

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

臺西至麥寮地區地層下陷與地下水補注之研究

-子計畫二：臺西至麥寮地區地下水天然補注量之研究(V)

精簡報告

計畫編號：NSC89-2625-Z-002-016

計畫主持人：劉振宇 研究助理：陳世楷

執行單位：國立台灣大學農業工程學 研究所

一、研究目的

本子計畫主要針對台西至麥寮地區進行地下水天然補注量之推估。對於該區長期保持湛水之農漁用地進行入滲補注研究，包括入滲影響因子之探討與數學模擬，期能瞭解該區天然補注機制與量化潛在之地下水補注來源，俾提出可行之補注方案。

二、本研究對整合型計畫之貢獻

本子計畫主要針對台西至麥寮地區進行地下水天然補注量之研究。研究成果可分別提供子計畫一、三在建立地層下陷模型分析研究及人工補注研究上所需之淺層入滲水力環境與垂向地下水補注量化資料，對於規劃該區人工補注與減緩地層下陷佔有極重要之地位。

三、研究方法與步驟

本子計畫之研究方法主要可分為資料收集、現地量測、實驗室測定土壤特性曲線，並聯合運用非飽和層數值模擬及水收支平衡法，綜合分析地下水補注之數量與比例分配，以利掌握研究區域內之地下水流分佈。歷年來之主要研究工作為評估水田垂直與側向滲漏之分配比例及影響因子，以及乾田田面龜裂狀態下之入滲變化，以評估實施休耕期引水補注之可行性。相關入滲數學模擬包括以一維入滲模式SAWAH探討入滲影響因子，及以三維FEMWATER模擬水田側滲

流況及乾田田面龜裂狀態下之入滲變化，藉以分析確認水田入滲水分側滲因子及水田在湛水/乾田狀態下之入滲機制，模式簡介如下：

(一) 一維土壤-水平衡模式SAWAH

荷蘭農業大學利用差分形式數學架構，發展出一維土壤-水平衡模式 SAWAH (Simulation Algorithm for Water Flow in Aquic Habitats)(ten Berge, et. al., 1992)，由於具有模擬多層飽和及非飽和共存現象之地表水入滲情形，可供具有湛水之水稻田或埤塘計算入滲水量。SAWAH為一有限差分數值模式，可藉由區隔土壤剖面成數個計算區間 (compartment)分別計算不同深度之各個區間含水量與壓力水頭變化，以及區間界面之垂直水流通量，據此了解地表湛水深變化及真正進入地下水位面之水量。模式具有以下數點特性：

(1). 可模擬不同土層同時發生之飽和及非飽和流動。

(2). 模式輸入資料包括：

1. 土壤水分保持曲線函數。
2. 水力傳導係數曲線($k-\theta$, $k-h$)函數。
3. 外部邊界條件：灌溉水量、降雨量、蒸發散及地下水位等。

模式在計算時，會將所有飽和/非飽和交界面之壓力水頭設定為0，在每一時間段(time step)計算後均會重新計算此一交界面之位置。時間段之範圍為

0.0001 至 0.01 天。

(二) 三維地下水水流模式FEMWATER

本研究採用三維有限元素電腦模式 FEMWATER 係由 Lin et al. (1996) 所發展，並由 Brigham Young University (1996) 接受 US Army Engineer Waterways Experiment Station 資助將其納入 GMS(Groundwater Modeling System) 中，以處理飽和與非飽和的地層狀況中地下水水流之各種流動情形，並使用具親和力之資料輸入/輸出處理系統。而本研究主要用於推估水田入滲情況，FEMWATER 採用有限元素法與有限差分法，有限差分法應用在解不連續的時間網點，而有限元素法不只可提供空間上連續的解，處理非等向、異質性的界面，不受不規則邊界的影響，可在研究範圍的不同區塊內建立不同密度之網格。

四、具體成果

本計畫歷年主要成就為確定水田及魚塭入滲剖面，並以現地實驗方式，求取實驗田相關土壤/水力參數，提供研究區域相關入滲數學模擬之用，包括以一維入滲模式 SAWAH 探討入滲影響因子，及以三維 FEMWATER 模擬水田側滲流況及乾田田面龜裂狀態下之入滲變化，藉以分析確認水田入滲水分側滲因子及水田在湛水/乾田狀態下之入滲機制，並配合該區水利會灌溉及魚塭養殖方式與氣象水文條件，推估全區全年水田及魚塭入滲補注總量。最後則探討利用豐水期水田休耕時，利用多餘水量進行水田自然補注地下水之可行性。研究成果歷來已提供作為其他子計畫在人工補注及地盤下陷防治模擬所需之相關參數。並可以提供政府決策單位研擬水資源管理計劃所需，亦對其他從事相關研究提供完整之研究方法及步驟。

五、結論與建議

5.1 結論

本研究以探討研究區域內農漁用地入滲對地下水涵養補注之機制為主，以提供作為研擬增加地下水涵養補注可行方法之基本依據，在綜合運用現地試驗、一維 SAWAH 及三維 FEMWATER 數值模式後，可針對影響水田等農漁用地之入滲因子及可行之補注方案提出以下結論及建議：

1. 水田基本入滲受牛踏層拘限，在水稻栽培期間之灌溉入滲率偏低。魚塭則受養殖期間所投放之餌料及養殖水產之排泄物逐漸堆積，致入滲率偏低。
2. 模式推估研究區域內水田在正常灌溉下之年平均入滲量分別為台西鄉 155 萬 8 千立方公尺，麥寮鄉 454 萬 9 千立方公尺，合計兩鄉在每年第一期作（春作）時期，即 3~5 月期間約有 610 萬 8 千立方公尺之入滲量。
3. 由於水田在研究區域內之農漁用地中具有最高之入滲量，雖受期作等因素影響，全年中僅有約 3 個月左右之時間保持持續入滲，但未來若能配合水利單位近年來研擬之夏季水田蓄洪及補注地下水措施，將可大幅增加本區之入滲量。
4. 未經犁耙整地之水田在乾田時期因田面龜裂造成牛踏層之破壞，因入滲壓力水頭增加，使裂縫底緣入滲量大幅增加。在豪雨期間可吸納較經犁耙整地濕田狀態下水田更多之入滲水量。應為研究區域內地下水位觀測井地下水位在豪雨後迅速上升原因之一。
5. 大面積之水田入滲仍以垂向入滲為主。僅鄰近乾濕邊界處會有明顯之側滲發生，側滲率之大小依地下水位以上土壤層滲透性與乾田區土壤乾濕度而定，土層滲透性愈佳且乾田區土壤愈乾燥時，側滲率亦愈大，單一土層之側滲率甚至較水田區通過牛踏層之垂直入滲率為大。

6. 綜合實驗及模擬結果，可提出水田增加地下水補注功能之方法，依序為犁破牛踏層、超量灌溉及休耕期加高田埂蓄水，可作為農政單位推廣水田生態公益機能施政之參考。

5.2 建議

1. 本研究以進入水田牛踏層之入滲水流為探討對象，側向滲漏亦以牛踏層及以下土層之側滲為探討對象，對於現地田面高程差異，如能進一步考慮探討，將可估計地表水側向滲漏的流失量與土層因傾斜狀況對水分垂向或側向滲漏的影響。
2. 牛踏層在人為或自然狀態下破壞，均可大幅提升水田之入滲率，較之提升水位等其他措施有更佳之地下水補注效果。唯是否導致復耕時需耗用更多之灌溉水量及肥料，應進行長期觀測與評估，使水田所具有之生產、生態及生活等公益功能能獲得平衡發展。
3. 在考慮補注水量之來源，引水渠道系統之供水後，應以利用農田水利會轄區內之水田於休耕期間將多餘之水量分區分年引灌入田，如能一併配合加高田埂及犁破牛踏層，則補注效果更佳。
4. 部分休耕田區若能以政府補助方式，使其保持曬田乾裂狀態，亦有助於颱風豪雨期間吸納更多之降雨量。此外，未來實施休耕補注種水時，補注區應以大面積綿延之水田為主，以減少因補注水田因畸零分佈造成乾/濕邊界增加，減損補注效果。

參考文獻

1. 陳尚、李德滋, 1964, "以土壤水分當量推算水稻灌溉需水量之研究", 農工學報第10卷第4期, pp15-40。
2. 陳尚, 1980, "水稻田在水土資源保育上之功用與影響問題之研究", 農業用
水內部水量調整問題之研究, pp1101-1178, 農業工程研究中心。
3. 霍雨時, 1983, "層型土壤滲入現象之分析", 入滲率代數式的演進研討會, pp135-139, 經濟部水資源統一規劃委員會。
4. 曹以松, 林俊男等, 1987, 財團法人農業工程研究中心研究報告"集集共同引水計畫-人工補注技術及可行性實施計畫", pp52, pp70, pp99。
5. 萬鑫森 譯, 1991, "基礎土壤物理學", pp131-253。
6. 甘俊二、徐玉標、施嘉昌、曹以松, 1993, "灌溉排水原理", pp70-77。
7. 蔡明華, 1993, "水田灌溉公益效能剖析研究", 農委會, pp1-62。
8. 經濟部水利司, 1995, "台灣地區地下水觀測井網計畫81~83年度技術成果彙編", pp19, pp28, pp34-36。
9. 張良正, 1995, "區域性地下水觀測站網檢討(I)-濁水溪沖積扇觀測站井佈置檢討", pp13-25。
10. 張誠信, 1996, "雲林地區地下水水流之三維數值模擬", pp6-17。
11. 周曉雯, 1997, "雲林地區水稻田入滲量之評估", pp11-29。
12. 劉振宇, 1996, 1997, 水稻田生態環境保護規劃及示範(第一年)、(第二年)"水稻田對地下水補注功能評估分級", 行政院農業委員會。
13. 賈儀平, 劉振宇, 陳世楷, 1996, 1997, 1998"臺西至麥寮地區地下水天然補注量之研究(I)、(II)、(III)", 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
14. 台灣省彰化農田水利會, 水田及旱作灌溉用水計畫與實際取水量記錄表, 1993-1997。
15. 李振誥, 1997, "嘉南地區水稻田灌溉對地下水補注影響之評估", 第二屆地下水資源及水質保護研討會論文集, pp473-479。

16. 葉一隆, 1998, "推廣水田生態環境保護及地下水涵養補注計畫:水稻田蓄水成效評估與提昇措施子計畫(一)", 水田超量灌溉蓄水之基本水文資料觀測與建檔(第二次工作會報書面資料), 國立屏東科技大學。
17. Driessen, P.M., 1986, "The Water Balance of the Soil. "In:H.van Keulen and J. Wolf Eds. , Modeling of Agricultural Production : weather , soil and crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp76-116.
18. Wopereis,M.C.S.et al.,1994,"Hydraulic resistance in puddled rice field : measurement and effects on water movement. "Soil Tillage Res., 24: pp199-209.
19. Wopereis,M.C.S. et al.,1994,"Hydraulic resistance in flooded rice field.(I) Validation of the soil-water balance model SAWAH." Agricultural Water Management, 26:pp277-289.
20. Wopereis,M.C.S. et al.,1994,"Hydraulic resistance in flooded rice field. (II) Percolation and seepage losses." Agricultural Water Management, 26:pp291-304.
21. BYU and Department of Defense, 1995, GMS Reference Manual : Groundwater Modeling System, Brigham Young University Engineer Computer Graphics Laboratory
22. BYU and Department of Defense, 1995, GMS Tutorials:Groundwater Modeling System, Brigham Young University Engineer Computer Graphics Laboratory
23. G.T. Yeh , J.R. Cheng , H.P. Cheng and Norman L. Jones, 1995 , FEMWATER USERS' Manual : A three-dimensional Finite Element computer Model for simulating density driven flow and transport : the Hydraulic Laboratory of the US Army Engineer Waterways Experiment Station.
24. Thomas G. Lane, 1996, "ArcView Network Analyst",pp1-17 。

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

地層下陷與地下水補注研究-臺西至麥寮地區 Land Subsidence and Recharge of Ground Water at Tai-Shi and Mai-lau

子計畫二：臺西至麥寮地區地下水天然補注量之研究(V)

Study the Amount of Groundwater Natural
Recharge from Tai-Shi to Mai-Lau (V)

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC89-2625-Z-002-016

執行期間：88年8月1日至89年7月31日

整合型計畫：總計畫主持人：林美玲
子計畫主持人：劉振宇

處理方式：可立即對外提供參考
一年後可對外提供參考
兩年後可對外提供參考
(必要時，本會得展延發表時限)

執行單位：國立台灣大學農業工程學系
中華民國 89 年 7 月 31 日

謝 誌

本計畫係由國科會支助 N S C 89-2625-Z-002-016 之計畫，本計畫得以順利完成除感謝本所林俊男教授鼎力協助並提供構思外，並感謝經濟部水資源局鄭立新博士、博士研究生張誠信等之協助，特此申謝。

摘要

本計畫目的在於推求出台西至麥寮地區之天然補注量，並明瞭不同土地利用型態之入滲特性，以提供地下水資源規劃決策及評估所需之依據。本計畫藉由彰化田中試驗田區之土壤物理特性及水力傳導係數之量測數據，作為一維SAWAH及三維地下水數值模式FEMWATER模擬試驗田區之地下水入滲，側流及推估地下水有效補注量之依據，

模式推估年水田平均入滲量分別為台西鄉155萬8千立方公尺，麥寮鄉454萬9千立方公尺，合計兩鄉在每年第一期作（春作）時期，即3~5月期間約有610萬8千立方公尺之入滲量。由於水田在此區各種農/漁土地利用型態中具有最高之入滲率。模式模擬結果亦顯示區域性水田入滲以垂向運動為主，側滲則明顯發生於乾濕邊界區，側滲比例隨著乾濕邊界長度、水田湛水面積及初始土壤水分含量不同而改變。模擬結果亦顯示乾田時期之水田因田面乾裂，致牛踏層遭受破壞，且入滲壓力水頭增加，造成入滲率之大幅提昇。研究成果有助於瞭解水田入滲至地下水之移動機制，垂直流與水平側向流動過程。由於台西麥寮地區之水田具有完整之引水渠道，未來若能配合水利單位近年來研擬之夏季水田蓄洪及補注地下水措施，將是大幅增加本區地下水補注量之可行方式。

Abstract

The purpose of the study is to quantity the amount of annual recharge in the area from Tai-shi to Mai-lau. The result will be useful to the government for planning and management of groundwater resources. The study has established the relationship between the lateral and vertical percolation in paddy field, assessed the potential methods of increasing the ground water recharge from the paddy field. The data of soil characteristics and hydraulic parameters obtained from Ten-Chung flooded paddy field are used for the simulation model. The 1-D SAWAH and 3-D model FEMWATER are adopted to simulate infiltration and groundwater recharge in paddy field.

According to the simulation results, the paddy field remains the highest infiltration rate than the other landuse patterns, its infiltration capacity is restricted by the hardpan. Though the irrigation/infiltration is just taken place from March to May in a year , the annual amount of irrigation water infiltrating through hardpan is 1,558,000 cubic meters in Tai-Shi and 4,549,000 cubic meters in Mai-Lau. Simulation results also show that the movement of infiltration water is mainly vertically downward in most area for regional flooded paddy field, the lateral movement is obviously occur on the wet to dry boundary. The ratio of lateral seepage depend on the length of wet to dry boundary, the area of flooded paddy field, and the different initial water content in flooded/dry farm soils. The cracks developed when paddy field in drainage condition will obviously increase the infiltration rate because of the breakage of hard pan. It suggests that the usage of these paddy field farms and its irrigation/conduit system is a feasible way in increasing the amount of recharge and flood control on summer times.

