

斷層泥分類之探討

THE CLASSIFICATION SYSTEM OF FAULT GOUGE IN TAIWAN

林銘郎* 鄭富書* 翁作新† 黃文昭‡

Ming-Lang Lin Fu-Shu Jeng Tzou-Shin Ueng Wen-Chao Huang

*副教授 †教授 ‡碩士

*†‡國立台灣大學土木工程學系

*Associate Professor †Professor ‡M.S.

Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Abstract

To obtain the strength of fault gouge, a series of experiments are often conducted. However, such experiments are time-consuming and the specimen is always arduous to prepare. Thus some experiments about general property and strength are taken to correlate the general properties and strength of fault gouge. According to this relationship, a classification system of fault gouge with respect to its strength can be established and consequently be applied in the further researches. Some restrictions are also discussed about this classification of fault gouge to prevent from misusing.

Keywords: fault gouge, strength, classification.

摘要

一般要了解斷層泥之強度，常常需要透過一連串的實驗求其強度特性，然而強度試驗通常較費時且試體準備較為繁複，本研究試著從較容易進行的一般物理性質試驗著手，試圖將斷層泥之一般物理性質與強度關係加以迴歸，找出物理性質與強度之關係式，並藉由此一關係式訂出斷層泥之強度分類依據，根據強度之不同將斷層泥初步分為 A、B、C、D 四類；在隧道或邊坡工程施工時，可先將出露之斷層泥進行一般物理性質試驗，再依據此一迴歸式，將斷層泥進行分類，以推測其力學特性。最後並探討此一關係式之限制條件，以免誤用。

關鍵詞：斷層泥、分類系統、強度。

1. 前言

斷層帶除了吾人一般所熟知之極破碎的產狀之外，另外常常還包含了厚度數公釐至數十公分之剪動泥夾雜在斷層剪動帶之中，而此種薄層之斷層剪動泥亦稱為斷層泥 (fault gouge)。斷層泥因其為斷層錯動之劇烈剪切作用下產物，成因較為特殊，已有相當多國內外學者對其強度、組構、一般物理性質等做過詳細的研究與探討 (如 Hoek [1]; Rutter, *et al.* [2]; Skepmton [3,4]; Sibson [5]; Wahlstrom, *et al.* [6]; Wu [7]; 沈 [8]; 吳 [9]; 洪 [10]; 陳 [11]; 陳 [12]; 劉 [13])：斷層泥強度在斷層泥含水量低時較高，而泡水即變得幾乎毫無強度可言；組成的顆粒極細，大部分之顆粒均較 200 號篩孔徑為小；組構方面常常可以觀察到斷層泥內部含有相當平整且可反射光線之擦痕面，順向排列極為明顯。

在隧道開挖遭遇斷層破裂帶時，常會有突發之大

量湧水，落盤等破壞產生，而斷層泥之出露也會對於工程本身造成影響，其強度較低 (一般於斷層帶出露之新鮮斷層泥必含有一定量之水份)，遇水弱化情形嚴重，這一部分更是會對隧道的施工進度造成相當程度的影響，較著名的案例有木柵一號隧道通過新店斷層時發生嚴重之頂拱變形。

一般要得到土壤強度，都需先進行一連串的強度試驗，才能得到所需的數據，然而實驗本身常常需要較大量之土壤樣本，且較為耗時，故一般在現場施工較無法真正進行強度試驗，反而常用含水量等一般物理性質之性質來約略推估。本研究即針對此點進行研究，先前研究斷層泥的學者們，僅對於特定斷層帶之斷層泥的某一特性進行探討，而在本研究中，嘗試將強度與一般物理性質進行迴歸分析，試圖由較為容易獲得之一般物理性質來推估斷層泥本身之強度，並依據此一關係將斷層泥加以分類，以做為日後大地工程施工時遭遇斷層泥時分類參考依據。另外由於斷層泥

本身之變異性較大，常常同一個斷層，甚至同一個地方出露之斷層泥，因為其風化條件、環境等因素之不同，常會造成其物理性質上產生極大的變化，而這些變化，就會進一步地影響斷層泥之強度。因此，若針對單一斷層進行研究後便依據其強度、物理性質等性質去定義該斷層泥，不免顯得較為不當。若能夠透過斷層泥之一般物理性質、強度參數等性質，再輔以當地斷層泥之出露環境之適當描述，應可獲致不錯的分類結果。

由於引進本研究做統計之斷層泥均屬於西部麓山帶之斷層，其成因、組成均較東部或其他地方所出露之斷層泥可能不同，因此，本研究提出之分類方式也有其限制，此一部分也將在本文中加以探討。

2. 斷層泥採樣地點

本研究除了自行採樣之外，為了增加斷層泥分類可應用性之廣泛程度，也將其他學者對於斷層泥研究中之強度及一般物理性質結果引入本研究中一同探討，以下為本研究中所採用斷層泥之採樣地點：

- (A) 北部地區斷層：新莊斷層（劉 [13]；洪 [10]；黃 [14]）、金盈斷層（沈 [8]；洪 [10]）、三義斷層（沈 [8]；洪 [10]）、以及新店斷層（本研究新增）。
- (B) 中部地區斷層：車籠埔斷層（本研究新增）、新城斷層（本研究新增）。
- (C) 南部地區斷層：應菜龍斷層（陳 [12]）、新化斷層（本研究新增）。

3. 基本物理性質及強度試驗結果

3.1 試驗部分

本研究在一般物理性質方面所進行的實驗有斷層泥乾密度、比重、阿太堡限度、含水量、粒徑分析等，實驗步驟均參照 ASTM 規範進行；在強度實驗方面所進行的實驗有直剪試驗及三軸試驗。

