

암반절리의 거동에 대한 유한요소해석

A Finite Element Analysis of Joint Behavior of Rock Masses

김	문	겸*
Kim,	Moon	Kyum
이	승	원**
Lee,	Seung	Won
황	대	진***
Hwang,	Dae	Jin

요 약

본 연구에서는 암반 내에 존재하는 절리가 암반의 구조거동에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통하여 분석하였다. 절리에 따른 암반의 이방성 비선형 거동을 유한요소화하기 위하여 암반의 응력-변형을 관계를 구성모형화하고, 이를 기준으로 유한요소해석 program을 구성하였다. 여기서, 해석과정에 필요한 계산을 효율적으로 하기 위하여 하중재하 방법과 해석영역의 크기를 검토하여 문제의 크기를 최소화하도록 하였다. 해석대상으로 암반 내에 굴착되는 원형 공동을 택하여 절리의 존재여부에 따른 거동의 변화를 검토하여 절리의 비선형거동이 합리적으로 모형화되었음을 검증하였다. 다음, 절리 방향의 변화에 따라 응력이완상태, 변위, 변형형태등에 미치는 영향을 검토하였다. 해석 및 분석의 결과, 절리의 방향성은 암반의 비선형거동에 영향을 많이 미치며, 그 영향은 공동의 중심을 기준으로 하여 절리방향에 직각인 방향의 부위에 절리의 활동이 집중되게 한다는 것을 밝혔다. 또한, 원형은 변형 후, 절리의 방향이 장축이 되는 타원 형태로 됨을 보였다.

Abstract

Effect of joints which pre-exist in the rock mass on the behavior of underground structures is studied. A finite element program is developed using a constitutive model for rock masses exhibiting nonlinear anisotropic behavior. The initial loading scheme combined with reduced region of analysis is employed to minimize the problem size. A circular tunnel within rock mass is analyzed and the results are compared with those of elasto-plastic analysis to verify that the program is reasonable. The effect of joint direction is also analyzed in regard to stress relaxation, displacement, and deformation shape. It is concluded that the joint direction has significant influence on the nonlinear behavior of rock masses such that the vicinity of tunnel perpendicular to the direction of the joints is stressed to slide. It is also observed that the circular shape deforms to an elliptical shape with a major axis in the joint direction.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 조교수

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

*** 일본동북대학 박사과정, 연세대학교 토목공학과 석사과정 졸업

□ 이 논문에 대한 토론을 1990년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1990년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근에 있어서 문화의 다변화에 따라 도시구조가 다차원화되어 지하구조물의 건설이 급증하고 이에 따라 구조물의 심층화, 복잡화가 필연적이게 되었다. 따라서, 그 설계 및 시공에 있어서 지반과 지보의 구조적 거동을 합리적이고 현실적으로 해석하여 설계에 적용시키는 것이 필요하게 되었다. 특히, 암반체는 절리부가 존재하고 이러한 절리는 암반체의 구조거동에 큰 영향을 미치므로 이 영향을 해석에 반영하는 것이 필요하다.¹⁾

탄성역학 또는 소성역학에 의한 암반체의 해석은 그 해가 쉽지 않고 또한 해를 구할 수 있는 대상이 극히 제한되어 있다. 따라서 절리가 존재하는 경우에 엄밀해에 의한 해석이 시도된 경우는 없고 지하구조물의 설계에 있어서 기존하는 절리의 영향은 탄성계수를 감소시키는 등 경험에 의존해 왔다.²⁾ 1960년대의 전자계산기의 효율화와 수치해석기법 및 지하계측기술의 발전은 상술된 문제를 해결할 수 있는 합리적인 해석방법을 연구할 기반을 마련하게 되었다. 따라서 1970년대 이후의 지하구조물의 안정성 검토 및 변형거동의 해석에 유한요소 기법이 사용되고 이 해석기법은 시공 시 변형 및 응력을 실측함과 병행하여 효율적으로 설계 및 재설계에 반영되고 있다.³⁾ 또한, 1980년대에 들어와 유한요소 해석과 더불어 선형 및 비선형 경계요소 기법의 사용이 활발히 연구되고 있다.⁴⁾

본 연구에서는 유한요소 기법을 이용하여 암반체 내에 존재하는 절리의 방향성이 지반구조체에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 이를 위하여 절리부의 응력-변형률의 구성방정식을 정립하여 유한요소화하고 이를 이용하여 절리를 가진 암반의 굴착에 따른 구조거동을 절리의 방향에 따라 비교하고자 한다.

