

암반사면 안정성해석 통합시스템 개발

Development of Rock Slope Stability Evaluation Program

정 희 원(Hee-Won Jung)	한국시설안전기술공단 기술개발실
송 윤 섭(Hee-Won Jung)	한국시설안전기술공단 기술개발실
박 혁 진(Hyuck-Jin Park)	한국시설안전기술공단 기술개발실
장 범 수(Buhm-Soo Chang)	한국시설안전기술공단 기술개발실
신 창 건(Chang-Gun Shin)	한국시설안전기술공단 기술개발실
양 형 식(Hyung-sik Yang)	전남대학교 자원공학과

1. 서론

암반사면의 안정성 평가 방법에는 정성적인 방법으로서 평사투영법, 블록이론 등이 있으며 정량적인 방법으로는 한계평형법, 최대근사법, 그리고 다양한 수치해석법 등이 있다. 그러나 이들 해석 방법들은 각각의 적용한계와 장단점을 가지고 있어 다양한 지질조건이나 환경에 있는 모든 암반사면에 일괄적으로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 이들을 유기적으로 연계하여 다양한 특성을 지닌 암반사면의 안정성을 가장 효과적으로 평가할 수 있는 통합해석 시스템 개발이 요구된다. 본 연구는 암반사면의 안정성을 평가하는 여러 가지 해석 기법들을 유기적으로 연계하여 암반사면의 구조지질학적 특징을 고려한 종합 해석 프로그램을 개발하는데 있다. 해석기법들의 분석과 암반사면의 현장 조사를 통해 평사투영법, 한계평형법, 최대근사법, SMR 분류 등을 망라하는 통합해석 프로그램을 개발하고 개발된 프로그램의 타당성을 검토한 후 실무 적용을 위한 전문가 시스템을 구현하고자 하였다. 특히 암반사면의 정성적인 평가법인 평사투영의 정량화를 통한 공학적 해석이 가능하게 했으며 프로그램의 실제 문제 적용을 통한 적합성 및 타당성을 검토했다.

2. 본론

2.1 평사투영의 정량화

2.1.1 정량화를 위한 가설 및 연구방향

Daylight envelope는 평면파괴의 가능성을 판단하는 척도로 실제적인 의미는 활동면이 사면상에 나타나는 것을 말한다. 평사투영법에 의한 해석에서는 극점들이 Daylight envelope 내에 위치하면 평면파괴의 가능성이 존재한다는 결론을 얻을수 있으나 하지만 daylight envelope 내에서도 각 위치마다 파괴 가능성은 달라질수 있다. 본 연구에서는 한계평형법을 이용하여 daylight envelope 내에서 파괴가능성의 변화를 살펴보고 이러한 변화들이 총체적인 위험성에는 어떠한 영향을 미치는지 판단하여 daylight envelope 내에서의 안

전도(safety level)를 차별화하여 평가하였다. 이를 위하여 먼저 극점의 각 위치마다 안전율을 평가할 수 있는 기준을 마련하고 그 기준에 따라 안전도의 가중치를 부여한 후 daylight envelope 내에서 등 안전도 영역을 나타내는 방법으로 연구를 진행하였다.

2.2 정량화 과정

정량화 과정의 첫단계는 절리면의 경사변화에 수반되는 안전율을 산정한후 절리면의 경사 방향에 수반되는 안전율을 산정한다. 다음에는 경사/경사방향에 따른 등간격 모델링 실시하고 안전율을 산정하여 안전율 영역이 유사한 곳에 대한 밀도 영역을 작성하여 각 영역에 안전도 등급(safety level)을 부여하여 실제 사면 해석을 통한 검증을 실시하였다.

2.2.1 파괴면의 경사 변화에 따른 안전율

그림 1과 같이 파괴면의 경사변화에 따른 전단력의 변화를 관찰하였을때 파괴면의 경사가 증가함에 따라 전단력이 증가함을 하였으며 반면에 그림 2에 나타나듯이 파괴면의 경사가 증가함에 따라 파괴암반 블록의 크기(체적)는 감소하였다. 전단력과 파괴 암반의 크기 변화를 함께 고려할 수 있는 방법은 전단응력으로 나타내는 것이다. 따라서 파괴면의 경사 변화에 따른 전단응력의 변화를 관찰하였을때 전단응력이 증가하는 부분은 암석체적의 감소보다 전단력의 증가가 우세하여 전단응력이 증가하고, 감소부분은 암석체적의 감소가 전단력의 증가보다 우세한 영역으로 결국 전단응력은 감소하는 것이다.