由於研究中要獲得斷層泥之強度參數，而實驗之原狀試體常無法在採樣中大量獲得，因此，強度試驗方面為採用能夠控制含水量、乾密度之重模試體，而試體之準備方式乃採用固定能量之夯實方式，以此一方法可以得到性質相當一致之

表 1 直剪試驗試體之含水量及乾密度變異性分析表

斷層泥類型	重模試體含水量 (%)			重模試體乾密度 (g/cm ³)		
	平均值	標準差	個數	平均值	標準差	個數
新城斷層樣本	6.98	0.28	6	2.16	0.034	7
新城斷層樣本	8.95	0.41	5	2.15	0.057	5
車籠埔斷層 埤豐橋樣本	7.81	0.37	8	2.20	0.032	8

試體（表 1），為所得到之強度參數去除了一些原狀斷層泥所較無法控制的因素。

在直剪試驗方面，採用 6cm × 6cm × 3cm 之正方形斷面試體，各斷層樣本以三組試體進行試驗，每組試體先施加特定正向應力，範圍約在 1 ~ 16MPa 間，求取尖峰剪力性質，再三次增加正向應力求取殘餘剪力性質，因此可求得各斷層泥樣本之尖峰強度參數之 c_p 、 ϕ_p 及殘餘強度參數之 c_r 、 ϕ_r 。直剪試驗試體來源包括新城斷層、新店斷層、車籠埔斷層（中台醫專、埤豐橋）。

三軸試驗包括飽和壓密不排水試驗（CU 試驗）及不飽和不壓密不排水試驗（UUU 試驗）。三軸試驗試體來源包括新城斷層、新店斷層、車籠埔斷層（中興新村、台中環線、埤豐橋）。CU 試驗於圍壓 100 ~ 800kPa 進行，由於須對試體進行飽和作用，試體會有吸水弱化現象。試體飽和與壓密階段所需時間與斷層泥的滲透係數及壓密係數有關，一般而言飽和階段約需 4 天始能將孔隙水壓係數 B 值提高至 0.95 以上；壓密階段則約需 2 天以上才達到穩定狀態，試體之破壞採取有效主應力比 (σ_1'/σ_3') 達最大值之定義。與 UUU 實驗所得結果比較，則可以了解各斷層泥強度受含水量之影響程度。

另外由於三軸試驗各組資料採用的試驗法有 CU 試驗、多階段 CU 試驗、及 UUU 試驗之差別，再加上飽和試體 c 值大部份趨近於零，使得等值無圍壓縮強度與物理性質指數關係不若以直剪試驗結果所得者明顯，因此斷層泥之力學性質與一般物理性質之迴歸式採直剪試驗結果比較。

根據莫爾庫侖破壞準則之剪力強度式：

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

可以得知，土壤本身之強度 τ 由凝聚力 (c) 及抗剪角 (ϕ) 來描述的，但此兩個參數在工程應用上並不如剪力強度 τ 來得簡單易於應用，而剪力強度在不同的應力狀態 σ 下，會有不同的剪力強度大

小，因此在本研究中，所比較之強度參數採用剪力強度 τ 是在同一個應力狀態下比較的，亦即選定無圍壓縮強度 σ_s ，定義為相當於圍壓 $\sigma_3 = 0$ 之應力狀態下之強度，可用下式表示：

$$\sigma_s = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2)$$

3.2 實驗結果及前人研究結果整理

斷層泥之一般物理性質試驗結果，與前人研究中之一般物理性質結果整理如表 2、表 3 所示。本研究納入進行實驗之斷層泥如上一節所述，其一般物理性質中，乾密度之範圍介於 $1.9 \sim 2.5 \text{g/cm}^3$ ，比重約在 2.68 至 2.81 之間，現地孔隙比大多在 0.3 以下。由阿太堡試驗結果可知，斷層泥樣本的液性限度 (LL) 約在 30% 左右；塑性指數 (PI) 介於 11% 至 21% 之間。經由粒徑分析，得知斷層泥粘土級含量主要介於 31% ~ 66%。依據 USCS 土壤分類法，各斷層泥樣本皆屬於低塑性粘土 (CL)。

直剪試驗結果整理如表 2 所示，由實驗結果可以得知大部分殘餘抗剪角均較尖峰抗剪角為低，僅有新店斷層泥之試驗結果與上述情形恰相反，推測可能是由於新店斷層泥在採樣時之含水量原本較高，在直剪試驗來回剪動數次之後，造成水份被擠出至上下盒間的空隙，造成剪動盒內試體較原來乾燥，故有殘餘抗剪角大於尖峰抗剪角的情形。

三軸試驗結果整理如表 3 所示。由於 CU 試驗在受剪程序中不容許排水，隨著軸差應力的施加會激發孔隙水壓。孔隙水壓係數 A_f 為試體達破壞狀態時孔隙水壓與軸差應力的比值。 A_f 值的大小能反應試體的應力歷史，正常壓密粘土的 A_f 值大於 0.5。本研究中斷層泥之 A_f 值皆小於 0.5 甚至小於 0，表示皆具有過壓密土的力學性質。至於詳細實驗結果可參考林等人 [15]。

4. 斷層泥力學性質與一般物理性質相關性探討

4.1 斷層泥物理性質指數與等值無圍壓縮強度相關性比較

研究中選定取樣之新城、新店、車籠埔等斷層泥，各項物理性質試驗如粒徑分佈、阿太堡試驗結果相近 (表 2 和表 3 所列數據)。但事實上斷層泥卻常因含水量或孔隙比之變化而使其強度有著較大的變異性。因此，不適合單由液塑限，或粒徑分

