

行政院環境保護署

「99 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

多深度微水試驗測試段長度對水力傳導係數推估之影 響

期末報告

EPA-99-GA103-03-A236-14

主 辦 單 位：



行政院環境保護署

受 託 單 位：

國立中央大學應用地質研究所

計 畫 主 持 人：

陳家洵

計 畫 執 行 人 員：

陳家洵、謝云琚、林雅婷

計 畫 執 行 期 間：

99/12/29 ~ 100/12/28

中 華 民 國 100 年 12 月

行政院環境保護署計畫成果中英文摘要(簡要版)

一、中文計畫名稱：

多深度微水試驗測試段長度對水力傳導係數推估之影響

二、英文計畫名稱：

Influence of the test length of a multilevel slug test on the estimation of hydraulic conductivity

三、計畫編號：

EPA-99-GA103-03-A236-14

四、執行單位：

國立中央大學應用地質研究所

五、計畫主持人：

陳家洵教授

六、執行開始時間：

99/12/29

七、執行結束時間：

100/12/28

八、報告完成日期：

100/12/20

九、報告總頁數：

121

十、使用語文：

中文，英文

十一、報告電子檔名稱：

EPA99GA10303A23614.DOC，EPA99GA10303A23614.PDF

十二、報告電子檔格式：

WORD 2003，Acrobat

十三、中文摘要關鍵詞：

多深度微水試驗，水力傳導係數，測試段長度

十四、英文摘要關鍵詞：

multilevel slug test，hydraulic conductivity，test section

十五、中文摘要：

含水層的異質性影響地下水流場、污染物溶解相流布、及非水相液體遷移，是設計污染整治和選用整治技術上的重要考量因素。多深度微水試驗(multilevel slug test, MLST) 是一種單井雙封塞技術，可有效決定測試井周圍含水層水力傳導

係數的垂直異質性， $K(z)$ 。在場址中不同位置的監測井執行 MLST 則可獲得場址的三維異質性 $K(x,y,z)$ 。受限於雙封塞系統的結構和 MLST 實際施作因素，測試段長度 l_s 以 0.25m 至 1m 為宜。 $K(z)$ 的解析度及 MLST 工作量均和 l_s 呈反比。本計畫的目的是評估測試段長度對 $K(z)$ 的影響，並決定兼顧 $K(z)$ 解析度和 MLST 工作量平衡的測試段長度。在三口井使用四個不同測試段長度($l_s=0.25\text{m}$ 、 0.5m 、 0.75m 、及 1.0m)進行 158 次 MLSTs，和三口井的全篩段微水試驗(full screen slug test, FST)。結果顯示在垂直異質性相當弱的局部深度範圍內，四個測試段長度所得的 $K(z)$ 分布情況和解析度相當一致，可選用最長的測試段長度($l_s=1\text{m}$)以減少 MLST 工作量。在不同程度的垂直異質情況下， $l_s=1\text{m}$ 所得 $K(z)$ 的解析度最差， $l_s=0.25\text{m}$ 和 0.5m 所得 $K(z)$ 的解析度大約相同，所以使用 $l_s=0.5\text{m}$ 足以反映垂直異質性變化。由於場址異質性屬事先未知，因此建議測試段長為 0.5m(左右)，以減少 MLST 工作量及調查成本並且兼顧水文地質的變異性。FST 所得的 $\bar{K}$ 值為全篩段的垂直平均水力傳導係數，無法有效反應垂直異質性； $\bar{K}$ 水文地質代表性並不明確。對場址調查或污染整治設計而言， $\bar{K}$ 較缺乏實用性，故不建議使用全篩段微水試驗進行場址調查。

十六、英文摘要：

As an important factor in remediation design, aquifer heterogeneity significantly influences groundwater flow field, the distribution of dissolved solutes, and migration of nonaqueous phase liquids. The multilevel slug test (MLST) is a single-well technology that employs the double-packer system for the determination of the vertical heterogeneity of hydraulic conductivity, $K(z)$. A three-dimensional $K(x,y,z)$ can be obtained by conducting the MLST in different wells at a site. Limited by the structure of the double-packer system and by the MLST operation, the test section length l_s is normally between 0.25 to 1.0 m. The test section is a perforated pipe that connects the two packers. Both the resolution associated with the $K(z)$ obtained and the wor

k load of the MLST are inversely proportional to l_s . The purposes of this project are to evaluate the influence of l_s on $K(z)$ obtained and to determine the test section length appropriate for a balanced weight on a sufficient resolution of $K(z)$ and the work load of the MLST. In three wells, a total of 158 MLSTs using different l_s (0.25, 0.5, 0.75, and 1.0m) were conducted. In addition, three full screen slug tests (FSTs) were performed in the three wells, respectively. The results show that in some small areas of little vertical heterogeneity, the resolutions and profiles of $K(z)$ from the four different l_s are about the same, so one can choose the longest possible test section length ($l_s=1.0\text{m}$) for the MLST. Under different vertically heterogeneous conditions, however, $l_s=1.0\text{m}$ yields the worst resolution for $K(z)$, and the profiles and the resolutions of $K(z)$ from $l_s=0.25$ and 0.5m are about the same, indicating $l_s=0.5\text{ m}$ is sufficient to reflect the vertical heterogeneity. Since aquifer heterogeneity is unknown *a priori*, it is suggested that $l_s=0.5\text{ m}$ be used in the MLST in order to reduce the work load as well as to obtain sufficient resolution for $K(z)$. As far as the FST is concerned, the $\bar{K}$ value obtained represents the vertically averaged hydraulic conductivity over the full well screen, which fails to reflect the vertical heterogeneity and has an unclear hydrogeological meaning. Because of lacking practical usefulness of $\bar{K}$ in the remediation design, it is suggested that the FST not be used for site investigation.

符號說明

英文字母

符號說明

A、B : Bouwer and Rice (1976) 模式之經驗係數 [0]

b : 含水層厚度 [L]

F : 形狀因子 [L]

F_C : Hvorslev (1951) 受壓含水層之部分貫穿形狀因子[L]

F_U : Bouwer and Rice (1976) 非受壓含水層之部分貫穿形狀因子 [L]

F_P : Dagan (1978) 非受壓含水層之部分浸水情況形狀因子 [L]

H : 振幅 [L]

K : 水力傳導係數 [L/t]

K_A : 測試段為0.25m之垂直平均水力傳導係數[L/t]

K_B : 測試段為0.5m之垂直平均水力傳導係數[L/t]

K_C : 測試段為0.75m之垂直平均水力傳導係數[L/t]

K_D : 測試段為1 m之垂直平均水力傳導係數[L/t]

$K(z)$: 垂直方向水力傳導係數 [L/t]

$\bar{K}$: 為全篩段的垂直平均水力傳導係數[L/t]

L_0 : 井水位面至測試段頂部的距離 [L]

L_s : 有效井篩長度 [L]

l_s : 測試段長度 [L]

$R_{AC} = \left| \frac{\overline{K_A} - \overline{K_B}}{\overline{K_A}} \right|$: 測試段 0.5 m 對 0.25 m 的垂直平均 K 值相對差異比

$R_{AC} = \left| \frac{\overline{K_A} - \overline{K_C}}{\overline{K_A}} \right|$: 測試段 0.75 m 對 0.25 m 的垂直平均 K 值相對差異比

$R_{AD} = \left| \frac{\overline{K_A} - \overline{K_D}}{\overline{K_A}} \right|$: 測試段 1 m 對 0.25m 的垂直平均 K 值相對差異比

R_e : 地下水流影響半徑 [L]

r_c : 連接管半徑 [L]

r_w : 井篩半徑 [L]

S : 儲水係數 [0]

T : 流通係數 [L^2/t]

T_A : 振盪週期 [t]

T_0 : 遲滯時間 [t]

t : 時間 [t]

w_0 : 初始水位位移 [L]

$w(t)$: 水位面壓力資料變化 [L]

Z_C : 地表至測試段中點的深度 [L]

希臘字母

$\alpha=l_s/r_w$ ：爲測試段扁平比 [0]

β ：振盪參數 [1/t]

ω ：振盪頻率 [1/t]

報告大綱

第一章、序言

含水層的異質性影響地下水流場、污染物溶解相流布、及非水相液體遷移，是設計污染整治和選用整治技術上的重要考量因素。多深度微水試驗(multilevel slug test, MLST) 是一種單井雙封塞技術，可有效決定測試井周圍含水層水力傳導係數的垂直異質性， $K(z)$ 。在場址中不同位置的監測井執行MLST則可獲得場址的三維異質性 $K(x,y,z)$ 。受限於雙封塞系統的結構和MLST實際施作因素，測試段長度 l_s 以0.25m至1m為宜。 $K(z)$ 的解析度及MLST工作量均和測試段長度呈反比。本計畫的目的是評估測試段長度對 $K(z)$ 的影響，並決定兼顧 $K(z)$ 解析度和MLST工作量平衡的測試段長度。在三口井使用四個不同測試段長度($l_s=0.25$ 、 0.5 、 0.75 、及 1.0 m)進行158次連續深度MLSTs和三口井的全篩段微水試驗(full screen slug test, FST)。

第二章、多深度微水試驗方法及操作步驟

說明多深度微水試驗所需儀器、執行方法及操作步驟。多深度微水試驗是一單井雙封塞原位試驗技術，不受地質材料變化或井深影響，只需井徑大小適合封塞尺寸，即可執行，適用於任何水井操作。

第三章、多深度微水試驗資料分析方法

討論多深度微水試驗資料分析方法。本計畫之多深度微水試驗振盪反應分析採用Chen(2006)半解析方式來推估 K 值，解決繁複的曲線套疊步驟。非振盪反應通常發生於 K 值約小於 6×10^{-4} m/s以下的低滲透性地層，其水位資料在半對數圖上多呈一直線。本場址的多深度微水試驗非振盪反應幾乎都具此特徵，可用Hvorslve (1951)方法分析。而部分浸水資料以Dagan (1978) 方法分析。

第四章、測試段長度對推估 K 值影響

在三口井中共執行 158 次 MLSTs 與 3 次 FSTs。所得的 $K(z)$ 分布除了用來決定測試段長度對 K 值推估的影響外，亦可用於推估測試井周圍的水文地質概況。在 4.1 至 4.3 節分述討論 T_{w1} 、 T_{w2} 及 T_{w6} 三口井不同 l_s 的 $K(z)$ 變化，4.4 節綜合三口井 $K(z)$ 評估最合適測試段長度來執行 MLST。

第五章、結論與建議

當垂直異質性相當弱的情況下，四個測試段長度所得的 $K(z)$ 分布和解析度相當一致，選用 $l_s=1$ m 即可以減少工作量和成本。在不同程度的異質情況下， $l_s=0.25$ m 和 0.5 m 所得 $K(z)$ 的解析度大約相同，使用 $l_s=0.5$ m 足以反映垂直異質性變化，又可減少一半的 MLST 工作量。由於場址異質性屬事先未知，因此建議測試段長度為 0.5 m(左右)，以減少 MLST 工作量及調查成本並且兼顧水文地質的變異性。

行政院環境保護署委託研究計畫成果報告摘要(詳細版)

計畫名稱：多深度微水試驗測試段長度對水力傳導係數推估之影響

計畫編號：EPA-99-GA103-03-A236-14

計畫執行單位：國立中央大學 應用地質研究所

計畫主持人(包括協同主持人)：陳家洵 教授

計畫期程：99 年 12 月 29 日起 100 年 12 月 28 日止

計畫經費：975,785 元整

摘要

含水層的異質性影響地下水流場、污染物溶解相流布、及非水相液體遷移，是設計污染整治和選用整治技術上的重要考量因素。多深度微水試驗(multilevel slug test, MLST) 是一種單井雙封塞技術，可有效決定測試井周圍含水層水力傳導係數的垂直異質性， $K(z)$ 。在場址中不同位置的監測井執行 MLST 則可獲得場址的三維異質性 $K(x,y,z)$ 。受限於雙封塞系統的結構和 MLST 實際施作因素，測試段長度 l_s 以 0.25m 至 1m 為宜。 $K(z)$ 的解析度及 MLST 工作量均和測試段長度呈反比。本計畫的目的是評估測試段長度對 $K(z)$ 的影響，並決定兼顧 $K(z)$ 解析度和 MLST 工作量平衡的測試段長度。在三口井使用四個不同測試段長度($l_s=0.25\text{m}$ 、 0.5m 、 0.75m 、及 1.0m)進行 158 次連續深度 MLSTs，和三口井的全篩段微水試驗(full screen slug test, FST)。結果顯示在垂直異質性相當弱的局部深度範圍內，四個測試段長度所得的 $K(z)$ 分布情況和解析度相當一致，可選用最長的測試段長度($l_s=1\text{m}$)以減少 MLST 工作量。在不同程度的垂直異質情況下， $l_s=1\text{m}$ 所得 $K(z)$ 的解析度最差， $l_s=0.25\text{m}$ 和 0.5m 所得 $K(z)$ 的解析度大約相同，所以使用 $l_s=0.5\text{m}$ 足以反映垂直異質性變化。由於場址異質性屬事先未知，因此建議測試段長為 0.5m(左右)，以減少 MLST 工作量及調查成本並且兼顧水文地質的變異性。FST 所得的 $\bar{K}$ 值為全篩段的垂直平均水力傳導係數，無法有效反應垂直異質性； $\bar{K}$ 水文地質代表性並不明確。對場址調查或污染整治設計而言， $\bar{K}$ 較缺乏實用性，故不建議使用全層微水試驗進行場址調查。

As an important factor in remediation design, aquifer heterogeneity significantly influences groundwater flow field, the distribution of dissolved solutes, and migration of nonaqueous phase liquids. The multilevel slug test

(MLST) is a single-well technology that employs the double-packer system for the determination of the vertical heterogeneity of hydraulic conductivity, $K(z)$. A three-dimensional $K(x,y,z)$ can be obtained by conducting the MLST in different wells at a site. Limited by the structure of the double-packer system and by the MLST operation, the test section length l_s is normally between 0.25 to 1.0 m. The test section is a perforated pipe that connects the two packers. Both the resolution associated with the $K(z)$ obtained and the work load of the MLST are inversely proportional to l_s . The purposes of this project are to evaluate the influence of l_s on $K(z)$ obtained and to determine the test section length appropriate for a balanced weight on a sufficient resolution of $K(z)$ and the work load of the MLST. In three wells, a total of 158 MLSTs using different l_s (0.25, 0.5, 0.75, and 1.0m) were conducted. In addition, three full screen slug tests (FSTs) were performed in the three wells, respectively. The results show that in some small areas of little vertical heterogeneity, the resolutions and profiles of $K(z)$ from the four different l_s are about the same, so one can choose the longest possible test section length ($l_s=1.0\text{m}$) for the MLST. Under different vertically heterogeneous conditions, however, $l_s=1.0\text{m}$ yields the worst resolution for $K(z)$, and the profiles and the resolutions of $K(z)$ from $l_s=0.25$ and 0.5m are about the same, indicating $l_s=0.5\text{ m}$ is sufficient to reflect the vertical heterogeneity. Since aquifer heterogeneity is unknown *a priori*, it is suggested that $l_s=0.5\text{ m}$ be used in the MLST in order to reduce the work load as well as to obtain sufficient resolution for $K(z)$. As far as the FST is concerned, the $\bar{K}$ value obtained represents the vertically averaged hydraulic conductivity over the full well screen, which fails to reflect the vertical heterogeneity and has an unclear hydrogeological meaning. Because of lacking practical usefulness of $\bar{K}$ in the remediation design, it is suggested that the FST not be used for site investigation.

前 言

自「土壤及地下水污染整治法」公告實施後，國內大多數的污染物場址陸續展開調查評估及整治設計工作。執行「土壤及地下水污染整治法」中第 8、9、12、14 或 22 條時，必須進行場址的水文地質調查，並依據調查結果設計污染整治計畫。場址水文地質調查的主要目的是要瞭解含水層異質性、污染種類調查、各污染源濃度分布情形等。異質性是指含水層水力

傳導係數 K 的空間分布， $K(x,y,z)$ 。地質材料的透水性強弱由水力傳導係數反映之； K 值越大，地質材料的滲透性越佳，流體越容易通過；反之，則不容易通過。一般情況下， K 值與地質材料的粒徑成正比，因此天然含水層的 K 值因地質材料空間分布呈一定的異質性。把 K 假設為定常，則純屬均質性 (homogeneity) 的理想狀況，實際不可能發生。 $K(x,y,z)$ 影響地下水流場、溶解相傳輸及 NAPL 遷移路徑與殘留相分布 (Bedient et al., 1999)。基本上，整治成效不彰並非整治技術的物化反應失靈，而是缺乏詳細的場址水文地質特徵資訊。在場址異質性認識不足的情況下，無法確實瞭解地下水流場(流速與流向)變化，無從瞭解污染物的流布和污染物的聚集情況，更遑論整治試劑(如化學藥劑、奈米零價鐵、熱能...)是否能接觸到污染物質而加以摧毀。因此有效的污染整治方案必須進行水文地質調查，以瞭解含水層的 $K(x,y,z)$ 分布，對高、低 K 區採取不同的整治技術或措施，可增加污染整治成效與降低整治成本。

多深度微水試驗(multilevel slug test, MLST)，如圖一所示，是一種單井雙封塞技術，可以有效決定測試井周圍含水層不同深度的水力傳導係數， $K(z)$ 。於場址中不同位置的監測井執行 MLST 則可獲得場址的 $K(x,y,z)$ 。MLST 特別適合污染場址因為此項技術(1)不需抽水因而沒有污染水處理問題；(2)產生的地下水壓力變化相當小不致影響場址地下水流場，也不會干擾污染物濃度分布；(3)省時易於執行。我們近年的實際使用經驗顯示測試段(雙封塞之間的透水段)的長短對所得的 $K(z)$ 有相當程度的影響。基本上，測試段越長所得 $K(z)$ 解析度越差。而且當測試段長度超過一定限度時，所得水力傳導係數的垂直平均效應會過大，喪失 $K(z)$ 的代表性，無法可靠反應垂直異質性。減少測試段長度雖然可增加 $K(z)$ 解析度，但加重 MLST 的工作量，增加場址調查成本。

研究目的與方法

本計畫的目的是評估測試段長度對 $K(z)$ 影響，和決定能兼顧 $K(z)$ 解析度和 MLST 工作量平衡的測試段長度。台灣大多數的污染場址位於工商發達的西部平原區。西部平原區為近一萬年至現今的第四紀海相沖積地層，此沖積層中的含水層沉積環境、顆粒組成結構及水文地質條件並不隨地區而有明顯變化；故本計畫相關試驗雖然在高雄輔英科技大學試驗井場(隸屬台灣西部現代沖積層)進行，所獲得的成果與資訊適用於西部平原區的其他場址。本計畫選用井場的 Tw1、Tw2 及 Tw6 三口井進行相關微水試驗。

封塞為特殊材質可充氣氣囊，封塞長度依製造商規格而定，一般約 0.75

至 1m。本計畫採用的封塞長度為 0.75m。因雙封塞系統的結構限制，測試段最短的長度為 0.25m。最長的測試段長度(l_s)則以不超過 1m 為宜，因 l_s 超過 1m，雙封塞系統(含兩支封塞和一支測試段)的總長度超過 2.5m，實地施作 MLST 非常容易折斷。再者 l_s 超過 1m 時所推估 K 值的垂直平均效應會降低 $K(z)$ 的解析度。所以測試段長度 l_s 以 0.25m 至 1m 為宜。本計畫在 Tw1、Tw2 及 Tw6 三口井使用不同測試段長度($l_s=0.25、0.5、0.75、及 1.0m$)進行 158 次連續深度 MLSTs 和三次的全篩段微水試驗(full screen slug test, FST)。FST 即傳統微水試驗，無須用雙封塞系統，所得的 K 值代表整個井篩段長度的垂直平均水力傳導係數， $\bar{K}$ 。

MLST 操作方法是自井口將雙封塞系統下放至預定調查深度。封塞充氣後氣囊直徑擴大，可將對應的井篩段封閉不透水。此時地下水僅能從測試段自由進出連接管。利用氣壓啟動器用將空氣注入連接管中，造成井內水位面下降一個穩定幅度，稱初始水位位移(w_0)。釋放注入井中的氣體，此 w_0 壓力差導致地下水流進測試段，逐時記錄井水位面壓力變化， $w(t)$ 。待 $w(t)$ 恢復至原有水位即完成一次 MLST 試驗。本計畫所執行 MLST 皆將壓力計置於井水位面下 0.5 m，且控制 w_0 低於 0.5 m，是為了避免動態水壓所造成的非線性變化造成資料分析困難性。(Butler et al., 2003；Chen, 2006,2008；Chen, 2011)

MLST 資料分析方法依據 $w(t)$ 分振盪與非振盪兩種不同的反應特徵。如圖二A 所示，振盪反應的井水位呈現相對於初始水位的上下振盪，通常發生於 K 值約大於 6×10^{-4} m/s 以上的高滲透性地層(如中、粗砂、礫石層)。本計畫之 MLST 振盪反應分析採用 Chen(2006)半解析方式來推估 K 值，解決繁複的曲線套疊步驟；分析步驟與方法可參考 Chen, 2006；Chen et al., 2011。非振盪反應通常發生於 K 值約小於 6×10^{-4} m/s 以下的低滲透性地層，其 $w(t)$ 在半對數圖上多呈一直線(圖二B)。本場址的 MLST 非振盪反應幾乎都具此特徵，可用 Hvorslve (1951) 方法分析；可參考 Chen, 2006；Chen et al., 2011；Butler, 1998。

在執行 FST 時，發現場址的地下水位面低於 Tw1、Tw2、及 Tw6 三口井的井篩頂端，造成所謂部分浸水(partially submerged)的情形。當部分浸水情況發生時，地下水實際流入井中的井篩長(有效井篩長)會隨水位回升而增加，其分析方法以 Dagan (1978) 的方法最適合，分析步驟與方法可參考 Dagan, 1978；Butler, 1998。

結果討論

158 組 MLST 所得的 $K(z)$ 示於圖三；藍色三角形、紅色圓形、綠色菱形、及黑色方形分別代 $l_s=0.25\text{m}$ 、 $l_s=0.5\text{m}$ 、 $l_s=0.75\text{m}$ 、及 $l_s=1\text{m}$ 的 K 值。所得的 $K(z)$ 分布除了用來決定 l_s 對 K 值推估的影響外，亦可用於推估測試井周圍的水文地質概況；提供或補強地質鑽探和岩芯取樣不足(漏失)之處。整體而言，MLST 調查結果顯示本場址在地表下約 2 至 5 m 的 54 個不同段測試段的 MLST 均呈現非振盪反應，其 K 值範圍約 3×10^{-5} 至 6×10^{-4} m/s，屬低滲透性的地層(粉砂夾細砂、細砂)。而 5 至 9 m 的 104 個的不同段測試段的 MLST，均呈現振盪反應，其 K 值約介於 6×10^{-4} 至 1.7×10^{-3} m/s 之間，屬高滲透性地層(中砂、粗砂)。故可得知含水層是由不同地質材料與厚度的地層所構成，並不是均質、單一地質材料組成。本計畫三口井的 FST 所得 $\bar{K}$ ，皆以虛線示於圖三；其中 Tw1 的 $\bar{K}$ 為 4.46×10^{-4} m/s，Tw2 的 $\bar{K}$ 為 4.52×10^{-4} m/s，Tw6 的 $\bar{K}=6.51\times 10^{-4}$ m/s，皆介於各自 MLST 所得 $K(z)$ 範圍之間，無法透露 $K(z)$ 變化，且不能界定高、低 K 值位置及範圍，對相關的污染整治設計幫助不大。

