

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

溫度影響岩石之潛變行為研究(I)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-002-047-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：鄭富書

計畫參與人員：蔡立盛

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 1 日

# 溫度影響岩石之潛變行為研究(I)

## Influence of temperature on Creep of Rock(I)

計畫編號：NSC 92-2211-E002-047

執行期限：92/8/1-93/7/31

主持人：鄭富書 台灣大學土木工程學系 教授

### 一、摘要

**中文摘要**(關鍵詞：砂岩，潛變)

隨著近代交通路網的增建及核廢料儲存等需求下，地下開挖必將遭遇高岩覆及經過溫泉區等高溫條件下施工之相關工程問題。然而目前針對此一問題尚無深入之研究。特別是隧道施工經驗上，時有遭遇擠壓之依時變形問題，其在高溫下的依時變形研究更是有待努力，有鑑於此，本研究著重岩石於高溫、高壓力下之潛變力學特性，並探討其與常溫下之岩石力學性質之差異性。

本研究選取曾經遭遇隧道擠壓災害之木山層砂岩為研究對象，針對完整岩石試體，進行岩石單軸與三軸潛變試驗，深入瞭解其不同應力狀態下之潛變行為，配合砂岩之物性因子，討論上述之力學機制，以了解溫度對岩石強度及變形力學行為之影響

**英文摘要**(Keyword: sandstone, creep)

Base on the combination of the Eurasia and Philippine plate forms the Taiwan Island. Engineering projects such as nuclear waste disposal and deep tunnel under high mountain may involve site condition of great depth underground. As depth at considered site increases, both the underground temperature and pressure tend to elevate. The mechanical properties of rock at elevated temperatures and pressures can be significantly different from those,

which are in the room temperature condition.

To evaluate the creep properties of rock at elevated temperatures and pressure over a typical type of rocks is selected as tested material in this research. The types of mechanical experiments include uniaxial and triaxial creep tests.

Based on the understanding of the mechanical behavior, endeavor will be contributed to establish a material model, which is able to describe the characteristics of rock. The expected results of this research are able to obtain the creep behavior of rock at elevated temperatures and pressures.

### 二、緣由與目的

台灣位處歐亞大陸板塊和菲律賓海洋板塊的聚合帶，地體構造活動頻繁且複雜。此外隨著近代交通路網的增建及核廢料儲存等需求下，地下開挖必將遭遇高岩覆及經過溫泉區等地熱條件下施工之相關工程問題。

根據Jaeger(1979)的研究顯示，地面下之岩層隨深度增加，岩層中之岩壓與溫度亦隨之增高，平均每增加1m，溫度大約增高0.031~0.033°C。以歐洲阿爾卑斯山岩覆約2000m深之隧道周圍岩石及未來橫貫台灣中央山脈之鐵路隧道為例，其周遭岩石之溫度即可能到達60°C以上。而由Dames and Moore(1978)就高放射性核廢料儲存之研究報告中亦指出，在儲存核廢

料金屬密封容器外與岩石之介面處，其溫度可高達 200°C。

未來台灣之地下開挖或隧道等工程，逐漸地可能將涉及較深層岩石力學行為問題，然而目前針對此一問題尚無深入之研究。特別是隧道施工經驗上，時有遭遇之擠壓依時變形問題，其在高溫下的依時變形研究更是有待努力，有鑑於此，本研進行一系列加溫狀態下之單軸與三軸試驗，並探討其與常溫下之岩石力學性質之差異性。最後，值得一提的是探討高溫、高壓下岩石的變化對瞭解斷層深部錯動帶與圍岩間之能量釋放行為亦是相當有意義的。一般而言，破壞性大地震的發震帶大都發生在上中部地殼約 15 公里深度以內 (Sibson, 1986; Scholz, 1988)，而目前科技無法直接探測如此深的地殼內之岩石力學性質，要研究發震帶的岩石力學性質和特性唯有待岩石抬升到地表淺處或露出地表後，才得以取樣研究。但此時斷層帶上的岩石或多或少遭受到後來流體作用的影響，而改變原有的性質。為盡量減少流體對斷層帶岩石的影響，在大地震後直接鑽取不等深度斷層帶上的岩石，研究其組成及力學特性，以及流體的性質等研究，可以提供資料以了解該地區斷層特性及力學行為、斷層帶上的岩石成因以及引發地震的可能機制，透過本計劃之執行結果可結合 921 車籠埔鑽井計劃之相關研究，了解岩石力學與斷層帶之關係。

### 三、岩石材料潛變行為之影響因素

潛變為材料處在一定的外在環境下，受一固定應力作用時的依時變形

行為，此現象與材料之黏滯性有關，而材料的潛應變在應力解除之後多半不會完全恢復，因此潛變可視為一種黏塑(viscoplastic)變形，所以 Goodman (1989)認為材料的依時力學行為其實就是材料的黏滯性行為。

