

영구 무지보 터널의 일반적인 조건에 관한 수치해석적 연구

Numerical analysis on the general requirement of permanently unsupported tunnels

윤지선*1, 류주열*2

Yoon, Ji-Sun · Ryu, Ju-Yeol

Abstract

The present with in this country, rock bolt installation, shotcrete, and concrete lining in construction order has become accepted as a general tunnelling method in NATM. On the other hand Unlined tunnelling method, which was developed by many countries near Scandinavian Peninsula with hard rocks comparatively, has recently been introduced all over the world, and numerous studies about that have been being devoted to domestic tunnels. Unlined tunnelling method has been developed on the basis of the permanently unsupported openings, and general 7 requirements for them were suggested by Nick Barton. There are no case record about these conditions for Q-system in this country. Therefore, input parameters for Q-system under these conditions were applied to general road tunnel cross-section and numerical analyses for each condition were executed with UDEC-BB, Distinct Element Method.

Keywords: Unlined tunnel, permanently unsupported openings, Q-system, UDEC-BB

요 지

현재 국내에서는 굴착 후 록볼트, 슛크리트와 콘크리트 라이닝을 현장에서 타설하는 NATM이 일반적인 터널공법으로 정착되어있는 상태이다. 이에 반해 최근 암반이 양호한 스칸디나비아 반도 부근의 국가를 중심으로 무라이닝 터널공법이 개발되어, 세계각국으로 확대되고 있으며 비교적 암반이 양호한 국내에서도 이러한 무라이닝 터널공법에 대한 적용성이 활발히 연구중 이다. 무라이닝 터널공법은 영구 무지보 지하공동에 대한 연구를 근간으로 발달되어 왔으며, 영구 무지보 지하 굴착에 관해서는 Barton이 수많은 사례기록들을 토대로 일반적인 조건 7가지를 제시하고 있다. 이 조건들은 Q-system에 관한 조건이지만, 국내에는 적용된 실적이 없는 조건이다. 따라서, 이 조건들에 의해 산출된 Q값에 대한 입력변수를 임의의 일반 도로터널단면에 적용하여, 불연속체 해석기법인 UDEC-BB를 사용하여 각 조건에 대해 수치해석적 검증을 실시하였다.

주요어: 무라이닝 터널, 영구 무지보 터널, Q-시스템, UDEC-BB

*1 정회원, 인하대학교 환경토목공학부 교수

*2 정회원, (주)삼보기술단 지반공학부 기사

1. 서론

협소한 국토를 효율적으로 활용하기 위한 지하공간의 활용과 도로의 직선화, 환경보존을 위해 터널의 시공이 증가되고 있는 추세이며, 이와 같이 터널공법의 비중도 증가해 왔다. 1980년대 초 도입되어 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 NATM은 터널의 주요 지보재로 록볼트, 슛크리트와 그 이외에 터널의 안정성에 불리한 상황이나 안전율의 증가를 위한 콘크리트 라이닝을 사용한다. 하지만, 최근에 들어서는 1970년대 초반부터 노르웨이 등 암반이 양호한 북유럽 국가를 중심으로 개발되어온 무라이닝 터널공법-NMT-이 세계각국은 물론 북유럽과 비슷한 경암지대를 많이 가지고 있는 국내에도 그 적용성이 활발히 논의되고 있다.

이러한 무라이닝 터널공법은 경제성, 시공성, 유지보수면에서 많은 장점을 가지고 있기 때문에 국내 지질 상황, 시공조건 등을 고려하여 알맞게 적용된다면 국내 터널시공에 있어 많은 이익을 가져오리라 생각된다.

