

國立交通大學  
土木工程研究所  
碩士論文

定流量非水相液體於土壤中滲流  
之研究

**Permeability of Partially Saturated Soils to  
NAPL under Constant Flow Rate**

研究生：陳維良

指導教授：單信瑜 博士

中華民國九十六年八月

定流量非水相液體於土壤中滲流之研究

**Permeability of Partially Saturated Soils to NAPL  
under Constant Flow Rate**

研究生：陳維良

Student: Wei-Lean Chen

指導教授：單信瑜 博士

Advisor: Hsin-Yu Shan

國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

August 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China.

中華民國九十六年八月

# 定流量非水相液體於土壤中滲流之研究

學生：陳維良

指導教授：單信瑜 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

由於在低飽和度狀況下，土壤的導水度甚低，因此傳統的定水頭或變水頭量測方法，不僅耗費頗長時間，且量測準確度較低。導致試驗時間長以及精確度低的主要原因之一，是因為在滲流過程中，非飽和試體中各部分的含水比會同時改變以達到新的平衡狀態，同時造成各部份水水頭不能穩定，造成無法判斷實驗是否已達穩定狀態(Steady state)。

本滲透儀試驗將利用低流量之蠕動幫浦作為滲流液體循環裝置，強制流入和流出的液體量相等，使試體提早達到穩態滲流，並利用 RETC 程式預測滲透係數值，瞭解非水相液體於土壤中，在不同的張力狀況下其保持行為。試驗採用的土壤為渥太華砂及寶二水庫現地土樣；所採用的非水相液體為：九五無鉛汽油與柴油。

進行滲透儀實驗時，在相同的體積含水比之下，與空氣界面張力越大則其滲透係數越小；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 RETC 程式預測液體之滲透係數值，較為準確的為滲透儀保持曲線所得之結果。在同一體積含水比下，本滲透儀試驗方法所得導水度  $k$ ，也較其他試驗方法來的準確。

# **Permeability of Partially Saturated Soils to NAPL under Constant Flow Rate**

Student : Wei-Lean Chen

Advisor : Hsin-Yu Shan

Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## **Abstract**

Direct measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils in the laboratory is difficult because not only the experimental setup is more complicated than that for measuring the hydraulic conductivity of saturated soils but the time for reaching steady state is often very long. Furthermore, the rate of inflow and outflow may not equalize for a long period of time since the water content within the specimen keeps varying with time to adjust to the imposed hydraulic gradient.

In this study a low flow rate peristaltic pump is used to force equal inflow and outflow rate of liquid permeating through the specimens to establish steady state flow condition. Hydraulic conductivity can thus be determined as soon as the water levels in the head monitoring pipettes are stabilized, which, theoretically, should take only a short period of time. 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 and diesel.

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 test is more accurate. However, at any given volumetric water content, the hydraulic conductivity predicted of permeability tests are more accurate than the other tests.

## 誌謝

在交大的研究生涯期間，承蒙指導教授 單信瑜博士悉心指導與協助。本論文得以順利完成，老師功不可沒，不管是在觀念啟發、實驗進行等方面，均給予我很大的幫助，在此謹向 單老師致上最誠摯的感謝與敬意。

另外，在論文口試期間，由衷地感謝朝陽科技大學 賴俊仁教授、中興大學 廖文彬教授及暨南大學 劉家男教授的親臨指教，為本論文提供寶貴的指正與建議，使本論文得以修正疏漏之處並改正缺失。

在學期間，承蒙本所各師長的悉心授業與教誨，同時同學與學弟在課業及生活上，亦給予我相當大的協助及關心，在此一併致謝。

最後，特別感謝我的父、母、女友彩鳳及其家人在求學期間給予我最大的支持，讓我能順利完成學業。在此對所有關心我的朋友致上最真誠的謝意，願此成果與他們共享。

# 目 錄

<u>章 節</u>	<u>頁 次</u>
中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
符號說明.....	xi
<b>第一章 緒論</b> .....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究範疇.....	4
<b>第二章 相關理論及研究</b> .....	5
2.0 摘要.....	5
2.1 流體通氣層中的傳輸行為.....	6
2.1.1 通氣層概論.....	6
2.1.2 勢能.....	7
2.1.3 流體於通氣層中的流動.....	8
2.2 非水相液體於通氣層中的行為.....	10

2.2.1 非水相液體的種類.....	10
2.2.2 有機液體的侵入情形.....	10
2.3 土壤水保持特性.....	16
2.3.1 保持曲線之定義.....	16
2.3.2 遲滯效應.....	18
2.3.3 殘餘飽和度.....	19
2.4 保持曲線求取方法.....	21
2.4.1 實驗室相關試驗方法.....	21
2.4.2 經驗公式.....	23
2.5 非飽和土壤之導水度.....	25
<b>第三章 研究方法.....</b>	<b>30</b>
3.0 摘要.....	30
3.1 試驗土壤基本性質.....	31
3.2 試驗液體.....	32
3.3 滲透儀實驗裝置及程序.....	33
3.3.1 滲透儀試驗裝置.....	39
3.3.2 滲透儀試驗程序.....	40
3.3.3 導水度試驗操作步驟與方法.....	48
3.3.4 蠕動幫浦的原理及功能.....	50
3.4 RETC 程式求取滲透係數.....	52
<b>第四章 實驗結果與分析.....</b>	<b>54</b>
4.0 摘要.....	54
4.1 保持曲線試驗結果.....	54
4.1.1 液體-空氣及水-有機液體保持曲線.....	55
4.1.2 保持特性與土壤性質的關係.....	58

4.1.3 流體性質對保持特性的影響.....	61
4.2 液體—空氣兩相滲流試驗.....	62
4.2.1 水對空氣滲透儀試驗結果.....	62
4.2.2 95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗結果.....	65
4.2.3 柴油對空氣滲透儀試驗結果.....	67
4.3 NAPL—水兩相滲流試驗.....	69
4.3.1 水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗結果.....	69
4.3.2 滲透實驗結果綜合比較.....	70
4.4 由 RETC 程式預測 k 值.....	80
4.5 綜合比較.....	85
<b>第五章結論與建議.....</b>	<b>92</b>
5.1 結論.....	92
5.2 建議.....	93
參考文獻.....	95
附錄 (Appendix) RETC 程式說明及使用.....	99

## 表目錄

	<u>頁次</u>
表 1.1 加油站分佈統計表.....	2
表 2.1 土壤含水比與結構势能關係的經驗方程式.....	24
表 2.2 土壤水力傳導係數與含水比關係的經驗方程式.....	28
表 3.1 滲流試驗項目.....	31
表 3.2 實驗使用二種土壤之基本性質.....	32
表 3.3 試驗液體之重要性質.....	33
表 3.4 不同管徑搭配不同轉速可提供流體流量.....	52
表 4.1 張力為 60 mbar 時之殘餘體積含液比.....	60
表 4.2 初始含液比與殘餘含液比之差值.....	61
表 4.3 初始含液比與最終含液比之差值.....	61
表 4.4 土樣一水對空氣 $k$ 值比較(排出曲線).....	88
表 4.5 土樣一汽油對空氣 $k$ 值比較(排出曲線).....	88
表 4.6 土樣一柴油對空氣 $k$ 值比較(排出曲線).....	88
表 4.7 土樣一水對汽油 $k$ 值比較(排出曲線).....	88
表 4.8 土樣二水對空氣 $k$ 值比較(排出曲線).....	89
表 4.9 土樣二汽油對空氣 $k$ 值比較(排出曲線).....	89
表 4.10 土樣二柴油對空氣 $k$ 值比較(排出曲線).....	89
表 4.11 土樣二水對汽油 $k$ 值比較(排出曲線).....	89
表 4.12 土樣一水對空氣 $k$ 值比較(濕潤曲線).....	90
表 4.13 土樣一汽油對空氣 $k$ 值比較(濕潤曲線).....	90
表 4.14 土樣一柴油對空氣 $k$ 值比較(濕潤曲線).....	90
表 4.15 土樣一水對汽油 $k$ 值比較(濕潤曲線).....	90

表 4.16	土樣二水對空氣 $k$ 值比較(濕潤曲線).....	91
表 4.17	土樣二汽油對空氣 $k$ 值比較(濕潤曲線).....	91
表 4.18	土樣二柴油對空氣 $k$ 值比較(濕潤曲線).....	91
表 4.19	土樣二水對汽油 $k$ 值比較(濕潤曲線).....	91

## 圖目錄

### 頁次

圖 2.1	三相存在於孔隙中.....	11
圖 2.2	液體飽和度與相對滲透係數之關係.....	12
圖 2.3	LNAPL 於地下流動情形.....	14
圖 2.4	DNAPL 於地下流動情形.....	15
圖 2.5	傳統的土壤水保持曲線.....	17
圖 2.6	不同粒徑土壤的保持曲線.....	17
圖 2.7	保持曲線的遲滯效應.....	19
圖 2.8	張力平板儀器裝置.....	21
圖 2.9	壓力儀示意圖.....	22
圖 2.10	Water-TCE 兩相滲流試驗結果.....	26
圖 2.11	TCE-Water 兩相滲流試驗結果.....	26
圖 2.12	$k_r(h)$ 經驗式的預測與實驗結果比照圖.....	29
圖 3.1	實驗基本架構.....	30
圖 3.2	兩種土樣之粒徑分佈曲線.....	32
圖 3.3	不飽和滲透試驗配置圖.....	34
圖 3.4	水對空氣導水度試驗配置示意圖.....	35
圖 3.5	95 無鉛汽油對空氣導水度試驗配置示意圖.....	35
圖 3.6	柴油對空氣導水度試驗配置示意圖.....	36

圖 3.7	水對 95 無鉛汽油導水度試驗配置示意圖.....	36
圖 3.8	兩相流滲透儀主體.....	37
圖 3.9	滲透儀裝置主體部分.....	37
圖 3.10	滲透儀所用陶瓷片及陶瓷頭.....	38
圖 3.11	隔膜貯水儀示意圖.....	39
圖 3.12	滲透儀裝置組裝完成圖.....	45
圖 3.13	U 型管連接示意圖.....	46
圖 3.14	不同氣壓下陶瓷片孔隙內凹面變化情形.....	47
圖 3.15	側壁通氣孔示意圖.....	47
圖 3.16	蠕動幫浦.....	51
圖 3.17	蠕動幫浦作用機制.....	51
圖 4.1	水對空氣滲透儀保持曲線.....	56
圖 4.2	95 無鉛汽油對空氣滲透儀保持曲線.....	56
圖 4.3	柴油對空氣滲透儀保持曲線.....	57
圖 4.4	水對 95 無鉛汽油滲透儀保持曲線.....	57
圖 4.5	水對空氣保持曲線與前人比較(滲透儀).....	58
圖 4.6	汽油對空氣保持曲線與前人比較(滲透儀).....	59
圖 4.7	柴油對空氣保持曲線與前人比較(滲透儀).....	59
圖 4.8	水對汽油保持曲線與前人比較(滲透儀).....	60
圖 4.9	不同液體對空氣保持曲線(土樣一).....	62
圖 4.10	不同液體對空氣保持曲線(土樣二).....	62
圖 4.11	水對空氣滲透儀試驗(土樣一).....	63
圖 4.12	水對空氣滲透儀試驗(土樣二).....	64
圖 4.13	水對空氣滲透儀試驗.....	64
圖 4.14	95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗(土樣一).....	65
圖 4.15	95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗(土樣二).....	66

圖 4.16	95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗.....	66
圖 4.17	柴油對空氣滲透儀試驗(土樣一).....	67
圖 4.18	柴油對空氣滲透儀試驗(土樣二).....	68
圖 4.19	柴油對空氣滲透儀試驗.....	68
圖 4.20	水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗(土樣一).....	69
圖 4.21	水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗(土樣二).....	70
圖 4.22	汽油與柴油對空氣滲透儀試驗比較(土樣一).....	71
圖 4.23	汽油與柴油對空氣滲透儀試驗比較(土樣二).....	72
圖 4.24	水對汽油與空氣滲透儀試驗比較(土樣一).....	73
圖 4.25	水對汽油與空氣滲透儀試驗比較(土樣二).....	73
圖 4.26	水對汽油與空氣的 $k-S$ 實驗曲線(土樣一).....	74
圖 4.27	水對汽油與空氣的 $k-S$ 實驗曲線(土樣二).....	74
圖 4.28	汽油與柴油對空氣的 $k-S$ 實驗曲線(土樣一).....	75
圖 4.29	汽油與柴油對空氣的 $k-S$ 實驗曲線(土樣二).....	75
圖 4.30	水對空氣滲透儀試驗結果與前人比較.....	76
圖 4.31	水對空氣滲透儀試驗結果與前人比較.....	77
圖 4.32	95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗結果與前人比較.....	77
圖 4.33	95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗結果與前人比較.....	78
圖 4.34	水對 95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗結果與前人比較.....	78
圖 4.35	水對 95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗結果與前人比較.....	79
圖 4.36	柴油對空氣滲透儀試驗結果與前人比較.....	79
圖 4.37	水對空氣滲透儀試驗結果與 RETC 程式預測 $k$ 值之比... ..	81
圖 4.38	汽油對空氣滲透儀試驗結果與 RETC 程式預測 $k$ 值之比..	82
圖 4.39	柴油對空氣滲透儀試驗結果與 RETC 程式預測 $k$ 值之比..	83
圖 4.40	水對汽油滲透儀試驗結果與 RETC 程式預測 $k$ 值之比較..	84

## 符號說明

$\theta$	: 體積含水比	$k(h)$	: 不飽和水力傳導係數
$W$	: 重量含水比	$k_s$	: 飽和時水力傳導係數
$\theta_s$	: 飽和時體積含水比	$k_r$	: 相對滲透率
$\theta_r$	: 殘餘體積含水比	$p_c(S)$	: 毛細壓力-飽和度曲線
$\delta$	: 接觸角	$W_0$	: 空壓力儀重
$h_b$	: 空氣進入值	$W_s$	: 試驗乾土重
$S$	: 飽和度	$W_l$	: 壓力儀+濕土重
$S_e$	: 有效飽和度	$W_w$	: 水重
$\lambda$	: Brooks and Corey 參數	$V$	: 套環體積
$\Psi$	: 結構勢能	$\rho_w$	: 水密度
$m$	: Van Genuchten 參數	$r$	: 毛細管半徑
$n$	: Van Genuchten 參數	$\beta$	: 比例放大因素
$\alpha$	: Van Genuchten 參數	$\sigma_{ij}$	: 界面張力

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

由於台灣地形狹長，河流逕流較短，雖然各地區均有水庫可供儲水，但因地形陡峭及集水區水土保持不確實，往往大雨一來造成地表沖刷，使水庫淤積，至今每逢颱風一來缺水的問題也接踵而致，因此地下水資源的利用也成為人們關心課題。台灣各種用水的主要來源有三類：水庫水(21%)、河川水(45%)以及地下水(34%)，全台灣每年總用水量為178.51億噸，地下水抽取量高達71.39億噸(水利署, 2004)。

然而地下水及易受地表污染之危害而造成局部性或區域性之污染，以往除了農藥造成直接的地下水污染，由於台灣地區污水排水系統也不完善，工業及家庭廢水均可能污染了土地及地下水源；此外地下油槽的有機液體，常因儲槽或管線的破損而導致有機液體滲漏。由於台灣地區石化工業發達，再加上全省二千多各加油站(如表1.1)，地下儲槽的數量頗為可觀。一但這些儲槽發生滲漏(多半為汽油、柴油等有機液體)，除了直接污染了土壤、地下水之外，更可能因為有機液體揮發，引起一些公共意外災害，對於附近民眾的生命財產造成很大的危害。

然現今一般發生污染後，隨即接受污染物質的是非飽和層土壤，之後才會慢慢地傳輸到地下水層。因污染物、土壤性質的不同，污染物在往下傳輸的過程中可能發生各種物理或化學的現象，或因雨水、地表入滲造成的影響、孔隙中水份與有機液體之比例會依壓力改變，故地層中依深度不同，土壤內含有機污染物之量亦不同，這些變化而且會因土壤之孔隙大小，粒徑分佈而改變。使得污染物的流速不均。因此，為了解此類的流體於非飽和土壤中傳輸的速率及行為，進而提

供對於污染物的處理有一套解決的方法，相關議題的研究非常重要。

表 1.1 加油站分佈統計表(經濟部能源局, 2007)

類 別  縣 市 別	合 計			類 別  縣 市 別	合 計		
	中油	民營	總計		中油	民營	總計
台北市	41	39	80	桃園縣	50	224	274
高雄市	40	65	105	新竹縣	19	63	82
基隆市	14	15	29	苗栗縣	30	71	101
新竹市	11	32	43	台中縣	31	180	211
台中市	19	93	112	彰化縣	33	139	172
嘉義市	11	23	34	南投縣	23	74	97
台南市	30	43	73	雲林縣	35	79	114
台北縣	48	189	237	嘉義縣	32	71	103
台南縣	69	164	233	澎湖縣	4	6	10
高雄縣	33	143	176	金門縣	0	8	8
屏東縣	33	101	134	連江縣	0	1	1
台東縣	18	29	47	宜蘭縣	18	41	59
花蓮縣	18	52	70	合計	660	1945	2605

## 1.2 研究目的

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非水相液體(Non-aqueous phase liquid, NAPL)時的導水度(Hydraulic conductivity,  $k$ )。本研究之結果希望可以提供往後工程師在進行污染整治時，可以推算現的地污染情況，進一步設計良好的整治方案。

本試驗部分將區分成兩部分，利用兩種土壤，一為渥太華砂，一為寶山第二水庫工址附近現地土壤(含砂、沉泥、黏土)，來進行以下

飽和和非飽和導水度之兩相流體導水度試驗：

- 1、 建立水對空氣及 NAPL 對空氣之兩相系統導水度試驗，以求取飽和及非飽和階段所對應的導水度  $k$ ，並求取系統中土壤特徵曲線 (Soil water characteristic curve, SWCC)，即是試驗中各張力所對應體積含水比之關係。
- 2、 建立水對 NAPL 之兩相系統導水度試驗，以求取飽和及非飽和階段所對應的導水度  $k$ ，並求取系統中土壤特徵曲線 (SWCC)，即是試驗中各張力值所對應體積含水比之關係。

並將由導水度試驗結果與試驗所得土壤特徵曲線 (SWCC) 經由經驗式推估的導水度值相互比較，以及其他試驗方法得出的導水度  $k$  相互比較，包括：

1. 龍元祥(2004)所做的含非水相液體土壤之透水性，所得的水對 NAPL 之兩相系統導水度  $k$  與本實驗結果進行比較。
2. 林立偉(2005)所做的非水相液體於土壤中滲流之研究，所得的水對空氣及 NAPL 對空氣之兩相系統導水度  $k$  與本實驗結果進行比較。
3. 直接利用水對空氣、水對 NAPL 及 NAPL 對水導水度試驗所得的 SWCC 推估的導水度和實驗結果的差異，藉此探討定流率非飽和導水度試驗之有效性。

### 1.3 研究範疇

本研究中將採用兩種不同的土壤(C109 渥太華砂及寶二水庫之現地土壤)，並採用水及兩種不同的有機液體(汽油、柴油)，共三種液體分別與空氣及水與 95 無鉛汽油進行兩相滲流試驗。

主要的工作如下：

- (1) 土壤基本性質試驗：如粒徑分佈及最大、最小乾密度試。
- (2) 有機液體基本性質試驗：即密度與界面張力試驗。
- (3) 滲透儀試驗裝置：求取在土壤中不同飽和度下水對空氣、水對 NAPL 及 NAPL 對水兩相度滲流之導水度  $k$ 。
- (4) 實驗數據之整理與分析。
- (5) 利用(Retion curve program for unsaturated soils , RETC) 程式推估導水度與實驗結果互相比較及驗證。
- (6) 討論與建議

## 第二章 相關理論及研究

### 2.0 摘要

不論是石化工業、電子電器工廠、半導體製造業造成的污染或是地下油槽的滲漏，污染物質其中多半為石化產品、三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)、四氯乙烯(Tetrachloroethylene, PCE)、三氯乙烷(Trichloroethane, TCA)、汽油、柴油等有機溶劑。一般而言有機液體可分為兩大類：其一為密度較水小之 LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid)，此污染物比水輕，透過土壤後會浮在地下水位上，隨著地下水流動而擴散；另一為密度較水大之 DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid)，此污染物比水重，透過土壤後則繼續往地下水層底部移動，沿著地下水層底部的不透水層地形往低處移動。

不溶於水的有機液體在地表或地下滲漏後，會經由通氣層(Vadose zone)，進入地下含水層中。因此有機液體對土壤及地下水所造成的污染皆從通氣層開始，且其在通氣層中會因土體結構及流體本身性質的差異，造成土壤本身儲存或保持能力的不同，使得有機液體在土壤中的殘餘量亦隨之改變。

本章中，首先概述何謂通氣層；其次介紹流體在通氣層的流動情形，及不同種類的非水相液體在通氣層中的狀態及傳輸情形。另外，對於土壤保持曲線、液體在土體中的遲滯現象(Hysteresis)、殘餘飽和度(Residual Saturation) 等觀念，亦做一簡單探討。最後，將說明一些與土壤保持曲線相關的試驗方法及經驗公式，並簡單介紹保持曲線應用在非飽和層中的水力傳導特性等。

## 2.1 流體在通氣層中的傳輸行為

### 2.1.1 通氣層概論

通氣層一般可定義為包含三相的系統，即固態、液態、氣態三種物質。固態物質主要由礦物顆粒及有機物組成，在經過物理和化學作用，如風化、膠結、壓密等，則形成我們常見的岩石、土壤；液態物質則包括可溶於水的物質，及不溶於水的非水相物質，許多有機液體即屬此類；氣態物質則為水蒸氣及其他氣體，其比例和大氣中各氣體比例並不相同，端視通氣層中各物質的存在情形而定。英文中現多稱通氣層為 Vadose Zone，因為此層中的毛細水邊緣層(Capillary Fringe)，雖位於地下水位以上，但因毛細力作用，含水比近飽和。

Davidson (1966)將「通氣層」細分為三層：土壤水層(Soil Water Zone)、中間通氣層(Intermediate Vadose Zone)、以及毛細水邊緣層。土壤水層與中間通氣層係以土石風化狀況區別，土壤水層指的是最近地表的風化層，中間通氣層則是由風化層至完全未受風化的土壤或岩層間的漸變區域。許多情況下，中間通氣層根本不存在，或二者無法仔細分辨。此二層中液體之流動，因含水比不同而變化。含水比愈高，導水度愈大，水的流動速率愈快。土壤水層因最接近地表，這也是最早接受污染物的區域。其中各種物理、化學作用的發生機會較大、種類亦多，且因空氣充足，好氧微生物作用強。污染物性質變化最大。

毛細水邊緣層是通氣層的底層，其下就是地下水位，緊接著地下水含水層。此區域含水近飽和，導水度高，水流動速率較以上二層快。若遭密度較水小之 LNAPL 污染，由於表面張力作用，會停滯浮在毛細水邊緣層之上；若遭密度較水大之 DNAPL 污染，若其水頭不大，無法克服進入壓力(Entry Pressure)，則也會浮在毛細水邊緣層之上。

毛細水邊緣層的厚度乃依土壤粒徑大小而異。土壤顆粒愈小者，其顆粒間孔隙愈小，相當於毛細管的管徑較小，所以毛細水的高度較高，亦即毛細水邊緣層厚度較厚；反之，土壤顆粒愈大者，毛細水邊緣層厚度較小。在某些狀況下，例如降雨雨水入滲後，水滲入至毛細水邊緣層上，此時毛細水邊緣層厚度會比前述依土壤粒徑關係推估者大，乃屬短暫之情形，最後仍應達到勢能平衡，恢復應有厚度。有機液體污染浮在毛細水邊緣層之上，也可能使整體毛細水邊緣層厚度變大，此時毛細層中之孔隙液體則包括水與有機污染物。

### 2.1.2 勢能 (Potential)

液體在地下的滯留與移動情形，以水為例，可以用能量的觀點來描述。通常以自由能量(Free Energy) 該項來判斷水在地層中流動的趨勢。當自由能量因為某項主要因素改變造成差異時，水將會由較高的自由能量往較低的自由能量處而移動。

土壤與水之間自由能量主要受三種不同的能量勢能(Potential) 所影響(Boulding , 1995)：

1. 結構勢能(Matric Potential)：指水和土壤顆粒之間的吸引力。主要是由於顆粒對水的吸附(Adsorption)及孔隙間的毛細作用所引起。此勢能會減少自由能量的量值，即結構勢能會使水留滯，因此視為負值，亦稱為結構張力(Matric Suction)。

2. 滲透勢能(Osmotic Potential)：由於溶解在水中的物質造成，及離子對水的吸引力而降低了自由能量，造成純水會往含高濃度溶質處移動之現象，故滲透勢能亦為負值，亦稱為滲透張力(Osmotic Suction)。

3. 重力勢能(Gravitational Potential)：由於地心引力對重心的吸引而導致水的流動，因此重力勢能必為正值。

土水勢能(Soil Water Potential)主要即為此三種勢能之和。惟有在重力勢能大於結構勢能和滲透勢能之和時，水才會造成移動。在不飽和層中，結構勢能及滲透勢能是影響水流動的主要因素。

對於一般土壤而言，毛細力可能是造成水移動的最重要機制，因此在探討液體於土壤中的行為時，常就以結構勢能，即毛細張力，視為最重要的影響因素；而對於黏土質土壤來說，滲透束縛及電雙層作用則佔主要的支配力。

### 2.1.3 流體於通氣層中的流動

水(有機液體)於通氣層中流動的機制主要是重力及毛細力。接近飽和的土壤，如大雨後的濕潤土壤，其中的水分會因為重力作用而向下流動，當重力作用和表面張力作用大小相同時，重力排水即停止。(此時該土壤中的含水量稱為田間含水量，Field Capacity)。當土壤漸漸變乾之後，毛細作用則佔用主要的影響因素。毛細力可分為兩種：一為水與土壤之間的吸引力，稱為附著力(Adhesion)；一為水分子之間的吸引力，稱為內聚力(Cohesion)。這兩種作用力則統稱為毛細力。由於毛細力的作用，可使水保持於土壤孔隙中，並造成負的壓力(張力)。而土壤的粒徑大小分佈、夯實度大小、不同液體的侵入等，都會影響土體中液體與毛細張力間的關係。

流體在通氣層中移動，滲透係數(Permeability,  $k$ )並非定值，而是隨著土壤中的飽和度而改變，其滲透係數可以表達成飽和度的函數形式 $k(S)$ 。在多相流中可以廣義的達西定律來定義(Muskat, 1937)：

$$q_i = -\left[ \frac{k_i(S)}{\mu_i} \right] (\nabla P_i - \rho_i g \nabla h) \quad (2.1)$$

其中各個參數之涵義為：

$q_i$ ： $i$ 相液體之達西速度

$k(S)$ ：有效滲透係數(Effective Permeability)

$\mu$ ：黏滯係數(Viscosity)

$P$ ：壓力(Pressure)

$\rho$ ：液體密度(Density)

$g$ ：重力(Gravitational Acceleration Constant)

$h$ ：高程(Elevation Above a Datum)

$i$ ：第 $i$ 相流體

對於一個特定的流體而言，相對滲透係數(Relative Permeability,  $k_r$ )可以定義成有效滲透係數(Effective Permeability) 與飽和（本身）滲透係數的比率，其變化的範圍從 0~1 之間：

$$k_{ri}(S) = \frac{k_i(S)}{k} \quad (2.2)$$

其中， $k_{ri}(S)$ 是第 $i$ 相流體的相對滲透係數， $k$ 是飽和滲透係數。

## 2.2 非水相液體於通氣層中的行為

### 2.2.1 非水相液體的種類

純有機液體在水溶液中不能輕易溶解，會獨自形成一分離相的液體，稱為非水相液體(Non-aqueous phase liquid, NAPL)。非水相液體可以分為兩大類：密度小於水的稱為 LNAPL (Light non-aqueous phase liquid)；密度大於水的稱為 DNAPL (Dense non-aqueous phase liquid)。大部分的 LNAPL 為混合碳氫化合物的燃料油，諸如汽油、柴油、各類機油，這些油品中主要成份為烷類，亦含有許多芳香烴族的產物，包括了苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、乙基苯(Ethylbenzene)、二甲苯(Xylene) 等四種油品中最常見的可疑致癌物質，亦即俗稱之 BTEX。油品中亦含有近年來被視為極難分解的 MTBE 等有機物質；而 DNAPL 主要為含氯的碳氫化合物，如三氯乙烯(TCE)、四氯化碳、氯酚、氯苯等，多半為有毒的成份。

當 LNAPL 或 DNAPL 不慎洩漏到土壤之中，由於流體本身密度的差異，污染土壤及地下水的形式及過程就有相當大的差異。不過兩者所造成的污染都是大污染範圍，而且殘留的時間相當長。

### 2.2.2 有機液體的侵入情形

當 NAPL 移動至非飽和層中後，繼續由重力之作用以單獨一相 (Separate Phase) 往下移動，其整體往下向地下水位移動，但有些則沿移動路徑留滯於土壤孔隙中。有機液體之存在使得通氣層被提升成為一三相液體共存之系統——水、有機液體、空氣(如圖 2.1)。在典型之土壤系統中，水是溼相(Wetting Fluid)，會佔據最小的孔隙。在一含水的兩相系統中，空氣或汽油為非溼相(Non-Wetting Fluid)，但在三相併存情況下，其溼相之順序(Wettability)為：水、NAPL、空氣。

此序列決定三流體在土壤孔隙中之位置，與其對滲流之影響。溼相流體，例如水，在通氣層中於低飽和度時會佔據小的孔隙，以一土壤顆粒上之水膜(Thin Film) 狀態存在。而空氣會存在於較大孔隙中，且於其間移動。而有機液體則屬中間溼潤(Intermediate Wetting)，可能也以薄膜附在水膜之上，或以油粒狀態存在，相對於空氣而言，其為溼相流體。通常 NAPL 在地下水中移動時會取代水及空氣的位置。水對於空氣及 NAPL 來說為濕相液體，因此會沿著孔隙的邊緣前進，並且附著在土壤顆粒上；NAPL 為非濕相液體，則傾向於往孔隙的中心部位移動。在通氣層中，孔隙中常同時含有水、NAPL，甚至空氣。這些流體對於土壤的滲透性往往比孔隙中只充滿某一種液體時來得低。圖 2.2 表示水及 NAPL 在不同飽和度時與其相對滲透性的關係。每個流體(水或 NAPL) 都會因其飽和度的遞減，使其相對滲透性跟著減少，直到該流體達到其殘餘飽和度，相對滲透性變成零，即意味著該流體在土壤中已經不具流動性。

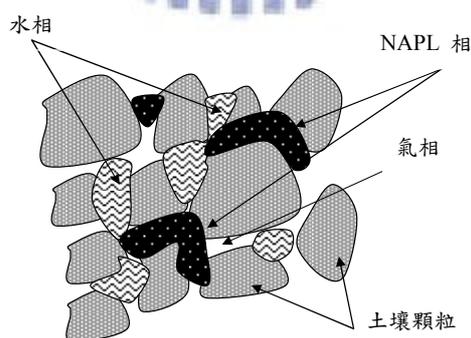


圖 2.1 三相存在於孔隙中(歐國隆, 2000)

