

第三章 研究方法

本研究之目的為研發適用於軟弱岩石的中空扭試驗儀器。李程遠（2003）曾設計一套扭剪儀器以用於軟岩之實心試體環剪試驗，當時之設計，由於系統控制擷取的資料量過大，有時造成系統的不穩定。因系統的環境、試驗儀器的機械裝置、系統的材料勁度、控制系統的靈敏度、擷取系統的解析度、擷取資料量的處理，對整體的系統穩定度都相當重要。因此本論文的研究工作，包含了對系統的修正改進、安裝、測試中空試體環剪儀之研製，以及中空試體的製作、研擬試驗的步驟、方法與驗證。各階段工作乃以完成一套能求得軟岩殘餘剪力強度的環剪儀為目標，而材料試驗對象，設定為新竹寶二水庫右側壩墩膠結不良，單壓強度在 0.1~2 MPa 之間的更新世頭嵙山層香山相軟弱砂岩。

3.1 原有扭剪儀系統

多功能大地材料試驗儀最早是為土壤大型三軸試驗儀而設計，後為李程遠、曾孝欽（2003）將其改良為實心試體扭剪儀、直剪儀與單剪儀，以達到多功能材料試驗的目標。中空扭剪儀所沿用扭剪儀的設備（圖 3.1）如下：

1. 沿用大型多自由度荷載系統之機座與反力樑。
2. 油壓缸、油壓系統。
3. 上基座，包含線性滑槽與固定座。
4. 試體之扭剪室。
5. 下基座，其作用為連結油壓缸與扭剪室。

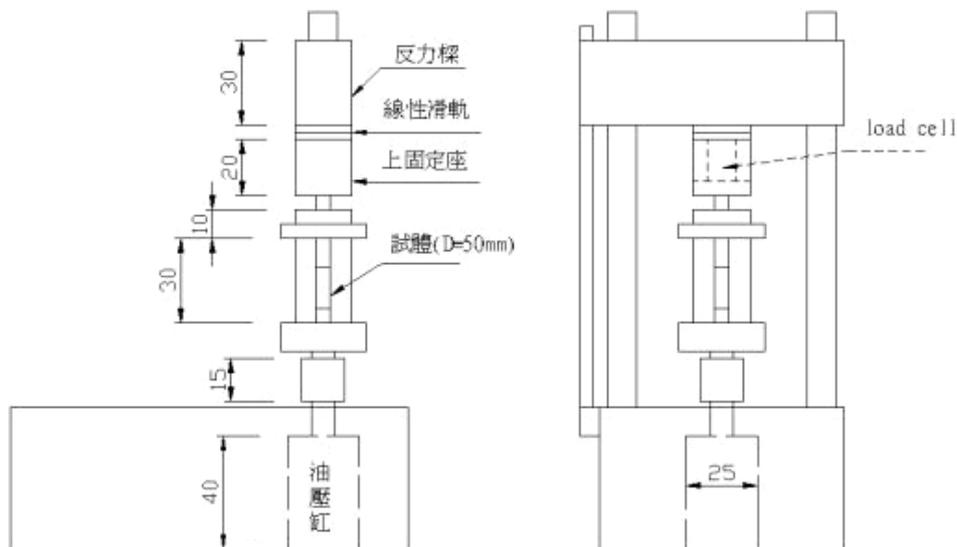


圖 3.1 扭剪儀系統架構示意圖（摘自曾孝欽，2003）

3.1.1 基座與反力樑：

基座之功能為容納油壓缸與提供用以架設試驗儀的平台。反力樑則提供試體架設時的反力。是由勁度為 10.5×10^9 N/m 之高勁度鋼架所組成。此反力樑配合油壓供應幫浦，可承擔 20 噸之正向力。

