

第四章 實驗結果與分析

4.0 摘要

本章中將所有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，兩相液體間的界面張力愈大，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水殘留在土體中。

在滲透儀實驗中，滲透係數 K 值的大小會隨著張力的增加（體積含水比減少）而減小。而影響滲透係數大小的因素主要有下列兩項：液體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，兩液體間的界面張力越大則當時的滲透係數會比較小；另一方面，試體中細顆粒土壤的比例增加也會造成滲透係數值的減小。

由壓力儀所獲得的保持曲線經 Van Genuchten 經驗公式預測滲透係數值時，所獲得的結果均不盡理想，一方面由於壓力儀與滲透儀的土樣雖然相同，不過因為試體的大小不同，夯實過程也會有些許差異再加上滲透儀試驗裝置的精度不足，太微小的 K 值無法測出，都是造成結果不甚理想的原因。整體而言，由滲透儀保持曲線代入經驗公式所獲得的結果會跟實驗值較為接近。以下將逐步討論之。

4.1 壓力儀實驗結果

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)。

4.1.1 水—有機液體保持曲線

圖 4.1~圖 4.3 表示水—有機液體之保持曲線實驗結果。從圖形中可以看出，不論有機液體或土樣為何，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非常高。因為當有機液體侵入試體中佔據孔隙之後，當張力減小水要再回吸時，部分有機液體會被卡鎖在孔隙中，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，渥太華砂因為顆粒比較大，所以水在低壓的部分(0.1 bar 以內)就幾乎被排出，因此在 0.1 bar 以上 MDC 及 MWC 曲線會有重合的現象，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，現地土樣的保持曲線遲滯現象較渥太華砂明顯，主要原因就是土壤顆粒大小的影響。

在圖 4.1~圖 4.3 中均有附上滲透儀試驗所得之保持曲線，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：初始飽和度的不同、試體的大小不同、製作過程夯實造成的差異以及滲透儀裝置中欲量測水頭差的陶瓷頭造成的些微含水比誤差。

由於本研究中兩種試驗所得的保持曲線並不相同，所以對往後採用經驗公式預測 K 值時也會有所影響。

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(水)所殘餘的體積含液比，土樣二的值都比土樣一來得高，表示殘餘體積含液比會隨著土壤顆粒的減小而增加。

圖 4.4 為不同土樣之水—有機液體保持曲線，由圖中可以發現，對於較粗顆粒的渥太華砂，有機液體的侵入會比現地土樣來得快，表現出有機液體佔據大孔隙的能力。由於渥太華砂的顆粒比較大且均勻，所以在保持曲線上在低壓的部分（0.1 bar 以內）水很快就被排出，在高張力的部分，含水比幾乎沒有什麼改變，相對的，現地土樣則在高張力的部分持續有水被排出，在圖 4.4 中可以很明顯的看出兩者的不同。

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要來得多，探究原因應是土樣二飽和時之含水比原本就比土樣一來得高，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 4.3 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大，也就是小孔隙越多，水回吸的量也會越多。但是從表 4.3 中所得到的結果並不明顯，可能和試驗中每次張力增加的值有關，也可能是兩者試驗程序的差異造成。

表 4.1 張力為 1.5 bar 時之殘餘體積含液比

土壤試體	土樣一(%)	土樣二(%)
九五無鉛汽油	5.78	8.90
柴油	2.52	3.26
庚烷	6.52	9.34

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(%)
九五無鉛汽油	35.89	38.98
柴油	38.70	44.78
庚烷	35.29	36.78

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(%)
九五無鉛汽油	34.55	35.43
柴油	35.14	41.66
庚烷	30.54	30.55

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有機液體（九五無鉛汽油、柴油、庚烷），圖 4.5~圖 4.6 表示水對不同有機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，實驗中所用的三種有機液體與水之間的界面張力由大至小分別是庚烷、九五無鉛汽油、柴油，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，水在土壤孔隙中殘留的量也會越大。這由圖 4.5 中可以得到證明。

一般來說，在同一種孔隙結構的土壤試體中，依照流體間界面張力的大小可以決定孔隙中各流體存在的比例，其實這也就是比例原則的原理。所以對於同一種土樣來說，不同的流體對應該會有相似形狀的保持曲線，但是實際上製作土樣的時候，因為夯實的過程及土壤本身的不一致性再加上有機液體與水之間的界面張力會隨著實驗過程中水的排出而有所改變，並不會維持定值，所以實際上比例原則在很多情形之下並不會適用。不過就本實驗結果而言，從圖 4.5 中可以發現，渥太華砂之不同有機液體之保持曲線形狀十分類似，而現地土樣則有比較大的差異，由於渥太華砂顆粒較均勻，在土樣的製作上較現地土樣有一致性，因此在應用比例原則時，維持試體的一致性是相當重要的一個因素。

4.1.4 由 Van Genuchten 經驗公式求取 K 值

大部分的保持曲線在量測及計算參數後，多用於預測導水度 K 值，因為導水度 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的便是 van Genuchten (1980) 所發展之模式。

本實驗是採用 RETC 這套程式進行分析，輸入的資料為保持曲線實驗所得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，經由程式分析之後便可以得到經驗公式中所需的參數 m 、 n 、 α ，把參數代入經驗公式中即可求得滲透係數 K 值。再與滲透儀實驗所得之數據進行比較。

圖 4.7 及圖 4.8 為壓力儀保持曲線經由 van Genuchten 經驗公式求得的水對三種有機液體在不同的體積含水比之下的 K 值。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曲線的差異並不大。主要的差別是因為起點的不同所造成，也就是一開始飽和的 K 值不同所造成。另外濕潤曲線由於各個試體在保持

曲線試驗過程中含水比變化的範圍不同(殘餘含水比及最終含水比之值各試體均不相同),所以在圖形上呈現比較大的差異,不過趨勢仍是一樣的。

4.2 滲透儀試驗結果

試驗過程中是以滲透儀試驗裝置進行實驗,試體組裝完成之後,先將土壤試體以水飽和;接著增加張力值使有機液體侵入試體中,水會因而排出,參考由保持曲線經由Van Genuchten經驗公式分析所得之滲透係數K值之曲線,逐步增加張力值,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滲透係數K值。接著逐步減少張力值,便可以求得濕潤曲線上的K值曲線。

圖4.9~圖4.11分別為水對不同有機液體之滲透實驗結果。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,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4.12表示不同有機液體滲透實驗值之比較,就實驗結果來看,在同一體積含水比之下,對渥太華砂來說兩液體間的界面張力越大(庚烷>九五無鉛汽油>柴油),則滲透係數值會越小;對現地土樣而言,整體上僅水對柴油滲透係數值比較小,並沒有如渥太華砂一般與表面張力有直接的關係。

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 μ 為液體之黏滯性,而 γ_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，其滲透係數值將保持一定值。

由此原則與本實驗結果相比，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，水對有機液體的三條滲透實驗值理論上應該相同，但實驗結果（圖4.12）卻有差異，探究其原因，可能是水在滲流過程中與其他有機液體間的互制作用使得其黏滯性不維持定值之故。

圖4.13為不同土樣滲透實驗值之比較，由圖中可以發現，在同一體積含水比之下，土樣一之滲透係數值都比土樣二來得大，表示土壤顆粒越小則滲透係數也會越小。

圖 4.14~圖 4.16 為滲透係數實驗值與壓力儀及滲透儀所得之保持曲線之圖形。由圖中可以發現，滲透係數值隨著體積含水比的減小而急速的變小，對照圖形來說，在張力到達空氣進入值之前是滲透係數急速下降的區域，過了空氣進入值之後，滲透係數變小的趨勢將會減緩。

從實驗數據上來看，量測到的滲透係數值最小只能到 1×10^{-8} cm/s這個數量級，所以一旦張力超過100 mbar時，由於時間上的限制（每一階段最

多五天)，滲流量都幾乎不會有改變，所以便無法量測到滲透係數值。探究其原因應有下列幾點：

- 1、當張力增加到100 mbar以上時，有機液體幾乎都已侵入至土壤試體中。由於滲透儀試體比較大，而有機液體侵入時皆從側面上方的孔侵入，如此會造成試體中兩相液體分佈的不平均，所以有機液體可能會佔據試體中央部份的孔隙，造成水滲流的路徑消失，水根本無法有通路可以進行滲流，所以便沒有滲流量可以量測。
- 2、試驗裝置本身的精度問題；由於本試驗裝置為自行設計製造而成，且讀取讀數時皆使用皮尺及肉眼判定，所以當體積含水比降低、滲透係數變的很小的時候，在有限的時間便無法量得滲流量。

由於試驗裝置本身的限制，在進行滲流時滲透儀上下兩管的水頭差不能無限制的增加，而滲透儀頂部與底部之陶瓷片又會消耗掉所提供的水頭差，所以如果可以改用強迫滲流的方式，以控制滲流量的方式進行試驗，應該可以改善上述問題。



4.3 應用比例原則求取滲透係數

求取土壤中任兩相液體之間的保持曲線實驗所需要的時間很長，往往一天只可以得到一兩個資料點，既耗時又費力。但如果應用比例原則就可以由一已知的參考流體對藉以求得其他流體對之間的保持曲線。

由於水—空氣之保持曲線為最基本的保持曲線，且實驗時也比較方便，所以用水—空氣之保持曲線為參考的流體對是較佳的選擇。

4.3.1 由比例原則推保持曲線

圖4.17是以水—空氣為參考流體對，推出水—九五無鉛汽油、水—柴油、水—庚烷之保持曲線。在此使用的比例縮放因子 β_{ow} 如表4.4所示：

表4.4 比例原則使用之縮放因子

試驗液體	表面張力 (dynes/cm)@24°C	與水界面張力 (dynes/cm)	β_{ow}
水	72.7	—	—
95 無鉛汽油	21.0	51.7	1.406
柴油	22.8	49.9	1.457
庚烷	19.5	53.2	1.367

由圖中可以看出，對於渥太華砂來說，由於顆粒較為均勻，所以各個試體差異性較不大，因此縮小後的水—空氣保持曲線與水—有機液體保持曲線具有較好的一致性；相對的現地土樣由於顆粒較細，在試體的製作上具有較低的重複性，每一次試驗所代表的土體結構就不盡相同，所以縮小後的水—空氣保持曲線與水—有機液體保持曲線差異會比較大。

圖4.18為由壓力儀實驗所得之水—有機液體保持曲線反推水—空氣保持曲線的結果，同樣可以發現渥太華砂因為顆粒較大且均勻，所以在試體製作上較有重複性，所以每條保持曲線的形狀十分類似，差異性不大；而現地土樣差異就比較大，可以看出現地土樣在試體的製作上較不具有重複性。

4.3.2 由 Van Genuchten 經驗公式求取 K 值

藉由比例原則所得到的保持曲線同樣可以應用 Van Genuchten 之經

驗公式而求得相對應的滲透係數 K 值。

圖 4.19 表示經由經驗公式所得到的滲透係數 K 與體積含水比之間的關係。由圖中可以看出因為三種有機液體與水的界面張力差別並不大，所以應用比例原則所求出的水—有機液體之保持曲線本身就差異不大，因此應用經驗公式所得到 K 值與體積含水比曲線均相當接近。

4.4 綜合比較

以下將各個試驗中所得之滲透係數值加以詳細比較討論。討論中包含有以下四種滲透係數值，其中 K_1 為滲透實驗值、 K_2 為滲透儀保持曲線帶入經驗公式所得之值、 K_3 為壓力儀保持曲線帶入經驗公式所得之值、 K_4 為經比例原則所得之保持曲線帶入經驗公式所得之值。

圖 4.20~圖 4.22 表示水對九五無鉛汽油各滲透係數值之比較。由圖中可以看出以排出曲線來看，三條經驗公式所獲得的值都相當接近，對渥太華砂來說，試體顆粒較大且均勻，所以保持曲線上的差異不大，但是對現地土樣來說，由比例原則所獲得之值會跟其他值有較大的差距，原因是其初始含水比的差異所造成。而對濕潤曲線來說，圖形上的差異就比較大，最大的原因就是在於體積含水比變化的範圍不一樣所造成；另外在實驗的過程中，當張力逐步減小時，由於遲滯效應的影響，體積含水比都改變非常小，整個試體內仍是充滿了有機液體，由於體積含水比沒有什麼變化，所以濕潤曲線實驗的前半段亦無法量測到滲流量，一值要到張力減小到 50 mbar 以下時，才可以量測到滲流量，但所量得的值仍是十分微小的。

觀察四條曲線的差異，發現造成曲線不同很大的一個原因是因為起始點的體積含水比並不一樣，壓力儀的保持曲線土樣一與土樣二飽和的體積含水比分別大約為 40% 與 48%，但是滲透儀的飽和體積含水比則下

降為 36%與 41%，起點不一樣造成保持曲線不相同。探究原因，應是壓力儀試體較小，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。

表 4.5~表 4.10 為同一張力值下各個K值之比較，由表中我們發現在固定張力的狀況之下，不論是排出曲線或是濕潤曲線，在張力小時預測值和實驗值都保持在同一個數量級之間，但是一旦張力到 100 mbar以上時，則差異會變的比較大，這是因為經驗公式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。表中所選用的張力值為 50、100、300 mbar，在表中可以發現，在張力為 50 mbar時，滲透實驗所得之值相對都比其他三條曲線要小，原因應該是一開始滲透儀的體積含水比就比較低，試體中仍有空氣殘留，使得滲流路徑相對的比較少，所以滲透係數比較低，而當張力大於 100 mbar時，會有兩種情形發生，一是實驗沒有讀數，如果有數據的話則會比其他三條曲線要大。探究其原因，應是滲透儀試驗裝置的精度問題，因為在實驗過程中，所求得的最小滲透係數都是在 1×10^{-8} 次方這個數量級，再小的話，一方面因為有機液體佔據了水滲流的路徑之外，在加上時間的限制，使得張力較大的部分，均無法量測到滲流量。若是有數據的話，也因為用皮尺及肉眼判定的結果，使得誤差本身就比滲透係數值的差異來得大。

表 4.11~表 4.16 則為同一含水比各排出曲線 K 值之比較。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，則經驗公式所獲得的值與實驗值均維持在同一個數量級之內，可以發現體積含水比是控制滲透係數大小很重要的一個因素。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。

