

## 블록 및 오목 사면 형상에 따른 거동에 대한 수치해석 모형 연구

### A Numerical Study on the Behavior of Convex and Concave Slopes in Plan View

정우철<sup>1)</sup>, Woo-Cheol Jeong, 박형동<sup>2)</sup>, Hyung-Dong Park, 박연준<sup>3)</sup>, Yun-Jun Park, 유광호<sup>4)</sup>, Kwang-Ho You

<sup>1)</sup> 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사과정, Master course, Division of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

<sup>2)</sup> 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수, Professor, Division of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

<sup>3)</sup> 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, University of Suwon

<sup>4)</sup> 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, University of Suwon

**개요(SYNOPSIS)** : Numerical modeling of cut slope has some limits in simulating the real slopes. In the case of 2D analysis of slope stability, it is assumed that slope is simply straight even when it is concave or convex in plan view. In this study, 3D analysis in curved shape slopes has been conducted for the comparison with 2D analysis in terms of failure mode and factor of safety. For this, 3D analysis by FLAC3D was compared with 2D analysis in plane strain condition and axi-symmetric model condition by FLAC. It was also observed how safety factors of slopes were affected by the variation of the tensile strength and cohesion, which are important variables to decide whether the slope fails or not. 2D analysis of concave slopes under plane strain condition showed much smaller safety factors by 16-40 % errors depending on the radius of curvature of slopes, compared to the more realistic values from 3D analysis. In case of convex slopes, the lower values by 7-10 % has been reported. 2D analysis of axi-symmetric model showed also smaller safety factors by 6-10 % and by 2-4 %, in case of concave and convex slopes, respectively. Such results are expected to contribute to the better understanding of failure process and could be applied for improved design of slopes.

**주요어(Key Words)** 곡면형상사면(curved slope in plan view), 오목사면(concave slope), 볼록사면(convex slope), 안전율(factor of safety), 전단강도감소기법(shear strength reduction technique)

## 1. 서론

기존의 사면해석은 절편법에 의해 대부분 수행되었지만, 최근에 와서는 수치해석을 이용하여 보다 실제와 가까운 파괴형상을 구현하고 현장 조건을 좀 더 잘 반영할 수 있는 해석이 가능하게 되었다. 그러나, 사면의 한 단면만을 해석하는 2차원 해석으로는 3차원 사면의 거동을 해석하는데 있어 한계를 지니게 된다. 그 중의 하나로 2차원 해석은 사면 형상의 3차원적인 변화를 반영시키지 못한다는 점을 들 수 있다. 즉, 사면의 길이 방향으로 평면이 아닌 오목하거나 볼록한 형상의 사면의 해석에 있어 2차원 해석은 모두 같은 사면으로 해석하게 된다. 실제 Zhang(1988)등의 기존 연구 결과에 의하면 오목사면은 평면사면보다 더 안전하고 볼록사면은 평면사면보다 더 불안하다라고 알려져 있다. 이 연구에서는 2차

표 1. 연구사례를 통한 수치해석의 한계평형법에 대한 장점

작가	주요 해석 내용	한계평형법과 비교한 장점
Clough and Woodward (1967)	비선형 응력-변형을 거동	비선형 구성방정식 계산 가능
Zienkeiwicz et al. (1975)	3가지 다른 구성재료의 사면	평행력과 회전력에 대한 평형을 함께 고려 할 수 있음
Donald & Giam, (1988)	연약층이 있는 사면	평행력과 회전력에 대한 평형을 함께 고려 할 수 있음
Potts et al. (1990)	점진적인 사면 파괴 양상	한계평형법으로 모사할 수 없음
Griffith and Lane (1999)	불균질 사면	평행력과 회전력에 대한 평형을 함께 고려 할 수 있음
Lorig (1999)	현장응력상태의 영향	토압계수( $K_0$ )의 영향 고려 가능
Zettler et al, (1999)	지하수위 변화의 영향	유동 해석(flow analysis)를 통한 사면 굴착 후 지하수위의 정확한 예측

원 해석과 3차원 해석에 있어서 곡면형상사면(Curved slope in plan view)의 안정성을 비교하였다. 또한, 사면 파괴에 영향을 주는 변수인 인장강도를 변화시키면서 안전율의 변화 양상을 비교해 보았다.

