

## 技術講座專欄

# 陸 工程地質之計量化及其應用

## A Quantitative Approach in Engineering Geology and Its Application

洪 如 江\*

### 一、前 言

由於工程規模之日趨龐大，工程地質的功效與重要性，日趨顯著，不但在增進工程安全上有其貢獻，而且在節省經費、縮短工期與減少災害方面，也有重大作用。但工程地質在國內似乎尚未發揮其應有功能，原因大致有：

1. 地質師與土木工程師使用不同的專業語言，難於溝通。地質師常使用描述性語言而土木工程師則慣用數字性的文字，計算的輸入 (Input) 與輸出 (Output) 都要是數字。舉例而言，若地質報告只說某一砂岩為「厚層、堅硬」者，大部份土木工程師都難了解，土木工程師一定要知道所謂厚層，究竟是幾公尺？所謂堅硬，究竟強度是每平方公分幾公斤？而愈沒有工地經驗的資淺工程師，愈是只會從事計算、玩弄數字，而難於體會任何工程作業，除了計算與數字之外，還有許多非計算、非數字的事情。假使說地質學家不使用數字性的文字，也非事實，只不過兩方面（地質師與土木工程師）所使用的尺度常有差別。以時間而言，地質時間與工程時間就常常有很大差異。筆者認為，兩方面都沒有錯，只是「言語不通」罷了，土木工程師看不懂地質報告，地質師也難於發現設計書缺乏考慮重要的地質因素。

2. 土木工程師缺乏地質學智識。原因是我國

大專土木系課程，工程地質學的學分（2至3學分）太少，在職訓練也缺乏機會，因此難體認地質的重要而高喊電腦萬能。但筆者也常聽到一些工程地質師談到，愈有豐富工地經驗之土木工程師愈重視工程地質工作，而純坐辦公廳的工程師（俗稱 Armchair Engineer）或剛出校門的工程師則不太重視工程地質工作。

3. 地質師缺乏土木工程經驗。不明白工程的重點何在，不明白土木水利工程作業的程序與各階段所要求的精度不同。舉例而言，土木工程師在設計時，所需要的地質圖及地質剖面圖的比例尺是百分之一 (1/100) 或二百分之一 (1/200) 者，五百分之一者已經是精度很差的了；但是地質報告中地質圖的比例尺常見者為千分之一甚至萬分之一者，作為可行性分析或規劃之用，尚嫌精度略有不足或僅僅勉強可用。

4. 國家常備地形圖、地質圖不足。對一切土木水利工程計畫而言，第一重要的基本資料是地形圖，第二重要的基本資料是地質圖，而且在不同的作業階段，需要不同精度（比例尺）者。我國常備地形圖，只有五萬分之一者 (1/50,000) 是完全的，二萬五千分之一者及五千分之一者尚未完全；常備地質圖，五萬分之一者尚未完全。在這種情況之下，某一工程地質師奉命從事某一工程計畫的工程地

\* 國立臺灣大學土木工程學系教授

質調查工作之時，只有利用現有地形圖以作為其工程地質圖的底圖，若是比例尺太小，那就要看工程計畫中能否自行補測、自行製備大比例尺的地形圖了。

5. 中央政府階層，尚無工程部，因此工程作業與工址調查準則，尚無統一之準則。每一土木水利工程計畫，是否從事工程地質調查與分析？調查程序與精度如何？調查研判報告之製作與格式如何？尚無一定標準，全視工程計畫主持人而異，差別極大。有些工程負責人，過份自信，完全排除工程地質工作，造成不少地質災變。有時，同一地區的許多工程，分由許多機構辦理，重複調查者有之，皆不調查者亦有之，已有調查而無法將已有資料交由後繼工程使用者更多，因某一工程暫告結束，工程人員轉移他處，甚至工程作業單位亦已不存在，已有資料散失，經驗難有整體之累積。

## 二、工程地質量化的途徑

地質學的範圍很廣，並非所有地質資料都與工程有關。為了工程目的，只要取得足夠的有關地質資料即可。並且，因工程的不同、工程作業階段的不同，所需要的地質資料的種類及精密度也不一樣。有關工址調查的精度及程度，可參考洪如江（民國七十年）一文。至於各種工程工址調查之重點，可參考洪如江（民國七十二年四月，本刊第二期）一文。但應注意的是：該二文所討論者為一般情形。有一些特殊情形，究竟那一種地質資料（或因素）是某一工址的決定性因素，並非易於判定，常需相當智識與智慧才能捉到重點。

在某些較為單純的岩坡問題裏，例如含單一弱面的岩坡滑動、含雙弱面之楔形破壞、或是簡單的翻倒破壞，只要岩石材料的剪力強度遠大於弱面的剪力強度，則所需要的地質資料，不外是：弱面的方位、坡面的方位、地下水位的高程、以及弱面的剪力強度參數（摩擦角 $\phi$ 與凝聚力 $c$ ）。當然，弱面的剪力強度，已經是岩石力學的範圍，常需辦理弱面的直接剪力試驗，才能求到。但是，若是地質調查可以指出弱面的粗糙度，則可以由過去的經驗，大致估計 $\phi$ 值。如上述資料完整確實，即可應用立體投影法（或逐漸成熟之電腦圖學）以從事穩定性分析。不過，資料完整已經不易，欲求確實更難，尤其是水位的變化及摩擦角的數值，對岩坡穩定

