析方面, 最早由 Fellenius (1927)提出之切片法(Ordinary Method of Slices)開始。依據此切片法觀念, 相繼提出其他不同型式的極限平衡分析方法, 如 Bishop's Modified Method (Bishop, 1955)、Force Equilibrium Method (Lowe & Karafiath, 1960)、Janbu's Generalized Procedure of Slices (Janbu, 1968)、Morgenstern and Price's Method (Morgenstern & Price, 1965)以及 Spencer's Method (Spencer, 1967)等方法。上述不同的分析法, 基本土乃依據其對切片側力假設的不同而有差別。

極限平衡法是以力平衡為理論背景, 配合一些假設使其分析簡單化, 故在使用上所需考慮的參數與條件較少, 應用於實際工程問題之分析上也較為簡便。以極限平衡法為理論依據之分析程式, 一般以普渡大學所發展的 PCSTABLE 之一系列程式為代表, 此

程式在分析使用上頗為簡便,且包含數種不同的極限平衡分析方法以供使用者參考,故應用於邊坡分析上相當普遍。

雖然極限平衡法在使用上較為簡便,但由於其在分析上是假設沿邊坡破壞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,此與邊坡實際之漸進式破壞方式並不相符,此為極限平衡分析法之應用限制。

在有限元素法於邊坡穩定分析方面,是基於連體力學原理,同時考慮材料之應力-應變行為,並考慮不同邊界條件,故為一較嚴謹的分析方法。此方法最早由 Clough and Woodward (1967) 年,將有限元素法應用於分析邊坡之穩定性問題上,並使得地分析方法漸受大地工程專業人士所重視。自此以後,有限元素法的發展相當快速,且逐漸廣泛應用於邊坡安全性問題分析上。

相較於極限平衡分析法,有限元素法為一較嚴謹的分析方法,其主要的優點有:(1)能模擬較複雜且較接近實際情況之大地材料行為;(2)不必預先假設破壞面形狀及位置,其破壞的產生發生在土壤之抗剪強度無法抵抗邊坡之下滑力時,故分析方式較合理;(3)能模擬邊坡的漸進式破壞,較極限平衡法假設邊坡破壞滑動面上之各點均同時達到極限狀態,較能實際描繪邊坡破壞。

有限元素法在分析上較極限平衡法嚴謹,且更能實際的模擬土壤材料的行為,但由於理論背景較複雜,且在分析時所需考慮參數較多,往往使得分析者必須花較多的時間熟悉有限元素法之分析過程。理論背景及決定參數之合理值。其次,利用有限元素法進行邊坡

穩定分析時,較難定義其破壞機制(包括破壞滑動面之形式與位置),為有限元素法分析邊坡穩定問題之限制。

三、研究方法與步驟

為達成計畫目的所擬定之工作項目與計畫期程,本研究就所有相關資料之收集與分析著手,進行「降雨入滲理論」、「邊坡滲流現象」與「邊坡穩定分析法」等之理論背景、前人重要研究,以及本計畫所採行之研究方法及其步驟,茲分別說明如后。

1. 降雨入滲理論

由於影響入滲量大小因子複雜,故很難有具代表之入滲推估模式,可一體適用於各種不同場址其降雨量與入滲量之估算。因此對降雨與入滲量之關係,多採用現地試驗或數值模式來推估。在現地觀測方面,根據徐美玲等(2000)於蘭陽溪上游夫布爾沖積扇階地之礫石層之野外現地試驗,顯示降雨事件在竹林內較竹林外晚 30 分鐘發生,可知竹林之截留效應複雜。在入滲方面,當降雨強度小於 4.85mm/hr,總降雨量小於 21mm 的降雨條件下,60 cm 深度以下之土體不因降雨量而有明顯的變化;而在 30 cm 深度內之土體,其土體含水量變化在雨峰過後甚難模擬,此結果可說明影響入滲量因子之複雜程度。一般在水資源管理或水收支平衡分析,推估降雨入滲量常用下列公式推求:

$$\text{總入滲量} = 0.3 \times (\text{總降雨量} - 0.7 \times \text{總蒸發散量}) \quad (1)$$

上式中之 0.7 為晞皿係數(Pan coefficient),而 0.3 則為本省常用之入滲係數(Infiltration coefficient)。惟此式僅用在長期距之降雨入滲量推估,對於

暴雨期間之推估，是否能適用尚待商榷。

在降雨期間之入滲率(Infiltration rate)推估，理論分析上比較著名之公式為 Gardner & Widstoe (1921)及 Horton (1940)入滲公式，可得公式如：

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2)$$

上式中， f_c 為入滲進行至長時間後之穩定或最小入滲率； f_0 為降雨開始初始土壤入滲率； f 為降雨開始後 t 時間土壤入滲率； t 為時間；以及 k 為常數，與土壤性質有關。但此入滲公式僅針對地表較平坦之地表入滲容量，但確可描述土體於降雨期間之入滲率隨時間變化。

綜合以上學者之理論研究，可知影響土壤入滲之因子甚多。因此本研究將採用理論分析配合土體滲流之一維度數值分析模式，以反推求桃園紅土台地之降雨量-入滲量-土壤之關係。為得到現場觀測數據，本計畫於中壢市農業工程研究中心埋設不同深度之土壤水份計，採長期、定期觀測方式。配合農業工程研究中心原有氣象站資料，及該中心埋設之 TDR 自記式土壤水份測定，分析不同降雨與地表植被下之土體入滲量變化。

2. 邊坡滲流現象

邊坡的主體多為孔隙介質的土壤所構成，因此在降雨過後會有滲流現象發生。由於邊坡的安全性與土體內的滲流流況有著相當密切的關係，所以掌控邊坡土體的滲流現象，便成了相當重要的課題。一般邊坡之滲流效應會引起總水頭（或壓力水頭）的變化。自由液面（Phreatic surface，或稱地下水水位面）高低變化，以及坡面之滲流面產生（Seepage surface），這些現象均會導致

邊坡的直接或間接破壞。邊坡地下水水流控制方程式，可由飽和、未飽和地下水水流控制方程式與未飽和層水力特性方程式共同組成，其控制方程式如下。（Bear, 1979）

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [K(\nabla h + \nabla z)] \quad (3)$$

上式中， h 為壓力水頭（Pressure head）； t 為時間（Time）； K 為水力傳導張量（Hydraulic conductivity tensor）；以及 z 為勢能水頭（Potential head）。而 $C = d\theta/dh$ ，稱做比水容積（Specific water capacity），代表土壤中水分保持曲線（Soil-water retention curve）的斜率；控制滲流的時間項則為 $\partial h / \partial t$ 。

當水流通過一無降雨入滲之土層時，在自由液面以上為未飽和層，其壓力水頭為負。愈靠近地表，土壤愈乾燥的情況下，其含水量愈少，則壓力水頭負值愈大，因此水流愈不易流動，使得水力傳導係數也隨之變小。所以含水量與水力傳導係數均隨著深度變化而改變。當由未飽和層接近自由液面時，土壤中的含水量由未飽和狀態趨近於飽和狀態，此時壓力水頭負值漸小，水流愈易流動，使得水力傳導係數也漸變大，至自由液面以下之飽和層中成為一定值，此時壓力水頭為正。而在非拘限含水層自由液面之上，因為毛細現象所產生的吸力，所以形成了一含水量近似飽和的毛細鑲邊（Capillary fringe），在數值計算上可以忽略此種現象。

$$K = \begin{cases} K_s, & h > 0 \text{ (飽和層)} \\ K_r \times K_s, & h < 0 \text{ (未飽和層)} \end{cases} \dots\dots(4)$$

