

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

台灣地區造震斷層摩擦組成律及其應用-以車籠埔斷層為例

計畫類別： 個別型計畫

計畫編號： NSC93-2211-E-002-039-

執行期間： 93 年 08 月 01 日至 94 年 10 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： 林銘郎

計畫參與人員： 鍾春富 黃俊傑

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 94 年 10 月 25 日

台灣地區造震斷層摩擦組成率及其應用-以車籠埔斷層為例(I)

A study on laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting in Taiwan (I)

計畫編號：NSC 93-2211-E002-039

執行期限：93/8/1-94/7/31

主持人：林銘郎 台灣大學土木工程學系 副教授

一、摘要

中文摘要(關鍵詞：斷層泥，摩擦組成率，停滯時間，沉降法)

台灣位於活動地體構造，全島多斷層和破碎帶，由於斷層錯動所引發之地震，其震源較淺，且距都會區較近，其所造成之災害亦較為嚴重。Dieterich 及 Ruina 等人(1994)，研究斷層泥之摩擦特性，結合速率與狀態參數，提出摩擦組成律。此組成律提供了研究地震之相當實用的解釋工具。由現地觀察之震前移動、能量集結、同震破裂、與震後變形等現象，均可利用摩擦律來解釋。

由於國外研究多以花崗岩顆粒或是石英砂等粒狀材料進行試驗，而台灣地區之斷層泥則以黏土質或是沉積岩剪碎或風化後之產物為主，因此，須對台灣地區之斷層泥摩擦特性作一個探討，由於其斷層泥細料含量較高，不易透水，在斷層錯動之過程中，其所夾之斷層泥可能累積大量之孔隙水壓，進而影響其有效應力，因此，有必要進行有效應力分析。

本研究選取車籠埔沿線挖溝所得斷層泥以沉降法製作重模之斷層泥試體。並改良一般三軸試驗之設備以利進行夾泥之三軸試驗，並在剪動過程中量測孔隙水壓，以進行有效應力分析。探討斷層泥癒合作用之機制與總應力分析以及有效應力分析對摩擦組成律之影響。

本研究結果顯示以沉降法製作斷層泥試體，可製作出具有飽和、優選排列之試體，使得在試驗過程中，其穩定剪動時之摩擦係

數可以控制在一定範圍內。錯動—停滯—錯動試驗中，孔隙水壓之激發為影響有效摩擦係數之主因。而有效摩擦係數隨停滯時間之對數值之增加而有線性上升之趨勢，在不同加壓速率下是影響摩擦係數上升值之主因。而在變速率夾泥三軸試驗中，在超額孔隙水壓與軸向位移關係中，在慢剪時會激發較高之孔隙水壓而在快剪所激發之水壓相對較小，經研判認為在慢剪時會有受壓密實之現象，而快剪由於會造成試體拉伸而使孔隙增加，進而使孔隙水壓較小。

英文摘要(Keyword: fault gouge, friction law, holding time, slide-hold-slide tests, velocity stepping tests)

Base on the combination of the Eurasia and Philippine plate forms the Taiwan Island, the disaster which is induced by fault movement will be serious because the earthquake focus is quit shallow and near the city. The study of the friction characteristic of the fault gouge is proposed by Dieterich, etc(1994) that combines the speed and the state parameter to propose the friction law. This friction law offers a quite practical method to study the earthquake. To explain the friction law, most of the existing experimental studies use the granular materials such as the granite particle and the quartz sand. Most faults in western Taiwan contain fault gouges, including Chelungpu Fault, so that this research focuses on the technical practicability to find out the effect of clayey gouge and some other factors which may control the slip stability. This approach shows that the insight conclude the underlying physics of a specific fault and the

parameters into the following rules.

Two main experiments are performed, there are Slide-Hold-Slide tests (SHS tests) and Velocity Stepping tests (VS tests), to determine some friction parameters and to establish the relation between different parameters in the friction law. The experiments are carried out by using triaxial apparatus on a 5mm-thick gouge layer of remolded fault clayey gouge. Slide-Hold-Slide tests are driven at a constant velocity for each test, and it keeps a given interval to restart at the driving velocities. The results indicate that (1) the static friction (healing) μ_s and the friction relaxation are linearly increased with log-hold-time during the quasi-stationary contact; (2) the fast slip produces would have large static friction for a given contact time, but the rate of healing β would maintain constant at different operating rates of displacements; (3) the drained volume Δv is increased as the holding time in the sample compression, and this behavior is similar to the consolidation of soil mechanics. For the Velocity Stepping tests, the effects on the friction parameters are discussed by varying the ratios of steps depending on velocity (10~400), load velocity (0.005~5 mm/min), and the accumulated slip in velocity stepping tests. The results indicate that (1) the frictional stability (a-b) is decreasing with shear strain, and the positive value of (a-b) leads the fault gauge to be “velocity-strengthening” behavior, which is intrinsically stable; (2) frictional parameters a, b, and (a-b) are not major influence of velocity; (3) the critical slide distance D_c decreases with the increasing ratio of the velocity steps. Furthermore, the friction law is verified and suitable for this research, and the fitting curve from the experimental results has good R-squared values. Finally, the relations between parameters $b=\beta \ln(10)$ and $(a-b)=d\mu/dV$ are also established.

