

挪威隧道工法及其評估
NORWEGIAN METHOD OF TUNNELLING AND
ASSOCIATED EVALUATION

鄭富書，顏東利，潘國樑
F. S. Jeng, T. L. Yen and K. L. Pan

原著載於地工技術雜誌第 67 期
1998 年 6 月，第 83~98 頁

Reprinted from Sino-Geotechnics
Taipei, Taiwan
June, 1998, No. 67, pp.83~98

挪威隧道工法及其評估

鄭富書

台大土木系

顏東利 潘國樑

亞新工程顧問有限公司

摘要

挪威隧道工法(NMT)在挪威之應用成效卓著，在支撐時效、工時、經費方面有漸領先新奧工法之趨勢。本文介紹挪威隧道工法之岩體評分系統、支撐系統、於TBM工法之應用、防水策略、施行步驟、合約型態以及比較NMT及NATM之差別。同時本文初步探討NMT在台灣之適用性，包括Q-系統、開挖工法、合約以及其他方面之可能遭遇情況。冀望透過此初步探討，能有計畫吸收NMT之優點，並事先對台灣隧道施工環境作一調整，以充份發揮NMT之長處，從而提昇台灣隧道工程能力。

關鍵字：挪威隧道工法。

NORWEGIAN METHOD OF TUNNELLING AND ASSOCIATED EVALUATION

JENG FU-SHU

Department of Civil Engineering, National Taiwan University

YEN TUNG-LIH PAN KUO-LIANG

Moh and Associates, Inc.

ABSTRACT

In Norway, the use of Norwegian Method of Tunneling (NMT) results in outstanding performance in support system, reduction of constructional time and substantial saving of costs compared to the New Austrian Tunnelling Method. This paper introduces the methodology of NMT, which includes the rock mass characterization method, support system, application to TBM projects, procedures of NMT and the NMT contract as well. The feasibility of applying NMT in Taiwan is then evaluated regarding the validity of Q-system for soft rocks, excavation method, contract and other issues. It is deemed that the merits of NMT can be employed to the tunneling in Taiwan under fully understanding of NMT and development of related technology.

KEY WORDS : Norwegian Method of Tunnelling, NMT.

一、前言

台灣近年來山岳隧道設計及施工大多採用新奧地利工法(New Austrian Tunnelling Method, 簡稱NATM)。NATM引進國內已將近20年,雖然有許多使用成功的案例,但亦有一些失敗案例,如在北部區域一些公路隧道曾遭遇嚴重之施工障礙,造成工程建設之延誤(鄭富書, 1995)。

除奧地利之外,挪威為世界上另一個主要的隧道技術開拓國家。Barton等人於1974年提出一套應用於隧道工程之「Q系統(Q-system)」,此系統包括岩體評分法及各岩體等級之對應支撐方式。在1974年至1984年間,Q系統所採用之主要支撐方式為岩栓、鋼線網噴凝土、鋼支保及澆鑄混凝土拱(Cast Concrete Arch, 簡稱CCA),與NATM頗為相類。在1984年之後,由於鋼纖維噴凝土技術已趨成熟,挪威隧道工法逐漸全面改採用以岩栓、鋼纖維噴凝土及澆鑄混凝土拱為主之支撐方式;即不再採用鋼線網噴凝土及鋼支保為主之支撐方式;此時挪威隧道工法(Norwegian Method of Tunnelling, 以下簡稱為NMT)與NATM之區別更趨明顯,已自成一格。

NMT在二十餘年來持續發展,包括支撐概念之改變、鋼纖維噴凝土技術及設備之發展,已頗有成效。NMT在挪威施作之實績包括(Barton等人, 1992; Barton, 1996a):

1. 提昇施工效率 - 由於NMT不必掛網、安設鋼支保(只有在少數情況使用)及打設混凝土內襯砌,故安設支撐所花費的

時間可大幅縮短。在強度為120至300MPa之片麻岩、閃長岩、石英岩、大理岩及片岩之隧道施工中,最佳紀錄可達90.2米/天、426米/週、1176米/月。

2. 發展鋼纖維噴凝土技術 - 每小時可施噴15至25m³,回彈量5~10%,典型之混凝土強度50~60MPa,塌度15~20公分。

3. 降低支撐成本 - 每公尺約4000至8000美元(斷面大小從45m²至110m²),約為NATM支撐費用之1/2至1/5。

4. 減少施工人員 - 工作編制採全能班,每輪只需三人,從事鑽炸、出碴、安設岩栓及噴凝土等項工作。

5. 改善施工環境 - 由於全面採用溼式噴凝土,空氣品質較乾式噴凝土為佳。

挪威在隧道工程之佳績,令人印象深刻;其長處為何,值得加以探討,並據以檢討台灣目前隧道工程在技術上、作法上是否有需改進之處。值得注意的是,台灣之地質狀況、工程環境及行政體系相較於挪威困難許多,在探討NMT特點之際,亦應評估是否適用於台灣之狀況,是否應加以局部調整,使能進一步本土化以適用台灣之隧道工程。本文主要目的係在介紹挪威隧道工法及其特色,同時初步探討在台灣適用性有關之問題。

二、挪威隧道工法

NMT之核心為Q系統,包括岩體評分法及各岩體等級的支撐方式。Barton、Lien與Lunde根據212隧道案例,於1974年提出Q系統。至1993年,其累積的案例已達1050例(Grimstad及Barton, 1993)。在近二十年的應用,Q系統的評分方面只

有在應力因素(SRF值)方面，進一步考量擠壓及岩爆行為，作了小幅修改，表一所示為1993年修正之Q法評分標準。而在支撐方面之變革幅度則較大，從1974年之38類岩體支撐，至1986年之七類支撐方式，至目前(1993年提出)之九類支撐方式，如圖一、圖二及圖三所示。NMT之岩體評分法、支撐方式、施行步驟及NMT之特性，分別介紹如下：

2.1 Q-系統評分法

Q-系統評分法以Q值來代表岩體之品質，作為隧道支撐設計的參考依據。Q值係依下式表示：

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \dots \dots \dots (1)$$

其中，

- RQD 岩石品質指標
- J_n 節理組之評分
- J_r 節理面粗糙度之評分(最不利的不連續面或節理組)
- J_a 節理換質(alternation)之評分(最不利的連續面或節理組)
- J_w 節理滲水折減因子
- SRF 應力折減因子

上式中RQD與 J_n 之比值(RQD/J_n)可用來瞭解岩體之整體結構情形，衡量岩塊之尺寸； J_r 與 J_a 之比值(J_r/J_a)可顯示岩塊間之最小剪力強度； J_w 可表示水壓之大小；SRF可表示：(1)剪動帶與夾軟弱粘土之岩石鬆弛所造成之荷重，(2)堅實岩盤之岩石應力，與(3)非堅實岩盤之擠壓與膨脹荷重，因此SRF大致可視為岩石之總應力參數，而 J_w 與SRF之比值(J_w/SRF)則代表岩石之作用應力(Active Stress)。由於 J_r 與 J_a 係針對節理組或可能引致破壞發生之不連續面來評定，因此Q-系統已隱含了弱面方位與隧道

方向之重要影響。公式(1)中6個參數的詳細說明及其評分如表一所示，所計算的Q值的可能範圍為0.001到1000。

表一第6項應力折減因子(SRF)之L、M、N項， σ_3/σ_c 欄，以及註(4)均為最新之修訂結果(Grimstad and Barton, 1993)，除此之外，其他所有項目之評分均與1974年相同。修訂SRF之原因是由於厚層岩盤(Massive Rock)在高應力作用下需要之支撐比原先建議高出許多，故對SRF值作大幅提高(即調降Q值，以增加支撐)。唯對擠壓因素及膨脹因素之SRF值則未作調整。

