

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

非飽和土壤定流率導水度試驗研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-009-021-

執行期間：93年08月01日至94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：龍元祥、林立偉

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 25 日



# 含非水相液體土壤之透水性

## Water Permeability of Soils Partially Saturated by LNAPL

計畫編號：NSC93-2211-E-009-021

執行期限：93年8月1日至94年7月31日

主持人：單信瑜 國立交通大學土木工程學系 副教授

### 一、中文摘要

本研究的主要目的在於以壓力儀及滲透儀試驗方法以及 Van Genuchten 經驗公式，瞭解當非水相液體侵入土壤中時，水與有機液體在土壤中的互制行為。試驗採用的土壤為渥太華砂及寶二水庫現地土樣；所採用的有機液體為九五無鉛汽油、柴油及庚烷。實驗結果顯示：進行壓力儀試驗時，試驗土壤的顆粒越小，由於水具有佔據小孔隙的能力，所以水的殘餘量會隨之增加。另外不同的有機液體，與水的界面張力越大則同一張力下水的殘餘量也會變大。進行滲透儀實驗時，在相同的體積含水比之下，與水界面張力越大則水之滲透係數越小；另外試驗土壤的顆粒越小，相對的滲透係數也會跟著越小。以經驗公式預測水之滲透係數值，較為準確的為滲透儀保持曲線所得之結果，而比例原則所推得之結果較不理想。然而在同一個體積含水比之下，三條曲線所得之結果與實驗值之差異均在同一個數量級之內，就大地工程上應用來說，仍是接受的範圍。

### ABSTRACT

The main purpose of this study is to understand the hydraulic behavior between Non-Aqueous Phase Liquid (NAPL) and air in soils partially saturated by NAPL. Tempe cells were used to determine the Soil Water Characteristic Curve (SWCC) and custom-made fix-wall permeability cells were used to determine the hydraulic conductivity in soils. The RETC program is used to predict the hydraulic conductivity with empirical equations by utilizing SWCC data. The soils used in the study were Ottawa sand and Bow-Shan local sand. The NAPLs used were 95 gasoline, diesel, and heptane. The results of permeability tests showed that the liquids with higher surface tension of air yield lower permeability at the given volumetric water contents. On the other hand, the smaller the soil particles, the lower the permeability. The results also show that the hydraulic conductivity predicted utilizing SWCC data obtained during permeability and Tempe cell tests is more accurate. However, at any given volumetric water content, the hydraulic conductivity predicted by empirical equations is often 0.3 to 3 times of the experimental data. Therefore, the hydraulic conductivity predicted by empirical equations is acceptable when the results are applied to engineering purposes.

### 二、緣由與目的

地下水受到油品污染時，油品的傳輸受到土壤非飽和導水度的控制。不飽和層中水力傳導係數 ( $K$ ) 並非定值，而是會隨著土壤含水比或結構勢能變的函數 [ $K=K(\theta)$  or  $K=K(\psi)$ ]。如同土壤特徵曲線一般，不飽和層中水力傳導係數與土壤結構勢能間的關係，亦有遲滯現象。一般在高結構勢能時（即較低的毛細張力），含水比較高，土壤水力傳導係數  $K$  值亦較高，反之亦然。

直接以實驗量測非飽和土壤導水度方面的經驗與較量測飽和土壤導水度少，係因各階段的含水量控制不易，且在低飽和度時，相對導水度小，又無法利用高水利坡降避免影響含水比之平均分布，導致儀器設備之設計與試驗程序均遠較飽和之試驗複雜，且量測之不確定度亦高，所以整體困難度較高。本研究將進行一連串的定流率相對導水度試驗，以求出非飽和土壤導水度以及飽和土壤在含有 NAPL 時的導水度。

試驗部分區分成兩部分，利用兩種土壤，一為砂性，一為壤土（砂、沉泥、黏土皆有），進行以下非飽和導水度之兩相流體之兩種試驗：

- A.  $k$  of air-water, air-NAPL
- B.  $k$  of NAPL-water

藉由不同之定流率探討達到穩態時間之影響以及對於求出的導水度  $k$  之影響。並藉由試驗結果與 air-water SWCC 的經驗式推估值相互比較以下的結果：

