

技術講座專欄

1. 工程地質學導論

洪如江*

1.1 引論

土木工程，在於彌塑地球以適合人類的生活。開運河、挖隧道，是一種彌刻工作；築長城、建大壩，是一種塑造工作。

開山機、鑽岩機、以及炸藥等等，是土木工程師的彌刻工具；運土車、夯土機、以及混凝土施工機械，就是塑造工具。

彌塑地球，必然與地質學發生關係。但地質學的範圍極廣，並非全部與土木工程有關。與土木工程有關的地質學知識，稱為工程地質學 (Engineering Geology)。而與土木工程有關的地質問題，稱為工程地質。至於與地質有直接而密切關係的土木工程，稱為地質工程 (Geological Engineering)，例如隧道工程、採石工程、岩坡工程、壩基工程……等等。

地質學與土木工程學的分科，本是人為的。科學的問題，不論工程地質學或地質工程學，都需要地質師與土木工程師的共同努力。

有些地質師與工程師，認為岩石才是地質材料；其實，土壤及水都算是地質材料。

岩石經風化作用之後變為土壤或土壤及岩屑之混合物。此種土壤或土壤及岩屑之混合物，經侵蝕作用而離開產地，經搬運作用而到遠地，再經壓密作用而成沉積岩。岩石或土壤深埋之後，可能熔為岩漿。岩漿經火山噴出或侵入其他地盤之中，成為火成岩。沉積岩及火成岩，若受高溫或高壓，而成為變質岩。沉積岩、火成岩及變質岩，皆能經風化作

用變為土壤；而土壤亦能由壓密作用而成岩。地球上岩石與土壤間之地質循環，永遠不停。在此地質循環中，既然不只岩石參加作用而尚有土壤及水，則土壤及水自然也算是地質材料。

1.2 工程地質之原理

岩石、土壤、及水，皆為地質材料 (Geologic Materials)。

我們了解了岩石、土壤、及水的性質，距離了解工程地質還很遙遠。考慮了地質構造的影響以後，才能了解岩體 (Rock Mass) 性質或土體 (Soil Mass) 性質。

岩體或土體，受到環境的作用，例如地質應力，孔隙與地下水、及風化等，就構成種種不同的地質條件 (Geologic Conditions)。

工程地質，須考慮地質條件及工程條件。

由上可知，工程地質必需考慮到地質材料、地質構造、環境、及工程。而所謂工程，指工程結構物以及建造工程結構物的施工，尤其是開挖、排水等等。

地質條件固然影響到工程，但是工程也對地質條件有影響。工程地質不單由地質條件決定，也不單由工程決定。

工程地質問題，固然希望能用科學智識加以解答，但因涉及工程問題，必有技術的成份。談到技術，除了科學因素之外，必定還有工程地質師的：

素養

* 國立臺灣大學工學院土木工程學系教授

經驗 判斷

這些「人的因素」。

由於處理工程地質問題的方式不同，結果也可能有：卓越成功、平平成功、與失敗等幾種情形。因此，從事個案分析，可以瞭解問題的真相、處理方式、成敗原因……等等，以增進經驗。因此，個案分析，是工程地質學中最重要的方法之一。

1.3 工程地質學的興起

土木工程學與地質學的發展都很早，土木工程、採礦工程的發展更早。歷史上許多重大的工程建設，必定應用到地質學的智識。但工程地質學之成為一門有系統的學科，却為時不久。茲按時間次序舉出幾個重大事件，說明近代工程地質學之興起。

1922 奧地利人 Stini 著 *Technische Geologie*

1925 奧地利人德在基氏 (Terzaghi) 著 *Erdbaumechanik*，土壤力學誕生。這是第一本對地質材料之一，土壤，作有系統的計量研究，而且直接應用於土木工程實務的著作。