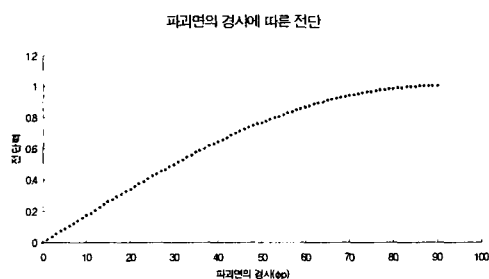


그림 1. 전단력의 변화

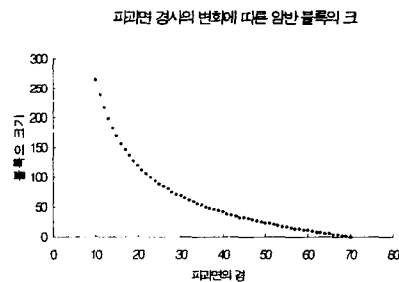


그림 2. 체적의 변화

또한, 파괴면의 경사변화가 사면의 안정성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 절리면의 각도를 변화시켰다. 그리고 각각의 파괴면에 대해 한계평형법에 의한 안전율을 산출하였다. 파괴면의 경사가 증가할수록 안전율이 다소 감소하였다가 증가하고 절리의 경사가 사면의 경사와 비슷한 각도에서는 안전율이 상당히 증가함을 알 수 있었다. 여기에서 파괴면의 경사가 암반의 내부마찰각보다 크고 사면의 경사보다 작은 $30^{\circ} \sim 62^{\circ}$ 까지 변화할 때 안전율은 0.86~2.93의 변화 범위를 나타낸다. 이러한 결과는 daylight envelope 내에서 파괴가능 절리의 위치와 관계없이 안전율을 일괄적으로 평가하는 현재의 평사투영 해석에 문제가 있음을 증

명할 뿐만 아니라 daylight envelope 내의 절리에 대한 안전율이 절리면의 경사에 크게 의존한다는 것을 의미한다. 암반사면의 형성에 있어 설계에 가장 많이 적용되고 있는 구배인 1:1, 1:0.7, 1:0.5에 해당하는 경사 45°, 55°, 63° 에 대해 각각 절리면의 경사에 따른 안전율의 변화양상을 관찰하였으며 이들 각 사면에 대해 최소 안전율을 표시하였다. 최소안전율을 비교하면 절리면의 경사가 증가함에 따라 그 변화 양상이 유사하다. 하지만 최소 안전율을 나타내는 점들은 사면의 경사가 증가할수록 감소함을 알 수 있었다. 이것은 절리면의 경사가 동일하더라도 사면의 경사가 증가할수록 사면의 안전율은 감소함을 의미한다.

2.2.2 절리면의 경사 변화에 따른 안전율

본 절에서는 절리면의 경사방향이 변화하는 경우 이에 따른 안전율의 변화에 관해 논의하고자 한다. 그림 3은 사면의 경사와 절리의 경사가 변화하지 않고 절리의 경사방향이 변화하는 양상을 나타낸 그림이다. 그림 3에서 평면파괴를 일으키는 조건이 되는 양쪽 측면의 분리면을 경계로 하여 그 중앙 축을 기준으로 절리면의 경사방향을 변화시켰다. 만약 사면의 양 측면의 분리면을 기준으로 경사방향을 변화시킨다면 절리의 주향이 사면의 주향과 평행한 선을 기준으로 절리의 경사방향이 양쪽으로 변화할 때 이에 따른 파괴 암체의 중량변화가 상이하게 된다.

