

第三章 研究方法與規劃

本研究主要為利用不同應力路徑三軸試驗，並配合微應變和大應變之量測、波速量測及基本物性試驗探討軟岩之彈性，塑性之降伏行為，以了解不同應力路徑下，膠結不良砂岩之應力 - 應變行為及變形性。試體可分成兩部分，第一部分為鑽取寶山第二水庫工址岩層，取得品質良好岩樣，第二部分則以寶山岩塊為材料製作人造膠結不良砂岩，製作流程參照王柏皓(2004)及孫光東(2004)。

本章主要在說明軟岩用三軸試驗系統構架及研究的方法。

3.1 實驗儀器

本研究使用的儀器為柳政男(1998)、黃惠儀(1999)、林景民(2001)、洪任賢(2002)及葉季霖(2003)等經長期研製改善之軟岩三軸系統，其可經由電腦配合完整之量測系統來進行電腦伺服控制，有效地控制軸壓系統，和圍壓系統。軸壓系統採用 MTS 公司之材料試驗系統 (MTS810)，圍壓系統則採用電磁比例壓力控制閥油壓機及加壓器，分別控制實驗過程中之軸向力和圍壓，有效地控制實驗中之應力路徑。系統配置如圖 3-1 與圖 3-2 所示，三軸室架構圖如圖 3-3 所示。

一般岩石三軸室需要極大的圍壓，因此設計上以金屬材料為最多（如不鏽鋼），且安全係數比較大（日本一般之油壓規範為以材料降伏強度之八分之一來作為設計強度），因此設備動輒數百公斤，必須藉由油壓起重設備來輔助試驗之操作。一般來說岩石三軸之接合面只有一個，此種接合的理

念稱為凸緣接合 (Flanged Joint)，加上 U 型圈作為油封 (壓力越大，U 型圈之油封效果越好)，輔以 O-Ring 來彌補 U 型圈在小壓力時油封不足的缺點。

土壤三軸室無須承受太大的圍壓，故材質一般為透明壓克力。以 O-Ring 來防止漏水，土壤三軸室骨架採支撐柱設計，為了方便試體架設與置換及可進行多種試驗方法，三軸室頂盤和底盤以四根支撐柱連接，當試體架設完成後再罩上三軸管壁，接著以套環固定三軸管壁。

本軟岩用三軸室設計能承受最大 15 MPa 之壓力，雖然對岩石而言，此圍壓並不大，但若採壓克力則強度略嫌不足，故本三軸室採用降伏強度超過 300 MPa 的不鏽鋼 (沃斯田鐵系不鏽鋼 304)，為方便架設，在設計上乃參考土壤三軸結構設計理念。

三軸室管壁：三軸室管壁為不鏽鋼 (沃斯田鐵系不鏽鋼 304，降伏強度超過 300 MPa) 所鑄成，長度為 50 公分，厚為 0.9 公分，可承受最大室壓為 15 MPa，大約 15 公斤。

三軸室支撐構架：頂盤由四根支柱垂直通過三軸室內和底盤連接，四根支柱以鎖在底盤下面的螺絲固定頂盤及底盤，四根支柱採用鎳鉻鉬合金鋼以強化並減低變形量，實驗時，僅利用釣鉤上下提昇三軸室管壁，試體架設或更換完成後，再將套環環繞於頂盤外圈並以螺絲固定於頂盤，提供三軸室密封性，如此可方便試體的架設與更換。

頂盤：加壓桿與軸承固定於頂盤上，內設油封裝置。另三軸室灌油時，趕氣泡的調節閥。

內部配件：三軸室內有內置式荷重盒 (Internal Load Cell)，可消除因加壓桿摩擦阻力造成的誤差，內置式荷重盒固定在底盤，試體的頂蓋和加壓桿連結，試體的底蓋可固定在內置式荷重盒 (可進行不同應力路徑之試驗) 或以插銷定位於內置式荷重盒上 (進行等向壓密試驗時較方便)，試體頂蓋與底蓋都有透水石並留孔洞可經塑膠管進水通過試體內部，進行試體飽和、壓密或排水試驗。三軸室內並預留超音波探頭空間，以進行三軸狀態下超音波試驗，量測動彈性係數。

底盤：底盤上留有四個孔洞進行排水或壓密、一個連接圍壓壓力轉換器的孔洞、十二個提供內置式荷重盒和局部應變計使用的電壓傳訊棒，可將內置式荷重盒和局部應變計之電壓值傳出三軸室連接至資料擷取系統，仍保持三軸室的密封性。

2. 軸壓施加系統

本實驗之軸壓施加系統採用 MTS 810 材料試驗機，本身即具自動補償加於試體的力量和速率。試驗機具有讀取並記錄加載值的資料擷取系統，主要載重設備有載重架 (Load Frame)、荷重感應器 (Load Cell)、加壓桿 (Actuator)、伺服閥 (Servo Valve)、油壓方向控制器 (HSM, Hydraulic Services Manifold)、油壓供應器 (HPS, Hydraulic Power Supply) 以及冷卻

系統。在控制系統方面，為了有效地控制應力路徑，使軸向力，和圍壓可以配合，本研究未採用 MTS 所提供之軟體，而是以自己撰寫的電腦程式，透過研華的 PC816 (A/D、D/A)，經由電腦伺服控制，傳遞程式命令於 MTS 458 控制器 (如圖 3-4)，控制三軸室內試體之軸向力。