이러한 무라이닝 터널공법은 영구 무지보 지하공동 개념을 포함하고 있다. 이 영구 무지보 지하 굴착은 Barton이 수많은 사례기록들을 토대로 제시한 일반적인 조건 7가지를 가지고 있다. 이 7가지 조건은 영구 무지보 굴착과 무라이닝 터널에 대한 범위를 나타낼 수 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 암반 불연속체 해석에 많이 사용되는 UDEC-BB를 이용하여 Barton이 제시한 영구 무지보 공동에 대한 일반적인 조건을 수치해석적으로 검토하였다.

각 조건에 대해서 Q-값을 여러 단계로 나누어 모델을 설정하여 해석을 실시하여 암반거동 결과를 통하여 일반적인 조건에 대한 수치해석적 타당성을 검토하였고, 그 결과를 비교함으로써 영구 무지보 터널과 무라이닝 터널 적용 영역에 대한 Q-값의 범위에 대해 고찰하였다.

2. 무라이닝 터널

무라이닝 터널 공법은 1970년대부터 노르웨이, 스웨덴, 핀란드 등 주로 암반이 양호한 북유럽 국가를 중심으

로 개발·발전되어 왔다. 특히 노르웨이에서 주요 도로 터널, 철도터널, 대규모 공동, 1992년 완공된 span 62m의 Gjøvik 경기장에도 록볼트와 강섬유보강 슛크리트를 영구적 지보로 사용하면서 무라이닝 터널 공법을 정립하게 되었다.

무라이닝 터널 공법의 개념은 양호한 암반터널에서 암반과 1차 지보재 (록볼트와 슛크리트)에 의한 보강으로 충분히 안정된다는 전제하에 2차 지보재인 콘크리트 라이닝을 생략하는 공법이다. 라이닝이 생략된 대신 마감재(PC-panel 등)가 슛크리트 보강 단면과 일정 간격을 두고 설치되고, 그 사이에 방수막이 앵커볼트에 의해 고정되도록 시공되어진다. 이로써 터널 내부로 침투되는 지하수를 터널 외부로 유도 배수하여 마감재에는 잔류수압을 작용시키지 않는다. 이런 경우 마감재는 구조재가 아닌 미관이나 배수 목적으로 활용된다. 특히 암반이 아주 양호한 경우에는 1차 지보재도 생략하는 터널이 증가하고 있는 추세이다. 그림 1은 무라이닝 터널 공법의 개념을 나타낸다.

3. 영구 무지보 터널

양호한 암반에서는 1차 지보재 마저 생략하는 영구 무지보 굴착이 가능하며 실제 지하 굴착은 영구 무지보가 될 수 있다. 이러한 무지보 굴착이 환상처럼 보이는 하지만 (스칸디나비아 또는 한국과 브라질 일부 지역의 경암지대에서만 찾을 수 있다.) 암석은 실제로 콘크리트 라이닝보다 양질이며 훨씬 큰 전단강도를 가질 수 있다. 일본 철도터널 내의 규격 미달의 콘크리트 (cold joint)의 최근 붕괴는 이를 잘 보여주는 한 예이다. 지보 또는 무지보의 결정은 암반의 물성치, 스팬, 굴착형태, ESR (또는 굴착지보비율 또는 요구되는 안정성)등과 같은 여러 요소에 의존한다. N. Barton은 1976년에 'Unsupported Underground openings'라는 자신의 논문에서 무지보 굴착에 관한 사례기록들 (case records)로부터 다음과 같은 일반적인 결론을 내렸다.