上式中， K_s 為飽和層中的水力傳導係數； K_r 為相對水力傳導度（Relative hydraulic conductivity）。水力傳導度 K_r 為有效飽和度 Θ （Effective saturation）的函數，而有效飽和度 Θ 又為壓力水頭 h 的函數，所以未飽和層的相對水力傳導度 K_r 亦為壓力水頭 h 的

函數。在預測未飽和層中的相對傳導度與土水保持曲線之關係時，我們依據 Mualem (1976) 模式所推導出之封閉方程式來進行預測。Maulem 由統計方式，並依據水份保持曲線來預測 K_r 。

其中 h 為壓力水頭； Θ 為有效飽和度，而 van Genuchten (1980) 假設 Θ 與 h 為函數關係，故可以推求出水份保持曲線關係式如下：

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|^n)\right]^m} \quad (5)$$

再將上式對 h 微分，可得比水容積 C 如下，當壓力水頭 h 愈大時，含水量 θ 愈大，此時水份保持曲線的斜率應該為一正值。

至於本研究所採行之求解方法，由於台灣地區地質環境複雜，因此邊坡構成往往有所謂分層組成現象，各層間之水力傳導係數與土壤物理特性均不相同。此種分層特性，在邊坡穩定分析上十分棘手，對於坡地滲流現象之分析亦然。傳統之水流理論分析，及實驗室模型試驗與砂箱模型試驗均難以描述現場實際狀況，因此本計畫採用有限元素數值模擬模式模擬坡地之滲流現象，其優點可針對台灣地區邊坡特性之不同分層、坡度、坡形進行模擬。為達成目標，本研究選用滲流分析常用之 3D-FEMWATER Yeh (1987) 數值模式來分析坡地滲流。如為確保數值模式分析之正確性，亦可於邊坡於不同深度埋設土壤水分感應器(sensor)，以現地資料回饋模式以修正參數值，以驗證所分析模式模擬其參數之正確性。

3. 邊坡穩定分析法

由於降雨入滲對於邊坡穩定性有很大的影響，Sudhakar (1996) 假設有一無限邊坡，且表層存有一等厚度 z 之土

壤，下層則為固結岩層。在降雨情況下，Sudhakar 假設入滲雨水讓表層土壤逐時飽和，其飽和層厚度為 h ； k 為表層土壤之飽和滲透係數； t 為自開始降雨後之時間； n 為上層土壤之孔隙率； s_0 為土壤之起始飽和度； h 為飽和土層之深度。因此可以根據傳統之極限平衡法，推導得此無限邊坡其安全係數值為：

$$F.S. = \frac{c_h + [\gamma(z-h) + \gamma_{sat}h] \cos^2 \beta \tan \phi_d}{[\gamma(z-h) + \gamma_{sat}h] \cos \beta \sin \beta} \quad (6)$$

其次，國內方面有鄧子榆(2001)利用 PLAXIS 有限元素程式分析降雨後之邊坡穩定問題。但在降雨入滲之分析方面，鄧氏仍假設在某一條件下之分析，即假設降雨後表層有 3~5 m 之飽和層；其與 PCSTABLE 分析方法之結果頗為一致。前述兩者之研究，對於邊坡安全之分析著墨甚多，但對於土壤滲流部份則多以假設為之，且兩者對於土體之飽和程度其界面劃分明顯，因此分析上仍不夠完備。

本研究為達成計畫目標，配合坡地三維有限元素滲流數值模擬模式(3D-FEMWATER)，理應選擇有限元素法來分析。但由於所需參數資料較多，因此本年度暫用 PCSTABLE 邊坡穩定分析模式，後續於資料充份時方選擇國內已有使用經驗之 PLAXIS 有限元素數值模式來分析邊坡之安全性。其執行步驟，首先由 3D-FEMWATER 數值模式模擬降雨後邊坡地各節點土壤含水量隨時間之變化以及地下水水位升降情形。其次將各節點含水量轉換其所對應之各點土壤物理參數(如單位重、抗剪強度等)，再將資料輸入 PCSTABLE

邊坡穩定分析模式來分析邊坡之安全性。最後可得到降雨後不同時間之邊坡可能破壞機制，以建立預警制度。

PCSTABLE 程式用於邊坡相關問題之分析上相當普遍，其包含數種不同的極限平衡分析方法供使用者參考，再配合一些假設使其分析起來簡單方便。PCSTABLE 程式架構，首先從邊坡剖面狀的輸入，其次為土層性質、地下水位、地表荷重、地震加速度、地錨及加勁土壤之設定，而後再選擇破壞面產生方式等。最後再以 Bishop Spencer 或 Janbu 等安全係數計算方式，求得最終臨界之 10 個活動面，輸出其最小安全係數及對應之活動面座標，得到一個最小安全係數之臨界滑動面。在破壞面形狀方面，可依所選取之安全係數計算方式，可為圓弧形破壞；或為任意形狀之破壞面形狀。由於必須先設定所有相關參數與坡面幾何形狀，因此對於隨時間變化情況之前述輸入資料，需隨時改變模式之輸入資料，此為程式在使用上之限制。

四、研究結果與討論

本計畫根據前述研究方法與步驟所得模擬結果，茲分「坡地滲流分析」、「坡地安全時變分析」及「現地實驗」三部份說明分析結果，並對現象提出討論。

1. 坡地滲流分析

本研究針對一有坡趾之虛擬邊坡進行滲流分析模擬，此虛擬邊坡坡度為 45 度，模擬範圍為長 48 公尺，高 14 公尺之人工邊坡。其土壤性質假設為均質與具等向性，其水力傳導係數為 0.864 m/day 之沙質紅壤土層，劃分為 188 個節點與 74 個元素之有限元素網格（如圖 1）；並假設無雨穩態情況下

為模式水頭分佈之起始條件（如圖 2 所示）。

在坡地降雨滲流分析方面，本研究採取三種不同之降雨入滲強度，分別為 100, 150 與 200 mm/day，模擬壓力水頭分佈、土壤含水量變化、地下水水面升降和滲流面是否產生的情形。此時在邊界條件設定方面，坡頂為定流量邊界（其側坡入滲量假設為坡頂之 1/3），右側為無流量邊界。在降雨強度為 100 mm/day，其模擬結果如圖 3~圖 6 所示。至於降雨強度為 150 與 200 mm/day，亦分別可得不同之逐時水頭分佈結果。

由模擬結果可以看出，在連續降雨 1 天後，坡趾左側之地下水位面已有抬升，並隨連續降雨天數增加益發明顯。到連續降雨第 4 天時已可以約略看到坡趾滲流面的產生。若持續降雨達到穩定情況時，則可發現整個坡地幾乎達到飽和狀態，其滲流面也從坡趾抬高到高程 11 公尺左右。在非飽和層方面，其土壤含水量也隨降雨時間之不斷延長而逐漸達到飽和。在降雨強度為 150 與 200 mm/day 在連續降雨 1 天後，坡趾左側之地下水位面已有抬升，且約略看到坡趾滲流面的產生。

