

개별요소법에 의한 절리 암반사면의 안전을 평가

Estimation of Safety Factor for a Jointed Rock Slope by DEM

유 광 호^{*1} You, Kwang-Ho

박 연 준^{*1} Park, Yeon-Jun

Abstract

In the case of jointed rock slopes, analytical methods, which are widely used to estimate the factor of safety for soil slopes based on limit equilibrium method, cannot be easily applied because it is difficult to assume their failure planes. Meanwhile, a method was developed based on ubiquitous joint model to calculate the factor of safety for rock slopes in which 2 sets of joints exist. However, this method cannot incorporate individual joint effectively. In this study, therefore, a method is developed to estimate the factor of safety for jointed rock slopes. The method is based on discontinuum analysis which can incorporate individual joint properly. To this end, the joint shear strength reduction technique was applied and a program routine was developed with FISH which is the internal programming language in UDEC. In addition, a scanline survey was performed at the jointed rock slope in a construction site. The factor of safety of the rock slope was evaluated by both ubiquitous joint model analysis and the developed technique, and the results were compared.

요 지

절리가 발달한 암반사면의 경우, 토사사면의 안전을 평가 위해 널리 이용되는 한계평형법을 이용한 해석법은 파괴 활동면을 가정할 수 없기 때문에 사용이 곤란하다. 한편, 비등방 탄소성 모델(편재절리모델)을 사용하여 2조의 절리군을 가진 암반사면의 안전을 계산할 수 있는 방법이 개발되었지만, 이 방법은 개별절리를 효과적으로 고려하지 못한다. 본 연구에서는 개별절리를 고려한 불연속체 해석에 의한 암반사면의 안정성 해석시 사면의 안전을 평가하는 기법을 개발하였다. 이를 위해, 절리 전단강도 감소기법을 적용하였으며, UDEC의 내장 언어인 FISH를 사용하여 프로그램을 개발하였다. 또한 실제 절리 암반사면을 대상으로 절리를 측정하고, 개발된 기법에 의해 사면의 안전을 구하였으며, 동일한 사면에 대해 등가연속체로 가정한 편재절리모델 해석을 수행하여 결과를 비교하였다.

Keywords : Distinct element method, Joint shear strength reduction technique, Safety factor

1. 서 론

토사사면의 안전을 계산을 위해 Bishop법, Spencer법, Morgenstern and Price법, Janbu의 엄밀법 등과 같이 한계평형법을 이용한 해석법이 널리 이용된다. 이들 해석법들은 임의의 활동면을 가정하고, 최소 안전율을 주는 활동면을 찾아 토사사면의 안전율을 구한다. 암반사

면이 토사사면과 크게 구별되는 특징 중의 하나는 절리(joints)를 포함한다는 것이며, 이들 절리들로 구성되는 암괴(rock block)의 거동에 지배를 받는다는 것이다. 따라서 절리가 발달한 암반사면의 경우 사면의 파괴는 사면과 절리의 상대적인 방향성 및 파괴특성에 지배되므로 임의의 활동면을 가정해야하는 한계평형법을 이용한 해석법은 적용하기가 어렵다. 절리가 발달한 암반의

*1 정회원, 수원대학교 토목공학과 조교수

해석법은 크게 연속체 모델과 불연속체 모델을 사용하는 방법으로 대별될 수 있다.

연속체 모델을 사용할 경우에는 유한요소법이나 유한차분법을 이용하는 방법이 주를 이루며, 불연속체 모델을 사용할 경우는 개별요소법이 주로 사용된다.

개별요소법에서는 암반을 절리에 의해 형성되는 암석 블록의 집합체로 보고 블록간의 접촉력을 계산하여 가속도를 구하고, 이로부터 블록들의 속도, 변위 및 회전 등을 계산한다. 암반 절리의 변형 및 파괴거동을 암반의 거동에 흡수시킨 등가연속체 모델이 Morland(1974), Zienkiewicz and Pande(1977), Thomas(1982), Blanford et al.(1987), Chen(1989) 등에 의해 연구 개발된 바 있으며, 국내에서는 이연규(1994), 박연준과 Dawson(1997)이 비등방 탄소성 모델을 개발하여 발표한 바 있다.

또한 박연준과 유광호(1998)는 박연준과 Dawson(1997)이 개발한 비등방 탄소성 모델(편재절리모델)을 사용하여 2조의 절리군을 가진 암반사면의 안전율을 계산하고, 등가의 물성을 가진 토사사면에 대한 해석결과와 비교하였다. 이들은 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해, 상한해로서 평면파괴의 경우에 대한 Culmann의 한계평형해와 비교하였다. 하지만, 개발된 편재절리모델은 절리 간격, 절리길이를 고려할 수 없는 단점이 있다.

