

# 國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

台灣地區掩埋場覆蓋層採用蒸發散覆蓋的可行性研究

**Feasibility of Evapotranspiration Cover for  
Landfill Cover in Taiwan**

研究生：林昱辰

指導教授：單信瑜 博士

中華民國一〇一年七月

台灣地區掩埋場覆蓋層採用蒸發散覆蓋的可行性研究

Feasibility of Evapotranspiration Cover for Landfill Cover in Taiwan

研究生：林昱辰

Graduate Student : Yu-Chen Lin

指導教授：單信瑜 博士

Advisor : Dr. Hsin-Yu Shan

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

A Thesis

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

July, 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

# 台灣地區掩埋場覆蓋層採用蒸發散覆蓋的可行性研究

研究生：林昱辰

指導教授：單信瑜 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 摘要

由於台灣地區降雨量分布不均，南北差異甚大，雖然總雨量頗高，但實際上乾溼兩季分明且中部及南部地區年降雨量較少類似半乾旱氣候。故本研究將考慮台灣地區的氣候條件，輸入北部(淡水)、中部(台中)、南部(台南)的歷史氣象資料，以蒸發散覆蓋為覆蓋層型式，控制地表植生條件，透過蒸發散的概念將入滲水排除達到減少水流通過覆蓋層底層的下滲。本研究以 HELP 模式及 HYDRUS-1D 模式進行數值模擬，來計算水流通過覆蓋層底層的下滲量。其中 HELP 模式為擬二維的分析方式，該模式僅考慮水文平衡沒有考慮土壤保水特性與非飽和土壤導水度的關係；而 HYDRUS-1D 模式雖是描述土壤的一維的水流下滲行為，但分析上考慮土壤保水特性與非飽和土壤導水度的影響。分析結果顯示，單一土層類型有低水力傳導性並且有高的貯水能力，使單一土層覆蓋增加貯水容量，提高蒸發散量以限制水流的下滲。而單一土層蒸散覆蓋的土層厚度取決於降雨量及土壤的貯水容量。毛細阻隔層類型上層為細顆粒層下層為粗顆粒層，結合了單一土層類型的特性，並藉由毛細作用力將水流限制在細顆粒層以減少下滲至粗顆粒層。

關鍵字：掩埋場、覆蓋層、蒸發散、HELP、HYDRUS-1D。

# **Feasibility of Evapotranspiration Cover for Landfill Cover in Taiwan**

Student: Yu-Chen Lin

Advisor: Dr. Hsin-Yu Shan

**Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University**

## **Abstract**

Alternative covers of landfills have been proposed and permitted on a case by case basis in the United States. Researches over the past decade indicated that evapotranspiration (ET) cover with either monolithic layer or capillary barrier have been proven to be better or equivalent to traditional RCRA Subtitle D covers. A number of researches and site demonstration projects showed that ET cover can also effectively minimize percolation and meet the requirement of the cover system in regions with wet climate. Thus ET covers may be suitable for the landfills in southern Taiwan where evapotranspiration is greater than precipitation and rainfall often occurs in very short periods. In this study, the effectiveness of ET covers with monolithic fills and capillary barrier has been investigated by computation by Visual HELP and HYDRUS-1D with historical meteorological data representing the northern (Tamsui), central (Taichung), and southern (Tainan). The results show that monolithic covers of a single layer of fine-grained soil with low hydraulic conductivity and a high storage capacity can be quite effective in deterring infiltration. The design of these properties allows monolithic covers to manipulate the water balance by increasing the storage, evaporation, and limiting percolation. The amount of precipitation and the storage capacity of the soils are the critical factors for determining the thickness of these covers. On the other hand, capillary barriers consist of a layer of fine-grained soil underlain by a layer of coarse soil are also very effective by limiting infiltration with the low relative conductivity of the coarse layer.

Keywords : Landfill, Cover Systems, Evapotranspiration, HELP, HYDRUS-1D

## 誌謝

轉眼間兩年的碩士班已到了尾聲，在此非常感謝指導教授單信瑜 博士在專業知識及論文研究上的指導，讓我在研究的觀點及態度上有更多的突破。也非常感謝口試委員黃富國 博士、徐松圻 博士、賴俊仁 博士對於論文初稿的指導改正，使本研究論文更臻完善。

在碩士班兩年內也受到彥森學長、凱仁學長等的關心及照顧，還有單門夥伴效丞、潤翰、智緯、志清學弟及大地組的同學們，一起運動打球的日子。也祝福各位在未來的人生旅途中，能夠平安順利。

最重要的是，我非常感謝我的父母，從小對我的栽培到長大成人，尤其是我的媽媽，讓我能夠不愁吃穿，將我照顧得無微不至，媽媽對我的養育恩情不是在字裡行間就能表達完的，在這裡我要告訴她我愛她。

最後我要感謝的是我的女朋友姿容，以及楊媽媽對我的照顧，在我大學生涯及碩士班的求學階段能夠陪伴我共同經歷喜怒哀樂，能夠一起去欣賞世界的美景，讓我們的人生可以過得精彩。

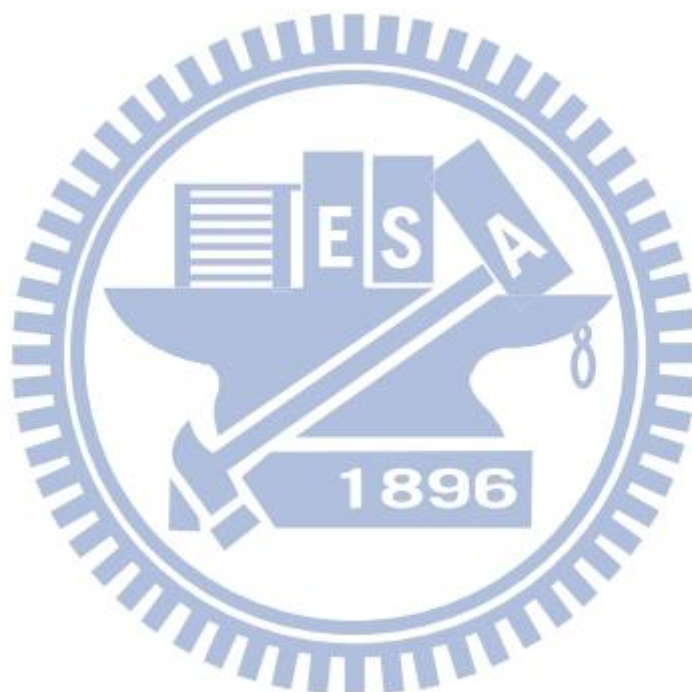


## 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XI
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 研究方法.....	1
1.4 研究流程.....	2
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 掩埋場與覆蓋系統.....	3
2.1.1 掩埋場設施及相關法令規範.....	3
2.1.2 掩埋場覆蓋系統.....	5
2.2 非常規覆蓋系統.....	6
2.2.1 非常規覆蓋系統的概念.....	6
2.2.2 蒸發散覆蓋系統.....	6
2.3 覆蓋系統有效性分析.....	9
2.3.1 蒸發散覆蓋試驗與結果.....	9
2.3.2 水文平衡分析.....	11
第三章 研究方法.....	15
3.1 研究流程.....	15

3.2 水文平衡模式 HELP 數值模擬.....	17
3.2.1 模式簡介.....	17
3.2.2 模式操作與執行.....	17
3.3 水文平衡模式 HYDRUS-1D 數值模擬.....	19
3.3.1 模式簡介.....	19
3.3.2 模式操作與執行.....	19
3.4 覆蓋系統模型與參數設定.....	21
第四章 數值模擬結果.....	22
4.1 降雨事件隊下滲量的影響.....	22
4.2 單一土層覆蓋模擬結果.....	23
4.2.1 顯著降雨事件對單日下滲量的影響.....	24
4.2.2 全年降雨量對累積下滲量的影響.....	34
4.2.2.1 土壤導水度在土層厚度 1 m 對累積下滲量的影響.....	34
4.2.2.2 土壤導水度在土層厚度 1.5 m 對單日下滲量的影響.....	38
4.2.2.3 土壤導水度在土層厚度 2 m 對單日下滲量的影響.....	42
4.3 毛細阻隔層覆蓋模擬結果.....	46
4.3.1 顯著降雨事件對單日下滲量的影響.....	47
4.3.2 全年降雨量對累積下滲量的影響.....	55
4.3.2.1 土壤導水度在土層厚度 1 m 對累積下滲量的影響.....	55
4.3.2.2 土壤導水度在土層厚度 1.5 m 對單日下滲量的影響.....	59
4.3.2.3 土壤導水度在土層厚度 2 m 對單日下滲量的影響.....	63
4.4 數值模擬綜合分析.....	67
第五章 結論與建議.....	70

5.1 結論.....	70
5.2 建議.....	71
參考文獻.....	72
附錄 A.....	75





## 圖目錄

圖 1-1	研究流程圖.....	2
圖 2-1	掩埋場示意圖(單信瑜、姚振天, 2004).....	3
圖 2-2	覆蓋系統剖面圖(單信瑜、姚振天, 2004).....	5
圖 2-3	美國一般廢棄物(MSW)掩埋場頂部覆蓋系統透視圖 (von Maubeuge and Eberle, 1998).....	6
圖 2-4	蒸發散覆蓋概念(Abichou et al., 2003).....	7
圖 2-5	單一土層蒸發散覆蓋(Abichou et al., 2003).....	8
圖 2-6	毛細阻隔層蒸發散覆蓋(Abichou et al., 2003).....	8
圖 2-7	具有 UDL 與無 UDL 之毛細阻隔層比較(Stormont and Morris, 1997) ...	10
圖 2-8	掩埋場蒸發散覆蓋之水文平衡(Winkler, 1999).....	11
圖 2-9	100 mm/hr 之降雨 24 小時內的蒸發散覆蓋水文平衡 (Harianto, 2008)..	12
圖 3-1	研究方法流程圖.....	16
圖 3-2	HELP 模式模擬流程圖.....	18
圖 3-3	HYDRUS-1D 模式模擬流程圖.....	20
圖 3-4	12 種類型土壤參數(Carsel and Parrish, 1988).....	21
圖 4-1-a	單一土層粉土質壤土厚度 1 m 的單日下滲量.....	22
圖 4-1-b	毛細阻隔層(粉土質壤土+砂土)厚度 1 m 的單日下滲量.....	23
圖 4-2-a	砂土質壤土 $K_r$ 與體積含水比的關係(Carsel and Parrish, 1988).....	26
圖 4-2-b	粉土質壤土 $K_r$ 與體積含水比的關係(Carsel and Parrish, 1988).....	26
圖 4-2-c	粉土 $K_r$ 與體積含水比的關係(Carsel and Parrish, 1988).....	27
圖 4-2-d	砂土質壤土導水度 $K$ 與體積含水比的關係.....	27
圖 4-2-e	粉土質壤土導水度 $K$ 與體積含水比的關係.....	28
圖 4-3-a	不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部).....	28
圖 4-3-b	不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部).....	29

圖 4-3-c	不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部)	29
圖 4-3-d	不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)	29
圖 4-3-e	不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)	30
圖 4-3-f	不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)	30
圖 4-3-g	不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)	30
圖 4-3-h	不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)	31
圖 4-3-i	不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)	31
圖 4-3-j	不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)	31
圖 4-3-k	不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)	32
圖 4-3-l	不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)	32
圖 4-3-m	不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)	32
圖 4-3-n	不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)	33
圖 4-3-o	不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)	33
圖 4-3-p	不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)	33
圖 4-3-q	不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)	34
圖 4-3-r	不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)	34
圖 4-4-a	不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(北部)	35
圖 4-4-b	不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(中部)	36
圖 4-4-c	不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(南部)	36
圖 4-5-a	不同導水度土壤在 1 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ )	37
圖 4-5-b	不同導水度土壤在 1 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ )	37
圖 4-5-c	不同導水度土壤在 1 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ )	38
圖 4-6-a	不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(北部)	39
圖 4-6-b	不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(中部)	39
圖 4-6-c	不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(南部)	40

圖 4-7-a	不同導水度土壤在 1.5 m 下北部的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ ).....	41
圖 4-7-b	不同導水度土壤在 1.5 m 下中部的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ ).....	41
圖 4-7-c	不同導水度土壤在 1.5 m 下南部的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ ).....	42
圖 4-8-a	不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(北部) .....	43
圖 4-8-b	不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(中部).....	43
圖 4-8-c	不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(南部) .....	44
圖 4-9-a	不同導水度土壤在 2 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ ) .....	44
圖 4-9-b	不同導水度土壤在 2 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ ).....	45
圖 4-9-c	不同導水度土壤在 2 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 $K_s$ ) .....	45
圖 4-10-a	不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部) .....	49
圖 4-10-b	不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部) .....	49
圖 4-10-c	不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部) .....	49
圖 4-10-d	不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部) .....	50
圖 4-10-e	不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部) .....	50
圖 4-10-f	不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部).....	50
圖 4-10-g	不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部) .....	51
圖 4-10-h	不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部) .....	51
圖 4-10-i	不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部).....	51
圖 4-10-j	不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部) .....	52
圖 4-10-k	不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部) .....	52
圖 4-10-l	不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部).....	52
圖 4-10-m	不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部) .....	53
圖 4-10-n	不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部) .....	53
圖 4-10-o	不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部).....	53
圖 4-10-p	不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部) .....	54

圖 4-10-q	不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部).....	54
圖 4-10-r	不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部).....	54
圖 4-11-a	不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(北部).....	55
圖 4-11-b	不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(中部).....	56
圖 4-11-c	不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(南部).....	56
圖 4-12-a	不同導水度土壤在 1 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較 Ks).....	57
圖 4-12-b	不同導水度土壤在 1 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較 Ks).....	57
圖 4-12-c	不同導水度土壤在 1 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 Ks).....	58
圖 4-13-a	不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(北部).....	60
圖 4-13-b	不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(中部).....	60
圖 4-13-c	不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(南部).....	61
圖 4-14-a	不同導水度土壤在 1.5 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較 Ks)....	62
圖 4-14-b	不同導水度土壤在 1.5 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較 Ks)....	62
圖 4-14-c	不同導水度土壤在 1.5 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 Ks)....	63
圖 4-15-a	不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(北部).....	64
圖 4-15-b	不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(中部).....	64
圖 4-15-c	不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(南部).....	65
圖 4-16-a	不同導水度土壤在 2 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較 Ks).....	66
圖 4-16-b	不同導水度土壤在 2 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較 Ks).....	66
圖 4-16-c	不同導水度土壤在 2 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 Ks).....	67



## 表目錄

表 2-1	SNL 試驗結果(U.S. Department of Energy, 2000) .....	9
表 2-2	覆蓋系統效能相當評估準則(Benson et al., 2000).....	9
表 2-3	EPIC 與 HELP 之蒸發散分析項目比較.....	13
表 3-1	Van Genuchten (1980)理論公式 .....	21
表 4-1	單一土層蒸發散覆蓋參數組合 .....	24
表 4-2	單一土層類型的單日下滲量百分比 .....	25
表 4-3	單一土層類型在不同導水度土壤下厚度 1 m 的全年累積下滲量 .....	36
表 4-4	單一土層類型在不同導水度土壤下厚度 1.5 m 的全年累積下滲量 .....	40
表 4-5	單一土層類型在不同導水度土壤下厚度 2 m 的全年累積下滲量 .....	45
表 4-6	毛細阻隔層蒸發散覆蓋參數組合 .....	46
表 4-7	毛細阻隔層類型的單日下滲量百分比 .....	48
表 4-8	毛細阻隔層類型在不同導水度土壤下厚度 1 m 的全年累積下滲量 .....	58
表 4-9	毛細阻隔層類型在不同導水度土壤下厚度 1.5 m 的全年累積下滲量 .....	61
表 4-10	毛細阻隔層類型在不同導水度土壤下厚度 2 m 的全年累積下滲量 .....	65
表 4-11	單一土層類型下全年降雨量的累積下滲量百分比 .....	68
表 4-12	毛細阻隔層類型下全年降雨量的累積下滲量百分比 .....	69

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

由於國內對於掩埋場覆蓋系統的研究極少，法令規範雖仿自國外，但卻未能考量本島地區氣象條件與土壤、植生等狀況，因此所訂定規範的同時並未設定效能目標。美國許多地區因降雨較少，非常規覆蓋(Alternative Cover)系統的概念亦日漸興起。而台灣幾乎所有的掩埋場並未隨歐美法規與技術的進步以地工膜布阻隔層作為覆蓋系統的主要阻水層，卻採用夯實土壤作為覆蓋系統的主要構件。相較於歐美各國，台灣的年平均雨量雖為其三倍，但降雨時空分布不均，南北差異甚大，雖然總雨量頗高，但實際上乾溼兩季分明，且溼季降雨又往往集中在梅雨期和颱風來襲時。尤其在近年的降雨狀況來看，梅雨期較以往不明顯，降雨也少；但颱風時期的雨量卻更集中。這樣的趨勢尤其以台灣南部更為明顯，且南部地區年蒸發散量高於降雨量。

在國外亦有研究蒸發散覆蓋可應用於降雨量較多的地區。且根據柳中明等(2009)研究推估，受到氣候變遷的影響，台灣的降雨型態將延續上述趨勢且更為劇烈。且因為溫度逐漸升高，因此蒸發散量也將逐漸增大。這樣的降雨型態導致台灣中南部地區的降雨型態逐漸近似乾旱地區。一年之間除了有數日的暴雨之外，大多時間降雨極少。這樣的氣候型態將使得台灣的掩埋場應該可以採用蒸發散覆蓋來有效控制雨水下滲。

## 1.2 研究目的

本研究目的以蒸發散覆蓋為非常規覆蓋仍能達到傳統覆蓋層的效果，並且有較低的成本。應用單層土壤(Monolithic Covers)蒸發散覆蓋或毛細阻隔層(Capillary Barriers)蒸發散覆蓋，捨棄以地工膜布阻隔水入滲，既可解決地工膜布與土壤介面低剪力強度導致的邊坡滑動潛在問題，也消除地工合成材壽命與長期效能與維護的疑慮。利用土壤的貯水能力貯存更多的入滲水，以利提供植生(蒸發散)、植物吸水，透過這種方式，便將先前貯存的入滲水排出以減少雨水的下滲。

## 1.3 研究方法

本研究針對蒸發散覆蓋的可行性採用數值模式分析下滲量(Percolation)，主要使用 HELP 水文平衡模式及 HYDRUS-1D 非飽和水流模式。首先考慮場址區域位置並建立覆蓋層模型，採用蒸發散覆蓋系統，有單一土層覆蓋及毛細阻隔層覆蓋兩種類型，即不再使用地工膜布。進而選擇土壤參數並控制植生條件，藉由



中央氣象局提供之歷史氣象資料作為氣象條件，以台灣北部、中部、南部為代表性氣象輸入模式，執行模式輸出後進行分析討論。

## 1.4 研究流程

本研究流程圖整理如下(圖 1-1)：

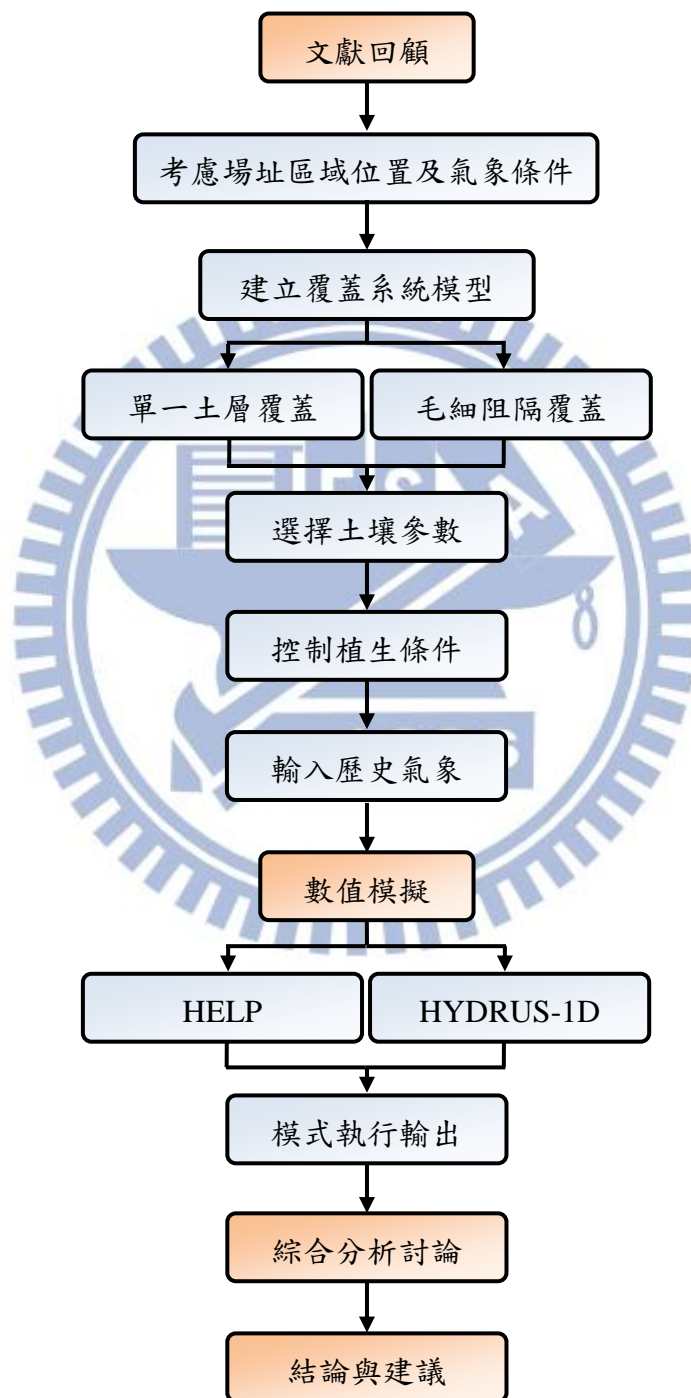


圖 1-1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 掩埋場與覆蓋系統

#### 2.1.1 掩埋場設施及相關法令規範

現代衛生掩埋場是有控制地處理城市固體廢棄物的一種方法，其設置的目的在於存放廢棄物，阻絕對環境的污染，最後依賴自然的力量分解廢棄物。城市固體廢棄物一般包括生產垃圾、商業垃圾和生活垃圾。台灣地區垃圾處理後續計畫(環保署, 2004)所定義的廢棄物包括一般廢棄物及事業廢棄物(有害事業廢棄物、一般事業廢棄物)。目前，工業開發國家在設計掩埋場時，多採用雙重屏障的觀念，利用天然和人工屏障，盡量使所處置的廢棄物與生態環境相隔離。

廢棄物之掩埋處理係多元垃圾處理體系中所必備之設施，衛生掩埋場除了可接受廢棄物以外，尚可容納焚化爐之灰燼、一般事業廢棄物及資源回收後之殘餘物。廢棄物處理過程包括貯存、收集、清運、中間處理及最終處置等。在處理過程中，原則上盡可能將其中有價物質回收再利用，難以再利用者其可燃物可藉焚化、熱解、堆肥等化學及生化處理技術回收熱能、燃料及有機肥等。至於不能再利用者或焚化殘渣，則依一定之準則安全衛生地處置之，稱為「最終處置」。

掩埋場設計可分為三個部份，包括襯底系統(Liner System)、滲出水收集系統(Leachate Collection System)、覆蓋系統(Cover System)(圖 2-1)。底部襯底系統的功能為阻止滲出水外滲並收集處理。在掩埋場已經填埋達到預定之高程後，必須進行封場，亦即在掩埋場的頂部設置覆蓋系統。

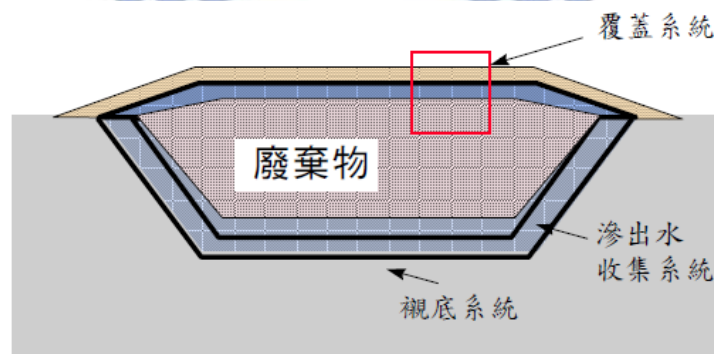


圖 2-1 掩埋場示意圖(單信瑜、姚振天, 2004)

關於我國掩埋場的相關法令規範如下：

1. 「一般廢棄物衛生掩埋場設置規範」(衛生署, 1985)

在設施構造方面，對於底部阻水設施的說明如下：

底部阻水設施為阻止掩埋場內之滲出水污染地下水，在設置掩埋場時，除利用天然地形之不透水層外，仍必須設置底部阻水設施。

掩埋場內部透水係數如大於  $10^{-5}$  cm/sec，宜設置底部阻水設施。底部阻水設施如無天然不透水層(如岩層)可供利用時，須考慮掩埋場之地形、土質、地下水狀況，以及掩埋廢棄物種類和掩埋作業方式等，選擇適當之不透水材料或粘土、膠質粘土等做成不透水層，其透水係數須在  $10^{-6}$  cm/sec 以下。

## 2. 「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」(環保署，2006)

事業廢棄物之最終處置掩埋方式，應以下列之一為之：

### 一、安定掩埋法

指將一般事業廢棄物置於掩埋場，設有防止地盤滑動、沈陷及水土保持設施或措施之處理方法。

安定掩埋場終止使用者，應覆蓋厚度50 cm以上之砂質或泥質黏土。

### 二、衛生掩埋法

指將一般事業廢棄物掩埋於以不透水材質或低滲水性土壤所構築，並設有滲出水、廢氣收集處理設施及地下水監測裝置之掩埋場之處理方法。

衛生掩埋場於每工作日結束時，應覆蓋厚度15 cm以上之土，並予以壓實；於終止使用時，應覆蓋厚度50 cm以上之砂質或泥質黏土。底層及周圍應以透水係數低於 $10^{-7}$  cm/sec，並與廢棄物或其滲出液具相容性，厚度60 cm以上之砂質或泥質黏土或其他相當之材料做為基礎，或以透水係數低於 $10^{-10}$  cm/sec，並與廢棄物或其滲出液具相容性，單位厚度0.2 cm以上之人造不透水材料做為基礎。

### 三、封閉掩埋法

指將有害事業廢棄物掩埋於以抗壓及雙層不透水材質所構築，並設有阻止污染物外洩及地下水監測裝置之掩埋場之處理方法。

有害事業廢棄物應以封閉掩埋法處理，底層應以透水係數低於  $10^{-7}$  cm/sec，並與廢棄物或其滲出液具相容性，厚度 60 cm 以上之砂質或泥質黏土或其他相當之材料做為基礎，及以透水係數低於  $10^{-10}$  cm/sec，並與廢棄物或其滲出液具相容性，單位厚度 0.2 cm 以上之人造不透水材料做為襯裡。

封閉掩埋場設置之底層及周圍設施須覆以透水係數低於  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec、厚度

90 cm之黏土，再覆以單位厚度0.076 cm以上雙層人造不透水材料。終止使用者，應先覆以厚度15 cm砂質或泥質黏土，再覆蓋透水係數低於 $10^{-10}$  cm/sec、單位厚度0.2 cm以上之人造不透水材料及厚度60 cm以上之砂質或泥質黏土，並予壓實。

## 2.1.2 掩埋場覆蓋系統

覆蓋系統用在以下幾種狀況：廢棄物掩埋場、土壤污染場址、廢礦渣或不明廢棄物場址之封閉。覆蓋系統係指在地表的人造系統，其主要功能為減少地表水入滲、隔絕填埋廢棄物、控制填埋廢棄物生成氣體排放、植生美化。而覆蓋系統(圖2-2)由下而上可分成集排氣層、分隔層、阻水層、地表水收集排除系統(Surface Water Collection and Removal System, SWCRS)、土工織物分隔層、地表覆土；但並非全部皆有，可根據當地狀況、需求不同而有不同之設計。

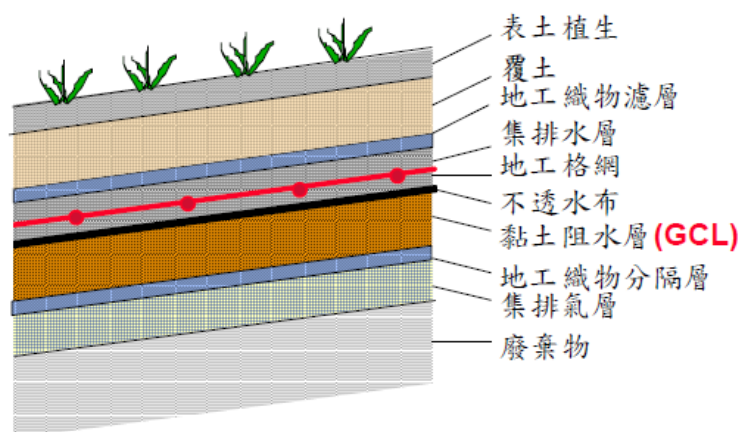


圖 2-2 覆蓋系統剖面圖(單信瑜、姚振天，2004)

美國掩埋場的相關法規係基於1976年美國國會通過的資源保護與回收法案(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)。該法案責成其環保署制定各種與廢棄物相關之法規。其中，Subtitle C係有害廢棄物(Hazardous Waste)之管制規定；Subtitle D則為一般廢棄物(Municipal Solid Waste, MSW)之規範(USEPA, 2010)。

在美國環保署對於覆蓋系統的要求方面，自1993年起必須符合新的要求，亦即覆蓋系統的透水性(Permeability)必須小於或等於底部的阻水層之透水性或小於 $1 \times 10^{-5}$  cm/s中較小者。入滲層(Infiltration Layer，包括各覆蓋系統構件)厚度至少需18 in (45 cm)以上，同時必須有厚度至少6 in (15 cm)的土壤防止沖蝕層以提供植物生長來減緩沖蝕防止覆蓋系統崩解(40 CFR Part 258 Subpart F)(USEPA, 2010)。



在覆蓋系統中除地工膜布或地工皂土毯用以阻止水份下滲外，亦含排水層排除水份降低水頭，而集氣層係用來收集廢棄物分解所產生之氣體。依據我國之規範，有害事業廢棄物之安定掩埋場須於封閉時設置含不透水布之最終覆蓋系統，但對一般廢棄物掩埋場則無此要求。以我國現況而言，應要求至少所有掩埋場於封閉時設置含地工膜布之最終覆蓋系統(Final Cover System)。

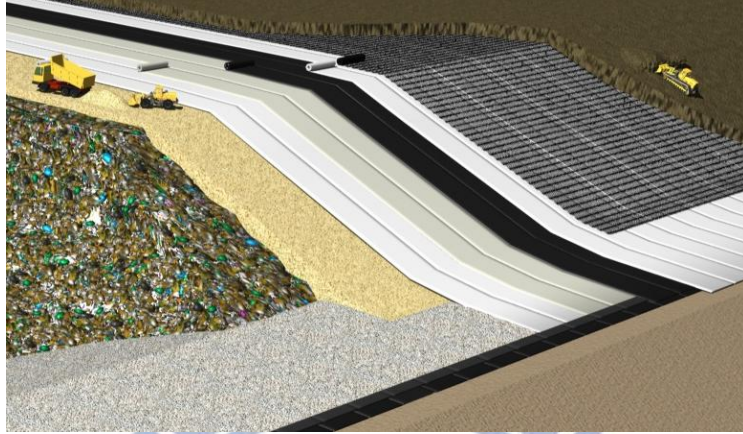


圖 2-3 美國一般廢棄物(MSW)掩埋場頂部覆蓋系統透視圖 (von Maubeuge and Eberle, 1998)

有關美國環保署規定集排水層上方淤積水頭的規定，美國環保署 RCRA Subtitle D 要求在集排水層上的滲出水水頭必須低於 30 cm，且掩埋場封場後，污水處理與各種管理及監測設施與措施必須持續至少 30 年(USEPA, 2012)。

## 2.2 非常規覆蓋系統

### 2.2.1 非常規覆蓋系統的概念

非常規覆蓋被定義為在符合規定下的可替換使用覆蓋層類型。這種廣泛的定義包含許多覆蓋類型，只要符合 RCRA 的規定下且有相當的等效性就能使用。然而，掩埋場覆蓋層的主要目的是盡量減少水流的下滲，在能有效隔離廢棄物的條件下，若要將非常規覆蓋成為可取代的條件，就必須至少達到相同的滲流率或甚至更低。

### 2.2.2 蒸發散覆蓋系統

蒸發散覆蓋層(Evapotranspiration Cover)是近年來掩埋場覆蓋系統演進的方向，其特性為掩埋場的覆蓋系統以現地土壤建造。主要有兩種設計覆蓋型式，即單一土層同時提供入滲水貯存與植生，或設置一毛細阻隔層再於其上鋪設一地表植生層。蒸發散覆蓋亦屬於非常規覆蓋層(Alternative Cover)，其優點包括：壽命較長、成本較低(約為使用地工膜布的 2/3)、修復較易、符合環保和永續的概念。

蒸發散覆蓋層是一個健全的植生覆蓋，能夠允許快速和多產的根系生長，土壤應保持足夠的水以減少在極端氣象條件下水分的運動(Abichou et al., 2003)。

蒸發散覆蓋的基本概念(圖 2-4)是在降雨時利用土層的孔隙貯存入滲水，若有足夠的孔隙，在較乾旱地區這些孔隙足以貯存全部的入滲水而不會導致下滲(Percolation)。這些貯存在覆土中的入滲水可於平時提供植物生長所需，透過植物的蒸散作用可以將先前貯存的入滲水排出。對於美國中西部許多乾旱或半乾旱地區，蒸發散覆蓋系統應該相當有效，且其費用遠較設置傳統的 Subtitle D 覆蓋系統便宜(Abichou et al., 2003)。

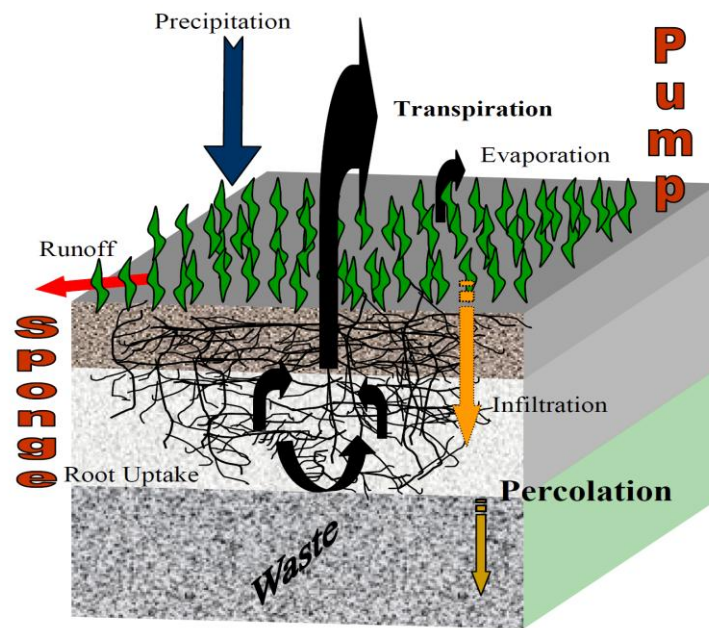


圖 2-4 蒸發散覆蓋概念(Abichou et al., 2003)

單一土層蒸發散覆蓋(Monolithic Cover)的細顆粒土壤，有低水力傳導性並且有高的貯水能力，這些屬性的設計，使單一土層覆蓋增加貯水容量，提高蒸發散量以限制水流的下滲(圖 2-5)。而單一土層蒸散覆蓋的土層厚度取決於降雨量及土壤的貯水容量，可由水文平衡分析得出。掩埋場覆蓋層的水文平衡影響因子在於地表逕流、土壤保水能力、水力傳導係數等。細顆粒土壤藉由不飽和水力傳導與吸力逐漸在改變的關係，使得蒸發散量增加(Khire et al., 1995)。由於基底附近的低含水量，產生低水力傳導係數和單位梯度條件，限制了水流的下滲(Benson et al., 1997)。