前述之模擬為假設邊坡右側無地下水之流入與抬升之情形，但在實際降雨情況，邊坡右側常存在地下水之流入與抬升。為了解右側地下水位抬升與流入，與加上坡地降雨入滲之綜合效應。因此本計畫改變邊坡之邊界條件，並假設右側邊坡在 5 天內逐漸抬升 2 m 之情況，模擬三種不同降雨強度下之各種水頭、地下水位、滲流面位置等之變化。模擬結果顯示，降雨強度為 100 mm/day 可以看到在降雨 0.5 天時

地下水位面由起始之 2.2 公尺上升至 3 公尺左右，到第 1 天時水位面在較 0.5 天時上升 0.5 公尺，達到 3.5 公尺。給予持續降雨情況下，在 3.5 天時後側水位已抬升至 10 公尺處，在第 5 天已有滲流面產生之跡象。

為了顯示此滲流模式能廣泛應用到各種坡度或不規則形狀的坡面上，因此本研究建立另一個有坡趾，且坡面與坡形為不規則之虛擬邊坡進行模擬。此虛擬邊坡平均坡度約為 56 度，模擬範圍長 48 m，高 14 m。在土壤性質方面，假設其為均質與具等向性，水力傳導係數仍為 0.864 m/day 之沙質紅土層。其模擬結果如圖 7 與圖 8 所示。

由模擬可知，當給定邊界及降雨條件，模式均能計算邊坡因降雨滲流所造成之土壤含水量變化、地下水位升降及滲流面大小隨時間變化等資料。當降雨入滲強度愈大，在降雨發生後其土壤含水量變化與地下水水位升降愈明顯。尤其邊坡後方，在降雨發生之同時，因地下水之流入抬升，其土壤含水量與地下水位變化更明顯。本模式對不規則之自然邊坡，或不均質、非等向性質之土體滲流情形均能模擬。

2. 坡地安全時變分析

根據洪如江(1979)對於台灣紅棕土壤之研究指出，浸水後的紅土，其強度約為浸水前的三分之一，即浸水後之紅土其強度有相當程度的降低。又根據陳榮河(1990)等人對於紅土礫石台地之研究，紅土礫石台地陡坡之破壞皆屬淺層，凝聚力對於該類型邊坡受雨水入浸時之影響相當大。因此本計畫在進行邊坡穩定分析前，取一般紅土物理參數，其土壤乾單位重(Dry unit weight)為 $16 \text{ KN}/\text{M}^3$ ；而飽和單位重

(Saturated unit weight) 則為 $23.75 \text{ KN}/\text{M}^3$ (鄧子榆，2001)。對於紅土之凝聚力(C)與摩擦角(ϕ)等參數之設定，由於不同含水量之紅土有不同之力學性質，本計畫另根據 Baldovin (1969)對夯實紅土之試驗資料推估出其參數值與含水量之關係，推得圖 9 為含水量與凝聚力 C 之關係，可知隨含水量增加，其凝聚力逐漸降低；以及圖 10 為含水量與摩擦角(ϕ)之關係，均顯示含水量變化影響土體之物理性質。

在降雨現象對坡地安全性之時變分析方面，假設在降雨入滲強度分別為 100、150、200 mm/day，根據滲流模擬所得各節點之資料，求出不同時間下每個網格的含水量 w 與地下水位面隨時間變化。將這些模擬結果與土壤參數的對應關係輸入邊坡穩定分析程式中，即可求得在不同降雨強度下其安全係數與時間的變化關係。在程式操作中，首先建立 49 個片段來組成邊坡剖面土體區塊（如圖 11 所示）。其次根據不同降雨強度，所得不同時間下各節點的含水量 w ，由資料將土壤種類以節點平均法分成十種參數值分別輸入程式；對不同時間下的地下水位面位置，則依座標分點輸入。

根據分析結果，可得當降雨強度為 100、150 與 200 mm/day 等不同情況之安全係數分析結果（圖 12 與圖 13 所示）。由此可知在降雨強度為 100、150 mm/day 時，10 天內並不會破壞；當降雨強度 200 mm/day 時，其邊坡可能在時間第 5 天面臨破壞，這個結果就可做為預警參考。至於其最脆弱面，根據分析結果，在 150 mm/day 降雨入滲條件下，分別如圖 14、與 15 所示，可知最脆弱面因含水量逐時變化等因素，並

非固定在同一位置。

為模擬在後側地下水抬升之情況，假設模擬起始條件與前項相同，只是在降雨過程中，其右側地下水水位在 5 天內抬升 2m。在模擬降雨強度 100、150、200 mm/day，各降雨 5 天下，根據反覆計算可得出不同降雨強度下其安全係數變化與時間的關係（如圖 16 與圖 17 所示）。

由此可了解在降雨強度在 100mm/day 時，其邊坡可能在時間第 4 天達到臨界接近破壞；當降雨強度為 150mm/day 時，其邊坡可能在時間第 3~4 天之間破壞；當降雨強度 200mm/day 時，其邊坡可能在時間第 2~3 天之間破壞。

根據前述坡地安全性時變分析，可整理得到在右側地下水抬升情況下，假設安全係數小於 1 表示邊坡會破壞，因此可得降雨強度 - 延時與邊坡破壞之關係，如圖 18 所示，此結果可做為坡地安全預警之參考。

本計畫採區塊分割方式給定土壤相對應參數值，可得到邊坡穩定之時變性分析。根據分析結果，可知邊坡最脆弱面因含水量隨時間變化，並非在同一位置。右側有地下水抬升之情況，使得邊坡更易產生破壞。坡面滲流面的發生與位置高低，對邊坡安全性影響很大。然本階段工作尚未考慮此項滲流力，及因滲流作用把坡趾細顆粒土壤帶出等影響邊坡安全等因素。

3. 現地試驗之目的與過程

由於影響土壤入滲之因子甚多，因此本研究將採理論分析配合一維度數值分析模式，以反推求桃園紅土台地之降雨與入滲量關係。為得到現場觀測數

據，本計畫於中壢市農業工程研究中心埋設不同深度之土壤水份計，採長期、定期觀測方式。配合農業工程研究中心原有之氣象站資料，以及該中心已埋設之 TDR 自記式土壤水份測定，分析不同降雨與地表植被下之土體入滲量變化。

在埋設土壤水份計前，由於感測子之讀數與土壤水份關係與土壤性質有關，因此在現場埋設感測子前，本研究先進行感測子之率定 (Calibration) 工作，以得到代表中壢地區紅土層之感測子讀數與土壤含水量關係，因此現場試驗分兩部份進行，一為室內儀器率定，另一為現場安裝。

本計畫於現場採用之儀器有兩種，一為 Soil moisture Meter 以及另一種為 HydroSense。由於儀器感測子讀數與土壤水份關係與土壤性質有關，因此本研究須先進行感測子讀數之率定工作，以得到代表中壢地區紅土層之感測子讀數與土壤含水量關係。