절리를 가진 암반체의 거동해석은 다음과 같은 세 가지의 방법으로 접근할 수 있다. Interface 요소를 사용하여 절리를 모형화하여 암반체와의 상호작용을 모형화하는 것이 그 하나이다.⁵⁾ 단위 block의 결합체로 암반체를 모형화하여 해석할 수도 있다.⁶⁾ 또는 연속적인 절리가 한 유한요소에서 균일하게 형성되는 것으로 보아 개개의 유한요소에서

절리를 연속체로 모형화하여 구성방정식을 사용함으로써 해석할 수도 있다.⁷⁾ 그러나, interface 요소를 사용할 수 있는 대상은 fault와 같은 대단위 절리를 가진 암반체이고, 지표부위와 같이 조밀하고 연속적인 절리가 존재하는 경우는 해석의 양이 커지므로 비효율적이게 된다. 또한, 단위 block을 사용할 경우는 연속체역학에 기준한 유한요소 해석과의 결합이 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 개개 유한요소의 적분점에서 절리를 이방성 연속체로 모형화하는 방법을 취하도록 한다. 이방성은 절리의 수직 및 수평방향의 응력-변형률 관계를 수정하여 모형화하였다.

본 연구는 전술된 연구목적에 효율적으로 달성하기 위하여 다음과 같은 제한된 범위 내에서 수행하였다. (1) 지반구조체는 평면변형을 상태에 있다고 가정한다. 일반적으로 지반구조체는 연속적인 매체 내에 존재하므로 구조체의 축방향으로의 차원이 단면부의 차원에 비하여 클 경우 이러한 가정은 타당하다 할 수 있다. (2) 절리는 1개 방향으로 연속적으로 존재한다고 가정한다. 암반의 절리는 퇴적층의 형성 또는 지각변동에 따라 발생하므로 일반적으로 평행한 방향으로 2-3조로 존재한다.⁸⁾ 따라서, 대표적인 방향을 취하면 해석에 1차로 반영할 수 있을 것이므로 방향성 분석의 변수를 단순화하기 위하여 이와 같은 가정을 취한다. (3) 절리는 해석 단면에 대하여 수직인 방향으로 연속된 경우에 제한한다. 실제의 절리는 단면에 대하여 임의의 각도를 가질 수 있으나, 수직일 경우가 구조체 축방향과 평행하고 큰 불안정 block을 형성하므로 가장 취약하다.⁹⁾ 따라서, 이 가정은 구조체의 지보설계에 있어서 안전측 가정이다. (4) 해석 대상 구조물은 원형으로 제한한다. 구조물의 형태 또한 절리의 방향성의 영향을 변화시키는 변수가 되나, 본 연구에서는 구조물의 불규칙성에 의한 영향을 배제하기 위하여 원형으로 제한한다. (5) 절리에 따른 이방성 거동은 암반 및 절리의 파괴기구 형성에 따라 이에 대응되도록 절리의 연직 및 평행방향의 응력-변형률 관계를 수정함으로써 모형화한다.