## 2. 사면안정해석에서의 수치해석

### 2.1. 수치해석의 장점

과거의 사면 해석은 대부분 한계평형법에 의해서 수행되었지만, 최근에는 컴퓨터의 성능이 향상되고 가격이 저렴해짐에 따라 수치해석법이 널리 적용되고 있다. 수치해석법은 기존의 방법이 가지고 있던 몇가지 단점들을 보완하면서 더 나은 해석결과를 제시해 줄 수 있다. 다음은 기존의 연구를 통해 밝혀진 사면 안정 해석에서 한계평형법에 비교하여 수치해석법이 가지고 있는 장점들이다.

- 파괴면의 형상이나 위치에 대한 가정을 미리 할 필요가 없다.
- 절편에 대한 가정이 없으므로 절편의 측압력에 대한 가정도 필요없다.
- 토체에 대한 신뢰있는 물성정보가 있다면 작용하는 응력 범위에서 변위에 대한 정보를 얻을 수 있다.
- 비선형의 복잡한 구성방정식을 쉽게 해석할 수 있어 비선형 응력-변형률 거동을 해석할 수 있다.
- 굴착 또는 건설 동안의 지형의 변화에 대한 고려가 가능하다.
- 사면 형상의 영향을 고려할 수 있다.

이 밖에 수치해석은 한계평형법으로 해석 불가능한 해석이 가능하고 보다 현실성이 높은 여러 가지 해석이 가능한데, 표 1에서 이러한 내용을 잘 보여주고 있다.

### 2.2 곡면형상사면(Curved slope in plan view)

이상의 수치해석으로 보다 현실적으로 분석할 수 있는 해석 중에 이번 연구에서는 사면 형상의 영향을

살펴보고자 한다. 여기서 사면 형상의 영향이란 사면의 길이방향으로 오목하거나 볼록한 사면을 말한다. 이들을 곡면형상사면이라 하는데, 그림 1과 그림 2에서처럼 관찰자의 입장에서 볼 때, 오목하게 들어가는 사면을 오목사면이라 하고 볼록하게 나와있는 사면을 볼록사면이라고 부른다.

최근까지 곡면형상사면에 대한 연구는 Jenike and Yen(1963), Piteau and Jennings(1970), Hoek and Bray(1981), Zhang(1988), Zettler et al.(1999), Lorig(1999)등에 의해 수행되어졌다. 표 2는 이제까지 연구된 곡면형상사면에 대한 연구사례이다.

### 3. 전단강도 감소기법(Shear Strength Reduction Technique)

최근에 수치해석을 이용한 사면안정 해석에 있어 전단강도감소법을 두루 사용하고 있다. 이것은 사면안정 분야에서 안전율을 구할 수 있는 방법으로, 이때의 안전율은 파괴가 일어났을 때의 감소된 전단강도에 대한 실제 사면의 전단강도의 비로 정의된다. 여기서 안전율은 식(1)과 식(2) 처럼 Fellenius(1927)가 정의한 것을 기반으로 하였다.

$$\eta = \eta_t = \eta_\phi \tag{1}$$

$$\eta_t = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_{crit}} = \frac{c}{c_{crit}} \tag{2}$$

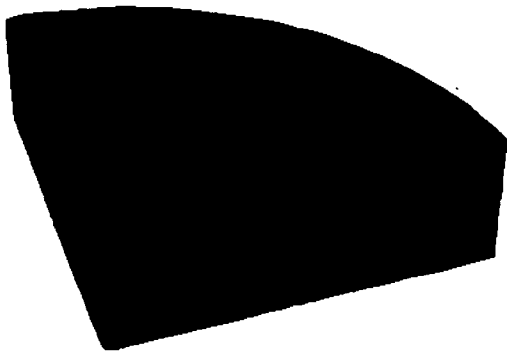


그림 1. 오목사면(concave slope)

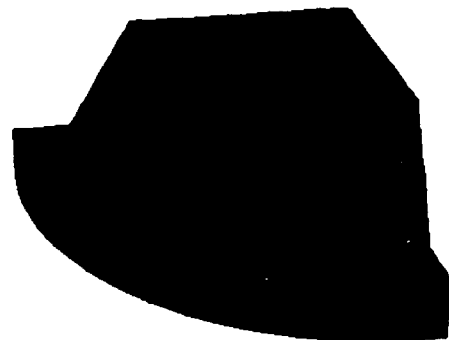


그림 2. 볼록사면(convex slope)

