

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

一維未飽和坡地淺崩塌模式之整體敏感度分析

Global Sensitivity Analysis of One-Dimensional Unsaturated Shallow

Landslide Model

1896

研究生：黃舒勤

指導教授：楊錦釗 博士

張胤隆 博士

中華民國 一百零一年 八月

一維未飽和坡地淺崩塌模式之整體敏感度分析

Global Sensitivity Analysis of One-Dimensional Unsaturated Shallow
Landslide Model

研究生：黃舒勤

Student : Shu-Chin Huang

指導教授：楊錦釗

Advisors : Jinn-Chuang Yang

張胤隆

Yin-Lung Chang

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文



Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Civil Engineering

August 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一 百 零 一 年 八 月

一維未飽和坡地淺崩塌模式之整體敏感度分析

學生：黃舒勤

指導教授：楊錦釗 博士

張胤隆 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

本論文目的在針對 Tsai and Chen (2010)所發展之「一維未飽和坡地淺崩塌模式」進行整體敏感度分析，以探討模式各項輸入條件在其變異範圍內變動時對邊坡安全係數之影響程度。研究中所考慮之模式輸入條件包含保水曲線參數、初始地下水位、坡度、土層厚度、有效凝聚力、有效摩擦角以及土壤比重等，其中坡度之變異係肇因於數值高程量測之隨機誤差，此隨機誤差除了與數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)之解析度有關外，亦受量測地點之地形影響，因此本研究考慮兩種台灣常見之 DEM 解析度(5 m 與 40 m)，並分別考慮在緩、中與陡等三種地形下總計六個案例。待獲得前述各項參數之統計資料分析後，本研究以艾利颱風 48 小時之降雨事件針對前述六個案例進行模擬，並利用變異數法與取樣法對模式輸出之孔隙水壓與安全係數做整體敏感度分析。六個案例之一階與全域敏感度指數分析結果皆顯示，參數彼此間之交互作用對模式輸出具有一定程度影響。孔隙水壓敏感度分析結果顯示，保水曲線參數變異性對孔隙水壓之影響隨累積降雨之增加而增加，而初始地下水位之變異性對孔隙水壓之影響隨累積降雨之增加而降低。另外在安全係數敏感度分析方面，保水曲線參數與初始地下水位對安全係數之影響皆隨累積雨量之增加而增加。此外，以 5 m 以及 40 m DEM 解析度所計算之坡度其變異性對安全係數之影響以前者較高；而在相同 DEM 解析度下，地形越緩則坡度變異性對安全係數之影響越高。土層越深處之安全係數其受土層厚度變異性之影響越大，但土層越深

處之安全係數其受凝聚力變異性之影響則越小。兩種整體敏感度分析之方法以及所有案例之分析結果皆顯示有效摩擦角之變異對安全係數之影響最大，而土壤比重之變異對安全係數之影響極小。

關鍵字：淺崩塌、孔隙水壓、安全係數、整體敏感度分析、變異數法、取樣法



Global Sensitivity Analysis of One-Dimensional Unsaturated Shallow Landslide Model

Student : Shu-Chin , Huang

Advisors : Jinn-Chuang, Yang

Yin-Lung, Chang

Department of Civil Engineering
National Chiao-Tung University

Abstract

In this study, the global sensitivity analysis was performed to estimate the effect of model input variability on the output (pore pressure and safety factor, FS) of a one-dimensional unsaturated shallow landslide model. Seven model inputs, including the parameters in the water retention curve, initial groundwater level, slope angle, soil thickness, effective cohesion, effective friction angle, and specific weight of soil were considered and the sensitivity indexes between the model output and individual input variable were calculated based on the variance-based and sampling-based methods. The variability of slope angle results from the random error of the digital elevation model (DEM) which is influenced by the grid space of DEM and terrain surface characteristic. Thus, two DEMs with different grid space (5 m and 40 m) and three slopes with different characteristics (gentle, medium, and steep) were considered. The combination of the considered DEMs and terrain surface characteristics renders six cases to be analyzed in this study. For the sensitivity feature in pore water pressure, the analysis results showed that the importance of water retention curve parameters and initial groundwater level are increased and decreased, respectively, with the increase in accumulative rainfall depth. However, for the sensitivity feature in safety factor, the importance of water retention curve parameters and initial groundwater level are simultaneously increased with the increase in accumulative rainfall depth. The influence of slope angle variability on the safety factor in the case with 5 m grid space DEM is higher than that in the case with 40 m grid space DEM. For the cases with the same grid space of DEM, the importance of slope angle in gentle slope is always higher than that in steep slope. The analysis results among the six cases showed that the safety factor near the ground surface is significantly influenced by the effective cohesion variability. Besides, the effective friction

angle is the most important input for rainfall triggered landslide modeling while the variability of specific weight of soil could be neglected.

Keywords : shallow landslide, pore water pressure, safety factor, global sensitivity analysis, variance-based, sampling-method



誌謝

感念恩師楊錦釧教授與張胤隆博士對我悉心教導，無論在做人處事的態度及學術專業知識各方面都給予相當多的指引與啟發，得以使拙作順利完成，心中感激之意難以言述。

於論文審查期間，承蒙口試委員吳瑞賢教授、張哲豪教授於百忙之中撥冗審閱和口試，並給予諸多寶貴意見，使得本文更加完善，學生在此至上由衷的感謝之意。

在論文撰寫期間，感謝文祿學長、世偉學長、浩榮學長、建華學長、弘恩學長、仲達學長、仁凱學長、東洲學長、聖翔學長以及綾玲學姐等；同儕好友芳綺、岱玲、建翔、昀直、信富、韋豪、家榮等，以及學弟妹醇國、健賓、于軒、瑋廷、亞雯及蓉瑩等，由於你們的幫忙與鼓勵，才能使我克服每個難關，因為你們的陪伴使我在研究所求學階段中留下美好回憶，感謝你們陪我走過研究所求學時期，真的很感謝你們！

最後感謝我的家人，給予最大的支持與照顧，感謝你們的愛護與無悔的付出，使我在求學過程中無憂無慮、順順利利，感激之情永銘於心。在此感謝所有關心我的人，並共同分享這份喜悅與榮耀。謹以本文獻給所有支持我的人，並致上最真誠的感激與祝福。

目錄

摘要	I
Abstract.....	III
誌謝	V
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
符號說明	XI
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	1
1.2.1 邊坡穩定分析方法	1
1.2.2 敏感度分析	4
1.3 研究方法與步驟.....	5
1.4 章節介紹.....	6
第二章 降雨引發坡地淺崩塌模式介紹.....	7
2.1 模式理論基礎.....	7
2.2 模擬條件資料彙整	11
第三章 整體敏感度分析之理論及方法介紹	13
3.1 整體敏感度分析之理論	13
3.2 整體敏感度分析之方法	14
3.2.1 變異數法	14
3.2.1 取樣法	19
第四章 假設案例探討分析.....	21
4.1 資料選取概述及參數設定	21

4.1.1 資料選取概述	21
4.1.2 案例模式條件設定	21
4.2 假設案例分析	25
4.2.1 孔隙水壓敏感度分析	26
4.2.2 安全係數敏感度分析	27
第五章 結論與建議	31
5.1 結論	31
5.2 建議	32
參考文獻	33



表目錄

表1.1	國內外崩塌評估方法相關整理.....	41
表4.1	艾利颱風期間時雨量表.....	42
表4.2	模式參數統計特性整理表.....	43
表4.3	保水曲線參數之共變異係數矩陣.....	44
表4.4	坡度與土壤厚度設定.....	44



圖目錄

圖1.1	論文之研究步驟.....	45
圖2.1	坡地座標系統與模擬邊界條件示意圖.....	46
圖3.1	偏相關係數示意圖.....	47
圖3.2	部分相關係數示意圖.....	47
圖4.1	砂崙仔工程地區位置(楊錦釗等,2006).....	48
圖4.2	艾利颱風期間三光站時雨量組體圖.....	48
圖4.3	坡度與崩塌深度現場量測資料.....	49
圖4.4	誤差項常態測試圖.....	49
圖4.5	案例一土層第一層，孔隙水壓一階敏感度指數.....	50
圖4.6	案例一土層第二層，孔隙水壓一階敏感度指數.....	50
圖4.7	案例一土層第三層，孔隙水壓一階敏感度指數.....	50
圖4.8	案例一土層第一層，孔隙水壓全域敏感度指數.....	51
圖4.9	案例四土層第一層，孔隙水壓一階敏感度指數.....	51
圖4.10	案例一土層第一層，孔隙水壓部分相關係數.....	51
圖4.11	案例一土層第二層，孔隙水壓部分相關係數.....	52
圖4.12	案例一土層第三層，孔隙水壓部分相關係數.....	52
圖4.13	案例一土層第一層，安全係數一階敏感度指數.....	52
圖4.14	案例一土層第二層，安全係數一階敏感度指數.....	53
圖4.15	案例一土層第三層，安全係數一階敏感度指數.....	53
圖4.16	案例一土層第二層，安全係數全域敏感度指數.....	53
圖4.17	案例二土層第一層，安全係數一階敏感度指數.....	54
圖4.18	案例二土層第二層，安全係數一階敏感度指數.....	54
圖4.19	案例二土層第一層，安全係數全域敏感度指數.....	54

圖4.20	案例三土層第一層，安全係數一階敏感度指數.....	55
圖4.21	案例三土層第二層，安全係數一階敏感度指數.....	55
圖4.22	案例三土層第二層，安全係數全域敏感度指數.....	55
圖4.23	案例四土層第一層，安全係數一階敏感度指數.....	56
圖4.24	案例四土層第三層，安全係數一階敏感度指數.....	56
圖4.25	案例五土層第一層，安全係數一階敏感度指數.....	56
圖4.26	案例五土層第一層，安全係數全域敏感度指數.....	57
圖4.27	案例六土層第一層，安全係數一階敏感度指數.....	57
圖4.28	案例六土層第三層，安全係數一階敏感度指數.....	57
圖4.29	案例六土層第三層，安全係數全域敏感度指數.....	58
圖4.30	案例一土層第一層，安全係數部分相關係數.....	58
圖4.31	案例一土層第二層，安全係數部分相關係數.....	58
圖4.32	案例一土層第三層，安全係數部分相關係數.....	59
圖4.33	案例二土層第一層，安全係數部分相關係數.....	59
圖4.34	案例二土層第三層，安全係數部分相關係數.....	59
圖4.35	案例三土層第一層，安全係數部分相關係數.....	60
圖4.36	案例四土層第一層，安全係數部分相關係數.....	60
圖4.37	案例四土層第二層，安全係數部分相關係數.....	60
圖4.38	案例五土層第一層，安全係數部分相關係數.....	61
圖4.39	案例五土層第三層，安全係數部分相關係數.....	61
圖4.40	案例六土層第一層，安全係數部分相關係數.....	61
圖4.41	案例六土層第三層，安全係數部分相關係數.....	62

符號說明

c' : 土壤凝聚力(effective cohesion)

$\text{Cov}[]$: 共變異數 (covariance)

d_{Lz} : 垂向土層深度

d_z : 垂向地下水位深度

$E[]$: 期望值

FS : 安全係數(factor of safety)

G_s : 土壤比重(specific gravity of soil)

I_z : 降雨強度(rainfall intensity)

K_L : x、y 方向之水力傳導係數

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

K_z : z 方向之水力傳導係數

M : 曲線密合因子(curve fitting parameter)

N : 孔徑指數(pore size index)

S : 飽和度(the degree of saturation)

S_e : 有效飽和度(the effective degree of saturation)

S_i : 一階敏感度指數(first order sensitivity index)

S_r : 殘餘飽和度(the residual degree of saturation)

S_T : total effect 敏感度指數(total effect sensitivity index)

T : 降雨延時(rainfall duration)

u_a : 孔隙氣壓力 (pore air pressure)

u_w : 孔隙水壓力 (pore water pressure)

$V[]$: 變異數

z : 空間座標

α : 坡地之坡度

ζ : 進氣潛能因子(empirical parameter of air entry value)

σ : 總垂直應力(total normal stress)

ψ : 壓力水頭(pressure head)

θ : 土壤體積含水量(soil volumetric water content)

θ_s : 飽和體積含水量(saturated volumetric water content)

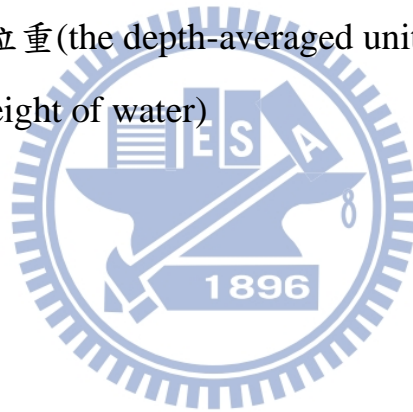
θ_r : 殘餘體積含水量(residual volumetric water content)

ϕ' : 有效摩擦角(effective friction angle)

χ : 有效應力參數(effective stress parameter)

$\bar{\gamma}$: 土壤深度平均單位重(the depth-averaged unit weight of soil)

γ_w : 水單位重(unit weight of water)



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

台灣位在環太平洋地震帶上，終年大小地震不斷，造成土質較為鬆動，又因地狹人稠，使得山坡地開發頻繁；此外台灣在氣候上為典型海島型氣候，潮濕多雨，夏秋之際颱風造訪頻繁帶來豐沛的雨水，近年全球氣候變遷影響下，暴雨發生的機率逐漸增大。脆弱的地質以及豪大雨頻繁地發生，經常造成坡地崩塌的發生，若崩塌區位於水源保護區，將使得大量的土砂經由河道進入水庫，造成水庫嚴重的淤積，減少水庫的庫容與其運行之壽命。崩塌區如果接近人民生活區域，使人民生命財產遭受危難。因此，為了降低坡地崩塌所帶來的災害，預測、預警成了重要的課題。

邊坡穩定分析(slope stability analysis)已廣泛地應用於評估坡地是否發生崩塌，然而參數的完整性與全面性不易達到，因此在參數具有不確定性(uncertainty)的情形下，可能會影響邊坡穩定分析的成果。

綜上所述，本研究基於 Tsai and Chen (2010)所發展之「一維未飽和降雨引發坡地淺崩塌模式」，利用整體敏感度分析方法探討模式各項輸入參數在其變異範圍內變動時對邊坡安全係數之影響程度，以供模式使用者進行重要參數調查試驗或後續邊坡穩定不確定性分析之參考。

1.2 文獻回顧

1.2.1 邊坡穩定分析方法

根據 Dai et al. (2002)之研究指出，導致崩塌發生之影響因子大致上可分成兩類如下：

(1) 潛在因子(preparatory variables)：導致邊坡易發生崩塌且存在於現實之

條件，如坡度、排水狀況、土壤風化程度、植被等。

- (2) 誘發因子(triggering variables)：驅動邊坡實際開始發生崩塌之外在因子，如地震、降雨等。

Soeters and Van Westen (1996)及 Van Westen (1997)將邊坡穩定分析方法歸納為三類：(1) 歷年資料判別法、(2) 經驗法、(3) 解析法。以下對此三種方法做簡述：

歷年資料判別法(landslide inventory)

藉由地質調查資料、地質環境演化的過程，再加上考慮影響邊坡穩定因素與可能的破壞方式，以此建立歷年崩塌破壞之資料庫，用以研判分析區域再發生破壞之頻率。此方法僅依據過去資料做為判斷之標準，為災害研究最直接之方法，但無法定量評估坡地是否發生崩塌。然而此方法所建立之資料庫可進一步做為量化災害與風險分析之前置作業，如 Korup (2005) 利用資料判別法在紐西蘭西南方山區進行崩塌面積在空間上分布情形之調查。

經驗法(the empirical formula)

經驗法係根據過去所蒐集之崩塌相關資料，如潛在因子、誘發因子等，藉由統計分析方法歸納出邊坡影響因子與邊坡穩定之相關性，以此建立簡單的經驗公式計算邊坡是否發生崩塌。較常見的公式有打荻珠男(1971)所提出之打荻氏公式，其為降雨崩塌率與引發崩塌之臨界降雨關係式；Hovius (1997)利用冪次法(power law)分析崩塌率與規模之關係；降雨門檻值法(the empirical rainfall threshold concept)利用相關之降雨資料，如降雨強度、累積降雨量、降雨延時等，評估崩塌之可能性。謝正倫(2002)採用打荻氏公式，研究霧社水庫集水區之土砂產量；陳樹群(2004)利用篩選崩塌相關因子並給予因子評分權重之方式，評估崩塌是否會發生。

解析法(deterministic approach)

解析法是以嚴謹的力學基礎概念考慮邊坡塊體之力學平衡，並計算安全係數(FS)以判斷坡地是否發生崩塌。Petley (2008)回顧 2007 年所發生導致死亡的坡地崩塌，降雨所造成的坡地崩塌占 89.6%，地震所造成的占 0.7%，數據顯示大部分之崩塌皆是由降雨所造成的；Harp and Jibson (1995)指出降雨所引發之崩塌大多屬於淺層邊坡滑動(shallow landslide)為主，因此可做大範圍假設邊坡為平面無限邊坡(infinite slope)滑動來推求安全係數。Iverson (2000)利用理察方程式之簡單解析解，計算不考慮超滲降雨作用下邊坡入滲之情形，並配合無限邊坡理論，模擬地下水位上升所導致飽和層破壞。利用 Iverson (2000)模式簡單、實用的特點，Baum et al. (2002)在美國地質調查所(U.S. Geological Survey, USGS)支持下，進一步將模式擴充發展了 TRIGRS(Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Analysis)模式。Tsai and Yang (2006)經由引入非線性地表面入滲邊界件，修正 TRIGRS 模式中，假設入滲能力等於飽和水力傳導係數(saturated hydraulic conductivity)，造成降雨入滲高估之現象。然而崩塌不僅發生於飽和土壤中，也可能發生於未飽和土壤因地下水位上升造成基質吸力(matric suction)消散所致，目前已有許多未飽和降雨所引發坡地淺崩塌的物理基礎模式被提出(Tsai et al., 2008)，但過去所提出之模式土壤單位重及剪力強度都未隨飽和度變化，而 Tsai and Chen (2010)進一步提出考慮土壤單位重與剪力強度隨飽和度變化之模式。

表 1.1 整理國內外相關崩塌評估之方法。就學理上來看，經驗法簡單與方便大範圍使用，但其受限於地區性、不具有力學上的意義以及無法提供良好的量化資訊。解析法則具有完整的力學基礎，具通用性及客觀性，且 Van Westen (2006)指出在崩塌方面解析法可提供良好的量化資訊，可供未來直接使用在工程設計及風險量化上。

1.2.2 敏感度分析

參數不確定性

Morgenstern (1997)曾提出邊坡崩塌不確定性的問題主要來自於各個階段,如參數測量與分析、地形資訊、邊坡分析、工程之設計等;Chen et al. (2007)提出在邊坡分析中參數通常存在不確定性,造成參數不確定性的原因可能有非均質土層(non-homogeneity)、不完全的土壤資料、地形資料、地下水位資料,以及不恰當的測量資料等。參數之不確定性對於邊坡穩定分析結果有重大的影響,故在邊坡穩定分析前,需考慮各項邊坡參數之變化對模式輸出之影響程度。

敏感度分析

不確定性的存在不是因科學方法所造成之偶然因素,而是必然存在的,因此必須透過一些統計分析方式以減少不確定性之存在;Christian et al. (1992)、Mostyn and Li (1993)提出透過機率分析之方法可提供良好的量化資訊給工程之設計者所使用。在模式應用上,敏感度分析(sensitivity analysis)與不確定性分析(uncertainty analysis)是兩個常被同時提起之概念,但兩者之目的並不相同。敏感度分析之目的在於分析個別模式輸入條件之不確定性對模式輸出不確定性之影響,以找出對模式輸出不確定性最具影響性之輸入條件;而不確定性分析之目的則在定量計算模式輸出之統計特性,例如各項動差(moment)或是機率密度函數(probability density function, PDF)等。

依據 Saltelli et al. (2008),敏感度分析主要在進行以下兩種模式輸入因子特性之判別,即:

- 一、重要輸入因子篩選(factor prioritization):目的在判斷哪些模式輸入條件之不確定性對模式輸出之變異性具有重要影響,亦即哪些輸入因子當固定於其真值後,模式輸出之變異性可大幅降低。此資訊除了可供

後續不確定性分析判斷所需考慮之輸入因子外，亦有助於瞭解須針對哪些輸入因子進行率定或投入更深入之調查，以更有效率地減少模式輸出之不確定性。

- 二、低影響輸入因子篩選(factor fixing)：目的在判斷哪些模式輸入條件在其可能範圍內自由變動時，並不會使模式輸出產生太大變異，亦即並不需要考慮這些輸入因子之不確定性。須注意的是，若一輸入因子並不屬於重要因子，並不能保證其必為低影響因子，因為該輸入因子在分析模式中可能與其他輸入因子具有交互作用(interaction)。

應用敏感度分析對模式做重要因子篩選或低影響因子篩選研究包括 Knopan and Voss (1988)對多孔介質傳輸模式做重要輸入因子篩選；Chang and Yang (1993)對輸砂運移模式做敏感度分析，篩選出模式重要之因子，進而研究模式輸出之統計特性；Borga et al. (2002)對無限邊坡穩定模式的輸入參數做敏感度分析，其結果顯示參數基礎值之選定將影響敏感度分析之結果；蘇歆婷(2007)對降雨引發崩地淺崩塌式做敏感度分析篩選出重要輸入因子，並且進一步建立風險評估模式；Chang (2010)對降雨引發坡地淺崩塌模式輸入參數做敏感度分析，並以敏感度分析之結果為基礎進一步探討模式之不確定性。上述案例說明過去水利工程使用敏感度分析之案例，大部分冀望藉由敏感度分析篩選出對模式重要之因子，以利於提供模式使用者重要的量化資訊或進一步對模式做不確定性研究，由此了解敏感度分析對於模式之建構以及評估佔有相當重要之影響性。

1.3 研究方法與步驟

潛在因子造成邊坡處於不穩定之狀態，然而測量或是獲得潛在因子的過程中存在許多不確定的因素，所以判別潛在因子之重要性為邊坡穩定分析首要的條件之一。因此，本文以 Tsai and Chen (2010)所發展之邊坡穩定分析模式為基礎，考慮模式參數之變異對孔隙水壓與邊坡安全係數之影響程

度。然而為明確地了解模式參數之變異對模式之影響，對模式參數之統計資料作分析並且將分析之結果帶入模式做模擬產生大量的模式輸出值，接著對模式之輸出以整體敏感度方法做分析，方法包含有變異數法 (variance-based Method)與取樣法(sampling-based)，藉由分析結果探討各個參數之變異對於邊坡穩定分析結果之影響程度，並且提出相關的論點供給未來研究做進一步分析之參考。

