

岩石節理面粗糙係數之尺寸效應

蘇苗彬¹ 何敏龍²

關鍵字：岩石節理面、粗糙係數、尺寸效應。

摘 要

本文對 Barton (1977) 所提出之岩石節理面尖峰剪力強度公式，以數值分析方法進行粗糙係數之尺寸效應的研究利用。並自製剖面儀進行實際岩石節理剖面之量測，及配合節理壁單壓強度尺寸效應之驗證與室內推力試驗確定其適用性。應用 Bandis (1981) 與本文提出之 JRC 尺寸效應公式及新的角度參數，證實適於求取不同規模節理剖面之粗糙係數。

THE SCALE EFFECT OF THE JOINT ROUGHNESS COEFFICIENT

Miau-Bin Su¹

*Associate Professor, Department of Civil Engineering,
National Chung-Hsing University
Taichung, Taiwan 40227, R.O.C.*

Min-Lung Ho²

*P.h. D., Research Institute of Civil Engineering,
National Taiwan University
Taipei, Taiwan 10764, R.O.C.*

Key Words: Rock joint, Joint roughness coefficient, Scale effect.

ABSTRACT

This paper is aimed at the study on the scale effect of joint roughness coefficient for rock. Numerical Analysis and laboratory tests are conducted to study the JRC (joint roughness coefficient) scale effect. A profilometer was constructed to measure the artificially cracked rock joint. Push tests were carried out also. The scale effect of JRC has been set numerically and at the end proved to be reasonable.

一、緒 言

對於岩石節理面剪力強度之研究方法，一為採用物理模型分析，二則以自然岩石節理進行現場或室內剪力強度試驗。從 Barton & Bandis (1980) [1] 之研

究指出，因尺寸效應的存在與模型相似性之符合要求，使模型分析“模擬”之尺寸常大於自然岩塊的節理長度，導致常低估了節理岩體之剪力強度；而室內試驗所採用的樣體，由於其尺寸與現場岩塊相差甚大，則造成高估岩體之剪力強度。因此，若僅由小尺寸試體之強度試驗值應用於岩體強度之設計，容易造成誤導。存在於岩石節理面剪力強度之尺寸效應，實有深入探討的必要。

¹ 國立中興大學土木工程學系副教授

² 國立台灣大學工學博士

由 Barton (1977) [2] 所歸納出之岩石節理面尖峰剪力強度公式：

$$\tau_f = \sigma_n \tan[JRC \log(JCS / \sigma_n) + \phi_r] \quad (1)$$

式中

JRC：岩石節理面粗糙係數 (Joint Roughness Coefficient)

JCS：岩石節理壁單壓強度 (Joint Wall Compression Strength)

ϕ_r ：節理面之剩餘摩擦角 (Residual Friction Angle)

其中剩餘摩擦角並無尺寸效應現象，當正應力 σ_n 已知，岩石節理面之剪力強度係由 JRC 與 JCS 所控制。由其定義可知，JRC 及 JCS 會隨岩石節理試體尺寸大小的不同而改變，亦即會存有尺寸效應。Barton & Choubey (1977) 認為以現地自然岩塊尺寸進行剖面量測或剪力強度試驗，所求出的參數較具代表性，這樣的建議在當岩體被三組以上弱面切割，岩塊試體較小且易取得時進行容易。但實際困難在於當遭遇連續性較佳之節理時，岩塊之尺寸仍難以判定，如圖一所示，自然岩體的大小受採樣的影響，且受試驗儀器所限，究竟該採多大尺寸的試體，才具代表性？難有定論。

鑑於大尺寸節理試體採樣的困難及大型力學試驗進行之不易，本文嘗試由節理面剪力強度參數之尺寸效應的研究來探討岩石節理面剪力強度之尺寸效應。研究之重點在於建立 JRC 尺寸效應公式，期能建立以小尺寸節理面相關之參數推求大尺寸自然岩體的 JRC 值。至於 JCS 之尺寸效應，則檢核 Hoek & Brown (1981) 所建議之岩石單壓強度公式的適用性。

