

불연속 암반 내 지하공동의 변형거동에 관한 수치해석

이종길(아주 지오엔지니어링) · 백환조(강원대학교 지구시스템공학과)

1. 서 론

지하공간 구조물의 건설대상이 되는 지하암반은 단층이나 절리, 층리, 균열과 같은 다양한 불연속면을 포함하고 있으며 이들 불연속면의 기하학적 형태와 역학적 특성은 지하구조물의 안정성에 대단히 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 지하구조물의 정확한 안정성 해석을 위해서는 불연속면의 특성을 효과적으로 해석에 반영할 수 있는 해석기법의 확립이 필수적이다. 불연속면을 포함하고 있는 암반에 대한 수치해석은 크게 연속체 개념의 해석법과 개별체 개념의 해석법으로 구분할 수 있다. 한편, 절리의 역학적 성질을 무결암과 결합시켜 절리를 포함하는 암반의 전체적인 거동이 개별절리를 고려할 때와 유사한 결과를 나타내도록 하는 연속체 개념의 절리해석기법이 점차 보편화되고 있으며 이러한 연속체 절리모델 또는 편재절리모델(Ubiquitous Joint Model)의 기본 원리는 불연속면에 의해 블록으로 나누어진 불연속 암반을 불연속면의 특성이 반영된 연속체로 가정하여 해석하는 것으로 불연속면의 발달간격이 구조물의 크기에 비해 충분히 작은 경우 적용이 가능하다(이연규, 1994; 박연준 등, 1997). 본 연구에서는 연속체 절리모델을 이용하여 불연속면이 우세한 방향성을 갖는 단일 균의 형태로 발달되어 있는 암반에서 불연속면의 역학적 특성, 불연속면의 방향성, 공동의 단면형상 및 축압계수의 변화에 따른 탄소성해석을 수행하여 지하공동의 변형거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 수치해석모델

1) 해석과정

불연속 암반에 공동이 굴착되면 공동주위는 이차적 응력 재분배로 인한 응력집중과 불연속면 및 암반자체의 항복으로 인한 소성영역이 발생하게 되며 이러한 거동을 묘사하기 위해 탄소성해석을 수행하였으며 모델은 평면변형률 상태의 Mohr-Coulomb 항복조건식을 적용하였다. 또한, 해석에 사용된 모델은 단일 절리균의 불연속면을 포함하므로 대칭성을 보이지 않기 때문에 공동 전단면을 고려하였으며 공동은 전단면 굴착에 의해 굴진되는 것으로 가정하였고 수직응력은 암반의 자중만을 고려하였다. 공동굴진과 함께 공동의 횡방향이나 축방향으로 하중전이효과(arching effect)가 발생하며 이러한 축방향의 하중전이를 2차원 평면상에서 적절히 고려해주기 위해서는 하중분담률의 도입이 필요하다. 본 해석에서는 내부압력

으로 하중분담률을 조절하는 방법에 의해 40-30-30의 하중분담율을 적용하였다. 또한, 해석을 위한 무결암, 지보재 및 불연속면의 물성치는 Table 1과 같이 설정하였다.

2) 매개변수 설정

불연속 암반의 거동은 암석자체의 역학적 특성보다는 불연속면의 공간적 분포 및 역학적 특성에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 지하 구조물의 건설에는 불연속면의 영향을 고려하는 것이 중요하며 또한 지하 구조물의 설계와 안정성을 해석하는데 있어 축압계수, 즉 수직응력에 대한 수평응력의 비(K)는 중요한 고려사항이다. 이러한 매개변수의 변화가 지하공동의 변형거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 먼저 공동단면의 경우 동일한 단면적을 갖는 원형과 마제형단면을 선정하였으며 공동단면 장단축의 변화 및 곡률반경의 변화에 따른 변형거동을 살펴보기 위해 장단축의 비가 2:1인 수평타원과 수직타원에 대해서도 고려하였다. 공동은 50m의 심도에 위치하는 것으로 가정하였다.

