

절리 암반사면에서의 인자효과에 의한 유한요소 해석의 타당성 검토

A Parametric Study for Jointed Rock Slope Using FEM

이진아¹ Lee, Jin-A
정창희² Chung, Chang-Hee
천병식³ Chun, Byung-Sik

Abstract

Though the stability analysis of soil slopes widely employs the limit equilibrium method, the study on the jointed rock slopes must consider the direction of joint and the characteristics of joint at the same time. This study analyzes the result of the change in the factors which show the characteristics of discontinuity and the shape factor of rock slopes, and so on, in an attempt to validate the propriety as to the interpretation of jointed rock slope stability which uses the general finite element program. First, the difference depending on the flow rules was compared, and the factor effect study was conducted. The selected independent variables included the direction of joint which displays the mechanical characteristics of discontinuity, adhesive cohesion, friction angle, the inclination and height of rock slope which reveal the shape of slope and surcharge load. And the horizontal displacement was numerically interpreted at the 1/3 point below the slope, a dependent variable, to compare the relative degree of factor effects. The findings of study on factor effects led to the validation that the result of horizontal displacement for each factor satisfied various engineering characteristics, making it possible to be applied to stability interpretation of jointed rock slope. A modelling is possible, which considers the application of the result of real geotechnical surveys & laboratory studies and the non-linear characteristics when designing the rock slope. In addition, the stress change which may result from the natural disaster, such as precipitation, and the construction, can be expressed. Furthermore, as the complicated rock condition and the ground supporting effect can be considered through FEM, it is considered to be very useful in making an engineering decision on the cut-slope, reinforcement and so on.

요 지

토사사면의 안정성 해석에는 한계평형법이 널리 사용되고 있으나 절리가 발달한 암반사면의 파괴는 절리의 방향성과 파괴특성이 동시에 고려되어야 한다. 본 연구에서는 불연속면의 특성을 나타내는 인자와 암반사면의 형상 인자 등의 변화에 따른 결과를 분석하여, 범용 유한요소프로그램을 이용한 절리암반사면 안정해석의 타당성을 검증해 보고자 한다. 우선 흐름 법칙에 따른 차이를 비교하였으며, 인자효과 연구를 수행하였다. 독립변수로는 불연속면의 역학적 특성을 나타내는 절리면의 경사각과 점착력, 마찰각, 사면형상을 나타내는 암반사면의 경사와 높이 그리고 상재하중을 선택하였다. 그리고 종속변수로서 사면 아래에서 1/3 지점에서의 수평변위를 수치 해석하여 인자효과와의 상대적인 크기를 비교해 보았다. 인자효과 연구를 통하여 각 인자에 대한 수평변위의 결과가 다양한 공학적 특성을 만족하여 절리암반사면의 안정해석에 응용이 가능함을 증명하였다. 암반사면의 설계 시 실제 지반조사와 실내실험 결과적용과 비선형성을 고려한 모델링이 가능하며, 강우와 같은 자연재해와 시공 중에 일어날 수 있는 응력변화 또한 표현할 수 있다. 또한, 유한요소해석을 통해 복잡한 암반구성조건과 지반 보강의 효과도 고려할 수 있으므로 절취경사, 보강 등에 대한 공학적인 결정시에 매우 유용할 것으로 사료된다.

Keywords : FEM, Jointed Rock, Jointed Rock Slope, Parametric Study

1 정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.)

3 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하길: 회원은 2007년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

암반 사면의 수치해석은 절토나 성토 등에 의해 지반의 응력변화가 발생하였을 경우, 사면의 변위 거동 및 보강재에 미치는 영향을 검토하기 위해 수행되어진다. 대상 암반을 불연속체로서 취급하는 방법으로 강체 스프링 모델(RNSM), 개별요소법(DEM), 불연속변형법(DDA) 등이 있으며, 대상 암반을 연속체로서 취급하는 방법으로 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM) 등이 있다.

