

地下堰體對集水廊道取水影響之研究

Influence of Underground Weir on Water Withdrawal of Infiltration Gallery

國立臺灣大學
水工試驗所
助理研究員

劉宏仁*

Hung-Jen Lin

國立臺灣大學
土木工程學系
教授

徐年盛

Nien-Sheng Hsu

經濟部
中央地質調查所
所長

江崇榮

Chong-Rong Jiang

國立臺灣大學
土木工程學研究所
研究生

朱哲廷

Che-Ting Chu

摘要

集水廊道為設置於河床下礫石層以汲取地下水的水工結構物，優點為水質清澈且全年可穩定取水。若於集水廊道下游建立一地下堰體，除了可避免河床過度淘刷導致集水廊道基腳沖毀並延長集水廊道的壽命外，亦可抬升集水廊道附近之地下水位，進而增加集水廊道出水量。本研究旨在探討建立地下堰體對集水廊道取水量之影響，以存在集水廊道的林邊溪二峰圳為研究區域，配合數值模式率定、成本經濟分析以進行地下堰體與集水廊道之最佳埋深優選。

本研究首先利用一虛擬設計案例分別將集水廊道與地下堰體概念化，以確認利用 FEMWATER 模式進行數值模擬時之邊界條件設定方式，並分別探討各種地下堰體與集水廊道配置情況下，集水廊道附近地下水位變化情況之合理性。接著蒐集林邊溪二峰圳相關資料進行集水廊道數值模式之建立與率定；再進行二峰圳集水廊道與地下堰體之成本效益分析，並將地下堰體加入模式模擬，最後分別以地下堰體與集水廊道之埋深為決策變數、最大營運淨效益為目標函數，進行下列兩組案例分析：(1)已有二峰圳，增設地下堰體，以及(2)現地未有工程構造物，同時建立地下堰體與集水廊道。

研究結果顯示地下堰體以及集水廊道之設定可合理模擬地下水位之變化情況。當二峰圳已存在時，增設地下堰體且底部埋深至地下 15.2 公尺時為最佳埋深；假設現地無任何構造物，同時建立地下堰體與集水廊道時，集水廊道埋深 18.6 公尺、地下堰體埋深 21.5 公尺為最佳埋深。地下堰體確實可增加集水廊道的出水量，最佳化設計與否工程效益差異可達億元以上。

關鍵詞：集水廊道、地下堰體、FEMWATER、二峰圳。

*通訊作者，國立台灣大學水工試驗所助理研究員，10617 台北市羅斯福路四段 1 號，f91521308@ntu.edu.tw

ABSTRACT

Infiltration gallery is an artificial structure installed below the riverbed including perforated in gravel to collect subsurface runoff in riverbed. The main advantage of the infiltration gallery is stably supplying clean water. If we build an underground weir downstream of infiltration gallery, in addition to avoiding riverbed erosion and extend the life of the infiltration gallery, it can also raise groundwater level around the infiltration gallery and increase water-intake from infiltration gallery.

The aim of the research is investigating the influence of underground weir on infiltration gallery, and focused on groundwater level and water-intake. First, this study design a simple case and conceptualize infiltration gallery and underground weir to confirm that the usability of boundary conditions set in FEMWATER numerical model, and then discusses the rationality of the variation of groundwater level around infiltration gallery by setting different configuration of infiltration gallery and underground weir. Second, this study collected observations about Er-Feng infiltration gallery to establish and calibrate a numerical model of groundwater flow. Finally, this study use the model has been calibrated to establish an optimization model. The objective of the optimization model is the maximum annual value of net benefit. The decision variables include the depth of infiltration gallery and underground weir.

The results shows: (1) By a virtual case study results that this study combined FEMWATER mode, underground weir and infiltration gallery boundary conditions setting can be reasonably simulated groundwater level changes; (2) When Er-Feng infiltration gallery has built, the optimal depth of weir is 15.2m. If there is no structure in the wild, the optimal depth of infiltration gallery and underground is 18.6m and 21.5m. Underground weir can indeed increase water-intake from infiltration gallery. Both facilities need to be optimally designed, since the difference of benefit among different design can be over billion dollars.

Keywords: Infiltration gallery, Underground weir, FEMWATER, Er-Feng irrigation system.

