

3차원 효과를 고려한 암반사면의 안전율 변화에 관한 연구

A Study on the Factor of Safety for Rock Slopes Based on Three Dimensional Effects

서 옥 근¹ Seo, Og-Geon

이 승 호² Lee, Seung-Ho

Abstract

In the slope stability analysis and design, Limit Equilibrium Method (LEM) and Shear Strength Reduction technique (SSR) are mainly used. Both methods are able to perform two and three dimensional analysis. SSR is considered to be more sensitive and more reasonable than LEM by many researchers. However, in practice LEM is still widely used because of the increase of analysis time and complexity of the model in SSR. In this study, three dimensional analysis of the protruding rock slope is performed by SSR in order to study the effects of protruding length using rock slope FLAC 3D. In this study, as results of analysis variations of the safety factor have been studied according to slope angle, slope height, the soil strength, protruding slope length projected variables. The results show that the factor of safety as more affected by the shapes of the protruding rock slope than the rock strength.

요 지

사면안정분야의 해석과 설계에는 한계평형법(LEM)과 전단강도 감소기법(SSR)이 주로 사용된다. 이 두 방법은 2차원과 3차원 해석을 모두 수행할 수 있지만 많은 연구자들에 의해 전단강도 감소기법이 해석 변수에 대해 더욱 민감하게 반응하고 합리적인 결과를 산출한다고 알려져있다. 그러나 전단강도 감소기법의 모델링의 복잡함과 해석시간의 증가 등의 이유로 한계평형법이 여전히 일반적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 FLAC 3D를 사용하여 전단강도 감소기법을 통한 돌출된 암반사면의 3차원 효과에 대해 연구하였다. 수치해석 변수는 사면의 경사, 높이, 지반강도, 사면의 돌출길이이며 연구 결과 사면의 안전율은 암반의 강도보다 사면의 형상에 더 영향을 받는 것으로 나타났다.

Keywords : 3D Slope Stability, Rock Slope, LEM, SSR, Factor of Safety, FLAC 3D

1. 서 론

사면의 안정해석이나 설계에는 한계평형법(LEM, Limit Equilibrium Method)과 전단강도 감소기법(SSR, Shear

Strength Reduction technique)이 주로 이용된다. 한계평형법은 재료의 강도 한계상태와 작용력(자중, 상재하중 등)의 평형(힘평형 또는 모멘트평형)을 비교하여 안정성을 판단하는 방법으로 Bishop(1955), Fellenius(1927),

1 정회원, 상지대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Doctor's Course, Dept. of Civil Engrg., Sang-ji Univ., Tel: +82-2-884-9919, Fax: +82-44-201-5659, ogseo@naver.com, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Sang-ji Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Janbu(1954)의 방법이 주로 이용되며 대체로 2차원 해석이 수행된다. 전단강도 감소기법은 연속체해석을 이용하여 재료의 강도를 기준으로 일정 비율로 강도를 감소시키거나 증가시켜 사면의 파괴 또는 안정성까지 반복해석을 수행하여 재료의 강도와 증가 또는 감소된 강도를 이용하여 사면의 안정성을 판단하는 방법이다. 이러한 방법은 2차원 해석 및 3차원 해석에 모두 사용 가능하나 한계평형법에 비해 시간이 많이 소요되고 요구 변수가 많은 단점이 있어 실무에서는 한계평형법이 주로 사용된다. 그러나 Jiang과 Magnan(1997), Griffiths와 Lane(1999), Dawson(1999), Cala(2001) 등 많은 연구자들에 의해 복잡한 지층이나 사면구조에서는 전단강도 감소기법이 변수에 더욱 민감하게 반응하며 합리적인 결과를 나타낸다고 연구된 바 있다. Griffiths와 Lane(1999)은 발표논문에서 ‘왜 기술자들이 아직도 파괴원호를 그리는가?’라는 질문으로 전단강도 감소기법의 필요성을 역설하였다.

