

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，試驗流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，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、滲透儀所獲得的保持曲線資料經 RETC 程式預測滲透係數值時，所獲得的結果雖不盡理想但仍可接受，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，由壓力儀及滲透儀保持曲線資料代入 RETC 程式所獲得的導水度預測值多為實驗值的 0.3 至 3 倍之間，和實驗值的差距不算過大。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空氣-有機液體的保持曲線。試驗過程中先將土壤試體以液體飽和，然後施加張力使空氣侵入試體中，液體便會被排出，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 液體-空氣保持曲線

圖 4.1~圖 4.4 表示壓力儀液體-空氣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，渥太華砂因為顆粒比較大，所以液體在低壓的部分(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 4.5~圖 4.8 中為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：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 4.9 為不同土樣之液體-空氣保持曲線，由圖 4.9a 中可以發現，對於較粗顆粒的渥太華砂，液體的侵入會比現地土樣來得快。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 4.9b 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小，也就是小孔隙越多，水回吸的量也會越多。

表 4.1 張力為 1.5 bar 時之殘餘體積含液比

土壤試體	Ottawa Sand (%)	Local Sand (%)
水	3.56	12.16
九五無鉛汽油	5.22	2.51
柴油	8.33	19.35
庚烷	11.8	14.23

表 4.2 初始含液比與殘餘含液比之差值

土壤試體	Ottawa Sand (%)	Local Sand (%)
水	36.92	37.51
九五無鉛汽油	38.11	39.00
柴油	33.21	24.32
庚烷	27.58	43.44

表 4.3 初始含液比與最終含液比之差值

土壤試體	Ottawa Sand (%)	Local Sand (%)
水	33.36	46.37
九五無鉛汽油	29.51	24.76
柴油	22.98	19.72
庚烷	13.94	9.93

4.1.3 流體性質對保持特性的影響

本試驗中總共使用四種液體（水、九五無鉛汽油、柴油、庚烷），圖 4.10~4.11 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

的四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、庚烷，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 4.10 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 4.11 中，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。

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液體與空氣之間的界面張力會隨著實驗過程中的排出而有所改變，也許不會維持定值，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 4.10 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 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，相對的利用保持曲線配合間接的方法：如利用 RETC 程式分析較為快速且方便。

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)、(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，並給予飽和時的滲透係數 K_s 值，對於排出曲線來說，飽和K值即為一開始所測量之 K_s 值，但是對濕潤曲線來說，飽和K值為滲透儀實驗當中，解壓過程最後張力值為零時所得之滲透係數值。

圖4.12及圖4.13為壓力儀保持曲線資料經由RETC求得的液體對空氣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、初始飽和度不同所造成。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，不過趨勢仍是類似的。

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，先將土壤試體以試驗液體(水、汽油、柴油或庚烷)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，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4.14~17分別為空氣對不同液體之滲透實驗結果(有些試驗結未完成)。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，一旦張力值超過空氣進入壓力之後，滲透係數值

幾乎都接近零。而在濕潤曲線上的點由於飽和度及平衡與否判斷不易，致使求出的結果並不是很理想，故之後的討論多以液體的排出曲線為主，較有規律性及代表性。

圖4.18表示不同液體滲透實驗值之比較，理論上來講，液體與空氣間的介面張力越大，在同樣的飽和度之下，因為毛細力的關係，應該有較小的K值，但以渥太華砂的圖4.18a來看，水的導水度K並不是最低的，而且似乎不太合理，可能在判定張力平衡與否方面出了問題，當時讀到的數也許並不是實際的導水度值，如果有足夠的時間，再等待到達完全的平衡狀態，應該能改善這種情況。另外，在現地土樣的曲線中，可發現水和庚烷的曲線其實驗過程的飽和度變化範圍並不太大，原因是液體於現地土樣中滲透較緩慢，常常在張力值並不大時，就無法量測到K值了，這時便考慮開始進入回吸的狀態，求取另一導水度K值。

圖4.19為不同土樣滲透實驗值之比較，由圖中可以發現，一般在同一體積含水比之下，渥太華砂之滲透係數值都較現地土樣大，表示土壤顆粒越小則滲透係數也會越小；汽油的試驗中，雖然兩條曲線有發生交錯的行為，應屬實驗中的誤差導致，整個趨勢來看的話，孔隙較大的渥太華砂在同一個飽和度之下，仍然會有較大的導水度K值。另外，在水和庚烷試驗的現地土樣中，由於試驗狀況並不理想，導致試驗過程的飽和度變化幅度可能太小，不容易跟渥太華砂試驗相比較，這是往後應當改善的地方。

圖 4.20~23 為滲透係數實驗值與滲透儀所得之保持曲線之圖形。一般來講，滲透係數值隨著體積含水比的減小而急速的變小，對照圖形來看，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^{-7} 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，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，液體幾乎都要排出了，由於滲透儀試體較壓力儀的土樣大很多，因此需要很冗長的等待時間；同時也因為有機液體從管線中揮發的效果也許較讀數量管流入流出的量影響還要來得深遠，因此並不容易量測到很低的導水度K值。
- 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

求取土壤中任兩相流體之間的保持曲線實驗所需要的時間很長，往往數天才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4.24是以水-空氣為參考流體對，推出汽油-空氣、柴油-空氣、庚烷-空氣之保持曲線。在此使用的比例縮放因子 β_{ao} 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	β_{ao}
水	72.7	—
汽油	21.0	3.462
柴油	22.8	3.189
庚烷	19.5	2.481

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-空氣保持曲線與有機液體-空氣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4.25為由壓力儀實驗所得之有機液體-空氣保持曲線反推水-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 RETC 程式預測 K 值

藉由比例原則所得到的保持曲線同樣可以應用 RETC 之電腦程式而求得相對應的滲透係數 K 值。

圖 4.26 表示經由 RETC 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空氣的界面張力差別並不大，所以應用比例原則所求出的有機液體-空氣之保持曲線本身就差異不大，因此應用 RETC 程式所得 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 RETC 程式所得之值、 K_3 為壓力儀保持曲線帶入 RETC 所得之值、 K_4 為壓力儀保持曲線(水-空氣)經比例原則所得之保持曲線(有機液體-空氣)帶入 RETC 所得之值。

圖 4.27~30 表示液體對空氣滲透係數值之比較。由圖可知排出曲線因渥太華砂試體顆粒較大且均勻，所以保持曲線上的差異較現地土樣來的小。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不同流體對的試驗中，其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，體積含水比的改變都不大，整個試體內回吸的液體亦不多，或有機液體有從管線中揮發之情況，所以濕潤曲線實驗的滲流量量測是不容易而且不若排出曲線來得準確，要到張力回到很小時，才可以量測到滲流量，但中間所量得之數據多是呈現不穩定的跳動現象。

觀察四條曲線的差異，發現造成曲線不同的一個原因是因為起始點的體積含水比並不一樣(實驗值不同，輸入值不同)；壓力儀的保持曲線

中，渥太華砂與現地土樣的飽和體積含水比較滲透儀的飽和體積含水比要來的高些，起點不一樣造成保持曲線不相同。探究原因，應當是壓力儀試體較小，在進行飽和時飽和度會比較容易達到飽和；而滲透儀試體較大，飽和度相對就比較低，再加上滲透儀實驗中，空氣無法由陶瓷片中通過，不像壓力儀空氣可以由上方開孔排出，所以飽和度無法與壓力儀試體一樣高。若能將滲透儀飽和度提高，則實驗結果應該會更接近。

表 4.5~11 中為同一張力值下各個 K 值之比較：

由表 4.5 排出曲線的資料中，可以發現 RETC 預測的 K_2 和 K_3 和實驗值 K_1 相當接近； K_2 在 10cm 和 20cm 的張力階段之下，分別是實驗值 K_1 的 0.92 倍及 0.39 倍，張力再加大後，差距則隨之變大； K_3 在 10cm、20cm、30cm、50cm 的張力階段中，分別是實驗值 K_1 的 1.03、1.01、0.99、0.66 倍。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 的濕潤曲線中，由於濕潤曲線階段時，難以量測出實驗值 K_1 ，因此僅列出預測所得之 K_2 、 K_3 的數值供參考。

表 4.6 可發現，排出曲線中，由 RETC 估算的 K_2 和 K_3 值和實驗值亦相當接近：在 10cm、20cm、30cm、55cm 的張力階段中， K_2 是實驗值 K_1 的 1.17、1.64、1.99、1.76 倍； K_3 是實驗值 K_1 的 1.05、0.78、0.61、0.66 倍。至於濕潤曲線，則由於 RETC 預測出的 K 值甚小，和實驗值 K_1 相比較之下差異極大，應是試體在回吸階段時，飽和度並不好控制，及回吸量可能太小，以致實驗值的量測頗困難且不太準確。

表 4.7 中發現，在排出曲線中，RETC 預測的 K_2 和 K_3 值均不如 K_4 來的接近(最低是實驗值 K_1 的 0.1 倍、0.26 倍；最高是 1.29 倍)，但由於點數可能過少，較不具參考價值。濕潤曲線的資料中，由於只能在最後張力恢復為零時量測到實驗值，因此最後的經驗式估算值會等於實驗值，此組比較可能較不具意義。

表 4.8 中的排出曲線，發現 RETC 預測後的 K_3 與實驗值的差異性最小(從 1.28 倍到 2.71 倍)；而 K_2 和 K_4 與實驗值 K_1 的差異性則常常超過 10 倍以上。濕潤曲線中，則同樣由於量測不易，且比較的點數較不足，因此參考性較低。

表 4.9 中排出曲線中，RETC 預測的 K_3 值和實驗值的差距很小(三個點中，分別是實驗值的 0.84、1.53、0.95 倍)，較 K_2 、 K_4 接近實驗值許多。濕潤曲線則由於實驗尚未完成，故無資料可比較。

表 4.10 中，濕潤曲線試驗尚未完成，排出曲線可看出實驗值要較 RETC 估算之 K_2 、 K_3 、 K_4 值要來的低(K_2 、 K_3 、 K_4 常常是實驗值的 3 到 12 倍之間)，可能由於庚烷揮發性較大，導致較容易低估了實驗值，若能使用抗揮發性更好的管線，對於得到更正確的試驗結果必大有幫助。

表 4.11 排出曲線中，由 RETC 預測 K_2 和 K_3 雖然較實驗值來的大(約為實驗值的 1.43 到 3.87 倍)，還是和實驗值相當接近，仍屬可接受的參考範圍。

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 RETC 程式的預測值 K_2 和 K_3 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。表中所選用的張力值是配合不同的流體對，採取其試驗範圍中合適的張力值來比較討論。

而當張力較大時，會有兩種情形發生，一是實驗沒有讀數；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^{-7} 次方這個數量級，再小的話，一方面因為液體滲流太慢，讀取到的量管水面變化本身就不大了，加上有機液體易從管線中揮發，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 4.12~18 則為同一含水比各排出曲線 K 值之比較：

表 4.12 中可看出，以 RETC 程式預測的 K_3 (為實驗值的 0.56、0.28 倍) 較接近實驗值，而 K_2 則為實驗值的 0.30、0.17 倍，以 K_3 的預測值和實驗值較接近。

表 4.13 中，則是預測值 K_2 較 K_3 接近實驗值； K_2 在兩個張力階段中，分別是實驗值 K_1 的 2.24 及 0.82 倍， K_3 則是實驗值的 0.23、0.12 倍。

表 4.14 中，預測值 K_4 較接近實驗值(兩個張力階段中，為實驗值的 0.76、0.52 倍)， K_2 和 K_3 則是實驗值的 0.06 至 0.72 倍之間，變動頗大。不過整體看來，由比例原則推估的保持曲線資料再經由 RETC 程式預測的 K_4 值，大都較其他的預測值不具參考性。

表 4.15 中，預測出來的 K 值似乎和實驗值不甚符合(從實驗值的 0.01 倍到飽和度較高時的 1.46 倍)，可能在試體設置及實驗過程中要更加注意有機液體揮發情況或初始、最終飽和度的檢查。

表 4.16 中， K_2 在兩個張力階段中，為實驗值的 0.52、0.28 倍， K_4 則為實驗值的 0.49、0.35 倍，不致偏離實驗值太大。

表 4.17 中， K_2 較 K_3 、 K_4 接近實驗值(K_2 在三個張力階段中的值為實驗值的 6.60、3.79、1.88 倍， K_3 、 K_4 則為實驗值的 4.81 到 11.42 倍)。庚烷的揮發能力強，改善設備後應該能得到更準確的實驗值。

表 4.18 中，點數較不足，但 K_2 和 K_3 都很接近實驗值(K_2 在兩個張力階段中的值為實驗值的 1.44、1.45 倍， K_3 則為實驗值的 0.97、1.66 倍)。

從表中發現如果在同一個體積含水比(張力不同)的情形之下，則 RETC 程式預測所得的值常為實驗值的 0.3 倍至 2 倍之間，同一個體積含水比之下，各經驗公式所預測的值與實驗值差異都不大。

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。

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，而且水在低張力的時候便幾乎被排出，當張力大於 80-100 mbar 時其體積含水比就幾乎沒有什麼變化（圖 4.9），相對於顆粒較小的土壤來說，在張力超過 100 mbar 時其體積含水比仍陸續會減少，一直要到張力超過 500 mbar 時才幾乎沒有改變。由於用 RETC 程式求取滲透係數所依據的便是所提供的保持曲線資料，所以若保持曲線有差異，則預測的滲透係數值也會有所差異。RETC 程式所推得的保持曲線均為平滑的曲線，跟實驗值雖然十分接近但卻不會完全重合，

整體而言，由表 4.12~18 的分析比較中可發現，以 RETC 預測水之滲透係數，在相同的含水比為基礎下，以滲透儀保持曲線資料和壓力儀保持曲線資料代入程式所獲得的結果 (K_2 、 K_3 值) 較為準確，而比例原則推得之保持曲線所得結果差異較大些。在同一個體積含水比之下，其所得之預測值多為實驗值之 0.3 至 3 倍，就大地工程上的應用來說，仍是可以接受的參考範圍。

