

軟弱砂岩力學行為與微觀機制研究 (I)
The Study of The Mechanical Behavior And
The Microscopic Mechanism of Weak Sandstones (I)

計畫編號：NSC 89-2211-E002-059

執行期限：88/8/1-89/7/31

主持人：鄭富書 台灣大學土木工程學系 副教授

一、摘要

中文摘要(關鍵詞：軟弱砂岩，潛變)
近年來台灣西部麓山帶地區隧道開挖與地下施工日益頻繁，為期能減少日後地下開挖和隧道工程災害，故實有必要針對這些第三紀沈積地層的岩石之力學行為進行探討。本研究的目的是對岩石材料的「潛變」行為進行探討。因此，本研究選取四稜砂岩、澳底層枋腳段砂岩、五指山層砂岩、木山層砂岩、大寮層砂岩、南港層砂岩和大理岩等共七個岩層進行短期多階段潛變實驗。

由潛變實驗結果顯示，在應力比值低時，徑向潛變量遠小於軸向潛變量，而當應力比值愈高時，岩石的軸向和徑向潛變量將隨之變大。對於低孔隙率的砂岩而言，在低應力比值時，有明顯的一次潛變趨勢，但二次潛變趨勢卻不明顯，直到高應力比值時，才會有明顯的二次潛變趨勢。而孔隙率高的岩石，其第一階段的軸向潛變量通常會大於第二階段，其後軸向潛變量才又會隨著應力比值的增加而變大。此外比較澳底層、五指山層、木山層和大寮層等砂岩，發現基質含量愈多，其潛變量將愈大。就其所含之黏土礦物方面，發現高嶺石對潛變破壞應力有極高的負相關，而綠泥石對

潛變破壞應力則有極高的正相關。最後本研究利用柏格模式進行分析，由模式所得之 A 值和 C 值，分別對孔隙率、飽和含水量、乾密度及基質含量等性質進行迴歸分析，結果顯示 A 值和 C 值與孔隙率及基質含量有較顯著的相關趨勢。

英文摘要(Keyword: soft sandstone, creep)

Most of the strata in western Taiwan are young sedimentary rocks of Tertiary or Quaternary period. In general, these young rocks are soft in strength, and have the characteristics that have induced sever engineering problems, especially in tunneling engineering. These undesired characteristics include deterioration due to wetting process, shear dilation as well as creep.

This paper presents the creeping behavior of sandstone, included seven rock strata, based on a series of uniaxial creep tests. The impacts of porosity, level of shear stress, matrix content and petrographic index were investigated.

The experimental results indicate that sandstone has the following creeping behavior: (a) In low porosity rocks (hard rocks), the primary creep behavior is

significant at low level of shear stress. However, when shear stress increases, secondary creep behavior plays an important role. (b) In high porosity rocks (soft rocks), creep strain is large at the initial step and reduces rapidly at the second step. Nevertheless, in overall situation greater degree of shear stress will induce greater creep strain. (c) More lateral creep strain would be induced if more matrix of sandstone is contained. (d) Increase in chlorite content and decrease in koalinite content will induce more creep strength;

A creep modal, Burger's modal, is used in this research to analysis the creep behavior of soft sandstone, and two main parameters, A and C, are investigated. The analytic results indicated that the magnitude of A and C are much dependent on the porosity and matrix content of sandstone.

二、計畫緣由與目的

根據前人對台灣軟弱岩石材料的研究，歸納台灣軟弱岩石具有以下力學特性，值得隧道開挖時注意：(1)浸水後強度大幅弱化、(2)剪應力引致大量體積膨脹行為、以及(3)顯著的潛變特性。由於以上不良力學特性，係導致隧道大量變形之主因。在本研究中，選擇其中之潛變因素，以力學試驗與組構觀察，試圖掌握軟弱砂岩之力學機制，以供軟弱砂岩地區之隧道工程使用，減少工程困難之發生。

