

# 以河底集流管開採河川伏流量之評估方法探討

## Discharge Evaluation Methods for the Intake Structure of Under-River Pipes

逢甲大學水利工程學系  
副教授

許少華  
Shaohua Marko Hsu

逢甲大學土木及水利工程研究所  
研究生

黃文圻  
Wen-Qi Huang

逢甲大學土木及水利工程研究所  
研究生

林時猷  
Shi-You Lin

### 摘 要

伏流水取水量估計以往都是由傳統經驗式作為水量估算，但有鑑於經驗式各有適用條件上的限制，估算之取水量往往彼此差距甚大且通常較實際取水量大出許多。故本文以濁水溪沖積扇頂的河床伏流水為研究對象，研究土層之飽和水力傳導係數、集水管管徑、集水管埋設位置以及集水管上下游河流方向的水力坡降等因素對伏流水取水之影響。經由 SEEP2D 模式之數值模擬及砂箱試驗的相互驗證下，可找出影響伏流水取水的相關敏感參數，最後再由這些敏感參數來建立最大集水量經驗通式。雖經驗通式估算流量皆比傳統經驗式估算之流量來的小，然此經驗通式，可用來估計濁水溪沖積扇頂區之伏流水安全集水量與集水管管徑大小以及埋設深度等設計因子之相互關係。此集水量經驗通式乃利用濁水溪沖積扇區域各相關參數而得到，故僅適用於此區域，然通式求得之步驟及方法，也可引為其他欲取水區域之用。

**關鍵詞：**伏流水，變動飽和土，數值模擬，砂箱試驗，迴歸分析。

### ABSTRACT

There are various formulas for predicting the intake discharge for under river pipes (or tunnels). The assumptions they made are for fully saturated flow and they usually give values far optimistic than the resulting outcomes in real cases. SEEP2D software for simulating flow in variable saturated flow in steady state is employed to study the flow field and intake discharge for cases with different conductivity, pipe dimension, deepness of the pipe, and the groundwater gradients. Sensitivity analysis was performed to determine the relative importance between parameters. Formulation for maximum intake

discharge within a specific site in the dry season is obtained by multi-variable regression. Design charts are also invented. This offers a different choice for discharge, pipe-dimension, or deepness designing in the preliminary planning. Sand-box experiments prove that the suggested method is relative conservative.

**Keywords:** Interflow, Variable saturated zone, Numerical simulation, Sand-Box experiment, Regression analysis.

## 一、前言

河川伏流水乃沿襲自日文的用語，至今尚未有明確的定義（溫志超等，2001）。在此也可稱為河川滲漏水，乃指河水以及河谷週遭雨水入滲地表匯聚於河床底下將進入地下含水層之過渡階段或存在於淺層土中又於下游出滲補注河水的暫流水(interflow)。藉由埋設於河床底下的集水管（管徑大的又稱集水廊道），經重力及水力坡降便可收集水源，與攔河堰比較在施工上是相對的經濟。伏流水的收集因經過河床底層土壤的過濾，故水質相對乾淨，且可避免因建設地表上的大型水工結構物而造成環境的破壞，導致民眾的抗爭。故不失為一值得採用的水源開發方式。

在台灣，伏流水取用的歷史，可推至日據時代台糖屏東萬隆農場將林邊溪上游力力溪的伏流水導至下游的農場灌溉（江崇榮、李昭順，1996）；近年來有高雄自來水公司開採高屏溪下游之伏流水供民生之用（台灣省自來水公司，1999）。目前規劃當中的有宜蘭縣羅東溪攔河堰及伏流水開採計劃（台灣省水利局，1996）。因此伏流水的開發可成為部分地區水資源增益的重要水源。目前水利處委託中興顧問公司規劃的西螺大橋伏流水開採工程又是一個新的實例。

以往對於伏流水可取用水量之初步規劃估算，如集集共同引水計劃（台灣省水利局，1997），及由中華顧問公司所做的高屏溪評估（台灣省自來水公司，1999），皆以經驗公式估算，而經驗公式有很多，皆類似橫井公式，莫衷一是。且其各有適用條件上的限制，往往假設為飽和地下水流，水流皆水平流動等等，故不一定適用於不同季節與不同深度等條件的伏流水取

水，因而導致估算之取水量往往與實際取水量有相當的差距。當集流管埋在河床底下由於不同季節，水位變化差距大，使得集流管可處在變動飽和區內，如圖 1 所示，則所收集水量可由飽和流  $Q_f$  與未飽和流  $Q_u$  之總和而得，此時使用經驗公式顯然不恰當。有鑑於此，吾人實應思考其他的估算方法來做為取水量的估計參考。

再者，因數值模式與計算軟體的日新月異，變動飽和層地下水模式已有日漸成熟可靠的趨勢，故本文乃以評估具有潛在伏流水取水效益（水利局，1997；經濟部，1996）的濁水溪沖積扇扇頂區域的河床伏流水為研究對象，藉實驗及數值模擬分析，來獲得影響伏流水取水量之重要敏感參數，並進而歸納出濁水溪沖積扇扇頂區域河床伏流水取水量迴歸公式。有了此迴歸公式，便可做為日後濁水溪沖積扇扇頂區域河床伏流水取水工程的設計參考。而此推求最大集水量通式的方法流程，亦可作為日後求取其他地區之集水量迴歸通式的流程。本文除了以現場已知條件來比較數值模擬迴歸式與經驗式之差異之外，更以一室內簡化實驗再將兩者比較以資慎重。

## 二、估算集水量的現有公式

估計地下埋管之收集水量，可採用的經驗式很多，以下僅舉數個為例：

1. 水平不透水層不考慮集水管兩端進水，僅管壁兩側進水。（經濟部水資源統一規劃委員會，1982）（集水後地下水位低於集水管管頂）

$$q = \frac{K(H_s^2 - H_o^2)}{R} \dots\dots\dots(1)$$

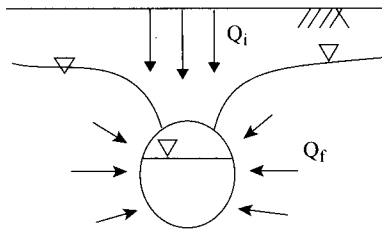


圖 1 集水管於河床底下之橫剖面示意圖

其中  $K$  為飽和水力傳導係數 ( $LT^{-1}$ ) ;  $H_0$  為集水後地下水位 ( $L$ ) ;  $H_s$  為原地下水位 ( $L$ ) ;  $R$  為取水之影響半徑 ( $L$ ) 。