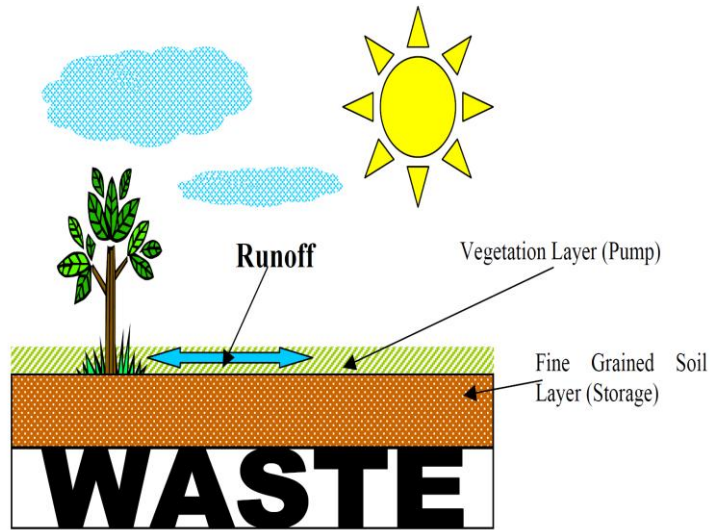


圖 2-5 單一土層蒸發散覆蓋(Abichou et al., 2003)

毛細阻隔層蒸發散覆蓋(Capillary Barriers)有細顆粒層及粗顆粒兩層，結合了單一土層的低水力傳導性，藉由毛細阻隔層之表面張力防止水入滲至粗顆粒層。毛細阻隔層的基本概念是利用土壤保水特性與非飽和導水度之差異，使得入滲水因為毛細張力的作用而停留在顆粒較小、保水性較強的上層土壤，而不會進入下層顆粒較大、保水性低、非飽和導水度甚低的下層土壤(圖 2-6)。上下兩層土壤的顆粒大小差異愈大，毛細阻隔層的效果愈好。若要有水通過上層的毛細層，必須是此層土壤已經完全被水飽和之後，入滲水才會克服毛細張力作用往下滲入下方土層。而因下方土層仍相對乾燥，含水比甚低，因此其非飽和導水度甚低，且在適當坡度下，水會沿坡度滲流，而減少垂直下滲比例(Abichou et al., 2003)。

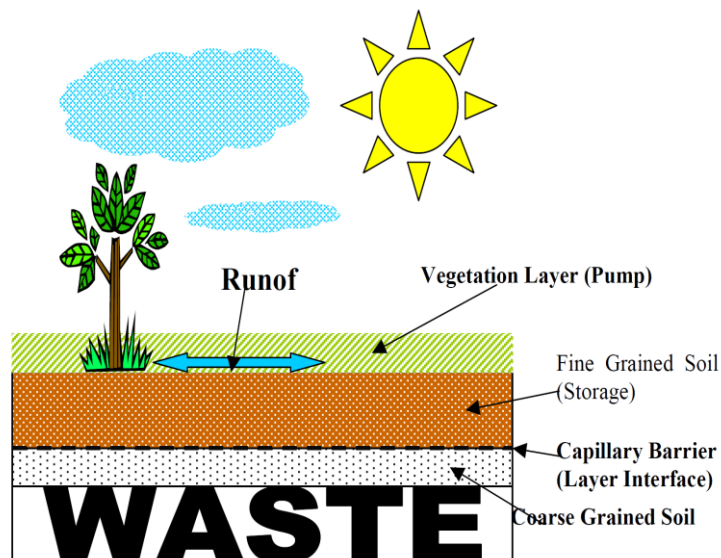


圖 2-6 毛細阻隔層蒸發散覆蓋(Abichou et al., 2003)

## 2.3 覆蓋系統有效性分析

### 2.3.1 蒸發散覆蓋試驗與結果

美國能源部所進行的非常規覆蓋系統試驗計畫(U.S. Department of Energy, 2000)，以大規模的現場試驗比較了各種可用的非常規覆蓋系統之有效性。該試驗一共比較了 RCRA Subtitle D 覆蓋、RCRA Subtitle C 覆蓋、GCL 覆蓋、毛細阻隔層覆蓋、異向性覆蓋、蒸發散覆蓋。

美國能源部的試驗結果如(表 2-1)所示，該年的累積雨量 160,728(liter)在所有覆蓋系統中，因 Subtitle C 覆蓋有幾乎完全不透水的土工膜布，因此其下滲量最小，一年只有 0.13 mm；但同樣有土工膜布的 GCL 覆蓋下滲量稍高，約為 1.81 mm，恐因與土工膜布搭接品質有關。而採用夯實黏土的 Subtitle 覆蓋下滲率最高，可達 4.82 mm。蒸發散覆蓋、異向性覆蓋、毛細阻隔層覆蓋下滲量都很小，尤其是異向性覆蓋和蒸發散覆蓋的下滲量竟較毛細阻隔層覆蓋更佳。

表 2-1 SNL 試驗結果(U.S. Department of Energy, 2000)

覆蓋系統	下滲量 Flux Rates (mm/year)	單價 (USD/m <sup>2</sup> )
Subtitle D Cover	4.82	51.4
Subtitle C Cover	0.13	157.54
GCL Cover	1.81	89.99
Capillary Barrier	0.87	92.64
Anisotropic Barrier	0.16	75.26
ET Cover	0.19	73.89

此外，蒸發散覆蓋與傳統覆蓋的效能相當性，亦可參照(表 2-2)中之準則。只要能評斷蒸發散覆蓋的下滲量可低於(表 2-2)中夯實黏土或土工膜布覆蓋的數值，即可論證蒸發散覆蓋之有效性與傳統覆蓋系統相當。

表 2-2 覆蓋系統效能相當評估準則(Benson et al., 2000)

覆蓋層類型	半乾旱氣候條件	潮濕氣候條件
夯實黏土	10 mm/yr	30 mm/yr
土工膜布	3 mm/yr	3 mm/yr

由於蒸發散覆蓋系統的優點甚多，因此許多工程人員與研究者希望能在乾旱與半乾旱地區以外雨量稍高的地區亦能使用蒸發散覆蓋層。以北美地區而言，毛細阻隔層在冬季和早春降水較多但蒸發散量較小的時期受到最大的考驗。但在毛細阻隔層有坡度時，因導水度太低而導致側向排水極少；在降雨事件時，毛細層

接近飽和、下滲即發生，側向水流的範圍仍非常有限 (Stormont and Morris, 1997)。

若將毛細阻隔層的設計稍加調整，則可適度提升側向排水能力。更好的方法是在毛細阻隔層和粗顆粒層之間設置一層較薄但排水能力良好的排水層；此材料的透水性應該頗高，但應保持非飽和狀態以維持和其下粗顆粒層的毛細阻斷作用 (Stormont and Morris, 1997)。因此便有研究指出若在毛細層中加入一層非飽和排水層 (Unsaturated Drainage Layer, UDL) 之後 (圖 2-7)，毛細阻隔層覆蓋系統可以在降水量較多的地區採用。

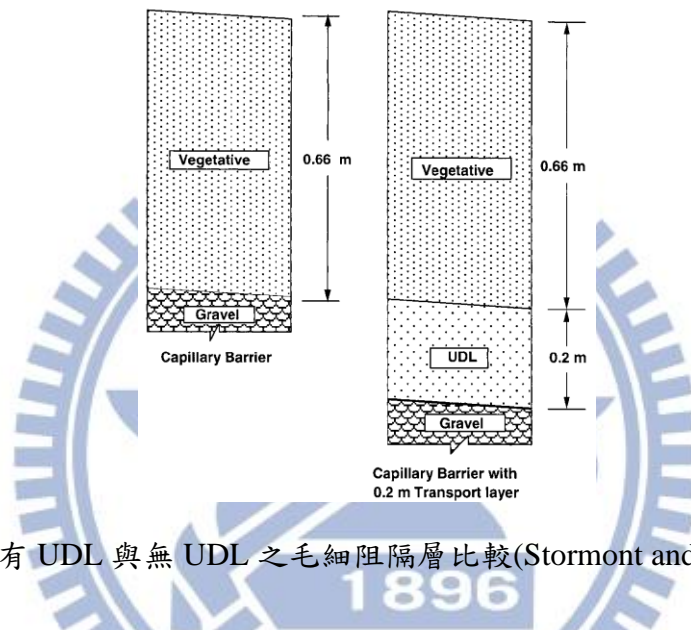


圖 2-7 具有 UDL 與無 UDL 之毛細阻隔層比較 (Stormont and Morris, 1997)

UDL 之採用將使得毛細阻隔層本身可以使用現地的細顆粒土壤，同時作為植生和提供貯水之用，建造費用將較低廉。例如毛細阻隔層使用沈泥質土壤，粗顆粒層為礫石，則 UDL 可為細砂層。此細砂層同時也是毛細阻隔層，也是 UDL。

Morris and Stormont (1999) 探討毛細阻隔層中 UDL 介面坡度與材料對系統側向排水效能的影響。模擬有與無 UDL (砂層) 的毛細阻隔層覆蓋系統在不同天候條件下 10 年之中，坡度為 5, 10, 20 % 時的效能。結果顯示在毛細層和粗顆粒層之間設置有 UDL 的覆蓋系統在側向排水能力上有顯著的提升。

Morris and Stormont (1999) 採用 TRACER3D (Travis and Birdsell, 1991) 模擬包含 UDL 之毛細阻隔層覆蓋系統；其蒸發散的分派採用和 HELP 一樣的方式。結果顯示 UDL 可以有效提升側向排水，在降水密集且蒸發散較少的時期大幅增進毛細阻隔層的效能。

### 2.3.2 水文平衡分析

覆蓋系統效能評估最主要的準則就是水文平衡，蒸發散覆蓋系統的設計比傳統的掩埋場覆蓋系統設計更仰賴水文平衡分析，因為覆蓋系統中沒有一層不透水（若施工良好，理論上不透水）的地工膜布，因此必須以水文平衡分析佐證其有效性。所有有關蒸發散覆蓋的研究都必須以簡單或複雜的水文平衡來分析通過覆蓋層的下滲量（圖 2-8）。最簡單的水文平衡式為：

$$I = P - R - D - E - \Delta S$$

式中：I 為入滲（Infiltration or percolation），E 為蒸發散（Evapotranspiration）P 為降水（Precipitation），R 為地表逕流（Surface runoff），D 為側向排水（Lateral Drainage）， $\Delta S$  為土壤貯水（Changes in soil-water storage 含水比增加量）。

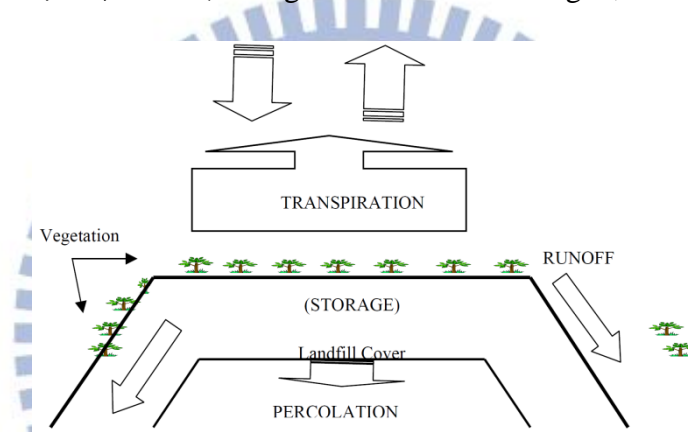


圖 2-8 掩埋場蒸發散覆蓋之水文平衡(Winkler, 1999).

在評估時所採用的降雨量將影響評估的準確性。Koerner and Daniel (1997) 提出以最大時雨量資料來分析時，覆蓋系統下滲量可能為以最大日降雨量分析的 40 倍。但 Harianto (2008) 探討在掩埋場覆蓋系統土壤材料中添加纖維以抵抗乾裂；透過實驗室中的模型試驗發現對一多層構建的覆蓋系統而言，在採用 1926 年-2006 年之間日本佐賀縣的最大時雨量試驗後，85 % 以上的降水以逕流排除，僅有約 2 %（約 2 mm）的降水下滲，其餘 13 mm 貯存於覆蓋系統土壤中（圖 2-9）。尤其實驗結果推論，在較大降雨時只要能有效排除地表逕流，蒸發散覆蓋仍可有效阻止入滲水下滲。



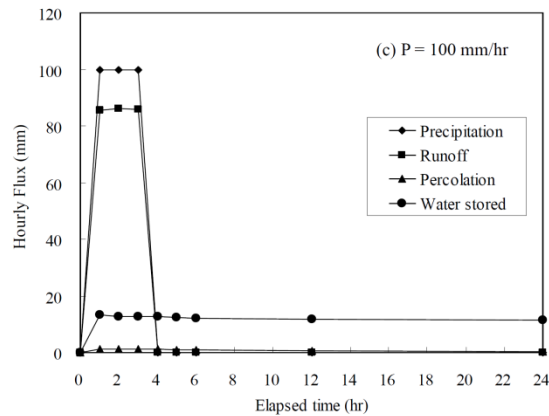


圖2-9 100 mm/hr之降雨24小時內的蒸發散覆蓋水文平衡 (Harianto, 2008)

有許多研究以水文平衡來探討掩埋場蒸發散覆蓋的有效性，Abichou et al., (2003)探討蒸發散阻隔層覆蓋系統在美國佛羅里達州的可行性。佛羅里達州的降雨量較高，年平均約為 1270 – 1651 mm，但年與年之間變化甚大，甚至於可以達到兩倍，暴雨時則常見 24 hr 降雨達 500 mm；此降雨量及降雨型態近乎與台灣中南部平原地區相當。研究結果顯示佛羅里達州也可以採用蒸發散阻隔層，只要地表坡度適當，植生適合，則即使在年雨量達 1840 mm 的西北部地區，下滲量小於 180 mm，低於採用傳統的夯實黏土層。又如 Yang et al. (2009)透過利用 48 年的氣象資料與水文數值分析，推論中國大連地區的掩埋場若採用 1.2 m 厚的蒸發散阻隔層覆蓋系統，就以足夠有效控制下滲量。

在模式方面，常用來進行蒸發散覆蓋水文平衡分析或滲流的模式包括：HELP、EPIC、HYDRUS、UNSAT-H。前二者為水文平衡模式，無水流之計算；後二者為非飽和水流模式，無水文平衡之分析，入滲水必須由簡易水文平衡分析自行假設。

HELP 是美國工兵團專為掩埋場水文平衡分析開發的程式(Schroeder et al., 1994)，近二十年來早已成為美國環保署官方認可而每一個掩埋場設計都必須採用的程式。HELP 是一擬二維 (quasi-two-dimensional) 模式。盧彥森 (2009)將之應用於台灣掩埋場的水文平衡分析，將結果與實際滲出水水量對比，驗證該程式只要有適當的氣候資料輸入在台灣一樣可以使用。但因 HELP 在植物蒸散量的估計上較不準確，因此大多數研究者都發現 HELP 會高估下滲量，甚至於高達觀測值的 4 倍(Benson and Pliska, 1996; Khire et al., 1997)。

EPIC 係一維水文平衡模式，EPIC 的開發始於 1980 年代，可推估各層的側向水流，時距為一天，因此可納入各種以日為基準的氣象資料。EPIC 可估計植物生長狀況、土壤沖蝕、水中的農藥與養分移動。

HELP 與 EPIC 雖在水流分析部分較為簡單，但因為可納入氣候資料運算，並已可提供各種植生供選擇以計算蒸發散量（表 2-3），故在使用上極為方便。且雖 HELP 有高估下滲的情形，但對掩埋場而言屬於保守，故官方與業界仍然支持其繼續應用。然而，因為在水流動態模擬部分欠缺，因此不夠精確。綜合考量兩類模式，對於工程設計而言，仍以 HELP 與 EPIC 兩個模式可產出較為可靠之結果。

表 2-3 EPIC 與 HELP 之蒸發散分析項目比較

模式分析項目	EPIC	HELP
估計實際的根系生長	可	無
土壤密度與根系生長	可	無
土壤溫度與根系生長	可	無

在滲流模式方面，除了 HYDRUS 與 UNSAT-H 有較多研究採用之外，也曾有人採用 SEEP/W 與 LEACHM。基本上，UNSAT-H 與 HYDRUS 均為水流模式，因此在涵蓋實際應用面的狀況較少，尤其對於氣象資料的輸入與植生資料並無內建模式，無法直接讀取氣象資料計算水文平衡。因此使用上較為困難，氣象與逕流、植物蒸散等資料必須經過前處理再予輸入。因此雖然分析較為精確，但不適合在工程初步設計使用。且因為需要的假設較多，在工程評估與設計時，產出之資料雖精確但不一定正確，其可信度反而較低。在較複雜的水流模式方面，VADOSE/W 是專為模擬非飽和土壤中水流開發的二維分析模式，適用於邊坡穩定、廢棄物掩埋場與整治場址覆蓋、農業灌溉等相關的分析。其考量之因子與輸入之參數與 HELP 和 EPIC 類似，故可視為較 UNSAT-H 與 HYDRUS 實用，而較 HELP 與 EPIC 精確之程式。

UNSAT-H 前身是美國能源部補助開發的程式 UNSAT，內部並無估計植物生長吸收水分的關係式，使用者必須自己由該模式中提供的幾種土壤水特徵曲線中挑選可涵蓋此效應者。UNSAT-H 為一維有限差分模式，可模擬非飽和土壤中的水流和熱流；模式求解修正 Richard's 偏微分方程式。該模式無法計算地表逕流，僅能將無法入滲的水量指派為地表逕流。此模式可模擬非飽和水流、蒸發、蒸散。但缺點是其忽略側向排水。若側向排水頗為顯著，則 UNSAT-H 會高估下滲量 (Morris and Stormont, 1999)。

Benson et al.(2000)針對毛細阻隔層的水文平衡，以 UNSAT-H 進行模擬評估各層厚度、非飽和導水性質、天候對於毛細阻隔層覆蓋效能的影響。模擬結果顯示毛細層的厚度和導水度對毛細層的水文平衡有顯著的影響；增加厚度和降低導水度可以減少入滲。粗顆粒層的性質對於下滲量的影響較小。在天候因素的影響



方面，在遇到降雨頻率愈高但強度較低但卻並非最高蒸發散潛能季節狀況時，土壤的貯水能力應該更高。

Woyshner and Yanful (1995)分析加拿大魁北克省一處礦渣土壤覆蓋層的下滲量，採用 HELP 計算水文平衡，再將結果輸入 SEEP/W。但是假設全年單一淨下滲量穩態水流，包括非飽和層與飽和層。該場址降水中有 56 % 蒸散、11 % 地表逕流、33 % 入滲，分析得出約 34.4 mm 水量下滲通過覆蓋層。若僅以 HELP 模擬，則約有 38 mm 下滲。Tami et al. (2004)曾採用 SEEP/W 與 SVFlux 分析具坡度的毛細阻隔層覆蓋系統。

Zornber et al. (2003)探討一位於加州的超級基金整治場址蒸發散阻隔層覆蓋系統之設計。結果發現，下滲量和植物根系深度、覆蓋厚度、飽和導水度之間的關係是高度非線性的。但結果也發現蒸發散阻隔層覆蓋系統可以適用於許多條件下。分析採用電腦程式 LEACHM 是一維有限差分水文平衡模擬模式，求解非飽和和水流 Richard's 偏微分方程式；該模式可分析地表蒸發與蒸散量。但因也是一維模式，因此地表假設為水平，不考慮側向排水；無法入滲的部分就視為地表逕流。LEACHM 曾被用在農業相關的計畫中與入滲計的監測資料比較，但尚未被應用在覆蓋系統的模擬。該研究的敏感度分析顯示覆蓋層厚度是控制下滲量的最主要因素。此外，植物根系深度和總降水量對覆蓋系統的效能影響較小。

在程式的比較方面，Wilson et al. (1999)利用 UNSAT-H、HELP、EPIC 以及 HYDRUS-2D 模擬 Hanford 場址覆蓋的入滲計(Lysimeter)資料，並提出程式之間的功能比較。其研究結果發現 UNSAT-H 預測值和實際下滲量差異僅 0.25 cm，HYDRUS-2D 差異值為 0.5 cm，HELP 高估下滲量 6.7 cm。Khire et al. (1997)根據研究結果建議當進行初步評估與規劃時採用 HELP 即可，而當進行細部設計時則採用較複雜的程式如 UNSAT-H 為之。

## 第三章 研究方法

本章節主要說明本研究之研究方法，主要內容可分為四大部分：(1) 研究流程，(2) 水文平衡模式HELP數值模擬，(3) 水文平衡模式HYDRUS-1D數值模擬，(4) 覆蓋系統模型設定。

### 3.1 研究流程

研究方法流程主要可以分成以下步驟：

#### 1. 考慮場址區域位置及氣象條件

首先選定以台灣北部(淡水)、中部(台中)、南部(台南)三個地區為場址位置，分別代表台灣北部、中部、南部的氣候條件。而中部及南部地區降雨往往集中在梅雨期及颱風時期數日，氣候類似半乾旱型氣候，適合使用蒸發散覆蓋層為覆蓋系統。

#### 2. 建立覆蓋系統模型

建立掩埋場覆蓋系統模型，以蒸發散覆蓋為覆蓋層條件，可分為單一土層覆蓋及毛細阻隔覆蓋兩種。增加覆蓋層厚度及使用低透水性的土壤皆能降低水流下滲量，故分別設定覆蓋層厚度為 1 m、1.5 m、2 m，及選用砂土質壤土、粉土質壤土、砂土質黏土三種不同透水度的土壤種類組合。

#### 3. 選擇土壤參數

選定了三種土壤進行模擬之前，必須控制三種土壤的基本參數。根據 Carsel and Parrish (1988)試驗結果提出的土壤參數，提供了 12 種類別土壤的殘餘含水量、飽和含水量、飽和水力傳導係數。

#### 4. 控制植生條件

以草本植物(grass)為植物參數條件，並設定植物生長期開始日、植物生長期結束日、植物根系入土深度。

#### 5. 輸入歷史氣象

根據中央氣象局所提供北部、中部、南部三地區之歷史氣象資料，輸入此三代表性地區的氣候為模擬條件。

## 6. 數值模擬

控制上述參數後，分別以 HELP 模式及 HYDRUS-1D 模式進行數值模擬。模擬輸出後比較 HELP 模式及 HYDRUS-1D 模式的降雨量對應到的下滲量及累積下滲量，對台灣地區掩埋場覆蓋層的可行性進行分析。

將以上所述之研究方法流程由下圖表示：

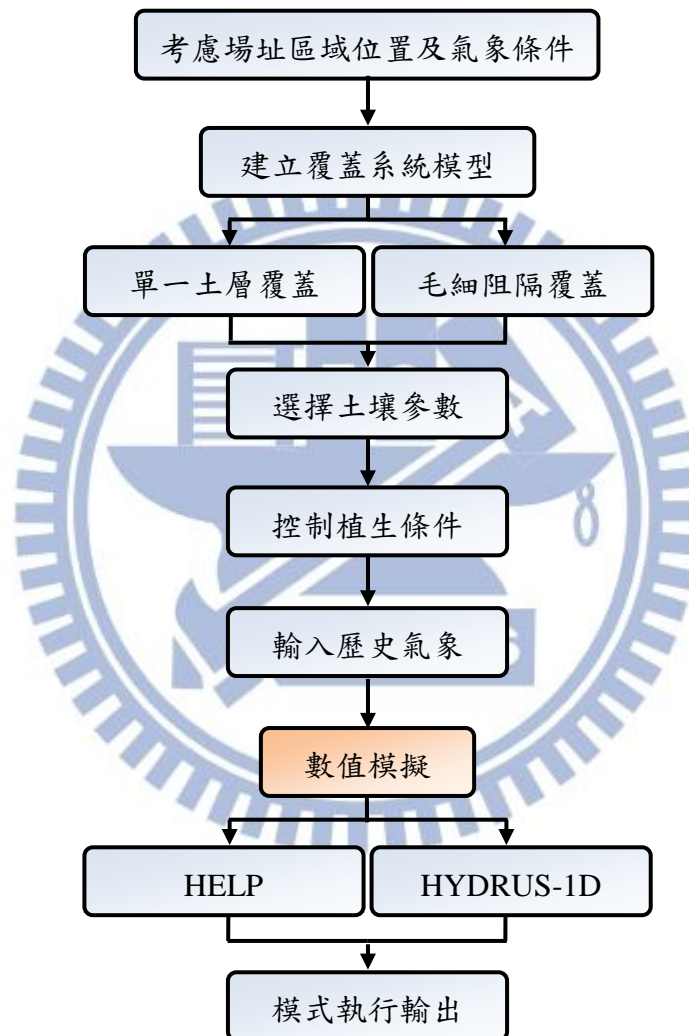


圖 3-1 研究方法流程圖

## 3.2 水文平衡模式 HELP 數值模擬

### 3.2.1 模式簡介

HELP 是美國工兵團專為掩埋場水文平衡分析開發的程式(Schroeder et al., 1994a and 1994b)，近二十年來早已成為美國環保署官方認可而每一個掩埋場設計都必須採用的程式。HELP 是一擬二維 (quasi-two-dimensional) 模式，HELP 模式可因現地不同條件輸入以下資料進行水文平衡模擬。

- (1) 氣象資料：降雨量、太陽輻射量、溫度、蒸發散參數；
- (2) 土壤性質：孔隙率、田間含水量、凋萎點、水力傳導係數；
- (3) 設計項目：襯墊、滲濾液和逕流收集系統、表面坡度。

### 3.2.2 模式操作與執行

本小節將對 HELP 模擬流程分成以下步驟：

#### 1. 建立覆蓋層模型

輸入覆蓋層厚度、並選擇土壤種類。

#### 2. 設定剖面參數

設定由模式自動計算逕流方法及初始水分、逕流面積及植生條件。

#### 3. 控制土壤參數。

設定含水量及飽和水力傳導係數。

#### 4. 輸入歷史氣象資料。

輸入歷史降雨量、太陽輻射量、溫度、蒸散區深度、最大葉面積指數、生長期時間、平均風速、四季溼度。

將以上所述 HELP 模擬流程由下圖表示：

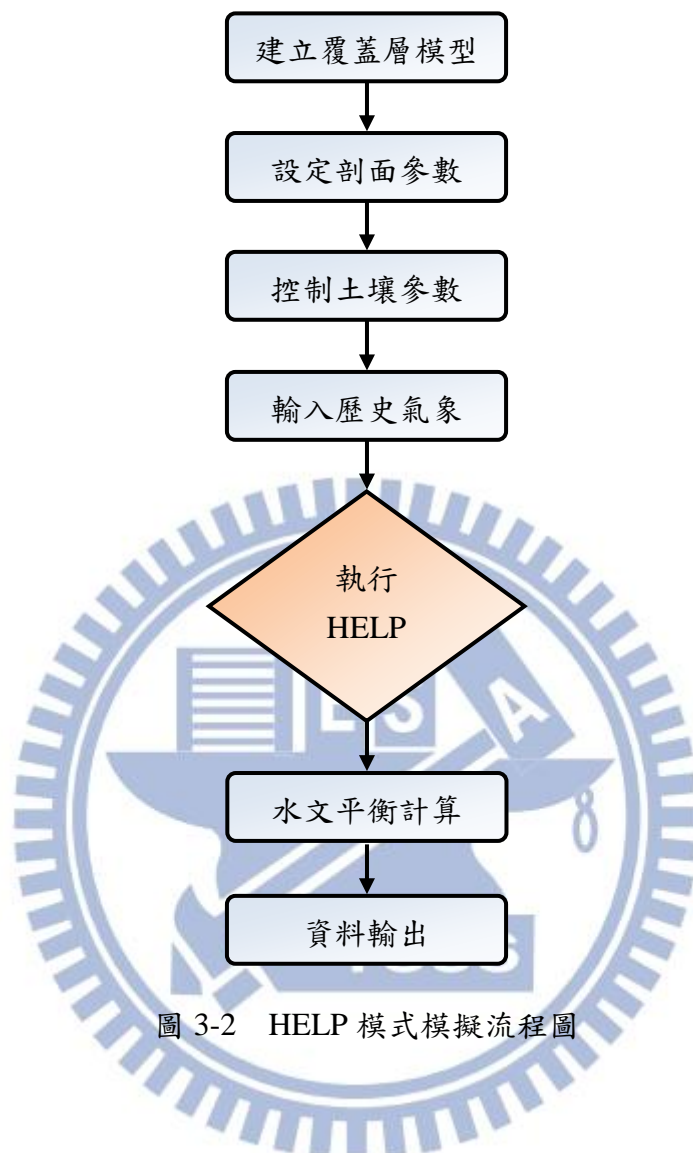


圖 3-2 HELP 模式模擬流程圖



### 3.3 水文平衡模式 HYDRUS-1D 數值模擬

#### 3.3.1 模式簡介

本研究使用水文平衡模式 HYDRUS-1D 版本 4.0 的套裝軟體進行數值模擬。HYDRUS-1D 是國際地下水模型中心公布的模式，可用來模擬非飽和土壤中的一維水流、熱量傳遞，在一階連續可變飽和土壤的衰變反應下涉及的溶質運動。此數值模式利用 Richards 方程式來描述可變飽和土壤中水的流動，熱能傳遞對平流-延散(advection-dispersion)的影響以及溶質的傳輸。主要可用來模擬的程序包含水的流動、溶質傳輸、熱流傳導、植物根系吸水行為、植物生長因子、二氧化碳傳輸。

#### 3.3.2 模式操作與執行

本小節將對 HYDRUS-1D 模擬流程分成以下步驟：

##### 1. 選擇模擬主要程序

本研究因模擬掩埋場覆蓋層下滲水通過底層有多少下滲量，故在模擬項目選擇水的流動、植物根系吸水、植物生長因子。

##### 2. 建立覆蓋層模型

依模擬的覆蓋層種類設定土壤類型數、土壤分層數、土壤厚度，並設定長度單位。

##### 3. 設定模擬時間

輸入初始模擬時間及最終時間、時間步驟訊息，且選取由模式自動計算每日植物蒸散量的變化及每日的氣象變化，並設定時間單位。

##### 4. 選擇土壤參數

依土壤分層選擇土壤種類。

##### 5. 設定水流邊界條件

選擇土壤上層及下層的邊界條件，並選擇要控制的初始條件。

##### 6. 選擇植物參數及植生條件



選用 Feddes 參數草本植物(grass)且輸入根系深度及生長期時間。

### 7. 輸入歷史氣象資料

輸入歷史氣象資料。

### 8. 編輯土壤剖面

可設定網格密度、土層類型分層、土壤初始含水量。

將以上所述 HYDRUS-1D 模擬流程由下圖表示：

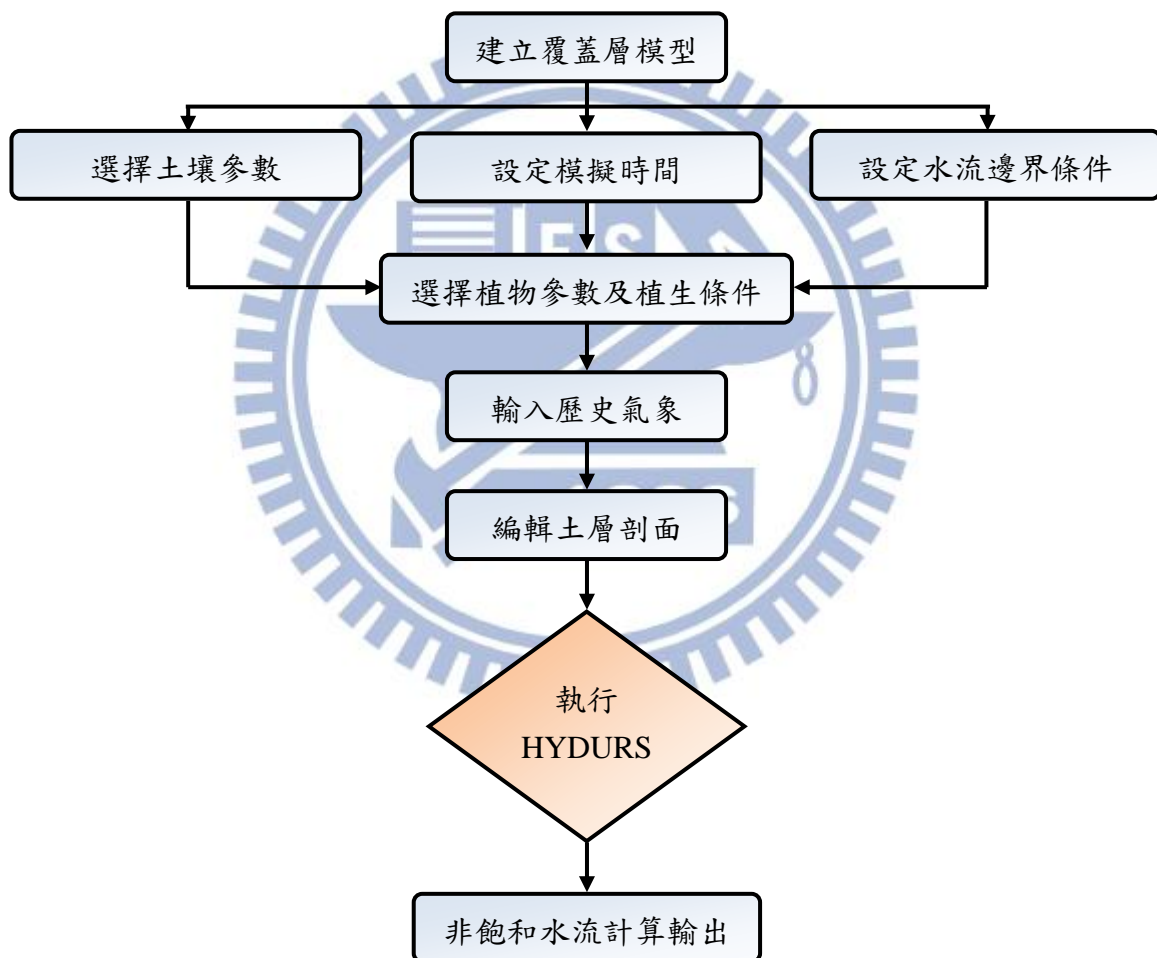


圖 3-3 HYDRUS-1D 模式模擬流程圖

### 3.4 覆蓋系統模型與參數設定

HELP 模式及 HYDRUS-1D 在土壤參數的選定均以 Carsel and Parrish (1988) 提出的參數為依據。土壤參數來源依 Van Genuchten (1980) 提出土壤與水特徵曲線：

$$\theta_s - \theta_r = (\theta - \theta_r) \left[ 1 + (\alpha |\Psi|)^n \right]^m \quad [表 3-1]$$

而 Carsel and Parrish (1988) 將試驗數據套入 Van Genuchten 理論公式後回歸出以下土壤參數，其中  $\Psi$  為土壤水分吸力、 $\theta_r$  為殘餘含水量、 $\theta_s$  為飽和含水量、 $\alpha$  與  $m$  及  $n$  均為特徵曲線參數、 $K_s$  為飽和水力傳導係數。

Texture	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$ 1/cm	$n$	$K_s$ cm/d
Sand	0.045	0.43	0.145	2.68	712.8
Loamy Sand	0.057	0.41	0.124	2.28	350.2
Sandy Loam	0.065	0.41	0.075	1.89	106.1
Loam	0.078	0.43	0.036	1.56	24.96
Silt	0.034	0.46	0.016	1.37	6.00
Silt Loam	0.067	0.45	0.020	1.41	10.80
Sandy Clay Loam	0.100	0.39	0.059	1.48	31.44
Clay Loam	0.095	0.41	0.019	1.31	6.24
Silty Clay Loam	0.089	0.43	0.010	1.23	1.68
Sandy Clay	0.100	0.38	0.027	1.23	2.88
Silty Clay	0.070	0.36	0.005	1.09	0.48
Clay	0.068	0.38	0.008	1.09	4.80

圖 3-4 12 種類型土壤參數(Carsel and Parrish,1988)