表一 NGI之Q值描述及評分標準(Barton and Grimstad, 1994)

1.岩心品質指標		RQD
A	惡劣	0-25
B	劣	25-50
C	普通	50-75
D	良	75-90
E	優良	90-100

註：(1)當RQD ≤ 10時(包括0)，於計算Q值時採用10。
(2)RQD之間距採用5即可(例如100、95、90等)，其精度即已足夠。

2.節理組評分		J_n
A	厚岩層，無或很少節理	0.5-1.0
B	一組節理	2
C	一組節理加偶現節理	3
D	二組節理	4
E	二組節理加偶現節理	6
F	三組節理	9
G	三組節理加偶現節理	12
H	四組以上節理，節理分佈不規則，極發達，或小方塊狀等	15
I	粉碎如土壤般的岩石	20

註：(1)在交叉段採用($3 \times J_n$)
(2)在洞口採用($2 \times J_n$)

3.節理粗糙度評分		J_r
(a) 節理面保持接觸；及 (b) 剪動在10cm以內，兩壁可接觸		
A	不連續節理	4
B	粗糙或不規則，波浪狀	3

C	光滑, 波浪狀	2
D	具擦痕, 波浪狀	1.5
E	粗糙或不規則, 平面狀	1.5
F	光滑, 平面狀	1.0
G	具擦痕, 平面狀	0.5
(c)剪動時, 兩壁岩石不會接觸		
H	含有粘土, 其厚度足以使兩壁不致發生接觸	1.0
I	含有砂質、礫石質或粉碎帶(Zone), 其厚度足以使兩壁不相接觸	1.0
註: (1)B至G之粗糙度係依小尺度(Small scale)至中尺度(Intermediate scale)之特性, 予以描述。 (2)若主要節理組之平均間距大於3cm, 則 J_r 加1.0。 (3)若節理具沿平面分佈之擦痕, 且線理位於最低強度之方向, 則採 $J_r=0.5$ 。		

4. 節理面換質評分		J_a	ϕ_r
(a)節理面兩壁接觸			
A	緊密閉合, 堅硬, 夾心不軟化與不透水(如石英或綠簾石)	0.75	-
B	兩壁面未換質, 僅表面鏽染(Staining)	1.0	25-35°
C	兩壁面輕微換質, 壁面外層(Coating)為不軟化礦物、砂質顆粒、不含粘土之崩解岩石	2.0	25-35°
D	壁面外層為粉質或砂質粘土, 含少量粘土(不軟化)	3.0	20-25°
E	壁面外層為軟化或低摩擦粘土礦物, 如高嶺石、雲母、綠泥石、滑石、石膏、石墨等與少量膨脹性粘土	4.0	8-16°
(b)剪動在10cm以內, 兩壁可接觸			
F	砂質顆粒、不含粘土之崩解岩石	4.0	25-30°
G	高度過壓密不軟化之粘土礦物夾心(連續, 但厚度<5mm)	6.0	16-24°
H	中度或低過壓密軟化之粘土夾心(連續, 但厚度<5mm)	8.0	12-16°
J	膨脹性粘土夾心, 如蒙脫石(連續, 但厚度<5mm), J_a 值視膨脹性粘土含量百分比及與水接近之情形而定	8.0 12.0	6-12°
(c)剪動時兩壁岩石不會接觸			
K	夾崩解或粉碎岩石與粘土(粘土	6.8	6-24°
L	情況之描述見G、H、J)	或	
M		8-12	
N	夾粉質或砂質粘土, 少量粘土成份(不軟化)	5.0	-
O	夾厚且連續之粘土(粘土狀況之	10, 13,	6-24°
P	描述見G、H、J)	或	
R		13-20	

5. 節理滲水折減因子		J_w	概估水壓(kg/cm ³)
A	開挖面乾燥或少量滲水(如局部小於5ℓ/min)	1.0	<1
B	中度滲水或水壓, 有時洗出節理夾心	0.66	1-2.5
C	堅固岩盤之無夾心節理大量滲水或有高水壓	0.5	2.5-10
D	大量滲水或高水壓, 大量節理夾心被洗出	0.33	2.5-10
E	開炸時冒出極大量滲水或極高水壓, 但逐漸減小	0.2-0.1	>10
F	極大量湧水或極高水壓, 持續無明顯減小	0.1-0.05	>10
註: (1)C至F項係概估, 如有排水設施, J_w 可提高。 (2)不考慮結冰所引起的特別問題。			

6. 應力折減因子			SRF	
(a)軟弱帶(Weak zone)與開挖相交, 隧道開挖時會使岩石鬆動。				
A	有多條含有粘土或化學分解岩石之軟弱帶, 周圍岩石非常鬆動(任何深度)		10	
B	一條含有粘土或化學分解岩石之軟弱帶(開挖深度≤50m)		5	
C	一條含有粘土或化學分解岩石之軟弱帶(開挖深度>50m)		2.5	
D	優良岩石含多條剪裂帶(無粘土), 周圍岩石鬆動(任何深度)		7.5	
E	優良岩石含一條剪裂帶(無粘土)(開挖深度≤50m)		5.0	
F	優良岩石含一條剪裂帶(無粘土)(開挖深度>50m)		2.5	
G	鬆動開口節理, 節理高度發達或岩石成小方塊等(任何深度)		5.0	
註: (1)若相關剪裂帶僅影響, 但不與開挖面相交, SRF可減少25-50%。				
(b)優良岩石, 岩盤有應力問題		σ_c / σ_1	σ_1 / σ_c	SRF
H	低應力, 近地表, 開口節理	>200	<0.01	2.5
J	中等應力, 有利的應力情況	200-10	0.01-0.3	1
K	高應力, 極緊密結構, 通常對穩定有利, 可能對側壁不利	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	厚層岩盤在1小時後發生中等應力破裂	5-3	0.5-0.65	5-50
M	厚層岩盤在數分鐘後發生應力破壞或岩爆	3-2	0.65-1	50-200
N	厚層岩盤強烈岩爆與中等動態變形	<2	>1	200-400
註: (2)若現地應力經量測具高度異向性, 當 $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ 時, 將 σ_c 折減為 $0.75 \sigma_c$, 當 $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ 時, 將 σ_c 折減為 $0.5 \sigma_c$, σ_c = 單軸抗壓強度, σ_1 與 σ_3 分別為最大與最小主應力, σ_1 = 依據彈性理論估計之最大切向應力 (3)由於僅有少數頂拱(Crown)深度小於跨距寬度之案例, 在此種情況下建議SRF由2.5增加至5(第H項)。				

(c)擠壓性岩盤：軟弱岩盤在高岩壓影響發生塑性流動		σ_v / σ_c	SRF
O	中等擠壓性岩壓	1-5	5-10
P	高度擠壓性岩壓	>5	10-20
註：(4)深度 $H > 350Q^{1/3}$ 時岩盤可能發生擠壓，岩體抗壓強度可以下式估算： $q = 0.7 \gamma Q^{1/3}$ (MPa)，其中 γ = 岩盤密度(kN/m ³)。			
(d)膨脹性岩盤：因水存在而引起化學性膨脹作用			SRF
R	中等膨脹岩壓		5-10
S	高度膨脹岩壓		10-15

