

極軟弱岩石取樣與現地試驗技術之研發

Development of Sampling and In-Situ Testing Techniques for Very Weak Rocks

計畫編號：NSC88-2218-E-009-038

執行期限：87年08月至83年07月

主持人：黃安斌 國立交通大學土木工程系 教授

一、中文摘要 (關鍵詞：軟弱岩石、現地試驗、傍壓儀試驗)

台灣中北部麓山帶地區出露之地層(如上新世之卓蘭層及上新-更新世之頭嵙山層)常含極軟弱之砂岩層。這類砂岩層在地質年代上均屬於甚為年輕之地層，一般強度均在『極軟弱至軟弱』之範圍。對於離地表較淺或離開挖面不遠之砂岩層而言，容易因為風化作用或淋濾作用而產生材料逐漸弱化之行為。本計畫為整合性計畫『極軟弱年輕砂、頁岩層之力學行為』中的一個子計畫。本子計畫之目標在於1) 使用改良後之取樣設備與方法，鑽取軟弱岩石試樣提供各子計畫實驗之用；2) 研發適用於軟弱岩石之現地試驗技術與其結果之解釋；和3) 配合其他子計畫中室內試驗之方法，建立一套決定軟弱岩石工程性質的系統與分析工具。本三年計畫於1997年8月開始執行。第二年之工作重點在研發製作一適用於軟弱岩石之高壓傍壓儀以及一多功能現地試驗裝置，並使用此高壓傍壓儀從事一系列之現地試驗。本報告敘述計畫之背景、目的與第二年之研究成果。使用本子計畫所

英文摘要 (keywords: weak rocks, in-situ test, pressuremeter test)

The outcrops in the northern and central regions of Western Taiwan (e.g., the Pliocene Cholan Formation and the Pliocene-Pleistocene Toukoshan Formation) often contain very weak sandstones. The strengths of these young formations lie within "very weak" and "extremely weak". The near-surface sandstone can easily degrade or weaken due to weathering or leaching action. The objectives of this sub-project include: 1) design and improve drilling and sampling techniques that are suitable for weak rocks, and obtain high quality samples for other laboratory

experiments; 2) develop in-situ testing systems and techniques that are suitable for weak rocks; and 3) collaborate with other sub-projects to establish a system for the engineering analysis of weak rock formations. The proposed in-situ tests will include field slug tests, shear wave velocity measurements, development of a pressuremeter and a multiple purpose down-the-hole in-situ testing device. The three-year project has been in progress since August of 1997. Research efforts in the second year concentrate on the development of a high stress pressuremeter and a multiple-purpose, down-the-hole in-situ testing device that are suitable for characterizing weak rock formations in-situ, and performing a series of pressuremeter tests in a weak rock using the newly developed pressuremeter equipment. This report describes the background of the research, its objectives, and accomplishments in the second year.

二、計畫緣由與目的

台灣中北部麓山帶地區出露之地層，除未固結之紅土礫石層、台地堆積層、河床沖積層等以外，係以上新世之卓蘭層及上新-更新世之頭嵙山層為主。此等岩層在地質年代上均屬於甚為年輕之地層，屬於『極軟弱至軟弱』之岩石。Johnston (1993)認為軟弱岩石特性恰介於土壤力學與岩石力學處理範疇的界限，宜同時兼用土壤力學與岩石力學的觀點來考慮。極軟弱年輕之砂岩層普遍具有固結差，膠結不良，於原地層中尚可如同固結之岩石，一旦受解壓或經開挖暴露後，潮溼時易於分解與受侵蝕，若出露地表乾燥時則可能產生剝落，顯露其弱化之特性。因強度不甚高，一般節理不會很發達，節理影響亦較不明顯。因此等砂岩孔隙大、透水性高，含此岩層之邊坡於豪雨或開挖後，於砂岩體內常產生局部之侵蝕破壞或沿頁岩面上