兩模式在植物參數設定均為草本植物(grass)，在 HELP 模式選定最大葉面積指數為 5 即植生狀況良好；HYDRUS-1D 模式以 Feddes 參數選定為草本植物。而植生條件在 HELP 模式及 HYDRUS-1D 模式均設定植生開始日為第 70 天，植生結束日為第 320 天。至於植物根系條件方面，在 HYDRUS-1D 模式可設定入土深度，將初始入土深度設為 0.01 cm，最大入土深度為 60 cm。植物參數及植生條件均設定完成之後，即可由模式自動計算蒸散量。

氣象資料根據中央氣象局所提供，兩模式都以歷史氣象資料輸入降雨量、太陽輻射量、溫度、平均風速、溼度。HELP 模式可輸入蒸散區深度，而 HYDRUS-1D 模式能輸入每天日照時間成為模擬條件。

## 第四章 數值模擬結果

本章節將 HELP 模式及 HYDRUS-1D 模式的模擬結果加以整理及分析，主要內容分成以下兩個部份：(1) 單一土層蒸發散覆蓋的模擬結果 (2) 毛細阻隔層蒸發散覆蓋的模擬結果。以兩種覆蓋層類型在不同導水度的土壤下，對水流下滲量的影響，並分別增加土層厚度後，比較在北部、中部、南部的氣候條件下累積通過底層的下滲量。

### 4.1 降雨事件對下滲量的影響

選擇 2007 年總雨量非特多或特少為代表性的氣候，北部年降雨量為 2672.6 mm、中部年降雨量為 2432.9 mm、南部年降雨量為 2207.3 mm，模擬結果顯示在使用南部氣象條件下之累積下滲量最多、北部次之、中部最少。由於南部降雨量集中在數日且降雨強度較高，使雨水在短時間內無法藉由植物蒸散作用有效將雨水排出，導致南部氣象條件之累積下滲量比北部累積下滲量還要多的現象。

進一步分析在單一土層覆蓋(圖 4-1-a)及毛細阻隔層覆蓋(圖 4-1-b)的條件下，全年當中單場主要的降雨事件對單日下滲量的影響。將分別針對第一次顯著降雨事件，以及後續的第二次顯著降雨事件進行分析及比較。

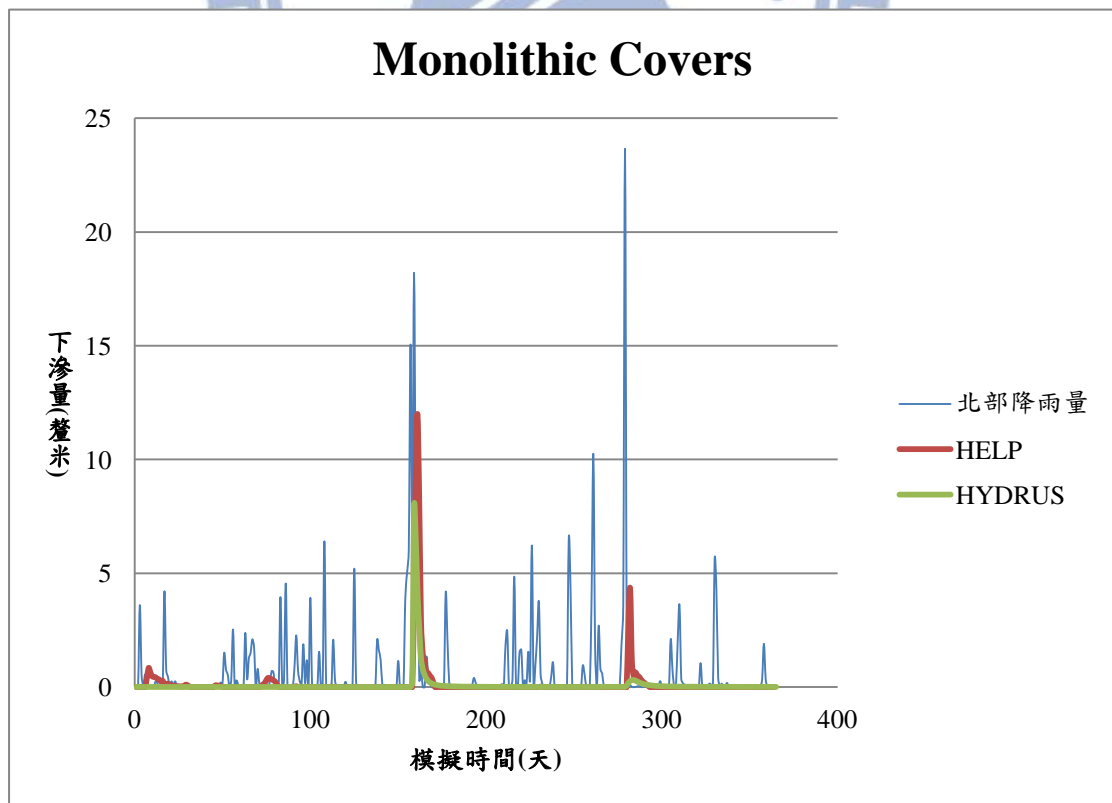


圖 4-1-a 單一土層粉土質壤土厚度 1 m 的單日下滲量

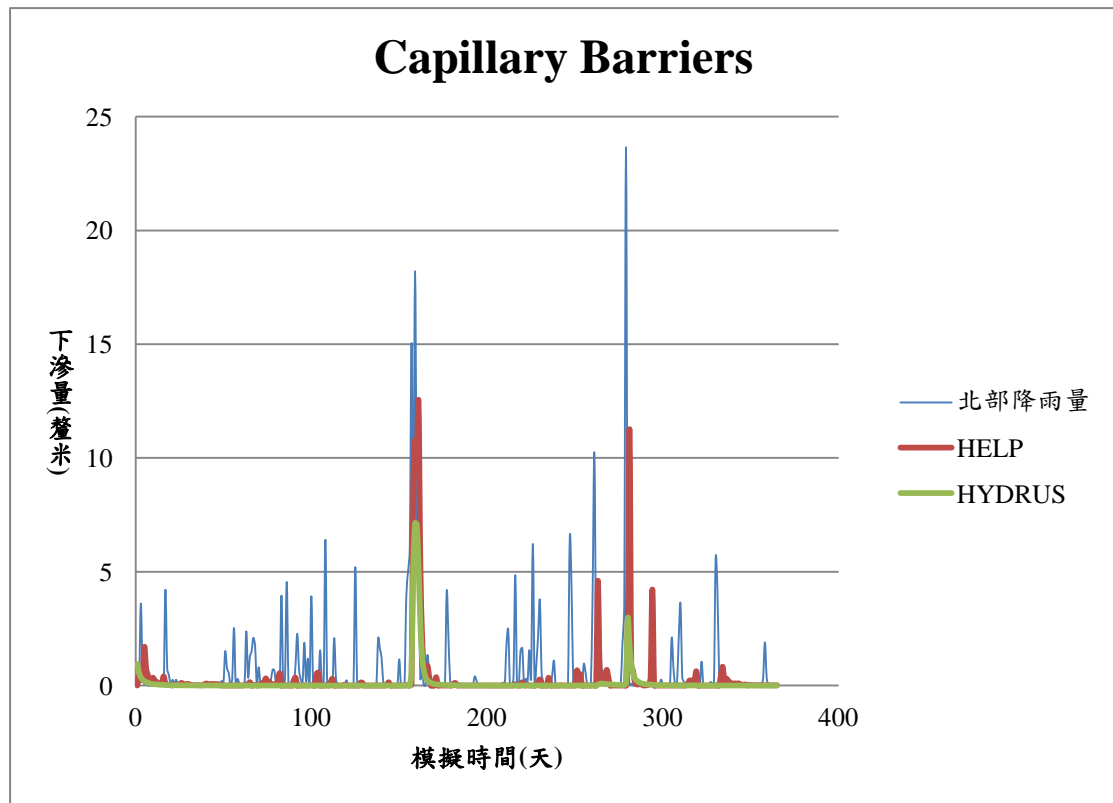


圖 4-1-b 毛細阻隔層(粉土質壤土+砂土)厚度 1 m 的單日下滲量

由於兩模式在下滲量的大小及出現的時間上不盡相同，HELP 模式的下滲量較 HYDRUS 模式的下滲量多。當使用砂土質壤土時，HELP 模式在厚度 1 m 下當天就反映出下滲量，增加厚度至 1.5 m 及 2 m 也在當天就有明顯的下滲量；而 HYDRUS 模式在厚度 1 m 下當天也能反映出下滲量，增加厚度至 2 m 在第二天才反映出明顯的下滲量。使用低導水度的粉土質壤土時，HELP 模式在厚度 1 m 及 1.5 m 下當天就能反映出下滲量，增加厚度至 2 m 在第二天才反映出下滲量；而 HYDRUS 模式在厚度 1 m 下當天就反映出下滲量，增加厚度至 1.5 m 在第二天才反映出明顯的下滲量，增加厚度至 2 m 在第三天才反映出下滲量。由於 HELP 模式僅考慮水文平衡沒有考慮土壤保水特性與非飽和土壤導水度的影響，往往會高估下滲量；而 HYDRUS 模式雖是描述土壤的一維的水流下滲行為，但模式分析考慮土壤保水特性與非飽和土壤導水度的影響，比較符合真實的現象。而本研究不考慮逕流、坡度及側向排水的影響，因此下滲量的幅度較高。

## 4.2 單一土層覆蓋模擬結果

本小節內容為兩模式採用單一土層蒸發散覆蓋類型的數值模擬結果。將單一土層蒸發散覆蓋的地表植生設定為狀況良好(Maximum LAI = 5)的草本植物(grass)，輸入歷史氣象條件(2007 年)，以不同導水度的土壤種類有砂土質壤土、粉土質壤土、粉土，土層厚度為 1 m、1.5 m、2 m 等的參數組合整理如下(表 4-1)：



表 4-1 單一土層蒸發散覆蓋參數組合

覆蓋類型	土壤種類	土層厚度	案例代號	氣象條件
單一土層 (Monolithic)	砂土質壤土 (Sandy Loam)	1m	M-SaL-1m	輸入北部、中 部、南部地區 歷史氣象
		1.5m	M-SaL-1.5m	
		2m	M-SaL-2m	
	粉土質壤土 (Silty loam)	1m	M-SiL-1m	
		1.5m	M-SiL-1.5m	
		2m	M-SiL-2m	
	粉土 (Silt)	1m	M-Si-1m	
		1.5m	M-Si-1.5m	
		2m	M-Si-2m	

#### 4.2.1 顯著降雨事件對單日下滲量的影響

此部分將探討單一土層覆蓋類型在覆蓋層厚度變化下，以不同導水度的土壤砂土質壤土、粉土質壤土、粉土作為覆蓋層材料，分別在北部、中部、南部的氣候條件下，水流通過底層的單日下滲量。將單日下滲量百分比定義為一場的顯著降雨事件下有多少的單日下滲量。

由測站的氣象資料顯示，在全年當中單場主要的降雨事件下，北部第一次顯著單日降雨量為 182 mm、第二次顯著單日降雨量為 236.5 mm；中部第一次顯著單日降雨量為 252.2 mm、第二次顯著單日降雨量為 169.2 mm；南部第一次顯著單日降雨量為 199 mm、第二次顯著單日降雨量為 102.5 mm。

綜合(表 4-2)模擬結果發現，在北部及中部的氣候條件下，HYDRUS 的結果顯示出土壤導水度對下滲量的敏感度高，使用低導水度的土壤均能明顯減少下滲量，進一步發現由於 HYDRUS 考慮非飽和土壤與導水度的影響(圖 4-2-a 至圖 4-2-e)，減少下滲量的幅度大。在同一種導水度的土壤下，第一次顯著降雨事件前，土壤非飽和且較為乾燥，含水量較低，所對應的  $K_r$  成為導水度的控制因子。且在同一種導水度土壤下，HYDRUS 對厚度的敏感度較 HELP 來得高，增加土層厚度可以有效減少下滲量(圖 4-3-a 至圖 4-3-m)。HYDRUS 顯示南部的氣候條件下第二次顯著降雨事件的結果，將砂土質壤土改用導水度較低的粉土質壤土時，有下滲量不減反增的現象。由測站歷史氣象資料顯示，在第二次顯著降雨事件前連續四天下下了 247.2 mm 的雨量，比北部前連續四天的 54.9 mm，中部前連續四天的 113 mm，多了兩倍以上的降雨量，所以導致低導水度的粉土質壤土孔隙水比例甚高，體積含水比也較高且達到飽和，使得當日的下滲量內有先前所累積的孔隙水。而粉土質壤土  $K_r$  在土壤飽和下等於 1，使得粉土質壤土的導水度較非飽和的砂土質壤土  $K_r$  所控制的導水度高，導致粉土質壤土有較高的下滲量。

表 4-2 單一土層類型的單日下滲量百分比

北部氣候 土層類型	$K_s$ (cm/sec)	第一次顯著降雨		第二次顯著降雨	
		182(mm)		236.5(mm)	
		HELP	HYDRUS	HELP	HYDRUS
M-SaL-1m	$1.23 \times 10^{-3}$	26.50%	66.64%	19.43%	46.77%
M-SaL-1.5m		25.93%	53.41%	19.43%	40.21%
M-SaL-2m		25.93%	11.73%	19.43%	25.50%
M-SiL-1m	$1.25 \times 10^{-4}$	65.85%	43.46%	18.32%	1.29%
M-SiL-1.5m		64.46%	24.46%	8.53%	0.30%
M-SiL-2m		59.23%	10.38%	4.36%	0.19%
M-Si-1m	$6.94 \times 10^{-5}$	52.29%	26.31%	9.56%	0.20%
M-Si-1.5m		42.02%	6.57%	6.95%	0.11%
M-Si-2m		30.33%	1.04%	5.47%	0.08%
中部氣候 土層類型	$K_s$ (cm/sec)	第一次顯著降雨		第二次顯著降雨	
		252.2(mm)		169.2(mm)	
		HELP	HYDRUS	HELP	HYDRUS
M-SaL-1m	$1.23 \times 10^{-3}$	12.11%	60.39%	28.26%	52.82%
M-SaL-1.5m		11.31%	57.26%	11.18%	34.53%
M-SaL-2m		11.31%	25.17%	8.27%	29.69%
M-SiL-1m	$1.25 \times 10^{-4}$	56.08%	16.25%	17.37%	5.35%
M-SiL-1.5m		47.63%	3.80%	8.25%	1.45%
M-SiL-2m		31.96%	0.71%	5.36%	0.91%
M-Si-1m	$6.94 \times 10^{-5}$	37.83%	7.95%	7.02%	0.85%
M-Si-1.5m		34.83%	0.51%	4.81%	0.47%
M-Si-2m		25.12%	0.43%	3.92%	0.41%
南部氣候 土層類型	$K_s$ (cm/sec)	第一次顯著降雨		第二次顯著降雨	
		199(mm)		102.5(mm)	
		HELP	HYDRUS	HELP	HYDRUS
M-SaL-1m	$1.23 \times 10^{-3}$	53.56%	70.37%	42.66%	52.89%
M-SaL-1.5m		20.47%	65.63%	39.95%	49.83%
M-SaL-2m		20.47%	42.66%	39.56%	46.30%
M-SiL-1m	$1.25 \times 10^{-4}$	67.11%	53.52%	54.42%	89.93%
M-SiL-1.5m		64.87%	35.23%	43.53%	81.41%
M-SiL-2m		58.84%	26.50%	42.88%	69.67%
M-Si-1m	$6.94 \times 10^{-5}$	52.91%	29.17%	65.12%	58.33%
M-Si-1.5m		51.43%	21.76%	37.73%	58.18%
M-Si-2m		41.59%	17.91%	18.74%	57.38%

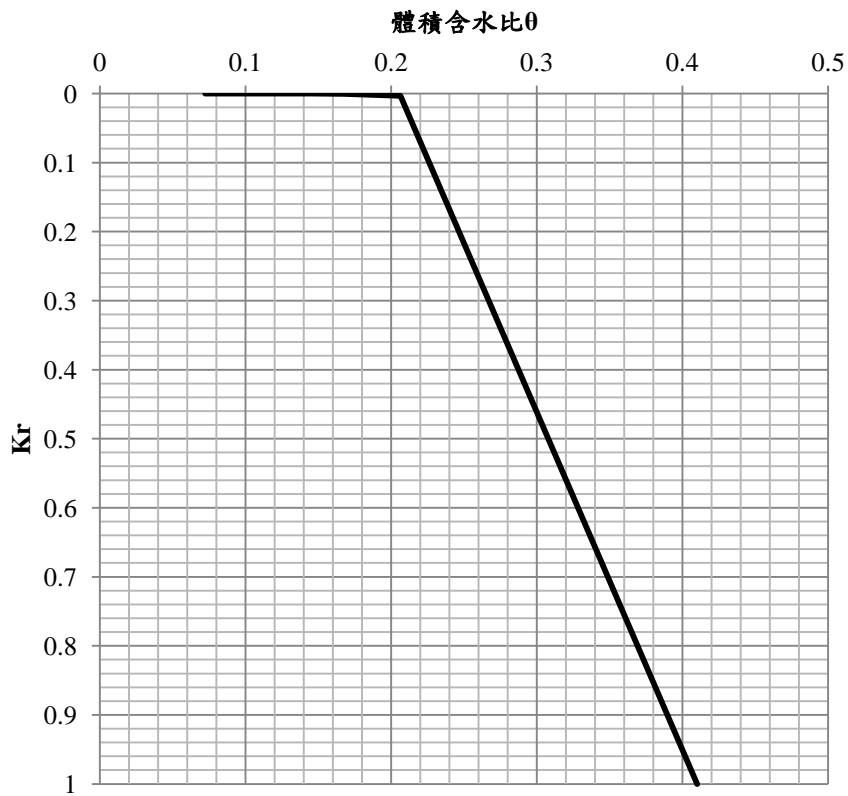


圖 4-2-a 砂土質壤土  $K_r$  與體積含水比的關係(Carsel and Parrish, 1988)

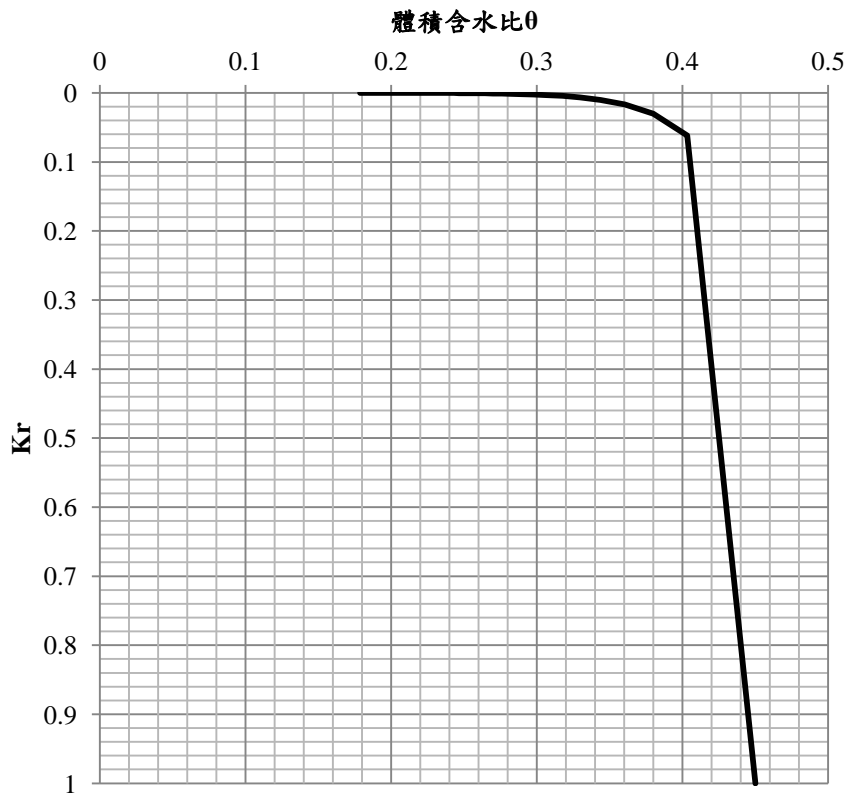


圖 4-2-b 粉土質壤土  $K_r$  與體積含水比的關係(Carsel and Parrish, 1988)

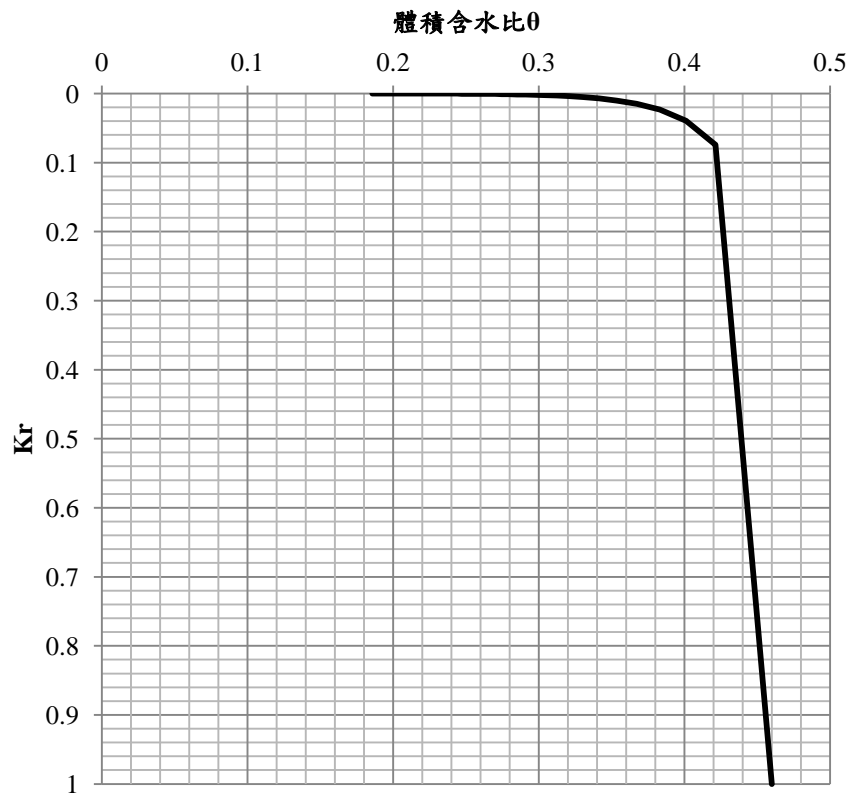


圖 4-2-c 粉土 Kr 與體積含水比的關係(Carsel and Parrish, 1988)

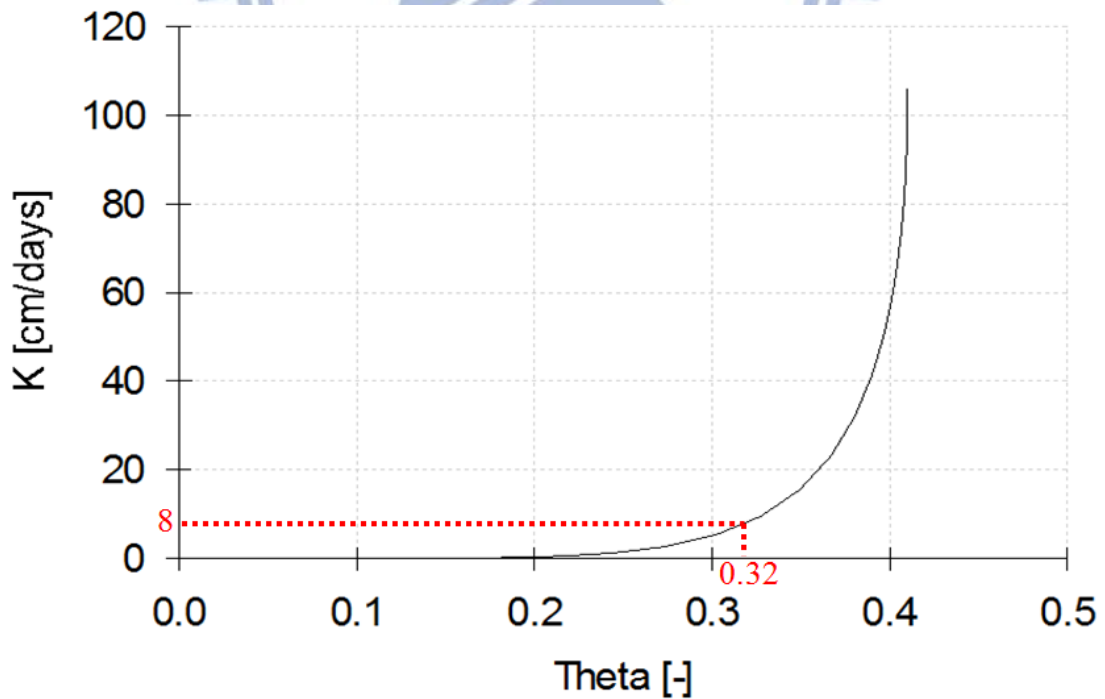


圖 4-2-d 砂土質壤土導水度 K 與體積含水比的關係



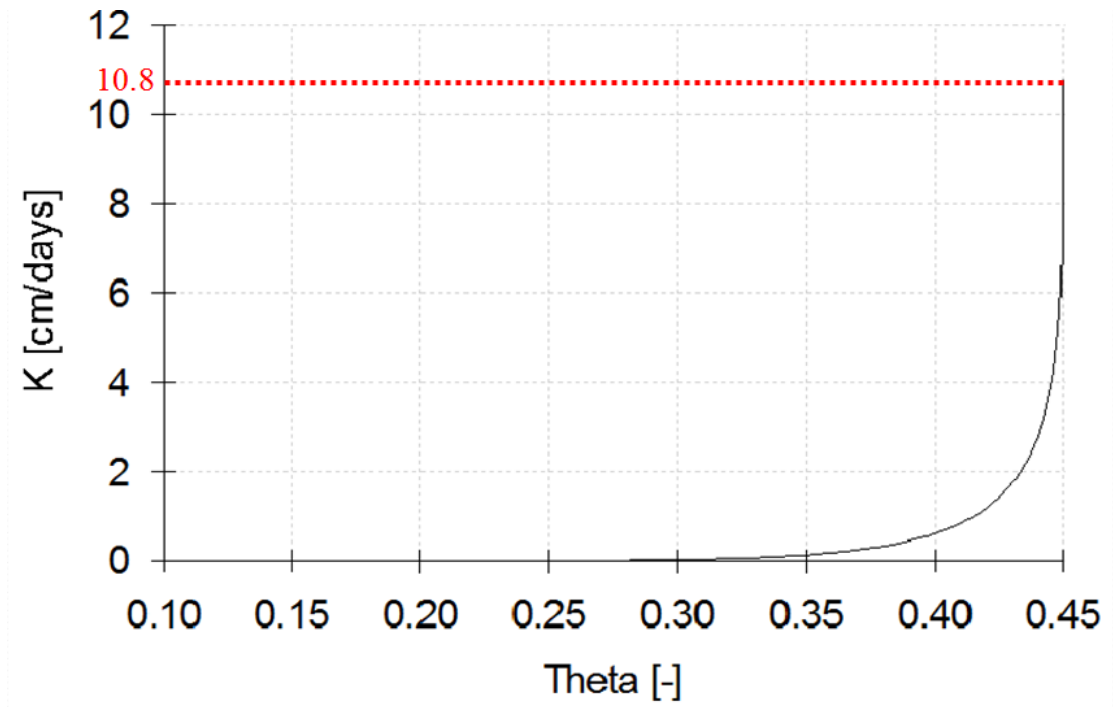


圖 4-2-e 粉土質壤土導水度 K 與體積含水比的關係

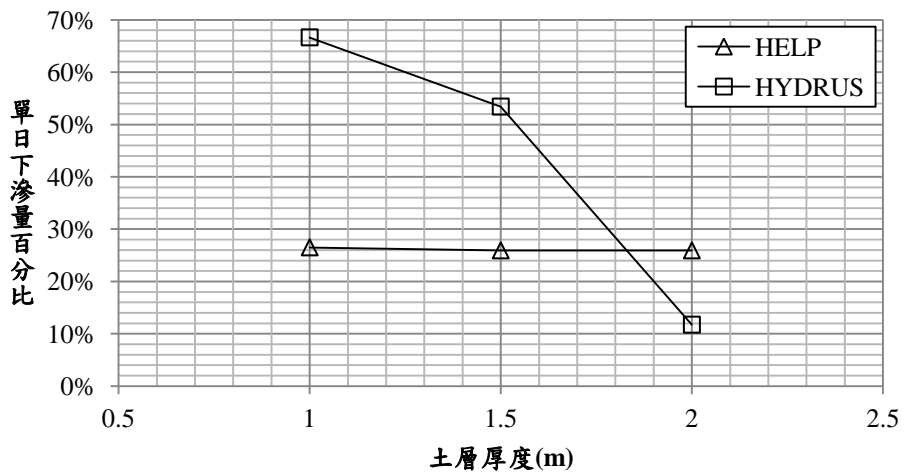


圖 4-3-a 不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部)

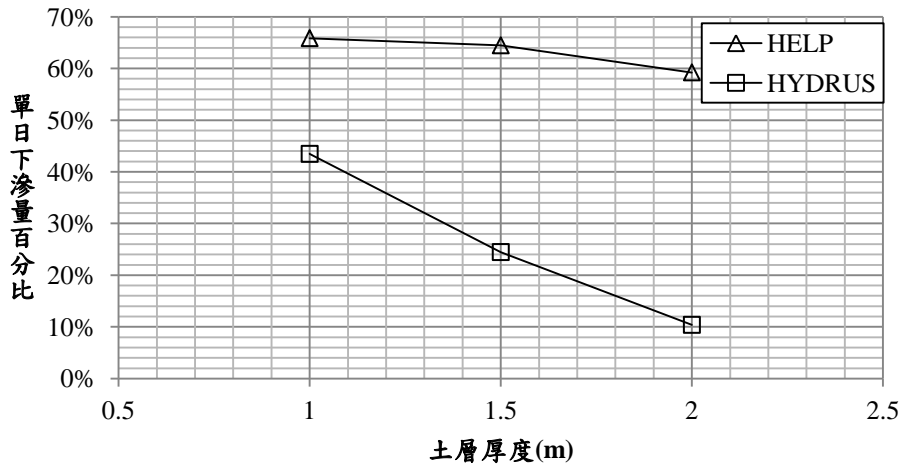


圖 4-3-b 不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部)

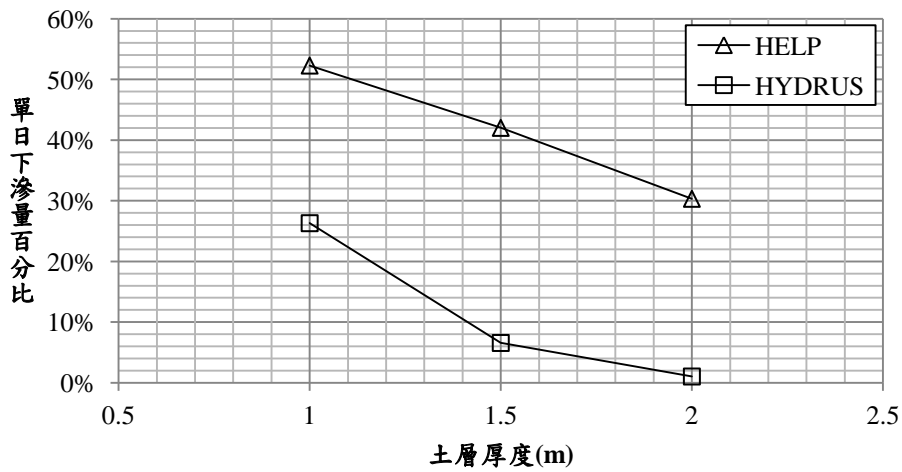


圖 4-3-c 不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部)

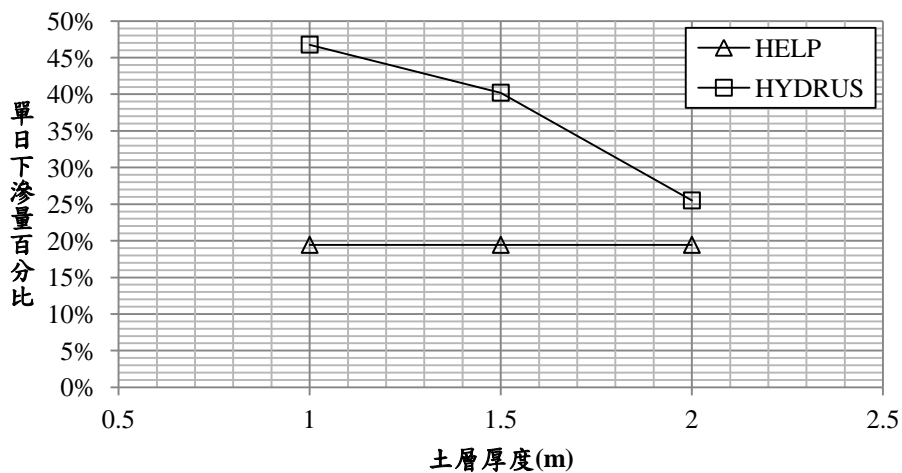


圖 4-3-d 不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)

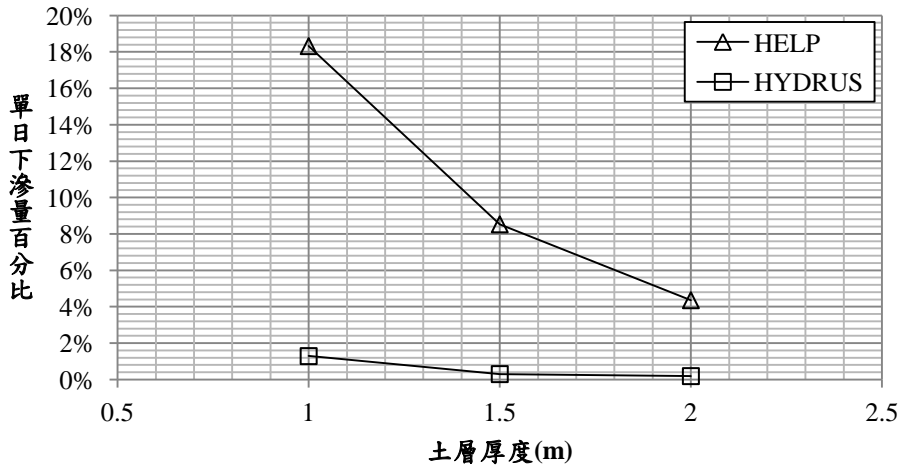


圖 4-3-e 不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)

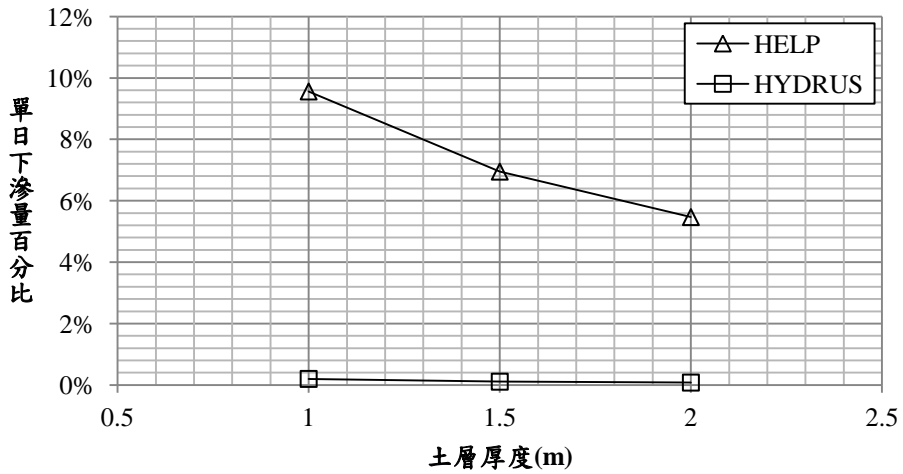


圖 4-3-f 不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)

