

암반사태와 블록성 암반내 터널의 안정성 해석을 위한 개별요소법의 적용성

문현구¹⁾, 장석부²⁾

Application of a Distinct Element Method in the Analyses of Rock
Avalanche and Tunnel Stability in Blocky Rock Masses

Hyun Koo Moon, Seok Bue Chang

ABSTRACT

The distinct element method(DEM) is well suited to the kinematic analysis of blocky rock masses. Two distinctive problems, a rock avalanche and tunnel in jointed rock masses, are chosen to apply the DEM which is based on perfectly rigid behaviour of blocks. Investigated for both problems are the effects of the input parameters such as contact stiffnesses, friction coefficient and damping property. Using various types of models of the avalanche and tunnel, an extensive parametric study is done to gain experiences in the method, and then to alleviate difficulties in determining parameter values suitable for a given problem.

The coefficient of friction has significant effects on all aspects of avalanche motion(travel distance, velocity and travel time), while the stiffnesses affect the rebounding and jumping motions after collision. The motion predicted by the models having single and mutiple blocks agrees well to the observations reported on the actual avalanche. For the tunnel problem, the behaviour of the key block in an example tunnel is compared by testing various values of the input parameters. The stability of the tunnel is dependent primarily on the friction coefficient,

*1992년 11월 접수

(이 연구는 1991년도 한국과학재단 연구비(과제번호 911-0508-005-2)의 일부 지원에 의한 결과임.)

1) 정회원. 한양대학교 공과대학 자원공학과 조교수.

2) 학생회원. 한양대학교 공과대학 자원공학과 대학원 박사과정.

while the stiffness and damping properties influence the block velocity.

The kinematic stability of a tunnel for underground nuclear waste repository is analyzed using the joint geometry data(orientation, spacing and persistence) occurred in a tailrace tunnel. Allowing a small deviation to the mean orientation results in different modes of failure of the rock blocks around the tunnel. Of all parameters tested, the most important to the stability of the tunnel in blocky rock masses are the geometry of the blocks generated by mapping the joint and tunnel surfaces in 3-dimensions and also the friction coefficient of the joints particularly for the stability of the side walls.

1. 서 론

교차하는 절리군이 두개 이상 분포하는 블록성 암반의 변형 특성은 신선암(intact rock)의 변형보다는 절리면의 변형에 의해 좌우된다고 볼 수 있다.¹⁾ 암석절리의 강도 또한 절리면의 낮은 점착력과 마찰각에 의해 신선암에 비해 상당히 낮은 강도값을 갖게 되며 따라서 전단 및 인장파괴가 상대적으로 용이해진다.²⁾ 암반을 다수의 절리군에 의해 분할된 암석블록들의 집합체로 볼 때 이 절리암반의 전체적인 변형 및 파괴거동은 주로 절리면을 따라 일어난다고 볼 수 있다. 암석블록 자체 즉 신선암의 영향이 절리에 비해 상대적으로 무시될 수 있는 정도라면 블록성 암반의 거동은 강체블록(rigid block)을 가정한 개별요소법으로도 잘 예측될 수 있다.³⁾

개별요소법은 개별 블록들의 큰 변위와 회전 등을 해석할 수 있는 방법으로서 국내에서도 이미 지하공동과 암반사면의 안정성 해석 및 발파 문제에 사용되어 왔다.⁽⁴⁻⁷⁾ 또한 암반사태(rock avalanche) 문제에 있어 쇄석(rock debris)의 이동경로를 예측함으로써 피해가능지역의 범위를 추정하는 연구에도 적용된 바 있다.⁸⁾ 그러나 신빙성 있는 개별요소해석이 이루어지기 위해서는 모델에 사용된 입력변수들이 명확히 규명되어야 하며 또한 이 변수들이 실

험실이나 현장에서 측정된 물성들과 어떠한 관계에 있는지 연구되어야 한다.⁹⁾

지하공간에서는 암석블록의 개별적인 운동가능성은 상당히 제한된다. 터널의 경우 원형, 계란형, 말굽형 또는 장방형 등과 같이 굴착 자유면이 폐곡선을 이룸으로써 블록이 움직일 수 있는 방향은 한정된다. 반면 사면의 경우에는 블록들이 넓은 자유면에 노출됨으로 해서 운동성이 높아진다.¹⁰⁾ 지하에 있는 암석블록은 사면에 비해 피복압, 구조응력 등 현장응력(in-situ stress)이 높게 작용함으로써 절리면은 밀착된 상태에 있으며 절리면의 틈새는 몇 mm이하가 보통이다. 이러한 차이는 지하공간 문제와 암반사면 문제에 개별요소법을 적용하는데 있어서도 다른 양상을 보이게 된다. 이를 두가지로 대별한다면 물성에 관련된 사항과 수치해석상의 안정성에 관한 사항으로 분리할 수 있다.

본 연구에서는 서로 대조되는 두가지 문제 즉 블록의 움직임이 매우 큰 암반사태 문제와 움직임이 제한된 터널문제를 선정하였고 개별요소 모델실험을 통해 입력변수들의 영향을 개별적으로 분석 평가하였다. 터널의 경우 실제 현장에서 관찰된 절리군의 방향성의 편차가 터널 주변암반의 파괴거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 세개의 상이한 모델을 비교 분석하였다.

2. 입력변수에 대한 고찰

개별요소법이 1970년대 초반 제안된 이후 이를 다양한 문제에 적용 또는 확장코자 많은 연구가 수행되어 왔다.¹¹⁻¹³⁾ 각 연구마다 입력변수에 대한 부분적인 언급이 있었으나 입력변수와 측정된 물성치와의 관계 또는 각각의 입력변수가 블록의 거동에 미치는 영향 등에 관한 연구는 충분치 못하다. 개별요소법의 주요 입력변수로서 접촉강성(contact stiffness), 마찰계수, 감쇠효과(damping)등을 들 수 있다.

