

블록반응곡선을 이용한 불연속 암반내 공동에 대한 지보설계에 관한 연구

이 영주*¹, 이 희근*²

*1 : 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사, 현대건설

*2 : 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

1. 서론

NATM공법에서 지보는 주로 암반반응곡선(Ground Reaction Curve, GRC)상에서 설계된다. 그러나 GRC는 유도과정에서 많은 가정을 지니고 있어 시공에 직접 반영하기에는 많은 한계를 지닌다. 특히 과지압에 의한 소성거동의 문제가 심각하지 않고, 암반의 거동이 불연속면에 영향을 많이 받는 지역에서는 GRC의 가정 중에 하나인 등방 연속체라는 가정은 큰 결점 중의 하나이다. 본 연구에서는 불연속 암반내의 공동에 대한 NATM 시공이 가능하도록 불연속면을 고려한 블록반응곡선(Block Reaction Curve, BRC)을 유도하여, 이를 현재 건설중인 공동에 대해 적용해 보았다. 유도과정에서는 개별요소 프로그램인 UDEC과 본 연구에서 개발한 프로그램을 사용하였다.

2. BRC의 유도과정과 해석 및 지보설계

BRC의 유도과정에서 본 연구에서 사용한 가정과 기호규약은 아래와 같다.

- 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 블록을 이루는 불연속면 중에 양(+)의 x방향에 있는 불연속면을 '평면-1'이라 하고, 음(-)의 x방향에 있는 불연속면을 '평면-2'라 정의한다.
- ⑥ 지보압의 계산시 블록의 회전은 없는 것으로 가정한다.

해석시 사용한 모델은 블록은 Mohr-Coulomb 모델이며, 불연속면은 Barton-Bandis모델이다. 여기서 주의할 것은 계산 상의 시간인 차분시간과 실시간과의 관계이다. 이는 계측변위와 계산변위의 관계를 이용해 해결할 수 있다. BRC상의 지보시점과이 정해지는 것은 계산 시간상이기 때문에 이를 계측 변위와 비교하여 지보를 설치하는 실시간을 찾아내야 할 것이다.

BRC를 이용한 일반적인 지보설계과정은 아래 그림 1과 같다. 이러한 과정을 거쳐 구해진 BRC는 지보압 P 가 (+)이면, 블록이 암반내에서 안정한 것을 나타내고, (-)이면 블록이 암반

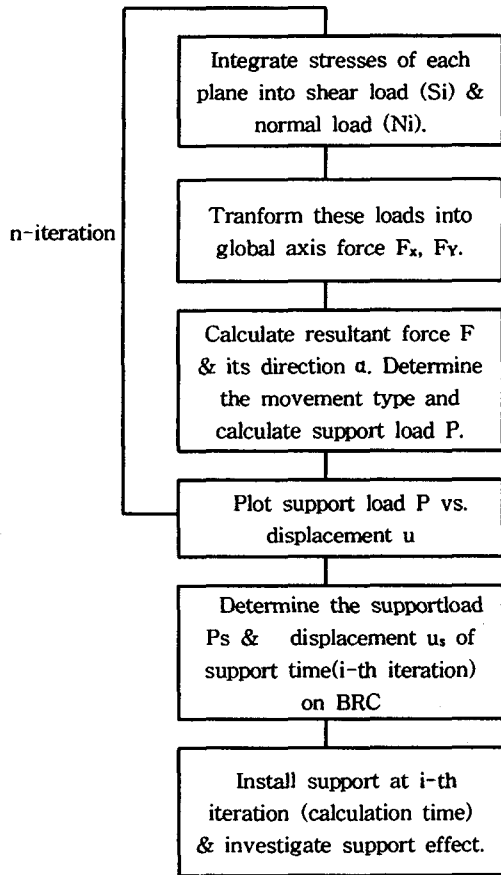


Fig. 1 Procedure of the support design using BRC

내에서 밀려나오는 불안정한 것을 나타낸다. 그림 2는 전형적인 BRC를 보여준다. 곡선 A의 경우는 붕락되는 블록에 대한 전형적인 BRC이다. 거동을 크게 4 단계로 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 암반자

체의 지지력이 감소하기 시작하고, 불연속면에서의 분리가 부분적으로 진행되기 때문에 발생하는 현상이므로 이를 블록이 다시 안정해진다고 판단해서는 안된다.

