통계적 절리 모델링을 통한 암반 사면 안정성 평가

조성우, 송재준 (서울대학교)

1. 서 론

암반 사면에서는 작은 부피의 암석 블록이라고 할지라도 암석의 높은 비중으로 인하여 사면에서 분리될 경우 인명이나 재산에 심각한 손상을 줄 수 있으므로 암반 사면을 절취하는 과정은 물론 사후 관리시에도 지속적으로 관심을 기울여야 한다.

Goodman & shi(1985)등에 의해서 제안된 블록이론은 사면에 존재하는 절리면과 자유면의 교차에 의해 형성될 수 있는 블록을 예측하고 각 블록의 안정성을 판단하는데 중심을 둔 해석 이론이다. 블록이론은 비교적 신속한 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있으나 절리 정보를 단순화시켜 실제 발생하는 암반 블록의 크기와 빈도 등을 산정하는데는 효율적이지 못하다.

본 연구에서는 블록이론중의 블록 유한성 및 거동성 해석기법과 통계적 절리 모델링 기법등을 이용하여 암반 사면의 안정성을 해석하는 방법을 제시하고자 하였다. 여기에서 개발한 해석방법은 다음과 같은 특성을 지닌다: 첫째, 통계적 절리 모델링을 사용하여 암반 사면에 실제로 발생 가능한 블록을 묘사하였다. 이는 조사창 조사 등을 시행하여 통계적 자료를 득한 후 암반 사면에서 실제 발생 가능한 절리면을 반복적으로 발생시키는 모의시험을 통해 가능하였다. 둘째, 암반 내에 존재하는 지하수의 영향을 고려하였다. 사면은 특히 폭우나 장마 기간에 붕괴하는 비율이 매우 높은데 이는 지하수로 인하여 암반 내부에 수압이 발생, 절리면의 유효수직응력이 감소함으로써 전단파괴가 쉽게 일어나기 때문이다. 셋째, 개별 블록들의 안정성 해석을 바탕으로 사면에 대한 총체적인 평가를 내릴 수 있는 방법에 대해서 연구하였다.

이와 같은 연구를 수행하기 위하여 해석프로그램을 개발하였으며 암석의 부피에 따라 가중 평균한 안전율과 사면의 단위 면적당 발생하는 블록의 부피를 이용하여 사면의 안정성을 평가하는 방법을 제안하였다.

2. 해석 절차 및 배경 이론

먼저 사면을 포함하는 가상의 3차원 공간상에 불연속면을 발생시키고 생성된 불연속면의 기하학적인 정보를 이용하여 블록의 생성유무를 판별한다. 이후에는 각 유한블록을 대상으로 거동성을 확인하고 거동가능블록에 대하여 안전율을 계산한다. 이를 수행하기 위한 해석 알고리즘은 그림 2.1과 같다.