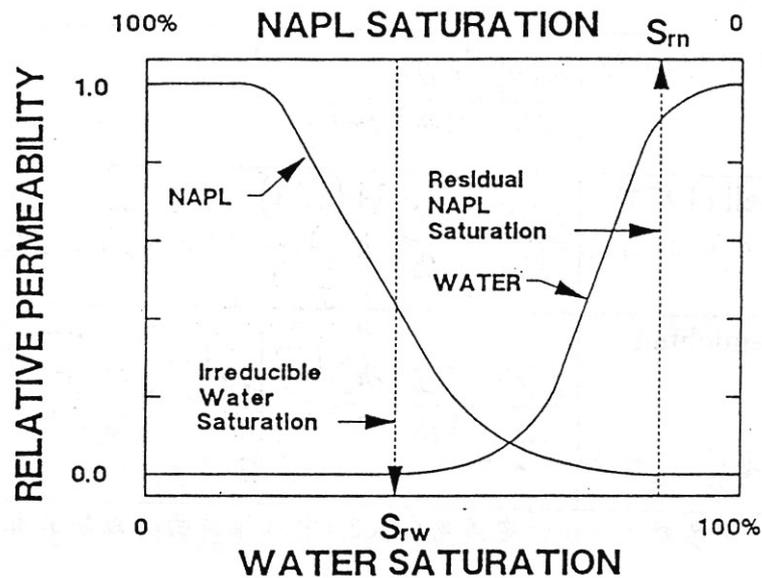


圖 2.2 液體飽和度與相對滲透係數之關係(Palmer and Johnson, 1989)

NAPL 在土壤中的行為及流動情形則視其為 LNAPL 或 DNAPL 的不同而有所差異。圖 2.3 則表示 LNAPL 在地下的移動情形。當滲漏的 LNAPL 量少時(如圖 2.3A)，除非超過殘餘飽和度，否則 LNAPL 會停留在通氣層中。但 LNAPL 中有些溶解度較高的物質(如苯、甲苯、二甲苯) 會溶解於入滲水而將其帶入地下水中；LNAPL 的揮發性較高(汽油、機油等)，因此其氣相也會和土壤中的空氣成一比例存在，並且藉著分子擴散在不通氣層中移動著。

若有較多的 LNAPL 滲漏(如圖 2.3B)，將會造成 LNAPL 到達地下水位。溶解在水中的有機物質將比滲漏的 LNAPL 先到達毛細層的頂部，且隨著毛細層中水的濕相性被改變，其殘餘飽和度逐漸減少，

終至穿過毛細層到達地下水位，並形成一凹面。當 LNAPL 滲漏因通氣層中的 LNAPL 達到殘餘飽和而不再流動，LNAPL 將在毛細層上半部側向擴散(圖 2.3C)，地下水位也會因為 LNAPL 及水之間界面的總水頭降低而稍有回彈，但 LNAPL 仍然會以殘餘飽和度的量存在著，且入滲水亦會持續著將通氣層中 LNAPL 的某些物質溶解到地下水中，造成含水層的污染(呂元鈞, 2002)。

圖 2.4 則為 DNAPL 的滲漏情形。由於 DNAPL 有較低的溶解度、高密度及低黏滯力的影響，使得 DNAPL 在土壤中具有相當大的流動性。在取代水時，水相對地為低密度、高黏滯性流體，因此兩流體在接觸面上會造成不穩定的前進鋒面，即所謂 Viscous Fingering 現象。如圖 2.4A 所示，少量的 DNAPL 侵入會以 Fingering 型式穿透通氣層，在到達殘餘飽和度之前留滯於通氣層中，其間入滲水會將溶解物質帶到地下水中，其蒸氣也會存在於土壤孔隙中。更多 DNAPL 滲漏會使其累積在毛細層中，待其厚度足夠抵抗水和土層之間的毛細力時，便會繼續流入含水層中，直到其殘餘飽和度時才停止(如圖 2.4B)。在滲透期間，若含水層中有一不透水的薄夾層，DNAPL 會在該不透水層上側向流動，累積形成一薄層(pool) DNAPL。若 DNAPL 持續滲透(如圖 2.4C)，DNAPL 會貫穿到含水層底部，且沿著底部的地形往低處流動，和地下水流動無關(呂元鈞, 2002)。

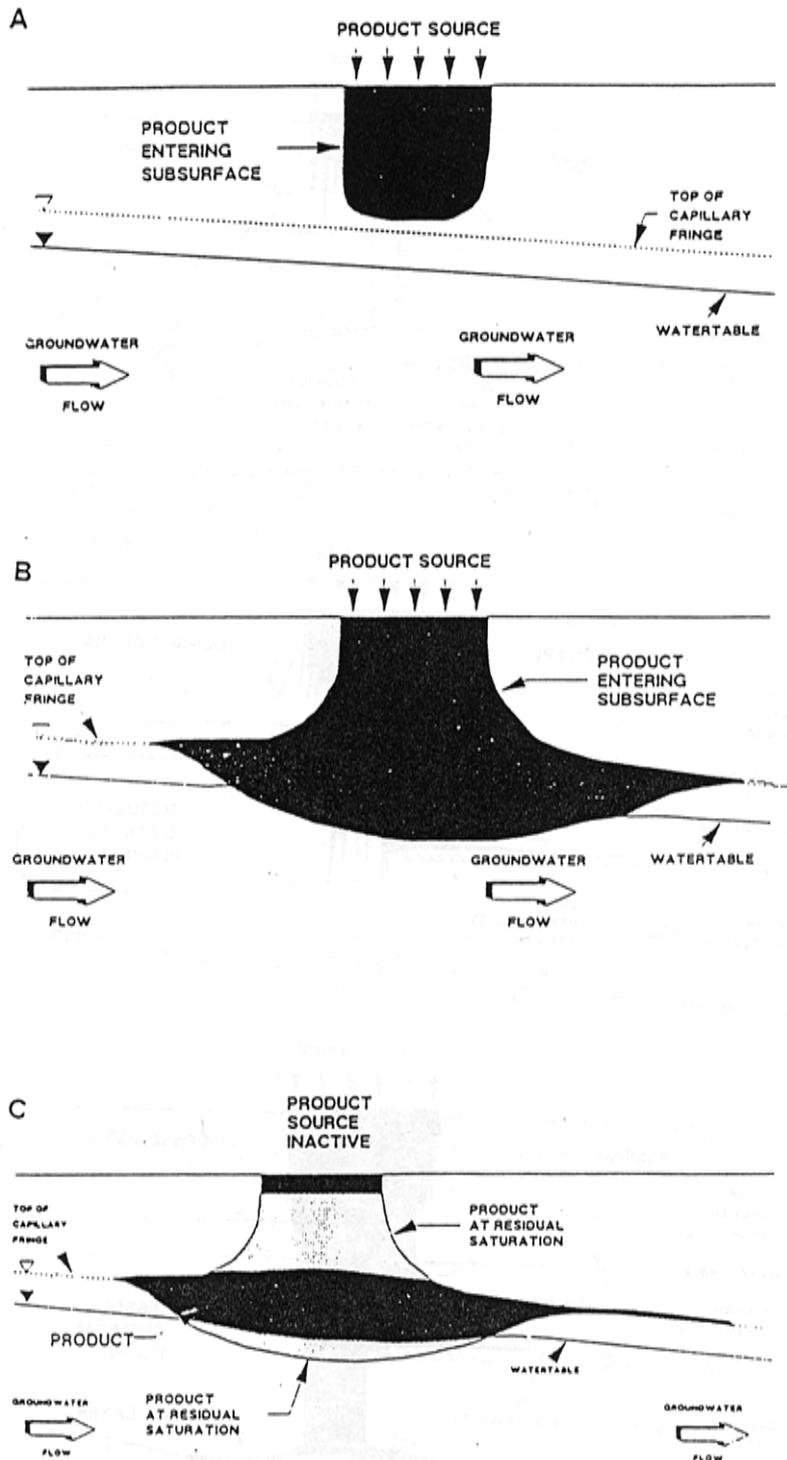


圖 2.3 LNAPL 於地下流動情形(Palmer and Johnson, 1989)

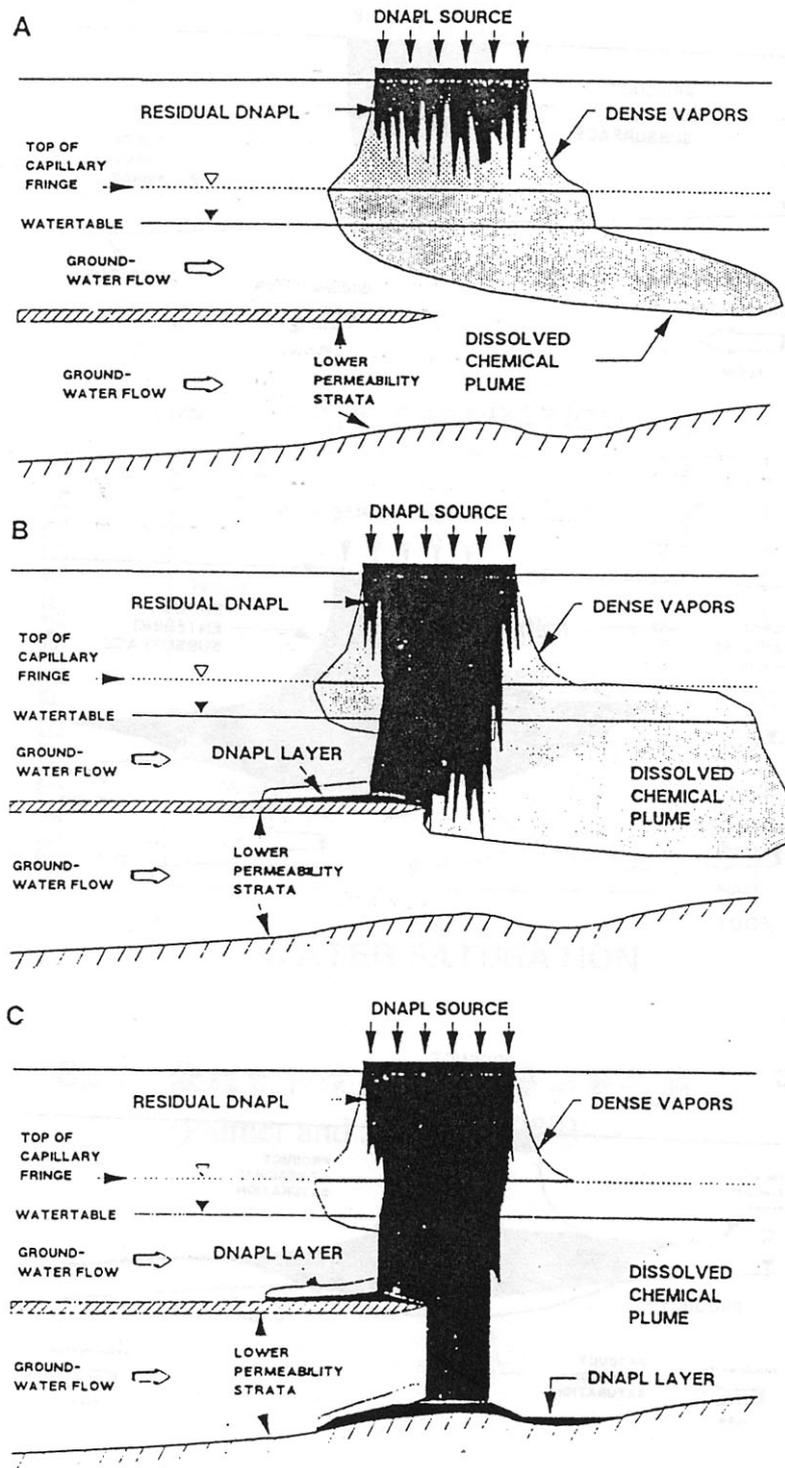


圖 2.4 DNAPL 於地下流動情形(Palmer and Johnson, 1989)

## 2.3 土壤水保持特性 (Soil Water Characteristics)

### 2.3.1 保持曲線之定義

對於土壤與水的特徵曲線(SWCC)可定義成一土壤中含水量與張力之間的關係。一般亦稱為土壤與水之保持曲線(Retention Curve)。此時含水比通常以體積含水比的型式來表示，以便明確地瞭解液體在土壤孔隙間的行為。而張力通常指結構勢能，即以毛細張力為主。

對於保持曲線的表示方法，由於一般土壤其含水量在壓力為低範圍的時候變化非常大，因此若要表示出一較廣泛壓力範圍的保持曲線時，壓力可採用對數座標，含水比採算術座標即可。但若只觀看低壓範圍的保持曲線時，亦可皆採用算術座標。

圖 2.5 中表示一傳統的土壤水保持曲線。其中  $\theta_s$  為土壤在大氣壓力下飽和時的體積含水比； $h_b$  則稱為空氣進入值(Air Entry Value)或起泡壓力(Bubbling Pressure)，意指空氣(或非濕相液體)開始進入孔隙時的毛細張力； $\theta_r$  則為最後的殘餘體積含水比(Residual Volumetric Water Content)。

對一土壤的保持曲線而言，不僅代表土壤結構勢能與含水比間的關係，同時也反映出土壤粒徑與孔隙大小分佈的狀況。圖 2.6 為兩種不同粒徑分佈土壤的水保持曲線，由圖中可看出顆粒大小較一致的土壤(Well Sorted)，其土壤水保持曲線上，會有較明顯的空氣進入值，且排水過程也較為快速(Fetter, 1993)。

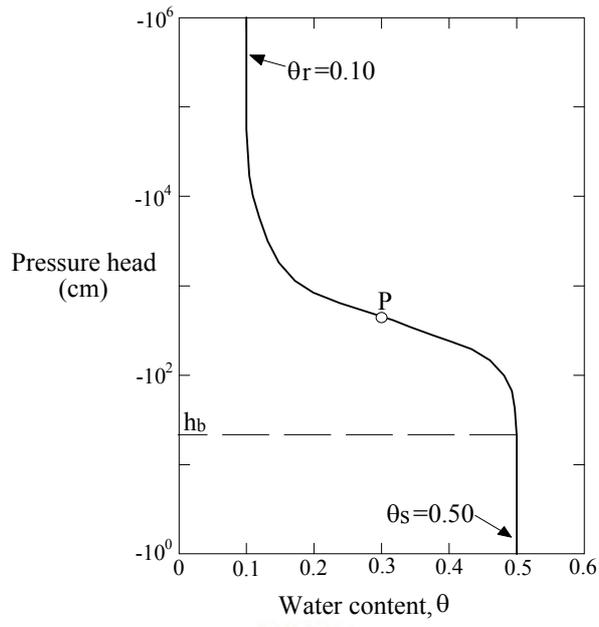


圖 2.5 傳統的土壤水保持曲線 (Van Genuchten, 1980)

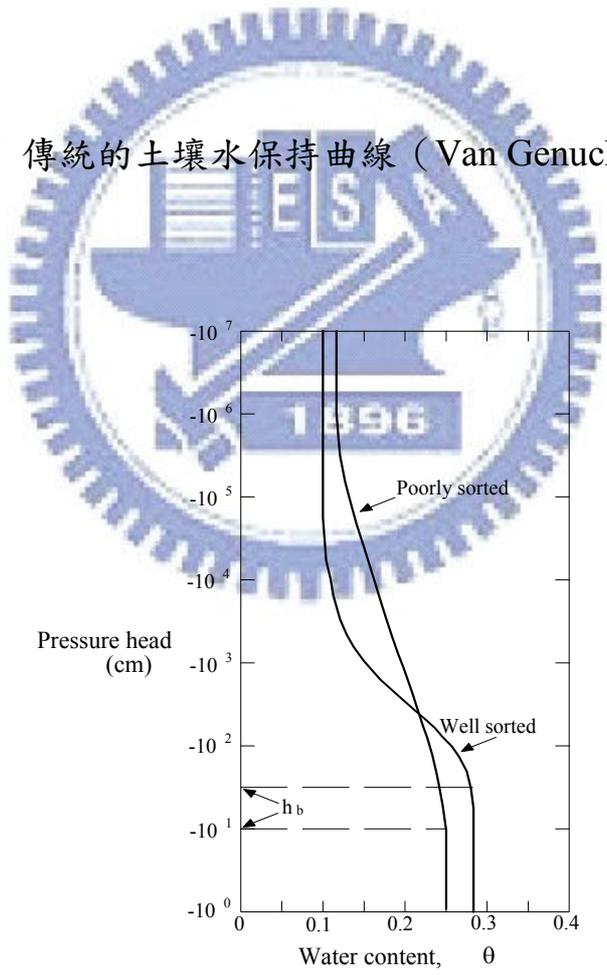


圖 2.6 不同粒徑土壤的保持曲線(黃進富, 1996)

### 2.3.2 遲滯效應(Hysteresis)

保持曲線實驗時，隨著張力的增加，土壤便會自飽和狀態開始排出液體，此時不同的張力狀態下會有不同的體積含液比，直至液體不再排出為止，此時壓(張)力與體積含液比的關係即為該土壤的主要排出曲線(Main Drainage Curve, MDC)。當土壤再重新濕潤，隨著張力的減少，也會有其相對的體積含液比，此時張力與體積含液比的關係則稱為該土壤的主要濕潤曲線(Main Wetting Curve, MWC)。如圖 2.7 所示，這兩條保持曲線並不會相同，在濕潤曲線上的任何一點，其含液比都會比在排出曲線上對應相同張力情況下的含液比來得低，這種現象就叫做遲滯效應。

主要造成遲滯效應的原因有三：(Hillel, 1980)

- 1、由於土壤孔隙的大小及幾何形狀呈不規則，因此在相同的含液比下會有不同的張力( $P \propto \frac{1}{r}$ )，也就是所謂墨水瓶效應(ink bottle effect)。
- 2、液體和土壤顆粒之間的接觸角會視液體在土壤是排出或進入的情形而異(Receding or Advancing)，接觸角在濕潤情形(advancing)時會較排出時大，因此張力較小( $P \propto \frac{\cos \theta}{r}$ )。
- 3、當土壤再濕潤時，濕相液體(如水)會取代非濕相液(如空氣、有機液)，但同時也會將非濕相液給牽絆住(Entrapped)，使得濕相液的含液量因此減少。由於此項原因，常使得 MWC 在張力為零時，常不能回到 MDC 的起點，此差值即為殘餘非濕相含量(Residual Nonwetting Fluid Content)。

此外，土壤的乾縮(Shrinking)及膨脹(Swelling)，乾濕速率快慢不同，孔隙表面的粗糙程度等，都會影響土壤的遲滯效應(Davidson et al.,1991)。

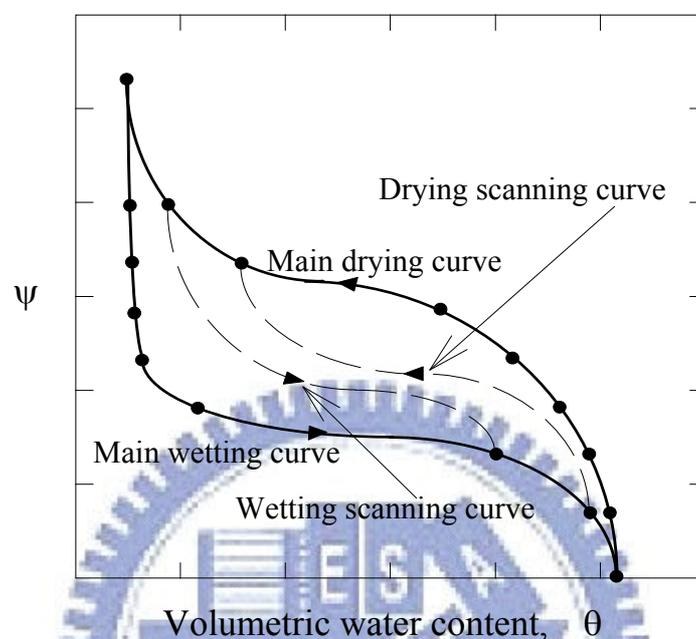


圖 2.7 保持曲線的遲滯效應(黃進富, 1996)

### 2.3.3 殘餘飽和度(Residual Saturation)

殘餘飽和度( $S_r$ )是指當土體中毛細力逐漸增加時，水份漸漸排出到一定程度，土壤的飽和度會維持一定值，此時就算張力增加飽和度也不會改變，該飽和度即稱為殘餘飽和度。一般土體中殘餘飽和度會受到土體中液體性質、孔隙大小及土壤顆粒排列形狀所影響(Kia, 1988; Von Englehardt, 1955; Morrow, 1970)。若土壤中含有其他液體，則液體和液體間之介面性質(如表面張力、接觸角)、黏滯力、水力梯度等，也會改變殘餘飽和度存量(Mercer and Cohen, 1990; Stegemeier, 1997)。

對於土壤污染整治工作來說，有機液體在土壤中的殘餘飽和度可視為一個相當重要的指標。由此指標可直接或間接了解該地遭受到有機液體污染的嚴重程度，並且判斷污染整治所應適用的整治技術及整治時間，對於整治計劃來說，這是非常重要的環節。

有關有機液體在土壤中的殘餘量機制及存在於孔隙中的型式，和土壤中各個流體的相對濕相性，具有相當大的關係。在相當乾的土壤，可視為兩相系統時，對於空氣來說，有機液體可視為濕相液體，藉著張力行為以濕相殘餘的型式存在(Kia, 1988)；若土壤為一三相系統時(水、有機液體、空氣)，其濕相性的程度依序為水、有機液體、空氣，有機液體在土壤中的殘餘含量則受”卡鎖(Snap-Off)”及”孔隙周圍流動(By Passing)”的機制，以非濕相殘餘的型式存在(Chatzis et al., 1983; Wilson et al., 1988)。隨著有機液體在一系統中所具有的相對濕相性而定，有機液體存在的型式則有不同。當有機液體視為濕相液時(有機液體/空氣系統)，液體會在土壤顆粒上形成薄膜，並形成不連續情形；當有機液體視為非濕相液體時(水/有機液體或水/有機液體/空氣系統)，有機液體會孔隙及流通的路徑上(Pore Throats)中間形成孤立的球粒(Kia, 1988; Wilson et al., 1988)。

至於有機液體在土壤中的殘餘含量，已有許多學者進行實驗研究。隨著不同土樣，土樣顆粒大小的不同，現地土層的情形(飽和或不飽和、均質或異質)，有機液體的殘餘飽和度差異性相當大，大致上隨著土壤顆粒的減小，殘餘飽和度會有增加的趨勢。而有機液留滯在乾燥土壤的殘餘飽和度一般也較在濕土中來得高。

液體殘留在土壤中是一個相當複雜且受到許多因素互相影響的過程，每個因素的對殘餘飽和度的效應尚未有明確地得到證實。起始

含水比、有機物質等因素的影響趨勢及程度更是不清楚，許多問題仍待研究。

## 2.4 保持曲線求取方法

### 2.4.1 實驗室相關試驗方法

實驗室中最早用來求取保持曲線的方法是由(Haines, 1930)提出的張力平板裝置(Suction Plate Assembly)如圖 2.8 所示。將濕的土壤放置於一個多孔的陶瓷片上，土壤頂部保持大氣壓力，陶瓷片底部施以一負壓(張力)，待一段時間水力平衡之後，求出體積含水比，即可獲得該土壤毛細張力與含水比間的關係。

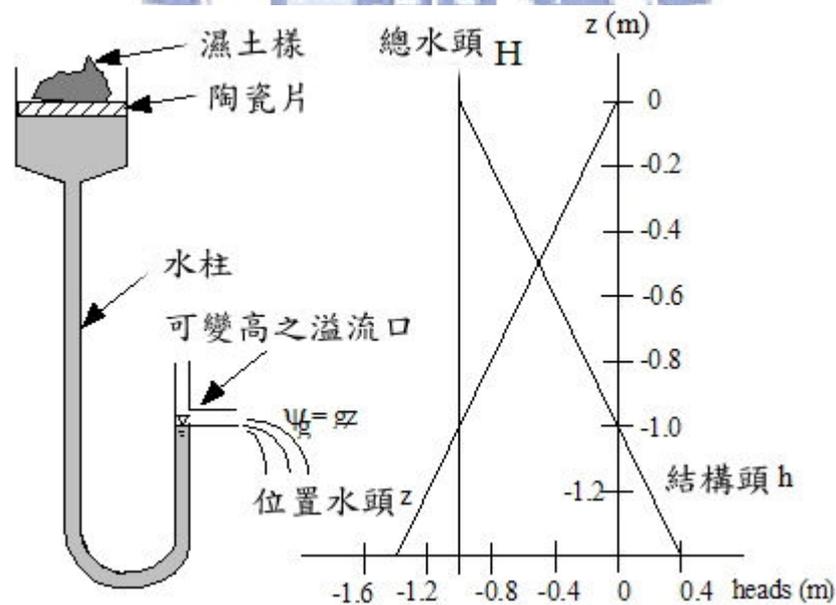


圖 2.8 張力平板儀器裝置 (Haines, 1930)

由上述方法衍生出來的，也是最廣泛被使用的方法則是壓力儀方法(Pressure Cell; Pressure Plate) (Garden , 1956)。如圖 2.9 所示，濕土樣被置於密閉的壓力儀中，上方連接壓力系統，下方保持大氣壓力，水則從陶瓷片下方排出並記錄，壓力則在水力平衡之後逐步增加。本研究所使用的試驗即採用壓力儀方式，雖然為了求低張力時的保持曲線而稍有變更實驗方式，但原理是一樣的。

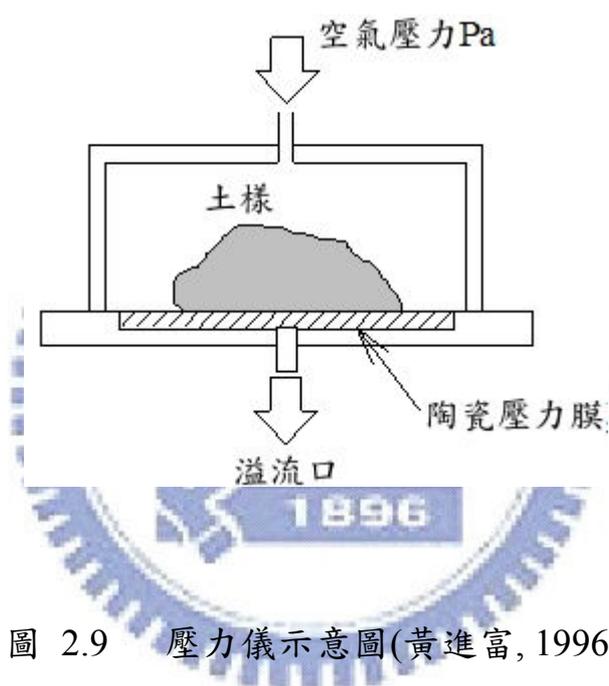


圖 2.9 壓力儀示意圖(黃進富, 1996)

由於傳統的保持曲線試驗方法，均需耗費相當久的時間等待平衡。對於一個 2.5 cm 高的土樣，為求得一保持曲線上 7-8 個資料點至少需要 2 至 3 週(Klute, 1986)。因此，為了更快速而有效率地求得保持曲線，(Su and Brooks, 1980)一反傳統保持曲線試驗等待平衡的方式，提出一個控制試體水份流出或流入量的方法，利用壓力計與玻璃量管求取土壤結構勢能與含水比的關係。此方法有效縮短實驗時間，

僅 24 小時就可以求得一資料點，但是其缺點是並沒有考量到水分蒸發，且僅適用在較小壓力範圍。基於(Su and Brooks, 1980)的原理，(Lorentz et al., 1991)也設計一種由壓力儀方式改進而來的控制流出量方法(Controlled Outflow Method, COM)。這種試驗方式，是以將陶瓷片底下溢流口關閉後一既定時間(通常為 12-24 小時)，取代以往等待最終平衡的冗長時間。經試驗證明，當溢流口關閉後，水力平衡很快即能達成，然後，再配合一些量測壓力的儀器設備，便可較快求得保持曲線。

為進一步改善 COM 方法，最近更有一個可以量測整個試驗土壤體積變化(Overall Volume Changes)的裝置被提出(Fourie et al., 1995)。此裝置是利用一般三軸室加以組裝而來，可求得更精確的保持曲線。

此外，(Topp et al., 1967)也曾提出以張力計及  $\gamma$  射線求土壤含水量的原理，來獲得動態的水保持曲線。但其所得出的動態水保持曲線比起傳統靜態水保持曲線，在同樣的壓力頭下，土壤含水比通常比較大，因此，其準確性仍有待研究。

#### 2.4.2 經驗公式

對於不飽和層中土壤含液比與毛細張力間的關係，許多學者亦提出一些經驗方程式，如表 2.1 所示。表中， $\lambda$  是表示土壤粒徑大小分佈的指數， $m$ 、 $n$  及  $\alpha$  則為(Van Genuchten, 1980)土壤參數。而在含水的孔隙中，若其含水比低於殘餘含水比，則對平流(Convective Flow)的貢獻甚小，所以 Brooks and Corey 忽略殘餘含水比的影響，提出有效飽和度(Effective Saturation,  $S_e$ )一詞，用以代替飽和度  $S$ 。定義如下：

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2.3)$$

$S_e$  亦可代表為一被正規化(Normalized, Dimensionless)的含水比，從有效飽和度的觀點與毛細張力之間的關係，更加可以說明孔隙中水的流動情形。

表 2.1 土壤含水比與結構勢能關係的經驗方程式

Authors	Equations	Parameter Index
Brooks and Corey (1964)	$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{h_b}{\psi} \right)^\lambda$	$\lambda$ = experimentally derived pore size index $h_b$ = bubbling pressure $\theta_r$ = residual volumetric water content $\theta_s$ = volumetric water content at saturation $\psi$ = matric potential
Campbell (1974)	$\frac{\theta}{\theta_s} = \left( \frac{h_b}{\psi} \right)^\lambda$	同上
Van Genuchten (1980)	$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{1}{1 + (\alpha * \psi)^n} \right)^m$	$n = \frac{1}{1 - m}$ $\alpha = \frac{1}{h_b} \left( 2^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{1-m}$

\* 摘自(黃進富, 1996)

## 2.5 非飽和土壤之導水度

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化的函數[ $k=k(\theta)$  or  $k=k(\Psi)$ ]。如同土壤保持曲線一般，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。

(Lin, Pinder, and Wood 1982)所做 Water-TCE 兩相滲流試驗，得到飽和度與相對滲透係數關係圖(如圖 2.10 所示)，圖中右邊曲線(排出曲線)代表試體用水飽和後，逐漸加入非水相液體 TCE，使水排出試體減少含水量並量測各飽和度下的相對滲透係數  $k$ ，直至水不再滲流，相對滲透係數為零才停止。左邊曲線(回吸曲線)代表試體逐漸加入水，使非水相液體 TCE 排出，增加含水量並得到飽和度與相對滲透係數關係曲線。圖中排出曲線與回吸曲線也有遲滯現象的發生。

(Lin, Pinder, and Wood 1982)所做 TCE-Water 兩相滲流試驗，得到飽和度與相對滲透係數關係圖(如圖 2.11 所示)，圖中右邊曲線(排出曲線)圖中右邊曲線(排出曲線)代表試體用 TCE 飽和後，逐漸加入非水相液體水，使 TCE 排出試體增加含水量並量測各飽和度下的相對滲透係數  $k$ ，直至 TCE 不再滲流，相對滲透係數為零才停止。左邊曲線(回吸曲線)代表試體逐漸加入 TCE，使非水相液體水排出，減少含水量並得到飽和度與相對滲透係數關係曲線。

