

## 技術講座專欄

# 3. 工程地質中之材料因素

洪如江\*

## 一、前言

在工程地質問題之中，最受注意的是岩石裂面 (Discontinuities) 或弱面 (Weak Planes)。自然界的岩盤，由於地質作用而產生的許多種地質構造，層面、斷層、節理等弱面，幾乎在大多數的重大岩石工程中都可能遭遇到。但是對於岩石裂面之重視與強調，不應導致對岩石材料之忽視。在某些情況下，岩石材料之性質，也有決定性影響。最典型的一個實例是美國 St. Francis 壩之崩潰。該壩右壩基岩石材料浸水之後產生大量氣泡，迅即消散為碎屑及泥漿，導致大壩破壞之災。

就地質師的觀點來看，岩石材料的重要性質是：產因、產狀、礦物組成、組構、異向性等等。但就工程師的觀點來看，岩石材料的重要性質是：強度、變形性、透水性、風化性、韌性、切削的難易性等等。事實上，二者所重視者，並非毫無關連。例如，對於礦物組成的瞭解，可能估計出岩石材料的強度。但是，不同的岩石材料，可能有不同的決定性因素，必須靠工作者就個案加以判斷，以科學方法加以求證。

國際岩石力學學會 (以下簡稱 ISRM) 列出岩石材料試驗之項目，計為：含水量、孔隙率、密度、吸水性、膨脹性、消散耐久性、硬度、抗磨耗性、傳波速度，以及岩石學描述等。ISRM 建議之岩石材料試驗項目，可作為分類之用，也可以指示出岩石的重要工程性質。本文所討論的岩石材料性質，其重點在於說明材料性質對岩石工程或力學性質

之作用或影響，尤其注重地質與工程之關連。

按地質學與岩石力學之區分，完全是人為的，在工程地質學逐漸走向量化的今天，往年純粹屬於岩石力學研究分析的項目，也逐漸進入工程地質學討論與調查的範圍；而一些地質學的項目也為岩石力學學者所重視。將地質學與岩石力學充分整合，以應土木工程及探礦工程之需，是雙方共同努力的長程目標，希望有一天，工地的工程師們與地質師使用完全相同語言、調查試驗工具與方法。在目前，設法使地質調查結果與岩石工程性質建立計量性關連，是一個可行的初步做法。這種做法，如能有效，可節省許多時間與經費，並且使工程師們對他們所面臨的基礎、邊坡或隧道的岩盤，具有基本的、自然科學的瞭解；而地質師也因工程而能看到更多挖開的岩層。在這種精神之下，本文擇要報告了一些以往學者的研究成果，當然，也包括了一部分臺大土木系岩石力學試驗室的貢獻。

## 二、礦物摩擦力受水份之影響

Terzaghi 在他著名的 Mechanism of Landslides (1950) 一文中，曾經談到：每次暴雨而引起坍方時，大多數地質師及工程師都歸因於水份滲入地中，「潤滑作用」使剪阻力減小。Terzaghi 認為「潤滑作用」一說難以令他接受，理由有二：

1. 水對許多常見物質，例如石英，具「反潤滑」作用。他早在 1925 年就指出乾燥石英表面之摩擦係數在 0.17 至 0.20 之間；濕石英表面之摩擦

\* 國立臺灣大學土木工程學系教授。

係數在 0.36 至 0.41 之間。

2. 潤滑劑之潤滑作用，只需要極薄之薄膜，就足以產生潤滑作用，大量增加潤滑劑用量並不能增進潤滑效果。而大部份濕地，所含水量，早已超過潤滑土粒表面所需者。

但是，暴雨造成坍方却是事實，應如何解釋？Terzaghi (1950) 以坡地中壓力水面 (Piezometric Surface) 之上升以及孔水壓力之增加造成土壤剪阻力之減小加以解釋。

Terzaghi (1950) 之解釋雖然令人口服，但是他本人心中却未完全釋然。他在美國伊利諾大學兼課期間，有博士班學生 H. M. Horn 找不到合適博士論文題目，他建議從事各種礦物之摩擦試驗，尤其注重乾濕摩擦面的分別。

H. M. Horn 之試驗，導致英國 Geotechnique 雜誌出現了一篇「礦物之摩擦特性」的文章 (Horn & Deere, 1962)。其結論是：塊狀礦物在乾燥時之摩擦阻力小於潮濕時之摩擦阻力；頁狀礦物浸水之後摩擦阻力減小。各種礦物在乾濕狀況下的摩擦係數各如表一所示。