미국 Itasca의 Cundall 박사는 암반의 절리를 개별적으로 고려할 수 있도록 개별요소법에 근거한 해석용 소프트웨어인 UDEC(1996)을 개발하였다. 미국 Berkeley 대학의 Goodman과 Shi(1985)는 블록이론(block theory)을 이용하여 사면의 안정 여부를 판정하는 기법을 개발하였다. 하지만, 이들 방법은 절리 암반사면이 안정한지 혹은 불안정한지를 판단할 수는 있으나, 얼마나 안정한지를 나타내는 안전율은 주지 못하는 단점이 있다.

또한, 토사사면의 안정성 판정을 위해 개발된 한계평형법(Limit equilibrium method)을 이용한 해석법들은 암반사면의 안전율을 구할 수 있으나 암반 사면파괴의 종류를 가정해야 하고, 절리군의 대표값을 사용해야 하는 단점이 있다.

본 연구는 개별절리를 고려한 불연속체 해석에 의한 암반사면의 안정성 해석시 사면의 안전율을 평가하는 기법을 개발하였다. 이를 위해, 절리 전단강도 감소기법을 적용하였으며, UDEC의 내장 언어인 FISH를 사용하여 프로그램을 개발하였다. 또한 실제 절리 암반사면을 대상으로 절리를 측정하고, 개발된 기법에 의해 사면의 안전율을 구하였으며, 동일한 사면에 대해 등가연속체

로 가정한 편재절리모델 해석을 수행하여 결과를 비교하였다.

2. 개별요소법에서의 전단강도 감소기법에 의한 안전율의 계산

사면이나 독, 제방 등에 있어서 안전율 F 는 '파괴를 막을 수 있는 최소 전단강도와 실제 지반의 전단강도와 의 비'라고 정의된다(Bishop, 1955). 즉 안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 사면이 붕괴될 때의 가상 지반 강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율 F 는 Duncan(1996)이 지적했듯이 지반의 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 나눈 값이 된다고 할 수 있다.

유한요소법을 이용한 사면해석에서 안전율은 실제 지반의 강도를 사면의 파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다.

이러한 전단강도 감소기법은 현재 흔히 쓰이고 있는 절편법(method of slice)에 비하여 여러 가지 장점이 있다. 가장 큰 장점은 임계파괴면이 자동으로 찾아지기 때문에 임계파괴면의 기하학적 형태를 사전에 원호, log spiral, 부분선형 등으로 가정할 필요가 없다는 점이다.

만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 연상유동법칙(associated flow rule)이 적용될 경우, 전단강도 감소기법으로 구해진 안전율은 분할법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성정수나 초기 응력, 혹은 응력 경로와 무관하다(Dawson 등, 1999). 전단강도 감소기법은 이미 1975년에 Zienkiewicz 등에 의하여 사용된 바 있으며, 그 이후에도 Naylor(1982), Giam & Donald(1988), Matsui & San(1988, 1992), Ugai(1989), Kobayashi(1990), Ugai & Leshchinsky(1995) 등에 의하여 사용된 바 있다.

절리가 발달한 암반사면의 경우 암반의 거동은 주로 절리에 의해 좌우된다. 이는 모암의 강도에 비해 절리의 강도가 현저히 작기 때문이다. 따라서 절리를 개별적으로 모사하여 해석하는 개별요소법에서는 절리의 전단강도에 전단강도 감소기법을 적용하여 절리 암반사면의 안전율을 구할 수 있다. 즉 실제 절리의 점착력 j_c 와 내부 마찰각 j_ϕ 를 시험 안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하여 절리 암반의 안전율을 구한다. 이때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 절리 물성치는 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

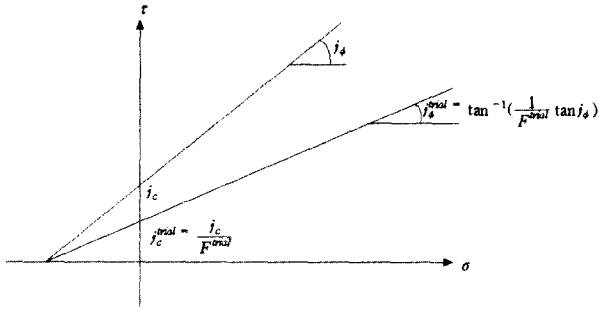


그림 1. 절리 전단강도와 시험 전단강도와의 관계

$$j_c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} j_c \quad (1)$$

$$j_\phi^{trial} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{F^{trial}} \tan j_\phi \right) \quad (2)$$

이 때 절리의 파괴포락선과 시험 안전율에 의해 감소된 파괴포락선은 그림 1에 도시된 바와 같이 동일한 인장강도 점에서 단지 기울기만 감소한 직선을 나타내게 된다.

