

절리 특성을 고려한 암반사면의 절취경사 기준 설정에 관한 연구

A study of the gradient establishment for Rock slope considering joints characteristics.

이수곤¹⁾, Su-Gon Lee, 김부성²⁾, Boo-Sung Kim

¹⁾서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul.

²⁾서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul.

SYNOPSIS : The percentage of a mountainous district in our country is comparatively high but the concern for rock mass has been disregarded for a long time. Especially for rock slope, the most important factors are geometric characteristics and their shear strength parameter. In this paper, parametric studies are performed using the distinct element computer program UDEC-BB for rock slopes. Parameters adopted in this paper are joint angle, spacing, persistence, aperture and shear strength parameters (JRC, JCS, basic friction angle). To estimate slope stability, shear strength reduction method is used. The most important factors affecting rock slope stability are joint angle and spacing. The relationship between average displacement calculated by UDEC-BB and safe factor by shear strength reduction method is researched.

Key words : rock slope, shear strength parameter, BB-joint model, UDEC, joint characteristics

1. 서 론

일반적으로 사면의 안정성을 해석함에 있어서 현지 응력 조건은 실측 자료가 없는 경우 자중과 poisson 효과를 고려하여 적용하는 것이 일반적이다. 사면의 수직고가 100m 인 경우 최대 수직 응력은 3Mpa을 넘지 않는다. 건설교통부 표준 품셈에서 연암의 기준이 되는 암석의 일축압축강도는 70-100MPa의 범위이며, 이 경우 최대 현지응력에 대한 암석의 거동은 탄성범위 내에 들게 된다. 따라서, 암반사면의 경우 무결암(intact rock)의 거동은 주요한 인자가 아니라고 할 수 있다. Hoek 등(1981)은 암반사면의 안정성을 해석함에 있어 고려해야할 가장 중요한 요소를 절리 등에 의해 생성되는 사면을 구성하는 암반의 기하학적 형상과 불연속면의 전단강도로 보았다. 이는 기하학적 형상과 불연속면 및 사면의 주향과 경사의 관계로부터 사면의 어느 부분이 슬라이딩 또는 낙석이 발생할 위험이 있는지를 예측할 수 있으며, 불연속면의 전단강도를 산정 하여 위험 가능 블록의 안정성을 한계 평형법을 적용하여 판단할 수 있기 때문이다.

본 연구는 연암 이상의 강도를 갖는 암반사면을 대상으로 하여, 사면의 거동에 있어 가장 중요한 인자인 절리 특성의 변화에 따른 암반사면의 거동을 분석하고 각 절리 특성이 미치는 영향을 파악하였다. 사면의 해석에 사용한 프로그램은 개별요소법을 적용한 범용지반해석프로그램인 UDEC ver. 3.10을 사용하였으며 절리 구성 모델로는 Barton-Bandis joint model을 적용하였다. UDEC 해석결과가 변위와 불

평형력등 해석자의 주관적인 판단에 따라 안정성 여부의 판단이 달라질 수 있으므로 전단강도감소 기법을 적용하여 trial and error를 통하여 정량적인 안전율을 산정 하고자 하였다. 또한 각 절리 특성의 영향을 수준별로 균형 있게 판단하기 위해 인자배열법의 하나인 직교배열법을 적용하였다.

이러한 결과로부터, 절리특성을 고려한 암반사면의 일차적인 절취경사의 설정에 대한 참고자료로 활용할 수 있는 기준을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 인자의 선정과 수준

본 연구에서 고려한 인자는 사면의 절취 경사, 절리의 경사, 절리의 간격(vertical spacing), 절리의 간극(aperture), 연장성(persistence), 거칠기(joint roughness, JRC), 벽면강도(joint wall compressive strength, JCS), 기본마찰각(basic friction angle or residual friction angle)의 8가지이며, 각 인자별로 5가지로 수준을 나누었으며 선정한 영향인자와 각 수준은 표.1과 같다. 사면의 경사는 현재 도로 절취 사면에 일반적으로 적용되는 절취 구배에 따라서 구분하였다. 절리 경사의 경우, 0° ~120° 는 10° 간격으로 나누었다. 절리 간격, 간극, 연장성은 국제 암반역학회(ISRM)에서 제안한 ‘암반불연속면의 정량적 기재에 대한 지침(1981)’을 기준으로 각 5등급으로 나누었으며, JRC와 JCS 및 잔류마찰각은 등간격으로 구분하였다.

