

Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석

최성웅¹⁾ · 정소길²⁾

Stability Analysis of a Jointed Rock Slope with the Barton-Bandis Joint Constitutive Model Using UDEC

Sung-Oong Choi and So-Keul Chung

ABSTRACT Distinct element simulation in jointed rock masses is largely dependent upon the joint constitutive equation used. This paper describes the differences between the Barton-Bandis (BB) and the Mohr-Coulomb (MC) joint constitutive models for the stability analysis of the jointed rock slopes. The BB model, which allows the modelling of the dilation accompanying shear, predicts results very similar to the present condition of slopes. Consequently the 10 cm thick shotcrete was proposed for the reinforcement of those slopes. The MC model, however, in which the dilation angle is constant, is relatively insensitive to the behaviors of joints.

Key words : Distinct element simulation, Barton-Bandis (BB) joint constitutive model, Dilation

초 록 암반 내에 존재하는 절리의 분포 양상을 현실적으로 반영할 수 있는 개별요소해석에서, 절리의 거동을 모사하는 구성방정식의 적절한 선택이 해석결과에 미치는 영향은 매우 크다. 본 연구에서는 절리 암반 사면의 안정성 분석을 통하여 Barton-Bandis (BB)의 구성방정식과 Mohr-Coulomb (MC)의 구성방정식을 비교해 보았다. 절리의 전단변위 발생에 따른 수직 팽창을 허용하는 BB 모델에서는 현장의 사면 양상과 매우 유사한 결과를 도출하였으며, 그 결과 10 cm 두께의 슛크리트 타설이 보강 방안으로 제안되었다. 반면, 수직팽창이 일정한 값으로 주어지는 MC 모델에서는 외부 하중 조건에 대하여 둔감한 반응을 보이는 등 현장 상황을 충분히 예측하지 못하는 결과가 도출되었다.

핵심어 : 개별요소해석, Barton-Bandis(BB)의 구성방정식, 수직팽창

1. 서 론

최근 여러 종류의 지반해석용 전산프로그램이 개발되고 상용화됨에 따라, 다양한 각도에서의 수치해석이 가능해졌다. 하지만 프로그램에 대한 선택의 폭이 넓어진 대신 해석자의 프로그램에 대한 인지도와 적용성에 대한 판단능력이 더욱 요구되고 있으며, 특히 수치해석의 대상과 목적에 따라 최적의 결과물을 도출하기 위한 해석자의 프로그램 선정 능력이 그 어느 때보다 요구되고 있다.

특히 절리를 포함하고 있는 암반의 경우, 암반 자체의 물리적 특성보다는 암반 내에 존재하는 절리의 거동 특성에 의해 구조물의 안정성이 더욱 영향을 받게 되므로 이 때에는 UDEC(Universal Distinct Element Code)과 같이 개별요소법을 바탕으로 하는 프로그램을 선정하는 것이 더욱 현실성 있는 결과물을 도출할 수 있다.

또한 동일한 프로그램을 적용한다 하더라도 해석과정에서 지반의 거동을 모사하기 위한 구성 방정식의 적용에 따라 해석의 결과가 달라질 수 있기 때문에 적절한 구성 방정식의 선택 역시 중요한 문제로 대두되고 있다.

일반적으로 토사나 암반으로 구성되어 있는 지반의 거동 특성은 Mohr-Coulomb(MC)의 소성 모델로써 흔히 표현되고 있다. 그러나 절리를 MC 모델로 표현할 경우, 절리의 미끄러짐이나 분리현상, 그리고 절리의 움직임에 따른 암반 블록의 회전 및 이동 현상 등을 정확히 모사하지 못한다는 사실 때문에 최근 Barton과 Bandis (1990)에 의해 비선형 Barton-Bandis(BB) 절리 모델이 새롭게 제안되었다.

1) 정회원, 한국자원연구소 암반·발파연구그룹 선임연구원
2) 정회원, 한국자원연구소 암반·발파연구그룹 책임연구원
원고 접수일 : 1999년 3월 25일
원고 심사 완료일 : 1999년 6월 3일

따라서 본 연구에서는 BB 모델과 MC 모델의 적용 특성 및 필수 설계정수에 대해 비교해 보고, 이를 실제 암반 사면의 안정성 해석에 적용시켜 그 타당성을 검증하고자 한다.

2. BB 비선형 절리 모델

BB 비선형 절리 모델에서는 Barton과 Choubey (1977)에 의해 제안된 다음의 식과 같이 절리의 거칠기, 압축강도, 잔류마찰각을 이용하여 절리의 전단강도를 표현한다.

