

블록반응곡선을 이용한 불연속 암반내 공동에 대한 지보설계에 관한 연구

이영주¹⁾ · 이희근²⁾

A Study on Design of Support for Cavern in Jointed Rock Mass Using Block Reaction Curve

Young-Joo Lee and Hi-Keun Lee

ABSTRACT

Generally, support design is carried out by the ground reaction curve concept in NATM. But this concept has too many assumptions to be applied directly to construction site, especially where rock mass is good in quality and plastic region induced by over-stress is not considerable, thus behavior is influenced dominantly by discontinuities. In this study, the block reaction curve (BRC) of the rock mass was studied numerically, and the support design was carried out by BRC concept. Discrete element program, UDEC was used to get displacement and stress at each time step. The block model is Mohr-Coulomb, and the joint model is Barton-Bandis. Properties of the block and the joint were acquired in the laboratory test. Simple models were analyzed to understand the process of designing the support by BRC. In the case where same-shaped key blocks exist at roof, sidewall, and floor of cavern, stability of each block was examined, and the support was designed using BRC. And influence of initial stress state on BRC was examined by applying different coefficients of geostatic stress(K) to same model. Stability of the cavern under construction was examined and the support was designed by BRC analysis.

요 약

일반적으로 NATM공법에서 지보의 설계는 암반반응곡선의 개념을 통해 수행된다. 그러나 암반반응곡선은 암질이 좋고 과지압에 의한 문제가 심각하지 않은 지역에 적용되며, 따라서 주로 불연속면에 의해 암반의 거동이 영향을 받는 지역에서는 시공과정에 직접 적용하기가 힘들다. 본 연구에서는 암반 블록에 대한 블록반응곡선을 연구하여, 블록반응곡선상에서 지보를 설계하였다. 각각의 차분시각에서의 변위와 응력을 얻기위해서 개별요소 프로그램인 UDEC을 사용하였다. 블록은 Mohr-Coulomb 모델이며, 불연속면은 Barton-Bandis 모델이다. 블록과 불연속면의 물성은 실험실 실험을 통하여 구하였다. 블록반응곡선을 이용한 지보설계과정을 이해하기 위하여 간단한 모델분석을 실시하였다. 동일한 형상의 키블록이 공동의 천정, 측벽, 바닥에 존재할 경우, 각 블록의 안정성 판단 및 지보의 설계를 실시하였다. 또한 초기지압의 영향을 알아보기 위하여, 측압계수(K)를 달리하여 해석해보았다. 현재 건설중인 공동에 대한 안정성 판단 및 지보설계를 블록반응곡선을 이용하여 설계하였다.

* 1995년 2월 2일 접수

1) 공학석사, 현대건설 토목설계부

2) 정회원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

1. 서 론

지하공동의 시공개념으로 널리 알려진 것 중에 NATM은 암반의 자체 지지력을 이용하며, 계측을 통해 불규칙한 암반의 거동을 연속적으로 관찰하여 이 결과를 시공에 반영하는 경제적이고, 안전한 시공방법으로 알려져 있다. 이러한 NATM 공법의 주요 지보설계 개념은 암반반응곡선(GRC, Ground Reaction Curve)을 이용하여 이루어진다. 그러나 GRC는 유도과정에서 여러가지 가정들을 수반하기 때문에 실제 직접 시공에 반영하기에는 어려운 점이 많다. 그중 암반을 등방연속체로 가정하는 것은 이 개념을 시공에 반영하는데 많은 어려움을 준다.

현재 대부분의 지하 대공동의 건설은 300 m 내외로 심도가 깊지 않고, 암질이 좋은 지역에서 이루어지고 있다. 이러한 지역에 건설되는 공동의 경우, 공동의 안정성은 파지압에 의한 소성거동의 영향을 받는다고 보다는 불연속면에 의해 발생하는 블록들의 거동에 의해 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 불연속면에 의해 발생하는 블록의 거동을 추적하여 최적의 지보설계를 유도할 수 있는 블록반응곡선(BRC, Block Reaction Curve)을 유도하여 공동의 안정성 평가 및 지보설계를 해보았다. 이전의 블록에 대한 안정성 평가는 주로 정적인 평가에 의해서 이루어졌다⁴⁾. 즉 블록의 형상과 불연속면에서의 마찰력 등을 이용해 블록의 붕락 가능성이 평가되었는데, 이러한 분석으로는 NATM에 의한 시공이 불가능하다. BRC 해석은 이러한 정적인 평가가 아닌 블록의 변위를 추적하여, 각각의 변위단계에서 블록에 작용하는 힘을 계산함으로써 블록의 개별적 이동과 변위를 동시에 평가할 수 있다.

또한 대부분의 블록이론들이 블록을 강체(rigid body)로 가정하고 해석하기 때문에 실제 굴착에 따른 블록의 변형과 그에 따른 응력의 재분포를 반영할 수 없다. 물론 킨블록의 경우 블록 자체의 변형은 무시할 수 있지만 주의의 암반들이 변형되면서 킨블록에 가해지는 응력분포는 강체해석으로는 정확히 반영할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 블록을 변형가능하도록 하여 해석하였다. BRC를 유도하기 위해 개별요소 프로그램(Discrete Element Program)인 UDEC과 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하였다.

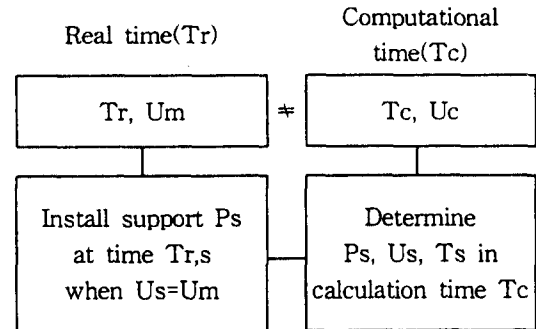


Fig. 1. Relation of real time and calculation time

2. BRC의 유도과정과 해석 및 지보설계

본 연구에서 사용한 개별요소법에서 구하는 각 차분 단계에서의 물리량은 계산상의 차분시간과 연결된다. 그러나 이러한 차분시간은 실시간과는 아무런 연관이 없다. 예를 들어 변위대 차분시간의 그래프에서는 변위의 변화 속도는 물리적인 의미가 없는 것이고, 변화양상만이 의미가 있는 것이다. 따라서 이를 실제 시공상에 반영하기 위해서는 실시간(T_r)과 차분시간(T_c)을 연결시키는 것이 아니라, 계산으로 구한 변위량(u_c)과 계측한 변위량(u_m)을 비교해야만 한다. 이에 대한 관계는 Fig. 1에 나타나 있다.

