單一水平井於河畔取水效益之研究

文/謝壎煌、陳忠偉、李振誥

摘要

水平井一般與寬口井搭配而成輻射井取水工，水平井可增加進水量與減緩井壁堵塞情況。由於水平井設置方式將對管內進水產生影響，故本研究將進行水平管設置之因子影響評估，並尋求最佳水平井設置方式。

本研究以 MODFLOW 建立地下水數值模式，並以 Joshi(1988)及呂勁(1993)之解析公式進行驗證。利用數值模式進行水平井在不同深度、長度、出水量與透水係數等多項因子影響評估，由模式水平衡分析推估水平井入水量與來源。由研究成果顯示，增加水平井埋設深度，可降低地下水位洩降，水平井設置長度應隨出水量加以合適評估。水平井設置前應考慮含水層之地質參數，進行最佳出水量評估。

關鍵字：水平井、輻射井、MODFLOW、水平衡分析

一、前 言

台灣目前水庫開發較爲困難，如能利用水利設施汲取河川之伏流水，則可減少地表逕流量與增加水資源可用量。當山區大雨導致河川水濁度太高，無法直接引用河川水時，埋設於河床底下之水平井則可取得水質較佳水源。

水平井取水解析模式推估近年爲 Joshi(1988)[1]提出單一水平井於地層中取水之解析公式，並應用於 Abandoned 與 Algyo 等地，評估各試驗場之取水情況。竇宏恩(1996)[2]修正並簡化 Joshi(1988)之解析公式，應用於冷平、樹平與任平等地區之油井開採。蔣廷學(2000)[3]以平面徑向方式簡化求解過程，推導多分枝水平井之解析公式，其研究成果顯示可有效分析水平井之滲流機制。台灣地區對於水平井取水之相關研究較少，僅只有部分工程施做時，利用攔河堰擷取伏流水，如屏東林邊淨水場由林邊溪取伏流水。台灣地區水資源開發綱領計畫(2001)[4]中提出，利用集水廊道開發濁水溪西螺河段之伏流水，該區域河床爲粒徑較大的之礫石組成，地質條件適合進行伏流水開發。Schafer(2003)[5]應用 MODFLOW 地下水流數值軟體，推估美國 Louisville 地區含水層及河床水力傳導係數，並有效評估河床阻塞效率。

本研究分別利用解析與數值模式進行數值模式驗證，並利用數值模式探討水平井取水對環境之影響，進行水平井埋設深度、長度、出水量與位於不同透水係數含水層等因子之影響分析，研究流程示於圖 1。

二、解析與數值模式介紹

本研究將利用 MODFLOW 地下水流數值軟體，建構自行假設之虛擬流場數值模式，利用 Joshi(1988)之解析模式驗證其適用性。應用驗證完成之數值模式，探討各項因子對水平井進水量之影響。

2.1 Joshi(1988)解析模式

Joshi(1988)提出水平井之解析公式，假設水平井內水流流動由水平與垂直面組合而成。演算過程將水平井水平面假設爲橢圓球

體，垂直面則假設爲圓柱體，分別推估水平與垂直面之滲流阻力，採用歐姆(Ohm)和達西(Darey)定律的相似原理，推求得產出量解析解。本研究以呂勁(1993)[6]修改 Joshi 提出之解析解如式(1)。

$$Q=\frac{2\pi K_h h}{\mu_0 B}\left[\frac{\Delta P}{\ln\frac{a+\sqrt{a^2-(L/2)^2}}{L/2}+\frac{h}{L}\ln\frac{h}{2r_w}}\right] \quad (1)$$