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

여기서, σ_n ; 절리면에 대한 유효 수직응력
 JRC ; 절리의 거칠기 계수(0~20)
 (단위는 degree)
 JCS ; 절리면의 압축강도
 ϕ_r ; 잔류마찰각

한편 Bandis 등(1983)은 수직응력하에서 절리면의 단합을 고려하여 수직강성, K_n 을 다음 식과 같이 표현하였다.

$$K_n = \left(\frac{K_{ni}}{(1 - V_z/V_{zm})^2} \right) \quad (2)$$

여기서, K_n ; 절리의 수직강성
 K_{ni} ; 절리의 초기 수직강성
 V_z ; 주어진 수직응력 조건에서의 절리면의 단합도
 V_{zm} ; 절리면의 최대 단합도

BB 모델에서는 최대 전단강성을 다음 식과 같이 최대 전단강도, τ_p 와 최대전단변위량, δ_p 로써 표현한다.

$$K_s = \frac{\tau_p}{\delta_p} \quad (3)$$

Barton(1990)은 여러 가지 실험 및 현장 조사 결과로부터, 최대전단변위량은 다음과 같이 표현될 수 있음을 경험적으로 제시한 바 있다.

$$\delta_p = \frac{L_n}{500} \left(\frac{JRC_n}{L_n} \right)^{0.33} \quad (4)$$

여기서, L_n 은 절리의 길이(단위; meter)이며, JRC_n 은 절리의 거칠기와 관련되는 계수로서 0~20의 값을 갖는다.

또한 Barton과 Bandis(1982)는 절리면에 대한 전단시험을 수행할 경우, 현장의 절리규모에 대한 크기 효과를 보정하기 위해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$JRC_n = JRC_0 \left[\frac{L_n}{L_0} \right]^{-0.02JRC_0} \quad (5)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left[\frac{L_n}{L_0} \right]^{-0.03JRC_0} \quad (6)$$

(5)식과 (6)식에서 아래 첨자인 0과 n은 시험편의 절리길이(100 mm) 및 현지암반의 절리길이를 각각 의미한다.

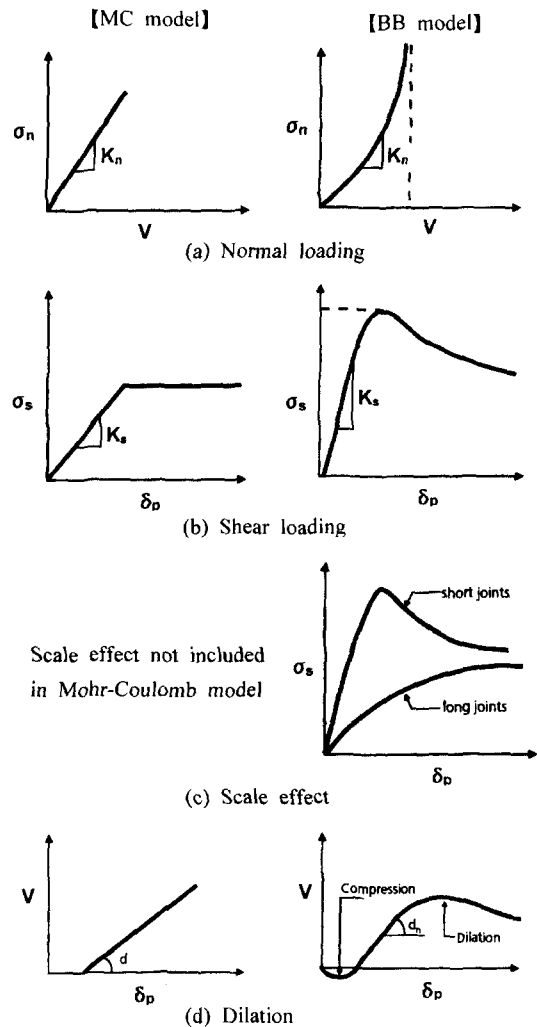


Fig. 1. Basic differences between the MC model and the BB model.

이상과 같이 정의되는 BB 모델의 거동 특성을 MC 모델과 비교하여 그림으로 표현하면 Fig. 1과 같다.

즉 수직응력하에서 MC 모델은 선형성을 띄는 반면, BB 모델은 비선형 거동을 하고 있으며, MC 모델에서는 수직팽창각(dilation angle)이 일정한 값으로 적용되는 것에 반해, BB 모델에서는 절리의 거동에 따라 수직팽창각이 변화하는 형태를 적용하고 있는 것 등이 MC 모델과 BB 모델의 큰 차이점이다.

3. 안정성 해석을 위한 설계정수의 선정

MC 모델과 BB 모델을 각각 적용하여 개별요소 코드인 UDEC 프로그램을 이용하여 안정성 해석을 실시할 경우 필수 입력자료는 Table 1과 같이 정리될 수 있다.