2.1 Barton-Bandis 절리모델

본 해석에서 사용한 절리모델은 Barton-Bandis 모델이라 불리는 것으로 현장에서 간단한 도구를 이용해 절리 거칠기(JRC)와 절리면 압축강도(JCS)만을 측정하여도, 크기효과(scale effect)를 고려할 수 있고, 반복 거동 등의 복잡한 거동을 경험을 통해 정해진 상수들을 이용해 해석할 수 있는 모델이다. 본 모델의 간단한 특징은 아래와 같다^{6, 8)}.

- ① 비선형 절리거동을 고려할 수 있다.
- ② 절리의 초기수직강성을 추정하여, 계산할 수 있다.
- ③ 반복하중에 의한 영구변형을 고려할 수 있다.
- ④ 현장과 시료 절리면의 길이의 비를 이용해 JRC, JCS의 현장값을 추정할 수 있다.
- ⑤ 전단거동이 진행되면서 생기는 거칠기의 마모를 묘사할 수 있다.

2.2 BRC의 유도과정

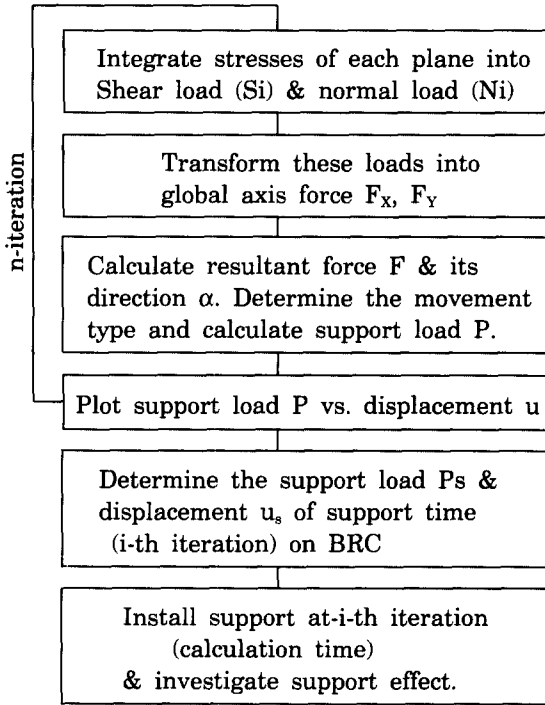
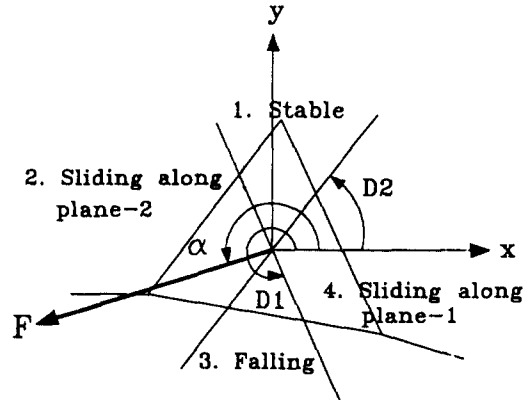


Fig. 2 Procedure of the support design using BRC

본 연구에서 제안된 BRC의 원리는 단순히 블록의 안정성만을 평가하는 것이 아니라 최적의 지보시점과 지보량을 결정할 수 있도록 변형하였다. 필자들이 유도 과정에서 사용한 가정과 정의는 아래와 같으며, 해석과 정의는 Fig. 2에 정리되어 있다.

- ① 해석은 2차원 터널 단면이며, 블록을 이루는 불연속면의 주향은 터널의 축방향으로 평행하다고 가정한다.
- ② 블록은 자유면과 함께 3각형인것만을 고려한다.
- ③ 블록은 변형가능하다.
- ④ 미끄러질 경우에는 어느 한 면을 따라 미끄러지는 것으로 본다.
- ⑤ 전체 좌표계(X-Y)는 터널에 대해 수직, 수평방향으로 이루어지며, 블록에 대한 블록좌표계(x-y)는 블록의 무게중심을 원점으로 하여, 양(+)의 y방향에 암반대로 향하게 정의한다.
- ⑥ 블록을 이루는 불연속면 중에 양(+)의 x방향에 있는 불연속면을 평면-1 이라 하고, 음(-)의 x방향에 있는 불연속면을 평면-2라 정의한다.
- ⑦ 지보압의 계산시 블록의 회전은 없는 것으로 가정한다.



D_i : Angle between $x(+)$ & $S_i(-)$

Fig. 3. Determination of block movement type.

여기서 최종합력 F 와 그 방향 α 를 구하면 블록의 거동형태를 결정할 수 있고, 또한 지보압 P 를 구할 수 있다. 미끄러짐이 발생할 경우의 지보하중을 구하기 위해서는 최종합력을 미끄러짐이 발생하는 평면에 대해 수직하중(F_n)과 전단하중(F_s)으로 나누어 계산한다. F_s 의 부호는 블록을 붕괴시키려는 방향일 때를 (-)로 정의하며, F_n 의 부호는 미끄러짐 평면을 향해 압축력일 때를 (+)로 정의했다. 각 거동형태에 따른 지보압의 계산과 정의는 아래와 같다(Fig. 3 참조). 이러한 방식으로 각 차분단계에서의 지보압을 구하게 되며, 이를 블록의 무게중심(centroid)의 변위 $u(=\sqrt{u_x^2 + u_y^2})$ 에 대해 지보압 P 를 도식한 것이 블록에 대한 BRC가 된다.