접촉강성의 단위는 '힘/변위'로서 특성상 수직강성과 전단강성으로 구분된다. 개별요소법의 수치계산 측면에서 수직강성이 커지면 한 단계 계산을 위한 시간간격을 짧게 함으로써 계산의 안정성을 증가시키는 반면 때로 과도한 연산시간의 원인이 되기도 한다. 임계시간간격은 다음식에 의해 결정된다.

$$\Delta T_{crit} = 2(M_{min}/K_{max})^{1/2} \quad (1)$$

여기서 ΔT_{crit} 는 임계시간간격, M_{min} 은 최소 블록질량, K_{max} 는 최대 접촉강성이다. 강성비(stiffness ratio) 즉 '수직강성/전단강성'의 비는 보통 2~100의 범위를 갖기 때문에¹⁴⁾ 위 식의 분모는 항상 수직강성이 되고 따라서 임계시간간격은 수직강성에 의존하게 된다. 인접 블록간의 접촉을 corner-to-edge 또는 edge-to-corner의 접촉으로 정의하는 개별요소법에서 접촉강성은 보통 '응력/변위'의 단위를 갖는 절리강성(joint stiffness)과 구별되어야 한다.

감쇠효과와 마찰미끄럼은 블록성 암반내 에너지 소산의 주요 기구에 속한다. 점성 감쇠는 과감쇠, 부족감쇠, 임계감쇠로 분류되며 어떠한 구조계에 의도적으로 감쇠효과를 증감시키지 않는다면 대개의 공학적 문제는 0.5%~5% 범위의 부족감쇠 범주에 속한다고 본다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 본

연구에 사용된 감쇠효과는 질량비례 감쇠와 강성비 감쇠로 구성된다. 전자는 블록의 중심과 지면사이의 대쉬포트, 후자는 접촉하는 블록간의 대쉬포트 작용을 의미한다. 감쇠행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

여기서 $[C]$ 는 감쇠행렬, $[M]$ 은 질량행렬, $[K]$ 는 강성행렬, $\alpha = 2\pi fD$, $\beta = D/(2\pi f)$, f 는 진동수, D 는 감쇠비(damping ratio)이다. 진동수가 높을 경우 감쇠는 진동의 일차 함수에 근접하게 되고 진동수가 낮을 경우에는 감쇠는 진동의 역수 함수에 근접하게 된다. 질량비례 감쇠효과는 블록들이 점성 유체속에서 움직이는 것과 같은 효과를 줌으로써 기준좌표에 대한 블록의 움직임을 감쇠시킨다. 반면 강성비례 감쇠효과는 블록들의 상대적인 움직임을 감쇠시킨다. 따라서 이 두가지 감쇠효과는 분석코자 하는 문제의 성격에 따라 선택적으로 사용할 수 있다. 암석블록이 잘 물려있는 경우에는 질량비례 감쇠를 적용함으로써 낮은 진동에서 작은 움직임을 효과적으로 감소시킬 수 있어 암반터널과 같은 문제에 적합하다. 다만 과도한 질량비례 감쇠는 정상적인 강체운동을 방해하고 블록들의 미끄럼과괴를 인위적으로 억제하는 결과를 초래하기 때문에 주의를 요한다.¹⁸⁾ 한편 사면에서 암석블록들이 구르거나 미끄러지는 큰 움직임 거동을 해석하는 데는 강성비례 감쇠가 적합하다.

3. 암반사태에의 적용예

이 적용예는 경사가 각기 다른 세개의 사면을 따라 붕괴된 암반사태의 중심(블록)의 이동 경로를 추적하고 입력변수를 변화시키면서 블록의 운동특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 사용한 모델은 1964년 알라스카에서 일

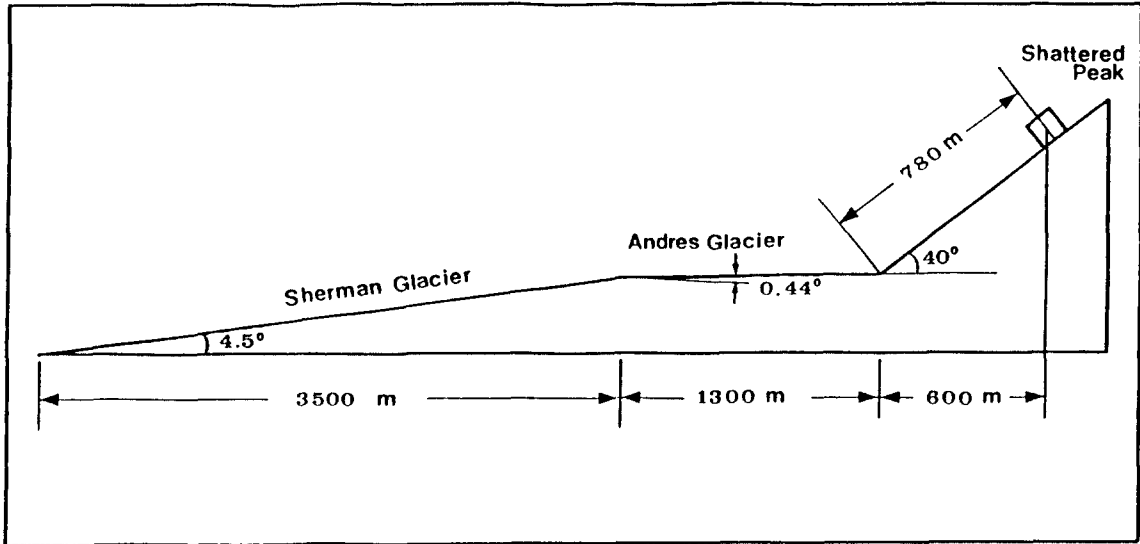


Fig.1 Single-block distinct element model of Sherman Glacier rock avalanche.