1. 利用 air-water SWCC 推估  $k$  和實驗結果的差異。
2. 利用 air-water SWCC scaling 後得到的參數推估的  $k$  和實驗結果的差異。
3. 直接利用 air-NAPL or NAPL-water SWCC 推估的  $k$  和實驗結果的差異。

藉此探討定流率非飽和導水度試驗之有效性。

### 三、研究方法

本研究將進行之試驗包括：

1. 土壤物性試驗 - 求出土壤之基本物理性質，包括粒徑分布、最大與最小乾密度、比重、土壤分類等。
2. 土壤水特徵曲線 SWCC 試驗 - 包括 Air-Water, Air-NAPL, NAPL-Water 三大類，NAPL 將選擇以汽油代表 LNAPL、以 TCE 代表 DNAPL。
3. 定流率非飽和導水度試驗 - 流體對組合與 SWCC 相同。

### 3.1 試驗土壤

本試驗使用兩種土樣，分別為編號一 C109 渥太華標準砂和編號二新竹縣寶山第二水庫現地砂土。渥太華砂的顆粒大小均勻，所得之結果可以作為對照之用；現地土樣則由較細的顆粒組成，經試驗分析得到在土壤統一分類法當中屬於 SM，可以用來比較實驗結果。利用上述這兩種土壤，對不同有機液體的侵入，將作有系統的分析，了解有機液體與水在土壤中的平衡情形。

此兩種土樣的基本性質及試驗中所需之乾土量如表 3.1 所示。為了使試驗的土樣之間可以互相比較對照，試驗時必須控制土樣之某種一致性。一般採用控制單位重或相對密度等方式。本研究則採取以預設之土壤相對密度 60% 來控制土樣的一致性。相關標準試驗方法可參考 ASTM D421-85；D422-63；D4253-83；D4254-83。

表 3.1 試驗所用土壤之基本性質

編號	最大乾密度, (g/cm <sup>3</sup> )	最小乾密度, (g/cm <sup>3</sup> )	相對密度 60%, (g/cm <sup>3</sup> )	壓力儀試驗所需乾土重(g)	滲透儀試驗所需乾土重(g)
渥太華砂	1.799	1.506	1.669	113	814
現地土樣	1.650	1.258	1.467	100	716

### 3.2 試驗液體

試驗中所選擇的液體，除了水之外，有機液體部份則用汽油、柴油（Diesel Fuel）、庚烷（Heptane）作為試驗液體。汽油、柴油是機動車輛的燃料油，屬於混合物有機液體，一般加油站的地下儲槽即為此主要儲存液體，一旦儲槽滲漏，則汽油及柴油便成為土壤及地下水污染的主要來源。庚烷則是汽油的主要成分之一，屬於純有機液體，對於其各種性質較能掌握，有助於實驗結果之分析。由於汽油、柴油、庚烷的密度小於水，一般稱為輕水性非水相溶液（LNAPL）。有關各試體的性質則如表 3.2 所示，其中表面張力為工研院化工所的實驗結果。

表 3.2 試驗液體之重要性質

試驗液體	化學式	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	表面張力 (dynes/cm)	與水界面張力 (dynes/cm)
水	H <sub>2</sub> O	0.997	72.7	-
汽油	-	0.770	21.0	51.7
柴油	-	0.821	22.8	49.9
庚烷	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	0.689	19.5	53.2

### 3.3 滲流實驗裝置及程序

本試驗裝置是參考 Klute(1986)所曾提出之配置修改自製而成。本研究中的試驗模乃以不銹鋼材質製成。鋼模主要構造仍與保持曲線試驗用的 Tempe Cell 相當類似，主要部分為頂蓋、底蓋、主體部分、陶瓷片、陶瓷頭及環封。主體部分之內徑為 6.0cm、高度為 17.25 cm，內部體積為 487.73 cm<sup>3</sup>。頂蓋和底座一樣有環封防漏，主體側邊有三個孔，一側的雙孔（間距 10 cm）可連接較細之量管，用來觀測實驗時實際的水頭差，另一側的單孔則是用來連接不銹鋼儲液儀

(Permeant Interface Device, PID)使有機液體能侵入土壤中，頂蓋與底蓋各有一個孔，用來連接蠕動泵，讓水滲流，進而觀察土壤在不飽和狀態下的導水度。

