

# 正向閉合行為下花崗岩節理面導水性研究

趙振宇<sup>1</sup> 雷世璋<sup>2</sup> 張六順<sup>3</sup> 莊文壽<sup>4</sup>

<sup>1</sup>國防大學中正理工學院 軍事工程學系

<sup>2</sup>聯合大地工程顧問公司

<sup>3</sup>國立臺灣大學 土木工程研究所

<sup>4</sup>核能研究所 化工組

## 摘要

本文針對金門區域內之花崗岩質節理面，進行正應力作用下節理面導水偶合行為之實驗模擬探討。研究共分兩階段進行，首先利用環氧樹脂製作透明模擬節理試體，再運用微量滴定法取得模擬節理面之初始內寬分布；此外，另以一組追蹤劑試驗觀察正向閉合過程中，節理面滲流路徑的變化狀態。最後，再以兩組大面積之節理試體為模擬對象，探討花崗岩節理面在正向閉合行為時的導水特性。

經一系列之實驗模擬後，可知花崗岩節理面之導水性具下列之特性：(1)由樹脂模擬節理面的內寬分布量測成果顯示，花崗岩節理面內寬分布呈現對數常態分布，隨正應力之增加內寬逐漸趨向集中一殘餘內寬值；(2)本區內之花崗岩岩材的強度相當良好，節理面粗糙程度亦相當明顯，當正應力由自重狀態增至 20MPa 時，其導水係數變化倍率可達 2 階(約 100 倍)；當正應力高於 10MPa 以上時，節理面已近乎不透水狀態，顯見在適當的岩覆壓力深度內，粗糙花崗岩質之節理面在阻絕滲流能力上，具有良好的工程效果。

關鍵字：初始內寬分布、導水係數、粗糙度。

## 一、前言

臺灣地區位處歐亞大陸與菲律賓海兩板塊之碰撞區間，由於活躍的板塊作用與頻繁的地震，導致本區域內地質構造發達岩盤破碎度高，地震力的擾動亦可能使岩盤產生較大的變形，並增加岩盤工程在設計及施工上的挑戰性。另一方面，我國利用核能發電已有近三十餘年的歷史，而核電所產生高污染性廢棄物的安全處置，以及終極阻絕場址的選定工作上，因受限於台灣地區工程地質環境不佳，亦使得相關安置技術的發展顯得困難重重。如何在本區域內覓得一理想的阻絕貯存場，在安全評估工作與考量上，又較高度使用核電之歐美先進國更為嚴苛。

基於我國對高污染廢棄物深埋阻絕體場址的選定與開發上有其迫切需要，在本區內欲覓得一地盤穩定且岩體完整之工址，似以具花崗岩盤之離島地區為首選，但因離島區域地處偏遠與海上交通不便所限。因此，國內岩石力學研究方面，對於花崗岩節理面之工程性質以及導水性的探討，尚未能有一完整的成果。基於此一重要之環保課題及為長遠生態安全考量，本研究擬針對金門區域內之花崗岩節理面於正向閉合行為下導水特性，做一系統性之實驗研究探討。

## 二、相關研究

岩石節理面力學—導水偶合行為在高污染廢棄物深埋阻絕場址的安全評估上，為一重要課題。NGI 之 Makurat 等人(1990)經由自然岩石節理面之力學—導水偶合行為的實驗研究得知，節理面之導水性變化深受外在作用力場、岩材側壁強度(JCS)、節理面粗糙度(JRC)、以及岩材礦物所影響，亦瞭解控制節理面導水特性的關鍵因子為其內寬分布。然因節理面之內寬分布為一隨機分布特性空間，在節理面力學—導水偶合行為的理論分析上，此一參數之取得最為困難。由於節理面內寬分布實為上述諸項影響因子的綜合展現，因此，Hakami(1990)透過微量滴定法，取得節理面於自重狀態下之初始內寬分布以及低正應力態下內寬分布的改變；Brown(1987)則透過合成高程剖面(composite profile)觀念，利用碎形模擬節理面(Fractal surface)高程分布取得粗糙節理面之內寬分布，用以探討節理面粗糙特性對其滲流場的影響；Tsang(1987)則提出流槽模型解釋節理面內寬空間中滲流路徑的網路特性。上述諸項理論研究成果，雖可對粗糙節理面的導水性與其影響因素做詳細的探討，然國內在節理面導水偶合行的研究起步較晚，近年來，雖在理論模式研究探討上取得相當之成果，然對於真實岩石節理面導水特性的實驗模擬上，仍有相當探討空間。

