

以深抽水排水輔助淺覆蓋隧道施工之成效檢討

黃金山¹、徐金錫²、蘇苗彬³、吳富豐⁴

¹ 臺灣省水利局副局長

² 臺灣省嘉南農田水利會會長

³ 中興大學土木工程研究所副教授

⁴ 臺灣省水利局課長

摘要

烏山頭水庫放水設施更新改善工程，送水隧道工程部份，因遭遇流砂二次發生災害，經會商擬定自地表面設置深抽水井系統，全面排除地下水，以利工程進行。經由抽水試驗決定第一階段先沿隧道兩側距預定中心線 15 米處，以 16 米為間距，佈置系列的小流量高揚程之深抽水井。為評估其成效，規劃全區的地下水位觀測系統及抽水井回水試驗定期進行檢驗。

歷經三個月的抽水井系統排水實施後，評估其地下水壓力已得到控制，隧道開挖作業得以重新動工，並如期完成送水隧道之開挖作業與襯砌設置，在此就執行時的考量作成報告，以供相關單位參考。

一、前言

烏山頭水庫放水設施更新改善工程之送水隧道部分[1]，於開挖至測點 0 k + 275.30 公尺附近，因地質條件特殊，一直無法順利施工，考慮相鄰結構物之安全與工程之進展，遂決定改道，並擬定以深抽水井排水方式，全面降低隧道開挖附近區域之地下水壓力，以利工程進行，其間並考慮井抽水可能引致地層變形而對水庫副壩安全的影響，由工程技術檢討會作成決定，針對抽水井排水系統應妥善進行先期之調查、規劃、設計執行與監督等步驟。

以全面深抽水井布置，達區域地下水壓力之降低與控制，需考慮之因素眾多，現地有高傾角之地層構造，多為泥岩材料，其間夾以厚度不等之含水砂層，水文地質條件複雜，而送水隧道沿線覆土厚度由 0 ~ 30m 不等，排水系統又不得干擾隧道開挖之進行及副壩之安全，所需的考量，不同於一般作業，故擬定先進行現地之井抽水試驗，再行規劃設置排水系統。並隨著隧道工程之進行，長期觀測排水系統的成效。

二、先期調查與抽水試驗

在全面實施抽水計畫前，先行規劃實施井抽水試驗的工作，來確認現地水文地質特性，擬定以下工作項目：

1. 水文地質特性研判

區域內地下水位偏高，與水庫相通有關，由鑽探資料可知其隧道沿線的地質狀況，並繪成地質剖面圖（如圖二）。

2. 地球物理探勘

據鑽探報告所示，本區地層屬砂、泥岩互層，探測之目的在找出風化或疏鬆砂岩層連通成的水脈。因含水量大者具有較低之電阻值，故輔以地電阻探測定出水脈的可能位置。(結果如圖一中所標示)。

3. 井抽水試驗

抽水井之試驗結果，可提供將來排水實施的設計依據，及全區之水文地質特性更完整的確認，為全程工作成效之所繫。另實施完成之井抽水試驗結果，可分析地層之導水及儲蓄水的能力，並綜合前面之調查研判全區水文地質特性。

□ 施鑽結果

各鑽探井鑽探結果，大多為砂層與泥岩層之夾層且砂層厚度為2m~3m，僅有一、二層厚度較厚之砂層可作薄管取樣。砂層分佈情形，併入已有地質調查鑽孔資料供作水文地質研判用，初步認為區域水文地質類似現代的沉積地形，含水層可能連通相當廣。

□ 室內試驗

完成採得樣品之一般物理性質試驗及過濾料選定試驗[2]，計由採回之小銅管及薄管取得土樣，進行比重及顆粒分析試驗。

□ 抽水試驗井設計與施工

抽水試驗井之設計應依據採樣井所得之地層分佈及材料特性而定，其進水段應完全涵蓋主要含砂層，並完全延伸至鑽孔底部，以得最大之出水量。以5米長15公分直徑之PVC管作井管材料，進水段表面鑽圓孔，其孔洞所佔面積比例不得小於15%，外包覆透水性良好之工程不織布，並以鐵線固定，其上方則以同級PVC管連接至地表。其過濾料設計見(烏山頭水庫放水設施更新改善工程隧道開挖實施排水試驗及軟地層補強研究計畫總報告)。