空氣-水、空氣-有機液體、水-有機液體的非飽和滲透試驗，儀器試驗配置圖及滲流儀如圖 3.1 所示。滲流之滲流率用蠕動幫浦控制。當使用 NAPL 滲流時，因滲流液體仍是水，且僅流經過蠕動幫浦中的塑膠管線，因此僅使用一組 PID 當作儲水水槽即可。空氣-有機液體試驗時，滲流液體為有機液體，為不使水流經過蠕動泵之管線，因此必須使用兩個 PID。

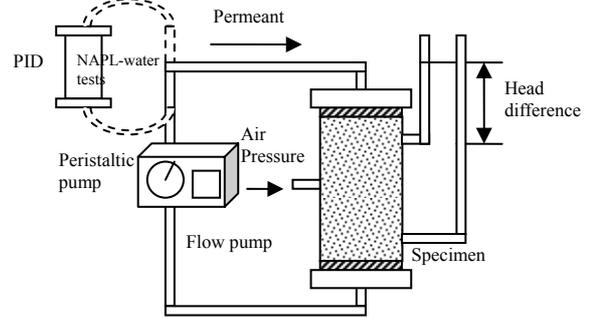


圖 3.1 滲流裝置配置圖

試驗程序主要為分為以下幾個步驟：

- 1、實驗裝置組裝及裝置土樣
- 2、試體飽和
- 3、裝置隔膜除液儀（PID）
- 4、進行試驗及紀錄

### 3.4 van Genuchten經驗公式求取滲透係數

大部分的保持曲線在量測及計算參數後，多用於預測水利傳導係數K值，因為於導水度K值不易量測且誤差大，相對的保持曲線量測較為方便。而近年來使用較多也是最具代表性為van Genuchten (1980)所發展模式。

van Genuchten之經驗公式如式(3.1)所示：

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (3.1)$$

上式中 $\theta$ 為體積含水比、 $\theta_r$ 為殘餘體積含水比、 $\theta_s$ 為飽和體積含水比、m則為van Genuchten參數、 $K_s$ 則為飽和時的滲透係數值。

本實驗是採用 RETC 程式（賴威宇，2004）進行分析，輸入的資料為各個保持曲線之張力與體積含水比之關係，並給予飽和時的滲透係數 $K_s$ 值，對於排出曲線來說，飽和K值即為一開始所測量之 $K_s$ 值，但是對濕潤曲線來說，飽和K值為滲透儀實驗當中，解壓過程最後張力值為零時所得之滲透係數值。經由程式分析之後便可以得到經驗公式中所需的參數m，把參數代入經驗公式中即可求得不同體積含水比下之滲透係數K值。再與滲透儀實驗所得之數據進行比較。

由於壓力儀及滲透儀實驗均可以求得該試體之保持曲線，加上由水對空氣保持曲線經比例原則推得之水對有機液體保持曲線，所以由經驗公式分析所得之K值曲線會有三條，再與滲透儀實驗值加以比較。

#### 四、結果與討論

實驗的第一個部分是採用壓力儀求取水—有機液體的保持曲線。試驗過程中先將土壤試體以水飽和，然後施加壓力使有機液體侵入試體中，水便會被排出，可以求得試體的主要排出曲線（MDC）；接著逐步進行解壓便可以求得試體的主要濕潤曲線（MWC）。

由水對不同有機液體之滲透實驗結果可以發現在排出曲線上，隨著張力的增加，含水比下降，滲透係數會急遽的減小，一旦張力值超過100 mbar之後，滲透係數值幾乎都接近零。而在濕潤曲線上的點因為含水比並沒有多大改變，所以滲透係數值也並無多大差異。