## 三、節理面初始內寬與滲流場特性

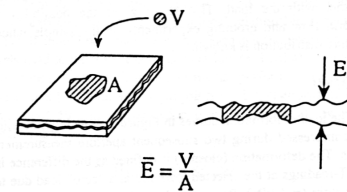
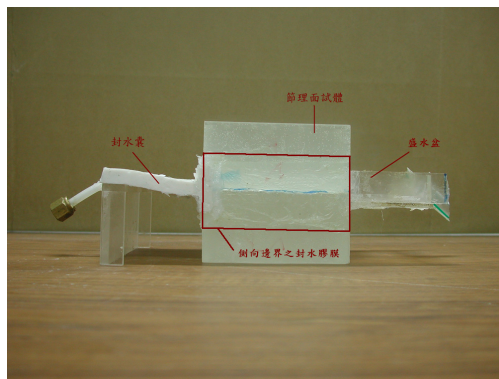
### 3.1 節理面內寬分布量測

節理面力學行為除影響岩體的力學性質外，亦主導了岩體的水力傳輸特性，然節理面導水性又與其內寬分布有極密切之關係。因此若能正確地量得節理面之初始內寬分布及力場作用時其內寬分布的改變，即可掌握節理面導水係數的起始點與導水性的變化趨勢。故本研究擬訂之第一階段實驗工作，即針對花崗岩模擬節理面進行初始內寬分布的量測，以期瞭解粗糙花崗岩節理面內寬分布的特徵。

#### 3.1.1 節理面內寬分布量測之設計

本研究採用 Hakami(1990)所發展之微量滴定方法進行節理面內寬分布的量測工作，首先，利用透明環氧樹脂做為複製模擬節理面試體的材料，如圖 1(A)所示；透過透明度極高的

樹脂節理試體，以染色水進行微量滴定，經由滴定於試體表面所產生之水膜面積(如圖 1(B)所示)，可反推得節理面間內寬分布狀態。此外，配合一組追蹤劑試驗之執行，可確實觀察到正應力作用下，模擬節理面間滲流路徑發展的過程。當然，樹脂模擬材料的力學性質，亦須符合岩石模擬材料相似律的要求，經試驗得知：模擬材料之單軸抗壓強度為 65.4MPa；靜彈模數平均值  $E_{av}$  為 3.6GPa；包生比  $\nu$  為 0.34。由試驗結果可知，在單壓條件下，應力態介於 0MPa 至 35MPa 間，樹脂模擬材料之應力—應變關係呈現良好之線彈性行為，故本研究恰可利用此一材料在該應力範圍的力學特性，進行節理面初始內寬量測與滲流場特性的探討。

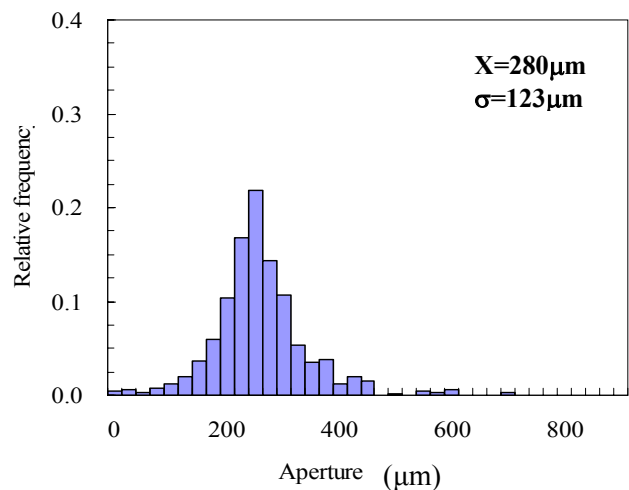
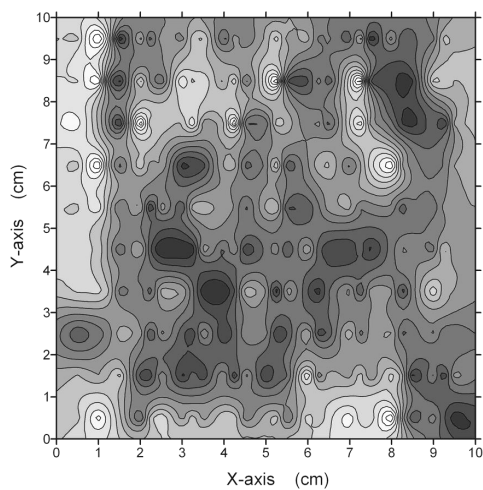


V = Small volume of silicon rubber placed between the two joint surfaces.  
A = Area of the stain covered by rubber after compression of the joint.  
 $\bar{E} = \frac{V}{A}$   
E = Average aperture over the area A.