目 錄

謝誌	i
中文摘要	ii
英文摘要	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	vii
第一章、前言	1
1.1 緒論	1
1.2 研究目的	2
1.2 研究方法及進行步驟	3
第二章、研究區域入滲環境	5
2.1 研究區域概述	5
2.2 土地利用與灌溉/用水情形	7
2.3 引水渠道利用現況	9
第三章、模式理論與數值方法	11
3.1 水田入滲水流數學模式基本假設	12
3.2 水田一維垂直入滲模式	12
3.2.1 飽和土壤中水流	14
3.2.2 非飽和土壤中水流	15
3.2.3 母體通量位能	17

3.3 三維地下水水流動模式理論數值方法	20
3.3.1 流體控制方程式.....	20
3.3.2 數值方法	23
3.3.3 GMS 模式模擬流程	27
第四章、入滲模式建立及分析	30
4.1 實驗田區概述	30
4.2 入滲模擬分析側向滲漏模擬	31
4.2.1 影響水田垂向入滲補注因子探討.....	31
4.2.2 台西麥寮地區入滲量之推估	34
4.2.3 試驗田區模擬	36
4.2.4 實驗及模擬結果.....	44
第五章、綜合討論	49
5.1 水田有效補注量分析及補注區規劃原則.....	49
5.2 水田超量灌溉及休耕期水田蓄水之討論.....	52
5.3 台西麥寮地區以水田補注地下水之可行性探討	55
第六章、結論與建議.....	59
6.1 結論	59
6.2 建議	60
參考文獻	62

圖 目 錄

圖 2.1	台西至麥寮鄉位置圖	6
圖 3.1	GMS 模式模擬流程圖	29
圖 4.1	一維 SAWAH 水田入滲數值模擬示意圖	32
圖 4.2	田中實驗田區坵塊配置圖	39
圖 4.3	水田區、乾濕邊界區及乾田區三區示意圖	40
圖 4.4	田中地區模擬區域立體模型圖	41
圖 4.5	田中地區模擬區域地層剖面圖	41
圖 4.6	裂縫位置與劃分格網之平面示意圖	38
圖 4.7	裂縫模擬區域之立體示意圖	39

表 目 錄

表 2.1 雲林縣台西及麥寮兩鄉農漁用地使用情形	8
表 2.2 雲林農田水利會台西及麥寮兩鄉水田灌溉情形	8
表 4.1 入滲補注因素探討之各種土壤/水力條件組合	33
表 4.2 各種土壤/水力條件組合對應之基本入滲率、30 天內累積入滲量、土壤水分平衡收納水量及通過底層界面淨通量	33
表 4.3 台西及麥寮兩鄉水田區域入滲總量推估	35
表 4.4 彰化田中地區實驗田土壤分層表	37
表 4.5 入滲模擬情況比較表	46

第一章、前言

1.1 緒論

台灣西部沿海地區，人口密集，工商發展快速，地面上水無法滿足用水量之需求，各界乃競相開發地下水源，由於大量且過度集中之開採，造成該區地下水位大幅下降、海水入侵、水質鹽化與地盤下陷等後遺症一一浮現，部分地區低於海平面，每遇豪雨則因排水不良氾濫成災，造成人民生命財產重大損失，為求保持國內經濟繼續發展，如何合理的有效利用水資源，減緩沿海地區地盤下陷國土流失，是必須解決的問題。雲林沿海地區由台西至麥寮目前正積極規劃為離島工業特區，包括台塑六輕、大鋼廠、發電廠、境外航運中心都將設置於此，而該區不僅地質層砂泥交錯複雜，亦是地下水超抽地盤下陷最嚴重的地區。故本整合計畫乃選擇上述地區作為研究對象，希望藉由理論之探討、實驗之執行、區域特性模式之模擬，以及新技術之開發，提出具體地盤下陷之預測模式及防治策略，以達到國土保育、水資源永續利用之目的。

本子計畫主要是針對雲林沿海台西至麥寮地區砂泥互層地下水流動進行深入之調查、試驗、分析及模擬研究，並著重於水田補注機制之探討、補注量之推估、利用實驗田區之

現地量測、實驗室測定土壤特性曲線，結合數學模式之應用，評估國內相關經驗公式之適用性，並將推估所得之入滲量提供其他子計畫應用於評估地下水水位變化對該地區地盤下陷之影響。

對於佔該區廣大面積之農業土地利用形態而言，不僅是該區天然降雨補注入滲地下水之管道，原先農業工程界所認定之灌溉用水滲漏損失亦提供了可觀之補注量。在此條件下，本計畫乃廣泛收集評估國內外相關研究，以水田土壤/水力條件結合該區天然氣象因子探討垂直飽和/非飽和流動機制，作為推估入滲補注量之基礎。並進而推廣至不同土地使用型態之入滲推估，以建立本土化之地下水補注模式，未來亦可經由總計劃之整合，利用地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)對具有空間分佈特性之入滲資料及入滲計算結果經由處理、分析及整合，協助掌握地理區位及地下水補注區位間之關係，提供地下水資源規劃更為有效率之決策與評估。

1.2 研究目的

本研究第一年度之水田入滲研究係以有限差分法數值模式SAWAH，對水稻田的垂直入滲做一維的模擬。第二年度則以第一年度研究成果為基礎，配合台西及麥寮兩鄰近地區實驗田區較為詳盡之土壤/水力及灌排、氣象水文資料之收集分析，並以實驗田水收支平衡計算所得水稻生長期間之入滲

量變化，對數學模式及相關經驗公式進行驗證。然後進行兩鄉鎮區域性水田入滲量之推估計算。第三年度除參與實驗田區之入滲量測及土壤/水力資料收集分析外，並引進三維數學模式探討水田垂向入滲與側向滲漏之分配比例，對本區水田之垂向入滲補注量進行更精確之推估。第四年度則以模式分析探討增加農漁用地入滲能力之可行辦法，包括超量灌溉、休耕期之補注、水田在曬田時期乾裂時之入滲補注情形等方式，本年度則綜合整理前四年之研究成果，歸納水田、魚塭等作為補注池之可行性及其補注效益，並提出相關建議。希冀經過本計畫之研究，能建立計劃區域內本土化之地下水補注模式，增進對地下水補注在邊界、數量與機制上之認知及地下水水流分佈，並提供作為該區地下水水位下陷對地盤下陷推估之參考。

1.3 研究方法及進行步驟：

本研究採取之區域性地下水水流之研究方法與步驟，主要可分為資料收集、現地量測、實驗室測定土壤特性曲線，並聯合運用非飽和層數值模擬及水收支平衡法，綜合分析地下水補注之數量與比例分配，並將所得結果反饋至已建立之地下水數學模式中，進行參數驗證，以掌握卻確切之地下水水流分佈。前四年度已分別完成資料收集與水田入滲機制數學理論之分析探討、數學模式驗證與區域入滲量推估以及三維數學模式FEMWATER之驗證，並評估水田垂直與側向滲漏之分

配比例，並藉由模式模擬，探討不同土地利用型態入滲補注能力差異；並以模式分析探討增加農漁用地入滲能力之可行辦法，包括超量灌溉、休耕期之補注、水田在曬田時期，田面乾裂後之入滲補注能力等方式，並從考慮側滲因子之有效補注量評估進行水田作為補注池之工程規劃，。

本年度採用之三維有限元素地下水水流數學模式FEMWATER係由Yeh(1996)所發展，並由Brigham Young University接受US Army Engineer Waterways Experiment Station資助將其納入GMS(Groundwater Modeling System)中，以處理飽和與非飽和的地層狀況中地下水水流之各種流動情形，並使用具親和力之資料輸入/輸出處理系統GMS，以避免在模式模擬過程中產生不必要之人為疏失。

第二章 研究區域入滲環境

2.1 研究區域概述

本計畫研究區域位於台灣中部雲林縣之沿岸地帶，其範圍東以崙背、東勢鄉為界，西臨台灣海峽，北起濁水溪，南至舊虎尾溪(圖 4.1)。涵蓋面積約為 154 平方公里，全區域地形以平原為主。在氣象水文方面，本區屬亞熱帶氣候，平均年雨量約為 1100mm，但是降雨對於時間上分佈極不平均，夏、秋兩季降雨量約佔年雨量之 80%，且沿海地區蒸發量大。雲林大部份地區地形平坦，無可供蓄水之水庫，地面上分布許多河川，主要河川為濁水溪及新、舊虎尾溪等。目前該區之用水標的，可分為灌溉用水、養殖用水、工業用水及公共用水，以灌溉用水而言，區內農業興盛，為本省重要農業區之一，水利會灌溉面積廣佈，除由各河川引用地面水源，另鑿有地下水井汲取地下水使用，以補充地面水之不足。以養殖用水而言，近年來本區域養殖漁業興盛，在沿海地區處處可見養殖魚塭，其供水來源是藉由大量抽取地下水，所以在雲林沿海地區包括麥寮、台西、四湖、口湖、水林等鄉鎮，造成地下水位逐年下降及地層下陷之問題。以工業用水而言，近年來在台西與麥寮地區開發許多大型工業區，例如台塑六輕工業區、離島工業區等，而工業區每日用水量十分可觀，對目前已不敷使用的水資源，更是雪上加霜，所以基於

水土資源保育之觀點，必須加以重視。

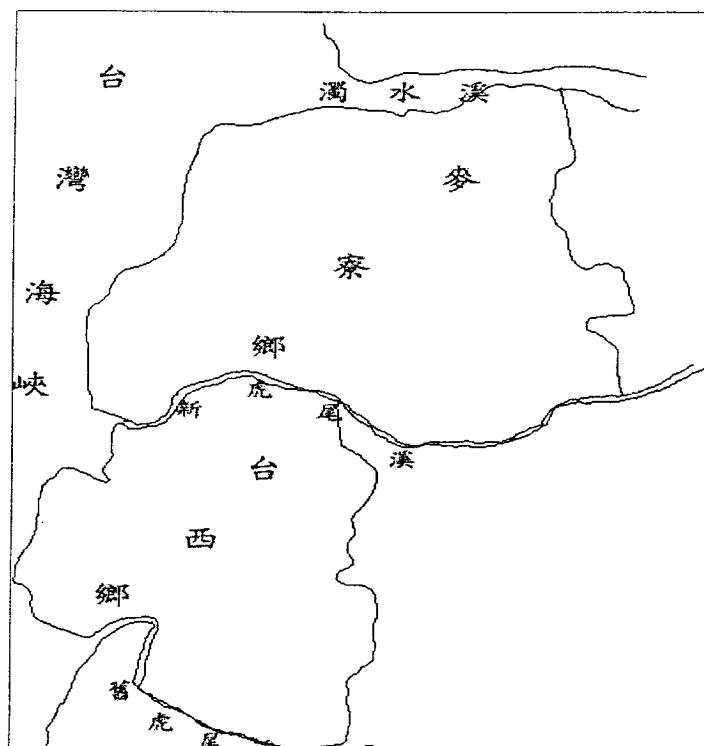
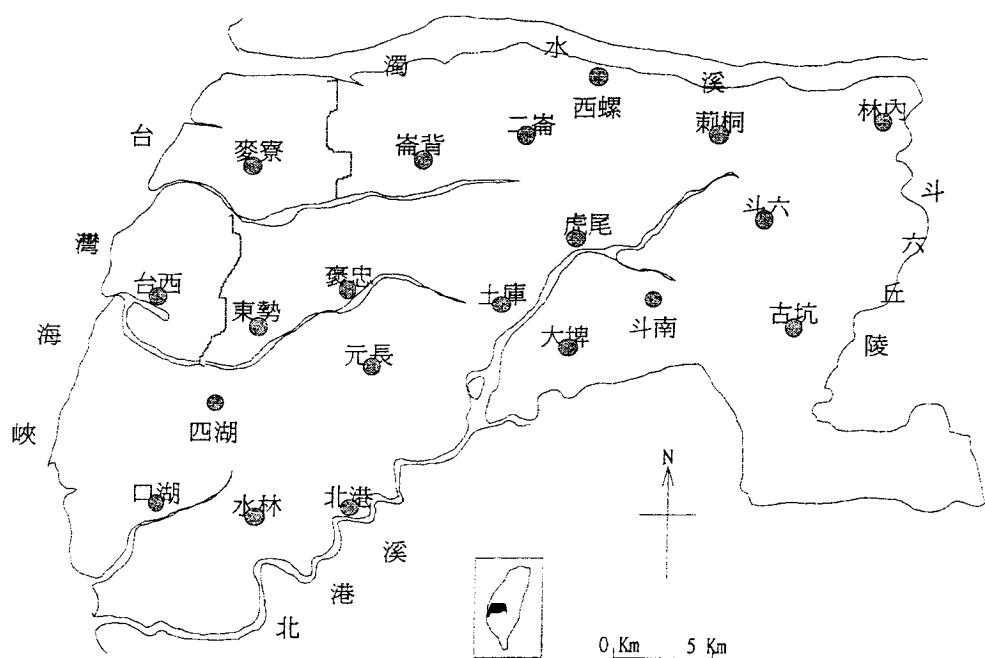


圖 2.1 台西至麥察鄉位置圖

2.2 土地利用與灌溉/用水情形

就土地利用而言，本區以農/養殖漁業為主，其中又以水田所佔面積最為廣泛，達4867公頃（見表2.1）。在灌溉制度方面，目前該區水田灌溉大都由雲林農田水利會西螺工作站調配供水，面積約為3234.5公頃，佔總水田面積2/3左右。

此會轄區之灌溉水源可分為以下三種：

1. 河川取水口：灌區主要水源取自濁水溪及新虎尾溪，由濁幹線各分支圳溝引水至各坵塊。唯濁水溪水源不穩定，且其年平均含砂量達0.34%，洪水期更高達0.60%，故有抽取地下水及利用迴歸水之用水方式。
2. 抽取地下水：由於兩鄉位處河川下游，故有約1/3之水田屬農民自行抽取地下水灌溉，另水利會亦開鑿地下深淺井多口供乾旱期運用。
3. 利用迴歸水：河川取水暨抽取地下水仍有不足之慮，因此攔截河川或排水路之迴歸水為水源，補助水源之不足。

水利會所轄灌區以坵塊為單位，同樣因水源不足而採取三年二作或三年一作之方式進行水稻栽植，其中台西鄉全為三年一作，麥寮鄉兩者皆有之。灌溉方式係以輪灌為主，以適量用水及依序灌溉為其基本精神，一次灌溉之水深，可供數日之作物需求、土壤滲漏、田面蒸發及稍微之乾田，此一

經歷時間即為輪灌期距。台西及麥寮兩鄉在表層土壤質地、輪灌期距上均有所差異（見表2.2~表2.3），前者輪灌期距為7.5天，後者為6.0天，雲林水利會一次灌溉水深約為4-6.5cm，除考慮有效降雨外，並視水稻生長階段而定；一般而言，水田之灌溉狀況扣除整田時期後，大致由成活至分蘖期起至完熟期止共區分為八個時期，每一時期皆有其用水需求，其中之有效分蘖終期至幼穗形成始期前之時段較不需灌溉，完熟期亦需停止供水，其餘皆需以續灌或輪灌方式保持大部分時期之濕田狀態。