- ① $D_2 \leq \alpha \leq D_1 - 180$: 블록이 암반으로 밀려들어 감 (stable).

$$P = F$$

- ② $D_1 - 180 < \alpha < D_2 + 180$: 블록이 평면 1을 따라 미끄러짐(sliding on plane-1).

$$P = F_s + \mu F_n, \quad \mu = \tan(JRC \log \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r),$$

$$\sigma_n = \frac{F_n}{area}$$

- ③ $D_2 + 180 \leq \alpha \leq D_1$: 블록이 떨어짐(falling).

$$P = -F$$

- ④ $D_2 + 180 < \alpha \leq D_1$: 블록이 평면 2를 따라 미끄러짐 (sliding on plane-2).

$$P = F_s + \mu F_n, \quad \mu = \tan(JRC \log \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r),$$

$$\sigma_n = \frac{F_n}{area}$$

2.3 BRC의 해석과 지보설계

2.3.1 BRC에 의한 블록의 안정성 판단

앞의 유도과정에서 보았듯이 지보압 P 가 (+)이면 블록이 암반내에서 안정한 것을 나타내고, (-)이면 블록이 암반내에서 밀려나오는 불안정한 것을 나타낸다. 그림 4는 전형적인 BRC를 보여준다. 곡선 A의 경우는 봉락되는 블록에 대한 전형적인 BRC이다. 거동을 크게 4단계로 나누어 설명할 수 있으며, 각 단계에서의 거동은 아래와 같다.

① 블록의 접촉면에서 응력이 이완되는 단계 : 블록이 암반에서 분리되기 시작하면서 각 불연속면에서의 응력이 감소하기 시작한다. 이 단계에서는 블록이 암반내에서 안정한 상태로 존재한다.

② 블록 주위의 암반이 이완되는 단계 : 블록이 계속해서 빠져나오면 블록을 둘러싸고 있는 주위의 암반도 블록이 빠져나간 공간을 향해 이동한다. 따라서 다시 블록과 암반사이의 접촉이 증가하고, 지보압이 증가하는 것이다. 즉 암반자체의 지지력이 감소하기 시작하고, 불연속면에서의 분리가 부분적으로 진행되기 때문에 발생하는 현상이므로 이를 블록이 다시 안정해진다 고 판단해서는 안된다.

③ 블록의 봉락이 본격화되는 단계 : 블록의 변위가 상당량 발생하고, 불연속면에서의 분리가 가속화 된다. 따라서 각 불연속면의 응력은 0으로 접근하기 시작한다.

④ 블록이 봉락되는 단계 : 모든 접촉점에서의 응력이 0이 되고, 불연속면이 모두 분리되어 블록이 봉락된다.

곡선 B는 안정한 블록으로 변위가 어느 정도 진행되면 변위가 멈추고, 지보압도 일정한 수준을 유지한다. 이는 바로 그러한 힘으로 블록이 암반내에 안정화되는 것이다. 이러한 형태의 곡선은 공동의 바닥에 있는 블록이나, 지보재를 설치한 이후의 블록에 대한 BRC에서 볼 수 있다.

2.3.2 BRC에 의한 지보의 설계

일반적으로 블록에 대한 지보는 불연속면의 방향과 블록의 모양, 불연속면의 마찰각 등을 이용해 록볼트로 설계하는 경우가 많다. 이는 블록의 거동을 각 힘벡터와 변위벡터들을 이용해 해석하기 때문이다. 따라서 선하중을 줄 수 있는 록볼트로 설계하는 것이 슛크리트 같은 지보재에 비해 더 용이하게 계산할 수 있다.

본 연구에서 유도한 BRC를 이용한 블록에 대한 지보설계는 지보시점과 지보량, 즉 지보재의 최대강도를 구하는 것이다. NATM에서의 지보설계시에는 일반적인

GRC를 통해 지보재의 강성까지도 설계할 수 있다. 그러나 이는 전체 공동을 지보재로 완전폐합시키고, 최대칭조건일 경우 가능하다. 그런데 블록에 대한 볼트설계는 그러한 경우가 아니므로 강성의 설계는 몹시 어려운 문제이다. 또한 볼트의 설치가 반드시 불연속면을 통과해야만 하기 때문에 볼트 전체에 고른 하중이 걸리지도 않는다. 따라서 본 연구에서는 볼트에 대한 최대하중과 설치시점만을 결정하는 것으로 하며, 볼트의 강성은 일반적인 강철과 그라우트의 물성을 그대로 이용하기로 한다.

Fig. 4의 불안정한 블록의 경우를 보자. 지보의 시점은 블록이 이완되어 지보압이 최소가 되는 시점으로 한다. 이는 1단계와 2단계의 사이가 되는 지점으로, 암반에서 블록이 심하게 이완되기 전의 최소지보압인 것이다. 따라서 이 경우 지보는 변위가 u_s 만큼 발생했을 때, P_s 의 최대강도를 갖는 볼트로 설치해야 한다. Fig. 5에는 전형적인 지보설치 이후의 BRC를 보여준다. 지보설치 이전에는 동일한 거동을 보이다가 s 지점에서 볼트를 설치하였을 경우 u_s - u_e 만큼의 변위가 더 발생한

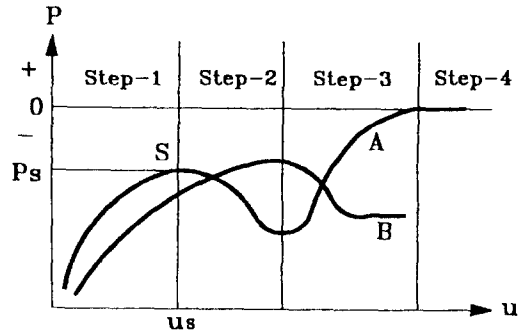


Fig. 4. Typical BRC of unstable and stable blocks

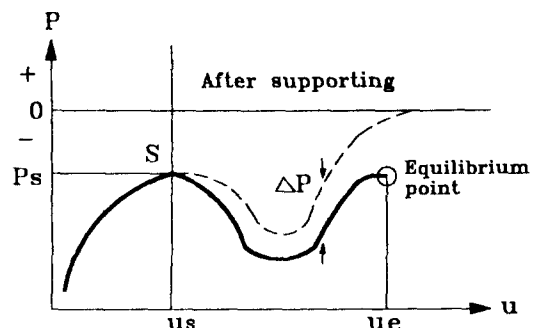


Fig. 5. typical BRC of the supported block

이후에 e지점에서 거동을 멈추었다. 이때 앵커가 이완되지 않은 암반에 위치한다면, 볼트가 분담한 하중은 ΔP 이다. 따라서 볼트가 발휘한 강성은 아래와 같다.

