

# 國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

降雨引發坡地淺崩塌模式之建立與探討

Development and Examination of  
Rainfall-Triggered Shallow Landslide Model

研究生：陳弘恩

指導教授：楊錦釗、蔡東霖 博士

中華民國九十四年七月

降雨引發坡地淺崩塌模式之建立與探討  
Development and Examination of  
Rainfall-Triggered Shallow Landslide Model

研究生：陳弘恩  
指導教授：楊錦釗  
蔡東霖

Student : Hung-En Chen  
Advisors : Jinn-Chuang Yang  
Tung-Lin Tsai

國立交通大學

土木工程學系



Submitted to Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
in  
Civil Engineering  
July 2005  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年七月

# 國立交通大學

## 論文口試委員會審定書

本校 土木工程 學系碩士班 陳弘恩 君

所提論文：降雨引發坡地淺崩塌模式  
之建立與探討

合於碩士資格標準、業經本委員會評審認可。

口試委員：

王克漢

李天浩

潘以文

蔡車霖

楊錦訓

蔡車霖

指導教授：

楊錦訓

系主任：

張良正

教授

中華民國

94 年

7 月

11 日

# 降雨引發坡地淺崩塌模式之建立與探討

研究生：陳弘恩

指導教授：楊錦釗

蔡東霖

國立交通大學土木工程學系

## 摘要

本研究利用理查氏方程式(Richards equation)配合無限邊坡穩定理論(infinite slope stability theory)，探討降雨引發之坡地淺崩塌。研究中，首先探討降雨引發陡坡及緩坡淺崩塌之類型與機制，並依據其結果，推導地下水位上升引發坡地淺崩塌之充分條件，再進一步探討降雨特性，包括雨量、延時及雨型，對坡地淺崩塌之影響。結果顯示，陡坡之淺崩塌可能發生於土壤未飽和或飽和處，然而緩坡似乎僅可能發生於土壤飽和處。降雨導致土壤虹吸(soil suction)減小與地下水位上升，皆可能引發坡地崩塌。地下水位上升引發坡地淺崩塌之充分條件，可作為工程實務上，判別坡地發生崩塌之簡易方法。此外，降雨雨量、延時與雨型對坡地是否發生淺崩塌，以及破壞深度及時間皆有重大的影響。

**關鍵詞：**坡地淺崩塌、無限邊坡穩定理論、雨量、延時、雨型

# Development and Examination of Rainfall-Triggered Shallow Landslide Model

Student : Hung-En Chen

Advisors : Jinn-Chuang Yang  
Tung-Lin Tsai

Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

In this study, based on Richards equation and infinite slope stability theory, a rainfall-triggered shallow landslide model is developed and examined. After the developed model is verified, the type and mechanism of failure in steep and mild slopes are investigated first. The influences of rainfall characters including intensity, duration, and pattern on shallow landslide are then examined. The results show that the failure of steep slope could happen when the soils are unsaturated or saturated. However, the failure of mild slope seems to occur in saturated soils only. Both the decrease of soil suction and the rise of groundwater table caused by rainfall could trigger landslide. The intensity, duration, and pattern of rainfall have significantly influence not only on the occurrence of shallow landslide but also on the depth and time of soil failure. In addition, the sufficient condition of landslide caused by the rise of groundwater table is derived and it could be used in engineering practices.

***Keywords: shallow landslide ; infinite slope stability theory ; rainfall ;  
duration ; rainfall pattern***

## 誌謝

承蒙恩師楊錦釗教授與蔡東霖博士多年來悉心指導，得以使本論文順利完成，並且感謝口試委員王克漢教授、李天浩教授與潘以文教授悉心給予指正與建議，使本論文更臻完善，此外，亦感謝葉克家教授、張良正教授、許勝田博士在課堂上的教誨，使學生受益匪淺，在此謹向各位老師表示最衷心的敬意。

感謝就學期間研究室德勇學長、夢祺學長、恩添學長、祥禎學長、胤隆學長、昇學學長、世偉學長、仕哲學長及曉萍學姊於學業上之指導與生活上之照顧，亦感謝同學益家、俊毅、峰志、于軒及璨仲在生活與課業上的幫助，及感謝學弟妹欣瑜、浩榮、仲達、宣汝、力瑋給予的鼓勵與協助，在此表示誠摯感謝。

最後，感謝我的家人多年來的支持與鼓勵，讓我得以順利完成論文及獲得學位，感激之情永銘於心，僅將本論文與你們分享我的喜悅。

# 目錄

摘要 .....	i
Abstract .....	ii
誌謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vi
圖目錄 .....	vii
符號說明 .....	ix
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	1
1.3 研究方法與步驟 .....	3
1.4 章節介紹 .....	4
第二章 理論基礎 .....	5
2.1 坡地降雨入滲模擬 .....	5
2.2 無限邊坡穩定性分析 .....	7
第三章 數值計算程式之建立與驗證 .....	11
3.1 離散方程式 .....	11
3.2 計算流程 .....	13
3.3 程式之驗證 .....	13
第四章 降雨引發坡地淺崩塌之探討 .....	15
4.1 陡坡淺崩塌之探討 .....	15
4.2 緩坡淺崩塌之探討 .....	17
4.3 地下水位上升引發淺崩塌之充分條件 .....	17
第五章 降雨特性對坡地淺崩塌之影響 .....	19
5.1 緩坡淺崩塌 .....	19
5.2 陡坡淺崩塌 .....	21
第六章 結論與建議 .....	24

6.1 結論 .....	24
6.2 建議 .....	25
參考文獻 .....	26



# 表目錄

表 4.1 土壤性質參數.....30



## 圖目錄

圖 1.1 山崩種類示意圖(Varnes 1987) .....	31
圖 1.2 概念化實際降雨雨型 .....	32
圖 1.3 研究步驟流程圖 .....	33
圖 2.1 三維坡地地下水流 .....	34
圖 2.2 一維坡地地下水流 .....	35
圖 2.3 無限邊坡示意圖 .....	36
圖 3.1 程式計算流程圖 .....	37
圖 3.2 0.5 小時含水量比較 .....	38
圖 3.3 各時刻質量守恆誤差 .....	38
圖 4.1 緩坡淺崩塌 .....	39
圖 4.2 陡坡淺崩塌 .....	39
圖 4.3 陡坡未飽和土層淺崩塌 .....	40
圖 4.4 緩坡淺崩塌之充分條件示意圖 .....	40
圖 4.5 陡坡淺崩塌之充分條件示意圖 .....	41
圖 5.1 降雨 135mm 雨量對緩坡淺崩塌之影響 .....	42
圖 5.2 降雨 270mm 雨量對緩坡淺崩塌之影響 .....	42
圖 5.3 不同雨量對緩坡之累積入滲量 .....	43
圖 5.4 雨量對緩坡淺崩塌之影響 .....	43
圖 5.5 降雨 3 小時對緩坡淺崩塌之影響 .....	44
圖 5.6 降雨 6 小時對緩坡淺崩塌之影響 .....	44
圖 5.7 降雨 12 小時對緩坡淺崩塌之影響 .....	45
圖 5.8 不同延時對緩坡之累積入滲量 .....	45
圖 5.9 延時對緩坡淺崩塌之影響 .....	46
圖 5.10 均勻型對緩坡淺崩塌之影響 .....	47
圖 5.11 前進型對緩坡淺崩塌之影響 .....	47
圖 5.12 中央型對緩坡淺崩塌之影響 .....	48
圖 5.13 後退型對緩坡淺崩塌之影響 .....	48

圖 5.14 不同雨型對緩坡之累積入滲量 .....	49
圖 5.15 緩坡不同雨型達破壞之雨量延時圖 .....	49
圖 5.16 降雨 180mm 雨量對陡坡淺崩塌之影響 .....	50
圖 5.17 降雨 360mm 雨量對陡坡淺崩塌之影響 .....	50
圖 5.18 降雨 720mm 雨量對陡坡淺崩塌之影響 .....	51
圖 5.19 降雨 4 小時對陡坡淺崩塌之影響 .....	52
圖 5.20 降雨 8 小時對陡坡淺崩塌之影響 .....	52
圖 5.21 降雨 16 小時對陡坡淺崩塌之影響 .....	53
圖 5.22 均勻型對陡坡淺崩塌之影響 .....	54
圖 5.23 前進型對陡坡淺崩塌之影響 .....	54
圖 5.24 中央型對陡坡淺崩塌之影響 .....	55
圖 5.25 後退型對陡坡淺崩塌之影響 .....	55
圖 5.26 陡坡不同雨型達破壞之雨量延時圖 .....	56



## 符號說明

$c'$  : 土壤之凝聚力(cohesion)

$FS$  : 安全係數

$i$ 、 $n$  : 網格空間及時間座標

$K$  : 水力傳導係數

$K_L$ 、 $K_z$  :  $x$ 、 $y$  及  $z$  方向之水力傳導係數

$K_s$  : 飽和水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity)

$l$  : 單位長度

$N$  : 孔徑指數(pore index)

$NX$  : 網格空間座標終點

$M$  : 曲線密合因子(cure fitting parameter)

$t$  : 時間

$u_a$  : 孔隙氣壓力

$u_w$  : 孔隙水壓力

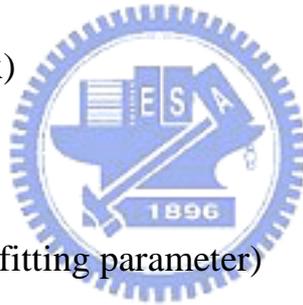
$W$  : 土層重力

$w$  : 地下水位上升高度

$x$ 、 $y$ 、 $z$  : 空間座標

$H$  : 垂向深度

$H_d$  : 垂向地下水位深度



$H_L$  : 垂向土層厚度

$z_d$  : 正向地下水位深度

$z_L$  : 正向土層厚度

$\alpha$  : 坡地之坡度

$\gamma$  : 土壤比重

$\gamma_w$  : 水比重

$\Delta t$  : 時間間距

$\Delta z$  : 空間間距

$\phi'$  : 摩擦角度

$\phi^b$  : 基質吸力增加所造成土壤之摩擦角

$\theta$  : 含水量(moisture content)

$\theta_s$  : 飽和含水量(saturated moisture content)

$\theta_r$  : 殘餘含水量(residual moisture content)

$\sigma$  : 主應力(normal stresses)

$\tau$  : 剪力強度(shear strength)

$\psi$  : 壓力水頭(pressure head)

$\psi_c$  : 未飽和壓力水頭

$\psi_p$  : 飽和壓力水頭

$\zeta$  : 進氣潛能因子(empirical parameter of air entry value)



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

降雨乃是引發坡地崩塌(landslide)的主要自然外在誘因之一，尤其是對於位處亞熱帶颱風好發的台灣地區而言。此外，由於全球氣候的變遷，屬於海島型氣候的台灣地區，近年來亦經常發生因暴雨引發之坡地崩塌。坡地崩塌所產生之大量土砂，不但能經由河道進入水庫造成嚴重淤積，減低水庫容量及壽命，影響水庫永續經營，更可能帶來民眾生命財產的重大損失。因此，如何預測、預警及預防因降雨引發之坡地崩塌，儼然已成為重要且迫切的研究課題。

本研究之目的即在於探討降雨引發坡地崩塌之類型與機制，以及降雨特性，包括雨量(rainfall)、延時(duration)及雨型(rainfall patterns)對坡地崩塌之影響，並且提出引發坡地崩塌之判別方法，以供工程實務之用。本研究之結果，可作為預測、預警及預防降雨引發坡地崩塌之重要參考。

## 1.2 文獻回顧

探討飽和未飽和地下水入滲，Darcy(1856)首先經由實驗提出線性滲流理論，為往後地下水入滲理論的發展奠定了基礎。Buckingham(1907)提出未飽和層水流與勢能梯度相關之觀念，並提出Darcy-Buckingham方程式，運用於土壤含水量不隨時間變化下未飽和層水流之運動。Richards(1931)利用達西定律，並定義未飽和土層之總水頭係為位置水頭及張力(負壓)之和，且水力傳導係數為張力水頭之函數，再根據一維垂向連續方程，建立未飽和水流之偏微分方程。求解理查氏方程式(Richards equation)已是近代研究飽和未飽和地下水入

滲之主要方法，如Brandt et al.(1971) 利用交替隱式差分法配合牛頓迭代法求解理查方程式，模擬二維未飽和層地下水入滲，Neuman(1973) 利用有限元素法求解加入多孔隙物質壓縮特性的理查方程式，以便處理未飽和層和飽和層間不連續的問題。Haverkamp et al.(1977)以隱式有限差分法模擬砂質土壤地下水入滲，並探討九種不同權重型式之水力傳導係數。Hills' et al.(1989) 利用雙步驟Crank - Nicolsom有限差分法模擬層狀未飽和土壤地下水入滲。陶方策(1995)以有限解析法建立一維未飽和層水流傳輸模式。褚淑慧(2001) 以有限差分法建立一維未飽和層水流傳輸模式，並改善未飽和層水流傳輸模式質量守恆與數值擴散問題。其他，如Allen and Murphy(1986)、Milly (1988)、Celia(1990)、Gottardi(1993)、Romano(1998)等。

坡地崩塌(landslide)的型式依其移動方式，如圖1.1所示，分為墜落(Fall)、傾翻(Topple)、滑動(Slide)、側滑(Spread)與流動(Flow)五種，一般地震或豪雨所造成之崩塌大多以淺層邊坡滑動(Shallow slide)為主，而以莫爾-庫倫破壞準則為基礎之無限邊坡穩定分析模式(Skempton 1957)，為一廣泛採用於評估坡地崩塌可能性之分析方法，Fredlund et al.(1978) 提出未飽和土壤剪力強度關係式，將基質吸力(suction)及其摩擦角之觀念加入Terzaghi土壤剪力強度關係式中。利用未飽和土壤剪力強度關係式，可求得未飽和層邊坡穩定分析式，往後之學者進而將飽和未飽和入滲理論應用於無限邊坡穩定分析中，如Johnson, K. A. and Sitar, N. (1990)、Campos and Menezes (1991)、Rohadjo and Fredlund (1995)、Fannin and Jaakkola (1999)等。

Iverson(2000)利用理查方程式之簡單解析解，計算不考慮超滲降雨作用下斜坡之飽和未飽和入滲，並利用無限邊坡穩定分析，模擬地下水上升引致飽和層邊坡破壞。Tarantino and Bosco(2000)利用無限邊

坡穩定分析，探討考慮坡地坡度與內摩擦角之關係，降雨引致不同型式之邊坡破壞，當坡度大於內摩擦角(陡坡)，其破壞發生於入滲作用下之未飽和土層，當坡地坡度小於內摩擦角(緩坡)，破壞發生於地下水水面以下之飽和土層，並提出降雨強度及延時與兩種破壞型式之關聯。Collins and Znidarcic (2004)將無限邊坡穩定之臨界關係線建立於入滲濕鋒隨時間下降之壓力水頭與深度關係圖上，並分別模擬在均勻入滲下，飽和層與未飽和層兩種不同型式之破壞。基於上述學者之研究，本研究探討飽和未飽和入滲作用下，降雨對不同坡度坡地淺崩塌之影響，與不同降雨特性對坡地淺崩塌之影響。

### 1.3 研究方法與步驟

本研究之目的在於探討降雨引發坡地崩塌類型與機制，以及降雨特性，包括雨量、延時及雨型對坡地崩塌之影響，並且提出降雨引發坡地崩塌之判別方法，以供工程實務之用。研究中，採用理查方程式(Richards equation)模擬降雨入滲，配合無限邊坡穩定理論(infinite slope stability theory)探討降雨引發之坡地崩塌。研究中，首先探討降雨入滲引發坡地崩塌之類型與機制，並根據破壞類型與機制之探討，提出引發坡地崩塌之判別方法，最後進一步探討雨量、延時及雨型對坡地崩塌之影響。為探討雨型對坡地破壞之影響，將雨型概念化如圖 1.2所示，包括均勻型(uniform pattern)分佈及後退型(delayed pattern)、前進型(advanced pattern)與中央型(intermediate pattern)等三種三角形雨型分佈。

本研究之研究流程與步驟，如圖 1.3所示，首先了解如何利用理查氏方程式求解飽和及未飽和地下水流，以模擬坡地降雨入滲現象。並且瞭解如何利用飽和及未飽和地下水流模擬結果，配合無限邊坡穩

定理論，探討坡地崩塌(如第二章所述)。理論建立完後，撰寫數值計算程式，並利用簡單案例，驗證計算程式之正確性(如第三章所述)。接下來，利用建立並驗證完成之數值模式，探討降雨入滲引發陡坡及緩坡坡地崩塌之類型與機制，並推導崩塌發生之充分條件(如第四章所述)。進一步探討時變降雨作用下，降雨特性對崩塌之影響(如第五章所述)。最後，對本研究做結論，並提出建議(如第六章所述)。

## 1.4 章節介紹

第一章為緒論，首先闡述本研究的動機與目的，並回顧文獻，再提出研究方法與步驟。

第二章為理論基礎，首先介紹如何利用理查氏方程式求解飽和及未飽和地下水流，以模擬坡地降雨入滲現象，再簡介無限邊坡穩定分析理論。

第三章為數值計算程式之建立與驗證，本章首先介紹雙步驟Crank-Nicolson有限差分法求解一維理查氏方程式，再說明程式計算流程，並利用簡單案例驗證程式之正確性。

第四章為降雨對坡地淺崩塌之探討，本章分別探討降雨引發陡坡及緩坡崩塌之類型與機制，並推導崩塌發生之充分條件。

第五章為降雨特性對坡地淺崩塌之影響，本章探討降雨特性，包括雨量、延時及雨型，分別對陡坡及緩坡坡地崩塌之影響。

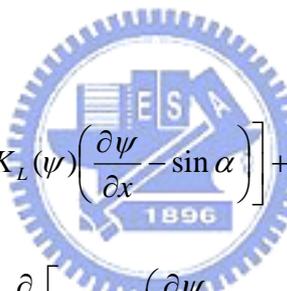
第六章為結論與建議，除了對本研究之成果作綜合性之歸納說明外，並對未來研究方向提出建議。

## 第二章 理論基礎

本研究之目的在於探討降雨引發坡地崩塌類型與機制以及降雨特性，包括雨量、延時及雨型對坡地崩塌之影響，並且提出引發坡地崩塌之判別方法，以供工程實務之用。研究中，採用理查氏方程式模擬坡地降雨入滲，配合無限邊坡穩定理論探討降雨引發之坡地崩塌。以下分別簡介利用理查氏方程式模擬坡地降雨入滲過程中之飽和與未飽和地下水流，以及利用無限邊坡穩定分析理論探討坡地崩塌。

### 2.1 坡地降雨入滲模擬

三維坡地地下水流之控制方程式(Hurley and Pantelis, 1985)，如圖2-1 所示，可表示為


$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \quad (2.1)$$

式中， $\theta$  為含水量(moisture content)； $\psi$  為壓力水頭(pressure head)； $\alpha$  為坡地之坡度； $t$  表示時間； $x$ 、 $y$  及  $z$  表示空間座標； $K_L$  與  $K_z$  分別表示在  $x$   $y$  及  $z$  方向之水力傳導係數，且為壓力水頭之函數。

若坡地可能發生崩塌之深度遠小於坡地之長度與寬度，且降雨延時遠小於孔隙水在  $x$   $y$  方向之傳輸時間(Iverson, 2000)，如圖2-2所示，(2.1)式可進一步簡化為

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos(\alpha) \right) \right) \quad (2.2)$$

由(2.1)式與(2.2)式可知，在淺崩塌(shallow landslide)之假設下，三維

地下水流方程式可簡化成一維垂向地下水流方程式。

求解(2.2)式需要適當之初始條件(initial condition)以及邊界條件(boundary condition)。如圖2-2所示，初始時，坡地之穩態水流平行坡面，且地下水位距離坡面下  $z_d$  處，則初始之壓力水頭可表示為

$$\psi(z, 0) = (z - z_d) \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

因為假設土層厚度  $z_L$  之坡地，若底部與堅硬不透水之土層或岩石相接，則坡地土層底部之邊界條件為

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_{z=z_L} = \cos \alpha \quad (2.4)$$

若底部與堅硬且透水性良好之砂土相接，則坡地土層底部之邊界條件為

$$\psi(z_L, 0) = (z_L - z_d) \cos(\alpha) \quad (2.5)$$

此外，坡地表面處，在窪蓄效應(ponding effect)尚未影響降雨入滲時，也就是降雨完全入滲進入土壤，則坡面之邊界條件可表示為

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_{z=0} = -\frac{f}{K_z|_{z=0}} - \cos \alpha \quad (2.6)$$

其中  $f$  表示降雨量。然而，當降雨入滲受窪蓄效應影響後，在不考慮窪蓄深度下，也就是忽略坡面地表逕流(overland flow)之水深，則坡面之邊界條件為

$$\psi(0, t) = 0 \quad (2.7)$$

降雨過後，坡面再無水流入滲，所以坡面之邊界條件變為零流邊界

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_{z=0} = \cos \alpha \quad (2.8)$$

另外，求解(2.2)式，亦需要土壤含水量與壓力水頭之關係，即  $\theta-\psi$  關係，也就是保水曲線(water retention curve)。已有許多學者利用理論或實驗方式歸納出土壤含水量與壓力水頭之半經驗關係式，例如Brooks and Corey (1964) 根據實驗資料，發展出壓力水頭與含水量之間經驗公式；Mualem(1976)利用土壤粒徑分佈之概念，提出水力傳導係數之數學表示式；Van Genuchten(1978)依據Mualem(1976)之水力傳導係數模式，改善其不能描述突擴和突縮的現象，提出飽和度與壓力水頭和水力傳導係數間的關係式。本研究採用Van Genuchten所提出之飽和度與壓力水頭和水力傳導係數間的關係式，如下所示