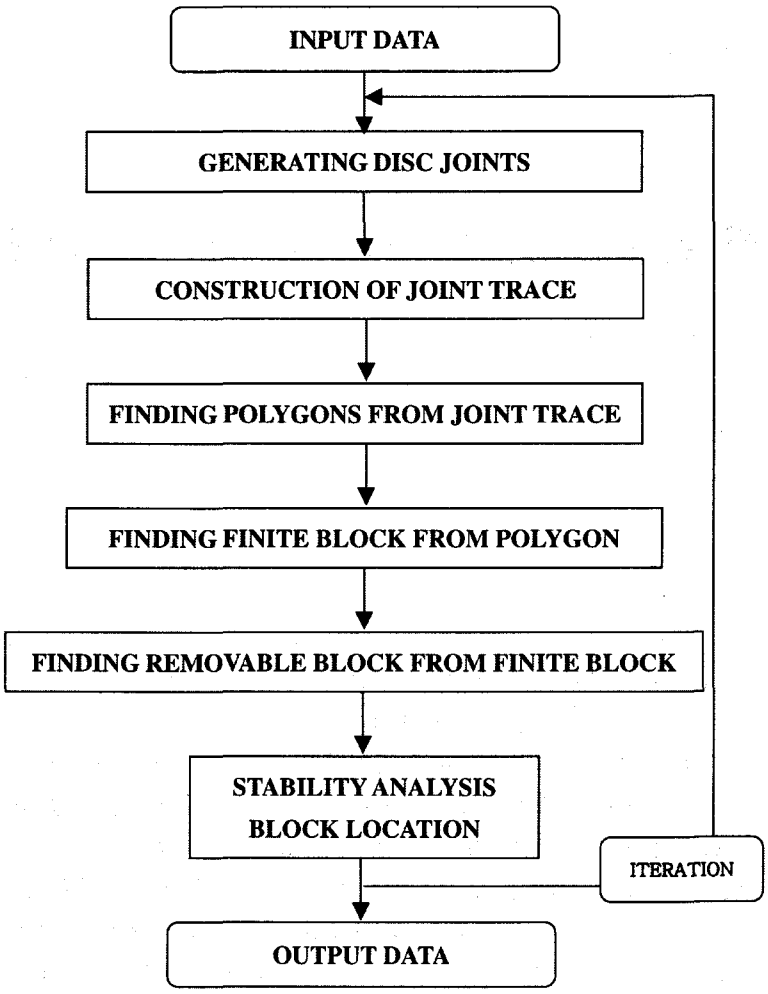

그림 2.1 해석 절차

2.1 통계적 절리 모델링

절리의 방향은 조사된 암반 사면 상의 절리들을 하나의 군으로 묶는 가장 중요한 요소이다. 같은 지역에서 발견된 절리들 중에서 같거나 혹은 비슷한 원인으로 발생하는 절리들은 그 형태나 방향이 비슷하므로, 같은 절리군으로 모아진 자료들을 이용하여 하나의 군(set)을 대표하는 분포함수와 추정치들을 만들 수 있다.

본 연구에서는 절리의 방향분포를 나타내기 위해서 투영구 상에서 절리군이 어떠한 참 값을 중심으로 원형의 밀집 형태를 띠는 Fisher(1953) 분포를 사용하였다.

절리의 직경분포는 송재준(2005)이 제안한 최소자승법을 이용하여 오차와 편향을 최소화하는 직경분포의 추정법을 이용하였는데, 이 추정 방법은 현장에서 조사한 양끝내포선(contained trace)의 분포로부터 직접적으로 절리의 직경분포를 산출하며, 이 과정에서 체적빈도도 같이 제공한다.

앞선 과정을 통하여 절리의 위치, 방향, 크기, 빈도등에 대한 변수를 구하면 이를 통해서 3차원 공간상에 포아송 디스크를 발생시킬 수 있다. 그림 2.2에서 층리나 단층을 나타내는 고정절리와 통계적 모델링으로 개별 절리를 발생시킨 모습을 볼 수 있다.

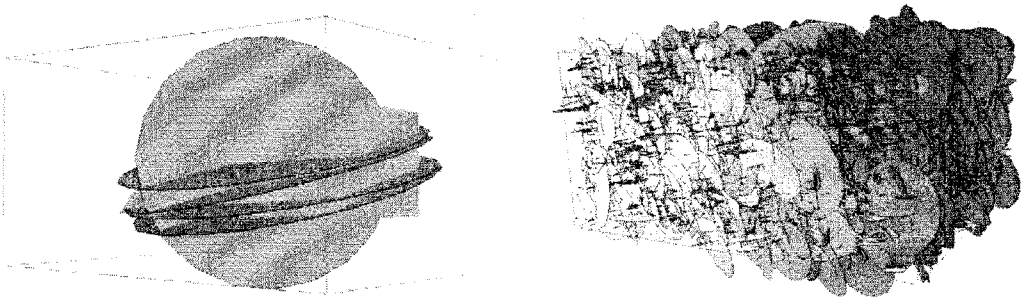

그림 2.2 3차원 공간상에 절리를 발생시킨 모습

2.2 절리망 구성 및 블록의 판별

고정된 절리와 통계적 분포에 따라서 생성된 절리는 암반사면에 절리망을 구성하게 된다. 이때 2차원 평면(사면)에 형성된 절리망으로부터 후보 유한블록을 구분하기 위하여 먼전 다각형 구조를 선별한다.

Jing & Stephansson(1994)이 제시한 2차원 다각형 선별 과정은 그림 2.3과 같다. 그 과정은 크게 4단계로 구분된다. 먼저 사면의 경계와 절리 조사선의 양끝단을 조사하여 모든 정보를 선분으로 구성한다. 다음으로 모든 선분들간의 교점을 조사하고 쓸모없는 선분들을 제거한 후, 각 이웃한 교점끼리 방향이 서로 반대인 2개의 방향 벡터를 생성·기록한다. 폐다각형을 찾기 위해서는 임의의 한 교점에서 출발하여 다음 교점까지 진행하고 교점에서 진행방향이 둘 이상인 경우에는 반시계 방향으로 가장 작은 각을 가지는 방향의 선분으로 진행(smallest left turn principle)한다. 이미 거쳐간 교점간의 방향 벡터는 기록상 제거하여 경로의 중복을 피한다. 이러한 원칙에 의거하여 계속 진행하다가 출발점으로 다시 돌아왔을 경우 하나의 블록을 찾은 것으로 기록하며, 다음 블록을 찾게 된다. 모든 방향 벡터가 다 제거되었을 때 판별과정은 종료된다.