二、緣由及目的

台灣為歐亞大陸板塊與菲律賓海洋板塊推擠下形成，在板塊劇烈持續推擠下，每年除了以約 7 公分的高移動速率，由東南向西北推進外，也使得地盤累積變形儲存了大量的應變能，最終引致地震發生。

地震的發生經常伴隨著地表破裂，並促使破裂面產生相對滑移，反覆的剪切造成破裂帶間岩石極為破碎，經長時間物理、化學作用形成斷層泥。斷層一旦形成後，後續的運動即受到破碎帶間的摩擦力所控制，而斷層帶間摩擦的穩定性，將是決定一個斷層是否可能引發地震的主要控因。

摩擦組成律主要透過速度變化後，造成摩擦力的改變，進而推論斷層穩定與否、破裂發生的型式 (rupture mode)、應力變化 (stress drop)、斷層癒合速率 (healing rate) 以及剪動造成的熱效應 (shear heating) 等行為；而在現地斷層觀察到之震前移動、能量集結、同震破裂及震後變形等現象，亦都能在室內試驗以摩擦律重現 (Marone, 1998; Scholz, 1992, 2000; Tullis, 1988)。

目前國內關於斷層泥之研究，大部份針對斷層泥的剪力強度參數與微觀組構為主，對於斷層破碎帶材料與地震發生的互制行為著墨不多；而國外相關研究中，雖有應用摩擦律解釋上述之互制行為，但研究對象主要為以花崗岩或石英質等粒狀材料進行模擬，與台灣西部地區以粉土、黏土質細粒料含量之斷層泥不同，因此，不同的材料特性，是否仍能以摩擦律作適當的描述與量化；此外，原狀斷層泥不均質微組構等，不利於室內試驗控制變因之需求，造成試驗資料變異性大不利於後續分析。

三、研究方法

目前室內試驗探討之摩擦特性包括摩擦係數與停滯時間(hold time)及滑動速率(slip rate)的關係等兩點。其中摩擦係數上升值($\Delta\mu$)為停滯後再次剪動之最大摩擦係數與停滯前穩定剪動之摩擦係數之差值稱之，亦稱之為癒合作用(healing)，而剪動速率改變後，其

穩定剪動之摩擦係數與改變速率前不同，亦即剪動速率影響到穩定剪動時之摩擦係數。

綜合以上兩點，摩擦律即是用來描述上述兩種特性之數學模式，一般較常用者為 Dieterich law，其數學式如下所示：

$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + b \ln\left(\frac{V_0 \theta}{D_c}\right) \quad \frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{V\theta}{D_c}$$

其中 a、b：為經驗常數，分別代表滑動速率變化對摩擦係數之短期、長期直接影響 (direct effect)。而 a、b 值由實驗數據迴歸而得。V₀：為參考滑動速率，μ₀：為 V=V₀ 之穩態摩擦係數。D_c：臨界滑動距離(critical slip distance)，代表在經歷速率變化之後，界面內顆粒重新接觸而達到穩定滑動狀態所需之距離。θ：狀態參數(state variable)。在摩擦律中，最重要的參數為 a、b、D_c 值，其中 a、b 這兩參數代表了摩擦系統之穩定性，而(a-b) 值為推測可能產生地震之條件。

因此本研究以集集地震之車籠埔斷層沿線地表露頭之斷層泥為樣本，進行斷層泥之基本物性試驗。並比對相關文獻，初步瞭解本研究之斷層泥基本特性。並改善黏土質斷層泥重模方式，建立完整夾泥三軸試驗流程。本實驗將一般三軸試驗儀器加以改良後，以進行 45° 斜面之夾泥三軸試驗(如圖 1)，並在剪動面附近裝設孔隙水壓量測計，以量測剪動過程中孔隙水壓之變化。以進行錯動—停滯—錯動試驗：探討停滯時間與剪動速率對斷層泥摩擦特性之影響，並藉由孔隙水壓之量測，以進行有效應力分析；此外，本試驗尚可在停滯期間量測試體之體積變化，利用其體積之變化對斷層泥癒合作用之機制作一合理之解釋，並與國外研究結果比對。在不排水變速率夾泥三軸試驗方面，藉由剪動過程中孔隙水壓之量測，比較總應力分析與有效應力分析之差異，並與相關研究作比對，以期修正其不足之處。

