

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

西部麓山帶砂岩潛變特性研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-002-046-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 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

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 92 年 10 月 31 日

西部麓山帶砂岩潛變特性研究
The Study of The Creep Behavior of Sandstones
in Western Taiwan

計畫編號：NSC 91-2211-E002-046

執行期限：91/8/1-92/7/31

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)

台灣西部麓山帶岩石之膠結及壓密程度不佳，復以台灣地區多雨水，既溫且濕的氣候環境，故岩石強度不高且易風化。當隧道開挖後，隧道周圍岩石極易因浸水弱化導致隧道周圍塑性區變大，產生擠壓現象的依時變形災害。本研究以五指山層砂岩、木山層砂岩、大寮層砂岩等三種岩層為研究對象，探討其遇水弱化及潛變之力學行為。透過一系列單軸潛變及不同體積應力條件下之三軸潛變實驗結果，探討其破壞包絡線及潛變行為。

單軸潛變實驗結果顯示木山層於低應力下的潛變行為異於五指山層及大寮層砂岩，其第一階段的軸向潛變量通常會大於第二階段，之後軸向潛變量又會隨著應力比值的增加而變大。

傳統三軸潛變實驗結果顯示，木山層砂岩軸向與環向潛變量隨軸差應力的增加而呈單調遞增的趨勢，且將軸差應力正規化至應力比後，各不同圍壓之結果，有相當一致之趨勢。在含水量影響方面，相同應力比下，含水試體之潛變量均較乾燥試體來的大。在體積變形方面，乾燥試體在圍壓為零時，應力比低時，體積呈壓縮

狀態，當應力比大於 0.5 後，開始有體積膨脹的情形發生；圍壓逐漸升高後，體積變形則大部份處於壓縮狀態。含水試體則不論圍壓為何，均大部份處於體積膨脹之狀態。在破壞強度方面，實驗結果顯示木山層砂岩為一高度遇水弱化之砂岩，其強度弱化比約為 40%。

木山層砂岩傳統三軸及純剪三軸之潛變試驗結果顯示，體積應力階段時，圍壓大於 10MPa，軸向與環向潛變量相當一致，顯示木山層係一均向性高的材料。相同應力狀態下，純剪三軸應力路徑所得潛變量均高於傳統三軸的試體。

英文摘要(Keyword: sandstone, creep)

In the western Taiwan most rocks are sedimentary rocks of tertiary period. These rocks are often not well cemented, and sometimes full of geological structure, such as joint, faults, fracture. Besides, rainfalls in Taiwan often exceeds thousands of millimeter, rock in this situation may weathered very quickly, and may cause many engineering problems.

In order to reduce the problems encountered during engineering, we must research the mechanical behavior of these rock.

In this study, we research the creep behavior of sandstone, included three rock strata. Uniaxial and triaxial creep

tests are used to study the creep behavior sandstone. The effective of stress path and level of shear stress and confining pressure were investigated.

The uniaxial creep test results indicate that sandstone has the following creeping behavior: In Mushan sandstone, the primary axial creep behavior is significant at low level of shear stress. In Mushan, 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.

According to the conventional triaxial creep test results, the creep strain and creep strain rate increase with deviatoric stress. And if we normalize the deviatoric stress to SSR (Stress - Strength Ratio), we found that in the ε -SSR diagram, every curve has the same trend, and falls in a very narrow region, in spite of confining pressure. In this study, we also found that in the same SSR the strain of wet specimens always greater than dry specimens. In the volume strain of wet specimens, the volume always dilates at every SSR. the strength of sandstones decreased with water.

In the hydrostatic creep test, when cell pressure is higher than 10 MPa, the axial creep behavior and lateral creep behavior are similar. the amount of lateral and volumetric creep during the pure shear stress path creep test is higher than during the tradition triaxial test at the same stress level.