3. 圍壓施加系統及氣壓系統

圍壓的施加系統可分成油壓和氣壓系統，油壓系統可針對高圍壓時，給予一穩定的圍壓，然在低圍壓，油壓系統並不穩定，改用氣壓系統則可滿足低圍壓所需。以下分別介紹其功能

油壓系統由具備電磁比例壓力控制閥的油壓機 (如圖 3-5) 及一加壓器 (Pressure Intensifier) (如圖 3-6) 提供，本油壓機具備兩個比例控制閥，一為電磁比例壓力控制閥，另一為電磁比例流量控制閥，可利用輸入電流值控制油壓機輸出的流量或壓力，亦可以手動旋扭控制其流量與壓力，液壓油為中油出品 R68 型。特別設計之加壓器除可放大油壓機給予之壓力外並可平衡油壓機之初始脈衝壓力及避免因試驗後油質受到試體碎屑污染損害油壓機，三軸室與油壓機之間以高壓軟管連接。為了有效地控制應力路徑，亦透過過研華的 PCL816 (A/D、D/A)，經由電腦伺服控制，經由電磁比例流量控制閥控制油壓。由於在較低壓力時，油壓較不穩定，故改經由氣壓控制面版 (如圖 3-7) 和空壓機控制及施加壓力，不僅可提供三軸室較低之圍壓，亦可用於控制飽和試體時需要的反水壓。

4. 量測儀器

量測儀器如圖 3-8 與圖 3-9 所示。軸差應力 (Deviator Stress) 由內置式荷重元 (Internal Load Cell) 量測，由 Applied Measurement Limited 製造，可於油壓狀態下使用。

三軸室圍壓與孔隙水壓由壓力轉換器 (Pressure Transducers) 量測，圍壓壓力轉換器由 TML 公司製造，型號為 PW-20 MPa，最大壓力範圍為 20 MPa，激發電壓為 10V。孔隙水壓壓力轉換器之最大壓力範圍則為 500 psi。

軸向應變可分成微應變的量測和大應變之量測，微應變之量測由裝設試體中段的二個微應變計 (Proximitor Transducer) (System sensitivity=200mV/mil; 購買美國 BENTLY NEVADA 生產, 型號為 3300 XL) 量測，其範圍在 2 mm 內，且此系統可線性將輸出電壓在 0~20V 範圍。分別置於試體由下往上三分之一和三分之二處，由兩個相對之位移來計算試體應變。本試驗系統採用目標金屬物材質為 AISI 4140 steel 試驗時改採用將目標金屬打孔，將鋼針 (fixing pin) 插入試體內約 15mm，使目標金屬固定在試體表面，再以高強度速乾型矽利康封膠，使其量測到為試體本身之位移，設備如圖 3-10 所示。

大應變之量測則擷取 MTS 810 內置之 LVDT，其精度可達 0.001 mm，其範圍為 -10~+10mm，對應之電壓為 -10~10v，由試體總長，再考量 MTS 衝程來計算試體大變形時的應變量。

徑向應變則為置於試體中段的 LVDT (sensitivity = 2.49 Mv/v/.001inches ; 購自於英國 Lucas 公司量測 ; 主要放置於試體周圍之環形鍊條 (Circumferential Deformation Device) 可量測試體徑向變化量, 環形應變計可在液壓油浸泡環境中使用, 能承受 60,000 psi (414 MPa), 且可承受 200 °C 的溫度。

5. 資料擷取伺服系統

資料擷取系統 (如圖 3-11) 可分成兩個部分 : 一為大應變擷取系統, 一為微應變擷取系統。大應變資料擷取系統由 Advantech PCL816 (含 A/D、D/A)、PCLD8115 兩塊面板組成。Advantech PCL816 之 A/D 卡可將輸入之類比電壓訊號 (analog) 轉換成數位訊號 (digital), 方便記錄與計算, D/A 卡可將數位訊號轉換成類比電壓輸出, PCLD8115 為連結 PCL816 (A/D、D/A) 和試驗儀器的介面卡, 共有 8 個頻道, 將 PCL816 (A/D、D/A) 裝設於個人電腦 486, 啟動後可將試驗儀器轉換器 (Load cell, Pressure Transducers, MTS LVDT) 感應到的試驗數據經由 ADAM-3014 放大後藉由 PCLD8115 傳入 A/D 介面卡 (Advantech PCL816) 將類比電壓訊號, 轉換成數位資料, 以 QBASIC 程式控制擷取資料並儲存於硬碟, 另於程式中作伺服控制系統, 透過 PCL816 D/A 傳遞程式命令, 經由 MTS 458-20 控制器和電磁比例流量控制閥, 控制軸壓和圍壓, 使試驗過程自動化依所要之應力路徑進行壓密和剪動。

微應變量測系統，則針對試體在極微應變時，這時得考量量測 output 電壓精度之要求，故本系統採用 Agilent HP 34401A 數值電表，配合 HP-IB 界面和程式的設計，可即時且高度精度的量測到 Proximitor Transducer、Load Cell、Pressure Transducer、在微應變時之變化，處理和記錄，使用此量測系統我們可量測至 0.0001% 的應變量。