其中 $a=\sqrt{(\frac{L}{2})^2+(\frac{h}{2})^2}$

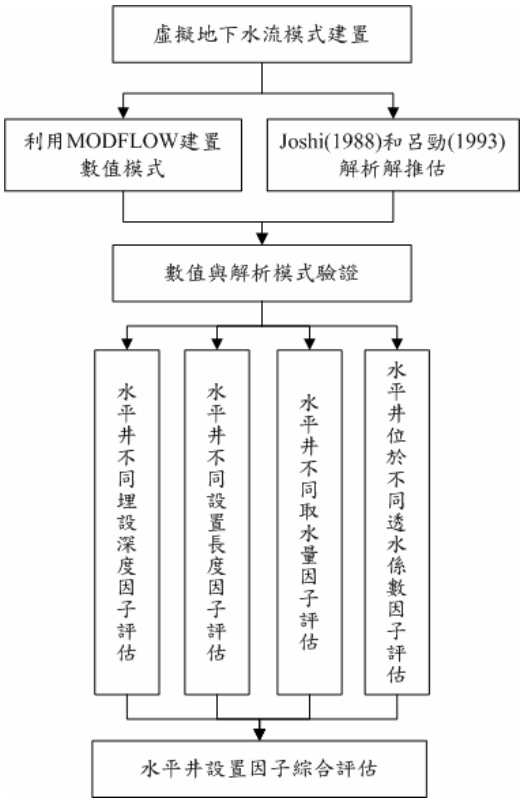


圖 1 研究流程圖

式(1)中之 Q 爲抽水量(m/s)，Kh 爲滲透率(m2)，h 爲含水層厚度(m)，△P 爲抽水前後之井內水位壓力差(pa)，B 爲抽取前後體積比，μ0 爲黏度(Pa・s)，L 爲水平井長度(m)，rw 爲水平井半徑(m)。本研究爲進行出水量之推估，假設水之黏度(μ0)爲 0.001(Pa・s)，水體假設爲不可壓縮，故其體積比 B 爲 1。

2.2 MODFLOW 數值模式介紹

本研究採用 PROCESSING MODFLOW 5.06，此套軟體是依據美國地質調查所(U.S.G.S.) 之 MODFLOW(McDonald & Harbaugh, 1988)[7]地下水流模擬程式再行研發之軟體。MODFLOW 之地下水流控制方程式爲假設在固定密度下，含水層三維地下水流的流動控制方程式之偏微分式如式(2)。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

其中 Kxx、Kyy 和 Kzz 爲分別爲沿著 x、y、z 方向之透水係數[LT-1]；h：水頭[L]；W：水之流入或流出單位體積流通量[T-1]；Ss：比貯水率[L-1]；t：時間[T]。由式(2)結合有限差分法、反向差分法及迭代運算技巧，可推算得 MODFLOW 模擬地下水流之基本控制方程式之解。

三、解析與數值模式驗證

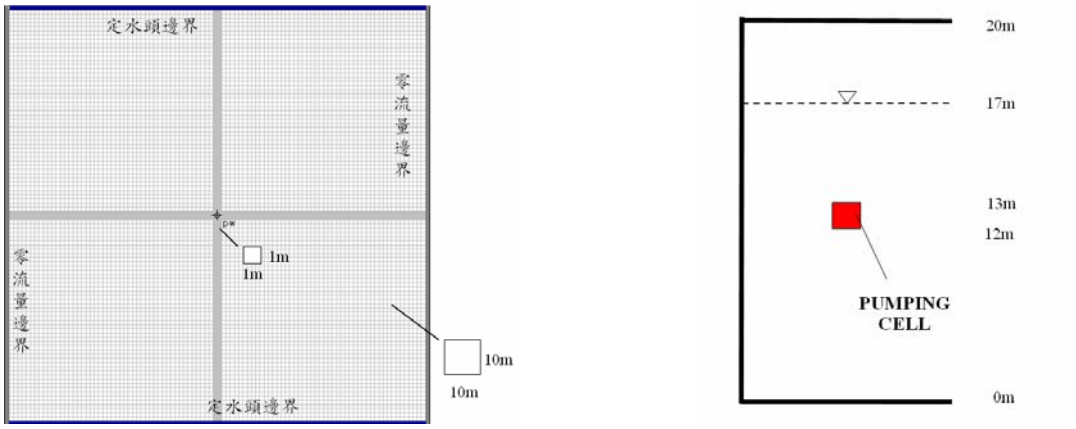
本研究首先進行解析與數值模式之驗證，以確定地下水流數值模式 MODFLOW 之適用性。本研究建構一虛擬地下水模式，進行模式驗證與評估各項因子之影響。