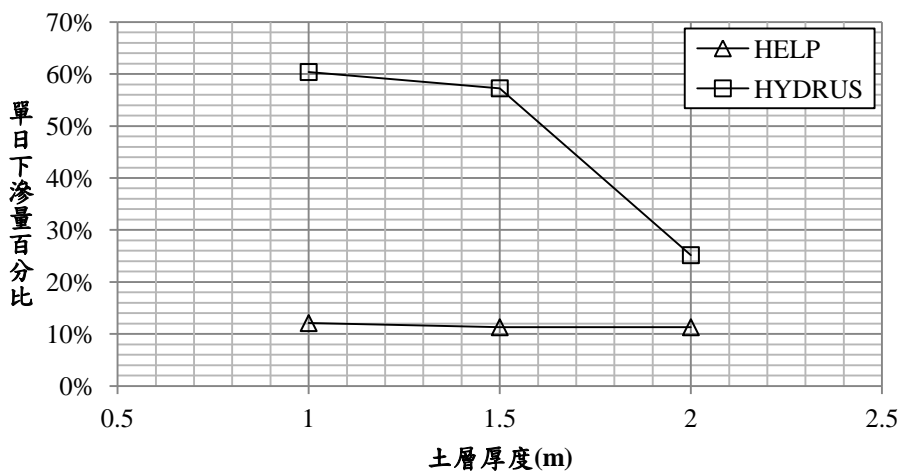


圖 4-3-g 不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)

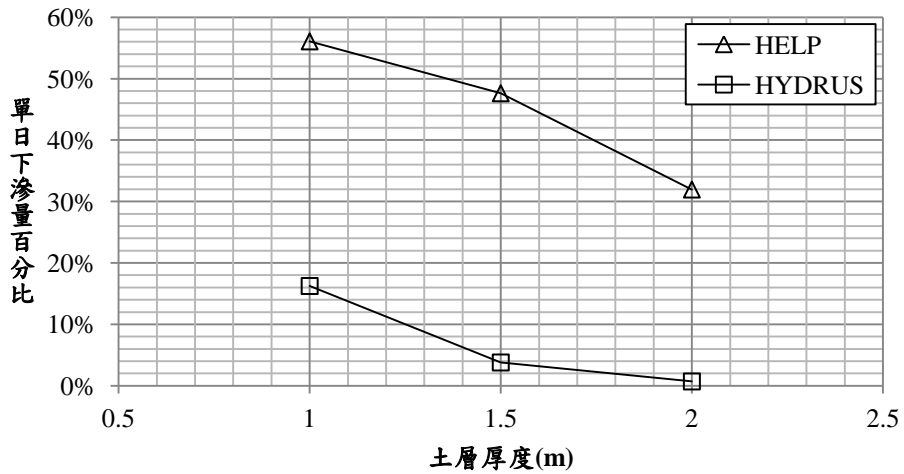


圖 4-3-h 不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)

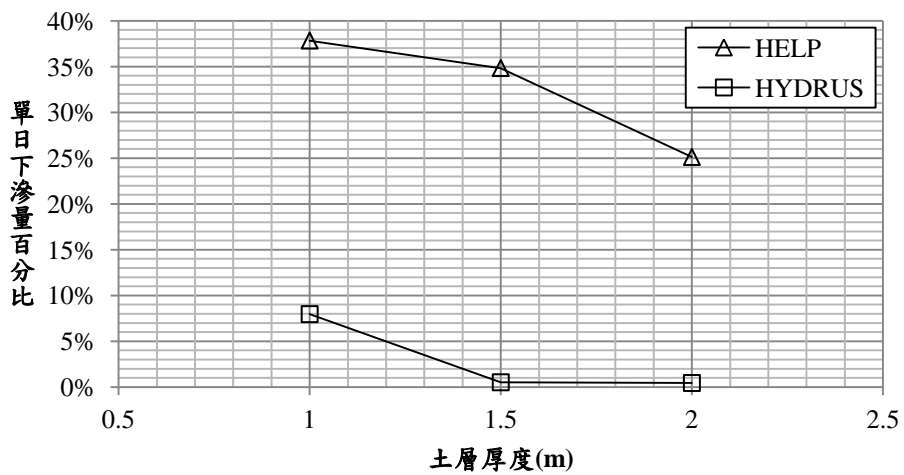


圖 4-3-i 不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)

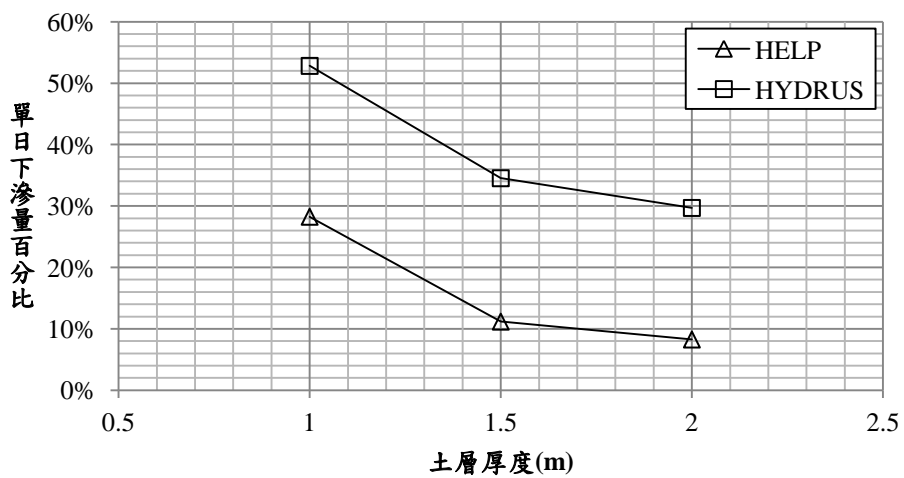


圖 4-3-j 不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)



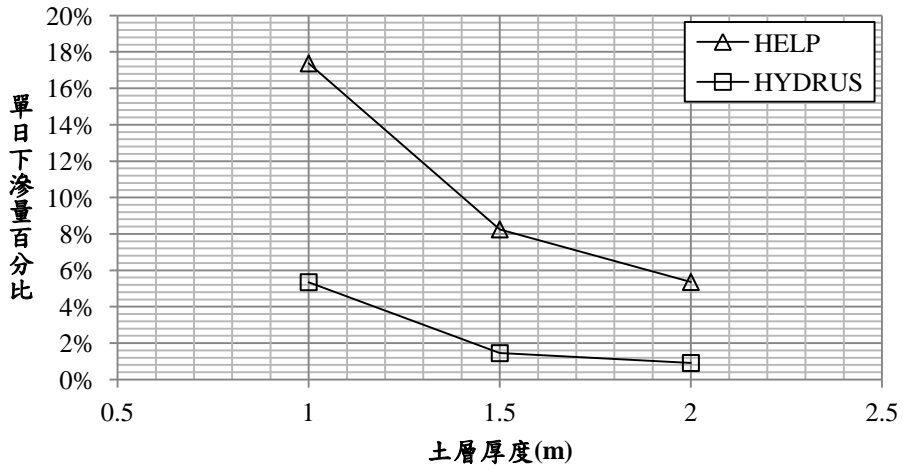


圖 4-3-k 不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)

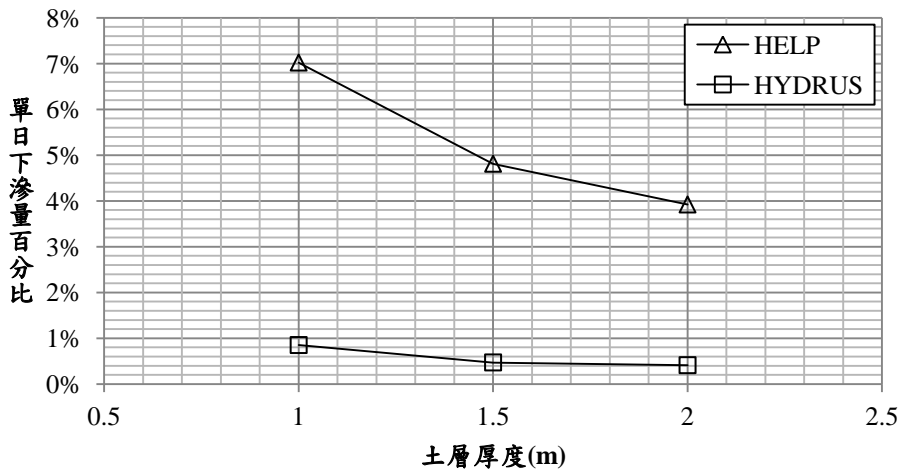


圖 4-3-l 不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)

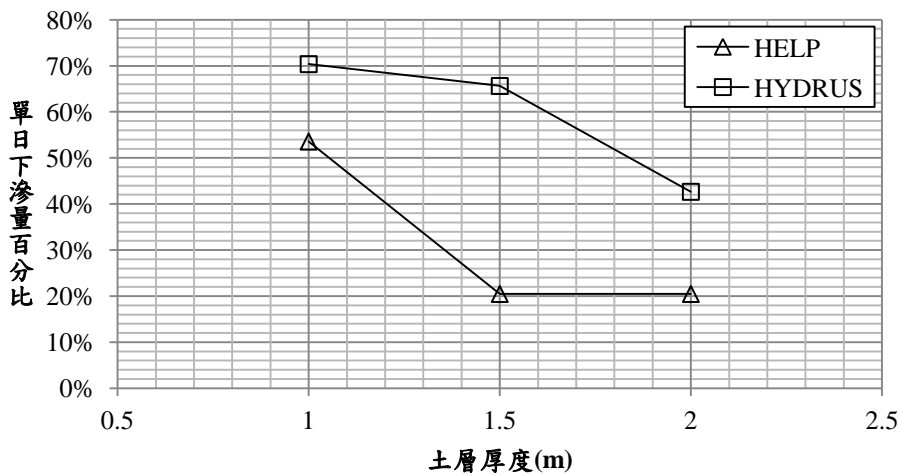


圖 4-3-m 不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)

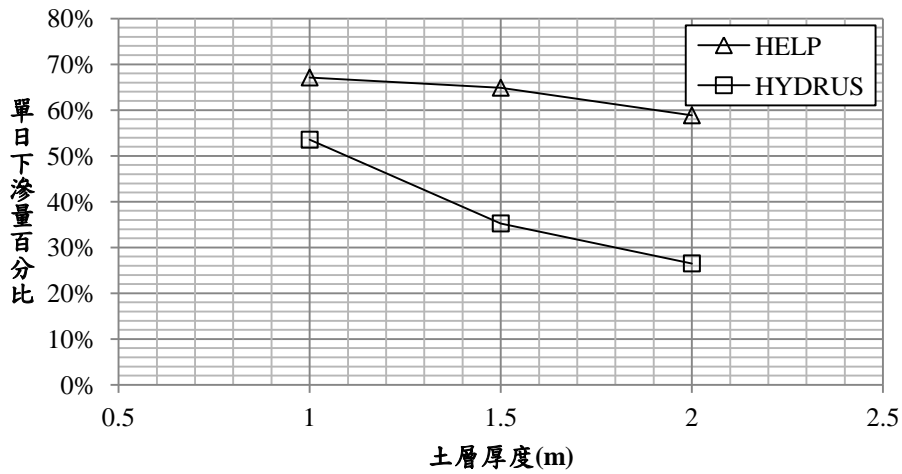


圖 4-3-n 不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)

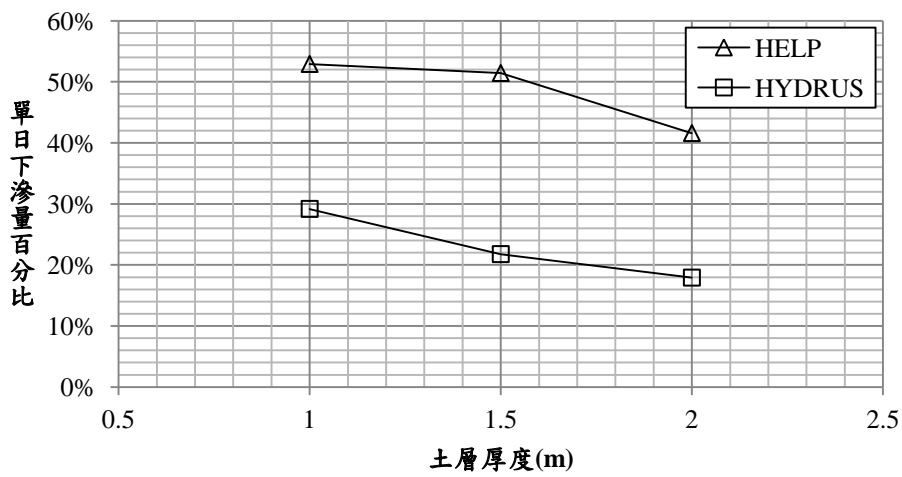


圖 4-3-o 不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)

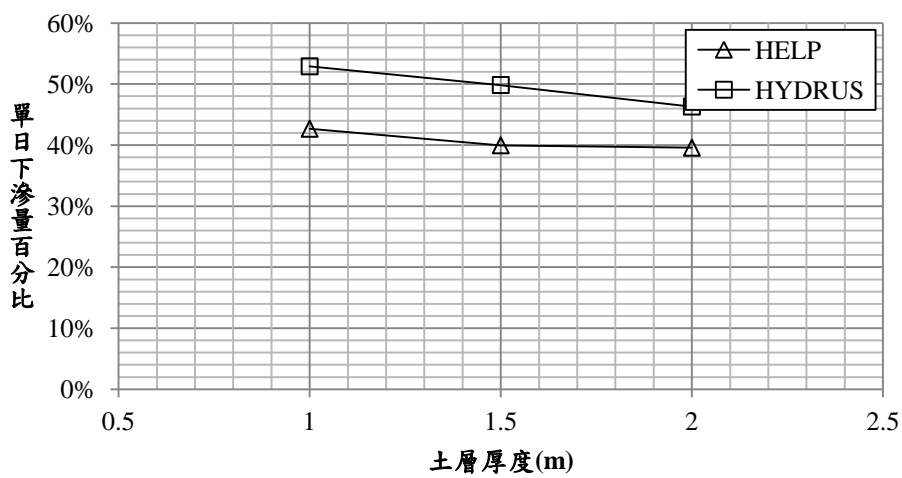


圖 4-3-p 不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)

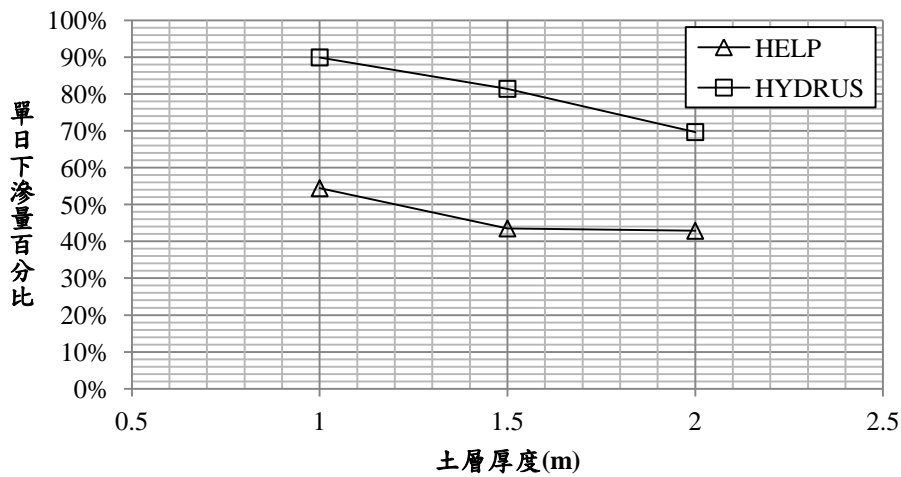


圖 4-3-q 不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)

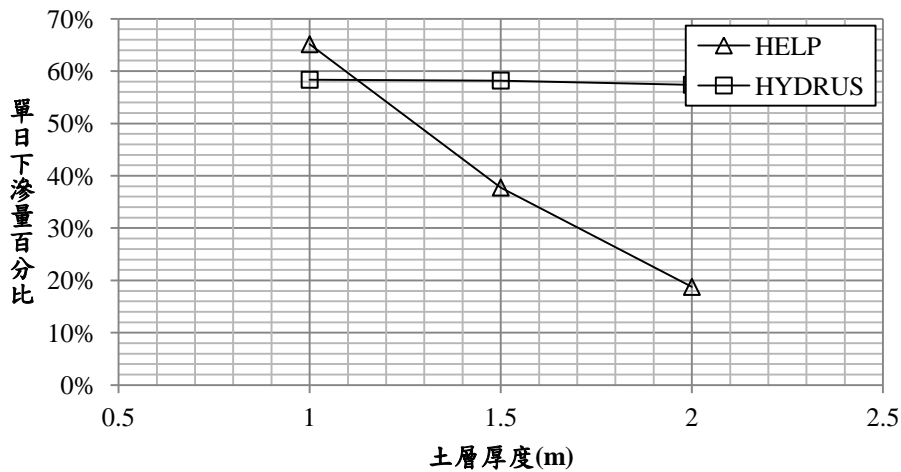


圖 4-3-r 不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)

## 4.2.2 全年降雨量對累積下滲量的影響

### 4.2.2.1 土壤導水度在土層厚度 1 m 對累積下滲量的影響

此部分將探討單一土層覆蓋類型在覆蓋層厚度 1 m 之下，以不同導水度的土壤砂土質壤土、粉土質壤土、粉土作為覆蓋層材料，分別在北部、中部、南部的氣候條件下，水流通過底層的全年累積下滲量。

綜合九項案例(表 4-3)模擬結果發現，單一土層的覆蓋材料使用粉土質壤土限制下滲量的效果遠比砂土質壤土限制下滲量的效果佳。在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式減少了 38 %、34.31 %、23.34 % 的累積下滲量，

HYDRUS 模式減少了 28.47 %、31.97 %、21.35 % 的累積下滲量，可發現兩模式均顯示出將單一土層的覆蓋材料由砂土質壤土改為粉土質壤土時，減少累積下滲量的幅度相當可觀。若將覆蓋材料改為粉土時，在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式的累積下滲量分別為 19.96 %、17.86 %、31.61 %，HYDRUS 模式的累積下滲量分別為 6.78 %、7.50 %、19.39 %，由此發現在北部及中部的氣候條件下已能將累積下滲量百分比控制在 10 % 以下，而南部的氣候條件因降雨集中在數日且降雨強度大，雖然年降雨量都比北部及中部氣候來的小，但仍有累積下滲量較高的現象。

結合案例(表 4-3)的模擬結果可知，在北部(圖 4-4-a)、中部(圖 4-4-b)、南部(圖 4-4-c)的氣候條件下，使用導水度愈低的土壤做為單一土層的覆蓋材料，能夠明顯減少累積通過底層的下滲量，但降雨強度的大小也直接影響了累積下滲量的多寡。

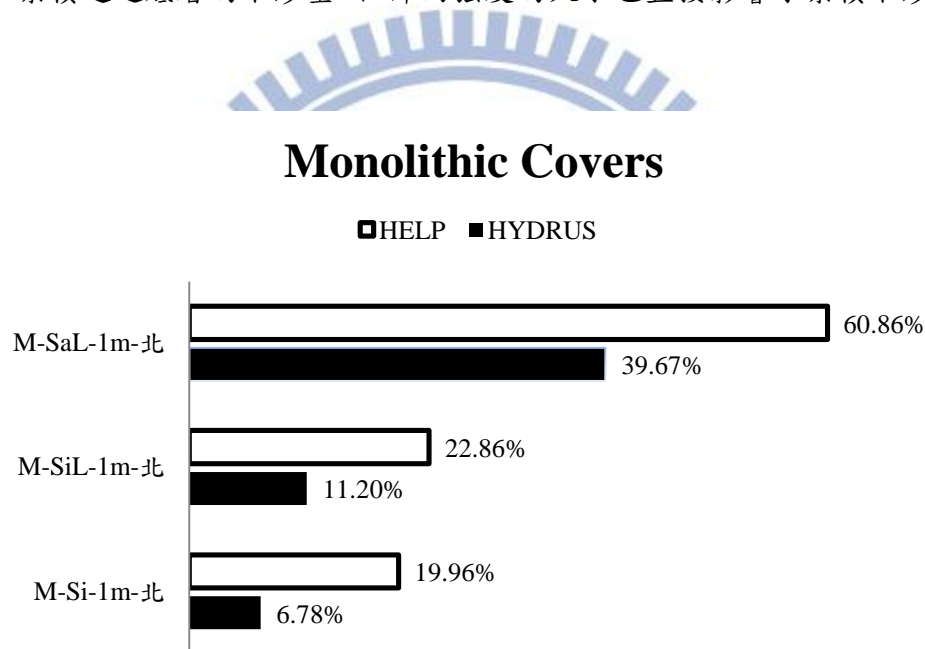


圖 4-4-a 不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(北部)



## Monolithic Covers

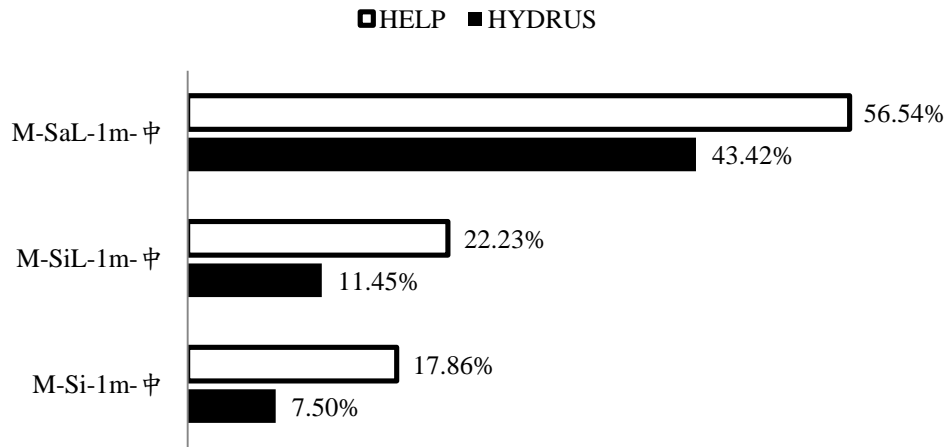


圖 4-4-b 不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(中部)

## Monolithic Covers

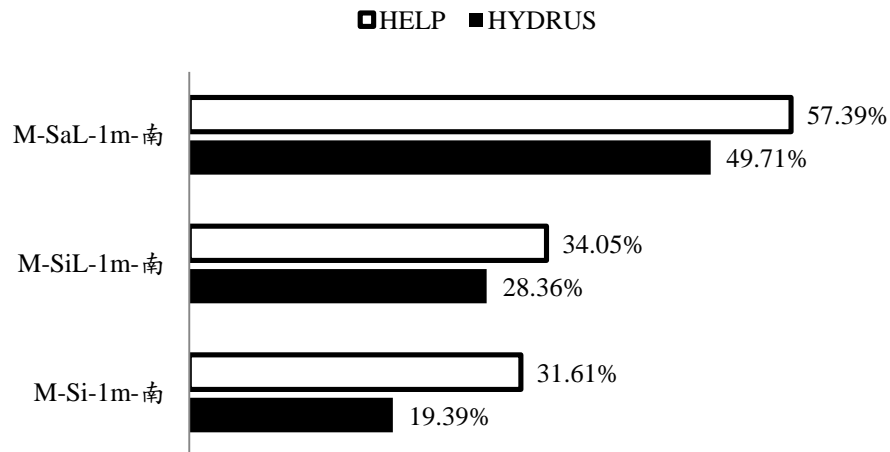


圖 4-4-c 不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(南部)

表 4-3 單一土層類型在不同導水度土壤下厚度 1 m 的全年累積下滲量

案例名稱	Ks (cm/sec)	HELP (mm)	年下滲量 (%)	HYDRUS (mm)	年下滲量 (%)
M-SaL-1m-北	$1.23 \times 10^{-3}$	1626.6	60.86 %	1060.1	39.67 %
M-SiL-1m-北	$1.25 \times 10^{-4}$	610.9	22.86 %	299.4	11.20 %
M-Si-1m-北	$6.94 \times 10^{-5}$	533.4	19.96 %	181.2	6.78 %
M-SaL-1m-中	$1.23 \times 10^{-3}$	1375.5	56.54 %	1056.4	43.42 %
M-SiL-1m-中	$1.25 \times 10^{-4}$	540.9	22.23 %	278.6	11.45 %

M-Si-1m-中	$6.94 \times 10^{-5}$	434.6	17.86 %	182.5	7.50 %
M-SaL-1m-南	$1.23 \times 10^{-3}$	1266.7	57.39 %	1097.2	49.71 %
M-SiL-1m-南	$1.25 \times 10^{-4}$	751.5	34.05 %	626.1	28.36 %
M-Si-1m-南	$6.94 \times 10^{-5}$	697.8	31.61 %	428	19.39 %

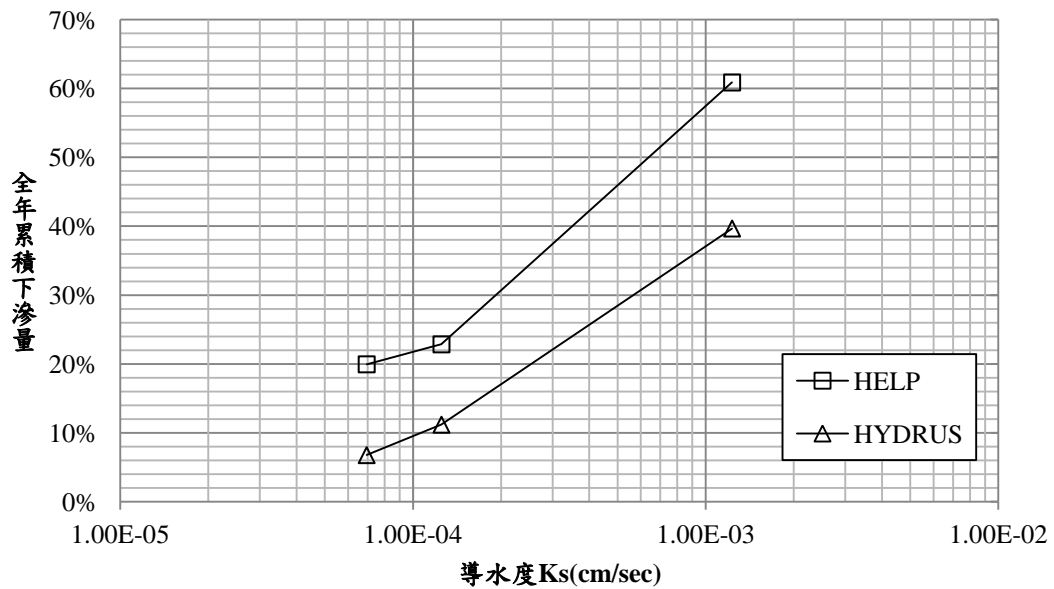


圖 4-5-a 不同導水度土壤在 1 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

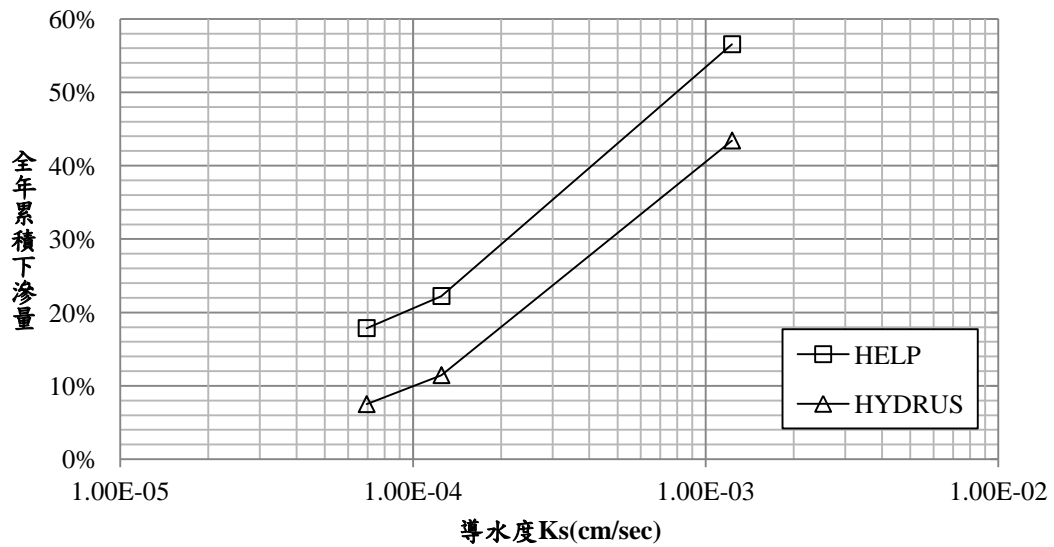


圖 4-5-b 不同導水度土壤在 1 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

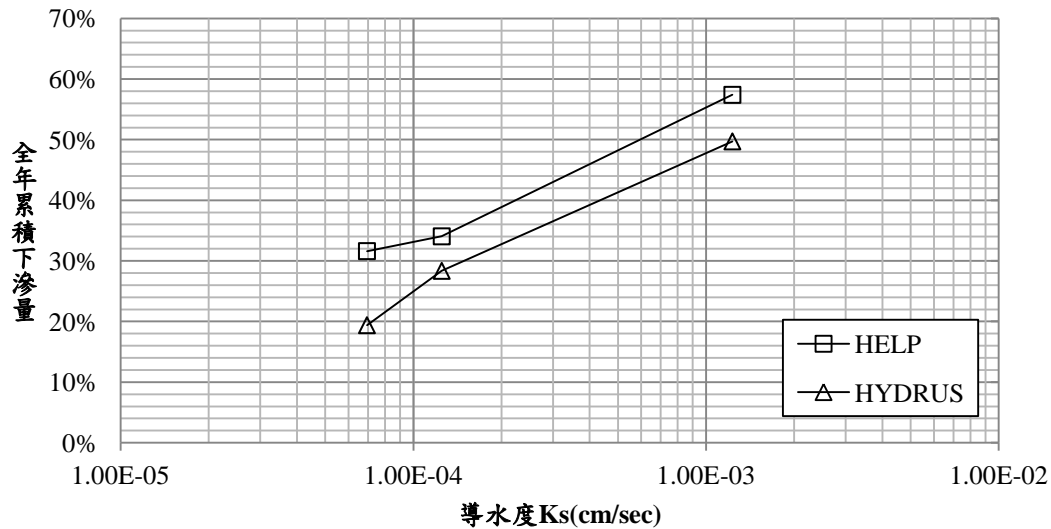


圖 4-5-c 不同導水度土壤在 1 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 Ks)

#### 4.2.2.2 土壤導水度在土層厚度 1.5 m 對累積下滲量的影響

此部分將探討單一土層覆蓋類型在覆蓋層厚度 1.5 m 之下，以不同導水度的土壤砂土質壤土、粉土質壤土、粉土作為覆蓋層材料，分別在北部、中部、南部的氣候條件下，水流通過底層的全年累積下滲量。

綜合九項案例(表 4-4)模擬結果發現，單一土層的覆蓋材料使用粉土質壤土限制下滲量的效果遠比砂土質壤土限制下滲量的效果佳。在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式減少了 39%、31.47%、18.28% 的累積下滲量，HYDRUS 模式減少了 28.64%、32.71%、21.91% 的累積下滲量，可發現兩模式均顯示出將單一土層的覆蓋材料由砂土質壤土改為粉土質壤土時，減少累積下滲量的幅度相當可觀。若將覆蓋材料改為粉土時，在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式的累積下滲量分別為 19.06%、17.54%、30.92%，HYDRUS 模式的累積下滲量分別為 5.29%、5.86%、17.29%，由此發現在北部及中部的氣候條件下已能將累積下滲量百分比控制在 10% 以下。

結合案例(表 4-4)的模擬結果可知，在北部(圖 4-6-a)、中部(圖 4-6-b)、南部(圖 4-6-c)的氣候條件下，使用導水度愈低的土壤做為單一土層的覆蓋材料，能夠明顯減少累積通過底層的下滲量，無論是土層厚度為 1 m 或者是 1.5 m，兩者減少下滲量百分比的趨勢非常相近，也能從中發現，增加土層厚度是可以減少最多約 5% 以內的累積下滲量。

## Monolithic Covers

□HELP ■HYDRUS

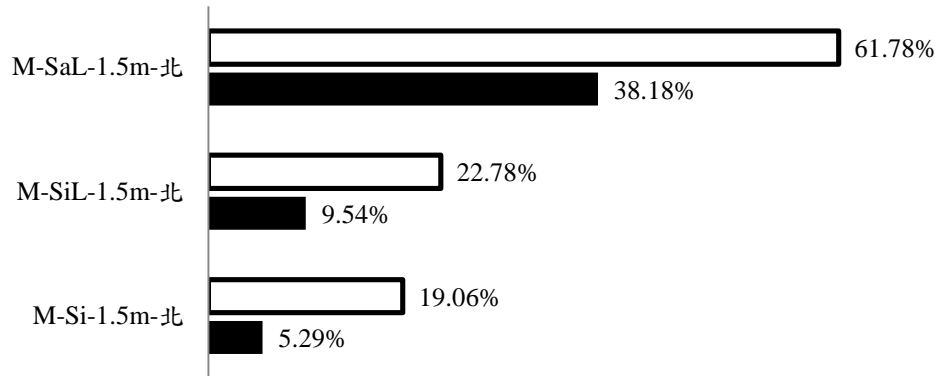


圖 4-6-a 不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(北部)

## Monolithic Covers

□HELP ■HYDRUS

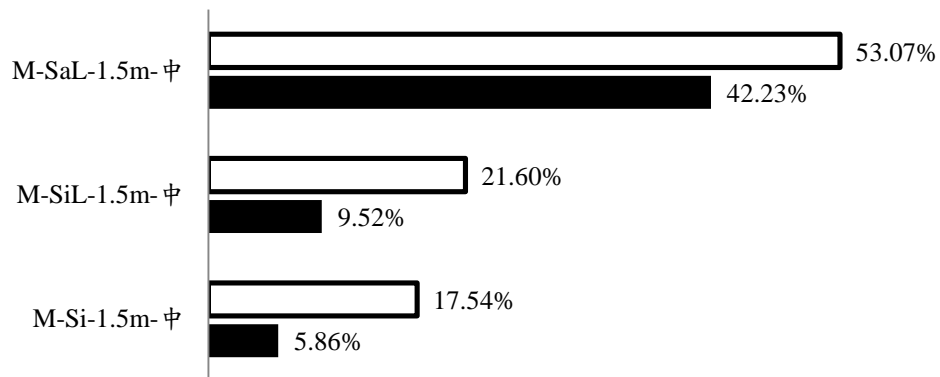


圖 4-6-b 不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(中部)

# Monolithic Covers

□HELP ■HYDRUS

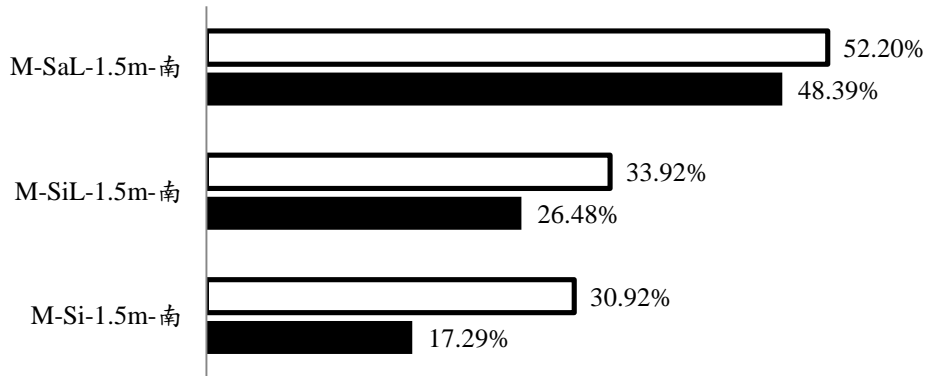


圖 4-6-c 不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(南部)

