

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，在壓力儀及滲透儀中夯實，控制其相對密度並以空氣和四種不同之液體(水、95無鉛汽油、柴油和庚烷)分別進行保持曲線及不飽和滲透試驗。在壓力儀之試驗中，給予土壤試體不同的張力下，求出各張力狀態下液體之流出量，以計算出土壤中水與有機液體之比例，進而可以求出該狀況下之液體-空氣之保持曲線。而在滲透儀試驗中，則是在不同的張力狀態下，一定的時間內量測水的排出量進而求得其滲透係數。最後在藉由比例原則及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。

3.1 試驗土壤

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 3.1 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，相對密度 60% 的土壤，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3.1 實驗使用二種土壤之基本性質

編號	最大乾密度, (g/cm ³)	最小乾密度, (g/cm ³)	相對密度 60% (g/cm ³)	壓力儀試驗所 需乾土重(g)	滲透儀試驗所 需乾土重(g)
C109 渥太華砂	1.799	1.506	1.669	113	814
寶二水庫 現地土樣	1.650	1.258	1.467	100	716

3.2 試驗液體

試驗中所選擇的液體，除了水之外，有機液體部份則用 95 無鉛汽油、柴油、庚烷作為試驗液體。汽油、柴油是機動車輛的燃料油，屬於混合物有機液體，一般加油站的地下儲槽即為此主要儲存液體，一旦儲槽滲漏，則汽油及柴油便成為土壤及地下水污染的主要來源。庚烷則是汽油的主要成分之一，屬於純有機液體，對於其各種性質較能掌握，有助於實驗結果之分析。由於汽油、柴油、庚烷的密度小於水，一般稱為輕水性非水相溶液。

有關各試體的性質則如表 3.2 所示，其中表面張力為工研院化工所的試驗結果。



表3.2 試驗液體之重要性質

試驗液體	化學式	密度 (g/cm ³)@25°C	表面張力 (dynes/cm)@24°C	與水界面張力 (dynes/cm)
水	H ₂ O	0.997	72.7	-
95 無鉛汽油	-	0.770	21.0	51.7
柴油	-	0.821	22.8	49.9
庚烷	C ₇ H ₁₆	0.689	19.5	53.2

3.3 壓力儀實驗裝置及程序

本研究採用壓力儀進行試驗。壓力儀係採用美國 Soil Moisture 公司所製造的 Tempe Cell。試驗所採用的壓力範圍為 0~1.5 bar。由於試驗所用來對土樣施加張力的氣壓裝置讀表最小刻度為 0.02 bar，而對於試驗土樣而言，液體的空氣進入值(Air Entry Pressure)也許在相對非常小的壓力即會發生，所以為了得到小壓力階段時較精確的實驗結果，在 0~0.1 bar 左右(約 100 cm 的水頭差)的壓力則以試體與液面的高度差來控制，而不使用氣壓裝置。

試驗時，皆從試體飽和後開始進行試驗。首先增加壓力求得液體在不同土壤中的排出曲線(MDC)；直至 1.5 bar 後，再逐漸解壓，以求得土樣回吸液體時的濕潤曲線(MWC)。

3.3.1 壓力儀試驗裝置(Tempe Pressure Cell)

壓力儀的裝置如圖 3.3 所示。主要的構件有底蓋、頂蓋、套環、陶瓷片及環封。由於試驗採用的液體除了水之外均為有機液體，有機液體具有揮發性高、低界面張力等性質，因此壓力儀是採用不銹鋼所製成。

陶瓷片是壓力儀的主要構件之一，其大小為直徑 5.72 cm，厚度為 0.64 cm。陶瓷片的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、柴油和庚烷)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 3.4 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。本實驗中壓力最大到 1.5 bar，所以均採用空氣進入壓力為 5 bar 的陶瓷片，如此空氣便無法通過陶瓷片，可經由施壓得到張力-液體體積含水比的關係。

試驗所使用的套環，其內徑為 5.35 cm，高為 3.00 cm，內部體積為 67.44 cm³。一般套環的材質以銅製成，可利用土壤取樣器在現地取土樣，再直接置入壓力儀組裝試驗；亦可利用重模的方式，將土樣調配好裝入環中。本試驗是利用重模方式來準備試驗土樣，並且在考慮套環的材質不會和有機液體發生反應作用之下，試驗除了水之外均採用不銹鋼材質的套環。在壓力儀的頂蓋和底蓋內側，各裝有一個環封(O-ring)，目的在防止外面空氣與試體的接觸；而底蓋的底部置有一個小環封，以避免套環和陶瓷片在沒有完整密合的情況時，液體會沿著陶瓷片邊緣滲漏出去。