3.1 虛擬模式條件與設定

本研究建構之虛擬地下水流場示於圖 2。由圖 2(a)顯示，模式範圍之東西向與南北向均爲 1000 m，東西向與南北向均有 118 個網格，在抽水井(pw)附近之網格爲 1m×1m 之網格，其餘網格爲 10m×10m。東西邊界設爲零流量邊界，南北邊界均爲 17 m 之定水頭邊

界。

含水層爲單一自由含水層，虛擬含水層剖面示於圖 2(b)。含水層底部高程爲 0m，含水層頂高程爲 20m，地下水位爲高程 17m 處，水平井埋設於高程 12 m 至 13 m 位置。水平井管徑假設爲 1 m，長度假設爲 7 m，各項水文地質參數示於表 1。



(a) (b)

圖 2 虛擬地下水模式初始與邊界條件示意圖

表 1 虛擬含水層模式參數表

參數名稱	參數值	單位
水力傳導係數	43.2	m/day
有效孔隙率	0.25	-
含水層厚度	20	m
初始地下水位高程	17	M
集水井出水量	1000	m3/day
水平井水力傳導係數	1000	m/day
水平井有效孔隙率	0.99	-
出水時間	60	day

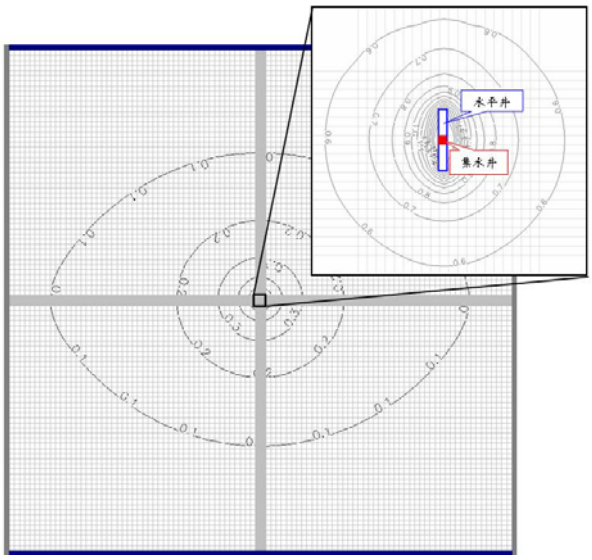


圖 3 數值模式推估地下水位洩降

3.2 數值與解析模式驗證

數值模式達穩態後，其地下水流模擬結果示於圖 3。由圖中顯示，集水井之最大水位洩降約爲 1.8 m，集水井周圍受水平井集水影響，地下水位洩降等值線與水平井方向一致，呈南北向橢圓形狀，距集水井越遠則受模式邊界影響，呈東西向橢圓形狀。

爲驗證本研究應用之數值模式之適當性，將模式之各項水文地質參數代入式(1)，推求解析解之取水量爲 986 (m3/day)，與模式設定之出水量相對偏差僅爲 1.4%。