綜合國內外之相關研究(林宏勳, 2001; Lama, 1978; Dusseault & Fordham, 1993; Cristescu & Hunsche, 1998)，可將影響岩石依時變形的重要因素分為外在的環境因素和內在的組構因素。外在的環境因素包含有應力(圍壓、應力比及應力路徑等)、溫度和含水量三大項；內在的組構因素則有岩石種類、顆粒大小、顆粒方向以及孔隙率等多項。其中以應力大小、圍壓的影響最為顯著，故本研究的潛變試驗條件控制因子係以此為主。

### 四、實驗方法及流程

本研究所進行的潛變試驗係採多階段加載方式進行，其優點為可避免因材料的變異性所造成的影響，此外亦可探討應力歷史的影響。

本研究規劃進行不同溫度下之單軸及三軸試驗，探討溫度對砂岩強度及變形性之影響。之後再依砂岩材料破壞強度，規劃單軸、純剪三軸等潛變試驗。實驗控制的應力比值(應力比值=潛變應力/破壞強度)涵蓋範圍約在 0.1~0.9 之間，各階段潛變時間約在 6~24 個小時不等，圍壓大小約在 20~60MPa。由實驗結果除可瞭解不同應力狀態對砂岩潛變行為之影響外，尚可探討潛變時間長短對潛變行為的影響。

在研究項目之執行方面，本研究規劃分兩年進行，分別為”溫度影響岩

石之潛變行為研究(I)”(本年度執行)及”溫度影響岩石之潛變行為研究(( ))”(93年度執行中),其中(I)為本年度執行,主要項目包括有

1. 國內外相關文獻蒐集與歸納整理。
2. 岩石試體之現地採樣及室內鑽切取岩心準備。
3. 國內外相關試驗方法之經驗、規範之蒐集及評估。
4. 試驗儀器及實驗技術改善。
5. 試驗儀器與量測系統之儀器校正與測試。
6. 進行不同溫度控制條件下之潛變實驗
7. 試驗結果資料之交插比對及分析整理。

其中 1 至 5 項的工作均已完成,第 6 項規劃工作亦已進行了部份的試驗,且獲得部份的初步成果。第 7 項的工作項目則將於第( )期計畫(93 年度)中一併討論。

## 五、岩石三軸加溫設備

為能模擬岩石在加溫狀態下之力學行為,本研究採購可配合即有三軸加壓設備之加溫系統,底下針對此加溫系統之功能介紹如下。

此加溫度設備係由美國 GCTS 公司生產製造,其溫度最高可加至 150 °C。此三軸加溫度系統之周邊設備示意圖可參考圖 1 所示,包含有二個熱電偶(thermocouple)、四個加溫棒(Cartridge heaters)、一個溫度控制箱(Temp. Control box)、一個溫度表(temperature meter)及電腦。

兩個熱電偶一為量測液壓油溫度、另一個則是量測三軸筒表面之溫

度。熱電偶所量測之溫度值會回傳至電腦軟體中作為迴饋訊號,進行自動之加熱控制。

加溫方式係將圖 2 之四根加溫棒放置於圖 3 三軸筒的底面的四個孔洞中,加溫棒溫度係由三軸筒傳遞至液壓油再傳至試體表面。圖 4 顯示加溫系統佈設於三軸筒上之實際情形。

## 六、試驗結果與討論

### 6.1 加溫儀器測試與校正

為了解液壓油溫與試體內部溫度之關係,作為試體溫度校正之用,本研究於木山層砂岩之試體中心與表面各埋設一熱電偶如圖 5 所示,以量測試體內部溫度與液壓油溫的關係。試驗時液壓油之溫度設定分別為 75、100、125 及 150 °C,液壓油加油過程同時量測試體的溫度變化情形,試驗之結果如圖 6 所示。圖 6 顯示液壓加至設定溫度後,加熱器即會停止再繼續加溫,待溫度低於設定溫度的 5 °C 時,加熱器會再一次自動啟動。同時亦可觀察到試體的達到最終穩定溫度所需時間隨著溫度增加而增加,以 75 度為例,試體達到穩定溫度狀態的時間約為 3 小時,若 150 度,則試體約需 7 小時才會達到溫度穩定之狀態。此外試體之最終穩定狀態均與設定溫度差約 5 °C。圖 7 為將不同設定溫度與試體達到穩定狀態關係圖,在 75 至 150 °C 範圍內時其為一線性關係:

$$T_s = 0.96T_h + 1.85$$

其中  $T_s$  代表試體之最穩定溫度;  
 $T_h$  液壓油溫的設定溫度。

### 6.2 單軸試驗

在進行單軸潛變試驗之前，本研究首先進行不同溫度的單軸試驗，以了解溫度對砂岩材料之變形性及強度的影響。圖 8 為不同溫度的單軸實驗之軸向、環向的應力與應變關係圖。

圖 9 則顯示不同溫度下，木山層砂岩的單壓強度，由圖中可明顯的觀察到，在 120°C 的範圍內，溫度對木山層砂岩的強度並沒有很明顯的影響。此項結果與黃勇茂(1996)針對木山層 140 以內對單壓試驗強度影響不大之結果相同。