表 4.5 Ottawa Sand 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			經驗公式 K_3		
		θ (%)	K(cm/s)	θ (%)	K(cm/s)	K_2/K_1	θ (%)	K(cm/s)	K_3/K_1
	10	42.98	4.05E-06	43.95	3.71E-06	0.92	40.13	4.17E-06	1.03
	20	35.48	3.78E-06	37.27	1.47E-06	0.39	39.75	3.82E-06	1.01
	30	30.17	3.40E-06	25.82	2.12E-07	0.06	39.13	3.37E-06	0.99
	50	13.18	3.28E-06	14.37	2.39E-09	0.0007	36.15	2.18E-06	0.66
	70	10.55	—	12.46	2.63E-10	—	26.78	5.61E-7	—

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETIC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETIC預測之值)



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	
		θ (%)	K(cm/s)	θ (%)	K(cm/s)	θ (%)	K(cm/s)
	60	11.66	—	12.27	2.73E-11	4.92	1.28E-08
	50	12.23	—	13.11	6.35E-10	5.12	2.43E-08
	30	14.47	—	14.22	5.55E-09	5.66	1.04E-07
	20	15.67	—	16.17	5.41E-08	6.33	4.45E-07
	10	18.64	—	18.6	3.69E-07	6.88	1.53E-06

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETIC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETIC預測之值)

表 4.6 Local Sand 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			經驗公式 K_3		
		$\theta(\%)$	$K(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$K(\text{cm/s})$	K_2/K_1	$\theta(\%)$	$K(\text{cm/s})$	K_3/K_1
	10	40.57	2.80E-06	40.37	3.27E-06	1.17	49.29	2.95E-06	1.05
	20	40.6	2.06E-06	40.42	3.38E-06	1.64	48.24	1.61E-06	0.78
	30	40.35	1.75E-06	40.47	3.49E-06	1.99	46.66	1.06E-06	0.61
	55	37.81	6.25E-07	38.01	1.10E-06	1.76	42.64	4.15E-07	0.66
	75	32.89	7.02E-07	33.44	3.07E-09	0.0043	37.55	1.34E-07	0.19

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)



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		
		$\theta(\%)$	$K(\text{cm/s})$	$\theta(\%)$	$K(\text{cm/s})$	K_2/K_1	$\theta(\%)$	$K(\text{cm/s})$	K_3/K_1
	65	33.18	9.32E-07	33.62	3.69E-10	0.0004	15.31	1.23E-09	0.0013
	55	34.92	4.10E-07	33.55	1.85E-10	0.0004	15.45	1.61E-09	0.0039
	45	35.25	1.00E-06	33.68	6.76E-10	0.0006	15.52	1.97E-09	0.0019
	30	34.16	—	33.89	2.93E-09	—	16.33	1.04E-08	—
	10	34.92	—	34.87	1.82E-07	—	17.15	8.32E-08	—

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

表 4.7 Ottawa Sand 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			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	36.38	3.19E-06	38.37	4.11E-06	1.29	39.09	1.19E-06	0.37	38.43	4.11E-06	1.29
	20	27.03	1.60E-06	25.02	1.64E-07	0.10	34.37	4.19E-07	0.26	26.51	7.33E-07	0.46
	30	16.68	9.86E-07	19.29	4.29E-09	0.0044	28.51	1.06E-07	0.11	16.52	9.64E-08	0.10

註：K₂(滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₃(壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₄(壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)



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
	20	17.70	8.08E-07	18.29	5.73E-10	0.0007	9.70	5.22E-09	0.0065	4.95	3.09E-10	0.0004
	10	19.96	—	20.01	9.01E-08	—	11.17	3.79E-08	—	6.65	7.19E-09	—
	1	22.9	2.71E-06	22.9	2.71E-06	1.00	13.82	2.71E-06	1.00	13.64	2.71E-06	1.00

註：K₂(滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₃(壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₄(壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)

表 4.8 Local Sand 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			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
	20	41.70	3.32E-06	43.71	2.33E-06	0.70	41.15	4.26E-06	1.28	40.83	3.74E-07	0.11
	30	34.13*	2.08E-06	25.45	2.39E-07	0.11	40.42	3.02E-06	1.45	33.10	6.08E-08	0.03
	40	29.22	1.06E-06	12.85	5.14E-09	0.0049	39.34	2.34E-06	2.21	32.39	5.14E-08	0.05
	50	14.78	7.11E-07	12.00	3.38E-09	0.0048	38.23	1.93E-06	2.71	28.83	1.79E-08	0.03
	60	8.95	5.33E-07	10.09	4.68E-10	0.0009	37.17	1.53E-06	2.87	28.61	1.69E-08	0.03

註：K₂(滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₃(壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₄(壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)



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
	50	10.37	—	11.74	1.89E-10	—	5.18	1.81E-11	—	14.34	8.92E-11	—
	30	12.59	—	12.77	1.66E-09	—	5.76	4.60E-11	—	14.75	1.51E-10	—
	10	16.82	7.77E-07	16.80	1.07E-07	0.14	10.21	6.18E-09	0.01	15.85	4.07E-09	0.01

註：K₂(滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₃(壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₄(壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)

表 4.9 Ottawa Sand 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			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
曲線	5	32.54	5.08E-06	36.23	7.10E-06	1.40	40.84	4.26E-06	0.84	40.03	5.58E-06	1.10
	15	29.89	4.29E-06	27.14	3.51E-07	0.08	41.38	6.57E-06	1.53	32.66	1.84E-06	0.43
	20	24.32	2.69E-06	23.31	3.56E-08	0.01	39.88	2.56E-06	0.95	26.51	7.33E-07	0.27
	25	19.48	—	21.46	4.50E-09	—	40.36	3.06E-06	—	20.1	2.23E-07	—

註：K₂(滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₃(壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₄(壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)



表 4.10 Ottawa Sand 庚烷對空氣 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			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
曲線	10	41.76	9.67E-07	42.65	6.91E-06	7.15	39.24	7.10E-06	7.34	40.36	7.09E-06	7.33
	20	39.76	5.44E-07	41.38	5.38E-06	9.89	38.91	6.66E-06	12.24	36.03	3.47E-06	6.38
	25	36.50	4.78E-07	37.04	2.33E-06	4.87	38.01	5.71E-06	5.232	30.22	1.53E-06	3.20
	30	33.34	4.68E-07	31.18	5.29E-07	1.13	37.07	4.97E-06	10.62	24.27	5.93E-07	1.27
	50	21.82	—	22.50	3.31E-10	—	24.83	5.63E-06	—	12.14	2.79E-08	—

註：K₂(滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₃(壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₄(壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)

表 4.11 Local Sand 庚烷對空氣 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			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	53.86	3.52E-06	53.95	5.02E-06	1.43	57.60	5.02E-06	1.43	45.82	1.19E-06	0.34	
20	53.39	1.58E-06	53.78	4.87E-06	3.08	57.21	4.77E-06	3.02	41.71	4.72E-07	0.30	
30	51.16	1.23E-06	53.61	4.70E-06	3.82	56.82	4.52E-06	3.67	37.47	1.85E-07	0.15	
40	48.74	—	51.09	3.02E-06	—	53.74	3.27E-06	—	36.70	1.55E-07	—	
60	33.93	—	37.28	2.94E-08	—	40.87	8.21E-07	—	29.09	2.06E-08	—	

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_4 (壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)



表 4.12 Ottawa Sand 水對空氣 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	
		K(cm/s)	K(cm/s)	K_2/K_1	K(cm/s)	K_3/K_1
線	35	3.78E-06	1.12E-06	0.30	2.12E-06	0.56
	30	3.40E-06	5.87E-07	0.17	9.42E-07	0.28
	13	3.28E-06	1.79E-09	0.0006	2.07E-08	0.01

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)



表 4.13 Local Sand 水對空氣 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	
		K(cm/s)	K(cm/s)	K_2/K_1	K(cm/s)	K_3/K_1
線	40	1.16E-06	2.60E-06	2.24	2.66E-07	0.23
	37	6.70E-07	5.52E-07	0.82	7.80E-08	0.12
	33	6.98E-07	2.67E-11	0.00004	4.38E-08	0.06

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

表 4.14 Ottawa Sand 汽油對空氣 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	36	3.19E-06	2.29E-06	0.72	5.86E-07	0.18	2.44E-06	0.76
	27	1.60E-06	2.27E-07	0.14	9.30E-08	0.06	8.33E-07	0.52
	17	9.87E-07	6.88E-12	0.00001	2.51E-09	0.0025	1.04E-07	0.11

註：K₂(滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₃(壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₄(壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)



表 4.15 Local Sand 汽油對空氣 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	43	3.32E-06	1.99E-06	0.60	4.86E-06	1.46	6.01E-07	0.18
	28	2.08E-06	3.89E-07	0.19	2.39E-07	0.11	1.16E-08	0.01
	13	1.06E-06	1.44E-08	0.01	6.34E-09	0.01	1.37E-14	0

註：K₂(滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₃(壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K₄(壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)

表 4.16 Ottawa Sand 柴油對空氣 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	33	5.08E-06	2.66E-06	0.52	4.43E-07	0.09	2.48E-06	0.49
	30	4.29E-06	1.21E-06	0.28	1.37E-07	0.03	1.52E-06	0.35
	24	2.69E-06	6.68E-08	0.02	2.84E-08	0.01	5.69E-07	0.21

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_4 (壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)



表 4.17 Ottawa Sand 庚烷對空氣 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	42	9.67E-07	6.38E-06	6.60	7.28E-06	7.53	7.28E-06	7.53
	36	4.78E-07	1.81E-06	3.79	5.46E-06	11.42	2.89E-06	6.05
	33	4.68E-07	8.8E-07	1.88	2.25E-06	4.81	2.50E-06	5.34

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_4 (壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)

表 4.18 Local Sand 庚烷對空氣 K 值比較

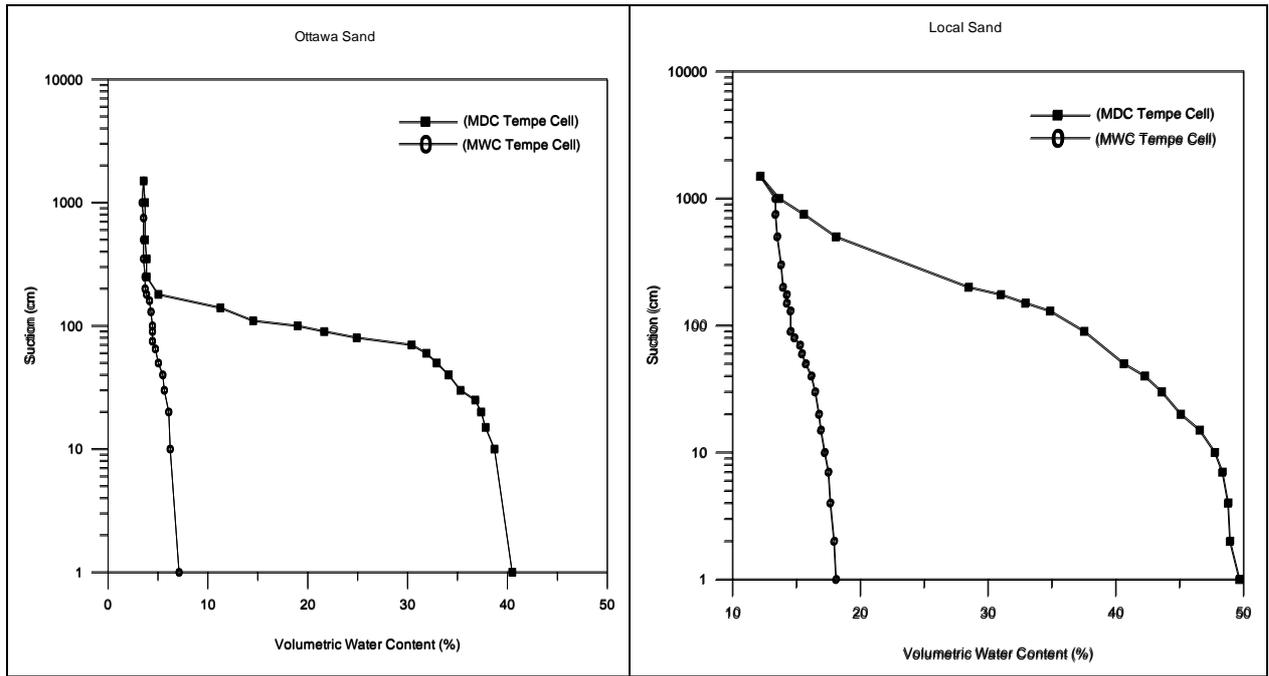
排出曲線	含水比 (%)	滲透實驗 K_1	經驗公式 K_2		經驗公式 K_3		經驗公式 K_4	
		K(cm/s)	K(cm/s)	K_2/K_1	K(cm/s)	K_3/K_1	K(cm/s)	K_4/K_1
	54	3.52E-06	5.07E-06	1.44	3.40E-06	0.97	—	—
	48	1.10E-06	1.59E-06	1.45	1.83E-06	1.66	2.24E-06	2.04

註： K_2 (滲透試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_3 (壓力儀試驗保持曲線資料經由RETC預測之值)

K_4 (壓力儀水-空氣保持曲線資料scaling後經由RETC預測之值)