四、研究成果

4.1 斷層泥物性試驗之結果

本研究之斷層泥土樣，位於台中區霧峰鎮中興大學葡萄中心北側，北溝溪旁挖溝取樣所得，本區於 921 斷層活動性調查研究中，共進行四處槽溝開挖，其中 GF-2 槽溝為本研究斷層泥材料之主要採樣點。試驗結果比重試驗平均值為 2.70；阿太堡試驗結果液性限度為 46.1%，塑性限度為 15.8%，塑性指數(PI) 則為 30.3%；經由粒徑分析，霧峰鎮樣本之黏土級含量在 63.7%，粉土級含量在 32%。依據統一土壤分類法，屬於低~高塑性黏土(CL~CH)，如表 1 所示。

4.2 夾泥三軸試體之土樣重模流程

以重模土樣進行力學性質試驗之目的，除考慮力學性質試驗具有重複性外，以減少原狀土樣之變異性外，並克服原狀土樣取得不易之問題。重模土樣與原狀土樣間可由控制乾密度、含水量等物性指數滿足兩者相似程度，但重模土樣之組構性質，與斷層泥原狀土樣高度擠壓剪動下之組構有所差異。

在三軸試驗中為模擬地下水位下斷層泥受剪行為，需使用飽和試體，但製作重模之斷層泥試體，其飽和度控制不易，若使用反水壓使其飽和，當試體飽和後會造成含水量之改變，進而使黏土試體因吸水而剪力下降，亦即有吸水弱化之現象，因此本研究以沈降法製作重模試體，以期能達到均質、飽和及優選排列之試體。

採用沈降法製作試體需先將試體靜置沈澱，再加壓以利壓密排水，最後以壓力機加壓以增加壓密應力，以提高其密度。由掃描式電子顯微鏡(SEM)試驗觀察結果顯示，試體排列方向與水平方向一致，及發育良好之大型片狀黏土礦物，因此可知以沈降法可以製作出具有明顯優選排列之試體，如圖 2。

4.3 夾泥三軸試驗

4.3.1 錯動-停滯-錯動試驗

在錯動—停滯—錯動試驗中，由總應力及有效應力下，摩擦係數與軸向位移關係(圖 3)，結果顯示，停滯前累積之孔隙水壓為影響摩擦係數上升值之主因。而隨停滯時間及剪動速率之增加而摩擦係數增加之趨勢。

由不同剪動速度下，摩擦係數與停滯時間(對數座標)關係，其結果顯示，摩擦係數 $\Delta\mu_s$ 與停滯時間，可看出有一良好的線性關係(如圖 4)，在探討滑動速度對於癒合及癒合率之影響，結果顯示停滯前剪動之速度越快，則在相同停滯時間後再次剪動時，摩擦係數上升值 $\Delta\mu_s$ 將越高；對於癒合率 β 而言，試驗結果則顯示在本試驗剪動速度範圍內，癒合率是幾乎相同的。

由不同剪動速度下，排水體積與停滯時間(對數座標)之關係(圖 5)，其結果顯示，隨停滯時間增加，排水體積有隨之增加趨勢，但排水體積與剪動速度則無明顯相關性。

4.3.2 變速率試驗

在變速率夾泥三軸試驗中，以總應力分析之試驗曲線會有應變硬化或軟化之現象發生，以致於無法達到穩定之剪動，在求取摩擦組成律參數 a 、 b 時易造成誤判。由本試驗中總應力及有效應力分析下，摩擦係數與軸向位移關係如圖 6 所示，其結果顯示，在總應力分析所得之結果亦有應變硬化或軟化之現象。然而，在有效應力分析方面則可以觀察到摩擦係數可以達到穩定，進而可以較準確地計算出摩擦組成律參數 a 、 b 值。而造成總應力分析與有效應力分析之差異則是由於孔隙水壓之累積，而造成總應力分析出現應變軟化之現象。

