

터널굴착에서 불연속면에 의한 공동주변 암반블록의 안정성 해석

송 재준*¹, 이 정인*²

*1 : 서울대학교 공과대학 자원공학과 박사과정

*2 : 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

1. 서 론

절리가 발달된 경암질 암반내에서 터널을 굴착할 때에 발생하는 심각한 문제중의 하나는 암반내에 존재하는 불연속면과 굴착에 의하여 형성되는 자유면에 의하여 생성된 블록의 낙반 사고이다. R.E. Goodman, Gen-hua shi³⁾ 등에 의하여 제안된 블록이론은 암반사면이나 지하공동에 존재하는 절리들의 방향성을 조사하여 우세한 방향의 절리들에 의하여 발생하는 블록들의 안정, 불안정 및 낙반의 가능성 여부를 판정할 수 있도록 하였다. 그러나 이 블록이론에 의한 해석은 단지 몇 개의 우세한 방향의 절리들에 의하여 형성되는 블록들만을 대상으로 하며 그 외에 존재하는 불규칙 절리를 포함한 수 많은 절리들에 대한 해석이 제외되고 절리의 연장성에 제한을 둘 수 없으며 절리의 위치를 고려하지 않는다는 단점을 가지고 있다.

이 연구에서는 Gen-hua shi²⁾ 와 S.F. Hoerger¹⁾ 등의 연구내용을 이용하여 현장 절리 지질도에 나타난 절리 트레이스들을 입체적으로 재구성하고 각 절리의 교차로 인하여 생성되는 블록들을 찾아내어 각 블록에 대한 거동성을 분석한 후 안정성을 계산하는 프로그램을 구성하였다. 이 프로그램을 에너지 비축공동의 안정성 해석에 적용한 결과, 낙반의 예측과 보강에 필요한 개별 블록의 부피와 높이⁶⁾, 그리고 안전율등의 자료를 얻을 수 있었다. 여기에서 산출된 내용은 동일 공동에 대하여 블록이론을 적용하여 해석한 결과와 비교하여 각 방법의 장·단점을 살펴보았다.

2. 개별 블록의 안정성 해석법

터널이 굴착되면서 작성되는 현장 절리 지질도에는 실제 절리들의 위치와 길이, 방향 등이 모두 나타나있음에도 불구하고 여기에서 절리의 방향에 관한 정보만을 선택하는 것은 블록의 안정성에 대한 보다 상세한 해석의 기회를 잃는 것이다. 이 연구에서는 절리의 방향과 함께 위치와 크기를 고려하여 현장 절리 지질도에 나타난 절리들을 입체적으로 재구성하고 터널 경계면에 나타난 블록 다각형 형태의 '후보 거동가능블록' 들을 선별한 후 안정성을 계산하여 위험 블록들에 대한 위치와 크기를 산출하도록 하였다. 프로그램의 흐름도는 Fig.1 와 같다.

2.1 절리정보의 처리

현장 절리 지질도에 표시되어 있는 절리의 주향과 경사를 입력하고 절리의 시점과 종점의 x, y 좌표값을 화일에 저장하여 입력자료로서 사용한다. 2차원의 좌표값을 3차원 공동 경계면상의 좌표

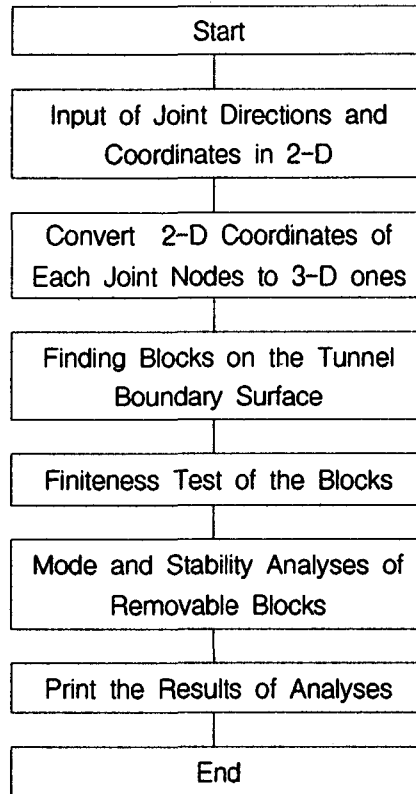


Fig. 1 Flow chart of stability analyses for each block

값으로 환산하기 위하여는 공동 단면 형상에 대한 정보가 필요하다. 2차원 좌표의 3차원 변환과정 이 Fig.2에 나타나 있다.