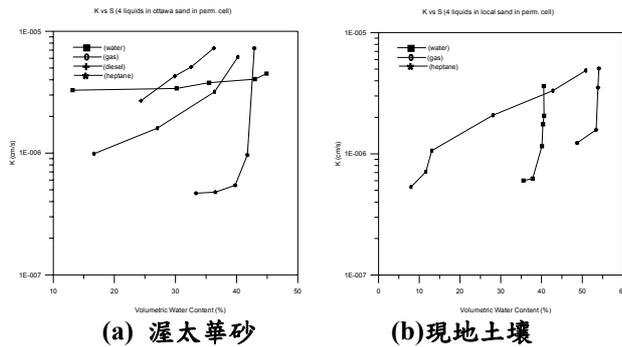


圖 4.1 不飽和導水度與體積含水比之關係

圖 4.1 表示渥太華砂與現地土壤不同液體在排水時導水度實驗值之比較，理論上來講，液體與空氣間的介面張力越大，在同樣的飽和度之下，因為毛細力的關係，應該有較小的 K 值，但以渥太華砂來看，水的導水度 K 並不是最低的，而且似乎不太合理，可能在判定張力平衡與否方面出了問題，當時讀到的數也許並不是實際的導水度值，如果有足夠的時間，再等待到達完全的平衡狀態，應該能改善這種情況。另外，在現地土樣的曲線中，可發現水和庚烷的曲線其實驗過程的飽和度變化範圍並不太大，原因是液體於現地土樣中滲透較緩慢，常常在張力值並不大時，就無法量測到 K 值了，這時便考慮開始進入回吸的狀態，求取另一導水度 K 值。

以下將各個試驗中所得之滲透係數值加以比較，討論中包含有以下四種滲透係數值，其中 K1 為滲透實驗值、K2 為滲透儀保持曲線帶入 RETC 程式所得之值、K3 為壓力儀保持曲線帶入 RETC 所得之值、K4 為壓力儀保持曲線(水-空氣)經比例原則所得之保持曲線(有機液體-空氣)帶入 RETC 所得之值。

圖 4.2~4.5 表示液體對空氣滲透係數值之比較。由圖可知排出曲線因渥太華砂試體顆粒較大且均勻，所以保持曲線上的差異較現地土樣來的小。

觀察曲線的差異，發現造成曲線不同的一個原因是因為起始點的體積含水比並不一樣(實驗值不同，輸入值不同)；壓力儀的保持曲線中，渥太華砂與現地土樣的飽和體積含水比較滲透儀的飽和體積含水比要來的高些，起點不一樣造成保持曲線不相同。探究原因，應當是壓力儀試體較小，在進行飽和時飽和度會

比較容易達到飽和；而滲透儀試體較大，飽和度相對就比較低，再加上滲透儀實驗中，空氣無法由陶瓷片中通過，不像壓力儀空氣可以由上方開孔排出，所以飽和度無法與壓力儀試體一樣高。若能將滲透儀飽和度提高，則實驗結果應該會更接近。

