

地下水人工補注入滲動態之試驗研究

An Experimental Study on Infiltration Dynamics for Artificial Recharge of Groundwater

國立屏東科技大學土木工程系副教授

國立屏東科技大學土木工程系碩士

丁 澈 士

簡 明 克

Cheh-Shyh Ting

Ming-Ko Chien

摘 要

地下水人工補注現場試驗，其主要的目的為了解經由引取地表水灌注人工補注池後，其入滲速度及地下水丘變化情況及補注池水補注至地下含水層後水量大小對地下水蓄存及流動之機制。

本試驗時間為 17 天，其中 14 天為一般補注試驗，之後 3 天為加泥砂試驗。補注水量平均約為 10,000CMD，池水位盡可能保持於 1.7m，平均入滲速度為 15.2m/day，在加泥砂試驗後，其最終入滲速度遞減至 5.3m/day。遞減原因為細顆粒土壤阻塞礫石層孔隙降低原有入滲速度。再者利用土壤水分特性曲線，求得細顆粒土壤的淤積深度為 35 公分。由試驗成果得知影響入滲速度的因子依序為：含砂量、池水位、蓄水體積、埋水深、水質指標(SAR)。

關鍵詞：入滲速度，地下水丘，加砂試驗，土壤水分特性曲線，級配濾料。

ABSTRACT

Artificial recharge of groundwater using infiltration basin at Wanlong Farm, Pingtung Plain, the purpose of the study program is to gain a better understanding of recharge system, infiltration rate and added groundwater amount after conveying surface water to the infiltration basin.

From the designed full scale excavation area with the maximum amount of water needed to maintain a constant water level in the basin estimated to be 10,000 CMD, water supply was performed for 17 days, 14 days was the normal recharge test, the other 3 days was sand added test, an average discharge of water supply was 10,000 CMD. The water level was kept at 1.7m, and average infiltration rate was 15.2 m/day, after the sand added test, the infiltration rate was declined from 15.2m/day to 5.3m/day. The clogging is the main factor of the infiltration rate reducing from the study. Using the soil characteristic

curve by the pressure plate to find out fine sediment penetration depth is greater than 35 cm in a gravel filter.

The use of grain size filter has been designed a good performance during the operation of groundwater recharge in terms of sediment trap efficiency and maintain the permeability of underlying aquifer. According to outcomes of the experiment, the factor that affect the infiltration rate from the most to the least are sediment charge; level of the infiltration basin; capacity; depth between groundwater level and basin level; Sodium Adsorption Ratio respectively.

Keywords: Infiltration rate, Water level, Sand added test, Soil characteristic curve, Filter.

一、前言

由於台灣的地理及氣象條件特殊，使得降雨多發生在 5~10 月間，尤其以南部地區其降雨分部更顯集中。又因地形起伏大，使得水資源無法長期蓄留於地面上，迅速流入大海中，減少人們對水資源利用機會。另一方面西南部沿海地區，其養殖魚業發達，在民生、工業、養殖用水大量需求下，大量抽取地下水，而又無適度總量管制下，造成地下水位遽降，引發地層下陷、土壤鹽化、海水倒灌等環境地質災害等。上述這些問題中可藉由地下水人工補注方向進行解決。本研究是利用現地試驗觀測，進而瞭解以補注池方法來涵養地下水資源之可行性。

在國際上設置人工補注方式來增加地下水資源案例頗多，如日本 Yamagata 市於 1986 年試驗利用補注池 (recharge basins) 及補注坑溝 (recharge pits) 進行人工補注工作，其補注成效顯著且有效提升地下水位 (肥田登，1999)。荷蘭 Groot Berkheide 地區之地下水人工補注，經過有了數年地下水補注經驗後，由 1993 年研究改善方法，企圖將生態工程與補注結合，其系統目標如下：

1. 基本上為自然非人工設計 (Virtually Natural Instead of Artificial)
2. 配合景觀
3. 減少系統使用面積
4. 利用自然地形坡度使系統生動活潑
5. 穩定的營運以控制地下水位變動量

6. 不需要經常性的清理、監測、和營運方案

美國地區實施地下水人工補注計劃，其中尤其以人工補注池 (recharge basin) 方式最具成效，在加州地區所實施補注池為例，其每年的地下水補注量可達 $15.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Bouwer, 1974)。在國內的地下水人工補注試驗中，前台灣省政府水利處 (1998) 推動濁水溪沖積扇地表地下水聯合運用計畫時，考慮降雨量之時空分佈及地理條件，指出在濁水溪沖積扇中的雲林縣，可利用人工補注池補注地下水為可行方案之一。

屏東縣政府於 (1999) 委託中鼎工程顧問公司執行「屏東平原設置人工湖可行性評估計畫」經評估多處人工湖址後，以林邊溪上游之台糖公司萬隆農場為最佳地點，並於日後作其先期試驗工作，已得到良好之預期效果，以冀將來得政府相關單位之經費補助繼續推動，對屏東平原之地下水補注及其所產生之功能，如地層下陷、海水入侵、土壤鹽化之遏止或緩和有所裨益。