1928 美國 St. Francis 壩破壞，工程地質學開始受到土木工程師的注意。在此之前，工程地質學只受到採礦工程師的注意。

1929 奧地利人 Redlich-Terzaghi-Kampe 著 *Ingenieur Geologie*

1930 年代 美國 TVA 計劃中，歐洲阿爾必思山區的隧道及山坡地開發工作中，工程地質學的應用很廣，訓練出不少工程地質師。

1936 第一屆國際土壤力學與基礎工程會議在美國劍橋舉行。*Geotechnique* 季刊在英國創刊。

1950 美國成立工程地質師學會。國際工程師協會成立。

1957 法國人 Talobre 著 *La Méthode Des Roches*，為第一本岩石力學之書。

1957 美國 Krynine & Judd 著 *Principle of Engineering Geology & Geotechnics*。

1957 英國工程地質學教育開始走向計量化，大學部地質系工程地質學課程，除了基本學科、地質學、工程地質學等課外，特別注重土壤力學、岩石力學、及基礎工程。假期中並需在工地實習。

1959 法國 Malpasset 拱壩崩潰，400 多人死亡。主要原因在於左壩基楔形岩石受滲水作用而滑

出。自此，岩石力學受土木工程界注意。

1963 意大利 Vajont 水庫發生巨大岩體滑落水庫之中，水庫之水溢過拱壩 (265.5 m) 約 150 m，造成 2500 人死亡。拱壩未損。在慘案發生之前，曾經鑽探，但深度太淺，未達滑動面。

1963 International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract 在英國創刊。

1963 Rock Mechanics and Engineering Geology 在德國創刊，1969 起改稱 Rock Mechanics。

1964 Engineering Geology 在美國創刊，1968 起改稱 Bulletin of the Association of Engineering Geologists。

1965 Engineering Geology 在荷蘭創刊。

1966 第一屆國際岩石力學會議在葡萄牙里斯本舉行。

1966 英國南威爾斯發生煤礦廠岩渣堆崩滑慘案，兒童 116 人，成人 28 人死亡。起因岩石因風化而降低強度加上雨水引起崩滑，衝入坡腳小學之中。

1966 美國 Deere & Miller 創岩石材料之工程分類法。

1968 The Quarterly Journal of Engineering Geology 在英國創刊。

1968 Ground Engineering 在英國創刊。

1970 Bulletin of the International Association of Engineering Geology 在德國創刊。

1970 國際工程地質協會第一屆大會在巴黎舉行。

1970 美國 Auburn 拱壩開工。該壩頂長 1220 m，高 208.8 m，基礎內斷層及滑石帶甚多。打破二俗知之觀念：拱壩需要狹谷及岩石甚佳之基礎。後因故停工檢討。

1973 南非 Bieniawski 創岩體之地質力學分類法。考慮了地質材料、地質構造、環境、及工程等因素，並加以定量。

1974 挪威地工技術研究所 (NGI) Barton 等人創另一「岩體之工程分類」用於「設計隧道支架」較 Bieniawski 分類法更為詳細。

1976 美國 Teton 壩 (土石壩) 崩潰。原因是岩石裂隙滲水，造成止水塹 (Key Trench) 之管湧

(Piping)。

1976 Attewell & Farmer 著 Principles of Engineering Geology 在英國出版。

1976 Zaruba & Mencl 著 Engineering Geology 在荷蘭出版。

1976 Anderson & Trigg 著 Case-Histories in Engineering Geology 在英國出版。

1976 英國土木工程師公會 (ICE) 出版 Manual of Applied Geology for Engineers。

1976 俄 Nurek 壩完工，高 300 m+，體積 56 M m³。

1977 英國倫敦地質學會發表 The Description of Rock Masses for Engineering Purposes。

1.4 工程地質與土壤力學、 岩石力學之關係

由於土壤力學及岩石力學之發展，許多地質工程、基礎工程、及土方工程，能以數學方法加以解決。但土壤力學及岩石力學的計算，常基於許多假設，以簡化問題。簡化與假設，必製造誤差。