表一 各種礦物之摩擦係數  $f$  (Horn & Deere, 1962)

塊狀礦物	$f$ 飽和	$f$ 乾	靜摩擦 $f$ 飽和/ $f$ 乾	動摩擦 $f$ 飽和/ $f$ 乾
透明石英	0.42	0.11	3.82	2.30
乳白石英	0.51	0.14	3.64	2.91
玫瑰石英	0.45	0.13	3.45	2.36
長石 A	0.76	0.11	6.90	6.90
長石 B	0.77	0.12	6.42	6.42
方解石(N.S.)	0.68	0.14	4.85	4.85
層狀礦物				
白雲母(Penna)	0.23	0.43	0.54	0.54
白雲母(巴西)	0.22	0.41	0.54	0.54
白雲母	0.26	0.45	0.58	0.58
金雲母(Mada.)	0.15	0.31	0.48	0.48
金雲母(加拿大)	0.16	0.29	0.55	0.53
黑雲母(加拿大)	0.13	0.31	0.42	0.42
綠泥石	0.22	0.53	0.42	0.42
蛇紋石 (Vermont)	0.26	0.62	0.47	0.42
塊滑石	0.23	0.38	0.61	0.50
滑石	0.16	0.36	0.45	0.45

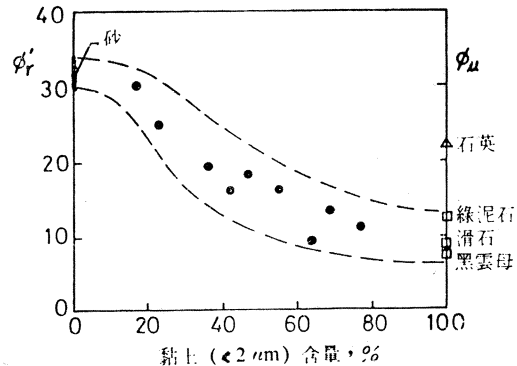
註。  $f = \tan \phi$ 。  $\phi_u$  = 礦物面之摩擦角

黏土礦物多是頁狀礦物，浸水之後，摩擦阻力降低。因此，水對黏土礦物的確是潤滑劑。而頁岩、泥岩材料本身、岩石裂縫中所含之泥縫 (Seam)，以及一般細粒土層，都含有黏土礦物，雨水浸濕之後，自然因潤滑作用而易於發生坍方。因此，水庫開始蓄水之時，若兩岸岩石含頁狀礦物，就應注意坍方問題，其中，水的潤滑作用是許多項因素中重要的一項。

### 三、礦物成分對地質材料力學性質之影響

#### 3.1 黏土含量之影響

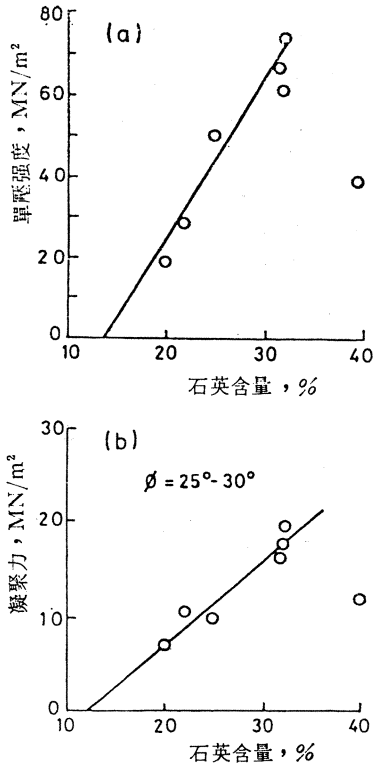
Skempton (1964) 在研究邊坡長期穩定性問題之時，發現土壤及弱岩中黏土含量 (<0.002 mm 者) 對其剩餘摩擦角有相當大的影響，示如圖一。圖中， $\phi'_r$  為有效剩餘摩擦角， $\phi_u$  為礦物基本摩擦角。石英礦物基本摩擦角約 22°；而石英質為主之砂土，其剩餘摩擦角則達 30°~35°。綠泥石、滑石、及黑雲母之礦物基本摩擦角則甚低，其值亦與 Horn & Deere (1962) 試驗結果 (表一) 相符。