2. Goodman et. al (1965) (台灣省政府水利處, 1998) 以集水管滲入水量來評估單位長度集水量, 考慮地下水源供應不絕, 使得地下水位可假設為不受影響而維持高度的穩態狀況。

$$q = \frac{2\pi KH}{2.3 \ln(2H/r)} \dots\dots\dots(2)$$

其中  $H$  為原地下水位至集水管之距離 ( $m$ ) ;  $r$  為集水管半徑 ( $m$ ) , 此公式亦使用於隧道開挖之漏水量估計。

3. Gustafson (1986) (台灣省政府水利處, 1998) 以映像法 (imaginary tunnel method) 求得單位長度集水量類似(2)式, 但數量大了 2.3 倍。

$$q = \frac{2\pi KH}{\ln(2H/r)} \dots\dots\dots(3)$$

4. 當集水管未達不透水層時 (台灣省水利局, 1997) :

$$q = \frac{0.5K(H_s^2 - h_w^2)}{\log\left(\frac{\pi R/2 + L}{\pi r/2 + L}\right)} \dots\dots\dots(4)$$

其中  $L$  為集水管管長 ( $m$ ) ;  $h_w$  為管內水位至不透水層之距離 ( $m$ ) 。

5. Chapman 公式 (1956) (Michael H., 1998) , 適用於自由含水層 :

$$q = \left(0.73 + 0.27 \frac{M - h_h}{M}\right) \cdot \frac{K}{2R} \cdot (M^2 - h_h^2) \dots\dots(5)$$

其中  $M$  為含水層厚度 ( $m$ ) ;  $h_h$  為抽水後之地下水位洩降量 ( $m$ ) 。

6. Borisov 公式 (1964) (Michael H., 1998) :

$$q = \frac{2\pi \cdot K_x \cdot M \cdot (H_s - h_h)}{\ln \frac{4R}{L} + \frac{H}{L} \cdot \ln \frac{H}{2\pi \cdot r_{eff}}} \dots\dots\dots(6)$$

其中  $K_x$  為水平向水力傳導係數 ( $m/s$ ) ;  $r_{eff}$  為有效水井半徑 ( $m$ )

$$r_{eff} = \frac{(1 + \beta) \cdot r_{br}}{2\beta}$$

其中  $r_{br}$  為實際水井半徑 ( $m$ ) ;  $\beta = \frac{\sqrt{K_x}}{\sqrt{K_y}}$  ;  $K_y$

為垂直向水力傳導係數 ( $m/s$ ) 。

雖然經驗公式甚多, 但每個經驗公式皆有其限制與假設, 如公式(1)需在水平不透水層, 且地下水水位需低於集水管管頂的情況下集水才可使用, 公式中的影響半徑  $R$  亦很難去界定等。伏流水為淺層集水, 垂直向水力傳導係數  $K_y$  應為一重要影響因子, 但經驗公式大多以水平向水力傳導係數  $K_x$  進行集水量的計算, 且對於集水管該埋多深亦沒有作詳細的探討, 因此使得公式不一定適用於取水區域的現況與需求。而本文所欲推求的迴歸集水量通式便希望能解決這些缺點, 使通式更適用於該集水區域。

### 三、數值模擬方法

#### 3.1 模式介紹

在數值模式模擬方面本文採用 GMS (地下水數值模式系統) 軟體中之 SEEP2D 模組進行模擬計算, SEEP2D 為垂直二維有限元素法之地下水水流模式, 適用於飽和及非飽和流況的穩定流場, 所以可用來模擬本研究之變動飽和區域之流場。且透過 GMS 中的前置處理模組, 使得網格製作迅速且接近取水管附近之網格可局部加密以提高計算精度 (如圖 2 所示), 參數輸入簡單, 邊界條件給定簡易。

#### 3.2 控制方程式

在 SEEP2D 模式中所使用之控制方程式為

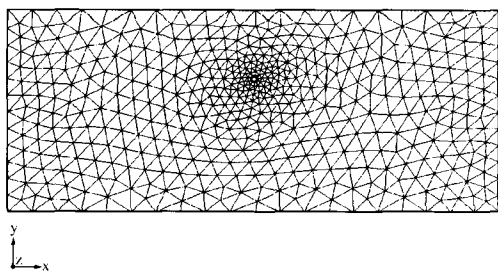


圖 2 SEEP2D 模式模擬之網格分布圖

穩定狀態之垂直二維滲流方程式如(7)式所示：

$$\nabla \cdot (\bar{K} \cdot \nabla h) = 0 \dots\dots\dots(7)$$

或

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} + K_{yz} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (8)$$

其中  $h$  為總水頭【L】（ $h = z + \psi$ ； $z$ ：位置水頭【L】， $\psi$ ：壓力水頭【L】）； $\bar{K}$  為水力傳導係數張量

如含水層為未飽和狀態時，水力傳導係數將為一變數，本文選定 van Genuchten 式來模擬未飽和條件下之土壤保水曲線與水力傳導係數變化，其式如下：

$$S = \left[ 1 + (\alpha|\psi|)^n \right]^m \dots\dots\dots(9)$$

其中  $S$  為土壤飽和度 =  $\frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)}$ ， $\theta$  乃體積含水量； $\alpha, n$  為 van Genuchten 參數；

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

在未飽和土層中之相對水力傳導係數可寫為：

$$k_r = S^2 \left[ 1 - \left( 1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \dots\dots\dots(10)$$