이 그림에서는 원형공동의 갤러리 부분을 10개의 평면으로 근사시켜 각 평면들의 경계부분에 총 11개의 모서리가 만들어지도록 하였다. i 번째 모서리의 끝점 A_i 의 좌표를 (X_{Ai}, Y_{Ai}, Z_{Ai}) 라 할 때 이 점이 2차원 절리도의 a_i 점에 대응되며 이 때의 좌표를 (x_1, y_1) 점이라 한다. 절리도면에서의 (x_1, y_1) 점이 x 축 상에서 보면 a_4 와 a_5 점 사이에 있으므로 입체면에서는 모서리점 A_4 와 A_5 사이에 존재하게 되며 그 3차원 좌표 (X_1, Y_1, Z_1) 은 아래의 식에서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X_1 &= X_{A4} + \frac{x_1 - x_{a4}}{x_{a5} - x_{a4}} (X_{A5} - X_{A4}) \\
 Y_1 &= Y_{A4} + \frac{x_1 - x_{a4}}{x_{a5} - x_{a4}} (Y_{A5} - Y_{A4}) \\
 Z_1 &= -y_1
 \end{aligned}$$

(x_2, y_2) 점도 같은 방식으로 (X_2, Y_2, Z_2) 값으로 변환된다.

3차원 공동면에서 이 절리 트레이스의 양 끝점 사이에 존재하는 절점의 위치는 모서리 직선들과 절리 평면의 교점들로부터 구할 수 있다. 입체면상에서 모든 절리의 양끝점 및 절점들의 좌표를 계산한 후에는 절리 트레이스의 교차점들을 조사한다. 공간에서 두 직선의 교점은 두 직선이 같은 평면에 있다는 조건하에 구하게 된다.

2.2 블록의 선별

블록은 크게 오목블록과 블록블록으로 구분해 볼 수 있는데 유한성 및 각종 안정성 해석 과정에서 블록한 형태의 블록을 기본가정으로 하므로 블록의 선별과정에서 블록한 블록들만을 찾아야 한다. Fig.3 에는 4개의 블록블록이 존재하는데 이들을 찾는 구체적인 과정은 다음과 같다.

시작절리 : ① 번			
회전 : 왼쪽	고점번호	절리번호	참고사항
	1 → 2	①	막힘
회전 : 오른쪽			
회전 : 오른쪽	고점번호	절리번호	참고사항
	1 → 2	①	
	2 → 4	①③	
	4 → 6	①③⑤	St1 : ①③ 과 (4,5) 저장
	6 → 3	①③⑤④	
	3 → 1	①③⑤④②	
	1 → 2	①③⑤④②①	Loop 1 : ①③⑤④②
	4 → 5	①③	St1 에서 재개
	5 → 6	①③④	
	6 → 4	①③④⑤	St2 : ①③④ 과 (6,3) 저장
	4 → 5	①③④⑤③	Loop 2 : ③④⑤
	6 → 3	①③④	St2 에서 재개
	3 → 1	①③④②	
	1 → 2	①③④②①	Loop 3 : ①③④②
시작절리 : ② 번			
회전 : 왼쪽	고점번호	절리번호	참고사항
	1 → 3	②	
	3 → 6	②④	
	6 → 4	②④⑤	St3 : ②④ 과 (6,5) 저장
	4 → 2	②④⑤③	
	2 → 1	②④⑤③①	②<① 이므로 중단
	6 → 5	②④	St3 에서 재개
	5 → 4	②④③	St4 : ②④ 와 (5,7) 저장
	4 → 6	②④③⑤	St5 : ②④③ 과 (4,2) 저장
	6 → 5	②④③⑤④	④③⑤ 가 Loop 이나 ④>③ 이므로 중단
	4 → 2	②④③	St5 에서 재개
	2 → 1	②④③①	②>① 이므로 중단
	5 → 7	②④	St4 에서 재개
	7 → 8	②④⑥	
	8 → 9	②④⑥⑦	막힘, St6 : ②④⑥ 과 (8,10) 저장
	8 → 10	②④⑥	St6 에서 재개
	10 → 9	②④⑥⑧	
	9 → 8	②④⑥⑧⑦	
	8 → 7	②④⑥⑧⑦⑥	Loop 4 : ⑥⑧⑦
회전 : 오른쪽			
회전 : 오른쪽	고점번호	절리번호	참고사항
	1 → 3	②	막힘