度甚為敏感。

在許多隧道開挖及支保工、拱壩基礎（包括壩翼）、以及各種岩石基礎的剪力強度與變形性問題，情形就更複雜得多，有關的因素很多，在這種情況之下，每一因素的影響力各多大？是很費推敲的。

各方學者的意見也不很一致，例如 Müller (1970) 只考慮了岩石材料的強度及弱面的間距二因素，就要決定岩體的摩擦角及凝聚力；美國伊利諾大學的 Deere (1964)、Cecil (1970) 及 Merritt (1972) 等氏，則以岩石品質指標 (RQD) 逕行與隧道支保設計發生關係；南非之 Bieniawski (1973, 1974, 1976, 1979) 則考慮了岩石材料強度、RQD、弱面間距、弱面狀況、地下水狀況、及弱面方位等六因素，而計算岩體評分 (Rock Mass Rating, 簡稱 RMR)，並由試驗及經驗建立 RMR 與岩體力學性質（例如變形性或強度）或隧道開挖、支保方法之關係；挪威之 Barton et al. (1974) 則考慮了 RQD、弱面組數、弱面粗糙狀況、弱面品質、弱面內水流情形、及應力影響因素等六因素，而算得岩體品質  $Q$ ，再由經驗建立  $Q$  與隧道荷重、支保工範疇之關係；美國的 Wickham et al. (1974)，考慮了岩石之地質分類（火成岩、變質岩、沉積岩）、地質構造、滲水情形、弱面品質、弱面間距、弱面方位與隧道前進方向等六個地質因素與一個工程因素，而估算岩體構造評分 (Rock Structure Rating, 簡稱 RSR)，再由經驗建立 RSR 與隧道荷重或支保工設計之關係；日本池田和彥 (1972) 考慮了岩性（分 A, B, C, D, E, F 等六級）及岩體之傳波速度二因素，建立岩體分等，再由經驗建立各等岩體與隧道設計及施工準則。

上述 Bieniawski (1972) 之 RMR 法、Barton 之  $Q$  法、Wickham 之 RSR 法、以及池田和彥方法，通稱為岩體分類法 (Rock Mass Classification)。各家之岩體分類方法雖不相同，但考慮之因素則大同小異（日本池田和彥方法例外），因此，我們可以把各種不同方法中所考慮的地質因素、環境因素、及工程因素都找出來，在任何一個工程計畫中，只要把這些因素都調查或試驗出來，則不論用那一種分類方法都可以。這些因素，不論調查之時，不論其記錄是描述性的或是數量性的，最後都要轉換成計量性的數字，就各種地質因素而言，就是一種工程地質的計量化。

筆者認為在目前情況之下，工程地質的計量化

，採用岩體分類法，最為可行，工程先進國家，已相當普遍。國內，由筆者（洪如江，民國六十一年）首次介紹之後，研究者日增，亦曾試用，其結果尚令人滿意。

### 三、工程地質有關因素的描述與評估

#### 3.1 有關因素

工程地質的有關因素，包括地質材料、地質構造、環境因素、及工程因素四大類，針對上述 Bieniawski、Barton 與 Wickham 等三個岩體分類法，四大類因素的細目大致如下：

##### 3.1.1 地質材料因素

- (1) 岩石材料之地質類別
- (2) 地質材料之顏色
- (3) 岩石材料成份之粒度
- (4) 地質材料之強度（單壓強度及張力強度）
- (5) 岩石材料之風化狀況

##### 3.1.2 地質構造因素

- (1) 弱面（相當於一般岩石力學所稱之節理、裂縫）方位
- (2) 弱面間距
- (3) 弱面持續性
- (4) 弱面粗糙度
- (5) 弱面品質：指風化、腐朽程度
- (6) 弱面內寬
- (7) 弱面（裂縫）內軟弱夾心的狀況
- (8) 弱面組數
- (9) RQD
- (10) 地質構造概況

##### 3.1.3 環境因素

- (1) 大地應力
- (2) 地下水或弱面滲水情形
- (3) 地表下深度

##### 3.1.4 工程因素

- (1) 工程規模
- (2) 隧道軸向及開挖前進方向

工程地質有關因素，未必限於上述各小項，上列者主要是為三個岩體分類法考慮之要項。

#### 3.2 各有關因素之描述與評估方法之發展

以往的地質報告都記錄了許多地質資料，有些與工程有關，有些無關；對地質材料或構造的描述，雖有一般習慣，但出入也很大，甚至在分類上

也不很一致。1977 年，英國倫敦地質學會（The Geological Society, London，簡稱 GSL）工程組（Engineering Group）的岩體描述工作小組（Working Party on the Description of Rock Masses for Engineering Purposes）發表了其岩體描述研究報告，主要內容包含了岩石材料描述、岩體描述、分類試驗之技術、數據之求法、記錄與報告方法等（工程地質季刊十卷四期，即 Q. JI' Engng. Geol. 1977, Vol. 10, pp. 355-358）。隨後，國際岩石力學學會（ISRM）也公佈了岩體內弱面計量描述之建議方法（Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses）。Bieniawski 於 1979 年調整其岩體評分法中之評分標準以配合 ISRM 描述標準。