3.1.2 油壓缸：

此油壓缸由強詠機械股份有限公司製造，為一複合式的油壓缸。可同時提供垂直移動，如圖 3.2；與水平旋轉，如圖 3.3，上部為垂直油壓缸；下部則為扭力油壓缸。

垂直式油壓缸最大衝程為 150 mm，設計安全出力為 20 噸；旋轉式油壓缸最大旋轉角度則為 100 度，藉由伺服閥以 $\pm 5V$ 電壓控制。



圖 3.2 垂直油壓缸

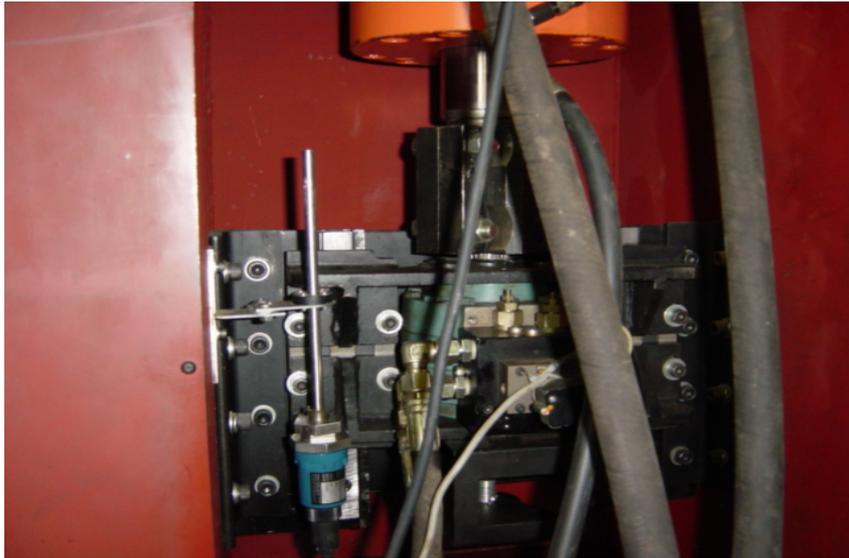


圖 3.3 旋轉油壓缸

3.1.3 油壓供應系統：

油壓供應幫浦 (Hydraulic Power Supply, HPS) 為美國 MTS 公司所製造，其提供試驗系統所需要的高油壓動力來源。本套試驗儀採用的是的油壓供應幫浦 (如圖 3.4)，與另一部獨立試驗儀 (MTS-810) 共用，以水冷式循環來達到降溫效果。



圖 3.4 油壓供應幫浦

3.1.4 上基座：

上基座為六片金屬板構成，形狀為一中空立方體，而荷重元放置其中，上方由二組線性滑軌組成，其功能為提供水平向的旋轉束制，並允許水平面上滑動為一雙向自由度的系統，如圖 3.5。



圖 3.5 上基座

3.1.5 扭剪室：

扭剪室為一個類似三軸室之裝置。由於本研究主要目標為獲得軟岩試體正確的殘餘剪力強度及應力-應變曲線。因此，本研究旨在研製一套適用軟岩中空試體之環剪試驗儀器，圖 3.6 所示為扭剪室。



圖 3.6 扭剪室

3.1.6 下基座：

圖 3.7 為下基座，主要功能為傳遞油壓缸的軸力及扭力至扭剪室中的試體，其組成包含：扭力傳遞夾具、下扭力計接頭、上扭力計接頭。其扭力傳遞均採摩擦傳導機制，夾具上驅動摩擦傳導所需的位移量遠小於由材料變形的應變—應力傳導所需之變形量，可防止不必要的衝程浪費。

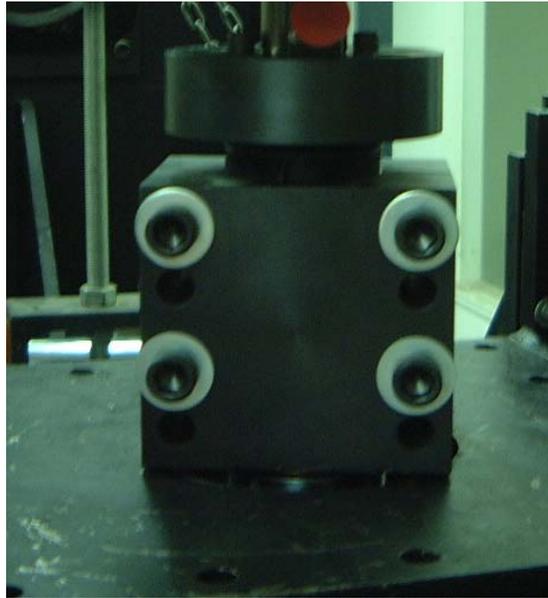


圖 3.7 下基座

3.1.7 垂直向荷重元 (Loadcell):

由 Interface 製造，型號為 SM-1000，如圖 3.8。其最大安全荷重為 1000 lb，量測精度為 1 lb，反應頻率為 3350Hz，最大變形量為 0.127mm。



圖 3.8 垂直向荷重元

3.1.8 垂直向位移計與角度計：

Temposonic 垂直位移計、角度計之功能為量測相對位置之感測計 (sensor)。Temposonic 垂直位移計負責垂直向線性位移之量測；而角度計負責水平旋轉方向之量測。Temposonic 垂直位移計與角度計均採用電磁感應。可確保量測的線性與準確，並連續量測，可大幅減少量測儀器損壞機會。

由於此類位移量測系統不同於荷重感測計 (sensor) 與一般 LVDT，其輸入、輸出訊號不易因系統之變換而有不同，也因為此類感應器標定困難，故採用原廠標定數據。



3.2 系統修改的部份

3.2.1 上下試體加載板：

上、下試體加載板之功能在於傳遞軸力、扭力於試體上，其形狀類似於三軸之上、下加壓板。李程遠 (2003) 原來設計之系統扭剪儀為了傳遞扭力，在原設計扭剪儀上下加壓板如圖 3.9，設計透水石並加設鋼製鰭片，雖能達到傳遞扭力的效果，但對試體卻預先產生張裂紋 (圖 3.10)，如此可能會導致所求的尖峰強度偏低。因此，本研究改採用黏膠接著方式以替代鋼製鰭片。設計的上下加載板直徑為 7.5cm 的圓柱形鋁製品，高 5.5cm，內部開一直徑為

