

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

考慮地下水位變化之擬似三維邊坡穩定模式之建立

Development of Quasi-3D Slope Stability Model Associated with
Groundwater Level Variations

研究生：黃亞雯

指導教授：楊錦釗 博士

姜世偉 博士

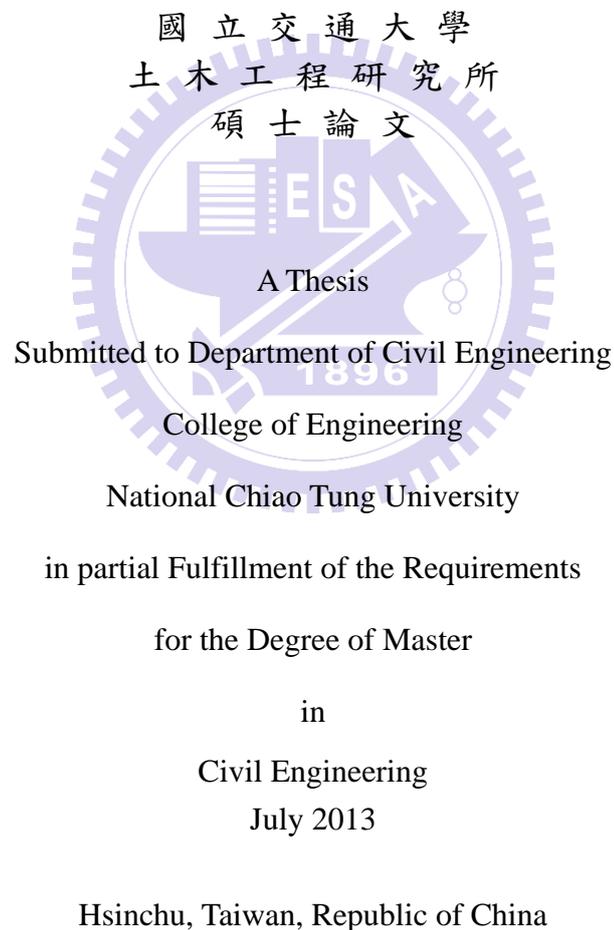
中華民國一〇二年七月

考慮地下水位變化之擬似三維邊坡穩定模式之建立

Development of Quasi-3D Slope Stability Model Associated with
Groundwater Level Variations

研究生：黃亞雯
指導教授：楊錦釗
姜世偉

Student : Ya-Wen Hwang
Advisor : Jinn-Chuang Yang
Shih-Wei Chiang



中華民國一〇二年七月

考慮地下水位變化之擬似三維邊坡穩定模式之建立

學生：黃亞雯

指導教授：楊錦釗

姜世偉

國立交通大學土木工程研究所

摘要

本研究旨在以極限平衡法建立擬似三維邊坡穩定模式，除可完整考慮實際崩塌情況與地形變化外，更可避免三維模式之龐大計算量。模式中採用 Green-Ampt 入滲理論結合一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式以考慮降雨入滲與地下水位之變化，將三維已知可能破壞土體，切割為數個二維切面，各切面以簡化 Bishop 切片法計算其安全係數，再依權重計算整體安全係數，在不考慮側向出入流條件下，藉以探討三維邊坡因土壤滲透性、降雨特性、降雨雨型、岩盤傾斜角度、地形幾何與土壤分布對其穩定性之影響。

關鍵字：極限平衡法、降雨入滲、邊坡穩定分析、擬似三維模式



Development of Quasi-3D Slope Stability Model Associated with Groundwater Level Variations

Student : Ya-Wen Hwang

Advisor : Jinn-Chuang Yang
Shih-Wei Chiang

Department of Civil Engineering National Chiao-Tung University

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a quasi-three-dimensional slope stability model based on limit equilibrium method for overcoming the huge computational effort and taking realistic conditions into consideration. The rainfall infiltration and groundwater level variation were simulated by solving the Green-Ampt theory and the one-dimensional Boussinesq equation for sloping aquifer simultaneously. The three-dimensional system was divided into several two-dimensional layers. The stability of each layer was analyzed by using the simplified Bishop method. The three-dimensional stability condition with rainfall infiltration over time was therefore calculated by employing a weighted procedure where weighting was based upon arc-length or area of each layer. Under neglecting lateral flows, the effects of soil permeability, rainfall characters, rainfall patterns, inclined angle of rock layer, topography and soil properties on slope stability were discussed.

Keywords: limit equilibrium method, rainfall infiltration, slope stability analysis, quasi-three-dimensional model

致謝

在研究過程中曾遇到各種難題及困惑，承蒙恩師楊錦釗教授與姜世偉博士悉心指導下，得以使本論文順利完成。在論文口試期間感謝口試委員世曦工程顧問李順敏協理與嘉義大學蔡東霖教授的細心審查文章，並給予許多指正與建議，使本論文更臻完善，在此致上最誠摯的感謝。

感謝就學期間研究室胤隆學長、浩榮學長、永佳學長、文祿學長、建華學長、弘恩學長、仲達學長、仁凱學長、聖翔學長、家偉學長、昀直學長、建翔學長、舒勤學姐與芳綺學姐在學期間給予的協助與照顧，亦感謝同窗瑋廷、醇國、蓉瑩、健賓、于軒、威辰與莉玲在研究所生活互相扶持與關懷，及感謝學弟妹怡君、瑋宸、佩衡、承儒與伯華的協助，在此表示誠摯謝意。

最後，感謝家人多年來的支持與鼓勵，使我得以順利完成論文及獲得學位，此恩永銘於心，謹將此論文與你們分享。



目錄

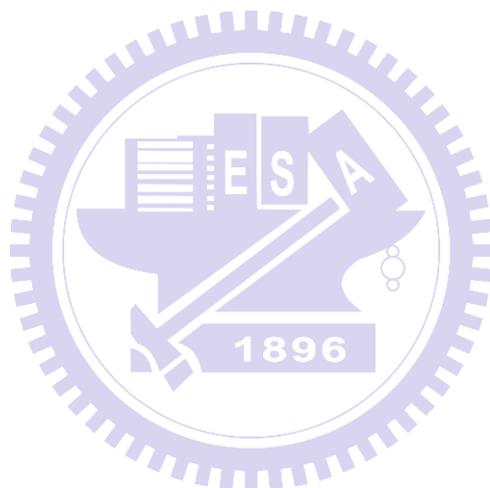
摘要	I
ABSTRACT	II
致謝	III
目錄	IV
表目錄	VI
圖目錄	VII
符號表	IX
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 文獻回顧	1
1.3 研究方法與步驟	3
1.4 章節介紹	3
第二章 理論基礎	8
2.1 降雨入滲理論	8
2.2 地下水位計算	9
2.2.1 一維 Boussinesq 方程式	9
2.2.2 一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式	10
2.3 邊坡穩定分析	11
2.3.1 簡化 Bishop 切片法	11
2.3.2 考慮地下水位之邊坡穩定分析	13
第三章 模式之建立與驗證	18
3.1 降雨入滲模式之建立與驗證	18
3.1.1 降雨入滲模式之建立	18
3.1.2 降雨入滲模式之驗證	19
3.2 地下水位計算模式之建立與驗證	20
3.2.1 地下水位計算模式之建立	20
3.2.2 地下水位計算模式之驗證	20
3.3 擬似三維邊坡穩定模式之建立與驗證	21
3.3.1 擬似三維邊坡穩定模式之建立	21
3.3.2 擬似三維邊坡穩定模式之驗證	22

第四章 假設案例之探討分析	33
4.1 案例說明	33
4.2 均勻邊坡	33
4.2.1 土壤滲透性與降雨特性影響	33
4.2.2 雨型之影響	34
4.2.3 岩盤傾斜角度之影響	35
4.3 非均勻邊坡	35
4.3.1 地形幾何之影響	35
4.3.2 土壤分布之影響	36
第五章 結論與建議	56
5.1 結論	56
5.2 建議	56
參考文獻	57
附錄一 一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式之推導	60



表目錄

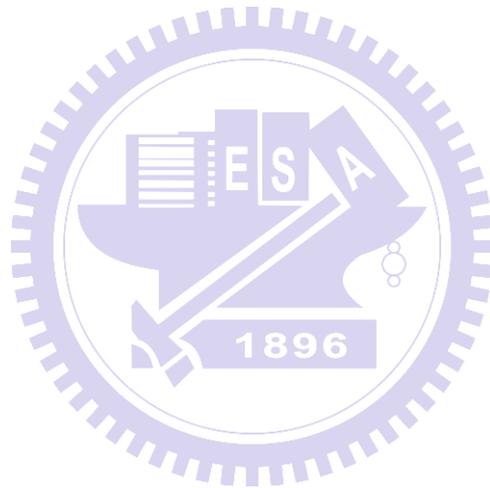
表 1-1 不同邊坡穩定分析方法彙整表.....	5
表 3-1 Green-Ampt 土壤入滲相關係數.....	24
表 3-2 驗證案例降雨事件資料.....	24
表 3-3 本研究與 3 種三維模式之安全係數比較結果彙整表.....	25
表 4-1 假設案例模擬條件彙整表.....	37
表 4-2 假設案例相關土壤參數彙整表.....	37
表 4-3 土壤滲透性與降雨特性之模擬條件彙整表.....	37
表 4-4 雨型之模擬條件彙整表.....	38
表 4-5 岩盤傾斜角度之模擬條件彙整表.....	38
表 4-6 地形幾何之模擬條件彙整表.....	39
表 4-7 非均勻土壤分布之模擬條件彙整表.....	39



圖目錄

圖 1-1 山崩種類示意圖.....	6
圖 1-2 4種概念化雨型示意圖.....	6
圖 1-3 研究步驟流程圖.....	7
圖 2-1 Green-Ampt 入滲理論示意圖.....	14
圖 2-2 控制體積示意圖.....	14
圖 2-3 一維 Boussinesq 方程式計算概念圖.....	15
圖 2-4 一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式計算概念圖.....	15
圖 2-5 簡化 Bishop 切片法邊坡分析示意圖.....	16
圖 2-6 第 n 片切片受力分布示意圖.....	16
圖 2-7 第 n 片切片作用力平衡分析圖.....	16
圖 2-8 考慮地下水位之邊坡分析示意圖.....	17
圖 2-9 第 n 片切片之孔隙水壓分布示意圖.....	17
圖 3-1 Green-Ampt 降雨強度與入滲能力關係圖.....	26
圖 3-2 Green-Ampt 降雨入滲計算驗證結果.....	27
圖 3-3 一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式數值計算驗證結果.....	28
圖 3-4 擬似三維邊坡穩定分析概念示意圖.....	29
圖 3-5 邊坡與圓球相切之切片示意圖.....	29
圖 3-6 擬似三維邊坡分析之切面示意圖.....	30
圖 3-7 加權方法示意圖.....	30
圖 3-8 擬似三維邊坡穩定模式計算流程圖.....	31
圖 3-9 不同破壞形式之破壞面示意圖.....	32
圖 3-10 2種加權法切面數量對安全係數之影響比較圖.....	32
圖 4-1 可能破壞面搜尋之中心面示意圖.....	40
圖 4-2 模擬案例三維邊坡示意圖.....	40
圖 4-3 不同降雨強度下安全係數與降雨延時關係圖(a)土壤一(b)土壤二(c)土壤三.....	41
圖 4-4 不同降雨強度下入滲率與降雨延時關係圖(a)土壤一(b)土壤二(c)土壤三.....	42
圖 4-5 降雨強度 5 mm/hr 之地下水位分布圖.....	43
圖 4-6 降雨強度 10 mm/hr 之地下水位分布圖.....	44
圖 4-7 降雨強度 20 mm/hr 之地下水位分布圖.....	45
圖 4-8 降雨強度 40 mm/hr 之地下水位分布圖.....	46
圖 4-9 土壤一在不同降雨強度下二維與擬似三維安全係數比較圖.....	47
圖 4-10 4種雨型之安全係數與降雨延時關係圖(a)土壤一(b)土壤二(c)土壤三.....	48
圖 4-11 4種雨型之累積入滲量與降雨延時關係圖(a)土壤一(b)土壤二(c)土壤三.....	49
圖 4-12 3種岩盤傾斜角度之安全係數與降雨延時關係圖.....	50
圖 4-13 3種岩盤傾斜角度之地下水位分布圖.....	51
圖 4-14 6種邊坡地形示意圖.....	52

圖 4-15 6種邊坡地形坡壞面示意圖.....	53
圖 4-16 凹型邊坡之安全係數與降雨延時關係圖.....	54
圖 4-17 凸型邊坡之安全係數與降雨延時關係圖.....	54
圖 4-18 垂直分層土壤分布示意圖.....	55
圖 4-19 不同土壤分布之安全係數與降雨延時關係圖.....	55
圖 A1.1 傾斜岩盤之地下水位座標轉換示意圖.....	62



符號表

A'_n : 各切面之破壞面積

b_n : 切片寬

c' : 土壤之凝聚力

cs : 控制表面

cv : 控制體積

d : 切面位置為距離球心長度

F : 累積入滲深度

FS : 安全係數

FS_i : 降雨起始前之安全係數

f : 入滲率

f^* : 入滲能力

H : 坡高

H' : 地下水入滲深度

h : 水頭高

h_0 : 地表積水深度

h' : 各切片平均高度

h'_w : 各切片中含水之平均高度

I : 降雨強度

i : 空間格網座標

K : 土壤之水力傳導係數

L : 地下水模擬長度

l : 單位長度



m : 時間格網座標

N : 切片個數

N_y : y 方向切面個數

N_r : 破壞面上之正向力

n : 切片表示代號

P : 切片側向正向力

Q : 流量

q : 水流通量

R : 球半徑

r : 圓半徑

r'_n : 各切面之破壞弧長

S_y : 比流率

T : 切片側向剪力

T_r : 切片上之阻抗剪力

t : 時間

u : 孔隙水壓力

V : l 方向上通過單位橫斷面土壤之體積流率

\bar{V} : 流速

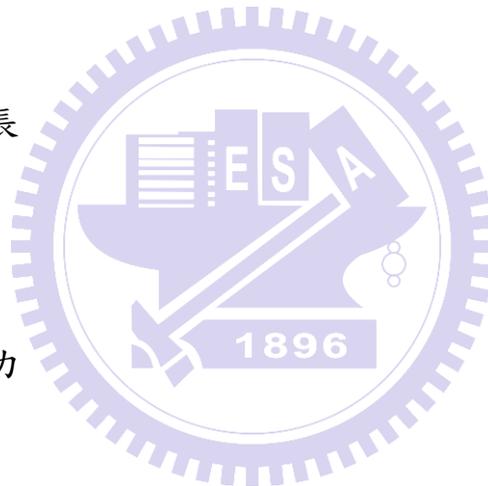
W : 切片重

W_u : 未飽和之切片重

W_s : 飽和之切片重

x 、 y 、 z : 空間座標

x' : 空間座標轉換



Y : 邊坡 y 方向長度

Z : 座標轉換地下水位與基準面之高度差

z' : 位勢水頭

α : 切片底部中點的傾角

β' : 岩盤傾斜角度

β'_w : 地下水位切線與岩盤之夾角角度

γ : 土壤單位重

γ_{sat} : 土壤飽和單位重

γ_w : 水單位重

Δt : 時間間距

Δx : 空間間距

η : 土壤孔隙率

θ : 土壤含水量

θ_e : 土壤有效孔隙率

θ_i : 土壤起始含水量

ρ_w : 水的密度

σ' : 破壞面上的正向應力

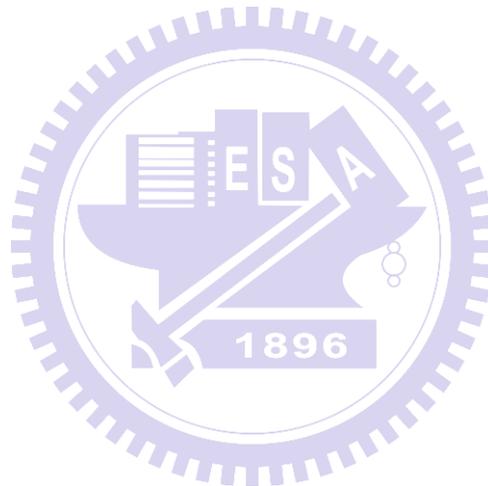
τ_d : 破壞面上所發展之剪應力

τ_f : 破壞面上土壤之剪力強度

ϕ' : 土壤之摩擦角

ψ : 濕鋒吸力水頭

ψ' : 壓力水頭



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

台灣位於歐亞板塊和菲律賓海板塊交界，地形險峻且地質脆弱，本島面積有三分之二為山坡地，屬於亞熱帶海島型氣候，年雨量豐沛。台灣地狹人稠，隨著人口成長與經濟發展，山坡地開發利用漸增，隨著降雨而引發坡地崩塌造成大規模災害，近年來更是豪雨颱風頻繁，遇雨成災，土石崩塌不僅直接危及山區居民性命安危，更造成房舍毀損，道路中斷，若土石經由河道運移進入水庫，將使庫容大幅減少進而影響供水。為防止災害持續的發生，瞭解土石崩塌的機制首當重要，為集水區治理及防災預警工作之基石。

本研究之目的即旨在發展擬似三維邊坡穩定模式，藉以解析因降雨入滲引發邊坡破壞之機制，並探討降雨強度、雨型、岩盤傾斜角度、邊坡幾何地形與土壤分布等對坡地崩塌之影響，本研究結果可提供未來相關研究之參酌。

1.2 文獻回顧

一般邊坡穩定常以塊體形式破壞進行分析，即在不考慮土體變形的情況下，以莫爾-庫倫破壞準則(Mohr-Coulomb failure criterion)建立土壤正向應力與抗剪強度之關係，並在不考慮土體變形的條件下，以極限平衡法(Limited equilibrium analysis)進行分析。Varnes(1978)將崩塌依據其塊體運動之型態及移動方式區分為5種基本類型，包含落石(Fall)、翻覆(Topple)、滑動(Slide)、側滑(Lateral spread)與流動(Flow)等5種型式如圖 1-1 所示，本研究針對滑動形式破壞進行定量分析。導致崩塌發生之影響因子可概分為兩類，即(a)潛在因子；(b)誘發因子。

(a)潛在因子(Preparatory variables)：即存在於現實條件之中，驅使邊坡處於臨界破壞之穩定狀況，包含地質構造、坡度、地質參數與植被等。

(b)誘發因子(Triggering variables)：致使呈臨界狀態之坡地發生實際崩塌，如地震或降雨等。

造成邊坡破壞的原因可分為剪應力增加與剪力強度降低2種(施國欽, 2000)。常見之剪應力增加如：坡頂或坡面加載、坡趾開挖或沖蝕、坡度及坡高增加或地震及爆炸等；常見之剪力強度降低如：降雨或地下水影響作用、地震引起之砂土

液化或張力裂縫等。黃筱婷等 (2011)提出邊坡滑動除與降雨、地震以及人為因素等誘因外，地質構造如層面、節理系統、褶皺、斷層等，均直接或間接影響邊坡的穩定性。

如表 1-1 所示，常用之二維邊坡穩定分析方法有簡化 Bishop 切片法、Janbu 切片法及 Morgenstern-Price 切片法，各分析方法對切片側力與力平衡在不同假設下，各有其適用性(施國欽, 2000；楊宏慶, 2012)：

(a)簡化 Bishop 切片法(Bishop, 1955)：假定切片間只有水平作用力，忽略切片間垂直作用力，以破壞面圓弧的圓心為力矩中心，求得此破壞面之安全係數，此計算簡單方便、精度高，且已廣泛用於邊坡穩定分析之評估，大多可得滿意之結果(Liu et al., 1987；Kumar, J., 2000；Koutnik et al., 2008)。

(b)Janbu 切片法(Janbu, 1968)：考慮破壞土體水平力與垂直力的平衡，適用於任意破壞面的邊坡穩定計算，但不滿足力矩平衡條件且計算安全係數過程十分複雜，故在工程應用較為少見。

(c)Morgenstern-Price 切片法(Morgenstern and Price, 1965)：適用於任意形狀破壞面之邊坡穩定計算，將破壞土體分為數片後，再代入力與力矩平衡微分方程式，缺點是計算結果一般難以收斂，需多次演算方能滿足極限平衡條件。

坡地崩塌經常發生在降雨事件時，降雨入滲後則地下水位上升，邊坡內孔隙水壓增加致使安全係數下降，故降雨入滲為邊坡穩定性分析重要的一環(Gokceoglu and Aksoy, 1996; Collins et al., 2004; Tasi et al., 2008; Chen et al., 2010；Rahardjo et al., 2010)。降雨隨時間與空間之變化，大致可分為均勻型(Uniform pattern)、後退型(Delayed pattern)、前進型(Advanced pattern)與中央型(Intermediate pattern)等 4 類(Chow et al., 1988)，如圖 1-2 所示。陳弘恩 (2005)探討降雨之雨量、延時及雨型對陡坡與緩坡坡地淺崩塌影響，結果可知雨量、延時及雨型對入滲深度與入滲率有極大的影響。Tasi (2008)將 Iverson (2000)水文地質模式結合無窮邊坡模式，探討雨型對邊坡穩定影響。林威甫 (2010)探討不同雨型之崩塌機率，降雨量及雨型不僅影響崩塌潛勢較高之位置及面積，亦會影響崩塌潛勢較高區域發生之時間。