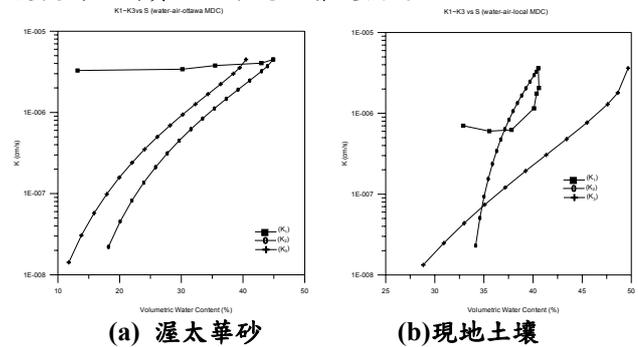


圖 4.2 水對空氣導水度值比較

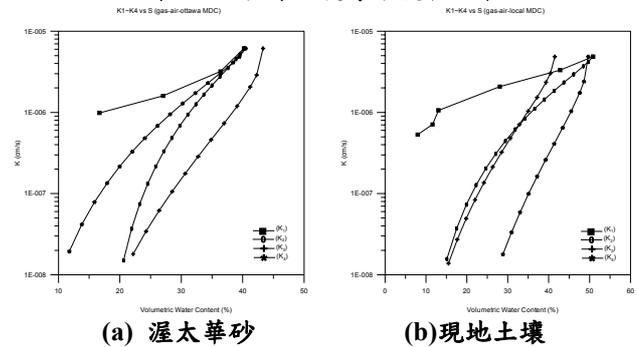


圖 4.3 汽油對空氣導水度值比較

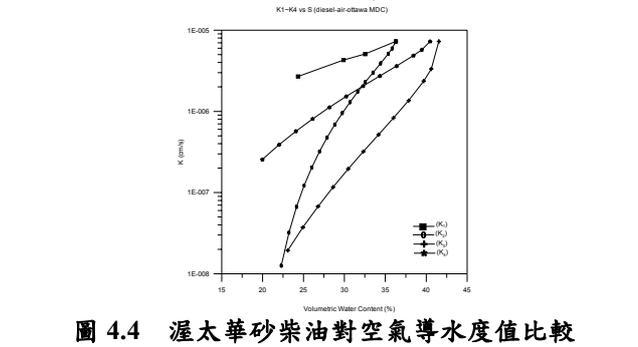


圖 4.4 渥太華砂柴油對空氣導水度值比較

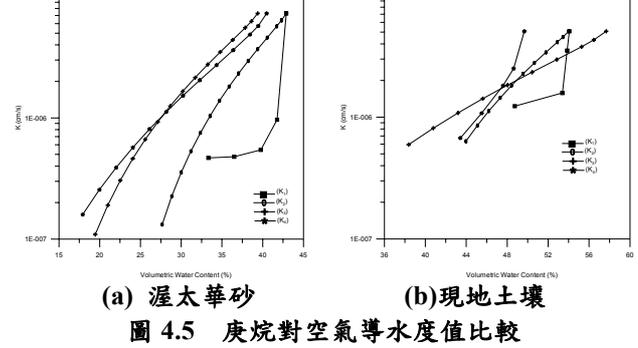


圖 4.5 庚烷對空氣導水度值比較

表 4.1~4.7 則為同一含水比各排出曲線 K 值之比較。表 4.1 中可看出，以 RETC 程式預測的 K3(為實驗值的 0.56、0.28 倍)較接近實驗值，而 K2 則為實驗值的 0.30、0.17 倍，以 K3 的預測值和實驗值較接近。表 4.2 中，則是預測值 K2 較 K3 接近實驗值；

K2 在兩個張力階段中，分別是實驗值 K1 的 2.24 及 0.82 倍，K3 則是實驗值的 0.23、0.12 倍。

表 4.3 中，預測值 K4 較接近實驗值(兩個張力階段中，為實驗值的 0.76、0.52 倍)，K2 和 K3 則是實驗值的 0.06 至 0.72 倍之間，變動頗大。不過整體看來，由比例原則推估的保持曲線資料再經由 RETC 程式預測的 K4 值，大都較其他的預測值不具參考性。

表 4.4 中，預測出來的 K 值似乎和實驗值不甚符合(從實驗值的 0.01 倍到飽和度較高時的 1.46 倍)，可能在試體設置及實驗過程中要更加注意有機液體揮發情況或初始、最終飽和度的檢查。

表 4.1 渥太華砂水對空氣 K 值比較 (排出)

含水比 (%)	滲透實驗 K <sub>1</sub>	經驗公式 K <sub>2</sub>		經驗公式 K <sub>3</sub>	
	K(cm/s)	K(cm/s)	K <sub>2</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub>
35	3.78E-06	1.12E-06	<b>0.30</b>	2.12E-06	<b>0.56</b>
30	3.40E-06	5.87E-07	<b>0.17</b>	9.42E-07	<b>0.28</b>
13	3.28E-06	1.79E-09	<b>0.0006</b>	2.07E-08	<b>0.01</b>

表 4.2 現地土壤水對空氣 K 值比較 (排出)

含水比 (%)	滲透實驗 K <sub>1</sub>	經驗公式 K <sub>2</sub>		經驗公式 K <sub>3</sub>	
	K(cm/s)	K(cm/s)	K <sub>2</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub>
40	1.16E-06	2.60E-06	<b>2.24</b>	2.66E-07	<b>0.23</b>
37	6.70E-07	5.52E-07	<b>0.82</b>	7.80E-08	<b>0.12</b>
33	6.98E-07	2.67E-11	<b>0.00004</b>	4.38E-08	<b>0.06</b>

表 4.3 渥太華砂汽油對空氣 K 值比較 (排出)

含水比 (%)	滲透實驗 K <sub>1</sub>	經驗公式 K <sub>2</sub>		經驗公式 K <sub>3</sub>		經驗公式 K <sub>4</sub>	
	K(cm/s)	K(cm/s)	K <sub>2</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>4</sub> /K <sub>1</sub>
36	3.19E-06	2.29E-06	<b>0.72</b>	5.86E-07	<b>0.18</b>	2.44E-06	<b>0.76</b>
27	1.60E-06	2.27E-07	<b>0.14</b>	9.30E-08	<b>0.06</b>	8.33E-07	<b>0.52</b>
17	9.87E-07	6.88E-12	<b>0.00001</b>	2.51E-09	<b>0.0025</b>	1.04E-07	<b>0.11</b>