어났던 Sherman 빙하에서의 암반사태를 대상으로 설정하였다(Fig.1). 이 암반사태의 지질 배경 및 역학적 분석은 McSaveney에 의해 보고되었다.¹⁹⁾

이 개별요소모델은 지진에 의해 암반이 붕괴된 후 경사 40°의 산사면, 수평(경사 0.4°) 및 4.5°의 빙하면을 따라 이동할 때 사태의 질량 중심이 본래의 위치에서 마지막 정지한 위치까지 움직인 과정을 재현하고자 만들어졌다. 모델실험을 통해 마찰계수, 수직강성, 전단강성 및 진동수가 사태의 운동거동에 미치는 영향을 비교하였다.

수직 및 전단강성을 10MN/m, 진동수를 5Hz로 고정하고 마찰계수를 0.1에서 0.5까지 증가시켜 보았다. 마찰계수는 블록의 이동거리에 직접적인 영향을 주고 있음을 볼 수 있으며 마찰계수 0.1의 경우 160초 동안 총 3.1km이동하고 정지하였다(Fig.2). 마찰계수가 증가함에 따라 블록의 속도는 감소하였고 Andres 빙하에 닿기 직전 최대속도 60-85m/sec에 달한

후 되튀김과 미끄러짐 거동을 보였다. 운동방정식으로부터 예측된 이 지점에서의 사태중심의 속도는 67m/sec였다.

한편 마찰계수를 0.2, 진동수를 12.5Hz, 전단강성을 1MN/m로 고정하고 수직강성을 10MN/m에서 100MN/m로 변화시켜 보았다. 즉 강성비를 100에서 10으로 감소시켰으나 40° 산사면에서의 블록의 속도에는 차이가 없었으며 단지 빙하면에서의 되튀김 거동에 약간의 차이를 가

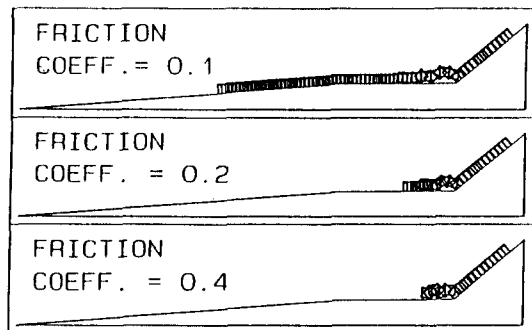


Fig.2 Motion of rock block for different friction coefficients.

져왔다(Fig.3). 이와같은 현상은 수직강성 10MN/m, 마찰계수 0.2, 진동수 25Hz로 고정하고 전단 강성을 0.01MN/m에서 1MN/m까지 변화시켰을 때도 나타났다(Fig.4). 일반적으로 전단강성이 증가할수록 블록의 이동거리는 단축되는 경향을 보였다. 또 다른 모델실험에서는 진동수의 영향을 비교하기 위해 수직 및 전단강성을 각각 10MN/m와 0.1MN/m, 마찰계수를 0.2로 고정하고 진동수를 2.5Hz에

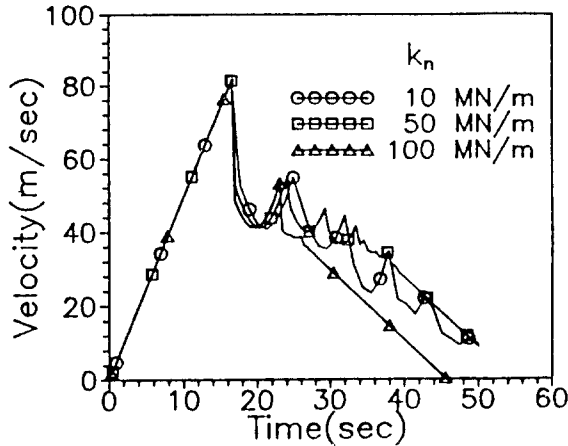


Fig.3 Velocity-time curves for different normal stiffnesses.

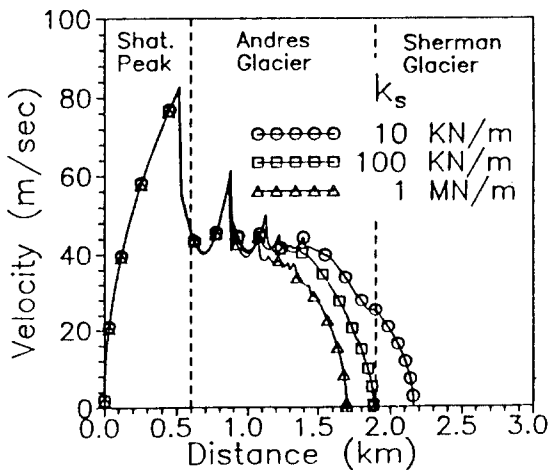


Fig.4 Velocity-distance curves for different shear stiffnesses.

서 25Hz까지 증가시켰다. 진동수가 증가하면서 되튀김, 회전, 블록의 요동이 심해졌으며 전체 이동거리도 증가하였다(Fig.5).

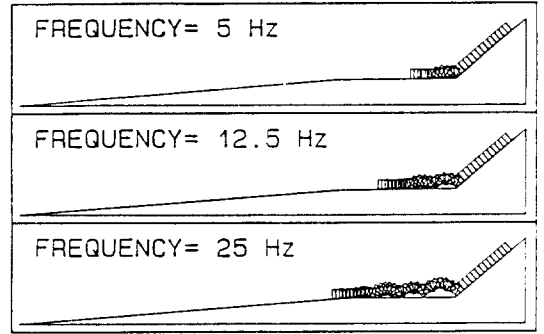


Fig.5 Motion of rock block for different values of frequency.