二、研究方法

2.1 JRC 尺寸效應之研究

2.1.1 標準剖面之數位化

Barton(1977) 對於 JRC 的判定，採用與標準剖面比對的方式進行，並建立了十個標準粗糙剖面，每級之差值為 2，本研究由其中選取四個剖面進行數位化。將數位化後之粗糙剖面繪於透明紙上與標準剖面進行比對，當兩者十分吻合時，則數位化所得之剖面予以採用，並作為後續分析之依據。本研究所選取之四個標準粗糙剖面，其粗糙係數分別為 JRC = 6 ~ 8，JRC = 10 ~ 12，JRC = 14 ~ 16 與 JRC = 18 ~ 20。數位化後由電腦繪出之剖面與標準剖面之比較圖，如圖二所示。由圖中可看出，數位化重繪之剖面與標準剖面相當吻合，適宜 JRC 尺寸效應之分析。至於剖面之 JRC 值，則應用 Tse & Cruden (1979) [3] 的公式進行計算。

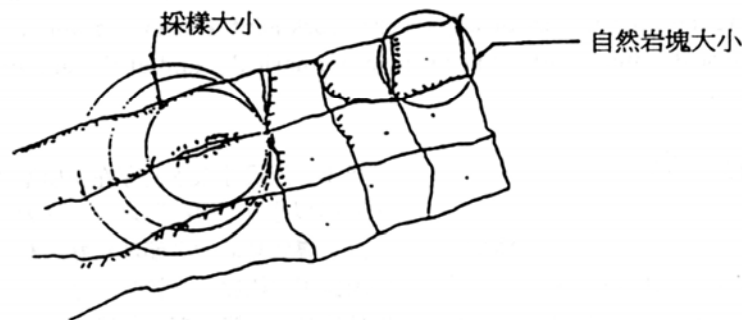
2.1.2 JRC 之計算

本文應用 Tse & Cruden (1979) 建立之 JRC 公式，計算數位化剖面之 JRC 值。Tse 所建議之 JRC 公式中，由於剖面參數 SF (剖面一次導數平方的平均值)，對於採樣間距太過敏感 [4]，不適合用作求取 JRC 值，因此，本文採用以下公式：

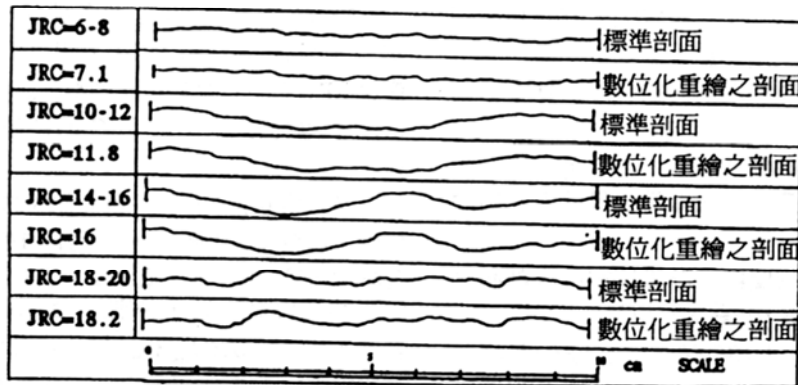
$$JRC = 32.2 + 32.47 \log_{10} Z_2 \quad (2)$$

進行 JRC 值之計算，式中

Z_2 ：剖面一次導數之均方根值 (Root Mean Square of the First Derivative of the Profile)



圖一、連續性節理與自然岩塊取樣上之差異

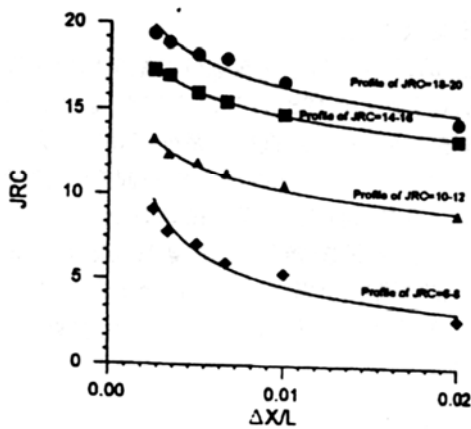


圖二、BARTON 標準粗糙剖面與數位化後剖面之比較圖

$$Z_2 = \frac{1}{L} \left[\int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 dy \right]^{\frac{1}{2}},$$