至於 l_s 對 $K(z)$ 的影響；Tw1 共有 55 組資料分析所得的 $K(z)$ 示於圖三 A，我們首先依據 $K(z)$ 的變化程度將地表下 2.05m 至 3.55m 分為甲區，地表下 3.55m 至 5.05m 為乙區，及地表下 5.05m 至 8.05m 為丙區來討論 l_s 的影響。而地表下 8.05 至 8.8 m 的調查範圍沒有 $l_s=1\text{m}$ 所得 K 值，故不列入這三區討論。甲、乙、丙三區中，丙區的垂直異質性最小；在 3 m 調查範圍內 $K(z)$ 變化僅由 7.63×10^{-4} 至 1.09×10^{-3} m/s，最大與最小 K 值相差 1.4 倍。甲區的垂直異質性變化較丙區大；在 1.5m 的調查範圍內 $K(z)$ 變化範圍 3.06×10^{-5} 至 1.06×10^{-4} m/s，最大與最小 K 值相差 3.3 倍。乙區的垂直異質性變化最大；在 1.5m 調查範圍中 $K(z)$ 變化由 3.5×10^{-5} 至 1.04×10^{-3} m/s，最大與最小 K 值相差 29.7 倍。

在同一區內有 n 個使用相同 l_s 的水力傳導係數推估值 K_i ， $i=1, 2, \dots, n$ 。我們使用 $\bar{K}_A$ 、 $\bar{K}_B$ 、 $\bar{K}_C$ 、及 $\bar{K}_D$ 分別代表四個不同的測試段長度($l_s=0.25\text{m}$ 、 $l_s=0.5\text{m}$ 、 $l_s=0.75\text{m}$ 、及 $l_s=1.0\text{m}$)的垂直平均水力傳導係數。垂直平均水力傳導係數(Cho et al., 2000；Schwartz and Zhang, 2003)定義為

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^n \frac{K_i l_s}{n \times l_s} \quad (1)$$

舉例來說，圖三 A 中甲區從 2.05 至 3.55 m，涵蓋 1.5m 的調查深度範圍，共有 3 個 $l_s=0.5\text{m}$ 的 K 值(7.52×10^{-5} m/s、 7.55×10^{-5} m/s、及 3.43×10^{-5} m/s)。

其對應的垂直平均 K 值是 $\bar{K}_B = (0.5 \times 7.52 \times 10^{-5} + 0.5 \times 7.55 \times 10^{-5} + 0.5 \times 3.34 \times 10^{-5}) / (0.5 + 0.5 + 0.5) = 6.15 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。

由於 $l_s = 0.25 \text{ m}$ 的 $K(z)$ 解析度最佳，我們以 $\bar{K}_A$ 為標準來評估其它三個 l_s 所得 K 值的準確度，進而瞭解 l_s 對 K 值推估的影響。定義三個 l_s 的垂直平均 K 值與 $\bar{K}_A$ 的相對差異比， R_{AB} 、 R_{AC} 、 R_{AD} ，為

$$R_{AB} = \left| \frac{\bar{K}_A - \bar{K}_B}{\bar{K}_A} \right| \quad (2)$$

$$R_{AC} = \left| \frac{\bar{K}_A - \bar{K}_C}{\bar{K}_A} \right| \quad (3)$$

$$R_{AD} = \left| \frac{\bar{K}_A - \bar{K}_D}{\bar{K}_A} \right| \quad (4)$$

當相對差異比越大時，所對應測試段長度的垂直平均 K 值與 $l_s = 0.25 \text{ m}$ 的垂直平均 K 值相差越大。在此情況下，這些測試段長度的 $K(z)$ 分布和 $l_s = 0.25 \text{ m}$ 的 $K(z)$ 分布會有明顯的差異。

所有的試驗都有一定程度的試驗量測誤差和資料分析誤差，微水試驗 (MLST 或 FST) 亦不例外。微水試驗的試驗量測誤差主要來自壓力計 (pressure transducer)。壓力計的準確度和所量測的壓力變化範圍有關。我們控制每次微水試驗 (MLST 或 FST) 的初始水位變化 w_0 小於 0.5 m ，所引起的井水位壓力變化範圍相當小，所以試驗量測誤差是可以忽略的。微水試驗 (MLST 或 FST) 的資料分析誤差多源於忽略井邊濾料層、可能之薄壁效應 (skin effect)、含水層垂直異向比 (vertical anisotropy)、及使用形狀因子來反應井邊流場變化的影響。這些影響造成 K 值推估的誤差依問題情況而定，不易有一定的標準。對一個 MLST 在有垂直異向性的含水層問題，Hyder et al. (1994) 視 25 % 誤差為可接受的誤差範圍。我們對 R_{AB} 、 R_{AC} 、和 R_{AD} 三個差異比所定的可接受誤差範圍為 $\pm 15\%$ 。舉例而言，若 $R_{AD} > 15\%$ ，則視使用 1 m 測試段所得 K 值準確度不夠。

如表 1 所示，丙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 9.24 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、 $\bar{K}_B = 9.17 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、 $\bar{K}_C = 8.96 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、及 $\bar{K}_D = 8.69 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ，得到 $R_{AB} = 1\%$ 、 $R_{AC} = 3\%$ 、及 $R_{AD} = 3\%$ 。各個相對差異比均相當小，顯示在此異質性相當小的情況下可選用最長的 $l_s = 1 \text{ m}$ 進行 MLST 以降低工作量和減少調查成本。

甲區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 5.85 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、 $\bar{K}_B = 6.15 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、 $\bar{K}_C = 5.29 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、及 $\bar{K}_D = 6.57 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ，得到 $R_{AB} = 5\%$ 、 $R_{AC} = 10\%$ 、及 $R_{AD} = 12\%$ 。在 1.5 m 的調查範圍， R_{AB} 、 R_{AC} 、及 R_{AD} 皆小於 15% 可接受誤差範圍，故可選用最長 $l_s = 1 \text{ m}$ 進行 MLST。

乙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A=5.41 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B=5.21 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C=6.75 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D=7.04 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB}=4\%$ 、 $R_{AC}=25\%$ 、及 $R_{AD}=30\%$ 。因 R_{AC} 和 R_{AD} 皆超過 15% 可接受誤差範圍，顯示用 $l_s=0.75$ 與 1 m 所得 K 值準確性不夠，故建議選用 0.5 m 的測試段來進行 MLST。

另外，我們在 Tw2 共執行 53 次連續深度 MLSTs，53 組資料分析所得 $K(z)$ 示於圖三 B。依據 $K(z)$ 的變化程度將地表下 2.35m 至 3.85m 視為甲區，地表下 4.35m 至 5.85m 為乙區，地表下 5.85m 至 8.35m 為丙區來討論 l_s 的影響。地表下 3.85 至 4.35 m 介於甲、乙兩區之間，而地表下 8.35 至 8.85 m 在丙區之下。這兩個範圍內沒有 $l_s=0.75$ 、1 m 的 K 值，故不列入這三區的討論。三區中，丙區的垂直異質性最小，在 2.5 m 調查範圍內 $K(z)$ 變化由 7×10^{-4} 至 1.66×10^{-3} m/s，最大與最小 K 值相差 2.4 倍。甲區的 $K(z)$ 變化較丙區大；在 1.5m 的調查範圍內 $K(z)$ 變化由 1.13×10^{-4} 至 4.95×10^{-4} m/s，最大與最小 K 值相差 4.4 倍。乙區的 $K(z)$ 變化最大；在 1.5 m 調查範圍中 $K(z)$ 變化由 1.64×10^{-4} 至 9.25×10^{-4} m/s，最大與最小 K 值相差 5.6 倍。

如表 1 所示，丙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A=1.2 \times 10^{-3}$ m/s、 $\bar{K}_B=1.21 \times 10^{-3}$ m/s、 $\bar{K}_C=1.17 \times 10^{-3}$ m/s、及 $\bar{K}_D=1.23 \times 10^{-3}$ m/s，得到 $R_{AB}=1\%$ 、 $R_{AC}=3\%$ 、及 $R_{AD}=3\%$ 。各個相對差異比均相當小，顯示在異質性相當小的情況下可選用最長的 $l_s=1$ m 進行 MLST 以降低工作量和減少調查成本。

甲區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A=2.69 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B=3 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C=2.35 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D=1.99 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB}=11\%$ 、 $R_{AC}=13\%$ 、及 $R_{AD}=26\%$ 。因 R_{AD} 已超過 15 % 可接受的誤差範圍，顯示使用 1m 所得 $K(z)$ 變化的準確度不夠。 R_{AC} 及 R_{AB} 均小 15 % 可接受的誤差範圍，顯示 $l_s=0.25$ 、0.5、0.75m 所得的 K 值均相當一致，故可用三者中最長的測試段 $l_s=0.75$ m 執行 MLST。又這些定量分析的結果與圖三 B 所示 $K(z)$ 的變化相吻合。

乙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A=5.08 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B=5.43 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C=6.08 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D=3.93 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB}=6\%$ 、 $R_{AC}=20\%$ 、及 $R_{AD}=23\%$ 。其中僅 R_{AB} 小於 15 % 可接受的誤差範圍，顯示 $l_s=0.5$ m 及 0.25m 所得的 K 值相當一致，故可用 0.5 m 的測試段即可獲得充分的 $K(z)$ 解析度。

再者，我們在 Tw6 共執行 50 次連續深度 MLSTs，50 組資料分析所得 $K(z)$ 示於圖三 C。依據 $K(z)$ 的變化程度將地表下 2.35m 至 5.35m 視為甲區，地表下 5.35m 至 8.35m 為乙區來討論 l_s 的影響。兩區中乙區的垂直異質性最小；在 3m 調查範圍內 $K(z)$ 變化僅由 6.33×10^{-4} 至 1.03×10^{-3} m/s，最大與最小 K 值相差 1.6 倍。乙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A=8.78 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B=8.52 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C=8.51 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D=8.41 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB}=3\%$ 、

$R_{AC}=3\%$ 、及 $R_{AD}=4\%$ 。各個相對差異比均相當小，顯示此在異質性相當小的情況下可選用最長的 $l_s=1\text{ m}$ 進行 MLST 以降低工作量和減少調查成本。

甲區的 $K(z)$ 變化較乙區大；在 3m 的調查範圍內 $K(z)$ 變化範圍 4.04×10^{-4} 至 $7.48\times 10^{-4}\text{ m/s}$ ，最大與最小 K 值相差 1.9 倍。甲區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A=5.75\times 10^{-4}\text{ m/s}$ 、 $\bar{K}_B=5.78\times 10^{-4}\text{ m/s}$ 、 $\bar{K}_C=5.87\times 10^{-4}\text{ m/s}$ 、及 $\bar{K}_D=5.24\times 10^{-4}\text{ m/s}$ ，得到 $R_{AB}=2\%$ 、 $R_{AC}=2\%$ 、及 $R_{AD}=8\%$ 。各個相對差異比均相當小， R_{AB} 、 R_{AC} 、及 R_{AD} 均小於 15%，故可選用最長的測試段長度 1m 進行 MLST 即可獲得充分的解析度。基本上，Tw6 井周圍的垂直異質性變化相當小；甲區的最大與最小 K 值相差 1.9 倍，乙區的最大與最小 K 值相差 1.6 倍。在這種垂直異質性變化相當小的情況下，不同 l_s 對 K 值的垂直平均效應相仿，故不需使用較短的 l_s 來增加 $K(z)$ 的解析度。

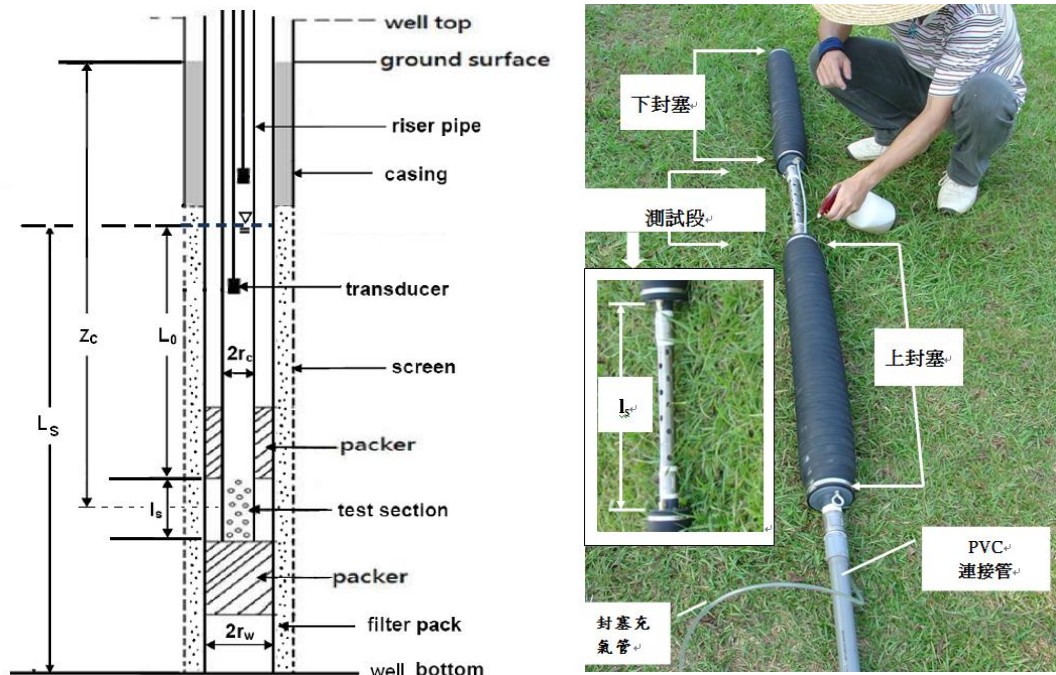
綜合討論上述結果，如表 1 所示。結果顯示在 1.5m 的深度範圍內最大和最小 K 值在 5.6 至 29.7 倍的情況， $l_s=0.5\text{ m}$ 與 $l_s=0.25\text{ m}$ 所得的 $K(z)$ 分布相當一致，又用 $l_s=0.5\text{ m}$ 來執行 MLST 以減少一半的工作量。在 1.5m 的深度範圍內最大和最小 K 值在 5.6 倍以下的情況， $l_s=0.25$ 、0.5 和 0.75 m 所得的 $K(z)$ 解析度大約相同，建議可選擇最長 $l_s=0.75\text{ m}$ 來執行 MLST。此外，當最大和最小 K 值在 3.3 倍的情況下，無論調查範圍是 1.5、2.5、或 3m， $l_s=1\text{ m}$ 即可獲得相當準確的 $K(z)$ 分布，大幅減少 MLST 工作量和調查成本。

然而進行水文地質調查前，通常事先並不清楚含水層異質性的變化強弱，若貿然使用較長的測試段長度(如 0.75m 甚至 1m)容易喪失 $K(z)$ 的解析度，進而影響三維 $K(x,y,z)$ 的代表性，會錯估高、低 K 層的位置和分布，不利於污染整治的設計和技術選用，也會增加整治的困難性。故在 MLST 現地實驗操作上，建議選用 $l_s=0.5\text{ m}$ 。

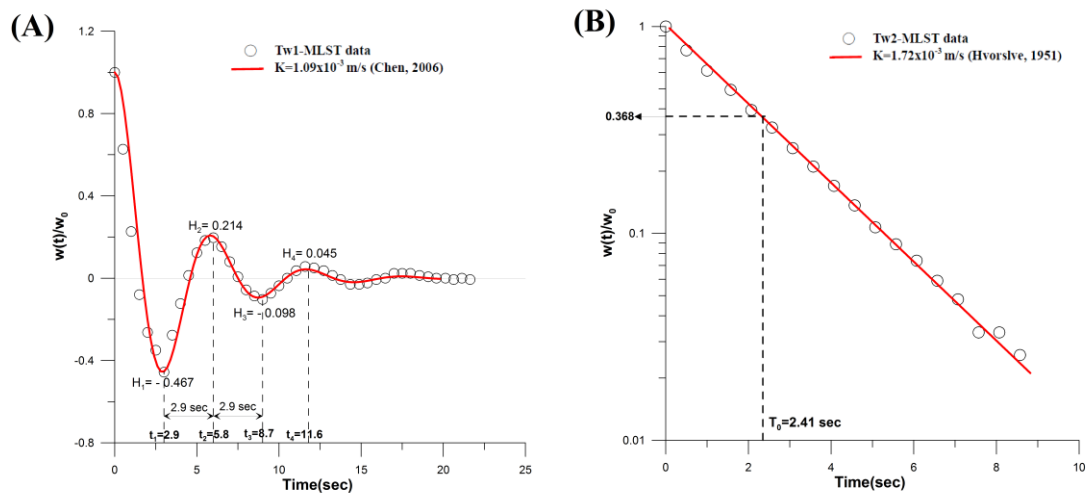
結論與建議

限於雙封塞系統的結構和 MLST 實際施作因素，測試段長度 l_s 以 0.25m 至 1m 為宜。本計畫在三口井使用不同測試段長度($l_s=0.25\text{ m}$ 、0.5 m、0.75 m、及 1.0 m)進行 158 次連續深度 MLSTs。結果顯示當垂直異質性相當弱的情況下，四個測試段長度所得的 $K(z)$ 分布和解析度相當一致，選用 $l_s=1\text{ m}$ 即可以減少工作量和成本。在不同程度的異質情況下， $l_s=1\text{ m}$ 所得 $K(z)$ 的解析度最差， $l_s=0.25\text{ m}$ 和 0.5 m 所得 $K(z)$ 的解析度大約相同，使用 $l_s=0.5\text{ m}$ 足以反映垂直異質性變化，又可減少一半的 MLST 工作量。由於場址異質性屬事先未知，因此建議測試段長度為 0.5m (左右)，以減少 MLST 工作量及調查成本並且兼顧水文地質的變異性。

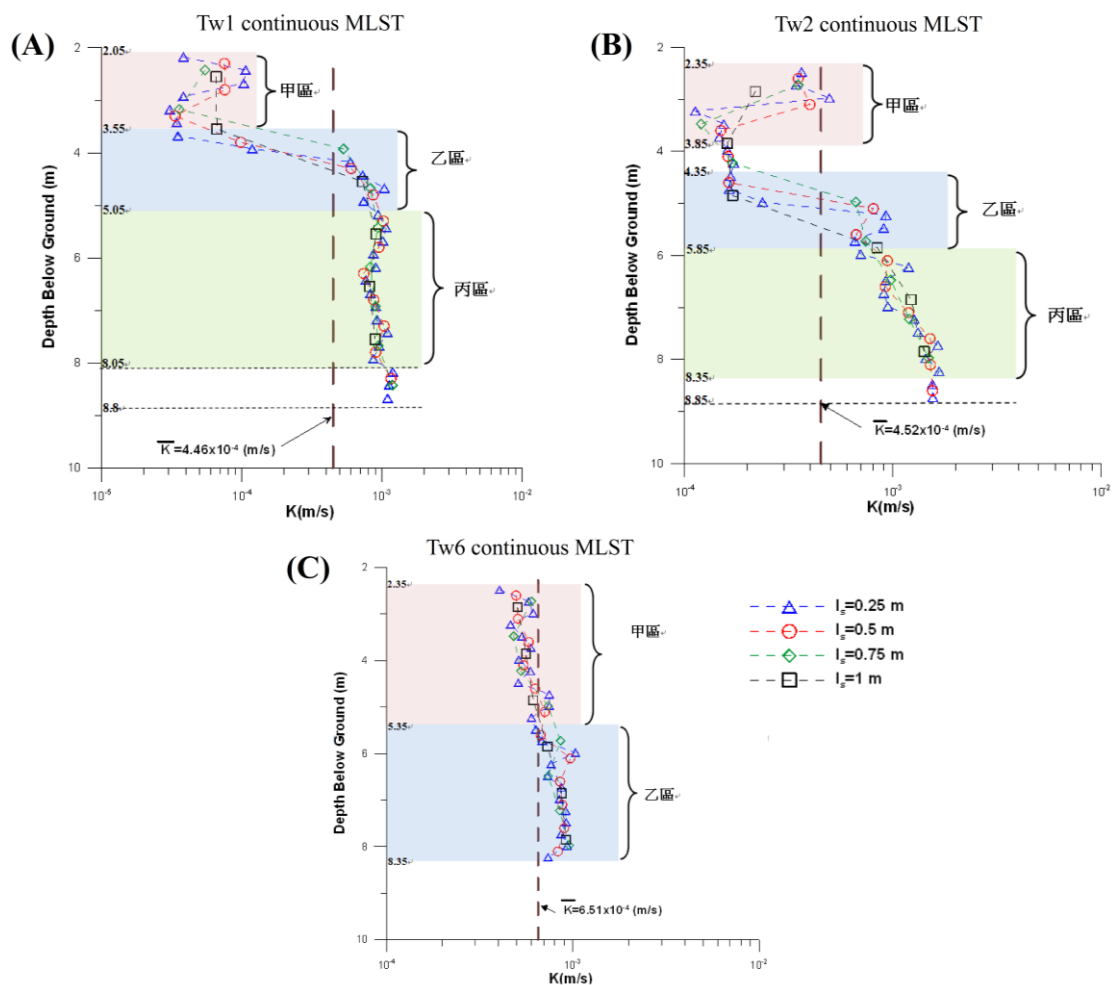
MLST 可用以有效推估每口井周邊的 K 值垂直分布情況。多口井的 K 值垂直分布則可瞭解場址三維異質性， $K(x,y,z)$ ，對於地下水污染整治提供不可或缺的資訊。FST 的 $\bar{K}$ 值代表整個井篩段周圍地質材料的垂直平均 K 值，無法反映垂直異質性。 $\bar{K}$ 的水文地質代表性並不明確。對場址調查或污染整治設計而言， $\bar{K}$ 較缺乏實用性，故不建議使用全層微水試驗進行場址調查。



圖一、雙封塞多深度微水試驗(MLST)儀器設備示意圖



圖二、微水試驗資料 $w(t)$ 反應特徵：(A)振盪反應(B)非振盪反應。



圖三、Tw1、Tw2、及 Tw6 三口井中四個不同長度測試段的 MLST 所獲得 K(z)分布和 FST 所獲得的 $\bar{K}$ 值：(A)Tw1 的 K(z)變化範圍約為 3.06×10^{-5} 至 1.19×10^{-3} m/s。 $\bar{K} = 4.46 \times 10^{-4}$ m/s；(B)Tw2 的 K(z)變化範圍約為 1.13×10^{-4} 至 1.66×10^{-3} m/s。 $\bar{K} = 4.52 \times 10^{-4}$ m/s；(C) Tw2 的 K(z)變化範圍約為 4.04×10^{-4} 至 1.03×10^{-3} m/s。 $\bar{K} = 6.51 \times 10^{-4}$ m/s。