潛變行為是指岩石材料在受到固定的外在環境以及一定應力作用下，其材料之變形會隨時間增加而有增大的趨

勢，為岩石材料依時變形行為的一種 (Goodman, 1989)。本研究選取一系列第三紀沈積岩層為主的砂岩進行潛變實驗，包括四稜砂岩、澳底層枋腳段砂岩、五指山層砂岩、木山層砂岩、大寮層砂岩和南港層砂岩等共六個岩層，並以大理岩為對照組。藉由這七種岩石之實驗結果相互比對，並配合偏光顯微鏡的觀察，來了解砂岩潛變行為的微觀特性，以期對這一系列岩石材料的潛變行為有初步了解。

三、岩石材料潛變行為

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，而當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塑性變形，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。典型的岩石潛變曲線如圖 1 所示。依潛變速率不同可分為三個階段：一開始潛變速率隨時間遞減，稱為主要潛變(primary or transient creep)；之後潛變速率維持定值，是為二次潛變(secondary or steady-state creep)；最後潛變速率急遽增加直至試體破壞，稱為三次潛變(tertiary or acceleration creep)。

綜合前人研究(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。外在的環境因素又可分應力、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。

四、實驗規劃

本研究選取的試體有：四稜砂岩、澳底層枋腳段砂岩、五指山層砂岩、木山層砂岩、大寮層砂岩、南港層砂岩和大理岩，整體實驗的流程請見圖 2。在實驗規劃方面，除了岩石基本物性實驗之外，本研究以短期多階段潛變實驗為主，探討砂岩在不同應力比值下的潛變特性。並透過微觀的角度，了解岩石組構在實驗前後之變化。潛變實驗是以短期多階段方式進行。先進行單軸壓力試驗，求得各砂岩層的平均單壓強度。再依其平均單壓強度值，規劃各階段潛變應力之量值，其(應力值 / 平均單壓強度)之比值大致為 0.2、0.4、0.6、0.8 和 0.9 共五階段，加壓和減壓為 20 kN/min，各階段潛變應力之時間控制則為一個小時。依據上述實驗規劃探討砂岩在不同應力階段下之潛變行為。接著，將實驗後之砂岩試體製成岩石薄片，觀察其礦物組成、黏土礦物成份和顆粒粒徑等項目，檢視砂岩的微觀組構在潛變實驗前後之變化。觀察力學和微觀實驗的結果並相互比較，以期對砂岩材料的潛變行為有初步了解。

五、基本物性與潛變試驗結果

(1) 基本物性及力學性質

一般物性實驗項目包括求取岩石試體之飽和含水量(water content)、孔隙率(porosity)及乾密度(dry density)。砂岩試體之單壓強度、變形模數和破壞應變等力學參數。現將各岩層乾燥試體單軸壓力試驗結果及物性結果整理至表 3。根據本研究所採用的單壓強度分類標準，木山層砂岩屬軟弱岩石(1 MPa 至 50 MPa)；大理岩、五指山層砂

岩和大寮層砂岩屬中強岩石(50 MPa 至 100 MPa)；南港層砂岩、澳底層砂岩和四稜砂岩屬強岩(100 MPa 以上)。

(2) 潛變試驗結果與討論

潛變實驗所得之應力應變曲線如圖 3 所示，試驗結果討論如下。值得強調的是，在本研究中，應變指的是試體在單壓潛變實驗中的總應變量(total strain)，即為各潛變階段的潛變應變量之總和，而潛變應變(creep strain)則是指試體在潛變階段中的一個小時內所累積之應變量。：

(a) 應力比值對潛變行為的影響

應力比值的定義：潛變階段之應力值除以破壞強度。進行短期多階段潛變實驗，在不同的潛變應力階段下，可得到試體的潛變曲線(圖 4)。整理各試體於不同應力比值下各階段一小時的軸向和徑向潛變應變量可發現：無論是軟弱岩石、中強岩石還是強岩，當應力比值愈高時，岩石的軸向和徑向潛變應變量也會隨之變大。亦即潛變應力愈大，岩石試體的潛變應變量愈大。

屬於軟弱岩石的木山層砂岩在低應力比值的狀況下，即有明顯的潛變行為。屬於強岩的岩石試體，在低應力比值時多沒有明顯的潛變行為，甚至可能沒有潛變發生，通常是在應力比值超過 0.6 後，才可能有明顯的潛變行為。

