

개별요소법에 의한 절리 암반 비탈면의 안정성 해석

Stability Analysis of Jointed Rock Slope by D.E.M

박 근 역*
Park, Geun-Uck

임 한 옥**
Lim, Han-Uk

Abstract

The Distinct Element Method (DEM) was used to analyze the stability of jointed rock slope, of which dimension are about 200m(length), 60m(height), 55° dip. The Barton-Bandis joint model was used, as a constitutive model. The parameters such as JRC and spatial distribution characteristics of discontinuities were acquired through field investigation. Three different cases such as 51°, 45° and 38° in angle of rock slope were analyzed to decide a stable slope. To keep the jointed rock slope safely, it is proposed to reduce the height of slope from 60m to 48m and to reduce the angle of the from 55° to 38° too.

키워드 : 개별요소법, 절리 암반 비탈면, Barton-Bandis 절리 구성 모델, 불연속면, 암반 비탈면의 기울기

Keywords : *Distinct Element Method(DEM), jointed rock slope, Barton-Bandis joint constitutive model, discontinuities, angle of rock slope.*

1. 서론

일반적으로 암반 비탈면을 안정하게 굴착, 유지하기 위해서는 암반내 각종 지질적인 요소, 비탈면의 기하학적 형태, 지하수 및 발파 등에 의한 후천적인 영향 등이 검토되어야 한다. 여기서 지질적인 요소란 암반중의 절리, 층리 및 단층 등을 포함하며 이들을 불연속면(discontinuity)이라 할 때 이들의 출현 빈도, 방향 및 경사 등의 요인과 물리적 역학적 특성이 주요 요인이 된다. 이와 같이 복잡한 요인에 의해 좌우되는 암반 비탈면의 안정성 해석법은 크게 경험적 방법과 수치해석적 방법으로 구별할 수 있다.

수치해석적 방법이란 암반 내 불연속면과 주요 역학적 특성을 구하고 이를 해석 프로그램에 입력시켜 계산하는 방법으로 여기에는 연속체 해석과 불연속체 해석으로 나눌 수 있다. 연속체 해석은 대상 암반을 거시적으로 포착하여 그 영역내에서

불연속성에 의한 역학적 특성을 등가가 되는 연속체로 바꾸고 파괴와 변형상태를 해석하는 방법이다. 반면에 불연속체 해석은 대상 암반중의 개개의 불연속면을 평가하여 암반을 암반 블록으로 된 불연속체로 간주하여 파괴후의 암반 블록의 거동, 영향범위, 파괴 메커니즘을 해석하는 방법이라 할 수 있다.

수치해석 방법은 종래 경험적인 방법에 비하여 상대적으로 비용이 적게 들고 또한 정량적 평가가 가능한 점에서 널리 이용되고 있다. 그러나 현지 암반 내 복잡한 지질 구조를 정확히 모사하기 어렵기 때문에 사용에 제한이 따른다. 즉 불연속체 모델은 개별 블록들의 거동을 일일이 계산하므로 이상적인 방법이라 할 수 있지만 지반내 절리의 발달 사항을 정확히 파악하기도 어려우며, 컴퓨터의 계산 용량이 과대해지는 단점이 있다.

그러나 절리를 포함한 암반의 경우 암반 자체의 물리적 특성은 물론이고 암반내에 존재하는 절리의 거동 특성에 의해 구조물의 안정성이 더욱 영향을 받게 되므로 UDEC과 같은 개별요소법을 바탕으로 한 프로그램을 선정하는 것은 타당한 것으로 알려져 국내에서도 최근에 터널은 물론 암반

* 강원대학교 지구시스템공학과 공학석사

** 강원대학교 지구시스템공학과 교수, 공학박사

비탈면의 안정성 해석에도 비교적 널리 이용되고 있다.[1-4]

따라서 본 연구에서는 Barton과 Bandis에 의해 제안된 비선형 Barton-Bandis (BB) 절리 모델을 이용한 UDEC 프로그램으로 비탈면의 안정성을 해석하였다. 개별요소법에서는 각 암석 블록의 파괴보다는 불연속면의 움직임에 따라 비탈면의 안정성이 좌우될 것으로 예상되므로 비탈면을 구성하는 암석 블록의 변위 속도 벡터를 기준으로 비탈면의 안정 여부를 판단하였다. 즉 비탈면 내 암석 블록의 변위 속도 벡터가 거의 없는 상태를 비탈면이 안정된 상태로 판정하였다.