불연속 암반에 대해 연속체 절리모형을 적용하기 위해서는 다음과 같은 불연속면의 일반적인 속성이 고려된다. 첫째, 암반내에 분포하는 다양한 상태의 불연속면들은 주향과 경사 및 간격이 비교적 일정한 주절리군으로 표현되며 둘째, 절리군내에서 절리면의 역학적 특성은 비교적 일정하다. 따라서, 불연속면이 갖는 방향성에 대한 고려는 2차원 해석의 제한으로 인해 불연속면의 주향은 공동의 굴진방향과 일치하는 것으로 보았으며 불연속면의 경사는 수평면과 각각 0°, 30°, 45°, 60°, 90°로 변화하는 경우를 설정하였다. 또한, 불연속면의 역학적 특성은 Table 1을 기준으로 3단계(CASE 1, CASE 2, CASE 3)로 나누어 점차적으로 낮아지도록 하였으며 축압계수(K)는 이들 각각에 대하여 0.5, 1.0, 1.5, 2.0으로 변화시키면서 해석을 수행하였다.

3. 해석결과 및 고찰

1) 불연속면에 의한 영향

불연속면이 우세한 방향성을 가지고 발달되어 있는 경우 암반의 역학적 특성은 취약면의 존재로 인하여 전체적으로 이방성을 보이게 된다. 이러한 암반 내에 공동이 굴착되는 경우 굴착면 주위에는 다른 부분에 비해 상대적으로 변형이 큰 부분이 발생하게 된다. Fig. 1은 각각 연속체 모델과 연속체 절리모형을 이용하여 해석한 결과로 연속체 모델을 이용한 경우에는 공동의 변형거동은 단면형상에 따라 항상 대칭적으로 나타나는 특징을 보인다. 그러나 연속체 절리모형과 같이 불연속면을 고려하는 경우(dip_angle=30°) 불연속면의 존재로 인하여 공동의 변형은 수직축에 대해 비대칭성을 나타내며 굴착면 주위에서 발생하는 변위를 살펴보면 불연속면에 수직인 방향에서 큰 변위가 발생한다. 소성영역의 분포양상도 연속체 모델을 적용한 경우 원형공동 주위에서 동일한 깊이로 전개되는 양상을 보이나 불연속면을 포함하는 연속체 절리모형의 경우 공동단면 수직축에 대해 비대칭적으로 분포하며 불연

속면에 수직한 방향으로 전개되는 특징을 보인다.

Figs. 2, 3은 축압계수 $K=1.0$ 인 경우에 원형단면에서 불연속면의 경사 및 강도변화에 의한 천반 및 측벽에서의 변위를 나타낸 것으로 불연속면의 강도가 CASE 1인 경우 불연속면의 경사변화는 공동의 변형거동에 크게 영향을 미치지 않으나 불연속면의 강도가 CASE 2, CASE 3로 점차 낮아짐에 따라 공동의 변형은 불연속면의 경사에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 마제형단면에서 불연속면의 강도변화에 따른 공동의 변형상태를 도시한 것으로 불연속면의 물성치가 CASE 1인 경우에 발생하는 변위는 공동단면 수직축에 대하여 거의 대칭적으로 나타나지만 불연속면의 강도가 저하됨에 따라 30° 경사의 불연속면과 접하는 공동의 경계부 즉, 천단 좌측부분과 바닥 우측 모서리 부분에서 변위량의 급격한 증가를 살펴볼 수 있다. 따라서 불연속면이 우세한 방향성을 가지고 발달한 암반의 경우에는 단순히 RMR이나 Q-system과 같은 암반분류법에 의해 암반의 강성을 낮추어 연속체 모델을 적용하는 것은 바람직하지 않으며, 지반조사 단계에서부터 불연속면의 공간적 분포 및 역학적 특성을 정확히 파악해야 할 것으로 판단된다.

2) 불연속면의 경사변화

Figs. 5, 6는 $K=1.0$ 인 경우 원형단면에 있어 하중이완에 따른 천반의 처짐 반경방향의 변위를 불연속면의 경사에 따라 도시한 것으로 천반의 처짐은 불연속면의 경사가 수직에 가까울수록 감소하는 경향을 보이나 O-A선 방향으로의 반경방향 변위는 수직 및 수평경사에 비해 불연속면이 경사진 경우 상대적으로 큰 변위량을 보이며 60° 의 경사에서 가장 큰 변위를 나타낸다. 수평경사인 경우 천반의 처짐 및 하반의 용기는 상대적으로 큰 값을 나타낸다.

