

노르웨이 터널 시공 방법¹⁾

김치환²⁾ · 임경호²⁾ · 이석천²⁾

Norwegian Method of Tunnelling

Chee Whan Kim, Kyung Ho Lim and Seok Chun Lee

ABSTRACT

NATM has been applied most of tunnel design and construction in Korea these days. But, if you observe the tunnel designing method and construction conditions, you can see that the NATM isn't usually the most suitable to Korean geology. Also most of engineers feel that it is necessary to understand the NATM correctly and to introduce another tunnelling principle which can be applied more economically and safely. So, we'd like to introduce a new tunnelling concept, Norwegian Method of Tunnelling(NMT) by comparing the NATM. The main character of NMT is that the forward prediction of conditions and the support of tunnel is done through geological investigation in details. And it can be compared with NATM, in which the support pattern is decided by monitoring of tunnel deformation on the construction.

1. NMT와 NATM의 비교

노르웨이와 오스트리아는 슛크리트와 록볼트를 이용하여 터널을 시공하는 기술이 뛰어난 나라이다. 이들 두나라는 터널보강과 관련하여 오랜 전통을 갖고 있으나 적용대상과 개념적인 측면에서 현저한 차이를 나타내고 있다. 즉 NATM은 기계굴착이나 인력굴착이 가능한 연암에 적합하며, 따라서 여굴이 발생되지 않고 요철이 없는 매끈한 굴착면 형성이 가능하다. 계측은 NATM에서 필수적인 요소로 2차 보강의 시기와 보강량을 결정하는 중요한 역할을 한다. NATM에서는 슛크리트가 주보강재로 사용되며 암반 조건에 따라 록볼트와 강재지보의 패턴이 변경되어 사용된다.

반면에 NMT는 응력이 크게 작용하며 절리가 많이 분포한 암반에 적용된다. 따라서 천공발파공법이나

경암용 TBM 등에 의한 굴착이 주로 이용되며 지질이 극히 나쁜 곳에서만 계측이 이루어진다. 이 방법은 Q-시스템에 의하여 암반분류를 하고 보강방법을 미리 결정하는 사전예측방법이며, 록볼트를 주보강재로 사용한다. 노르웨이의 경암터널에서는 과굴로 인하여 와이어메쉬와 강재지보의 사용은 부적당하며 대신에 강섬유 보강 슛크리트와 록볼트가 주로 이용된다. 이점은 이들 보강재들이 모든 형태의 터널 단면형상에 적용할 수 있기 때문에 터널 보강재로서 매우 유용하고, 강섬유보강 슛크리트의 두께와 록볼트 간격을 조정함으로써 임시보강이나 영구보강인 경우 모두에 적용할 수 있기 때문이다. 암반등급에 따라 보강 방법은 CCA, S(fr)+RRS+B, B+S(fr), B+S, B, S(fr), S, Sb, NONE^{*)} 등으로 분류된다(Fig. 1). 일반적으로 NMT를 적용시 굴진속도가 빠르고 안전성이 높으며 작업환경이 개선되는 장점을 갖는다.

* 1994년 4월 22일 접수

1) 이 글은 'World Tunnelling' 1992년 6월호와 8월호에 게재된 'Norwegian Method of Tunnelling'을 발췌한 것이다.

2) 정희원, (주)삼립건설터트 기술 연구소

*) CCA: Cast Concrete Arches, RRS: Reinforced Ribs of Shotcrete, S(fr): Steel Fiber Reinforced Shotcrete, B: Systematic Bolting, S: Shotcrete, Sb: Spot Bolt, NONE: No support method.