產生各種形態之大規模岩層滑動。

此類地層常發生大地工程災害，探究其原因乃是對於此類地層之力學行為、力學特性、材料組成律等未完全掌握，而未採用適合之分析方法及施工方法所致。岩層取樣時多採用水為介質，致使鉆探取得之岩樣，普遍含水量均過高（極可能失真），大部分岩樣本身之組織構造可能已受到破壞。岩石力學實驗室得到之單壓強度結果一般均甚為散亂。而由於厚層砂岩內常夾薄層之頁岩（香山相）或常形成砂頁岩互層（卓蘭層、六雙層），取樣過程欲明確鑑別薄頁岩層之存在亦十分困難。

傍壓儀試驗是一種現地試驗的方法，因為無需取樣，應該可以避免許多與取樣相關之困難。

三、研究方法及成果

本年度之計畫中研發製作一適用於軟弱岩石之高壓傍壓儀以及一多功能現地試驗裝置，並在新竹縣寶山第二水庫壩址使用此高壓傍壓儀從事一系列之現地傍壓儀試驗(PMT)。PMT試驗結果並與使用 suspension P-S Logger 所量得之結果相比較以評估高壓傍壓儀之功能。

3.1 高壓傍壓儀之設計及儀器特點

因軟岩之強度及變異性皆大於土壤，藉由體積量測方式之儀器無法量取極小之變形量，以反應岩層真實之勁度，且岩層一般均具有方向性，因此在軟岩地區施作傍壓儀應以直接徑向變形量測方式為宜。本研發儀器係採用預鑽式，同時考量在軟岩地區需量取微小變形，且軟岩於鑽探過程易因介質沖洗而使孔壁擴大。因此為避免孔徑過大而無法量取足夠之變形量，探管之直徑以接近鑽孔直徑為宜，考量國內鑽探通常採用NX口徑(76mm)之鑽孔，因此本探管(含保護殼)之直徑取76mm作為設計依據。所發展之傍壓儀具有下列特點：

1. 利用六個應變臂 (strain arms) 讀取傍壓管上中下三層及各90度方向之變形量，以瞭解孔壁實際擴張行為，以求進一步掌握軟岩受壓過程中地層變形可能之差異性及弱面之影響。
2. 傍壓管總長為1075mm，可擴張段長度為410mm，直徑為76mm，可適用於NX size之鑽孔。長徑比等於5.4，依據Borsetto (1983) 利用不同型式傍壓管進行比較，建議傍壓管

之長徑比應大於4，以減少因membrane兩端束制，造成傍壓管擴張時非成圓柱體膨脹之影響，因此一長徑比應可符合要求。最大允許membrane徑向總變形量為20mm，大約等於2.7%之徑向應變，解析度為 3×10^{-4} mm，約為0.005%徑向變形量

3. 整體系統之最大容許壓力 (maximum pressure) 為25MPa，可充分滿足軟岩之需求。
4. 資料擷取系統一部份位於傍壓管底部，直接將應變臂輸出之類比訊號轉成數值訊號傳遞至地表，可避免因鑽探深度過長，輸出電壓因長距離傳輸導致之雜訊影響。
5. 壓力轉換器位於傍壓管內，可直接量得作用應力，以避免應力量測單元位於地表之應力損失。