佈等擾動性較大之物理性質來推估其特性。

經由研究結果表 2 的整理，得知斷層泥一般物理性質指數中，以乾密度 γ_d 、塑性指數 PI、含水量 w 、孔隙比 e 與力學性質的關係較為顯著 (圖 1、2)。其中以塑性指數及乾密度與等值無圍壓縮強度呈正相關趨勢；含水量及孔隙比則與等值無圍壓縮強度呈負相關之關係。

因此選定以上四個物理性質指數與等值無圍壓縮強度，進一步探討各指數相互之間的相關程度。參考資料選擇國內斷層泥物理性質與力學性質相關研究中，力學試驗方法採直剪試驗者，包括劉 [13]、吳 [9]、陳 [12]；採三軸試驗者，包括沈 [8]、洪 [10]、黃 [14]，去除其中 σ_s 為 0 之試驗資料，及烘乾後含水量為 0 狀態下進行之試驗 (如表 3** 部分所示)。各直剪試驗、所得強度與物理性質指數相關係數 R 、 R^2 整理至表 4；三軸試驗所得強度與物理性質指數相關性整理至表 5。表 4 中所列乾密度、孔隙比、塑性指數對等值無圍壓縮強度相關係數最顯著， R^2 分別為 0.64、0.61、0.53。各物理性質指數間亦有相關，其中乾密度—孔隙比、乾密度—含水量、塑性指數—液性指數關係最密切， R^2 分別為 0.89、0.67、0.67。

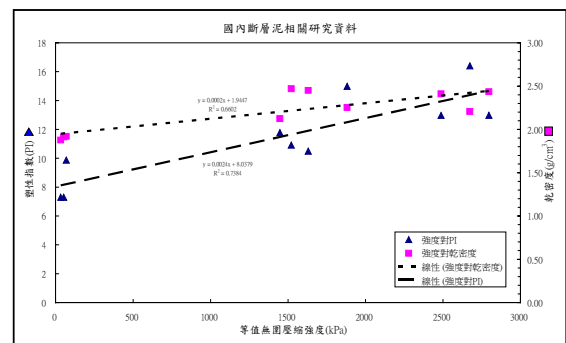


圖 1 等值無圍壓縮強度與塑性指數、乾密度之關係

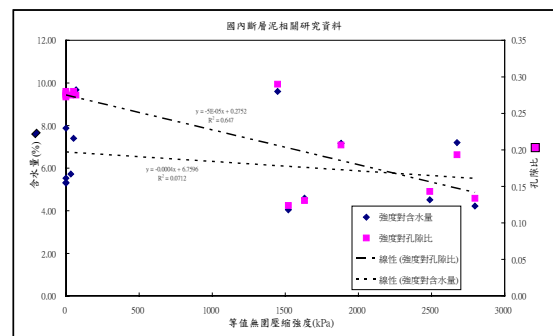


圖 2 等值無圍壓縮強度與含水量、孔隙比之關係

表 2 斷層泥直剪試驗物理性質與工程性質相關關係結果

研究者	樣本來源	樣號	試驗方式	力學參數					物性指數					備註
				尖峰強度		殘餘強度		等值無圍壓縮強度	乾密度	孔隙比	塑性指數	含水量	粘土級	
				c_p (kPa)	f_p (°)	c_r (kPa)	f_r (°)	s_s (kPa)						
劉俊杰 (1993)	關渡斷層泥	A	直剪試驗	528	46.9	39	26.4	2674.0	2.21	0.19	16.4	7.2	66	
	關渡斷層泥	B	直剪試驗	280	47.7	0	41.6	1447.5	2.12	0.29	11.8	9.6	35	
	關渡斷層泥	C	直剪試驗	284	56.4	45	30.9	1881.3	2.25	0.21	15	7.2	49	
吳富洵 (1993)	新店斷層	MCS1	直剪試驗	665.4	39.1	30.7	32	2796.4	2.44	0.13	13	4.2	52	
	新店斷層	MCS2	直剪試驗	459.5	31.2	4.5	34	1631.0	2.45	0.13	10.5	4.6	55	
	新店斷層	MCN1	直剪試驗	653.1	34.6	75.6	23.4	2487.9	2.41	0.14	13	4.5	51	
	新店斷層	MCN2	直剪試驗	361.1	39.2	1.3	37.2	1521.0	2.47	0.12	10.9	4	48	
陳豐昇 (1992)	應菜龍斷層	Y-1	直剪試驗	0.0*	34.6	—	—	0**	1.92	0.28	5	5.3	35	**未列入迴歸分析
	應菜龍斷層	Y-2	直剪試驗	0.0*	36	—	—	0**	1.87	0.27	7.8	5.5	40	
	應菜龍斷層	Y-3	直剪試驗	0.0*	38	—	—	0**	1.86	0.28	8.4	5.3	40	
	應菜龍斷層	Y-4	直剪試驗	0.0*	39	—	—	0**	1.87	0.28	7.6	7.9	34	
	應菜龍斷層	Y-5	直剪試驗	8	38	—	—	32.8	1.88	0.28	7.3	5.7	40	
	應菜龍斷層	Y-6	直剪試驗	13	37	—	—	52.2	1.91	0.28	7.3	7.4	64	
	應菜龍斷層	Y-7	直剪試驗	17	37.5	—	—	69.0	1.92	0.28	9.9	9.7	65	
本研究	新城斷層		直剪試驗	1180	12.1	1140	9.9	2919.6	2.33	0.15	17	3.9	41.1	
	新店斷層		直剪試驗	226	7.5	0	16.5	515.4	2.2	0.23	15.5	9.6	41	
	車籠埔斷層	中台醫專	直剪試驗	669.9	18.7	119.6	34.5	1868.0	1.94	0.39	14	0.0**	15.2	**未列入迴歸分析
	車籠埔斷層	埤豐橋	直剪試驗	670	41.3	1208.7	13.9	2960.9	2.54	0.08	14.6	4.3	35.8	
	龍船斷層		直剪試驗	404	46.3	2043.2	12.3	2015.0	2.45	0.13	14.6	2.3	—	