#### 3.3 地質材料因素之描述與評估

##### 3.3.1 岩石材料之地質類別

倫敦地質學會（GSL）將岩石材料分成 55 類，如表 1 所示。每類皆以雙位數之編號，個位數示其在縱座標（成份粒度）位置；十位數示其在橫座標（產狀）位置。此一分類，在目前可供 Wickham 氏 RSR 法之用。

##### 3.3.2 地質材料顏色

顏色之標準，可使用美國地質學會之土壤標準顏色圖（1963）。

GSL 將岩石材料顏色以三位數字表示之，個位數示主要顏色，十位數示次要顏色，百位數區分深、淺：

1 淺	1 粉紅	1 粉紅色
2 深	2 紅	2 紅色
	3 黃	3 黃色
	4 棕	4 棕色
	5 橄欖	5 橄欖色
	6 綠	6 綠色
	7 藍	7 藍色
	8 灰	8 白色
		9 灰色
		0 黑色

##### 3.3.2 岩石材料成分之粒度

GSL 採用一般土壤粒度標準：

表一 岩石材料類別 (倫敦地質學會)

成因分類		硬屑沉層	岩層	火成碎屑物	化學岩	變質岩	火成岩	岩層
一般構造	構造	硬屑沉層	岩層	火成碎屑物	化學岩	變質岩	火成岩	岩層
成粒級	分	岩粒、石英、長石或其他礦物	至少50%之顆粒為碳酸質	至少50%之顆粒為細粒火山岩	石英、長石、雲母、針狀深色礦物	淺色礦物：石英、長石、雲母、類長石礦物	酸性岩石、中性岩石	深色礦物
極粗粒	60	顆粒本身為岩石碎塊或碎粒	灰質礫岩 (21)	集塊岩(31) (圓形)	混合岩(51)	偉晶岩(81)	輝石岩(01) 及 橄欖石(02)	輝石岩(01) 及 橄欖石(02)
粗粒	2	礫岩(10), 圓型 角礫岩(11), 角狀	灰質砂岩 (22)	火山碎屑 (32) (角狀)	片麻岩(52) 大理岩(62)	閃長石 (82)	輝長石 (92)	輝長石 (92)
中粒		砂岩：顆粒本身為礦物 石英質(12)：95%砂岩、石英，孔隙含膠結物或空白 長石砂岩(13)：75%石英，長石占25%以下，孔隙含膠結物或空白 泥質砂岩(14)：75%石英，15%細屑	石 灰 岩 (20)	硬石膏(42) 石膏(43)	片岩(53)	微閃長石 (83)	粗粒玄武岩 (93)	粗粒玄武岩 (93)
細粒	0.06	泥岩(15) 頁岩(16)：易裂泥岩 粉岩(17)：50%以上為細粒 黏土岩(18)：50%以上為極細粒	灰質粉岩 (23) 灰質泥岩 (24)	凝灰岩(33) 細粒凝灰岩 (34)	千枚岩(54)	流紋岩 (73)	安山岩 (84)	安山岩 (84)
極細粒	0.002	灰質泥岩(19)	極細粒凝灰岩(35)	燧石(44)	板岩(55)	磨爛岩(56)	玄武岩 (94)	玄武岩 (94)
玻璃質				其他(47)		黑曜岩 (74)	松脂岩 (85)	玄武玻璃 (95)

名稱	粒徑
極粗粒	>60 mm
粗粒	2 mm~60 mm
中粒	60 $\mu\text{m}$ ~2 mm
細粒	2 $\mu\text{m}$ ~60 $\mu\text{m}$
極細粒	<2 $\mu\text{m}$

### 3.3.4 凝聚性地質材料之強度

ISRM 將凝聚性土壤及 岩石材料之強度分成 13 級。按理，地質材料之強度宜以力學試驗求之，但由地質師所從事之地質調查，以不使用任何儀器而可在野外利用地質師必備的地質錘及小刀鑑定之即可。下列者 S1 至 S6 為黏土分級，R0 至 R6 為岩石分級，各級後括號內之數字（由 <0.025 至 >250）為材料之單壓強度概值範圍以 MPa 為單位，其後為描述性稱呼，最後為地質師鑑定方法。