二、研究區域環境概況

本研究區域於台糖公司之萬隆農場 (見圖 1)，作為本現地試驗之場址，此區域地下水位每年之豐枯水季變化甚大約 25m，豐水期水位約於地表下 30m；枯水期水位則約於地表下 58m。將實驗場址之地點決定在此共有以下幾點考量。

2.1 水文地質狀況

林邊溪沖積平原為一發育極為完整之沖積扇地形，萬隆農場位於林邊溪之扇頂位置，扇頂



圖 1 萬隆農場位置圖

區之沉積物主要為巨礫所組成，補注功能大。根據抽水試驗得知，導水係數 T 值為 18,818 m^2/day ， S 值為 0.13； K 值為 344 m/day 。

2.2 流域狀況

林邊溪為台灣地區最南端的主要河川，河流長度約 42 公里，為最短、最陡之主要河川；歷年平均雨量為 3,330 mm ；豐水期流量佔 97%，枯水期流量僅佔 3%，豐枯水期流量比懸殊，為其他主要河川之冠。可知林邊溪在水資源開發上並不容易，一場暴雨僅約莫數小時即奔流入海。因此，將林邊溪豐水期迅速徑流入海之豐沛水量，攔截蓄存於人工湖區內，並藉由良好的水文地質條件，入滲至地下含水層之廣大空間予以貯存。

2.3 取水問題

為達試驗補注目標，需有足夠水源供應，本區域鄰近二峰圳之灌溉渠道，二峰圳水質清澈少砂質，非常適合補注入滲試驗。

三、研究方法與理論

本研究是以現地試驗所得之數據，如池水位、補注流量、池水面積等來加以分析人工湖與地下水位間的相互效應關係。另外，則利用室內砂箱實驗來分析現場所無法實施的試驗項目如不同地下水位對於地下水人工補注量的關係，並

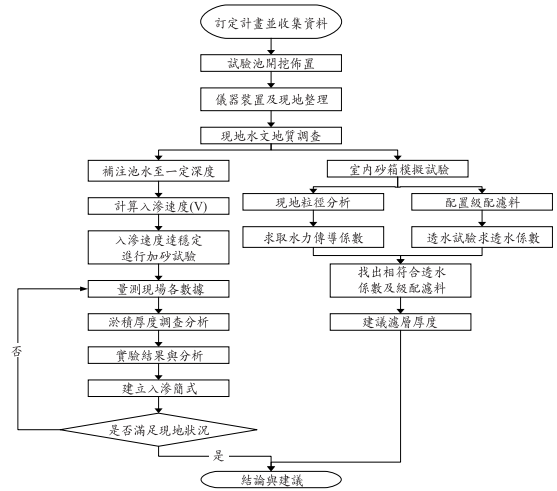


圖 2 研究流程圖

將淤積土壤分析不同壓力下土壤水份含量，藉以瞭解細顆粒土壤淤積深度。其主要研究架構及流程如圖 2 所示，各試驗之方法敘述如下：

3.1 入滲水質分析

在地下水人工補注中水質優劣會影響其補注的效益，在本研究中主要探討其阻塞成因有懸浮物質、含砂量對於入滲速度的衝擊與否，並對研究區域內，調查評估本試驗所需用水水質，並藉此釐清研究所要的水質項目，是否會構成對地下水人工補注工程產生阻塞之現象。參照 Bower (1974)在地下水補注其以 SAR 值作為水質之常用參數，其表示式見式 1。 SAR (Sodium Adsorption Ratio)為陽離子交換比值，又名為鈉吸著率，代表土壤中鈣鎂與鈉離子交換情形，水中若鈉太多而鈣鎂離子太少，則 SAR 值高，可能造成土壤團粒破壞，在 Bower(1974)的書中指出 SAR 值大小可反應水中離子化學作用產生淤積之指標， pH 則於其作用速率有關。鈣與鎂在土壤中可以使土壤保持良好結構，易透水及空氣流通，至於鈉則相反，能使土壤土粒分散，呈緊密結構，透水性低，導致排水不良。由此可知鈣、鎂含量增多，對土壤結構有利；反之，鈉離子含量增加則對土壤有害，所以水中 SAR 值的高低為判斷水質優劣之重要指標。

$$SAR = \frac{(Na)^+}{\left[\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2} \right]^{0.5}} \dots\dots\dots(1)$$

3.2 土壤水份之研究

土壤水份移動、儲存受土壤質地及構造的影響甚大，一般而言，於相同的吸力下，黏土間的孔隙較砂粒間的孔隙小；黏粒土壤較砂土土壤保水度高。土壤於平衡時所保持的水量為孔隙體積函數，亦為基質吸力之函數，此函數關係可測得一曲線，既為土壤水份特性曲線。不同質地土壤在任一土壤吸力下，其保持水份量差異甚大。例如在凋萎現象時的張力，此時黏土水份含量為 19%；坩質壤土為 10.5%；細砂為 4%；石英砂為 1%。所以土壤特性曲線一般形狀決定於土壤質地，此乃因質地會影響孔隙半徑之分佈，以壓力造成吸力自土壤移出水份過程中，大孔隙首先被移空，較小者隨後。