表 2.1 雲林縣台西及麥寮兩鄉農漁用地使用情形 面積：公頃

農/漁業種 鄉鎮別	鹹水魚塭	淡水魚塭	水田面積	旱田面積
台西鄉	1630	371	2098	1226
麥寮鄉	611	1337	2769	691
合計	2241	1708	4867	1917
備註	資料來源:85 年 6 月雲林 縣政府漁業局 統計資料		資料來源:85 年 雲林縣政府農 業局統計資料	

表 2.2 雲林農田水利會台西及麥寮兩鄉灌溉情形 面積：公頃

灌溉資料 鄉鎮別	水田耕地面積	供水 方式		輪灌期距 (天)
		三年兩作	三年一作	
台西鄉	1332.99	0	1332.99	7.5
麥寮鄉	1901.52	799.13	1102.39	6.0
合計	3234.51	799.13	2435.38	
備註	資料來源:85 年 6 月雲林 縣政府農業局 統計資料			

在水井利用情形方面，此二沿海鄉鎮由於養殖業與農業發展，導致民眾紛紛未經合法登記便自行鑿井抽取地下水應用，根據嘉義農專沈向白（1992）之研究指出，單以麥寮鄉而言，其水井總數已達 10,945 口，台西鄉亦有 3,046 口，就用途分類，麥寮鄉灌溉用水井為 6,504 口，養殖用水井為 4,053 口，分別佔該鄉水井總數之 60% 及 37%。台西鄉灌溉用水井為 1,602 口，養殖用水井為 1,419 口，分別佔該鄉水井總數之 53% 及 47%。

就養殖用水而言，其水源並非全部引用海水，此因鹽度太高會影響養殖魚類之生長速度及大小，因此需將海水稀釋，將鹽度降低方能使用，而此區域之可用淡水水源，如區域排水、農地排水、灌溉用水大都遭受污染，所以多數業者（包括鹹、淡水養殖）都以抽取地下水之方式養殖。

2.3 引水渠道利用現況

本區較為靠近內陸之區域，土地利用仍以水利會轄區之農田為主，仍有相當發達完善之灌排系統，其中，麥寮鄉係由新虎尾溪別線之崙背支線及貓兒干支線經雷厝、橋頭、施厝、興化厝及大有等分線輸水至坵塊。台西鄉則由濁幹線經路利潭、下許厝寮、四美、草寮、十張犁等分線輸水至坵塊。

靠近海岸之養殖漁業區或鄰近之農/養殖漁業混和區因

魚塭多為取用海水或地下水水源，其取水引道多以管路為之，原有之灌溉渠道或雜草叢生，或垃圾污染嚴重，多呈荒蕪狀態，儘管魚塭之排水系統尚稱發達，但僅具排水功能，若欲進行豐水期之地表補注作業，在考量引水之便利性及水質之潔淨程度，應以自濁幹線引水之水利會轄區為主。

第三章 模式理論與數值方法

本計畫歷年採取之入滲補注研究方法與步驟，主要可分為國內外相關入滲研究之資料收集、本省水田入滲水力環境調查，驗證相關之飽和/非飽和入滲數值模式，包括荷蘭農業大學發展之一維土壤/水平衡模式SAWAH (Simulation Algorithm for Water Flow in Aquic Habitats, SAWAH與印尼語之水田音同)(Ten Berge, et. al., 1992)，及三維有限元素數值模式FEMWATER (A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density Dependent Flow and Transport，此程式由Lin et al.(1996)所發展，並由Brigham Young University (1996) 接受US Army Engineer Waterways Experiment Station 資助將其納入GMS(Groundwater Modeling System)中，以處理飽和與非飽和的地層狀況中地下水水流之各種流動情形，並使用具親和力之資料輸入/輸出處理系統）。藉以瞭解水田入滲水力特性及機制，並分析水田入滲補注地下水過程中，受到田面龜裂或側滲影響時之整體補注量改變情形。並提供增加水田入滲補注地下水之方案分析。經由模式模擬，可以瞭解水田入滲水力特性及機制，並分析水田入滲補注地下水過程中，受到田面龜裂或側滲影響時之整體補注量改變情形。並提供增加水田入滲補注地下水之方案分析。

3.1 水田入滲水流數學模式基本假設

土壤水流係由兩點間位能坡降 (Potential gradient) 產生之驅動力 (Driving force) 所致，其通量 (Flux) 與位能坡降成正比。在定義總位能時，有下述幾個假設：

- (1)滲析梯度可忽略，不考慮土壤內水流之濃度差。
- (2)沒有外在之靜電力場，土壤粒子間之靜電吸引力可忽略。
- (3)土壤內水流不受溫度梯度之影響即溫度隨土壤深度之變化情形可忽略。
- (4)土壤孔隙內之氣體壓力等於大氣壓力。
- (5)壓力位能由土壤內之水重造成，土體本身之重量並不影響壓力位能。
- (6)因水田為一長期湛水之環境，遲滯效應可忽略。

3.2 一維水田入滲水流數學模式

荷蘭農業大學近年來根據差分形式數學架構，發展出一維土壤-水平衡模式 SAWAH (Simulation Algorithm for Water Flow in Aquic Habitats)(ten Berge, et. al., 1992)，由於具有模擬多層飽和及非飽和共存現象之地表水入滲情形，可供具有湛水之水

稻田或埤塘計算入滲水量，及計算其他農作地（如旱田）在天然降雨量較大時之入滲量。SAWAH 為一有限差分數值模式，可藉由區隔土壤剖面成數個計算區間(compartment)分別計算不同深度之各個區間含水量與壓力水頭變化，以及區間界面之垂直水流通量，據此了解地表湛水深變化及真正進入地下水位面之水量。模式具有以下數點特性：

- (1). 可模擬不同土層同時發生之飽和(以隱性法演算)及非飽和(以顯性法運算)流動。
- (2). 可模擬自地表至地下水表面間之入滲剖面至多 10 層不同性質土壤層之入滲狀況。
- (3). 模式輸入資料包括：
 1. 土壤水分保持曲線 (Soil Water Characteristic Curve, $\theta \sim h$) 函數。
 2. 水力傳導係數曲線 ($k \sim \theta$, $k \sim h$) 函數。
 3. 外部邊界條件：灌溉水量、降雨量、蒸發散及地下水位等。

此外，模式在計算時，會將所有飽和/非飽和交界面之壓力水頭設定其值為 0，在每一時間段(time step)之計算後均會重新計算此一交界面之位置。時間段之範圍為 0.0001 至 0.01 天。相關入滲水流數學理論介紹如下：

3.2.1 飽和土壤中水流

1. 通量方程式

就飽和系統之一維垂直水流(以垂直向下為正Z軸(L)方向)
通量 $q(L/T)$ 可以應用Darcy equation表示如下：

$$q = -k_s \frac{dH}{dz} = -k_s \frac{dh}{dz} + k_s \quad (3.1)$$

其中：
 H 為水力水頭(L)

h 為壓力水頭(L)

k_s 為飽和水力傳導係數(L/T)

2. 質量守恆方程式

質量守恆方程式或連續方程式係以土壤含水量隨時間之
變率為通量之散度(Divergence)來加以描述，其形式如下：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (3.2)$$

在土壤呈飽和狀態時，上式可簡化為

$$\frac{dq}{dz} = 0 \quad (3.3)$$

若將土壤分割成數個區間，並採用差分形式計算，其中一飽和段部份含有n個區間，已知 k_i 和 Z_i 及飽和段之 H_1 及 H_{n+1} ，則可將n個通量方程式寫成：

$$q_1 = -k_1 \frac{H_2 - H_1}{Z_2 - Z_1}$$

$$q_2 = -k_2 \frac{H_3 - H_2}{Z_3 - Z_2}$$

$\dots = \dots$

$$q_n = -k_n \frac{H_{n+1} - H_n}{Z_{n+1} - Z_n} \quad (3.4)$$

且各區間之上下邊界之總水頭差值之和為

$$(H_2 - H_1) + (H_3 - H_2) + \dots + (H_{n+1} - H_n) = H_{n+1} - H_1 \quad (3.5)$$

以上n+1個方程式可以矩陣形式表示如下：

$$\begin{bmatrix} \frac{-k_1}{\Delta Z_1} & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & \frac{-k_2}{\Delta Z_2} & \dots & 0 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-k_n}{\Delta Z_n} & -1 \\ +1 & +1 & \dots & +1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \vdots \\ \Delta H_n \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ H_{n+1} - H_1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

求解矩陣即可得各區間之總水頭差及該飽和層之通量。

3.2.2 非飽和土壤中水流

1. 通量方程式

非飽和土壤之水力傳導係數並非定值，為壓力水頭 h 之函數，表示如下：

$$q = -k(h) \frac{dH}{dz} = -k(h) \frac{dh}{dz} + k(h) \quad (3.7)$$

2. 質量守恆方程式

當入滲通量在Z方向上隨著Z之增加而減少時，土壤含水量之時間變率表示與3.2式相同，即：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z}$$

3. 水力傳導係數函數

非飽和土壤水力傳導係數為壓力水頭 h 之函數，目前已發展出多種關係式，一般常採用之指數函數關係式如下：

$$\begin{aligned} k(h) &= k_s e^{\alpha h}, h \geq h_{\max} \\ k(h) &= a|h|^{-1.4}, h < h_{\max} \end{aligned} \quad (3.8)$$

其中 $\alpha(L^{-1})$ 、 $h_{\max}(L)$ 及 $a(L^{2.4}T^{-1})$ 為經驗土壤特性係數。

4. 土壤含水量特性

將上式與3.10式結合，即可求得以母體通量位能表示之通量，如下式所示：

$$q = \left(\frac{-1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta h} \right) \times \Delta \phi \quad (3.15)$$

其中，右式之第一項指通量之母體項，第二項為重力項。

3. 母體通量位能在層狀土壤之應用

若逢遇二種不同形態之土壤時，考慮二相鄰格網i-1及i，設其壓力水頭為 h_{i-1} 與 h_i ，k值分別為 k_1 及 k_2 ，面對前述之平均問題，可分別假想二層皆為 k_1 土壤及 k_2 土壤，計算其 $\Delta \phi$ 值，再予以幾何平均，即：

$$\int_{h_{i-1}}^{h_i} k dh = \left[\int_{h_{i-1}}^{h_i} k_1 dh \times \int_{h_{i-1}}^{h_i} k_2 dh \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

此一做法之優點為可以保留以h為權重之平均k值，將此式代入3.14式，即可求得此兩層土壤間之通量。

4. 流動方程式

結合3.7式及3.2式，即可導得流動方程式，或稱理查方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(- k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right) \quad (3.17)$$

上式亦可以母體通量位能改寫為：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \phi}{\partial z} + k(h) \right) \quad (3.18)$$

理查方程式即為非飽和土壤流動之控制方程式，在以上所介紹之數學計算模式中，並非以該式直接計算，而是在已知邊界條件下，將其分解成兩步驟，即通量計算及通量散度計算。

3.3 三維地下水水流動模式理論

由於一維垂直入滲模式無法探討水田與相鄰接乾/旱田形成土壤層乾濕邊界之側滲問題，對於水田田面湛水在入滲之後的有效地下水補注量推估將會產生高估之嫌，因此本研究乃測試採用三維有限元素電腦模式 FEMWATER 以處理更為複雜之水田入滲流況，包括水田乾濕邊界側滲之模擬分析以及水田經排水後產生裂縫，其再次湛水後之入滲情形等。相關理論說明如后：

3.3.1 流體控制方程式

FEMWATER 之控制方程用於描述地層某種初始與邊界條件下，流體與介質流經飽和與非飽和地質環境中之情況，此一流體控制方程為改良之理查方程式 (the modified Richards equation)，其數學表示式為：

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{d\theta}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[K \cdot \left(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) \right] + \frac{\rho^*}{\rho_0} q$$

(3.19)

其中

h : 壓力水頭。

K : 水力傳導係數張量。

Z : 勢能水頭。

q : 內部的源出點與匯入點(source/sink)。

ρ : 於化學濃度 C 時之水密度。

ρ_0 : 於化學濃度 0 時之參考水密度。

ρ^* : 注入或抽出時之水密度。

θ : 保水度 (the moisture content)。

(1). 上式中之水力傳導係數 K 可以利用方程式表示如下：

$$K = \frac{\rho g}{\mu} k = \frac{(\rho / \rho_0)}{(\mu / \mu_0)} \frac{\rho_0 g}{\mu_0} k_s k_r = \frac{(\rho / \rho_0)}{(\mu / \mu_0)} K_{so} k_r$$

(3.20)

其中

μ : 於化學濃度 C 時，水之動力黏滯性。

μ_0 : 於化學濃度 0 時，水之參考動力黏滯性

k : 滲透度張量(the permeability tensor)。

k_s : 飽和滲透度張量。

k_r : 相對水力傳導係數。

K_{so} ：參考飽和水力傳導張量。

(2).水之密度與動力黏滯性，可以利用化學濃度之關係式表示如下

$$\frac{\rho}{\rho_0} = a_1 + a_2 C + a_3 C^2 + a_4 C^3 \quad (3.21)$$

和

$$\frac{\mu}{\mu_0} = a_5 + a_6 C + a_7 C^2 + a_8 C^3 \quad (3.22)$$

其中， a_1, a_2, \dots, a_8 是定義在化學濃度 C 存在時，其與水密度和黏滯性的關係。而當流體密度均勻不變時，與化學濃度相對較無關連性，此時可設定 a_1 和 a_5 為 1，其他 $a_2, a_3, a_4, a_6, a_7, a_8$ 為零。

(3).達西速度的計算如下

$$V = -K \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho} \nabla h + \nabla Z \right) \quad (3.23)$$

(4).流體方程之初始條件

$$h = h_i(x, y, z) \quad \text{on } R \quad (3.24)$$

其中

R ：表示研究區域

h_i : 描述區域之初使條件，其值可由現地調查量
得或解(3.19)式於穩態(steady state)狀況下得到。

(5). 流體方程之邊界條件

(a). 已知水頭邊界(Dirichlet Conditions)可以表示如下：

$$h = h_d(x_b, y_b, z_b, t) \quad \text{on } B_d \quad (3.25)$$

(b). 已知通量邊界(Neumann Conditions)可以表示如下：

$$- n \cdot K \cdot \frac{\rho_0}{\rho} \nabla h = q_n(x_b, y_b, z_b, t) \quad \text{on } B_n \quad (3.26)$$

(c). 歌西邊界(Cauchy boundary)為上述兩種邊界的結合

(d). 變動邊界(Variable boundary)

如地表入滲等隨時間變化之邊界問題可以時間函數
方式表示之。

3.3.2 數值方法

FEMWATER 模式係使用兩種數值解法處理地下水水流計算，包括有限元數法(the finite element methods)處理空間上離散，與有限差分法(the finite difference methods)處理時間上之離散。一般而言，有限差分法主要應用在解不連續的網點，而有限元素法不只可提供空間上連續的解，更有多項的優點，如可用於非等向、異質性的界面，不受不規則邊界的