표 2. 곡면 형상 사면의 연구사례와 한계점

작가	해석 사면	해석 방법	결론	한계
Jenike and Yen(1963)	축대칭 사면	사면의 임계 경사도를 조사	곡률반경이 커지면 임계경사가 평면사면에 가까워짐	점착력을 고려 안함
Piteau and Jennings (1970)	남아프리카의 다이아몬드 광산 사면	파괴시의 평균 사면각을 조사	오목사면 > 평면사면	정량적인 결과를 주지 못함
Hoek and Bray(1981)		안정한 사면각의 비교	오목사면 > 평면사면	정량적인 결과를 주지 못함
Zhang(1988)	오목사면 모델	3차원 한계평형법	오목사면 > 평면사면	한계평형법의 가정
Zettler et al.(1999)	3차원 오목, 평면, 볼록사면	전단강도감소기법	오목사면 > 평면사면 > 볼록사면	회전반경의 영향을 고려하지 않음
Lorig(1999)	축대칭 오목사면	전단강도감소기법	오목사면 > 평면사면	축대칭 모델(3차원 효과를 고려하지 않음)

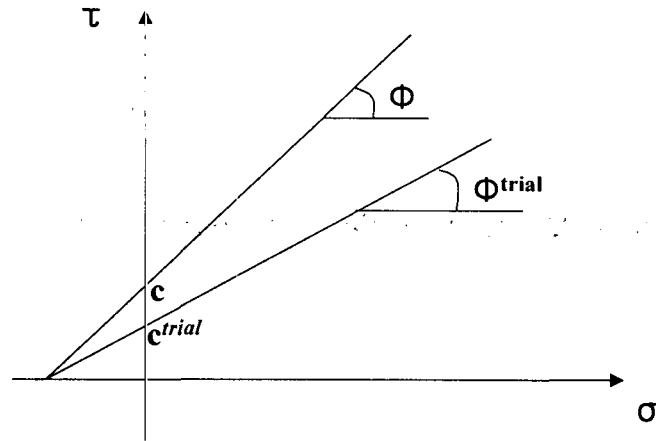


그림 3. 실제 지반 강도 정수와 시험 지반 강도 정수와의 관계

이러한 전단강도 감소기법은 1975년에 Zienkiewicz 등에 의해 사용된 바 있으며, 그 후에도 Naylor(1982), Donald & Giam(1988), Matsui & San(1992), Ugai(1989), Ugai & Leshchinsky(1995), (Zettler et al, 1999), (Lorig, 1999) 등에 의하여 사용된 바 있다. 사면 안정해석에 있어 전단강도 해석기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력  $C$ 와 내부마찰각  $\phi$ 를 시험 안전율  $F^{trial}$ 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다. 이때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치와는 그림 3과 같이 다음의 관계를 갖게 된다.

$$C^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} C \quad (3)$$

$$\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan\phi\right) \quad (4)$$

이번 해석에서는 전단강도감소기법중 하나인 양분법(bisection method)로써 구하였는데, 이 방법은 다음과 같다. 먼저 그림 4와 같이 안전율의 상한값과 하한값을 준 후, 두 값을 양분한 값을 첫 번째 안전