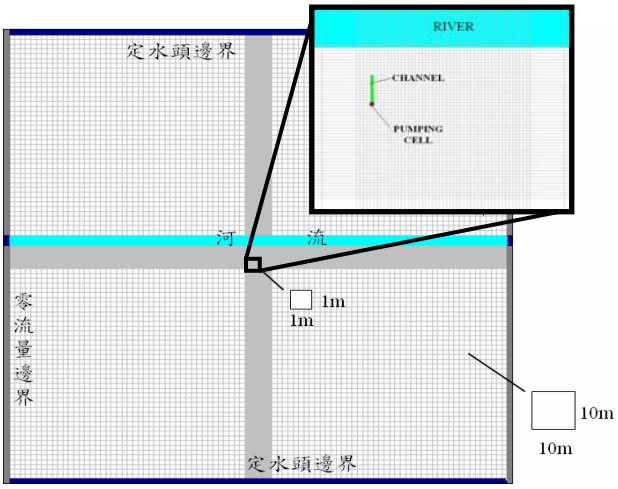
四、水平井設置因子之影響評估

在數值解與解析解進行驗證後，本研究利用數值模式，分別假設不同水平井埋設深度、長度、取水量與透水係數等因子，並探討對地下水位洩降量、河川滲漏量與水平井集水量等影響，本模式於數值模式中增加河川模組，模式網格初始條件與邊界條件設定示於圖 4(a)。

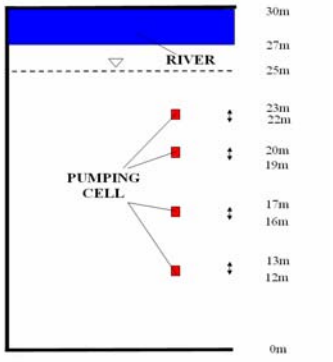
4.1 水平井埋設深度因子之影響

水平管長 10 m，井徑爲 1 m，埋設位置分別爲探討水平井埋設位置對其他因子之影響評估，設定水平井埋設位置示於圖 3(a)。假設

位於 22m、19m、16m 與 12m 位置，含水層剖面與水平井設置位置示於圖 4b)。



(a)



(b)

圖 4 水平井設置示意圖

利用數值模式建立四種不同水平井埋設深度模式，模式水平衡分析結果示於表 2。由表 2 中顯示，模式尚未進行取水之前，河川滲漏量爲 22,046 m3/day，假設集水井取水量爲 5000 m3/day，埋設深度距地下水位面 2 m 時，水平井取水所引致之河川滲漏量爲增加 3,883 m3/day。埋設深度爲 12 m 時，取水所引致之河川滲漏量爲則小幅度降爲 3,853 m3/day，顯示水平井設置於不同深度取水時，河川滲漏量與取水量之百分比僅下降 0.6%，對含水層之影響不大。由水平井埋設深度相對於水平井集水量之影響結果顯示，水平井埋設深度變化時，水平井集水量與取水量之百分比介於 58.16%至 60.42%之間，並無明顯影響。由以上研究成果顯示，水平井埋設深度愈深，相對於地下水位洩降減少 5.5%，河川滲漏量減少 0.6%，對水平井之集水量影響並不明顯。

將水位洩降百分比與埋設深度關係示於圖 5。由圖 5 顯示，埋設深度由 2 m、5 m、8 m 增加至 12 m 時，其洩降百分比由 10.0%降至 4.5%，顯示埋設深度越深，含水層地下水位洩降越小。

4.2 水平井設置長度因子之影響

本研究探討水平井設置長度相對於水平

井集水量之影響，水平井設置深度假設位於 12m 處，水平井井徑爲 1m，水平井設置長度分別爲 2 m、3 m、4 m、5 m、10 m、15 m、20 m、30 m 與 40 m，設置方式示於圖 6(a)。

由模擬結果顯示，水平井不同長度與地下水位洩降百分比示於圖 6(b)。由圖中顯示，水平井長度由 2 m 延伸到 10 m 時，地下水位洩降約增加 1%之地下水位洩降量。當水平井長度超過 10m，地下水位洩降值並無顯著減少。