基於前述二維邊坡穩定分析方法之理論架構，陸續已有三維模式的發展(Lam and Fredlund, 1993；Huang and Tsai, 2000)。Xing (1988)提出一簡單三維分析方法，可得破壞土體俯視之曲率半徑與邊坡穩定性關係，並將三維模式並與 6 種二維模式進行比較。Seed et al. (1990)以擬似三維分析方法進行垃圾掩埋區邊坡穩定評估。Huang and Tsai (2002)在三維模式中引入在兩垂直方向之力與力矩平

衡，可有效分析複雜邊界與地質分層之穩定性。Loehr et al. (2004)以擬似三維邊坡穩定分析不同楔型滑動行為，並提出擬似三維邊坡穩定性分析較易滿足靜力平衡。Cheng et al. (2007)基於二維模式之假設將簡化 Bishop 切片法、簡化 Janbu 切片法及 Morgenstern-Price 切片法擴展為三維模式，並假設三維模式中僅以單一方向滑動，使其模式計算更穩定且快速。范佐憲 (2007)以三維方法進行廢棄掩埋場穩定分析，發現掩埋場開口角度 30° 至 60° 時，三維較二維安全係數低，顯示滑動體兩側降低整體之穩定性。

1.3 研究方法與步驟

上述文獻回顧中，目前已有許多方法用以評估邊坡穩定性，其中三維模式較符合實際現況且機制考慮較為完備，但較少考慮降雨入滲之影響。因此，本研究發展擬似三維邊坡穩定模式，藉以探討降雨入滲與地下水位變化對邊坡穩定之影響。

本研究採用 Green-Ampt 入滲理論計算土壤入滲率，並結合一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式(Childs, E. C., 1971; Verhoest et al., 2000)計算地下水位隨時間變化之情形，並以簡化 Bishop 切片法(Simplified Bishop method, 1955)判斷邊坡之穩定性。

研究步驟如圖 1-3 所示，首先闡述模式中所採用之理論，包含 Green-Ampt 入滲理論、傾斜岩盤地下水流控制方程式及簡化 Bishop 切片法。基於前述理論建構可考慮降雨入滲能力、地下水位變化之擬似三維邊坡穩定分析，並以簡單案例驗證模式之正確性，續以假設案例探討地文與水文條件對邊坡穩定性之影響。最後，對本研究分析統整結論，並提出建議。

1.4 章節介紹

本文一共分五個章節，以下為章節概要簡述：

第一章為緒論，述說本研究之動機與目的以及過去學者所做之相關研究，並說明本研究之研究方法與步驟。

第二章為理論基礎，介紹本研究所採用之 Green-Ampt 入滲理論、一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式及簡化 Bishop 切片法。

第三章為模式建立與驗證，在 Green-Ampt 入滲理論架構下利用疊代求解入滲率，並以數值方法求解地下水位隨時間之變化，最後以簡化 Bishop 切片法建

構擬似三維邊坡穩定模式，並分別以簡單案例驗證模式建立之正確性。

第四章為假設案例探討分析，將擬分析案例歸納為均勻邊坡與非均勻邊坡 2 類，並分別探討地文、水文條件對邊坡穩定之影響。

第五章為結論與建議，除了對本研究之成果做綜合性之歸納說明，並對未來研究方向提出建議。

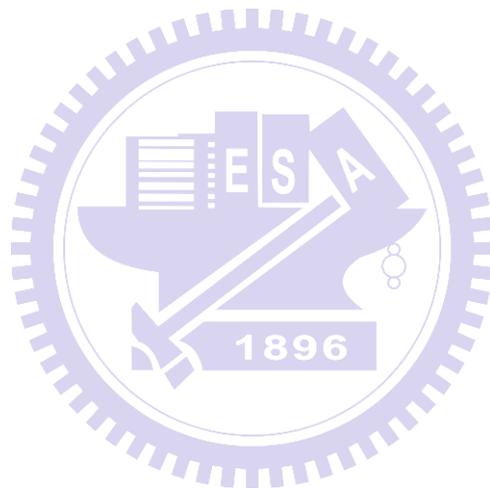
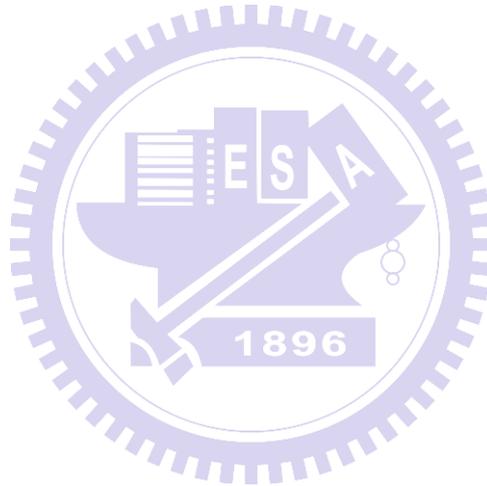


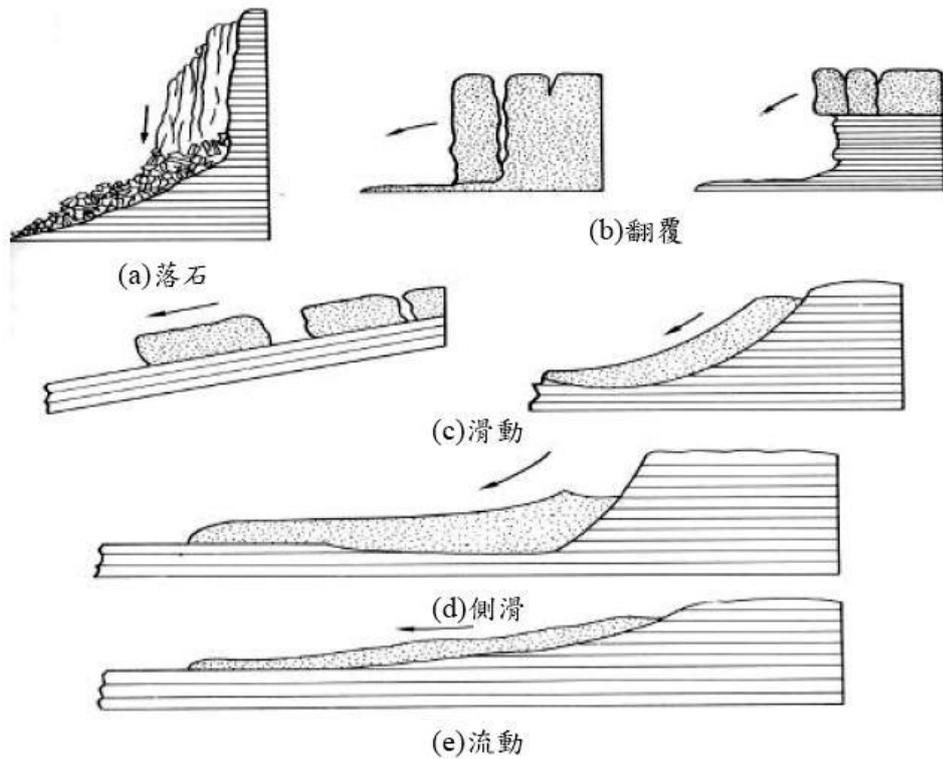
表 1-1 不同邊坡穩定分析方法彙整表

分析種類	切片側力考慮	切片平衡	適用性
簡化 Bishop 切片法 (Bishop, 1955)	剪力 $\Delta T = 0$	$\sum F_y = 0$	圓弧形破壞
Janbu 切片法 (Janbu, 1968)	剪力 T 與正向力 P 皆考慮 (簡化時，不考慮側力，再 依經驗乘上修正係數)	$\sum F_x = 0$ $\sum F_y = 0$ $\sum M = 0$	圓弧形破壞或 非圓弧形之不規則破壞
Morgenstern-Price 切片法 (Morgenstern and Price, 1965)	剪力 T 與正向力 P 及水壓 力皆考慮	$\sum F_x = 0$ $\sum F_y = 0$ $\sum M = 0$	圓弧形破壞或非圓弧形破壞

註:正向力與剪力分布如圖 2-6 所示

資料來源:施國欽(2000)





參考資料：Varnes(1978)

圖 1-1 山崩種類示意圖

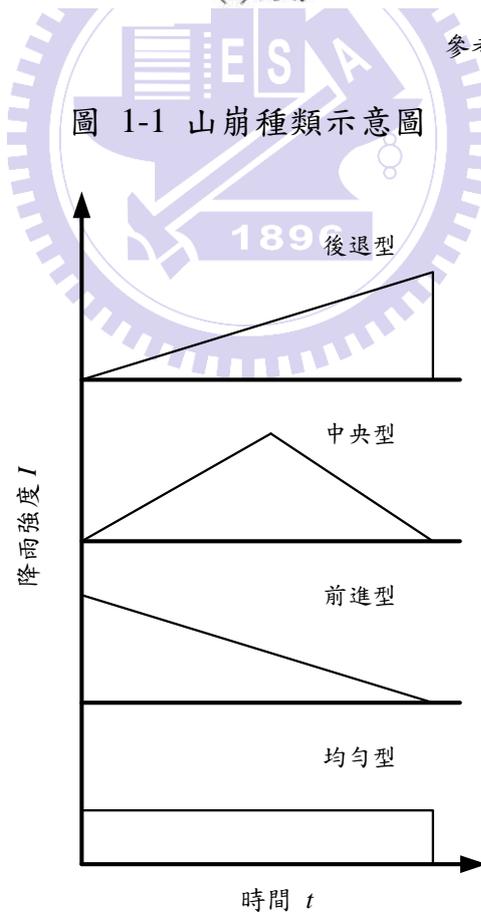


圖 1-2 4 種概念化雨型示意圖

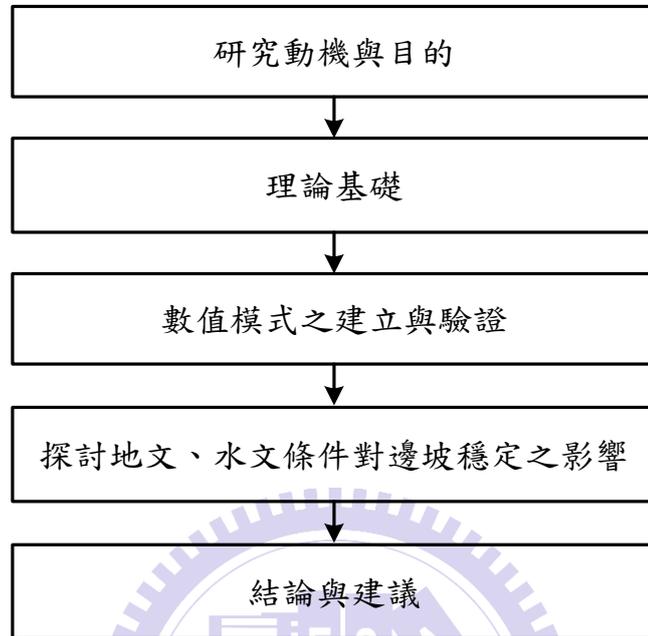


圖 1-3 研究步驟流程圖

第二章 理論基礎

本章節主要介紹本研究所採用之 Green-Ampt 入滲理論、一維 Boussinesq 方程式與簡化 Bishop 切片法。

2.1 降雨入滲理論

Green and Ampt (1911)將土壤水份入滲之濕鋒(Wetting front)假設為一平整的邊界，如圖 2-1 所示，降雨入滲前，土壤起始含水量為 θ_i ，土壤孔隙率(Porosity)為 η ，當水份入滲濕峰到達地表下深度 H' 時，依據質量守恆理論，降雨入滲至土壤之累積入滲深度(F , Cumulative infiltration depth)可表示為：

$$F(t) = H'(\eta - \theta_i) = H' \Delta\theta \quad (2.1)$$

降雨入滲機制可由達西定律(Darcy's Law)描述：

$$V = -K \frac{dh}{dl} = -K \frac{d}{dl} \left(z + \frac{p}{\gamma_w} \right) \quad (2.2)$$

式中， V 為 l 方向上通過單位橫斷面土壤之體積流率； h 為水頭； z 為已知高程； p 為土壤水份壓力； γ_w 為水的單位重(Specific weight)； K 為土壤之水力傳導係數(Hydraulic conductivity)。

如圖 2-1 所示，斷面一與斷面二分別為地面及下滲濕鋒位置，並定義垂直向下之方向為正，則可利用(2.2)式將入滲能力(f^* , Infiltration capacity)表示為：

$$f^* = -V = K \frac{d}{dl} \left(z + \frac{p}{\gamma_w} \right) \quad (2.3)$$

若地表積水深度為 h_0 ，下方乾燥土壤的濕鋒吸力水頭為 ψ ，則入滲能力為：

$$f^* = K \left(\frac{H' + \psi + h_0}{H'} \right) \quad (2.4)$$

假設地表積水之水量立即轉變為漫地流，因此地表積水深度 h_0 相對於土壤吸力水頭 ψ 以及濕鋒下滲深度 H' 甚小，故可加以忽略。由(2.1)式得知濕鋒下滲深度為 $H' = \frac{F}{\Delta\theta}$ ，則將(2.4)式可改寫為：

$$f^* = K \left(\frac{H' + \psi}{H'} \right) = K \left(\frac{F + \psi\Delta\theta}{F} \right) \quad (2.5)$$

由 $f^* = \frac{dF}{dt}$ ，可得累積入滲深度：

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta}\right) \quad (2.6)$$

(2.6)式即為 Green-Ampt 入滲公式，可由該式求得 t 時間之累積入滲量 F ，則入滲能力 f^* 可藉由下式求得：

$$f^*(t) = K \left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (2.7)$$

當 $t=0$ 時，累積入滲深度 $F_{t=0}=0$ ，代入(2.7)式，此時入滲能力 ($f^* = \infty$) 無限大，則入滲率 (f , Rate of infiltration) 為降雨強度 (I , Rainfall intensity) ($f_i = I_i$)，即降雨完全入滲至土壤。在計算時間內，若入滲能力大於降雨強度 ($f^* > I_i$)，則入滲率等於降雨強度 ($f_i = I_i$)；若入滲能力小於降雨強度 ($f^* < I_i$)，則入滲率等於入滲能力 ($f_i = f^*$)，此時地表開始積水而產生漫地流。

2.2 地下水位計算

2.2.1 一維 Boussinesq 方程式

圖 2-2 為控制體積示意圖，假設土壤中水份為連續分布，其遵守質量守恆 (Mass conservation) 定律，則地下水流連續方程式可表示為：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho_w dV = - \int_{cs} \rho_w \bar{V} \cdot n dA \quad (2.8)$$

式中， cv 為控制體積(Control volume)； cs 為控制表面(Control surface)； t 為時間； ρ_w 為水密度； \bar{V} 為流速，等號右側負號表示流入控制表面。上式代表地下水在控制體積內的質量增加率等於進入控制體積內的質量流率。

水流通過飽和土壤孔隙的流量與水力梯度關係可由達西定律予以描述：

$$q = -K \nabla h \quad (2.9)$$

式中， q 為水流通量(Flux)，亦稱為達西流速(Darcy velocity)。

地下水運動係受重力或壓力差作用下之滲透行為。地下水水頭為 $h = z' + \psi'$ ， z' 為位勢水頭； ψ' 為壓力水頭，則水流流量(Q , Flow rate)可表示為：

$$\begin{cases} Q_x = -K_x(h) \frac{\partial h}{\partial x} \\ Q_y = -K_y(h) \frac{\partial h}{\partial y} \\ Q_z = -K_z(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \end{cases} \quad (2.10)$$

圖 2-3 為一維 Boussinesq 方程式計算概念圖，將(2.10)式代入(2.8)式，並予以化簡，即可得一維 Boussinesq 方程式如下所示：

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = K \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + f \quad (2.11)$$

式中， S_y 為比流率(Specific yield)； h 為水力水頭高(Hydraulic head)； K 為水力傳導係數； f 為地下水補注率(Recharge rate)，亦即為 Green-Ampt 入滲公式中土壤之入滲率。

2.2.2 一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式

本研究進一步考慮傾斜岩盤可能造成地下水位變化及對坡地破壞之影響，圖

2-4 為一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式計算概念圖。其中， x 為空間座標； h 為水頭高； β' 為岩盤傾斜角度，將水流流量可表示為：

$$Q_x = -Kh \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cos \beta' + \sin \beta' \right) \quad (2.12)$$

將上式代入(2.8)式，即可得一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式如下：

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = K \left[\cos \beta' \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \sin \beta' \frac{\partial h}{\partial x} \right] + f \cos \beta' \quad (2.13)$$

上述詳細之推導過程可見附錄一。

2.3 邊坡穩定分析

2.3.1 簡化 Bishop 切片法

圖 2-5 為簡化 Bishop 切片法進行邊坡分析示意圖，其中以第 n 片切片為例，其受力分布如圖 2-6 所示。依極限平衡法，安全係數定義為破壞面上土壤平均剪力強度與平均剪應力之比值，即為

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (2.14)$$

其中， FS 為安全係數(Factor of safety)； τ_f 為破壞面上土壤之平均剪力強度； τ_d 為破壞面上所發展之平均剪應力。阻抗剪力可表示為：

$$T_r = \tau_d \cdot b_n' = \frac{\tau_f \cdot b_n'}{FS} \quad (2.15)$$

其中， T_r 為切片上之阻抗剪力； $b_n' = \frac{b_n}{\cos \alpha_n}$ ，其中 b_n 切片寬。利用莫爾-庫倫破壞準則，則可推導如下：

$$T_r = \frac{1}{FS} [c' + \sigma' \tan \phi'] b_n' \quad (2.16)$$

其中， c' 為土壤的凝聚力(Cohesion)； ϕ' 為土壤的摩擦角(Angle of internal friction)； σ' 為破壞面上的正向應力(Normal stress)。

將破壞面上的正向應力 $\sigma' = \frac{N_r}{b_n'}$ 代入(2.16)式，可得：

$$T_r = N_r \left(\frac{\tan \phi'}{FS} \right) + \frac{c' b_n'}{FS} \quad (2.17)$$

圖 2-7 為第 n 片切片作用力平衡分析圖，若假設 $P_n - P_{n+1} = \Delta P$ 且 $T_n - T_{n+1} = \Delta T$ ，考慮垂直方向的作用力平衡可得：

$$W_n + \Delta T = N_r \cos \alpha_n + \left[N_r \left(\frac{\tan \phi'}{FS} \right) + \frac{c' b_n'}{FS} \right] \sin \alpha_n \quad (2.18)$$

上式整理後可得：

$$N_r = \frac{W_n + \Delta T - \frac{c' b_n'}{FS} \sin \alpha_n}{\cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS}} \quad (2.19)$$

如圖 2-5 所示，考慮邊坡 ABC 之穩定，其中弧 AC 為潛在破壞面，計算各切片對圓心 O 點之力矩合為：

$$\sum_{n=1}^{n=N} W_n r \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=N} T_r r \quad (2.20)$$

其中 $T_r = \frac{1}{FS} (c' b_n' + N_r \tan \phi')$ ，並將(2.19)式代入(2.20)式可得安全係數 FS 計算公式為：

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} (c' b_n + W_n \tan \phi' + \Delta T \tan \phi') \frac{1}{\cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS}}}{\sum_{n=1}^{n=N} (W_n \sin \alpha_n)} \quad (2.21)$$

其中， b_n 為第 n 片之切片寬； W_n 為第 n 切片之土體重； FS 為安全係數。若進一步忽略各切片垂直剪力，亦即 $\Delta T = 0$ ，則上式可修正為：

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} (c' b_n + W_n \tan \phi') \frac{1}{\cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS}}}{\sum_{n=1}^{n=N} (W_n \sin \alpha_n)} \quad (2.22)$$

(2.22) 式中安全係數 FS 出現在等號兩邊，可採用疊代法求得 FS 值。若安全係數 FS 小於 1，表示破壞面上土壤剪力強度小於滑動面上之剪應力，故邊坡產生破壞；反之，安全係數 FS 大於 1，則邊坡處於穩定狀態，故以安全係數 $FS = 1$ 做為判斷破壞之標準。

