

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 地下水位變動對油品滲漏監測之影響 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 100-2221-E-009-126-  
執行期間：100年08月01日至101年07月31日  
執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：單信瑜

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：楊凱仁  
碩士班研究生-兼任助理人員：江潤翰  
碩士班研究生-兼任助理人員：王智緯

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 101 年 08 月 27 日

中文摘要： 加油站地下儲槽滲漏的潛勢隨著使用齡期而提高。為了避免油品滲漏導致其中的有毒物質污染土壤與地下水，必須針對地下儲槽進行監測以及早預警。在監測方法中，土壤氣體監測和地下水監測可以直接偵測地下儲槽洩漏出的物質。因洩漏出的有機化合物由流動與擴散傳輸，故其傳輸路徑可能受到地下儲槽與管線和地下水位升降的影響。再者，土壤氣體監測和地下水監測的有效性也會因之而異。本研究以軟體 TMVOC 模擬儲槽洩漏以評估地下水位變動對監測效果的影響。結果發現土壤透水係數(Kw)較高與孔隙率(n)較小時，由於污染團傳輸速度較快，會提高測漏管的監測效率。且隨著距離洩漏點越遠，效果越明顯。遲滯現象於變動水位模擬的結果雖然有影響，其效果並沒有很明顯，可能是因為洩漏量較少的緣故。本研究成功地以多相流傳輸模擬軟體 TMVOC 模擬加油站儲槽與管線滲漏後，地下水位變動狀態下油品之純相、溶解相、蒸汽相傳輸，並據以評估土壤氣體與地下水監測之有效性。

中文關鍵詞： NAPL、地下儲槽、土壤氣體監測。

英文摘要： Among the leak detection methods for underground storage tanks (USTs), soil gas and groundwater monitoring detect the leaked product directly. The pathway of leaked gasoline flows and diffuses and thus, in turn the effectiveness of soil gas and groundwater monitoring, may be affected by the existence of USTs of gasoline station and the fluctuation of groundwater table such that the effectiveness of soil vapor and groundwater monitoring is affected as a result. In this study, numerical simulation with the software TMVOC was performed in order to assess the effectiveness of soil vapor and groundwater monitoring. The results show that when the leakage occurs at a greater depth, both soil vapor and groundwater monitoring are less effective. Soil vapor monitoring can detect leakage earlier than groundwater monitoring in general; but groundwater monitoring is more effective when the distance from leakage increases. The VOC vapor and groundwater migrate faster when the hydraulic conductivity is higher and porosity is smaller such that the monitoring is more effective. The influence of hysteresis of soil water characteristic curve on

the sensitivity of soil vapor and groundwater monitoring is also studied but was found insignificant.

英文關鍵詞： NAPL, underground storage tank, soil vapor monitoring.

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

地下水位變動對油品滲漏監測之影響

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 100-2221-E-009 -126

執行期間：100 年 8 月 1 日至 101 年 7 月 31 日

執行機構及系所：國立交通大學土木工程學系

計畫主持人：單信瑜

共同主持人：

計畫參與人員：楊凱仁、江潤翰、王智緯

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

赴國外出差或研習心得報告

赴大陸地區出差或研習心得報告

出席國際學術會議心得報告

國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

中 華 民 國 101 年 8 月 8 日

# 地下水位變動對油品滲漏監測之影響

NSC 100-2221-E-009 -126

## 精簡報告

### 摘要

加油站地下儲槽滲漏的潛勢隨著使用齡期而提高。為了避免油品滲漏導致其中的有毒物質污染土壤與地下水，必須針對地下儲槽進行監測以及早預警。在監測方法中，土壤氣體監測和地下水監測可以直接偵測地下儲槽洩漏出的物質。因洩漏出的有機化合物由流動與擴散傳輸，故其傳輸路徑可能受到地下儲槽與管線和地下水位升降的影響。再者，土壤氣體監測和地下水監測的有效性也會因之而異。本研究以軟體 TMVOC 模擬儲槽洩漏以評估地下水位變動對監測效果的影響。結果發現土壤透水係數(Kw)較高與孔隙率(n)較小時，由於污染團傳輸速度較快，會提高測漏管的監測效率。且隨著距離洩漏點越遠，效果越明顯。遲滯現象於變動水位模擬的結果雖然有影響，其效果並沒有很明顯，可能是因為洩漏量較少的緣故。本研究成功地以多相流傳輸模擬軟體 TMVOC 模擬加油站儲槽與管線滲漏後，地下水位變動狀態下油品之純相、溶解相、蒸汽相傳輸，並據以評估土壤氣體與地下水監測之有效性。

關鍵字: NAPL、地下儲槽、土壤氣體監測。

### Abstract

Among the leak detection methods for underground storage tanks (USTs), soil gas and groundwater monitoring detect the leaked product directly. The pathway of leaked gasoline flows and diffuses and thus, in turn the effectiveness of soil gas and groundwater monitoring, may be affected by the existence of USTs of gasoline station and the fluctuation of groundwater table such that the effectiveness of soil vapor and groundwater monitoring is affected as a result. In this study, numerical simulation with the software TMVOC was performed in order to assess the effectiveness of soil vapor and groundwater monitoring. The results show that when the leakage occurs at a greater depth, both soil vapor and groundwater monitoring are less effective. Soil vapor monitoring can detect leakage earlier than groundwater monitoring in general; but groundwater monitoring is more effective when the distance from leakage increases. The VOC vapor and groundwater migrate faster when the hydraulic conductivity is higher and porosity is smaller such that the monitoring is more effective. The influence of hysteresis of soil water characteristic curve on the sensitivity of soil vapor and groundwater monitoring is also studied but was found insignificant.

Keywords: NAPL, underground storage tank, soil vapor monitoring.

## 1、前言

地下儲槽及管線，因材質發生銹蝕或老化的材料受應力扭曲，極易造成破損洩漏。目前台灣與世界各國加油站監測的方法雖以採行多年，但是除了監測儀器本身的精確度經過驗證之外，諸如土壤氣體監測、地下水監測等監測成效和現場水文地質條件以及設施配置緊密相關的方法，其可靠度均未經過詳細之研究。雖然土壤氣體和地下水監測為成本最低且最符合環境監測定義、且全台灣加油站最普遍採用的監測方法，但其監測之有效性卻是監測方法中可靠度最被質疑的。根據資料顯示，國內近十餘年來許多被列為控制場址的加油站，其土壤氣體監測的數據除了極少數幾點超標導致污染被發現之外，大多數並未顯示土壤氣體濃度異常。但經過本團隊以 TMVOC 模擬，土壤氣體濃度應具有足夠之靈敏度，不至於發生未偵測滲漏的狀況。究其原因可能是受到地下水位變動的影響，導致滲漏之油品因地下水位的升降而被困在孔隙中，而且測漏管的效能也同時因地下水位升降影響。

由於台灣地區地下水位季節性變動頗大，在平原地區可達 2-3 m，在丘陵地區更可達 10 m 以上。在油品發生滲漏之後，當地下水位變動時，在非飽和層中或浮動於地下水位面之上的油品將殘留於非飽和層中或地下水位面以下的孔隙中，使得土壤氣體監測和地下水監測的效果受到影響。本研究將針對加油站滲漏時土壤氣體與地下水監測之有效性受地下水位變動的影響，以 TMVOC 模式模擬加以評估。若模擬結果顯示土壤氣體監測確實受到地下水位變動之嚴重影響，則將提出較佳的監測配置與警戒值設定。

## 2、文獻回顧

導致地下水位變化的原因有許多種，其中包括來自於自然和人為現象的「非構造因子」，及來自於地質活動和板塊運動的「構造因子」。在非構造因子中的自然現象，包括：降雨、大氣壓力、溫度、地下含水層分部及附近水系的伏流、地潮、海潮、引力、季節變化等；非構造因子中的人為現象，包括人為的抽取與補注等，甚至於地下含水層附近地表負載

及震動都可能造成地下水位在井裏的振盪(劉政，2005)。

地下水位產生變化在非構造因子中，以降雨為最大的影響因子，其次為大氣壓力與潮汐變化。但這些影響因子對地下水位變化的影響，降雨會因區域性地質現象及含水層分布，導致降雨入滲到含水層時，產生遲延的現象。而大氣壓力與潮汐雖能直接影響水位的變化，但都屬長週期的影響，通常需要 4 至 12 小時。

Marinelli and Durnford (1996)記錄了四點共同觀察現象，由現地的水文地質學家們(hydrogeologists)使碳氫化合物洩漏並且提供和地下水位升降相關的解釋：

1. 監測井可能不會有浮動 LNAPL，即使鄰近的土壤裡已有不少碳氫化合物。這可能發生在由於地下水位的起伏導致碳氫化合物同時殘留於地下水位以上及以下的土壤孔隙中。
2. 監測井中，浮動 LNAPL 的厚度隨著水位上升而減少。當水位上升，油體受限於土壤中，因此少許動態油體能夠進入井中。
3. 在監測井中，LNAPL 可能會突然出現或消失其中。水位突然上升可能會完全困住碳氫化合物，結果使得監測井測不到 LNAPL。Brooks-Corey 模擬提出，在監測井中累積任何 LNAPL 之前，就會有一個最小量的浮動油體存在，當這個存在的量超過一個定值，井中就會突然測得 LNAPL 的存在。
4. 假設水位驟降至一個前所未有的點位，則浮動的 LNAPL 可能會消失。碳氫化合物可能通過土壤的速度變的緩慢，而且其下降的速度並不如水位下降之快。因此這系統便失去平衡，而移動油體明顯的沒有足夠的時間到達新的平衡以及到達監測井中。

在清除 LNAPL 洩降之後，動態的 LNAPL 在撇取井或溝槽中分離，然而，一個完整 LNAPL 的量會殘留在土壤中。揮發性的 LNAPL 可以透過土壤-蒸汽抽取法系統來分離。然而，非揮發性的產物會留在土壤中。此統計根據 LNAPL 的性質以及土壤的結構紋理。土壤中的油體估計其保留容積範圍，礫石約為 5L/m<sup>3</sup>、粉砂為 40 L/m<sup>3</sup> (Testa and

Paczkowski, 1989)。許多碳氫化合物會因為土壤中的細菌降解，特別是有氧的土壤。碳氫化合物洩漏使用生物處理法，漫射氣體至土壤中是最有效的系統。(Fetter, 1999)

Lenhard et al. (1989)曾以數值模擬初步探討 LNAPL 因地下水位變動而被困住的狀況。之後 Lenhard et al. (1993)以實驗量測因地下水位變動被困在孔隙中的 LNAPL。Ryan and Dhir (1996)探討殘留在孔隙中的 LNAPL 之移動性與 Bond number 的關係。其基本概念與毛細力數類似。只要水流夠快或毛細力可降低，則 LNAPL 被困在孔隙中的機會較小。

Kamon et al. (2006)利用實驗室管柱試驗模擬一維地下水位變化對苯分布之影響，並以 NAPL Simulator 程式模擬。在修改程式碼之後，NAPL Simulator 模擬地下水位變化後苯的分布正確性較高。

陳培旻(2010)利用 TMVOC 模擬軟體探討加油站滲漏監測的可靠度。結果顯示 TMVOC 模擬相當良好。整體而言地下水位較高者(地表下 2 m)其土壤氣體與地下水體含苯濃度之監測效果均優於地下水位較低者(地表下 5 m)。但研究中對於污染團傳輸路徑受到障礙物阻擋或洩漏點位置發生於油槽底部而言，其整體之監測效果較不理想，建議可以於油槽底部另外增設監測儀器以彌補監測井之監測盲點。研究之結果中發現影響監測井功效之主要控制因子為「洩漏點之位置」。

液體在非飽和層(Vadoze Zone)中的流動機制較在飽和土壤中複雜許多，如液體因毛細現象運動(Capillary Movement)，而使得排水及出水之間上會有遲滯現象(Hysteresis)，即土壤水保持曲線上會有一遲滯區間(Hysteresis Loop)，使液體在非飽和層中模擬及預測難度增加(單信瑜，張良正，2003)。此外，土壤的乾縮(Shrinking)及膨脹(Swelling)，乾濕速率不同。孔隙表面的粗糙程度等都會影響土壤遲滯效應 (Davidson et al., 1996; Demond and Roberts, 1991)。

在非飽和層中，因土壤水分會因乾燥、濕潤交替歷程而產生遲滯現象，但大部分的研究為避免複雜計算而忽略。但在入滲及蒸發兩者交替的歷程是不能忽略 (Royer and Vachaud, 1975)，一般在土壤水分估計計算上，多未能真實反應土壤水分變化情形，要準確

計算必須在乾燥、濕潤交替歷程中考慮遲滯現象 (Beese and van der Ploeg, 1976)。在排水過程中，受到空氣進入值影響甚大，若土壤含有較大空氣進入值時，在排水初期會有基質水頭變化而含水量不變之情形，此現象使得一般預測值在低負基質水頭會有高估含水量現象。

### 3、研究方法

本研究將以 TMVOC 模擬加油站滲漏與地下水位變動情形，完成網格之建立後再建立不同深度之穩定地下水位狀態，最後於油槽區內進行油品污染物洩漏之模擬，如圖 3-1 所示。

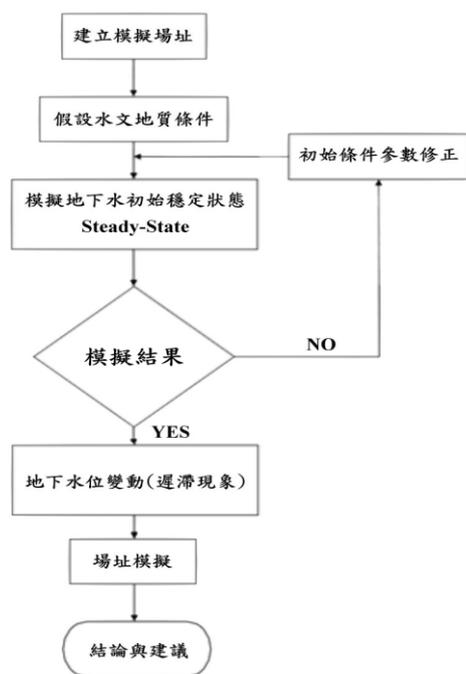


圖 3-1 研究架構與方法

本研究中，將忽略邊界效應之敏感度，使用 120 m×120 m 研究模型(Case 1)，尚增加 100 m×80 m 之模型(Case 2)。

表 3-1 邊界範圍說明

邊界範圍	模型尺寸 (m)
四周各 1 倍之方形為模擬區域	120×120 (case 1)
四周分長形為主要模擬區域	100×80 (case 2)