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{1}{1 + (\zeta \psi)^N} \right)^M \quad (2.9)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{M}} \right]^M \right\}^2 \quad (2.10)$$

其中， $\theta_s$  為飽和含水量(saturated moisture content)， $\theta_r$  為殘餘含水量(residual moisture content)， $K_s$  為飽和水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity)， $\zeta$  為進氣潛能因子(empirical parameter of air entry value)， $N$  為孔徑指數(pore index)， $M$  為曲線密合因子(cure fitting parameter)。

## 2.2 無限邊坡穩定性分析

無限邊坡穩定分析乃是假設坡地之破壞面平行於坡面，並以力平

衡概念作為判別土壤破壞的一種簡易邊坡穩定分析方法。上章節中，模擬坡地降雨入滲時，假設坡地可能發生崩塌之深度遠小於坡地之長度與寬度，也就是坡地之破壞面平行於坡面。因此，利用一維垂向坡地入滲模擬，配合無限邊坡穩定分析，探討坡地之淺崩塌，在學理上具有一致性。

土層中之某一臨界面其抗剪強度降低至小於剪應力，或其剪應力增加至大於抗剪強度，則產生邊坡斜面之滑動破壞。在分析飽和、未飽和水流流動對邊坡破壞之力學行為時，需考慮二單獨有效應力，即靜應力 $(\sigma - u_a)$ 與基質吸力 $(u_a - u_w)$ ，其中 $\sigma$ 為主應力(normal stresses)， $u_a$ 為孔隙氣壓力， $u_w$ 為孔隙水壓力，Fredlund et al.(1978)利用摩爾庫倫理論(Mohr-Coulomb theory)，將土層中之未飽和剪力強度以靜應力與基質吸力組成之函數，如下表示

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan(\phi') + (u_a - u_w) \tan(\phi^b) \quad (2.11)$$

其中， $c'$ 為土壤之凝聚力(cohesion)， $\phi'$ 為摩擦角度， $\phi^b$ 為基質吸力增加所造成土壤之摩擦角，當土孔隙氣壓力相等於大氣壓力時，並假設 $u_a = 0$ ，則(2.11)可簡化為

$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan(\phi') - u_w \cdot \tan(\phi^b) \quad (2.12)$$

利用上式將土壤剪力強度與土層重力所產生剪應力之比值，如圖2-3所示，也就是安全係數(Factor of Safety)，可以判定邊坡之穩定性，如下所示

$$FS = \frac{\tau \cdot l / \cos(\alpha)}{W \cdot \sin(\alpha)} \quad (2.13)$$

式中

$$\tau = c' + \gamma \cdot H \cos^2(\alpha) \cdot \tan(\phi') - u_w \cdot \tan(\phi^b) \quad (2.14)$$

$$W = \gamma \cdot l \cdot H \quad (2.15)$$

其中， $W$  為土層重力， $\gamma$  為土壤比重， $H$  為破壞深度， $l$  為單位長度，將(2.14)式與(2.15)式代入(2.13)式，則

$$\begin{aligned} FS &= \frac{c' + \gamma \cdot H \cos^2(\alpha) \cdot \tan(\phi') - u_w \cdot \tan(\phi^b)}{\gamma \cdot Z \cdot \sin(\alpha) \cos(\alpha)} \\ &= \frac{\tan(\phi')}{\tan(\alpha)} + \frac{c' - \gamma_w \cdot \psi_c \cdot \tan(\phi^b)}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\alpha) \cos(\alpha)} \end{aligned} \quad (2.16)$$

其中， $\gamma_w$  為水比重， $\psi_c$  為負壓力水頭。當FS大於1時土層為穩定，反之FS小於1時土層即不穩定。(2.16)式可分析地下水面以上未飽和層之安全係數，然而當破壞深度( $H$ )大於地下水面深度( $H_d$ )時，壓力水頭( $\psi_p$ )為正，且地下水面下之土層為飽和層，未飽和基質吸力之摩擦角 $\phi^b$ 等於土壤摩擦角度 $\phi'$ ，則安全係數可表示為

$$FS = \frac{\tan(\phi')}{\tan(\alpha)} + \frac{c' - \gamma_w \cdot \psi_p \cdot \tan(\phi')}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\alpha) \cos(\alpha)} \quad (2.17)$$

將(2.16)式與(2.17)合併，以一式同時反應正、負壓力水頭與安全係數之關係，可得

$$FS = \frac{\tan(\phi')}{\tan(\alpha)} + \frac{c' - \gamma_w \cdot \psi_c \cdot \tan(\phi^b) - \gamma_w \cdot \psi_p \cdot \tan(\phi')}{\gamma \cdot H \cdot \sin(\alpha) \cos(\alpha)} \quad (2.18)$$

若  $\psi > 0$ ，則  $\psi_c = 0$

若  $\psi < 0$ ，則  $\psi_p = 0$

上式中，深度( $H$ )為垂向深度，與坡地地下水流之正向深度( $z$ )並不一致。因此，僅需將坡地地下水流之結果轉換至垂向深度( $H$ )，也就

是  $H = z/\cos(\alpha)$ ，即可利用(2.18)式求得各深度之安全係數。

此外，若令(2.18)式中之安全係數為  $FS = 1$ ，則可得

$$H = \frac{c' - \gamma_w \cdot \psi_c \cdot \tan \phi^b - \gamma_w \cdot \psi_p \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot \cos^2 \alpha \cdot (\tan \alpha - \tan \phi')} \quad (2.19)$$

(2.19)式表示若深度與壓力水頭滿足此關係，則該深度發生破壞，Collins and Znidarcic (2004)將(2.19)式稱為破壞包絡線(failure envelope)。若土壤之  $c' = 5\text{kpa}$ ， $\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$ ， $\phi' = 30^\circ$ ， $\phi^b = 20^\circ$ ，坡地坡度  $\alpha = 25^\circ$ ，則破壞包絡線，如圖2.4。由圖2.4可知，深度  $H = 100\text{cm}$  處，若壓力水頭等於或大於  $120\text{cm}$  時，則該處發生破壞，因此壓力水頭  $\psi = 120 \text{ cm}$  稱為深度  $H = 100\text{cm}$  之臨界壓力水頭(critical pressure head)。本研究採用破壞包絡線探討坡地破壞，將求解理查氏方程式所得深度與壓力水頭之關係線與破壞包絡線相互比較，即可判別坡地是否破壞及破壞深度，也就是當壓力水頭分佈線與破壞包絡線相交時，表示坡地發生破壞，且兩者之相交處即為破壞處。

## 第三章 數值計算程式之建立與驗證

第二章已分別闡述坡地降雨入滲模擬及無限邊坡穩定性分析之理論基礎，本章主要的內容是數值計算程式之建立與驗證。首先說明如何以數值方法求解理查氏方程式，再簡述如何將坡地降雨入滲模擬結果，引入作為無限邊坡穩定性分析之用，最後驗證研究中所建立數值計算程式之正確性。

求解理查氏方程式可使用數學解析法(analytical method)或數值計算法(numerical method)等兩種方式。例如，Broadbridge and White(1988)利用數學解析方式求解固定入滲率下之一維理查方程式；Warrick et al.(1991)則進一步求解時變入滲率作用下之一維理查方程式。然而，理查方程式具有高度非線性特質，因此利用解析解方式求解時，常常需要適度地假設簡化問題，因此可能較無法適用於一般情況，尤其是對複雜的土壤特性以及降雨型態而言，所以數值計算方法已廣泛地被使用於求解理查方程式。有限元素法(finite element method)及有限差分法(finite difference method)是兩種常被使用於求解理查氏方程式的數值計算方法。本研究採用Hills' et al. (1989)所提出雙步驟Crank-Nicolson有限差分法求解理查氏方程式。此方法利用預測(predictor)與修正(corrector)兩個步驟，有效且準確地求解高度非線性之理查氏方程式，此法亦常被使用降雨入滲之模擬，例如Hsu et al. (2002)。

### 3.1 離散方程式

利用Hills' et al. (1989)所提出之雙步驟Crank-Nicolson有限差分雙步驟法，可將(2.2)式離散化如下：

## 預測步驟

$$M_i^n \frac{\psi_i^* - \psi_i^n}{\Delta t} + \frac{(K_i^n - K_{i-1}^n) \cos(\alpha)}{\Delta z} - \frac{K_{i+1/2}^n}{2\Delta z} \left( \frac{\psi_{i+1}^* - \psi_i^*}{\Delta z} + \frac{\psi_{i+1}^n - \psi_i^n}{\Delta z} \right) + \frac{K_{i-1/2}^n}{2\Delta z} \left( \frac{\psi_i^* - \psi_{i-1}^*}{\Delta z} + \frac{\psi_i^n - \psi_{i-1}^n}{\Delta z} \right) = 0 \quad (3.1)$$

其中， $n$  表示網格時間座標， $i$  表示網格空間座標， $\Delta t$  為時間間距， $\Delta z$  為空間間距， $M_i^n = M(\psi_i^n)$ ， $K_i^n = K(\psi_i^n)$ ， $K_{i+1/2}^n = \frac{1}{2}(K_{i+1}^n + K_i^n)$ ， $K_{i-1/2}^n = \frac{1}{2}(K_i^n + K_{i-1}^n)$ ， $K_{i+1/2}^n$  和  $K_{i-1/2}^n$  為空間上之平均。將(3.1)式求得之計算中間值(intermediate value)，即  $\psi_i^*$ ，進一步代入修正步驟求解下一計算時刻之壓力水頭值，也就是  $\psi_i^{n+1}$ ，如下所示：

## 修正步驟

$$M_i^{n+1/2} \frac{\psi_i^{n+1} - \psi_i^n}{\Delta t} + \frac{(K_i^{n+1/2} - K_{i-1}^{n+1/2}) \cos(\alpha)}{\Delta z} - \frac{K_{i+1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left( \frac{\psi_{i+1}^{n+1} - \psi_i^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_{i+1}^n - \psi_i^n}{\Delta z} \right) + \frac{K_{i-1/2}^{n+1/2}}{2\Delta z} \left( \frac{\psi_i^{n+1} - \psi_{i-1}^{n+1}}{\Delta z} + \frac{\psi_i^n - \psi_{i-1}^n}{\Delta z} \right) = 0 \quad (3.2)$$

其中， $M_i^{n+1/2} = \frac{1}{2}(M_i^n + M_i^*)$ ， $K_i^{n+1/2} = \frac{1}{2}(K_i^n + K_i^*)$ ， $K_{i+1/2}^{n+1/2} = \frac{1}{2}(K_{i+1/2}^* + K_{i+1/2}^n)$ ， $K_{i-1/2}^{n+1/2} = \frac{1}{2}(K_{i-1/2}^* + K_{i-1/2}^n)$ 。

此外，邊界條件與初始條件，如(2.3)式至(2.7)式所示，可分別離散化如下：

(1) 紐曼邊界 (Neuman's boundary condition)

$$\frac{\psi_1^n - \psi_0^n}{\Delta z} = -\frac{f}{K_0^n} + \cos(\alpha) \quad (3.3)$$

(2) 狄瑞曲邊界(Dirichlet's boundary condition)

$$\psi_0^n = 0 \quad (3.4)$$

土層下邊界之離散方程式如下

$$\frac{\psi_{NX}^n - \psi_{NX-1}^n}{\Delta z} = \cos(\alpha) \quad (3.5)$$

其中，NX為網格空間座標終點。

## 3.2 計算流程

上章節以說明離散方程式，接下來進一步闡述數值計算程式之計算流程。如圖3.1，首先輸入相關參數，包括土壤性質、坡地坡度、土層厚度、初始地下水位及降雨資料等。接下來，根據已知之降雨資料，利用理查氏方程式計算飽和及未飽和壓力水頭，先假設降雨完全入滲下，求解理查氏方程式，判斷坡地表面是否達到飽和，也就是坡地表面之壓力水頭是否大於零，亦即 $\psi > 0$ 。若不是，也就表示土壤未達窪蓄(ponding)，則降雨完全入滲，進行下一時刻計算。反之，若坡地表面之壓力水頭大於零，則土壤產生窪蓄作用，也就是降雨並非完全入滲，需假設坡地表面之壓力水頭為零，重新進行計算。計算所得壓力水頭隨時間及深度變化之結果，與無限邊坡穩定性分析中所得之坡地破壞包絡線，相互比較即可得知坡地是否發生淺崩塌，且亦可獲悉崩塌深度與時間。

## 3.3 程式之驗證

假設一土層厚度為70cm，土層頂部有一均勻入滲流量為

$q=13.69\text{cm/hr}$ ，土層底部為一固定水頭 $\psi = -61.5\text{cm}$ 。土壤之保水曲線採用Haverkamp et al.(1977)利用實驗歸納所得

$$\theta(\psi) = \frac{a(\theta_s - \theta_r)}{a + |\psi|^b} + \theta_r \quad (3.7)$$

$$K(\psi) = K_s \frac{A}{A + |\psi|^c} \quad (3.8)$$

其中，水力傳導係數 $K_s=34\text{ cm/hr}$ ，殘餘含水量 $\theta_r=0.075$ ，飽和含水量 $\theta_s=0.287$ ，參數 $A=1.175 \times 10^6$ ， $a=1.611 \times 10^6$ ， $b=3.96$ ， $c=4.74$ 。

在土壤起始含水量 $\theta=0.1$ ，空間間距與時間間距分別為 $\Delta x=1.0\text{cm}$ ， $\Delta t=0.005\text{hr}$ 下，數值計算模式之模擬結果，如圖3.2所示。由圖3.2可知，模擬結果與Hills' et al.(1988)所得之結果極為吻合。此外，利用質量守衡誤差(mass conservation error)，亦即

$$\text{Mass error}(\%) = \frac{\text{True mass added} - \text{Calculated mass added}}{\text{True mass added}} \times 100 \quad (3.9)$$

進一步驗證模式之正確性，結果如圖3.3所示。由圖3.3可知，最大誤差在百分之五以下，且誤差在模擬初期較大，但隨時間而減少至百分之一以下。

## 第四章 降雨引發坡地淺崩塌之探討

本章先分別探討降雨引發陡坡及緩坡淺崩塌之類型與機制，再根據其結果，推導降雨引發淺崩塌之充分條件，以供工程實務上判別坡地發生崩塌之用。研究中，所謂陡坡(steep slope)，乃是指坡地坡度大於內摩擦角而言，即 $\alpha > \phi'$ 。相反地，若坡地之坡度小於內摩擦角，也就是 $\alpha < \phi'$ ，則稱為緩坡(mild slope)。

### 4.1 緩坡淺崩塌之探討

首先探討降雨引發緩坡淺崩塌之機制。有一坡度為 $23^\circ$ 之均勻土層，土層厚度 $z_L = 250\text{cm}$ ，土層下方為堅實不透水之土壤，地下水位位於地表面下1.5公尺處，即 $z_d = 150\text{cm}$ ，土壤參數如表4.1所示。表4.1乃參考 Soil mechanics for unsaturated soils(1993)與 Classic groundwater simulations(1993)，所示之土壤為壤土(loam)，其性質介於黏土(clay)與砂土(sand)之間。固定降雨強度 $45\text{mm/hr}$ ，連續降雨8小時，壓力水頭與破壞包絡線之模擬結果，如圖4.1所示，其中，粗線表示破壞包絡線。由第二章理論基礎可知，壓力水頭分佈線與破壞包絡線相交處，即為破壞發生處。因此，此案例中，降雨停止後16小時，坡地發生破壞，且破壞處位於土層底部，如點a所示。此種破壞乃是由於降雨入滲導致地下水位上升所產生。此外，若土壤之內摩擦角增加至 $29.5^\circ$ 時，在降雨情況與其他土壤參數皆不變之情況下，坡地破壞模擬結果，如圖4.1所示。由圖4.1可知，若土壤內摩擦角增加至 $29.5^\circ$ 時，則坡地不發生破壞。

## 4.2 陡坡淺崩塌之探討

接下來探討降雨引發陡坡淺崩塌之機制。有一坡度為  $32^\circ$  之均勻土層，其土層厚度  $z_L = 250\text{cm}$ ，土層下方為堅實不透水之土壤，地下水位位於地表面下 2 公尺處，即  $z_d = 200\text{ cm}$ ，土壤凝聚力為  $8\text{kpa}$ ，其他土壤參數如表 4.1。固定降雨強度  $17.5\text{ mm/hr}$ ，連續降雨 6 小時，壓力水頭與破壞包絡線之模擬結果，如圖 4.2 所示，其中，粗線表示破壞包絡線。由圖 4.2 可知，降雨停止後 7 小時，坡地發生破壞，且破壞處位於土層底部。如前一節所述，此種破壞乃是由於降雨入滲導致地下水位上升所產生。此外，若土壤內摩擦角增加至  $29.5^\circ$  時，則坡地不發生破壞。

由上述降雨引發陡坡與緩坡淺崩塌之探討可清楚發現，如圖 4.1 及圖 4.2 所示，陡坡與緩坡破壞包絡線之斜率不同。緩坡破壞包絡線之臨界壓力水頭皆大於零，因此坡地破壞不會發生在未飽和土壤處。然而，由於陡坡破壞包絡線之斜率與緩坡相反，因此陡坡淺崩塌似乎可能發生在壓力水頭為負值之未飽和土壤處。

考慮一坡度為  $37^\circ$  之均勻土層，其土層厚度  $z_L = 170\text{cm}$ ，土層下方為堅硬且透水性良好之土壤(reference A. Tarantino, 2000)，地下水位位於地表面下 3 公尺處，即  $z_d = 300\text{ cm}$ ，土壤參數如表 4.1。固定降雨強度  $45\text{ mm/hr}$ ，連續降雨 8 小時，壓力水頭與破壞包絡線之模擬結果，如圖 4.3 所示，其中，粗線表示破壞包絡線。由圖 4.3 可知，降雨 4 小時後，開始產生窪蓄現象(ponding effect)。降雨 6.5 小時後，坡地發生破壞，破壞深度約在地表下  $150\text{cm}$  處，如圖 4.3 中 b 點所示。此外，破壞處之壓力水頭約為  $\psi = -35\text{cm}$ ，也就是破壞發生在負壓力水頭處，即土壤未飽和。此種破壞發生之機制，乃是由於降雨過程中，

因為入滲使得土壤虹吸(soil suction)變小，導致土壤抗剪強度減弱所產生。

由上述可知，緩坡淺崩塌可能發生於土層底部，為地下水上升引致破壞。陡坡淺崩塌則可能發生於土壤未飽和或飽和處，也就是土壤壓力水頭為負或正之處。降雨入滲導致土壤虹吸減小或壓力水頭變大，皆可能引發崩塌。此外，由上述討論亦可知，降雨也可能不會引發陡坡淺崩塌，此結果與不考慮土壤凝聚力時，陡坡必定發生破壞之結論有所差異(Dietrich and Montgomery, 1994)，顯示土壤凝聚力之重要性。

### 4.3 地下水位上升引發淺崩塌之充分條件

根據前兩節，降雨引發陡坡及緩坡淺崩塌之探討，吾人可進一步推導降雨引發淺崩塌之充分條件。由圖 4.1 至圖 4.2 可知，壓力水頭之變化必定會發生於初始壓力水頭分佈線與穩態壓力水頭分佈線之間，如圖 4.4 所示，且當破壞包絡線與此區域相交時，則坡地產生破壞。因此以下所推導降雨引發淺崩塌之條件，僅為充分條件。

如圖 4.4 所示， $\psi_1$  表示起始時土層底部壓力水頭值，由(2.3)式，可表示為

$$\psi_1 = (H_L - H_d) \cdot \cos^2(\alpha) \quad (4.1)$$

降雨入滲至穩態，地下水位上升  $w$  所產生之土層底部壓力水頭  $\psi_w$ ，由上式，可表示為

$$\psi_w = [H_L - (H_d - w)] \cdot \cos^2(\alpha) \quad (4.2)$$

破壞包絡線在土層底部之臨界壓力水頭 $\psi_B$ ，由(2.18)式，可表示為

$$\psi_B = \frac{c' + H_L \cdot \gamma \cdot \cos^2(\alpha) \cdot (\tan(\phi') - \tan(\alpha))}{\gamma_w \cdot \tan(\phi')} \quad (4.3)$$

若 $\psi_w$ 大於或等於 $\psi_B$ 時，亦即

$$[H_L - (H_d - w)] \cdot \cos^2(\alpha) > \frac{c' + H_L \cdot \gamma \cdot \cos^2(\alpha) \cdot (\tan(\phi') - \tan(\alpha))}{\gamma_w \cdot \tan(\phi')} \quad (4.4)$$

則坡地必定發生破壞。(4.4)式可進一步表示為

$$\frac{w}{H_L} > \frac{c'}{\gamma_w \cdot H_L \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \tan(\phi')} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \left( 1 - \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\phi')} \right) + \frac{H_d}{H_L} - 1 \quad (4.5)$$

穩態時地下水位上升值與土層厚度之比值，若大於(4.5)式右側計算值，則坡地發生破壞。(4.5)式右邊第一項表示土壤凝聚力之影響，土壤凝聚力愈小，愈容易產生破壞。(4.5)式右邊第二項與第三項，則分別為坡度與內摩擦角差異之影響及初始時地下水位深度與土層厚度比值之影響。當坡度愈大、內摩擦角愈小，或初始地下水位深度與土層厚度之比值愈小，即初始地下水位愈高，則愈容易產生坡地破壞。(4.5)式，降雨引發淺崩塌之充分條件，雖然是根據緩坡推導而得，但是亦可以適用於陡坡。此外，如圖4.5所示，若 $c' > H_L \gamma \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \phi')$ 且 $\psi_B$ 小於或等於 $\psi_w$ 時，也就是如圖4.2所示，因地下水位上升引發的陡坡破壞，則陡坡破壞充分條件之推導與緩坡相同，如(4.1)式至(4.5)式所示。因此，(4.5)式可同時適用於陡坡或緩坡。