- ① 높은 RQD가 거의 대부분이지만, 예외가 없지는 않다. 무지보 스팬의 하나는 RQD=0를 갖는다. (분

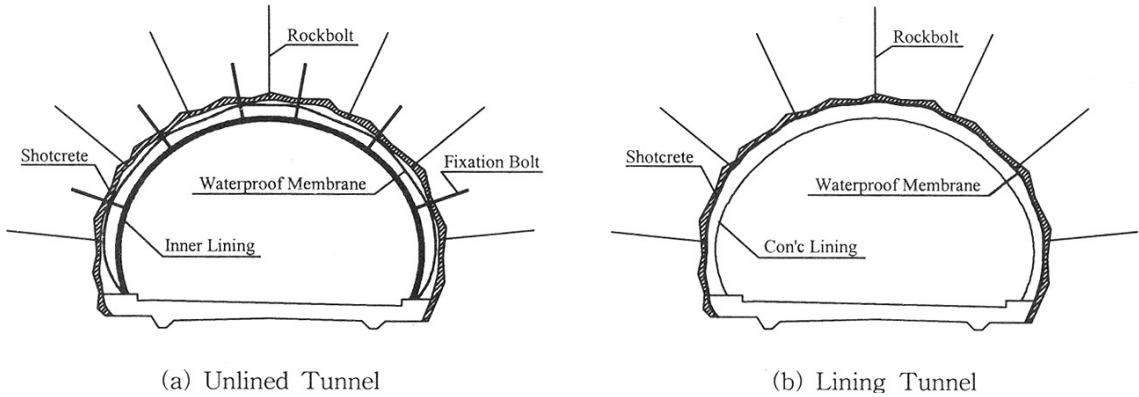


그림 1. 무라이닝 터널과 라이닝 터널의 개념도

류목적을 위한 명목상의 값은 10)

- ② 세 개의 절리군을 가진 몇몇의 무지보 굴착이 있을 지라도 하나의 절리군과 랜덤한 절리 ($J_n=3$)가 평균이다. 이러한 경우 절리는 거칠거나 파상(rough or undulating)이다.
- ③ 절리의 평균 거칠기 ($J_r=2.7$)는 ‘부드럽고, 파상(smooth, undulating)’과 ‘거칠거나 불규칙, 파상(rough or irregular, undulating)’ 사이의 상태를 의미한다. 하지만 ‘부드럽고, 평면적(smooth, planar)’ 절리를 가진 경우도 있으며 이 특징은 단지 두 개의 절리군이나 이보다 적은 경우에 나타난다.
- ④ 어떤 물질 코팅도 없는 변질되지 않은 절리 ($J_a=1.0$)는 무지보 굴착에 대한 필요조건으로 중요한 것으로 판단된다.
- ⑤ 작거나 무시해도 좋은 지하수 흐름 ($J_w=1.0$)이 또 하나의 중요한 조건이다.
- ⑥ 암반응력은 대부분 중간에서 높은 정도(tight한 구조물, 아치에 대해 유리한)이지만 명백하게 rock bursting이나 squeezing 상태가 시작할 정도로 충분히 높지는 않다.

이러한 일반적인 결론을 토대로 Barton은 영구 무지보 터널에 대해 요구되는 일반적인 조건을 다음과 같이 7가지로 정리하였다.

- 1) 조건 1 : $J_n \leq 9, J_r \geq 1.0, J_a \leq 1.0, J_w = 1.0, SRF \leq 2.5$

- 2) 조건 2 : $RQD \leq 40$ 이면, $J_n \leq 2$
- 3) 조건 3 : $J_n = 9$ 이면, $J_r \geq 1.5$ 및 $RQD \geq 90$
- 4) 조건 4 : $J_r = 1.0$ 이면, $J_n < 4$
- 5) 조건 5 : $SRF > 1$ 이면, $J_r \geq 1.5$
- 6) 조건 6 : $SPAN > 10m$ 이면, $J_n < 9$
- 7) 조건 7 : $SPAN > 20m$ 이면, $J_n < 4$ 및 $SRF \leq 1$

이 조건들을 근거로 각 요소들의 값으로 해석 물성치를 역추정하고, 각 조건에 대해 요소 값들의 변화에 의해 생기는 범위를 선정하여 해석을 실시하였다. 각 요소들을 이용한 해석 물성치의 역추정과 각 조건에 대한 Q값의 범위에 대해서는 다음 장에서 언급하기로 한다.