한계상태를 효과적으로 찾아내기 위해, 본 연구에서는 초기 상한값과 하한값을 가정하지 않고 비교적 빨리 안전율을 구할 수 있는 incremental search 방법을 사용하였다. 이 방법은 먼저 안전율의 시작값(F^{start})과 증분값(F^{inc})을 정한다. 이때 시작값은 전산해석 결과가 평형상태에 도달하는, 즉 사면의 파괴가 발생치 않는 시험 안전율이 되며, 증분값은 원하는 안전율의 정확도에 따라 정해지는데, 해석과정에서 단계별로 감소시킬 수 있다. 예를 들면, 첫 단계에서 증분값을 1.0, 다음 단계에서 증분값을 1/5로 감소시킨 0.2, 또 다음 단계에서 1/10으로 감소시킨 0.02 등을 사용하여 단계별로 최종 안전율의 정확도를 증가시킬 수 있다. 각 단계에 있어서, 해석결과가 수렴하게 되면 사면의 파괴가 발생치 않는 것이므로 시험 안전율(F^{trial})은 증분값 만큼 증가되고, 이 때 시험안전율은 F^{low} 로 저장된다. 반대로 해석결과가 수렴하지 않으면, 이 시험 안전율은 실제 안전율보다 높은 값이므로 이 값은 바로 전단계의 안전율인 F^{low} 로 대체되고, 여기서부터 다음 단계로 넘어가 감소된 증분값을 사용하여 안전율을 구하게 된다. 이 같은 과정을 안전율 증분이 충분히 작을 때까지 되풀이하여 최종 안전율을 구하게 되는데, 안전율을 구하는 과정을 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다.

Incremental search 방법의 수렴성은 시작값(F^{start}), 증분값(F^{inc}), 구하고자 하는 안전율의 유효숫자 수에 따라 달라질 수 있다. 일반적인 사면(안전율이 1.0~3.0)

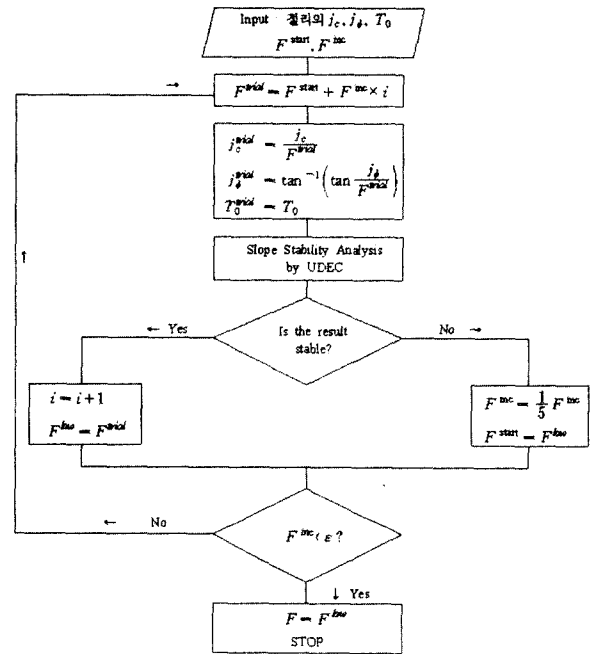


그림 2. 안전율 계산과정의 흐름도

에 대해 안전율을 소수점이하 둘째 자리까지 구하는 경우, 시작값을 1.0으로 하고 위에서 설명한 바와 같이 단계별 증분값을 1.0, 0.2, 0.02로 하는 경우, 최소 6번, 최대 15번의 해석수행이 요구된다

3. 대상 암반사면의 절리 측정 및 평사투영 해석

대상 암반사면은 신갈-상하간 도로 사면으로 기반암은 선 캄브리아기의 편마암류가 주로 분포하며, 주 구성 광물은 석영, 장석, 흑운모 등으로 미량의 유색광물이 함유되어 있다. 국부적으로 규장암 암맥이 소규모로 관입되어 있다. 절토사면의 암질은 각 구간별로 차이가 있지만, 크게 연암에서 풍화가 심한 풍화암으로 대별될 수