즉 Table 1에서 보는 바와 같이 MC 모델과 BB 모델의 큰 차이점은, 전자의 경우 절리면의 마찰각, 점착강도, 인장강도가 해석에 이용되는 것에 비해, 후자의 경우에는 절리면의 거칠기 계수, 절리면의 압축강도, 잔류마찰각이 암반의 응력-변형률 거동에 지대한 영향을 미치는 요소로 이용되고 있다는 점이다.

이들 몇 가지 설계 변수들 중에서 절리면의 마찰각, 점착강도, 인장강도 등은 절리면에 대한 실내 전단시험으로부터 구해질 수 있으며, 절리면의 거칠기 계수 및 절리면의 압축강도는 현장 조사를 통해 광범위한 범위에 대해 더욱 정확하게 얻어질 수 있다.

즉 절리면의 거칠기 계수는 프로파일 게이지를 이용하여 현장에서 쉽게 얻어질 수 있고, 절리면의 압축강도 역시 Schmidt hammer 타격 시험으로 현장에서 용이하게 얻어질 수 있다.

그러나, 실내시험으로부터 구해질 수 있는 절리면의 마

찰각 및 점착강도, 그리고 인장강도 등은, 이들을 산정하기 위한 실내시험 자체가 용이하지 않고, 또한 실내시험으로부터 얻을 수 있는 값의 신뢰도 역시 상당히 낮다.

왜냐하면 절리 시험편의 채취 과정에서 절리 사이의 충전물의 보전이 쉽지 않을 뿐더러, 시료 성형 과정에서 절리면이 개구(open) 되는 현상이 종종 발생하여 기본적인 점착강도를 잃어버리기 십상이기 때문이다.

따라서 필수입력자료의 취득 용이성과 측정치의 신뢰도 면에 있어서, BB 모델의 우위성을 알 수 있으며, 또한 조사비의 절감 차원에서 MC 모델에 대한 BB 모델의 탁월함을 알 수 있다.

한편, 각 모델의 서로 다른 적용 해석에 따른 안정성 분석 결과의 신뢰성 확인을 위해 절리 암반 사면에 대한 수치해석을 다음과 같이 실시하였다.

4. BB 모델을 이용한 암반 사면의 안정성 분석

4.1 개요

대전-진주간 고속도로 구간 중 제 OO공구 내에는 절취고가 약 65 m에 이르는 대절토 암반 사면이 시공 중에 있다. 공사 도중 암반의 굴착에 의해 형성된 절토 사면과 암반 내에 존재하는 불연속면의 조합에 의한 낙석이 이미 발생한 바 있어, 현재는 3개의 소단으로 분할 굴착되어 있는 상태이다. 현재 사면의 전체경사는 약 64°이고, 일부 구간에서는 선택 풍화대가 나타나고 있으며 국부적으로 붕락현상이 보이고 있다.

만약 이 부분이 향후 풍화작용이나 강우에 의한 영향 등을 받을 경우 사면침식이 진행되면서 이완영역이 점차 확대될 가능성이 있어 장기적으로 볼 때 사면의 불안정을 초래할 수 있으므로 이에 대한 대책 마련이 요구되고 있다.

따라서 전체 절토 사면 중에서 현장 조사결과, 가장 취약한 단면에 대하여 BB 모델을 적용한 2차원 전산해석이 실시되었다. 해석에 사용된 프로그램은 BB 모델이 추가된 UDEC Version 3.0(Itasca Consulting Group, Inc., 1996)이다.

4.2 입력자료의 선정

BB 모델을 이용한 2차원 전산 모델링을 위하여 절리면에 대한 필수입력자료는 현지암반 불연속면의 조사 결과와 절리면 전단시험 결과로부터 선정되었으며, 암반 블록의 역학적 상수는 RMR=58을 기준으로 설계정수 결정

Table 1. Essential input parameters in the MC model and the BB model

MC model	BB model
ρ (block density)	ρ (block density)
K (bulk modulus of block)	K (bulk modulus of block)
G (shear modulus of block)	G (shear modulus of block)
JKN (joint normal stiffness)	JKN (joint normal stiffness)
JKS (joint shear stiffness)	JKS (joint shear stiffness)
Jfric (joint friction angle)	phir (joint residual friction angle)
Jcoh (joint cohesion)	
Jten (joint tensile strength)	JRS (joint roughness coefficient)
	JCS (joint wall compressive strength)