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

④ 블록이 붕락되는 단계 : 모든 접촉점에서의 응력이 0이 되고, 불연속면이 모두 분리되어 블록이 붕락된다.

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. 그림 3은 지보를 설치한 이후의 BRC이다. 지보의 시점은 1단계에서 2단계로 넘어가는 지점이며, 지보재의 최대 지보압은 그 지점의 지보압이다. 사용한 지보재는 록볼트이다. 지보

설치 이전에는 동일한 거동을 보이다가 s지점에서 볼트를 설치하였을 경우 $u_e - u_s$ 만큼의 변위가 더 발생한 이후에 e지점에서 거동을 멈추었다. 이때 앵커가 이완되지 않은 압반에 위치한다면, 볼트가 분담한 하중은 ΔP 이다. 따라서 볼트가 발휘한 강성은 아래와 같다.

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

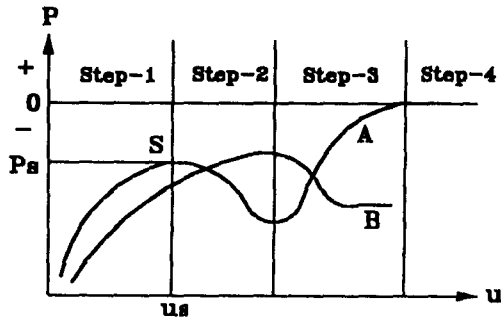


Fig.2 Typical BRC of unstable & stable block

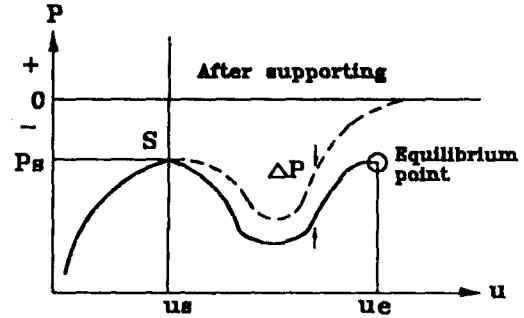


Fig.3 Typical BRC of supported block

3. 블록의 위치와 측압계수의 변화에 따른 BRC의 변화

폭이 10m인 정사각형의 공동에 경사가 45° 인 두 불연속면 군이 존재하면, 공동의 천장과 측벽, 바닥에 동일한 형상의 삼각형 키블록이 존재한다. 이 경우 천장과 우측 측벽에 존재하는 키블록에 대한 BRC 분석을 해 보았다. 그 결과는 그림 4, 5에 나타나 있다. 그림 5에서 보는 것과 같이 측벽에 존재하는 블록의 경우 회전이 발생하기 때문에 본 연구에서는 해석하기 곤란한 거동을 보인다.

그림 6, 7은 측압계수를 달리하였을 때의 최대지보압과 지보시점의 변위를 비교한 것이다. 최대 지보압은 현지최대주응력이 블록의 정점 방향으로 존재할 때 가장 커지며, 지보시점의 변위는 현지응력의 크기가 클수록 크다. 그러나 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 특정한 형상의 블록에 대해서만 적용가능하며, 일반화시키기는 어려울 것이다.

4. 현지 공동에 대한 안정성 판단 및 지보설계

현재 건설중인 공동에 대해 우선 압반을 연속체로 가정하여 일반적인 GRC를 유도하여 안정성을 판단해보기로 하자. 공동의 높이는 30m이며 7.5m씩 4단계 분할굴착을 실시한다. 여기서 사용하는 파괴기준식은 Heok & Brown의 경험파괴기준식을 사용하기로 한다. 이는 이 파괴기준식이

Mohr-Coulomb의 식에 비해 더 많은 소성영역을 나타내기 때문에 소성변형에 의해 공동의 안정성에 위험이 있는지를 좀 더 알아보기 위함이다. 해석결과는 그림 8에 도시되어 있다. 변위가 1.76mm 발생하면 소성영역이 발생하기 시작하여, 79cm의 소성영역이 발생하나, 더 이상 발전하지 않고, 최종변위 2.2 mm에 수렴되어 거동을 멈춘다. 이때의 지보압이 0이므로 더 이상 아무런 지보를 설계하지 않아도 공동은 안정된다.

