

泥漿體應力鬆弛特性之實驗研究

Experimental Study on the Characteristics of Stress Relaxation of Mud Slurries

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授

詹 錢 登

Chyan-Deng Jan

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士生

郭 峰 豪*

Feng-Hao Kuo

國立成功大學
水利及海洋工程學系
博士生

郭 啓 文

Chi-Wen, Kuo

摘 要

在固定剪切率作用下，泥漿體的剪應力隨著受剪時間的增加而逐漸減小，最後趨向於定值(平衡狀態)，此種流變特性稱為“應力鬆弛現象”。本研究進行不同濃度泥漿體在不同固定剪切率條件下的流變實驗，分析不同泥漿體達到剪應力平衡的時間，並比較受剪開始時及達到平衡時之剪應力。分析結果顯示濃度較高之泥漿體，其剪應力達到平衡之時間較長，而且開始受剪時與達到平衡時之剪應力差異也較大，此表示含砂濃度較高之泥漿體的應力鬆弛現象較為明顯。本文進一步採用 Toorman(1997)之應力鬆弛模式，推估出不同泥漿體之流變參數，並建立泥漿體中泥砂含量與流變參數之關係，以做為未來分析泥漿體流動運動機制之參考。

關鍵詞：泥漿體，流變特性，應力鬆弛。

ABSTRACT

The shear stress of the sheared mud slurry would decrease as the increase of shearing time, and gradually reach an equilibrium state, under a constant shearing rate. This rheological behavior is called “stress relaxation”. A series of rheological experiments of different concentrated mud slurries were conducted to investigate the stress relaxation behavior in this study. The equilibrium time (the time to reach the shear stress at equilibrium state) of different concentrated slurries was analyzed, and the initial shear stress (the shear stress at the initial state for slurries just starting to be sheared) and equilibrium shear stress (the shear stress at the equilibrium state) were compared in this study. The results show that the sheared slurries with higher concentration took longer

*通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程系博士生，70101 台南市大學路一號，hugebig.tw@yahoo.com.tw

time to reach their equilibrium state, and their stress differences between initial and equilibrium state were also larger. This implies that the stress relaxation behavior of slurries with higher concentration is more obvious. Based on the experimental data, the rheological parameters of the stress relaxation model proposed by Toorman (1997) were calculated, and the relationships of rheological parameters and volumetric concentration of slurries were analyzed, for providing the reference to future analysis of slurries-flow mechanism.

Keywords: Mud slurry, Rheological property, Stress relaxation.

一、前言

大量的泥、砂、礫石與水混合所形成之泥漿體的流動特性，一直為土木、水利工程上極為重要的研究議題之一。由於泥漿體的流變特性直接影響其外在的流動行為，因此在分析漿體之流動特性之前需先了解其流變特性(詹錢登, 2000)。流變關係是指漿體變形所承受之剪應力和剪切率之關係。一般而言，泥漿體在開始流動時、穩定流動時以及減速停止時之流變特性均有所不同。以往有許多學者專家曾經探討不同泥砂濃度及粒徑分佈的泥漿體，在穩定流況下之剪應力和剪切率的關係(O'Brien, and Julien, 1988; Major and Pierson, 1992; Wang and Larsen 等人, 1994; 余昌益, 1996; 詹錢登等人, 1997)。他們的研究成果顯示：當漿體的泥砂含量大於一定程度時，泥漿體將具有明顯的屈服應力，而且其剪應力和剪切率的關係大致可以賓漢流體模式來描述，即：

$$\tau = \tau_B + \mu_B \dot{\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

上式中 τ 為剪應力； τ_B 為賓漢屈服應力； μ_B 為賓漢黏滯係數； $\dot{\gamma}$ 為剪切率。在漿體受到剪切作用而開始流動時，由於泥漿體細顆粒間絮網結構(flocculated framework)仍處於破壞和恢復作用的平衡過程中，使得漿體的剪應力會隨著受剪時間的增長而持續遞減，最後趨近於平衡狀態。此種剪應力隨受剪時間遞減的現象稱之為應力鬆弛現象(stress relaxation)。以往有學者認為泥漿體之流變特性符合賓漢流體模式，而其屈服應力 τ_y

及黏滯係數 μ 則為一個與時間及剪切率有關之函數，進而提出符合賓漢方程式的的應力鬆弛模式(Worrall and Tulliani, 1964; 韓文亮, 1991; Toorman, 1997)，即：

$$\tau(t, \dot{\gamma}) = \tau_y(t, \dot{\gamma}) + \mu(t, \dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \dots\dots\dots (2)$$

近年來，隨著實驗量測及現地觀測技術的進步，已經有部份學者開始注意具時變性之流變特性對泥漿體流動情況之影響。如 Davies 等人(1991)曾觀測到中國蔣家溝的泥石流波於靜止後數分鐘，又再次以較小型的泥石流波向下傳遞。Davies 等人(1992)認為此為泥石漿體屈服應力(yield stress)和漿體停止所需之剪應力(halting stress)於時間上之遲滯影響(hysteresis)所致；Contreras and Davies(2000)則進一步分析泥石漿體屈服應力及泥漿體停止所需之剪應力，並說明非時變性之流變特性無法完整描述土石流體的流動及堆積特性。由此可知，為瞭解泥漿體於不同流動情況下之流變特性，除了要分析穩定情況下之流變特性，亦需進一步探討在時變情況下的流變特性。本文先初步介紹泥漿體之觸變行為及 Toorman (1997)的應力鬆弛模式，然後以台灣南投地區土石流堆積區的細泥漿體為主要實驗材料，進行一系列固定剪切率之流變實驗，分析泥漿體於時變狀態下之應力鬆弛特性；最後，以 Toorman (1997)所發展出的應力鬆弛模式，分析不同泥漿濃度條件下的應力鬆弛模式流變參數，以做為未來泥漿體運動機制分析及數值模擬之參考。