### 6.3 單軸潛變試驗

由於國內目前在隧道工程案例中有遭遇 60°C 之實際工案例，且目前國內尚無任何加溫下之潛變試驗資料可供參考。因此本研究以溫度 60°C 之潛變試驗結果為例，詳細探討加溫情形下之潛變行為，以供工程設計時之參考。圖 10 為液壓油溫度設定 60°C 時之應力應變曲線，由圖中可觀察到其在加解壓狀態時，試體伴隨著大量的黏塑(viscoplastic)變形，且其會形成一閉合的加解壓曲線。此仍因為試體已潛變至一穩定狀態，此時的加解壓曲線更能代表試體的彈性變形行為(Cristescu, 1998)。觀察各應力階段之軸向及環向潛變曲線於圖 11 亦可發現，在溫度 60 的情況下，試體的潛變行為與常溫(25°C)相同地被應力狀態所影響。亦即應力愈高，潛變量愈高，一次的潛變率也愈高。

此外觀察軸差應力與潛變行為之關係如圖 12 所示，可發現在低軸差應力下時，體積之潛變行為主要以壓縮為主(潛縮)。到了比較高軸差應力狀態下，潛變行為則改為膨脹為主(潛脹)。

圖 13 顯示了試體於潛縮行為下，試體最終達到穩定而不致發生破壞。但是潛脹則會最終導致試體的破壞。因此，試體的應力狀態如在潛脹之範圍內時，應考慮試體的長期強度之安全性。最早提出此一門檻值者為 Bieniawski (1967)根據常溫下之單軸及傳統三軸試驗結果提出岩石受剪時體積變形行為係先產生裂隙閉(Crack closure)；隨後進入彈性變形(Elastic deformation)段，此段的變形趨勢為直線段；之後則為穩定性裂隙繁殖(Stable fracture propagation)段，此時試體的體積變形仍然為壓縮性變形，但是會開始產生微裂隙；最後當試體體積變形開始由壓縮轉換成膨脹(此轉換點底下稱為剪脹門檻)，裂隙會開始大量的繁殖，最終引致試體破壞，此階段稱為不穩定裂隙繁殖(Unstable fracture propagation)段。Bieniawski 認為如果試體的應力狀態位於不穩定裂隙繁殖段內時，試體最終會因潛變而導致破壞。本研究比對單軸試驗與單軸潛變結果顯示單軸試驗之剪脹點較為潛脹之應力狀態為低，此乃因為 Bieniawski 僅考試體之總變形，未考慮試體之彈性變形所致。本研究建議以試體潛變行為由潛縮轉換至潛脹之應力狀態點作為考慮試體開始產生不穩定裂隙之門檻值會更恰當。

## 七、結論

本研究於本年度採購之三軸加溫系統，經過測試與實驗結果已獲得初步之成果，感謝國科會之贊助，使得本研究得以推動。國內目前在溫度影響岩石依時行為方面仍然非常的缺乏。但是台灣有越來越多交通工程或

水利工程如正在推動中之蘇花高速公路、規劃中之中橫公路及引水隧道等已逐漸地往山區發展。以台灣地質環境之特殊性，地熱地質勢為日後工程界必須面對之課題。本研究雖在本年度中已獲有初步之研究成果，惟模擬地下開挖之重要方式(亦即三軸應力狀態)，本研究規劃於93年度溫度影響岩石之潛變行為研究( )之計畫中執行。因此更具體之溫度對岩石材料之潛變行為影響，將在93年度計畫執行年度中進行交互比對及討論後，再提出更詳細之報告。

### 參考文獻

- [1] 林宏勳(2001)，木山層砂岩之潛變行為研究，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- [2] 黃勇茂(1996)，溫度對木山層砂岩力學行為之影響研究，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
- [3] Maranini, E. , M. Brignoli (1999) : Creep behaviour of a weak rock, a experimental characterization. *Int. J. of rock mech. and mining Sci.* **36**, 127-138.
- [4] Cristescu, N. D. and U. Hunsche (1998), *Time Effect in Rock Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- [5] Dusseault, M. B. and Fordham, C. J. (1993), *Time-dependent Behaviour of Rocks*, Comprehensive rock engineering : principles, practice & projects. / editor-in-chief , John A. Hudson, Vol.2, 119~149.
- [6] Jaeger, C. (1979), *Rock Mechancis and Engering*, 2<sup>nd</sup> Ed., Cambridge Univ. Press.
- [7] Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978) *Handbook on Mechanical Properties of Rock*, Vol.2, Trans. Tech. Public., 57~59.
- [8] Dames and Morre (1978), Thermomechanical stress analysis and development of thermal loading guidelines, *In Technical Support for GEIS: Radioactive Waste Isolation in Geologic Formations*, vol. 20, White Plains, N. Y.
- [9] Bieniawski, Z.T., 1967. Mechanism of brittle fracture of rock. *Int. J. rock Mech. Min. Sci.*, 4, 395-430.