一、緒 論

台灣位於熱帶、副熱帶交界之季風氣候區，由於台灣山脈之分布大致呈南北走向，故台灣西南部受東北季風影響甚微，造成西南部冬季少雨而降雨集中於夏季。此乾濕季分明之現象對水資源調配帶來了一定的困難。除氣候因素外，台灣水文地質條件先天坡陡流急，夏季對流旺盛時降雨之時空分布皆不均勻，局部強降雨加劇河床淘刷，河川水高濃度之泥沙含量造成利用上之困

難；冬季時則因降雨日少，許多西南部河川呈乾涸狀，進而出現缺水之情形。

面對缺水現象，傳統興建水庫、攔河堰、鑿井抽水等方式皆因對環境之衝擊以及可能之風險造成開發阻力驟升，以致於必須尋找其他水資源方案。台灣因地形特性，山區平原交界處附近之礫石層地下水蘊藏量豐富，於該區域興建集水管或集水廊道取水，具有水質清澈、水源穩定並且對環境衝擊影響小之優點。

集水廊道或集水管之取水量與地下水位有

非常密切的關係，前人研究(Kochina, 1962; Olofsson, 1991)結果顯示集水廊道上方水位深淺與出水量呈正相關，因此於興建集水管相關設施時，若可有效抬升地下水位，則取水效益將會提升。參考攔河堰攔阻河川水以增加取水量之原理，亦可以建立地下堰體的方式攔阻地下水使水位抬升，以增加取水量。本研究著重以數值模擬方法，探討於集水廊道下游建立地下堰體時地下水位與出水量之變化情形。

本研究旨在討論建立地下堰體對集水廊道取水之影響，並應用於屏東縣林邊溪二峰圳之實際案例中，最後進行成本經濟分析優選出集水廊道與地下堰體的最佳埋深。本研究首先探討以數值模式模擬集水廊道與地下堰體時，邊界條件設定之合理性，接著依據實際案例之情況收集現地水文地質相關資料，並進行穩態模式參數率定，再以率定完成之數值模式為基礎加入地下堰體並模擬不同集水廊道及地下堰體埋深時出水量之變化，最後以工程經濟分析方法建立優選模式找尋最佳埋設深度。

二、集水廊道與地下堰體 概念化方式分析

集水廊道係指於地底下埋設一集水空間，當地下水位足夠高時，地下水藉由水頭差流入集水空間以集水，可輸送至需水地區供民生用水或農業灌溉；地下堰體則為埋設於地底下的不透水結構物，可用於保護結構物或攔阻地下水(Ishida, 2011)。欲將上述兩者應用於現地，須確認數值模式模擬結果之水力特性與現實相符。本節將說明本研究之模式設計、集水廊道與地下堰體的概念化方式，並設計虛擬案例進行模擬以觀察水力現象。

2.1 模式程式碼設計

本研究採用 Yeh (1987)發展出包含了模擬地下水與污染傳輸的FEMWATER 數值模式進行模擬，其中未飽和層參數使用 van Genuchten (1980)之經驗公式，然而本研究不考慮污染傳輸且假設無抽水井之影響，參考 Bear (1979)之推

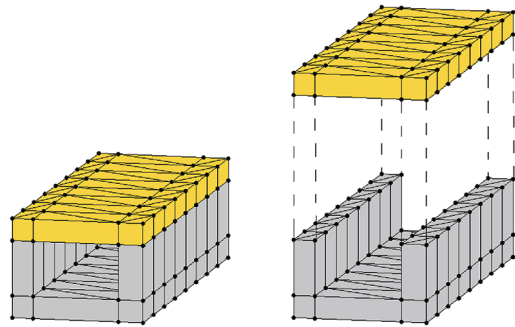


圖 1 集水廊道概念化示意圖。

導，得到簡化過後之地下水控制方程式如下：

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathbf{K} \cdot \nabla (h + z)] \dots\dots\dots (1)$$

上式中， S 為儲水係數； \mathbf{K} 為水力傳導係數張量； h 為壓力水頭； Z 為位置水頭； t 為時間。

本研究以 GMS 作為模式的視覺化平台，此外利用程式語言自動產生 FEMWATER 之輸入檔，包含網格元素資訊以及水文地質參數設定，並以外部呼叫的方式執行 FEMWATER 模式，最後利用程式語言處理模式輸出檔以求得本研究欲探討之集水廊道設計參數，並以上述方式進行各項數值試驗。

2.2 集水廊道概念化與邊界條件設定

集水廊道概念化之流程為先決定集水廊道埋設位置、埋設深度與坡度以及集水廊道尺寸，並以此為基礎建立三維網格。本研究將集水廊道之模擬概念化為一矩形斷面渠道，以挖空中間元素(element)的方式模擬集水廊道內部集水空間，並以更改集水廊道上層元素之水力傳導係數的方式模擬濾層，周圍其餘元素則給定極小之水力傳導係數以模擬集水廊道的混凝土材質。集水廊道概念化如圖 1 所示。

集水廊道若由上方取水，地下水位必須高於集水廊道頂部，並且以重力的方式流入集水廊道內部，集水廊道外部的地下水流與內部的明渠流為分離之系統。集水廊道之集水空間其頂部與空氣接觸，即壓力水頭為零(許少華等，2002)，故