利用上述理論，其不同質地土壤在土壤吸力下有不同的含水量。因此，在加砂試驗結束後，作壓力鍋試驗，繪出不同深度土壤下其含水量之差異，藉以推估細顆粒土壤之淤積深度。

3.3 影響入滲機制探討

初期的滲入量減小，是由於顆粒濕潤之後膨脹崩解引起的。隨後升高，是由於孔隙中的空氣因溶解於水中而被消除引起。以後的入滲量減小，多少是具有指數形式，這是由於池底部下部土壤的孔隙被堵塞而引起的。水中是懸浮微粒的滯留，藻類與菌類的生長(如水中存在營養物質)，由水釋放出溶解的或被混和之氣體，被溶解的固體重新沉澱，被溶解的固體或土顆粒與空隙中固有的水發生化學反應的結果，都會引起阻塞作用，請參照圖 3。

當入滲池其滲入量降低到某一設計值以下以後，就不能作為補給來利用，但經過乾裂，刮除、清理，挖去其阻塞之底土，使入滲率恢復到與初始值差不多，入滲池才可重新使用。其清理次數，取決我們當地的土壤，地質，水文條件等，

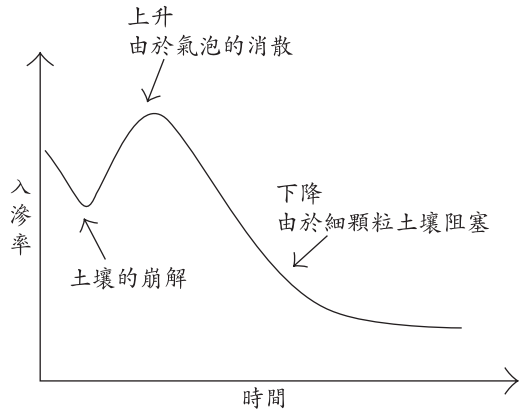


圖 3 入滲率標準圖(Perez-Paricio1998)

通常於枯水期時清理。為了達到其經濟效益，通常可採用預先處理，如使用凝結劑，使懸浮物質凝結等。

3.4 人工湖入滲率計算理論

水平衡法或水收支法(Water-budget method)乃根據水流之連續性原理。利用下列公式計算之：

$$dV/dt = I - O - E + P - i \dots\dots\dots(2)$$

式中， dV/dt 為補注池蓄水體積變化率(L^3/T)， I 為流入量(L^3)， O 為流出量(L^3)， E 為蒸發量(L^3)， P 為降雨量(L^3)， i 為滲漏量(L^3)。此法為本研究入滲試驗的計算理論依據。

3.5 室內砂箱模擬實驗

水工模型試驗是針對水利工程上的問題，水利工程之各種現象不能作分析之研究，對實物之控制，更不能操縱自如，所以研究水利工程者，均以模型試驗為主。因無法以人為方式來控制地下水位，研究其對補注量的關係，故本研究以室內進行砂箱模型模擬不同地下水位實驗分析。共有以下兩個重點。

- (1) 砂箱模型之製作：砂箱模型是將含水層及其邊界依比例縮小而製成之模型。試驗進行利用長 600cm，高 100cm，寬 30cm 之砂箱模型(見圖 4)，砂箱為以強化玻璃製成可觀察水位升降過程，在水箱兩側為定水

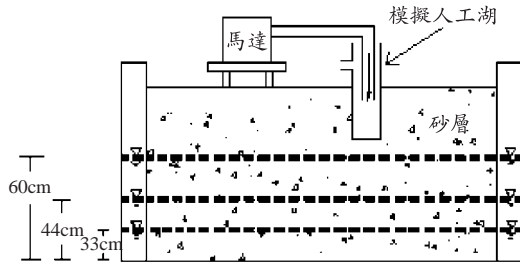


圖 4 砂箱配製圖

頭水箱抽取補注時可謂水位高度。於砂箱旁分佈 60 隻測壓管，其中 30 支置於上層，30 支置於下層可觀測水頭之變化，而上、下層測壓管分別置於距砂箱底 10cm 及 60cm 處，測壓管為 4mm 的 L 型玻璃管直接鑲入砂箱，並以細砂網防止砂粒流出而影響水頭損失。

- (2) 實驗項目：分別量測三種不同地下水位對於地下水人工補注之影響，並繪出其不同地下水位下補注量之差異。

四、試驗設計說明

本試驗共計 17 天，期間前 14 天進行一般補注試驗待入滲速度達穩定時，進行下一階段之加砂試驗，以模擬含砂量對地下人工補注之影響。之後再進行室內砂箱模擬，以比較之間之差別。

4.1 現場試驗

本試驗場址位於屏東縣萬隆農場內，為池底為 20×20 公尺，池頂 30×30 公尺，池深為 2.5 公尺之正方錐體，邊坡坡度為 1:2(垂直:水平)。場址有四口觀測井，編號為 MW-1、MW-2、MW-3、MW-4 及一口抽水井編號為 SGW-1，其場址分佈如圖 5 所示。

4.1.1 試驗儀器裝置

在補注試驗之前，必須清除入滲池內有關影響入滲速度之阻礙物，所以必須先清除附在池底之植被物。再者就是將研究所用的儀器加以佈置及安裝，所裝設之儀器，包括：水位計、水質計、三角堰、氣象站(包括降雨量、蒸發量、溫度、溼度、大氣壓力)。