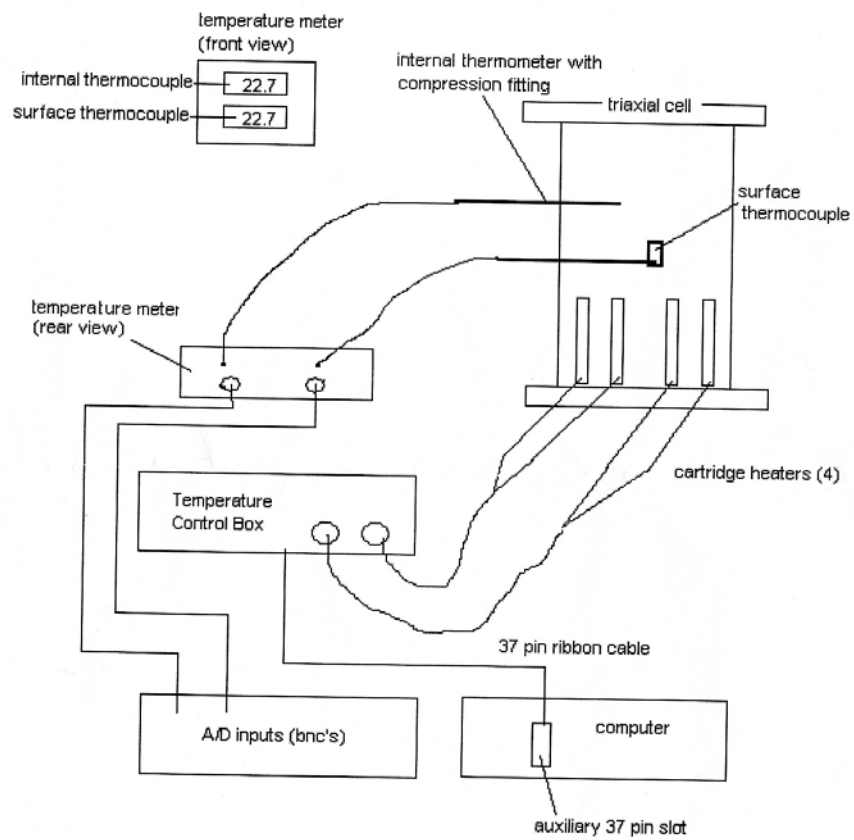


圖 1 三軸加溫系統示意圖



圖 2 三軸加溫系統之加溫棒



圖 3 三軸筒之外蓋，底部四個孔洞為加熱棒之放置處。

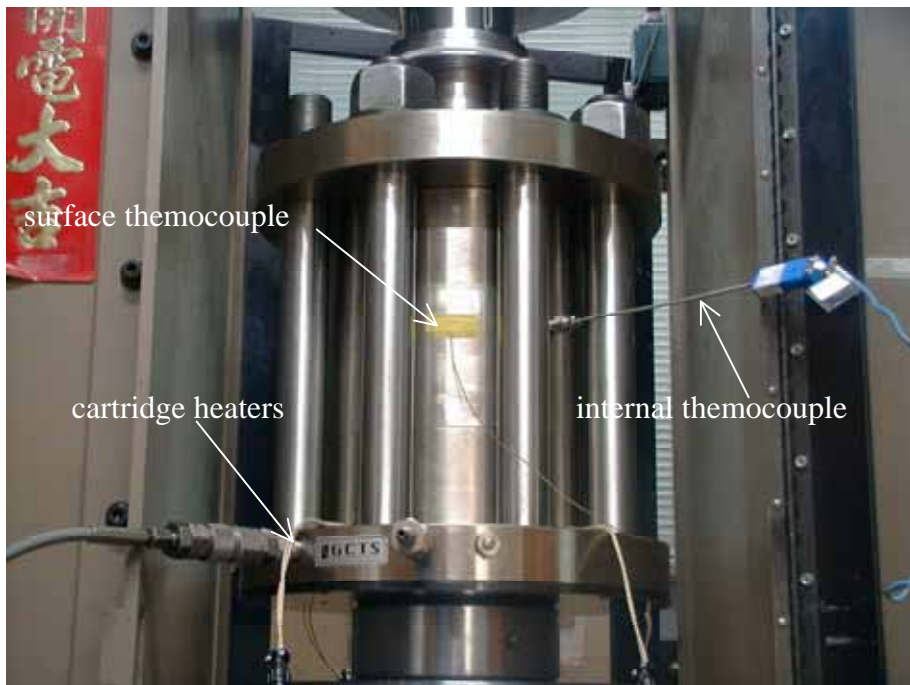