- S1 (<0.025) 甚軟黏土：手掌易於插入
- S2 (0.025~0.05) 軟黏土：大拇指易插入
- S3 (0.05~0.10) 實黏土：大拇指用力可插入
- S4 (0.10~0.25) 硬黏土：大拇指易於壓出凹痕但難插入
- S5 (0.25~0.50) 甚硬黏土：大拇指甲難於壓出凹痕
- S6 (>0.50) 堅硬黏土：大拇指甲難於壓出凹痕
- R0 (0.25~1.0) 極弱岩石：大拇指甲僅略能壓出凹痕
- R1 (1.0~5.0) 甚弱岩石：可以地質錘細端敲碎；可以小刀切削之
- R2 (5.0~25) 弱岩：小刀難於切削；地質錘細端敲出淺痕
- R3 (25~50) 中強岩石：小刀無法切削；地質錘敲擊一次可裂
- R4 (50~100) 強岩：地質錘敲擊一次以上始裂
- R5 (100~250) 甚強岩石：地質錘敲擊多次始裂
- R6 (>250) 極強岩石：地質錘猛敲僅見小碎片跳出，極難於敲裂

上表中所謂黏土，包括黏土、沉泥質黏土、或黏土與沉泥及砂的混合物。以地質錘敲擊岩石，係以手持標本之大小為準，而非直接敲擊岩盤。

至於岩石材料之張力強度，若缺乏試驗資料，

可取單壓強度的 15 分之 1。

ISRM 原來將上述 S1 至 S6 及 R0 至 R6 之強度分級，用於描述弱面岩壁之材料強度。

### 3.3.5 岩石材料之風化狀況

岩石材料之風化狀況，已在洪如江（民七十二年七月，地工技術雜誌第 3 期）之「工程地質中之材料因素」一文中加討論。如採用「風化係數」作為風化之指標，則需辦理岩心之傳波速度的測試。若該文之各種描述、評估方法並不合用，讀者自可發展任何合用之方法。

ISRM 將弱面（裂縫）內壁岩石材料之風化狀況分為新鮮（未風化）、輕度變色、中度變色、高度變色、分解、及分散等六級。

## 3.4 地質構造因素之描述與評估

### 3.4.1~3.4.9 岩石弱面之描述與評估

弱面，其位置及方位、間距、持續性、粗糙度、內寬、軟弱夾心、滲水情形、組數、以及 RQD 等因素之描述與評估，請見洪如江（民國七十二年十月）發表於地工技術雜誌第 4 期之「岩體中之弱面」一文。

軟弱夾心之強度，如缺乏力學試驗，可由地質師或工程師在工地以手掌或指甲插壓估定之，如本文 §3.2.5 中所述之 S1 至 S6 者。

此外，弱面風化腐朽情況，ISRM 分為新鮮、輕度變色、中度變色、高度變色、分解、及分散等六級，已如前述。

### 3.4.10 地質構造概況

RSR 岩體分類法中，將岩體中之地質構造簡單分成：厚層、輕度斷層或褶皺、中度斷層或褶皺、高度斷層或褶皺等四類，此四類構造之相對優劣比較大致為 4:3:2:1。

## 3.5 環境因素之描述與評估

### 3.5.1 大地應力

大地應力，宜實際量測之，若缺乏實測數據，或可假設大地應力之最大值  $\sigma_1$  為鉛直地壓力 ( $\gamma z$ ) 之 1.5 倍或 1.0 倍。式中， $\gamma$  為地質材料之單位重，約 2.7 T/m<sup>3</sup>， $z$  為深度。

### 3.5.2 地下水或弱面滲水情形

弱面滲水情形，可參閱洪如江（民國七十二年十月）「岩體中之弱面」一文。在 RMR 岩體分類法中建議二種方法，一種是量水壓，以「水壓/ $\sigma_1$ 」

比值表示之；另一種方法是量 10 m 長隧道每分鐘漏水多少公升 (ℓ)。

3.5.3 地表下深度

通常指隧道在山頂下多少公尺深處。

3.6 工程因素之描述與評估

3.6.1 工程規模

通常指隧道跨度，荷重影響面積或體積。

3.6.2 隧道軸向及開挖前進方向

在 RSR 法之中，考慮隧道方位與弱面方位之相互影響。

四、工程地質計量化方法之一：  
岩體分類法

如前所述，工程地質有關的因素很多，將之逐

項描述評估之後，即可套用於前述三種岩體分類法，茲分別說明如下。

4.1 南非 Bieniawski 之 RMR 法

南非 CSIR 之 Bieniawski 氏自1973年發展出所謂地質力學分類法 (Geomechanics Classification System) 以來，經多次修正，以 1979 年版者最新，主要根據六項因素，分別評分，評分總和為「岩體評分」(Rock Mass Rating, 簡寫為 RMR)，其評分標準概略為：岩石材料強度 0 至 +15 分；RQD+3 至 +20 分；弱面間距 (原稱節理) +5 至 +20 分；弱面狀況 0 至 +30 分；地下水情形 0 至 +15 分；弱面方位 -12 至 -60 分。其評分細節示於表 2 及表 3。