二、泥漿體的觸變行為及應力鬆弛模式

2.1 觸變行為(Thixotropy)

泥漿體為大量固相顆粒和水的混合物。泥漿體中泥砂顆粒愈細，其單位體積泥沙顆粒所具有的表面面積越大，而顆粒間的相互作用則越重要。當帶有吸附水膜之細泥沙顆粒相互靠近時，顆粒之間會形成帶有正電荷之公共吸附水膜，而公共吸附水膜所帶之正電荷與顆粒表面所帶之負電荷互相吸引，進而形成集合體，此種顆粒結合成集合體之作用稱為絮凝作用(flocculation)。絮網結構之形成和發展除了與顆粒間之相互作用力(范德華力和雙電層斥力)有關外，一般而言，還與顆粒濃度、粒徑分佈、顆粒的布朗運動等等因素有關(錢、萬，1983)。

細顆粒泥沙由於絮凝作用會逐漸連結成絮團(floc)，絮團形成後，顆粒本身之顆粒特性將消失，取而代之的是絮團的整體特性呈現，並且還會影響單獨存在的泥沙顆粒特性。而隨著泥漿濃度的提高和絮凝的繼續發展，使具有極限尺寸的絮團個數不斷增加，當絮團個數到達一定數量之後，絮團與絮團之間開始發生連接，形成一種鬆散的網狀結構，稱之為絮網結構(flocculated framework)。絮網結構的密度隨著濃度的增高而增高，而在同一濃度下之絮網結構，隨著時間的推移，在自重的作用下，也會不斷的調整，緩慢的將清水分離出來，逐漸將結構密度增加。經過這種動態調整，絮網結構逐漸地向密實度較高的階段發展。一般而言，絮網結構的密實度越高，所呈現之結構強度也越強。然而一旦絮網結構被破壞後，在相同外力作用下，漿體內部所能抵抗外力的能力也隨之下降，而一旦外力去除後，漿體內部之絮網結構經由一段時間的靜置，則又會恢復原有之結構強度，此種會隨時間而變動的流變特質稱之為觸變特性『thixotropy』(王裕宜等人，2001)。

2.2 應力鬆弛模式

泥漿體的觸變特性說明了漿體剪應力會隨受剪時間而變化之原因。當泥漿體開始流動時，

因其絮網結構未受到任何擾動，因而使其流動所需之剪應力較大；而隨著持續的外力作用下，絮網結構逐漸被破壞，使漿體流動所需之剪應力則隨之遞減。最後，隨著絮網結構被破壞到一平衡狀態，此時漿體持續流動所需之剪應力則達到一穩定之情況；此種漿體剪應力隨時間而減小之特性稱之為應力鬆弛特性。

為了評估漿體內部絮網結構變動情況，Moore (1959)曾經提出一個流體內部絮網結構變率的評估方法，其假設泥漿體內部絮網結構的變化可由破壞和修復兩個可逆過程組成，其方程式為：

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(\lambda_0 - \lambda) - b\gamma\lambda \dots\dots\dots(3)$$

其中 λ 為無因次結構係數，值域為0~1，當該值為0時表示漿體的絮網結構被完全破壞，而值為1時表示絮網結構狀態最為強固； λ_0 為最大結構係數，可假設該值為1； a 為結構恢復係數； b 為結構破壞係數； γ 為剪切率； a 、 b 及 γ 均為正值。當(3)式右側之值為負值時，代表其破壞率大於恢復率，也就是絮網結構正在破壞中；反之若為正值時，則表示漿體絮網結構正在恢復中；若為零時，表示絮網結構的破壞率和恢復率相當，此時達平衡狀態，其平衡時之結構係數 λ_e 可表示為：

$$\lambda_e = \frac{\lambda_0}{1 + \beta\gamma} \dots\dots\dots(4)$$

其中 β 為破壞係數 b 與恢復係數 a 之比值(i.e., $\beta = b/a$)。(4)式顯示平衡結構係數和剪切率有關；當剪切率越大，結構係數值越小，表示絮網結構被破壞的越嚴重。將(3)式經由積分求解，並假設 $\lambda_0 = 1$ ，可得：

$$\lambda = \frac{1 + \beta\gamma e^{-(a+b\gamma)t}}{1 + \beta\gamma} \dots\dots\dots(5)$$

以上Moore (1959)分析漿體結構變化的方法曾被許多學者採用(Nguyen and Boger, 1985；韓文亮，1991；Toorman, 1997；郭啟文，2002)。然而，流體之流變特性(如黏滯係數或屈服應力)