#### 四、濁水溪中游案例之模擬測試

##### 4.1 現地水力傳導係數之蒐集

本文所欲分析模擬的地區，乃以濁水溪中游

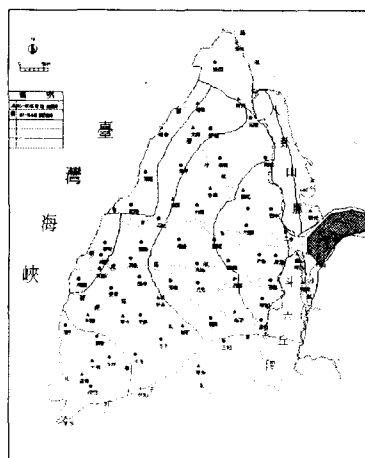


圖 3 研究區域位置圖（圖中深色部分）

彰雲大橋以上與名竹大橋以下的區域（如圖 3 深色區域所示），此乃因文獻告知此地區應含有豐富之伏流水（水利處，1999）。由過去之抽水試驗可知，該區水力傳導係數之範圍為 0.85~8.5m/hr（經濟部，1996），但因抽水試驗之水力傳導係數屬於深層的橫向水力傳導係數，故需對此區之淺層土壤進行水力傳導係數之量測。且因伏流水位於淺層土層中，鉛垂向水力傳導係數，應視為一重要之參考因子，故本文將水平向水力傳導係數與垂直向水力傳導係數之比例，列入探討影響參數之一。

##### 4.2 水力傳導係數之儀器試驗及結果

由於文獻中此地區之水力傳導係數乃以往之抽水試驗資料所得，代表 15 米以下的水平傳導係數，然所欲取水區域乃位於淺層土層（15 米以內）中，為估計此區域淺層土層之水力傳導係數，故至現場採集現地土壤進行水力傳導係數試驗。此試驗乃是以圓柱型砂箱為試驗儀器，砂箱直徑 10cm，長度 50cm，利用定水頭方式量測現地土樣的垂直向之水力傳導係數（ $K_z$ ）。試驗結果如表 1 所示。將此試驗結果與經濟部於 1996 年的現地水井抽水試驗所得的水力傳導係數結果（為 0.85~8.5m/hr）比較，可知均屬同一數量級（order）。

表 1 飽和 K 值試驗之結果與分析

土樣	土樣長( $\Delta L$ ) (cm)	截面積(A) ( $\text{cm}^2$ )	水頭( $\Delta h$ ) (cm)	滲流量(Q) ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )	滲透係數(K) (m/hr)
河床砂礫	18.25	128.68	20	53.05	13.1
河床底泥	20	128.68	20	9.09	2.0

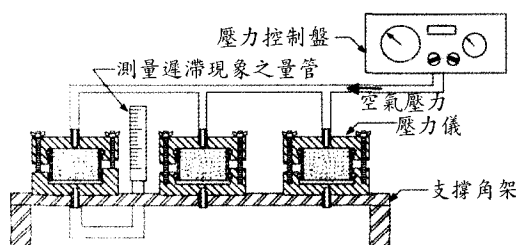


圖 4 壓力儀系統配置圖

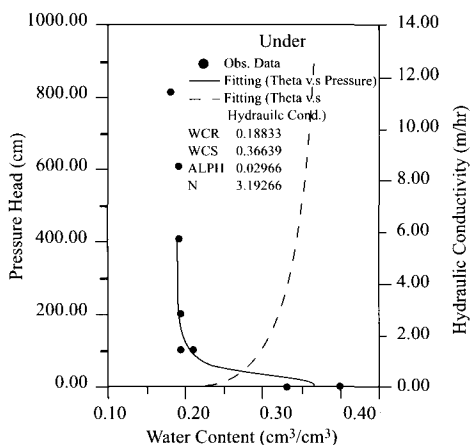


圖 5 壓力儀試驗資料點（濁水溪河床下砂礫層）與土壤特性曲線

#### 4.3 土壤保水曲線試驗

由於伏流水乃處於變動飽和含水層，其中有部份處於飽和狀態，部份完全處於未飽和層，故需對現地土壤進行土壤保水曲線試驗，以得到現地土壤之土壤特性曲線，進而獲得水力傳導係數與飽和度的關係。藉由壓力儀試驗，如圖 4 配置圖所示，便可得到如圖 5 之壓力儀試驗資料點以及土壤保水曲線與水力傳導係數曲線圖。因壓力儀的裝置樣本容量有限，吾人只能假設較細的顆粒對保水曲線的影響有瓶頸作用的代表性。

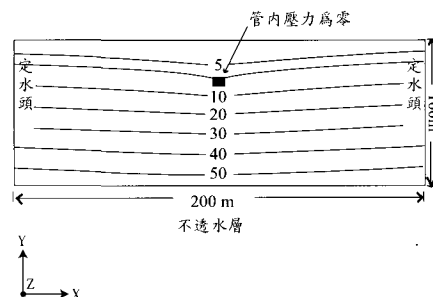


圖 6 SEEP2D 之邊界給定與壓力分佈圖( $D=20\text{m}$ 、 $H=10\text{m}$ 、 $S=0.005$ 、 $K_x/K_y=1$ 、 $K_x=3.6\text{m/hr}$ )

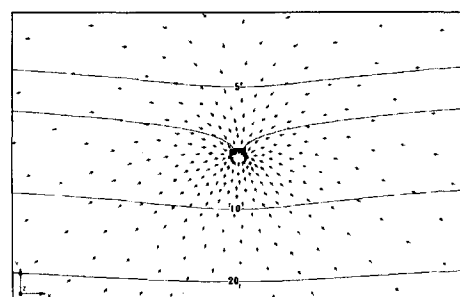


圖 7 SEEP2D 模擬之局部放大流速向量圖( $D=20\text{m}$ 、 $H=10\text{m}$ 、 $S=0.005$ 、 $K_x/K_y=1$ 、 $K_x=3.6\text{m/hr}$ )

#### 4.4 數值模擬條件以及集水量的求得

此次模擬的垂直剖面區域如圖 6 所示乃一沿著河水流向切開之縱剖面，其左右邊界（上下游間）相距 200m（此類似經驗式中的影響範圍），總深度則為 100m。上下游各給予不同的定水頭邊界，而底層為不透水層，集水管橫斷面的模擬則在模擬區域內設一內邊界（internal boundary）為之，內邊界集水管則給予一零壓力邊界（即設為大氣壓力），為了模擬枯水季節，故上（頂）邊界設為無河水的垂向補注；圖 6 之模擬流場可局部放大如圖 7 所示之流速向量

表 2 數值模擬選定參數之變化條件

管徑 D (m)	1、2、4
埋深 H (m)	5、10、15
$K_x/K_y$	1、5、10
水力坡降 S	0.005、0.007、0.009
$K_x$ (m/hr)	0.1、1、3.6、10