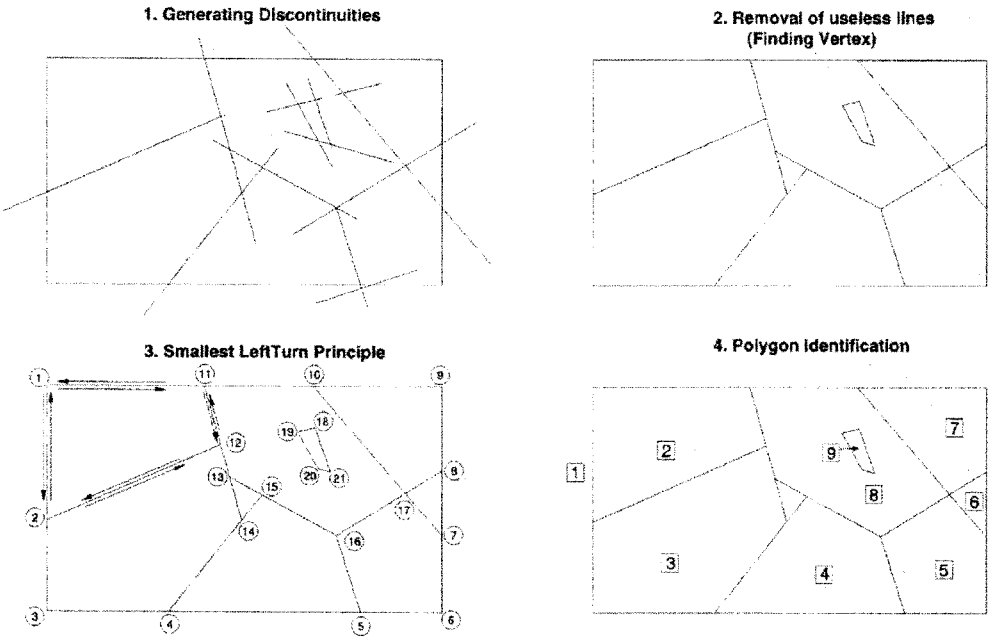

그림 2.3 폐다각형을 구성하는 과정 (Jing & Stephansson, 1994)

2.3 블록 이론에 따른 블록의 판별 및 안전율 계산

Goodman & Shi(1985)에 의해서 제안된 이론인 블록이론은 현장암반을 불연속면들에 의해 발생하는 암석블록의 집합체로 보고 이들의 거동이 가능한지 아닌지를 판별하는 이론이다. 블록의 거동양상은 암석블록의 경계부를 구성하는 자유면과 불연속면들의 상대적인 위치와 방향, 그리고 블록에 작용하는 힘의 방향과 크기에 따라서 결정된다.

블록의 구분은 먼저 유한성과 무한성에 따라 분류하는데 암반 내에서 불연속면과 자유면에 의해 경계가 설정되어 일정한 부피를 가지는 다면체를 유한블록(finite block)이라고 하며, 불연속면에 의해서 폐합되지 못하고 특정방향으로 무한한 연장성을 가지는 블록을 무한블록(infinite block)이라고 한다. 유한블록은 다시 거동불가능블록(tapered block)과 거동가능블록(removable block)으로 나누어진다. 여기에서 거동불가능블록은 기하학적인 구조로 인하여 암반 내에 블록이 갇혀서 이동이 불가능한 블록이다. 거동가능블록은 다시 안정블록(stable block)과 잠재적 키블록(potential key block), 그리고 키블록(key block)으로 구분할 수 있다. 안정블록은 블록에 작용하는 합력의 방향과 자유면의 저항력이 없는 최악의 경우에도 블록의 이동이 발생하지 않는 블록인 반면에 잠재적 키블록은 합력이 블록의 거동을 가능하게 하는 방향으로 작용하나 마찰력 등에 의해서 블록의 이동이 일어나지 않는 블록을 의미한다. 키블록은 블록을 지탱하는 저항력보다 거동력이 커서 자유면 발생과 동시에 움직이게 되는 블록이다.