由於 RMR 可用於基礎、岩坡、及隧道等各

表二 Bieniawski (1979) 地質力學分類法評分標準

1	岩料 石強 材度	點荷重指數	>10 MPa	4~10 MPa	2~4 MPa	1~2 MPa	以單壓強度為準		
		單壓強度 MPa	>250	100~20	50~100	25~50	5~25	1~5	<1
	評	分	+15	+12	+7	+4	+2	+1	0
2	RQD		90~100	75~90	50~75	25~10	<25		
	評	分	+20	+17	+13	+8	+3		
3	弱面間距		>2 m	0.6~2 m	200~600 mm	60~200 mm	<60 mm		
	評	分	+20	+15	+10	+8	+5		
4	弱面狀況		不連續， 緊閉， 岩壁甚粗糙堅硬	內寬 <1 mm 岩壁略粗糙堅硬	內寬 <1 mm 岩壁略粗糙軟弱	連續， 擦痕或 泥 <5 mm 或 內寬 1~5 mm	連續， 泥 >5 mm 或 內寬 >5 mm		
	評	分	+30	+25	+20	+10	0		
5	地下 水情 況	流量/10 m 隧道	0	<10 ℓ/min	<25 ℓ/min	25~125 ℓ/min	>125 ℓ/min		
		弱面水壓/ $\sigma_1$	0	0	0~0.2	0.2~0.5	>0.5		
		一般滲水情況	全乾	潮	濕	滴水	流水		
評	分	+15	+10	+7	+4	0			
6	弱面方位 (走向、傾角)		很有利	有利	可	不利	很不利		
	評 分	隧道	0	-2	-5	-10	-12		
		基礎	0	-2	-7	-15	-25		
		岩坡	0	-5	-25	-50	-60		

表三 Bieniawski (1976) 地質力學分類法中，有關弱面方位有利於或不利於隧道之評估方法

弱面走向垂直隧道軸向				弱面走向平行隧道軸向		任何弱面走向
隧道前進方向相同於弱面傾向		隧道前進方向逆於弱面傾向				
弱		面		傾		角
45°~90°	20°~45°	45°~90°	20°~45°	45°~90°	20°~45°	0°~20°
很有利	有利	可	不利	很不利	可	不利

方面，並且尚非十分複雜，故流行最廣。尤其可經由 RMR 求岩體之力學性質，因此優於其他只適用於隧道開挖及支保工設計者。

4.2 挪威 Barton 之岩體品質 (Q) 法

4.2.1 引言

挪威地工技術研究所 (Norwegian Geotechnical Institute) 之 Barton, Lien 及 Lunde (1974) 三氏，為隧道支保設計之需，發展出一套岩體品質法，將岩體以 Q 值作為分類標準，而 Q 值則由下式表示之：

$$Q = (RQD/J_n) \cdot (J_r/J_a) \cdot (J_w/SRF)$$

式中，RQD=岩石品質指標，即每一m岩心中，長度超過10 cm 者所佔之%

J<sub>n</sub>=弱面組數之評分，

J<sub>r</sub>=弱面粗糙度評分

J<sub>a</sub>=弱面品質（風化、腐朽情形）之評分

J<sub>w</sub>=弱面滲水情形之評分

SRF=應力影響因素之評分

4.2.2 評分標準

4.2.2.1 RQD 岩石品質指標

說明	RQD
A 惡劣	0~25
B 劣	25~50
C 可	50~75
D 良	75~90
E 優	90~100

- 註：(1)若實測 RQD ≤ 10, 甚至為 0, 皆用 10。
- (2) RQD 之間距以 5 即可，例如 100, 95, 90 等。
- (3)若無 RQD 資料，則用 RQD=115-

3.3 J<sub>v</sub>，J<sub>v</sub>=每 m<sup>3</sup> 岩體中弱面之數目，但 RQD ≤ 100。

4.2.2.2 弱面組數 (J<sub>n</sub>)

	J <sub>n</sub>
A 厚岩層，無或少弱面	0.5~1.0
B 一組弱面	2
C 一組弱面+偶現弱面	3
D 二組弱面	4
E 二組弱面+偶現弱面	6
F 三組弱面	9
G 三組弱面+偶現弱面	12
H 四或更多組弱面，豆腐塊狀	15
J 粉碎岩石，似土	20
註：隧道岔口用 3×J <sub>n</sub> ，隧道口用	2

4.2.2.3 弱面粗糙 (J<sub>r</sub>)

- (a)弱面兩面保持接觸，或
- (b)剪動若不超過 10 cm，則兩壁保持接觸者
  - A. 弱面連續 4
  - B. 波浪狀，但粗糙不規則 3
  - C. 波浪狀，但光滑 2
  - D. 波浪狀，但曾經滑動 1.5
  - E. 平面狀，但粗糙不規則 1.5
  - F. 平面狀，但光滑 1.0
  - G. 平面狀，但具擦痕 0.5
- (c)剪動時，兩壁不接觸者
  - H. 含厚黏土，防碍兩壁接觸 1.0
  - I. 含砂、礫、碎石，阻碍兩壁接觸 1.0