吾人必須強調，雖然(4.5)式可作為判別坡地破壞之簡易工程方法，但是坡地破壞之時間，則需要經由數值計算才能獲悉。

## 第五章 降雨特性對坡地淺崩塌之影響

上章節中已詳細說明降雨引發淺崩塌之類型與機制，本章進一步探討降雨特性，包括雨量、延時及雨型，對陡坡及緩坡坡地淺崩塌之影響。

### 5.1 緩坡淺崩塌

#### 雨量之影響

坡度  $23^\circ$  之均勻土層，土層厚度為  $z_L=250\text{cm}$ ，土層下方為堅實不透水之土壤，地下水位位於地表下 1.5 公尺，即  $z_d=150\text{cm}$ ，土壤參數如 4.1 表所示。首先探討雨量對緩坡淺崩塌之影響。圖 5.1 與圖 5.2 分別表示均勻降雨 6 小時下，總降雨量為 135mm 及 270mm 之坡地破壞模擬結果。圖 5.3 表示累積入滲量之模擬結果。由圖 5.1 及圖 5.2 可知，總降雨量為 270mm 時，坡地發生破壞，但總降雨量為 135mm 時，則不發生坡地破壞。第四章之討論吾人可知，緩坡坡地破壞可能因降雨入滲導致地下水位上升所產生。由圖 5.3 可知，相同降雨延時下，降雨強度愈大，累積入滲量愈大，地下水位上升亦愈高。因此，在相同降雨延時下，降雨量愈大愈容易發生坡地破壞。由上述，吾人似乎可進一步探討降雨量與坡地破壞之關係，也就是臨界降雨量之發生，若降雨量大於臨界降雨量則發生破壞，反之則坡地穩定。如圖 5.4 所示，此案例中，臨界降雨量約為 145 mm。

#### 延時之影響

接下來探討延時對緩坡淺崩塌之影響，圖 5.5 至圖 5.7 分別表示

總降雨量為 270mm 下，均勻降雨 3 小時、6 小時及 12 小時之坡地破壞模擬結果。由圖 5.5 至圖 5.7 可知，降雨延時為 3 小時不發生坡地破壞，但降雨延時為 6 小時及 12 小時則產生坡地破壞。這是因為，相同降雨量下，若延時愈長，表示降雨強度愈小，則較不易發生地表窪蓄，降雨入滲量可能愈大，因此地下水位上升高度也愈大，由圖 5.8 可知。由上述之討論，吾人似乎可進一步探討相同降雨量之下，不同延時對坡地破壞之影響。如圖 5.9 所示，此案例中，當降雨延時約大於 4 小時，即發生坡地破壞。

### 雨型之影響

進一步探討雨型對緩坡淺崩塌之影響，在總降雨量 240mm，降雨延時 6 小時下，四種時變降雨雨型，即均勻型及前進行、後退型與中央型等三種三角雨型，坡地破壞之模擬結果，如圖 5.10 至圖 5.13 所示。此外，四種雨型之累積入滲量模擬結果，如圖 5.14 所示。由圖 5.10 至圖 5.13 可知，前進型、中央型與均勻型等三種雨型，降雨 3 小時後皆已發生窪蓄，其中前進型降雨入滲影響之深度最大，而中央型最小。然而，降雨 3 小時後，後退型雨型卻尚未發生窪蓄現象。由此可知，雨型嚴重影響壓力水頭之分佈及累積入滲量。由圖 5.14 可清楚發現，四種代表雨型中，後退型之累積入滲量最小，其次為中央型，均勻型與前進型則有相近的累積入滲量。因此，吾人似乎可以預期，後退型較其他雨型不易發生緩坡淺崩塌。由圖 5.10 至圖 5.13 可知，此案例中，後退型未發生破壞，其餘雨型皆發生破壞。

由上述可知，降雨之雨量、延時及雨型與坡地之入滲有明顯關係，故嚴重影響地下水位之上升。因此，降雨之雨量、延時及雨型與緩坡淺崩塌是否發生息息相關。降雨量愈大，以及相同降雨量下降雨

延時愈長，皆易發生崩塌。此外，雨型嚴重影響坡地淺崩塌之發生。綜合上述，進一步模擬不同雨型達破壞之雨量及延時，如圖 5.15，由圖中可知，在降雨延時 5 小時，總降雨量 165mm 下，均勻型及前進型發生破壞，中央型及後退型則未發生破壞。此外，總降雨量未達 130mm 或降雨延時低於 4 小時，則四種雨型皆不發生破壞。

## 5.2 陡坡淺崩塌

由第四章降雨引發陡坡淺崩塌之機制探討可知，陡坡淺崩塌可能發生於土壤未飽和或飽和處。降雨雨量、延時及雨型對陡坡發生因地下水位上升，飽和土壤處淺崩塌之影響與緩坡相似，在此不多贅述。因此，本章節僅探討降雨雨量、延時及雨型對陡坡發生因土壤虹吸減少土壤未飽和處淺崩塌之影響。

### 雨量之影響



坡度  $37^\circ$  之均勻土層，土層厚度為  $z_L=170\text{cm}$ ，土層下方為凝聚力較大且透水性良好之土壤，地下水位位於地表下 3 公尺，即  $z_d=300\text{cm}$ ，土壤參數如 4.1 表所示。首先探討雨量對陡坡淺崩塌之影響。圖 5.16 至圖 5.18 分別表示均勻降雨 8 小時下，總降雨量為 180mm、360mm 及 720mm 之坡地破壞模擬結果。由圖 5.16 至圖 5.18 可發現，降雨量 180mm 不發生坡地破壞而降雨量 360mm 與 720mm 則產生坡地破壞，兩者發生破壞深度相似但破壞時間不同，降雨強度愈大，愈快發生破壞。第四章之討論吾人可知，陡坡坡地破壞可能因降雨入滲導致土壤虹吸變小，導致土壤抗剪強度減弱所產生。總降雨量為 180mm 時，在降雨過程中，其入滲濕鋒下降最淺，在降雨過後入滲之壓力水頭重組時，土壤之壓力水頭亦未達破壞之臨界壓力水

頭，因此不發生破壞。總降雨量為 360mm 及 720mm 時，則在降雨過程中即發生破壞。此外，降雨強度愈大，其入滲濕鋒下降速度愈快，愈快發生破壞。

### 延時之影響

接下來探討延時對陡坡淺崩塌之影響，圖 5.19 至圖 5.21 分別表示均勻降雨 4 小時、8 小時及 16 小時下，總降雨量為 360mm 之坡地破壞模擬結果。由圖 5.19 至圖 5.21 可發現，降雨延時 4 小時不發生破壞，降雨延時 8 小時與 16 小時則發生破壞，但破壞深度與發生破壞之時間卻不同，降雨強度愈大，破壞深度愈淺，且延時愈長，愈晚發生破壞。這是因為，在相同總降雨量下，降雨延時愈短，降雨強度愈大，其累積入滲量愈小，在降雨過程中，入滲濕鋒下降之位置愈淺，因此，降雨延時 4 小時不發生破壞。然而，降雨強度愈大，土層表面愈易達飽和。因此，在降雨延時為 8 小時下，土層表面於降雨過程中達飽和，其破壞發生於土壤壓力水頭接近飽和處。在降雨延時為 16 小時下，則於降雨過程中土層皆未達飽和，其破壞發生於未飽和壓力水頭較小處，即破壞深度較深處。

### 雨型之影響

進一步探討雨型對陡坡淺崩塌之影響，圖 5.22 至圖 5.25 分別表示時變降雨作用下，四種代表雨型，連續降雨 8 小時，總降雨量 360mm 之坡地破壞模擬結果。由圖 5.22 至圖 5.25 可知，雨型嚴重影響壓力水頭隨時間變化情況。此外，不同雨型亦影響發生破壞之時間與破壞深度。其中，前進型最快發生破壞，均勻型次之，後退型最慢，且後退型為降雨過後發生破壞，但破壞深度以後退型最大，中央型次之，

均勻型最小。

由上述可知，降雨之雨量、延時及雨型嚴重影響未飽和虹吸之變化。因此，降雨雨量、延時及雨型對陡坡發生未飽和淺崩塌之破壞深度與破壞時間有重大之影響。此外，降雨之雨量、延時及雨型亦明顯影響陡坡淺崩塌是否發生。綜合上述，進一步模擬不同雨型達破壞之雨量及延時，如圖 5.26，由圖中可知，在降雨延時 8 小時下，均勻型及前進型較中央型及後退型易發生破壞，在降雨延時 20 小時下，後退型及中央型較均勻型及前進型易發生破壞。此外，總降雨量未達 240mm 或降雨延時小於 4.5 小時，則四種雨型皆不發生破壞。

由 5.15 及圖 5.26 可清楚了解降雨特性對緩坡與陡坡淺崩塌發生之影響。降雨量愈小，以及降雨延時愈短，緩坡與陡坡皆不易發生崩塌。此外，在降雨延時短時，如降雨延時 6 小時，雨型對陡坡與緩坡之影響相同，即前進型與均勻型似乎較中央型與後退型易發生破壞。亦即降雨延時短，降雨強度大，則累積入滲量為影響緩坡與陡坡淺崩塌發生之主要因素。在降雨延時長時，如降雨延時 20 小時，雨型亦明顯影響陡坡淺崩塌發生。此因為，不同雨型之降雨強度隨時間變化有所不同，其入滲之虹吸變化亦有所不同。然而，在降雨延時長時，雨型對緩坡淺崩塌之影響不大。大部份雨水入滲至土壤，四種雨型之累積入滲量接近相同，因此，破壞之臨界降雨量則趨於一致。

## 第六章 結論與建議

本章除了對本研究之結果做綜合性說明外，並對未來研究方向提出建議。

### 6.1 結論

本研究利用理查氏方程式配合無限邊坡穩定理論，探討降雨引發之坡地淺崩塌。研究中，首先探討降雨引發陡坡及緩坡淺崩塌之類型與機制，並依據其結果，推導降雨引發坡地淺崩塌之充分條件，再進一步探討降雨特性，包括雨量、延時及雨型，對坡地淺崩塌之影響。本研究之結論如下所述：

1. 坡地坡度大於土壤內摩擦角，即陡坡時，淺崩塌可能發生於土壤未飽和或飽和處，也就是土壤壓力水頭為負或正之處。降雨入滲導致土壤虹吸減小或壓力水頭變大，皆可能引發崩塌。此外，降雨亦可能不會引發陡坡淺崩塌，此結果與不考慮土壤凝聚力時，陡坡必定發生破壞之結論有所差異，顯示土壤凝聚力之重要性。
2. 坡地坡度小於土壤內摩擦角，即緩坡時，與陡坡最大之不同在於，緩坡破壞似乎不可能發生在未飽和土壤處。這是因為，陡坡與緩坡破壞包絡線之斜率不同，使得緩坡破壞包絡線之臨界壓力水頭皆大於零。因此，緩坡與陡坡皆可能發生因降雨入滲導致地下水位上升所引發之飽和坡地淺崩塌，但緩坡卻不會發生因降雨入滲土壤虹吸減小所引發之坡地淺崩塌。
3. 根據陡坡及緩坡發生破壞之類型與機制，以及降雨入滲地下水壓力水頭變化必定會發生於初始壓力水頭分佈線與穩態壓力水頭分佈線之間，且當破壞包絡線與此區域相交時，則坡地產生破壞

之結果。吾人可推導出地下水位上升引發坡地淺崩塌之充分條件，此充分條件可作為工程上判別坡地破壞之簡易方法，但是坡地破壞之時間，則需要經由數值計算才能獲悉。

4. 由降雨引發坡地淺崩塌之充分條件可知，土壤凝聚力愈小，坡度愈大、內摩擦角愈小，或初始地下水位深度與土層厚度之比值愈小，即初始地下水位愈高，皆愈容易產生坡地破壞。
5. 降雨之雨量、延時及雨型與坡地之入滲有明顯關係。因此，雨量、延時及雨型與是否引發坡地淺崩塌息息相關。降雨量愈大，以及相同降雨量下降雨延時愈長，皆愈易發生崩塌。此外，雨型亦嚴重影響坡地淺崩塌之發生。
6. 降雨雨量、延時及雨型對土壤虹吸減小引發陡坡未飽和淺崩塌之破壞深度與破壞時間有重大之影響。



## 6.2 建議

本研究建議將來可進一步探討之方向陳列如下以供參考：

1. 本研究僅考慮坡地地下水流引致崩塌，未來可進一步結合地表水流計算，探討漫地流對地下水流及崩塌之影響，並比較結果。
2. 本研究於計算降雨過後入滲重組時，未考慮蒸散作用及土壤水分遲滯現象之影響，未來可結合並探討對坡地淺崩塌之影響。
3. 本研究僅考慮水流對坡地淺崩塌之影響，未來可進一步結合其他坡地影響因素，如植生等。
4. 本研究僅以一維理查方程式模擬地下水流，未來可進一步利用二維理查方程式計算地下水流。

## 參考文獻

- 陶方策，「有限解析法在未飽和層水流應用之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，1995。
- 許少華、倪春發，「以理查氏方程式數值解比較常用入滲公式」，中國土木水利工程學刊，第十一卷，第二期，327—336, 1999。
- 褚淑慧，「改善未飽和層水流傳輸模式質量守恆與數值擴散問題之研究」，國立交通大學土木工程學研究所碩士論文，2001。
- 陳進發，「未飽和層土壤水平衡模式解析及其應用之研究」，國立成功大學資源工程學研究所博士論文，2002。
- 楊岳達，「未飽和層一維入滲解析之研究」，國立成功大學資源工程學研究所碩士論文，2003。
- 李伯亨，「入滲效應與土石流發生臨界雨量線之探討及應用」，國立台北科技大學環境規劃與管理研究所碩士論文，2003。
- 盧綉真，「兩型與入滲對運動波漫地流之影響分析研究」，國立交通大學土木工程學研究所碩士論文，2004。
- Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J., and Goldberg, D., “Infiltration from a trickle source: i, mathematical models” , Soil Sci. Soc. Am. Proc., Vol. 35, 675~682, 1971.
- Broadbridge, P., and White, I., “Constant Rate Infiltration: A Versatile Nonlinear Model, 1. Analytic Solution.” Water Resour. Res., Vol. 24, No. 1, 145~154, 1988.
- Brooks, R. H., and Corey A. T., “Properties of porous media affecting fluid flow,” J. Irrig. Drain Div. Am. Soc. Civ. Eng., 92(IR2), 61-88, 1964.
- Buckingham, E., “Studies on the movement of soil moisture.” Bull. 38.

- U.S. Dept. of Dept. of Agr. Bureau of Soils, Washington, D.C. , 1907.
- de Campos, T. M. P., Menezes, M. S. S., “A proposed procedure for slope stability analysis in tropical soils.” *Proc., 6<sup>th</sup> Int. Symp. On landslides*, Christchurch, New Zealand, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol. 2, 1351~1355, 1991.
- Celia, M. A., Bouloutas, E. T., and Zarba, R. L., “A General Mass-Conservation Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation.” *Water Resour. Res.*, Vol. 26, No. 7, 1483~1496, 1990.
- Chiang C. Mei, “Mathematical analysis in engineering : How to Use Basic Tools.” Cambridge University Press, 1997.
- Collins, Brian D., and Znidarcic, D., “Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides” *ASCE.*, April, 362~372, 2004.
- Cruden, D. M. and Varnes, D. J., “Landslide Types and Processes.” *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington DC: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Chapter 3, July.
- Fannin, R. J., and Jakkola, J., “Hydrological response of hillslope soils above a debris-slide headscarp.” *Can. Geotech. J.*, Vol. 36, No. 6, 111~1122, 1999.
- Fredlund, D. G., and Rahardjo, H., “Soil mechanics for unsaturated soils.” Wiley, New York, 1993.
- Green, W. H., and C. A. Ampt, “Studies on soil physics, 1, Flow of air and water through soils” *J. Agr. Sci.*, 4, 1, 1911.
- Haverkamp, R., Vauclin, M., Touma, J., Wierenga, P. J., and Vachaud, G., “A comparison of Numerical Simulation Models for One-dimensional Infiltration.” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 41, 285~294, 1977.

Hills, R. G., Porro, I., Hudson, D. B. and Wierenga, P. J., “Modeling one-dimensional infiltration into very dry soils. 1. Model development and evaluation.” *Water Resour. Res.*, Vol. 25, 1259~1269, 1989.

Horton, R. E., “The role of infiltration in the hydrologic cycle.” *Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 14, 446~460, 1933.

Hurley, D. G., and Pantelis, G., “Unsaturated and saturated flow through a thin porous layer on a hillslope.” *Water Resour. Res.*, Vol. 21, 821~824, 1985.

Iverson, R. M., “Landslide triggering by rain infiltration” *Water Resour. Res.*, Vol. 36, 1897~1910, 2000.

J. L. M. P. de Lima, and V. P. Singh, “The influence of the moving rainstorms on overland flow.” *Advances in Water Resources*, 25:817~828, 2002.

Johnson, K. A., and Sitar, N., “Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation.” *Can. Geotech. J.*, Vol. 27, 789~801, 1990.

Milly, P.C.D., “Advances in Modeling of Water in the Unsaturated Zone.” *Transport in Porous Media*, 3, 491~525, 1988.

Neuman, S. P., “Saturated–unsaturated Seepage by Finite Elements.” *J. Hydraulic. Div. Am.Aoc. Civ. Eng.*, 99(HY12), 2233-2250, 1973.

Ng, C. W. W., Wang, B. and Tung, Y. K., “Three-dimensional numerical investigation of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns.” *Can. Geotech. Jour.*, Vol. 38, 1049~1062, 2001.

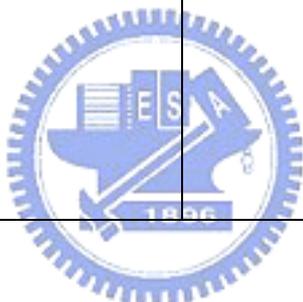
Philip, J. R., “The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution.” *Soil Sci.* Vol. 83, No. 5, 345~357, 1957.

Rahardjo, H., and Fredlund, D. G., “Procedures for slope stability

- analyses involving unsaturated soils. ” Developments in deep foundations and ground improvement schemes, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 33~56, 1995.
- Richard, L. A., “Capillary conduction of liquids through porous mediums.” Physics, Vol. 1, 318~333, 1931.
- Romano, N., Brunone, B., Satini, A., “ Numerical analysis of one-dimensional unsaturated flow in layered soils.” Advances in Water Resour., Vol. 21, No. 4, 315~324, 1998.
- Segol. G., “Classic Groundwater Simulations.” PRT Prentice Hall, USA, 283~330, 1993.
- Steven C. Chapra and Raymond P. Canale, “Numerical methods for engineers: second edition” McGraw-Hill Book Company, 1988.
- Tarantino, A., and Bosco, G., “Role of soil suction in understanding the triggering mechanisms of flow slides associated with rainfall.” Debris-Flow Hazards Mitigation : mechanics, prediction, and assessment , 81~88, 2000.
- Van Genuchten, M. Th., “A closed-Form Equation for Predicting Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.” Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, 892~898, 1980.
- Ven Te Chow, David R. Maidment, and Larry W. Mays, “Applied Hydrology” McGraw-Hill Book Company, 1988.
- Warrick, A. W., Islas, A., and Lomen, D. O., “An Analytical Solution to Richards’ Equation for Time-Varying Infiltration.” Water Resour. Res., Vol. 27, No. 5 , 763~766, 1991.