(b) 軸向和徑向潛變應變量

比較試體於相同應力比值下的軸向和徑向潛變應變量，可得知：無論是軟弱岩石、中強岩石還是強岩，當應力比值低時，徑向潛變應變量遠小於軸向潛變應變量，但是當應力比值約大

於 0.6~0.8 後，徑向潛變應變量開始顯著增加，到試體破壞前甚至可能超越軸向潛變應變量。

(c) 體積潛變應變量

由圖 4 顯示，當試體從低應力比值階段開始受潛變應力作用時，體積潛變應變量為正值，表示試體處在壓縮狀態，而隨著潛變應力遞次增加，試體會開始膨脹，其體積潛變應變量會變為負值，而當試體接近破壞時，體積潛變應變量會有極大的負值增量，顯示試體有急速膨脹的現象。

(d) 孔隙對潛變行為的影響

由潛變實驗結果發現，低孔隙率的砂岩在低應力比值時，有明顯的一次潛變趨勢，但是其後的潛變曲線之斜率趨近於零，故可知二次潛變趨勢並不明顯。直到高應力比值時，才会有明顯的二次潛變趨勢。

六、各種岩石微觀特徵與討論

本研究對岩石的微觀特徵進行下列數項岩理參數的計算工作—礦物組成、平均粒徑、顆粒堆疊密度、顆粒形狀參數和 X 光繞射分析。希望透過量化的方式，表現出各種岩石間的岩理差異性，進而討論各項參數間的相關性。

(1) 礦物組成和平均粒徑

從潛變實驗結果發現，幾乎沒有基質的四稜砂岩和大理岩軸向應變量和徑向應變量皆最小，其次是由碳酸鈣質膠結的南港層砂岩，最後才是以黏土礦物為基質的砂岩。若進一步比較澳底層枋腳段砂岩、五指山層砂岩、木山層砂岩和大寮層砂岩，可發現基質含量和徑向應變量呈線性關係，基質含量愈多，其徑向應變量也會愈大(圖 5)。

將平均粒徑的結果分別和潛變破壞應力、軸向應變與徑向應變進行相關係數分析，發現平均粒徑對軸向應變與徑向應變有極高的負相關(圖 6)，但是和潛變破壞應力無顯著之關係。

(2) 顆粒形狀參數

將顆粒形狀參數的結果分別對潛變破壞應力、軸向應變與徑向應變進行相關係數分析，發現顆粒形狀參數和潛變破壞應力的正相關係數高達 0.85，而和軸向與徑向應變之關係係數分別為 -0.33 和 0.09。

(3) X 光繞射分析

經 X 光繞射分析後，各砂岩普遍含有高嶺石、伊萊石和綠泥石等黏土礦物，但是膨潤石則僅存在澳底層砂岩和大寮層砂岩。

將黏土礦物半定量的結果分別對潛變破壞應力、軸向應變與徑向應變進行相關係數分析，發現高嶺石對潛變破壞應力有極高的負相關，而綠泥石對潛變破壞應力有極高的正相關。

七、柏格潛變模式

根據砂岩單軸多階段潛變試驗結果，可建立柏格模式參數與應力狀態之關係。此方程式可適當模擬試體的一次和二次潛變，但是對於三次潛變行為則無法模擬。柏格模式表示如下：

承受一定軸應力 σ_1 的柏格體，隨時間而變的軸應變 $\varepsilon_1(t)$ 值為

$$\varepsilon_1(t) = \left(\frac{2\sigma_1}{9k}\right) + \left(\frac{\sigma_1}{3G_2}\right) + \left(\frac{\sigma_1}{3G_1}\right) - \left(\frac{\sigma_1}{3G_1}\right)e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}} + \left(\frac{\sigma_1}{3\eta_2}\right)t \quad (1)$$

式中， k 為容積模數、 G_1 為控制遲延彈性值、 G_2 為彈性剪力模數、 η_1 為決定遲延彈性的速率、 η_2 為說明黏滯性流

動的速率。

上式可以分為三部份進行討論。 $\varepsilon_1(t) = (2\sigma_1/9k) + (\sigma_1/3G_2)$ 為模擬試體瞬間變形的部份。 $\varepsilon_1(t) = (\sigma_1/3G_1) - (\sigma_1/3G_1)e^{-(G_1 t/\eta_1)}$ 為模擬試體一次潛變的部份。 $\varepsilon_1(t) = (\sigma_1/3\eta_2)t$ 為模擬試體二次潛變的部份。