□ 抽水試驗實施

抽水試驗之實施如下：

由預先設置之抽水井輪流執行抽水，其餘當觀測井使用，第一階段控制抽水井之水位下降在10m~20m之間，調整出水量，力求可控制水位後開始觀測，直到所有觀測井水位穩定不再變化後，加大流量成中流量，控制水位下降在20m~30m之間，觀測後再放大流量，使其達最大之洩降，但需注意最低水位不得低於控制開機之水位。完成所有觀測達穩定之後，關掉抽水馬達，實施回水觀測，完成第一組之試水作業。

□ 抽水分析理論與方法

當水井完全貫穿一廣大含水層，其出水量之影響範圍將隨而時間向外擴展，而地下儲水被抽出時其含水層之壓力水頭將降低，因而形成不平衡非定量水流情形[3]。

Theis(1935)由Darcy定律代入連續方程式(Continuity Equation)，並依據地下水流與熱傳導相似之原理，引入時間因素與儲水係數得下列兩式：

$$\begin{cases} \frac{r^2}{t} = \frac{4T}{S} u \\ s = \frac{Q}{4\pi T} w(u) \end{cases}$$

其中 S : 儲水係數(Storativity ; Dimensionless)
 T : 導水係數(Transmissivity ; m^2/day)
 s : 洩降(Drawdown ; m)
 t : 洩降時間(Time ; t)
 r : 徑向距離(Distance of Radial Flow of The observation well ; m)
 u : 波茲曼變數(Boltzmann Variable)

$w(u)$: 井函數 ; $w(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$

並建議使用圖解法求得解答。

□ 抽水試驗之結果分析

經由共計八組之抽水及回水試驗，並採用 Theis 的非穩定流分析，抽水及回水流量介於 7 ~ 47CMD，推算得儲蓄係數 S 介於 0.0001 至 0.15 而導水係數 T 則介於 0.25 ~ 9.23 m^2/day 。且由於抽水井交接不同之含水層(含水層呈傾斜 45 度走向)造成試驗結果之 S 、 T 有相當大的變化，建議採較保守之 S 、 T 分別在 0.02 ~ 0.16 及 1 ~ 5 m^2/day 之間，且由於 T 值不大，抽水井應採小流量定水位之設計。

三、排水系統規劃

地下水排除之計畫採用深井抽水之方式進行，工程所需控制的地下水，為一長條狀的區域，應依所擬的地下水位洩降量來作設計，以下概略的推算有關因子。

1. 抽水量的計算：

抽水井的規劃，抽水量為第一項要確定的參數，抽水量可由試水結果以下列公式來推算：

$$Q = T \cdot s / 0.0796W(u)$$

其中 Q 為設計抽水量(m^3/d)

T 為含水層之導水係數(m^2/d)

$W(u)$ 為井函數(無因次)

s 為所欲達到的洩降(m)

$$u = r^2 S / 4Tt$$

其中 S 為含水層之儲蓄係數(無因次)

t 為規劃之抽水時間(day)

r 為抽水井至欲控制洩降的點位置之間的距離。

依前面所述，抽水試驗之結果，採用較保守之 T 值約 $1 \sim 5(\text{m}^2/\text{d})$ ， S 值約 $0.02 \sim 0.16$ 。由於抽水量與洩降成正比，以 Q/s 為計算可得以下。

