

불연속면을 고려한 터널의 설계 및 보강 방안

A scheme of tunnel design considering rock discontinuities

문상조¹⁾, Sang-Jo Moon, 허도학²⁾, Do-hak Huh, 장석부³⁾, Seok-bue Chang

1) (주)유신코퍼레이션 전무이사, Yooshin Corporation

2) (주)유신코퍼레이션 대리, Yooshin Corporation

3) (주)유신코퍼레이션 부장, Yooshin Corporation

SYNOPSIS : This paper presents some proposed methods for discontinuum analysis with rock discontinuities data acquired in tunnel design stage. The limit equilibrium method for rock block sliding and falling proposed in this paper can consider the tunnel excavation and support stage, and, to the extent, the standard deviations and means of joint set orientation. Simple Distinct Element modelling methods are recommended in estimating the stability of tunnels in jointed rock masses. Because, the simple models are likely to show more consistent and clear than very complex model with finite joint length and joint deviation parameters.

Key words : Geometrical properties of joints, Discontinuum analysis

1. 서론

일반적인 터널의 규모에서 불연속면은 단층과 절리로 구분할 수 있으며, 단층은 비교적 대규모이고 일부 구간에 존재하는데 비하여 절리는 거의 모든 암반에 무수히 많이 산재되어 있는 특징이 있다. 단층에 비하여 절리가 터널에 미치는 영향은 미소하나, 모든 암반에 존재하기 때문에 암반의 거동특성에 직접적인 영향을 준다. 이러한 측면에서 본 논문에서는 단층보다는 암반절리와 터널의 설계와 관련된 사항에 대하여 현실적으로 적용이 어려운 부분과 개선방안을 다루었고 절리의 특성에 대해서는 주로 기하학적 분포특성을 중심으로 다루었다. 터널설계시 절리의 분포특성을 고려하기 어려운 원인은 절리조사 자체의 문제와 절리를 고려한 해석상의 난해함을 들 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 설계단계에서 습득할 수 있는 절리의 기하학적 분포특성 자료들의 특징과 제한사항을 설명하였고 이를 바탕으로 한 터널의 불연속 해석에 있어서 기존 해석상의 문제점을 지적하고 부족하나마 이에 대한 개선방안을 제시하였다.

2. 조사

절리의 분포특성에는 경사, 경사방향, 간격, 길이로 정의되며, 설계단계에서 절리의 기하학적 분포특성을 조사하기 위한 방안으로는 크게 시추코아관찰, 노두조사, 시추공내 촬영 등의 3 가지를 들 수 있다. 각각의 조사방법에 따른 조사항목과 제한사항은 다음 표 1과 같다.

표 1. 조사방법에 따른 조사항목과 제한사항

구 분	시추코아관찰	노두조사	시추공내 촬영
조사항목	경사, 간격 측정	경사, 경사방향, 간격, 길이	경사, 간격, 경사방향
조사 불가항목	경사방향, 절리길이등은 측정 곤란	-	절리길이 측정 곤란
특 징	<ul style="list-style-type: none"> · 토목구조물 계획심도 및 지점에서 조사가 가능 · 조사비가 적음 	<ul style="list-style-type: none"> · 적합한 노두가 없는 경우가 있음 · 주로 지표부근에 위치하여 토목 구조물 계획심도 및 지점과 이격되어 있어 정확성이 낮음 · 면적이 작은 경우에는 절리길이 측정이 곤란함 	<ul style="list-style-type: none"> · 토목구조물 계획심도 및 지점에서 조사 가능 · 조사비가 높음

위 표와 같은 이유로 일반적으로 절리경사와 간격 외의 자료를 습득하기는 쉽지 않으며, 현장에서 모아진 절리자료는 다수의 표본자료 성격을 갖게 된다. 각각의 절리분포특성은 평균과 편차를 구하기 위하여 통계처리된다.

3. 해석

3.1 개요

절리를 고려한 해석에는 크게 낙반해석과 개별요소해석을 들 수 있다. 이 두 해석법의 장단점은 다음 표 2와 같다.