- 註：(1)若主要一組弱面之平均間距大於 3 m，則加 1。
- (2)若弱面呈平面狀、含擦痕，具有利方位之線理者，用 J<sub>r</sub>=0.5。

4.2.2.4 弱面品質 (風化、腐朽情形)	$(J_a)$	$\phi_r$
(a)弱面兩壁保持接觸者		
A. 接觸面緊閉、強硬、夾心主要為石英或綠簾石	0.75	(—)
B. 兩壁未腐污，僅表面受染污	1.0	(25°~35°)
C. 兩壁風化輕微。不軟化礦物塗料、砂粒、崩解岩石 (不含黏土)	2.0	(25°~30°)
D. 粉質或砂質塗料、黏土微量 (不軟化)	3.0	(20°~25°)
E. 軟化或低摩擦力黏土礦物塗料，例如高嶺石、雲母。又綠泥石、滑石、石膏、石墨等，小量膨脹性黏土 (不連續塗料，厚 1~2 mm，或更薄)。	4.0	(8°~16°)
(b)剪動若不超過 10 cm，則兩壁岩石保持接觸者		
F. 砂粒，崩解岩石 (不含黏土) 等	4.0	(25°~30°)
G. 高度過份壓密不軟化黏土礦物夾心 (連續，厚度 <5 mm)	8.0	(12°~24°)
H. 中度或低度過份壓密軟化黏土夾心 (連續，厚度 <5 mm)	8.0	(6°~12°)
J. 膨脹性黏土 (蒙脫石) 夾心，連續，(厚度 <5 mm)。 $J_a$ 值依膨脹性黏土成分之%、及接觸水份之情況而定	8.0~12.0	(12°~16°)
(c)剪動時，兩壁岩石不接觸者		
K, L, M 含碎石及黏土 (情況見 G, H, J)	6.0~8.0	(6°~24°)
N 含粉質或砂質黏土，小量黏土成分 (不軟化)	8.0~12.0	
O, P, R 含厚，連續黏土 (情況見 G, H, J)	10.0~13.0	(6°~24°)
	13.0~20.0	

註： $\phi_r$  值之出入，與腐朽產物之礦物性質有近似關係。

4.2.2.5 弱面滲水折減因素	$(J_w)$	水壓 kg/cm <sup>2</sup>
A. 乾挖，冒水量小，<5 l/min (限於局部)	1.0	<1
B. 冒水量中等，水壓偶爾將弱面夾心冲出	0.66	1.0~2.5
C. 優良岩石含無夾心弱面，冒水量大，水壓高	0.5	2.5~10.0
D. 冒水量極大，水壓高，弱面夾心冲出相當多	0.33	2.5~10.0
E. 隧道開炸時冒水量極大或水壓甚高，但逐漸減小	0.2~0.1	>10.0
F. 冒水量極大但水壓甚高，持續不變	0.1~0.05	>10.0

註：(1)C與F之估計較為粗略，如有排水設施， $J_w$  略為提高。

(2)未考慮冰凍影響。

4.2.2.6 應力影響因素	SRF
(a)軟弱夾層與開挖交叉，隧道開挖時岩盤可能鬆動者	
A. 軟弱夾層多道，且含黏土或化學作用所分解之岩石，週圍岩石鬆動 (任何深度)	10.0
B. 軟弱夾層一道，且含黏土或化學分解之岩石 (開挖深度 ≤50 mm)	5.0
C. 軟弱夾層一道，含黏土或化學分解岩石 (深度 >50 mm)	2.5
D. 優良岩石 (無黏土) 含多道剪動帶，周圍岩石鬆動 (任何深度)	7.5
E. 優良岩石 (無黏土) 含一道剪動帶 (深度 ≤50 m)	5.0
F. 優良岩石 (無黏土) 含一道剪動帶 (深度 >50 m)	2.5



G. 鬆動開口弱面，高度破裂，岩石成小方體，等等（任何深度）			5.0
(b)優良岩石，岩石應力問題存在者			
	$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_1/\sigma_1$	SRF
H. 近地表，應力低	>200	>13	2.5
J. 壓力中等	200~10	13~0.66	1.0
K. 應力高，構造甚緊	10~5	0.66~0.33	0.5~2.0
L. 中等岩爆（厚層岩石）	5~2.5	0.33~0.16	5~10
M. 強裂岩爆（厚層岩石）	<2.5	<0.16	10~20
(c)擠壓性岩盤，不堅實岩盤受高岩石壓力影響之塑性流動者			
N. 溫和擠壓性			5~10
O. 高度擠壓性			10~20
(d)膨脹性岩石；因水而生膨脹者			
P. 溫和膨脹岩石壓力			5~10
R. 高度膨脹岩石壓力			10~15

### 4.3 美國 Wickham 之岩石構造評分 (RSR) 法

#### 4.3.1 引言

美國礦務局 (US Bureau of Mines)，受美國高級研究計劃組織 (Advanced Research Projects Agency) 之補助，委託 Jacobs Associates 顧問公司，分析美國 53 個隧道之 200 斷面（總長約 200 哩）建立「岩石構造評分法 (Rock Structure Rating)」，以供估計隧道之荷重與設計隧道之支保 (Wickham, et al, 1974)。

此一方法，考慮了一般地質評分（參數 A），弱面方位與隧道方向（參數 B），以及漏水與弱面品質之評分（參數 C）等三大項。而

$$RSR=A+B+C$$

#### 4.3.2 評分標準

##### 4.3.2.1 一般地質評分（參數 A）

岩石種類	地質構造			
	厚層	輕度斷層或褶皺	中度斷層或褶皺	高度斷層或褶皺
第一類岩石	30	22	15	9
第二類岩石	27	20	13	8
第三類岩石	24	18	12	7
第四類岩石	19	15	10	6