由式(4.1)可以知道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（參考圖 2.6），而且水在低張力的時候便幾乎被排出，當張力大於 100 mbar 時其體積含水比就幾乎沒有什麼變化（圖 4.4），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 Van Genuchten 經驗公式求取滲透係數所依據的便是所提供的保持曲線，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。由於 Van Genuchten 經驗公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，圖 4.23~圖 4.25 為水對有機液體各個保持曲線之比較，由圖 4.23 並對照圖 20 及表 4.5、表 4.11~表 4.12 可以發現，對水-九五無鉛汽油流體對來說，在同一體積含水比下經驗公式所獲得之值大部分都要比實驗值來得大，由圖 4.23 中可以發現經驗公式所獲得之保持曲線與滲透實驗值比較起來，對試驗的土壤來說相當於是一個顆粒比較大且均勻的土樣，所以其預測的滲透係數值會比較大。由圖 4.25 對照圖 4.22 及表 4.9、表 4.15，也可以發現水對庚烷之經驗公式值亦大部分較實驗值為高。探究其原因，除了本身經驗公式迴歸所得之曲線與實驗值有差異之外，最大的原因仍是各個曲線初始的飽和含水比不一致所造成。

整體而言，從表 4.11~表 4.16 中可以發現，用經驗公式預測水之滲透係數值，以滲透儀保持曲線代入經驗公式所獲得的結果較為準確，而比例原則所推得之結果較不理想；然而在同一體積含水比之下，三條曲線所預測之結果與實驗值之差異其實都在同一個數量級之內，就大地工程的應用上來說，仍是可以接受的範圍。

表 4.5 土樣一水對九五無鉛汽油 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			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	10	35.01*	3.97E-06*	35.87	5.64E-06	1.42	41.17	5.63E-06	1.42	39.97	5.48E-06	1.38
	30	32.68	1.09E-06	35.45	5.14E-06	4.72	40.17	4.81E-06	4.41	36.38	3.05E-06	2.80
	50	30.53	8.54E-07	28.73	1.88E-06	2.20	33.69	2.11E-06	2.47	27.15	1.11E-06	1.30
	100	11.44	2.48E-08	11.09	1.44E-08	0.58	11.76	1.42E-08	0.57	11.76	1.93E-08	0.78
	300	6.62	1.78E-08	6.47	6.33E-12	3.6E-4	6.28	6.17E-12	3.5E-4	4.33	1.02E-11	5.7E-4

濕 潤 曲 線	張力值 (mbar)	滲透實驗值K ₁		經驗公式K ₂			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	300	6.29	—	6.25	2.92E-12	—	5.97	1.09E-13	—	3.7	1.39E-16	—
	100	6.48	1.53E-08	6.51	1.66E-10	0.01	6.19	5.99E-12	3.9E-4	4.12	4.17E-14	2.7E-6
	50	6.76	1.69E-08	6.74	1.55E-09	0.09	6.38	4.36E-11	2.6E-3	4.68	7.26E-13	4.3E-5
	30	6.87*	1.83E-08*	6.87	4.57E-09	0.25	6.60	2.76E-10	0.01	5.8	1.28E-11	7.0E-4
	10	6.97*	1.97E-08*	6.95	1.03E-08	0.52	6.97	3.42E-09	0.17	10.28	1.49E-09	0.08

*為內插之值

表 4.6 土樣二水對九五無鉛汽油 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			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	10	40.15*	2.27E-06*	40.98	2.84E-06	1.25	46.81	2.22E-06	0.98	48.63	1.55E-06	0.68
	30	38.26	5.20E-07	40.54	2.55E-06	4.90	41.39	8.95E-07	1.72	43.42	4.16E-07	0.80
	50	36.11	4.17E-07	34.39	9.74E-07	2.34	32.73	2.21E-07	0.53	39.25	1.67E-07	0.40
	100	17.69	—	18.57	2.78E-08	—	19.73	9.46E-09	—	30.92	2.14E-08	—
	300	11.85	—	10.22	1.62E-12	—	11.06	2.02E-11	—	20.5	3.29E-10	—

濕 潤 曲 線	張力值 (mbar)	滲透實驗值K ₁		經驗公式K ₂			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	300	10.29	—	10.26	4.73E-12	—	9.79	3.60E-13	—	13.48	1.17E-13	—
	100	10.96	—	10.92	3.65E-10	—	10.28	5.82E-12	—	14.47	5.41E-12	—
	50	11.38	2.62E-08	11.45	3.01E-09	0.11	10.78	5.13E-11	1.9E-3	15.12	3.12E-11	1.2E-3
	30	11.65*	2.88E-08*	11.69	7.33E-09	0.25	11.17	2.00E-10	6.9E-3	15.78	1.32E-10	4.6E-3
	10	11.93*	3.14E-08*	11.87	1.65E-08	0.53	11.86	1.59E-09	0.05	17.10	1.54E-09	0.05

*為內插之值

表 4.7 土樣一水對柴油 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			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	10	34.34	4.86E-06	34.49	5.24E-06	1.08	39.61	4.90E-06	1.00	39.97	5.48E-06	1.13
	30	15.07	4.96E-07	15.22	8.64E-08	0.17	8.97	1.72E-08	0.03	36.38	3.05E-06	6.15
	50	12.56*	2.91E-07*	9.05	6.57E-10	2.3E-3	4.67	6.07E-10	2.1E-3	26.12	6.81E-07	2.34
	100	9.63	5.06E-08	8.28	8.14E-11	1.6E-3	3.60	7.42E-11	1.5E-3	10.74	1.33E-08	0.26
	300	8.91	1.59E-08	7.89	1.01E-11	6.4E-4	3.06	9.08E-12	5.7E-4	4.21	5.76E-12	3.6E-4

濕 潤 曲 線	張力值 (mbar)	滲透實驗值K ₁		經驗公式K ₂			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	300	8.16	—	8.05	6.08E-14	—	2.62	3.22E-15	—	3.7	2.67E-16	—
	100	8.30	1.36E-08	8.32	1.17E-12	8.6E-5	2.92	1.09E-12	8.0E-5	4.12	7.99E-14	5.8E-6
	50	8.63	1.71E-08	8.59	9.68E-12	5.7E-4	3.31	2.06E-11	1.2E-4	4.68	1.39E-12	8.1E-5
	30	9.29*	2.74E-08*	8.86	5.17E-11	1.9E-3	3.71	1.17E-10	4.3E-3	5.8	2.46E-11	8.9E-4
	10	9.94*	3.77E-08*	9.40	7.75E-10	0.02	5.29	5.72E-09	0.15	9.72	1.90E-09	0.05

*為內插之值

表 4.8 土樣二水對柴油 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			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	10	41.70	1.98E-06	40.81	1.52E-06	0.77	43.07	9.11E-07	0.46	48.63	1.55E-06	0.78
	30	34.13*	1.47E-06*	32.66	3.14E-07	0.21	30.63	1.17E-07	0.08	43.42	4.16E-07	0.28
	50	29.22	5.96E-07	24.51	5.50E-08	0.09	21.92	1.98E-08	0.03	39.25	1.67E-07	0.28
	100	14.78	8.29E-08	16.36	4.13E-09	0.05	13.21	1.12E-09	0.01	30.92	2.14E-08	0.26
	300	8.95	—	9.23	4.33E-11	—	6.95	2.72E-11	—	20.5	3.29E-10	—

濕 潤 曲 線	張力值 (mbar)	滲透實驗值K ₁		經驗公式K ₂			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	300	6.74	—	6.67	3.55E-13	—	3.70	1.21E-12	—	13.48	1.27E-13	—
	100	6.85	2.52E-08	6.91	7.17E-12	2.8E-4	4.47	1.12E-10	4.4E-3	14.35	3.94E-12	1.6E-4
	50	7.16	3.14E-08	7.16	5.36E-11	1.7E-3	5.16	1.04E-09	0.03	15.12	3.38E-11	1.1E-3
	30	7.55*	3.28E-08*	7.36	2.16E-10	6.6E-3	5.68	3.83E-09	0.12	15.78	1.43E-10	4.4E-3
	10	7.95*	3.41E-08*	7.71	2.07E-09	0.06	6.29	1.91E-08	0.56	17.1	1.67E-09	0.05

*為內插之值

表 4.9 土樣一水對庚烷 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			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	10	35.62*	5.76E-06*	35.51	6.23E-06	1.08	41.32	6.33E-06	1.10	39.97	5.99E-06	1.04
	30	34.96*	2.89E-06*	35.32	5.14E-06	1.78	40.83	5.96E-06	2.06	36.38	3.34E-06	1.16
	50	34.54	9.63E-07	33.62	4.62E-06	4.80	39.85	5.39E-06	5.60	28.17	1.03E-06	1.07
	100	16.27	3.21E-08	16.23	1.05E-07	3.27	10.45	1.10E-08	0.34	11.76	2.12E-08	0.66
	300	9.31	—	9.05	1.43E-11	—	7.01	3.27E-11	—	4.33	1.02E-11	—

濕 潤 曲 線	張力值 (mbar)	滲透實驗值K ₁		經驗公式K ₂			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	300	9.59	—	9.58	3.22E-11	—	6.73	2.68E-14	—	3.7	2.06E-16	—
	100	10.37	2.01E-08	10.48	1.15E-09	0.06	7.18	2.97E-12	1.5E-4	4.12	6.19E-14	3.1E-6
	50	11.11	2.62E-08	11.01	5.58E-09	0.21	7.84	4.35E-11	1.7E-3	4.96	3.42E-12	1.3E-4
	30	11.24*	2.77E-08*	11.23	1.12E-08	0.40	8.90	5.57E-10	0.02	6.08	3.37E-11	1.2E-3
	10	11.37*	2.92E-08*	11.3	1.53E-08	0.52	10.74	9.61E-09	0.33	10.28	2.21E-09	0.08

*為內插之值

表 4.10 土樣二水對庚烷 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			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	10	40.85*	3.11E-06*	40.79	2.82E-06	0.91	45.61	2.78E-06	0.89	48.63	1.69E-06	0.54
	30	39.55*	1.73E-06*	39.55	1.63E-06	0.94	44.07	1.66E-06	0.96	44.47	5.91E-07	0.34
	50	38.63	6.60E-07	37.89	1.06E-06	1.61	39.99	7.36E-07	1.11	39.25	1.84E-07	0.28
	100	32.62	3.63E-07	31.26	2.21E-07	0.61	30.79	1.24E-07	0.34	31.96	3.24E-08	0.09
	300	20.61	—	18.82	2.85E-09	—	16.49	1.11E-09	—	21.23	6.27E-10	—

濕 潤 曲 線	張力值 (mbar)	滲透實驗值K ₁		經驗公式K ₂			經驗公式K ₃			經驗公式K ₄		
		θ(%)	K(cm/s)	θ(%)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	θ(%)	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
	300	12.09	—	11.92	3.98E-12	—	9.60	5.91E-13	—	13.48	8.62E-14	—
	100	12.32	2.05E-08	12.37	1.27E-10	6.2E-3	10.55	1.63E-11	7.9E-4	14.47	3.97E-12	1.9E-4
	50	12.69	2.27E-08	12.68	6.93E-10	0.03	12.11	3.93E-10	0.02	15.12	2.29E-11	1.0E-3
	30	12.94*	2.29E-08*	12.88	1.96E-09	0.09	13.49	2.18E-09	0.10	15.78	9.66E-11	4.2E-3
	10	13.18*	2.31E-08*	13.13	9.07E-09	0.39	15.40	1.59E-08	0.69	17.1	1.13E-09	0.05

*為內插之值

表 4.11 土樣一水對九五無鉛汽油 K 值比較

排出曲線	含水比	滲透實驗K ₁	經驗公式K ₂		經驗公式K ₃		經驗公式K ₄	
	(%)	K(cm/s)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
曲線	35	3.93E-06	4.79E-06	1.22	2.50E-06	0.64	2.54E-06	0.65
	25	4.82E-07	1.01E-06	2.10	5.93E-07	1.23	5.71E-07	1.18
	15	2.77E-08	9.00E-08	3.25	5.73E-08	2.07	6.29E-08	2.27

本表均為內插之值

表 4.12 土樣二水對九五無鉛汽油 K 值比較

排出曲線	含水比	滲透實驗K ₁	經驗公式K ₂		經驗公式K ₃		經驗公式K ₄	
	(%)	K(cm/s)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
曲線	40	2.16E-06	2.33E-06	1.08	7.32E-07	0.34	2.02E-07	0.09
	30	1.54E-07	4.77E-07	3.10	1.35E-07	0.88	1.71E-08	0.11
	20	—	4.65E-08	—	1.07E-08	—	2.68E-10	—

本表均為內插之值

表 4.13 土樣一水對柴油 K 值比較

排出曲線	含水比	滲透實驗K ₁	經驗公式K ₂		經驗公式K ₃		經驗公式K ₄	
	(%)	K(cm/s)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
曲線	35	5.76E-06	5.82E-06	1.01	2.93E-06	0.51	2.54E-06	0.44
	25	1.74E-06	1.13E-06	0.65	8.50E-07	0.49	5.71E-07	0.33
	15	4.90E-07	8.03E-08	0.16	1.33E-07	0.27	6.29E-08	0.13

本表均為內插之值

表 4.14 土樣二水對柴油 K 值比較

排出曲線	含水比	滲透實驗K ₁	經驗公式K ₂		經驗公式K ₃		經驗公式K ₄	
	(%)	K(cm/s)	K(cm/s)	K ₂ /K ₁	K(cm/s)	K ₃ /K ₁	K(cm/s)	K ₄ /K ₁
曲線	40	1.87E-06	1.31E-06	0.70	5.61E-07	0.30	2.02E-07	0.11
	30	7.36E-07	1.89E-07	0.26	1.06E-07	0.14	1.71E-08	0.02
	20	2.69E-07	1.60E-08	0.06	1.20E-08	0.04	2.68E-10	9.9E-4

本表均為內插之值

表 4.15 土樣一水對庚烷 K 值比較

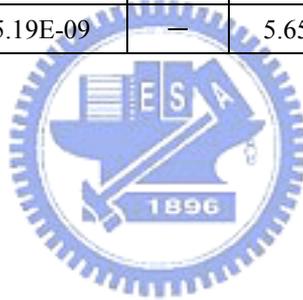
排出曲線	含水比 (%)	滲透實驗 K_1	經驗公式 K_2		經驗公式 K_3		經驗公式 K_4	
		K(cm/s)	K(cm/s)	K_2/K_1	K(cm/s)	K_3/K_1	K(cm/s)	K_4/K_1
線	35	3.09E-06	5.68E-06	1.84	3.26E-06	1.06	2.78E-06	0.90
	25	1.68E-07	1.12E-06	6.67	9.05E-07	5.39	6.25E-07	3.72
	15	3.21E-08	6.31E-08	1.97	9.98E-08	3.11	6.88E-08	2.14

本表均為內插之值

表 4.16 土樣二水對庚烷 K 值比較

排出曲線	含水比 (%)	滲透實驗 K_1	經驗公式 K_2		經驗公式 K_3		經驗公式 K_4	
		K(cm/s)	K(cm/s)	K_2/K_1	K(cm/s)	K_3/K_1	K(cm/s)	K_4/K_1
線	40	2.24E-06	1.89E-06	0.84	7.38E-07	0.33	2.21E-07	0.10
	30	2.80E-07	1.63E-07	0.58	1.03E-07	0.37	1.87E-08	0.07
	20	—	5.19E-09	—	5.65E-09	—	2.94E-10	—