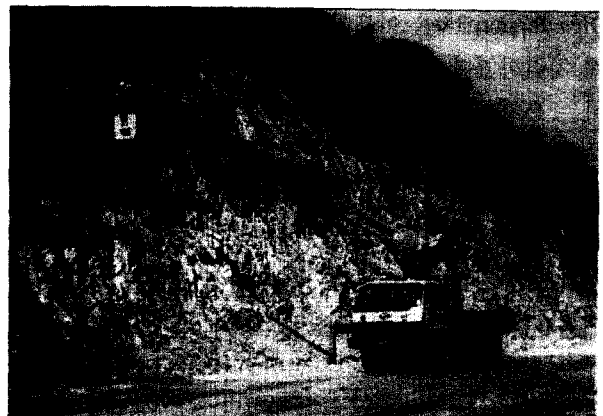


그림 3. 신갈-상하간 도로변 사면의 크레인을 이용한 절리측정

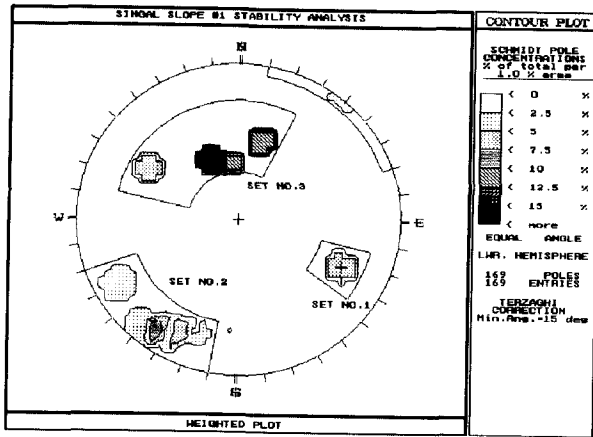


그림 4. 대상사면의 불연속면 pole vector(with Terzaghi orrection)

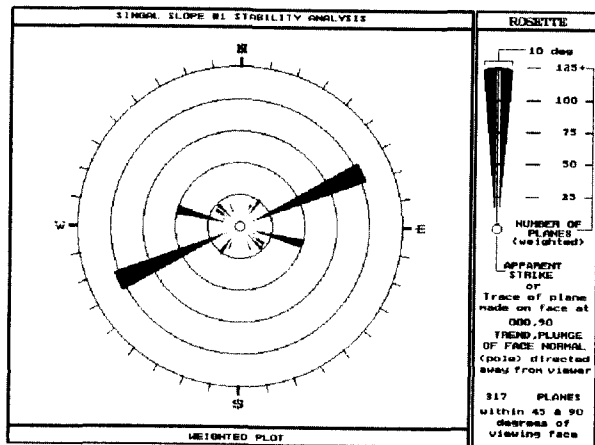


그림 5. 대상사면의 rosette diagram(with Terzaghi correction)

있다. 또한 암석이 변색되고, 절리는 벌어져 있으며 녹니석, 점토 등의 충전물이 끼어 있고, 지하수가 스며나오는 곳도 있다. 전반적으로 암반상태는 가벼운 타격에도 쉽게 부서지고, 맨손으로도 암괴를 분리할 수 있을 정도로 절리가 매우 발달된 암반사면이다. 평사투영 해석을 위해 그림 3에서 보는 바와 같이 절리를 측정하고, Dips version 3.0을 이용하여 측정된 불연속면 자료를 통계 처리하였다. 그림 4는 불연속면의 방향에 따라 발생하는 오차를 수정한 경우의 사면에서 측정된 불연속면 수직벡터들의 등고선도를 보여주며, 그림 5는 일종의 주향(strike) 또는 경사방위(dip direction)에 대한 방사상의 막대그래프인 rosette 다이어그램을 보여준다. 다만 경사각(dip angle)이 45°와 90°사이의 각을 갖는 불연속면들만이 계산에 포함되었다.

표 1에서 경사각과 경사방위의 표준편차는 stereonet 상에서의 cone angle로서 구해졌다. 즉, 경사각의 표준편차는 경사방위의 영향을 없도록 하여 구하였고, 경사

방위의 표준편차는 경사각의 영향을 없도록 하여 구하였다. 대상사면에 대한 평사투영법에 의한 해석결과, 평면파괴의 가능성이 있고, 전도파괴의 영역에 몇 개의 절리가 도시됨으로 전도파괴의 가능성이 있다. 그러나 wedge sliding zone 내에 절리군의 교차점이 존재하지 않으므로 썩기파괴의 가능성은 없는 것으로 나타났다. 종합적으로 대상사면은 평면파괴와 전도파괴의 가능성을 가지고 있는 불안정한 사면으로서 안정대책이 필요한 것으로 사료된다.