表 2 水平井位於不同深度之影響

地表下深度(m)	初始河川滲漏量(m3/day)	取水後河川滲漏量(m3/day)	取水引致河川滲漏量(m3/day)	河川滲漏量與取水量百分比(%)	水平井集水量與取水量百分比(%)
2	22,046	25,929	3,883	77.7	60.38
5	22,046	25,918	3,872	77.4	58.96
8	22,046	25,909	3,863	77.2	58.16
12	22,046	25,899	3,853	77.1	60.42

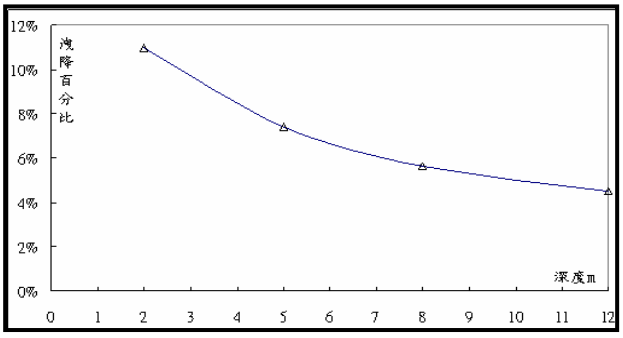


圖 5 水平井埋設深度與地下水位洩降百分比關係圖

不同水平井設置長度造成河川滲漏量變化關係示於圖 6(c)，圖中顯示水平井長度由 2 m 增加至 10m 時，取水引致河川入滲量百分比約提高 0.08%，當水平管長度增加至 4 0m 時，河川入滲量僅增加 0.03%，顯示水平管長度對河川入滲量之影響不大。

若以水平管設置長度對於水平井流入集水井水量進行探討，其水平井入流量(Q_i)對於取水量(Q_p)之百分比與水平井設置長度變化示於圖 6(d)。由研究成果顯示，水平井長度由 2 m 增加至 10m 時，其水平井集水量由 45%顯著增加至 60%，但水平井長度增加至 10 m 以上時，其水平井集水量則呈現水平無成長現象。由以上成果顯示，水平井設置長度對地下水位洩降與河川滲漏量之影響並不明顯，對於水平井之集水功能則有顯著增加，但本研究模式顯示水平井長度若超過 10m，則集水功能並無顯著增加，故水平井長度並非越長越好。

4.3 水平井取水量因子之影響

本研究探討水平井取水量相對於最大水位洩降、河川滲漏量以及水平井集水量之影響，水平井設置深度假設位於 12m 處，水平井直徑爲 1m，水平井設置長度爲 20m，設置方式示於圖 7(a)。

不同水平井取水量與地下水位最大洩降變化關係示於圖 7(b)。圖中顯示隨著取水量之增加，不論位於管內、管末端或管外 20m 處，取水量與最大水位洩降約呈線性正相關。管內由於連通性佳，取水點與管末端之最大水位洩降一致，而管外 20m 處之水位洩降，顯示含水層壓力水頭於抽水過程之洩降情形。

不同取水量與河川滲漏量變化關係示於圖 7(c)，圖中顯示取水量與河川滲漏量呈線性正相關。取水量及水平井之集水量關係圖示於圖 7(d)，亦呈現線性正相關結果。因此，藉由取水量之增加與含水層之水位洩降，抽水引致之河川滲漏量與水平井集水量三者，均有高度線性正相關關係。4.4 水平井位於不同透水係數之影響

本研究探討水平井位於不同透水係數(K)含水層取水之影響，水平井設置深度位於 12m 處，取水量爲 1000m3/day，水平井直徑爲 1m，水平井設置長度爲 20 m，設置方式示於圖 8(a)。

經模式模擬水平井在不同 K 值之含水層取水時，含水層 K 值與最大水位洩降變化關係示於圖 8(b)。圖中顯示隨著含水層 K 值增大，最大水位洩降幅度逐漸趨緩，但 K 值增大到一定幅度時，顯示含水層之傳輸能力將接近於水平井內部，故兩者之最大水位洩降將會趨於一致。