圖一 黏土含量對土壤及弱岩摩擦角之影響 (Skempton, 1964)

#### 3.2 石英含量對岩石強度之影響

Smart *et al.* (1982)，研究煤系岩石之物理特性時，發現石英含量愈多之岩石，其強度亦愈高，示如圖二。圖二(a)為單壓強度與石英含量之關係；圖二(b)為三軸壓力試驗所求得之凝聚力與石英含量之關係。在其所有三軸試驗之結果，摩擦角皆在 25° 至 30° 之間，變化不大，故以凝聚力為變數，示於圖二(b)。以工程觀點而言，石英含量之測定，不論在採樣、試體修裁、或試驗方面，皆遠比強度試驗迅速且費用低廉。但須注意者，圖二之數值可能各地不同，未可逕行套用。



圖二 石英含量對岩石強度影響之例  
(a)單壓試驗, (b)三軸試驗  
(資料來源: Smart *et al.*, 1982)

### 3.3 黏土產狀對土壤強度及邊坡穩定之影響

Blong & Pain (1978) 在研究新幾內亞 (New Guinea) Papua 地區之邊坡穩定問題時, 發現火山灰質之黏土, 其剪力強度常高於同等塑性之沉積黏土, 並且, 坡面角常大於  $27^\circ$ 。二氏並統計世界各地火山質土壤之摩擦角如表二所示:

Blong & Pain (1978) 將所研究地區之表土按產狀分為三大類, 並調查自然坡地之安定坡面角, 如表三所示。

## 四、風化程度對岩石力學性質之影響

### 4.1 引言

岩石材料之風化, 對岩石力學性質有不利影響, 在工程也常造成災害, 諸如坍方、隧道落磐、基礎沉陷等等。在工程作業上, 常以噴漿來防止易於風化之弱岩。但是到處噴漿, 不但在費用上難於負擔, 而且也有失美觀, 造成視覺上污染。

因特殊個案而定出風化分級標準者, Knill & Jones (1965) 曾為 Roseires、Kariba 及 Latiyan

表二 火山質土壤之摩擦角及黏土礦物  
(Blong & Pain, 1978)

地點	$\phi, ^\circ$	$\phi'$ (或 $\phi$ )	黏土礦物
爪哇	39°	—	A
	39°	—	A
	25°	—	H
	35°	—	H
	31°~38°	—	A+H
紐西蘭	37°	—	A+H
義大利	—	(30°~40°)	?
墨西哥	—	43°	A
	—	47°	A
新幾內亞	38°	—	A+H
	29°	—	A+H

註: A為水鋁英石 (ALLOPHANE)  
H為和樂土 (HALLOYSITE)

表三 坡地土壤產狀與坡面角之關係  
(Blong & Pain, 1978)

類別	坡地土壤產狀	安定坡面角	
		正常	高限
1	第四紀火山土, 集塊岩質及火山角礫質土層	25°~35°	40°~45°
	石灰質崩積土	25°~35°	—
2	第三紀火山土, 雜砂岩質, 弱粉岩質及砂岩質土層	12°~20°	30°
	第四紀沖積土	<10°	—
3	黏土質頁岩, 脆弱泥岩	<6°	—
	第四紀湖積土 (黏土及粉泥)	2°~3°	—

壩。Ward *et al.* (1968) 曾為英國白堊土; Chandler (1969) 以及 Meigh (1976) 曾為英國三疊紀岩石; Lumb (1952) 曾為香港花崗岩, 建立有效分級標準。

至於一般性的風化分級, Iliev (1966) 提出以超音波測定岩心傳波速度, 以計算岩石材料之風化係數  $K$ :

$$K = (v_0 - v_w) / v_0$$

式中,  $v_0$  為新鮮岩心 (未風化岩石材料) 之傳波速度

$v_w$  為已風化岩心之傳波速度

完全未風化岩石材料之  $K=0$ ；完全風化之岩石  $K=1$ 。Iliev (1966) 並以之定保加利亞二長石 (Monzonite) 之風化分級如下：

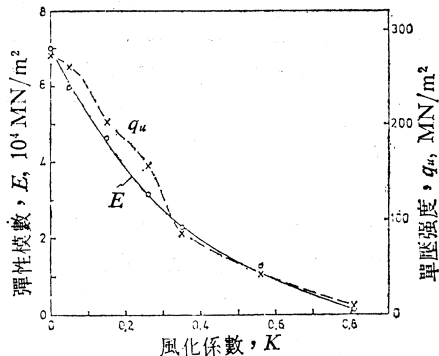
風化程度	傳波速度 $v$ m/s	風化係數 $K$
新鮮	>5000	0
輕微風化	5000-4000	0-0.2
中度風化	4000-3000	0.2-0.4
高度風化	3000-2000	0.4-0.6
極度風化	<2000	0.6-1.0