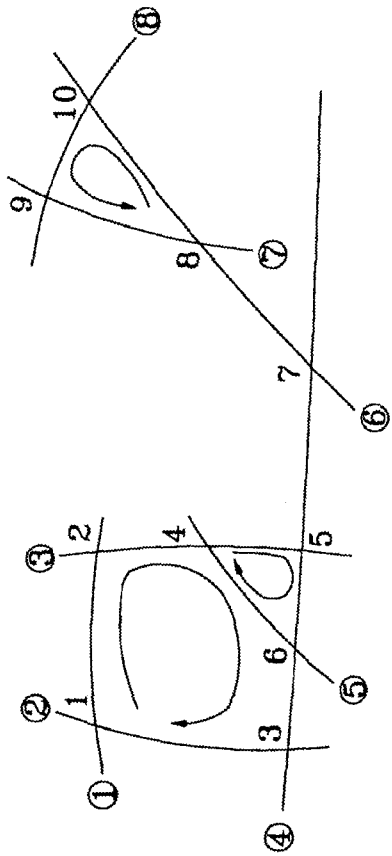


Fig. 3 Finding convex blocks in the joint map including 7 joints

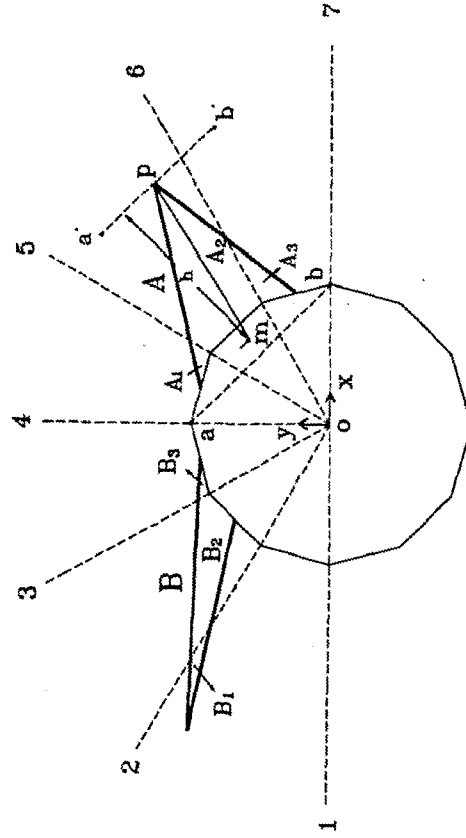


Fig. 4 Subdivision of concave blocks around a circular cavern

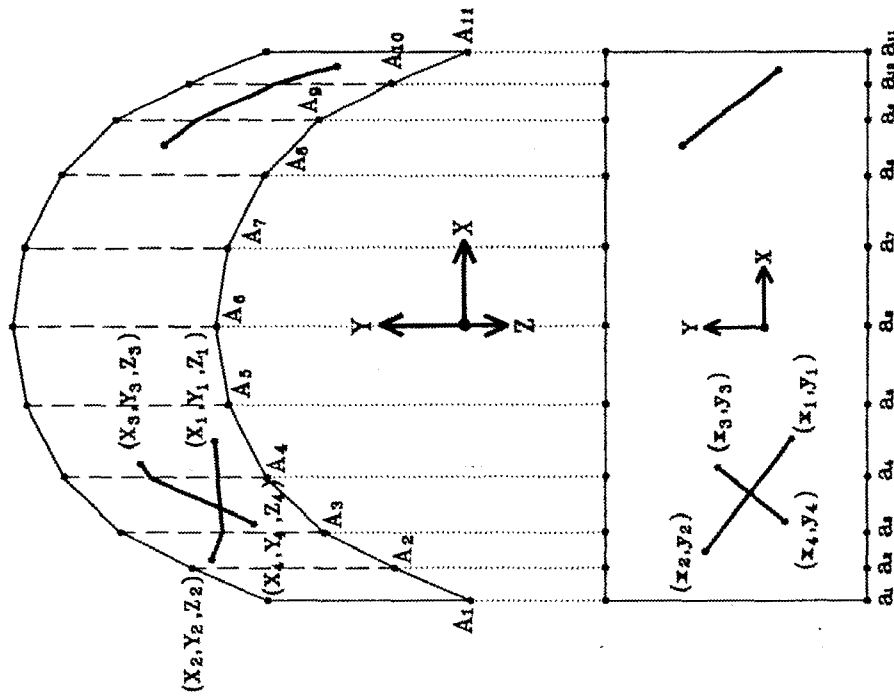


Fig. 2 An Example of converting 2-d coordinates to 3-d ones

2.3 블록의 부피와 높이 계산

거동가능블록의 자중을 계산하고자 할 때는 암석의 밀도와 부피를 알아야 한다. 밀도는 해당지역에서 채취한 표본 암석시료로부터 구할 수 있으며 부피는 절리면과 자유면의 방향벡터와 교점들의 좌표를 통하여 계산하게 된다. 사면체의 경우 블록의 부피는 밀면적 \times 높이 / 3 으로 구할 수 있으므로 주어진 블록을 여러개의 기본 사면체들로 나누어 각각에 대하여 계산한 부피의 합을 구하면 된다. 그러나 터널의 경계부를 포함하는 블록은 벽면이 곡면 상태인 경우 오목한 다면체가 되므로 이것의 부피를 구하기 위해서는 주어진 블록을 몇 개의 볼록한 블록들로 분할하는 작업이 필요하다. 원형공동을 여러개의 평면이 결합된 형태로 모사할 경우 경계부의 오목블록들을 볼록블록들로 분할하는 방법이 Fig.4 에 나와 있다.

이 그림에서 공동의 상부에 존재하는 A 블록과 B 블록은 공동의 중심축과 공동 경계부의 꼭지점을 통과하는 평면들에 의해 절단된다. 이와같은 방법에 의하여 A 블록과 B블록은 각각 세개의 하위블록들로 나뉜다.

록볼트로 터널 경계부를 보강할 때 위험성을 가지는 블록의 경우 자중과 이동방향 및 미끄러짐면, 그리고 형상을 아는 것이 중요하다. 록볼트를 시공상의 난점 등의 이유로 벽면에 수직인 방향으로 타설한다면 블록의 자중과 함께 벽면에서 블록의 상부 정점까지 이르는 거리를 계산할 필요가 있다. 공동과 블록의 형상이 Fig.4와 같을 때 A 블록의 높이 h 는 블록의 하부 오목면의 중점 위치에서 블록의 정점 P 까지의 거리를 계산하여 구한다.