(A) 透明樹脂之模擬節理試體(張六順,2005)

(B) 微量滴定水膜法(Hakami,1990)

圖 1 節理面內寬量測之微量滴定法及節理試體



(A) 節理面內寬分布等高線圖

(B) 內寬分布頻率曲線

圖 2 樹脂模擬節理面 B 之初始內寬分布與分布頻率直方圖(張六順,2005)

### 3.1.2 節理面內寬分布特性

在節理面的內寬分布量測上，本研究共對兩張裂之花崗岩節理面進行模擬節理面試體取樣(面積為 10cm×10cm)，節理面之粗糙度係數分為 13.6 與 6.8，此兩組試體以

JTA 與 JTB 稱之，然後以環氧樹脂翻製透明節理試體，當獲得模擬節理面之初始內寬分布後，再將節理試體置於一荷重架中，對試體施加正應力後，並重行進行節理面之內寬分布量測工作，表 1 所示為兩模擬節理面於正應力 1MPa、5MPa 時內寬分布之統計特性之比較。圖 2 所示為模擬節理面 JTB 之初內寬分布以及內寬分布頻率曲線。

表 1 樹脂材質模擬節理面試體內寬分布及其統計特性參數

節理面編號	JTA(JRC=13.6)			JTB(JRC=6.8)		
	0	1	5	0	1	5
正應力(MPa)	0	1	5	0	1	5
內寬平均值( $\mu\text{m}$ )	334	234	142	280	152	91
標準偏差( $\mu\text{m}$ )	77	61	35	123	80	41



(A)頂視圖



(B)正視圖

圖 3 模擬節理面滲流路徑追蹤劑試驗裝置

### 3.2 節理面滲流場特性

本研究經由微量滴定法取得模擬節理面之內寬分布後，更進一步以定點注射追蹤劑的方式，觀察正應力作用下，模擬節理面內寬空間中滲流路徑發展的過程，實驗裝置如圖3所示。圖4與圖5所示則為兩模擬節理面於正應力分為1MPa與5MPa時滲流路徑分布的情形。由圖中可知，模擬節理面在低正應力條件時，滲流路徑沿著外視水力梯度方向呈平行狀之發展，且流槽寬度較大；隨著所受正應力增高後，節理面內寬分布逐漸緊縮，亦使得滲流流槽數量減縮且寬度變窄，同時會發展出交會之流槽網路型態。

## 四、花崗岩節理面導水性

### 4.1 節理面閉合變形之導水實驗設計

本研究在擬訂第二階段的節理面導水性實驗中，採用真實花崗岩材製作之張裂節理試

體，進行高岩覆應力作用下節理面導水性的探討。至於節理面所受高岩覆應力的來源，則以伺服控制之剛性壓力機取代，為使節理試體可於閉合變形條件下，進行較困難但符合現地條件之平面型滲流試驗(planar flow test)，實驗中亦設計一套節理面變形量測支架與試體固定基座，可將供應節理面滲流之封水囊與量測試體變形的儀具一同固定於節理試體上，使節理面試體於高岩覆應力作用時，亦可同步進行導水試驗，實驗裝置之設計如圖 6 與圖 7 所示。