거동가능블록으로 판별된 블록은 파괴종류가 결정되고 이에 대한 안전율이 계산되게 된다. 본 문에서는 Warbutron(1981)이 제안한 벡터 안정성 해석법(Vector Stability Analysis)을 사용하여 각 블록의 안정성을 해석하였다. 이 해석법은 블록을 구성하는 각 절리면의 방향벡터, 블록의 질량중심에서 작용하는 합력, 거동방향의 단위벡터를 이용하여 거동성을 해석한다. 거동가능 블록은 3가지 파괴 종류로 나눌 수 있는데 먼저 블록이 아무런 지지면 없이 움직이는 경우로 자유낙하나 지하수등의 부력으로 인하여 뜨는 현상이 여기에 속한다. 다음으로는 한 면을 지지면으로 평행하게 움직이는 경우와 두면을 지지면으로 하여 쐐기파괴가 발생하는 경우가 있다. 각각의 파괴는 사면의 방향벡터와 블록을 구성하는 절리면의 방향벡터를 이용하여 결정된다.

사면을 설계할 시에는 가능한 한 안전율의 범위를 총체적으로 다루고 지하수 상태의 변화에 대한 사면의 민감도를 고려하여야 한다. 그림 2.4에서 블록에 작용하는 힘의 요소를 나타내고 있다. 블록 전체 하중으로 인하여 힘 W가 발생하며 이는 미끄러지는 사면 쪽으로 분력인 거동력 f와 수직력 n으로 분해된다. 이 힘들과 점착력 c, 그리고 사면내 지하수로 인한 부양력 U를 이용하여 블록의 안전계수를 산정하게 된다. 안전계수는 식(2.1)와 같이 미끄러짐을 유발시키는 전체 힘에 대한 미끄러짐에 저항하는 힘의 비로 주어진다.

$$F_{dry} = \frac{cA + n \cdot \tan\phi}{W \sin\phi}$$

$$F_{saturated} = \frac{cA + (n - U\sin\theta)\cdot\tan\phi}{W\sin\phi + U\cos\theta} = \frac{cA + (n - U_n)\cdot\tan\phi}{W\sin\phi + U_f} \qquad (2.1)$$

여기에서 는 미끄러지는 면이 수평면과 이루는 각도이고 는 합력 U가 미끄러지는 면과 이루는 각이 된다. 또한 c는 미끄러지는 면의 점착력, A는 미끄러지는 면의 면적이다.

여기에서 수압은 식(2.2)로 계산될 수 있다.

$$U_1 = \frac{1}{2}\gamma_w z_2 z_1 \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \psi_{p1})$$
$$U_2 = \frac{1}{2}\gamma_w z_2^{\,2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \psi_{p2}) \qquad (2.2)$$

여기에서 ψ_{p1}, ψ_{p2} 는 각각 1번과 2번 절리면이 평면과 이루는 각이다.

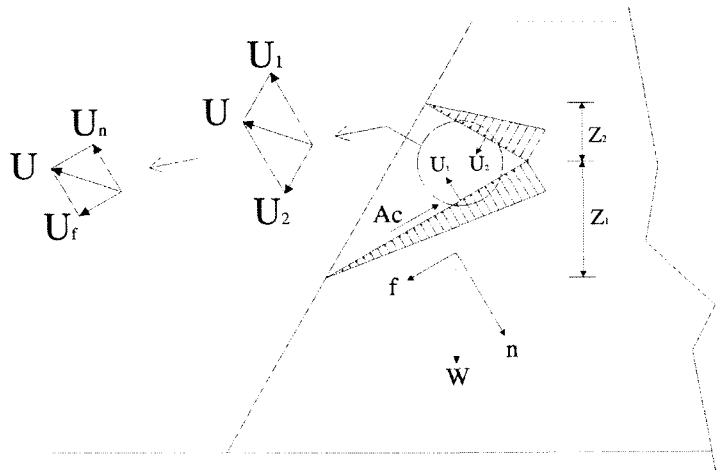

그림 2.4 암반블록에 수압이 작용하는 힘의 모식도

2.4 사면 평가

각각 생성된 거동가능블록은 안정성 해석을 거쳐 블록에 대한 안전율을 계산할 수 있으나 이는 키블록의 위치나 크기등에 대한 정보를 개별적으로 내려주기 때문에 사면 전체에 대한 안정성에 대해서는 그 의미를 부여하기가 어렵다. 이러한 단점을 해결하고자 사면 안정성에 대한 새로운 지수를 제안하고자 한다. 사면 전체에 대한 안전지수 SI는 다음의 식(2.3)와 식(2.4)로 얻어질 수 있다.