其中 T 、 S 各試 1 、 5 及 0.02 、 0.16

抽水時間 t 以 10 天預估

r^2 以擬定之規劃假設，計算得之 Q/s 代表在選定的抽水井與觀測點的距離下，造成每單位米洩降所需之抽水量。

2. 抽水井佈置計畫：

抽水井距離的選定，關係著抽水降低地下水位之成效，為求有效控制地下水壓力，就抽水計畫作以下之計算。

由於現場有前進灌漿的部份，其與隧道中心線應有 15m 之距離，故其佈置主要為抽水井之間距，選定以下三方案作檢討。

(1) 井之間距為 16m ，等距離沿隧道兩側佈置。

(2) 井之間距為 8m ，等距離沿隧道兩側佈置。

(3) 井之間距 8m ，除了沿隧道兩側佈置外，並在隧道中心線上方設置一組 8m 間距之抽水井。

三個方案之可能成效，可由抽水效果之計算來推定。表一為以 $T=5.0\text{m}^2/\text{day}$ ， $S=0.02$ ，抽水時間 $t=10$ 天為例所計算得之抽水井距 r 與單位洩降所需之抽水量(Q/S)的關係。

表一 單位洩降所需之抽水量與距離之關係

$r(\text{m})$		0.20	8.00	15.0	16.0	17.0	22.0	24.0	32.0	35.0	50.0	57.0
$T=5.0$ $S=0.02$ $t=10$	u	4E-6	6E-3	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.10	0.12	0.25	0.33
	$W(u)$	11.9	4.49	3.11	3.11	3.01	2.47	2.36	1.81	1.64	1.04	0.80
	Q/s	5.28	13.9	20.22	20.2	20.8	25.4	26.6	34.7	38.3	60.4	75.7

再以資料 $T=5.0\text{m}^2/\text{day}$ 、 $S=0.02$ 抽水時間為 10 天，以設計最大抽水量為 $20\text{m}^3/\text{day}$ 對抽水井距離為 8m 的情況作計算，得以下結果如表二。

表二 觀測井距離(r)與單位洩降(s)所需之抽水量(Q)關係

T=5.0m ³ /day , S=0.02 , t=10 天 , Q=20m ³ /day						
	u	W(u)	Q/s	單井可洩降量	同半徑之井總洩降量(*4)	
r1	15.5	0.024	3.16	19.8	1.01	4.04—a
r2	19.2	0.037	2.76	22.8	0.88	3.52—b
r3	25.0	0.063	2.21	28.4	0.71	2.84—c
a+b+c=10.4m						

其中 a、b、c 分別代表三種不同井距離所得之洩降。

3. 抽水井施工與品質

本工程所施設之抽水井依前所述應為小流量，控制水位之抽水設施，以沖擊法鑽至所需深度後以連桿長確定深度，設置井管，回填濾料，並安裝抽水機及控制設備，其施工品質可由抽水情形來檢驗，全部安裝完成後，抽水機應於地下水位超過其設定抽水水位而啟動，當水位下降至低水位時自動停止，其出水不得混濁，保證過濾之功能，開始抽水會有部份泥水，之後應維持清澈，並應定期觀察是否有變化。

四、評估方法與結果

1. 抽水井回水評估作業

對於所規劃抽水井效果的評定，以施行回水測試來看是否已達成需求，進行的方式為針對每一口井予以停抽，而維持鄰近抽水井繼續作業，觀測停抽時及各個時間延遲之水位變化，至 24 及 25 小時後，量測最終水位當作區域的地下水位動態平衡點，其為除測試點以外的抽水井運作在測試點位置可達成的實際水位洩降量，其中由於少了測試點本身的抽水，所得結果應較偏保守。

2. 回水評估結果檢討

在開始進行回水評估時，先量測抽水井的出水量及抽水的間隔時間。抽水井的出水量表示抽水機操作時段內，井內儲存及補注的水量，而抽水的間隔時間則代表區域地下水流入抽水井所需的時間，可顯示出補注的快慢，由其結果可以發現補注速率的分佈，亦可以看出現地水文地質的變異性。

大出水量較集中地區大致可分為沈陷區附近及新線東北側，其抽水間隔時間亦較短，不過由於各抽水井本身及地質的複雜性，相鄰井之間亦呈現相當大的差異，值得特別注意。

量得之各抽水井之出水量從幾乎抽不到水，小於 1m³/day 到大於 100m³/day。此大流量部份經由換算，其等值的滲透係數相較於取樣所做之室內透水試驗結果有偏大之趨勢，此點顯