4. 수치해석에 의한 안정성 평가

일반적으로 암반사면의 파괴는 암반 내에 발달한 절리를 따라 발생하게 된다. 이러한 암반사면의 특성으로 인하여 절리암반의 안정성 해석방법으로는 개별절리의 거동을 일일이 모델링하는 개별요소법과 절리의 특성을 암반물성에 포함시킨 편재절리모델을 사용하는 방법이 사용될 수 있다. 본 연구에서는 두 가지 방법을 모두 동일한 사면에 적용시켜 두 방법의 적용성에 대한 타당성을 검증하고자 하였다.

4.1 편재절리모델에 의한 사면 안정성 해석

본 연구의 대상지역에 발달한 절리는 간격이 10 내지 20cm에 지나지 않아 지표관찰에만 의존한 방법으로는 사면 내부 지반중의 절리 발달상태를 정확히 판단하기가 사실상 불가능하다. 이러한 경우 유용한 모델이 편재절리모델(ubiquitous joint model)로 암반을 연속체로 가정하되, 특정방향으로 미끄러지기 쉬운 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 박연준과 유광호(1998)에 의해 2개조의 절리가 발달된 사면에 적용가능 하도록 개발된 FISH routine을 사용하여 안전율을 계산하였다.

표 1과 같이 3조의 절리군이 발달되어 있고, 이를 각각 해석단면으로 투영하면, 절리군 1은 약 40°, 절리군 2는 약 77°, 절리군 3은 약 -45°의 경사를 이루게 된다. 이 중 절리군 1은 발달 정도가 다소 미약하나, 절리군

표 1. 절리군별 대표값

절리군	절리수	경사각		경사방위		절리간격	
		평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
1	17	70	0	295	0	0.050	0.026
2	40	80	4.1	037	15.9	0.211	0.219
3	72	46	9.7	163	18.4	0.143	0.265

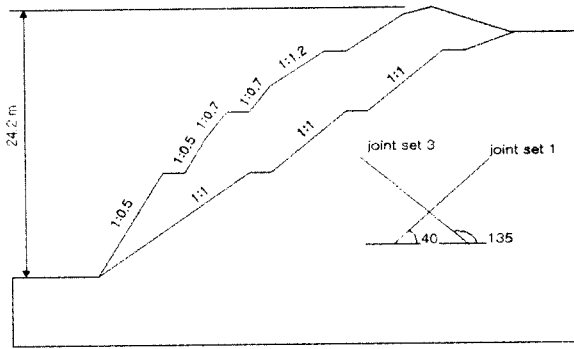


그림 6. 대상사면 및 절리 발달상태(현 사면경사=1:0.5)

2 보다는 사면 안정성에 미치는 영향이 오히려 클 것으로 판단되어, 본 해석에서는 그림 6과 같이 절리군 1과 절리군 3을 고려하였다. 각 절리의 역학적 특성은 측정된 바 없으나, 타 지역의 경기 편마암 절리 시료에 대한 절리전단 시험결과 및 현장에서 관측한 절리의 표면 거칠기 및 상태를 고려하여 마찰각은 35°, 점착력은 10kPa로 결정하였다. 이는 사면 내부의 압착상태의 절리에 대하여는 다소 보수적인 값이며, 사면에 노출된 개구절리에 대하여는 다소 높은 값이나, 전반적으로 사면 전체의 절리에 대하여는 적절한 대표값으로 판단되었다.

해석 결과, 현재의 1:0.5 사면은 안전율 1.038로 최소 안전율 1.5에는 미치지 못하였다. 사면의 파괴양상은 토사사면에서처럼 명확하게 나타나지는 않으나, 그림 7에 도시된 속도벡터도에서 볼 수 있듯이 사면 중단으로부터 40° 절리 상부의 암체가 사면 내부의 암반보다 빠른 속도를 갖는 것으로 나타났다. 이를 개선하기 위하여 그림 6에 도시된 바와 같이 1:1로 사면 경사를 낮추어 해석을 수행하였다. 그 결과 사면의 안전율은 2.13으로 개선되었으며, 이 때의 파괴 양상은 그림 8에 도시된 바와 같이, 사면 하단에서부터 40° 절리 상부의 암체가 절리를 따라 파괴될 것으로 예상된다. 따라서 대상사면에 대