Table 4.1 Geometric and geotechnical parameters

Parameter	value
$\gamma$	20 KN/cm <sup>3</sup>
$c'$	3.0 Kpa
$\phi'$	27.5°
$\phi^b$	23.5°
$K_s$	3.125 cm/hr
$N$	2.0
$M$	1-1/N
$\theta_s$	0.47
$\theta_r$	0.17
$\xi$	0.01



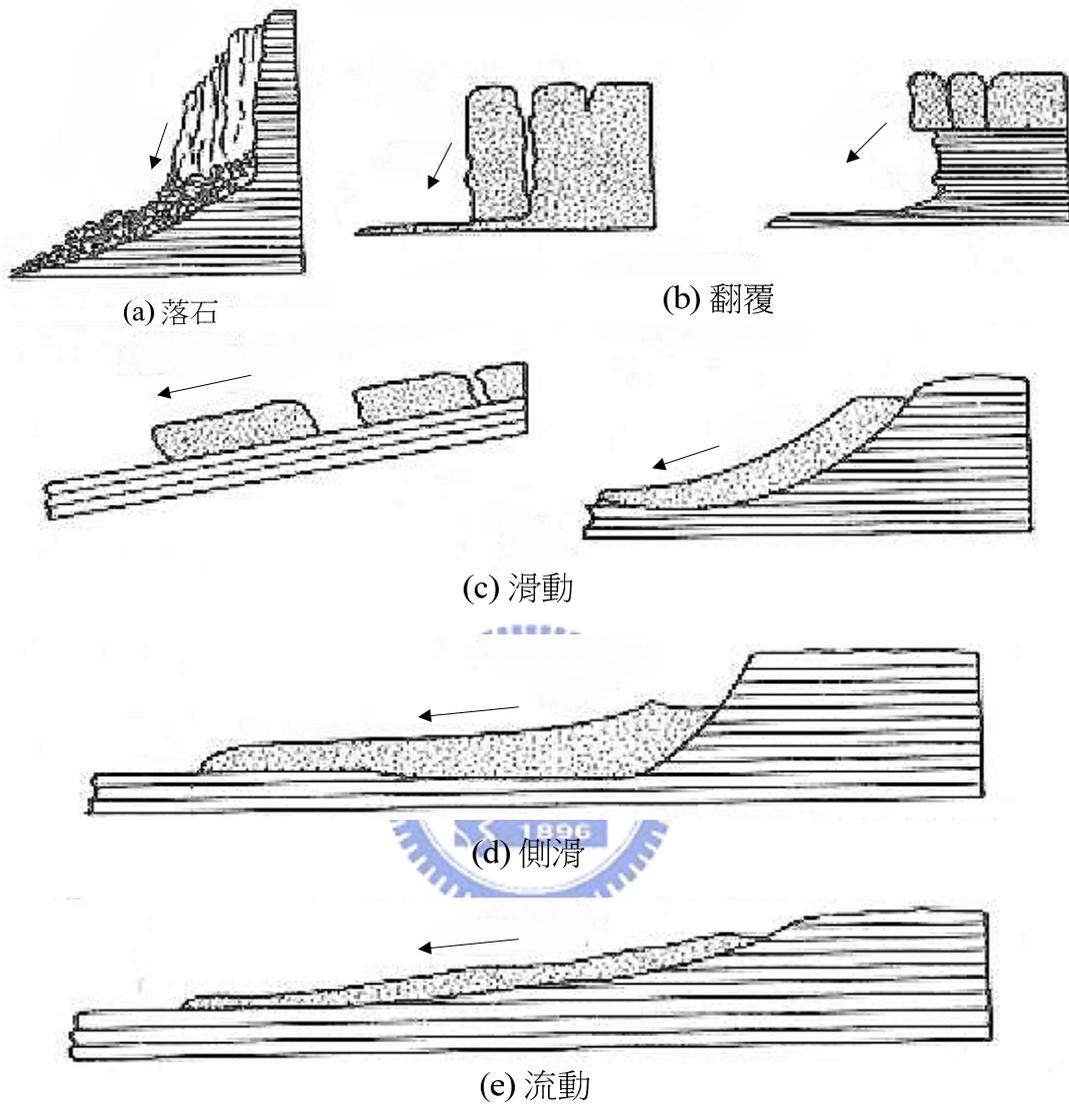


圖 1.1 山崩種類示意圖(Varnes 1987)