그리고 개별요소법으로 계산한 결과값 해석하는데 참고하기 위하여 Mohr-Coulomb (MC) 모델을 이용한 연속체 해석을 동시에 실시하였다. 해석을 위해 필요한 입력 자료는 현장에서 채취한 암반 블록을 사용하여 실험실에서 직접 코어링하여 시료를 얻었고, 암석 물성 실험을 실시하여 얻어진 값을 보정하여 사용하였다.

본 연구의 대상 비탈면은 경기도 가평에 위치한 ○○공사 현장의 한 작업장을 선정하였는데, 그 높이는 약 60m, 폭은 약 200m에 달하는 비교적 높은 비탈면이다.

2. 연구 대상 지역의 지질특성

본 연구 대상 지역은 가평군 설악면으로 선캄브리아기에 생성된 석영장석질 편마암, 호상 흑운모 편마암으로 구성되어 있다.

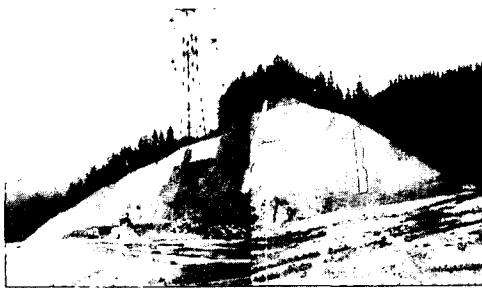


Fig. 1 View of Rock Slope

지상에서 높이 1.5m, 길이 20m 정도의 조사선(scanline)을 설치하여 클리노미터로 주향, 경사, 절리간격, 연속성 등 방향성을, 프로파일 게이지(profile gauge)를 사용하여 절리면의 거칠계수를, 슈미트 햄머를 이용하여 불연속면의 벽면강도(JCS)를 구하였는데, 그 결과는 Table 1과 같다.

한편 불연속면의 방향성은 DIPS 프로그램을 이용하여 구하였는데, Table 1 및 Fig. 2와 같이 대표적인 절리군 3개를 얻었다.

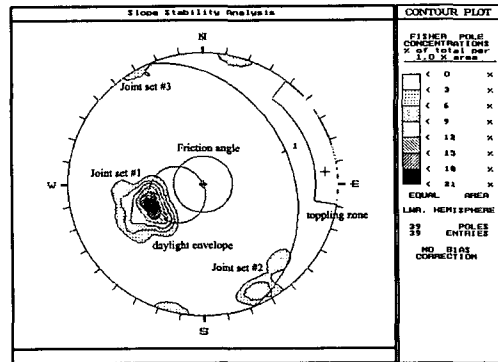


Fig. 2 Contour map of joint sets

JRC는 현장에서 구한 것을 Barton & Choubey (1977)[5]가 제시한 표준 JRC 곡선과 비교하였으며, JRC는 측정된 반발치를 Franklin[6] 등이 제안한 다음의 경험식에 대입하여 구하였다.

$$\log_{10}(JCS) = 0.00088\rho R + 1.01 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 건조밀도(kN/m³), R은 슈미트 햄머(Schmidt hammer) 반발치이다.

한편 실험실 시험은 국제암반공학회(ISRM) 시험 기준에 따라 각 항목별로 15회씩 실시하여 그

Table 1 Result of geological data obtained from field

| joint set | Orientation (dip/dip direction) | Trace (m) | Spacing (m) | Aperture (m) | JRC | JCS (MPa) |
|-----------|------------------------------------|--------------|----------------|-----------------|-----|--------------|
| #1 | 34/068 | 17 | 0.3 | 0.01 | 5 | 66 |
| #2 | 79/334 | 10 | 0.7 | 0.01 | 3 | 58 |
| #3 | 87/150 | 12 | 0.5 | 0.01 | 4 | 54 |

값을 평균하였으며, 이들을 보정하기 위하여 여러 학자들이 제안한 경험식들을 이용하였는데 이들은 RMR을 기준하고 있다.