影響等，可在研究範圍的不同區塊建立不同密度的網格。有關模式處理時空間問題之數值方法說明如下：

(1). 葛爾金 (Galerkin) 有限元素法處理空間離散

有限元素法中研究區域空間之參考壓力水頭可近似如下：

$$h \approx \hat{h} = \sum_{j=1}^N h_j(t) N_j(x, y, z) \quad (3.27)$$

其中

h ：空間中壓力水頭分佈。

h_j ：各節點壓力水頭。

N ：分析區域的總節點數。

N_j ：形狀函數 (Basis Function)。

則偏微分方程式可以運算元的方程式離散成

$$L \left\{ \hat{h} \right\} = R_r \neq 0 \quad (3.28)$$

其中

L ：微分運算元 (Differential Operator)。

R_r ：殘差 (Residual)。

如 h^* 為正確解，則殘差 Rr 為零，而在殘差加權法(the method of Weighted Residual)中，即選定適當之加權函數，迫使殘差之積分值為零。則式(3.19)可改寫如下：

$$\begin{aligned} & \left[\int_R N_i \frac{\rho}{\rho_0} F N_j dR \right] \frac{d h_j}{d h} + \left[\int_R (\nabla N_i) \cdot K \cdot (\nabla N_j) dR \right] h_j \\ &= \int_R N_i \frac{\rho^*}{\rho_0} q dR - \int_R (\nabla N_i) \cdot K \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z dR + \int_R n \cdot K \cdot \left(\nabla h + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla z \right) N_i dB \end{aligned} \quad (3.29)$$

上式可由矩陣形式表示如下：

$$[M] \left\{ \frac{dh}{dt} \right\} + [S] \{h\} = \{Q\} + \{G\} + \{B\}$$

(3.30)

其中

$\{dh/dt\}$ 和 $\{h\}$ 為在表示各點上 dh/dt 和 h 單列向量矩陣。

$[M]$ ：表示儲水的質量項矩陣。

$[S]$ ：表示傳導運動項矩陣。

$\{Q\}$ ：表示內在源、匯。

{G}：表示重力項。

{B}：邊界條件。

在大部份有限元素法中，達西速度（Darcy velocity）之數值模式計算如下：

$$V = -K \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho} (\nabla \cdot N_j) h_j + \nabla z \right) \quad (3.31)$$

(2). 有限差分法處理時間離散

$$\frac{[M]}{\Delta t} \left(\{h\}_{t+\Delta t} - \{h\}_t \right) + \omega [S] \{h\}_{t+\Delta t} + (1-\omega) [S] \{h\}_t = \{Q\} + \{G\} \quad (3.32)$$

假設在時間 $t + w\Delta t$ 時，會呈現變化率。

w：時間加權係數。

w=0.5：中央差分法，又稱克拉克－尼克森法(Crank-Nicolson)。

w=1.0：後退差分法，又稱隱性法。

w=0：前進差分法，又稱顯性法。

第二種方法，假設未知的變數值呈現線性變化，在間格為 Δt ，方程式改寫如下：

$$\left(\frac{2}{\Delta t} [M] + [S] \right) \{h\}_{t+\Delta t/2} - \frac{2}{\Delta t} [M] \{h\}_t = \{Q\} + \{G\}$$

(3.33)

和

$$\{h\}_{t+\Delta t} = 2 \{h\}_{t+\Delta t/2} - \{h\}_t$$

(3.34)

其中 $[M]$, $[S]$ 和 $\{Q\}$ 於 $(t + \Delta t)$ 時加以運算。

方程式 (3.33) 和 (3.34) 可寫成如下之矩陣方程：

$$[T] \{h\} = \{Y\}$$

(3.35)

其中 $[T]$, $\{Y\}$ 表示如下：

$$[T] = \frac{[M]}{\Delta t} + [S]$$

(3.36)

和

$$\{Y\} = \frac{[M]}{\Delta t} \{h\}_t + \{Q\} + \{G\}$$

(3.37)

其中， $\{h\}$ 表前段時間的水頭勢能。

3.3.3 GMS 模式模擬流程

以往舊版之 FEMWATER 於程式執行時，在建構輸入檔時，不僅繁雜費時，且亦產生錯誤以致影響執行成效，GMS 提供了多種執行方程式之前置作業，如 MODFLOW、MODPATH、FEMWATER 等，以改善此一缺點。本研究即使用 GMS 作為 FEMWATER 模擬執行前，研究區域之地層狀況、地質資料、周邊條件的建構工具，其執行流程如圖 3.1 所示。

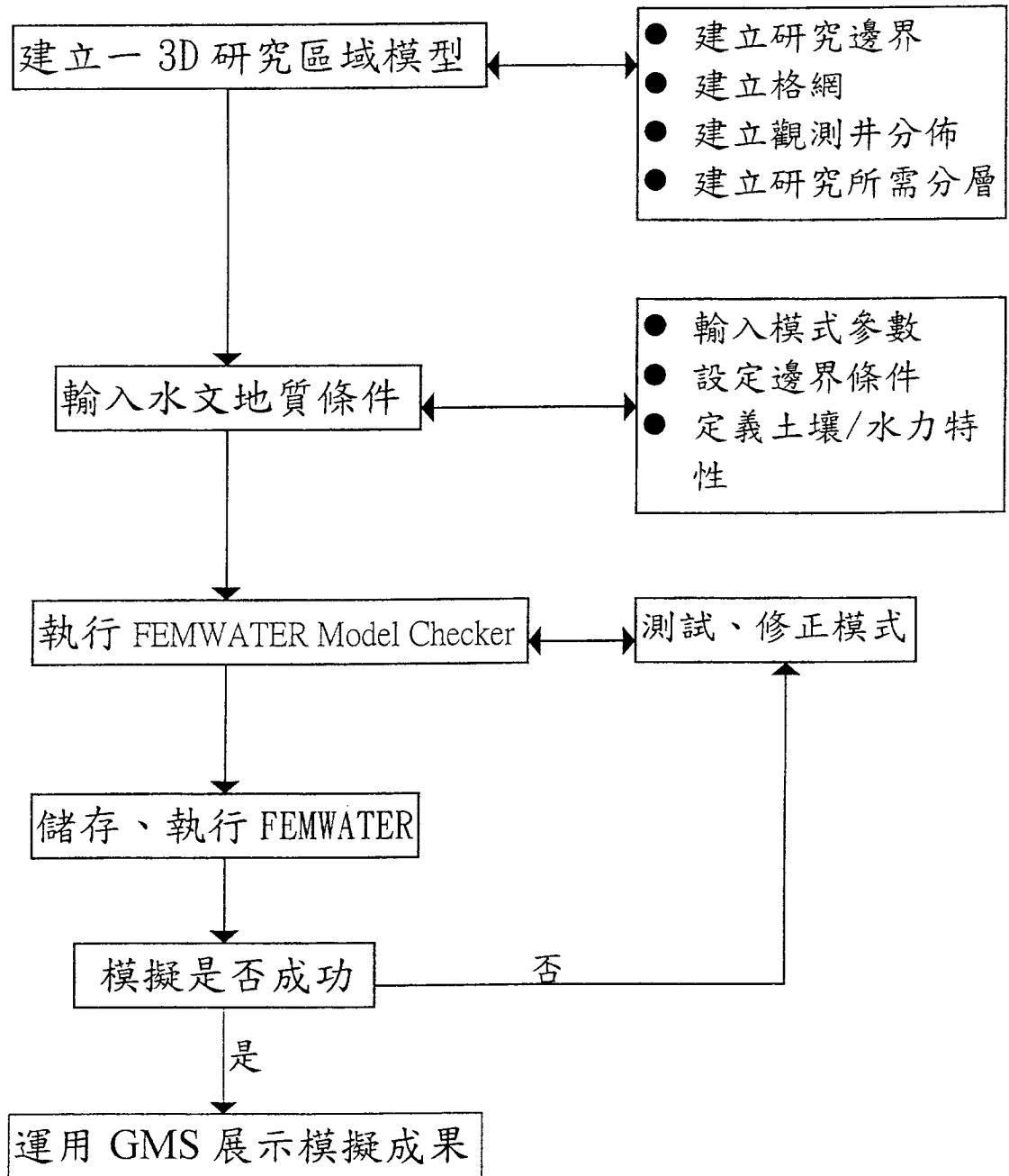


圖 3.1 GMS 模式模擬流程圖

第四章 入滲模式建立及分析

區域入滲量之推估需要龐大及完整之各項資料，包括各管理處工作站工作小組內輪灌小區之土壤質地、粘粒百分比、期作別、灌溉天數及灌溉面積等資料。台西及麥寮兩鄉僅有部份資料可供應用，因此在進行入滲量推估前利用鄰近區域具有較完整灌排及氣象水文資料之區域進行入滲模式與經驗公式測試，為避免謬誤之必要程序，本計畫歷年來利用濁水溪沖積扇頂區之田中實驗田及扇央區之麻園實驗田進行相關驗證工作。並以此結果配合台西麥寮兩鄉現有資料進行區域入滲量之推估。並評估藉由加高田埂、改變牛踏層厚度、超量灌溉、改變耕作制度及改變灌溉方式等方法促進水稻田對地下水補注之功效，以達成將農田水利會轄區內之水田，於休耕期間將多餘之灌溉水量引灌入田增加涵養地下水之效益，達到地下水永續利用之目標。

4.1 實驗田區概述

為充分瞭解水田入滲機制，建立並驗證入滲數學模式，量化水田入滲補注地下水之功能及評估豐水期增進水田入滲量之各種方法，於實驗田區進行現場試驗是重要之研究方法，本計畫參考農委會近年於濁水溪沖積扇扇頂區進行之水田入滲試驗作為模式參數及驗證之依據，實驗田位於彰化縣田中鎮，其東側緊鄰八卦山脈，面積約 20 餘公頃除大部份為經過翻犁湛水之水田外，亦保留部份保持乾田狀態之水田，作為對照研究之用。

4.2 入滲模擬分析

4.2.1 影響水田垂向入滲補注因子探討

本研究初期利用 SAWAH 模式套配不同土壤剖面，探討影響水田垂向入滲補注因子，其基本土壤剖面係引用研究區域內農試所所提供之淺層四層土壤(自地表起 0-30cm、30-60cm、60-90cm 及 90-150cm)質地數值化圖幅，探討之因子包括初始含水量、地下水位、牛踏層厚度及其飽和水力傳導係數、壓力水頭等五項參數，設計 10 種不同土壤/水力條件組合，如表 4.1 所示。以分析不同組合條件下對基本入滲率、累積入滲量、土壤水分平衡收納水量及通過表層介面淨通量之影響（圖 4.1 為一維 SAWAH 水田入滲數值模擬示意圖），以上狀況經過模擬，所得之主要結論摘要如下(參考表 4.2)：

1. 定水頭狀態下之入滲在補注路徑土壤層會形成一含水量平衡，在接近地表補注源及靠近地下水位附近易達到飽和含水量，其餘區間多呈未飽和狀態。
2. 初始含水量多寡雖會造成初期入滲率之不同，並造成補注時效之差異，然並不影響基本入滲率之大小。模擬結果亦顯示地下水位高低並未對基本入滲率造成影響。
3. 牛踏層厚度及其飽和水力傳導係數對基本入滲率具主控性，且未受到其下層較高滲透性之土層組合變化之影響。

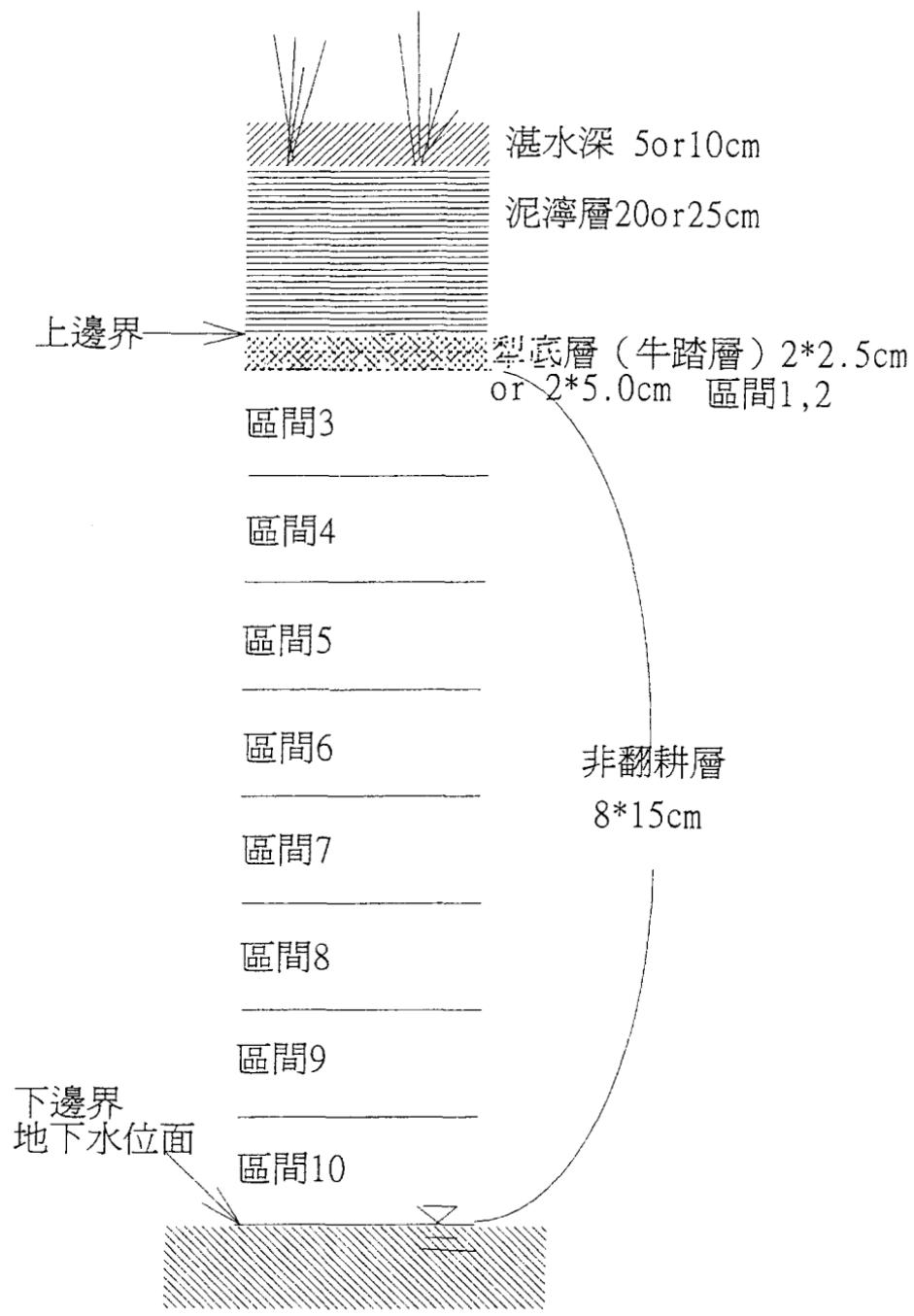


圖 4.1 一維 SAWAH 水田入滲數值模擬示意圖

表 4.1 入滲補注因素探討之各種土壤/水力條件組合

狀況編號 土壤/水力條件	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
地下水位(m)	1.5	1.5	1.5	4.0	0.9	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
牛踏層厚度(cm)	10	10	10	10	10	5	0	10	10	5
牛踏層飽和水力傳導 係數(cm/day)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	--	0.3	0.0 3	0.3
含水率(%)	F.C	3/2F.C	1/2F.C	F.C	F.C	F.C	F.C	F.C	F.C	F.C
壓力水頭(cm)	30	30	30	30	30	30	30	30	15	30