會影響未飽和層中地下水的流動與污染物的傳輸之因數甚多，如:透水係數、土壤孔隙率、土壤含水量、其他土壤參數等；而於 TMVOC 之操作界面中，土層之透水係數是

以絕對滲透係數(Permeability,  $L^2$ )表示之。相關假設如表 3-2，地下水位於地表下 2 m。而一般垂直透水係數約為水平透水係數之 1/5~1/100 間(Noonan and Curtis, 1990; Testa and Winegardner, 1991; Nyer, 1993; Domenico and Schwartz, 1998)，因此垂直之絕對滲透係數分別為  $5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  與  $5.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ ，土壤孔隙率分別為 0.3、0.4，水力梯度均採 0.005。

表 3-2 土壤參數變化說明

絕對滲透係數 ( $\text{m}^2$ )	透水係數 $K_w$ (cm/sec)	孔隙率
$2.5 \times 10^{-11}$	$2.74 \times 10^{-2}$	0.4
$2.5 \times 10^{-12}$	$2.74 \times 10^{-3}$	
$2.5 \times 10^{-12}$	$2.74 \times 10^{-3}$	0.3

本模擬場址是以中型加油站為參考場址其站區範圍為：長 40 m、寬 40 m；而模擬深度至地下 10 m。而為避免邊界效應因此將數值模擬區域之四個邊界往外再延伸一倍模擬範圍，每個模擬範圍長為 40 m，寬為 40 m，整個數值模型尺寸長為 120 m、寬為 120 m 及 100 m 長、80 m 寬兩種。深度模擬至地下 10 m。並於 X 軸、Y 軸、Z 軸分割網格。於主要模擬區內，油槽區之網格再細分：於 X 軸與 Y 軸分割為 1 m/grid，Z 軸則為 0.5 m/grid。

土層之相對滲透率與三相系統之毛細壓力曲線則參考 Kererat and Soralump (2010) 之研究模型，整理如表 3-3、表 3-4；土壤/水-汽油保持曲線，由毛細壓力曲線參數(表 3-4)搭配 TMVOC 中之 Parker's model 即可求得。

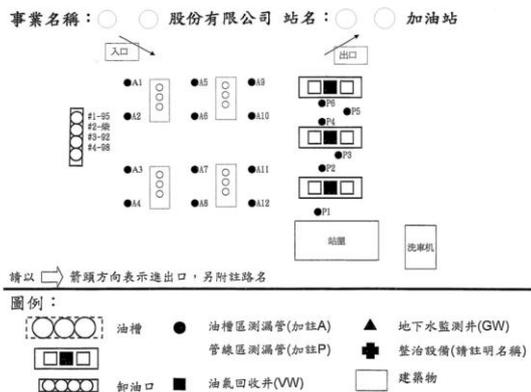


圖 3-2 加油站配置示意圖

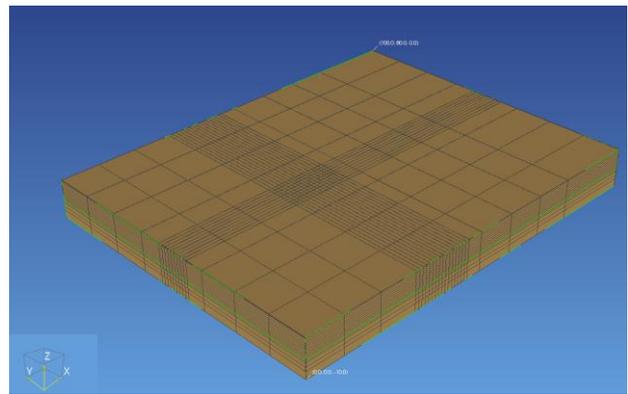


圖 3-3 TMVOC 數值模擬之模型網格示意圖(Case 2)

表 3-3 相對滲透係數參數(Stone's model)

參數 材料	$S_{wr}$	$S_{nr}$	$S_{gr}$	n exponent
大氣層	0.1	0.05	0.05	3
土壤	0.1	0.05	0.05	3

註:  $S_{wr}$  為殘餘水相飽和度、 $S_{nr}$  為殘餘 NAPL 相飽和度、 $S_{gr}$  為殘餘汽相飽和度

表 3-4 毛細壓力曲線參數(Parker's model)

參數 材料	$S_m$	$\alpha_{gn}$	$\alpha_{nw}$	n exponent
大氣層	—	—	—	—
土壤	0	100	110	1.84
土壤	0	450	450	1.6636

(hysteresis)

註:  $S_m$  為極限飽和度、 $\alpha_{gn}$  為強度參數(氣-NAPL 相)、 $\alpha_{nw}$  為強度參數(NAPL-水相)

本加油站內之儲槽區假定設有儲油量為 55 公秉之儲油槽 4 個，其尺寸為直徑 3 m、長度 8.2 m，埋設於地表下 1 m 處，符合規範之油槽頂部距地表至少 0.6 m 之規定，而地下水水位部分則假設為在地表下 2 m、5 m 處。

在 TMVOC 中土層之邊界條件的假設可以設為: Dirichlet Boundary Condition 即為定水頭邊界與 Neuman Boundary Condition 即為無通量(No Flow)邊界(Pruess and Battistelli, 2002)。

於本研究中之模擬區域由於假設水力梯度為 0.005，且於模擬進行中時，上下游之水頭須維持不變。因此將模擬區域之邊界設定為定水頭邊界，而地表面則為大氣壓力邊界(Atmospheric Pressure Boundary Condition)，並且假設地表無逕流。

由於需要於主要模擬區域中配置地下儲油槽 4 個，然而 TMVOC 僅提供使用者於模

擬區域中改變土壤參數，並無法置入非土壤材料。地下儲槽區之網格式態設定為 Disabled 狀態，使得於模擬期間地下儲槽區之狀態維持不變，以符合現實狀況中污染物無法滲入地下儲槽。

為得到較密集之模擬資料以及為了減少網格式數與執行模擬所需之時間，因此將監測井儘量靠近油品洩漏點以及縮小監測井間之距離，因此採每一監測井間之距離為 3 m，共設置 11 支監測井如圖 3-4。監測井的設置深度，為顧及當地下水位於地表下 5 m 時，仍能獲得不飽和層之氣體濃度與飽和層中之水中濃度，因此設置深度達地表下 6 m。

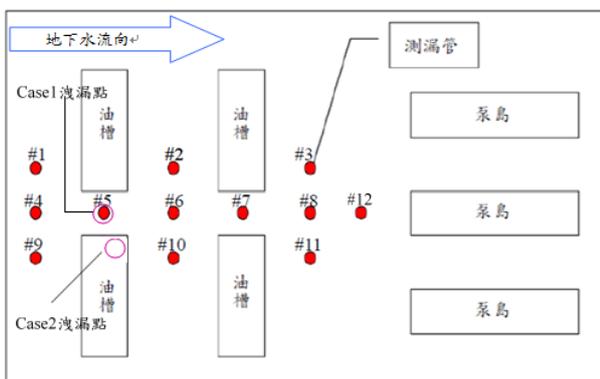


圖 3-4 監測井與油槽之相關位置示意圖

本模擬總時間為 360 天(約 1 年計)，水位升降以半年為單位設定，每個 Case 起始水位各有兩種，如 Case 1-1 水位設定為 0 至 180 天水位由地下 2 m 下降至地下 5 m，第 180 至 360 天水位再由地下 5 m 上升至地下 2 m(表 3-6)。Case 1-2 水位設定則由地下 5 m 開始模擬。Case 2 模擬方式如 Case 1，但是水位設定只到地下 4 m。

表 3-5 地下水位設定

地下水位 (-m) 案例	時間 (day)		
	0	180	360
Case 1	2	5	2
Case 1	5	2	5
Case 2	2	4	2
Case 2	4	2	4

遲滯現象之模擬則在 Case 1、Case 2 中各再增加一組模擬，來對照未加入遲滯現象(H)的模擬情形。

表 3-6 加入遲滯現象之模擬(H 為遲滯現象)

Time(days)	0-180	180-360
地下水(-m)		
Case 1	2 — 5	5 — 2
Case 1	2 — 5	5H — 2H
Case 1	5 — 2	2 — 5
Case 1	5H — 2H	2 — 5
Case 2	2 — 4	4 — 2
Case 2	2 — 4	4H — 2H
Case 2	4 — 2	2 — 4
Case 2	4H — 2H	2 — 4

表 3-7 汽油組成成份及百分比

汽油組成成份		
成分	範例	百分比(%)
正烷類	MTBE	18
芳香族	苯	3.5
	乙苯	5.5
	甲苯	7
	二甲苯	1.5
脂肪族	庚烷	20
	異辛烷	20
	環戊烷	24.5

一般加油站油品的洩漏約以 10 L/day ~ 100 L/day 不等的速率洩漏，而於美國規範中，加油站之測漏管應能於 30 天內測得 150 加侖之油品洩漏事件，即平均每天以 5 加侖之速度洩漏(約為 19 L/Day)；環保署(2006)於「加油站防止污染地下水體設施及監測設備管理辦法」中明訂對於偵測靈敏度要求須能達 0.2 gal/hr 之水準(即為 4.8 加侖/天)。因此於本研究中原本均假設其油品之洩漏速率為 5 gal/day，但是由於軟體模擬時間過長，因此在油品洩漏速率進行調整；並連續注入油品(約 1 年)360 天。於本研究中在此假設 2 種不同位置發生油品洩漏分別概述如下：

Case 1：因發生鏽蝕、或外力造成破損而產生油品洩漏，且於下游處受到油槽阻擋。洩漏點於加油區內之輸油管線，距離入口之地界線 21 m；與左側臨地之地界線距 14 m；深度於地表下 1 m 處。

Case 2：因發生破損而產生油品洩漏。洩漏點於儲油槽之底部，距離入口之地界線 23 m；與左側臨地之地界線距 15 m；深度於地表下 4 m 處。

油品的洩漏速率分別為 1.35 gal/day (Case 1)、1.5 gal/day (Case 2)，其注入模擬時間達到 360 日(約 1 年)，分別依照不同的地下水位變化(如 Case 1 之 2-5-2 m、5-2-5 m；

Case 2 之 2-4-2 m、4-2-4 m)、透水係數 ( $2.74 \times 10^{-2}$ 、 $2.74 \times 10^{-3}$  cm/sec)、孔隙率( $n=0.3$ 、 $0.4$ )、及不同的洩漏點位置(Case 1—儲槽區內之輸油管線、Case 2—儲油槽下方)、遲滯現象的加入，來進行資料整理及分析。並以各測漏管之網格資料分別篩選出不飽和層之平均土壤氣體濃度( $X_{Gas}$ )與溶解於地下水中之苯溶解相濃度( $X_{Liq}$ )。最後列出各監測井達到規範中「有油氣污染滲漏之虞」之土壤氣體濃度(500 ppmV)時間及達第二類地下水污染管制標準中苯含量達 0.05 mg/L 警戒值之時間。模擬結果以 12 支監測井表示不同位置氣相與地下水中 VOC 濃度，位置如圖 3-11，其油品洩漏點附近之監測井中土壤氣體濃度與地下水含苯濃度值其分別達到警示值之時間與地下水位、透水係數間之關係統整於表 3-8。

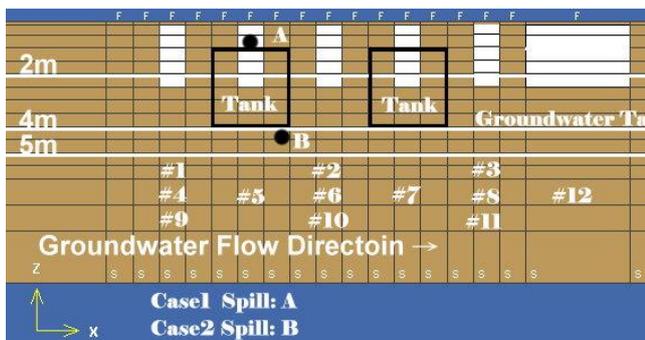


圖 3-11 模擬示意圖

表 3-8 傳輸模擬之影響因子

洩漏速率 (gal/day)	1.35、1.5
洩漏點位置	儲槽區內管線、儲油槽下方
地下水位變化(m)	252、525、242、424
透水係數(cm/sec)	$2.74 \times 10^{-2}$ 、 $2.74 \times 10^{-3}$
孔隙率(n)	0.3、0.4
遲滯現象	有、無

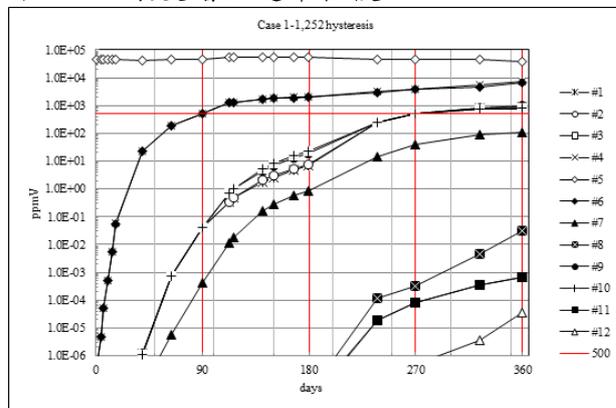
## 4、結果與討論

本研究以 TMVOC 模擬所得之各假設滲漏情境下的測漏管中 VOC 濃度變化與地下水中溶解相 VOC 濃度變化如圖 4-1 與 4-2 所示。因所得出之類似圖甚多，因此僅以 Case 1-1 為例。