자연 절리면 직접 전단 시험은 각 절리군의 평균 JRC와 유사한 값을 가진 압편을 선정하고 이들을 대상으로 5회 시험을 실시하여 전단강성과 잔류마찰각을 구하고 그 값을 평균하였다.

3. 개별요소법에 의한 해석

개별요소법은 Cundall(1971)이 처음 제안한 방법으로 암반공학 문제들을 풀 수 있는 효과적인 수치해석 기법으로 인식되고 있다.[1-4] 절리면 사이 접촉면의 특성을 나타내기 위하여 절리의 강성을 고려하였고, 운동방정식을 수치 적분하기 위하여 명시적 유한차분법을 사용하는 것이 그 특징이다. 암반은 절리 암반이 서로 연결되어 구성된 블록들의 집합체로 다루어지며, 개별 블록은 블록 내부의 유한차분 요소망에 의해 분할된다.

3.1 프로그램의 개요 및 이론

해석에 사용된 프로그램은 개별요소법을 바탕으로 한 UDEC(Universal Distinct Element Code) 3.10 version[13]으로 불연속면 사이의 접촉면의 특성을 나타내기 위하여 불연속면의 강성을 고려하였고, 운동방정식을 수치적분하기 위하여 FLAC과 마찬가지로 순차적으로 계산하는 방법(Explicit scheme)을 사용하는 것이 특징으로 블록의 이동에 의해 경계면에 발생하는 접촉력 및 변위를 계산한다.

블록의 이동은 블록 시스템을 가로질러 경계면에 전달되는데 이는 동적으로 블록 시스템의 물리적 특성으로 속도가 전파됨을 의미한다. 수치해석적인 관점에서는 이러한 동적인 거동은 시간이라는 매개변수를 도입하여 표시한다. 이때 시간의 크기는 매 계산 단계에서 각 블록의 이웃 블록들에 대한 침투가 즉각 전달되지 않을 정도로 충분히 작아야 한다. 이러한 과정은 연속체 해석에서 유한차분법의 Explicit법에서 사용하는 방법과 유사하다. 이 개별요소법에 의한 블록 시스템의 변위 계산은 동적인 계산식에 기초를 두고 있기 때문에 정적인 문제에 이 방법을 적용하기 위해서는 시스템이 안정된 상태로 수렴하기 위하여 댐핑(damping) 상수값을 도입하여 동적이완을 시킨다. 이 방법에 사용되는 알고리즘은 강성블록 사이의 상호작용을 나타내는 힙-변위 관계식과 각 블록에 작용하는 힘과 모멘트에 의한 운동방정식에 기초를 두고 있다.

3.2 모델의 적용 및 해석과정

UDEC에는 Null model group, 탄성모델그룹(elastic model group) 및 소성그룹모델(plastic model group)이 있으며, 일반적으로 토사나 암반으로 구성되어 있는 지반의 거동 특성은 소성모델그룹 중 Mohr-Coulomb model로 표현되기도 한다.

불연속면의 미끄러짐이나 분리현상, 그리고 불연속면의 움직임에 따른 암반 블록의 회전 및 이동현상 등을 정확히 모사하기 위해 Barton과 Bandis에 의해 비선형 Barton-Bandis 절리모델이 새롭게 제안되기도 하였다.

이 모델은 불연속면의 변형과 강도에 미치는 불연속면 거칠기의 영향을 일련의 경험적 관계식에 의하여 표현하였으며, 다음과 같은 특성을 갖는다. 즉 절리의 수직 거동은 쌍곡선적인 응력-변위 경로, 반복적인 하중의 재하에 의한 시간 이력, 반복적인 하중의 재하에 의한 수직 강성의 증가, 전단 변위에 의해 발생된 불연속면 표면의 엇갈림에 의한 수직 강성의 변화, 절리의 암착량과 절리면의 거칠기에 근거한 수리적 틈(hydraulic aperture of joint) 등을 고려하였다.