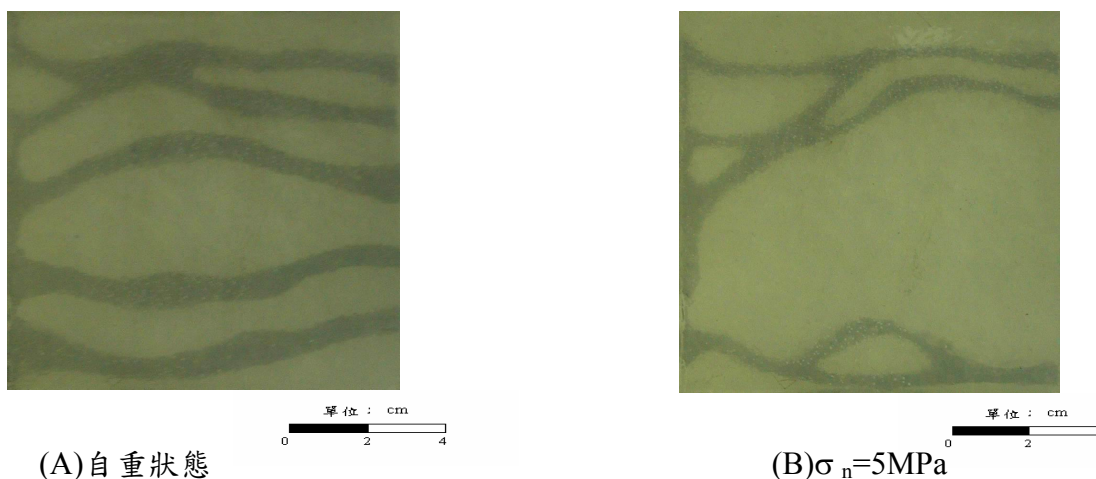


圖4 樹脂模擬節理面A以追蹤劑試驗所得滲流路徑分布圖(張六順,2005)

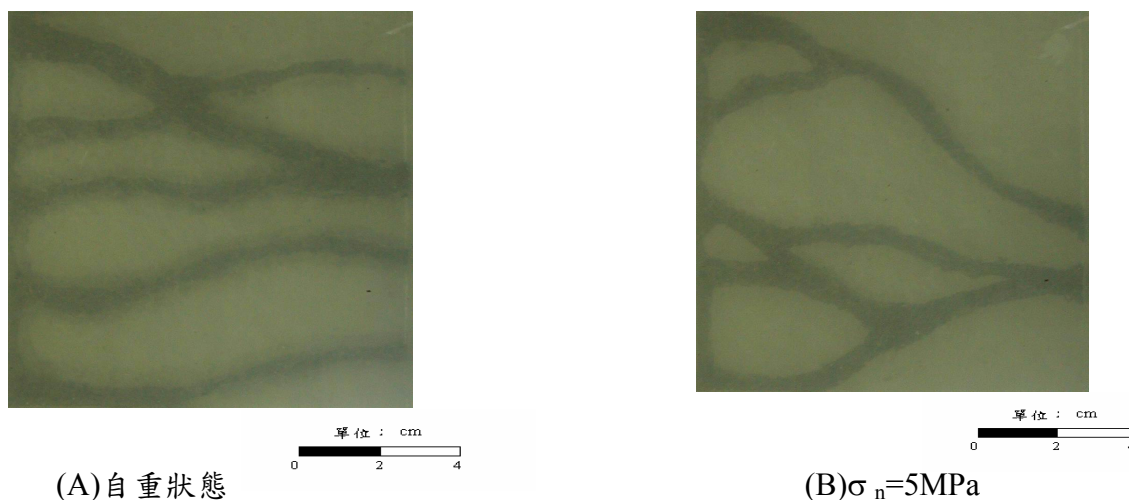


圖5 樹脂模擬節理面B以追蹤劑試驗所得滲流路徑分布圖(張六順,2005)

## 4.2 花崗岩力學性質

本研究所需岩材由台大土木系岩力室支援一塊庫存之金門片麻花崗岩材，以及由石材市場購得與金門地域相近之福建花崗岩材，方便相關試驗工作得以順利進行。然片麻花崗岩材之材積有限，故節理面之導水實驗研究上，僅能以福建花崗岩材製作之模擬節理面試體，進行相關實驗模擬工作。為瞭解兩種花崗岩材力學性質上的差異，故本研究先對金門片麻花崗岩與福建花崗岩進行單軸抗壓、靜彈模數試驗、與三軸力學等三項試驗。其結果討論如下：