3.7cm，深 0.6cm 的凹槽。並於加载板上刻數道溝槽如圖 3.11 所示，使試體與加载板間除了膠的黏結力外，還能提供部分的承載力以傳遞扭力。上加壓板由於需與加壓桿做連結，採用原設計的十字溝槽傳遞軸力與承受扭力，其優點為連結方便並能確保足夠之勁度與抗扭強度。下加壓板則使用螺絲將其固定於三軸室內，由於本研究並未使用三軸室的圍壓系統，故不設計排水路徑及透水石。



圖 3.9 原系統的試體上加載板及鱗片

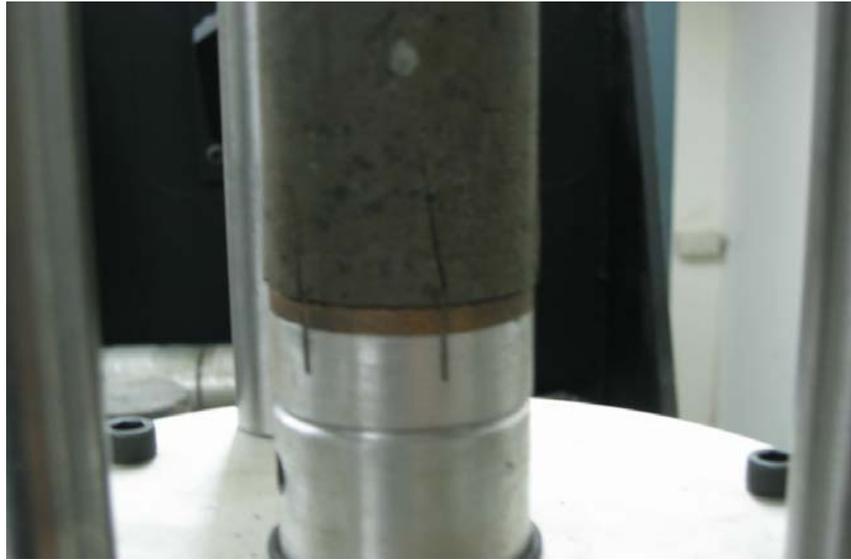


圖 3.10 原系統使用鰭片導致產生張裂紋的情形



圖 3.11 本研究採用之上載板並刻溝槽，再以粘膠接著傳遞扭力

3.2.2 試體橫向束制環：

圖 3.12 所示為試體橫向束制環，內、外環各一單元之外觀。

圖 3.13 所示為試體束制環，完全組合樹立後的外觀，也是中空試

體環剪儀中容納中空試體之所在。橫向束制環的存在，其目的在於模擬試體在 K_0 狀態下之情形。試體在壓密、受剪過程中由於橫向束制的存在，限制了橫斷面積變化的可能，可使試體的軸應力與剪應力在同一高程點完全相同，不容易有應力不均而產生的應力集中現象，讓試體的破壞行為更加合理、結果解析更加容易。

由於本研究是採用中空試體，原系統的橫向束制中空金屬環尺寸並不適用，因而變更為每一層金屬環之平均厚度約為 6.0 mm，內徑 75.02 mm，外徑 90 mm。每一層金屬環之底部，均由車床車出一圈凹槽，其中鑲有約 80 顆之金屬滾珠，層與層之間之相對運動，以滾珠為介質，滾珠則循環滾動。內環則以日本 NACHI 的軸承替代內部橫向束制的中空金屬環，其平均厚度約為 12mm，內徑為 12 mm，外徑為 37 mm。

原扭剪系統是採用實心試體，試體的中心點可能並未達殘餘狀態。本研究是採用中空試體的設計，可以讓試體的破壞行為與所得殘餘強度可信度大幅提高。本研究儀器既有之旋轉油壓缸安全旋轉量雖僅為 100 度，但即使對於較為軟弱變形性甚大的試體，亦能保證其應變量足以使試體斷面完全達到殘餘狀態。



圖 3.12 試體橫向內、外束制環（各一單元）



圖 3.13 試體橫向內、外束制環（完全組立）

3.2.3 控制系統：

原控制系統（如圖 3.14 示意圖）主要由電腦負責控制、擷取及計算的工作，在目前的個人電腦仍無法做如此大量的資料處理。因此，原控制系統常因大量資料的處理而資源不足導致系統失控的現象。而本次研究在系統中加入 MTS458.20 的控制器，試圖將控制、擷取的部分替代，使個人電腦單純的只做計算的部分，大幅降低資料處理所影響的系統速度，圖 3.15 為改良後系統伺服迴圈之示意圖。

