

개별요소법을 이용한 터널 안정성 해석에 있어 Barton-Bandis 절리 모델과 Mohr-Coulomb 절리 모델의 비교

이 성규¹⁾, 김 치환²⁾, 남 기천¹⁾, 박 성록¹⁾, 임 경호¹⁾

¹⁾청석 ENG, ²⁾우석대학교

초 록

불연속체 해석을 이용하여 터널 안정성 해석을 수행할 경우 해석 결과는 절리 모델의 선택에 따라 달라진다. 따라서 본 연구에서는 개별요소법을 이용한 불연속체 터널 안정성 해석에 있어 BB 모델 적용시의 해석 결과와 MC 모델 적용시의 해석 결과를 비교하였다. 또한 주어진 응력 조건과 터널 형상에 따른 암반의 변형 거동을 규명하기 위하여 불연속체 해석 결과와 연속체 해석 결과를 비교하였다.

연속체 해석결과와 BB 모델을 사용한 불연속체 해석 결과는 변위 및 응력 분포는 비슷한 양상을 보이는 반면, MC 모델을 사용한 불연속체 해석결과는 이와 다른 양상을 보였다. 또한 MC 모델을 사용하여 불연속체 해석을 실시할 경우 절리의 영향을 명시적으로 고려하였음에도 불구하고 연속체 해석 결과에 비해 변위 및 최소 주응력이 더 작게 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 MC 모델이 실제 절리의 변형거동 특성을 현실적으로 모사할 수 없기 때문에 발생하는 결과이며, 특히 절리면의 전단거동에 무관하게 팽창각을 일정한 상수로 취급하는 MC 모델의 특성으로 인한 결과이다.

1. 서 론

암반은 초기응력과 지각운동에 의해 생성된 불연속면을 포함하고 있으며, 이들 불연속면은 주변 블록에 비해 낮은 강도 특성 및 높은 투수성을 가짐으로 인하여 암반의 역학적, 수리적 거동을 좌우한다. 따라서 절리 암반에 굴착되는 터널의 안정성을 현실적으로 검토하기 위해서는 절리에 의한 영향을 고려한 해석을 수행해야 한다.

이러한 필요에 의해 절리의 영향을 고려할 수 있는 여러 가지 해석기법이 제안되었다. 이들 방법은 크게 절리의 영향을 명시적으로 고려할 수 있는 불연속체 개념의 해석법과, 개별 절리의 영향을 암시적으로 고려할 수 있는 방법으로 절리의 역학적 성질을 무결암과 결합시켜 절리를 포함한 암반의 전체적인 거동이 개별 절리를 고려할 때와 유사한 결과를 나타내도록 하는 연속체 개념의 해석법으로 대별할 수 있다. 불연속체 해석법으로 Cundall 등이 개발한 개별요소법에 의한 프로그램인 UDEC(Itasca Consulting Group, Inc., 1996)과 DDA(Discontinuous Deformation Analysis, Shi, 1988) 등이 대표적이다.

또한 절리 암반의 역학적 거동을 현실적으로 모사하기 위해서는 해석법의 선정에 못지않게 절리의 구성방정식 즉 절리 모델의 선정 또한 중요한 요소이다. Patton(1966)이 거칠기를 고려한 절리 모델을

제안한 이후로 많은 연구자들이 절리의 역학적 거동을 현실적으로 모사하기 위한 절리 모델을 제안하였으며, 그중 Barton과 Bandis(Barton & Bandis, 1990)가 제안한 Barton-Bandis 절리 모델(이후 BB 모델이라 칭함)이 현재까지 제안된 절리 모델 중 암석 절리의 거동을 가장 현실적으로 모사하는 것으로 인정받고 있다. 한편 절리의 미끄러짐이나 분리현상, 절리의 전단 변형에 따른 수직팽창 등 실제 절리의 역학적 거동을 모사하는데 한계가 있는 것으로 알려져 있는 Mohr-Coulomb 절리 모델(이후 MC 모델이라 칭함)도 많이 사용되고 있다.