示現地可能有某些洶空或特別寬鬆的水流路存在，對隧道施工有極大的影響。

本工區內由於地層並非均質，含水層為傾斜之延伸，部份可能呈現受壓含水層的狀態，無法用一般含水層的觀點來判識，但仍可從等高線變化方向大致看出地下水流向與變化。大致上，由東北方向向新線位置延伸，有一水力梯度存在，至原沈陷區抽水井最集中地點為最低，另一梯度方向則為由水庫經西方向漸減，兩者都顯示出抽水井排水系統的功效。

五、地下水控制成果

1. 抽水井水位變化

抽水井在停止抽水達到 24 小時後，其回昇所得的水位大致代表當點的地下水壓力，當然其中少了測試井本身的抽水，其應較相鄰地區為略高。由此資料的變化，可以看出全區的排水成效，再與水庫水位並列，可以看出與水庫的相關性。比對其參考隧道高程，可以判定是否達成控制地下水壓力的目標，提供作為施工安全的評定。因此地下水位之長期變化代表各鑽孔位置水壓力的消長，也顯示排水的效果。抽水井回水試驗之長期觀測如圖三。

2. 地下水等水位線變化

地下水的等水位線圖為其區域地下水壓力分佈的表示，由其等位水位線的分佈與形狀，可以研判某一時段的地下水壓力大小及地下水的流向，在此用它來討論區域地下水壓力控制的情形，作為隧道開挖安全與否的評定。將不同時段抽水井回水所達到 25 小時後的最高點資料，作出各個時期的地下水的等水位線圖(如圖四)。圖上* 號位置為觀測井或抽水井所在，旁邊的數值則為其觀測值，曲線代表某個數值的等水位線，圖下方為水庫戲水區位置，為電腦分析方便以水庫水位輸入，故都為等值。

綜合這些等水位線圖可以發現，自八十二年三月份起，各地區的水位數值持續減少，於後期已達到平衡，表示地下水壓力因抽水井排水的效果，持續的降低，對施工有利。地下水位下降達平衡，表示排水系統的功能已達極限，應檢討施工安全性是否足夠。

六、結論與建議

本工區之抽水井排水系統，依前期抽水試驗完成實施方法與規劃，即開始於現場設置，每一口抽水井完工後即陸續加入抽水之行列。至八十二年七月上旬完成全部現場設施，著手進行抽水井排水效果的評估作業，經由兩次抽水井數的增加及數次現場修正，完成全體之評估。再擬定後續的區域排水成效監測與評估作業，由全期工作之結果，據以檢討分析，得以下結論與建議事項：