二、緣由與目的

台灣西部麓山帶岩層以第三紀的沉積岩為主，由於該岩層成岩作用時間短，岩石膠結及壓密程度不佳；復以台灣既溫且濕的氣候環境，風化作用快速進行，使得此類岩層常呈膠結不良、孔隙率高、變形性大等特性，形成大地工程之不利因素。以其中之

木山層砂岩為例，除了岩性軟弱之外，尚具有剪脹、高潛變量與遇水易弱化等特性；容易造成隧道大量變形之擠壓行為，屬於隧道工程之問題岩種。

而當地下開挖(如礦坑、地下電廠、核廢料儲存廠等)和隧道工程在通過此類岩石時，便可能遭遇到嚴重擠壓變形、剝落乃至於大量抽心的事故。以北二高中和隧道為例，施工期間通過木山層砂岩段時，即遭遇大量之擠壓變形。台灣的第三紀砂岩地層分布廣泛，而擠壓之問題於近年來台灣地區隧道工程之施工經驗中經常遭遇，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擠壓依時變形行為進行探討。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，包括五指山層砂岩、木山層砂岩、大寮層砂岩等三種岩層，期對這一系列岩石材料的潛變行為有一初步了解。

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，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，稱為一次潛變；之後潛變速率維持定值，是為二次潛變；最後潛變速率急遽增加直至試體破壞，稱為三次潛變。

綜合國內外之相關研究(唐孟

瑜，1998、游威耀，2000；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結構因素。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；內在的結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

本研究選取的試體有：五指山層砂岩、木山層砂岩、大寮層砂岩等，試驗流程圖如圖 1 所示。除了基本物性實驗之外，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。

本研究首先進行單軸及三軸試驗，求得各砂岩層的破壞包絡線，再依其材料破壞強度，規劃單軸、圍壓、傳統三軸、純剪三軸等不同應力狀態下之潛變試驗。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 1~64 個小時不等，圍壓大小約在 20~80MPa。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。

五、基本物性與潛變試驗結果

5.1 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、孔隙率及乾密度

等。基本力學性質則包含有單壓強度、楊氏模數等，各岩層乾燥試體單軸壓力試驗結果及物性結果整理如表 1 所示。由單壓試驗所得應力應變線可發現，木山層砂岩具有明顯之裂隙閉合段，而五指山層及大寮層砂岩則無明顯的裂隙閉合段，本研究將於後文進一步討論此一裂隙閉合段之存在，對於砂岩於單軸應力下時的軸向潛變行為具有重大的影響。

5.2 單軸潛變試驗結果與討論

單軸潛變實驗係採取五指山層、木山層及大寮層進行，以木山層砂岩為例，試驗結果的應力應變曲線如圖 2 所示。圖中亦與單軸壓力試驗所得應力應變曲線結果作一比較。其中顯著之差異在於，單壓試驗的砂岩試體，解壓再壓曲線會形成有開口遲滯圈，單軸潛變試驗的再壓曲線則是會回到解壓時的狀態點，形成一封閉圈。至於潛變行為方面，底下將分別就軸向、環向及體積潛變行為討論五指山層、木山層及大寮層砂岩的潛變行為。

1. 軸向潛變量

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如圖 3 所示。綜合各試體於不同應力比值下各階段的軸向潛變應變量如圖 4 所示。木山層砂岩相較於五指山層及大寮層砂岩具有明顯不同的潛變行為。當應力比值低時，木山層砂岩其第一階段的軸向潛變量通常會大於第二階段，待應力比值高於 0.5 後，軸向潛變量才又會隨著應力比值的增加而變大。五指山層與大寮層則是應力比值高時，軸向潛變應變量也隨之變大，亦即潛變應力愈大，試體的潛變

應變量也愈大。

木山層砂岩在低應力比值(應力比約等於 0.1)的狀況下時,即有明顯的潛變行為之原因,可由其單壓試驗所得軸向應力應變曲線發現,相較於其它兩種岩層,木山層砂岩具有明顯之裂隙閉合段,亦即在低應力比值狀態下時,高額潛變量有大部份的貢獻係來自於裂隙的閉合行為。而五指山及大寮層砂岩,在相同低應力比下時,軸向的應力應變曲線已位於彈性段,故少了裂隙閉合的貢獻,潛變量係隨著應力比值的增加而呈線性的增加。