이번 연구에서는 개별요소법을 이용한 프로그램인 UDEC Version 3.0에 의한 암반 터널의 안정성 해석을 수행함에 있어 BB 모델과 MC 모델을 선택하였을 경우의 결과를 비교하였으며, 각각의 결과를 연속체 해석 결과와 비교함으로써 BB 모델과 MC 모델의 유효성을 검증하고자 하였다. 연속체 해석은 FLAC Version 3.3을 이용하여 수행하였다.

2. BB 절리 모델과 MC 절리 모델 비교

절리의 역학적 거동을 현실적으로 모사하기 위해서는 수직변형 거동, 전단변형 거동, 치수효과, 절리의 전단변형에 따른 수직 팽창 효과를 모두 고려해야 한다. 이들 절리의 역학적 거동을 수치해석에 고려할 수 있도록 개발된 절리모델중 주로 사용되는 것은 MC모델과 BB 모델이다. 해석 결과는 사용하는 절리 모델에 따라 달라지며, MC 모델을 사용했을 때의 해석 결과보다 BB 모델을 사용했을 때의 해석 결과가 실제 절리암반 거동에 보다 더 잘 맞는 것으로 보고되고 있다(최성웅 등, 1999, Bhasin & Barton, 1997). 절리 거동 특성을 모사함에 있어 BB 모델과 MC 모델의 차이점을 Fig. 1에 도식적으로 표현하였다(최성웅 등, 1999). BB 모델은 비선형 수직변형 거동 및 전단변형 거동을 모사할 수 있는 반면, MC 모델은 선형 수직변형 거동 및 전단변형 거동으로 모사한다. 또한 실제 암석 절리에 대하여 실험적으로 증명된 치수효과, 즉 절리의 크기가 증가함에 따른 JRC(Joint Roughness Coefficient), JCS(Joint wall Compressive Strength) 감소로 인한 절리 전단 강도의 저하현상에 대해서는 BB 모델로는 모사 가능하나 MC 모델을 통해서서는 모사가 불가능하여 실제 암반의 거동에 비해 보수적인 해석 결과를 도출한다. 절리의 거동중 가장 중요한 특징인 전단변형에 따른 수직팽창 효과의 경우 MC 모델이 전단변형에 관계없이 일정한 팽창각을 갖는 것으로 모사하는 반면, BB 모델의 경우 전단변형에 따라 팽창각이 변하는 현상을 모사할 수 있다.

MC 모델과 BB 모델은 절리 거동 특성 모사 방법뿐만 아니라 사용하는 입력 물성에서도 차이가 있다. Table 1에 각 절리 모델의 필수 입력 물성을 정리하였다(최성웅 등, 1999). MC 모델의 입력 물성을 구하기 위해서는 절리면 압축시험과 절리면 전단시험을 수행해야 하는데 시험을 위한 시료 채취 및 성형이 번거로울 뿐만 아니라 시료 성형과정에서 절리면의 손상으로 인한 시험 결과의 신뢰도가 저하되는 문제가 있다. 반면 BB 모델의 경우 간단한 현장시험을 통하여 해석에 필요한 입력 물성을 얻을 수 있다는 장점이 있으며, 비용측면에서도 MC 모델의 입력물성을 얻는데 비해 유리하다.

MC 모델에서는 절리면 수직강성(K_n)과 절리면 전단강성(K_s)이 계산과정에서 중요한 인자인데 비해 BB 모델에서는 절리면 수직강성과 절리면 전단강성은 실제 계산에 사용되지 않는 그리 중요한 인자가 아니다. 단지 유한차분계산시 필요한 timestep의 크기를 결정하는데 사용된다. 실제 계산과정에서 절리면 강성은 주어진 입력 물성 JRC, JCS를 이용하여 자동적으로 계산된다

