

利用砂箱模型評估休耕農田以砂樁補注地下水效益

Benefit Evaluation of Sand Piles in Fallow Croplands on Groundwater Recharge using Sand Tank Model

國立屏東科技大學土木工程系
副教授

葉一隆

Yi-Lung Yeh

國立屏東科技大學
土木工程系

陳智謀

Zhi-Mou Chen

國立屏東科技大學
土木工程系

曾煜璋

Yu-Wei Zeng

摘要

地下水補注為水田功能之一，但牛踏層會阻礙水分之入滲。本文利用砂箱模擬休耕水田蓄水，以評估砂樁對地下水補注之效益，並分析是否穿破牛踏層對地下水補注之影響。由實驗結果顯示，若以未植入砂樁之基本入滲率為背景值，則植入一支、三支與五支砂樁且砂樁未貫穿牛踏層之基本入滲率分別為背景值之 2.33、4.80 與 5.24 倍。植入五支砂樁而有一支、三支與五支砂樁貫穿牛踏層之基本入滲率分別為背景值之 5.82、7.93 與 9.25 倍。而為考慮田區恢復耕作時之澆水功能，將砂樁與周圍的土壤混合，以模擬田區翻耕作用，由試驗結果得其基本入滲率為背景值 0.33 倍，顯示田區翻耕後可迅速恢復水田之澆水功能。

關鍵詞：砂箱模型，休耕農田，砂樁，地下水補注，基本入滲率。

ABSTRACT

Groundwater recharge is one of the functions of paddy field. However, the hard pan will obstruct moisture infiltration. The sand tank model was used to simulate water storage in fallow paddy field for evaluating the efficiency of sand piles on groundwater recharge. The effects of sand pile pierce through hard pan on groundwater recharge was also discussed in this paper. The result shows that the basic intake rate of one, three and five sand piles which were not pierced through hard pan is 2.33, 4.80 and 5.24 times of unset sand pile on field, respectively. While one, three and five sand piles were pierced through hard pan among five sand piles has 5.82, 7.93 and 9.25 times basic intake rate of unset sand pile on field, respectively. Sand and soil mixed to recover the function of storage water of paddy field. The result shows that the mixed soil has 0.33 times basic

intake rate of background value. The experiment shows that the mixed soil can quickly recover storage water function of paddy field.

Keywords: Sand tank model, Fallow croplands, Sand piles, Groundwater recharge, Basic intake rate.

一、前言

水田在農業社會時代，往往被定位於生產機能，而忽略其對生態機能之貢獻；隨著時代進步，人類對環境之要求愈來愈迫切，而且在飲食習慣改變後，水稻田被釋出成為其他產業用途；另外，因水田區需大量引水灌溉，而使人有耗費水資源之感受，但水田所耗用之水量並非全部由植物消耗，而是另具其他生態性之機能。為維持水田之基本生態機能，政府單位鼓勵農民於豐水期之休耕期間將田間蓄水，一方面可增加土壤水份之涵養，另一方面可維持水田內之生態功能，並維持水田區之微氣候機制。

對水田生態功能之研究，蔡明華(1994)提出水田灌溉公益機能，包括生產性、生態性及生活性機能，並研提水稻田生態環境維護有關對策。吳富春與許銘熙(1995)描述水稻田之生態與環境之關係進行初步探討，以了解水稻田之水資源循環利用及水稻田土壤之理化性質描述。吳祖揚(1996)提出水田價值評估之方法並敘述其可行之法則。吳瑞賢和張嘉軒(1996)于研究水田逕流影響之評估，結果發現田埂高度對調節洪峰流量有相當大之影響，同時亦發現就長期推估水田之存在會使得深層滲漏增加，逕流量減少。甘俊二等(1997)以水資源有效利用的立場，由水田即水庫為出發點，配合農業用水的架構與鄰近國家稻作用水量比較，在不改變原有灌溉系統前提下，由臺灣傳統輪作田的特性及我國未來加入 WTO 後所面臨之衝擊，研議三生水田利用的模式。葉一隆等(2002)說明水稻田休耕蓄水對土壤肥力之影響，試驗結果顯示休耕後水稻根系腐化，造成土壤有機質以及有效磷顯著的增加。蓄水後天然蓄水田區有機質及有效磷分別增加 51% 及 88%，連續蓄水田區分別增加 13% 及 69%。而天然蓄水田