	岩石種類			
	堅硬	中等	軟弱	分解
火成岩	第一類	第一類	第三類	第四類
變質岩	第二類	第二類	第三類	第四類
沉積岩	第三類	第三類	第四類	第四類

4.3.2.2 漏水與弱面品質之評分(參數 C)

預測漏水情形	A + B = 13 → 44			A + B = 45 → 75		
	弱面品質					
	良	可	劣	良	可	劣
無	22	18	12	25	22	18
微量 (<200 gpm)	19	15	9	23	19	14
中等 (200~1000 gpm)	15	11	7	21	16	12
嚴重 (>1000 gpm)	10	8	6	18	14	10

弱面品質：良：緊閉或膠合；可：輕度風化或腐朽；  
劣：嚴重風化、腐朽、或張開

4.3.2.3 弱面方位與隧道方向之評分(參數 B)

弱面密度	弱面間距 (吋)	弱面走向上隧道軸向						弱面走向/隧道軸向		
		隧道前進方向						隧道前進方向		
		與弱面傾向相同			與弱面傾向相反					
		主要弱面之傾角						主要弱面之傾角		
		平	傾	斜	垂	直	傾	料	垂	直
1. 很密	3	9	11	13	10	12	9	9	7	
2. 密	3	14	16	19	15	17	14	14	11	
3. 中等	6	23	24	28	19	22	23	23	19	
4. 中等至塊狀	12	30	32	36	25	28	30	28	24	
5. 塊狀至厚層	24	36	38	40	33	35	36	34	28	
6. 厚層	48	40	43	45	37	40	40	38	34	

註：弱面之傾角：平=0~20°；傾斜=25°~50°；垂直=50°~90°

4.4 各種岩體分類法之關係

各種岩體分類法所考慮之工程地質有關因素不全相同。經 Bieniawski (1976)、Rutledge et al. (1978) 等之研究，各分類制之間的關係式如下：

$$RMR = 9 \log_e Q + 44$$

$$RMR = 13.5 \log Q + 43$$

$$RSR = 0.77 RMR + 12.4$$

$$RSR = 13.3 \log Q + 46.5$$

五、工程地質計算化之應用

5.1 由岩體分類求岩體之變形模數

根據 Bieniawski (1978) 之研究，含多弱面之岩體，其變形模數  $E_M$  與 RMR 之關係式為：

$$E_M = 2 RMR - 100$$

由於 RMR 與  $Q$  值已建立關係，故由  $Q$  值一樣

可求得岩體之變形模數。圖一示 RMR 及  $Q$  與岩體變形模數之統計。

5.2 由岩體分類求岩體之剪力強度

根據 Bieniawski (1979) 之研究，已知 RMR 即可得知岩體之剪力強度，如圖二所示。

Hoek & Brown (1981) 曾提出其岩體剪力公式如下：

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} + (m\sigma_c\sigma_{3f} + S\sigma_c^2)^{1/2}$$