註：Ja與Jr係針對最不利穩定之節理組或不連續面(考慮方位與剪力阻抗 τ ， $\tau = \sigma_n \tan^{-1}(J_r/J_a)$)，選擇最能引致破壞者來評定。

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \left(\frac{J_v}{SRF}\right)$$

不同安全等級之ESR建議值

開挖種類		ESR
A	臨時性探礦開挖	2-5
B	永久性探礦開挖，水力發電之引水隧道(不含高壓力隧道)、探查隧道、大型開挖之導坑與上半斷面、解湧室(Surge chamber)	1.6-2.0
C	地下貯窖、水處理廠、次要公路及鐵路隧道、橫坑	1.2-1.3
D	發電廠、主要公路及鐵路隧道、防空洞、洞口、交叉段	0.9-1.1
E	地下核能電廠、鐵路車站、運動場及公共設施、工廠、主要瓦斯管線隧道	0.5-0.8

2.2 NMT之支撐

NMT所採用之主要支撐構件包括有：岩栓、鋼纖維噴凝土、鋼筋噴凝土加勁環、澆鑄混凝土拱。依據Q-System之評分結果可以經驗方式預估開挖時所需要之隧道支撐。於Q值評定後，先依據地下開挖工程之重要性，由表一選擇一適當之ESR(Excavation Support Ratio)，以下式計算出等值跨距：

$$\text{等值跨距} = \frac{\text{跨距或高度}}{\text{ESR}} \dots\dots\dots(2)$$

ESR可反映出設計時所需之安全係數，ESR愈低即表示安全係數愈高。支撐種類之決定，係利用Q值與等值跨距，依據圖三決定所需之隧道支撐種類及數量。

NMT之各主要支撐方式之特性，分述如下：

1. 岩栓

岩栓具有相當的強度與延展性，因此可增加岩體之韌性，使岩體之破壞應變提高，可允許較大之變形發生。一般而言岩栓可依其功能之考慮而分為臨時性與永久性兩種，臨時性岩栓使用於欲立即發揮穩定效果之情況，其裝設簡單而且迅速。永久性岩栓則須考慮其長期之可靠性，因此須避免岩栓鏽蝕問題，為達到此項要求，挪威已發展出如圖四所示之套管(Combi-Tube, CT)岩栓(Barton, 1996b)，此種岩栓以PVC管套在表面鍍鋅並且塗環氧樹脂(Epoxy)之岩栓軸桿之外，PVC管之內外可於噴凝土施工前或施工後灌注水泥漿，以形成多重之防鏽保護。此外，挪威亦發展出玻璃纖維岩栓，此種岩栓具有不鏽蝕、質輕與高軸向強度之優點，但其剪力強度低於一般之岩栓。

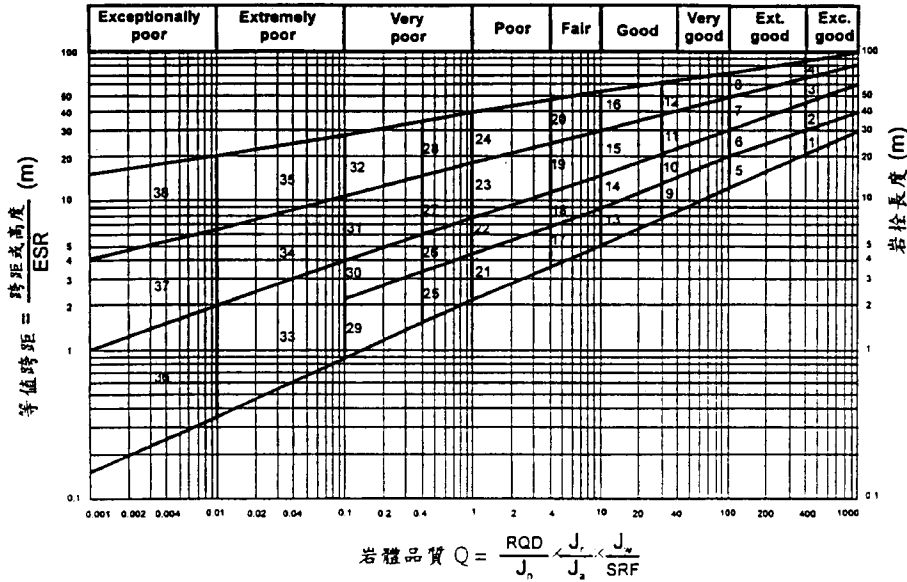
NMT因係採用高強度之鋼纖噴凝土，因此可減少岩栓數量。岩栓之長度及間距可由圖三所決定；當節理近乎垂直，並且與隧道軸方向平行時，或當可能會有深入岩壁的岩楔滑落時，應增加岩栓長度。

2. 鋼纖維噴凝土

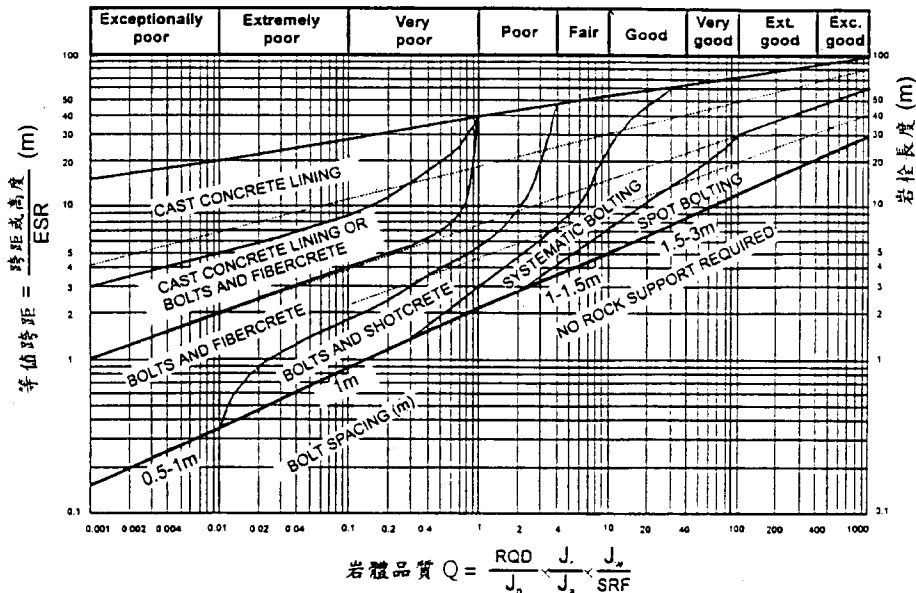
噴凝土具有支撐與保護岩體之作用。以往之噴凝土大都使用鋼線網，但在施噴時常因鋼線網之振動造成噴凝土鬆動而使強度降低；同時，因鋼線網不易緊貼在破碎與凹凸不平之岩盤表面，因此易造成施噴時之死角；此外，在開挖面上鋪設鋼線網亦相當費時且危險度亦高，因此

挪威從1984年全面使用鋼纖噴凝土，並且採用溼式施工以減少混凝土之反彈量，提高混凝土之品質，並且改善隧道內之空氣品質。鋼纖維噴凝土自1978年引進挪威，在早期爲了提高噴凝土之流動性，噴凝土需加入多量的水，導致水灰比(W/C值)偏