Table 2. Characteristics of three joint sets observed in field

불연속군	경사방향 (°)	경사각 (°)	간격 (m)	연속성 (m)	JRC
Joint set 1	016	83	0.56±0.37	12.1±8.5	5
Joint set 2	066	75	0.74±0.27	12.5±9.6	4
Joint set 3	123	68	0.39±0.34	6.3±5.5	5

Table 3. Physical properties on joints and rock masses for numerical simulations

불연속군	전단강성 (GPa/m)	수직강성 (GPa/m)	마찰각 (°)	일축압축강도 (MPa)
Joint set 1	5.16	6.17	35.4	
Joint set 2	5.96	6.70	33.5	333
Joint set 3	4.70	6.34	38.9	
RMR(=58) 분류에 의한 암반의 역학적 상수				
밀도=2.66 g/cm ³ , 포아송비=0.23, 접착강도=5.0 MPa, 내부마찰각=34°, 탄성계수=16 GPa, 인장강도=1.7 MPa				

과정(한국암반공학회 외, 1998)을 통하여 산정되었다. Table 2와 Table 3은 불연속면의 분포 현황 및 실내 시험에 의한 암반의 역학적 상수를 각각 나타내고 있다. 따라서 Table 1에서와 같이 BB 모델에서의 필수입력 자료는 Table 4와 같이 다시 정리될 수 있다.

4.3 해석결과

장마철 집중 호우를 고려하여 사면 전체가 완전 침수된 상태에서 해석을 실시한 결과, 암반 블록의 속도 분포 및 변위발생 양상은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다.

즉 Fig. 2에서 보는 바와 같이 암반 블록의 움직임은 1소단 및 2소단에서 집중적으로 나타나고 있으며, 지속적인 변위발생 가능성을 보여주고 있기 때문에 적절한 보강 조치가 뒤따르지 않을 경우 사면의 붕괴 가능성을 시사하고 있다.

사면 붕괴의 영향 범위를 살펴보기 위해 블록의 변위발생양상을 5배로 확대하여 나타낸 것이 Fig. 3인데, 약 10 m 깊이 까지 그 영향권에 들고 있음을 알 수 있어 보강 범위를 구체적으로 제시하고 있다.

이러한 해석결과는 한국도로공사 건설사업소의 검토 결과(기술자문단 검토서, 1998) 및 실제 현장 양상과도 일치하고 있어 BB 모델을 적용한 개별요소해석기법의 신뢰성을 잘 보여주고 있다.

한편, BB 모델에 의한 수치해석 결과, 사면 붕괴 가능성이 도출됨에 따라 현 사면에 대한 안정성 확보를 위하

Table 4. Summary of input data for the UDEC-BB simulation

	Joint set 1	Joint set 2	Joint set 3	비고
경사각(°) (평균/표준편차)	81.1/1	74.7/1	8.2/1	①
길이(m) (평균/표준편차)	200/20	200/21	200/11	②
단락(m) (평균/표준편차)	0/0	0/0	0/0	③
간격(m) (평균/표준편차)	5.6/3.7	7.4/2.7	3.9/3.4	④
JKS (GPa/m)	5.16	5.96	4.70	⑤
JKN (GPa/m)	6.17	6.70	6.34	⑤
JRC	5	4	5	⑥
JCS (MPa)	50	50	50	⑦
L ₀ (m)	0.1	0.1	0.1	⑧
phir (°)	26	26	26	⑤
sigmac (MPa)	300	300	300	⑨

기타 암반의 역학적 상수
 밀도=2.66 g/cm³, 포아송비=0.23,
 접착강도=5.0 MPa, 내부마찰각=34°,
 탄성계수=16 GPa, 인장강도=1.7 MPa

- ① 실제의 경사방향과 경사각을 전산모델링 단면방향으로 축변환시킨 값
- ② 평균값은 요소크기를 고려하여 가정한 값이며, 표준편차는 측정치 중 최대편차
- ③ 모든 불연속면은 연결된 것으로 가정함으로써 해석모델을 간략화
- ④ 측정치의 10배를 적용(이틀 다시 변형가능 블록으로 재분할함으로써 현장과 유사한 효과 도모)
- ⑤ 절리면 전단시험 결과 적용
- ⑥ 현지암반 불연속면 조사결과 적용
- ⑦ 현장 Schmidt hammer test 조사결과 적용
- ⑧ 절리면 전단시험 시료의 전단 방향 길이
- ⑨ 실내암석물성시험 결과 적용

여 사면의 각 소단에 대해 10 cm 두께의 슛크리트 타설을 보강 방안으로 제시하였으며, 보강 후 사면의 안정성 확보 여부를 살펴보았다. 해석에 적용된 슛크리트의 물성치, 그리고 암반과 슛크리트 접촉부의 물성치는 Table 5와 같다.