그리고 절리의 전단 거동은 수직 응력과 전단 변위 함수로서의 확장, 최대 전단 이후의 절리면 손상, 최대 전단 이후 반복 재하시 2차 최대 전단 강도의 감소 등을 고려하였다.

경계조건은 모델의 하부에서는 수직·수평방향의 변위를 전부 구속하였으며, 좌·우 경계에서는 수평 방향 변위는 구속하고, 수직 방향 변위만 허용하도록 하였고, 초기응력은 중력만 작용하도록 하였다.

초기에 비탈면을 절취하기 전에 모델에서 계산을 수행하여 불평형력(unbalance force)이 일정한 값에 수렴하도록 한 뒤, 생기는 변위는 무시하고 다시 계산을 수행하였다.

3.3 입력 물성치

가. 암반 블록의 물성

UDEC과 같은 불연속체 해석에서는 불연속면의 영향이 명시적으로 고려되기 때문에 암반 블록의 물성은 시추코어에 대한 암석 실내 시험 결과에 따라 결정하였다.

그러나 현지 암반내 대표적인 물성치를 구하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 현지 암반내 변형계수, 내부마찰각 및 점착력 그리고 인장강도 값을 추정하는 몇 가지 식을 다음과 같이 검토하였다. 먼저 Serafim과 Bieniawski 등은 RMR(Rock Mass Rating)값을 이용하여 현지 암반내 변형계수를 구하는 경험식을 제안하였는데, 전자는 RMR값이 50 이하일 때, 후자는 50 이상일 때 적합도가 높은 것으로 알려지고 있다. 그러나 Mitri, Nicholson, Mohammad 등은 RMR값과 실험실 탄성계수

값을 이용하여 암반의 변형계수를 결정하는 경험식을 제안한 바 있다. 이 중에서도 Nicholson[10]의 식이 가장 많이 인용되기 때문에 본 연구에서도 이 식을 이용하였다.

$$E_m = \left[0.0028R^2 + 0.9 \exp\left(\frac{R}{22.82}\right) \right] \cdot E_i \quad (2)$$

여기서 E_m , E_i , R 은 각각 현지 암반의 변형계수 (GPa), 실험실에서 구한 탄성계수 (GPa) 그리고, RMR 값을 나타낸다.

다음으로 내부마찰각과 점착력을 추정하는 식은 Truman, Trunk 등의 제안식 중 비교적 낮은 값을 나타내는 Trunk[11]의 제안식을 인용하였다.

$$C_m = -0.051 + 0.008R - 3.346 \times 10^{-5}R \quad (3)$$

$$\phi_m = (0.5 \cdot R + 8.3) \pm 7.2 \quad (4)$$

C_m , ϕ_m , R 은 각각 현지 암반의 점착력 (MPa), 내부마찰각 (degree) 및 RMR 값을 나타낸다.

한편 현지암반의 인장강도 환산은 Hoek & Brown[12]이 제시한 식 (5)를 이용하였다.

$$\sigma_t = 0.5 \cdot \sigma_c (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (5)$$

여기서 σ_c 는 일축압축강도를 나타내고 m 과 s 는 상수로서 다음과 같이 구해진다.

$$m = m_i \cdot \exp\left(\frac{R-100}{14 \cdot I_m}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{R-100}{6 \cdot I_s}\right)$$

여기서 m_i 는 신선암에 대한 m 의 값으로 연구 대상 지역의 암반이 편마암이므로 $m_i = 25$ 를 적용하였다. I_m 은 기계굴착 및 조절발파를 시행하여 암반이 불교란 되었을 때는 1, 교란되었을 때는 2를 적용하며, I_s 는 불교란 암반일 경우 1, 교란 암반일 경우는 1.5를 적용한다. R 은 RMR 값이다.

UDEC 해석을 위한 물성치와 전단특성을 요약하면 각각 Table 2 및 Table 3과 같다.

나. 불연속면의 물성

불연속면의 물성은 국제암반역학회에서 제안한 실험법으로 실측하는 방법과 Bandis 등 (1982)의 연구 결과를 근거로 하여 경험식으로 구하는 방법이 있다.[7,8] 본 연구에서는 현장에서 지질조사에 의한 값과 실험실에서 구한 값을 사용하였는데, 그 내용은 Table 3과 같다.