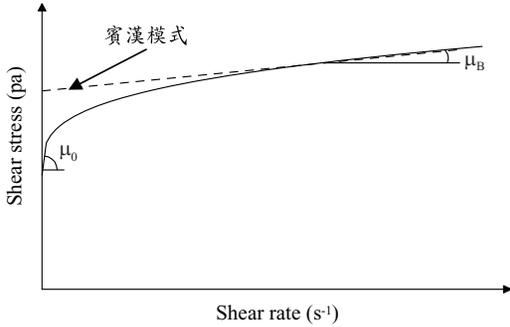


圖 1 流變關係曲線示意圖

如何隨著絮網結構破壞情況而變化，卻有許多專家學者提出不同的應力鬆弛模式，以模擬漿體流變關係隨時間而變化之情況。如 Worrall and Tulliani (1964) 採用 Moore 的絮網結構方程式，提出一個賓漢型式之時變性流變模式，其方程式如下：

$$\tau = \lambda \tau_0 + [\eta_\infty(\dot{\gamma}) + c\lambda] \cdot \dot{\gamma} \dots\dots\dots (6)$$

上式中 η_∞ 為絮網結構完全破壞時之動黏滯係數，它是剪切率 $\dot{\gamma}$ 之函數； τ_0 為絮網結構尚未破壞前之屈服應力；而參數 c 則為受剪起始的黏滯係數 μ_0 與賓漢黏滯度 μ_B 之差值(i.e., $c = \mu_0 - \mu_B$)，黏滯係數示意圖如圖 1 所示。Toorman (1997) 進一步藉由流體剪應力平衡曲線(equilibrium flow curve)，推導出 Worrall-Tulliani 模式中的 $\eta_\infty(\dot{\gamma})$ 可以表示為：

$$\eta_\infty(\dot{\gamma}) = \mu_B + \frac{\lambda_0 \beta \tau_0}{1 + \beta \dot{\gamma}} = \mu_B + \lambda_e \beta \tau_0 \dots\dots\dots (7)$$

因此，Worrall and Tulliani (1964) 所提出之方程式可寫成爲下式：

$$\tau = \lambda \tau_0 + (\mu_B + c\lambda + \beta \tau_0 \lambda_e) \cdot \dot{\gamma} \dots\dots\dots (8)$$

Toorman (1997) 依據許多黏土及泥漿之流變實驗數據，推求出(8)式中之流變參數，並應用數值方法，分析泥漿體在不同情況下之應力行爲，其分析結果與實際上之應力行爲相當一致。然而 Toorman (1997) 並未建立不同泥漿濃度與流變參數之關係，爲此，本文將採用 Toorman 所提出之流變模式，並依據泥漿體之流變實驗數據，推求

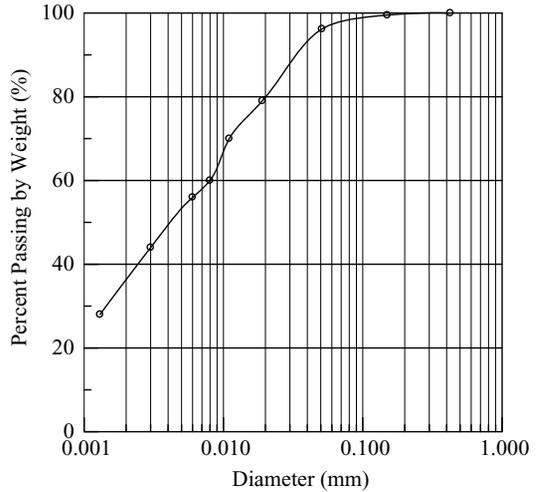


圖 2 本實驗所採用之細泥漿體的泥砂粒徑分佈曲線

出不同泥漿試體之 τ_0 、 μ_0 、 μ_B 、 a 及 b 等 5 個流變參數，並進一步建立泥漿濃度與流變參數之關係式，以作為未來泥漿體運動機制分析及數值模擬之參考。

三、實驗材料及儀器

3.1 實驗材料

本實驗以南投縣陳有蘭溪豐丘村之下游土石流淤積區的細顆粒土樣爲主要實驗材料。本實驗所採用的細顆粒密度約爲 2.69 g/cm^3 ，其中最大粒徑爲 0.5 mm ，中值粒徑(d_{50})約爲 0.004 mm ，粒徑分佈圖如圖 2 所示。本文將細顆粒和水調配成體積濃度 C_{vf} 分別爲 0.30 、 0.35 、 0.40 及 0.45 等 4 組細泥漿試體，以量測不同濃度泥漿試體的流變特性。其中體積濃度 C_{vf} 定義爲細顆粒體積 V_f 和總泥漿體積 V_T (細顆粒體積 V_f 加上水體積 V_w) 之比值，即 $C_{vf} = V_f / (V_f + V_w)$ 。

3.2 流變計(Rheometer)

本實驗採用美國 Brookfield 公司所製造的 DV-III 型水平旋轉式流變計及 RV 系列之 RV7 柱狀式轉子(Spindle) (如圖 3 所示)，進行固定剪切率(Constant shear rate)的流變特性量測，也就是實驗中設定轉子(Spindle)之固定轉速，以量測其