表 4.4 現地土壤汽油對空氣 K 值比較 (排出)

含水比 (%)	滲透實驗 K <sub>1</sub>	經驗公式 K <sub>2</sub>		經驗公式 K <sub>3</sub>		經驗公式 K <sub>4</sub>	
	K(cm/s)	K(cm/s)	K <sub>2</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>4</sub> /K <sub>1</sub>
43	3.32E-06	1.99E-06	<b>0.60</b>	4.86E-06	<b>1.46</b>	6.01E-07	<b>0.18</b>
28	2.08E-06	3.89E-07	<b>0.19</b>	2.39E-07	<b>0.11</b>	1.16E-08	<b>0.01</b>
13	1.06E-06	1.44E-08	<b>0.01</b>	6.34E-09	<b>0.01</b>	1.37E-14	<b>0</b>

表 4.5 中，K2 在兩個張力階段中，為實驗值的 0.52、0.28 倍，K4 則為實驗值的 0.49、0.35 倍，不致偏離實驗值太大。表 4.8 中，K2 較 K3、K4 接近實驗值(K2 在三個張力階段中的值為實驗值的 6.60、3.79、1.88 倍，K3、K4 則為實驗值的 4.81 到 11.42 倍)。庚烷的揮發能力強，改善設備後應該能得到更準確的實驗值。

表 4.5 渥太華砂柴油對空氣 K 值比較 (排出)

含水比 (%)	滲透實驗 K <sub>1</sub>	經驗公式 K <sub>2</sub>		經驗公式 K <sub>3</sub>		經驗公式 K <sub>4</sub>	
	K(cm/s)	K(cm/s)	K <sub>2</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>4</sub> /K <sub>1</sub>
33	5.08E-06	2.66E-06	<b>0.52</b>	4.43E-07	<b>0.09</b>	2.48E-06	<b>0.49</b>
30	4.29E-06	1.21E-06	<b>0.28</b>	1.37E-07	<b>0.03</b>	1.52E-06	<b>0.35</b>
24	2.69E-06	6.68E-08	<b>0.02</b>	2.84E-08	<b>0.01</b>	5.69E-07	<b>0.21</b>

表 4.6 渥太華砂庚烷對空氣 K 值比較 (排出)

含水比 (%)	滲透實驗 K <sub>1</sub>	經驗公式 K <sub>2</sub>		經驗公式 K <sub>3</sub>		經驗公式 K <sub>4</sub>	
	K(cm/s)	K(cm/s)	K <sub>2</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>4</sub> /K <sub>1</sub>
42	9.67E-07	6.38E-06	<b>6.60</b>	7.28E-06	<b>7.53</b>	7.28E-06	<b>7.53</b>
36	4.78E-07	1.81E-06	<b>3.79</b>	5.46E-06	<b>11.42</b>	2.89E-06	<b>6.05</b>
33	4.68E-07	8.8E-07	<b>1.88</b>	2.25E-06	<b>4.81</b>	2.50E-06	<b>5.34</b>

表 4.7 中，點數較不足，但 K2 和 K3 都很接近實驗值(K2 在兩個張力階段中的值為實驗值的 1.44、1.45 倍，K3 則為實驗值的 0.97、1.66 倍)。從表中發現如果在同一個體積含水比(張力不同)的情形之下，則 RETC 程式預測所得的值常為實驗值的 0.3 倍至 2 倍之間，同一個體積含水比之下，各經驗公式所預測的值與實驗值差異都不大。

Taylor(1948)提出滲透係數值與土壤的粒徑分佈、滲流之流體性質及土壤之孔隙比有關。當滲流的流體固定時，則滲透係數就只和土壤的粒徑分佈及孔隙比有關。對於顆粒較大且粒徑分佈較為均勻的土壤來說，其保持曲線會有較明顯的空氣進入值，而且水在低張力的時候便幾乎被排出，當張力大於 80-100 mbar 時其體積含水比就幾乎沒有什麼變化，相對於顆粒較小的土壤來說，在張力超過 100 mbar 時其體積含水比仍陸續會減少，一直要到張力超過 500 mbar 時才幾乎沒有改變。由於用 RETC 程式求取滲透係數所依據的便是所提供的保持曲線資料，所以若保持曲線有差異，則預測的滲透係數值也會有所差異。RETC 程式所推得的保持曲線均為平滑的曲線，跟實驗值雖然十分接近但卻不會完全重合，整體而言，由表 4.1~4.7 的分析比較中可發現，以 RETC 預測水之滲透係數，在相同的含水比為基礎下，以滲透儀保持曲線資料和壓力儀保持曲線資料代入程式所獲得的結果(K2、K3 值)較為準確，而比例原則推得之保持曲線所得結果差異較大些。在同一個體積含水比之下，其所得之預測值多為實驗值之 0.3 至 3 倍，就大地工程上的應用來說，仍是可以接受的參考範圍。