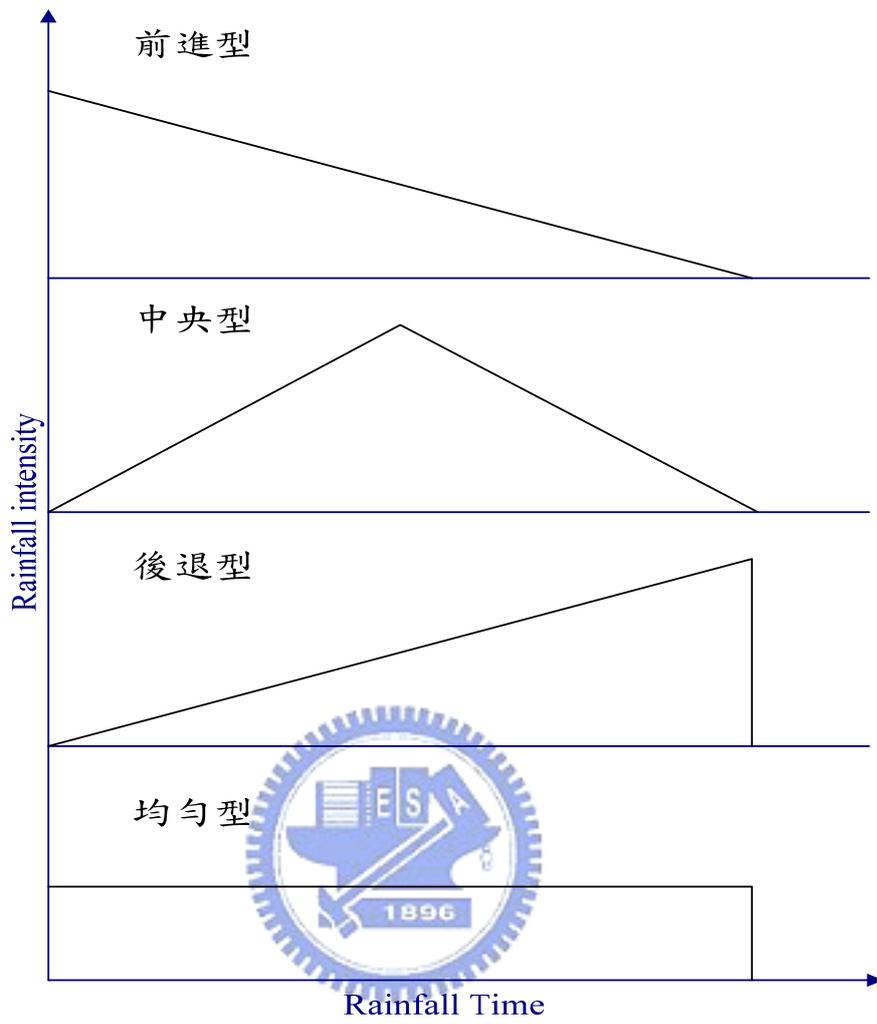


圖 1.2 概念化降雨雨型

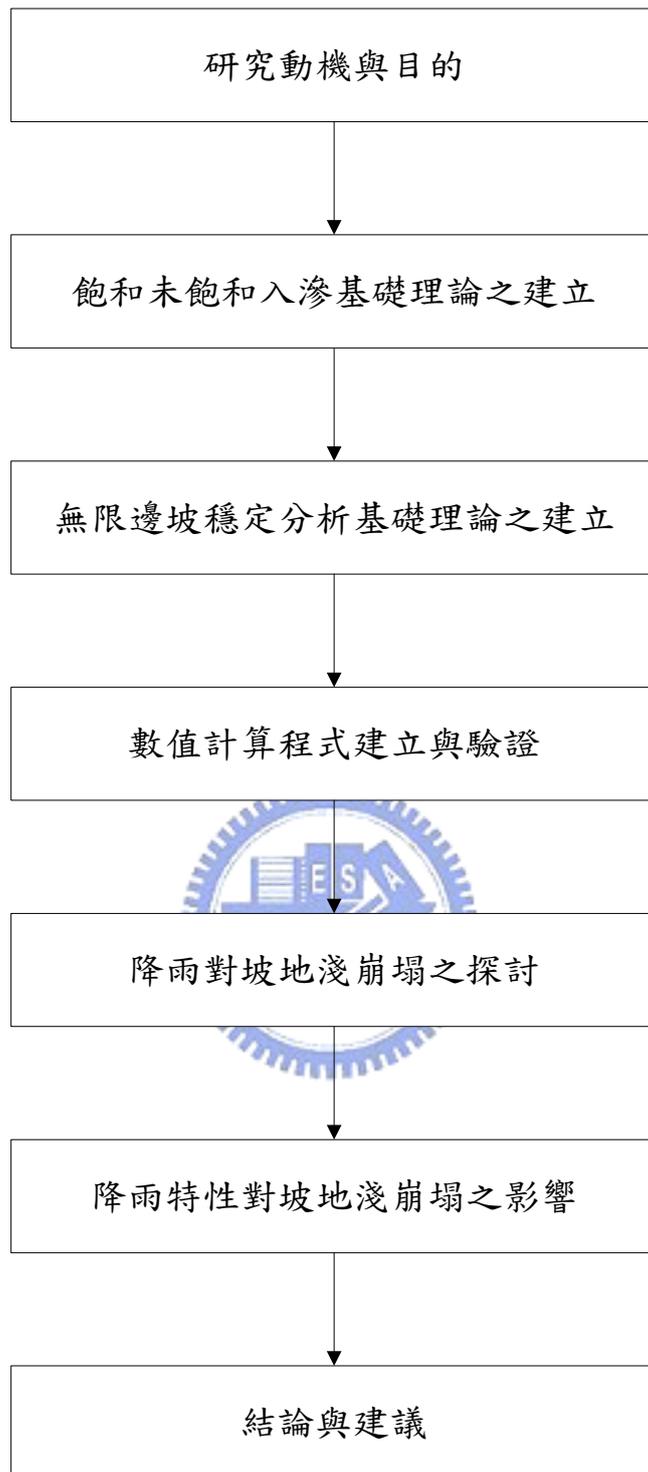


圖 1.3 研究步驟流程圖

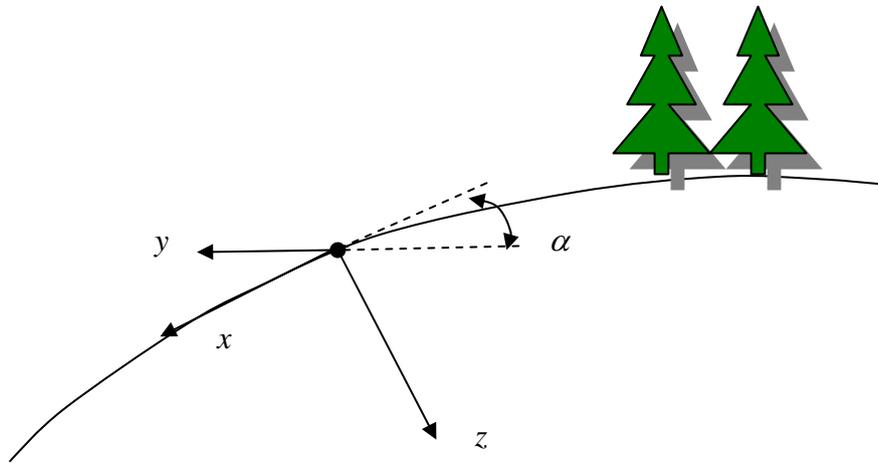


圖 2-1 三維坡地地下水流



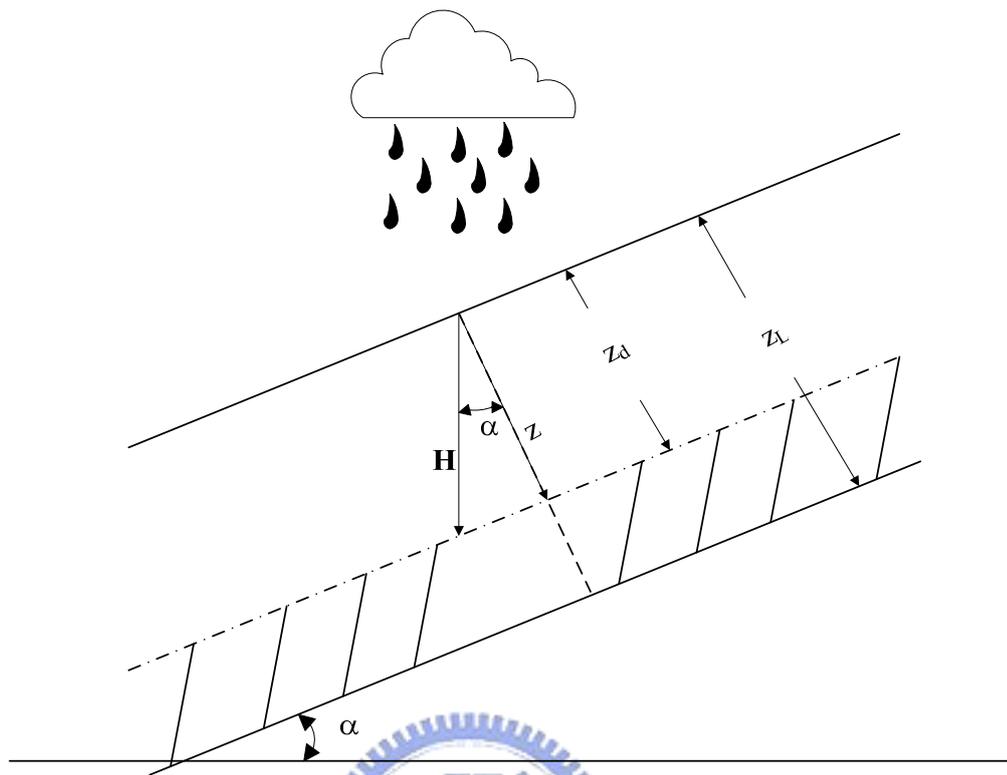


圖2-2 一維坡地地下水流

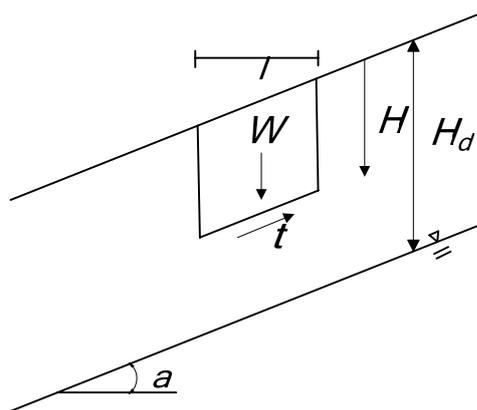


圖2-3 無限邊坡示意圖

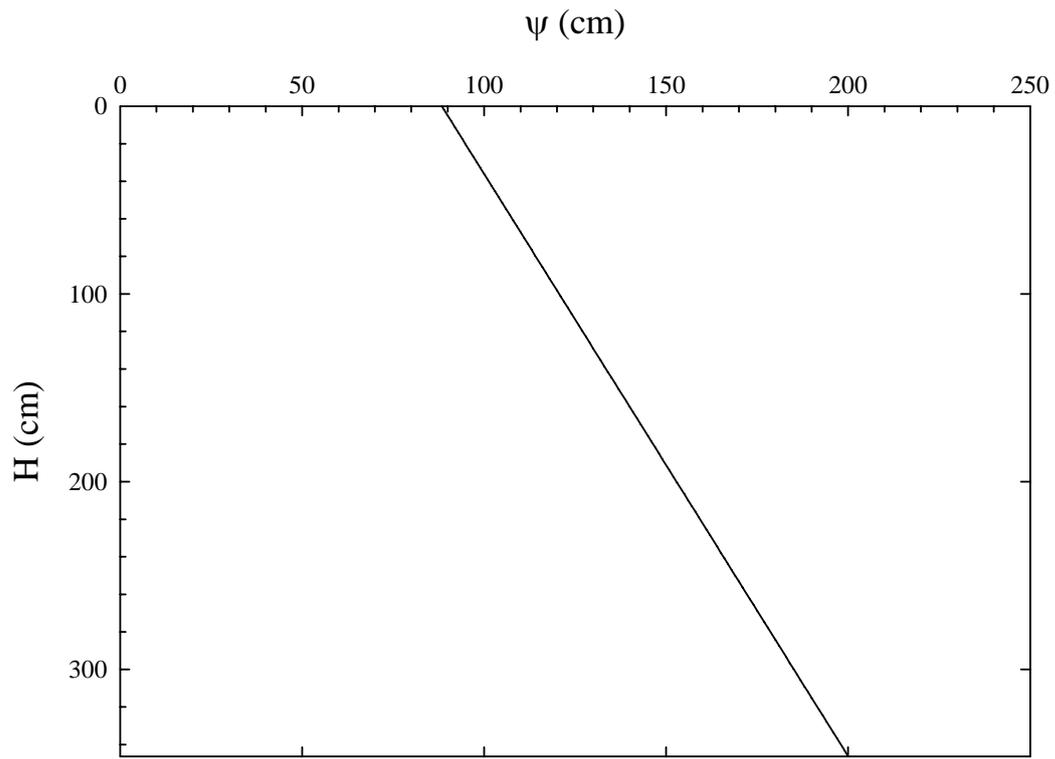


圖2-4 無限邊坡穩定破壞包絡線



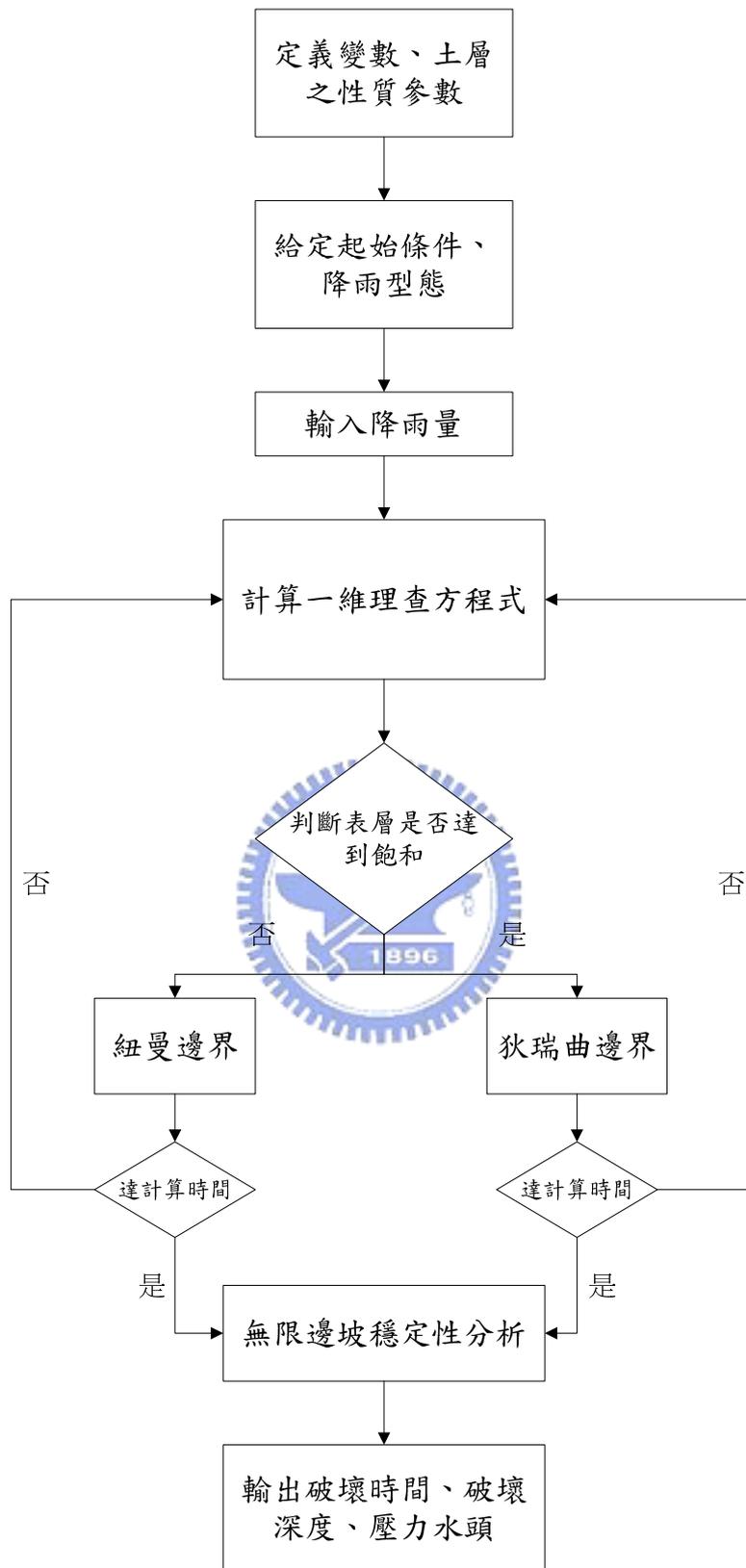


圖 3.1 程式計算流程圖

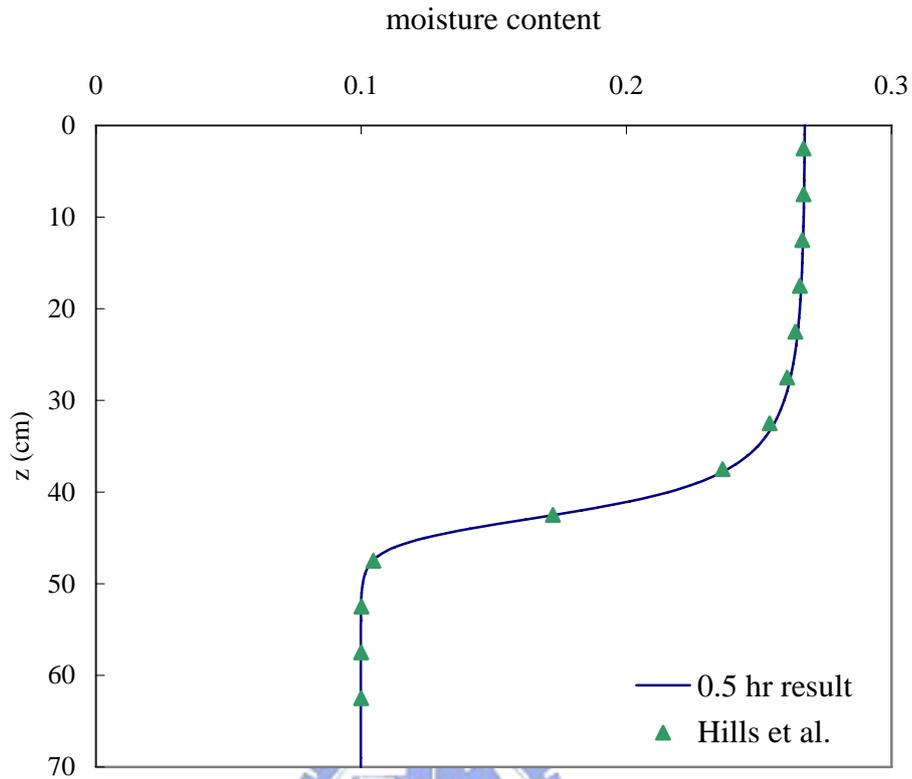


圖3.2 0.5小時含水量比較

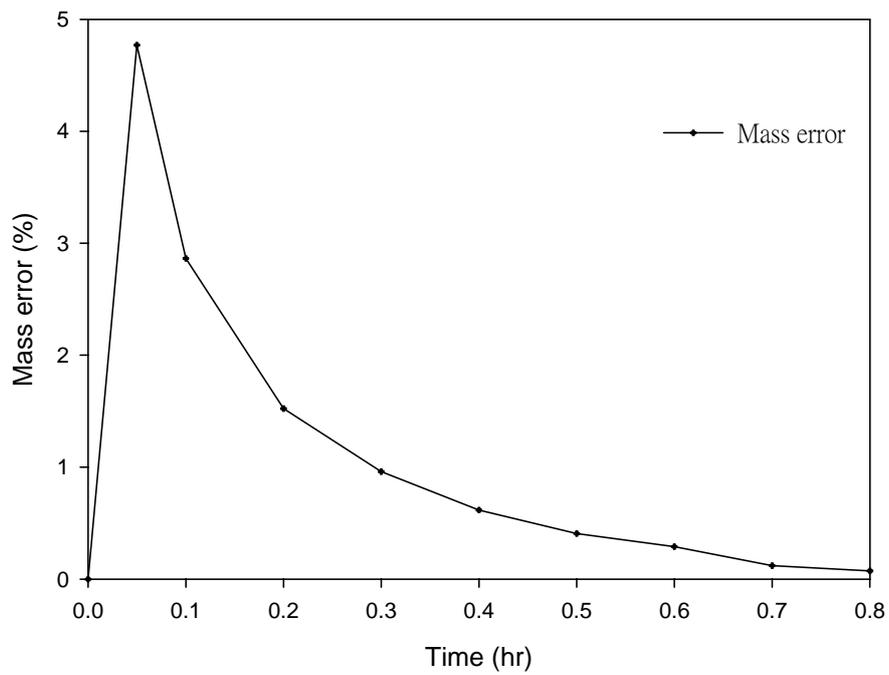


圖3.3 各時刻質量守恆誤差

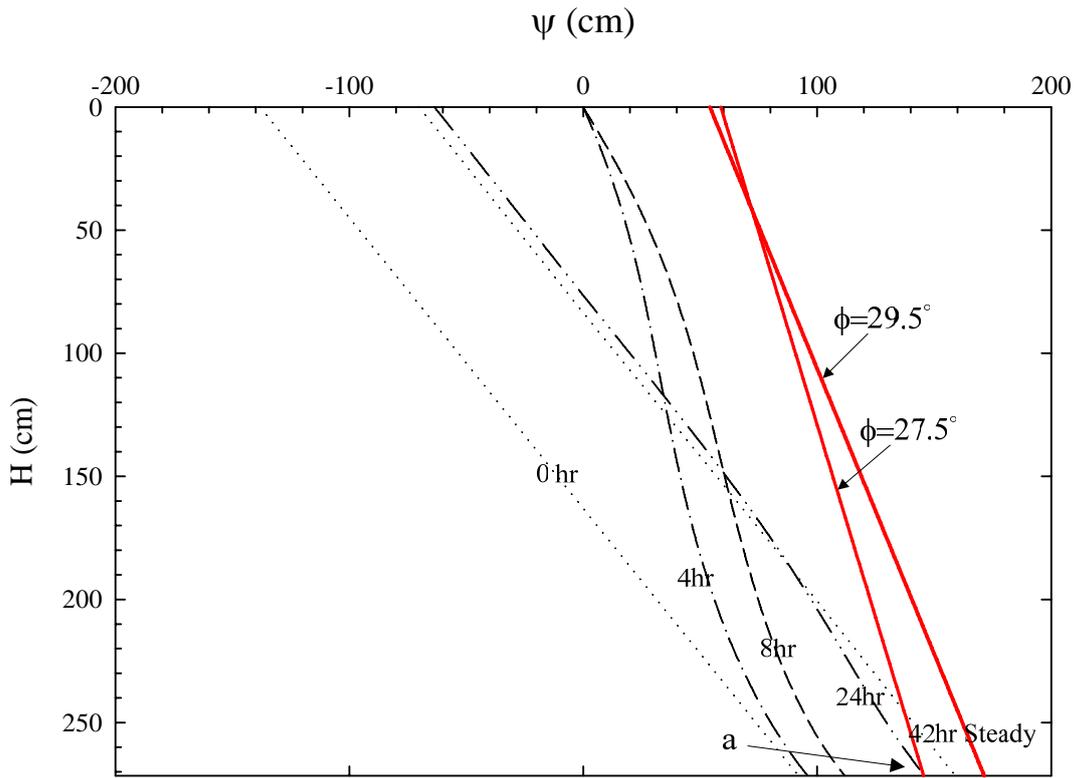


圖 4.1 緩坡淺崩塌

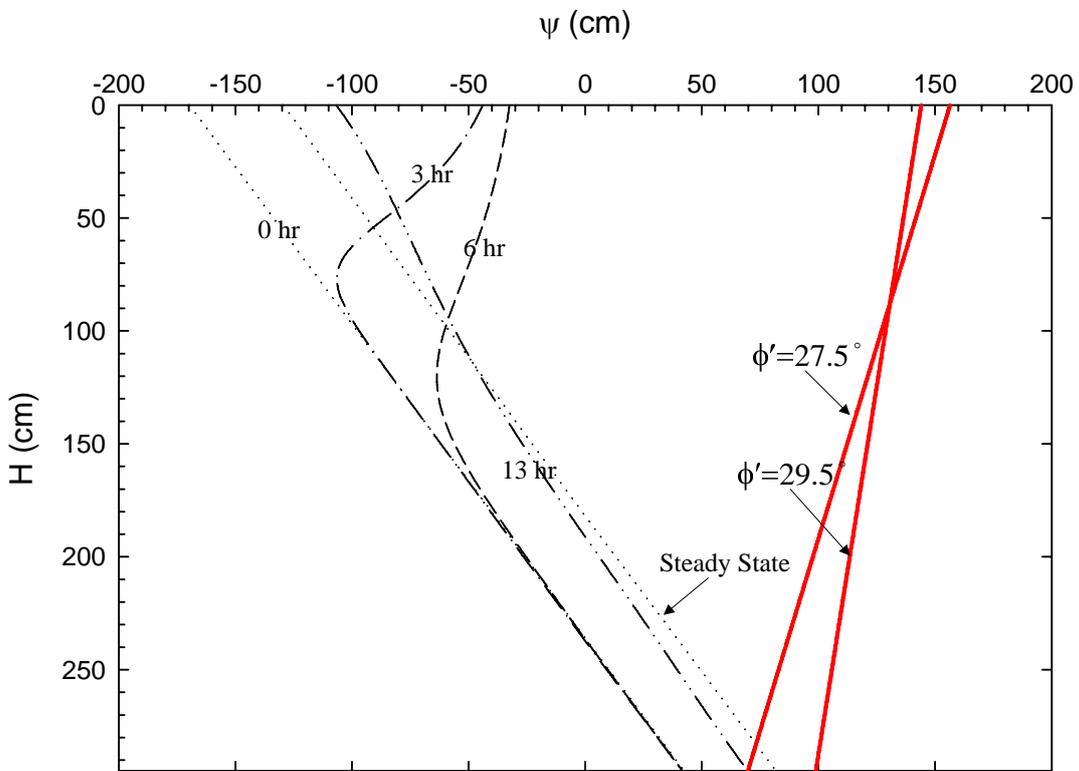


圖 4.2 陡坡淺崩塌

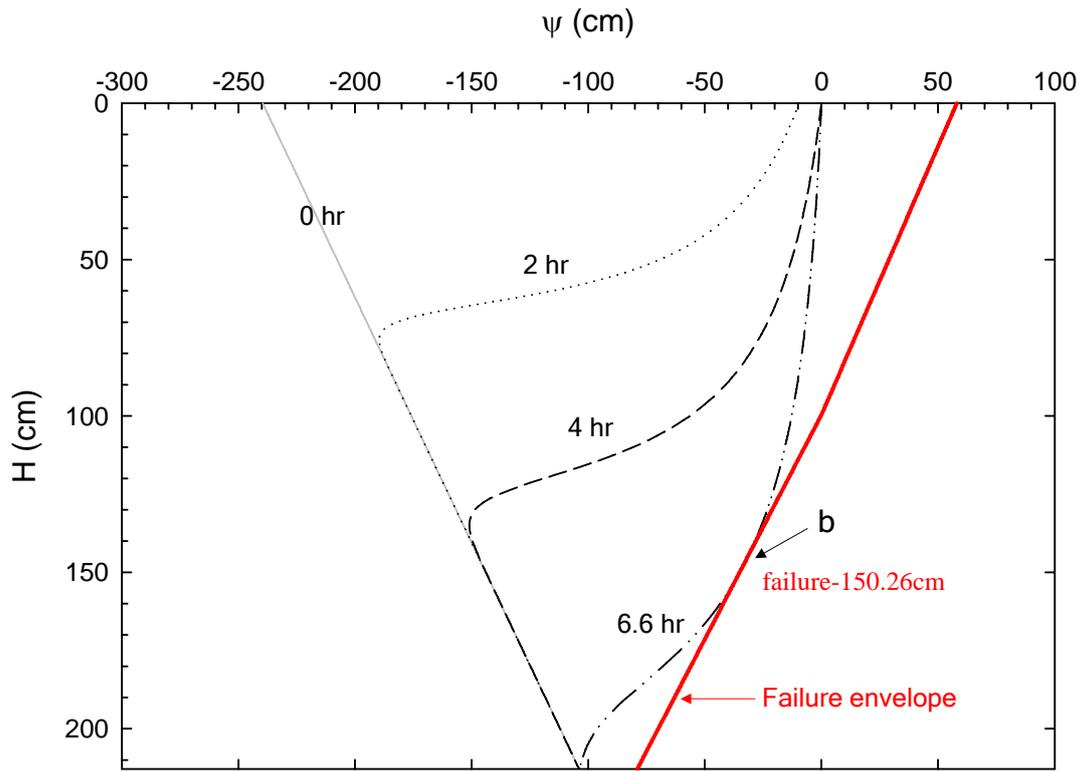