2. 절리를 가진 암반체의 응력-변형을 관계

암반체의 비선형거동은 다음과 같이 세 가지로 대별되는 절리의 역학적 거동의 결과로 인식될 수 있다.⁹⁾ 즉, 기존의 절리면에 평행한 전단력에 의한 절리면을 따른 암반체의 활동(sliding), 기존의 절리면에 수직방향으로 작용되는 인장력에 의한 분리(opening), 또는 과잉응력의 작용에 따라 새로운 절리가 생성되는 파쇄(cracking)가 암반체의 응력-변형을 관계를 비선형화하는 원인이라고 보는 것이다. 이러한 거동은 파괴 조건을 사용하여 모형화하여 유한요소화 할 수 있다. 본 연구에서는 전단에 대하여 Mohr-Coulomb 조건을, 인장에 대하여 tension-cut-off 조건을 사용한다. 그림1은 수직응력 σ 와 전단응력 τ 의 평면에 표시한 파괴조건으로서 암반체와 절리부 각각의 파괴조건을 표시하고 있다. 암반의 파괴는 연성파괴(ductile failure)와 취성파괴(brittle failure)로 구별할 수 있는데, 이 구별은 해석의 단순화를 위하여, 절리의 거동과 상관없이 암반이 처너파괴되는 경우를 연성파괴, 절리의 역학기구에 의하여 파괴되는 경우를 취성파괴로 분리하여 모형화하였다.

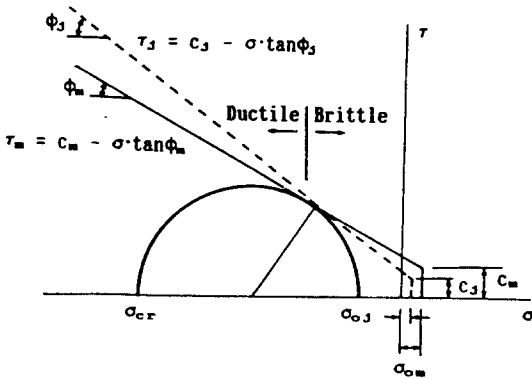


그림1. Mohr-coulomb 파괴조건

연성파괴 영역의 응력상태에서는, 전단응력이 암반체의 전단강도에 이를 경우에 전단파괴면의 방향으로 전단균열(shear crack)이 발생된다. 즉, 암반의 마찰각을 ϕ_m 이라 하면 균열은 $\pm(45^\circ - \phi_m/2)$ 의 방향으로 발생된다. 취성파괴의 응력상태에서는, 전단응력이 절리의 전단강도에 이를 경우에 최소주응력 방향으로 균열이 발생한다. 최대주응

력이 tension cutoff 강도 σ_{om} 에 이르면 최소주응력방향으로 인장균열(tensile crack)이 일어난다. 기존의 절리부에 평행한 전단응력이 절리부의 전단강도에 이르면 암반체는 활동한다. 이 때 절리부의 전단강도는 취성영역에서는 절리부의 파괴기준에 따라 τ_j 를, 연성영역에서는 암반체의 파괴기준에 따라 τ_m 을 취한다. 기존 절리의 분리는 절리면의 수직응력 σ 가 절리부의 tension cutoff $\sigma_{o,j}$ 에 이르면 일어난다. 이 경우 절리부의 수직 및 전단응력은 0으로 수정된다. 그림2는 전술된 절리의 활동과 분리의 조건과 그에 대응하는 응력과 변형률의 구성관계를 보여주고 있다.

Failure Mode	Ductile Failure	Brittle Failure	Tensile Failure
Condition	$\sigma \leq \sigma_{cr}$ $\tau \geq \tau_m$	$\sigma_{cr} \leq \sigma \leq \sigma_{o,j}$ $\tau \geq \tau_j$	$\sigma \geq \sigma_{o,j}$
Mechanism	Sliding	Sliding	Open
Shear Stress			
Normal Stress			

그림2. 절리의 활동 및 분리에 대한응력-변형을 구성관계

3. 암반체의 유한요소 모형

지반구조체를 비선형해석하기 위해서는 해석치가 정도를 유지하는 한, 유한요소망을 최소로 하고 해석에 필요한 반복기법을 효율적으로 하여야 한다. 따라서, 본 논문에 사용된 유한요소 program은 다음과 같은 기법을 사용하였다. 즉, 재하하중을 in-situ 응력에 따른 초기재하와 상재하중으로 치환하였고, 반복계산의 수를 줄이기 위하여 implicit 반복기법을 사용하여 매 반복 시 접선 강성도를 수정하여 사용하였다.