$$K(bolt) = \frac{\Delta P}{u_e - u_s}$$

3. 블록의 위치와 축압계수의 변화에 따른 지보설계과정

3. 1 블록의 위치에 따른 BRC의 비교

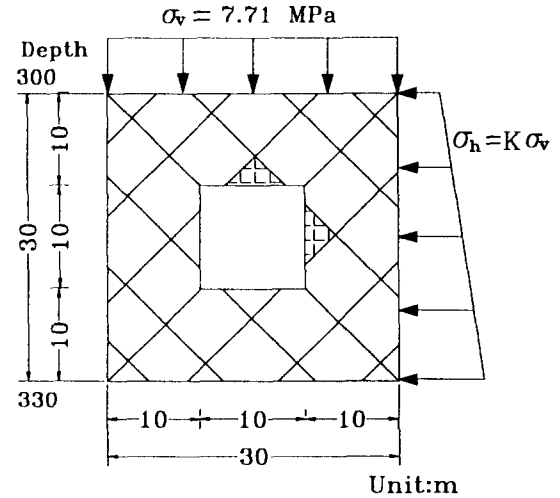
동일한 형상의 블록이 각각 공동의 천정, 측벽, 바닥에 존재할 때 이에 대한 BRC를 유도하여 비교해 보고, 필요할 때, 지보를 설계하여 보겠다. 해석에 사용된 모델은 그림 6과 같다. 두 불연속면의 경사는 45° 로 동일하며, 공동 천정의 심도는 310 m이며 수직응력은 자중에 의한 식을 사용하여 구하였다. 사용한 물성은 Table 1과 같으며, 축압계수는 $K=0.5$ 이다.

Table 1에 나온 물성을 선택한 이유는 블록의 물성은 비교적 경암에 속하는 것으로서 소성영역이 발생하지 않도록 한 것이고, 불연속면의 물성은 비교적 약한 것으로 선택함으로써 전체 모델의 거동이 주로 불연속면의 거동에 영향을 받도록 하기 위한 것이다.

지보설계시 지보에 대한 안전율을 FS라 하고 강철의 압축강도(σ_c)와 인장강도(σ_t)가 같다면, 사용하는 강철의 항복강도는 아래와 같다.

$$\sigma_c = \sigma_t (MPa) = FS \frac{P_c}{N}$$

여기서 N은 그 블록에 대한 설치볼트의 갯수이다. 여기서는 각 블록에 대해 불연속면을 통과하는 볼트 하



Key block of BRC analysis

Fig. 6. DEM model for BRC analysis

나식과 무게중심을 지나는 볼트, 총 3개의 볼트를 설치하는 것으로 한다. 볼트의 깊이는 이완이 가장 조금 되었다고 생각되는 곳까지 설치하는 것으로 하여 8 m로 정하였다.

볼트의 물성은 Table 2와 같다. 여기서 볼트의 인장강도와 압축강도는 실제 사용하는 볼트의 강도가 아닌 가상의 물성이다. 실제 볼트의 경우에는 인발 시험을 통한 인발강도를 사용하며, 이 값은 사용하는 볼트의 종류에 따라 많은 차이가 나고, 그 값도 위의 표의 값에 비해 매우 작은 편이다⁹⁾. 따라서 실재 시공에 있어서는 사용하는 볼트에 대한 인발시험을 통해 볼트의 물성과 사용해야할 갯수를 정하는 것이 가장 바람직하다.

3.1.1 공동의 천정에 존재하는 블록에 대한 BRC 해석

Table. 1. Properties of the distinct element model for BRC.

Property	Density (10^6 kg/m^3)		Bulk modulus K (MPa)	Shear modulus G (MPa)	Tensile strength S_t (MPa)	Friction angle ϕ ($^\circ$)	Cohesion C (MPa)	
Block	0.00262		50000	30000	20	40	50	
Property	JCS (MPa)	JRC	Normal stiffness K_n (MPa/m)	Initial shear stiffness K_{si} (MPa/m)	Residual friction angle	Compressive strength S_c (MPa)	L_n (m)	L_o (m)
Joint	150	10	50000	10000	15	300	2.0	0.2

Key : L_n ; Field scale joint length, L_o ; Laboratory scale joint length.

Table 2. Properties of the grouted rock bolt

Steel			Grout				
E_{steel}	σ_c	σ_t	E_g	ν_g	τ_t	K_{bond}	S_{bond}
(MPa)	(MN)	(MN)	(MPa)		(MPa)	(MN/m/m)	(MN/m)
2.1×10^8	1.12	1.12	2000	0.2	25	15560	0.27

Dey : τ_t ; 1/2 of compressive strength of grout,

K_{bond} ; shear stiffness of grout per unit length,

S_{bond} ; Shear strength of grout per unit length.

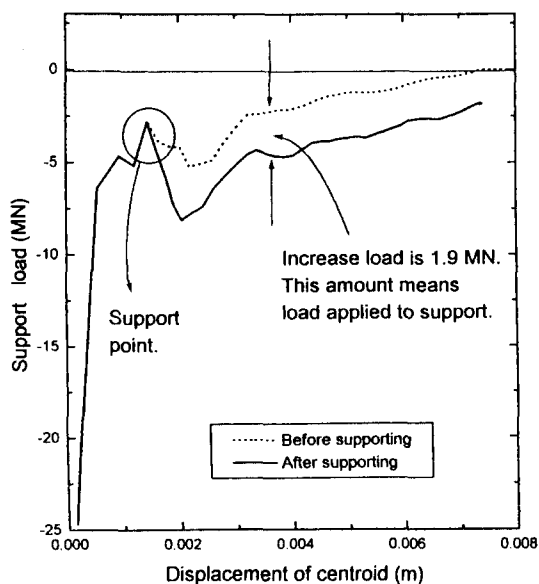
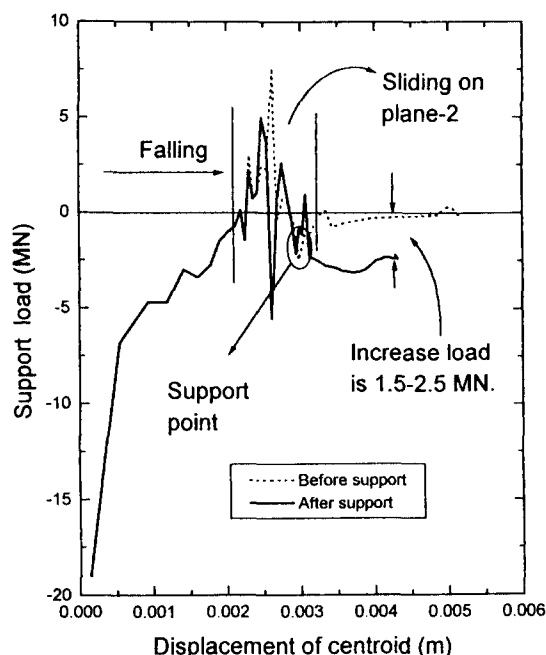
Fig. 7. BRC analysis of roofblock ($K = 0.5$)