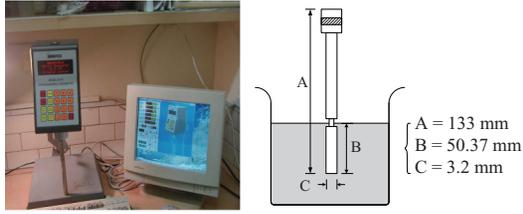


圖 3 Brookfield DV-III 流變計及 RV7 轉子示意圖

對應之扭矩和黏滯度隨時間變化之情況。其中剪切率 $\dot{\gamma}$ 和剪切應力 τ 之計算方法如下：

$$\dot{\gamma} = \frac{2w'R_c R_b^2}{x^2(R_c^2 - R_b^2)} \dots\dots\dots (9)$$

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 B} \dots\dots\dots (10)$$

其中 w' 為轉子之轉速(rad/sec)； R_c 為容器之半徑(cm)； R_b 為轉子的半徑($R_b = 1.6$ mm)； x 為剪切率計算處之半徑值(與 R_b 值相同)； M 為實驗所量測之扭矩值； B 為轉子插入漿體之深度($B = 50.4$ mm)；轉子尺寸示意圖如圖 3 所示。由於一般土石流運動的平均剪切率介於 $1 \sim 20 \text{ s}^{-1}$ ，因此本實驗依據(9)式，設定七組剪切率 $\dot{\gamma} = 4、6、8、10、13、16$ 及 20 s^{-1} ，以進行 4 組不同漿體濃度條件下之流變實驗。

四、實驗結果

本研究分別對於 4 組細泥漿體進行 7 組固定剪切率的流變實驗，實驗結果顯示本實驗所採用的細泥漿試體均具有應力鬆弛特性。圖 4 為體積濃度 $C_{vf} = 0.30$ 之泥漿體在不同剪切率下，剪應力隨著受剪時間之變化情況。由圖 4 可看出，在相同剪切率條件下，漿體剪應力會隨著受剪時間的增長而逐漸減小，而且遞減速率會隨著時間的增加而減緩，而到了一定時間之後，剪應力趨近於某一穩定值。此剪應力隨時間增加而逐漸減小之曲線稱為應力鬆弛曲線。其他體積濃度之泥漿體也具有相同之關係趨勢，圖 5 為不同體積濃度漿體在剪切率 $\dot{\gamma}$ 為 10 s^{-1} 作用下之應力鬆弛曲線。圖 5 顯示在相同受剪時間作用下，體積濃度較高之泥漿體，其剪應力值及剪應力遞減速率均

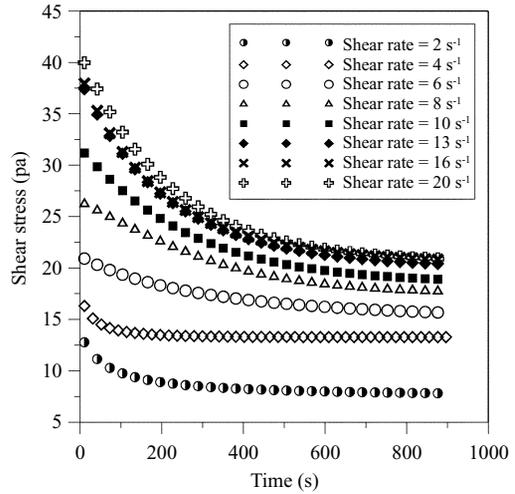


圖 4 泥漿體($C_{vf} = 0.3$)在不同剪切率條件下之應力鬆弛曲線

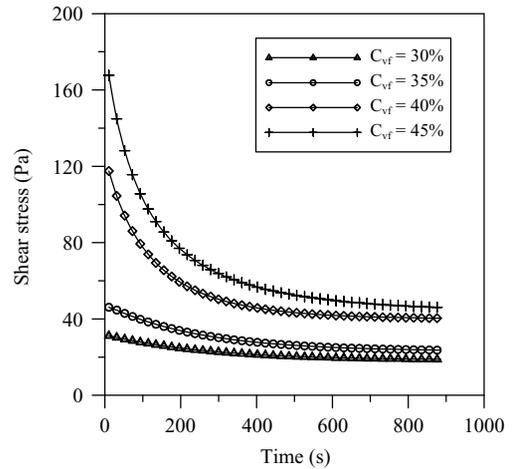


圖 5 不同體積濃度泥漿體在剪切率為 10 s^{-1} 作用下之應力鬆弛曲線

較高。為進一步比較了解不同濃度漿體在不同受剪條件下之行為，本文分析泥漿體之應力平衡時間並比較漿體於之開始受剪時及平衡狀態時之剪應力，最後並依據 Toorman (1997) 之應力鬆弛模式，分析出該模式之流變參數。分析結果說明如下：