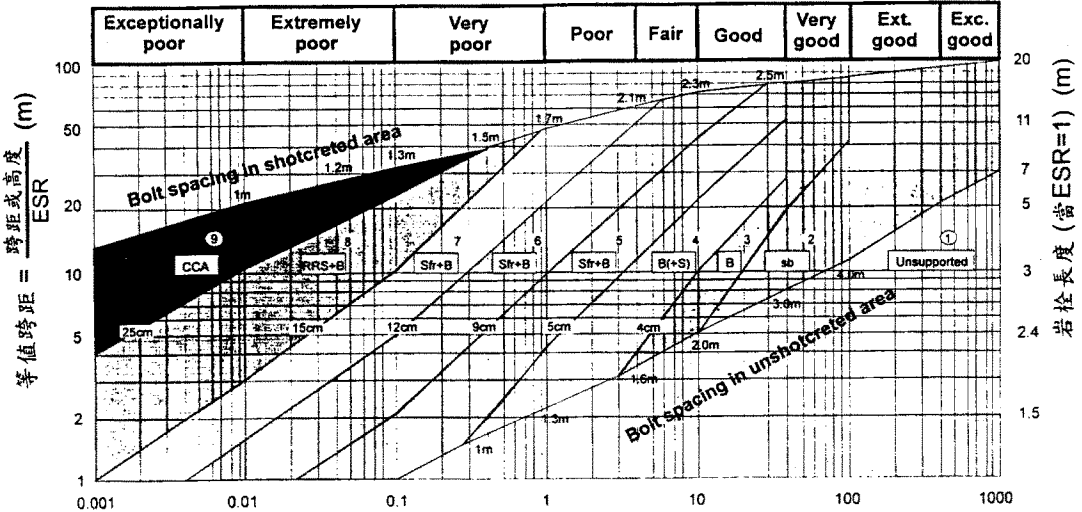
高，混凝土部份之強度不高。隨後，矽質爐灰及塑性劑(Plasticizer)添加物使得噴凝土之強度及流動性大幅提昇：混凝土之一般強度約爲50至60MPa(可達100MPa)，塌度15~20公分。因此自1984年以後便很少再使用鋼線網噴凝土而全



圖一 1974年版Q法之支撐等級劃分



圖二 1986年版Q法之支撐等級劃分



$$岩體品質 Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_1}{J_2} \frac{J_w}{SRF}$$

註:支撐等級:①無支撐, ②局部岩栓(Spot bolting, sb), ③系統岩栓(Systematic bolting, B), ④系統岩栓與4-10cm厚無加勁噴凝土(B+S), ⑤5-9cm厚鋼纖維噴凝土與岩栓(Sfr+B), ⑥9-12cm厚鋼纖維噴凝土與岩栓(Sfr+B), ⑦12-15cm厚鋼纖維噴凝土與岩栓(Sfr+B), ⑧厚度大於15cm鋼纖維噴凝土、噴凝土加勁環與岩栓(Sfr+RRS+B), ⑨澆鑄混凝土拱(CCA)

圖三 1993年版Q法之支撐等級劃分

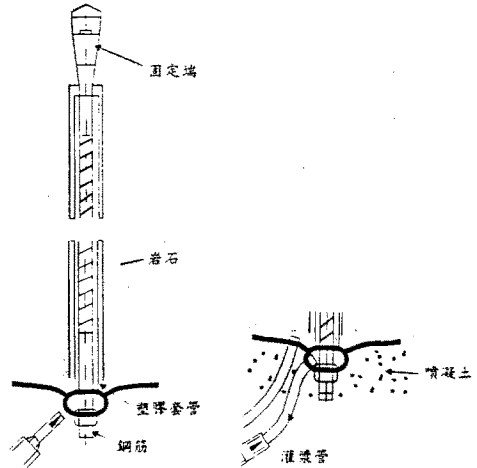
面採用鋼纖維噴凝土。典型之鋼纖維噴凝土之配比, 如表二所示。

表二 NMT之鋼纖維噴凝土之典型配比及性質

波特蘭水泥	450~550 kg/m ³
矽質爐灰	3~10%水泥重
礫石料大小	0~10mm
塑性劑 (plasticizer)	0.3%~1.0%水泥重
超塑性劑	0.3%~1.0%水泥重
鋼纖維	50kg/m ³ (視韌度要求而定)
水	W/(C+S) = 0.40~0.45
塌度	15~18 cm
空氣含量	<4%
溫度	15~20°C

綜合而言, 溼式鋼纖維噴凝土具有下列之優點:

- (1) 可利用自動化之機具施工, 效率高。
- (2) 可快速發揮支撐效果。
- (3) 反彈量約在5至10%之間(大部界於4%~6%之間), 遠低於乾式施工。



圖四 挪威套管式(CT)防鏽岩栓
(改繪barton, 1996b)

- (4) 鋼纖維不致增加反彈量。
- (5) 噴凝土品質均勻且佳。
- (6) 施工時之粉塵少, 改善作業環境, 有利健康。
- (7) 透水性低。

(8)鋼纖不連續,可避免鋼線之鏽蝕問題。

(9)可緊貼在凹凸不平之岩壁,充份發揮支撐效果。

(10)具有高韌性,可允許較大之變形而不破裂,且可有效分佈岩栓固定端荷重至較大範圍之噴凝土。

為了確保鋼纖維噴凝土與岩壁能有效固著,在施噴之前,必需用水與壓縮空氣混合之水流噴洗岩壁表面(可運用噴漿設備實施噴洗即可)。在鋼纖維噴凝土施噴之後,除非尚需加噴噴凝土,否則應立即施噴一層保護薄膜來減緩水份之蒸發,以養護噴凝土。同時,每天應對噴凝土噴水至少二次,進行養護。

3. 鋼筋噴凝土加勁環 (Reinforced Ribs of Shotcrete)

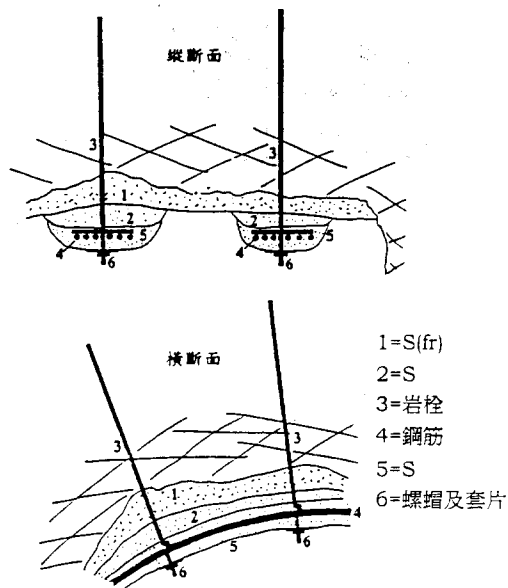
在易產生擠壓之軟弱岩盤、含膨脹性粘土或薄覆蓋層時,一般厚度之鋼纖噴凝土所提供之支撐力可能不足;或開炸後之斷面太過於不規則以致無法使岩體形成承載環時,可採用如圖五所示之鋼筋噴凝土加勁環(RRS)來作為支撐:在鋼纖維噴凝土之後,岩壁加噴一層無加勁噴凝土,再安設鋼筋,最後而噴上一層噴凝土加以保護鋼筋及防銹。相較於一般之鋼筋,RRS之最大優點是能與岩盤緊密相接,發揮支撐效果,避免岩盤因大量變形或鬆動而喪失強度。

4. 澆鑄混凝土拱(Cast Concrete Lining)

岩體狀況極差(例如膨脹或擠壓性岩盤)或開挖斷面較大時,除了可使用RRS之外,於需要時亦可再以澆鑄全斷面之混凝土拱(CCA)作為支撐。視岩體之變形或破壞情形,CCA厚度可以從平均30公分增加到1公尺以上。