$$SI_1 = \sum_{i=1}^{N} FS_i \times (weighting\ \ Factor)$$
$$= \frac{\sum_{i=0}^{N} FS_i \times Volume_{i,\ Key\ Block\ \&\ Potential\ Key\ Block}}{Volume_{Total\ \ Key\ Block\ \&\ Potential\ Key\ Block}} \qquad (2.3)$$

$$SI_2 = \frac{\sum_{i=0}^{M} Volume_{i,\ Key\ Block}}{AREA_{slope}} \times 100 \qquad (2.4)$$

여기에서 N은 키블록과 포텐셜 키블록 개수의 합이며 M은 키블록의 개수를 의미한다.

암반 사면 전체에 대한 평가를 하나의 정량적인 표현을 사용하는 방법은 현재까지 딱히 제안된 방법이 없다. 이러한 결정을 내리기 위해서는 사면을 어떻게 평가하는가에 달려있다. 본 연구에서는 사면에서 다음의 두 가지 요인을 가장 중요한 위험지수로 생각하였다.

첫째는 사면에 얼마나 위험한 인자들이 존재하는가에 대한 평가, 둘째는 위험한 인자들이 존재

한다면 이 위험 인자는 얼마나 많이 존재하는가에 대한 평가이다. 이 대표적인 두 가지 의문을 해결하고자 다음의 2가지 사면 평가 지수를 제안하였다.

먼저 SI_1이 개별적인 안전계수를 사면전체를 평가하는데 사용되어 사면에 존재하는 위험인자들의 전체 안정성을 평가하였다. 부피가 큰 블록이 위험할수록 사면전체의 안정성에 나쁜 영향을 준다는 개념하에서 이를 고려한 지수가 SI_1인 것이다. 이 지수에는 암반 블록 중에서 거동 가능성이 있는 키블록과 포텐셜 키블록을 대상으로 계산하여 얻을 수 있다. 다음의 SI_2은 사면전체 겉보기 면적에 대해서 키블록이 차지하는 부피의 비를 비교함으로써 사면의 단위면적당 얼마만큼의 위험요소(키블록)를 가지고 있느냐를 의미하는 지수이다. 결론적으로 SI_2가 클수록, SI_1이 작을수록 사면 전체는 위험성을 많이 내포하고 있다는 의미이다.

3. 암반사면에의 현장 적용

3.1 현장 조건

대상 부지는 전남 광양에 위치한 대규모 암반 사면이다. 대상 사면에는 수평에 가까운 다수의 층리들이 관찰되며 사면을 중심을 사선으로 가로 지르는 단층 파쇄대로 인하여 많을 블록이 형성됨을 관찰할 수 있다.

3.2 절리 모델링

현장에서 조사창 조사를 통해 이루어진 자료를 토대로 절리군 분석을 시행하여 그 방향성을 정의하였으며, 체적밀도와 직경분포를 결정하였다.

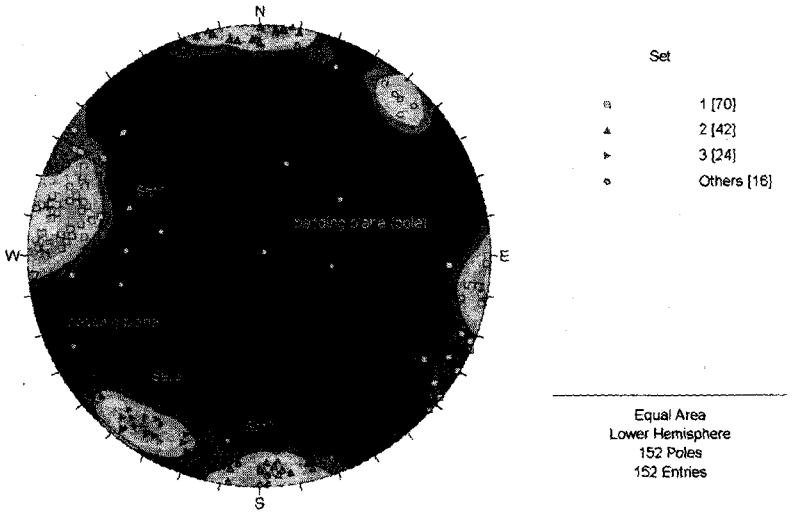

그림 3.1 조사된 절리에 대한 평사투영

표 3.1 3개의 절리군 정보

Set No.	Trend / Plunge	Fisher K	Volumetric Frequency (m^{-3})
1	103 / 83	27	0.962
2	358 / 89	52	0.455
3	34 / 78	64	0.710