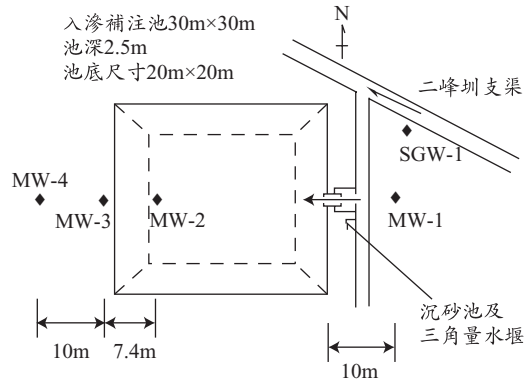


圖 5 試驗場址概略圖(本圖不按比例)

1. 地下水位計：每隔 1 小時，觀測紀錄地下水位變化於四口觀測井。
 2. 三角堰：每隔 1 小時，觀測紀錄三角堰高，以確實掌握補注之流量變化。
 3. 池水位之標尺：當達到池水位(深)為 1.7m 時，保持定水位之補注以方便求取入滲速度之變化。
 4. 氣象站：為了解試驗池附近之氣象變化情況，於本場址之東南側設置一氣象觀測站，其觀測項目有降雨量、蒸發量、溫度、溼度、大氣壓力。
 5. 加砂器：本實驗設置一簡易加砂器，以簡易模擬實際引用含有泥砂之地面水至補注池之情形。
 6. 砂樣：本實驗由阿公店水庫載運其淤泥以確實模擬阻塞之情形。
- 4.1.2 入滲試驗流程
1. 每小時以水位計量測 MW-1~MW-4 觀測井之水位變化，並加以紀錄之。
 2. 每隔 1 小時，觀測紀錄三角堰高，以確實掌握補注之流量變化。
 3. 控制流量以人工逐時控制使其能維持池水深為 1.7m，保持定水位之補注，以方便求取入滲速度之變化。
 4. 待入滲實驗達一段時間，其入滲速度穩定，方進行下一階段加砂試驗，以探討了解細顆粒土壤對於孔隙阻塞，而導致入滲速度降低之現象。

5. 加砂試驗結束後停止補注，量測其池底表面淤泥厚度。
6. 挖一深度 60 公分深坑，分層挖掘並帶回土壤樣本，進行土壤特性實驗，以了解細顆粒對於礫石層淤積深度。

4.2 加砂試驗

待入滲試驗其補注率達一定穩定值後，著手進行加砂試驗，以了解模擬細顆粒土壤進入其礫石層後，其孔隙阻塞與入滲速度的變化關係。本試驗砂源考量土方數量之問題，且期正值阿公店水庫庫底淤泥清除作業期間，故決定採用阿公店水庫庫底淤泥來作為加砂試驗之材料，其砂特性將在其下作詳細的土壤特性分析實驗。

(1) 土壤特性分析

採樣兩樣本秤其重分別為 500.3g、500.23g，經過其洗篩過程，將其大於 200 號篩者洗出，烘乾並秤其重，所得重量分別為 78.03g、94.06g，因此其小於 200 號篩的比例為 84%、81%，而小於 200 號篩之土壤，經比重計分析後得到，其小於 200 號篩的粒徑為坩土及黏土之間。

(2) 土壤比重試驗

比重試驗得知，其平均比重為 2.325。

(3) 液限試驗

液性限度為土壤介於液體狀態下之界限含水量，可知液限為 23。

(4) 塑限試驗

土壤能被搓成直徑 0.32cm 之土條之最小含水量稱為塑性限度，為土壤呈塑性與半固性狀態分界，得知塑限為 17。

由土壤顆粒分析中，可得知本加砂試驗土壤大都為細顆粒土壤中的坩土及細砂。在其土壤特性，塑限為 17 及液限指數為 23，根據統一土壤分類表得知，本加砂試驗土壤性質為低至中塑性之黏土或無機性沉泥。

4.3 室內砂箱試驗

經由石英砂及黏土製作之室內砂箱模擬試驗，主要觀察以模擬不同之地下水位時的入滲現象情形。保持一定之蓄水深度，來模擬人工湖之

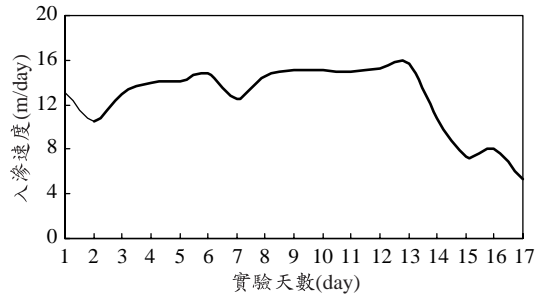


圖 6 入滲速度曲線圖

入滲補注動態現象。分別以高、中、低之地下水位來進行試驗，由於並沒有特別取其地下水位差之間距，大略的調整地下水位，為 60cm、44cm、33cm 的砂箱模擬實驗。

