

現地抽水試驗案例探討

王堯弘¹

摘要

本文主要探討台灣北部林口地區某工程隧道基地之抽水試驗案例，本工程因地下水位高度較隧道開挖斷面為高，故於工程進行期間必須進行降水工作，以降低隧道開挖之風險。本隧道長度約 6.4 公里，通過之含水層邊界情況不盡相同，故分別於隧道南端出口與中段進行兩次抽水試驗，以實際了解現場地下水環境，並對於抽水影響半徑進行討論。依據含水層邊界情況，分別採用適用於自由含水層邊界之 Neuman 標準曲線法與適用於侷限含水層之 Cooper-Jacob 線性回歸法進行水理參數分析。分析結果顯示，隧道通過地層之水理特性並不盡相同，顯示於林口地區不同工址進行降水工程時，必須實際進行抽水試驗工作，以掌握地下水理特性，提供降水配井作業之依據。本文同時亦針對水井建置原則進行概述，以供現場進行水井鑿設之參考。

關鍵字：抽水試驗、水理係數、影響半徑

A Case Study of In-Situ Pumping Test

Yao-Hung Wang¹

ABSTRACT

A pumping test project for a tunnel in Lin-Ko area was studied. Dewatering is required to reduce the risk of tunneling since the groundwater is higher than the invert of tunnel. Because the boundary conditions of aquifer along this 6.4 km long tunnel are quite different, two pumping tests were performed respectively in the south portal and the middle section of tunnel to understand the hydrogeological condition and influence radius of pumping. Neuman method and Cooper-Jacob method were used in hydraulic parameter analysis with condition of free aquifer and confined aquifer, respectively. The test results indicated the hydraulic parameters from two different locations and not identical. Therefore, in-situ pumping tests are essential to determine dewatering schemes in Lin-Ko area. The arrangement of dewatering wells was briefly described in this paper which can be used as a reference for well establishment on site.

Key Words : Pumping Test、Hydraulic Parameter、Influence Radius

一、前言

隧道工程於施工過程中，常需配合地層狀況與地下水位條件進行抽降水工作，以確保隧道開挖面之穩定與安全。由於本工程基地地層條件差異頗大，故分別於隧道不同位置施作兩次抽水試驗，以實際了解現場地下水環境，供後續降水設計參考依據。抽水試驗之水理參數分析分別採用 Cooper-Jacob 半對數線性回歸法與 Neuman 標準曲線法，針對抽水試驗期間各觀測井於各階段量測之資料進行評估與比對，以求取地下水理參數。