6. 實驗控制

由於本系統可有效地控制軸壓和圍壓系統，故在實驗前，先決定壓密和應力路徑，即可達成試驗過程自動化之功能。圍壓和軸壓分別由具備電磁比例壓力控制閥藉由輸入之電流大小控制油壓輸出壓力，軸壓由 MTS458 控制器，來調整軸壓大小，配合擷取系統 PCL816 之 AD 和 DA 卡，試驗數據經由 A/D 介面卡 (Advantech PCL816) 將類比電壓訊號，轉換成數位資料，儲存於硬碟。藉 D/A 卡 (Advantech PCL816) 將數位資料轉換成類比電壓訊號再經由功率放大器，控制圍壓值和軸壓值。結合 A/D 和 D/A 控制軸壓施加系統和油壓機，在進行三軸試驗之壓密階段時，控制圍壓加壓值和軸向加壓值成一定比例關係，可達到以不同 K 值壓密的目標，另外在進行三軸試驗之受剪階段，圍壓加壓會影響軸壓，造成軸壓增加的現象，也需要以自動回饋系統保持軸壓一定。

7. 剪力波元件試驗 (Bender Element Test)

為了能在試驗進行中求得試體的波速變化以探討剪力模數及彈性模數的變化，所以在三軸試體上下蓋加裝剪力波元件，本研究所使用之設備為自行組裝之剪力波速量測系統，可突破 NGI 傳統剪力波元件試驗之試體高度限制 (高度 76mm、直徑 38mm)，試驗可量測之試體高度為 15 公分，突破以往試驗設備之限制，可滿足一般土壤力學之研究需求，[圖 3-12](#) 為剪力波量測系統之示意圖，各項元件之功能及規格如下。

7.1 壓電陶瓷晶片 (Piezoelectric Ceramics)

土壤中剪力波速的傳送與接收室內試驗早期由美國德州大學 (University of Texas at Austin) 所發明，乃利用剪力片 (Shear Plate) 進行試驗，以石英或壓電水晶為主要元件，然而，拜現代科技之賜，目前以壓電陶瓷材料所組成之剪力波元件 (Bender Element) 逐漸取代剪力片，所以目前國內外三軸室內剪力波量測試驗，多採用壓電陶瓷晶片；本研究所使用之壓電陶瓷晶片為構自 PIEZO SISTEM 公司，型號 PSI-5H-S4，尺寸大小為 14.5× 12× 1mm，極化電壓為 10V，尺寸如[圖 3-13](#) 所示，將剪力波元件嵌入三軸室試體上下頂蓋中，並使用 Araldite 環氧樹脂 (AB 膠) 固定於三軸室上下頂蓋中，透水石部分則以矽膠填塞，總凸出約 1/4 元件長 (約 3mm)，試體上下蓋設計示意圖如[圖 3-14\(a\)](#)及[圖 3-14\(b\)](#)所示，完成後之試驗設備如[圖 3-15](#)。

目前國外試驗所使用之剪力波元件(Bender Element)其材料多以聚水晶陶瓷(Polycrystalline Ceramics)代替傳統所使用之天然水晶體，除了具天然壓電晶體之壓電特性之外，亦可製作成任何所需要之尺寸，並且較不易受含水量及大氣狀況所影響。

壓電特性指當材料受到一機械外力作用時，將會產生相對於機械力大小之電壓；同樣地，當材料受到一電壓作用時，會產生相對於此電壓大小的形狀改變。因此可知，壓電現象產生的原因為壓電材料受到電壓作用會產生膨脹或收縮的行為，而壓電陶瓷晶片在焯煉時的極化方向決定了未來受一特定電壓方向作用下的變形方向，壓電陶瓷晶片可在不同方向上表現出壓電特性，故可表現出各種振動模式。

壓電陶瓷晶片可分為串聯(Series connected)與並聯(Parallel connected)兩種連接方式，不同的連接方式會有不同的壓電特性，串聯時機械能轉換為電能之功率是並聯的兩倍，反之，並聯時電能轉換為機械能的功率是串聯的兩倍，故利用壓電陶瓷晶片剪力波元件量測剪力波速時，上端以並聯型式作為激發端，並以函數產生器(Function Generator)調制激發波形，由試體底端以串聯型式作為接收端，並以示波器或是其他設備擷取波形，可達到傳送及接收訊號的良好效果。

7.2 函數產生器(Function Generator)

主要功能在於產生單一脈衝正弦波，函數產生器輸出電壓予上蓋剪力

波元件後將電能轉換為動能，透過土體傳遞剪力波。本試驗所使用之函數產生器是由惠普公司出產，型號為 HP33120A，函數產生器可輸出五種波形：正弦波、方波、三角波、斜波及 Random wave，可由預先定義之五種波型中任選一種使用，或自行撰寫程式設定波形，可輸出單一週期波型或輸出連續波；輸出頻率範圍為 $10 \mu\text{Hz}$ ~15MHz；輸出之振幅範圍視目前所選用之波形函數和輸出端而定，本試驗使用正弦波輸出端為 50，輸出最大振幅為 50mV_{pp} ~ 10V_{pp} 。