五、資料分析與討論

經由上述之研究項目及流程，將本研究所得結果，分別以現地試驗數據與室內砂箱模擬試驗及人工級配濾料建議設計厚度來做一分析探討。

5.1 現地試驗成果與分析

本試驗共計 17 天，期間前 14 天進行補注試驗，後三天進行加砂試驗，其現場試驗成果與分析分述如下。

(1) 入滲速度

本入滲試驗池中水深變化大致控制於 1.7m，以近似定水頭方式進行補注。而其入滲速度計算方式，則於 3.4 節所介紹為利用水平衡方程式，每隔 1 小時紀錄一次其入滲速度變化，觀測結果見圖 6 所示。其結果顯示定水頭試驗時計入滲速度由試驗初期 13.11m/day，而中期入滲速度達穩定時的 15.61m/day，至後期進行加砂試驗後，其入滲速度遞減為 5.25m/day，其入滲速度減少將近 67%，由此可知其細顆粒土壤的控制對於地下水人工補注是個非常重要影響因素。

(2) 地下水位變化

在本試驗期間補注後各水位觀測井地下水位變化情形，於灌水入補注池後，其 MW-1、MW-2、MW-3 位於補注池內及周圍，其地下水位有逐漸上升之趨勢，其中 MW-4 觀測井水位一

表 1 各因子與入滲速度相關係數比較表

項目	相關係數
池水位 h(m)	0.57
埋水深 H(m)	0.41
試驗池面積 A(m ²)	0.23
蓄水體積 V(m ³)	0.54
補注流量 Q(m ³ /d)	0.16
含砂量 S(ppm)	-0.68
水質 SAR	0.39

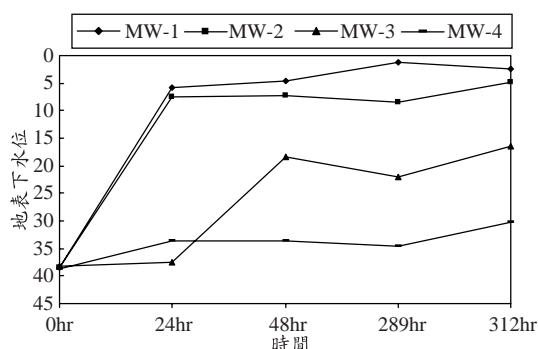


圖 7 地下水水位變化圖

直維持於地表下 38~32m 之間，並無顯著之上升趨勢，但是在補注期間也無下降之現象。由地下水水位變化圖 7，可知四口觀測井在補注期間地下水皆有抬昇。其 MW-1、MW-2 在 24 小時後其地下水水位已有顯著抬昇，可了解此試驗場址為高透水性含水層。而在試驗末期，抬昇現象較為緩慢的 MW-4，已大約上升約 5 公尺的高度，表示經補注後，其補注水已蓄積在試驗場址下的含水層周圍中，形成所謂的周圍蓄積(water banking)。

5.2 入滲機制之探討

在此對試驗中之各種因子拿來與入滲速度之間做個探討，了解各個因子對入滲速度之影響，其結果見表 1，各個因子影響分別說明如下。

(1) 池水位

在本試驗中，池水位雖定義為維持在 1.7m 上，但由於試驗期間適逢台糖蔗田灌溉，所以有時無法保持一定水量及水位補注，但經由其實驗紀錄中其池水位的高低仍與入滲速度的大小有其相關性。

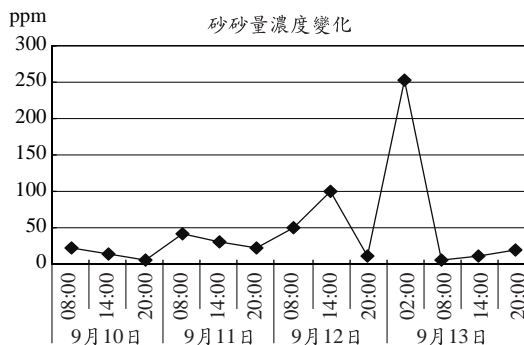


圖 8 含砂量濃度變化圖

(2) 埋水深

埋水深的定義為地下水水位與池水位之高程差，在此以 MW-3 及 MW-4 兩口觀測井之埋水深來做一探討。

(3) 試驗池面積

在此以試驗池之表面積，與入滲速度來做個比較。

(4) 蓄水體積

(5) 補注流量

如同池水位，因為台糖蔗田灌溉之影響，故流量非常的不穩定，因而影響了數據。

(6) 含砂量

為了解補注池含砂量與入滲速度的關係，進行加砂試驗，並每隔 6 小時採集水樣進行含砂量之檢測，圖 8 為補注池水含砂量變化圖，由圖可知其含砂量最大值為達 252.3ppm，最小達 6.4ppm。其含砂量變化甚大，其可能原因有：

- 本加砂試驗進行時，為連續 24 小時不間斷，但取樣止於某一時刻，無法得每各時刻其含砂量變化。
- 與本採樣地點有關，因為其擴散常受其水流與風力影響其含砂量大小及分佈範圍。
- 因為本次加砂試驗，為沉泥性質的細顆粒土壤，所以其質輕較易沉澱於池底，而採樣多採其池水表面，無法真正準確達較深池水位採樣，所以其含砂量測值較為小。