二、基地地層與地下水概況

2.1 基地地層

本隧道土層於深度 90 公尺以內大致可分為 4 個主要層次，分佈概況如圖 1，茲就土層分佈由上而下說明如下：

(1) 回填層：

本層次主要分佈深度約介於地表至地下 2.5m 之間，主要組成粉質砂土與粉土為主。

(2) 砂礫石層(I)：

本層次分佈深度介於地表下 2.5m 至 51.6m 之間，主要組成砂礫石、細砂與粉土為主。

(3) 泥岩、粉土與粉質砂土混合層：

本層次主要分佈於地表下方 51.6m~66.0m 以下之

間，主要組成以泥岩、粉土與粉質砂土為主，依據試驗室試驗得知該土層具有低滲透性之特性。

(4) 砂礫石層(II)：

本層次主要分佈於地表下方 66.0m~90.0m，主要組成砂礫石與粉質砂土為主。

(5)粉質黏土層

本層次主要分佈於地表下方 90.0m 以下，主要組成粉質黏土為主。

2.2 地下水概況

依據現場觀測井量測之地下水位資料顯示，本基地地下水為約位在地表下 2.5m 左右，其水壓大致呈靜態水壓分佈狀況。砂礫石層(II)之地下水壓則呈現受壓之狀況。

三 抽水試驗配置

隧道南端出口與中段進行兩次抽水試驗之位置配置如圖 2，以下分別茲就各次抽水試驗之配置說明如下：

3.1 隧道南端抽水試驗配置

本隧道南端通過砂礫石層(I)位置，該土層屬自由含水層，水壓力極大，故必須於隧道施工前先行進行降水工作，規劃施作抽水試驗，以提供後續降水工作之依據。

本次抽水試驗配置一口抽水井(PWA)與三口觀測井

1.亞新工程顧問股份有限公司大地工程部工程師

(OWA-1~OWA-3)進行試驗，其配置如圖 3 所示。

抽水井與觀測井均裝設於砂礫層(I)。抽水井 PWA 之井管直徑 300mm，濾水管直徑 100mm，埋置深度為地表下 42.0m，透水段位於深度 12.0m 至 42.0m，開孔率約為 10%。觀測井 OWA-1 與 OWA-2 之井管直徑 50mm，埋置深度為 42.0m，透水段位於深度 30.0m 至 42.0m。觀測井 OWA-3 之井管直徑為 25.4mm，埋置深度為 50m，透水段位於深度 38.0m 至 50.0m。抽水幫浦採用 20HP 沉水式馬達，埋置於抽水井內 40m 深度。

3.2 隧道中段抽水試驗配置

本隧道中段通過砂礫石層(II)，為求取該土層之水力參數，同時評估該含水層與上部含水層是否存有滲漏現象，故規劃進行抽水試驗。

抽水試驗配置一口抽水井(DW-2)與四口觀測井(OW1~OW2、OW4~OW5)進行試驗，其配置如圖 4 所示。

抽水井與觀測井 OW-1、OW-2 與 OW-5 均裝設於粉質砂土層，另為觀測本層與上層含水層(砂礫石層(I))是否存在滲漏現象，於砂礫石層(I)埋設一觀測井 OW-4。抽水井 DW-2 之井管直徑 350mm，濾水管直徑 200mm，埋置深度為地表下 86.5m，透水段位於深度 72.0m 至 86.5m，開孔率約為 8%。觀測井 OWA-1、OW-2 與 OW-5 之井管直徑 40mm，埋置深度為 88.0m，透水段位於深度 76.0m 至 88.0m。觀測井 OW-4 之井管直徑為 40mm，埋置深度為 50.0m，透水段位於深度 25.50m 至 50.0m。抽水幫浦採用沉水式馬達，其抽水能力為 20HP 沉水式馬達，埋置於抽水井底部。

四 抽水試驗執行

本基地前後兩次抽水試驗皆採取分級試水、定量抽水及回復試水三階段進行，並採用電子式水壓計配合資料自動記錄器對抽水井與觀測井之資料進行擷取與儲存。

4.1 準備工作

- (1)抽水井與觀測井功能確認：井體鑿設完成後，進行試抽工作，檢核抽水井水質是否清澈穩定與觀測井功能確認，必要時需再次進行洗井工作。
- (2)水量控制：抽水井裝設制水閥，並以三角堰量測出水量。
- (3)井距與井口高程測量：進行抽水試驗前，先行測定抽水井與各口觀測井高程與各井間之距離。
- (4)觀測靜水位：抽水井及觀測井設置完成後，連續觀測各井之靜態水位數日，俟水位穩定後，始進行抽水試驗。
- (5)排水設施：於三角堰出水口施作排水設施，以避免抽取之地下水回流井，影響試驗精度。
- (6)水位量測設備：各井以電子式水壓計自動化量測讀取水位變化，並於試驗期前檢核調整個水壓計之校正係數及精確度。同時特定觀測期間，採用人工方式抽測抽水井與觀測井水位讀數，俾與電子式水壓計之讀數比較。

4.2 分級試水

分級試水之目的係求得抽水井之安全出水量，水井安全出水量(Well Safety Yield)係指水井本身因水層特性、水層厚度、井體構造等條件限定下之最大極限水量。凡水井抽水，在不致引起水層物理特性改變，亦不致造成井體濾水管暴露，而能維持長時間抽水量之最大出水量謂之「水井最大安全出水量」，一般簡稱「水井安全出水量」[1]。每一階段抽水進行至觀測井水位面洩降趨勢呈現穩定後，始進行下一階段試水。將各階段抽水量與穩定洩降量繪製