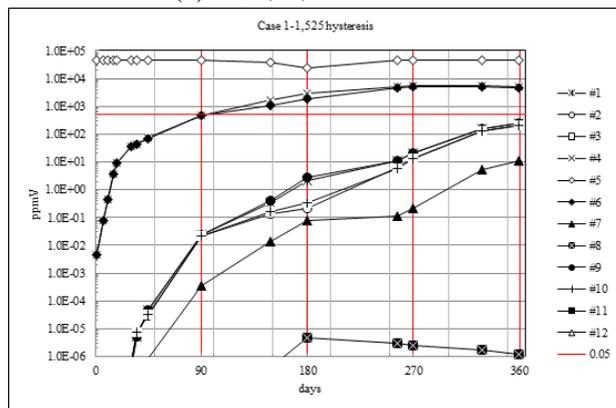
### 4.1 地下水位變動之影響

由圖 4-1 中可知當地下水位較低時(5-2-5)測漏管的靈敏度(亦即特定時間 VOC 濃度)

較高。因此，由圖 4-1(a)與(b)比較可看出，一開始地下水位較低者(5-2-5)測漏管中 VOC 濃度增加較快。當地下水位升降時，測漏管中的 VOC 濃度也跟著改變，2-5-2 案例中地下水位下降時測漏管中 VOC 增加速度較快；5-2-5 案例中地下水位升高時，測漏管中 VOC 濃度增加速率較慢。



(a) 地下水位 2-5-2 m

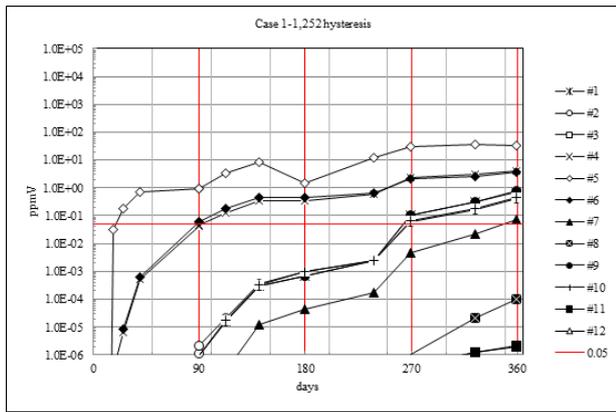


(b) 地下水位 5-2-5 m

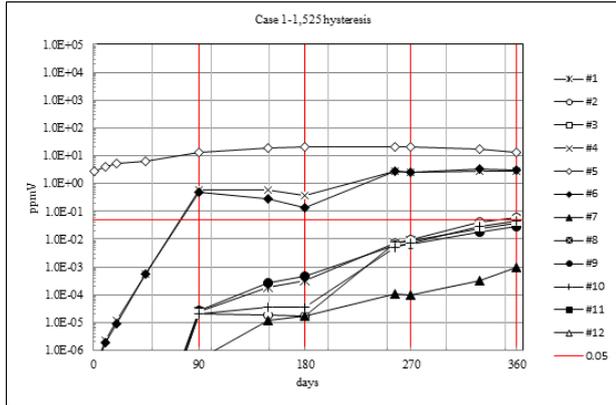
圖 4-1 Case 1-1(hysteresis)測漏管土壤氣體濃度圖

圖 4-1 與 4-2 中的紅色水平線，代表固定水位及變動水位下土壤氣體及地下水含苯濃度達警戒值 500 ppmV 及 0.05 mg/L(ppm)。

由圖 4-2 中可看出，整體而言在若滲漏發生在地下水位較高或較低時對早期監測井中 VOC 濃度影響不大，但隨著油品逐漸下滲至接觸到地下水位，則地下水位的位置和變化趨勢就會造成影響。如圖 4-2(a)中水位逐漸由地表下 5 m 回升至 2 m 過程中接觸油品面積較大，監測井中的 VOC 濃度增加較快。但在圖 4-2 (b)中，此時反而地下水位逐漸下降，因此地下水與油品接觸面積較小，故下游監測井中 VOC 濃度變化較為緩慢。



(a) 地下水位 2-5-2 m



(b) 地下水位 5-2-5 m

圖 4-2 Case 1-1 (hysteresis) 監測井地下水體含苯濃度圖

由於模擬的測漏管及監測井數量很多，因此只選擇最具代表性或距離洩漏點較近的土壤氣體測漏管或地下水監測井，較容易看出變化者來說明。固定水位的情形下，測漏管監測到土壤氣體濃度及地下水含苯濃度的情形會比水位變動時的狀況來的好。

Case 1 分別位於上、下游的測漏管#4 與 #6，和洩漏點的距離皆為 3 m，由表 4-8 4-1 (a) Case 1-1 中，可以看出這兩支測漏管測到土壤氣體濃度達 500 ppmV 警戒值之天數非常皆近。於固定水位 2 m 下，Case 1-1 測漏管 #4 與 #6 達到土壤氣體濃度值的門檻時皆為 29 天、Case 1-2 為 37 天，Case 1-3 為 26 天。在變動水位 2-5-2 m 下，Case 1-1 之測漏管 #4 與 #6 達到警戒值標準時為 90 天、Case 1-2 為 117 天、Case 1-3 為 42 天。不論固定水位或變動水位，有遲滯者皆與未加入遲滯者相同。至於固定水位 5 m 監測時間 Case 1-1 為 51 天、Case 1-2 為 59 天、Case 1-3 為 22 天；變動水位 5-2-5 m 時，測漏管 #4 的 Case 1-1、Case 1-2、

Case 1-3 監測達門檻時間分別為 85 天、110 天、57 天。有遲滯者為 92、144、53 天。測漏管 #6 在固定水位 5 m 為 Case 1-1 至 Case 1-3 分別為 85、135、57 天，有遲滯者為 94、140、53 天。

由土壤氣體濃度的監測來看，水位固定的情況下皆能較快速的偵測到土壤氣體濃度超過標準值；水位有變動情形者，通常需要花比較長的時間才能監測到土壤氣體濃度達到警戒標準。

地下水中苯濃度的部分(表 4-1 (a))，於固定水位的情形下，水位無論是在地下 2 m 或 5 m 時，地下水監測井偵測到水中苯濃度警戒值的時間均相同。如水位在 2 m 時，Case 1-1 監測井 #4 與 #6 所花的時間為 35 天；Case 1-2 為 47 天，Case 1-3 為 30 天。固定水位在 5 m 時，Case 1-1 偵測時間為 44 天；Case 1-2 為 57 天；Case 1-3 為 55 天。變動水位下(表 4-2 (a))為 2-5-2 m 時，Case 1-1 的監測井 #4 偵測到水中苯濃度達警戒值時間為 92 天；Case 1-2 為 125 天；Case 1-3 為 77 天。監測井 #6，Case 1-1 為 88 天；Case 1-2 為 120 天；Case 1-3 為 75 天。水位在 5-2-5 m 時，監測井 #4 偵測所需時間 Case 1-1 為 142 天；Case 1-2 為 140 天；Case 1-3 為 160 天。

比較地下水中含苯濃度的狀況，Case 1-1 固定水位 2 m 與變動水位 2-5-2 m 相比(表 4-1 (a)、4-2 (a))，2 m 達 0.05 mg/L(ppm)的測定標準所需要的時間為 35 天，2-5-2 m 為 92 天，相差 57 天；固定水位 5 m 與變動水位 5-2-5 m 為 44 天及 142 天，相差 98 天。Case 1-2 固定水位 2 m 為 47 天，變動水位 2-5-2 m 為 125 天，相差 78 天；5 m 與 5-2-5 m 為 57 天及 140 天，相差 93 天。Case 1-3，2 m 與 2-5-2 m 分別為 30 天與 77 天，相差 47 天；5 m 與 5-2-5 m 為 55 與 160 天，相差 95 天。其分析結果與土壤氣體濃度的測定狀況相同，地下水中含苯濃度的測定值，達到警戒標準的時間依然是固定水位的時候比變動水位要快的許多，差異較大甚至達到 3 個月之久，水位變動確實使得監測井偵測濃度時間增加的情形。

表 4-1 (a) Case 1 定水位監測井土壤氣體及地下水含苯濃度值達警戒所需時間(day)

Case 1(gas) <sup>1</sup>	Case 1-1		Case 1-2		Case 1-3	
孔隙率(%)	0.3		0.4		0.4	
透水係數 K <sub>w</sub> (cm/sec)	2.74×10 <sup>-3</sup>		2.74×10 <sup>-3</sup>		2.74×10 <sup>-2</sup>	
洩漏速率(gal/day)	1.35					
起始水位(-m)	2	5	2	5	2	5
500ppmV	gas					
#1	91	182	119	167	77	64
#2	91	182	119	167	77	66
#3	-	-	-	-	253	-
#4	29	51	37	59	26	22
#5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
#6	29	51	37	59	26	22
#7	131	311	170	-	110	82
#8	310	-	-	-	181	180
#9	91	193	119	167	79	64
#10	91	182	119	167	77	66
#11	-	-	-	-	217	-
#12	-	-	-	-	311	-
Case 1(aq) <sup>2</sup>	aq					
#1	96	114	129	147	73	93
#2	96	114	129	147	73	-
#3		-	-	-	73	275
#4	35	44	47	57	30	55
#5	2	9	3	11	11	33
#6	35	44	47	57	30	55
#7	141	176	189	235	100	33
#8		319	-	-	203	240
#9	96	114	129	147	72	93
#10	96	114	129	147	73	93
#11	-	-	-	-	293	275
#12	-	-	-	-	-	-

註：<sup>(1)</sup>：土壤氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)

註：<sup>(2)</sup>：地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)

表 4-1 (b) Case 2 定水位監測井土壤氣體及地下水含苯濃度值達警戒所需時間(day)

Case 2(gas) <sup>1</sup>	Case 2-1		Case 2-2		Case 2-3	
孔隙率(%)	0.3		0.4		0.4	
透水係數 K <sub>w</sub> (cm/sec)	2.74×10 <sup>-3</sup>		2.74×10 <sup>-3</sup>		2.74×10 <sup>-2</sup>	
洩漏速率(gal/day)	1.5					
起始水位(-m)	2	4	2	4	2	4
500ppmV	gas					
#1	-	-	-	-	-	-
#2	-	-	-	-	-	-
#3	-	-	-	-	-	-
#4	-	-	-	-	354	-
#5	134	-	170	-	106	-
#6	174	-	226	-	135	-
#7	-	-	-	-	238	-
#8	-	-	-	-	-	-
#9	-	-	-	-	-	-
#10	134	-	170	-	106	-
#11	-	-	-	-	-	-
#12	-	-	-	-	-	-
Case 2(aq) <sup>2</sup>	aq					
#1	-	-	-	-	314	-
#2	-	-	-	-	196	277
#3	-	-	-	-	-	-
#4	336	335	342	-	160	208
#5	68	105	86	118	44	72
#6	108	140	148	190	82	109
#7	-	-	-	-	198	277
#8	-	-	-	-	-	-
#9	342	258	-	344	200	169
#10	68	105	86	118	44	72
#11	-	-	-	-	-	-
#12	-	-	-	-	-	-

註：(1)：土壤氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)

註：(2)：地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)

表 4-2 (a) Case 1 變水位監測井土壤氣體及地下水含苯濃度值達警戒所需時間(day)

Case 1(gas) <sup>1</sup>	Case 1-1				Case 1-2				Case 1-3			
孔隙率(%)	0.3				0.4				0.4			
透水係數 K <sub>w</sub> (cm/sec)	2.74×10 <sup>-3</sup>				2.74×10 <sup>-3</sup>				2.74×10 <sup>-2</sup>			
洩漏速率(gal/day)	1.35											
起始水位(-m)	252		525		252		525		252		525	
是否含遲滯現象		H		H		H		H		H		H
#1	268	270							105	105	225	154
#2	268	270							108	108	225	159
#3										108		
#4	7	7	7	1	27	27	14	115	1	1	11	1
#5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
#6	7	7	7	1	27	27	16	138	1	1	12	1
#7									207	209	258	
#8												
#9	254	270							105	105	225	154
#10	255	270							108	108	225	159
#11												
#12												
Case 1(aq) <sup>2</sup>												
是否含遲滯現象		H		H		H		H		H		H
#1	257	264	231		322	306			252	252	236	198
#2	265	268	241	343	310	327			154	149	253	217
#3									151	148		
#4	5	5	5	9	35	35	50	50	73	73	160	153
#5	1	1	1	1	1	1	1	1	42	42	109	102
#6	2	2	26	27	39	39	50	50	73	73	163	158
#7		349							173	173	298	289
#8									194	197		
#9	257	264			301	305			154	149	236	196
#10	265	267			309	325			151	148	255	215
#11												
#12												

註：(1)：土壤氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)

註：(2)：地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)

表 4-2 (b) Case 2 變水位監測井土壤氣體及地下水含苯濃度值達警戒所需時間(day)

Case 2(gas) <sup>1</sup>	Case 2-1				Case 2-2				Case 2-3			
孔隙率(%)	0.3				0.4				0.4			
透水係數 K <sub>w</sub> (cm/sec)	2.74×10 <sup>-3</sup>				2.74×10 <sup>-3</sup>				2.74×10 <sup>-2</sup>			
洩漏速率(gal/day)	1.50											
起始水位(-m)	242		424		242		424		242		424	
是否含遲滯現象		H		H		H		H		H		H
#1									315	309		
#2									277	274		
#3												
#4	335	356							271	269		
#5	280	247	142	146	280	276	171	171	260	253	159	159
#6	302	256	259	163					263	256	169	169
#7									277	274		
#8									339	331		
#9	305	331			360	360			289	285		
#10	280	273	142	146	280	276	171	171	259	252	160	160
#11												
#12												
Case 2(aq) <sup>2</sup>												
是否含遲滯現象		H		H		H		H		H		H
#1											337	
#2											247	231
#3												
#4	267	267	315	317	360			336	231	231	185	142
#5	70	70	55	58	91	91	72	76	55	55	72	80
#6	109	109	109	99	137	137	138	138	81	81	72	80
#7											242	216
#8												
#9	251	251	157	162	261	257	336	278	229	229	78	85
#10	68	68	57	60	87	87	72	76	52	52	72	80
#11												
#12												