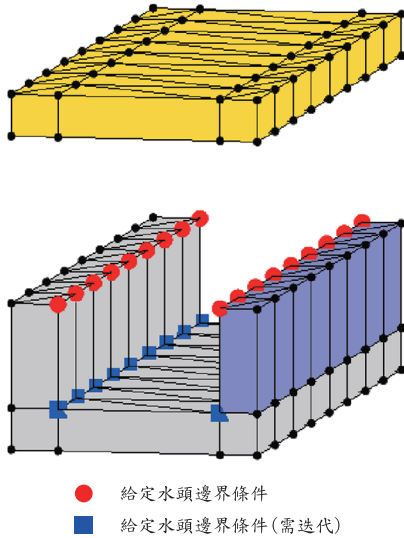


圖 2 集水廊道上方及側邊取水邊界條件示意圖。

將集水廊道內部上層節點設為給定水頭邊界條件，其總水頭值為節點之高程。

若集水廊道可由側邊進水，集水廊道內明渠流與外部地下水流會連通產生水體交換之情形，機制較上方取水複雜，須以迭代之方法求得集水廊道內水深。本研究以集水廊道下層節點給定水頭邊界條件的方式模擬集水廊道內水流，其總水頭值為節點高程加上集水廊道內水深，迭代步驟首先給定一集水廊道內初始猜測水深，並以邊界條件輸入模式，接著由模擬結果之出水量經曼寧公式計算得到一換算水深，再將此換算水深設為邊界條件輸入模式，重複模擬並迭代至集水廊道內水深收斂為止。集水廊道取水示意圖如圖 2 所示。

2.3 虛擬案例—集水廊道

集水廊道之邊界條件設定方法建立後，本研究設計一虛擬案例進行模擬。模式設定為一筆直河道，河道長度 2,000 公尺、寬度 400 公尺；上游地表高程 130 公尺、下游地表高程 110 公尺，厚度皆 40 公尺，並且於正中間 1,000 公尺處設立一垂直於河道、同時可由上方及側邊進水的集水廊道，示意圖如圖 3，圖中框選部分為集水廊道

之出口，其高程約為 97 公尺，本研究將著重觀察此部分之水面變化。

本研究設計不同上游面之地下水位進行穩態模擬，由地下水位低於集水廊道逐漸上升至地下水淹沒集水廊道並觀察其水力現象。本虛擬案例下游水位固定為 90 公尺，上游水位由 90 公尺開始，每次增加 5 公尺進行模擬並觀察其水位變化，模擬結果如圖 4 所示。

由圖 4 可觀察到上游水位為 90 公尺時，附近地下水位低於集水廊道；當上游水位上升至 100 公尺時，集水廊道附近地下水位開始高於集水廊道底部，開始由側邊進水；上游水位上升至 120 公尺時，附近地下水位開始高於集水空間，並開始可由上方進水；當上游水位上升至 130 公尺時，地下水位整個高於集水廊道上方濾層，上升至 135 公尺時，可觀察出集水廊道正上方之地下水位因集水廊道取水而呈凹陷狀。由上述結果可知本研究之集水廊道概念化與邊界條件設定方式可得出符合實際水力特性之模擬結果。

2.4 地下堰體概念化與邊界條件設定

地下堰體之概念化方式首先決定堰體尺寸、位置、埋設深度與厚度，接著依堰體之設計建立三維網格並調整元素的水力傳導係數(即 K 趨近於零)以模擬混凝土材質。

2.5 虛擬案例—地下堰體

本研究模擬地下堰體之虛擬案例其三維網格與模擬集水廊道之虛擬案例相同，僅將集水廊道改為地下堰體，其中地下堰體頂部高程約為 98 公尺。本研究設計不同上游地下水位進行穩態模擬，由地下水位低於地下堰體頂部逐漸上升至地下水位越過地下堰體並觀察其水力現象。虛擬案例下游水位固定為 90 公尺，上游水位由 90 公尺開始，每次上升 5 公尺觀察附近地下水位變化，模擬結果如圖 5 所示。

由圖 5 可知當上下游地下水位皆為 90 公尺時，地下堰體附近水位為水平；上游水位上升至 95 公尺時，堰體上游面水位上升，下游面水位因地下堰體之元素水力傳導係數並非設為零而是