Table 1. Comparing NATM with NMT

구분	NATM	NMT
적용 암반 조건	<ul style="list-style-type: none"> 연암으로 기계나 인력 굴착이 가능 절리가 구별되지 않음 과굴이 형성되지 않음 굴착면에 요철이 없이 매끈함 	<ul style="list-style-type: none"> 강도가 높은 암반에 적용 즉 절리가 있고 굴착중 과굴이 발생하고 천공 발파나 경암용 TBM 등으로 굴착함
계측	<ul style="list-style-type: none"> 2차 보강의 시기를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 	<ul style="list-style-type: none"> 지질이 극히 나쁜 곳에서만 계측한다.
보강재	<ul style="list-style-type: none"> Shotcrete가 주 보강재이며 경우에 따라 록볼트, steelrib를 함께 사용함 	<ul style="list-style-type: none"> 록 볼트를 주 보강재로 간주하고 있음 과굴로 인하여 steelrib은 부적당하여 거의 사용치 않음 강섬유 보강 슛크리트와 록볼트가 주보강재이고 steelrib 대신 reinforced rib of shotcrete 사용 (요철이 있는 굴착면에 밀착 보강가능)
보강 방법	<ul style="list-style-type: none"> 계측에 의하여 변위가 계속 진행하면 추가 보강하는 방법 	<ul style="list-style-type: none"> Q-system에 의하여 암반 분류를 하고 보강방법을 미리 결정하는 사전 예측 방법 (forward predictive method) 임

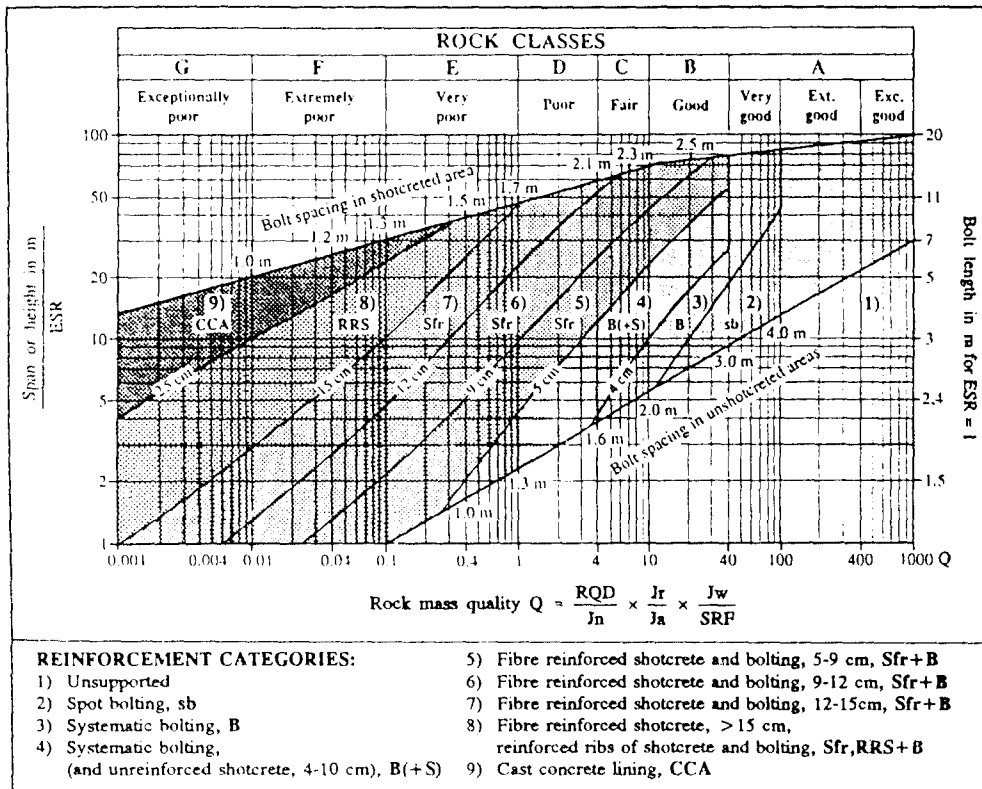


Fig. 1. Rock mass classification-permanent support recommendation based on Q and NMT. (Note extensive use of S(f) as permanent support.)

2. 사전 조사 방법

2.1 지질조사 및 암반의 공학적 분류(Q-시스템)

NMT는 조사설계 단계에서 지질 및 지질공학적 특성을 거의 완벽하게 파악하여 굴착장비, 굴착방법 및 보강방법을 상세히 서술한다. 이를 위해 단순히 경험적인 방법에 의존하기 보다는 Q-시스템과 같은 정량적인 분류체계를 도입함으로써 객관적이며 일관성 있는 분류가 이루어지고 있다. NGI(Norwegian Geotechnical Institute)에서는 지난 20년간 노르웨이에서 시공된 약 4,000 km의 터널중 25%에 대하여 시공중 지질 mapping을 실시하였고 이를 토대로 암반을 공학적으로 분류하였으며 최근에는 1,000개소 이상의 터널 시공현장에서 암반분류를 행하여 Q-시스템의 분류기준을 재설정 또는 수정을 계속해 왔다.