4. 해석모델과 암반물성

4.1 해석모델 설정

본 연구에서는 무지보 굴착에 관한 해석이므로 비교적 조건이 좋은 암반을 해석대상으로 하였기 때문에 불연속체 해석을 선택, 적용하였고 따라서 개별요소법을 채택한 상용 프로그램인 UDEC을 사용하였으며 불연속면의 거칠기 및 전단에 의한 팽창에 대한 절리의 변형거동을 고려하기 위하여 BB모델을 적용하였다.

각 조건의 최소 Q값에서부터 점차 Q값을 증가시켜 가

면서 해석을 실시하였으며 차후에 설명할 탄성해석법을 근거로 한 천단 및 내공변위 기준치보다 작은 변위가 일어나는 Q값의 범위를 조건별로 관찰하였다.

조건에 따라 3가지 해석단면을 고려하였으며 각각 수평방향과 터널 아래 방향으로 2D이상의 거리를 두고 경계범위를 설정하였다 (그림 2).

해석에 이용된 터널은 터널 폭 14.33m와 21.44m 두 가지 단면으로 실시하였다. SPAN은 터널 굴진중 무지보 구간의 거리, 터널의 폭 또는 높이에서 가장 긴 부분을 의미한다. 본 연구에서 사용한 UDEC-BB는 2차원 해석 프로그램이므로 터널 굴진중 무지보 구간의 거리를 표현하는데 어려움이 많으므로, SPAN을 터널의 폭으로 사용하였다. Condition 1 ~ 6은 터널 폭, 즉 SPAN =

14.33m 도로터널 ($ESR = 1.0$)로, Condition 7은 $ESR = 0.5 \sim 0.8$ 을 적용할 수 있는 대단면 터널로 해석을 실시하였다.

4.2 허용 변위 기준치 설정

국내 터널에서는 시공관리나 안전관리를 위해 절대치 또는 예측치로 계측자료를 관리한다. 이들은 관리 기준치와 실측치 또는 예측치를 비교 검토하여 공사의 안전성을 확인하는 방법이다.

관리기준치 이용방법에는 여러 가지가 있지만, 주로 터널구조물에서 그 크기를 고려하여 산정하는 방법과 탄성해석방법을 많이 사용한다. 터널 크기 (반경)에 따라