表一、Tw1、Tw2、及 Tw6 三口井中各區的四個不同長度測試段的垂直平均 K 值與相對應的差異比；紅色代表超過 15%可接受誤差範圍。

井號	區號	$K_{\max}/K_{\min}$ (倍)與分區深度(m)比	R_{AB} (%)	R_{AC} (%)	R_{AD} (%)
Tw1	甲	3.3(倍)/1.5m	5	10	12
	乙	29.7(倍)/1.5m	4	25	30
	丙	1.4(倍)/3m	1	3	3
Tw2	甲	4.4(倍)/1.5m	11	13	26
	乙	5.6(倍)/1.5m	6	20	23
	丙	2.4(倍)/2.5m	1	3	3
Tw6	甲	1.9(倍)/3m	2	2	8
	乙	1.6(倍)/3m	3	3	4

第一章 序言

第一章 序言

1.1 計畫緣起

自「土壤及地下水污染整治法」公告實施後，國內大多數的污染物場址陸續展開調查評估及整治設計工作，並在執行「土壤及地下水污染整治法」中第8、9、12、14或22條時，必須進行場址的水文地質調查，並依據調查結果設計污染整治計畫。場址水文地質調查的主要目的是要瞭解含水層異質性（heterogeneity）、污染種類調查、各污染源濃度分布情形等。異質性是指含水層水力傳導係數（ K ）的空間分布情形， $K(x,y,z)$ 。地質材料的透水性強弱由水力傳導係數反映之； K 值越大，地質材料的滲透性越佳，流體越容易通過；反之，則不容易通過。一般情況下， K 值與地質材料的粒徑成正比，因此天然含水層的 K 值因地質材料空間分布呈一定的異質性。把 K 假設為定常，則純屬均質性（homogeneity）的理想狀況，實際不可能發生。 $K(x,y,z)$ 影響地下水流場、溶解相傳輸及NAPL遷移路徑與殘留相分布（Bedient et al., 1999）。基本上，整治成效不彰的主要因素並非整治技術的物化反應失靈，而是缺乏詳細的場址水文地質特徵資訊。在場址異質性認識不足的情況下，無法確實瞭解地下水流場(流速與流向)變化，無從瞭解污染物的流布和污染物的聚集情況，更遑論整治試劑(如化學藥劑、奈米零價鐵、熱能...)是否能接觸到污染物質而加以摧毀。

近年地下水污染傳輸研究顯示低 K 區強烈影響污染傳輸行為[Haggerty and Gorelick 1995, 1998； Schumer et al., 2003； Zhang et al. 2008, 2009； Berkowitz et al., 2008； Berkowitz and Scher, 2009； Bianchi et al. 2011, and references given therein]。這點與現場整治經驗不謀而合：場址中低 K 區是污染整治的瓶頸。整體而言，高 K 區是地下水及污染物溶解相的優勢流徑(preferential flow path)，而低 K

區則扮演相當複雜的角色。在地下水污染過程中，污染物優先在高 K 區中通過，而周遭的低 K 區藉由分子擴散作用吸收污染物，類似“污染物儲存槽”。在整治過程中，整治試劑主要在高 K 區傳輸，摧毀高 K 區的污染物質。低 K 區的滲透性差，不易被整治試劑滲入，早先吸收的污染物質不易被摧毀。當高 K 區的污染物濃度低於低 K 區的污染物濃度時，儲存於低 K 區的污染物開始反饋到高 K 區，造成常見的濃度穿透曲綫長拖尾(tailing)效應，或中止整治後濃度反彈(rebound)現象。換言之，低 K 區形成溶解相的另類地下污染源-類似 NAPL 殘留相的影響。因此有效的污染整治方案必須進行水文地質調查，以瞭解含水層的 $K(x,y,z)$ 分布，對高、低 K 區採取不同的整治技術或措施，可增加污染整治成效與降低整治成本。

1.2 三維水文異質性調查技術

1.2.1 非原位-異質性調查技術

鑽探岩心取樣是屬於非原位 (non-situ) 異質性調查技術，是利用旋轉式中空鑽管向地下鑽孔取土樣，取出的土樣可在實驗室利用定水頭 (constant-head test) 與落水頭 (falling-head test) 實驗來測定單一土樣的 K 值；定/落水頭實驗方法可參考 Freeze and Cherry, 1979；Bedient and Huber, 2002；Schwartz and Zhang, 2003。然而，現地鑽探岩心土樣屬於擾動樣品(disturbed samples)，其顆粒緊密度、排列及孔隙大小異於原位(in-situ)情況。故使用擾動性樣品所做之定/落水頭實驗所求的 K 值大於原位地質材料的 K 值，而且不易獲得 K 值垂直變化。 K 值只可僅供參考，無法得到原有真實地質材料性質的 K 值，因此多年來已發展大量現地原位試驗技術，包括抽水試驗 (pumping test)、微水試驗 (slug test) 等，是利用現場實驗來瞭解含水層水文地質情況與決定相關水文地質參數。

1.2.2 原位-異質性調查技術

一般常見原位(in-situ)現地實驗技術，概分為井內及井外兩大類[Zlotnik and Zurbuchen, 2003；Chen et al., 2011]。井外技術以直接貫入法(direct push, DP)為主[Cho et al., 2000; Sellwood et al., 2005; 孟祥中, 2009]。此項技術無需設井，在合適地質情況下(粒徑<4 mm，深度<25~30 m)結合不同的探測儀（如 HPT, PST）可相當快速推估 $K(z)$ 。直貫入機具和相關探測儀成本頗高，故本計畫不擬採用。

井內技術需要使用水井。每個污染場址均有為數甚多的用井，所以井內技術是可行的。一般而言，抽水試驗是指在一抽水井利用定流量或定洩降的方式產生人為的地下水流動，並在抽水、觀測井中量測其洩降變化，利用洩降資料進而獲得含水層的流通係數（ T , transmissivity）與儲蓄係數（ S , storage coefficient）。當假設含水層為均質、等向時，即 $K(z)$ 為一定值，所推估的主要參數為 T 及 S 值是代表整個含水層厚度（ b ）的水力性質；然而真正定義 $T = \int_0^b K(x, y, z) dz$ ，故不適用利用一般抽水試驗獲得 K 值在空間上的分布[Freeze and Cherry, 1979；Schwartz and Zhang, 2003；Todd and Mays, 2005]。此外，微水試驗為一單井實驗，是瞬間將井中增加/移除重量或注入氣體而造成水位下降或上升變化，因井內外壓力差使得地下水流進或流出井篩段，逐一記錄井中水位壓力變化及對應的時間，直至水位變回原有水位，即完成微水試驗，目的是決定井篩段周邊地質材料的 K 值，所得的 K 值代表整個井篩段的垂直平均值，亦無法透露 $K(z)$ 變化[Butler, 1998；Sellwood et al., 2005]。由此可知，傳統抽水與微水試驗可獲得整個含水層的透水性程度，對於估算補注水量仍有重要參考價值，但是完全無法反映組成含水層厚度的高、低 K 層位置和範圍。

近年來已快速大量發展三維 K 值調查技術，以下列三種方法為主(1)井孔流速儀試驗(borehole flowmeter test, BFT)：用來量測現地井中地下水垂直方向流動速度來

推估K值，通常需搭配抽水幫浦(pump)使用（圖1）[Boman et al., 1997；Young et al., 1998；Arnold and Molz, 2000；Crisman et al., 2001；Paradis et al., 2011]；(2)雙極水流試驗(dipole flow test, DFT)：如圖2所示，雙極水流系統由三支氣囊式封塞(pneumatic packer)與一支抽水幫浦組成。將雙極水流系統置於井中來區隔上、下兩段井篩段，並利用幫浦在上井篩段抽水再回注下井篩段而流回至含水層，造成一垂直循環流場以獲得地層透水性程度 [Kabala, 1993；Zlotnik and Zurbuchen, 1998；Zlotnik et al., 1997, 2001；Zurbuchen et al., 1998, 2011]；及 (3)多深度微水試驗(multilevel slug test, MLST)：如圖3所示，雙封塞系統是用一長度為 l_s 的透水測試段連接兩支氣囊式封塞管組成。測試段長度 l_s 可視實際需要調整。雙封塞系統由連接管通至地面。將雙封塞系統置入井中預定深度後，封塞充氣其氣囊直徑擴大將對應的井篩段封閉成不透水，測試段為地下水進出雙封塞系統的唯一通路。此時，執行一次特定深度微水試驗，獲得該測試段深度的微水試驗反應資料；試驗深度以測試段中點深度 (Z_c)為代表。將封塞洩氣移動至下個預定深度，重複試驗步驟可以獲得不同深度的反應資料來推估K值[Zlotnik and McGuire, 1998； Zlotnik and Zurbuchen, 2003；Zemansky and McElwee, 2005；Ross and McElwee, 2007；謝云珺，2009；林雅婷，2009；孫渥鈞，2011； Alexander et al. 2011；Chen et al., 2011)。詳細MLST所需儀器設備與操作步驟方法於第二章介紹。

比較上述三種三維K值調查方法；從執行操作上而言，DFT執行需要三個封塞且搭配抽水幫浦使用，在現場裝設上較為複雜；而MLST與BFT之儀器裝備較為簡便方便執行。Zurbuchen et al. (2002) 和 Zlotnik and Zurbuchen (2003) 在美國布拉斯加州對一個地質材料主要為礫石、砂、粉砂所組成的非受壓含水層場址，分別在兩口相距約10 m的6吋實驗井 (Well-14、Well-15) 比較BFT、DFT 及MLST三種K值調查方法。由圖4所示，空心方框代表使用DFT方法所獲得垂直變化結果；實心圓圈則代表使用MLST方法；Well-14的K值變化約由10至250 m/day (圖4-a)，

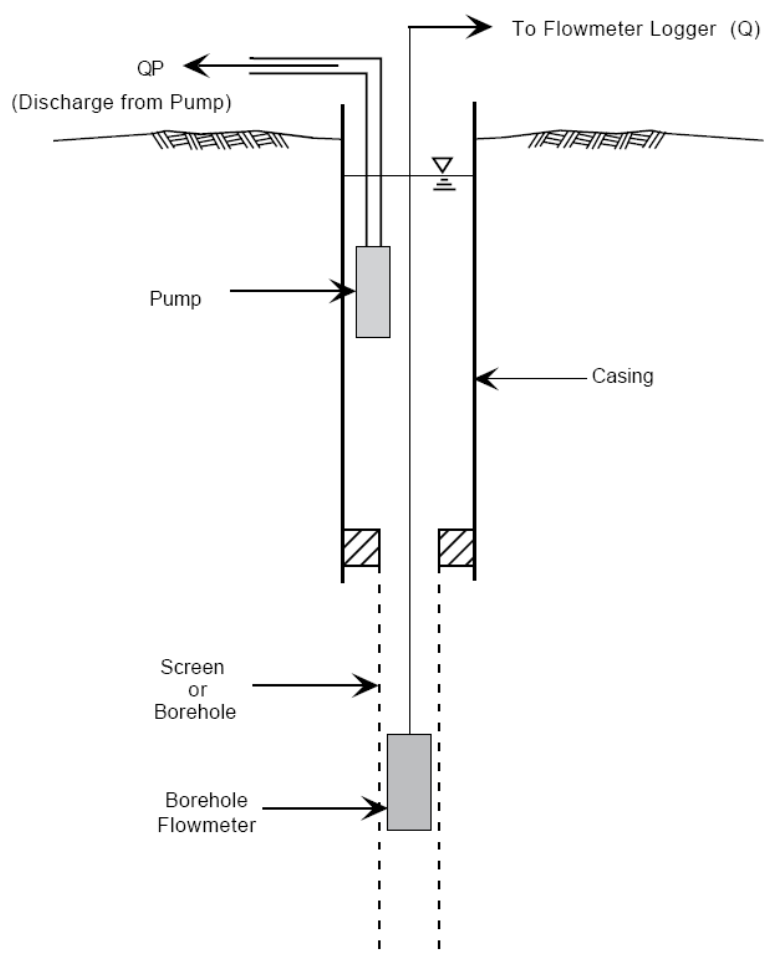


圖 1、井孔流速儀試驗(BFT)儀器設備示意圖，摘自 Young et al. (1998)。

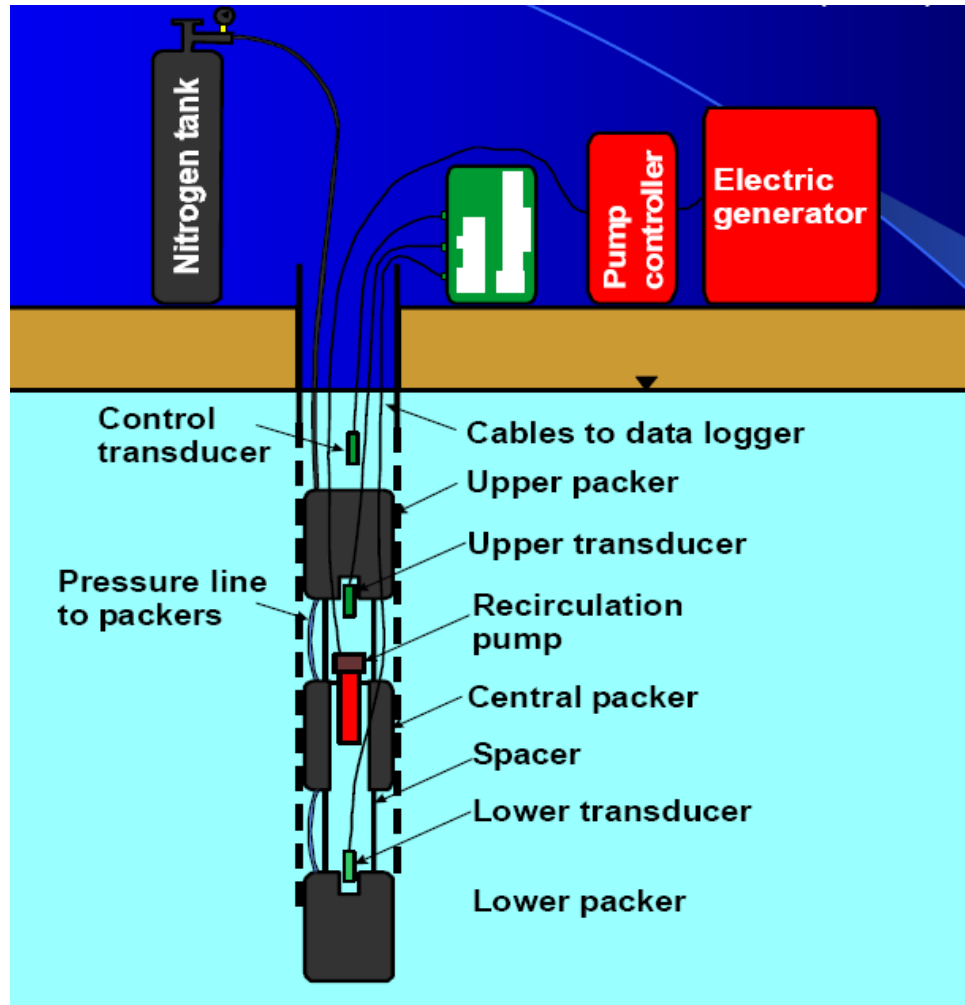


圖 2、雙極水流試驗(DFT)儀器設備示意圖，摘自 Zurbuchen (2011)。

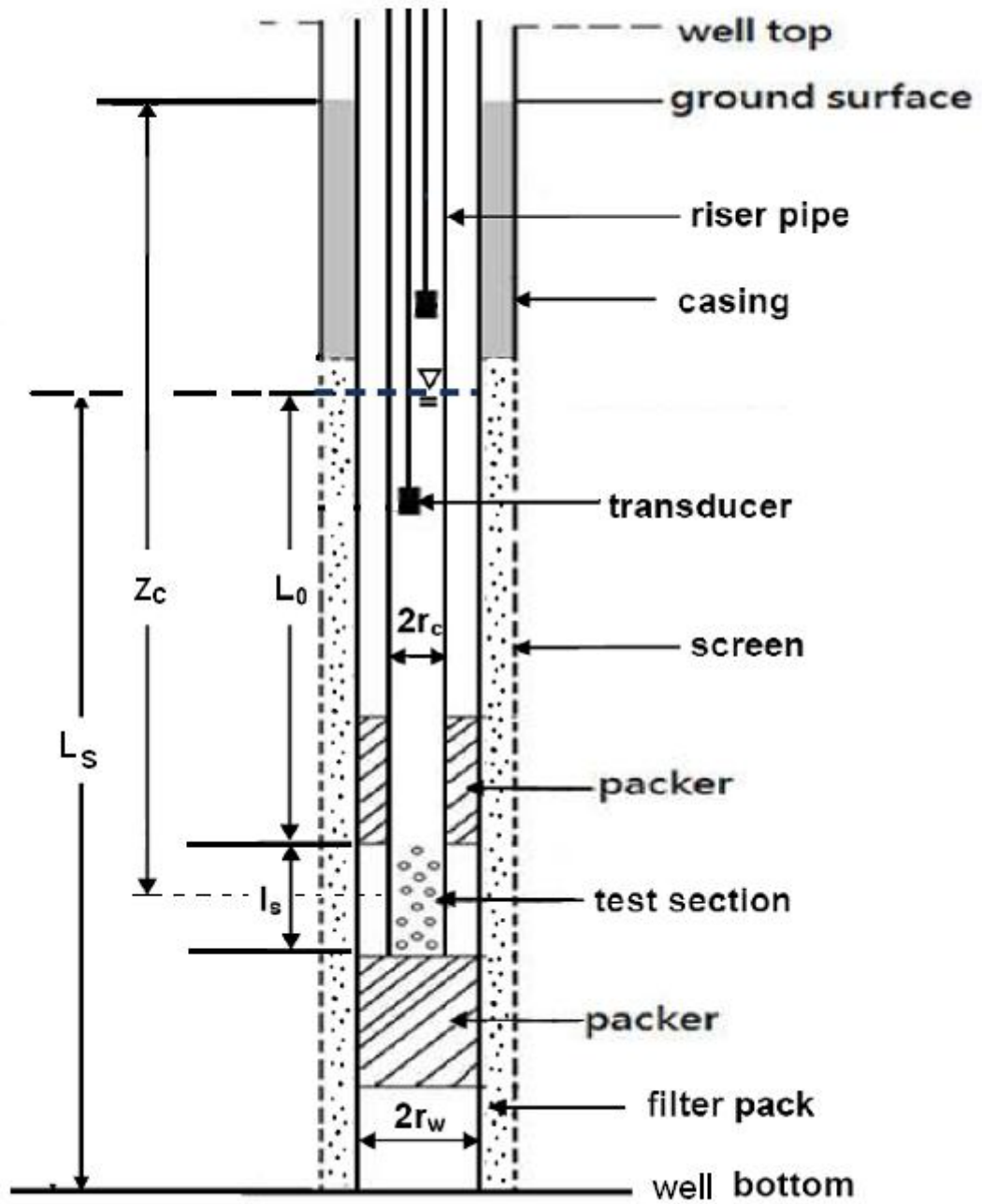
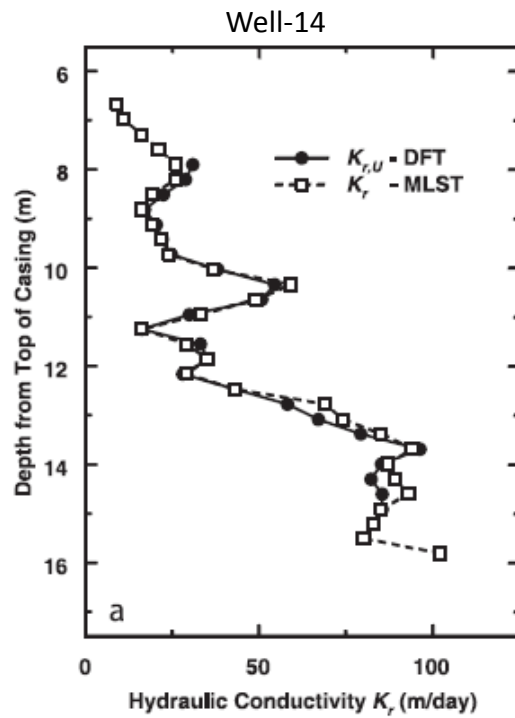


圖 3、多深度微水試驗(MLST)儀器設備示意圖。

(a)



(b)

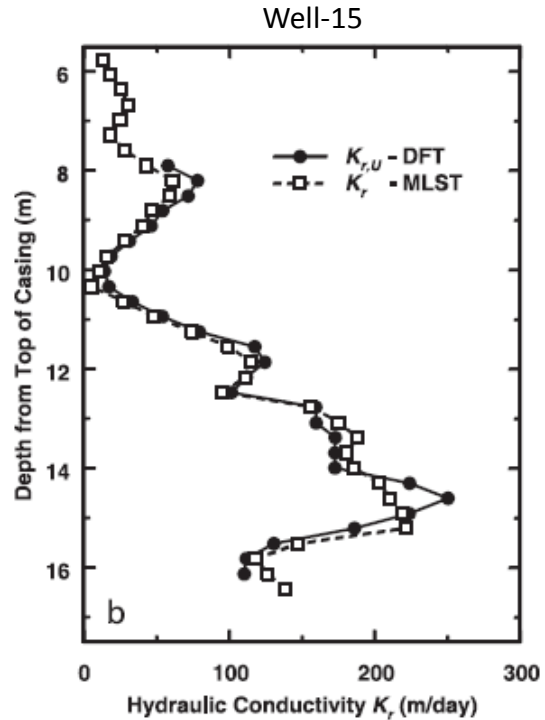


圖 4、美國布拉斯加州一非受壓含水層場址分別在兩口實驗井(Well-14、Well-15)利用 MLST 與 DFT 兩種方法進行比較，發現 MLST 與 DFT 的 K 值變化分布相當一致，兩者相關性最強(Zlotnik and Zurbuchen, 2003)：(a)Well 14 的垂直變化結果；(b)Well-15 的垂直變化結果。

且兩者相關係數 R^2 為0.98；Well-15的K值變化約由 25 至 100 m/day (圖4-b)， R^2 為0.96；由此可知MLST與DFT的垂直變化結果相當一致。此外，由圖5所示，空心方框代表使用BFT方法所獲得正規化垂直變化結果；實心圓圈則代表DFT使用方法；Well-14 的垂直分布結果約 0.4 至 2 的範圍 (圖 5-a)， R^2 為 0.59；Well-15 的垂直變化約由 0.02 至 2.2 (圖 5-b)， R^2 為 0.7；綜合上述結果發現 MLST 與 DFT 的相關性最強，而 BFT 與其他兩種方法相關性弱。Melville et al. (1991) 比較 MLST 與示蹤劑試驗(tracer test)所得之 $K(z)$ ，發現兩者的 $K(z)$ 分布相仿。這些國外研究結果顯示 MLST 可以用來準確推估 K 值；並適用於各種未固結砂質含水層與開放性裂隙中操作 MLST 來獲得 K 值。MLST 特別適合污染場址因為此項技術(1)不需抽水因而沒有污染水處理問題，(2)產生的地下水壓力變化相當小不致影響場址地下水流場也不會干擾污染物濃度分布，(3)省時易於執行。由上述討論與我們在臺灣的經驗均顯示 MLST 較為有利，故本計劃採用 MLST。實際上每種方法各有優劣，互相輔助使用對場址調查產生最佳效果。這些不同原位實驗的對比費用龐大非本計畫所能支付。限於本計劃的經費和時間，我們無法對每種方法進行研究。