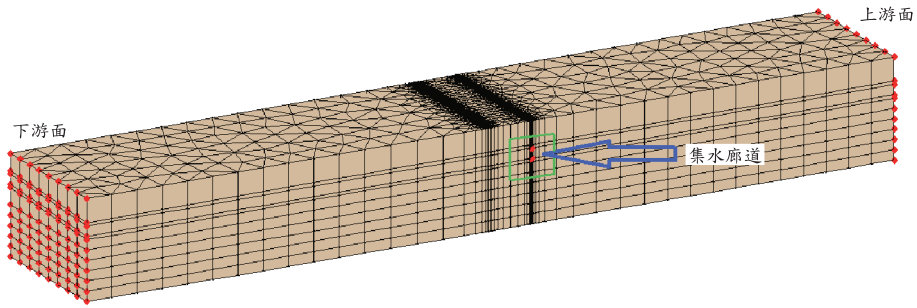


圖 3 虛擬案例三維網格圖。

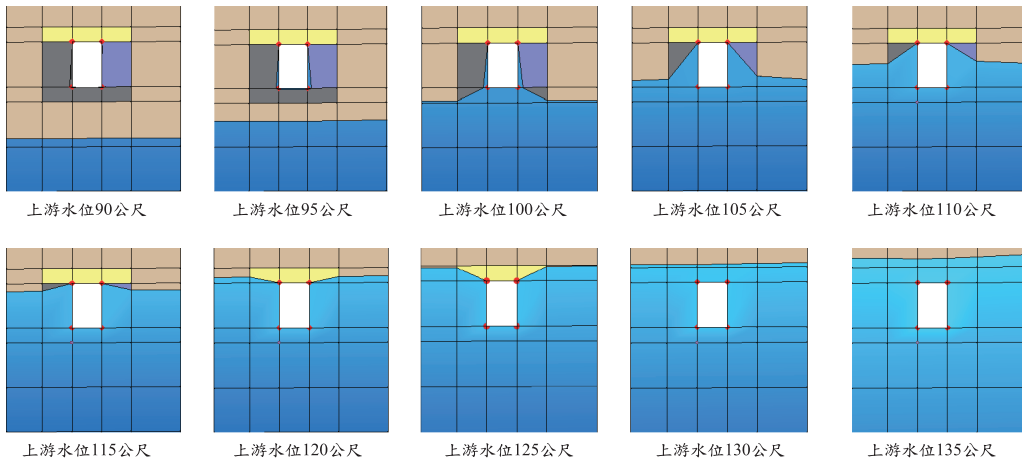


圖 4 虛擬案例一集水廊道附近地下水位變化。

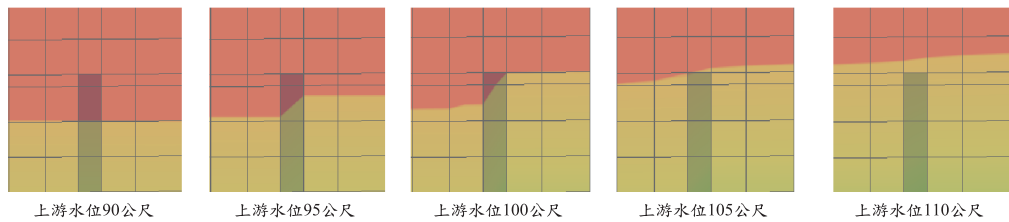


圖 5 虛擬案例地下堰體附近地下水位變化圖。

一微小值，故地下水仍有些微流動，導致地下水位微幅上升；上游地下水位上升至 100 公尺時，地下水位開始溢過堰體，上游面水位與堰頂等高，下游面水位則持續上升；上游地下水位上升至 105 公尺時，下游面水位已與堰體等高，整體水位開始高於地下堰體；最後上游水位上升至

110 公尺時地下水位已高於堰體，但仍可觀察出堰體上游面水位變化較緩、下游面水位變化較陡，代表因堰體的攔阻使上游面水位抬升。由上述結果可知本研究之地下堰體概念化與邊界條件設定方式可得出符合真實水力特性之模擬結果。