如圖 1.1 為本文之研究步驟，首先了解 Tsai and Chen (2010)所發展邊坡穩定分析模式之理論背景以及敏感度分析之方法，接著蒐集模式參數之相關資料，例如：現地參數的試驗數據、現地高程資料、參數之統計特性等，再依所蒐集之參數統計資料作分析並帶入模式中做計算得到模式所需之大量參數樣本，並且對模擬之輸出以整體敏感度分析(global sensitivity analysis)方法做分析，最後對分析結果提出相關論點以及建議。

1.4 章節介紹

本文一共分五個章節，以下為所有章節概要簡述：

第一章為緒論，述說本研究之動機、目的，過去學者所做之相關研究介紹，以及本研究之方法與步驟。

第二章為 Tsai and Chen (2010)所發展之一維未飽和降雨引發坡地淺崩塌模式詳細之理論基礎解介紹，以及模式內所設置參數之條件彙整。

第三章為介紹整體敏感度分析之理論架構，並且介紹本文所選用之整體敏感度分析方法，包含有變異數法與取樣法。

第四章為假設案例探討分析，案例參數如何選定，以及分析結果之展現，並提出相關討論。

第五章為結論，假設案例之結果整理，以及提出相關的建議及想法以供未來之研究做參考。

第二章 降雨引發坡地淺崩塌模式介紹

本研究採用 Tsai and Chen (2010)所發展之降雨引發坡地淺崩塌模式，當降雨入滲時模式參數對於模式輸出之敏感度分析。此章節介紹，降雨所引發坡地淺崩塌模式詳細之理論基礎以及模式內條件設定彙整。

2.1 模式理論基礎

降雨所引發的坡地崩塌，大多都以淺層崩塌為主，且評估淺層崩塌以無限邊坡穩定分析理論所建立的邊坡穩定分析模式已廣泛地受到應用。Tsai and Chen (2010)所發展之降雨引發坡地淺崩塌模式係基於無限邊坡穩定分析理論，假設破壞面與坡面平行，崩塌深度遠小於坡地之長寬。

非穩態未飽和坡地達西地下水流(Darcian flow of groundwater)之控制方程式依據理查方程式(Richards' equation)並伴隨坡地座標系統(Bear, 1972; Hurley and Pantelis, 1985)，如圖 2.1 所示，方程式可以表示如下

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

其中， θ 為土壤體積含水量(soil volumetric water content)， ψ 為壓力水頭(pressure head)， α 為坡地之坡度， t 表示時間， x 、 y 、 z 為空間座標，分別是沿著地表方向、正切地表方向、垂直於 $x-y$ 平面之方向， K_L 為側方向之水力傳導係數(hydraulic conductivity)， K_z 則為垂直坡面方向之水力傳導係數(hydraulic conductivity)。

在淺層崩塌的假設下，降雨延時遠小於側向孔隙水壓傳輸之時間，由此假設可將(2.1)式之三維坡地達西地下水流控制方程式化簡成一維地下水流方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \cos^2 \alpha \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (2.2)$$

其中， Z 為高程。

求解(2.2)式所需之邊界條件及初始條件，如圖 2.1 所示。初始地下水為平行於坡面，位置則距離坡面下 d_z 處，因此初始條件可表式為

$$\psi(Z,0) = (Z - d_z) \cos^2 \alpha \quad (2.3)$$

假設坡地之土層厚度為 d_{Lz} ，若底部與堅硬不透水土層或是不透水岩層相接，則底部之邊界條件為

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(d_{Lz}, t) = \cos^2 \alpha \quad (2.4)$$

若底部與透水性良好的砂土相接，則底部邊界條件則可改為

$$\psi(d_{Lz}, t) = (d_{Lz} - d_z) \cos^2 \alpha \quad (2.5)$$

坡地在滯蓄效應(ponding effect)影響前，降雨完全入滲，地表邊界條件為

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(0, t) = \left(-\frac{I_z}{(K_z)_{z=0}} + 1 \right) \cos^2 \alpha \quad (2.6)$$

其中， I_z 降雨強度。然而當降雨入滲開始受到滯蓄效應影響後，在不考慮滯蓄深度下，坡面之邊界條件為

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

降雨過後，不再有水流入滲，坡面之邊界條件則為

$$\frac{\partial \psi}{\partial Z}(0, t) = \cos^2 \alpha \quad (2.8)$$

(2.2)式到(2.8)式皆為非線性方程式，數值方法必須配合疊代法(iterative method)做求解。計算上先假設降雨完全入滲，地表邊界條件為(2.6)式，計

算降雨所造成之壓力水頭，再進行判斷，若壓力水頭小於 0 或等於 0，表示土壤未發生滯蓄現象，假設正確繼續算下一時刻；如果壓力水頭大於零，表示土壤發生滯蓄現象，假設錯誤，部分降雨變為地表逕流(overland flow)，然而在不考慮地表逕流水深下，將地表邊界條件改為(2.7)式進行重新計算。直到降雨延時結束，地表邊界條件則改為(2.8)式進行計算。

求解(2.2)式需要土壤含水量與壓力水頭之關係($\theta-\psi$ 之關係)，即為保水曲線(water retention curve)，而在過去已經有多位學者歸納出許多半經驗半物理模式(physic-empirical model)，如 Brook and Corey (1964)、Haverkamp (1977)、Campbel (1974)都曾根據實驗資料推出壓力水頭與含水量關係之經驗公式。Tsai and Chen (2010)所發展之模式選用過去研究較常使用的經驗式，為 Van Genuchten (1980)所提出之飽和度與壓力水頭，以及飽和度與水力傳導係數之關係式，如下

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

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

其中， θ_s 為飽和體積含水量(saturated volumetric water content)， θ_r 為殘餘體積含水量(residual volumetric water content)， K_s 為飽和水力傳導係數， ζ 、 N 與 M 分別為進氣潛能因子(empirical parameter of air entry value)、孔徑指數(pore index)、曲線密合因子(curve fitting parameter)，並且在孔徑指數與曲線密合因子兩者間存有線性關係式為，

$$M = 1 - \frac{1}{N} \quad (2.11)$$

利用(2.2)式到(2.10)式計算出之壓力水頭隨時間變化的情形，提供無限

邊坡穩定分析(infinite slope stability analysis)計算安全係數(FS)之用。

藉由安全係數判斷土壤是否發生破壞，然而土壤破壞是指當土層中某一臨界面其抗剪強度減弱小於剪應力，或剪應力增大超過抗剪強度，進而產生邊坡斜面滑動破壞。在模式中考慮土壤剪力強度隨時間的變化，土壤的剪力強度則依據 Bishop (1954)所提出擴充莫爾庫倫破壞準則(extended Mohr-Coulomb failure criterion)，表示為

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (2.12)$$

其中， c' 為有效凝聚力(effective cohesion)， σ 為總垂直應力(total normal stress)， u_a 為孔隙氣壓力(pore air pressure)， χ 為有效應力參數(effective stress parameter)， u_w 為孔隙水壓力(pore water pressure)， $u_a - u_w$ 則表示為基質吸力(matric suction)， ϕ' 為有效摩擦角(effective friction angle)。

Vanapalli and Fredlund (2000)與 Lu and Likos (2004)提出有效應力參數與體積含水量之關係可表示為

$$\chi = \frac{\theta - \theta_s}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.13)$$

(2.13)式可進一步以飽和度之方式表示

$$\chi = S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2.14)$$

其中， S 為飽和度(degree of saturation)， S_r 為殘餘飽和度(residual degree of saturation)， S_e 為有效飽和度(effective saturation)。有效應力參數 χ ，值介於 0 到 1 之間，當土壤為飽和狀態時，其值為 1；當土壤為殘餘飽和度時，其參數值則為 0。

當土層摩擦力與凝聚力所產生的抵抗應力小於土層下滑應力時，坡地

便可能產生破壞。利用無限邊坡穩定分析與土壤剪力強度，並假設孔隙氣壓力等於大氣壓力，土層中任意安全係數(FS)可表示：

$$FS = \frac{\tan\phi'}{\tan\alpha} + \frac{c' - \chi\gamma_w\psi_c\tan\phi' - \gamma_w\psi_p\tan\phi'}{\bar{\gamma}Z\sin\alpha\cos\alpha} \quad (2.15)$$

其中， γ_w 為水之單位重， $\bar{\gamma}$ 為土壤深度平均單位重(depth-averaged unit weight of soil)。 ψ_c 當土壤未飽和時，值為(2.2)式之解 ψ ， ψ_p 則為 0；當土壤達到飽和時， ψ_p 值等於 ψ ， ψ_c 則為 0。

(2.14)式中之 $\bar{\gamma}$ 土壤深度平均單位重，計算式子如下：

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{Z} \int_0^Z [(1-\theta_s)\gamma_w G_s + \theta\gamma_w] dZ \quad (2.16)$$

其中， G_s 為土壤比重， γ_w 為水單位重，並由(2.16)式可以看出土壤深度平均單位重與體積含水量有關，進而推知其也與飽和度有關。

2.2 模擬條件資料彙整

由前 2.1 小節降雨引發坡地淺崩塌模式理論基礎介紹得知模式計算邊坡穩定性分析必需輸入相關條件設定，如：土層厚度(d_{LZ})、坡度(α)、降雨條件、地下水位面(d_z)等資料，才可進行模式演算。模擬所需之輸入條件整理如下：

1. 降雨條件

降雨條件包含模擬地區之總降雨量、降雨延時、降雨強度與降雨之雨型等。

2. 初始地下水位(d_z)：

初始地下水位是指當場降雨臨前之地下水位面所在之位置，並且以距離地表面之深度表示。初始地下水位可能因為地質、高程、土壤性質、地層走向、植被情形、河川距離之遠近、氣候狀況、人為開發等因素而有所

差異。

3. 坡度(α)

坡度是指一段距離內高程的起伏程度。模擬時可藉由數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)網格式高程資料,再經由 Arc GIS 軟體做計算,計算格網點之坡度。目前較常使用之 DEM 解析度資料分別為 40 m DEM 以及 5 m DEM。

4. 土層厚度(d_{LZ})

Heimsath et al. (1999)提出地表至基岩間的土壤厚度隨斜坡曲率(hillslope curvature)增加,有線性遞減之趨勢。在國內外有許多位學者,利用現地調查建立土層厚度與坡度的迴歸式(陳本康,2005;鍾欣翰,2008; Delmonaco et al., 2003; Salciarini et al., 2006)。藉由土壤厚度與坡度之迴歸公式,只要取得該處之坡度,即可得到土層之厚度。

5. 土壤參數

土壤參數包含土壤比重(G_s)、有效摩擦角(ϕ')與有效凝聚力(c')。皆是由現地取樣之土壤經由試驗得知。

6. 保水曲線參數

使用 Van Genuchten(1980)所提出之經驗式,包含之參數為飽和水力傳導係數(K_s)、飽和體積含水量(θ_s)、殘餘體積含水量(θ_r)、進氣潛能因子(ζ)、孔徑指數(N)、曲線密合因子(M)。透過壓力板試驗得到飽和度對基質吸力曲線,並利用 Van Genuchten(1980)提出之飽和度與壓力水頭關係式進行迴歸,可得到保水曲線參數之進氣潛能因子(ζ)、孔徑指數(N)、曲線密合因子(M),再藉由定水頭試驗得到飽和水力傳導係數(K_s),含水量試驗得到飽和體積含水量(θ_s)、殘餘體積含水量(θ_r)。

第三章 整體敏感度分析之理論及方法介紹

本章說明整體敏感分析之基本理論，以及所選用整體敏感度之變異數法及取樣法理論。

3.1 整體敏感度分析之理論

敏感度分析理論之歷史發展極為悠久，常用之敏感度分析可分為兩大類，局部敏感度分析與整體敏感度分析。就字面上意思，整體敏感度是縱觀整體模式參數在其可能範圍內變化對模式輸出之影響。

整體敏感度分析常使用之取樣法，做法上在模式輸入參數合理之變化範圍內做大量之取樣並執行蒙地卡羅模擬，接著選定適當地數學假設 (Knopman and Voss, 1988)，判斷各輸入參數對模式之敏感度。然而數學假設有許多種，常選用假設為模式輸入參數與模式輸出之結果呈現線性關係，如下所示：

$$Y = \sum_{i=1}^k \beta_i Z_i \quad (3.1)$$

Y 為模式之輸出值， $X = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ 為模式輸入之參數， $B = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ 為線性迴歸所得每一項參數前所帶之係數， β_i 為常數，並且由 β_i 作為判斷參數敏感程度，數值越大表示越敏感，而正負號表示為正相關或是負相關。此方法假設之前提為輸入參數間彼此獨立無相關性，但參數間並非全然如此獨立。El-Kadi (1987) 提到考慮參數的相關性可以減少大約 1/3 的不確定性，而 Carsel and Parrish (1988) 也提出考慮參數的相關性可以減小模式輸出之變異性，並且了解在微小變量下對模式之影響。因此，本文考慮參數間具有相關性，並選擇變異數法與取樣法之部份相關係數兩種敏感度方法做為分析。

3.2 整體敏感度分析之方法

3.2.1 變異數法

將參數 $X=(Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ 與模式輸出 Y 之間以簡單數學式表示 $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ ，並計算模式輸出 Y 之變異數，式子如下：

$$V(Y) = E[(Y - E(Y))^2] = E(Y^2) - [E(Y)]^2 \quad (3.2)$$

$V(Y)$ 為模式之輸出變異數， $E(Y)$ 為模式之輸出期望值。但由(3.2)式無法得知模式單一參數變化對輸出之影響程度，因此將模式單一參數值固定 $X_i = \tilde{X}$ ，使模式輸出變為有條件之限制，(3.2)式改變如下：

$$V(Y|X_i = \tilde{X}) = E\left(\left(Y|X_i = \tilde{X}\right)^2\right) - \left[E(Y|X_i = \tilde{X})\right]^2 \quad (3.3)$$

上述之限制條件過於強調參數之定值，無法明確地了解各項參數變化對輸出之影響，然而為降低定值對變異數之影響，將(3.3)式取期望值，

$$E[V(Y|X_i = \tilde{X})] = E(Y^2) - E\left[E(Y|X_i = \tilde{X})\right]^2 \quad (3.4)$$

並將(3.4)式以(3.2)式取代並移項即得到，

$$V(Y) - E[V(Y|X_i = \tilde{X})] = E\left[E(Y|X_i = \tilde{X})\right]^2 - [E(Y)]^2 \quad (3.5)$$

(3.5)式之等式右邊也可以表示為 $V(E(Y|X_i = \tilde{X}))$ 。而(3.5)式之等式右邊或左邊皆是對 $X_i = \tilde{X}$ 模式輸出值 Y 之敏感度好的量化方式。所以將(3.5)式除以無條件限制之變異數 $V(Y)$ ，並定義一階敏感度指數(first order sensitivity index)為，

$$S_i = \frac{V\left[E\left(Y|X_i = \tilde{X}\right)\right]}{V(Y)} \quad (3.6)$$

一階敏感度係數可以表示出單一參數對模式輸出之敏感程度，但在模式中參數間彼此可能有交互作用，造成一階敏感度指數無法完整表示參數對模式輸出之影響程度，所以需考慮高階敏感度指數(higher order sensitivity index)。

利用 Sobol' 為增加函數式之維度方法做拆解，將無條件之變異數做展開，

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_i \sum_{j>i} V_{ij} + \cdots + V_{12\cdots k} \quad (3.7)$$

$$V_i = V\left(E(Y|X_i)\right) \quad (3.8)$$

$$V_{ij} = V\left(E(Y|X_i, X_j)\right) - V_i - V_j \quad (3.9)$$

對(3.7)式之同除以 $V(Y)$ ，即可以得到所有敏感度指數之總和，

$$1 = \sum_i S_i + \sum_i \sum_{j>i} S_{ij} + \cdots + S_{12\cdots k} \quad (3.10)$$

為其中， $\sum_i S_i$ 為所有參數一階敏感度指數之總和，其餘為參數間彼此交互作用所造成之敏感度指數，稱為高階敏感度指數。由高階敏感度指數加上一階敏感度指數即可完整表達參數對模式輸出之影響程度，並將此定義為全域敏感度指數(total effect sensitivity index)。將全域敏感度指數以數學式表示，並用參數 X_1 做為例子，如下：

$$S_{T1} = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123} + \cdots + S_{12\cdots k} \quad (3.11)$$

若將(3.8)式與(3.9)式假設為模式中只有兩種參數做變化，式子可改變如下：

$$V_1 = V(E(Y | X_1)) \quad (3.12)$$

$$V_{12} = V(Y) - V_1 - V_2 \quad (3.13)$$

將(3.12)與(3.13)式相加並除以 $V(Y)$ ，即可得到 X_1 之全域敏感度指數，

$$S_{T1} = \frac{V(Y) - V(E(Y | X_2))}{V(Y)} \quad (3.14)$$

由(3.14)推論全域敏感度指數之通式如下：

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V[E(Y|X_{\sim i})]}{V(Y)} \quad (3.15)$$

其中， $X_{\sim i}$ 為除了 i 參數外的參數。

Sttelli (2002)提出之變異數敏感度分析方法，是以蒙地卡羅模擬為概念之計算方式，需大量的參數樣本套入模式並對模式之輸出作分析。但此計算方式極為耗時與繁瑣，以計算一階敏感度指數為例，需先有條件之期望值 $E(Y|X_i)$ ，接著對有條件之期望值做變異數，如取樣 1000 次，計算之次數可達 10^6 。因此，為了減少原來方程式計算之時間，Sttelli (2002)提出以矩陣之型態做計算，以減少計算之時間及步驟。假設模式之參數共有 N 個，取樣次數為 $2k$ 次，如此必須在參數合理變化範圍內產生 $(N, 2k)$ 個隨機數變數，並組成 A 、 B 矩陣，如下：

$$A = \begin{bmatrix} X_1^{(1)} & X_2^{(1)} & \dots & X_i^{(1)} & \dots & X_k^{(1)} \\ X_1^{(2)} & X_2^{(2)} & \dots & X_i^{(2)} & \dots & X_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{(N-1)} & X_2^{(N-1)} & \dots & X_i^{(N-1)} & \dots & X_k^{(N-1)} \\ X_1^{(N)} & X_2^{(N)} & \dots & X_i^{(N)} & \dots & X_k^{(N)} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} X_{k+1}^{(1)} & X_{k+2}^{(1)} & \dots & X_{k+i}^{(1)} & \dots & X_{2k}^{(1)} \\ X_{k+1}^{(2)} & X_{k+2}^{(2)} & \dots & X_{k+i}^{(2)} & \dots & X_{2k}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{k+1}^{(N-1)} & X_{k+2}^{(N-1)} & \dots & X_{k+i}^{(N-1)} & \dots & X_{2k}^{(N-1)} \\ X_{k+1}^{(N)} & X_{k+2}^{(N)} & \dots & X_{k+i}^{(N)} & \dots & X_{2k}^{(N)} \end{bmatrix}$$

再藉由 A、B 矩陣得到 C 矩陣，除了所需得知參數敏感度之第 i 個參數值來自 A 矩陣之外，其餘之參數皆來自 B 矩陣，C 矩陣如下：

$$C = \begin{bmatrix} X_{k+1}^{(1)} & X_{k+2}^{(1)} & \cdots & X_i^{(1)} & \cdots & X_{2k}^{(1)} \\ X_{k+1}^{(2)} & X_{k+2}^{(2)} & \cdots & X_i^{(2)} & \cdots & X_{2k}^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{k+1}^{(N-1)} & X_{k+2}^{(N-1)} & \cdots & X_i^{(N-1)} & \cdots & X_{2k}^{(N-1)} \\ X_{k+1}^{(N)} & X_{k+2}^{(N)} & \cdots & X_i^{(N)} & \cdots & X_{2k}^{(N)} \end{bmatrix}$$

將 A、B、C 矩陣帶入模式中做計算可以得到三個向量模式輸出值分別表示為，

$$Y_A = f(A) \quad Y_B = f(B) \quad Y_C = f(C) \quad (3.16)$$

並將(3.6)式與(3.15)式計算敏感度指數之方程式做變換，為利於矩陣計算之形式。先將(3.5)式其中之 $E[E(Y|X_i = \tilde{X})]^2$ 依 Ishigami 和 Homma (1990) 所展開之式子並做簡化，以 \hat{U}_j 做定義

$$E[E(Y|X_i = \tilde{X})]^2 = \hat{U}_j = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N Y_A^j Y_C^j \quad (3.17)$$

$[E(Y)]^2$ 依相同之方式展開並做簡化，

$$[E(Y)]^2 = \hat{E}_A^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_A^j Y_B^j \quad (3.18)$$

$$[E(Y)]^2 = \hat{E}_B^2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_B^j \right)^2 \quad (3.19)$$

其中， \hat{E}_A^2 為 Y_A 之期望值平方， \hat{E}_B^2 為 Y_B 之期望值平方。

$V(Y)$ 也依相同之方式展開並做簡化，

$$\hat{U}_{VA} = \frac{1}{N-1} \sum_j^N \left[(Y_A^j) - \frac{1}{N} \left(\sum_j^N Y_A^j \right) \right] \quad (3.20)$$

$$\hat{U}_{VB} = \frac{1}{N-1} \sum_j^N \left[(Y_B^j) - \frac{1}{N} \left(\sum_j^N Y_B^j \right) \right] \quad (3.21)$$

其中，(3.19)式之 \hat{U}_{VA} 為 Y_A 之變異數，(3.20)式之 \hat{U}_{VB} 為 Y_B 之變異數。

一階敏感度指數(3.6)式以(3.17)、(3.18)、(3.20)式做取代，即可得到下面的式子

$$S_i = \frac{V[E(Y|X_i = \tilde{X})]}{V(Y)} = \frac{\hat{U}_j - \hat{E}_A^2}{\hat{U}_{VA}} \quad (3.22)$$

全域敏感度指數之計算，將(3.17)式改為計算除了 i 參數之外的式子，

如下：

$$\hat{U}_{\sim j} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N Y_B^j Y_C^j \right) \quad (3.23)$$

接著將(3.15)式由(3.19)、(3.21)、(3.23)做取代，

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V[E(Y|X_{\sim i})]}{V(Y)} = 1 - \frac{\hat{U}_{\sim j} - \hat{E}_B^2}{\hat{U}_{VB}} \quad (3.24)$$

計算一階敏感度指數、全域敏感度指數改由(3.21)與(3.23)式，計算次數可以降低至 $N(k+2)$ 次，計算時間也可以減少許多。

上述 Stitelli (2002)所提出之方法皆是假設模式之參數間彼此獨立無相關性，然而在本文考慮保水曲線參數彼此具有相關性之存在、土層厚度與坡度也具有相關性之存在。因此，根據 Jacques et. al. (2006)提出之改善方法，只需以 A、B 矩陣做交換得到 C 矩陣時，計算具有相關性參數之敏感度時，將存有相關性之參數同時以 A 矩陣內參數做取代，其餘之計算與原來相同，帶入方程式(3.21)式與(3.23)式計算，即可得到本文所需之一階敏感度指數與