2.側向潛變量

三種砂岩所得之側向潛變量具相似的趨勢,並不會像軸向一樣得到木山層砂岩潛變量較高的情形。探究其因,可由其單壓試驗的環向應力應變曲線得知,木山層砂岩與其它兩種砂岩相同,沒有明顯的裂隙閉合段。因此,其潛變量均是隨著應力比的增加而遞增。比較相同應力比值下的軸向和側向潛變應變量,當應力比值低時,側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,側向潛變應變量開始顯著增加,接近試體破壞強度的應力比值時,甚至可能超越軸向潛變應變量。

3. 體積潛變量

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,顯示試體有急遽膨脹的現象。經由實驗的結果顯示,木山層砂岩試體於單軸潛變應力

作用時,約在應力比值 0.4~0.5 之間時,其體積潛變量會由壓縮變形,轉換至膨脹的變形行為。

5.3 三軸潛變試驗結果與討論

1. 體積應力潛變試驗結果

本試驗係於圍壓 5、10、20、30、40 及 50MPa 時進行一小時之加壓潛變試驗。體積應力對潛變量之影響,因試體承受一等向圍壓應力,因此,試體無論軸向環向或體積潛變應變均處於壓縮變形行為。軸向與環向之潛變應變於圍壓大於 10MPa 後,兩方向之潛變量相當接近,此結果顯示,木山層砂岩為一均向性高的試體。

2. 傳統三軸潛變試驗

本試驗係以木山層砂岩烘乾及含水的試體進行 20~80MPa 不同圍壓值下的實驗,一方面探討應力比值及圍壓的影響,另一方則是可探討水對砂岩潛變行為的影響。綜合烘乾試體的試驗結果顯示,低應力比值時,不會有相似於單軸潛變試驗所得的高額軸向潛變量,其行為係隨應力比增加而呈緩慢遞增,應力比值到達 0.6 以上時,潛變量始有激增現象。

比較單軸應力狀態與三軸應力狀態作用下,低應力比值對軸向潛變量產生此兩種不同趨勢的原因為,在圍壓為零之單軸應力狀況下,當第一階應力加載時,孔隙受到壓縮產生壓縮變形,故在單軸潛變中第一階常出現較大的潛變量,爾後,當第二階應力加載時,由於孔隙先前已受壓產生大量變形,此時孔隙產生變形之空間已不如第一階大,故此時之變形主要由岩材之變形所提供,因此,此時之變形常較第一階小。隨後第三階、第四

階的加載，變形主要由岩材之變形所提供，故隨著應力比的升高，變形量亦升高。而在圍壓不為零的三軸應力狀態下，由於圍壓之束制，孔隙已被先行壓縮，因此當第一階加載時，變形由少量的孔隙壓縮加上岩材的變形所提供，因此第一階產生之潛變量並未特別的大。此後，當每一階應力加載時，變形均由一部份的孔隙壓縮及岩材變形所提供，因此，潛變量即隨著應力比的升高而遞增。

整理含水試體三軸潛變試驗之潛變量與應力比值之關係，可觀察出各個不同圍壓之潛變量均隨著應力比的增加而增加，且有著相當一致的趨勢，另外觀察相同應力比之下，圍壓愈大，其潛變量愈低，此結果與 Maranini, E. , M. Brignoli (1999)、Cristescu & Hunsche (1998)及唐孟瑜 (1998)等人的結果相同。將含水試體與烘乾試體的潛變量加以比較如圖 5。圖中為圍壓 40MPa 作用下，含水及乾燥試體一小時潛變量之比較，由圖中可看出，含水試體之軸向及環向潛變量均比乾燥試體來的大，其中在環向尤其明顯。另外，其它不同圍壓的實驗結果顯示，隨著圍壓的升高，含水及乾燥試體潛變量之差別漸趨縮小，尤其在軸向應變方面，當圍壓高達 80 MPa 時，幾乎已看不出含水量的影響。

含水試體之應力比與一小時體積潛變量之關係顯示，含水試體在低應力比時體積即呈現體積膨脹的行為，僅有一兩組實驗在低應力比呈壓縮狀態，且隨著應力比的升高膨脹的趨勢愈是明顯，此和乾燥試體在圍壓不為零之狀態下，大部份處於壓縮狀態有著極大的不同。