在不同剪動速率下之超額孔隙水壓與軸向位移關係中(圖 7)，結果顯示，在慢剪時會激發較高之孔隙水壓而在快剪所激發之水壓相對較小，經研判認為在慢剪時會有受壓密實之現象，而快剪由於會造成試體拉伸而使孔隙增加，進而使孔隙水壓較小。

4.3.3 變速率與摩擦組成率參數之影響

變速率試驗曲線套用摩擦律求取參數

a 、 b 及 D_c 值，為減低人為辨別上的誤差，資料皆取加速段進行計算。結果顯示，以重模黏土質斷層泥進行試驗，與相關文獻中夾泥行為相較，在部份行為或趨勢上有明顯差異。

1. (a - b)、 D_c 與剪位移之關係

本研究之摩擦穩定性因子(a - b)值，隨剪位移增加有一遞減之趨勢，但下降量仍不顯著，其中(a - b)值範圍 0.0011~0.002，如圖 8 所示。與相關文獻中黏土質材料試驗結果有相同趨勢(Saffer & Marone, 2002)；粒質材料試體，則隨剪位移增加(a - b)值有一驟降部分後，維持在一定值範圍，此為材料差異造成之明顯差異(Marone, 1998；高樺樹, 2001)。臨界滑動距離 D_c 值隨著剪位移增加， D_c 值並沒有明顯的相關性，與相關文獻亦存在隨剪位移增加而驟降部分差異(圖 9)。

2. (a - b)、 D_c 與變速率比值之關係

本研究之摩擦穩定性因子(a - b)值，隨速度變化比值增加，無明顯改變，如圖 10 所示。圖中顯示初始剪動(趨勢線實線)時，較剪位移量大(趨勢線虛線)時有較高的系統穩定性，即(a - b)值在初始剪動時較高，但受速度變化比值影響卻是相當一致的。本研究主要並非探討如前人研究，以不同剪動速度範圍內，改變相同的變速率比值求取(a - b)值差異，(Blanpied, 1998；Mair & Marone, 1999；Saffer & Marone, 2002)。但在本研究進行之不同變速率比值的試驗過程中，運用之剪動速度由 0.005 mm/min~5 mm/min，且研究結果亦顯示(a - b)值並不隨變速率比值改變而有明顯影響，可間接說明在試驗之剪動速度範圍內，剪動速度的改變對(a - b)值影響不大，與相關研究有相似的結果。臨界滑動距離 D_c 值，隨速度變化比值增加，有明顯遞減的趨勢(圖 11)。

4.3.4 摩擦組成律適用性討論

根據錯動-停滯-錯動試驗求得癒合率

β ，而 b 值可由變速率試驗求得，兩試驗所求參數可建立一簡單關係式， $\beta = b \ln(10)$ ，藉以比對本試驗選用之摩擦律與狀態發展律適用性。 b 值由變速率試驗結果顯示，範圍介於 0.0029~0.0039 之間，平均值則為 0.0033；錯動-停滯-錯動試驗透過 β 反算 b 值則約為 0.004，經反算結果僅有些微差距。此外，紀錄系統在每一速度下達穩定滑動時之動摩擦係數 (μ_d)，與其對應之速度 (對數座標) 作圖，求取圖上之斜率即可得 ($a-b$) 值，且隨著紀錄之剪動速度與對應之動摩擦係數資料越多，或剪動速度範圍越大所估算得之 ($a-b$) 值，相較於一組變速率試驗求得之 ($a-b$) 值具代表性 (圖 12)；將試驗曲線以摩擦律進行曲線模擬時，亦可驗證選用之摩擦組成律適用於本試驗摩擦行為之描述 (圖 13)。

五、結論

本研究以沉降法製作斷層泥試體，目前已經可以製作出具有飽和、優選排列之試體，使得在試驗過程中，其穩定剪動時之摩擦係數可以控制在一定範圍內。在改良土壤三軸試驗儀器以進行夾泥之三軸試驗，已成功地在剪動過程中同時量測其力學為、孔隙水壓的變化以及在停滯期間之體積變化，以進一步分析其有效摩擦係數與癒合之機制。

在錯動-停滯-錯動試驗中，孔隙水壓之激發為影響有效摩擦係數之主因。有效摩擦係數隨停滯時間之對數值之增加而有線性上升之趨勢，在相同圍壓，但不同剪動速率下，斷層泥之癒合率仍然相似，因此加壓速率之不同則是影響摩擦係數上升值之主因。