본 연구는 복잡하지 않은 3차원 형상이 암반사면의 안전율에 미치는 영향을 판단하기 위한 목적으로 전단강도감소기법을 이용하여 암반사면에 대해 해석변수별 수치해석을 통한 분석을 수행하였다.

2. 문헌연구

사면은 일정한 구배로 시공되어 대부분 평면응력 조건을 어느 정도 만족하므로 실무에서는 주로 2차원 한계평형해석이 쓰이고 있다. 그러나 Lam(1993) 등은 2차원 한계평형해석의 결과는 안전율이 과소평가되며 역해석 시 지반의 전단강도가 과대평가된다는 연구결과

를 발표하였다. 이러한 이유들로 사면해석이나 설계에도 3차원 한계평형해석의 필요성이 대두되었으며 사면의 3차원 한계평형 해석방법은 Duncan(1996)에 의해 제안되었다. 3차원 한계평형해석은 2차원 해석에서 각 절편(slice)으로 분할하여 해석하던 방법을 3차원으로 확장하여 각 절편을 사각기둥(column)의 형태로 적용하였다(Fig. 1).

3차원 한계평형법은 Duncan(1996) 이후 분할기둥의 횡방향력 계산이나 파괴면의 형태에 따라 많은 연구자들에 의해 주장되었으나 복잡한 형상을 가진 사면에 적용하기 위한 상용프로그램이 나와 있지는 않다. 반면에 전단강도 감소기법은 복잡한 형상을 가진 시스템을 편리하게 해석할 수 있는 연속체해석법을 토대로 만들어졌기 때문에 복잡한 형상을 가진 사면에도 적용이 가능하다. 두 해석법의 결과는 균일한 단일지반에서는 없으며 지층의 구성과 형태, 사면의 형태 등이 복잡해질수록 차이가 발생한다(Cala et al., 2001).

전단강도 감소기법의 활용은 컴퓨터의 성능개선과 함께 해석시간의 단축 등으로 점차 늘어나는 추세이나 아직 2차원 한계평형법이 실무에서 주로 사용되고 있다. 그러나 앞서 언급했듯 전단강도 감소기법이 한계평형법보다 변수에 더욱 민감하고 합리적인 결과 값을 도출하므로 전단강도 감소기법의 적용확산이 필요하나 시뮬레이션이 복잡하고 해석시간이 긴 단점으로 아직 널리 사용되지는 못하고 있으며 대부분의 경우 전단강도 감소기법의 장점인 입체모델링의 장점을 반영할 수 없는 2차원 해석이 수행되고 있다. 본 연구에서는 3차원 형상을 갖는 암사면에 대해 전단강도 감소기법으로 수치해석을 통한 변수연구를 수행하여 사면의 3차원 형상