2.3.2 考慮地下水位之邊坡穩定分析

在實際狀況下，將邊坡內地下水流納入考量方能解析孔隙水壓對邊坡破壞之影響。圖 2-8 為邊坡存在滲流之情形，圖 2-9 為其中之一切片，若考慮切片底部的平均孔隙水壓為 $u_n = h'_w \gamma_w$ ，則(2.22)式可修正為：

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} \left[c' b_n + (W_n - u_n b_n) \tan \phi' \right] \frac{1}{\cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS}}}{\sum_{n=1}^{n=N} (W_n \sin \alpha_n)} \quad (2.23)$$

其中， h'_w 為第 n 切片之平均水面高； γ_w 為水單位重。

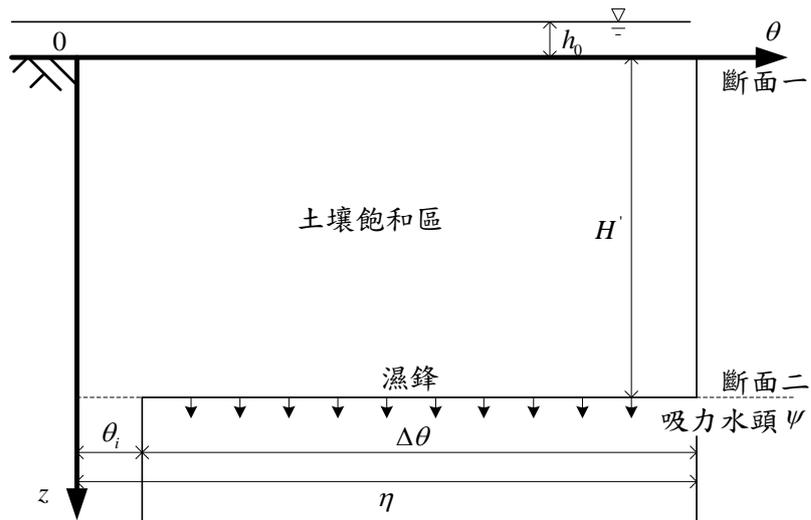


圖 2-1 Green-Ampt 入滲理論示意圖

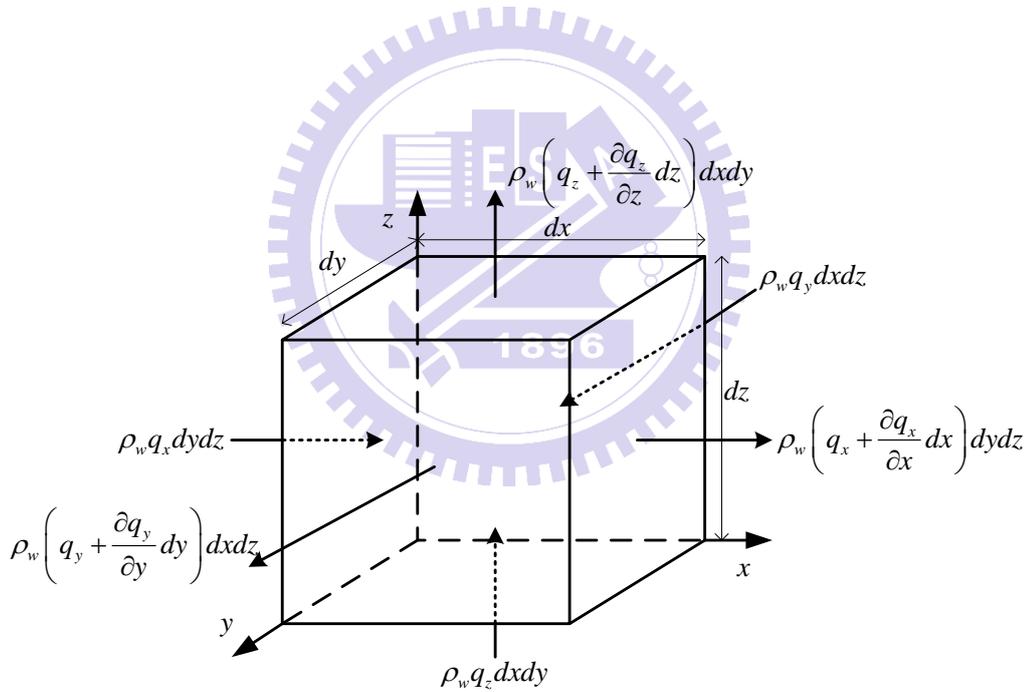


圖 2-2 控制體積示意圖

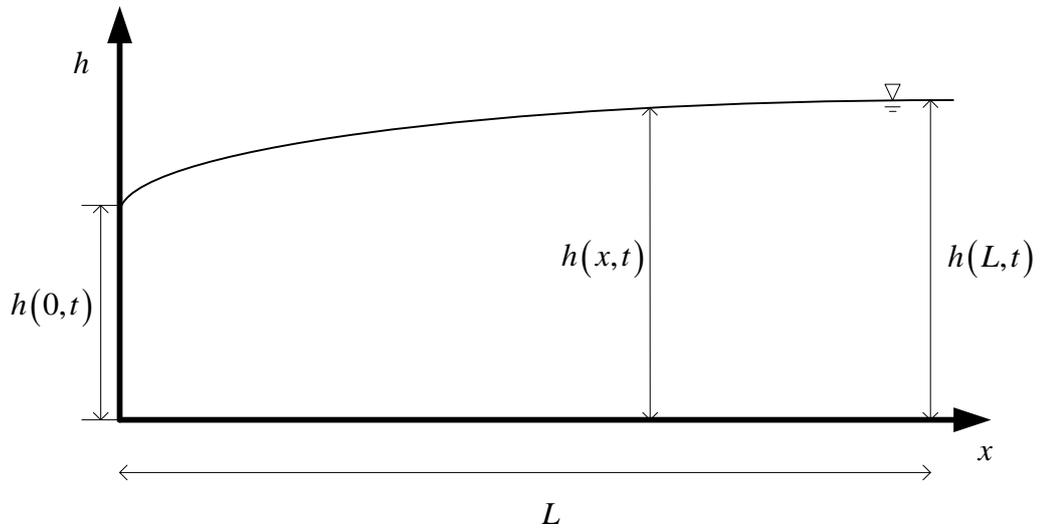


圖 2-3 一維 Boussinesq 方程式計算概念圖

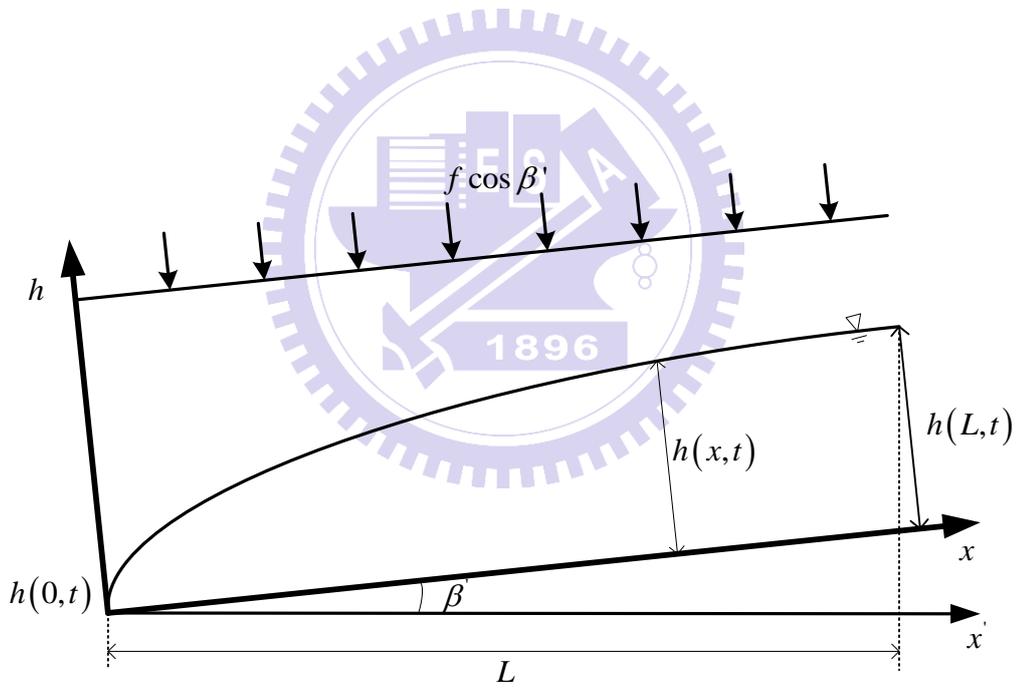


圖 2-4 一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式計算概念圖

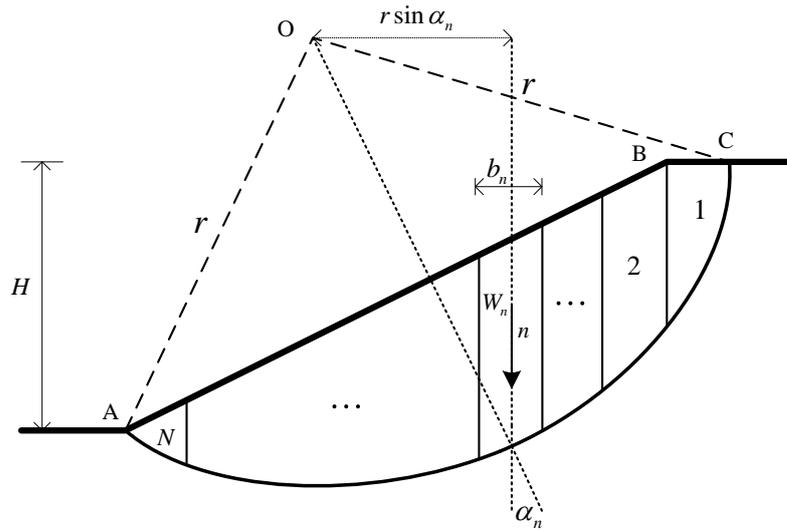


圖 2-5 簡化 Bishop 切片法邊坡分析示意圖

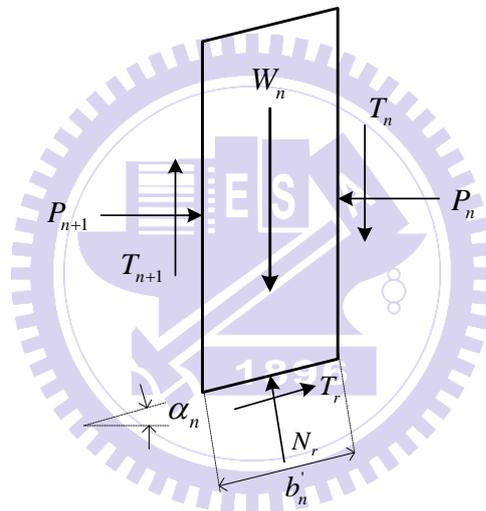


圖 2-6 第 n 片切片受力分布示意圖

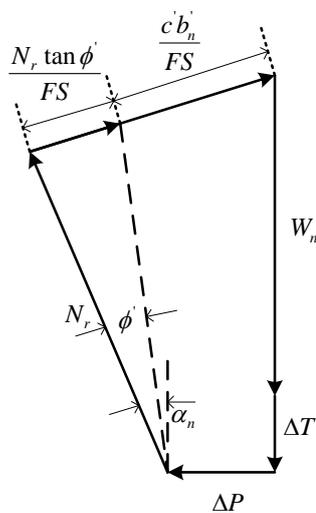


圖 2-7 第 n 片切片作用力平衡分析圖

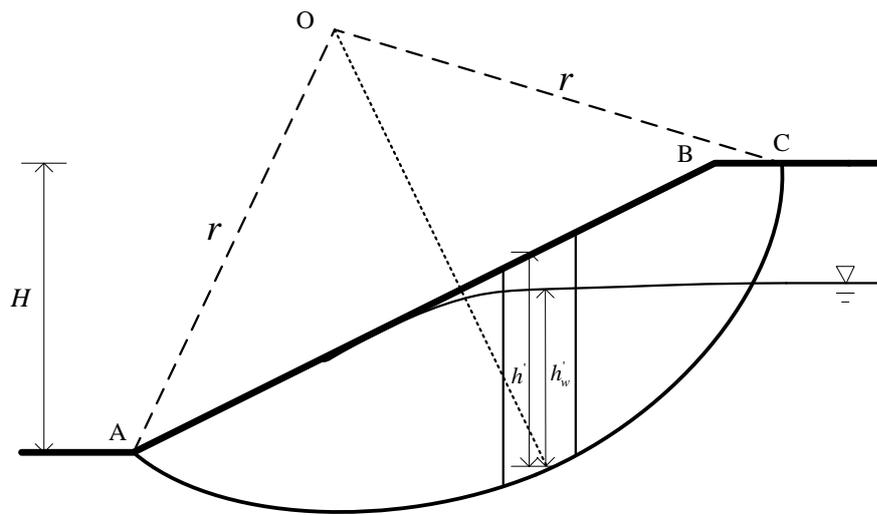


圖 2-8 考慮地下水位之邊坡分析示意圖

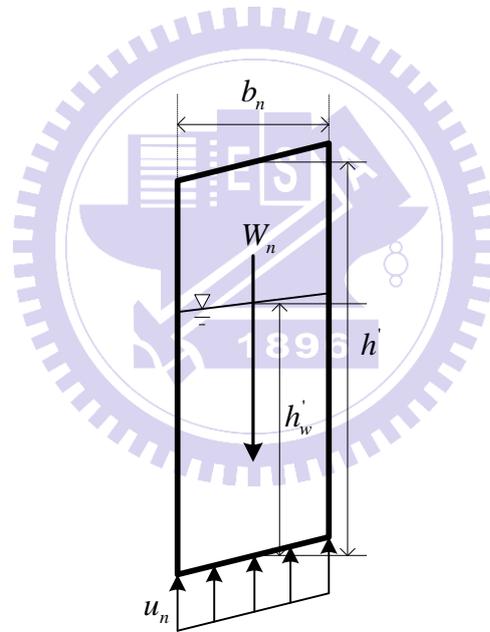


圖 2-9 第 n 片切片之孔隙水壓分布示意圖

第三章 模式之建立與驗證

本章節分別說明降雨入滲模式、地下水位計算模式與擬似三維邊坡穩定模式之建立過程，並利用簡單案例驗證模式之正確性。

3.1 降雨入滲模式之建立與驗證

3.1.1 降雨入滲模式之建立

將一場降雨事件分割成以 Δt 組成之降雨組體圖，並假設每個分割時間等份內之降雨強度為一定值。若假設降雨起始在 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 內之降雨強度為 I_{t_0} ，其 3 種情形如下：

情形(a)所示：發生積水

如圖 3-1(a)，在 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時皆為積水，則入滲能力小於降雨強度 ($f_{t_0}^* < I_{t_0}$)，此時入滲率等於入滲能力，可利用(2.6)式計算 t_0 之累積入滲深度為：

$$F_{t_0+\Delta t} - F_{t_0} - \psi \Delta \theta \left(\frac{\psi \Delta \theta + F_{t_0+\Delta t}}{\psi \Delta \theta + F_{t_0}} \right) = K \Delta t \quad (3.1)$$

將上式代回(2.7)式求得入滲能力，此時入滲率等於入滲能力 ($f_t = f^*$)。

情形(b)：不發生積水

如圖 3-1(b)所示，在 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 內不發生積水，則入滲能力大於降雨強度 ($f_{t_0}^* > I_{t_0}$ 且 $f_{t_0+\Delta t}^* > I_{t_0}$)，此時入滲率等於降雨強度。由(2.7)式計算 t_0 之入滲能力，假設入滲能力大於降雨強度，依照質量守恆定律，則入滲量等於降雨量則 $t_0 + \Delta t$ 時刻之累積入滲深度為：

$$F_{t_0+\Delta t} = F_{t_0} + I_{t_0} \Delta t \quad (3.2)$$

情形(c)：時間間距內發生積水

如圖 3-1(c)所示，在 t_0 至 $t_0 + \Delta t$ 時間間距內發生積水，在 t_0 時入滲能力大於降雨強度 ($f_0^* > I_0$)，但 $t_0 + \Delta t$ 時則相反 ($f_{t_0+\Delta t}^* < I_{t_0}$)，表示在時間間距內 t_p 時刻發生積水。在 t_p 時入滲能力等於降雨強度 ($f_t^* = I_t$)，由(2.6)式可求得發生積水時刻之累積入滲深度為：

$$F_p = \frac{K\psi\Delta\theta}{I_{t_0} - K} \quad (3.3)$$

上述 3 種情形下，累積入滲深度可利用以下通式表示：

$$F_{t+\Delta t} - F_t = K\Delta t + \psi\Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F_{t+\Delta t} - F_t}{\psi\Delta\theta + F_t} \right), t = 1, 2, 3 \dots M_t \quad (3.4)$$

式中， Δt 為時間間距， t 為時間， M_t 為累積入滲深度的總時間間距。以情形 (a) 為例，令 $T = t_0$ 且 $\Delta t = t - t_0$ ，利用下式疊代可求得累積入滲深度為：

$$F_t^{M+1} = Kt + \psi\Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F_t^M}{\psi\Delta\theta} \right), M = 1, 2, 3 \dots \quad (3.5)$$

$$\left| \frac{F_t^{M+1} - F_t^M}{F_t^{M+1}} \right| \leq 10^{-6} \quad (3.6)$$

式中， M 為疊代次數，並設定收斂條件為 10^{-6} 。

3.1.2 降雨入滲模式之驗證

假設一降雨事件發生於砂質壤土(Sandy loam)，土壤之相關入滲參數如表 3-1 所示，其中水力傳導係數 K 為 1.09 cm/hr，濕鋒吸力水頭 ψ 為 11.01 cm，所模擬之降雨資料如表 3-2 所示。

模式計算與 Chow et al.(1988)入滲率和累積入滲深度之比較結果分別如圖 3-2(a)與圖 3-2(b)所示。由圖 3-2(a)得知，降雨事件開始時雨量可完全入滲至土壤，

當時間為 60 min 時入滲能力低於降雨強度而積水開始發生直至 140 min 積水結束。圖 3-2(b)可見累積降雨量與入滲量之關係，模擬結果與 Chow et al.(1988)之結果相吻合，由上述模擬結果可驗證降雨入滲模式建立之正確性。

3.2 地下水位計算模式之建立與驗證

3.2.1 地下水位計算模式之建立

以完全顯示有限差分法(Fully explicit finite difference method)將(2.13)式離散並整理後可表示為：

$$h_i^{m+1} = h_i^m + \left\{ \frac{K \Delta t}{S_y} \left[\cos \beta' \left(\frac{h_{i+1}^m - h_{i-1}^m}{2\Delta x} \frac{h_{i+1}^m - h_{i-1}^m}{2\Delta x} + h_i^m \frac{h_{i+1}^m - 2h_i^m + h_{i-1}^m}{(\Delta x)^2} \right) + \sin \beta' \left(\frac{h_{i+1}^m - h_{i-1}^m}{2\Delta x} \right) \right] + \frac{f \cos \beta' \Delta t}{S_y} \right\} \quad (3.7)$$

式中， i 為空間格網座標； m 為時間格網座標； t 為時間； Δx 為空間間距； Δt 為時間間距； f 為每個時間間距由 Green-Ampt 入滲公式計算所得之入滲率，亦即表示計算地下水位變化將考量降雨入滲之效應。

3.2.2 地下水位計算模式之驗證

本小節以一簡單案例進行驗證，如圖 2-4 所示，假設左側邊界條件水位為零 ($h(0,t)=0$)；右側邊界為零流量邊界 ($\frac{\partial h(L,t)}{\partial x}=0$)；起始條件為：

$$H_0(x) = h(x,0) = 2\sqrt{x} \quad (3.8)$$

相關參數設計如下：水力傳導係數 K 為 2.315×10^{-3} m/s；比流率 S_y 為 0.15；土層長度 L 為 5000 m；空間間距 Δx 為 100 m；時間間距 Δt 為 0.5 hr；岩盤傾斜角度 0° ；不考慮額外入滲，即入滲率 $f=0$ 。本案例之解析解(Bear, 1972)為：

$$h(x,t) = \frac{h_i(x)}{1 + \frac{1.12Kh_i(L)t}{S_y L^2}} \quad (3.9)$$

以第 24hr 與第 48hr 時之解析解與數值計算結果進行比較，其結果分別如圖 3-3(a)與 3-3(b)所示，由圖可知數值計算結果與解析解相符。

3.3 擬似三維邊坡穩定模式之建立與驗證

以二維的角度並無法完整考量地形變化及非均勻土壤分布對邊坡穩定之影響，圖 3-4 所示為本研究以二維簡化 Bishop 切片法為基礎，藉以發展擬似三維邊坡穩定模式概念示意圖。