NMT는 Q-시스템에 근거한 사전예측 보강방법으로 계측을 통하여 최종보강 시기와 보강량을 결정하는 NATM과는 근본적으로 다르다. 이러한 관점에서 가장

중요한 점은 사전예측에 의한 보강량 결정과 조사, 설계단계에서 예측하지 못한 지질조건에 대해 가능한 한 신속하고 정확하게 보강방법을 변경하여 시공자와 발주자 외에 관계자의 검토를 거치고 지체없이 이 보강을 시행함으로써 시공 안전성을 높이고 보강방법에 대한 논란을 줄이는 것이다.

1) Q-시스템의 수정 발전

Q-시스템은 1974년 Barton 등에 의해 제안된 것으로 1986년 Grimstad 등에 의해 NMT의 본질적 요소인 습식 강섬유 슛크리트를 적용하기에 적합하도록 수정·간편화되었다. 또한 1990년 NGI에서는 현장 및 시추조사로부터 얻어진 자료를 효과적으로 표시하기 위한 logging chart를 작성하였다(Fig. 2). 여기에는 Q-시스템의 기본적인 요소외에 수치해석중 개별요소법(UDEC-BB)의 입력자료를 포함하며 다음과 같이 분류된다.

A. 암반의 구조

1. R.Q.D(Q)

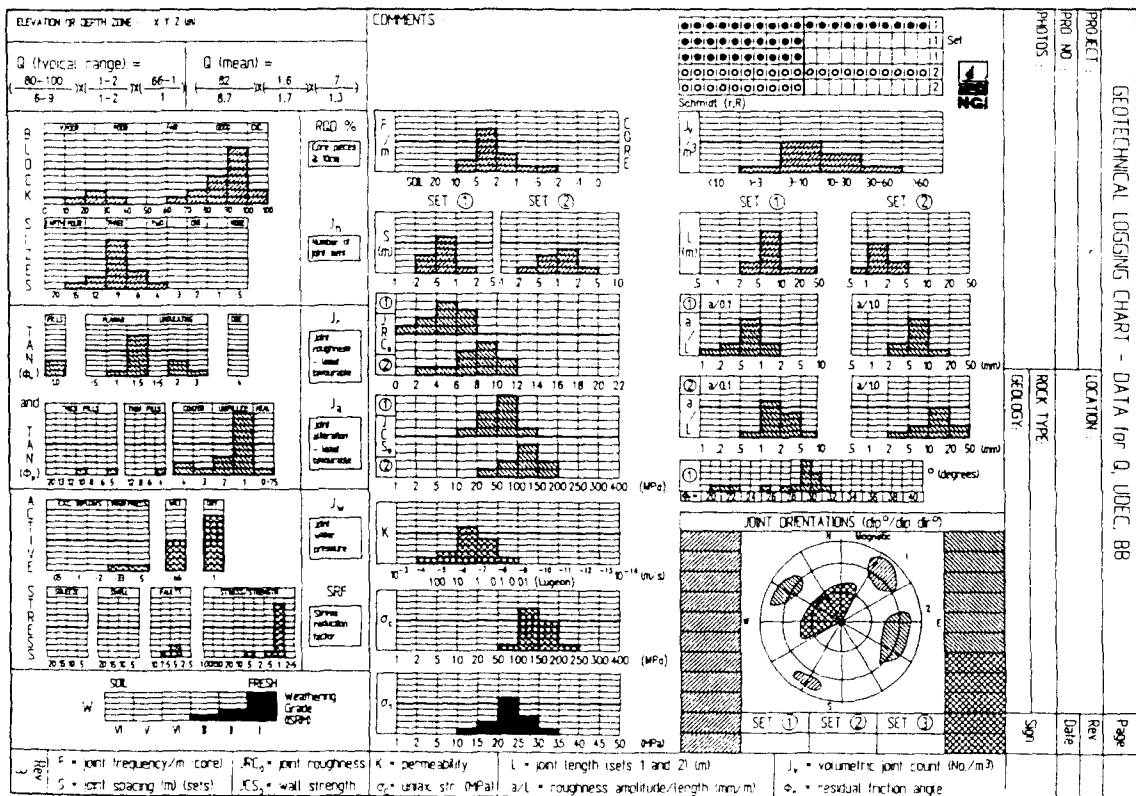


Fig. 2. Geotechnical logging chart for describing rock masses and rock joints for subsequent use in Q-system and UDEC-BB tunnel and cavern design.

- 2. J_n : 절리갯수(Q)
- 3. F: 절리빈도
- 4. J_u : 단위부피당 절리갯수
- 5. s: 절리간격(m)
- 6. L: 절리길이(m)
- 7. W: 풍화도
- 8. σ/β = 경사/절리경사의 방향
- B. 절리특성
 - 9. J_r : 절리면의 거칠기(Q)
 - 10. J_a : 절리면의 풍화도(Q)
 - 11. JRC: 절리면 거칠기 계수