儀器中 sensor 的材質是以電阻外包石膏，sensor 在實驗中當石膏遇水傳遞至電阻使導電度發生改變，因此 Soil moisture Meter 立即反映出不同讀值，故我們可以藉此間接取得所要量測的含水量。另外使用另一套系統 HydroSense 來做土壤含水量試驗，兩者互相比較。此兩儀器，sensor 是深埋於土層中，隨時讀取土壤含水量資料，而 HydroSense 是開挖後可即時測出土壤含水量，兩者目的不同。實驗率定在試驗數據方面，Soil moisture Meter 共做 30 組數據，而 HydroSense 則做了 55 組數據。

Soil moisture Meter 感測子讀值與真含水量的關係數據記錄，可繪出一率

定曲線(圖 19)。此圖形曲線與隨儀器所附之 Yolo Clay Loam 曲線相近。於現地實驗時可根據此圖來對應土壤含水量。而 HydroSense 讀值與真含水量的關係數據,亦可繪出一率定曲線(圖 20)。此曲線可讓我們方便於現地時不必挖掘,只需取與實驗時土樣一樣高度的土樣即可量測該土樣之含水量。

在土壤水分計現地安裝與觀測方面,由於中壢地區屬紅土台地,因此本計畫選定紅土礫石為現地試驗場址。經評選後選擇中壢市的農業工程研究中心為第一階段現地試驗場地。評選主要考量為:(1)該中心目前有完整之自記式氣象站,方便獲得相關之氣象資料(圖 21);(2)該地點位於中壢台地上,且距本校約 10 分鐘路程;(3)該中心目前已有埋設 TDR 跟 Water mark 土壤水份測定計,資料可供相互比對。

於選定場址後,本計畫即進行現地埋設工作,首先在試驗場址(農業工程研究中心氣象站)前空地,劃出 100 cm(長)*100 cm(寬)*100 cm(深)之區域,垂向埋置探測子(sensor),其間隔為距地表表 20、40、60、80、100 cm 等各設一探測子共計 5 組。將電阻線頭以橡皮筋綑綁整理,並分別以彩色標籤編號,最底層為 1、其次是 2 而至最後為 5,以便量測時識別。

在挖掘至不同深度,須以土壓計量測該層土壓,以便回填時回復該層土層情況。其次於安置 sensor 之位置往側向開挖 15 cm 以便安置 sensor,然後確實封填此側向開孔,最後逐層覆土回復原狀,圖 22~25 為部份埋設水份感測子之過程。

在完成土壤水份計感測子埋設後,為評估所埋設感測子之觀測頻率,

本計畫取得該中心相關之氣象與土壤水份觀測紀錄(8、9 兩月份之小時資料)。本計畫首先針對長時間之降雨、土壤水份關係(8、9 兩月之日資料),可得 8 月份及 9 月份之降雨與不同深度土壤水份之關係如圖 26 與圖 27。由圖可知,降雨量在 2 mm 以下,對 10 cm 深之土壤含水量增加幾乎無影響,降雨量在 3 mm 以下,對 20 cm 深之土壤含水量增加幾乎無影響。為更精確分析,本計畫再取某一段下雨高峰,如 8 月 4 日與 9 月 25 日兩日做細部分析,亦可得到相近結果(圖 28 與圖 29)。

根據前述之實驗室與現地試驗,可得:(1)紅土之 Soil moisture Meter 儀器感測子讀值與真含水量率定圖,以及紅土之 HydroSense 儀器讀值與真含水量率定圖,對後續現地試驗之土壤含水量測定幫助甚大。(2)選定中壢市的農業工程研究中心為第一階段現地試驗場地,該中心可提供完整之氣象資料;且本計畫所埋設之感測子可與該中心目前已埋設之 TDR 跟 Water mark 土壤水份測定計,資料可相互比對。(3)目前已完成現地試驗場址之安裝與設定,但目前尚未達穩定狀態。根據目前所獲資料可知,當降雨量在 2 mm 以下,對 10 cm 深之土壤含水量增加幾乎無影響,降雨量在 3 mm 以下,對 20 cm 深之土壤含水量增加幾乎無影響。

本計畫由於尚未測得土壤之水力傳導係數與土壤水份保持曲線,因此目前尚無法推估得該地之降雨入滲率。

五、 結論與建議

根據本計畫擬定工作內容與執行成果,可得以下之結論與建議,供各界參考,茲分別說明如后。

1. 結論

- (1)在降雨滲流之數值模擬方面，只要給定與現場一致之邊界條件及不同之降雨條件，均能快速計算出邊坡因降雨滲流所造成之土壤含水量變化、地下水水位升降等。並可計算出坡面發生滲流面之時間，以及其滲流面大小與位置隨時間變化等資料。模擬結果顯示，當降雨強度愈大，其在降雨發生後土壤含水量變化與地下水水位升降愈明顯；尤其邊坡後方，在降雨發生之同時，因地下水之流入抬升，其土壤含水量變化與地下水水位升降更加明顯。
- (2)邊坡滲流模式不僅適用於規則之人工邊坡，對於不規則之自然邊坡，或不均質、非等向性質之邊坡土體滲流情形均能模擬。因此可做為計算自然邊坡，因降雨所產生之內部土體含水量於時間之變化情形。
- (3)在邊坡穩定分析方面，由於邊坡土壤因降雨入滲所成之含水量變化因時、因地而有不同，故本計畫採區塊之方式給定相對應之參數值，最後可得到邊坡穩定之時變性分析。根據分析結果，可知邊坡最脆弱面因含水量隨時間變化因素，並非在同一位置。
- (4)降雨後邊坡後側地下水之流入與地水位之相對抬升，對邊坡安全影響很大，其效果與單純之土體含水量因降雨入滲變化比較起來更形重要。
- (5)本計畫可求得降雨強度 - 延時與邊坡破壞之關係外，可做為建立邊坡安全預警制度之參考。
- (6)本計畫已得到紅土之 Soil moisture Meter 儀器感測子讀值與真含水量率定圖，以及紅土之 HydroSense 儀器讀值

與真含水量率定圖，對後續現地試驗之土壤含水量測定幫助甚大。

- (7)本研究已完成現地之土壤水份感測子埋設，選定中壢市的農業工程研究中心為第一階段現地試驗場地，該中心可提供完整之氣象資料；且本計畫所埋設之感測子可與該中心目前已埋設之 TDR 跟 Water mark 土壤水份測定計，資料可相互比對。根據目前所獲資料可知，當降雨量在 2 mm 以下，對 10 cm 深之土壤以及降雨量在 3 mm 以下，對 20 cm 深以下之土壤含水量幾無影響。

2. 建議

- (1)由於目前感測子所得之數據尚不穩定，尚待後續長期觀測。其次亦尚未測得現地不擾動土壤之水力傳導係數與土壤水份保持曲線，故目前尚無法推估得該地之降雨入滲率。如有此兩數據，本計畫即可推估長期降雨與入滲率關係；以及短期暴雨其土層含水量隨時間之變化等水文現象。
- (2)土壤因降雨導致強度弱化，以及單位重隨含水量多寡之變化等現象。本計畫目前僅根據相關文獻資料自行假設合理之參數值，後續可繼續加強此方面之實驗數據，以強化分析之理論基礎。
- (3)坡面滲流面的發生與位置，對於邊坡之安全性影響很大。但本階段工作中尚未能考慮此項滲流作用力，以及因滲流作用把坡趾細顆粒土壤帶出等影響邊坡安全之綜合作用。
- (4)為簡化分析過程，本研究目前所採邊坡多偏重坡面與坡形單純之人工邊坡，主要目的為探討所結合之模式可用以進行坡地安全之預警。然事實上影響土石流之邊坡大部分是崩場地，或是有大量裂縫之不規則坡地，因此建議後續可繼