在變速率夾泥三軸試驗中，在有效應力分析方面則可以觀察到摩擦係數可以達到穩定，進而可以較準確地計算出摩擦組成律參數 a 、 b 值。在超額孔隙水壓與軸向位移關係中，在慢剪時會激發較高之孔隙水壓而在快剪所激發之水壓相對較小，經研判認為在慢剪時會有受壓密實之現象，而快剪由於會造成試體拉伸而使孔隙增加，進而使孔隙水壓

較小。

參考文獻

- [1] 高樺樹 (2001)，黏土質斷層泥摩擦律特性初探，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，台北。
- [2] 白瑞民 (2002)，停滯時間對斷層泥摩擦特性之探討，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，台北。
- [3] 陳聖杰 (2003)，摩擦組成律於黏土質斷層泥摩擦行為之研究，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，台北。
- [4] Beeler, N. M., Tullis, T. E. and Weeks, J. D. (1996), Frictional behavior of large displacement experimental faults. *J. Geophys. Res.*, 101, 8697-8715.
- [5] Blanpied, M. L., Tullis, T. E. and Weeks, J. D. (1998), Effect of slip, slip rate, and shear heating on the friction of granite. *J. Geophys. Res.*, 103, 489-511.
- [6] Dieterich, J. (1994), A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.*, 99, 2601-2618.
- [7] Mair, K. and Marone, C. (1999), Friction of simulated fault gouge for a wide range of velocities and normal stress. *J. Geophys. Res.*, 104, 28899-28914.
- [8] Marone, C. (1998), Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 26, 643-696.
- [9] Saffer, D. M., Frye, K. F. and Marone, C. (2001), Laboratory result indicating complex and potentially unstable frictional behavior of smectite clay. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2297-2300.
- [10] Scholz, C. H. (1998), Earthquakes and Friction Laws. *Nature*, 391, 37-42.
- [11] Scholz, C. H. (2002), The mechanics of earthquakes and faulting, 2nd ed. Cambridge University press, New York.

表 1 斷層泥之基本物性(車籠埔斷層霧峰葡萄園)

	乾密度 γ_d (g/cm ³)	比重 G_s	孔隙比 e	粒徑分析		阿太堡限度		
				粉土級 (%)	黏土級 (%)	LL(%)	PL(%)	PI(%)
試驗值	2.23	2.71		30.2	65.1	45.3	14.3	
	2.25	2.68		33.1	63.8	47.2	16.5	
	2.19	2.72		32.7	62.2	45.9	16.7	
平均值	2.22	2.70	0.27	32	63.7	46.1	15.8	30.3