이와 같이 슛크리트에 의한 사면 보강 결과, Fig. 4에서 보는 바와 같이 변위발생량은 거의 억제되었음을 알 수 있으며, 슛크리트에 가해지는 축력 또한 허용치 이하이기 때문에 사면의 안정성은 확보된 것으로 판단된다.

5. MC 모델을 이용한 암반 사면의 안정성 분석

5.1 입력자료의 선정

MC 모델과 BB 모델의 해석 특성을 비교하기 위하여,

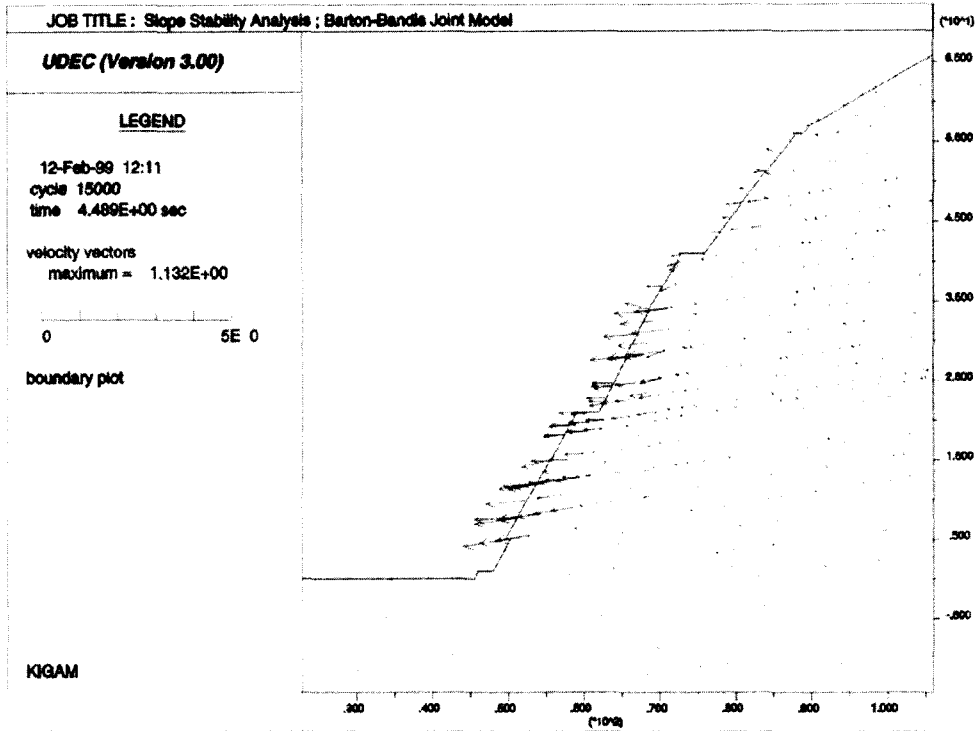


Fig. 2. Velocity vectors generated in fully saturated rock slope.

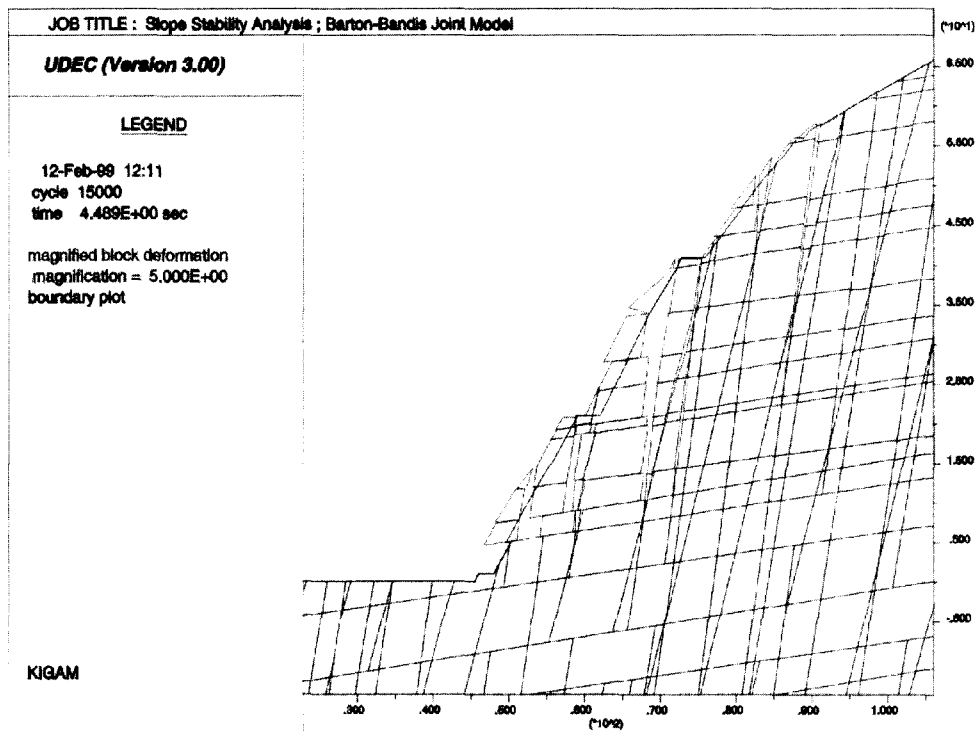


Fig. 3. Magnified block deformation in fully saturated rock slope.