本研究所發展之傍壓儀大體可分為1. 壓力來源及連接管路2. 控制系統3. 傍壓管三部份，各項配件佈置如圖一所示。

傍壓儀之壓力來源可以使用油壓（最大壓力25MPa）或氣壓（最大壓力10 MPa）。為使各項壓力源之壓力能夠符合試驗所要求之精度，在壓力源與傍壓管間，設有一控制箱。藉由耐高壓及高精度之壓力表及調壓閥調整壓力至試驗所需，同時另有閥門可進行油壓或氣壓源之切換。為使傍壓管內與地面間連接訊號線路不受到鑽孔孔壁塌陷導致之損壞及避免地下水之干擾，全部訊號線置於油管內保護。因此在地表上需設有一轉接器以使線路得以連接電腦及電源供應器(power supply)。傍壓管全長1075 mm，直徑74 mm。依結構體主要可分為兩段，一為壓力室長度為740 mm，可膨脹部分長度 = 410mm，一為資料擷取室長為265 mm。依功能包含membrane 中心桿件、應變量測單元(displacement unit)、應力轉換計(pressure transducer)、資料擷取系統等，各元件組裝完成之傍壓管詳如圖二。傍壓管膜(membrane)使用現有之Ménard GB Probe 之耐高壓橡皮膜，內含一圈鋼絲，其直徑68 mm，長度510 mm，厚度4.3 mm。為使變形量測單元之安裝及各元件具有固定位置，於壓力室中設有一中空圓桿。於置入傍壓管前將量測應變臂變形之簧片鎖上，將簧片上之strain gage線路連結，可方便組裝作業，再利用螺栓與壓力室外壁結合。主要

電源及輸出線路經由圓桿中心，避免與簧片上惠施登電橋線路相互影響。圓桿中心同時作為簧片及彈簧之固定器。其詳細構造如圖三所示。

本系統採用徑向變形直接量測之方式，同時為考慮軟岩本身之材料特性，設置了上中下三層之應變臂，每層四個變形量測器，各以間隔90°之方向排列。每個變形量測器包含了主體彈簧、簧片。當傍壓管膜未膨脹時應變量測主體上之連桿向內壓迫簧片，而簧片於受壓側及受張側分別貼有strain gage，以各成180°之兩個簧片連結成惠施登電橋(Wheastone bridge circuit)。藉由惠施登電橋輸出電壓之改變量取徑向變位。應變臂之各別可容許之最大變形量為10 mm，亦即兩側共可量取20mm之徑向變形量。

因此項試驗係於地表下之鑽孔內施作，而其線路亦隨孔深而增長，為避免strain gage及應力轉換計所輸出之電壓在訊號傳送過程中受雜訊之干擾，將資料擷取系統置於傍壓管內。藉由可耐高壓及高溫之特殊接頭，將訊號由壓力室傳送至下方之類比/數值轉換器，此系統之最小解析度等於 3×10^{-4} mm，大約等於0.005%之徑向應變。類比/數值轉換器直接將輸出之電壓轉成數值訊號，再透過置於油壓管內之線路回到地表，連接至地表上，透過RS-232接至電腦做資料擷取。

3.2 PMT 試驗結果

本研究在新竹縣寶山第二水庫壩址使用此高壓傍壓儀從事一系列之現地傍壓儀試驗(PMT)。在PMT中進行兩次加壓解壓試驗(unload-reload loop)。圖四展示一典型之PMT膨脹曲線。圖五將PMT加壓解壓試驗所得之剪力模數(G_{ur})與最大剪力模數 G_o 之比較。 G_o 是經由PMT鑽孔附近P-S Logger所量得之剪力波速換算而得。由 G_{ur} 與 G_o 改變趨勢之一致性可證明本研發傍壓儀之可靠性。

3.3 軟弱岩石孔內試驗裝置之研發

軟弱岩石具有大地工程材料普遍存在之缺陷(defects)，像是裂縫、互層與節理等，但是就軟弱岩石而言，缺陷對整體岩性之表現影響甚大。使用現地試驗可避免取樣之擾動性問題，而且理想的現地試驗應該可以量測缺陷對整個岩體的影響。要達到這個目的，試驗時受應力影響之材料範圍就必須擴及這些可能存在的缺陷或互層才會得到具有代表性的結果。相關傳

統的現地力學試驗方法均可達到此一要求，像是平板載重試驗和現地直接剪力試驗等。但是傳統這些試驗需要使用大型儀器，價錢非常昂貴，在實際解決工程問題上，常會因此而不加以考慮。