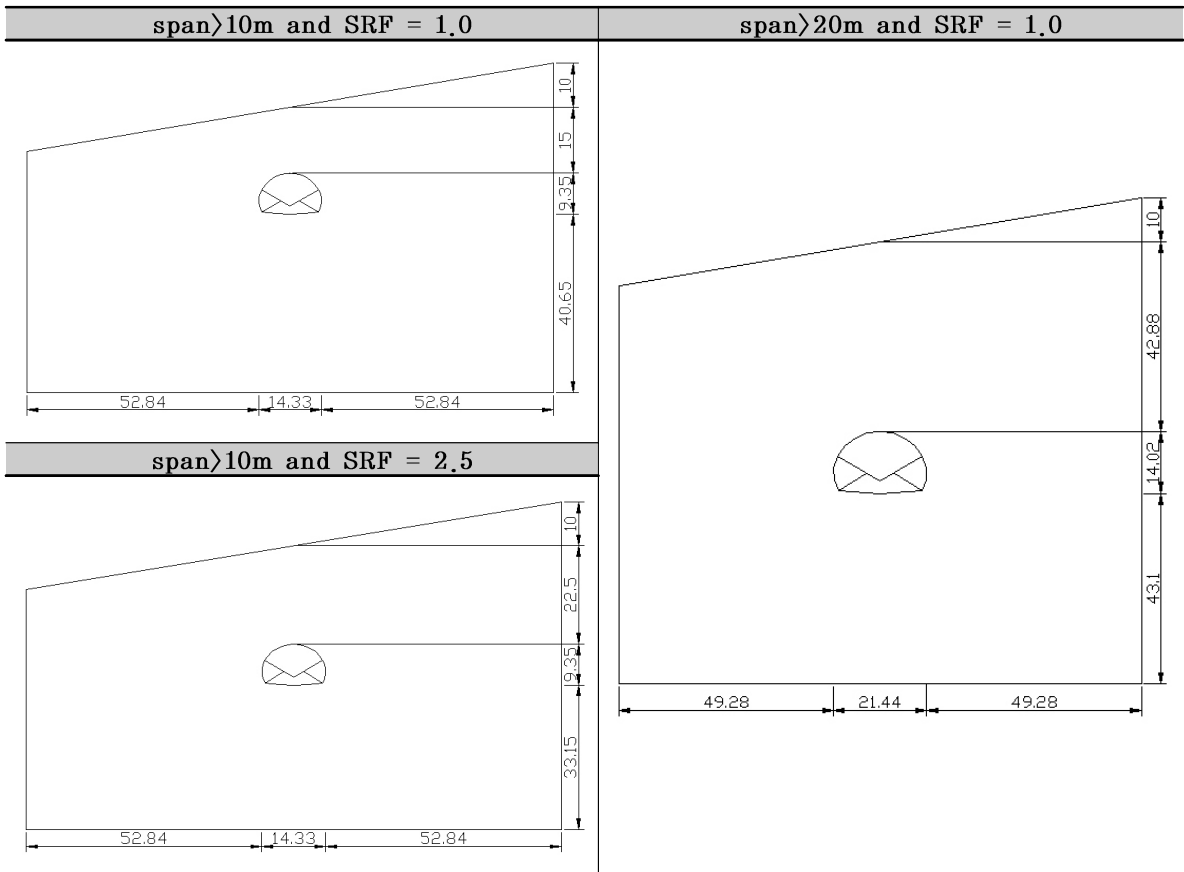


그림 2. 수치해석 암반모델

표 1. 변위의 기준치

Span	SRF	K_0	천단변위	측벽변위
>10m	2.5	0.5	2,999	5,749
>10m	2.5	2.0	1,087	2,082
>10m	1.0	0.5	4,499	7,681
>10m	1.0	2.0	1,629	2,782
>20m	1.0	0.5	12,863	21,192
>20m	1.0	2.0	4,658	7,676

표 2. Q-시스템의 각 요소와 반영된 물성치

Q - 각 요소	물성치	비고
RQD	Joint spacing	절리군의 빈도수와 평균간격과의 관계 (Hudson)
J_n	Number of joint set	
J_r	JRC	J_r 과 시편의 JRC 와의 관계 (Barton)
J_a	ϕ_r (residual friction angle)	
J_w	-	
SRF	Depth	일축압축강도/최대주응력의 비와 SRF 의 관계

모든 조건에 대하여 $J_w \leq 1$ 이므로, J_w 는 고려하지 않고 고정값인 1을 모든 조건에 대해 적용하였다.

기준치를 산정하는 경우 그 기준치는

- 터널의 천단변위 : 터널 반경의 0.5 ~ 1.0%
- 터널의 측벽변위 : 터널 반경의 3.0 ~ 4.0%

이며, 이러한 경우 1차에서 3차까지 나누어서 관리기준치를 고려한다. 1차관리 기준치는 허용치의 60%, 2차관리 기준치는 80%, 3차는 100%이다.

탄성해석법은 지질조사시 구한 암반특성치를 이용하여 비교적 간편하게 천단침하를 구하는 방법이다. 부분적인 지질 특성 및 굴착패턴등은 충분히 고려되지 않지만 터널반경 및 토피두께, 지질 조사결과등을 토대로 하여 간편하게 구할 수 있다.

$$U_h = \frac{(1+\nu) \times R}{2 \times D} [(1+K_0) + (3-4\nu)(1-K_0)] \times P_v \quad (1)$$

$$U_v = \frac{(1+\nu) \times R}{2 \times D} [(1+K_0) - (3-4\nu)(1-K_0)] \times P_v \quad (2)$$

여기서, R : 터널반경, D : 암반변형계수, ν : 포아송비, K_0 : 측압계수, $P_v = \rho(\text{밀도}) \times g(\text{중력가속도}) \times h(\text{심도})$

식 (1)은 천단변위의 기준치, 식 (2)는 내공변위의 기준치를 구한 식이다.