Fig. 7은 천정에 있는 블록에 대한 BRC를 나타낸 것이다. 2장에서 언급한 바대로 전형적인 불안정 블록을 보여준다. 모든 거동은 떨어짐(falling)이며, 최종합력의 방향은 약 -90° 이다. 즉 어떠한 미끄러짐이 없이 중력의 방향으로 거동이 발생한다. 모든 접촉점에서의 응력이 0이 되어 완전 붕락되는 시기는 변위가 8.12 mm 발생할 때이다. 천정에 있는 블록의 경우 불연속면에서의 응력이 이완되어 최소가 되는 지점(단계-1에서 단계-2로 넘어가는 지점)을 보강시점으로 정한다. 이때의 변위는 1.45 mm이며, 지보압은 2.78 MN이다. 표 2에서의 인장강도와 압축강도는 이 지보압에 안전율 1.2, 설치볼트 갯수 3일 때의 값이다. 볼트를 설치하기 전의 거동은 설치하기전의 곡선과 일치하다가 볼트를 설치한 이후부터 곡선이 달라지고 있다. 거동은 지보압이 1.9 MN이 되

Fig. 8. BRC analysis of sidewall block ($K = 0.5$)

며, 변위가 7.3 mm되면 수렴한다. ΔP 는 약 1.9 MN이며, 변위차이는 볼트의 앵커부분이 약 4mm의 변위가 생겼으므로 실제 지보의 변위는 약 3.3 mm이다. 따라서 발휘된 지보의 강성은 약 $1900 \div (3.3 - 1.45) = 1030 \text{ MN/m}$ 이다.

3.1.2 공동의 측벽에 존재하는 블록에 대한 BRC 해석

Fig. 8은 우측 측벽에 존재하는 블록에 대한 BRC이다. 측벽에 존재하는 블록의 경우는 그림에서 보는 바와 같이 복잡한 과정을 지낸다. 측벽에 존재하는 블록의 경우 암반이 블록을 밀어내는 방향과 중력에 의한 자중의 방향이 다르기 때문에 블록의 거동이 진행되면 회전이 발생할 수 밖에 없다. 평면-2로 미끄러지는 단계에서의 BRC의 심한 진동은 이러한 회전현상에 기

Table 3. Comparison of the roof block and the sidewall block for various K

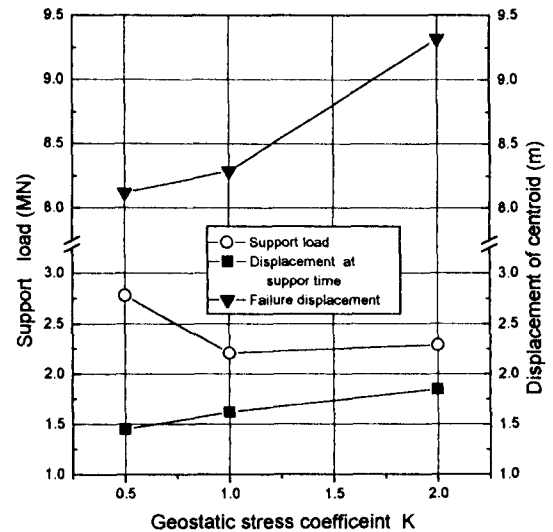
K	Roof block			Sidewall block	
	P_s (MN)	u_s (mm)	u_r (mm)	P_s (MN)	u_s (mm)
0.5	2.78	1.45	8.12	1.16	3.06
1.0	2.21	1.62	8.29	1.04	3.41
2.0	2.29	1.85	9.32	3.12	4.19

인하는 것으로 사료된다. 이 단계에서의 초기에 발생하는 양(+)의 지보압은 평면 2에 매우 큰 수직응력이 작용하는 것을 의미하는 것으로, 최종합력의 방향이 떨어짐의 방향에서 평면-2로 미끄러짐 (sliding on plane-2)의 방향으로 전환할 때 평면-2에 거의 수직인 방향으로 되기 때문이다. 지보의 설계는 평면-2에서 미끄러짐이 발생하는 단계에서 가장 작은 지보압이 걸리는 수준을 지보의 시점으로 정하는 것으로 하였다. 이는 이미 블록이 다시 떨어짐 거동을 보인 후, 곧 평면-1로 미끄러질 때는 평면-2가 완전히 분리된 상태로 불안정한 거동을 보인다고 판단했기 때문이다. 천정에 있는 키블록의 BRC와는 달리 지보를 설치하기 전의 두 곡선이 일치하지 않고 있다. 이는 평면-2에서 미끄러짐이 발생할 때 상부에 있는 블록의 영향이 천정의 키블록에 대한 지보로 인하여 변했기 때문이다. BRC는 4.3 mm의 변위가 진행된 이후에 지보압 2.21MN의 수준에서 수렴되었다. 이때 발휘된 지보의 강성은 다음과 같이 계산된다. 즉 볼트의 앵커부분에 약 0.1 mm정도의 변위밖에는 발생하지 않았다. 따라서 발휘된 강성은 평균 $2210 \div (4.2-3.06) = 1940 \text{ MN/m}$ 이다. 이는 천정의 블록에 대한 지보의 강성에 비해 큰 값인데 볼트의 앵커부분에 변위가 많이 생기지 않았기 때문이다.

전체적으로 회전이 발생하는 블록에 대한 BRC해석은 본 연구에서 다루지 않았기 때문에 해석이 곤란하다. 이후에 이러한 회전까지도 고려한 BRC를 유도해야만 이러한 블록에 대한 거동을 완전하게 이해할 수 있을 것이다.