表 4.7 現地土壤庚烷對空氣 K 值比較 (排出)

含水比 (%)	滲透實驗 K <sub>1</sub>	經驗公式 K <sub>2</sub>		經驗公式 K <sub>3</sub>		經驗公式 K <sub>4</sub>	
	K(cm/s)	K(cm/s)	K <sub>2</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>3</sub> /K <sub>1</sub>	K(cm/s)	K <sub>4</sub> /K <sub>1</sub>
54	3.52E-06	5.07E-06	<b>1.44</b>	3.40E-06	<b>0.97</b>	—	—
48	1.10E-06	1.59E-06	<b>1.45</b>	1.83E-06	<b>1.66</b>	2.24E-06	<b>2.04</b>

## 五、結論

本研究的結果顯示出以下結論：

1. 進行有機液體-空氣保持曲線試驗時，試驗土壤的孔隙越小，則有機液體的殘餘量會隨之增加，其間平衡的速率也較慢。
2. 進行滲透儀實驗時，在相同的體積含水比之下，試驗土壤的顆粒越小，相對的滲透係數也會跟著越小；由於自製試驗裝置精密度不高，加上試驗時的變因不少，可量測的 K 值範圍最小只到~10<sup>-7</sup>(cm/s)，但已屬可應用的有效參考範圍。
3. 欲利用保持曲線資料預測滲透係數時，採用壓力儀及滲透儀之保持曲線資料代入 RETC 程式均可得到不錯的成果。但理論上應以滲透儀保持曲線資料較能得到準確的預測，因為其初始飽和度和代入 RETC 程式所需的 Ks 值最接近實際滲透試驗時的狀況，在相同體積含液比的前提之下，其差異性極少大於 3 倍以上。
4. 進行滲透儀實驗，裝置土樣時須小心維持土壤結構的一致性，且提高土壤試體的飽和度將可以使實驗結