개별요소법에서는 암반을 절리에 의해 형성되는 암석블록의 집합체로 보고 블록간의 접촉력을 계산하여 가속도를 구하고, 이로부터 블록들의 속도, 변위 및 회전 등을 계산한다. Itasca의 Cundall은 개별요소법에 근거한 해석용 소프트웨어인 UDEC(1996)을 개발하였다. 또한 박연준과 유광호(1998)는 비등방 탄소성 모델(편재절리모델)을 사용하여 2조의 절리군을 가진 암반사면의 안전율을 계산하고, 등가의 물성을 가진 토사사면에 대한 해석결과와 비교하였다. 그러나 편재절리모델은 절리간격, 절리길이를 고려할 수 없어 개별절리를 효과적으로 고려하지 못한다.

Berkeley의 Shi & Goodman(1984)은 블록이론(block theory)으로 이용하여 DDA의 역해석 모델을 처음으로 발표하였다. 이 모델을 이용하면 블록시스템의 변형과 변위를 여러 축점에서 측정된 변형과 변위 데이터로부터 계산할 수 있다. 따라서 절리암반사면의 안정한 정도는 판단 가능하나, 안전율은 주지 못하는 단점이 있다.

유한요소법과 유한차분법은 구조, 수리, 지반분야에 널리 사용되어 왔으나, 사면의 안정해석에 있어서는 제한적으로 사용되어졌다. 가장 큰 이유는 유한요소 해석으로는 사면의 파괴 여부 및 활동 양태를 살펴볼 수는 있으나 안전율을 구할 수 없기 때문이었다. 지반의 실제 전단강도를 사면의 파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다. 이러한 전단강도 감소기법은 임계파괴면의 기하학적 형태를 사전에 가정할 필요가 없으며, 만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 연상흐름법칙이 적용될 경우, 전단강도 감소기법으로 구해진 안전율은 절편법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성정수나 초기응력, 혹은 응력경로와 무관하다(Dawson 등, 1999).

유한요소법은 하나의 해석대상을 다양한 모양의 유

한한 요소로 나누어야 하며, 필요에 따라서 요소의 모양을 정의할 수 있다. 불규칙한 형태의 대상도 쉽게 모델화 할 수 있고, 다양한 종류의 하중조건을 쉽게 다룰 수 있다. 또한 각각의 요소에 대해 서로 다른 방정식으로 문제를 풀기 때문에 다른 물질로 구성된 물체를 모델링하기 편리하다. 터널 등 지하구조물 설계를 위하여 많이 사용되고 있으나, 암반사면에서의 적용은 아직 실용화 되지 못하고 있다.

이동엽 등(2003)은 토사사면에 대하여 전단강도 감소기법에 근거한 유한요소해석기법과 한계평형법의 비교 연구를 수행하였다. 균질사면과 다층토사면에 대한 유한요소해석기법에 의한 사면안정해석을 통하여 한계평형법으로 해결할 수 없는 부분을 보완하는 많은 장점을 지니고 있음을 확인하였다. 또한 사면의 안전율 평가는 해석기법의 정확성과 모델링 방법, 구성법칙, 흐름법칙 등에 의해 상당한 영향을 받음을 확인하였다.

암반사면은 토사사면과 달리, 불연속면이 존재하므로 전단강도 감소기법을 적용하기에는 한계가 있다. 따라서, 안전율의 개념과 유사한 지표로서 파쇄대 부근 비탈면에서의 수평변위를 사면의 안정을 판단할 수 있을 것이다. 나경웅 등(1999) 터널 시공 현장에서의 암반특성을 나타내는 인자에 대한 전단변위를 확률유한요소법으로 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 흐름법칙, 불연속면의 특성을 나타내는 인자 그리고 암반사면의 형상 인자의 변화에 따른 수평변위를 유한요소해석을 수행하여 사면안정해석의 타당성을 검토하였다.

2. 유한요소해석을 이용한 매개변수 연구

수치해석 결과로 제시되는 종속변수는 독립변수에 따라 영향을 받는다. 본 연구에서는 독립변수로 절리면의 특성을 나타내는 경사각, 점착력, 마찰각 그리고 암반사면의 경사각과 높이 그리고 상재하중을 선택하였고, 종속변수로는 파쇄대와 근접한 사면의 아래로부터 1/3 지점의 수평변위를 분석하여 인자효과의 상대적인 크기를 비교해 보았다.