Fig. 7은 마제형단면에서 천반의 처짐을 도시한 것으로 원형단면과는 달리 60° 의 경사에서 가장 큰 변위가 발생하며 반경방향의 변위는 원형단면의 결과와 유사함을 보이나(Fig. 8), 불연속면의 경사가 60° 인 경우 원형단면과 비교하여 상대적으로 큰 변위가 발생하며 이러한 현상은 처반의 처짐에서도 살펴볼 수 있다. 이러한 원인은 마제형단면의 좌우측벽부 및 바닥부에서 취약면을 따라 발생하는 전단항복에 의한 영향으로 마제형단면은 원형단면에 비해 불연속면의 영향을 더 크게 받고 있음을 알 수 있다.

3) 공동단면의 형상변화

공동단면의 형상변화에 의한 공동주위 응력분포 및 변위에 대한 연구는 지금까지 많은 연구가 이루어져 수학적으로 계산이 가능하나 분석이 가능한 공동형상이 제한되어 있으며 대부분이 탄성조건에 기초하고 있다. 또한, 불연속면을 고려한 공동단면의 형상변화에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 공동단면의 장단축의 변화 및 불연속면이 접하는 지점에서의 곡률반경의 변화에 의한 영향을 살펴보기 위해 장축 대 단축의 비가 2 대 1인 수평장축을 갖는 타원형(Model III)과 수직장축을 갖는 타원형(Model IV)을 적용하였으며 기존

의 원형 및 마제형 단면과 비교하였다.

Figs. 9, 10은 공동단면의 4가지 형상에 대한 천반의 처짐 및 측벽에서의 수평변위를 불연속면과 접하는 공동의 곡률반경 변화에 따라 도시한 것으로 천반의 처짐은 곡률반경이 가장 작은 수직타원의 경우 가장 작은 변위를 나타내며 곡률반경이 커짐에 따라 천반의 수직변위는 증가하는 경향을 보인다. 또한, 측벽에서의 수평변위는 수직경사와 접하는 지점에서의 곡률반경이 가장 작은 수평타원의 경우 가장 작은 값을 나타내며 곡률반경에 비례하여 증가한다.

4) 측압계수

연직응력을 일정하게 고정하고 수평방향의 응력을 측압계수에 의해 0.5, 1.0, 1.5, 2.0의 비율로 변화시키면서 공동의 변형거동을 살펴보았다. Figs. 11, 12은 원형단면에서 측압계수의 변화에 의한 천반의 처짐 및 측벽에서의 내공변위를 불연속면의 경사변화에 따라 도시한 것으로 천반에서 발생하는 처짐은 수평경사의 경우 측압계수가 증가함에 따라 즉, 초기 수평응력이 수직응력에 비해 상대적으로 커짐에 따라 급격하게 증가하는 반면, 그 이외의 경사에서는 측압계수의 변화는 공동의 수직변형거동에 상대적으로 큰 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다. 또한, 측벽에서의 내공변위는 경사변화에 따라 큰 차이는 보이지 않으며 전체적으로 측압계수가 점점 커짐에 따라 수평응력에 비례하여 증가하는 경향을 보여준다. Figs. 13, 14은 마제형단면에서 측압계수의 변화에 따른 천반의 처짐 및 측벽에서의 내공변위를 나타낸 것으로 천반의 처짐은 천단부 단면형상의 유사함으로 인해 원형단면에서의 결과와 비슷한 양상을 보이며 수평경사의 경우 원형단면에서와 같이 초기 수직응력에 비해 수평응력이 커짐에 따라 천반의 처짐은 급격하게 증가되는 특징을 보인다.

이러한 현상은 수평응력이 상대적으로 커짐에 따라 공동의 경계부와 접하는 불연속면이 인접한 불연속면으로부터 분리되어 공동 안쪽으로 수렴되는 것에 기인한다. 또한, 측벽에서의 내공변위는 초기수직응력에 비해 수평응력이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보이며 단면형상의 차이로 인해 원형단면과는 달리 측압계수가 커짐에 따라 수직경사에서 가장 큰 변위를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 연속체 절리모델을 이용하여 절리나 층리, 균열등의 취약면이 암반 내에서 우세한 방향성을 갖는 단일균의 형태로 발달되어 있는 경우 불연속면의 역학적 특성, 불연속면의 방향성, 공동의 단면형상, 측압계수의 변화에 따른 탄소성해석을 수행하여 매개변수의 변화가 지하공동의 변형거동에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 살펴보았으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 불연속 암반에서 공동의 변형거동은 불연속면에 수직인 방향에서 상대적으로 큰 변위가

발생하며 불연속면의 강도가 저하됨에 따라 이러한 경향은 더욱 두드러지며 소성영역의 전개양상도 유사함을 보인다. 따라서 대상암반을 암반분류법에 의해 단순히 연속체로 가정하는 것은 불합리하다.