L 為剖面總長度, x 為長度, y 為高度

考慮 Z_2 會受採樣間距之影響, 以量測間距與節理剖面長度之比值 $\Delta X/L$ 分別為 1/50、1/100、1/150、1/200、1/300、1/400 分析四個數位化剖面, 並計算 JRC 值。將 JRC 值與量測間距繪成關係圖, 如圖三所示。由圖中可知, 對相同剖面而言, 當 $\Delta X/L$ 比值愈大, 則依式(2)計算所得之 JRC 值愈低。因 $\Delta X/L$ 擇取之不同所導致之 JRC 差值, 最高可達 6.3。在 6 個 $\Delta X/L$ 比值中, $\Delta X/L$ 採用 1/150 與 1/200 計算所得之 JRC 值合乎 Barton 之標準剖面的 JRC 範圍, 確實可用。為計算方便, 本文選取 $\Delta X/L = 1/200$ 進行 JRC 尺寸效應之分析。

圖三、不同 $\Delta X/L$ 比值對 JRC 大小之影響

2.1.3 JRC 尺寸效應

Barton 標準剖面數位化後, 節理剖面長度只有 10cm, 不足以滿足現場實際採樣尺寸之多樣變化與分析所需。為能進行尺寸效應之研究, 將數位化剖面於橫、縱向同時放大 3 倍, 則其 JRC 值不變, 但尺寸變大, 可模擬現地大尺寸之節理。再切割原始數位化所得之 10cm 長及放大後之 30cm 長的剖面, 以模擬小尺寸節理試體之採樣。剖面切割時, 切割尺寸之考慮, 以接近 NX 岩心尺寸為節理剖面之最小切割長度。依此原則, 將 10cm 剖面切割成兩個 5 cm 之小剖面; 30cm 剖面則分別切割成 6 個 5cm、3 個 10cm 以及 2 個 15cm 長的小剖面。利用不同尺寸的剖面, 進行 JRC 尺寸效應之分析。不同尺寸規模的節理剖面, 其 JRC 值的比較, 係以未切割前剖面之 JRC 值做為比較基準, 探討剖面在切割前後, JRC 值因剖面長度的改變所導致之尺寸效應。

對不同尺寸節理面之 JRC 值的關係, Bandis 等人 (1981) [5] 建議以下式求取:

$$JRC_n / JRC_1 = \bar{\alpha}_n^\circ / \bar{\alpha}_1^\circ \quad (3)$$

式中

JRC_n : 現場岩石節理面之 JRC 值

JRC_1 : 室內試驗岩石節理剖面之 JRC 值

$\bar{\alpha}_n^\circ$: 現場岩石節理剖面之平均正傾斜角

$\bar{\alpha}_1^\circ$: 室內試驗岩石節理剖面之平均正傾斜角

其中 $\bar{\alpha}_n^\circ$ 之求取, 係直接於大尺寸岩石節理剖面上量取。換言之, 除非能取得現場大尺寸岩石節理試體, 否則無法求得 $\bar{\alpha}_n^\circ$ 值。為能直接由小尺寸剖面推估大尺寸節理剖面之角度參數, 而不須進行大尺寸岩

石節理試體之取樣，本文以下述步驟探討 JRC 值因剖面大小的改變所導致之尺寸效應：

1. 定義 $\lambda = L/D$ ， L ：節理剖面總長度， D ：切割後之小剖面長度。
2. 以式 (2) 計算切割後各節理剖面之 JRC 值，再取其平均值，以 JRC_{ave} 表示。此即為小尺寸節理剖面之平均 JRC 值。
3. 以 $\lambda \times \Delta X/L$ 為採樣間距，計算切割後各剖面之 JRC 值，取其平均值，定義為 JRC_λ 。
4. 為能更廣泛與深入探討 JRC 值之尺寸效應，除了式 (3) 所建議之平均正傾斜角外，本研究另採用以下不同的尺寸效應參數進行尺寸效應分析：

- (1) $AVE(i_g)$ ：節理剖面之平均傾斜角。

$$AVE(i_g) = \sum_{m=1}^n (i_{x+m\Delta x}) / n$$

其中， $i_x = \tan^{-1}[(y_{x+\Delta x} - y_x) / \Delta x]$

y_x ：座標 x 處所對應之剖面高度

$y_{x+\Delta x}$ ： $x + \Delta x$ 處所對應之剖面高度

- (2) $AVE(+i_g)$ ：節理剖面之平均正傾斜角，此即式 (3) 中之 $\bar{\alpha}^\circ$ 值。

$$AVE(+i_g) = \sum_{m=1}^n |i_{x+m\Delta x}| / n$$

- (3) $RMS(i_g)$ ：節理剖面傾斜角的均方根值 (Root Mean Square)。

- (4) Z_2 ：剖面一次導數之均方根值。

上述參數，以 $\Delta X/L$ 比值計算得出者，定義為“小尺寸”節理剖面之 JRC 尺寸效應參數，以 $\bar{\alpha}_L^\circ$ 表示；由 $\lambda \times \Delta X/L$ 計算所得者，定義為大尺寸節理剖面之 JRC 尺寸效應參數，以 $\bar{\alpha}_\lambda^\circ$ 表示。