為半對數曲線圖，可推估得隧道南端與中段抽水井之安全出水量分別為 7.20cmh 與 4.60cmh。

4.3 定量抽水

分級試水完成 48 小時後，俟地下水位回升穩定後，始進行連續 48 小時之抽水井定量抽水試驗。依據分級試水之結果，於隧道南端與中段之定量抽水分別採用 6.93cmh 及 4.50cmh 之抽水量。於定量抽水試驗過程中，不定時檢視三角堰之流量顯示，以確認抽水井出水之穩定性。

4.4 回復試水

定量抽水結束停止抽水後，隨即開始進行連續 24 小時之回復試水，紀錄抽水井與觀測井水位回升變化。通常具抽水井距離最短之觀測井為最具代表性，圖 5 與圖 6 為隧道南端 OWA-1 與中段 OW-1 之回復試水曲線圖，圖中 t 為抽水試驗開始後歷時，t' 則為回復試水試驗開始後歷時。

五 試驗結果分析探討

5.1 隧道南端抽水試驗分析-Neuman 分析法

隧道南端抽水試驗主要目的為求取砂礫石層(I)之水力係數，本含水層屬於一自由含水層，抽水井管(PWA)埋置狀況屬於完全貫穿透水層，故分析方法採用適用於非受限水層之 Neuman 標準區線法[2]進行分析。

非受限水層之洩降曲線可分三大部分：(1)急速洩降區：通常發生於抽水試驗初期，地下水迅速被抽離含水層所致，地層中於一延滯時間內尚無法補充抽水井內之地下水所致。(2)平緩洩降區：通常發生於抽水試驗開始數小時內，地層供水能力恢復，含水層已能逐漸提供足夠地下水至抽水井內。(3)輕微急速洩降區：通常發生於試驗後期，其洩降速率小於急速洩降區，其為含水層因抽水試驗長時間抽水作用下，致使含水層供水能力再度下降。

隧道南端抽水試驗之 Neuman 標準曲線如圖 7 所示，Neuman 標準區線法分析所得之水力係數詳表一所示。

5.2 隧道中段抽水試驗分析-Cooper Jacob 分析法

隧道中段抽水試驗主要目的為求取砂礫石層(II)之水力係數，由觀測井 OW4 觀測結果顯示，於各抽水階段進行時，該觀測井水位面並無任何變化，顯示砂礫石層(II)與砂礫石層(I)並無滲漏(Leaky)現象，故可判定本含水層屬於一侷限含水層，且抽水井井管完全貫穿含水層，採用適用於侷限含水層之 Cooper-Jacob 線性回歸法[3]進行分析。

Cooper-Jacob 法乃為簡化 Theis 法[4]演伸而來，兩分析法之不同在於 Cooper-Jacob 法假設 $u=r^2S/4Tt < 0.01$ ，其中 r 為抽水井與觀測井中心距離，S 為地層之儲水係數，T 為導水係數，t 為試驗歷時，故運用該法分析水力係數時，必須對於分析結果詳加檢核是否符合該限制條件。

侷限水層是藉由擠壓水層和水體積膨脹的方式排水，稱之為儲水現象。採用各觀測井洩降量(s)、抽水歷時(t)和觀測井與抽水井距離(r)與函數(t/r^2)之關係，以半對數座標繪製 Cooper-Jacob 回歸分析曲線圖如圖 8 所示，求取之水力係數詳表二所示。

5.3 水力係數比較與討論

分析結果顯示砂礫石層(I)之導水係數(T)介於 $0.157\text{m}^2/\text{hr} \sim 0.394\text{m}^2/\text{hr}$ 之間，平均值為 $0.266\text{m}^2/\text{hr}$ ；透水係數(k)約介於 $2.21 \times 10^{-4}\text{cm}/\text{sec} \sim 8.81 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{sec}$ 之間，平均

值為 $1.49 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 。砂礫石層(II)之導水係數(T)約介於 $0.64 \text{ m}^2/\text{hr} \sim 1.18 \text{ m}^2/\text{hr}$ ，平均值約為 $0.90 \text{ m}^2/\text{hr}$ ；透水係數(k)約介於 $4.47 \times 10^{-3} \text{ cm/sec} \sim 8.20 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 之間，平均值為 $6.28 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 。