表 3 斷層泥三軸試驗物理性質與工程性質相關關係結果

研究者	樣本來源	試體	樣號	試驗法	力學參數				物理性質指數			
					c (kPa)	ϕ (°)	σ_s (kPa)	乾密度 (g/cm ³)	孔隙比	塑性指數 (%)	含水量 (%)	粘土級 (%)
沈建志 (1995)	新莊斷層	原狀	TI1	多階 CU	0	33.4	—	1.79	0.49	11.4	15.6	27.5
	新莊斷層	原狀	TI2	多階 CU	4.7	30.9	—	1.77			16.6	
	新莊斷層	原狀	TI3	多階 CU	1.6	31.3	—	1.79			14.5	
	新莊斷層	原狀	TI4	多階 CU	17.6	29.3	—	1.81			16.4	
	新莊斷層	原狀	TI5	多階 CU	16.4	25.8	—	1.81			15.8	
	金盈斷層	原狀	JI1	多階 CU	21	20.1	—	2.22	0.21	11.2	3.6	15
	金盈斷層	原狀	JI2	多階 CU	40.7	16.1	—	2.24			3.8	
洪清琳 (1996)	新店斷層	原狀	SD	CU	1	30	—	2.18	0.25	4.9	9.3	21.8
	新莊斷層	原狀	SC	CU	26	13	—	1.97	0.39	12.5	15	61
	金盈斷層	原狀	JI	CU	104	18	—	2.23	0.22	11.2	8.3	32.7
黃欽稜 (1999)	新莊斷層	原狀	SC	CU	93.6	16	—	2.1	0.32	8.7	10.6	49
本研究	新城斷層	原狀	SCH-1	CU	0.6	28.2	—	2.33	0.15	17	10.9	41.1
	新城斷層	重模	SCH-2	CU	4.9	35.6	—	2.16	0.24	17	10.4	41.1
	新店斷層	原狀	SD-1	CU	40.9	14.9	—	2.2	0.21	15.5	13.5	41
	新店斷層	重模	SD-2	CU	40.9	28.3	—	2.15	0.26	15.5	12.2	41
	車籠埔斷層	原狀	中興新村	CU	13.3	23.1	—	2.3	0.18	15.5	12.4	56.4
	車籠埔斷層	原狀	台中環線泥質	CU	0.2	22	—	2.28	0.2	21	12.3	53.3
	車籠埔斷層	原狀	台中環線砂質	CU	6	25	—	2.24	0.21	10.8	8.1	31.2
	車籠埔斷層	重模	埤豐橋	CU	58.7	33.6	—	2.54	0.08	14.6	10.2	35.8
	新城斷層	重模	SCH-3	UUU	122.4	43.4	1925.3	2.16	0.24	17	8	41.1
	新店斷層	重模	SD-3	UUU	438.4	21.4	1597.2	2.15	0.26	15.5	7	41
	車籠埔斷層	原狀	台中環線泥質	UUU	333.7	45.2	2950.1	2.28	0.2	21	2.7	53.3
	車籠埔斷層	原狀	台中環線砂質	UUU	177.2	56.4	3850.6	2.24	0.21	10.8	7.5	31.2
	車籠埔斷層	重模	埤豐橋	UUU	476.2	30.1	1103	2.54	0.08	14.6	7.6	35.8

表 4 斷層泥直剪試驗物理性質與力學性質相關係數一覽表

	相關係數	等值無圍壓強度		塑性指數	乾密度	含水量	孔隙比	粘土含量	液性指數
		σ_s	PI	γ_d	w	e	CF	LI	
力學參數	等值無圍壓強度	R ²	1	0.5304	0.6421	0.3413	0.6097	0.0352	0.1103
		R		0.7283	0.8013	-0.5843	-0.7809	-0.1876	0.3325
	凝聚力	R ²		0.499	0.4829	0.3332	0.503	0.0679	0.1139
		R		0.7064	0.6949	-0.5772	-0.7092	-0.2607	0.3374
	抗剪角	R ²		0.047	0.0001	0.0018	0.0013	0.0441	0.057
物性參數		R		-0.2168	-0.0081	-0.0426	0.0361	0.21	-0.2388
	塑性指數	R ²	1	0.2904	0.0088	0.2094	0.049	0.6688	
		R		0.5389	-0.0939	-0.4576	-0.2214	0.8178	
	乾密度	R ²		0.4853	0.8941	0.1013	0.0586		
		R		-0.6967	-0.9456	0.3183	0.242		
	含水量	R ²		0.6711	0.0249	0.1333			
		R		0.8192	0.1577	0.3651			
	孔隙比	R ²		0.0269	0.0076				
		R		0.164	-0.0872				
	粘土含量	R ²					1		
		R						0.0121	
液性指數	R ²							1	

表 5 斷層泥直剪試驗物理性質與力學性質相關係數一覽表

	相關係數	塑性指數		乾密度	含水量	孔隙比	粘土含量	液性指數
		PI	γ_d	w	e	CF	LI	
力學參數	等值無圍壓強度	R ²	0.0714	0.1275	0.3376	0.0002	0.0075	0.0008
		R	-0.2673	0.3571	-0.581	0.0151	-0.0867	0.029
	凝聚力	R ²	0.0956	0.0963	0.2228	0.0195	0.002	0.0001
		R	-0.3092	0.3103	-0.472	0.1395	-0.0449	-0.008
	抗剪角	R ²	0.0191	0.0542	0.1148	0.5684	0.2341	0.0007
	R	0.1382	-0.2329	-0.3388	-0.7539	-0.4839	0.0274	