本表均為內插之值



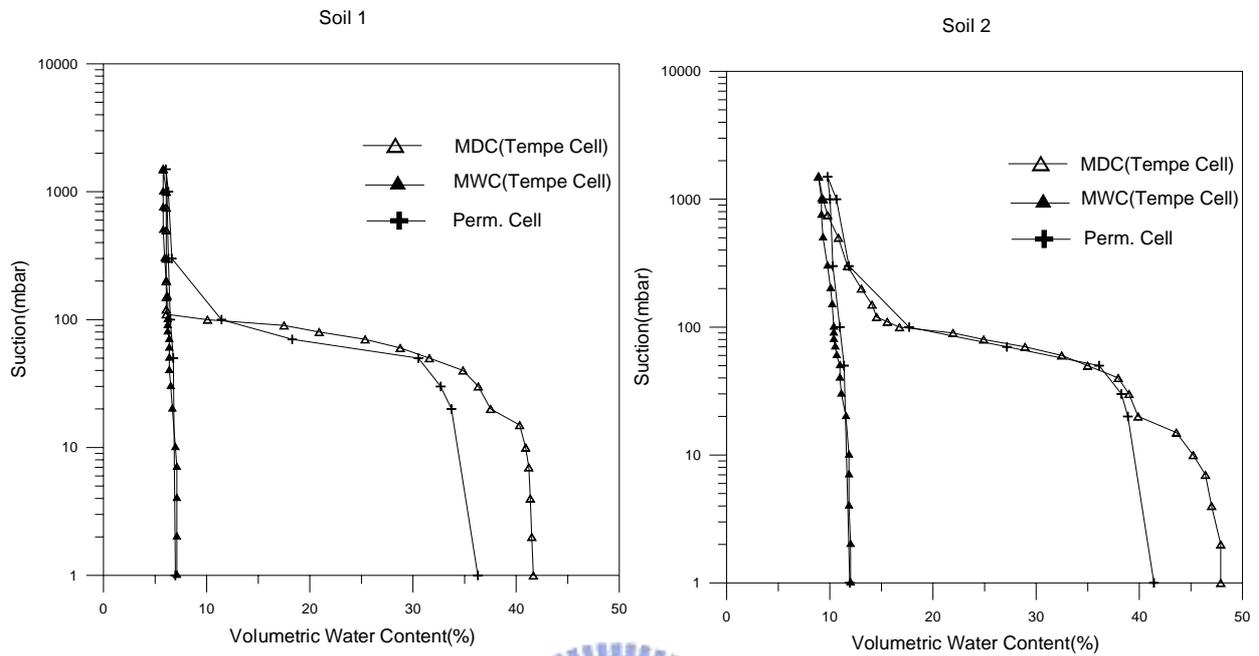


圖 4.1 水對九五無鉛汽油保持曲線

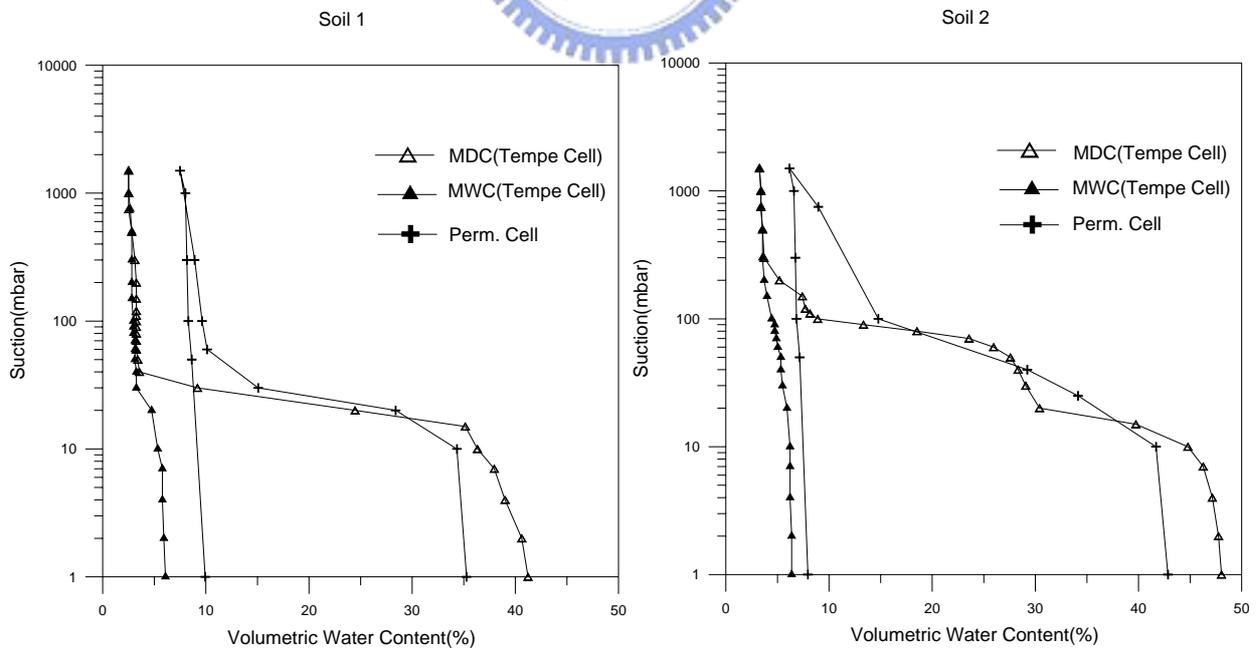


圖 4.2 水—柴油保持曲線

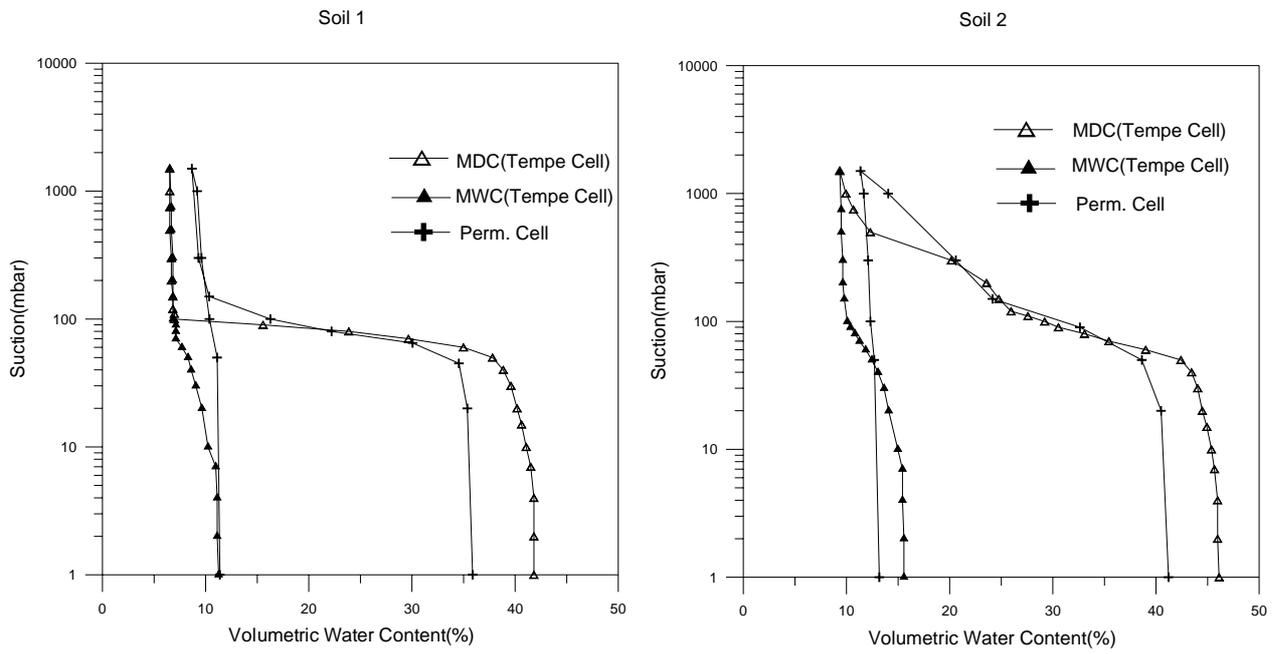


圖 4.3 水對庚烷保持曲線



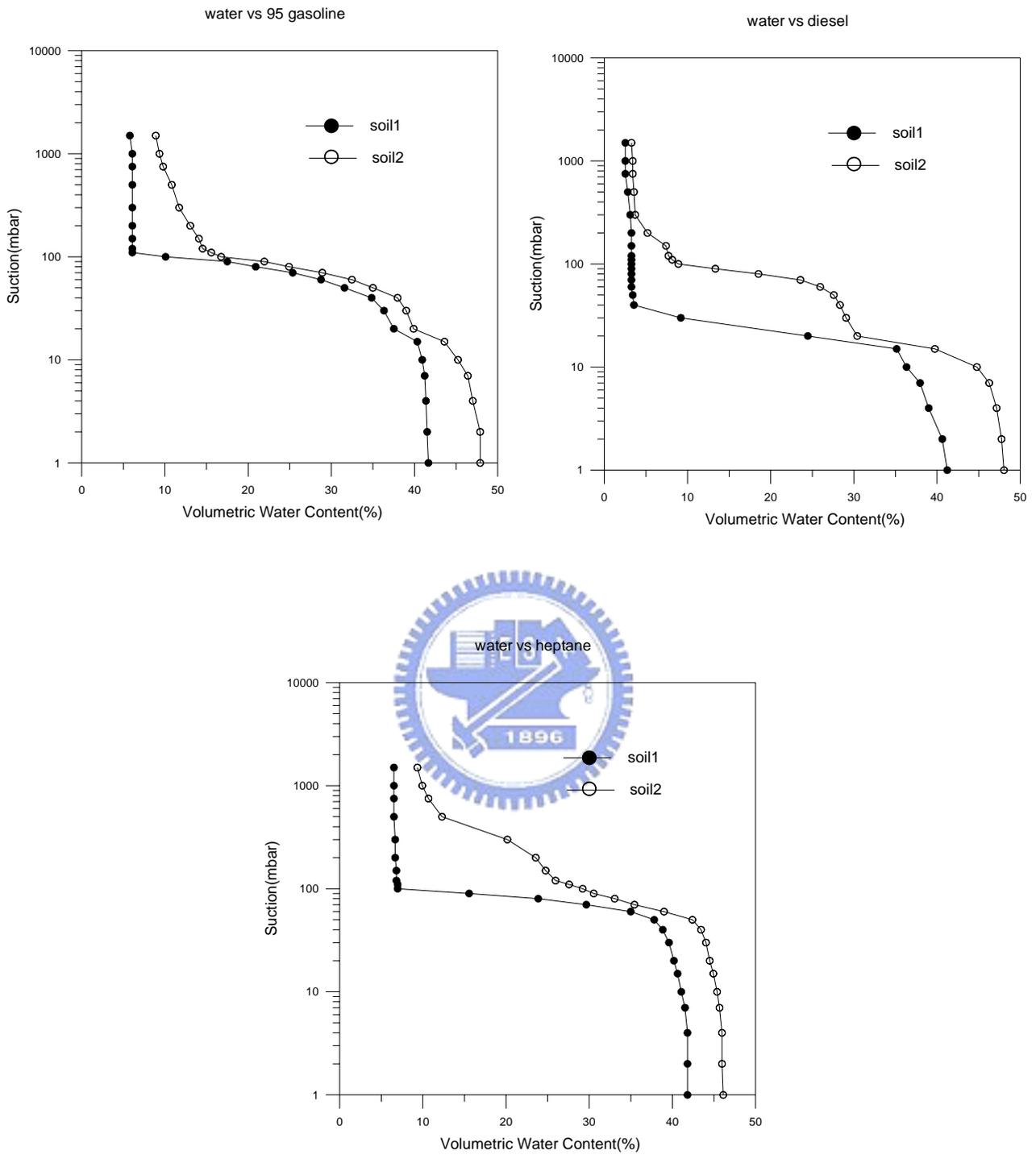


圖 4.4 不同土樣之水對有機液體保持曲線比較

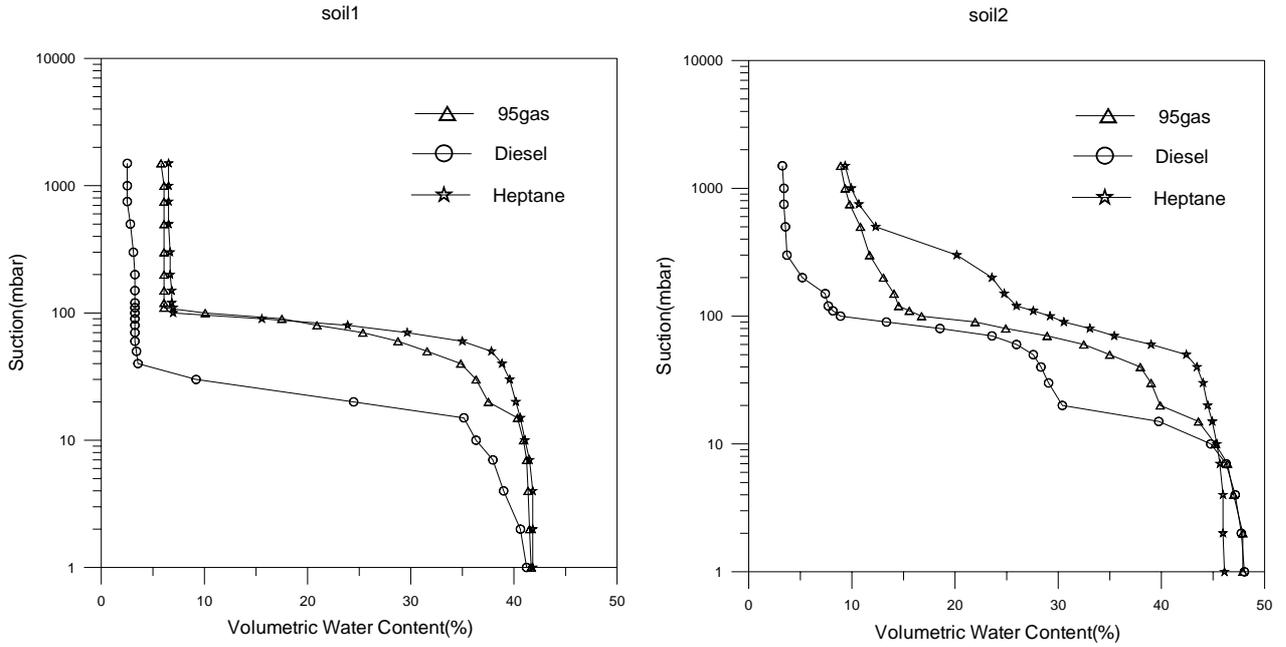


圖 4.5 水—有機液體排出曲線之比較

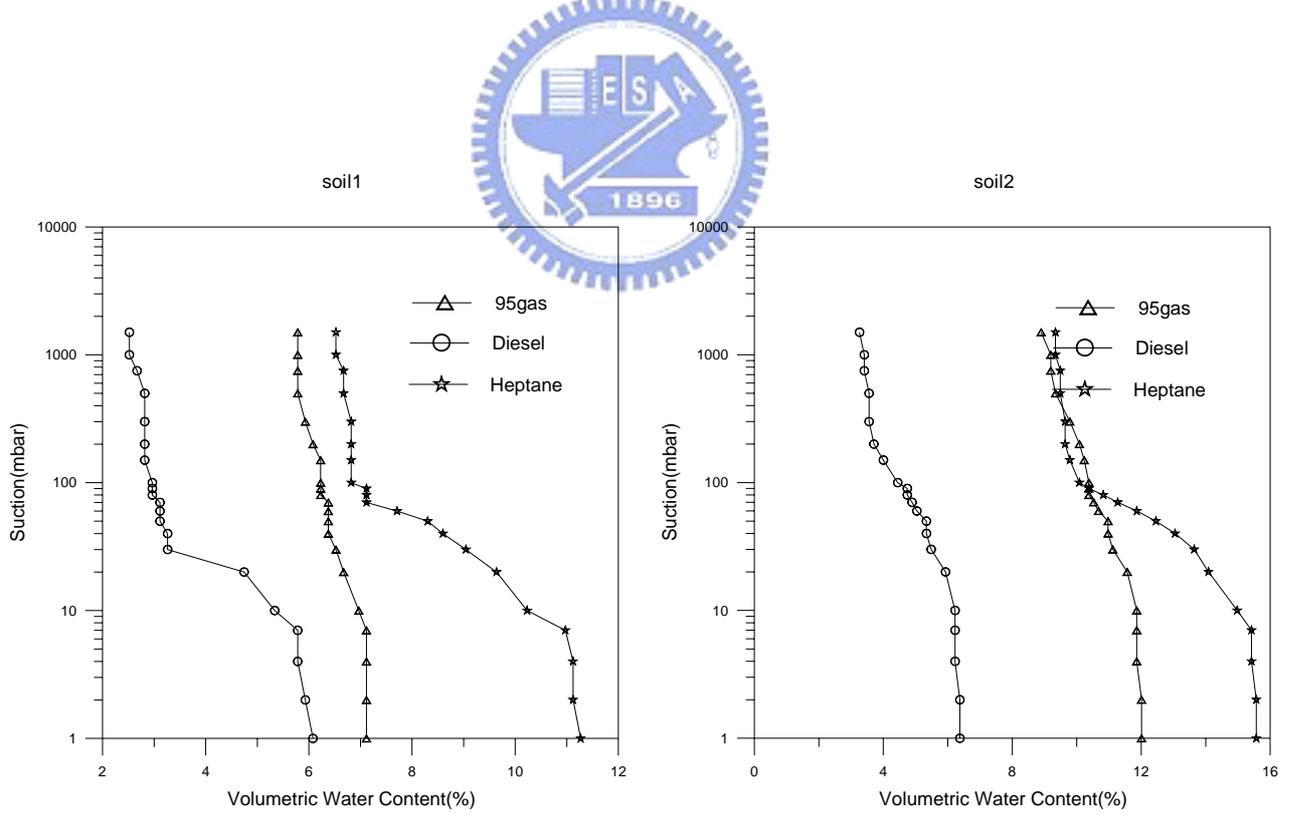


圖 4.6 水—有機液體濕潤曲線之比較

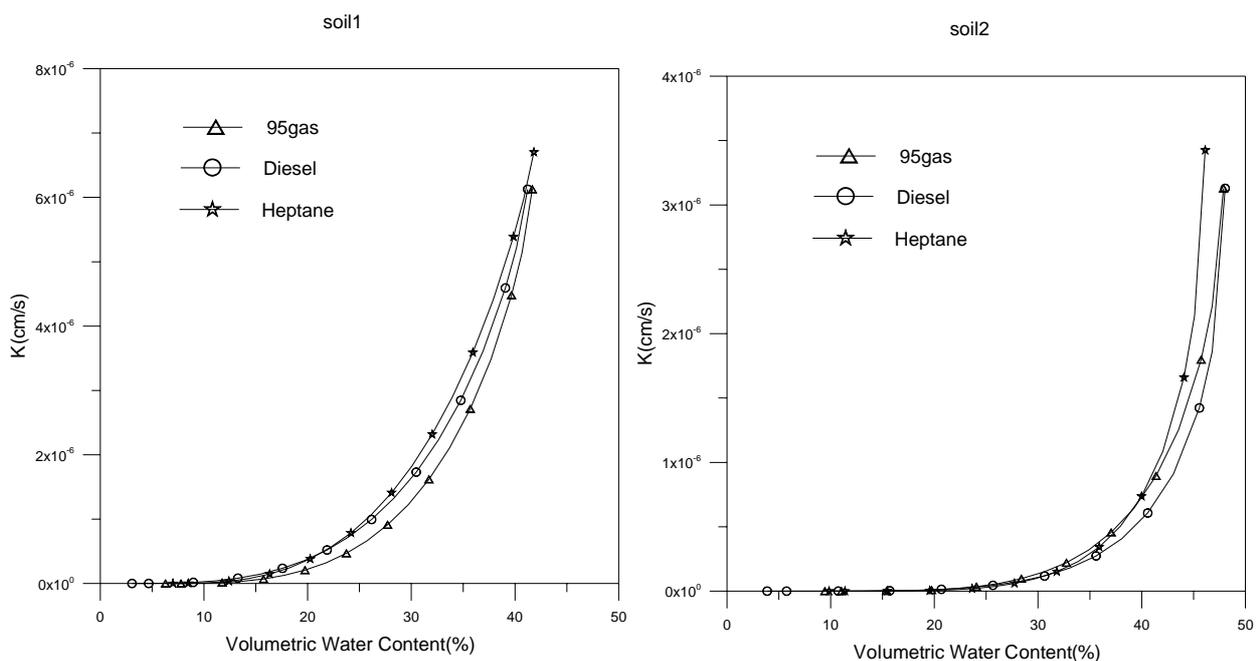


圖 4.7 經驗公式預測之 K 值比較(MDC)

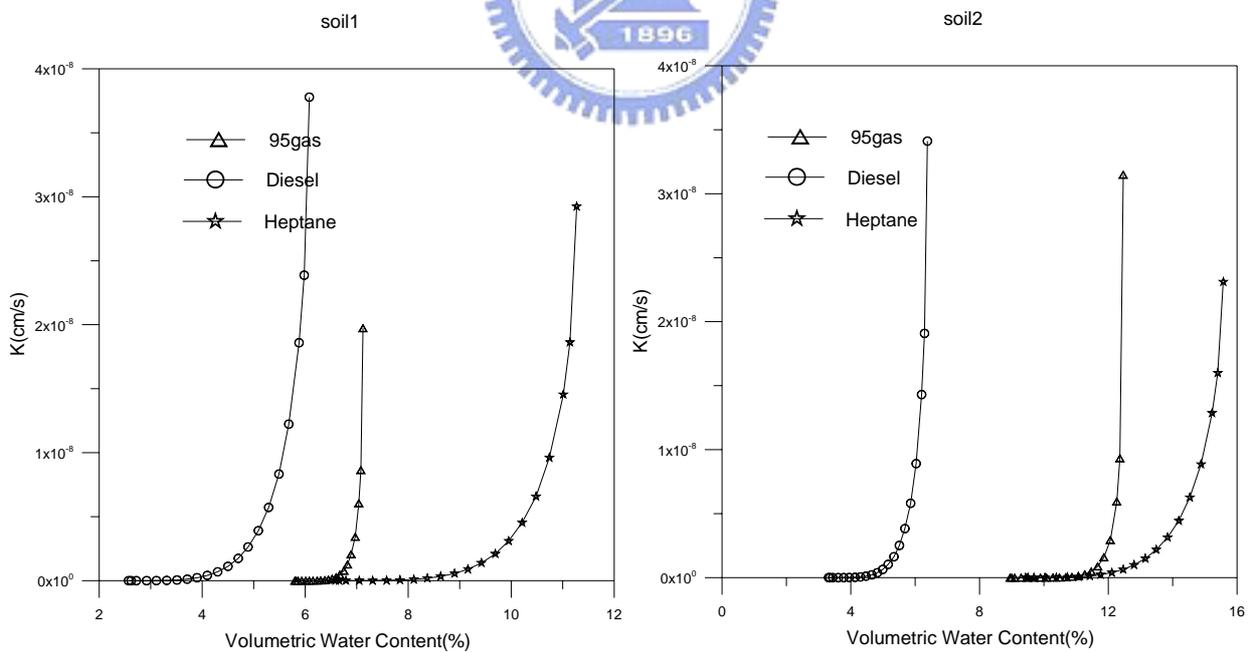


圖 4.8 經驗公式預測之 K 值比較(MWC)