隨著含水層 K 值之增大，抽水所導致河川滲漏量之關係圖示於圖 8(c)。由圖中顯示，當 K 值增加時，水平井之集水的效果將持續增加，相對水平井所引致之河川滲漏量逐漸減少。不同 K 值與水平井入流量/取水量(Qi/Qp)之關係圖示於圖 8(d)。由圖中可得知，隨著 K 值增加則水平井之集水效果也愈佳。

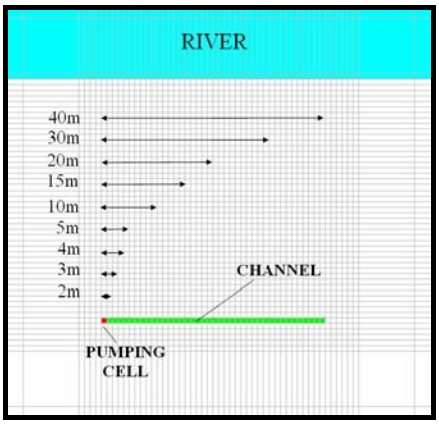


圖 6(a) 水平井不同長度設置示意

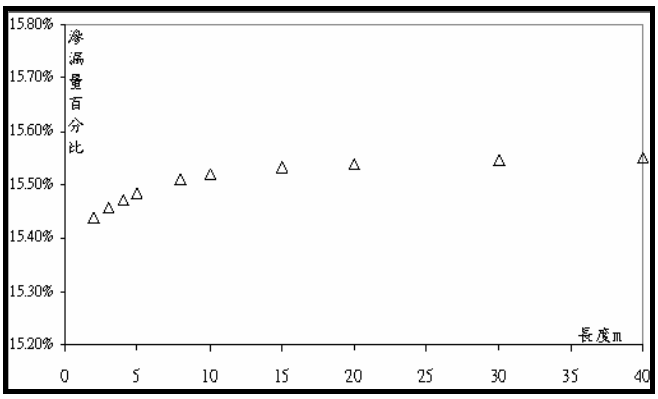


圖 6(c) 水平井設置長度與河川滲漏百分比關係

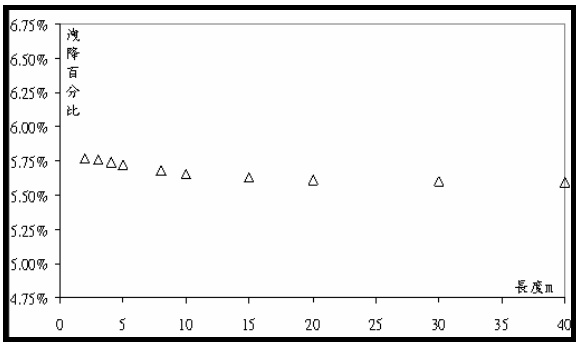


圖 6(b) 水平井長度與地下水位洩降百分比關係

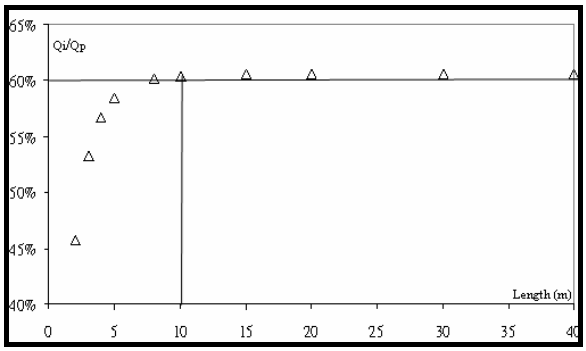


圖 6(d) 水平井入流量/取水量(Q_i/Q_p)與水平井設置長度關係

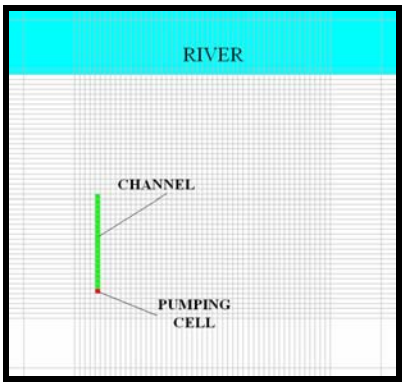


圖 7(a) 不同取水量之模擬場示意

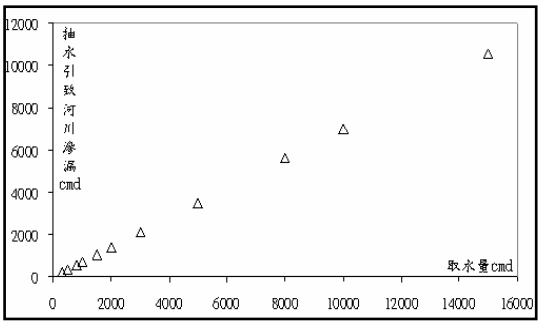


圖 7c) 取水量與河川滲漏量關係

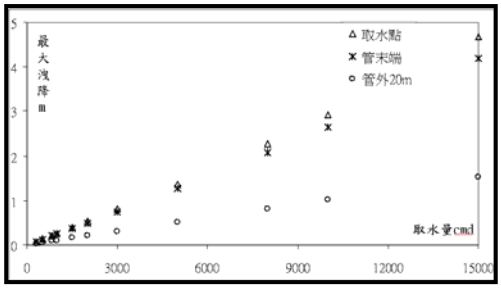


圖 7(b) 取水量與最大水位洩降關係

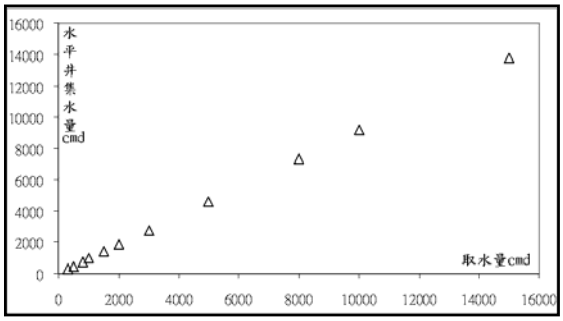


圖 7(d) 水平井集水量與取水量變化

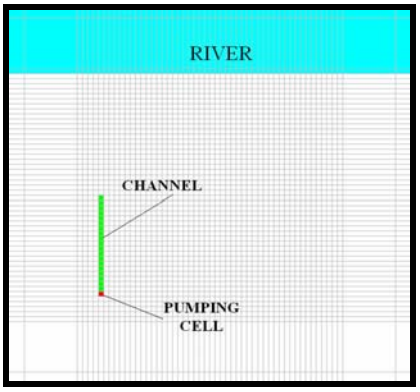


圖 8(a) 不同透水係數含水層示意