다음은 본 공동에 대해 BRC 해석을 실시하기로 하자. 그림 9은 천장의 키블록에 대한 BRC 해석을 나타낸 것이다. 블록은 갤러리를 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 갤러리를 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, 지보압은 18 MN, 변위는 6.66 mm에서 거동을 멈추었다. 볼트의 앵커부분에서 변위가 거의 발생하지 않았기 때문에 볼트가 발휘한 강성은 9330 MN/m이다.

그림 10는 우측 측벽에 있는 블록에 대한 BRC 분석을 나타낸 것이다. 벤치-1 굴착까지는 블록이 아직 암반내에 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 $P_s = 9$ MN이며, 지보 설치시의 변위 $u_s = 2.57$ mm이다. 따라서 필요지보압은 2.7 MN이다. 지보설치 이전의 곡선 부분이 다른 이유는 천장의 블록에 대한 지보가 측벽블록의 지보설치 이전에 설치되어 측벽블록에 대한 응력분포가 바뀌었기 때문이다. 지보설치 이전 보다 지보압이 더 큰 (+)의 값을 갖는 이유는 천장의 블록이 암반내에 밀착되어 안정하기 때문에 측벽블록의 불연속면에 작용하는 수직 응력이 상대적으로 커지기 때문으로 판단된다. 대부분의 거동은 평면-2로 미끄러지는 것이며, 지보압은 4-8 MN, 변위는 5.55 mm에서 거동을 멈추었다.

5. 결론

본 연구에서 얻어진 주요한 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 간단한 모델에 대한 BRC 해석 결과, 천장에 있는 키블록의 경우 BRC는 0으로 수렴되고 변위만 발생하여 붕락되는 것으로 나타났다. 이러한 경우 지보의 시점은 블록의 각 평면에서 응력이 감소

하여 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 키블록의 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 BRC분석을 한 결과 천장에 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 없다라고 판단할 수 있는 현지공동이라도 불연속면을 고려하였을 때에는 안정성의 문제가 생기며, 지보 설치의 필요성이 있다라고 판단할 수 있다.

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

참고문헌

1. J.L. Yow, Jr. & R.E. Goodman, 1987, A ground reaction curve based upon block theory : Rock mechanics and rock engineering, v. 20, p. 167-190
2. M. Voegele, C. Fairhurst & P. Cundall, 1977, Analysis of tunnel support loads using a large displacement, distinct block model : Proc. of the first international symposium, Stockholm, p. 247-252
3. R.E. Goodman & G.H. Shi, 1985, Block theory and its application to rock engineering : Prentice-Hall, Inc.

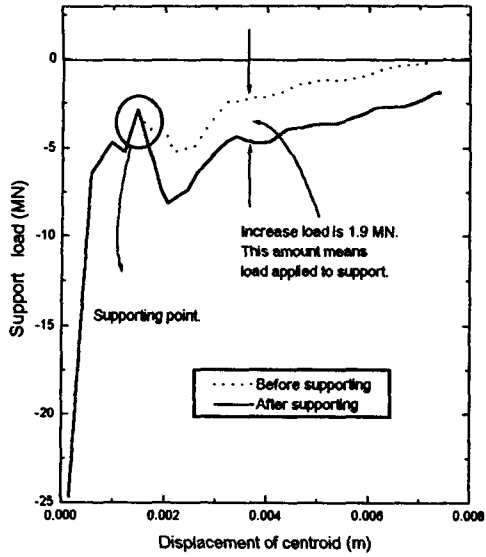


Fig. 4 BRC analysis of roof block (K=0.5)