4.1 應力平衡時間

觀察圖 4 中之關係曲線，本文初步將剪應力

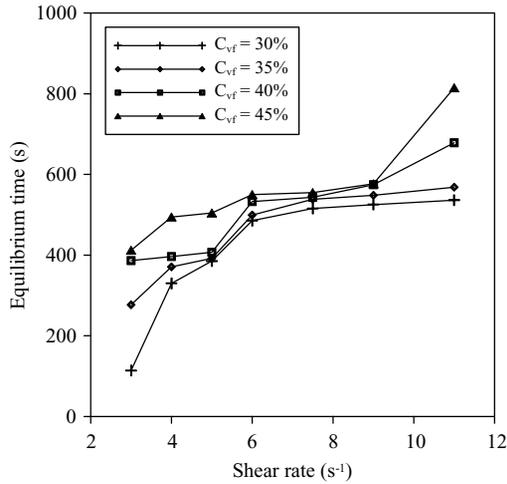


圖 6 不同漿體在不同剪切率條件下之應力平衡時間

與受剪時間之關係曲線區分為應力鬆弛區及應力穩定區：應力鬆弛區為剪應力隨時間有明顯遞減之區域；應力穩定區則為應力隨時間遞減速率趨近於零之區域。為了解不同泥漿濃度下，漿體剪應力到達應力穩定區所需之時間，本文初步定義漿體剪應力達到平衡之時間條件為：

$$\frac{\tau_t - \tau_{t+60}}{\tau_t} \leq 0.02 \quad \dots\dots\dots (11)$$

其中 τ_t 為某時刻 t (秒) 之剪應力； τ_{t+60} 為某時刻 t 後 60 秒之剪應力。也就是說，當剪應力值 τ_t 滿足(11)式之條件時，則該時刻稱之為應力平衡時間。依此定義本文計算出不同漿體在不同剪切率作用下之應力平衡時間，其分析結果如圖 6 所示。由圖 6 可看出，相同濃度之漿體應力平衡時間會隨著剪切率的增加而增加，顯示剪切率較大時，漿體剪應力達到平衡狀態所需的時間較長；而在相同剪切率情況下，應力平衡時間也隨著泥漿體積濃度的增加而有增加之趨勢，如體積濃度 $C_{vf} = 0.45$ 之泥漿體，不同剪切率作用下之應力平衡時間約介於 400 s~800 s 之間，顯示應力鬆弛特性對於體積濃度較高之泥漿體影響時間較長。

4.2 起始剪應力及平衡剪應力之比較

為探討在不同剪切率條件下，泥漿體剪應力

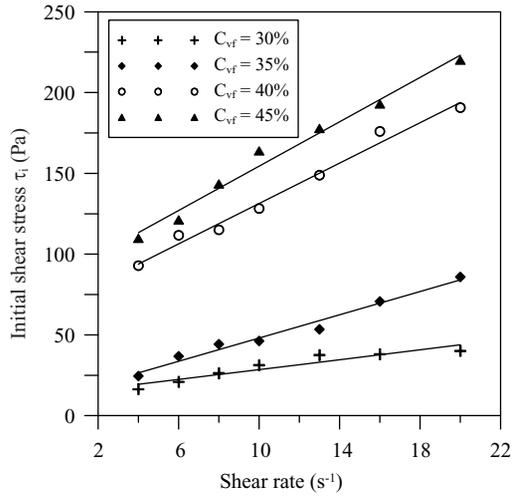


圖 7 不同漿體之起始剪應力 τ_i 和剪切率關係圖

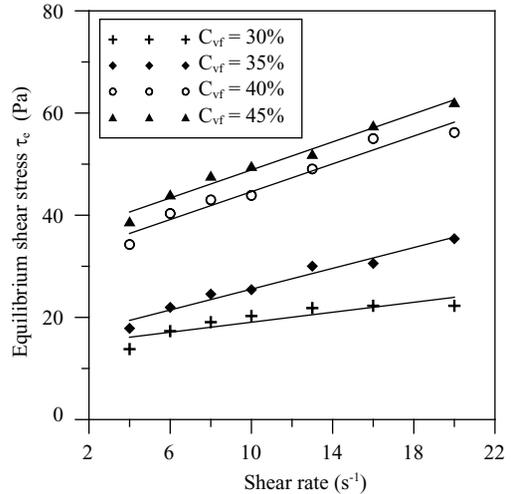


圖 8 不同漿體之平衡剪應力 τ_e 和剪切率關係圖

隨受剪時間之變化情況，本文推算出受剪時間為零時之起始剪應力 τ_i 以及剪應力已達平衡時之剪應力 τ_e ，並以剪應力值為縱軸，其相對應之剪切率為橫軸，繪製出實驗起始時和應力平衡時之流變關係曲線，分別如圖 7 及圖 8 所示。由圖 7 和圖 8 可看出，受剪起始時和應力平衡時之剪應力及剪切率關係，約略呈現一線性關係，顯示泥漿體在未達平衡過程之流變特性仍可以賓漢型式之時變性流變模式表示。

圖 9 為不同漿體在不同剪切率條件下，漿體

表 1 不同體積濃度漿體之應力鬆弛模式流變參數

體積濃度	Toorman 應力鬆弛模式之流變參數				
	τ_0 (Pa)	μ_B (Pa.s)	μ_0 (Pa.s)	A ($\times 10^{-3}$)	B ($\times 10^{-3}$)
0.30	0.60	0.44	1.67	2.55	0.18
0.35	0.82	0.70	4.78	1.62	0.25
0.40	2.35	1.03	8.71	1.51	0.37
0.45	12.48	2.28	11.33	0.71	0.56

