

歐 晉 德*

本問題與解答專欄將定期於本刊登出，所擬問題均選自目前大地工程界於施工中可能遭遇之一些疑難小問題，此類問題雖小，但常造成施工人員之困擾。本欄歡迎各讀者提出問題，並歡迎學者專家就解答內容提供意見。有鑑於大地工程牽涉範圍及變化甚多，讀者亦請避免將本欄提供之解答視為唯一方案，以免造成施工或尋求解決方法之錯誤。

Q23：新奧工法 (NATM) 中之支撐系統有何特色？

新奧工法之支撐系統乃於隧道開挖後，容許開挖面四週岩體變形至某一程度時，適時地以半剛性支撐材料，並配合觀測系統之量測，機動調整或加強所用之支撐材料，形成岩石承載環，充分利用承載環的支持力，以強化岩體強度而達到穩定開挖之目的。其與傳統之鋼支撐隧道工法比較時，主要特色為：較經濟，支撐材料之選擇及配合較具多元性，施工條件較佳且可適用於不同之地層狀況。

經濟性：傳統之隧道工法，視鋼支撐為臨時支撐，須加混凝土襯砌為永久支撐，在臨時支撐設計時完全以鋼支撐來抵抗開挖後所產生之磐壓及側壓。NATM 之支撐設計時，即無臨時支撐或永久支撐之分，而視第一次支撐為永久支撐，第二次支撐（視實際狀況而決定是否需要）之混凝土襯砌僅是多加的安全措施而已，且其所用之材料極少。NATM 支撐作用之主要精神乃利用岩體本身之強度來分擔開挖後所產生之磐壓及側壓，亦即岩體開挖後，尚未產生極大變形前，迅速的以適量之噴凝土、岩栓、鋼絲網等半剛性材料支撐，以形成岩石承載環，以支撐之。鋼支撐工法於支撐前岩體已產生極大之變形，相對的其產生之壓力遠大於 NATM 迅速的抑制岩體產生更進一步變形所生之壓力，且 NATM 之半剛性支撐材料施設後乃允許岩體有少許之變形，亦能降低岩體開挖後所生之壓力。鋼支撐法之混凝土襯砌為永久支撐其厚度亦遠大於 NATM 於需要時之第二襯砌厚度，所以 NATM 之支撐費用遠較傳統

之鋼支撐法為便宜，本點 B 就支撐工法及 NATM 法施工時均為熟手比較之。

支撐材料之選擇性：傳統之鋼支撐設計主要依據 Terzaghi 等人之定性岩體分類法推估得之磐壓而選擇不同型號之鋼支撐，其型式及尺寸不易變更。NATM 之支撐材料包括噴凝土、岩栓、鋼絲網及輕型鋼支撐等，其材料之選擇可由 CSIR 及 NGI 等定量岩體分類法，配合觀測系統之量測資料及工地工程師之判斷，靈活的應用各種材料來達成半剛性支撐系統，是故就支撐材料之選擇言，NATM 較具多元性。

施工條件：傳統之鋼支撐因有臨時及永久支撐，故施工程序上至少有二個主要循環，且鋼支撐之組成費時，形狀固定不易改變。鋼支撐之間距離較大，以點支撐方式承載荷重，容易因過大之不均勻岩壓造成岩體局部損壞，而形成鄰近鋼支撐之超負荷，引起一連串之破壞。NATM 施工法因無臨時及永久支撐之區別故施工程序上可只有一個主要循環，所用之支撐材料不需事先加以組合，較不佔施工空間，且適用於任何形狀之斷面，又可藉觀測系統機動調整支撐方式，故就施工條件言，NATM 工法之支撐系統其施工較迅速，方便且安全。

地層之適用性：傳統鋼支撐工法，施工前，若對於整個隧道縱斷面之地層狀況未完全瞭解，於施工後若遭遇完全不同性質之地層，則必造成工程上相當之困難性，而 NATM 之支撐系統則無此顧慮，僅需機動調整支撐材料或對地盤稍加改良即可，如灌漿、冰凍……等輔助工法。故 NATM 之支撐系統對於不同地層