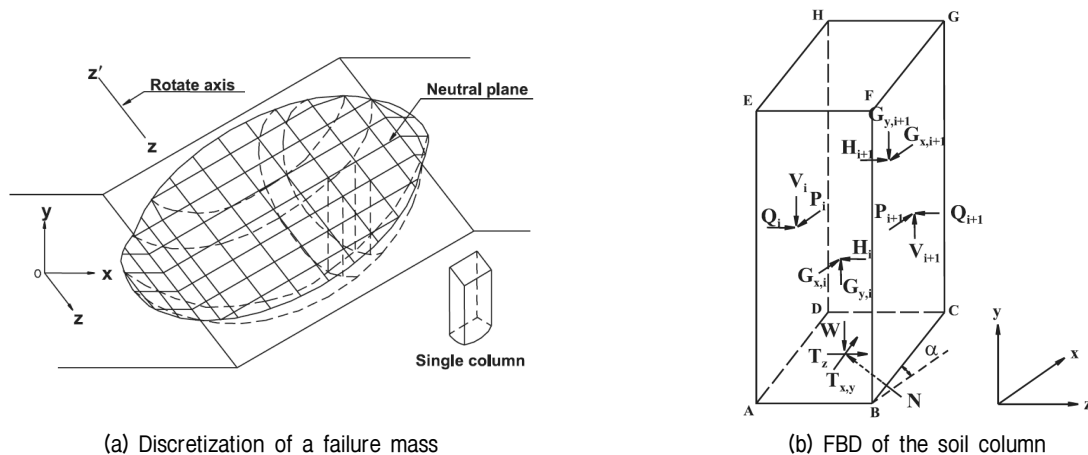


Fig 1. Failure mass and FBD of the single soil column in 3D LEM (Zuyu Chen, 2003)

에 따른 안전율의 변화를 분석하였다.

3. 수치해석 제원 및 사례

본 연구에 사용된 3차원 연속체해석 프로그램은 유한 차분법(FDM, Finite Differential Method) 알고리즘을 이용하는 Itasca사의 FLAC 3D이다. FLAC 3D는 지반공학 분야의 연구, 실무 분야에서 널리 이용되고 있다. 해석

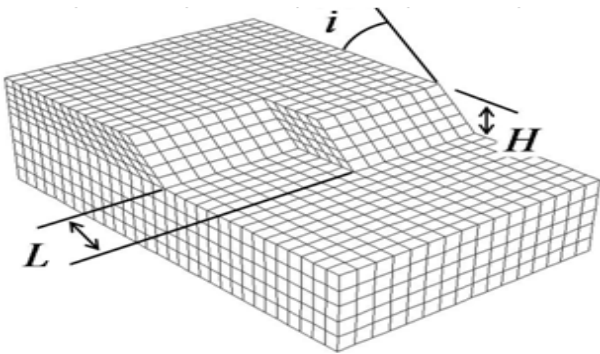


Fig. 2. Analysis grid mesh

Table 1. Cases of the numerical analysis

Uniaxial Strength (kPa)	Slope Incline Ratio (1:cot i)	Slope Height (H, m)	Protruding Ratio (L/H)	Remark
100	1:0.5	10	0	189 Cases
200	1:1.0	15	0.5	
300	1:1.5	20	1.0	
			1.5	
			2.0	
			2.5	
			3.0	

에 사용된 모델은 Mohr-Coulomb 모델이며 지반의 일축 압축 강도와 사면의 경사(i), 높이(H), 돌출길이기비(L/H)가 해석변수이다. 돌출길이기비란 사면이 돌출된 거리와 사면의 높이에 대한 비율(Fig. 2)로 본 연구에서 3차원 효과를 적용시킨 변수이다. Fig. 2에 해석격자요소망을 Table 1에 해석변수에 대한 수치해석 사례를 정리하였다. 암반의 일축압축강도는 Mohr-Coulomb 모델의 점착력으로 반영하였으며 적용된 점착력의 크기는 일축압축강도의 절반 값이다. 경계조건은 격자요소망의 상부를 제외한 경계면에 연직변위 구속조건(로울러 경계 조건)을 적용하였다.

4. 해석결과 및 고찰

수치해석 결과 사면의 돌출길이기비가 0과 0.5에서는 전체사면 파괴가 발생하였으며 돌출길이기비가 1.0이상의 해석 결과에서는 돌출부파괴 또는 측면파괴가 발생하였다(Fig. 3, 해석완료 시 격자요소망의 수평변위). 이는 돌출길이기비 0.5까지는 돌출부의 파괴토체가 전체 사면의 일부분으로 작용하며 돌출길이기비 1.5 이상인 상태에서는 돌출부의 파괴토체가 독립적인 사면으로 작용하기 때문이다.