표 2. 낙반해석과 개별요소해석의 특징

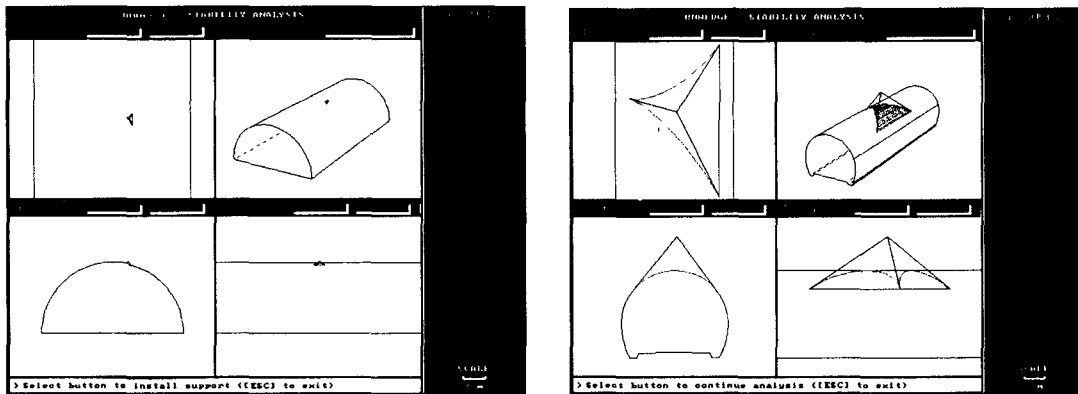
구 분	낙반해석	개별요소해석
상용 해석프로그램	UNWEDGE	UDEC
해석개요	<ul style="list-style-type: none"> · 한계평형법을 이용 · 3개의 우세절리군으로부터 터널천장, 막장, 측벽등에 형성되는 블록형상 파악 	<ul style="list-style-type: none"> · 블록의 운동방정식과 접촉점의 힘-변위 법칙을 이용 · 절리면으로 구획된 암석블록의 운동학적(kinematic) 거동 해석 가능
특 징 및 장·단점	<ul style="list-style-type: none"> · 한계평형해석을 통하여 쉘기형 암석의 낙석 및 활동에 대한 안전성 검토 · 블록은 변형체로 해석할 수 없음 · 원지반 응력조건 및 터널주변 응력조건을 고려할 수 없음. 	<ul style="list-style-type: none"> · 암석블록의 변형과 슛크리트 및 록볼트는 연속체해석과 동일한 방법으로 고려됨 · 블록을 강성체 또는 변형체로 해석할 수 있음 · 블록 주변 및 내부의 응력상태를 고려함

3.2 낙반해석 현황 및 개선방안

기존 낙반해석에서는 무지보구간과 지보구간의 구별이 없이 절리군에 의해 형성되는 낙반의 규모를 파악한 후 지보전과 후의 안정성만을 평가하는 것이 일반적인 방법이었다. 그러나, 굴착 중에는 굴착 및 지보순서에 따라 굴진장에 해당하는 무지보 구간과 지보구간으로 구별이 되며 이 구간에서 형성되는 이동 가능한 블록의 규모도 다를 것이다.

따라서, 터널의 굴착공법과 굴착 및 지보순서를 고려하여 낙반해석을 하는 것이 적합할 것이다. 그림 1은 상·하반 분할굴착과 무지보 및 지보시에 각각 형성되는 블록의 규모를 나타낸 것으로 분할굴착 및 무지보 구간에서 형성된 낙반과 지보구간에서 형성된 낙반은 그 절리군의 블록형성에 따라 차이가 크게 발생된다. 그러나, 일반적으로 굴진장이 매우 짧은 경우에는 형성된 낙반의 규모도 매우 적기 때문에 터널 안정성에 위협이 될 정도는 아닌 것으로 판단된다.

반면에 지보구간에서는 경우에 따라서는 형성된 블록의 규모가 매우 커서 추가 지보가 검토되어야 할 정도로 안정성에 중대한 영향을 주는 경우도 있으므로 주의해야 한다.