3.2 축압계수의 변화에 따른 BRC의 비교

3.1절과 동일한 모델에 대해 축압계수만을 달리하여 각각 $K=0.5, 1.0$, 및 2.0 일 경우에 대해 BRC를 유도하여 보았다. 각각의 경우에 대한 지보압(P_s), 지보시점의 변위(u_s), 그리고 모든 불연속면의 응력이 0이 되는 봉

Fig. 9. Comparison of roof blocks for various K

락시점의 변위(u_r)는 표 3과 같다.

Fig. 9와 10에서 보는 바와 같이 각 변위들에 대해서는 축압이 클수록 증가한다. 이는 응력 수준이 높을수록, 변위가 많이 발생하여도 블록이 암반과 접촉하는 힘이 크다는 사실을 반영한다. 그러나 이것이 축압이 크다고 굴착 후 블록이 붕락될 때까지 오랜 시간이 걸린다는 것을 의미하지는 않는다. 이는 계산상의 시간에서 계산되어진 것이므로, 실제로 있어서는 변위속도에 의해 블록의 붕락에 대한 실시간 시점이 정해지는 것이다. 따라서 변위가 많이 발생한다 하여도 변위속도가 빠르면 먼저 붕락할 수도 있는 것이다. 또한 키블록의 정점방향으로 가장 큰 초기지압이 걸릴 때 블록에 대한 지보량이 가장 커진다.

그러나 이상의 결과를 일반화 시키기는 어렵다. 블록의 경우 블록의 형상이 거동과 안정성에 가장 큰 영향을 주기 때문에 다른 형상을 갖는 블록에 대해 일반화시킬 수는 없을 것이다. 다만 본 연구에서와 같이 삼각

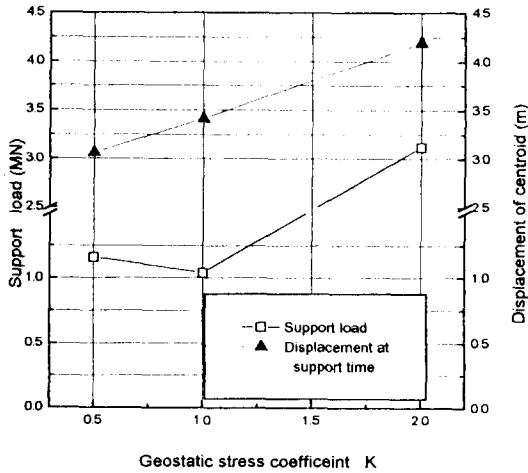


Fig. 10. Comparison of sidewall blocks for various K

형의 대칭형 블록일 경우에만 측압계수의 변화에 따라 위의 사실들이 성립할 것이다.

4. 현지 공동에 대한 안정성 해석, 지보설계, 및 검토

4.1 연속체로 가정했을 시의 GRC에 의한 해석

현재 건설중인 공동에 대해 암반을 연속체로 가정하여 일반적인 GRC를 유도하여 안정성을 판단해보기로 하자. 공동의 높이는 30 m이며 7.5 m씩 4단계 분할굴착을 실시한다. 여기서 사용하는 파괴기준식은 Hoek & Brown의 경험파괴기준식을 사용하기로 한다. 이는 이 파괴기준식이 Mohr-Coulomb의 식에 비해 더 많은 소성영역을 나타내기 때문에 소성변형에 의해 공동의 안정성에 위협이 있는지를 좀 더 알아보기 위함이다.

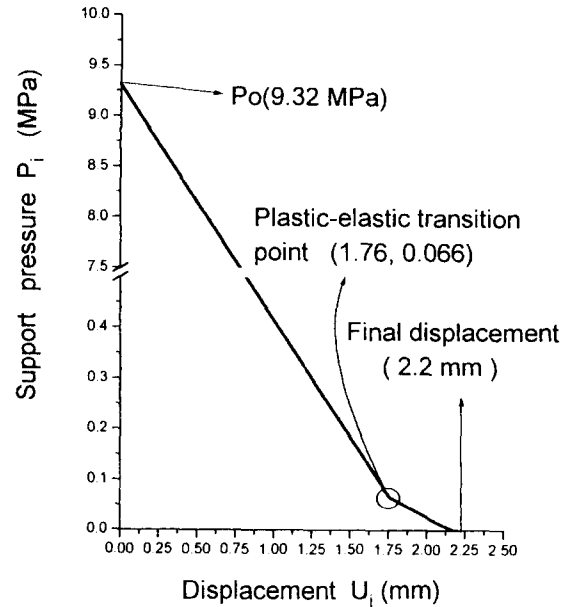


Fig. 11. GRC analysis using Hoek & Brown criteria

입력자료는 Table 4와 같으며, 물성은 실험실 실험을 기초로 한다.

해석결과는 Fig. 11에 도시되어 있다. 변위가 1.76 mm 발생하면 소성영역이 발생하기 시작하여, 79 cm의 소성영역이 발생하나, 더 이상 발전하지 않고, 최종 변위 2.2 mm에 수렴되어 거동을 멈춘다. 이때의 지보압이 0이므로 더 이상 아무런 지보를 설계하지 않아도 공동은 안정된다.

4.2 BRC에 의한 해석 및 검토

4.2.1 모델구성

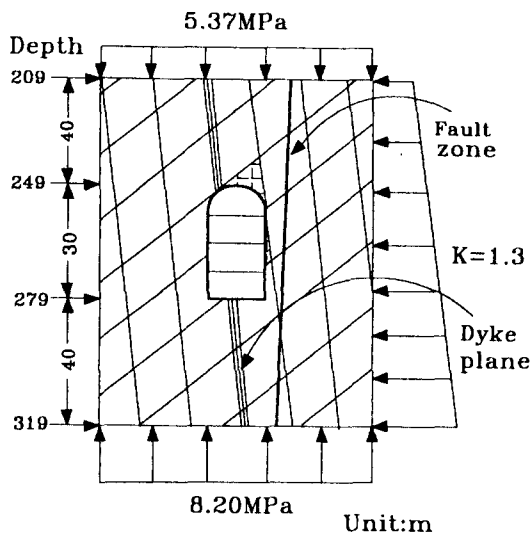
불연속면의 경사, 주향, 간격은 갱리리와 벤치-1 굴착

Table 4. Properties for the GRC analysis

E	8.25×10^4 MPa	S_c	283 MPa	ν	0.23
Equivalent area of circle (full face excavation) r_i					12.83 m
Outer pressure (maximum pressure at the bottom of cavern) P_o					9.32 MPa
	Intact rock (good quality rock)	Broken rock (poor quality rock)			
m	1.0	0.05			
s	0.004	0.00001			