3.4 유한차분법에 의한 안정성 해석

개별요소법에 의한 해석결과를 검토하는데 참고하기 위하여 FLAC 프로그램에 의한 연속체 해석을 동시에 실시하였다.

이 프로그램의 이론은 잘 알려져 있기 때문에 생략한다. 그리고 입력 물성치는 UDEC과는 달리 Table 2에 제시된 입력값만을 인용하였는데 이 값들은 앞에 서술한 바와 같이 동일한 방법으로 보완하였다.

Table 2 Input data of mechanical characteristics for UDEC

| Properties | Lab. Value | | Input data |
|-----------------------------------|------------|-------------|------------|
| | Ave. Value | Range | |
| · Uniaxial comp. strength(MPa) | 68.6 | 57~76.1 | 69 |
| · Brazilian tensile strength(MPa) | 6.4 | 5.6~10.5 | 0.0133 |
| · Young's modulus(GPa) | 39.37 | 36.55~47.37 | 1.7487 |
| · Poisson's ratio | 0.254 | 0.232~0.269 | 0.254 |
| · Density(gr/cm ³) | 2687 | 2505~2763 | 2687 |
| · Cohesion force(MPa) | 11.2 | 10.1~14.5 | 0.15 |
| · Int. friction angle(°) | 38 | 46.3~50.8 | 17.8 |

Table 3 Input data of shearing characteristics for UDEC

| | Joint set #1 | Joint set #2 | Joint set #3 | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|---|
| Dip (°) | 27.5 | 80.1 | 52.5 | ① |
| Length (m) | 17 | 10 | 12 | ② |
| Aperture (m) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | ③ |
| Spacing (m) | 3 | 7 | 5 | ④ |
| JKn (MPa/m) | 6784 | 4173 | 5639 | ⑤ |
| JKs (MPa/m) | 2206 | 2148 | 1687 | ⑤ |
| JRC | 5 | 3 | 4 | ⑥ |
| JCS (MPa) | 65.5 | 58 | 64 | ⑦ |
| Lo (m) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | ⑧ |
| Phir (°) | 33 | 24 | 28 | ⑤ |
| Sigmac (MPa) | 63 | 63 | 63 | ⑨ |

- ① 실제의 경사방향과 경사각을 전산모델링 단면 방향으로 축변환 시킨 값
- ② 평균값은 요소크기를 기준하여 가정한 값
- ③ 모든 불연속면은 연결된 것으로 가정함으로써 해석모델을 간략화 시켰음
- ④ 축정치의 10배를 적용 (이를 다시 fully deformable block으로 세밀하게 zoning을 시킴으로써 실제값과 거의 같은 효과를 거둘 수 있음)
- ⑤ 절리면 전단시험 결과를 적용
- ⑥ 현지암반 불연속면 조사결과를 적용
- ⑦ 현장 Schmidt hammer test 조사결과 적용
- ⑧ 절리면 전단시험 시료의 전단 방향 길이
- ⑨ 실내 암석 물성 시험 결과 적용

4. 해석 결과 및 고찰

개별요소법에 의한 해석은 편의상 비탈면의 높이 48.4m에 대하여 비탈면의 높이 대 수직거리의 비가 각각 1 : 0.8(경사각 58°), 1 : 1.0(45°) 및 1 : 1.3(38°) 등 세 가지 경우로 나누어 해석하였다. 즉 각각의 경우 개별요소망을 구성하고 해석결과 X 및 Y 방향의 변위, 변위벡터, 주응력의 분포, 최대 절리면 전단 변위 및 변위 속도 벡터 등을 구하였다.

이들 중 가장 안정한 것으로 판단되는 1 : 1.3의 경사에서 개별요소망, 최대 절리면 전단 변위, 변위 속도 벡터를 예시하면 Fig. 3~Fig. 5와 같다.

한편 비탈면의 경사가 각각 1 : 0.8 및 1 : 1.0의 경우 최대 절리면 전단 변위는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같으며, 변위 속도 벡터의 해석 결과는 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다.