2.1 해석 조건 및 모델링

본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 Bulk failure 모델을 적용하였으며, Bulk failure 모

델을 이용하여 암반의 불연속면의 방향성과 강도 감소 값을 정의하여 절리를 연속체로서 단순화하여 표현 할 수 있었다. 해석대상 사면의 높이는(H) 70m로 하고 사면의 경사각(α)은 60도(그림 1)로 구성하였고 적용된 요소망은 그림 2와 같으며 해석대상지반의 역학적 특성은 표 1과 같다. 전체 요소를 하나의 암반으로 간주하여 역학적 특성을 가정하였으며, 암반사면은 2개의 경사가 다른 불연속면을 포함하고 있다고 가정하였다. 또한 저항력을 감소하게 하는 불연속면의 간격, 거칠기, 풍화, 충전물질의 영향을 반영하기 위해 open joints에서의 Shear retention 변수를 정의하여 고려하였다.

또한 해석 시 암반사면의 역학적 특성 중 하나의 변수를 독립변수로 설정하여 해석을 반복 수행하였다. 해

석 결과가 수렴하였는지를 판단하고, 사면의 소성대와 근접하고 사면의 아래로부터 1/3 지점에서의 수평변위를 분석하여(그림 3) 인자효과의 상대적인 크기를 비교하였다. 해석 알고리즘은 그림 4와 같다.

3. 흐름법칙에 따른 영향

소성변형률 증분은 소성흐름법칙(plastic flow rule)에 의해 계산된다. 관련흐름법칙(associated flow rule)을 적용하는 경우에 수치해석 과정에서 여러 가지 편리한 점이 많지만, 암반의 탄소성 해석에 적용할 경우에는 비현실적으로 과도한 체적팽창이 발생되는 경향이 있으므로 비관련흐름법칙(nonassociated flow rule)이 권장되고

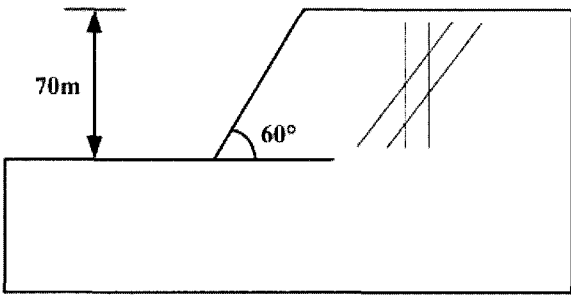


그림 1. 해석조건

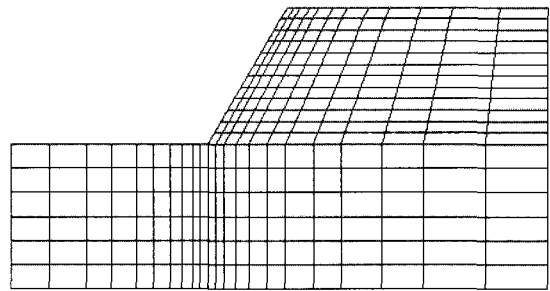


그림 2. 해석에 적용된 유한요소망

표 1. 해석대상지반의 역학적 특성

전체 암반의 특징				Joint 의 특징				사면의 형상			
E	ν	K_0	γ	점착력(d_a)	마찰각(β)	ψ_b	f_{sr}	Joint1 경사각	Joint2 경사각	경사각 (α)	높이
28GPa	0.2	1/3	2.5kN/m ³	30kPa	45°	22.5°	0.5	90°	52.5°	60°	70m