3.3.1 擬似三維邊坡穩定模式之建立

如圖 3-5 所示，假設一三維邊坡之破壞面，為一圓球與之相切之球面，給定圓球之球心與半徑，若切面距離球心長度為 d ，則可經由截面圓半徑公式求得各切面之圓半徑：

$$r = \sqrt{R^2 - d^2} \quad (3.10)$$

其中， R 為球半徑； r 為圓半徑。經由上式決定邊坡內與圓球相切之各二維切面後，以(2.23)式簡化 Bishop 切片法計算其安全係數 FS_y ，其中地下水位高度將土壤切片分為水位上未飽和與水位下飽和 2 部分(見圖 2-9)，各切片土重 W 為未飽和部分(W_u)與飽和部分(W_s)之總和，相關算式如下所示：

$$W_u = \gamma(h' - h'_w)b_n \quad (3.11)$$

$$W_s = \gamma_{sat}h'_wb_n \quad (3.12)$$

$$W = W_u + W_s \quad (3.13)$$

其中， γ 為土壤單位重； γ_{sat} 為土壤飽和單位重； h' 為切片平均高度； h'_w 為切片中含水之平均高度； b_n 為切片寬。

將各參數求得後代入(2.23)式進行疊代，設定收斂條件為 10^{-5} ，可得各切面之安全係數 FS_y 。

如圖 3-6 所示，將各切面之安全係數 FS_y 加權可得三維邊坡之安全係數 FS 。本研究考慮 2 種加權法，一為切面弧長加權法(見(3.14)式)，二為切面面積加權法(見(3.15)式)：

$$FS = \frac{\sum(FS_y \times r'_n)}{\sum(r'_n)} \quad (3.14)$$

$$FS = \frac{\sum(FS_y \times A'_n)}{\sum(A'_n)} \quad (3.15)$$

其中， FS 為擬似三維邊坡之安全係數； FS_y 為各切面之安全係數； r'_n 為各切面之破壞弧長(如圖 3-7(a)所示)； A'_n 為各切面之破壞面積(如圖 3-7(b)所示)。

模式計算流程如圖 3-8 所示，降雨起始時，累積入滲深度為零($F_t = 0$)，降雨延時內時間 t 累積入滲深度與入滲能力 f_t^* 可由 Green-Ampt 入滲公式解得，並判斷時間間距內是否發生積水(如圖 3-1 所示)，將土壤之入滲率代入一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式求得地下水位分布，三維滑動土體沿 y 方向等距切分 N_y 片切面後，將水重與孔隙水壓因子加入簡化 Bishop 切片法計算各切面之安全係數 FS_y ，並假設各切面間無任何作用力，再以權重比例求得該時刻之擬似三維邊坡之安全係數 FS ，若模擬時間未結束則進行下一時間間距之計算流程。

3.3.2 擬似三維邊坡穩定模式之驗證

利用 Slope 2000(Cheng, Y. M., Dept. of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic Univ., Hong Kong.)與本研究所發展之模式進行比對。假設一均

勻 30° 坡面與坡高為 8 m 之邊坡，其坡趾座標(0,0,0)，破壞面球心座標為(5,0,12) 並考量 3 種不同半徑 $R=10,13,15$ m，形成 3 種不同破壞形式分別為坡面破壞 (Slope circle)、坡趾破壞(Toe circle)、坡底破壞(Midpoint circle)，其破壞示意圖如圖 3-9 所示。土壤參數設計如下：土壤單位重 γ 為 18.0 KN/m^3 ；土壤凝聚力 c' 為 0.5 KN/m^2 ；土壤摩擦角 ϕ' 為 30° ； y 方向切面 15 面；單位面上共切片 30 片，暫不考慮地下水位進行模擬。

安全係數計算模擬結果分別與簡化 Bishop、簡化 Janbu 與 Morgenstern-Price 等 3 種三維模式進行比較，3 種三維模式中將土體切割為土條後，並分別基於各方法假設下考慮三方向之力與力矩平衡，結果如表 3-3 所示，雖本模式不考慮各切面間相互作用力，但本模式與上述 3 種三維模式所得之安全係數 FS 結果相近，其結果可驗證模式之正確性。

以前述案例之坡趾破壞為例，進一步改變切面數量 N_y 探討對安全係數 FS 之影響，圖 3-10 為弧長加權法與面積加權法之比較結果。由圖 3-10 可得知面積加權法於切面約 15 面後趨於穩定。相較於弧長加權法，面積加權法較為穩定且較接近前述 3 種三維模式計算結果，故本研究使用面積加權法進行後續案例之模擬。



表 3-1 Green-Ampt 土壤入滲相關係數

Soil class 土壤分類	Porosity 孔隙率 η	Effective porosity 有效孔隙率 θ_e	Wetting front soil suction head 濕峰吸力水頭 ψ (cm)	Hydraulic conductivity 飽和水力傳導係數 K (cm/hr)
Sandy loam 砂質壤土	0.453	0.421	11.01	1.09

資料來源: Rawls, Brakensiek and Miller(1983)

表 3-2 驗證案例降雨事件資料

Time (min)	Rainfall		
	Incremental (cm)	Cumulative (cm)	Intensity (cm/hr)
0		0.00	1.08
10	0.18	0.18	1.26
20	0.21	0.39	1.56
30	0.26	0.65	1.92
40	0.32	0.97	2.22
50	0.37	1.34	2.58
60	0.43	1.77	3.84
70	0.64	2.41	6.84
80	1.14	3.55	19.08
90	3.18	6.73	9.90
100	1.65	8.38	4.86
110	0.81	9.19	3.12
120	0.52	9.71	2.52
130	0.42	10.13	2.16
140	0.36	10.49	1.68
150	0.28	10.77	1.44
160	0.24	11.01	1.14
170	0.19	11.20	1.02
180	0.17	11.37	

資料來源: Chow, Maidment and Mays(1988)

表 3-3 本研究與 3 種三維模式之安全係數比較結果彙整表

破壞形式	球體半徑 R	本研究 弧長加權法	本研究 面積加權法	簡化 Bishop 三維模式 (Slope 2000)	簡化 Janbu 三維模式 (Slope 2000)	Morgenstern-Price 三維模式 (Slope 2000)
坡面破壞	10	1.2817	1.2749	1.3207	1.2627	1.3179
坡趾破壞	13	1.5345	1.5733	1.6771	1.5282	1.6757
坡底破壞	15	1.7839	1.8420	1.9828	1.7747	1.9884



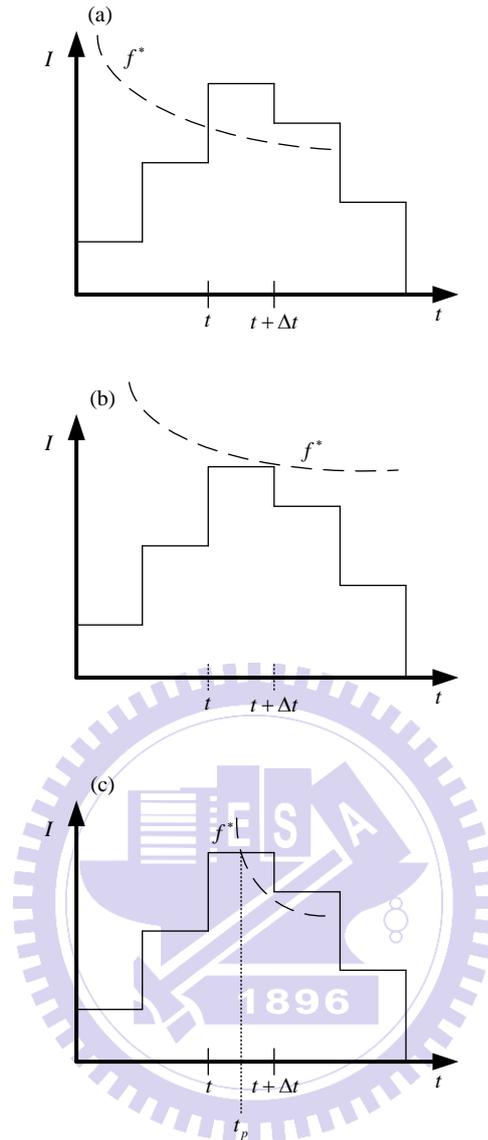


圖 3-1 Green-Ampt 降雨強度與入滲能力關係圖

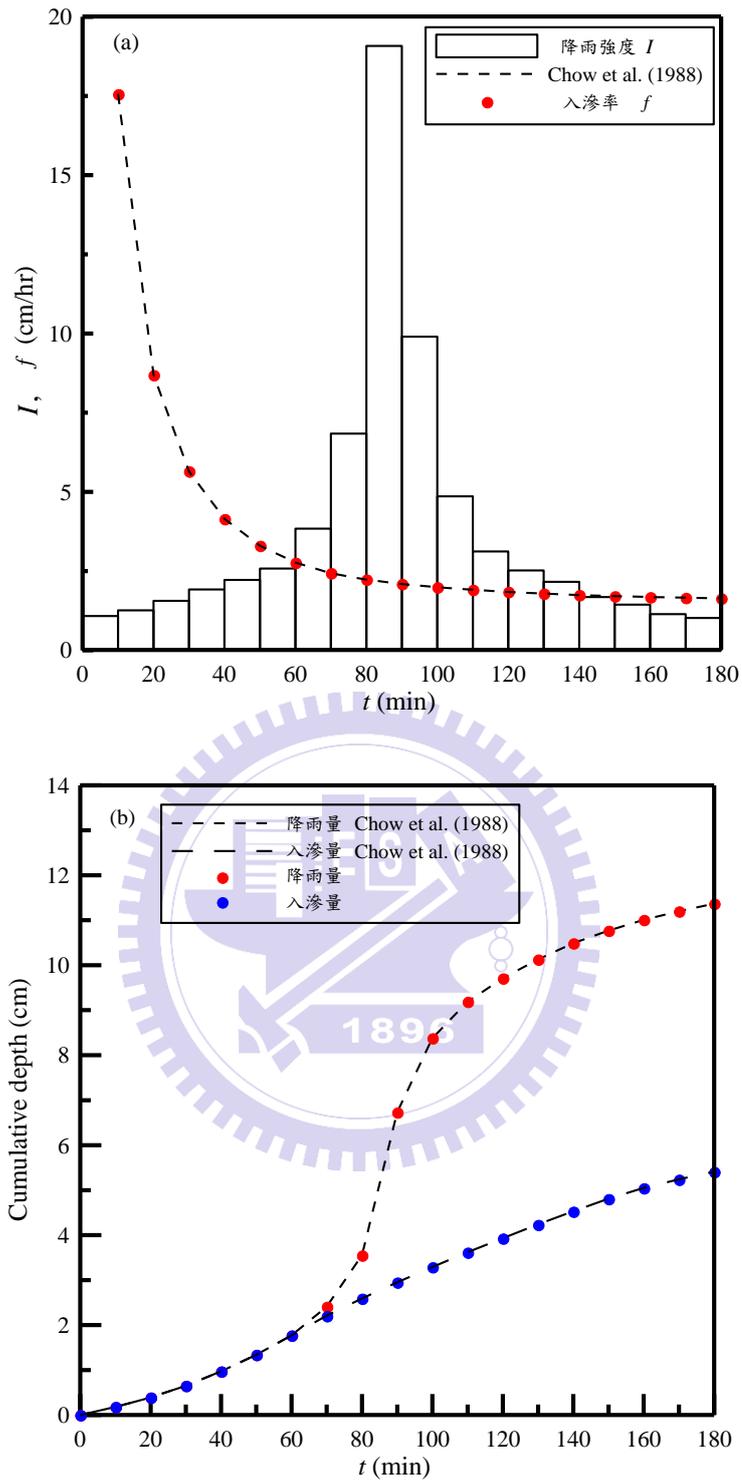


圖 3-2 Green-Ampt 降雨入滲計算驗證結果

(a)降雨組體圖與入滲率 (b)累積降雨量與入滲量

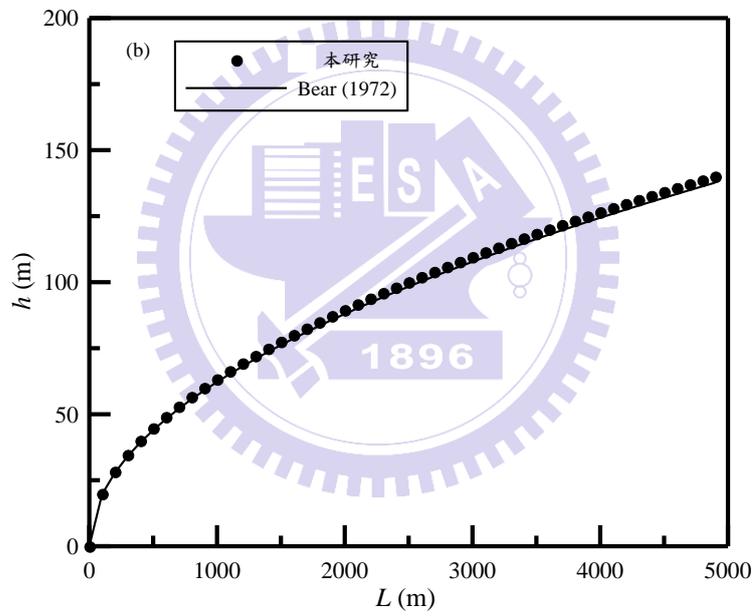
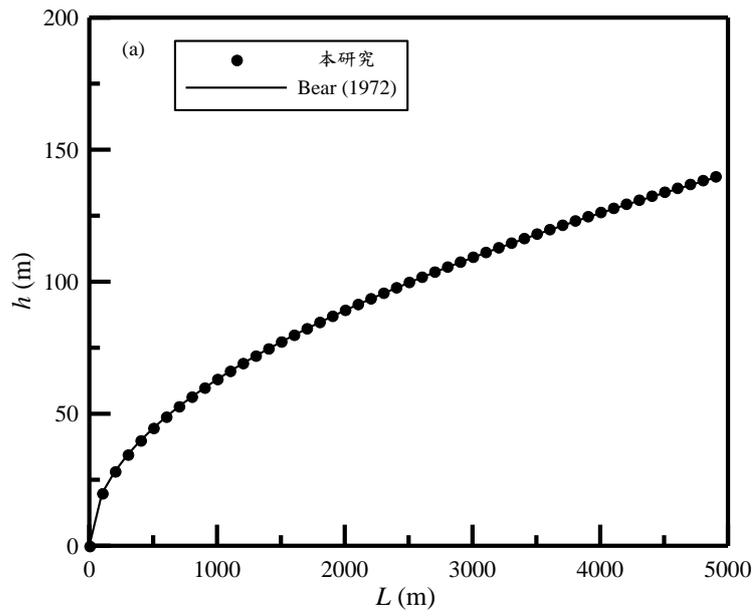