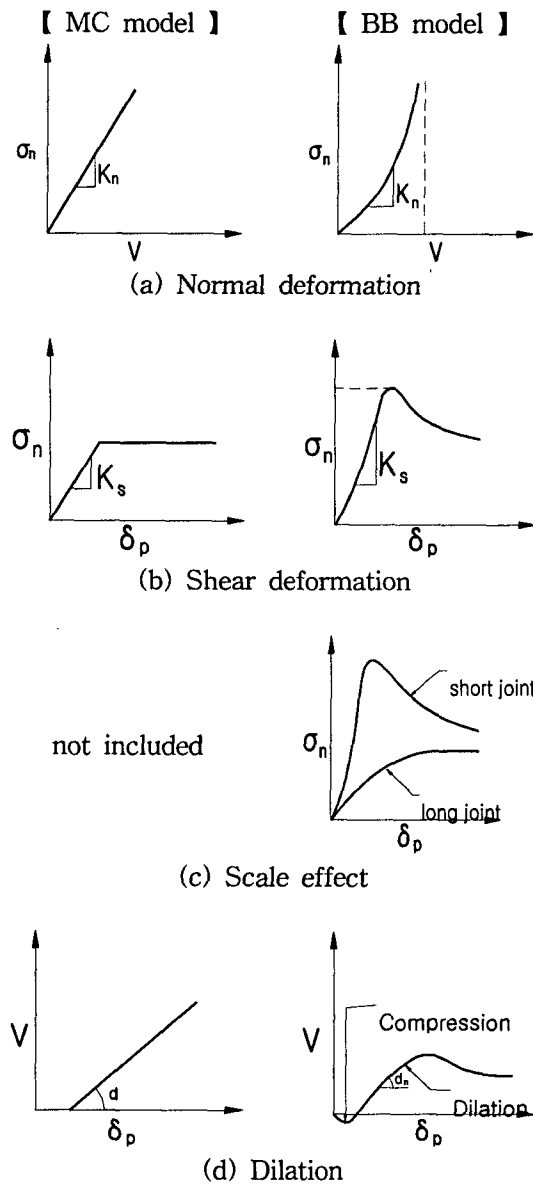


Fig. 1. Differences between MC joint model and BB joint model in simulating joint deformation behavior.

Table 1. Essential input parameters of MC model and BB model.

MC joint model	BB joint model
K_n (normal stiffness)	JRC
K_s (shear stiffness)	JCS
C(joint cohesion)	φ_b (basic joint friction angle)
φ (joint friction angle)	K_n (normal stiffness)
j_{ten} (joint tensile strength)	K_s (shear stiffness)

3. 적용 입력 물성 및 지보 패턴

본 연구에서는 연속체 해석결과와 BB 모델 적용시, MC 모델 적용시의 불연속체 해석 결과의 비교 분석을 위하여 연속체 해석 및 불연속체 해석을 각각 수행하였다. 따라서 입력 물성 또한 연속체 해석을 위한 물성과 불연속체 해석을 위한 물성을 별도로 산정하였다.

해석 대상 암반은 RMR 분류 결과 Type-IV에 속한다. 입력 물성 산정시 우선 암반 등급에 따른 각 물성의 범위를 결정하였다. 변형계수는 심도 및 무결암의 단축압축강도를 고려할 수 있는 Barton의 경험식을 활용하였고, 점착력과 마찰각은 Hoek-Brown 파괴기준식을 활용하였으며, 포아송비와 단위중량은 실내시험값을 활용하여 산정하였다. 연속체 해석시 보수적인 결과를 위하여 각 등급별 범위의 최소값을 사용하였다. 불연속체 해석시 블록의 물성은 절리 모델과는 무관하므로 MC 모델을 사용한 경우와 BB 모델을 사용한 경우 모두 같은 값을 사용하였다. 연속체 해석의 경우 암반 내에 존재하는 모든 절리의 영향을 고려하여 입력 물성을 결정하는 반면, 불연속체 해석에서는 일부 절리의 영향 명시적으로 고려하기 때문에 연속체 해석의 입력 물성보다 큰 물성을 적용해야 한다. 하지만 암반 내의 모든 절리를 해석에 고려할 수 없기 때문에 실내 시험 결과인 무결암의 물성보다는 작은 값으로 입력 물성을 결정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Type-IV의 입력 물성 범위중 최대값을 블록 물성으로 사용하였다. 축압계수는 0.5를 사용하였다. Table 2에 Type-IV의 물성 범위, 연속체 해석에 적용한 물성, 불연속체 해석에 적용한 블록 물성을 정리하였다.