* K_0 : 초기수평응력계수

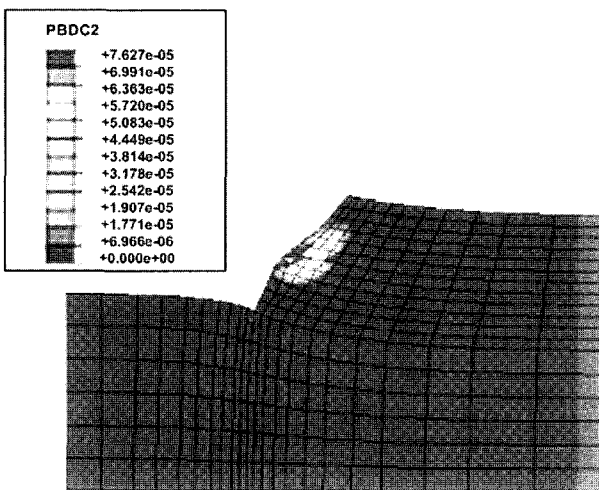


그림 3. 등가소성변형률

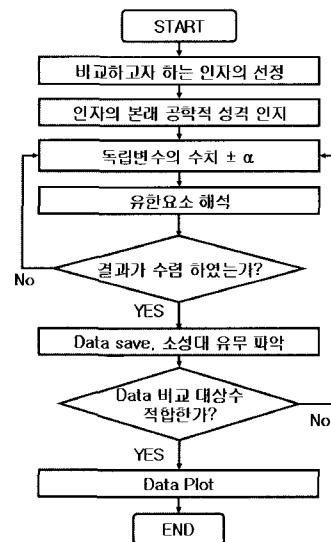


그림 4. 해석 알고리즘

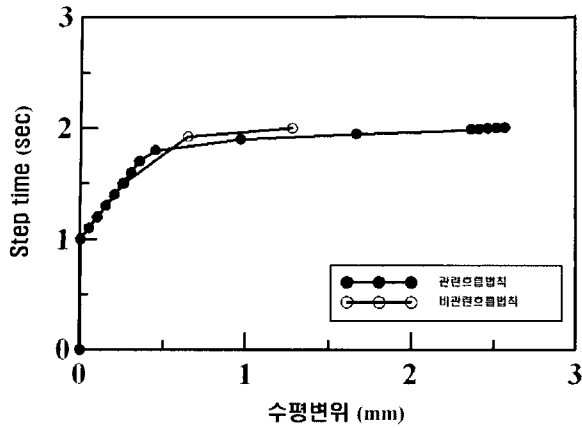


그림 5. 흐름법칙에 따른 수평변위 비교

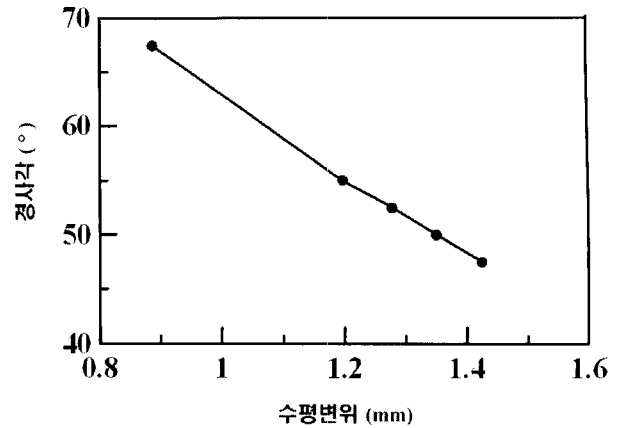


그림 7. 경사각에 의한 수평변위

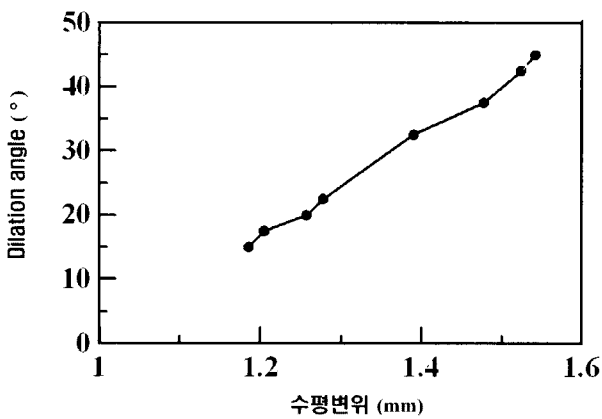


그림 6. Dilation angle(ψ_b)에 의한 변위

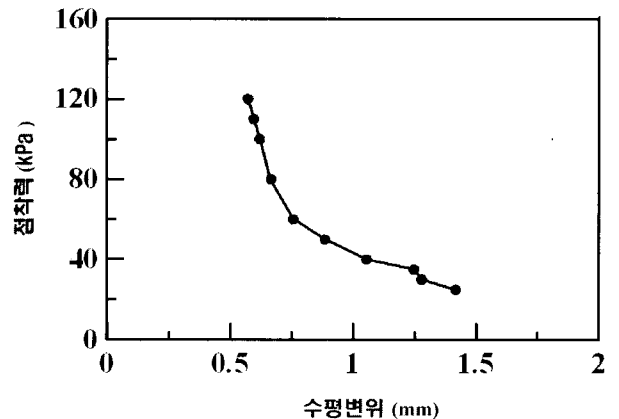


그림 8. 점착력에 의한 수평변위

있다. Bulk failure 모델에서는 절리면의 마찰각(β)과 bulk material의 dilation angle(ψ_b)의 정의로 흐름법칙을 구분하고 있는데, $\beta = \psi_b$ 이면 관련흐름법칙, $\beta \neq \psi_b$ 이면 비관련흐름법칙이 성립하게 된다. 그림 5는 관련 흐름법칙($\beta = 45^\circ$, $\psi_b = 45^\circ$)과 비관련흐름법칙($\beta = 45^\circ$, $\psi_b = 22.5^\circ$)을 적용한 결과 흐름법칙의 수평변위가 비관련흐름법칙의 수평변위보다 2배 이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 6은 $\psi_b = 15^\circ \sim 45^\circ$ 범위 안에서 해석한 결과로 ψ_b 가 클수록 변위가 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