圖 3-3 一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式數值計算驗證結果

(a)第 24 hr (b)第 48 hr

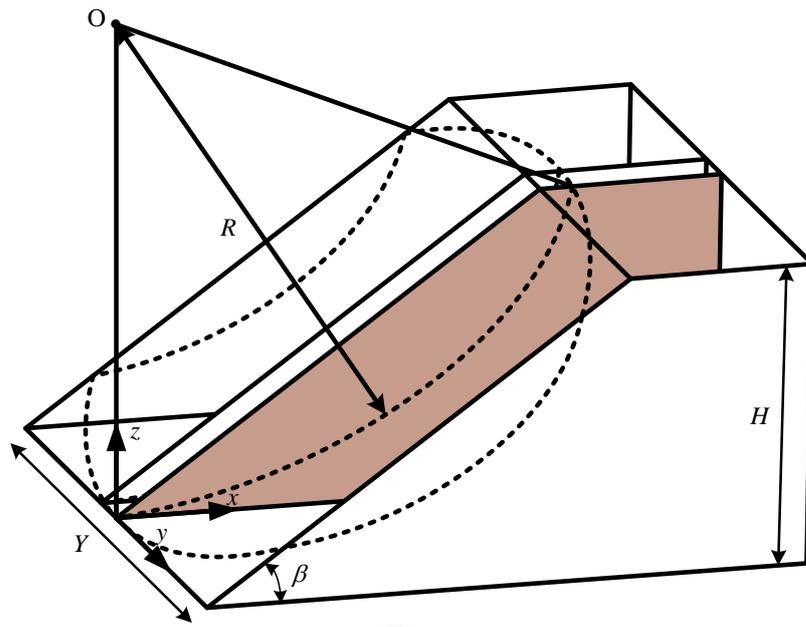


圖 3-4 擬似三維邊坡穩定分析概念示意圖

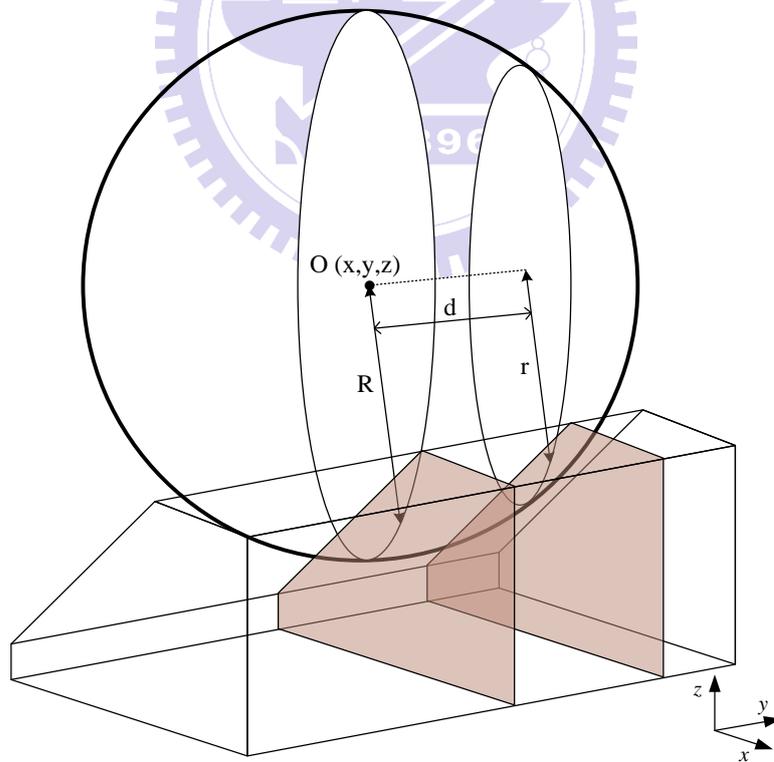


圖 3-5 邊坡與圓球相切之切片示意圖

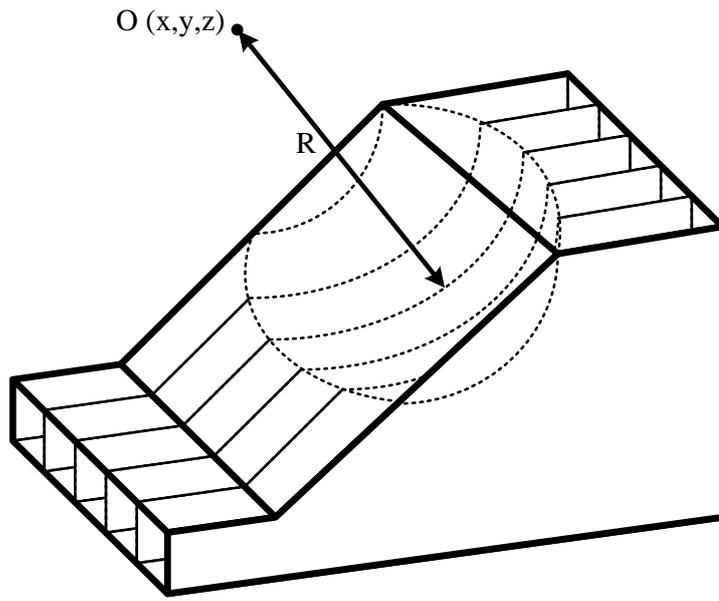


圖 3-6 擬似三維邊坡分析之切面示意圖

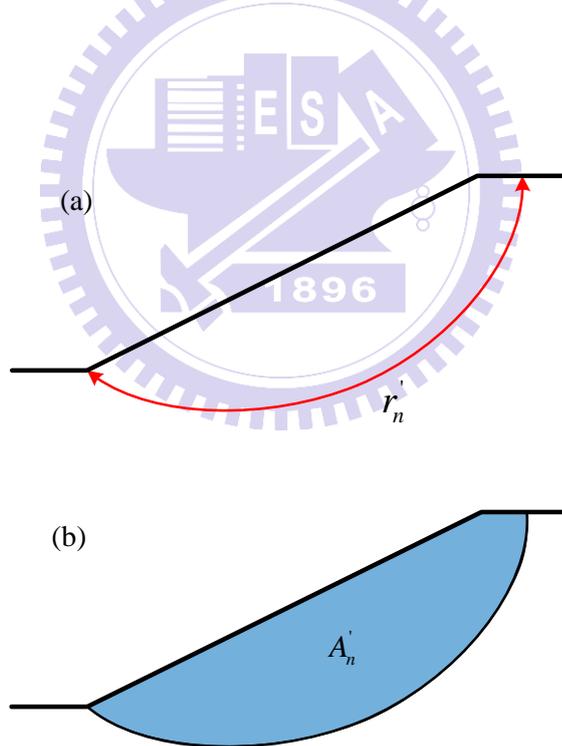


圖 3-7 加權方法示意圖

(a)弧長加權法 (b)面積加權法

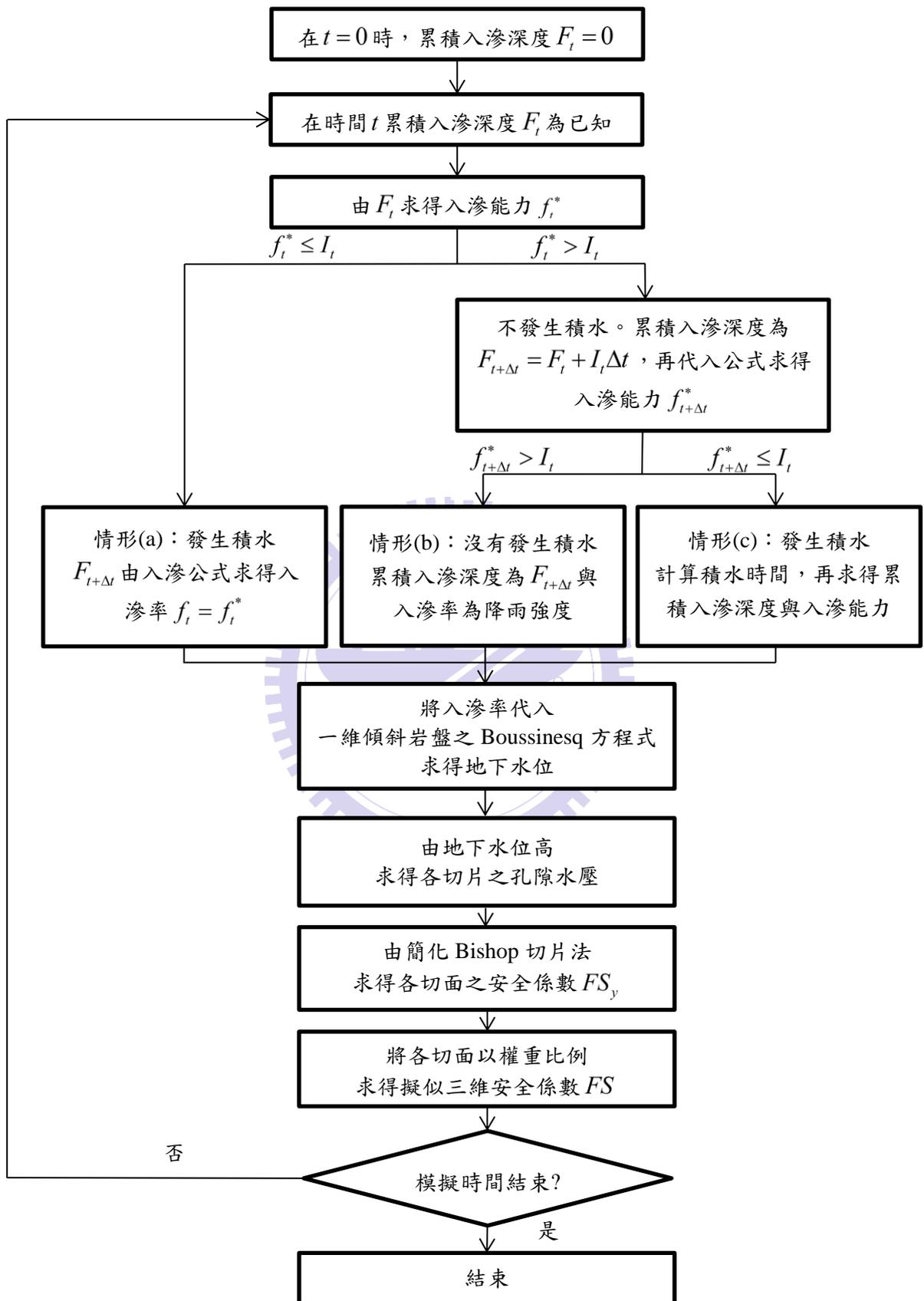


圖 3-8 擬似三維邊坡穩定模式計算流程圖

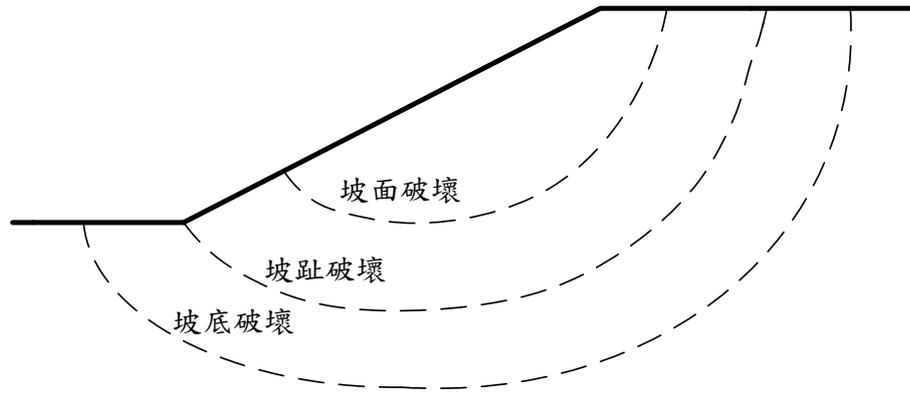


圖 3-9 不同破壞形式之破壞面示意圖

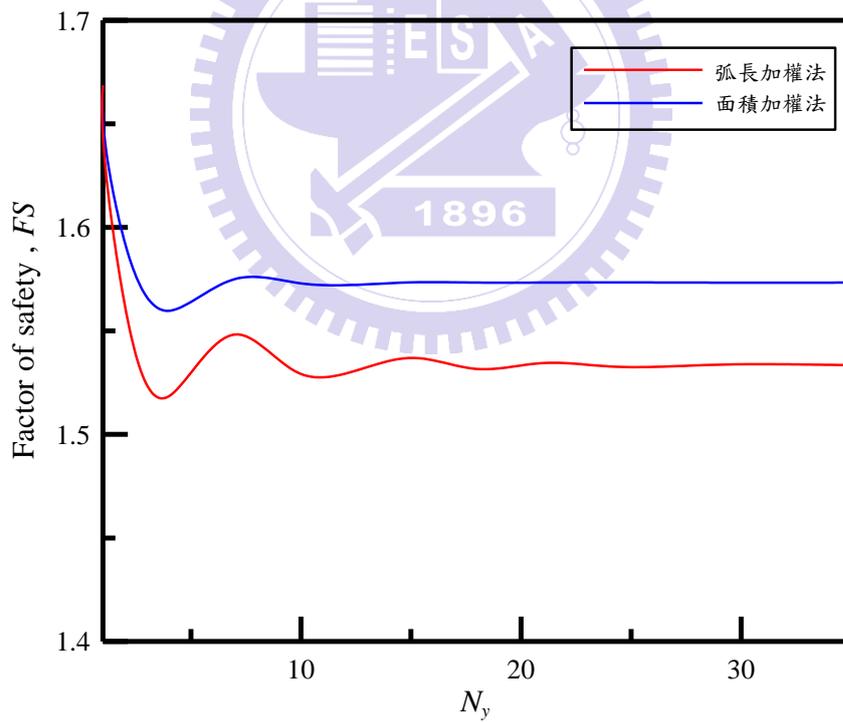


圖 3-10 2 種加權法切面數量對安全係數之影響比較圖

第四章 假設案例之探討分析

本章節將假設案例分為二大部分進行探討，第一部分在均勻地形及土壤條件下，分別考量不同土壤滲透性、雨型條件與岩盤傾斜角度對安全係數 FS 之影響；第二部分在非均勻地形及土壤條件下，分別進行地形之幾何變化與土壤分布變化對安全係數 FS 影響之分析，茲將前述假設案例之模擬條件彙整於表 4-1。

4.1 案例說明

如圖 4-1 所示，考慮一均勻 30° 且坡高為 8 m 之坡面，若假設可能破壞面經過坡趾座標(0,0,0)，設定球心搜尋範圍為座標 x 方向 -5 至 5； z 方向 8 至 18；球半徑 R 為 8 m 至 18 m，搜尋一球心座標及球半徑使安全係數 FS 為最小之可能破壞面，搜尋結果如圖 4-2 所示，其球心為(0,0,16.5)，球半徑 R 為 16.5 m，為簡化計算，以此可能破壞面進行後續模擬。選用土壤參數如下：土壤單位重 γ 為 18.0 KN/m^3 ；土壤凝聚力為 0.5 KN/m^2 ；土壤摩擦角 ϕ' 為 30° ；孔隙率 η 為 0.45；有效孔隙率 θ_e 為 0.4；濕鋒吸力水頭 ψ 為 5.0 cm，另考慮 3 種滲透性土壤，依水力傳導係數 K 大小依序為土壤一($K=10 \text{ cm/hr}$)、土壤二($K=2 \text{ cm/hr}$)與土壤三($K=0.5 \text{ cm/hr}$)，將上述相關土壤參數整理於表 4-2。

4.2 均勻邊坡

4.2.1 土壤滲透性與降雨特性影響

首先考慮均勻型降雨，其降雨強度分別為 5、10、20 與 40 mm/hr，降雨延時為 48 hr，其總降雨量分別為 240、480、960 與 1,920 mm，相關模擬條件如表 4-3 所示。

不同降雨條件下，3 種不同滲透性土壤之安全係數 FS 隨時間變化之模擬結果如圖 4-3 所示。由圖 4-3(a)可知，土壤一在 4 種降雨強度下皆完全入滲，降雨強度越大，地下水位較易上升，將產生較大孔隙水壓致使安全係數 FS 下降。其中降雨強度為 20 與 40 mm/hr，發生安全係數 FS 小於 1 之時間分別為 46hr 與 21hr 25min。

土壤二與土壤三之模擬結果分別如圖 4-3(b)與圖 4-3(c)所示，與圖 4-3(a)比較

結果顯示當水力傳導係數 K 越小安全係數 FS 變化幅度隨之越小，茲將上述 3 種土壤在不同降雨強度下隨時間變化之入滲率繪製於圖 4-4，由圖中可見，水力傳導係數 K 越小之土壤，越易造成積水，降雨較不易入滲，地下水位較不易變動，對安全係數 FS 影響亦較小。反之，水力傳導係數 K 越大之土壤，地表不易造成積水，降雨較易完全入滲，地下水位較易上升使安全係數 FS 較易下降。將 3 種土壤地下水位隨時間變化之情形整理於圖 4-5 至圖 4-8，由圖中則可見前述之現象。

以土壤一為例，二維簡化 Bishop 切片法與本研究所發展之擬似三維模式在不同降雨強度下，安全係數 FS 隨時間變化之模擬比較結果如圖 4-9 所示。由圖 4-9 可知，二維與擬似三維之安全係數 FS 隨時間變化之趨勢相近，整體而言，二維分析結果普遍偏低，原因在於擬似三維為球形破壞，降雨發生後，潛在破壞土體兩側須待地下水位上升至一定高度後始受影響。反之，二維模式僅考慮單一破壞面，因此直接受地下水位上升影響而較早發生破壞。

4.2.2 雨型之影響

此小節進一步探討不同雨型對邊坡穩定之影響，依時間分布降雨特性將雨型分為後退型、中央型、前進型與均勻型 4 類，概念化雨型如圖 1-2 所示。考慮降雨延時 48 hr，總雨量 1,920 mm 之降雨條件，相關模擬條件如表 4-4 所示。

4 種雨型之安全係數 FS 隨時間變化之模擬結果如圖 4-10 所示。其中圖 4-10(a) 顯示土壤一在不同雨型下破壞順序依次為前進型、均勻型、中央型與後退型，其破壞時間分別為 11hr 50min、21hr 25min、22hr 25min 與 31hr 55min。不同雨型下累積入滲量如圖 4-11(a) 所示，圖中可見 4 種雨型皆為完全入滲，即總入滲量相同，而邊坡達破壞之時間順序則為累積入滲量達破壞臨界時之順序。

圖 4-10(b) 顯示土壤二破壞順序依次為均勻型、前進型、中央型與後退型，其破壞時間為 37hr 50min、38hr 5min、42hr 5min 與 45hr 35min。4 種雨型累積入滲量(圖 4-11(b)) 顯示積水效應造成累積入滲量減少，與土壤一破壞時間相較，土壤二破壞時間均較晚。

圖 4-10(c) 顯示土壤三在不同雨型下安全係數 FS 無明顯變化且未有小於 1 之情形發生。由不同雨型累積入滲量(圖 4-11(c)) 顯示，相較於土壤一與土壤二，土壤三之累積入滲量較少，因此安全係數 FS 皆大於 1。

4.2.3 岩盤傾斜角度之影響

本小節選用土壤一，在均勻型降雨強度為 40 mm/hr、降雨延時 48 hr 條件下，分別針對岩盤傾斜角度 0° 、 2.5° 與 5° ，分析其對邊坡穩定之影響，相關模擬條件如表 4-5 所示。

不同岩盤傾斜角度下安全係數 FS 與降雨延時關係圖如圖 4-12 所示，圖中可見，岩盤傾斜角度 0° 、 2.5° 與 5° 時，其形成破壞時間分別為 21hr 25min、18hr 40min 與 15hr 50min。將不同岩盤傾斜角度，在時間 12、24 與 48 hr 時之地下水位分布繪製於圖 4-13(a)至圖 4-13(c)，比較圖 4-13(a)至圖 4-13(c)可知，在相同入滲量下，若岩盤傾斜角度越大，地下水位越易受到水位起始條件而抬升，邊坡可能形成破壞時間則越短。

4.3 非均勻邊坡

4.3.1 地形幾何之影響

如圖 4-14 所示，將坡度 30° 與 45° 以坡高 8 m 之坡面組合成 6 種不同邊坡地形，進行本小節地形幾何影響之探討。相關模擬條件如表 4-6 所示，在均勻型降雨強度為 40 mm/hr、降雨延時 48 hr 條件下，6 種不同邊坡地形分別搜尋其最小安全係數 FS 之破壞面，破壞面分別如圖 4-15 所示。以下說明均勻邊坡分別與凹型邊坡以及凸型邊坡之模擬結果。

(a) 凹型邊坡

凹型邊坡之安全係數 FS 與降雨延時關係圖如圖 4-16 所示，由圖 4-16 可知，相較於 30° 均勻坡， 45° 均勻坡之起始安全係數 FS_i 較小，因坡度越陡其破壞面上之剪應力越大，故降雨發生後易形成破壞。此外，上凹型邊坡與下凹型邊坡兩者皆產生破壞，然上凹型邊坡在破壞面上整體較下凹型邊坡陡，故上凹型邊坡起始安全係數 FS_i 較小，降雨發生後，上凹型邊坡發生破壞時間較下凹型邊坡為早，破壞時間分別為 20hr 10min 與 26hr 50min。

(b) 凸型邊坡

凸型邊坡之安全係數 FS 與降雨延時關係圖如圖 4-17 所示，由圖 4-17 可知，上凸型邊坡中央較陡之土體所佔整體安全係數權重比例較大，故其起始之安全係

數 FS_i 較小，降雨發生後，易產生破壞。進一步比較圖 4-16 與圖 4-17 可知，相較於凹型邊坡，凸型邊坡皆較易產生破壞。

4.3.2 土壤分布之影響

如圖 4-18 所示，將邊坡垂向分為三等分，混合(a)邊坡為中央土壤三，兩側土壤一；混合(b)邊坡為中央土壤一，兩側土壤三，相關模擬條件如表 4-7 所示。

在均勻型降雨強度為 40 mm/hr、降雨延時 48 hr 條件下，土壤分布之安全係數 FS 隨時間變化之模擬結果如圖 4-19 所示，圖中可見混合(a)邊坡與混合(b)邊坡皆發生破壞，其破壞時間分別為 36hr 55min 與 30hr 50min。究其原因，混合(a)邊坡雖滲透性高之土壤(土壤一)比例較多，但皆位於兩側，故佔整體安全係數權重比例較小，則安全係數相對較高。反之，混合(b)邊坡因中央土壤滲透性高，且其佔整體安全係數權重比例較大，故相對較易破壞。



表 4-1 假設案例模擬條件彙整表

		模擬條件
案例一	均勻邊坡	土壤滲透性與降雨特性之影響
案例二		雨型之影響
案例三		岩盤傾斜角度之影響
案例四	非均勻邊坡	地形幾何之影響
案例五		土壤分布之影響

表 4-2 假設案例相關土壤參數彙整表

	單位重 (KN/m ³)	凝聚力 (KN/m ²)	摩擦角 (°)	孔隙率	有效 孔隙率	濕鋒 吸力水頭 (cm)	水力傳導係數 (cm/hr)
	γ	c'	ϕ'	η	θ_e	ψ	K
土壤一	18.0	0.5	30	0.45	0.40	5.0	10
土壤二							2
土壤三							0.5

表 4-3 土壤滲透性與降雨特性之模擬條件彙整表

	土壤種類	降雨強度 (mm/hr)	雨型種類	總降雨量 (mm)	岩盤傾斜角度 (°)
	均勻邊坡	土壤一	5	均勻型	240
10			480		
20			960		
40			1,920		
土壤二		5	240		
		10	480		
		20	960		
		40	1,920		
土壤三		5	240		
		10	480		
		20	960		
		40	1,920		

表 4-4 雨型之模擬條件彙整表

	土壤種類	降雨強度 (mm/hr)	雨型種類	總降雨量 (mm)	岩盤傾斜角度 (°)
均勻邊坡	土壤一	—	後退型	1,920	0
			中央型		
			前進型		
			均勻型		
	土壤二		後退型		
			中央型		
			前進型		
			均勻型		
	土壤三		後退型		
			中央型		
			前進型		
			均勻型		

表 4-5 岩盤傾斜角度之模擬條件彙整表

	土壤種類	降雨強度 (mm/hr)	雨型種類	總降雨量 (mm)	岩盤傾斜角度 (°)
均勻邊坡	土壤一	40	均勻型	1,920	0
					2.5
					5

表 4-6 地形幾何之模擬條件彙整表

地形幾何	土壤種類	均勻降雨 總降雨量 (mm)	坡高 (m)	坡度 (°)	岩盤傾斜角度 (°)
30° 均勻邊坡	土壤一	1,920	8	均勻 30	0
45° 均勻邊坡				均勻 45	
下凹型邊坡				中央 45 兩端 30	
上凹型邊坡				中央 30 兩端 45	
下凸型邊坡				中央 30 兩端 45	
上凸型邊坡				中央 45 兩端 30	

表 4-7 非均勻土壤分布之模擬條件彙整表

土壤分布		均勻降雨總降雨量 (mm)	坡高 (m)	坡度 (°)	岩盤傾斜角度 (°)
皆為 土壤一		1,920	8	30	0
皆為 土壤三					
混合(a)	中央 土壤三 兩側 土壤一				
混合(b)	中央 土壤一 兩側 土壤三				