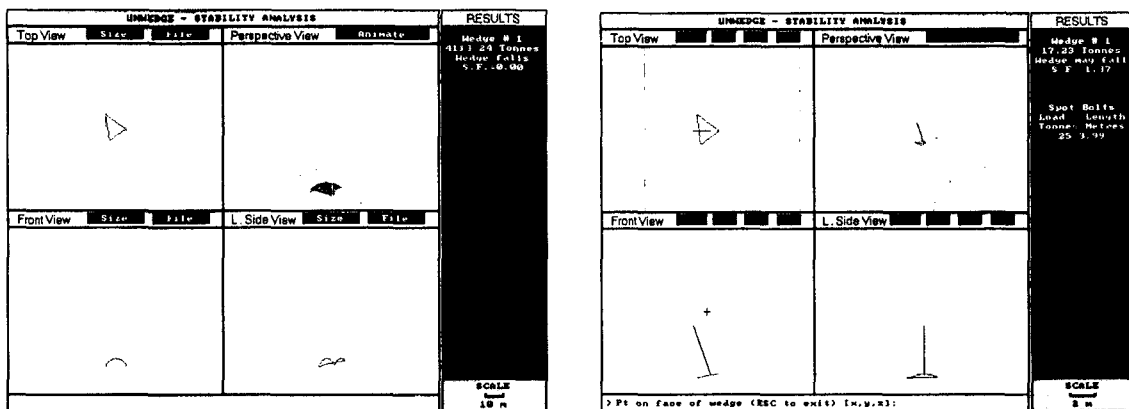


(a) 상반분할 굴착 및 무지보(굴진장)구간

(b) 지보구간

그림 1. 상반굴착, 무지보구간 및 지보구간 낙반해석

그림 2는 터널 주변에 대규모 낙반이 형성된 경우 지보전과 지보후의 낙반해석 결과이다. 터널 주변에 형성된 낙반의 규모가 매우 크기 때문에 지보후 안전율(S.F.=1.3)이 매우 낮은 상태로 불안정한 상태를 나타낸다.



(a) 지보전

(b) 지보후

그림 2. 터널주변에 형성된 대규모 낙반

이 경우와 같이 터널 주변에 대규모 낙반이 형성될 경우 한계평형법을 이용한 낙반해석은 단순히 형성된 블록면에서의 전단저항력에 의해서만 안전율을 판단하게 되므로 불안정한 상태로 나타날 수 있다. 그러나, 실제의 경우 터널 주변에서는 일정한 응력상태가 존재하므로 상기와 같이 불안한 상태는 아닐 것으로 판단된다.

따라서, 낙반해석시 대규모 낙반이 형성될 경우는 단순히 낙반의 규모(낙반의 무게)에 의해서만 안정성을 판단할 것이 아니라 개별요소해석 결과를 참고하는 등의 주변 응력상태를 고려하여 판단하는 것이 적절할 것이라 판단된다.

이외에도 절리 분포특성상 절리경사는 편차를 지니게 된다. 이 경우 편차에 따라서 낙반의 규모가 다소 차이가 나므로 향후 낙반해석에서는 절리평균에 대한 해석외에 편차를 고려한 낙반해석도 필요할 것이다.

3.3 개별요소해석

기존 2차원 개별요소해석의 결과 중 대부분은 지반조사에서 얻어진 절리 분포특성을 동일하게 적용하여 해석목적과는 연관성이 결여된 결과를 도출하는 경우가 있었다. 그래서, 본 논문에서는 동일한 절리 분포에 대한 입력자료를 가지고 해석목적에 따라 각각 다른 방식의 수치해석 접근방법을 제시한 것이다.

최근 암반터널 설계에서는 해석목적이 불분명하고 지나치게 복잡한 개별요소모델링을 적용하는 경향이 있다. 이는 정량적인 안정성 해석을 위해서는 통계적으로 충분히 많은 계산회수가 요구되는 문제점이 있는 것으로 판단된다. 따라서, 결정적 모델을 적용하고 해석목적에 적합한 해석을 하기위해 절리군과 터널의 상대방위를 고려하는 방법과 터널 해석을 위한 개별 요소해석에서 적절한 절리발생방법을 제안하였다(장석부와 허도환, 2001).

3.3.1 2차원 개별요소모델링에서의 절리군의 고려

일반적으로 암반은 다수의 절리군을 포함하며, 이들 절리군의 방위는 터널의 안정성에 큰 영향을 미친다. 절리군의 방위는 경사와 경사방향(주향)으로 표현되며, 절리의 경사는 터널방향에 따라 해석단면에 투영되는 외견경사가 크게 변한다.

그림 3은 터널과 다양한 상대방위를 갖는 5개의 절리군을 보이고 있으며 절리군 J1, J2는 터널축과 평행, J3는 거의 직교, J4는 약 45° 정도로 교차하고 J5는 거의 수평이다.