區鎂、鉀、鈉分別降低 35%，24%，及 47%，連續蓄水田區分別降低 29%，14% 及 41%。

而水田對地下水補注相關研究，Takagi(1960)首先探討灌溉水分移動指出水田灌溉之水分入滲可以非飽和穩態流來推估。Sanchez(1973)利用土壤水平衡來計算水田之滲漏率。Hamada 與 Komae(1998)利用 ^{222}Rn 來當做追蹤計來瞭解水田蓄水之水分移動情形。丁澈士等(1998)綜合地下水評估與管理研究提出地下水資源應首重評估地下水補注量，其中分析了屏東平原中農業灌溉用水對地下水補注推估量及有效之分析方法，包括直接量測及間接量測法對區域性及局部性對水稻田入滲補注提出牛踏層(Plow pan: hard pan)具有抑制入滲及滲漏之功能，對地下水補注形成一阻礙，而發現大部份土壤水沿著牛踏層(Plow pan)下方與硬板層間側向地表逕流量進入排水路排入河川，小部份或經由未連續面深層滲漏並進入地下水體形成地下水補注。葉一隆等(2000)提出地表裂縫會加速水分在土層中的入滲，在 24 小時內，有裂縫時的入滲量約是無裂縫的 4.5 倍；而地表有裂縫達到基本入滲率之時間較地表無裂縫之所需時間為長，約為 1.65 倍；地表有裂縫達基本入滲率為無裂縫之基本入滲率的 5.45 倍。劉振宇(2000)提出水田同時具有生產、生活、生態的三生功能，水田生態功能包含調節微氣候、補注地下水等。一般水田都有牛踏層(Hard pan)的存在，而牛踏層會使地面水的補注功能受限，破壞牛踏層為提高補注量的方法之一，能否回復水田原有的湛水能力是一大疑慮，通常會希望農民在整田期間增加耕犁次數，藉由耕犁翻土及農機重量之夯實，來恢復水田省水耕種的特性。經過試驗得知若只是純耕犁作用 1 次就可使基本入滲率降低為初始(牛踏層已被破壞)入滲率的 63%，純夯實作用 15 次，其基本入滲

率降低為初始入滲率的 30%，若將耕犁及夯實混合作用 14 次使基本入滲率降低至初始入滲率的 4%。黏粒含量高之田區，破壞牛踏層之後再回填原挖除的土壤，再以常用的耕犁方式施予土壤鬆土與壓實的作用即可逐漸恢復其低透水性，基本上黏粒高之田區不適合規劃為破壞牛踏層以補注地下水之田區，除非其表土以下有高透水性土壤。Chen 與 Liu(2002)在彰化田中現地量測水田蓄水之水分有效滲漏量與測流量。

本研究之目的在探討休耕水田中設置砂樁以增加地下水補注之效益，利用砂箱模型來模擬休耕水田蓄水情形，並探討砂樁穿破牛踏層增加補注量之成果。

二、研究方法與步驟

為了達到增加地下水補注之目的，藉由入滲現象之基本理論，觀測砂樁數量與處理方式對地下水補注量之效用，並評估砂樁穿破牛踏層增加補注量之成果。本實驗的主要方向在不破壞原水田的條件並合乎經濟條件之下，達到增加地下水補注量之目標。為達成此目標，本研究利用砂箱模擬水田蓄水以補注地下水，模擬項目包括以下八項：