壓力儀試驗系統的配置如圖 3.5 所示，利用一組壓力控制系統，同時控制數個壓力儀進行試驗。本研究則以一次控制四個壓力儀的壓力變化進行試驗。由於本實驗所使用的壓力錶，其精準度只達 0.02 bar，對於水或有機液體在極低壓力範圍(100 cm 壓力水頭內)求取保持曲線時會失去其準確性，因此利用玻璃量管中液面與試體的高度差，來控制在低壓範圍時某一點的負壓(張力)，等到液體變化量漸緩，再以空壓系統控制。為了使玻璃管的液面和試管可以有相當程度的高度差，連接壓力儀底蓋溢流口和玻璃管之間的軟管就必須要有較長的長度(70~100 cm)。本實驗採用的為內徑 1/4 英吋的 Tygon 軟管。

試驗前試體及陶瓷片先用該液體(水、95 無鉛汽油、柴油或庚烷)飽和，液體於上方溢流口溢出後，再放置 24 小時以後，使其達到較飽和的狀態，然後再以空氣侵入，以模擬現地遭受到污染的情形。在試驗中，壓力儀下方的試驗液體溢出口須連接管線以記讀土樣在不同張力下試驗液體之溢出量，當試驗的液體為有機液體時，為避免「液面與空氣」的直接接觸會造成大量的氣體揮散至大氣中或空壓系統中，對壓力控制閥及壓力錶產生不良的影響，於是使用隔膜儲水儀(Bladder Accumulator)，或稱滲流液界面裝置(Permeant Interface Device, PID)(見圖 3.6)，以避免揮發產生的不良影響。隔膜儲水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的轉換

界面。隔膜的材料為高密度聚乙烯(High Density Polyethylene, HDPE)，具有高度抗蝕及防止揮發的能力，正好符合有機液體試驗所應具備的條件。而整個儲液室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壓(本系列有機液體試驗中，PID 上方裝水，再連接有刻度之玻璃量管以記讀排出有機液體體積變化量)，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，連接到壓力儀，使有機液體可以侵入土壤試體中，因此以不銹鋼材質製成，達到抗蝕及防止揮發的功能。

3.3.2 壓力儀試驗程序

試驗的第一步驟為試體準備；為了使試驗的土樣情況可維持固定，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來控制土樣的一致性，即在已知壓力儀試體體積狀況下，計算土樣乾重，製作土樣。

試驗時，將土樣置入組合好的壓力儀套環，陶瓷片必須先被該液體飽和(水、95無鉛汽油、柴油或庚烷)，因此若直接將已知重量的乾土直接置入，在壓(張)力平衡的原則下，陶瓷片中之液體會被吸出，導致陶瓷片將引入氣泡之困擾；此外，之後土樣飽和不但所需時間較長，且飽和度可能較低。若先將套環組裝後，套環內充滿液體後再倒入乾土，以沉降方式製作土樣，則不但較難準確控制相對密度，而且

在沉降過程中發生的粗細顆粒離析現象，將使試體不均勻。因此本研究決定採取用溼潤土壤夯壓重塑法製作土樣，先將適量的土壤與液體拌合後，置入套環形成試驗土樣。

試體製作時，依銅套環體積，參照訂定的相對密度，計算出適量之乾土重(參考表3.1)，與適當的液體拌合後，將溼土分層置入套環後輕輕夯壓，逐步作成。

壓力儀試驗步驟主要可分為三個部份：

- 1、裝置土樣。
- 2、試體飽和。
- 3、組裝隔膜儲液儀(PID)。
- 3、進行試驗及記錄。



分別敘述如下：

1、裝置土樣

將未裝入土樣的壓力儀各部份(包含不銹鋼環、陶瓷片、環封、螺絲、溢流口接頭…等等構件，陶瓷片須先用該液體飽和)稱重 W_0 。秤完重後，迅速將底蓋與玻璃管上的軟管接上，以防止陶瓷片下方有氣泡存在。

每種土樣以60%的相對密度計算出所需的乾土樣(W_s ，渥太華砂為113g、現地土樣為100g)，將粗細顆粒均勻拌合，加入適量的液體攪拌，再分層地置入套環內。

2、試體飽和

裝好土樣的壓力儀，陸續地加入試驗液體並靜置，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，再將壓力儀頂蓋，連同螺絲，一起組合完畢。

提高玻璃量管內的液面，使之高於壓力儀的頂蓋高度，造成一水力梯度，使試體飽和。當水從壓力儀頂蓋的空氣進入口流出後，至少要再放置24小時以上，以確保試體能完全飽和。

試體飽和後，拔掉軟管，將整個壓力儀拿去秤重得 W_t ，在迅速接回。則可以預估試驗前液體重 W_w 為 $W_w=W_t-(W_o+W_s)$ ；體積含液比

$$\theta_1 = \frac{W_w / \rho_w}{V}$$

， V 為套環體積， ρ_w 為試驗液體密度。

3、組裝隔膜儲液儀 (PID)