續進行崩場地或有大量裂縫存在之邊坡進行研究，並探討其崩塌原因。

六、 參考文獻

- [1] Bishop, A.W., (1955) 'The use of the slip circle in the stability analysis of slopes', *Geotechnique*, Vol.V,No.1, pp.7-17.
- [2] Brooks, R.H. and A.T. Corey (1964) 'Hydraulic properties of porous media', *Hydrology Pap.*, Colo. State Univ., Fort Collins, No.3,pp.27.
- [3] Campbell, G.S. (1974), 'A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data,' *Soil Sci.* Vol.117, No.6, pp.311-314.
- [4] Childs, E. C., (1971), 'Drainage of groundwater Resting on a sloping bed', *Water Resour. Res.*, Vol.7, No.3, pp.1256-1263.
- [5] Clough, R.W. and R.J., Woodward, (1967), 'Analysis of embankment stress and deformations', *J. Soil Mechanics and Found. Div.*, ASCE, 93(4), pp.529-549.
- [6] Fellenius, W. (1927), *Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohasion*, Ernst, Berlin (in German)
- [7] Genuchten, M.T., (1980) 'A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils', *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.44, pp.892-898
- [8] Huyakorn, P. S., S. D. Thomas and B.M. Thompson, (1984) 'Techniques for making finite element competitive in modeling flow in variably saturated porous media', *Water Resour. Res.*, Vol.20, No.8, pp.1099-1115.
- [9] Janbu, N. (1968), 'Slope Stability Computations', *Soil Mechanics and Foundation Engrg. Report*, Technical University of Norway, Trondheim.
- [10] Morgenstern, N. and V.E. Price, (1965), 'The Analysis of the stability of General slip surfaces', *Geotechnique*, Vol.XV, No.1, pp.79-93.
- [11] Mualem, Y., (1976) 'A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media', *Water Resour. Res.*, Vol.12, No.3, pp.513-522.
- [12] Mualem, Y., (1978) 'Extension of the similarity hypothesis used for modeling the soil water characteristics', *Water Resour. Res.*, Vol.13, No.4, pp.773-780.
- [13] Mualem, Y. and G.F. Pinder, (1982), *Numerical solution of Partial Differential in Science and Engineering*, John Wiley and Sons, N.Y.
- [14] Rulon, J.J., R. Rodway and R.A. Freeze, (1985) 'The development of multiple seepage faces on slopes', *Water Resour. Res.*, Vol.21, No.11, pp.1625-1636.
- [15] Spencer, E. (1967), 'A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces', *Geotechnique*, Vol.XVII, No.1, pp.11-26.
- [16] Sudhakar, M.R. (1996), 'Role of apparent cohesion in the stability of Dominican allophane soil slopes', *Engineering Geology*, vol. 43, pp.265-279.
- [17] Verma, R.D. and W. Brutsaert, (1970) 'Unconfined aquifer seepage by capillary flow theory', *J. Hydraulics Div.*, A.S.C.E, Vol.96, No.6, pp.1331-1343.

- [18]Yeh, G.T.,(1987) '*FEMWATER: A Three Dimensional Finite Element Model of Water Flow Through Saturated-Unsaturated Media,*' ORNL-6386, Oak Ridge National Laboratory, OAK RIDGE, Tenn..
- [19]林美玲、王幼行，(1999) 地表水及地下水對土石流破壞型態之影響，地工技術第 74 期：29-38。
- [20]洪如江，(1967)，「台灣北部（濁水溪以北）紅棕土之物理特性」，國科會專題研究期終報告。
- [21]洪明瑞 段賢麟 廖新興 張惠文，(1998) 台灣山坡地災害類型及產生因素之探討（上），現代營建 223 期：55-63。
- [22]徐美玲、黃誌川，(2000)，「未飽合層一維入滲之模擬」，八十八年電子計算機於土木水利工程應用研討會，國立中興大學，民國八十九年二月。
- [23]許瑞昌、陳主惠、劉振宇，(1997)，「為飽合層土壤水份垂直入滲之數值模擬」，八十七年度農業工程研討會。
- [24]陳進發，(1990)，「洩降下土壩滲流之縮小模型研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- [25]陳晉琪、詹錢登，(1999)土石流發生之臨界土層含水量，第 2 屆土石流研討會論文集：129-137。
- [26]陳榮河等，(1990)，「紅土台地坍方防治方法之綜合研究」，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 78-73 號。
- [27]陳聰海，(1991)，「分區型模型土壩受洩降之滲流行為」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- [28]黃宏斌，(1993)，「非飽合堆積層土石流發生之臨界角度與含水量之關係研究」，中華水土保持學報，24(1):21-27。

- [29]黃誌川、徐美玲，(1997)，「多參數土壤水份傳導度之推估」，八十七年度農業工程研討會。
- [30]鄧子榆，(2001)，「以有限元素法進行邊坡穩定分析之研究」，中原大學土木工程研究所碩士論文。
- [31]鄭魁香、蔣偉寧，(1994)，「臺灣地區邊坡破壞類型分析」，高苑學報，3：103-103。