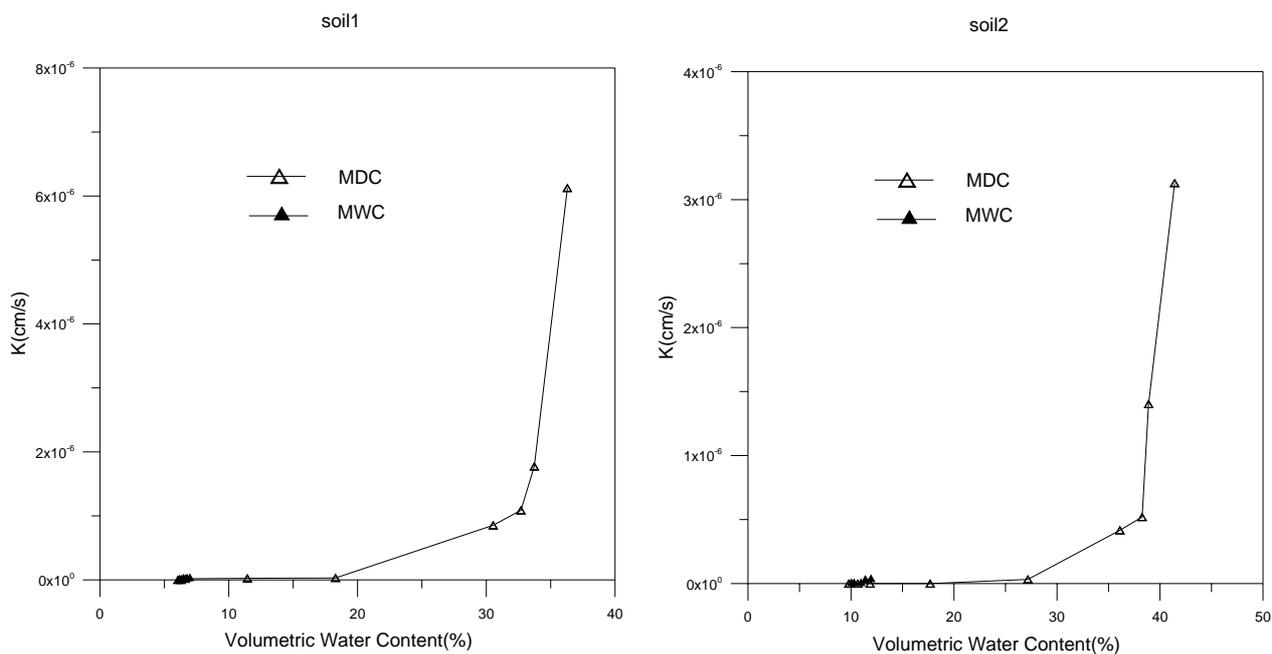


圖 4.9 水對九五無鉛汽油滲透實驗結果

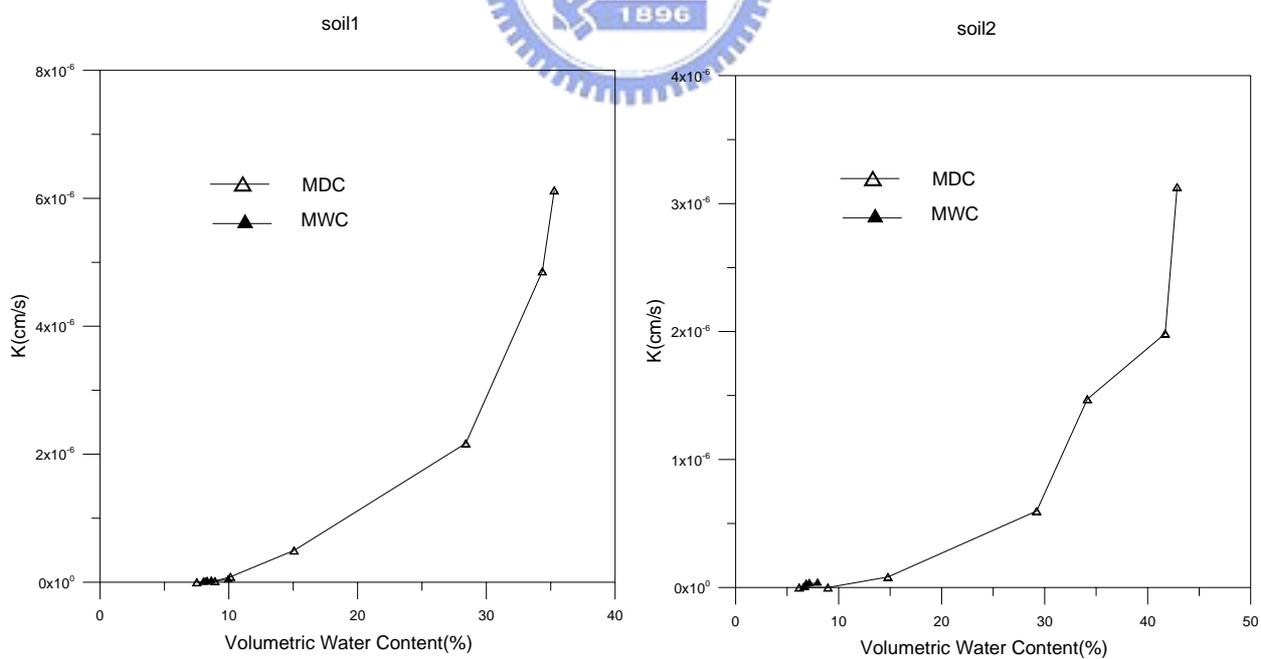


圖 4.10 水對柴油滲透實驗結果

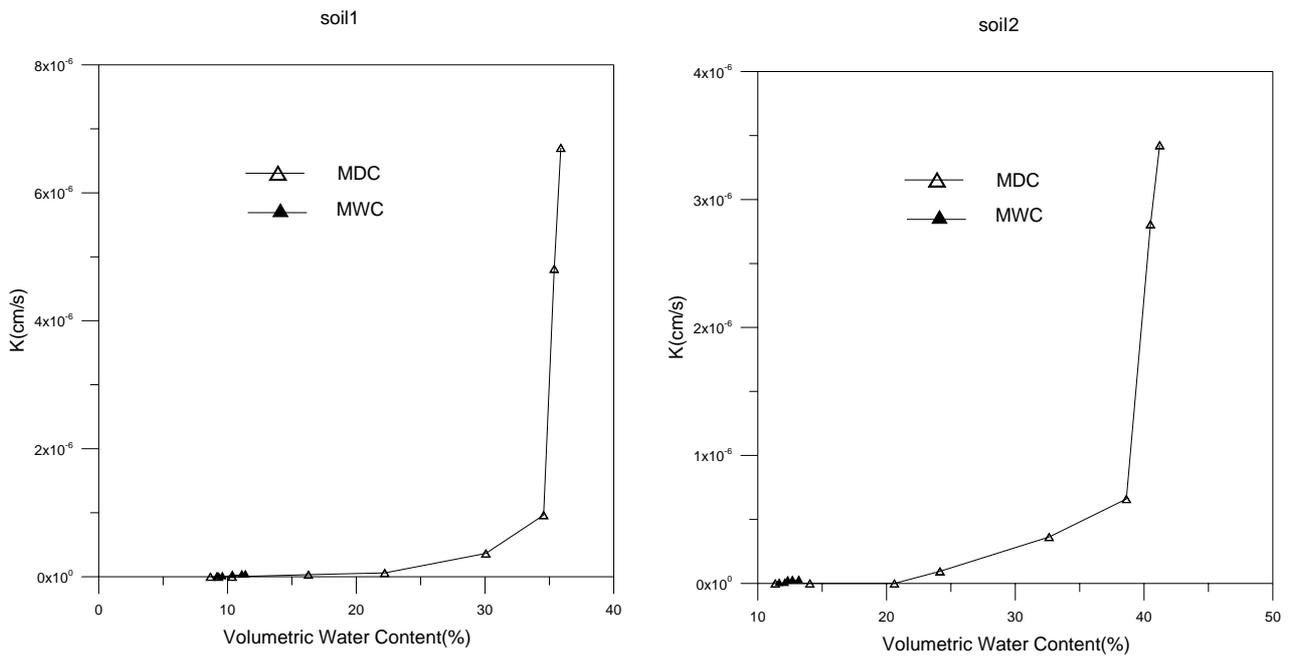


圖 4.11 水對庚烷滲透實驗結果

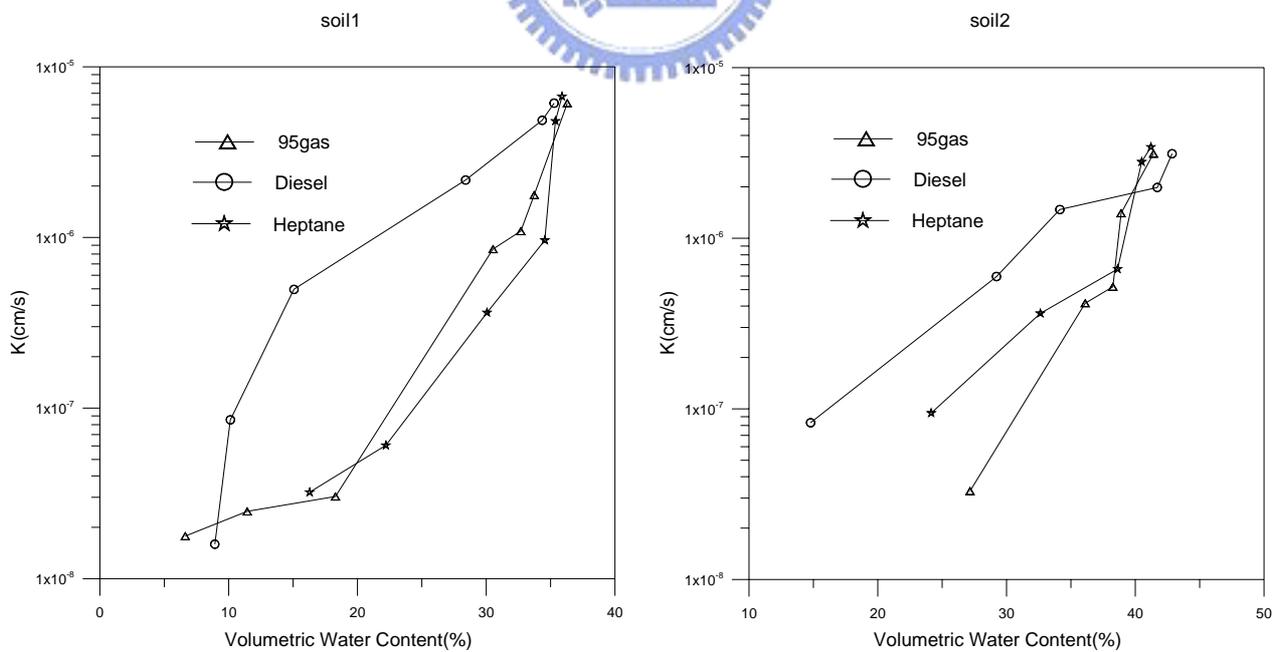


圖 4.12 不同有機液體滲透實驗值比較 (對數座標)