Table 5. Physical properties of the shotcrete

-shotcrete	
밀도 (kg/cm ³)	2,500
탄성계수 (GPa)	21.0
포아송비	0.15
인장강도 (MPa)	20.0
잔류강도 (MPa)	10.0
일축압축강도 (MPa)	40.0
암반/-shotcrete 접촉부	
수직강성 (GPa/m)	1.0
전단강성 (GPa/m)	1.0
마찰각 (°)	45

BB 모델 적용으로 실시되었던 해석 단면과 동일한 단면에 대해 MC 모델 적용에 의한 수치해석이 실시되었다. 해석을 위한 입력자료 선정을 위하여, Table 1에서 나타난 바와 같이 MC 모델 적용을 위한 필수적인 입력자료 중에서 BB 모델의 경우와 중복되는 변수들, 즉 절리면의 분포현황이나 수직 및 전단강성 등은 BB 모델의 것과 동일하게 적용되었으며, MC 모델에서만 사용되는 절리면의 점착강도, 마찰각, 인장강도에 대해서는 Table 6에서 보는

바와 같이 절리면에 대한 실내전단시험 결과를 이용하였다.

5.2 해석결과

Fig. 5는 BB 모델의 경우와 마찬가지로 장마철 집중호우시를 고려하여 사면 전체가 완전 침수된 상태를 가정하였을 때의 변위발생양상을 보여주고 있다. BB 모델의 경우인 Fig. 2와 비교해 볼 때, 속도 벡터는 거의 0.05 배에 불과함을 알 수 있어, 본 사면의 안정성은 확보된 것으로 보여지고 있다. 또한 Fig. 6에서처럼 변위발생양상을 5배로 확대하여 나타낸 그림에서도 사면의 움직임은 거의 없는 것으로 나타나고 있는데, 전술한 바와 같이 이러한 해석결과는 현재의 현장상황이나, 한국도로공사 기술검토서의 결과와도 전혀 맞지 않는 결과를 나타내고 있다.

Table 6. Input parameters used in the MC model only

절리면의 점착강도 (MPa)	0.5
절리면의 마찰각 (°)	35
절리면의 인장강도 (MPa)	0

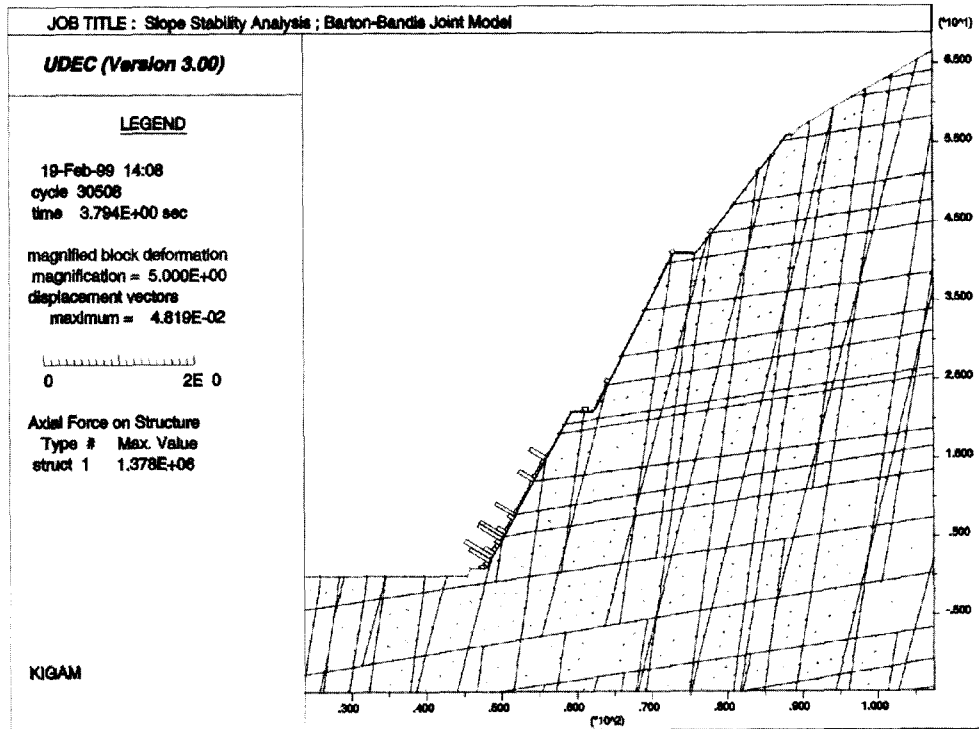


Fig. 4. Magnified block deformation and axial force on the shotcrete.