果更具有說服力。

5. 在相同的體積含水比之下，由 RETC 程式所預測的滲透係數值多為實驗值的 0.3 至 3 倍以內，仍屬可以接受的參考範圍。

## 六、參考文獻

1. 呂元鈞，碩士論文，「非水相液滲透係數—飽和度—毛細壓力關係之微模型試驗研究」，國立交通大學土木工程研究所，(2002)。
2. 黃進富，碩士論文，「土壤中水/有機液體保持特性研究」，國立交通大學土木工程研究所，(1996)。
3. 歐國隆，碩士論文，「遲滯效應及尺度原則對 NAPLs 於孔隙介質中傳輸模擬之影響」，國立交通大學土木工程研究所，(2000)。
4. 龍元祥，碩士論文，「含非水相液體土壤之透水性」，國立交通大學土木工程研究所，(2004)。
5. Boulding, J. R., (1995), "Ractical Handbook of Soil, Vadose-zone, and Ground-Water Contamination: Assessment, Prevention, and Remediation," Boca Raton: Lewis Publishers, pp.948.
6. Brooks, R. H., and Corey, A. T., (1964) "Hydraulic Properties of Porous Media," Colo. State Univ. , Fort Collins, Hydrol. Pap.3, pp.27.
7. Brown, H.W., (1951), "Capillary Pressure Investigations," Pet. Trans. AIME, 192: pp.67-74.
8. Calhoun, J. C., Lewis, Jr., M., and Newman, R. C., (1949), "Experiments on the capillary properties of porous solids, Pet. Trans." AIME, pp.189-196.
9. Campell, G. S., (1974), A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data, Soil Sci., 117: pp.311-314.
10. Chatzis, J.C., Lewis, Jr., and Lim, H.T., (1983), "Magnitude and Detailed Structure of Residual Oil Saturation," Soc. Pet. Eng. AIME Pap SEP, 23(2), pp.311-326.
11. Davidson, J. M., Nielsen, D. R., and Biggar, J.W., (1966), "The Dependency of Soil Water Uptake and Release on the Applied Pressure Increment," Soil Science Society of America, Proc. Vol. 30, No. 3: pp.298-304.
12. Demond, A. H., and Robert, P.V., (1991), "Effect of Interfacial Forces on Two-Phase Capillary Pressure-Saturation Relationships", Water Resour. Res., 27: pp.423-437.
13. Fetter, C. W., (1993), "Contaminant Hydrogeology", Macmillan Publishing Company, New York, pp.168-175.
14. Fourie, A. B., Papageorgiou, G., and Blight, G. E., (1995), "The Rapid Determination of the Moisture-Retention Characteristics of Soil," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.18, No.2, June 1995, pp.276-285.
15. Garden, W. R., (1956), "Calculation of Capillary Conductivity from Pressure Plate Outflow Data," Proceedings of the Soil Science Society of America, Vol. 20, No. 3, pp.317-320.
16. Haines, W. B., (1930), "Studies in the Physical Properties of Soil: V. The Hysteresis Effect in Capillary Properties and the Modes of Moisture Associated Therewith," Journal of Agricultural Science, Vol. 20, pp. 97-116.
17. Hillel, (1980), "Fundamentals of Soil Physics", New York: Academic Press, Inc, pp.413
18. Kia, S.F., (1988), "Modeling of the Retention of Organic Contaminants in Porous Media of Spherical Particles," Water Res. 22(10), pp.1301-1309.
19. Klute, A., (1986), "Water Retention: Laboratory Methods," Methods of Soil Analysis, Klute, A., Ed., No. 9, Part 1, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 635-662.
20. Lenhard, R.J., and Parker, J.C., (1987). "Measurement and Prediction of Saturation-Pressure Relationships in Three-Phase Porous Media Systems," Journal of Contaminant Hydrology, pp.407-424.
21. Lorentz, S. A., Durnford, D. S., and Corey, A. T., (1991), "Liquid Retention Measurement on Porous Media Using a New Capillary Pressure Cell," Agronomy Abstracts, Annual Meeting, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp.244
22. Mercer, J. W., and Cohen, R. M., (1990). "A Review of Immiscible Fluids in the Subsurface : Properties, Models, Chacterization and Remediation," J. of Contaminant Hydrology, V.6, pp.107-163.
23. Melrose, J.C., (1965). "Wettability as Related to Capillary Action in Porous Media," Soc. Pet. Eng. J., pp.259-271.
24. Morrow, N. R. (1970), "Irreducible Wetting Phase Saturation in Porous Media," Chem. Eng. Sci., 25(11), pp.1799-1815.
25. Muskat, M., (1937). The Floe of Homogeneous Fluids through Porous Media. New York: McGraw-Hill.
26. Palmer, C. J., and Johnson, R. L., "Physical Processes Controlling the Transport of Non-Aqueous Phase Liquids in the Surface" , Seminar Publication: Transport and Fate of Contaminants in the Subsurface, Chapter 3, EPA/625/4-89/019, pp.23-28(1989) .
27. Stevenson, F. J., (1982), "Humus Chemistry," Wiley and Sons, pp.444.
28. Su, C., and Brooks, R. H., (1980), "Water Retention Measurement for Soils," Journal of Irr. Drain. Div., Proc. ASCE, Vol. 106, pp.105-112.
29. Topp, G. C., Klute, A., and Peter, D. B., (1967), "Comparison of Water Content-Pressure Head Data Obtained by Equilibrium, Steady State, and Unsteady State Methods," Soil Science Society of America, Proc. Vol. 31, pp.312-314.
30. Van Genuchten, M. Th., (1980) "A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", Soil Sci. Soc. of Am. J., 44, pp.892-898.
31. Von Englahardt, W., (1955), "Interstitial Water of Oil Bearing Sands and Sandstones," Proc. World Petroleum Congress, pp.399-416
32. Wilson, J. T., (1988), "The Pore Level Spatial

Distribution and Saturation of Organic Liquids in  
Porous Media," Proc. NWWA Conf. on Petroleum  
Hydrocarbons and Organic Solvent in the Subsurface.