

복유립의 Unlined Tunnels



지왕돌

정회원, (주)청석엔지니어링 지반공학부
상무이사, 한양공대 겸임교수



임병찬

(주)청석엔지니어링 지반공학부

1. 개요

우리나라의 현재 터널 설계는 암질에 비해서 과다 설계 되는 경향이 있다. 우리나라는 대부분의 금속 광산 터널의 경우 규모는 작지만 무지보로 설계되어 있고, 대규모

석탄 광산의 주운반 굴진 터널의 경우도 심도 200m 이상에서 Lining의 설치 없이도 영구 구조물로 운영되고 있다. 또한 국내에서 시공된 대규모 유류 비축 저장동굴의 설계도 라이닝없이 시공되어 있으나, 구조적 결함은 전혀 없는 실정이다. 반면에 대부분의 도로 및 철도 터널은

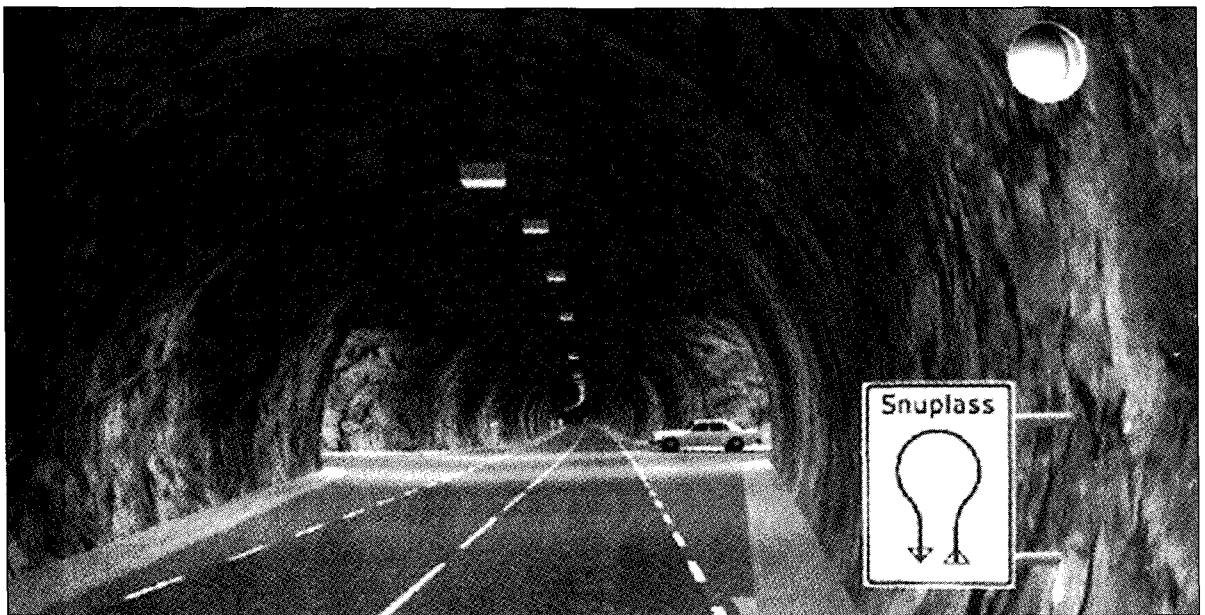


그림 1. 터널 전경

Lining으로 마감하게 설계 시공되고 있다. 국내 암반공학 기술이 일천하여 그 이론적 안정성이 실제로 현장에서 적용되고 있지 못함도 그 하나의 원인으로 판단된다. 국내 산악 터널의 암질과 유사한 북유럽의 경우 대부분의 수로터널, 도로터널, 철도터널에서 Unlined Tunnel이 적용되어, 안전성과 경제성에서 유리한 공학기술을 보여 주고 있는 실정이다. 따라서, 현재 터널기술을 터널의 전통적인 Underground Roof Control, Soil & Rock Mechanics, Rock Tunnel Excavation에 대한 전문가들의 의견을 모아서 현재 실시되고 있는 철도 및 도로 터널의 과다 설계문제를 해결해야 할 것이다. 여기에 덧붙여 정통 터널 기술이 아닌 단순구조 기술분야 등의 잣대로 지하구조물 설계문제를 보아서는 안될 것이다. 결국에는 우리나라 산악지형의 견고한 암질을 감안 할 때, 국내도 장대 산악 터널 건설공법으로 지보 패턴의 간소화, 기계화시공, 내부라이닝 생략 등으로 공기 단축 및 건설경비를 최소화할 수 있는 Unlined 공법적용이 필요할 것이며, 설계 기준 및 시방서의 작성을 위한 연구등이 필요할 것으로 사료된다.

2. Unlined Tunnel의 설계 적용

도심지 지하철 터널의 경우 천층에 위치하여 주변 기반암이 연약하고, 지하수위 변동에 의한 부등침하등의 영향으로 개착(Cut and Cover)형태의 설계가 많이 적용되며, 기본적으로 1차 지보재(1st Rock Support)로 인한 안전설계가 되어 있음에도 배수압등 안전성 확보 차원에서 Lining을 2차 지보재로 활용하고 있는 실정이다. 그러나, 최근의 세계적인 도로 터널의 설계추세를 보면, 산악 터널에서 지하수의 수압에 대한 영향을 고려하지 않고 완전 배수 형식으로 설계를 하고 있다. 또한 최근의 터널설계 기준(99. 건교부)에 의하여도 수압의 영향을 고려하지 않고 있는 배수형 터널 설계를 기준으로 하고 있어 수압의