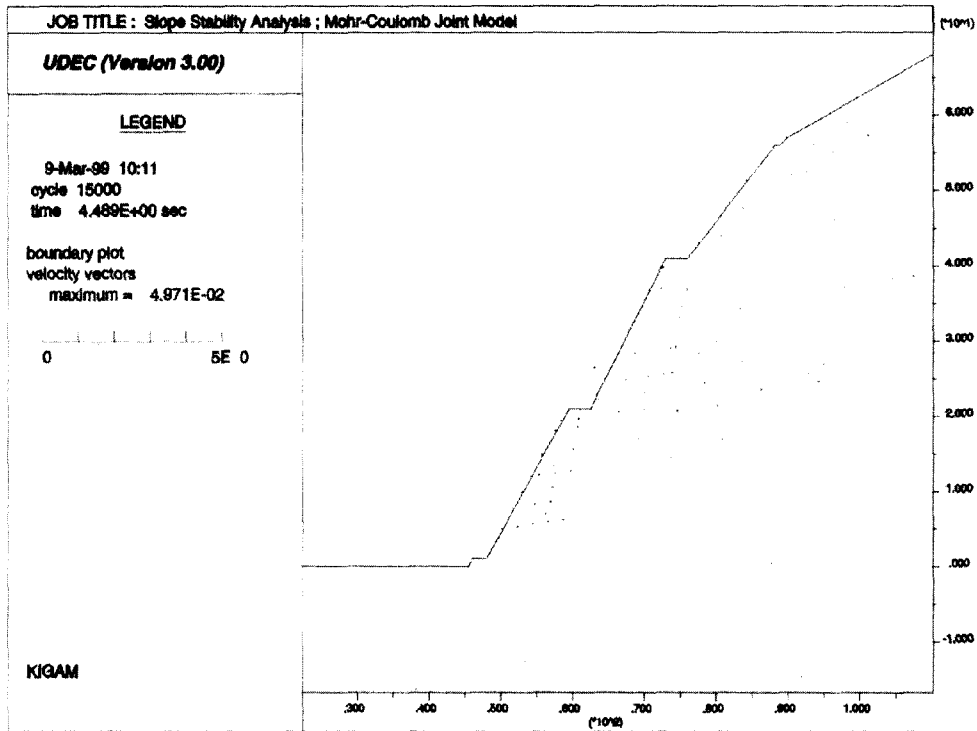


Fig. 5. Velocity vector distributions in the MC model analysis.