Table 2. Summary of input parameters of block for continuum and discontinuum analysis.

	E_m (GPa)	Poisson ratio	Unit weight (g/cm^3)	Cohesion (MPa)	Friction angle ($^\circ$)	K_0
Range(Type-IV)	1.8~5.6	0.26	2.65	0.8~3.3	25~40	-
Continuum	1.8	0.26	2.65	2.6	35	0.5
Discontinuum	5.6	0.26	2.65	3.3	40	0.5

UDEC을 이용한 불연속체 해석을 위해서는 절리망 구성을 위한 절리 분포 특성, 블록의 물성 및 절리의 물성을 결정해야 한다. 절리망 구성을 위한 절리 분포 특성은 노두 조사 자료 및 BIPS, BHTV 조사 자료를 통계 처리하여 결정하였다. 절리의 간격 및 연장성을 조사 결과로 얻은 값을 넣을 경우 모델이 복잡해져 계산시간이 오래 걸리기 때문에 해석을 위해서는 적정선에서 간격 및 연장성을 조정할 필요가 있다. 간격 및 연장성을 조사결과의 3배로 하여 해석에 적용하였다.

앞서 언급한 바와 같이 MC 모델과 BB 모델은 각기 다른 입력 물성을 요한다. JRC와 JCS는 시추 코어상의 절리 조사를 통하여 결정하였다. Fig. 2는 충전물 유무 및 종류와 풍화상태에 따른 JRC, JCS 변화양상을 나타낸다. 기본 마찰각은 규암에 대한 값으로 문헌을 참조하여 결정하였다(Barton & Choubey, 1977). 수직 강성과 전단 강성은 JRC와 JCS를 이용하여 결정하였다(Bandis 등, 1983). MC 모델의 점착력과 내부 마찰각은 JRC와 JCS를 등가 점착력과 내부 마찰각으로 결정하였다(Hoek, 1998). 절리의 수직강성과 전단 강성은 BB 모델과 MC 모델에 공통적으로 사용하였다.

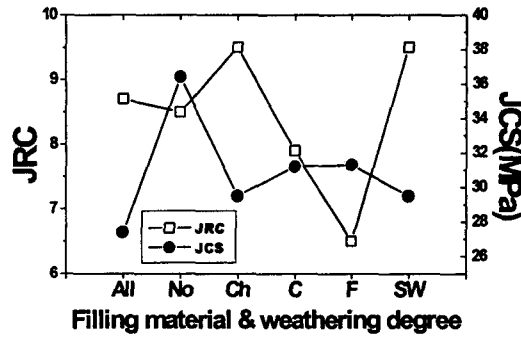


Fig. 2. Variations of JRC and JCS with filling material and degree of weathering.

Table 3. Summary of joint input parameters for discontinuum analysis.

Parameter		Joint set	Set 1	Set 2	Set 3
Geometry		Orientation (dip dir./dip)	011/87	073/35	296/79
		Trace length(m)	13.10	7.36	0.98
		Spacing (m)	0.42	1.70	1.88
Mechanical Properties		BB	JRC	9.5	
			JCS(MPa)	29.5	
			Basic Friction Angle(°)	25	
		MC	K_n (GPa/m)	20.0	
			K_s (GPa/m)	3.8	
			K_n (GPa/m)	20.0	
			K_s (GPa/m)	3.8	
			C(kPa)	46	
			φ (°)	34.5	
jten(MPa)	0.0				

지보 패턴은 종방향 1.0m, 횡방향 1.2m 간격으로 길이 4m의 록볼트와 두께 16cm의 슛크리트로 설계하였으며, 굴착은 상하반 분할 굴착하는 것으로 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과