本研究已完成研發一套中型系統，可在鑽孔內做類似傍壓儀之鑽孔千斤頂試驗(borehole jack test)、鑽孔剪力試驗(borehole shear test)、以及孔底平板載重試驗(plate loading test)。此系統裝置適用於軟弱岩石之現地試驗，不僅可以求取橫向與縱向之應力—應變關係曲線，更可以得到鑽孔側壁剪力行為，而且其試驗應力影響範圍需擴及軟弱岩石之缺陷(defects)。

3.3 軟弱岩石孔內試驗裝置介紹

軟弱岩石孔內試驗裝置是綜合Retrievable rig (Johnston et al., 1980)、Goodman jack (Goodman et al., 1968)、和孔底平板載重試驗 (Pells, 1983; and ISRM, 1981)之觀念將多種之試驗功能結合在單一的裝置設計而成。本儀器可分為：1、動力系統，又稱壓力源系統；2、孔內試驗裝置主體；3、量測擷取系統。而其中動力系統可在細分為平板載重動力系統與鑽孔千斤頂之壓力系統既是使用前述之高壓傍壓儀。孔內試驗裝置主體又可分為上部千斤頂試驗裝置、中部傍壓儀放置筒與擷取盒裝置、以及下部平板載重試驗裝置；量測擷取系統也分為量測儀器系統和資料擷取系統。鑽孔試驗裝置主體見圖六(a)、(b)；儀器整體試驗系統圖敘述於圖七。平板載重動力系統可提供70MPa以下，平板載重試驗所需之壓力源。上部千斤頂試驗裝置可進行鑽孔千斤頂試驗與鑽孔剪力試驗，此部份之俯視示意圖見圖八。裝置主體由四片鋁合金材質之填充板所構成，四片填充板組裝起來中間留有直徑76mm之孔洞以便放置高壓傍壓儀，填充板相鄰兩者之間裝設有五條拉力彈簧，在填充板閉合時已預先施予拉力，此目的在於試驗完之後，填充板可以自行回復到直徑200mm。中部傍壓儀放置筒與擷取盒裝置長度為365mm，因為傍壓儀底部設有資料擷取盒等設備，所以底部長度較長，這樣的長度設計可以讓傍壓儀的薄模位在上部的四片填充板的正中央，加壓膨脹時才會讓力量平衡，填充板向外均勻膨脹。下側之擷取盒乃是要放置類比/數位轉換器與Load Cell之電壓放大器，可以提供量測儀器與資料擷取系統之輸入電源，以及

把轉換後之數位訊號傳遞到地表，透過 RS-232 接至電腦。底部平板千斤頂之衝程為 30mm。千斤頂外徑為 170mm，高度為 200mm，內部有效推動面積為 78.5cm²，在油壓為 35MPa 時推力為 300kN。

3.4 孔內試驗裝置之試驗原理與結果解釋

鑽孔千斤頂試驗是依據 Goodman jack 之原理，主要內部膨脹機制是利用傍壓儀在本裝置內部膨脹，以及傍壓儀內部之應變臂(strain arms)來量測四片橫向填充板向外膨脹量，以求得岩體鑽孔側壁之壓力—變形之關係曲線。等到四片填充板之橫向量形量停止後，開啟底部之平板千斤頂並增加壓力，使上部鑽孔千斤頂試驗裝置與下部平板載重試驗裝置互相推擠；上部鑽孔千斤頂試驗的四片填充板向上移動，量測 Load Cell 之讀數及上部架設之線性量測儀器所量得知變形量，可以推知鑽孔側壁剪應力與剪應變之關係曲線，此試驗過程即為鑽孔剪力試驗；而下部平板也因此向下擠壓底部岩體，量測 Load Cell 之讀數、以及架設於底部千斤頂之線性量測器與上部架設線性量測器兩者之讀數差值，可以得知岩體縱向 z 軸之應力—應變之關係曲線，這個過程就是傳統孔底平板載重試驗。是本研發之系統省去了傳統平板載重試驗龐大的反力架系統，而改以鑽孔千斤頂之四片填充板所提供之抗剪力來當作反力來源。