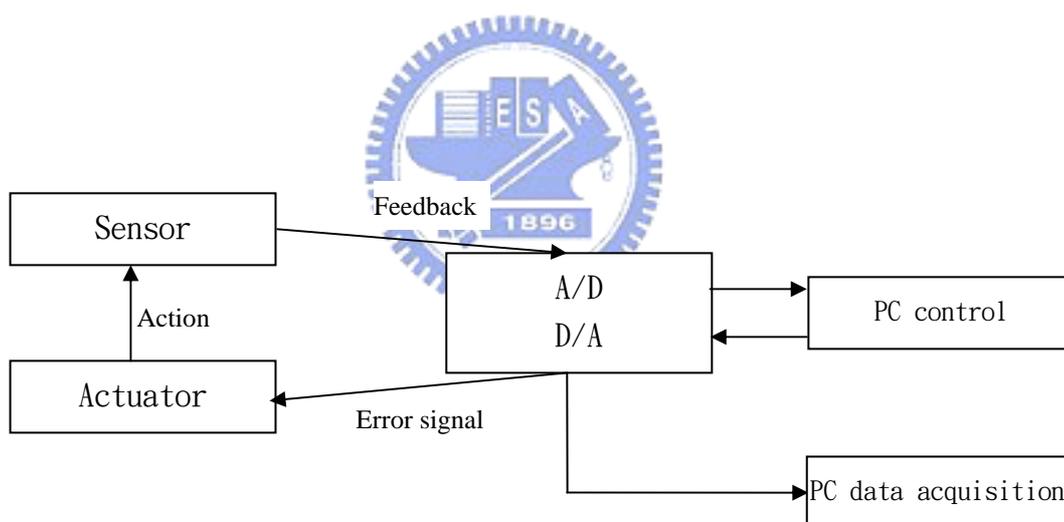


圖 3.14 原系統伺服迴圈示意圖

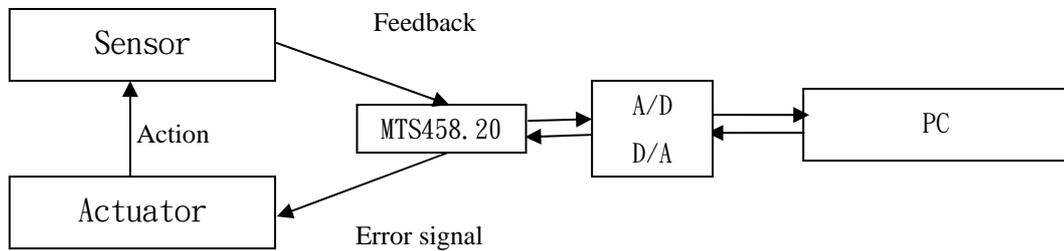


圖 3.15 改良系統伺服迴圈示意圖

3.2.4 控制軟體：

原試驗儀之控制軟體，以 Labview 圖控程式語言寫成，人性化的圖形操作介面讓使用者能快速熟悉控制方式、隨時監控試驗狀態、並修改容易。但由於控制系統中加入 MTS458.20 的控制器，因此控制程式必需加以修改。然而程式主體架構是設計執行不同組合條件之控制，以進行不同條件之加載試驗。包括（1）固定正向力扭剪試驗，控制「垂直應力—旋轉應變」、（2）固定體積扭剪試驗，控制「垂直應變—旋轉應變」、（3）固定垂直向勁度扭剪試驗，控制「垂直勁度—旋轉應變」。

擷取卡配合系統硬體設施，能同時監控八個頻道的動作，控制

兩個方向的油壓缸動作，因而能夠從事應力、應變，以及勁度控制試驗。

圖 3.16 為控制程式視窗介面。A 為資料儲存設定區，可設定資料存放路徑、檔案名稱；B 為八個監控頻道的放大係數 C1-S~C8-S，放大係數的輸入值與感應器的斜率有關。C 為監控八個頻道狀態之圖形顯示視窗，右側則分別監控八個頻道狀態之數位資料。D 為單位時間內感應器的掃描次數。E 為資料讀取設定區，可設定資料讀取路徑、檔案名稱，F 為監控讀取資料的圖形顯示視窗，左側為讀數為伏特數，中間為物理量，右側則為數位資料。