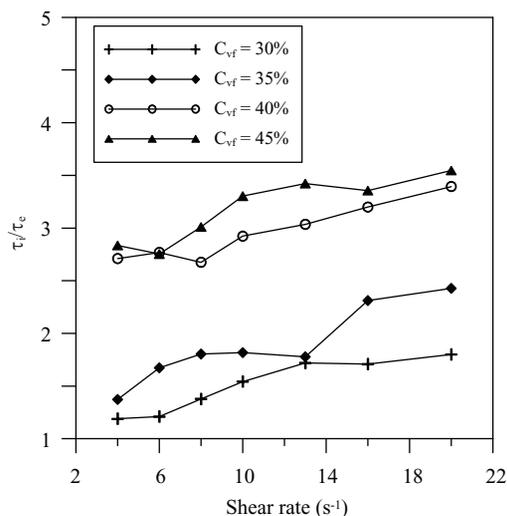


圖 9 不同漿體起始剪應力及平衡剪應力比值(τ_i/τ_e)與剪切率之關係圖

起始剪應力和應力平衡剪應力比值 (τ_i/τ_e) 隨剪切率及濃度之變化圖。由圖 9 可看出，相同濃度條件下，剪應力比值會隨著剪切率的增加而增加；在相同剪切率情況下，剪應力比值則隨著體積濃度增加而增加。對於泥漿體積濃度較高 ($C_{vf} > 0.40$) 之泥漿體，其 τ_i/τ_e 比值約界於 2.5~3.5 之間，顯示高濃度泥漿體在受剪初期與達到平衡時的剪應力差異較大。

4.3 流變參數分析

為進一步探討本實驗漿體之相關流變參數，以作為未來泥漿體運動機制分析及數值模擬之參考，本研究初步以 Toorman (1997) 所提出之應力鬆弛模式來分析泥漿體之應力鬆弛特性，此模式包含有絮網結構尚未破壞前之屈服應力 (τ_0)、受剪起始時的黏滯度 (μ_0)、賓漢黏滯係數 (μ_B)

表 2 應力鬆弛模式流變參數與體積濃度之關係

流變參數	流變參數與濃度之關係式	相關係數 γ^2
τ_0 (Pa)	$\tau_0 = 0.95 \times 10^{-3} e^{(20.3C_{vf})}$	$\gamma^2 = 0.92$
μ_0 (Pa.s)	$\mu_0 = 599.2 \times C_{vf}^{4.77}$	$\gamma^2 = 0.96$
μ_B (Pa.s)	$\mu_B = 0.016 e^{(10.7C_{vf})}$	$\gamma^2 = 0.97$
a	$a = -11.3C_{vf} + 5.84$	$\gamma^2 = 0.93$
b	$b = 0.018 e^{7.5C_{vf}}$	$\gamma^2 = 0.99$

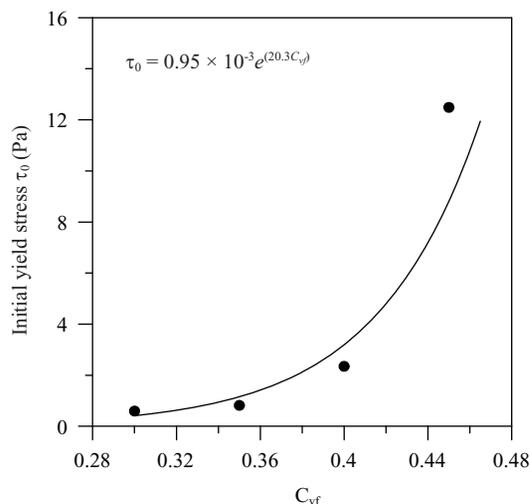


圖 10 起始屈服應力與泥漿體積濃度之關係圖

以及二個與時變性有關之絮網結構參數 (a 及 b) 等 5 個流變參數。本研究將同一漿體濃度下 7 組不同剪切率所量測之實驗數據視為同一組輸入條件，以應用電腦程式最佳化之方式推求該濃度漿體之 5 個流變參數。在最佳化演算法方面，本文採用 HEC-HMS 裡所應用之 Nelder and Mead 最佳化演算法，並以 7 組數據的最小標準偏差總和為目標函數，其分析結果如表 1 所示；5 個流變參數與其泥漿體積濃度之關係圖如圖 10~圖 14 所示；其迴歸關係式及相關係數如表 2 所示。

圖 10~圖 12 分別為起始屈服應力 τ_0 、起始黏滯係數 μ_0 及賓漢黏滯係數 μ_B 與泥漿體積濃度之關係圖。由圖中可看出，泥漿體之 τ_0 、 μ_0 及 μ_B 均會隨著泥砂體積濃度 C_{vf} 的增加有明顯增大之趨勢，其關係式可表示為：