- (1) 在砂箱中模擬水田未植入砂樁之入滲情形。
- (2) 在砂箱中模擬水田植入一支砂樁且砂樁未穿破牛踏層之入滲情形。
- (3) 在砂箱中模擬水田植入三支砂樁且砂樁均未穿破牛踏層之入滲情形。
- (4) 在砂箱中模擬水田植入五支砂樁均未穿破牛踏層之入滲情形。
- (5) 在砂箱中模擬水田植入一支砂樁貫穿牛踏層四支未貫穿牛踏層之入滲情形。
- (6) 在砂箱中模擬水田植入三支砂樁貫穿牛踏層兩支未貫穿牛踏層之入滲情形。
- (7) 在砂箱中模擬水田植入五支砂樁貫穿牛踏層牛踏層之入滲情形
- (8) 探討復耕時之入滲情形，將砂樁與周圍的土壤混合後蓄水，探討入滲情形。

為了解水田因植入砂樁對於水分入滲與在

土壤內移動之影響，本研究利用砂箱實驗方式進行分析，其試驗步驟如下：

- (1) 至休耕的水稻田區取得土樣後，將土樣氣乾後敲碎處理，再利用 10 號篩網篩選，去除石塊及雜草，作為試驗之土樣。
- (2) 從校區內取得黏土土樣，同樣將土樣氣乾後敲碎處理，利用 10 號篩網篩選，去除石塊及雜草，作為試驗之黏土土樣。
- (3) 分析田區土壤以及校區黏土之各項物理性質。
- (4) 利用寬約為 30cm、高約為 97cm 及長約為 600cm 之長方形的砂箱，將砂箱內裝水，在將土樣分層填入。首先填入厚度約為 30cm 之飽和石英砂，使其自然沉降填入砂箱中。接著填入厚度約 11cm 較難透水的黏土以模擬牛踏層，自然沉降填入砂箱中。最後填入約 28cm 之壤土，自然沉降填入砂箱中，而後將水排掉，使土樣產生壓密，砂箱之配置如圖 1 所示。
- (5) 在填土過程中，分別在靠近黏土層上下兩側(由土壤表面預計高度起算 22cm 及 43cm 處)，埋入土壤水分張力感應器(water- mark)，以量測土層中水分移動的情形。
- (6) 待土樣穩定不再沉陷後，再砂箱上方指定位置再堆兩個土堤高約 20cm，作為田區的田埂。
- (7) 再砂箱上方及兩田埂間緩緩加水，蓄水深約 10 公分，模擬田區灌水。準備一支量筒，筒內裝水以量測蒸發量。
- (8) 依各組需要擬定記錄之時間，觀測並記錄砂箱水位變化量及土壤水分張力感應器的讀數。
- (9) 當砂箱中水分完全入滲進入土壤後，在砂樁預定位置利用鋼管取樣，而後植入第一支深度 23cm 之砂樁，重複第 7、8 的步驟。
- (10) 當砂箱中水分完全入滲進入土壤後，植入第二支及第三支的砂樁(砂樁深度 23cm)，重複第 7、8 的步驟。
- (11) 當砂箱中水分完全入滲進入土壤後，植入