將方程式中模擬一次潛變和二次潛變部份相加，此一方程式即為探討各種岩石之潛變特性，並將其化簡為下式：

$$\varepsilon_1(t) = A(1 - e^{-Bt}) + Ct \quad (2)$$

式中：

$A = (\sigma_1/3G_1)$ 代表一次潛變階段之應變量； $B = (G_1/\eta_1)$ 代表一次潛變階段之潛變速率； $C = (\sigma_1/3\eta_2)$ 代表二次潛變階段之潛變速率； C 值愈大，則二次潛變速率愈快。因此，得知二次潛變階段之潛變速率為影響砂岩潛變應變量的一個主要因素。若將基質含量和 A 值和 C 值作圖分析，可發現基質含量最小的四稜砂岩，其 A 值和 C 值最小；而基質含量最大的大寮層砂岩，其 A 值和 C 值也是最大，基質含量明顯與 A 值和 C 值成相關趨勢。故可知基質含量也是一項影響砂岩潛變的重要因素。

八、結論

為了解岩石潛變行為之差異，本研究針對七種不同岩性之岩石，進行物性實驗、單軸壓力試驗和單軸潛變試驗等，並將岩性與各項微觀參數做探討。結果顯示：

1. 無論是軟弱岩石、中強岩石還是強岩，當應力比值愈高時，岩石的軸向和徑向潛變量也會隨之變大。亦即潛

變應力愈大，岩石試體的潛變量愈大。就岩石的潛變特性而言，應力比值對單壓強度高的岩石影響較為明顯。而當應力比值低時，徑向潛變應變量遠小於軸向潛變應變量，但是當應力比值約大於 0.6~0.8 後，徑向潛變應變量開始顯著增加，到試體破壞前甚至可能超越軸向潛變應變量。

2. 就潛變實驗結果而言，可發現徑向應變量會隨著試體單壓強度的增加而有減少的趨勢。

3. 由潛變實驗結果發現，低孔隙率的砂岩在低應力比值時，有明顯的一次潛變趨勢，但二次潛變趨勢卻不明顯。直到高應力比值時，才有明顯的二次潛變趨勢。而孔隙率高的岩石，其第一階段的軸向潛變量通常會大於第二階段，其後軸向潛變量才又會隨著應力比值的增加而變大。

4. 從潛變實驗結果發現，幾乎沒有基質的四稜砂岩和大理岩軸向潛變量和徑向潛變量皆最小，其次是由碳酸鈣質膠結的南港層砂岩，最後才是以黏土礦物為基質的砂岩。

5. 分析各砂岩的黏土礦物成份後，發現高嶺石對潛變破壞應力有極高的負相關，而綠泥石對潛變破壞應力有極高的正相關。

6. 利用柏格模式所求出來之 A 值和 C 值，分別對應力比值、平均單壓強度、平均孔隙率、平均參考飽和含水量、平均乾密度及基質含量進行分析，發現 A 值和 C 值分別與平均孔隙率及基質含量有較顯著的相關趨勢，因之這兩個因素可能是影響砂岩潛變的主要因素。由柏格模式所求出來之 A 值和 C 值，可以了解在各種砂岩中，二次潛變階段之潛變速率為影響砂岩潛變應