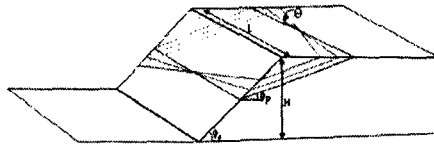


그림 3 절리면의 경사방향 변화

절리면의 경사방향이 변화할 때 파괴 암반의 중량 변화를 계산하면 경사방향이 변화함에 따라 파괴 암체의 중량도 소폭 증가하였다. 또한 파괴 암체의 중량이 증가할수록 안전율은 감소하였으며 이는 파괴 암체의 부피가 증가함에 따라 한계평형식에서 암체의 활동력에 저항하는 전단강도의 증가보다 암체를 활동하게 하는 전단력의 증가가 높기 때문이다. 또한 경사 방향이 증가할수록 즉, 절리의 경사방향이 사면의 경사방향과 이루는 각도인 θ 값이 증가할수록 안전율은 소폭 감소함을 알 수 있었다. Daylight envelope 내에 안전도가 유사한 위치의 contour를 작성하여 안전도 분포를 파악하기 위해 사면의 폭, 높이, 경사/경사방향 등의 기하적인 값들과 점착력, 내부마찰각, 암반의 단위중량 등의 물성들을 일정하게 고정시키고 평사투영법의 해석에 필요한 절리의 경사/경사방향에 따른 안전율을 산출하였다. 2001~2002년에 전국을 대상으로 조사한 암반사면 자료를 통계분석하여 대표 값이 되기에 가장 타당한 파라미터 값을 결정하였다.

표 1. 사면 파라미터의 대표 값

사면의 파라미터	대표 값	결정 근거
접착력(t/m^2)	27	최빈값
내부마찰각($^\circ$)	30	최빈값
암반의 단위중량(t/m^3)	2.50	최빈값
사면의 높이(m)	20	평균/최빈값
사면의 폭(m)	100	최빈값
사면의 경사($^\circ$)	63	평균/표준값
사면의 경사방향	0	임의값

또한 Daylight envelope 내에서 안전율을 평가하기 위한 경사와 이에 대응하는 경사방향을 등간격으로 나누어 총 49개의 극점을 모델링하였다. 모델링한 극점들의 안전율을 구하였을 때 daylight envelope 내에서도 절리면의 위치에 따라 파괴에 영향을 미치는 안전율은 차이가 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 안전율 영역을 6단계로 구분함으로써 평사투영의 daylight envelope내 안전도를 차별화 하여 평가하는 안전도 등급(safety level)을 산정하였다. 본 연구에서 개발된 암반사면의 평면파괴 해석 과정의 알고리즘은 먼저 사면과 절리 data가 입력된 data sheet를 불러들이고 이를 stereonet상에서의 파괴 가능성을 분석하게 된다. 즉 절리를 나타내는 극점의 집중 부분이 daylight envelope 내에 위치하는가를 분석한 후 평면파괴의 가능성이 없다면 해석은 암반사면이 평면파괴에 대해 안정이라는 결론으로 끝나게 되지만 만약 파괴가능성이 존재한다면 한계평형법의 안전율을 산정하여 이에 따른 daylight envelope 내에서의 안전도의 가중치를 부여하고 안전도 등급을 산정하여 암반사면의 안정성을 평가함으로써 해석은 종료된다.

2.3 현장적용

본 연구에서는 실제 암반사면 2곳(A, B 사면)을 대상으로 한계평형법, 기존의 평사투영법, 그리고 본 연구에서 새롭게 제한된 안전도 등급(safety level) 평가법을 이용하여 해석을 실시하였다. 본 해석이 실시된 지역 중 A사면은 전라남도 고흥군에 위치한 도로변의 절취면이다. 암석은 주로 백악기에 형성된 석영 반정을 가진 조립질의 석영반상화강암으로 구성되어 있다. B사면의 경우 암종은 강도가 높은 화강 편마암으로 구성되어 있고 단위 면적당 불연속면이 잘 발달되어 있다.