式中， $\sigma_{1f}$  = 岩朽破壞時之最大主應力

$\sigma_{3f}$  = 岩石破壞時之最小主應力

$\sigma_c$  = 岩石材料之單壓強度

$m, S$  為二常數，因岩性及受力作用前破裂之程度而異

Hoek & Brown (1981) 建立岩體分類與  $m, S$  之

關係，如圖三所示。

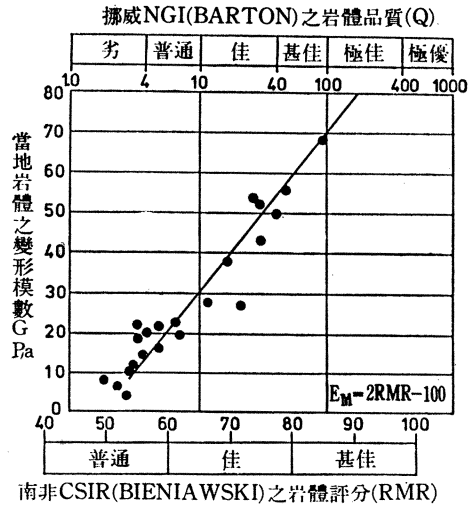
5.3 由岩體分類求隧道荷重、開挖方法、及支保設計

請參考財團法人臺灣營建研究中心（民國七十二年）研究報告 TR7203：現代隧道工程技術之研究——岩體分類法在隧道工程之應用。

六、後 語

2. 工程地質工作是要服務工程作業用的，其有關因素的計量化，不但有必要而且也可行。

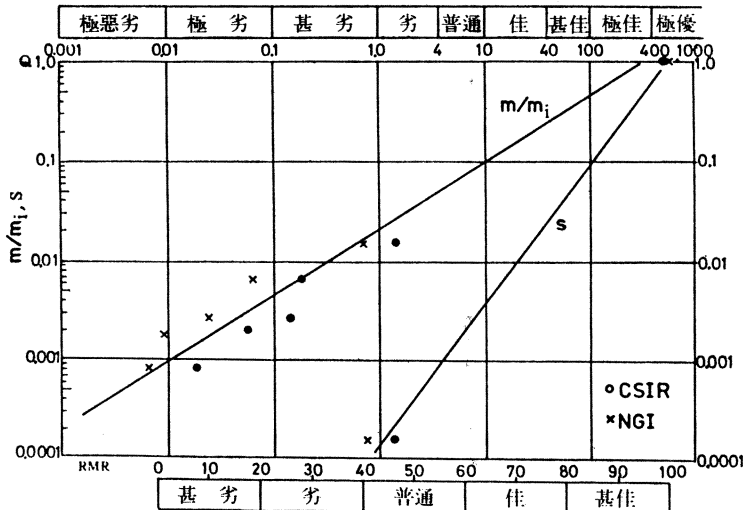
1. 工程地質計量化的發展，至目前為止，主要考慮地質材料、弱面、少數環境因素、少數工程因素，尚有繼續發展改進之餘地。地質材料方面也以岩石材料為主，純粹土壤方面，可能須由土壤力學家與地層學家合作，發展出軟地工程地質學。



圖一 以岩體分類估計岩體變形模數  $E_m$ ，(Bieniawski, 1978)

級	I	II	III	IV	V
評 語	甚佳	佳	中等	劣	甚劣
評 分, RMR	100~81	80~61	60~41	40~21	<20
隧道免支保時間、跨度	10年, 15 m	6月, 8 m	1週, 5 m	10小時, 2.5 m	30分鐘, 1 m
岩體凝聚力, $c$	>400 KPa	300~400 KPa	200~300 KPa	100~200 KPa	<100 KPa
岩體摩擦角, $\phi$	>45°	35°~45°	25°~35°	15°~25°	<15°

圖二 Bieniawski (1979) 地質力學分類法中，分類等級、總岩體評分 (RMR) 及概略工程性質



圖三 Panguna 安山岩  $m, S$  值與岩體分類之關係 (Hoek & Brown, 1981)  
( $m_i$  為完整岩石，即岩石材料之  $m$  值)

3. 本文所介紹之各種地質因素描述與評估結果，已足供三種岩體分類法之應用。而岩體分類之結果，應用且廣，本文第五節所報告者，僅其開端。

4. 工程地質計量化之途徑，不必限於岩體分類法；其他方法，有待繼續發展。任何新方法，宜注意其在他國之適用性而不可獨善其身或閉關自守。

### 參 考 文 獻

- 洪如江 (1977) 「工程地質之應用」，土壤與基礎工程研討會論文專集，中國土木水利學會。
- 洪如江 (1981) 「大型土木水利工程作業與工址調查之程序」，土木水利八卷二期，頁 27~31。
- 洪如江 (1983) 「工程地質學導論」，地工技術雜誌第一期，頁 67~70。
- 「各種工程工址調查重點」，地工技術雜誌第二期，頁 106~108。
- 「工程地質中之材料因素」，地工技術雜誌第四期，頁 109~116。
- 「岩體中的弱面」，地工技術雜誌第四期，頁 111~118。
- 池田和彥 (1972) 「隧道之物理探查」，物理探礦 25 卷 6 號，頁 48~62。
- BARTON, N., LIEN, R. and LUND, J. (1974) "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support", *NGI Publication No. 106*.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1973) "Engineering Classification of Jointed Rock Masses", *The Civil Engineer in South Africa*.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1974) "Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling", *Proc. 3rd Cong. Intl. Soc. Rock Mech.*, Denver, Vol. 2A: 27-32.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1976) "Rock Mass Classification in Rock Engineering", *Proc. Symp. Expl. Rock Engg.*, Johannesburg, 1: 97-106.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1978) "Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories", *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sc.* 15: 237-247.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1979) "The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications", *Proc. Intl. Cong. Rock Mech. Montreux* 2: 40-48.
- CECIL, O. S. (1970), DEERE, D. U. (1964), MERRITT, A. H. (1972) 等之文獻，請參閱 HOEK & BROWN "Underground Excavation in Rock" (1980). Geol. Soc. London (1977) "The Description of Rock Masses for Engineering Purposes", *Q. J. Engg. Geol.*, 10:4: 355-388.
- HOEK, E. and BROWN, E. T. (1980) *Underground Excavations in Rocks*, IMM, London.
- I. S. R. M. (1978) "Suggested Methods for the Quantitative Descriptions in Rock Masses", *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sc.* 15:6: 319-368.
- RUTLEDGE, T. C. and PRESTON, R. L. (1978) "New Zealand Experience with Engineering Classification of Rock for the Prediction of Tunnel Support", *Proc. Intl. Tunnel. Symp. Tokyo*, pp. A3-1-7.
- WICKHAM, G. E., TIEDEMANN, H. R. and SKINNER, E. H. (1974) "Ground Support Prediction Model (RSR Concept)", *Proc. 2nd Rapid Exc. & Tunneling Conf.*, AIME N. Y., pp. 691-707.