圖。本文採用此一模式來進行伏流水流量模擬，模擬的成果可得整個模擬範圍內的垂面流場，因模擬條件中令集水管下半圓為不透水材料，故將集水管上半邊界各點的流速進行積分，便可得到集流管的單寬集水量。本文將選擇三種不同管徑，三種埋深，三種水平及垂直水力傳導係數比以及三種集水管附近之水力坡降變化作為迴歸的樣本，因本區域之水平向水力傳導係數為 0.85 至 8.5m/hr 之間，故亦將取四組水平方向水力傳導係數  $K_x$  進行數值上的模擬，模擬條件列如表 2 所示，其中 van Genuchten 參數， $\alpha$  及  $n$  值，可由上述圖 5 之土壤保水曲線試驗得到，即  $\alpha = 0.030$ 、 $n = 3.193$ 。

#### 4.5 分析參數之決定

在本文中，因為模式無法模擬實際集水管之管壁邊界開孔效應，故乃假設集水管上半圓為完全透水，且假設管中之流量乃由集水管末端的集水井完全抽出而不積水，更假設管內之壓力為大氣壓力。因此最後得到取水量迴歸式，為枯水季之最大集水量之迴歸通式，而建立此通式，最重要的步驟便是式中參數的決定。而取決的參數是經由過去的文獻及模式模擬測試來初步決定了幾個較重要的影響集水管入流量參數，分別有土層之飽和水力傳導係數  $K_x$ (橫向)及  $K_y$ (垂直)、集水管管徑(D)、集水管埋設位置低於原始地下水位面之深度(H)以及埋設集水管附近之初始上下游河向的水力坡降(S)等，且考慮到本區域之水力傳導係數介於三個級數之間，故亦將水平向水力傳導係數  $K_x$ ，列為一參數，觀察其與集水量之關係為何。

#### 4.6 數值模擬結果之集水量公式迴歸

經由數值模擬，發現伏流水初始水位坡降對集水管集水量影響性相對很小，因此在進行集水管集水量通式之分析建立過程中便剔除了此一較不具影響之參數，再來進行集水量通式之建立。本文將建立固定水平向水力傳導係數及不固定水平向水力傳導係數兩種集水量通式，通式之建立如下。

##### 4.6.1 固定水平向水力傳導係數

因為本區域之水平向水力傳導係數介於 0.85 至 8.5m/hr 之間，故本文首先取兩者幾何平均與算術平均之平均值之水平向水力傳導係數  $K_x = 3.6\text{m/hr}$  的模擬數據來進行迴歸，而其它影響參數則為集水管管徑(D)、集水管埋設深度(H)、垂直與水平水力傳導係數比( $K_x/K_y$ )等三種參數變化條件與集水管單位長度集水量( $q$ )。經利用統計軟體 MINITAB 之複迴歸分析結果可獲得集水管單位長度之集水量通式為：

$$q = 0.21D^{0.732}H^{1.29}\left(\frac{K_x}{K_y}\right)^{-0.296} \dots\dots\dots(11)$$

(11)式並非無因次式，僅為一具有單位之迴歸式，其中  $q$  之單位為  $\text{m}^2/\text{hr}$ ，管徑  $D$  及有效埋深  $H$  均為  $\text{m}$ ，( $K_x/K_y$ ) 為一無因次單位。由於此經驗通式用到的所有水文及地質資料，皆取自本文研究之濁水溪沖積扇區域，故此公式亦只適用於此研究區域的參數範圍。

##### 4.6.2 不固定水平向水力傳導係數

如考慮數值模擬中不同水平向水力傳導係數之影響，將所得集水量數據加入統計軟體 MINITAB 之複迴歸分析可獲得集水管單位長度之集水量通式如(12)式：

$$q = 0.064K_x^{0.998}D^{0.732}H^{1.26}\left(\frac{K_x}{K_y}\right)^{-0.303} \dots\dots\dots(12)$$

此通式之水平向水力傳導係數乃界於 0.1~10m/hr，其可使用之範圍彈性比(11)式（僅適用於  $K_x=3.6\text{m/hr}$ ）大了許多。比較(12)式與(11)式可知，考慮  $K_x$  的不同大小並未顯著影響其他參數的幕次方。而  $K_x$  的幕次方幾乎等於 1.0，亦

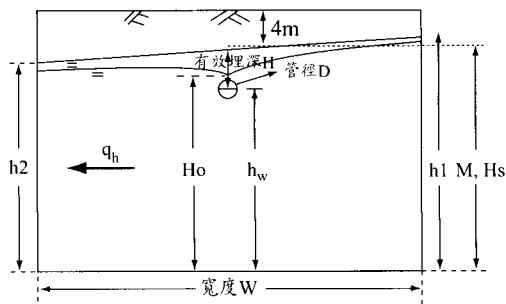


圖 8 參數位置示意圖

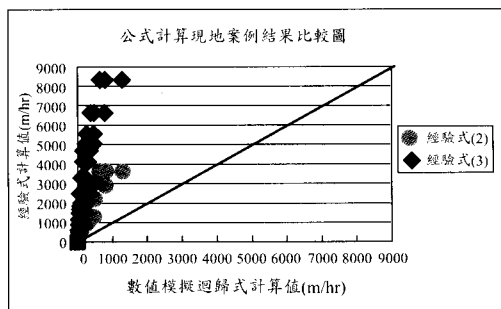


圖 9 以數模迴歸及經驗公式估算現地集水量結果比較圖

即  $K_x$  與集水量間的關係幾乎是線性比例關係；此與水平井的經驗式，如(1)~(6)式，一致。注意(12)式僅適用於表 2 的參數範圍，亦即管徑  $D$  介於 1~4m，埋深  $H$  介於 5~15m， $K_x$  介於 1~10m/hr，水平向與垂直向水力傳導係數比介於 1~10。

#### 4.7 應用水平井公式及數值模擬迴歸公式估算濁水溪中游案例之伏流水集水量

此案例乃以濁水溪中游河床作為取水區域，上下游邊界水頭為皆 90m，原地下水位 ( $H_o$ ) 則取邊界水頭之平均為 90m，含水層厚度 ( $M$ ) 為 100m，影響半徑影 ( $R$ ) 假設為 100m，示意圖如圖 8 參數位置示意圖所示。以迴歸公式及經驗式計算表 2 之各數值模擬數據條件，將其計算結果繪於圖 9 以資比較。由於所蒐集的經驗式(1)及(5)皆須有集水後地下水水位資料，而式(4)及(6)則須有影響半徑資料，故在此僅取式(2)及