在破壞強度方面，實驗結果顯示木山層砂岩為一高度遇水弱化之砂岩，其強度弱化比約為 40%，其破壞包絡線如圖 6 所示。

3. 純剪三軸潛變試驗結果

本研究進行之純剪潛變試驗為採烘乾試體進行圍壓 20~60MPa，綜合實驗結果，顯示其潛變量與軸差應力存在正相關之關係。將各圍壓之試驗以其破壞時軸差應力可得軸向、環向及體積潛變應變經正規化後有相當的一致性，且當應力比大於 0.6 時，軸向與側向潛變量均有激增的現象，此潛變行為與傳統三軸所得結果有著相似的趨勢。

5.4 應力路徑對潛變行為影響探討

本研究比較傳統三軸及純剪三軸應力路徑如圖 7 在相同應力狀態下之潛變行為，結果顯示應力路徑確實對於試體潛變行為有顯著之影響。比較體積的潛變量值如圖 8 所示，相同應力狀態下，純剪三軸潛變試驗均比傳統三軸潛變所得之值來的高。

六、結論

為了解砂岩潛變行為之差異，本研究針對三種地層岩石，進行物性實驗、單軸壓力試驗和三軸潛變試驗等，茲將本研究所得之重要成果列舉如下：

- 1.單軸潛變試驗方面，木山層於低應力下的潛變行為異於五指山層及大寮層砂岩，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。
- 2.三軸潛變試驗方面，純剪三軸潛變試

- 驗與傳統三軸試驗結果均顯示，應力比值與軸向、側向及體積潛變量之關係，均存在一致性良好的趨勢。
- 3.含水量之影響方面，相同應力比下，含水試體之潛變量較乾燥試體來的大。
 - 4.木山層砂岩為一高度遇水弱化之砂岩，其強度弱化比約為 40%。
 5. 相同應力狀態下，純剪三軸潛變試驗所得之潛變量較傳統三軸所得潛變值來的高。

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] 游威耀 (2000)，砂岩組構對潛變行為影響之初步研究。國立台灣大學地質研究所碩士論文。
- [3] 唐孟瑜 (1998)，木山層砂岩變形行為之研究，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- [4] 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.
- [5] Cristescu, N. D. and U. Hunsche (1998), *Time Effect in Rock Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- [6] 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.
- [7] Dusseault, M. B., Rothenburg, L. & Kornelson, P. K. (1991) Transient Response Simulation Using a Discrete Element Approach. *In Proc. KALI '91*, Hamburg.
- [8] Goodman, R. E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd Edition, John Wiley & sons.
- [9] Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978) *Handbook on Mechanical Properties of Rock*, Vol.2, Trans. Tech. Public., 57~59.
- [10] Singh, D. P. (1975), A Study of Creep of Rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **Vol. 12**, No. 9, 271~275.

表 1 各岩石物性及單軸壓力試驗結果

試體名稱	五指山層砂岩	木山層砂岩	大寮層砂岩
飽和含水量(%)	7.39	5.77	5.58
孔隙率(%)	11.3	12.7	14.8
乾密度(g/cm ³)	2.2	2.2	2.3
平均單壓強度(MPa)	47.7	37.2	68.7
楊氏模數(MPa)	5	12.7	9.7