- (1)單壓試驗：試驗所得金門片麻花崗岩平均值為 123MPa；福建花崗岩則約為 180MPa。
- (2)靜彈模數試驗：試驗所得金門片麻花崗岩平均靜彈模數  $E_{av}$  約為 27GPa，包生比  $\nu_{av}$  為 0.47；福建花崗岩平均靜彈模數  $E_{av}$  約為 42GPa，包生比  $\nu_{av}$  為 0.28，福建花崗岩較金門片麻花崗岩強度高出近 45%外，金門地區花崗岩之靜彈模數亦僅為福建花崗岩 65%，包生比則較福建花崗岩高出甚多，顯見金門地區已片麻化之花崗岩的變形性較內陸區花崗岩為低。
- (3)完整岩材三軸試驗：本項試驗所施加最大圍壓值為 30MPa，兩種岩材經試驗後獲得之破壞包絡線呈現極佳之線性行為，金門片麻花崗岩之  $\phi$  值約為  $54^\circ$ ，福建花崗岩則  $\phi$  值則為  $57^\circ$ ；片麻花崗岩 C 值約為 20MPa，福建花崗岩 C 值約為 32MPa。

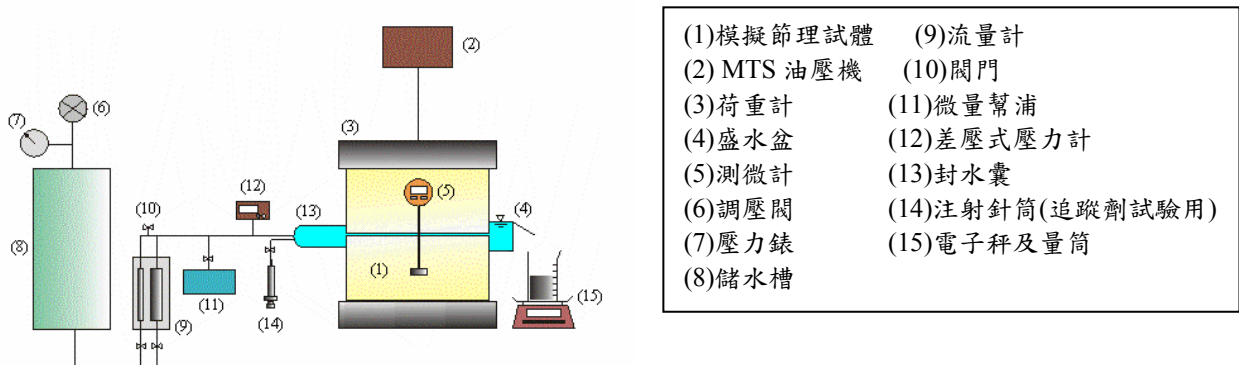
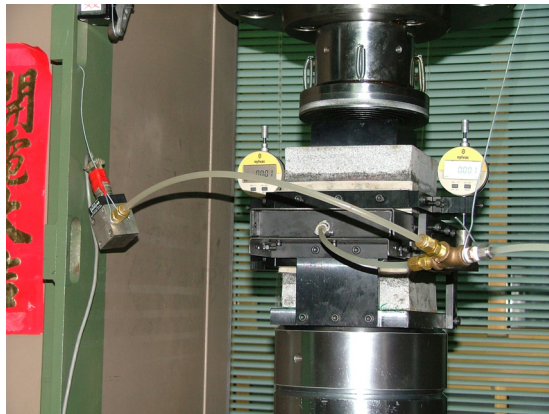


圖 6 節理面正向閉合之力學—導水耦合實驗裝置設計架構圖(雷世璋,2003)



(A)節理面變形量測與滲流封水支架裝置



(B)節理面滲流壓力控制與微量注射幫浦裝置

圖7 張裂花崗岩節理面正向閉合導水耦合試驗之裝置圖

### 4.3 花崗岩節理面導水性

#### 4.3.1 花崗岩節理面之取得

本階段實驗之花崗岩模擬節理面係以張裂法取得，再經加工裁切為正方形，並儘量取得

大面積之節理面試體，以消除試體規模效應之影響。由於福建花崗岩材強度高且韌性大，經張裂獲得之模擬節理面試體成功率僅約 40%(4 組)，加上裁切過程的損失，故可實際用於導水性測試的試體組數僅有三組。在本文中，僅就實驗成果較佳之兩組大面積之花崗一號(尺寸：158mm×158mm，JRC 值為 11.8)、二號(160mm×160mm，JRC 值為 12.3)之導水特性進行討論。