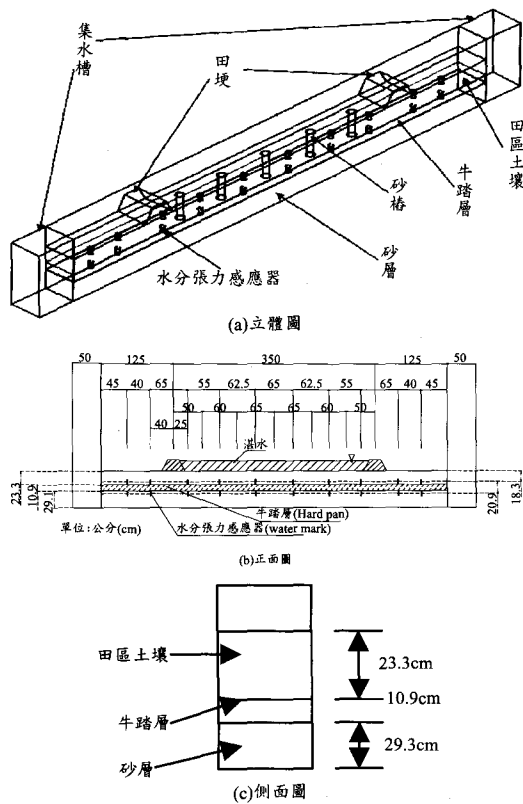


圖 1 實驗之砂箱配置圖

第四支及第五支的砂樁(砂樁深度 23cm)，重複第 7、8 的步驟。

- (12) 當砂箱中水分完全入滲進入土壤後，將第一支砂樁重新植入並貫穿牛踏層(砂樁深度 50cm)，重複第 7、8 的步驟。
- (13) 當砂箱中水分完全入滲進入土壤後，將第二支及第三支砂樁重新植入並貫穿牛踏層(砂樁深度 50cm)，重複第 7、8 的步驟。
- (14) 當砂箱中水分完全入滲進入土壤後，將第四支及第五支砂樁重新植入並貫穿牛踏層(砂樁深度 50cm)，重複第 7、8 的步驟。
- (15) 當砂箱中水分完全入滲進入土壤後，將砂樁與周圍的土壤混合，重複第 7、8 的步驟。
- (16) 自砂箱中取出土樣進行土壤基本物理性質分析。

三、砂箱試驗結果

(一) 土壤物性試驗

表 1 土壤分類試驗結果

試驗項目	田區土壤	校區粘土
液性(%)	27.143	33.636
塑性(%)	21.628	14.014
塑性指數(%)	5.155	19.622
通過#200 篩百分比(%)	55.45	83.00
美國統一土壤分類	有機質粉土	低塑性粘土

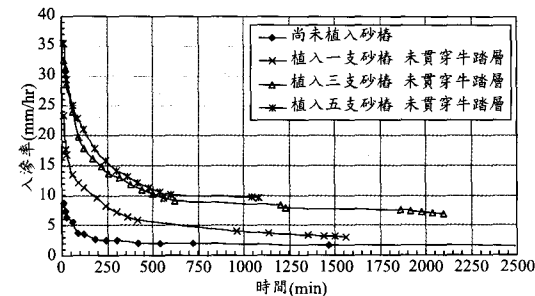


圖 2 砂樁未貫穿牛踏層與未植砂樁之入滲率比較

將田區與校區所取得之土樣進行液性、塑性及篩分析，以進行土壤分類，實驗結果如表 1 所示，由結果可知田區土壤為有機質粉土，校區土壤為低塑性粘土，而其水力傳導係數由滲透實驗分別求得為 1.2×10^{-6} cm/sec 與 2.0×10^{-7} cm/sec。砂層之水力傳導係數亦由實驗求得為 1.9×10^{-4} cm/sec，砂樁之水力傳導係數為 2.9×10^{-4} cm/sec。

(二) 砂樁補注地下水之砂箱試驗

入滲為水分進入土壤孔隙介質之過程，本文利用 Kostikov 模式來套配水分在土壤孔隙介質間傳輸的基本入滲率(Clemmens, 1983)，其入滲率之公式可表示為 $I = Kt^a$ ，其中 I 為入滲率(mm/hr)， K 為一係數， t 為時間(min)， a 為一係數。而依據美國西部諸州之設計基準規定，當入滲率之變化率達到入滲率之 10%時，該時間 t_b (min)之入滲率稱為基本入滲率 I_b (mm/hr)。故基本入滲率 $I_b = Kt_b^a$ 。

依據砂箱試驗之結果，將砂樁未貫穿牛踏層與未設砂樁之入滲率對時間變化比較曲線繪於圖 2，砂樁貫穿牛踏層與未設砂樁之入滲率對時間變化比較曲線繪於圖 3，而砂樁移除後與未設砂樁之入滲率對時間變化比較曲線繪於圖 4，利