4. 불연속면의 역학적 특성을 나타내는 인자

4.1 절리면의 경사각에 따른 영향

그림 7은 Joint1의 경사각을 90° , 연직방향으로 고정시키고 Joint2의 경사각을 $30^\circ \sim 70^\circ$ 범위에 대하여 해석하였으며, $47.5^\circ \sim 67.5^\circ$ 범위만 수렴하여 결과를 나타내

었다. 연직방향에 근접할수록 수평변위는 감소하고, 수평방향과 가까워질수록 변위가 증가하는 경향을 나타냈다.

4.3 절리면의 점착력에 따른 영향

암반의 점착력은 중요한 강도정수로서 점착력을 작게 고려하면 비경제적인 설계가 될 수 있고, 반대로 너무 크게 고려하면 안전하다는 잘못된 결과를 얻어 낼 수 있다. 그림 8은 점착력-수평변위 관계를 나타내었는데 점착력 60kPa 전후로 변위의 추세가 달라지는 것을 알 수 있다. 또한 점착력이 25kPa보다 작은데서 결과 값이 발산하는 것으로 보아 그 때의 안정성이 매우 취약함을 알 수 있다.

4.4 절리면의 마찰각에 따른 영향

그림 9는 절리면의 마찰각이 감소함에 따라 발생하는 수평변위가 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 이러한

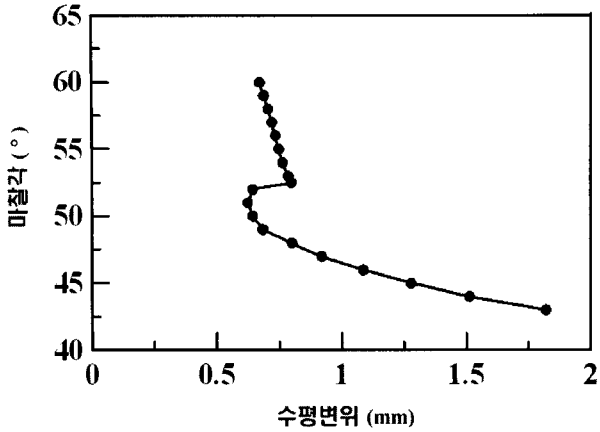


그림 9. 마찰각에 대한 수평변위

결과는 마찰각이 작아지면 전단강도가 작아져 저항력이 약해진다는 결론과 부합하는 내용이다. 한편 52.5°에서 그래프의 경향이 바뀌는 것은 Joint2의 경사각에 영향을 받는 것으로 판단되어진다.