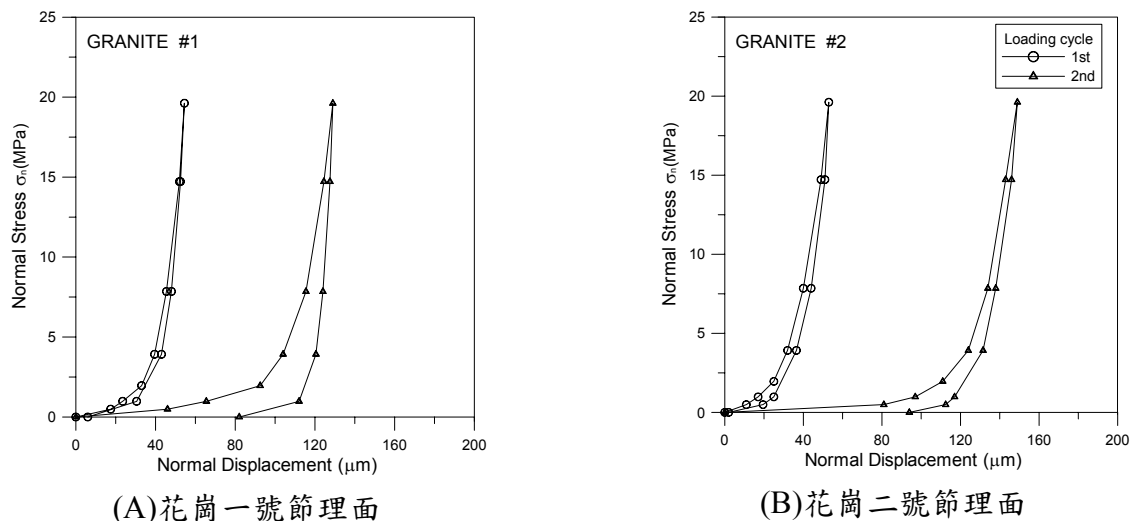


圖8 花崗岩模擬節理面之閉合曲線

#### 4.3.2 節理面閉合行為

模擬節理面於正向閉合試驗時，所需施加的最大正應力係參考深層掩埋阻絕體所需深度範圍之岩覆應力，其值介於 15MPa 至 20MPa 間，故選定 20MPa 做為施加於節理試體之最大正應力，閉合過程之加一解載循環至少需進行三次，經實驗變形量測記錄顯示，節理面於第二、第三加一解載循環之變形行為已趨於一致，為使實驗成果之圖形便於分析與描述，下述討論所繪圖形均只呈現第一與第二加解循環過程。

##### (一) 一號節理面

圖 8(A)所示為節理面之正向閉合曲線，由結果可知：第一次加載循環時，由自重狀態至 1MPa 之正應力時，節理面之閉合變形量(不含岩材變形量)約為 66 $\mu$ m；當正應力達 20MPa 時，節理面之最大閉合量約為 129 $\mu$ m。於第二次加載循環結束時，節理面閉合量降低至 55 $\mu$ m；而在第三次加載循環結束時，節理之閉合量與第二循環相當。

##### (二) 二號節理面

圖 8(B)所示本節理面於第一次加載循環時，由自重狀態至 1MPa 之正應力時，節理面閉合量為 97 $\mu$ m；當正應力達 20MPa 時，節理之最大閉合量約為 149 $\mu$ m。於第二次加載循環結束時，節理面閉合量則降低至 53 $\mu$ m。

#### 4.3.3 節理面導水係數

模擬節理面在每一正應力加一解載過程中，均同時進行節理面滲流試驗，然節理面試體

所受正應力超過 2MPa 以上時，一般定水頭式之滲流試驗已無法準確量得通過試體之滲流量，故須改用微量幫浦，以注射方式進行滲流試驗。每一荷重階段至少進行五分鐘以上之滲流注射，當節理面入水口處之水頭值與幫浦注射速率達到平衡時，節理面之滲流場方能維持穩態滲流條件，而單一節理面之閉合導水實驗過程共需 10 小時以上之工作時間。