이상의 단일블록을 이용한 실험은 사태 중심의 움직임에 국한된 해석으로서 암석블록간의 충돌과 사면에 펼쳐지는 쇄석의 분포를 파악할 수 없다. 따라서 모델의 단순함을 유지하면서 블록간의 상호간섭작용을 분석하기 위해 블록의 수를 한개에서 두개와 네개로 증가시켜 보았다. 눈 덮인 빙하면의 특성을 고려하여 마찰계수를 0.11, 수직강성 50MN/m, 전단강성 1MN/m(강성비 50), 진동수 20Hz를 사용하였다. 이 때 단일블록의 이동거리는 3.03km로서 실제로 있었던 암반사태의 질량중심의 이동거리 3.1km와 근사한 결과를 얻었다. 두개 블록을 이용한 모델의 경우 앞선 블록(1)의 이동거리는 4.08km, 뒤 따르는 블록(2)의 이동거리는 2.35km로서 평탄한 빙하면에서 이 두 블록이 충돌할 때 뒷 블록의 이동량이 앞 블록에 전가되었음을 나타낸다. 블록(1)은 실제 암반사태의 선단이 이동한 거리 5.4km와 약 14%의 차이를 보였다. 네개 블록의 경우 블록(3)과 (4)는 빙하면에 충돌시 블록(1)과 (2)에 운동량을 전달한 후 Andres빙하면에 멈추었으며 블록(2)는 블록

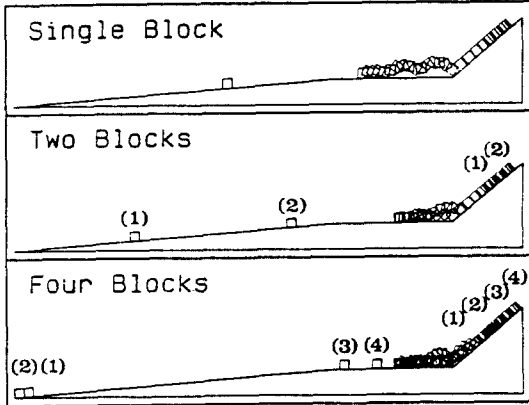


Fig.6 Motions of single block and multiple blocks simulating rock avalanche.

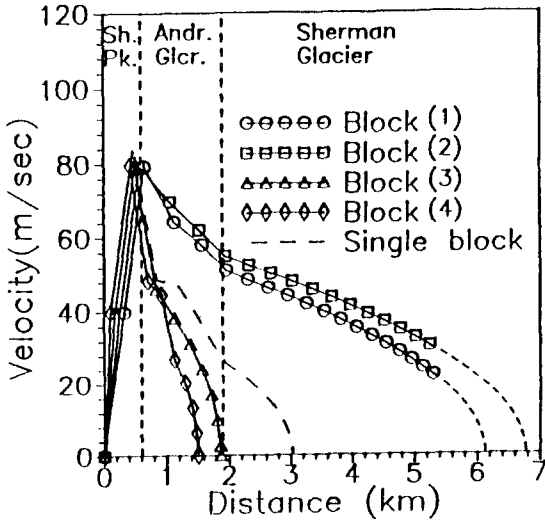


Fig.7 Comparison of velocity-distance curves between single block model and 4-block model.

(1)을 뛰어넘어 모델의 경계를 벗어났다(Fig. 6). 이 두개 블록의 이동거리는 모델 실험결과 얻어진 시간에 따른 각 블록의 속도의 변화와 운동방정식으로부터 추산하였다. 블록(1)은 사태 개시후 약 200초 동안 6.12km이동했으며 블록(2)는 212초 동안 6.77km 이동하였다(Fig.7). 모델로부터 예측된 이동거리는 실제보다 13-

25%과대 평가되었으나 마지막 블록이 정지한 시간 212초는 실제 보고된 이 암반사태의 진행시간 208초와 비교할 때 2% 이내에서 잘 일치하였다.

4. 블록성 암반내 터널에의 적용

블록의 속도와 이동거리가 매우 큰 암반사태 문제와는 달리 블록성 암반내 터널문제는 굴착 경계면에 분포하는 몇몇 암석블록들의 한정된 마찰 미끄럼 파괴가 전체 안정성에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 즉 인접한 블록들의 움직임을 유발하는 키블록(key block)의 돌출여부에 개별요소해석의 초점이 있다고 본다. 따라서 본 실험에서는 Fig.8에서와 같이 키블록(K)의 미끄러짐과 인접블록의 연쇄적인 이동에 미치는 입력변수의 영향을 파악하였다. 암반사태의 경우에는 강성비례 감소효과를 고려하였으나 이 터널문제에서는 질량비례 감소효과를 변화시켜 보았고 마찰계수, 수직 및 전단 강성에 대해서도 비교실험을 수행하였다.

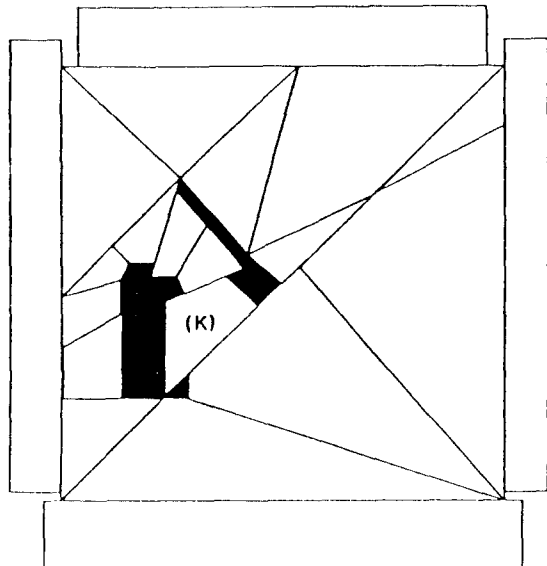


Fig.8 Key block motion and collapse of example tunnel model.