7.3 訊號擷取系統

當上蓋觸發一正弦波後，便採用示波器或電腦接收訊號，並記錄之，並在電腦上判斷剪力波到達時間；訊號接收系統應至少具有一個接收通道（channel）及一個觸發同步信號通道（目的在觸發時間原點），若使用示波器可透過 RS232 或 GPIB 介面將訊號輸出或直接將結果列印，而本試驗利用電腦配合訊號處理卡及信號輸入盒（功能類似於一般訊號量測之 terminal board）接收試體底座剪力波元件所激發之電壓波形，並且利用軟體同時進行訊號平均運算等功能，最大接收訊號頻率為 25kHz。

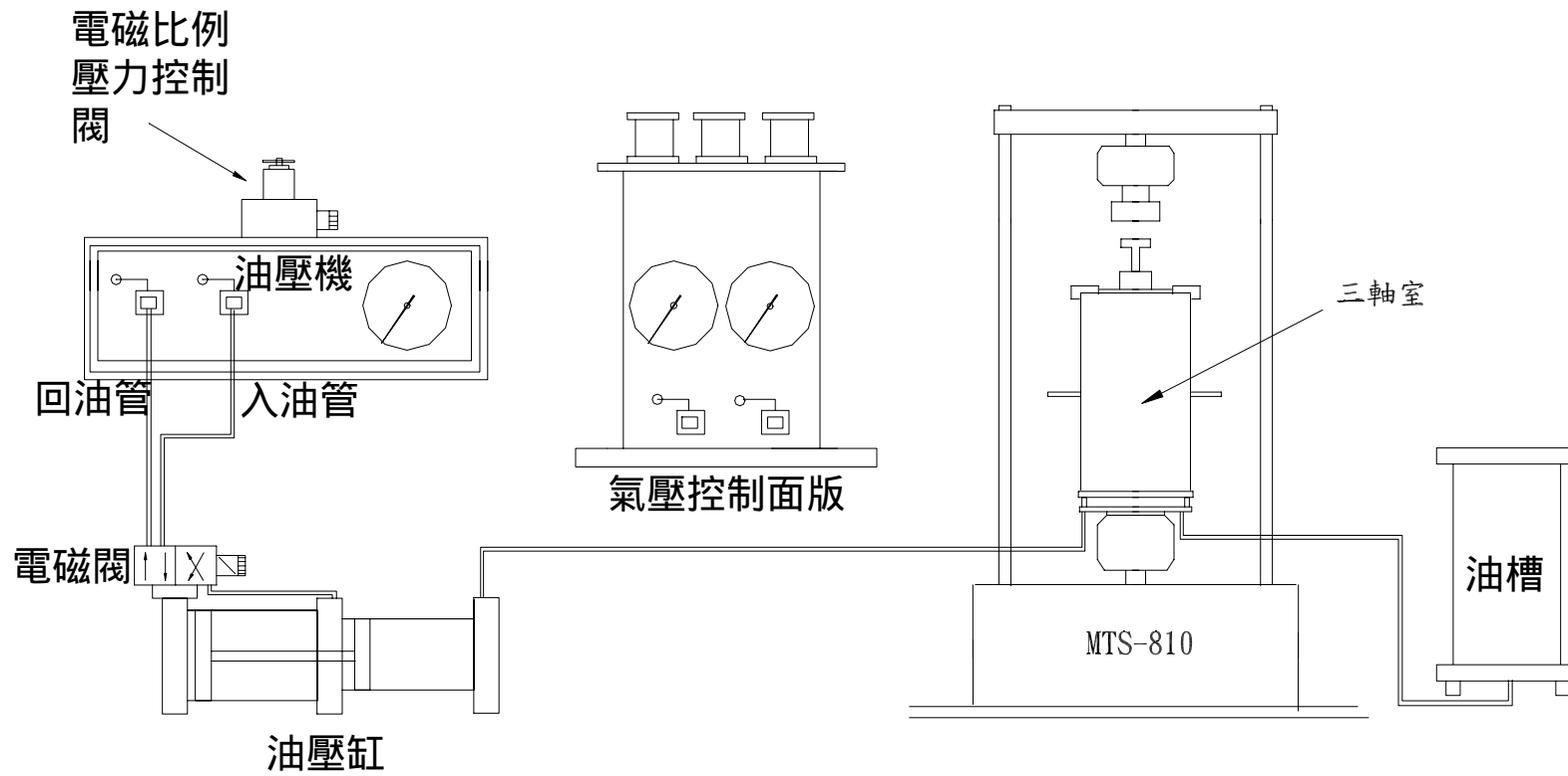


圖 3-1 軟岩三軸系統配置圖