4.1 변위 및 절리면 전단변위

Fig. 3은 BB 모델 적용시, MC 모델 적용시, 연속체 해석시 최종 단계의 변위도이다. 연속체 해석과 BB 모델 적용시 불연속체 해석 결과 최대 변위는 각각 4.41mm, 4.67mm로 인버트에서 발생한다. 하지만 MC 모델 적용시 불연속체 해석 결과에서 최대 변위 1.2mm는 천단에서 발생하여 상기 두 해석 결과와는 다른 경향을 보인다. 적용 축압계수가 0.5임을 감안할 때 인버트를 폐합하지 않고 보강할 경우 최대 변위는 인버트에서 발생하는 것이 역학적으로 올바른 결과이다. 또한 MC 모델 적용시 절리의 영향을 명시적으로 고려했음에도 불구하고 연속체 해석에 의한 결과보다 변위가 적게 발생하였다.

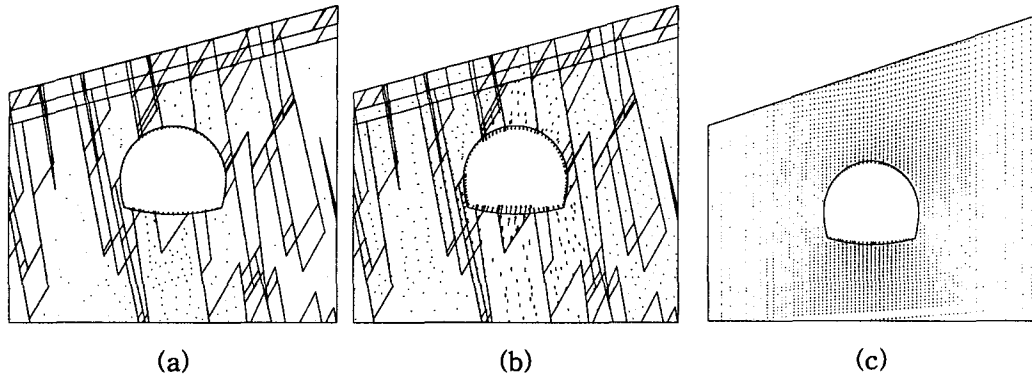


Fig. 3. Displacement vector at the final construction stage. (a) Discontinuum analysis with MC model, (b) Discontinuum analysis with BB model, (c) Continuum analysis.

Fig. 4는 세 가지 해석 경우의 최대 변위를 나타내며, Con.는 연속체 해석 결과이다. 최대 절리면 전단 변위도 BB모델 적용시에는 2.2mm로 인버트에서 발생하나 MC모델 적용시는 0.4mm로 천단에서 발생한다. MC 모델 적용시 최대 절리면 전단변위는 BB 모델 적용시 최대 절리면 전단변위의 20%정도로 그 발생량이 미미함을 알 수 있다.

MC 모델 적용시의 변위 발생 양상이 다른 두 경우와 다르고, 변위 발생량이 적은 이유는 절리 전단변위에 의한 수직팽창각을 일정한 값으로 가정하는 MC 모델의 한계로 인한 것으로 판단된다.

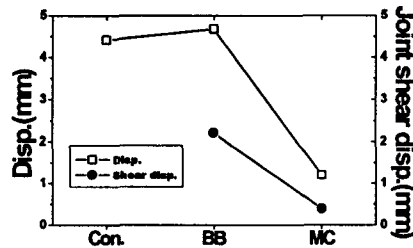


Fig. 4. Variations of maximum displacement and maximum joint shear displacement depending on joint model and numerical method.