 - 12. a/L: 단위길이당 거칠기 빈도(mm/m)
 - 13. JCS: 절리면의 압축강도
 - 14. ϕ_r : 잔류마찰각
- C. 지하수, 응력, 강도
 - 15. J_w : 절리내 지하수 감소계수(Q)
 - 16. SRF: 응력감소계수(Q)
 - 17. K: 암반의 투수계수(m/s)
 - 18. C: 압축강도
 - 19. I: 최대주응력

또한 Grimstad와 Barton 등은 1992년에 노르웨이내 1,050여개의 터널 현장에서 조사된 자료를 분석하여 Q-시스템중 SRF의 분류기준을 수정하였다.

2.2 시추공간 탄성파탐사(Cross-hole Tomography)

터널이 토피가 낮은 지역의 단층대나 해저의 대단층을 통과할 것으로 예상될 때 단층대의 정확한 위치, 규모 및 성상을 파악할 필요가 있다. 이를 통해 시공자는 시공전략 수립, 장비 결정, 위험의 최소화 등을 도모할 수 있으며 과보강이나 시간지체를 피할 수 있다. 이런 측면에서 노르웨이에서는 공간 탄성과 탐사의 수행이 증가되는 양상이며 대규모 프로젝트에서 사전 혹은 시공중에 필수적인 지질조사법으로 인식되고 있다. 특히 저장공동 및 지하체육시설 등 대규모 폭을 가진 공동을 시공시 공간 탄성과 탐사를 통해 암반 내부구조를 파악함으로써 적절한 공동의 위치를 선정하여 보강량을 대폭 줄일 수 있다. 일례로서 62m 폭을 가진 요빅 지하아이스하키장을 들 수 있는데 공간 탄성과 탐사를 통해 공동의 심도 및 방향을 결정하였다(Fig. 3).

공간 탄성과 탐사로는 지상에서 시추를 하고 시추공

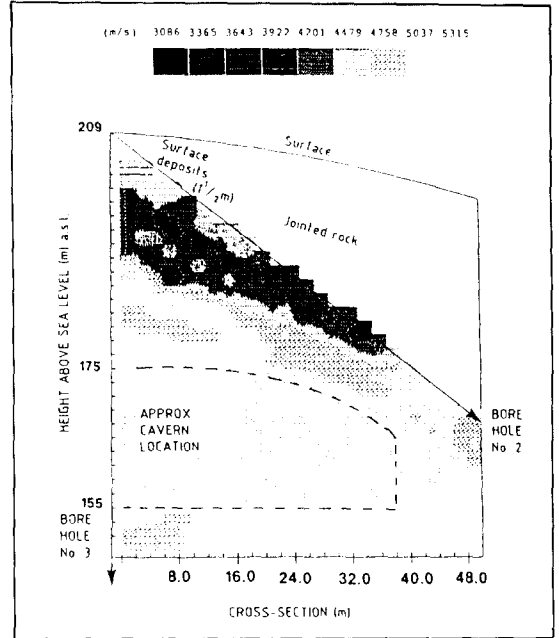


Fig. 3. An example of cross-hole seismic tomography for extrapolating data between boreholes: Gjovik Olympic cavern.