表 4-4 單一土層類型在不同導水度土壤下厚度 1.5 m 的全年累積下滲量

案例名稱	Ks (cm/sec)	HELP (mm)	年下滲量 (%)	HYDRUS (mm)	年下滲量 (%)
M-SaL-1.5m-北	$1.23 \times 10^{-3}$	1651.1	61.78 %	1020.4	38.18 %
M-SiL-1.5m-北	$1.25 \times 10^{-4}$	608.7	22.78 %	254.9	9.54 %
M-Si-1.5m-北	$6.94 \times 10^{-5}$	509.3	19.06 %	141.4	5.29 %
M-SaL-1.5m-中	$1.23 \times 10^{-3}$	1291.1	53.07 %	1027.3	42.23 %
M-SiL-1.5m-中	$1.25 \times 10^{-4}$	525.6	21.60 %	231.6	9.52 %
M-Si-1.5m-中	$6.94 \times 10^{-5}$	426.7	17.54 %	142.5	5.86 %
M-SaL-1.5m-南	$1.23 \times 10^{-3}$	1152.1	52.20 %	1068.2	48.39 %
M-SiL-1.5m-南	$1.25 \times 10^{-4}$	748.8	33.92 %	584.5	26.48 %
M-Si-1.5m-南	$6.94 \times 10^{-5}$	682.6	30.92 %	381.7	17.29 %



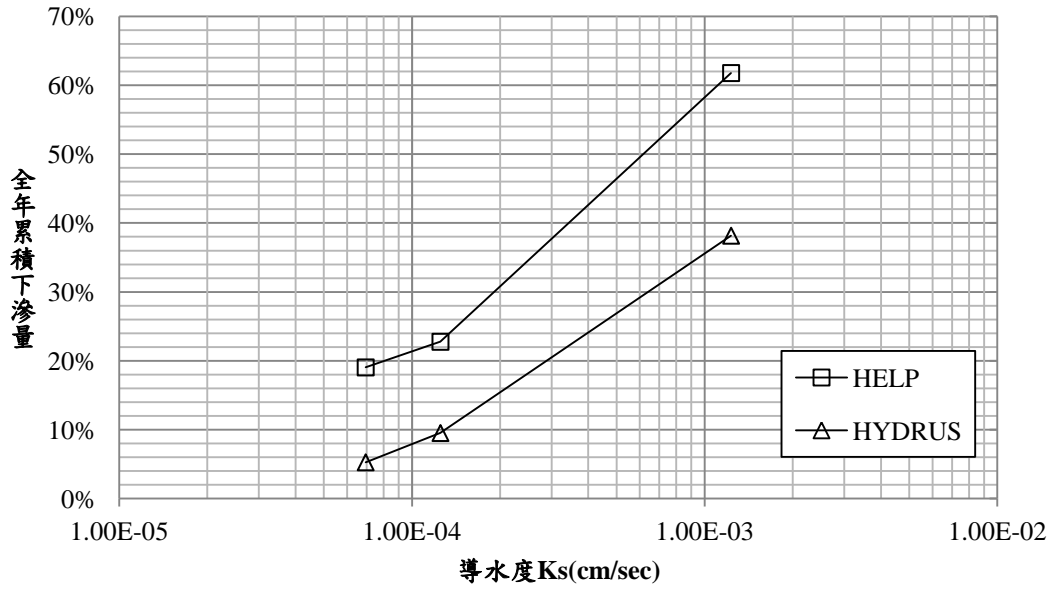


圖 4-7-a 不同導水度土壤在 1.5 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

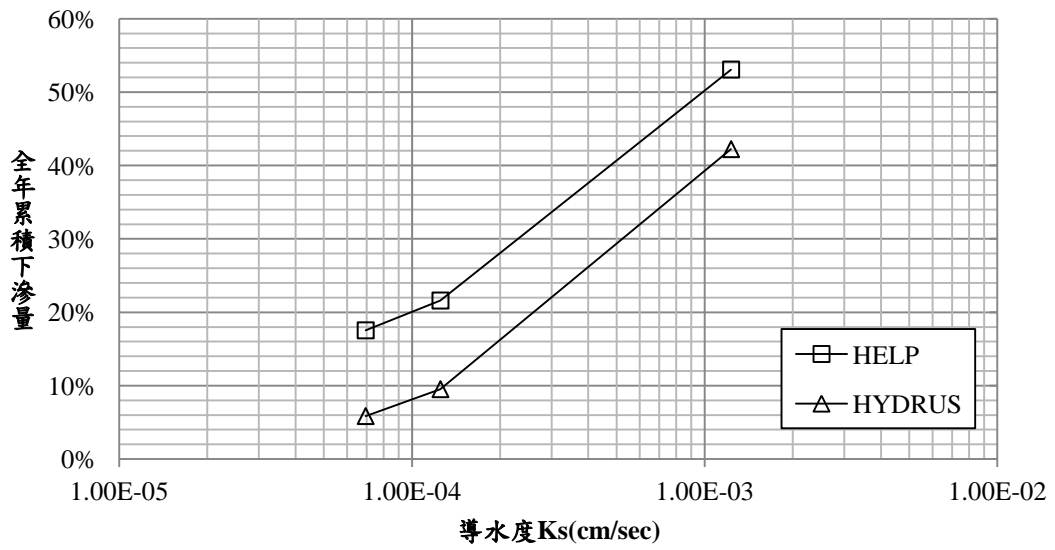


圖 4-7-b 不同導水度土壤在 1.5 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

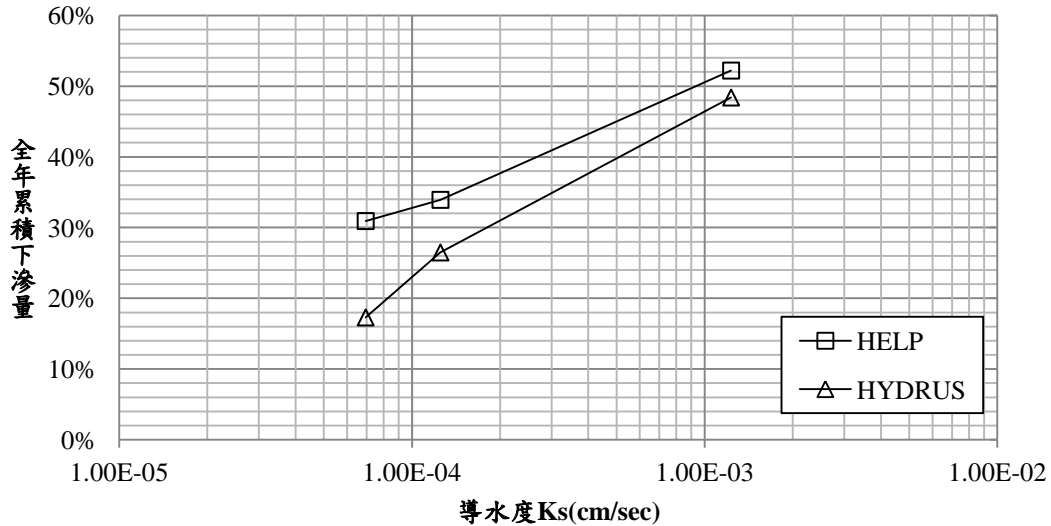


圖 4-7-c 不同導水度土壤在 1.5 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

#### 4.2.2.3 土壤導水度在土層厚度 2 m 對累積下滲量的影響

此部分將探討單一土層覆蓋類型在覆蓋層厚度 2 m 之下，以不同導水度的土壤砂土質壤土、粉土質壤土、粉土作為覆蓋層材料，分別在北部、中部、南部的氣候條件下，水流通過底層的全年累積下滲量。

綜合九項案例(表 4-5)模擬結果發現，單一土層的覆蓋材料使用粉土質壤土限制下滲量的效果遠比砂土質壤土限制下滲量的效果佳。在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式減少了 39.34 %、33.73 %、20.56 % 的累積下滲量，HYDRUS 模式減少了 28.25 %、32.87 %、21.51 % 的累積下滲量，可發現兩模式均顯示出將單一土層的覆蓋材料由砂土質壤土改為粉土質壤土時，減少累積下滲量的幅度相當可觀。若將覆蓋材料改為粉土時，在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式的累積下滲量分別為 19.08 %、17.50 %、30.95 %，HYDRUS 模式的累積下滲量分別為 4.17 %、4.23 %、16.27 %，由此發現在北部及中部的氣候條件下已能將累積下滲量百分比控制在 10 % 以下。

結合案例(表 4-5)的模擬結果，在北部(圖 4-8-a)、中部(圖 4-8-b)、南部(圖 4-8-c)的氣候條件下，使用導水度愈低的土壤做為單一土層的覆蓋材料，能夠明顯減少累積通過底層的下滲量。增加土層厚度減少下滲量百分比的趨勢非常相近，減少最多約 5 % 以內的累積下滲量。最後統整單一土層覆蓋材料總共二十七種案例的模擬結果，可發現限制累積下滲量的最大關鍵仍在於不同導水度土壤( $K_s$ )的差異。

## Monolithic Covers

□HELP ■HYDRUS

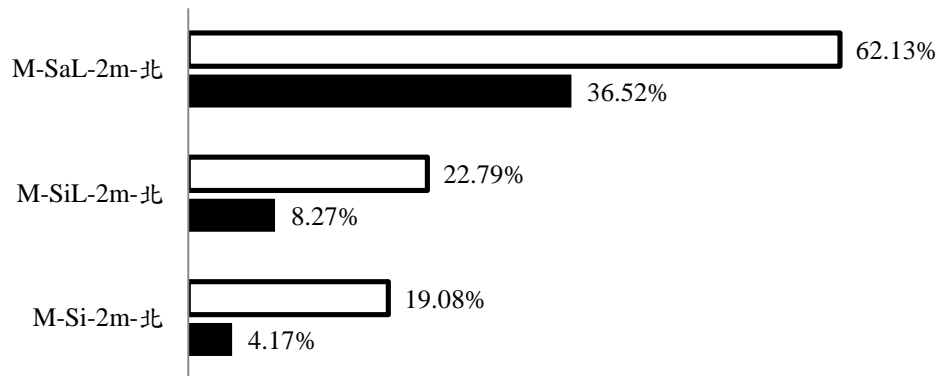


圖 4-8-a 不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(北部)

## Monolithic Covers

□HELP ■HYDRUS

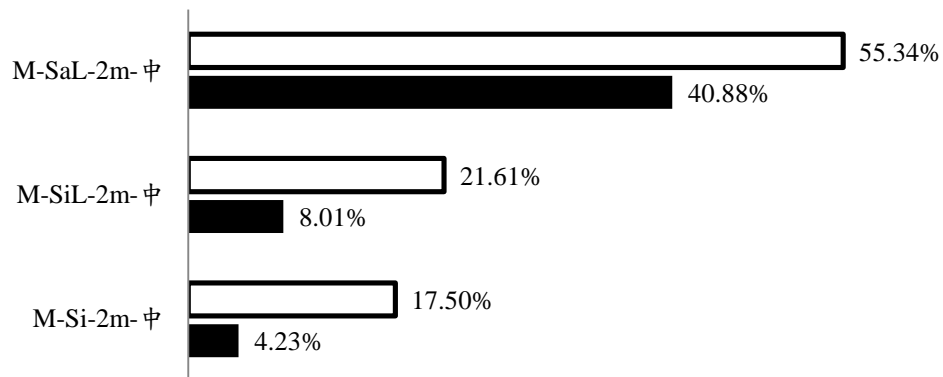


圖 4-8-b 不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(中部)

# Monolithic Covers

□HELP ■HYDRUS

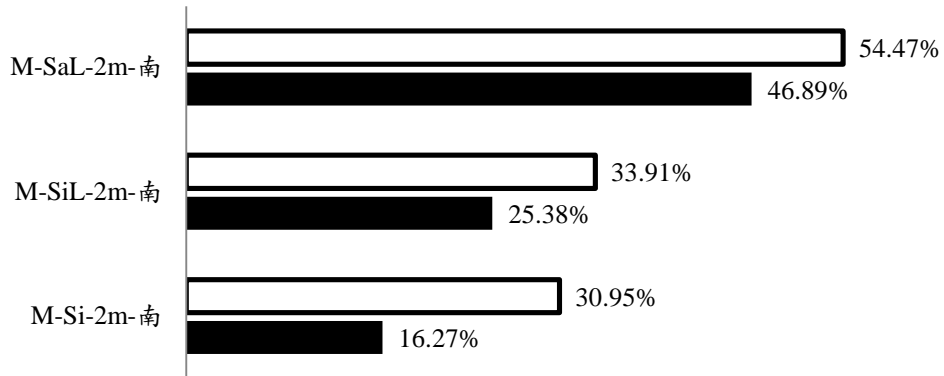


圖 4-8-c 不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(南部)

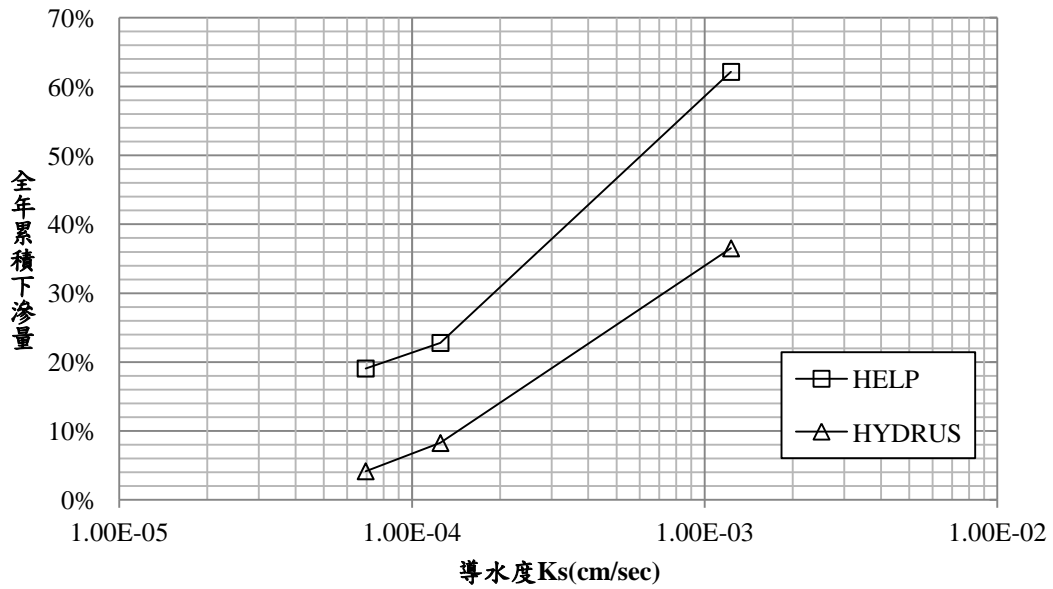


圖 4-9-a 不同導水度土壤在 2 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

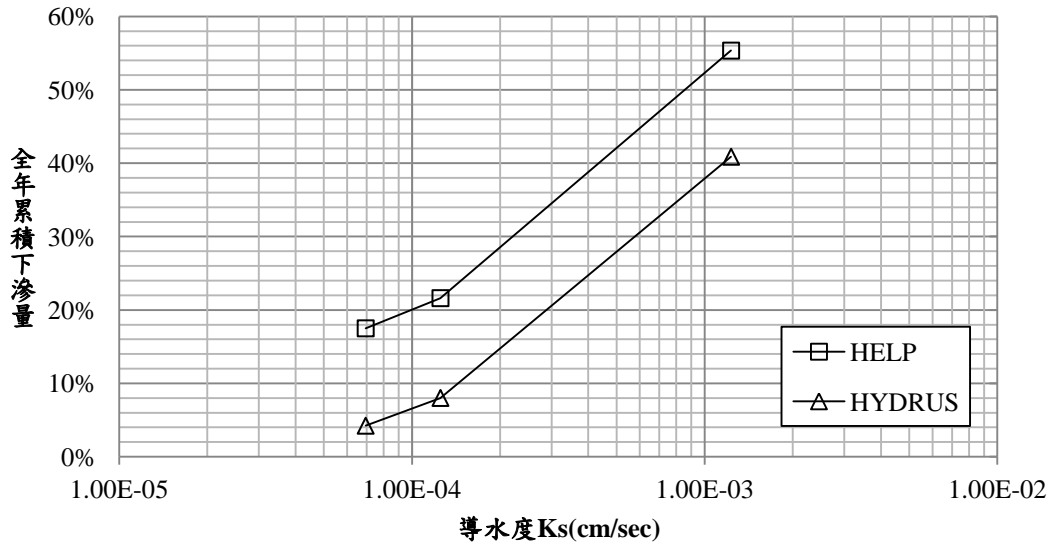


圖 4-9-b 不同導水度土壤在 2 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較 Ks)

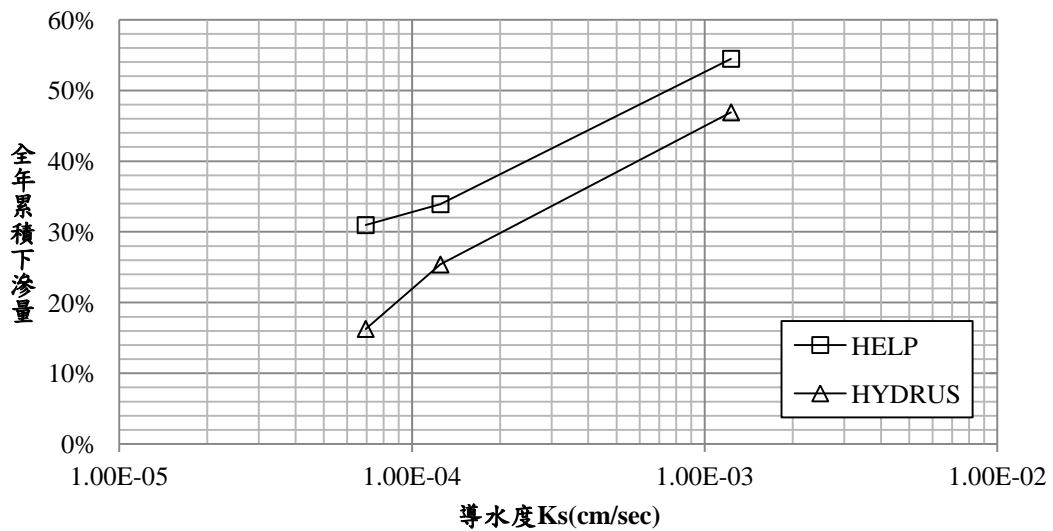


圖 4-9-c 不同導水度土壤在 2 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 Ks)

表 4-5 單一土層類型在不同導水度土壤下厚度 2m 的全年累積下滲量

案例名稱	Ks (cm/sec)	HELP (mm)	年下滲量 (%)	HYDRUS (mm)	年下滲量 (%)
M-SaL-2m-北	1.23x10 <sup>-3</sup>	1660.6	62.13 %	976.0	36.52 %
M-SiL-2m-北	1.25x10 <sup>-4</sup>	609.0	22.79 %	220.9	8.27 %
M-Si-2m-北	6.94x10 <sup>-5</sup>	509.9	19.08 %	111.4	4.17 %
M-SaL-2m-中	1.23x10 <sup>-3</sup>	1346.3	55.34 %	994.5	40.88 %
M-SiL-2m-中	1.25x10 <sup>-4</sup>	525.8	21.61 %	194.8	8.01 %
M-Si-2m-中	6.94x10 <sup>-5</sup>	425.7	17.50 %	103.0	4.23 %



M-SaL-2m-南	$1.23 \times 10^{-3}$	1206.6	54.47 %	1035.1	46.89 %
M-SiL-2m-南	$1.25 \times 10^{-4}$	748.6	33.91 %	560.2	25.38 %
M-Si-2m-南	$6.94 \times 10^{-5}$	683.2	30.95 %	359.2	16.27 %

### 4.3 毛細阻隔層覆蓋模擬結果

本小節內容為兩模式採用毛細阻隔層蒸發散覆蓋類型的數值模擬結果。將毛細阻隔層蒸發散覆蓋的地表植生設定為狀況良好(Maximum LAI = 5)的草本植物(grass)，輸入歷史氣象條件(2007年)，以不同導水度的土壤上層為細顆粒層的砂土質壤土、粉土質壤土、粉土，土層厚度的組合為0.5 m、1 m、1.5 m，下層為顆粒層的砂土，土層厚度為0.5 m，並將上述參數組合整理如下(表 4-6)：

表 4-6 毛細阻隔層蒸發散覆蓋參數組合

覆蓋類型	土壤種類	土層厚度	案例代號	氣象條件
毛細阻隔層 (Capillary)	砂土質壤土 (Sandy Loam) + 砂土 (Sand)	0.5m +	C-(SaL+S)-1m	輸入北部、中 部、南部地區 歷史氣象
		0.5m 1m +	C-(SaL+S)-1.5m	
		0.5m 1.5m +	C-(SaL+S)-2m	
		0.5m +	C-(SiL+S)-1m	
		0.5m 1m +	C-(SiL+S)-1.5m	
		0.5m 1.5m +	C-(SiL+S)-2m	
	粉土 (Silt) + 砂土 (Sand)	0.5m +	C-(Si+S)-1m	
		0.5m 1m +	C-(Si+S)-1.5m	
		0.5m 1m +	C-(Si+S)-1.5m	
		0.5m 1m +	C-(Si+S)-1.5m	

		0.5m		
		1.5m	C-(Si+S)-2m	
		+ 0.5m		

### 4.3.1 顯著降雨事件對單日下滲量的影響

此部分將探討毛細阻隔層覆蓋類型在覆蓋層厚度變化下，以不同導水度的土壤砂土質壤土、粉土質壤土、粉土作為覆蓋層材料，分別在北部、中部、南部的氣候條件下，水流通過底層的單日下滲量。將單日下滲量百分比定義為一場的顯著降雨事件下有多少的單日下滲量。

由測站的氣象資料顯示，在全年當中單場主要的降雨事件下，北部第一次顯著單日降雨量為 182 mm、第二次顯著單日降雨量為 236.5 mm；中部第一次顯著單日降雨量為 252.2 mm、第二次顯著單日降雨量為 169.2 mm；南部第一次顯著單日降雨量為 199 mm、第二次顯著單日降雨量為 102.5 mm。

綜合(表 4-7)模擬結果發現，在北部及中部的氣候條件下，HYDRUS 的結果顯示出土壤導水度對下滲量的敏感度高，使用低導水度的土壤且增加土層厚度均能明顯減少下滲量(圖 4-10-a 至圖 4-10-r)，由於 HYDRUS 考慮非飽和土壤與導水度的影響，減少下滲量的幅度大。在同一種導水度的土壤下，第一次顯著降雨事件前，土壤非飽和且較為乾燥，含水量較低，所對應的  $K_r$  成為導水度的控制因子。由於毛細阻隔層結合了單一土層的特性，可發現同一種土壤非飽和狀況下在單一土層 1 m 與毛細阻隔層 1.5 m 下，單日下滲量百分比相近，由此可知影響毛細阻隔層單日下滲量的關鍵仍然在細顆粒土層的厚度。而在 HYDRUS 的模擬結果中，發現在全年的顯著降雨事件單日下滲量百分比有 1% 以下的案例，且均為低導水度的土壤，可推得只要非飽和情況下，低導水度的土壤均能表現出低水力傳導性及高貯水能力，有效控制水流的下滲。但黏質土類型的低導水度土壤比砂質土類型的高導水度土壤容易達到飽和情況，而飽和情況使得粉土質壤土的導水度較非飽和的砂土質壤土  $K_r$  所控制的導水度高，導致低導水度土壤有較高的下滲量。

表 4-7 毛細阻隔層類型的單日下滲量百分比

北部氣候 細顆粒層類型	K <sub>s</sub> (cm/sec)	第一次顯著降雨		第二次顯著降雨	
		182(mm)		236.5(mm)	
		HELP	HYDRUS	HELP	HYDRUS
C-(SaL+S)-1m	1.23x10 <sup>-3</sup>	26.37%	68.68%	14.18%	51.84%
C-(SaL+S)-1.5m		26.04%	55.73%	14.12%	31.78%
C-(SaL+S)-2m		16.30%	43.50%	7.94%	24.78%
C-(SiL+S)-1m	1.25x10 <sup>-4</sup>	59.12%	39.21%	11.62%	12.52%
C-(SiL+S)-1.5m		19.69%	13.75%	11.16%	0.25%
C-(SiL+S)-2m		18.59%	7.59%	5.91%	0.04%
C-(Si+S)-1m	6.94x10 <sup>-5</sup>	48.69%	25.75%	32.45%	1.44%
C-(Si+S)-1.5m		46.33%	22.82%	8.38%	0.01%
C-(Si+S)-2m		44.03%	11.83%	4.37%	0.01%
中部氣候 細顆粒層類型	K <sub>s</sub> (cm/sec)	第一次顯著降雨		第二次顯著降雨	
		252.2(mm)		169.2(mm)	
		HELP	HYDRUS	HELP	HYDRUS
C-(SaL+S)-1m	1.23x10 <sup>-3</sup>	17.48%	68.42%	62.46%	51.33%
C-(SaL+S)-1.5m		13.56%	29.44%	29.12%	50.34%
C-(SaL+S)-2m		8.67%	23.93%	6.22%	32.94%
C-(SiL+S)-1m	1.25x10 <sup>-4</sup>	33.97%	30.49%	41.48%	25.15%
C-(SiL+S)-1.5m		29.64%	11.21%	9.06%	2.77%
C-(SiL+S)-2m		26.82%	4.67%	5.71%	1.73%
C-(Si+S)-1m	6.94x10 <sup>-5</sup>	34.85%	12.02%	21.69%	5.83%
C-(Si+S)-1.5m		32.65%	6.01%	7.02%	1.18%
C-(Si+S)-2m		25.76%	0.61%	0.31%	0.40%
南部氣候 細顆粒層類型	K <sub>s</sub> (cm/sec)	第一次顯著降雨		第二次顯著降雨	
		199(mm)		102.5(mm)	
		HELP	HYDRUS	HELP	HYDRUS
C-(SaL+S)-1m	1.23x10 <sup>-3</sup>	50.15%	70.57%	44.94%	55.66%
C-(SaL+S)-1.5m		17.00%	67.18%	39.80%	48.87%
C-(SaL+S)-2m		16.05%	59.13%	37.54%	44.50%
C-(SiL+S)-1m	1.25x10 <sup>-4</sup>	34.80%	47.10%	43.53%	67.23%
C-(SiL+S)-1.5m		29.63%	44.66%	42.88%	64.97%
C-(SiL+S)-2m		22.81%	41.44%	41.73%	62.79%
C-(Si+S)-1m	6.94x10 <sup>-5</sup>	52.50%	28.32%	65.69%	56.86%
C-(Si+S)-1.5m		34.33%	27.37%	58.37%	42.39%
C-(Si+S)-2m		22.32%	25.48%	37.73%	42.16%

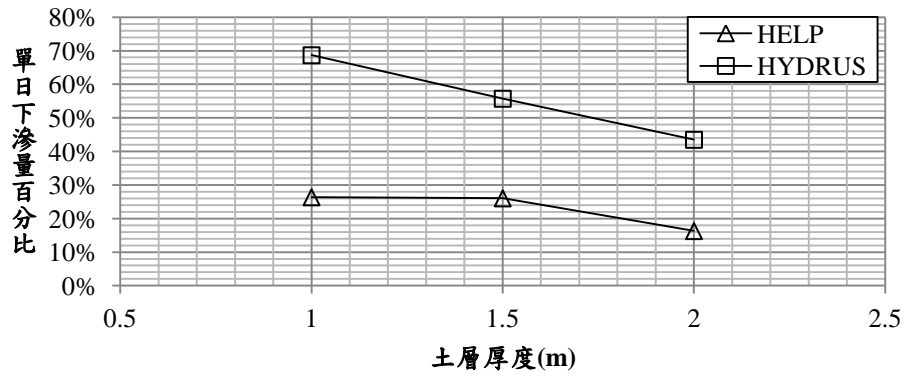


圖 4-10-a 不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部)

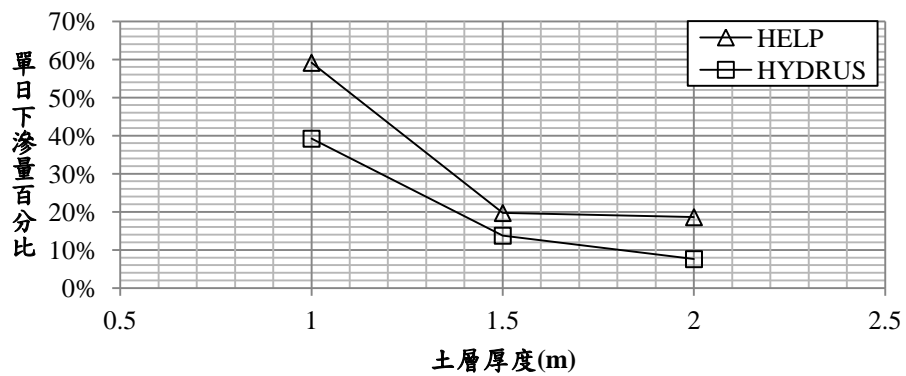


圖 4-10-b 不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部)

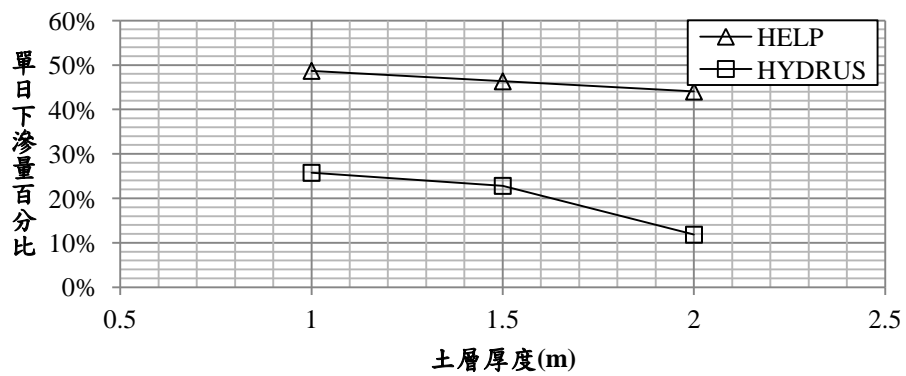


圖 4-10-c 不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(北部)

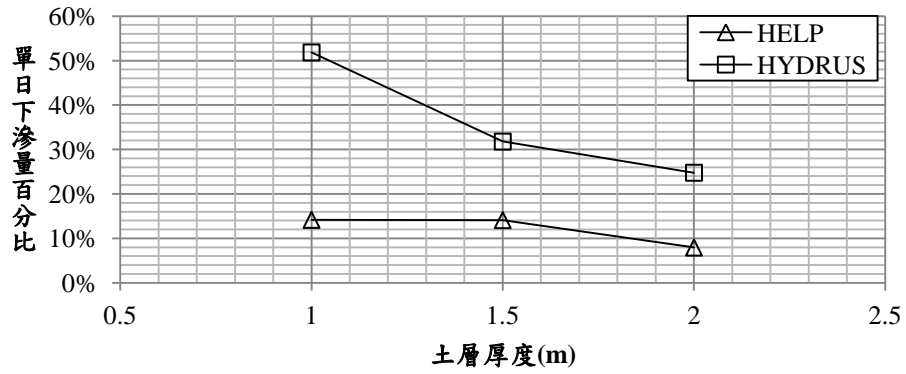


圖 4-10-d 不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)

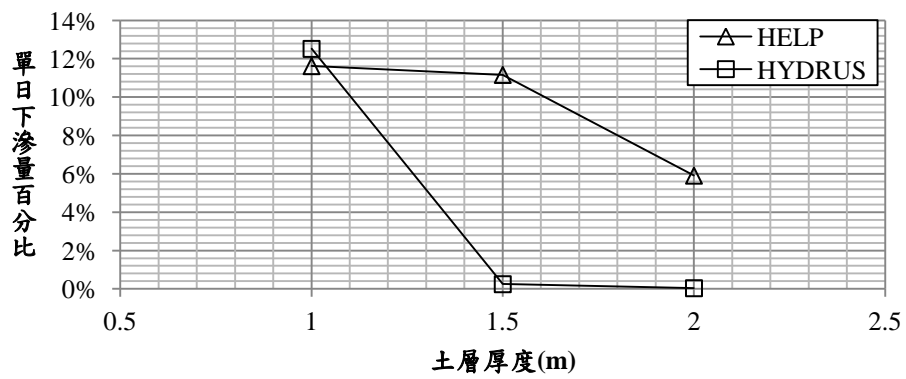


圖 4-10-e 不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)

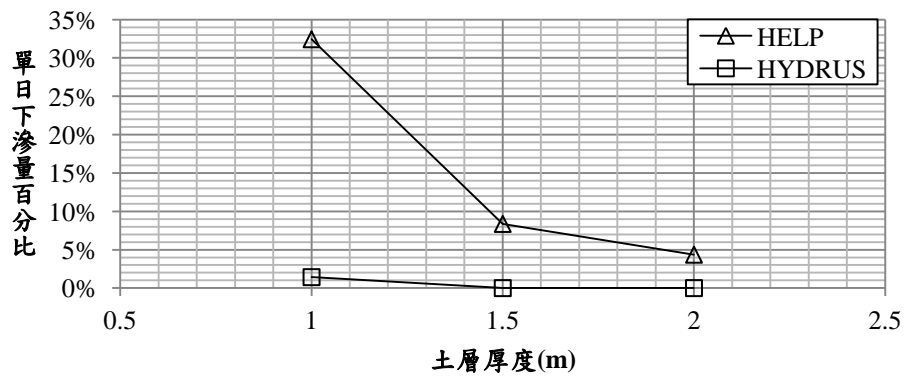


圖 4-10-f 不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(北部)



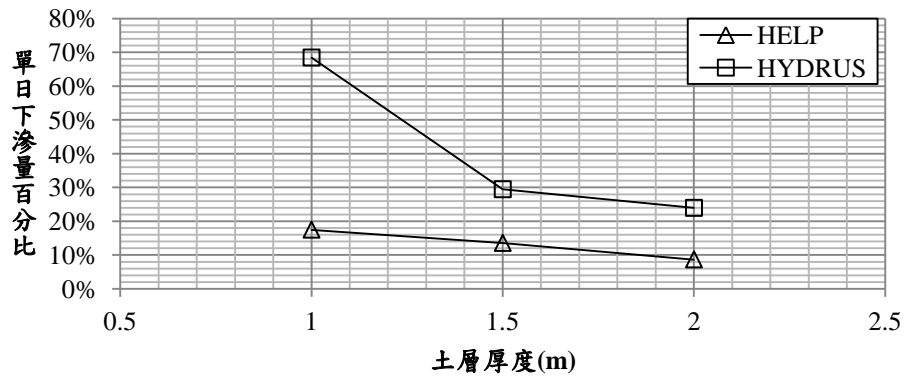


圖 4-10-g 不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)

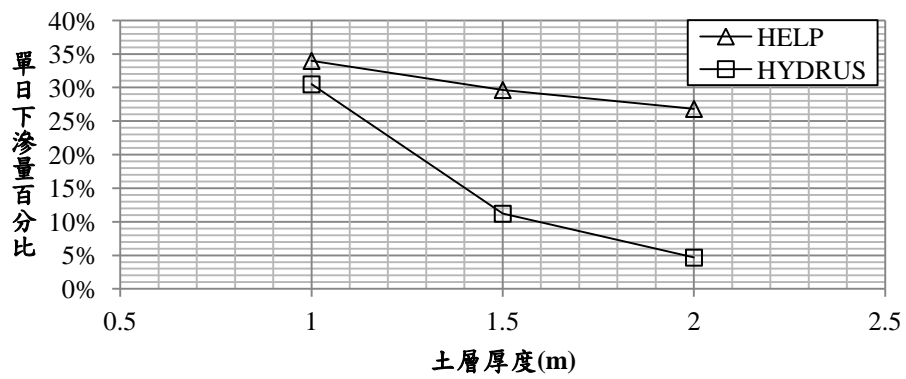


圖 4-10-h 不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)

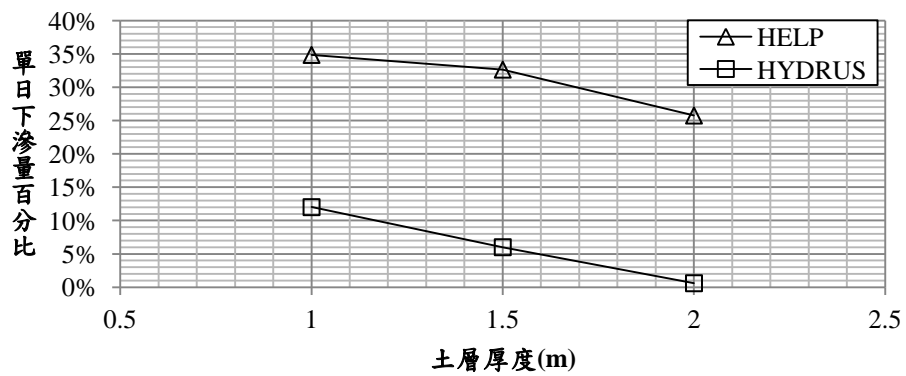


圖 4-10-i 不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(中部)