全域敏感度指數。而一階與全域敏感度指數間之差異可用以判斷該模式輸入參數彼此間在模式計算中是否具有交互作用，以及全域敏感度指數本身可做為低影響因子篩選(factor fixing)之依據，若一模式輸入參數之全域敏感度指數很小，代表該輸入條件在其可能範圍內任意變動時並不致對模式輸入產生顯著影響。

3.2.1 取樣法

在此之取樣法(sampling-based)是利用相關係數之值，了解到函數變量與函數結果間之關係。Chang et al. (2010)曾將相關係數應用到崩塌模式上，公式如下：

$$r(\text{FS}, x_k) = \frac{\sum_{m=1}^M [R(x_{k,m}) - \overline{R_{x_k}}][R(\text{FS}_m) - \overline{R_{\text{FS}}}]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M [R(x_{k,m}) - \overline{R_{x_k}}]^2 \sum_{m=1}^M [R(\text{FS}_m) - \overline{R_{\text{FS}}}]^2}} \quad (3.25)$$

其中， $r(\text{FS}, x_k)$ 為安全係數(FS)與模式第 k 個輸入參數之相關係數，M 為一組安全係數和模式輸入參數之樣本數， $R(x_{k,m})$ 、 $R(\text{FS}_m)$ 為第 k 個輸入參數隨機樣本中之第 M 個， FS_m 則是代表模式輸出之安全係數， $\overline{R_{x_k}}$ 、 $\overline{R_{\text{FS}}}$ 則分別代表模式參數樣本平均值以及參數樣本經過模式計算所輸出之安全係數平均值。相關係數之意義為輸出值之不確定性被輸入參數解釋之比例，若隨機輸入之參數 k 與模式輸出有較高之相關係數值，表示其影響模式輸出之比例也較高。但基本之相關係數公式計算以參數與模式輸出兩者單獨之間比例做判斷，由於在本文假設保水曲線參數彼此間具有相關性、坡度與土層厚度間也具有線性關係，因此相關係數之計算方式較不適用。

相關係數不適用，因此轉為計算偏相關係數(partial correlation coefficient)，偏相關係數是將所需計算相關係數之參數排除兩者之外的影響所計算之相關係數；或部分相關係數(part correlation coefficient)，又稱之為半偏相關係數(semi-partial correlation coefficient)，只處理各別參數與其它參

數之影響所得到之相關係數，然而因兩者所考慮之方式不同，各別都有其優點以及缺點。計算方式如圖 3.1 與圖 3.2 所示， Y 為模式輸出， X_1 、 X_2 為模式之參數，圖 3.1 偏相關係數計算，實線部分為分母值，分母為全體之相關係數扣除與 X_1 有影響之值，虛線部分則為分子僅考慮 Y 與 X_1 之影響關係；圖 3.2 為部分相關係數計算示意圖，與圖 3.1 之差異在於分母不管參數間彼此之影響全部納入考慮。由示意圖可看出偏相關係數當參數與模式輸出間線性程度較大時，會造成所計算各參數出之偏相關係數之值會非常接近，讓參數之敏感度難以判別。因此，本文選用較不受模式參數與輸出值間線性程度影響之部分相關係數作為計算，其計算式如下：

$$r_{y(z \cdot x)} = \frac{r_{yz} - r_{xy} r_{xz}}{\sqrt{1 - r_{xy}^2}} \quad (3.26)$$

上述式子 r_{yz} 表示 y 、 z 間相關係數，其餘的以此類推。但使用此項方程式計算時間花費較大，所以轉為以矩陣計算型式做計算，如下：

$$r_{y(z \cdot x)} = \frac{r_{yz} - V_y' B_z}{\sqrt{1 - R_z^2}} \quad (3.27)$$

其中， $V_y' B_z$ 為參數相乘之和 VZ 乘上參數與參數相乘所得矩陣之反矩陣和 BZ ， R_z^2 為參數與模式輸出值相乘之和 VY 乘上 BZ 。部分相關係數所計算之敏感度分析，正負之表示參數影響為正相關亦或是負相關，以及此項整體敏感度分析可用於重要影響因子之篩選(factor prioritization)，部分相關係數之絕對值越高，代表該影響因子之不確定性對模式輸出之影響越大，但是此方法無法進行低影響因子篩選(factor fixing)，因其未考慮參數間彼此在模式計算中可能具有之交互作用。

第四章 假設案例探討分析

在本文之第二章、第三章分別介紹了降雨引發坡地淺崩塌模式，以及敏感度分析之方法。本章節將使用前述之模式和分析方法作為基礎，並以假設之案例分析模式參數之敏感度。

4.1 資料選取概述及參數設定

4.1.1 資料選取概述

民國 93 年艾利颱風大豪雨造成石門水庫上游集水區內發生嚴重崩塌，此崩塌造成水庫淤積、水庫供水問題以及和崩塌地區周遭生活人民之危難。因此，在民國 95 年 1 月 13 日政府所公告之「石門水庫及其集水區整治特別條例」，以確保石門水庫營運功能、上游集水區水域環境之保育及穩定水庫供水能力、保障民眾用水能力。因特別條例在石門水庫上游集水區內投入了大量研究經費，所以石門水庫上游集水區內有較完整之土壤試驗資料以及地形調查資料。因此，本文之假設案例，降雨資料採用集水區內三光雨量站所量測之艾利颱風 48 小時降雨事件資料，土壤參數資料選用經濟部水利署所辦理之「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究」計畫所完成相關土壤試驗之資料數據，資料來源位置如圖 4.1，以及數值高程模式 DEM 選用工研院制作之 5 m DEM 資料。模式保水曲線之參數資料則是根據砂崙仔崩塌工程地區，土壤粒徑試驗結果為粗粒土壤，依 Carsel and Parrish (1988)內所提出之砂質壤土(sandy loam)保水曲線參數值。

4.1.2 案例模式條件設定

模式輸入條件與模式本身可能具有某種程度上之不確定性，進而造成模擬結果之誤差。因此，在本文考慮模式參數之變異性與彼此間之相關性，繼而進行敏感度分析。以下將詳細介紹模式參數之統計特性、參數之相關

性以及現地參數之試驗資料，予以案例設定：

不進行敏感度分析之參數

不考慮敏感度之參數包含有降雨條件、水之單位重(γ_w)、飽和體積含水量(θ_s)。降雨條件採用民國 93 年艾利颱風期間之豪雨事件作為資料，以三光雨量站所測得之時雨量資料進行模擬，表 4.1 與圖 4.2 分別為時雨量資料表及降雨組體圖，降雨時間為民國 93 年 8 月 23 日 12 時至 25 日 11 時，共計 48 小時，模擬時間總計 96 小時。水之單位重假設為 9.81 kN/m^3 。飽和體積含水量(θ_s)根據 Carsel and Parrish (1988)假設為 0.41。

進行敏感度分析之參數

1. 初始地下水位(d_z)：

在台灣地區無長期地下水位監測資料，因此為考慮地下水位之變化對模式輸出之影響，在本文初步假設初始地下水位之機率密度函數分佈符合均勻分布(uniform distribution)，變動範圍介於上限 5m，下限 1m 之間。統計特性整理於表 4.2。

2. 坡度(α)

坡度可以藉由數值高程模式(Digital Elevation Model, DEM)搭配 Arc GIS 軟體做計算可以得到。在此考慮坡度之變異性肇因於 DEM 之量測誤差，而均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)為評估 DEM 高程精度之指標性數值，其定義如下：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon^2}{n}} \quad (4.1)$$

其中， ε 為 DEM 量測誤差。測量無系統誤差之情形下，DEM 僅存有測量過

程中所造成之隨機誤差(random error)。由於隨機誤差沒有任何規則性，所以在假設無系統誤差下，DEM 之誤差平均值可假設為 0，標準差可近似均方根誤差值 RMSE，如下所示：

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon - \mu)^2}{n-1}} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon^2}{n}} \quad (4.2)$$

其中， σ_{ε} 為 DEM 量測誤差 ε 之標準差， μ 則為其平均值。Li (1992) 指出 DEM 量測誤差 ε 接近常態分佈。

根據上述之假設，考慮 DEM 量測誤差 ε 之真實高程可表示為：

$$DEM_{real} = DEM_{measure} + \varepsilon; \varepsilon \sim N(0, RMSE^2) \quad (4.3)$$

其中， DEM_{real} 為考慮量測誤差之真實高程， $DEM_{measure}$ 為實際測量之高程， ε 為隨機誤差項，根據 Li (1992) 假設為常態分佈。

不同 DEM 解析度對坡度之計算上也有所影響，因此本文為考慮 DEM 解析度對坡度之影響，分別以 5 m DEM 解析度、40 m DEM 解析度做分析並探討結果之差異。資料來源為工研院製做之 5 m DEM 資料，並以 5 m DEM 資料擷取 40 m DEM 資料做分析，並根據顏(2005)之研究假設其 RMSE 分別為 2.126 和 4.152。

利用 DEM 計算坡度之方法有相當多種，本文以 Arc GIS 軟體內建之八點法為坡度計算公式，所以計算單一網格坡度需鄰近八個格網點之高程資料配合。由於鄰近格網之 DEM 量測誤差 ε 大多具有空間相關性，假設量測誤差 ε 符合二階定常性(second-order stationary)(Cressie, 1993)、等向性(isotropy)，以及定常共變異數為指數型態(Wanger and Gorelick, 1989；Mylopoulos, 1999)，所以空間變異性(spatial variability)之隨機變數期望值在空間上的任一點皆相等，任兩點之共變異數(covariance)僅與兩點間之距離有關，如下所表示：

$$E[\varepsilon] = \mu \quad (4.4)$$

$$\text{Cov}[\varepsilon_i, \varepsilon_j] = \sigma_\varepsilon^2 \times \exp\left\{-\frac{|\Delta_{i,j}|}{a}\right\} \quad (4.5)$$

其中， i 與 j 代表空間上之點位， μ 、 σ_ε 分別為 DEM 量測誤差之平均值與標準差， $|\Delta_{i,j}|$ 為 i 點與 j 點之距離， a 為水平相關尺度。在此假設水平相關尺度為 40，並利用(4.4)式與(4.5)式求得具有空間相關性之量測誤差，接著帶入(4.3)式求得真實高程，再配合 Arc GIS 八點法坡度公式做坡度之計算。

3. 土層厚度(d_{LZ})

根據陳本康(2005)所提出之坡度與土層厚度回歸公式，現場量測之資料如圖 4.3 所示。Chang et al. (2010)以陳本康(2005)現場量測之資料推估土層厚度之變異性如圖 4.4 所示，建立崩塌深度與坡度之關係如下所示：

$$d_{LZ} = -0.0716\alpha + 5.6563 + \varepsilon_d; \varepsilon_d \sim N(0, 0.3076^2) \quad (4.6)$$

其中， d_{LZ} 為土層厚度， α 為坡度， ε_d 為常態分佈之隨機誤差項(平均值為 0，標準差為 0.3076)。誤差項 ε_d 與坡度、土層厚度互為獨立無相關性，因此土壤厚度可透過計算好的坡度，在考慮迴歸誤差下，經由(4.6)式求得。

4. 土壤參數

包含土壤比重(G_s)、有效摩擦角(ϕ')與有效凝聚力(c')，其平均值選用「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究」所做地土壤試驗值，而有效摩擦角(ϕ')、有效凝聚力(c')機率密度函數根據 Refice and Capolongo (2002)假設為常態分佈；土壤比重(G_s)機率密度函數根據 Harr (1987)假設為常態分佈，其餘詳細之統計特性皆整理於表 4.2。

Christian et al. (1994)與 Husein Malkawi et al. (2000)皆指出摩擦角、凝聚

力與土壤單位重彼此間相關性相當微小而可加以忽略，而 Chen et al. (2007) 也曾指出凝聚力與摩擦角雖與地下水位有關，但在參數間相關性資料缺乏的情況下，可合理將其視為互相獨立。故本文，假設摩擦角、凝聚力與土壤比重間彼此互相獨立而無相關性存在。

5. 保水曲線參數

飽和水力傳導係數(K_s)、殘餘體積含水量(θ_r)、進氣潛能因子(ζ)、孔徑指數(N)四個參數根據 Carsel and Parrish (1988)所提出之共變異係數矩陣，如表 4.3，考慮彼此之相關性。孔徑指數(N)的機率密度函數為 Johnson system 之 LN(lognormal)；水力傳導係數(K_s)、殘餘體積含水量(θ_r)、進氣潛能因子(ζ)的機率密度函數為 Johnson system 之 SB(log ratio)。保水曲線參數之統計特性皆整理於表 4.2。

藉由正交轉換(orthogonal transformation)將不具有相關性之樣本轉換為具有相關性，接著利用 Johnson 逆轉換，式子如下：

$$\text{LN} : X = \exp(Y) \quad (4.7)$$

$$\text{SB} : X = [B \exp(Y) + A] / [\exp(Y) + 1] \quad (4.8)$$

其中， X 為有相關性之 Johnson system 分佈， Y 為具有相關性之常態分佈樣本， A 為參數所限制之下限， B 則為上限。在此 SB 分佈之水力傳導係數(K_s) 上限 B 為 30，下限 A 為 0；殘餘體積含水量(θ_r) 上限 B 為 0.11，下限 A 為 0；進氣潛能因子(ζ) 上限 B 為 0.25，下限 A 為 0。

4.2 假設案例分析

為了使假設案例可明確地表示出不同 DEM 解析度下，不同的坡度對模式輸入參數敏感度之影響，故設計六種案例分別探討，如表 4.4。並進一步在案例上做細分，將土層以相對之位置做 3 等分，探討不同深度下，隨時

間變化之參數敏感度。以及假設案例敏感度分析之結果是針對特定之條件設定如土壤性質、DEM 量測之方式等所得到之結果，無限制特定地區，因此具有相同之設定情況下在此研究結果可提供參考。

4.2.1 孔隙水壓敏感度分析

模式內降雨為直接影響孔隙水壓之變化，藉由孔隙水壓進一步影響安全係數之變化。在模式之參數上，有效摩擦角、有效凝聚力、土壤比重為直接影響安全係數；初始地下水位參數、保水曲線參數為直接影響孔隙水壓，而坡度、土層厚度對孔隙水壓、安全係數皆有直接之影響。因此，為明確地了解影響孔隙水壓之參數敏感度隨時間之變化，對孔隙水壓做敏感度分析，結果為圖 4.5 至圖 4.12。

變異數法

圖 4.5 降雨入滲未到達時，以初始地下水位敏感度最大，保水曲線參數與坡度、土層厚度敏感度趨於零。大約在 20 小時後受到降雨影響，初始地下水位敏感度開始下降，保水曲線參數敏感度上升，坡度、土層厚度敏感度係數趨近於零。圖 4.6 土層越下方，影響之時間延後，受到降雨之影響也減弱。比照圖 4.5 與圖 4.7 也觀察出越下方之土層因累積之土層越厚，造成坡度、土層厚度敏感度有些許增加。圖 4.8 為全域敏感度指數在其考慮參數交互作用之影響下，初始地下水位之敏感度指數明顯的較一階敏感度數大。而案例二、案例三參數敏感度隨時間之變化趨勢也與案例一相近。

案例四，圖 4.9，DEM 解析度為 5 m 與 40 m 解析度之圖 4.5 做比較，變化趨勢相近，皆在降雨未影響時，初始地下水位敏感度最大，保水曲線參數與坡度、土層厚度敏感度係數趨近於零。當開始受降雨影響，保水曲線參數敏感度上升，初始地下水位敏感度降低，則坡度、土層厚度變化不明顯。而其餘案例之變化趨勢皆與前述之案例相同。

取樣法

案例一，圖 4.10 未受到降雨影響時，初始地下水位敏感度為負相關並且值為最大，其餘參數部分相關係數之值皆趨近於零。大約 20 小時後，初始地下水位部分相關係數值向座標軸正的方向變化，以及殘餘體積含水量與孔徑指數敏感度係數也向座標軸正的方向變化，水力傳導係數、進氣潛能因子則向負的方向變化，坡度、土層厚度之部分相關係數值趨近於零。而圖 4.11、圖 4.12 土層越下方，因越接近飽和受降雨影響越不明顯所以參數敏感度對時間之變化也較不明顯，以及越下方相對累積的土層厚度越厚，造成土層厚度部分相關係數值增加。案例二至案例六參數部分相關係數值隨時間之變化趨勢皆與案例一相近。

4.2.2 安全係數敏感度分析

此小節中，探討參數之變異對安全係數之影響，然而在此模式中孔隙水壓為影響安全係數變化之重要因子，因此在安全係數敏感度分析時也探討模式內主要影響孔隙水壓之保水曲線參數與初始地下水位之變異對安全係數之影響。

變異數法

DEM 解析度為 40 m

案例一，一階敏感度指數圖 4.13，開始參數敏感度為摩擦角最大，次要為坡度、土層厚度，其餘參數敏感度皆趨近零。當受到降雨影響後，主要影響孔隙水壓之參數敏感度上升，有效摩擦角敏感度稍微降低。圖 4.14 土層越下方因越接近飽和，所以受降雨影響較小，造成參數敏感度隨時間之變化也較不明顯，圖 4.15 更加趨近於飽和，造成參數敏感度隨時間之變化幾乎不變，然而飽和程度受到初始地下水位面的影響，所以初始地下水

位敏感度越下方越大。全域敏感度指數圖 4.16 與圖 4.14 相較之下，參數敏感度隨時間之變化趨勢相近。

案例二，一階敏感度指數圖 4.17，未受到降雨影響時，摩擦角敏感度最大，次要為凝聚力，其餘參數敏感度皆不顯著。當受到影響時，相較於圖 4.13 保水曲線敏感度變化較為劇烈，因土層之分層是依相對位置作劃分，所以相較於案例一土層厚度較薄之緣故。土層越下方圖 4.18，受降雨影響較不顯著，保水曲線參數敏感度隨時間變化趨於平緩。全域敏感度指數圖 4.19 與圖 4.17 相互比較後得知坡度、土層厚度之敏感表現較一階敏感度指數明顯，藉此也可知曉參數交互作用之重要性。

案例三，一階敏感度指數圖 4.20，在降雨未影響前，參數之敏感度為摩擦角為最大，次要為凝聚力，其餘參數之敏感度皆趨近於零。越下方之土層圖 4.21，因越趨於飽和，參數之敏感度隨時間變化則趨於平緩。全域敏感度指數圖 4.22 相較於圖 4.21，因考慮參數間交互作用，凝聚力之敏感度較一階敏感度時明顯。

DEM 解析度為 5 m

案例四，一階敏感度指數圖 4.23，在降雨未影響前，參數敏感度為坡度、土層厚度為最大，次要為摩擦角，其餘參數之敏感度皆趨近於零。當受到降雨影響時，主要影響孔隙水壓之初始地下水位與保水曲線參數敏感度有些許之變化，與圖 4.13 比較變化不明顯。圖 4.24 越下方之土層，因土壤越趨於飽和，因此參數之敏感度隨時間變化趨於平緩。

案例五，一階敏感度指數圖 4.25，在降雨未影響前，參數之敏感度為摩擦角最大，次要為坡度、土層厚度，其餘參數之敏感度皆趨近於零。當受到降雨影響時，主要影響孔隙水壓之參數敏感度變大，摩擦角與坡度、土層厚度敏感度下降。而全域敏感度指數圖 4.26 與圖 4.25 相較下，圖 4.26 因考慮參數交互作用使凝聚力之敏感度有較明顯的表現。

案例六，一階敏感度指數圖 4.27，在降雨未影響前，參數之敏感度為摩擦角最大，次要為凝聚力，接著為坡度、土層厚度，其餘參數之敏感度皆趨近於零。土層分層是依相對位置做劃分，因此陡坡之案例土層厚度相對較薄，所以明顯地受到降雨影響的時間提前。全域敏感度指數圖 4.29 與圖 4.28 比較，圖 4.29 因考慮參數彼此交互作用之影響，凝聚力之參數敏感度較一階敏感度指數時表現更為顯著。

取樣法

DEM 解析度為 40 m

案例一，圖 4.30 在降雨未影響前，參數部分相關係數之絕對值大小順序為摩擦角、坡度、凝聚力、初始地下水位，其餘參數部分相關係數之值皆趨近於零。當降雨開始影響時，主要影響孔隙水壓之初始地下水位、水力傳導係數與進氣潛能因子部分相關係數值向座標軸正的方向增加，以及主要影響孔隙水壓之殘餘體積含水量與孔徑指數則向負方向增加。圖 4.31 與圖 4.32 越下方之土層，相對之土層厚度越厚，因此土層厚度之部分相關係數值變大；越下方相對的越接近飽和，減緩降雨的影響，因此參數部分相關係數值隨時間之變化也較為趨緩，而飽和之程度受到初始地下水位的影響，所以初始地下水位之敏感度增加。

案例二，圖 4.33 降雨影響未到達前，參數部分相關係數值之絕對值大小順序為摩擦角、凝聚力、坡度，其餘參數之部分相關係數值皆趨近於零。當降雨開始影響，主要影響孔隙水壓之初始地下水位、水力傳導係數與進氣潛能因子皆朝座標軸正的方向增加，以及主要影響孔隙水壓之殘餘體積含水量與孔徑指數則朝負的方向增加。圖 4.34 為土層分層之底部，由於越下方土壤越接近飽和，因此明顯的凝聚力之敏感度較圖 4.33 小。

案例三，圖 4.35 當參數受到降雨影響時，參數部分相關係數值隨時間

之變化相較於圖 4.33 變化更為劇烈，因為土層分層以相對土層做劃分，所以圖 4.35 之土層厚度較圖 4.33 薄，造成降雨的影響更為劇烈。

DEM 解析度為 5 m

案例四，圖 4.36 在降雨未影響前，參數部分相關係數值之絕對值大小順序為摩擦角、坡度，其餘參數敏感度皆趨近於零。當降雨開始影響時，主要影響孔隙水壓之參數部分相關係數值開始增大，但相較於圖 4.30 變化較不劇烈。

案例五，圖 4.38 降雨影響未到達前，參數部分相關係數值之絕對值大小順序為摩擦角、坡度、凝聚力，其餘參數敏感度皆趨近於零。當受到降雨影響時，主要影響孔隙水壓之初始地下水位、水力傳導係數與進氣潛能因子向正方向增大，以及主要影響孔隙水壓之殘餘體積含水量與孔徑指數向負方向增大，然而影響安全係數之摩擦角與凝聚力則減小。圖 4.39 土層底部相較圖 4.38 凝聚力敏感度變小，此因為越下層越接近飽和促使凝聚力之影響性變小。

案例六，圖 4.40 相較於案例三與案例四因坡度較大相對的凝聚力之部分相關係數值也變大。當受到降雨影響時，也因為土層厚度較薄，造成參數部分相關係數值之變化也較前兩個案例劇烈。比較圖 4.40 與圖 4.41，位於越下方，土層厚度之部分相關係數值較大，此事因越下方相對累積之土層越厚，進而對安全係數之影響增加。