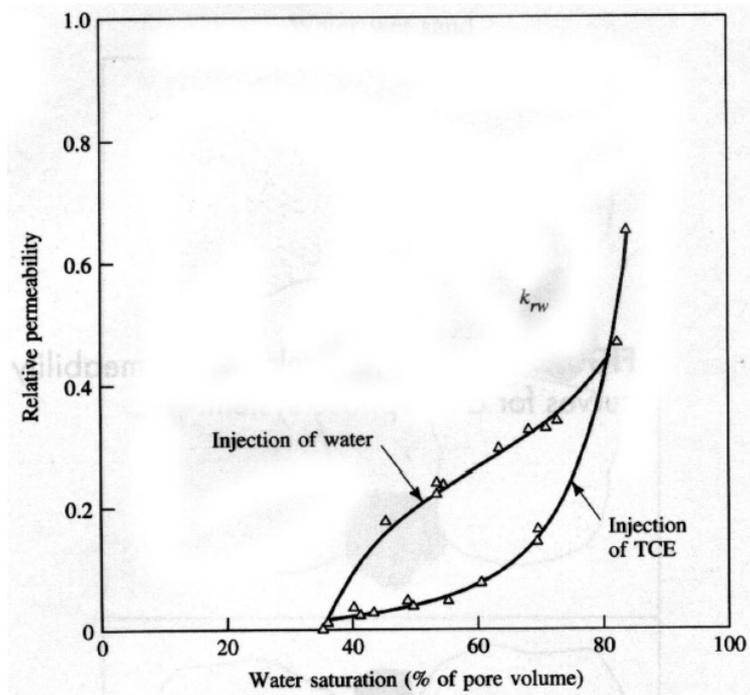


圖 2.10 Water-TCE 兩相滲流試驗結果(Lin, Pinder, and Wood 1982)

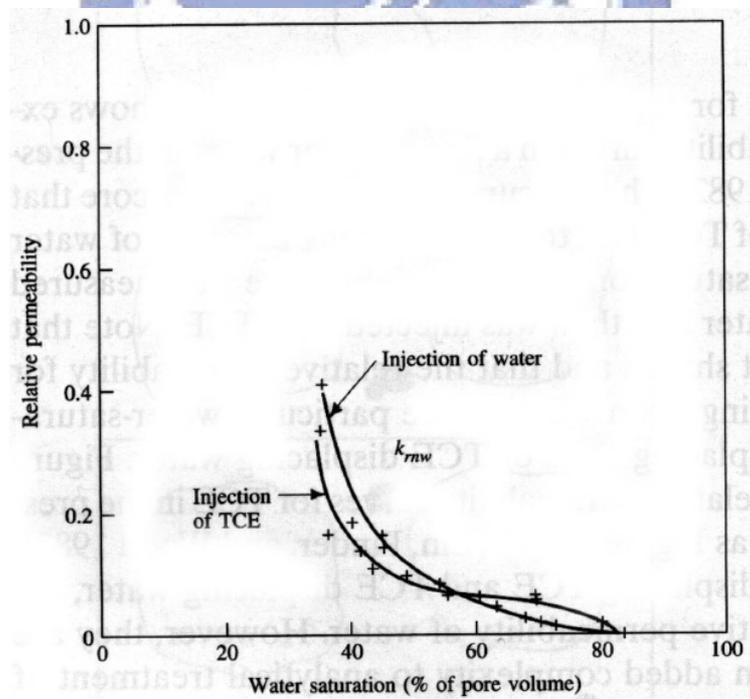


圖 2.11 TCE-Water 兩相滲流試驗結果(Lin, Pinder, and Wood 1982)

由圖 2.10~2.11 可知此種試驗方法，滲流流體不同，雖然有相同的體積含水比，得到的滲透係數滲透係數也不會相同。可能是試體中水和 TCE 分布狀況不同及滲流流體界面張力不同所造成的差異。

由於三相度滲流量測導水度  $k$  不易水-空氣-非水相液體三相度相對滲透係數關係式(2.5)是由 Faust (1985)所提出，他利用 Stone (1973)所做的兩相度滲透試驗數據，加以整理並得到兩相度滲透試驗關係式，進一步發展成三相度滲透試驗關係式。

$$k_{rn} = k_{rmw}^* \left[ \left( \frac{k_{rmw}}{k_{rmw}^*} + k_{rw} \right) \left( \frac{k_{rna}}{k_{rmw}^*} + k_{ra} \right) - (k_{rw} + k_{ra}) \right] \quad (2.4)$$

$k_{rn}$  為水-空氣-非水相液體三相系統時，非水相液體侵入時所得到相對滲透係數。

$k_{rmw}^*$  為水-非水相液體兩相系統時，非水相液體侵入達到殘餘飽和度所得到相對滲透係數。

$k_{rmw}$  為水-非水相液體兩相系統時，非水相液體侵入各階段飽和度所對應的相對滲透係數。

$k_{rna}$  為空氣-非水相液體兩相系統，非水相液體侵入各階段飽和度所對應的相對滲透係數。

$k_{rw}$  為水-非水相液體兩相系統時，非水相液體未侵入試體飽和時，所對應相對滲透係數。

$k_{ra}$  為空氣-非水相液體兩相系統，非水相液體未侵入試體飽和時，所

### 對應相對滲透係數

無論是在實驗室或是現場，計算不飽和層中  $k$  值的過程均相當麻煩，於是有了些經驗式的推演。通常這些經驗式中所用的土壤參數，均可由土水保持曲線得來，如表 2.2 所示。

另外，(Van Genuchten, 1980)也提出一個  $k$  值與壓力頭( $h$ )間的關係式(2.5)，式中  $k_r(h)$ 代表一相對滲透率(Relative Permeability)的觀念。

圖 2.12 中顯示其理論值與實驗所得結果相當接近。

$$k_r(h) = \frac{k(h)}{k_s} = \frac{\left\{1 - (\alpha * h)^{n-1} \left[1 + (\alpha * h)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha * h)^n\right]^{\frac{m}{2}}} \quad (2.5)$$

表 2.2 土壤水力傳導係數與含水比關係的經驗方程式

Authors	Equations
Brooks and Corey (1964)	$\frac{k(\theta)}{k_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{3 + (2/\lambda)}$
Campbell (1974)	$\frac{k(\theta)}{k_s} = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{3 + (2/\lambda)}$
Van Genuchten (1980)	$\frac{k(\theta)}{k_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{1/2} \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{1/m}\right]^m\right\}$

\* 表2.2中參數 $\lambda$ 、 $m$ 的定義均與表2.1中水保持曲線經驗式相同， $k_s$ 則為完全飽和時的 $k$ 值。摘自(黃進富, 1996)

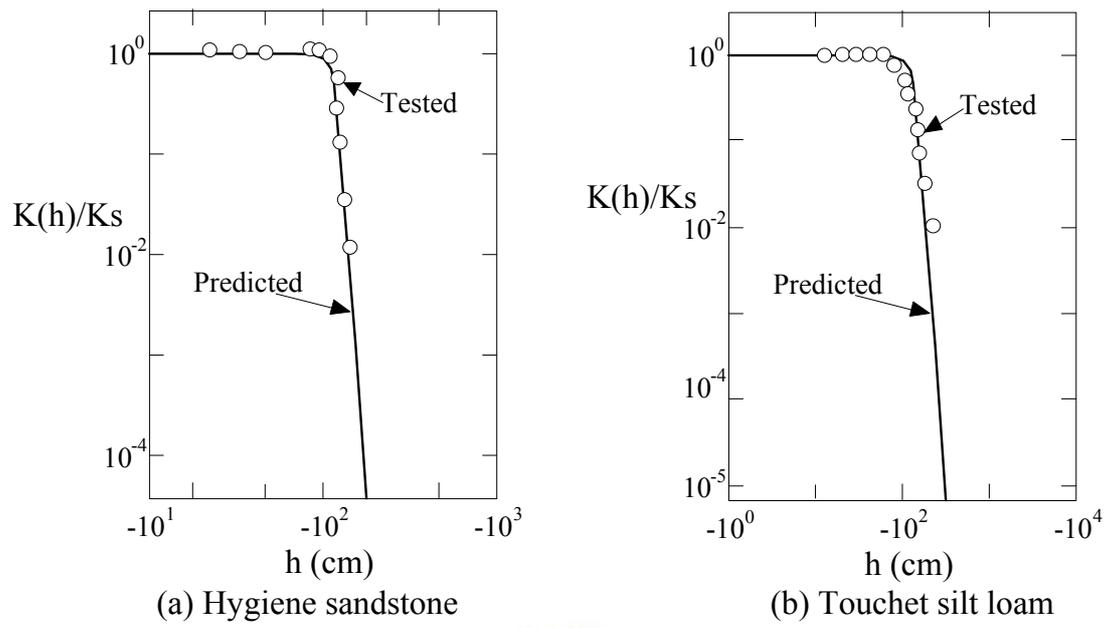


圖 2.12  $k_r(h)$ 經驗式的預測與實驗結果比照圖(Van Genuchten, 1980)



## 第三章 研究方法

### 3.0 摘要

本研究擬採用C109渥太華砂及寶二水庫現地之土壤，在滲透儀中夯實，控制其相對密度並以空氣和三種不同之液體(水、95無鉛汽油、柴油)及水對95無鉛汽油分別進行不飽和滲透試驗(如表3.1所示)。在滲透儀試驗中，利用蠕動幫浦提供定流率之液體並量測試體在不同的張力狀態下，一定的時間內量測其水頭差值，代入達西定律進而求得其滲透係數。最後在藉由RETC程式與實驗結果互相比較加以印證。實驗的基本架構如圖3.1所示。

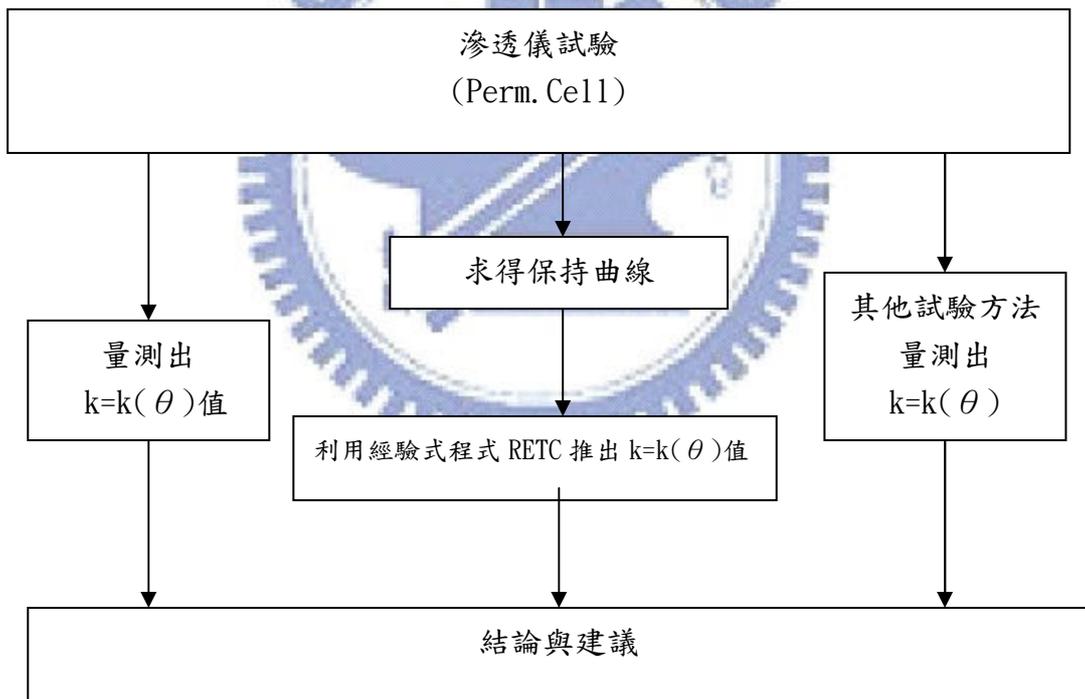


圖 3.1 實驗基本架構

表 3.1 滲流試驗項目

試驗項目	滲流流體	非濕相流體	試驗配置示意圖
水-空氣	水	空氣	圖 3.4
95 汽油-空氣	95 無鉛汽油	空氣	圖 3.5
柴油-空氣	柴油	空氣	圖 3.6
水-95 汽油	水	95 無鉛汽油	圖 3.7

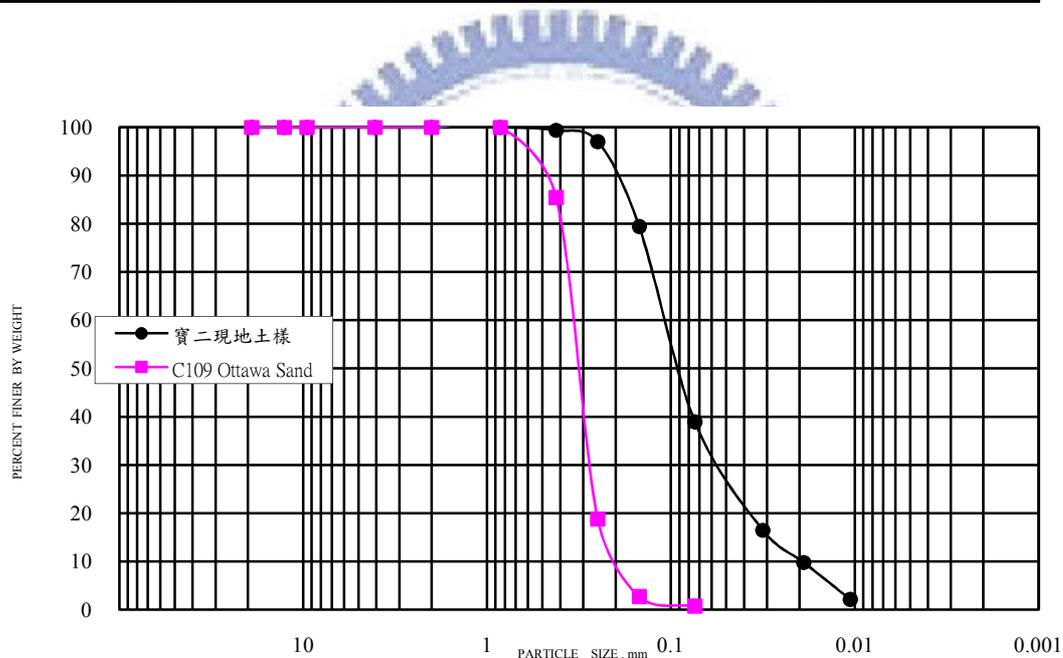
### 3.1 試驗土壤基本性質

本試驗將使用兩種土樣，一種為 C109 渥太華砂、另一種為新竹縣寶山第二水庫現地土樣。渥太華砂的顆粒大小均勻，所得之結果可以作為標準對照之用；現地土樣則由較細的顆粒所組成，經試驗分析得到在土壤統一分類法當中屬於粉土質砂(SM)，可以用來比較實驗結果。利用上述這兩種土壤，對不同液體的侵入，作有系統的分析，了解液體與空氣在土壤中的平衡情形。

此兩種土樣的基本性質及試驗時所需之乾土量如表 3.2 所示。為了使試驗的土樣狀況固定，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，以手持器具輕輕夯壓，得到不錯的緊密性。兩種土樣的粒徑分佈曲線則示於圖 3.2 中。相關標準試驗方法可參考 ASTM D421-85；D422-63；D4253-83；D4254-83。

表3.2 實驗使用二種土壤之基本性質

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> )	滲透儀試驗所 需乾土重(g)
渥太華砂 (土樣一)	1.799	1.506	1.669	814
現地土樣 (土樣二)	1.650	1.258	1.467	716



有關各試體的性質則如表 3.3 所示，其中表面張力為工研院化工所的試驗結果。

表3.3 試驗液體之重要性質

試驗液體	化學式	密度 (g/cm <sup>3</sup> )@25°C	表面張力 (dynes/cm)@24°C	與水界面張力 (dynes/cm)
水	H <sub>2</sub> O	0.997	72.7	-
95 無鉛汽油	-	0.770	21.0	51.7
柴油	-	0.821	22.8	49.9

### 3.3 滲透儀實驗裝置及程序

本試驗裝置是參考(Klute, 1986)所曾提出之配置(圖3.3)修改自製而成。分別進行水對空氣、95無鉛汽油對空氣、柴油對空氣、水對95無鉛汽油飽和及非飽和導水度試驗，儀器試驗配置圖及滲流儀主體如圖3.4~3.8所示。本研究中的試驗模乃以不銹鋼材質製成(水、有機液體兩用)。鋼模主要構造為頂蓋、底蓋、主體部分(如圖3.9)、陶瓷片、陶瓷頭(如圖3.10)及環封。主體部分之內徑為6.0 cm、截面積 $A=28.27 \text{ cm}^2$ 、高度為17.25 cm，所以內部體積為 $487.73 \text{ cm}^3$ 。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，用來觀測實驗狀態下實際的水頭差，另一側的單孔則是用來連接空氣或有機液體使能侵入土壤中，頂蓋與底蓋各有一溢流口，用來連接管線，若試驗時濕相液為有機液體時，則上、下溢流口均須連接滲流液界面裝置(Permeant Interface Device, PID)或稱隔膜儲液儀(Bladder Accumulator)(見圖3.11)，以避免「有機液面與空氣」

的直接接觸會造成大量的氣體揮散至大氣中。隔膜儲液儀原為土壤滲流試驗實用的裝置，其主要構造包含一隔膜作為壓力轉換介面。隔膜的材質為高密度聚乙烯(High Density Polyethylen , HDPE)，具有高度抗蝕及防止揮發的功能，正好符合有機液體試驗所應具備的條件。而整個儲液是被隔膜一分為二，一側通至壓力傳遞系統，傳遞流體為空氣或水，不會和有機液體接觸，因此以壓克力材質製成；另一側裝盛有機液體，連接到滲透儀，使有機液體可以侵入土壤試體中，因此以不鏽鋼材質製成，達到抗蝕及防止揮發的功能。；最後，PID的上部儲液室則充滿水後再連接玻璃量管以調整試驗時各階段張力，讓空氣及有機液體侵入，並量測玻璃管刻度來了解其侵入量，求的各階段之體積含水比。在進行NAPL對空氣滲透儀試驗時，使用PID讓蠕動幫浦所驅動的液體為水，則NAPL暴露的管線減少，來減少管線揮發的問題。試驗中與有機液體接觸的管線，均使用鐵氟龍管，其抑制揮發的效果佳。

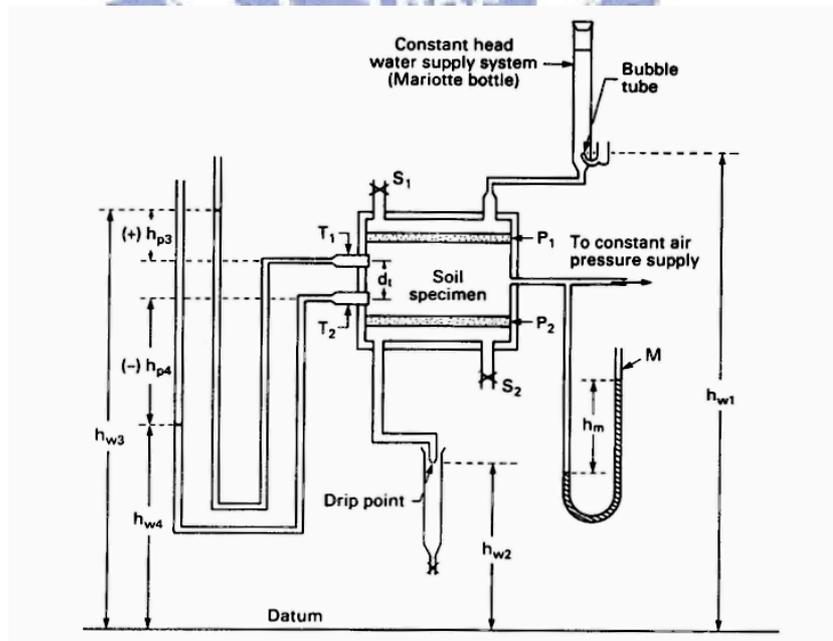


圖3.3 不飽和滲透試驗配置圖(Klute, 1986)

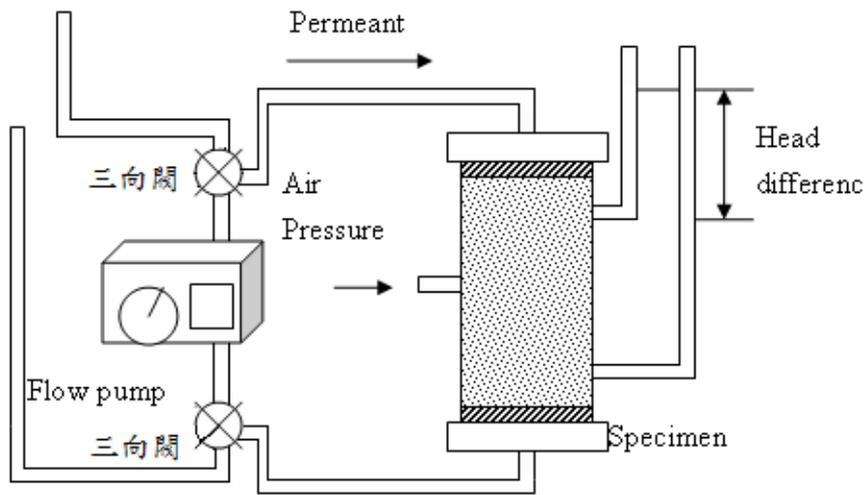


圖3.4 水對空氣導水度試驗配置示意圖

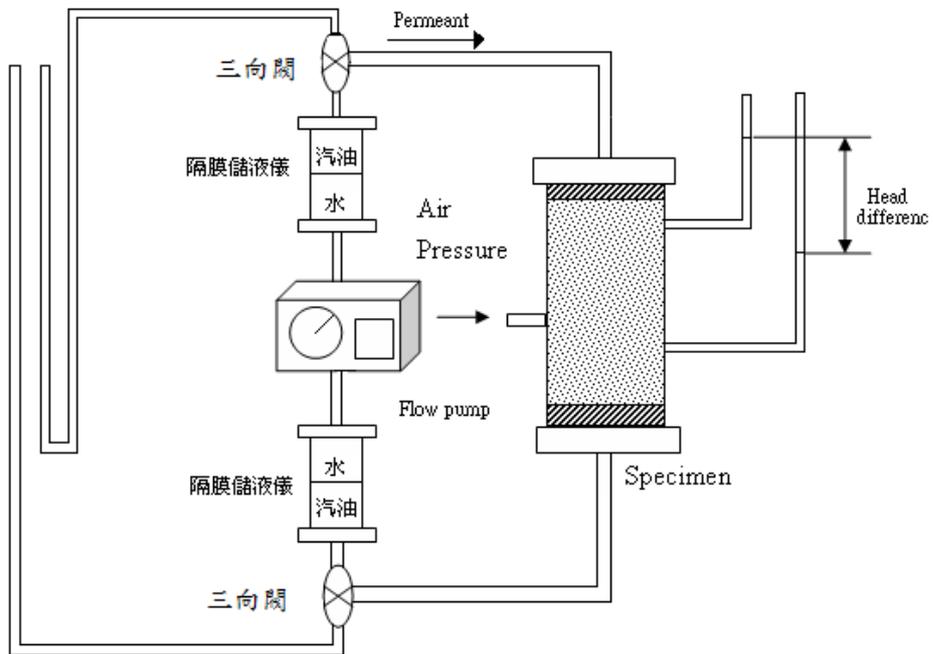


圖3.5 95無鉛汽油對空氣導水度試驗配置示意圖

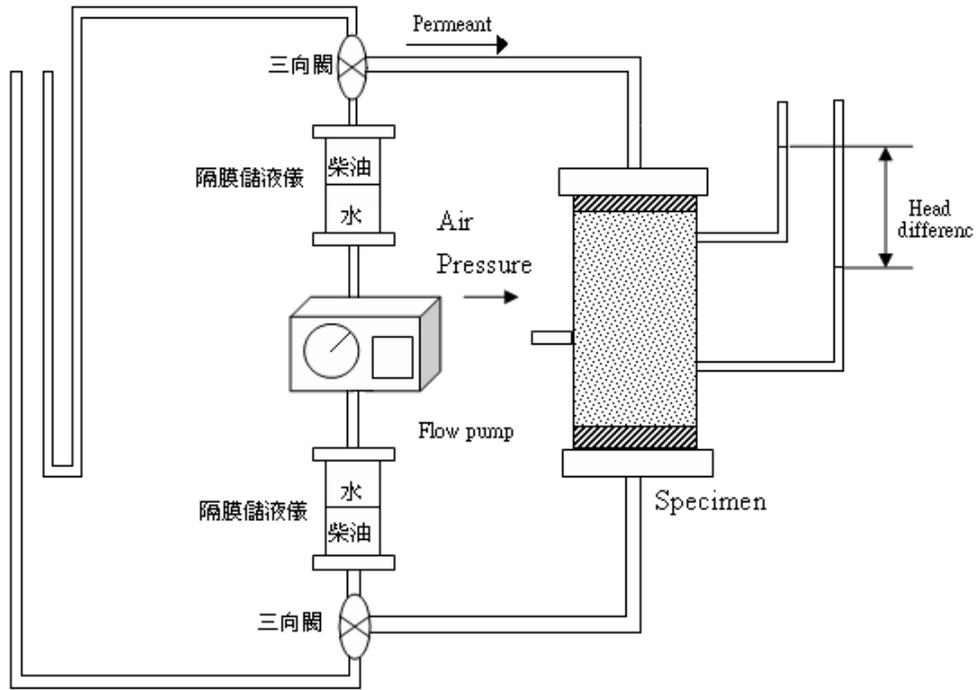


圖3.6 柴油對空氣導水度試驗配置示意圖

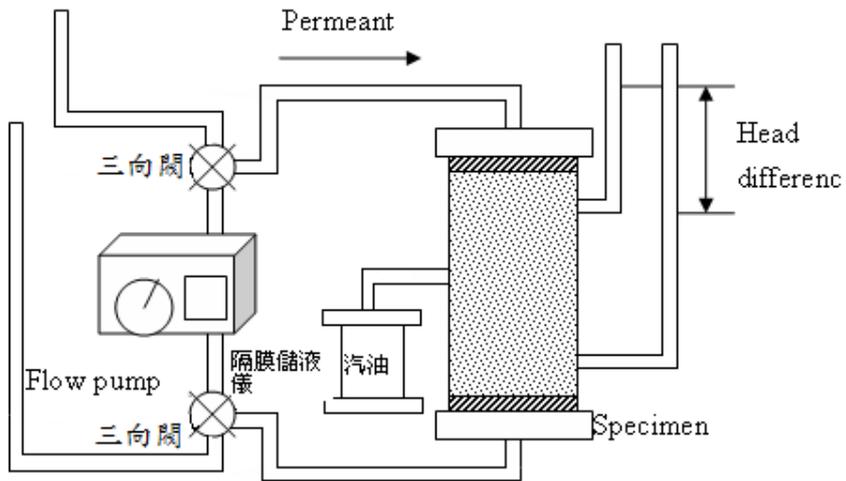


圖3.7 水對95無鉛汽油導水度試驗配置示意圖

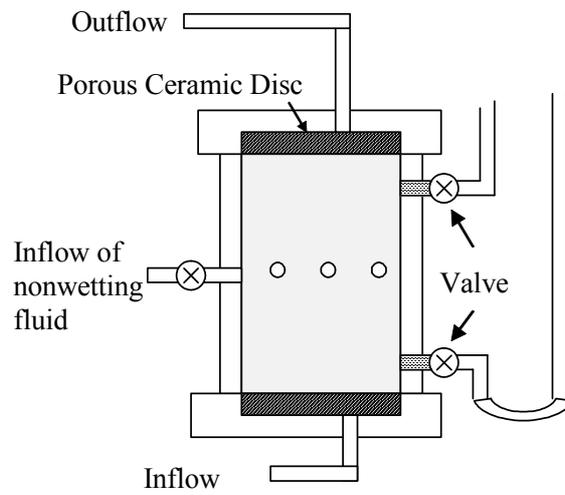


圖 3.8 兩相流滲透儀主體



圖 3.9 滲透儀裝置主體部分

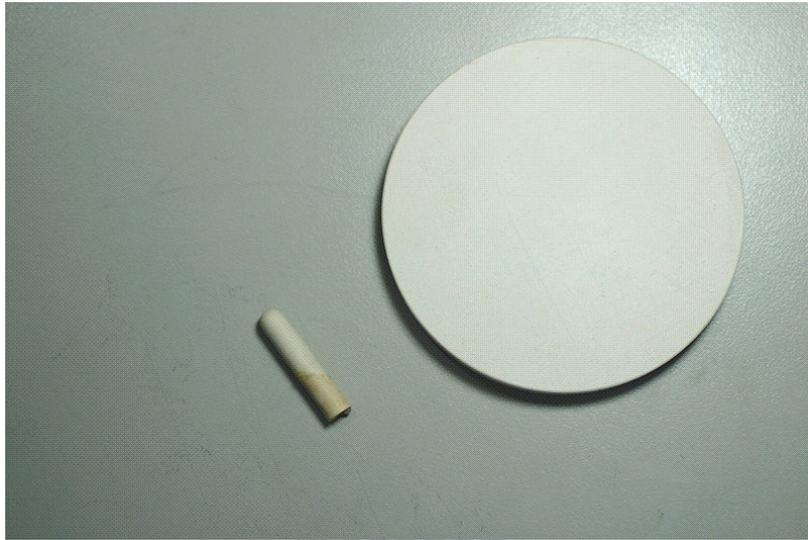


圖3.10 滲透儀所用陶瓷片及陶瓷頭

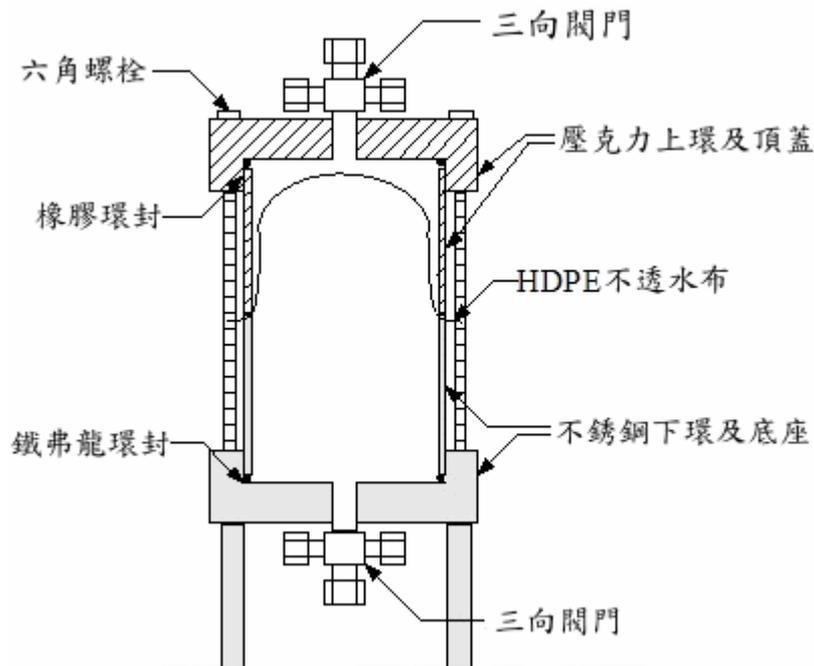


圖 3.11 隔膜貯水儀示意圖(黃進富, 1996)