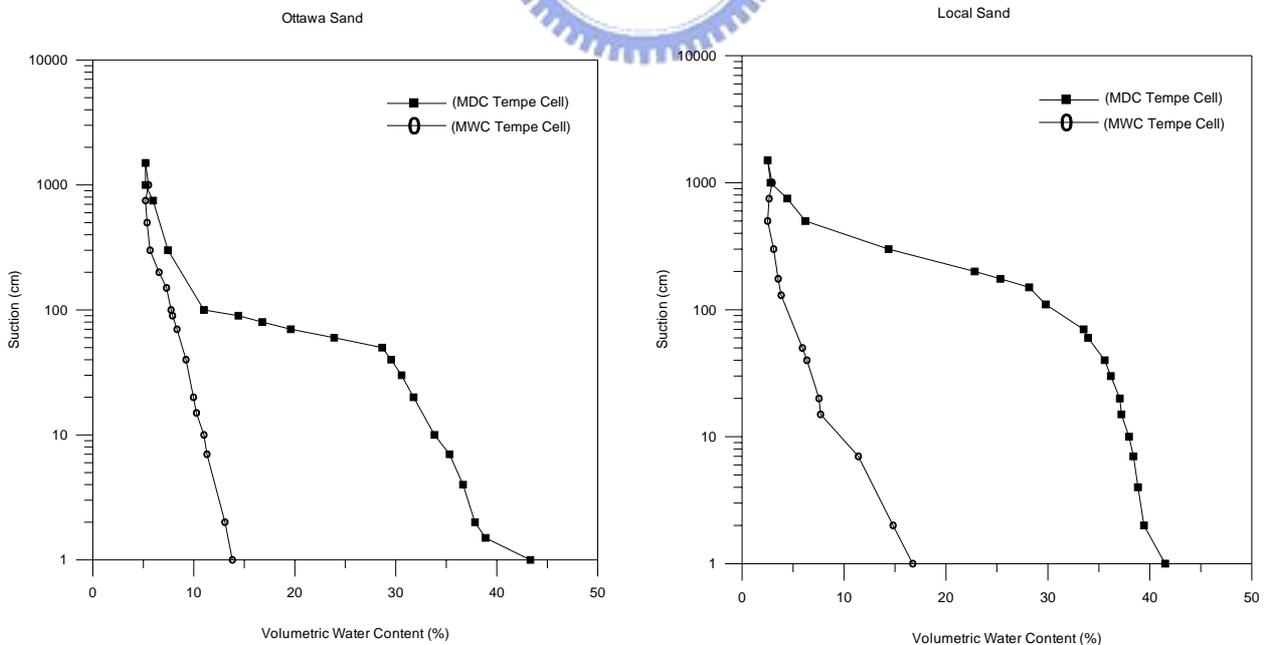
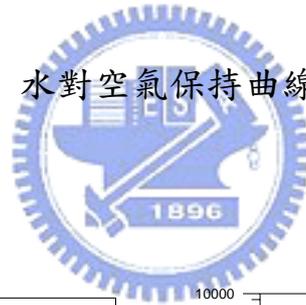




a

b

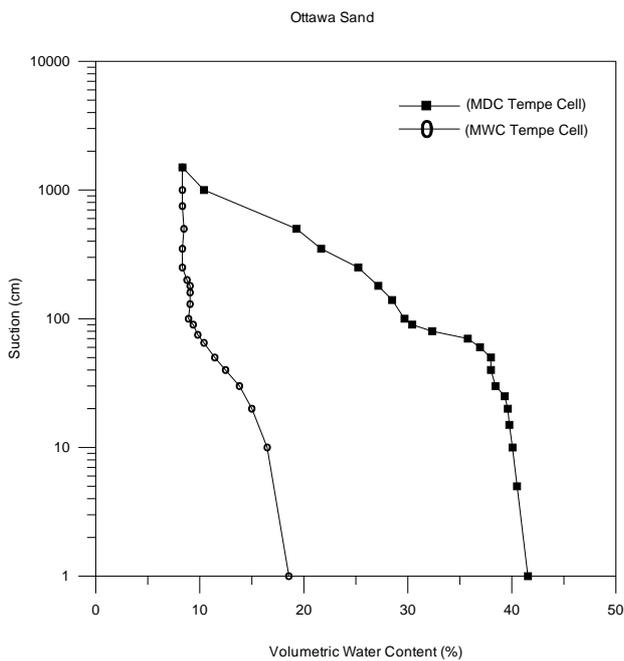
圖 4.1 水對空氣保持曲線(壓力儀)



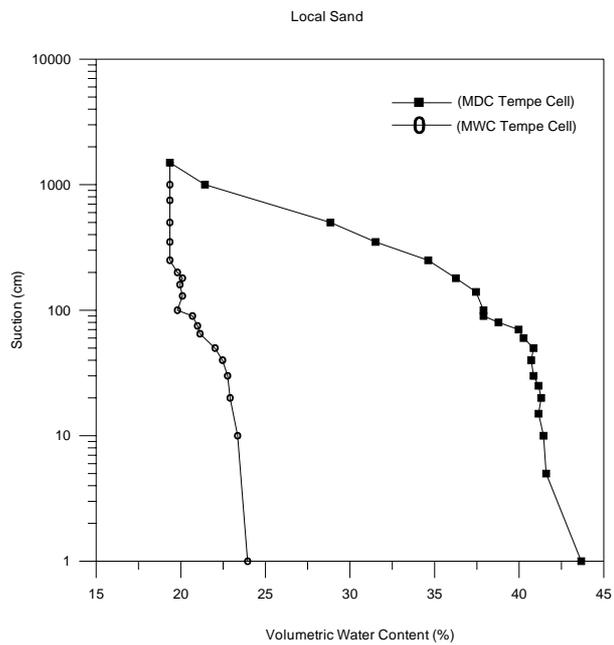
a

b

圖 4.2 汽油對空氣保持曲線(壓力儀)

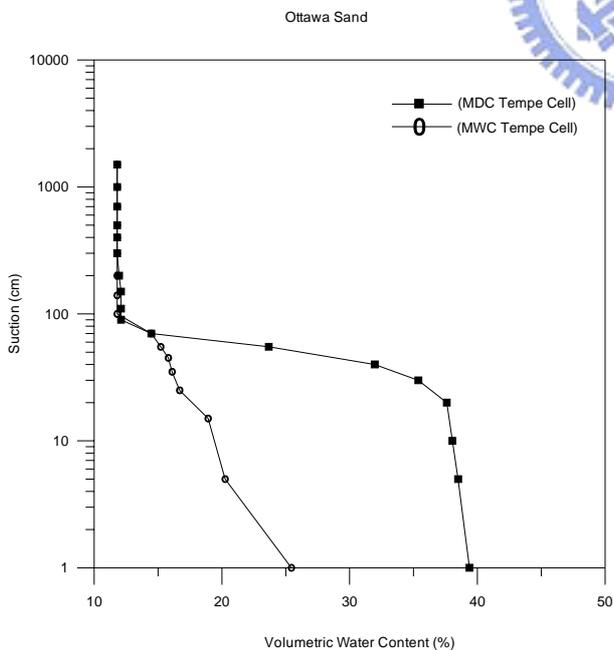


a

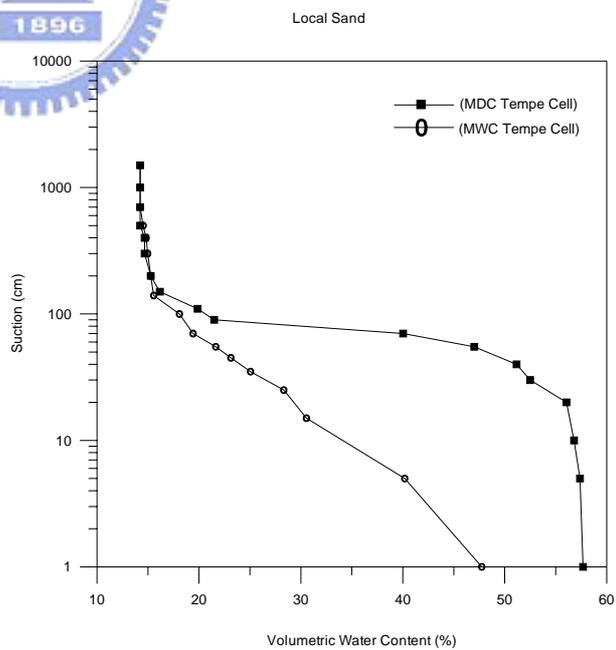


b

圖 4.3 柴油對空氣保持曲線(壓力儀)



a



b

圖 4.4 庚烷對空氣保持曲線(壓力儀)

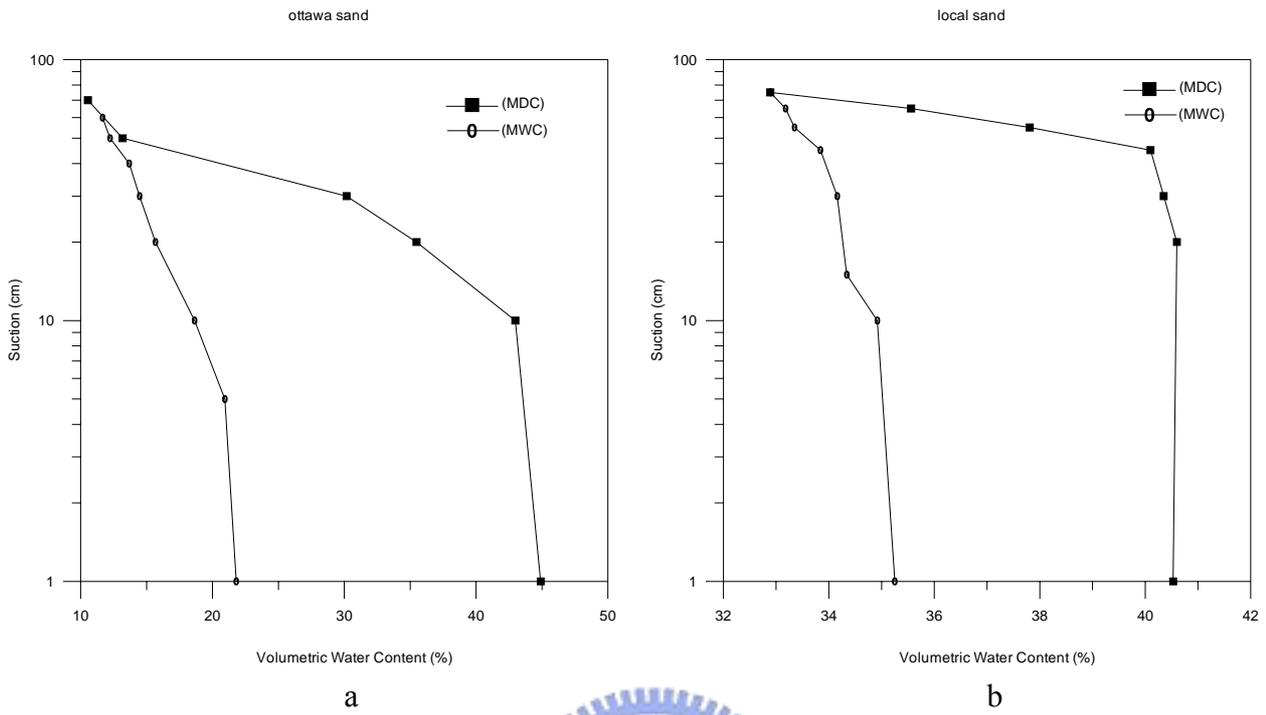


圖 4.5 水對空氣保持曲線(滲透儀)

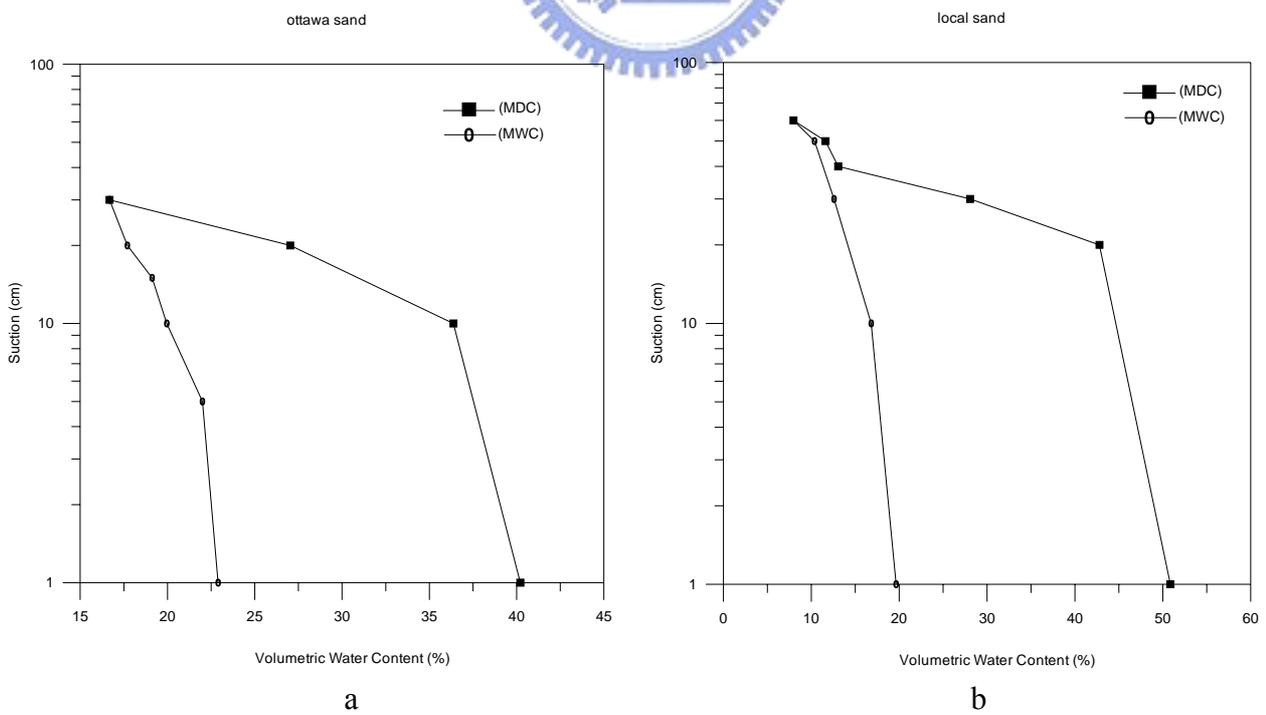
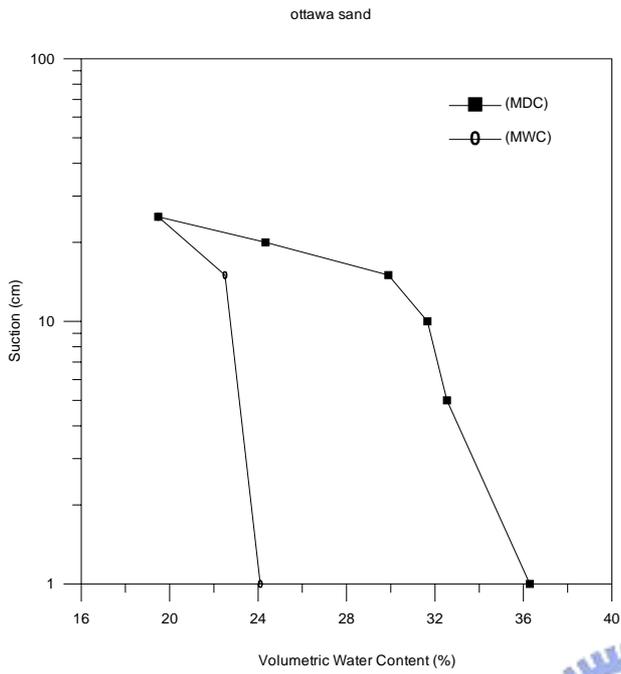
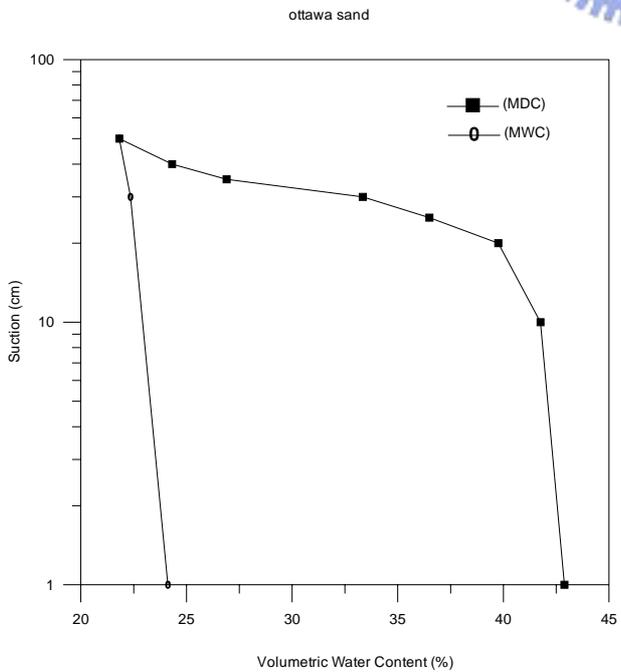