圖 4 三軸加溫系統之安裝情形

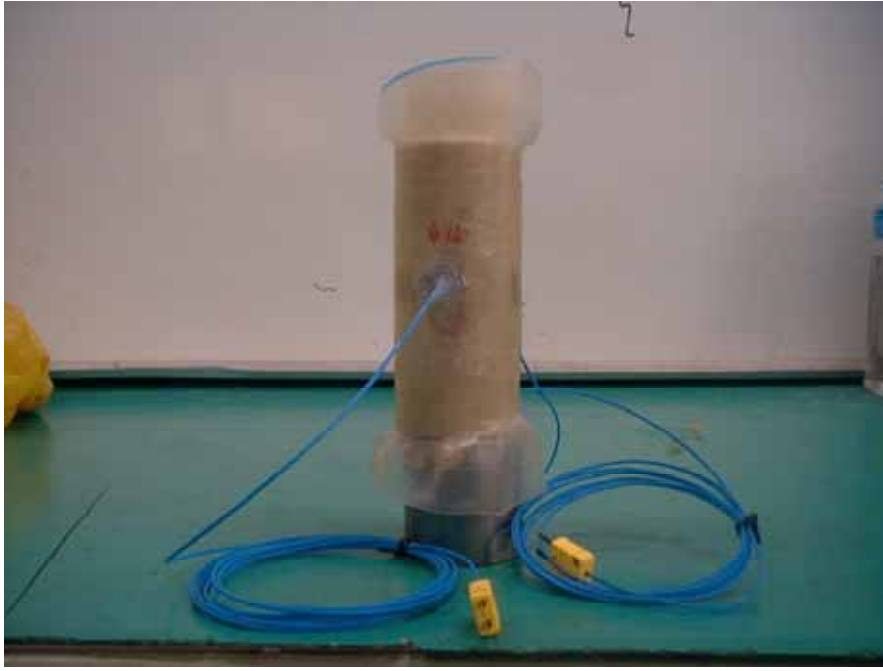


圖 5 埋設熱電偶於試體表面及中心之情形。

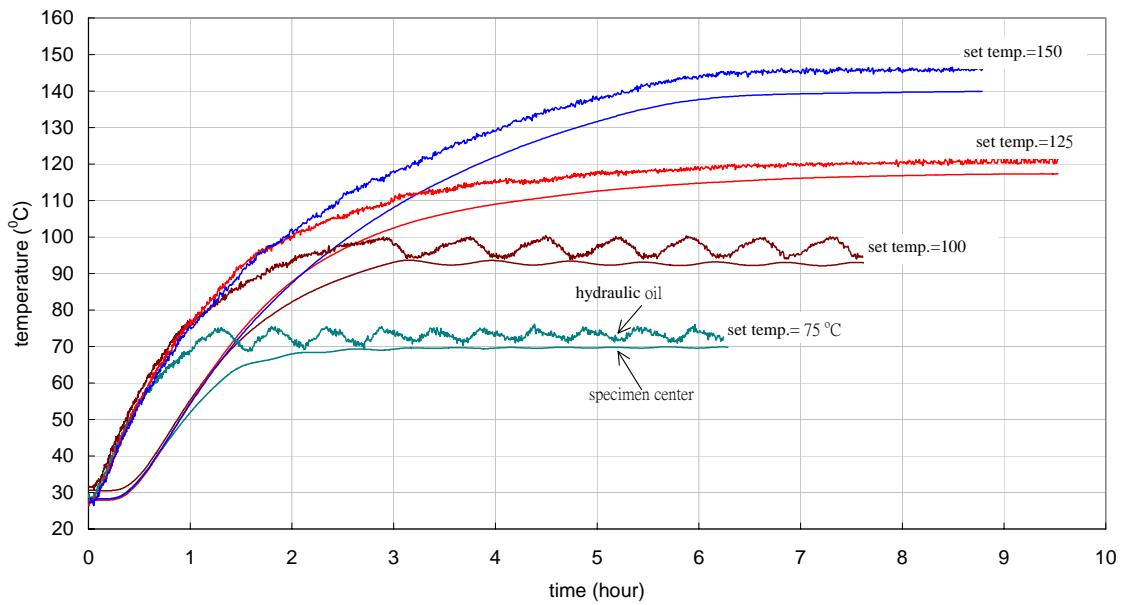


圖 6 試體與液壓油隨時間之溫度變化情形