3.3 해석과정 및 결과

현장에 대한 해석은 본 연구에서 개발한 프로그램을 통하여 이루어졌다. 해석은 반복을 통해서 이루어지는데 해당 현장은 절리의 길이가 충분하고 절리의 체적밀도가 높아서 5회 이상 반복 해석한 결과 바로 수렴하는 것을 볼 수 있었다.

조사 대상인 사면의 가로 40m, 세로 20m에 해당하는 지역에 50회 반복 해석을 실시하여 그 결과를 얻을 수 있었다. 해석은 각각 건조한 현재 상태와 집중 호우나 장마로 인하여 완전 포화된 2가지의 경우에 대해서 실시하였다. 또한 안정성에 크게 영향을 끼치지 않는 $10cm^3$ 이하의 블록은 결과에서 제외하였다. 해석 결과는 다음의 표 3.2와 같다.

표 3.2 50회 반복 해석 결과

	건조사면	포화사면
포텐셜+키블록 총부피	33.967	34.560
키블록 총부피	14.450	28.676
Slope Index 1	5.447	1.590
Slope Index 2	1.445	2.868
유한블록 발생개수	1098 EA	1062 EA
유한블록 평균부피	0.120	0.117
유한블록 평균심도	1.001	1.025
포텐셜+키블록 발생개수	570 EA	550 EA
포텐셜+키블록 평균부피	0.060	0.063
포텐셜+키블록 평균심도	0.685	0.716
키블록 발생개수	166 EA	208 EA
키블록 평균부피	0.088	0.138
키블록 평균심도	0.966	1.470

상기 조사 대상 사면은 사진을 통해서 육안으로 판별할 경우에도 실제 위험한 사면으로 생각되었다. 실제로 해석한 결과 166개의 키블록이 발생하며 이들의 평균적인 크기는 $0.088m^3$에 이르렀는데 이 크기는 한변이 대략 44cm인 정육면체의 암석블록의 부피와 같다. 이는 인적 물적 재산에 충분한 피해를 입힐 수 있는 크기이다. 또한 키 블록의 심도 또한 매우 깊게 나타나므로 이는 록볼트 등을 이용해서 보강을 할 경우에 깊은 심도까지 시공을 하여야 함을 의미한다. 또한 본 현

장은 강우시에 더욱더 큰 피해를 생성할 수 있다. 암반 내 수압의 영향으로 블록의 개수가 25% 이상 더 발생할 뿐만 아니라 키블록의 크기와 심도 또한 더욱 크게 변하였다.

본 해석의 결과는 해석 대상의 암반 사면이 사면에 대한 공사 시작 전이 아니라 이미 어느 정도 완성이 된 사면이기 때문에 건조한 상태에서 키블록으로 판별된 블록들은 사면을 형성하는 동안 이미 파괴가 이루어졌을 가능성이 높다. 특히 현장에서 조사창 조사를 진행하는 동안에도 실제로 약한 힘으로 무너지는 암석 블록이 많은 것을 볼 때 사면이 수압의 영향을 받는다면 실제로 파괴되는 블록이 많다고 판단된다. 즉 건조와 포화의 차이인 대략 $14m^3$의 암석 블록이 차후에 파괴될 가능성이 있으므로 이 사면은 이에 대한 보강이 필요하다. 다음 그림 3.2 ~ 그림 3.5에서 해석 결과를 보여준다.