(7) 水質

表 2 一般入滲試驗迴歸分析表

試驗因子	線性入滲迴歸式	R ²
h、A、V、Q	I=4.8h+0.0005A-0.014V+0.04Q	0.92
h、V、Q	I=4.89h-0.014V+0.04Q	0.92
h、V	I=27.93h-0.045V	0.41
h	I=1.57h+11.95	0.27

表 3 加砂試驗迴歸分析表

試驗因子	線性入滲迴歸式	R ²
SAR & S	I=12.02SAR-0.001S	0.39
S	I=-0.0081S+9.98	0.41
SAR	I=13.27SAR-4.47	0.39

在進行加砂試驗時，每間隔 12 小時取水樣 1 次，以監測水質之變化，並參照式 1 之 SAR 值作為水質之常用參數。

由上述試驗因子，可知其對於入滲速度影響大小，並統合其試驗因子，建立其本試驗之入滲迴歸式，分為兩階段結果整理如表 2。第二階段為加砂試驗，將其累積含砂量濃度(S)、SAR 為本入滲試驗主要影響因子如表 3。

其入滲速度與累積含砂量濃度的關係，若以指數型態表示，其 2R 可提升至 0.47 的可靠度，其入滲迴歸式為 $I=22.87S^{-0.223}$ 。

5.3 淤積厚度調查分析

在加砂試驗中，水中含砂量隨著時間而沉澱於池表面而造成淤塞，導致入滲速度降低，當補注水之累積含砂量越高則入滲速度越低，待在本入滲實驗結束後，在試驗池底每隔一公尺丈量其表面淤積土壤之表面厚度，其池底淤積之含泥已有 0~6.4cm 厚度不等，其淤積分佈情形是以三角堰為中線，其由兩端擴散，所以淤積厚度也是中間較高，兩側較低。

(1) 濾層厚度之推求

- a. 在加砂試驗結束後，除了量測其表面淤積土壤厚度外。在試驗池底開挖一長寬為 30 公分，深為 50 公分的深坑，分為 3 層，所採取之土樣，經土壤粒徑分析後，將其試驗結果繪製土壤粒徑分佈曲線

表 4 不同層別土壤透水係數及孔隙率表

土壤層別	飽和水力傳導係數(m/sec)	孔隙率	土壤性質
第一層 (0~15cm)	0.429×10^{-4}	0.48	砂質黏質壤土
第二層 (15~30cm)	0.572×10^{-3}	0.34	砂壤土
第三層 (30~50cm)	0.294×10^{-2}	0.32	砂土

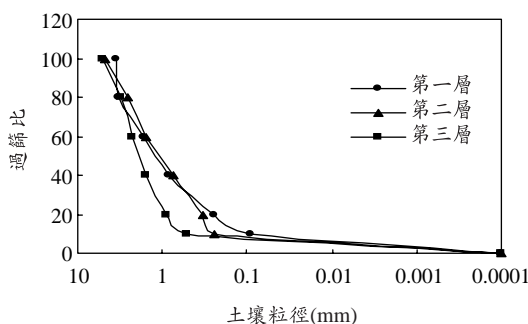


圖 9 三層土壤力徑分析比較圖

圖，如圖 9 所示。本實驗以三角分類法 (Triangular Soil Classification) 為判定土壤性質的法則。其當土壤粒徑分佈曲線求出後，依其粒徑大小分出黏土、粉土、砂、礫石的百分比。粒徑小於 0.005mm 定義為黏土，介於 0.005~0.074mm 的為粉土，介於 0.074~2mm 為砂土，大於 2mm 為礫石，根據上述定義求出各層土壤之粉土、砂土及礫石所佔之百分比。而後再將其土壤做飽和水力傳導係數及孔隙率的測定。

將其試驗場址所帶回的土樣，先將大於 2mm 之礫石篩除，剩餘土樣，以三軸透水試驗儀做室內透水試驗，所測得資料，代入下式 3，式中 Q 為水流體積 (cm³)；L 為試體長度(cm)；T 為時間(sec)；H 為水頭差(cm)；A 為試體面積(cm²)，即可求得分層土壤飽和透水係數。結果見表 4 所示。

$$K = \frac{Q \times L}{T \times H \times A} \dots\dots\dots (3)$$

於 100ml 量杯中裝水至 70ml 處再除放入 50ml 土樣，利用玻璃棒攪拌後靜置 5 分鐘，再紀錄水土混和物的體積，最後以下式計算土壤孔隙率，一般孔隙體積未扣除水土混合物體積(即以 24 小時烘乾土為主)。結果見表 4 所示。

孔隙體積=(土樣體積+水之體積)-水土混合物體積

孔隙率(%)=(孔隙體積/土樣體積)×100%

- b. 再挖一個深入池面挖掘長寬為 30 公分，深為 60 公分的深坑，以了解其細顆粒土壤的淤積深度。每 5cm 為一層，分層取樣，帶回實驗室做進一步的土壤保水特性曲線分析。