Ramana & Gogte (1982) 提出了用風化物質百分比 (Decomposed Product, 簡稱為 DP) 作為風化程度之指標。二氏所謂之風化物質 (DP) 係指岩石風化後新產生之黏土礦物。風化程度愈高者, 岩石材料內原有礦物保留下來的也愈少而新產生的黏土礦物比例也愈高。

採用 DP 值作為風化程度之指標, 優點在於無需規則性岩心, 節省不少採樣、鑛探時間及費用; 至於分析與試驗室工作, 也是 DP 之決定較省。

#### 4.2 風化程度對花崗岩力學性質之影響

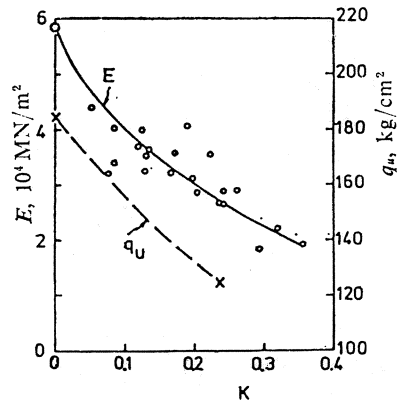
Irfan & Dearman (1978) 報告了英國 Hingston Down 花崗岩的材料性質, 包括指數性質、傳波速度、以及多種力學性, 並且以統計方法建立互相間的關係。二氏所試岩石材料, 自完全新鮮者到完全風化者, 一應俱全, 最適宜以傳波速度計算不同風化程度岩石材料之風化係數  $K$ , 並以之顯示風化程度對岩石材料力學性質之影響, 如圖三所示。由圖可見風化使強度及變形模數下降之明顯趨勢。二氏原文所報告之力學性質尚有岩石材質之透水係數及動態彈性模數等。當風化係數  $K=0.15$  時,



圖三 岩石強度及彈性模數與風化係數之關係, 英國 Hingston Down 花崗岩 (Irfan & Dearman, 1978)

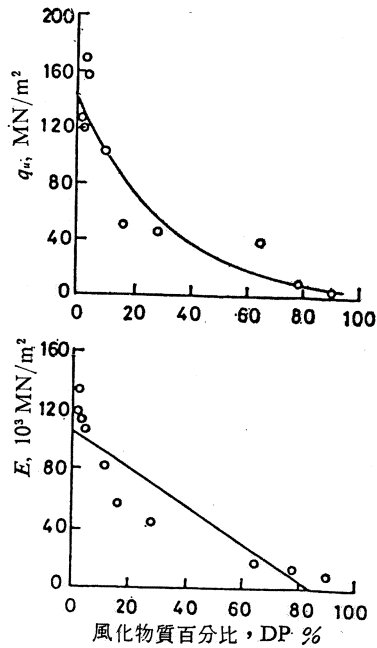
透水係數為  $10^{-8} \sim 10^{-10}$  cm/sec;  $K=0.6$  時, 透水係數為  $10^{-9}$  cm/sec;  $K=0.81$  時, 透水係數為  $10^{-7}$  cm/sec;  $K=0.84$  時, 透水係數為  $10^{-6}$  cm/sec, 可見風化使花崗岩材質趨向於較易透水。

Balakrishna *et al.* (1980) 報告了印度 Kalyani 壩址花崗岩之風化分級及力學性質。筆者以 Iliev (1966) 公式計算出風化係數  $K$ , 並繪出  $K$  值與力學性質之關係曲線, 如圖四所示。