第五章 結論與建議

在前四個章節，分別闡述過去邊坡穩定分析、敏感度分析、一維未飽和降雨引發坡地淺崩塌模式、本文所使用之敏感度分析方法之理論架構以及假設案例模式參數之敏感度隨時間變化之分析結果。本章節對前文內容所述做一統整，並對後續研究提出建議以供參考。

5.1 結論

基於 Tsai and Chen (2010)所發展之「一維未飽和降雨引發坡地淺崩塌模式」，本文考慮模式參數之變異性與彼此間之相關性，同時以兩種不同解析度之 DEM 資料產生三種不同之平均坡度，合計共六個案例，並且以艾利颱風 48 小時之降雨事件進行模擬，對模式輸出之孔隙水壓與安全係數分別以變異數法與取樣法做整體敏感度分析，分析結果歸納如下：

1. 變異數法之敏感度分析結果顯示，在部分案例與參數中，其全域敏感度指數顯著大於一階敏感度指數，如案例一中初始地下水位對孔隙水壓之敏感度指數；案例二中坡度、土層厚度對安全係數之敏感度指數；案例三、案例五與案例六凝聚力對安全係數之敏感度指數。
2. 40 m 解析度之 DEM 其量測隨機誤差雖大於 5 m 解析度 DEM，但其因水平尺度較大，因此由 40 m 解析度 DEM 所計算之坡度其變異性較以 5 m 解析度 DEM 所計算為小，故 5 m 解析度之坡度敏感度指數與部分相關係數分析結果其皆較 40 m 解析度時大。此外，緩坡的案例受 DEM 解析度影響較大，因此在緩坡案例中坡度敏感度指數與部分相關係數分析結果較中間坡與陡坡之案例大，且隨著坡度上升而降低。
3. 凝聚力之安全係數敏感度指數與部分相關係數分析結果皆顯示隨著坡度之上升，其對模式之輸出影響越大。

4. 全域敏感度指數分析結果顯示土壤比重對安全係數影響不大，摩擦角對於安全係數有極為重要之影響。
5. 孔隙水壓敏感度分析結果顯示，保水曲線參數變異性對孔隙水壓之影響隨累積降雨之增加而增加，而初始地下水位之變異性對孔隙水壓之影響隨累積降雨之增加而降低。另外在安全係數敏感度分析方面，保水曲線參數與初始地下水位對安全係數之影響皆隨累積雨量之增加而增加。土層越深處之安全係數其受土層厚度變異性之影響越大，但土層越深處之安全係數其受凝聚力變異性之影響則越小。

由一階敏感度分析結果與全域敏感度分析結果相互比較，得知此模式參數間彼此交互作用對模式之輸出具有一定的影響程度；以及在敏感度指數分析與部分相關係數隨時間之變化，其分析結果皆顯示參數之變化對模式輸出之影響是極為複雜情況，因此不可以任意忽略參數之重要性。

5.2 建議

1. 本文在計算坡度上假設 DEM 誤差之空間變異性具有指數型態之共變異函數，而依據現地狀況之不同應考慮假設之合適性，未來可進一步探討共變異函數為其他型態時之影響。
2. 進行變異數敏感度分析方法在未來嘗試採用可獨立分析各參數敏感度係數之方法。
3. 未來可以實際現地之案例，分析崩塌參度與崩塌時間之敏感度分析，以評估降雨條件對坡地淺崩塌之影響。

參考文獻

1. 打荻珠男(1971),「ひと雨による山腹崩壊について」,新砂防。
2. 方至聖(2010),「地質參數對降雨入滲無限邊坡安全係數之敏感度分析」,國立嘉義大學土木與水資源工程學研究所,碩士論文。
3. 林仙蕓(2008),「降雨引發坡地崩塌之區域性風險分析研究」,國立交通大學土木工程學研究所,碩士論文。
4. 林柏勳(2011),「石門水庫集水區土壤厚度經驗式探討」,水保技術, 98-109。
5. 林俐玲、陳信宏(2006),「推估土壤水分特性研究」,水土保持學報,38(3), 287-302。
6. 陳樹群(2003),「水庫集水區土砂整治成效評估 2/2」,經濟部水利署。
7. 陳本康(2005),「石門水庫集水區崩塌特性及潛勢評估研究」,國立中興大學水土保持學研究所,博士論文。
8. 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。
9. 陳資婷(2011),「建立考量土壤參數不確定性之降雨引發淺崩塌機率模式」,國立嘉義大學土木與水資源工程學研究所,碩士論文。
10. 楊錦釗(2008),「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究 3/3」,經濟部水利署。
11. 楊錦釗(2011),「水庫集水區區域性高精度崩塌潛勢分析研究 3/3」,經濟部水利署。
12. 顏宏宇(2005),「LiDAR 直接量測數值地形資料精度分析與應用」,國立成功大學地球科學研究所,碩士論文。
13. 蘇歆婷(2007),「降雨引發坡地崩塌風險評估模式之建立與應用」,國立

交通大學土木工程學研究所，碩士論文。

14. 劉綾玲(2012)，「數種不確定性分析方法於降雨引發坡地崩塌模式之比較研究」，國立交通大學土木工程學研究所，碩士論文。
15. 謝正倫(2002)，「流域土砂管理模式之研究 3/3」，經濟部水資源局。
16. 鍾欣翰(2008)，「考慮水文模式的地形穩定分析—以匹亞溪集水區為例」，國立中央大學應用地質研究所，碩士論文。
17. Alonso, E. E. (1976). Risk Analysis of Slopes and its Application to Canadian Sensitive Clays. *Geotechnique*, 26(3), 453-472.
18. Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. 1, Basic Principles*. John Wiley & Sons Inc.
19. Baum RL, Savage WZ, Godt JW (2002). TRIGRS-a Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Analysis, Virginia, US Geological Survey Open file report, 02-424.
20. Bear J (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover, Mineola, New York.
21. Bishop AW (1954). The Use of Pore Pressure Coefficients in Practice. *Geotechnique*, 4, 148-152.
22. Borga, M., Dalla Fontana, G., Gregoretti, C. and Marchi, L. (2002). Assessment of Shallow Landsliding by Using a Physically Based Model of Hillslope Stability. *Hydrological Processes*, 16 (14), 2833-2851.
23. Brooks, R.H., and A.T. Corey (1964). *Hydraulic Properties of Porous Media*. Hydrology Paper 3. Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
24. Campbell, G. (1974). A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data. *Soil Sci.* 142, 311-314.
25. Carsel RF, Parrish RS (1988). Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755-769.
26. Celia MA, Bouloutas ET, Zarba RL (1990). A General Mass-Conservation

- Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation. *Water Resources Research*, 26(7), 1483-1496.
27. Chang, C. H., Yang, J. C., and Tung, Y. K. (1993) Sensitivity and Uncertainty Analyses of a Sediment Transport Model: a Global Approach. *Journal of Stochastic Hydrology and Hydraulic*, 7(4), 299-314.
28. Chang, Y. L., Tsai, T. L., & Yang, J. C. (5th-7th of July 2010). Global Sensitivity and Uncertainty Analysis of Rainfall Triggered Shallow Landslide. Paper presented at the 10th International Symposium on Stochastic Hydraulics and the 5th International Conference on Water Resources and Environment Research, Quebec City, Canada.
29. Chen, J. C., Jan, C. D., & Lee, M. H. (2007). Probabilistic Analysis of Landslide Potential of an Inclined Uniform Soil Layer of Infinite Length: Theorem. *Environmental Geology*, 51(7), 1239-1248.
30. Cheung, R. W. M. and Tang, W. H. (2005). Realistic Assessment of Slope Reliability for Effective Landslide Hazard Management. *Geotechnique*, 55(1), 85-94.
31. Christian, J. T., Ladd, C. C., & Baecher, G. B. (1992). Reliability and Probability in Stability Analysis.
32. Christian, J. T., Ladd, C. C., & Baecher, G. B. (1994). Reliability Applied to Slope Stability Analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*; (United States), 120(12), 2180-2207.
33. Cressie, N. A. C. (1993). *Statistics for Spatial Data*: Wiley (New York).
34. Cruden, D. M. and Fell, R. (1997) Landslide Risk Assessment, Proc. of International Workshop on Landslide Risk Assessment. Honolulu, Hawaii, U.S.A.
35. Dai, F. C., Lee, C. F., & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide Risk Assessment and Management: an Overview. *Engineering Geology*, 64(1), 65-87.
36. Delmonaco G, Leoni G, Margottini C, Puglisi C, Spizzichino D (2003), Large Scale Debris-Flow Hazard Assessment: A Geotechnical Approach and

- GIS Modeling, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, (3), 443-455.
37. El-Kadi, A. I. (1987). Variability of Infiltration under Uncertainty in Unsaturated Zone Parameter, *J. Hydrol.*, 90(1), 61-80.
38. Fetter, C. W. (1994). *Applied Hydrology*. New York: Macmillan College Publishing Company Inc.
39. Gelhar LW (1993). *Stochastic Subsurface Hydrology*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
40. Griffiths, D. V. and Fenton, G. A. (2001) Bearing Capacity of Spatially Random Soil: the Untrained Clay Prandtl Problem Revisited. *Geotechnique*, (4), 351-359.
41. Harr, M. E. (1987). *Reliability-Based Design in Civil Engineering*. McGraw-Hill, New York.
42. Haverkamp, R., M. Vauclin, J. Touma,; P. J. Wierenga, and, G. Vachaud (1977). A Comparison of Numerical Simulation Models for One-Dimensional Infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 285-294.
43. Harp, E. L., Jibson, R. W., (1995). Inventory of Landslides Triggered by the 1994 Northridge, California Earthquake, in: *US Geological Survey Open-File Report*, 17, 95-213.
44. Heimsath, A. M., Dirtrich, W. E., Nishiizumi, K., and Finkel, R. C.,(1999). Cosmogenic Nuclides, Topography, and the Spatial Variation of Soil Depth. *Geomorphology*, 27, 151-172.
45. Homma, T., Saltelli, A.(1996). Importance Measures in Global Sensitivity Analysis of Model Output, *Reliability Engrg. System Safety* 52 (1), 1–17.
46. Hovius, N., Stark, C. P., & Allen, P. A. (1997). Sediment Flux from a Mountain Belt Derived by Landslide Mapping. *Geology*, 25(3), 231-234.
47. Husein Malkawi, A. I., Hassan, W. F., & Abdulla, F. A. (2000). Uncertainty and Reliability Analysis Applied to Slope Stability. *Structural Safety*, 22(2), 161-187.
48. Hurley DG, Pantelis G (1985). Unsaturated and Saturated Flow through a

- Thin Porous Layer on A Hillslope. *Water Resources Research*, 21, 821-824.
49. Iverson, R. M. (2000). Landslide Triggering by Rain Infiltration. *Water Resources Research*, 36(7), 1897-1910.
50. Ishigami, T., Homma, T., (1990). An Importance Quantification Technique in Uncertainty Analysis for Computer Models, in: *Proceedings of The ISUMA'90, First International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis*, December 3–6, University of Maryland.
51. Jennings, E. (1965). Matrix Formulas for Part and Partial Correlation. *Psychometrika*, 30(3).
52. Jacques, J., Lavergne, C. and Devictor, N. (2006). Sensitivity Analysis in Presence of Model Uncertainty and Correlation Inputs. *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 1126-1134.
53. Jibson, R. W., Harp, E. L., & Michael, J. A. (1998). A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps: An Example from The Los Angeles, California, area: US Dept. of the Interior, US Geological Survey.
54. Korup, O. (2005). Distribution of Landslides in Southwest New Zealand. *Landslides*, 2(1), 43-51.
55. Knopman, D.S. and Voss ,C.I. (1988). Further Comment Sensitivities, Parameter Estimation and Sampling Design in One-Dimension Analysis of Solute Transport in Porous Media. *Water Resources Research*, 24(2), 225-238.
56. Lu, N. and Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Hoboben, New Jersey.
57. Morgenstern, N. R., (1997). *Toward Landslide Risk Assessment in Practice*. In: Cruden and Fell (eds.) *Landslide Risk Assessment*, 15-24, Balkema, Rotterdam.
58. Mostyn, G. R. and Li, K. S., (1993). Probabilistic Slope Analysis-State-of-Play. *Proceedings of the Conference on Probabilistic*

- Methods in Geotechnical Engineering, 89-110, Canberra, Australia.
59. Mylopoulos, Y. A., Theodosiou, N., & Mylopoulos, N. A. (1999). A Stochastic Optimization Approach in the Design of an Aquifer Remediation under Hydrogeological Uncertainty. *Water Resources Management*, 13(5), 335-351.
 60. Petley, D. N. (2008). The Global Occurrence of Fatal Landslides in 2007. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU General Assembly 2008, 3pp.
 61. Refice A, Capolongo D (2002), Probabilistic Modeling of Uncertainties in Earthquake-Induced Landslide Hazard Assessment. *Computers & Geosciences*, 28, 735-749.
 62. Saltelli,A.,Ratto,M.,Andres,T.,Campolongo, F. ,Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. and Tarantola, S. (2008) *Global Sensitivity Analysis, the Primer* .
 63. Saltelli, A., S. Tarantola, F. Campolongo and M. Ratto (2004). *Sensitivity Analysis in Practice: a Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, Ltd.
 64. Saltelli,A.(2002).Making Best Use of Model Evaluations to Compute Sensitivity Indices. *Computer Physics Communications* 145, 280-297.
 65. Salciarini D, Godt JW, Savage WZ, Conversini P, Baum RL, Michael JA (2006), Modeling Regional Initiation of Rainfall-Induced Shallow Landslides in the Eastern Umbria Region of Central Italy. *Landslides*, 3, 181-194.
 66. Sivakumar Babu G.L., Mukesh M.D. (2003), Risk Analysis of Landslides-a Case Study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 21, 113-127.
 67. Sobol', I. M. (1990). Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. *Matematicheskoe Modelirovanie* 2, 112–118.
 68. Soeters, R. and Van Westen, C. J. (1996). Slope Stability Recognition, Analysis and Zonation in: *Landslides Investigation and Mitigation*. (eds.) Turner, A. K., Schuster, R. L., Transportation Research Board, special report 247, 129-177, National Academy Press, Washington.
 69. Tsai TL (2008). The Influence of Rainstorm Pattern on Shallow Landslide.

- Environmental Geology, 53(7), 1563-1570.
70. Tsai TL, Chen HE, Yang JC (2008). Numerical Modeling of Rainstorm-Triggered Shallow Landslides in Saturated and Unsaturated Soils, Environmental Geology, 55(4), 1269-1277.
71. Tsai TL, Chen HF (2010). Effects of Degree of Saturation on Shallow Landslides Triggered by Rainfall. Environmental Earth Sciences, 59, 1285-1295.
72. Tsai TL, Yang JC (2006). Modeling of Rainfall-Triggered Shallow Landslide. Environmental Geology, 50(4), 525-534.
73. Tung, Y. K. and Yen, B. C. (2005). Hydrosystems Engineering Uncertainty Analysis. McGraw-Hill, New York.
74. Van Genuchten (1980). A Closed-Form Equation for Predicting Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.
75. Vanmarcke, E. H. (1977). Reliability of Earth Slopes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103(11), 1227-1246.
76. Vanmarcke, E. H. (1992). Reliability in Foundation Engineering Practice. Foundation Engineering, Principles and Practices, Vol. 2., (Ed. E. H. Kulhawy), 1158–1669.
77. Van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M. T. J. and Soeters, R. (1997). Prediction of the Occurrence of Slope Instability Phenomena through GIS-Based Hazard Zonation. Geologische Rundschau, 86(2), 404-414.
78. Van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J. and Soeters, R. (2006). Landslide Hazard and Risk Zonation – Why is it Still so Difficult? Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65(2), 167-184.
79. Vanapalli SK, Fredlund DG (2000), Comparison of Empirical Procedures to Predict the Shear Strength of Unsaturated Soils Using the Soil-Water Characteristic Curve. In Advances in Unsaturated Geotechnics, Shackelford CD, Houston SL, and Chang NY eds. GPS No.99, ASCE, Reston, VA, pp. 195-209.

80. Wagner, B. J., & Gorelick, S. M. (1989). Reliable Aquifer Remediation in the Presence of Spatially Variable Hydraulic Conductivity: From Data to Design. *Water Resources Research*, 25(10), 2211-2225.
81. Yarahmadi Bafghi AR, Verdel T (2005). Sarma-Based Key-Group Method for Rock Slope Reliability Analysis. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29, 1019-1043.



表 1.1 國內外崩塌評估方法相關整理

研究者	研究方法分類	方法簡述	優點	缺點
謝正倫 (2002)	經驗法	利用打荻公式推估崩塌	1.簡單 2.適用大區域	1.不具力學基礎 2.需要大量的歷年崩塌資料率定參數 3.具區域性限制而無法適用於任何地區
陳樹群 (2004)	經驗法	利用篩選崩塌相關因子並給定各因子評分及權重之方式評估是否會產生崩塌。(此法類似環境影響評估常用之方法)	1.簡單 2.適用大區域	1.不具力學基礎 2.需要人為給定各崩塌因子評分及權重 3.可能較不客觀
Iverson (2000)	理論法	利用一維垂向近似飽和 Richard 方程式，配合無限邊坡穩定分析法，評估坡地崩塌。	1.具力學基礎 2.適用大區域與小範圍 3.簡單 4.參數獲得較為容易	1.土壤近似飽和假設 2.無法模擬陡坡未飽和崩塌
Tsai and Yang (2006)	理論法	改良 Iverson 模式，考量地表水窪蓄作用，利用數值方法求解一維垂向近似飽和 Richard 方程式，配合無限邊坡穩定分析法，評估坡地崩塌。	1.具力學基礎 2.適用大區域與小範圍 3.簡單 4.有考慮窪蓄作用	1.土壤近似飽和假設 2.無法模擬陡坡未飽和崩塌
Tsai et al. (2008)	理論法	考量完整的 Richard 方程式及擴充莫爾庫倫破壞理論，配合無限邊坡穩定分析法，評估坡地崩塌。	1.具力學基礎 2.適用大區域與小範圍 3.簡單 4.能較完整的模擬降雨入滲及土壤剪力強度	土壤單位重及未飽和剪力強度假設為定值，可能影響坡地崩塌之評估

表 4.1 艾利颱風期間時雨量表

日期(日/月)	時刻(hour)	時雨量(mm)	日期(月/日)	時刻(hour)	時雨量(mm)
8/23	12	4.5	8/24	12	14.5
8/23	13	2	8/24	13	23.5
8/23	14	1.5	8/24	14	17.5
8/23	15	1.5	8/24	15	18.5
8/23	16	1	8/24	16	12.5
8/23	17	8.5	8/24	17	28
8/23	18	12	8/24	18	42
8/23	19	21.5	8/24	19	28
8/23	20	9.5	8/24	20	46
8/23	21	4.5	8/24	21	66
8/23	22	13	8/24	22	44
8/23	23	17.5	8/24	23	57
8/23	0	30	8/24	0	71.5
8/24	1	25.5	8/25	1	60.5
8/24	2	15	8/25	2	57.5
8/24	3	16.5	8/25	3	53
8/24	4	6.5	8/25	4	59.5
8/24	5	14.5	8/25	5	50
8/24	6	42	8/25	6	40.5
8/24	7	37	8/25	7	30
8/24	8	14.5	8/25	8	12
8/24	9	14.5	8/25	9	7
8/24	10	27.5	8/25	10	4.5
8/24	11	23.5	8/25	11	2

表 4.2 模式參數統計特性整理表

模式參數	平均值	標準差	機率密度函數
初始地下水位(d_z)	2.5 m	0.725	均勻分布
土壤比重(G_s)	2.665	0.18665	常態分佈
有效摩擦角(ϕ)	30.9°	1.125	常態分佈
有效凝聚力(C)	2.25 kN / m ²	9.27	常態分佈
殘餘體積含水量(θ_r)	0.065	0.017	Johnson family SB
飽和水力傳導係數(K_s)	4.42 cm / hr	5.63	Johnson family SB
進氣潛能因子(ξ)	0.012	0.037	Johnson family SB
孔徑指數(N)	1.89	0.17	Johnson family LN
飽和體積含水量(θ_s)	0.41	0.09	
水單位重 γ_w	9810 N / m ³		
40 m DEM 誤差	0	4.152	
5 m DEM 誤差	0	2.126	

表 4.3 保水曲線參數之共變異係數矩陣

$$\begin{bmatrix} 2.5600 & -0.2488 & 0.0592 & 0.3376 \\ -0.2488 & 0.3129 & 0.0035 & -0.1367 \\ 0.0592 & 0.0035 & 0.0019 & 0.0048 \\ 0.3376 & -0.1367 & 0.0048 & 0.0826 \end{bmatrix}$$