3. 현장적용

3.1 공동의 제원 및 현장의 지질 특성

안정성 해석의 대상이 되는 곳은 지하 에너지 비축 공동이다. 단면의 형상은 Fig.5 와 같은데 현장 절리 지질도에서 절리를 취한 부분은 갤러리와 벤치I 까지이다. 대상 지역의 공동 축 방향 길이는 총 222m 인데 개별블록에 의한 안정성 해석을 위하여 20m 길이의 10개 구간과 22m 길이의 1개 구간으로 나누어 구간별로 해석을 실시 하였다. 공동의 축방향은 선주향(Trend)이 N20W 이고 선경사(Plunge)는 0° 이다. 현장의 지질 상태는 화강암질 편마암이 주종을 이루고 수직에 가까운 급경사 절리와 저경사 절리들이 많이 분포하는 것으로 보고 되었다. 현장 절리 지질도에서 116개의 절리를 선택하여 각각의 방향을 극좌표계상에 등밀도선으로 나타낸 후 최고 밀도가 9% 미만인 극점들을 제외하고 절리군을 조사한 결과 Table 1 과 같이 4개의 군으로 분류하게 되었다.

Table 1 Directions of major joint sets around the tunnel

Joint plane	Dip (degree)	Dip direction (degree)
1	20	134
2	90	27
3	90	278
4	24	28