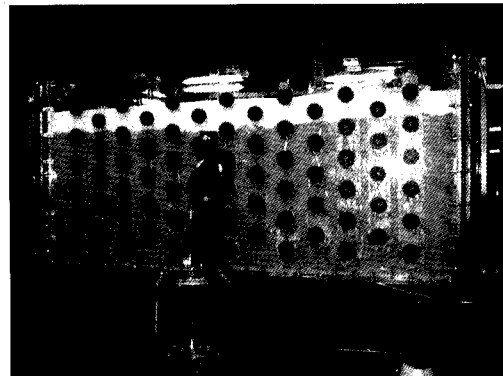


圖 10 設置完成未取水時之砂箱(右邊為高水頭)

(3)與迴歸公式作計算結果比較。由圖中可看出迴歸公式計算所得集水量與經驗式所得集水量皆有約 10 倍左右的差距。

## 五、砂箱實驗

### 5.1 實驗目的

圖 9 所示的估計流量只能顯示各種推估方法的相對差異，並無法證明那一種較為正確。因此以下將以試驗所得到的流量數據，來與數值模擬值以及集水量迴歸通式和傳統經驗式來進行分析比較，以探討其絕對差異。

### 5.2 實驗設備

實驗之儀器主要為一長 150cm，寬 10cm (內寬 7cm)，高 60cm 之砂箱，而集水管以上半管週開口取水，管長與砂箱厚度同為 10cm，如圖 10 所示。實驗所採用之實驗砂體為土壤特性較為均勻的實驗用渥太華砂，砂體型號 C190，飽和水力傳導係數由許銘汶等人 (1999) 實驗所得之平均數據為 1.73m/hr。

### 5.3 實驗條件

實驗主要藉由砂箱上下游水位的調整變化，分別針對不同埋深，以及集水管上下游水位坡降變化進行試驗，量測不同管徑集水管之集水量變化再進行分析，各參數變化範圍及集水量範圍如表 3 所示。

表 3 試驗模擬選定參數之變化條件表

管徑 $D$ (cm)	1.8~4.2
埋深 $H$ (cm)	5~20
水力坡降 $S$	0.0013~0.0093
集水量 $Q$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	1.94~8.24

5.4 試驗結果之集水量公式迴歸

實驗之控制變數僅有管徑  $D$ 、有效埋深  $H$  及初始水力坡降  $S$ ，故全部選取，並以複迴歸分析獲得集水管單位長度之集水量通式，如(13)式，相關係數為 0.976：

$$q = 0.468H^{0.883}S^{0.0133}D^{0.153} \dots\dots\dots(13)$$

(13)式中為一具有單位之迴歸式，其中  $q$  為  $\text{cm}^2/\text{s}$ ，管徑  $D$  及有效埋深  $H$  均為  $\text{cm}$ 。與(11)、(12)式相較，(13)式中顯示在所實驗的範圍內，仍以參數  $H$  的冪次方最大，亦即對集流量的影響較敏銳。同時仍以伏流水的原始水力坡降  $S$  的冪次最小。

5.5 水平井經驗式、試驗迴歸式及數值模擬之比較

此部份將以砂箱試驗迴歸公式(13)及水平井經驗式計算砂箱案例，來與此一尺寸之單一數值模擬結果進行比較。其中集水管管徑 ( $D$ ) 為 1.8cm，管長 ( $L$ ) 為 7cm，上下游邊界水頭為 60.2 ( $h_1$ ) cm 及 59.8 ( $h_2$ ) cm，含水層厚度 ( $M$ ) 設為 60cm，因取水範圍為整個砂箱故其影響半徑 ( $R$ ) 乃取砂箱之一半即為 75cm；原地下水水位至集水管頂之距離 ( $H$ ) 為 18.2cm，土體之水力傳導係數  $K=0.048\text{cm}/\text{sec}$  (1.73m/hr)，其中集水後地下水水位高於集水管中心 8cm，而集水後地下水深 ( $H_0$ ) 為集水後地下水水位至含水層底床之距離即為 48.9cm， $H_0$  之定義如圖 8 示意圖所示，計算結果繪如圖 11 之比較圖。

由圖 11 可看出，數值模擬所求得之集水量值為最小且與經驗式及試驗流量皆有一段差距，本文將透過背景流量做更進一步的探討。

5.6 背景流量的探討

背景流量乃指實驗砂箱在未裝設取水管取

表 4 背景單寬流量及背景流量表

$h_1(\text{cm})$	$h_2(\text{cm})$	$x_2-x_1=L$	$q_b(\text{cm}^2/\text{s})$	$Q$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) (取水量) ( $q_b \times 7\text{cm}$ )
60.2	59.8	-150	0.00768	0.05376

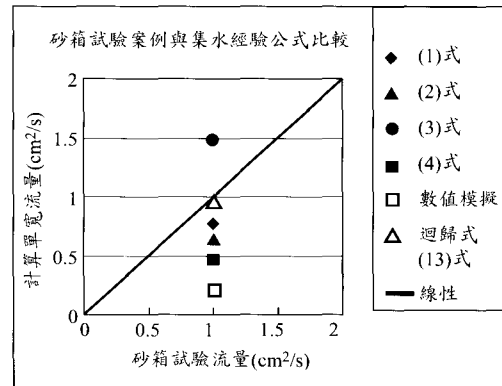


圖 11 以經驗式及數值模擬砂箱集水量結果比較圖

水時，砂箱土體內之水流在沒有集水管影響下，僅藉水力坡降由上游流至下游的水流流量。由達西公式可推得(14)式來計算砂箱之背景單寬流量  $q_b$ ，於不同上、下游水頭情況，所得之背景（單寬）流量，列於表 4：

$$q_b = \frac{K(h_1^2 - h_2^2)}{2W} \dots\dots\dots(14)$$

其中  $q_b$  為背景單寬流量 ( $L^2/T$ )； $h_1$ 、 $h_2$  為上、下游水頭 ( $L$ )； $W$  為上、下游距離 ( $L$ )。