2. 정수압 하에서 불연속면의 경사변화에 의한 공동의 변형거동은 공동단면 변화로 인한 2차응력의 크기 및 방향변화로 인해 차이를 보이며 마제형공동의 경우 불연속면의 경사가 $45 + \phi_w/2$ 부근에서 가장 불리한 변형거동현상이 관찰된다. 또한, 불연속면의 강도 저하로 인한 추가적인 항복영역의 진전은 불연속면이 경사진 경우 전단항복이 지배적으로 발생하며 수평 및 수직경사의 경우 공동경계면이 불연속면과 나란한 부분에서 인장응력에 의한 항복이 발생한다.
3. 공동단면의 형상변화에 의한 공동천반의 처짐은 수평경사를 갖는 불연속면과 공동천반이 접하는 지점의 곡률반경이 커짐에 따라 증가하며 측벽에서의 수평변위도 수직경사와 접하는 공동벽면의 곡률반경에 비례하여 증가한다.
4. 측압계수(K)의 변화에 의한 공동의 수직변형거동은 초기 수직응력에 비해 수평응력이 증가함에 따라 수평경사에서 가장 큰 영향을 받는 반면 수평변형거동은 측압계수가 증가하여도 불연속면의 경사에 의해 크게 변화되지는 않는다.

참 고 문 헌

- 이연구, 1994, 록볼트로 보강한 절리암반의 점소성거동에 관한 수치해석 모델 개발, 서울대학교 자원공학과 박사학위논문.
- 박연준, Dawson, E.M., 1997, 편재절리모델의 유용성과 한계성, 터널과 지하공간, Vol. 7, pp. 202-207.

Table 1 Mechanical properties of rock and shotcrete adapted in this study

	Unit	Rock	Discontinuity	Shotcrete	
				soft	hard
Young's modulus	t/m ²	1.0E6	-	5.0E4	1.5E5
Cohesion	t/m ²	30.0	15.0	-	-
Friction angle	degree	35	35	-	-
Poisson's ratio	-	0.25	-	-	-
Tensile strength	t/m ²	15.0	8.0	-	-
Unit weight	t/m ⁴	2.5	-	-	-
Area	m ²	-	-	0.12	0.12

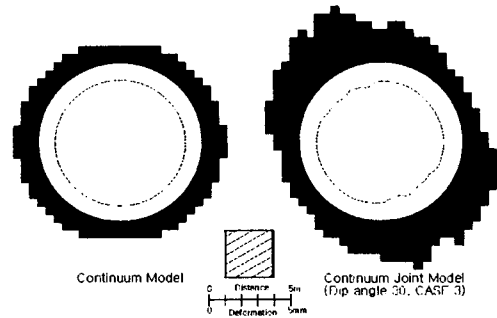


Fig. 1 Deformation and yield zone of the circular opening (K=1.0)

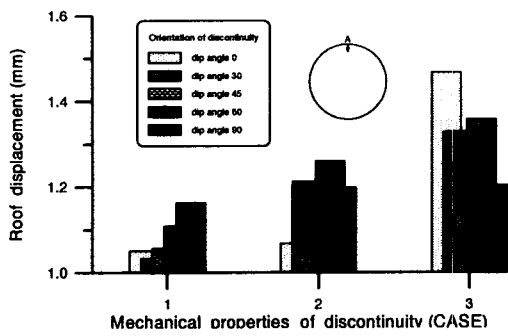


Fig. 2 Roof lowering of the circular opening (K=1.0)