표 1. 인자 수준

| 인자 수준 | 사면 경사 (°) | 절리 경사 (°) | 절리 경사 (°) | 절리 경사 (°) | 절리간 격 (m) | 절리간 극 (mm) | 연장성 (m) | JRC | JCS (MPa) | 잔류마찰 각(°) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------|-----|--------------|--------------|
| level 1 | 73 | 0 | 10 | 20 | 0.2 | 0 | 50 | 0 | 20 | 15 |
| level 2 | 63 | 30 | 40 | 50 | 0.5 | 5 | 20 | 5 | 40 | 20 |
| level 3 | 55 | 60 | 70 | 80 | 1 | 10 | 10 | 10 | 60 | 25 |
| level 4 | 45 | 90 | 100 | 110 | 3 | 50 | 6 | 15 | 80 | 30 |
| level 5 | 40 | 120 | 140 | 170 | 6 | 100 | 3 | 20 | 100 | 35 |

2.2 인자의 배열

인자 효과를 파악하기 위한 방법으로 다른 인자들은 고정하고 파악하고자 하는 인자만을 변화시켜서 실험을 수행하거나 모든 인자의 조합에 대해 실험을 수행하는 것이 일반적이다. 그러나 이와 같은 경우 실험의 수가 많아지는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 직교배열을 적용하였다. 직교배열은 각 인자간의 균형적인 배열을 통해 실험의 수를 최소화하고 효과적으로 인자효과를 파악할 수 있는 방법이다.(김남수 등,2000) 본 연구에서는 $L_{125}(5^{31})$ 직교 배열을 만들어 사용하였으며, 임의의 두 열간의 균형성을 확인하였다. 표. 2는 2수준을 갖는 7가지의 인자에 대한 직교 배열의 예이다. 위의 배열에서 임의의 두열을 살펴보면 모든 조합이 존재하고 각각의 조합이 같은 수만큼 존재함을 알 수 있다.

표 2. 직교배열의 예

| | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

2.3 UDEC 해석

해석에 사용한 프로그램은 UDEC ver 3.10로써 불연속면의 거동을 보다 현실적으로 나타낼 수 있는 것으로 알려진 Barton-Bandis 모델을 적용하여 해석을 수행하였다.(Barton, etc, 1990. 최성웅 등, 1999) 또한, 본 연구의 목적이 불연속면의 특성의 변화에 따른 사면 거동 분석이기 때문에 블록은 강성블록으로 간주하여 블록의 변형은 고려하지 않았다. 현지응력 조건은 자중에 의한 수직 응력과 Poisson 효과에 의한 수평응력만을 고려하였다. 해석을 통해, 모델 전체의 불평형력과 변위 및 속도벡터를 기록하였으며 사면 법면 상단과 중앙부 및 하단의 3곳을 측정점으로 하여 각 지점의 개별 거동을 기록하였다. Barton-Bandis 절리 모델은 다음 식 (1)과 같다. 식 (2)와 (3)은 실내 실험과 현장의 절리면의 길이에 대한 치수효과를 고려한 경험식이다. (Bandis. S, 1981)

$$\tau = \sigma_n \tan [JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r] \quad (1)$$

여기서 σ_n : 절리면에 작용하는 수직응력(MPa)

JRC : 절리면 거칠기 계수

JCS : 절리면 벽면강도 (MPa)

ϕ_r : 잔류 마찰각 (degrees)

$$JRC_n = JRC_0 \left[\frac{L_n}{L_0} \right]^{-0.02JRC_0} \quad (2)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left[\frac{L_n}{L_0} \right]^{-0.03JRC_0} \quad (3)$$

여기서 첨자 n은 현장에서의 값을 의미하며 0는 길이 10cm의 시료에 대해 실내에서 산정된 값을 의미한다.