圖 4.4 坡度與土壤厚度設定

案例	一	二	三	四	五	六
平均坡度	20 度	30 度	40 度	20 度	30 度	40 度
DEM 解析度	40 m DEM			5 m DEM		

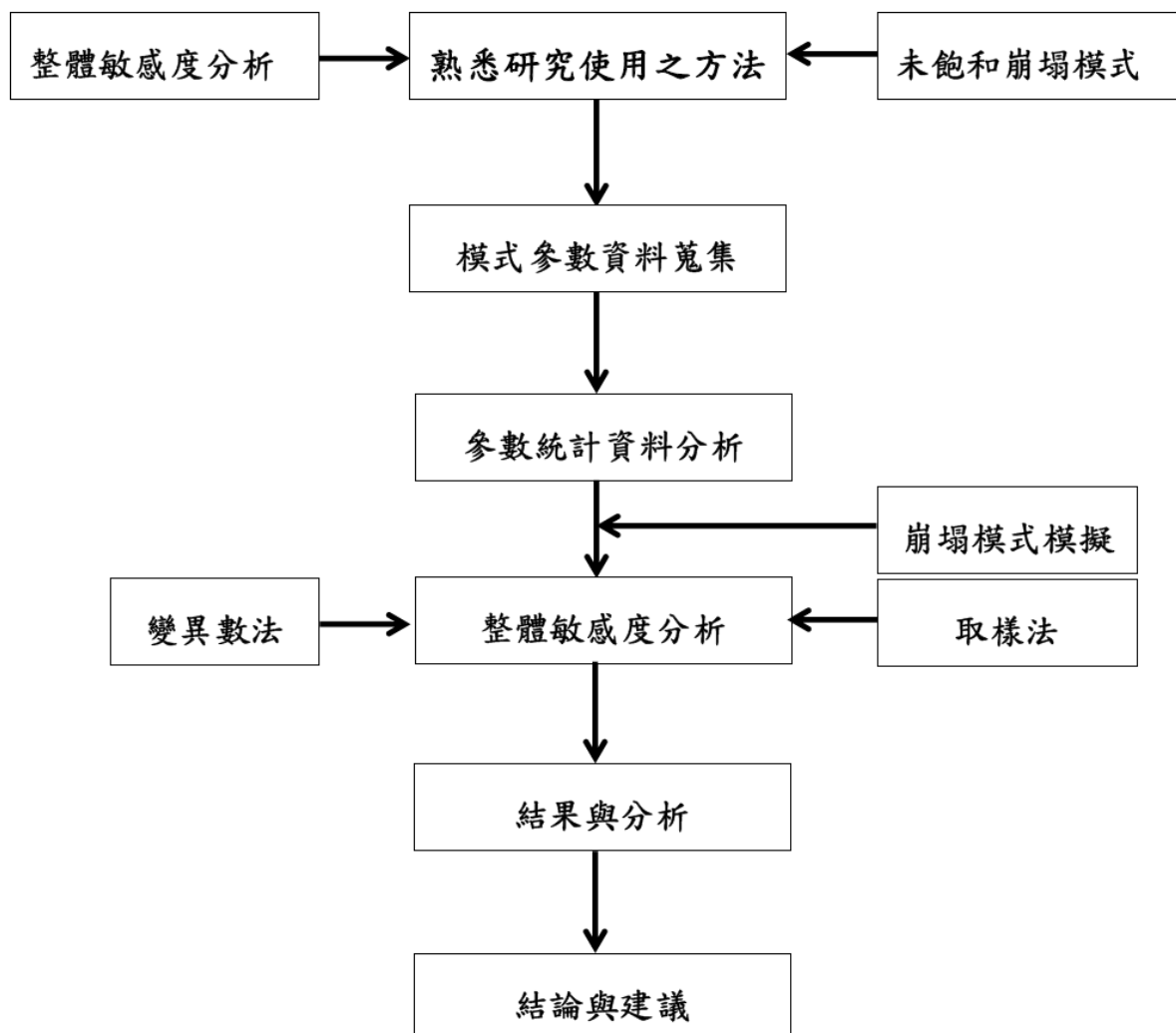


圖 1.1 研究步驟

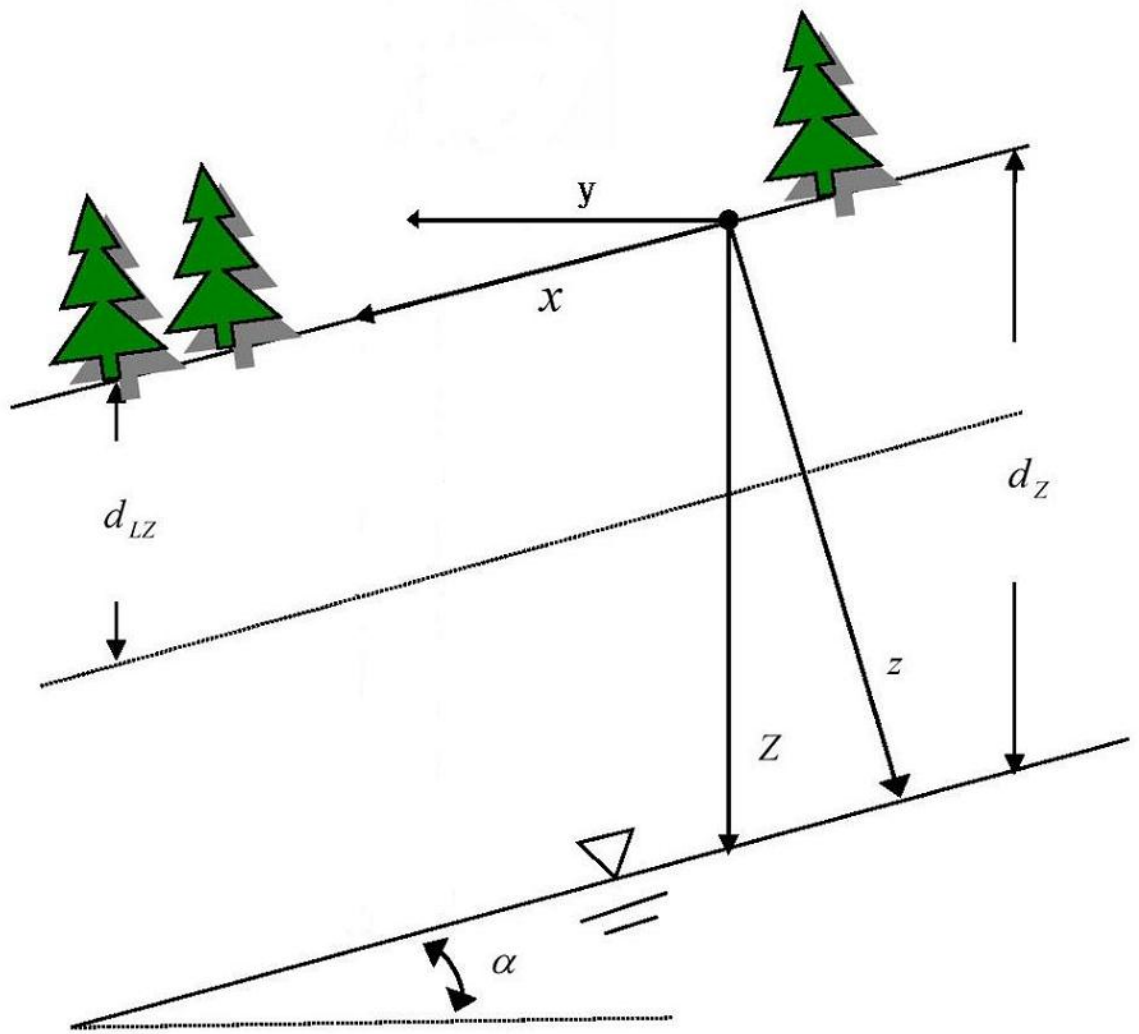


圖 2.1 坡地座標系統與模擬邊界條件示意圖

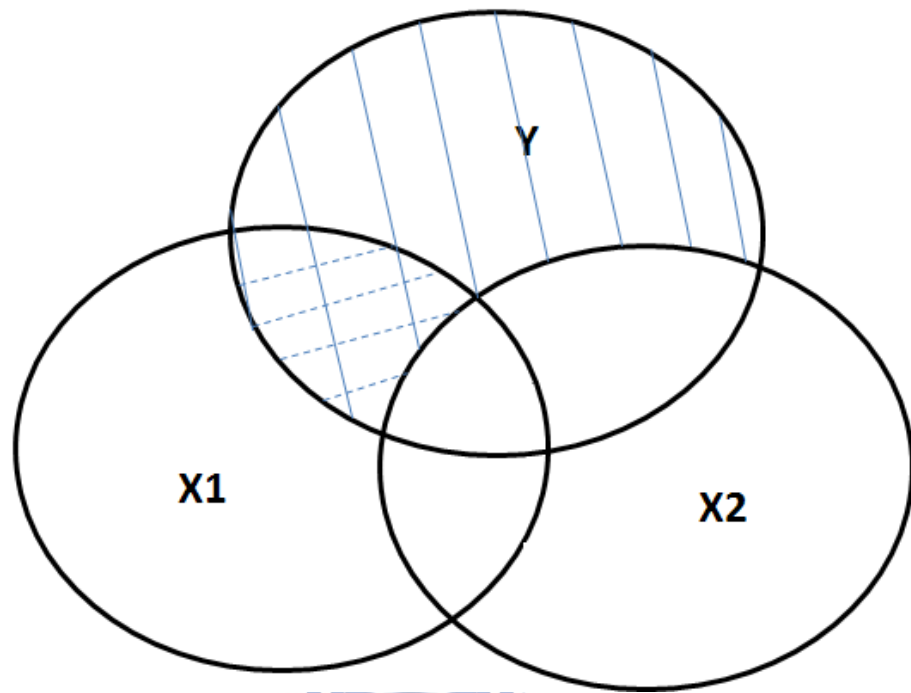


圖 3.1 偏相關係數示意圖

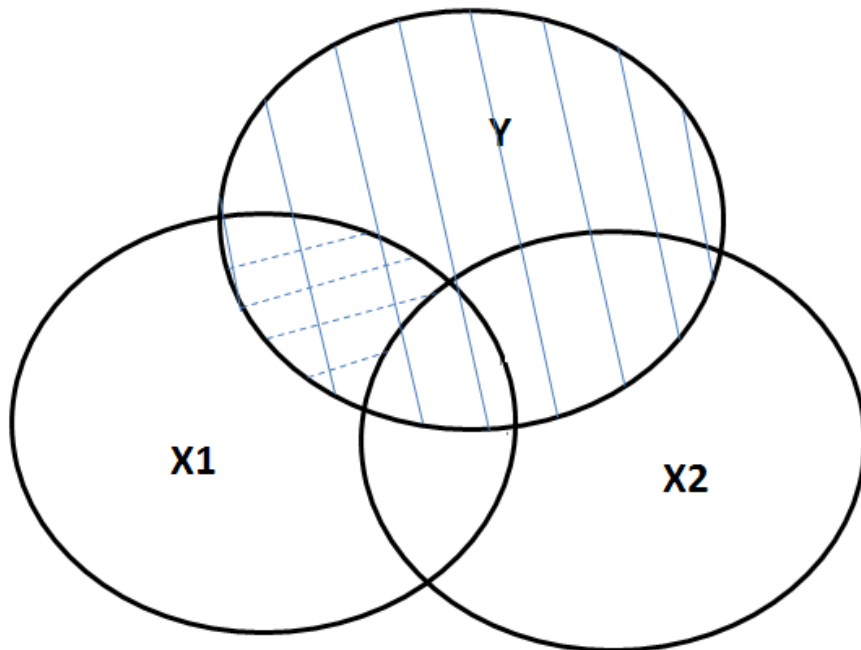


圖 3.2 部分相關係數示意圖

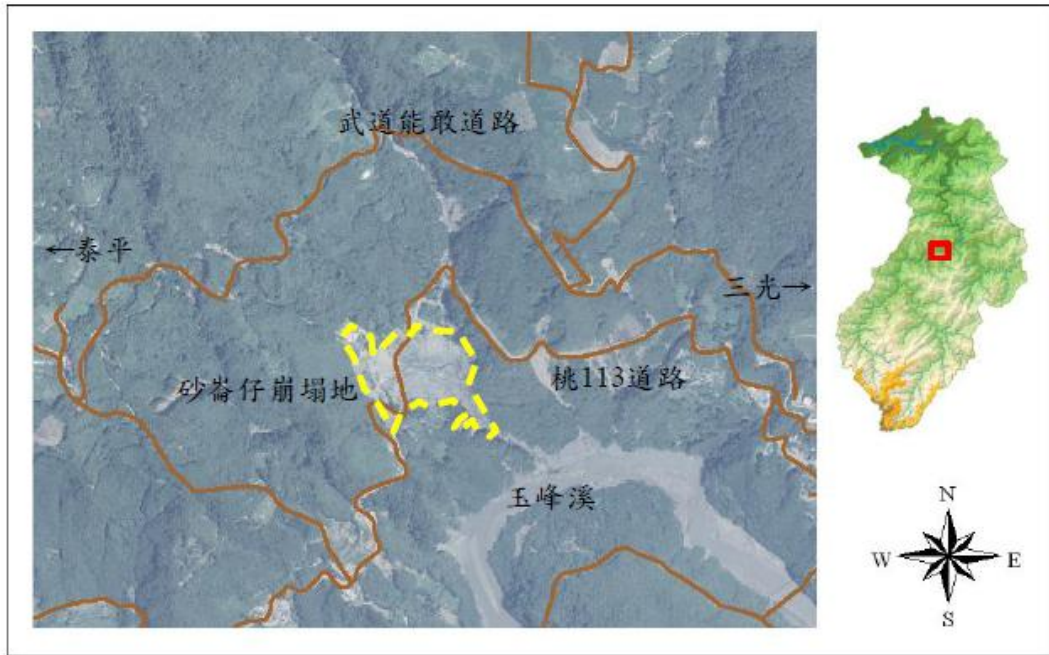


圖 4.1 砂崙仔工程地區位置(楊錦釗等,2006)