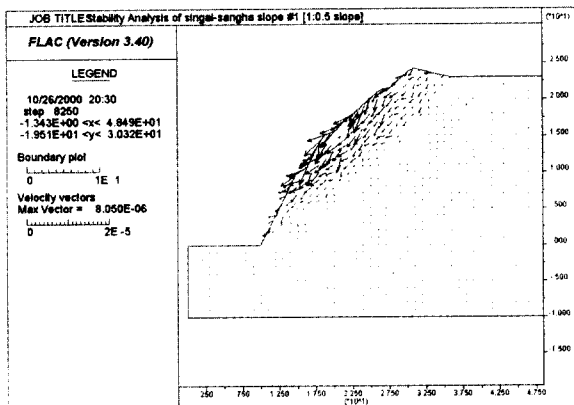


그림 7. 1:0.5 사면에서의 파괴양상-예상 안전율 1.038

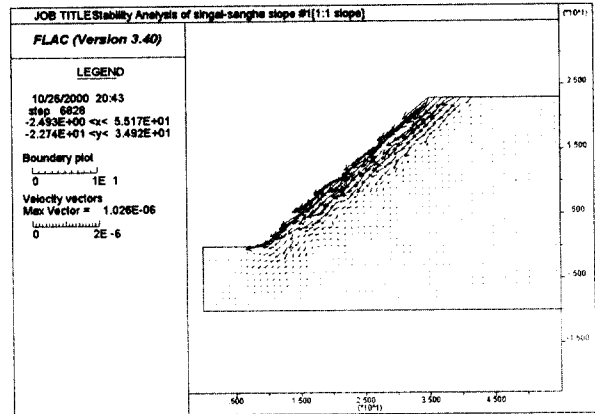


그림 8. 1:1 사면에서의 파괴양상-예상 안전율 2.130

한 안정성 해석 결과, 본 사면은 절리를 따른 파괴 가능성을 나타내고 있으며, 현재의 경사로는 최소 안전율 1.5를 확보할 수 없었다. 따라서 장기적인 사면의 안정성 확보를 위해서는 사면의 경사를 1:1로 낮추거나 별도의 보강조치가 필요할 것으로 판단되었다. 해석에 사용한 모암과 절리의 물성치는 각각 표 2와 표 3과 같다. 해석에서 파괴는 절리에서만 발생하는 것으로 가정하였다. 인장강도를 0으로 할 경우 국부적인 파괴가 발생되어 해석이 지연되는 경향이 있기 때문에, 해석 결과에는 영향을 미치지 않는 작은 값으로 100Pa를 가정하였다.

4.2 개별절리모델(UDEC)에 의한 해석

그림 9에서 보는 바와 같이, 사면안정에 큰 영향을 주지 않는 절리군을 제외시키고, 편재절리모델 해석에서와 같이 우세절리 2조를 사용하여 안정성 해석을 수행하였다. 해석 프로그램으로는 개별요소법에 근거하여 개발된 UDEC version 3.0을 사용하였으며, 사면의 안전율을 구하기 위해 자체 개발된 FISH 프로그램을 사용하였다. 각 절리의 입력물성치는 편재절리모델과 같은 값(마찰각 35, 점착력 10kPa)을 사용하였으며, 절리간격은 측정된 값이 14cm 및 20cm 정도였으나, 이 값으로 블록

표 2. 모암 물성치

밀도(kg/m ³)	체적탄성계수(Pa)	전단탄성계수(Pa)
2,500	2 × 10 ¹⁰	1 × 10 ¹⁰

표 3. 절리의 물성치

수직강성(Pa/m)	전단강성(Pa/m)	점착력(Pa)	인장강도(Pa)	마찰각(°)
2 × 10 ¹⁰	1 × 10 ¹⁰	1 × 10 ⁴	100	35

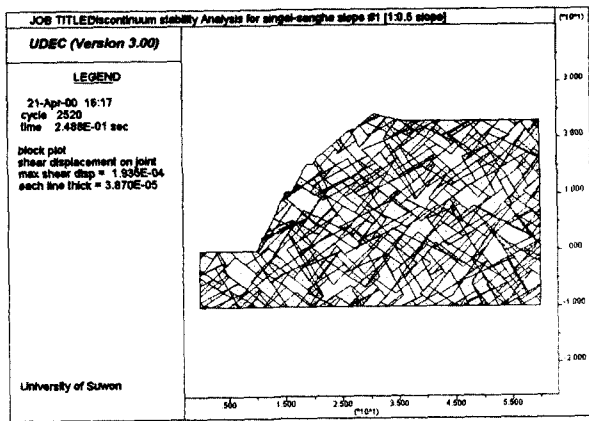


그림 9. 현재 사면의 평형상태 시 전단 변위도

을 생성시키면 너무 많은 수의 블록이 생성되어 해석이 불가능하였다. 절리의 연결성과 컴퓨터 용량 및 계산속도를 고려하여 측정치의 대략 5배 정도인 0.7m와 1m로 하였다.