圖 4.3 陡坡未飽和土層淺崩塌

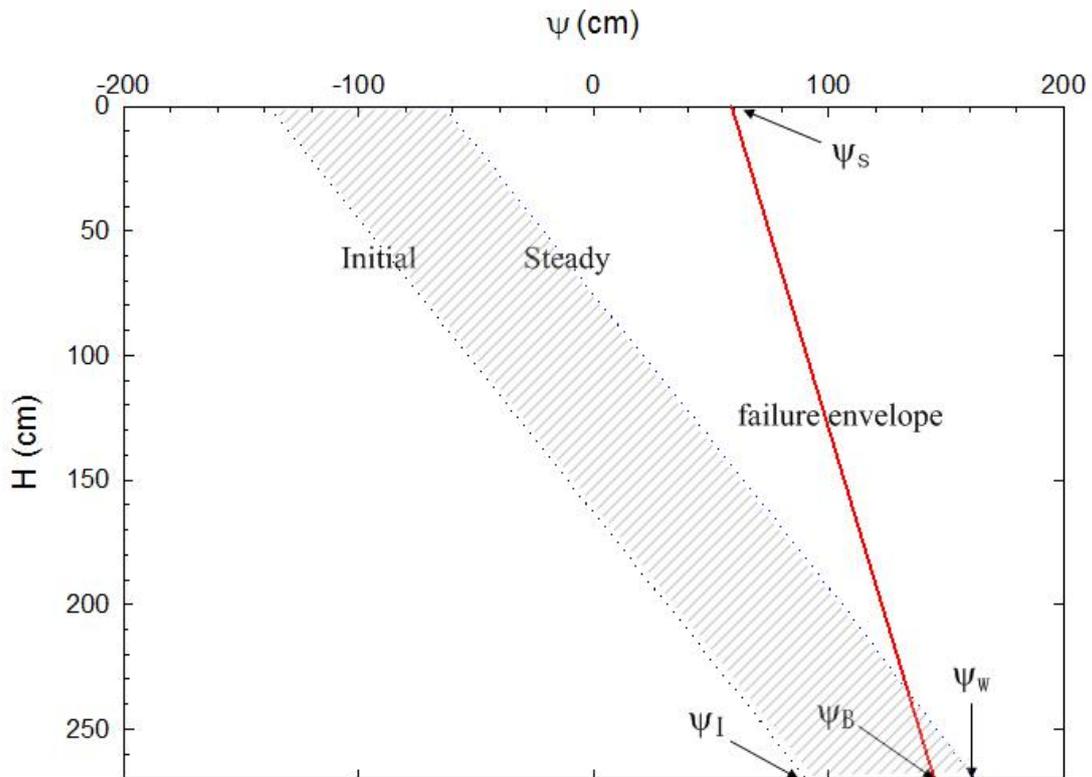


圖 4.4 緩坡淺崩塌之充分條件示意圖

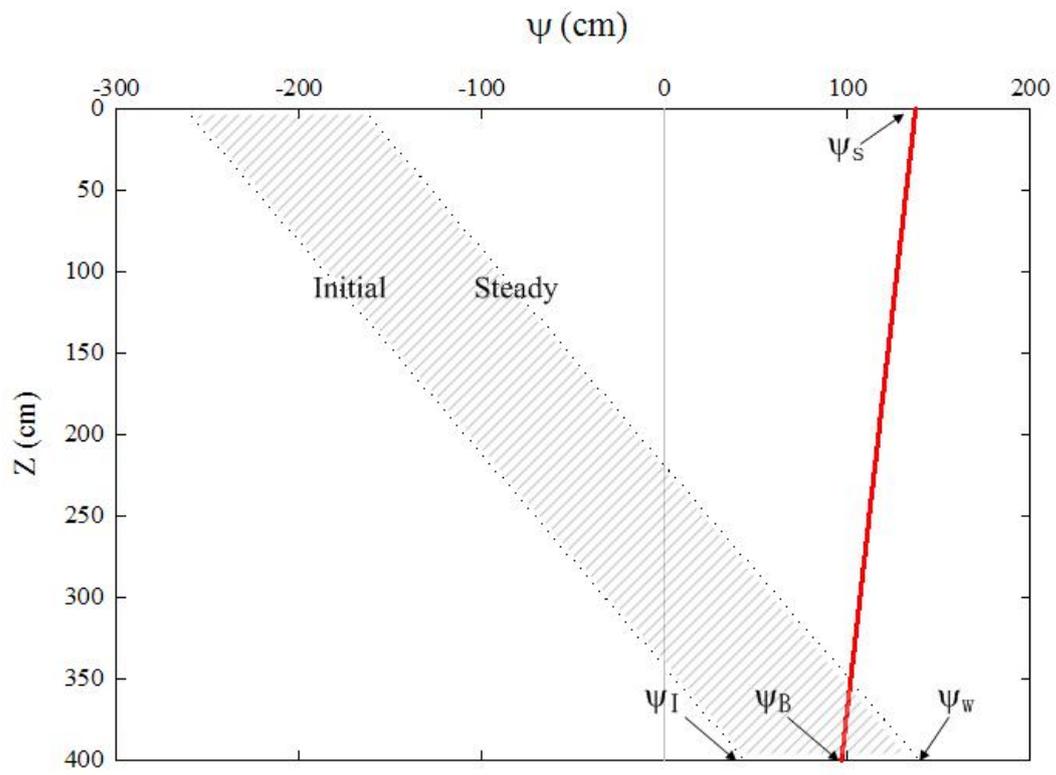


圖 4.5 陡坡淺崩塌之充分條件示意圖



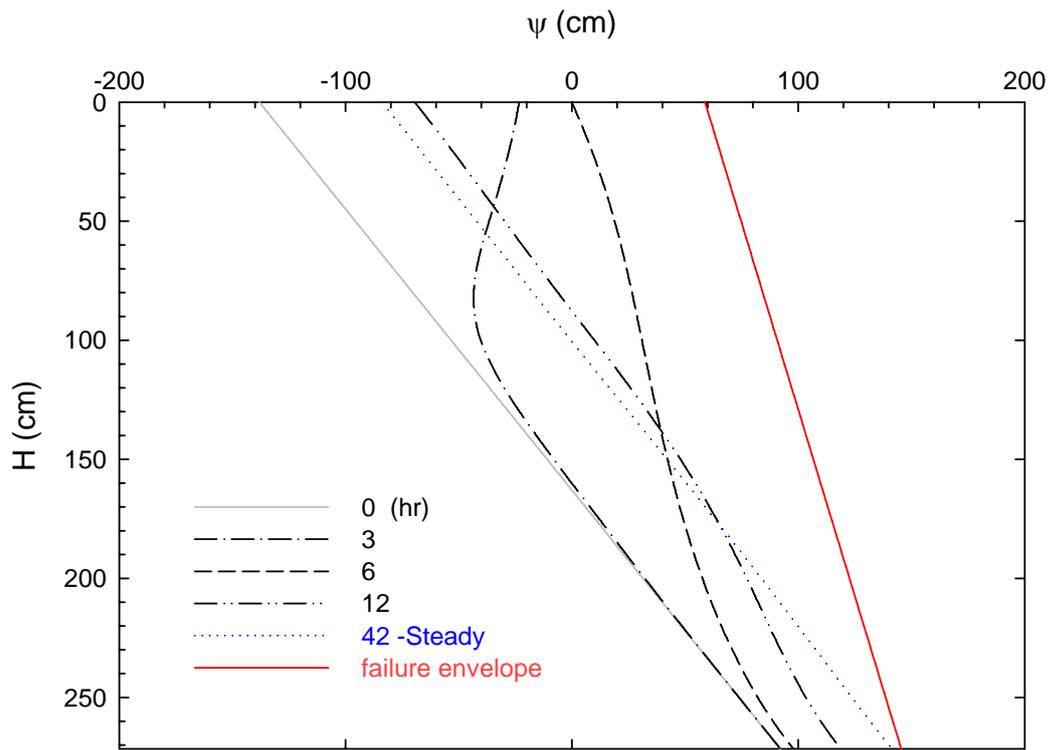


圖 5.1 降雨 135mm 雨量對緩坡淺崩塌之影響

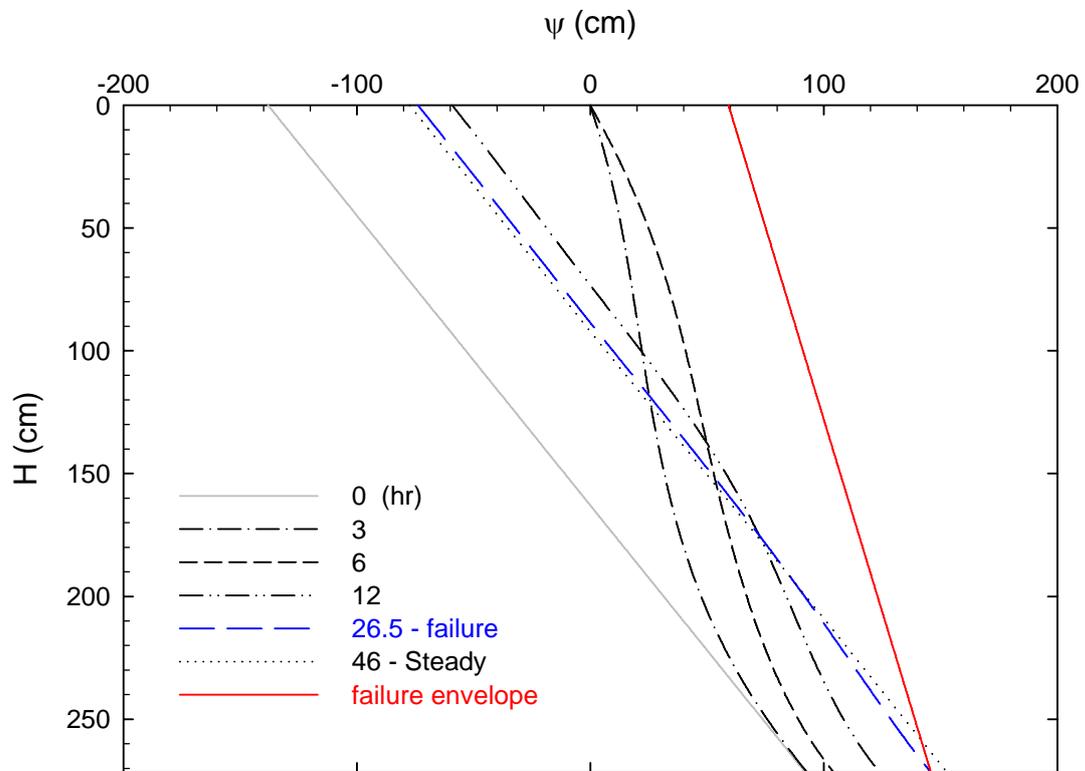


圖 5.2 降雨 270mm 雨量對緩坡淺崩塌之影響

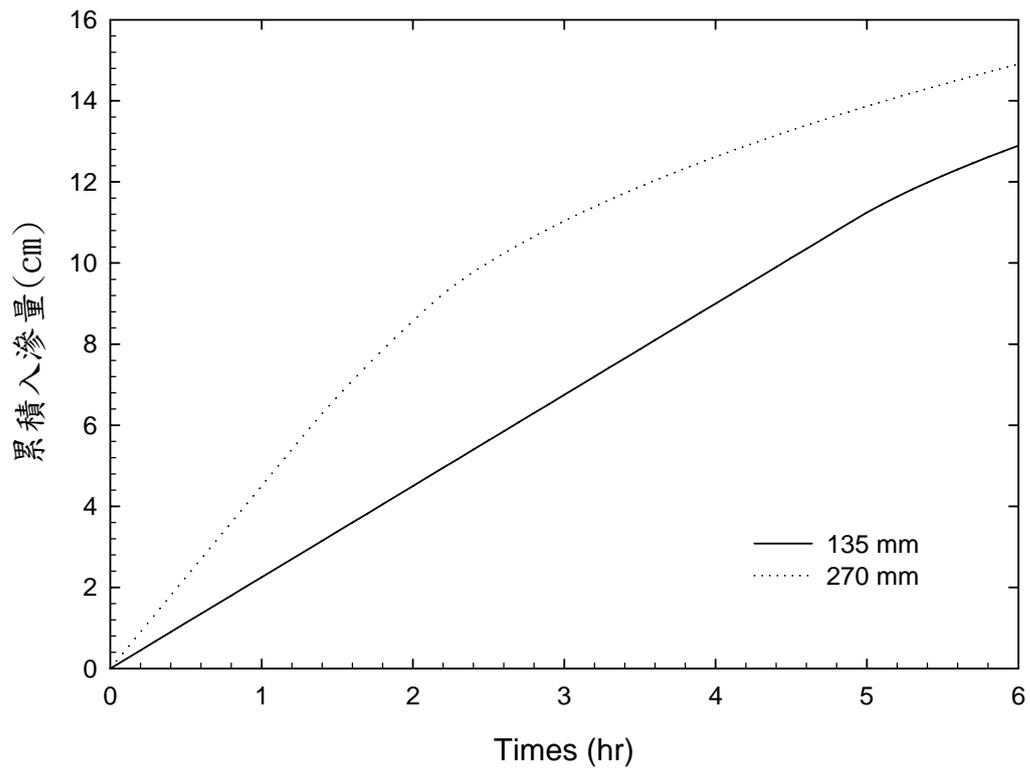


圖 5.3 不同雨量對緩坡之累積入滲量

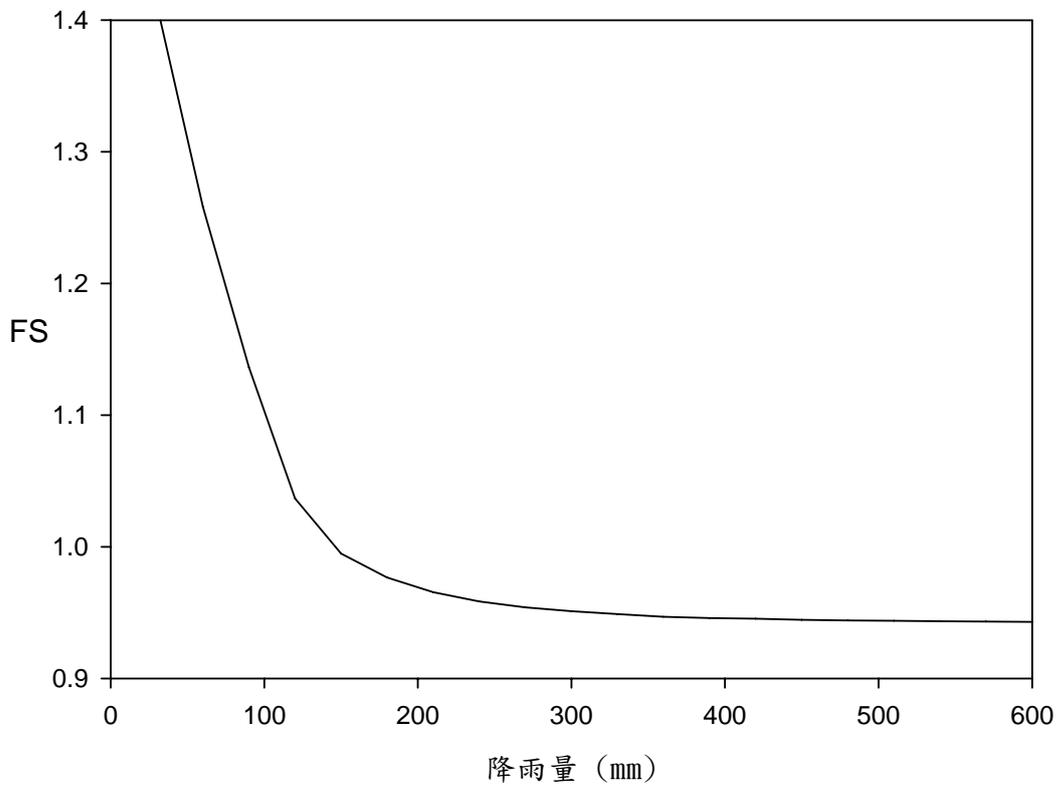


圖 5.4 雨量對緩坡淺崩塌之影響

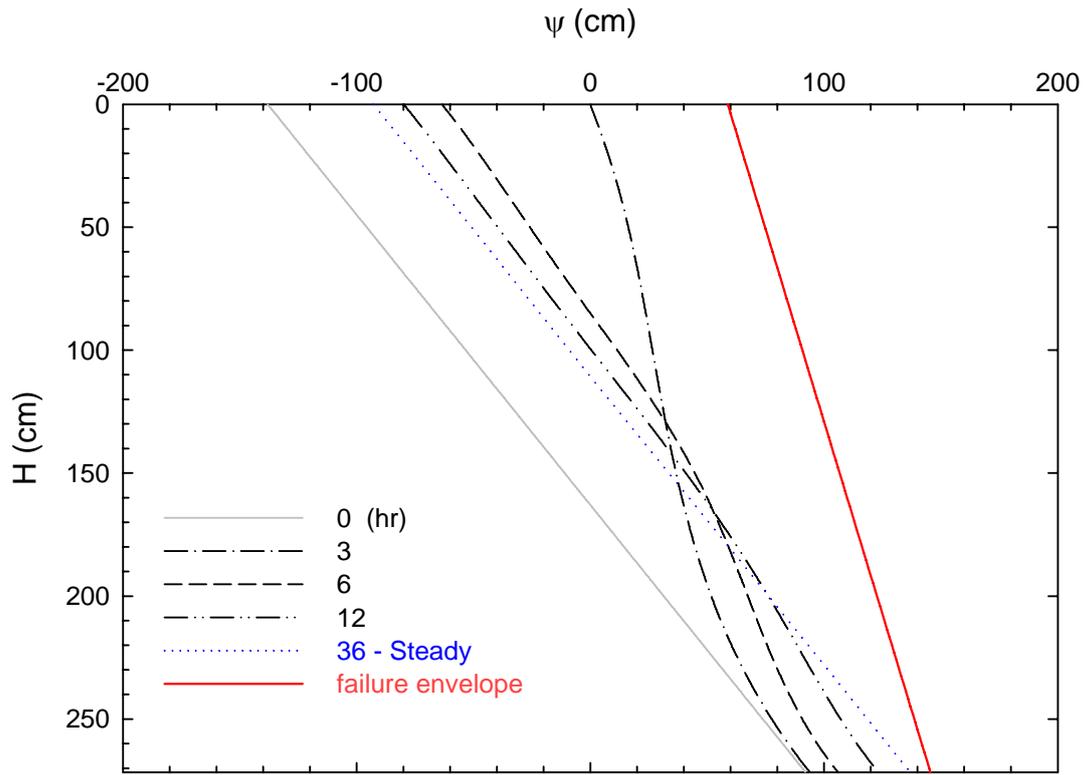


圖 5.5 降雨 3 小時對緩坡淺崩塌之影響

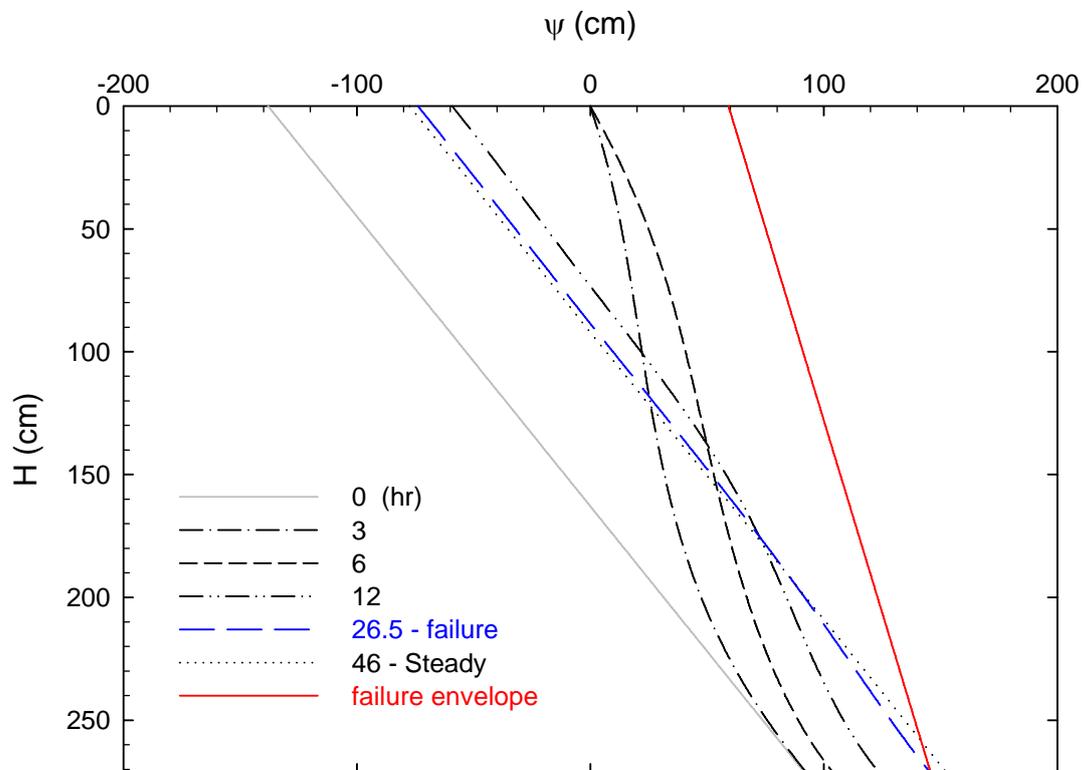


圖 5.6 降雨 6 小時對緩坡淺崩塌之影響

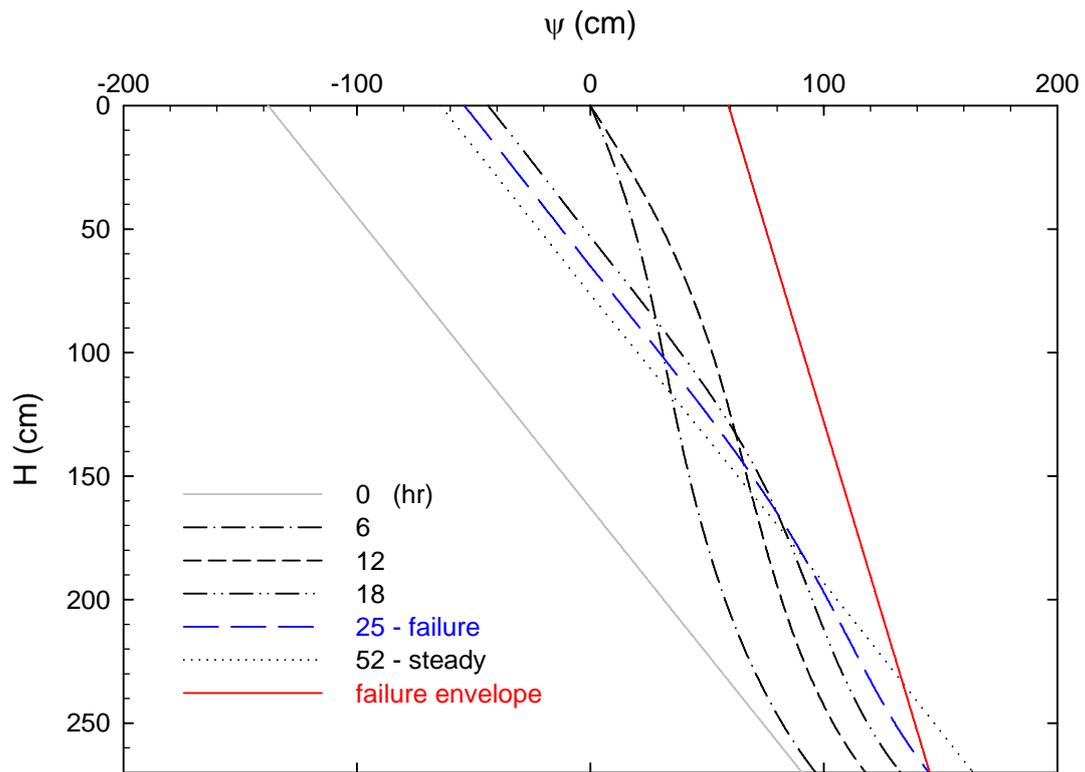


圖 5.7 降雨 12 小時對緩坡淺崩塌之影響

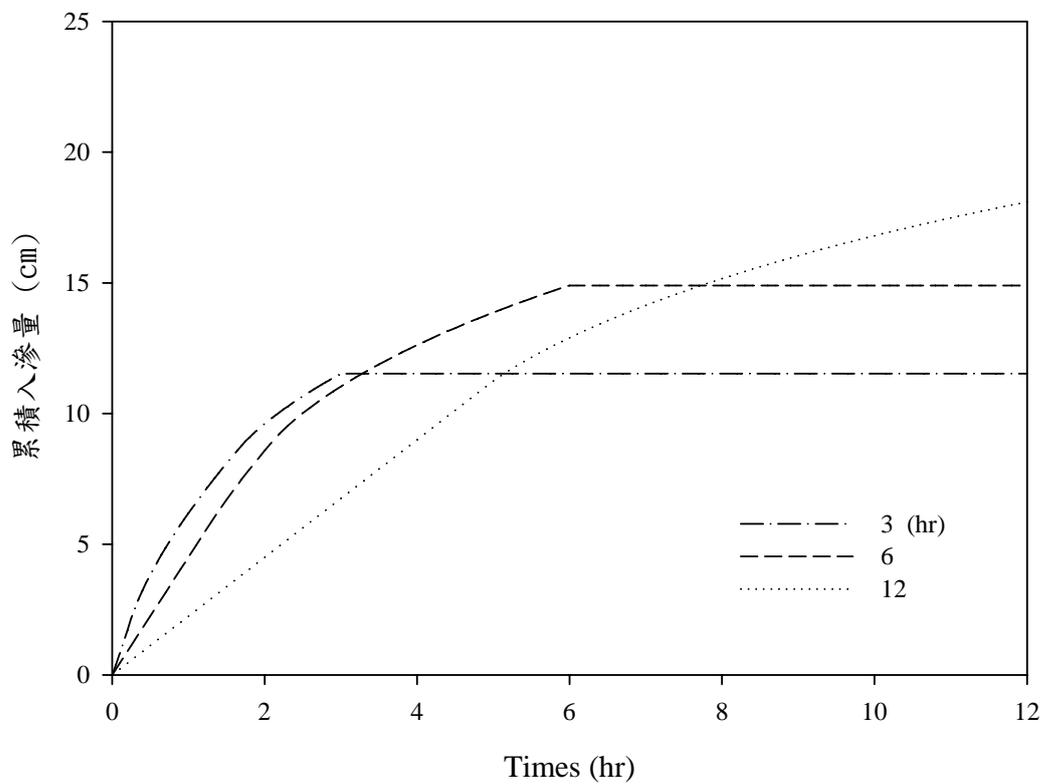
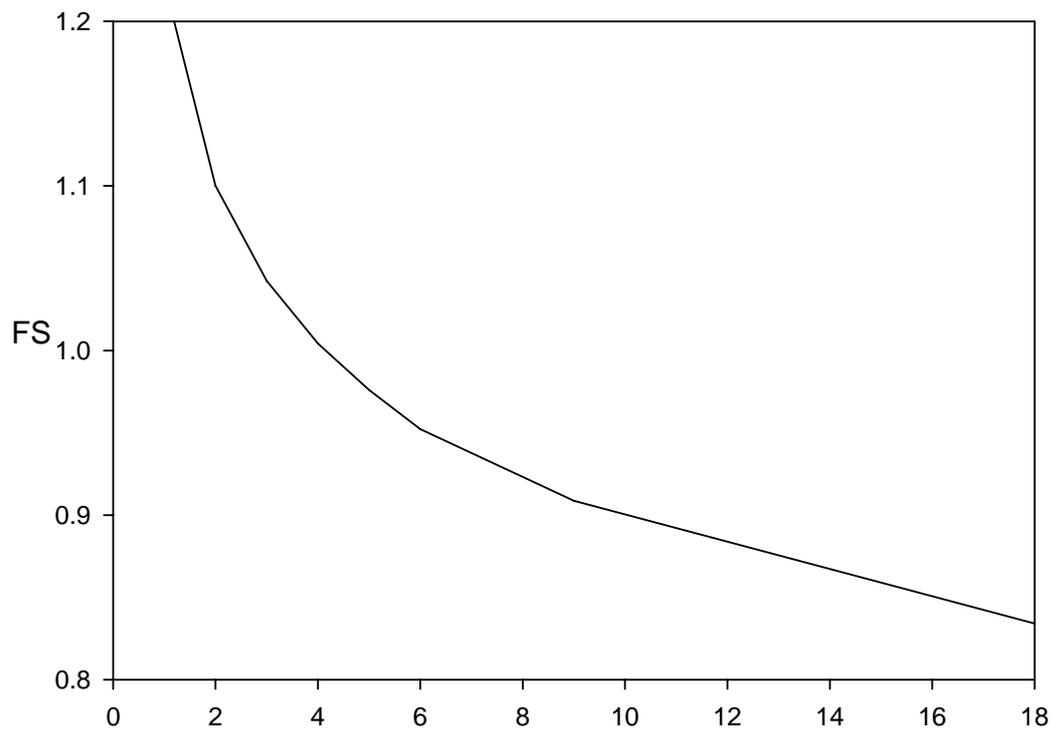