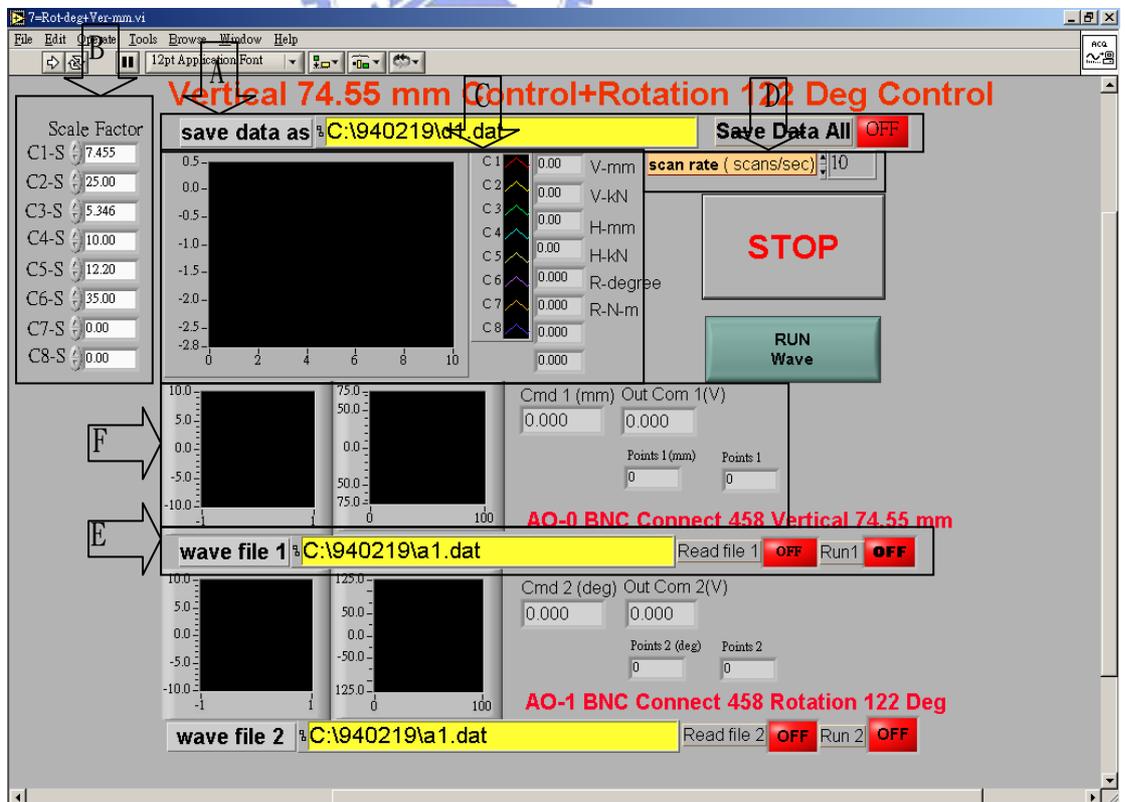


圖 3.16 LabView 控制程式視窗介面

3.2.5 微處理控制主機：

圖 3.17 為微處理控制主機 MTS458.20 之照片。MTS458.20 型微處理控制主機面板上有多功能顯示器，並有六個擴充卡槽，供控制線路板使用。並具有子卡（Range cartridge）提供計算、上下極限設定的保護裝置、緊急停止按鈕，可以使實驗過程中多一層保障。而原系統的 P、I、D 三個試驗控制參數在 LABVIEW 的控制面板上控制，在本研究中，則將其轉移至 MTS458.20 控制，由於類比訊號在處理上比數位訊號快（免除類比轉數位、和數位轉類比的轉換時間），也可減少電腦資料處理的負荷。綜合命令與感應器回饋訊號比較產生的差異稱為 DC Error，代表預期的動作與實際動作的誤差，當誤差值過大時即可調 P、I、D 值，而 P、I、D 在控制面板上為 Gain、Reset、Rate 三項，而 P 值的作用為調整傳至伺服閥訊號的放大比例，以降低 DC Error 值；I 值的作用是調整 DC Error 值積分的時間常數以減少靜態或低頻時的補償；D 值的作用是調整回饋訊號初次差分的起始點，可提高 Gain 的設定值使系統的運作更穩定。P 值與伺服閥反應速率有關，數值越高、反應越迅速；而 I 值則與控制容許誤差有關，數值越大、誤差容許量越小，此兩數值實驗控制精度的主要參數。理論上是越大越好，但實際上則要視試體種類、狀態調整。



圖 3.17 微處理控制主機 MTS458.20

3.2.6 擷取系統



由於試體的尺寸改變，而部分的擷取系統元件亦必需改變。現系統由於加入 MTS458.20 可以大幅分擔個人電腦的工作量。因此，原先控制擷取分開二台電腦，現已合併成一部電腦，也可以有效的利用設備資源。

擷取界面卡：

原系統儀器的擷取界面卡有兩套，分為控制系統之擷取介面與資料擷取之擷取介面，現系統已合併成為一套。本研究所用 LabView 控制程式（何明雄，2004），其硬體配備如表 3.2。

表 3.1 扭力計原廠標定值

Test Load Applied(lb-in)	Clockwise (mV/V)	Test Load Applied(lb-in)	Clockwise (mV/V)
0.0	0.0000	0.0	-0.0002
399.9	-0.1421	399.9	0.1417
799.7	-0.2834	799.7	0.2833
1199.6	-0.4246	1199.6	0.4249
1599.4	-0.5663	1599.4	0.5669
1999.3	-0.7078	1999.3	0.7085
2399.2	-0.8495	2399.2	0.8502
2799.0	-0.9903	2799.0	0.9923
2999.0	-1.0610	2999.0	1.0633
2799.0	-0.9901	2799.0	0.9924
2399.2	-0.8488	2399.2	0.8509
1999.3	-0.7071	1999.3	0.7091
1599.4	-0.5659	1599.4	0.5674
1199.6	-0.4243	1199.6	0.4255
799.7	-0.2828	799.7	0.2836
399.9	-0.1414	399.9	0.1416
0.0	0.0001	0.0	-0.0003
Nonlinearity(%FS)	0.019	Nonlinearity(%FS)	-0.028