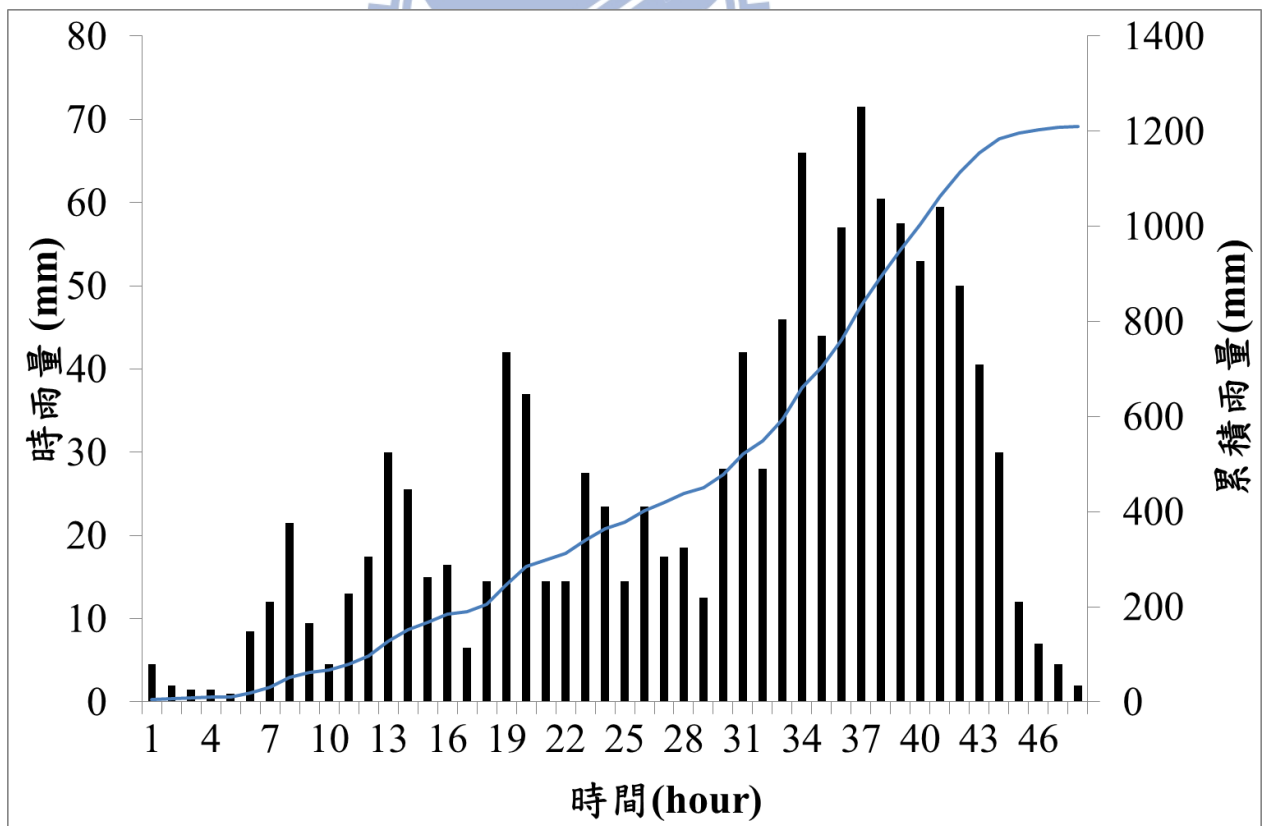


圖 4.2 艾利颱風期間三光站時雨量組體圖

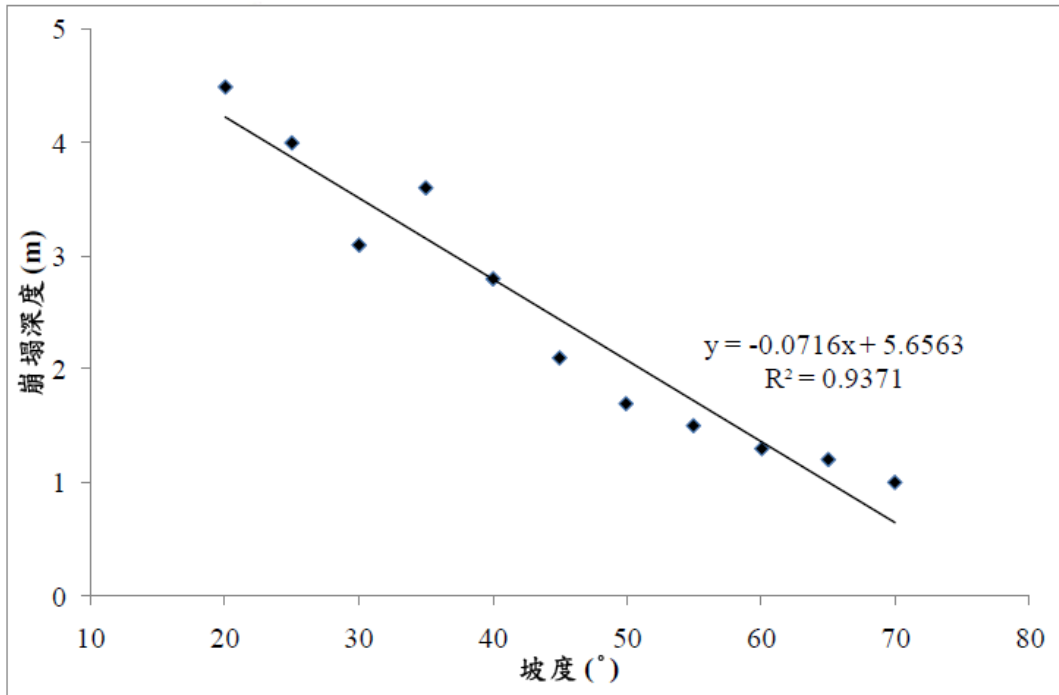


圖 4.3 坡度與崩塌深度現場量測資料

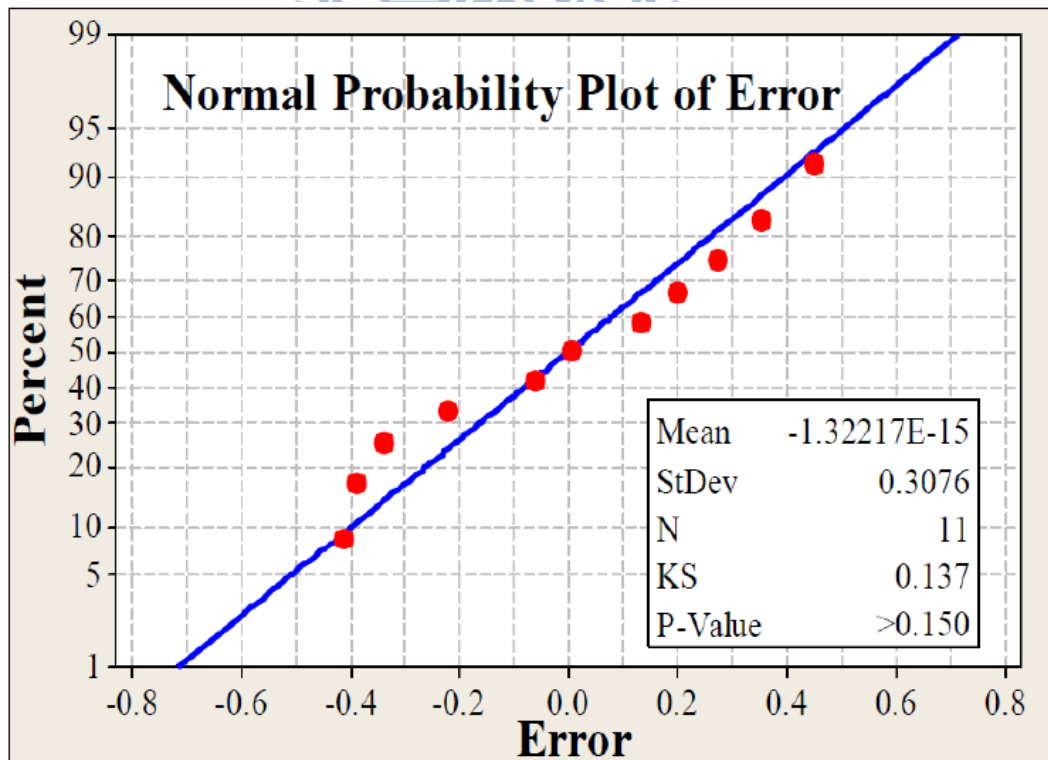


圖 4.4 誤差項常態測試圖

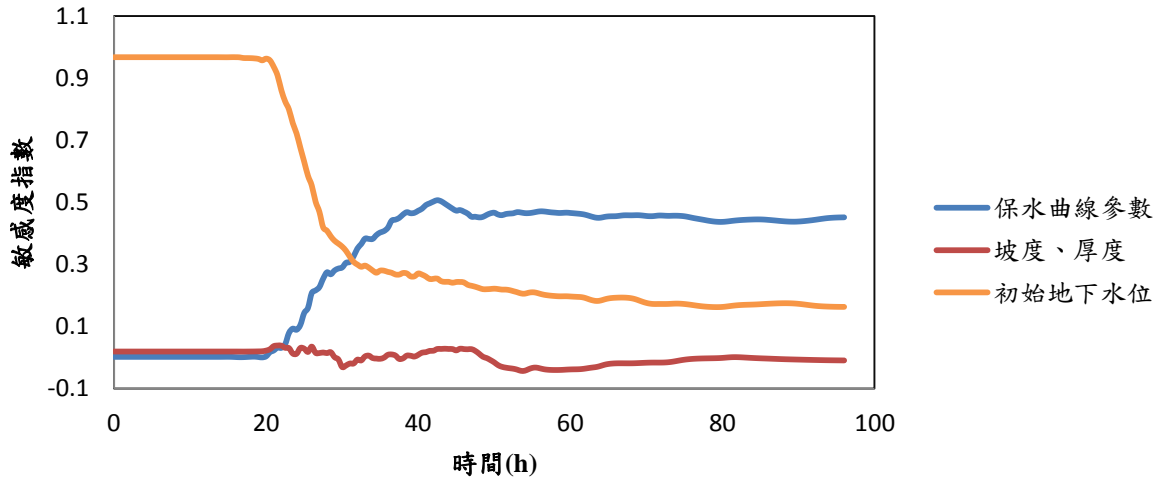


圖 4.5 案例一土層第一層，孔隙水壓一階敏感度指數

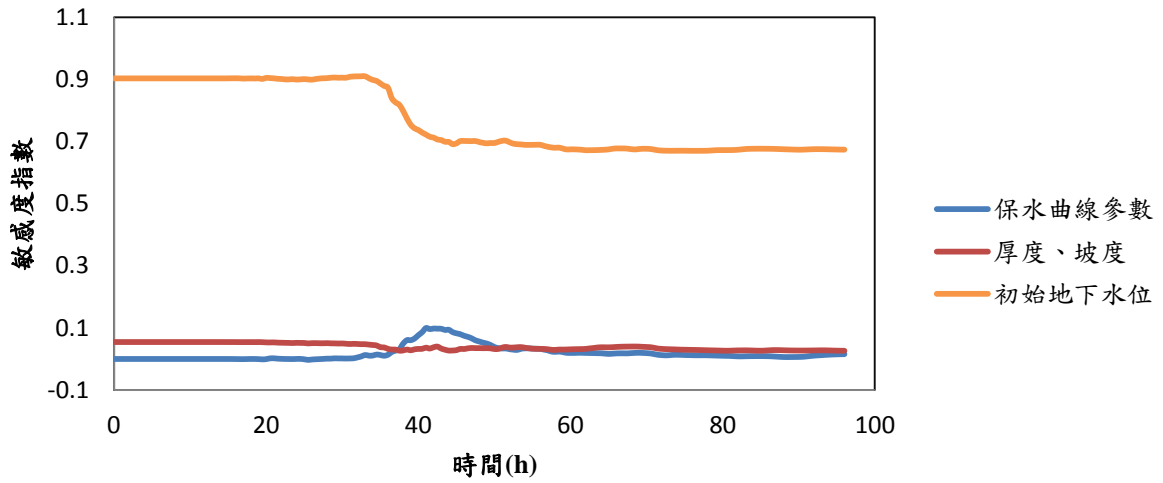


圖 4.6 案例一土層第二層，孔隙水壓一階敏感度指數

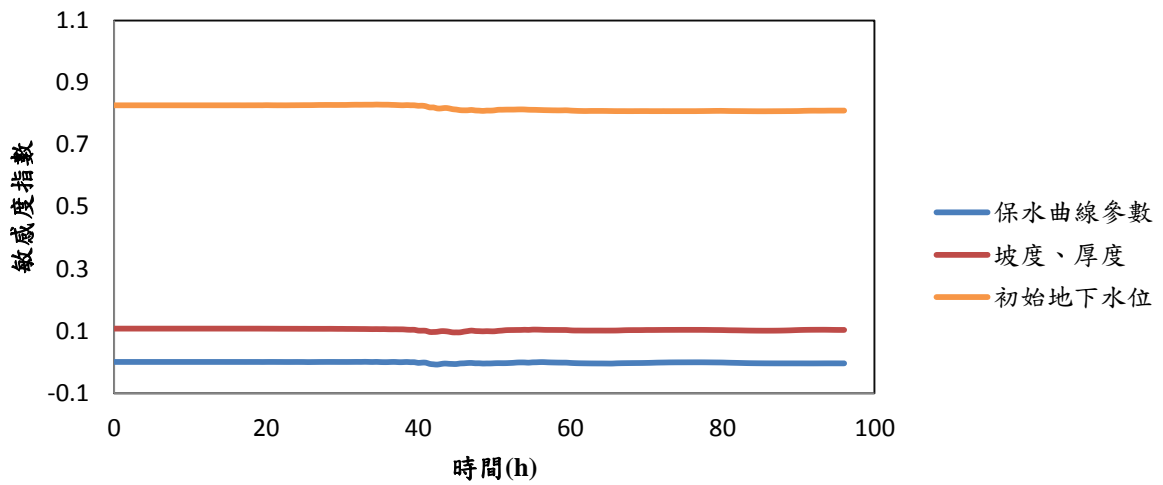


圖 4.7 案例一土層第三層，孔隙水壓一階敏感度指數

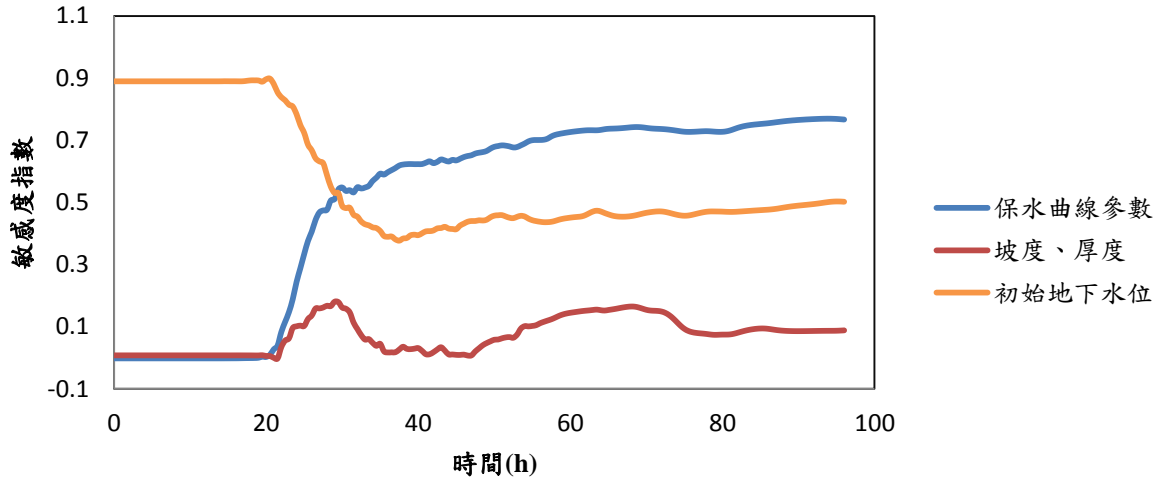


圖 4.8 案例一土層第一層，孔隙水壓全域敏感度指數

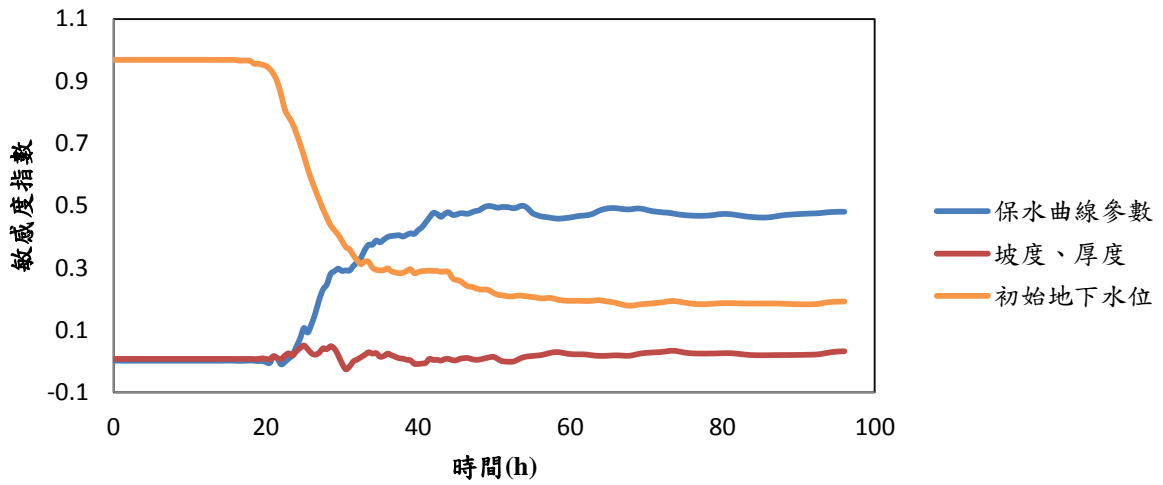


圖 4.9 案例四土層第一層，孔隙水壓一階敏感度指數

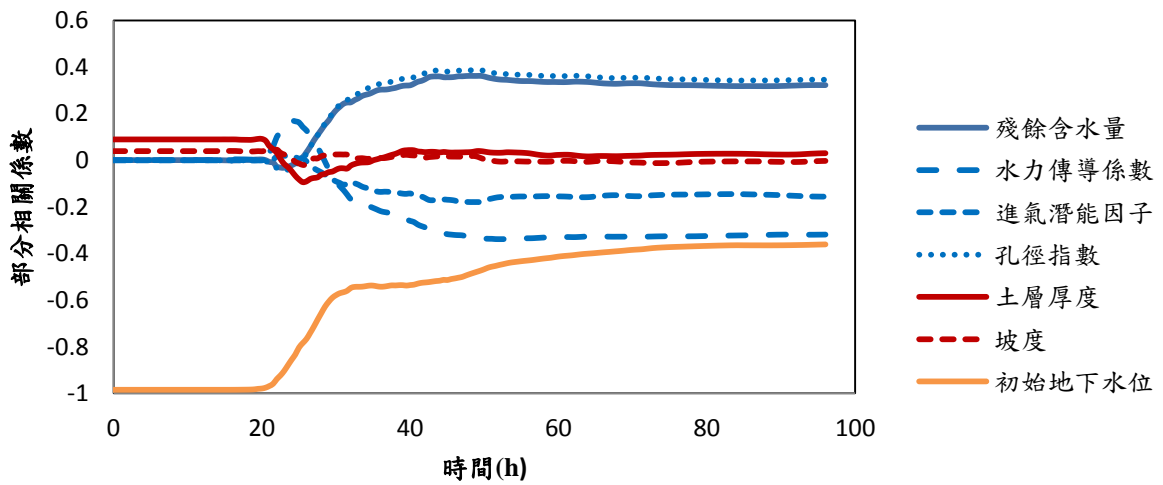


圖 4.10 案例一土層第一層，孔隙水壓部分相關係數

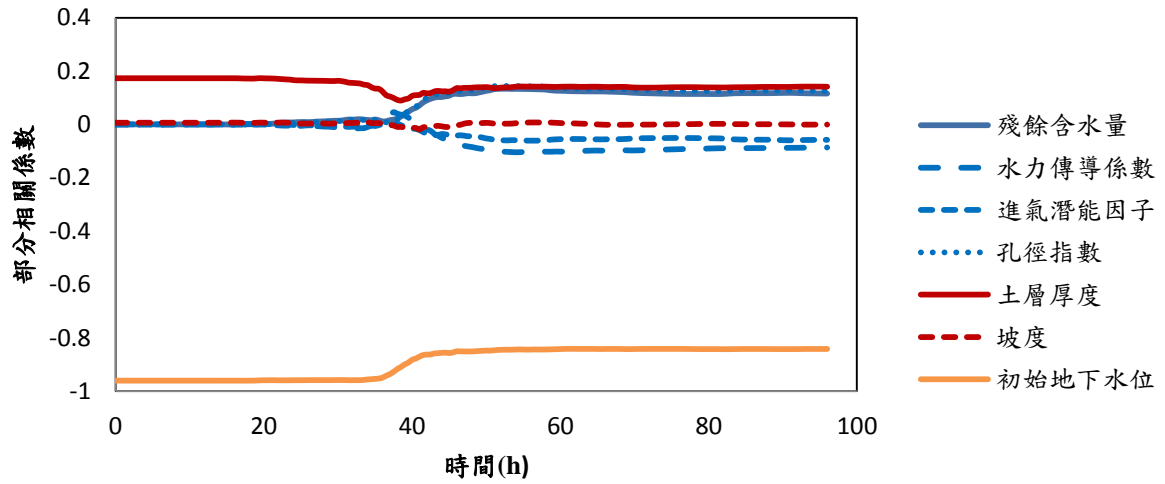


圖 4.11 案例一土層第二層，孔隙水壓部分相關係數

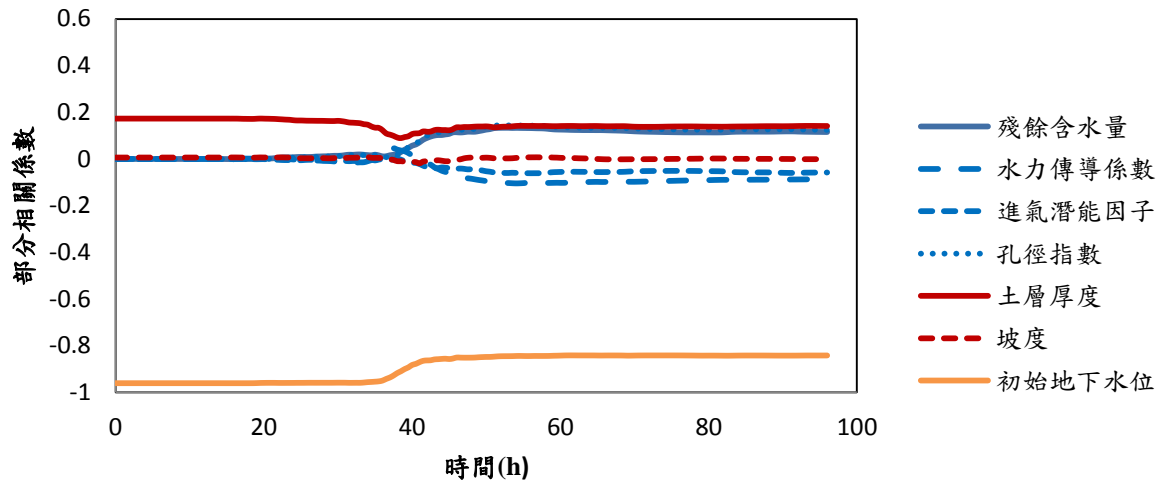


圖 4.12 案例一土層第三層，孔隙水壓部分相關係數

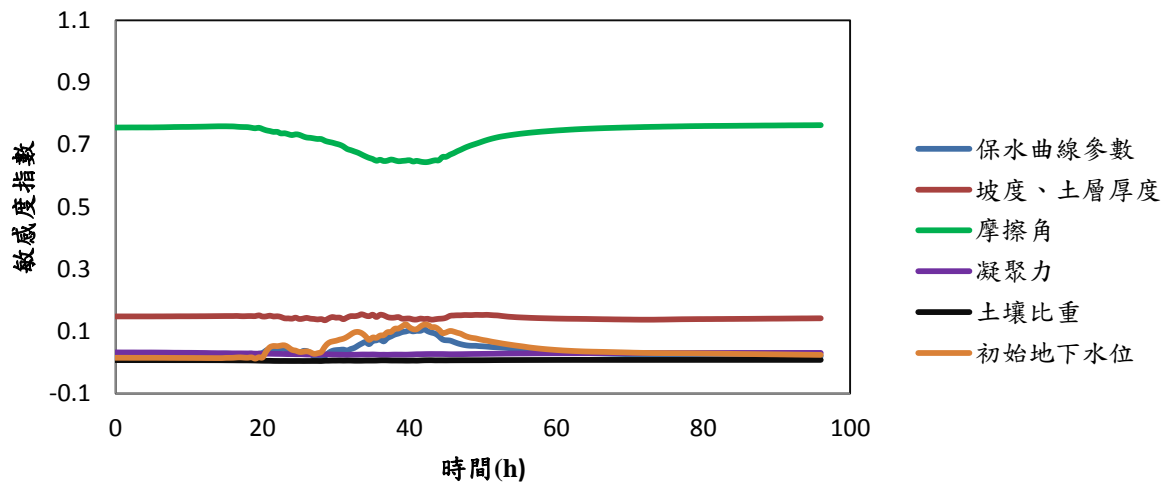


圖 4.13 案例一土層第一層，安全係數一階敏感度指數

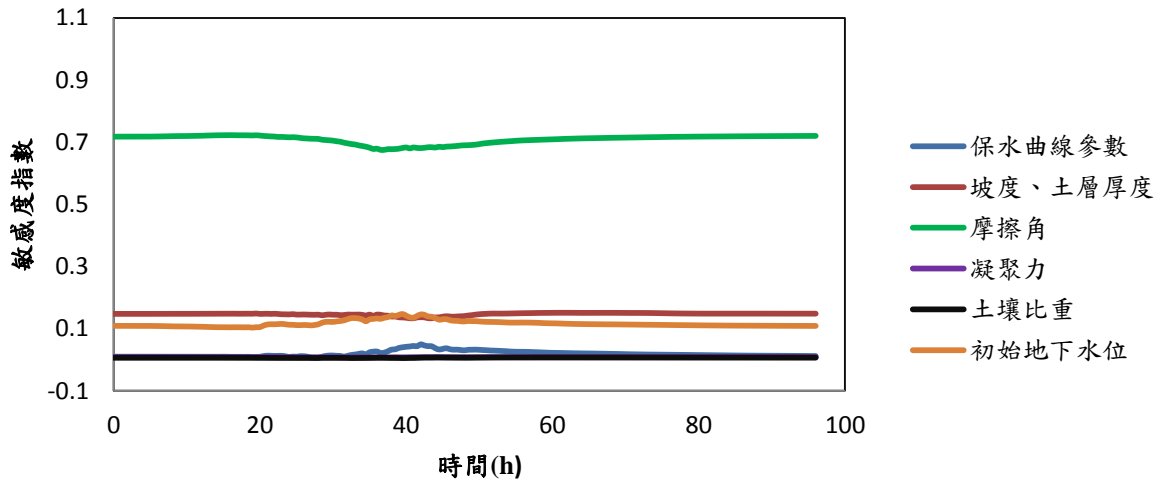


圖 4.14 案例一土層第二層，安全係數一階敏感度指數

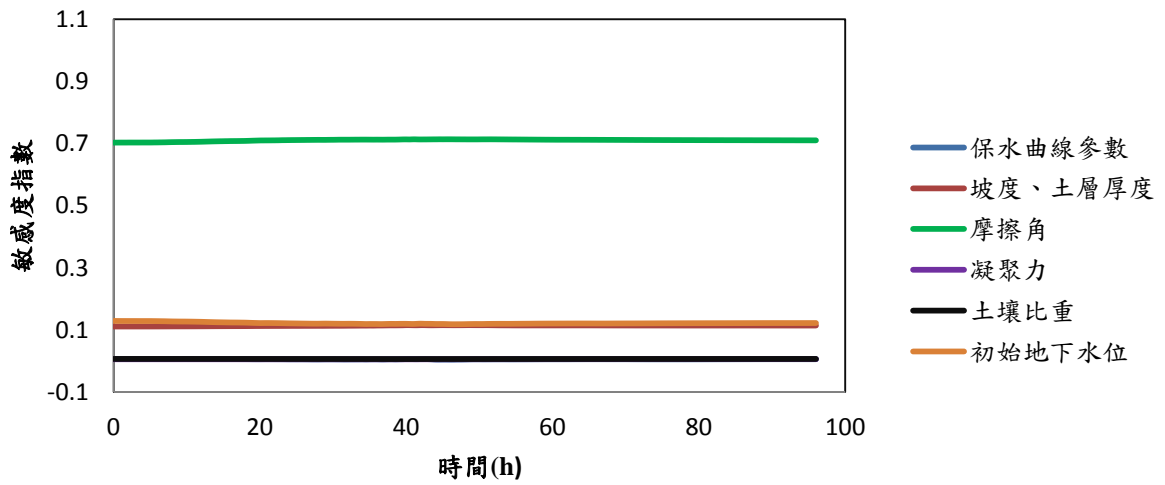