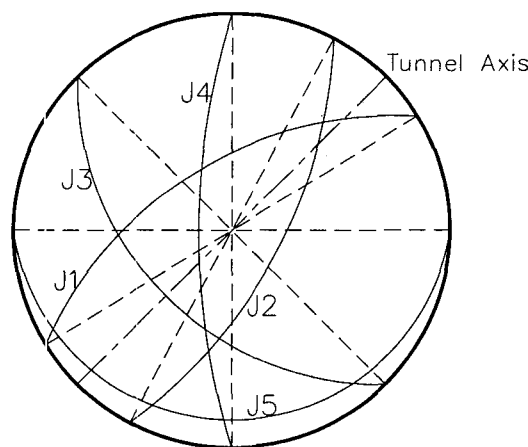


그림 3. 터널방향과 5개 절리군의 방위에 대한 평사투영도

터널과 절리군의 주향과 이루는 각도를 β 라 하고, 절리군의 경사를 dip으로 표현하면, 터널단면상에 투영된 절리군의 외견경사, δ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\delta = \tan^{-1}[\cos\beta \tan(\text{dip})] \quad (1)$$

그림 4(a)는 비교적 절리군의 주향이 터널과 평행하여 외견경사 $\delta 1$ 과 $\delta 2$ 가 실제 절리군 J1, J2와 유사한 것으로 두 절리군에 의한 낙반 또는 측벽부분에 있는 암석블록의 활동면을 제공한다. 이러한 거동 특성은 2차원 개별요소해석의 모델과 매우 유사한 거동특성을 보이므로 모델링이 적절하다고 할 수 있다. 반면에, 나머지 절리군들은 2차원 개별요소해석에서는 고려될 수 없는 막장면 암석블록을 형성하거나 수평절리군을 형성한다.

그림 4(b)는 터널과 절리군의 주향이 이루는 각도 β 에 따라 실제 경사(dip)에 대하여 감소하는 외견경사각 δ 를 보여주고 있으며 $\beta=30^\circ$ 까지는 δ 가 실제경사와 큰 차이가 없으나 터널의 불연속해석 모델링시에는 $\beta=45^\circ$ 까지를 평행한 절리로 고려하는 것이 안전측 해석일 것이다.

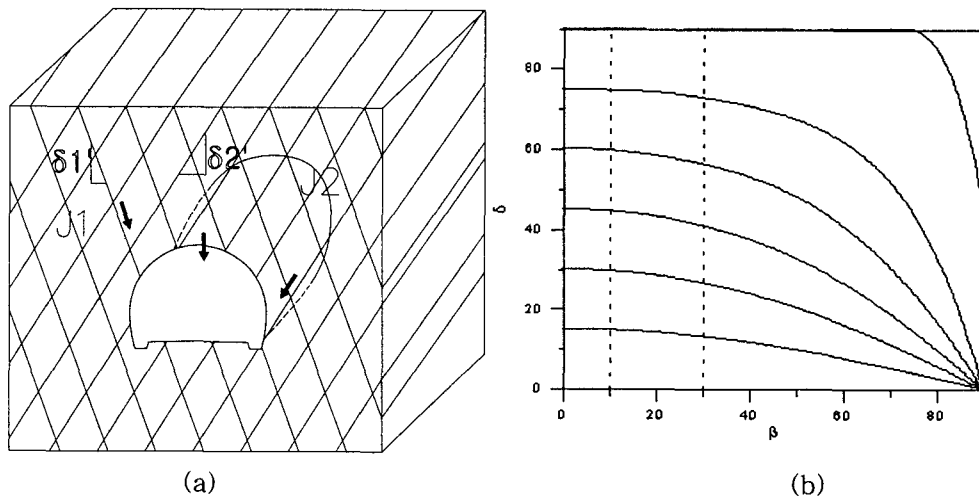


그림 4. 터널방향에 대한 절리군의 상대방위에 따른 외견경사

즉, 2차원 개별요소해석시에는 터널과 주향이 45° 이하이거나 경사가 20° 이하인 절리군을 절리망 생성시 반영하고 이 외 절리군은 암석블록의 탄소성 특성을 보정하는데 사용하는 방법을 제안한다.

개별요소블록을 형성하지 못한 절리군을 암석블록의 물성보정에 보정하기 위해서는 절리와 무결암의 특성으로부터 암석블록의 물성을 결정하는 방법이 요구된다. 한 예로써, Fossum(1985)이 제시한 절리군의 방위와 간격(S)에 따라 암반의 탄성이방특성을 유도하는 방법도 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 이 방법은 동일한 절리군의 자료를 가지고 절리의 불연속 거동을 직접모델링함과 동시에 블록형성이 곤란한 절리군은 암석블록의 연속체 물성으로 고려하는 합리적인 방법이라고 판단된다.