2.4 UDEC 해석 결과

UDEC 해석의 결과 주로 관찰되는 사면 거동 양상은 슬라이딩이었으며, 절리의 간격이 좁은 경우에는 토사사면에서 주로 관찰되는 원호파괴의 양상이 나타났다. 암반사면의 주된 파괴 양상인 썩기 파괴의 경우 UDEC 프로그램이 2차원 해석에 적용되는 프로그램이기 때문으로 관찰되지 않았다.

일반적으로 보면 절리의 간격이 좁은 경우와 그 연장성이 긴 경우에 변위의 발생이 많았으며, 이러한 경우 주로 관찰되는 거동은 원호파괴의 형태이었다. 반면에, 절리의 간격이 넓고 순방향절리가 분포하

고 그 연장성이 긴 경우에는 주절리면을 따라서 발생하는 슬라이딩형태의 변형이 관측되었다. 이러한 경우는, 주 절리면의 마찰각에 따라서 변위의 양이 다름을 보이고 있다. 각 절리특성의 수준별 변화에 따라 발생하는 x 방향 평균변위의 변화양상은 다음과 같다.

절리의 경사의 변화에 따른 변위의 변화 양상은 아래 그림 5과 같다. 그림에서 보듯이 절리의 경사가 일반적인 암반 절리의 마찰각보다 큰 $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 사이에서 변위가 많이 발생함을 보이며, 전도파괴의 일반적인 경사각인 $100^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 사이에서 변위가 증가함을 보이고 있으며 그림 1와 같다.

절리의 간격의 변화에 따른 변위의 변화 양상은 아래 그림 6과 같다. 간격이 간격 1m를 기준으로 해서 1m 이하의 간격에서는 변위가 많이 발생하고 3m이상의 절리 간격에서는 비교적 작은 변위가 발생함을 보인다. 따라서, 절리의 간격이 좁은 경우에 사면에 변위가 많이 발생하는 경향을 보이고 있으며 그림 2과 같다.

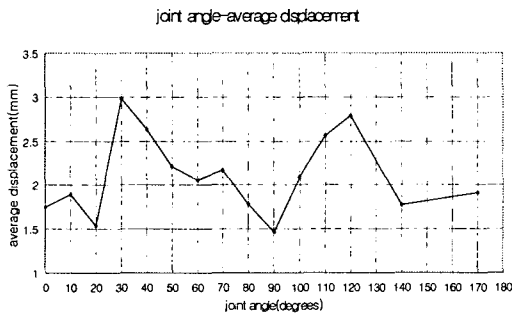


그림 1 절리 경사와 평균변위의 관계

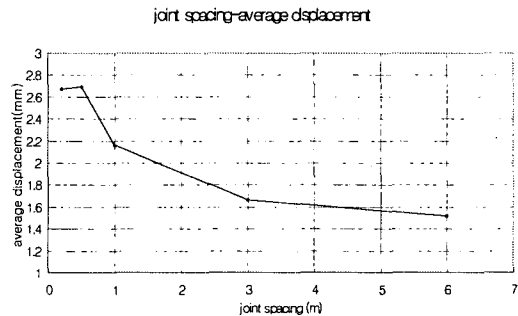


그림 2 절리 간격과 평균변위의 관계

잔류 마찰각의 변화에 따른 변위의 변화 양상은 아래 그림 3 과 같으며 잔류마찰각이 증가 할수록 변위의 발생이 적음을 보인다.

사면의 경사에 따른 변위의 변화 양상은 아래 그림 4와 같다. 사면의 절취경사가 클수록 변위는 증가함을 보인다. 표준 절취 구배의 하나인 1:0.3 (73°)의 경우 가장 많은 변위가 발생하였고, 1:0.7(55°)이하의 절취 경사에서는 변위가 감소하기는 하지만 그 차이가 크지 않은 경향을 보이고 있다.