圖 6 研究區域為於林邊溪流於之相對位置。

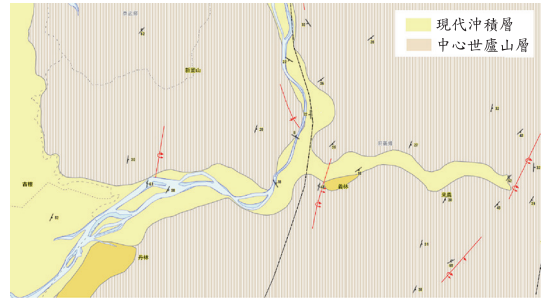


圖 7 林邊溪研究區域附近地質分布。

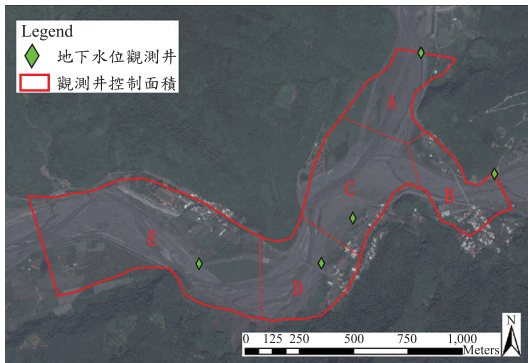


圖 8 林邊溪數值模擬範圍之水文地質分區。

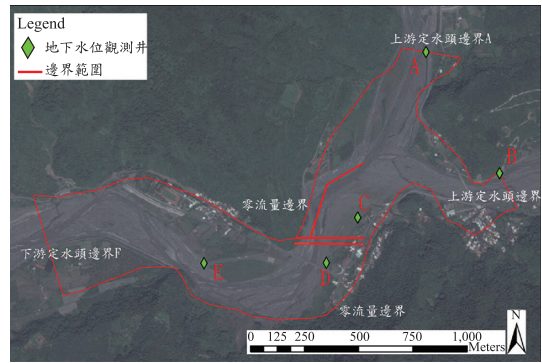


圖 9 林邊溪研究區域地下水數值模式邊界條件設定。

三、案例應用— 林邊溪二峰圳集水廊道

3.1 研究區域簡介

林邊溪研究區域選定瓦魯士溪與來社溪匯流處下游約 500 公尺，如圖 6，研究區域內存在由鳥居信平所建立的二峰圳集水廊道，因二峰圳集水廊道有較完整之研究資料，可供數值模式率定，故選定二峰圳進行地下水流數值模式實際應用。

研究區域來義大橋附近地層大致上分為兩層，下層為硬頁岩夾變質砂岩，上層則覆蓋現代沖積層。由礫石、砂所組成，透水性良好。林邊溪研究區域附近地質分布如圖 7。經濟部水利署水利規劃試驗所(2010)於二峰圳集水廊道附近進

行鑽探作業，估計五口地下水位觀測井附近之河床沖積層厚度約為 20 公尺至 50 公尺。

3.2 數值模式建立與率定

接著依據沖積層辨識、邊界辨識之結果建立數值模式並進行率定，本研究將研究區域依據五口地下水位觀測井進行徐昇式分區，並給予不同土壤參數，參考羅振優(2015)及 Hsu (1995)之方法進行率定，徐昇式分區如圖 8、邊界條件設定如圖 9、林邊溪模式三維網格如圖 10。

上游邊界依觀測水位設為給定水頭邊界，下游邊界依觀測水位設為給定水頭邊界，河道兩側之河床邊界為不透水設為零流量邊界。三維網格分層於表面設定一層 0.5 公尺之河道底泥層，往下至二峰圳埋深高程處等距切三層，接著由二

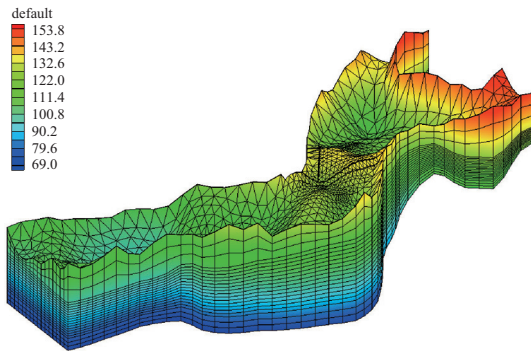


圖 10 林邊溪數值模式 3-D 網格。

峰圳埋深向下每 2 公尺切一層，最後至河床堆積層底部等分切三層，共計 22 層。建立之集水廊道包含梯形堰堤與半圓形集水暗渠，梯形堰堤長 328 公尺，圓形集水管長 455 公尺。建立之地下堰體位於集水廊道下游約 20 公尺處，堰體長 330 公尺且與梯形堰堤平行。模式模擬分為旱季與雨季，旱季為 2010/1/1 至 2010/5/21、雨季為 2010/5/22 至 2010/9/5，旱季觀測水位取旱季期間之平均地下水位，雨季觀測水位取雨季期間之平均地下水位。

經率定後雨季之河床沖積層水力傳導係數 C 區為 312 (m/d)、D 區為 120 (m/d)、E 區為 179 (m/d)、集水廊道入口水力傳導係數為 40 (m/d)；另外在地下水位部分，雨季模擬結果較佳，地下水位誤差皆小於 1 公尺，旱季模擬結果較差，最大地下水位誤差為井 E 的 1.52 公尺；模擬所得集水廊道取水量雨季為 187,207 (cmd)，旱季為 49,838 (cmd)，與觀測資料之誤差百分比分別為 0.3%與 2.6%，顯示模式率定結果正確，適用於模擬集水廊道取水。模式率定之結果如表 1，率定完成之水文地質參數如表 2，結果顯示埋設集水廊道區域之地層透水性較佳，並且較原實驗量測之結果高；另外河道底泥層之水力傳導係數影響出水量與地下水位甚鉅，需合理設定，不可過大。