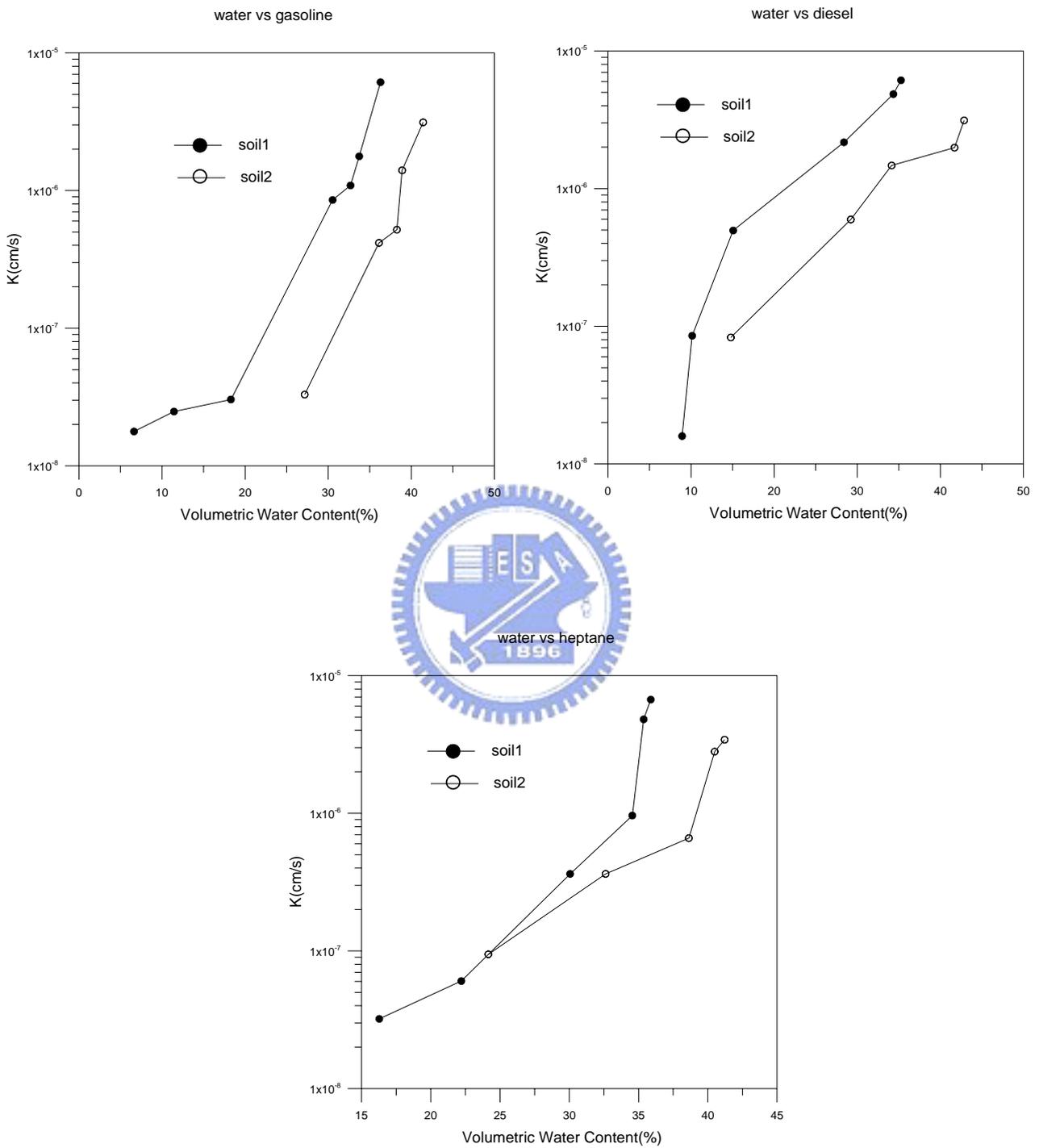


圖 4.13 不同土壤滲透實驗值之比較（對數座標）

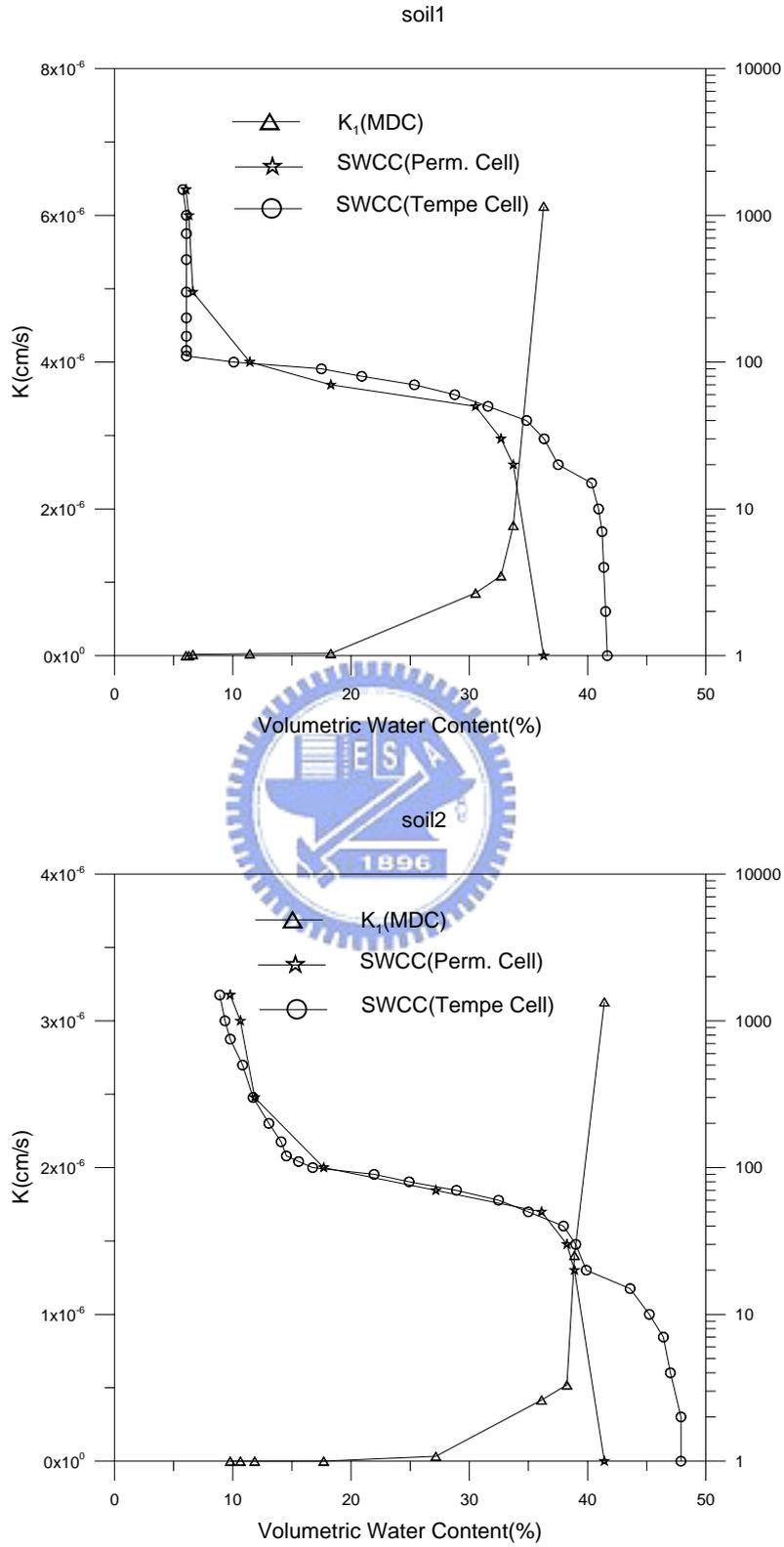


圖 4.14 水對九五無鉛汽油保持曲線與 K 值曲線

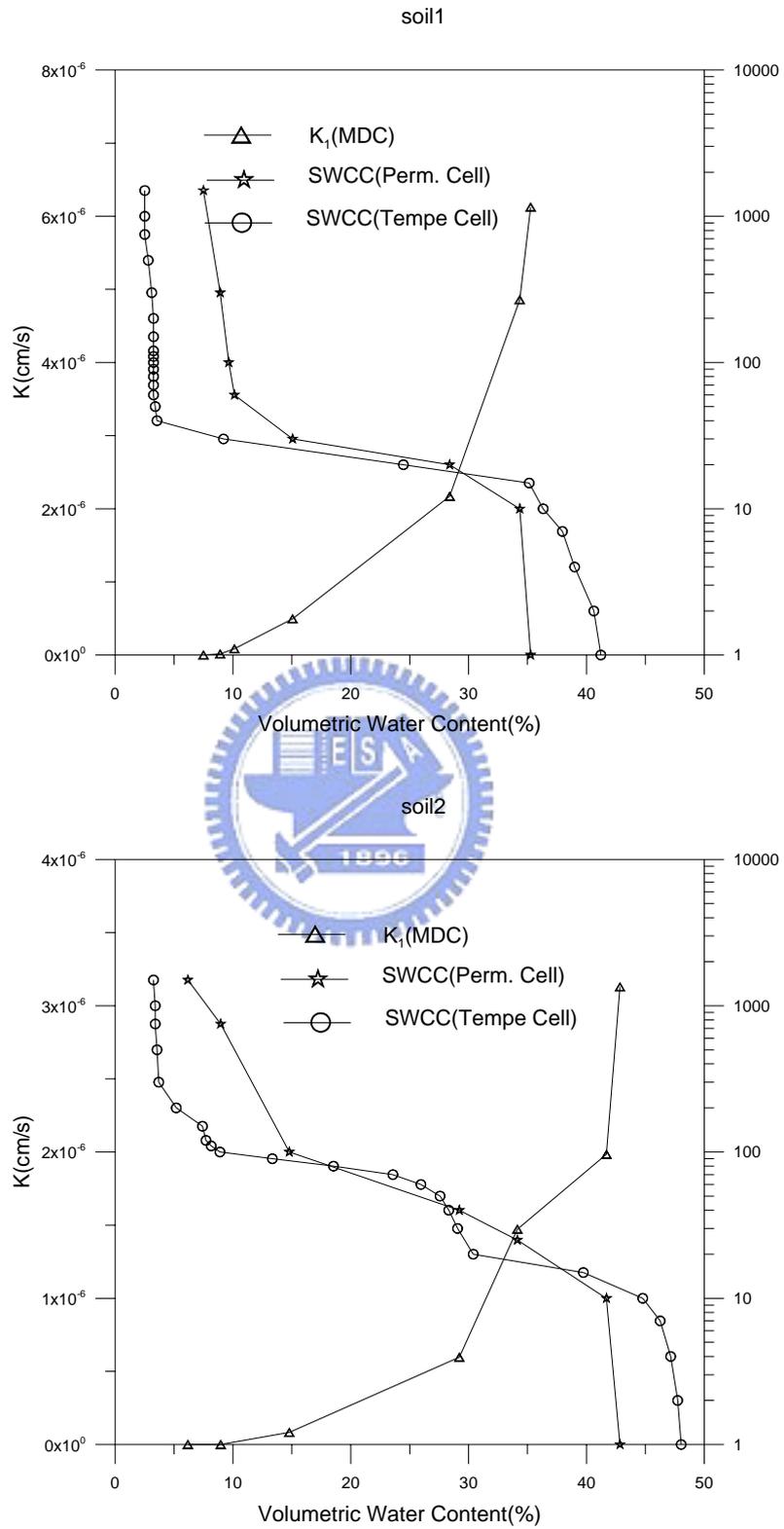


圖 4.15 水對柴油保持曲線與 K 值曲線