Table 2. Approximate correlation between Q and P-wave velocity

V_p (m/sec)	500	1500	2500	3500	4500	5500	6500
Q	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000

사이의 지질을 파악하는 방법과 터널 막장에서 선진 시추를 하고 이 시추공 사이의 지질을 파악하는 두 가지 방법이 있는데 이 두가지 방법을 조합하여 사용함으로써 관심지역의 지질조건을 확인할 수 있다. 또한 Barton은 탄성과 속도 V_p 와 Q 값 사이에는 다음과 같은 일정한 관계가 있다고 밝혔다(Table. 2).

$$Q = 10^{(V_p - 3500)/1000}$$

따라서 공간 탄성과 탐사에 의해 보강량을 산정할 수 있다.

3. NMT에서의 보강패턴

노르웨이에서는 경암을 대상으로 한 터널시공이 많음에도 불구하고 단층대, 지각운동에 의한 절리

발생 지역, 열수변질 지역 그리고 Rock Burst 발생 지역 등이 많이 분포하기 때문에 터널 시공시 암반 보강이 필요하다.

터널이나 대규모 지하공동에서의 보강량은 시공 목적과 유지기간에 따라 다양하며, 이러한 점은 Q-시스템에서 ESR로써 언급하고 있다. 가장 많이 사용되고 있는 보강재는 록볼트(경우에 따라서는 Steel Strap과 함께 사용), 강섬유 보강 슛크리트 그리고 Cast Concrete이다. 록볼트의 길이와 간격 그리고 슛크리트의 두께와 발현강도와 같은 보강설계는 Q-시스템에 의거하여 이루어지고 있다. 최근에는 암반 조건이 매우 불량한 지역에서도 록볼트와 강섬유 보강 슛크리트 혹은 Steel bar reinforced ribs of shotcrete (RRS)의 사용으로 기존의 Cast Concrete를 점차적으로 대체해 나가고 있는 추세이다.

3.1 록볼트

노르웨이에서는 여러 형태의 록볼트가 사용되고 있다. 임시 보강재로서 사용될 때는 신속하고 간편한 설치로 암반의 안정효과를 즉시 얻을 수 있어야 하고, 영구 보강재로서 사용될 때는 오랜 기간 보강효과를 지속할 수 있는 내구성이 가장 중요한 요소인데 단일 형태의 록볼트로 이러한 요구조건을 충족시킬 수 있는 록볼트의 개발에 주력해 왔다.

경암지역에서는 선단정착형 록볼트(Point anchored rock bolt)가 임시보강재로 가장 널리 사용되며, Expansion shell이 부착된 Rebar bolt나 Tube bolt 그리고 폴리에스터 레진 카트리지로 선단을 정착시키는

Rebar bolt가 주로 쓰인다. 이 록볼트들은 영구보강의 목적을 위해 터널 막장면으로부터 일정거리 후방에서 그라우팅 된다. Rock burst나 압출이 발생하는 암반 조건에서는 Triangular steel plate가 부착된 선단 정착형 록볼트가 사용된다. 일반적으로 노르웨이에서는 Split set bolt, Wedge bolt 그리고 Swellex bolt와 같은 형태는 사용되지 않는다.

3.2 강섬유 보강 슛크리트(Steel fiber reinforced shotcrete)

암질이 불량하여 록볼트의 간격이 너무 좁게 되는 경우에는 슛크리트를 적용한다. 노르웨이에서는 1984년 이후 와이어메쉬 사용이 급격히 감소하고 있다.