$$\tau_0 = 0.95 \times 10^{-3} e^{(20.3C_{vf})} \dots\dots\dots (12)$$

$$\mu_0 = 599.2 \times C_{vf}^{4.77} \dots\dots\dots (13)$$

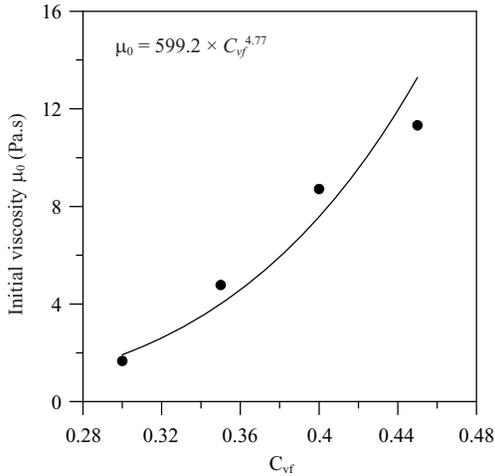


圖 11 起始黏滯係數與泥漿體積濃度之關係圖

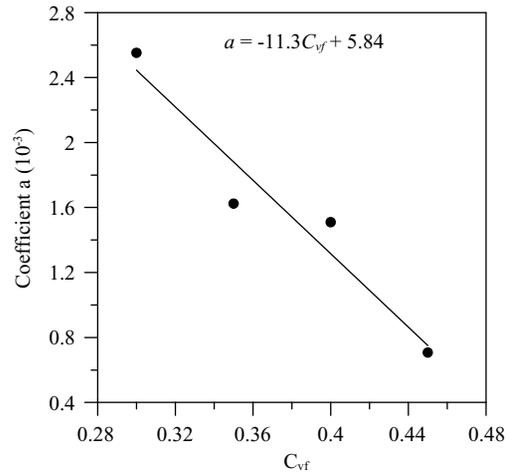


圖 13 結構恢復係數 a 與泥漿體積濃度之關係圖

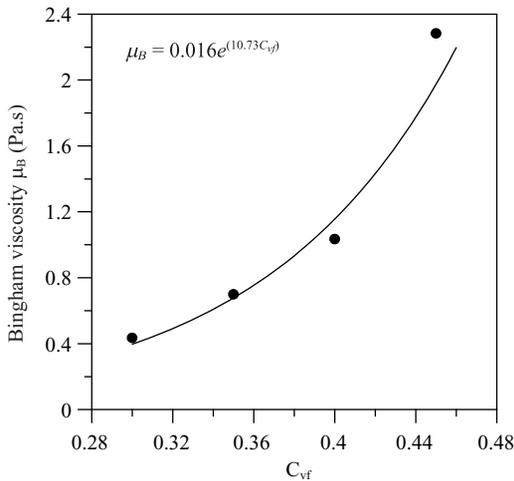


圖 12 賓漢黏滯係數與泥漿體積濃度之關係圖

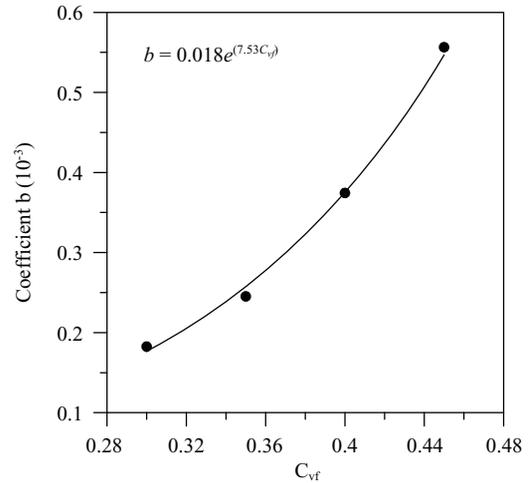


圖 14 結構破壞係數 b 與泥漿體積濃度之關係圖

$$\mu_B = 0.016e^{(10.73C_{vf})} \dots\dots\dots (14)$$

此外，由圖 13 和圖 14 可看出，泥漿體之恢復係數 a 隨著體積濃度增加而減少，而破壞係數 b 則隨著泥漿濃度增加而增加，其關係式可表示為：

$$a = -11.3C_{vf} + 5.84 \dots\dots\dots (15)$$

$$b = 0.018e^{7.53C_{vf}} \dots\dots\dots (16)$$

根據(3)式之定義，在相同的剪切率及結構係數條件下，當 a 愈小而 b 愈大時，其絮網結構破

壞速率愈快；因而可推論顯示泥漿體積濃度愈高，其絮網結構破壞速率愈快。此一分析結果與實驗所觀察到在相同受剪時間下，泥漿體積濃度愈高，剪應力遞減速度愈快之特性相當一致，顯示 Toorman (1997)所提出之流變模式可有效反應出泥漿體應力鬆弛之特性。

五、結 論

本文初步探討泥漿體觸變特性以及其外顯之應力鬆弛行為。依據不同體積濃度漿體之固定剪切率流變實驗結果，本文分析比較其應力平衡

時間、起始剪應力、平衡剪應力及其比值關係，最後應用電腦程式率定出 Toorman (1997)的應力鬆弛模式裡的 5 個最佳流變參數，以提供做為未來土石流運動機制分析及數值模擬之參考。本文分析結果如下：