在如圖三所示之第八、九類岩盤施工

時,其開挖方式應考慮採用多階段開挖或側導坑法,同時亦應考慮採用灌漿加固岩盤及導排水工法。在此軟弱岩盤段之施工,亦應密切加以監測及進行分析隧道之穩定性,以作必要之反應或補支撐。



圖五 RRS之橫斷面與縱斷面(Barton,1996)

2.3 NMT於TBM工法之應用

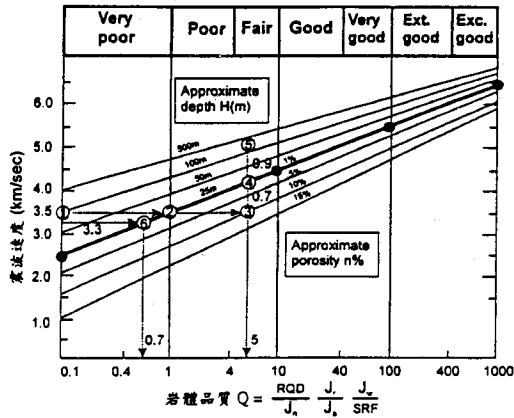
當隧道採用TBM開挖時,開挖面之地質資料,往往不可見,無法用來決定隧道之支撐。此時可利用前進鑽孔進行震測,量得隧道前方岩盤之壓力波速(V_p),利用圖六以估算岩體之Q-值及岩體之變形模數(\bar{M})。 V_p 、Q-值及 \bar{M} 三者之經驗關係式如下:
 $V_p = \log Q + 3.5 \quad (\text{km/sec}) \dots \dots \dots$

$$(3) \quad \bar{M} = 10 \times Q^{1.3} \quad (\text{GPa}) \dots \dots \dots (4)$$

$$\bar{M} = 10 \times 10^{\left(\frac{V_p - 3.5}{3}\right)} \quad (\text{GPa}) \dots \dots \dots (5)$$

在岩層深度(H,單位:m)愈大處進行震測,岩石孔隙率(n%)愈小,所得之壓力波速愈大;為了反應岩層深度及岩石孔隙

率對壓力波速之影響，可利用圖六進行修正。



圖六 不同深度及岩石孔隙率之震波速度與岩體品質之關係曲線(Barton,1996)

茲考慮一砂岩，震測深度為250m，孔隙率為10%，單壓強度25MPa，震測量得之 V_p 為3.5 km/sec，估算Q-值之步驟如下：

(1) 在圖六標示①處($V_p=3.5\text{km/sec}$)水平交標準線($H=25\text{m}$, $n=1\%$)於②處，所對應之Q值為1，此代表如在深25m處對 $n=1\%$ 之岩盤施測震測，如量得之 $V_p=3.5\text{km/sec}$ ，則此岩石之Q值為1。

(2) 考量 n 值修正，從②點再水平延伸交 $n=10\%$ 線於③點，對應之Q值=5，即在此較良質之岩石方能在 $n=10\%$ 之時，其 $V_p=3.5\text{ km/sec}$ 。由③與④之距離(0.7km/sec)，讀知 $Q=5$ 之岩盤，如其 $n=1\%$ ，則其 V_p 應增加0.7km/sec。

(3) 接著考量深度修正， $Q=5$ 岩盤，如量測深度為250m減至25m時，波速減少量應為④點與⑤點之距離，即為減少0.9km/sec。

(4) 綜合考量深度修正(減0.9 km/sec)及 n 值修正(加0.7km/sec)，其淨修正量為-0.2km/sec，即 V_p 應為3.5-

0.2=3.3 (km/sec)。由標準線與 $V_p=3.3\text{ km/sec}$ 線之交點(◎點)，代表將 H 由250m修正至25m及 n 值由10%修正至1%時之 V_p 及 Q 值(=0.7)。

由於圖六之關係曲線係基於單壓強度為100MPa岩石之行為，所得之值(以 Q_c 表之)尚需經岩石之單壓強度修正。修正方法如下：

$$Q = Q_c \times \frac{100\text{MPa}}{\text{岩石單壓強度}} = 0.7 \times \frac{100}{25} = 2.8 \quad \dots(6)$$

圖六所決定之 Q 值實為岩體品質之初估值，TBM施工可據此初估值，決定TBM後方之支撐是否應針對前方可能出現狀況而加強(或減少)，同時決定是否應對TBM前方進行灌漿或其他措施。當TBM持續前進，至此預測路段於盾尾出露時，可依目視決定岩體之真正之 Q 值，從而決定是否需進一步調整支撐(Barton, 1996c)。根據Løset(1992)之研究，在同樣地質狀況下，TBM施工所得之 Q_{TBM} 值有大於鑽炸工法所得 $Q_{D\&B}$ 值之現象。此現象發生之範圍在 Q_{TBM} 介於4至30之間($Q_{D\&B}$ 介於2至10之間)， Q_{TBM} 高出 $Q_{D\&B}$ 約1.5倍至3倍之間。在應用時，對此 Q 值區間之支撐選擇應加以注意，以決定合適之支撐。

2.4 NMT隧道防水策略

NMT隧道防水策略，如圖七所示：

由於其主要支撐為鋼纖維噴凝土，並不需要混凝土襯砌，在一般狀況下，噴凝土是會滲(排)水的。在滲水量大之處可施以灌漿，以減少水的入滲量。

如圖七(a)所示，在入滲水量不大的情況之下，僅需在隧道之上方加掛輕質隔版，以擋住滴水；在隧道下方可安置薄混凝土隔版，其後加設隔水膜，以隔水並集水排於下方之水溝。

當需進行溫度隔絕時(如高地熱帶)，可如圖七(b)所示，安設含隔熱材料之混凝土隔版，其後並安設隔水膜以隔水。

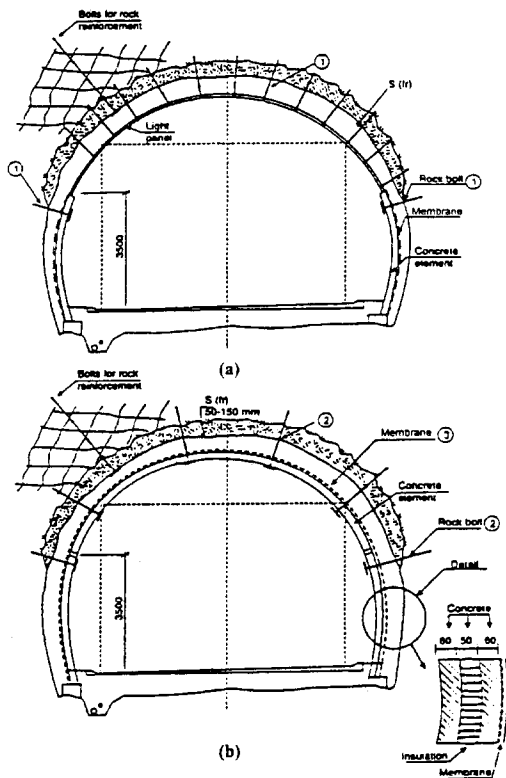
在內襯板與隧道岩壁之間為空隙，不需使用混凝土填滿。

此種防水(絕熱)之優點包括：(1) 可減少混凝土使用量(空隙取代了大部份的混凝土內襯砌之空間)；(2) 隔版之安設快速(組裝速率可達1公里/月)，且維修容易；(3) 超挖不致增加大量的混凝土用量(但超挖應極力避免)。