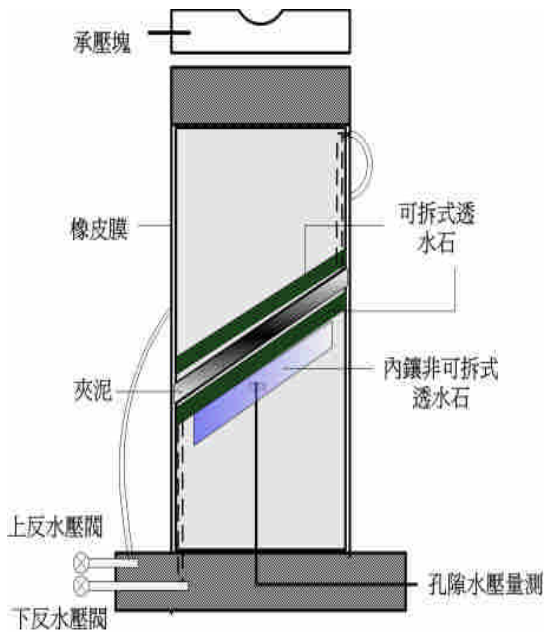


圖 1 夾泥三軸試驗配置圖

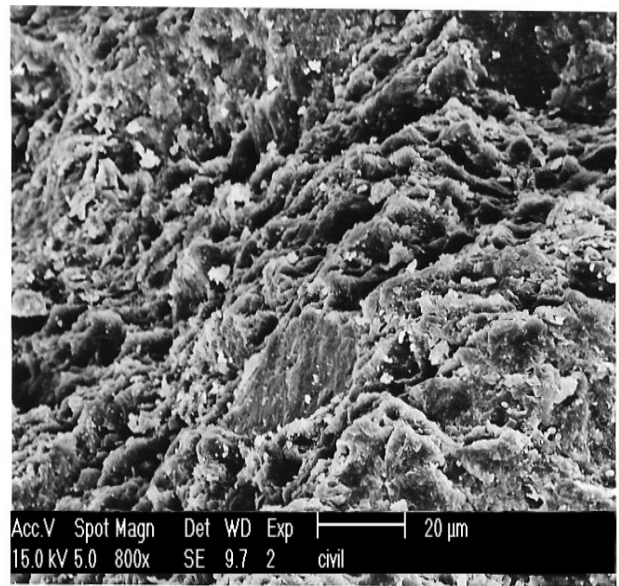


圖 2 重模完成之斷層泥，具順向排列結構

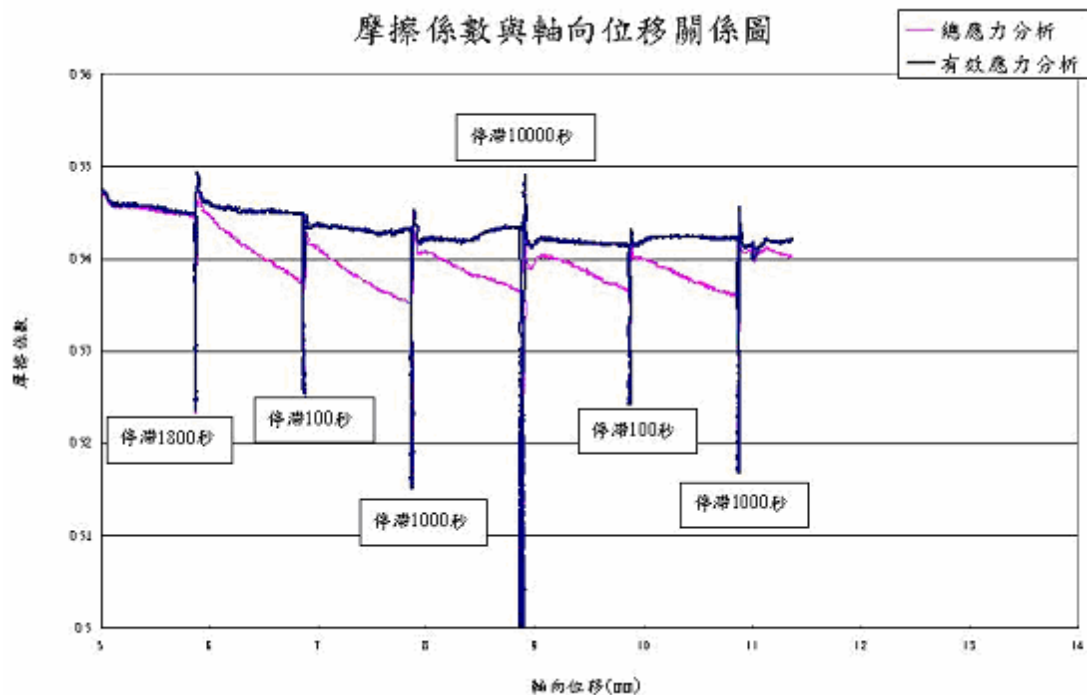


圖 3 總應力分析與有效應力分析關係圖

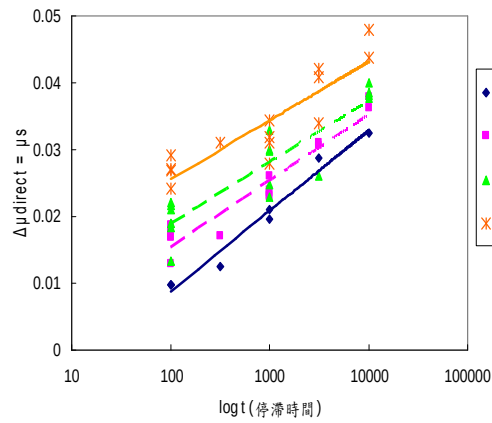


圖 4 剪動速率對癒合率之影響

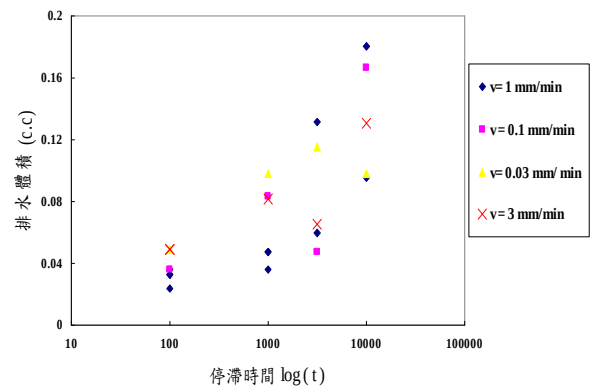