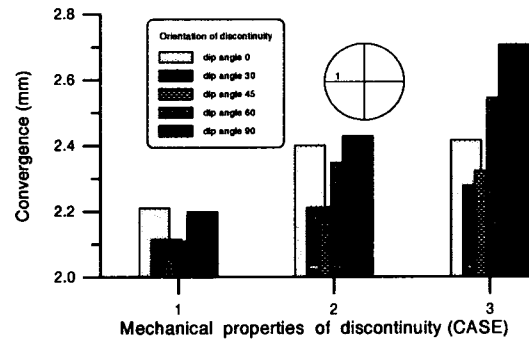


Fig. 3 Convergence of the circular opening measured along line 1 (K=1.0)

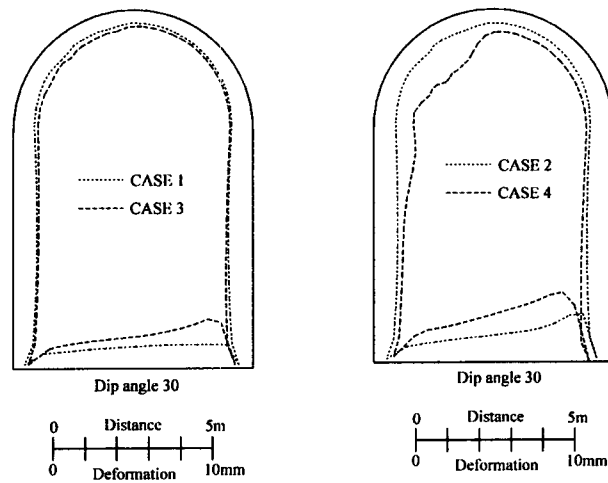


Fig. 4 Deformation of the horse-shoe shaped opening for different mechanical properties of discontinuity (K=1.0)

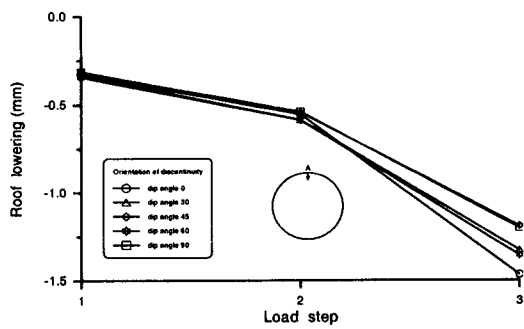


Fig. 5 Roof lowering of the circular opening (CASE 3, $K=1.0$)

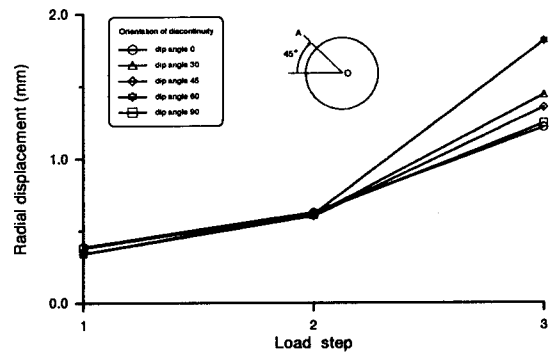


Fig. 6 Radial displacement of the circular opening measured along line O-A (CASE 3, $K=1.0$)

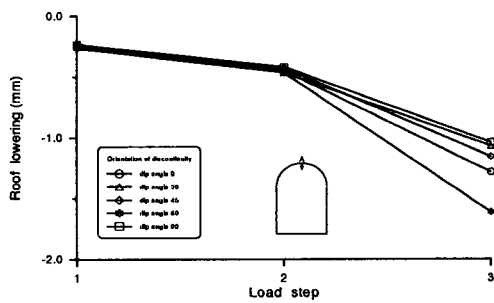


Fig. 7 Roof lowering of the horse-shoe shaped opening (CASE 3, $K=1.0$)

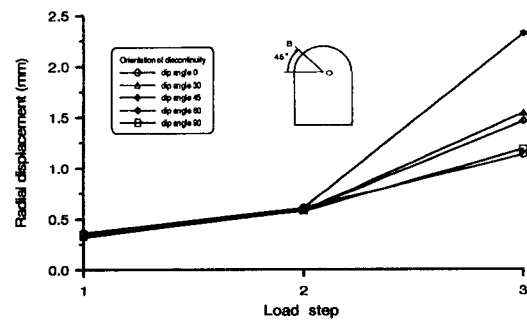


Fig. 8 Radial displacement of the horse-shoe shaped opening measured along line O-B (CASE 3, $K=1.0$)