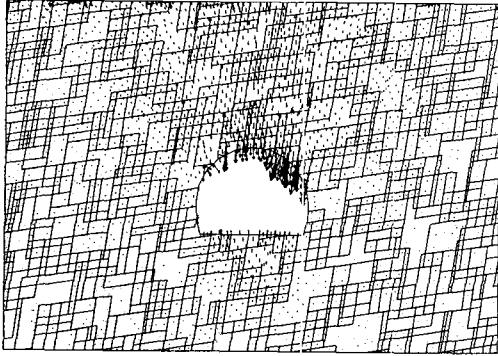
3.3.2 절리발생을 고려한 해석방법

절리암반은 절리군의 기하학적 특성과 역학적 특성에 큰 영향을 받으며, 전자는 터널의 파괴 및 활동양상에 절대적인 영향을 미치며, 후자는 절리면의 활동양상에서 안전율의 결정에 영향을 미친다(장석부, 1997). 따라서, 절리암반의 개별요소모델링시에는 실제 터널의 거동을 묘사할 수 있도록 개별요소들인 암석블록들의 집합체를 구성하는 것이 매우 중요하다.

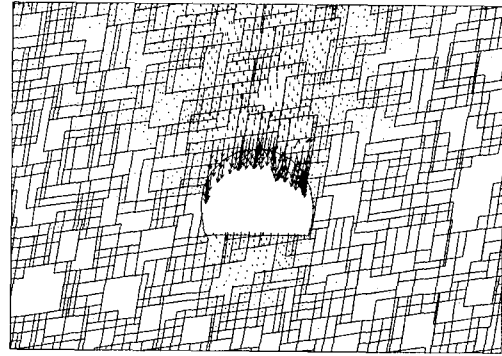
동일한 절리자료에 대해서도 절리발생 방법에 따라 암석블록의 형상과 블록들의 배치는 크게 달라질 수 있다. 그림 5은 UDEC의 내부발생기를 이용하여 절리방위편차와 절리길이를 고려한 경우(Model A)와 고려하지 않은 경우(Model B)에 대하여 절리를 발생시킨 후 개별요소해석을 수행한 결과를 보여주

는 것이다.

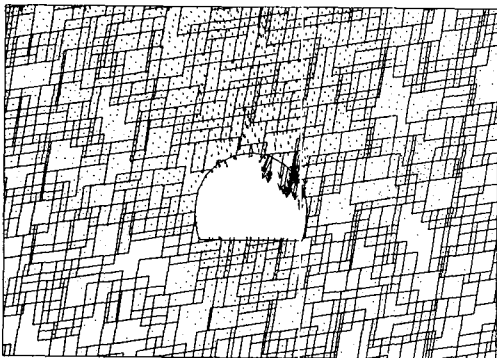
Model A는 천정부에서 전반적으로 변위가 발생을 하지만 변위발생의 우세 위치가 각각 다르며 그 정도도 다르게 나타났다. 반면에 Model B는 절리와 터널굴착면이 만나는 조건에 따라 약간의 차이가 발생하나 변위발생양상이 매우 유사하고 연직절리를 따라 뚜렷하게 불연속거동을 보이고 있다.