하중의 재하

그림3과 같은 지하의 원형 공동을 생각해 본다. 그림 3a의 영역 A와 같이 기하학적 불연속지점의 주위에 있어서의 응력 상태는 집중되고 비선형 효

과를 일으키게 하나, 그림 3a의 경계 B와 같이 불연속 지점에서 떨어진 부분의 응력 상태는 다소간 균일하고 in-situ 응력상태와 큰 차이가 없다.¹⁰⁾ 그러므로 공동주변의 응력상태는 그림 3b와 같이 영역 A를 해석대상으로 하여 경계 B에 in-situ 응력을 작용하중으로 취하여 해석하여도 무리가 없을 것이다.

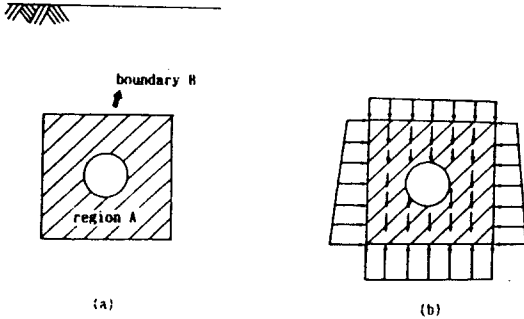


그림3. 하중의 모형 (a) 모형대상, (b) 모형화한 하중

또한, 수직방향 토압의 변화를 모형하기 위하여 경계응력에 추가하여 초기응력의 개념을 사용하였다. 작용된 외부하중은 절점하중 $\{F\}$ 와 $-[M]\{g\}$ 로 표시되는 암반체의 자중에 의한 물체력이다. 여기서 $[M]$ 은 구조체의 consistent 질량행렬이고 $\{g\}$ 는 중력가속도의 절점벡터이다. 초기응력의 영향은 등가절점하중 $\{F_i\}$ 로 표현된다. 물체의 복원력과 초기응력에 의한 절점하중의 합은 작용하중과 평형을 이루어야 하므로 평형방정식은 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$[K]\{u\} + \{F_i\} = \{F\} - [M]\{g\} \quad (1)$$

여기서 강성도 행렬 $[K]$ 와 미지절점변위 $\{u\}$ 의 곱이 복원력벡터이다.

Implicit 반복계산

식(1)에서 강성도 $[K]$ 는 비선형 효과를 가지고 있고 매 계산 시의 추정된 변위 $\{u\}$ 또는 응력 $\{\sigma\}$ 에 관한 함수이다. 여기서는 반복수렴을 촉진하기 위하여 Newton-Raphson 방법으로 이 $[K]$ 를 매 반복 시 수정하였다. 변위 $\{u\}$ 에 대응되는 하중항을 조합하면 작용된 전체하중 $\{F_i\}$ 는

$$\{F_i\} = \{F\} - \{F_i\} - [M]\{g\} \quad (2)$$

라고 할 수 있다.

다음은 n 번째 하중 증분 $\{\delta F_i\}$ 중 i 번째 반복 계산에 대하여 절리모형의 implicit 반복을 설명한다. 요소 e 에서의 응력과 변형률은 $x-y$ 평면 내의 평면변형률 문제에 대하여 선형 탄성 영역에서는

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \epsilon_x \end{Bmatrix} = 1/E \begin{bmatrix} 1-\nu & 0 & -\nu \\ -\nu & 1 & \nu \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \\ -\nu & -\nu & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \sigma_x \end{Bmatrix} \quad (3)$$

이다. 만일 암반 또는 절리 파기기가 생성되면 그림2의 조건에 의하여 이 관계는 수정된다. i 번째 반복계산에서의 식(3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{\epsilon_e\}_i = [D_e]^{i-1} \{\sigma_e\} \quad (4)$$