圖 4.6 汽油對空氣保持曲線(滲透儀)

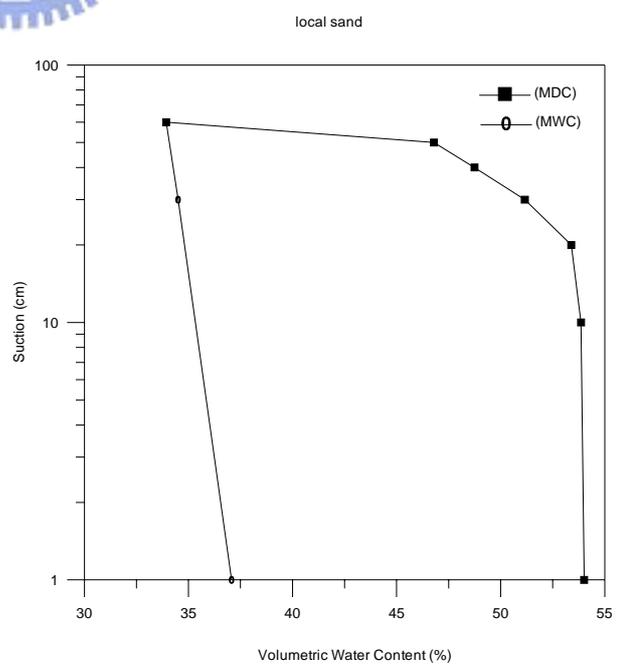


a

圖 4.7 柴油對空氣保持曲線(滲透儀)



a



b

圖 4.8 庚烷對空氣保持曲線(滲透儀)

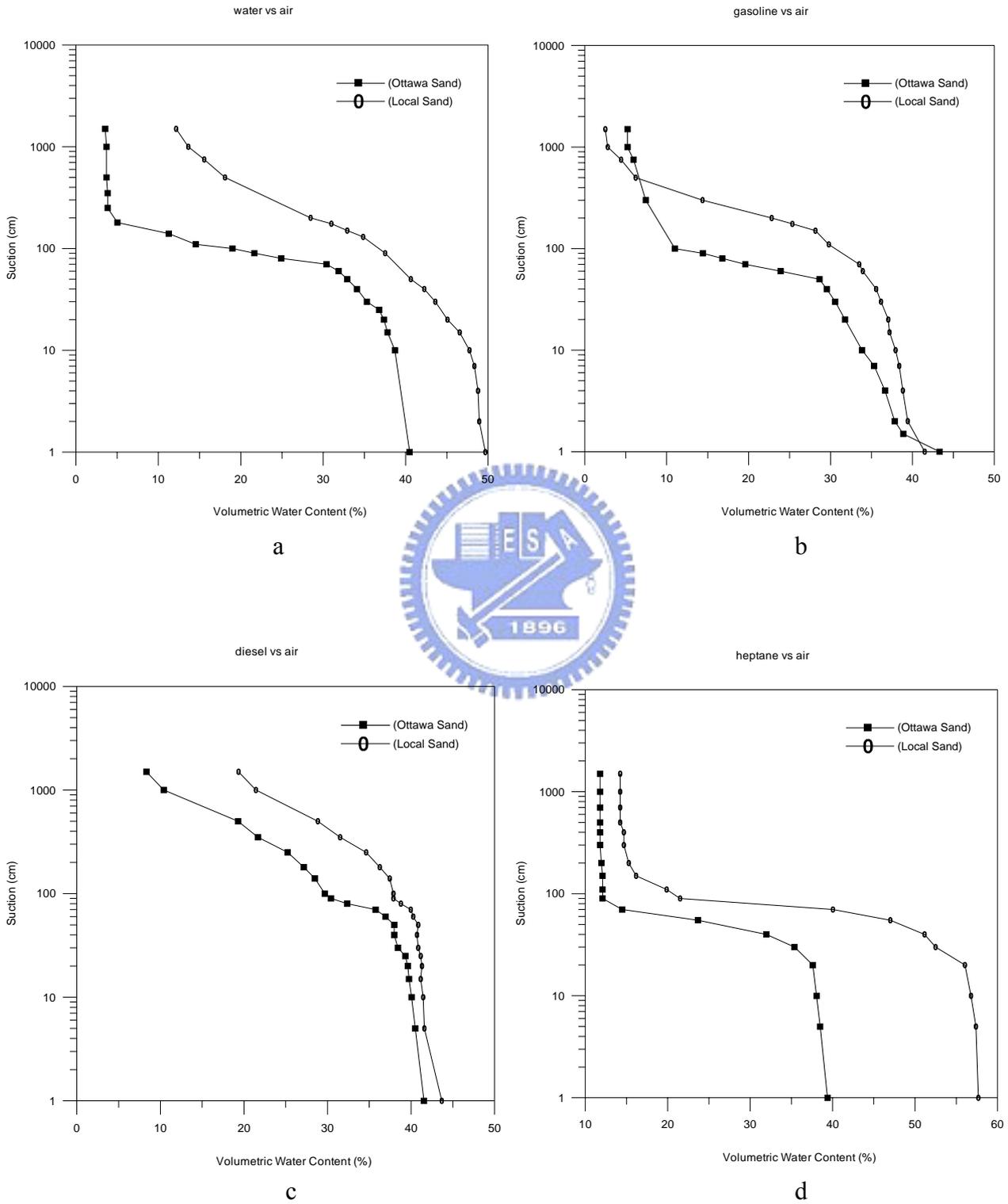
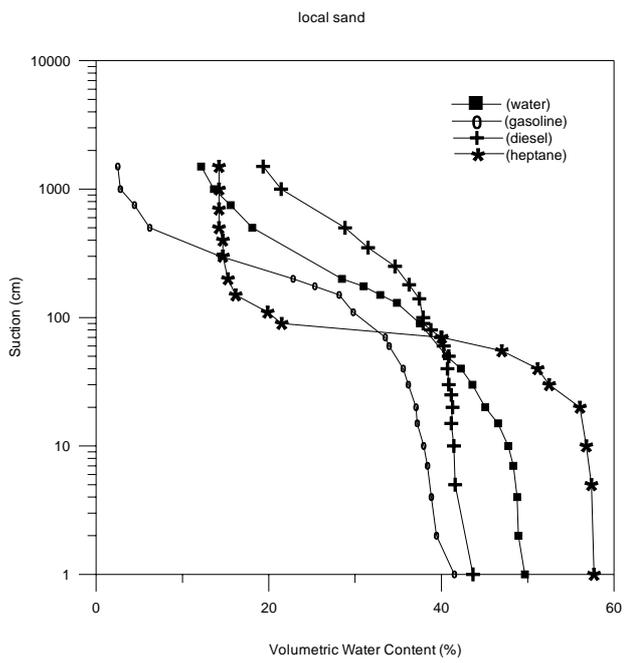
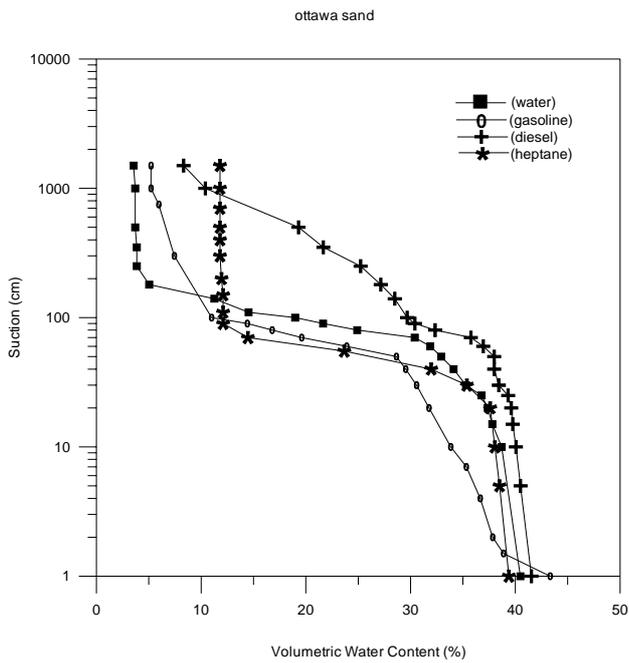


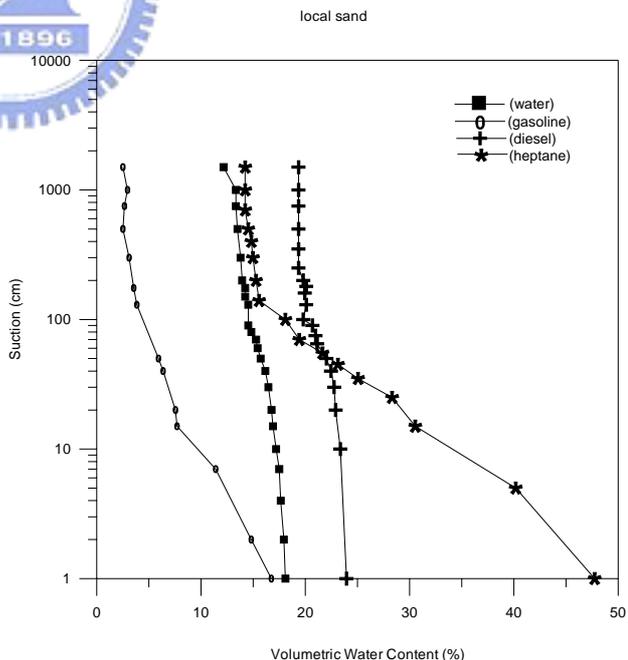
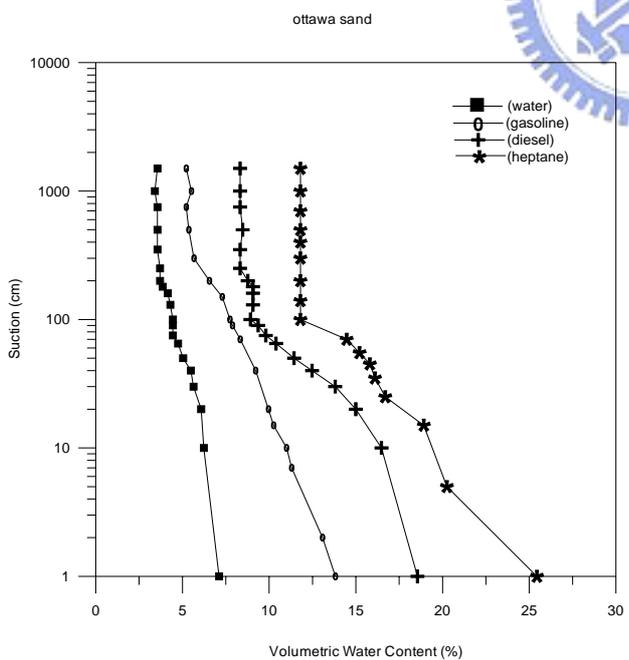
圖 4.9 不同土樣之液體-空氣保持曲線(壓力儀)



a

b

圖 4.10 空氣對液體排出曲線之比較(壓力儀)



a

b

圖 4.11 空氣對液體濕潤曲線之比較(壓力儀)

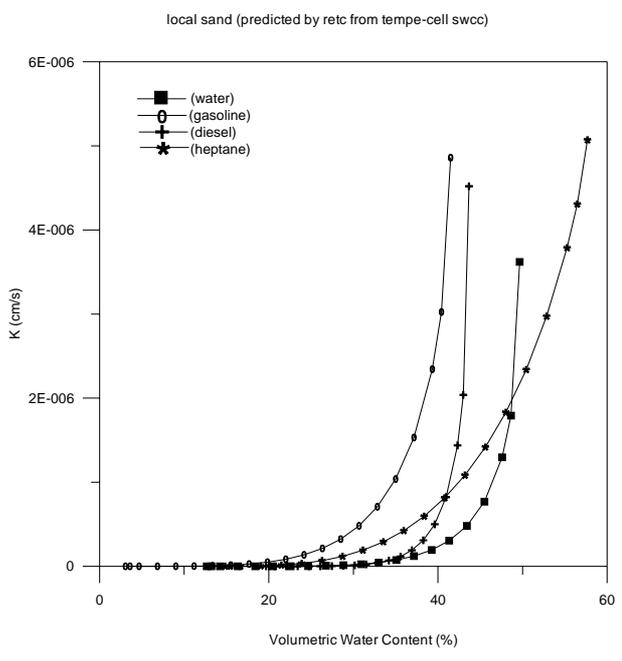
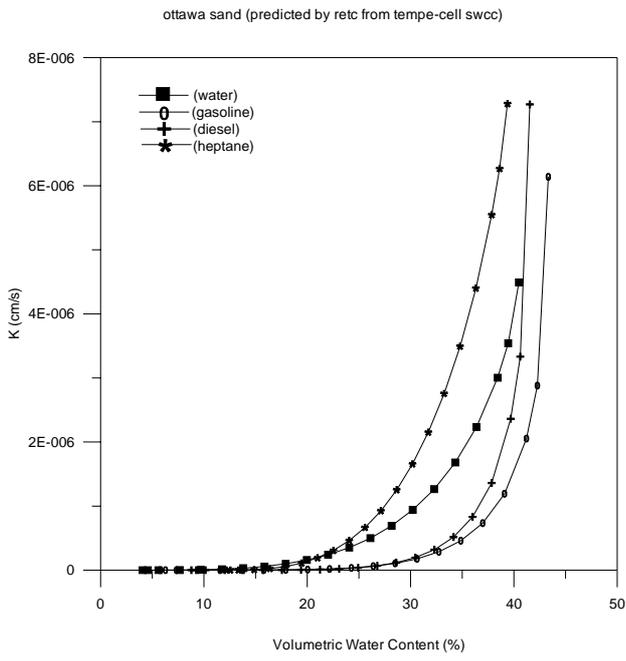