4.2 乾密度、塑性指數對強度迴歸關係式

在實際工程應用中，若要推估斷層泥之強度，一般皆是利用量測含水量等較為粗略之方式概估。在本研究中，乃嘗試由上小節提到與強度相關性較高之一般物理性質與斷層泥之剪力強度建立一迴歸關係式以供現地研判分類使用，因此此函數不能過於繁複，否則失去其簡便易用於現地工程的意義。由前一小節的討論可知影響強度的物理性質因子很多，且各物理性質因子不能視為獨立變數。其中以乾密度、孔隙比、塑性指數對強度的相關係數最高，但乾密度與孔隙比為高度相依，故選定以乾密度和塑性指數對強度進行迴歸。

假定等值無圍壓縮強度 σ_s 為乾密度及塑性指數的函數，可以表示為下式：

$$\sigma_s = Af(\gamma_d)g(PI) \quad (3)$$

其中 σ_s 為等值無圍壓縮強度，單位為 kPa，
 A 為常數，
 γ_d 為乾密度，單位為 g/cm^3 ，
 PI 為塑性指數，以百分比表示。

由前述迴歸關係中，已知

$$\sigma_s = 3895.1\gamma_d - 7142.5 \quad R^2 = 0.6421 \quad (4)$$

$$\sigma_s = 257.64 PI - 1597.4 \quad R^2 = 0.5304 \quad (5)$$

然而式(4)、式(5)僅分別代表 γ_d 、 PI 對強度的趨勢，必須將兩式修正為兩獨立變數 γ_d 、 PI 對強度的函數，以滿足式(3)之定義。修正方法如後：

1. 由於乾密度對強度的相關係數較高，故先將 σ_s 對乾密度函數(式 4)正規化。強度對乾密度正規化後的意義如同去除乾密度函數的影響，可以得到正規化等值無圍壓縮強度 $\frac{\sigma_s}{f(\gamma_d)}$ 對塑性指數 PI 的函數關係，式(3)可改寫為：

$$\frac{\sigma_s}{f(\gamma_d)} = g(PI) = (0.1284PI - 0.7249) \quad R^2 = 0.5712 \quad (6)$$

2. 再將 σ_s 對塑性指數函數(式 6)正規化，去除塑性指數對強度的影響，可再得到修正後的乾密度函數，式(6)再改寫成：

$$\frac{\sigma_s}{g(PI)} = Af(\gamma_d) = A(4149\gamma_d - 7650.9) \quad R^2 = 0.8143 \quad (7)$$

3. 檢核修正前後的乾密度函數(式 4 及式 7)，一次修正後乾密度函數的 R^2 提高到 0.8143。重覆步驟 1 ~ 3 對 $f(\gamma_d)$ 及 $g(PI)$ 進行修正，直到函數斜率值與 R^2 值趨於穩定。

兩函數隨修正四次後已趨於穩定，於是視為已經去除相互之間的影响，乾密度函數及塑性指數函數(如圖 3 和圖 4 所示)分別修正為：

$$f(\gamma_d) = 4450.2\gamma_d - 8820.2 \quad R^2 = 0.8157 \quad (8)$$

$$g(PI) = 0.1113 PI - 0.5885 \quad R^2 = 0.5514 \quad (9)$$

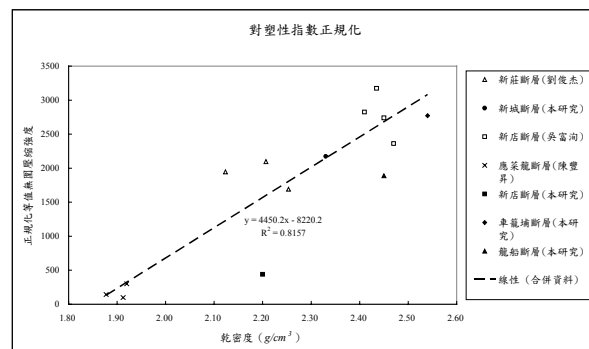


圖 3 對塑性指數正規化之等值無圍壓縮強度與乾密度關係圖 (四次修正)

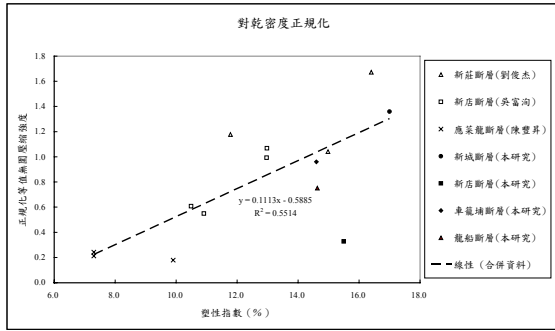


圖 4 對乾密度正規化之等值無圍壓縮強度與塑性指數關係圖 (四次修正)