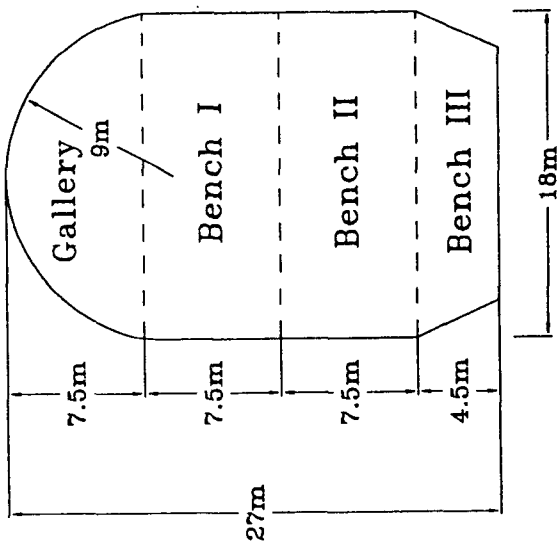


Fig. 5 Cross-section of the energy storage cavern

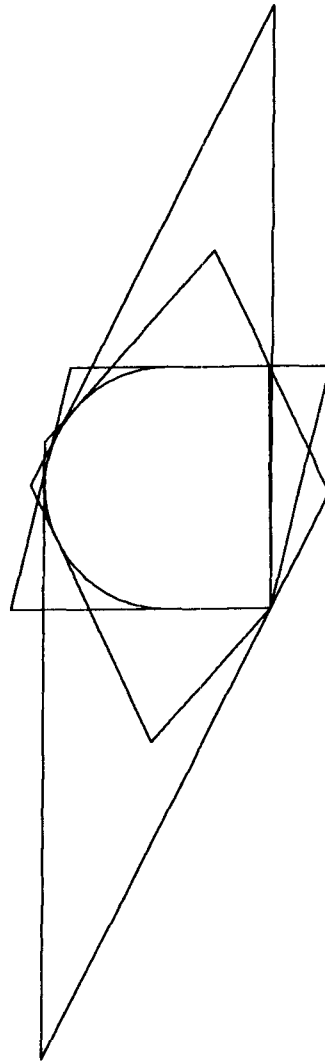


Fig. 7 Cross-sections of maximum removable blocks

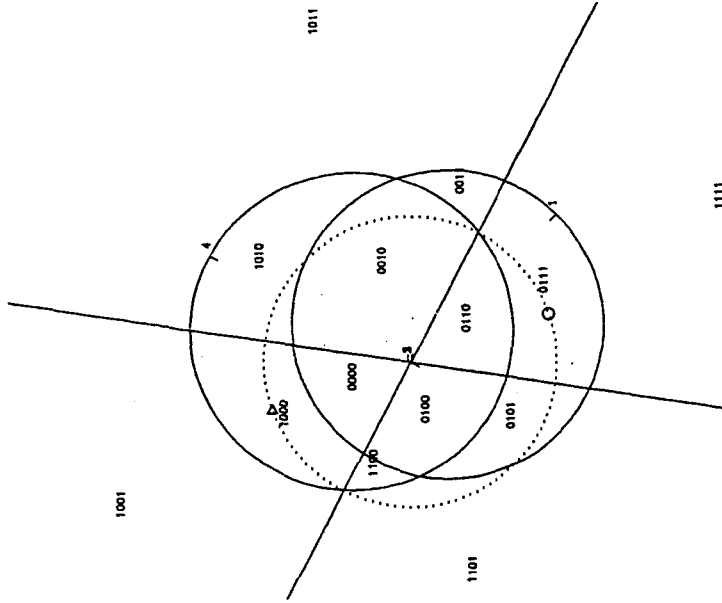


Fig. 6 A stereographic solution for finding removable blocks

3.2 블록이론에 의한 안정성 해석

블록이론은 고정된 몇 개의 절리군 방향만을 사용하므로 이것을 통하여 결정될 수 있는 블록의 형상도 몇가지로 한정된다. 이러한 의미에서 블록이론에 의한 해석을 결정론적 해석이라고 부르기도 한다. 해석 대상 공동 주변의 절리 방향은 Table 1 에 나타난 바와 같이 4개의 군으로 요약되므로 이 자료를 이용하여 평사 투영도 해석을 실시하면 Fig.6 과 같다. 4 개의 절리군을 선택하였으므로 조합될 수 있는 블록코드의 경우의 수는 총 16개 이고 평사 투영도에 나타나는 절리 피라미드(JP)는 14개임을 알 수 있다. 평사 투영도에 나타나지 않은 블록은 JP 코드가 0001 과 1110 인 두 개의 테이퍼드블록이다. 두 개의 축 벡터를 포함하는 1000 과 0111 블록은 무한 블록임을 알 수 있다. 따라서 해석 대상이 되는 블록은 모두 12개 이다.

모든 절리면의 마찰각을 30° 로 가정할 경우 해석내용은 Table 2 로 요약될 수 있다. 블록의 종류에 따른 발생위치를 관찰해 보면 갤러리 부분에 존재하는 블록은 모두 자중 방향으로 낙하하는 키블록이고 잠재적 키블록은 벤치와 갤러리에 걸쳐서 나타나며 안정블록은 항상 바닥면을 포함하고 있음을 알 수 있다.

거동가능블록의 단면 형상을 모두 합하면 Fig.7 과 같다. 공동의 상부에 나타나는 키블록들과 바닥면의 안정블록의 높이가 공동의 측면부에 나타나는 잠재적 키블록보다 상대적으로 작음을 볼 수 있고 공동의 갤러리와 측벽에 나타나는 블록 중 부피가 작을 수록 위험성이 큰 블록이 됨을 알 수 있다.

3.3 현장의 개별 블록에 대한 안정성 해석

현장 절리 지질도에서 분할한 11개의 구간에 대하여 각 구간에 나타나는 절리 중 주향과 경사가 기록되어 있는 절리들을 선택하였다. 각 절리들의 위치와 방향을 입력자료로 하여 절리들이 교차하여 이루어지는 블록들을 조사하고 각 블록의 안정성과 크기, 자중 등을 계산하였다.

절리면들의 마찰각은 30° 로 가정하였으며 암반의 밀도는 2.7 ton/m³ 을 사용하였다. 11개 구간

Table 2 Types of blocks found by the deterministic method

Block Type	JP code (S.F.)
Key	1 0 0 1 (Lifting)
	1 0 1 1 (Lifting)
	1 1 0 1 (Lifting)
	1 1 1 1 (Lifting)
Potential Key	0 0 1 1 (1.843)
	0 1 0 1 (3.731)
	1 0 1 0 (1.297)
Stable	0 0 0 0
	0 1 0 0
	1 1 0 0
Tapered	0 0 0 1
	1 1 1 0
Infinite	0 1 1 1
	1 0 0 0

중 5번과 6번 구간의 해석결과를 살펴보면 다음과 같다.

가) 다섯번째 구간

경사각이 60° 이상인 절리가 8개 존재하며 50° 가 1개, 30° 미만이 7개 존재한다. Fig.8 에서 서로 나란하게 보이는 6, 7, 8번의 방향이 서로 같고 13, 14, 15번 절리도 같은 방향을 갖는다. 구간의 경계 밖으로 나와있는 1번과 4번은 경사각이 각각 20° , 30° 로서 저경사 절리이다.

이 구간에서는 11개의 블록이 발생되었는데 이 중 9개는 무한블록이고 나머지는 각각 키블록과 잠재적 키블록이다. Table 3 를 참조하면 여기에서 발생하는 잠재적 키블록은 안전율이 1.0이고 5번의 저경사 절리면을 따라 미끄러짐의 가능성을 보이는 소규모 블록임을 알 수 있다. 갯터리의 천정 부근에 있는 키블록은 수직 방향으로 낙하하며 높이가 1m 미만인 비교적 작은 블록이다. 두 블록의 단면과 입체 형상을 Fig.9 에서 볼 수 있다.

나) 여섯번째 구간

30° 이하의 저경사 절리가 6개이며 나머지 8개는 급경사 절리이다. Fig.10 을 보면 3, 4, 5번과 12번 이상의 저경사 절리는 블록의 형성에 크게 기여하지 않음을 알 수 있다.