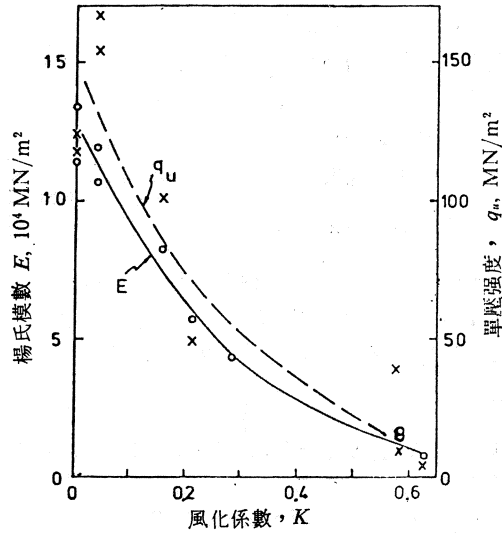


圖四 岩石強度及彈性模數與風化係數之關係, 印度 Kalyani 壩址花崗岩 (Irfan & Dearman, 1978)

Ramana & Gogte (1982) 報告了印度 Porthimund 壩址一種紫蘇花崗岩 (Charnockites) 之風化分析及力學性質。二氏對不同風化程度之岩石, 進行詳細之礦物學分析, 定出岩石中各種未風化礦物之百分比。在抗風化之耐久性方面, 石英 (Quartz) 最為堅強, 其他者依次為石榴石 (Garnet)、輝石 (Pyroxene)、磁鐵礦 (Magnetite)、微斜長石 (Microcline)、正常石 (Orthoclase)、斜長石 (Plagioclase)、黑雲母 (Biotite)。風化物質為黏土礦物 (Clay Minerals)。二氏並繪製風化物質百分比 (% Decomposed Product) DP 對單壓強度  $q_u$ 、楊氏模數  $E$  等之關係曲線, 如圖五所示。由圖可見風化物質百分比愈大者 (未風化物質當然就愈少) 強度及楊氏模數愈是降低。二氏也曾測得岩石材料  $P$  波之傳波速度  $v_p$ , 最新鮮岩石材料 (DP=1%) 之  $v_p=6630$  m/s; 最風化者 (DP=89%) 之  $v_p=2480$  m/sec。筆者以 Iliev (1966) 公式計算風化係數並繪製  $K-q_u$  及  $K-E$  曲線, 示如圖六, 同樣可以看出風化係數大者, 強度及楊氏模數下降之情形。



圖五 岩石單壓強度及楊氏模數與風化物質百分比之關係 (印度 Porthimund 壩址紫蘇花崗岩 Ramana & Gogte, 1982)



圖六 岩石強度及楊氏模數與風化係數之關係 (印度 Porthimund 壩址紫蘇花崗岩)

4.3 風化程度對泥岩材料剪力強度之影響

Chandler (1969) 在研究英國三疊紀岩石 Keuper Marl (泥岩為主，偶含粉岩及石膏質材料)，根據 Skempton & Davis (1966) 未公開發表意見，將其風化程度分為四級，如表四所示。

Chandler (1969) 之研究結果顯示，風化程度愈高則密度下降，含水量增多，塑性增高，黏土粒含量增多，剪力強度亦下降。茲以表五顯示風化程度對 Keuper Marl 剪力強度之影響。

表四 Keuper Marl (泥岩) 之風化分級 (Chandler, 1969)

風化程度	風化分級	說	明
完全風化	IVb	只有基質 (土壤)	
部份風化	IVa	基質偶含岩粒，粒徑小於 3.2 mm，大部份在粗砂粒之大小	
	III	基質含岩塊至 25 mm 大小岩塊少稜角	
	II	多角狀未風化岩塊，幾乎不含基質	
未風化	I	泥岩 (常見微裂)	

表五 不同風化等級 Keuper Marl (泥岩) 之剪力強度與透水係數 (Chandler, 1969)

風化等級	I	III	IV
$c'$ (psi)	$\geq 4$	$\leq 2.5$	$\leq 2.5$
$\phi'$ (度)	$\geq 40$	42~32	32~25
$\phi_r'$ (度)	32~23	29~22	24~18
$\epsilon_{1f}$ (%)	$\leq 3$	3~6	6~15
$A_f$	負值	0~0.2	$\geq 0.2$
$(d\epsilon_v/d\epsilon)_f$	$\geq 0.5$	0.1~0.5	$\leq 0.1$
$(\tau_{max} - \tau_r)/\tau_{max}$	$> 55\%$	55~30%	35~20%
$k$ , (cm/sec)	—	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-8}$