圖 3-2 軟岩三軸試驗系統全景

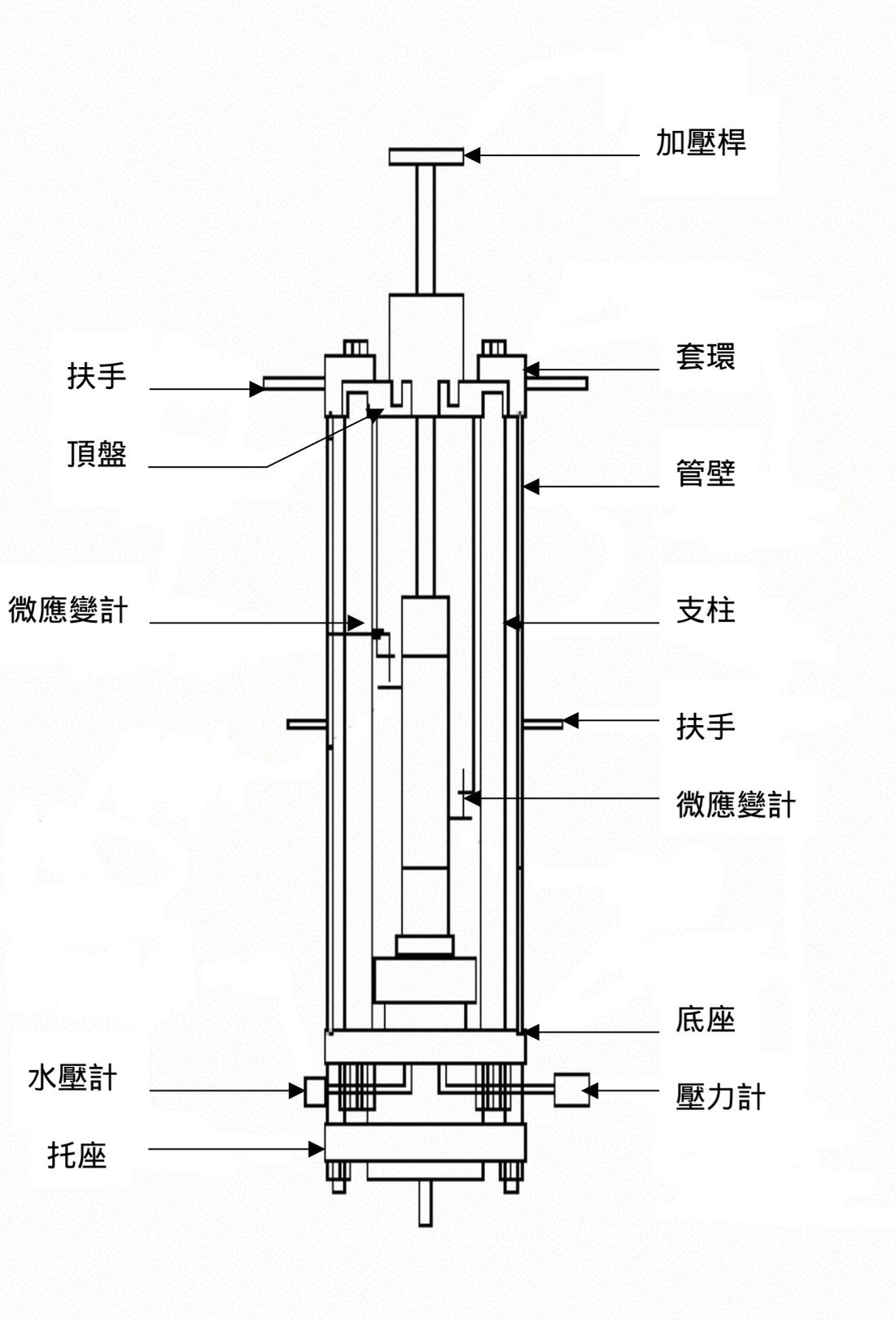


圖 3-3 三軸室組構圖



圖 3-4 MTS 458 控制器



圖 3-5 油壓機



圖 3-6 油壓缸與真空幫浦



圖 3-7 氣壓控制面版

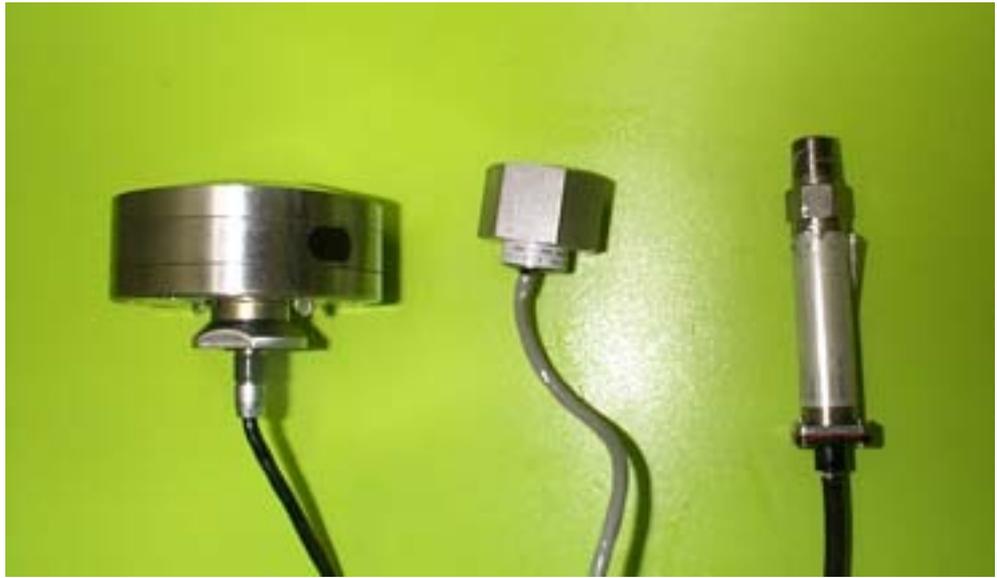


圖 3-8 內置式荷重計、壓力轉換器



圖 3-9 微應變計



圖 3-10 非接觸式位移計之目標金屬物固定裝置

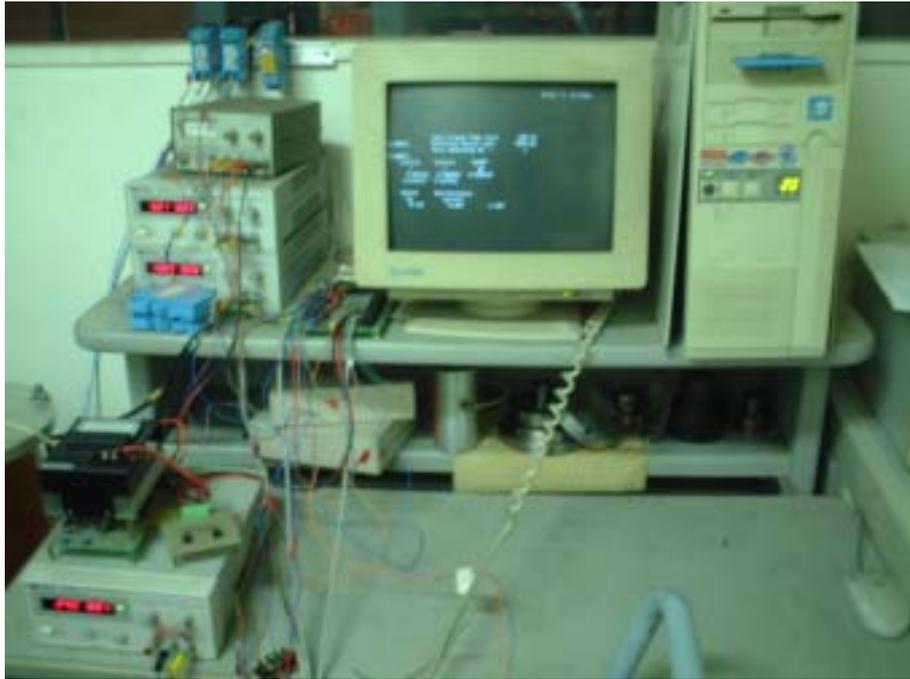


圖 3-11 資料擷取系統