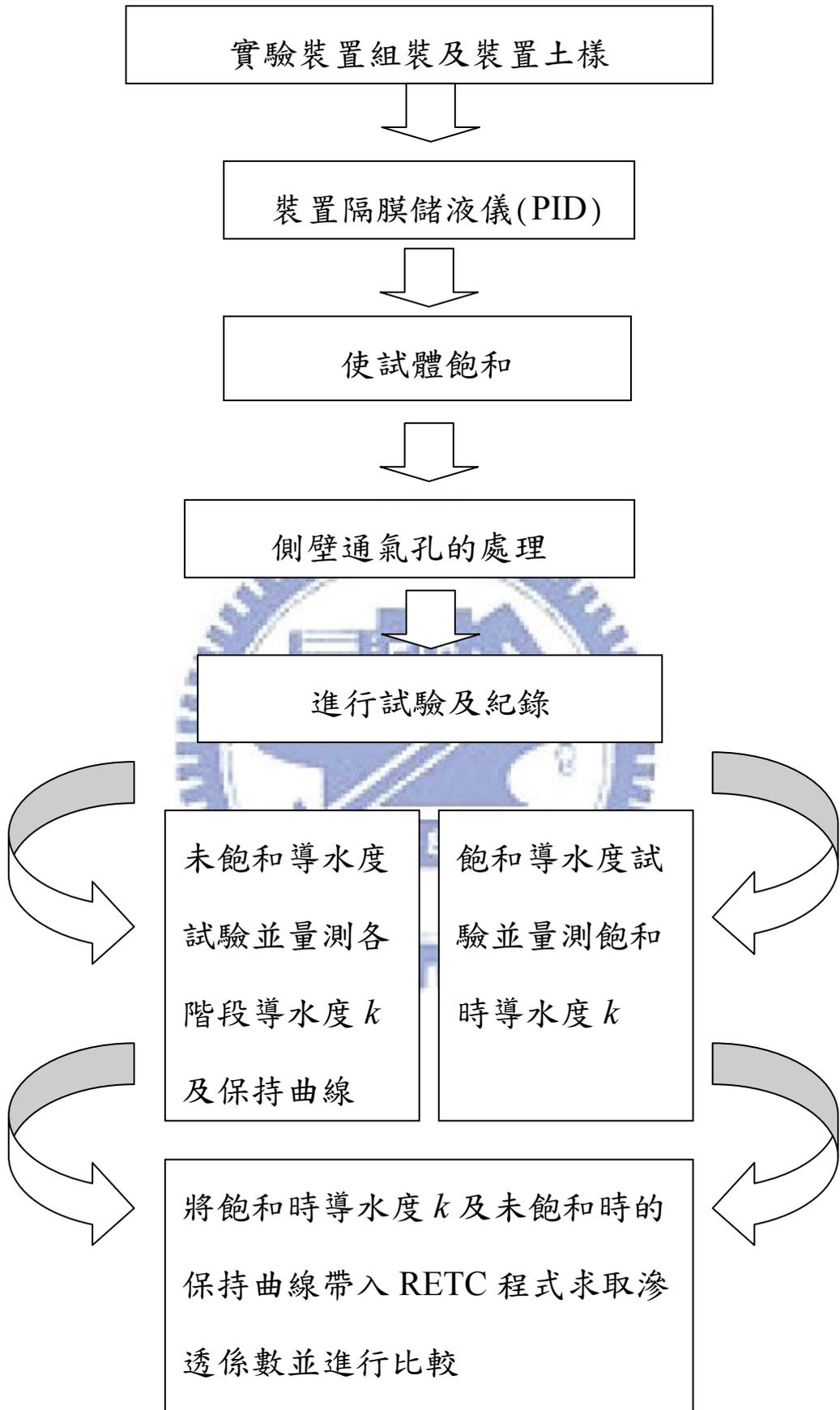
### 3.3.1 滲透儀試驗裝置

在實驗之前必須先將陶瓷頭用膠連同 PU 管粘貼於主體部分，陶瓷頭主要的功能和陶瓷片一樣，濕相液體可以自由的通過陶瓷頭而非濕相液體則不行。在水對空氣及水對 95 無鉛汽油導水度試驗中，水為濕相液體時，陶瓷頭連接 PU 管，管線中則是充滿水，最後在接上一特製的玻璃細管。在 95 無鉛汽油對空氣及柴油對空氣導水度試驗中，汽油與柴油為濕相液體時，陶瓷頭接鐵氟龍管的另一端則連接一特製的 U 型玻璃管；鐵氟龍管及 U 型玻璃管中，則充滿有機液體，U 型玻璃管另一頭連接的管線中則是充滿水，最後再接上一特製的玻璃細管。

利用蠕動幫浦提供定流量的循環系統，使得濕相液體在試驗過程中達到穩定滲流，並利用細玻璃管來觀察在實驗過程中上下兩點的水頭差 $\Delta h$ ，而兩陶瓷頭間的距離便是滲流路徑長度 $L$ ，後代入達西定律就可以求得當時之滲透係數，裝置如(圖 3.12、3.13)。另外，滲透儀使用的陶瓷片主要用途在於利用其孔隙的大小，可以控制流過液體的種類。試驗中，濕相液體(在本實驗中為水、95 無鉛汽油、柴油)可自由地通過陶瓷片，而非濕相液體(侵入的空氣)則依其界面張力及所施壓力的大小來決定是否可以通過。圖 3.14 中以水為例，顯示出在不同的氣壓之下，陶瓷片孔隙內液體凹面變化的情形，當氣體壓力大於陶瓷片的進入壓力時，凹面將不存在，而空氣可透過孔隙。同理，當將空氣置換成有機液體時，道理亦同。本實驗中採用為空氣進入值為 5 bar 的陶瓷片，其尺寸大小為直徑 7.95 cm、厚度 0.74 cm，頂蓋與底蓋部份均要裝置陶瓷片，如此可以確保實驗過程中，只有濕相液體可以從試體中排出。

### 3.3.2 滲透儀試驗程序

試驗程序流程圖如下：



細部過程分述如下：

### 1、實驗裝置組裝及裝置土樣：

先組裝好滲透儀底部即底蓋、環封及主體部分，環封要注意使進入底蓋的溝槽內，才能密合；接著放入已用濕相液體(水、95無鉛汽油、柴油)飽和過的陶瓷片，再將底蓋之溢流口連接至玻璃量管(濕相液體為水時)或PID(濕相液體為95無鉛汽油、柴油時)。

土樣的準備是採用溼潤土壤夯壓重塑法的方式製作土樣，再將土樣分層夯實裝入鋼模中。為了保持土樣的一致性，仍是採取控制相對密度為60%來製作土樣，使用的乾土重分別為渥太華重814 g、寶二水庫現地土樣重716 g。裝好土樣的滲透儀，可先在頂蓋尚未蓋上時加入濕相液體飽和並靜置，使試體內的氣泡冒出，並加速飽和時間。等到試體上方再無氣泡冒出，且試體表面濕潤，紀錄所加水之體積(若濕相液體為有機液體時，則於飽和全部完成後，以整個滲透儀鋼模進行秤重，藉由已知液體的密度和滲透儀體積去求得初始體積含液比)。

### 2、裝置隔膜儲液儀(PID)：

將隔膜儲液儀裝置完畢，頂蓋的三向閥門一接真空抽氣機，一接氣壓機；底蓋的三向閥門一接濕相液體(水、95無鉛汽油、柴油)的來源，一接連接試體的管子(鐵氟龍管)。利用閥門的控制，將濕相液體抽入儲液室中，再利用氣壓機將液體住滿管子，並接上滲透儀下方溢流口。

### 3、試體飽和：

土樣裝置完成之後，將隔膜儲液儀裝置完畢後，再利用氣壓機並調整壓力控制盤以0.1 bar的氣壓將液體注滿管子，並接上試體使試體飽和，至少放置24小時以上以確保試體能完全飽和，此時先不將滲透儀之頂蓋組裝以免試體內之空氣無法排出，待試體表面有液體溢出時，再將頂蓋(包含陶瓷片)部分，連同螺絲，一起組合完畢再持續飽和一段時間，此時亦可將滲透儀旁邊的進氣孔閥門打開，讓一些空氣得以排出，可增加土樣的飽和度。

在此飽和階段中，液體亦會經由滲透儀側壁，上、下兩個量測水頭差的陶瓷頭流至與其粘接的鐵氟龍管管線中，此時可不必在意；惟於飽和完畢，欲將滲透儀整組秤重時，記得將鐵氟龍管管線中的液體先去除，以免高估飽和度。

### 4、側壁通氣孔的處理

當進行不飽和滲流時，則將此通氣孔(如圖 3.15)打開，讓空氣進入使成一不飽和狀態(當所需的張力更大時，此孔亦是空壓系統壓力進入之處)；當滲流液體為有機液體時，為避免揮發量過大，則於通氣孔再連接一鐵氟龍管，將鐵氟龍管浸沒於水中，每隔一段時間須將管子拉出、將水甩除，讓空氣能持續進入土樣中造成不飽和狀態，也可盡量減少有機液體揮發的影響。若侵入之非濕相液體為有機液體而不是空氣時，則側壁的通氣孔必須連接一充滿有機液體的隔膜儲液儀(PID)。

### 5、進行試驗及紀錄：

首先進行飽和時之導水度量測：

在進行水對空氣及水對95無鉛汽油導水度試驗時，調整三向閥開關形成試體－幫浦－試體的通路(如圖3.3、3.7所示)，開啟蠕動幫浦(Peristaltic pump)進行低流量滲流並量測連接於側壁上兩細玻璃管之間的高度差將數值代入達西定律便可以求得飽和時之導水度 $k_s$ 。

在進行95無鉛汽油對空氣及柴油對空氣導水度試驗時，調整三向閥開關形成試體－PID－幫浦－PID－試體的通路，開啟蠕動幫浦(Peristaltic pump)進行低流量滲流並量測連接於側壁上兩細玻璃管之間的高度差將數值代入達西定律便可以求得飽和時之導水度 $k_s$ 。

接著進行不飽和滲流部分：

在進行導水度試驗時，選擇試體中央部份為基準點，先將上下管之水面置於基準點之下，上管的水面跟下管一樣高，使試體上下都受到張力，此時試體中央所受到的張力值為兩管張力的平均值，再逐漸增加此高度差(張力值)通常可分為張力 $T=10、20、30、40、50、60$  cm等階段。觀察上下管的液面變化並加以紀錄，同時紀錄旁邊兩細玻璃管的高度差，當兩細玻璃管水位高度趨近相等時，代表試體達到某階段之張力值。利用上下管的液面變化可得知非濕相侵入量，得之濕相液體在某張力值下的體積含水比，進而得知該試驗的保持曲線。當張力平衡時，調整三向閥開關形成試體－幫浦－試體或試體－PID－幫浦－PID－試體的通路，開啟蠕動幫浦(Peristaltic pump)進行低流量滲流並量測連接於側壁上兩細玻璃管之間的高度差將數值代入達西定律便可以求得非飽和時之導水度 $k$ 。通常，在幾十公分的張力值之間，可盡量利用上述控制液面高低差的方法來施加張力，較為精確；若張力值超過100 cm水頭以上，便可以將側壁通氣孔接上空壓機，改用空壓機來增加張力值，減壓步驟則剛好相反。



圖 3.12 滲透儀裝置組裝完成圖

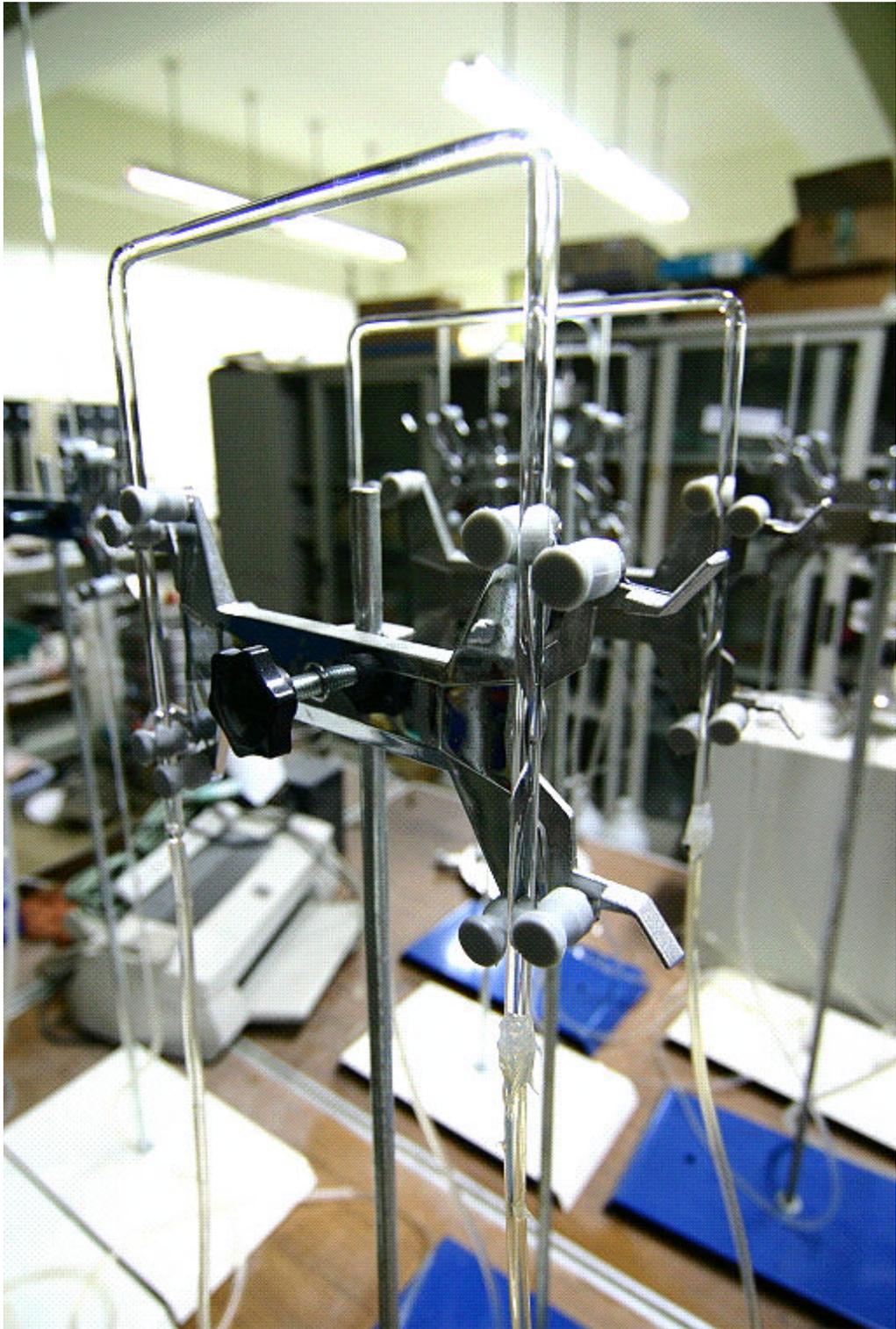


圖 3.13 U 型管連接示意圖

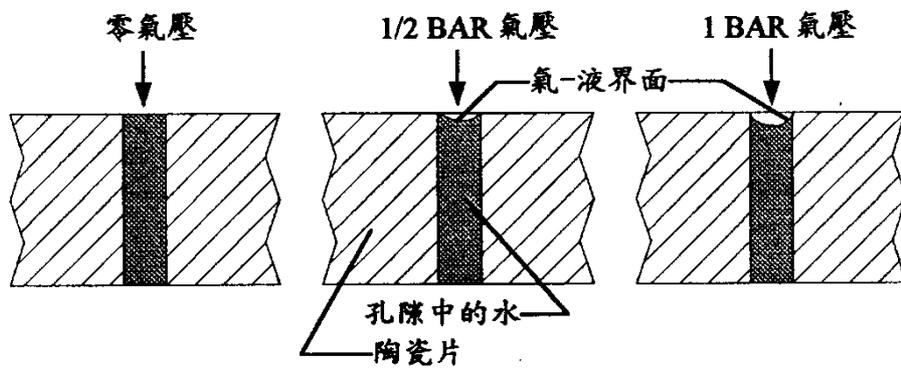


圖 3.14 不同氣壓下陶瓷片孔隙內凹面變化情形(黃進富, 1996)

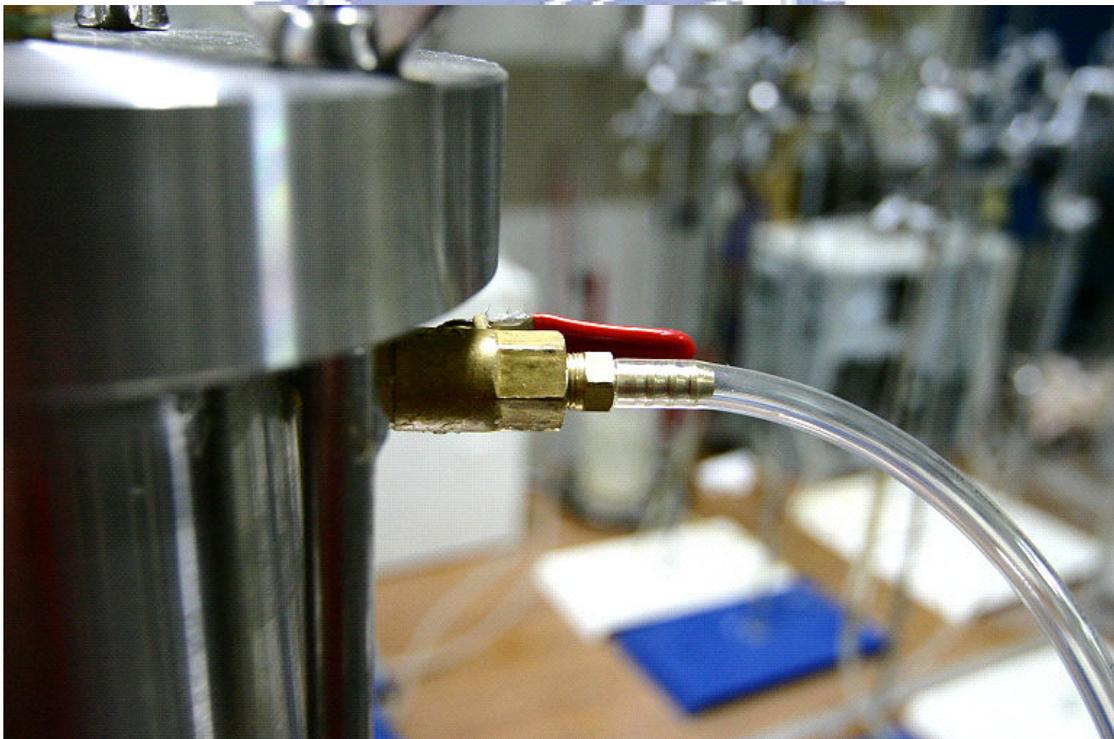


圖 3.15 側壁通氣孔示意圖

### 3.3.3 導水度試驗操作步驟與方法

飽和試體導水度試驗之操作步驟為：

1. 將飽和土樣置於兩相度滲流系統中(如圖 3.4~3.7 所示),開啟蠕動幫浦分別以 0.5、1、1.5 rpm 轉動速率來提供三種低流量滲流。
2. 利用連接於側壁上兩細玻璃管來觀測滲流進行時,試體上下固定距離之間的水頭差(即是水力梯度  $i$ ),當水頭差達到穩定時,表示試體達到穩態滲流。
3. 分別將蠕動幫浦提供流量  $q$ 、穩態滲流時量測的水頭差  $h$  及試驗試體的截面積  $A$ , 帶入達西定率  $q = k i A$ , 及可求得試體飽和時的導水度  $k$  並記錄其值。
4. 調整蠕動幫浦的轉動速率,提高流量進行滲流,重複步驟 2 至 3 可得到不同滲流量,飽和試體的導水度  $k$ , 來驗證所量測導水度  $k$  的可靠性。

非飽和試體導水度試驗之操作步驟為：

1. 轉動三向閥關切斷蠕動幫浦滲流通路(如圖 3.4~3.7 所示),並打開試體側邊的通氣孔,選擇試體中央部份為基準點,先將連接於上下溢流口之玻璃量管置於基準點之下,上管的水面跟下管一樣高,使試體上下都受到張力,此時試體中央所受到的張力值為兩管張力的平均值。
2. 觀察上下玻璃量管的液面變化並加以紀錄,同時紀錄旁邊兩細玻璃管的高度差計算飽和度,當兩細玻璃管水位高度趨近相等

時，代表試體達到某階段之張力值。利用上下玻璃量管的液面變化可得知非濕相侵入量，得之濕相液體在某張力值下的體積含水比。

3. 當張力平衡時，調整三向閥開關形成試體—幫浦—試體或試體—PID—幫浦—PID—試體的通路，開啟蠕動幫浦分別以0.5、1、1.5 rpm 轉動速率來提供三種低流量滲流。
4. 利用連接於側壁上兩細玻璃管來觀測滲流進行時，試體上下固定距離之間的水頭差(即是水力梯度  $i$ )，當水頭差達到穩定時，表示試體達到穩態滲流。
5. 分別將蠕動幫浦提供流量  $q$ 、穩態滲流時量測的水頭差  $h$  及試驗試體的截面積  $A$ ，帶入達西定率  $q = k i A$ ，及可求得試體非飽和時的導水度  $k$  並記錄其值。
6. 調整蠕動幫浦的轉動速率，提高流量進行滲流，重複步驟4至5可得到不同滲流量，非飽和試體的導水度  $k$ ，來驗證所量測導水度  $k$  的可靠性。
7. 利用步驟1的方法，再降低濕相液體體積含水比，待平衡後，進行下一階段滲流試驗並重複步驟3至6。
8. 濕相飽和度降低至預期之殘餘飽和度時，步驟1中改為液體回吸，逐步提高飽和度，進行導水度試驗。完成試驗張力值回到0，拆解試體，並量測試體的飽和度(濕相液體的含量)。

### 3.3.4 蠕動幫浦原理與功能

本試驗採用蠕動幫浦(圖 3.16)控制流經試體的水之流量。蠕動幫浦的構造簡單，透過控制滾輪轉速，擠壓滾輪中間的塑膠管線，壓出管線中的液體。藉由更換管線來調整較大的流量變化，並藉由控制滾輪轉速微調流量。

如圖 3.17 所示當馬達軸心旋轉時，軸心周圍的滾輪壓住內有液體的管道。在兩個滾輪之間的液體將隨著滾輪的移動而移動。當滾輪轉動越快時，液體流動的速度越快。由於液體的流動的同時在管道中也形成壓力差，所以當液體流速越快時，壓力產生的速度也加快，當流速越快時，既使尖端的抽吸入口沒有堵塞住，也會因為抽吸入口的直徑所形成的阻力而在尖端形成負壓(尤其是 I/A tip 的抽吸入口為 0.3 mm，比內徑為 0.9 mm 的 phaco tip 更容易發生此現象)。尖端的負壓也和 ASP 管道的內徑及長度有關，內徑越大、長度越長，其負壓上升速度越慢。但在低流速時，此效應不明顯可忽略不計。

本次試驗的蠕動幫浦是 WASTON—MARLOW 英國公司製造，型號為 205 CA，其操作面板功能有觸壓防水按鈕、LCD 數字顯示轉速 rpm。內部構造有十支不鏽鋼的轉軸，其中有五個轉軸持續與蠕動管接觸，並搭配四種可換式轉頭及 8 個通道，每各通道有獨立的壓管匣。本機器具有引流裝置，可預防管子破裂時，液體流出不會使機器的馬達受損，蠕動管操作範圍為內徑 0.13 mm~2.79 mm，蠕動幫浦提供流量大小是取決於轉速高低及蠕動管徑的大小(如下表 3.3 所示)。這次試驗採用管徑為內徑約為 1.29 mm 的蠕動管，利用最低轉速 0.5 rpm 提供的流量約為每秒 0.0005 ml。



圖 3.16 WASTON—MARLOW 蠕動幫浦

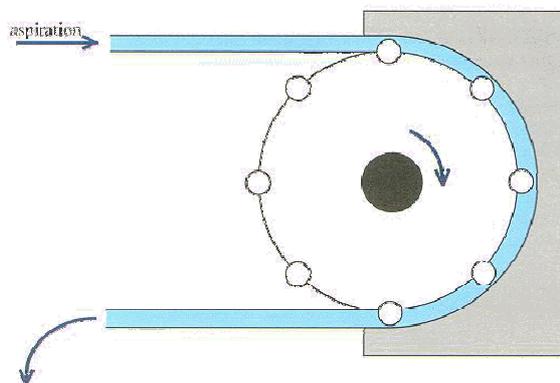


圖 3.17 蠕動幫浦作用機制

表 3.4 不同管徑搭配不同轉速可提供流體流量

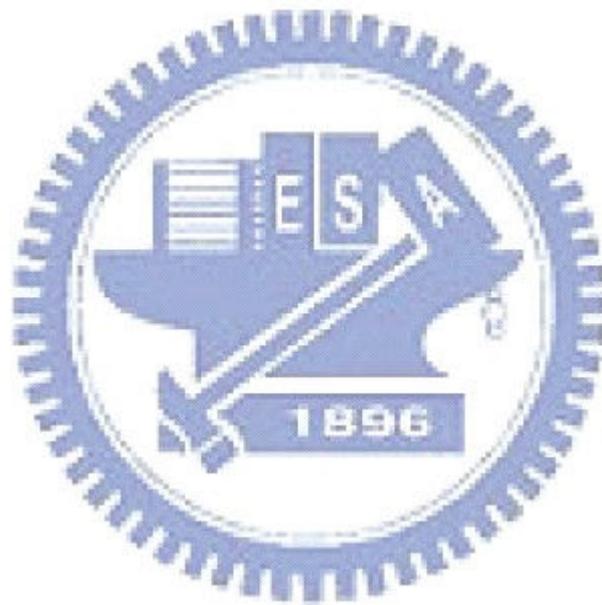
管子內徑(mm)	0.13	0.19	0.25	0.38	0.5
轉速 0.5(rpm)	0.0006(ml/min)	0.0009(ml/min)	0.0013(ml/min)	0.0036(ml/min)	0.0056(ml/min)
轉速 90 (rpm)	0.10(ml/min)	0.16(ml/min)	0.23(ml/min)	0.65(ml/min)	1.01(ml/min)
管子內徑(mm)	0.63	0.76	0.88	1.02	1.14
轉速 0.5 (rpm)	0.0083(ml/min)	0.011(ml/min)	0.016(ml/min)	0.021(ml/min)	0.026(ml/min)
轉速 90 (rpm)	1.49(ml/min)	2.02(ml/min)	2.92(ml/min)	3.76(ml/min)	4.68(ml/min)
管子內徑(mm)	1.29	1.42	1.52	1.65	1.85
轉速 0.5 (rpm)	0.033(ml/min)	0.04(ml/min)	0.043(ml/min)	0.051(ml/min)	0.063(ml/min)
轉速 90 (rpm)	5.95(ml/min)	7.20(ml/min)	7.69(ml/min)	9.12(ml/min)	11.3(ml/min)
管子內徑(mm)	2.05	2.38	2.54	2.79	
轉速 0.5 (rpm)	0.076(ml/min)	0.092(ml/min)	0.11(ml/min)	0.12(ml/min)	
轉速 90 (rpm)	13.8(ml/min)	16.5(ml/min)	19.3(ml/min)	22.0(ml/min)	

### 3.4 RETC程式求取滲透係數

大部分的保持曲線在量測及計算參數後，多用於預測水力傳導係數 $k$ 值，因為於導水度 $k$ 值不易量測且誤差大，相對的利用保持曲線配合間接的方法：如利用RETC程式方析較為快速且方便。

本實驗是採用RETC程式進行分析，RETC這套電腦程式是美國環境保護署(U.S. Environment Protection Agency, EPA)發展出來的，可用來分析土壤在不飽和狀態下之保持曲線及水力傳導係數，模式內含了(Brooks and Corey, 1964)、(Mualem and Burdine, 1975)及(Van Genuchten, 1980)之經驗公式，利用最小平方法迴歸出未知的水力參數，可從已知的保持曲線資料估算出該飽和度範圍內的水力傳導係數 $k$ 值。輸入的資料為各個保持曲線之張力與體積含水比之關係，並給予飽和時的導水度 $k_s$ 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導水度值。RETC說明及操作方式列於附錄中。



## 第四章 實驗結果與分析

### 4.0 摘要

本章中將實驗結果整理成圖表，並詳細加以分析討論。就保持曲線來說，影響土壤的保持特性主要有下列兩項因素；土壤的粒徑分布(顆粒大小、夯實狀況)及液體間的界面張力。大致上而言，土壤保持液體的能力會隨著細顆粒土壤的比例增加而提高；另一方面，試驗液體與空氣間的界面張力愈大，則要達到相同的含水比就需要較大的張力，也就是同樣的張力之下會有比較多的液體殘留在土體中。

在滲透儀實驗中，導水度  $k$  值的大小會隨著張力的增加(體積含水比減少)而減小。而影響導水度大小的因素主要有下列兩項：液體與空氣間的界面張力及土壤的粒徑分布；整體而言，在同一土壤結構下，一定的體積含水比時，液體與空氣間的界面張力越大則當時的導水度會比較小；另一方面，試體中細顆粒土壤的比例增加也會造成導水度的減小。

### 4.1 保持曲線試驗結果

試驗過程中第一部分是以前滲透儀試驗裝置進行實驗，求取空氣—有機液體的保持曲線。試體組裝完成之後，先將土壤試體以試驗液體(水、汽油、柴油)飽和；接著增加張力使空氣進入試體中，液體會因而排出，逐步增加張力值，可以求得試體的主要排出曲線(MDC)；第二部分紀錄上下兩量管的水面刻度變化及兩細玻璃管的高度差，經由達西定律便可以求得相對應的導水度  $k$  值。接著逐步減少張力值，便可以求得試體的主要濕潤曲線(MWC)及濕潤曲線上的  $k$  值曲線。

#### 4.1.1 液體-空氣與水-有機液體保持曲線

圖 4.1~圖 4.3 表示滲透儀液體-空氣之保持曲線實驗結果，圖 4.4 表示滲透儀水-有機液體之保持曲線實驗結果。從圖形中可以看出，不論液體或土樣為何，都有遲滯現象的發生；亦即實驗的主要排出曲線和濕潤曲線並不會重合，且張力為零時，含水比皆無法回到排出曲線的起點，殘餘之有機液體含量都相當低。因為當有機液體侵入試體中佔據孔隙之後，當張力減小要再回吸時，部分液體會將空氣卡鎖在孔隙中，因此會造成濕潤曲線上含水比較低；不過就兩種土樣比較起來，土樣一因為顆粒比較大，所以液體在低壓的部分(10 mbar 以內)就幾乎被排出，其餘的部分在相同的張力之下 MWC 曲線上的含液比都會比 MDC 上所對應的來得低。整體而言，土樣二的保持曲線遲滯現象較土樣一明顯，主要原因就是土壤顆粒大小與粒徑分佈的均勻性的影響。

由滲透儀試驗於等待張力平衡時所得之保持曲線，由圖形中可以看出，雖然為同一種土樣且具有同樣的相對密度，不過實驗結果卻不盡相同，造成試驗結果差異的原因主要有：液體本身的濕潤性不同及 NAPL 介面張力較小導致飽和階段較易有空氣殘留而造成初始飽和度較低。