* 亞新工程顧問公司副總經理

之適用性較傳統工法之鋼支保為佳。(廖志中)

Q24：岩石隧道工程設計中，盤壓及側壓如何估算？

岩石隧道荷重來自隧道拱頂上方及兩側地層對隧道支撐或襯砌所施加之壓力，來自洞頂的垂直壓力稱為盤壓，來自兩側向隧道內擠之壓力稱為側壓。

在鋼支保為主的支撐設計中，以 Terzaghi 在 1946 年提出的經驗理論最簡便。他將不同的岩石情況分為九類，並推估其相應之盤壓，和所須之支保工關係如表一及圖一。盤壓的大小除受岩石的情況影響外，且與隧道的寬度和高度有密切關係，但與隧道深度無關。

Cording, Hendron 和 Deere (1972) 研究深度較深的大型地下開挖實測之支保壓力後，發現用岩栓支保或岩錨支保的支保壓力遠低於 Terzaghi 所建議的盤壓和側壓（圖二、三）。主要是因岩栓或岩錨的變形量較鋼支保的變形量小，而有較低的實測盤壓和側壓，他們採用楔形破壞之構想，配合 RQD 的分類法，提出修正係數（見圖四），以推估盤壓 P_{roof} 如下式：

$$P_{roof} = nBr \tag{1}$$

P_{roof} ：盤壓 (T/m^2)

n ：修正係數

B ：隧道寬度 (m)

r ：岩石單位重 (T/m^3)

式(1)中之 n 值可由 RQD 值和圖三的 n -RQD 實線， $n-\phi$ 點線或 n -RQD- ϕ 陰影部分的交點查出來，而盤壓按隧道的寬度成比例增加，與隧道高度無關。

Barton、Lien 和 Lunde 研究許多案例後也在 1974 年提出以岩體品質 Q 和盤壓之關係：

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \tag{2}$$

Q ：岩體品質

RQD：每鑽中長度大於 10 公分以上岩心之總和與每鑽總長度之百分比。

J_n ：節理組數，考慮層面、斷層等斷裂面

J_r ：節理面粗糙度

J_a ：節理面變質情況

J_w ：地下水扣減係數

SRF：應力扣減係數

(一)當節理組數大於或等於 3 時 ($J_n \geq 9$)

$$P_{roof} = \frac{2 J_n^{1/2} (Q)^{-1/3}}{3 J_r} \tag{3}$$

(二)當節理組數小於 3 時 ($J_n < 9$)

$$P_{roof} = \left(\frac{2.0}{J_r}\right) Q^{-1/3} \tag{4}$$

圖五顯示盤壓與 Q 之關係，大部分實測資料落在陰影區內，可用橫軸之 Q 值查出對應之最大盤壓、最小盤壓或採用平均值。至於側壓可依下兩式計算：

(一)當節理組數大於或等於 3 時 ($J_n \geq 9$)

$$P_{wall} = \frac{2 J_n^{1/2} (dQ)^{-1/3}}{3 J_r} \tag{5}$$

P_{wall} ：側壓 (kg/cm^2)

d ：側壁修正係數

(二)當節理組數小於 3 時 ($J_n < 9$)