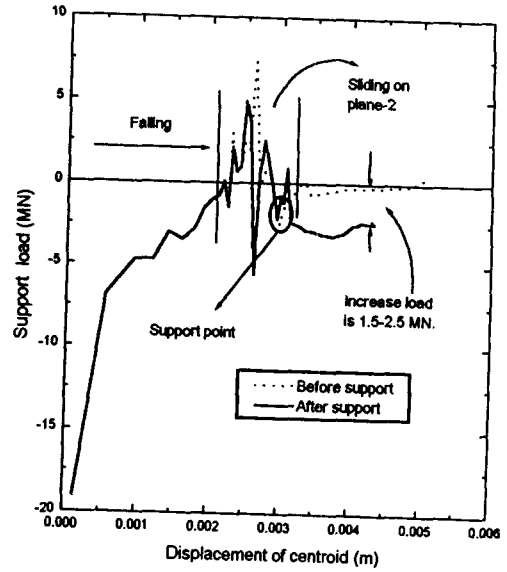


Fig. 5 BRC analysis of sidewall block (K=0.5)

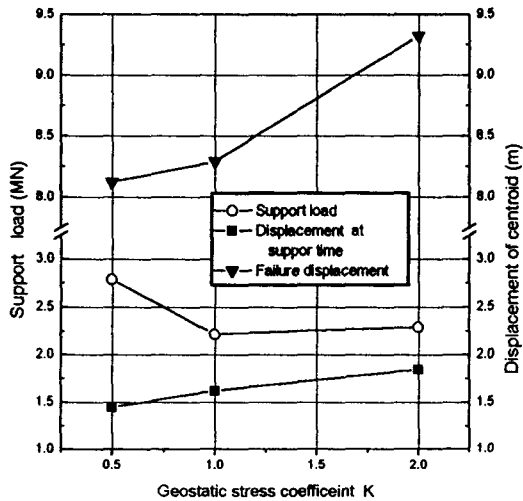


Fig. 6 Comparison of roof blocks for various K

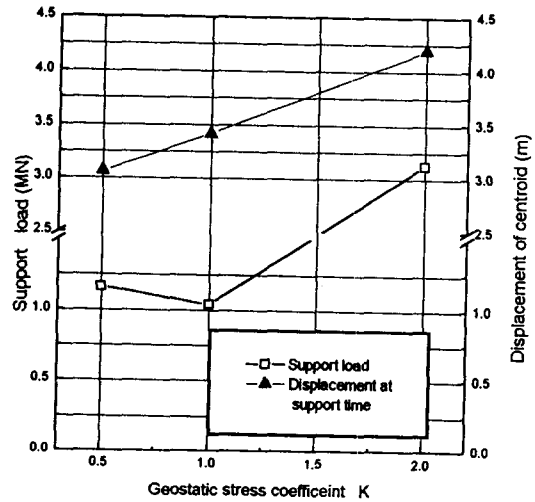


Fig. 7 Comparison of sidewall blocks for various K