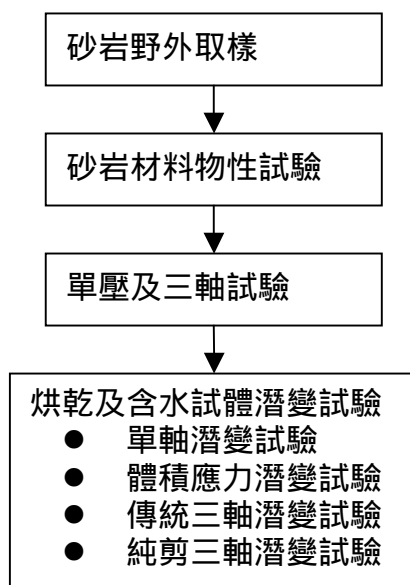


圖 1 試驗流程之規劃

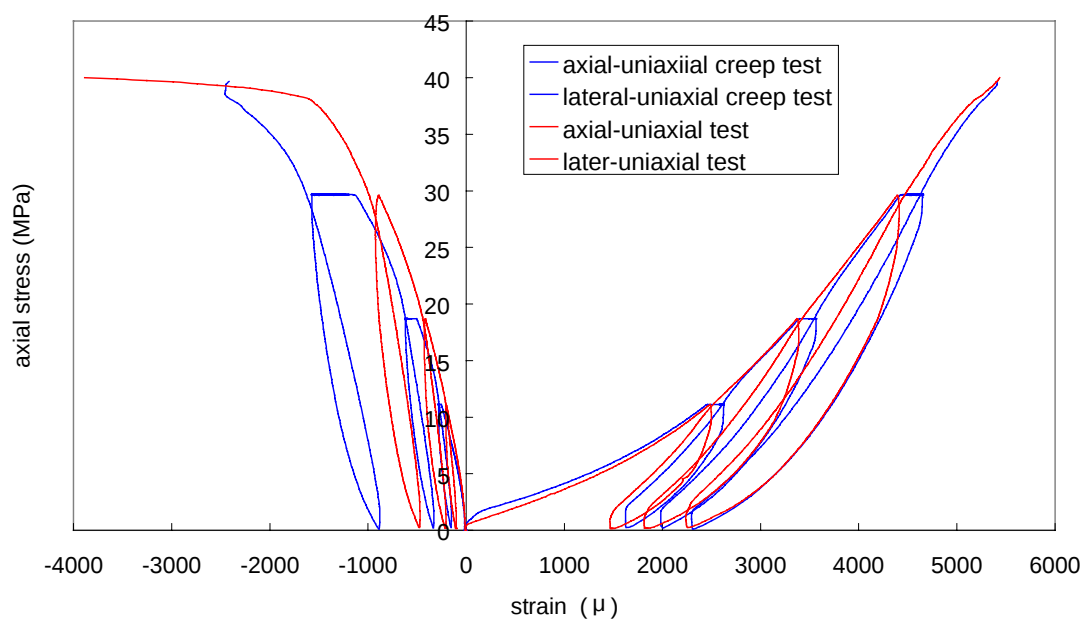


圖 2 單軸潛變實驗之應力應變曲線圖(以木山層砂岩為例)

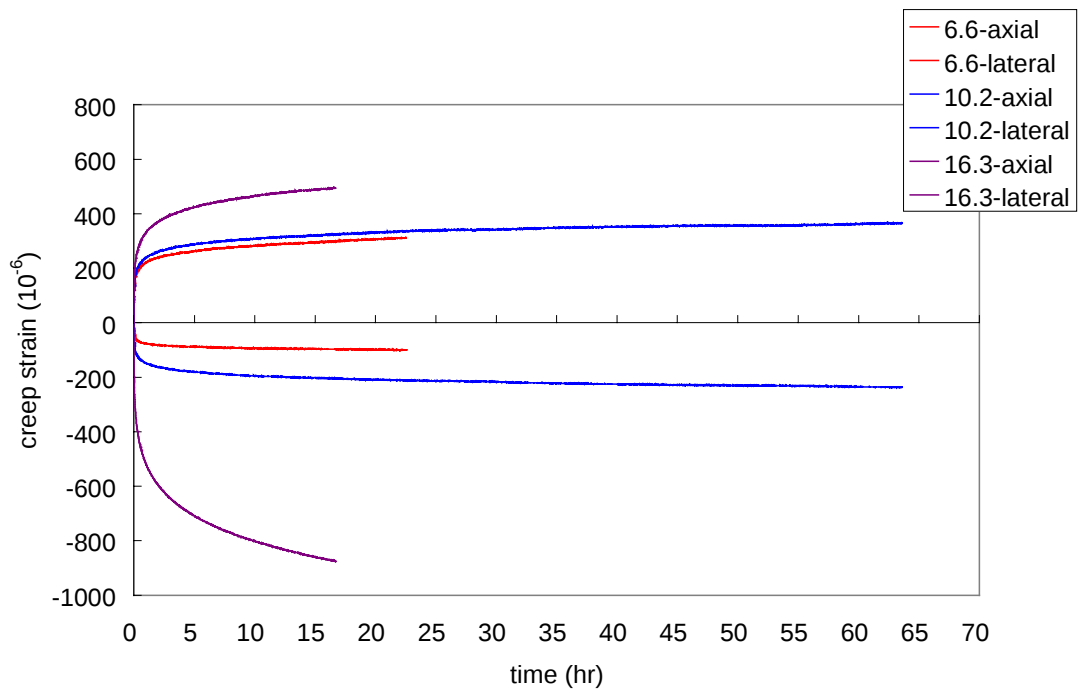


圖 3 在不同的單軸潛變應力作用下之潛變應變曲線
(以五指山層砂岩為例)