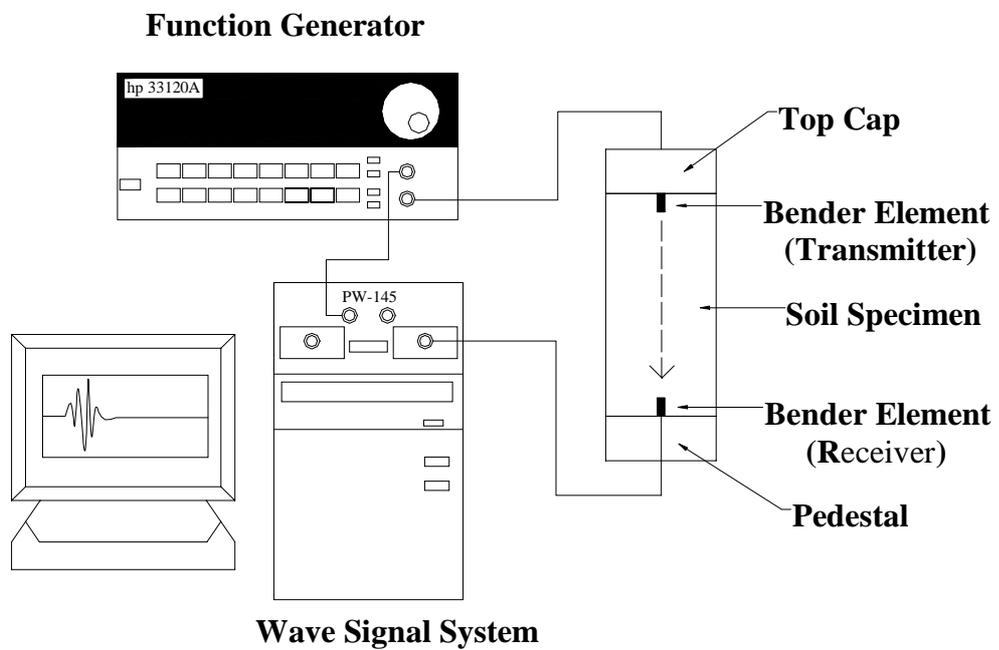


圖 3-12 剪力波元件試驗系統示意圖

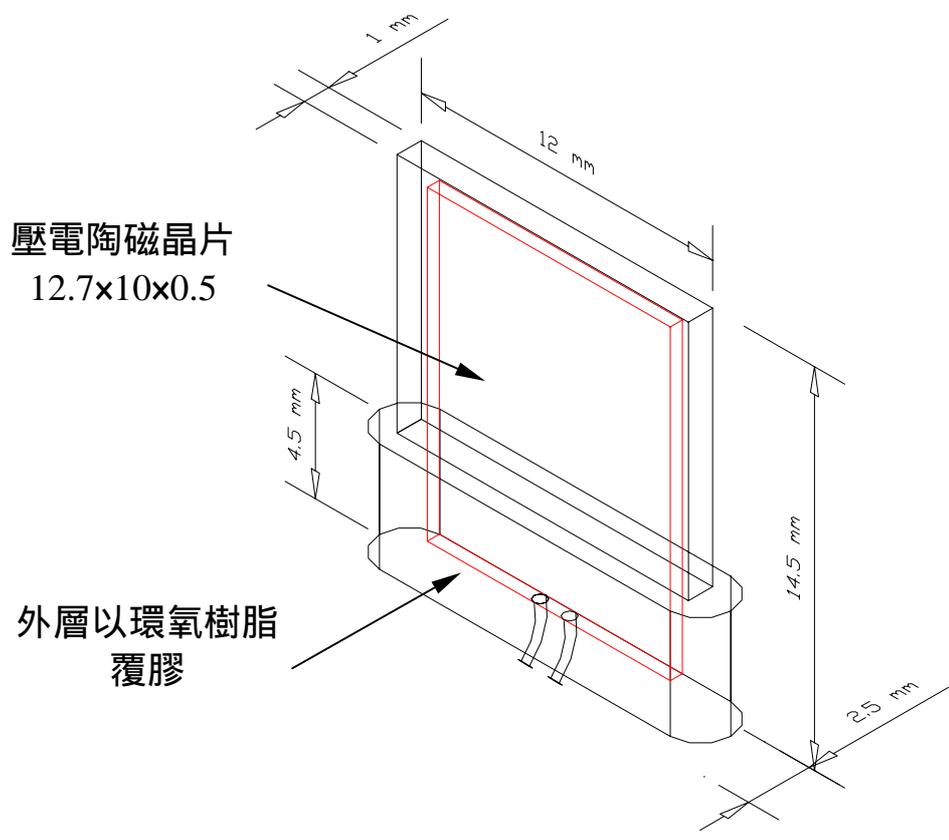


圖 3-13 壓電陶瓷晶片剪力波元件尺寸

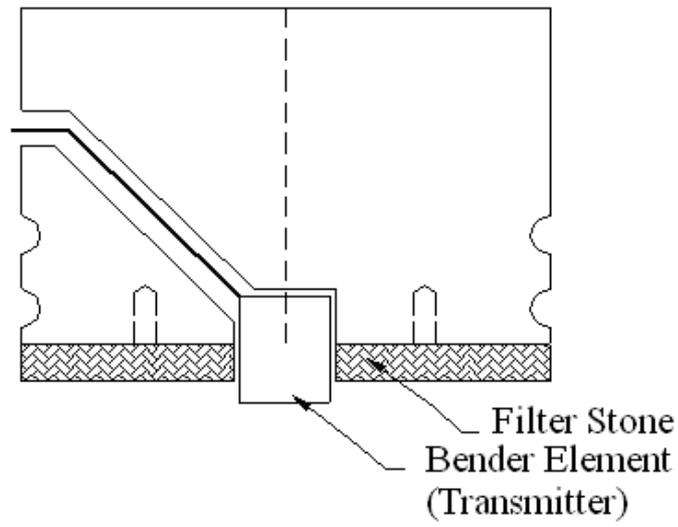


圖 3-14(a) 試體頂蓋剪力波元件（發射端）嵌入示意圖

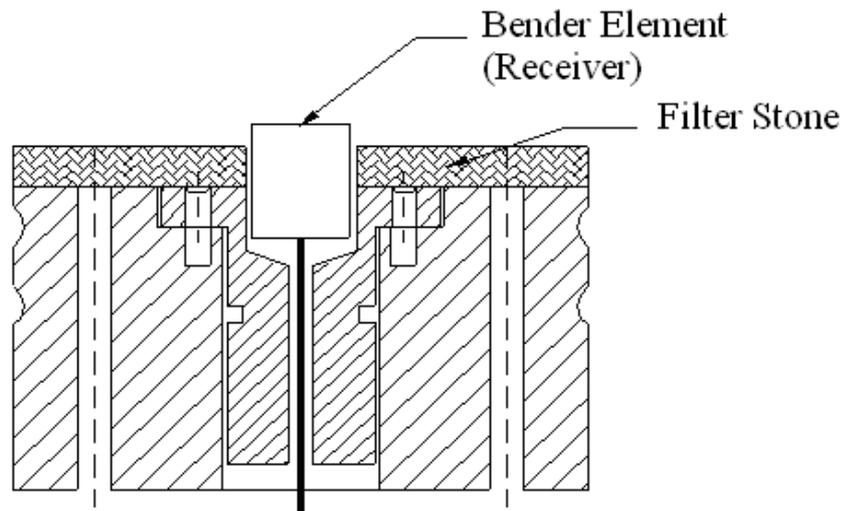


圖 3-14(b) 試體底座剪力波元件（接收端）嵌入示意圖



圖 3-15 上下蓋加裝剪力波元件完成圖

3.2 試體來源與製作

3.2.1 試體來源

本研究的岩樣來源可分為兩部分一為取自新竹縣寶山地區的岩樣屬西部麓山帶地質區，出露之地層以較年輕之上新世卓蘭層及更新世之楊梅層（頭嵙山層）為主要研究對象，岩心以膠結不良之砂岩為主。取樣深度約 10m，而鑽心時，岩心取樣器內套管內原有之 1m 長兩片半圓形之內套管將由兩長 50cm，單體之透明壓克力管所取代。壓克力管之內徑與原內套管相同。岩心在旋轉取樣時直接進入壓克力管，取樣器吊至地表後將所取得之岩心連同壓克力管一起用水壓頂出，然後立刻將壓克力管兩端開口使用膠帶與臘加以密封。如此一來，每一取樣之過程會產生兩支 50cm 長壓克力管保護之密封岩心試體(如圖 3-16)。而岩心只有在試驗室內準備做試驗時才取出，以保持其原有之含水量並降低受擾動之機會。