註：1. 地下水位為具原地表深。

2. 牛踏層厚度改為 5 公分厚時，泥濘層由 20 公分增加為 25 公分。

3. 無牛踏層存在，泥濘層由 20 公分增加為 30 公分。

表 4.2 各種土壤/水力條件組合對應之基本入滲率、30 天內累積入滲量、土壤水分平衡收納水量及通過底層界面淨通量

狀況別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
基本入滲率 (mm/day)	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	4.2	312.0	21.0	1.2	39.0
30 天內累積入 滲量(mm)	66.5	62.3	70.7	66.5	66.5	116.0	9112.6	614.6	41.0	1134.0
土壤水分平衡 收納水量(mm)	73.3	-79.6	226.2	-6.4	65.7	61.1	259.0	95.3	71.2	94.6
30 天內通過底 層界面淨通量 (mm)	-6.8	142.1	155.5	72.9	0.8	54.9	8853.6	519.3	30.2	1039.4

4.2.2 台西麥寮地區入滲量之推估

(一) 水稻田灌溉時期垂直入滲量

台西及麥寮兩鄉在表層土壤質地、輪灌期距及耕作期數上均有所差異，前者輪灌期距為 7.5 天，後者為 6.0 天，在雲林水利會一次灌溉水深大致相同的情況下，根據本計畫第二年度之 SAWAH 模擬結果顯示，麥寮鄉要較台西鄉有更高之入滲率。模式係沿用麻園區之牛踏層資料（即水力傳導係數訂為 0.05cm/day ，厚度訂為 7.5cm ），並將濱海地區與平原蒸發量差異以 3~5 月之平均值按照比例（比值約為 1.12）改變之。可得本田時期供水 90 天平均 2.77mm/day 之入滲量，麥寮鄉另按輪灌期距之反比例 ($7.5\text{天}/6.0\text{天} = 1.25$) 求得入滲率最高為 3.46mm/day 。將此數值結合兩地耕作期數，可得水利會灌區三年輪作期之總入滲量。此外，由於區域內尚有為數不少之自行灌溉水田，雖然缺乏詳細灌溉資料，但在灌溉水量上應與水利會差異不大。且在農村缺乏人力，機械代耕盛行之情況下，其耕作時期亦應與水利會灌區相同。基於此種假設，可求得兩鄉三年期間之總入滲量（見表 4.3），各年之入滲總量甚為接近，年平均入滲量分別為台西鄉 155 萬 8 千立方公尺，麥寮鄉 454 萬 9 千立方公尺，合計兩鄉在每年第一期作（春作）時期，即 3~5 月期間約有 610 萬 8 千立方公尺之入滲量。

表 4.3 台西及麥寮兩鄉水田區域入滲總量推估

年 鄉鎮別 入 滲 量	第一年入滲 總量 (立方 公尺)	第二年入滲 總量 (立方 公尺)	第三年入滲 總量 (立方 公尺)	三年入滲總 量 (立方公 尺)	年平均入滲 量 (立方公 尺)
台西鄉	水利會田區 940,858.2	887,113.3	941,315.3	2,769,286.8	923,095.6
	自灌田區 ---	---	---	1,907,170.1	635,723.4
	合計 ---	---	---	4,676,456.9	1,558,819.0
麥寮鄉	水利會田區 3,450,914.2	3,009,069.2	3,351,479.0	9,811,462.4	3,270,487.5
	自灌田區 ---	---	---	3,836,591.2	1,278,863.7
	合計 ---	---	---	13,648,054.6	4,549,351.2

(二) 水田與其他土地利用入滲能力比較

水田與不同土地利用型態，包括旱田及魚塭等之入滲量初步評估可藉由雲林地區前人研究加以比較之。而旱田入滲量估計是採用各地之平均降雨量及蒸發量等氣候因素，估計的方式是以蒸發皿的蒸發量，乘上蒸發皿係數，此係數假設為 0.7，即實際蒸發量，假設 70% 的水形成地表逕流，流入河川或海洋，另外 30% 向下入滲到土壤中(郭振泰, 1992)，經公式計算後，兩鄉旱田之入滲量大約為 -0.0179mm/day 至 0.119mm/day 間。對於魚塭入滲問題，所牽涉之相關因子甚多，如養殖期間所投放之餌料及養殖水產之排泄物逐漸堆積，均會使入滲降低，其量測多以水收支平衡法為之。以(淡水)養鰻池為例，根據台大水工所 (1997) 之現地調查，雲

林沿海地區養鰻池初期滲漏嚴重，漁池在清淤入水約 1 公尺後第一日即有 10 公分以上之滲漏量，如此持續約 3~4 日後，入滲才逐漸降低，一般在水深降至 50~60 公分之間時，約可保持池中水位平衡，此時損失水量可考慮僅為蒸發量而已，加上餌料及養殖水產之排泄物逐漸堆積，在三個月內堆積厚度可達 20cm 左右，均會使入滲降至極低。而根據簡錦樹等人(1996)之研究指出該地區之魚塭入滲率約為 1.44mm/day 至 2.88mm/day 之間。由以上研究可看出水田入滲率在此區中具有最高之入滲率，但因魚塭為全年供水，以簡錦樹等人(1996)推求之平均入滲率配合鹹淡水魚塭面積可得年平均入滲量分別為 1,766 萬 8 千立方公尺及 1,346 萬 6 千立方公尺，均高於水田之 610 萬 8 千立方公尺。

4.2.3 試驗田區模擬

由於水田在此區中具有最高之入滲率，雖受期作等因素影響，全年中僅有約 3 個月左右之時間保持持續入滲，但未來若能配合水利單位近年來研擬之夏季水田蓄洪及補注地下水措施，將可大幅增加本區之入滲量。因此本計畫在第三、四年度於彰化田中地區之實驗田進行一系列之水田補注研究。

水稻田之垂直剖面可以系統性區分為湛水 (ponded water)、對水流具低阻抗性之泥濘層 (muddy layer)、對水流具高阻抗性之犁底層 (俗稱牛踏層，plow sole)，以及其下之非飽和層 (non-puddled subsoil)。利用此一概念劃分，可以運用試驗所得之土壤水力特性資料，以一維 SAWAH 及三維 FEMWATER 模擬水田入滲及水流於非飽和土層流況。

田中地區實驗田地層組成以礫石為主，而淺層地質狀況可由現地實驗和屏東科技大學鑽井所取土樣得知，牛踏層7.5cm，其水力傳導係數， k 值為0.055cm/day，坋土層32.5cm，其 k 值1.1cm/day，紅壤土層7.4m，其 k 值1.6cm/day，黑黏壤土2m，其 k 值1.5cm/day，以下全為礫石層，其 k 值300cm/day，其中地下水位位於9~12m之間，於礫石層與黑黏壤土交界處附近（鄒禕等，1998），為求取在模擬時更高精確度，所以於各土層中又細分成數個水平格網如表4.4。

表4.4 田中試驗田區土壤分層表

水力特性與格網劃分 土層	飽和水力傳導係數 K 值 (cm/day)	土層厚度(m)	水平格網 (mesh)
牛踏層	0.055	0.075	3
坋土層	1.1	0.325	2
紅壤土	1.6	7.4	4
黑黏壤土	1.5	2	2
礫石層	300	5	4

田中實驗田區量測項目包括水田湛水深、泥濘層厚度，及泥濘層、牛踏層界面壓力，以作為牛踏層頂部壓力水頭設定之依據，並

參考屏東科技大學現地量測之湛水深、蒸發量、地下水位資料（鄒禕等，1998）。田區坵塊配置、邊界條件及 GMS 建構之模型如圖 4.2~圖 4.5 所示，針對水田田面開裂對入滲影響之模擬，則另以 GMS 建構模型，基本土體單元平面尺寸為 $15\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，共建立 9 個土體單元，其四周裂縫訂為 2.5cm 寬，如圖 4.6~圖 4.7 所示。以上模擬時之各項條件說明如下：

1. 討論加高田埂，以求增加補注量的方法，亦即增加蓄水深(增加初始壓力水頭)，對於入滲補注的影響。模擬時主要分為 15cm、20cm、25cm 三種初始壓力水頭狀況來探討。
2. 探討破壞牛踏層使水分能直接穿透增加補注量之方法，在模式中假設無牛踏層。而初始壓力水頭依然使用 15cm、20cm、25cm 三種，並與有牛踏層之情況相比較。
3. 為了探討側向滲漏與垂直入滲的關係，在考慮現地狀況下，依現地設東西兩邊為乾田區，並且假設水田區與乾田區的初始地層土壤有不同的乾濕度，如水田區初始地層土壤壓力水頭為 -1.2m，而乾田區初始地層土壤分為 -1.2m、-3.3m、-6.9m 三種分別討論其對側向滲漏之影響。
4. 探討水田田面開裂對入滲之影響，基本土體單元平面尺寸為 $15\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，共建立 9 個土體單元，其四周裂縫訂為 2.5cm 寬，假設原土體單元內之牛踏層板塊並未遭到破壞（位於田面下 20~27.5cm 處），模式模擬時分別假設裂縫深度達田面下 80cm、60cm、27.5cm 及 20cm 深(意即僅泥濘層開裂)等四種開裂深度。

圖 4.2 田中實驗田區塊配置圖

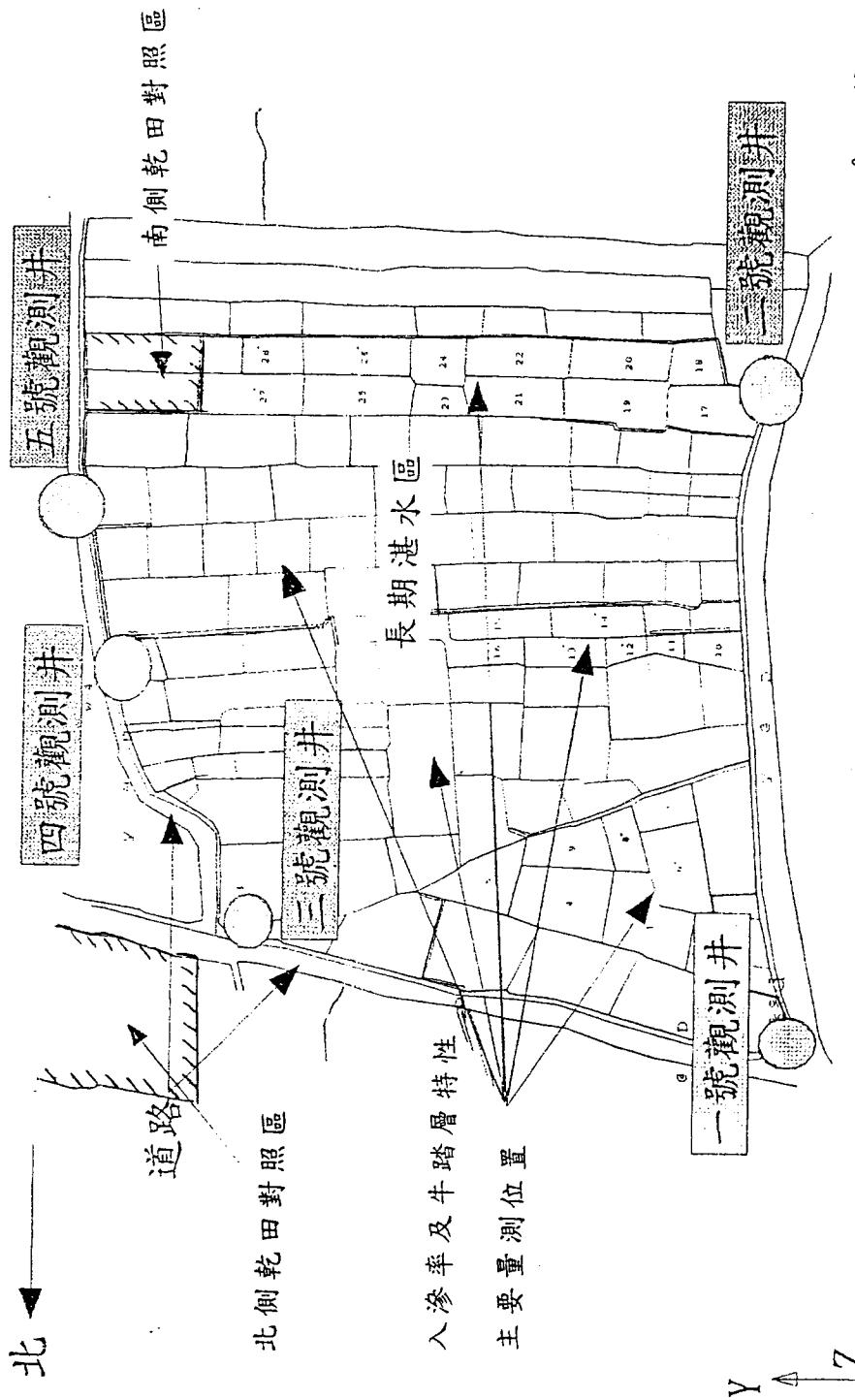
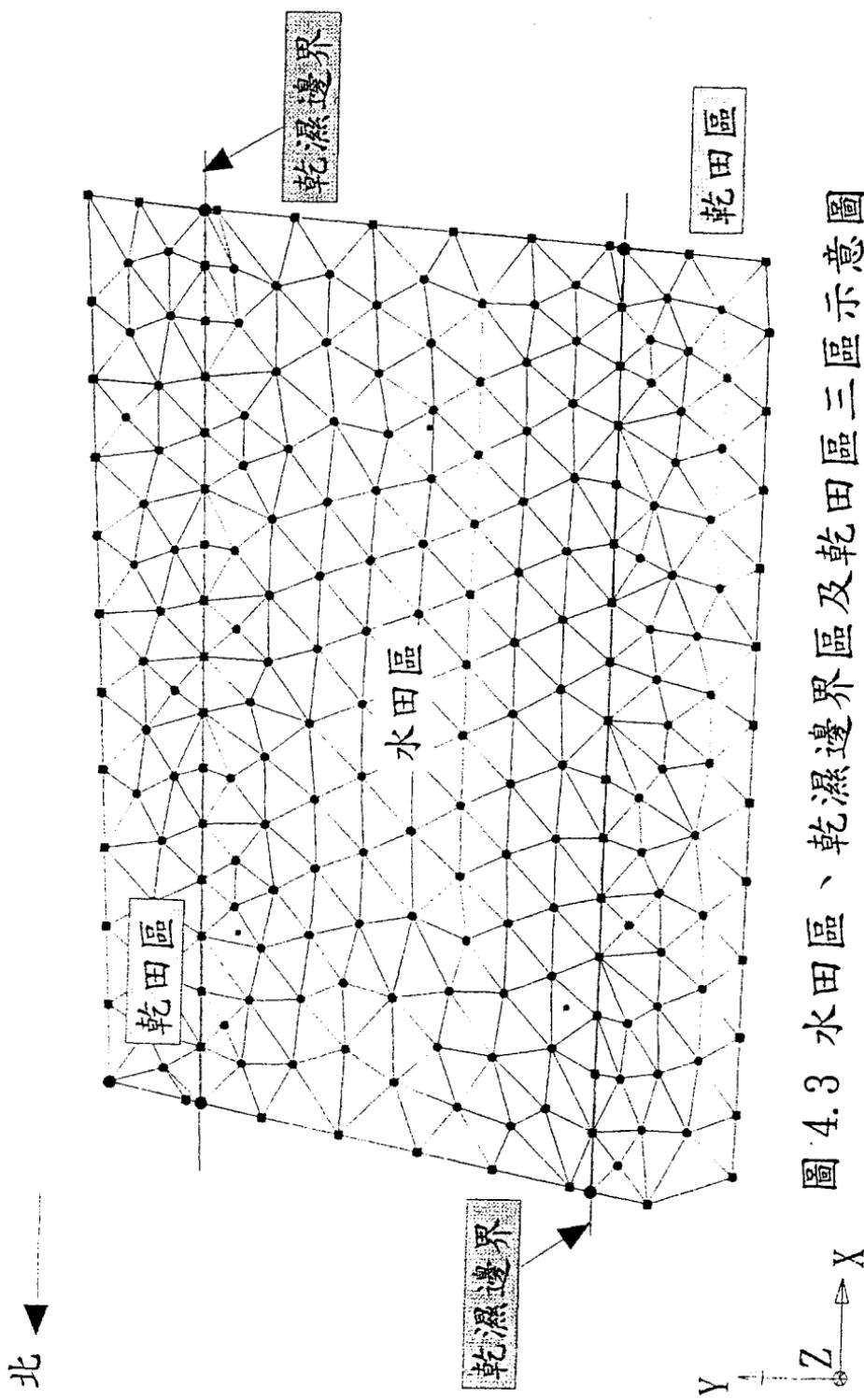