圖 4.15 案例一土層第三層，安全係數一階敏感度指數

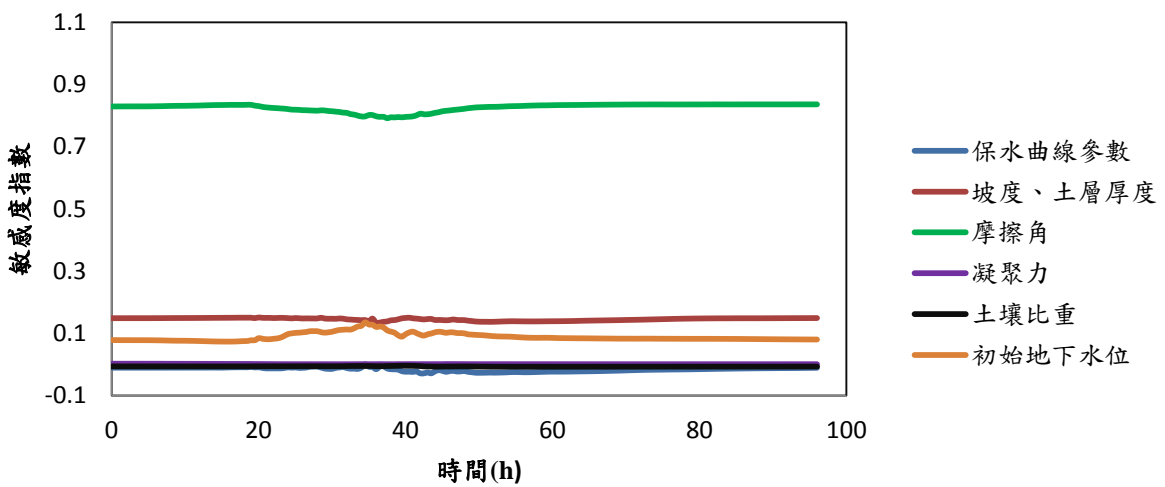


圖 4.16 案例一土層第二層，安全係數全域敏感度指數

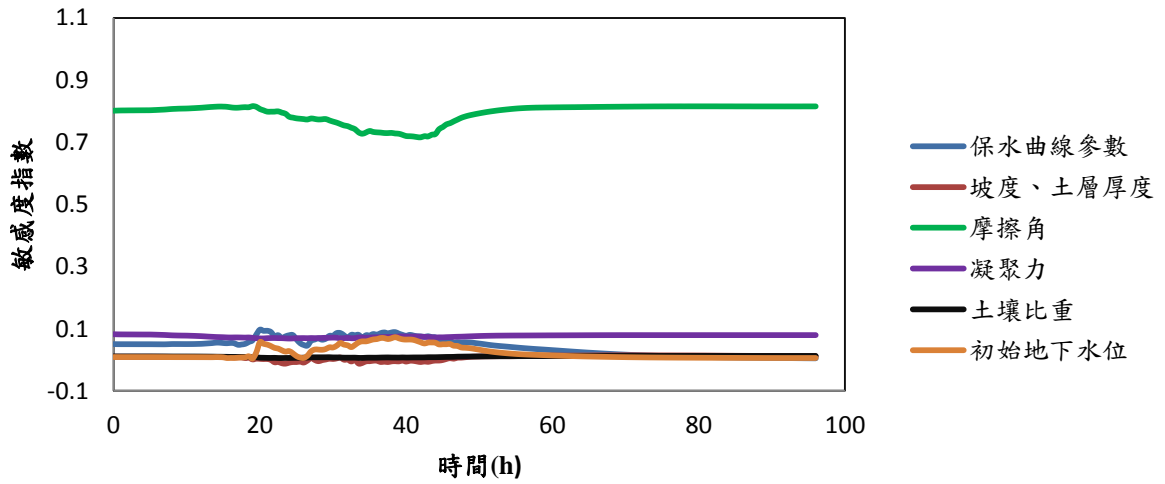


圖 4.17 案例二土層第一層，安全係數一階敏感度指數

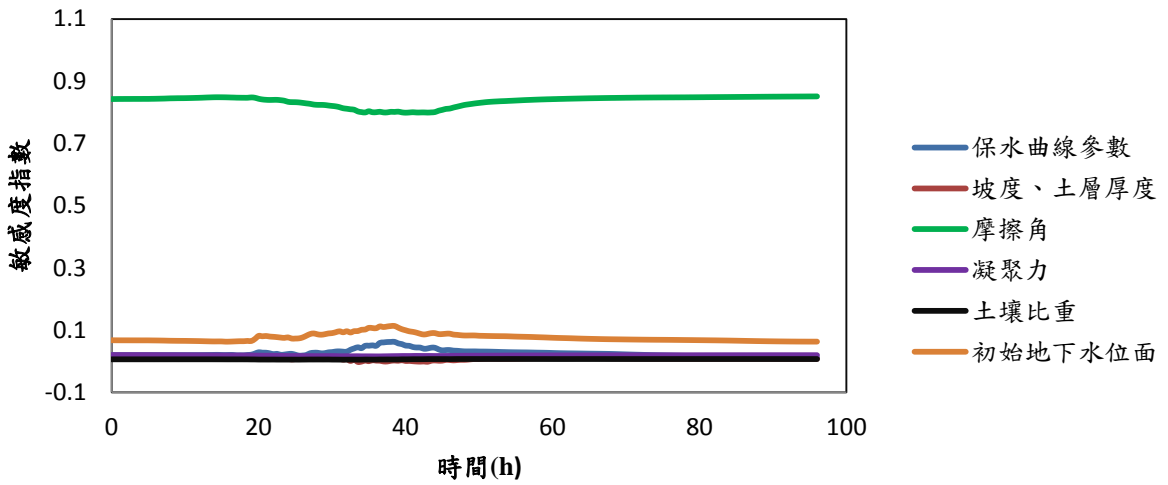


圖 4.18 案例二土層第二層，安全係數一階敏感度指數

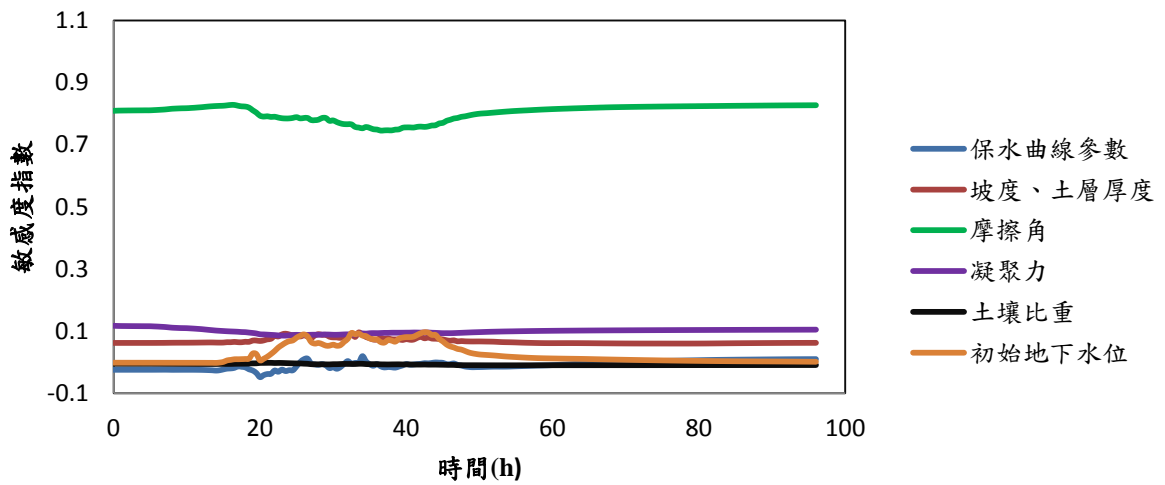


圖 4.19 案例二土層第一層，安全係數全域敏感度指數

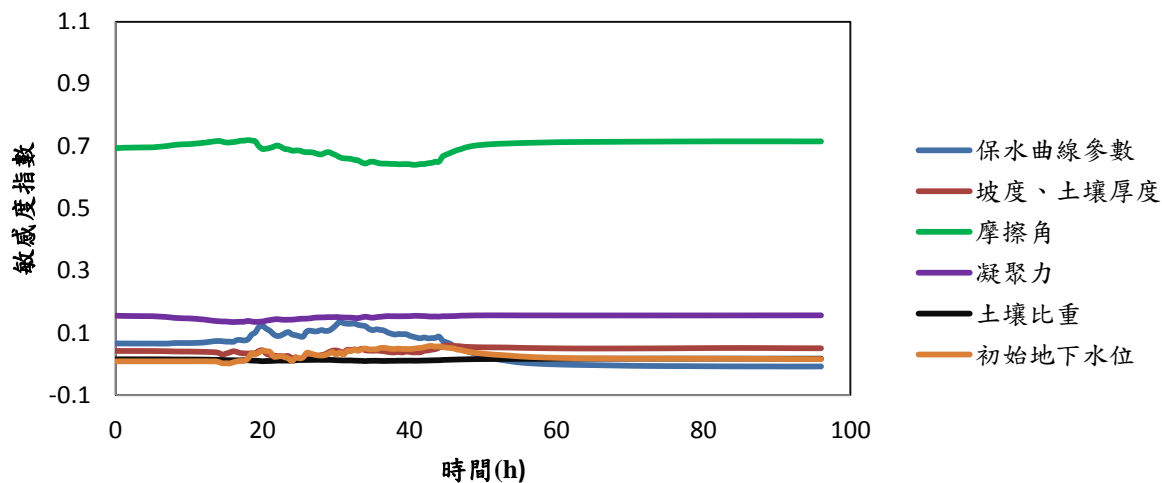


圖 4.20 案例三土層第一層，安全係數一階敏感度指數

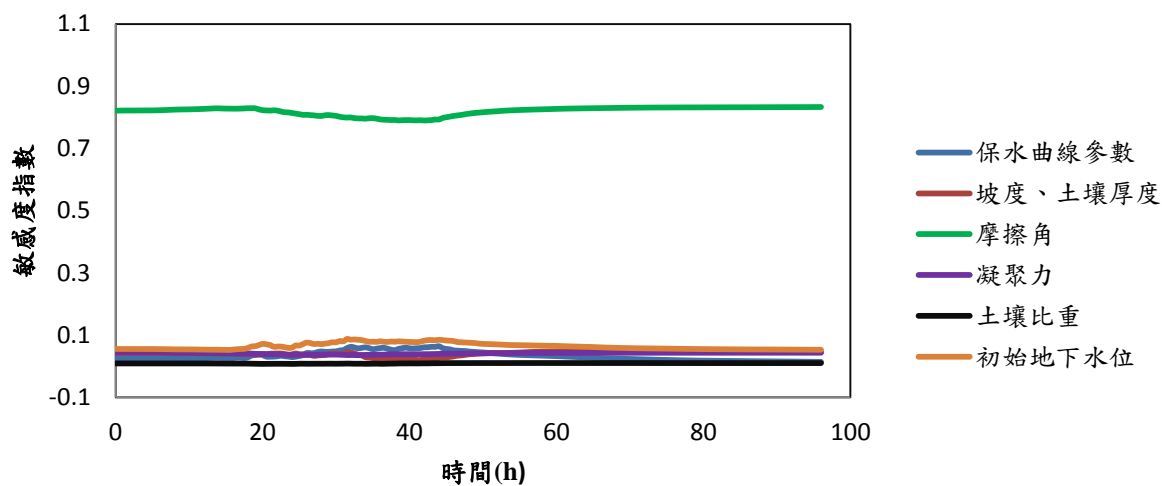


圖 4.21 案例三土層第二層，安全係數一階敏感度指數

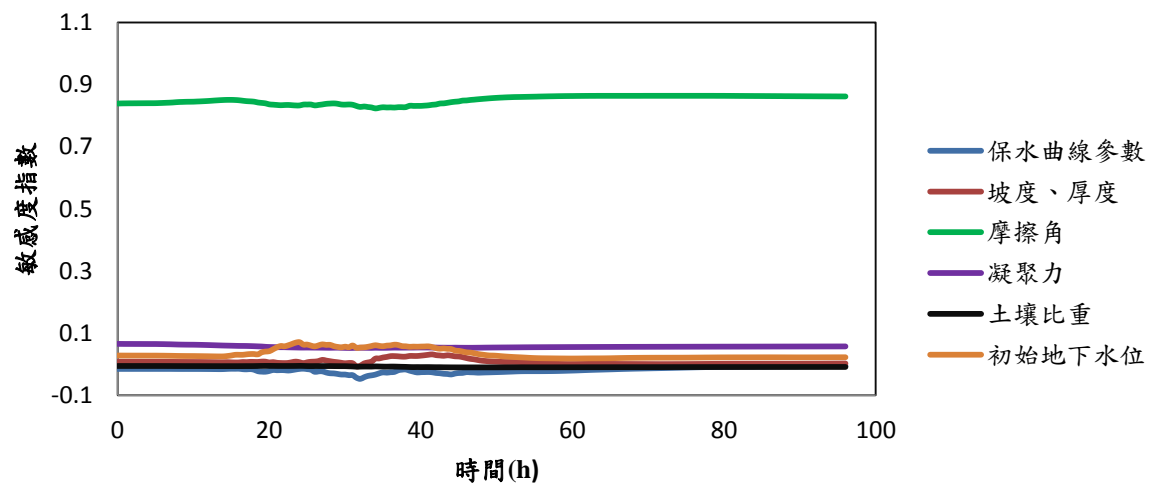


圖 4.22 案例三土層第二層，安全係數全域敏感度指數

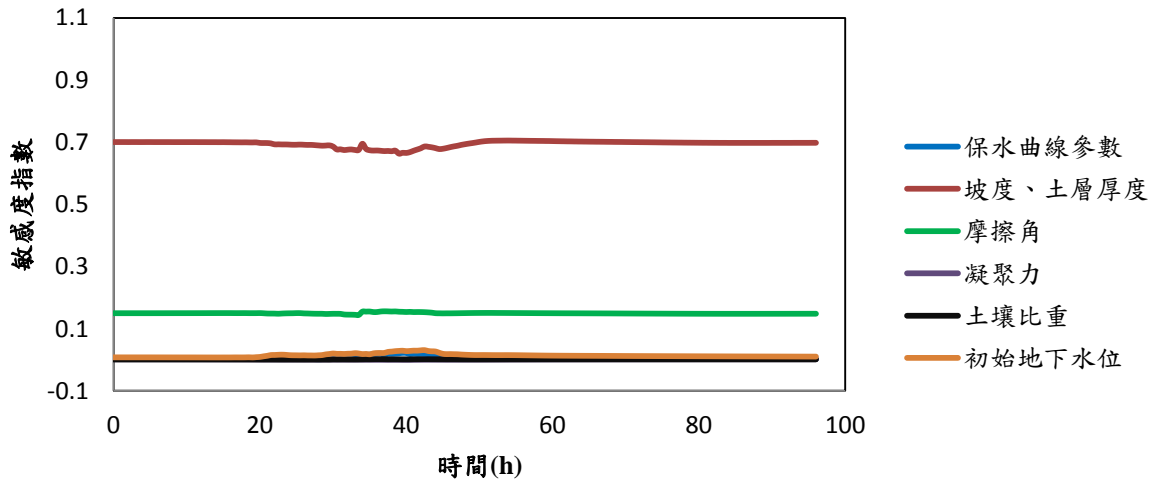


圖 4.23 案例四土層第一層，安全係數一階敏感度指數

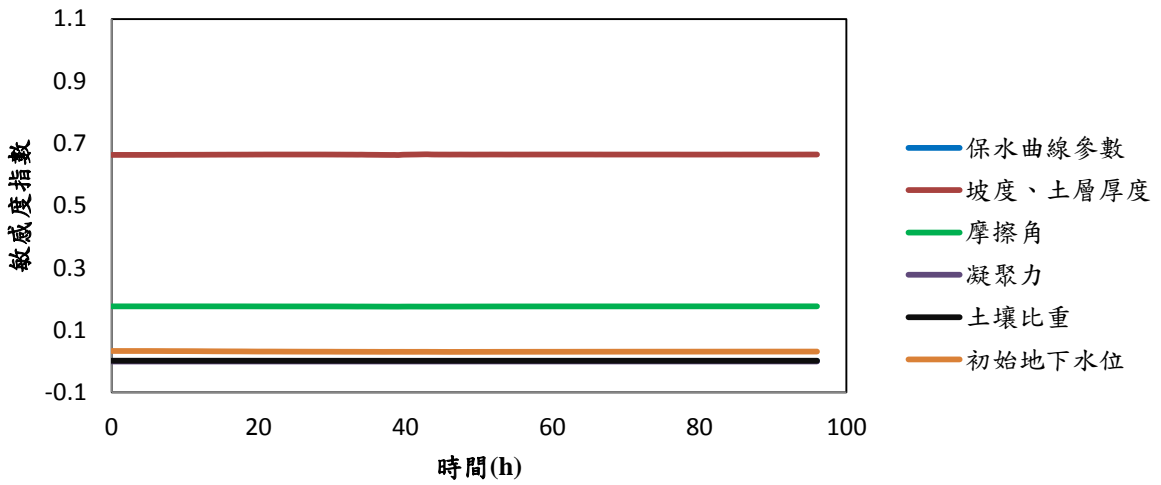


圖 4.24 案例四土層第三層，安全係數一階敏感度指數

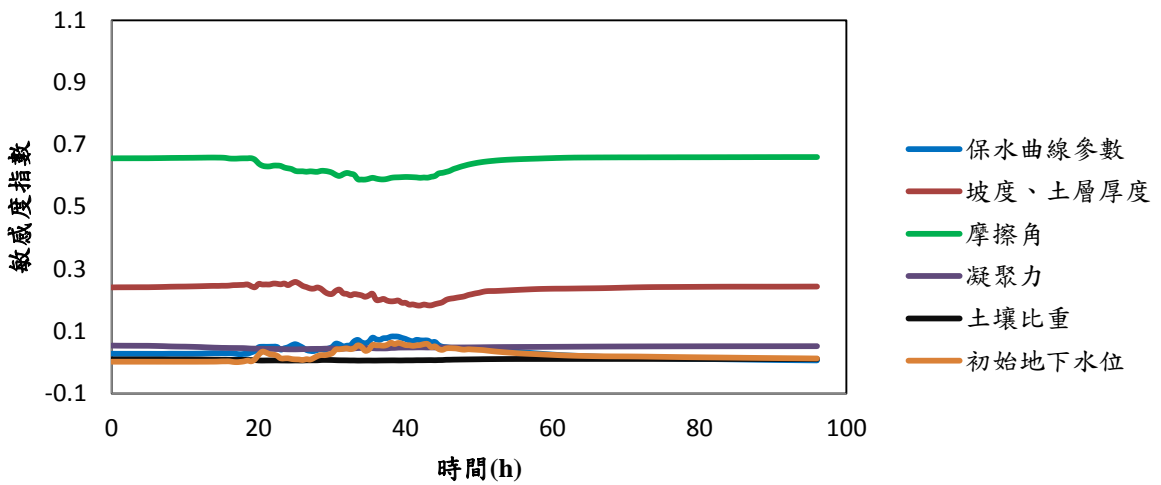


圖 4.25 案例五土層第一層，安全係數一階敏感度指數

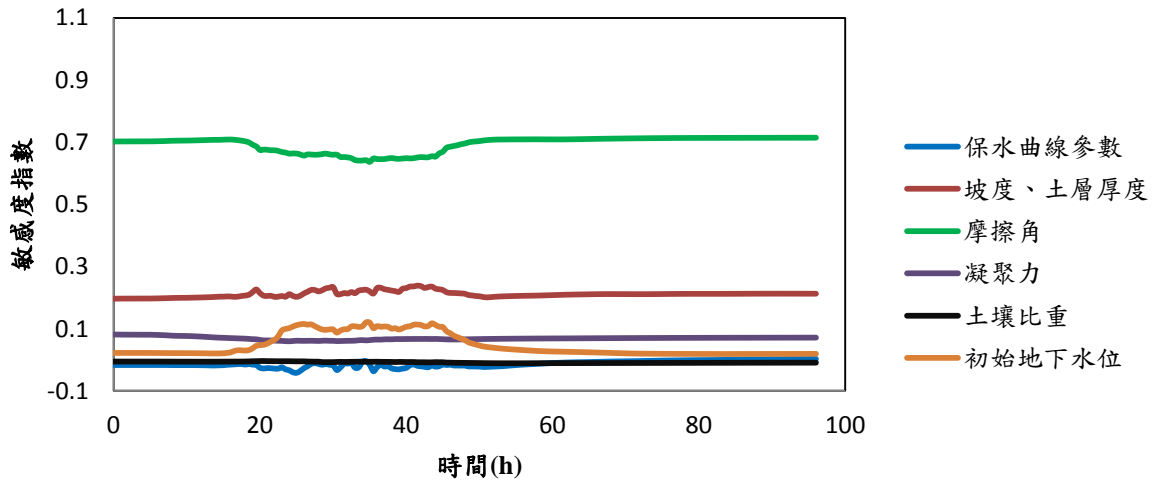


圖 4.26 案例五土層第一層，安全係數全域敏感度指數

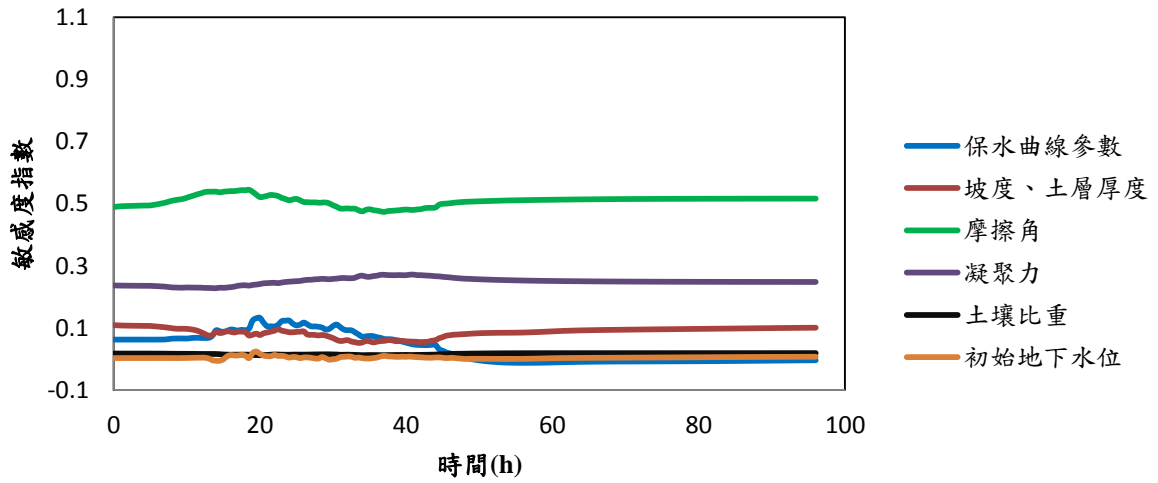


圖 4.27 案例六土層第一層，安全係數一階敏感度指數

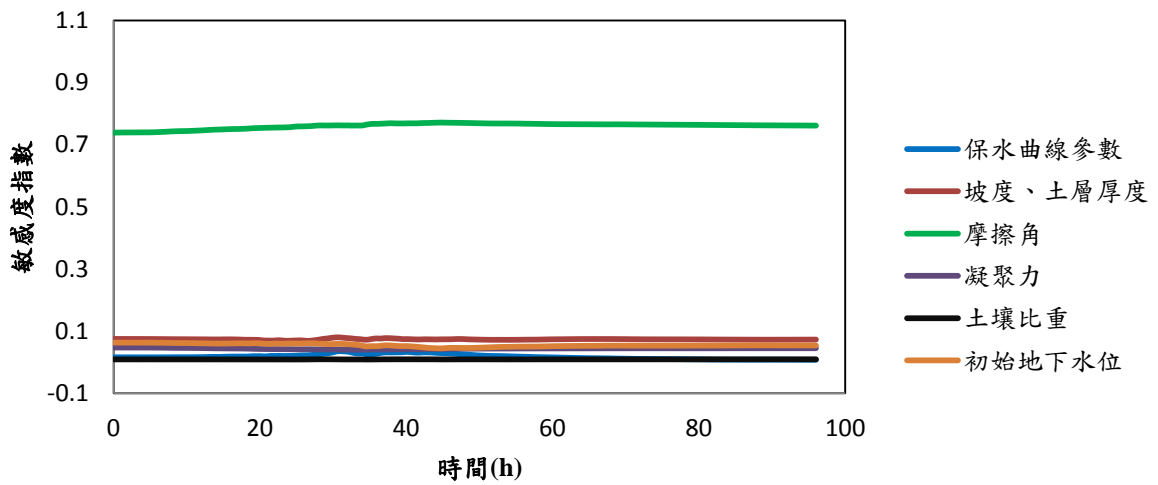