由表 4 的計算可知，砂箱背景流量相當的小，小於取水管取水量的 1%，實可以忽略。此意謂著取水管砂箱實驗的流量驅動力主要來自於取水管內與自由水面間的壓力差所致。而取水量主要是靠兩端定水頭的控制來供給。由此可知，若現地集水管取水量超過背景伏流水流量，則需其他水源，如河谷其他方向的補注來補充。否則上游原先的地下水水位將再下降，亦即受影響的範圍將再擴大。

六、參數敏感度分析

6.1 砂箱實驗部分



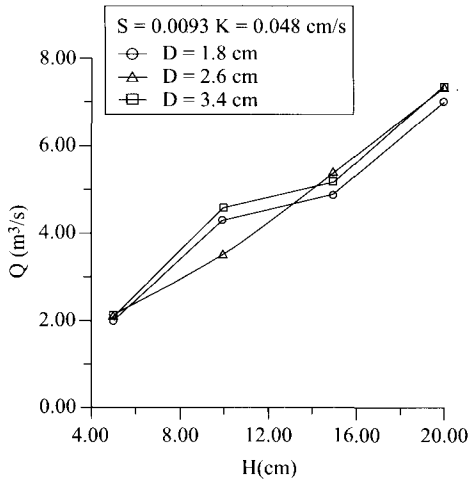


圖 12 不同管徑的集水管單位管長集水量隨有效埋深之變化圖（實驗部分）

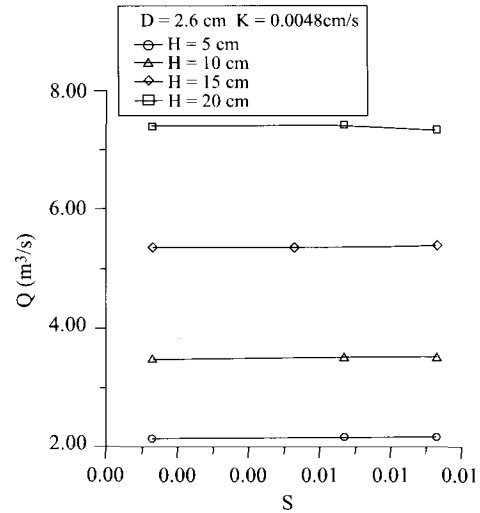


圖 13 不同有效埋深  $H$  時，流量  $Q$  與水力坡降  $S$  之變化圖（實驗部分）

### 6.1.1 集水管有效埋深 ( $H$ )

集水管有效埋深乃以未埋管取水前，原伏流水水位與集水管埋設位置管心之距離，圖 12 為伏流水水面坡降 ( $S$ ) 固定為 0.0093，不同管徑的集水管單位管長集水量隨有效埋深之變化圖，由圖中可以明顯發現，相同管徑的集水管，隨著埋深增加單位管長之集水量亦隨之增加。

### 6.1.2 集水管上下游原伏流水水面坡降 ( $S$ )

圖 13 為當固定管徑  $D=2.6\text{cm}$ ，且在不同有效埋深  $H$  時，流量  $Q$  與水力坡降  $S$  之變化圖，由圖中可看出當有效埋深固定，模擬條件中的集水管上下游附近的水面坡降變化（由 0.0013~0.0093）對單位管長的集水量影響不大。

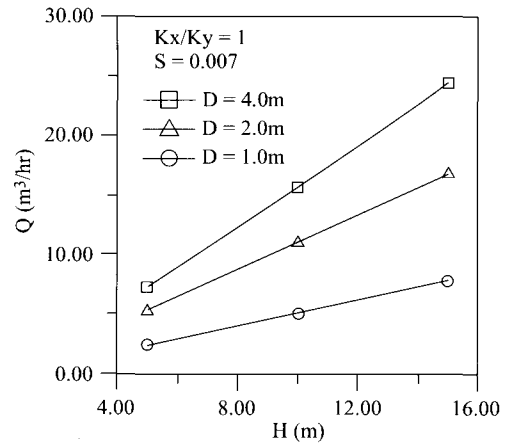


圖 14 不同管徑的集水管單位管長集水量隨有效埋深之變化圖（數值部分）

## 6.2 數值模擬部分

### 6.2.1 集水管有效埋深 ( $H$ )

圖 14 為初始伏流水水面坡降 ( $S$ ) 固定為 0.007，水平與垂直水力傳導係數比值 ( $K_x/K_y$ ) 為 1 時，不同管徑的集水管單位管長集水量隨有效埋深之變化圖，由圖中可以明顯發現，相同管徑的集水管，隨著埋深增加因壓差增大使得單位管長之集水量亦隨之增加，且管徑愈大增加埋深所增加的集水量亦愈大。

### 6.2.2 水平與垂直水力傳導係數之比值 ( $K_x/K_y$ )

在本研究中對於水平與垂直水力傳導係數的比值探討乃限定在濁水溪之特定研究區域，圖 15 及圖 16 為伏流水水面坡降 ( $S$ ) 固定 0.007，集水管有效埋深分別為 5m、15m 時，不同管徑的集水管單位管長集水量隨水平與垂直水力傳導係數比值之變化圖。由三種條件的模擬結果顯示，在固定的  $K_x$  值條件下，相同管徑的集水管