鑽孔千斤頂試驗結果，利用 Goodman et al. (1968) and Heuze (1993)所提之公式，

$$E_{x,j} = A \cdot B \cdot D \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta D_x} \cdot T^* \quad (1)$$

$$E_{y,j} = A \cdot B \cdot D \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta D_y} \cdot T^* \quad (2)$$

其中

$E_{x,j}$ 、 $E_{y,j}$ 分別為鑽孔千斤頂試驗得到岩體橫向之 x 軸與 y 軸的彈性模數，MPa

A 為 3-D 修正因子，一般假設為 0.86

B 為內部壓力效能修正因子，以 Goodman jack 為例，此值為 0.93

D 為鑽孔直徑，mm

ΔQ 為壓力增量，MPa

ΔD_x 和 ΔD_y 為傍壓儀量得之 x 方向與 y 方向之徑向變形量，mm

T^* 為接觸角 β 與卜松比 ν 之函數

分別求得岩體橫向 x 軸與 y 軸的彈性模數 $E_{x,j}$ 與 $E_{y,j}$ 。

利用底部平板千斤頂所進行多階段加載，得到平板載重試驗之力量—變形關係曲線，亦可利用 Pells (1983) 之公式，

$$E_{z,p} = \frac{Q}{\rho D} (1 - \nu^2) \mu_0 \quad (3)$$

其中

$E_{z,p}$ 為孔底平板載重試驗得到岩體縱向之 z 軸的彈性模數，MPa

Q 為加載力量，N

ρ 為垂直沈陷量，mm

D 為鑽孔直徑，mm

ν 為岩體之卜松比

μ_0 為孔底平板載重試驗之深度修正因子

以獲得岩體之縱向 z 軸的彈性模數 $E_{z,p}$ 。鑽孔剪力試驗之結果可用以推估軟弱岩石側壁剪力行為，可用於基樁設計之參考。

四、結論與討論

本研究所規劃之高壓傍壓儀與軟弱岩石孔內試驗裝置研發製作已完成。高壓傍壓儀並已完成一系列之現地 PMT 試驗同時與 P-S Logger 所得結果相比較。由 PMT 所得 G_{ur} 與 P-S Logger G_o 改變趨勢之一致性可證明本研發傍壓儀之可靠性。軟弱岩石孔內試驗裝置已初步測試其上部鑽孔千斤頂試驗之保護簧片與拉力彈簧之勁度在內部使用 Ménard 傍壓儀時，傍壓管內壓為 3kg/cm² 就開始膨脹，在 3.5kg/cm² 時徑向變形量已達 10mm，顯示測試結果令人滿意。而且減壓時之回復性良好，拉力彈簧強度適當。

五、參考文獻

- Borsetto, M., Imperato, L., Nova, R. and Peano, A. (1983), "Effects of Pressuremeters finfte length in soft clay", Soil and Rock Investigations by In-situ Testing, Paris, Vol.2, pp211-215.
- Goodman, R. E., Van T. K. and Heuze F. E. (1968), "Measurement of rock deformability in boreholes", Proceeding 10th United State Symposium Rock Mechanics, Austin TX, pp. 523-555.
- Heuze, F. E. (1993), "How Do Some Field Tests

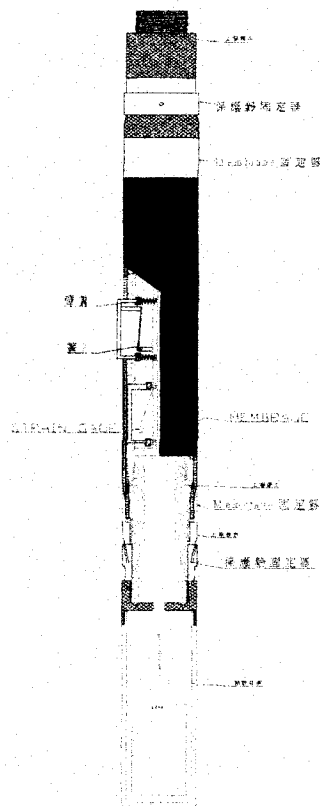
Really Work? The Case of the NX-Borehole Jack,” Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice, and Projects, Vol. 3 Rock testing and site characterization, pp. 683 –692.