圖 5.8 不同延時對緩坡之累積入滲量



降雨延時 (hr)  
圖 5.9 延時對緩坡淺崩塌之影響



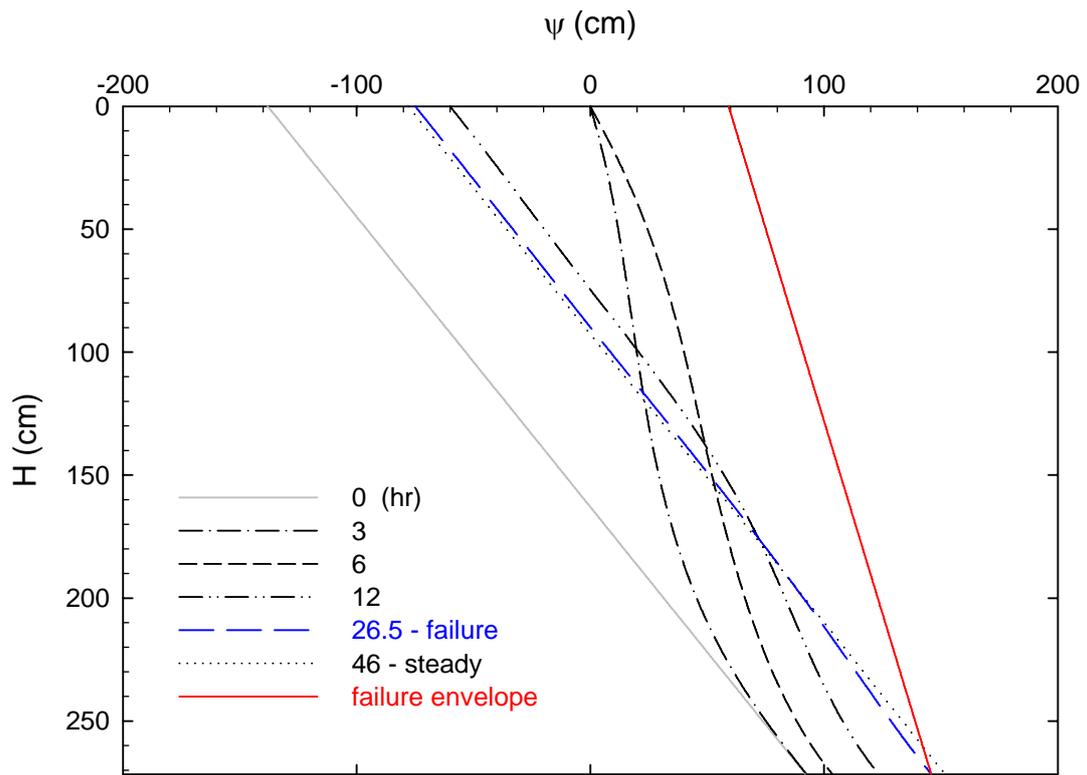


圖 5.10 均勻型對緩坡淺崩塌之影響

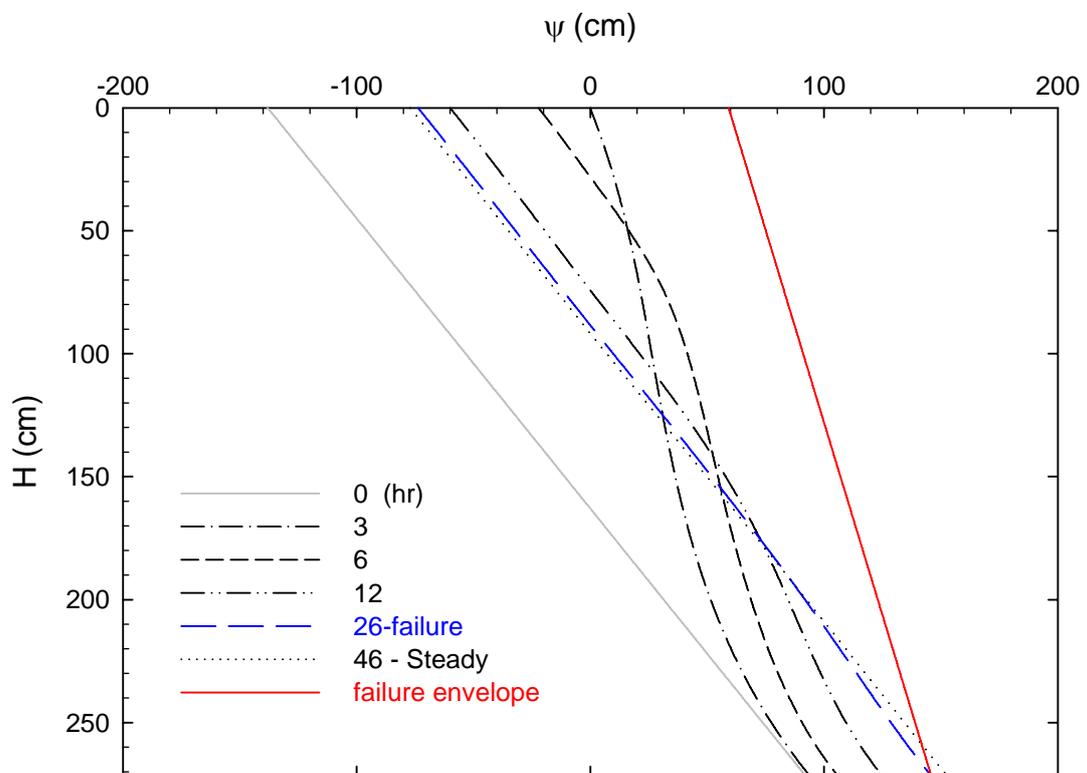


圖 5.11 前進型對緩坡淺崩塌之影響

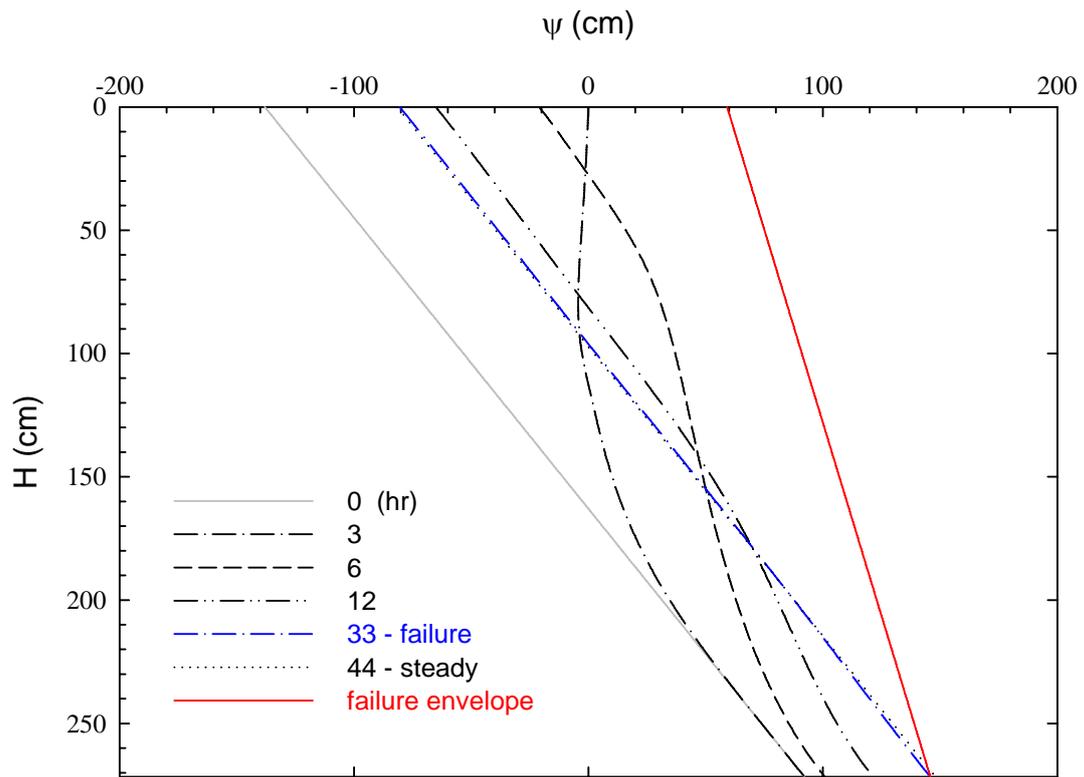


圖 5.12 中央型對緩坡淺崩塌之影響

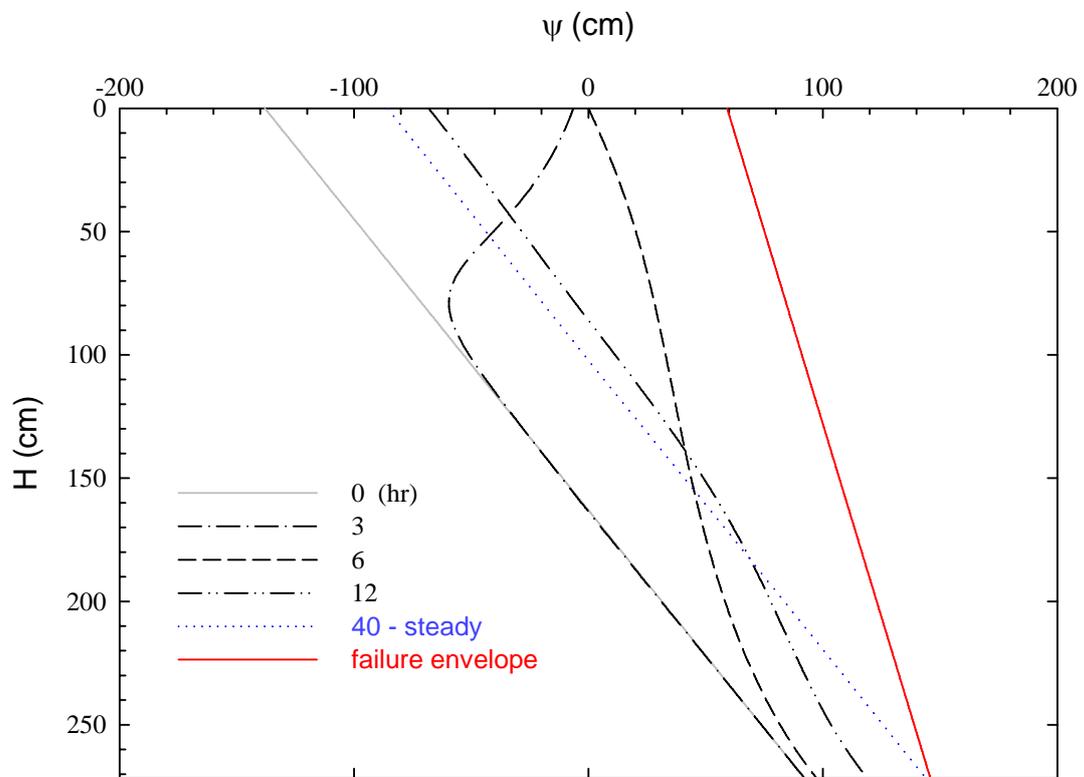


圖 5.13 後退型對緩坡淺崩塌之影響

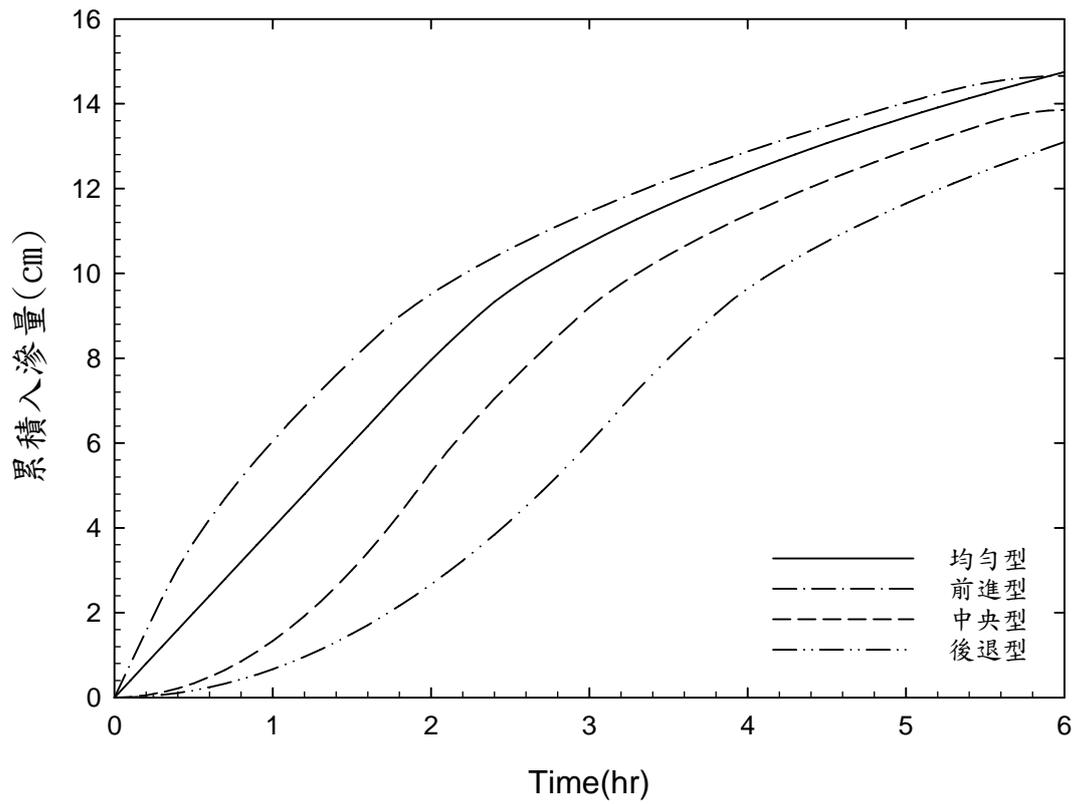


圖 5.14 不同雨型對緩坡之累積入滲量

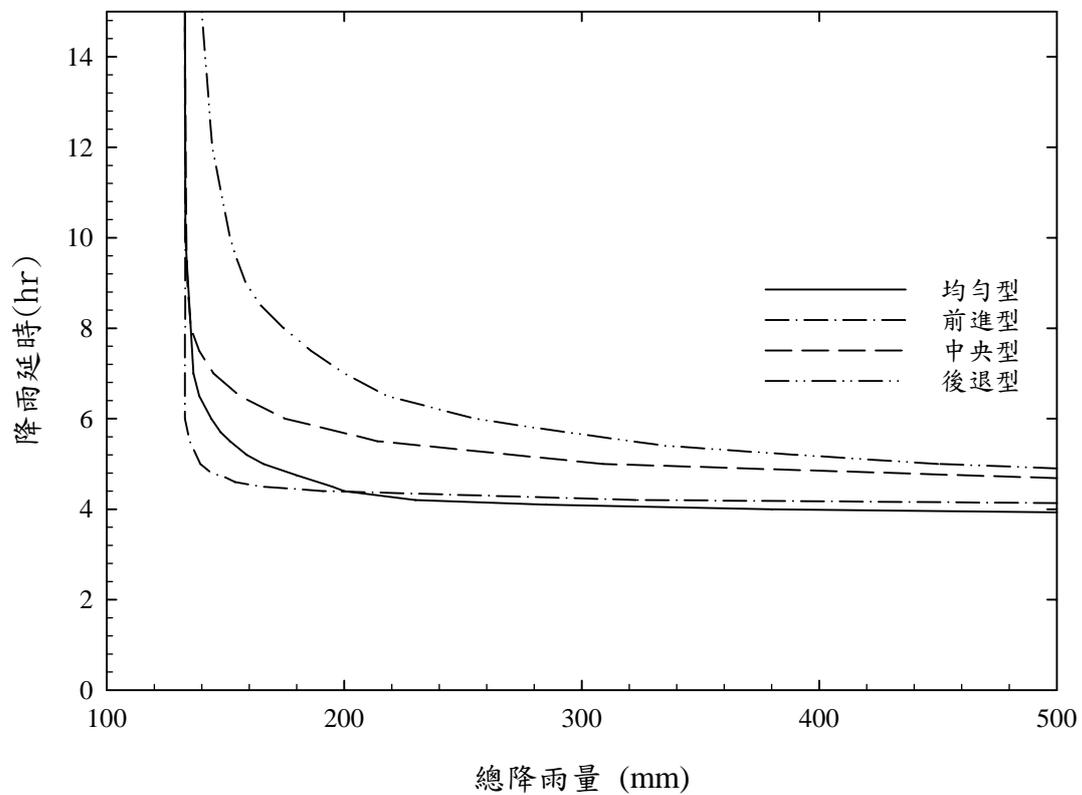


圖 5.15 緩坡不同雨型達破壞之雨量延時圖

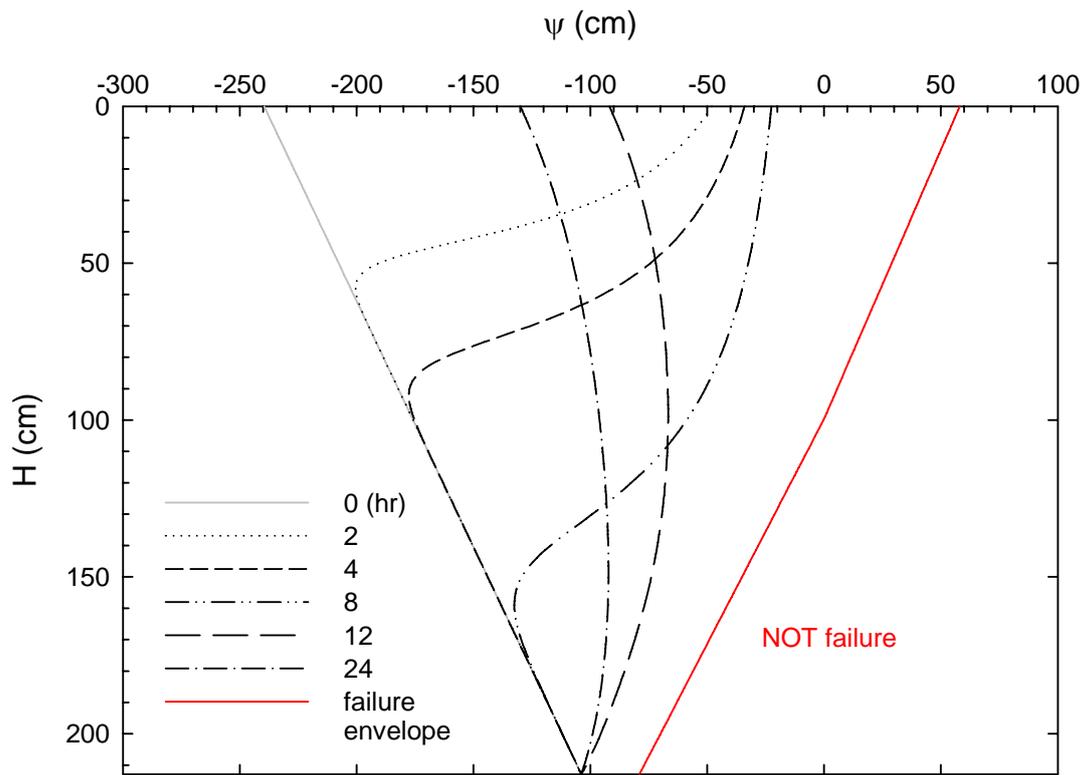


圖 5.16 降雨 180mm 雨量對陡坡淺崩塌之影響

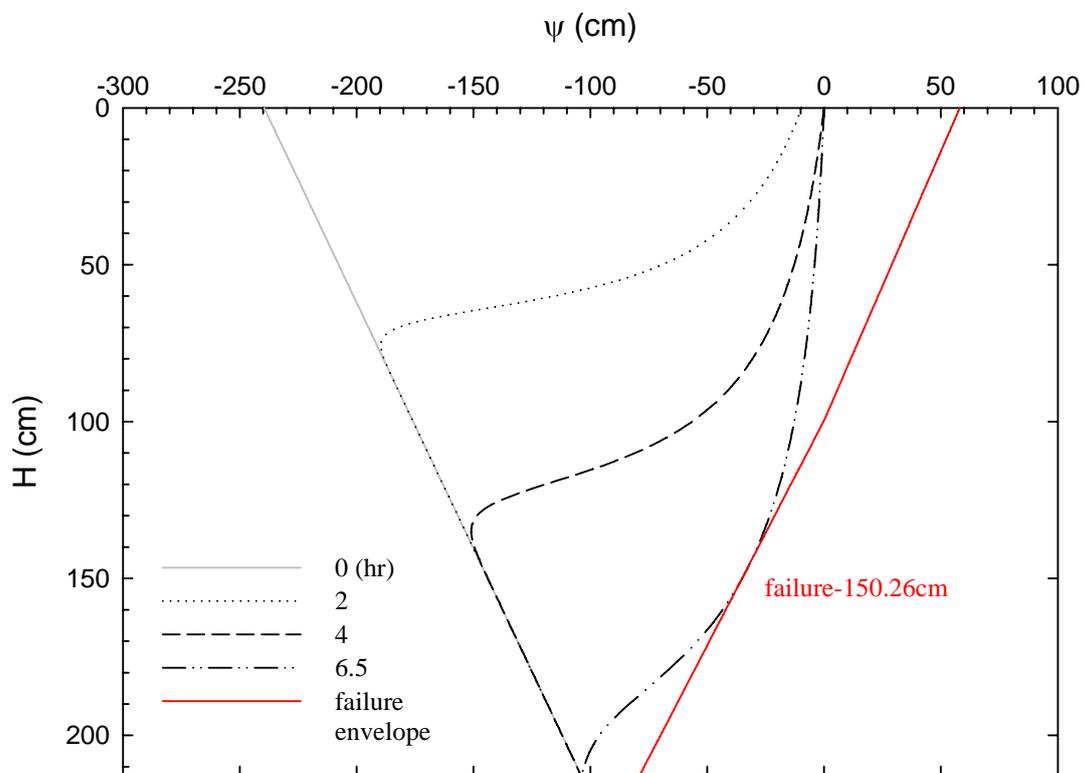


圖 5.17 降雨 360mm 雨量對陡坡淺崩塌之影響