一般而言，MLST資料有兩種水位反應特徵：(1)振盪反應（如圖6）：水位反應相對於初始水位上下來回振盪，通常發生於K值約大於 6×10^{-4} m/s以上的高滲透性地層(如中、粗砂、礫石層)。係因井篩段附近的地質材料屬於高滲透性，地下水流流入井篩的速率相當大，以致慣性力不可忽略而造成水位變化呈現振盪的情況。振盪反應之相關資料分析方法與理論可參考 van der Kamp (1976)；Kipp (1985)；Springer and Gelhar (1991)；Hyder et al. (1994)；Zurbuchen et al. (2002)；Chen (2006)(2008)；Chen and Wu(2006)；Chen et al.(2011)，and references given therein。

(2) 非振盪反應(如圖7)：通常發生於K值約小於 6×10^{-4} m/s 以下的低滲透性地層。當地質材料的滲透性低時，地下水流入井篩段的速率緩慢，造成緩慢的井水位面上升，其慣性力可忽略，故無振盪反應發生。非振盪反應之相關資料分析方法與

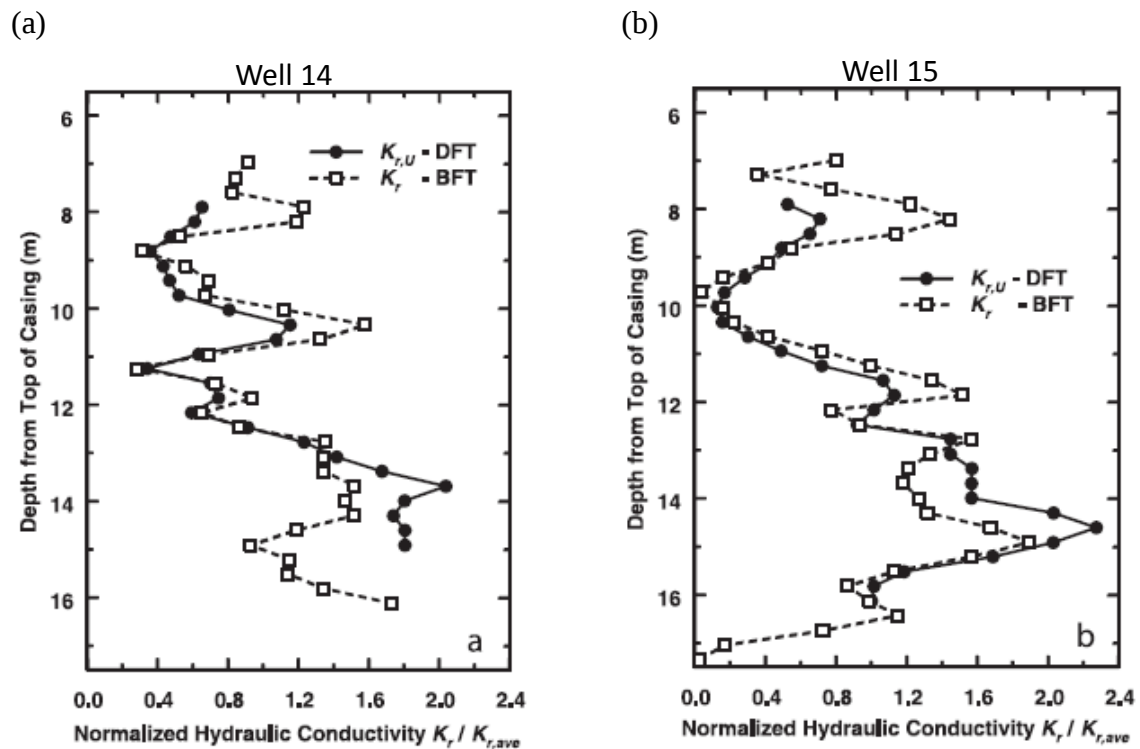


圖 5、美國布拉斯加州一非受壓含水層場址分別在兩口實驗井(Well-14、Well-15)利用 BFT 與 DFT 兩種方法進行比較，發現與 DFT 的 K 值變化稍為不同，故 BFT 與 DFT 相關性弱。(Zlotnik and Zurbuchen, 2003)：(a)Well 14 的垂直變化結果；(b)Well-15 的垂直變化結果。

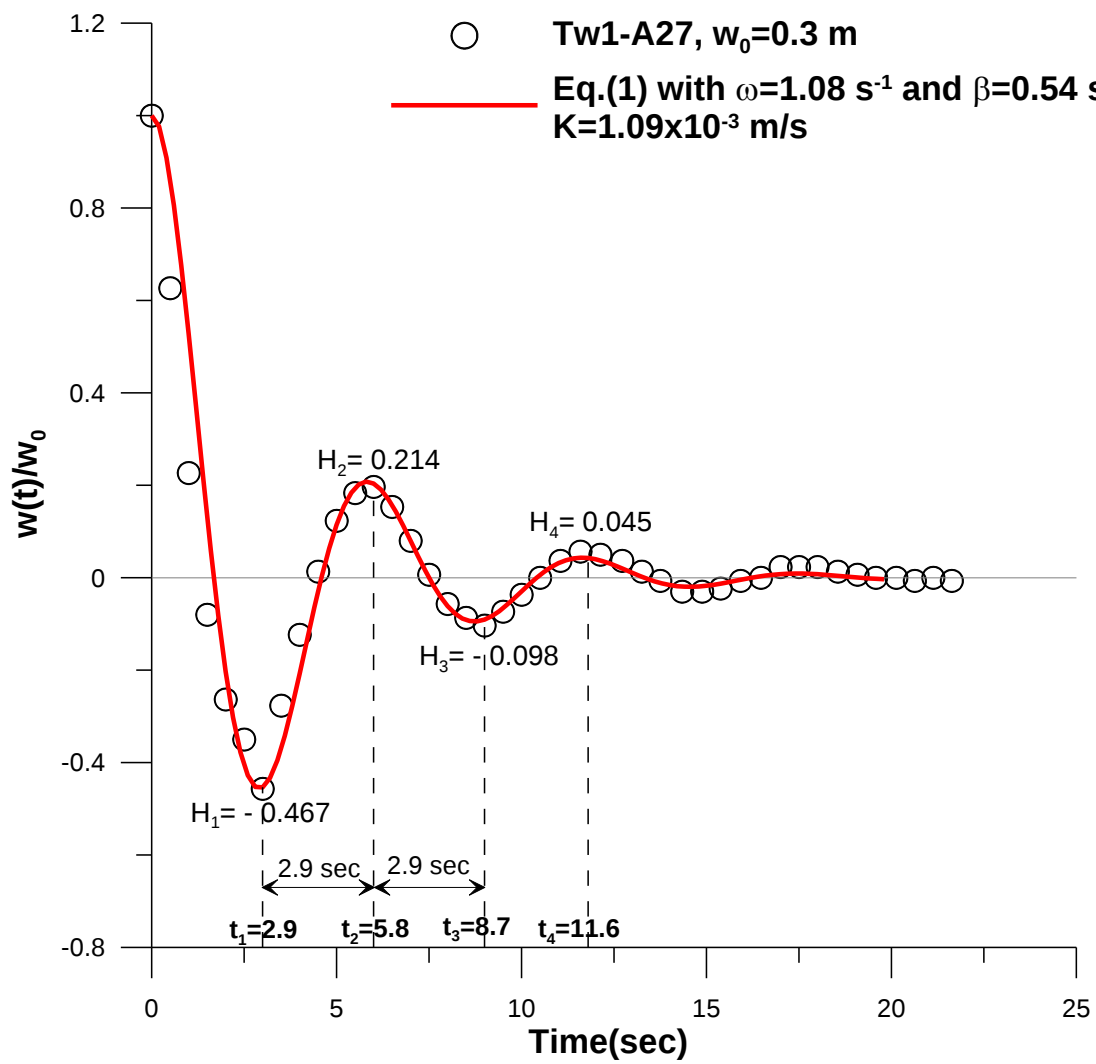


圖 6、井 Tw1 之 MLST 振盪反應資料分析。振盪反應通常發生於的高滲透性地層。

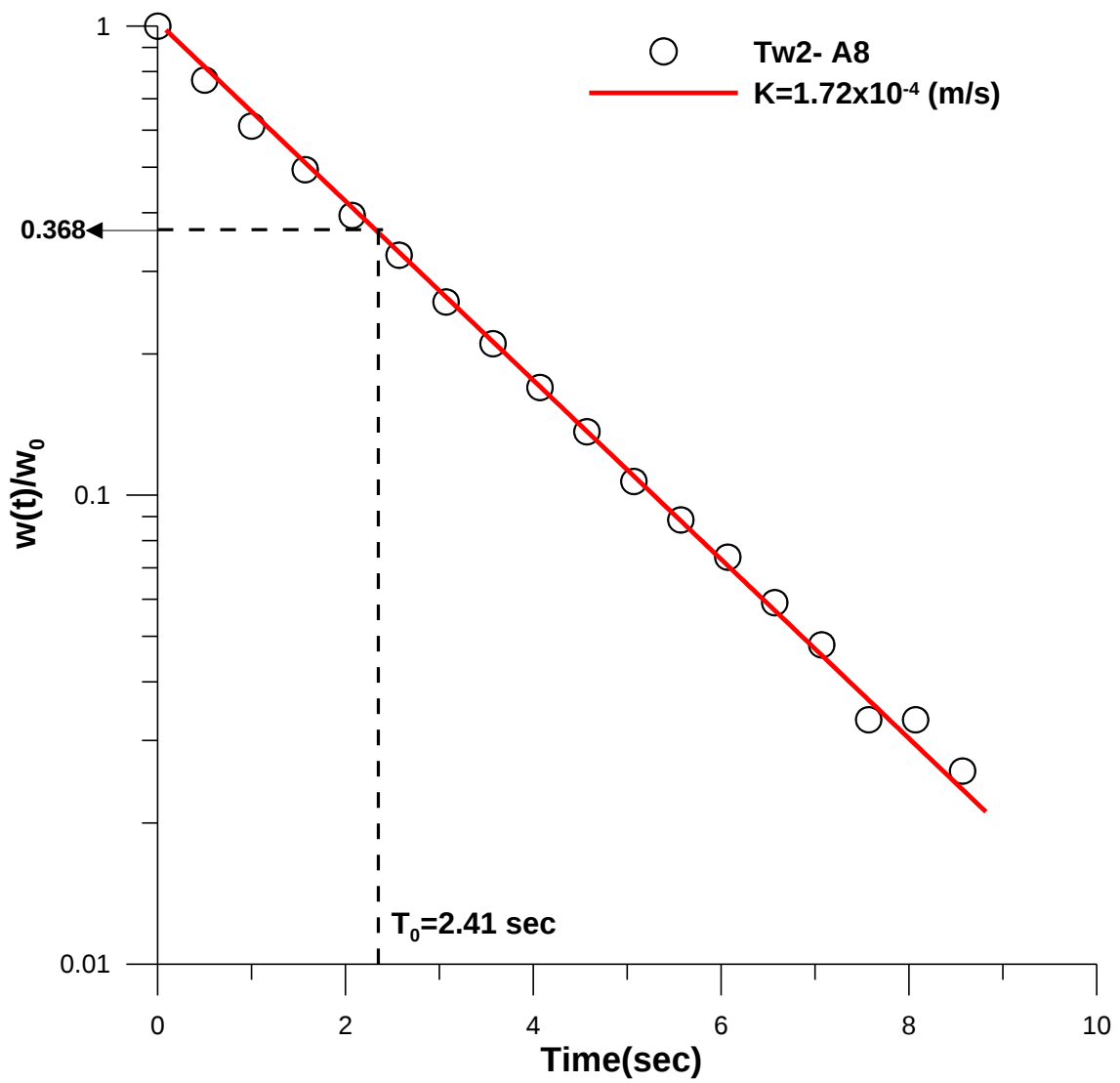


圖 7、井 Tw2 之 MLST 非振盪反應資料分析，通常發生於的低滲透性地層。

理論可參考 Hvorslev (1951); Bouwer and Rice (1976); Dagan (1978); Butler (1998); Ratnam et al. (2001); Mathias and Butler (2006) (2007); Chen et al. (2011) and references given therein。本計畫的 MLST 資料是依據水位反應(振盪/非振盪反應)、含水層種類(受壓/非受壓)、及開篩位置(部分/全層貫穿含水層)等條件選用最適資料分析方法以推得 K 值, 相關 MLST 資料分析方法在第三章中詳述之。

近來研究指出測試段長度對 K 值推估的影響甚大[Butler et al.,1994]。Butler et al. (1994) 假設含水層由許多不同 K 值與厚度的平行地層組成, 數值模擬結果顯示當測試段長度約與周圍地層厚度相同時, MLST 所得的 K 值誤差相當大。當測試段長度涵蓋數個地層時, MLST 所得的 K 值大約等於各個地層厚度加權的數學平均值。基本上, 測試段長度越小其 $K(z)$ 的解析度越高。測試段越長所得 $K(z)$ 解析度越差, 但 MLST 的工作量較少。更甚者, 測試段太長所得 K 值的垂直平均效應會過大而喪失特定深度的代表性, 無法可靠反應異質性。減少測試段長度增加 $K(z)$ 解析度, 也加重 MLST 的工作量, 增加場址調查成本。因此如何選取合適的測試段長度攸關 $K(z)$ 分布的解析度和 MLST 工作效率的平衡, 影響場址調查的成本。

1.3 工作內容與計畫目的

本計畫的目的是研究多深度微水試驗之測試段長度 l_s 對 $K(z)$ 推估的影響, 評估在一口井中不同測試段長度所得之 $K(z)$ 的相關性, 以決定是否可用一個最合適的測試段長度 l_s 來決定可靠的 $K(z)$ 。所得成果對 MLST 實際執行有益, 減少場址調查成本又能確保推估品質, 對未來執行 MLST 細則的制定亦有幫助性。

台灣大多數的污染場址位於工商業發達的西部平原區。西部平原區為近一萬年至現今的第四紀海相沖積地層, 其厚度可以從數十公尺到二百公尺。在岩性上, 大多數是由未膠結的黏土(clay)、粉砂(silt)、砂(sand)、礫石(gravel)以各種不同比例

所組成。此沖積層中的含水層沉積環境、顆粒組成結構及水文地質條件並不隨地區而有明顯變化；故本計畫相關試驗雖然在高雄輔英科技大學試驗井場(隸屬台灣西部現代沖積層)進行，所獲得的成果與資訊適用於西部平原區的其他場址。本井場設有七口 4 吋標準監測井，本計畫選用其中的 Tw1、Tw2 及 Tw6 三口井(圖 8)進行相關試驗。含水層為非受壓含水層，地下水位面有季節性升降，平均約在地表下 1.7 m 處。區域性地下水自東南向西北方向流動。Tw1、Tw2 及 Tw6 三口井篩長度約 8 m，開篩位置約地表下 1.5 m 處。

封塞為特殊材質的可充氣氣囊，封塞長度依製造商規格而定，一般長度約 0.75 至 1 m。本計畫所採用的封塞長度為 0.75 m。因雙封塞結構限制，測試段最短的長度約為 0.25 m。最長的測試段長度則以不超過 1 m 為宜，因為若測試段長度超過 1m，雙封塞系統（含兩支封塞和一支測試段）的總長度超過 2.5 m，在實地施作 MLST 時非常容易折斷。再者，當 l_s 超過 1m 時所推估 K 值的垂直平均效應會降低 $K(z)$ 的解析度。所以測試段長度宜限制在 0.25 至 1 m 之間。本計畫在 Tw1、Tw2 及 Tw6 三口井各進行一次全篩段微水試驗(full screen slug test, FST)及四次不同測試段長度($l_s = 1.0, 0.75, 0.5, 0.25$ m)的連續深度 MLST。FST 即傳統微水試驗，無須用雙封塞系統，所得的 K 值代表整個井篩段長度的垂直平均水力傳導係數， $\bar{K}$ 。連續深度 MLST 的施作方法將於第二章詳細討論。

依計畫書初期所擬訂工作進度如附錄一所示。本報告為期末報告。已完成計畫書中原預定工作進度及內容，完全滿足合約規定。

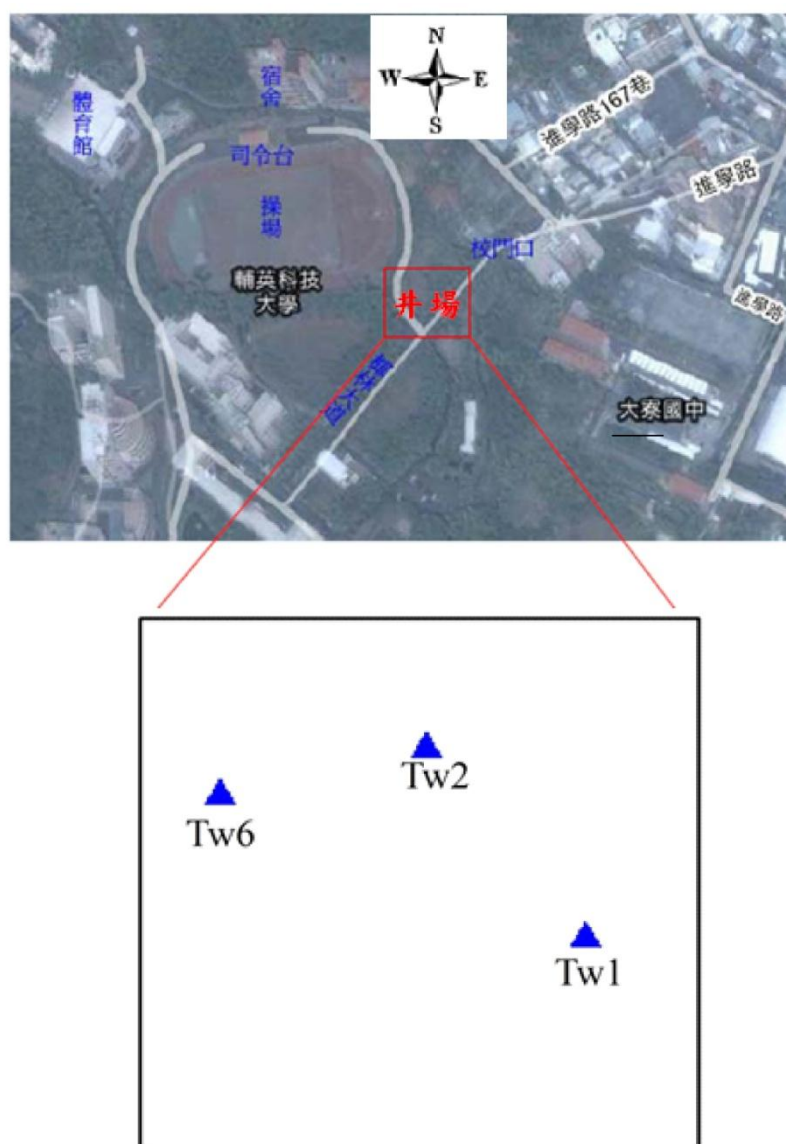


圖 8、試驗井場 MLST 三口井位置示意圖。

第二章 多深度微水試驗方法及操作步驟

第二章 多深度微水試驗方法及操作步驟

MLST 是一單井雙封塞原位試驗技術，不受地質材料變化或井深影響，只需井徑大小適合封塞尺寸，即可執行，適用於任何水井操作。執行 MLST 所需的儀器裝置包括：(1)雙封塞系統 (圖 9)：由兩支氣囊式封塞、測試段（為有開孔金屬管，相當於井篩）、PVC 連接管；及(2)氣壓啟動器(圖 10)：內含兩支自記式壓力計、注氣閥、及洩氣閥。本計畫採用的封塞長度大約為 75 cm 左右，未充氣時氣囊直徑約 3.7 吋，充氣後氣囊直徑約 4.1 吋，可與 4 吋水井井壁緊密結合。

MLST 是將自井口將雙封塞系統下放至預定調查深度。封塞充氣後氣囊直徑擴大，可將對應的井篩段封閉不透水。此時地下水僅能從測試段自由進出連接管。利用氣壓啟動器用將空氣注入連接管中，造成井內水位面下降一個穩定幅度，稱初始水位位移 (w_0)。釋放注入井中的氣體，此 w_0 壓力差導致地下水流進測試段，逐時記錄井水位面壓力資料變化， $w(t)$ 。待 $w(t)$ 恢復至原有水位即完成一次 MLST 試驗。McElwee and Zenner (1998)；Zurbuchen et.al (2002)；Zlotnik and Zurbuchen (2003)；Zemansky and McElwee (2005) 等人認為井水位變化會因井管內擾流和動態水壓變化而造成非線性反應。為避免動態水壓所造成的非線性變化造成資料分析困難性，壓力計必須擺放深度距水位面下 0.5 m，且 w_0 不超過 0.5 m [Butler et al., 2003；Chen, 2006,2008；Chen, 2011]。本計畫所執行 MLST 皆將壓力計置於井水位面下 0.5 m，且控制 w_0 低於 0.5 m。