將隔膜儲液儀裝置完畢後，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有機液體的來源，一接連接試體的管子(PU管對於仰制有機液體的揮發效果極佳)。利用閥門的控制，將有機液體抽入儲液室中，再利用氣壓機將液體住滿管子，並接上壓力儀下方之溢流口。

4、進行試驗及記錄

首先進行主要排出曲線部份。將玻璃量管中的液面調低，使液面和試體之間有一高度差，則試體所承受的張力即為試體與量管液面之高度差。此時空氣會侵入試體中，而液體會被排出，讀取玻璃量管內液面的變化。待平衡穩定，即液面不再變化後，再逐次增加高度差。當高度差大於100 cm之後，於壓力儀上方的空氣進入口接上空壓系統，改以氣壓機施加壓力。

加壓過程完成後，則進行濕潤曲線部份，也就是要逐漸解壓。解壓階段在初始階段時壓力間隔稍大，再逐漸減小。直到壓力減小到0.1 bar之後，在改以調整玻璃量管的液面來控制張力，等到液面與試體約相等時，實驗才算完成。

記錄過程中，以大約每幾小時記錄一次量管內液面的變化，若不再改變，則視為平衡。減壓完成之後，將壓力儀秤重，可得到土樣試驗後之體積含液比 θ_2 ，由 θ_1 及 θ_2 計算後可得出完整之土壤水保持曲線。

3.4 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3.7)修改自製而成。本研究中的試驗模乃以不銹鋼材質製成(水、有機液體兩用)。鋼模主要構造仍與保持曲線試驗用的Tempe Cell相當類似，主要部分為頂蓋、底蓋、主體部分(如圖3.8)、陶瓷片、陶瓷頭(如圖3.9)及環封。主體部分之內徑為6.0cm、高度為17.25cm，所以內部體積為487.73cm³。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10cm)可連接較細之量管，用來觀測不飽和狀態下實際的水頭差，另一側的單孔則是用來連接空氣使能侵入土壤中，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PID(類似前述壓力儀試驗下方溢流口的連接狀態)，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；最後，PID的上部儲液室則充滿水後再連接玻璃量管以觀察試驗中滲透儀的流入流出狀態，進行試驗；為避免有機液體於管線中揮發，試驗中與有機液體接觸的管線，均使用PU管，其抑制揮發的效果佳。

3.4.1 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(本系列試驗中為汽油、柴油及庚烷)則不行。陶瓷頭-PU 管的另一端則連接一特製的 U 型玻璃管；PU 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，用來觀察在實驗過程中上下兩點的水頭差，而兩陶瓷頭間的距離便是滲流路徑長度，在量測其排出的液體體積之後帶入達西定律就可以求得當時之滲透係數，裝置如(圖 3.10、3.11)。

另外，滲透儀使用的陶瓷片與壓力儀一樣也是空氣進入值為 5bar 的陶瓷片，其尺寸大小為直徑 7.95cm、厚度 0.74cm，但與壓力儀不同的是，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。

3.4.2 滲透儀試驗程序

試驗程序主要為分為以下幾個步驟：

- 1、實驗裝置組裝及裝置土樣
- 2、試體飽和
- 3、裝置隔膜除液儀 (PID)
- 4、側壁通氣孔的處理

5、進行試驗及紀錄

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、柴油或庚烷)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(濕相液體會95無鉛汽油、柴油或庚烷時)。

土樣的準備跟先前壓力儀試驗程序一樣，也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土樣一重814g、土樣二重716g。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、試體飽和：

土樣裝置完成之後，調整下玻璃量管的水面高度使其高於試體，產生一水力梯度使試體飽和，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PU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PU管管線中的液體先去除，以免高估飽和度。

3、裝置隔膜除液儀(PID)：

裝置步驟類似壓力儀試驗。裝置完成之後將PID分別連接至滲透儀上部及下部溢流口，為減少有機液體於管線中揮發的影響，上、下兩個溢流口以PU管接出後約10公分(長度視管線方便彎曲為準)，改以細玻璃管連接，如(圖3.12、13)。之後，將PID上部充滿水，再以管線連接至玻璃量管中，始可觀察上、下溢流變化量。

4、側壁通氣孔的處理

通氣孔，如(圖3.14)。

當求取液體之飽和狀態滲流時，此孔關閉。

當進行不飽和滲流時，則將此孔打開，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所在)；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 PU 管，將 PU 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。

5、進行試驗及紀錄：

首先進行飽和時之滲透係數量測，調整上下兩玻璃量管之高度差，使其產生一水力梯度開始滲流，紀錄一定時間之內上下管體積之改變量(流量以流出量為準，參考流入量，差異不大即可接受)，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滲透係數 K_s 。