圖 4.3 水田區、乾濕邊界及乾田區三區示意圖



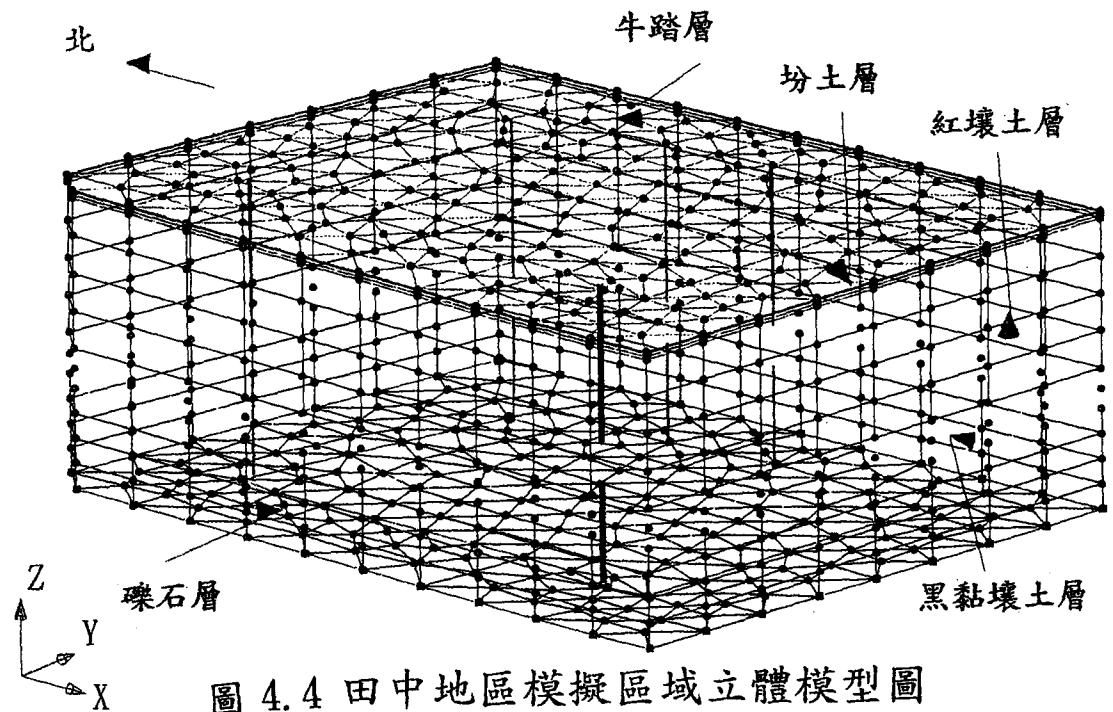


圖 4.4 田中地區模擬區域立體模型圖

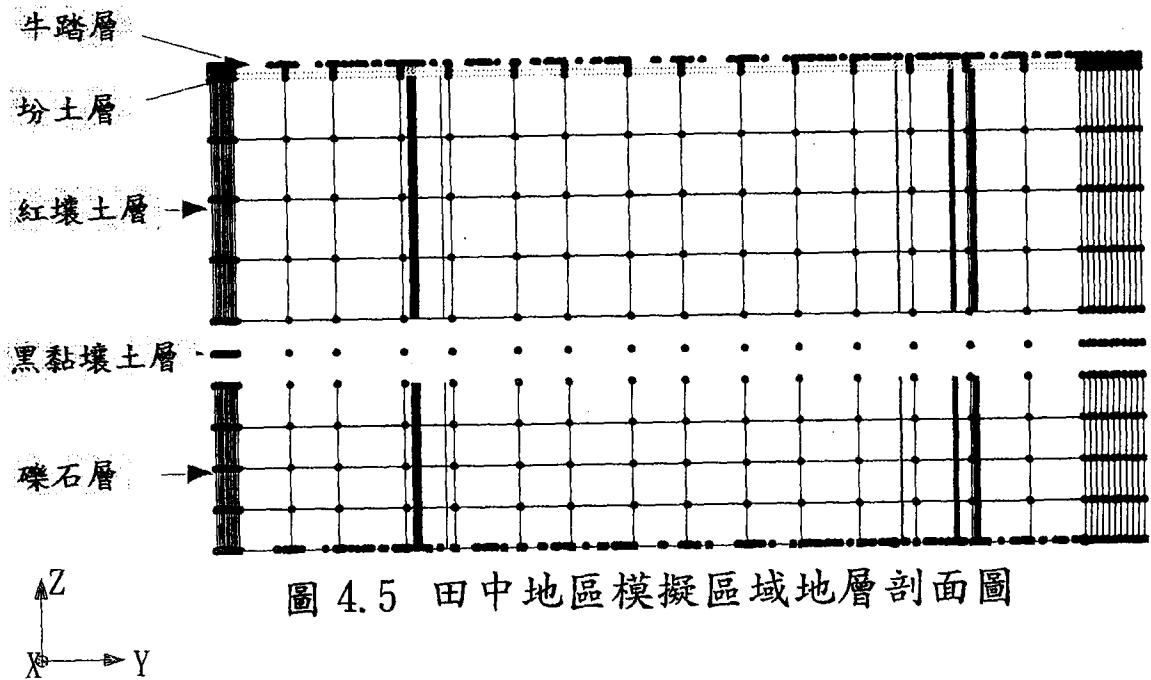


圖 4.5 田中地區模擬區域地層剖面圖

裂縫

所劃分之格網

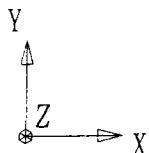
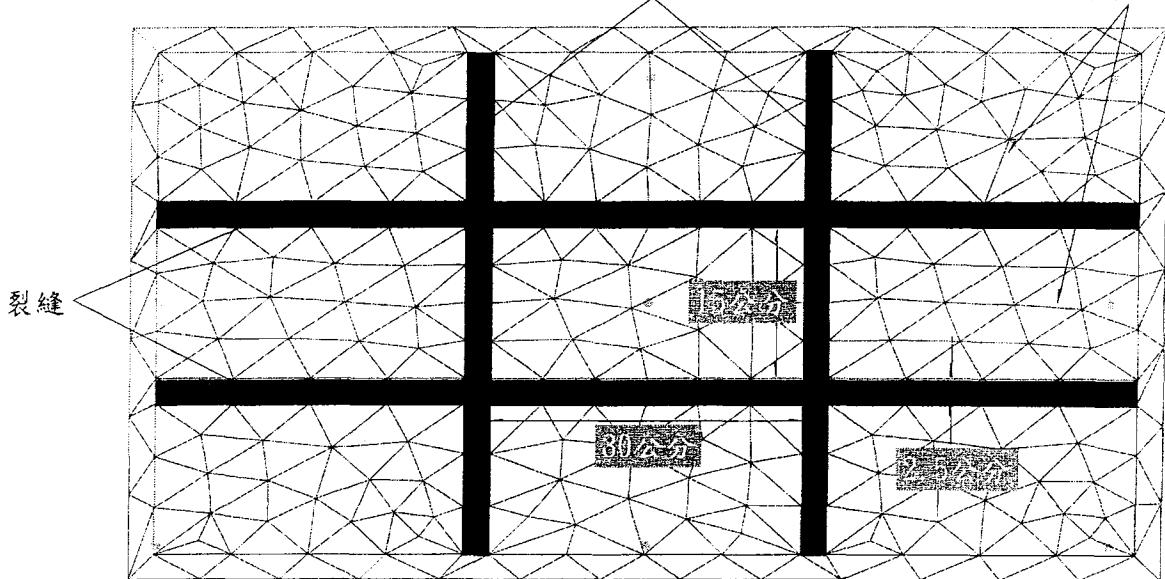


圖 4.6 裂縫位置與劃分格網之平面示意圖

裂縫分為20, 27.5, 60, 80公分四種

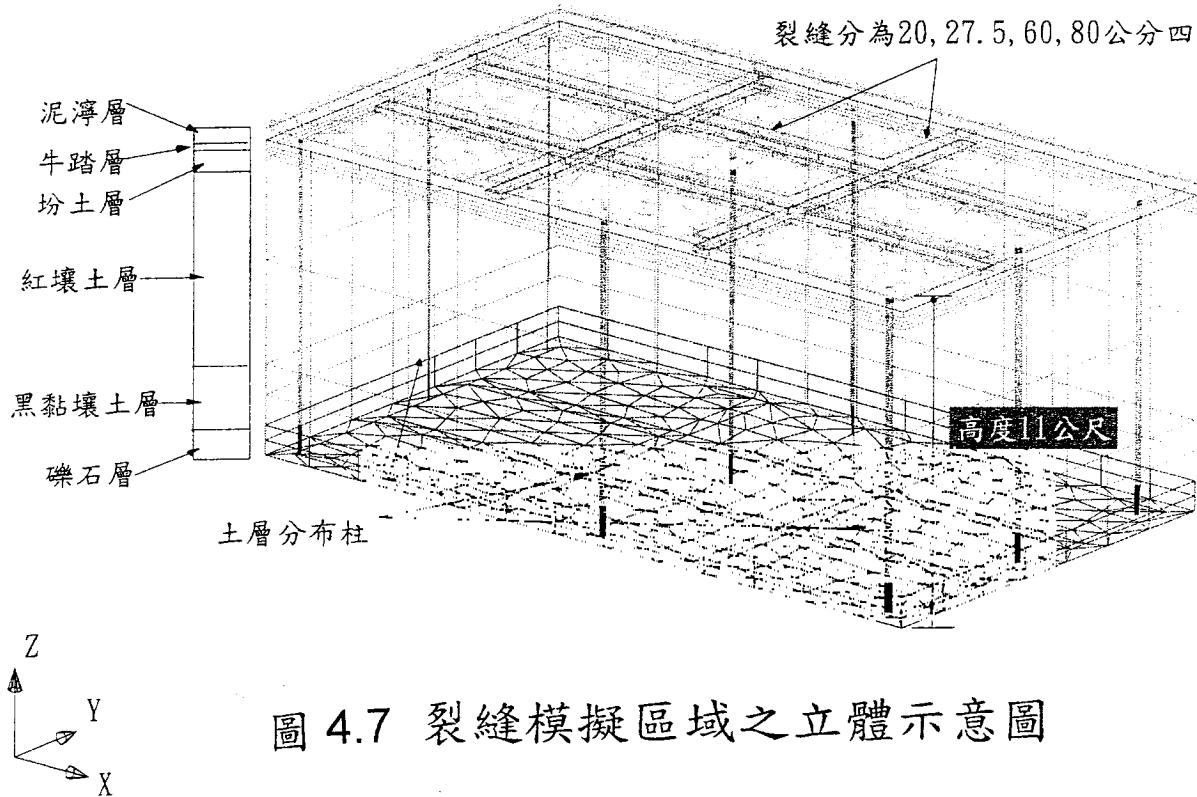


圖 4.7 裂縫模擬區域之立體示意圖

4.2.4 實驗及模擬結果

一、實驗結果

田中實驗田之土壤/水力現場及實驗室之各項分析結果如下(劉振宇及陳世楷，1998)：

1. 田中實驗田之牛踏層厚度約為 7.5 公分，飽和水力傳導係數介於 0.046~0.106cm/day，其平均值為 0.054cm/day。其基本入滲率介於 2.91~7.68mm/day，平均值為 3.55mm/day。
2. 牛踏層以下底層土壤之滲透性較佳，各土層飽和水力傳導係數約為牛踏層之 20~30 倍。牛踏層以上之泥濘層對垂向水流仍有部份阻抗性，在計算牛踏層入滲通量時，仍應評估入滲水頭在此層之損失。
3. 由上述以定水頭湛水深 6 公分者為比較之基準，則增加湛水深 (10 公分) 及打破牛踏層均可使入滲率增加，惟前者之增加效果較為有限，約為 1.47 倍，後者則可大幅增加入滲效果，可達 3.68 倍左右。
4. 未經犁耙整地之水田在乾田時期因田面龜裂造成牛踏層之破壞，在豪雨期間可吸納較經犁耙整地濕田狀態下水田更多之入滲水量。未來應進一步評估其蓄/截洪功能。

二、模擬結果

FEMWATER 之模擬狀況，是依據水田初始壓力水頭、乾田區地層土壤初始壓力水頭、水田區地層土壤初始壓力水頭、有無牛踏層等狀況，共分為 12 種不同組合，如表 2 所示，除了為瞭解不同水田初始壓力水頭對入滲及地下水補注量之影響外，並對非飽和層土壤流況、各種土層側流與垂直流比較及土層中滲漏率隨時間變化情形加以探討。

(一) 入滲率

在觀測區模擬中，隨著不同之定水頭大小與不同乾濕邊界其入滲率分別探討如下：

1. 變水頭一維 SAWAH 垂向入滲率模擬，模擬之輸入條件以彰化地區水田灌溉計畫為依據，五天一個期距，每次灌水 5cm，蒸發散量設為 4mm/day，平均入滲率如表 4.5 所示，當水田初始壓力水頭為 15cm 時，平衡之平均入滲率 2.6mm/day，20cm 時為 3.4mm/day，25cm 時為 4.1mm/day，各相差 0.5mm/day。
2. 定水頭入滲率模擬，因為三維 FEMWATER 模式無法由入滲率自行計算水頭變化之變水頭模擬，所以此模式必須改以定水頭來探討水田入滲補注，由模擬出來的結果得知，隨著不同的定水頭，其入滲率會有些微的變化，當水田初始壓力水頭為 15cm 時，平衡之基本入滲率 3.8mm/day，20cm 時，為 3.86mm/day，25cm 時，為 4.1mm/day，當定水頭大時基本入滲率會隨著變大，相差為 0.06mm/day 和 0.26 mm/day，差異不若變水頭情況明顯，而當初始土壤的乾濕度不一時，入滲率變化較為明顯，初始水田壓力水頭皆為 20cm，但是初始土層土壤的壓力水頭相差 10 倍，分別為 -1.2m 與 -12m，剛開始時的入滲率變化較大，而隨著時間加長，兩者有越接近的趨勢，到 60 天時入滲率分別為 3.86mm/day 與 5.5mm/day。
3. 無牛踏層時入滲率明顯變大，初始土層土壤壓力水頭皆為 -1.2m，三種水頭 15cm、20cm、25cm 之入滲率分別為 12mm/day、12.5mm/day、13.1 mm/day，相差約 0.5mm，而有 /無牛踏層入滲率之比較相差約 3 倍。