註：(1)：土壤氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)

註：(2)：地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)

Case 2 固定水位及變動水位於的部分[表 4-1 (b)、4-2 (b)]，固定水位 2 m 下，測漏管 #5 偵測到土壤氣體濃度於 Case 2-1 需要 134 天、Case 2-2 需 170 天、Case 2-3 需 106 天；變動水位 2-4-2 m 在 Case 2-1、Case 2-2 及 Case 2-3 則需要 70 天、91 天及 55 天，分別相差 64 天、89 天與 51 天。測漏管 #10 相對於洩漏點的位置對稱於測漏管 #5，因此偵測到土壤氣體濃度所花的時間和測漏管 #5 相同。位置稍為較遠一點的測漏管 #6 偵測到氣體濃度達到 500 ppmV 警戒標準的時間，於固定水位 2 m 時，Case 2-1 為 174 天與 Case 2-3 為 241 天；變動水位 2-4-2 m 則只有 Case 2-1 與 Case 2-3 偵測到濃度時間為 302 天及 263 天，與固定水位 2 m 監測相差 128 天和 37 天。Case 2 中偵測土壤氣體濃度的情形和 Case 1 相似，雖然偵測所花的時間皆比 Case 1 久，不過固定水位偵測土壤氣體濃度的狀況依舊比變動水位來的穩定。土壤氣體監測在固定水位 4 m 的時候，因為污染物的洩漏點較低(位於水面以下)加上水位沒有變化，因此測漏管無法偵測到儲油槽下方洩漏的污染物。變動的水位 4-2-4 m 則在 0~180 天的時候由上升的水位逐漸地將污染團往上帶起因此 Case 2-1、Case 2-2 與 Case 2-3 仍然能夠偵測到土壤氣體濃度，所需要的時間分別為 142、171 與 160 天。

綜合 Case 1 與 Case 2 來說，固定水位下由於 Case 2 的洩漏位置比 Case 1 來的要低，因此 Case 2 中設置的測漏管與監測井即使離洩漏點距離較近，要偵測到污染濃度還是要花比較多的時間。甚至 Case 2 固定水位 4 m 無法測到土壤氣體濃度，固定水位 2 m 最快如 Case 2-3 也要 3 個月後才能偵測到土壤氣體濃度。另外，變動水位時的測漏管無論是在 Case 1 或 Case 2 監測效果都不是很理想，而且洩漏點若是在水位以下將很難被偵測到。但是就 Case 2 而言，固定水位 4 m 原本沒辦法測到土壤氣體濃度，反而是由於 4-2-4 m 水位上升的情形，讓污染物有機會向上擴散，使得測漏管能夠偵測到土壤氣體的濃度。至於其它因為濃度不夠抑或受孔隙率或透水係數的影響監測效果的評估，會於 4.2、4.3 小節來分析。

Case 1, Case 2 中距離較遠的測漏管，固定水位下由於 Case 1 洩漏點的位置位於油槽

上方的輸油管線，在測漏管與監測井 #5 中，其次井 #1、#2、#9、#10 和測漏管 #5 的距離皆相同，使得這 4 支井在定水位下無論是測定氣體濃度或地下水含苯濃度時間都相同。井 #3、#8 與 #11 則因為在下游，雖然還是可以測到，不過幾乎都已經超過 5 個月以上甚至半年之久。而 Case 2 則因為洩漏點的位置在儲油槽的下方，靠近下游處且距離約在井 #5 與井 #10 之間使其呈對稱，使得這兩支井偵測到土壤氣體與苯濃度達到警戒值的時間完全相同。但是在較遠的井 #1、#2、#9 即使在達到警戒標準時也已經花了很長的時間；井 #3、#8 由於模擬的洩漏量較少且距離較遠，無法測到濃度。井 #12 位於本模擬場址所設置的最下游處，無論是 Case 1 及 Case 2 皆因距離洩漏點太遠導致在一年之內無法測得任何有效濃度。變動水位下 Case 1、Case 2 (表 4-2 (a)、4-2 (b))，無論是土壤氣體濃度或地下水含苯濃度監測時間都需要花比固定水位還要多一倍的時間，而且皆超過半年以上。不過 Case 2 於地下水含苯濃度的監測效率和固定水位非常皆近，因此也不能由單一情形推斷監測井的監測效果而下定論。

#### 4.2 土層透水係數之影響

本模擬中對土層透水係數  $K_w=2.74 \times 10^{-3}$  (cm/sec)、 $K_w=2.74 \times 10^{-2}$  (cm/sec) 兩者相差 10 倍於洩漏的影響，分別以固定水位下以及變動水位下 Case 1-2 ( $K_w$  小)、Case 1-3 ( $K_w$  大) 與 Case 2-2 ( $K_w$  小)、Case 2-3 ( $K_w$  大) 來進行說明。

固定水位就 Case 1 之井 #4 與 #6 可以看出差異，透水係數較高者其測漏管監測效率較高，能比較快速偵測到土壤氣體濃度達到警戒值。於 2 m (表 4-1(a))，Case 1-2 ( $K_w$  小)、Case 1-3 ( $K_w$  大) 偵測到土壤氣體濃度 500 ppmV 的時間分別為 37 天與 26 天，相差 11 天。較遠的測漏管如 #1、#2、#9 與 #10 濃度達到警戒的監測時間，當  $K_w$  小需要 119 天， $K_w$  大則為 77~79 天，相差約 40 天。最遠且有偵測到濃度的測漏管 #7 則差了 60 天。

地下水含苯濃度就監測井 #4 與 #6 來比較，Case 1-2 ( $K_w$  大) 的時候偵測達 0.05 mg/L 的警戒標準值需要 47 天的時間，但 Case 1-3 ( $K_w$  大) 則只要 30 天就可以偵測到，相差 17 天。較遠的井 #1、#2、#9 與 #10 當  $K_w$  較小時所需

要的監測時間皆為 129 天； $K_w$  大則只要花 73 天，相差 56 天。整體來說兩種污染濃度的偵測時間差異不會太大，但是  $K_w$  大者偵測效果較好。固定水位在 5 m 時，同樣監測井的位置相較於 2 m。則不同透水係數影響更明顯。井#4 與#6 當  $K_w$  較小時，偵測需要 59 天； $K_w$  大時則在 22 天就能偵測到，兩者相差 37 天。較遠的測監測井#1、#2、#9、#10， $K_w$  小與  $K_w$  大時監測到濃度的天數分別為 167 天及 65 天，相差達 100 天之久。地下水含苯濃度差距比較小，當  $K_w$  較小時，井#4 與#6 測得濃度時間為 57 天； $K_w$  較大時則需要 55 天，只有相差兩天。不過較遠的監測井仍舊是  $K_w$  較大的其偵測效果較好，快了 54 天。

Case 2 中固定水位 2 m 只有測漏管#5、#6 與#10 測得濃度，Case 2-2 ( $K_w$  小)所偵測到土壤氣體濃度的時間分別為 170、226、170 天；Case 2-3 ( $K_w$  大)所花的時間為 106、135、106 天，相差 64、91、64 天。地下水含苯濃度測於 2 m ( $K_w$  較小)時，監測井#5 與#10 的監測時間為 86 天； $K_w$  較大為 44 天。較遠的監測井#6 與#4， $K_w$  較小的時候為 148、342 天； $K_w$  較大為 82、160 天，相差 66、182 天。固定水位於 4 m 時偵測的苯濃度於較小的  $K_w$  時，監測井#5 與#10 需要時間為 118 天； $K_w$  較大需要時間為 72 天。較遠的監測井#6 與#9 於  $K_w$  較小監測時間為 190 天； $K_w$  較大需要 109 天，相差 81 天。

整體來說透水係數( $K_w$ )提高 10 倍時，固定水位 2 m 距離洩漏點較近(3 m)的測漏管測得土壤氣體達污染標準的時間減少 1.4 倍，較遠的(6 m)則減少 1.5 倍；於固定水位 5 m 時，由近而遠為減少 2.7 倍與 2.6 倍。Case 2 於固定水位 2 m 時約減少 1.6 倍。至於地下水含苯濃度 Case 1 固定水位 2 m 由近而遠依序為 1.6 至 1.9 倍；5 m 為 1 倍至 1.6 倍。Case 2 固定水位 2 m 距離洩漏點的測漏管由近而遠所花的時間縮短皆 2 倍；4 m 則為 1.6、1.7、2 倍。

變動水位 Case 1-2 (表 4-2(a))， $K_w$  小時測漏管#4 與#6 在 2-5-2 m 需要花 117 天才能偵測達到 500 ppmV 的土壤氣體濃度值； $K_w$  大時 Case 1-3 為 41 天。當 Case 1-2 在 5-2-2 m 時，#4 與#6 分別為 110 天與 135 天可測得；Case 1-3 皆為 57 天。地下水含苯濃度於  $K_w$  較小的 Case 1-2 之#4 與#6 測得 0.05 mg/L 天

數為 125 及 120 天； $K_w$  較大的 Case 1-3 則分別需要 77 天及 75 天。較遠的測漏管#1、#2、#9、#10 於  $K_w$  較小的時候需要 300 天以上才能測得超標的污染物； $K_w$  較大則分別於大約 150~250 天可測得污染物。

Case 2-2 ( $K_w$  較小)與 Case 2-3 ( $K_w$  較大)的比較，土壤氣體濃度由測漏管#5 與#10 來看，水位 2-4-2 m 時  $K_w$  小需要 280 天； $K_w$  較大需要 260 天。以 4-2-4 m， $K_w$  較小需要 171 天  $K_w$  較大需要 160 天。地下水含苯濃度於較近的測漏管(#5 與#10)差異並不大，但是距離較遠的測漏管(#4 與#9)則 Case 2-3 ( $K_w$  較大)偵測到苯濃度的速度比 Case 2-2 ( $K_w$  較小)快上許多。

綜合分析就固定水位而言，高水位、低水位分開比較，不論測漏管與監測井偵測為土壤氣體濃度或是地下水含苯濃度，皆透水係數( $K_w$ )大者有助於測漏管監測的效率。且離洩漏點越遠者，影響愈大。這情況於 Case 1 與 Case 2 的結果均相同，且當  $K_w$  增加 10 倍，則固定水位偵測土壤氣體濃度的時間約可縮短 1.4~2.7 倍；地下水含苯濃度的偵測時間約可縮短 1.6~2 倍。

若是由變動水位來看，Case 1-3 ( $K_w$  大)(表 4-2 (a))之 2-5-2 m 比起 Case 1-2 ( $K_w$  小)快了 76 天就測得土壤氣體濃度達到 500 ppmV 的門檻，少了將近 3 倍的時間；5-2-5 m 同樣也快了 2.6 倍左右。Case 1-3 ( $K_w$  大)在時間則比 Case 2-2 ( $K_w$  小)快了 20 至 80 天不等，平均約減少 1.1 倍的時間。但地下水含苯濃度到達警戒值的時間卻不必然受透水係數  $K_w$  值的影響。監測苯濃度的部分，Case 1 於 5-2-5 m 的狀況除了監測井#6 之外，監測井#4 不受到透水係數影響(表 4-2 (a))，反而是透水係數較低的比較快到達警戒值門檻，於 Case 2 的 4-2-4 m (表 4-2 (b))也有此現象，因此可以發現透水係數對於土壤氣體濃度影響較大，於地下水含苯濃度卻不一定受透水係數大小影響監測的時間。

另外，監測井距離洩漏點的遠近也不一定和監測井監測到警戒濃度的時間成正比，意即即使較遠的測漏管雖然透水係數較高，但偵測到濃度達警戒值的時間並不會差太多。相較於固定水位，變動水位於偵測地下水含苯濃度得效果並沒有很好。於本小節還可以用其他角度來檢視透水係數於變動水位的監

測效果。同樣就 Case 1 的三個案例來看(表 4-2 (a))，相同的透水係數於 2-5-2 m 或 5-2-5 m 這兩種情形，起始水位高低對於測漏管的監測效果影響不同(Case 2 也是如此)。意即同樣水位於第 2 m~5 m 或地下 2 m~4 m，透水係數相同時，起始水位初始設定位置會影響偵測結果。

因此就透水係數而言，時間拉長以後能夠明顯的看出差異性。所以透水係數的影響大概可以歸類成下列幾點：

1. 固定水位下的測漏管的監測無論是對於土壤氣體濃度或者地下水含苯濃度皆可看出監測效果的差異性非常明顯。透水係數較大者，測漏管監測的效果較好。
2. 變動水位下測漏管監測土壤氣體濃度仍然是透水係數較高者，其監測效果較好；但是監測地下水含苯濃度時，透水係數大小不影響監測效果。
3. 變動水位模擬時設定的初始水位對監測的效果有一定影響。

#### 4.3 土壤孔隙率之影響

固定水位下於模擬時間結束(一年)後輸出各測漏管之監測值並比較土壤孔隙率之影響。由 Case 1-1 (孔隙率  $n=0.3$ )、Case 1-2 ( $n=0.4$ ) 進行比較結果如表 4-1 與 4-2。