$$P_{wall} = \left(\frac{2.0}{J_r}\right) (dQ)^{-1/3} \tag{6}$$

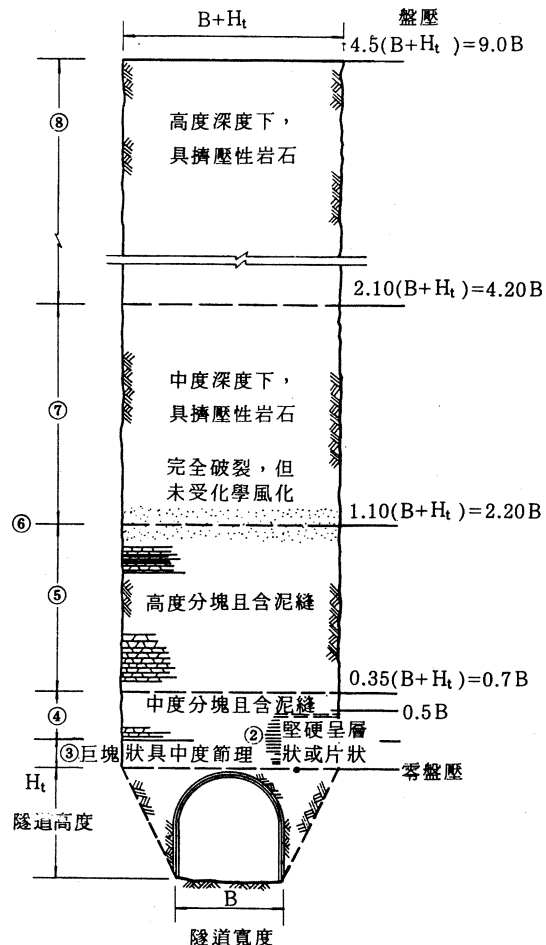


圖24-1 Terzaghi之盤壓與圍岩關係圖

表一 Terzaghi的盤壓與岩石情況關係表

岩石情況	盤壓(相當岩石厚度 m)	備註
1. 堅硬且完整 (Hard & intact)	0	僅當剝落發生時，須加薄層襯砌。
2. 堅硬呈層狀或片狀 (Hard stratified or schistose)	0~0.5 B	輕型支撐以防止剝落
3. 巨塊狀且具中度節理 (Massive, moderately jointed)	0~0.25 B	各點之荷重可能作不規則變化
4. 中度分塊且含泥縫 (Moderately blocky & seamy)	0.25 B~0.35(B+Ht)	側壓為零
5. 高度分塊且含泥縫 (Very blocky & seamy)	(0.35~1.10)(B+Ht)	側壓很小或零
6. 完全碎裂，但未受化學風化 (Completely Crushed) Dut Chemically impact	1.10(B+Ht)	側壓相當大。滲流水有軟化隧道底部的作用，鋼支保下部須連續支撐或者採用圓形鋼支保。
7. 中度深度下，且擠壓性 (Squeezing rock, moderate depth)	(1.1~2.1)(B+Ht)	側壓嚴重，仰拱須支撐，可採用圓形鋼支保。
8. 高度深度下，具擠壓性 (Squeezing rock, great depth)	(2.10~4.50)(B+Ht)	
9. 膨脹性 (Swelling rock)	可達 76 m	用圓形鋼支保，極端情況時，用可變形支保。

B: 隧道寬度(m), Ht: 隧道高度(m)