5. 암반 사면 형상을 나타내는 인자에 의한 변화

5.1 사면 경사각에 따른 영향

그림 10은 사면 경사각이 30°~90°인 형상을 나타내

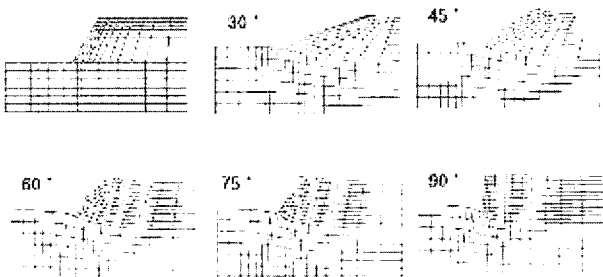


그림 10. 사면의 경사각에 따른 사면 변형 형상

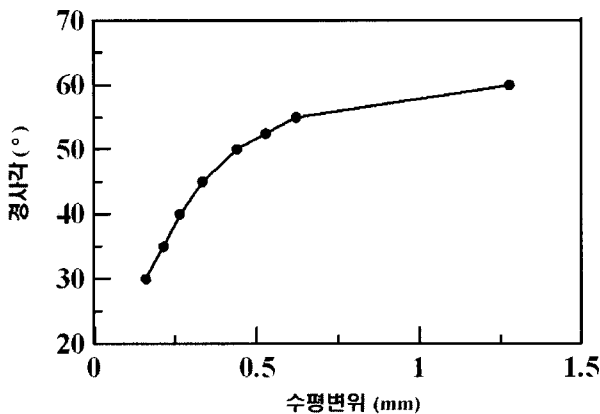


그림 11. 사면의 경사각에 의한 변위 양상

고, 그림 11는 사면의 경사각에 대한 수평변위의 경향을 나타낸 것으로서 경사가 급해짐에 따라 변위도 크게 증가함을 알 수 있고, 또한 사면의 경사가 60°이상에서는 결과 값이 발산하며 대소성 변형이 일어나는 것을 알 수 있다. 기본 모델의 경우 한계 55°이하의 경사각으로 설계하는 것이 안정하다는 결론을 얻을 수 있다.

5.2 사면 높이에 따른 영향

그림 12는 사면의 높이를 10m 단위로 증가시켜 해석한 결과를 보여주고 있는데, $h > 70m$ 에서는 발산한 것을 알 수 있고, 사면이 높아짐에 따라 점차 수평변위의 증분이 증가하는 것을 알 수 있다. 표 3은 사면의 높이에 따른 영향의 추세분석을 보여주고 있다.

5.3 상재 하중에 대한 영향

송전탑의 건설이나 교각의 시공 등과 같은 상재 하중은 사면의 안정에 영향을 줄 수 있는데 그 경우 사면의 절취경사 설계 변경이나 보강 작업이 필요하게 된다. 한편 암반사면의 상부에 일정한 압력을 가하면 전단응력이 증가하여 사면파괴에 영향을 줄 수 있다. 상재하중 20~500kPa 해석 결과, 0.00140mm/kPa로 선형적으로 증가하다가 $p > 300kPa$ 에서 발산하였는데 이를 통해 기본 모델의 사면이 상재하중 300kPa을 최대 지지할

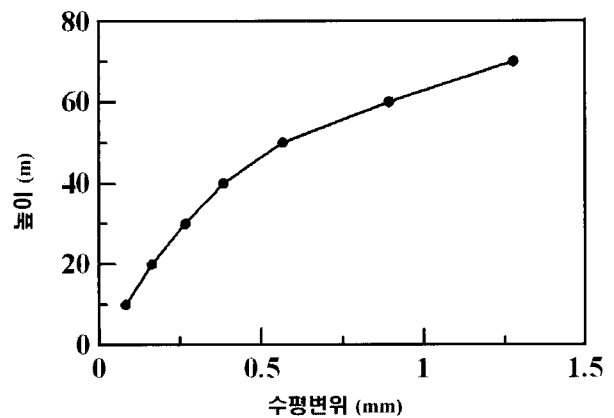


그림 12. 사면의 높이에 대한 변위

표 3. 사면 높이의 영향 추세 분석

사면의 높이	추세 분석	비 고
$10m \leq h \leq 40m$	0.0102mm / m	증분이 점점 증가
$40m \leq h \leq 50m$	0.0182mm / m	
$50m \leq h \leq 70m$	0.0357mm / m	