表 2 各種砂樁配置之入滲率方程式之參數與基本入滲率之計算結果

砂樁配置方式	K	a	t_b (min)	I_b (mm/hr)
尚未植入砂樁	18.397	-0.3358	201.48	3.097
植入一支砂樁且未貫穿牛踏層	70.672	-0.4136	248.16	7.220
植入三支砂樁且未貫穿牛踏層	79.452	-0.3191	191.46	14.856
植入五支砂樁且未貫穿牛踏層	82.224	-0.3105	186.3	16.222
植入五支砂樁而一支貫穿牛踏層	51.174	-0.2149	128.94	18.011
植入五支砂樁而三支貫穿牛踏層	47.551	-0.1475	88.5	24.546
植入五支砂樁而五支皆貫穿牛踏層	43.991	-0.1039	62.34	28.634
田區復耕試驗之砂樁移除	44.265	-0.6331	379.86	1.030

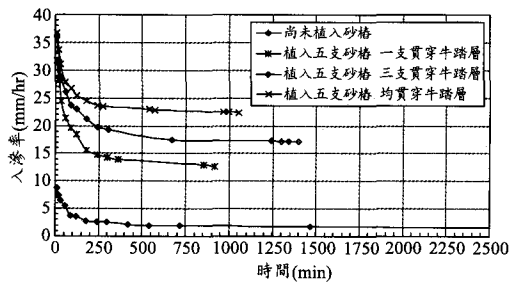


圖 3 砂樁貫穿牛踏層與未植砂樁之入滲率比較

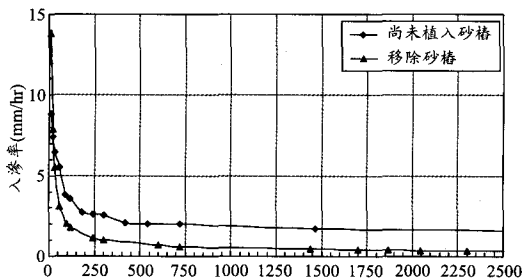


圖 4 砂樁移除後與未植砂樁之入滲率比較

用各種砂樁配置之入滲率曲線，以 Excel 套配得各配置之入滲率曲線方程式，即可求得入滲率曲線方程式中之 K 及 a 兩係數，再計算求出達基本入滲率之時間及基本入滲率列於表 2。

(三) 土壤水份移動量測

本研究於牛踏層上下位置各埋設 10 個土壤水分張力計(WaterMark)，埋設位置如圖 1(b)所示，此些土壤水分張力計可用來瞭解土壤內水分移動情形。此種土壤水分張力計之讀值為 0~2 bars，當土壤完全飽和時讀數為 0，而當土壤完

全乾燥時讀數為 2 bars。為使各次實驗之臨前條件相同，本研究儘量控制使土壤水分張力計之讀數接近於 0。若土壤水分張力計之編號由左自右邊號 1,2,...,10，表 3 為 1 號、5 號及 10 號土壤水分張力計在各實驗之讀值，由此表可知在試驗過程中砂箱中土壤均接近於飽和狀態，而由實驗觀察得知砂箱兩側之土壤有水分滲出之現象。

四、結果分析與討論

(一) 砂箱中植入砂樁之效益評估

利用表 2 之基本入滲率之結果，以未植入砂樁之基本入滲率為背景值，將植入砂樁所得之各基本入滲率與背景值比較，所得之倍率關係列於表 4，由表 4 可得知植入砂樁後之基本入滲率與未植入砂樁之入滲率相比，所得之倍率皆會提高，這說明了砂樁確實有提高入滲率之倍率，增加地下水補注效益之功用。

以植入一支砂樁且未貫穿牛踏層的情況而言，植入一支砂樁的入滲率為未植入砂樁之 2.33 倍，補注效益著實提高不少。植入三支與五支砂樁分別為未植入砂樁之 4.80 與 5.24 倍之入滲率，由此可瞭解增加砂樁支數，入滲率也會跟著加倍。

當砂樁在貫穿牛踏層之後，增加補注效益的結果更是顯著。以五支砂樁未貫穿牛踏層與五支砂樁一支砂樁貫穿牛踏層相比，一支砂樁貫穿牛踏層比砂樁未貫穿牛踏層多出 1.11 倍的入滲率。再以五支砂樁皆貫穿牛踏層的情況與未植入砂樁相比較，補注效益是未植入砂樁前的 9.25 倍，效益十分可觀。