2.5 NMT施行步驟

NMT之主要施行步驟如下：

(1) 初步設計係依據現場地質調查、



圖七 NMT隧道內襯砌與排水佈置 (Barton,1996)

鑽孔岩心描述或震測詮釋結果，以評定Q值，從而決定各岩體狀況之支撐。初步設計可進一步透過數值分析進行局部調整，如在應力集中區可採用更強之岩栓。即大部份隧道路段之永久性支撐並不依監測結果決定，而係由數值分析，在設計階段事先決定。數值分析之軟體，可採用分離元素法(Distinct Element Method)之電腦程式 UDEC-BB(二維分析)或 3DEC(三維分析)。少部份重要路段仍需仰賴監測，適時調整隧道之支撐。

(2) 開挖方法通常採用鑽炸法，亦可使用TBM開挖。至於開挖方法及階段，Q-系統並未指定，施工者需自行決定適合岩盤狀況之開挖方式。

(3) 開挖時臨時性支撐，例如局部性岩栓、系統性岩栓、或系統性岩栓與鋼纖噴凝土，可作為隨後永久性支撐之一部份。

(4) 在開挖後，由現場之Q-值決定永久支撐。永久性支撐通常由鋼纖加勁之噴凝土，與全段灌漿保護之岩栓組成，鋼纖噴凝土係以高性能之自動機器施作，當遭遇極差之地質時可以鋼筋噴凝土加勁環來補強形成永久支撐。

(5) 以NMT設計的隧道基本上是不可能滲排水的，若為了防水及隔熱，可加掛輕質隔版或混凝土隔版。

對於重要之地下開挖，應再利用數值分析方法來驗證依Q值所估計之支撐是否足夠。於選擇數值模擬方法時應考慮岩體之節理狀況，圖八為Barton(1996a)所建議的Q值與數值模擬方法之關係。若Q值小於0.1時，由於岩盤之節理極為發達，於進行數值分析時可採用連體模式，如FLAC或ABAQUS程式；若Q值介於0.1與100之間時，由於節理不甚發達，因此比較適合採用分離元素法，如二向度之

UDEDEC程式與三向度之3DEC程式來分析岩體之應力、應變與支撐之受力情形。當Q值大於100時，可採有限元素法或邊界元素法來進行分析。

2.6 NMT之合約型態

合理且彈性之隧道工程合約除可避免爭議發生之外，亦可確保工程安全且降低工程費用。NMT累積20多年之隧道工程經驗，在合約方面之作法包括下列各項：

(1) 投標文件應儘量詳細，尤其是地質與大地工程調查報告及會施作之調查項目，使承包商清楚了解可能的岩體狀況、岩石支撐、與各項詳細之調查結果(包括事實與假設狀況)。

(2) 投標文件列出各種支撐之數量及單價，並包括各種替代方案(如前進鑽探、灌漿、導坑等)之單價，不同支撐之要求與使用時機均在招標文件中予以規定。支撐可分為兩大類，第一類係在開挖面施作，會影響隧道施工進度，第二類則係在開挖面之後施作，不會影響施工進度。此外，所有在開挖面施作之支撐，其單價包括工

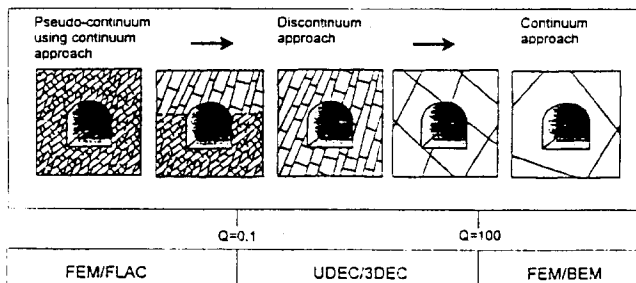
作人員與機具設備因延誤及閒置而產生之費用，招標文件亦應規定承包商須於工地設置之機具設備，並且規定其等候施工(Stand-by)之單價。

(3) 承包商須於投標文件中說明每一種支撐工之等值時間，以作為若變更支撐種類或數量時，計算總施工工期之依據。

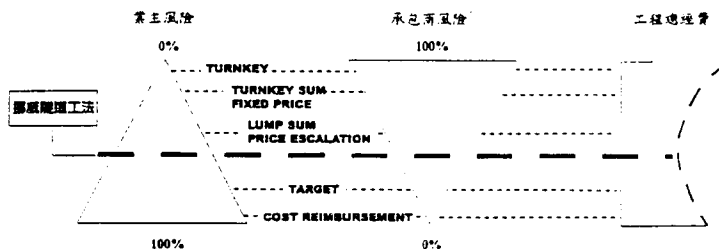
(4) 業主與承包商均應有熟練且有經驗之代表駐在工地，當施工有問題發生時，雙方均在現場一齊會勘、評估並決定最適當之解決方案，避免延誤或爭議，由於各項替代之支撐設施均有單價，因此承包商亦可提出其最佳建議。業主的代表或顧問必須是專家並且有決定最佳方案之權力，因此業主僅對在合格施作(Technical Correct)的支撐計價。

(5) 承包商之施工費用係依據招標文件上所列之單價結算。

以業主及承包商之風險分攤比例而言，此種合約型態業主分攤了大部份之風險，如圖九所示，使得工程費用可以有效降低(Kleivan, 1988)。



圖八 Q值與數值模擬分析法之關係(Barton, 1996)



圖九 合約型態與業主—承包商之風險分攤比例關係示意圖(Kleivan, 1988)

三、NMT與NATM之差別

綜合前面各節所述，NMT之主要特點可摘述如下：

1. 適用岩體：

(1) 節理岩體；較堅硬之岩體
($\sigma_c=3\text{MPa}\sim 300\text{MPa}$)

(2) 含粘土帶(Clay bearing zones)，
應力造成岩塊剝落或墜落情況
($Q=0.001\sim 10$)

2. 開挖方式：鑽炸、硬岩TBM、在含
粘土帶中人工開挖。

3. 臨時及永久支撐：

(1) 可包括以下任一種：CCA, S(fr)
+RRS +B, B+S(fr), B+S, B,
S(fr), S, sb, 或不需支撐。註：
CCA=澆鑄混凝土拱, S(fr)=鋼纖
噴凝土, RRS=鋼筋噴凝土加勁
環, B=系統性岩栓, S=噴凝土,
sb=局部性岩栓(Spot bolt)。

(2) 臨時支撐可成爲永久支撐之一部
份。

(3) 不用鋼線網。

(4) 不用乾式噴凝土。

(5) 不用鋼支保或桁架梁(lattice
girder)；在粘土帶用RRS。

(6) 承包商決定臨時支撐。

(7) 業主/設計顧問決定永久支撐。

(8) 很少使用混凝土內襯砌，以
B+S(fr)取代。

4. 岩體分類之用途：

(1) 預測岩體品質。

(2) 預測支撐需求。

(3) 在施工時，只於重要斷面監測，
適度調整支撐。

5. 成本：

(1) 低成本

(2) 較短工時

(3) 安全性提高(及時支撐)

(4) 施工環境較佳

由上述NMT之特性，Barton等人
(1992)進一步比較NMT與NATM之差異
如下：

(1) NATM可用於開挖斷面平滑且可
形成完整承載岩環(Load Bearing Ring)
的岩盤，較不適用於節理發達或過度破碎
(Overbreak)的岩盤，而較適用在可使用
機械或人工開挖之較弱地層。