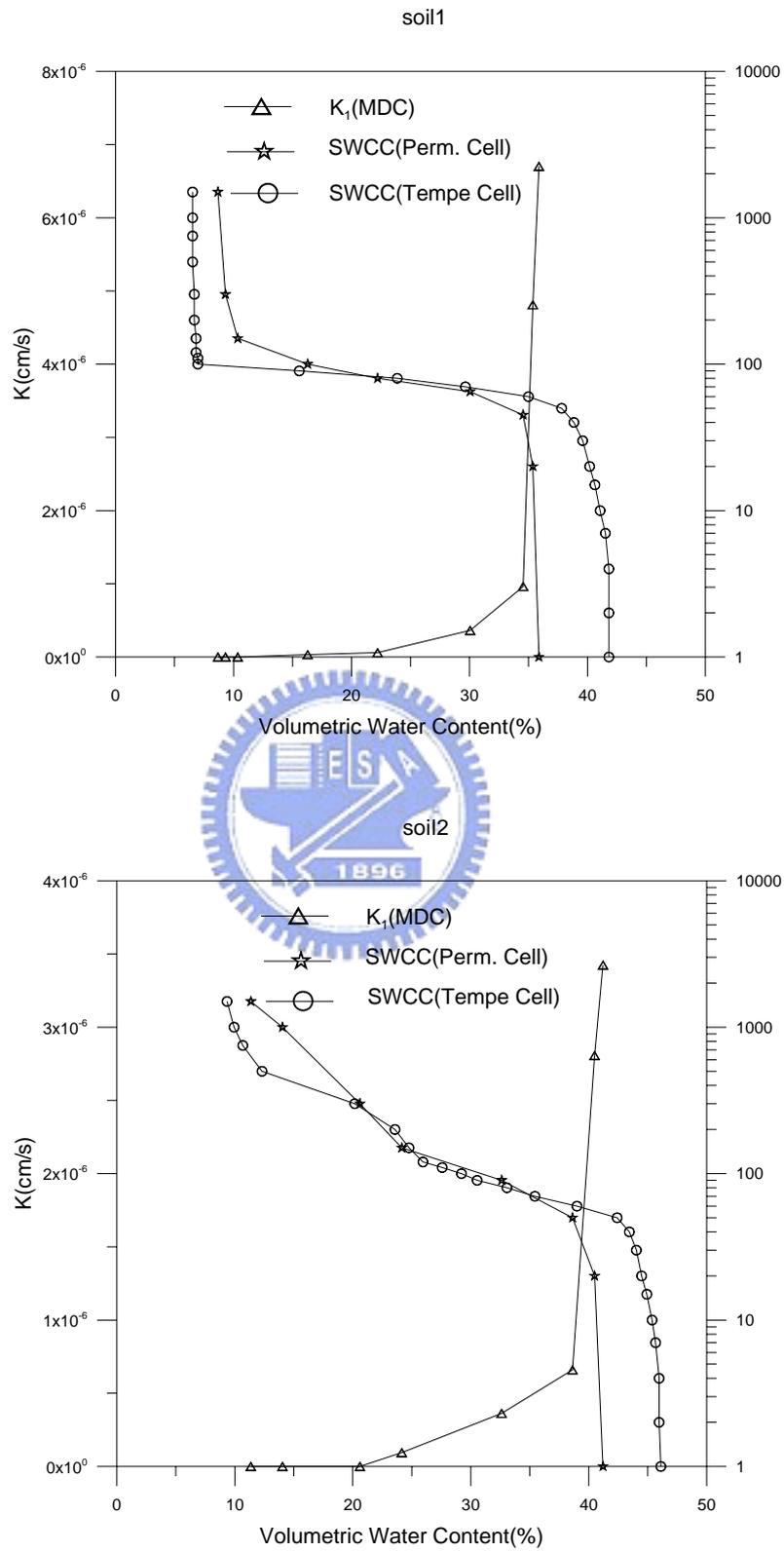


圖 4.16 水對庚烷保持曲線與 K 值曲線

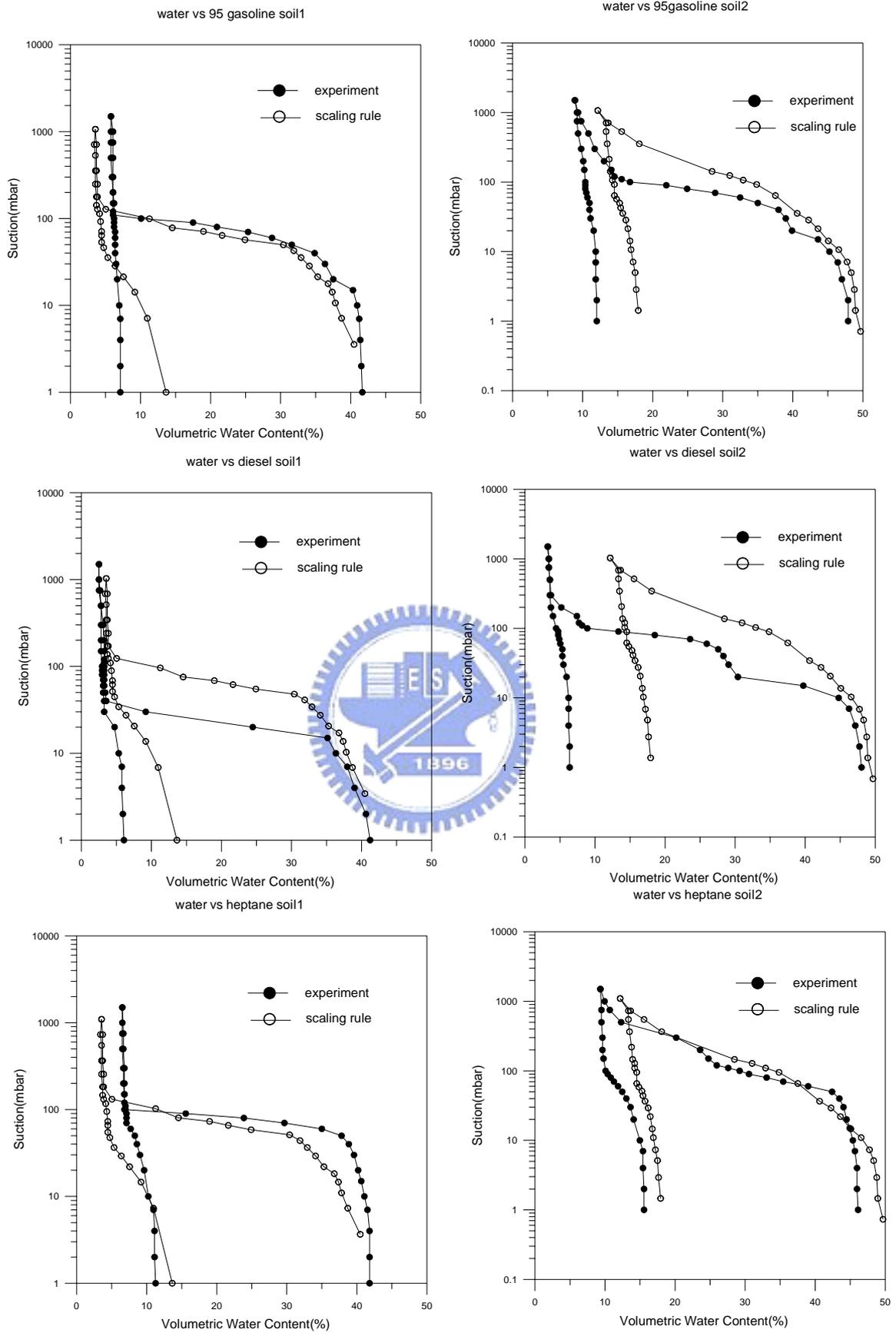


圖 4.17 由水—空氣經比例原則推水—有機液體保持曲線

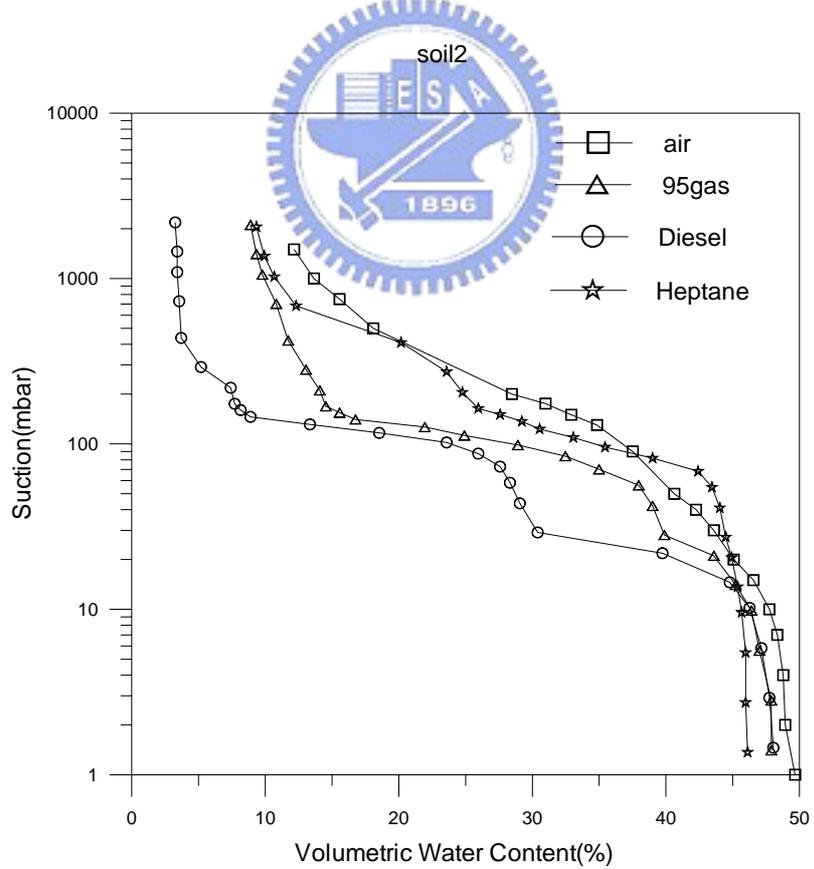
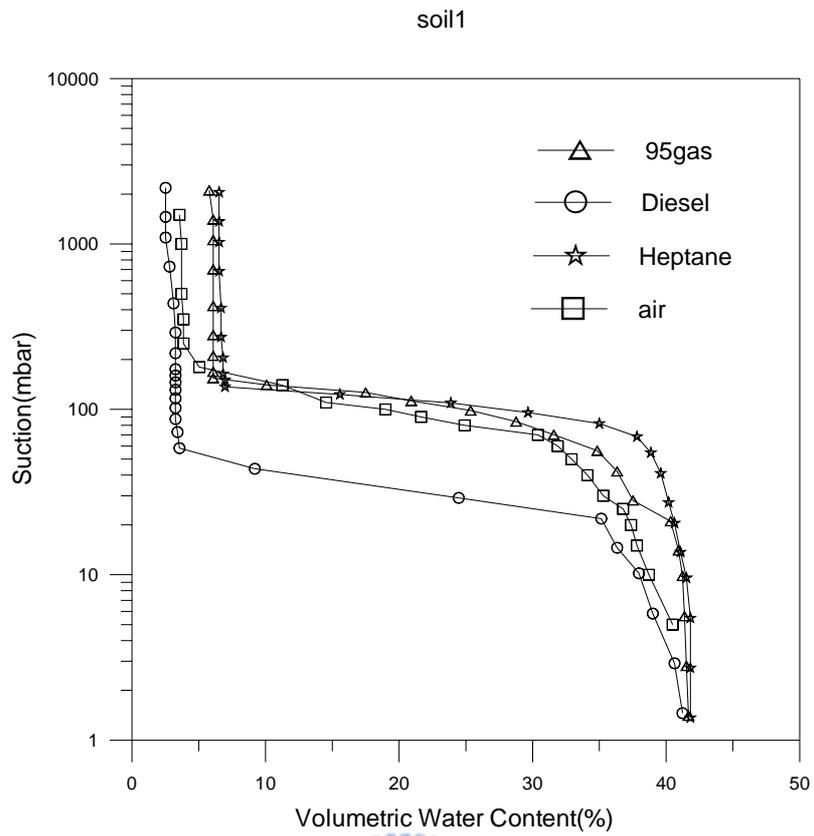