土木工程，最容易發生誤差與錯誤的，通常不屬於上部結構，而在於基礎及地質部份。工程地質工作的欠缺，會引起工程失敗。而工程師對工程地質的不了解與排斥，也是造成工程地質工作欠缺的原因之一。許多工程師以為土壤力學及岩石力學，甚至計算機，就能解決問題。

在另一方面，地質師若不了解工程，他所寫出來的地質報告，土木工程師以為讀到了天書，完全無法了解。有的地質報告，談了許多與工程完全不相干的事，不能幫助工程師解決問題。地質學理論，不等於工程地質學。

德在基氏 (Terzaghi, 1961)，曾一再強調工程地質學對土壤與岩石工程的重要，並主張土壤力學及岩石力學的學者，應有地質學訓練，而且最好由一般地質學開始，再及於應用地質學，最後學習工程地質學。

美國早年的一位最傑出的工程地質師 Berkey (1929) 認為「工程地質師的地位，有如法庭中的顧問。他提出意見，但不從事最後決定。他的責任是去發現問題，提出解釋，提出警告，但不能替代工程師。工程設計與工程的責任，在於工程師。」德在基氏 (Terzaghi, 1961) 為這一說法加以背書

，並強調工程地質師愈富工程智識，就愈能找出工程師所未能注意的地質上的弱點，愈能指出如何取得補充資料，但不宜主動地或被動地對工程該如何進行提出主張。Müller (1974) 則主張工程師與工程地質師之間，應密切合作，共同工作。

1.5 工程地質學之應用簡介

既然所有的土木工程都必須建在地上或地下，因此工程地質學就必然會應用到所有的土木工程，只是，應用的程度有差別。茲擇要簡介如下。

1.5.1 工程地質學在工址調查之應用

從事任何與地質有關的土木工程，都必須從事工址調查。在舊式的土木工程作業，先辦理調查，然後規劃，再設計、施工。

現代大型土木水利工程作業，分段更趨精細，有踏勘、環境評估，可行性研判、規劃、基本設計、招標與發包、施工與細部設計、營運與維護，等階段。每一階段皆需工址調查，但範圍與精度不同。愈是前面的階段，調查範圍愈大，但精度愈低；愈是後面的階段，調查範圍愈小，但精度愈高。各階段之工址調查，是不能互相替代的。

對於地質之了解，可以避免盲目之鑽探，可以針對工程目標，作出最佳工址調查計劃。

1.5.2 工程地質學在隧道工程之應用

與地質關係最密切的土木工程是隧道工程。其選線、設計、施工、與維護，都受到地質的重大影響。對於地質條件的忽視或判斷錯誤，常造成變更設計或追加預算。

選線不當，等於是自找麻煩。南迴鐵路曾擬穿越南大武山，覆蓋（隧道至地表）厚度超過二千公尺，垂直方向地壓力近 600 kg/cm^2 。根據岩石力學研究，地壓力接近岩石材料強度之 40%，即有岩爆 (Rock Burst) 之可能。因此，岩石強度若不超過 $1,500 \text{ kg/cm}^2$ ，任何覆蓋厚度超過 2000 公尺之隧道，皆有引起岩爆之危險。又隧道須避免斷層，寧願正交而不要同行。

地質對施工進度、施工機具，鑽挖岩機之能率，鑽頭之硬度，炸藥之用量，都有重大關係，影響造價與進度。

地質也影響隧道開挖方法、開挖形狀，以及支保設計。水平地層加上節理發達者，拱頂之設計若是太平緩，可能造出一「梁作用」(Beam Action)