接著進行不飽和滲流部分，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，上管的水面要比下管高，使試體上下都受到張力(滲流由上往下)，此時試體中央所受到的張力值為兩管張力的平均值(注意：為使上、下部受較均勻張力，上、下兩處施加的張力差不宜過大)，再逐漸增加此高度差(張力值)。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，此高度差便為當時上下兩點的水頭差(兩點相距為10cm)，將水力坡降、滲流時間、流量帶入達西定律就可以求得當時的滲透係數值。要注意的是，每次調整張力的初期，因為上下兩管都受到張力，所以上下兩管都會有水排

出，須等到平衡之後，才會開始穩定的滲流，此時才可以開始測量流量，但過程中仍須於每幾小時間觀察並記錄。

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100cm水頭以上，則可考慮用空壓系統加壓的方式施加張力，其間的取捨端視器材而定。

當張力值增加到100cm水頭高時，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。

3.5 比例原則之探討

本研究欲利用比例原則對試驗結果進行比較，由於水-空氣的保持曲線是最基本的保持曲線且在進行實驗亦較為方便，所以採用水-空氣的保持曲線為基準是較佳的選擇，藉此便可以推出汽油-空氣、柴油-空氣及庚烷-空氣之保持曲線。

相同孔隙，相同飽和度情況下：

$$S_w \left(\frac{2\sigma_{aw}}{P_{aw}} \right) = S_w \left(\frac{2\sigma_{ow}}{P_{ow}} \right) = S_o \left(\frac{2\sigma_{ao}}{P_{ao}} \right)$$

$$\frac{h_{aw}}{\sigma} = \frac{h_{ow}}{\sigma} = \frac{h_{ao}}{\sigma}$$

表3.3表示比例原則中所使用的比例縮放因子 β ，若要以水-空氣之保持曲線為基準時，查看表中的 β_{ao} 值，將水-空氣保持曲線之張力值除以該比例因子，則可得到相對應的有機液體-空氣保持曲線。

水-空氣保持曲線實驗結果如圖3.15所示。

表 3.3 各液體間之比例縮放因子

試驗液體	表面張力 (dynes/cm)@24°C	與水界面張力 (dynes/cm)	β_{ao}	β_{ow}
水	72.7	—	—	—
95 無鉛汽油	21.0	51.7	3.462	1.406
柴油	22.8	49.9	3.189	1.457
庚烷	19.5	53.2	2.481	1.367

3.6 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)、(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。