2.3.1 평사투영 및 한계형형 해석결과

평사투영 해석은 현재 상용 프로그램인 DIPS과 본 연구에서 개발한 통합해석프로그램인 SSEP을 이용하였고 이를 비교분석하였다. 본 연구에서 새롭게 제한한 안전도 등급 평가법에 의한 해석결과 A 사면의 안전율은 1.09, 2등급의 안전도, B 사면의 안전율은 0.83 5등급의 안전도로 평가되었다.

2.3.2 해석 결과 분석

기존의 평면파괴 해석으로 평가한 경우 A, B 두 사면 모두 파괴 가능성이 있는 것으로 평가된다. 그러나 본 연구에서 새롭게 제안된 안전도 등급 평가법으로 평가한 결과 A사면은 2등급, B사면은 5등급으로 B사면이 A사면에 비해 파괴 가능성이 더 높은 것으로 평가할 수 있다. 두 사면 모두에 대해 한계평형법으로 안전율을 산출한 결과는 A사면의 경우 안전율이 1.09, B사면의 경우 0.83으로 A사면이 B사면보다 안전율이 높게 평가되어 안전도 등급 평가법의 타당성을 뒷받침 하고있다. 본 해석에서 나타나듯이 평사투영의 안전도 등급에 의한 평면파괴의 안정성 평가는 기존의 정성적인 해석 방법인 평사투영법을 정량화한 것이다.

3. 결론

평사투영 해석프로그램인 DIPS에 의한 해석결과와 통합프로그램(SSEP)에 의한 해석 결과를 비교해 본 결과, 통합 프로그램의 해석 결과는 대체적으로 양호한 결과를 보이는 것으로 평가되었다. 따라서 통합해석 프로그램을 이용하여 사면의 평사투영 해석을 실시하여도 그 결과에 있어서는 전혀 무리가 없는 것으로 사료된다. 또한 본 통합해석 프로그램은 평사투영과 함께, 한계평형법, 최대근사법에 의한 안전율까지 일괄적으로 계산 후 결과값을 보여줌으로써 더욱 안정된 해석 결과를 나타내고 있다. 평사투영 프로그램들의 최대의 약점이었던 기하학적 안정성 평가 외에도 수치적으로 사면의 안정성을 평가함으로써 설계 및 해석에 있어 더욱 높은 이점이 있을 것으로 평가된다.

참고문헌

- 이희근, 양형식, 김호영, 신중호, 이경주, 윤용균, 김종우, 김종우, 김영근, 최성웅, 박의섭, 이대혁, 김택곤, 김재동, 정소걸, 1997, 응용암석역학, 서울대학교 출판부, p.119~170
- 황정규, 건설기술자를 위한 지반공학의 기초이론, 구미서관, 641~648
- 조영임, 1999, 최신 인공지능, 학문사
- 김대수, 1994, 신경망 이론과 응용 I, 하이테크정보
- 김대수, 1994, 신경망 이론과 응용 II, 하이테크정보
- 조용준, 허준, 최인규, 1999, Neural Connection을 이용한 데이터마이닝 신경망분석, SPSS 아카데미
- 이지수, 박혁진, 민경덕, 구호본, 2001, 불연속면의 특성을 고려한 보은지역 암반사면 안정성 해석, 자원환경지질, 제34권, 제6호, p601~615
- 김남수, 1996, 가속신경망을 이용한 암반분류의 기초연구, 전남대학교 대학원 석사학위 논문
- 김형근, 평사투영과 한계평형법에 의한 평면파괴 가능성의 정량화 연구, 전남대학원석사학위 논문, 1998

Romana, M.R. 1993, A geomechanical classification for slope : Slope Mass Rating, in Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol. 3, 575-600

S. Sharma, T. K. Raghuvanshi & Anbalagan, Plane failure analysis of rock slopes, Geotechnical & Geological Engineering, 1995

Hoek, E. and J.W. Bray, Rock Slope Engineering, Inst. Min. Metal., London, 1981

Sah, N.K., P.R Sheorey and L.N. Upadhyaya, Maximum likelihood estimation of slope stability, Int. j. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.Abstr. 1994

Araujo, LG., E. Vargas. Jr. & L.E. Vaz, Applications of limit analysis to stability problems of rock masses, Proc. of 2nd NARMS, Rock Eng., 1996