圖 9、雙封塞系統裝置。上、下封塞由可透水的測試段連接，利用 PVC 連接管放置預定試驗深度。封塞通氣管用來將氣體灌入氣囊使直徑擴大。

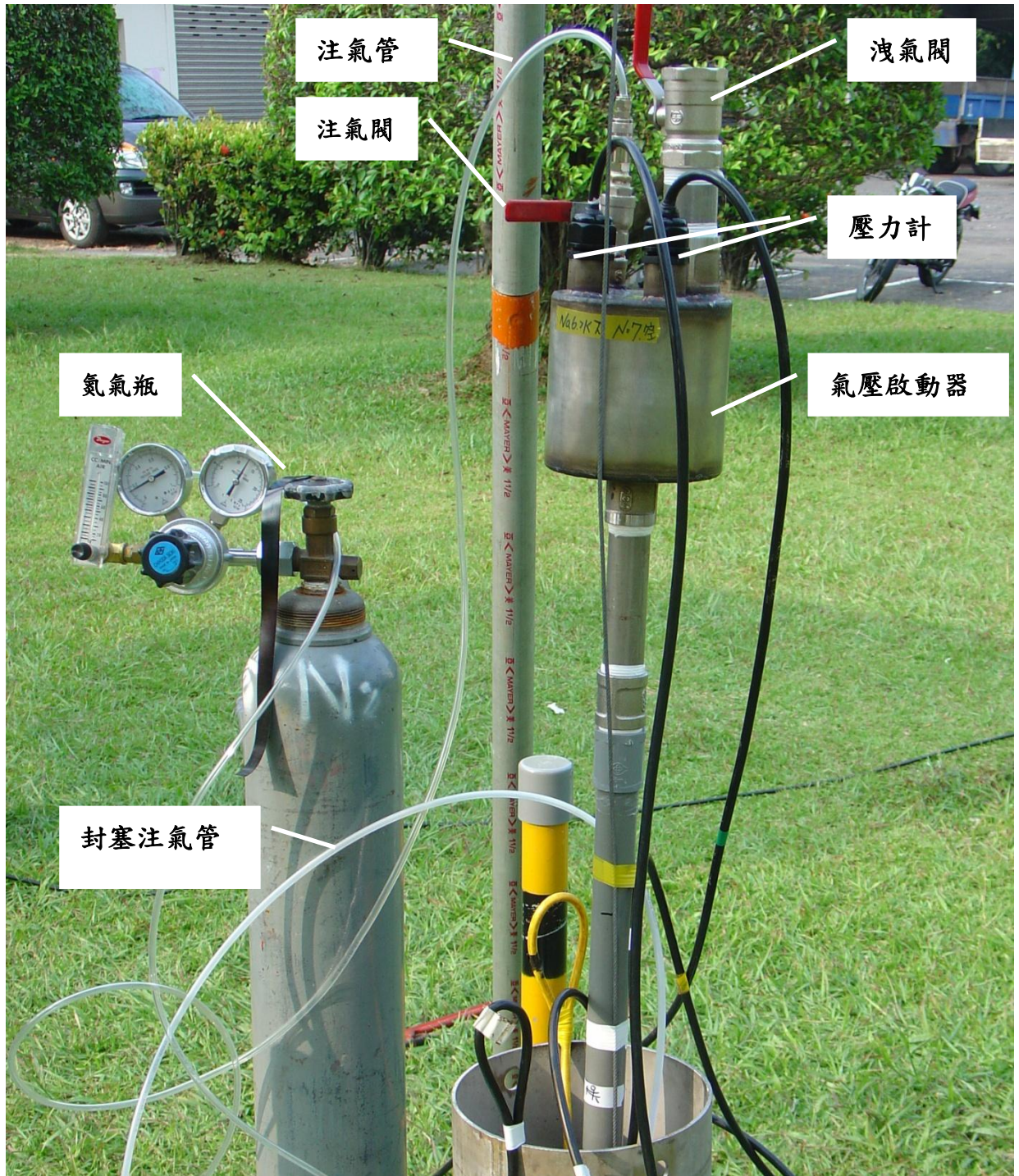


圖 10 多深度微水試驗地表上設置。

連續 MLST 操作步驟如下：

- (1) 連接管為 1 吋 PVC 管，與上封塞密閉連接(圖 9)。將未充氣的雙封塞系統自井口垂入井中預定調查深度。調查深度由測試段所在位置的中點深度 Z_c 代表之(圖 3)。
- (2) 到達預定調查深度後，使用氮氣瓶將上、下封塞充氣，固定雙封塞系統在井內的位置。此時地下水僅能從測試段自由進出井篩段和雙封塞系統。
- (3) 將氣壓啟動器與連接管在井口相連，確認一支壓力計位於井水位面下 0.5 公尺紀錄井水位面變化， $w(t)$ ，另一支位於井水位面之上量測氣體注入壓。
- (4) 啟動資料記錄器 (data logger)，然後利用氣壓啟動器注入氣體將井水位面降至預定之 w_0 ；注意： w_0 必須小於 0.5 公尺。
- (5) 待 w_0 穩定後，開啓氣壓啟動器的洩氣閥，紀錄 $w(t)$ 。完成一次特定 Z_c 位置的微水實驗。
- (6) 將雙封塞洩氣，將雙封塞系統下移一個 l_s 深度。重覆(3)-(6)步驟，完成新的特定深度的微水試驗。

第三章 多深度微水試驗資料分析方法

第三章 多深度微水試驗資料分析方法

一般而言，微水試驗資料 $w(t)$ 分振盪與非振盪兩種不同的反應特徵。如圖6所示，振盪反應的井水位呈現相對於初始水位的上下振盪，通常發生於 K 值約大於 6×10^{-4} m/s以上的高滲透性地層(如中、粗砂、礫石層)。Butler et al. (2003)，Chen and Wu (2006)分別使用Springer and Gelhar (1991)的振盪反應解析方程發展曲線套疊方法來分析MLST振盪反應資料。爲了避免繁複的曲線套疊步驟，Chen(2006)發展出半解析方法來決定振盪反應的 K 值。Chen (2008)更進一步證明此半解析法不受壓力計擺放深度的深淺而造成的非線性變化之影響。本計畫之MLST振盪反應分析採用Chen (2006)半解析析方來推估 K 值；其他振盪反應分析方法可參考 van der Kamp (1976)； Kipp, 1985；Springer and Gelhar (1991)； Hyder et al. (1994)；Zurbuchen et al. (2002)。非振盪反應通常發生於 K 值約小於 6×10^{-4} m/s以下的低滲透性地層，其 $w(t)$ 在半對數圖上多呈一直線（如圖7所示）。本場址的MLST非振盪反應幾乎都具此特徵，可用Hvorslve (1951)方法分析。非振盪反應還有其它類型的特徵，宜由不同的分析方法分析之；可參見Cooper et al. (1967)；Bouwer and Rice (1976)；Butler (1998)； Ratnam et al. (2001)；Mathias and Butler (2006) (2007)。

在執行 FST 時，發現場址的地下水位面低於 Tw1、Tw2、及 Tw6 三口井的井篩頂端，造成所謂部分浸水(partially submerged)的情形(圖 11)。當部分浸水情況發生時，地下水實際流入井中的井篩長(有效井篩長)會隨水位回升而增加，其分析方法以 Dagan (1978)的方法最適合。以下則對此三種方法進行討論，並以本計畫實驗資料作為案例計算。

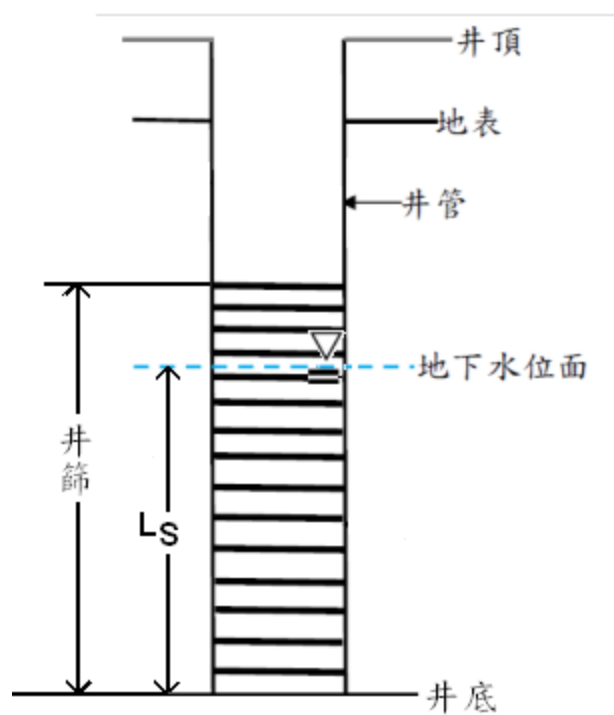


圖 11、部分浸水(partially submerged)：地下水位面低於井篩頂端，有效井篩長度隨水位回升而增加。

3.1 振盪反應資料分析方法

Springer and Gelhar (1991)的振盪反應解析方程為

$$\frac{w(t)}{w_0} = e^{-\beta t/2} \left[\cos(\omega t) + \frac{\beta}{2\omega} \sin(\omega t) \right] \quad (1)$$

其中 $\omega=2\pi/T$ [1/t]代表振盪頻率， T [1/t]代表振盪週期， β [1/t]為振盪參數用來反映振幅變化。 K 值受 β 、 ω 與其它參數的影響如下式(Chen et al., 2011, Butler, 1998, Chen, 2006) 所示

$$K = \frac{\omega^2 + 0.25\beta^2}{\beta} \frac{r_c^2}{r_w} F \quad (2)$$

其中 r_c [L]為封塞連接管半徑； r_w [L]為井篩半徑； F [0]為形狀因子，代表井篩段附近的地下水流場對井水位變化之影響，可由 l_s 、 r_w 、含水層厚度等已知參數決定。附錄二討論計算 F 的方法。而 β 與 ω 則需由用 $w(t)$ 來推估。以下討論 Chen (2006) 決定 β 與 ω 的半解析方法，並且搭配一組現場 MLST 資料(Tw1-A27)來輔助說明。(Tw1-A27 的意義解式如下。三口井 158 組不同測式段長度的連續深度 MLST 資料以 A、B、C、D 及其後的數目來代表。A 表示 $l_s=0.25$ m，B 表示 $l_s=0.5$ m，C 表示 $l_s=0.75$ m，D 表示 $l_s=1.0$ m。四個字母後的數目 k 則代表第 k 個調查深度， $k=1, 2, 3, \dots$ 。如 Tw1-A27 指 Tw1 井使用 $l_s=0.25$ m 時第 27 個調查深度的資料。)

1. 將 $w(t)/w_0$ 與實驗時間繪於線性圖紙，如圖 6 所示。
2. 決定各個波峰與波谷的對應時間， t_k ，其中 $k=1, 2, 3, 4$ 。由圖 6 得知， $t_1=2.9$ s、 $t_2=5.8$ s、 $t_3=8.7$ s、及 $t_4=11.6$ s。

3. 振盪週期是兩個相鄰波峰或兩個相鄰波谷的時距， $T = t_{k+2} - t_k$ 。由 t_1 、 t_2 、 t_3 及 t_4 得知 $T = 5.8 \text{ s}$ 。決定振盪頻率 $\omega = 2\pi/T = 1.08 \text{ s}^{-1}$ 。
4. 決定各個波峰或波谷的振幅， H_k ， $k=1, 2, 3, 4$ 。由圖 6 得知 $H_1 = -0.467 \text{ m}$ 、 $H_2 = 0.214 \text{ m}$ 、 $H_3 = -0.098 \text{ m}$ 、 $H_4 = 0.045 \text{ m}$ 。
5. 決定振幅比， $|H_k/H_{k+1}|$ ； $H_1/H_2 = 0.467\text{m}/0.214\text{m} = 2.182$ ， $H_2/H_3 = 2.183$ ，及 $H_3/H_4 = 2.177$ 。同一組 $w(t)/w_0$ 的振幅比變化不大，約為一定定值。
6. 由下式計算 β 值

$$\beta_k = \frac{4}{T} \ln \left| \frac{H_k}{H_{k+1}} \right| \quad (3)$$

求得 $\beta_1 = 0.538 \text{ s}^{-1}$ 、 $\beta_2 = 0.538 \text{ s}^{-1}$ 、 $\beta_3 = 0.537 \text{ s}^{-1}$ 。取它們的平均值 0.54 s^{-1} 為 β 值。

7. 將所求的 $\omega = 1.08 \text{ s}^{-1}$ 和 $\beta = 0.54 \text{ s}^{-1}$ 代入式(1)，然後比較由式(1)計算的井水位變化與實際量測的井水位變化。若兩者相當一致，則用利用式(2)決定水力傳導係數 K 值。否則回到步驟 2 重新決定 ω 和 β 。
8. 用式(A2) 求得 $F_U = 0.133$ 。將 $\omega = 1.08 \text{ s}^{-1}$ ， $\beta = 0.54 \text{ s}^{-1}$ ， $F_U = 0.133$ 代入式(2)可獲得水力傳導係數 $K = 1.09 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。

3.2 非振盪反應資料分析

Hvorslve (1951)分析方法計算水力傳導係數 K 值，如下式

$$K = \frac{r_c^2 F}{r_w T_0} \quad (4)$$

$T_0[t]$ ：遲滯時間，由量測 $w(t)$ 決定之。今用井 Tw2-A8 資料來介紹 Hvorslve (1951) 決定 T_0 的方法。

1. 將 $w(t)/w_0$ 相對於實驗時間繪於半對數圖紙，縱軸取對數，橫軸取線性，如圖 7 所示。
2. 決定資料點之最佳直線段。
3. 決定最佳直線段與 $w(t)/w_0=0.368$ 相交的對應時間，此時間即 T_0 。如圖 7 所示，
 $T_0=2.41s$ 。
4. 用式(A2) 求得 $F_U=0.133$ 。將上述的 $T_0=2.41 s$ ， $F_U=0.133$ 代入式(4)可獲得水力傳導係數 $K=1.72 \times 10^{-4} m/s$ 。

3.3 部分浸水資料分析

Dagan (1978) 分析部分浸水的微水資料方法適合 $L_s/r_w > 50$ 的情況。三口井的 FST 均滿足此條件。Dagan (1978) 指出

$$K = \frac{r_w^2}{2L_s T_0 F} \quad (5)$$

其中 $L_s[L]$ 為測試井的初始有效井篩長度， $T_0[t]$ 為遲滯時間，可由量測 $w(t)$ 決定。今用井 Tw1 之現場 FST 資料來介紹決定 T_0 的方法。

1. 由下式修正水位壓力

$$\overline{w(t)} = \frac{w(t)}{w_0} \frac{(2L_s - w_0)}{(2L_s - w(t))} \quad (6)$$

2. 將 $\overline{w(t)}$ 相對於實驗時間繪於半對數圖紙，縱軸取對數，橫軸取線性，如圖12所

示。

3. 決定資料點上之最佳直線段。
4. 決定最佳直線段與 $w(t)/w_0=0.368$ 相交時間，即為 T_0 。如圖 12 中， $T_0=1.45$ s。
5. 用式(A6) 求得部分浸水形狀因子 $F_p=0.243$ 。將上述求出 $F_p=0.243$ 與 $T_0=1.45$ s 代入式(6)，可推得水力傳導係數 $K=4.46 \times 10^{-4}$ m/s。

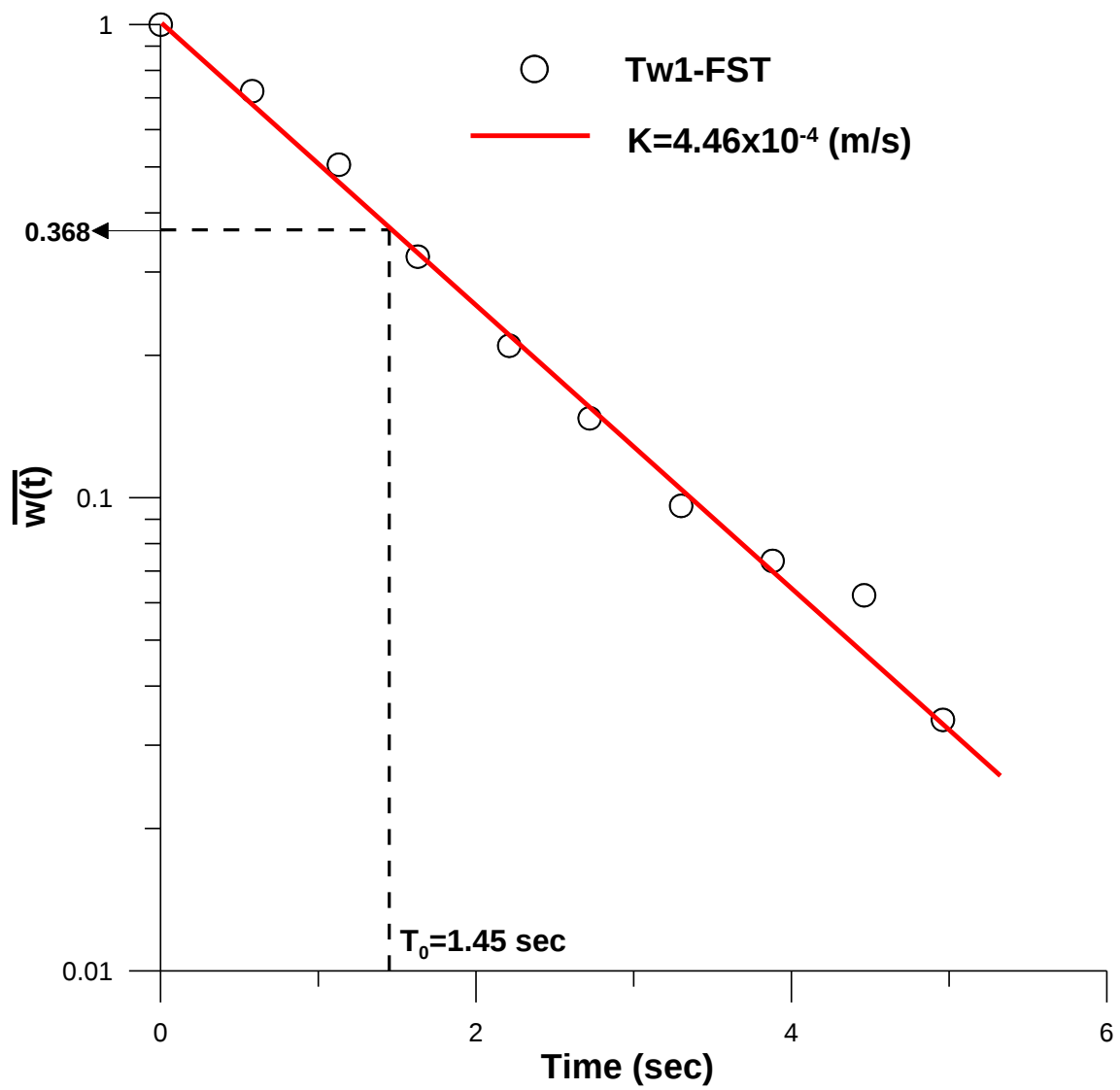


圖 12、Dagan (1978)方法分析井 Tw1 之 FST 部分浸水資料。

第四章 測試段長度對推估 K 值影響

第四章 測試段長度對推估 K 值影響

在三口井中共執行 158 次 MLSTs 與 3 次 FSTs，其資料分析方法依第三章所述，不再贅述。所得的 $K(z)$ 分布除了用來決定測試段長度對 K 值推估的影響外，亦可用於推估測試井周圍的水文地質概況；提供或補強地質鑽探和岩芯取樣不足(漏失)之處。一般而言，粗砂粒徑變化約自 0.5 至 1 mm，其 K 值範圍約自 10^{-3} 至 10^{-2} m/s；中砂粒徑變化約自 0.25 至 0.5 mm，其 K 值範圍約自 10^{-4} 至 10^{-3} m/s；細質顆粒(細砂、粉砂)粒徑變化約自 0.004 至 0.25 mm，其 K 值範圍約自 10^{-7} 至 10^{-4} m/s (見 Freeze and Cherry, 1979；Brassington, 1988)。整體而言，MLST 調查結果顯示本場址在地表下約 2 至 5 m 的 54 個不同段測試段的 MLST 均呈現非振盪反應，其 K 值範圍約 3×10^{-5} 至 6×10^{-4} m/s，屬低滲透性的地層(粉砂夾細砂、細砂)。而 5 至 9 m 的 104 個的不同測試段的 MLST，均呈現振盪反應，其 K 值約介於 6×10^{-4} 至 1.7×10^{-3} m/s 之間，屬高滲透性地層 (中砂、粗砂)。在 4.1 至 4.3 節分述討論 Tw1、Tw2 及 Tw6 三口井不同 l_s 的 $K(z)$ 變化，4.4 節綜合三口井 $K(z)$ 評估最合適測試段長度來執行 MLST。

4.1 井 Tw1 之 K 值結果與討論

Tw1 共執行 55 次連續深度 MLSTs；其中地表下 2.05 至 4.05 m 的 16 個不同測試段長度的 MLSTs 均呈非振盪反應，顯示此深度範圍的水文地質屬於低滲透性的地層。地表下 4.05 至 8.8 m 的 39 個不同測試段長度的 MLSTs 均呈振盪反應，證實此深度範圍的屬高滲透性的地層。Tw1 的 55 組資料分析所得的 K 值列於表 1、2、3、4，相關的 $K(z)$ 則示於圖 13。圖中藍色三角形代表 $l_s=0.25$ m 的 27 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約 3.06×10^{-5} 至 1.19×10^{-3} m/s；紅色圓圈代表以 $l_s=0.5$ m

表1、井 Tw1之MLST資料分析結果($l_s=0.25$ m , $r_w=0.0508$ m , $r_c=0.0135$ m)

水位	編號	Z_c (m)	T_0 (sec)		F [0]	K m/s
非 振 盪 反 應	Tw1-A1	2.175	9.5		0.101	3.83×10^{-5}
	Tw1-A2	2.425	3.55		0.105	1.06×10^{-4}
	Tw1-A3	2.675	3.75		0.108	1.03×10^{-4}
	Tw1-A4	2.925	10.3		0.11	3.83×10^{-5}
	Tw1-A5	3.175	13.1		0.112	3.06×10^{-5}
	Tw1-A6	3.425	11.8		0.113	3.44×10^{-5}
	Tw1-A7	3.675	11.7		0.114	3.5×10^{-5}
	Tw1-A8	3.925	3.5		0.116	1.18×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	Z_c (m)	ω (1/s)	β (1/s)	F [0]	K m/s
	Tw1-A9	4.175	1.37	2.1	0.117	5.94×10^{-4}
	Tw1-A10	4.425	1.43	1.53	0.118	7.26×10^{-4}
	Tw1-A11	4.675	1.65	1.29	0.119	1.04×10^{-3}
	Tw1-A12	4.925	1.43	1.53	0.12	7.37×10^{-4}
	Tw1-A13	5.175	1.48	1.17	0.12	9.35×10^{-4}
	Tw1-A14	5.425	1.45	0.95	0.121	1.07×10^{-3}
	Tw1-A15	5.675	1.32	0.83	0.122	1.01×10^{-3}
	Tw1-A16	5.925	1.28	0.95	0.123	8.65×10^{-4}
	Tw1-A17	6.175	1.29	0.93	0.124	8.97×10^{-4}
	Tw1-A18	6.425	1.36	1.35	0.124	7.63×10^{-4}
	Tw1-A19	6.675	1.32	1.12	0.125	8.25×10^{-4}
	Tw1-A20	6.925	1.26	0.9	0.126	9×10^{-4}
	Tw1-A21	7.175	1.15	0.72	0.127	9.18×10^{-4}
	Tw1-A22	7.425	1.26	0.72	0.128	1.09×10^{-3}
	Tw1-A23	7.675	1.2	0.77	0.129	9.52×10^{-4}
	Tw1-A24	7.925	1.19	0.86	0.13	8.65×10^{-4}
	Tw1-A25	8.175	1.17	0.57	0.131	1.19×10^{-3}
	Tw1-A26	8.425	1.11	0.55	0.132	1.12×10^{-3}
	Tw1-A27	8.675	1.08	0.54	0.133	1.09×10^{-3}

表 2、井 Tw1 之 MLST 資料分析結果($l_s=0.5\text{ m}$ ， $r_w=0.0508\text{ m}$ ， $r_c=0.0135\text{ m}$)

水位	編號	$Z_c(\text{m})$	$T_0(\text{sec})$		$F[0]$	$K\text{ m/s}$
非 振 盪 反 應	Tw1-B1	2.3	3.5		0.073	7.52×10^{-5}
	Tw1-B2	2.8	3.7		0.078	7.55×10^{-5}
	Tw1-B3	3.3	8.7		0.081	3.34×10^{-5}
	Tw1-B4	3.8	3.05		0.083	9.81×10^{-5}
振 盪 反 應	編號	$Z_c(\text{m})$	$\omega(1/\text{s})$	$\beta(1/\text{s})$	$F[0]$	$K\text{ m/s}$
	Tw1-B5	4.3	1.28	0.95	0.086	6.01×10^{-4}
	Tw1-B6	4.8	1.3	0.65	0.088	8.63×10^{-4}
	Tw1-B7	5.3	1.51	0.75	0.089	1.03×10^{-3}
	Tw1-B8	5.8	1.75	1.16	0.091	9.46×10^{-4}
	Tw1-B9	6.3	1.46	1.07	0.092	7.40×10^{-4}
	Tw1-B10	6.8	1.46	0.89	0.093	8.70×10^{-4}
	Tw1-B11	7.3	1.41	0.69	0.095	1.03×10^{-3}
	Tw1-B12	7.8	1.3	0.69	0.096	8.97×10^{-4}
	Tw1-B13	8.3	1.15	0.41	0.098	1.16×10^{-3}