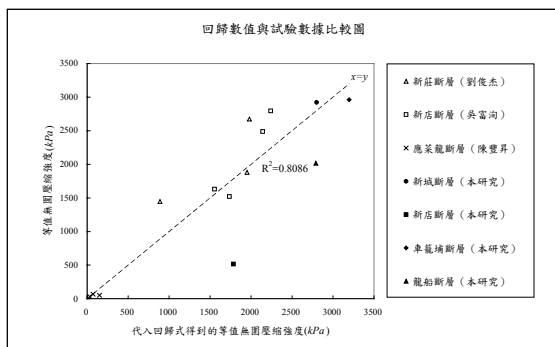


圖 5 迴歸之無圍壓縮強度與試驗值比較圖

將兩式相乘即符合式(3)的定義，得到等值無圍壓縮強度 σ_s 受乾密度 γ_d 及塑性指數 PI 影響的二變數函數(式 10)。

$$\sigma_s = Af(\gamma_d)g(PI)$$

$$= A(4450.2\gamma_d - 8220.2)(0.1113PI - 0.5885) \quad (10)$$

$$R^2 = 0.8086$$

(γ_d 介於 $1.88 \sim 2.54g/cm^3$; PI 介於 $7.3 \sim 17.0\%$)

將各組試驗資料之 γ_d 與 PI 代入式(8)中即可得到迴歸之強度，此迴歸強度與實際強度之關係如圖 5，顯示相關程度很高 (R^2 為 0.8086)，迴歸關係式可充份反應物理性質 (乾密度、塑性指數) 與力學性質 (等值無圍壓縮強度) 之間的關係。

5. 斷層泥初步分類

大地工程進行時當遭遇到斷層帶，若可得知其相對應之強度參數，則可以在即時提出適合之施工方式以修正原來之施工法，而斷層帶一般出露的順

序大致上皆為先遭遇到極為破裂之斷層帶，之後再有結構相當緻密、較不透水之斷層泥，在前人之研究中對於斷層破碎帶之岩體強度評估有較為詳細之探討 (Hoek, et al. [16])，而一般對於斷層泥之分類則鮮少提及，故於本研究中對於斷層泥之分類於本節中加以探討。

ISRM [17] 將凝聚性地質材料依強度分為 13 級，其中 S1 至 S6 針對粘土分級，R0 至 R6 針對岩石分級。本研究探討之斷層泥 (γ_d 介於 $1.88 \sim 2.54g/cm^3$, PI 介於 $7.3 \sim 17.0\%$) 等值無圍壓縮強度在 300kPa 至 5000kPa 之間，分別屬於甚硬粘土 (S5)、堅硬粘土 (S6) 或極弱岩石 (R0)、甚弱岩石 (R1)。ISRM 之地質材料強度分級，同時提供野外地質調查時，利用小刀及地質錘之鑑定方法，值得做為斷層泥初步分類的參考依據。

考慮式(10)之斷層泥物理性質－強度迴歸關係，表示成以乾密度、塑性指數、等值無圍壓縮強度為座標之三度空間關係後，再投影至乾密度、塑性指數座標平面上之 500kPa、1000kPa、2500kPa 強度等值線 (如圖 6 所示)。本研究據此將斷層泥初步區分為 A、B、C、D 四類 (如圖 7 所示)：

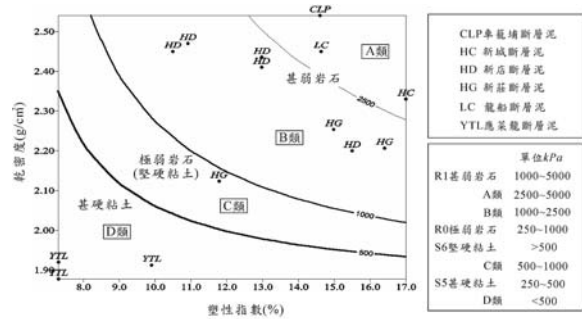


圖 6 斷層泥初步分類

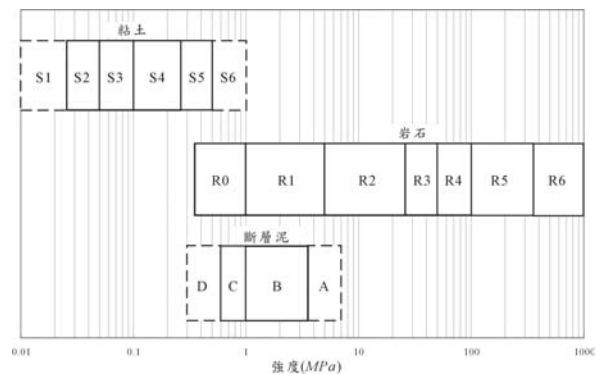


圖 7 斷層泥分類及 ISRM 地質材料強度分級

- A 類：強度 2500kPa 以上，同屬於 R1 級甚弱岩石或更強者，此類斷層泥受風化的影響不顯著。依前人研究及本研究試驗結果，以強度 2500kPa 為分界，可有效區分其中強度較高的斷層泥（如本研究之新城、車籠埔、龍船斷層泥）。
- B 類：強度 1000 ~ 2500kPa，相當於 R1 級甚弱岩石。此類斷層泥受風化程度影響較小，本研究之大部份新鮮地表樣本及地下取樣試體強度落於 R1 級範圍內。為了更有效突顯斷層泥之差異，將其中強度較低之新店（吳 [9]；本研究）、新莊斷層泥歸於此類。
- C 類：強度 500 ~ 1000kPa，依 ISRM 分類相當於 S6 級堅硬粘土或 R0 級極弱岩石。此類斷層泥標準貫入試驗 N 值大於 30，約介於土壤及岩石之間，其力學性質通常已受到相當程度之風化影響。部份新莊斷層泥（劉 [13]）屬此類。
- D 類：強度在 500kPa 以下，相當於土壤 S5 級之甚硬粘土或更軟弱者。此類斷層泥通常為嚴重解壓風化或吸水回脹後的樣本，材料特性可視為土壤。應菜龍斷層泥（陳 [12]）屬此類。