表 4.5 入滲模擬情況比較表

模擬 情況	入滲率 (m/day)	水田區地層 土壤初始壓 力水頭(m)	乾田區地層 土壤初始壓 力水頭(m)	水田壓力 水頭(m)	水頭條件	地下水位 深(m)	牛踏層
1	0.0038	-1.2	-1.2	0.15	定水頭	9.8	有
2	0.00386	-1.2	-1.2	0.20	定水頭	9.8	有
3	0.0041	-1.2	-1.2	0.25	定水頭	9.8	有
4	0.00398	-1.2	-3.3	0.20	定水頭	9.8	有
5	0.00408	-1.2	-6.9	0.20	定水頭	9.8	有
6	0.0026	-1.2	-1.2	0.15	變水頭	9.8	有
7	0.0034	-1.2	-1.2	0.20	變水頭	9.8	有
8	0.0041	-1.2	-1.2	0.25	變水頭	9.8	有
9	0.012	-1.2	-1.2	0.15	定水頭	9.8	無
10	0.0125	-1.2	-1.2	0.20	定水頭	9.8	無
11	0.0131	-12	-1.2	0.25	定水頭	9.8	無

(二) 地下水補注量

地下水補注量之比較，主要以有無牛踏層兩種情況來分析，選取地下水面上 3.25 公尺的水平格網層計算其流通率，有牛踏層時 30 天的補注量為 8319 立方公尺，無牛踏層時地下水補注量為 14200 立方公尺，補注量相差約 1.7 倍，因此，如果藉由農田補注地下水，打破牛踏層，為有效增加補注效率。

(三) 側向滲漏及田面開裂入滲

探討側向滲漏時，先將田區分為中央水田區、乾濕邊界區、乾田區，並依不同土壤型態與假設三種不同乾田區地層土層乾濕度相互模擬比較。探討水田田面開裂對入滲之影響時，則是根據實驗田稻作殘株開裂情形，配合近年 Hasegawa and Sato(1985)提出之作物裂縫模式作為探討乾田入滲水力特性機制之模型。結果如下：

1. 乾田區土層越乾躁，側滲率越大，但是中央水田區由於是水田直接補注區，水分補充含量較均勻，因此側滲率較小，比較側向滲漏率，其中乾濕邊界與乾田區約差一個級數(1 order)，而乾濕邊界與中央水田區則差三個級數(3 order)。黑黏壤土層受到地下水影響甚大，所以乾田區的側滲會異於另三種土壤。
2. 乾濕邊界區側向滲漏於乾田區土層較水田區土層乾燥時，側滲甚為明顯，且在坋土層、紅壤土層、黑黏壤土層時較垂直入滲率大，相差 3~10 倍。至於乾田和水田土層初始含水量一致時，垂直入滲還是比側滲為大，相差 2~10 倍。牛踏層

由於與泥漿層和湛水直接接觸，故垂直入滲較側滲為明顯。

3. 乾田區域並無水分由田面直接補充，因此地層土壤水分除了初始含水量外，必須由水田區側滲補充，當乾田區土層初始含水量少於水田區土層初始含水量時側滲較垂直入滲為大，乾田區地層土壤初始壓力水頭為-3.3m 時，相差約 10 倍，初始壓力水頭為-6.9m 時，相差約 100 倍，但於水田區與乾田區土層初始含水量相同時，垂直入滲會大於側滲，相差約 10 倍。
4. 田面龜裂造成牛踏層破壞後，因入滲壓力水頭增加，使裂縫底緣入滲量大幅增加，模擬顯示裂縫深度達 80cm 時，基本入滲量可達 9.4cm/day，遠較水田經耕犁湛水後之入滲率（約 3.55mm/day）為高。

第五章、綜合討論

區域入滲量之推估需要龐大及完整之各項資料，以水田入滲為例，所需資料包括各管理處工作站工作小組內輪灌小區之土壤質地、粘粒百分比、期作別、灌溉天數及灌溉面積等資料。台西及麥寮兩鄉僅有部份資料可供應用，因此在進行入滲量推估前利用鄰近區域具有較完整灌排及氣象水文資料之區域進行入滲模式與經驗公式測試，為避免謬誤之必要程序，本計畫歷年來利用濁水溪沖積扇頂區之田中實驗田及扇央區之麻園實驗田進行相關驗證工作。並以此結果配合台西麥寮兩鄉現有資料進行區域入滲量之推估。並評估藉由加高田埂、改變牛踏層厚度、超量灌溉、改變耕作制度及改變灌溉方式等方法促進水稻田對地下水補注之功效，以達成將農田水利會轄區內之水田，於休耕期間將多餘之灌溉水量引灌入田增加涵養地下水之效益，達到地下水永續利用之目標。

5.1 水田有效補注量分析及補注區規劃原則

一、補注田區應以大面積相鄰輪區為主

具有乾濕邊界之水田區，其側向滲漏影響因子包括各土層土壤之滲透性、乾/旱田區土壤初始含水量、乾濕邊界長度以及納入計算基準之水田區面積等。在側向滲漏比例

推估上，所需考量之因素極眾。由於乾田區之土壤乾濕程度造成水田區通過牛踏層之垂向入滲率改變幅度較小，在簡化推估因素之考量下，此一垂向入滲可以用基本入滲率加以代表之，但在計算側滲比例上，則應依乾/旱田區土壤初始含水量為估算之重要依據。此外，在推求側滲佔整體入滲水量比例時，即會衍生出因水田區面積不同（乾濕邊界長度亦隨之改變）造成計算結果差異之問題。

根據本計畫第四年度之模擬結果顯示，以台灣水田重劃之典型佈置（以 12 公頃為灌溉單元，每一基本坵塊長 100m × 寬 40m，共計 30 個坵塊）配合田中地區土層組合作為計算依據。假設此一灌溉單元四周均為旱田或乾田，此時乾濕邊界長度為（長 200m，寬 600m，周長為 1600m），側流量在乾濕邊界土壤壓力水頭為 -3.3m 對應 -1.2m 之情況下，有效之地下水補注量佔入滲總量之 70.86%。當乾濕邊界土壤壓力水頭為 -6.9m 對應 -1.2m 之情況下，有效之地下水補注量則佔入滲總量之 38.52%。

另以四個灌溉單元構成一輪區計 48 公頃為計算單位，（目前一般水利會輪區約 50 公頃），其乾濕邊界最長者為 5200m（長 200m，寬 2400m，四周均為乾（旱）田），在乾濕邊界土壤壓力水頭為 -3.3m 對應 -1.2m 之情況下，有效之地下水補注量佔入滲總量之 76.33%。在乾濕邊界土壤壓力水頭為 -6.9m 對應 -1.2m 之情況下，有效之地下水補注量

則佔入滲總量之 50.05%。

因此，若以本區休耕水田種水從事補注任務時，在規劃上應以各坵塊相鄰接形成大面積補注池方有較佳之補注效果，當種水坵塊呈畸零分佈，散佈於乾/旱田區，勢必增加乾濕邊界長度，導致側滲量增加，減少水田入滲之有效補注量。

二、補注田區應先行曬田使牛踏層自然破壞

受到耕犁作用及牛踏層之拘限，水田在整田後湛水狀態下，基本入滲率大幅下降，田中試驗田區現地實驗結果（劉振宇等，1998）與數值模擬皆可清楚比較出此種明顯之差異，前者乾田區之平均基本入滲率（ 160.3mm/day ）約為水田區（ 3.55mm/day ）之 45.15 倍。研判為水田在稻作收割後，因排水及自然蒸發造成田面乾裂，在無大量水分重新補充至淺層土壤之情況下，造成開裂逐漸向底層土壤發展，遇豪雨造成田面湛水時，強大之壓力水頭加上土壤初始含水量較低之情況下，使得初期之入滲率極大。國外學者之研究則指出，水田經耕犁後，其入滲率可降低為未耕犁前之 $1/500\sim1/1000$ 倍（Wopereis et al., 1992; Adachi, 1992）。其中，前者用以實驗之田區（包括水田及乾田）為將近 10 年未曾種植水稻者，後者則為實驗室之研究。若從以往本省農民之耕作習慣加以探討，在前期稻作收穫後，通常即進

行粗耕翻犁曬田，使土壤充分風化，並促使埋入土中之稻草殘株等有機物分解及有毒物質之釋放。此一過程研判具有阻止水田田面開裂面向下發展之功能，使牛踏層不致受到嚴重破壞，使下期作之整田或本田用水維持合理之範圍。此一結果應為前述之翻犁曬田過程，抑制牛踏層之自然破壞。此外，在進行水田休耕期引多餘水源進入田區進行補注時，是否需要進行翻耕作業，值得進一步研究。而水田在不翻耕之情況下，其牛踏層是否會形成更大之破壞，導致復耕時需耗用更多之灌溉水量及肥料，亦應進行長期觀測，使水田所具有之生產、生態及生活等公益功能能獲得平衡發展。

5.2 水田超量灌溉及休耕期水田蓄水之討論

灌溉水分對水稻生長雖然非常重要，但並非全期需要保持湛水狀態，其所需之灌溉水量依各生長期而異。在灌溉制度方面，目前本省水田灌溉係以輪灌為主，以適量用水及依序灌溉為其基本精神，一次灌溉之水深，可供數日之作物需求、土壤滲漏、田面蒸發及數日之乾田狀態，此一經歷時間即為輪灌期距。一般而言，水田之灌溉用水大略可分為三個階段：

(1).秧田時期：秧田需水量包括秧田之整地用水量及育秧用水，因秧田面積佔本田面積一般在 $1/25\sim 1/30$ 之間，且由於

秧苗目前多由育苗中心供給，多數水利會已不供給秧田用水，故本研究並不討論此一時期之灌溉補注量。

(2).整田時期：此一部份之用水係用於本田在插秧一、二日前灌水耕犁、打碎表土及整平田面以備插秧作業所需之水量。可將農地由旱田狀態轉變為泥濘狀態，並加上一冠水深，。牛耕之深度約 10-12cm，機械耕犁可達 25cm 上下。以往整田期距可達 30 天，近年因農業機械普遍應用，期距可縮短至 15 天左右。就整田用水而言，根據甘俊二(1992)之研究指出，各水利會依土質不同，約在 120~200mm 之間。

(3).本田時期：水稻自插秧起之生育期間之灌溉狀況大致由成活至分蘖期起至完熟期止共區分為八個時期，每一時期皆有其用水需求，其中之有效分蘖終期至幼穗形成始期前之時段較不需灌溉，完熟期亦需停止供水，其餘皆需以續灌或輪灌方式保持大部分時期之濕田狀態。

普通水田堆砌有 15~20cm 高之田埂，其保水能力相當大，在台灣地區最重要之排水發生時期為每年之 7~9 月，乃由颱風挾帶之雨量所造成，故一般水稻排水問題均發生在第二期作，在整田期以後，如平常灌溉水量為 4~6cm 之地區，其田埂內尚有 11~14cm 深之蓄水能力。有關加高田埂蓄水，以超量灌溉方式增加地下水補注之措施，若需兼顧稻米產量，則需考量水稻生長期浸水高度過高造成減產之影響。

根據施嘉昌(1980)之水稻清濁水淹浸損失試驗研究分析指出，浸水日數愈多，減產率愈高。浸水深度愈深，減產率亦愈高。以濁水淹浸之減產率為大，一般言之，水之濁度愈大，水中之光線愈弱，光合作用愈不完全，故減產率愈高。另根據施嘉昌(1988)轉載日本農林省之資料顯示，水稻浸水狀況分為全淹及半淹兩種狀況，前者指稻草全部淹沒水中，半淹則指稻草葉稍露出水面約9~15cm之情形。均會使減產率隨淹浸日數增加而提高。

因此，利用加高田埂蓄水，在水稻休耕期可行，在水稻生長時期，則另需考慮淹浸水減產問題及肥料施用問題。有關國內目前水田灌溉用水管理（中國農業工程手冊，1990），可整理如表5.1所示，其中，插秧初期，秧苗株高僅10~15cm、分蘖初期湛水超過5cm易造成稻株軟弱，影響分蘖、成熟中期需水量小，均不宜灌水過深外。另外在分蘖初期及末期各有一次排水，開花末期及成熟末期均應排水，因此，實際可行超量灌溉之天數將只有40天左右，若以田中試驗田區之實驗資料，以增加湛水深10cm，增加入滲率1.7倍計算，水稻生長全期需灌溉日數約為75~80天之情況來看，根據湛水深5~6cm之基本入滲率3.55mm/day計算，則一期作水稻生長全期在超量灌溉下之總入滲量至多為 $(40+40 \times 1.7) \times 3.55 = 384.4(\text{mm})$ （若為輪灌，則小於此數），以總灌溉日數為加權因子，則加高田埂續灌方式所增加之入滲率為原

先灌溉方式之1.35倍。若以休耕期水田加高田埂蓄水增加至16cm以上，則以60天之時間種水，總入滲量可達 $(60 \times 1.7) \times 3.55 = 362.1$ (mm)以上，約略與前者相當。而犁破牛踏層之後，在不增加湛水深之情況下，60天之總入滲量可達 $60 \times 3.55 \times 3.68 = 783.3$ (mm)。以公頃為單位，水稻生長全期在一般灌溉方式下，一期作入滲量可達 2840m^3 ，二期作在生長期較短之情況下，以75天計算入滲量亦可達 2663 m^3 。超量灌溉時，一期作入滲量可達 3844m^3 ，二期作約可達 3594 m^3 。休耕期水田加高田埂蓄水增加至16cm以上，60天時間種水總入滲量達 3621 m^3 以上，犁破牛踏層不增加湛水深時，60天之總入滲量可達 7833 m^3 。以上計算結果整理如表5.2所示，據此可知，犁破牛踏層之補注效果不僅大於原先灌溉方式一、二期作入滲總和，亦較超量灌溉時兩期作總和為大。

5.3 台西麥寮地區以水田補注地下水之可行性探討

一般而言，農田水利會轄區水田以外農地，多屬水源不足、引水較為困難之地區，或其土質透水性過大不適水田耕種之土地，而轄區以外之農田多從事旱作，沿海地區之砂質土壤則以種植作物需水量較少之瓜類作物，以減少作物用水之需求。

根據台灣省水利處"濁水溪沖積扇扇頂平原地區地表垂向

補注量”之研究指出（1997），非水田灌區旱田入滲補注量之估計，可以用到蒸發散、非飽和土壤水份滲流模擬，以及地表、地下耦合長期水文模擬的方法。因為降雨或灌溉發生在乾涸的田地與湛水的田地，對於入滲補注地下水的效果差異很大；前者水分主要是增加地表土壤的水分含量，除非連續下雨，達到積水情形如後者，否對於地下水的補注較缺乏效果。旱田與其他土地利用入滲注量估計方法的差異，在於逕流係數與窪蓄容量的有與無，研究結果顯示，在沒有灌溉水量也缺乏連續長時間降雨的情形下，根據一維非飽和層長期水文模式模擬計算結果，可耕地在台灣中部地區的氣候條件下，降雨量和雨後暫存於土壤的水份含量，都會被蒸發散所消耗，無法產生有效的地下水補注量。在水體、河道以及長期保持灌溉的農作區域，才會有較為顯著的地下水補注量。