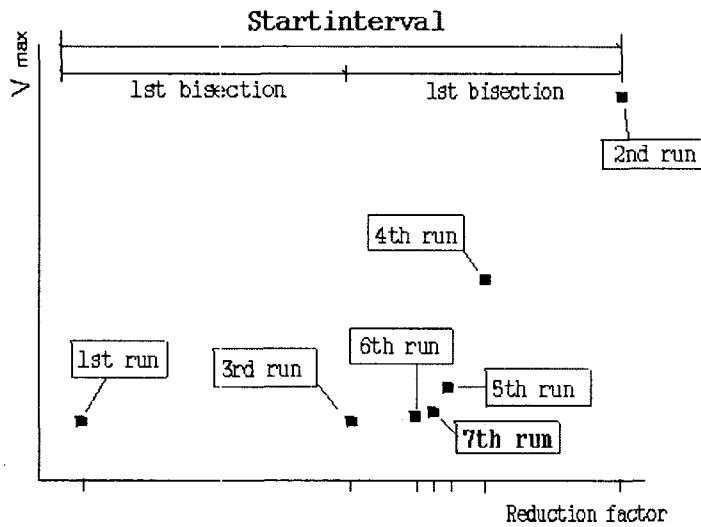


그림 4. 양분법을 이용한 안전율 계산

을로 놓고 식 (3)과 식 (4)처럼 처음의 점착력과 마찰각을 갱신하여 수렴여부를 판단한다. 이때, 상한값과 하한값은 각각 수렴하는 값과 수렴하지 않는 값으로 설정해야한다. 첫 번째 안전율이 수렴을 하면 양분한 값을 하한값으로 놓고, 다시 상한값과 이 값의 양분한 값으로 같은 작업을 반복한다. 반대로 수렴을 하지 않은 경우는 양분한 값을 상한값으로 놓고 다음 양분값을 구하여 작업을 반복하면 된다. 그림 4 처럼 이런식으로 반복작업을 하여 상한값과 하한값의 차이가 일정 수준 이하까지 작아지게 되면 해석을 멈추고 이때의 양분한 값을 안전율로 결정하게 된다.

#### 4. 평면사면에 대한 곡면형상사면의 비교

##### 4.1. 모델선정

이번 연구에서 해석 사면은 안전율이 1.0인 이상적인 절취사면을 선택하였다. 그림 2에서 처럼 높이 20m, 사면각  $60^\circ$ , 단위중량  $25,975\text{N/m}^3$ 의 사면으로, Chen(1975)에 의한 한계평형 해석에 의하면 내부마찰각  $\phi=20^\circ$ 의 경우 무차원 안정수(stability number)  $N_s=10.39$ 이다.  $N_s=\gamma H/C$ 의 관계에서 점착력  $c$ 를 구하면  $50\text{kPa}$ 이 된다. 3차원 해석에서 오목, 볼록 사면을 그림5에서 보이는 것처럼 각각의 회전축을 갖는 회전체로서 가정하였다. 이때, 두 사면을 비교하기 위해  $R_{cc}$ ,  $R_{cv}$ 와 같이 회전반경을 회전축에서 사면의 중심부까지의 거리로 나타내었다.

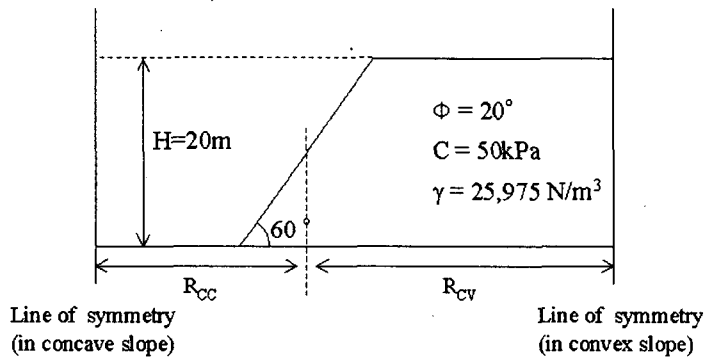


그림 5. 사면 모델과 물성치

##### 4.2 해석 결과

기존의 해석에 의해서 오목사면은 평면사면에 비해 높은 안전율을 갖고 볼록사면은 더 낮은 안전율을 갖는다고 알려져 있다(Zhang, 1988). 오목사면의 경우, 힘이 작용하는 방향이 회전축의 중심방향으로 집중되어 사면의 횡( $\theta$ )방향으로 압축력이 작용하게 된다. 이 힘이 사면이 붕괴하려는 힘을 구속하여 평면사면보다 안전율이 높게 나타난다. 따라서 회전반경이 작아질수록 이 힘이 커지게 되어 안전율이 높아지게 된다. 반대로 볼록사면의 경우는 회전축 방향에서 밖으로 나가는 방향으로 힘이 작용하므로 사면의 횡( $\theta$ )방향에서 인장력이 작용하게 된다. 표 3과 그림 6은 오목사면과 볼록사면에 대해 축대칭 모델을 이용한  $\text{FLAC}^{2D}$  해석과 3차원 모델을 이용한  $\text{FLAC}^{3D}$  해석을 평면사면해석과 함께 비교한 것이다. 이번 해석은 Mohr-Coulomb 파괴조건을 사용하였다. 그 결과를 살펴보면, 전체적으로 오목사면이 볼록사면에 비해 현저히 높은 안전율을 보이고 있다.