영향을 Lining 설계시는 고려치 않게 되었다. 수분의 함량이 미비하게 되고, 그나마, 암층의 지지력에 의해 수압이 감쇄되어, 배수가 원활히 될 경우, 수압의 영향은 거의 없다고 판단된다. 실제적으로, 2차 지보재의 구조체로서의 기능이 불필요하게 되며, 암질이 우수한 경우는 굴착 기술에 따라 Unlined Tunnel System이 가능하게 된다. 국내에도 밀양 수로 터널등 TBM 굴착 구간의 경암지역은 Unlined Tunnel로 설계 변경된 바 있다. 외국의 경우에도 도로터널, 수로터널, 고 수압의 가배수로 터널, 발전용 터널 등도 Unlined Tunnel로 설계 시공하여 최고 80년 이상 안전하게 운영하고 있다.

실제적으로 일축압축강도 만으로 보아도 경암의 경우 $\sigma_c=150\text{Mpa}$ 이상으로 콘크리트 강도 $\sigma_c=24\text{Mpa}$ 의 6배 이상 되므로, 정확한 Control Blasting으로 암반의 점착력을 훼손하지 않고 굴착을 하면, 자연적인 암반의 미적 기능을 살리면서 구조적으로 안정되고 유지보수 판단에 유리한(자연 친화적 시스템) Unlined Tunnel의 적용이 가능하다고 판단되며, 국내 산악 터널 구간 중 극경암 지역은, 안전성이 높고, 자연 암의 미적인 기능을 살리기 위해 지금이라도 Unlined Tunnel의 설계 적용이 가능하다고 판단된다.

3. 북유럽의 Unlined 터널 적용 사례

노르웨이의 경우 도로 터널이나 철도 터널뿐 아니라, 높이 150m~1,000m 사이의 최대 동수구배를 지닌 80여 개의 Unlined 가압 터널과 수직갱이 1960년대~90년대 사이 설치되어 왔다. 가장 오래된 것은 80년이 지난 것도 있다. 양수 발전소에 필요한 10개의 Unlined Air Cushion Surge Chamber로 부터의 공기압 저하등 측면으로 조사가 이뤄졌다. 이 때 내부의 공기압은 19~78bar 까지 이르며, Chamber의 체적은 2,000~120,000 m³에 이른다. 1960년 이래로 매년 평균 100km 정도의 터널이