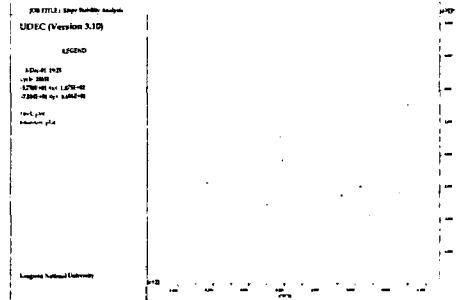


Fig. 3 Plot of discrete element grid (dip of slope 1 : 1.3)

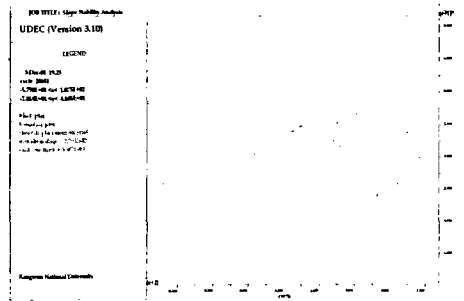


Fig. 4 Plot of joint shear displacement (dip of slope 1:1.3)

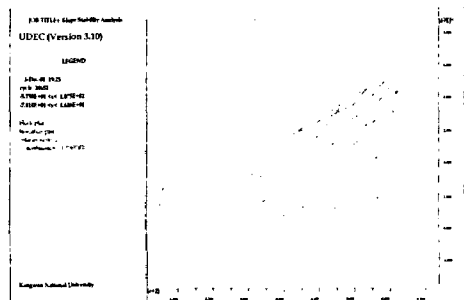


Fig. 5 Plot of displacement velocity vector (dip of slope 1:1.3)

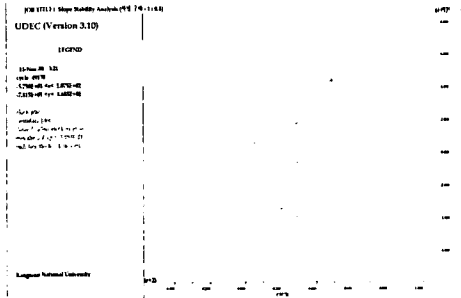


Fig. 6 Plot of joint shear displacement (dip of slope 1:0.8)

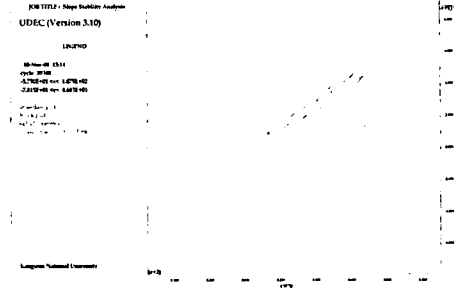


Fig. 9 Plot of displacement velocity vector (dip of slope 1:1.0)

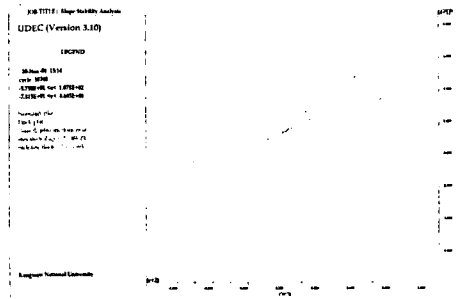


Fig. 7 Plot of joint shear displacement (dip of slope 1:1.0)

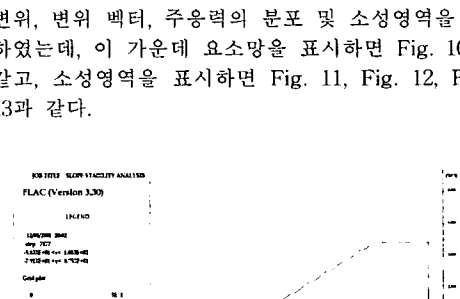


Fig. 10 Plot of grid (dip of slope 1 : 1.3)