七、 附圖表

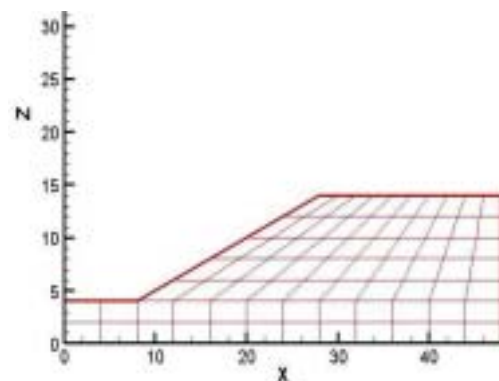


圖 1 模擬場址之網格劃分示意圖

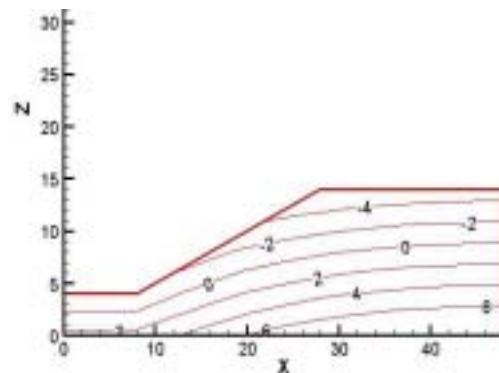


圖 2 無雨情形模擬之起始水頭

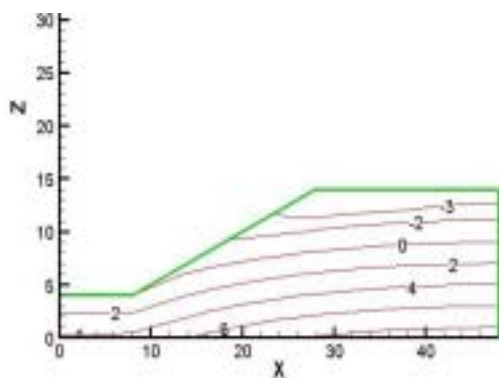


圖 3 連續降雨 1 天後壓力水頭分佈

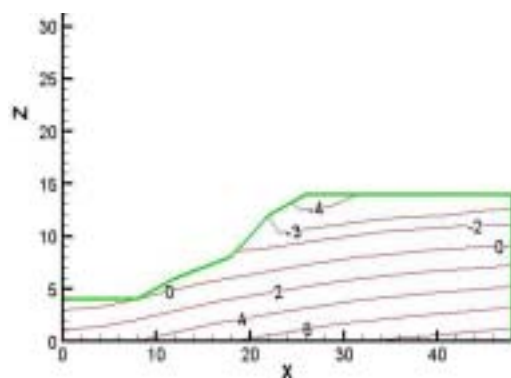


圖 7 不規則邊坡降雨 0.5 天水頭分佈

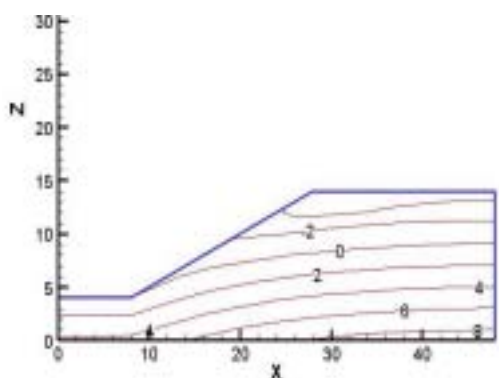


圖 4 連續降雨 2 天後壓力水頭分佈

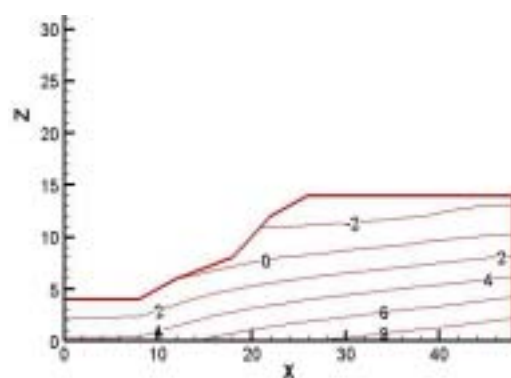


圖 8 不規則邊坡降雨 3 天水頭分佈

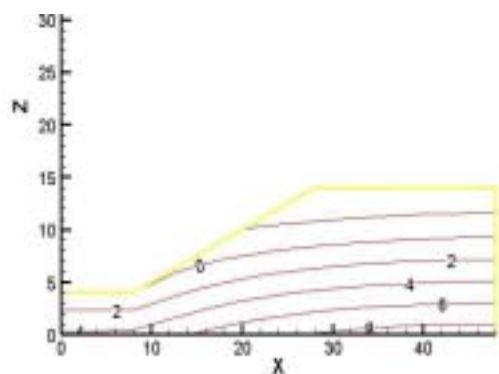


圖 5 連續降雨 4 天後壓力水頭分佈

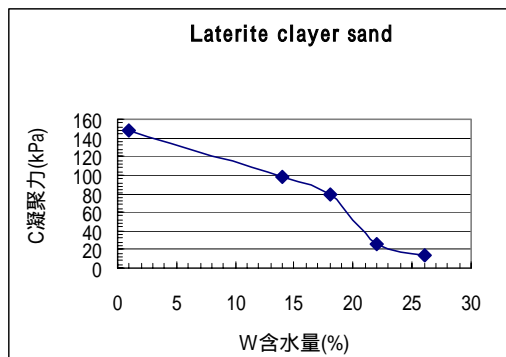


圖 9 含水量與土壤凝聚力關係

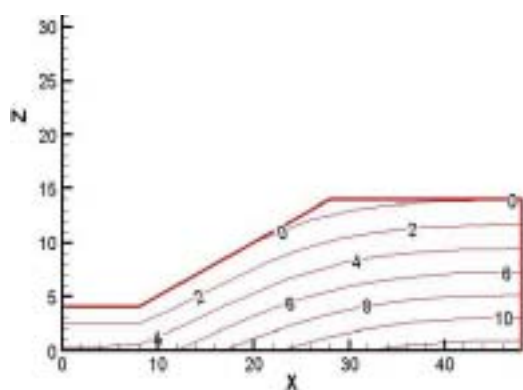


圖 6 穩定情況下壓力水頭分佈

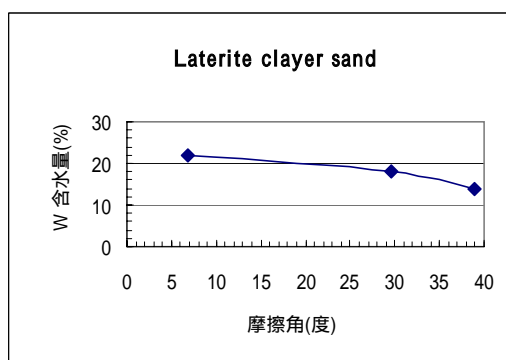


圖 10 含水量與土壤摩擦角關係

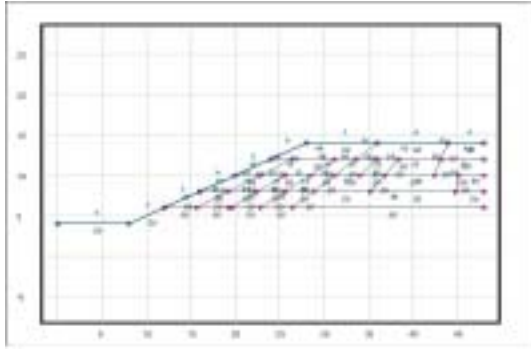


圖 11 時變分析之土壤區塊組成

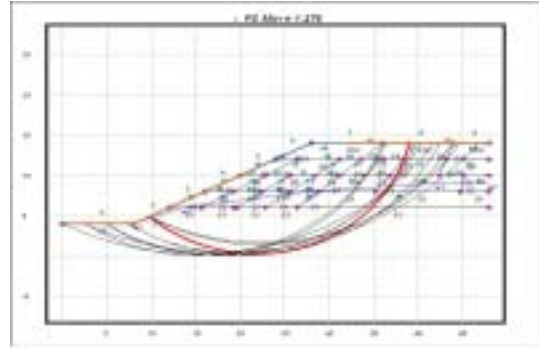


圖 15 降雨 1 天後分析輸出結果

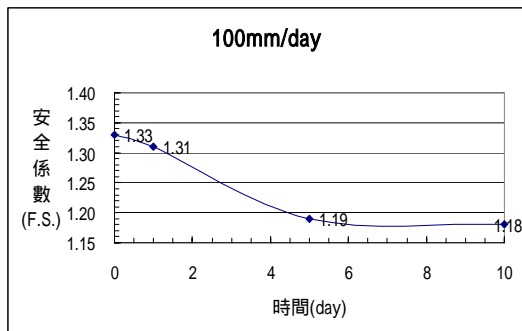