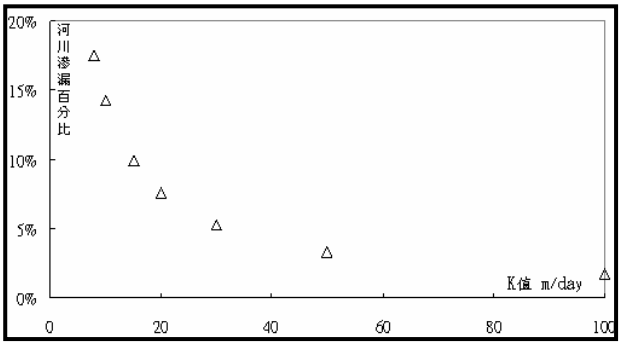


圖 8(c) 不同含水層 K 值與河川滲漏百分比

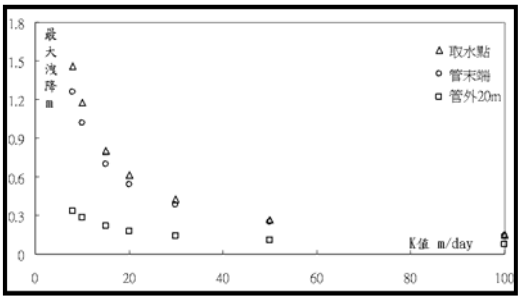


圖 8(b) 不同含水層 K 值與水位洩降

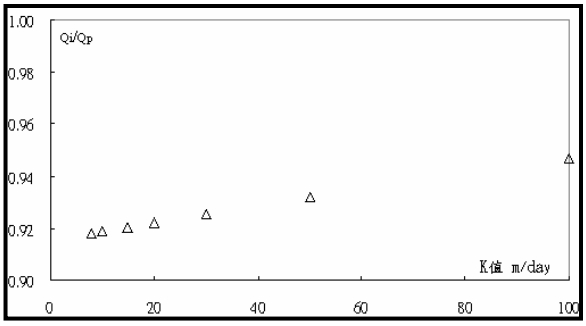


圖 8(d) 不同含水層 K 值與水平管供水量

五、結論與建議

本研究以一虛擬地下水流場，分別以數值模式與解析模式進行推估，結果顯示兩模式誤差僅爲 1.4%。以數值模式分別進行不同水平井埋設深度、長度、取水量與透水係數等情況下，探討其對地下水位洩降、河川滲漏量與水平井入流量等影響。本研究分析成果如下：

1.由數值與解析模式驗證，數值模式對水平井集水情形可合理模擬。

2.在探討水平井不同埋設深度成果顯示，水位洩降隨著水平井埋設深度增加而降低，對河流滲漏量及水平井集水量並無顯著變化。

3.在探討水平井不同設置長度成果顯示，長度在 10m 內能有效降低地下水洩降量，可增加河川入滲量與水平井集水量。本研究模式在水平井超過 10m 後，則各參數趨於穩定，故水平管的設置並非越長越好，需視出水量大小與水平井直徑進行適當評估。

4.在探討不同水平井取水量成果顯示，取水量與最大水位洩降、河川滲漏量、水平井集水量等因子，皆呈線性正相關。

5.探討水平井在不同透水係數含水層成果顯示，在透水係數較高之含水層設置水平井，其最大洩降及河川滲漏量皆會降低，對於水平管集水量有較佳集水效果。

6.水平井之取水量必須同時考量取水效率與對環境之影響，透過本研究成果，由透水係數之探討成果，可應用於開發場址之選取，透過出水量與水平井最佳埋設深度與長度，在達到取水目標下，將環境之影響降至最低。

參考文獻