5. JRC 尺寸效應公式

為配合本研究定義 JRC 尺寸效應參數之型式，將式 (3) 重新改寫為

$$JRC_n = JRC_{ave} \times \bar{\alpha}_L^\circ / \bar{\alpha}_\lambda^\circ \quad (4)$$

此外，本研究另行建立 JRC 尺寸效應公式如下：

$$JRC_n = JRC_\lambda \times \bar{\alpha}_\lambda^\circ / \bar{\alpha}_L^\circ \quad (5)$$

以應用 JRC_λ 求取大尺寸節理剖面之 JRC 值。

將 JRC_{ave} ， JRC_λ 及各項尺寸效應參數 $\bar{\alpha}_L^\circ$ 、 $\bar{\alpha}_\lambda^\circ$ ，分別代入式 (4) 及 (5)，即可求得大尺寸節理剖面之 JRC 值。四個數位化標準剖面與切割後由小剖面依尺寸效應公式求出之 JRC 的差值比較，如表一所示。

表一中共含四個標準剖面作成的結果，在 $\Delta X/L$ 欄中，代表其採樣間距，分別為 $1/200$ 及 $\lambda/200$ 。各試驗結果與原 JRC 值比較，表列其 ΔJRC 絕對值的平均值與最大值，分別以 $|\Delta JRC|_{ave}$ 與 $|\Delta JRC|_{max}$ 表示。其中， JRC_{ave} 係採用公式 (2) 計算所得，以後各欄則應用公式 (4) 與式 (5)，分別代入不同尺寸效應參數計算之結果。

綜合四個數位化剖面分別依式 (2)、(4) 與 (5) 之計算結果，檢驗各公式的適用性。其分析結果分別列於表二與表三，以下茲說明 JRC 尺寸效應公式與尺寸效應參數應用上之適用性。

- (1) 小剖面的 JRC_{ave} 、 JRC_λ 與切割前之大尺寸剖面 JRC 值之最大絕對差值 ($|\Delta JRC|_{max}$) 大於 2.0 (Barton 每一個標準粗糙剖面之 JRC 差值範圍)，表示二者皆不宜代表全剖面之 JRC 值。顯示現場取得之小試體的平均 JRC 值，實無法代表節理岩體之粗糙係數。
- (2) $AVE(i_g)$ 不適合做為 JRC 尺寸效應關係式之參數。
- (3) 由表三之數據顯示，對小尺寸剖面計算所得之 JRC_{ave} 及 JRC_λ 取其平均值，可以得到符合原尺寸剖面之 JRC 值。其所產生之誤差， $|\Delta JRC|_{ave}$ 與 $|\Delta JRC|_{max}$ 均小於原 Barton 規劃的 JRC 差值範圍。如此計算方式可提供由小尺寸剖面推估大尺寸節理面之粗糙係數的方法。

2.2 JCS 之尺寸效應

為驗證 JRC 尺寸效應之數值分析結果所需，同時探討 Hoek & Brown (1981) [6] 之單壓強度公式應用於 JCS 效應之適用性，遂進行一系列不同尺寸大小之岩石單壓強度試驗。試驗所採用之岩石試體，係於中橫公路 13k ~ 14k 間 (天冷) 現場鑽取之砂岩岩心 (何敏龍 1990 [7])。試驗結果，發現 Hoek & Brown (1981) 提出的單壓強度關係式非常適合本研究之岩類 (如圖四)，遂引用為本研究 JCS 尺寸效應之關係式，其關係式為