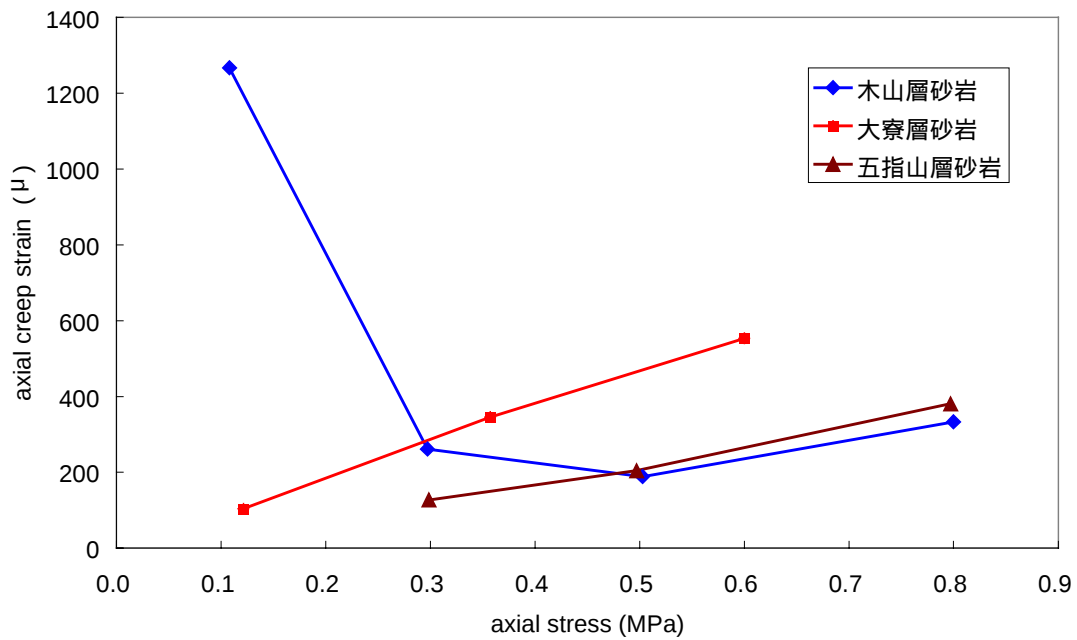


圖 4 單軸潛變應力作用下各砂岩之軸向潛向量比較

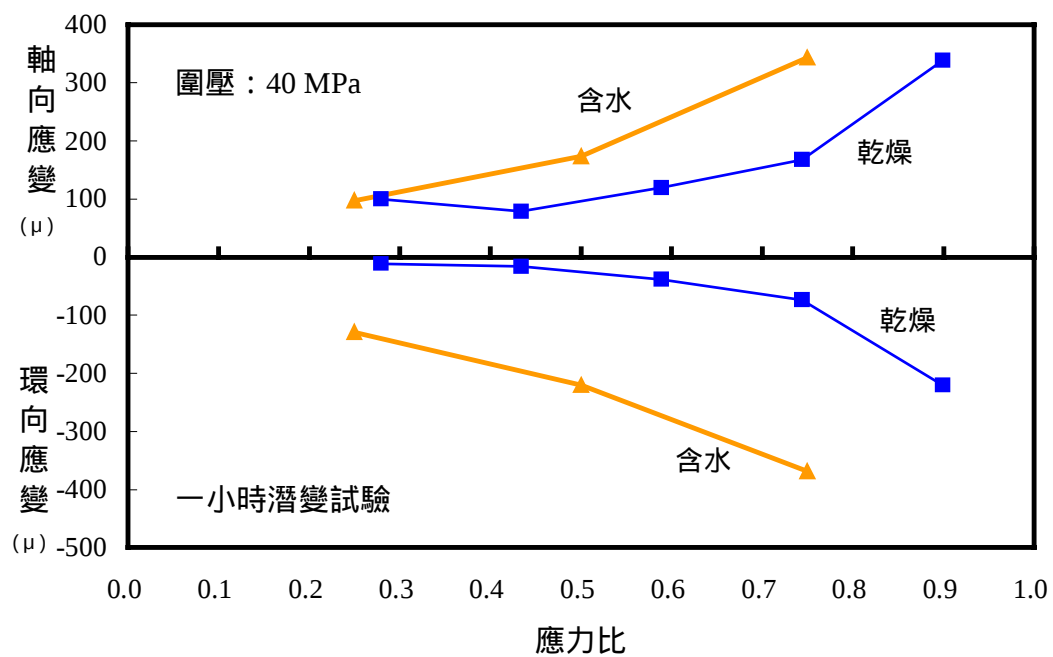