요소 e 에서의 i 번째 반복에서의 강성도 $[K_e]_i$ 는 변형률-변위 행렬을 $[B]$, 전번 과정에서 계산된 응력-변형률 행렬을 $[D_e]^{i-1}$ 라 할 때

$$[K_e]_i = [B]^T [D_e]^{i-1} [B] \quad (5)$$

이다. 따라서 변위의 증분 $\{\delta u_e\}_i$ 는 조립된 평형방정식을 해석하여 구할 수 있다. 이에 따른 요소 e 에서의 응력의 증분 $\{\delta \sigma_e\}_i$ 는 전술된 $[D_e]^{i-1}$ 을 사용하여

$$\{\delta \sigma_e\}_i = [D_e]^{i-1} [B] \{\delta u_e\}_i - \{\delta \sigma_e\}_i \quad (6)$$

이다. 식(6)에서 $\{\delta \sigma_{en}\}_i$ 는 초기응력의 증분을 의미한다. 현재의 추정된 응력 $\{\sigma_e\}_i$ 는

$$\{\sigma_e\}_i = \{\sigma_e\}_i + \{\delta \sigma_e\}_i \quad (7)$$

이다. 이 응력에 대하여 절리의 거동여부를 검토하고 그림2와 같은 구성조건에 따라 수정된다. 따라서 i 번째 반복에서의 응력증분 $\{\delta \sigma_e\}_i$ 는

$$\{\delta\sigma_e\}^i = \{\sigma_e\}^i - \{\sigma_e\}^{i-1} \quad (8)$$

이고, $[D]^i$ 가 수정될 수 있다. 현재의 응력추정에 따라 요소에 있어서의 등가절점하중 $\{F_e\}^i$ 은

$$\{F_e\}^i = \{F_e\}^{i-1} + \{\delta F_e\}^i \quad (9)$$

로 된다. 식(9) 에서

$$\{\delta F_e\}^i = \int_v [B]^T \{\delta\sigma_e\}^i dV - \int_v [B]^T \{\sigma_e\}^i dV \quad (10)$$

이다. 잉여력 $\{R\}^i$ 는 각 요소에서 $\{F_e\}^i$ 를 누가된 작용하중에서 빼고 전 요소에 대하여 합을 구함으로써 구할 수 있다. 반복의 수렴여부는 잉여력의 크기를 수렴기준과 비교하여 정할 수 있다.

해석 대상 및 방법

절리모형을 적용하여 암반체 내의 기존 절리의 방향이 암반체 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지하 100m에 반경 5m의 원형 공동을 굴착할 경우를 해석하였다. 본 해석에 앞서 기존 절리가 없을 경우에 해석대상영역의 크기의 변화에 따른 결과를 분석하여 해석범위를 설정하고 탄소성 해석과 비교하여 해석방법의 타당성을 검토하였다.

그림4는 해석대상의 기하학적 조건을 표시한다. 그림 4a와 같이 지하 100m 위치의 반경 5m인 공동을 대상으로 하였다. 해석영역을 효율적으로 하기 위하여 그림 4b와 같은 3개의 요소망에 대하여 해석을 실시하여 결과를 검토하였다. 이 때 기존의 절리는 존재하지 않는 것으로 하였다. 경우 1은 지표로부터 원공 주위의 수직, 수평방향으로 충분한 요소망을 취한 경우이고, 경우 2는 수평방향으로는 충분한 요소망을 취하지만, 수직방향으로는 최소한의 요소망을 취한 경우이고, 경우 3은 원공 주위의 수평, 수직방향으로 최소한의 요소망을 취한 경우이다. 경우 1은 64개 요소, 경우 2는 52개, 경우 3은 40개 요소를 각각 사용하였다. 표1은 해석에 사용된 암반의 물리적 성질을 보여주고 있다.