Fig. 4는 수치해석 결과 사면 경사별 사면돌출길이기비에 따른 안전율 변화를 나타낸다. 해석결과 사면돌출길이기비 0과 1일 때 비슷한 결과를 나타내었고 0.5일 때 안전율이 증가하였다. 이는 사면돌출길이기비 0.5일 경우 파괴형상은 전체사면 파괴이지만 돌출되지 않은 사면의 자중이 사면돌출길이기비 0일 때와 비교하여 줄어들었기

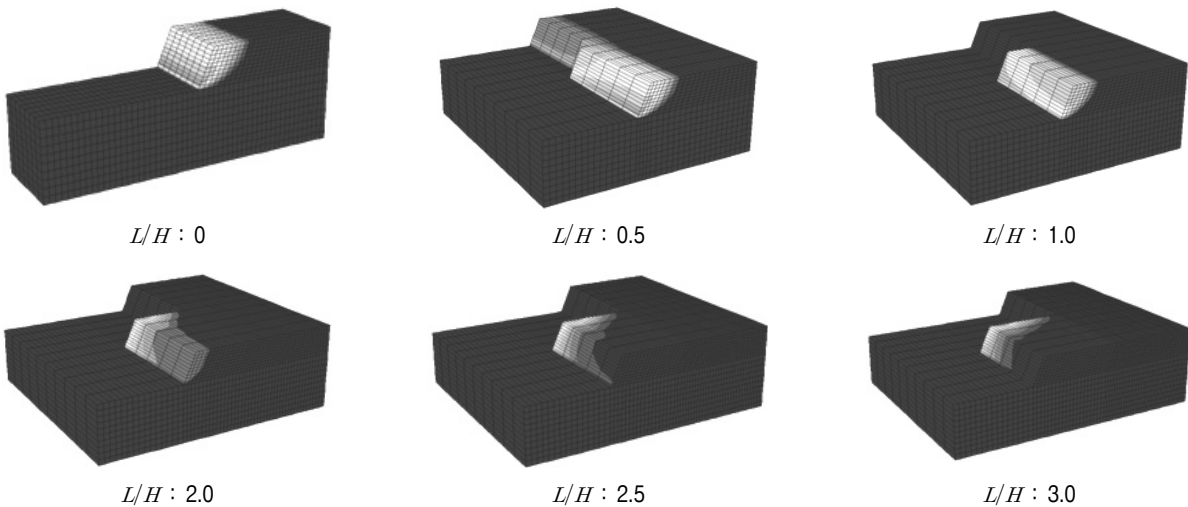


Fig. 3. Failure pattern of the slope according to the protruding ratio

때문이다.

Fig. 5는 수치해석 결과 사면높이별 사면돌출길이비에 따른 안전율 변화를 나타낸다. 해석 결과 사면경사가 가파른 1:0.5 사면의 경우는 사면돌출길이비에 따른 안전율의 변화가 상대적으로 작았으며 경사가 완만해 질수록 안전율의 하락이 크다. 이는 사면이 완만할수록 파괴면의 면적이 커져서 지반강도에 민감해지기 때문이다. 사면경사 1:1.5, 돌출길이비 3인 경우 안전율이 25%까지 감소하였다.

수치해석 결과를 종합하면 사면의 돌출길이비가 1일 때까지는 안전율의 감소가 발생하지 않고 1이상일 때부터 안전율의 하락이 발생하며, 안전율 하락의 상대적 크기는 사면이 완만할수록, 사면의 높이가 증가할수록 커진다.

각 변수에 따른 안전율 변화를 수식화하기 위해 회귀

분석을 수행하였다. 회귀분석의 순서는 먼저 안전율 변화량(α (%))과 돌출길이비(L/H)를 선형 회귀분석하고 (식 (1), Fig. 6), 식 (1)의 계수를 사면경사에 따라 선형 회귀분석하였다(식 (2), Fig. 7). 회귀분석에서 돌출길이비(L/H)는 1이상의 값이다.