表 3、井 Tw1 之 MLST 資料分析結果($l_s=0.75$ m , $r_w=0.0508$ m , $r_c=0.0135$ m)

水位	編號	Z_c (m)	T_0 (sec)		F [0]	K m/s
非 振 盪 反 應	Tw1-C1	2.425	3.85		0.059	5.46×10^{-5}
	Tw1-C2	3.175	6.35		0.063	3.57×10^{-5}
振 盪 反 應	編號	Z_c (m)	ω (1/s)	β (1/s)	F [0]	K m/s
	Tw1-C3	3.925	1.46	1.09	0.066	5.29×10^{-4}
	Tw1-C4	4.675	1.11	0.37	0.068	8.2×10^{-4}
	Tw1-C5	5.425	1.17	0.38	0.070	9.34×10^{-4}
	Tw1-C6	6.175	1.28	0.54	0.072	8.21×10^{-4}
	Tw1-C7	6.925	1.37	0.58	0.074	8.95×10^{-4}
	Tw1-C8	7.675	1.2	0.43	0.075	9.36×10^{-4}
	Tw1-C9	8.425	1.16	0.32	0.077	1.19×10^{-3}

表 4、井 Tw1 之 MLST 資料分析結果($l_s=1\text{ m}$ ， $r_w=0.0508\text{ m}$ ， $r_c=0.0135\text{ m}$)

水位	編號	$Z_c(\text{m})$	$T_0(\text{sec})$		$F[0]$	$K\text{ m/s}$
非 振 盪 反 應	Tw1-D1	2.55	2.7		0.049	6.55×10^{-5}
	Tw1-D2	3.55	2.91		0.054	6.61×10^{-5}
振 盪 反 應	編號	$Z_c(\text{m})$	$\omega(1/\text{s})$	$\beta(1/\text{s})$	$F[0]$	$K\text{ m/s}$
	Tw1-D3	4.55	1.34	0.52	0.056	7.26×10^{-4}
	Tw1-D4	5.55	1.16	0.32	0.059	9.02×10^{-4}
	Tw1-D5	6.55	1.37	0.52	0.061	8.13×10^{-4}
	Tw1-D6	7.55	1.26	0.41	0.062	8.91×10^{-4}

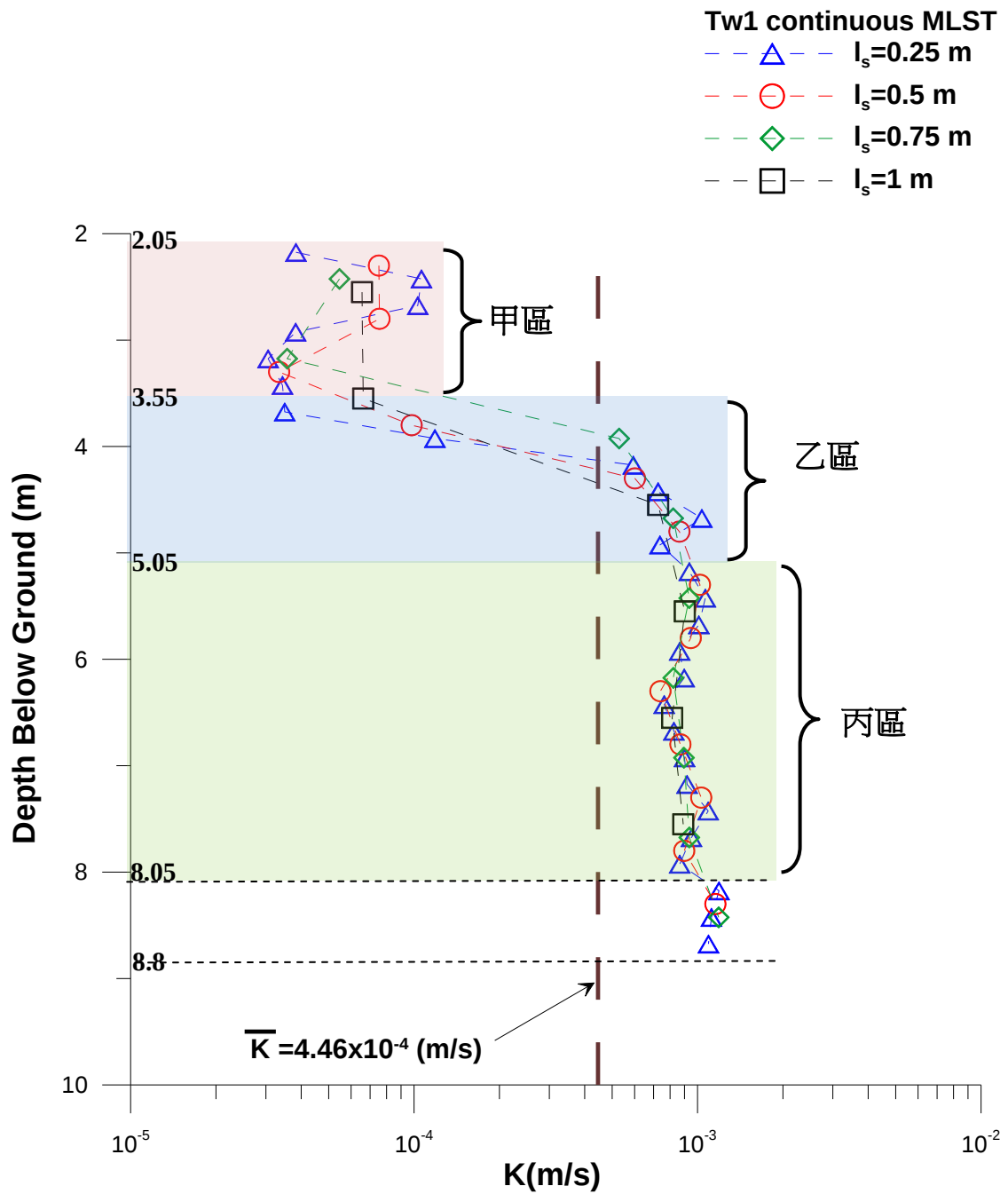


圖 13、Tw1 中四個不同長度測試段的 MLST 所獲得 $K(z)$ 分布和 FST 所獲得的 $\overline{K} = 4.46 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。 $K(z)$ 值變化範圍大約在 3.06×10^{-5} 至 $1.19 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。

的 13 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約 3.34×10^{-5} 至 1.16×10^{-3} m/s；綠色菱形代表以 $l_s=0.75$ m 的 9 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約 3.57×10^{-5} 至 1.19×10^{-3} m/s；黑色方形代表以 $l_s=1$ m 的 6 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約 6.55×10^{-5} 至 9.02×10^{-4} m/s。依據圖 13 的 $K(z)$ 分布，Tw1 附近的水文地質可概略畫分地表下 2.05 至 4.05m 的地質材料為細砂夾粉砂，4.05 至 4.55 m 的地質材料為細砂，4.55 至 8.8 m 的地質材料為中砂，顯示含水層並非均質，而是由不同地質材料與厚度的地層所構成。FST 所得 $\bar{K}=4.46 \times 10^{-4}$ m/s，以虛線示於圖 13。此 $\bar{K}$ 值所對應的地質材料屬細砂層，與可能的異質性變化不符。又 $\bar{K}$ 介於最大值與最小 K 值之間，無法透露 $K(z)$ 變化，且不能界定高、低 K 值位置及範圍，對相關的污染整治設計幫助不大。

至於 l_s 對 $K(z)$ 的影響，我們首先依據 $K(z)$ 的變化程度將地表下 2.05m 至 3.55m 分為甲區，地表下 3.55m 至 5.05m 為乙區，及地表下 5.05m 至 8.05m 為丙區來討論 l_s 的影響。而地表下 8.05 至 8.8 m 的調查範圍沒有 $l_s=1$ m 所得 K 值，故不列入這三區討論。甲、乙、丙三區中，丙區的垂直異質性最小；在 3 m 調查範圍內 $K(z)$ 變化僅由 7.63×10^{-4} 至 1.09×10^{-3} m/s，最大與最小 K 值相差 1.4 倍。甲區的垂直異質性變化較丙區大；在 1.5m 的調查範圍內 $K(z)$ 變化範圍 3.06×10^{-5} 至 1.06×10^{-4} m/s，最大與最小 K 值相差 3.3 倍。乙區的垂直異質性變化最大；在 1.5 m 調查範圍中 $K(z)$ 變化由 3.5×10^{-5} 至 1.04×10^{-3} m/s，最大與最小 K 值相差 29.7 倍。

在同一區內有 n 個使用相同 l_s 的水力傳導係數推估值 K_i , $i=1, 2, \dots, n$ 。我們使用 $\bar{K}_A$ 、 $\bar{K}_B$ 、 $\bar{K}_C$ 、及 $\bar{K}_D$ 分別代表四個不同的測試段長度($l_s=0.25$ m、 $l_s=0.5$ m、 $l_s=0.75$ m、及 $l_s=1.0$ m)的垂直平均水力傳導係數。垂直平均水力傳導係數(Cho et al., 2000; Schwartz and Zhang, 2003)定義為

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^n \frac{K_i l_s}{n \times l_s} \quad (7)$$

舉例來說，圖 13 中甲區從 2.05 至 3.55 m，涵蓋 1.5m 的調查深度範圍，共有 3 個 $l_s=0.5m$ 的 K 值(見表 2 的 Tw1-B1、Tw1-B2、和 Tw1-B3)。其對應的垂直平均 K 值是 $\bar{K}_B = (0.5 \times 7.52 \times 10^{-5} + 0.5 \times 7.55 \times 10^{-5} + 0.5 \times 3.34 \times 10^{-5}) / (0.5 + 0.5 + 0.5) = 6.15 \times 10^{-5} m/s$ 。

由於 $l_s=0.25 m$ 的 $K(z)$ 解析度最佳，我們以 $\bar{K}_A$ 為標準來評估其它三個測試段長度所得 K 值的準確度，進而瞭解測試段長度對 K 值推估的影響。定義三個測試段長度的垂直平均 K 值與 $\bar{K}_A$ 的相對差異比， R_{AB} 、 R_{AC} 、 R_{AD} ，為

$$R_{AB} = \left| \frac{\bar{K}_A - \bar{K}_B}{\bar{K}_A} \right| \quad (8)$$

$$R_{AC} = \left| \frac{\bar{K}_A - \bar{K}_C}{\bar{K}_A} \right| \quad (9)$$

$$R_{AD} = \left| \frac{\bar{K}_A - \bar{K}_D}{\bar{K}_A} \right| \quad (10)$$

當相對差異比越大時，所對應測試段長度的垂直平均 K 值與 $l_s=0.25m$ 的垂直平均 K 值相差越大。在此情況下，這些測試段長度的 $K(z)$ 分布和 $l_s=0.25m$ 的 $K(z)$ 分布會有明顯的差異。

所有的試驗都有一定程度的試驗量測誤差和資料分析誤差，微水試驗（MLST 或 FST）亦不例外。微水試驗的試驗量測誤差主要來自壓力計(pressure transducer)。壓力計的準確度和所量測的壓力變化範圍有關。我們控制每次微水試驗（MLST 或 FST）的初始水位變化 w_0 小於 0.5m，所引起的井水位壓力變化範圍相當小，

所以試驗量測誤差是可以忽略的。微水試驗(MLST 或 FST)的資料分析誤差多源於忽略井邊濾料層、可能之薄壁效應(skin effect)、含水層垂直異向比(vertical anisotropy)、及使用形狀因子來反應井邊流場變化的影響。這些影響造成 K 值推估的誤差依問題情況而定，不易有一定的標準。對一個 MLST 在有垂直異向性的含水層問題，Hyder et al. (1994)視 25 %誤差為可接受的誤差範圍。我們對 R_{AB} 、 R_{AC} 、和 R_{AD} 三個差異比所定的可接受誤差範圍為 $\pm 15\%$ 。舉例而言，若 $R_{AD} > 15\%$ ，則視使用 1m 測試段所得 K 值準確度不夠。

丙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 9.24 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B = 9.17 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C = 8.96 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D = 8.69 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB} = 1\%$ 、 $R_{AC} = 3\%$ 、及 $R_{AD} = 3\%$ 。各個相對差異比均相當小，顯示此在異質性相當小的情況下可選用最長的測試段長度 1m 進行 MLST 以降低工作量和減少調查成本。

甲區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 5.85 \times 10^{-5}$ m/s、 $\bar{K}_B = 6.15 \times 10^{-5}$ m/s、 $\bar{K}_C = 5.29 \times 10^{-5}$ m/s、及 $\bar{K}_D = 6.57 \times 10^{-5}$ m/s，得到 $R_{AB} = 5\%$ 、 $R_{AC} = 10\%$ 、及 $R_{AD} = 12\%$ 。在 1.5m 的調查範圍， R_{AB} 、 R_{AC} 、及 R_{AD} 皆小於 15%可接受誤差範圍，故可選用最長測試段 $l_s = 1$ m 進行 MLST。

乙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 5.41 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B = 5.21 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C = 6.75 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D = 7.04 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB} = 4\%$ 、 $R_{AC} = 25\%$ 、及 $R_{AD} = 30\%$ 。因 R_{AC} 和 R_{AD} 皆超過 15%可接受誤差範圍，顯示用 $l_s = 0.75$ 與 1 m 所得 K 值準確性不夠，故建議選用 0.5 m 的測試段來進行 MLST。

4.2 井 Tw2 之 K 值結果與討論

Tw2 的 MLST 共執行 53 次連續深度 MLSTs；其中地表下 2.35 至 5.1 m 的 22 個不同測試段長度的 MLSTs 均呈非振盪反應，顯示此深度範圍的水文地質屬於低滲透性地層。5.1 m 至 8.85 m 的 31 個不同測試段長度的 MLSTs 均呈振盪反應，證實此深度範圍的水文地質屬高滲透性地層。Tw2 的 53 組資料分析所得的 K 值列於表 5、6、7、8；相對的 $K(z)$ 示於圖 14。圖中藍色三角形代表 $l_s=0.25$ m 的 26 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約為 1.13×10^{-4} 至 1.66×10^{-3} m/s。紅色圓形代表 $l_s=0.5$ m 的 13 個不同深度的 K 值，其變化範圍約 1.49×10^{-4} 至 1.55×10^{-3} m/s。綠色菱形代表以 $l_s=0.75$ m 的 8 個不同深度的 K 值，其變化範圍約 1.2×10^{-4} 至 1.48×10^{-3} m/s。黑色方形代表以 $l_s=1$ m 的 6 個不同深度的 K 值，其變化範圍約 1.6×10^{-4} 至 1.22×10^{-3} m/s。依據圖 14 的 $K(z)$ 分布，Tw2 附近的水文地質可概略畫分為：地表下 2.35 至 3.1 m 的地質材料為細砂，3.1 至 5.1 m 的地質材料為細砂夾粉砂，5.1 至 7.1 m 的地質材料為中砂，7.1 至 8.85 m 的地質材料為粗砂，故可得知含水層是由不同地質材料與厚度的地層所構成，並不是均質、單一地質材料組成。FST 所得的 $\bar{K} = 4.52 \times 10^{-4}$ m/s，以虛線示於圖 14。此 $\bar{K}$ 值所對應的地質材料屬細砂層，介於 MLST 所得 $K(z)$ 範圍之間，無法透露 $K(z)$ 變化。

依據 $K(z)$ 的變化程度將地表下 2.35m 至 3.85m 視為甲區，地表下 4.35m 至 5.85m 為乙區，地表下 5.85m 至 8.35m 為丙區來討論 l_s 的影響。地表下 3.85 至 4.35 m 介於甲、乙兩區之間，而地表下 8.35 至 8.85 m 在丙區之下。這兩個範圍內沒有 $l_s=0.75$ 、1 m 的 K 值，故不列入這三區的討論。三區中，丙區的垂直異質性最小，在 2.5 m 調查範圍內 $K(z)$ 變化由 7×10^{-4} 至 1.66×10^{-3} m/s，最大與最小 K 值相差 2.4 倍。甲區的 $K(z)$ 變化較丙區大；在 1.5m 的調查範圍內 $K(z)$ 變化由 1.13×10^{-4} 至

表 5、井 Tw2 之 MLST 資料分析結果($l_s=0.25$ m , $r_w=0.0508$ m , $r_c=0.0135$ m)

水位	編號	Z_c (m)	T_0 (sec)		F [0]	K m/s
非 振 盪 反 應	Tw2-A1	2.475	1		0.101	3.64×10^{-4}
	Tw2-A2	2.725	1.1		0.105	3.43×10^{-4}
	Tw2-A3	2.975	0.78		0.108	4.95×10^{-4}
	Tw2-A4	3.225	3.5		0.11	1.13×10^{-5}
	Tw2-A5	3.475	2.6		0.112	1.54×10^{-4}
	Tw2-A6	3.725	2.77		0.113	1.46×10^{-4}
	Tw2-A7	3.975	2.56		0.114	1.60×10^{-4}
	Tw2-A8	4.225	2.50		0.116	1.66×10^{-4}
	Tw2-A9	4.475	2.52		0.117	1.66×10^{-4}
	Tw2-A10	4.725	2.58		0.118	1.64×10^{-4}
	Tw2-A11	4.975	1.8		0.119	2.36×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	Z_c (m)	ω (1/s)	β (1/s)	F [0]	K m/s
	Tw2-A12	5.225	1.35	0.95	0.12	9.25×10^{-4}
	Tw2-A13	5.475	1.45	1.17	0.12	9.03×10^{-4}
	Tw2-A14	5.725	1.44	2.12	0.121	6.56×10^{-4}
	Tw2-A15	5.975	1.43	1.77	0.122	7.00×10^{-4}
	Tw2-A16	6.225	1.38	0.76	0.123	1.19×10^{-3}
	Tw2-A17	6.475	1.2	0.76	0.124	9.25×10^{-4}
	Tw2-A18	6.725	1.32	0.98	0.124	9.03×10^{-4}
	Tw2-A19	6.975	1.3	0.9	0.125	9.45×10^{-4}
	Tw2-A20	7.225	1.26	0.6	0.126	1.26×10^{-3}
	Tw2-A21	7.475	1.21	0.53	0.127	1.32×10^{-3}
	Tw2-A22	7.725	1.18	0.4	0.128	1.64×10^{-3}
	Tw2-A23	7.975	1.21	0.49	0.129	1.44×10^{-3}
	Tw2-A24	8.225	1.18	0.4	0.13	1.66×10^{-3}
	Tw2-A25	8.475	1.26	0.5	0.131	1.55×10^{-3}
	Tw2-A26	8.725	1.13	0.4	0.132	1.55×10^{-3}

表 6、井 Tw2 之 MLST 資料分析結果($l_s=0.5$ m, $r_w=0.0508$ m, $r_c=0.0135$ m)

水位	編號	Z_c (m)	T_0 (sec)		F [0]	K m/s
非 振 盪 反 應	Tw2-B1	2.6	0.75		0.073	3.51×10^{-4}
	Tw2-B2	3.1	0.7		0.078	3.99×10^{-4}
	Tw2-B3	3.6	1.95		0.081	1.49×10^{-4}
	Tw2-B4	4.1	1.85		0.083	1.62×10^{-4}
	Tw2-B5	4.6	1.88		0.085	1.63×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	Z_c (m)	ω (1/s)	β (1/s)	F [0]	K m/s
	Tw2-B6	5.1	1.39	0.72	0.087	8.94×10^{-4}
	Tw2-B7	5.6	1.31	0.92	0.089	6.66×10^{-4}
	Tw2-B8	6.1	1.18	0.5	0.09	9.4×10^{-4}
	Tw2-B9	6.6	1.31	0.65	0.091	9.18×10^{-4}
	Tw2-B10	7.1	1.22	0.43	0.093	1.18×10^{-3}
	Tw2-B11	7.6	1.22	0.34	0.094	1.50×10^{-3}
	Tw2-B12	8.1	1.16	0.31	0.095	1.51×10^{-3}
	Tw2-B13	8.6	1.22	0.34	0.097	1.55×10^{-3}

表 7、井 Tw2 之 MLST 資料分析結果($l_s=0.75$ m , $r_w=0.0508$ m , $r_c=0.0135$ m)

水位	編號	Z_c (m)	T_0 (sec)		F [0]	K m/s
非 振 盪 反 應	Tw2-C1	2.725	0.6		0.059	3.50×10^{-4}
	Tw2-C2	3.475	1.9		0.063	1.2×10^{-4}
	Tw2-C3	4.225	1.4		0.066	1.70×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	Z_c (m)	ω (1/s)	β (1/s)	F [0]	K m/s
	Tw2-C4	4.975	1.69	1.19	0.068	6.63×10^{-4}
	Tw2-C5	5.725	1.36	0.67	0.07	7.4×10^{-4}
	Tw2-C6	6.475	1.81	0.93	0.072	9.72×10^{-4}
	Tw2-C7	7.225	1.28	0.41	0.074	1.09×10^{-3}
	Tw2-C8	7.975	1.23	0.28	0.075	1.48×10^{-3}

表 8、井 Tw2 之 MLST 資料分析結果($l_s=1\text{ m}$ ， $r_w=0.0508\text{ m}$ ， $r_c=0.0135\text{ m}$)

水位	編號	$Z_c(\text{m})$	$T_0(\text{sec})$		$F[0]$	$K\text{ m/s}$
非 振 盪 反 應	Tw2-D1	2.85	0.81		0.049	2.18×10^{-4}
	Tw2-D2	3.85	1.2		0.054	1.6×10^{-4}
	Tw2-D3	4.85	1.05		0.056	1.7×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	$Z_c(\text{m})$	$\omega(1/\text{s})$	$\beta(1/\text{s})$	$F[0]$	$K\text{ m/s}$
	Tw2-D4	5.85	1.68	0.74	0.059	8.4×10^{-4}
	Tw2-D5	6.85	1.33	0.32	0.061	1.22×10^{-3}
	Tw2-D6	7.85	1.32	0.28	0.062	1.41×10^{-3}