參考陳正勳等人[5]對於林口地區砂質礫石層之水力係數研究報告指出，林口地區砂質礫石層之滲透係數約為 $3.76 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ ，顯示林口地區之砂礫石層透水係數變異性高，故於林口地區砂礫石層進行降水工程時，必須依據工程位址實際進行抽水試驗，以瞭解地下水裡性質。

由試驗結果可知，砂礫石層(II)之透水性質和供水能力均較砂礫石層(I)為佳，故隧道於通過砂礫石層(II)之區域，必須進行大規模之降水工程，以確保隧道開挖斷面之安全。

砂礫石層(I)因含有較大量之粉土，故其滲透性質較砂礫石層(II)為低；陳文福[6]等人指出含水層之透水係數(K)與有效粒徑平方呈正比之關係，故推估砂礫石層(I)因其細粒料含量較高，因而導致其透水能力降低。

5.4 洩降半徑之比較與討論

採用定量抽水試驗之穩定洩降量與各井距離繪製洩降-距離關係半對數曲線，將井洩降量回歸為一洩降方程式，以推估不同距離於抽水期間之洩降量。隧道南端與中段之洩降-距離關係半對數曲線如圖 9 與圖 10 所示。由洩降程式可推估其影響半徑[7]，隧道南端之抽水影響半徑約為 80m，隧道中段之抽水影響半徑約為 1000m。

由抽水洩降半徑推估，砂礫石層(I)抽水洩降錐效應較為顯著，故其周圍觀測井之洩降較不明顯。砂礫石層(II)屬於一局限含水層，地層透水能力與供水能力均較砂礫石層(I)為佳，故其抽水洩降錐效應相較於砂礫石層(I)為不明顯，相對其抽水影響範圍亦較大。

5.5 井體規劃與井圈設計

地質調查顯示，本隧道通過之含水層均屬於砂礫石層，分佈厚度皆大於 30m，故選用深井型式建置抽水井。井體尺寸與抽水馬達尺寸宜通體一致，以降低井體儲水效應(Wellbore Storage Effect)影響[8]。濾水管建議選用之開孔率約為 15%，以避免井體效率降低[1][9]，濾水孔之形狀主要以開孔寬度可控制沙粒穿透為原則，目前一般常用之率水管開孔寬度約為 0.8mm~6.0mm。井圈透水材料應採用良好級配之人工礫石材料(Artificial Pack)，避免抽水期間地層與井體水力坡降過大，導致水位洩降過速，同時可防止地層細粒料阻塞。

六 心得與建議

- (1) 鑿井過程需謹慎控制品質，並慎選井管尺寸、封層位置、開孔率與透水材料，俾以求取準確的試驗結果。
- (2) 水井「安全出水量」之採用為台灣糖業公司研究發展而成，目前台灣地區之抽水試驗均沿用此原則進行抽水試驗。工程降水之主要目的為快速降水，此與抽水井長時間營運之目的並不相同。故採用水井最大抽水量進行降水是否造成地層與水井之影響需進行探討。
- (3) 抽水試驗分析結果顯示，林口地區砂礫石層(II)之透水能力與供水能力均較砂礫石層(I)為佳。
- (4) 抽水試驗結果分析條件皆假設地下土層為均勻分佈，惟實際地層分佈之變異性必為不均勻分佈，因此於應用抽水試驗之分析結果時，應詳加考量局部區域之差異，於實際降水計畫中納入降水安全係數以進行規劃。
- (5) 工程降水規劃階段，建議先行進行現地抽水試驗，以實際掌握地下水理參數，避免日後實際降水之誤差。