於固定水位土壤氣體監測結果，與透水係數相同的情形下來比較發現孔隙率較小 ( $n=0.3$ ) 者，達到 500 ppmV 濃度的監測門檻速度較快。固定水位 2 m 下 Case 1-1 ( $n$  小) 與 Case 1-2 ( $n$  大) 比較測漏管 #4 與 #6，孔隙率小偵測時間為 29 天；孔隙率大者需要 37 天，相差 8 天。於固定水位 5 m 則孔隙率小需要 51 天，孔隙率大需要 59 天，相差 8 天。地下水含苯濃度於 2 m 情形下，測漏管 #4 與 #6 在孔隙率較小時需要 35 天；孔隙率較大需要 47 天，相差 12 天。5 m 情形下，孔隙率小為 44 天；孔隙率大為 57 天，相差 13 天。Case 2-1 (表 4-1 (b))，土壤氣體濃度於 2 m 時，測漏管 #5 與 #6 於孔隙率較小偵測到濃度需要的時間為 134 與 174 天；孔隙率較大的需要 170 天與 226 天；分別相差 36 天與 52 天 (#10 與 #5 相同)。地下水含苯濃度於 Case 2 固定水位 2 m 時，測漏管 #5 與 #6 於孔隙率小需要 68 天及 108 天；孔隙率較大者需要 86 天及 148 天，相差 18 天及 40 天。4 m 時測

漏管 #5 與 #6 於孔隙率較小需要 105 天及 140 天；孔隙率較大者需要 118 天及 190 天，相差 13 天及 50 天。變動水位於 Case 1 及 Case 2 的案例皆整理於表 4-3，相較於固定水位時的情形，變動水位於孔隙率較小時，其監測的效果比較好。

表 4-3 土壤孔隙率於變動水位監測土壤氣體與水中含苯濃度情形(days)

案例 n 監測 點	Case1-1 Case1-2 2-5-2(m)		相差天 數 (B)-(A)	Case1-1 Case1-2 5-2-5(m)		相差天 數 (B)-(A)
	0.3(A)	0.4(B)		0.3(A)	0.4(B)	
#4、 #6(gas)	90	117	27	85	110	25
#4、 #6(aq)	92	125	33	142	140	-2
案例 水位	Case2-1 Case2-2 2-4-2(m)			Case2-1 Case2-2 4-2-4(m)		
#5 #10(gas)	280	280	0	142	171	29
#5、 #10(aq)	70	91	21	55	72	17
#6(aq)	109	137	28	109	138	29
#9(aq)	251	261	10	157	336	179

變動水位的部分如表 4-3，Case 1-1 (孔隙率小)，2-5-2 m 下土壤氣體濃度以測漏管 #4 與 #6 偵測所花的時間為 90 天；Case 1-2 (孔隙率大) 偵測濃度的時間為 117 天，相差 27 天。5-2-5 m 的情形下，Case 1 (孔隙率小)，測漏管 #4 與 #6 同為 85 天到達氣體濃度門檻；Case 1-2 (孔隙率大) 則花了 110 天才測到污染物濃度，相差 25 天。Case 2-1 (孔隙率小) 與 Case 2-2 (孔隙率大) 變動水位 2-4-2 m 之測漏管 #5 與 #10 則是花了 280 天達到警戒值，但是 Case 2-2 與 Case 2-1 模擬時間相同。離洩漏點較遠的測漏管監測均是孔隙小偵測到土壤氣體濃度的時間較快。至於在地下水含苯濃度情形的測定，於表 4-3 可見，變動水位於 5-2-5 m 時，孔隙率大小並沒有影響到測漏管偵測的時間，可能是模擬的誤差。因為於 Case 2-1 與 Case 2-2 仍然是孔隙率較小的監測效果較好。

由平流傳輸速率之公式  $v_x = \frac{k}{n_e} i$  (式中  $v_x$

為平均線性速度、 $k$  為水力傳導係數、 $i$  為水力梯度、 $n_e$  為有效孔隙率) 可知，當所有條件皆相同之情況下則傳輸速率約略與孔隙率之大小成反比。且考慮污染團在擴散的傳輸機

制下，當孔隙率較小則會使得液相污染團較容易充滿孔隙，因而流速增加而傳輸速率也會提高。

因此不論是固定水位或者是變動水位，仍然可以判定土壤孔隙率的大小對於污染物傳輸模擬監測的效果仍有影響，且在水位變動的情形下一致性非常高，當孔隙比較小的時候，容易被水或污染物充滿，飽和時間比較短會導致水流的速度加快，同時污染物的擴散速度也會增加。而土壤孔隙率對於污染團傳輸速率之影響亦會隨著距離之增加而更為顯著由結果可得出孔隙率小對於污染團傳輸有較大幫助之結論。最後以透水係數與孔隙率之敏感度分析結果比較可知，變動透水係數相較於變動孔隙率而言對於污染團傳輸之影響較大也較為敏感。

#### 4.4 遲滯現象模擬結果

遲滯現象加入模擬的結果如表 4-1，就土壤氣體濃度而言，Case 1 中，變動水位 2-5-2 m 下由較近的測漏管#4 與#6 來看，加入遲滯現象和未加入的模擬結果相同，因此看不出變化的情形。不過若是由較遠的測漏管，如 Case 1-1 至 Case 1-3 的#1、#2 則只有相差 2 天；在#9 與#10 則有相差 16 天。但若是以起始水位較低的 5-2-5 m 來看，水位上升時加入了遲滯現象導致一開始模擬的條件就不同，因此偵測到土壤氣體濃度達警戒標準的時間變的不一樣，但是差異也沒有特別明顯。Case 1-1，2-5-2 m，也就是水位由高降低的時候，土壤開始排水，到了 180 天後，水位由地下 5 m 低水位開始上升，此時的有加入遲滯現象的模擬導致殘留於水面下的 LNAPL 比較多，所以氣體濃度會變的比較少，導致偵測到濃度的速度稍為慢一些。這樣的情形於 Case 1-1、Case 1-2 的 5-2-5 m 也能夠看的出來。5-2-5 m 一開始便由低水位開始上升，因此屬於吸水狀態，而在土壤濕潤時濕相液體(水)會取代非濕相液體(空氣或有機液體)，同時也牽引著非濕相液體，使得 LNAPL 或土壤氣體沒辦法往上擴散，因此在模擬天數達 180 天之前，測漏管#4 及#6 皆已偵測到土壤氣體的濃度，只是有加入遲滯現象所需要偵測到的時間較長。至於 Case 1-3 的 5-2-5 m 反而是有遲滯現象模擬速度較快，則是因為有遲滯現象時，空氣孔隙較大，導致氣體飽

和度較高，因此土壤氣體濃度較快被偵測到。

Case 1-2 於 5-2-5 m 的比較可發現測漏管#4 與#6，水位由 180 天開始下降後，此時土壤氣體濃度也會隨之減少。但是有遲滯者其土壤測漏管裡濃度卻不斷上升，是因為受到遲滯的影響導致土壤中的汽氣體濃度下降少，在非飽和層(地下水位以上)，水飽和度都較無遲滯者少，因此含空氣孔隙較多，固定體積土壤中油氣總量高，則油氣濃度高。

Case 1-3 於 5-2-5 m 時，土壤氣體測漏管#4、#6 與#7 在 180 天水位開始下降時，濃度曲線卻在第 270 天時達 peak 值後開始減少，雖然擴散濃度增加，但是由於水位降低的效果較大，所以土壤氣體濃度有下降的趨勢，而有遲滯者在 180 天至 270 天中可看出曲線的差異，有遲滯者上升濃度較緩慢。

而 Case 2-1 模擬的結果不同於 Case 1-1，由於洩漏點一開始的位置就不一樣，Case 2-1 的洩漏點位於儲油槽底部導致模擬結果的差異。較近的測漏管如#5、#10 與#6，加入遲滯現象監測時間較快，不過#4 與#9 則相反。但可以確定的是偵測到濃度的時間都在 180 天之後，也表示水位由高(地下 2 m)往下降(地下 4 m)的時候屬於排水狀態，水位回升的時候遲滯現象的模擬有不同的結果。比較近的測漏管偵測的時間較快仍舊是因為有遲滯現象時，於土壤中氣體孔隙率較大，因此滲透較快，使得有遲滯現象時能夠較快偵測到土壤氣體濃度。Case 2-2 與 Case 2-3 的 2-4-2 m 結果皆與 Case 2-1 相同。而 Case 2-1 的#4 與#9 比較快能偵測到則是因為沒有遲滯現象時，殘留在水下的濕相液體較少，因此氣體濃度相對的比較高。

由 Case 2-1 的 2-4-2 m 自 180 天後，由 4 m 回升至 2 m 的狀況時，部分孔隙中仍然有空氣，未完全被水填滿，可能較容易讓油品進入，而且在通氣層中，空氣孔隙較多會使得油氣傳輸較快。

地下水含苯濃度值[表 4-2 (a)]於 Case 1，距離洩漏點較近的監測井#4 與#6，於 2-5-2 m 的部分，Case 1-1 的#4 與#6 為 92 天及 88 天。遲滯者為 92 天及 88 天。Case 1-2 的#4 與#6 為 125 天與 120 天，有遲滯者模擬結果相同。Case 1-3 的#4 與#6 為 77 及 75 天，有遲滯者偵測結果仍然相同。但是在 5-2-5 m 的部分，

有遲滯者模擬的結果偵測到地下水含苯濃度的時間較快，如 Case 1-1 中的監測井#4，模擬時為定量注水的方式，使得有遲滯者在孔隙有空氣時，水位上升較快且較高，因此會先遇到注入的油品。由於水位在地下水位下的水相液體，若有遲滯現象時濕相液體會牽引住殘留於水中的空氣及有機液體，因此水中的含苯濃度便增加，使得測漏管的偵測效果提升。

Case 2 的部分，2-4-2 m 於較近的監測井#5 與#10 監測其遲滯影響並不大，偵測到水中苯濃度的時間相同。但於 4-2-4 m 較近的監測井#5 與#10，由於洩漏時在水位面下，水位上升時土壤成吸水狀態，殘留在水下的 LNAPL 增加，不過由於有遲滯現象時，氣相的空氣孔隙較大，水位上升到達飽和的時間較久，因此偵測到水含苯濃度的時間比較長。

遲滯現象加入模擬的結果較為複雜，而且其模擬結果不是非常明顯，未來可進一步進行其它相關的模擬。

## 5、結論與建議

本研究以 TMVOC 模擬加油站油品洩漏並評估土壤氣體與地下水監測之有效性與地下水位變動以及土壤參數間之關係。根據研究結果可歸納出之結論如下：

1. 變動水位相較於固定水位時，監測的效果較不穩定，平均起來測漏管監測污染物到達警戒標準的時間都比固定水位增加許多。根據美國規範中，加油站之測漏管應能於 30 天內測得 150 加侖之油品洩漏事件，意即平均每天應該以 5 加侖的速度做洩漏(大約為 19 L/day)；環保署(2006)於法規中明訂偵測靈敏度須能達到 0.2 gal/hr 之標準(4.8 gal/day)。本研究為進一步探討在洩漏量更小的狀況下，土壤氣體監測與地下水監測是否仍然有效，故降低了洩漏的濃度。研究結果發現，在研究中假設的較小之土壤導水度條件下，土壤氣體監測和地下水監測仍然可能及時監測到滲漏事件。因此，若當加油站的回填材料導水度完全符合規範要求時，當可更早偵測到油品的滲

漏。

2. 地下水位變化對於透水係數(Kw)與孔隙率(n)的影響，無論是固定水位或者是變動水位，透水係數(Kw)較大或者孔隙率(n)較小者其偵測土壤氣體或地下水含苯濃度的效果較好。但是水位變動的情形下，土壤氣體濃偵測的效果比地下水含苯濃度好。傳輸速率會受到透水係數及孔隙率的影響，就透水係數而言，即使在水位變動的情形下，透水係數較大的案例其污染團整體傳輸速率會比較快，尤其隨著距離的增加，污染團傳輸速率受透水係數的影響越明顯。孔隙率則是當其他條件相同下，其值越小時，污染團容易充滿孔隙而飽和，使得污染物在土壤的孔隙中流速增加，讓傳輸速率變的更快。
3. 在有遲滯現象時，殘留於地下水位面下的 LNAPL 較多，濕相液體在水位上升的過程中進行濕潤作用時，會取代原來孔隙中的非水相液體及空氣。但是過程中又牽引著非水相液體及空氣，使浮到水位面上的氣體減少，測漏管偵測土壤氣體濃度的效果較差，相對的地下水含苯濃度的監測效果比較好。沒有遲滯現象時，則情形相反，當殘留於水位面下的 LNAPL 較少，此時代表土壤氣體濃度較容易被偵測到，水中含苯濃度則恰好相反。另外於氣相中，有遲滯現象的模擬其空氣孔隙率會比較高，無遲滯現象時空氣孔隙率較小；遲滯現象於水相中水的滲透力會變小，反之則較大，這些都是遲滯現象所造成的影響。
4. 本文中洩漏點的位置確實會影響到測漏管的監測效果。就固定水位而言，Case 1 無論是偵測土壤氣體濃度或地下水含苯濃度，效果較好。而且除了距離洩漏點太遠的測漏管(#3、#11 與#12)無法監測到數據外，其它測漏管皆能監測到土壤氣體濃度達到警戒的標準。不過洩漏點位於儲油槽下方，較不利於監測，如 Case 2 於固定水位 2 m 時比較近的測漏管(#5、#10 與#6)能測到土壤氣體濃度，其它的測漏管完全沒有辦法發揮作用。甚至固定水位 4 m 的情形下，沒有測漏管測得土壤氣體濃度的數據，效果其差。變動

水位時, Case 1 洩漏點在水位上方洩漏, 對於測漏管偵測土壤器土濃度而言, 效果較好。Case 2 洩漏點位於儲油槽下方(水位面下), 較不利於土壤氣體濃度偵測效果。地下水含苯濃度的監測, 距離較近的測漏管無論是洩漏位置的高低不影響其濃度的監測效率。但是 Case 1 由於洩漏位置較高, 因此若是以監測範圍而言, Case 1 仍然比 Case 2 來的好。為了求監測效果能夠更好, 監測井的設置仍然建議靠近污染物的潛勢洩漏地區較高的地方, 以確保監測井測漏管能夠發揮最佳的效果。