Johnston, I. W. (1993), “Soft Rock Engineering], Comprehensive Rock Engineering: principles, practice, and projects,” Vol. 1 Fundamental, pp. 367-393.

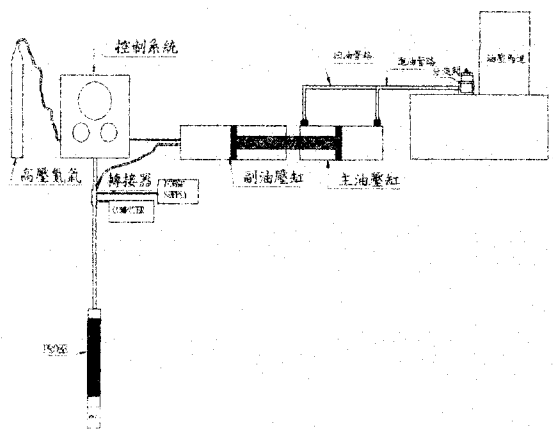
Johnston, I. W., Donald, I. B., Bennet, A. G., and Edwards, J. W. (1980), “The Testing of Large Diameter Pile Rock Sockets with a Retrievable Test Rig,” Proceedings, 3rd Australia – New Zealand Conference Geomechanics Wellington, Vol. 1, pp. 105-108.

Pells, P. J. N. (1983), “Plate loading tests on soil and rock,” In Situ Testing for Geotechnical Investigations, Balkema, Rotterdam, pp. 73-86.