그림 9는 현 상태의 1:0.5 사면을 해석한 것으로 평형 상태에 도달되었을 경우의 블록들과 발생한 전단 변위도를 보여준다. 이 때 최대 전단변위는 약 2 mm 정도 발생하였으며, 블록의 속도가 10-8 m/sec 이하로 수렴되었다.

그림 10은 앞서 언급된 절리전단강도 감소기법에 의한 안전율 계산 routine을 사용하여 1:0.5 사면의 안전율을 구한 해석결과로서 사면 하단부의 블록들의 변위가 크게 발생함을 보여준다. 그림 11은 점착력을 1/10으로 저하시켰을 경우 사면 하단부의 블록들이 흘러내리려는 것을 보여준다. 해석결과 1:0.5 사면의 안전율은 1.15로 예측되었다.

그림 12는 사면을 1:1로 낮추었을 경우 평형에 도달한 상태의 블록들의 속도벡터를 보여준다. 속속도가 충분히 작기 때문에 사면안정에 큰 문제가 없음을 알 수 있었고,

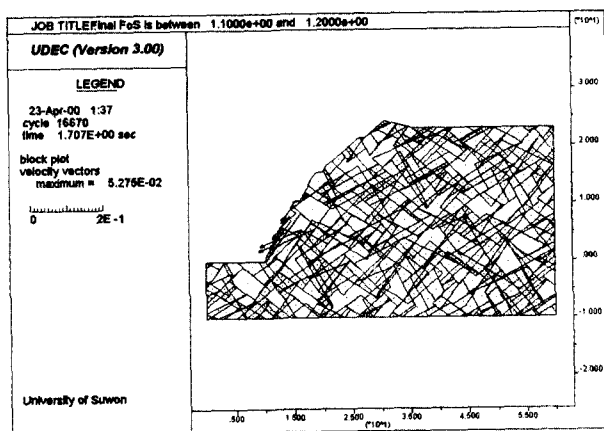


그림 10. 블록 및 속도 벡터도

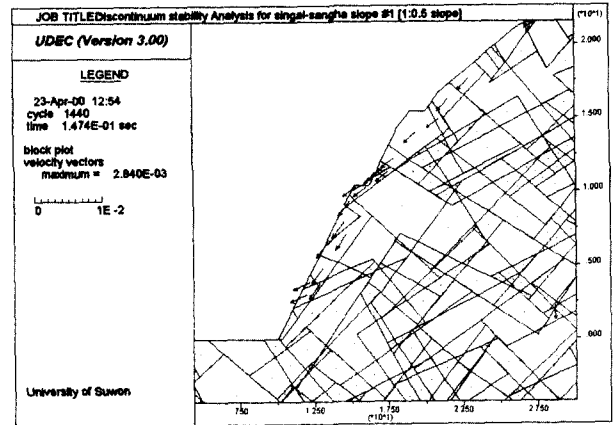


그림 11. 1/10로 점착력이 저하된 사면의 이동 블록부의 상세도

해석결과 사면의 안전율은 1.65 정도로 예측되었다.

결론적으로, 보통 도로사면의 경우 안전율이 1.5 이상을 유지해야 하며, 입력 물성치의 추정이 확실하지 않은 상황에서는 장기적인 사면안정성을 고려할 때, 현 사면을 1:1로 낮추어 안전율을 높이는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

사면경사가 1:1인 경우 편재절리모델과 개별절리모델에 의해 구한 대상사면의 안전율은 각각 2.13과 1.65로 예측되었는데, 이러한 차이는 각 모델이 실제 지반상태를 100% 반영하지 못하는 데에 기인한다. 일반적으로 절리의 방향성에 대한 분산을 무시하면 개별요소법에 의한 해석이 편재절리모델에 비해 더 큰 안전율을 주게 되나, 본 연구에서와 같이 절리의 방향성에 대한 분산을 고려하면, 경우에 따라 개별절리모델이 오히려 작은 안전율을 주기도 하는데, 이는 개별절리모델의 경우 사면 표면 부근에서의 절리의 방향성과 연결정도가 해석 결과에 커다란 영향을 주기 때문으로 사료된다.