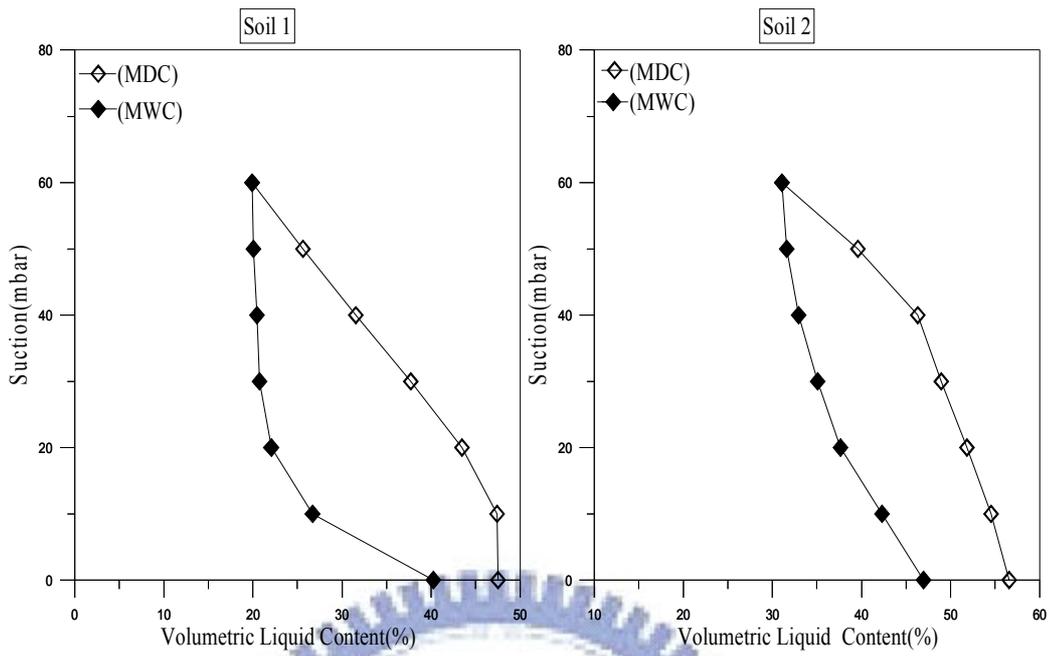


圖 4.1 水對空氣滲透儀保持曲線

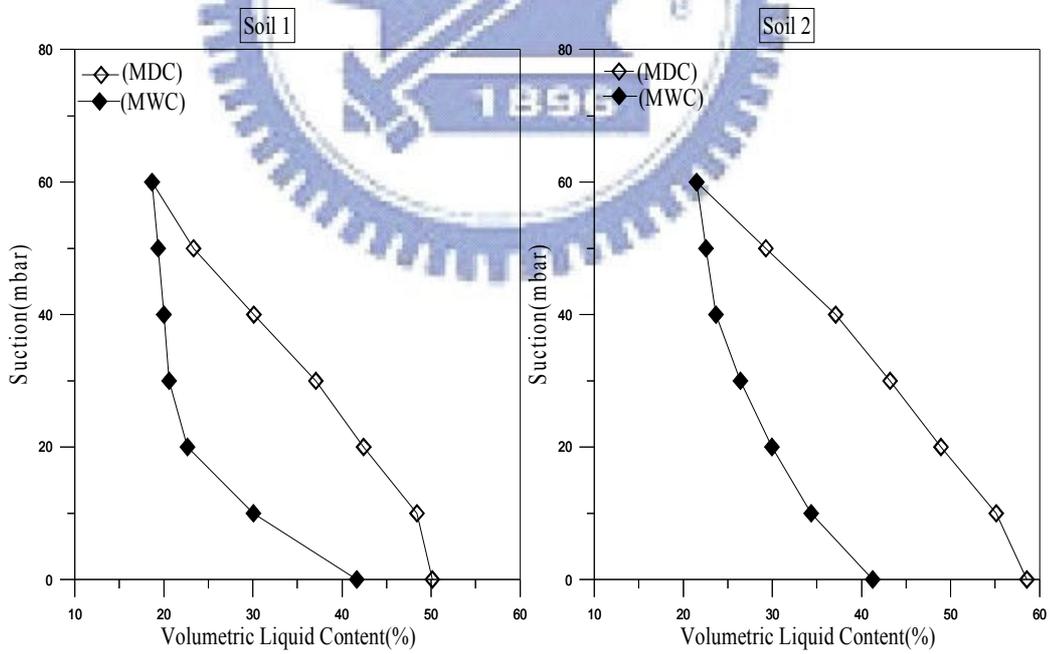


圖 4.2 95 無鉛汽油對空氣滲透儀保持曲線

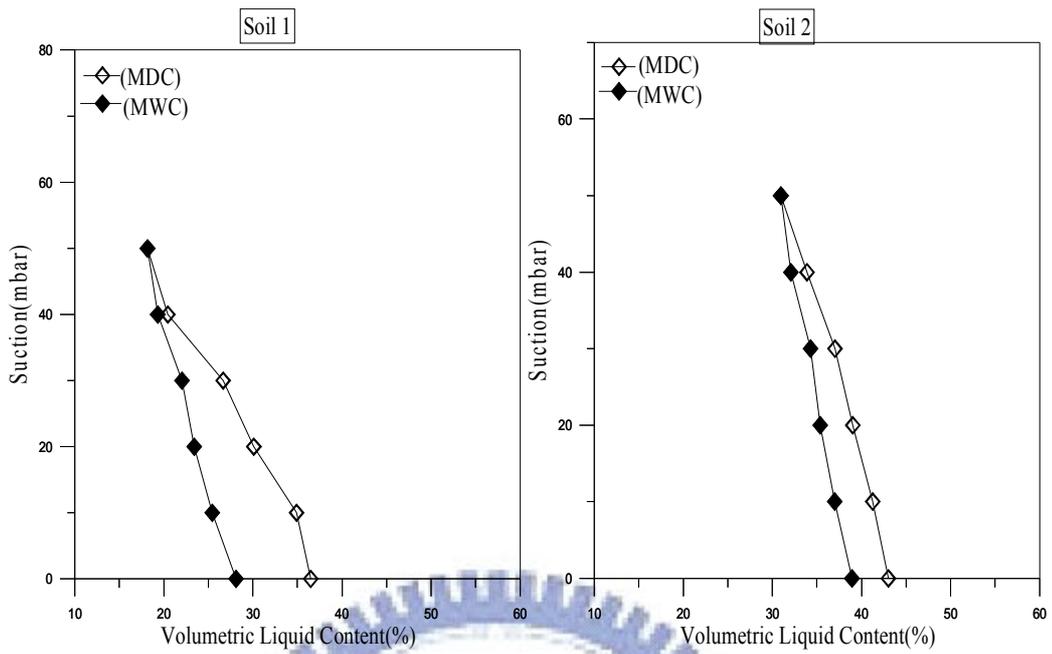


圖 4.3 柴油對空氣滲透儀保持曲線

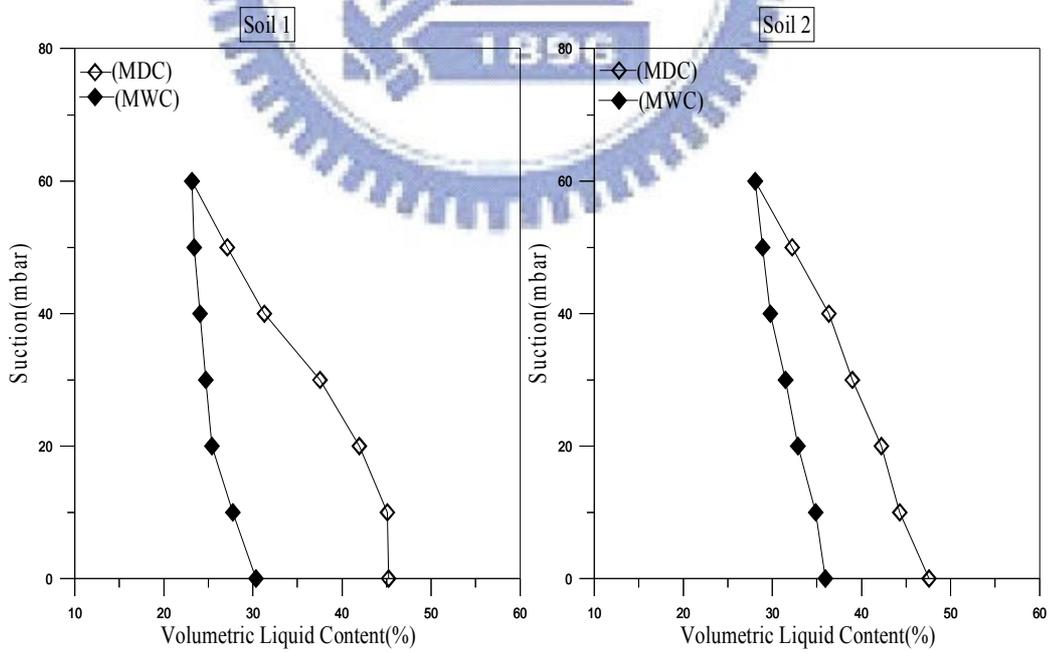


圖 4.4 水對 95 無鉛汽油滲透儀保持曲線

#### 4.1.2 保持特性與土壤性質的關係

表 4.1 表示出各試驗中之殘餘體積含液比，我們由表中可以發現，濕相液體所殘餘的體積含液比，土樣二的值比土樣一來得高，表示殘餘體積含液比會隨著土壤顆粒的減小而增加。

圖 4.5~圖 4.7 為不同土樣之液體-空氣保持曲線，由圖中可以發現，對於較粗顆粒的土樣一，液體的侵入會比土樣二來得快。由於土樣一的顆粒比較大且均勻，所以在保持曲線上在低壓的部分(60 mbar 以內)水很快就被排出。與林立偉(2005)滲透儀試驗所得之保持曲線相互比較，由圖形中可以看出，雖然為同一種土樣且具有同樣的相對密度，不過實驗結果卻不盡相同，造成試驗結果差異的原因主要有：本研究採用之試驗儀器裝置較為精密，且較可抑制 NAPL 揮發，所得知結果應較為準確。初始飽和度的不同、製作過程夯實造成的差異以及滲透儀裝置中欲調整張力的方法不同造成體積含水比的誤差。由於本研究採用之試驗儀器裝置較為精密，且較可抑制 NAPL 揮發，所得知結果應較為準確。

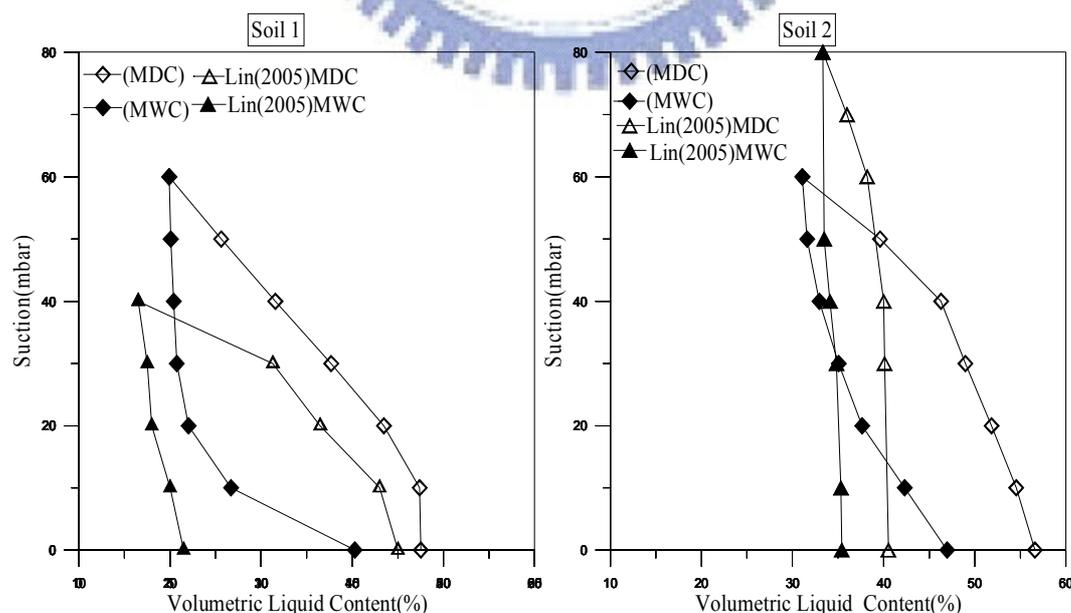


圖 4.5 水對空氣保持曲線與前人比較(滲透儀)

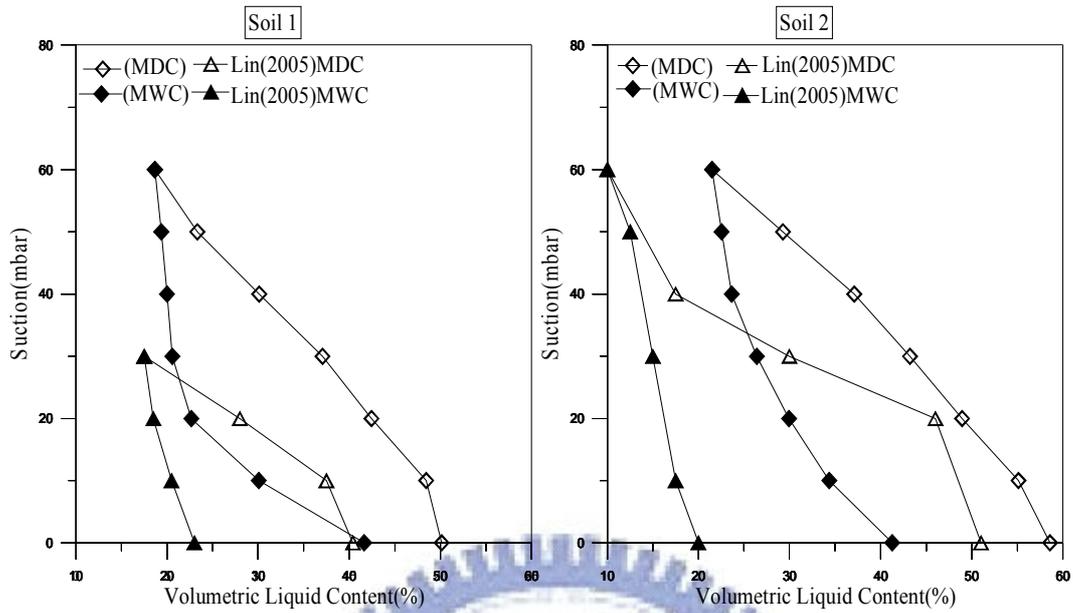


圖 4.6 汽油對空氣保持曲線與前人比較(滲透儀)

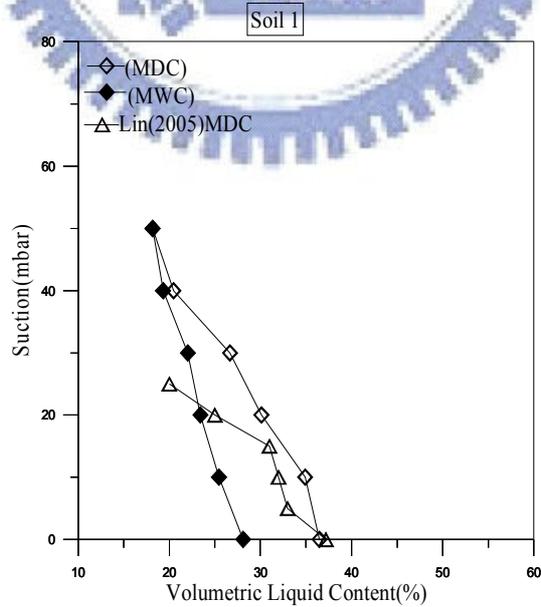


圖 4.7 柴油對空氣保持曲線與前人比較(滲透儀)

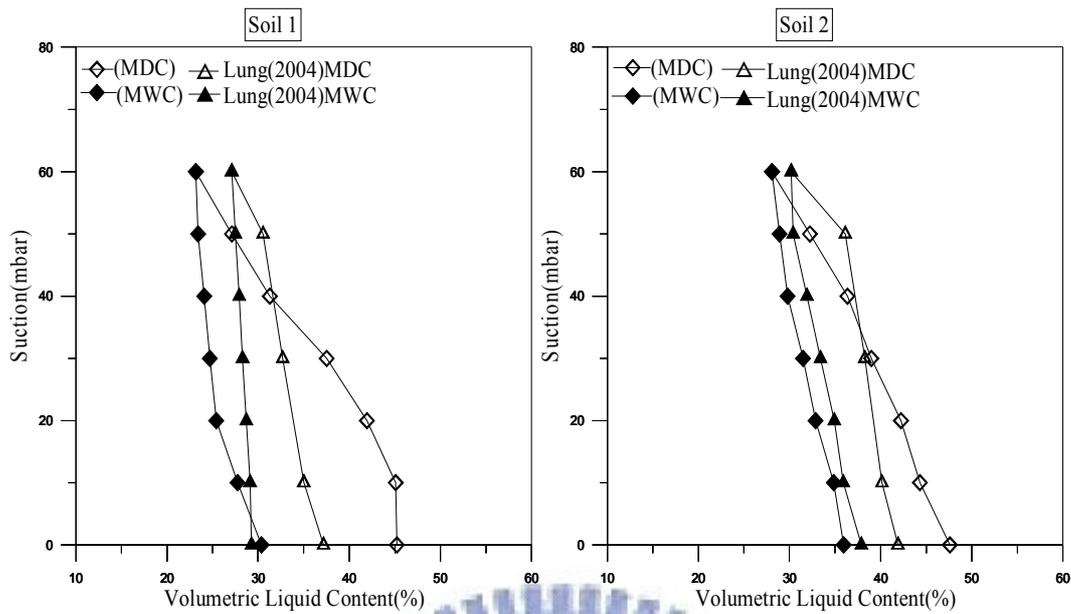


圖 4.8 水對汽油保持曲線與前人比較(滲透儀)

表 4.2 表示出各試驗中初使含液比與殘餘含液比之差值，理論上來說，土壤顆粒較小的試體對液體的保持能力較強，因此排出的液體會比較少，但是從表 4.2 中可以發現土樣二排出之水量都比土樣一多，探究原因應是土樣二飽和時之含水比原本就比土樣一高，所以雖然土樣二顆粒比較小，但是仍會有較多的水排出，若是可以增加試驗的組數，將現地土樣之細粒料的含量提高，方可以進一步加以比較。

表 4.1 張力為 60 mbar 時之殘餘體積含液比

土壤試體	土樣一(%)	土樣二 (%)
水—空氣	19.92	31.09
九五無鉛汽油—空氣	18.68	21.49
柴油—空氣	18.17	30.93
水—九五無鉛汽油	23.17	28.09

表 4.2 初始含液比與殘餘含液比之差值

土壤試體	土樣一 (%)	土樣二 (%)
水－空氣	27.51	25.5
九五無鉛汽油－空氣	31.45	37.09
柴油－空氣	18.33	12.08
水－九五無鉛汽油	22.04	19.5

表 4.3 表示各試驗中初使含液比與最終含液比之差值，(黃進富, 1996)指出其差值會隨著小孔隙的增加而變小，也就是小孔隙越多，水回吸的量也會越多。

表 4.3 初始含液比與最終含液比之差值

土壤試體	土樣一 (%)	土樣二 (%)
水－空氣	7.26	9.63
九五無鉛汽油－空氣	8.47	17.33
柴油－空氣	8.49	4.09
水－九五無鉛汽油	14.85	11.65

#### 4.1.3 流體性質對保持特性的影響

本試驗中總共使用三種液體(水、九五無鉛汽油、柴油)，圖 4.9~4.10 表示空氣對不同液體保持曲線之比較。因為土壤中液體的保持特性由液體與土壤間的作用力而定，此作用力就是毛細力，實驗中

所用的三種液體與空氣之間的界面張力由大至小分別是水、柴油、九五無鉛汽油，界面張力愈大表示具有較大的保持能力，也就是在同樣的張力之下，界面張力越大，液體在土壤孔隙中殘留的量也會越大。這由圖 4.9 中大致可見，排出曲線的初始飽和度雖然有些不同，但稍微移位比較後，發現和我們推測的結果相當一致。而由圖 4.10 中，柴油對空氣濕潤曲線的情況似乎不如上述合理，原因可能是對有機液體的揮發校正做的不夠完善，正常的情況下，有機液體的濕潤曲線應當再往左移一些。

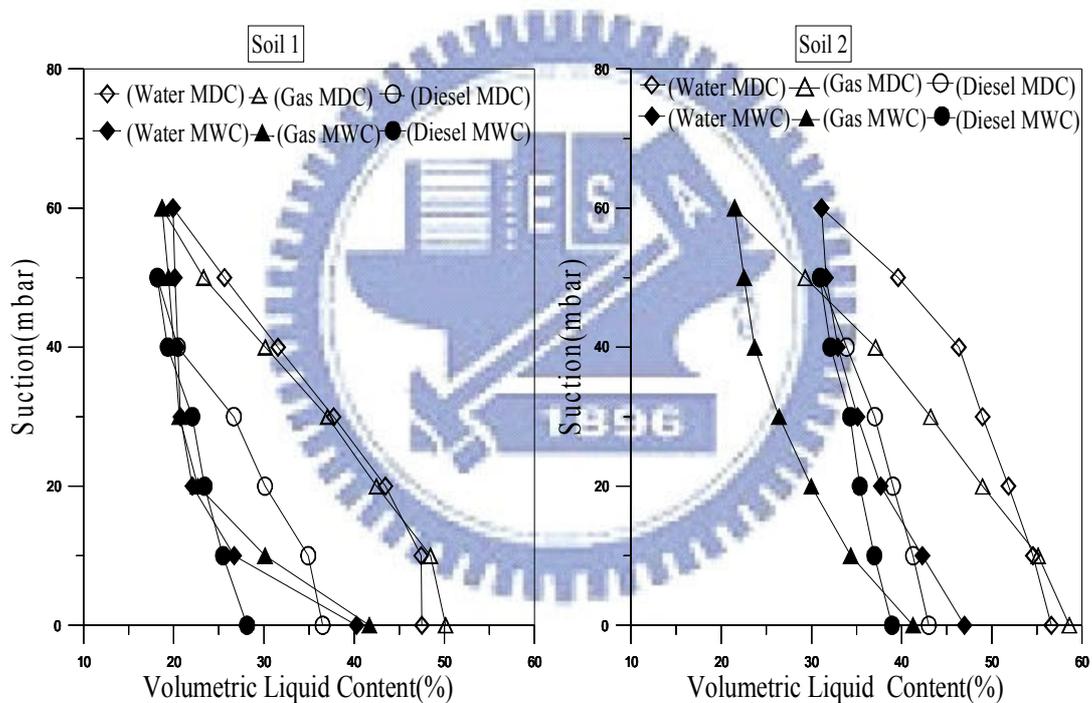


圖 4.9 不同液體對空氣保持曲線

圖 4.10 不同液體對空氣保持曲線

## 4.2 液體－空氣兩相滲流試驗

### 4.2.1 水對空氣滲透儀試驗結果

圖4.11~12分別為土樣一及土樣二水對空氣之滲透試驗結果。由圖中可以發現在排出曲線上，隨著張力的增加，含水比下降，導水度

會急遽的減小，一旦張力值超過空氣進入壓力之後，導水度變小的趨勢將會減緩。而在溼潤曲線上，隨著張力的減少，含水比增加，導水度隨之上升。在較低的體積含水比下，濕潤曲線與排出曲線的導水度非常接近，隨著體積含水比增加，兩條曲線導水度差距也隨之增加，不過兩條曲線發展趨勢具有一致性。

圖4.13為不同土樣滲透實驗值之比較，由圖中可以發現，在同一體積含水比下，無論是排出曲線或濕潤曲線，土樣一之導水度值都比土樣二來的大，表示土壤顆粒越小則導水度也會越小。

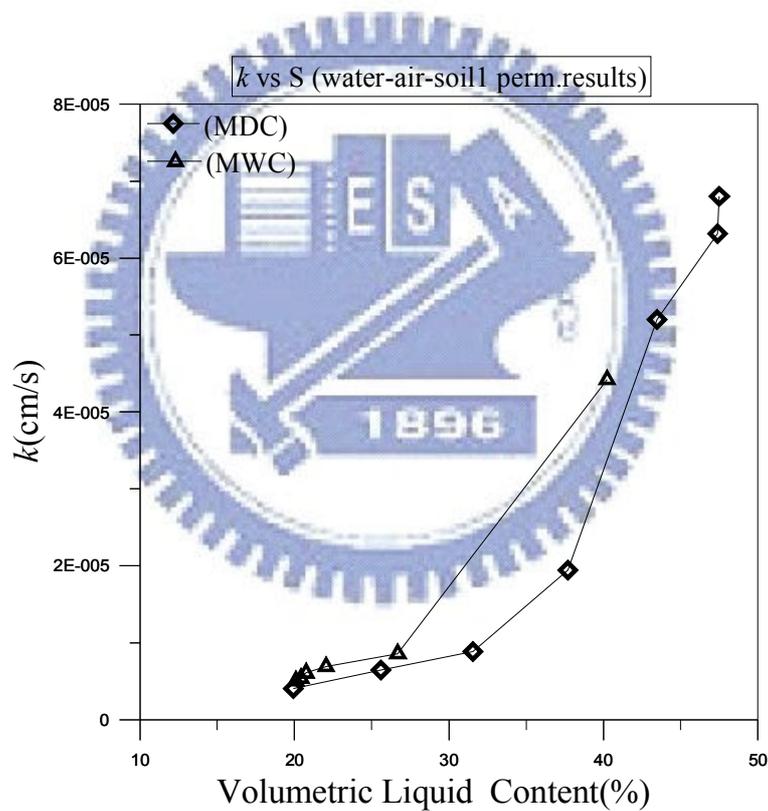


圖 4.11 水對空氣滲透儀試驗(土樣一)

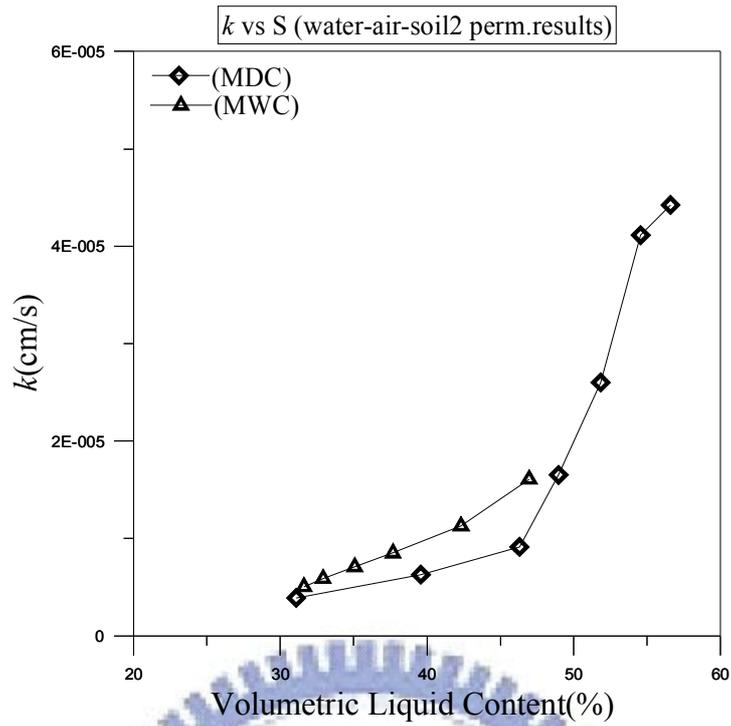


圖 4.12 水對空氣滲透儀試驗(土樣二)

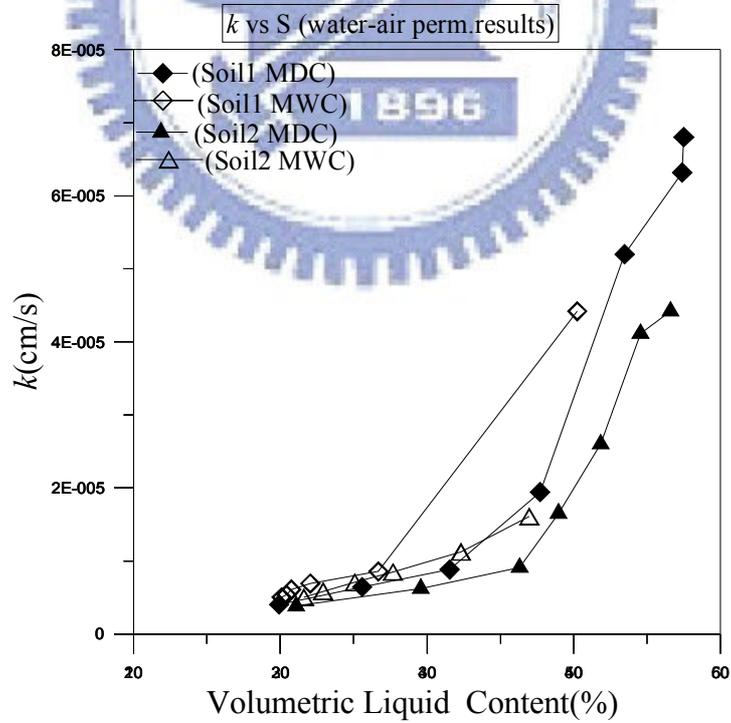


圖4.13 水對空氣滲透儀試驗

#### 4.2.2 95無鉛汽油對空氣滲透儀試驗結果

圖4.14~15分別為土樣一及土樣二95無鉛汽油對空氣之滲透試驗結果。由圖中可以發現在較高的體積含水比下，土樣一的排出曲線，其導水度值有急遽下降的趨勢。土樣二的排出曲線，其導水度值下降趨勢較為平緩。由此顯示在高飽和度下，土壤顆粒越大則導水度的改變量越大。土樣一的試驗中，雖然排出曲線與濕潤曲線有發生交錯的行為，應屬實驗誤差導致，可能實驗進行中並沒有達到穩定滲流，進行量測水頭差造成之影響。

圖4.16為不同土樣滲透實驗值之比較，由圖中可以發現當體積含水比大於40%時，土樣一排水曲線與土樣二排水曲線導水度 $k$ 差值有顯著增加，整各趨勢來看的話，孔係較大的土樣一在同一飽和度下，仍然有較大的導水度 $k$ 。

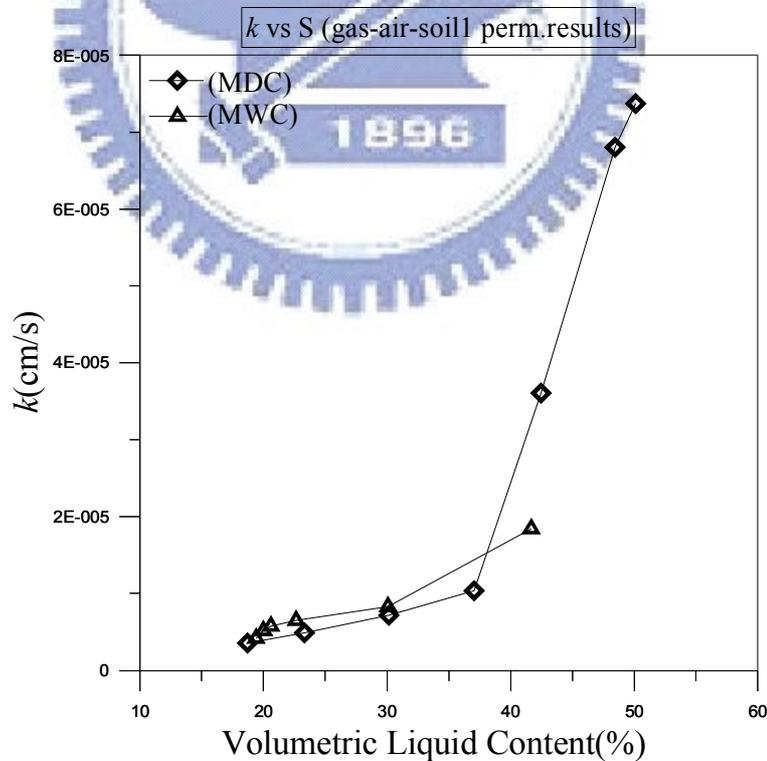


圖4.14 95無鉛汽油對空氣滲透儀試驗(土樣一)