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

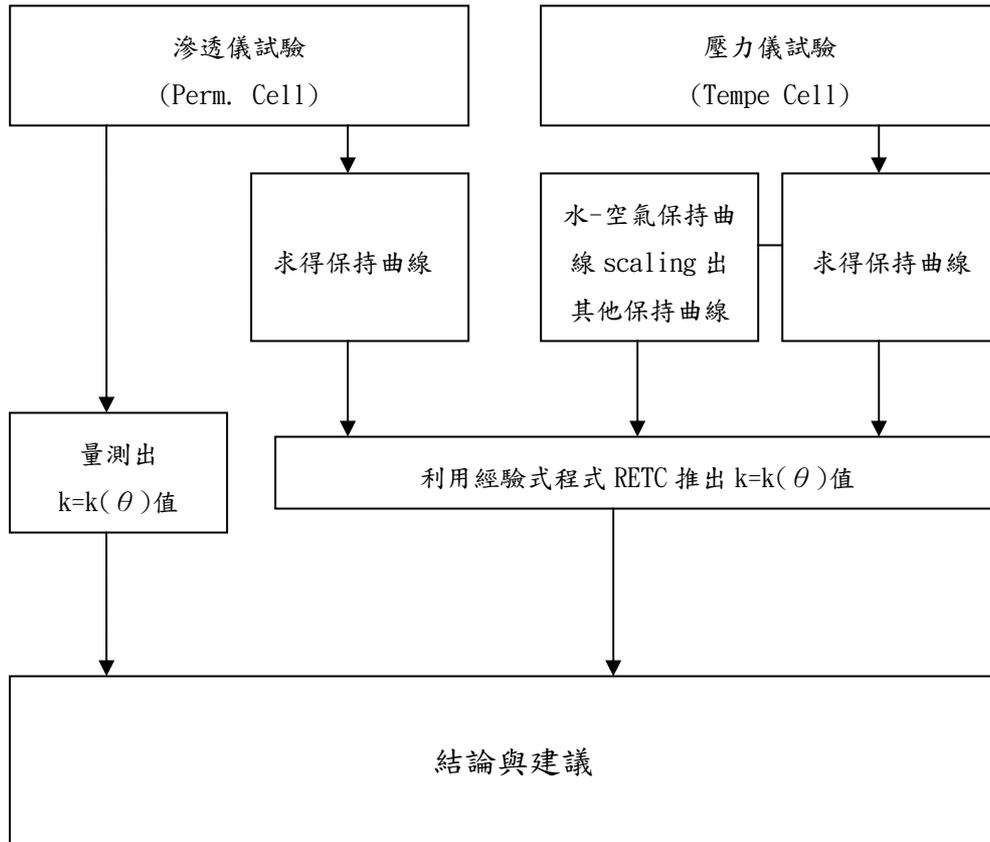
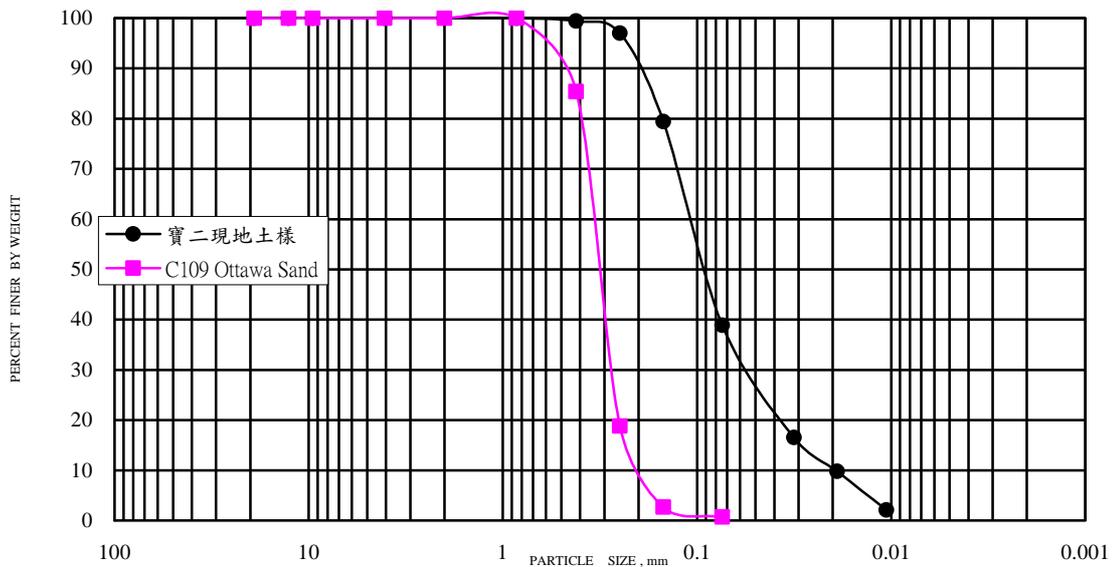


圖3.1 實驗基本架構



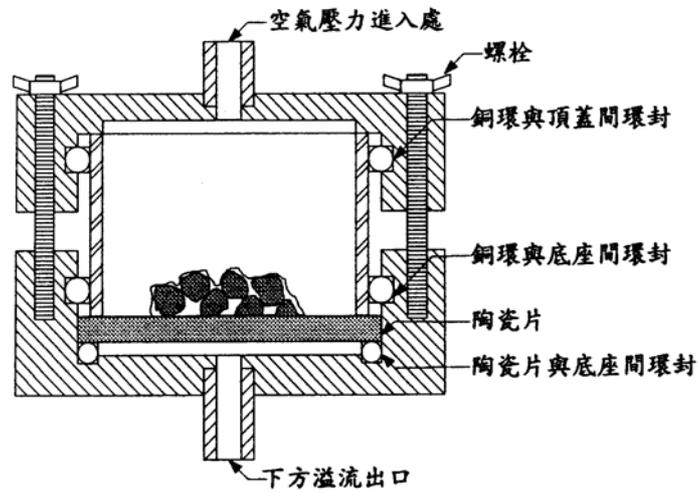


圖 3.3 壓力儀示意圖 (黃進富, 1996)

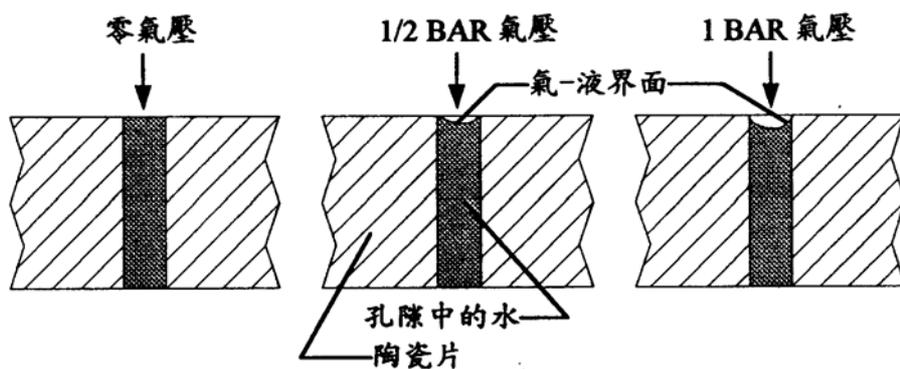


圖 3.4 不同氣壓下陶瓷片孔隙內凹面變化情形 (黃進富, 1996)