誌 謝

本文於撰寫期間承蒙亞新工程顧問公司莫博士若楫、秦協理中天、王經理劍虹與蘇計畫經理鼎鈞之大力支持與指正，並感謝楊永康先生提供寶貴意見，謹致以最大謝忱。

參考文獻

- [1]台灣糖業公司，水井手冊，台灣糖業公司，p.4-25(1971)。
- [2]Neuman, S. P., "Theory of Flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of Water Table," *Water Resources Research*, Vol.8, No4, p.1031-1045(1974).
- [3]Cooper, H.H. and C.E. Jacob, "A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarized well field history," *Am. Geophys. Union Trans.*, Vol.27, p.526-534(1946).
- [4]Theis, C.V., "The Relation Between The Lowering of The Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage," *Am. Geophys. Union Trans.*, Vol 16, p.519~524(1935).
- [5]陳正勳，侯松嘉，「卵礫石山岳隧道降水及防水處理探討(一)」，現代營建雜誌 249 期，21 卷，p.11(2000)。
- [6] 陳文福、張益生、田巧玲，「礫石層粒徑與透水係數之關係」，台灣水利第四期，47 卷，p.20(1999)。
- [7]陳家洵，「含水層特徵描述與參數推估」，行政院農業委員會 85 年度試驗研究計劃報告(1996)。
- [8]Papadopoulos, I. S., and H. H. Cooper, Jr., "Drawdown in a Well of Large Diameter," *Water Resources Research*, Vol.3, no.1, p.241-244.(1967).
- [9]Powers, J.P., "Construction Dewatering," A Wiley Interscience Publication(1981).

表一 隧道南端水力係數一覽表

	OWA-1	OWA-2	OWA-3
導水係數 T(m ² /hr)	0.157	0.248	0.394
滲透係數 k(cm/sec)	8.81E-05	1.39E-04	2.21E-04

表二 隧道中段水力係數一覽表

		OW-1	OW-2	OW-3
定量抽水	導水係數 T(m ² /hr)	0.72	1.18	0.96
	滲透係數 k(cm/sec)	5.00E-03	8.20E-03	6.72E-03
回復試水	導水係數 T(m ² /hr)	0.64	1.12	0.79
	滲透係數 k(cm/sec)	4.47E-03	7.80E-03	5.50E-03