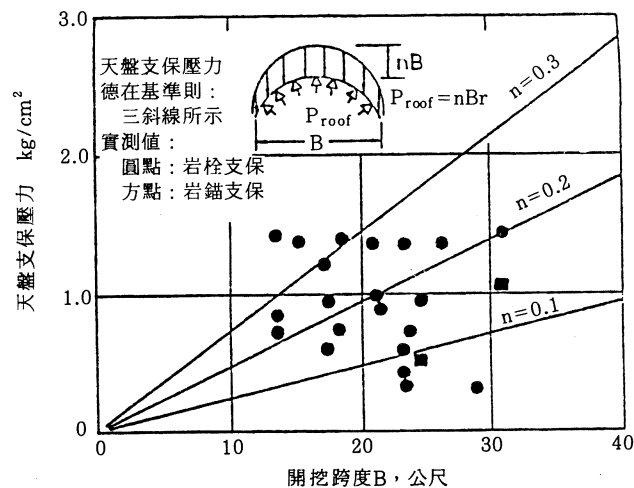


圖24-2 Cording等人之盤壓與開挖跨度之關係圖

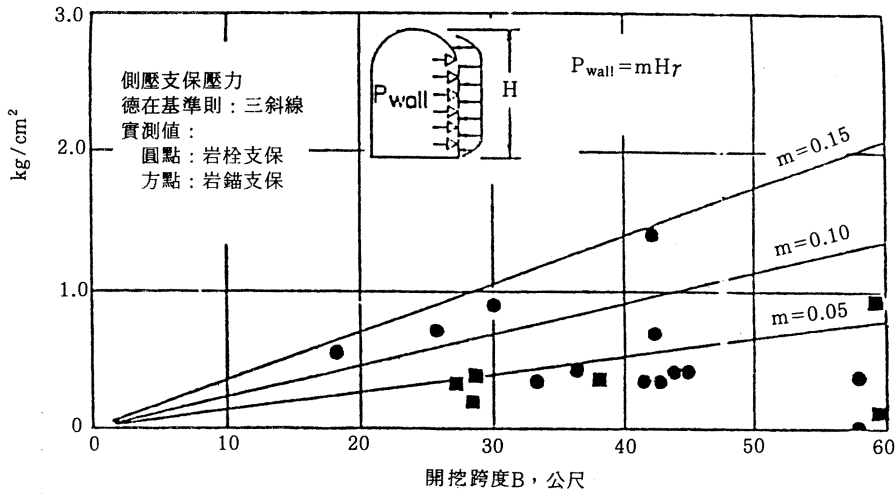


圖24-3 Cording等人之側壓與開挖高度之關係圖

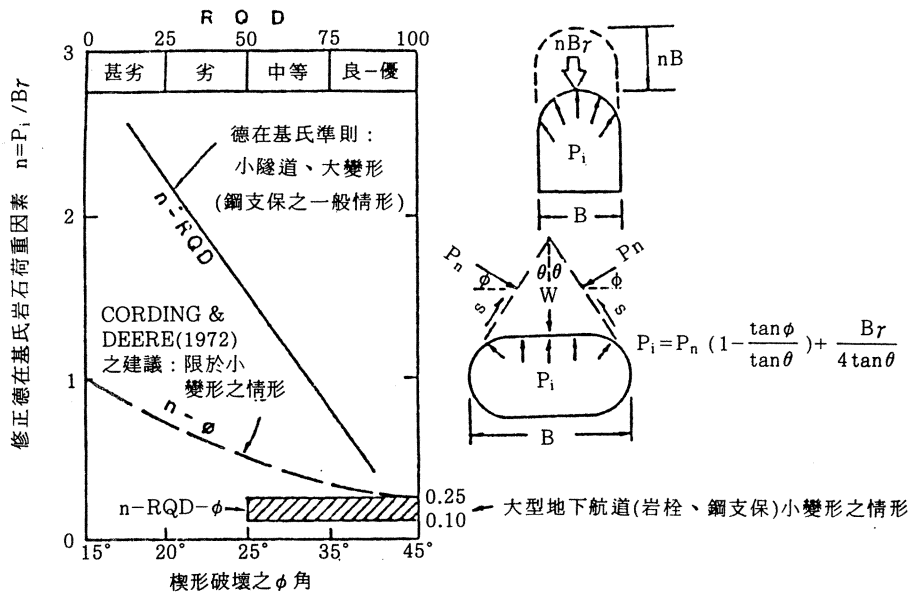
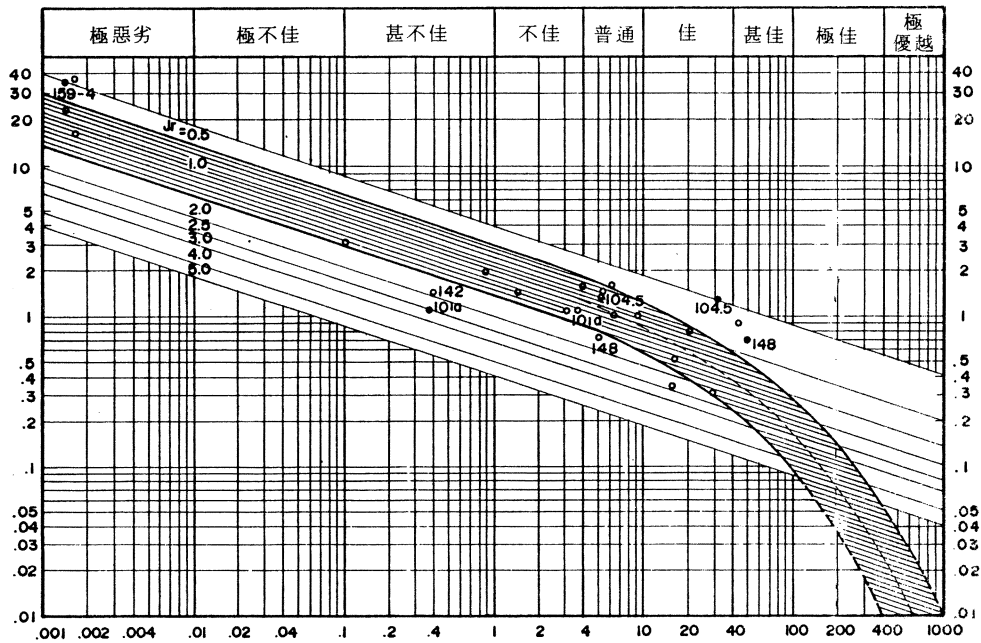