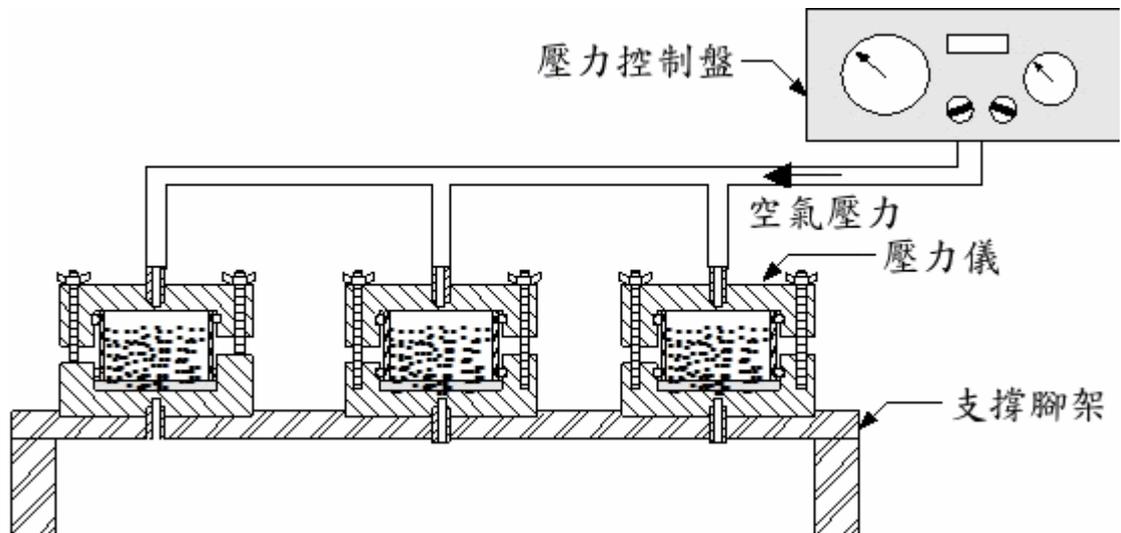


圖 3.5 壓力儀系統配置圖(黃進富, 1996)

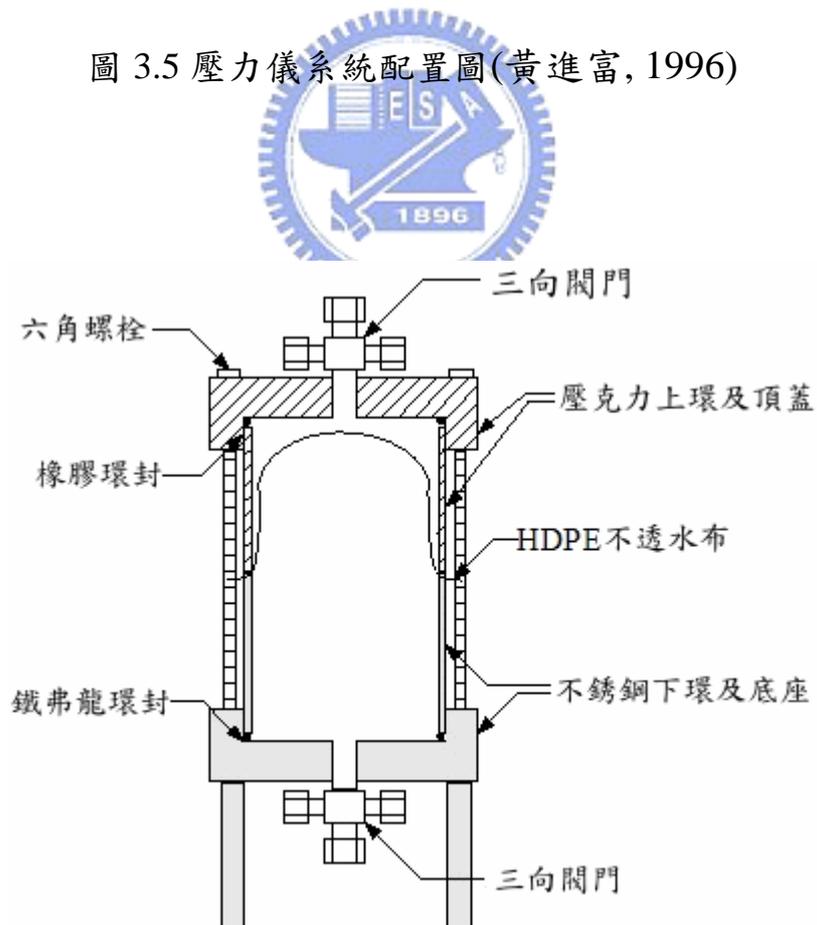


圖 3.6 隔膜貯水儀示意圖(黃進富, 1996)