圖 4.12 經驗公式預測之 K 值比較(壓力儀 MDC)

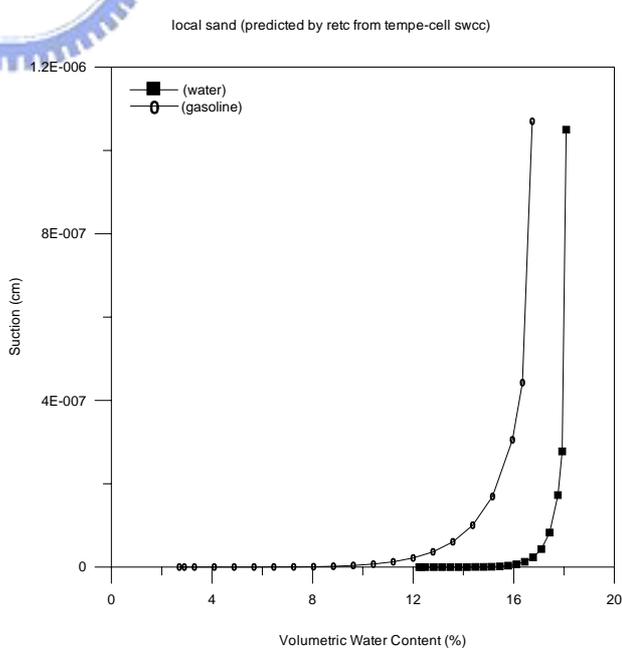
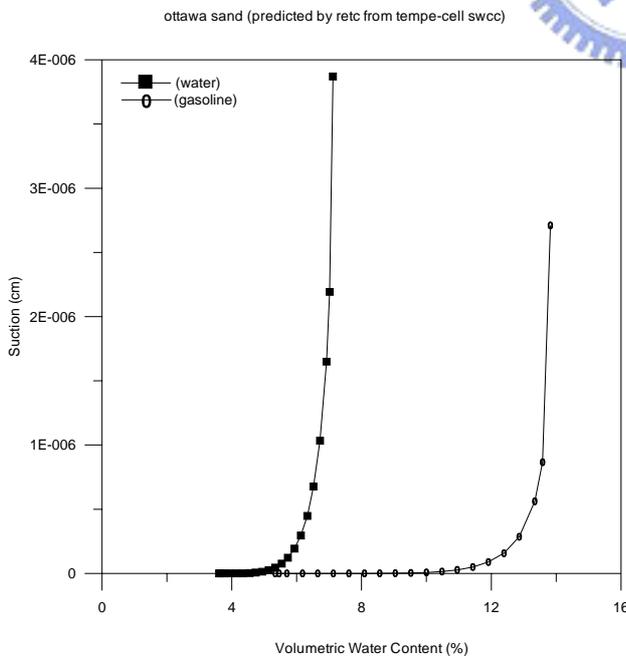
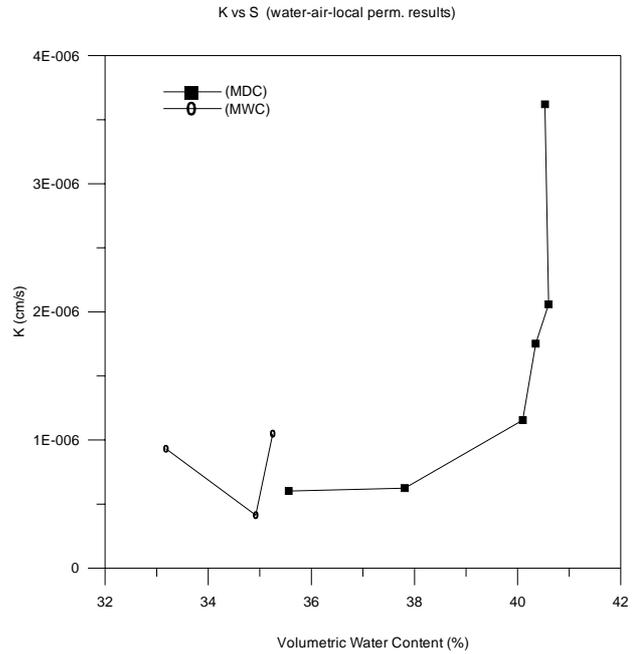
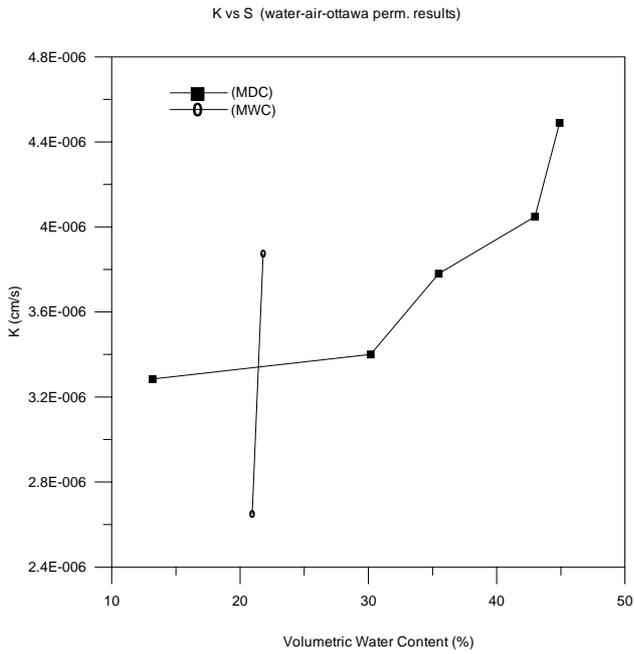


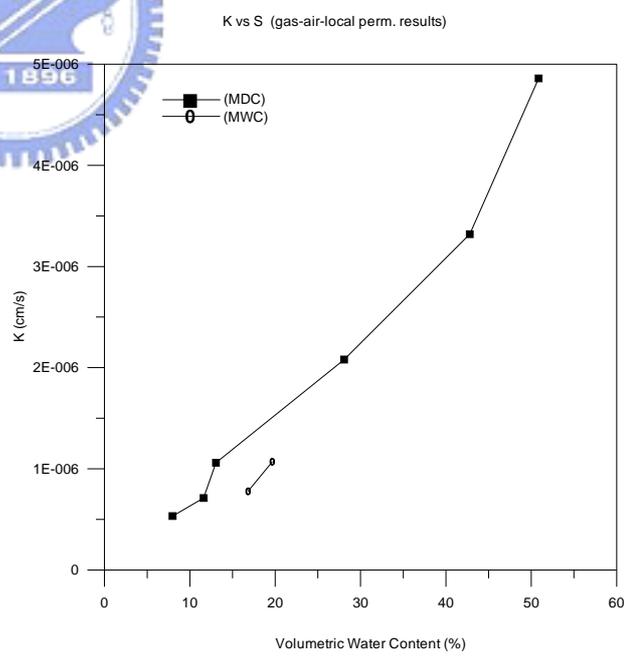
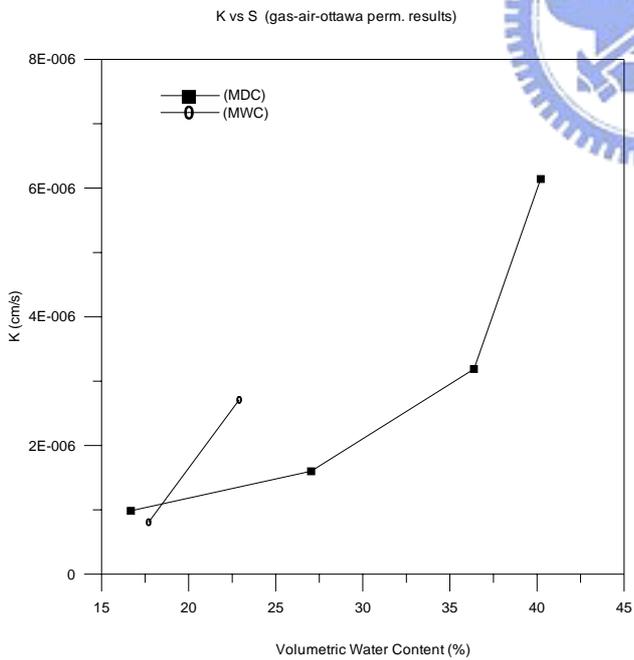
圖 4.13 經驗公式預測之 K 值比較(壓力儀 MWC)



a

b

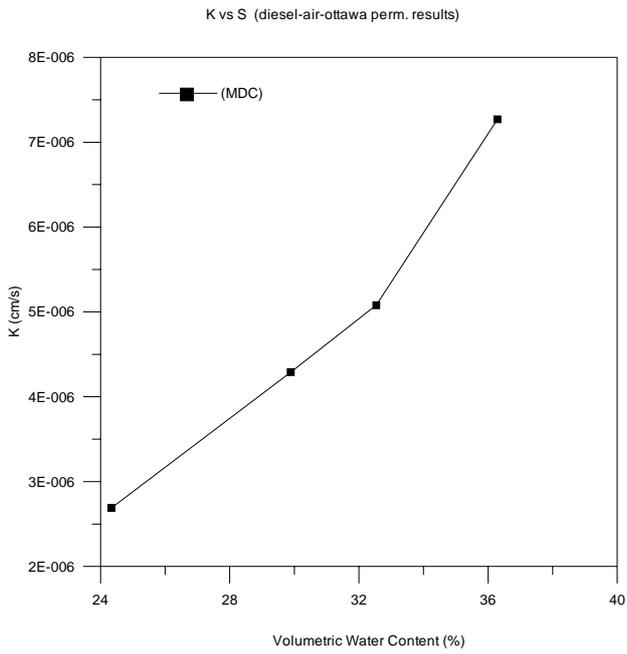
圖 4.14 水對空氣滲透實驗結果(滲透儀)



a

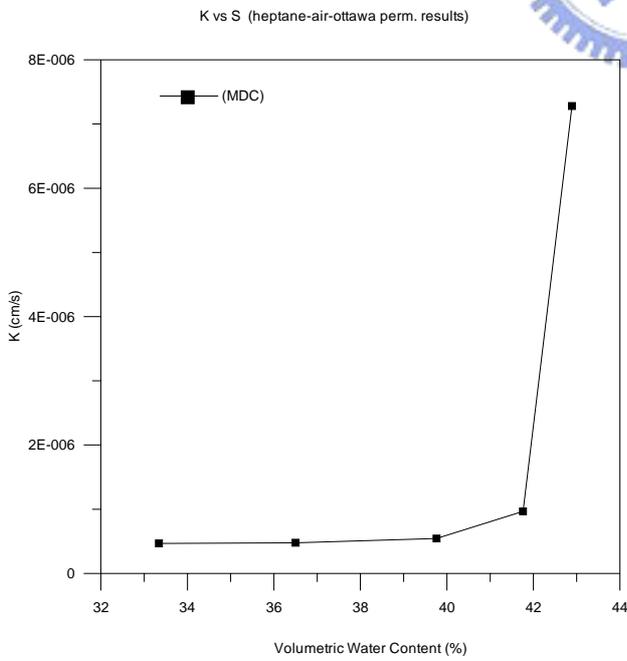
b

圖 4.15 汽油對空氣滲透試驗結果(滲透儀)

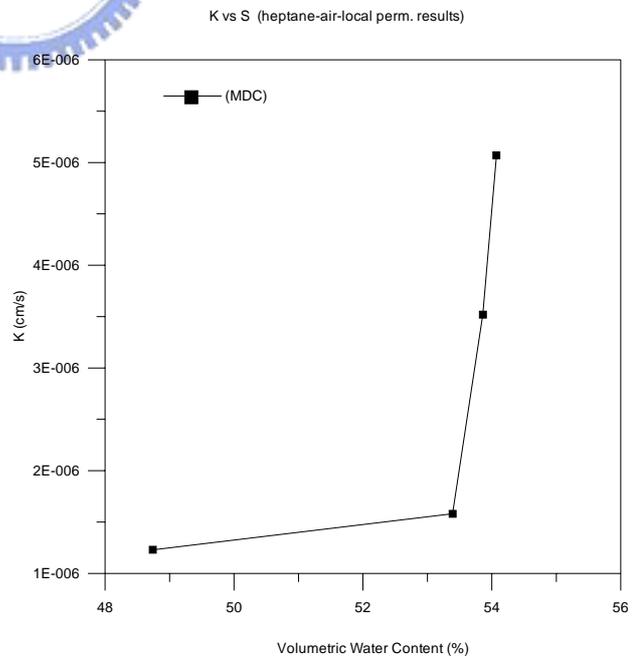


a

圖 4.16 柴油對空氣滲透試驗結果(滲透儀)



a



b

圖 4.17 庚烷對空氣滲透試驗結果(滲透儀)