3.3 最佳埋深優選結果

最佳埋深優選模式部分本研究設計兩種情境案例，其一，在二峰圳集水廊道存在之情況

表 1 參數率定後地下水位及出水量與觀測結果之比較

	觀測井 C (m)	觀測井 D (m)	觀測井 E (m)	出水量		
				(cmd)	(cms)	誤差 (%)
旱季觀測	117.00	115.45	101.70	48,552	0.562	2.648
旱季模擬	117.48	116.51	103.22	49,838	0.577	
雨季觀測	119.60	117.80	105.90	186,598	2.160	0.326
雨季模擬	119.32	117.47	106.24	187,207	2.167	

表 2 穩態模式參數檢定後各分區之土壤參數

分區	A	K_{xx}	K_{zz}	α	分區	A	B	C	D	E
		(m/d)	(m/d)	(1/m)						
沖積層	A	4.2	1.26	8.4	河道底泥層	A	0.9	0.3	0.8	
	B	30.5	10.15	8.4		B	0.9	0.3	0.8	
	C	312	104	8.6		C	5	1.6	0.8	
	D	120	40	10.4		D	1.2	0.46	0.8	
	E	179	60	18.0		E	0.9	0.3	0.8	
廊道入口		40	13.3	1.09						
混凝土		0.03	0.03	0.8						

下，進行地下堰體埋深之優選；其二，假設現地無任何水工構造物，在欲同時建立集水廊道與地下堰體情況下，優選集水廊道與地下堰體之埋深。

優選模式中目標函數選定為淨效益年值 (Z)，等於年計效益 (B_y) 減去年計成本 (C_y)。參考經濟部水利署 (2001) 工程經濟分析方法進行計算，年計效益是將總效益以等值平均分攤於分析年限間，總效益為各年之供水收入 (T_j)，等於各年集水廊道供水量乘上原水價格後加總。年計成本是將總成本以等值平均分攤於分析年限間，包含年利息、年償債基金、期中換新準備基金、保險費與稅捐以及年營運維護費。

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z(L_c, L_d) &= B_y - C_y \\
 &= \left(\sum_{j=1}^n (T_j) \cdot (1+i)^{n-j} \right) \cdot \frac{i}{(1+i)^n - 1} - C_y \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

表 3 地下堰體與集水廊道各分層高程與深度

地下堰體						集水廊道					
層數	高程	埋深	層數	高程	埋深	層數	高程	埋深	層數	高程	埋深
2	127.1	0.2	13	101.6	25.7	2	124.9	0.2	13	102.5	22.6
3	124.2	3.1	14	99.5	27.8	3	122.8	2.3	14	100.5	24.6
4	121.2	6.0	15	97.4	29.9	4	120.6	4.5	15	98.5	26.6
5	118.3	9.0	16	95.3	32.0	5	118.5	6.6	16	96.5	28.6
6	116.2	11.1	17	93.2	34.1	6	116.5	8.6	17	94.5	30.6
7	114.1	13.1	18	91.1	36.1	7	114.5	10.6	18	92.5	32.6
8	112.1	15.2	19	89.0	38.2	8	112.5	12.6	19	90.5	34.6
9	110.0	17.3	20	87.0	40.3	9	110.5	14.6	20	88.5	36.6
10	107.9	19.4	21	83.4	43.8	10	108.5	16.6	21	85.2	40.0
11	105.8	21.5	22	80.0	47.3	11	106.5	18.6	22	81.8	43.3
12	103.7	23.6				12	104.5	20.6	22	78.5	46.6

*高程及埋深單位為公尺(m)

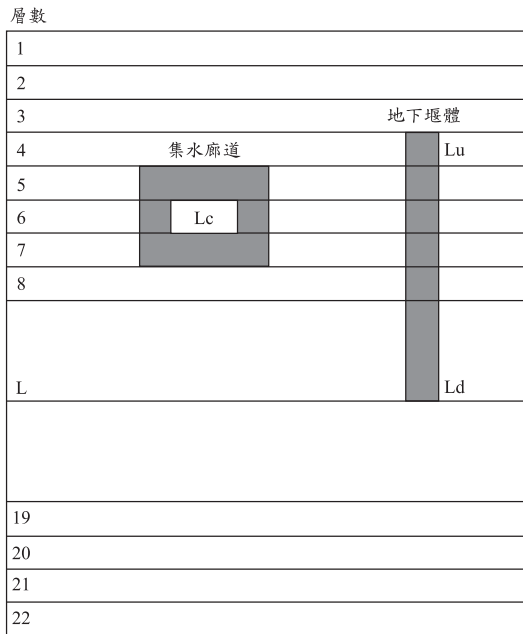


圖 11 集水廊道與地下堰體決策變數示意圖。

其中，決策變數為集水廊道埋深(L_c)以及地下堰體埋深(L_d)，兩者皆以層數表示之。最後給定相關限制式，包括集水廊道埋深層數需介於現地埋設深度以下至堆積層底間，即 $6 \leq L_c \leq 18$ ；地下堰體堰底埋深層數須介於集水廊道埋深層數至