본 연구에서는 굴착부분의 지질이 같고, 굴착패턴이 전단면 굴착으로 일정하기 때문에 탄성해석법의 단점을 충분히 극복할 수 있다고 판단되었고 또, 보다 안전측을 고려하여 기준치가 좀더 낮게 설정되는 탄성해석법으로 천단과 내공변위의 기준치를 설정하였다. 선정된 변위의 기준치는 표 1과 같으며 이 기준치를 각 조건에 적용하여 영구 무지보가 가능한 Q값의 경계범위를 조건 별로 도출하였다.

4.3 해석물성 설정

수치해석에 있어 가장 중요한 부분이 입력물성치를 설정하는 것이다. 본 연구에서는 Q값을 가지고 블록과 절리의 입력 물성치를 산정해야 하므로 더욱 신중한 검토가 필요하다. 따라서 다음과 같은 일정한 근거를 두고 블록과 절리의 물성치를 산정하였다.

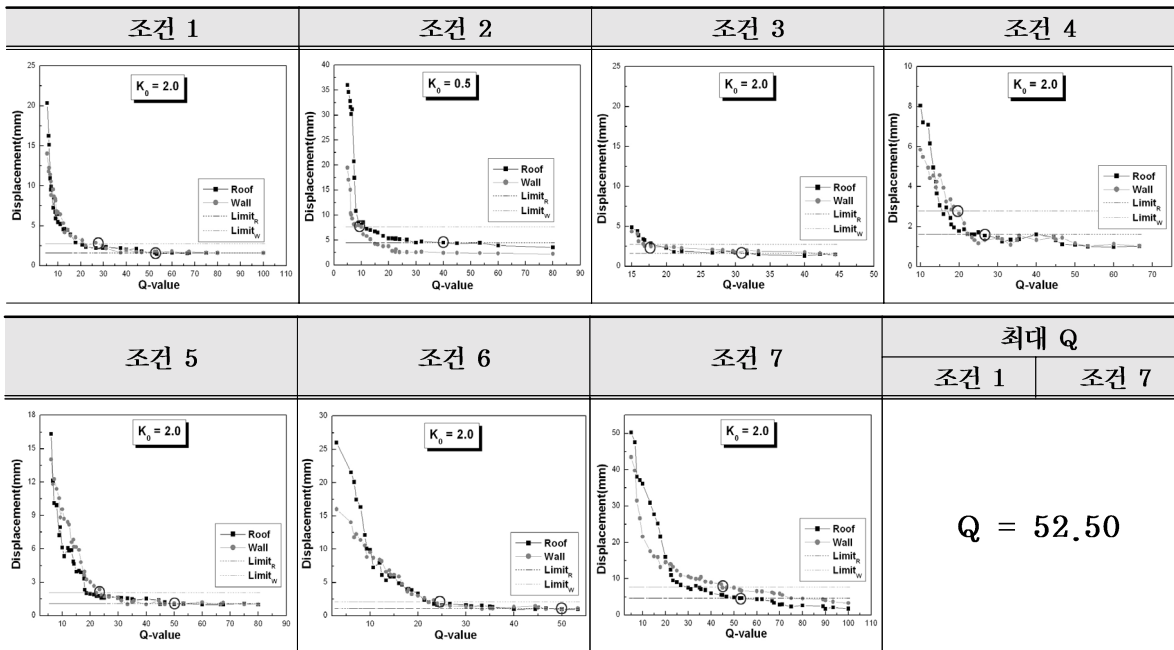
Q-system의 각 요소에 대해서 해석에 필요한 물성치

표 3. 해석에 사용된 블록물성치

밀도 [g/cm^3]	공극률 [%]	일축압축강도 [kgf/cm^2]	인장강도 [kgf/cm^2]	영률 [kgf/cm^2]	포아송비
2,61	1,45	1,220	85	$3,20 \times 10^5$	0,23
$\pm 0,05$	$\pm 1,34$	± 530	± 40	$\pm 1,70 \times 10^5$	$\pm 0,08$