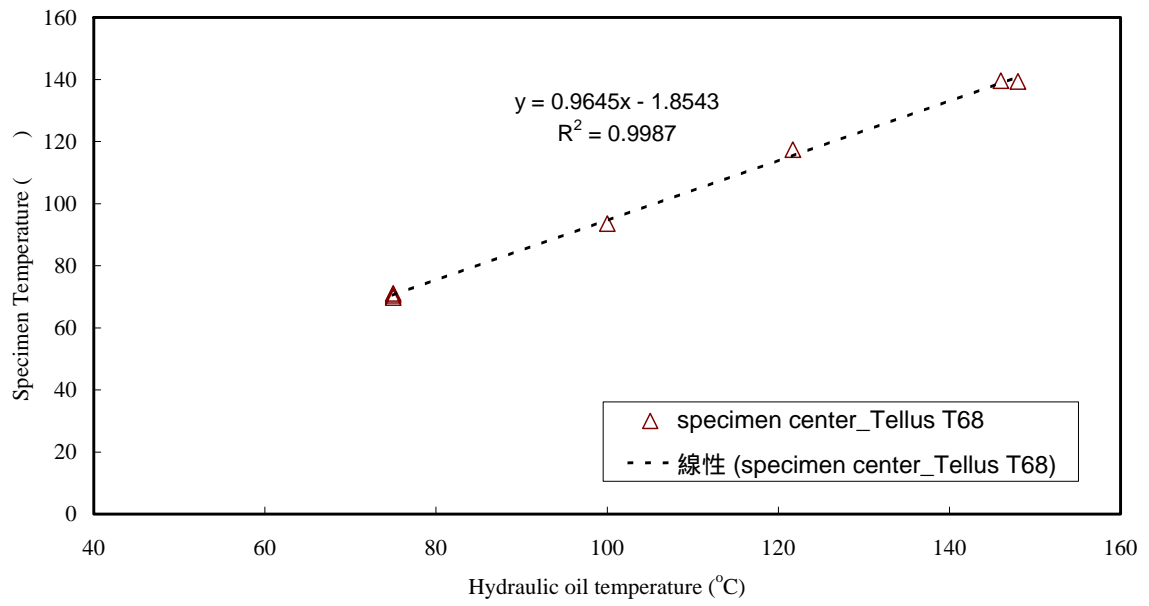


圖 7 木山層砂岩試體最終溫度與液壓油溫度關係圖

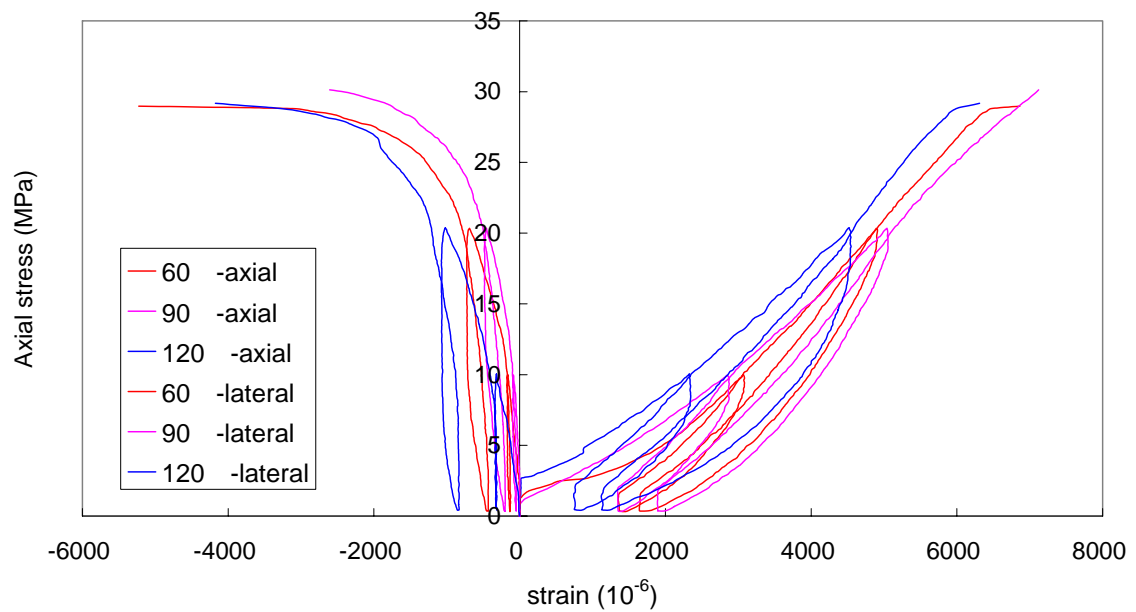


圖 8 不同溫度狀態下之應力應變曲線

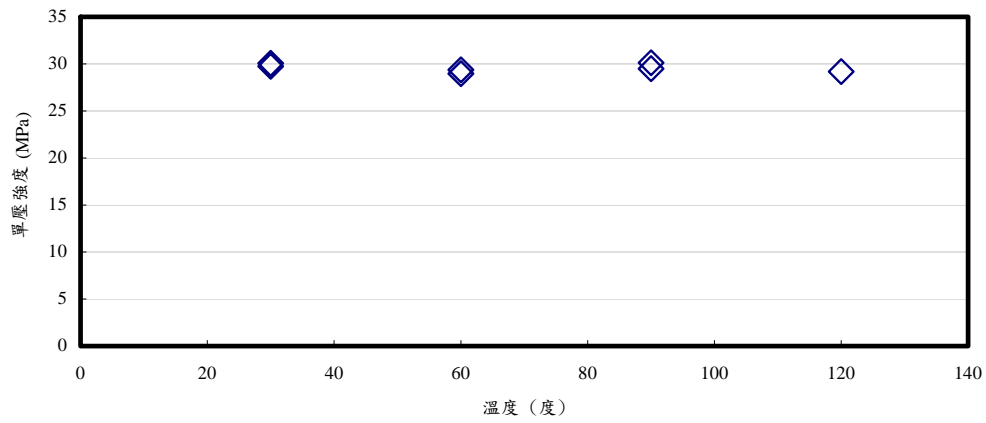