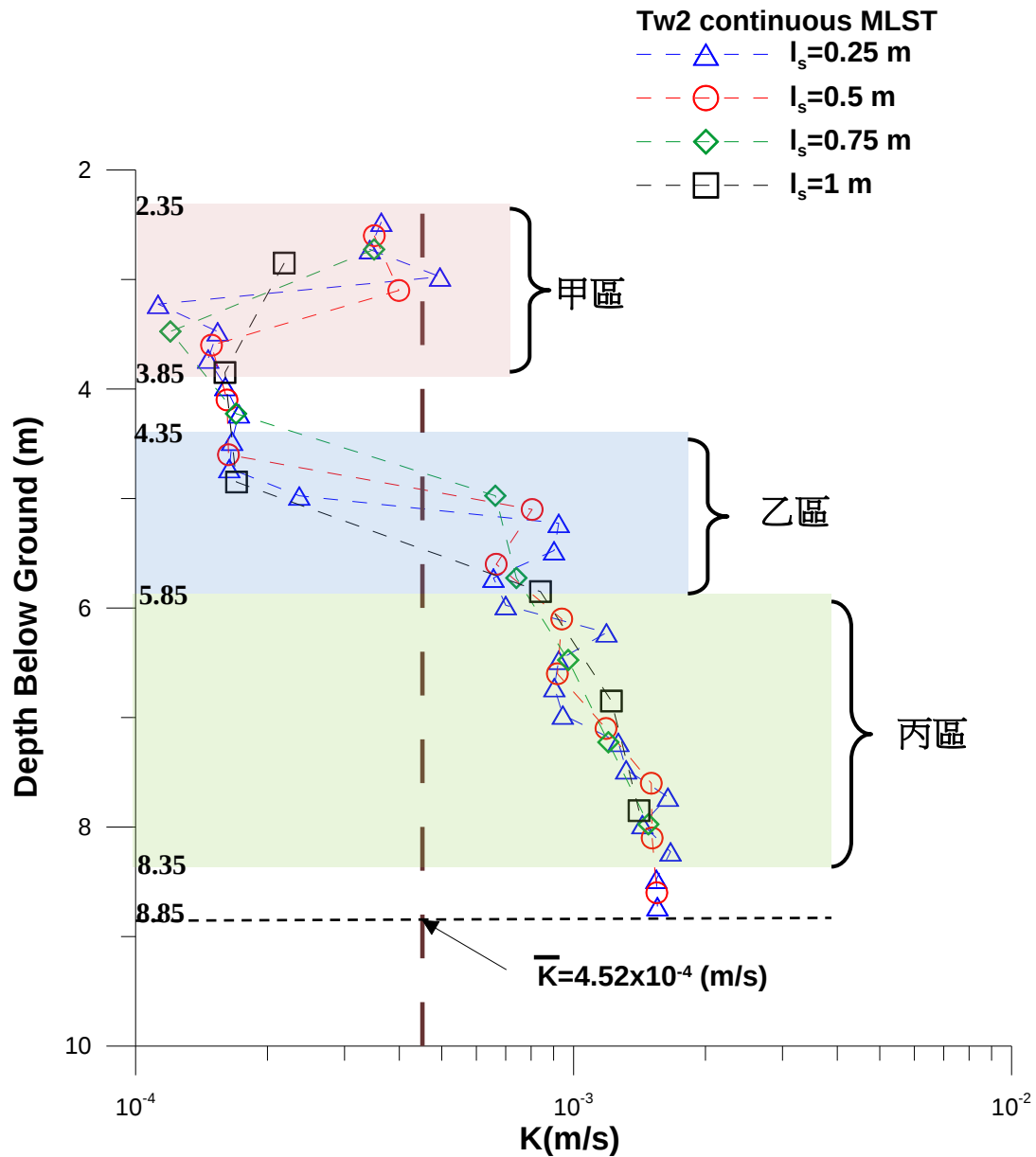


圖 14、Tw2 中使用四個不同長度測試段的 MLST 所獲得 $K(z)$ 分布和 FST 所獲得 $\bar{K}$ 值為 $4.52 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。 $K(z)$ 變化範圍大約為 1.13×10^{-4} 至 $1.66 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。

4.95×10^{-4} m/s，最大與最小 K 值相差 4.4 倍。乙區的 $K(z)$ 變化最大；在 1.5 m 調查範圍中 $K(z)$ 變化由 1.64×10^{-4} 至 9.25×10^{-4} m/s，最大與最小 K 值相差 5.6 倍。

丙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 1.2 \times 10^{-3}$ m/s、 $\bar{K}_B = 1.21 \times 10^{-3}$ m/s、 $\bar{K}_C = 1.17 \times 10^{-3}$ m/s、及 $\bar{K}_D = 1.23 \times 10^{-3}$ m/s，得到 $R_{AB} = 1\%$ 、 $R_{AC} = 3\%$ 、及 $R_{AD} = 3\%$ 。各個相對差異比均相當小，顯示此在異質性相當小的情況下可選用最長的測試段長度 1m 進行 MLST 以降低工作量和減少調查成本。

甲區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 2.69 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B = 3 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C = 2.35 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D = 1.99 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB} = 11\%$ 、 $R_{AC} = 13\%$ 、及 $R_{AD} = 26\%$ 。因 R_{AD} 已超過 15 % 可接受的誤差範圍，顯示使用 1m 所得 $K(z)$ 變化的準確度不夠。 R_{AC} 及 R_{AB} 均小 15 % 可接受的誤差範圍，顯示 $l_s = 0.25$ 、 0.5 、 0.75 m 所得的 K 值均相當一致，故可用三者中最長的測試段 $l_s = 0.75$ m 執行 MLST。又這些定量分析的結果與圖 14 所示 $K(z)$ 的變化相吻合。

乙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 5.08 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B = 5.43 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C = 6.08 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D = 3.93 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB} = 6\%$ 、 $R_{AC} = 20\%$ 、及 $R_{AD} = 23\%$ 。其中僅 R_{AB} 小於 15 % 可接受的誤差範圍，顯示 $l_s = 0.5$ m 及 0.25 m 所得的 K 值相當一致，故可用 0.5 m 的測試段即可獲得充分的 $K(z)$ 解析度。

4.2 井 Tw6 之 K 值結果與討論

Tw6 共執行 50 次連續深度 MLSTs；其中地表下 2.35 至 4.6 m 的 16 個不同測試段長度的 MLSTs 均呈非振盪反應，顯示此深度範圍的水文地質屬於低滲透性的地層。地表下 4.6 m 至 8.35 m 的 34 個不同測試段長度的 MLSTs 均呈振盪反應，

證實此深度範圍的屬高滲透性的地層。Tw6 的 50 組資料分析所得的 K 值列於表 9、10、11、12；相對的 $K(z)$ 示於圖 15。圖中藍色三角形代表 $l_s=0.25$ m 所得的 24 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約自 4.04×10^{-4} 至 1.03×10^{-3} m/s；紅色圓圈代表以 $l_s=0.5$ m 所得的 12 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約自 4.96×10^{-4} 至 9.71×10^{-4} m/s；綠色菱形代表以 $l_s=0.75$ m 所得的 8 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約自 4.82×10^{-4} 至 9.56×10^{-4} m/s；黑色方形代表以 $l_s=1$ m 所得的 6 個不同深度的 K 值，其變化範圍大約自 5.06×10^{-4} 至 9.19×10^{-4} m/s。依據圖 15 的 $K(z)$ 分布，可概略畫分 Tw6 附近的水文地質：地表下 2.35 至 4.6m 的地質材料為細砂，4.6 至 8.35 m 的地質材料為中砂；顯示含水層是由不同地質材料與厚度的地層所構成。FST 所得的 $\bar{K} = 6.51 \times 10^{-4}$ m/s，以虛線示於圖 15。此 $\bar{K}$ 值所對應的地質材料屬細砂層，介於 MLST 所得 $K(z)$ 範圍之間，無法透露 $K(z)$ 變化。

依據 $K(z)$ 的變化程度將地表下 2.35m 至 5.35m 視為選甲區，地表下 5.35m 至 8.35m 為乙區來討論 l_s 的影響。兩區中乙區的垂直異質性最小；在 3 m 調查範圍內 $K(z)$ 變化僅由 6.33×10^{-4} 至 1.03×10^{-3} m/s，最大與最小 K 值相差 1.6 倍。乙區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 8.78 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B = 8.52 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C = 8.51 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D = 8.41 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB}=3\%$ 、 $R_{AC}=3\%$ 、及 $R_{AD}=4\%$ 。各個相對差異比均相當小，顯示此在異質性相當小的情況下可選用最長的測試段長度 1 m 進行 MLST 以降低工作量和減少調查成本。

甲區的 $K(z)$ 變化較乙區大；在 3 m 的調查範圍內 $K(z)$ 變化範圍 4.04×10^{-4} 至 7.48×10^{-4} m/s，最大與最小 K 值相差 1.9 倍。甲區的四個垂直平均 K 值為： $\bar{K}_A = 5.75 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_B = 5.78 \times 10^{-4}$ m/s、 $\bar{K}_C = 5.87 \times 10^{-4}$ m/s、及 $\bar{K}_D = 5.24 \times 10^{-4}$ m/s，得到 $R_{AB}=2\%$ 、 $R_{AC}=2\%$ 、及 $R_{AD}=8\%$ 。各個相對差異比均相當小， R_{AB} 、 R_{AB} 、及 R_{AB} 均

表 9、井 Tw6 之 MLST 資料分析結果($l_s=0.25$ m, $r_w=0.0508$ m、 $r_c=0.0135$ m)

水位	編號	Z_c (m)	T_0 (sec)		F [0]	K m/s
非 振 盪 反 應	Tw6-A1	2.475	0.9		0.101	4.04×10^{-4}
	Tw6-A2	2.725	0.65		0.105	5.80×10^{-4}
	Tw6-A3	2.975	0.63		0.108	6.13×10^{-4}
	Tw6-A4	3.225	0.85		0.110	4.64×10^{-4}
	Tw6-A5	3.475	0.75		0.112	5.34×10^{-4}
	Tw6-A6	3.725	0.68		0.113	5.97×10^{-4}
	Tw6-A7	3.975	0.8		0.114	5.13×10^{-4}
	Tw6-A8	4.225	0.7		0.116	5.92×10^{-4}
	Tw6-A9	4.475	0.82		0.117	5.10×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	Z_c (m)	ω (1/s)	β (1/s)	F [0]	K m/s
	Tw6-A10	4.725	1.74	2.87	0.118	7.48×10^{-4}
	Tw6-A11	4.975	1.73	2.87	0.119	7.49×10^{-4}
	Tw6-A12	5.225	1.39	2.45	0.120	6.01×10^{-4}
	Tw6-A13	5.475	1.39	2	0.120	6.33×10^{-4}
	Tw6-A14	5.725	1.38	1.64	0.121	6.83×10^{-4}
	Tw6-A15	5.975	1.4	0.92	0.122	1.03×10^{-3}
	Tw6-A16	6.225	1.33	1.24	0.123	7.65×10^{-4}
	Tw6-A17	6.475	1.26	1.17	0.124	7.32×10^{-4}
	Tw6-A18	6.725	1.24	0.89	0.124	8.71×10^{-4}
	Tw6-A19	6.975	1.24	0.93	0.125	8.48×10^{-4}
	Tw6-A20	7.225	1.26	0.88	0.126	9.16×10^{-4}
	Tw6-A21	7.475	1.26	0.88	0.127	9.22×10^{-4}
	Tw6-A22	7.725	1.2	0.86	0.128	8.66×10^{-4}
	Tw6-A23	7.975	1.26	0.88	0.129	9.34×10^{-4}
	Tw6-A24	8.225	1.17	1.03	0.130	7.37×10^{-4}

表 10、井 Tw6 之 MLST 資料分析結果($l_s=0.5$ m, $r_w=0.0508$ m, $r_c=0.0135$ m)

水位	編號	Z_c (m)	T_0 (sec)		F [0]	K m/s
非 振 盪 反 應	Tw6-B1	2.6	0.53		0.073	4.96×10^{-4}
	Tw6-B2	3.1	0.55		0.078	5.08×10^{-4}
	Tw6-B3	3.6	0.5		0.081	5.81×10^{-4}
	Tw6-B4	4.1	0.55		0.083	5.44×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	Z_c (m)	ω (1/s)	β (1/s)	F [0]	K m/s
	Tw6-B5	4.6	1.25	0.85	0.085	6.28×10^{-4}
	Tw6-B6	5.1	1.25	0.75	0.087	7.09×10^{-4}
	Tw6-B7	5.6	1.44	1.13	0.089	6.73×10^{-4}
	Tw6-B8	6.1	1.35	0.64	0.090	9.71×10^{-4}
	Tw6-B9	6.6	1.27	0.66	0.091	8.55×10^{-4}
	Tw6-B10	7.1	1.27	0.65	0.093	8.79×10^{-4}
	Tw6-B11	7.6	1.23	0.6	0.094	9.01×10^{-4}
	Tw6-B12	8.1	1.51	1.05	0.095	8.32×10^{-4}

表 11、井 Tw6 之 MLST 資料分析結果($l_s=0.75$ m , $r_w=0.0508$ m 、 $r_c=0.0135$ m)

水位	編號	Z_c (m)	T_0 (sec)		F [0]	K m/s
非 振 盪 反 應	Tw6-C1	2.725	0.35		0.059	6.01×10^{-4}
	Tw6-C2	3.475	0.47		0.063	4.82×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	Z_c (m)	ω (1/s)	β (1/s)	F [0]	K m/s
	Tw6-C3	4.225	1.75	1.71	0.066	5.27×10^{-4}
	Tw6-C4	4.975	1.20	0.5	0.068	7.38×10^{-4}
	Tw6-C5	5.725	1.6	0.8	0.070	8.59×10^{-4}
	Tw6-C6	6.475	1.35	0.68	0.072	7.38×10^{-4}
	Tw6-C7	7.225	1.3	0.55	0.074	8.5×10^{-4}
	Tw6-C8	7.975	1.2	0.42	0.075	9.56×10^{-4}

表 12、井 Tw6 之 MLST 資料分析結果($l_s=1\text{ m}$ ， $r_w=0.0508\text{ m}$ 、 $r_c=0.0135\text{ m}$)

水位	編號	$Z_c(\text{m})$	$T_0(\text{sec})$		$F[0]$	$K\text{ m/s}$
非振盪 反應	Tw6-D1	2.85	0.35		0.049	5.06×10^{-4}
振 盪 反 應	編號	$Z_c(\text{m})$	$\omega(1/\text{s})$	$\beta(1/\text{s})$	$F[0]$	$K\text{ m/s}$
	Tw6-D2	3.85	2.2	2	0.054	5.62×10^{-4}
	Tw6-D3	4.85	1.83	1.23	0.056	6.14×10^{-4}
	Tw6-D4	5.85	1.19	0.42	0.059	7.32×10^{-4}
	Tw6-D5	6.85	1.25	0.4	0.061	8.71×10^{-4}
	Tw6-D6	7.85	1.6	0.65	0.062	9.19×10^{-4}

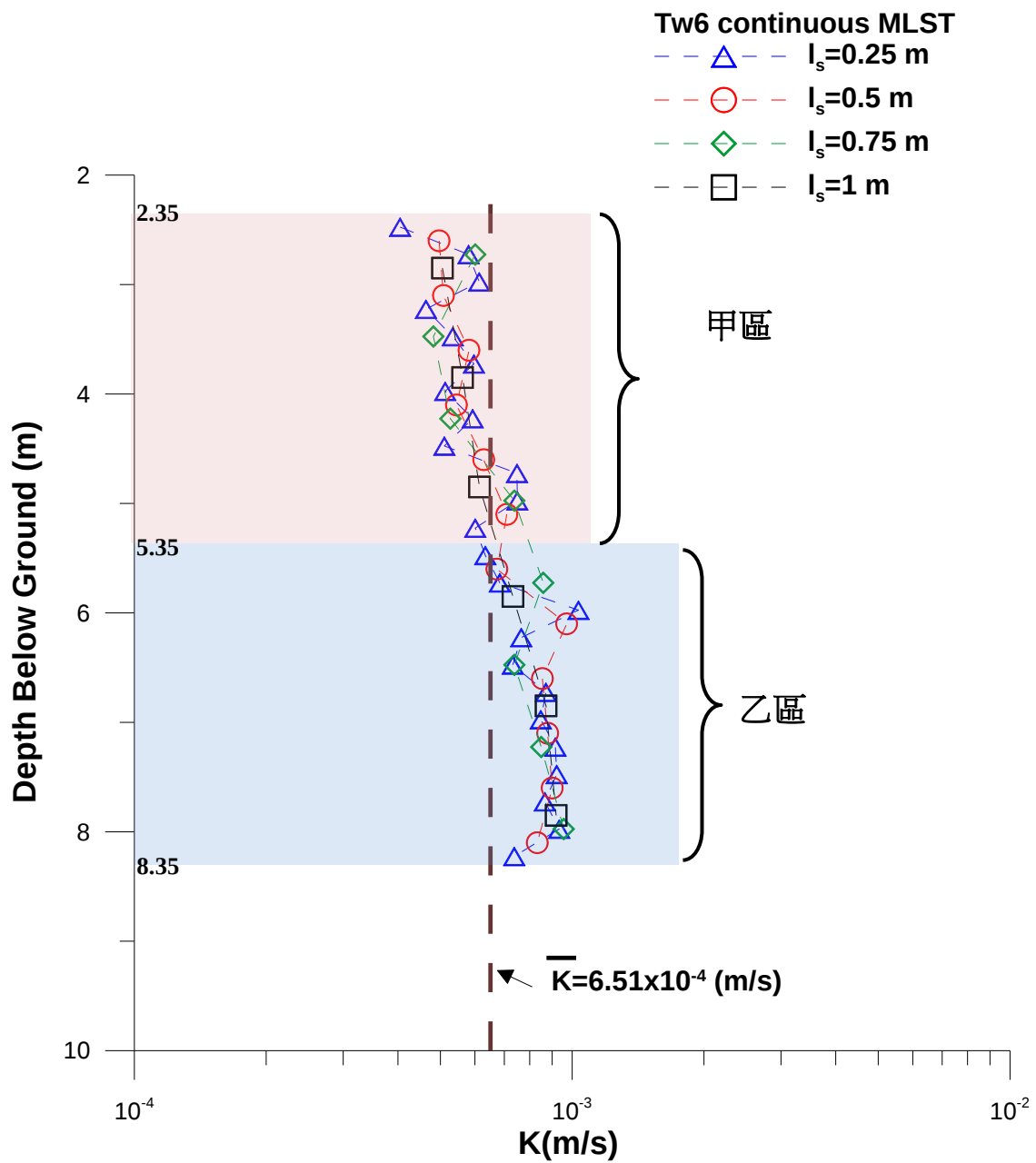


圖 15、Tw6 中使用四個不同長度測試段的 MLST 所獲得 $K(z)$ 分布和 FST 所獲得 $\bar{K}$ 值為 $6.51 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。 $K(z)$ 變化範圍大約為 4.04×10^{-4} 至 $1.03 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。

小於 15%，故可選用最長的測試段長度 1 m 進行 MLST 即可獲得充分的解析度。基本上，Tw6 井周圍的垂直異質性變化相當小；甲區的最大與最小 K 值相差 1.9 倍，乙區的最大與最小 K 值相差 1.6 倍。在這種垂直異質性相當弱的情況下，不同測試段長度對 K 值的垂直平均效應相仿，故不需使用較短的 l_s 來增加 $K(z)$ 的解析度。

4.4 綜合評估測試段長度對 K 值推估影響

當調查範圍固定為 1.5 m 時，Tw1 的甲區最大和最小 K 值為 3.3 倍時， $R_{AB}=5\%$ 、 $R_{AC}=10\%$ 、 $R_{AD}=12\%$ 皆不超過 15% 可接受範圍誤差；Tw1 的乙區最大和最小 K 值高達 29.7 倍時， $R_{AC}=25\%$ 和 $R_{AD}=30\%$ 皆超過 15% 可接受範圍誤差，僅 $R_{AB}=4\%$ 小於 15% 可接受範圍誤差。Tw2 的甲區最大和最小 K 值為 4.4 倍的情況下， $R_{AB}=11\%$ 和 $R_{AC}=13\%$ 均小於 15% 可接受範圍誤差，而 $R_{AD}=26\%$ 超過 15% 可接受範圍誤差。Tw2 的乙區最大和最小 K 值為 5.6 倍的情況下，僅 $R_{AB}=6\%$ 小於 15% 可接受範圍誤差，而 $R_{AC}=20\%$ 和 $R_{AD}=23\%$ 皆超過 15% 可接受範圍誤差。

當調查範圍固定為 3 m 時，Tw1 的丙區最大和最小 K 值為 1.4 倍的情況下， $R_{AB}=1\%$ 、 $R_{AC}=3\%$ 和 $R_{AD}=3\%$ 皆不超過 15% 可接受範圍誤差。Tw6 的甲區最大和最小 K 值為 1.6 倍的情況下， $R_{AB}=3\%$ 、 $R_{AC}=3\%$ 和 $R_{AD}=4\%$ 皆小於 15% 可接受範圍誤差；Tw6 的乙區最大和最小 K 值為 1.9 倍的情況下， $R_{AB}=2\%$ 、 $R_{AC}=2\%$ 和 $R_{AD}=8\%$ 皆小於 15% 可接受範圍誤差。當調查範圍固定為 2.5m 時，Tw2 的丙區最大和最小 K 值為 2.4 倍的情況下， $R_{AB}=1\%$ 、 $R_{AC}=3\%$ 和 $R_{AD}=3\%$ 皆不超過 15% 可接受範圍誤差。

由以上綜和討論得知，在 1.5m 的深度範圍內最大和最小 K 值在 5.6 至 29.7 倍的情況， $l_s=0.5$ m 與 $l_s=0.25$ m 所得的 $K(z)$ 分布相當一致，又用 $l_s=0.5$ m 來執行

MLST 以減少一半的工作量。在 1.5m 的深度範圍內最大和最小 K 值在 5.6 倍以下的情況， $l_s = 0.25$ 、 0.5 和 0.75 m 所得的 $K(z)$ 解析度大約相同，建議可選擇最長 $l_s = 0.75$ m 來執行 MLST。此外，當最大和最小 K 值在 3.3 倍的情況下，無論調查範圍是 1.5m、2.5、或 3m， $l_s = 1$ m 即可獲得相當準確的 $K(z)$ 分布，大幅減少 MLST 工作量和調查成本。

然而進行水文地質調查前，通常事先並不清楚含水層異質性的變化強弱，若貿然使用較長的測試段長度(如 0.75m 甚至 1m)容易喪失 $K(z)$ 的解析度，進而影響三維 $K(x,y,z)$ 的代表性，會錯估高、低 K 層的位置和分布，不利於污染整治的設計和技術選用，也會增加整治的困難性。故在 MLST 現地實驗操作上，建議選用 $l_s = 0.5$ m。

第五章 結論與建議

第五章 結論與建議

受限於雙封塞系統的結構和 MLST 實際施作因素，測試段長度 l_s 以 0.25m 至 1m 為宜。本計畫在三口井使用四個不同測試段長度(0.25m、0.5m、0.75m、及 1.0m)進行 158 次連續深度 MLSTs，和三口井的全篩段微水試驗(full screen slug test, FST)。結果顯示在垂直異質性相當弱的局部深度範圍內，四個測試段長度所得的 $K(z)$ 分布情況相當一致，可選用最長的測試段長度($l_s=1m$)以減少 MLST 工作量。在不同程度的垂直異質情況下， $l_s=1m$ 所得 $K(z)$ 的解析度最差， $l_s=0.25m$ 和 $0.5m$ 所得 $K(z)$ 的解析度大約相同，使用 $l_s=0.5m$ 足以反映垂直異質性變化。由於場址異質性屬事先未知，因此建議測試段長為 0.5m (左右)，以減少 MLST 工作量及調查成本並且兼顧水文地質的變異性。