考慮補注水量之來源，引水渠道之連接，在農田水利會轄區外之農地進行地下水補注之工作，實在有其困難之處，加以在一般降雨條件下，降雨量和雨後暫存於旱田土壤中之水分含量，多被蒸發散所消耗，不易產生有效之地下水補注，故引水灌溉轄區外之農地進行地水補注，並無法增加地下水之補注效益，涵養地下水，產生水田生活、生態之公益機能，因此，利用農田水利會轄區內之水田，於休耕期間委由水利會雇工將多餘之水量分區分年（避免水田

長期湛水使土壤處於還原狀態)引灌入田，增加涵養地下水是為有效補注地下水、涵養地下水水源之方法。

基於雲林一帶為本省傳統之農業縣份，農業開發甚早且為著名之穀倉，現存之水田歷史多在百年以上，復因位處濁水溪沖積扇，淺層土壤成分差異不大，在假設牛踏層厚度及水力傳導係數差異不大之情況下，其本田時期單位面積(公頃)通過牛踏層之入滲水量估計差異不大，應與田中地區實驗量測值 3.55mm/day 接近。而就一般旱作維持正常生長之條件來看，土壤水分含量可推斷在田間含水量至凋萎點之間，亦為本模擬所使用之 $-3.3\text{m} \sim -6.6\text{m}$ 壓力水頭之間，因此台西麥寮兩鄉之水旱田交界區必會產生部分側滲現象，然因地下水位較高(約4.5公尺)，側滲邊界之通量面積相對較小，因此當補注田區面積如5.2節之假設，當一灌溉單元四周均為旱田或乾田，有效之地下水補注量應大於田中地區之70.86%。當乾濕邊界土壤壓力水頭為 -6.9m 對應 -1.2m 之情況下，有效之地下水補注量應大於田中地區之38.52%。另以四個灌溉單元構成一輪區計48公頃為計算單位，其乾濕邊界最長者為5200m，在乾濕邊界土壤壓力水頭為 -3.3m 對應 -1.2m 之情況下，有效之地下水補注量應大於田中地區之76.33%。在乾濕邊界土壤壓力水頭為 -6.9m 對應 -1.2m 之情況下，有效之地下水補注量應大於田中地區之50.05%。事實上，以台西麥寮兩鄉水利會灌區水田面積約為

3234.5公頃，輪灌坵塊分別為麥寮鄉54個及麥寮鄉37個。多為相鄰接之水田專業區，因此其耕作期間之有效補注比例要較前節計算者高出甚多。

但考慮當地三年一作或三年二作之灌溉用水限制，超量灌溉並非全然可行。綜合前節之討論，較可行之補注方式應為利用休耕期水田加高田埂蓄水增加至 15~20cm 以上，假設本區水田入滲通過牛踏層之通量與田中地區接近，則 60 天時間之總入滲量達 $3621\text{ m}^3/\text{公頃}$ 以上，犁破牛踏層不增加湛水深時，60 天之總入滲量可達 $7833\text{ m}^3/\text{公頃}$ 以上。若以單一輪區坵塊計算，即使四周均為乾/旱田，有效補注量以 80% 計算（由於該區夏季屬豐水期，在降雨量較大之情況下，即使乾/旱田亦有較高之土壤水分含量，乾濕邊界土壤壓力水頭以 -3.3m 對應 -1.2m 較為適當），則前者 60 天時間有效補注量可達 $2897\text{ m}^3/\text{公頃}$ 以上，後者亦可達 $6266\text{ m}^3/\text{公頃}$ 以上。由於沿海地區，每逢颱風豪雨便積水成災，或引發海水倒灌，因此利用較為上游之水田加高田埂，不僅可調節洪水，更可增加地下水補注，此種利用休耕水田進行補注之方式，值得進一步加以評估推廣。而部分休耕田區若能以政府補助方式，使其保持曬田乾裂狀態，亦有助於颱風豪雨期間吸納更多之降雨量。

第六章、結論與建議

6.1 結論

本研究以探討研究區域內農漁用地入滲對地下水涵養補注之機制為主，以提供作為研擬增加地下水涵養補注可行方法之基本依據，在綜合運用現地試驗、一維 SAWAH 及三維 FEMWATER 數值模式後，可針對影響水田等農漁用地之入滲因子及可行之補注方案提出以下結論及建議：

1. 水田基本入滲受牛踏層拘限，在水稻栽培期間之灌溉入滲率偏低。魚塭則受養殖期間所投放之餌料及養殖水產之排泄物逐漸堆積，致入滲率偏低。
2. 模式推估研究區域內水田在正常灌溉下之年平均入滲量分別為台西鄉 155 萬 8 千立方公尺，麥寮鄉 454 萬 9 千立方公尺，合計兩鄉在每年第一期作（春作）時期，即 3~5 月期間約有 610 萬 8 千立方公尺之入滲量。
3. 由於水田在研究區域內之農漁用地中具有最高之入滲量，雖受期作等因素影響，全年中僅有約 3 個月左右之時間保持持續入滲，但未來若能配合水利單位近年來研擬之夏季水田蓄洪及補注地下水措施，將可大幅增加本區之入滲量。

4. 未經犁耙整地之水田在乾田時期因田面龜裂造成牛踏層之破壞，因入滲壓力水頭增加，使裂縫底緣入滲量大幅增加。在豪雨期間可吸納較經犁耙整地濕田狀態下水田更多之入滲水量。應為研究區域內地下水位觀測井地下水位在豪雨後迅速上升原因之一。
5. 大面積之水田入滲仍以垂向入滲為主。僅鄰近乾濕邊界處會有明顯之側滲發生，側滲率之大小依地下水面以上土壤層滲透性與乾田區土壤乾濕度而定，土層滲透性愈佳且乾田區土壤愈乾燥時，側滲率亦愈大，單一土層之側滲率甚至較水田區通過牛踏層之垂直入滲率為大。
6. 綜合實驗及模擬結果，可提出水田增加地下水補注功能之方法，依序為犁破牛踏層、超量灌溉及休耕期加高田埂蓄水，可作為農政單位推廣水田生態公益機能施政之參考。

6.2 建議

1. 本研究以進入水田牛踏層之入滲水流為探討對象，側向滲漏亦以牛踏層及以下土層之側滲為探討對象，對於現地田面高程差異，如能進一步考慮探討，將可估計地表水側向滲漏的流失量與土層因傾斜狀況對水分垂向或側向滲漏的影響。
2. 牛踏層在人為或自然狀態下破壞，均可大幅提升水田之入

滲率，較之提升水位等其他措施有更佳之地下水補注效果。唯是否導致復耕時需耗用更多之灌溉水量及肥料，應進行長期觀測與評估，使水田所具有之生產、生態及生活等公益功能能獲得平衡發展。

3. 在考慮補注水量之來源，引水渠道系統之供水後，應以利用農田水利會轄區內之水田於休耕期間將多餘之水量分區分年引灌入田，如能一併配合加高田埂及犁破牛踏層，則補注效果更佳。
4. 部分休耕田區若能以政府補助方式，使其保持曬田乾裂狀態，亦有助於颱風豪雨期間吸納更多之降雨量。此外，未來實施休耕補注種水時，補注區應以大面積綿延之水田為主，以減少因補注水田因畸零分佈造成乾/濕邊界增加，減損補注效果。

參 考 文 獻

1. 陳尚、李德滋，1964，“以土壤水分當量推算水稻灌溉需水量之研究”，農工學報第 10 卷第 4 期，pp15-40。
2. 水利局、台大農工系，1979.4，“灌溉系統配水技術之分析與研究”。
3. 陳尚，1980，“水稻田在水土資源保育上之功用與影響問題之研究”，農業用水內部水量調整問題之研究，p1101-1178，農業工程研究中心。
4. 中國農業工程學會，1990，“中國農業工程手冊—農業水利之部：灌溉、墾殖、管理”。
5. 林建元，1991，“地理資訊系統 ARC/INFO 入門”，松崗電腦圖書資料股份有限公司。
6. 中央氣象局，氣象年報，1990-1994。
7. 郭振泰等，1992，“放射性廢料設施及其附近地區地下水水流及水質傳輸模擬之研究(二)”，行政院原子能委員會成果報告。
8. 蔡明華，1993，“水田灌溉公益效能剖析研究”，農委會，pp1-62。
9. 林俊男，1993，“地理資訊系統應用於乾旱期安排停灌順序之研究”，農委會。
10. 台灣省雲林農田水利會，1993，“興水利農源流長”。

11. 蔡明華、林永德，1994，“因應加入 GATT 之能業對策研究 — 水稻田生態環境保護對策”，水資源經營管理研討會，台北市，pp123-137。
12. 耿慶志、薛仲修、龔誠山，1995，“雲林縣離島式基礎工業區開發計畫八十三年度整體規劃地盤沉陷研究”，中興工程顧問社。
13. 賈儀平、盧詩丁、王原賢，1996，“濁水溪沖積扇南翼之水文地質架構”，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，pp113-125。
14. 姜儼安、歐陽湘，1996，“雲林地區地下水與水平衡初步分析”，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，pp181-206。
15. 丁澈士，1996，“土壤水分收支法應用於地下水補注推估-屏東平原個案研究”，第八屆水利工成研討會論文集，pp665-672。
16. 劉振宇、陳世楷，1996，“台西至麥寮地區砂泥互層地下水流之研究(I)”，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
17. 台灣省水利局，1996，“水稻田生態環境保護規劃及示範，子題：水稻田對地下水補注供能評估分級”。
18. 工研院能資所，1996，“雲林地區地下水與水平衡初步分析”，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，pp181-206。
19. 劉聰桂等，1996，“濁水溪沖積扇之地下水資源-碳十四與氚定年/示蹤研究”，濁水溪沖積扇地下水及水文地質研討會論文集，pp145-164。

20. 簡錦樹、宋國城、賴泉基，1996，“台灣地區河海岸人工湖評估與規劃-雲嘉、高屏海岸地區之研究”，經濟部水利司。
21. 馮秋霞、許榮庭、李振誥，1997，“嘉南地區水田灌溉對地下水補注影響之評估”，第二屆地下水資源及水質保護研討會論文集，pp473-484。
22. 周曉雯，1997，“雲林地區水稻田入滲量之評估”，台大農業工程研究所碩士論文。
23. 財團法人成大研究發展基金會，1997，“台灣地區河海岸人工評估與規畫-雲嘉、高屏海岸地區之研究”，經濟部水利司。
24. 嘉義農專，1992，“台灣地區地下水觀測網第一期綱要計畫（第一年）—雲林縣沿海地區六鄉鎮地下水調查研究”。
25. 葉一隆,1998,"推廣水田生態環境保護及地下水涵養補注計畫:水稻田蓄水成效評估與提昇措施子計畫(一)",水稻超量灌溉蓄水之基本水文資料觀測與建檔(第二次工作會報書面資料),國立屏東科技大學。
26. Adachi, K., 1990, "Effects of rice-soil puddling on water percolation." In: Proceedings of the 14th International Congress of Soil Science, 12-18 August 1990, Kyoto, Japan, Vol. I. ISSS, Kyoto, Japan, pp.146-151
27. Angus, J.F., and H.G. Zandstra,(1980)."Climatic factors and the modeling of rice growth and yield",pp189-190 in Priceedings of the WMO-IRRI symposium on Agrometeorology of the rice crop,Los Banos,Philippines.
28. Belmans, C., J.G. Wesseling and R.A. Feddes, (1983). “Simulation Model of the Water Balance of A Cropped Soil: SWATRE.”, Journal of Hydrology 63:

pp271-286.

29. Bolton,F.R. and H.G. Zandstra,(1981)."A soil moisture based yield model of wetland rainfed rice.",IRRI Research Paper 62. IRRI, Los Banos, Philippines.
30. Driessen, P.M., (1986). "The Water Balance of the Soil." In: H. van Keulen and J. Wolf Eds., Modeling of Agricultural Production: weather, soil and crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp76-116.
31. Ferguson, J.A., 1970, "Effect of flooding depth on rice yield and water balance". Arkansas Farm Res., 19:4.
32. IRRI, 1965.Annual report 1964, International Rice Research Institute,Los Banos, Philippines, pp335.
33. Iwata, S., Tabuchi, T. and Warkentin, B.P., 1994,"Soil-water interactions. Mechanisms and Applications. Marcel Dekker, Inc., New York, pp362-363.
34. Klute, A., (1952). "A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials." Soil Sci. 73: pp105-117.
35. Moormann , F.R. and Van Breemen, N., 1978, "Rice: soil, water land. ", International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, pp185.
36. Miyazaki T., Hasegawa S. and Kasubuchi T.,1993, "Water Flow in Soil". Marcel Dekker, Inc., New York, pp221-253.
37. Mc Mennamy,J.A., and J.C. O'Toole,(1983)."RICEMOD: a physiologically based rice growth and yeild model." IRRI Research Paper 87. IRRI, Los Banos,Philippines.
38. Prihar, S.S., Ghildyal, B.P., Painuli, D.K. and Sur, H.S., 1985; "Physical properties of mineral soils affecting rice-based cropping systems." in:Soil Physics and Rice. International Rice Research Institute, Los Banos,

Philippines, pp57-70.

39. Philip, J.R. (1957). "The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution." *Soil Science*, 83: pp345-357.
40. Philip, J.R. (1958). "The theory of infiltration: 6. Effect of water depth over soil." *Soil Science*, 85:pp278-286.
41. Richards, L.A. (1931). "Capillary conduction of liquids through porous mediums." *Physics*, 1: pp318-333.
42. Sharma, P.K. and De Datta, S.K., 1985. "Effects of puddling on soil physical properties and processes.", in:*Soil Physics and Rice*. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, pp337-357.
43. Shan, C. and D.B. Stephens. (1992). "A generalized solution to ponded infiltration." Lawrence Berkeley National Lab., Berkeley, CA.
44. Sanchez, P.A., 1973, "Puddling tropical rice soils. 2. Effects of water losses", *Soil Sci.*, 115:pp303-308.
45. Takagi, S., 1960, "Analysis of the vertical downward flow of water through a two-layered soil.", *Soil Sci.*, 90: pp98-103.
46. Ten Berge, H.F.M., D.M. Jansen, K. Rappoldt and W. stol. (1992). "The soil water balance module SAWAH : description and users guide, Simulation Reports CABO-TT nr. 22 P.O. box 14,6700 AA Wageningen Netherlands .
47. Ten Berge, H.F.M., K. Metselaar, M.J.W. Hansen, and E.M. de San Agustin. (1995). "The SAWAH riceland hydrology model." *Water Resource Research*, 31(11): pp2721-2732.
48. Wopereis, M.C.S. et al. (1992). "Hydraulic resistance in puddled rice soils: measurement and effects on water movement." *Soil Tillage Res.*, 24:pp199.

49. Wickham, T.H. and Singh, V.P., 1978, "Water movement through wet soil." In: Soils and Rice. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, pp337-357.
50. Wopereis, M.C.S. et al. (1994). "Water use efficiency of flooded rice fields. (I) Validation of the soil-water balance model SAWAH." Agricultural Water Management, 26: pp277-289.
51. Wopereis, M.C.S. et al. (1994). "Water use efficiency of flooded rice fields. (II) Percolation and seepage losses." Agricultural Water Management, 26: pp291-304.