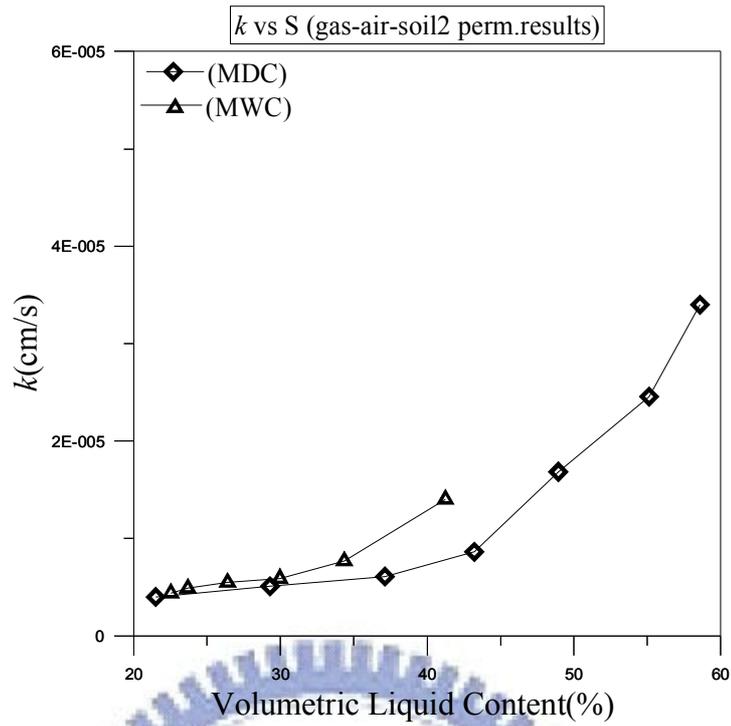


圖4.15 95無鉛汽油對空氣滲透儀試驗(土樣二)

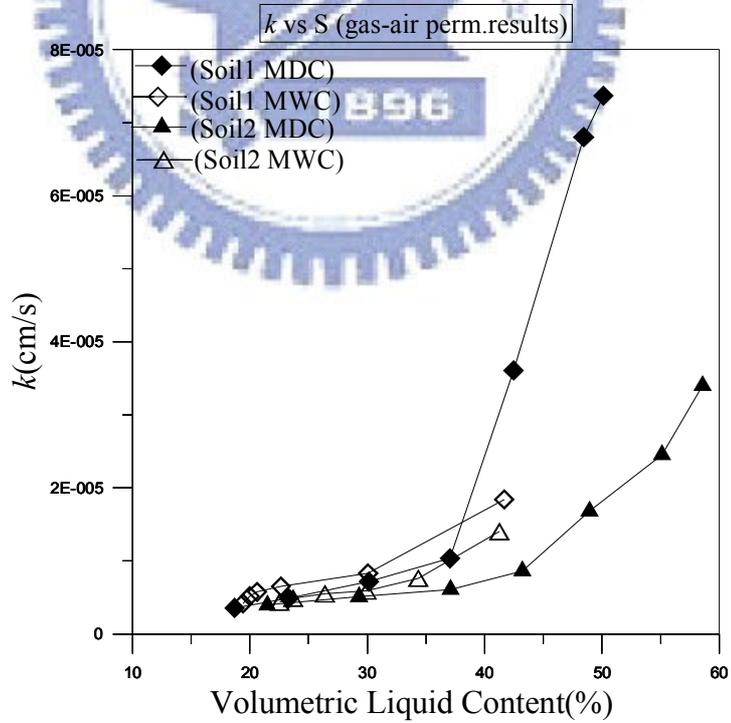


圖4.16 95無鉛汽油對空氣滲透儀試驗

### 4.2.3 柴油對空氣滲透儀試驗結果

圖4.17~18分別為土樣一及土樣二柴油對空氣之滲透試驗結果。由於土樣一試體初始體積含水比小於40%，土樣二試體初始體積含水比小於45%，其排出曲線的導水度 $k$ 相較於95無鉛汽油滲透儀試驗結果並無顯著的改變。

圖4.19為不同土樣滲透實驗值之比較，由圖中可以知道在較低的體積含水比下，土樣一排出曲線非常接近土樣二的排出曲線，在同一體積含水比下，無論是排出曲線或濕潤曲線，仍然是土樣一之導水度值都比土樣二來的大，表示土壤顆粒越大則導水度也會越大，但是在較低的體積含水比下，其導水度 $k$ 的差異不是非常大。

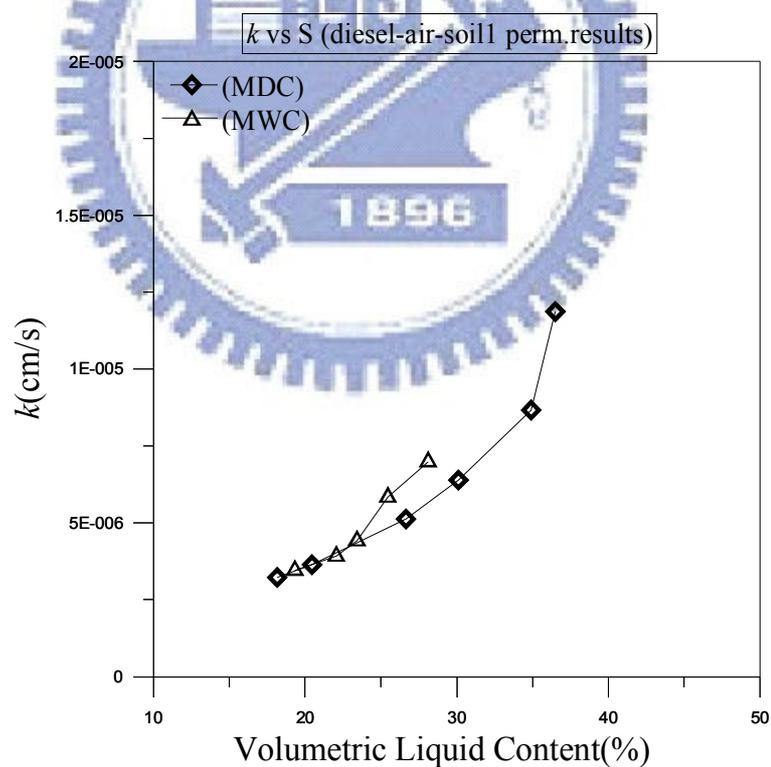


圖4.17 柴油對空氣滲透儀試驗(土樣一)

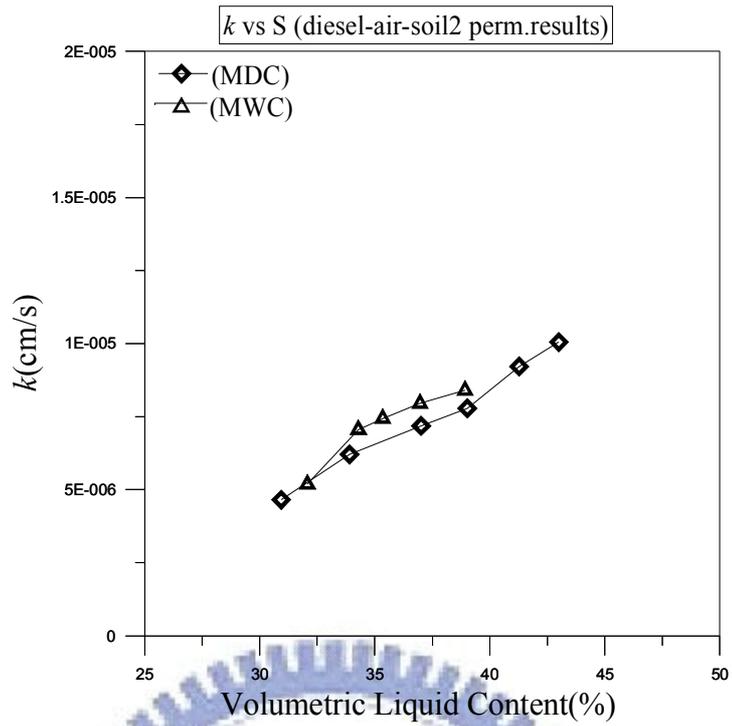


圖4.18 柴油對空氣滲透儀試驗(土樣二)

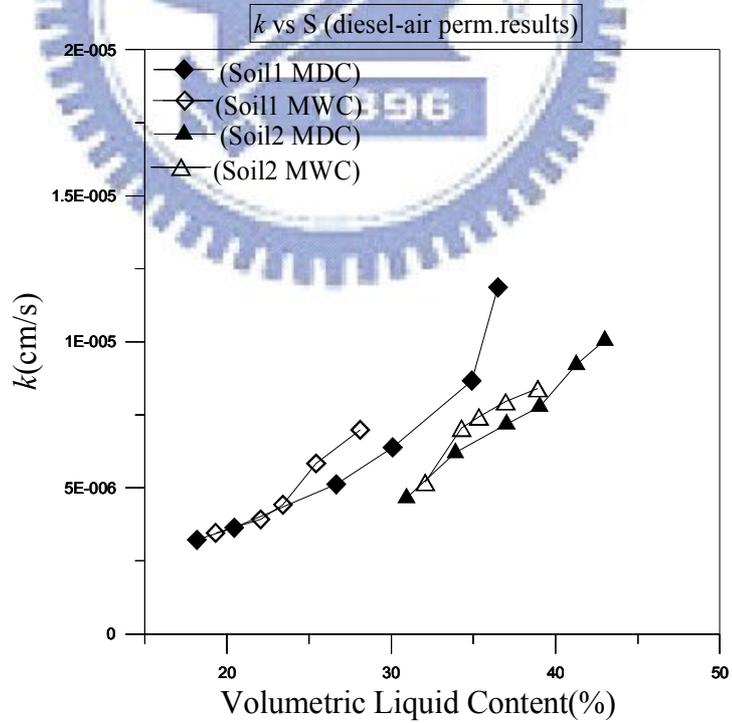


圖4.19 柴油對空氣滲透儀試驗

### 4.3 NAPL—水兩相滲流試驗

#### 4.3.1 水對95無鉛汽油滲透儀試驗結果

圖 4.20~21 分別為土樣一及土樣二水對 95 無鉛汽油之滲透試驗結果。由圖中可以發現在排出曲線上，隨著張力的增加，含水比下降，導水度會急遽的減小，在張力到達空氣進入值之前是導水度急速下降的區域，過了空氣進入值之後，導水度變小的趨勢將會減緩。

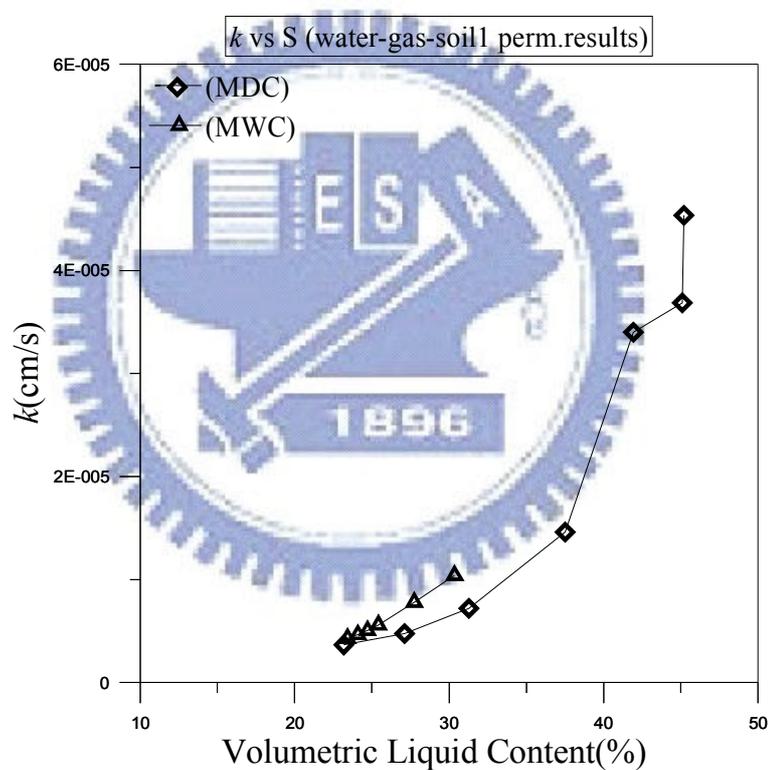


圖 4.20 水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗(土樣一)

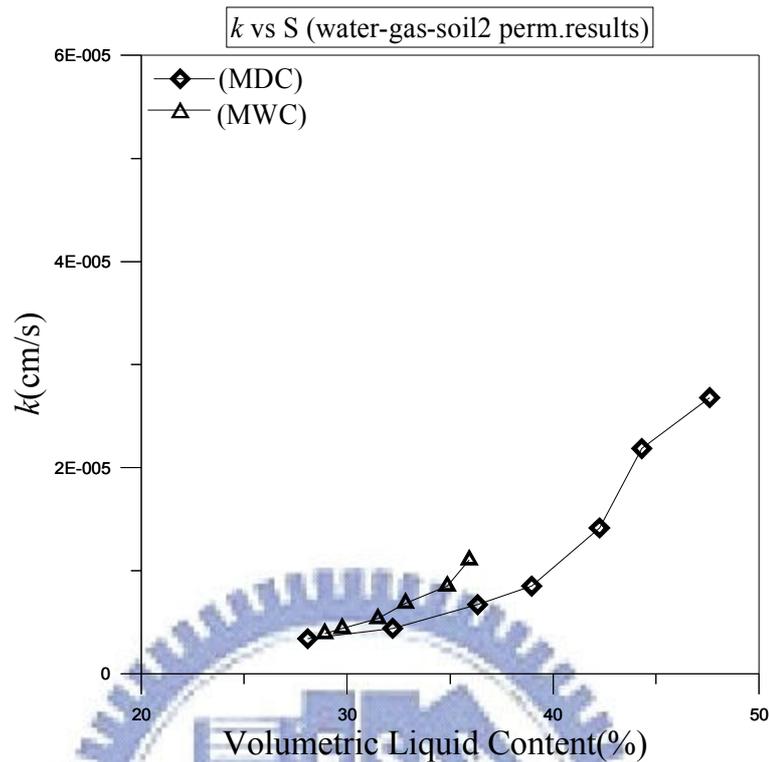


圖 4.21 水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗(土樣二)

### 4.3.2 滲透實驗結果綜合比較

Donald W. Taylor 於1948年曾提出式(4.1)

$$K = D_s^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C \quad (4.1)$$

式中 $\mu$ 為液體之黏滯性，而 $\gamma_w$ 則代表液體的密度、 $e$ 為孔隙比、 $D_s$ 代表土壤之粒徑分佈， $C$ 則為形狀因子，此式指出滲透係數值與下列因素有關：土壤的粒徑分佈、滲流之流體性質及土壤之孔隙比。若土壤的粒徑分佈及土壤結構保持一定，則滲透係數值將只與流體之黏滯性與密度有關，由式中可以看出滲透係數值會與液體的黏滯性成反比。

在土壤結構保持一定的情况下Muskat於1937年曾提出下列式子：

$$K_p = K \frac{\mu}{\gamma_w} \quad (4.2)$$

式中 $K$ 為Darcy's coefficient也就是以達西定律所求出導水度之值，而 $K_p$ 則稱為physical permeability，這個式子的意思是指，對同一種土壤來說，只要其粒徑分佈與土壤結構保持一定，其 $K_p$ 值將為定值，不論其中滲流的流體為何，其導水度值將保持一定值。

圖4.22~23分別將95無鉛汽油與柴油的滲透實驗結果進行比較，由(4.1)經驗式來看若土壤的粒徑分佈及土壤結構保持一定，則滲透係數值將只與流體之黏滯性與密度有關。由於95無鉛汽油與柴油的黏滯性、單位密度、表面張力...等等基本性質都非常接近。因此在相同的體積含水比下，95無鉛汽油與柴油的導水度 $k$ 因很接近，由實驗結果來看兩者的導水度 $k$ 也非常接近。

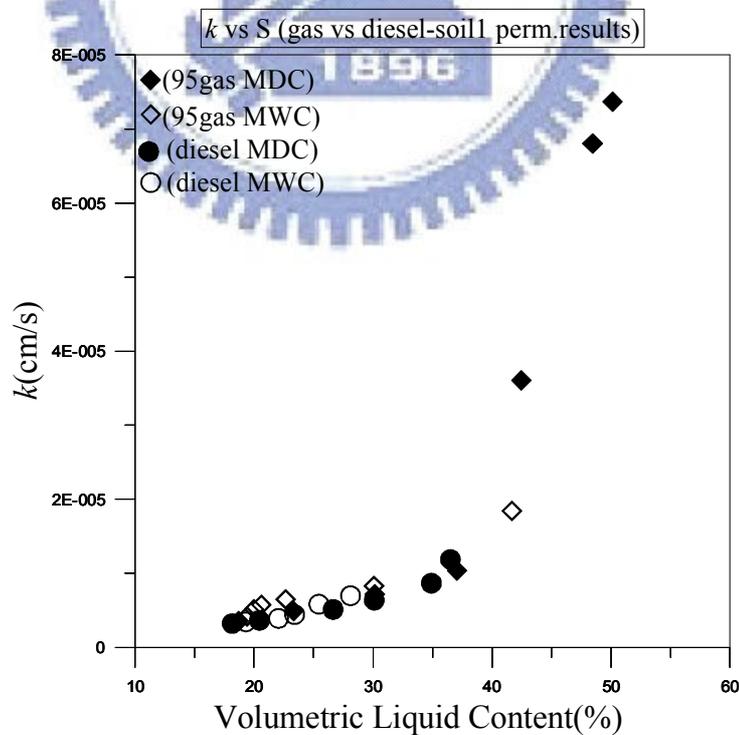


圖 4.22 汽油與柴油對空氣滲透儀試驗比較(土樣一)

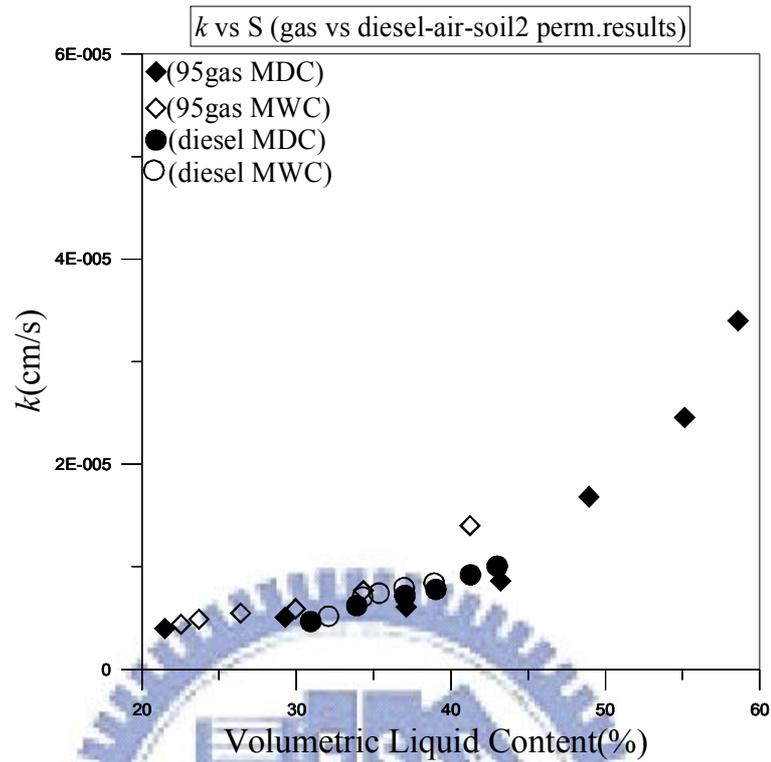


圖4.23 汽油與柴油對空氣滲透儀試驗比較(土樣二)

圖4.24~25分別將水對空氣與水對95無鉛汽油的滲透實驗結果進行比較。由於實驗中所滲流的液體均為水，再同一個土壤結構之下，式4.2中只剩下液體的黏滯性為影響的因素，假設在實驗過程中水的黏滯性並沒有改變，代表在一定的體積含水比之下，水對空氣與水對95無鉛汽油的兩條滲透實驗值理論上應該相同，但實驗結果水對空氣的導水度 $k$ 略大於水對95無鉛汽油的導水度 $k$ ，可能是水在滲流過程中與有機液體間的互制作用使得其黏滯性不維持定值之故。

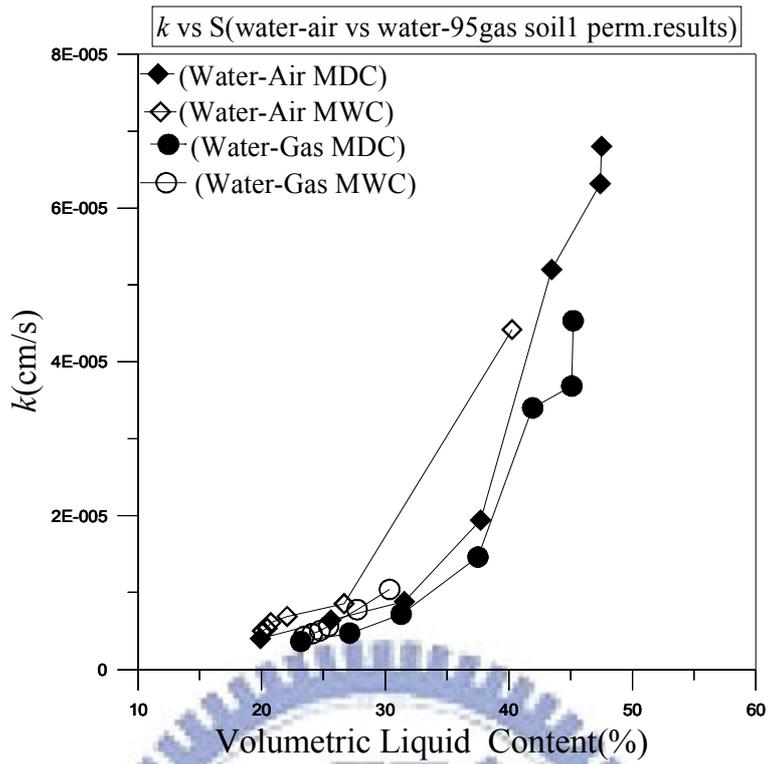


圖4.24 水對汽油與空氣滲透儀試驗比較(土樣一)

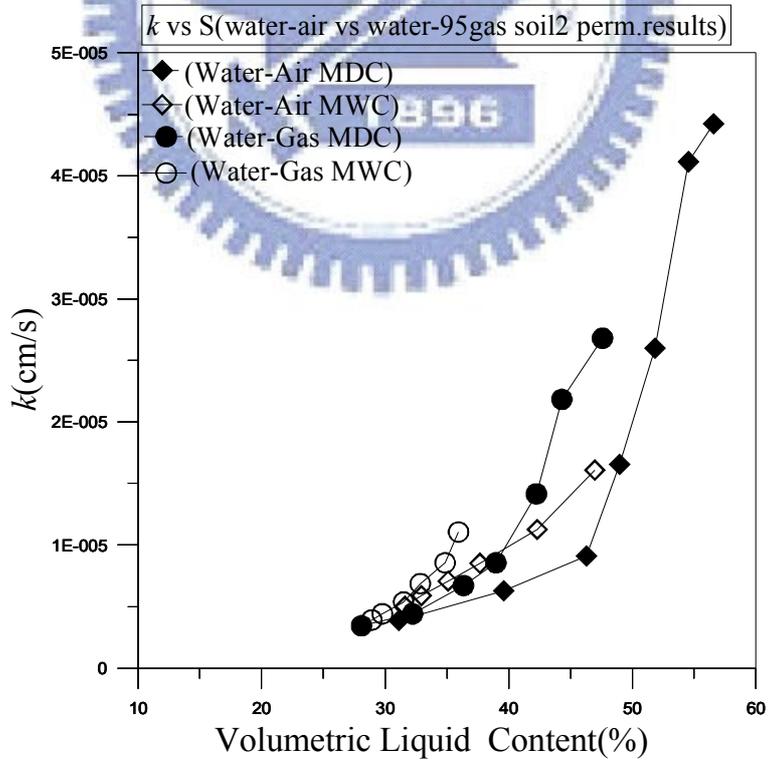


圖4.25 水對汽油與空氣滲透儀試驗比較(土樣二)

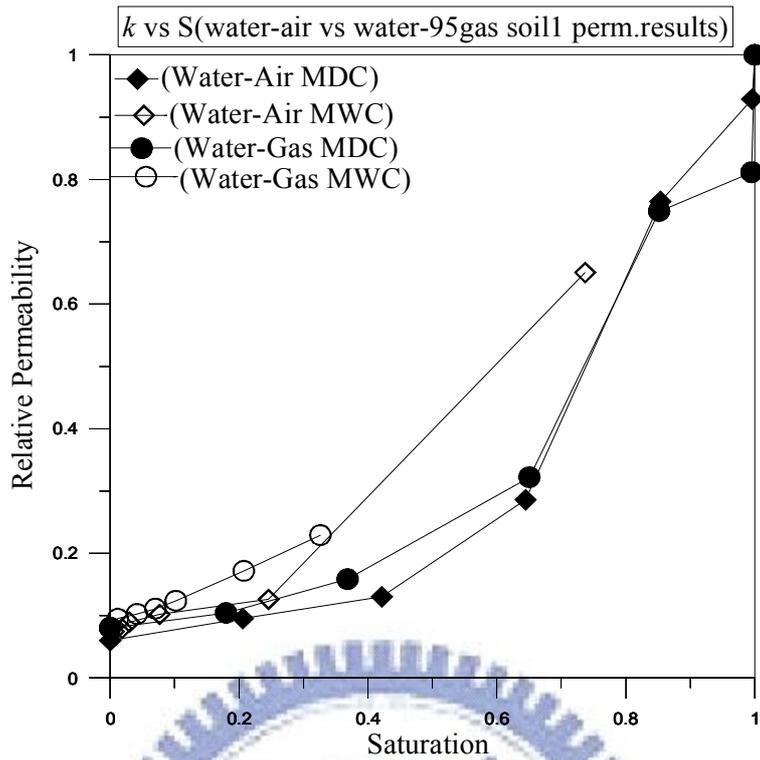


圖4.26 水對汽油與空氣的k-S實驗曲線(土樣一)

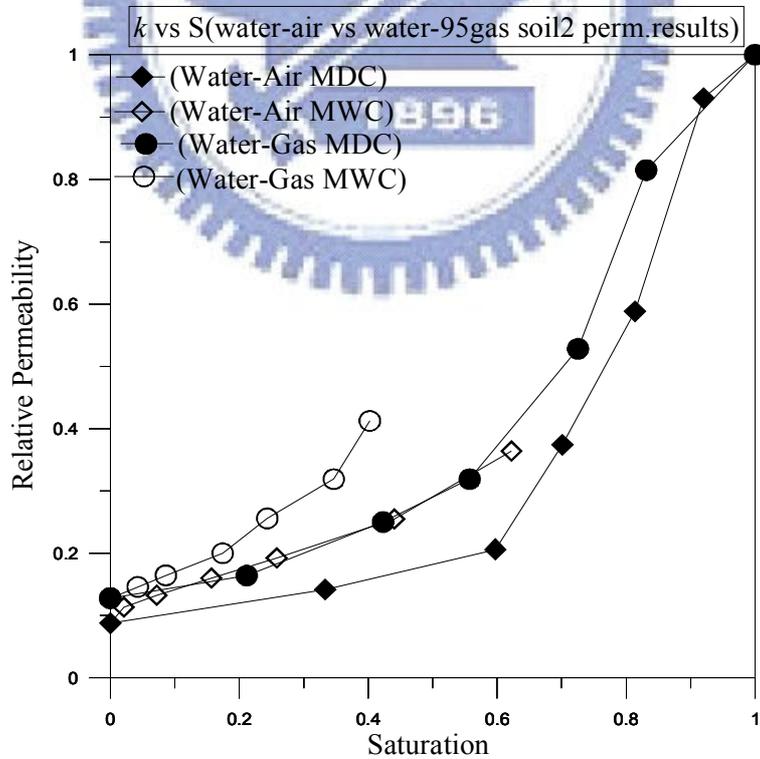


圖4.27 水對汽油與空氣的k-S實驗曲線(土樣二)

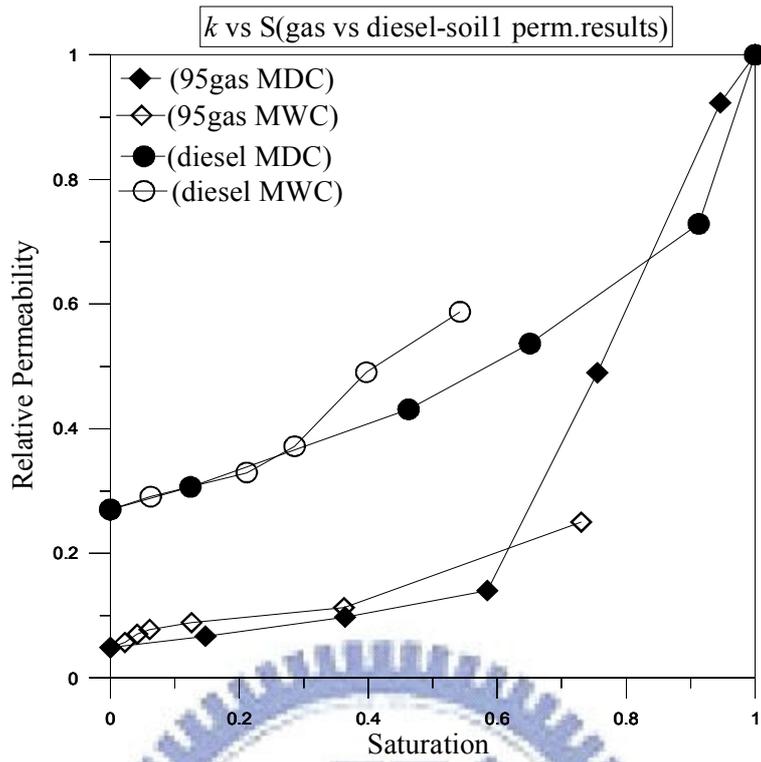


圖4.28 汽油與柴油對空氣的k-S實驗曲線 (土樣一)