表 3.2 訊號控制擷取硬體配備

	硬體配備
控制擷取卡	NI PCI-6035E
頻道卡	NI CB-68LP
類比控制器	MTS 458.20
數位控制器	Computer P4-2.4GHz

感應器：

扭力計 (Torque sensor)：

圖 3.18 為扭力計照片，型號為 5330-3K，為中空凸緣形式之扭力計，由 Interface 公司製造。其最大安全扭力量測上限為 3000 in-lb。表 3.1 為其原廠標定電壓值，圖 3.19 為垂直荷重元標定曲線，圖 3.20 為扭力計標定曲線。



圖 3.18 扭力計

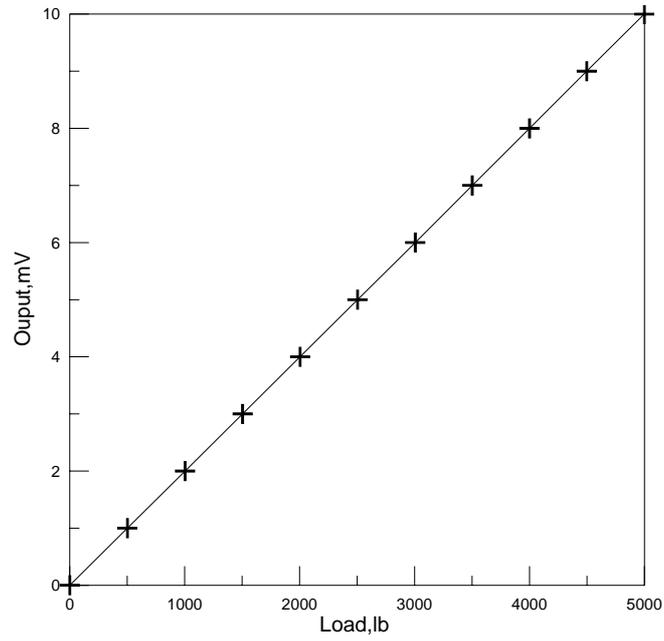


圖 3.19 垂直荷重元標定曲線

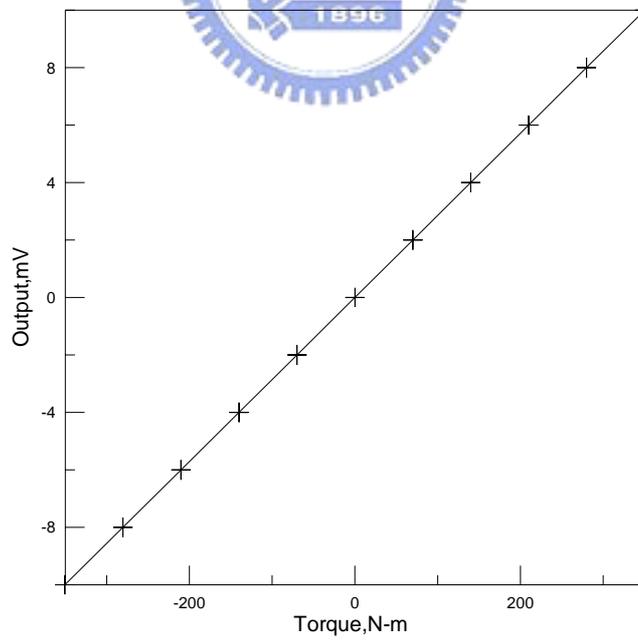


圖 3.20 扭力計標定曲線

3.2 中空試體的製作

由於軟弱岩石具有固結差、膠結不良、遇水極易軟化、單壓強度甚低的特性。因此，軟弱岩石在試體取樣的方法，與硬岩試體取樣的方法與策略迥然不同，詳見第二章。膠結不良之軟岩的取樣方法已有一定的困難度、失敗率高，若想要製作中空軟岩試體當然更是不易。軟弱岩石在鑽孔取樣的過程中仍會產生大量的岩屑和熱，本研究進行之初，在取樣的過程中也曾嘗試仿照陳賀瑞（1997）、林忠義（1999）的改良式軟岩取樣技術取樣，不過由於泡沫的介質對要製作如此薄壁且材料軟弱的試體，擾動仍然過大，在取樣的結果常是破裂成數塊的濕砂岩，如圖 3.21 所示。市面上的制式鑽筒原先的設計就並非是針對軟弱岩石特性而專門設計，鑽筒壁厚為 3.5mm，而鑽筒前的鑽石鑽頭厚度為 5mm，對如此軟弱的岩石常是以「撕裂」的方式在進行破壞。因此，有必要對整體的取樣方式加以改良，才有機會取得理想的中空軟岩試體。