전단강성을 10MN/m, 마찰계수 0.3, 감쇠상수 α 를 4.7/초로 고정하고 수직강성을 50MN/m에서 1GN/m까지 증가시켰다. 수직강성이

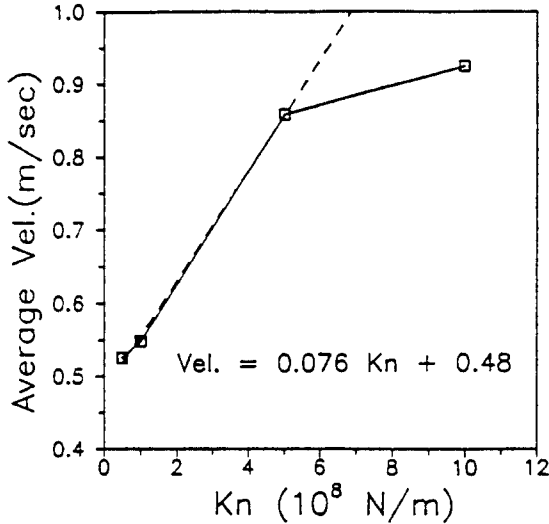


Fig.9 Variation of key block velocity with increased normal stiffness value.

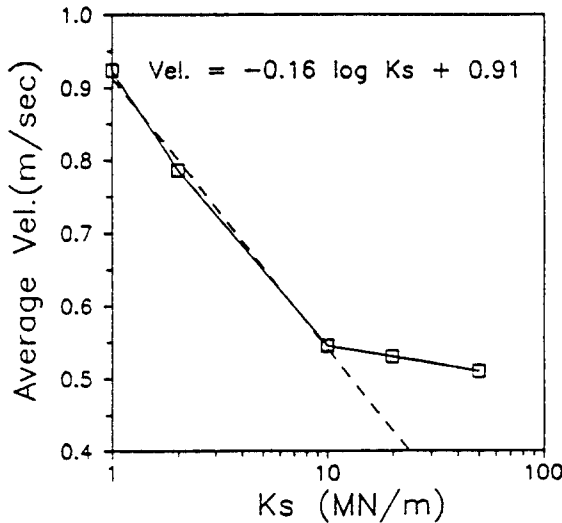


Fig.10 Variation of key block velocity with increased shear stiffness value.

500MN/m까지는 증가하면 블록(K)의 속도가 Fig.9와 같이 선형으로 증가하지만 그 이후의

속도변화는 매우 적다. 특히 50MN/m이하에서는 블록간의 겹침에 의해 강체거동을 볼 수 없었다. 전단강성의 영향은 수직강성을 100MN/m로 고정하고 강성비가 2에서 100까지 변화도록 하였다. 이 때 블록의 속도는 Fig.10에서와 같이 10MN/m까지는 전단강성의 로그함수로 감소하지만 전단강성이 10MN/m보다 클 경우에는 전단력이 Coulomb마찰법칙에 의해 상한이 정해지기 때문에 속도의 변화는 둔화되었다. 즉 수직강성이 클수록 또는 전단강성이 작을수록 블록은 짧은 시간내에 터널바닥으로 미끄러져 나온다. 한편 마찰계수를 0.25에서 0.4, 0.55로 증가시킬 경우 키블록의 미끄러진 거리는 마찰계수 0.25일 때의 3% 정도에 불과했다. 0.1~1.0MPa의 연직 하중조건에서 마찰계수가 0.4와 0.55일 경우 키블록은 안정된 거동을 보였다. 마찰계수는 블록의 속도 뿐만 아니라 이동거리에도 큰 영향을 미쳤다. 감쇠상수 α 를 0.16에서 4.7까지 증가시킬 경우 키블록의 초기속도는 Fig.11과 같이 감소하였다.³⁰⁾

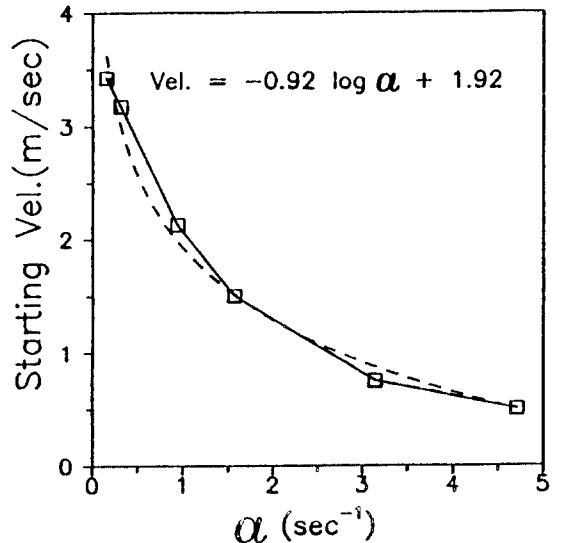


Fig.11 Variation of key block velocity with increased damping constants.

이상의 모델실험 결과 입력변수의 영향을 다음과 같이 요약할 수 있다: (1)블록간의 접촉을 방지하고 안정된 강체거동을 해석하려면 충분히 큰 수직강성치를 사용하여야 한다. (2)전단강성이 커지면 블록의 평균속도는 감소하나 모델의 수치해석적 안정성에는 무관하다. (3)접촉강성과 감쇠효과와는 대조적으로 키프록의 안정성 즉 터널의 안정성에 직접적인 영향을 주는 변수는 마찰계수이다.

암반사태와 간단한 터널문제를 이용한 강체 모델의 입력변수에 대한 이해와 경험을 토대로 방사성 폐기물 처분터널의 안정성을 해석해 보았다. 세개의 절리군이 분포하는 암반에 폭 7.2 m, 높이 6.2m의 말굽형 터널을 설정하였다. 절리의 기하학적 자료는 지하 양수발전소 방수로 터널에서 관찰된 현장자료를 사용하였으며 Table 1과 같다. 터널 장축의 방향은 N50° E로 가정하였다.