圖 12 降雨強度 100mm/day 時間與安全係數關係

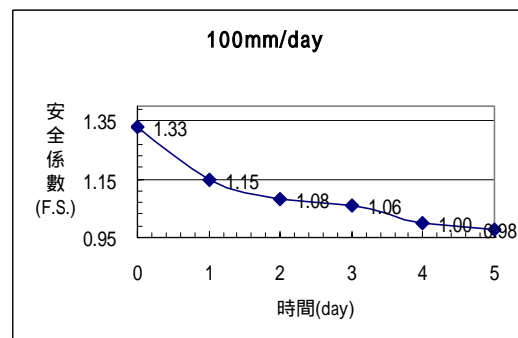


圖 16 降雨強度 100mm/day 時間與安全係數關係

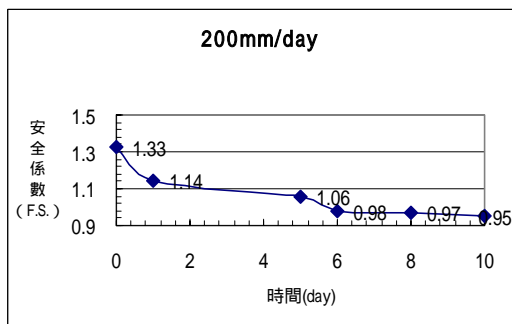


圖 13 降雨強度 200mm/day 時間與安全係數關係

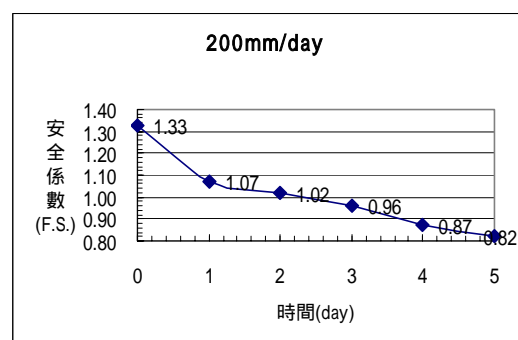


圖 17 降雨強度 200mm/day 時間與安全係數關係

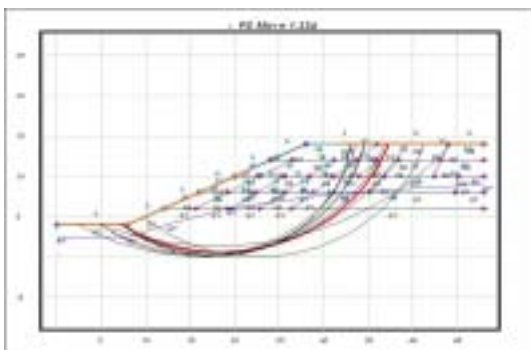


圖 14 降雨前分析輸出結果

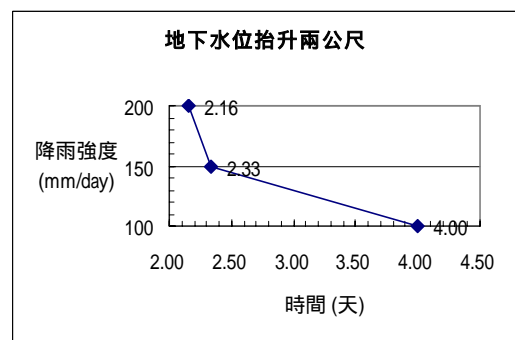


圖 18 降雨強度 - 延時與邊坡破壞之關係

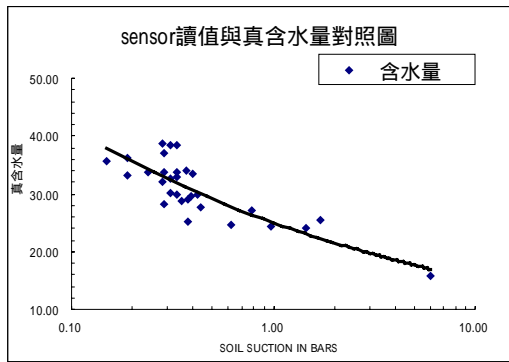


圖 19 紅土之 Soil moisture Meter 感測子讀值與真含水量率定圖

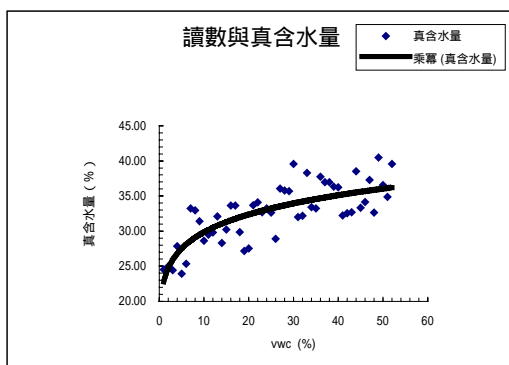


圖 20 紅土之 HydroSense 讀值與真含水量率定



圖 21 現地試驗場址鄰近之氣象站



圖 22 挖坑



圖 23 線頭整理盒與 sensor



圖 24 sensor 放置



圖 25 復原

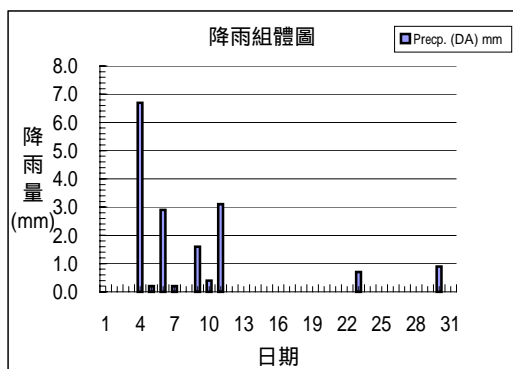


圖 26-1 八月份降雨量組體圖

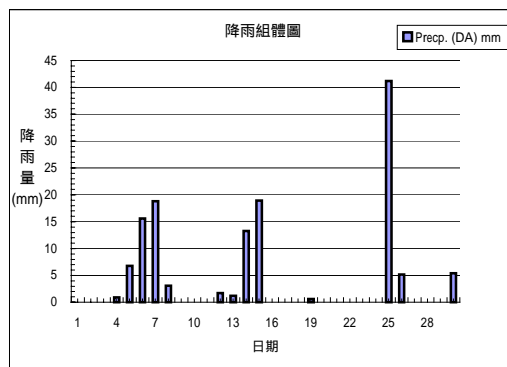


圖 27-1 九月份降雨量組體圖

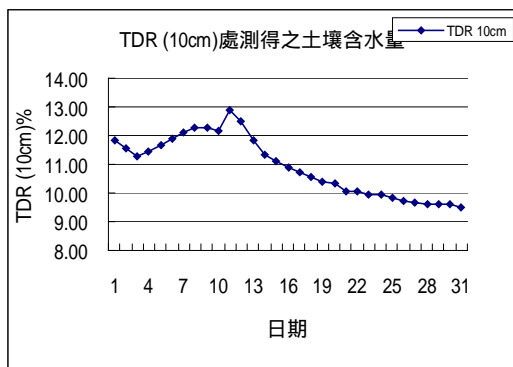