(2) 土壤水分保持曲線試驗

本試驗目的為求得各土層保水特性曲線之關係，而以壓力鍋來分析試驗。此外由於土壤孔隙率不易求得，也可經由保水曲線得知其孔隙大小及顆粒大小之情形。其原因為在飽和狀態時，傳導度最大之土壤是大的連續孔隙佔大部分孔隙體積之土壤；而傳導度小之土壤是孔隙體積皆由小孔隙構成之土壤，因此飽和之砂土導水較飽和黏土快。但如果土壤不飽和時正好相反。當吸力發生時，具有較大孔隙之土壤很快地排空而不能導水，使高傳導度據降。另一方面，具有小孔隙之土壤，具有相當大的吸力下，仍能保存水份，使傳導度不致據降。本試驗測試壓力為 0.1bar、0.5bar、0.8bar、1bar、1.5bar、2bar、3bar 共 7 組，量測不同壓力土壤水份含量。1bar 的壓力約為 1019cm 水柱高。

由試驗結果可知，0~10cm 其土壤水份含量在加壓過程中，含水量較無急劇下降之趨勢，表其土壤保水能較好，也印證其黏土成分較多；第二區域為 10~35cm，在此區域中其 40~45cm 也在其中，其推估其原因可能在取樣過程中，土壤與它層土壤有相混合，或為土壤水份過於飽和，或其土壤水份尚未排空等。第三區域為 35~60cm 此區域較類似於砂土性質，在低壓力下，其土壤水份很快地排空，其殘餘含水量也較低。因此根據上述篩分析、透水試驗及土壤水份保持曲線試

表 5 級配濾料比例表

濾料級配比例	時間 (sec)	流量 Q(cm ³ /s)	滲透係數 (cm/sec)
10 號篩比例：3/7 4 號篩比例：4/7	5	23.97	0.388
	10	23.97	0.388
	15	23.97	0.388
	20	24.48	0.380
	25	23.17	0.375
	30	25.56	0.377

驗結果，可推求細顆粒土壤淤積深度在 30~35 公分之間，來以作為粒石級配濾料的鋪設厚度設計。

(3) 級配濾料之設計

在地下水補注時，通常在補注地之透水層鋪陳一礫石層作為過濾之用。然而補注水中所含之泥沙，在補注之過程中將堵塞礫石層之孔隙或穿過礫石層而於透水層之頂部形成一透水性差之薄層，影響補注之效率。此濾層能便於清除池底淤泥，減少藻類繁生，使阻塞減至最小並具有過濾的功用。在礫石層條件下。

已知現地透水係數 K 值，以其為本試驗所推求之數據，找尋其合適級配濾料，來作為將來人工湖所需鋪設於礫石層上過濾之材質。且為了將來材質取得之方便，採用其#4 及#10 號篩之石料，進行級配比及透水試驗。經配比及透水試驗後，找出一組適合於現地透水係數之級配濾料，其級配比#10(2mm)及#4 號(4.76mm)石料其比為 3:4，將來作為人工補注池底過濾之用，其數據詳見表 5。

5.4 室內砂箱模擬成果與分析

試驗期間總補注量分別是 33cm 時為 37632(cm³/min);44cm 時為 72576(cm³/min);60cm 時為 79027(cm³/min)，其補注時間為地下水位 60cm 及地下水位 44cm 其時間皆為 30 分鐘。而地下水位為 33cm 因水丘已達土層頂部其補注時間只有 15.5 分鐘，無法再進行補注。結果及分析敘述如下：

- (1) 設置人工湖泊對地下水水位的抬昇，經試驗結果顯示具有相當之成效，以人工湖泊

的方式來補注地下水以提升地下水位是正面的效果。

- (2) 地下水位高低會影響到該補注量多寡，由結果可知補注量與地下水位關係呈現非線性關係。但在作為地下水人工補注工程中，須注意地下水位的高低，其關係到補注效益，及補注水源需求上的設計。
- (3) 在模擬人工湖補注地下水時，由於砂箱之地下含水層的鋪設範圍有限，且在砂箱模型以一長條形狀模擬，所以模擬補注地下水與實務上之環境範圍四周面積並非相同，形成一長條形面積之情形，而可能造成補注水量不完全之原因。
- (4) 地下水位距人工湖底愈遠，有較高的水頭差其補注的入滲速度會比較高。反之，地下水位離人工湖底愈近，其補注水丘較接近人工湖底，導致其水頭差減小影響其入滲速度。

六、結論與建議

本研究野外試驗部分，是以台糖公司萬隆農場現有試驗場來進行地下水人工補注試驗及加砂試驗，俾能對萬隆農場地區將來實施人工湖補注與地下水相互效應關係更進一步研究。

而室內試驗部分包括，第一部分主要是將現地採集之土壤樣本作其土壤特性調查，以了解加砂試驗結束後，土壤含水量、張力、粒徑分佈等變化情形。第二部分為砂箱模擬實驗，以標準砂作為含水層之材料，作其不同地下水位對於地下水補注量的關係，並了解其地下水丘抬昇現象，藉以克服現場實驗無法達成的部分。

6.1 結論

野外試驗：

- (1) 除人為操作運轉直接影響補注量外，影響入滲速度之因子頗多，在本試驗所討論因子有：池水深、地下水位、補注水質、含砂量等，由試驗成果得知影響入滲速度的因子依序為：含砂量、池水位、蓄水體積、埋水深、水質指標(SAR)等。