Table 1. Geometric properties of 3 joint sets used for 3 distinct element models of tunnel.

	Joint set(1)	Joint set(2)	Joint set(3)
Dip angle	34°	76°	65°
Dip direction	303°	107°	157°
Spacing (mean)	0.3-1.5m (0.7m)	0.4-3m (1.5m)	0.4-0.5m (0.4m)
Persistence	3-8m	1-4m	0.5-2m

각 절리군의 평균 방향과 평균 절리간격을 기초로 재현된 암반은 Fig.12와 같다. 해석에 필요한 전산시간의 부담을 줄이기 위해 각 절리군의 간격은 평균값의 2배를 취하였다. Fig. 13은 절리군의 경사각과 경사방향의 평균값을 그대로 적용한 모델로서 Case(1)이라고 했으며, 평균 방향으로부터 1°와 2°의 편차를 허용한 경우를 각각 Case(2)와 Case(3)으로 구별하여

개별요소 해석을 수행하였다. 이들 모델에 속한 블록들의 체적을 분석한 결과 방향성의 편차가 클수록 블록의 형상이 다양해지며 체적분포 역시 넓은 범위에 다양하게 나타남을 알 수 있었다. 절리 방향성의 편차를 고려함으로써 굴착경계면을 따라 여러가지 형태의 암석블록들이 분포할 확률이 높아지게 되며 이는 암반의 거동잠재력을 증가시킬 것으로 기대된다 (Fig.14).

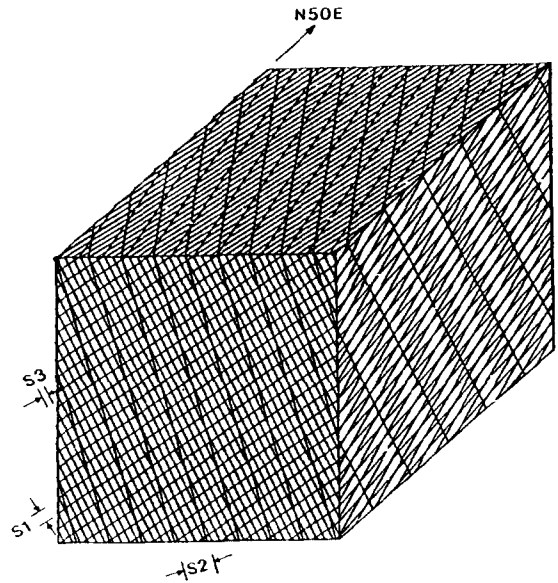


Fig.12 Jointed rock mass generated in 16m cube by 3 sets of intersecting joints having spacings S1=0.9m, S2=1.8m and S3=0.4m.

Case(1), Case(2) 및 Case(3)의 모델실험에 사용된 입력자료는 수직 및 전단강성이 각각 1GN/m와 0.5GN/m, 질량비례 감쇠상수 0.314, 마찰계수 0.2, 0.35, 0.5의 세가지 경우를 시험해 보았다.

Case(1)의 경우, 마찰계수가 0.2일 때 터널 천정 및 우측벽에서 블록들의 붕락이 발생하였으며 프로그램 수행에 있어서도 블록간의 접촉

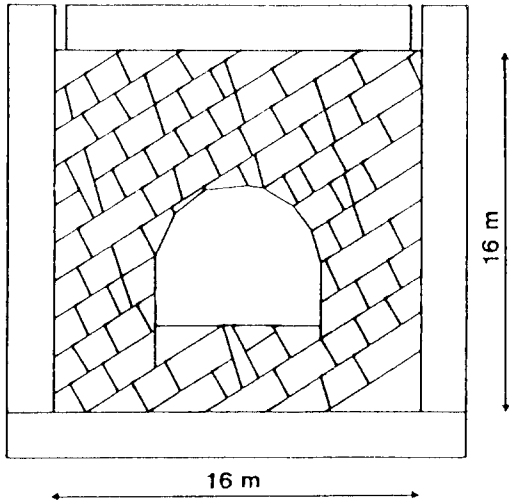


Fig.13 Distinct element model for the tunnel of Case(1).

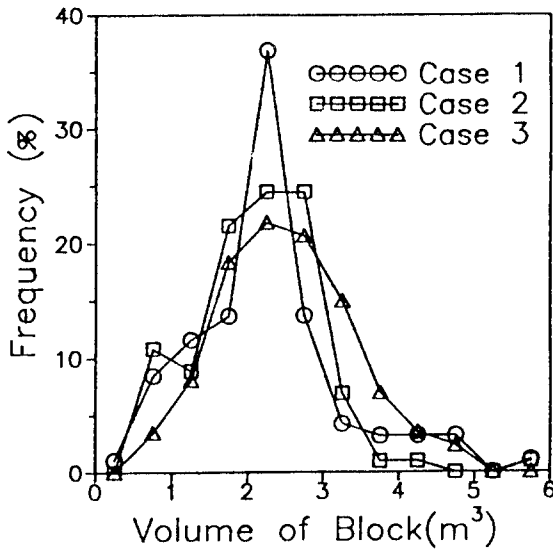


Fig.14 Frequency distribution of block volume for 3 test cases.