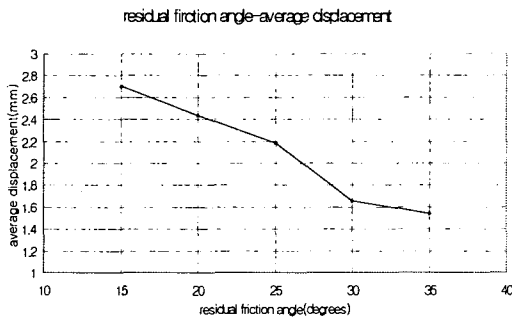


그림 3 잔류마찰각과 평균변위의 관계

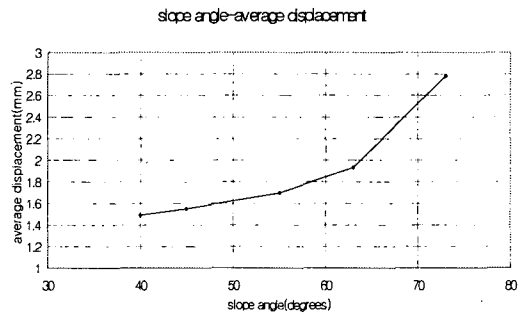


그림 4 사면 절취경사와 평균변위의 관계

JCS의 변화에 따른 변위의 변화 양상은 아래 그림 5와 같다. 절리면에 풍화가 발달한 경우로 산정한 20MPa~40MPa의 경우 변위가 많이 발생하며, 상대적으로 신선한 절리면을 산정한 60MPa 이상의 경우 변위의 발생이 적음을 보인다. 또한 60MPa이상의 경우 값의 변동이 크지 상대적으로 적게 나타난다. 이는 사면에 작용하는 응력이 상대적으로 작기 때문으로 보인다. 절리의 연장성의 변화에 따른 변위의 변화 양상은 아래 그림 6과 같다. 절리의 연장성이 짧은 경우에는 사면의 거동에 미치는 영향이 적음을 보이고 있다.

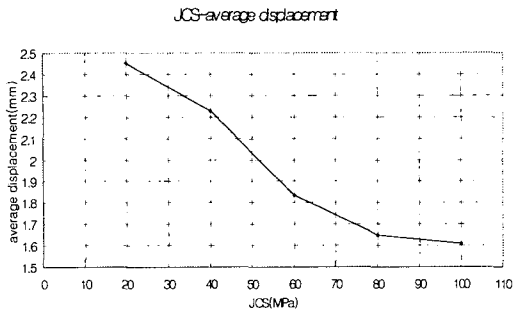


그림 5 JCS와 평균변위의 관계

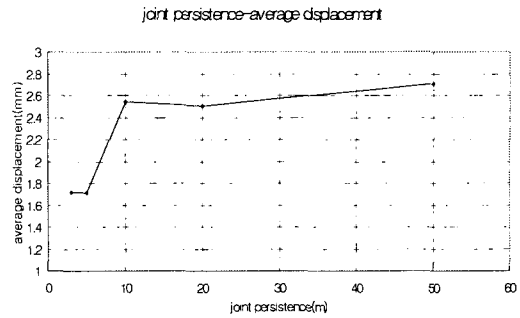


그림 6 절리연장성과 평균변위의 관계

JRC의 변화에 따른 변위의 변화 양상은 아래 그림 7과 같다. 아래 그림에서 보면 JRC가 증가함에 따라서 변위가 많이 발생함을 보이며 이는 B-B절리 모델의 scale effect에 의한 것으로 판단된다. 사면의 높이의 변화에 따른 변위의 변화는 사면의 높이가 증가할수록 변위의 발생이 증가하는 경향을 보이고 있으며 그림 8과 같다.