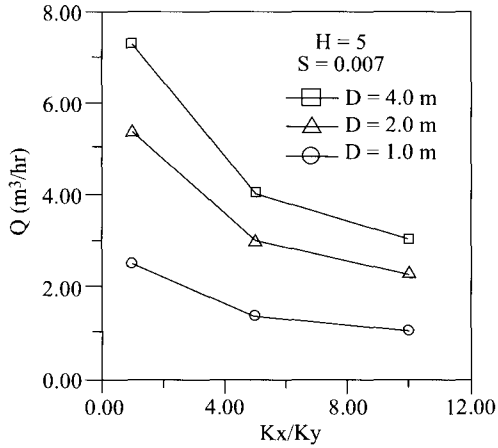


圖 15 有效埋深 5m，不同管徑的集水管單位管長集水量隨水平與垂直水力傳導係數比值之變化圖

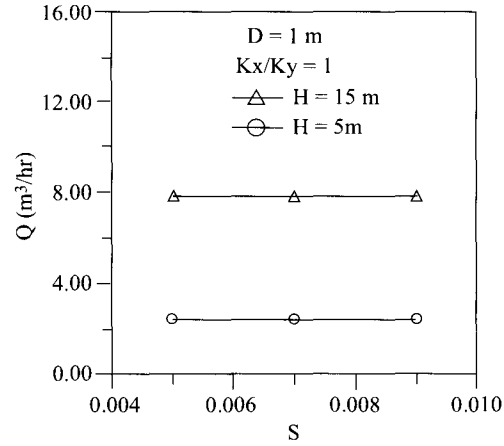


圖 17 集水管管徑 1m，不同伏流水水位坡降對集水管單位集水量的比較圖

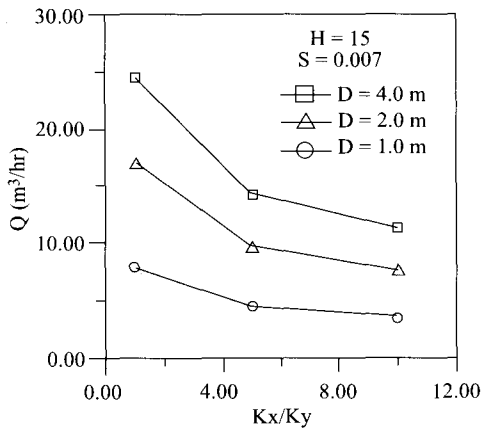


圖 16 有效埋深 15m，不同管徑的集水管單位管長集水量隨水平與垂直水力傳導係數比值之變化圖

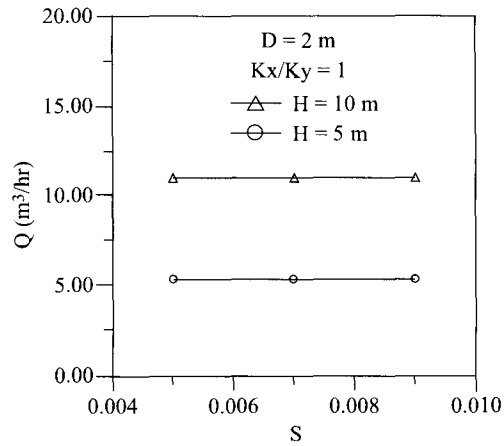


圖 18 集水管管徑 2m，不同伏流水水位坡降對集水管單位集水量的比較圖

當水平與垂直水力傳導係數比值變大時，因垂向  $K$  值的減小，集水量會隨之減少，而當水平與垂直水力傳導係數比值變大時，較大的集水管其最大集水量變化率均較大。通常垂直井所得的抽水試驗  $K$  值皆可視為  $K_v$  值，但  $K_v$  值通常會因砂礫形狀沉積過程的方向性緣故而較  $K_x$  小，此乃  $K_x/K_v$  比值探討的緣由。

### 6.2.3 集水管上下游原伏流水水面坡降 ( $S$ )

由模式之模擬結果發現在模式模擬條件下的三種集水管管徑、三種埋深以及三種水平與垂直水力傳導係數比值，集水管上下游之伏流水水面坡降對集水管之單位集水量無重要影響，圖 17 及圖 18 分別為集水管管徑 1m 及 2m 的比較圖，由圖中均可明顯看出當有效埋深固定，模擬條件中的集水管上下游附近的水面坡降變化（由 0.005~0.009）對單位管長的集水量不會產生變

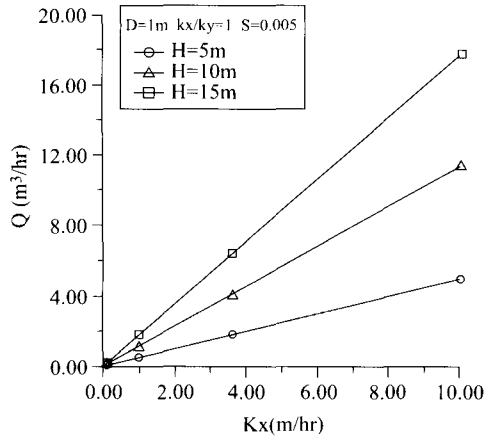


圖 19 不同埋深  $H$  時，水平向水力傳導係數  $K_x$  與流量  $Q$  之變化圖

化，即使是在水平與垂直水力傳導係數比值變化時，亦僅與有效埋深相關而已。此乃因所取的水量已大過初始的背景流量。

#### 6.2.4 土壤之水平向水力傳導係數 ( $K_x$ )

圖 19 為固定管徑  $D$  及  $K_x/K_y=1$ ，在不同埋深  $H$ ，水平向水力傳導係數  $K_x$  與流量  $Q$  之變化圖，由圖可看出，隨著  $K_x$  增加，則流量  $Q$  亦會隨其線性增加，且埋深  $H$  愈大時，流量  $Q$  之變化愈大。

### 七、應用迴歸式於集水量的規劃設計

有了現地的迴歸集水量通式，便可直接利用此公式來作為現地安全集水量設計的估算，以下將以名竹大橋附近區域作為設計案例，由資料可知附近河寬約為 1500m。枯水季伏流水水位設為河床下 4m，河床下水力傳導係數約為 3.6m/hr ( $K_x/K_y=1$ )，設計管徑為 1.5m，設計管長為 1200m，以下將以集水量已知及集水量未知的情况下，進行設計方法的探討。

#### 7.1 集水量已知情況

若計畫集水量為 150000CMD (單位管長集水 5.21m³/hr)，則可透過集水量通式(11)式的計算，而得到其有效埋深需約為 9.6m，當計畫集水量再增大時，便應考慮改變管徑或利用雙管來集

水。

#### 7.2 集水量未知情況

當計畫有效埋深為 6m 時，透過集水量通式(11)式的計算，可得總集水量約為 82000CMD (單位管長集水 2.85m³/hr)。

故透過集水量通式，便可依不同設計條件，而迅速的得到所需的有效埋深、管徑及計畫集水量等數據，作為設計的參考。

## 八、結論與建議

### 8.1 結論

伏流水的取用有著久遠的歷史且仍是目前值得運用的水源採取法。估計集水量的公式相當的多樣，然其假設飽和流的條件不一定適用於每種取水狀況。隨著科技的進步，模擬變動飽和流況的技術已經成熟，本文利用變動飽和數值模式模擬來求得迴歸集水量通式，提供了集水量估計的另一種選擇。