$$\sigma_c = \sigma_{c50} (50/d)^{0.18} \quad (6)$$

表一、尺寸效應公式計算結果與原標準剖面之 JRC 差值比較

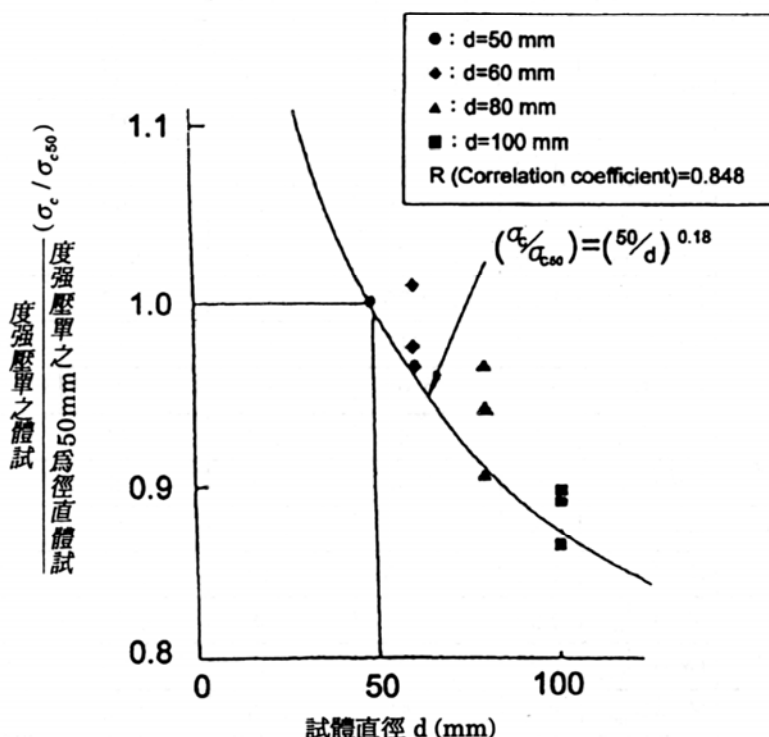
數位化標準剖面之 JRC	$\Delta X / L$	JRC 差值	公式 (2) 計算	剖面尺寸效應參數			
				$AVE(i_g)$	$AVE(+i_g)$	$RMS(i_g)$	Z_2
				公式 (4)、(5) 計算			
7.1	$\frac{1}{200}$	$ \Delta JRC _{ave}$	1.93	2.45	1.08	0.60	0.53
		$ \Delta JRC _{max}$	2.20	7.18	1.50	0.90	0.70
	$\frac{\lambda}{200}$	$ \Delta JRC _{ave}$	0.45	44.68	0.35	0.65	0.88
		$ \Delta JRC _{max}$	1.20	174.70	0.48	0.90	1.20
11.8	$\frac{1}{200}$	$ \Delta JRC _{ave}$	1.53	1.10	0.98	0.80	0.83
		$ \Delta JRC _{max}$	2.00	1.90	1.20	1.60	2.30
	$\frac{\lambda}{200}$	$ \Delta JRC _{ave}$	1.08	1.58	0.90	1.03	1.30
		$ \Delta JRC _{max}$	3.00	3.30	1.88	1.20	1.70
16.0	$\frac{1}{200}$	$ \Delta JRC _{ave}$	1.38	2.53	0.60	0.53	1.00
		$ \Delta JRC _{max}$	1.60	5.00	1.10	0.70	2.38
	$\frac{\lambda}{200}$	$ \Delta JRC _{ave}$	0.98	1.18	0.68	0.70	1.70
		$ \Delta JRC _{max}$	1.80	4.20	0.80	1.20	2.00
18.2	$\frac{1}{200}$	$ \Delta JRC _{ave}$	1.00	40.53	0.45	0.50	1.05
		$ \Delta JRC _{max}$	1.40	160.70	1.30	2.00	2.70
	$\frac{\lambda}{200}$	$ \Delta JRC _{ave}$	0.65	4.83	0.90	0.90	1.43
		$ \Delta JRC _{max}$	2.20	16.60	1.10	1.20	1.80

表二、四組數位化標準剖面與應用尺寸效應公式計算結果之 $|\Delta JRC|_{ave}$ 與 $|\Delta JRC|_{max}$ 值

	JRC 差值	公式 (2) 計算	剖面尺寸效應參數			
			$AVE(i_g)$	$AVE(+i_g)$	$RMS(i_g)$	Z_2
			公式 (4)、(5) 之計算			
小尺寸剖面	$ \Delta JRC _{ave}$	1.46	11.65	0.76	0.61	0.85
	$ \Delta JRC _{max}$	2.20>2.0	160.7>>2.0	1.50<2.0	2.00=2.0	2.70>2.0
λ 倍剖面	$ \Delta JRC _{ave}$	0.79	13.07	0.71	0.82	1.33
	$ \Delta JRC _{max}$	3.00>2.0	174.7>>2.0	1.80<2.0	1.20<2.0	2.00=2.0