안전율 변화량을 α (%) (식 (1))라 하고 α 와 돌출길이비(L/H)를 선형 회귀식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$FS_{3D} = \alpha FS_{2D} \quad (1)$$

- 여기서, FS_{3D} : 사면의 돌출효과를 반영한 안전율
- FS_{2D} : 돌출효과를 반영하지 않은 2차원 해석 시 안전율
- α : 안전율 변화량(%)

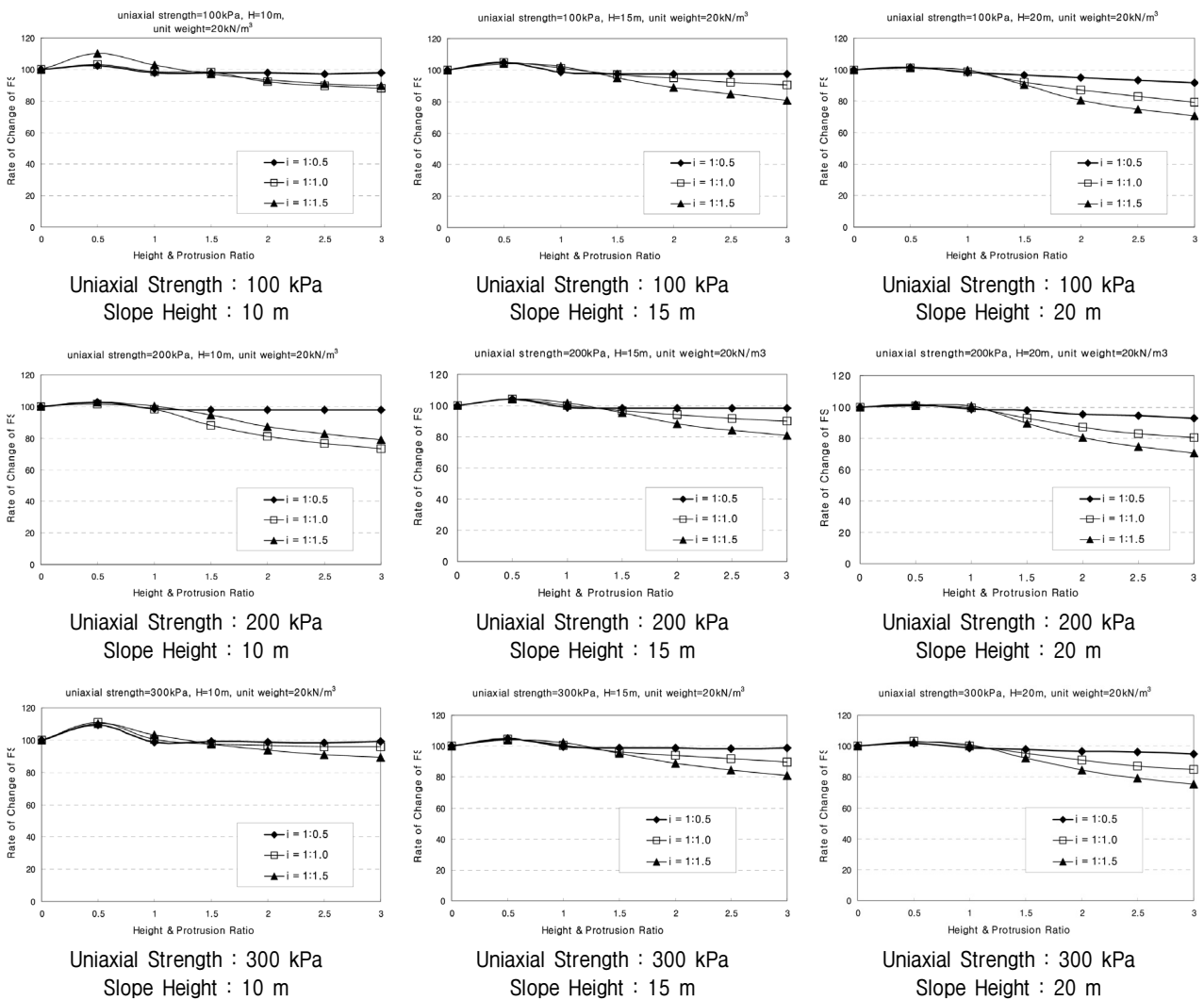


Fig. 4. Factor of safety changes of the slope according to the protruding ratio and the slope