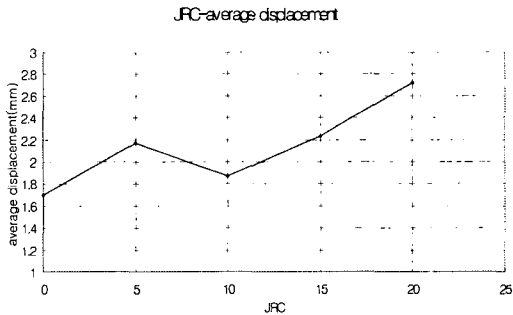


그림 7 JRC와 평균변위의 관계

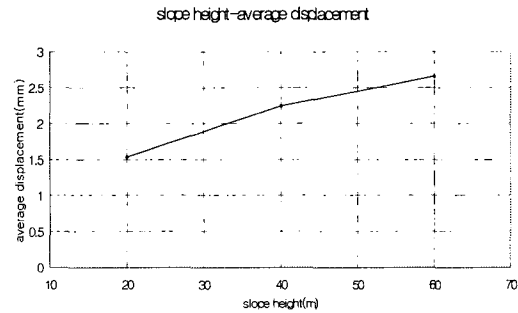


그림 8 사면 높이와 평균변위의 관계

그림 9는 지하수위비와 평균변위의 관계를 나타낸 그림으로써, 지하수위비를 사면의 높이에 대한 지하수위의 높이와의 비로 정의하였다. 지하수위가 높아질수록 사면의 변위가 증가하는 경향을 보이고 있다.

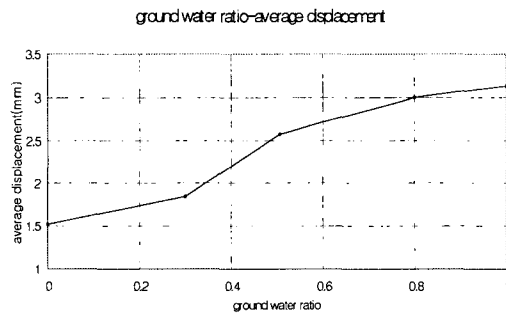


그림 9 지하수위 비와 평균변위의 관계

2.5 안정성 판단

UDEC 해석의 결과는 변위와 불평형력 등으로 표현되어 해석자의 주관적인 판단에 따라서 안정성을 판단하게 된다는 단점이 있다. 본 연구에서는 전단강도 감소 기법을 적용하여 UDEC의 결과에 대한 정

량적인 안전율을 결정하고자 하였다.

사면이나 독, 제방 등에 있어서 안전율을 ‘파괴를 막을 수 있는 최소 전단 강도와 실제 지반의 전단강도와의 비’ 라고 정의 된다.(Bishop, 1955)

즉 안전율을 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 사면이 붕괴 될 때의 가상 지반 강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율은 지반의 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다. 이러한 개념을 적용하는 구체적인 방법은 Dawson 등(1999) 및 박연준 등(1998)에 의해 소개된 바 있다. 본 연구에서는 각 가상의 안전율에 대한 가상 전단강도에 대한 모델의 수렴여부를 최대불평형력의 0.1%로 불평형력(unbalance force)이 수렴할때를 기준으로 하였다.(Itasca Consulting Group, 2000) 각 단계의 가상 안전율에 의한 가상의 전단 강도 정수를 할당하여, 위의 기준으로 수렴하면 안전한 것으로 그렇지 않으면 불안정한 것으로 판단하였다.

2.6 절취경사 설정 기준

해석의 결과를 분석하기 위한 분산 분석을 직교배열법을 적용한 설계법의 하나인 강건설계법의 과정을 따라 x 방향 평균 변위의 전체 평균과 각 인자의 평균으로부터 분산분석을 수행하였다.(김성호 등, 1992) 분산 분석의 결과는 표 3과 같다.

표3. 분산분석 결과

| factor | mean of square | 기여도(%) |
|----------|----------------|--------|
| 사면높이 | 141.3 | 14.3 |
| 사면경사 | 63.5 | 6.4 |
| 절리경사 | 214.8 | 21.7 |
| 간격 | 212.0 | 21.5 |
| 연장성 | 64.0 | 6.5 |
| JCS | 78.3 | 7.9 |
| ϕ_r | 96.9 | 9.8 |
| 지하수 | 117.1 | 11.8 |

위의 분산분석의 결과를 기준으로 하여 각 인자의 수준별 배점을 부여하였으며, trial and error를 통해 배점을 변화시키면서 안전율과 총점이 상관성을 갖도록 정하였다. 그 결과 다음 그림10와 같은 관계를 얻었으며 각 인자별 배점은 표4와 같다.