여기에서는 37개의 키블록이 나타나며 16개의 테이퍼드블록과 53개의 무한블록을 포함하여 총 106개의 블록이 존재한다. 이 키블록들의 안전율은 0.14와 0.17의 두 종류로 계산되었다. 이 구간에서의 키블록들은 전반적으로 다른 구간에서보다 부피와 자중이 큰 경향을 나타낸다. 이들 블록 중 높이가 가장 큰 것은 1번과 9번, 10번, 6번 절리들이 만나 이루어진 블록으로서 높이가 173.5m 에 이른다. 절리의 연장을 고려한다면 이러한 블록은 실제 상황에서는 거의 나타나지 않을 것으로 생각된다.

Table 4 에는 해석 대상이 된 11개의 전구간에서 발생한 블록들의 종류에 따른 갯수가 정리되어 있다. 블록으로 판명된 총 388개 중에서 거동가능블록은 17.6%를 차지하고 거동가능블록 중 키블록이 14.2%로 가장 큰 비율을 보이며 그 다음으로는 잠재적 키블록과 안정블록의 순으로 높은 비율을 나타낸다. 안정블록은 열한번째 구간의 갯터리와 벤치의 경계부분에서 유일하게 하나가 발생하였는데 이렇게 빈도가 작은 이유는 절리들이 주로 갯터리 부분에서 교차하여 블록들이 벤치의 벽면에서는 거의 나타나지 않기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

키블록의 경우 여섯번째 구간에서 전체 키블록의 약 67%가 발생하였다. 이 구간에서 발생된 키블록을 제외한다면 전체의 키블록 중 반은 수직낙하블록이 됨을 알 수 있다.

블록이 거동방향으로 이동하려는 힘을 거동력이라 한다면 연직으로 낙하하는 블록인 경우는 자중이 곧 거동력이 되며 그 외의 키블록에 대하여는 자중에 의한 미끄러짐 방향으로의 활동력에서 접촉면의 마찰에 의한 저항력을 제한 힘이다.

Table 5 에는 구간별로 발생한 키블록들이 거동력의 크기에 따라 4종류로 분류되어 있다. 전 지역에서 가장 큰 비율을 차지하는 거동력 구간은 1000 ton 이상의 구간으로서 총 17개의 블록이 여기에 해당한다. 이 블록들은 모두 여섯번째 구간에서 발생하였는데 평균 거동력은 3847.75 ton으로

Table 3 Specifications of Removable blocks in the 5th section

No.	Joint	Type (S.F.)	Volume (m ³)	Height (m)	Sliding Plane	Force (ton)
1	1 10 5	P (1.00)	0.09	0.44	5	0
2	2 6 9 8	K (F)	1.66	0.79	0	4.48