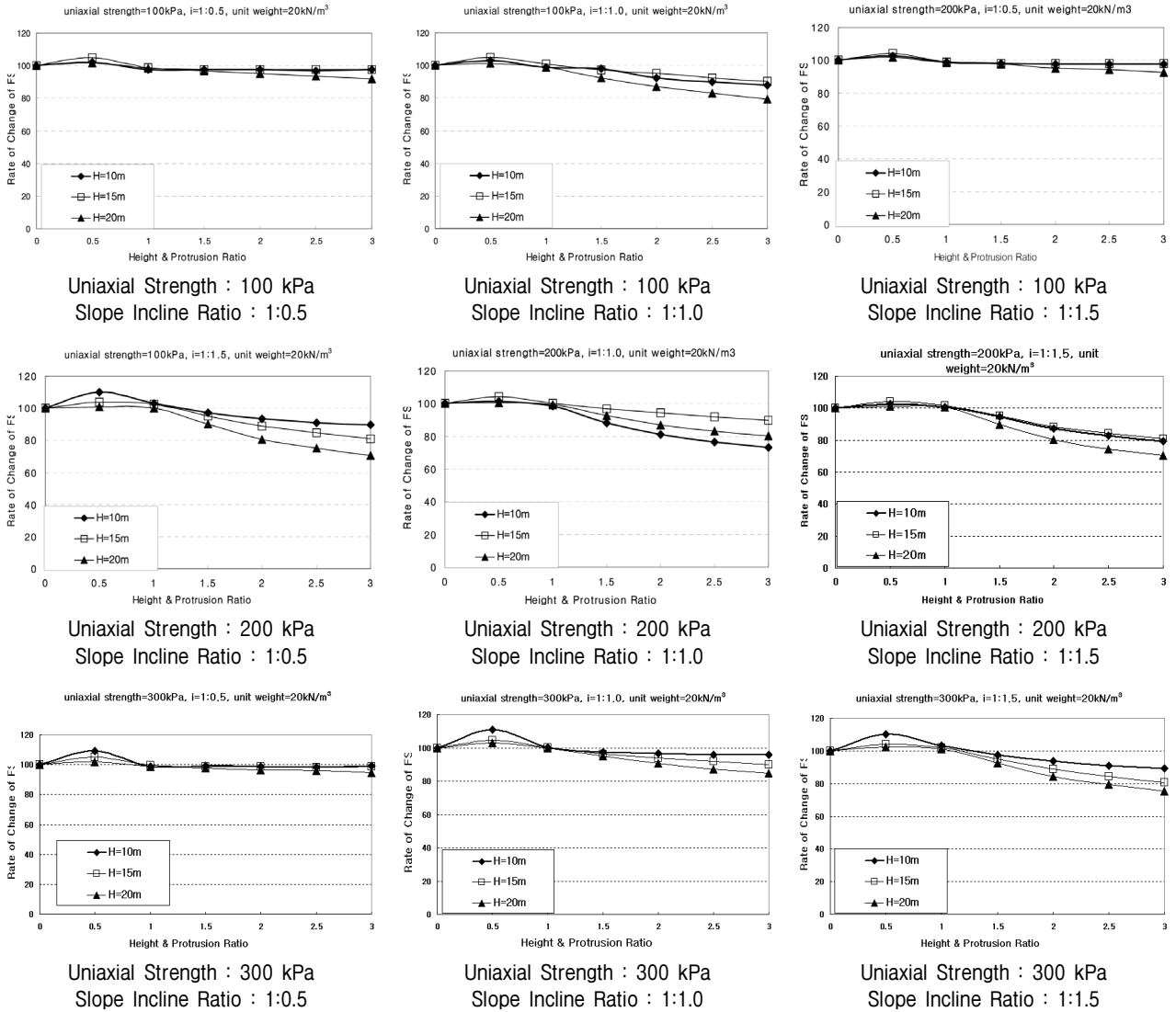


Fig. 5. Factor of safety changes of the slope according to the protruding ratio and the slope angle