(국내화강암의 물리역학적 성질, 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, 2000)

표 4. 각 조건에 대한 Q값에 따른 변위 분포도



를 역으로 추정하였다. 산정한 물성치는 표 2와 같다.

Intact 암석블록의 물성치는 국내의 대표적 암석이며, 무지보 굴착이 가능하다고 생각되는 경암인, 화강암의 일반적인 물성치를 사용하였다. 수치해석에 사용된 intact rock의 물성치는 표 3과 같다.

위의 물성치는 신선한 화강암의 물성치로 본 연구에서 실시한 모든 해석에서 고정값으로 사용하였다. 보다 취약한 암반에서의 해석을 고려하여 모든 해석에 일축압축 강도와 영률 (Young's modulus)는 최소값을 고정값으로 사용하였다.

5. 해석결과

각 조건을 가지고 Q값을 역산한 결과 최소 값은 1.78 이었으며, 최대 값은 100.00보다 크지만 100.00이상에서는 암반이 불연속면에 의한 거동을 하지 않고 암반 자체의 특성에 따라 연속체 거동을 한다고 판단하여 조건에 대한 Q값의 범위는 1.78~100.00으로 390여개의 case를 가지고 해석을 수행하였으며 그 결과는 표4와 같다.

표 5. 각 조건에서의 최대 Q값

조건	1	2	3	4	5	6	7
최대 Q값	52.50	40.00	31.66	26.67	50.00	50.00	52.50
K_0	2.0	0.5	2.0	0.5	2.0	2.0	2.0
SRF	1.0	1.0	1.0	1.0	2.5	2.5	1.0

5.1 해석 결과의 분석

본 연구에서는 조건 1 ~ 7까지 모든 조건들이 수치해석적으로 타당한 지와 영구 무지보 터널로서 안정이 되는 Q값의 범위에 대하여 알아보았다. 모든 조건들에서 Q값이 증가함에 따라 천단 및 내공변위가 감소하는 것을 볼 수 있었으며, 이는 Q값의 증가에 따라 암반이 역학적 으로 안정한 상태로 가고 있다는 것을 제시한다.

변위의 양상과 Q값 사이의 관계를 보여주는 표 4를 살펴보면 변위 기준선 ($LIMIT_R$, $LIMIT_W$)과 만나는 점 보다 큰 Q값에서는 변위의 변화가 거의 없으며, 거의 일정한 값으로 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 이로써 변위 기준선 ($LIMIT_R$, $LIMIT_W$)이상의 Q값에서는 터널을 영구 무지보로 굴착해도 충분히 안정하다는 것을 확인할 수 있다.

각 조건에서 영구 무지보 굴착에 대해 안정으로 나타나는 최대 Q값은 표 5와 같다.

모든 조건들이 가지는 Q값의 범위는 1.78 ~ 100.00 이고 각 조건에서 영구 무지보 터널이 가능한 것으로 판단되는 최소 및 최대 Q값의 범위는 8.89 ~ 52.50로 모든 조건이 수치해석적으로 안정한 것을 확인할 수 있었다.

측압계수와 상관없이 최대 변위는 모두 천단에서 발생 하였으며, 모든 Q_{max} 또한 모두 천단변위에 대한 기준치에서 나타남을 볼 수 있다.