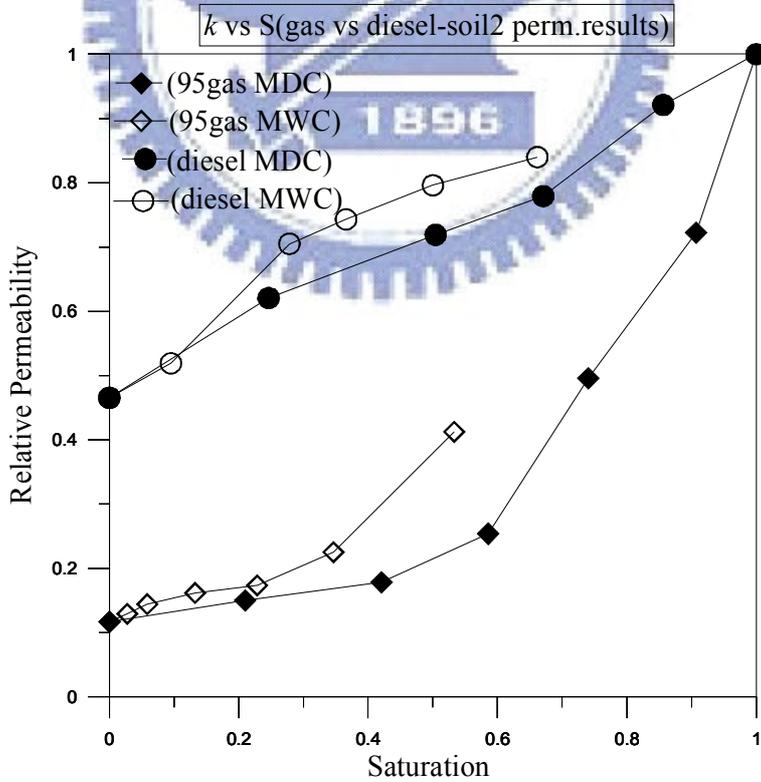


圖4.29 汽油與柴油對空氣的k-S實驗曲線(土樣二)

圖4.30~36分別將本次利用蠕動幫浦提供定流量滲透儀試驗結果與之前學長所做的重力排水滲透儀試驗結果進行比較。由圖中可以了解本次實驗方法較能掌握體積含水比與導水度 $k$ 的關係，同時在相同的體積含水比下，排出曲線與濕潤曲線應有相同得導水度 $k$ ，利用本次實驗方法也能得到較準確的結果。在較高的體積含水比下，因有較高的導水度 $k$ ，然而觀察林立偉(2005)所做的排出曲線與濕潤曲線則有交錯的現象，可能是因為試驗流體並沒有達到穩定滲流而量測出的導水度 $k$ 。利用蠕動幫浦提供定流量滲流，較能使試驗流體達到穩定滲流，增加試驗結果的可靠度。

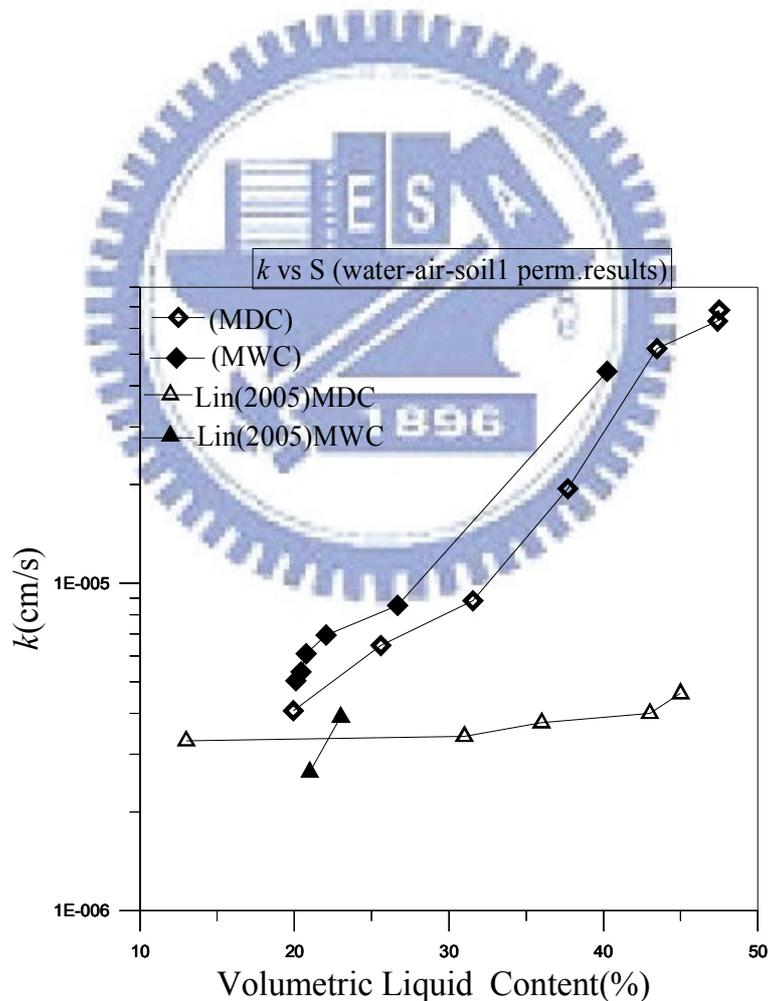


圖4.30 水對空氣滲透儀試驗結果與前人比較

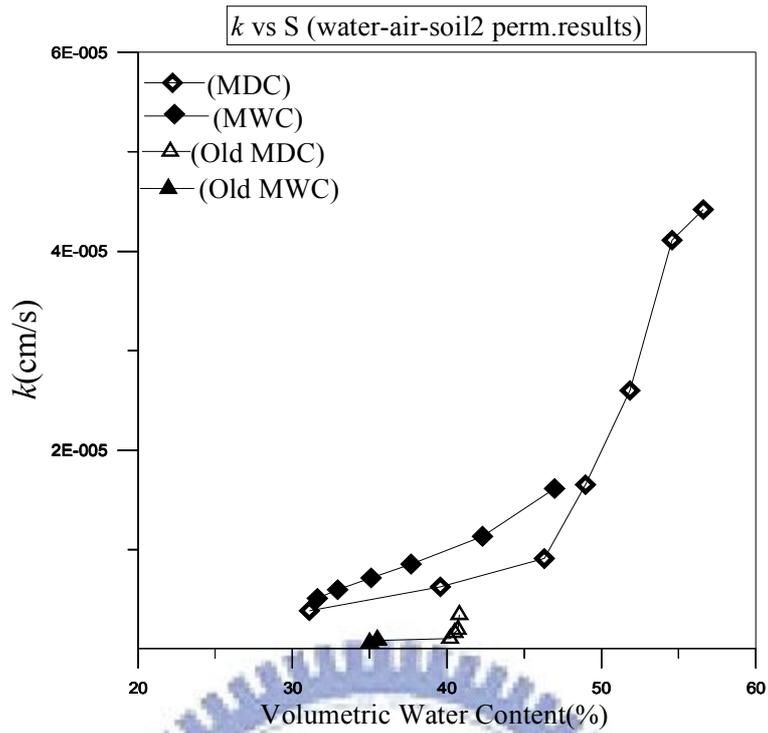


圖4.31 水對空氣滲透儀試驗結果與前人比較

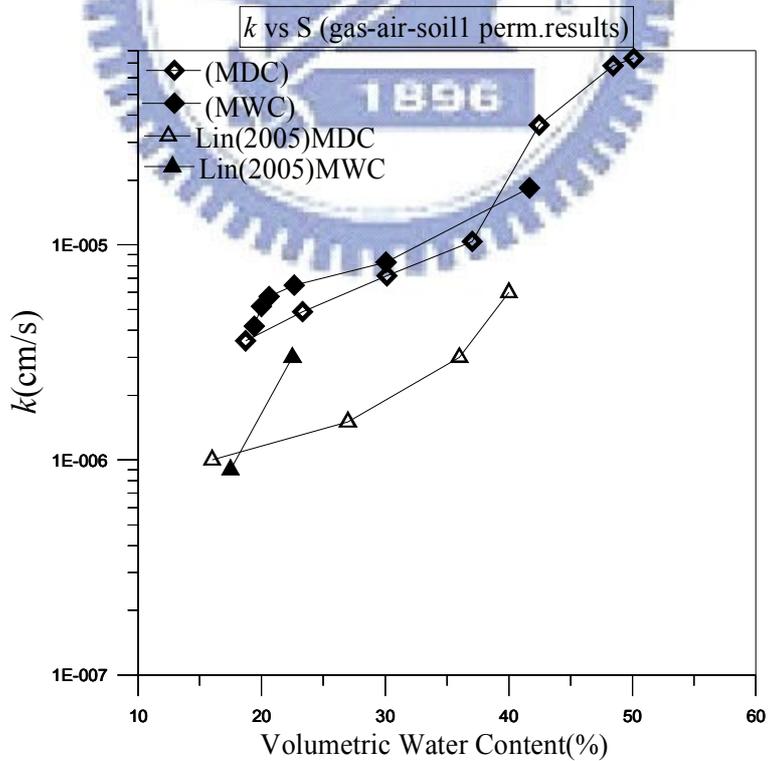


圖4.32 95無鉛汽油對空氣滲透儀試驗結果與前人比較

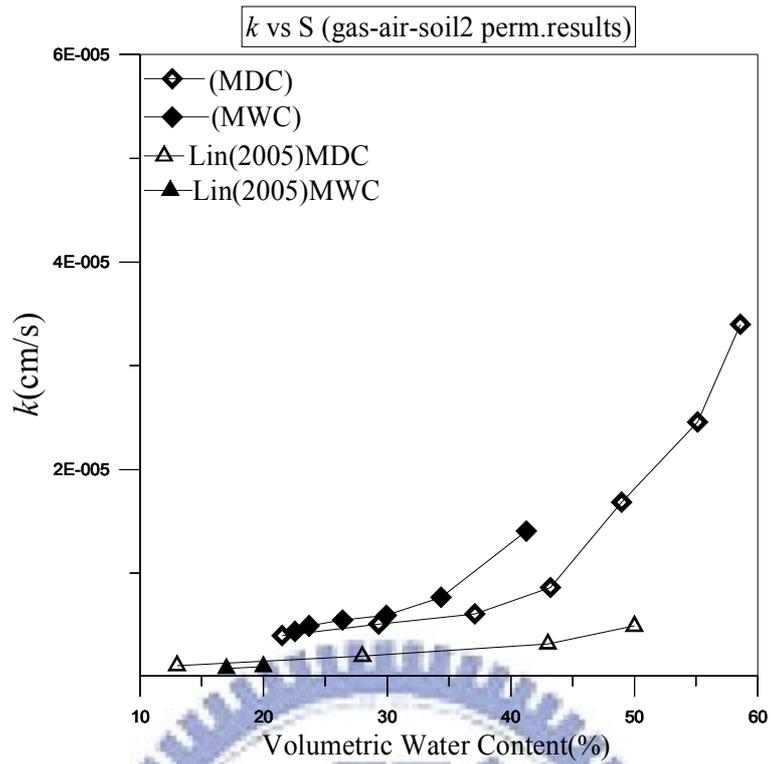


圖 4.33 95 無鉛汽油對空氣滲透儀試驗結果與前人比較

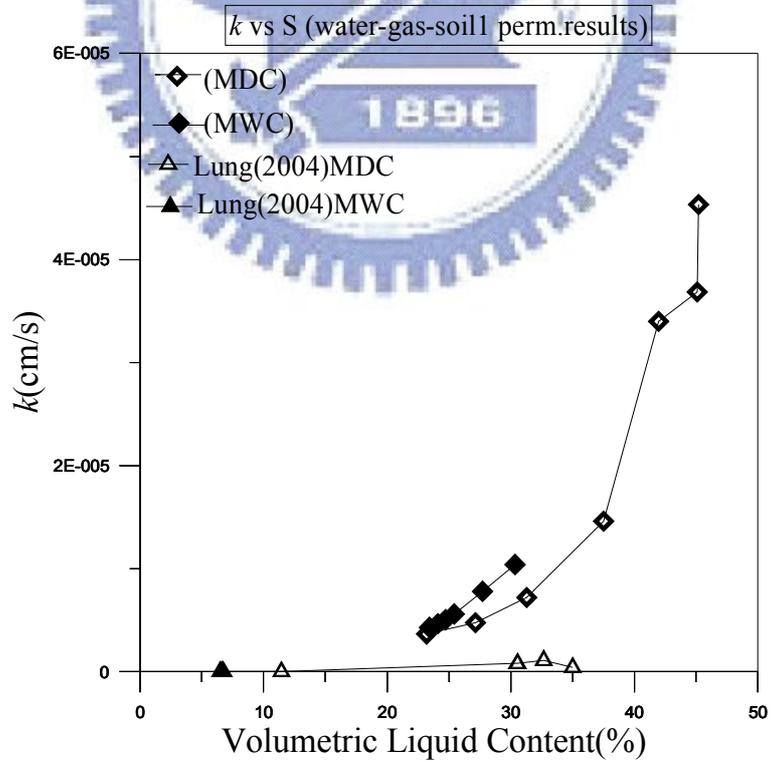


圖 4.34 水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗結果與前人比較

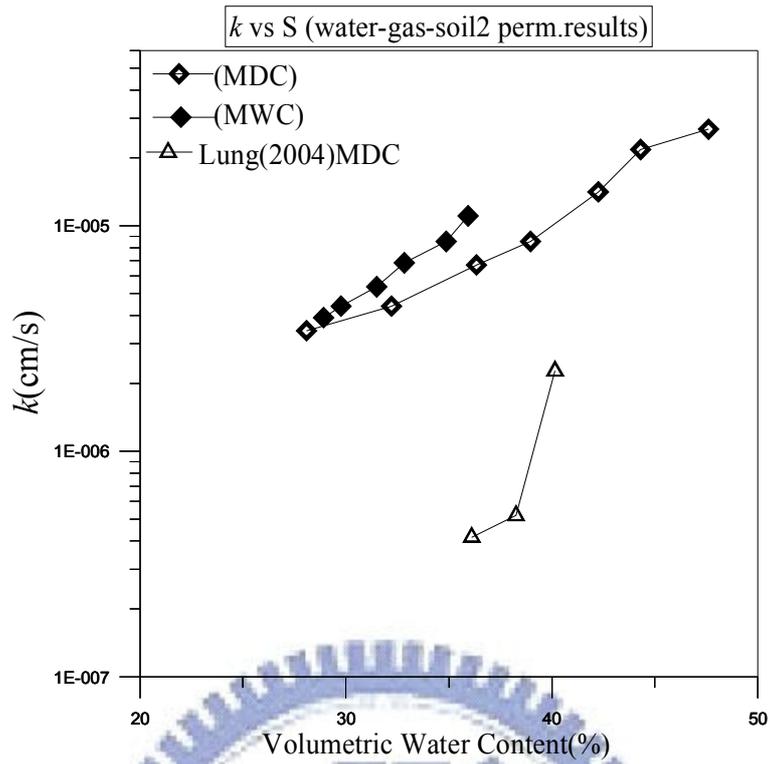


圖 4.35 水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗結果與前人比較

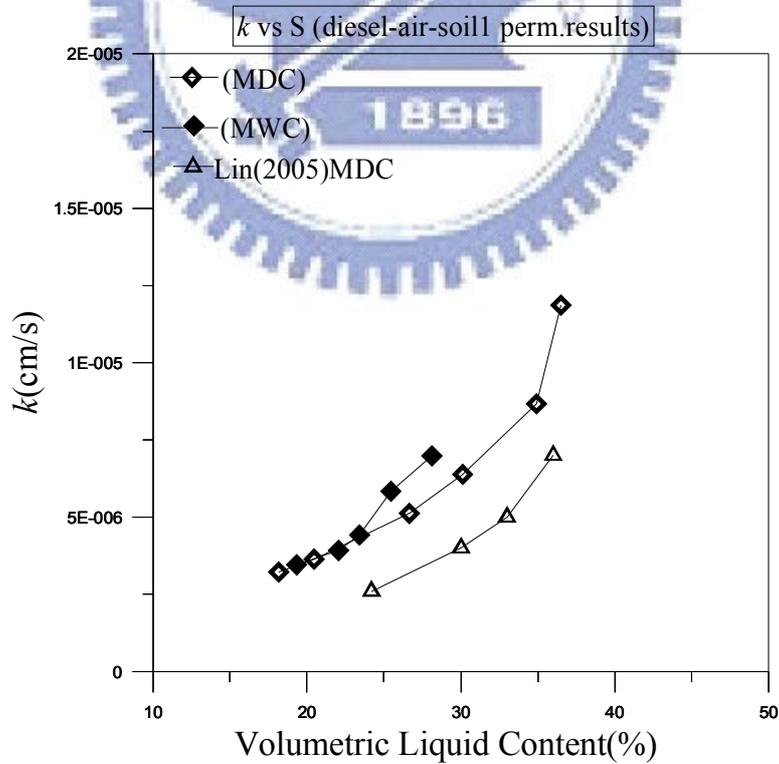


圖4.36 柴油對空氣滲透儀試驗結果與前人比較

#### 4.4 由 RETC 程式預測 $k$ 值

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，使用較多也具代表性的便是van Genuchten(1980)所發展之模式。

本實驗是採用RETC程式進行分析，RETC這套電腦程式是美國環境保護署(U.S. Environment Protection Agency, EPA)發展出來的，可用來分析土壤在不飽和狀態下之保持曲線及水力傳導係數，模式內含了(Brooks and Corey, 1964)、(Van Genuchten, 1980)及(Mualem and Burdine, 1975)之經驗公式，利用最小平方法迴歸出未知的水力參數，可從已知的保持曲線資料估算出該飽和度範圍內的水力傳導係數 $k$ 值。輸入的資料為各個保持曲線之張力與體積含水比之關係，並給予飽和時的導水度 $k_s$ 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導水度值。

圖 4.37~40 為滲透儀試驗結果與滲透儀保持曲線經由 van Genuchten 經驗公式求得在不同體積含水比之下的導水度 $k$ 值相互比較。由圖形中可以看出 $k$ 值的變化是隨著含水比的減少(也就是張力的增加)而變小，不同的有機液體之間的排出曲線與濕潤曲線差異不大，在較高的體積含水比下，實驗值與理論值非常接近，在較低的體積含水比下，實驗值與理論值的差距較大，可是差距維持一定比例，兩條曲線的趨勢具有一致性，實驗值貼著理論值移動且實驗值略高於理論值。

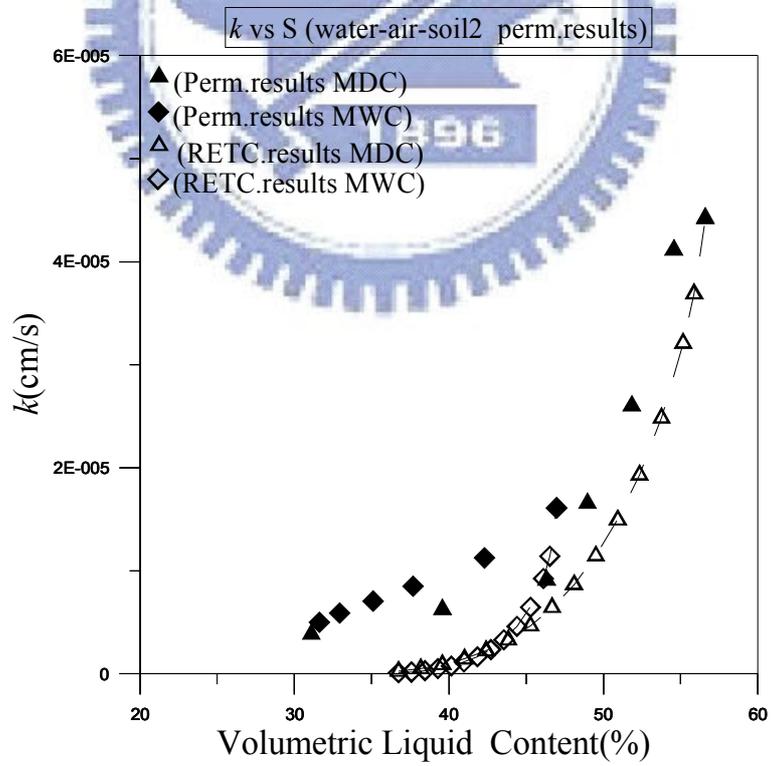
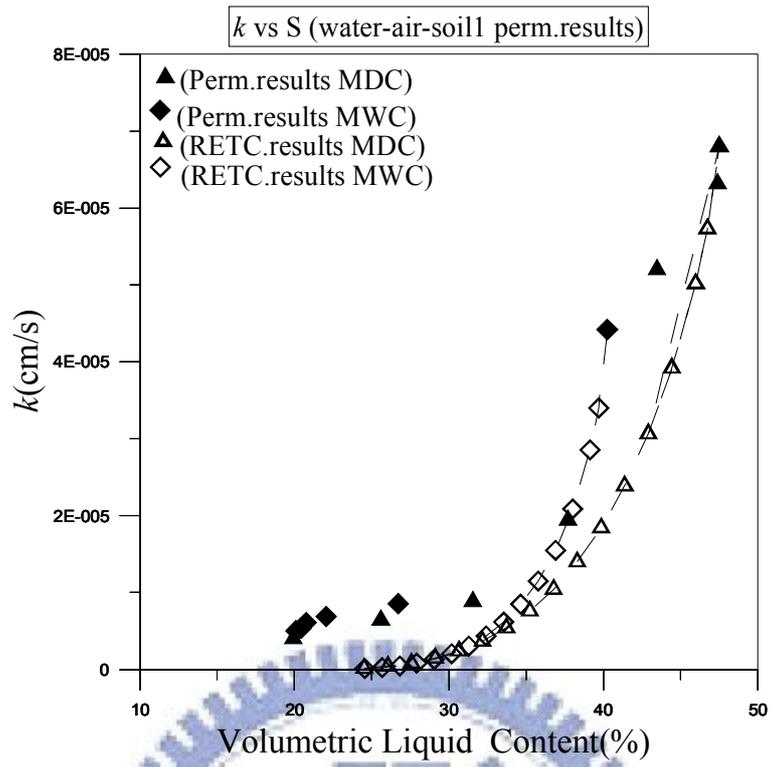


圖 4.37 水對空氣滲透儀試驗結果與 RETC 程式預測  $k$  值之比較

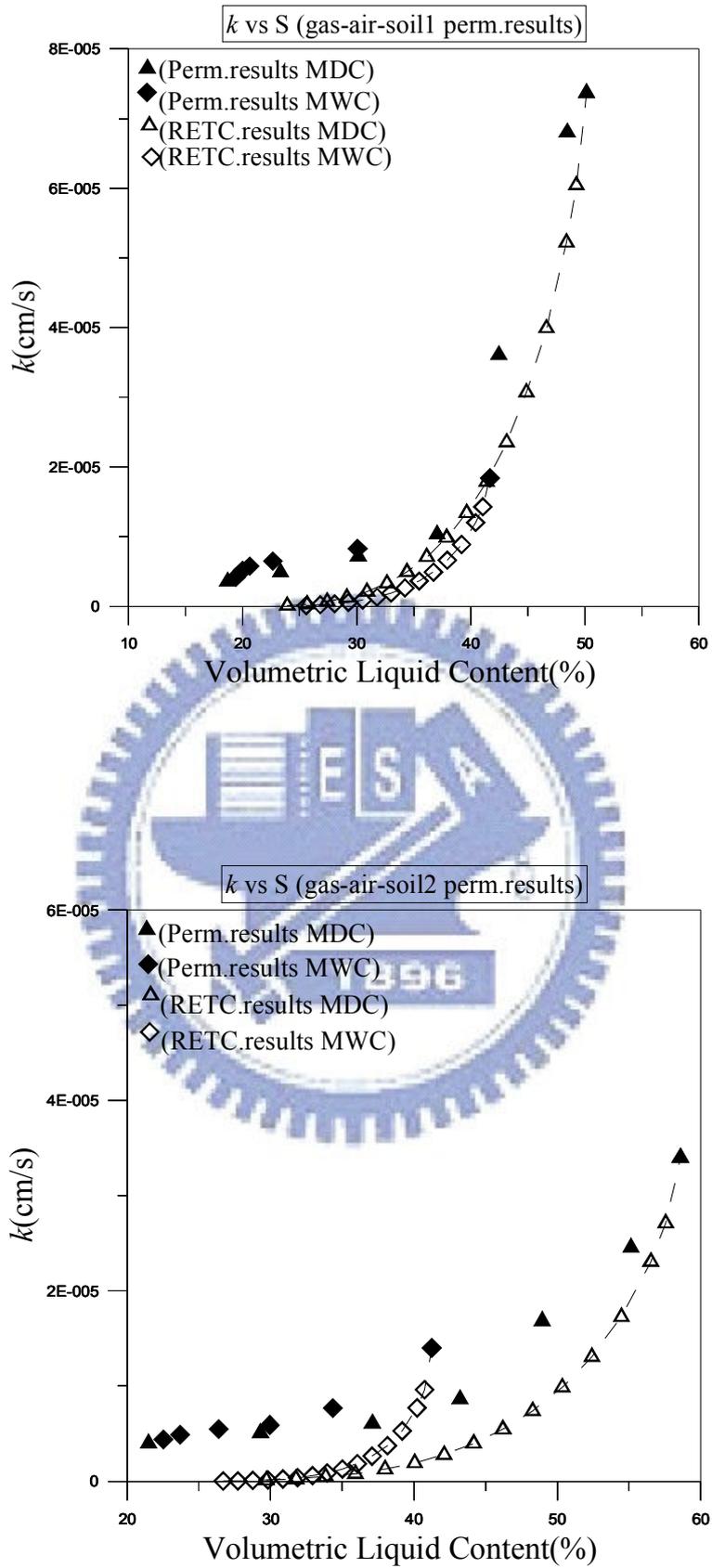


圖 4.38 汽油對空氣滲透儀試驗結果與 RETC 程式預測  $k$  值之比較

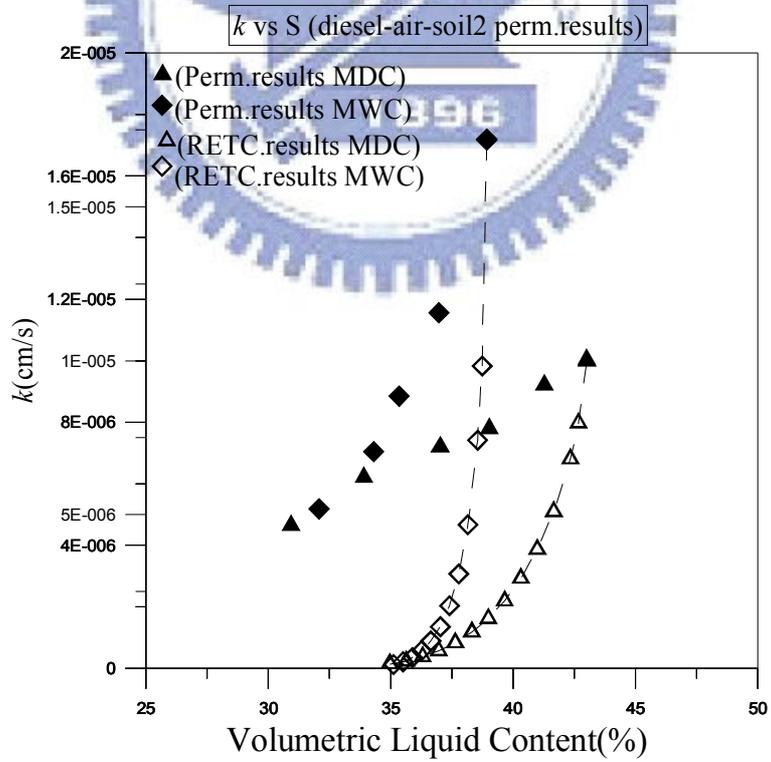
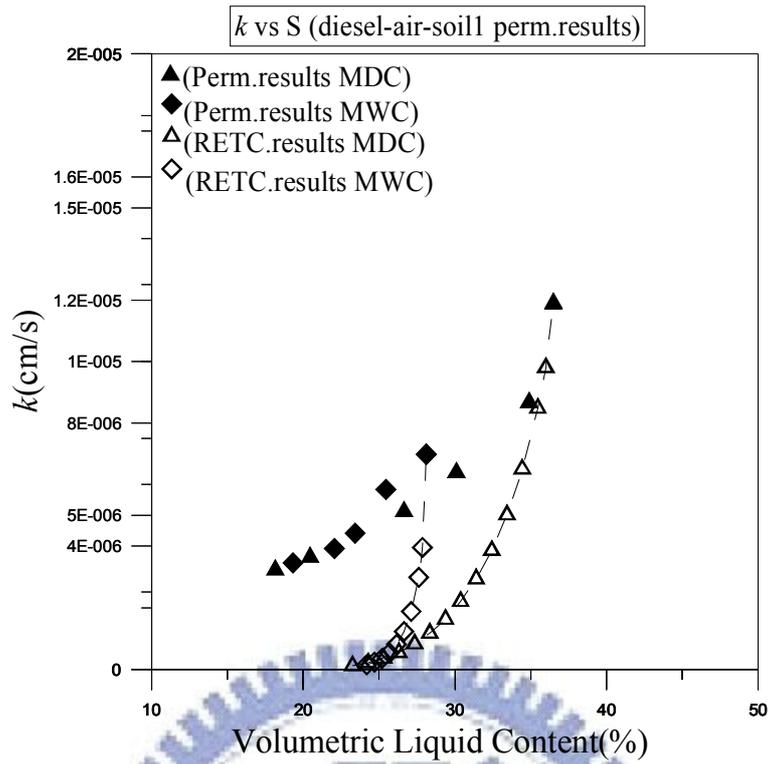


圖 4.39 柴油對空氣滲透儀試驗結果與 RETC 程式預測  $k$  值之比較

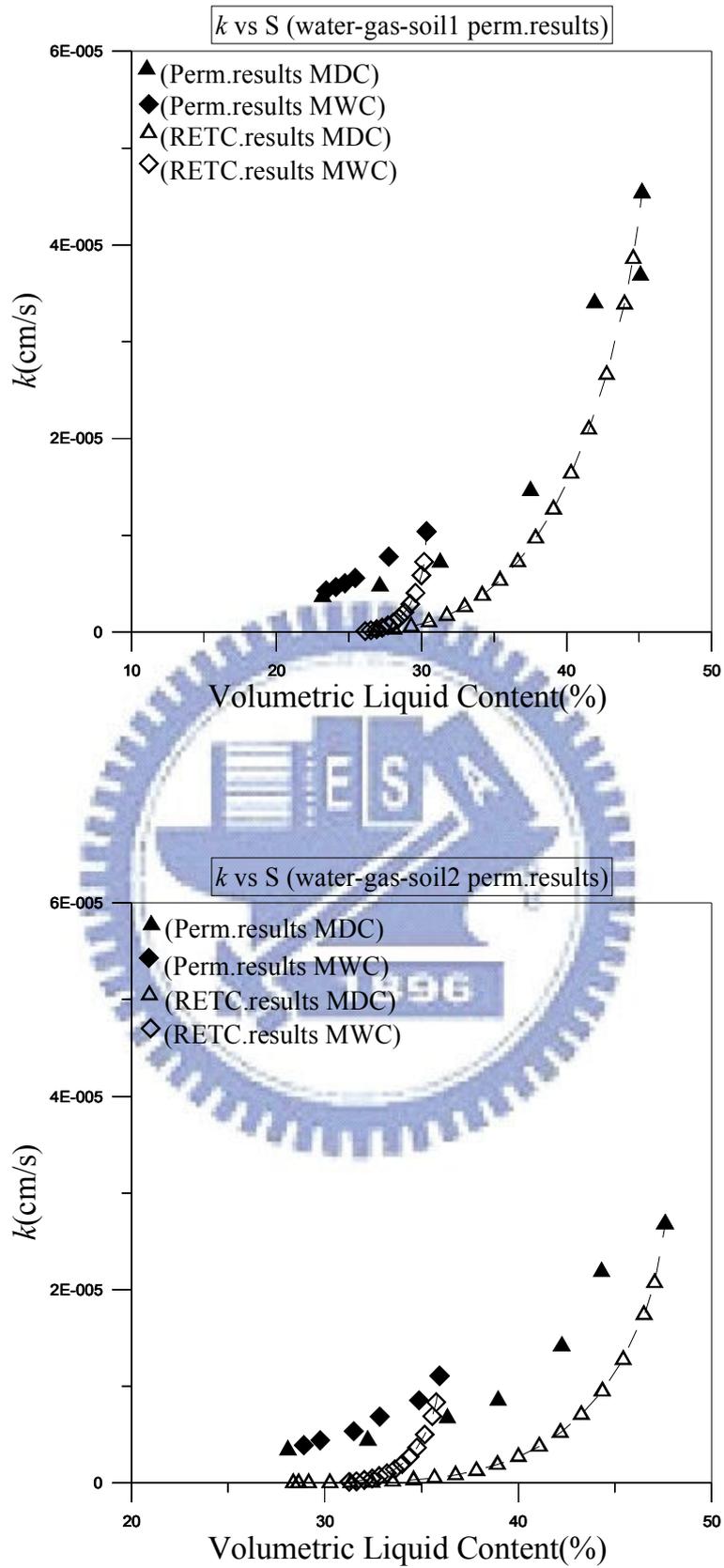


圖 4.40 水對汽油滲透儀試驗結果與 RETC 程式預測  $k$  值之比較

## 4.5 綜合比較

以下將各個試驗中所得之導水度值加以詳細比較討論。討論中包含有以下二種滲透係數值，其中  $k_1$  為滲透實驗值、 $k_2$  為滲透儀保持曲線帶入 RETC 程式所得之值。