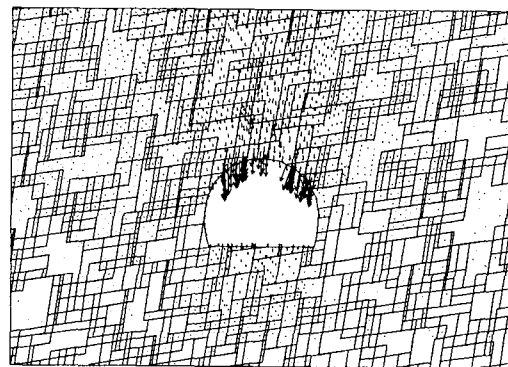
Model A-1



Model A-2

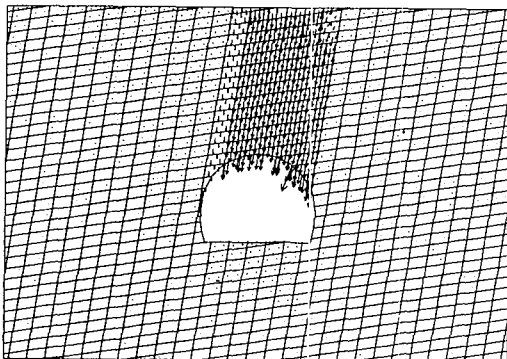


Model A-3

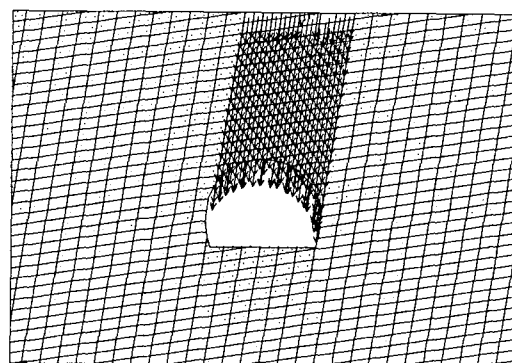


Model A-4

(a) 방위편차와 절리길이를 고려한 경우



Model B-1



Model B-2

(b) 방위편차와 절리길이를 고려하지 않은 경우
그림 5. 절리발생방법에 따른 터널주변 암반의 거동특성

절리의 방위편차와 길이를 고려한 경우, 특히, 통계적으로 복잡한 방법이 적용될수록 해석결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 통계적으로 충분히 많은 횟수의 해석이 필요하다. 반면에 절리의 방위편차와 길이를 고려하지 않은 개별요소 모델은 일관된 해석결과를 보여주는 경향이 크기 때문에 해석결과의 대표성을 부여할 수 있다. 그리고, 절리의 방향성에 따른 암반의 불연속 및 이방성 거동을 쉽게 파악할 수 있기 때문에 보강대책 수립이 용이한 장점이 있다.

4. 결론

지금까지는 설계단계에서의 터널 불연속 해석시 설계단계에서 습득할 수 있는 절리의 기하학적 분포 특성 자료들의 특징과 제한사항을 고려치 않으므로써 불연속 해석결과에 대한 신뢰성이 다소 문제가 있었다. 이에 본 논문에서는 설계단계에서 얻어지는 절리의 기하학적 분포특성에 대한 자료를 가지고 불연속해석을 수행하는데 있어서 기존의 방법보다 다소나마 개선된 방안을 제안코자 하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

- 1) 절리의 기하학적 분포를 정의하는 변수에 대한 조사자료의 신뢰성을 불연속해석시 충분히 검토할 필요가 있다.
- 2) 낙반해석시에는 터널의 굴착방법과 굴착방향에 따라 지보구간과 무지보구간을 각각 구별할 필요가 있으며, 이 때, 절리의 방위편차를 고려하는 방안이 적절할 것으로 판단된다. 낙반해석은 해석자체에 소요되는 시간과 노력이 작기 때문에 가능한 많은 해석을 수행하는 것이 적절할 것으로 사료된다.
- 3) 터널설계를 위한 개별요소해석은 전산효율 및 비용측면에서 대부분 2차원해석이 이루어지기 때문에 터널과 절리군의 상대방위를 고려한 개별요소모델링이 필요하다. 또한, 개별요소모델링에는 지나치게 복잡한 모델은 지양해야 소수의 해석에 있어서 신뢰성과 일관성 있는 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

끝으로, 설계단계에서 불연속해석에 대한 신뢰성과 정확성을 향상시키기 위해서는 조사의 질과 양을 늘리는 것 외에도 현장 시공시 절리면에 의한 터널거동 특성에 대한 체계적인 자료가 뒷받침되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 장석부, 문현구(1993), 통계적 개별요소 모델링 기법에 관한 연구, 한국자원공학회 제 60회 학술발표회 논문집, p.215-220
2. 장석부(1997), 절리의 기하학적 특성과 역학적 특성을 고려한 절리암반의 개별요소모델링에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, p.133
3. Cundall, P.A.(1992), Numerical modelling of jointed and faulted rock, *Proc. of the Int. Con. on Mech. of Jointed & Faulted Rock*, pp.11-18.
4. Fossum, A.F.(1985), Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.22*, No. 6, pp.467-470.
5. Starfield, A.M. & Cundall, P.A.(1988), *Toward a methodology for rock mechanics modelling*, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.25*, No.3, pp.99-106.