그림5는 각 경우, 해석된 공동 벽면의 변위 크기를 비교한 것이다. 경우 1이 이들 중 가장 실제

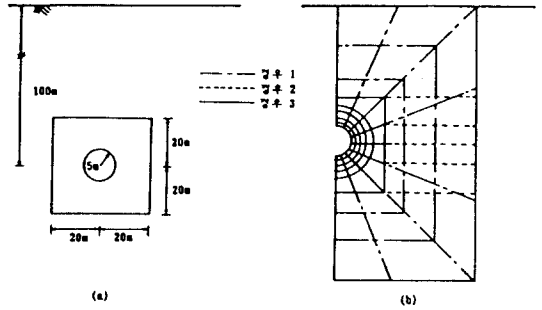


그림4. (a) 해석대상인 지하공동구조, (b) 모형된 요소망

표1. 해석에 사용된 암반 재료의 물리적 상수

탄성계수		2,000 MPa
Poisson 비		0.3
밀도		2,700 kg/m ³
정지토압계수		1.0
Intact Failure Envelope	마찰각 점착력 Tension cutoff	20° 1 MPa 0.1 MPa
Joint Failure Envelope	마찰각 점착력 Tension cutoff	30° 0.2 MPa 0.05 MPa

에 가까운 모형이므로 이를 기준으로 하여 경우 2와 경우 3과 같이 인위적인 경계조건을 삽입할 경우, 공동 천정부의 변위를 과대해석하며 저면부의 변위를 과소 해석하는 것을 알 수 있다. 이는 응력이완에 따라 공동 주위의 매체가 공동의 원점축으로 이동하는 것을 인위적인 경계에서 구속시키기 때문이다. 그러나, 전반적인 변형의 형상은 각 경우 일치하는 것을 볼 수 있다.

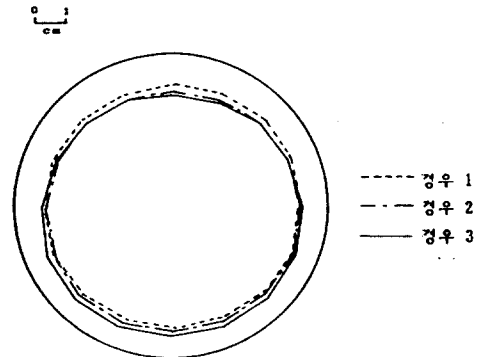


그림5. 해석영역의 변화에 따른 공동 벽면의 변위비교

그림6은 각 경우, 해석된 공동 벽면의 최소주응력(최대압축응력)의 크기를 비교한 것이다. 경우 1을 기준으로 경우 2에서는 전반적으로 낮은 응력을 얻었고 최대 오차는 7%이다. 경우 3에서는 천정부와 저면부의 응력은 적게 얻으나 측면부에서의 응력은 크게 얻었고 최대 오차는 10%이다. 이것은 측면에 설정된 경계가 측면부의 강성도를 크게 함으로써, 천정부와 저면부의 응력을 분산시키기 때문이다. 그러나, 각 경우 응력의 크기는 작은 오차 범위 내에 들므로 해석의 효율화를 위하여 경우 3의 해석영역을 취하여 절리의 영향을 고려하기도 한다.

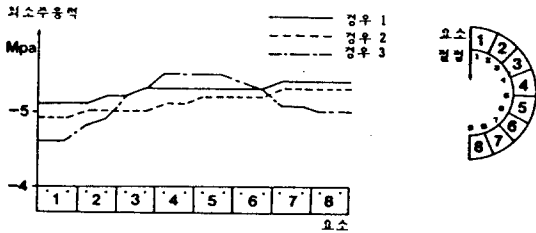


그림6. 해석영역의 변화에 따른 공동 벽면의 최소주응력 비교

절리 해석모형의 합리성을 검토하기 위하여 탄소성 해석을 경우 3의 모형에 대하여 취한 결과를 비교하였다. 이 때 두 해석의 조건을 근사하게 하기 위하여 탄소성 해석은 탄성-완전소성을 가정하였고 항복조건으로는 Mohr-Coulomb 조건으로 절리부의 파괴조건과 동일하게 하였다. 그림7은 탄소성 해석에 의하여 얻은 소성영역과 절리 해석에 의하여 얻은 균열 생성영역을 비교한 것이다. 두 해석의 비선형성 발생부위가 비근함을 알 수 있다. 미소한 차이는 절리해석에 있어서 두 개의