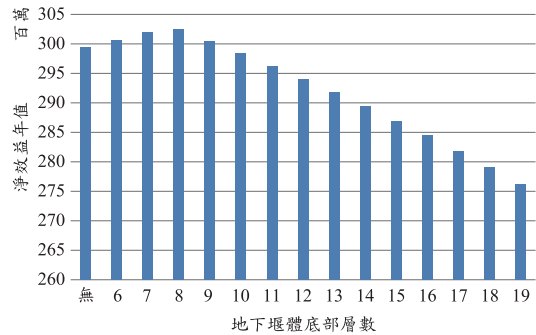


圖 12 不同地下堰體埋深之淨效益年值。

岩盤間，即 $L_c \leq L_d \leq 19$ ；另外考量到地下堰體必須高於集水廊道才有保護其不被侵蝕之功能，故限制地下堰體堰頂層數(L_u)需高於集水廊道兩層，即 $L_u = L_c - 2$ 。

決策變數示意圖如圖 11 所示，集水廊道與地下堰體各分層高程如表 3 所示。因為本研究加上限制式後所有可行解數量僅 200 組內，故直接計算所有可行解並從中優選最佳埋深。第一種情境為已有二峰圳條件下優選地下堰體埋深，結果如圖 12 所示，可看出當地下堰體底部埋至第 8 層(約地下 15.2 公尺)時，有最大淨效益年值 302.2 百萬元，且較未配置地下堰體之現況更佳，效益

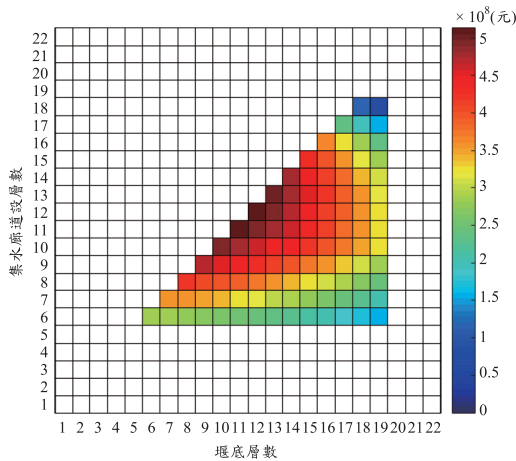


圖 13 同時建立集水廊道與地下堰體之淨效益年值

差異約 3 百萬元。雨季時當地下堰體底部埋深漸深時，集水廊道集水量逐漸增加，但在旱季時集水量在地下堰體底部埋深於第 8 層時就已穩定，以全年來看，地下堰體埋深增加，成本隨之增加但出水量卻無明顯上升，所以最佳解落在 $L_d = 8$ 。

第二種情境在現地無構造物情況下同時優選地下堰體與集水廊道的埋深，結果如圖 13 所示，可看出當集水廊道埋設至第 11 層(約地下 18.6 公尺)、地下堰體埋設置第 11 層(約地下 21.5 公尺)時，有最大淨效益年值 513.0 百萬元，較未最佳化配置者效益差異達 400 百萬元，十分顯著。在同一集水廊道埋深下，地下堰體底部埋設越深其出水量呈上升趨勢，隨著集水廊道埋深增加，建立地下堰體所增加之出水量會越少，推論其原因為兩者埋深越深即越遠離地下水位面，對地下水位影響變小，使得能增加的出水量變少。當固定集水廊道埋設層數時，地下堰體埋越深其淨效益年值越低，原因為埋設地下堰體所需之挖方由 45 度明挖邊坡工法進行，所需挖開之土體隨埋深越低而大幅上升，且必須回填等量土體進而導致成本上升，並可從中找到最大淨效益之配置深度。

四、結論與建議

4.1 結論

本研究集水廊道概念化採用矩形斷面並以挖空元素方式模擬，根據不同形式之集水廊道可分為上方取水、側邊取水或者兩者皆有。上方取水採用「將集水廊道中空部分之上層節點給定壓力水頭為零」之方式，以模擬地下水藉水頭差流入集水廊道空間；側邊取水則以「將集水廊道中空部分之下層節點設為給定水頭邊界條件並迭代收斂」，其水頭值為節點高程加上水深。分析結果顯示附近地下水位由低於集水廊道至高於集水廊道皆能表現合理之水力特性，為可行之集水廊道模擬方式。

地下堰體以更改元素之水力傳導係數的方式模擬，並探討水力現象之合理性。分析結果顯示當附近上游地下水位低於堰時，可有效攔阻上游之地下水，當整體地下水位覆過地下堰體時，上下游地下水位出現高低差，符合實際水力現象。故本研究對集水廊道與地下堰體之模擬為可行之方式。