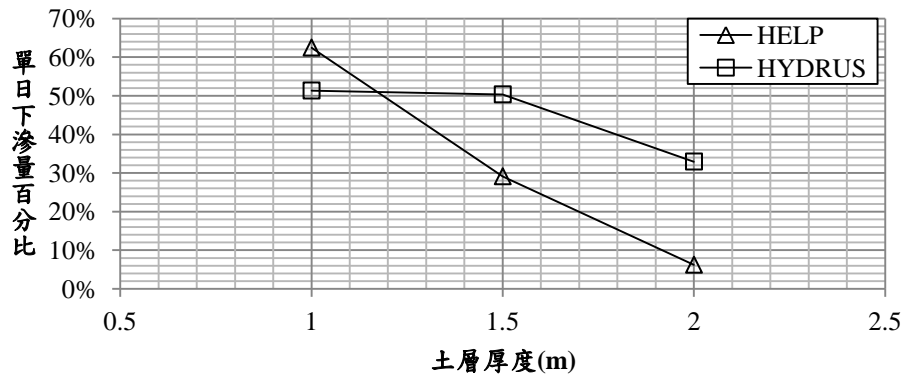


圖 4-10-j 不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)

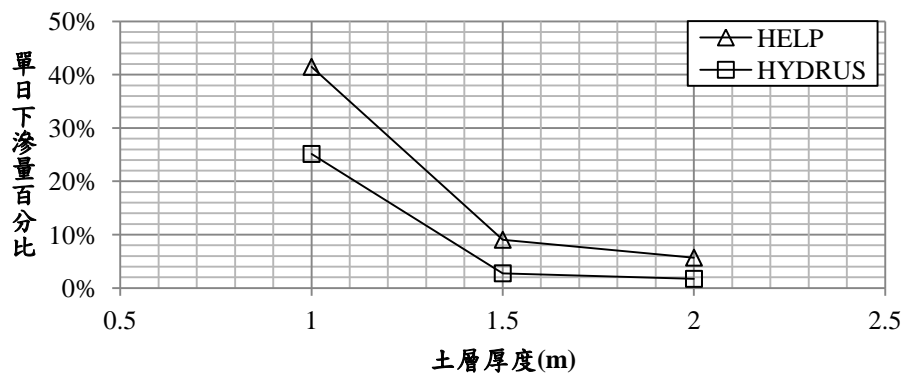


圖 4-10-k 不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)

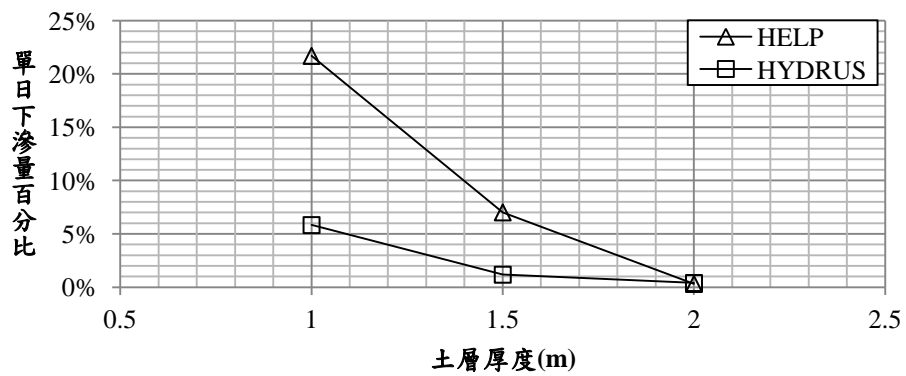


圖 4-10-l 不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(中部)

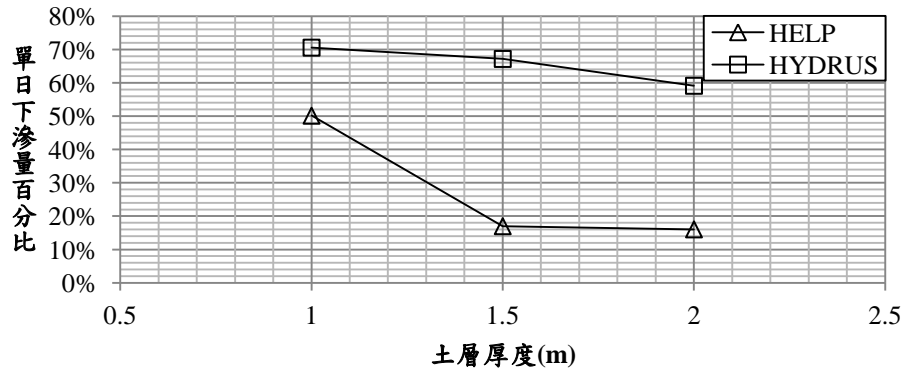


圖 4-10-m 不同厚度的砂土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)

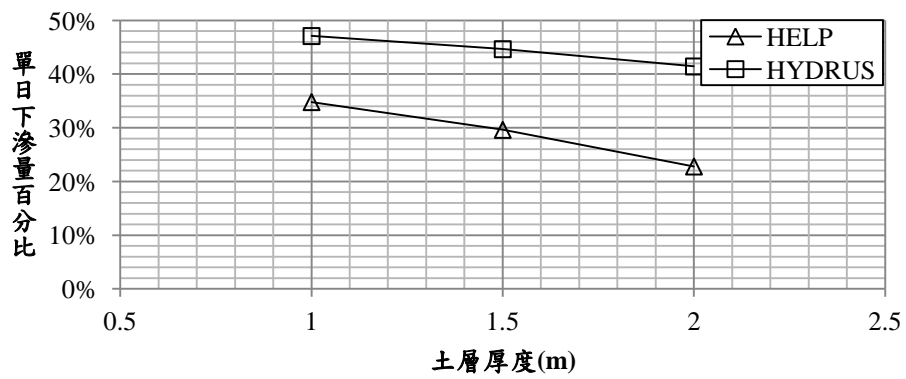


圖 4-10-n 不同厚度的粉土質壤土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)

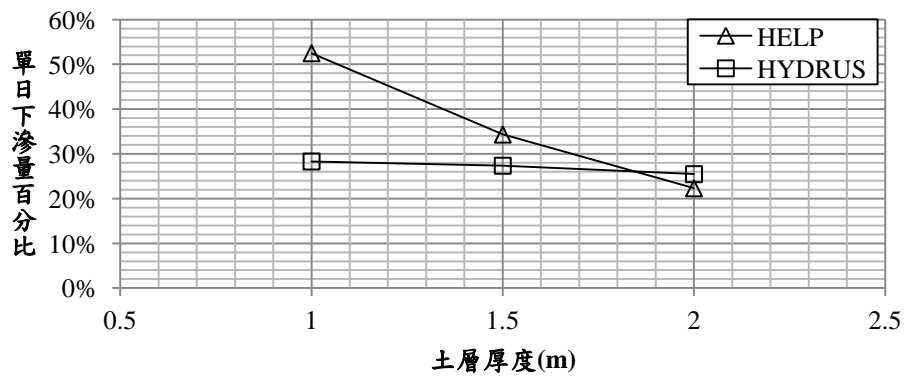


圖 4-10-o 不同厚度的粉土在第一場顯著降雨的單日下滲量(南部)

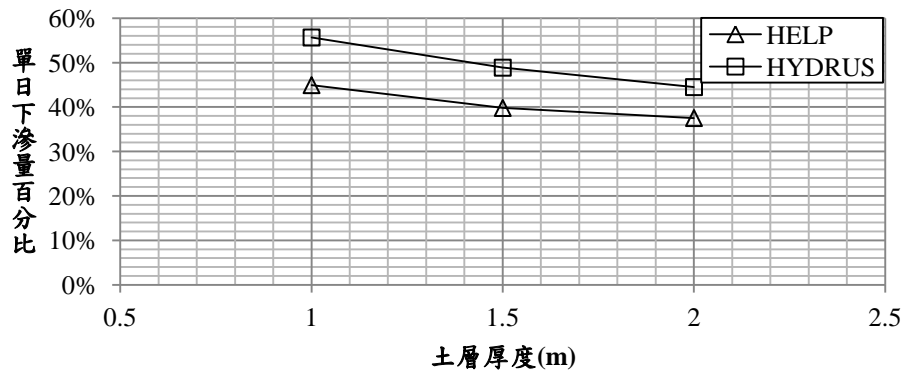


圖 4-10-p 不同厚度的砂土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)

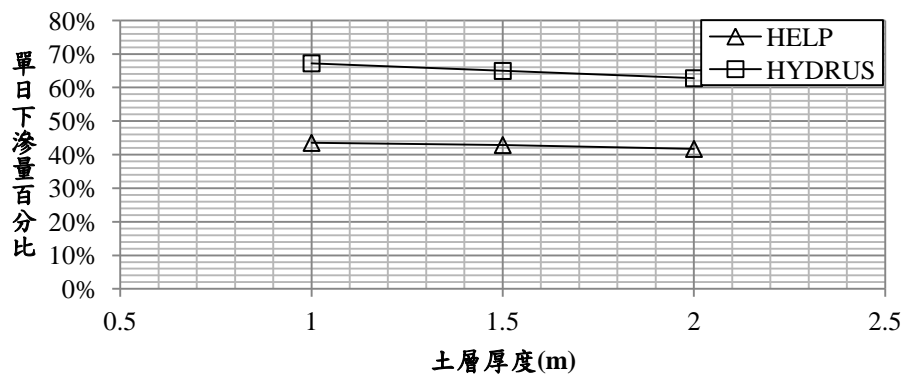


圖 4-10-q 不同厚度的粉土質壤土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)

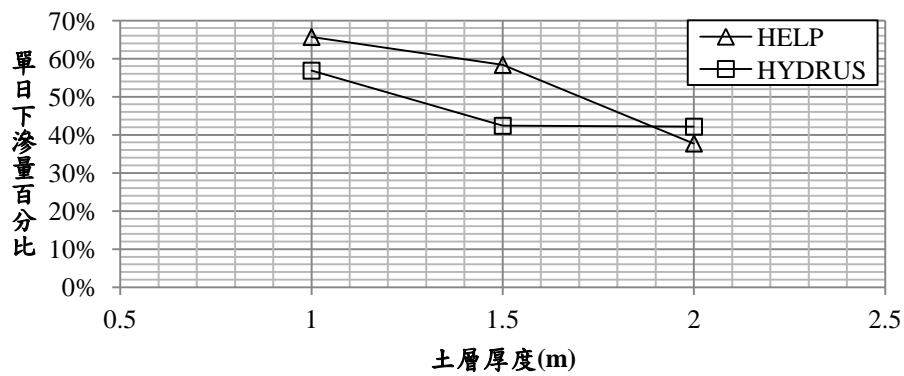


圖 4-10-r 不同厚度的粉土在第二場顯著降雨的單日下滲量(南部)

## 4.3.2 全年降雨量對累積下滲量的影響

### 4.3.2.1 土壤導水度在土層厚度 1 m 對累積下滲量的影響

此部分將探討毛細阻隔層覆蓋類型以上層細顆粒層為砂土質壤土、粉土質壤土、粉土均為 0.5 m 的覆蓋層材料，下層粗顆粒層為砂土 0.5 m 的覆蓋層材料，分別在北部、中部、南部的氣候條件下，水流通過底層的全年累積下滲量。

綜合九項案例(表 4-8)模擬結果發現，毛細阻隔層細顆粒層的覆蓋材料使用粉土質壤土限制下滲量的效果比砂土質壤土限制下滲量的效果佳。在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式減少了 29.14 %、19.28 %、16.55 % 的累積下滲量，HYDRUS 模式減少了 21.6 %、21.55 %、15.61 % 的累積下滲量，可發現兩模式均顯示出將毛細阻隔層細顆粒層的覆蓋材料由砂土質壤土改為粉土質壤土時，減少累積下滲量的幅度相當可觀。若將細顆粒層覆蓋材料改為粉土時，在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式的累積下滲量分別為 35.65 %、40.29 %、47.65 %，HYDRUS 模式的累積下滲量分別為 10.68 %、13.65 %、23.22 %，由此發現在北部及中部的氣候條件下已能將累積下滲量百分比控制在 15 % 以下，而南部的氣候條件因降雨集中在數日且降雨強度大，雖然年降雨量都比北部及中部氣候來的小，但仍有累積下滲量較高的現象。

結合案例(表 4-8)的模擬結果可知，在北部(圖 4-11-a)、中部(圖 4-11-b)、南部(圖 4-11-c)氣候條件下，使用導水度愈低的土壤做為細顆粒層的覆蓋材料，能夠明顯減少累積通過底層的下滲量，但降雨強度的大小也直接影響累積下滲量的多寡。

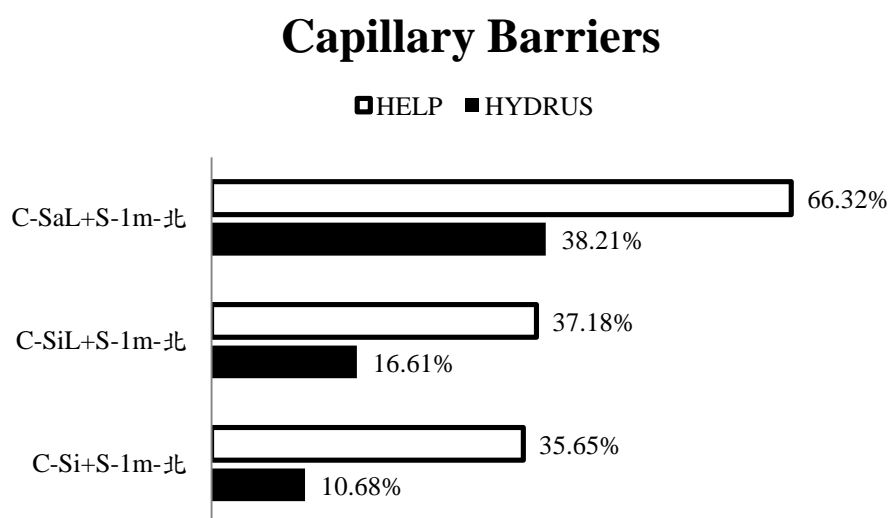


圖 4-11-a 不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(北部)



## Capillary Barriers

□HELP ■HYDRUS

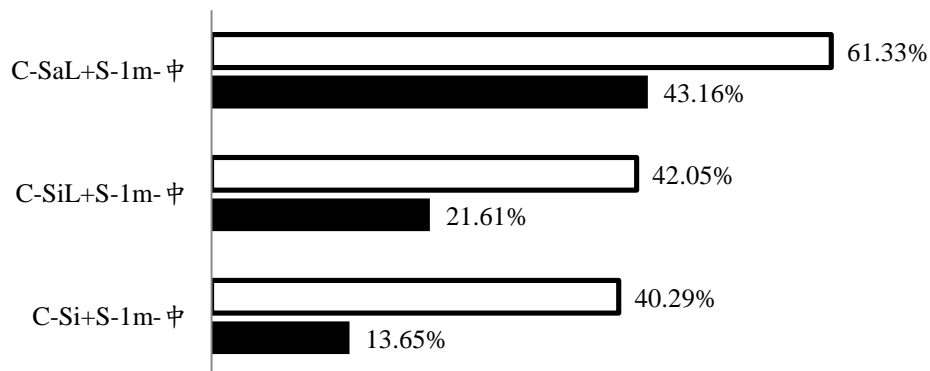


圖 4-11-b 不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(中部)

## Capillary Barriers

□HELP ■HYDRUS

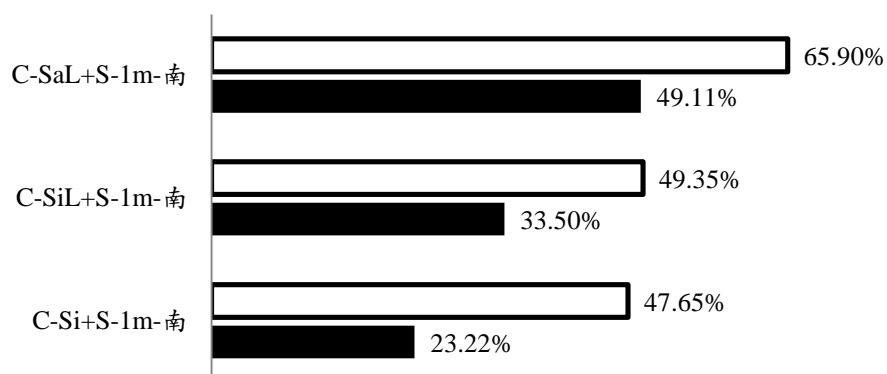


圖 4-11-c 不同導水度土壤厚度 1 m 下的全年累積下滲量百分比(南部)

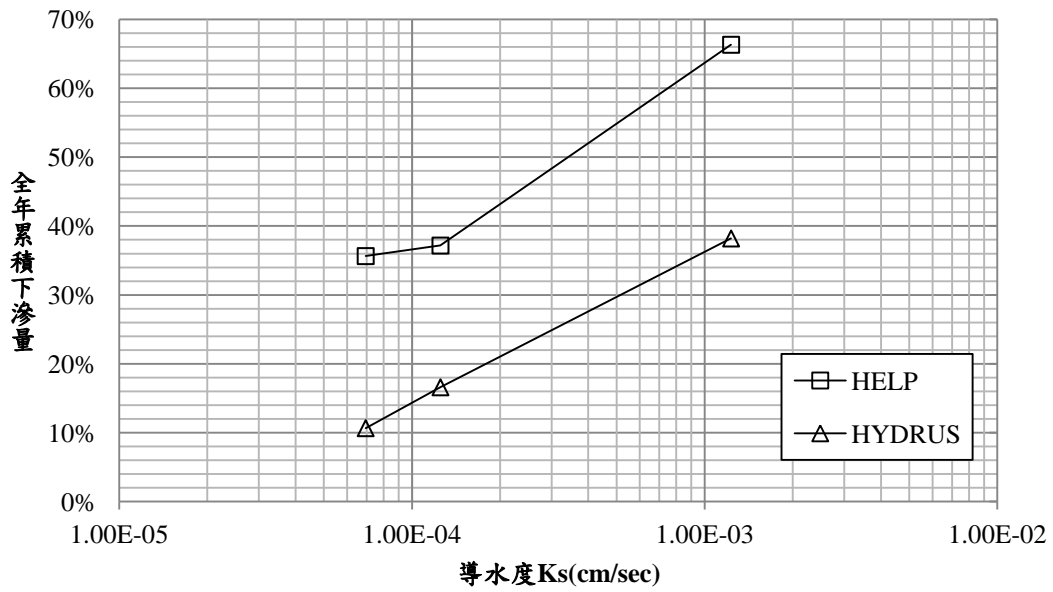


圖 4-12-a 不同導水度土壤在 1 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

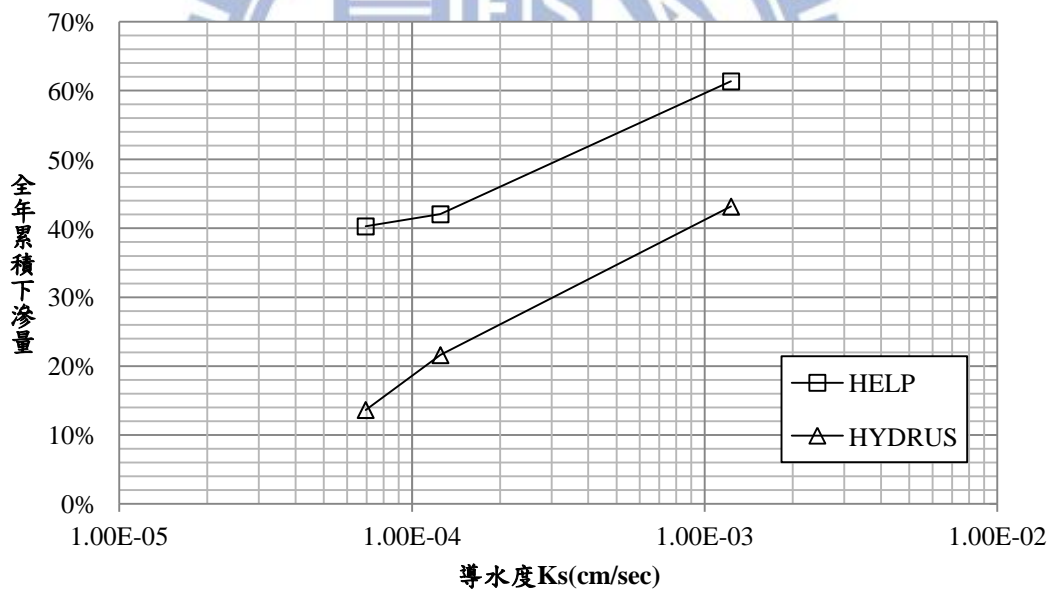


圖 4-12-b 不同導水度土壤在 1 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

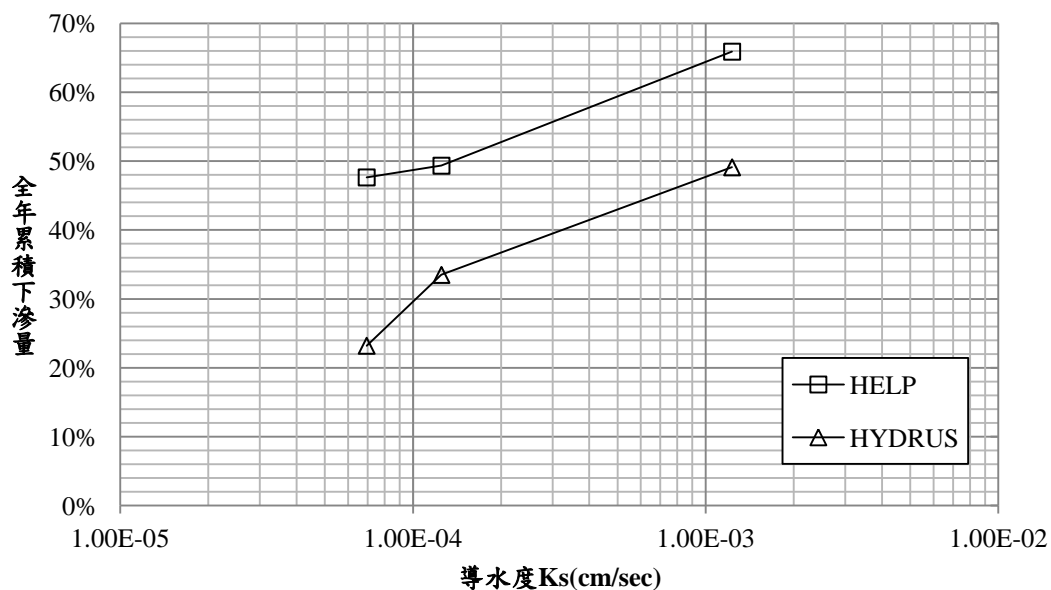


圖 4-12-c 不同導水度土壤在 1 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 Ks)

表 4-8 毛細阻隔層類型在不同導水度土壤下厚度 1 m 的全年累積下滲量

案例名稱	Ks (cm/sec)	HELP (mm)	年下滲量 (%)	HYDRUS (mm)	年下滲量 (%)
C-(SaL+S)-1m-北	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1772.4	66.32 %	1021.3	38.21 %
C-(SiL+S)-1m-北	1.25x10 <sup>-4</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	993.7	37.18 %	443.9	16.61 %
C-(Si+S)-1m-北	6.94x10 <sup>-5</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	952.8	35.65 %	285.5	10.68 %
C-(SaL+S)-1m-中	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1492.2	61.33 %	1050.1	43.16 %
C-(SiL+S)-1m-中	1.25x10 <sup>-4</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1023.0	42.05 %	525.8	21.61 %
C-(Si+S)-1m-中	6.94x10 <sup>-5</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	980.3	40.29 %	332.0	13.65 %

C-(SaL+S)-1m-南	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1454.7	65.90 %	1084.1	49.11 %
C-(SiL+S)-1m-南	1.25x10 <sup>-4</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1089.4	49.35 %	739.4	33.50 %
C-(Si+S)-1m-南	6.94x10 <sup>-5</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1051.8	47.65 %	512.5	23.22 %

#### 4.3.2.2 土壤導水度在土層厚度 1.5 m 對單日下滲量的影響

此部分將探討毛細阻隔層覆蓋類型以上層細顆粒層為砂土質壤土、粉土質壤土、粉土均為 1 m 的覆蓋層材料，下層粗顆粒層為砂土 0.5 m 的覆蓋層材料，分別在北部、中部、南部的氣候條件下，水流通過底層的全年累積下滲量。

綜合九項案例(表 4-9)模擬結果發現，毛細阻隔層細顆粒層的覆蓋材料使用粉土質壤土限制下滲量的效果比砂土質壤土限制下滲量的效果佳。在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式減少了 38.51 %、35.37 %、23.25 % 的累積下滲量，HYDRUS 模式減少了 28.21 %、31.99 %、18.55 % 的累積下滲量，可發現兩模式均顯示出將毛細阻隔層細顆粒層的覆蓋材料由砂土質壤土改為粉土質壤土時，減少累積下滲量的幅度相當可觀。若將細顆粒層覆蓋材料改為粉土時，在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式的累積下滲量分別為 18.35 %、18.69 %、32.17 %，HYDRUS 模式的累積下滲量分別為 7.93 %、7.18 %、22.53 %，由此發現在北部及中部的氣候條件下能將累積下滲量百分比控制在 10 % 以下。

結合案例(表 4-9)的模擬結果可知，在北部(圖 4-13-a)、中部(圖 4-13-b)、南部(圖 4-13-c)的氣候條件下，使用導水度愈低的土壤做為單一土層的覆蓋材料，能夠明顯減少累積通過底層的下滲量，無論是細顆粒層厚度為 0.5 m 或者是 1 m，兩者減少下滲量百分比的趨勢非常相近，也能從中發現，增加土層厚度是可以減少最多約 20 % 以內的累積下滲量。

## Capillary Barriers

□HELP ■HYDRUS

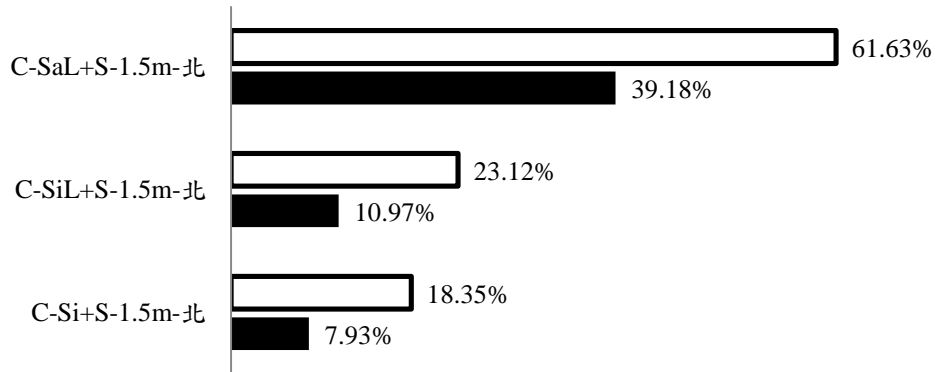


圖 4-13-a 不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(北部)

## Capillary Barriers

□HELP ■HYDRUS

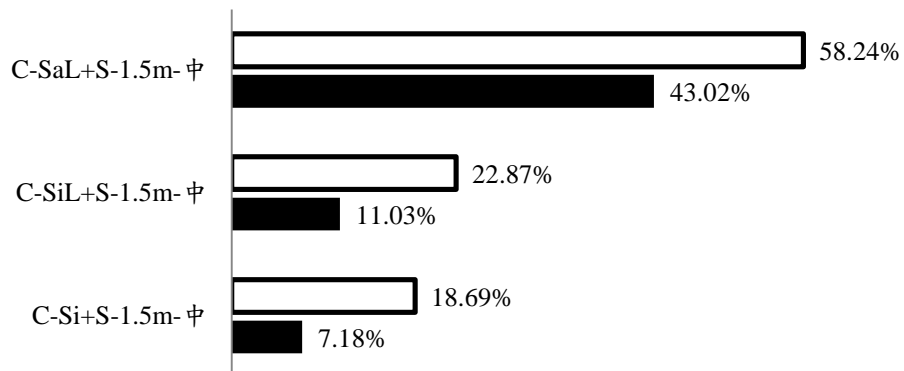


圖 4-13-b 不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(中部)



# Capillary Barriers

□HELP ■HYDRUS

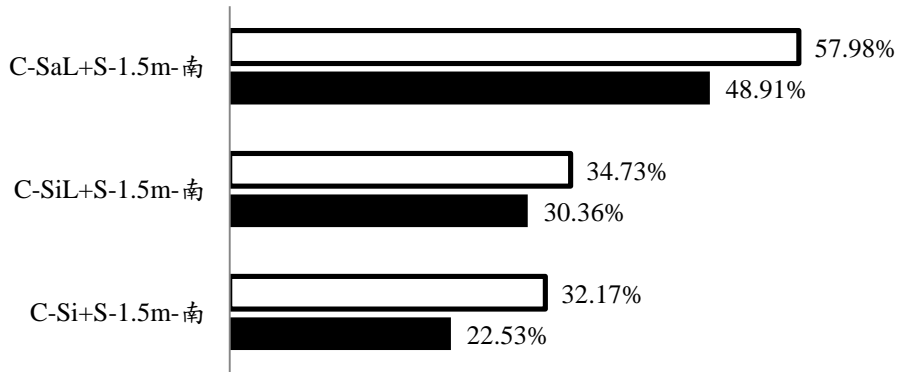


圖 4-13-c 不同導水度土壤厚度 1.5 m 下的全年累積下滲量百分比(南部)

表 4-9 毛細阻隔層類型在不同導水度土壤下厚度 1.5 m 的全年累積下滲量

案例名稱	Ks (cm/sec)	HELP (mm)	年下滲量 (%)	HYDRUS (mm)	年下滲量 (%)
C-(SaL+S)-1.5m-北	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1647.1	61.63 %	1047.2	39.18 %
C-(SiL+S)-1.5m-北	1.25x10 <sup>-4</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	617.9	23.12 %	293.1	10.97 %
C-(Si+S)-1.5m-北	6.94x10 <sup>-5</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	490.5	18.35 %	212.0	7.93 %
C-(SaL+S)-1.5m-中	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1417.0	58.24 %	1046.7	43.02 %
C-(SiL+S)-1.5m-中	1.25x10 <sup>-4</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	556.3	22.87 %	268.4	11.03 %
C-(Si+S)-1.5m-中	6.94x10 <sup>-5</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	454.8	18.69 %	174.6	7.18 %
C-(SaL+S)-1.5m-南	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1279.7	57.98 %	1079.5	48.91 %

C-(SiL+S)-1.5m-南	$1.25 \times 10^{-4}$ + $8.25 \times 10^{-3}$	766.7	34.73 %	670.2	30.36 %
C-(Si+S)-1.5m-南	$6.94 \times 10^{-5}$ + $8.25 \times 10^{-3}$	710.1	32.17 %	497.4	22.53 %

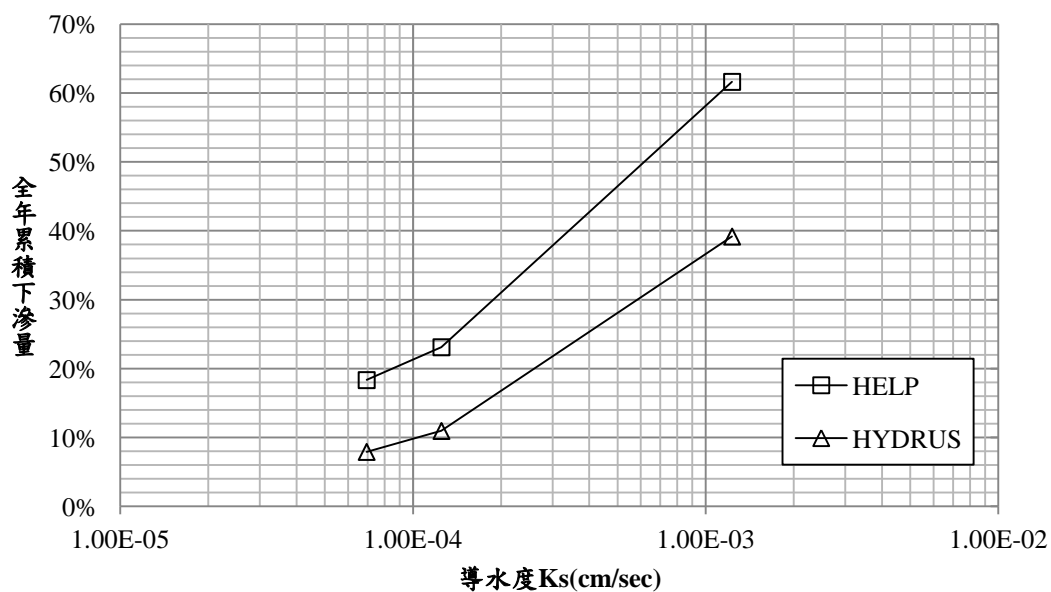


圖 4-14-a 不同導水度土壤在 1.5 m 下(北部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

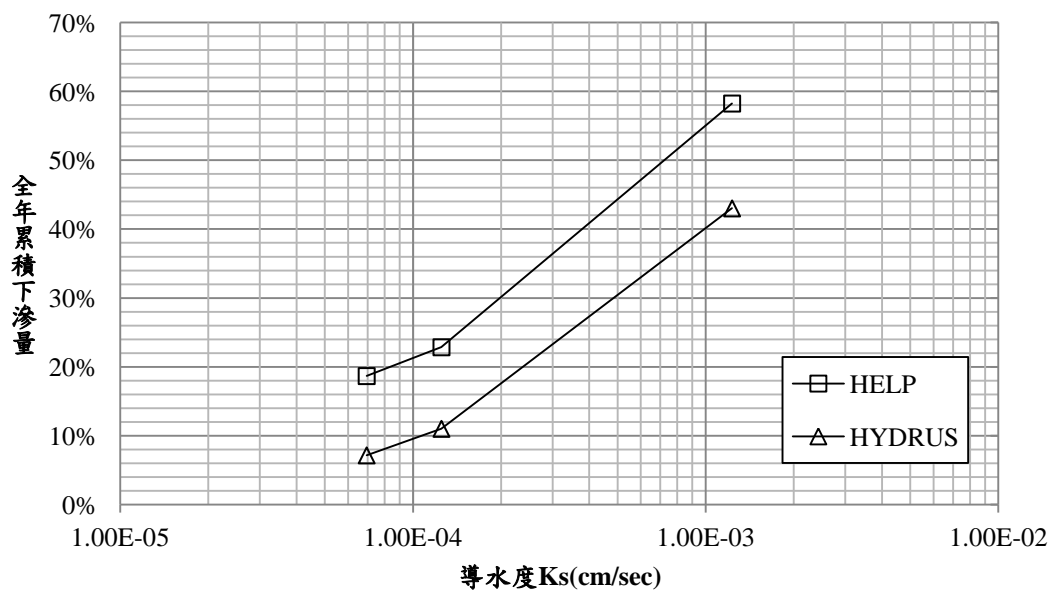


圖 4-14-b 不同導水度土壤在 1.5 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

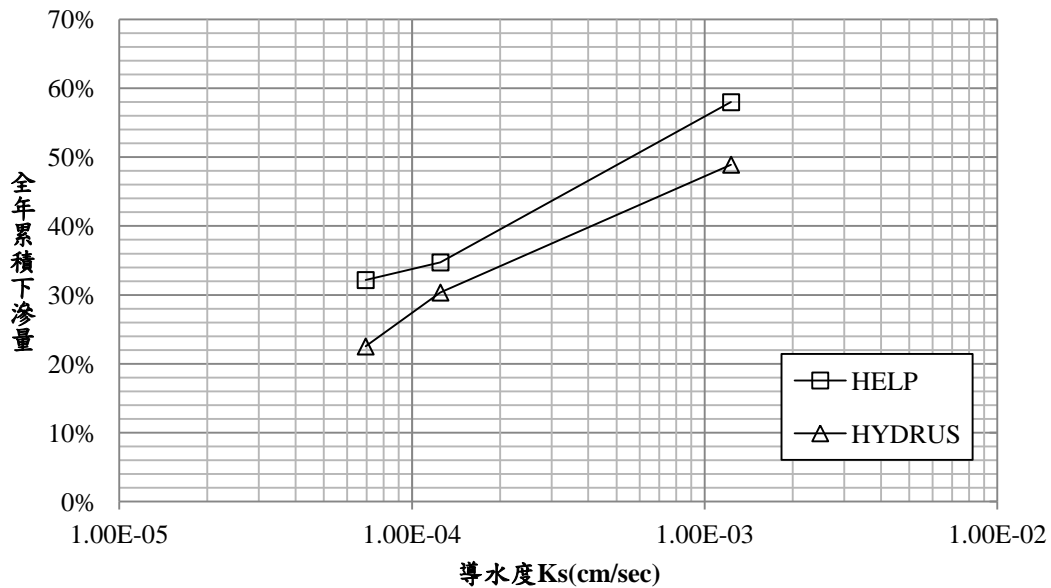


圖 4-14-c 不同導水度土壤在 1.5 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

#### 4.3.2.3 土壤導水度在土層厚度 2 m 對單日下滲量的影響

此部分將探討毛細阻隔層覆蓋類型以上層細顆粒層為砂土質壤土、粉土質壤土、粉土均為 1.5 m 的覆蓋層材料，下層粗顆粒層為砂土 0.5 m 的覆蓋層材料，分別在北部、中部、南部的氣候條件下，水流通過底層的全年累積下滲量。