圖24-4 修正係數n與RQD及楔形破壞角中之關係圖(Cording等人)

式(5)和(6)中，d值和岩體品質Q有關，當 $Q > 10$ 時 $d = 5$ ；當 $0.1 < Q < 10$ 時， $d = 2.5$ ；當 $Q < 0.1$ 時 $d = 1$ 。側壓也可用圖五求出最大側壓，最小側壓或採用平均值，但要把 dQ 值當作橫座標值，才可去找對應之縱座標側壓值。

Terzaghi 方法可用於推估鋼支撐支撐的馬

蹄型隧道的盤壓，Cording、Hendron 和 Deere 的 RQD 方法因沒有考慮岩體中節理的影響，所以要推估岩栓、噴凝土半剛性支撐系統下之盤壓和側壓，當以 Barton、Lien 和 Lunde 的 Q 方法較佳。(黃鎮臺)



$$\text{岩體品質 ROCK MASS QUALITY } Q = \left(\frac{\text{RQD}}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{\text{SRF}} \right)$$

圖24-5 盤壓與岩體品質Q之關係圖(Barton等人)

參 考 文 獻

洪如江, 1983, “岩體分類法在隧道工程之應用”, 現代隧道工程技術之研究, 研究報告 TR-7203, 臺灣營建研究中心。

汪樊之, 1983, 實用隧道工程學, 大中國圖書公司, PP21-31。

程禹, 李榮松, “對防止隧道施工災害之幾點建議”, 中華道路季刊, 第22卷, 第4期, 中華民國道路協會, PP1-6。

楊建西, 1982, “新奧工法在國內應用之檢討”, 中國土木工程學會71年年會論文集, 隧道工程、大地工程篇, PP1-19。

GOODMAN, R. E., TAYLOR, R. L. and BREKKE, T. L. (1968) “A Model for the Mechanics of Jointed Rock”, *J. SMFD ASLE*, vol, 94, P. 637-659.

GOODMAN, R. E. and SHI, G. H. (1985). *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, U. S. A.

HOOK, E. and BROWN, E. T. (1980). *Underground Ecavation in Rock*, IMM, London.

BARTON, N., LIEN, R. and LUNDE, J. (1974).

“Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support”, *Rock Mechanics* 6, Springer-Verlag, New York, PP. 189-230.

CORDING, E. J., HENDRON, A. J. and DEERE, D. U., (1972) “Rock Tunnel Supports and Field Measurements”, *Proceedings of The First North American Rapid Excavation and Tunneling Conference*, AIME, PP. 601-622.

GOLSER, J., (1976) “The New Austrian Tunneling Method (NATM), Shatcrete For Ground Support”, *Proceedings of the Engineering Foundation Conference*, ASCE, PP. 323-347.

HOEK, E., and BROWN, E. T., (1980). *Underground Excavation in Rock*, IME, London, PP. 329-332.

TERZAGHI, K., (1946) “Rock Defects and Loads on tunnel Supports”, *Rock Tunncing with Steel Support*, Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, PP. 15-99.

“What Is the NATM”, *Tunnels & Tunneling* vol. 16, No. 12, December 1984, P. 29.