本研究藉由實測之地下水位與出水量，以試誤法搭配高斯牛頓法完成林邊溪二峰圳旱季與雨季的模式率定。率定結果顯示雨季時井 C 之模擬水位為 119.3 公尺、井 D 之模擬水位為 117.5、井 E 之模擬水位為 106.2，集水廊道出水量為 187,207 (cmd)；旱季時井 C 之模擬水位為 117.8 公尺、井 D 之模擬水位為 116.5、井 E 之模擬水位為 103.2，集水廊道出水量為 49,838 (cmd)。

本研究優選模式以全域搜尋法求最佳解。結果顯示林邊溪研究區域當已有集水廊道之情況下，地下堰體埋設至數值模式第 8 層(約地下 15.2 公尺)時淨效益最高；另外假設現地未有工程構造物，同時建立地下堰體與集水廊道時，地下堰體埋設至數值模式第 11 層(約地下 21.5 公尺)、集水廊道埋設於數值模式第 11 層(約地下 18.6 公尺)時，取水效益最佳。在固定集水廊道埋深下，地下堰體底部埋設越深其出水量呈上升趨勢，但若集水廊道埋深太深，則建立地下堰體所能增加之出水量會變少，所以地下堰體確實可增加集水廊道出水量，但兩者皆需最佳化設計，最佳化與否工程效益的差異可達億元以上。

4.2 建議

集水廊道與地下堰體建立於數值模式時，集水廊道上層、中層、下層以及側邊皆只占數值模式之一層，因有限元素法進行計算時是以節點為基準，其控制體積為周圍元素之部分體積，故若僅設一層有可能發生節點受控制體積之影響而出現非預想之結果，於本研究集水廊道概念化中之側邊取水情形，即可能出現上層節點同時受上方濾層以及側邊濾層之水力傳導係數影響，進而導致未知的誤差，建議未來若進行相關模擬，應考量節點之控制面積，並謹慎設定網格切割以確保欲給定邊界條件或欲觀察之節點不受其他元素性質影響。

河道入滲邊界條件分為旱季與雨季，雨季時以給定水頭邊界條件模擬河川水位，其中模式表層之河道底泥層水力傳導係數值非常重要，若水力傳導係數設定過高，模擬結果可能出現地下水位抬升至河川水位，使研究區域整體呈飽和狀態，為不合理之現象。本研究因無現地河道底泥層之水力傳導係數資料，故僅能被動以地下水位之合理性進行調整，建議未來進行相關研究可進行河道底泥層之水力試驗得出一水力傳導係數合理範圍，或是探討河道底泥層透水性對河川補注地下水之影響。

本研究地下堰體埋設之平面位置為人工判定，且尺寸為手動劃設，並未針對地下堰體最適建置位置做探討，未來若進行相關數值模擬建議可將地下堰體之尺寸與擺放位置當作決策變數納入優選模式中。

五、參考文獻

1. Bear, J., *Hydraulics of groundwater*, McGraw-Hill Book Co, 1979.
2. Hsu, N. S., Kuo, J. T. and Chu, W. S., "Proposed daily streamflow-forecasting model for reservoir operation," *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 121(2), 132-143, 1995.
3. Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S. and Imaizumi, M., "Sustainable use of groundwater with underground dams," *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly*, 45(1), 51-61, 2011.
4. Olofsson, B., "Impact on groundwater conditions by tunnelling in hard crystalline rocks", Ph.D, Royal Institute of Technology, 1991.
5. Polubarinova-Kochina, P. Y., *Theory of ground water movement*, Princeton Univ Press, 1962.
6. Van Genuchten, M. T., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898, 1980.
7. Yeh, G. T. (1987). *Femwater: A finite element model of water flow through saturated-unsaturated porous media—first revision*: Oak Ridge National Laboratory.
8. 李昭順、劉振宇，「臺灣西部河川上游經濟穩定的伏流水開發」，*台灣水利*，60(1)，29-36 頁，2012。
9. 經濟部地質調查所，「台灣南段山區地下水資源調查與評估(1/4)」，2014。
10. 經濟部地質調查所，「台灣南段山區地下水資源調查與評估(2/4)」，2015。
11. 經濟部水利署，「濁水溪西螺河段伏流水工程基本設計報告」，2001。
12. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「林邊溪、力力溪現有集水廊道剩餘水資源開發潛能與經濟效益概估」，2010。
13. 羅振優，「集水廊道附近地下水流數值模式率定方法建立與應用—以林邊溪為例」，國立臺灣大學，土木工程學研究所碩士論文，2015。

收稿日期：民國 105 年 12 月 15 日
修正日期：民國 106 年 1 月 10 日
接受日期：民國 106 年 2 月 6 日