圖 5 停滯時間與排水體積關係圖

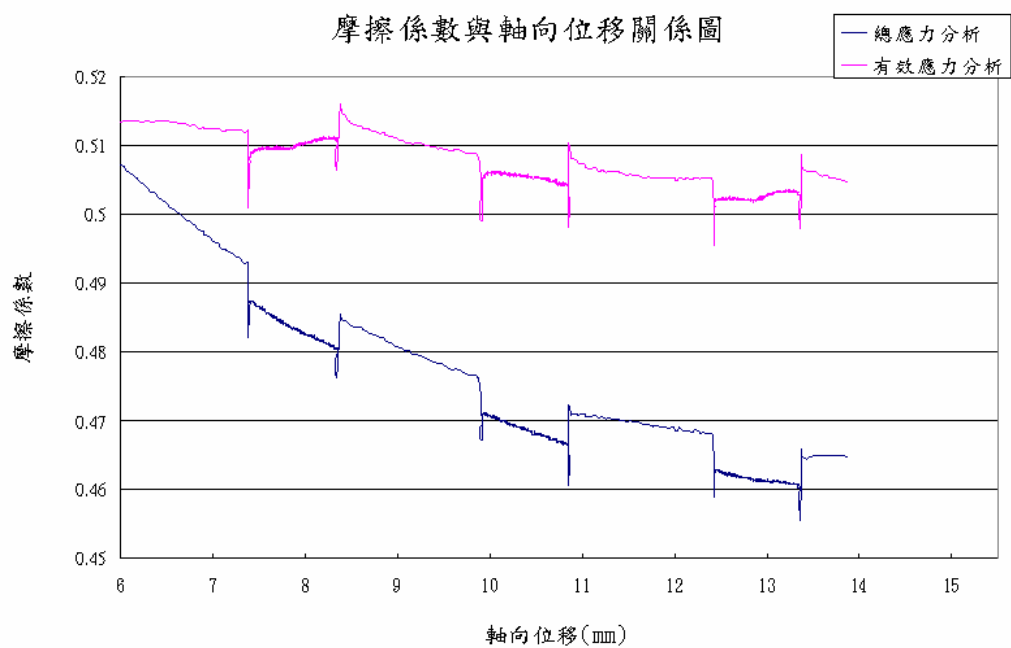


圖 6 變速率夾泥三軸試驗有效應力與總應力分析比較圖

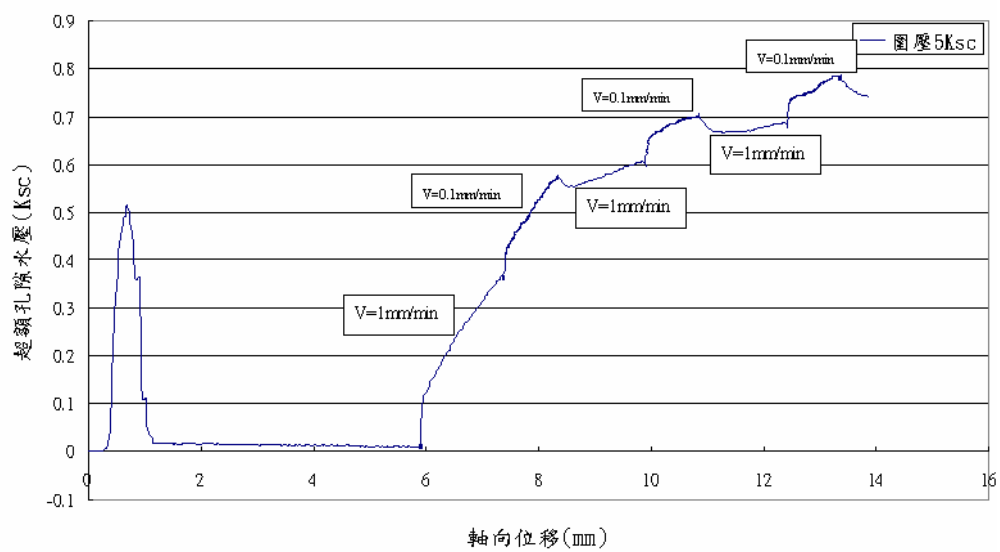


圖 7 變速率夾泥三軸試驗孔隙水壓與軸向位移關係圖

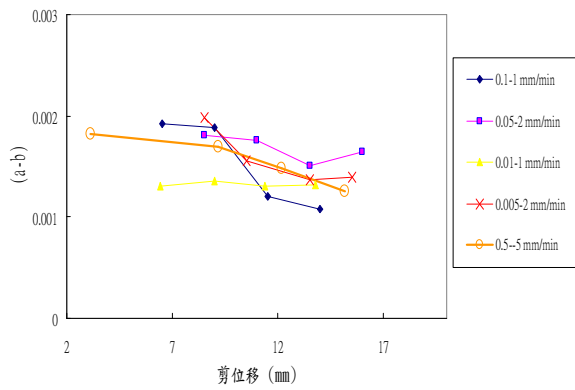


圖 8 剪位移與 (a-b) 值之關係

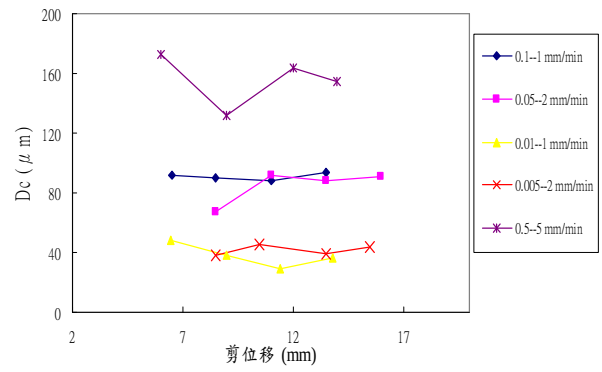


圖 9 剪位移與 Dc 值之關係