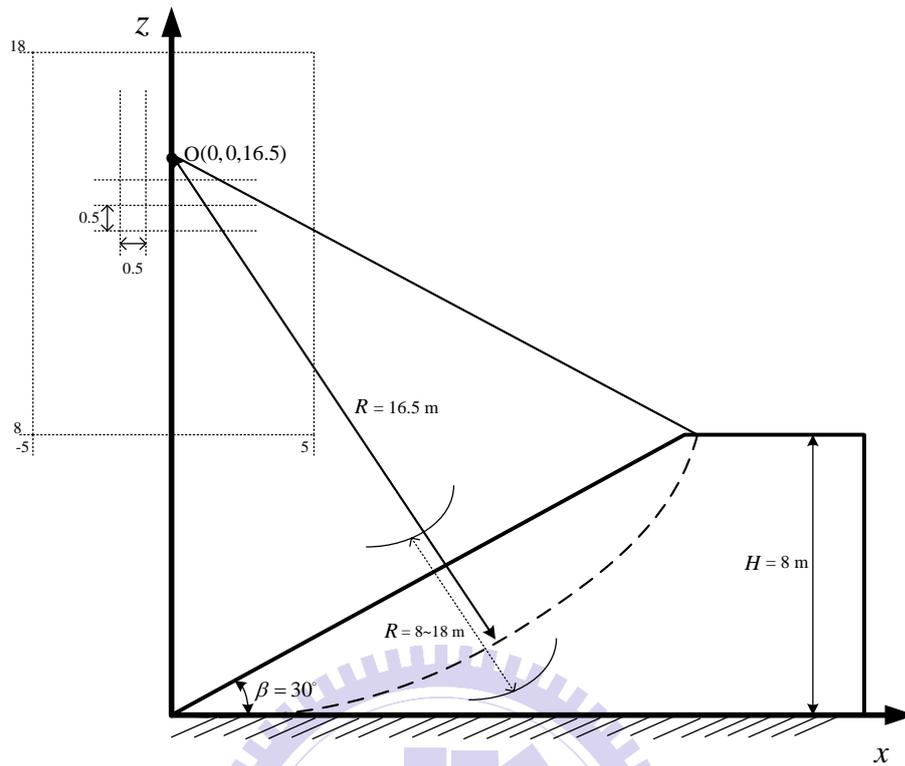


圖 4-1 可能破壞面搜尋之中心面示意圖

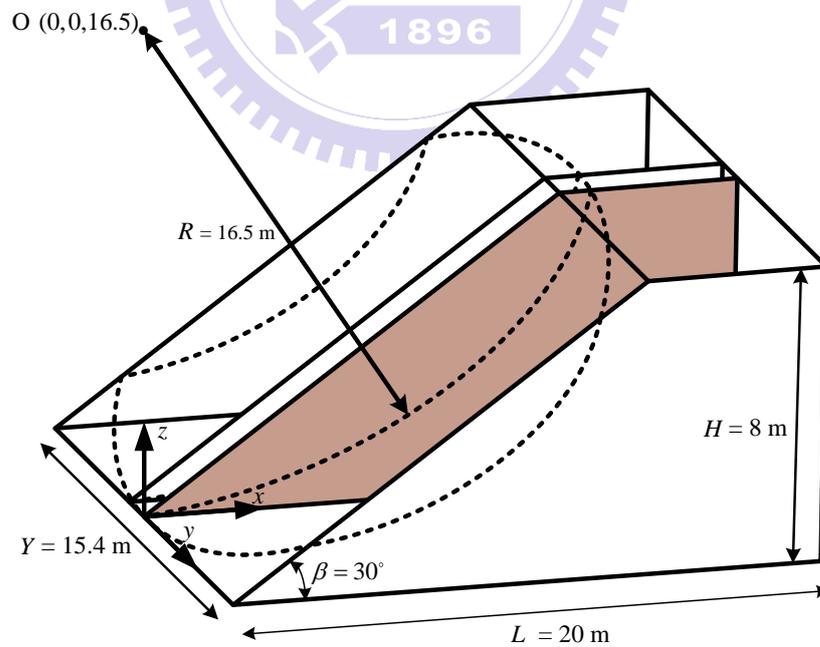


圖 4-2 模擬案例三維邊坡示意圖

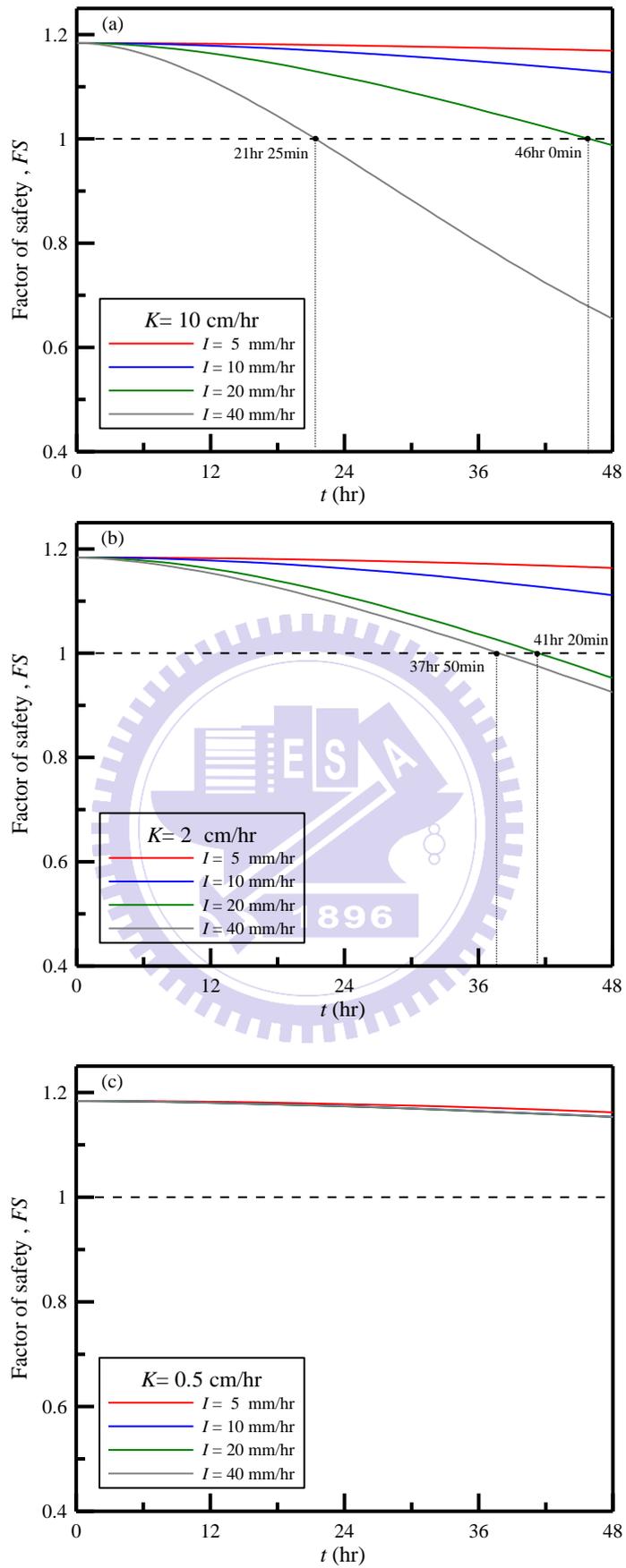


圖 4-3 不同降雨強度下安全係數與降雨延時關係圖(a)土壤一(b)土壤二(c)土壤三

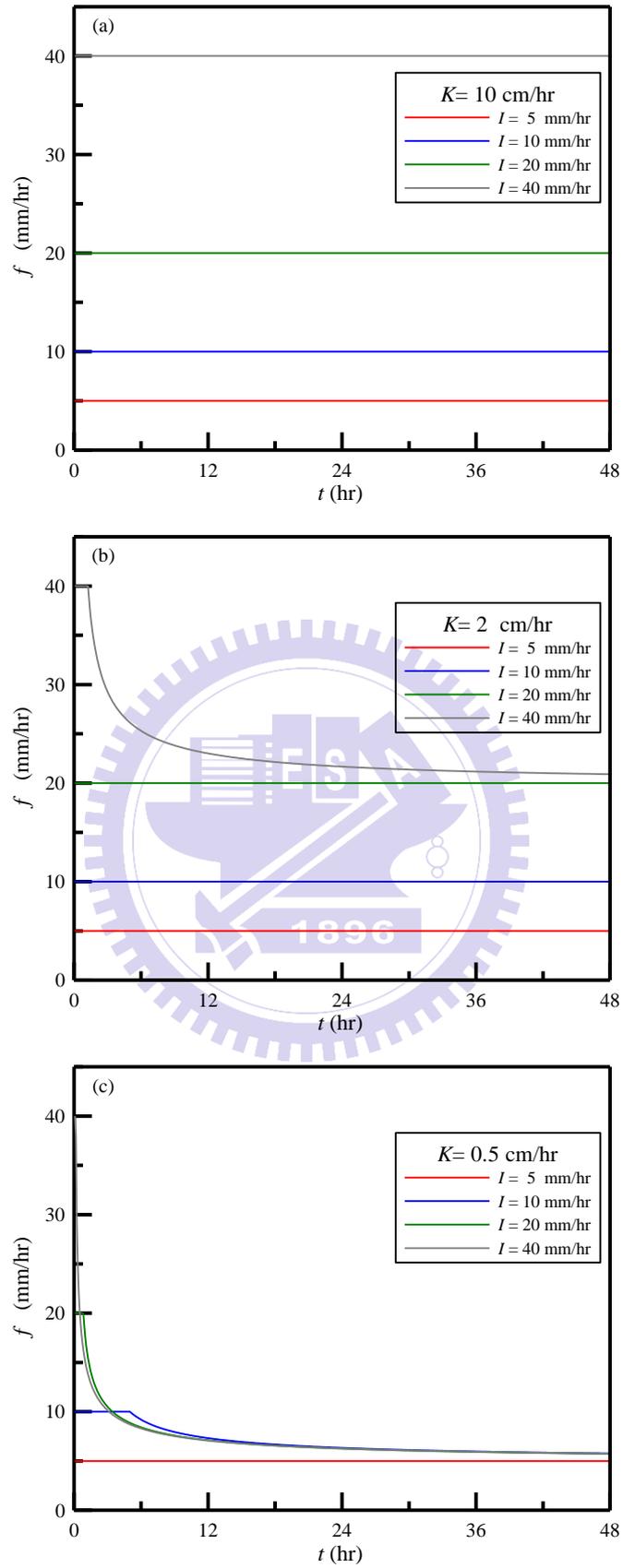


圖 4-4 不同降雨強度下入滲率與降雨延時關係圖(a)土壤一(b)土壤二(c)土壤三

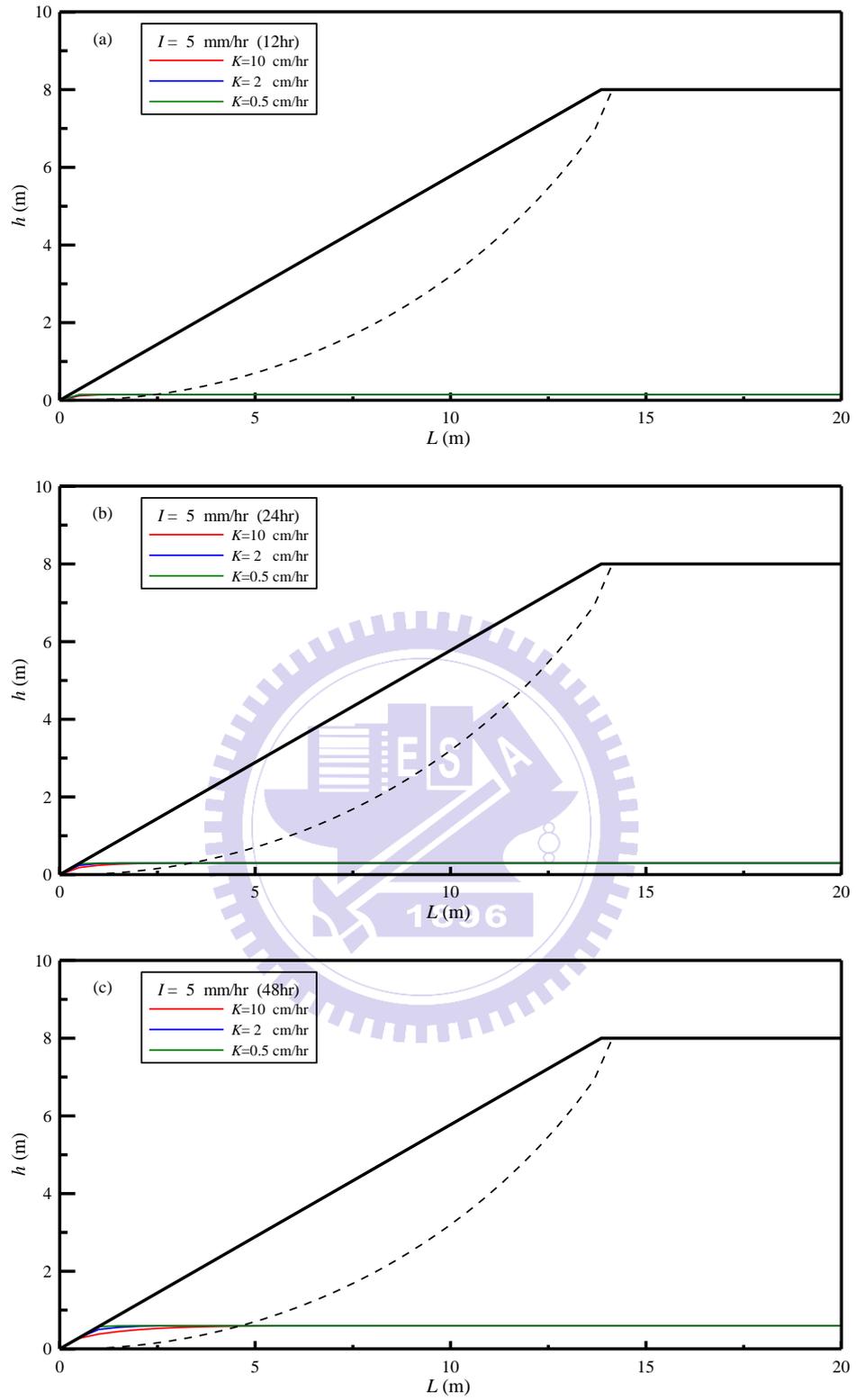


圖 4-5 降雨強度 5 mm/hr 之地下水位分布圖

(a)12 hr (b)24 hr (c)48 hr

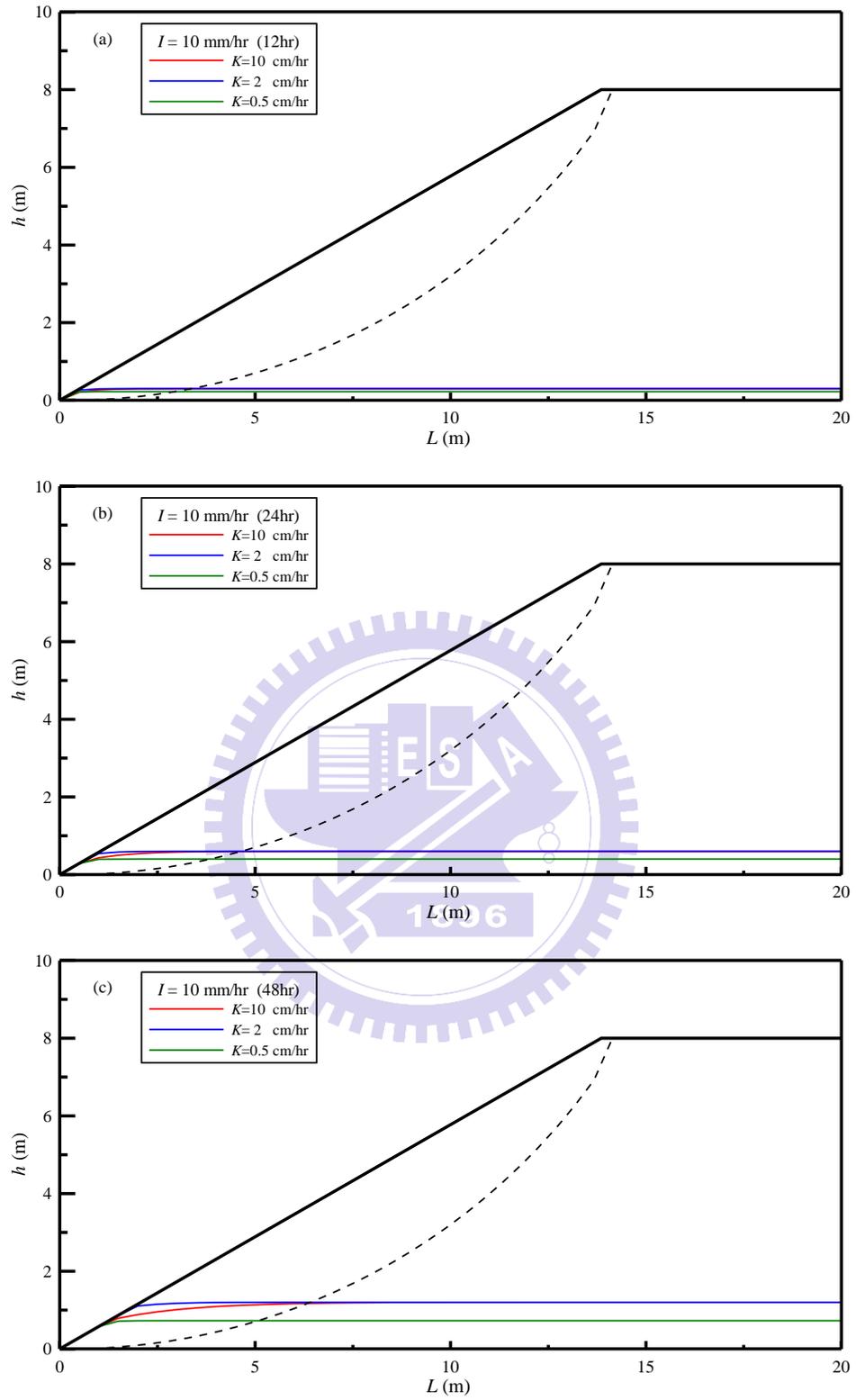


圖 4-6 降雨強度 10 mm/hr 之地下水位分布圖

(a)12 hr (b)24 hr (c)48 hr

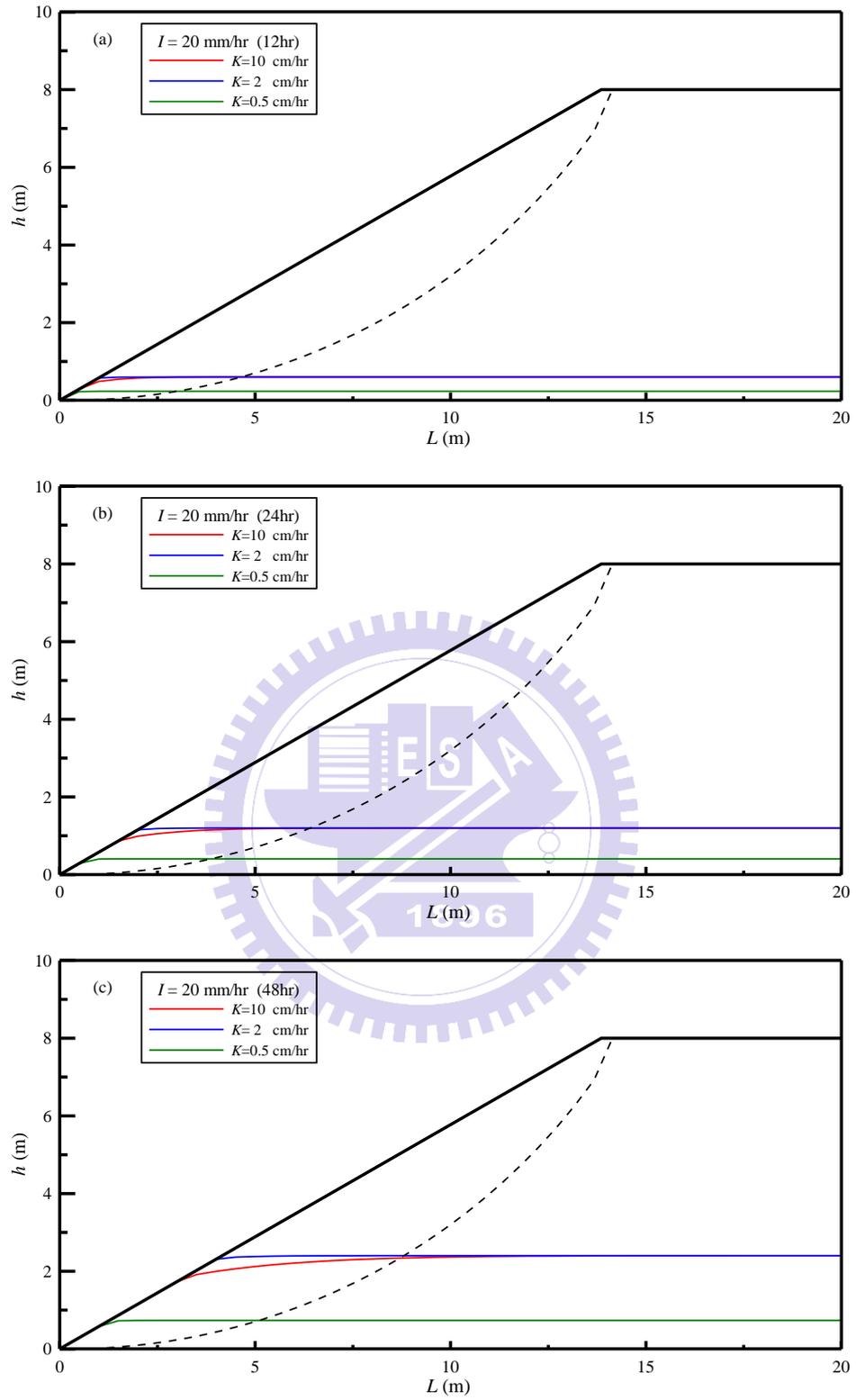


圖 4-7 降雨強度 20 mm/hr 之地下水位分布圖