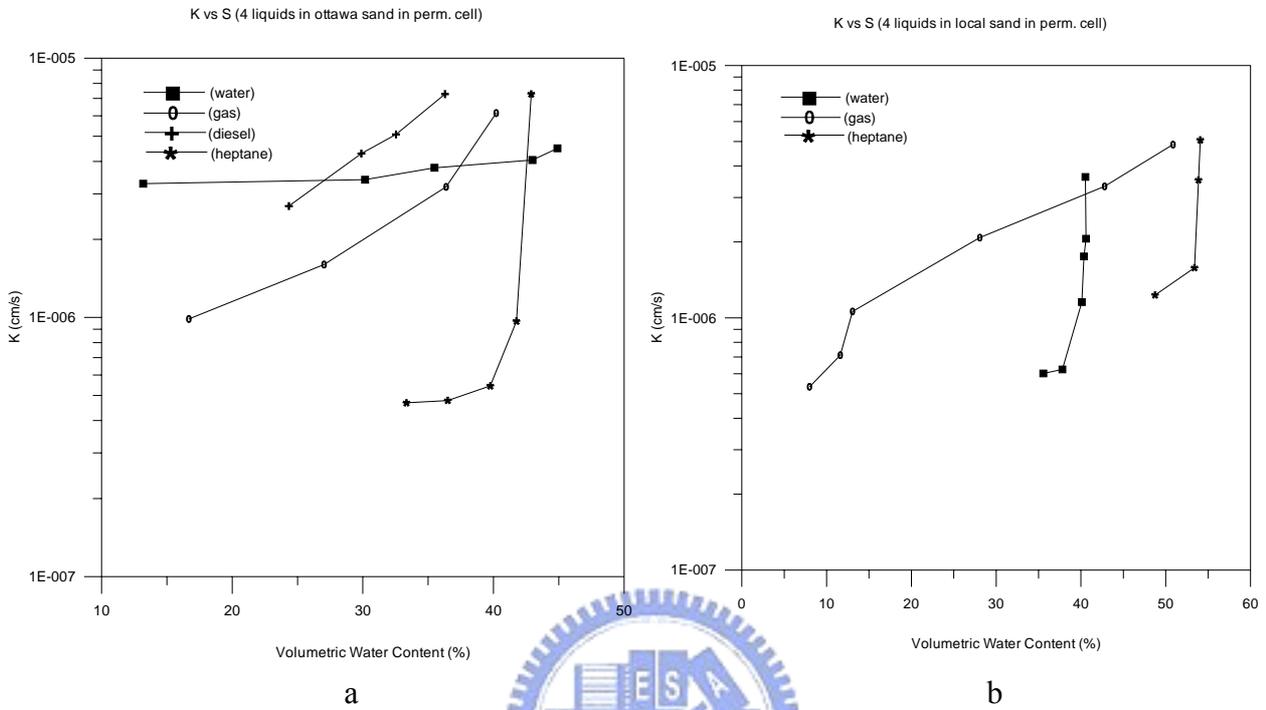


圖 4.18 不同液體滲透實驗值比較(對數座標)

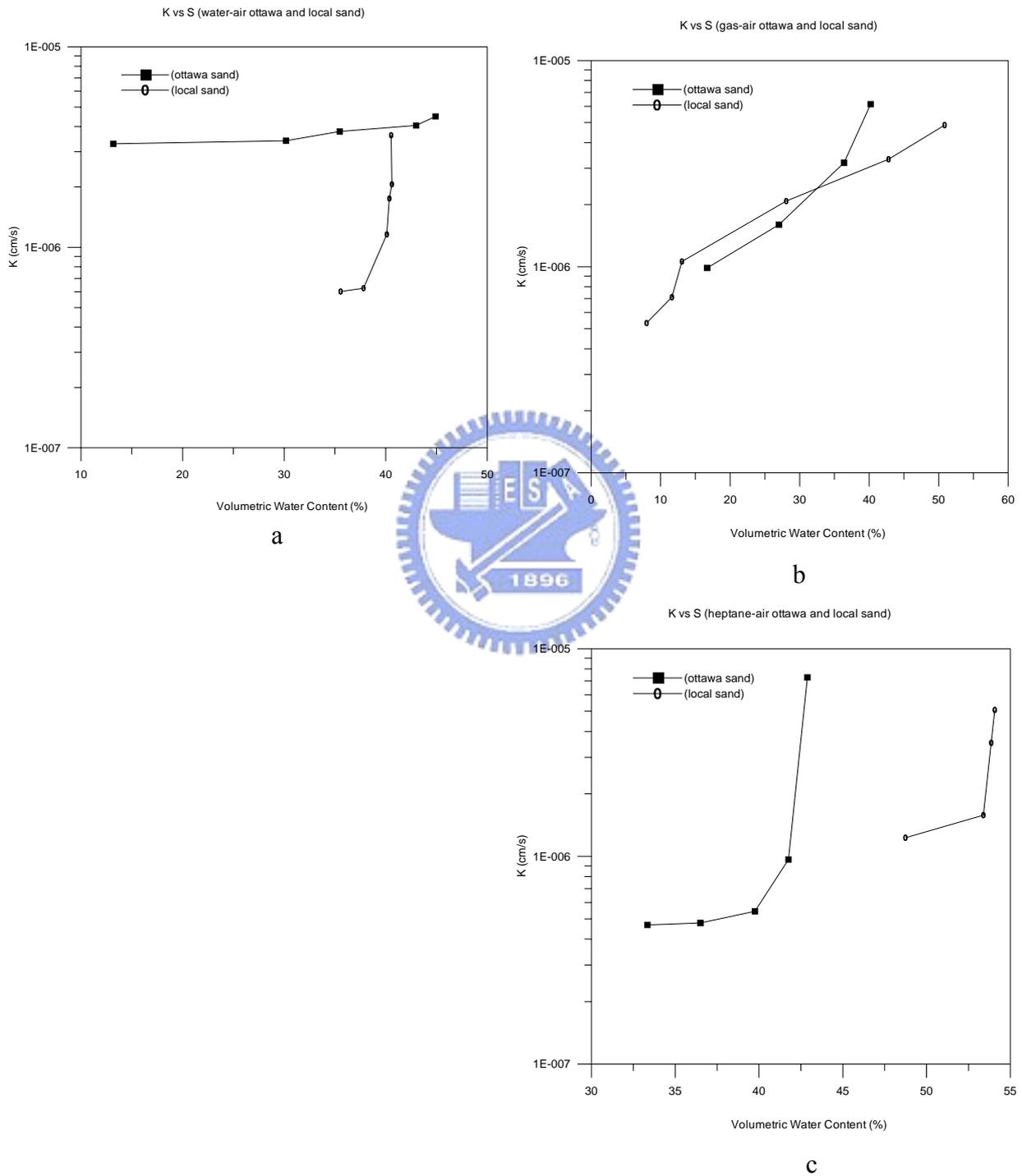
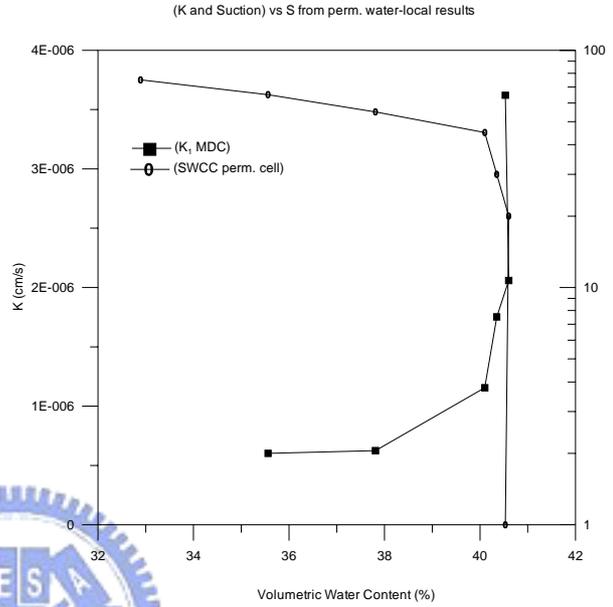
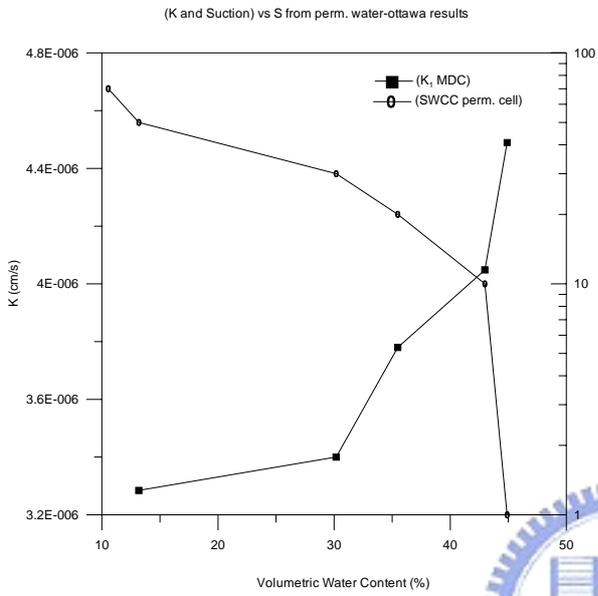


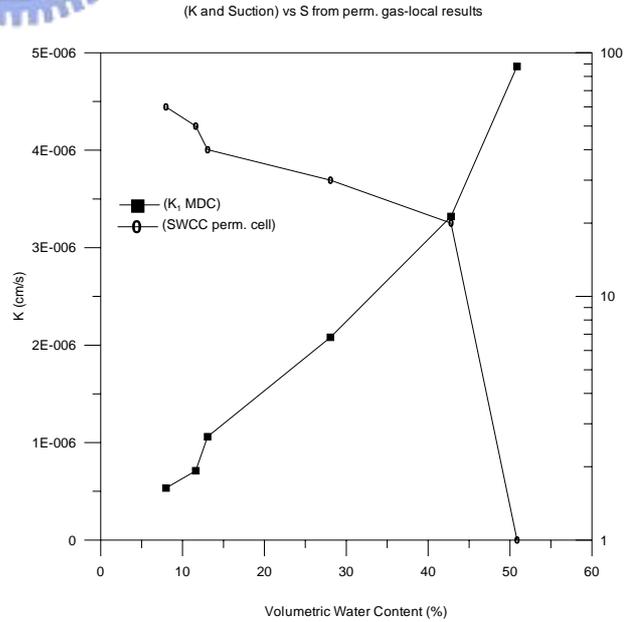
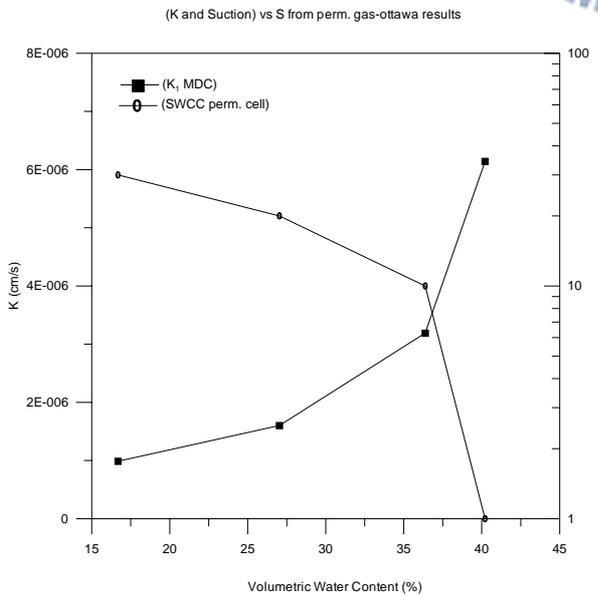
圖 4.19 不同土壤滲透實驗值之比較(對數座標)