表 3 各種砂樁配置之土壤水分張力計觀測結果

尚未植入砂樁						一支砂樁且未貫穿牛踏層							
時間 (分)	1 號		5 號		10 號		時間 (分)	1 號		5 號		10 號	
	上	下	上	下	上	下		上	下	上	下	上	下
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
540	0	0	0	0	0	0	300	0	0	0	0	0	0
1465	0	0	0	0	0	0	1140	0	0	0	0	0	0
2880	0	0	0	0	0	0	1440	0	0	0	0	0	0
4040	0	0	0	0	0	0	1560	0	0	0	0	0	0

三支砂樁且未貫穿牛踏層						五支砂樁且未貫穿牛踏層							
時間 (分)	1 號		5 號		10 號		時間 (分)	1 號		5 號		10 號	
	上	下	上	下	上	下		上	下	上	下	上	下
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
320	0	0	0	0	0	0	300	0	0	0	0	0	0
560	0	0	0	0	0	0	540	0	0	0	0	0	0
1201	0	0	0	0	0	0	795	0	0	0	0	0	0
2100	0	0	0	0	0	0	1080	0	0	0	0	0	0

五支砂樁且一支貫穿牛踏層						五支砂樁且三支貫穿牛踏層							
時間 (分)	1 號		5 號		10 號		時間 (分)	1 號		5 號		10 號	
	上	下	上	下	上	下		上	下	上	下	上	下
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	302	0	0	0	0	0	0
495	0	0	0	0	0	0	670	0	0	0	0	0	0
735	0	0	0	0	0	0	1045	0	0	0	0	0	0
915	0	0	0	0	0	0	1400	0	0	0	0	0	0

五支砂樁均貫穿牛踏層						移除砂樁							
時間 (分)	1 號		5 號		10 號		時間 (分)	1 號		5 號		10 號	
	上	下	上	下	上	下		上	下	上	下	上	下
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0
270	0	0	0	0	0	0	600	0	0	12	0	0	0
570	0	0	0	0	0	0	1440	0	0	12	0	0	0
865	0	0	0	0	0	0	2880	0	0	12	0	0	0
1056	0	0	0	0	0	0	3280	0	0	12	0	0	0

而植入砂樁後再將其移除，與未植入砂樁之入滲率相比，所得之入滲倍率僅有 0.33 倍，此說明植入砂樁後將田區翻耕以移除砂樁，土壤可快速恢復其滲水能力。

(二) 砂樁貫穿牛踏層效益評估

當五支未貫穿牛踏層之砂樁其入滲試驗完成後，將五支砂樁一支砂樁貫穿牛踏層，基本入

表 4 各種砂樁配置之基本入滲率與背景值比較結果

砂樁配置方式	倍率
植入一支砂樁且未貫穿牛踏層	2.33
植入三支砂樁且未貫穿牛踏層	4.78
植入五支砂樁且未貫穿牛踏層	5.24
植入五支砂樁而一支貫穿牛踏層	5.82
植入五支砂樁而三支貫穿牛踏層	7.93
植入五支砂樁而五支皆貫穿牛踏層	9.25
田區復耕試驗之砂樁移除	0.33

滲率能從 16.222(mm/hr)增至 18.011(mm/hr)。若再將兩支砂樁貫穿牛踏層，增至三支砂樁貫穿牛踏層，則能使基本入滲率提升至 24.546(mm/hr)。最後將剩下的兩支砂樁貫入牛踏層，使得五支砂樁均貫入牛踏層，則可使基本入滲率再提升至 28.635(mm/hr)。