表三、四組數位化標準剖面與應用尺寸效應公式計算結果之總平均 $|\Delta JRC|_{ave}$ 與 $|\Delta JRC|_{max}$ 值

總平均 JRC 差值	$\frac{(JRC_{ave} + JRC_{\lambda})}{2}$	剖面尺寸效應參數			
		$AVE(i_g)$	$AVE(+i_g)$	$RMS(i_g)$	Z_2
		公式 (4)、(5) 之計算			
$ \Delta JRC _{ave}$	0.76	10.35	0.71	0.71	0.77
$ \Delta JRC _{max}$	1.15<2.0	83.8>>2.0	1.30<2.0	1.30<2.0	1.25<2.0



圖四、單壓試驗結果與 Hoek & Brown之單壓尺寸效應公式的比較

式中

- σ_{c50} : 直徑 50mm 岩心試體之單壓強度
 σ_c : 其他尺寸試體之單壓強度
 d : 其他尺寸試體之直徑, 單位為 mm

三、試驗工作

3.1 剖面儀組立

為求取岩石節理剖面之粗糙係數, 本研究自行設計製造剖面儀(Profilometer)以進行節理剖面之量測[8]。剖面儀之構造, 主要由下述兩大部份組成:

1. 台座

台座由 50cm × 50cm 及 17cm × 50cm 兩鋼製底座組成。50cm 見方之底座為試體之置放量測區, 適合各種不同尺寸試體之量測工作。並具前進、後退功能以方便進行量測前之定位。50cm × 17cm 底座為安裝步進馬達(Stepping Motor)之用, 底座具升、降功能以適應不同厚度試體之量測。

2. 自動量測系統

由兩台步進馬達、馬達驅動器、馬達控制卡、LVDT、信號處理單元、類比/數位轉換卡等單元組

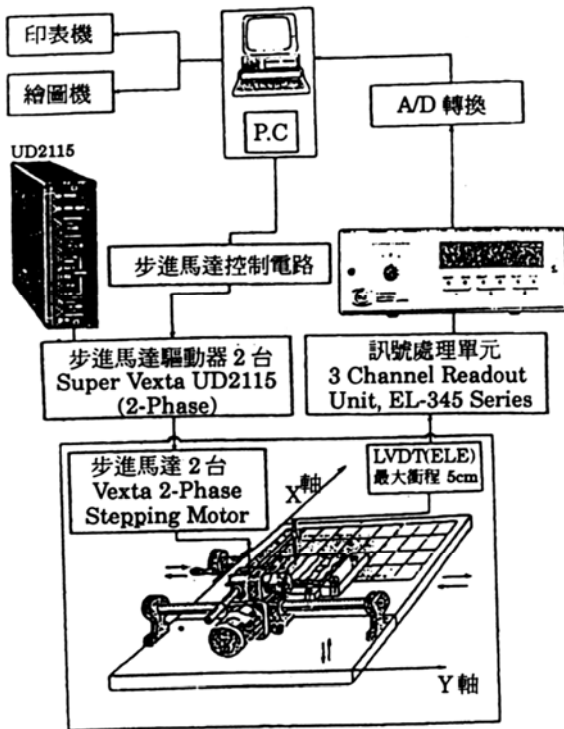
成。剖面儀整體系統架構如圖五所示。量測工作係由電腦操作步進馬達執行自動量測, 並進行自動資料擷取與資料存檔。

3.2 量測工作

由於現場大尺寸節理試體鑽取之不易, 岩石節理試體係以人工劈裂砂岩岩心製造五組節理試體。其尺寸為 10cm × 10cm, 上、下半試體各厚約 5cm。由於自然岩石節理試體, 一經受力試驗, 粗糙度即改變, 不具模型試體之複製性, 因此, 剖面量測時係將 10cm × 10cm 之節理面分成四個量測區(4 × 5cm × 5cm)模擬小節理試體分別進行量測, 以利 JRC 尺寸效應之分析。