4.2 응력

연속체 해석, BB 모델 적용시, MC 모델 적용시 모두 최대주응력의 최대값은 각각 4.4, 2.6, 1.2MPa로 응력집중이 가장 크게 발생하는 우각부에서 발생하였다. 연속체 해석, BB 모델 적용시 최소주응력 최대값은 인장력으로 변위에 의한 응력이완이 가장 큰 인버트에서 발생하는 반면, MC 모델 적용시 최소 주응력 최대값은 변위에 의한 응력이완이 가장 큰 천단에서 발생하며 그 값은 각각 0.04, 0.12, 0.036MPa이다. 응력 분포, 특히 최소 주응력 분포는 변위 분포와 마찬가지로 MC 모델 적용시 BB모델 적용시와 연속체 해석에 의한 응력 분포와는 다른 양상을 보임을 확인할 수 있다. Fig. 5는 시공 최종 단계에서의 주응력도이며, Fig. 6은 각 해석 경우에 따른 최대 주응력 및 최소 주응력의 최대값을 나타낸다.

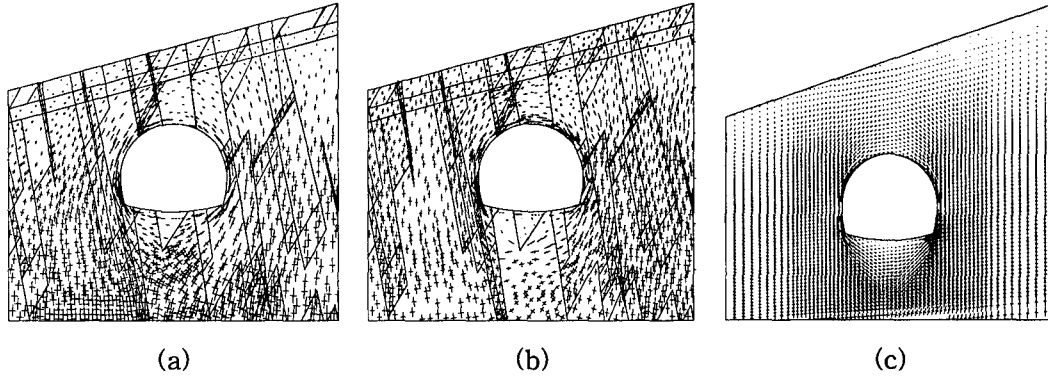


Fig. 5. Principal stress at the final construction stage. (a) Discontinuum analysis with MC model, (b) Discontinuum analysis with BB model, (c) Continuum analysis.

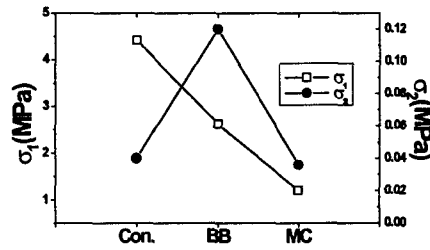


Fig. 6. Variations of maximum σ_1 and maximum σ_2 depending on joint model and numerical method.

4.3 지보재 응력

불연속체 해석의 경우 최대 록볼트 축력 및 최대 슛크리트 응력은 절리면 전단 변위가 크게 발생하는 위치에서 발생하며 그 값 또한 연속체 해석 결과보다 크다. 연속체 해석의 경우 지보재 부재력이 균등하게 분포하는 것과 비교해 볼 때 불연속체 해석이 연속체 해석보다는 좀 더 현실적인 해석 결과를 도출해낼 수 있음을 확인할 수 있다. 최대 슛크리트 응력 및 록볼트 축력의 크기는 BB모델 적용시, MC 모델 적용시, 연속체 해석시 순으로 감소한다. Fig. 7, Fig. 8은 시공 최종 단계의 록볼트 축력과 슛크리트 압축력을 나타내며, Fig. 9는 각 해석 경우에 따른 최대 록볼트 축력과 최대 슛크리트 압축응력을 나타낸다.