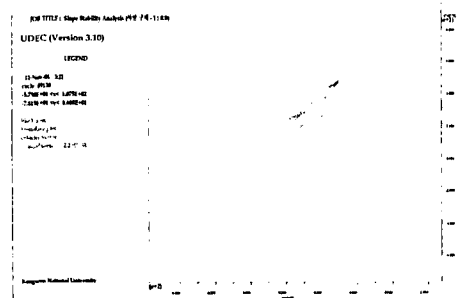


Fig. 8 Plot of displacement velocity vector (dip of slope 1:0.8)

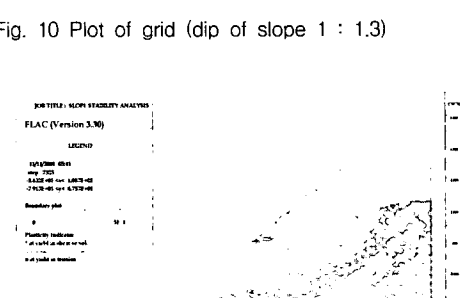


Fig. 11 Plot of plastic zone (dip of slope 1 : 0.8)

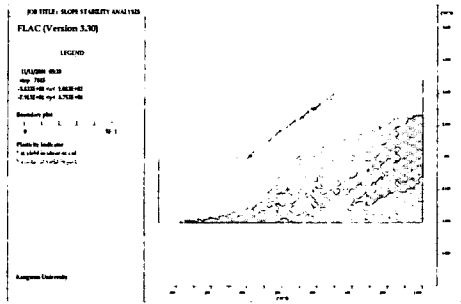


fig. 12 Plot of plastic zone (dip of slope 1 : 1.0)

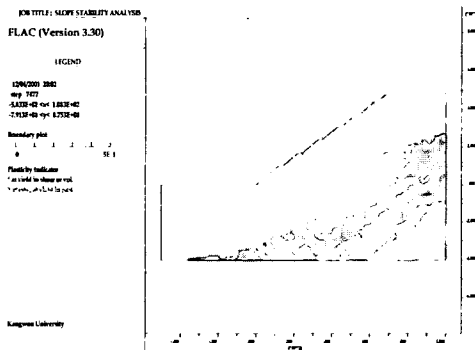


fig. 13 Plot of plastic zone (dip of slope 1 : 1.3)

소성영역이 발생하는 부분은 파괴가 일어나는 것으로 판단하여[4] 파괴영역으로 표시하였다. 계산 결과 비탈면의 경사가 51°인 경우 비탈면의 하부인 제 1단에서 소성영역과 인장균열이 발생한다. 비하여 45°의 경우 제 1단의 내부에서 부분적으로 소성영역이 발생하고 있다. 그러나 38°인 경우 소성영역과 인장균열이 전 구간에서 걸쳐 나타나지 않음을 알 수 있다.

4.1 해석 결과의 비교

개별요소법의 해석 결과 구배가 45°인 경우 변위 속도 벡터가 크게 나타나 불안정한 것으로 해석되나 38°의 경우 그 값이 거의 나타나지 않는 것으로 보아 안정한 것으로 판단할 수 있다.

반면에 유한차분법의 해석 결과 51°의 경우 불안정 하나 45°의 경우 안정한 것으로 보인다. 이것은 FLAC 해석이 암반을 등가의 연속체로 가정하여 암반내 불연속면의 영향을 고려하지 않은데 비하여 UDEC의 경우 절리의 특성을 고려하였기 때문이다.

따라서 절리가 다수 포함된 암반 비탈면의 안정성 해석시 UDEC의 경우가 실제 암반의 상황보다 근접한 결과를 나타낸다고 본다.

5. 결론

비탈면의 높이와 너비가 각각 48.4m, 200m인 암반 비탈면을 대상으로 비탈면의 경사를 수직 높이 대 수직 거리의 비를 각각 1 : 0.8(구배 51°), 1 : 1.0(45°), 1 : 1.3(38°) 등 세 가지로 변화시키면서 각각의 경우 개별요소법(UDEC)과 유한차분법(FLAC)에 의한 수치해석 결과 얻어진 주요 내용은 다음과 같다.