綜合九項案例(表 4-10)模擬結果發現，毛細阻隔層細顆粒層的覆蓋材料使用粉土質壤土限制下滲量的效果比砂土質壤土限制下滲量的效果佳。在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式減少了 5.73 %、30.82 %、18.89 % 的累積下滲量，HYDRUS 模式減少了 28.37 %、32.31 %、20.41 % 的累積下滲量，可發現兩模式均顯示出將毛細阻隔層細顆粒層的覆蓋材料由砂土質壤土改為粉土質壤土時，減少累積下滲量的幅度相當可觀。若將細顆粒層覆蓋材料改為粉土時，在使用北部、中部、南部的氣候條件下，HELP 模式的累積下滲量分別為 21.35 %、19.58 %、33.14 %，HYDRUS 模式的累積下滲量分別為 6.30 %、6.05 %、18.77 %，由此發現在北部及中部的氣候條件下能將累積下滲量百分比控制在 10 % 以下。

結合案例(表 4-10)的模擬結果，在北部(圖 4-15-a)、中部(圖 4-15-b)、南部(圖 4-15-c)的氣候條件下，使用導水度愈低的土壤做為單一土層的覆蓋材料，能夠明顯減少累積通過底層的下滲量，增加土層厚度仍有減少下滲量百分比的趨勢。最後統整毛細阻隔層細顆粒覆蓋材料總共二十七種案例的模擬結果，可發現限制累積下滲量的最大關鍵仍在於不同導水度土壤( $K_s$ )的差異。

## Capillary Barriers

□HELP ■HYDRUS

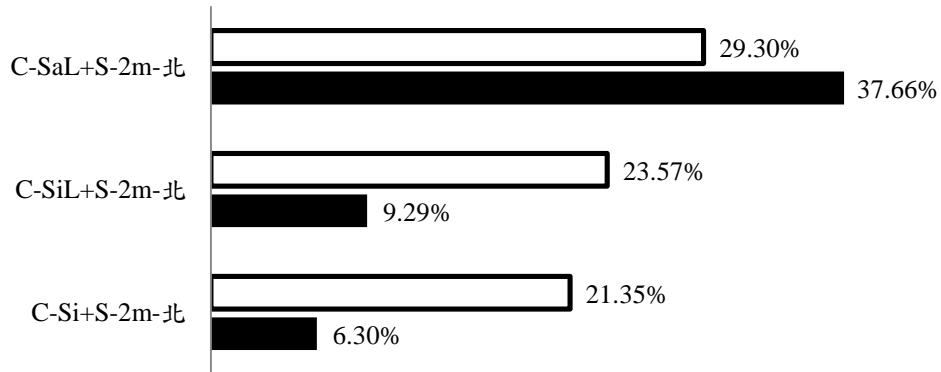


圖 4-15-a 不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(北部)

## Capillary Barriers

□HELP ■HYDRUS

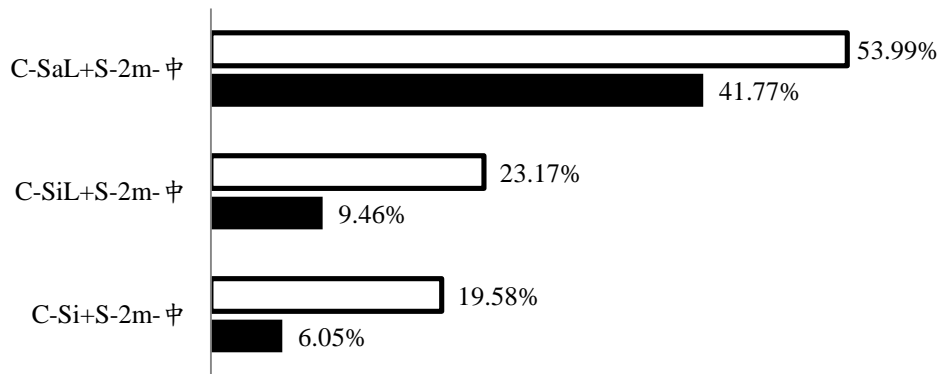


圖 4-15-b 不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(中部)

## Capillary Barriers

□HELP ■HYDRUS

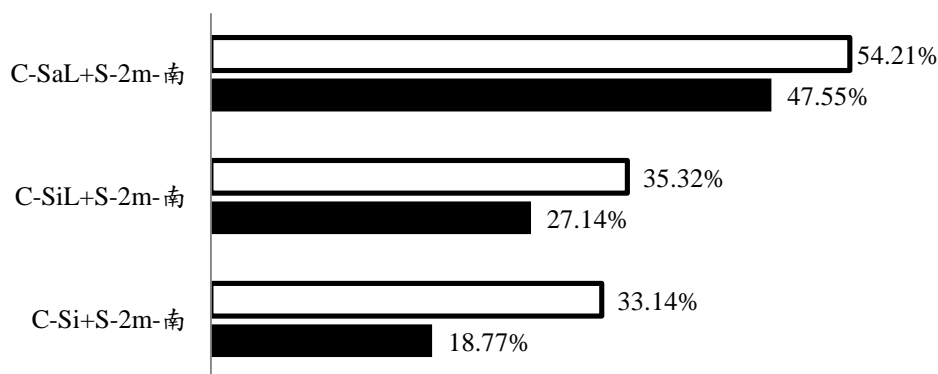


圖 4-15-c 不同導水度土壤厚度 2 m 下的全年累積下滲量百分比(南部)

表 4-10 毛細阻隔層類型在不同導水度土壤下厚度 2 m 的全年累積下滲量

案例名稱	Ks (cm/sec)	HELP (mm)	年下滲量 (%)	HYDRUS (mm)	年下滲量 (%)
C-(SaL+S)-2m-北	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	783.1	29.30 %	1006.4	37.66 %
C-(SiL+S)-2m-北	1.25x10 <sup>-4</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	630.0	23.57 %	248.4	9.29 %
C-(Si+S)-2m-北	6.94x10 <sup>-5</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	570.6	21.35 %	168.5	6.30 %
C-(SaL+S)-2m-中	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1313.5	53.99 %	1016.2	41.77 %
C-(SiL+S)-2m-中	1.25x10 <sup>-4</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	563.8	23.17 %	230.2	9.46 %
C-(Si+S)-2m-中	6.94x10 <sup>-5</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	476.4	19.58 %	147.1	6.05 %
C-(SaL+S)-2m-南	1.23x10 <sup>-3</sup> + 8.25x10 <sup>-3</sup>	1196.6	54.21 %	1049.5	47.55 %



C-(SiL+S)-2m-南	$1.25 \times 10^{-4}$ + $8.25 \times 10^{-3}$	779.7	35.32 %	599.1	27.14 %
C-(Si+S)-2m-南	$6.94 \times 10^{-5}$ + $8.25 \times 10^{-3}$	731.6	33.14 %	414.3	18.77 %

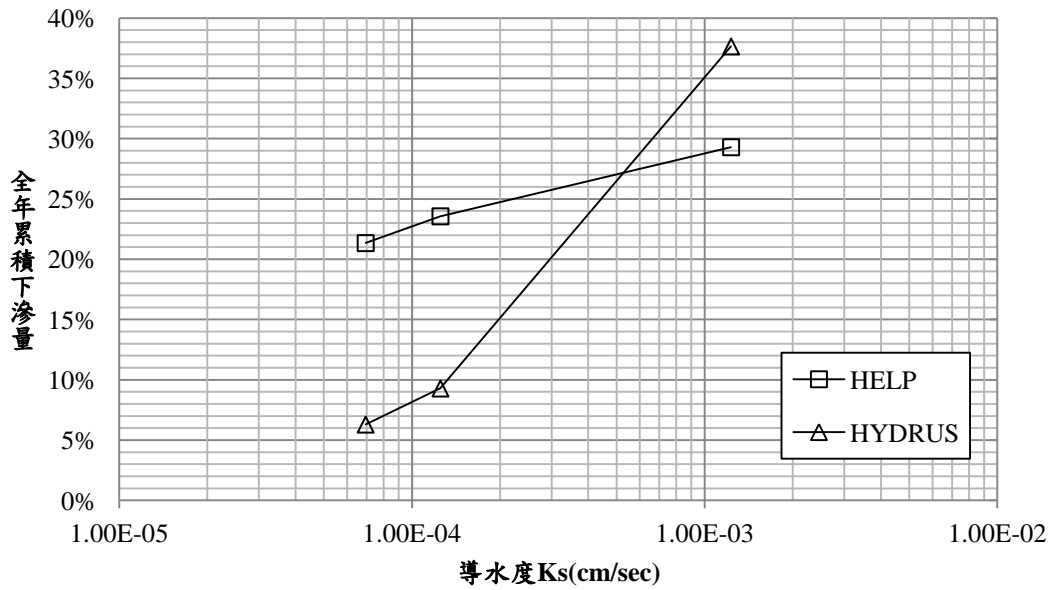


圖 4-16-a 不同導水度土壤在 2 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

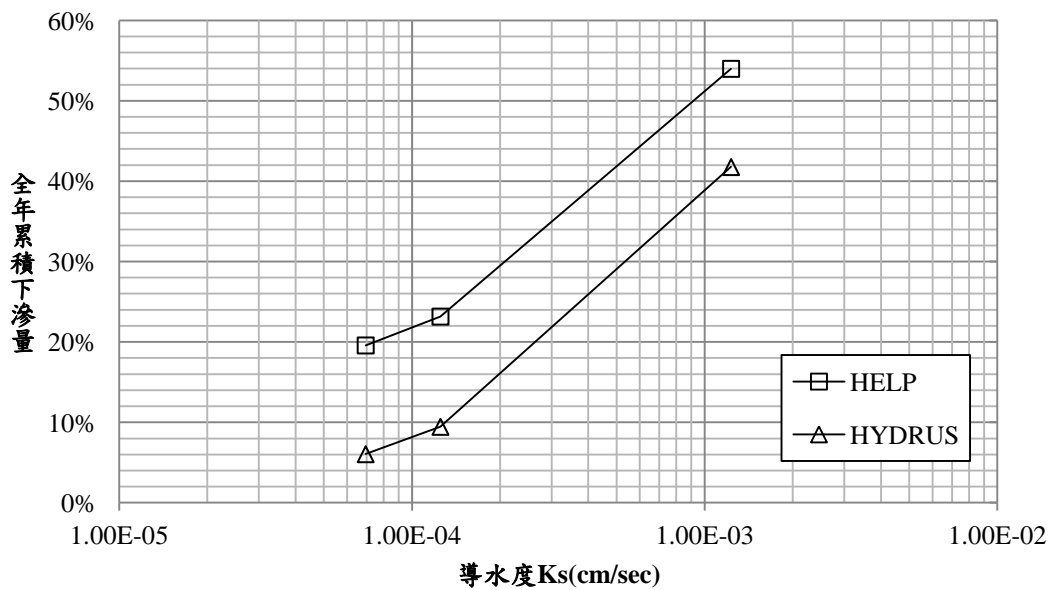


圖 4-16-b 不同導水度土壤在 2 m 下(中部)的累積下滲量百分比(比較  $K_s$ )

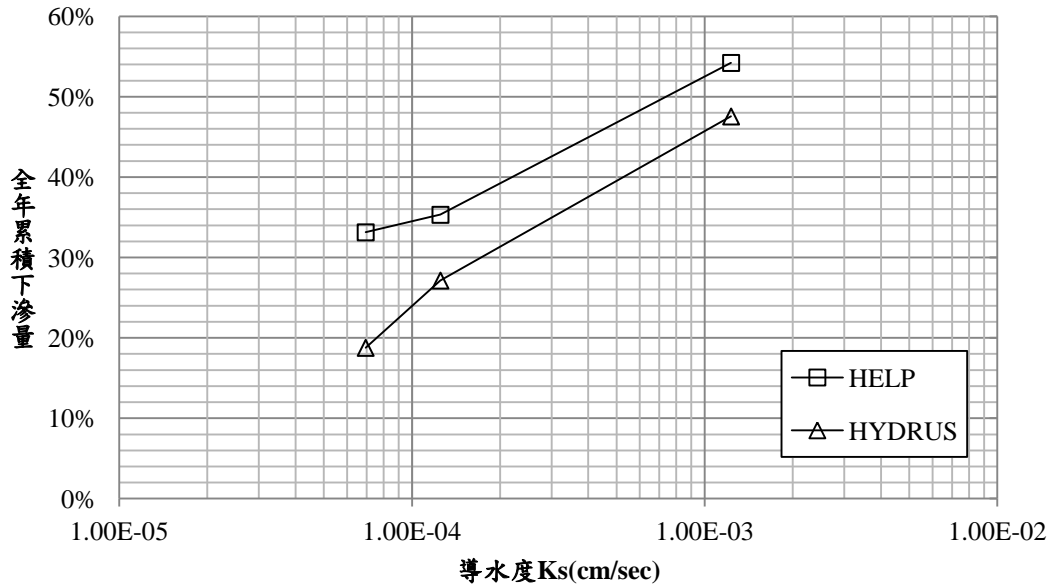


圖 4-16-c 不同導水度土壤在 2 m 下(南部)的累積下滲量百分比(比較 Ks)

#### 4.4 數值模擬綜合分析

將以上數值模擬結果針對單日下滲量及全年累積下滲量，以單一土層覆蓋及毛細阻隔層覆蓋兩種類型，砂土質壤土、粉土質壤土、粉土三種土壤種類，且以 1 m、1.5 m、2 m 為覆蓋層厚度，並考量北部(淡水)、中部(台中)、南部(台南)的氣候條件作以下的綜合分析。

針對單日下滲量百分比，在全年當中單場主要的降雨事件下，北部第一次顯著單日降雨量為 182 mm、第二次顯著單日降雨量為 236.5 mm；中部第一次顯著單日降雨量為 252.2 mm、第二次顯著單日降雨量為 169.2 mm；南部第一次顯著單日降雨量為 199 mm、第二次顯著單日降雨量為 102.5 mm。針對累積下滲量百分比，在全年當中北部(淡水)的年降雨量為 2672.6 mm，中部(台中)的年降雨量為 2432.9 mm，南部(台南)的年降雨量為 2207.3 mm。

在單一土層類型下，關鍵在於土層的厚度，藉由土壤的低導水度及土壤厚度的貯水能力，減少水流的下滲。可以從北部、中部、南部的模擬結果顯示，無論在單日下滲量百分比(表 4-2)、或全年累積下滲量百分比(表 4-11)，均顯示出只要土壤導水度愈低且增加土層厚度，最能有效減少下滲量。由 HYDRUS 模擬結果顯示，北部氣候條件使用粉土質壤土 1.5 m、中部氣候條件使用粉土質壤土 1.5 m，已能將全年累積下滲量百分比控制在 10% 以下，由於當年南部氣候條件降雨強度大且集中，使用粉土 2 m 僅能將全年累積下滲量百分比控制在 16.27%。在全年歷史氣象下，又以中部氣候條件的效果最好。

表 4-11 單一土層類型下全年降雨量的累積下滲量百分比

		土層類型	HELP	HYDRUS
單一土層	北部	粉土質壤土 1m	22.86 %	11.20 %
		粉土 1m	19.96 %	6.78 %
		粉土質壤土 1.5m	22.78 %	9.54 %
		粉土 1.5m	19.06 %	5.29 %
		粉土質壤土 2m	22.79 %	8.27 %
		粉土 2m	19.08 %	4.17 %
	中部	粉土質壤土 1m	22.23 %	11.45 %
		粉土 1m	17.86 %	7.50 %
		粉土質壤土 1.5m	21.60 %	9.52 %
		粉土 1.5m	17.54 %	5.86 %
		粉土質壤土 2m	21.61 %	8.01 %
		粉土 2m	17.50 %	4.23 %
	南部	粉土質壤土 1m	34.05 %	28.36 %
		粉土 1m	31.61 %	19.39 %
		粉土質壤土 1.5m	33.92 %	26.48 %
		粉土 1.5m	30.92 %	17.29 %
		粉土質壤土 2m	33.91 %	25.38 %
		粉土 2m	30.95 %	16.27 %

在毛細阻隔層類型下，關鍵在於細顆粒土層的厚度，由於結合單一土層的低導水度及土壤貯水能力的特性，在加上細顆粒與粗顆粒土層間的毛細作用力，使得下滲水被限制在粗顆粒層之上，以減少水流的下滲。可以從北部、中部、南部的模擬結果顯示，無論在單日下滲量百分比(表 4-7)、或全年累積下滲量百分比(表 4-12)，均顯示出只要土壤導水度愈低且增加土層厚度，最能有效減少下滲量。由 HYDRUS 模擬結果顯示，北部氣候條件使用細顆粒粉土 1 m 加粗顆粒砂土 0.5 m、中部氣候條件使用細顆粒粉土 1 m 加粗顆粒砂土 0.5 m，已能將全年累積下滲量百分比控制在 10 % 以下，由於當年南部氣候條件降雨強度大且集中，使用細顆粒粉土 1.5 m 加粗顆粒砂土 0.5 m 僅能將全年累積下滲量百分比控制在 18.77 %。在全年歷史氣象下，又以中部氣候條件的效果最好。

表 4-12 毛細阻隔層類型下全年降雨量的累積下滲量百分比

		細顆粒土層類型	HELP	HYDRUS
毛細阻隔層	北部	粉土質壤土 0.5m	37.18 %	16.61 %
		粉土 0.5m	35.65 %	10.68 %
		粉土質壤土 1m	23.12 %	10.97 %
		粉土 1m	18.35 %	7.93 %
		粉土質壤土 1.5m	23.57 %	9.29 %
		粉土 1.5m	21.35 %	6.30 %
	中部	粉土質壤土 0.5m	42.05 %	21.61 %
		粉土 0.5m	40.29 %	13.65 %
		粉土質壤土 1m	22.87 %	11.03 %
		粉土 1m	18.69 %	7.18 %
		粉土質壤土 1.5m	23.17 %	9.46 %
		粉土 1.5m	19.58 %	6.05 %
	南部	粉土質壤土 0.5m	49.35 %	33.50 %
		粉土 0.5m	47.65 %	23.22 %
		粉土質壤土 1m	34.73 %	30.36 %
		粉土 1m	32.17 %	22.53 %
		粉土質壤土 1.5m	35.32 %	27.14 %
		粉土 1.5m	33.14 %	18.77 %

## 第五章 結論與建議

綜合第四章的模擬結果，在北部(淡水)、中部(台中)、南部(台南)的氣候條件的結果顯示，單一土層類型 HELP 模式的北部及中部累積下滲量約在 17 % 至 19 %，南部累積下滲量約在 30 %；而 HYDRUS 模式的北部及中部累積下滲量約在 4 %，南部累積下滲量約在 16 %。毛細阻隔層類型 HELP 模式的北部及中部累積下滲量約在 18 %，南部累積下滲量約在 32 %；而 HYDRUS 模式的北部及中部累積下滲量約在 6 %，南部累積下滲量約在 18 %。針對顯著降雨事件的單日下滲量及年降雨量的累積下滲量，可歸納出以下結論與建議：

### 5.1 結論

1. 單一土層覆蓋類型，無論在北部、中部、南部的氣候條件下，均顯示出低導水度的土壤最能減少水流的累積下滲量，在同一種導水度的土壤下，增加土層厚度減少累積下滲量百分比的幅度愈明顯。
2. 毛細阻隔層覆蓋類型模擬結果顯示，低導水度的細顆粒層減少累積下滲量百分比的效果很好，而最大關鍵在於細顆粒層的厚度，土層愈厚保水性愈好，愈能減少水流下滲。
3. 降雨條件下，顯著降雨事件的單日下滲量百分比在單一土層類型及毛細阻隔層類型的下滲量百分比相近，主要影響因子在於當日降雨強度及累積降雨量的多寡。
4. 在數值模式方面，HELP 模式會高估累積下滲量，但在工程設計觀點上是保守的，所以在掩埋場的水文平衡計算上仍然被廣泛採用；而 HYDRUS-1D 模式比較符合真實的現象，但在工程設計觀點上仍需給予足夠的安全係數，故比較兩模式的分析結果做為設計的考量有其必要性。
5. 在大部分的模擬結果下顯示，單場降雨後入滲量與全年累積入滲量，大都低於 30 cm，因此對於封場後的掩埋場來說，原本按照法令要求，污水處理設施就應該持續運轉。以美國環保署 RCRA 為例，則要求至少 30 年。
6. 而本研究計算結果顯示，目前的入滲量很小，可使污水處理廠營運成本相當低。相當時日之後，廢棄物性質穩定，入滲水中各項需處理的物質濃度極低，污水處理廠幾乎不需要運作，也可確保排放水的水質符合法令要求。因此，本文中所提的覆蓋系統，目前已在台灣各地封場的掩埋場使用，而本文則可利用模式評估其有效性在台灣是可以符合掩埋場封場要求的。



## 5.2 建議

1. 由於 HELP 模式及 HYDRUS-1D 模式皆為一維的水文平衡模式及非飽和水流模式，若能進階使用二維或三維的數值模式精準度會更高且更能夠貼近真實解。
2. 愈低導水度的土壤及增加土層厚度能夠有效減少下滲量，但往往在面臨極端的降雨條件時，單場降雨強度較大的雨量以及連續降雨強度大的時間影響下，所產生的單日下滲量相當可觀，故必須審慎評估極端的降雨條件所帶來的影響。
3. 由於本研究以數值模擬的方式分析掩埋場覆蓋層底層的下滲量，若能加上現地試驗分別在北部地區、中部地區、南部地區的場址案例實驗結果進行比較，更能比較真實情況的下滲量結果。

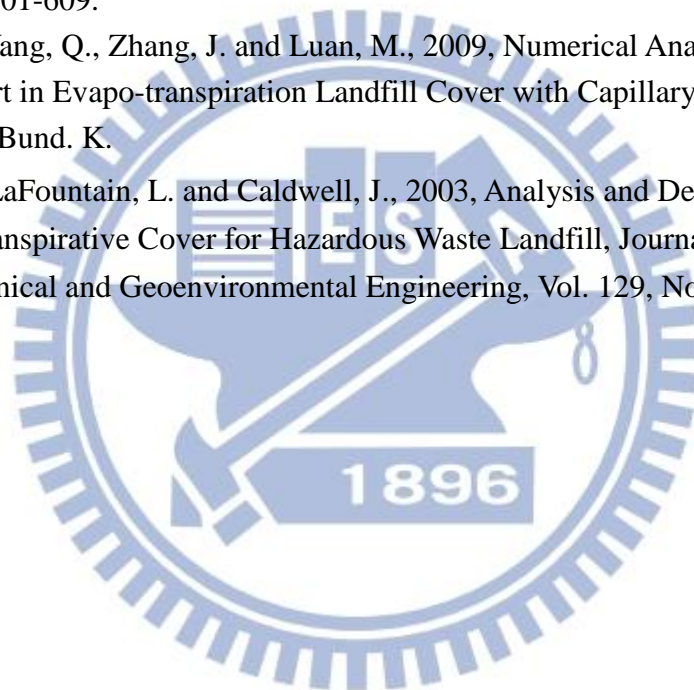


## 參考文獻

- 行政院衛生署，1985，「一般廢棄物衛生掩埋場設置規範」。
- 行政院環境保護署，2004，「台灣地區垃圾處理後續計畫」。
- 行政院環境保護署，2006，「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」。
- 李峰、繳錫云、李盼盼、翟鐸，2009，「田間土壤水分特徵曲線參數反演」，河海大學學報，第 37 卷，第 4 期，第 373 至 377 頁。
- 柳中明、吳明進、林淑華、陳盈蓁、楊胤庭、林瑋翔、曾于恆、陳正達，2008，「臺灣地區未來氣候變遷預估」，台灣大學全球變遷研究中心。
- 馬歡、楊大文、雷慧閩、蔡建峰、楠田哲也，2011，「Hydrus\_1D 模型在田間水循環規律分析中的應用及改進」，農業工程學報，第 27 卷，第 3 期，第 6 至 12 頁。
- 張文杰，2008，「填埋場騰發封頂系統中的水分運移分析」，岩石力學與工程學報，第 27 卷，第 3367 至 3373 頁。
- 許少華、劉建榮，2003，「Van Genuchten 土壤特性曲線參數對濕鋒模擬與暫態補注量之影響」，中國土木水利工程學刊，第 15 卷，第 1 期，第 211 至 218 頁。
- 單信瑜、姚振天，2004，「掩埋場覆蓋層阻隔材料透氣性研究」，土工技術雜誌，第 102 期，第 35 至 46 頁。
- 湯英、徐利崗、張紅玲、鮑子云，2011，「HYDRUS\_1D\_2D 在土壤水分入滲過程模擬中的應用」，安徽農業科學，第 39 卷，第 36 期，第 22390 至 22393 頁。
- 盧彥森，2010，「滲出水集排特性對掩埋場邊坡穩定度之影響」，國立交通大學，碩士論文。

- Abichou, T., Langoni, G., and Tawfiq, K., 2003, Assessment of Alternative Earthen Final Covers for Florida Landfills, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, University of Florida, Report #03-05.
- Benson, C., 2000, Introduction to Alternative Earthen Final Covers (AEFC's), Designing and Implementing Alternative Earthen Final Covers for Waste Containment Facilities, Section 1. Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin-Madison.
- Benson, C., and Pliska., R., 1996. Final Covers: HELP Needs Help From the Field. *Waste Age*, Vol. 27, No. 3, pp. 89-98.
- Carsel, R. F. and Parrish, R. S., 1988, Developing joint probability distributions of soil-water retention characteristics, *Water Resources Research*, Vol. 24, No.5, pp. 755-769.
- Hariato, T., 2008, Study On Innovative Multi-Layer Design of Landfill Cover Barrier Layer, A dissertation submitted to the Division of Engineering Systems and Technology, Graduate School of Science and Engineering, Saga University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering.
- Khire, M., Benson, C. and Bosscher, P., 1997, Water Balance Modeling of Earthen Final Covers. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engr.*, Vol. 123, No. 8, pp. 744 - 754.
- Koerner, R. and Daniel, D., 1997, Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- Morris, C. and Stormont, J., 1999, Parametric Study of Unsaturated Drainage Layers In A Capillary Barrier, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 12, pp. 1057-1605.
- Schroeder, P., Lloyd, C. and Zappi, P., 1994, The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model User's Guide for Version 3.0. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-94/168a, Cincinnati, OH.
- Stormont, J. and Morris, C., 1997, Unsaturated drainage layers for the diversion of infiltrating water. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 123(5), pp. 364-366.
- Tami, D., Rahardjo, H., Leong, E. and Fredlund, D., 2004, A Physical Model for Sloping Capillary Barriers, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 2.
- Travis, B. and Birdsell, K., 1991, TRACR3D: A model of flow and transport in porous media. LA-11798-M (UC-814), Los Alamos.
- U.S. Department of Energy, 2000, Alternative Landfill Cover, Innovative Technology Summary Report, DOE/EM-0558, Office of Environmental Management, Office of Science and Technology.
- USEPA, 2010, Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet, Online Database.

- USEPA, 2012, 40 CFR 264.117(a)(1) and 40 CFR 264.117 (a) (2) (i) & (ii).
- Von Maubeuge, K. and Eberle, M., 1998. Can geosynthetic clay liners be used on slopes to achieve long-term stability?. In: Proc. 3rd International Congress on Environmental Geotechnics. Lisbon, Portugal, pp. 375-380.
- Wilson, G., Albright, W., Gee, G., Fayer, M. and Ogan, B., 1999. Alternative cover assessment project phase I report. Rep. Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Contract No. 68-C5-0036, WA#14, U.S. EPA, Washington, D.C..
- Winkler, W., 1999, Thickness of Monolythic Covers in Arid and Semi-Arid Climates, MS Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- Woysner, M. and Yanful, E., 1995, Modelling and field measurements of water percolation through an experimental soil cover on mine tailings, Can. Geotech. J. 32, pp. 601-609.
- Yang, Q.-L., Yang, Q., Zhang, J. and Luan, M., 2009, Numerical Analysis of Moisture Transport in Evapo-transpiration Landfill Cover with Capillary Barrier, EJGE, Vol. 14, Bund. K.
- Zornberg, J., LaFountain, L. and Caldwell, J., 2003, Analysis and Design of Evapotranspirative Cover for Hazardous Waste Landfill, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 6, pp. 427-438.



# 附錄 A

## HELP 模式操作流程

### 1. 建立覆蓋層模型

- (a) 輸入土層厚度。
- (b) 選擇土壤種類。

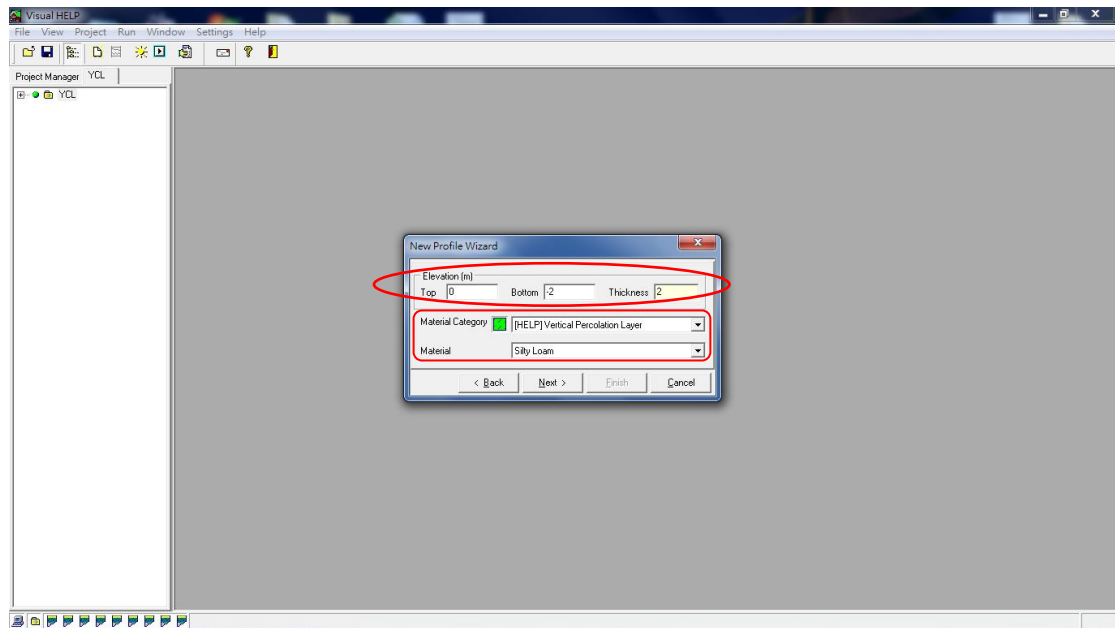


圖 A-1 建立覆蓋系統(HELP)

### 2. 設定剖面參數

- (a) 由模式自動計算逕流方法及初始水分。

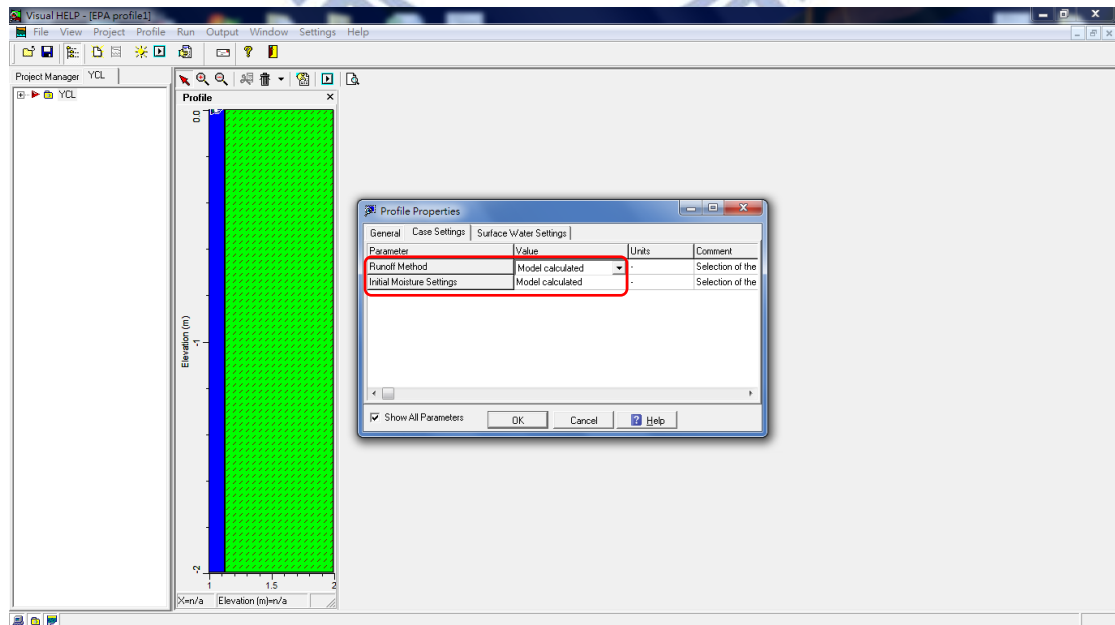


圖 A-2 設定剖面參數(HELP)