變量的一個主要因素。

參考文獻

- [1] 朱凌毅 (1998) 砂岩弱化微觀機制之實驗研究。台大土木所碩士論文。
- [2] 陳培源 (1998) 台灣新生界砂岩--岩象學之剖析。地質, 十八卷, 一期, 第17-41頁。
- [3] 趙杏媛和張有瑜 (1990) 黏土礦物與黏土礦物分析。海洋出版社, 中國。
- [4] Dussealt, M. B., Rothenburg, L. & Kornelson, P. K. (1991) Transient Response Simulation Using a Discrete Element Approach. *In Proc. KALI '91*, Hamburg.
- [5] Erosy, A. and Waller, M. D. (1995) Textural Characterisation of Rock. *Engineering Geology*, **39**, 123-136.
- [6] Goodman, R. E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd Edition, John Wiley & sons.
- [7] Gunsallus, K. L. and Kulhawy, F. H. (1984) A Comparative Evaluation of Rock Strength Measures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **21**, 233~248.
- [8] Howarth, D. F. and Rowlands, J. C. (1986) Development of an Index to Quantify Rock Texture for Qualitative Assessment of Intact Rock Properties. *Geotechnical Testing J.*, **9**, No. 4, 169~179.
- [9] ISRM (1981) Rock Characterization Testing and Monitoring. *ISRM Suggested Methods* (Edited by E. T., Brown), Pergamon, New York, 211.
- [10] Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978) *Handbook on Mechanical Properties of Rock*, Vol.2, Trans. Tech. Public., 57~59.
- [11] Singh, D. P. (1975) A Study of Creep of Rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. **12**, No. 9, 271~275.
- [12] Turk, N. and Dearman, W. R. (1986) Influence of Water on Engineering Properties of Weathered Rocks. *Groundwater in Engineering Geology*, London, 131~138.

表 1 各岩石物性及單軸壓力試驗結果

試體名稱	四稜砂岩	澳底層砂岩	五指山層砂岩	木山層砂岩	大寮層砂岩	南港層砂岩	大理岩
試體個數	5	6	6	8	4	4	5
參考飽和含水量 (%)	0.26	1.15	5.00	5.79	6.38	3.82	0.12
孔隙率 (%)	0.68	2.93	11.35	12.76	14.80	9.96	0.34
乾密度 (g/cm ³)	2.65	2.54	2.27	2.2	2.32	2.58	2.73
平均單壓強度 (MPa)	285.32	190.53	62.12	46.59	88.38	111.17	76.60
平均變形模數 (GPa)		11.63	5.81	4.56	4.45	10.75	7.42
平均破壞應變 (%)		1.37	0.91	0.85	1.65	0.89	0.80

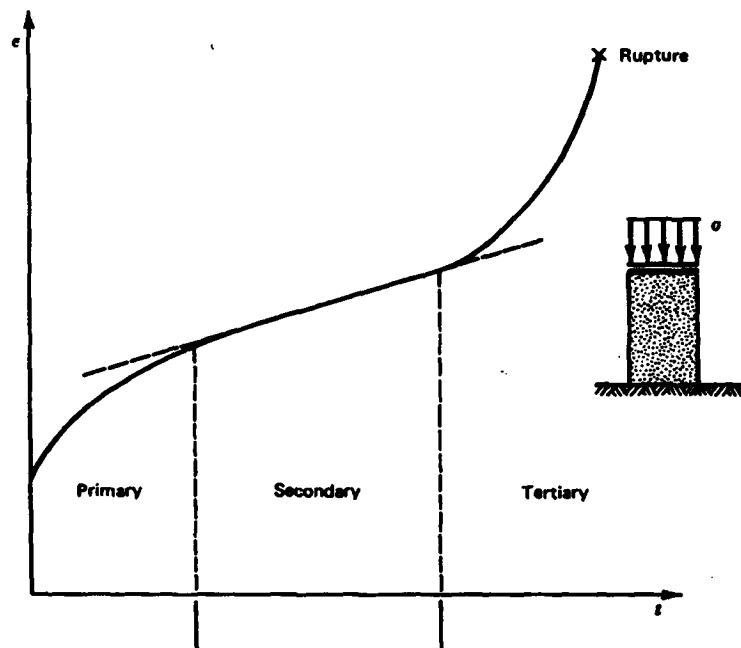


圖 1 岩石潛變曲線示意圖 (Goodman, 1989)