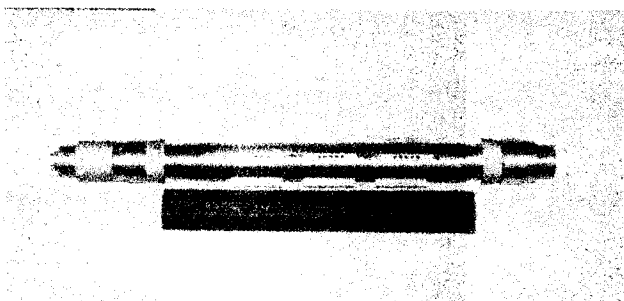
六、圖表



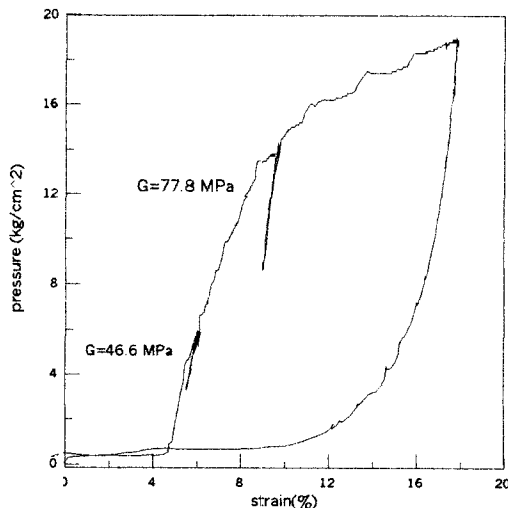
圖三、傍壓管配置圖



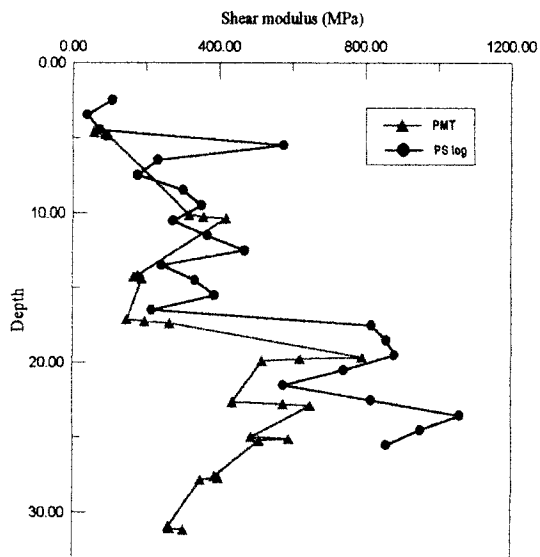
圖一、高壓傍壓儀系統。



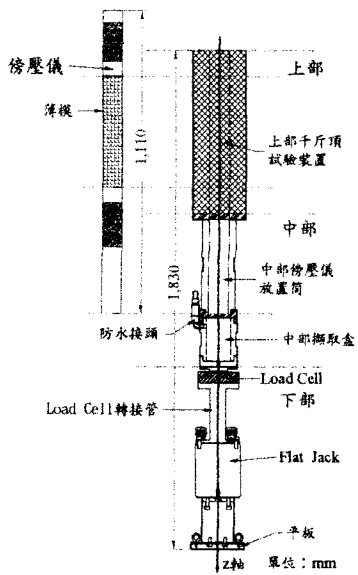
圖二、組裝完成之傍壓管。



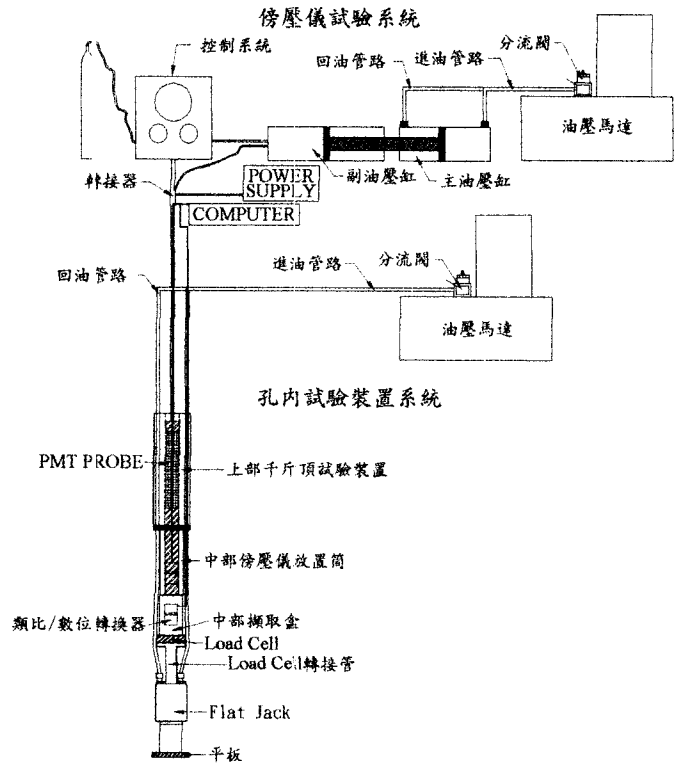
圖四、典型之 PMT 膨脹曲線。



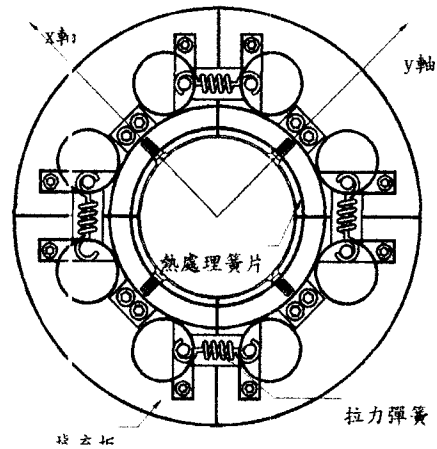
圖五、PMT G_{ur} 與 G_o 之比較。



圖六、鑽孔試驗裝置主體。



圖七、儀器整體試驗系統。



圖八、上部千斤頂試驗裝置之俯視圖。