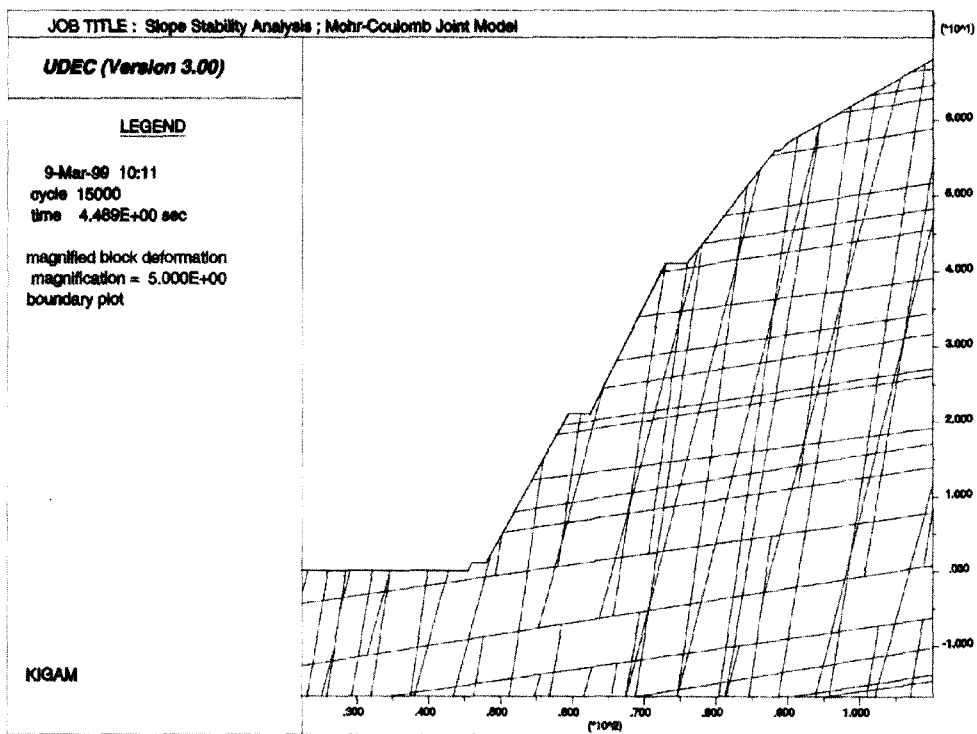


Fig. 6. Magnified block deformations in the MC model analysis.

이러한 현상은 Bhasin과 Høeg(1998)의 연구결과에서도 언급된 바와 같이, 암반 블록의 수직팽창각이 절리면의 전단 거동과는 무관하게 일정한 상수로 취급되는 MC 모델에서는 상대적으로 BB 모델에 비해 덜 민감한 응력 변형을 거동을 보여주지만, 절리면의 전단 변형 과정에서 수직팽창각이 비선형적으로 변화하는 BB 모델의 경우 훨씬 더 현실적인 해석결과를 도출할 수 있다는 사실과도 잘 부합되고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 절리 암반의 안정성 분석에 대해 탁월한 효과를 발휘하는 것으로 알려져 있는 개별요소 수치해석 과정에서, 절리 구성 방식의 적용에 따른 해석결과의 차이점을 비교하기 위하여 BB 모델 및 MC 모델에 의한 절리 암반 사면의 안정성 분석을 실시하였다.

암반의 수직팽창각을 일정한 상수로 취급하는 MC 모델에 비해 BB 모델에서는 불연속면의 거동에 따라 수직 팽창각의 비선형적 거동을 허용하기 때문에, 보다 현실성 있는 해석결과를 도출하는 것으로 밝혀졌다.

게다가 MC 모델을 적용할 경우, 필수입력자료인 절리면의 점착강도, 마찰각, 인장강도 등은 시험편의 성형 및 실내 시험 과정에서 에러가 포함될 소지가 크고 실내 시험 또한 용이하지 않는 반면에, BB 모델에서 요구하는 절리면의 거칠기 계수 및 벽면 강도 등은 현장 조사로부터 쉽고 정확하게 취득될 수 있다는 장점이 있다.

특히 MC 모델의 경우, 나머지 입력변수에 비해 점착강도가 해석 결과에 미치는 영향이 지대하다는 사실 때문에, 실내 시험 및 각종 현지암반 평가로부터 점착강도의 설계 값을 산정하기 위한 해석자의 부담은 클 수 밖에 없다.

따라서 BB 모델을 적용할 경우 상대적으로 객관적인

입력자료를 산정할 수 있는 장점이 있으며, 또한 김재동 등(1998)에 의한 연구결과에서도 보듯이 시추공 텔레뷰어 영상자료로부터 절리 구조의 3차원적 분석이나 거칠기 계수 및 절리 강성의 산정이 가능하기 때문에 보다 정확한 지반 정보를 해석에 반영할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김재동, 김종훈, 1998, 시추공벽 영상을 이용한 암반내 절리구조 해석, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, Vol. 8, No. 4, pp. 342-350.
2. 한국도로공사 기술검토서, No. 토질-16, 1998, 대절토 사면 안정처리대책 검토.
3. 한국암반공학회, 한국지구물리탐사학회, 한국자원연구소, 1998, 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술, 795p.
4. Barton, N., 1990, Scale effects or sampling bias?, Proc. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, pp. 31-55.
5. Barton, N. and S. Bandis, 1982, Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock, Keynote Lecture, Proc. 23rd U.S. Symp. on Rock Mech., pp. 739-760.
6. Barton, N. and S. Bandis, 1990, Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice, Proc. Int. Symp. on Rock Joints, Norway, pp. 603-610.
7. Barton, N. and V. Choubey, 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, No. 1/2, pp. 1-54.
8. Bandis, S., A. Lumsden, and N. Barton, 1983, Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, No. 6, pp. 249-268.
9. Bhasin, R. and K. Høeg, 1998, Parametric study for a large cavern in jointed rock using a Distinct Element Model (UDEC-BB), Int. J. Rock Mech. Min. Sci., & Geomech. Abstr., Vol. 35, No. 1, pp. 17-29.
10. Itasca Consulting Group, Inc., 1996, UDEC User's Manual, Version 3.0, Vol. 1, 2, 3.