圖 5 木山層砂岩烘乾及含水試體 1 小時之軸向及環向潛變量比較

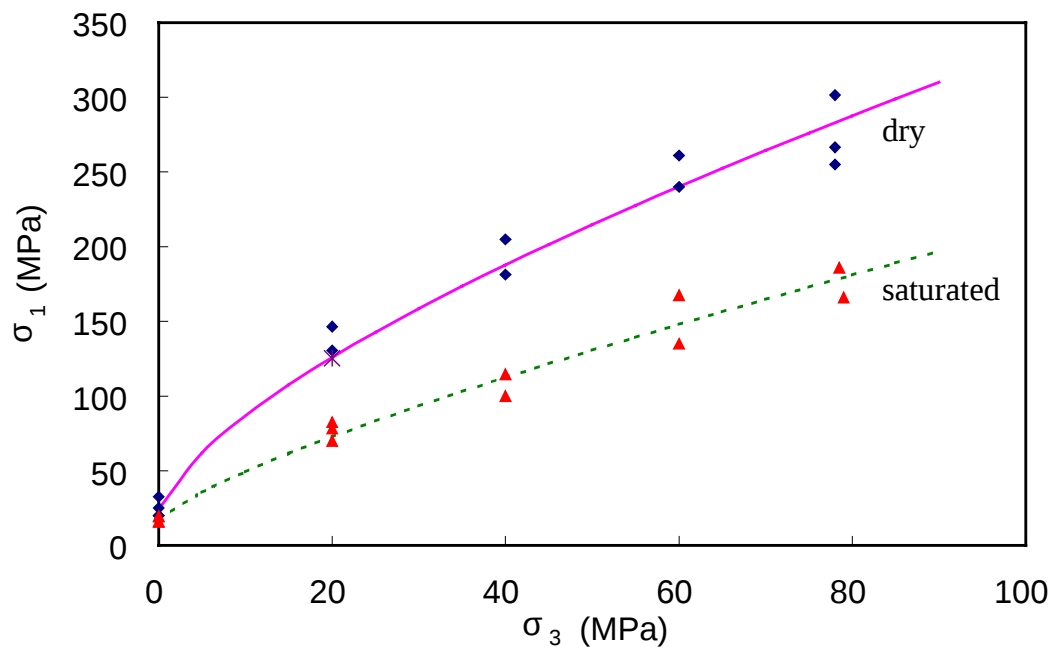


圖 6 木山層砂岩烘乾試體及含水試體的破壞包絡線

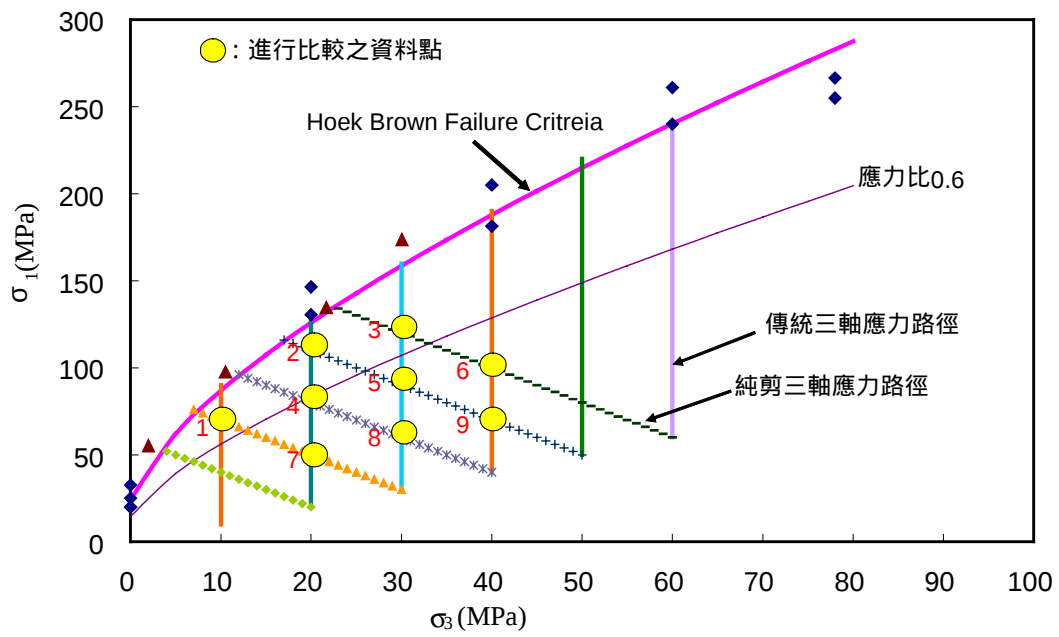