圖 9 木山層砂岩單壓強度與溫度之關係

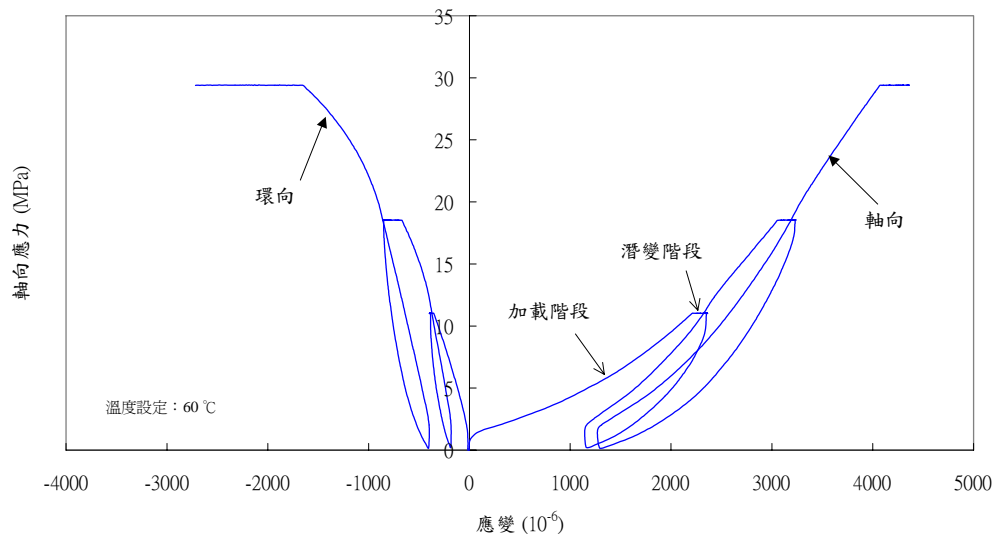


圖 10 溫度 60°C 下單軸潛變試驗之應力應變曲線

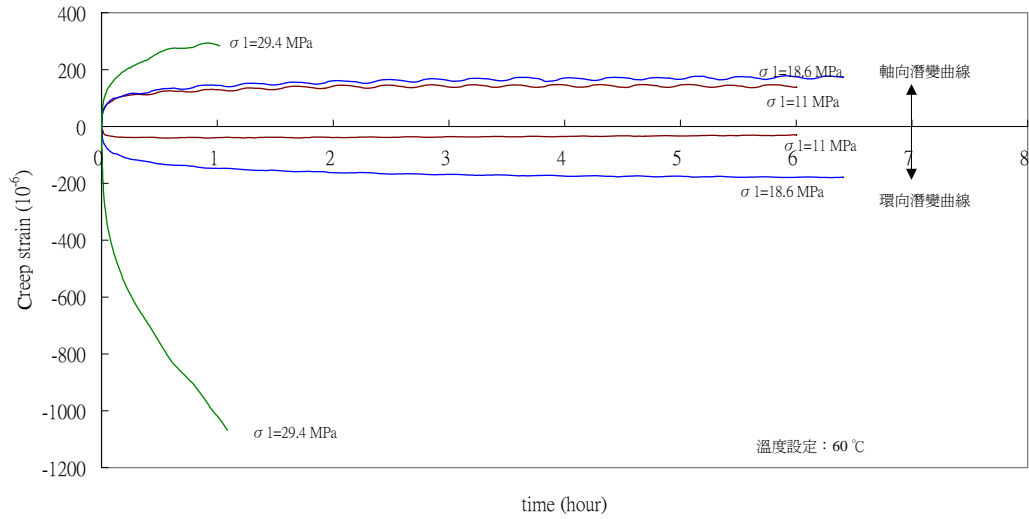


圖 11 溫度 60°C 時，軸向及環向之潛變曲線