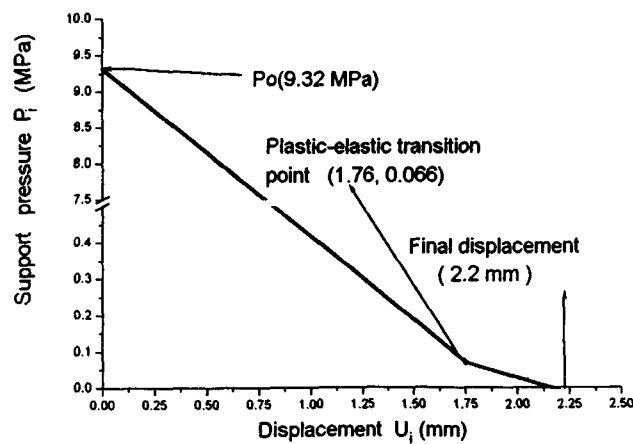


Fig. 8 GRC analysis using Hoek & Brown criteria

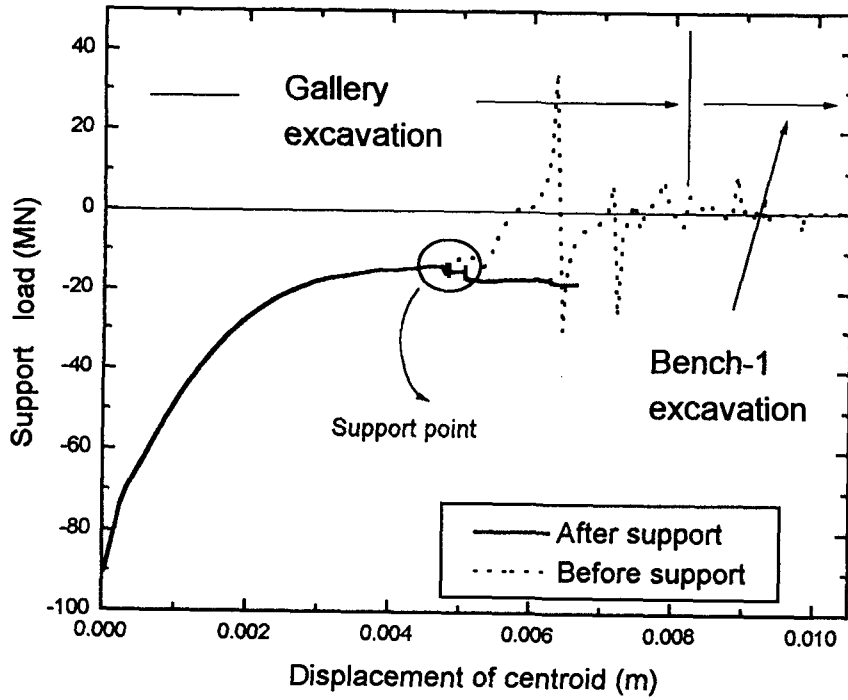


Fig. 9 BRC analysis of roof block

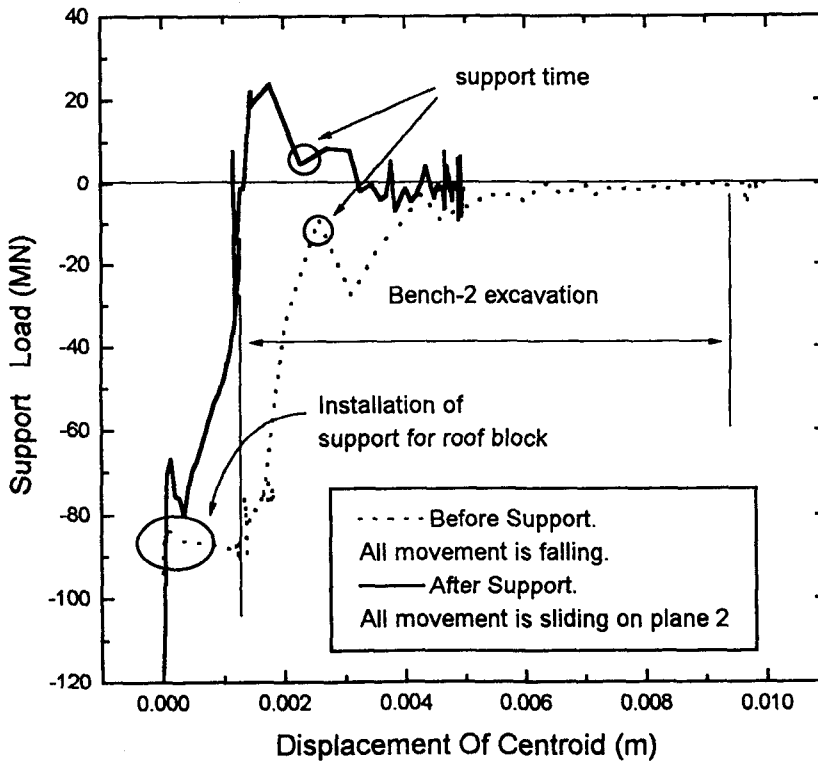


Fig. 10 BRC analysis of sidewall block