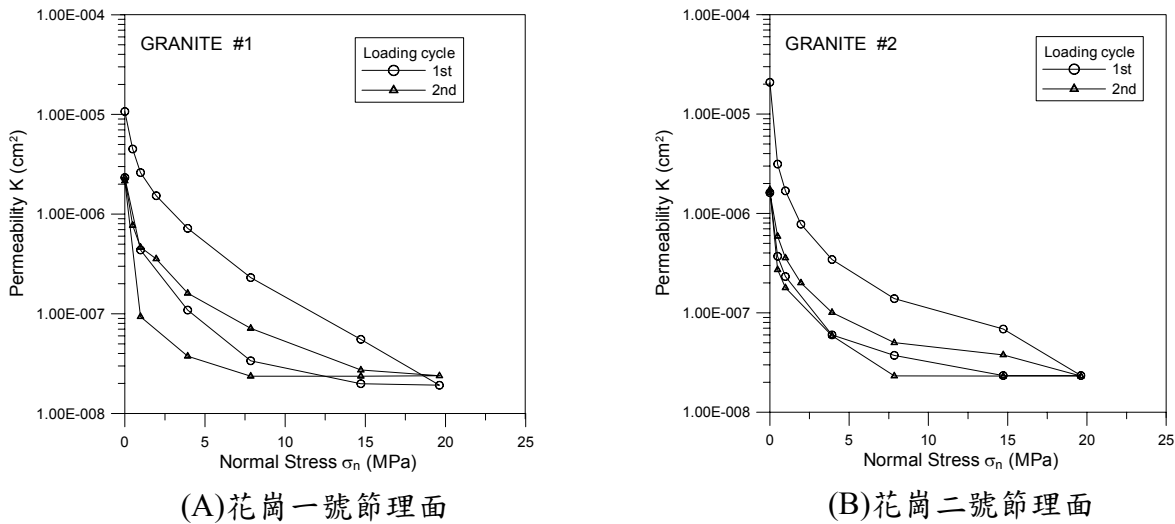


圖9 花崗岩模擬節理面之導水曲線

### (一)一號節理面

圖 9(A)所示為模擬節理面導水曲線的變化趨勢，經由平行板立方律反推自重狀態下之節理水力內寬約為 113  $\mu\text{m}$ ，對應之滲透係數為  $1.07\text{E}-5(\text{cm}^2)$ 。在第一次加壓循環時，當正應力達 1MPa 時，節理滲透係數驟降為  $2.61\text{E}-6(\text{cm}^2)$ ，隨作用之正應力持續增高，滲透係數則快速遞減，當正應力達 20MPa 時，節理滲透係數已降低為  $1.92\text{E}-8(\text{cm}^2)$ 。相較於自重狀態，節理面之滲透係數變化倍率高達 610 倍；而經第二次加壓循環作用時，正應力由自重增至 20MPa 間，節理滲透係數由  $2.33\text{E}-6(\text{cm}^2)$  降低至  $2.39\text{E}-8(\text{cm}^2)$ ，其變化倍率亦達 98 倍之多。

### (二)二號節理面

如圖 9(B)所示節理面於自重狀態下，節理水力內寬為  $159\mu\text{m}$ ，對應之滲透係數為  $2.09\text{E}-5(\text{cm}^2)$ 。在第一次加壓循環時，當正應力達 1MPa 時，節理滲透係數驟降為  $1.69\text{E}-6(\text{cm}^2)$ ；隨正應力持續增高，滲透係數快速遞減，當正應力達 20MPa 時，節理滲透係數為  $2.34\text{E}-8(\text{cm}^2)$ 。相較於自重狀態，滲透係數變化倍率約為 900 倍；經過第二次加壓循環後，正應力由自重狀態增至 20MPa，節理滲透係數由  $1.62\text{E}-6(\text{cm}^2)$  降低至  $2.31\text{E}-8(\text{cm}^2)$ ，其變化倍率亦達 70 倍之多。

經由兩組張裂獲得之真實岩石模擬節理面之導水實驗模擬結果顯示，可知花崗岩節理面

導水特性如下：

- (1)節理面在第一加載循環過程中，其導水係數由自重加載至 20MPa 時，因節理面並非處於地層中實際緊密閉合狀態，故其水力內寬值變化幅度較高，然當正作用之應力達 20MPa 時，導水係數已趨近於不透水狀態。
- (2)節理面在第二加載循環過程中，節理面的閉合狀態經過反覆加載之正應力作用後，可確實反映出節理面導水性受應力場改變的變化趨勢，由此一加解載循環之節理面導水係數變化趨勢可知：正應力由自重條件增至 20MPa 時，模擬節理面的水力內寬變化幅度約在 0.05mm 間；對應之導水係數變化區間則在 70 至 100 倍間。
- (3)由節理面導水曲線的變化趨勢可知，在 1MPa 至 10MPa 間的正應力範圍，節理面的導水係數變化極為敏感，亦可推論當地盤受到解壓作用時，岩石節理面的導水性會有相當明顯的改變。