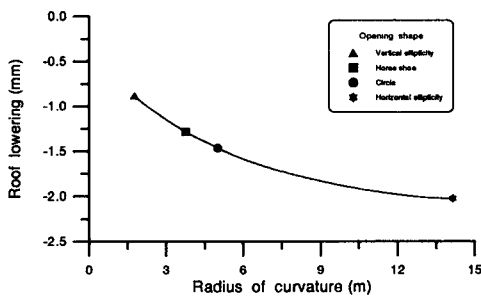


Fig. 9 Roof lowering vs. the radius of curvature for different opening shapes (CASE 3, $K=1.0$)

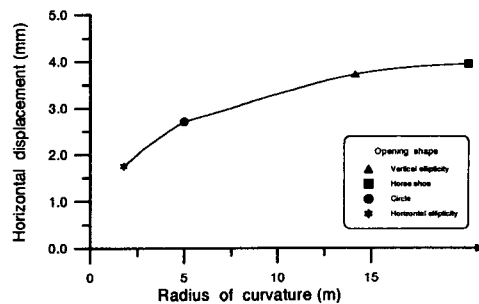


Fig. 10 Horizontal displacement vs. the radius of curvature for different opening shapes (CASE 3, $K=1.0$)

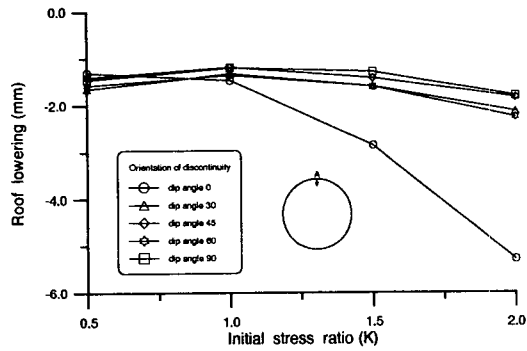


Fig. 11 Roof lowering of the circular opening versus initial stress ratio (CASE 3)

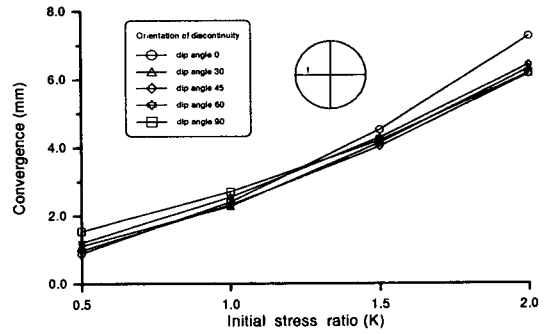


Fig. 12 Convergence of the circular opening measured along line 1 versus initial stress ratio (CASE 3)

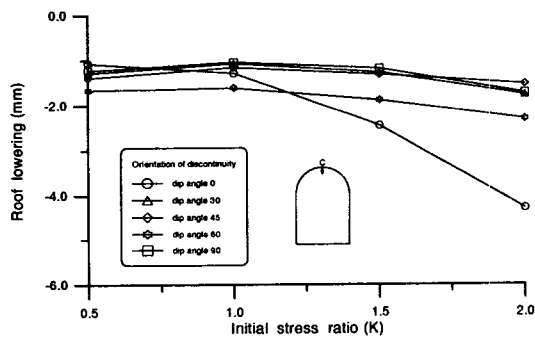


Fig. 13 Roof lowering of the horse-shoe shaped opening versus initial stress ratio (CASE 3)

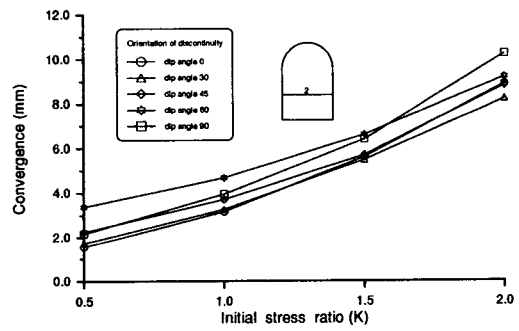


Fig. 14 Convergence of the horse-shoe shaped opening measured along line 2 versus initial stress ratio (CASE 3)