- (2) 淤塞為降低入滲率的主要因素，其括物理性與生化作用。其中，以物理性的含砂量濃度為最，本試驗結束後顯示池表面淤塞厚度有高達 6.4 公分，並經由土壤特性曲線得知，其細顆粒土壤其淤積深度更可達 35 公分，使入滲速度由原來 15m/day 降至約 5m/day。而水中生化作用與入滲速度之相關性甚低，由水質指標(SAR)可知。但藻類的產生致現場的水質會有優養化的傾向，造成環境的影響，當其沉澱於池表面，在短期來看尚無影響入滲速度，但若為長時間的地下水人工補注時，其就會造成孔隙的阻塞。
- (3) 由各井之非飽和土壤層內水份變化情況可知，在補注相當之水量後，池底土層中充滿水份，但由於現場土層為顆粒較大的質地，透水性良好，故其受濕區範圍較一般土壤層(如砂、坩土及黏土層)小。
- (4) 由實驗結果可知，萬隆農場之水文地質條件適於作地下水人工補注之場址。因此，如能將河水經攔截補注蓄存於地下水含水層內調蓄供水，除可減少水量蒸發外，亦可涵養沿海地區海水入侵、地層下陷區之含水層。且經地層過濾後，其由含水層之水質較地面水較為純淨。因此，水資源的量與質便可同時兼顧。

室內試驗：

- (1) 透水性試驗：加砂試驗後將池底土壤，分三層採樣，第一層 0~20 公分飽和 K 值為 3.71m/day，第二層為 20~35 公分飽和 K 值 49.42m/day，第三層為 35~60 公分飽和 K 值 254m/day，由現地土壤 K 值 344m/day 可知，其細顆粒土壤淤塞深度在礫石層中約在第二層至第三層之間。
- (2) 土壤特性曲線：為了更精確了解加砂試驗後，其淤塞深度利用不同質地土壤有不同的保水特性曲線來推求淤塞深度，在本實驗結果顯示其在深度 30~35 公分以後，土壤保水曲線特性已呈現與原現場相類似的土壤特性曲線，便可推定其淤塞約在 30~35

公分之間。

- (3) 砂箱模擬：了解到其地下水位高低會影響到該補注量多寡，其補注量與地下水位關係呈現非線性關係。但在作為地下水人工補注工程中，須注意地下水位的高低，其關係到補注效益，及補注水源需求上的設計。

6.2 建議

由上述所得的結論及試驗結果，提出以下幾點建議以供未來在地下水人工補注相關研究之參考。

- (1) 在設置人工湖來補注地下水時，建議湖址選定需考慮其地層之透水能力外，並要提高池蓄水深度及足夠地下蓄水層空間來蓄積地面水。
- (2) 濾石級配料設計，影響人工補注池之功能，有待後續對鋪設級配濾料於地下水人工補注效益評估。
- (3) 引用地面水作地下水人工補注時，須注意河川懸浮物質，其將影響地下水補注效益，以避免堵塞其孔隙，降低其入滲補注率。
- (4) 建議訂定池底淤泥刮除計劃，以期恢復原有入滲率，並訂定鋪設濾石級配濾料厚度規範，以保護原有透水層不受細顆粒土壤沉澱影響。
- (5) 補注水源之水質對地下水人工補注的影響，在本研究短時間補注研究過程中尚未產生影響，但對於日後若進行長時間的地下水人工補注時，其水質控制，是非常重要的環，尤對於在放空池水後，其池底剛毛藻污泥片對於地下水人工補注影響及其生成原因，冀後研究者加以探討之。

- (6) 補注水源及補注後地下水質，因其地質環境而異。建議補注前後之水質變化，加以探討。

致 謝

本研究承蒙國科會計畫編號 NSC-90-2211-E-020-010 補助，特此致謝。

參考文獻

1. 肥田登、石川悅郎、太田由紀子，「Experimental study of basin artificial recharge of groundwater in Rokugo Alluvial Fan」, Northern Japan, 日本地下水學會誌第 41 卷第一號, pp.23~33, 1999。
2. Bouwer, H., *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Publishing, 1974.
3. P'erez-Paricio, A., and Carrera, J., "Operation guidelines regarding clogging", Artificial Recharge of Groundwater, Proceeding of the Third International Symposium on Groundwater Recharge, A. Balkema Publish. Co., pp. 441-445., 1998.
4. 台灣省政府水利處，「濁水溪沖積扇地表地下水聯合運用第二階段-濁水溪沖積扇地下水人工補注計畫規劃報告」，pp. 5-69~5-70，台灣，1998。
5. 屏東縣政府，「屏東縣水資源開發與保育整體規劃及林邊溪上游人工湖設置工程計畫期末報告」，台灣，2003。
6. 經濟部水粒規劃試驗所，「人工湖法地下水補注試驗研究(二)」，台灣，2000。

收稿日期：民國 93 年 9 月 9 日

修正日期：民國 93 年 11 月 26 日

接受日期：民國 93 年 12 月 6 日