강섬유 보강 슛크리트는 팽창성 점토질 암반, Rock burst 혹은 압출이 일어나는 조건에서 발생하는 암반 하중을 분산시키고 굴착면을 안정시키기 위해 사용된다. 슛크리트의 두께와 록볼트 병행 사용에 대한

Table 3. Bolt spacing as a function of Q-value with and without shotcrete(Grimstad et al., 1991)

	Spacing between rock bolts in metres			
	Q=0.1	Q=1.0	Q=10	Q=30
Areas without shotcrete	1.2	1.4	2.0	3.0
Areas with shotcrete	1.3	1.6	3.0	4~5

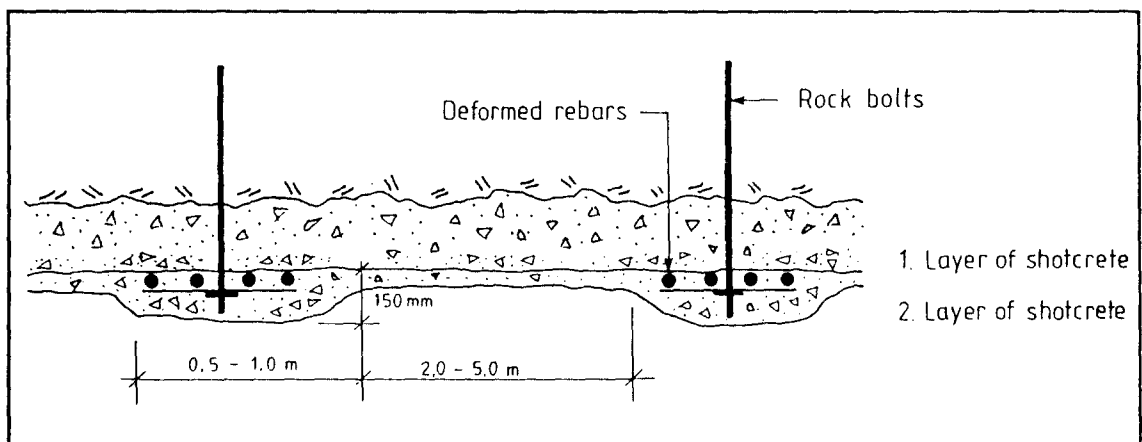


Fig. 4. Support with ribs of reinforced shotcrete(RRS).

필요성은 암반조건에 따라 달라지며 두께는 Q값에 의해 결정된다. 슛크리트 특성과 관련하여 암반의 변위가 크게 발생할 우려가 있을 경우에는 슛크리트의 처짐강도(Flexural Strength)와 Toughness index가 중요한 요소이며, 암반의 변위가 작을 때는 슛크리트의 압축강도가 가장 중요한 요소가 된다.

지난 3년간 노르웨이의 지하발전소, 도로 터널 등에서 약 1000가지 경우에 대해 분석한 결과, 슛크리트 보강시 록볼트 간격이 슛크리트 보강을 하지 않은 경우보다 넓어짐을 알 수 있다(Table 3).

3.3 철근지보 보강 슛크리트(RRS, Reinforced Ribs of Sprayed concrete)

주로 강섬유 보강 슛크리트의 통상적인 두께로는 재하되는 하중을 견디기에는 불충분한 경우에 철근 보강 슛크리트(RRS)가 이용된다. 이 방법은 발파에 의해 굴착면이 불규칙하게 형성된 암반을 보강하는 경우에도 효과적이다. Fig. 4와 같이 RRS는 철근의 두께와 간격이 필요에 따라 조정될 수 있는 신축적인 보강방법이다. Q값이 0.001에서 0.1인 매우 불량한 암반에서는 막장면에 선진시추, 공경의 변화를 관측하여 암반의 등급을 판단하는 것이 효율적이다. 강지보공 대신 RRS를 사용할 때 지반제어가 훨씬 효과적이며 슛크리트의 두께를 대폭 줄일 수 있다.

3.4 Cast Concrete Arch(CCA)

암반조건이 매우 불량한 암반(팽창·압출성 암반)에서 규모가 큰 공동을 굴착할 때는 분할굴착, 선진시추, 프리 그라우팅, 배수공법 및 임시적인 RRS로 보강해야 하며 철근이 보강된 Cast Concrete Arch를 주보강재로 이용한다. 록볼트와 슛크리트의 보강에 앞서 발생된 여굴의 양에 따라 CCA 두께는 30 cm에서 1 m까지 다양하며 압출·팽창성 지반에서는 조기에 강성이 강한 인버트 보강이 필수적이다. 또한 CCA 시공 전에 록볼트와 SFR 및 RRS에 대한 계측에 주의를 기울여야 한다.