표 3. FLAC2D, FLAC3D로 해석한 오목, 볼록사면의 회전반경에 따른 안전율 비교

R <sub>cc</sub>	concave		R <sub>cv</sub>	convex	
	FLAC2D	FLAC3D		FLAC2D	FLAC3D
75.77	1.12	1.16	64.23	1.06	1.09
65.77	1.13	1.17	54.23	1.06	1.09
55.77	1.15	1.18	44.23	1.06	1.09
45.77	1.17	1.21	34.23	1.07	1.10
35.77	1.20	1.25	24.23	1.07	1.11
25.77	1.25	1.31	plane (R=∞)	1.02	1.10
15.77	1.37	1.45			

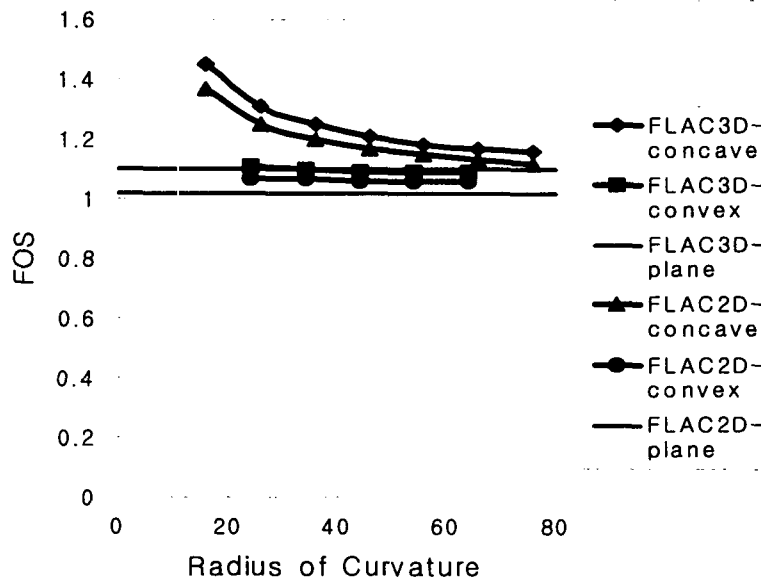


그림. 6 FLAC2D, FLAC3D로 비교한 오목, 볼록, 평면사면의 안전율

오목 사면의 경우, 평면사면에 비해 안전율이 다소 높게 나타난다. 또, 회전반경이 작아짐에 따라 안전율이 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 기존의 연구와 일치한 결과임 보여주는 것이다. 하지만, 볼록사면에서는 평면사면에 비해 안전율이 거의 차이가 없고 FLAC<sup>2D</sup>를 이용한 축대칭 해석의 경우 도리어 더 작아짐을 보이고 있고, 회전반경에 대해서도 거의 변화가 없다. Zhang(1988)의 연구등에 의하면 곡면사면에서 3차원 해석이 2차원 해석보다 조금 더 큰 안전율을 가지는 것으로 알려져 있다. 실제 이번 연구에서도 같은 결과를 보이고 있다. 따라서 FLAC<sup>2D</sup> 해석에서의 축대칭 해석은 2차원 해석이지만 3차원 효과를 보이고 있어, 한 단면만을 해석한 결과보다는 더 큰 안전율을 갖게 된다. 결국 볼록사면이지만 한 단면을 해석한 결과보다 더 큰 안전율을 갖는 결과를 보이게 되는 것으로 나타났다.

다음으로 Mohr-Coulomb 파괴 조건의 주요 변수인 인장강도를 변화시켜 해석을 결과를 비교하였다. 앞서 설명한 것처럼 오목사면과 볼록사면에서 사면의 횡( $\theta$ )방향으로의 압축력과 인장력 때문에 안전율에 영향을 주기 때문에 인장강도가 해석에 중요한 변수가 될 수 있다. 표 4와 그림 7은 인장강도를 10000Pa로 낮추어서 해석한 결과를 보여주고 있다. 결과에서처럼 이번에도 회전반경에 따라 안전율의 차이가 거의 나타나지 않지만, 볼록사면이 평면사면보다 안전율이 약간 낮게 나타났음을 알 수 있다. 하지만, 그 값이 현저히 작아 실제 사면안정성에는 그다지 크게 영향을 주지 못할 것이라 예상된다.