圖 4.28 案例六土層第三層，安全係數一階敏感度指數

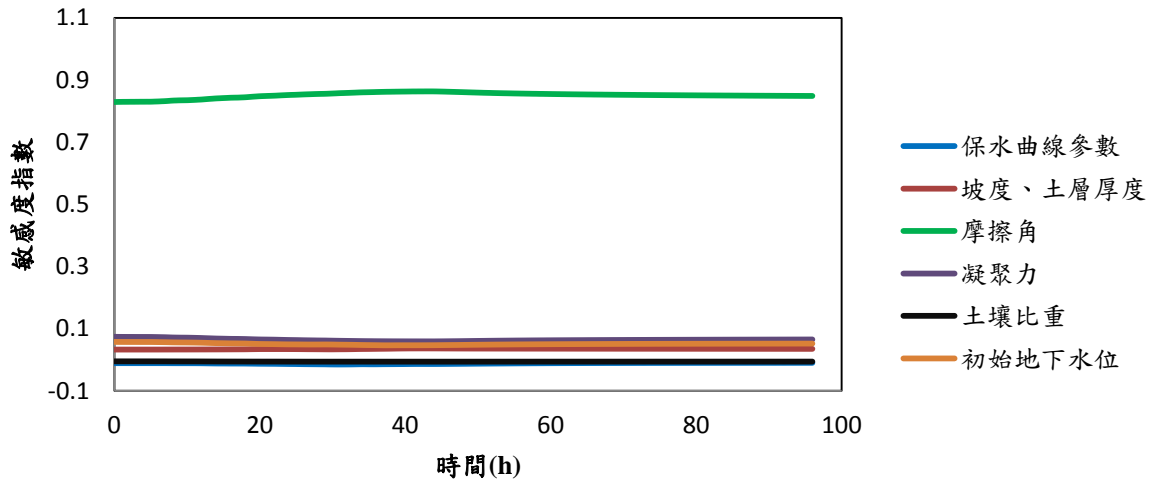


圖 4.29 案例六土層第三層，安全係數全域敏感度指數

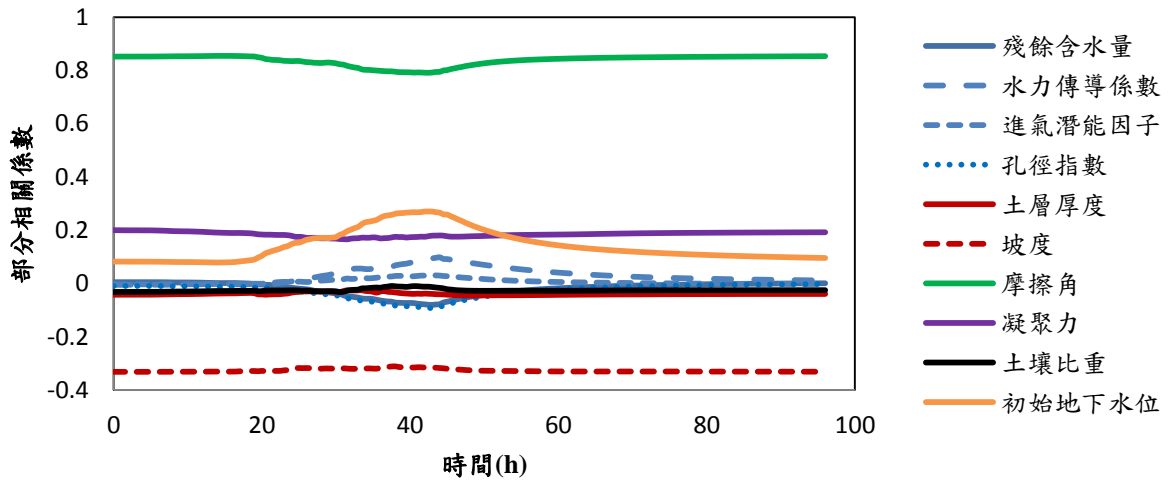


圖 4.30 案例一土層第一層，安全係數部分相關係數

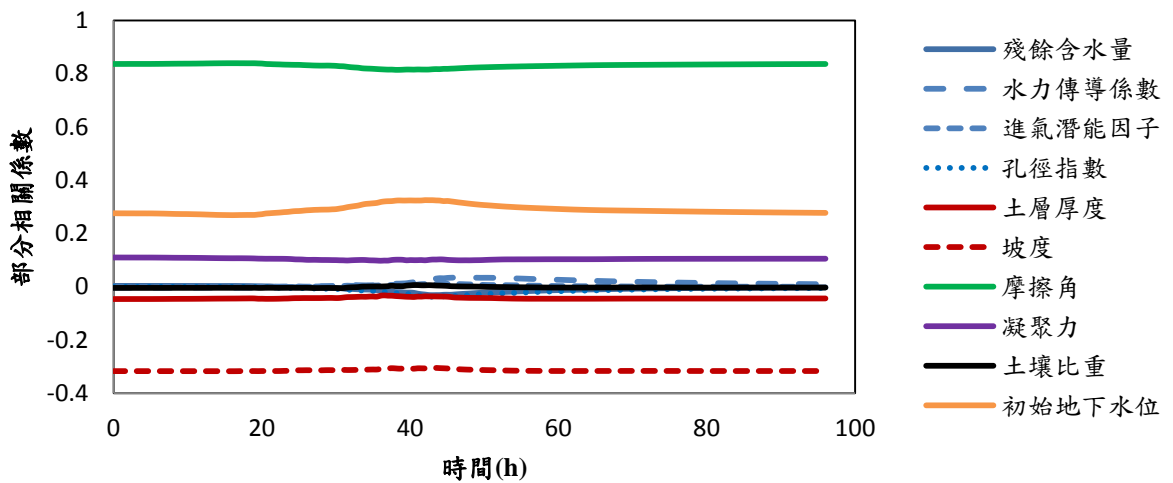


圖 4.31 案例一土層第二層，安全係數部分相關係數

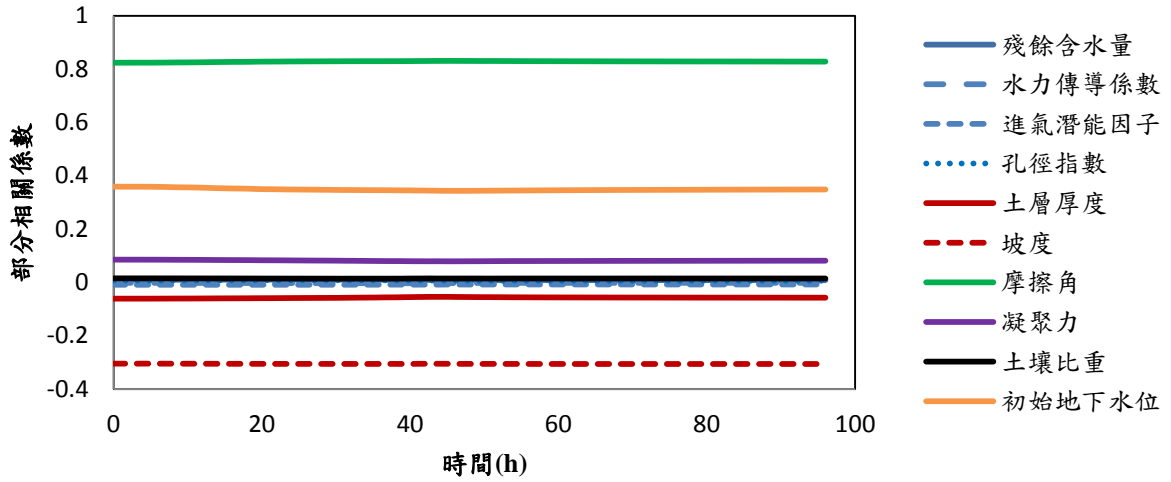


圖 4.32 案例一土層第三層，安全係數部分相關係數

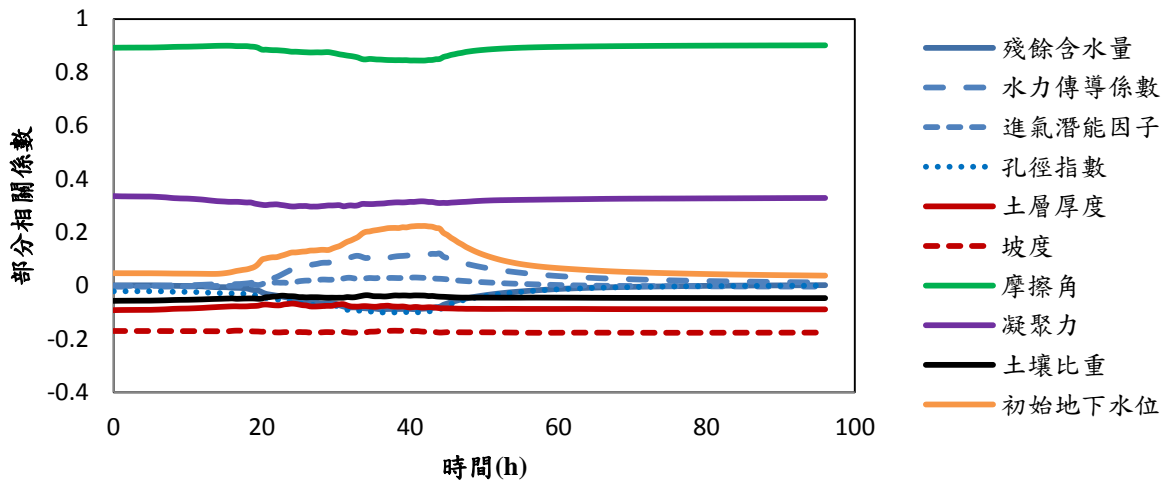


圖 4.33 案例二土層第一層，安全係數部分相關係數

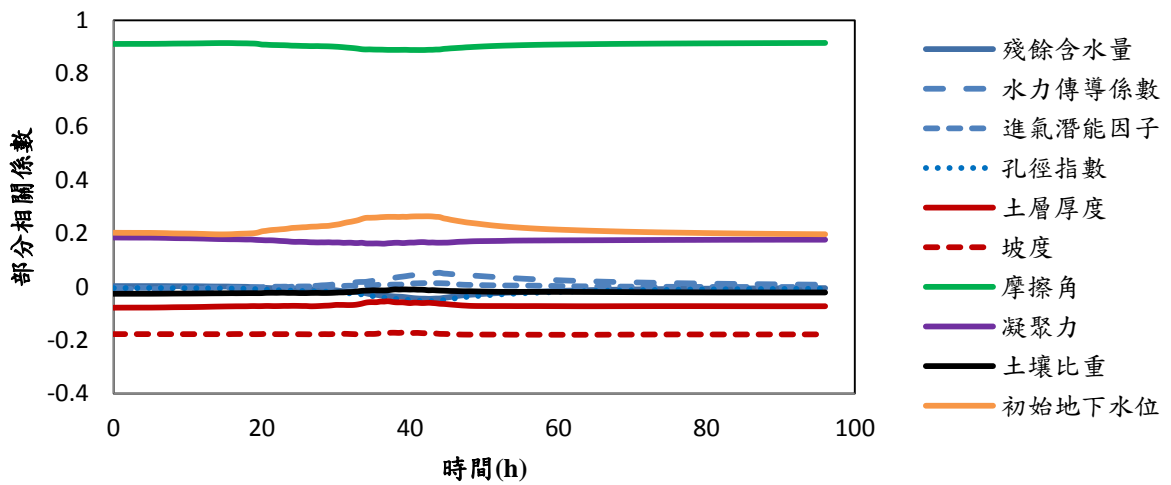


圖 4.34 案例二土層第三層，安全係數部分相關係數

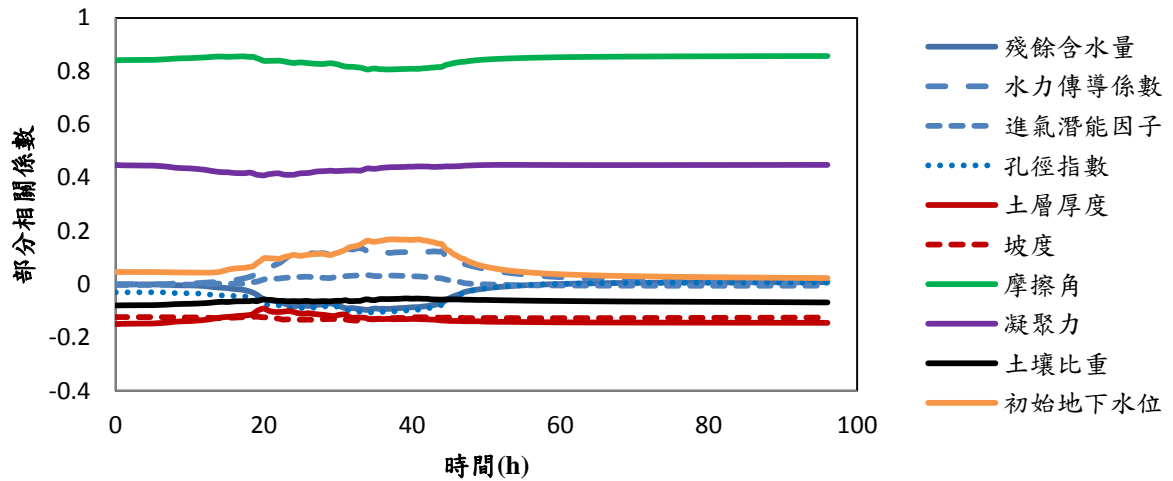


圖 4.35 案例三土層第一層，安全係數部分相關係數

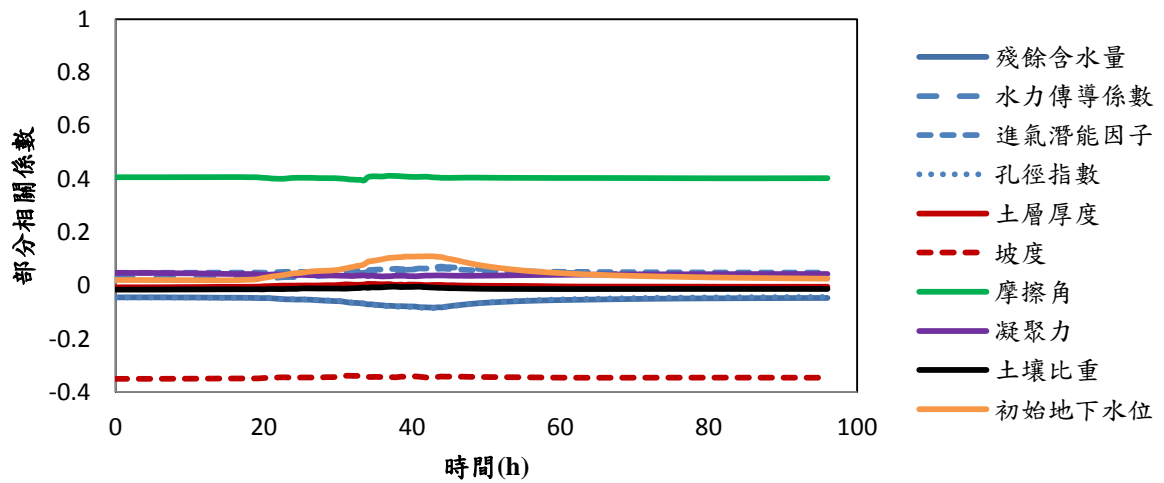


圖 4.36 案例四土層第一層，安全係數部分相關係數

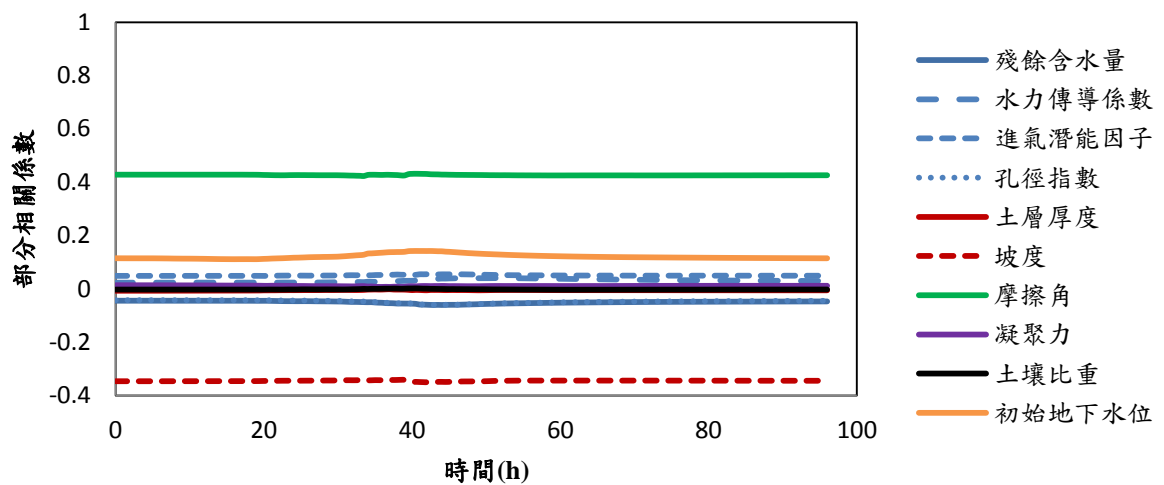


圖 4.37 案例四土層第二層，安全係數部分相關係數

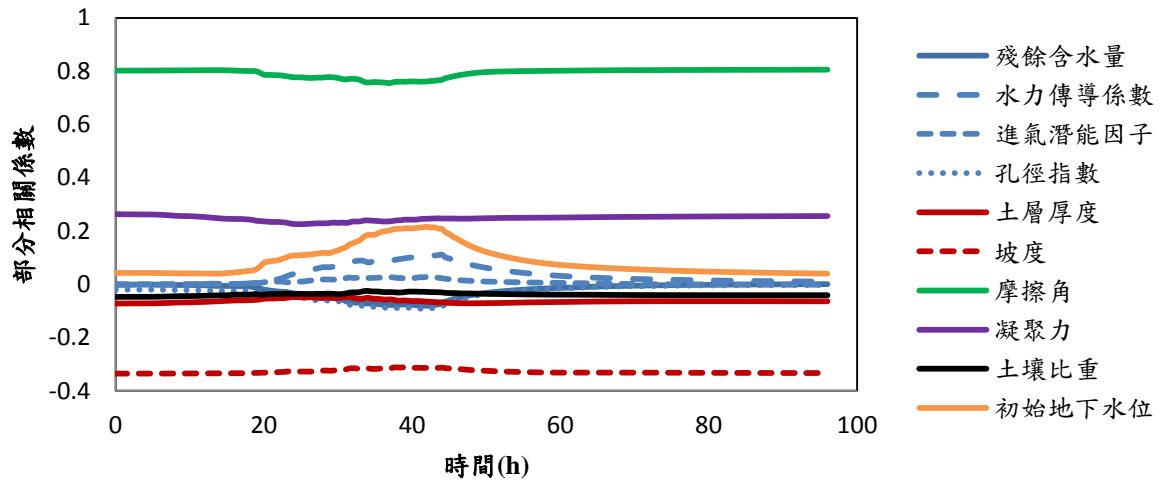


圖 4.38 案例五土層第一層，安全係數部分相關係數

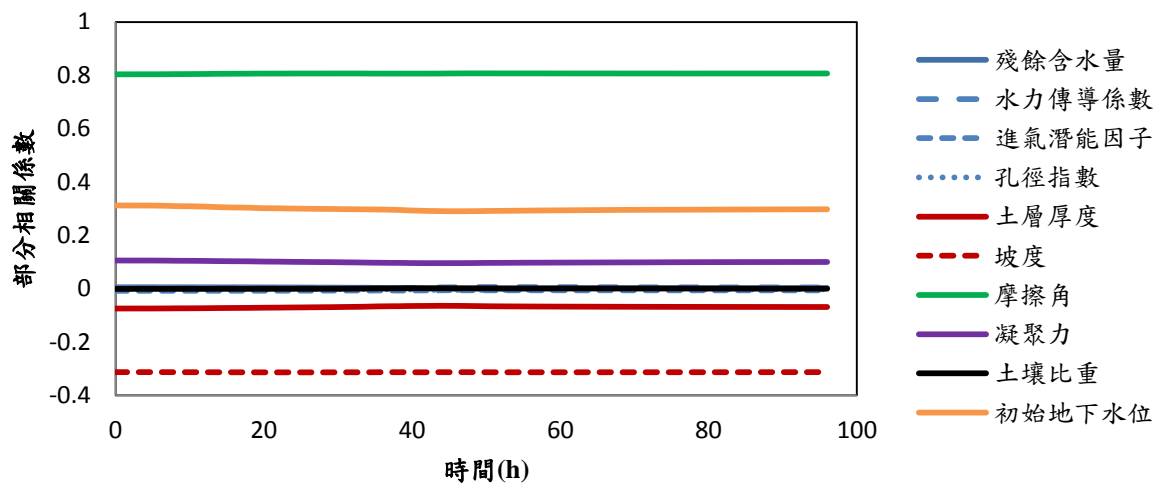


圖 4.39 案例五土層第三層，安全係數部分相關係數

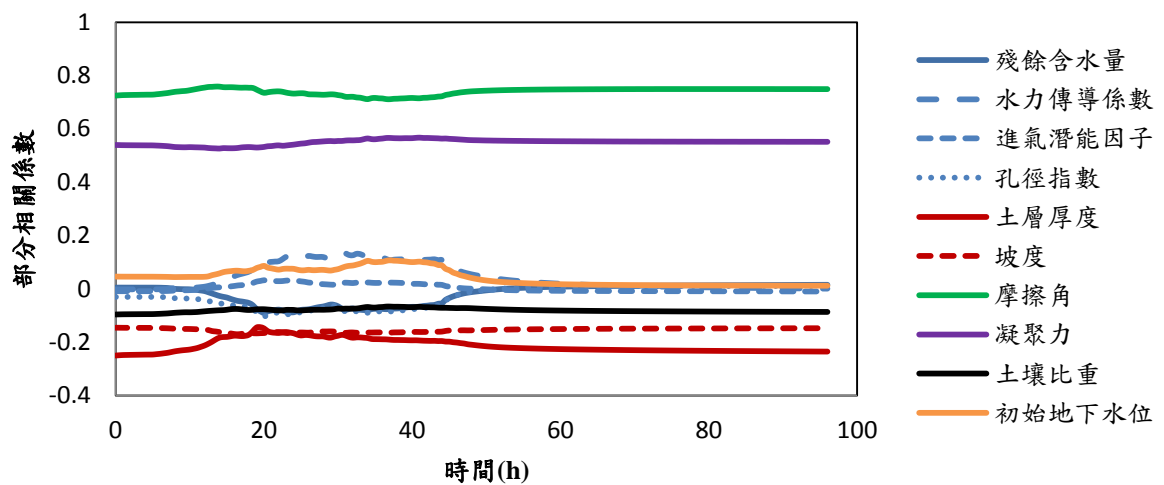


圖 4.40 案例六土層第一層，安全係數部分相關係數

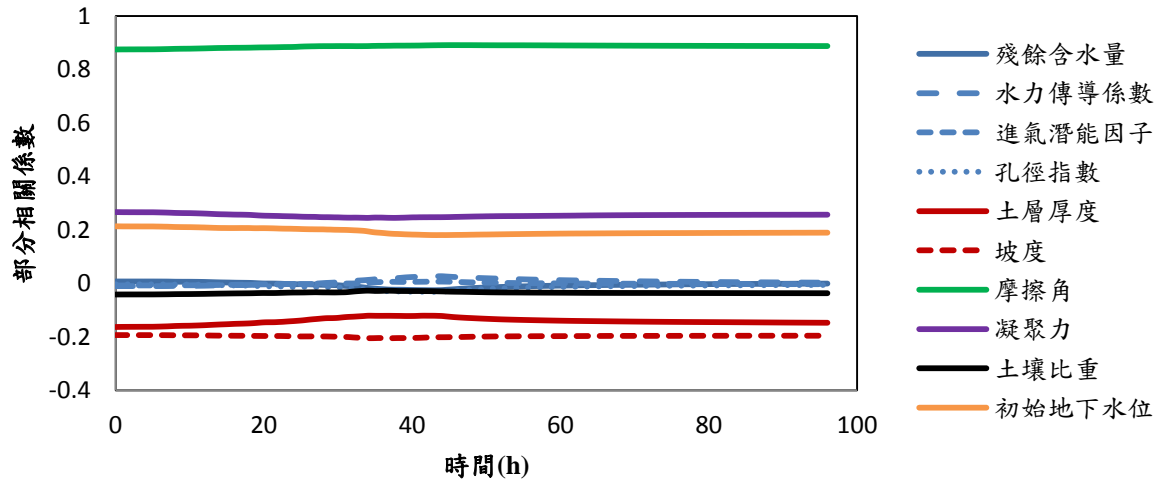


圖 4.41 案例六土層第三層，安全係數部分相關係數