4. NMT에서의 터널 굴진속도

볼트 시공용 점보와 자동 슛크리트 타설장치를 사용하는 나라에서는 터널 굴진속도를 크게 향상시킬 수 있으며 CCA대신 S(fr)과 B 또는 RRS와 B를 사

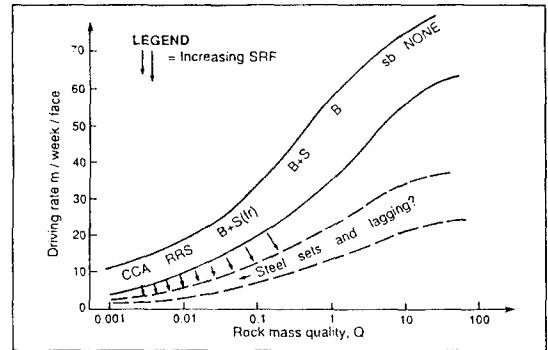


Fig. 5. Approximate tunnel advance rates in metres per week per face.

용하는 경우에는 터널굴진 속도가 더욱 증대된다. 나라별로 터널굴진 속도는 차이가 나며 특히 강재지보 및 Concrete liner를 주지보재로 생각하는 나라에서는 굴진속도가 현저히 떨어진다. 매년 100 km 이상 터널을 굴진하는 노르웨이는 경암용 TBM을 이용하는 경우 뿐만 아니라 발파 터널의 경우에도 터널굴진속도가 매우 빠르다. 즉 천공발파 도로 터널(단면적 50 m²)에서 주당 90~100 m의 굴진속도를 나타내는 경우도 흔하며 특히 TBM의 경우 주당 400 m를 기록한 경우도 있다.

Q값과 NMT 보강방법을 적용한 발파공법에서의 적정 터널굴진 속도를 제안하는 데는 터널의 단면적, 특수장비의 사용여부, 제약형태, 기술 수준 등에 제약을 받는다. Fig. 5는 NMT 보강방법이 채택된, 터널 단면적이 60~90 m²인 터널의 대략적인 굴진속도를 나타내는 것으로 강아치지보공을 사용한 경우의 곡선은 임의적인 것이다.

5. 연약대에서의 터널보강

연약대가 협재되어 있는 지반의 보강량 산정을 위하여 연약면의 Q값(대략 0.001 이하)과 주변 지반의 Q값(약 1.0)을 고려한다. 여기서 연약대의 두께와 연약대가 터널축과 만나는 각도가 중요하게 작용된다. 일반적으로 Q값을 평가할 때 이미 J_1/J_2 요소가 포함되어 연약대의 유리한 혹은 불리한 방향은 고려되었다. 터널설계에 있어서 연약대와 그 주변암반을 포함하는 실제적인 평균 Q값을 평가하기 위해 Loset (1990)는 다음 식을 제안하였다.

$$\log_{10}Q_m = \frac{b \log_{10}Q_z + \log_{10}Q_r}{b+1} \quad (6)$$

여기서, Q_m = 연약대와 주변암반의 평균 Q값
 Q_z = 연약대의 Q값
 Q_r = 주변 암반의 Q값
 b = 연약대의 폭(m)*

*터널축과 연약대가 교차하는 각도가 90°~45° : 1b
 터널축과 연약대가 교차하는 각도가 45°~20° : 2b
 터널축과 연약대가 교차하는 각도가 20°~10° : 3b
 터널축과 연약대가 교차하는 각도가 <10° : 4b
 예로서 $Q_z=0.01$, 연약대의 폭 $b=2\text{m}$, $Q_r=1$ 및 10인 경우를 적용해 본다. 연약대가 터널축과 30°로 교차한다고 가정한다.

$$1. \log_{10}Q_m = \frac{4 \log_{10}(0.01) + \log_{10}(1.0)}{4+1}$$

$Q_m = 0.025$ (주변 암반 불량)

$$2. \log_{10}Q_m = \frac{4 \log_{10}(0.01) + \log_{10}(10)}{4+1}$$

$Q_m = 0.040$ (주변 암반 좋음)

위 예에서 보듯이 매우 불량한 연약대가 포함되어 있을 경우 Fig. 1에서의 보강등급을 3~4등급 높여야 하며 록볼트는 연약대를 가로질러 켜매듯이 신선한 암반에 정착시킴으로써 연약대를 보강해야 한다.