本研究中相對於實務上, 監測井可能會因為環境、地形等因素而無法隨時就地測量其土壤的氣體濃度。由於加入變動水位的條件, 使得程式在模擬的時間大幅增加, 為了減少模擬冗長的等待時間, 場址大小的縮減及減少污染物的洩漏量都可能造成模擬結果的參考性質降低, 此外也尚未加入抽水井、異質性土層的模擬方式, 另外也可以探討不同的土壤氣體, 或不同的污染物加入成為模擬的條件。都是未來可以努力的目標。

## 參考文獻

- 單信瑜, 張良正, 「非水相液體於非飽和地層中傳輸行為之特性」, 地球系統科學研討會, 中央大學, 桃園, 2003
- 陳培旻, 2010, 加油站土壤氣體及地下水監測模擬, 交通大學土木工程研究所碩士論文
- Beese, F., and R. R. van der Ploeg, 1976, Influences of hysteresis on moisture flow in an unsaturated soil monolith, *Soil Sci. Am. J.*, Vol. 40, pp. 480-484.
- Davidson, J. M., D. R. Nielsen, and J. W. Biggar. 1966. The dependence of soil water uptake and release upon the applied pressure increment. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:298-303.
- Demon, A.H. and Roberts, P.V. (1991). Effect of interfacial forces on two-phase capillary pressure-saturation relationships. *Water Resources Research* 27(3): doi: 10.1029/90WR02408. issn: 0043-1397
- Fetter, C. W., "Contaminant Hydrogeology, 2<sup>nd</sup> Ed," Prentice-Hall, Inc., London, 1999.
- Kamon, M., Y. Li, G. Flores, T. Inui and T. Katsumi, 2006. Experimental and numerical study on migration of LNAPL under the influence of fluctuating water table in subsurface. *Ann. Disaster Prevention Res. Inst.*, 49: 383-392.
- Lenhard, R.J., Johnson, T.G. and Parker, J.C. (1993). Experimental observations of nonaqueous-phase liquid subsurface movement. *J. Contam. Hydrol.*, 12, pp. 79-101.
- Lenhard, R.J., Parker, J.C. and Kaluarachchi, J.J. (1989). A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow, 3. Refinements and numerical simulations. *Water Resources Research* 25(7): doi: 10.1029/89WR00389. issn: 0043-1397.
- Marinelli, F. and D.S. Durnford. 1996. LNAPL thickness in monitoring wells considering hysteresis and entrapment. *Ground Water* 34(3): 405-414.
- Royer, J. M., and G. Vachaud, Field determination of hysteresis in soil-water characteristics, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 39(2), 221-223, 1975.
- Ryan, R. G., and V. K. Dhir (1996). The effect of interfacial tension on hydrocarbon entrapment and mobilization near a dynamic water table. *J. Soil Contamination* 5(1): 9-34.
- Testa, S.M., and M.T. Paczkowski. Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monitoring Review*, 9 no.1:120-127 (1989)

## 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

### 1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

#### 達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

### 2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利：已獲得 申請中 無

技轉：已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

本研究之相關成果已於環保署環境訓練所 101 年度加油站地下儲槽監測人員訓練班課程中納入，且已透過參與環保署土壤污染整治基金會委辦計畫修訂加油站監測辦法專家會議討論，針對加油站監測作業規定提出監測方法與質量要求的建議。

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以500字為限）

本研究以模擬進行加油站土壤氣體與地下水監測之模擬，結果對於此兩種方法之有效性得出重要之結論。亦即，土壤氣體監測和地下水監測之有效性並不如預期，在許多狀況無法達到法規訂定時所預期的精確度。因為主持人是環保署環訓所加油站監測訓練班的講座，數年來每年定期訓練約五百位加油站的業者與顧問公司和檢測公司工程師；且亦擔任環保署土壤與地下水污染整治基金會各項計畫之審查委員。因而本計畫之研究結果，無論透過期刊或研討會論文發表、或者在主持人參加各種環保署相關的會議與講習時，均將提出來與業界及環保署討論。並據以建議修訂我國的加油站設置規範與監測辦法。這對於環境保護來說，是最直接的貢獻。

由於國內學術界與工程界對於非水相有機液體（NAPL）模擬之經驗非常少，因此本研究在過程中訓練學生使用 TMVOC 進行多相有機物傳輸模擬，對學生和業界來說都非常有價值。

# 國科會補助專題研究計畫項下出席國際學術會議心得報告

日期：101年8月7日

計畫編號	NSC 100-2221-E-009 -126		
計畫名稱	地下水位變動對油品滲漏監測之影響		
出國人員姓名	單信瑜	服務機構及職稱	交通大學土木工程學系
會議時間	101年7月16日 至 101年7月18日	會議地點	澳洲墨爾本市 Crown Convention Center
會議名稱	(中文)澳洲紐西蘭大地工程研討會 (英文) 11th Australia New Zealand Conference on Geomechanics (ANZ 2012) – Ground Engineering in a Changing World		
發表論文題目	(中文) 地下儲槽土壤氣體與地下水監測有效性評估 (英文) <i>Evaluation of Effectiveness of Soil Gas and Groundwater Monitoring for Underground Storage Tanks</i>		

## 一、參加會議經過

本次會議為紐西蘭與澳洲大地工程界定期舉辦的國際研討會，因這兩個國家都算是新興國家，資源充沛，經濟發達，但尚有許多的土地沒有開發，各項公共工程建設也快速進行中，因此大地工程領域頗為發達。所以，希望藉由參加本次研討會，瞭解紐澳區域在環境地工專業領域的發展概況與趨勢，並分享台灣在這些領域的概況與研究方向。

本次研討會參加人數眾多，遠超過主辦單位預期。本次會議大會開幕式演講，座無虛席。不僅各個口頭發表的場次場場爆滿，海報發表論文也相當多，參觀和討論的人士也極為踴躍。

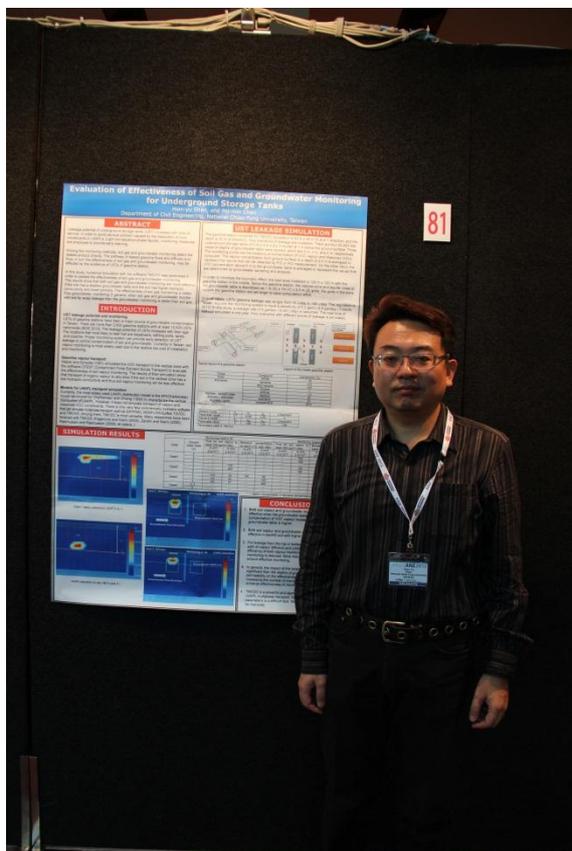
本人也和與會人士就台灣土壤地下水污染的相關概況與技術發展的情況交換心得，並也介紹了個人的研究成果。



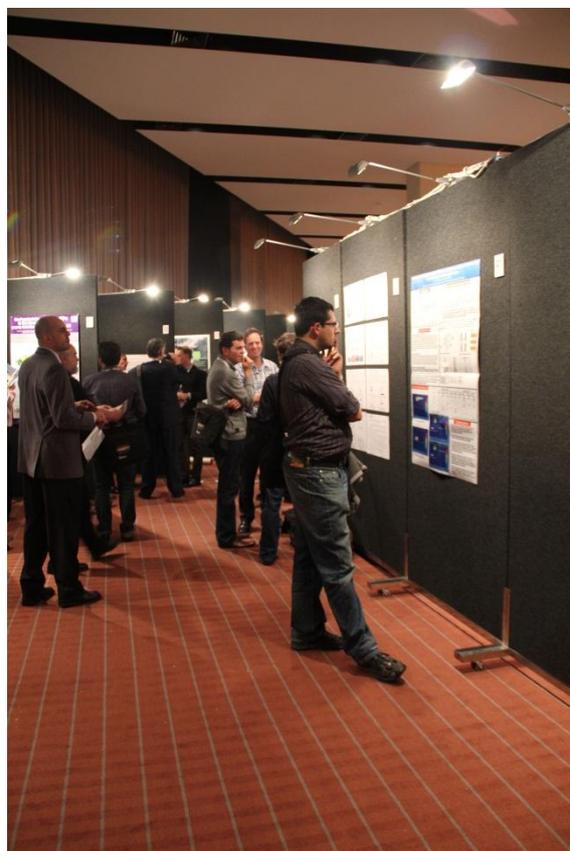
大會 Keynote Speech 狀況



海報展示會場



本研究論文海報



與會者閱覽本研究海報

## 二、與會心得

澳洲與紐西蘭的大地工程領域相當發達，本次會議報名踴躍超出大會預期。尤其是澳洲面積廣大，許多土地亟待開發，重大基礎建設也在陸續進行中。因該國有相當豐富的礦產與土地資源，農牧業發達，金融業健全。歐洲金融危機對該國國內基礎建設影響似乎不大。大地工程領域在此等「開發中地區」市場成長快速，人力需求高。

本次大會展覽參加廠商甚多，熱烈程度遠勝於國內舉辦的大地工程研討會。參展廠商中，一半以上是特殊機具設備製造或代理商與專業營造廠。

澳洲雖然人口與台灣相當，但因土地與自然資源充足，經濟成長快速。在大地工程領域的技術發展與學術研究也獨樹一格。無論是傳統大地工程或者是環境地工領域，在廣大的澳洲都有實際應用的大量需要，因此其學術發展或業界的技術開發都極為蓬勃。簡言之，是市場引導學術研究與技術開發。

此外，因為澳洲是英語系國家，所以技術資料的取得與應用的速度極快，基本上和美國、英國甚至於其他歐洲國家是幾乎沒有時間差距的。這一點也讓該國的學術研究和技術開發得以緊跟美國和世界其他先進國家的腳步，且亦得以快速將澳洲本土研究成果發表。

由本此與會狀況來看，澳洲大地工程領域的向心力與動力強大，在全球大地工程領域中的角色將日漸擴大與強化。



展覽會場場景 1



展覽會場場景 2

三、考察參觀活動(無是項活動者略)  
(無)

四、建議

紐澳地區的大地工程實務與研究均蓬勃發展，相當值得我國專業人員參與交流並開發合作機會。

五、攜回資料名稱及內容

ANZ2012 論文集光碟與會場廠商展覽資料。

六、其他



GROUND ENGINEERING IN A CHANGING WORLD  
15 – 18 July 2012  
Crown Promenade Hotel, Melbourne, Australia  
[www.anz2012.com.au](http://www.anz2012.com.au)

22 May 2012

**Ref:** 2459

Dr. Hsin-Yu Shan

Associate Professor

National Chiao Tung University, Taiwan

1001 Ta Hsueh Road

HSINCHU CITY 30010

TAIWAN

Dear Hsin-Yu

#### **ORAL & POSTER PRESENTERS - DETAILS OF YOUR SESSION**

Please see the details below in regards to your oral and/or poster presentation at the 11th Australia New Zealand Conference on Geomechanics (ANZ 2012).

**Please check these details carefully as your session time may have changed.**

#### **Session Details**

Poster/Oral Title: *Evaluation of Effectiveness of Soil Gas and Groundwater Monitoring for Underground Storage Tanks*

Paper Status: Accepted Full Paper - Poster

Session: Poster Session

Date: Monday, July 16 2012

Time: 1730 - 1830

Poster Number: 81

(if applicable)



# CERTIFICATE OF POSTER PRESENTATION

The ANZ2012 Conference was organised by Australian Geomechanics Society(AGS).

The Conference was held from 15-18 July 2012 at  
the Crown Convention Centre, Australia

This is to certify that

**Hsin-Yu Shan**

of National Chiao Tung University, Taiwan, TAIWAN

presented the following paper at the ANZ2012 Conference.

*Evaluation of Effectiveness of Soil Gas and Groundwater Monitoring for Underground Storage Tanks*

**This paper was scheduled as a poster presentation and published in the  
ANZ2012 Conference proceedings  
ISBN number: 978-0-646-54301-7**

Stephen Tyson  
ANZ2012 Conference Convenor





# CERTIFICATE OF ATTENDANCE

The ANZ2012 Conference was organised by Australian Geomechanics Society(AGS).

The Conference was held from 15-18 July 2012 at  
the Crown Convention Centre, Melbourne, Australia

This is to certify that

**Hsin-Yu Shan**

of National Chiao Tung University, Taiwan, TAIWAN

attended the conference as a full delegate to the  
ANZ2012 Conference.

Stephen Tyson

ANZ2012 Conference Convenor



# Evaluation of Effectiveness of Soil Gas and Groundwater Monitoring for Underground Storage Tanks

Hsin-yu Shan<sup>1</sup>, and Pei-min Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, 1001 Ta Hsueh Road, Hsinchu City, Taiwan; PH +886 3 513 1562; FAX +886 3 571 6257; email: [hyshan@mail.nctu.edu.tw](mailto:hyshan@mail.nctu.edu.tw)

<sup>2</sup>Apollo Technology, Co., Ltd. 15F-1, No. 421, Sung Shan Road, Taipei City, Taiwan; PH +886 2 2726 2099; FAX +886 2 2726 2037; email: [miller2237@hotmail.com](mailto:miller2237@hotmail.com)

## ABSTRACT

Potential of leakage of a underground storage tank (UST) of gasoline station increases with its service life. In order to avoid serious pollution caused by the dissolution of toxic constituents in LNAPLs (Light non-aqueous phase liquids), monitoring measures are employed to provide early warning. Among the monitoring methods, soil gas and groundwater monitoring detect the leaked product directly. The pathway of leaked gasoline flows and diffuses and thus, in turn the effectiveness of soil gas and groundwater monitoring, may be affected by the existence of USTs of gasoline station. In this study, numerical simulation with the software TMVOC was performed in order to assess the effectiveness of soil gas and groundwater monitoring. The results show that both soil gas and groundwater monitoring are more effective if the site has a shallow groundwater table and the soil has higher hydraulic conductivity and lower porosity. The effectiveness of soil gas monitoring is better than groundwater monitoring in general, when soil gas and groundwater monitor well are far away leakage then the groundwater monitoring is better than soil gas.