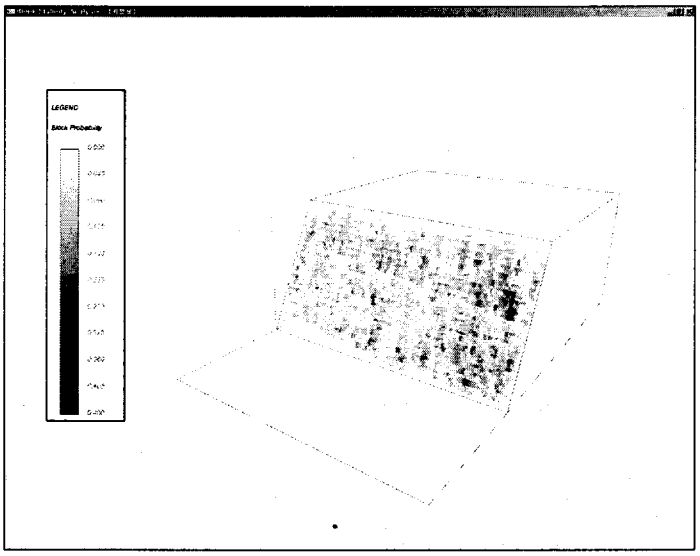

그림 3.2 건조사면에 대한 3차원 키블록 해석결과

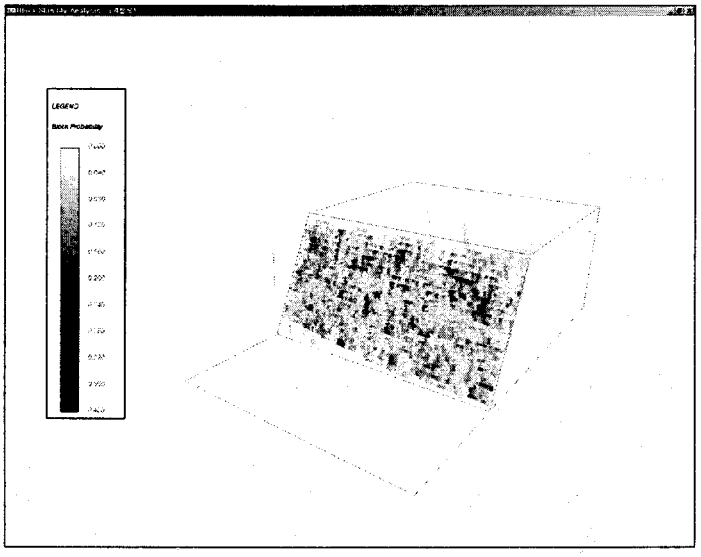

그림 3.3 포화사면에 대한 3차원 키블록 해석결과

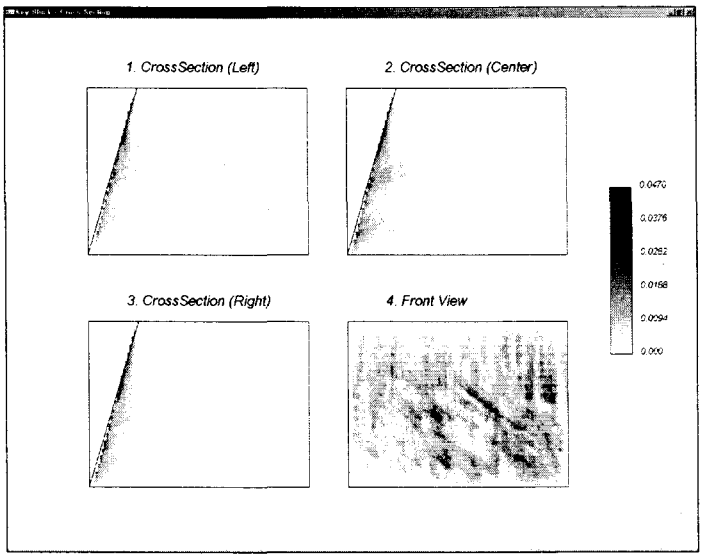

그림 3.4 건조사면에서 키블록 발생현황

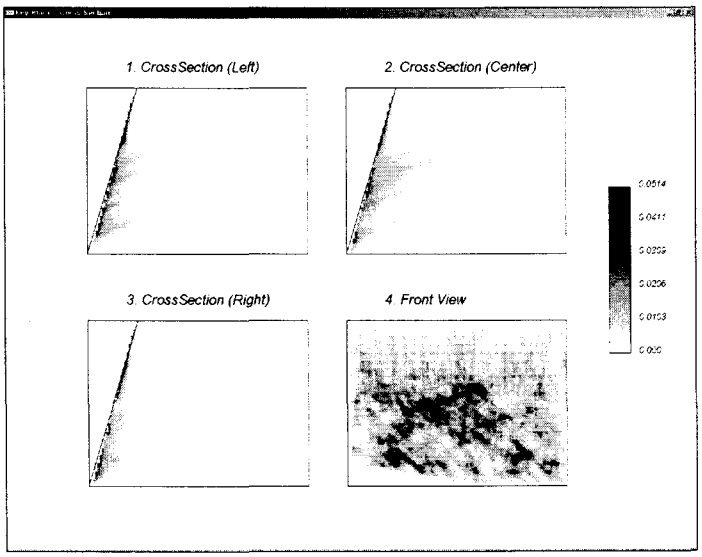

그림 3.5 포화사면에서 키블록 발생현황

4. 결 론

본 연구에서는 암반 사면에 발생하는 블록의 특성 및 거동성을 해석하기 위해서 조사창 조사를 통한 절리 자료를 이용하여 통계적 절리를 발생시키고 생성되는 블록의 거동형태 및 안정성을 평가하는 방법을 연구하였다. 그 결과 기존의 블록이론을 통한 키블록 해석법에 비해 실제 현장에서 발생 가능한 블록 생성을 구현하였고 이에 대한 거동 및 안정성을 해석할 수 있었다. 본 연구를 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 조사선의 방향과 길이 분포에 대한 조사가 충분한 경우에 실제 사면에서 발생한 길이에 부합하는 통계적 절리 모델링을 구현할 수 있었다.

2) 프로그램 상에 구현된 모든 알고리즘은 일정한 유한 블록을 대상으로 하여 각 과정에 대한 검증을 실시하여 프로그램의 신뢰성을 확인하였으며, 테이퍼드 블록, 안정블록, 포텐셜 키블록, 그리고 키블록에 대한 발생 위치, 부피, 최대 심도, 안전계수등에 대한 자료를 출력하여 암반 사면에 대한 각 블록의 해석 결과를 표현하였다.
3) 블록의 안정성을 해석함에 있어서 지하수에 의한 수압의 효과를 고려하였다.
4) 반복 해석된 사면의 개별 블록의 안정성을 이용하여 사면 전체에 대한 안전계수를 산출할 수 있는 새로운 지수를 제안하였다. 이는 개별 블록의 안정성에 대해서 블록의 부피를 가중치로 적용하여 위험정도에 대한 평가를 내리는 요소와 또한 사면 전체에서 키블록의 부피를 산출하여 위험요소의 크기에 대한 평가를 내리는 요소를 통해서 전체적인 사면에 대한 평가를 내릴 수 있도록 하였다. 그러나 이 지수에 대한 사항은 그 적용에 대해서 앞으로 많은 연구가 필요한 것으로 생각된다.
5) 개발된 프로그램을 사용하여 실제 현장에 적용하였다. 해석 결과 키블록의 발생은 고정절리를 중심으로 많이 발생하였다. 이는 실제 사면의 상황과 일치하는 모습을 보여주는데 수평 고정 절리와 수직 고정 절리가 만나는 곳에서 많은 붕괴가 이루어졌다. 또 발생하는 블록의 크기를 살펴보면 평균적으로 0.088m^{3}의 부피와 0.966m의 심도를 가지는 키블록이 166개 가량 발생하는 것으로 조사되었다. 