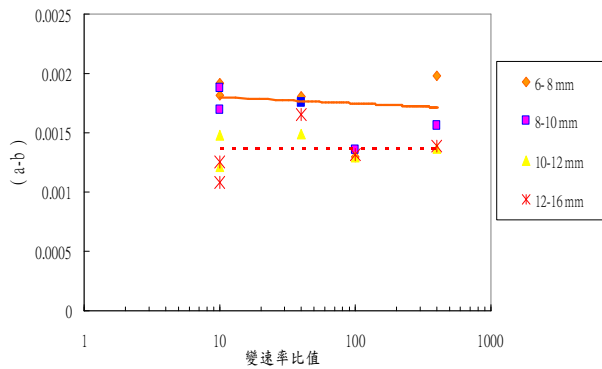


圖 10 變速率比值與 (a-b) 值之關係

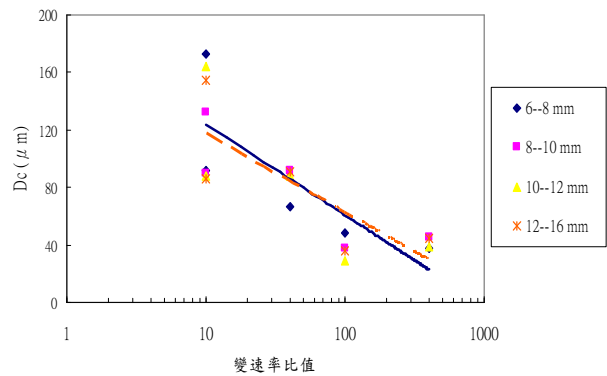


圖 11 變速率比值與 Dc 值之關係

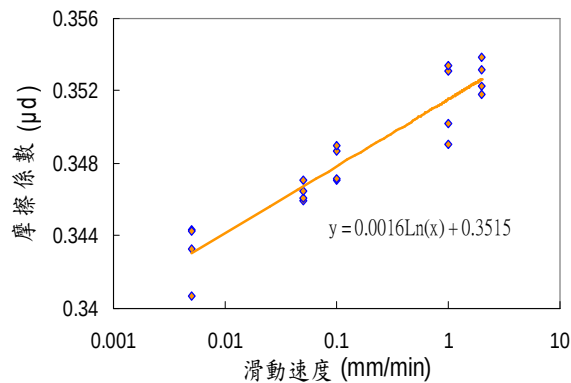


圖 12 穩態滑動係數 (μ_d) 與其對應之滑動速度關係，其中圖上斜率即為 (a-b) 值

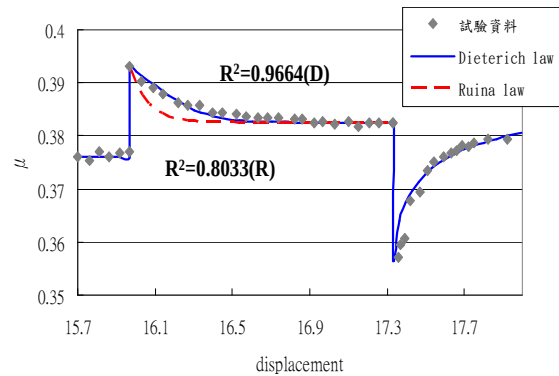


圖 13 摩擦律模擬試驗曲線吻合度良好