而非拱作用之頂部。

1.5.3 工程地質學在自然邊坡穩定之應用

地質條件，對邊坡破壞模式，坍方防治方法及成本，影響重大。

地表脆裂（節理發達）之砂岩，若下接頁岩或泥岩，在順向坡趾之開挖，可能觸發中度至大規模之平面式滑動，例如高速公路汐止段之坍方；在倒梯坡方面，須注意崖錐堆積之滑動及落石，例如臺北外雙溪中央公教社區、協和電廠等二地，皆曾以岩錨工程、排水措施、以及監測系統，保護邊坡之穩安。

1.5.4 工程地質學在壩址工程之應用

地質條件，對壩軸之決定，壩基之處理、壩翼之保護等，關係重大。

壩址宜儘量避免選在斷層、背斜之處。向下游傾斜之地層，須注意漏水及滑動。走向平行於河谷之單斜地層，對拱壩兩翼之變形不均。

壩基不够強勁者，常建土石壩，石門水庫由拱壩改為土石壩為一實例。

1.5.5 工程地質學在水庫工程之應用

水庫，最怕漏水、坍方，以及斷層活動。

埃及阿斯萬水庫，蓄水之後，左岸砂岩漏水。砂岩，通常較易透水，原因有二：

1. 脆性破裂，發生兩組節理，
2. 膠結不佳，材料本身易透水。

意大利 Vajont 水庫，被一次大坍方填滿，雖然拱壩尚存，但水庫功能全廢。

美國 Auburn 水庫，因附近活動斷層羣集，可能在地震時危害水庫安全，開工後迅即停工重新檢討。我國大陸廣東省內之新豐江水庫，也曾因地震而受損。

凡此，皆足以證明地質條件對水庫工程之重大影響。

參 考 文 獻

- BARTON, N., LIEN, R. and LUNDE, J. (1974), Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, *NGI Publication No. 106*.
- BERKEY, C. P. (1929), "Responsibilities of the geologist in engineering projects." *Am. Inst. Min. and Metall. Engin. Technical Publication 215*, pp. 4-9.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1973), Engineering Classification of Joint Rock Masses, *The Civil Engineer of South Africa*, Dec., pp. 335-343.
- BISHOP, A. W. (1973), "The Stability of Tips and Spoil Heaps." *Q. Jour. Engin. Geol.* Vol. 6, pp. 335-376.
- CHADWICK, W. L. et al. (1976), *Failure of Teton Dam*, US Government Printing Office, Washington D.C., USA.
- DEERE, D. U. and MILLER, R. P. (1966), Engineering Classification and Index Properties of Intact Rocks, *Tech. Rept. No. AFWL-TR-65-116*, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, New Mexico. 國內能獲得之文獻為：STAGG & ZIENKIEWICZ (1968), *Rock Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley, London.
- FREI, L. R. (1975), Auburn Dam Foundation Investigation, Design and Construction, *Field Trip Guide Book of the Assoc. of Engg. Geol.*, 18th Annual Meeting, Lake Tahoe, Calif. 1975.
- KNILL, J. L. (1975, 1976) *Lecture Notes, Applied Engineering Geology*, Dept. of Geology, Imperial College, London.
- MINISTRY OF AGRICULTURE (1960), *Final Report, Enquiry Commission of the Malpasset Dam*.
- MÜLLER, L. (1974), "Engineering Geology Today." *Bull. Intl. Assoc. Engg. Geol.*, No. 9, 75-78.
- MÜLLER, L. & FAIRHURST, C. (1968), "New Considerations on the Vajont Slide." *Rock Mechanics & Engineering Geology*, Vol. VI, 1-2, 1968.
- SERGEEV, E. M. (1974), "Teaching and Training in Engineering Geology" *Proc. 2nd Congress of the Intl. Assoc. of Engineering Geology*, São Paulo, Brazil, Aug. 1974.
- TERZAGHI, K. (1961), "Engineering Geology on the Job and in the Classroom." *J. Boston Soc. Civil Engineers*, April, 1961.
- WALTERS, R. C. S. (1962), *Dam Geology*, Butterworths, London.