除了天然岩心試體，本研究亦以一批人造軟岩試體進行試驗，以確保材料的均一性。人造軟岩之來源係由取自新竹縣寶山第二水庫工址之邊坡岩塊，磨碎後以壓密方式，製作成人造軟岩，而製作方式及製作流程參照王柏皓(2004)、孫光東(2004)，製作完成之人造岩體(如圖 3-17)再使用鑽心機以泡沫作為介質鑽取之 NX 尺寸(如圖 3-18)。



圖 3-16 寶二水庫鑽心試體照片



圖 3.17 人造膠結不良砂岩製作完成照片



圖 3.18 鑽心機以泡沫作為介質鑽取 NX 尺寸照片

3.2.2 試體製作

根據 I.S.R.M.(1979)對岩石試驗試體之規範建議敘述如下：

(1)試體形狀為標準圓柱體，長度對直徑比(L / D)約 2.5 ~ 3.0，其中直徑不要低於 NX 尺寸(54 mm)，且需大於試體最大粒徑尺寸之 10 倍。

(2)試體兩端表面之粗糙度須小於 0.02 mm，並與試體軸線(側邊)之垂直偏差度小於 0.001 rad 或 0.05 mm / 50 mm。

經由鑽心所取得之不擾動岩樣，主要為頭嵛山層風化嚴重的黃色砂岩。試體製作時，先在壓克力管前端置一 14cm 之壓克力管(如圖 3-19)，將所需長度推入壓克力管後，再修整兩端的平整，使試體符合 ISRM 的規定，並儘速套膜，安裝於三軸試內，以減少擾動的機會。



圖 3-19 寶二水庫鑽心試體的製作

3.3 試驗方法

3.3.1 三軸壓密不排水試驗(CIU)

本研究目的在於了解人造膠結不良砂岩飽和狀態，在不同應力路徑下之力學性質，透過三軸壓密不排水實驗，來瞭解軟弱岩石在受剪時的孔隙水壓變化，應力應變行為及變形性，實驗方式為使用電腦伺服控制實驗過程的應力路徑，本試驗壓密速率以每分鐘 0.25MPa 應力加載的方式做應力控制，步驟概述如下：

- 1、 選取所需的岩心段，並製成長徑比約等於 2.5~3.0 的試體，再修整其上下面使之平整，量測試體的重量、長度及直徑。
- 2、 將試體套上膠膜，並於試體周圍貼上排水帶，以加速試體的飽和，接著架設小應變的量測裝置 proximator 的感應鋼片使之平整，再將試體移至三軸室內。
- 3、 調整 proximator 之感應距離，使之在量測的線性範圍，約為 4~5 伏特。
- 4、 將所需的應力路徑輸入電腦，再啟動電腦的控制程式，開始進行應力控制的三軸試驗，一開始的接觸壓力為 20N。
- 5、 以氣壓將油注入三軸室內，待油注滿後連接管線。
- 6、 並以除氣水來趕出試體內的氣泡。
- 7、 施加反水壓來飽和試體，並使圍壓大於反水壓，由於為乾燥試體飽和時間需二至三天，再進行 B-check 使 B 值達 80%以上。

- 8、 開啟試體排水的閥門，再依照實驗所需的應力路徑來進行均向壓密，此時紀錄試體在壓密時之體積變化，在壓密過程中進行波速量測。
- 9、 待壓密完成後，再關閉排水的閥門，進行波速量測，而後依所需的應力路徑來進行加載步驟。
- 10、 於實驗的過程中同時量測軸向力、圍壓、反水壓、波速量測、軸向變形以及小應變，以做為實驗分析之用。

3.3.2 單軸壓縮試驗

本實驗以 MTS-810 材料試驗機來施做，試驗以 MTS458 進行應變控制，以每分鐘 0.4% 應變速率加載，步驟簡述如下：

- 1、 選取所需的岩心段，並製成長徑比約等於 2.0~2.5 的試體，再修整其上下面使之平整，量測試體的重量、長度及直徑。
- 2、 架設試體於三軸室內，再啟動量測裝置及電腦程式。
- 3、 設定所需的應變速率，以應變控制的方式加壓直至求得殘餘強度。

3.3.3 物性試驗

一般物理性質試驗項目包括含水量、土粒比重、單位重及粒徑分析；試體之準備、試驗方法及步驟依照 ASTM (America Society for Testing and Materials, 1991) 之規範及陳賀瑞 (1997) 對中北部地區軟弱砂岩物性試驗的研究建議。

含水量試驗與比重試驗 (ASTM D2216, D854) 此兩種試驗均遵循 ASTM 的規範進行。比重試驗則取烘乾並通過 10 號篩之軟岩約 20 克進行。