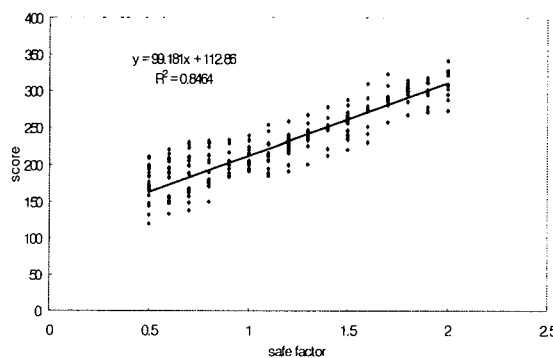


그림 10 안전율과 총점의 관계

표 4. 인자 수준별 배점(안)

| factor | level of factor | score | factor | level of factor | score | |
|-------------|-----------------|-------|-----------|-----------------|-------|---|
| 사면의높이 | 20m | 30 | 절리경사(°) | 0 | 30 | |
| | 40m | 20 | | 10 | 26 | |
| | 60m | 10 | | 20 | 20 | |
| 지하수위비 | 0 | 30 | | 30 | 10 | |
| | 0.3 | 22 | | 40 | 7 | |
| | 0.5 | 15 | | 50 | 5 | |
| | 0.8 | 8 | | 60 | 10 | |
| | 1.0 | 5 | | 70 | 10 | |
| 사면의 경사 | 1:1.2 | 30 | | 80 | 15 | |
| | 1:1 | 27 | | 90 | 20 | |
| | 1:0.7 | 22 | | 100 | 15 | |
| | 1:0.5 | 12 | | 110 | 10 | |
| | 1:0.3 | 5 | | 120 | 8 | |
| | | | | 140 | 20 | |
| | | | | 170 | 30 | |
| 잔류마찰각 (°) | 15 | 2 | | JCS(MPa) | 20 | 3 |
| | 20 | 4 | | | 40 | 6 |
| | 25 | 5 | 60 | | 8 | |
| | 30 | 9 | 80 | | 9 | |
| | 35 | 10 | 100 | | 10 | |
| 절리간격(m) | 0.2 | 5 | 연장성(m) | 3 | 10 | |
| | 0.5 | 5 | | 5 | 8 | |
| | 1 | 10 | | 10 | 7 | |
| | 3 | 20 | | 20 | 5 | |
| | 6 | 30 | | 50 | 4 | |

그림 10의 경우 120~340점의 분포를 보이고 있으며, 얻어진 선형회귀식에 의하면 260점이상인 경우 비교적 안전할 것으로(SF>1.5) 예상된다. 본 연구의 기본적인 가정은 사면의 단면내에 3개의 절리군이 있는 경우를 의미하며 하나의 절리군에 대해 절리군과 관련된 항목들(경사, JCS, 연장성, 간격, 마찰각)에 각 절리군별로 배점을 부여하도록 하였다.

수치해석 프로그램의 특성에 의한 오차와 절리 특성간의 교호작용 등에 의하여 선형회귀식의 데이터의 분산이 다소 크게 나타나고 있으나, 제안된 배점에 의한 판단이 절리특성을 고려한 사면의 개략적인 안정성 판단 기준으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 암반사면의 안정성에 영향을 미치는 인자로 절리 특성을 선정하고 인자에 따른 거동의 변화를 UDEC-BB를 사용하여 수치해석을 하였다. 그 결과를 분산분석을 통해 각 인자가 미치는 영향을 알아보았다. 또한 전단강도감소기법을 적용하여 정량적인 안전율을 파악하였으며, 이러한 결과를 토대로 인자수준별로 배점을 부여하여 안전율과의 관계를 알아보았다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 각 인자의 수준별 평균 변위의 비교를 통해 암반사면의 거동에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 절리의 경사와 절리의 간격임을 알 수 있었다.
- 2) UDEC 해석을 통해 주로 관찰되는 변형 양상은 슬라이딩과 원호 파괴였으며, 슬라이딩의 경우 절리의 경사가 30° ~70° 에서 주로 나타나며, 그 절리의 연장성이 20m이상인 경우에 뚜렷한 양상을 보였다. 전도성 변형의 경우 절리의 경사가 100~120° 사이에서 관측되었다. 원호파괴는 절리의 경사보