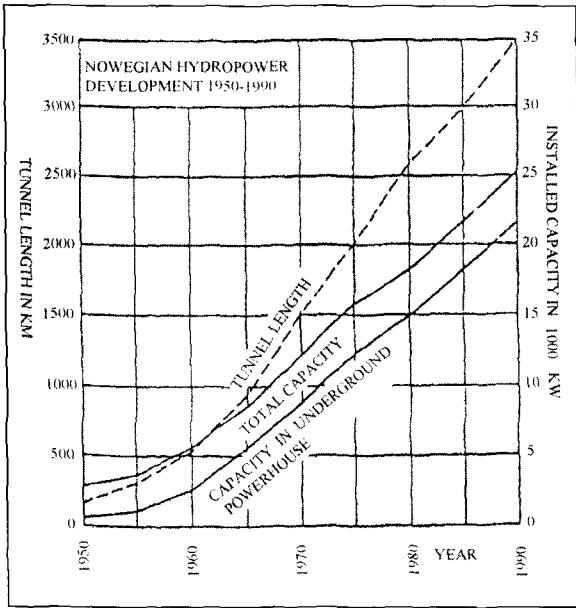


그림 2. The development of Norwegian hydroelectric power production capacity and the accumulated length of tunnels excavated between 1950 and 1990

굴착되고 있다(그림 2).

노르웨이의 암반은 주로 프리 캄브리안 시대 이전과 고생대의 화성암으로 형성되어 있다. 노르웨이의 수력발전용 터널은 단지 2~4% 만이 콘크리트 또는 슛크리트 라이닝으로 설계되어 있다.

1920년대 초에 노르웨이에는 1차 세계대전 직후 높은 가격급등과 불확실한 물류 문제 등 철강류의 부족현상이 발생하여 결과적으로 Unlined Tunnel이 1919년에서 1921년대에 건설되기 시작하였다.

1950년대에 Penstock(수로)을 갖춘 지상의 수력발전소는, 안전상의 이유로 지하로 이동되었고, Steel Pipe로 시공되었었다. 1960~1975년 기간동안 수두가 50~967m(평균수두 310m) 수직갱들이 무 라이닝으로 건설되었다. 일찍이 1958년에 새로운 기록인 286m의 Unlined 수직갱이 Tafjord K3에서 성공적으로 건설되었고, 무지보 수직갱에 대한 자신감을 갖게 되었다(그림 3).

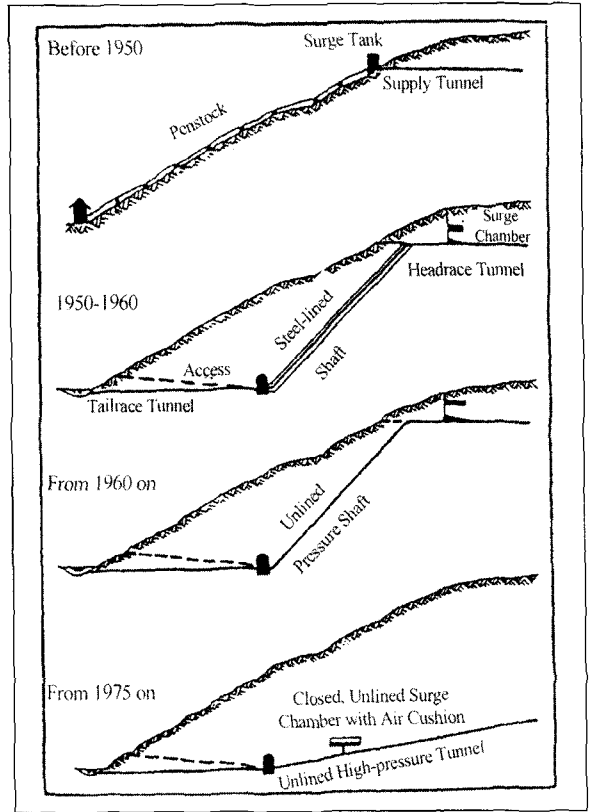


그림 3. Development of the general layout of hydroelectric plans in Norway

그림 3에 보이듯이 새로운 Unlined Shaft는 1960년대 초에 시공되었고, 1965년 이래로 Unlined 수직갱이 일반적인 시공법으로 설계되어 왔다(그림 4).