1.Joshi, S. D., “Augmentation of Well Productivity Using Slant and Horizontal Wells”, journal of Petroleum Technology 6th, p.729, 1988.

2.竇宏恩，預測水平井產能的一種新方法，石油鑽採工藝，第一期，第 18 卷，p.76，1996。

3.蔣廷學，多分枝水平井穩態產能研究，特種油氣藏，第三期，第 7 卷，p.14，2000。

4.水利署，台灣地區水資源開發綱領計畫，2001。

5.Schafer, D., “Use of aquifer testing and groundwater modeling to evaluate aquifer/river hydraulics at Louisville”, EGU, April, p.6, 2003.

6.呂勁，水平井穩態產油量解析公式及討論，石油探勘與開發，增刊，第 20 卷，p.135，1993。

7.McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh, “A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model”, U.S. Geological Survey, Virginia, 1988.

作者簡介：

謝壎煌先生

現職：台灣自來水公司第七區管理處經理

專長：自來水工程與管理、高級淨水處理系統、環境工程與資源管理

陳忠偉先生

現職：國立成功大學資源工程研究所博士生

專長：水資源開發、管理與聯合運用、數值模擬與地下水文分析

李振誥先生

現職：國立成功大學資源工程研究所教授

專長：地下水、水文地質、岩體工程