표 4. 인장강도가 10000Pa 일때의 FLAC3D 해석에 의한 안전율

$R_{cv}$	plane ( $R=\infty$ )	64.23	54.23	44.23	34.23
FOS	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06

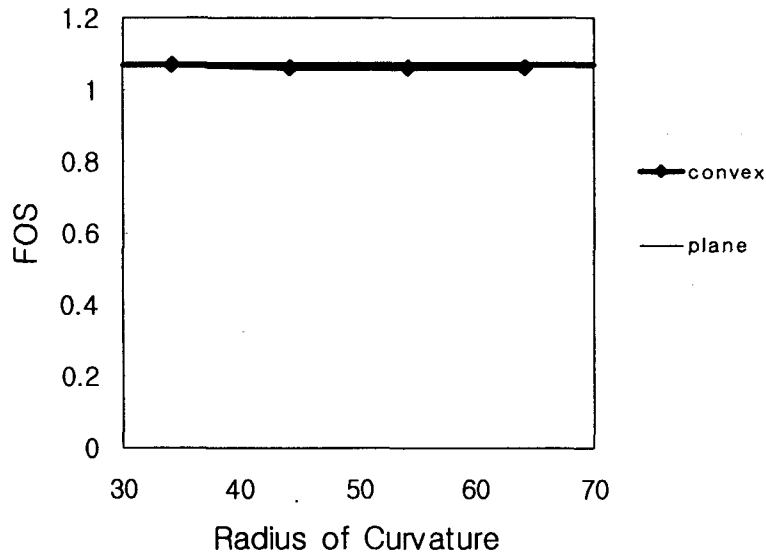


그림 7. 인장강도가 10000Pa 일때의 FLAC3D 해석에 의한 안전율 비교

## 5. 결론

실제 plane strain 조건으로 가정한 2차원 해석의 경우는 오탁사면의 경우 회전반경에 따라 16-40 %의 큰 오차정도로서 작은 값을 갖게 되고, 블록사면의 경우도 7-10 % 정도의 오차를 보인다. 또한 축대칭 모델의 경우도 오탁사면의 6-10 % 정도로 작은 값을 나타내었고, 블록사면의 경우는 2-4 % 정도의 작은 값을 갖게 해석되었다. 그리고 처음 사면 모델에서는 블록사면이 평면사면보다 안전율이 더 크게 나왔지만, 인장강도를 줄이고 나니 반대의 결과가 나왔다.

이러한 결과를 가지고 다음의 결론을 내릴 수 있다.

- 오탁사면은 회전반경이 작아 질수록 안전율이 현저히 커진다. 하지만, 블록사면은 그다지 큰 변화를 보이지는 않는다.
- 기존의 연구 결과에서처럼 오탁사면은 평면사면보다 안전율이 크지만, 블록사면은 인장강도값이 어느 정도 작아야지만 평면사면보다 안전율이 작아진다. 하지만, 그다지 큰 영향을 주지는 못한다.
- FLAC<sup>3D</sup>을 이용한 3차원 해석이 기존의 사면 한 단면을 해석하는 2차원 해석에 비해 회전반경에 대한 영향을 잘 나타내 줄 수 있다.

## 6. 참고문헌

1. 박연준, 유광호, 1998, 편재절리모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 한국 암반공학회, Vol. 8, pp.287-295
2. 박연준 외, 1999, 절편법과 유한차분법에 의한 사면안정해석 비교연구, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, Vol 15, No 6, pp.263-272
3. Clough and Woodward, 1967, Analysis of Embankment Stresses and Deformations, J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol 93, No.4, pp.529-549
4. Dawson and Roth, 1999, Slope Stability Analysis with FLAC, to appear in Proceedings, FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Minneapolis, Sept., Balkema
5. Dawson, Roth, and Drescher, 1999, Slope Stability by Strength Reduction, Geotechnique 49, No.6, pp.835-840
6. Donald and Giam, 1988, Application of the Nodal Displacement Method to Slope Stability Analysis, preprint of Fifth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics - Prediction versus Performance, Sydney, pp.456-460
7. Duncan, 1996, State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes, J. Geotech. Engrg, ASCE, Vol 122, No.7, pp.577-596
8. Griffiths and Lane, 1999, Slope Stability Analysis by Finite Elements, Geotechnique 49, No.3, pp.387-403
9. Lorig, 1999, Lessons learned from slope stability studies, FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics, Balkema, Rotterdam
10. Potts et al., 1990, Finite Element Analysis of Progressive Failure of Carsington Embankment, Geotechnique 40, No.1, pp.79-101
11. Zhang, 1988, Three-Dimensional Stability Analysis of Concave Slopes in Plan View, J. Geotech. Engrg, ASCE, Vol 122, No.7, pp.577-596
12. Zettler et al., 1999, Slope Stability Analysis based on the Shear Reduction Technique in 3D, FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics, Balkema, Rotterdam
13. Zienkiewicz et al., 1975, Associated and Non-associated Visco-plasticity and plasticity in soil mechanics, Geotechnique 25, No.4, pp.387-403