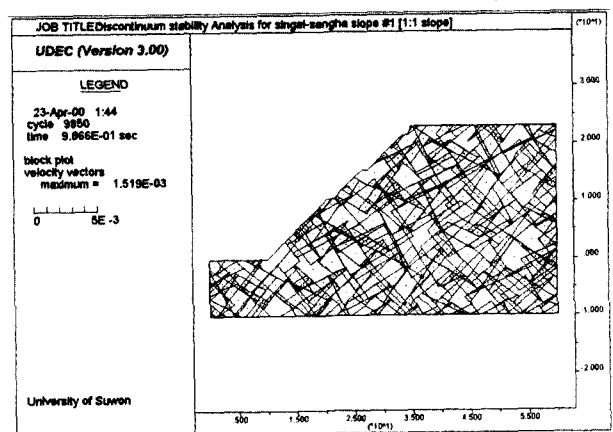


그림 12. 1:1 사면의 블록 및 속도 벡터도

5. 결론

본 연구를 통해 개별요소해석에 있어 절리가 발달한 암반사면의 안전율을 구하는 방법이 개발되었고, 대상 암반사면의 안전율 계산을 위해 편재절리모델 해석방법과 함께 적용되었다.

대상 사면에 대한 개별요소해석의 경우, 사면의 경사가 1:0.5인 경우 안전율이 1.15로 예상되었고, 경사를 1:1로 낮춤으로서 안전율이 1.65로 증가함을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 개발된 안전율 평가 기법은 절리를 개별적으로 고려해야 하는 암반사면의 설계 및 안정성 해석에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

추후에는 절리 암반사면의 개별요소해석에 있어서 사면보강시 지보재를 고려한 안전율을 구하는 기법이 개발되어, 사면 보강효과를 정량적으로 구할 수 있는 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 과제 R&D/97007-3의 지원에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해 준 건설교통부에 깊이 감사 드리는 바이다.

참고 문헌

1. 박연준, 유광호. (1998) "편재절리모델을 이용한 절리 암반사면의 안정성 해", 터널과 지하공간, 제8권, 제4호, pp.287-295.
2. 박연준, Dawson, E. M. (1997) "편재절리모델의 유용성과 한계성", 터널과 지하공간, 제7권, 제3호, pp.202-207.
3. 이연규 (1994) 록볼트로 보강한 절리암반의 점소성 거동에 관한 수치해석 모델개발, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 217p.
4. Bishop, A. W. (1955) "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", Geotechnique, Vol.5, pp.7-17.
5. Blanford, M. L., Key, S. W. and Chieslar, J. D. (1987), "A general 3-D model for a jointed rock mass", In C. S. Deasai et al., editor, Proceedings, Second International Conference on Constitutive Laws for Engineering Materials: Theory and Application, pp. 35-46, University of Arizona, Tucson, Arizona.

6. Chen, E. P. (1989) "A computational model for jointed media with orthogonal sets of joints", J. Appl. Mech. Trans. ASME, Vol. 56, pp.25-32.
7. Duncan, J. M. (1996) "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. Vol.122, No.3, pp.577-596.
8. Dawson, E. M., Roth, W. H., and Drescher, A. (1999) "Slope stability analysis by strength reduction", Geotechnique, Vol.49, No.6. pp.835-840.
9. Giam, S. K. and Donald, I. B. (1988) "Determination of critical slip surfaces for slopes via stress-strain calculations", Proc. Fifth Australia-New Zealand Conference on Geomech., Sydney, Australia, pp.461-464.
10. Goodman, R. E. and Shi, G. (1985) Block Theory and its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall, New Jersey.
11. Itasca Consulting Group, Inc. (1996) UDEC, Universal Distinct Element Code, Version 3.0., Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
12. Kobayashi, M. (1990) A study on application of finite element method to stability and settlement analysis in geotechnical engineering. Technical Note of PHRIMT, Japan, No.1 (in Japanese).
13. Matsui, T. & San, K. C. (1992) "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", Soils and Found. Vol.32, No.1, pp.59-70.
14. Morland, L. W. (1974) "Continuum model of regularly jointed mediums", J. Geophys. Res., Vol.79, No.2, pp.357-362.
15. Naylor, D. J. (1982) "Finite elements and slope stability", Numer. Meth. in Geomech., Proc. NATO Advanced Study Institute. Lisbon, Portugal, pp.229-244.
16. Thomas, R. K. (1982) A Continuum Description of Jointed Media, Technical Report SAND81-2615, Sandia National Laboratories, Albuquerque.
17. Ugai, K. (1989) "A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM", Soils and Foundations Vol.29, No.2, pp.190-195(in Japanese).
18. Ugai, K. & Leshchinsky, D. (1995) "Three-dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a comparison of results", Soils and Foundations, Vol.35, No.4, pp.1-7.
19. Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. & Lewis, R. W. (1975) "Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics", Geotechnique Vol.25 No.4, pp.671-689.
20. Zienkiewicz, O. C. & Pande, G. N. (1977) "Time dependent multi-laminate model of rocks-a numerical study of deformation and failure of rock masses", Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech., Vol.1, pp.219-247.

(접수일자 2001. 4. 9)