(b) 設定逕流面積及植生條件。

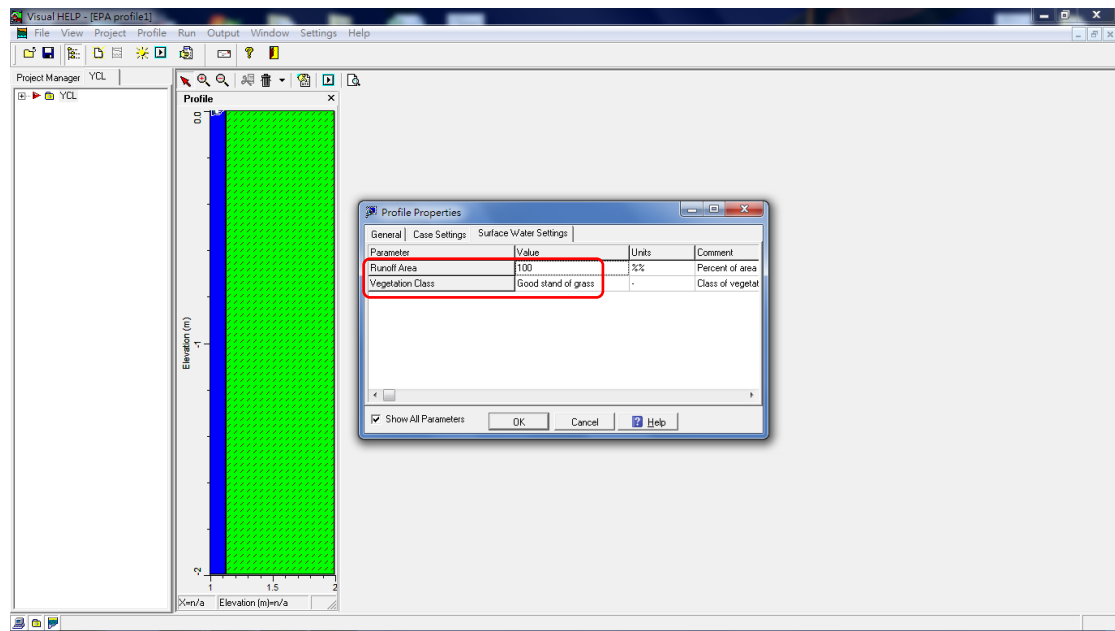
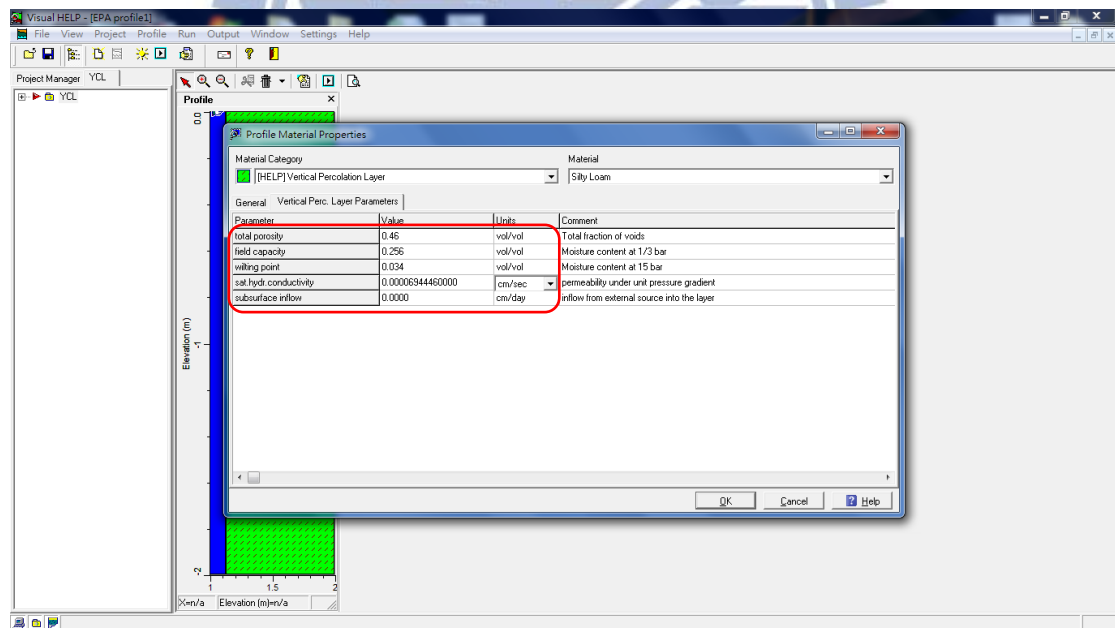


圖 A-3 設定剖面參數(HELP)

### 3. 控制土壤參數

(a) 控制含水量及飽和水力傳導係數。



A-4 控制土壤參數(HELP)

#### 4. 輸入歷史氣象資料

##### (a) 輸入歷史降雨量、太陽輻射量、溫度。

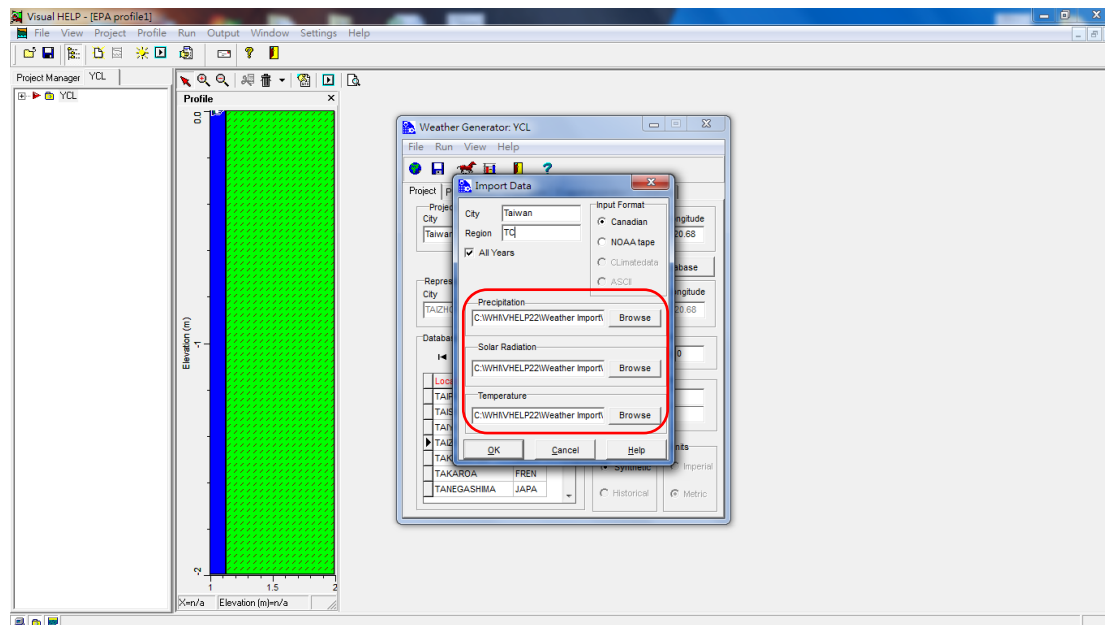


圖 A-5 輸入歷史氣象資料(HELP)

##### (b) 輸入蒸散區深度、最大葉面積指數、生長期時間、平均風速、四季溼度。

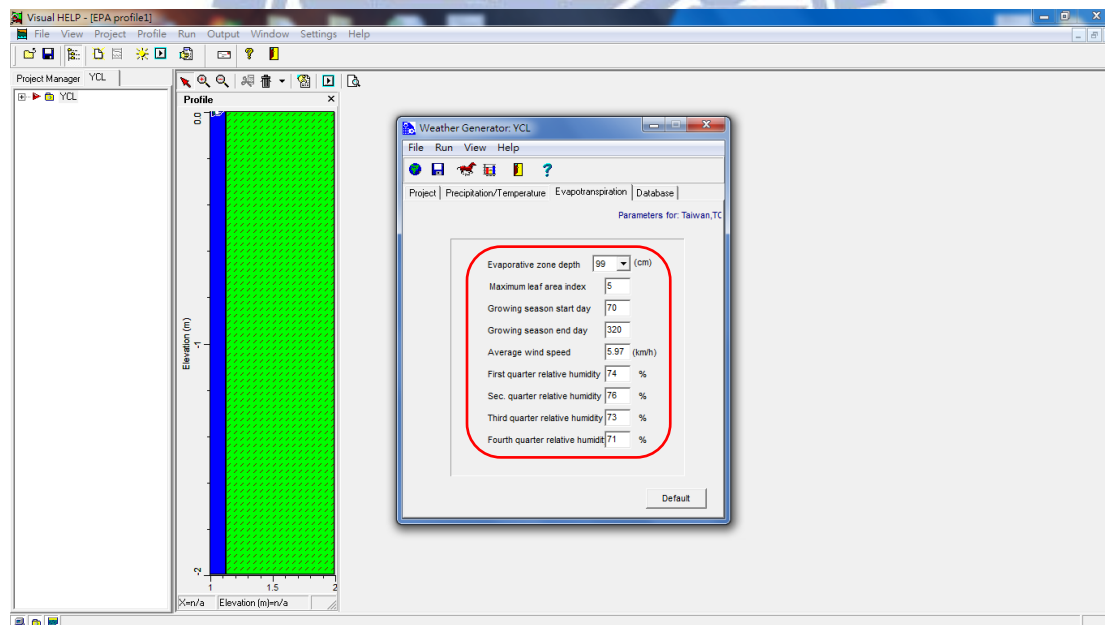


圖 A-6 輸入歷史氣象資料(HELP)

# HYDRUS-1D 模式操作流程

## 1. 前置流程及輸出資料

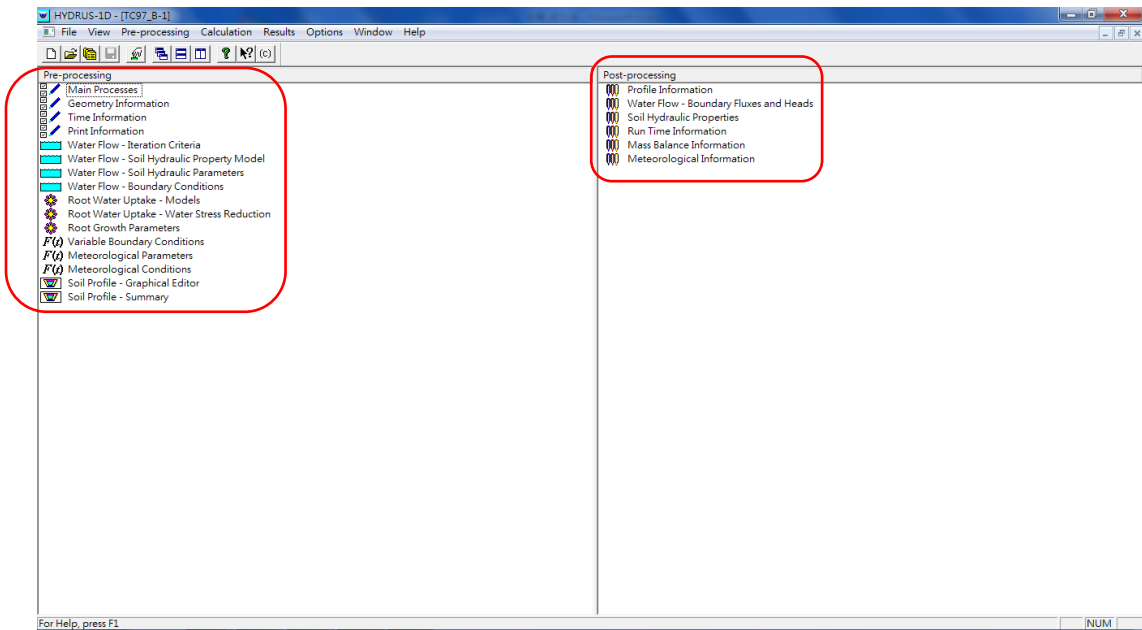


圖 A-7 HYDRUS-1D 模式使用介面

## 2. 選擇模擬項目

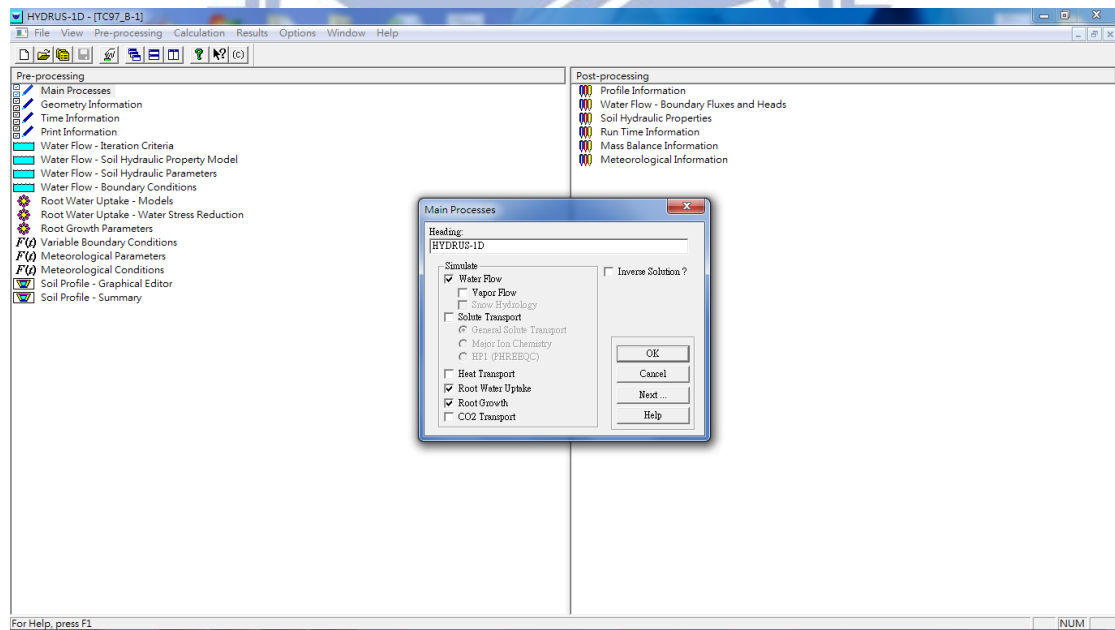


圖 A-8 模擬主要程序(HYDRYS-1D)

### 3. 建立覆蓋層剖面

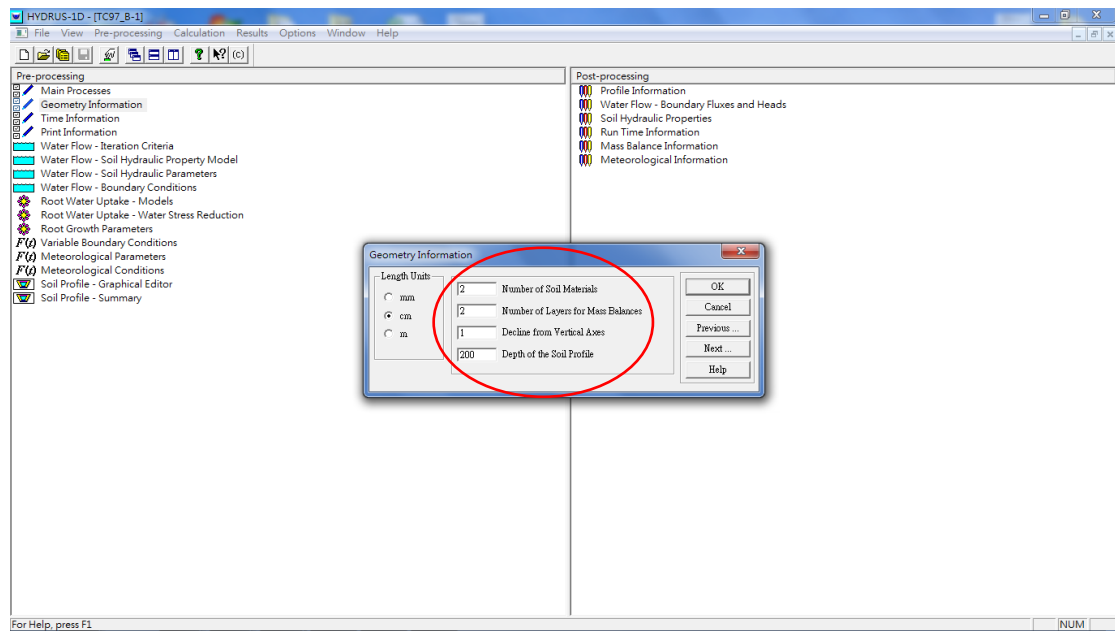


圖 A-9 建立覆蓋層剖面(HYDRYS-1D)

### 4. 設定模擬時間

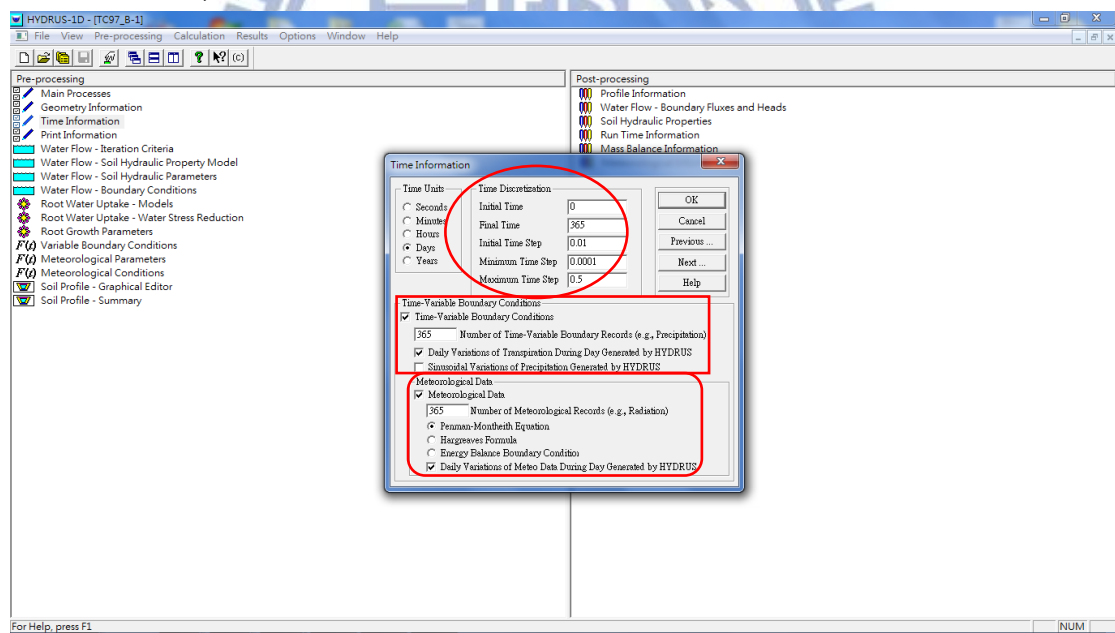


圖 A-10 設定模擬時間(HYDRYS-1D)

## 5. 選擇土壤參數

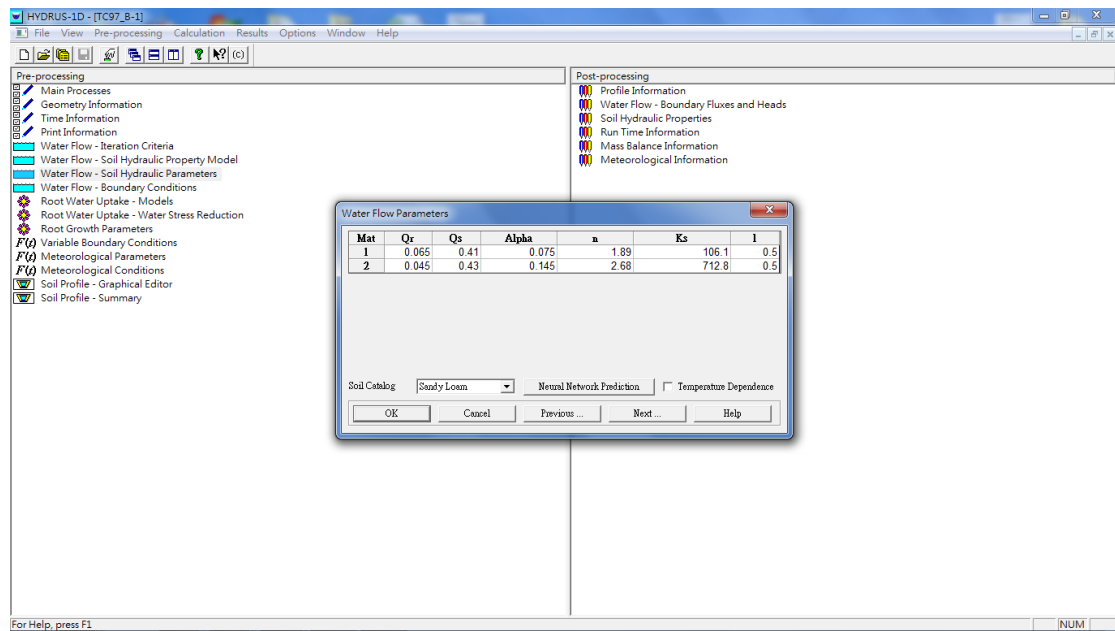


圖 A-11 選擇土壤參數(HYDRYS-1D)

## 6. 設定水流邊界條件

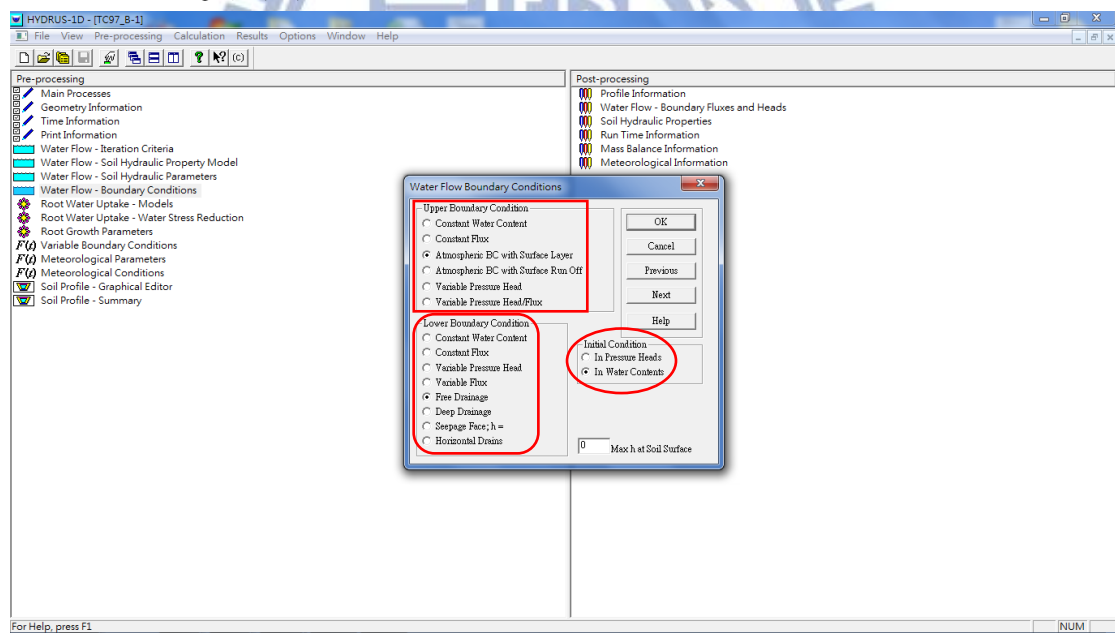


圖 A-12 設定水流邊界條件(HYDRYS-1D)



## 7. 選擇植物參數

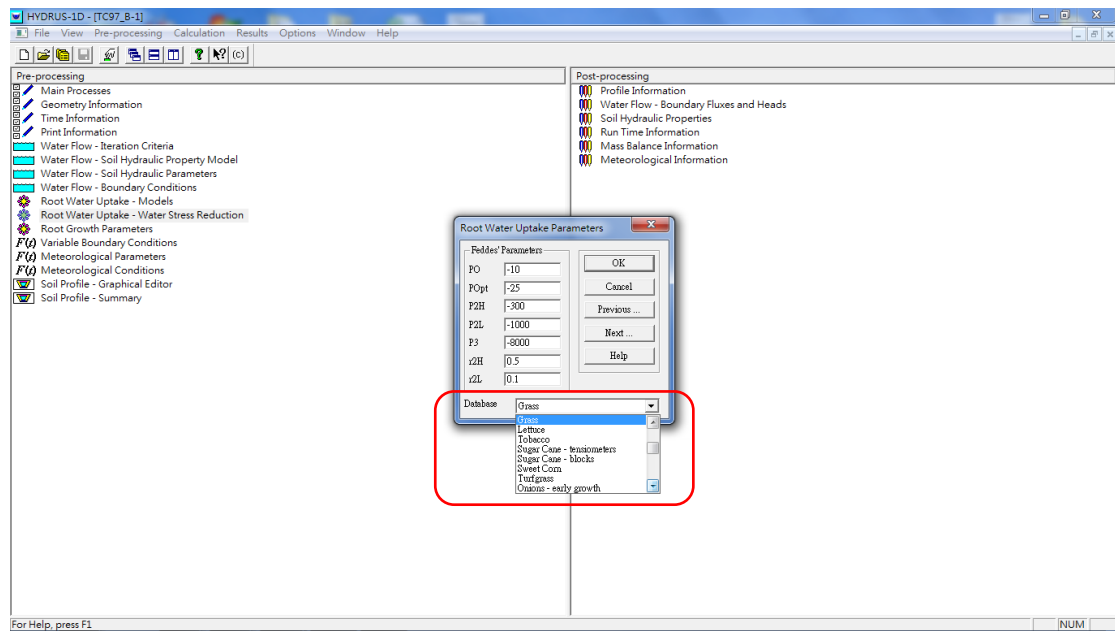


圖 A-13 選擇植物參數及植生條件(HYDRYS-1D)

## 8. 選擇植生條件

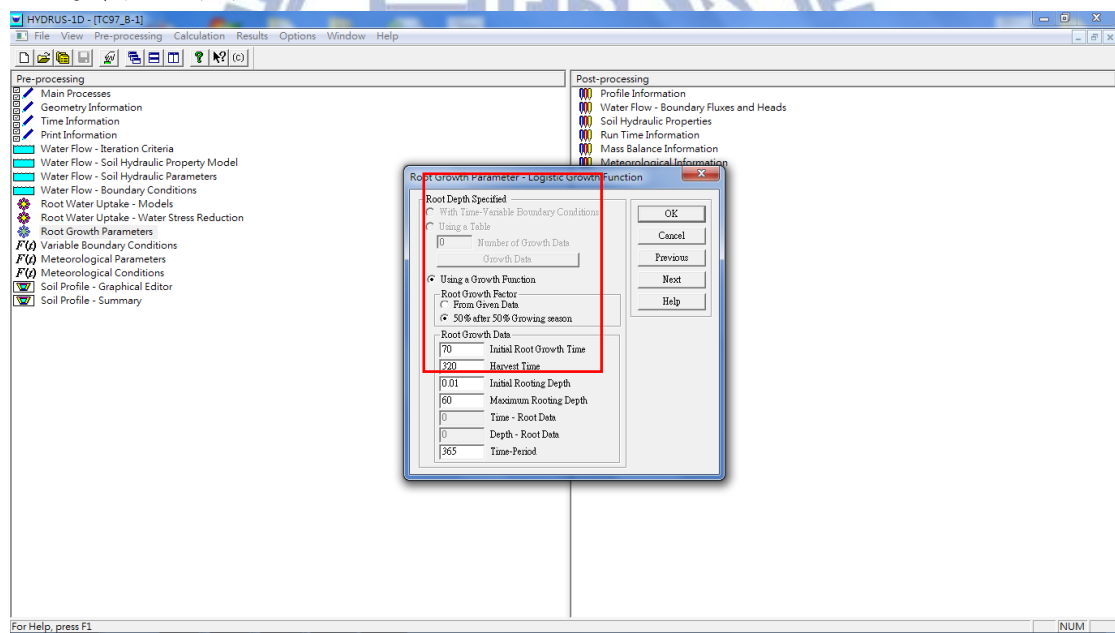


圖 A-14 選擇植物參數及植生條件(HYDRYS-1D)

## 9. 輸入歷史氣象資料

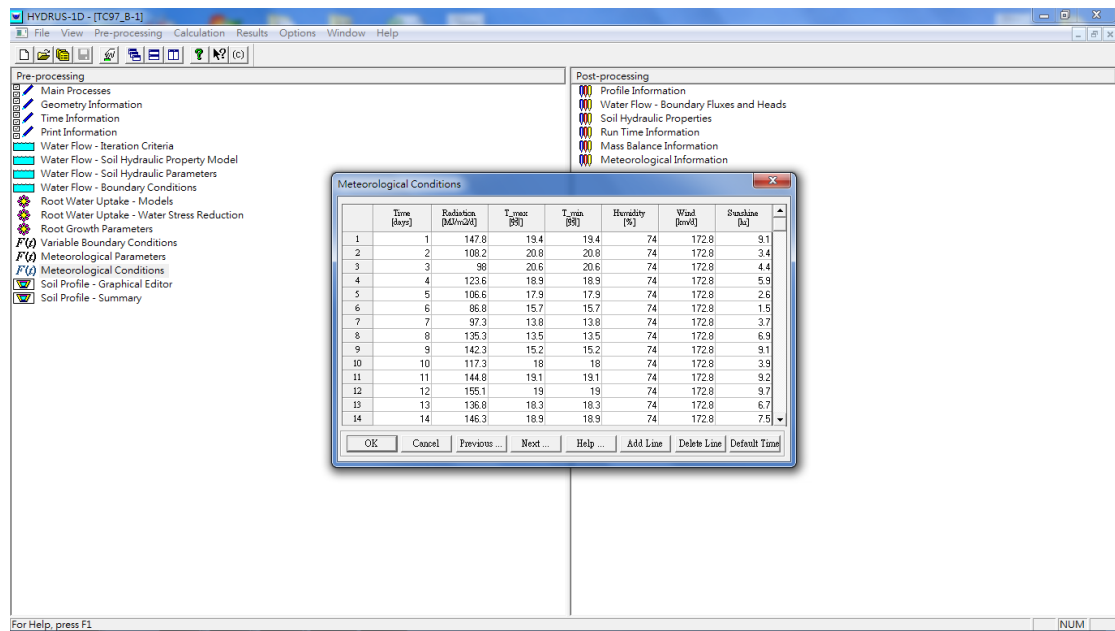


圖 A-15 輸入歷史氣象資料(HYDRYS-1D)

## 10. 設定土層網格數

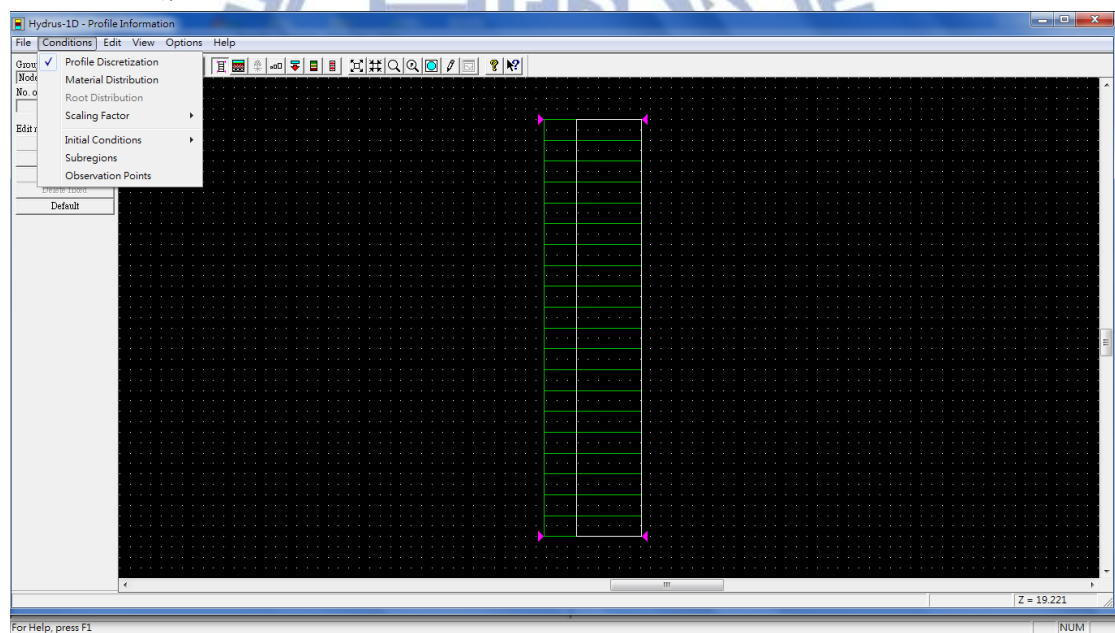


圖 A-16 編輯土壤剖面(HYDRYS-1D)

## 11. 設定土壤種類分層

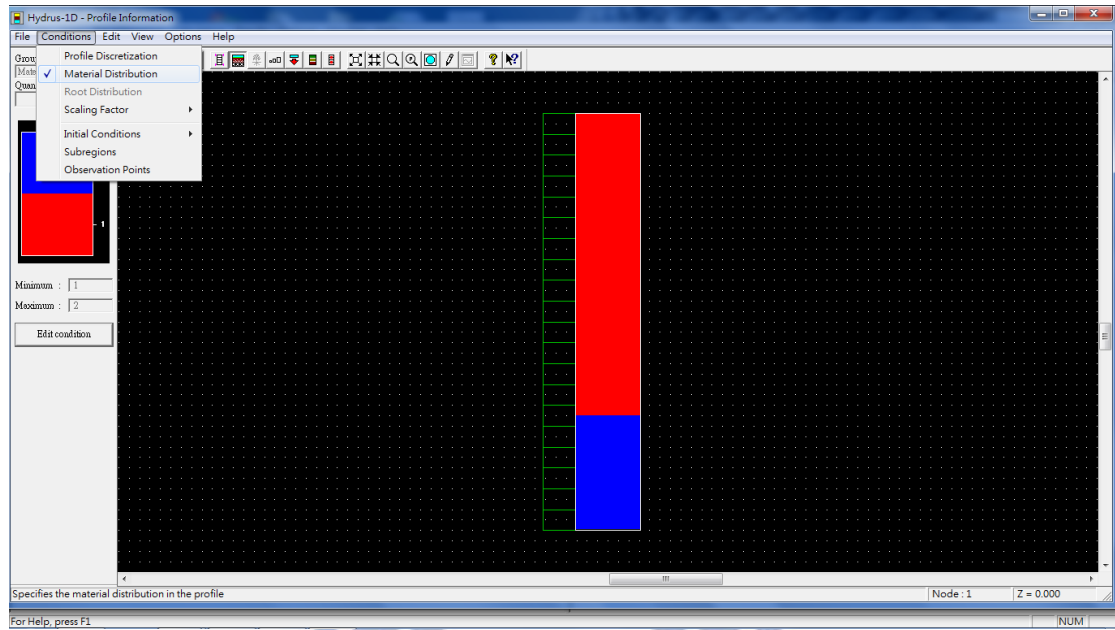


圖 A-17 編輯土壤剖面(HYDRYS-1D)

## 12. 設定初始含水量

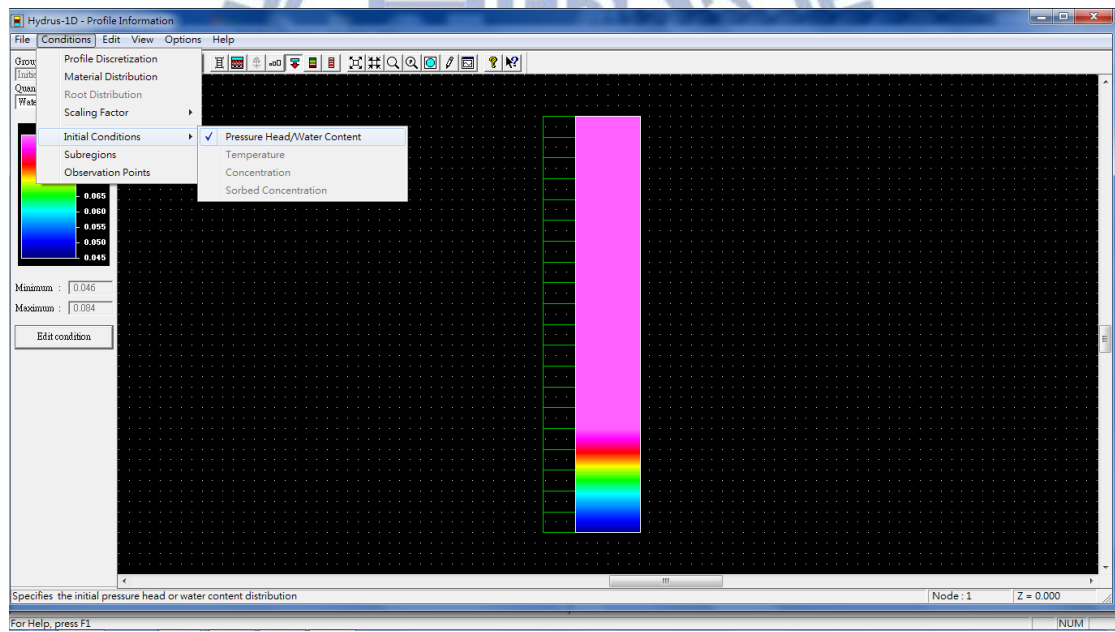


圖 A-18 編輯土壤剖面(HYDRYS-1D)