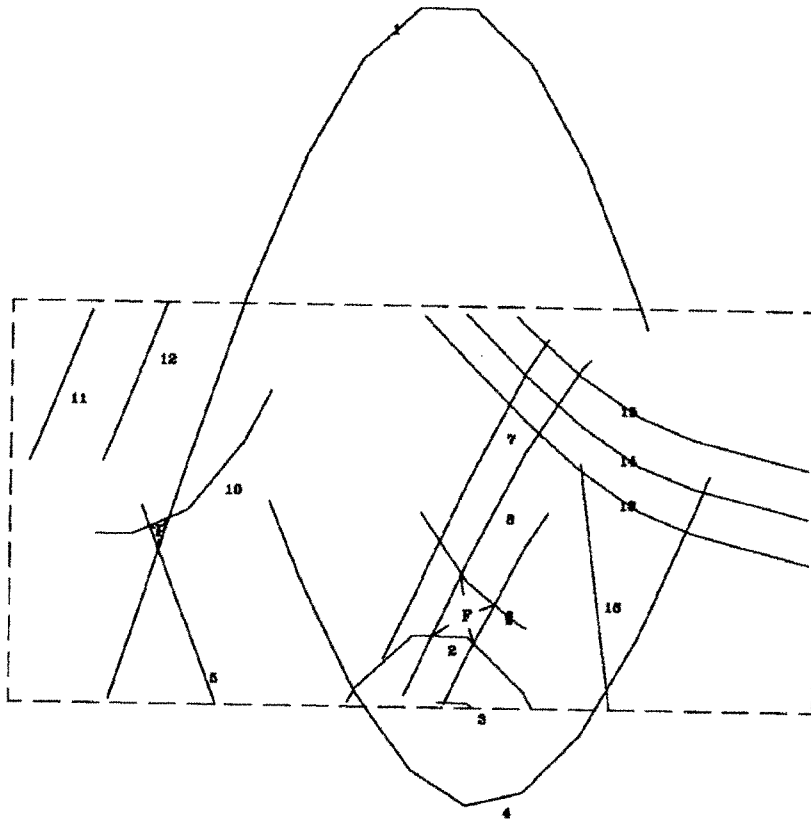


Fig. 8 The unrolled map of the 5th section

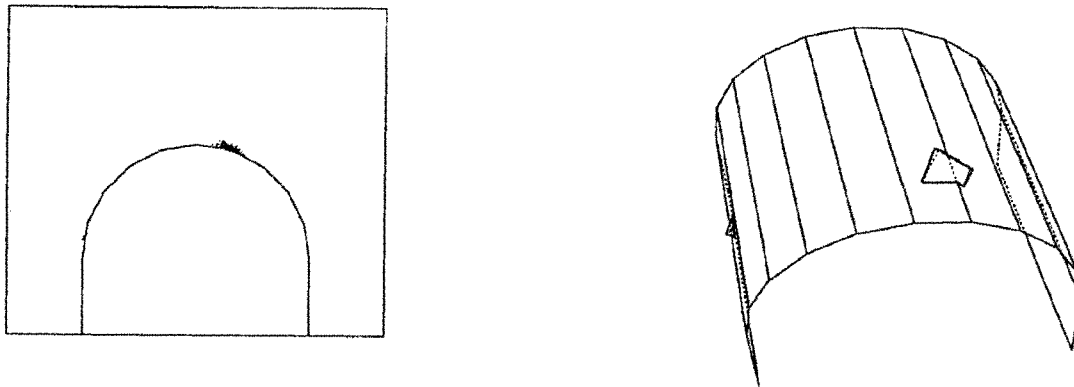


Fig. 9 Cross-section and 3-d shape of blocks in the 5th section

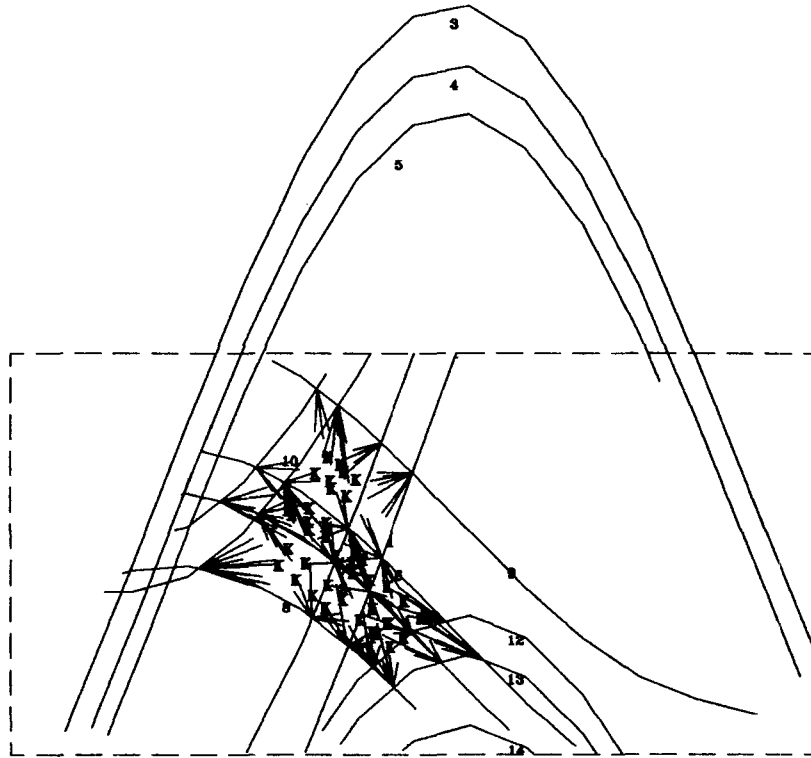


Fig. 10 The unrolled map of the 6th section

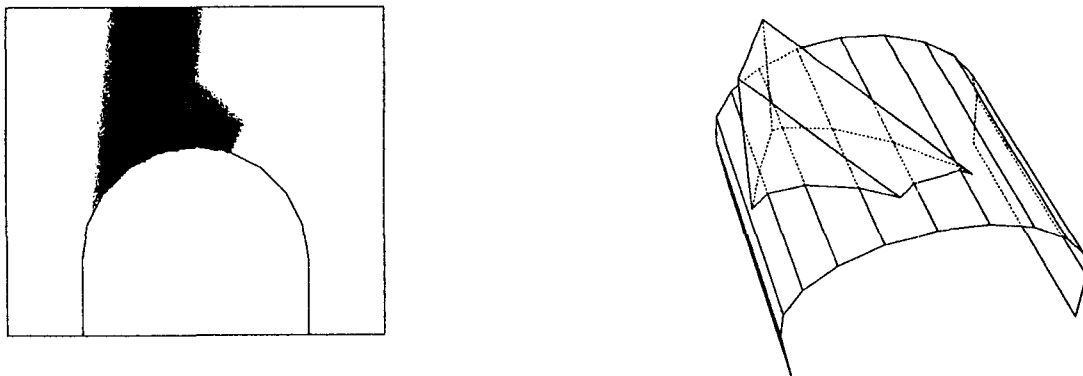


Fig. 11 Cross-section and 3-d shape of blocks in the 6th section

계산되었다. 거동력이 클수록 블록의 부피도 큰 경향을 보이므로 이러한 블록들은 암반내 절리의 연속성 가정하에 가능한 것들임을 고려할 때 실제 상황에서는 발생할 가능성이 희박한 것으로 생각된다. 암반내의 절리의 연장정도는 소규모 일수록 현장 발생 가능성이 크다는 가정을 해본다면 가장 주의깊게 살펴보아야 할 구간은 0 ~ 10 ton 구간이다. 이 구간에 해당하는 블록은 전구간에 서 총 10개가 나타나며 가장 많이 나타나는 곳은 해석 지역 중 일곱번째 구간으로서 4개의 블록이 존재한다. 10개의 블록 중 5개는 수직낙하 블록이며 2개는 안전율이 1.0 으로서 거동력은 없다. 따라서 0 ~ 10 ton 에 해당하는 구간의 블록들은 현장에서 나타날 가능성이 비교적 큰 것들이며 동시에 낙반의 위험을 많이 가지고 있음을 알 수 있다. Table 5 의 거동력 계산은 모든 절리면의 마찰각을 30° 로 가정하여 수행한 것이다.