表 4.4~11 中為同一張力值下各個  $k$  值之比較：

由表 4.4 排出曲線的資料中，可以發現 RETC 預測的  $k_2$  和實驗值  $k_1$  相當接近； $k_2$  在 10 cm ~ 40 cm 的張力階段之下，分別是實驗值  $k_1$  的 0.91 倍、0.6 倍、0.54 倍、0.27 倍，張力再加大後，差距則隨之變大。可能在低張力的情況中，對飽和度的影響不大，因此得到了頗接近的數值。

表 4.5 可發現，排出曲線中，由 RETC 估算的  $k_2$  值和實驗值亦相當接近：在 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 的張力階段中， $k_2$  是實驗值  $k_1$  的 0.78、0.57、0.52、0.71 倍。

表 4.6 中發現，在排出曲線中，由 RETC 估算的  $k_2$  值和實驗值亦相當接近：在 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 的張力階段中， $k_2$  是實驗值  $k_1$  的 0.77、0.55、0.96、0.3 倍。隨著張力增加，體積含水比減少，兩者導水度差距也增加。

表 4.7 中的排出曲線，在 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 的張力階段中， $k_2$  是實驗值  $k_1$  的 0.53、0.44、0.32、0.21 倍。

表 4.4~4.7 分別為土樣一水對空氣、95 無鉛汽油對空氣、柴油對空氣、水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗所得的排出曲線資料。將各表體積含水比約略相同的部份來看分別為 31.5%、30.1%、30.1%、31.3% 其所對應的導水度為  $8.8 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $7.2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $6.4 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、

$7.2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。由此可知土樣一滲透儀試驗所得在相同的體積含水比下排出曲線其導水度  $k$  大小分別為水—空氣  $> 95$  無鉛汽油—空氣  $>$  水— $95$  無鉛汽油  $>$  柴油—空氣。

由表 4.8 中的排出曲線，在 10 cm、20 cm、30 cm 的張力階段中， $k_2$  是實驗值  $k_1$  的 0.75、0.35、0.11 倍。

表 4.9 中的排出曲線，在 10 cm、20 cm 的張力階段中， $k_2$  是實驗值  $k_1$  的 0.42、0.28 倍。

表 4.10 中的排出曲線，在 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 的張力階段中， $k_2$  是實驗值  $k_1$  的 1.23、0.61、0.66、0.24 倍。

表 4.11 中的排出曲線，在 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 的張力階段中， $k_2$  是實驗值  $k_1$  的 0.44、0.37、0.22、0.12 倍。

表 4.8~4.11 分別為土樣二水對空氣、 $95$  無鉛汽油對空氣、柴油對空氣、水對  $95$  無鉛汽油滲透儀試驗所得的排出曲線資料。將各表體積含水比約略相同的部份來看分別為 31.1%、29.3%、30.9%、32.2% 其所對應的導水度為  $3.9 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $5.1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $4.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $4.4 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。

表 4.12~15 的濕潤曲線中，則由於 RETC 預測出的  $k$  值甚小，和實驗值  $k_1$  相比較之下差異大，隨著體積含水比增加，兩者之間的導水度差異隨之減小。由於濕潤曲線階段時，體積含水比的變化不大，因此實驗值  $k_1$  變化範圍在  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  這個數量級。

表 4.12~4.15 分別為土樣一水對空氣、 $95$  無鉛汽油對空氣、柴油對空氣、水對  $95$  無鉛汽油滲透儀試驗所得的濕潤曲線資料。將各表體積含水比約略相同的部份來看分別為 22.1%、22.7%、22.1%、23.4

%其所對應的導水度為  $6.9 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $6.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $3.9 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $4.3 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。

由表 4.16~19 中，我們發現在固定張力的狀況之下，濕潤曲線在張力小時 RETC 程式的預測值  $k_2$  約為實驗值的 0.3 至 3 倍之間。一旦張力大時，則差異會變的比較大，這是因為 RETC 程式的的起始點與實驗值一樣，所以在張力小的時候，預測的情形會比較準確。

表 4.16~4.19 分別為土樣二水對空氣、95 無鉛汽油對空氣、柴油對空氣、水對 95 無鉛汽油滲透儀試驗所得的濕潤曲線資料。將各表體積含水比約略相同的部份來看分別為 35.1%、34.3%、35.4%、34.9%其所對應的導水度為  $7.1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $7.7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $8.8 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $8.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。

$k_2$  為滲透儀保持曲線帶入 RETC 程式所得之值，利用最小平方法回歸出未知的水利參數，輸入的資料為各個保持曲線之張力與體積含水比之關係，並給予飽和時的導水度  $k$  值，對於排出曲線來說，飽和  $k$  值即為一開始所測量之導水度  $k_1$  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導水度  $k_1$  值。因此在低張力下排出曲線中導水度  $k_1$  值較接近  $k_2$ ，隨著張力增加體積含水比減少，導水度  $k_2$  值被 RETC 程式過度迴歸，造成排出曲線中導水度  $k_2$  與  $k_1$  的差值越來越大。至於濕潤曲線則反之。利用 RETC 程式所得出導水度  $k_2$  值，在較高的體積含水比下，滲透儀試驗所得導水度  $k_1$  與  $k_2$  值很接近，因此利用此程式來推估有機液體於土壤中的導水度  $k$ ，藉此對於有機液體於土壤中的污染及防治工作有很大的幫助。

表 4.4 土樣一(MDC)水對空氣 k 值比較

排 出 曲 線	張力值 mbar	滲透實驗值 k <sub>1</sub>		經驗公式 k <sub>2</sub>		
		θ(%)	k(cm/s)	θ(%)	k(cm/s)	k <sub>2</sub> /k <sub>1</sub>
	10	47.4	6.32E-05	46.74	5.73E-05	<b>0.91</b>
	20	43.47	5.2E-05	42.91	3.07E-05	<b>0.6</b>
	30	37.71	1.94E-05	36.78	1.05E-05	<b>0.54</b>
	40	31.55	8.84E-06	30.65	2.41E-06	<b>0.27</b>
	50	25.6	6.45E-06	24.52	1.69E-07	0.03
	60	19.92	4.07E-06	20.3	7.90E-11	1.90E-05

註：k<sub>2</sub>(滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.5 土樣一(MDC)汽油對空氣 k 值比較

排 出 曲 線	張力值 mbar	滲透實驗值 k <sub>1</sub>		經驗公式 k <sub>2</sub>		
		θ(%)	k(cm/s)	θ(%)	k(cm/s)	k <sub>2</sub> /k <sub>1</sub>
	10	48.44	6.8E-05	48.38	5.22E-05	<b>0.77</b>
	20	42.45	3.61E-05	41.39	1.79E-05	<b>0.5</b>
	30	37.07	1.03E-05	37.9	9.88E-06	<b>0.96</b>
	40	30.13	7.19E-06	30.91	2.13E-06	<b>0.3</b>
	50	23.32	4.9E-06	23.92	1.33E-07	0.03
	60	18.68	3.57E-06	19.12	4.57E-11	1.28E-05

註：k<sub>2</sub>(滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.6 土樣一(MDC)柴油對空氣 k 值比較

排 出 曲 線	張力值 mbar	滲透實驗值 k <sub>1</sub>		經驗公式 k <sub>2</sub>		
		θ(%)	k(cm/s)	θ(%)	k(cm/s)	k <sub>2</sub> /k <sub>1</sub>
	10	34.9	8.67E-06	34.46	6.5E-06	<b>0.75</b>
	20	30.1	6.39E-06	30.39	2.21E-06	<b>0.35</b>
	30	26.65	5.13E-06	26.32	5.51E-07	0.11
	40	20.45	3.65E-06	20.21	6.13E-09	1.68E-03
	50	18.17	3.22E-06	18.42	8.06E-12	2.50E-06

註：k<sub>2</sub>(滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.7 土樣一(MDC)水對汽油 k 值比較

排 出 曲 線	張力值 mbar	滲透實驗值 k <sub>1</sub>		經驗公式 k <sub>2</sub>		
		θ(%)	k(cm/s)	θ(%)	k(cm/s)	k <sub>2</sub> /k <sub>1</sub>
	10	45.1	3.68E-05	45.21	4.54E-05	<b>1.23</b>
	20	41.94	3.4E-05	41.54	2.09E-05	<b>0.61</b>
	30	37.51	1.46E-05	37.86	9.70E-06	<b>0.66</b>
	40	31.29	7.19E-06	31.74	1.71E-06	<b>0.24</b>
	50	27.13	4.73E-06	26.84	1.24E-07	0.03
	60	23.17	3.65E-06	23.48	6.34E-11	1.73E-05

註：k<sub>2</sub>(滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.8 土樣二(MDC)水對空氣 k 值比較

排 出 曲 線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	10	54.55	4.11E-05	55.17	3.21E-05	<b>0.78</b>
	20	51.84	2.6E-05	50.92	1.49E-05	<b>0.57</b>
	30	48.97	1.65E-05	48.09	8.66E-06	<b>0.52</b>
	40	46.32	9.12E-06	46.67	6.43E-06	<b>0.71</b>
	50	39.59	6.27E-06	39.59	8.77E-07	0.14
	60	31.09	3.86E-06	32.51	3.05E-09	7.90E-04

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.9 土樣二(MDC)汽油對空氣 k 值比較

排 出 曲 線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	10	55.13	2.46E-05	52.4	1.31E-05	<b>0.53</b>
	20	48.94	1.68E-05	48.28	7.40E-06	<b>0.44</b>
	30	43.21	8.63E-06	42.1	2.80E-06	<b>0.32</b>
	40	37.1	6.08E-06	37.97	1.27E-06	<b>0.21</b>
	50	29.3	5.1E-06	29.73	1.18E-07	0.02
	60	21.49	3.97E-06	22.01	1.12E-11	2.82E-06

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.10 土樣二(MDC)柴油對空氣 k 值比較

排 出 曲 線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	10	41.27	9.21E-06	40.99	3.87E-06	<b>0.42</b>
	20	39.03	7.79E-06	39.65	2.19E-06	<b>0.28</b>
	30	37.02	7.19E-06	36.97	5.72E-07	0.08
	40	33.904	6.21E-06	33.61	3.53E-08	5.68E-03
	50	30.93	4.65E-06	31.1	3.41E-12	7.33E-07

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.11 土樣二(MDC)水對汽油 k 值比較

排 出 曲 線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	10	44.3	2.18E-05	44.34	9.51E-06	<b>0.44</b>
	20	42.24	1.41E-05	42.17	5.22E-06	<b>0.37</b>
	30	38.96	8.54E-06	38.92	1.89E-06	<b>0.22</b>
	40	36.34	6.7E-06	36.76	8.31E-07	0.12
	50	32.22	4.4E-06	32.42	7.04E-08	0.02
	60	28.09	3.43E-06	28.36	4.68E-12	1.3644E-06

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.12 土樣一(MWC)水對空氣 k 值比較

濕潤曲線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	50	20.09	5.04E-06	20.37	7.12E-12	1.41E-06
	40	20.43	5.36E-06	20.65	7.91E-11	1.48E-05
	30	20.75	6.08E-06	21.21	8.80E-10	1.45E-04
	20	22.05	6.94E-06	22.33	9.85E-09	1.42E-03
	10	26.7	8.54E-06	26.81	4.72E-07	5.53E-02

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.13 土樣一(MWC)汽油對空氣 k 值比較

濕潤曲線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	50	19.39	4.18E-06	19.7	3.58E-12	8.56E-07
	40	20.01	5.17E-06	20.01	3.88E-11	6.76E-06
	30	20.6	5.74E-06	20.63	4.20E-10	7.32E-05
	20	22.65	6.5E-06	23.1	1.86E-08	2.86E-03
	10	30.08	8.3E-06	30.53	9.05E-07	1.09E-01

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.14 土樣一(MWC)柴油對空氣 k 值比較

濕潤曲線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	40	19.32	3.46E-06	19.44	5.54E-15	1.60E-09
	30	22.05	3.92E-06	22.25	1.18E-08	3.01E-03
	20	23.41	4.42E-06	23.72	8.17E-08	1.85E-02
	10	25.45	5.84E-06	25.67	5.34E-07	9.14E-02

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.15 土樣一(MWC)水對汽油 k 值比較

濕潤曲線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	50	23.43	4.3E-06	23.53	2.76E-13	8.96E-02
	40	24.09	4.65E-06	24.2	8.18E-10	5.12E-03
	30	24.72	5.04E-06	24.59	3.92E-09	7.78E-04
	20	25.42	5.61E-06	25.36	2.87E-08	5.12E-03
	10	27.74	7.79E-06	27.67	6.98E-07	8.96E-02

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.16 土樣二(MWC)水對空氣 k 值比較

濕潤曲線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	50	31.62	5.02E-06	31.83	5.57E-13	1.11E-07
	40	32.93	5.88E-06	32.05	7.69E-12	1.31E-06
	30	35.08	7.07E-06	35.03	2.08E-08	2.94E-03
	20	37.67	8.5E-06	37.59	1.83E-07	2.15E-02
	10	42.32	1.13E-05	41.85	1.66E-06	1.47E-01

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.17 土樣二(MWC)汽油對空氣 k 值比較

濕潤曲線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	50	22.53	4.4E-06	22.79	2.67E-13	6.07E-08
	40	23.68	4.9E-06	23.57	6.03E-11	1.23E-05
	30	26.41	5.49E-06	26.69	1.40E-08	2.55E-03
	20	29.96	5.9E-06	29.81	1.32E-07	2.24E-02
	10	34.34	7.66E-06	33.97	8.74E-07	1.14E-01

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.18 土樣二(MWC)柴油對空氣 k 值比較

濕潤曲線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	40	32.08	5.19E-06	32.18	1.55E-14	2.99E-09
	30	34.29	7.05E-06	34.36	3.04E-08	4.31E-03
	20	35.35	8.84E-06	35.12	1.18E-07	1.33E-02
	10	36.97	1.16E-05	37.02	1.34E-06	1.16E-01

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

表 4.19 土樣二(MWC)水對汽油 k 值比較

濕潤曲線	張力值 mbar	滲透實驗值 $k_1$		經驗公式 $k_2$		
		$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$k(\text{cm/s})$	$k_2/k_1$
	50	28.92	3.91E-06	29.02	1.14E-12	2.92E-07
	40	29.77	4.41E-06	29.7	1.90E-09	4.31E-04
	30	31.49	5.36E-06	31.26	1.01E-07	1.88E-02
	20	32.84	6.86E-06	32.82	6.89E-07	1.00E-01
	10	34.85	8.54E-06	34.38	2.70E-06	3.16E-01

註： $k_2$ (滲透試驗保持曲線資料經由 RETC 預測之值)

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

通氣層中，會因土體結構及流體性質差異，造成土壤本身儲存(Storage)或保持(Retention)能力的不同，使得有機液體再土壤中的殘餘量亦隨之改變。土壤液體保持曲線的形狀可以顯示出這種關係，依據保持曲線，可概略得知液體在不飽和層中可能的分布情形。

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，有機液體為濕相液體，試驗土壤的孔隙越小，即是細粒料含量越多，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. 進行水—有機液體保持試驗時，有機液體為非濕相液體，水為濕相液體，試驗土壤的孔隙越小，由於水具有佔據小孔隙的能力，因此水的殘餘量也隨之增加。另外有機液體與水的介面張力越大則水的殘餘量也會變大。
3. 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，相對的導水度也會跟著越小。
4. 定流量滲流實驗方法較能掌握體積含水比與導水度  $k$  的關係，同時在相同的體積含水比下，排出曲線與濕潤曲線應有相同得導水度  $k$ ，利用本次實驗方法也能得到較準確的結果。
5. 欲利用保持曲線資料預測導水度時，採用滲透儀之保持曲線資料代入 RETC 程式可得到不錯的成果。但將滲透儀試驗所得導水度與

RETIC 程式預測的導水度進行比較，可以發現在較高的體積含水比下，理論值與實驗值非常近較能得到準確的預測，因為其初始飽和度和代入 RETIC 程式所需的  $k_s$  值最接近實際滲透試驗時的狀況。

6. 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，以提高不同試驗土壤試體的飽和度相近，將可以使實驗結果更具有說服力。
7. 在相同的體積含水比之下，由 RETIC 程式所預測的滲透係數值多與實驗值的差異均在同一個數量級內，就大地工程應用上來說，是可以被接受的範圍。

當發生有機液體的污染時，欲設計良好的處理方案進行整治必須對土壤中各流體之間的互制行為有深入的了解，經過保持曲線及不飽和滲透試驗的分析，可對污染物於土壤中分布及移動的情況有初步的了解。本研究以一般常見燃料油及有機液體作為研究對象，藉此瞭解土壤遭受到有機液體污染後的實際情形，以期在污染物防治及整治工程設計上，有明確的依據。

## 5.2 建議

進行滲透儀實驗時，由於實驗設備為自製的，所以在試驗過程中，遭遇了許多的問題，由實驗過程及結果也可以發現，本實驗裝置仍有許多缺陷需改進；在滲透試驗中，試體一側黏有兩個小陶瓷頭透過玻璃細管來量測滲流過程中的水力坡降，雖然已採用矽膠來黏著，但是在組裝試體及試驗過程中，因為壓力的改變，偶而會造成液體從此處滲漏，造成實驗無法進行或必須重新再設置，在加上利用肉眼來觀測

玻璃細管水位差，如此一來更增加實驗結果的不確定性。建議可採用特殊的水壓計置於原本小陶瓷頭處，透過電腦來記錄每一時段上下試體水頭差，讓整個試體能夠一體成型，不但可以避免滲漏的發生，也可以提高試驗的穩定性。在試驗的過程中，我們是利用上、下兩玻璃管中的水位差來提供所需的張力，讓濕相液體排出，非溼相液體侵入，當溼相液體排出時則上、下兩玻璃管水位也改變所提供的張力並非一定值，觀測者必須時常量測並時常調整玻璃管使其提供固定的張力值，如此一來容易讓濕相液體分布不均造成實驗誤差。建議利用精密度高的壓力盤透過抽真空機提供所需的張力，讓試驗維持所需的張力值，提高實驗結果的可靠度。

本研究主要是探討有機液體在土壤中的行為，但是實驗過程中只有兩相的系統，即有機液體和空氣或水和有機液體但實際上在現地的不飽和層中，常是水、空氣、有機液體三相的狀態，若要將實驗結果應用在現地的整治工作上，勢必要將實驗結果對應到實際的情形中；對於三相系統的實驗設備裝置困難，且變因不易掌握，理論上的近似方法仍有待確認，因此，如何建立實驗室結果與現地實際問題之間的相互關係，將是進一步必須要解決的問題。

## 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. 林立偉，碩士論文，「非水相液體於土壤中滲流之研究」，國立交通大學土木工程研究所，(2005)。
6. Boulding, J. R., (1995), "Practical Handbook of Soil, Vadose-zone, and Ground-Water Contamination: Assessment, Prevention, and Remediation," Boca Raton: Lewis Publishers, pp.948.
7. Brooks, R. H., and Corey, A. T., (1964) "Hydraulic Properties of Porous Media," Colo. State Univ. , Fort Collins, Hydrol. Pap.3, pp.27.
8. Brown, H.W., (1951), "Capillary Pressure Investigations," Pet. Trans. AIME, 192: pp.67-74.
9. 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.
10. Campell, G. S., (1974), A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data, Soil Sci., 117: pp.311-314.

11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Fetter, C. W., (1993), "Contaminant Hydrogeology", Macmillan Publishing Company, New York, pp.168-175.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Hillel, (1980), "Fundamentals of Soil Physics", New York: Academic Press, Inc, pp.413
19. Kia, S.F., (1988), "Modeling of the Retention of Organic Contaminants in Porous Media of Spherical Particles," Water Res. 22(10), pp.1301-1309.

20. 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.
21. 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.
22. 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
23. Mercer, J. W., and Cohen, R. M., (1990). "A Review of Immiscible Fluids in the Subsurface : Properties, Models, Characterization and Remediation," J. of Contaminant Hydrology, V.6, pp.107-163.
24. Melrose, J.C., (1965). "Wettability as Related to Capillary Action in Porous Media," Soc. Pet. Eng. J., pp.259-271.
25. Morrow, N. R. (1970), "Irreducible Wetting Phase Saturation in Porous Media," Chem. Eng. Sci., 25(11), pp.1799-1815.
26. Muskat, M., (1937). The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. New York: McGraw-Hill.
27. 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) .
28. Stevenson, F. J., (1982), "Humus Chemistry," Wiley and Sons, pp.444.
29. Su, C., and Brooks, R. H., (1980), "Water Retention Measurement for Soils," Journal of Irr. Drain, Div., Proc. ASCE, Vol. 106, pp.105-112.

30. 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.
31. 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.
32. Von Englahardt, W., (1955), "Interstitial Water of Oil Bearing Sands and Sandstones," Proc. World Petroleum Congress, pp.399-416
33. 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.
34. 經濟部能源局已核發經營許可執照之汽車加油站(2007.4)
35. 經濟部台灣地區地下水觀測網整體計畫(2004)

參考網址：

1. RETC model :

<http://www.ussl.ars.usda.gov/models/retc.HTM>

## 附錄 RETC 程式說明及使用

RETC 是一套用來分析非飽和土壤中，土壤水保持曲線和水力傳導係數方程式的電腦程式。在水流經非飽和區域或土壤時，這些水力傳導性質是很重要的定量化參數。這套程式利用了 Brooks-Corey 和 Van Genuchten 的參數模式用來代表土壤水保持曲線；利用了 Mualem and Burdine 的理論孔隙分佈模式從觀察到的土壤水保持曲線預測水力傳導係數方程式，參考網頁如下：

<http://www.usssl.ars.usda.gov/models/retc.HTM>

使用說明如下：

1. 開啟 RETC 程式中的資料夾：



- 在 RETC 資料夾中，加入一個\*.in 檔，此處以 nctu.in 為例，輸入土壤中保持曲線中張力跟體積含水比資料，格式如下：(注意，張力值單值為公分，體積含水比須為小數點後 5 位數。)

nctu - 記事本				
檔案(F)	編輯(E)	格式(O)	檢視(V)	說明
1	0.54010	1		
10	0.53860	1		
20	0.53390	1		
30	0.51160	1		
40	0.48740	1		
50	0.46790	1		
60	0.33930	1		

- 以記事本開啟 RETC.CTL 檔案，鍵入來源資料檔 nctu.IN、鍵入結果輸出檔 nctu.OUT(每次要跑新的資料時，要將 RETC 資料夾中的 nctu.OUT 先刪去一次，才可每次於 nctu.OUT 中得到結果輸出。若不刪除亦可，輸出資料會存於 RETC.OUT 檔中，存下想要的資料即可)。再輸入 RETC 程式中的檔名例如 EXAMPLE : heptane vs air local(permeability)(MDC)。接著輸入殘餘體積含水比 WCR(注意小數點後要 5 位數)、飽和體積含水比 WCS(注意小數點後要 5 位數)、CONDS 飽和時的滲透係數值(cm/s)、最後面的 20 代表模擬的點數：

retc - 記事本									
檔案(F)	編輯(E)	格式(O)	檢視(V)	說明(H)					
nctu.IN									
nctu.OUT									
RETPLT.OUT									
CONPLT.OUT									
EXAMPLE : heptane vs air local(permeability)(MDC)									
3	2	1	1	1	8	50			
WCR	WCS	ALPHA	N	M	L	CONDS			
.33930		.54010		.01000		2.00000	.50000	.50000	1.00000
0	0	1	1	0	0	0			
1.00000		20							

4. 開啟 RETC 資料夾中的 RETC 執行程式：

```

D:\論文資料\實驗資-2\retc\retc.exe
←[2J***** RETC : LISTING OF CONTROL FILE *****
[1] OBSERVED DATA FILE NAME      : nctu.IN
[2] OUTPUT FILE NAME              : nctu.OUT
[3] PLOT FILE NAME FOR RETENTION CURVE : RETPLT.OUT
[4] PLOT FILE NAME FOR CONDUCTIVITY/DIFFUSIVITY: COMPLT.OUT
[5] TITLE OF CASE                 :
    EXAMPLE : heptane vs air local<perm><MDC>
[6] TYPE OF RETENTION/CONDUCTIVITY MODEL : 3
    1. Retention: van Genuchten
       Conductivity: Mualem
    2. Retention: van Genuchten
       Conductivity: Burdine
    3. Retention: van Genuchten with m=1-1/n
       Conductivity: Mualem
    4. Retention: van Genuchten with m=1-2/n
       Conductivity: Burdine
    5. Retention: Brooks & Corey
       Conductivity: Mualem
    6. Retention: Brooks & Corey
       Conductivity: Burdine

ENTER ITEM NUMBER TO BE CHANGED <RETURN FOR NEXT SCREEN>:
  
```

按 Enter 進入下頁...等等：

```

D:\論文資料\實驗資-2\retc\retc.exe
[14] INITIAL ESTIMATE  .34 !  .54 !  .01 !  2.00 !  .50 !  .50!  1.00
[15] FITTING?          0 !  0 !  1 !  1 !  0 !  0!  0
      <0 = known parameter; remains constant during parameter estimation>
      <1 = unknown parameter to be fitted to data>
[16] WEIGHT OF K/D DATA WITH RESPECT TO WATER CONTENT DATA      : 1.00
      <Default=1.0>
[17] NUMBER OF POINTS FOR PRINTING THE FITTED HYDRAULIC FUNCTION: 20

ENTER ITEM NUMBER TO BE CHANGED <RETURN FOR NEXT SCREEN>:
←[2J*****
*
*          LIST OF PROGRAM OPTIONS
*
*****
1:  EDIT CONTROL FILE
2:  RUN PROGRAM, OPTION TO PRINT OUTPUT FILE
3:  UPDATE FILE AND QUIT TO DOS
4:  QUIT TO DOS WITHOUT UPDATE
5:  VIEW FILE ON SCREEN OR PERFORM DOS COMMAND

ENTER SELECTION <1 - 5>:
  
```

按 2 Run program 後，依指示即可得到結果。

5. 開啟 nctu.OUT 或 RETC.OUT 即可得到結果，以下是輸出結果的頁面圖：

```

RETC - 記事本
檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)
*****
*
* ANALYSIS OF SOIL HYDRAULIC PROPERTIES
*
* EXAMPLE : heptane vs air local(perm)(MDC)
*
* MUALEM-BASED RESTRICTION, M=1-1/N
* ANALYSIS OF RETENTION DATA ONLY
* MTYPE= 3 METHOD= 2
*
*****

INITIAL VALUES OF THE COEFFICIENTS
=====
NO      NAME      INITIAL VALUE  INDEX
1       WCR        .3393          0
2       WCS        .5401          0
3       ALPHA      .0100          1
4       N          2.0000        1
5       H          .5000          0
6       L          .5000          0
7       CONDS      1.0000         0

OBSERVED DATA
=====
OBS. NO.  PRESSURE HEAD  WATER CONTENT  WEIGHTING COEFFICIENT
1          10.000        .5386          1.0000
2          20.000        .5339          1.0000
3          30.000        .5116          1.0000
4          40.000        .4874          1.0000
5          50.000        .4679          1.0000
6          60.000        .3393          1.0000

```

6. 最左邊的 WC 為體積含水比(於 2 步驟中輸入的), 中間的 COND(用線條圈選處)即是預測出的滲透係數值:

RETC - 記事本

檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明(H)

```

SUM OF SQUARES OF OBSERVED VERSUS FITTED VALUES
=====
                UNWEIGHTED   WEIGHTED
RETENTION DATA   .00354       .00354
COND/DIFF DATA   .00000       .00000
  ALL DATA       .00354       .00354

SOIL HYDRAULIC PROPERTIES (MTYPE = 3)
=====
   WC      P      LOGP      COND      LOGK      DIF      LOGD
.3421  .8315E+02  1.920  .6153E-05  -5.211  .2317E-01  -1.635
.3449  .7615E+02  1.882  .4145E-04  -4.382  .7219E-01  -1.141
.3505  .6965E+02  1.843  .2797E-03  -3.553  .2276E+00  -.643
.3616  .6351E+02  1.803  .1892E-02  -2.723  .7370E+00  -.133
.3728  .6000E+02  1.778  .5806E-02  -2.236  .1504E+01  .177
.3839  .5749E+02  1.760  .1289E-01  -1.890  .2550E+01  .407
.3951  .5549E+02  1.744  .2398E-01  -1.620  .3915E+01  .593
.4062  .5379E+02  1.731  .3988E-01  -1.399  .5661E+01  .753
.4174  .5229E+02  1.718  .6143E-01  -1.212  .7875E+01  .896
.4285  .5092E+02  1.707  .8945E-01  -1.048  .1068E+02  1.029
.4397  .4961E+02  1.696  .1248E+00  -.904  .1427E+02  1.154
.4509  .4835E+02  1.684  .1684E+00  -.774  .1890E+02  1.277
.4620  .4710E+02  1.673  .2213E+00  -.655  .2502E+02  1.398
.4732  .4582E+02  1.661  .2845E+00  -.546  .3331E+02  1.523
.4843  .4447E+02  1.648  .3593E+00  -.445  .4502E+02  1.653
.4955  .4300E+02  1.633  .4472E+00  -.350  .6263E+02  1.797
.5066  .4130E+02  1.616  .5500E+00  -.260  .9171E+02  1.962
.5178  .3918E+02  1.593  .6707E+00  -.174  .1486E+03  2.172
.5289  .3601E+02  1.556  .8139E+00  -.089  .3108E+03  2.493
.5345  .3322E+02  1.521  .8976E+00  -.047  .6133E+03  2.788
.5401  .0000E+00  .      .1000E+01  .000

END OF PROBLEM
=====

```