1. 本研究進行四種不同含砂濃度($C_{vf} = 0.3\sim 0.45$)之泥砂漿體流變實驗，每項實驗調整七種不同剪切率($\dot{\gamma} = 4\sim 20\text{ s}^{-1}$)，探討不同濃度及不同剪切率下，泥砂漿體流變特性隨受剪時間之變化。
2. 本實驗結果顯示細泥漿體在固定剪切率作用下，其漿體剪應力具有應力鬆弛特性。在泥漿體起始受剪時，泥漿體之剪應力值達最大值，而後剪應力會隨著受剪時間的增長而逐漸減小，而且遞減速率也會隨著時間的增加而減緩，而到了一定時間之後，其遞減速率趨近於零，此時之剪應力則趨近於平衡。
3. 泥漿體起始受剪時和達應力平衡時之剪應力與剪切率關係，約略呈現一線性關係，顯示泥漿體流變特性在未達穩定情況下，其流變特性仍可以賓漢模式表示。
4. 泥漿體剪應力達到平衡所需要的時間，以及泥漿體於起始受剪時與應力平衡時之剪應力比值 τ_i/τ_e 均會隨著體積濃度的增加而增加。例如泥漿體積濃度 $C_{vf} = 0.45$ 時，其應力平衡時間高達 800 s；而 τ_i/τ_e 高達 3.5 倍，顯示應力鬆弛特性對於體積濃度較高之泥漿體之影響較大。
5. 本文以 Toorman (1997)應力鬆弛模式分析泥漿體之流變參數，建立模式中五個流變參數與泥漿濃度之關係式，以作為未來泥漿體運動機制分析及數值模擬之參考。此五個參數包含起始屈服應力 τ_0 、起始黏滯係數 μ_0 、賓漢黏滯係數 μ_b 、絮網結構恢復係數 a 及破壞係數 b 。結果顯示隨著泥漿體積濃度 C_{vf} 的增加，泥漿體之 τ_0 、 μ_0 及 μ_b 均會隨之增加。此外，恢復係數 a 隨著濃度增加而減少，但破壞係數 b 則隨濃度增加而變大。本文建立五個流變參數與含砂濃度之關係式，將有助於未來分析泥漿體流動運動機制。

6. 本研究實驗所取之土樣來自南投縣陳有蘭溪豐丘村下游之土石流淤積區，不同地點之土樣對實驗結果之影響，未來可進一步探討。

誌謝

本研究工作承蒙國家科學委員會計畫(NSC96-2625-Z-006-001-MY3)的經費補助。

參考文獻

1. 王裕宜、詹錢登、嚴璧玉，(2001)，「泥石流體結構和流變特性」，湖南科學技術出版社，中國。
2. 余昌益(1996)，「高含砂水流流變參數之研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文(指導教授：詹錢登)。
3. 郭啓文(2002)，「泥漿體及石泥漿體之流變特性」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文(指導教授：詹錢登)。
4. 詹錢登、余昌益、吳雲瑞，(1997)，「含砂濃度對含砂水體流變參數的影響之初步研究」，第一屆土石流研討會論文集，第 179-190 頁，台灣。
5. 詹錢登，(2000)，「土石流概論」，科技圖書股份有限公司，台灣。
6. 韓文亮，(1991)，「細顆粒漿體的應力鬆弛模型」，泥砂研究，第 3 期，第 87-92 頁，中國。
7. 錢寧，(1989)，「高含砂水流運動」，清華大學出版社，中國。
8. 錢寧、萬兆惠，(1983)，「泥砂運動力學」，科學出版社，北京。
9. Contreras, S. M., and Davies, T. R. H. (2000), "Coarse-grained debris-flows: Hysteresis and time-dependent rheology." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 126(12), 938-941
10. Davies, T. R., Phillips, C. J., Pearce, A. J., and Zhang, X. (1991). "New aspects of debris flow behaviour." *Proc., Japan-U.S. Workshop on Snow Avalanche Landslide and Debris-Flow*

- Prediction and Control, Tsukuba, Japan, 443-451.
11. Davies, T. R., Phillips, C. J., Pearce, A. J., and Zhang, X. (1992), "Debris-flow behaviours: An integrated overview." *Proc., Int. Symp. On Debris-flows and Envir. In Mountain Regions*, IAHS publ. No. 209, 217-225.
 12. Major J. J., and Pierson T. C. (1992), "Debris Flow Rheology: Experimental Analysis of Fine-Grained Slurries," *Water Resources Research*, Vol. 28(3), 841-857.
 13. Moore, F., (1959), "The rheology of ceramic slips and bodies." *Transactions of the British Ceramic Society*, Vol. 58, 470-484.
 14. Nguyen, Q. D. and Boger, D. V. (1985), "Thixotropic behaviour of concentrated bauxite residue suspensions." *Rheol. Acta*, Vol. 24, 427-437.
 15. O'Brien, J. S., and Julien, P. Y. (1988), "Laboratory Analysis of Mudflow Properties." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114(8), 877-887.
 16. Toorman, E. A. (1997), "Modeling the thixotropic behavior of dense cohesive sediment suspensions." *Rheol. Acta*, Vol. 36, 56-65.
 17. Wang, Z., Larsen, P. and Xiang, W. (1994). "Rheological Properties of Sediment Suspensions and Their Implication." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 32(4), 495-516.
 18. Worrall, W.E., and Tuliani, S. (1964), "Viscosity changes during the ageing of clay-water suspensions." *Trans. Brit. Ceramic Soc.* Vol. 63, 167-185.

收稿日期：民國 97 年 10 月 23 日

修正日期：民國 98 年 3 月 13 日

接受日期：民國 98 年 3 月 16 日