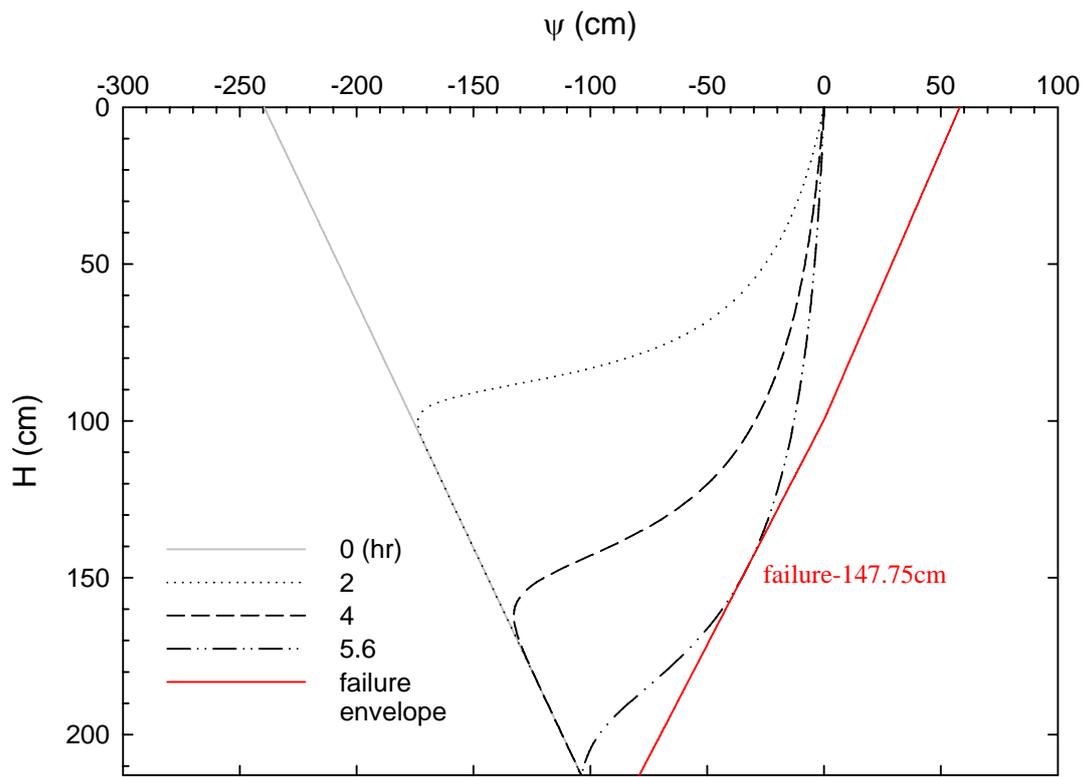


圖 5.18 降雨 720mm 雨量對陡坡淺崩塌之影響



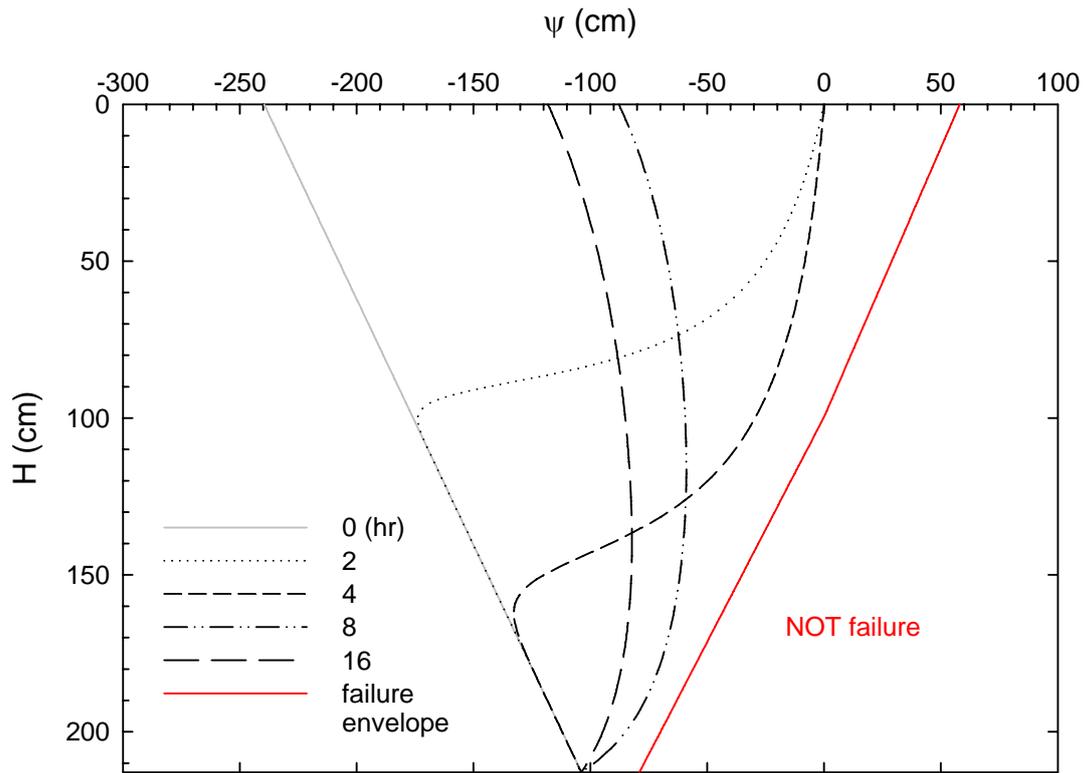


圖 5.19 降雨 4 小時對陡坡淺崩塌之影響

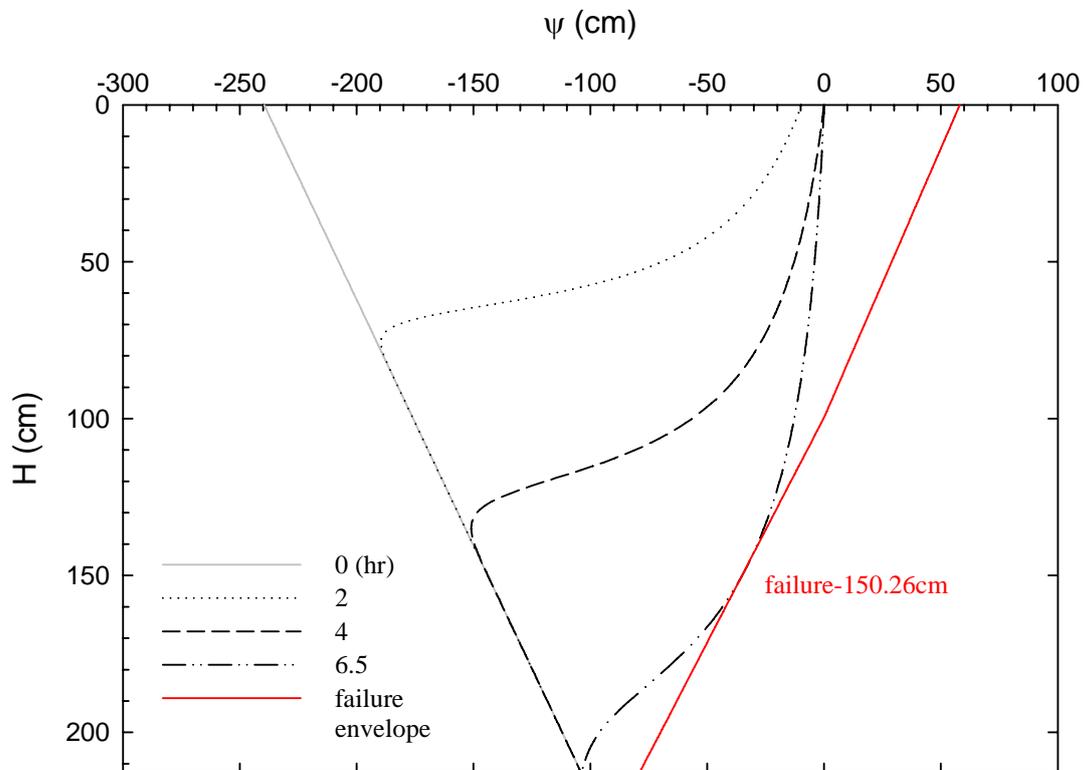


圖 5.20 降雨 8 小時對陡坡淺崩塌之影響

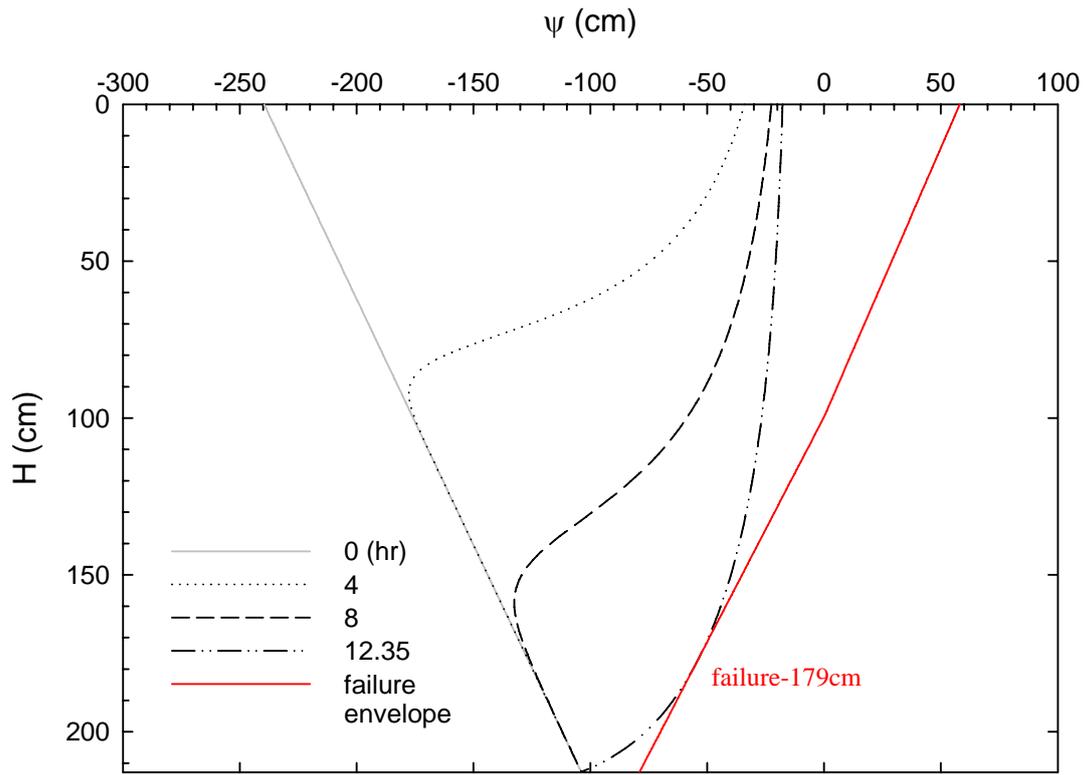


圖 5.21 降雨 16 小時對陡坡淺崩塌之影響



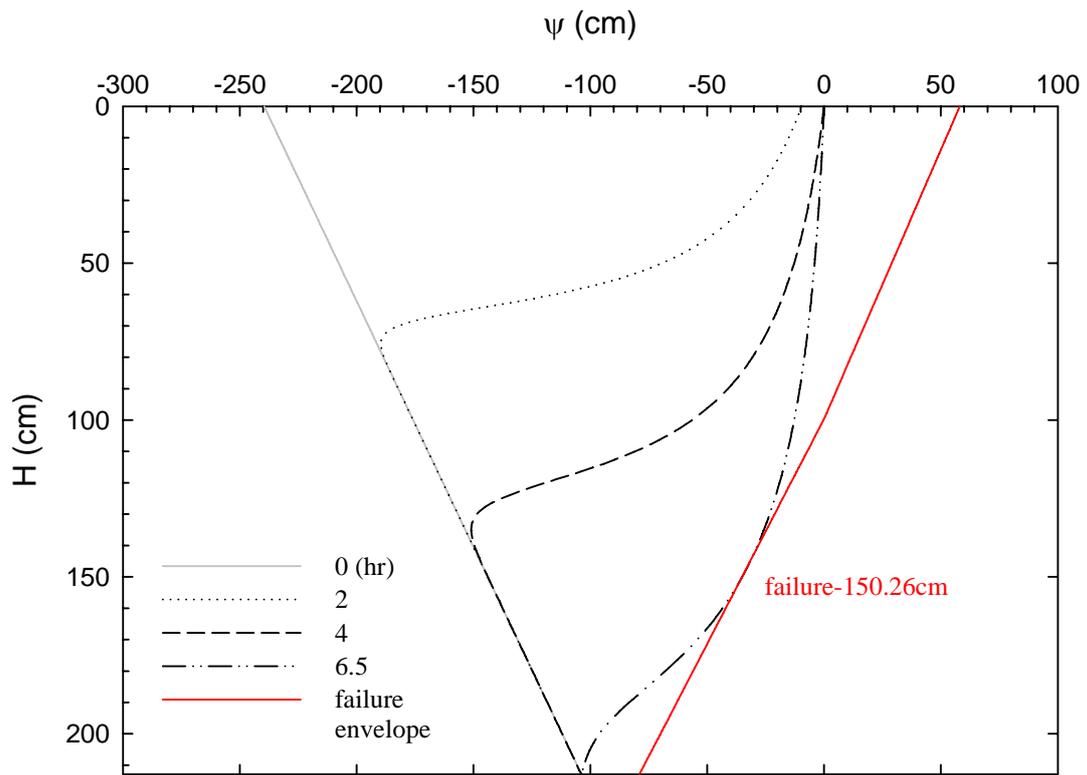


圖 5.22 均勻型對陡坡淺崩塌之影響

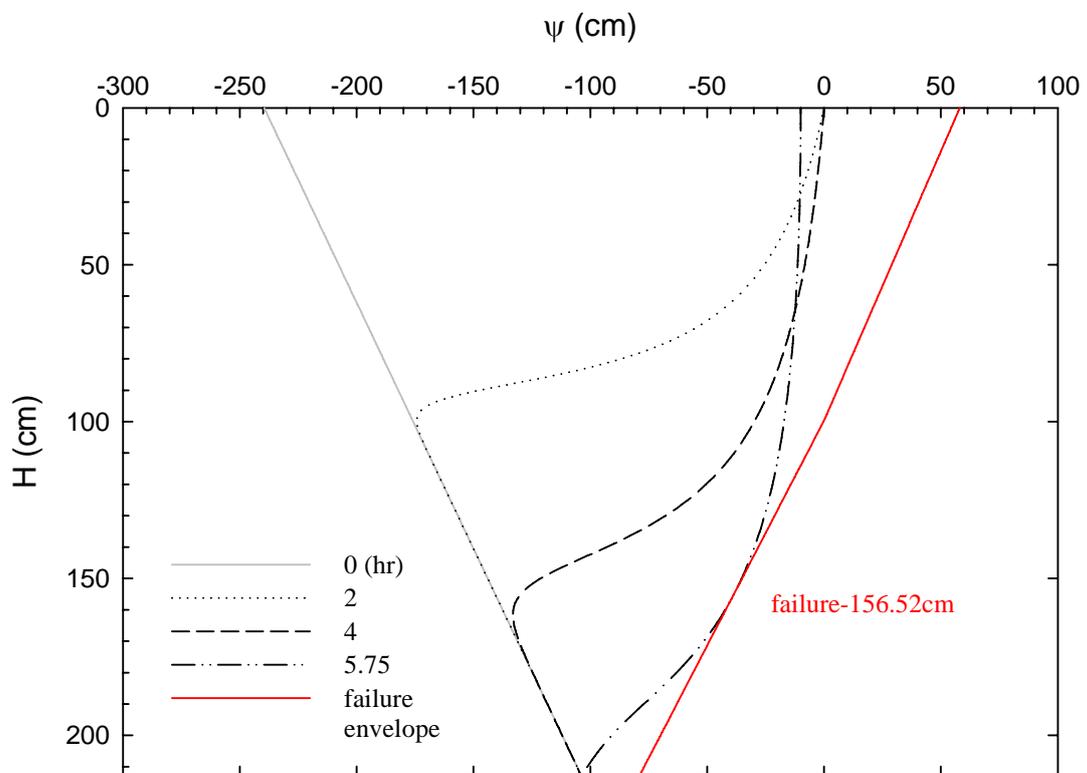


圖 5.23 前進型對陡坡淺崩塌之影響

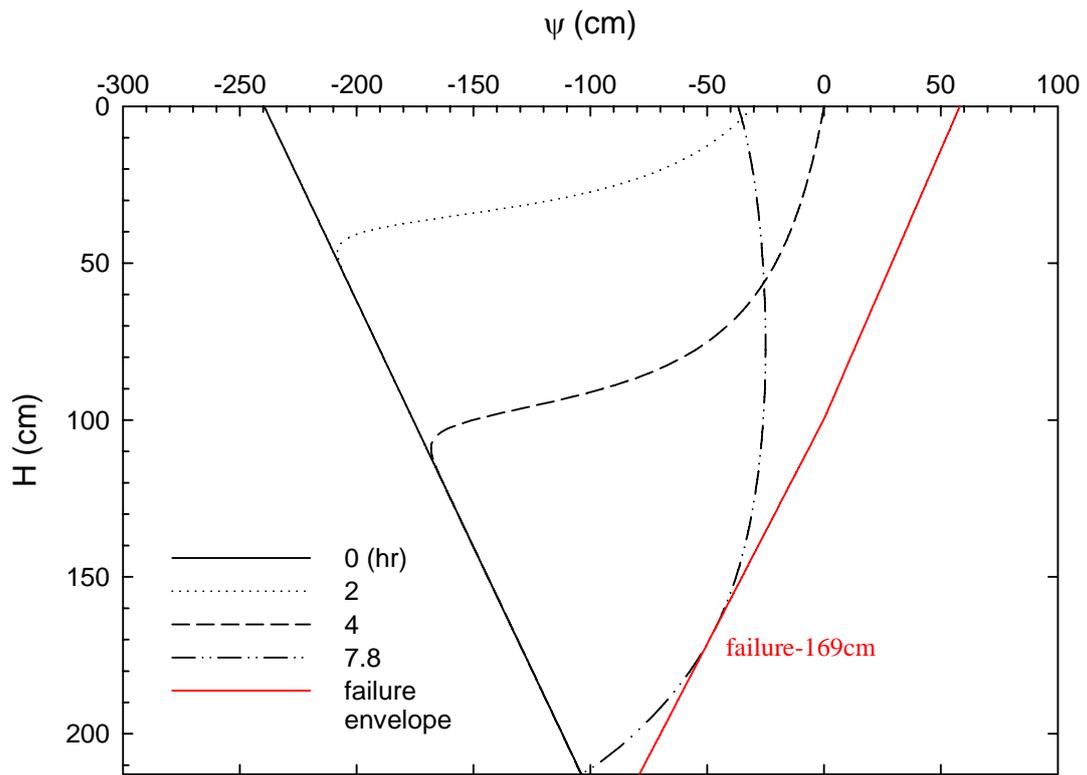


圖 5.24 中央型對陡坡淺崩塌之影響

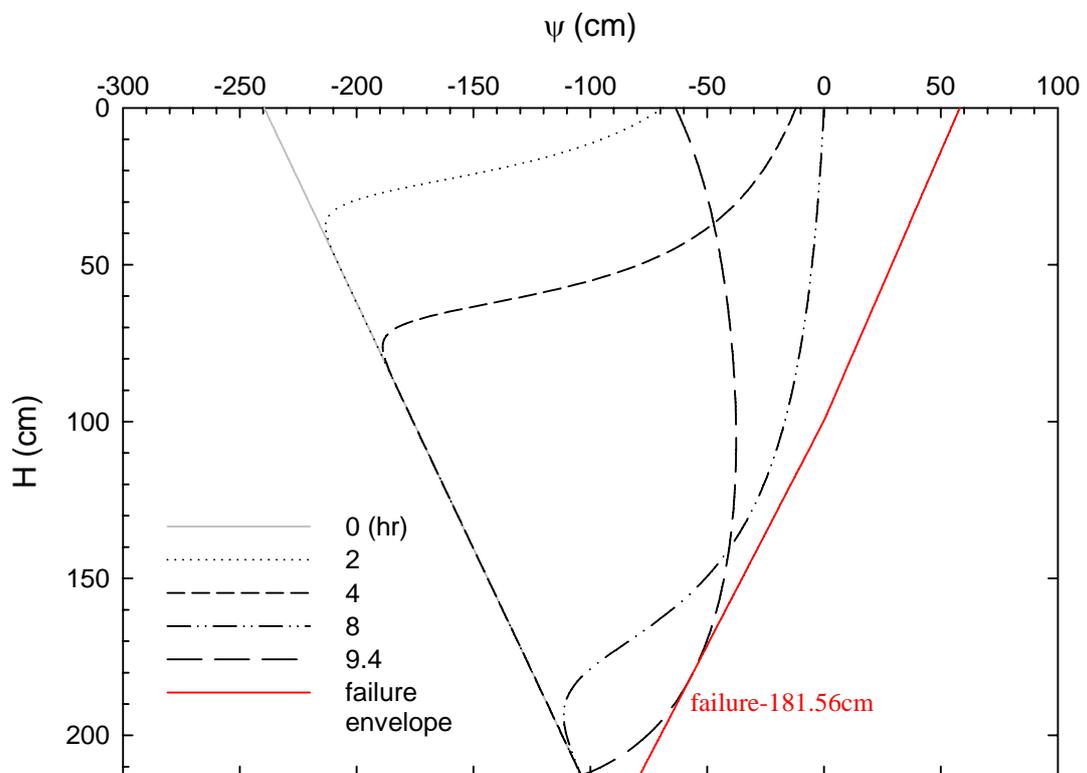


圖 5.25 後退型對陡坡淺崩塌之影響

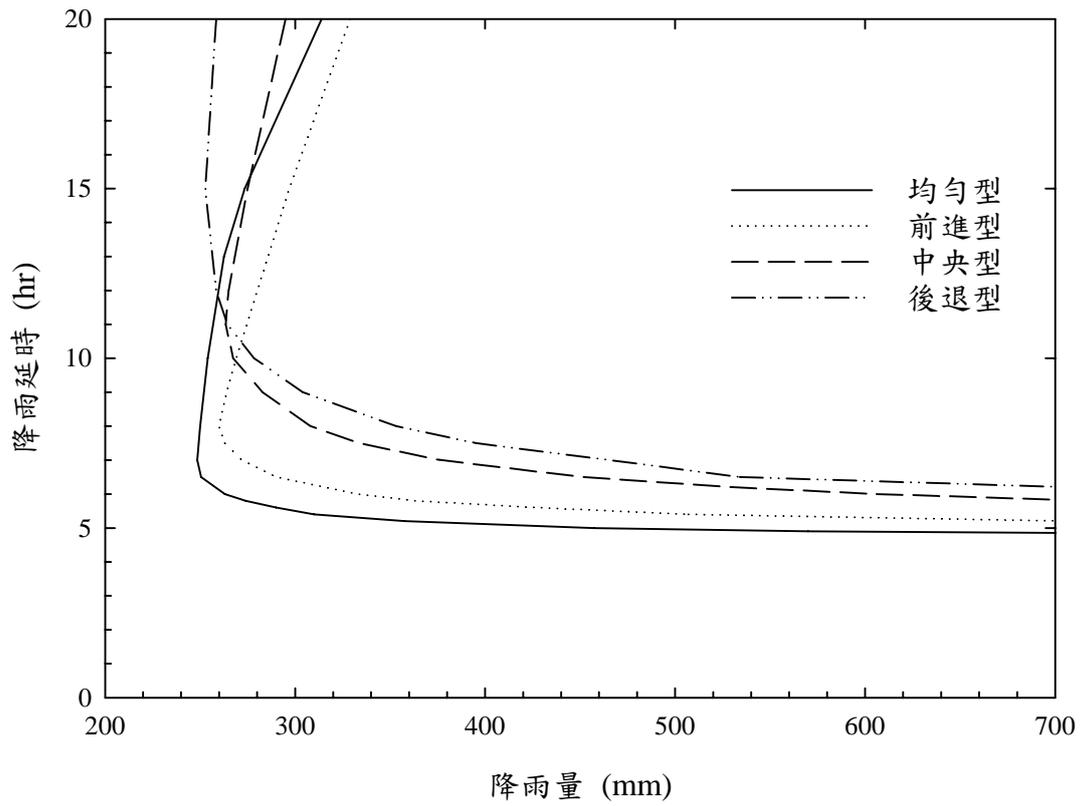


圖 5.26 陡坡不同雨型達破壞之雨量延時圖