이 정확히 인지되지 못하는 불안정한 거동을 보였다. 마찰계수가 0.35로 증가하면서 우측벽에서만 블록이 미끄러져 내리는 현상을 볼 수 있었고(Fig.15), 마찰계수가 0.5 일때 터널은 전체적으로 안정된 상태를 유지하였다. 이와는

대조적으로 Case(2)의 경우 세가지 상이한 마찰계수값에도 불구하고 모두 좌측 천정에서 5개의 블록들이 돌출하는 거동을 보였다(Fig.16). 마찰계수의 변화는 물론 돌출하는 블록의 이동속도에 약간의 차이를 발생시켰으나 붕락 현상 그 자체에는 변화를 주지 못했다. 따라서 이 터널 천정부의 불안정성은 절리의 방향성에 편차를 허용함으로써 얻어진 다양한 블록형상과 배열상태에 주된 원인이 있다고 해석된다. Case(3) 역시 사용된 마찰계수에는 무관하게 좌측 천정이 붕괴되는 현상을 보였다(Fig.17). 천정 중앙의 췌기형 블록의 돌출이 다른 2개 블록의 이동을 유도하는 역할을 했으며 Case(1)과 Case(3)에 비해 빠른 속도로 붕락이 진행되었다.

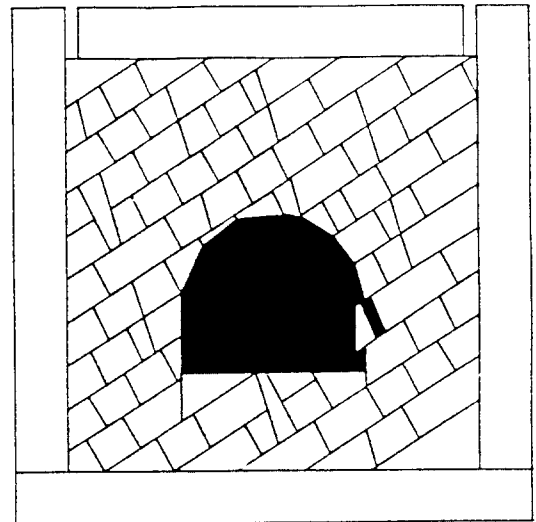


Fig.15 Mode of failure of the tunnel of Case(1).

5. 토 론

본 연구에서 수행된 전산 모델실험의 해석결과와 의미를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 암반사태와 터널문제에 강체를 가정한 개

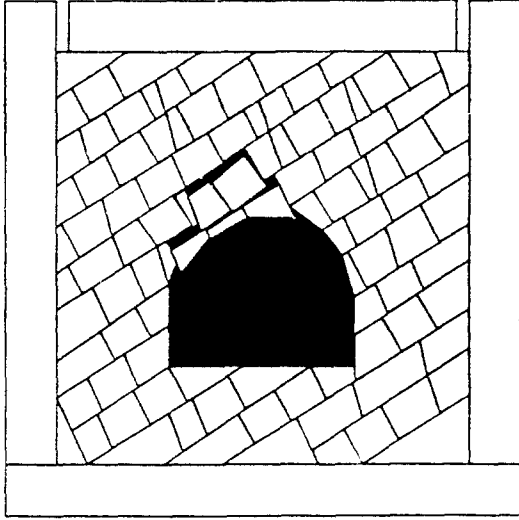


Fig.16 Mode of failure of the tunnel of Case(2).

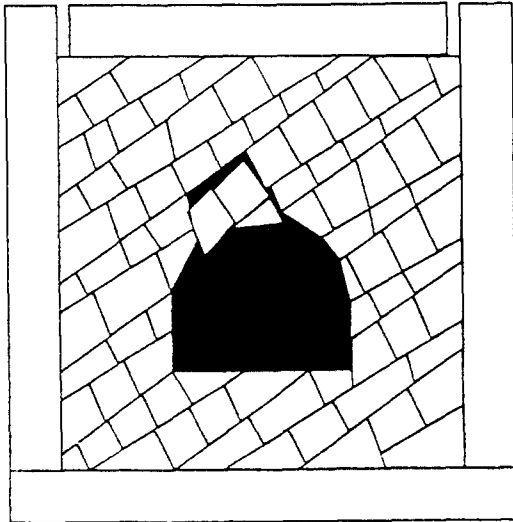


Fig.17 Mode of failure of the tunnel of Case(3).

별요소법을 적용할 경우, 사용된 입력변수들 중 마찰계수는 블록의 운동거동 전반에 걸쳐 가장 중요한 영향을 미쳤다. 사면의 경우 마찰에 의한 운동에너지의 손실은 블록의 속도와 가속도에 직접적인 영향을 미쳤으며 결국 블록

의 이동거리 즉 암반사태의 피해가능 범위를 변화시켰다. 터널의 경우 블록의 이동속도보다는 미끄럼과파괴에 의한 블록들의 돌출여부가 더 중요시 되며 따라서 자유낙하에 의한 붕락을 제외한다면 마찰계수가 터널의 안정성에 가장 큰 영향을 미쳤다.

(2) 개별요소법에서의 접촉강성과 절리면의 강성을 직접 비교하기는 어려우며 특히 접촉수직 강성은 블록들의 강제거동을 보장하는 안정된 프로그램 수행을 위해 조정되어야 할 때 개변수로서 이해하는 것이 더 적절하다. 따라서 블록들의 변위나 회전이 큰 모델에서는 겹치는 블록을 방지하기 위해 수직강성을 충분히 크게 잡아야 하며 3차원 개별요소 해석에서도 이점이 강조된 바 있다.¹²⁾

(3) 질량비례 및 강성비례의 두가지 감쇠특성은 문제의 성격에 따라 선택적으로 또는 함께 사용될 수 있으며 진동수가 클 경우에는 질량비례감쇠가 우세하고 진동수가 작을 경우에는 강성 비례감쇠가 우세하게 된다. 블록의 회전과 이동이 큰 사면문제에서는 강성비례감쇠를, 제한된 블록의 움직임과 돌출 등 비교적 초기에 발생하는 블록의 운동거동이 중요시 되는 터널문제에는 질량비례감쇠를 적용하는 것이 효과적이었다.