(2) NMT適用於節理發達與過度破
碎，且採用鑽炸法或TBM之較硬岩盤中。

(3) 除了已設置之初始支撐(Primary
Support)之外，NATM必須借重監測結果來
決定二次支撐(Secondary Support)是否須
設置，及其設置時機與支撐種類及尺寸。

(4) NMT使用岩體分類來預測支撐設
計，而NATM須結合岩體分類與監測來選
擇支撐等級。

(5) 由於岩盤過度破碎，NMT並不使
用鋼筋及桁架梁，主要係使用多功能之系
統性岩栓與鋼纖噴凝土，調整這兩種支撐
之打設間距與厚度即可應用於任何開挖
斷面，作爲臨時性或永久性支撐設施。於
不平整之壁面上，若需要可使用鋼筋噴凝
土加勁環以形成厚的承壓環。

(6) NMT不使用混凝土襯砌作爲永久
性支撐，而NATM則在臨時性支撐完成後
需再使用混凝土襯砌。

(7) NMT常使用高效能的自動機器設
備施作溼式鋼纖加勁噴凝土，而NATM工
法中，尚有部份使用人工安置鋼線網，再
以手提設備施作乾式噴凝土。

四、NMT於國內之適用性評估

4.1 Q-系統之適用性探討

在1974年提出之Q-系統，所根據之案例為212例，在1993年提出修正時所根據之案例已達1050例。考慮台灣之地質條件，如欲使用Q-系統，則下列事項有進一步探討之必要：

(1) 軟弱岩石之權重不足

Q-系統並未直接考慮岩石之強度，在應力折減因子中考慮剪裂帶與斷層所引起之岩石鬆動、擠壓及膨脹性地層，與岩盤是否含有夾泥、剪裂帶與軟弱夾層等因素。在這些狀況之SRF值變化範圍由2.5至20；反觀考量岩爆因素，SRF值變化範圍由0.5至400，對Q值之影響極為顯著。且SRF值係位於分母，其值愈大，Q值愈小，即岩盤之品質愈差。考量台灣之軟弱、破碎之岩盤，實有必要進一步探討目前之軟岩SRF值(2.5~20)是否能充份反應岩體之品質。

(2) Q-系統未能考量軟弱岩體之特殊因素

根據台灣北部地區隧道施工經驗顯示，造成施工災變之因素尚包括：邊坡滑動、薄覆蓋層、岩石遇水(或解壓)劣質化、大量湧水、地質構造(斷層、褶皺)。這些因素在Q-系統中尚未被系統性計入，有待進一步發展(鄭富書等人，1996)。根據鄭富書等人(1996)對軟岩浸水後力學行為的研究發現，軟弱砂岩浸水2小時後強度下降達60%，變形模數下降達60-70%，影響極大。如果隧道不能維持良好的排水狀況，則應考量水造成岩石劣質化之影響。

(3) 無法涵蓋國內之所有地層

Barton等人在發展Q-系統時所依據之案例，並無卵礫石地層，另沉積岩所佔比例太低(僅約10%)，主要係偏重在火成岩(尤其是花崗岩與片麻岩)與變質岩(尤其是片岩與石英石)等硬岩，由於台灣西部麓山帶之岩盤主要係以沉積岩為主，因此Q-系統在砂岩、頁岩、泥岩與砂頁岩或砂泥岩互層之沉積岩(尤其是第四紀地層)，以及卵礫石層之適用性有進一步評估之必要。

(4) Q-系統較為複雜，不易使用

Q-系統雖與RMR一樣共有6個參數，其中對節理面粗糙度、節理換質及應力折減等因子之考慮最為詳細，其評分亦相對較為困難，其中尤以 J_a 與SRF之評分最為不易，需熟練且豐富經驗之地質師或大地工程師方可精確使用，此亦為國內目前採用此分類法之比例仍普遍低於RMR之一原因。此外，由於Q-系統之評分項目仍有不少描述性之文辭，因此其最後之評分結果與RMR法一樣，易偏於主觀，於應用前須加強專業技術人員之訓練。

(5) Q-系統未能考慮隧道間互制的影響

依據近年來台灣北部地區隧道之施工及監測資料顯示，相鄰兩隧道間之距離若小於2至3倍隧道直徑時，其互制現象相當顯著，此因素在評分設計中，尚未具體加以考慮。

4.2 Q-系統之開挖工法探討

(1) 未涵蓋開挖工法

由於台灣之地質條件不佳，岩盤多軟弱、破碎，隧道施工時往往需採用不同之開挖方式，如多階段開挖、側導坑法。在遇容易抽心之岩盤時，需採用管幕工法，同時開挖面需加以穩定(如噴漿、安設臨時

岩栓)。 Q -系統雖對隧道之支撐有所建議，唯對隧道之開挖工法(尤其是軟弱岩盤，有產生大量擠壓或大量抽心者)則未有所建議。故採用 Q -系統時，開挖工法之決定，仍有賴有經驗之工程顧問公司加以分析與設計。

(2) 未涵蓋導排水工法

如隧道有大量湧水之情況(或可能性)時，在隧道施工時應施作導排水措施，以減少水之入滲量至可以施工為止，此為 NMT 或 Q -系統之前提。台灣隧道工程中，遭遇大量湧水之例子不少，如北迴鐵路之永春隧道、南迴鐵路之中央、安朔、大武、大鳥等隧道以及目前施工中之坪林隧道等。當隧道遭遇湧水時，可採用灌漿、排水導坑等方式加以排導水。如採用 NMT 工法，有關導排水之工法仍應事先規劃及設計。

(3) 未涵蓋特殊支撐方法

在隧道施工中，會遭遇特殊之地質狀況，而採用特殊支撐方式，例如：

(a) 安設岩栓鑽孔時，在破碎岩盤會遭遇塌孔情況，此時可能需改採用自鑽式岩栓。

(b) 有大量抽心之可能時，開挖面須加以穩定，視情況之需要，可能需安設臨時岩栓，如玻璃纖維岩栓。同時開挖時，隧道頂拱需施作管幕。

(c) 考量需快速安設岩栓時，可能需採用膨脹式($Swellex$)岩栓。

Q -系統雖有建議岩栓之安設距離、長度，對岩栓型式之採用則留下空間讓設計者或施工者視地質狀況，自行決定。其他工法(如灌漿、支撐時機、仰拱閉合時間要求)之採用與設計，亦留下空間，由設計顧問及承包商決定。

(4) 未考量施工技術與品質

NMT 在挪威施作成效良好，配合之條件之一為隧道承包商之施工技術與施工品質良好。反觀台灣之施工品質，不可諱言，部份隧道之施工存在下列現象：

(a) 開挖技術不佳 - 部份隧道開挖之鑽孔數不足、開炸雷管的延遲段數不足、炸藥用量過大，造成岩體因開炸造成損傷嚴重，增加支撐之需求。有人目睹開炸後，形容為「轟炸」，其來有自。

(b) 隧道浸水 - 軟弱岩盤有遇水弱化之現象，故在此種岩盤隧道施工，應作好排水工作，使隧道保持乾燥。很不幸地，國內隧道施工很少重視排水工作，內部泥濘的隧道，頗為常見；這些隧道在岩體評分之後，岩體品質仍會持續劣化，為 Q -系統所料不及。

(c) 轉包與工程界面 - 國內隧道之開挖、出碴、支撐工作由主營造商再行分由下包執行者不在少數。 NMT 之效率高，與施工人員之技術有關，施工人員需具備自動機械操作，從事鑽孔、開炸、出碴、噴凝土、安置岩栓等一系列工作，同時亦應具備機械維護能力。國內不僅欠缺「全能」之現場施作人員，更因國內人力不足，引進外籍勞工，其技術能力更顯不足。同時，由於各班人員換班之時間延誤、施工狀況未能完全交接，對隧道之穩定有相當不利之影響。