本文數值模式模擬所求得之集水量不管在現地或砂箱試驗中，皆比現有公式所求之集水量還要低，且亦只有砂箱試驗之集水量的 22%，故本文的估計量較其他方法保守。計算案例中之背景流量遠小於集水量，若無其他側流補注或抽水引致的補注，則集水量將受到限制，無法繼續維持。藉由集水量通式可依不同設計條件，快速的得到所需的有效埋深、管徑及計畫集水量等數據，作為設計的參考。

由實驗及數值模擬結果，發現水力坡降  $S$  對於伏流水集水量之收集影響較小，有效埋深  $H$  則具有相當大的影響。由數值模擬中可看出水平向與垂直向之水力傳導係數比值愈大 (即當固定水平向時，則垂直向之水力傳導係數愈小)，集水量  $Q$  會隨之愈小。水平向水力傳導係數  $K_x$  增加時，集水量  $Q$  會隨之早線性增加，並隨埋深愈深，變化愈大。這些敏感度分析的結果，也可提供設計者於取水設計時的參考。

文中利用 SEEP2D 模式對相同模擬尺度所做的模擬迴歸式，如(11)、(12)式，因參數範圍一致，故迴歸式的各參數幂次方一致，且預測的集

水量也一致。與水平井經驗式，(1)~(6)式比較，(12)式中  $K_x$  的冪次接近於 1.0，這也是一致的。

相較於(13)式由室內的砂箱試驗模擬所得的迴歸式，雖然同樣是由 SEEP2D 模擬所得，然而因模擬尺度上大小差異甚大，且因迴歸式所選取的參數不同，若將兩者（如(12)式與(13)式）應用在同一案例上，則所預測的集水量並不一致，且有相當的差異。此乃迴歸式應用上受其參數數據範圍的先天限制所致。因此使用上需依取水區域範圍、集水管徑及有效埋深等限制條件下選取使用，如此方能較符合該經驗式之特性條件，而得到較可靠的預估集水量值。

上述的經驗迴歸式，並無法代替 SEEP2D 模式，亦即無 SEEP2D 來的一般性。但針對某一特定案例，如本文所舉之濁水溪案例，明顯較 SEEP2D 易於使用，快速，並能抓住設計參數的敏感性。省去參數一經修改便得重新輸入改變參數值以模式模擬之麻煩。因此經驗式之建立，不僅可節省 SEEP2D 模式大量重複模擬的時間，也提供設計者一個可靠參考資訊的方便來源，而達到省時與便利性的目標。

本研究中各種數值模擬案例所獲得的集水量在工程應用上受限於所給定的條件如現地  $K$  值範圍，以及集水管中的壓力假設為大氣壓力，上下游影響範圍為已知之條件，非任意集水管案例均可使用相同的通式進行推估，但同一流程可重複應用於其他已知地點。本研究之最大集水管流量通式，乃為單管、單寬流量，並針對枯水季時，使用時應予注意。

## 8.2 建議

本文在數值模擬部分乃以垂直二維的 SEEP2D 模式進行模擬，未考慮到河谷兩側的補注影響，然因上下游條件乃固定水頭，故所求得之集水量遠大於河流向之背景流量，此需河谷兩側有來流補注方有可能。徐年盛曾利用 3D-FEMWATER 三維數值模式模擬屏東萬榮農場林邊溪上游集水廊道附近之水流流況（經濟部水資源局，2000），因此可考慮以三維模式模擬集水管收集區河谷側流之流況變化，惟邊界條件需蒐

集正確的水文資料。由於文中假設集流管內的壓力固定為一大氣壓，故埋深愈深時，因壓差增大迅速而致流量大增，然實際壓力會受集水管末端集水井水位之影響，故在此建議未來可針對在不同埋深時，集流管內管壓的變化作較深入的探討。

## 謝 誌

感謝經濟部水資源局 89 年濁水溪伏流水取水管設計原則之研究計劃的經費支援，使本研究得以進行，研究助理倪春發提供了資料蒐集上的幫助，特此申謝。

## 參考文獻

1. 台灣省水利局（1996）宜蘭縣羅東溪攔河堰規劃設計報告。
2. 台灣省水利局（1997）集集共同引水計畫—濁水溪西螺河段伏流水相關研究報告。
3. 台灣省政府水利處（1998）濁水溪沖積扇地下水人工補注計畫規劃報告。
4. 台灣省政府水利處（1999）集集共同引水計畫水源水量運用規則規劃。
5. 台灣省自來水公司（1999）高屏溪伏流水開發簡介。
6. 江崇榮、李昭順（1996）淺談集水廊道開發水資源。濁水溪沖積扇地下水及水資源研討會論文集。
7. 林時猷、林美君、王保民、許少華（2001）河川伏流水取水管取水量特性之實驗研究。第十二屆水利工程研討會，成大。
8. 許銘汶、胡清達、王譯輝（1999）微張力計與含水量計之率定以及二維補注坑滲漏過程之砂箱實驗。學士畢業論文，逢甲大學水利工程學系，台中市。
9. 溫志超、楊志盛、張湘杰、謝樹雨（2001）集集地震引起之濁水溪沿岸伏流水變化研究（一），第十二屆水利工程研討會，成大，PP.N-38。
10. 經濟部（1996）濁水溪中游地區地下水補注調查與評估八十五年度工作計畫。

11. 經濟部水資源統一規劃委員會 (1982) 台灣省自來水公司高屏溪九曲堂地下集水管水供模型試驗報告 (稿)。
12. 經濟部水資源局 (2000) 濁水溪伏流水取水管設計原則之研究。
13. 經濟部水資源局 (2000) 地下集水廊道出水量估算數值模式之建立。
14. Brigham Young University – Engineering Computer Graphics Laboratory (1998) Groundwater Modeling System Seep 2D Primer . Boss International, INC.
15. Michael H., Michael TH. S., Georg Z., Clemens W. B., (1998) Horizontal wells in groundwater engineering presented at hydroinformatic 98.
16. van Genuchten, M. T., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp.892-898.

收稿日期：民國 90 年 10 月 11 日

修正日期：民國 91 年 1 月 7 日

接受日期：民國 91 年 2 月 4 日