圖 7 傳統三軸與純剪三軸潛變試驗的應力路徑示意圖，圖中編號為比較應力路徑影響的資料點。

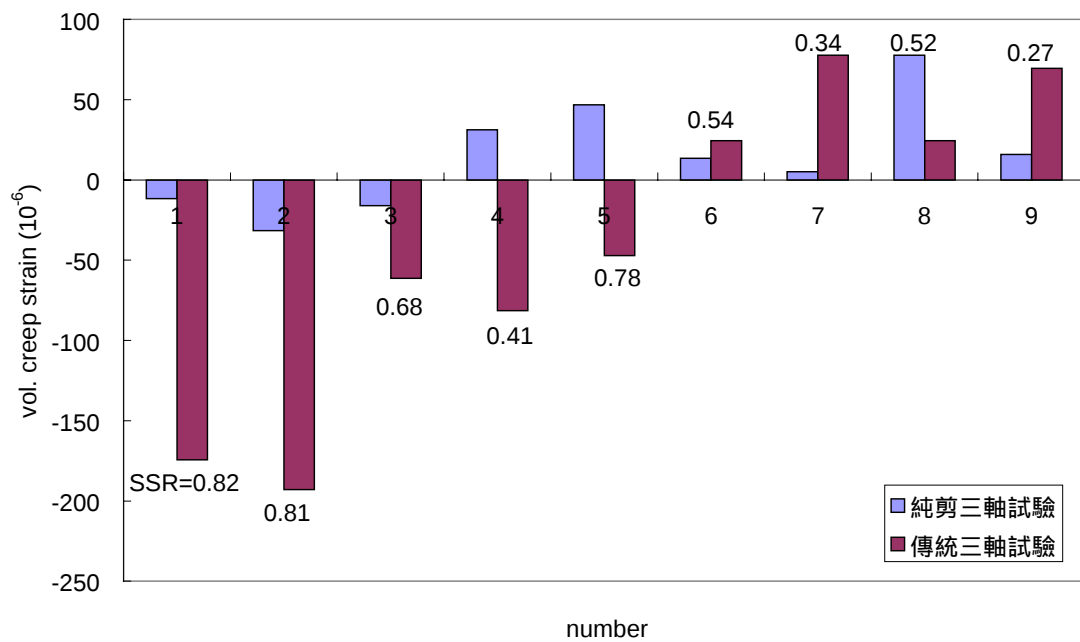


圖 8 不同應力路徑，相同應力狀態下，砂岩之潛變行為比較(以木山層砂岩為例)