3.3 推力試驗 (Push Test)

按 Barton 之研究[2][5], 當節理面所受正應力愈大, 其尖峰剪力強度之尺寸效應愈不顯著, 其原因在於正向應力的大小會影響節理面於受剪時之壓縮、膨脹現象及節瘤(asperity)剪斷行為。但節理面粗糙度為節理面受剪前之初始幾何特性, 在不考慮風化、侵蝕作用及正向應力過大引起之節瘤壓碎情形, 只要節理未受錯動而產生相對位移, JRC 值即不受正向應



圖五、剖面儀組立之系統架構圖

力大小的影響。故本研究以推力試驗(正向應力由岩塊自重提供,節理之壓碎、剪斷情形不嚴重)推求節理試體之 JRC 值,與剖面儀之量測結果作比較。由推力試驗推求節理試體之 JRC 值,可由下式計算:

$$JRC = i / \log_{10}(JCS / \sigma_n)$$

$$i = \tan^{-1}[(F + W \sin \alpha) / W \cos \alpha] - \phi_u \quad (7)$$

式中

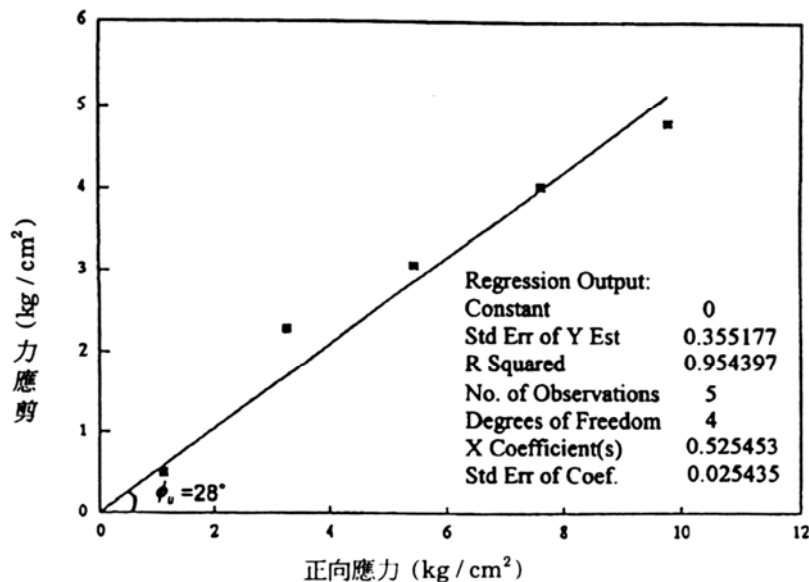
F : 推力

W : 節理試體之上半部試體重

α : 平均節理面與水平面之夾角

ϕ_u : 岩石節理面之基本摩擦角

式中, JCS 之求取係採用與節理試體同一岩心,經切割成 5cm × 5cm × 10cm 尺寸之試體,進行單壓試驗。再應用式(5)求取節理壁之單壓強度。 ϕ_u 之求取,依 Patton(1966)[9], Krahn & Morgensten (1979) [10]等學者之建議,切割完整砂岩岩心(直徑 2.5 英吋)成兩平滑平面,並以砂紙將切割面磨平後進行直接剪力試驗。其試驗結果如圖六所示,由試驗結果,節理面之基本摩擦角等於 28 度。推力試驗之結果詳如表四,與剖面儀量測結果之比較,將可確定數值分析法所建立之 JRC 尺寸效應的適用性,二者之差值比較皆符合原定之規範,確實可行。



圖六、基本摩擦角之直接剪力實驗結果

表四、推力實驗 (Push Test) 之結果

試體編號 (A~E)	JCS (kg/cm ²)	上半部試體重 (kg)	推力 = F (kg)	節理面所受正應力 σ_n (kg/cm ²)	ϕ_u (度)	JRC 值
A	583.94	1.48	4.50	0.0131	28°	9.4
B	594.44	1.55	5.00	0.0141	28°	9.7
C	642.15	1.52	5.00	0.0133	28°	9.6
D	613.14	1.42	4.75	0.0126	28°	9.7
E	555.38	1.46	6.50	0.0146	28°	10.8