*Keywords:* LNAPL, underground storage tank, soil vapour monitoring.

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 UST leakage potential and monitoring

USTs of gasoline stations have been a major source of groundwater contamination in Taiwan. There are more than 2,600 gasoline stations with at least 10,500 USTs nationwide (MOE 2010). The leakage potential of USTs increases with their age. The locations that most likely to leak fuel are dispensers, refilling ports, tanks, and pipeline (Figure 1).

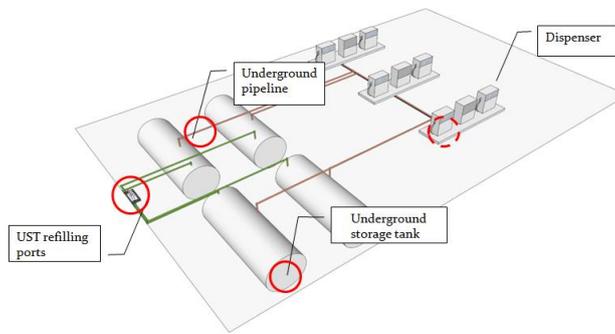


Figure 1. Typical layout of a gasoline station

It is imperative to install proper monitoring system for early detection of UST leakage to control contamination of soil and groundwater. Currently, there are four types of monitoring that are permitted by the regulatory agencies in Taiwan, which are: (1) Soil vapour monitoring, (2) Groundwater monitoring, (3) Tank tightness testing, (4) Interstitial monitoring (TWEPA 2011). Among them, soil vapour monitoring is most widely used due to the relative low cost of installation and monitoring. The vapour monitoring wells must be installed in the UST zone and pipeline zone (TWEPA 2006a). On the longitudinal sides of each UST, there must have at least two vapour monitoring wells. For USTs larger than 60,000 litres, six vapour monitoring wells are required for each tank. The vapour monitoring is conducted monthly. The concentrations of the volatile organic compounds (VOC) are measured with a combustible gas detector and flame ionization detector (FID) or photoionization detector (PID). When the LEL (Lower Explosive Limit) value is greater than 25% or when the VOC concentrations are greater than 500 ppmV, further investigation is required and, in the meantime, the regulatory agencies must be notified. Soil vapour monitoring cannot be used if the depth to the groundwater table below the gasoline station is less than 2 m.

If groundwater monitoring is selected as the major monitoring method, the depth to groundwater table must be less than 7 m. At least a total of 3 groundwater monitoring wells is required, one installed at the upstream of groundwater flow direction and at least two downstream. The hydraulic conductivity of the soil between the USTs and the monitoring wells must be greater than 0.01 cm/s. If free product is found in the monitoring well or the concentrations of BTEX (Benzene, toluene, ethyl benzene, xylenes) are above the regulatory limits, further investigation is required (TWEPA 2006b).

For gasoline stations with a depth of groundwater table between 2 to 7 m, both soil vapour monitoring and groundwater monitoring are allowed for leak detection monitoring. However, it is difficult to assess the equivalency of the two methods based on their effectiveness or sensitivity of detection of leakage.

## 1.2 Gasoline vapour transport

Weber and Schwille (1991) simulated the VOC transport in the vadose zone with the software CFEST (Contaminant Finite Element Solute Transport) to evaluate the effectiveness of soil vapour monitoring. The injected vapour for simulating gasoline is a mixture of methane, butane, and trichloroethylene (TCE). For soil vapour monitoring, a rule of thumb is that the time for gasoline to travel 4.5 m (15 ft) is about 15 days (Weber and Schwille, 1991). However, the results of their simulation show that for a leakage rate at 0.2 gal/h in to sand backfill, it takes 9 and 40 days for the VOC vapour to reach a contaminant level of 1% and 10% at the monitoring well 6.7 m (20 ft) away from the leakage source, respectively. In the meantime, when leakage rate

is reduced to 0.05 gal/h, the time to reach 1% and 10% at a monitoring well 6.7 m (20 ft) away is 22 days and more than 80 days, respectively.

The results of their simulation show that transport of organic vapour is very slow if the soil in the vadose zone has a low hydraulic conductivity and thus soil vapour monitoring will be less effective. In addition, Weber and Schwille (1991) suggest that in vadose zone of soils of low hydraulic conductivity, the background concentration of VOCs is constantly quite high due to the slow dissipation of small quantity of VOCs enters the vadose zone due to normal operation of gasoline stations.

### **1.3 Models for LNAPL transport simulation**

Currently, the most widely used LNAPL distribution model is the API/Charbeneau model developed by Charbeneau and Chiang (1995) to characterize the vertical distribution of LNAPL. It was later improved and executed as spreadsheets and specialized software (Charbeneau, 2007; Charbeneau and Beckett, 2007).

However, it does not simulate transport of vapour and dissolved VOC constituents.

There is only very few commercially available software than can simulate multiphase transport, such as 3DFATMIC, MODFLOW-Surfact, T2VOC, and TMVOC. Among them, TMVOC is most versatile. TMVOC belongs to MULKOM family of codes including TOUGH2, TOUGHREACT, T2VOC, and TMVOC, which were developed in the Earth Sciences Division of Lawrence Berkeley National Laboratory. TMVOC simulates three-phase non-isothermal flow of water, soil gas, and a multicomponent mixture of up to 19 species of VOCs in 3D heterogeneous porous media.

Fagerlund and Niemi (2003) simulate the multiphase transport of gasoline in porous media using T2VOC by combining the physical and chemical parameters of 8 constituents they selected. Zandin and Niemi (2006) studied DNAPL transport in heterogeneous porous media while infiltration varied with time by simulation with T2VOC. Kererat and Soralump (2010) evaluated the effectiveness of cut-off wall to impede the migration of benzene with TMVOC. Rasmusson and Rasmusson (2009) used TMVOC to simulate free product recovery by skimmer pumping of a 700 m<sup>3</sup> of gasoline and the results were in reasonably good agreement with field data.

## **2 UST LEAKAGE SIMULATION**

### **2.1 Modelling gasoline station with TMVOC**

The gasoline station modelled for TMVOC simulation is 40 m x 40 m (X and Y direction) in area and the depth is 10 m (Z direction) (Figure 2). Four scenarios of leakage modelled are shown in Figure 3. There are 4 55,000 litre underground storage tanks of 3 m x 3 m x 8.2 m buried at 1 m below the ground surface. Three cases of depths of groundwater table were studied, which are 2 m, 3 m, and 5 m, respectively. The monitoring points are the locations of concentration of VOC vapour and dissolved VOCs computed. The vapour concentration from ground surface to a depth of 2.5 m is averaged to represent the results that can be obtained by FID or PID measurement. On the other hand, the VOC concentration above 6 m to the groundwater table is averaged to represent the values that are determined by groundwater sampling and analysis. In order to

minimize the boundary effect, the total area modelled is 120 m x 120 m with the gasoline station in the middle. Below the gasoline station, the vadose zone and aquifer close to the groundwater table is discretised as 1 m (X) x 1 m (Y) x 0.5 m (Z) grids, the grids in the zone outside the gasoline station are set larger to save computation effort.

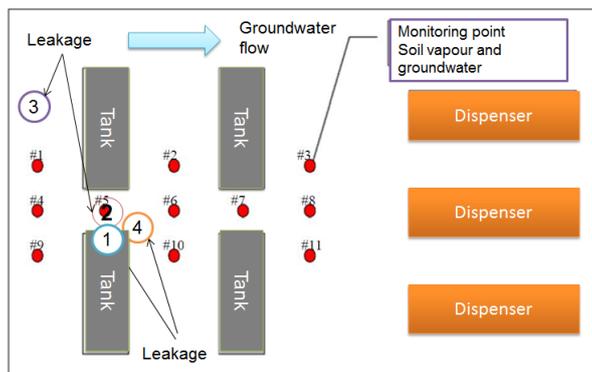
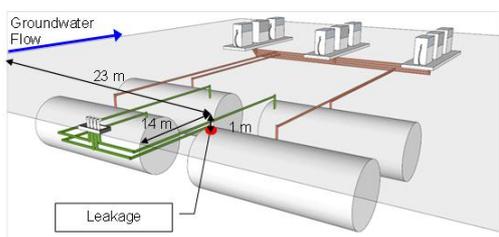
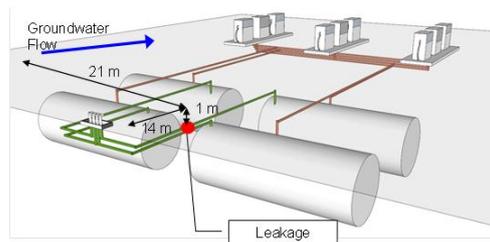


Figure 2. Layout of the model gasoline station

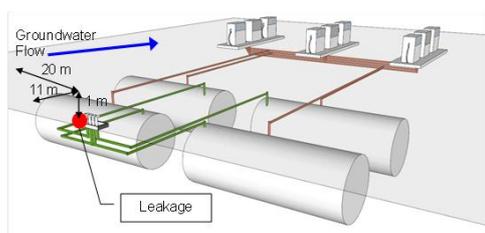
In most cases, USTs' gasoline leakage rate ranges from 10 L/day to 100 L/day. The regulation in Taiwan requires the monitoring system to have a sensitivity of 0.2 gal/hr (4.8 gal/day) (TWEPA 2011). In this study, a leakage rate of 5 gal/day (18.93 L/day) is assumed. The total time of leakage simulated is one year. Four scenarios with different points of leakage is simulated (Figure 3).



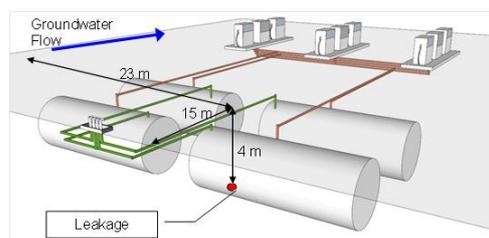
(a) Case1: connection between tank and pipeline



(b) Case2: pipeline in tank zone



(c) Case3: pipeline below refilling port



(d)

Case4: bottom of tank

Figure 3. Scenarios of leakage simulated

## 2.2 Properties of soil and gasoline

The same geological material is assumed for the vadose zone and the aquifer. The porosity is assumed to be

0.3. Two intrinsic permeability values assumed for studying the effect of hydraulic conductivity, which are  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  and  $2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ , respectively. The equivalent hydraulic conductivity,  $k_h$ , is thus  $2.74 \times 10^{-3}$  and  $2.74 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ , respectively. The intrinsic permeability in the vertical direction is set to 1/5 of those in horizontal direction. A hydraulic gradient of 0.005 is imposed by setting constant head boundaries at the upstream and downstream side of the site. Stone's relative permeability model and Parker's capillary-suction model are selected from a group of models available in TMVOC to describe the multiphase retention and flow of air, water, and gasoline. The parameters are listed in Table 1, where  $S_{wr}$ ,  $S_{nr}$ , and  $S_{gr}$  are residual liquid content of water, NAPL, and gas phase, respectively. The gasoline is simulated as a mixture of 8 major organic compounds (Table 2).

*Table 1: Parameters for Stone's model and Parker's model*

Stone's model	$S_{wr}$	$S_{nr}$	$S_{gr}$	$n$ exponent
Parameter value	0.1	0.05	0.05	3
Parker's model	$S_m$	$g_n$	$m_w$	$n$ exponent
Parameter value	0	100	110	1.84

*Table 2: Composition of gasoline simulated*

Group	Compound	Composition (%)
Ether	MTBE	18
Aromatics	benzene	3.5
	ethyl benzene	5.5
	toluene	7
	xylenes	1.5
Aliphatic - straight chain	heptane	20
Aliphatic - branched	isooctane	20
Aliphatic - cyclic	cyclopentane	24.5

### 3 RESULTS AND DISCUSSION GUIDELINES ON REFERENCING

For all cases simulated, the time soil vapour and groundwater to reach regulatory limit is listed in Table 3. The effect of depth of groundwater table is best demonstrated by the results of case 2, where gasoline is free to migrate downward and along the direction of groundwater flow. However, since monitoring point #5 is located where leakage occurs in case 2, the discussion will exclude its data. For sand backfill with a permeability of  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , when the depth of groundwater table is at 2 m, it takes 45 days for VOC vapour to reach 500 ppmV in monitoring well #6 which is 3 m downstream. When the groundwater table is at 3 m or 5 m deep, the time to reach 500 ppmV are 50 and 61 days, respectively. Obviously, VOC vapour will be more concentrated when the groundwater table are higher and the space for VOC to migrate is smaller. On the other hand, it takes 102 and 180 days for benzene concentration in the groundwater to reach the regulation limit of 0.05 mg/L for groundwater table of 2 m and 3 m, respectively. It can be seen in Figure 4 that even when groundwater table is 2 m deep, the LNAPL plume had just reached the groundwater the 180 day. For the groundwater located 5 m deep, the LNAPL was still far above it after 180 days.