4. Unlined 터널의 설계 기준

1970년 전에는 Unlined 압력 수갱의 계획은 수력발전소의 일반적인 Layout설계에 따라 정해졌다. 시공성에 따라 Unlined 수갱의 경사는 31°에서 47°로 설계되었고, 통상 45°경사로 설계되었다.

그림 5에 수압터널의 설계 규정을 보여준다.

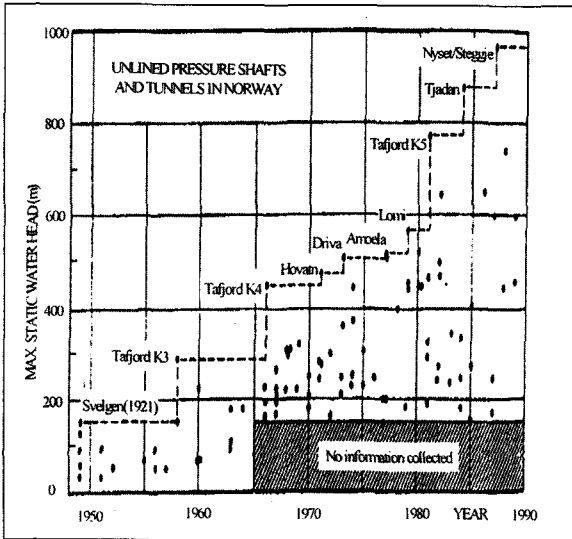


그림 4. Development of Unlined pressure shafts and tunnels in Norway

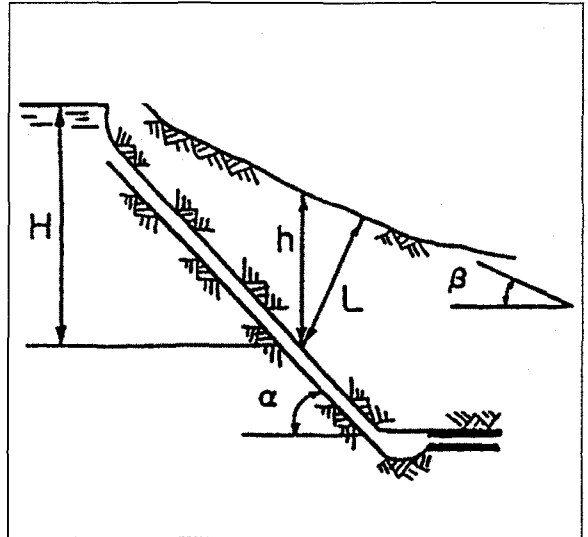


그림 5. Definitions for the rule of thumb for high-pressure tunnels or shafts

여기서

$h > C \cdot H$, 수갱내 어디에서나

h : 조사 대상 지점의 수직심도(m)

H : 조사대상 지점의 정수두압(m)

C : 상수, 계곡에서 경사가 35° 까지 0.6,
 60° 까지 1.0 적용

노르웨이의 경우 60° 이상 경사진 경우는 없는 실정이다. 1968년에 Byrte에 있는 300m Unlined 압력 수갱이 붕괴되어 발전소를 침수시키는 사건이 있던 이후, FEM 해석을 통한 Shaft 주변 암층의 응력 상태를 해석하는 방법이 1970년 Brekke 등에 의해 시도되었다. 1970년 가을에는 Askora에서 200m의 수두압을 가진 Unlined Shaft의 사암층에서 수리학적 쪼개짐 현상 (Hydraulically Split)이 일어나 구조물에 부분적 손실을 가져오기도 했다.