부피 분포에 대한 결과를 살펴보면 실제적으로는 이보다 작은 0.018m^{3}의 블록이 표면에서 집중적으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 지하수의 영향을 고려하여 사면 해석을 시행한 결과 포화된 경우에 해석 사면은 매우 불안정한 것으로 판단된다. 특히 발생한 키블록의 부피가 14.45m^{3}에서 28.67m^{3}으로 증가하였고 본 연구에서 제안한 지수를 통해서 비교한 결과 안정성은 1/3가량 감소하였으며, 위험의 크기는 2배 가량 증가하였다.

■ 참고문헌 ■

1. 조성우, 2005, 통계적 절리모델링을 통한 암반사면 블록의 거동성 해석, 서울대학교 대학원 공학석사 학위논문.
2. 송재준, 2005, 최소자승법을 이용한 원판형 절리의 직경분포와 체적빈도 추정에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지. 제15권 제2호 pp. 137 144.
3. Goodman, R. E. and Shi, G. H., 1985, Block theory and its application to rock engineering, Prentice-Hall Inc.
4. Jing, L. and Stephansson, O., 1994, Topological identification of block assemblages for jointed rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 31, No. 2, pp. 163-172.
5. Mauldon, M., 1998, Estimation mean fracture trace length and density from observations in convex windows, Rock Mechanics and Rock engineering, vol. 31(4), pp. 201-216
6. Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 18, pp. 183-197.
7. Priest, Stephen D., 1993, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall Inc.
8. 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. Vol. 18, pp. 415-427.
9. Wyllie, Duncan C. and Mah Christopher W., 2004, Rock Slope Engineering civil and mining 4th edition, Spon Press Inc.