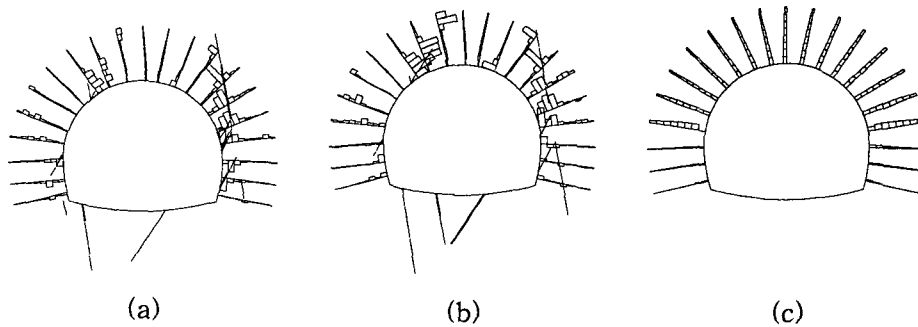


Fig. 7. Rockbolt axial force at the final construction stage. (a) Discontinuum analysis with MC model, (b) Discontinuum analysis with BB model, (c) Continuum analysis.

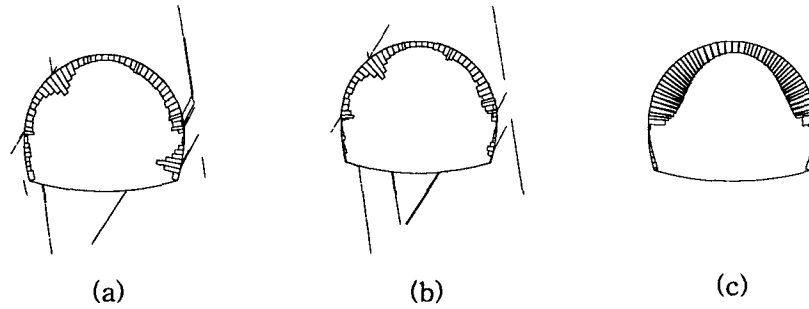


Fig. 8. Shotcrete compressive stress at the final construction stage. (a) Discontinuum analysis with MC model, (b) Discontinuum analysis with BB model, (c) Continuum analysis.

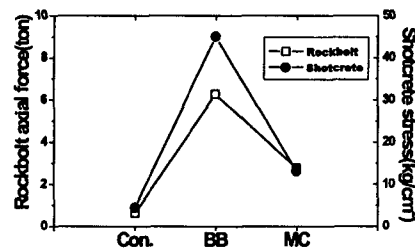


Fig. 6. Variations of maximum rockbolt axial force and maximum shotcrete compressive stress depending on joint model and numerical method.

4.4 평가

해석방법(연속체 해석, 불연속체 해석)에 관계없이 동일한 응력조건(축압계수)에서 변위 및 응력의 분포 양상은 유사해야 한다. 즉 본 해석의 경우와 같이 축압계수 0.5를 적용하고 인버트를 제외한 측벽 및 천단을 보강한 경우 최대 변위는 인버트에서 발생해야 하며, 최소 주응력의 최대값(인장력) 또한 변위에 의한 응력 이완이 가장 크게 발생하는 인버트에서 발생하는 것이 정상적인 현상이다. 연속체 해석결과와 BB 모델을 사용한 불연속체 해석 결과는 변위 및 응력 분포 양상이 앞서 언급한 양상과 비슷한 반면, MC 모델을 사용한 불연속체 해석 결과는 이와 다른 양상을 보인다. 이는 MC 모델이 실제 절리의 변형거동 특성을 현실적으로 모사할 수 없기 때문에 발생하는 결과이며, 특히 절리면의 전단거동에 무관하게 팽창각을 일정한 상수로 취급하는 MC 모델의 특성이 이러한 결과를 초래하는 가장 중요한 요인으로 평가되고 있다(Bhasin 등, 1997). 따라서 불연속체 해석시 보다 현실적인 결과를 얻기 위해서는 MC 모델보다 절리의 거동을 현실적으로 모사할 수 있는 BB 모델을 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