이러한 사건이후 Bergh-Christensen 과 Dannevig (1971)에 의해 다음과 같이 계곡에서의 수갱 경사에 대한 규정이 제안되었다.

$$L > \frac{\gamma_w \cdot H}{\gamma_r \cdot \cos \beta} \quad (1)$$

여기서 ;

L = 지표와 임의 지점과의 최단거리(m)

β = 계곡면의 평균 경사

γ_w = 물의 비중

γ_r = 암반의 비중

이러한 공식에 따라 시공된 Unlined Shaft가 오늘날 까지 누수 없이 안전하게 운영되고 있다.

문제는 연약한 지층, 심한 급경사, 투수성 절리의 발달 등 불리한 지반조건이 Unlined Tunnel 시공시 주요 누수 원인인 것으로 분석되었다.

Selmer-Olsen(1974)과 Broch(1982)에 의해서 FEM 해석에 의한 설계기준이 제안되었는데, Unlined 터널내에서 터널내부 수압이나 지지력이 주변 암반의 최소 주응력을 초과해야 된다는 것이다. 이러한 Unlined Tunnel의 설계적용은 노르웨이 같은 화강암, 편마암 같은 결정질 암반에서는 아주 적용효과가 크다. 그러나, 습곡부 등의

경우에는 암반의 자연적인 절리가 장애요소가 될 수가 있다. 특히 파쇄대가 포함된 단층과 연약지대는 그 자체가 터널 굴착에 따른 응력의 국부적인 재분포를 일으키기 때문에 응력 분포에 대하여 취약한 문제를 나타내고 있다. 또한 현장의 수압 파쇄시험을 통하여, 현장의 절리가 어느 정도의 수압에서 분리현상, 파괴가 일어나는지 Hydraulic Jacking Test를 실시하여 Unlined Tunnel 설계에 적합한지를 시험해야 한다.

5. 결론

스칸디나비아에 건설된 Unlined Tunnel은 철도 및 도로 터널은 그 안전성에 큰 문제가 없이 설계 시공되고 있다. 특히 노르웨이의 경우 큰 수압을 견뎌야 하는 발전용수로 터널을 화성암 경암 지역에 건설한 Unlined 터널도 30년 이상 최대 80년까지 어느것도 허용누수를 초과하지 않고 있다. 따라서 노르웨이와 압질이 유사한 국내의 편마암, 화강암의 경암 산악터널의 경우, 수압을 받는 발전용 터널은 현재 실제 적용을 위해 좀더 구체적인 연구가 필요하겠으나, 내부 수압을 받지 않는 도로 및 철도 터널은 Lining 없이 설계 시공하는 것이 경제적이고, 안전하고, 환경 친화적인 방법이라고 판단되며, 터널은 대규모 massive한 지반에 설치되는 것으로서 단순히 구조적으로 볼 것이 아니라 Underground Roof Control

(Gebirgsbeherrschung), 즉 지반의 거동 메카니즘의 개념으로 본다면, Lining을 반드시 마감재로 적용하는 기존의 설계 개념에 큰 변화가 올 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Broch, E. (2000), Unlined high pressure tunnels and air cushion Surge Chambers, AITES-ITA 2000 world Tunnel Congress, Durban, South African Institute of Mining and Metallurgy
2. Bergh-christensen, J. and Dammevig, (1971), N.T. Engineering geological evaluations of the unlined pressure shaft at the Mauranger hydropower plant(in Norwegian). Oslo, Norway Geo team A/S.
3. Brekke, T.L Bjorlykke, S., and Blindheim, O.T. (1970), Finite element analysis of the Byrte unlined pressure shaft failure. Large permanent underground openings (Brekke and Jorstad, editors). Oslo, Norway Universitetsforlaget, pp. 337-342
4. Broch, E. (1984), Design of unlined or concrete lined high pressure tunnels in topographical complicated areas. Water Power and Dam Construction 36:11
5. Broch, E. (1999), Sharing Experience with Concrete Plug in High-Pressure Tunnels. Hydro Review Worldwide. vol 7, no. 4, pp.30-33.
6. 건설교통부, (1999), 터널 표준 설계 기준
7. Jacobi, Oskar. (1981), Praxis der Gebirgsbeherrschung, G. I ckauf.