6. 斷層泥分類使用限制及其他相關影響因素探討

6.1 斷層泥分類使用限制

以上四類斷層泥初步區分以強度為依據，參考式(10)之物理性質－強度迴歸關係，可由乾密度、塑性指數推知斷層泥類別屬性。引用上述迴歸式及斷層泥分類時，有以下限制需特別注意：

- (A) 本研究對象針對台灣西部麓山帶沈積岩區之斷層泥，在未有其它試驗資料佐證前，不適宜貿然引用於其它岩性或不同構造作用下之斷層剪動泥。
- (B) 斷層泥物理性質強度迴歸式及分類參考之乾密度介於 1.88 ~ 2.54g/cm³、塑性指數介於 7.3 ~ 17.0%，不適宜推估物理性質落於此範圍外之斷層泥。
- (C) 迴歸式及分類的作用，在於對不同深度及取樣地點得到的斷層泥樣本，以物理性質指數對其力學性質進行初步的評估。由前人研究及試驗結果得知，斷層泥的力學性質受許多其它因素影響，其中又以斷層泥遇水弱化之影響最為顯著，這一部份於下小節中討論。

6.2 其它影響力學性質的因素

前述整理之物理性質指數中，以乾密度和塑性指數對強度的關係最為密切，並可由乾密度、塑性指數二變數迴歸式對斷層泥強度得到不錯的預測。其它影響斷層泥力學性質的重要因素還有含水量、粘土級含量、組構排列、風化程度、應力歷史等。雖然就一般狀況而言，乾密度塑性指數迴歸式，大致能夠概括其它變因的影響性，但是因應地下水及地質環境的差異，仍需視狀況進一步考量以下影響因素：

(A) 水的影響

水分子可以經由強烈的氫鍵鍵結力與帶有負電的粘土顆粒緊密結合。含水量低時，水受制於粘土礦物表面離子與鍵結力；當含水量高時，粘土的力學行為將會受到吸附水及自由水的影響。

本研究設計兩種三軸試驗方法：CU 試驗及 UUU 試驗，供比對斷層泥試體於飽和／未飽和狀態下的力學行為。試驗結果顯示斷層泥強度隨飽和程序後強度大幅降低（如表 3 中之陰影部分）。就同一斷層泥樣本而言，當試體飽和後（含水量增加 3%），等值無圍壓縮強度即大幅下降為未飽和強度的 3% ~ 13%。其原因最主要在於 c 值的大幅下降，而 ϕ 值受含水量的影響對斷層泥而言較小。在直剪試驗部分，因含水量分佈範圍較窄（約 4% 至 10% 之間，圖 2），且各斷層泥之採樣點不盡相同，性質差異較大，因此其強度之變化程度不如三軸試驗，僅有一負相關之趨勢可供驗證。

(B) 粘土級含量的影響

粘土級細粒料在土壤中的含量即使不高，亦能影響其力學行為，粘土在土壤中可發揮關鍵性少數的角色。主要原因是大顆粒之間的孔隙為小顆粒所填充，如果粘土含量夠多時，顆粒間將無法完全直接接觸，此時所產生的破壞都是孔隙中的粘土所控制，即使粘土的含量不夠多，無法填滿空隙，大顆粒還是會被表面所吸附的粘土所影響。

本研究討論之斷層泥樣本，粒徑在 200 號篩以下者幾乎在 90% 以上，而粘土級含量（粒徑小於 0.005mm），亦大都在 30% ~ 60% 之間。在這麼高的粘土含量下，粘土含量增減對強度的直接影響已不顯著，與 Skempton [4]、Kenney [18] 討論粘土含量與強度關係時，粘土含量大於 40% 後對強度影響程度較不明顯的趨勢相符。而粘土本身的應力歷史（過壓密比）及組構性質（異向性、風化程度）對斷層泥性質有較大的影響。因此使用強度迴歸式時必須特別注意。

在黏土礦物組成方面，本研究提到之斷層泥其礦物組成均相當類似，大部分均含伊利土、高嶺土等，若在研究中採用礦物組成來分析，則在分類上不免顯得較為困難。若往後之斷層泥礦物分析中含有如蒙脫土等高膨脹性的礦物時，則迴歸式中 PI 值可能會因此而超出本研究中所建議之適用範圍，此時應重新迴歸求取適當之公式再應用之。

(C) 粘土組構排列的影響

在沉積過程中(後)進行非均向壓密(剪動)或重模(夯實)之方法不同，均會造成土壤的組構排列的異向性，這代表顆粒的排列方向及顆粒間接觸方向之不同。巨觀上來看，組構的異向性通常會導致工程性質的不同，這是因為體積改變的傾向在不同方向的差異所造成的。顆粒之排列有所謂「優選排列」(preferred orientation)，當剪動方向與優選排列的方向正交時，所得到的強度及變形模數最高(Mitchell [19]; 林等人 [15])。

(D) 風化作用的影響

風化作用有物理性風化如淋溶、解壓、熱脹冷縮等，以及化學性風化如氧化、離子交換等。不論物理性風化或化學性風化，水都佔有重要的影響。風化作用造成材料礦物成份、組構型式及力學性質的改變，分述如下：

1. 組構特徵的變化

依據 Fan (1994) [20] 對不同風化程度之利吉混同層 (mélange) 的觀察，風化最輕微的土壤組構在鱗狀表面附近可觀察到較有順向排列的結果；部分風化及風化嚴重土壤，組構排列便愈向隨機分佈，並可觀察到土壤孔隙體積增加。