* Lithified argillaceous rock (tuff)⁹⁾

후 천정과 측벽에서 드러난 40 m의 구간의 막장 지질도에서 나타난 것의 평균치로 하였다. 여기서 모델에 사용한 불연속면의 간격은 실제 불연속면의 간격이 아닌 가상의 간격을 사용하였다. 실제 간격의 불연속면에 의해서 형성되는 키블록의 크기는 BRC로 해석하기에는 매우 작을 뿐 아니라, 지보를 설계할만한 성질의 것이 아니라고 판단된다. 따라서 본 해석시에는 두 불연속면에 의해 이루어질 수 있는 최대 크기의 키블록만을 대상으로 한다. 이는 공동의 형상과 두 불연속면의 경사에 의해서 결정될 수 있다. 이에 의해서 결정된 불연속면의 간격은 Table 5와 같이 절리군-1은 14 m, 절리군-2는 12.5 m이다. 이에 의해 결정되는 키블록은 Fig. 12에서 보는 것과 같이 공동의 천정과 우측 측벽에서 발견된다. 이러한 키블록은 가정된 절리면의 간격으로 이루어진 것으로 실제 공동에서 발생하는 것이 아니다. 따라서 BRC분석을 통해 설계된 지보는 붕락의 가능성



Key block for BRC analysis

Fig. 12. DEM model of the cavern for BRC analysis.

이 있는 실제 키블록에 대한 것이라기 보다는, 불연속면의 경사와 주향이 정해졌을 때 공동의 천정과 측벽에 대한 전반적인 지보인 것이다.

현지에는 방해석이 얇게 충전되어 있는 절리군과 단층, 그리고 매우 연약한 안산암 암맥(dyke)에 의한 불연속면으로 크게 3가지 종류의 불연속면이 존재하며, 연약한 불연속면으로 생각되는 것은 단층과 암맥에 의한 불연속면이라고 생각된다. 따라서 이러한 불연속면의 물성은 실험실 시험에서 구한 것보다 더 세심한 고려가 필요하다고 할 것이다. 1번과 2번 절리군은 실험실 시험값을 그대로 사용하며, 암맥의 경계면과 단층의 물성은 문헌을 참조하여 조정하였다⁷⁾. 사용한 물성은 Table 6과 같다.

4.2.2 BRC에 의한 안정성 평가와 지보의 설계

해석시 사용한 지보는 앞에서 사용한 것과 동일한 것이다. 설치 깊이는 비교적 이완이 되지 않았다고 판단되는 지역까지 설치하는 것으로 하여 약 15m로 결정하였다. 볼트의 갯수는 분리가 일어나는 평면에 대해 3개, 다른 평면에 대해 1개씩을 설치하였다.

Fig. 13은 천정의 키블록에 대한 BRC 해석을 나타낸 것이다. 블록은 갱리터를 굴착할 때까지는 안정하다가 벤치-1을 굴착하면서 급속히 불안정해져, 결국 모든 접촉점에서의 응력이 0이되어 붕락되고 만다. 따라서 벤치-1을 굴착한 후에는 이미 평면-2의 분리가 상당히 진행된 상태이기 때문에 갱리터를 굴착한 이후 평면-1로 미끄러짐이 시작되기 전의 최소 지보량을 지보 시점으로 결정하였다. 이때의 지보량 $P_s=13.83$ MN이며, 지보시점의 변위 $u_s=4.73$ mm이다. 따라서 필요지보하중은 4.15 MN이다. 모든 거동은 떨어짐이며, 지보 압은 18 MN, 변위는 6.66 mm에서 거동을 멈추었다. 볼트의 앵커부분에서 변위가 거의 발생하지 않았기 때문에 볼트가 발휘한 강성은 9330 MN/m이다.

Fig. 14는 우측 측벽에 있는 블록에 대한 BRC 분석을 나타낸 것이다. 벤치-1 굴착까지는 블록이 아직 압

Tale 5. Spacial characteristics of joint sets

Joint set	Strike/Dip	Apparent dip (°)	spacing (m)	
			Real	Assummed
Joing set-1	N72E/80NW	84	1.7	14
Joint set-2	N50E/45SE	39	1.3	12.5
Fault (shear zone)	N80E/86SE	86	* 6m from sidewall	

Table 6. Properties of discrete element analysis.

Block property	Density (10^6 kg/m^3)	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	S_t (MPa)	ϕ ($^\circ$)	C (MPa)
Test value	0.00262	77000	0.23	51100	33700	22.6	51	51.7
Joint Property	JCS ₀ (MPa)	JRC ₀	K_n (MPa/m)	K_{si} (MPa/m)	ϕ_r ($^\circ$)	S_c (MPa)	L_n (m)	L_o (m)
Joint	209.8	11.3	53900	1530	18.8	82500	0.7	0.07
Fault	143.0	9.9	53900	1530	14.5	82500	0.7	0.07
Dyke plane	158.9	10.3	53900	1530	15.6	82500	0.7	0.07

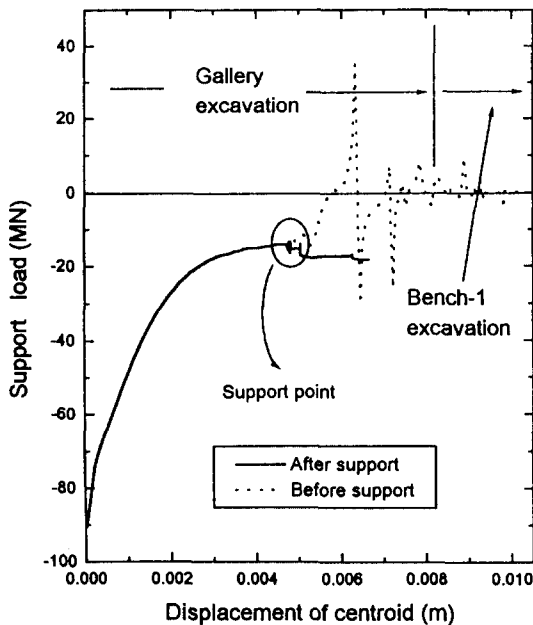


Fig. 13. BRC analysis of roof block

반내에 있기 때문에 변위가 많이 발생하지 않은 상태에서 지보압도 수렴이 되었다. 이후에 벤치-2가 굴착되면서 블록은 자유면에 완전 노출이 되어 급속히 지보압이 감소하여 불안정해져서 결국에는 블록이 붕락되고 만다. 곡선이 블록의 회전으로 인한 진동을 보이고 있어, 지보시점 선택의 어려움을 보이고 있다. 따라서 최초로 지보압이 최소가 되는 지점을 선택하였다. 그때의 지보압 $P_0=9 \text{ MN}$ 이며, 지보 설치시의 변위 $u_s=2.57 \text{ mm}$ 이다. 따라서 필요지보압은 2.7 MN 이다. 지보설치 이전의 곡선 부분이 다른 이유는 천정의 블록에 대한 지보가 측벽블록의 지보설치 이전에 설치되어 측벽블록에