圖 3.21 嘗試以傳統泡沫介質鑽取中空軟岩試體

3.3.1 試體來源

本研究試體來源為新竹縣寶山第二水庫右側壩墩，風化層下方約 2~3m 的位置的新鮮岩盤，採用挖土機明挖的方式開挖，將開挖起的塊狀試體放入 (100*100*100cm³) 尼龍袋內小心置入搬運車輛上並以纜索固定，周圍空隙以泡棉填充，以減少載運過程中的晃動。塊狀試體搬運至試驗室時以天車緩慢吊放，並切割至需要的大小 (約略為 40*40*30cm³)，搬運至通風良好的地下室存放。

3.3.2 鑽筒製作

本研究由於採用乾鑽的方式取樣，考慮到鑽頭會磨損的問題，因此設計觀念上採用岩心筒與筒頭分離的方式，而將岩心筒視為耗材。

筒頭為 SUS 304 不鏽鋼的鋼材，如圖 3.22，所研製之岩心筒材質為不鏽鋼複合式鋼材（外層材質採用 SUS304 不鏽鋼鋼板，內層材質採用 SPCC 冷軋碳鋼鋼板），如圖 3.23，所研製之岩心筒外徑尺寸各為 76mm、39mm，厚度均為 1.5 mm 的鋼管，經過計算與岩心取樣室的固定式鑽機尺寸配合，決定最適宜長度為 40 cm，筒頭上部尺寸外徑為 45mm，下部外徑為 73mm、36mm，長度為 12cm、9cm，筒頭中心並製造一個 5mm 的孔，以四個六角螺絲將岩心筒固定於筒頭上。利用砂輪機將直徑 76mm 的岩心筒平均分割成 16 個單元；直徑 36mm 的岩心筒則平均分割成 8 個單元，並以斜 45 度的方向切割鋸齒，鋸齒長度約為 7mm。





圖 3.22 岩心筒筒頭



圖 3.23 特製的薄管型岩心筒



圖 3.24 特製的鑽頭特寫

3.3.3 固定式鑽機

圖 3.25 為固定式鑽機照片，本研究主要為鑽取同心圓的軟弱岩石中空試體，鑽機的穩定性、固定性十分重要。本試驗使用的固定式鑽機為震生機器有限公司所製造，固定式鑽機主要是二支大鋼架為主要構架，並由變速馬達控制二支螺旋桿升降。固定式鑽機擁有兩組可變電阻，其一可以控制鑽筒的轉速，另一個則可以控制鑽筒下鑽的速度。此固定式鑽機在鑽取試體時，除了可控制鑽筒轉速、下鑽速度外，在取完內實心圓柱試體後，再取外中空圓柱試體時，亦能保持在同一圓心上，為其最大特點。



圖 3.25 固定式鑽機

3.3.4 鑽取試體

鑽取軟弱岩石中空試體的步驟如下：

1. 鑽取試體前，需先將塊狀試體的層面調成約略水平，再以四支螺桿、二支橫桿緊緊地鎖在固定式鑽機的基座上，必須加以檢核塊狀試體是否仍會晃動。
2. 將外徑為 39mm 的岩心筒，安裝於固定式鑽機上。
3. 以每公分為單位，並用油性的麥克筆標示水平的鑽進線。
4. 鑽孔取樣時的原則為鑽筒轉速為越快越好，而下鑽的速度則須緩慢不宜過快。
5. 每向下鑽進 3cm 後，就必須提起鑽筒一次。配合空壓機的高壓

空氣，將岩屑排出。

6. 完成內部的實心圓柱試體後並取出，再將外徑為 76mm 的岩心筒安裝上。
7. 重複 3~5 的步驟，即可完成軟岩中空圓柱試體。

另外，應注意之處尚可討論如下：

鑽孔取樣由於是採用空氣為介質的乾鑽。因此，對周遭的環境影響極大，本試驗過程採用 8 英吋，型號為 YS-200，150W 的手提式送風機，如圖 3.26，配合伸縮軟管及棉質布袋做為集塵設備，以降低對周圍環境的污染。

為了工作人員之安全與衛生，取樣者應配戴防塵的口罩及護目鏡，以減少岩屑粉塵對人體的傷害。



圖 3.26 手提式送風機

3.4 試驗步驟

由於本研究之環剪儀是對李程遠（2003）環剪儀再加以改良，其中試體的型式已由實心試體轉為中空試體。在試體準備上也必須加以修正，以達實驗理想的狀態。

3.4.1 試體準備

天然試體即使經過篩選難免仍具有相當程度之變異性，不容易避免材料個別或局部之變化。本研究試體來源為新竹寶山第二水庫右側壩墩的塊狀試體，由於該區域取回之試體物理性質變異性頗大。因此，運用 3.3.4 節鑽孔取樣的中空試體。在使用同一組試驗時，盡量採用同一塊的塊狀試體較佳。