圖 4.18 由水—有機液體經比例原則推水—空氣保持曲線

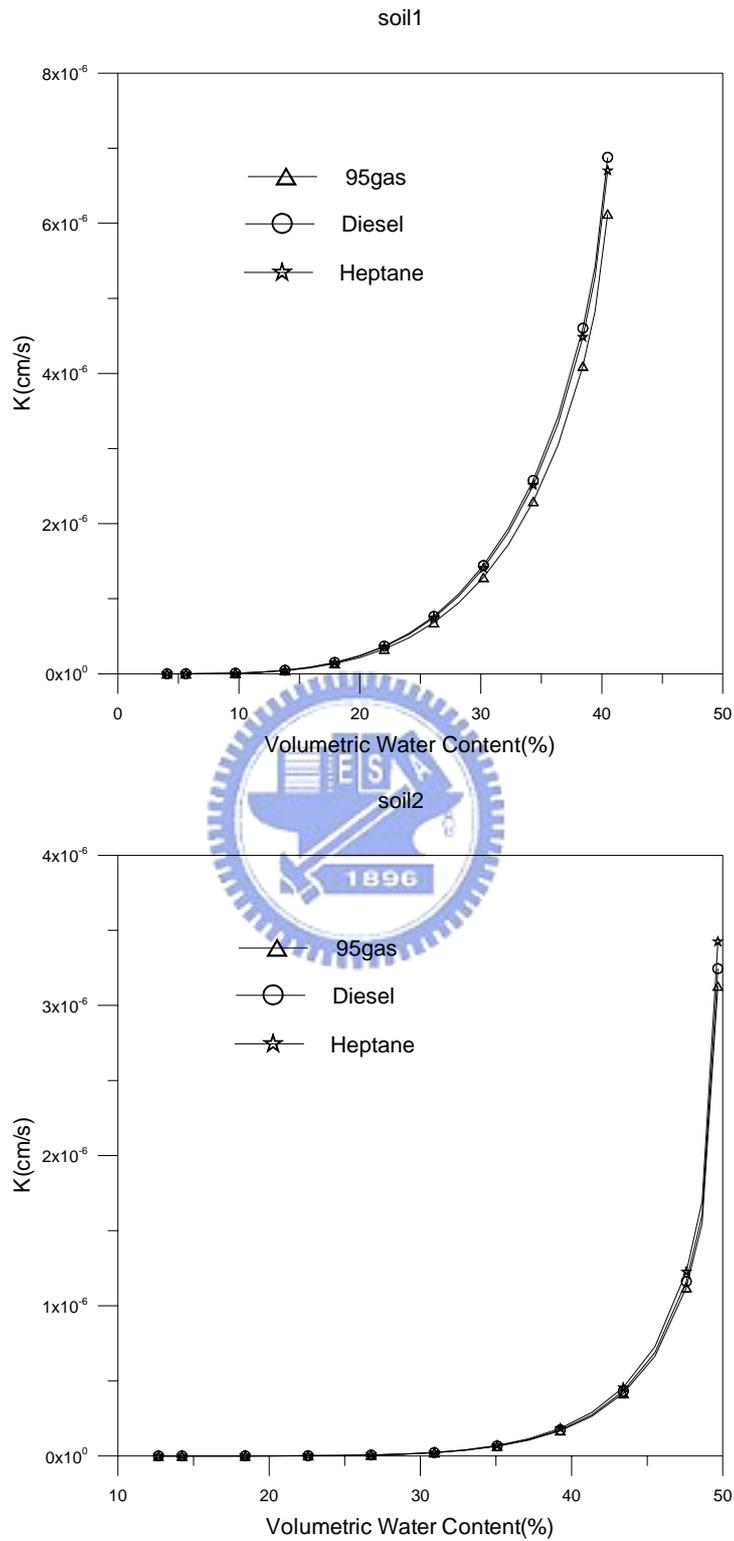


圖 4.19 經驗公式預估之滲透係數值

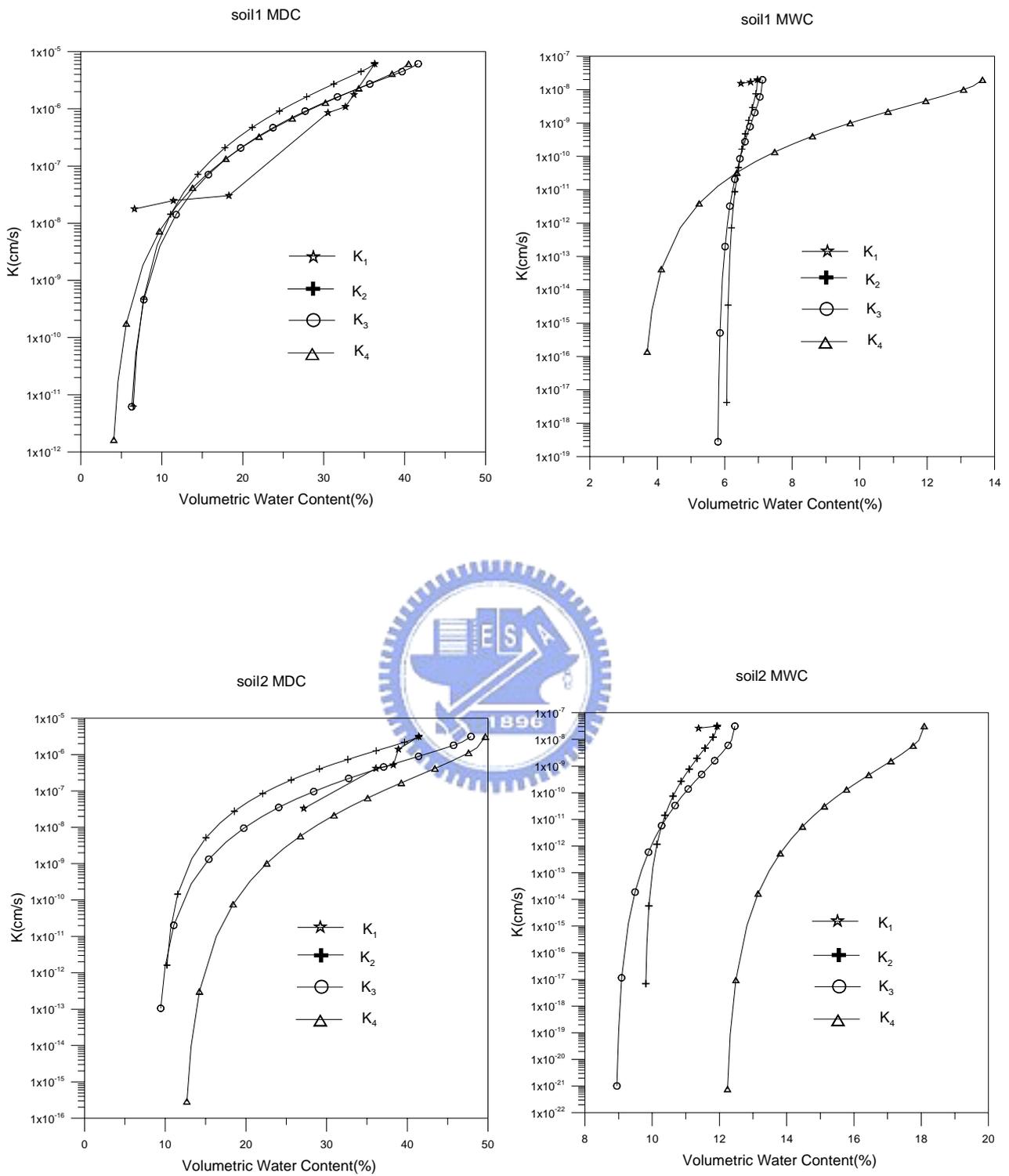


圖 4.20 水對汽油滲透係數值之比較 (對數座標)

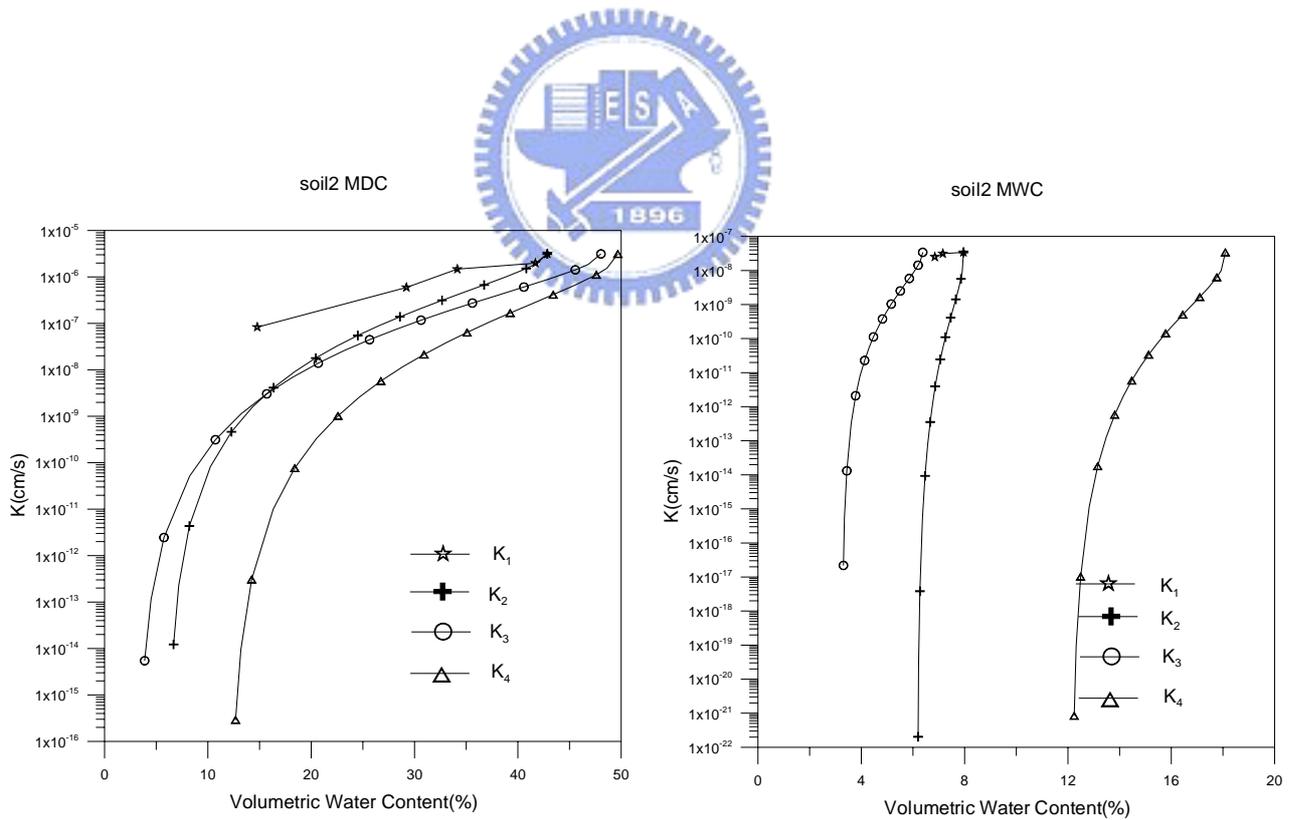
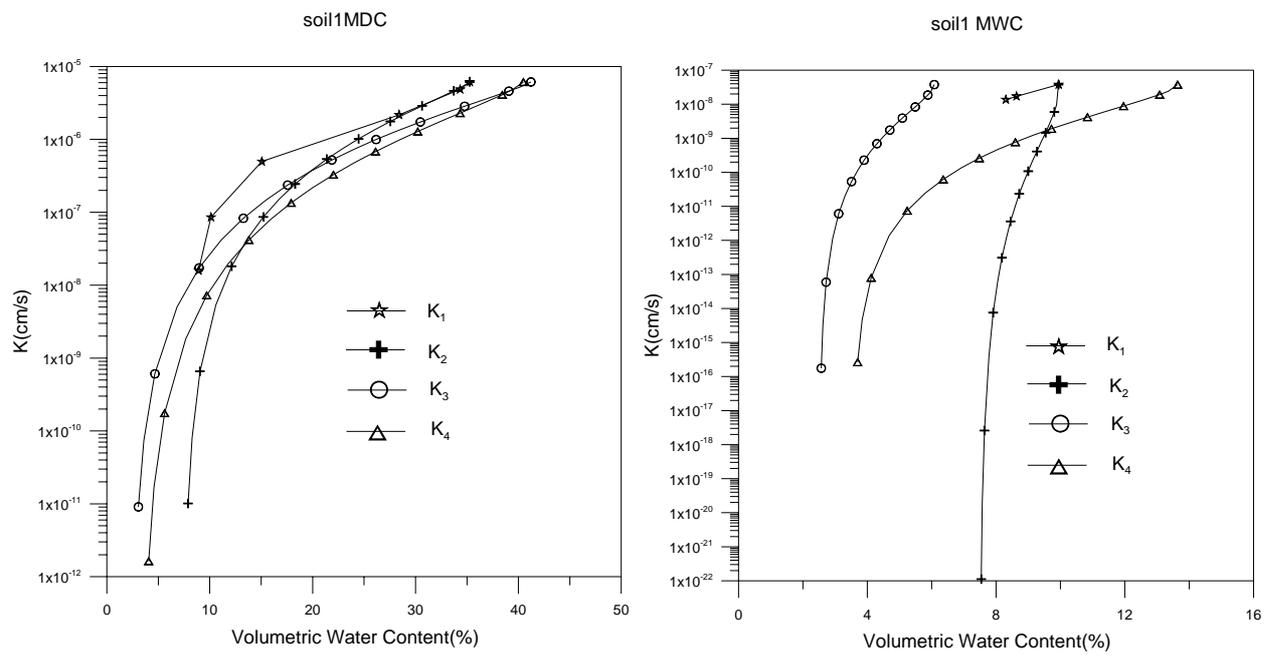