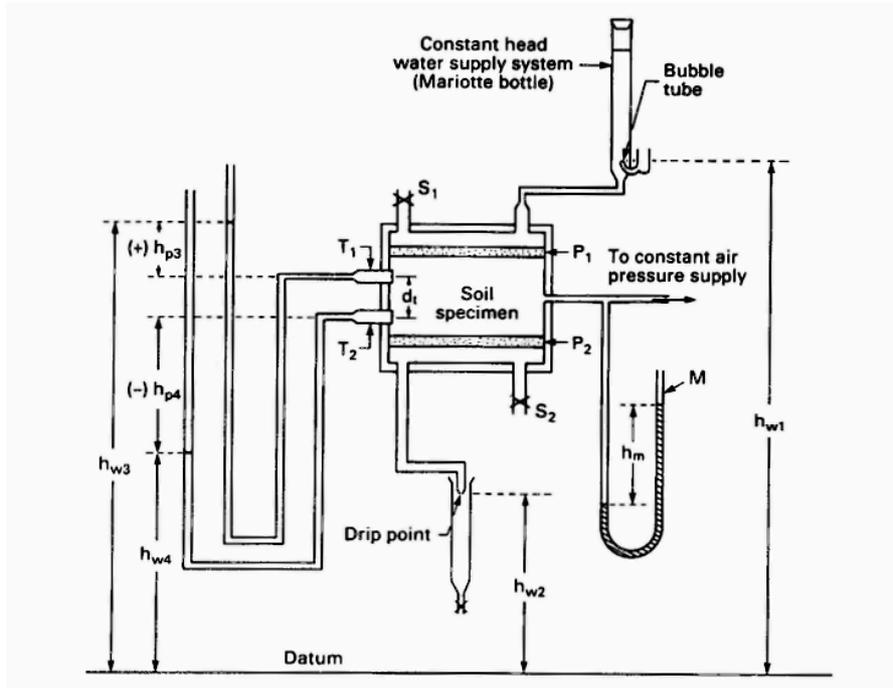


圖 3.7 不飽和滲透試驗配置圖(Klute, 1986)



圖 3.8 滲透儀裝置主體部分

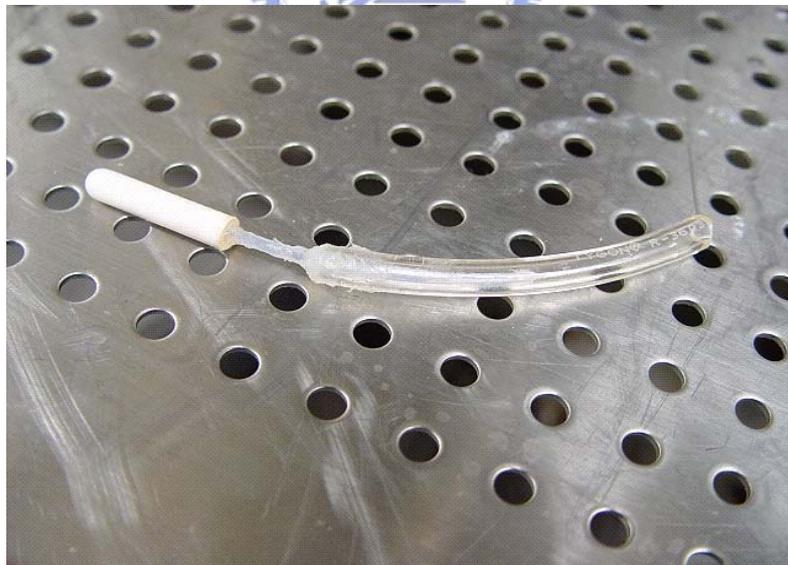
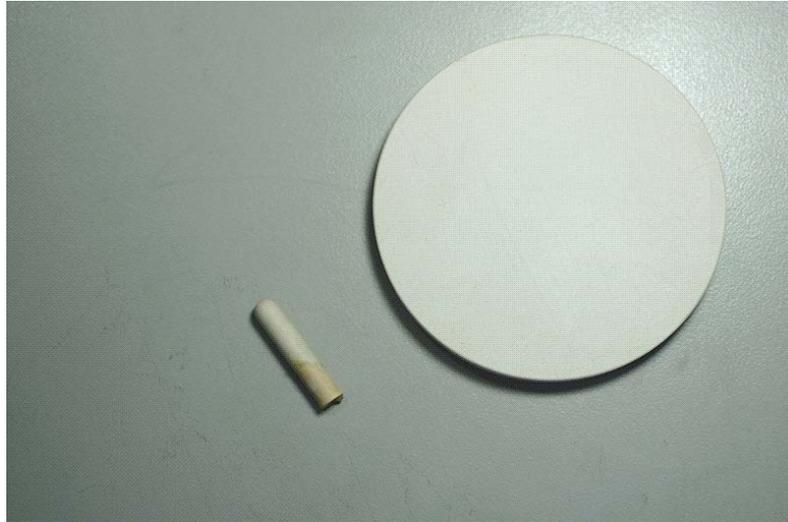