四、結論與建議

1. Tse & Cruden(1979)所建議之 JRC 公式，以不同 $\Delta X/L$ 比值，計算節理面之粗糙係數時，所得出之 JRC 值皆不相同。因此，該公式在應用時必須考量採樣間距，否則引起的誤差，可能比標準剖面比對法更大。依本研究結果，以 $\Delta x/L$ 取 $1/150 \sim 1/200$ 所計算出之 JRC 值合乎 Barton 標準剖面的 JRC 範圍。
2. 由於尺寸效應現象之存在，於現場鑽取之小型節理試體，其平均 JRC 值無法代表現地連續節理之粗糙係數。若取其值進行設計，將會高估或低估現地岩石節理面之尖峰剪力強度 (局部採樣，無法涵蓋連續節理中所包含之較平滑與粗糙區)，造成工程安全性之不確定。
3. 應用 Bandis 式 (4) 與本文提出之 JRC 尺寸效應公式 (式 (5))，以 JRC_{ave} 、 JRC_λ 配合 $AVE(i_g)$ 、 $RMS(i_g)$ 、 Z_2 等參數，即可求取不同尺寸節理面之 JRC 值。
4. 由推力試驗與剖面儀量測結果之比較，以 $\Delta X/L = 1/150$ 比值，計算數位化剖面較合乎 Barton 標準粗糙剖面之差值範圍； $\Delta X/L = 1/200$ 比值，由於採樣間距較小，量測結果為 i_2 (Second Order Waviness) 之影響大，與推力試驗結果比較，JRC 差值較偏高。
5. 本文所提出之方法，在觀念上只需進行小尺寸節理試體之剖面量測、節理壁壓力強度試驗及基本摩擦角試驗，即可推估現場節理岩體之剪力強度，而不須進行困難且昂貴的大型試體之取樣與試驗。但實際應用時，應考慮在尺度過大時，所推論的關係不見得能符合外插所求得之值。因此，在進行重要工程規劃時，大型或現地試驗仍然是唯一可靠的方法。此外，小尺寸試體之採樣應儘量保持連續性，以符合本文推導尺寸效應關係式之分析方式，而確保較高之精確性。而 Hoek & Brown (1981) 之單壓強

度公式，對本研究所採用之岩類 (砂岩) 頗適用於不同尺寸之新鮮節理面 JCS 的求取，對於其他岩類及風化節理面，則有待進一步研究。

6. 本研究在 JRC 尺寸效應之力學驗證上，因採天然砂岩以人工劈裂方式製造節理試體，故其 JRC 值只涵蓋特定範圍 (JRC=9.4 ~ 10.8)，且節理試體尺寸僅為 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ，建議進行現地大型節理試體之鑽取或採模型試驗，以進行更廣泛之驗證工作。

參考文獻

- [1] Barton, N. and Bandis, S., "Some Effect of Scale on the Shear Strength of Joints", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 17, pp.69-73 (1980).
- [2] Barton, N. and Choubey, V., "The Strength of Rock Joint in Theory and Practice", Rock Mechanics Vol. 10, pp.1-54(1977).
- [3] Tse, R. and Cruden, D. M., "Estimating Joint Roughness Coefficients", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 16, pp.303-307(1979).
- [4] Yu, X. and Vayssade, B., "Joint Profiles and their roughness Parameters of Rock Joint", Balkema, Rotterdam, ISBN 9-61911095, pp. 781-785(1990).
- [5] Bandis, S., Lumsden, A. C., and Barton, N. R., "Experimental Studies of Scale Effects on the Shear Behaviour of Rock Joints", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 18, pp.1-21(1981).
- [6] Hoek, E. and Brown, E. T., Underground Excavation in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.155-156(1981).
- [7] 何敏龍，「岩石節理面剪力強度參數之尺寸效應」，碩士論文，國立中興大學土木工程研究所，台中 (1990)。

- [8] M. B. Su and M. L. Ho, "An Equipment for studying JRC's scale effect", IV conference of Asian-pacific congress on strength Evaluation, Beijing(1991).
- [9] Patton, F. D., "Multiple Modes of Shear Failure in Rock", Proc. 1st. Congress ISRM, Lisbon, Vol. 1, pp.109-513(1966).
- [10] Krahn, J. and Morgensten, N. R., "The Ultimate Frictional Resistance of Rock Discontinuity", Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, pp.127-133(1979).

論文收稿日期：85 年 9 月 30 日

論文修訂日期：86 年 2 月 1 日

論文接受日期：86 年 2 月 18 日