圖 4.21 水對柴油滲透係數值之比較（對數座標）

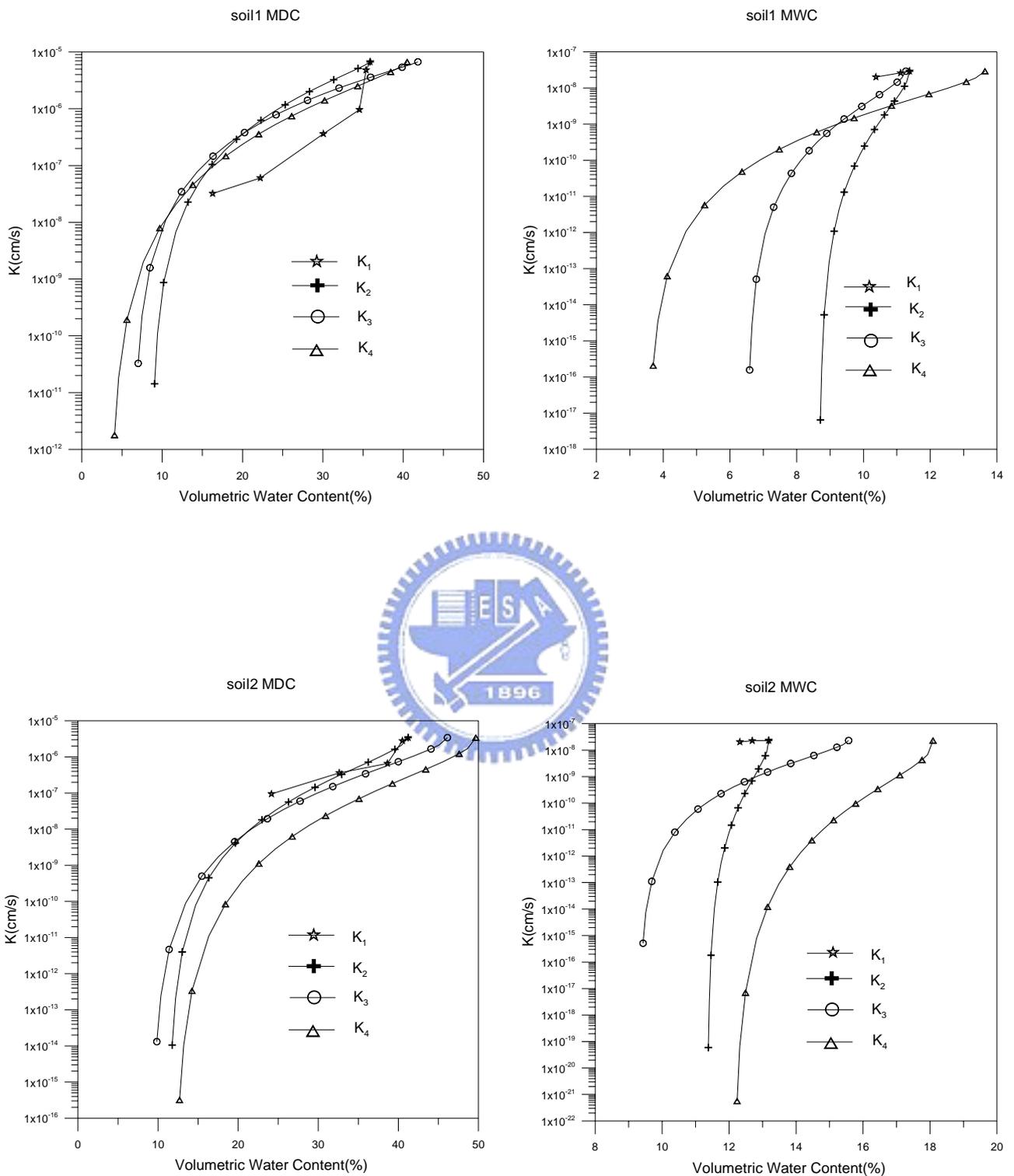


圖 4.22 水對庚烷滲透係數值之比較 (對數座標)

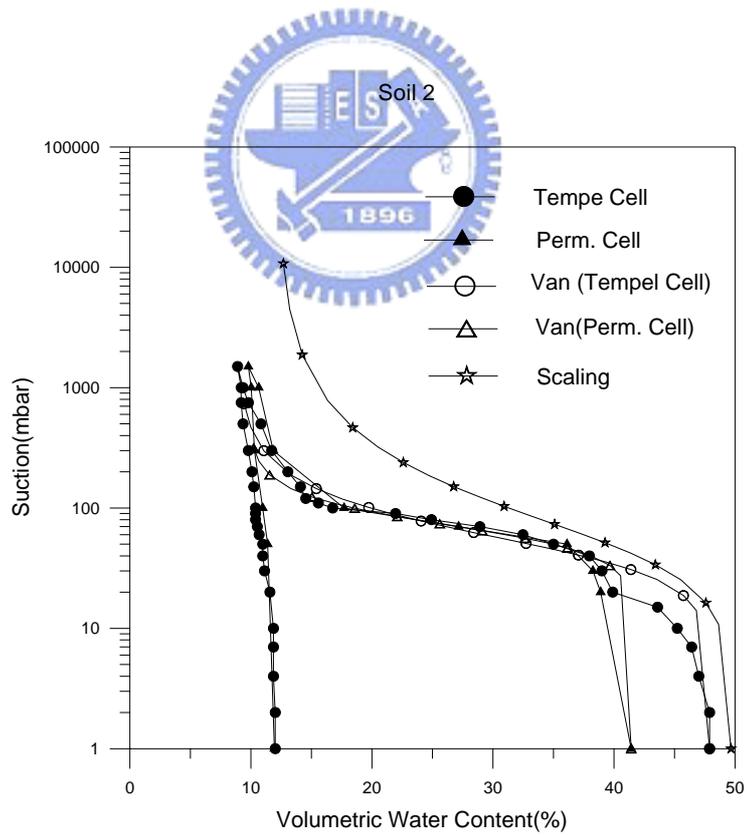
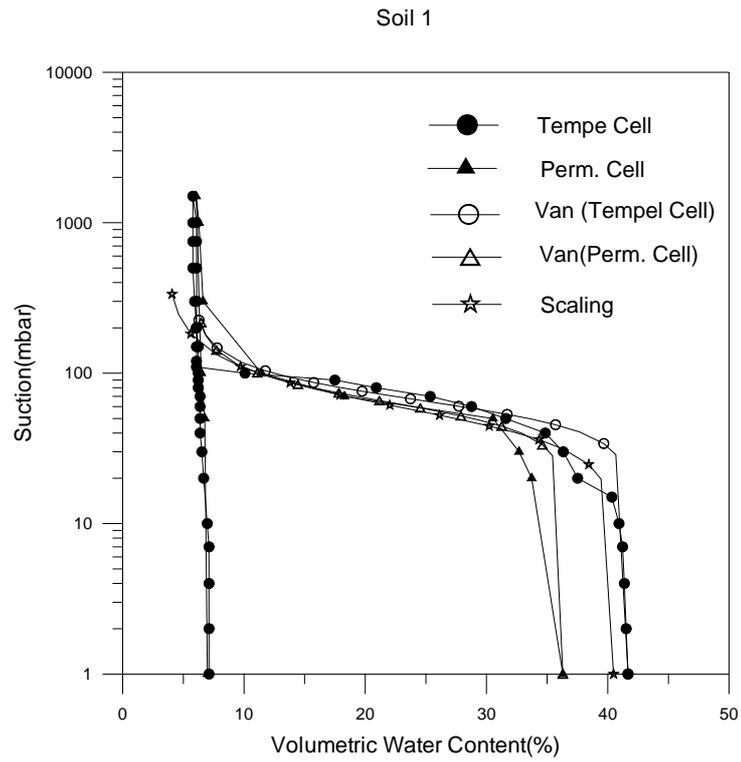


圖 4.23 水對九五無鉛汽油保持曲線

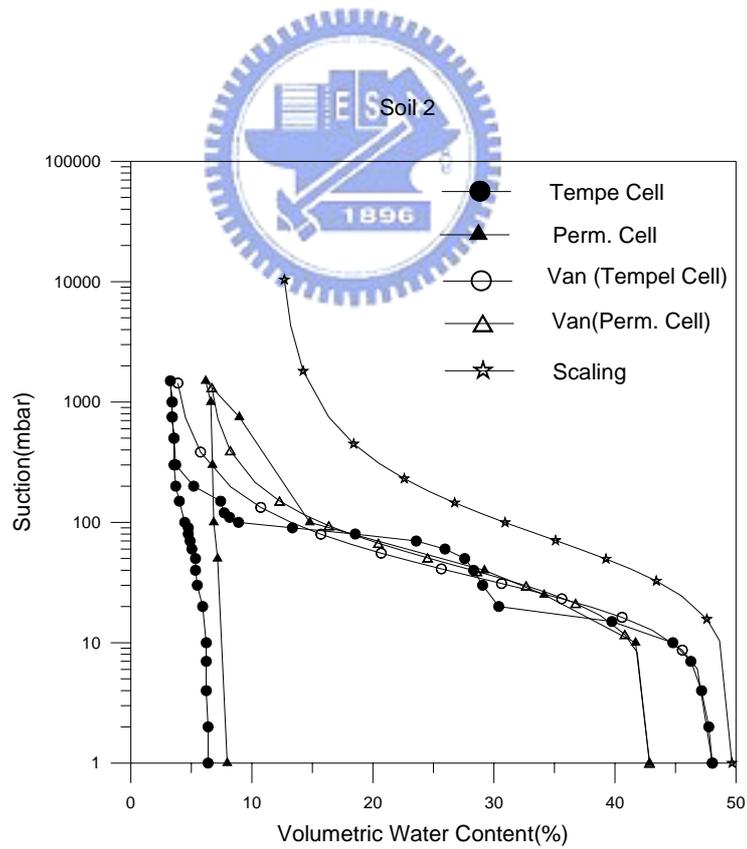
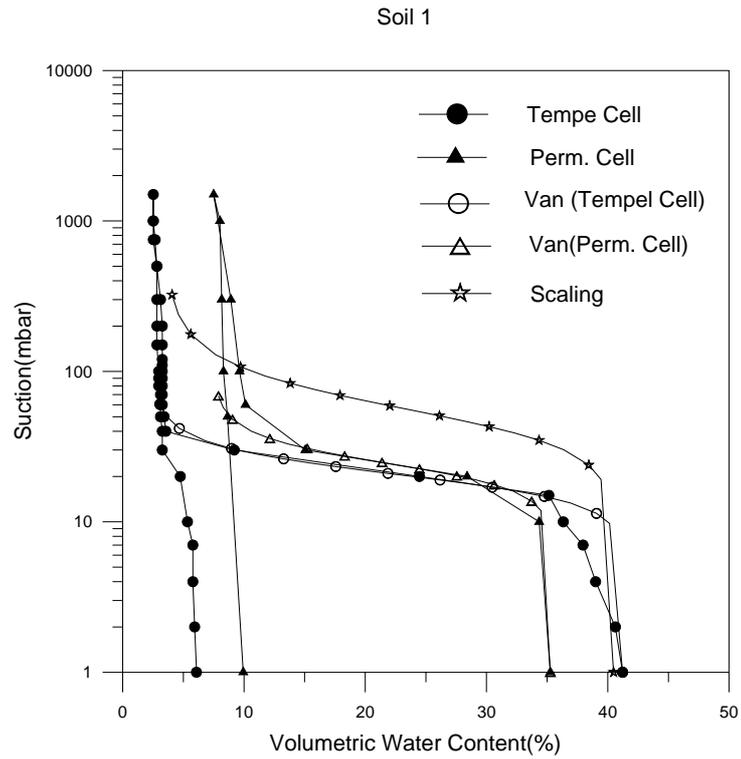


圖 4.24 水對柴油保持曲線

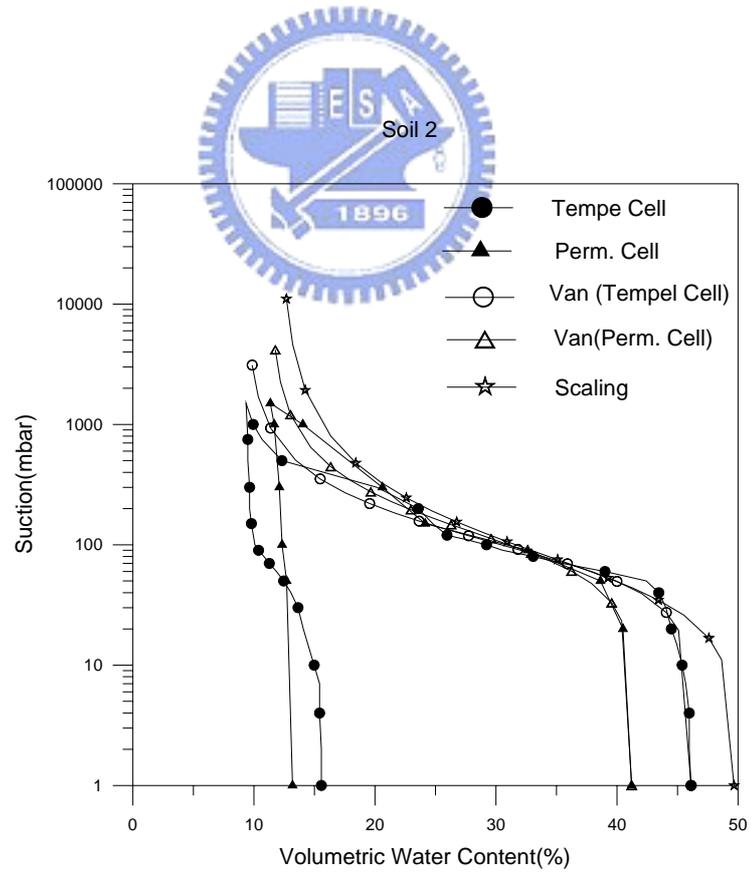
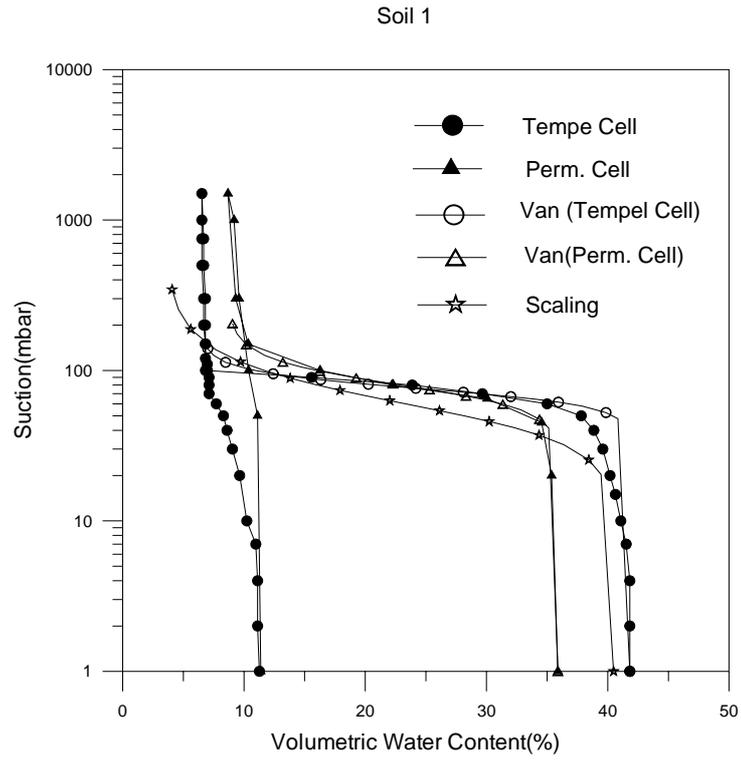


圖 4.25 水對庚烷保持曲線