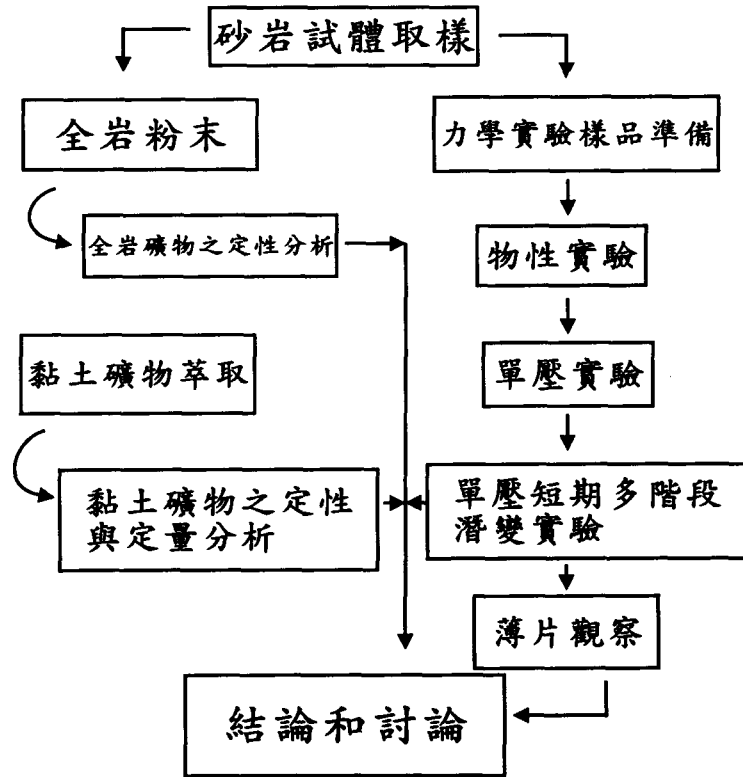


圖 3.1 實驗流程之規劃

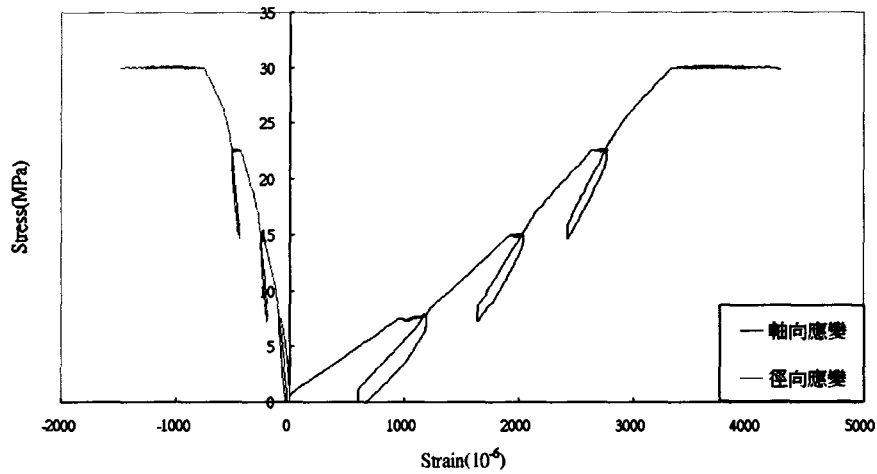


圖 3 潛變實驗之應力應變曲線圖
(以木山層砂岩為例)