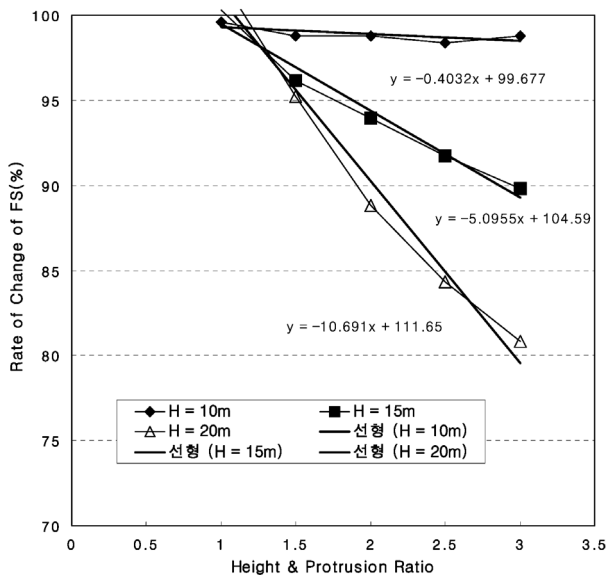


Fig. 6. Relationship between FS and (L/H)

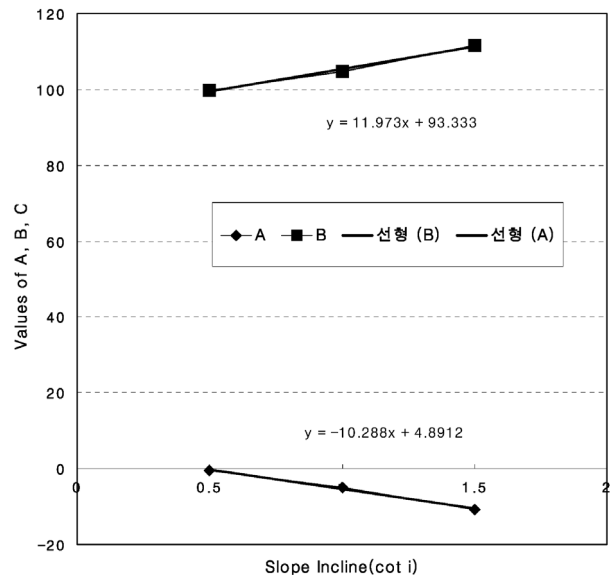


Fig. 7. Relationship between Coefficients in eq 1 and Slope Incline

$$\alpha = A(L/H) + B \quad (2)$$

여기서, A, B : 계수함수

A, B 를 사면경사(i)를 변수로 선형 회귀분석하면 식 (2)는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = (a_1 \cot i + b_1)(L/H) + (a_2 \cot i + b_2) \quad (3)$$

식 (3)에서 계수 a_i 와 b_i 를 사면높이(H) 선형 회귀분석(식 (4), (5))하면 식 (3)은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$a_i = a_{i1}H + a_{i2} \quad (4)$$

$$b_i = b_{i1}H + b_{i2} \quad (5)$$

$$\alpha = (a_{11} \cot i + b_{11})L + (a_{12} \cot i + b_{12})(L/H) + (a_{21} \cot i + b_{21})H + (a_{22} \cot i + b_{22}) \quad (6)$$