圖 26-2 八月份 10cm 土深 TDR 土壤水份觀測記錄圖

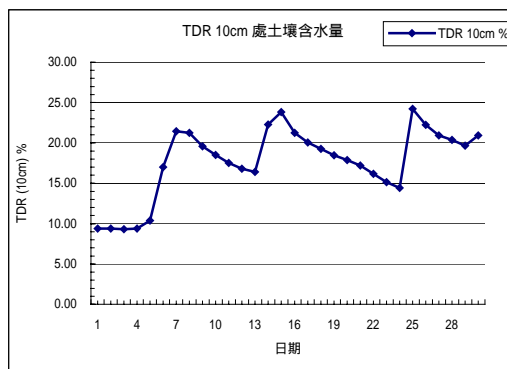
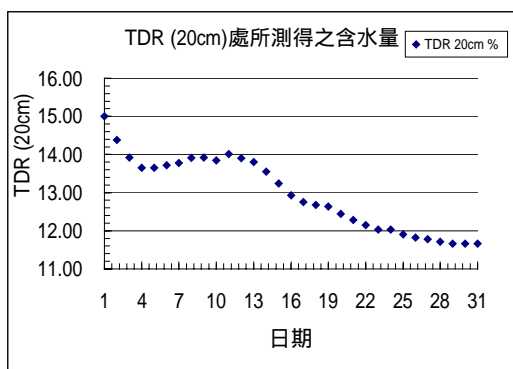
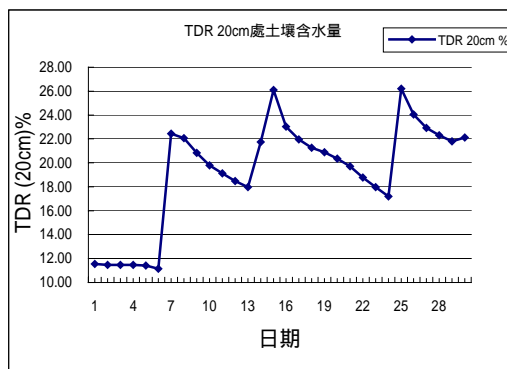


圖 27-2 九月份 10cm 土深 TDR 土壤水份觀測記錄圖



(20cm 土深 TDR 土壤水份觀測記錄圖)
圖 26-3 八月份降雨組體圖與不同深度土壤水份觀測值



(20cm 土深 TDR 土壤水份觀測記錄圖)
圖 27-3 九月份降雨組體圖與不同深度土壤水份觀測值

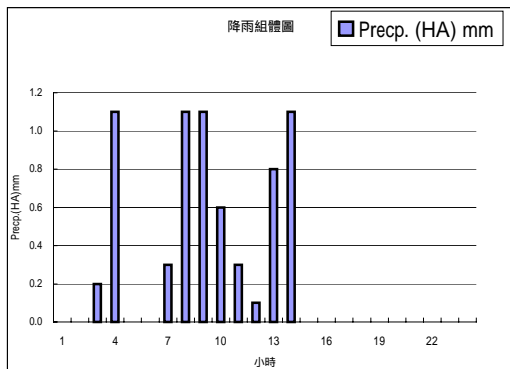


圖 28-1 降雨量組體圖(8 月 4 日)

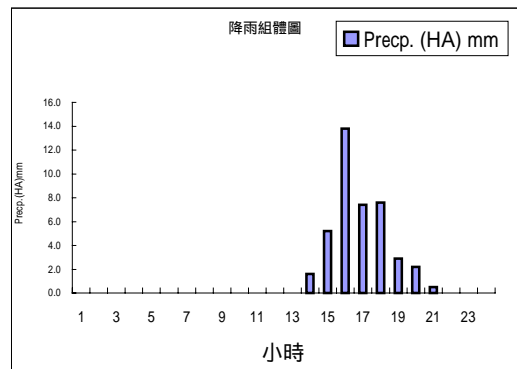


圖 29-1 降雨量組體圖(9 月 25 日)

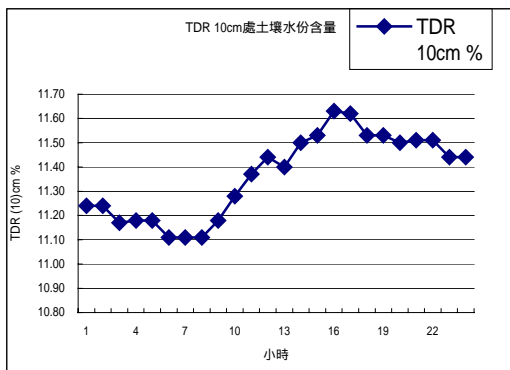


圖 28-2 10cm 土深 TDR 土壤水份觀測記錄圖(8 月 4 日)

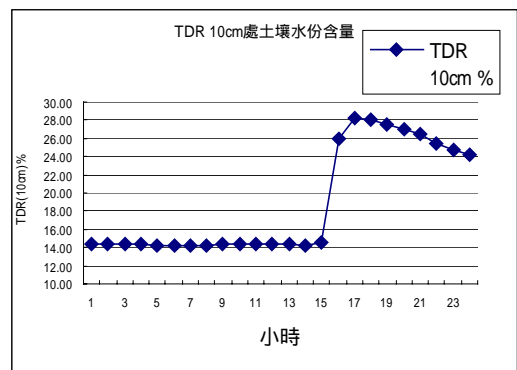
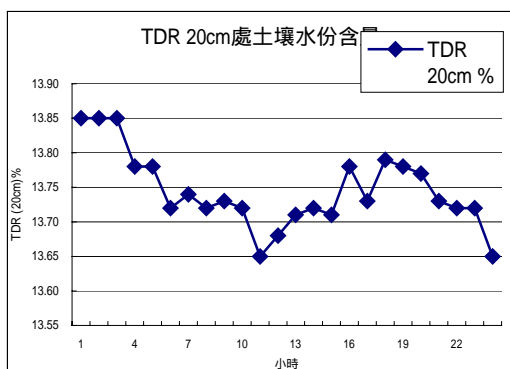
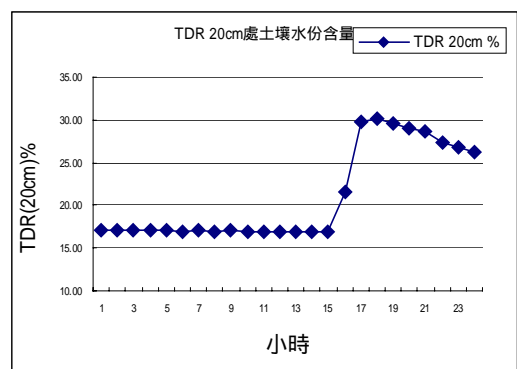


圖 29-2 10cm 土深 TDR 土壤水份觀測記錄圖(9 月 25 日)



(20cm 土深 TDR 土壤水份觀測記錄圖)
圖 28-3 降雨組體圖與不同深度土壤水份觀測值(8 月 4 日)



(20cm 土深 TDR 土壤水份觀測記錄圖)
圖 29-3 降雨組體圖與不同深度土壤水份觀測值(9 月 25 日)