(a)12 hr (b)24 hr (c)48 hr

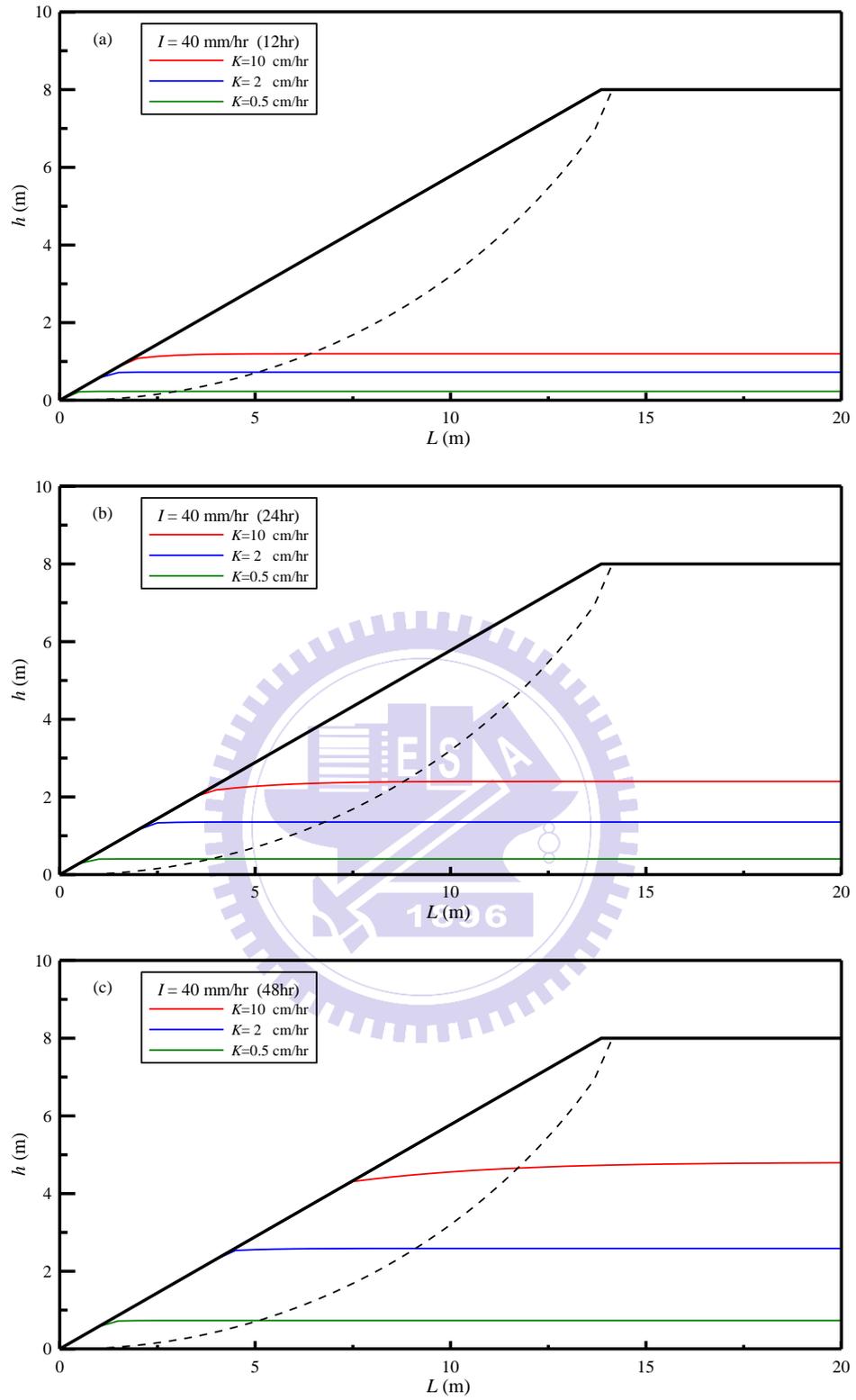


圖 4-8 降雨強度 40 mm/hr 之地下水位分布圖

(a)12 hr (b)24 hr (c)48 hr

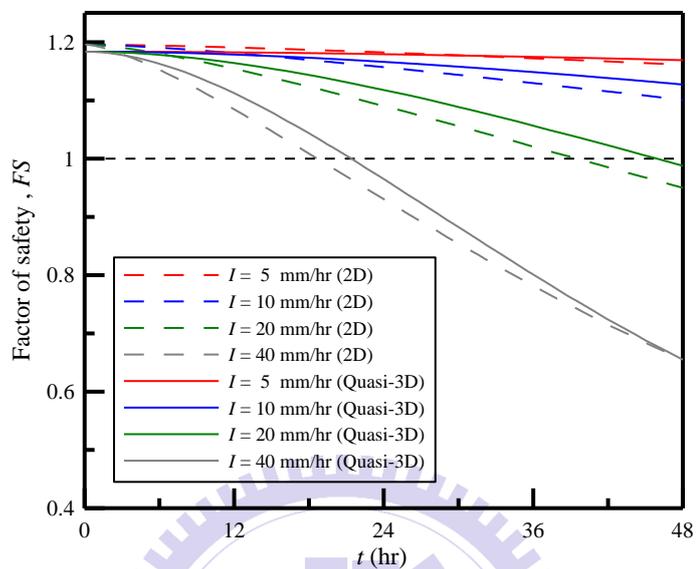


圖 4-9 土壤一在不同降雨強度下二維與擬似三維安全係數比較圖

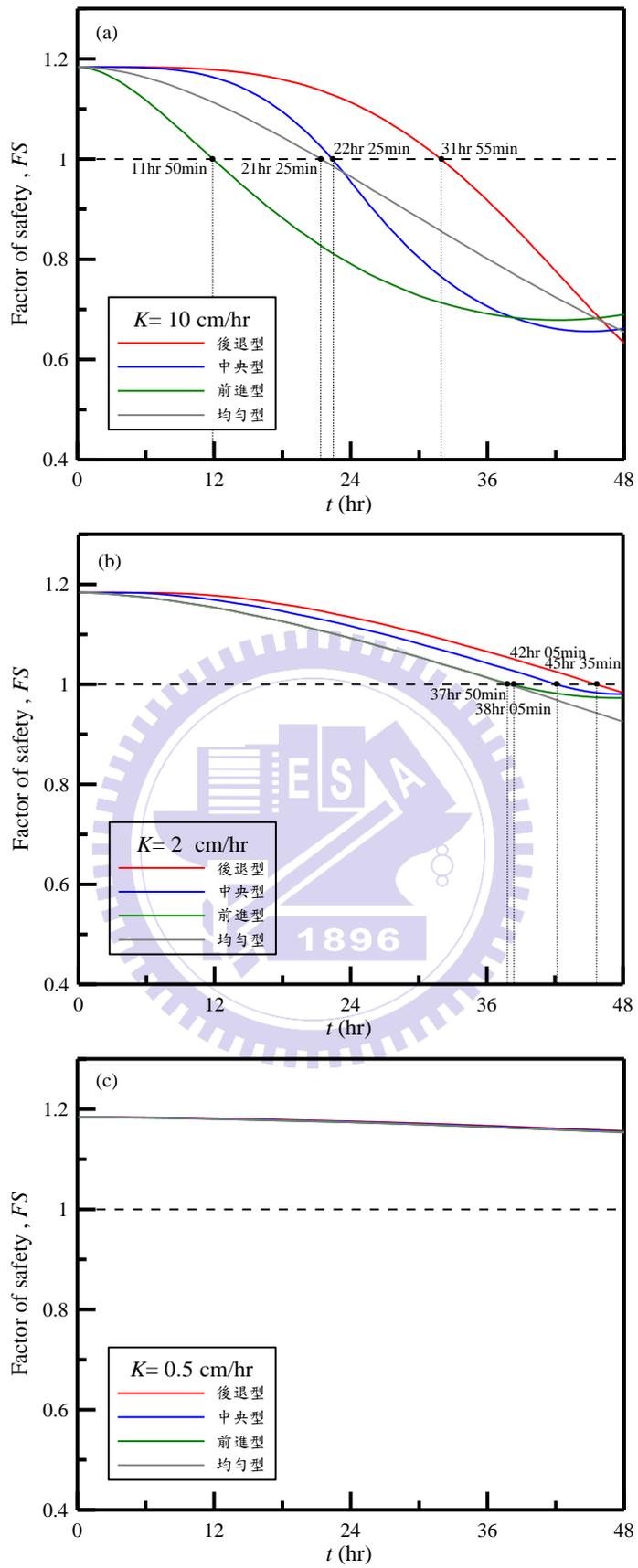


圖 4-10 4 種雨型之安全係數與降雨延時關係圖(a)土壤一(b)土壤二(c)土壤三

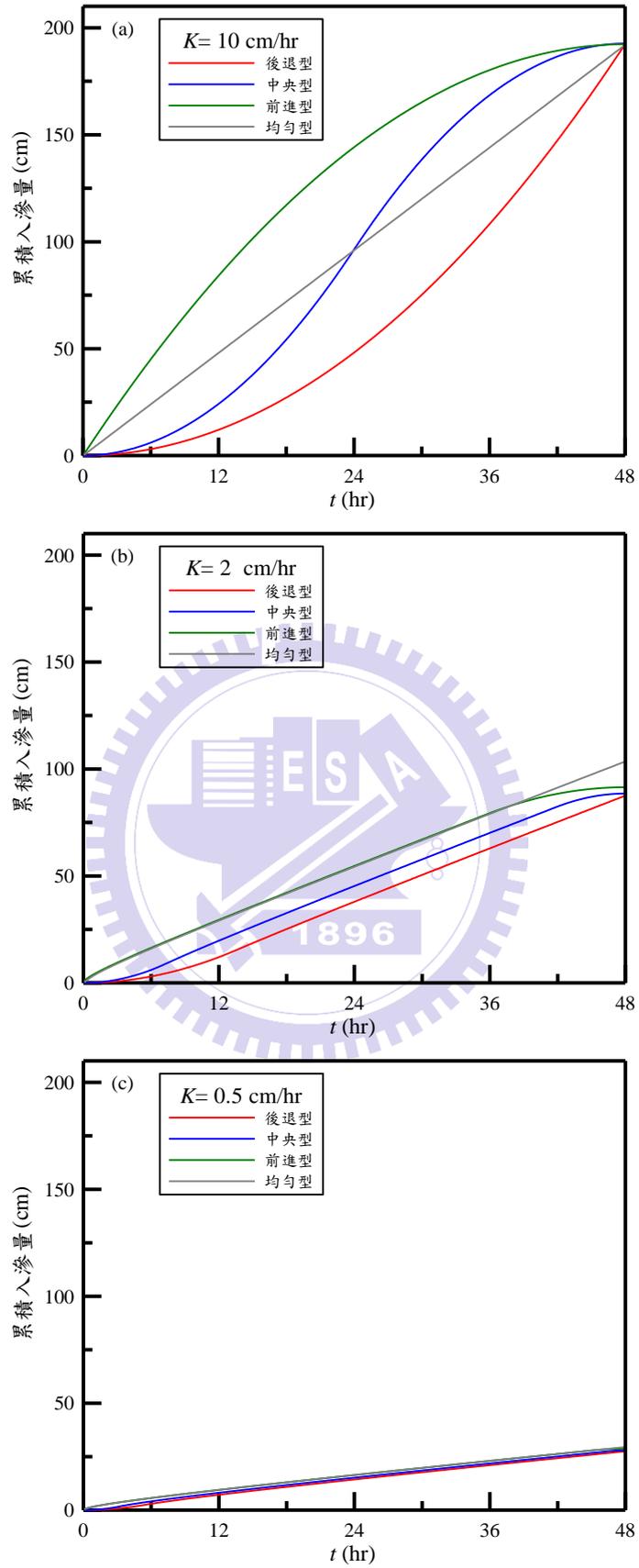


圖 4-11 4 種雨型之累積入滲量與降雨延時關係圖(a)土壤一(b)土壤二(c)土壤三

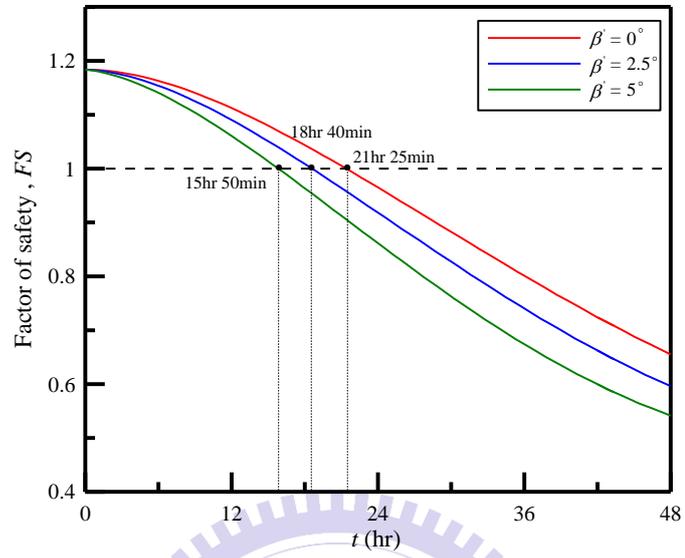


圖 4-12 3 種岩盤傾斜角度之安全係數與降雨延時關係圖

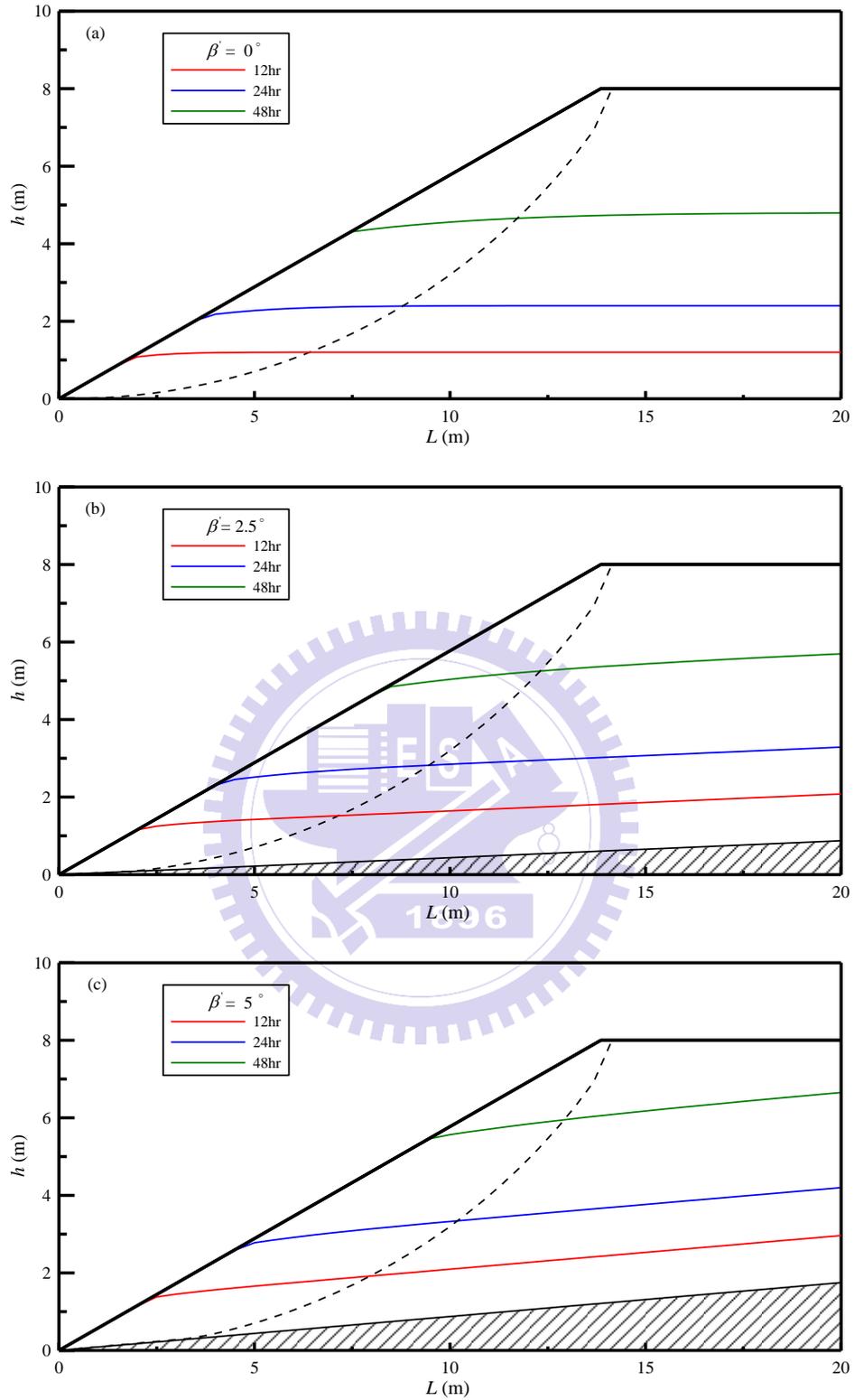
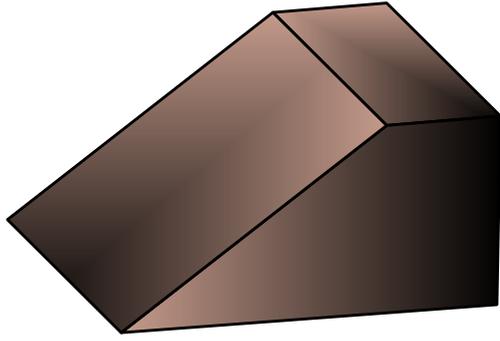
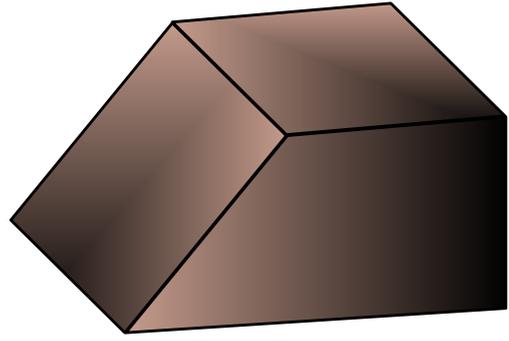