a

b

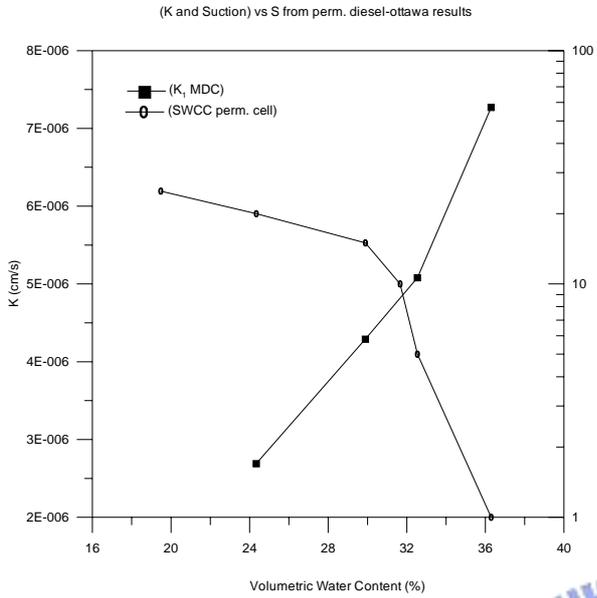
圖 4.20 水對空氣保持曲線與 K 值曲線



a

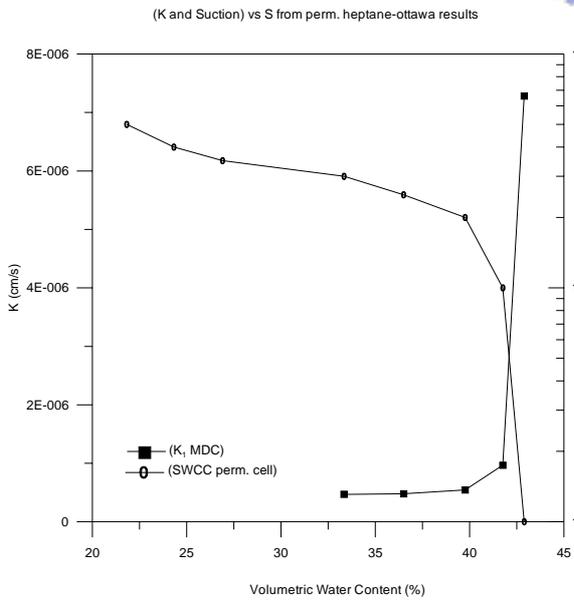
b

圖 4.21 汽油對空氣保持曲線與 K 值曲線

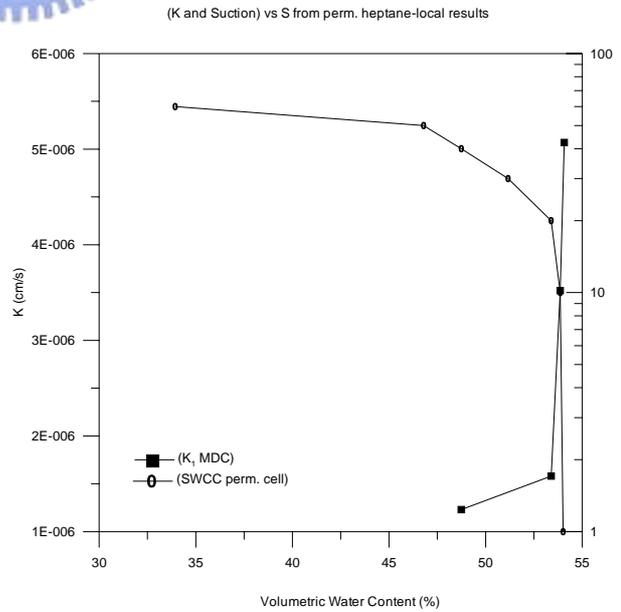


a

圖 4.22 柴油對空氣保持曲線與 K 值曲線

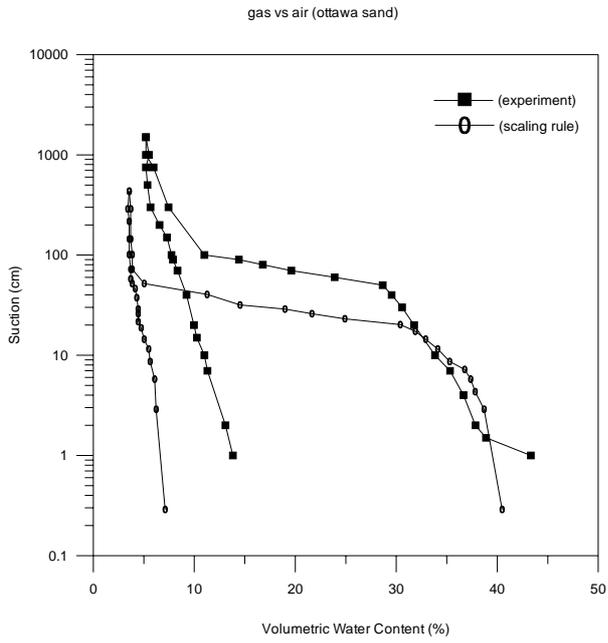


a

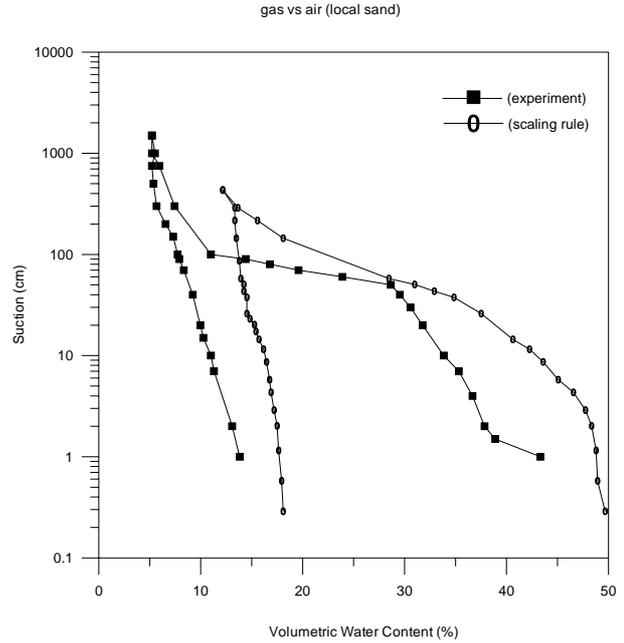


b

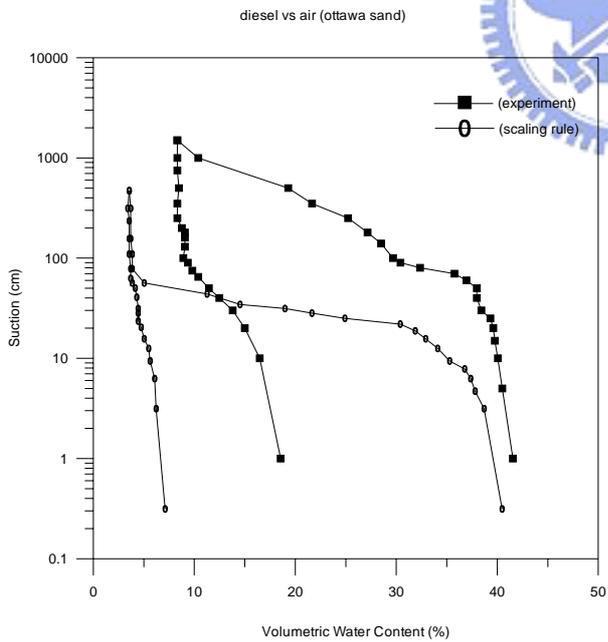
圖 4.23 庚烷對空氣保持曲線與 K 值曲線



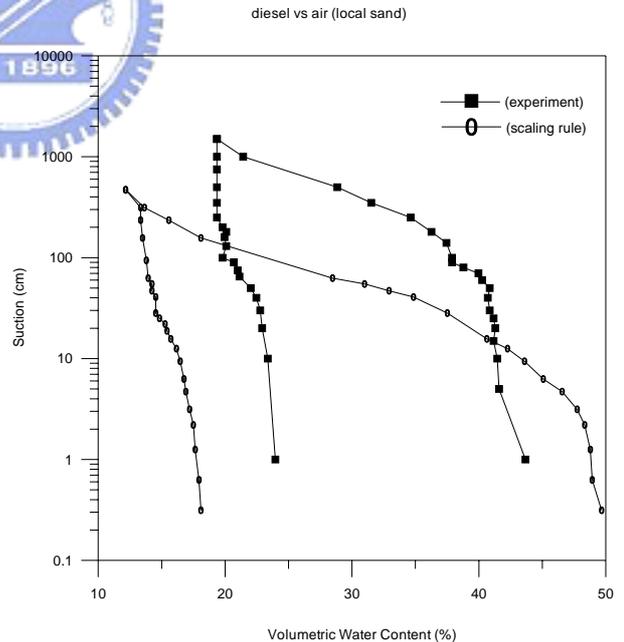
a



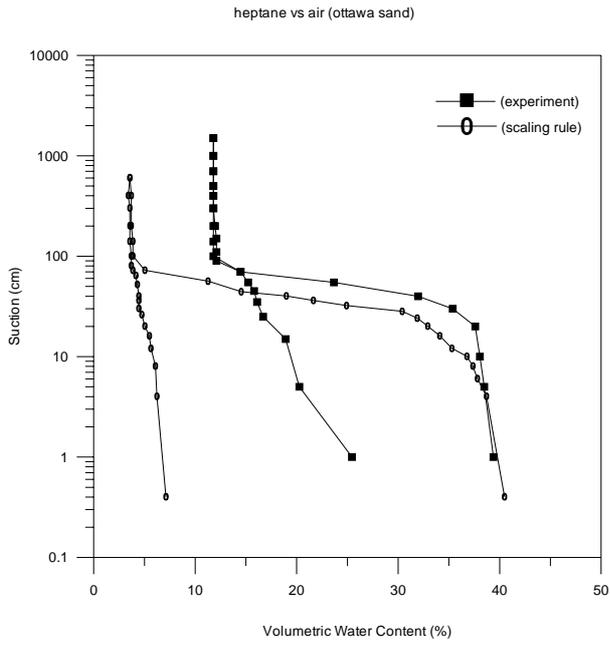
b



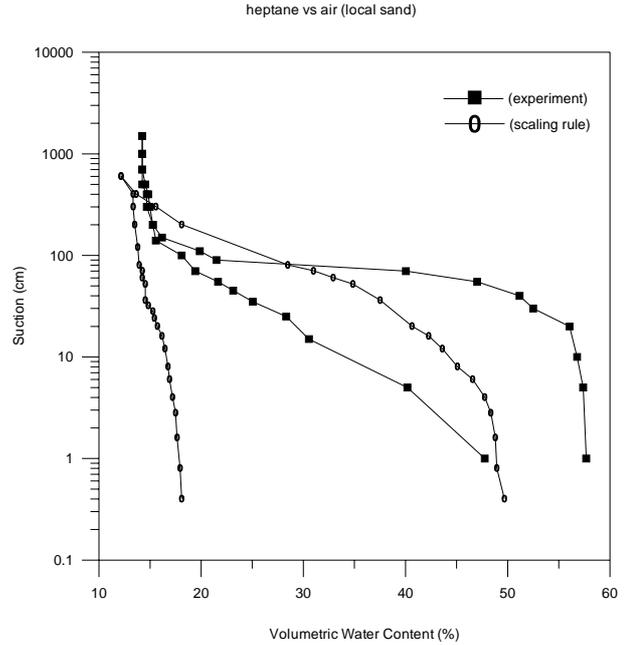
c



d

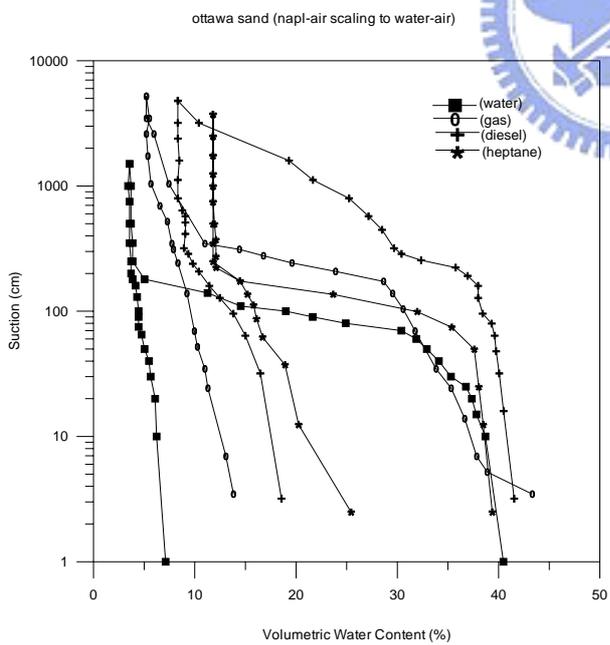


e

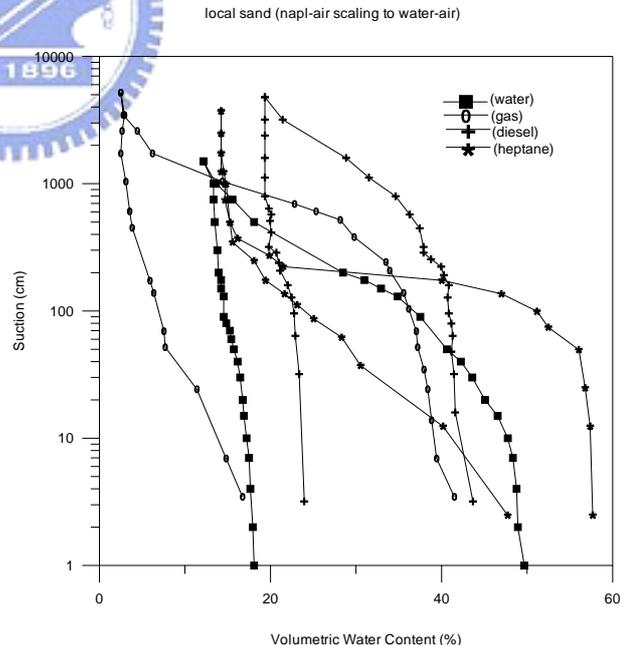


f

圖 4.24 由水-空氣經比例原則推出有機液體-空氣保持曲線



a



b

圖 4.25 由有機液體-空氣經比例原則推回水-空氣保持曲線

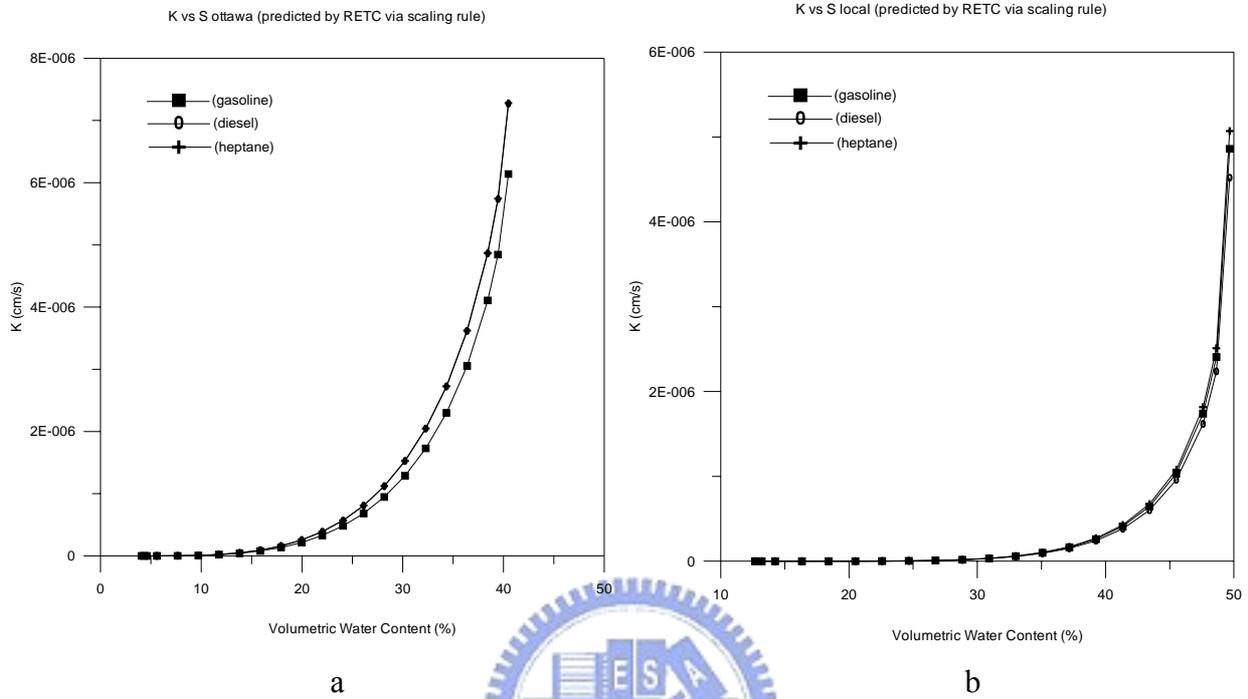
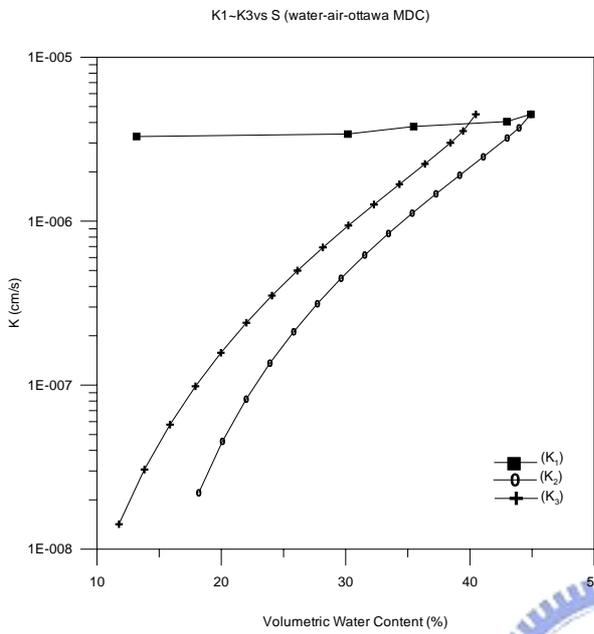
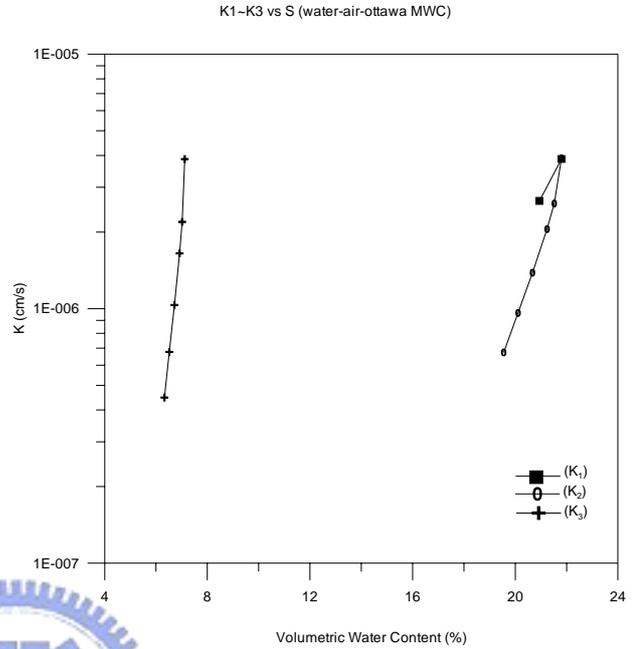