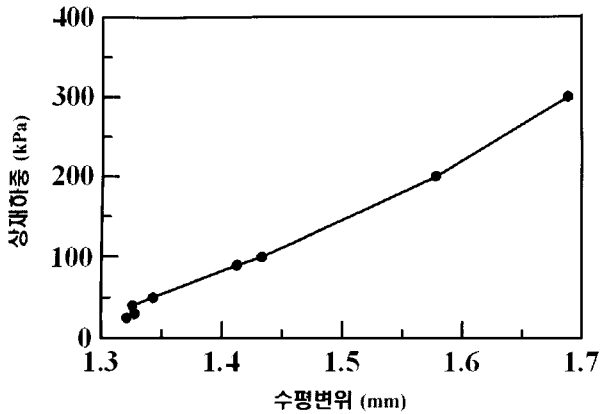


그림 13. 상재하중에 대한 변위

수 있다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 흐름법칙, 불연속면의 특성을 나타내는 인자 그리고 암반사면의 형상 인자의 변화에 따른 수평변위를 유한요소해석을 수행하여 사면해석의 타당성을 검토하였다. 또한 암반의 불연속면의 방향성과 강도 감소 값을 정의하여 절리를 연속체로서 단순화를 위해 Bulk failure 모델을 적용하였으며, 암반사면의 역학적 특성 중 하나의 변수를 독립변수로 설정하여 다양한 해석을 수행하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 불연속면의 특성을 나타내는 독립변수에 따른 종속변수인 수평변위 분석 결과, 절리면의 경사각과 마찰각이 사면의 거동에 가장 많은 영향을 미치는 인자임을 확인하였다. 또한 사면의 경사와 높이 그리고 상재하중이 커지면 사면의 수평변위가 증가하여 불안정한 사면이 되는 것으로 나타났다.
- (2) 독립변수에 따르는 종속변수의 분포를 효율적으로 파악이 가능하며, 다양한 공학적 특성을 만족시킨다는 것을 증명하였다. 또한 암반사면의 설계 시 실제 자연현상과 가까운 모델링이 가능하여 암반사면의 절리특성을 고려한 안정 평가에 사용 가능할 것

으로 판단된다.

- (3) 본 연구에서는 사면을 단순화하여 모델화 하였으므로, 여러 다른 인자의 영향에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며 수치해석에 의한 결과와 실제 사면의 거동과의 비교연구를 통해서 절리와 형상에 따른 암반사면의 절취경사, 보강 등에 대한 자료로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 나경웅, 김상호 (1999), “적응적 중요표본추출기법에 의한 지하구조체의 확률유한요소해석”, *대한토목학회 논문집*, Vol.19, No.1, pp.943-950.
2. 박연준, 유광호 (1998), “편재절리모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석”, *터널과 지하공간* 한국암반공학회, Vol.8, pp.287-295.
3. 양형식, 장명환 (2002), *암석과파이론* 전남대학교 출판부, pp.111-149.
4. 유광호, 박연준 (2001), “개별요소법에 의한 절리암반사면의 안전율 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제 17권 4호, pp.241-247.
5. 이송, 이규환, 채점식 (2002), *사면의 설계와 시공*, 예문사, pp.12-37, 103-112.
6. 이수형, 황성근, 사공명, 김현기 (2005), “철도연변 절취 토사사면에 대한 강우에 의한 침투를 고려한 사면안정해석법의 적용성 평가”, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권 6호, pp.137-146.
7. Dawson, E. M., Roth, W. H., and Drescher, A. (1999), “Slope stability analysis by strength reduction”, *Geotechnique*, Vol.49, No.6, pp.835-840.
8. Drucker, D. C., and W. Prager (1952), “Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design”, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol.10, pp.157-165.
9. Neylor, D. J. (1982), “Finite elements and slope stability”, Numer. Meth. in Geomech., Proc. NATO Advanced Study Institute. Lisbon, Portugal, pp.229-244.
10. Shi, G.h. and Goodman, R.E. (1984), “Discontinuous deformation analysis”, *Proc. 25th U.S. Symp. Rock Mech.*, Evanston, III, USA.
11. Ugai, K. (1989), “A method of calculation Description of Jointed Media”, *Technical Report SAND81-2615*, Sandia National Laboratories, Albuquerque.
12. Ugai, K. and Leshchinsky, D. (1995), “Three-dimensional limit equilibrium and finite element analysis : a comparison of results”, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.4, pp.1-7.
13. Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C., and Lewis, R. W. (1975), “Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics”, *Geotechnique*, Vol.25, No.4, pp.671-689.

(접수일자 2006. 12. 29, 심사완료일 2007. 6. 4)