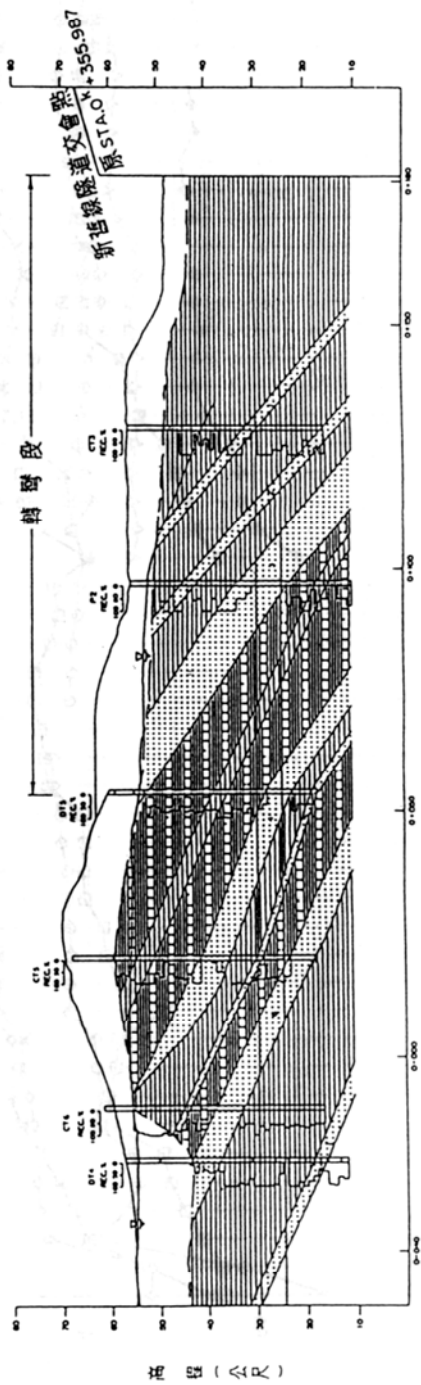
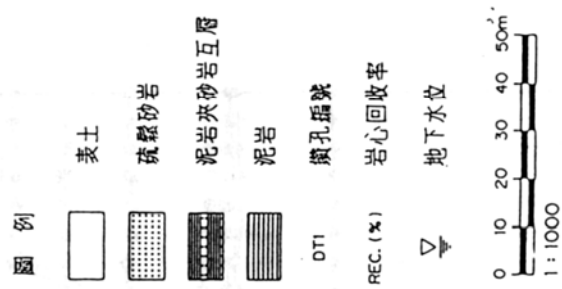
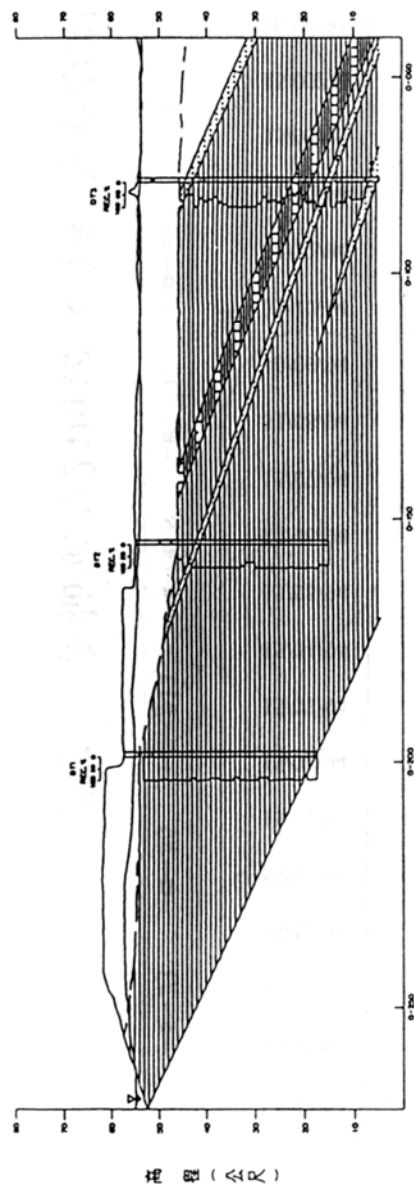
1. 抽水井之排水效果是值得肯定的，以抽水井持續抽水確可控制地層內之地下水壓力，協助隧道開挖工程之進行。
2. 本工區由於地層結構複雜，夾雜有多層非固結之砂岩層，影響區域內地下水的存在與流動，

均佈的抽水井排水之能力及成效都有相當大的差異，應持續進行排水成效的監測與評估，掌握其變化與差異，方可有效的協助隧道之進行。尤其當雨季來臨，補助來源加大時，應特別注意。

3. 所擬定之抽水井回水評估方法及區域鑽孔內水壓力變化監測，可明確表現出抽水排水之成效，並掌握隨時的地下水流與水壓力變化，是為恰當之抽水井系統品保品管之利器，可資利用。
4. 現地抽水井的操作，極易因各種內在或外來的原因而中斷，應規劃良好的作業與檢查程序，並對可能發生的問題擬訂補救方法，方能維持其功效。
5. 抽水井回水評估及鑽孔內水壓力變化為排水成效之檢驗，應定期進行觀測及評估作業，以掌握現地狀況，並可於必要時，作為抽水井排水系統的增補或調整的依據。