조건 1 ~ 7의 해석에 사용된 Q값의 범위는 1.78 ~ 100.00이고, 이는 불연속체 접근 (Discontinuum approach)에 해당하는 Q 범위 0.1 ~ 100.00에 포함되기 때문에 이 조건들을 암반에 대한 일반적인 조건으로 고려할 수 있다고 판단되며, 이러한 일반적인 조건에 대해 터널이 영구 무지보로 안정이 되는 경계 값으로 $Q = 52.50$ 을 제시한다. 단 일반적 Q값과, 보다 안전측으로

고려하여 $Q = 60$ 을 그 경계범위로 제시한다.

6. 결론

본 연구에서는 많은 case records를 토대로 Barton 이 제시한 영구 무지보 굴착에 관한 일반적인 조건에 대해 390여개의 case를 통해 수치해석적 검증과 이들을 가지고 불연속체로 거동하는 암반에서의 영구 무지보 터널이 가능한 Q값의 경계범위에 대해 검토하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 각 조건에 대해 수치해석적 검증을 한 결과 각 조건이 가지는 Q값의 최대 범위는 1.78 ~ 100.00이며 영구 무지보 터널이 가능한 것으로 판단되는 Q값의 범위는 8.89 ~ 52.50로, 모든 조건이 수치해석적으로 안정하며, 그 타당성을 확인할 수 있었다.
2. 영구 무지보 터널이 가능한 Q값의 범위는 8.89 ~ 52.50이므로 $Q = 10$ 이하에서 간단한 1차 지보재를 사용하여 터널의 안정을 취한 후 무라이닝 터널 공법 적용 가능하다고 판단되었다.
3. 각 조건들에 대하여 천단변위와 내공변위를 관찰한 결과, 일반적인 암반 조건에 대해 터널이 영구 무지보로 안정이 되는 경계 값으로 $Q = 52.50$ 을 선정하였다. 단 일반적 Q값과, 보다 안전측으로 고려하여 $Q = 60$ 을 그 경계범위로 제시한다.
4. 차후의 연구를 통해 간단한 고품질의 1차 지보재를 사용하여 무라이닝 터널을 적용할 수 있는 Q값 하한치에 관한 검토가 필요하다고 판단된다.
5. 본 연구에서 사용한 수치해석은 2차원으로 해석에 있어 제한적인 부분이 있었으므로 조건들에 대한 3차원 수치해석 검증과 실제 현장계측에 의한 Feed-back

을 통하여 실제 적용성에 대한 검토가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. 신희순, 선우 춘, 이두화 (1999), “토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류”, 구미서관, pp.238-262
2. 윤지선 (1996), “岩盤力學”, 구미서관 pp.16-35, 265-305
3. 조태진, 이연규 (2002), “경암굴착공동의 지보설계”, 구미서관, pp.65-76
4. Barton, N. (1999) “General report concerning some 20th century lesson and 21th century challenges in applied rock mechanics, safety and control of the environment”, Proc 9th Cong. of ISRM, Paris 1999, Gen. Rept. Session 1, vol. 3, Balkema, Rotterdam.
5. Barton, N. (1976) “Unsupported underground opening”, Rock Mechanics Discussion Meeting, Befo, Swedish Rock Mechanics Research Foundation, Stockholm, pp.61-94
6. Bell, F. G. (1992) “Engineering rock masses”, pp.119
7. Priest, S. D., Hudson, J. A. (1976) “Discontinuity spacing in rock”, Int. J. Rock Mech, Min. Sci & Geomech. Abstr., vol. 13 pp.135-148
8. Rajinder Bhasin, Kaare Høeg. (1998) “Parametric study for a large cavern in jointed rock using element model (UDEc-BB)”, Int. J. Rock Mech, Min. Sci & Geomech. Abstr., vol. 35, pp.17-29



윤지선

인하대학교 환경토목공학부 교수
jyoon@inha.ac.kr



류주열

(주)삼보기술단 지반공학부 기사
sbege@chollian.net