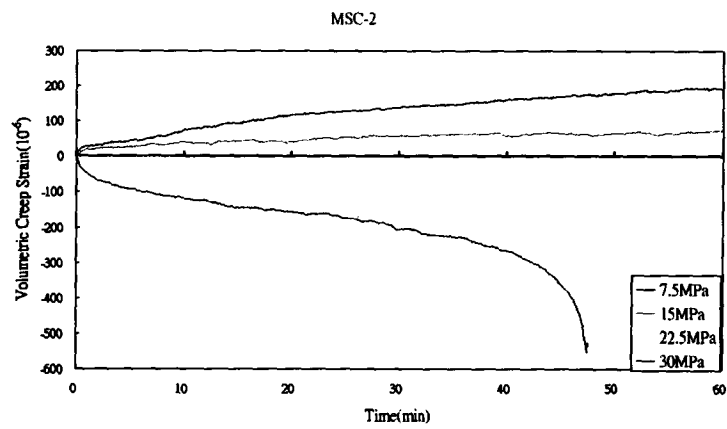
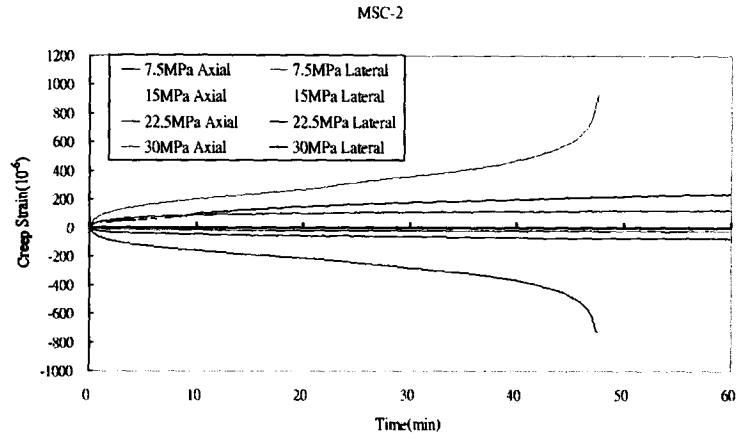


圖 4 在不同的潛變應力下的潛變應變曲線
(以木山層砂岩為例)

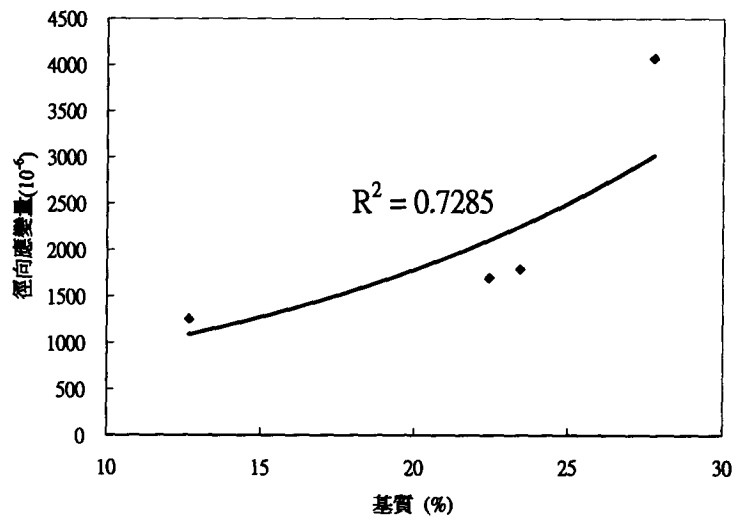


圖 5 基質與徑向應變關係圖

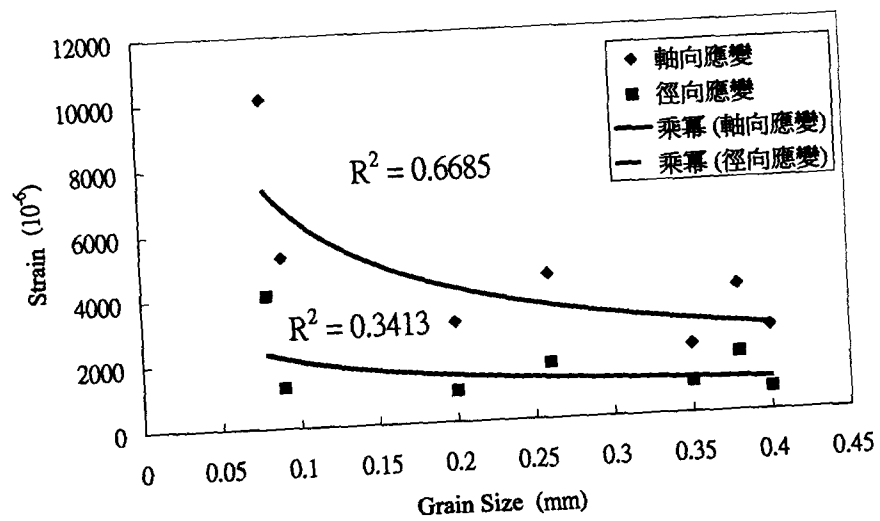


圖 6 平均粒徑對軸向應變與徑向應變關係圖