Table 4 Analysis of block types occurring in all sections

Section No.	Key(Falling)	Poten. K	Stable	Tapered	Infinite	Total
1	0(0)	0	0	0	6	6
2	0(0)	0	0	0	8	8
3	2(2)	0	0	0	44	46
4	3(3)	0	0	0	0	3
5	1(1)	1	0	0	9	11
6	37(0)	0	0	16	53	106
7	5(3)	6	0	18	59	88
8	0(0)	4	0	0	22	26
9	4(0)	0	0	5	8	17
10	2(0)	1	0	0	21	24
11	1(0)	0	1	7	44	53

Table 5 Analysis of moving force for key blocks over all sections

Section No.	Force (ton)			
	0 ~ 10	10 ~ 100	100 ~ 1000	1000 ~
1	•	•	•	•
2	•	•	•	•
3	•	•	2	•
4	1	2	•	•
5	2	•	•	•
6	•	10	10	17
7	4	1	•	•
8	1	•	•	•
9	•	2	2	•
10	2	•	•	•
11	•	1	•	•
Total/Average Force	27.22 / 2.72	684.70 / 42.79	3464.20 / 247.44	65411.75/3847.75

4. 결론

본 연구에서는 현장의 굴진막장에 존재하는 개별블록들의 안정성을 해석하는 프로그램을 개발하여 에너지비축공동에 대하여 적용하였고 여기에서의 결과를 동일지역에 대하여 블록이론을 사용하여 해석한 내용과 비교하였다. 본 연구 과정에서 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 절리의 교차로 인하여 생성되는 블록들을 선별하고 각 블록의 안정성을 해석하는 프로그램을 개발하고 그 타당성을 검토하였다.
- 2) 지하 에너지 비축 공동을 대상으로 블록이론을 적용한 결과 공동 상부에 비교적 작은 부피의 연직낙하 키블록들이 4종류가 발생함을 볼 수 있었고 측벽쪽에서는 안전율이 1.3~3.7인 잠재적 키블록들이 넓은 영역에 걸쳐 존재할 가능성을 확인하였다.
- 3) 개별 블록에 대한 안정성 해석 결과 각 구간별로 나타나는 블록의 형상과 거동력 등을 비교할 수 있었는데 여섯번째 구간에서 키블록이 집중적으로 발생하며 거동력이 10톤 이하의 소규모 키블록들은 일곱번째 구간에서 비교적 높은 비율로 나타남을 알게 되었다. 현장 절리도에 기록된 낙반 발생위치를 다섯번째 구간에서 확인할 수 있었으며 낙반된 블록은 비교적 작은 규모인 것으로 판별되었다.
- 4) 개별 블록에 대한 해석법은 현장에 나타나는 각 블록의 형상과 위치, 그리고 자중, 거동방향 등에 대한 구체적인 자료를 제시한다는 것과 해석 대상의 전구간에서 발생하는 블록들의 각종 특성을 통계적으로 산출할 수 있게 한다는 점에서 블록이론의 해석법에 비하여 장점을 나타내었다.
- 5) 절리의 암반내 연장 정도에 대한 적당한 기준을 마련할 경우 블록의 생성 여부를 좀 더 현실성있게 예측할 수 있으므로 앞으로 이 분야의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. S.F. Hoerger, 1988, Probabilistic and deterministic key block analysis for excavation design, Ph.D. Thesis, Michigan Technological Univ., Houghton, MI.
2. G. Shi, R.E. Goodman, 1990, Finding 3-d maximum key blocks on unrolled joint trace maps of tunnel surfaces, *Proc. of the 31st US Symp. on Rock Mechanics*, pp.219-228.
3. R.E. Goodman, G. Shi, 1985, *Block theory and its application to rock engineering*, Prentice-hall Inc.
4. D. Lin, C. Fairhurst, 1988, Static analysis of the stability of three-dimensional blocky systems around excavations in rock, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.25*, pp.139-147.
5. G. Shi, R.E. Goodman, 1983, Key bolting, *Proc. of Int. Symp. on Rock Bolting*, pp.143-164.
6. Lap-yan Chan, R.E. Goodman, 1983, Prediction of support requirements for hard rock excavations using key block theory and joint statistics, *Proc. of the 24th US Symp. on Rock Mechanics*, pp.557-576.
7. 장근무, 1989, Block theory 를 이용한 암반사면의 안정성 해석, 서울대학교 대학원 공학석사 학위논문.