(4) 절리군의 방향성(경사와 경사방향) 및 분포특성(절리의 간격 및 연속성)에 따라 다양한 개별요소모델이 발생될 수 있으며 터널주변 암석블록들의 파괴거동과 터널의 전체적인 안정성이 달라질 수 있다. 본 연구에서와 같이 방향성에 약간의 편차만을 허용함으로써도 세가지 다른 파괴양상을 관찰할 수 있었다. 따라서 개별요소해석에 앞서 절리의 방향성, 밀도분포 및 연속성에 대한 통계적 해석이 수행되어야 함은 물론 더욱 중요한 것은 이러한 통계적 해

석을 바탕으로 절리도가 작성되어야 하고 블록들이 만들어져야 한다는 점이다.

6. 결 론

본 연구에서는 두가지 대조적인 암반공학 문제를 대상으로 개별요소법을 적용하였다. 강체 블록에 기초한 개별요소법의 입력변수(접촉강성, 마찰계수, 점성감쇠)를 변화시키면서 암반 사태의 이동거리, 속도, 진행시간 등을 예측하였고 문헌에 보고된 실측자료와 비교하였다. 사태의 질량중심의 이동거리와 속도는 단일블록을 이용한 모델에서, 사태의 진행시간과 최대 이동거리는 4개 블록을 이용한 모델에서 잘 예측되었다. 한편 블록성 암반내 터널에 관해서는 입력변수를 변화시키면서 안정성에 결정적인 영향을 주는 키블록의 거동을 비교하였다. 접촉강성과 감쇠상수는 블록의 돌출여부와는 무관하였음에 반하여 마찰계수는 터널의 안정성에 직접적인 영향을 미쳤다. 프로그램의 수치적 안정성은 수직강성과 밀접한 관계에 있음이 확인되었다.

실제 현장에 분포하는 절리에 관한 자료와 개별요소법을 이용하여 터널의 안정성을 해석하였다. 이 때 절리의 기하학적 자료에 관한 통계적 분석을 바탕으로 3차원 공간에서 절리 암반을 재현하고, 계획한 터널단면에 나타나는 2차원 절리도를 재구성한 후 블록의 집합체를 형성하는 선처리 과정이 충실히 이루어졌느냐에 따라 개별요소 해석결과의 신빙성이 좌우된다고 본다.

본 연구에서 절리군의 방향성에 편차를 줌으로써 나타난 파괴거동의 차이는 이 결론을 입증한다고 볼 수 있다. 블록의 형상과 크기를 결정하는 절리의 기하학적 성질 이외에 터널 주변 암석 블록들의 불안정한 돌출에 직접적으로 영향을 주는 변수는 마찰계수이다.

참고문헌

- 1) Pariseau, W.G. & Moon, H.(1988) Elastic moduli of well-jointed rock masses. Proceedings 6th international conference on numerical methods in geomechanics, Innsbruck, pp.815-822.
- 2) 문현구, 김선홍, 김창용(1991) 불연속 암반의 탄소성 특성과 이를 이용한 전산모델연구. 한국자원공학회지, 제28권 3호, pp.227-236.
- 3) Maini, T., et al.(1978) Computer modeling of jointed rock masses. U.S. army engineer waterways experiment station, p. 397.
- 4) 윤건신(1991) 우리나라 결정질암내 동굴처분장에 대한 수치해석. 지질공학, 제1권 1호, pp.68-84.
- 5) 권상기, 김영근, 이희근(1991) 블록형 불연속암반내 공동주위의 변형과 파괴거동에 관한 연구, 한국자원공학회지, 제28권 5호, pp. 375-381.
- 6) 장석부(1992) 터널굴착에 의한 블록성 암반의 거동에 관한 수치해석. 한국자원공학회 제58회 학술발표회 논문집, pp.209-215.
- 7) 류창하(1990) Distinct element method를 이용한 불연속 암반에서의 발파 simulation. 한국자원공학회 제54회 학술발표회 논문집, pp.234-235.
- 8) Moon, H.K., Park, K.S. & Chang, S.B. (1992) Back calculation and a simple rigid block analysis for evaluation of the hazard zone of an example rock avalanche. ISRM symposium on rock slopes, in press.

- 9) Ohnishi, Y., et al.(1985) Verification of input parameters for distinct element analysis of jointed rock mass, Proceedings international symposium fundamentals rock joints, pp.205-214.
- 10) Goodman, R.E. & Shi, G.(1985) Block theory and its application to rock engineering, Prentice Hall, p.338.
- 11) Ryu, Chang-Ha(1989) Numerical modeling of fragmentation in jointed geologic media, Ph.D. dissertation, University of Utah, p.201.
- 12) Ghaboussi, J. & Barbosa, R.(1990) Three-dimensional discrete element method for granular materials, Int.J. Numer. Anal. Methods Geomech., vol.14, pp.451-472.
- 13) Pande, G.N., Beer, G. & Williams, J.R. (1990) Numerical methods in rock mechanics, John Wiley & Sons, p.327.
- 14) Belytschko, T., Plesha, M. & Dowding, C. H.(1984) A computer method for stability analysis of caverns in jointed rock, Int.J. Numer. Anal. Methods Geomech., vol. 8, pp.473-492.
- 15) Roy, R. & Craig, Jr.(1981) Structural dynamics, John Wiley & Sons, p.527.
- 16) Tse, F.S., Morse, I.E. & Hinkle, R.T.(1978) Mechanical vibrations-theory and application-, Allen & Bacon, p.449.
- 17) Humar, J.L.(1990) Dynamics of structures, Prentice Hall, p.780.
- 18) Plesha, M.E.(1986) Mixed time integration for the transient analysis of jointed media, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., vol.10, pp.91-110.
- 19) McSaveney, M.J.(1978) Sherman glacier rock avalanche, Alaska, U.S.A., in Rockslides and avalanches, 1st ed. Voight, Elsevier scientific publishing company, New York, pp.197-258.
- 20) 장석부(1991) 터널의 안정성 평가를 위한 개별 요소법과 블록이론의 적용, 석사논문, 한양대학교, p.82.