2. 強度

本研究探討之斷層泥樣本中，車籠埔斷層台中環線岩心為鑽探自地下 30 ~ 60 公尺之試體，其餘皆取自地表露頭較新鮮的樣本。比較三軸 UUU 試驗結果 (如表 3 所列數據)，車籠埔斷層台中環線岩心地下斷層泥的強度，較其它地表斷層泥高。但是將試體飽和之後，比較三軸 CU 試驗結果 (如表 3 所列數據)，則地表/地下斷層泥強度即無明顯差異。這表示就本研究採集到的樣本而言，含水量對強度的影響比地表/地下分類的影響大。其他受風化程度影響之變化尚有過壓密特性之改變、回脹特性、消散現象，這些現象在斷層帶現地也需視現地狀況加以考慮。

7. 結 論

一般遭遇斷層帶時，通常直接實驗而取得結果使用，然而對於斷層泥這種性質較一般土壤大不相同之斷層產物卻尚未進一步加以分類，以利工程參考運用。本研究中提出一迴歸關係式，將斷層泥之強度與乾密度、塑性指數做一關連性探討，分析結果顯示出不錯的吻合度。在現地工程中，乾密度與塑性指數之土壤參數較強度來得容易獲得，因此本方式為日後評估斷層泥強度提供了省時且不致太過粗略的方法。研究中根據迴歸關係式，定出斷層泥之分類共 A、B、C、D 四類，其中以 A 類之強度最高，D 類最低，而相較於 ISRM 為地質材料所作的分類，斷層泥落於 R2 (本研究分類為 A 類) 至 S5 (本研究分類為 D 類) 之間，為不同於一般土壤或岩石之強度分類界定標準。

另外其他尚有相當多的因素會影響到斷層泥本身之強度，由於所提出的關係式是建立在簡單易用的原則上建構出來的，因此難免有一些相當重要的因素無法考慮到，在使用本迴歸式時需要特別注意當地的一些特殊地質條件再做修正，以求符合現地之狀況。

參 考 文 獻

- [1] E. Hoek, "Estimating the stability of excavated slopes in opencast mines," *Trans. Inst. Min. Metal., Sect. A.*, 79, 1970, pp. 109-132.
- [2] E. H. Rutter, S. H. Maddock, S. H. Hall and S. H. White, "Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges," *Pure & Appl. Geophys.*, Vol. 124, 1986, pp. 3-30.
- [3] A. W. Skempton, "Some observation on tectonic shear zones," *Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 1, 1966, pp. 329-335.
- [4] A. W. Skempton, "Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory," *Geotechnique*, 35, No. 1, 1985, pp. 3-18.
- [5] R. H. Sibson, "Fault rocks and fault mechanisms," *J. Geol. Soc. Lond.*, 133, 1977, pp. 191-213.
- [6] E. E. Wahlstrom, C. S. Robinson and T. C. Nichols, "Swelling of rocks in faults in the roberts tunnel, Colorado," *Eng. Geol. Case Hist. Geol. Soc. Am.*, 6, 1968, pp. 83-89.
- [7] F. T. Wu, "Mineralogy and physical nature of clay gouge," *Pure & Appl. Geophys.*, 116, 1978, pp. 655-689.

- [8] 沈建志，「斷層泥力學特性之初步研究」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，1995年。
- [9] 吳富洵，「新店斷層及其在隧道工程上之影響」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，1993年。
- [10] 洪清琳，「斷層泥力學性質與微組構觀察之研究」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，1996年。
- [11] 陳正興，「斷層泥力學性質之初步研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，1978年。
- [12] 陳豐昇，「應菜龍斷層在工程地質上的意義」，國立台灣大學地質學研究所碩士論文，1992年。
- [13] 劉俊杰，「新莊斷層及其斷層泥特性之研究」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，1993年。
- [14] 黃欽稜，「新莊斷層泥變形行為之研究」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，1999年。
- [15] 林銘郎、鄭富書、翁作新、洪如江，「斷層泥力學性質研究」，交通部國道新建工程局研究報告124，2000年。
- [16] E. Hoek, P. Masinos and M. Benissi, "Applicability of the geological strength index classification for very weak and sheared rock masses, The case of the Athens schist formation," *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57, 1998, pp. 151-160.
- [17] E. T. Brown, Rock characterization testing and monitoring, ISRM Suggested Methods, ISRM, 1981, p. 211.
- [18] T. C. Kenney, "The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils," *Proc. Geotechnical Conf.*, Oslo 1, 1967, pp. 123-129.
- [19] J. K. Mitchell, *Fundamental of Soil Behavior*, 2nd edition, 1993.
- [20] C. H. Fan, "Deformation characteristics of scaly clay subject to tropical weathering," Ph.D. Dissertation, University of London, 1994.



林銘郎 (Ming-Lang Lin) 民國49年生，國立台灣大學土木工程學系副教授。台大土木系學士、博士。研究領域：大地工程、工程地質。



鄭富書 (Fu-Shu Jeng) 民國49年生，國立台灣大學土木工程學系副教授。台大土木系學士、碩士，美國麻省理工學院博士。研究領域：大地工程、岩石工程、地質力學、隧道工程。



翁作新 (Tzou-Shin Ueng) 民國 32 年生，國立台灣大學土木工程學系教授。美國柏克萊加州大學土木工程博士。研究領域：土壤力學、基礎工程、岩石力學、土壤動力學。



黃文昭 (Wen-Chao Huang) 民國 63 年生，國立台灣大學土木工程學研究所大地組碩士。國立台灣大學土木系學士，現任台大土木系助教。

收稿日期 91 年 5 月 15 日、修訂日期 91 年 6 月 14 日、接受日期 91 年 6 月 20 日
Manuscript received May 15, 2002, revised June 14, 2002, accepted June 20, 2002