6. 노르웨이 터널시공 계약 형태

터널 공사에 따른 계약 형태는 크게 나누어 Turnkey 방식, Lump Sum Fixed Price 방식 그리고 Cost Reimbursement 방식을 들 수 있다. 각 계약형태의 특징을 살펴보면 Turnkey 방식이나 Lump Sum Fixed Price 방식의 경우 공사비가 높고 재정적인 측면에서 시공자의 위험 부담율이 높으며 법적 분쟁의 소지가 많다. 이에 비해 Cost Reimbursement 방식은 시공자의 위험 부담율이 최소이고 발주자의 위험 부담이 큰 반면 공사비도 높은 것이 특징이다. Fig. 6은 계약형태별로 발주자와 시공자의 위험부담율과 공사비와의 상관관계를 나타낸 것이다.

노르웨이에서는 지난 20년간 터널 공사비에 대한 논쟁이 거의 없었으며, 조사 및 설계보고서에 지질 조사 및 지질공학 분석자료, 암질상태, 보강량 예측,

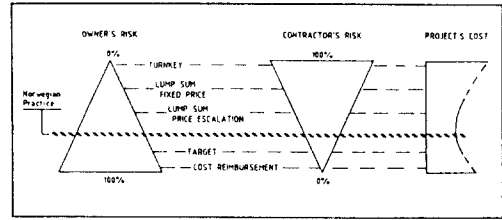


Fig. 6. Risk sharing according to type of contract and assumed influence on project cost(Kleivan, 1988).

장비 사용료, 굴착 방법, 보강재료비, 추가 조사비 그리고 추가 보강비 등을 명시하여 발주자와 시공자가 충분히 이해할 수 있도록 하였다. 노르웨이 계약방식의 개념은 여기치 못한 문제점이 발생할 경우, 발주자, 시공자 및 Consultant가 가장 적합하고 실용적인 방법을 찾기 위해 상호 협조적인 관계를 유지하도록 하고 있으며 설계 단계에서부터 예측 불허의 모든 가능성이 평가되기 때문에 완전 자유 경쟁의 장점을 보유하고 있다. 가장 강조되고 있는 것은 시공자가 부주의한 발파로 인해 불필요한 주변암반이 손상되지 않도록 해야 하는 것이다. 그렇지 않을 경우 발주자는 설계보고서내의 특정 암질에 대한 굴진거리의 제한, 천공패턴의 수정 등과 관련한 변경 단가를 적용한다. 그러므로 Q-시스템과 같은 암반분류 방법에 의해 발주자, 시공자 및 Consultant 간의 공사비에 대한 객관적 평가 및 추후 제기될 소지가 있는 분쟁을 해소할 수 있는 것이다.

7. 결 론

1) NMT 공법의 주된 특징중의 하나는 조사, 설계단계에서부터 철저한 사전조사를 실시하여 암반의 특성을 가능한 한 완벽히 파악함으로써 합리적인 보강이 이루어 지도록 하는 것이다.

2) NMT 공법은 Q-system에 의하여 암반을 분류하고 보강방법을 미리 결정하는 사전 예측 방법(forward prediction method)이므로 계측을 통하여 최종 보강시기와 보강량을 결정하는 NATM공법과는 근본적으로 다르다.

3) NMT 공법을 국내에 적용할 경우 기존의 터널 공법보다 굴진 속도가 빠르고, 안전성이 높으며 작업 환경이 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) Barton N., Grimstad G., Aas G., Opsahl O.A., Bakken A., Pedersen L. and Johansen E.D. 1992, "Norwegian method of tunnelling", WT Focus, World Tunnelling, June/August 1992.
- 2) Grimstad E. and Barton N., 1993, "Updating of the Q-system for NMT", Sprayed Concrete, Proceedings, Fragernes, Norway.
- 3) Kleivan, E., 1988, "NOTCOS-Norwegian Tunnelling Contract System", Norwegian Tunnelling Today, Publ. No. 5.