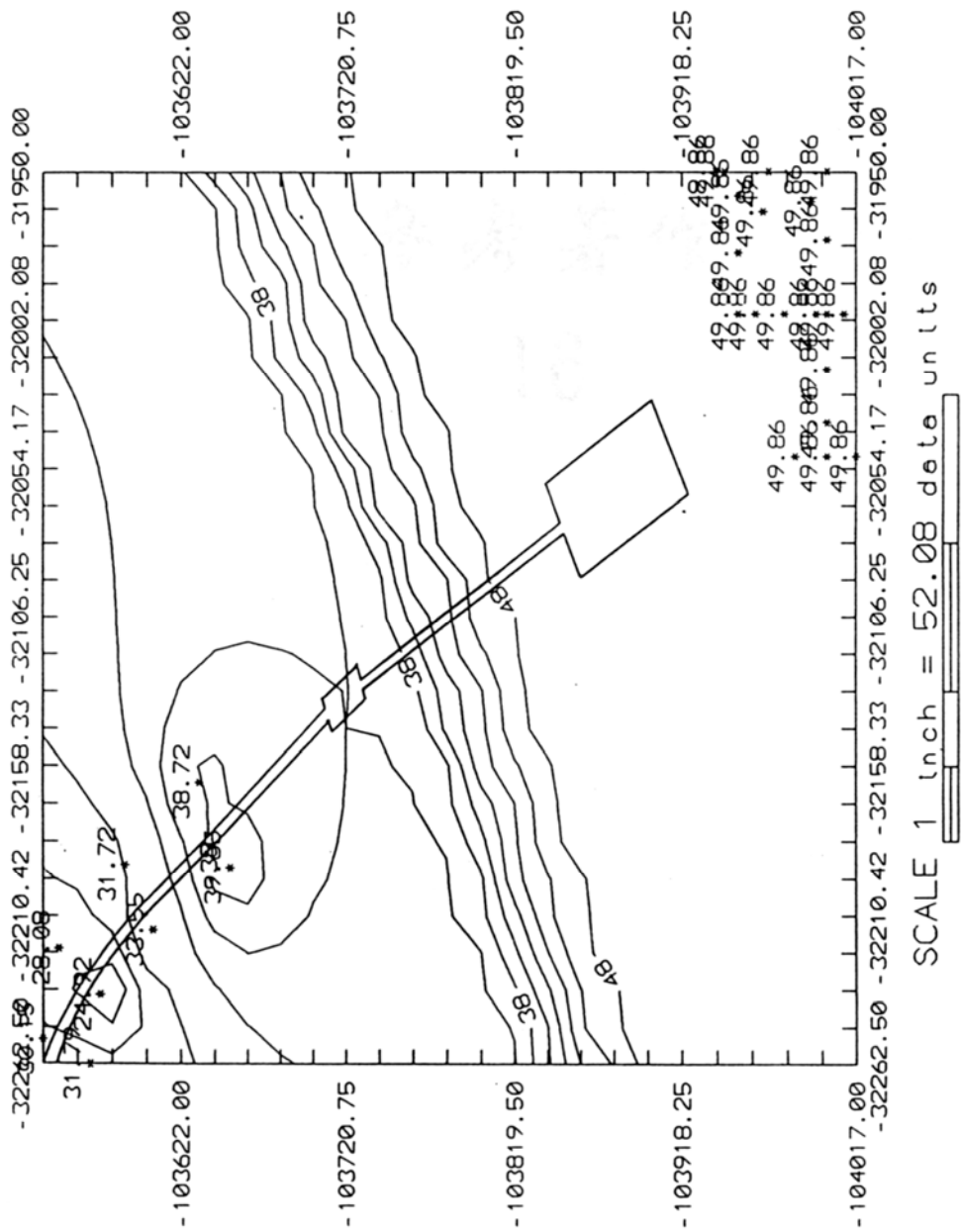
七、參考文獻

1. 蘇苗彬(1996)，「烏山頭水庫放水設施更新改善工程隧道開挖實施排水試驗及軟弱地層補強委託計畫報告」，中興大學土木工程研究所報告，台中。
2. 施進村(1994)，「粉質砂土管湧問題研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，台中。
3. Cedergren，H.R.(1989)，「Swepage， drainage， and flow nets」， John Wiley and Sons.



新線隧道里程

圖二 烏山頭水庫送水隧道地質剖面圖(取自聯合大地工程顧問公司鑽探報告)



圖四 地下水等水位圖(83.3.31)