李程遠（2003）扭剪試驗設計之觀念中，為了令試體處於無側向應變條件，必需以石蠟填滿金屬環與試體間之空隙。由於李程遠（2003）研究是將實心試體置入充滿液狀石蠟之金屬環中，令其自動「下沉」。此步驟雖可讓石蠟自動填入試體與金屬環之間隙，但卻無法保證試體與金屬環之間隙是完全的填滿。而本研究所研擬之方法是採用壓力式針筒注射的填充方式，可以確保試體與金屬環之間隙是完全的填滿。此外，前研究是將鱗片嵌入實心試體，如此做法會對試體產生預裂的後果，使得試體尖峰強度下降，如圖 3.10。為了改善此一

缺點，本研究是採用黏膠的方式處理，可以確保試體的完整性，而不會產生預裂的效果，可令破壞面自由發展，如圖 3.27 所示。



圖 3.27 改用黏膠方式，傳遞扭力且破壞面自由發展

試體套環：

1. 試體經 3.3.4 節所述的方法鑽孔取樣完成後，將風化部分標示出。
2. 切削試體：使用每公寸 14 齒的鋸子概略鋸出長度約為 100mm 的試體。
3. 研磨試體：使用 100 號的砂紙，將試體的上下兩端磨成水平，並使用高壓空氣將細顆粒的粉塵清除。
4. 組立環單元：先將 8 個內金屬環層層堆疊並放入金屬導桿，

並在各環底部與環內側塗以黃油，藉以潤滑、減少各環間之阻力，同時可避免石蠟由各環間之間隙逸出。

5. 放入內徑為 37.5mm，外徑 75mm 的環形紙片於底部。
6. 先將 16 個外金屬環層層堆疊，使用夾具固定其垂直度，並在各環底部與環內側塗以黃油。
7. 將試體放入內、外環間，並用內徑 37.5mm，外徑 75mm 的環形紙片將頂部封住。
8. 將適量石蠟放入玻璃針筒，並利用隔水加熱的方式。將石蠟溶解成液體狀。
9. 利用玻璃針筒的壓力，將石蠟徐徐注入試體與環間的空隙中（如圖 3.28 之照片所示）。
10. 試體上架，並於試體上下兩端塗布均勻的環氧化樹脂（Slink ECP-1230，工作時間為 20 分鐘），固定於上下加載板，靜置 18 小時。





圖 3.28 以針筒壓力式注蠟

3.4.2 壓密

由於控制程式與控制系統已有部份改變，壓密的過程已轉移至 MTS458.20 控制器執行，其壓密過程可分成軸向應力控制與軸向應變控制。

軸向應力控制：

應力控制之壓密是採緩慢加壓方式。預計壓密軸向力切割為若干，緩慢遞增，而後維持定值。並合乎 ASTM 對直剪的規範，試體在壓密應力值固定下，10 分鐘內試體之變形量需小於 0.05 mm，

才視為壓密完成。

軸向應變控制：

由於控制器 MTS458.20 在應力－應變控制切換過程中，油壓仍會有稍稍解壓現象，故在應變控制試驗之壓密，在應力控制下壓密完成後，回到應變控制，必須再度壓密。再度壓密的過程為：

1. 應力控制下，記錄顯示器上壓密完成時油壓缸之位置
2. 切換成應變控制，此時軸向應力會稍稍降低，再將油壓缸位置調整回壓密完成時的位置
3. 應力在 10 分鐘內降幅小於 2 公斤，則可視為壓密完成，開始施剪
4. 若應力衰減大於 2 公斤，則必須微微調油壓缸位置，使壓密應力重回預定壓密應力
5. 重複步驟 3、4，直至壓密完成



3.4.3 施剪

施剪過程旋轉一律採用應變控制。本試驗儀目前採用之應變速率為每秒旋轉 0.01 度。總行程為 95 度，實驗過程約為 2.5 hr。

3.5 討論

本研究首先以熱縮膜取代外橫向束制金屬環，藉以觀察與驗證試體的破壞情況確實合於理論的情況。隨後本研究以外橫向束制金屬環實際套裝於試體之外，配合資料擷取系統，進行固定應力扭剪試驗(控制垂直應力—扭轉角度)與固定體積扭剪試驗(控制垂直應變—扭轉角度)，以分別探討在不同應力狀態下的試驗行為比較。李程遠(2003)曾討論不同長徑比之試體強度差異及試體與橫向束制金屬環間有無填充材之行為，李程遠(2003)根據試驗結果認為試體長度較短者略高於長度較長者、有填充材即使破壞面形成試體亦不會崩潰。本研究確認改良後的中空環剪試驗量測結果，可以確保試體受剪的應力狀態已達殘餘強度，以提高試驗破壞模式之正確性。