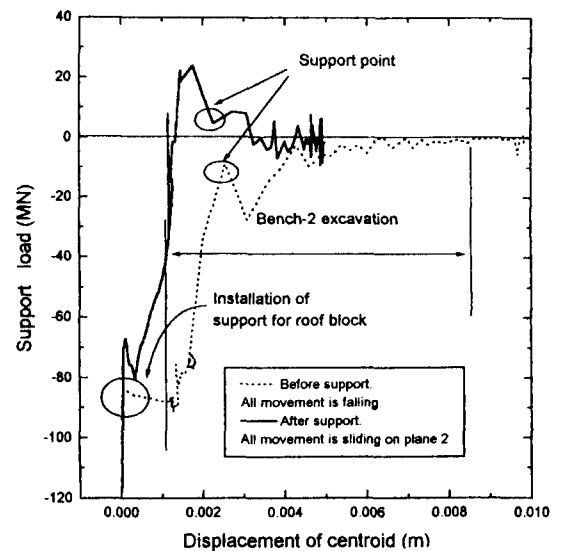


Fig. 14. BRC analysis of sidewall block

대한 응력분포가 바뀌었기 때문이다. 지보설치 이전 보다 지보압이 더 큰 (+)의 값을 갖는 이유는 천정의 블록이 암반내에 밀착되어 안정하기 때문에 측벽블록의 불연속면에 작용하는 수직 응력이 상대적으로 커지기 때문으로 판단된다. 대부분의 거동은 평면-2로 미끄러지는 것이며, 지보압은 $4\text{--}8 \text{ MN}$, 변위는 5.55 mm 에서 거동을 멈추었다.

본 연구가 본격적으로 시공에 반영되기 위해서는 앞으로 3차원적인 절리모델 분석에 의한 키블록의 규명, 불규칙하고 다양한 블록 형상에 대한 지보압의 계산과 정 등이 필요할 것이다. 또한 지보시점의 결정이 시공에 반영되기 위해서는 계측이 굴착초기부터 측정되어야 하며, 총변위의 양이 계산변위의 양과 가능한 한 근

사되어야 한다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요한 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 간단한 모델에 대한 BRC 해석 결과, 천정에 있는 키클록의 경우 BRC는 0으로 수렴되고 변위만 발생하여 붕락되는 것으로 나타났다. 이러한 경우 지보의 시점은 블록의 각 평면에서 응력이 감소하여 BRC 상의 지보압이 최소가 되는 최초의 시점으로 정할 수 있다.

2) 측벽에 있는 블록의 경우 회전이 발생하여 본 연구에서 구한 BRC로는 해석하기가 힘들다. 이러한 경우 첫번째로 분리되는 평면에서의 미끄러짐이 발생할 때, 지보압이 최소가 되는 지점을 지보의 지점으로 선택할 수 있다.

3) 측압계수가 변화할 때, 현지 초기응력이 큰 방향으로 키클록의 정점이 향해 있을 때 가장 높은 지보압이 필요하다. 또한 초기 응력의 수준이 높을 수록 블록의 붕락이나 지보시점의 변위가 크다. 그러나 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 특정한 형상의 블록들에 대해서만 적용 가능할 것이다.

4) 현지공동에 대해 Hoek & Brown 파괴기준식을 이용한 GRC 해석을 한 결과 소성영역이 일부 발생하였으나 최종 변위가 2.2 mm 발생하고 수렴하였다. 이러한 연속체 해석의 결과 현지 공동의 안정성을 크게 저해하는 요소는 없는 것으로 나타났다. 그러나 BRC 분석을 한 결과 천정에 있는 블록의 경우 벤치-1을 굴착하였을 때 붕락 가능성이 있고, 우측 측벽에 있는 블록의 경우 벤치-2를 굴착하였을 때 붕락 가능성이 있는 것으로 나타났다.

5) GRC 해석 결과 안정성에 이상이 없다고 판단할 수 있는 현지공동이라도 불연속면을 고려하였을 때에는 안정성의 문제가 생기며, 지보 설치의 필요성이 있다고 판단할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) Yow, J.L. Jr. & Goodman, R.E. 1987, A ground reaction curve based upon block theory : Rock mechanics and rock engineering, V. 20, pp. 167-190.
- 2) Voegelé, M., Fairhurst, C. & Cundall, P. 1977, Analysis of tunnel support loads using a large displacement, distinct block model : Proc. of the first international symposium, Stockholm, pp. 247-252.
- 3) Sofianos, A.L. 1986, Stability of rock wedges in tunnel roofs : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. V. 23, No. 2, pp. 119-130.
- 4) Goodman R.E. & Shi, G.H. 1985, Block theory and its application to rock engineering : Prentice-Hall, Inc.
- 5) Warburton, P.M. 1981, Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. V. 18, pp. 415-427.
- 6) Bandis, S.C., Lumsden, A.C. & Barton, N.R. 1983, Fundamentals of rock joint deformation : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. V. 20, No. 6, pp. 249-268.
- 7) Ehrle, H. 1990, Model materials for shear test of filled joints : Proc of Int. Conf. on Mech. of Jointed and Faulted rock, pp. 371-374.
- 8) Barton, N. & Bandis, S. 1990, Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice : Proc. of Int. Symp. on Rock Joints, pp. 603-610.
- 9) Hoek, E. & Brown, E.T. 1980, Underground excavations in rock : The institution of mining and metallurgy, London
- 10) 서영호, 1993, 연약암반에 굴착되는 NATM 터널의 변형거동과 보강설계 : 서울대학교 대학원 박사학위 논문.