식 (6)의 각 계수를 암반의 일축압축강도(σ_c , 단위 : kPa)로 나타내면 식 (7), (8)과 같다.

$$\begin{cases} a_{11} = 0.00004\sigma_c^2 + 0.012\sigma_c - 0.588 \\ a_{12} = 0.0008\sigma_c^2 - 0.1851\sigma_c - 1.053 \\ a_{21} = 0.00003\sigma_c^2 + 0.0068\sigma_c + 0.08 \\ a_{22} = 0.0013\sigma_c^2 - 0.3883\sigma_c - 3.946 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} b_{11} = 0.00003\sigma_c^2 - 0.0137\sigma_c + 1.424 \\ b_{12} = 0.0005\sigma_c^2 + 0.1933\sigma_c - 7.165 \\ b_{21} = -0.00008\sigma_c^2 + 0.0374\sigma_c - 3.6742 \\ b_{22} = 0.0057\sigma_c^2 - 1.9597\sigma_c + 165.03 \end{cases} \quad (8)$$

5. 결론

본 연구는 암반사면의 3차원 형상을 고려한 안전율 변화에 대한 기초연구로 본 논문에서는 전단강도 감소 기법을 이용하여 사면의 돌출길이비에 따른 안전율의 변화에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 연구된 바는 아래와 같다.

(1) 사면의 돌출길이가 증가할수록 사면의 파괴형태는 전체사면파괴 → 돌출부 사면파괴 → 돌출부 측면

파괴의 순으로 나타난다.

(2) 사면의 돌출길이가 사면 높이보다 작을 경우 3차원 해석시 안전율이 증가한다. 이는 전체사면파괴에서 돌출되지 않은 사면만큼 지반의 자중이 감소했기 때문이다.

(3) 사면의 돌출길이가 사면 높이보다 클 경우 사면의 안전율이 하락하며 그 크기는 지반의 강도보다 사면의 기하학적 형상에 더 크게 영향을 받으며 최대 25%의 안전율 하락이 나타났다.

(4) 사면의 돌출길이비(L/H)에 따른 사면 안전율의 변화는 사면이 완만할수록, 사면높이가 증가할수록 하락폭이 크다.

참고문헌 (References)

1. Bishop, A. W. (1955), The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, Institution of Civil Engineers.
2. Cala, M. and Flisiak, J. (2001), "Slope Stability Analysis with FLAC and Limit Equilibrium Methods", In *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics-2001*, Proceedings of the 2nd International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Ecully-Lyon, France, pp.113-114.
3. Chen, Z., Mi, H., Zhang, F., and Wang, X. (2003), "A Simplified Method for 3D Slope Stability Analysis", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, No.3, pp.675-683.
4. Dawson, E. M. and Roth, W. H. (1999), "Slope Stability Analysis with FLAC", In *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Minneapolis, Minnesota, pp.3-9.
5. Duncan, J. M. (1996), "State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-element Analysis of Slopes", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.7, pp.577-596.
6. Fellenius, W. (1927), *Erdstatische Berechnungen*, Revised Edition, W. Ernst u. Sons.
7. Griffiths, D.V. G.L. and Lane, P.A. (1999), "Slope Stability Analysis by Finite Elements", *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.387-403.
8. Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjaernsli, B. (1956), "Soil Mechanics Applied to Some Engineering Problems", *Norwegian Geotechnical Institute*, Publication, 16.
9. Jiang, G. L. and Magnan, J. P. (1997), "Stability Analysis of Embankments: Comparison of Limit Analysis with Method of Slices", *Geotechnique*, Vol.47, No.4, pp.857-872.
10. Lam, L. and Fredlund, D. G. (1993), "A General Limit Equilibrium Model for Three-dimensional Slope Stability Analysis", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30, No.6, pp.905-919.

Received : November 20th, 2014

Revised : January 12th, 2015

Accepted : January 19th, 2015