由以上得知，五支砂樁一支貫穿牛踏層比五支未貫穿牛踏層之基本入滲率多出 1.789 (mm/hr)；而五支砂樁三支貫穿牛踏層則比五支未貫穿牛踏層之基本入滲率多出 8.342(mm/hr)；最後將五支貫穿牛踏層的砂樁與五支未貫穿牛踏層的砂樁其相比，其基本入滲率多出了 12.412 (mm/hr)。由此可知，若砂樁能貫穿牛踏層，則入滲率必能大幅提升。此乃因為藉由砂樁貫穿牛踏層，可使水分快速入滲進入地下透水層，使得地表水可藉由砂樁的孔隙加速補注地下水之緣故。

(三) 田區復耕試驗分析

當植入五支貫穿牛踏層的砂樁完成入滲試驗之後，將其重新澆水並把土壤表面 5-10cm 厚的土壤利用耙子以耕犁模擬田區方式整田，發現耕犁後造成入滲率明顯下降，其原因為土壤受擾動後，造成土壤結構鬆散，產生很多細微顆粒懸浮，沈澱後不但阻塞了砂樁，更隨著水的入滲阻塞了土壤內部的孔隙，使得入滲率大幅下降，而且低於尚未植入砂樁狀態之入滲率。以田區種植水稻須澆水的角度考量，擾動砂樁使得田區回復澆水能力之目的可快速達成。

表 5 各種砂樁配置方式之總滲流量之數值計算與觀測值比較

砂樁配置方式	觀測累計時間 (min)	觀測之總滲流量 (m ³)	數值計算之總滲 流量(m ³)	相對誤差百分比 (%)
尚未植入砂樁	4020	0.1182	0.1101	6.85
植入一支砂樁且未貫穿牛踏層	1560	0.1431	0.1419	0.84
植入三支砂樁且未貫穿牛踏層	2100	0.3545	0.3503	1.18
植入五支砂樁且未貫穿牛踏層	1080	0.2446	0.2415	1.27
植入五支砂樁而一支貫穿牛踏層	915	0.2329	0.2268	2.62
植入五支砂樁而三支貫穿牛踏層	1400	0.4522	0.4520	0.04
植入五支砂樁而五支皆貫穿牛踏層	1056	0.4345	0.4297	1.10
田區復耕試驗之砂樁移除	3280	0.0337	0.0296	12.17

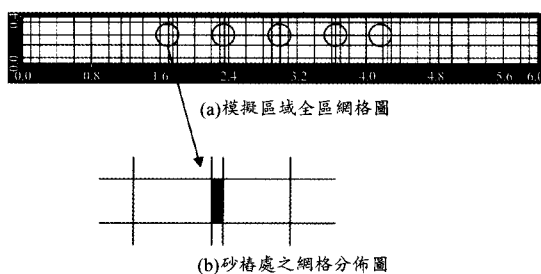


圖 5 數值模式模擬之網格分佈圖

五、數值模式分析

為評估砂樁對地下水補注之效益，本文利用 Visual MODFLOW 模式來模擬田區蓄水之入滲量變化，概念模式係依據圖 1 之尺寸來建立，本概念模式分成三層，其中間層為牛踏層，上層為田區土壤，下層為砂層，模式之網格分佈如圖 5 所示。在上層土壤上方有一長 350cm、寬 30cm 之蓄水區，邊界條件之設定除在集水槽為滲流面及上方為時變之減水深邊界外，其餘各面為不透水邊界。起始條件之設定由表 3 可知砂箱內之土壤在飽和狀態，故網格點起始值為其高程值，而數值計算時間依實驗之時間來決定。表 5 為各種砂樁組合之數值模擬結果與觀測所得在各試驗結束時間之總滲流量之比較，由此表顯示除了在砂樁移除試驗之計算結果與觀測值之相對誤差較大外，其餘各試驗之計算結果之相對誤差均在 10% 以內，即由實驗所得之質量平衡與數值模擬之量相近。