圖 4-13 3 種岩盤傾斜角度之地下水位分布圖

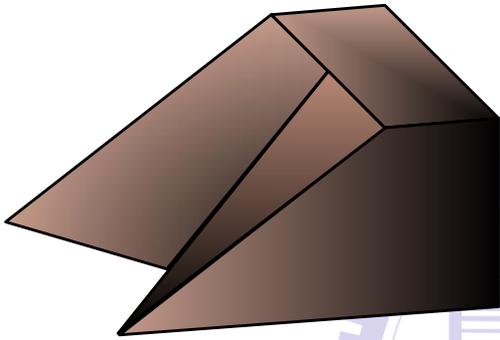
(a)岩盤傾斜 0° (b)岩盤傾斜 2.5° (c)岩盤傾斜 5°



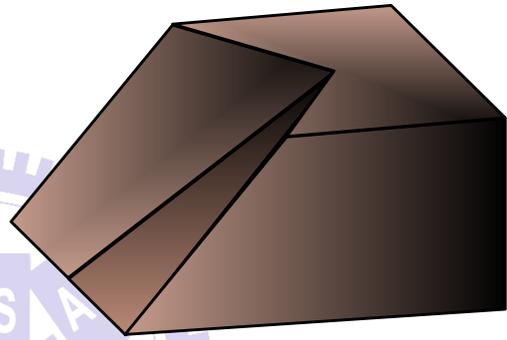
30° 均匀边坡



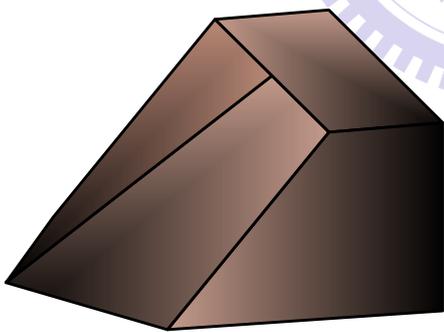
45° 均匀边坡



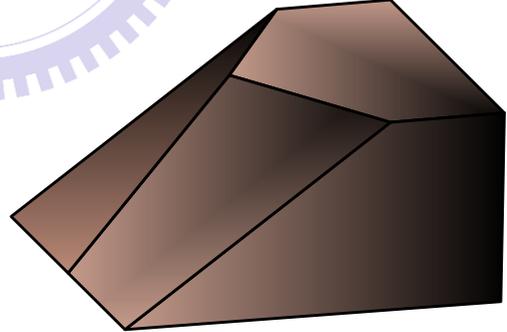
下凹型边坡



上凹型边坡

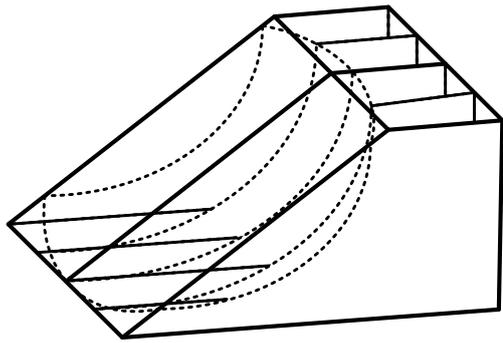


下凸型边坡

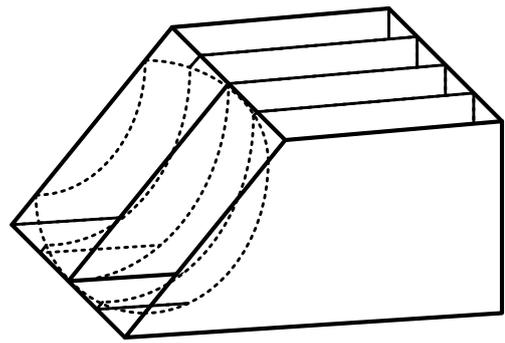


上凸型边坡

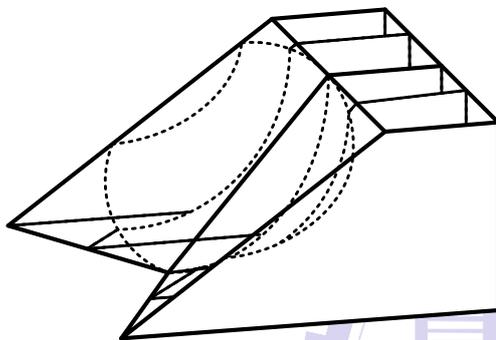
圖 4-14 6 種边坡地形示意圖



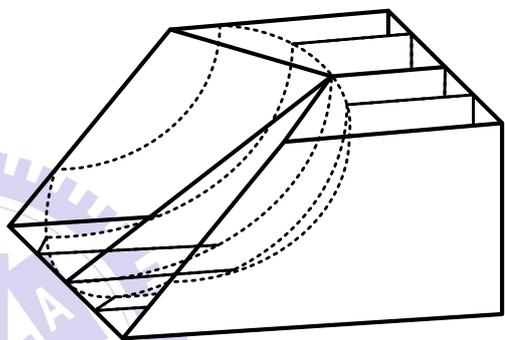
30° 均匀边坡



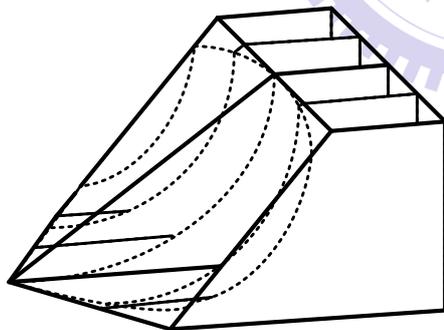
45° 均匀边坡



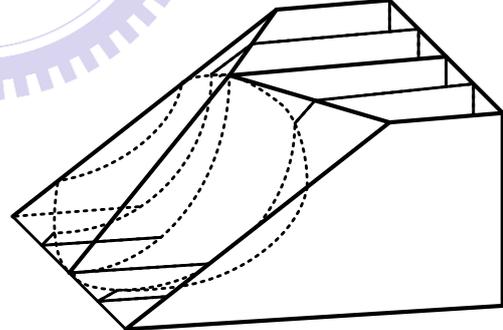
下凹型边坡



上凹型边坡



下凸型边坡



上凸型边坡

圖 4-15 6 種边坡地形坡壞面示意圖

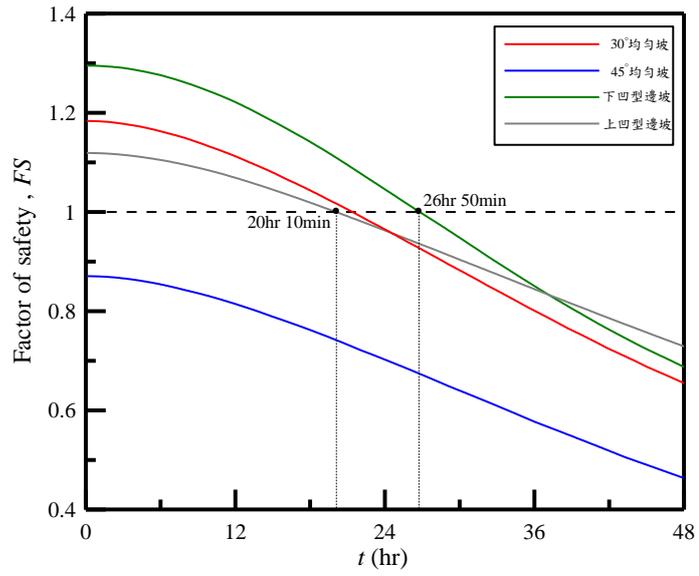


圖 4-16 凹型邊坡之安全係數與降雨延時關係圖

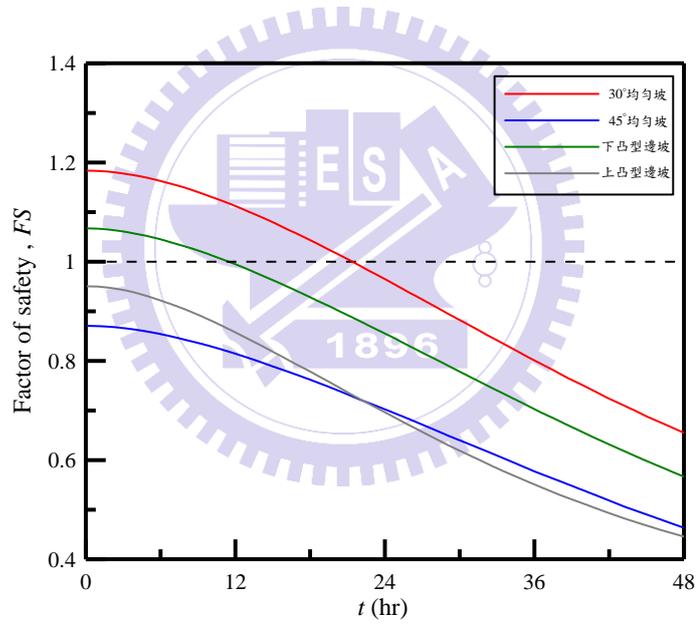


圖 4-17 凸型邊坡之安全係數與降雨延時關係圖

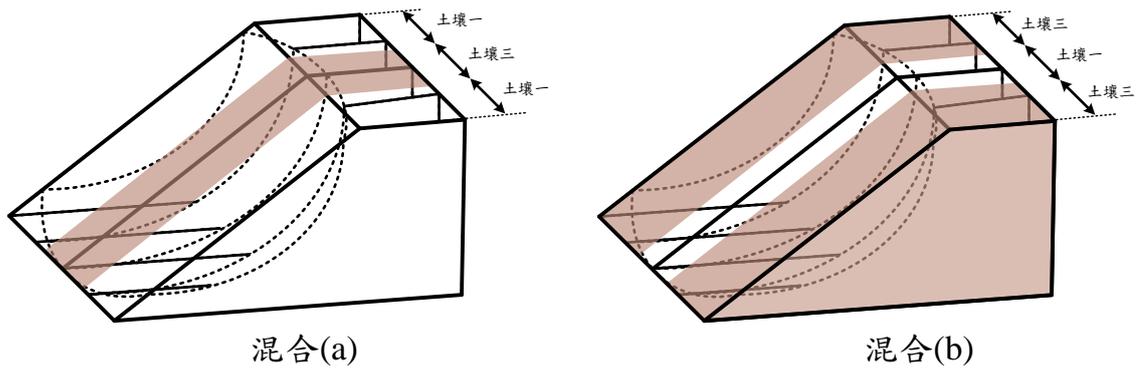


圖 4-18 垂直分層土壤分布示意圖

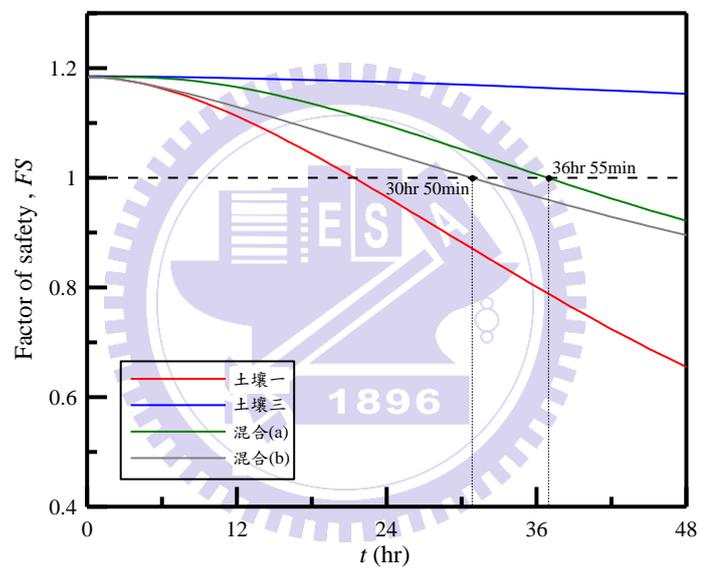


圖 4-19 不同土壤分布之安全係數與降雨延時關係圖

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究採用 Green-Ampt 入滲理論計算土壤入滲率與累積降雨量，並以一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式計算地下水位因降雨隨時間之變化，將地下水位影響土壤之孔隙水壓結合簡化 Bishop 切片法發展一擬似三維邊坡穩定模式，藉以探討在不同水文與地文條件下對邊坡穩定之影響。綜整本研究成果，結論可歸結如下所述：

1. 降雨強度越大，土壤入滲率越大，地下水位較易上升，將產生較大孔隙水壓致使安全係數 FS 下降。
2. 在相同總降雨量下，雨型為均勻型與前進型破壞時間較早，而後退型較晚產生破壞。
3. 在相同入滲量下，岩盤傾斜角度越大，地下水位越易受到抬升，邊坡可能形成破壞時間則越短。
4. 陡坡相較於緩坡較易產生破壞，其中凹型邊坡相較於凸型邊坡較為穩定。

5.2 建議

本研究針對未來可進一步探討之方向陳列於下以供參考：

1. 本研究僅考慮地下水位變化，未來可進一步結合三維地下水模擬，除考慮側向水流之影響外，可更完整展現降雨入滲對邊坡穩定之影響。
2. 未來可嘗試考慮降雨所產生積水深度對邊坡穩定之影響。
3. 可考慮其他外在因素，如植生、加載或保護工法等，對邊坡穩定之影響。
4. 未來可將本模式應用於實際案例，以了解模式之適用性。

參考文獻

- 施國欽 (2000), 「大地工程學—基礎工程篇」, 文笙書局
- 陳弘恩 (2005), 「降雨引發坡地淺崩塌模式之建立與探討」, 國立交通大學土木工程學研究所碩士論文。
- 范佐憲 (2007), 「廢棄掩埋場現地試驗與三維穩定分析」, 國立交通大學土木工程學研究所碩士論文。
- 林威甫 (2010), 「降雨引發淺崩塌機率模擬—以甲仙地區為例」, 國立嘉義大學土木與水資源工程學研究所碩士論文。
- 黃群玲 (2010), 「考量降雨入滲於河岸穩定分析模式之建立與應用」, 國立交通大學土木工程學研究所碩士論文。
- 黃筱婷等 (2011), 「地質構造與大型崩塌之關係—以阿里山公路為例」, 中華水土保持學報第, 四十二卷, 第四期, 第 279-290 頁。
- 經濟部水利署 (2011), 「水庫集水區區域性高精度崩塌潛勢之分析研究(3/3)」。
- 楊宏慶 (2012), 「降雨強度與邊坡特性對邊坡穩定分析影響之研究」, 國立成功大學資源工程學研究所碩士論文。
- Bear, J. (1972). Dynamics of fluids in porous media. New York,, American Elsevier Pub. Co.
- Bishop, A. W. (1955) "The use of the slip circle in the stability analysis of slope." Geotechnique, London 5(1): 7-17
- Chen, Q., M. Tang (2010). "Probabilistic Analysis of Slope Stability of Earth Dams during Rainfall Infiltration." GeoFlorida, 2022-2031.
- Cheng, Y. M. and C. J. Yip (2007). "Three-dimensional asymmetrical slope stability analysis extension of Bishop's, Janbu's, and Morgenstern-Price's techniques." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133(12): 1544-1555.
- Childs, E. C. (1971) "Drainage of Groundwater Resting on a Sloping Bed." Water Resources Research 7(5).
- Chow, V. T., D. R. Maidment, et al. (1988). Applied hydrology. New York, McGraw-Hill.
- Collins, B. D. and D. Znidarcic (2004). "Stability analyses of rainfall induced landslides." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130(4): 362-372.
- Duncan, J.M. (1996). "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis

- of slopes." *Journal of Geotechnical Engineering* 122(7): 577-596.
- Gokceoglu, C. and H. Aksoy (1996). "Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques." *Engineering Geology* 44(1-4): 147-161.
- Green, W. H., C. A. Ampt (1911). "Studies on Soil Physics, 1. The flow of air and water through soils." *Journal Agricultural Science* 4(1).
- Horton, R. E. (1933). "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle." *Transaction, American Geophysical Union* 14: 446-460.
- Huang, C. C. and C. C. Tsai (2000). "New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(10): 917-927.
- Huang, C. C., C. C. Tsai, et al. (2002). "Generalized method for three-dimensional slope stability analysis." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128(10): 836-848.
- Huang, Y. H. (1983). *Stability analysis of earth slopes*. New York, Van Nostrand Reinhold.
- Iverson, R. M. (2000). "Landslide triggering by rain infiltration." *Water Resources Research* 36(7): 1897-1910.
- Janbu, N. (1968). "Slope stability computations." *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, The Technical University of Norway, Trondheim, Norway.
- Koutnik, T., L. Wei, et al. (2008) "A Case Study of Safety Factor Comparison of Different Slope Stability Methods for Levee Design in New Orleans." *GeoCongress*: 499-506.
- Kumar, J. (2000) "Slope Stability Calculations Using Limit Analysis." *Slope Stability*: 239-249.
- Lam, L., D. G. Fredlund (1993). "A general limit equilibrium for three-dimensional slope stability analysis." *Canadian Geotechnical Journal* 30: 905-919.
- Liu, C. and J. B. Evett (1987). *Soils and foundations*. Upper Saddle River, N.J., Pearson/Prentice Hall.
- Loehr, J. E., B. F. McCoy, et al. (2004). "Quasi-three-dimensional slope stability analysis method for general sliding bodies." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(6): 551-560.
- Morgenstern, N. R., V. E. Price (1965). "The analysis of the stability of general slip surfaces." *Geotechnique*, London 15(1):79-93
- Philip, J. R. (1975). "The Theory of Infiltration:1. The Infiltration Equation and its

- solution." *Soil Science* 83(5): 345-357.
- Rahardjo, H., A. S. Nio, et al. (2010). "Effects of Groundwater Table Position and Soil Properties on Stability of Slope during Rainfall." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(11): 1555-1564.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, et al. (1983). "Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data." *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 109(1): 62-70.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, et al. (1983). "Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data." *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 109(1): 62-70.
- Richard, L. A. (1931). "Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums." *Physics* 1(1): 318-333.
- Seed, R. B., J. K. Mitchell, et al. (1990). "Kettleman-Hills Waste Landfill Slope Failure .2. Stability Analyses." *Journal of Geotechnical Engineering-Asce* 116(4): 669-690.
- Serrano, S. E. (2001). "Explicit solution to Green and Ampt infiltration equation." *Journal of Hydrologic Engineering* 6(4): 336-340.
- Ting, J. M. (1983). "Geometric Concerns in Slope Stability Analyses." *Journal of Geotechnical Engineering-Asce* 109(11): 1487-1491.
- Tsai, T. L. (2008). "The influence of rainstorm pattern on shallow landslide." *Environmental Geology* 53(7): 1563-1569.
- Tsai, T. L., H. E. Chen, et al. (2008). "Numerical modeling of rainstorm-induced shallow landslides in saturated and unsaturated soils." *Environmental Geology* 55(6): 1269-1277.
- Varnes, D. J. (1978). "Slope movement types and processes." *Transportation Research Board Special Report*(176).
- Verhoest, N. E. C. and P. A. Troch (2000). "Some analytical solutions of the linearized Boussinesq equation with recharge for a sloping aquifer." *Water Resources Research* 36(3): 793-800.
- Xing, Z. (1988). "3-Dimensional Stability Analysis of Concave Slopes in Plan View." *Journal of Geotechnical Engineering* 114(6): 658-671.

附錄一 一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式之推導

圖 A1.1 為傾斜岩盤之地下水位座標轉換示意圖，假設岩盤傾斜角度為 β' ，地下水沿流線 x 方向流量為 Q_x ，由達西定律表示：

$$Q_x = -Kh \frac{\partial Z}{\partial x} \quad (\text{A1.1})$$

其中， K 為水力傳導係數； Z 為地下水位與基準面之高度差。時間 t 時地下水高度 $h(x,t)$ 可表示為：

$$h(x,t) = (Z - x' \tan \beta') \cos \beta' \quad (\text{A1.2})$$

假設 β'_w 為地下水位切線與岩盤之夾角角度，則：

$$\frac{\partial Z}{\partial h} = \frac{\sin(\beta'_w + \beta')}{\sin \beta'_w} \quad (\text{A1.3})$$

$$\frac{\partial h}{\partial s} = \tan \beta'_w = \frac{\sin \beta'_w}{\cos \beta'_w} \quad (\text{A1.4})$$

若將(A1.1)式改寫為：

$$Q_x = -Kh \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial Z}{\partial h} \quad (\text{A1.5})$$

則將(A1.3)式與(A1.4)式代入(A1.5)式可得：

$$Q_x = -Kh \frac{\sin(\beta'_w + \beta')}{\cos \beta'_w} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{A1.6})$$

將(A1.6)式整理後可得：

$$Q_x = -Kh \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cos \beta' + \sin \beta' \right) \quad (\text{A1.7})$$

將本文中(2.8)式修正為沿流線方向之一維地下水流連續方程式如下：

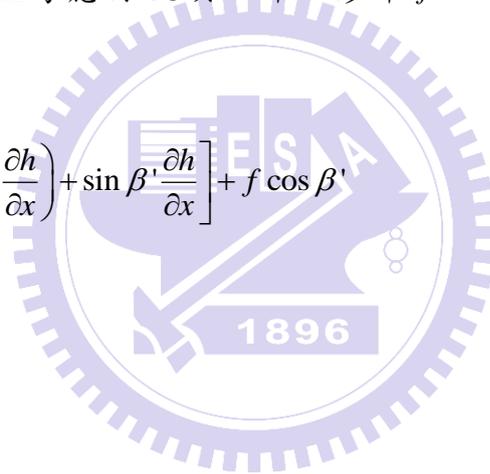
$$\frac{d}{dt} \rho_w S_y \cdot h \cdot dx = -\rho_w \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \quad (\text{A1.8})$$

將(A1.7)式代入上式：

$$\frac{d}{dt} S_y \cdot h = \frac{\partial}{\partial x} \left[Kh \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cos \beta' + \sin \beta' \right) \right] \quad (\text{A1.9})$$

將上式整理後，並考慮源流項，即入滲率 f ，即可得一維傾斜岩盤之 Boussinesq 方程式：

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = K \left[\cos \beta' \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \sin \beta' \frac{\partial h}{\partial x} \right] + f \cos \beta' \quad (\text{A1.10})$$



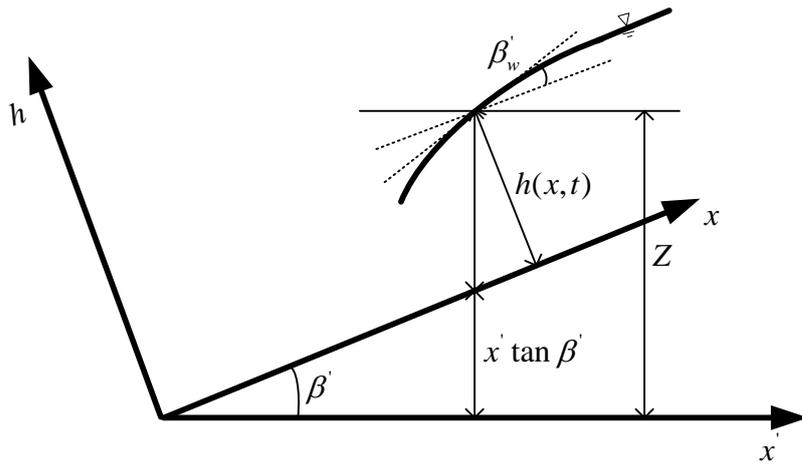


圖 A1.1 傾斜岩盤之地下水位座標轉換示意圖