4.4 風化程度對岩石變形性之影響

Meigh (1976) 在研究英國三疊紀 (Trias) 岩石之時，發現岩石變形模數有隨深度增大之趨勢，在風化帶中以及在未風化帶中，皆有類似情形，但風化帶中岩石之變形模數則遠低於未風化帶中者。Meigh (1976) 提出下一關係式：

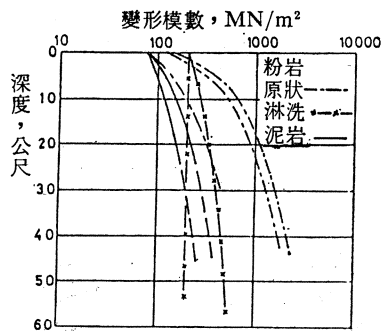
$$E = E_0 + K_z \cdot z$$

式中， $E$  為某一岩層表面之變形模數， $z$  為深度，自所論岩層表面起算， $K_z$  為單位深度增加量之變形模數增加量。根據 Meigh (1976) 之研究，摘要如表六。

表六 風化程度對變形模數之影響 (Meigh, 1976)

岩石	風化程度	$E_0, \text{MN/m}^2$	$k_z, \text{MN/m}^3$
泥岩	未風化或風化輕微帶中	75	4~12
	風化帶中	0~4	4~12
粉岩	未風化或風化輕微帶中	75~200	0~50
	風化帶中	4~5	2.5~4
砂岩	未風化或風化輕微帶中	500~3,500	0~80

未風化或風化輕微帶中之粉岩，如受淋洗 (Leaching) 作用者，其變形模數降低不少，示於圖七。圖中亦比較粉岩與泥岩之差異。



圖七 變形模數受岩石種類及深度影響之例 (英國三疊紀未風化至輕微風化者，Meigh, 1976)

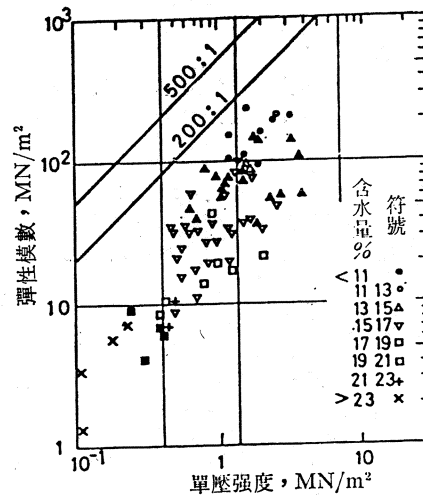
Meigh (1976) 又研究粉質泥岩至泥質石灰岩中，風化程度對變形模數之影響，變形模數與風化程度之關係如下：

風化程度	變形模數 $\text{MN/m}^2$
完全風化	—
高度風化	50
中度風化	200
輕度風化	1000
未風化	3000

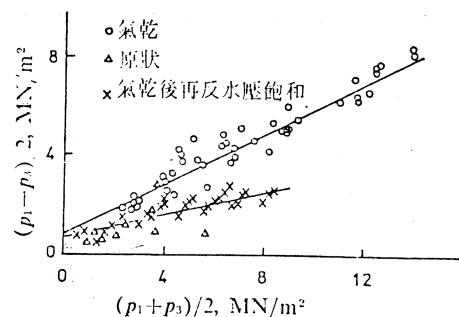
五、含水量對岩石材料力學性質之影響

臺大土木系岩石力學試驗室曾研究含水量對臺灣地區一些岩石力學性質之影響 (Lin & Hung, 1982)，茲擇要加以報告。

圖八示泥岩單壓強度及彈性模數隨含水量之增加而下降之情形。圖九示含水量影響泥岩三軸壓力強度之情形。



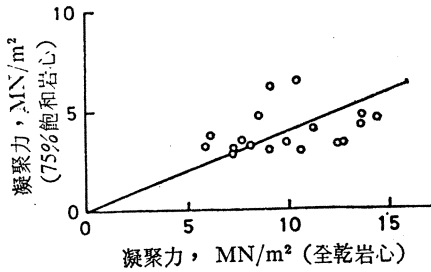
圖八 泥岩 (原狀) 單壓強度及彈性模數受含水量影響之情形 (資料來源：臺大土木系岩石力學試驗室)