1. 개별요소법의 해석 결과 비탈면의 경사에 따라 수평 방향의 변위는 4.0cm, 3.0cm, 2.0cm, 수직 방향의 변위는 3.0cm, 2.5cm, 1.5cm이다. 응력의 분포는 비탈면의 표면에서 주응력이 줄어들며, 방향은 불연속면의 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 비탈면의 안정성에 크게 관련되는 최대 전단 변위는 10.83cm, 3.658cm, 2.793cm로 비탈면의 내부 절리에서 발생하고 있다. 절리면 전단 변위가 크게 발생하는 절리면을 연결하면 비탈면이 파괴되는 양상을 알 수 있다. 한편 변위 속도 벡터는 0.9893cm, 0.8649cm, 0.8562cm로 나타났으며, 변위 속도 벡터가 나타나는 것은 절리로 분리된 암반 블록이 안정되지 않고 변위가 발생하는 상태 즉 암반 비탈면 중 불안정한 영역을 표시한다고 볼 수 있다. 이상의 결과를 종합할 때 1 : 1.3의 경우는 안정한 것으로 판단된다.

2. 유한차분법의 해석 결과 비탈면의 경사에 따라 수평 방향의 변위는 7.5mm, 0.5mm, 0.5mm, 수직 방향의 변위는 5mm, 1.5mm, 1.5mm이다. 그리고 최대 변위 벡터는 9.484mm, 7.537mm, 5.723mm이다. 비탈면의 안정성에 가장 큰 영향을 주는 소성영역은 51°의 경우 비탈면의 하부인 제 1단에서 소성영역과 인장균열이 나타났고, 45°인 경우 제 1단의 내부에서 부분적으로 나타났으며, 38°인 경우는 소성영역이 나타나지 않았다. 이들 결과를 종합하면 1 : 1.0 및 1 : 1.3의 경우 안정한 것으로 생각된다.

3. 두 가지 해석 결과 안정성을 확보하는 기술기로서 차이가 있지만 어느 경우도 1 : 1.3인 즉 38°일 때는 안정하다고 볼 수 있다. 이와 같은 차이는 전자의 경우 불연속면의 특성을 반영하였기 때문이다.

참고문헌

- [1] 강추원, "Barton-Bandis 절리 모델에 의한 지하 대공동 암주의 변형 특성 해석", 강원대학교 공학박사 학위논문, 1999
- [2] 김치환, "개별요소법에 의한 터널의 안정성 해석에 있어 설계 정수의 결정", 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, Vol. 9, No. 3, pp.278-290, 2000
- [3] 최성웅, 정소길, "Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석", 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, Vol. 9, No. 2, pp.141-148, 1999
- [4] 임한욱, 김치환, 백환조, "수치해석에 의한 석회암 채굴 사면의 안정성 해석", 한국암반공학회, 터널과 지하공간, Vol. 11, No. 3, pp.270-278, 2001
- [5] Barton. N, and Choubey. V, "The shear strength of Rock Joints in Theory and Practice", Rock mechanics and Rock Eng., 10, pp.11-54, 1977
- [6] Franklin, J. A & Dusseault M. B, "Rock Engineering", McGRAW-HILL International editions, 1989
- [7] Barton, N. and Bandis, S., "Effects of block size on the shear behavior of jointed rock", Keynote Lecture, Proc. 23rd U.S. Symp. on Rock Mech., pp.739~760, 1982
- [8] Barton, N., "Scale effects or sampling bias, Proc. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses", pp.31~55, 1990
- [9] Barton, N., and Bandis, S., "Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice", Proc. Int. Symp. on Rock joints, Norway, pp.603~610, 1990
- [10] Nicholson, G. A. and Bieniawski, Z. T., "A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification", Int. J. Min. & Geological Engng, Vol. 8, pp.181~202, 1990
- [11] Trunk, U., Honisch, K., "Private communication, To be published in Felsbau", 1989
- [12] Hoek, E. and E. T. Brown, "The Hoek-Brown Failure Criterion-a 1988 Update", Proc. 15th Can. Rock Mech. Symp., University of Toronto, Oct, 1988
- [13] Itasca Consulting Group, Inc., "UDEC User's Manual, Version 3.10", 2000
- [14] Itasca Consulting Group, Inc., "FLAC User's Manual, Version 3.3", 1995