## 五、結論與建議

### 5.1 結論

- (一)本研究利用環氧樹脂製作透明模擬節理面試體，以微量滴定水膜的技術，量得花崗岩模擬節理面初始內寬的分布；同時配合追蹤劑試驗，可觀察到模擬節理面於閉合行為下內寬分布與滲流路徑的變化，並可知節理面初始內寬分布特性均符合對數常態分布。
- (二)花崗岩節理面在第一加載循環過程中，其導水係數由自重至 20MPa 時，因節理面並非處於地層中實際緊密閉合狀態，其水力內寬變化幅度較高，導水係數之變化倍率亦超過 2 階以上；但當作用之正應力達 20MPa 時，導水係數已趨近於不透水狀態。花崗岩節理面在第二加載循環過程中，可確實反映出節理面導水係數受應力場改變產生的變化趨勢，模擬節理面的水力內寬變化幅度約在 0.05mm 間，對應之導水係數變化區間亦在 70 至 100 倍間。

### 5.2 建議

- (一)透過樹脂模擬節理面初始內寬分佈量測，可知節理面較粗糙者，其內寬分佈平均值較大。但由於實驗所用之粗糙節理面僅兩組，故建議在時間允許條件下，能取多組不同粗糙特性之花崗岩節理面進行初始內寬分佈量測，使粗糙特性與其導水性之相關性可更為明確的瞭解。
- (二)本研究受限於實驗困難度高與時程匆促，故未能對真實花崗岩材之節理面於正向閉合行為下之內寬分布變化及其導水性的變化趨勢做更詳細的模式分析，故建議後續應繼續進行節理面之理論模式分析對比研究，以明確的掌握住花崗岩節理面的導水特性。

## 六、致謝

本文內容為國科會/原委會應用科技合作計畫(NSC94-2623-7-014-016)之部份成果，在此謹向提供研究經費之兩會表達謝忱。

## 參考文獻

- [1]. 雷世璋，“岩石節理面受剪行為及對導水性影響之研究”，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文,2004。
- [2]. 張六順，“正向閉合下模擬節理面粗糙特性對其導水性之影響”，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文,2005。
- [3]. Bandis S. C., Lumsden A. C., and Barton N. R. (1983), “Fundamental of Rock Joint Deformation,” *International Journal of Rock Mechanics Sci. and Geomech. Abstr.* , Vol. 20, No 6, pp.249- 268, 1983.
- [4]. Brown, S. R., "Fluid Flow Through Rock Joints: The Effect of Surface Roughness," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. B2, pp . 1337-1347,1987.
- [5]. Hakami E., “Characterization of Fracture Aperture - Method and Parameters,” *Proceedings of 8<sup>th</sup> Conference of ISRM*, Tokyo, pp.751-754,1995.
- [6]. Hakami E. and Larsson E., “Aperture Measurements and Flow Experiments on Single Natural Fracture” *International Journal of Rock Mechanics Sci. and Geomech. Abstr.* , Vol. 33, No 4, pp.395- 404,1996.

## ABSTRACT

Coupling behavior of mechanical properties and hydraulic conductivity of rock joints is of primary importance in the field of environmental protection, particularly for the nuclear waste isolation problem. In this investigation, the hydro-mechanical coupling behaviour of granite joints of Taiwan region is studied by a series of experimental simulations. Firstly, the initial aperture distribution of two granite joints is measured with the method proposed by Hakami. Then, a set of tracer test is adopted to observe the development of flow channels in the flow field of granite joint when normal loading applied. Finally, the coupling flow test under normal loading condition of two tensile split granite fractures with area of 16cm×16cm is conducted.

According to the results in this investigation, the initial aperture distribution of granite joints (10cm×10cm) displays a log-normal distribution, and a few of tortuously flow channels is forming as normal loading applied on joint sample gradually. On the other hand, the permeability is apparently decreased as the normal loading applied, and the variation conductivity of the two 16cm×16cm joints, when normal loading up to 20MPa, could be decreased about 100 times to the self-weight state.

**Keywords:** coupling behavior, conductivity, aperture distribution.