圖 1 地層剖面圖

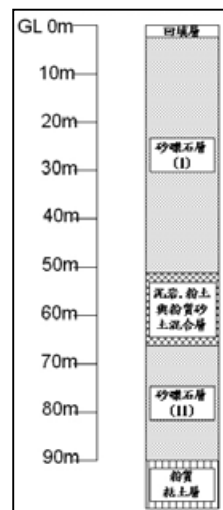


圖 2 抽水試驗配置位置圖

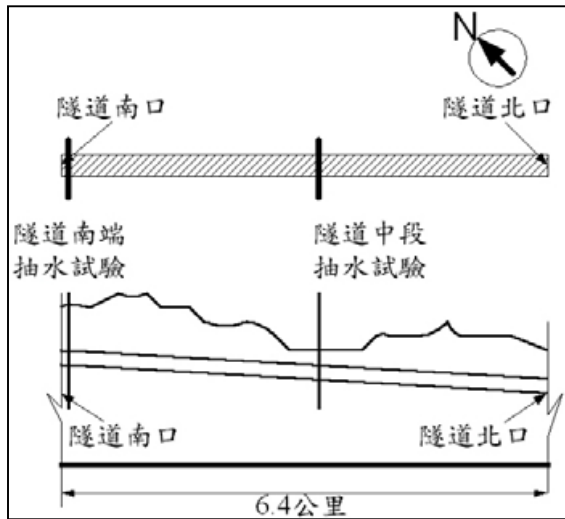


圖 3 隧道南端抽水試驗配置圖

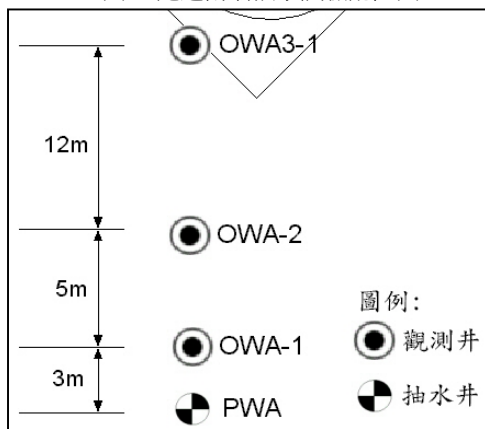


圖 4 隧道中段抽水試驗配置圖

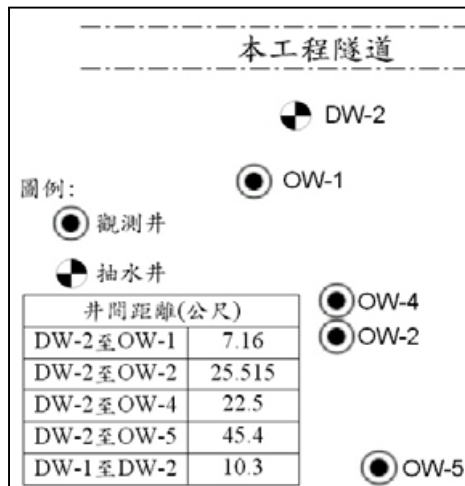


圖 5 隧道南端回復試水觀測井 OWA-1 歷時曲線圖

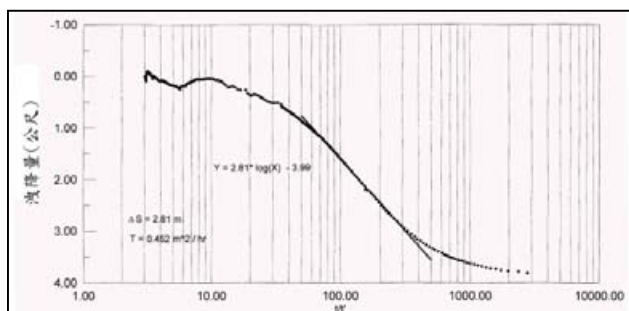


圖 6 隧道中段回復試水觀測井 OW-1 歷時曲線圖

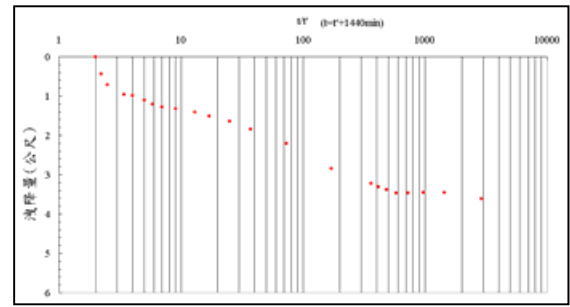


圖 7 隧道南端觀測井 OWA-1 Neuman 標準曲線圖

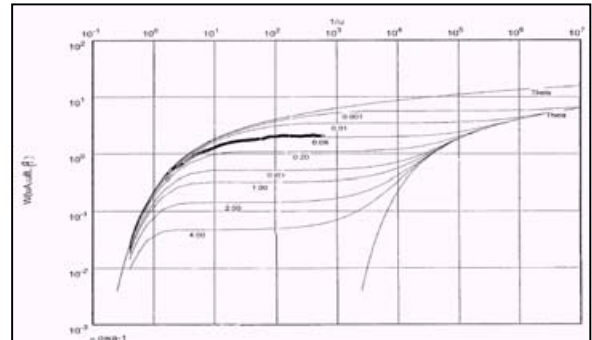


圖 8 隧道中段觀測井 OW-1 Cooper-Jacob 半對數曲線圖

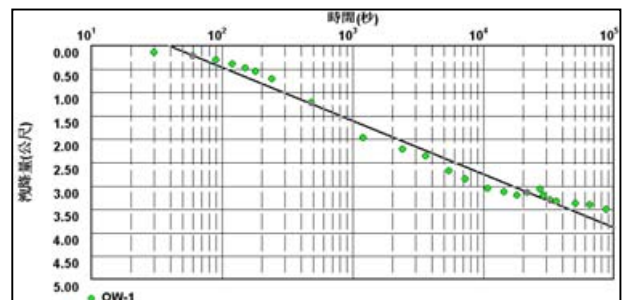


圖 9 隧道南端洩降-距離關係圖

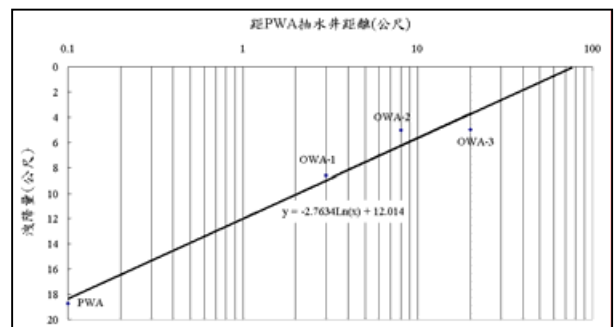


圖 10 隧道中段洩降-距離關係圖