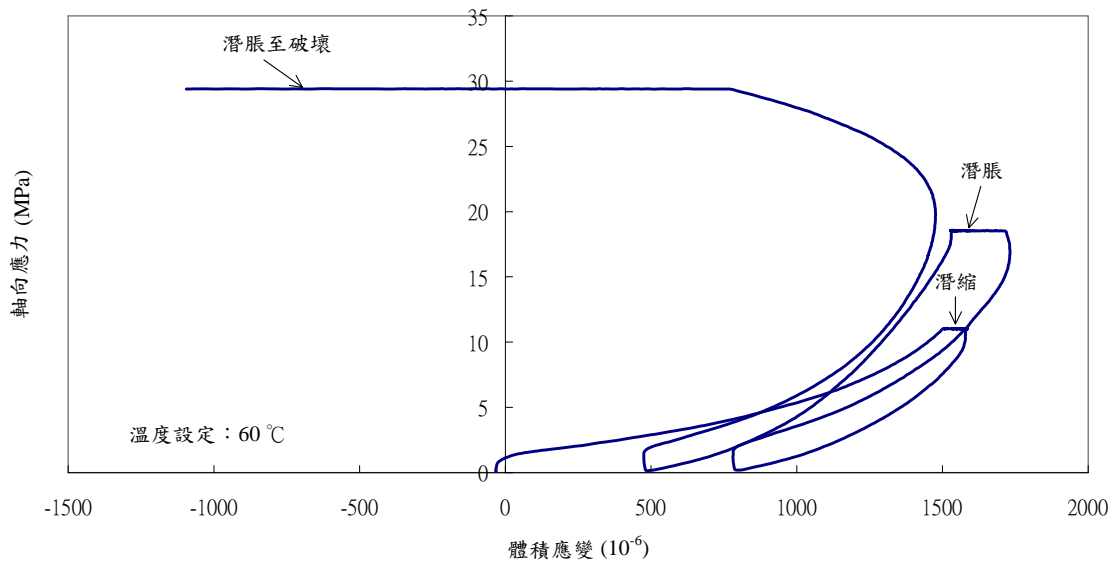


圖 12 溫度 60°C 下單軸潛變試驗之軸向應力 vs 體積應變關係圖

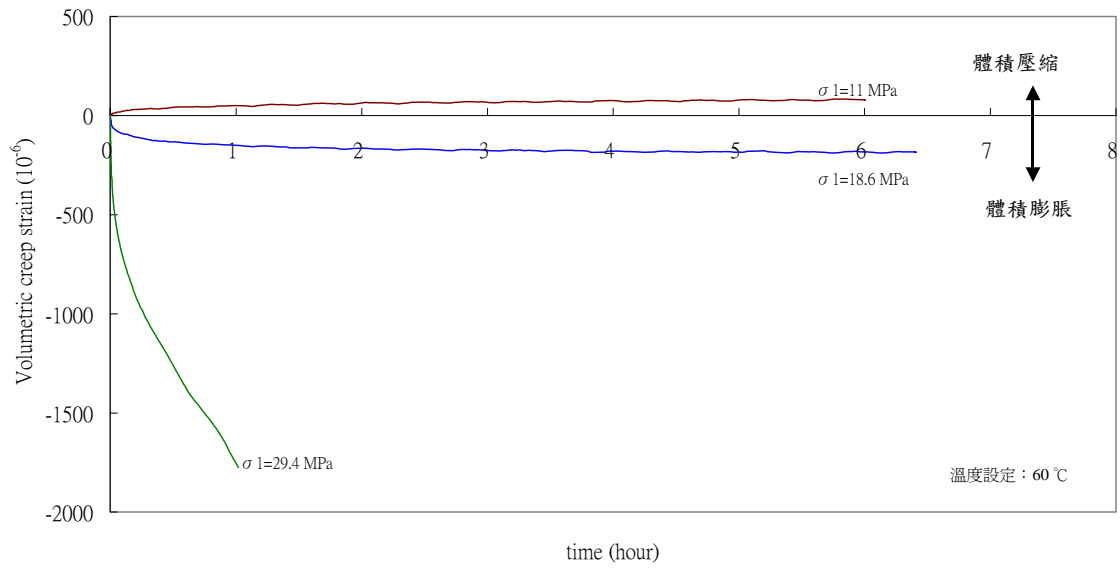


圖 13 溫度 60°C 時之體積潛變曲線