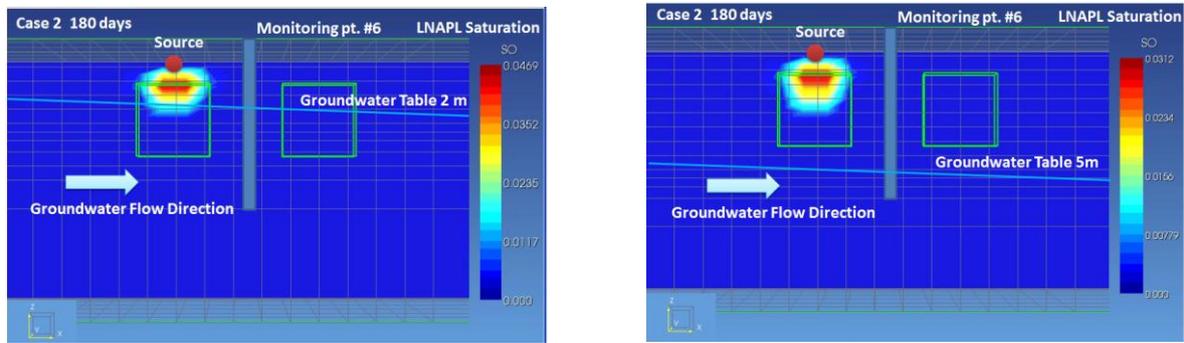


Figure 4. LNAPL saturation on day 180 in case 2

If  $k_h$  of backfill material increases 0.01 cm/s which is required by the regulation, it is possible that the benzene concentration in groundwater sampled from monitoring well #6 might reach 0.05 mg/L within 25 days and 45 days, for groundwater table of 2 m and 3 m, respectively. Although VOC vapour migration is driven by diffusion and not affected by  $k_h$ , the increased area of floating LNAPL will shorten the time for VOC vapour to migrate so that it also becomes more effective.

If the permeability is reduced to 1/10, the time for VOC vapour to reach 500 ppmV increases to 140, 160, and 230 days, respectively. Since the VOC vapour migration is driven by diffusion, it is likely that if the monitoring well is 1.5 m away from the leakage, the time for VOC vapour to reach 500 ppmV could be about 20 days.

The location of the leakage plays a significant role on the migration of LNAPL and its vapour. It can be seen in Figure 5 that for LNAPL leaks from above the tank (Case 1), the liquid will find its way to flow around and then downward along the side of the tank. Regardless of the depth of groundwater table, vapour concentration in monitoring well #5 adjacent to the leakage will reach 500 ppmV within 30 days for sand backfill with a permeability of  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  (Table 3). However, since the LNAPL accumulates on top of the tank, it is difficult for groundwater monitoring to detect the leakage even at high groundwater table condition. For case 3 where the leakage locates at the refilling port, the pattern of VOC vapour migration and dissolved VOC plume is similar to case 1. VOC vapour and groundwater monitoring by monitoring point #1 should be effective to detect the leakage within reasonable time even though the monitoring well is not at the downstream of the leakage.

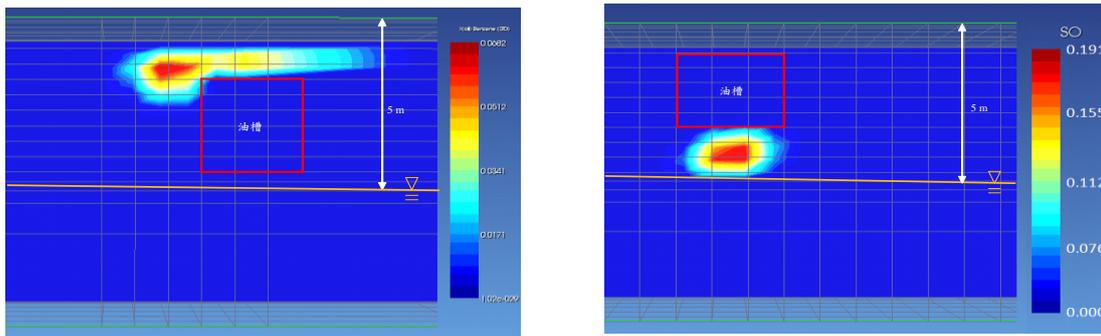
Table 3: Time to reach VOC vapour and benzene concentration limit in monitoring wells

Case	Ground water Table (m)	Monitoring location #1				Monitoring location #4			
		Time for soil vapour to reach 500 ppmV (day)		Time for benzene concentration to reach 0.05 mg/L (day)		Time for soil vapour to reach 500 ppmV (day)		Time for benzene concentration to reach 0.05 mg/L (day)	
		$K (\text{m}^2)$ $2.5 \times 10^{-12}$	$K (\text{m}^2)$ $2.5 \times 10^{-11}$	$K (\text{m}^2)$ $2.5 \times 10^{-12}$	$K (\text{m}^2)$ $2.5 \times 10^{-11}$	$K (\text{m}^2)$ $2.5 \times 10^{-12}$	$K (\text{m}^2)$ $2.5 \times 10^{-11}$	$K (\text{m}^2)$ $2.5 \times 10^{-12}$	$K (\text{m}^2)$ $2.5 \times 10^{-11}$
Case1	2	—	—	—	—	310	76	—	—
	3	—	—	—	—	—	100	—	—
	5	—	—	—	—	—	93	—	—
Case2	2	—	130	—	—	120	45	—	—
	3	—	205	—	—	180	80	—	—
	5	—	—	—	—	178	80	—	—
Case3	2	110	35	146	98	—	89	200	110
	3	110	40	—	180	—	120	—	350
	5	160	47	—	365	—	180	—	—
Case4	2, 3	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	—	—	—	—	—	—	—	90
Location of Leak	Ground water Table	Monitoring location #5				Monitoring location #6			
		Time for soil vapour to reach 500 ppmV (day)		Time for benzene concentration to reach 0.05 mg/L (day)		Time for soil vapour to reach 500 ppmV (day)		Time for benzene concentration to reach 0.05 mg/L (day)	

	(m)	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-12}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-11}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-12}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-11}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-12}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-11}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-12}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-11}$
Case1	2	46	23	—	—	300	80	—	—
	3	60	28	—	—	—	103	—	—
	5	70	33	—	—	—	130	—	—
Case2	2	1	1	102	85	140	45	140	102
	3	1	1	238	117	160	50	—	180
	5	1	1	—	—	230	61	—	—
Case3	2	—	185	300	118	—	200	—	120
	3	—	200	—	—	—	320	—	—
	5	—	—	—	—	—	—	—	—
Case4	2	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	—	—	89	63	300	80	—	—
	5	—	—	200	90	—	103	—	—
Monitoring location #7					Monitoring location #10				
Location of Leak	Ground water Table (m)	Time for soil vapour to reach 500 ppmV (day)		Time for benzene concentration to reach 0.05 mg/L (day)		Time for soil vapour to reach 500 ppmV (day)		Time for benzene concentration to reach 0.05 mg/L (day)	
		$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-12}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-11}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-12}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-11}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-12}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-11}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-12}$	$K$ ( $m^2$ ) $2.5 \times 10^{-11}$
Case1	2	—	160	—	220	255	50	—	190
	3	—	190	—	—	260	63	—	310
	5	—	—	—	—	258	73	—	—
Case2	2	—	120	180	105	—	80	330	120
	3	—	165	—	350	—	100	—	210
	5	—	—	—	—	—	160	—	—
Case3	2, 3, 5	—	—	—	—	—	—	—	—
Case4	2, 3	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	—	—	—	101	—	—	107	60

“—”: Vapour concentration or benzene concentration lower than regulation limits

For case 4 where LNAPL leaks from the bottom of the tank, it is difficult for soil vapour monitoring to detect leakage even when the groundwater table is 5 m deep. Since the effective length of soil gas wells are about 2.5 m long, the vapour takes 80 days to reach 500 ppmV in monitoring well #6. On the other hand, groundwater sample taken from monitoring well #5 will reach 0.05 mg/L in 63 days. When the groundwater table is 5 m deep, since more LNAPL is free to migrate downward the vapour accumulation in monitoring wells takes even longer and groundwater monitoring is more effective.



(a) Case 1 vapour distribution (GWT 5 m) (b) Case 4 LNAPL saturation (GWT 5 m)

Figure 5. Effect of leak location on LNAPL distribution pattern

#### 4 CONCLUSION

Based on the results of the simulation and discussion, the following conclusions can be made:

1. Both soil vapour and groundwater monitoring are more effective when the groundwater table is higher. The concentration of VOC vapour increases faster when groundwater table is higher.

2. Both soil vapour and groundwater monitoring are more effective in backfill soil with higher permeability.
3. For leakage from the top or bottom of the tank where the path of vapour diffusion and LNAPL migration is obstructed, efficiency of both vapour monitoring and groundwater monitoring is reduced. More monitoring wells are required to ensure effective monitoring.
4. In general, the impact of the location of the leakage is more significant than the depths of groundwater table and permeability on the effectiveness of leakage monitoring. Increasing the number of monitoring wells is the best way to enhance effectiveness of monitoring.
5. TMVOC is a powerful and appropriate tool for simulating LNAPL multiphase transport, however, the selection of parameters is a difficult task. Modelling efficiency could also be improved.

## 5 ACKNOWLEDGEMENTS

The funding of this research is provided by the National Science Council (NSC) of Taiwan through project NSC 98-2221-E-009 -133. The financial assistance of NSC is deeply appreciated.

## REFERENCES

- Miistry of Economy. (2010) Gasoline station statistics. <<http://www.moeaboe.gov.tw/oil102/cpknew/A04/A0410>> (Dec. 31, 2011) .
- Taiwan Environmental Protection Administration (TWEPA). (2011) "Codes on management and monitoring of underground storage tanks" (in Chinese) <<http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>> (Dec. 31, 2011)
- Taiwan Environmental Protection Administration (TWEPA). (2096a) "Stand procedure for soil vapour monitoring of underground storage tanks" (in Chinese) <<http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>> (Dec. 31, 2011)
- Taiwan Environmental Protection Administration (TWEPA). (2006) "Stand procedure for groundwater monitoring of underground storage tanks" (in Chinese) <<http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>> (Dec. 31, 2011)
- Weber, D. and F. Schwillie. (1991) "Passive vapor monitoring of underground storage tanks for leak detection." *Environmental Monitoring and Assessment*, 16, 99-116
- Fagerlund, F. and A. Niemi. (2003) "Multi- constituent modeling of a gasoline spill using the T2VOC numerical simulator." Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, California
- Zandin, H. and A. Niemi. (2006) "A modeling case study of napl transport in prous medium under the influence of variable water infiltration and geological heterogeneity." Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden
- Kererat, C. and S. Soralump. (2010) "Modeling of organic contaminant migration through soil cement barrier using TMVOC" The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference, Tailand
- Noonan, D. C. and J. T. Curtis. (1990) "Groundwater Remediation and Petroleum: A guide for underground storge tanks." Lewis Publishers, Chelsea, MI.
- Charbeneau, R.J., Chiang, C.Y. (1995) "Estimation of free hydrocarbon recovery from dual-pump systems." *Ground Water* 33 (4), 627-634.
- Charbeneau, R.J. (2007) "LNAPL distribution and recovery model. distribution and recovery of petroleum hydrocarbon liquids in porous media vol. 1." API Publication 4760. API Publications, Washington, DC.
- Charbeneau, R.J., Beckett, G.D. (2007) "LNAPL distribution and recovery model. user and parameter selection guide, vol. 2." API Publication 4760. Publications, Washington, DC.
- Rasmusson, K., and M. Rasmusson. (2009) "NAPL spill modelling and simulation of pumping remediation." Master Thesis, Department of Earth Sciences, Air, Water and Landscape Science, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala Sweden. ISSN 1401-5765

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/08/07

國科會補助計畫	計畫名稱: 地下水位變動對油品滲漏監測之影響
	計畫主持人: 單信瑜
	計畫編號: 100-2221-E-009-126- 學門領域: 大地工程
無研發成果推廣資料	

100 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：單信瑜		計畫編號：100-2221-E-009-126-					
計畫名稱：地下水位變動對油品滲漏監測之影響							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	1	0%	篇	單信瑜、陳培旻、楊凱仁，2011，加油站滲漏監測有效性評估，第 14 屆大地工程研討會，桃園，2011 年 8 月 25-26 日
		研究報告/技術報告	1	1	100%		
		研討會論文	2	1	50%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	3	3	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
博士後研究員		0	0	100%			
專任助理		0	0	100%			
國外	論文著作	期刊論文	1	0	100%	篇	H. -Y. Shan and P. -M. Chen, 2012, Evaluation of Effectiveness of Soil Gas and Groundwater Monitoring for Underground Storage Tanks, Proceedings, 11th Australia New Zealand
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
	研討會論文	2	1	50%			

Storage Tanks, Proceedings, 11th Australia New Zealand

							Changing World, Melbourne, Australia, 15-18 July, 2012
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力 (外國籍)	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)	本計畫成果已納入環保署環訓所加油站地下儲槽監測訓練班上課講義，每年有500人次以上的顧問公司、檢測機構、加油站與公司管理人員受訓。						
--------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------	--	--	--	--	--	--

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科教處計畫加填項目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

## 1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

## 2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

單信瑜、陳培昉、楊凱仁，2011，加油站滲漏監測有效性評估，第 14 屆大地工程研討會，桃園，2011 年 8 月 25-26 日

H.-Y. Shan and P.-M. Chen, 2012, Evaluation of Effectiveness of Soil Gas and Groundwater Monitoring for Underground Storage Tanks, Proceedings, 11th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, ANZ2012, Ground Engineering in a Changing World, Melbourne, Australia, 15-18 July, 2012

## 3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本研究成功地以多相流傳輸模擬軟體 TMVOC 模擬加油站儲槽與管線滲漏後，地下水位變動狀態下油品之純相、溶解相、蒸汽相傳輸，並據以評估土壤氣體與地下水監測之有效性。對學術界而言，TMVOC 是一個模擬功能很強的軟體但成功運用極為困難，尤其是過去並未成功地修改邊界條件以模擬地下水位變動的狀況，本研究是極大突破。對業界而言，過去無法有效模擬評估土壤氣體與地下水監測受環境因子影響下之有效性，本研究在此方面極具價值。