六、結論與建議

由本文之研究可得以下之結論：

1. 由實驗結果顯示，若以未植入砂樁之基本入滲率為背景值，則植入一支、三支與五支砂樁且砂樁未貫穿牛踏層之基本入滲率分別為背景值之 2.33、4.80 與 5.24 倍。植入五支砂樁而有一支、三支與五支砂樁貫穿牛踏層之基本入滲率分別為背景值之 5.82、7.93 與 9.25 倍。
2. 若將砂樁與周圍的土壤混合，以模擬田區翻耕作用，由試驗結果得其基本入滲率為背景值 0.33 倍，顯示田區翻耕後可迅速恢復水田之灌水功能。
3. 由試驗之結果得知，在田區中植入砂樁確實能提高入滲率，以達增加地下水補注之效益。而增加砂樁的支數，入滲率也會隨著增加。當砂樁貫穿牛踏層之後，入滲率必能大幅提升。
4. 由本試驗亦可得知，若田區欲恢復原有灌水能力，則可藉由整田將砂樁移除，則田區之灌水功能可快速恢復。
5. 由數值模擬結果顯示在模擬田區復耕後之入滲，因水力傳導係數之改變致使計算結果與觀測值比較之相對誤差較大。

由本研究可知在休耕水田區設置砂樁可增加地下水補注之效益，但在實際應用時，建議考慮以下事項：

1. 砂樁所使用砂之粒徑與材質對入滲之影響需進一步探討。

2. 砂樁配置數量與最佳配置方式，仍需探討以使補注效率達最大。
3. 砂樁設置之高度需略高於田區表面。

謝 誌

本研究蒙行政院農業委員會(計劃編號 91 農科-1.3.3-林-R1-27)及屏東農田水利會之經會支持，使得本研究得以順利完成，謹此致謝。

參考文獻

1. 丁澈士、田義聖、方宏文、呂川正、洪乙均，1998，水稻田入滲補注試驗研究。國立屏東科技大學土木工程系，八十七學年度專題實務報告。
2. 甘俊二、張煜權、陳焜耀，1997，「永續農業—三生水田灌溉之芻議」，農業工程學報，第 43 卷第 1 期，pp.1-8.
3. 吳祖揚，1996，「水田價值評估法芻議」，農業工程學報，第 42 卷第 2 期，pp.1-7.
4. 吳瑞賢、張嘉軒，1996，「水田對逕流系統之影響評估」，農業工程學報，第 42 卷第 4 期，pp.55-66.
5. 吳富春、許銘熙，1995，「水稻田生態與環境」，農業工程學報，第 41 卷第 4 期，pp.13-19.
6. 葉一隆，陳庭堅，王裕民，2000，地表裂縫對水分入滲影響，台灣水利，第四十八卷，第四期，pp.64-69。
7. 葉一隆，許美芳，陳庭堅，黃國禎，鄒禕，2002，休耕水稻田蓄水對土壤肥力影響試驗，水科學進展，第十三卷，第四期，pp.478-483。
8. 蔡明華，1994，「水稻田生態環境保護對策之研究」，農田水利，第 41 卷第 9 期，pp.10-13.
9. 劉振宇，2000，耕犁與夯實對土層入滲影響之試驗研究。財團法人曹公農業水利研究，2000 年度研究報案。
10. Chen, S.K. and Liu, C.W., 2002, Analysis of water movement in paddy rice fields (I) experimental studies, Journal of Hydrology, Vol. 260, pp.206-215.
11. Clemmens, A. J., 1983, Infiltration Equation for Border Irrigation models, Advances in Infiltration, pp.266~273.
12. Hamada, H. and Komae, T., 1998, Analysis of recharge by paddy field irrigation using ²²²Rn concentration in groundwater as an indicator, Journal of Hydrology, Vol.205, pp.92-100.
13. Sanchez, P.A., 1973, Puddling tropical rice soil, 2. Effects of water losses, Soil Science, Vol.115, pp.303-308.
14. Takagi, S., 1960, Analysis of the vertical downward flow of water through a two-layered soil, Soil Science, Vol. 90, pp.98-103.

收稿日期：民國 91 年 12 月 2 日
 修正日期：民國 92 年 5 月 14 日
 接受日期：民國 92 年 5 月 21 日