5. 결론

불연속체 해석을 이용하여 터널 안정성 해석을 수행할 경우 해석 결과는 절리 모델의 선택에 따라 달라진다. 따라서 본 연구에서는 개별요소법을 이용한 불연속체 터널 안정성 해석에 있어 BB 모델 적용시의 해석 결과와 MC 모델 적용시의 해석 결과를 비교하였다. 또한 주어진 응력 조건과 터널 형상에 따른 암반의 변형 거동을 규명하기 위하여 불연속체 해석과 연속체 해석 결과를 비교하였다. 해석 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1) BB모델 적용시 변위분포와 MC모델 적용시 변위분포는 각각 다른 양상을 보인다. 즉, BB모델을 사용한 경우 최대변위는 4.67mm로 인버트에서 발생하는 반면 MC 모델을 사용한 경우 최대변위는 1.2mm로 천단에서 발생한다. 단면형상, 적용 축압계수 0.5, 천단 및 측벽만 보강하였음을 고려할 때 최대변위는 인버트에서 발생하는 것이 합리적인 결과이나 MC모델 적용시 최대변위가 천단에서 발생하여 합리적인 결과라 볼 수 없다.

2) BB 모델 적용시, MC 모델 적용시 모두 최대주응력의 최대값은 각각 2.6, 1.2MPa로 응력집중이 가장 크게 발생하는 우각부에서 발생하였다. 최소주응력의 최대값은 BB 모델 적용시 변위에 의한 응력이완이 가장 큰 인버트에서 인장력으로 발생하는 반면, MC 모델 적용시 천단에서 인장력으로 발생하며 그 값은 각각 0.12, 0.036MPa이다. 최소 주응력 분포는 MC 모델 적용시와 BB모델 적용시 각각 다른 양상을 보임을 확인할 수 있었다.

3) 록볼트 축력과 슛크리트 응력은 BB모델 적용시와 MC모델 적용시 모두 절리면 전단변위가 큰 곳에서 크게 발생하였다. 하지만 BB모델 적용시 절리면 전단변위가 MC모델 적용시보다 크게 발생하므로 지보재 부재력 또한 BB모델 적용시가 MC모델 적용시보다 크게 발생하였다.

4) BB모델 적용시 해석결과, MC모델 적용시 해석결과, 연속체 해석결과를 비교·검토한 결과 동일한 해석 조건하에서 연속체 해석결과와 BB 모델을 사용한 불연속체 해석 결과는 변위 및 응력 분포 양상이 비슷한 반면, MC 모델을 사용한 불연속체 해석결과는 이와 다른 양상을 보인다. 이는 MC 모델이 실제 절리의 변형거동 특성을 현실적으로 모사할 수 없기 때문에 발생하는 결과이며, 특히 절리면의 전단거동에 무관하게 팽창각을 일정한 상수로 취급하는 MC 모델의 특성이 이러한 결과를 초래하는 가장 중요한 요인으로 평가되고 있다(Bhasin & Baton, 1997).

참 고 문 헌

1. 최성웅, 정소걸, 1999, Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, Vol. 9, pp. 141-148
2. Bandis, S. C., Lumsden, A. C., Barton, N., 1983, Fundamentals of Rock Joint Deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, pp. 249-268
3. Barton, N., Bandis, S., 1990, Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model in Engineering Practice, Proc. Int. Sym. on Rock Joints, Loen, Norway, pp. 603-610
4. Barton, N., Choubey, V., 1977, The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mech., Vol. 10, pp. 1-54.
5. Bhasin, R., Barton, N., 1997, A Comparison of the Barton-Bandis Joint Constitutive Model with the Mohr-Coulomb Model Using UDEC, Environmental and Safety Concerns in Underground Construction(eds. Lee, Yang & Chung), Balkema, Rotterdam.
6. Hoek, E., 1998, Rock Engineering Course Notes, pp. 70-72
7. Itasca Consulting Group, Inc., 1996, UDEC User's Manual, Ver. 3.0, Vol., 1, 2, 3
8. Patton, F. D., 1966, Multiple Modes of Shear Failure in Rock, Proc. 1st Int. Cong. Rock Mech., Lisbon, Vol. 1, pp. 509-513
9. Shi, G. H., 1988, Discontinuous Deformation Analysis: a New Numerical Model for the Statics and Dynamics of Block Systems, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, Calif.