圖 3.9 滲透儀所用陶瓷片及陶瓷頭



圖 3.10 滲透儀裝置組裝完成圖



圖 3.11 U 型管連接示意圖



圖 3.12 滲透儀溢流口管線設置圖

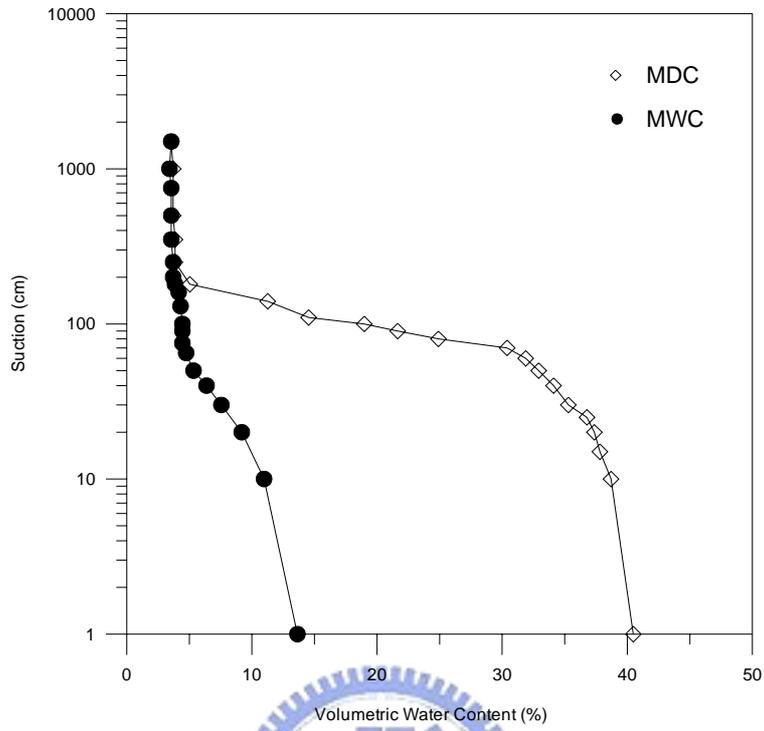


圖 3.13 滲透儀溢流口管線設置圖



圖 3.14 側壁通氣孔示意圖

Suction Vs. Volumetric Water Content Plot
(Water-Air-OttawaSand)



Suction Vs. Volumetric Water Content Plot
(Water-Air-LocalSand)

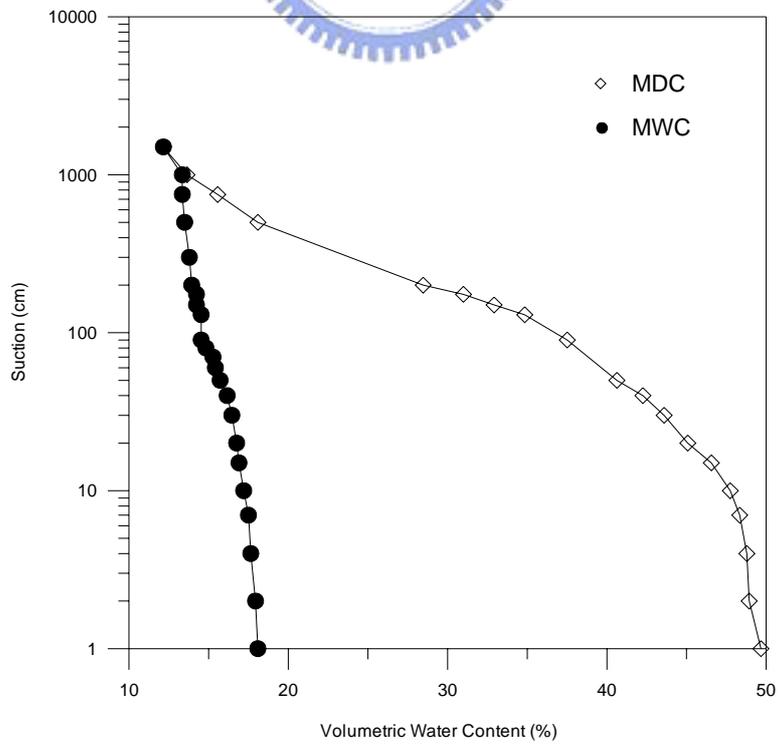


圖 3.15 水對空氣保持曲線