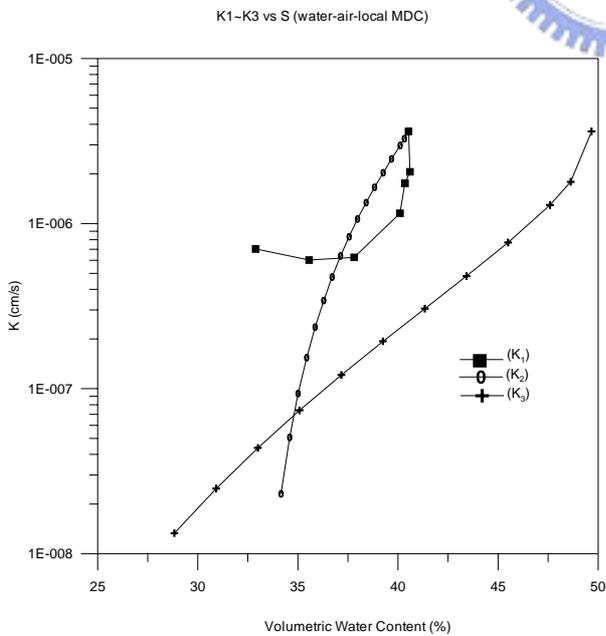
圖 4.26 RETC 經驗公式預估之滲透係數值



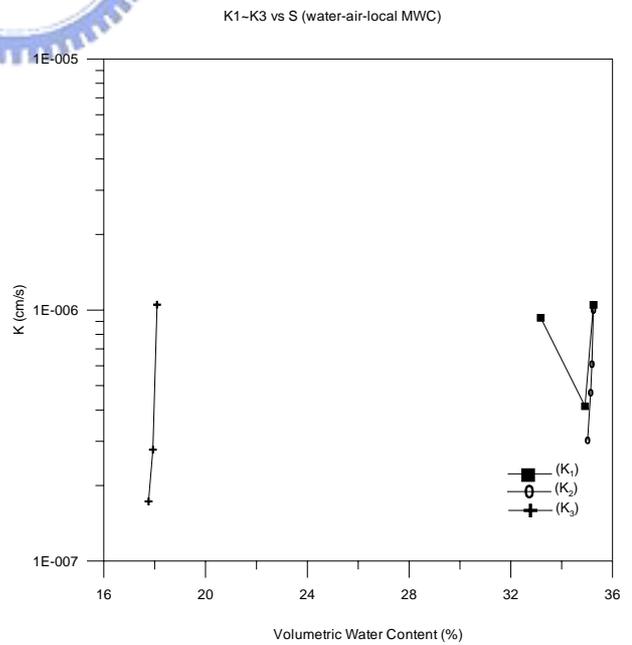
a



b

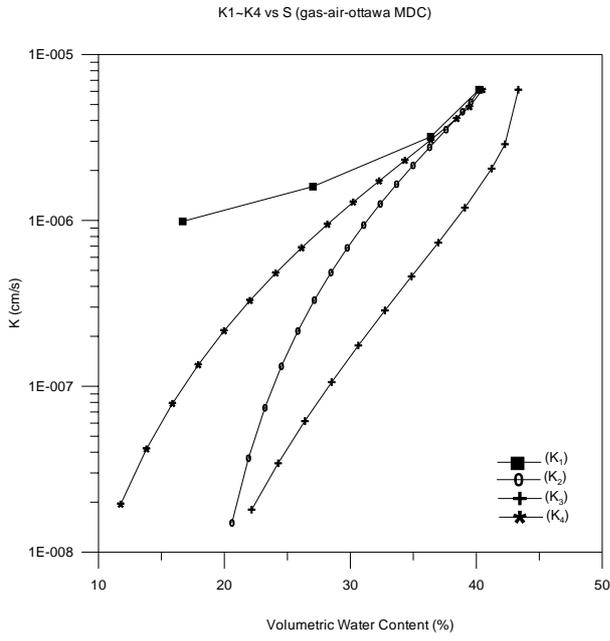


c

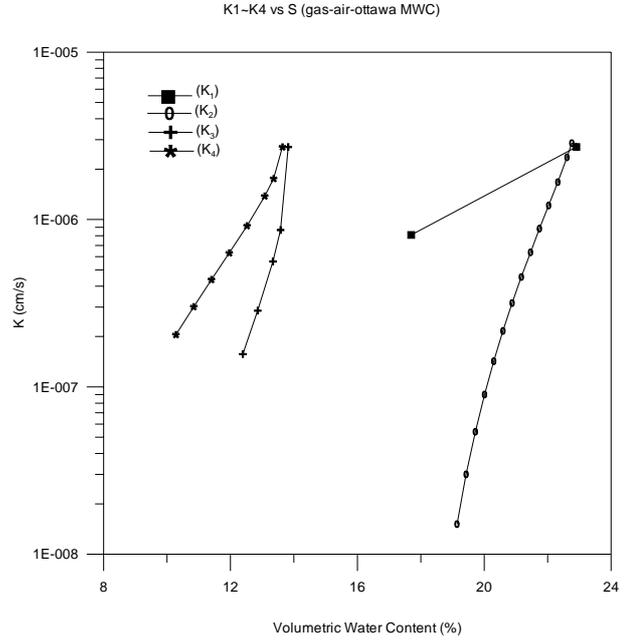


d

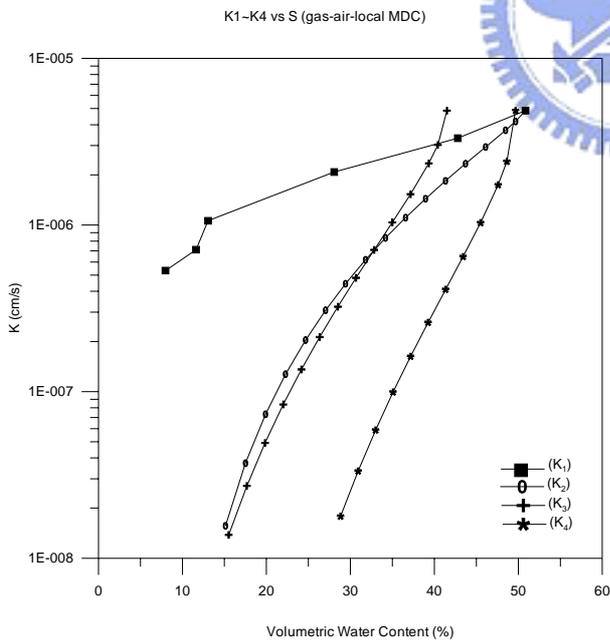
圖 4.27 水對空氣滲透係數值之比較(對數座標)



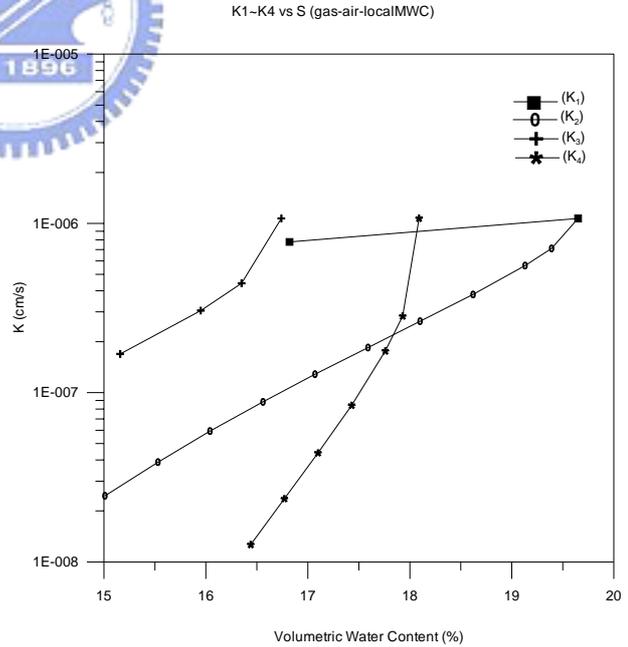
a



b

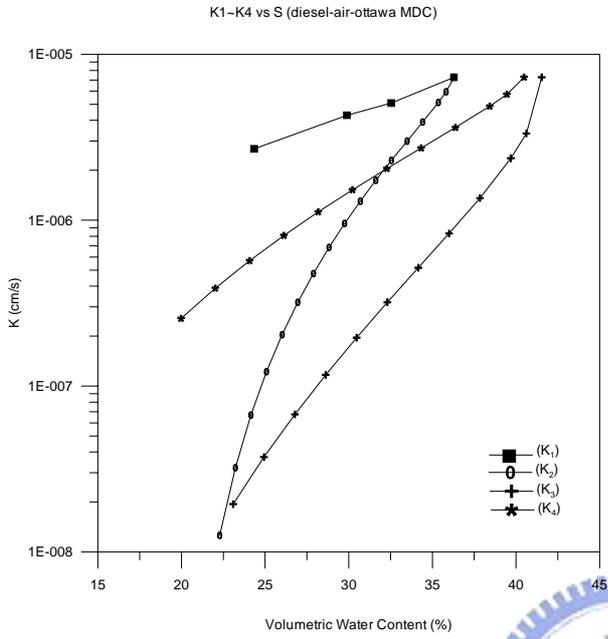


c



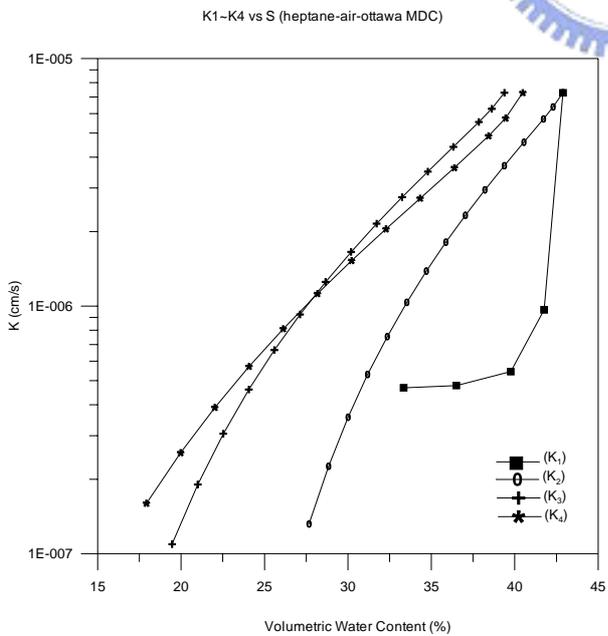
d

圖 4.28 汽油對空氣滲透係數值之比較(對數座標)

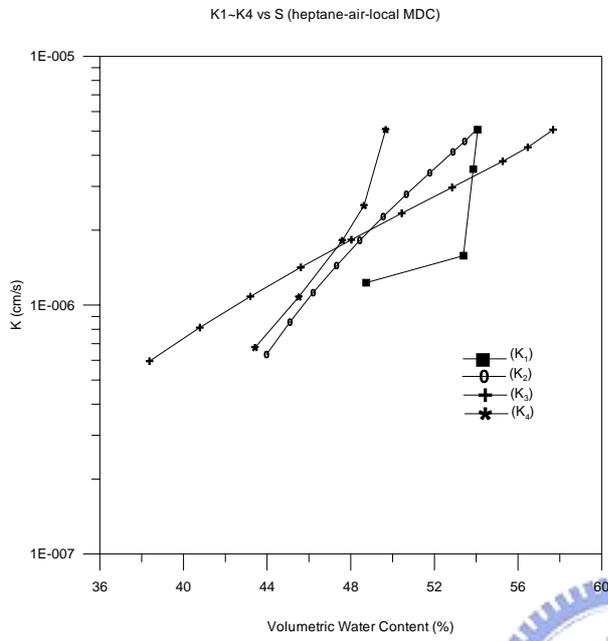


a

圖 4.29 柴油對空氣滲透係數值之比較(對數座標)



a



b

圖 4.30 庚烷對空氣滲透係數值之比較(對數座標)