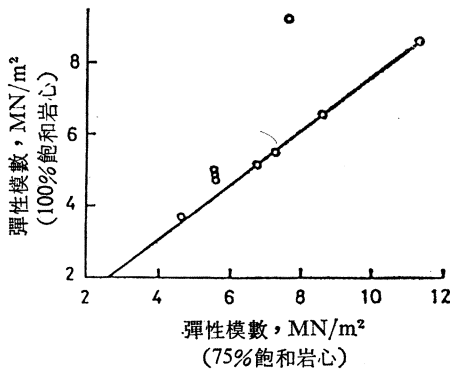
圖九 泥岩剪力強度受含水量情況之影響 (資料來源：臺大土木系岩石力學試驗室)

圖十、十一，分別示雜砂岩凝聚力與彈性模數因飽和度之增加而下降之情形。

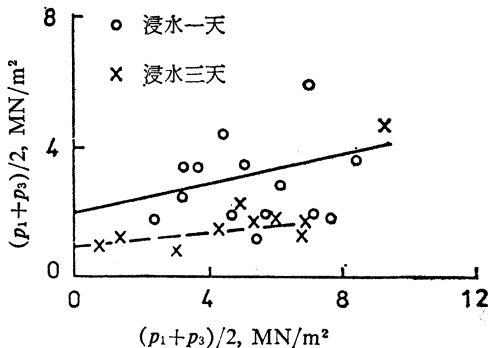
臺灣地區，頁岩分佈甚廣，也常因雨而發生不穩定之情況，最有名的一個案例是草嶺大崩山。草嶺大崩山之滑動面於頁岩層之表面附近。經採取原狀岩樣，辦理三軸壓力試驗，發現草嶺頁岩之剪力強度，確實會因浸水日數之增加而下降，如圖十二所示。



圖十 雜砂岩凝聚力受 75%飽和之影響



圖十一 雜砂岩彈性模數受飽和度之影響

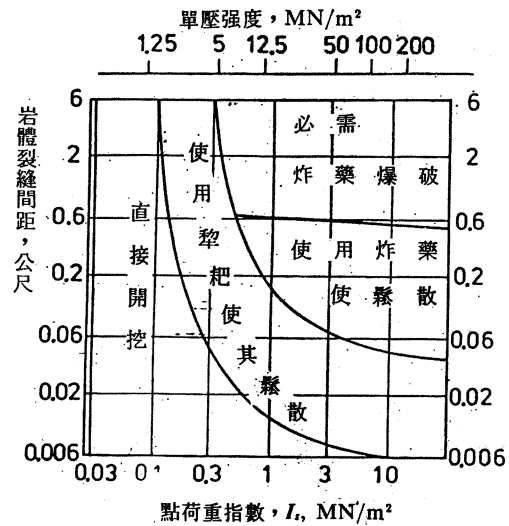


圖十二 草嶺頁岩受浸水時間之影響  
(資料來源：臺大土木工程系岩石力學試驗室)

## 六、岩石材料性質對岩體開挖工程之影響

岩石材料之硬度影響到開挖機械雙口之需求與消耗，岩石含硬度高之礦物，開挖機械雙口及鑽頭之硬度亦須提高，雙口及鑽頭之消耗也大，工期也會加長。

岩石材料之強度也影響到岩體開挖方法之不同，如圖十三所示，在相同岩體裂縫間距之情況下，材料強度低者以推土機鏟刀直接開挖即可；強度中等者使用裂石器（Ripper 或譯犁耙）造成岩體鬆散後再用鏟刀開挖之；强度高者需使用炸藥爆破或使其鬆散再用鏟刀開挖之。



圖十三 岩體開挖方法受岩石材料強度及裂縫間距之影響  
(Geol. Soc. London, 1970)

有些岩石，硬度及強度皆不高，但韌度 (Toughness) 高，開挖時，難於造成碎塊或裂片，致進度甚為緩慢。但有關岩石韌度之資料尚少，有待進一步研究。

## 七、結 論

有些岩石，層理不發達，例如泥岩、雜砂岩、及部份花崗岩，其岩體工程性質或力學性質受到其材料性質的控制。有些岩石，層理發達，例如頁岩及片岩，雖然層間摩擦阻力低，但若浸水，材料強度及壓縮性轉劣甚於裂面，致一旦有破壞，材料先於裂面。凡此，岩石材料性質之現況及變化，皆應予以重視。

一些堅硬岩石而裂理發達者，例如板岩、節理