MLST 可用以有效推估每口井周邊的 K 值垂直分布情況。多口井的 K 值垂直分布則可瞭解場址三維異質性， $K(x,y,z)$ ，對於地下水污染整治提供不可或缺的資訊。FST 所得的 $\bar{K}$ 值代表全篩段的垂直平均水力傳導係數，無法有效反應垂直異質性； $\bar{K}$ 的水文地質代表性並不明確。對場址調查或污染整治設計而言， $\bar{K}$ 較缺乏實用性，故不建議使用全篩段微水試驗進行場址調查。唯 FST 可用於檢驗設井完成後的完井(well development)成效；亦即，於完井前後各做一次全層微水試驗，由兩次所得的平均 $\bar{K}$ 值來確認完井成效。

參 考 文 獻

參考文獻

- Alexander, M., S. J. Berg, and W. A. Illman, 2011. Field study of hydrogeologic characterization methods in a heterogeneous aquifer. *Ground Water*, 49(3), 365-382, doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00729.x
- Arnold, K.B., and F. J. Molz, 2000. In-well hydraulics of the electromagnetic borehole flowmeter: Further study. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 20(1), 52-55.
- Bedient, P. B., H. S. Rifai, and C. J. Newell, 1999. *Ground Water Contamination: Transport and Remediation*, 2nd ed., prentice Hall PTR, NJ, 604pp.
- Bedient, P. B., and W. C. Huber, 2002. *Hydrology and Floodplain Analysis*. 3rd ed., New Jersey: Prentice-Hall.
- Berkowitz, B., S. Emmanuel, and H. Scher, 2008. Non-Fickian transport and multiple-rate mass transfer in porous media. *Water Resour. Res.*, 44, W03402, doi: 10.1029/2007WR0059068,
- Berkowitz, B. S., and H. Scher, 2009. Exploring the nature of non-Fickian transport in laboratory experiments. *Adv. Water Res.*, 32, 750-755, doi: 10.1016/j.advwatres.2008.05.004.
- Bianchi M., C. Zheng, G. R. Tick, and S.M. Gorelick, 2011. Investigation of small-scale preferential flow with a forced-gradient tracer test. *Ground Water*, 49(4), 503-514, doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00746.x
- Boman, G.. K., F. J. Molz, and K.D. Boone. 1997. Borehole flowmeter application in fluvial sediments: Methodology, results, and assessment. *Ground Water*, 35(3), 443–450.
- Bouwer, H. and R.C. Rice, 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of

- unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resour. Res.*, 12(3), 423- 428.
- Butler, J. J. Jr., 1998. *The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
- Butler, J. J. Jr., G. C. Bohling, Z. Hyder, and C. D. McElwee, 1994. The use of slug test to describe vertical variations in hydraulic conductivity. *J. Hydrol.* 156, 137-162.
- Butler, J. J. Jr., G. C. Bohling, Z. Hyder, and C. D. McElwee, 1994. The use of slug test to describe vertical variations in hydraulic conductivity. *J. Hydrol.* 156, 137-162.
- Butler, J. J. Jr., E. J. Garnett and J. M. Healey, 2003: Analysis of slug tests in formations of high hydraulic conductivity, *Ground Water*, **41(5)**, 620-630.
- Butler, J. J. Jr. and X. Zhan, 2003: Hydraulic tests in highly permeable aquifers, *Water Resour. Res.*, **40**, W12402, doi: 10.1029/2003 WR002998.
- Chen and C. R. Wu, 2006 Analysis of depth-dependent pressure head of slug tests in highly permeable aquifers. *Ground Water*, 44(3), 472-477, doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00152x.
- Chen, C. S., 2006. An analytic data analysis method for oscillatory slug tests. *Ground Water*, 44(4), 604- 608, doi:10.1111/j. 1745-6584.2006.00202.x.
- Chen, C. S., 2008. An analytical method of analyzing the oscillatory pressure head measured at any depth in a well casing. *Hydrogeol. Proc.*, 22(8), 1119-1124, doi:10.1002/hyp.6666.
- Chen, C. S., 2011. A review of the the multilevel slug test for characterizing aquifer heterogeneity. *Atmospheric and Oceanic Sciences*. Hy11005.
- Cho, J. S., J. T. Wilson, and F. P. Beck Jr., 2000. Measuring Vertical Profiles of Hydraulic Conductivity with In Situ Direct-Push Methods. *Journal of Environmental Engineering*, 126(8), 775-777.

- Cooper, H. H., Jr., Bredehoeft, J. D. and Papadopoulos, I. S., 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resour. Res.*, 3 (1), 326-269.
- Crisman, S.A., F.J. Molz, D.L. Dunn, and F.C. Sappington. 2001. Application procedures for the electromagnetic borehole flowmeter in shallow unconfined aquifers. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 21(4), 96–100.
- Dagan, G. 1978. A note on packer, slug, and recovery tests in unconfined aquifers . *Water Resour. Res.*, 14(5), 929-934.
- Freeze, R. A. and J. A. Cherry, 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall:Englewood Cliffs. New Jersey.
- Haggerty, R, and S. M. Gorelick, 1995. Multiple-rate mass transfer for modeling diffusion and surface reactions in media with pore-scale heterogeneity, *Water Resour. Res.*, 31(17), 2383-2400.
- Haggerty, R, and S. M. Gorelick ,1998. Modeling mass transfer processes in soil columns with pore-scale heterogeneity, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62(1), 62-74.
- Hvorslev, M. J., 1951. *Time lag and soil permeability in ground-water observations*. U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station Bulletin No. 36, Mississippi, USA.
- Hyder, Z., Butler, J. J., McElwee, C. D., and Liu W. Z., 1994. Slug tests in partially penetrating wells. *Water Resour. Res.*, 30(11), 2945-2957.
- Kabala, Z.J. (1993). The dipole flow test: a new single-borehole test for aquifer characterization. *Water Resources Research* ,29(1): doi: 10.1029/92WR01820. issn: 0043-1397.
- Kipp, K. L. Jr. 1985. Type curve analysis of inertial effects in the response of a well to a slug test. *Water Resour. Res.*, 21(9), 1397-1408.

- Mathias, S. A., and A. P. Butler. 2006. An improvement on Hvorslev's shape factors. *Geotechnique*, 56(10), 705-706.
- Mathias, S. A., and A. P. Butler. 2007. Shape factors for constant-head double-packer permeameters. *Water Resources Research*, 43, W06430. doi : 10.1029/2006WR005279.
- McElwee, C. D. and Zenner M. A., 1998. A nonlinear model for analysis of slug-test data. *Water Resour. Res.*,34(1), 55-66.
- Melville, J. G., F. J. Molz, and M. A. Widdowson. 1991. Multilevel slug tests with comparisons to tracer data . *Ground Water*, 29(6), 897-907.
- Paradis D., Ren´ Lefebvre, R. H. Morin, and E. Gloaguen, 2011. Permeability profiles in granular aquifers using flowmeters in direct-push wells. *Ground Water*, 49(4),534-547, doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00761.x
- Ratnam, S., K. Soga, and R. W. Whittle. 2001. Revisiting the Hvorslev's intake factors using the finite element method. *Géotechnique*,51(7), 641-645.
- Ross, H. C., and C. D. McElwee. 2007. Multi-level slug tests to measure 3-D hydraulic conductivity distributions. *Natural Resources Research*, 16(1), 67-79.
- Brassing, R. 1988. Field hydrogeology, Geological Society of London handbook Series. Open University Press.
- Schumer R., D. A. Benson, M. M., Meerschaert, and B. Baeumer, 2003. Fractal mobile/immobile solute transport. *Water Resour. Res.*, 39(17), 1296, doi: 10.1029/2003WR002141.
- Schwartz, F.W. and H. Zhang, 2003. *Groundwater*. JohnWiley & Sons, Inc., p. 583.
- Sellwood, S. M., J. M. Healey, S. Birk, and J. J. Butler Jr. 2005. Direct-push hydrostratigraphic profiling: Coupling electrical logging and slug tests. *Ground Water*, 43(1), 19-29.

- Springer, R. K., and L. W. Gelhar. 1991. *Characterization of large-scale aquifer heterogeneity in glacial outwash by analysis of slug tests with oscillatory response*. Cape Cod, Massachusetts. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 91-4034*, 3-40.
- Van der Kamp, G. 1976. Determining aquifer transmissivity by means of well response test: The underdamped case . *Water Resour. Res.*, 12(1), 71-77.
- Zemansky, G. M. and C. D. McElwee. 2005. High-resolution slug testing. *Ground Water*, 43(2), 222-230
- Zlotnik, V. A., and V. L. McGuire, 1998a. Multi-level slug tests in highly permeable formations: 2. Hydraulic conductivity identification, method verification, and field applications. *J. Hydrol.*, 204: 283 - 296.
- Zlotnik, V. A., and V. L. McGuire, 1998b. Multi-level slug tests in highly permeable formations: 1. Modification of the Springer-Gelhar (SG) model, *J. Hydrol.*, 204: 271 - 282.
- Zlotnik V. A., B. R. Zurbuchen, and T. Ptak, 1997. Applicability of the dipole flow test (DFT) and multi-level slug test (MLST) in highly conductive sediments: Horkheimer Insel Site, Germany, *Eos Trans. AGU*, 77(46), Fall meeting, Suppl., F192.
- Zlotnik V. A. and Zurbuchen, 1998. Dipole probe: Design and field application of a single-borehole device for measurement of vertical variations of hydraulic conductivity. *Ground Water*, 36(6), 884-893.
- Zlotnik, V. A. and B. R. Zurbuchen. 2003. Field study of hydraulic conductivity in a heterogeneous aquifer: Comparison of single-borehole measurements using different instruments. *Water Resour. Res.*, 39(4), 1101.
- Zlotnik V. A., B. R. Zurbuchen, and T. Ptak, 2001. The steady-state dipole-flow tests for

- characterization of hydraulic conductivity statistics in a highly permeable aquifer: Horkheimer Insel Site, Germany. *Ground Water*, 39(4), 504-516.
- Zhang, Y., D. A. Benson, and B. Baeumer, 2008. Moment analysis for spatiotemporal fractional dispersion. *Water Resour. Res.*, 44, W04424.
- Zhang, Y., D. A. Benson, and D. M. Reeves, 2009. Time and space nonlocalities underlying fractional-derivative models: Distinction and literature review of field applications, *Adv. Water Res.*, 32, 561-581.doi: 10.1016/j.advwatres.2009.01.008.
- Zurbuchen, B. 2011 .*The Dipole Flow Test (DFT) and Applications at the Garvey Elevator Site, Hastings, Nebraska*. U.S. National Association of Remedial Project Managers Report.
- Zurbuchen B. A., V. A. Zoltnik, J. J. Butler Jr., J. Healy, and T. Ptak,1998. Steady-state dipole flow tests in sand and gravel aquifers: Summary of field results. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 30(7), A226.
- Zurbuchen, B. R., V. A. Zlotnik, and J. J. Butler Jr., 2002. Dynamic interpretation of slug test in highly permeable aquifers. *Water Resour. Res.*, 38(3), 1025.
- 孟祥中（2009），水文地層剖析儀與氣壓式微水試驗儀調查淺層含水層水力傳導係數之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 林雅婷（2009），利用雙封塞微水試驗推估裂隙含水層之水力傳導係數。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 孫渥鈞（2011），儲蓄效應對多深度微水試驗參數推估之影響。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 謝云珺（2009），多深度微水試驗之測試段長度對水力傳導係數影響。國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

附 錄

附錄一、預定工作進度與查核點

一、 契約書中計畫預定進度及查核點

預定進度(以甘特圖表示)													
工作內容項目	月次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	年別												
	月份												
1. 第一口井五個不同測試段長度之 MLST													
2. 第二口井五個不同測試段長度之 MLST			※										
3. 第三口井五個不同測試段長度之 MLST						※							
4. 3 口井的資料分析、彙整評估所得 K(z)結果										※			
5. 報告撰寫												※	
預定進度累積百分比(%)		6	12	19	26	33	40	50	60	70	80	90	100
查核點	預定完成時間		查核點內容說明										
第 1 季：	3 月		完成 1.5 口井 5 個不同測試段長度之 MLST。										
期中：	6 月		完成 3 口井 5 個不同測試段長度之 MLST。										
第 3 季：	10 月		完成 3 口井試驗資料分析並彙整評估所得 K(z)結果。										
期末：	12 月		完成報告										

備註：一、上表須經執行單位確認，並明訂於契約書中。二、期中、期末應明列查核重點。

二、 實際預定進度及查核點說明

契約書之預定進度累積百分比 (%)					實際執行進度 (%)		
工作內容項目	實際執行情形	差異分析 (打√)			落後原因	困難檢討及 對策	預計改善完 成日期
		符合	落後	超前			
完成 1.5 口井 5 個不同測試段長 度之 MLST。	19	√			無		
完成 3 口井 5 個 不同測試段長度 之 MLST。	40	√			無		
完成 3 口井試驗 資料分析並彙整 評估所得 K(z)結 果。	80	√			無		
完成報告	100	√			無		
查核點	預定完成時間	查核點內容說明					
第 1 季：	3 月	完成 1.5 口井 5 個不同測試段長度之 MLST。					
期中：	6 月	完成 3 口井 5 個不同測試段長度之 MLST。					
第 3 季：	10 月	完成 3 口井試驗資料分析並彙整評估所得 K(z)結果。					
期末：	12 月	完成報告					

備註：上表於期中、期末審查時，由執行單位提出實際執行情形，明列於報告中，做為審查依據。

附錄二 形狀因子

Hvorslev (1951) 依據測試段之幾何形狀構造與水力特性提出九個不同案例的形狀因子。對受壓含水層我們使用 F_C 代表其形狀因子，對非受壓含水層則用 F_U 。適合 MLST 的 F_C 可由式 A1 決定；適合 MLST 的 F_U 可由式 A2 決定。其他相關形狀因子研究可參考 Moon and Whittle, 1961; Widdowson et al, 1990; Ratnam et al, 2001; Mathias and Butler, 2006, 2007。

$$F_C = 0.5\alpha^{-1} \ln \left[0.5\alpha + \sqrt{1 + 0.25\alpha^2} \right] \quad , l_s < b \quad (A1)$$

其中 $\alpha = l_s/r_w$ 為測試段扁平比(aspect ratio)

Bouwer and Rice (1976) 非受壓含水層之部分貫穿的形狀因子為 F_U ，如下式

$$F_U = 0.5\alpha^{-1} \ln \left(\frac{R_e}{r_w} \right) \quad , l_s < b \quad (A2)$$

$$\ln \left(\frac{R_e}{r_w} \right) = \left[\frac{1}{\ln(L_0/r_w + \alpha)} + \frac{A}{\alpha} + \frac{B}{\alpha} \ln \left(\frac{b-L_0}{r_w} - \alpha \right) \right]^{-1} \quad (A3)$$

其中 R_e 為地下水流影響半徑[L]。 L_0 為井水位至測試段頂部的距離。 A 、 B 為 Bouwer and Rice (1976) 之經驗係數，由下式計算。

$$A = 1.472 + 3.537 \times 10^{-2} l_s / r_w - 8.148 \times 10^{-5} l_s / r_w^2 + 1.028 \times 10^{-7} l_s / r_w^3 - 6.484 \times 10^{-11} l_s / r_w^4 + 1.573 \times 10^{-14} l_s / r_w^5 \quad (\text{A4})$$

$$B = 0.237 + 5.151 \times 10^{-3} l_s / r_w - 2.682 \times 10^{-6} l_s / r_w^2 - 3.491 \times 10^{-10} l_s / r_w^3 + 4.738 \times 10^{-13} l_s / r_w^4 \quad (\text{A5})$$

Dagan (1978) 非受壓含水層之部分浸水情況的形狀因子爲 F_p ，適合 FST 的 F_p 可由式下式決定

$$F_p = 4.32\alpha^{-1} + 0.216 \quad (\text{A6})$$

**附錄五、行政院環境保護署「多深度微水試驗測試段長度對水
力傳導係數推估之影響」計畫結案報告確認表**

項 目	受委託人 自評(符合 者打√)	業務主管 單位複評 (符合者 打√)
一、報告格式		
1. 封面是否註明計畫名稱、計畫編號、「行政院環境保護署委託研究」或「行政院環境保護署編印」字樣(計畫執行單位、計畫執行人員、計畫執行期間及印製年月)	√	
2. 書脊是否註明計畫名稱及「行政院環境保護署」之字樣?	√	
3. 封底是否註明「本報告係受託單位或計畫主持人個人之意見,僅供本署施政之參考」、「本報告之著作財產權屬(委辦者)所有,非經(委辦者)同意,任何人均不得重製、仿製或其他之侵害」及圖書統一標號?	√	
二、報告內文		
4. 是否已撰寫報告基本資料表?	√	
5. 是否已撰寫完整摘要?	√	
(1) 中英文計畫摘要(簡要版,各約三至五百字)	√	
(2) 成果摘要(詳細版,約四千至一萬字)		
6. 是否已撰寫目錄?(含章節目錄、圖表目錄及附件目錄)	√	
7. 是否依規定撰寫前言(報告於前言或緣起內應述明計畫由來及目的、執行進度、經費及各重要工作要項負責執行之人員資歷與專長)	√	
8. 是否依規定撰寫結論與建議?	√	
9. 計畫內若有統計實證是否已述明其操作型定義、問卷架構、方法、回收率、有效度及可信度(無統計實證者免填)		
10. 計畫若有採樣分析,記錄是否完整?(無採樣分析者免填)		
11. 對檢測數據是否已深入探討數據對於環境或研究主題以及政策上之意義(無檢測數據者免填)		
12. 涉及對事實判斷者,是否確實掌握相關資訊(無涉事實判斷者免填)		
13. 應用模式推估之計畫,是否述明模式原理、採用參數及原始資料等(無應用模式推估者免填)		
14. 報告附錄是否依契約齊備(例如:調查問卷、本署審議意見及研究主持人之修正說明、各項座談會紀錄、出國訪問報告、相關統計資料、法規及文件等重要資料)	√	
15. (1) 經費人力分配及工作項目章節是否對應列表 (2) 是否訂定工作流程圖示,並依據所訂流程循序進行並加以說明 (3) 計畫報告內文是否加註參考文獻出處或其他資訊 (計畫經費 500 萬元以下得免填)		

三、本計畫應繳交文件		
16. 計畫報告紙本（15）冊及未設密碼之電子檔（word 檔或 PDF 檔）三份	✓	
17. 中英文計畫摘要紙本及 word 電子檔（簡要版，300-500 字）	✓	
18. 成果摘要紙本及 word 電子檔（詳細版，4,000-10,000 字）	✓	
19. 計畫成果效益自評表紙本及 word 電子檔（非科技計畫者免填）		
20. 重要成果效益報告（依國科會要求填報，非科技計畫者免填）		
21. 計畫執行摘要表（如附件，以 A4 一頁為原則，應經委託單位主管簽名認可，結案時影印送主秘室及科顧室）	✓	
四、其他。		
22. 期末報告審查會議紀錄影本		
23. 期末報告書一本（呈核時須檢附）	✓	
24. 是否已依合約約定之工作項目完成各項工作	✓	
25. 駐署人員出勤狀況是否符合契約規範（檢附計畫執行期間之出勤紀錄表，並由業務主管單位人員核章確認。無駐署人員者請填無）	✓	
26. 金額在一百萬元以上者，如結案併同辦理撥款時，須檢附勞務結算驗收證明書		
27. (1) 計畫執行期限截止日期	12 月 28 日	月 日
(2) 期末報告初稿送署日期	11 月 15 日	月 日
(3) 期末報告審查會日期	月 日	月 日
(4) 期末報告會議紀錄發文日期	月 日	月 日
(5) 期末報告修正本送署日期	月 日	月 日
(6) 期末報告本署核可日期	月 日	月 日
(7) 正式報告送署日期	12 月 21 日	月 日
(8) 本署認可日期	月 日	月 日

28. (1) 確認期末報告電子檔公開方式： ☐ 全文公開：可以全部開放給民眾下載。【請上傳公開完整版】 ☐ 部分公開：已將不公開部分（例如：個人資料、列管場所等）刪除或以代號表示，製成公開版電子檔。【請分別上傳公開版（對民眾公開）及完整版（對署內公開）】 ☐ 完全不公開：屬機敏性專案資料，經____年__月__日簽奉 核准，勿需上網登錄基本資料及上傳期末報告。 計畫單位主管已確認公開方式（請核章）：_____ (2) 確認已將期末報告書本文及附件整合成一個 pdf 或 word 檔上傳且無加密。（期末報告完全不公開者免確認） (3) 期末報告書是否有原始資料？【原始資料分為實（檢）驗類、檢測調查類、問卷調查類及收集彙整類】 ☐ 無，或期末報告完全不公開。 ☐ 有，已上傳且電子檔（Excel 格式）內容確認無誤。 (4) 確認已於本署「環保專案登錄系統」（http://www.epa.gov.tw/epr）完成計畫成果登錄、電子檔上傳及審查。（請加會監資處核對）（專案登錄碼：_____）（期末報告完全不公開者免填）		
29. 研究報告結案後寄送指定寄存圖書館（名單洽綜計處，共 32 處；中央圖書館二份）		
30. 研究報告電子檔送國科會科資中心二份（非科技計畫者免送）		
31. 研究報告全文電子檔（Word 或 PDF）及報告定稿紙本各一份，送科顧室制作光碟（非科技計畫者免送）		

行政院環境保護署 99 年度委託計畫執行摘要

(請本署委託單位撰寫計畫之具體應用情形，以 A4 一頁為原則，於結案時影送主秘室及科顧室)

計畫名稱：多深度微水試驗測試段長度對水力傳導係數推估之影
計畫執行期程：中華民國九十九年十二月起至一〇〇年十二月
執行單位：國立中央大學應用地質研究所
計畫主持人：陳家洵 教授
計畫經費：玖 拾 柒 萬 伍 仟 柒 佰 捌 拾 伍 元整
執行摘要：

本計畫的目的是評估測試段長度對 $K(z)$ 影響，並決定兼顧 $K(z)$ 解析度和 MLST 工作量的測試段長度。在三口井使用四個不同測試段長度($l_s=0.25m$ 、 $0.5m$ 、 $0.75m$ 、及 $1.0m$)進行 158 次 MLSTs 和三次的全篩段微水試驗(full screen slug test, FST)。結果顯示在垂直異質性相當弱的局部深度範圍內，四個測試段長度所得的 $K(z)$ 分布相當一致，可選用最長的測試段長度($l_s=1m$)。在不同程度的異質情況下， $l_s=1m$ 所得 $K(z)$ 的解析度最差， $l_s=0.25m$ 和 $0.5m$ 所得 $K(z)$ 的解析度大約相同，所以使用 $l_s=0.5m$ 足以反映垂直異質性變化。由於場址異質性屬事先未知，因此建議測試段長為 $0.5m$ (左右)，以減少 MLST 工作量及調查成本並且兼顧水文地質的變異性。FST 所得的 $\bar{K}$ 值為全篩段的垂直平均水力傳導係數，無法有效反應垂直異質性； $\bar{K}$ 水文地質代表性並不明確。對場址調查或污染整治設計而言， $\bar{K}$ 較缺乏實用性，故不建議使用全層微水試驗進行場址調查

承辦處(室、所)主管簽名：