다는 절리의 간격에 의해서 많은 영향을 받으며 50cm 이하의 절리 간격에서 주로 관찰되었다.

- 3) JRC의 경우, JRC가 증가함에 따라 오히려 변위의 증가 양상을 보였다. 이는 BB 절리 모델의 특징 중 하나인 치수효과에 의한 것으로, 실내 실험을 통해 얻은 JRC와 JCS를 그대로 적용하여 실제 사면을 해석하기 보다는 치수효과를 고려하는 것이 보다 현실적일 것으로 판단된다.
- 4) 전단강도 감소기법을 통해 정량적인 안전율을 구할수 있었으며, 이 결과와 분산분석의 결과를 이용하여 인자수준별 배점을 부여하고, trial and error를 통해 안전율과 배점의 상관관계를 알아보았다.
- 5) 선형회귀분석의 결과 제안된 배점과 안전율은 다음과 같은 관계를 갖고 있음을 보인다.

$$\text{안전율} = 0.0085 * (\text{총점}) - 0.7855 \quad (R^2 = 0.8464)$$

- 7) 본 연구에서 제안한 배점과 안전율의 관계는 그 결과의 분산이 다소 크게 나타나고 동일 배점에 대한 안전율의 차이도 크게 나타나고 있다. 이는 해석 프로그램에 할당한 절리 특성 상호간의 교호작용과 프로그램의 특성에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 제안된 배점에 의한 판단이 절대적인 기준은 될 수는 없을 것이다. 그러나 암반사면의 절취경사 결정에 있어서 일차적이고 개략적인 판단의 기준은 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 실제 사면의 경우 고려한 인자들 외에도, 암반의 풍화 정도와 3차원적인 썩기파괴, 단층이나 파쇄대등에 따른 파괴 및 토층과 암반층의 경계면의 전단 강도등도 고려의 대상이 되어야 한다. 따라서, 실제 사면의 설계에 있어서는 경험있는 기술자에 의한 상세한 조사가 반드시 수반되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 김남수, 김보현, 양형식(2000), “다꾸치법에 의한 암반물성의 발파진동 영향 요소 분석”, *한국암반공학회지*, vol, 10, pp 475-480
2. 최성웅, 정소결(1999), “Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석”, *한국암반공학회지*, vol. 9, pp 141-148
3. 김호성, 양형식 외(1992), *강건설계를 이용한 품질공학*, 민영사
4. 박연준, 유광호(1998). “편재절리 모델을 절리 암반사면의 안정성 해석”, *한국암반공학회지*, Vol. 8. pp 287-295
5. Hoek, E., Bary. J.W(1981), *Rock slope Engineering*, The Institution of Mining and Metallurgy, London
6. Dawson, E.M., Roth, W.H., Drecher, A.,(1999), “Slope stability analysis by strength reduction”, *Geotechnique*, vol. 49, No. 6, pp 835-840
7. Itasca Consulting Group(2000), Inc, UDEC user manual ver. 3.10
8. N.Barton, S. Bandis(1990), “Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice”, *Rock Joint*, Balkema, pp 603-610
9. Bishop, A. W. (1955). “The use of the slip circle in the stability analysis of slopes.” *Geotechnique* 5. pp 7-17
10. Bandis, S. C., Lumsden, A. C. and Barton, N. R., “Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints.” *Int. J. Rock Mech. Min Sci & Geomech Abstr.* Vol. 18. pp 1-21