因此，應考慮施工品質之影響；例如可以減少 ESR 值之方式，作為可能之方法之一。

前二節所述之 Q -系統限制，值得進一步釐清或改善。值得注意的是，上述待改善之空間，並非僅 Q -系統所有；另一常用之 RMR 岩體評分法，亦有類似問題。根據鄭富書等人(1996)對台灣北部曾遭遇施工障礙之隧道研究結果發現，在某些隧道

Q-系統所評定之岩體品質較RMR法能充份反應隧道之地質狀況。

4.3 其他方面之探討

(1) 合約技術可供借鏡

NMT須視現場開挖後之岩體狀況及穩定情形，適時調整支撐及開挖方法，故合約須有相當之彈性，且業主代表及承商均應有豐富之專業能力，業主亦須有足夠之行政裁量權，可及時決定最適當之支撐設施及應變措施，以解決問題，並且避免爭議。國內目前受限於制度及一般人對隧道工程之特性及風險認識不足，以致合約僵化，業主與承商互信不足。NMT在隧道合約之作法，可提供國內合約及行政改革之借鏡。以合約內容方面，NMT在合約方面即明訂各種可能支撐方式及計價、容許替代方案及單價等。其計價項目甚至包括承包商等候施工之單價；國內目前不少工程爭議即為承包商等候施工之開銷，因此NMT的計價制度有值得參考的價值。

(2) 支撐技術有待推廣

溼式鋼纖噴凝土為NMT之主要支撐構件，國內曾成功地引用於台電之明湖抽蓄發電計畫中，但其使用仍未普遍。有關溼式鋼纖噴凝土之設備與技術有待進一步引進與研發，並累積實作經驗。此外，NMT所使用之多重防蝕永久性岩栓則尚未引進至國內，此等NMT的支撐工法均有待引進與推廣。

(3) 震測技術有待加強

國內於1994年開始引進隧道內震測法，用以探測隧道開挖面前方地質弱帶，進行震測技術之累積及研發(鄭富書等人, 1997)。NMT在TBM施工之應用需下孔式速度井測(Downhole Velocity Logging)或跨孔式震波斷面掃描(Crosshole

Tomography)技術，震測在這一方面之應用技術、儀器以及軟體有待進一步引進與研發。

五、結 論

本文對挪威隧道工法及其特性，作一摘要介紹；同時對挪威隧道工法在台灣適用性作一初步探討。綜觀NMT及NATM各有其優點，尤其是NATM在台灣施行近二十年，成功地完成了不少隧道。NMT具有不少優點，包括支撐、工時、經費、合約方式方面有其吸引人之處。

總體而言，以台灣之地質狀況及工程環境，可以考慮吸收NMT之優點，在採用NMT之作法之前，應作好一些準備工作，如：

(1)充份瞭解NMT及其特色，釐清其涵蓋及未涵蓋之範圍，同時評估何者應予引進。

(2)NMT所採用之部份技術可考慮先行引進國內，如鋼纖維噴凝土與震測技術等，可結合NATM施作或於其他工程(如邊坡工程)採用，累積實作經驗及本土化之改進。

(3)國內隧道合約之型式，目前已力求改善(鄭富書等人, 1997)，可參照NMT之合約型式，加以改革。

其實，在多年與隧道奮鬥過程中台灣本身亦累積不少隧道技術，建議未來應擷取各方法之長處，結合台灣之隧道經驗，發展出台灣本土之隧道工法。筆者與NMT專家Barton博士相談時，問及為何不稱其方法為NTM(Norwegian Tunnelling Method)，似乎更直接。Barton博士笑答，如果外人誤認NTM為New Taiwan Method，豈是不妙？平心而論，以台灣

目前所遭遇之隧道問題，不少是世界級之挑戰，如果我們能利用機會累積經驗與發展技術，有朝一日，以NTM著稱世界，亦不足為奇。

參考文獻

- 鄭富書 (1995), "長隧道工程技術之研究-台灣北部隧道天然施工障礙之研究, 研究報告", MOTC-STAO-RD1501, 交通部。
- 鄭富書、李怡德、黃燦輝 (1996), "軟弱砂岩遇水弱化行為實驗研究", 1996岩盤工程研討會論文集, 台灣大學, 1996年12月, 第373-382頁。
- 鄭富書、林銘郎、黃燦輝 (1996), "北部地區軟弱岩隧道天然障礙之探討", 岩石隧道施工技術研討會論文集, 台灣營建研究中心, 台北, 第19-56頁。
- 鄭富書、蔡道賜、林德松、施心玫(1997), "隧道前方地質弱帶自動化探測系統", 隧道設計與施工自動化講習會論文集, 台灣營建研究院, 1997年4月, 第45-75頁。
- 鄭富書、張森源、傅子仁、姚錫齡、黃治、侯嘉松、藍禮祖、劉姓 (1997), "隧道工程合約訂定與執行 - 現況及改革方向", 隧道工程技術、機具與工法研討會, 行政院公共工程委員會, 86年5月, 第29-55頁, 台北。
- BARTON, N. (1996a), "Investigation, Design and Support of Major Road Tunnels in Jointed Rock using NMT Principles," IX Australian Tunnelling Conference, Sydney, Australia.
- BARTON, N. (1996b), "Recent Development in Tunnelling Technique." Short Course Lecture Notes. Sinotech Engineering Consultants Inc., Taipei.
- BARTON, N. (1996c), "Rock Mass Characterisation and Seismic Measurement to Assist in the Design and Execution of TBM Projects," Proc. of 1996 Taiwan Rock Symposium, National Taiwan University, Taipei, pp. 1-16.
- BARTON, N. AND E. GRIMSTAD (1994), "The Q-System Following Twenty Years of Application in NMT Support Selection," 43. Geomech Colloquy, Saizburg, Felsbau 12 (1994) No. 6, pp. 428-436.
- BARTON, N., E. GRIMSTAD, G. AAS, O.A. OPSAHL, A. BAKKEN, L. PEDERSEN AND E.D. JOHANSEN (1992), " Norwegian Method of Tunnelling, " WT Focus on Norway, World Tunnelling, June/August, 1992.
- BARTON, N., R. LIEN, J. LUNDE, (1974), "Engineering Classification of Rockmasses for the Design of Tunnel Support," *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
- GRIMSTAD, E. AND N. BARTON (1993), "Updating of the Q-System for NMT," Proceedings of the International Symposium of Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes, Eds. Kompen, Opsahl and Berg. Norwegian Concrete Association, Oslo.
- JENG, F.S. AND T.H. HUANG (1996), "Validity of Rock Classification Method for Difficult Terrain," Proc. of the 6th KU-KAIST-NTU Trilateral Seminar/Workshop on Civil Engineering, Taejon, Korea, pp. 165-172.
- KLEIVAN, E. (1988), "NOTCOS - Norwegian Tunnelling Contract System." Norwegian Tunnelling Today, Publ. No. 5, pp. 67-72.
- Loset, F. (1992), "Support needs compared at the Svarusen road tunnel." Tunnels & Tunnelling, June 1992.

本文之討論意見將在後期刊出，請您將意見於兩個月內寄交本刊編輯委員會。

86年 7月 5日 收稿
86年 8月 26日 修改
86年 10月 7日 接受