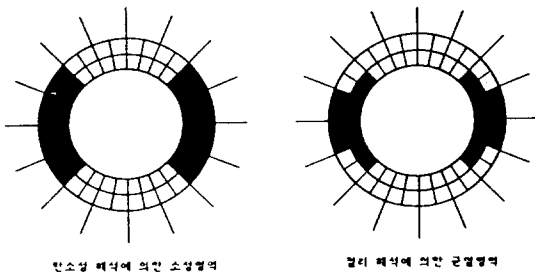


그림7. 소성영역과 균열영역의 비교

독립된 파괴조건을 사용하는데 비하여 탄소성에서는 하나의 항복조건을 사용하였기 때문에 사료된다. 따라서, 절리 해석이 타당성이 있는 것으로 판단된다.

4. 절리 방향성의 모형해석

암반체 내의 기존 절리의 방향이 암반체 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림4에서 설명된 원형 공동을 대상으로 해석하였다. 먼저, 기존의 절리가 단면의 수평방향에 대하여 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°로 각각 균일한 경우를 각각 해석하여 절리의 거동, 응력상태, 그리고 변위의 크기를 비교 검토하였다. 암반의 물리적 성질은 표1과 동일하게 취하고, 대칭성을 고려하여 절리가 0°, 90°일 때는 반원부위, 기타의 경우는 전원부위에 대하여 해석을 실시하였다.

그림8은 각 경우 별로 응력이완에 따라 발생하는 균열부를 비교한 것이다. 비교를 위하여 기존 절리가 없을 경우의 결과도 같이 표시하였다. 기존의 절리가 없을 경우는 측면부 주위에 응력이 집중되어 절리가 발생되나, 기존의 절리가 있을 경우는 천정과 저면부에 새로운 절리가 발생하는 것을 알 수 있다. 천정부의 불안정된 암반층이 지하사고의 큰 원인임을 고려할 때, 기존 절리가 있는 경우 파괴의 잠재력이 크다는 것을 알 수 있다.

그림9는 절리의 활동이 일어난 부위를 각 경우 별로 표시한 것이다. 각 경우 공통적으로 응력이완에 의하여 생성된 절리보다는 기존의 절리부에서 활동이 일어나고 있다. 원공의 중심을 기준으로, 기존절리 방향에 대하여 직각방향의 부위가 주로 활동됨을 볼 수 있다. 또한, 기존 절리 방향이 90°에 가까울수록 활동영역이 넓어지는 것을 알 수 있다.

그림10은 공동 벽면의 변형 형상을 각 경우 도시한 것이다. 일반적인 경향으로서 절리가 없을 경우와 비교하여 기존 절리방향의 변위가 크게 해석되고 있다. 변형 전의 원형 형태는 타원 형태로 변형되는데, 기존의 절리 방향이 변형된 타원의 장축 방향과 일치되는 것을 그림에서 볼 수 있다. 이는 그림9에서 전술된 바와 같이 기존 절리 방

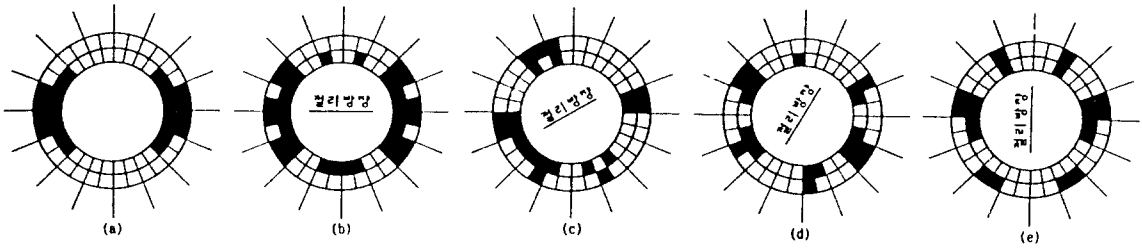


그림8. 절리(단열방향)의 방향변화에 따른 균열영역의 비교
 (a) 절리가 없는 경우 (b) 0°C (c) 30° (d) 60°
 (e) 90°로 절리가 있는 경우

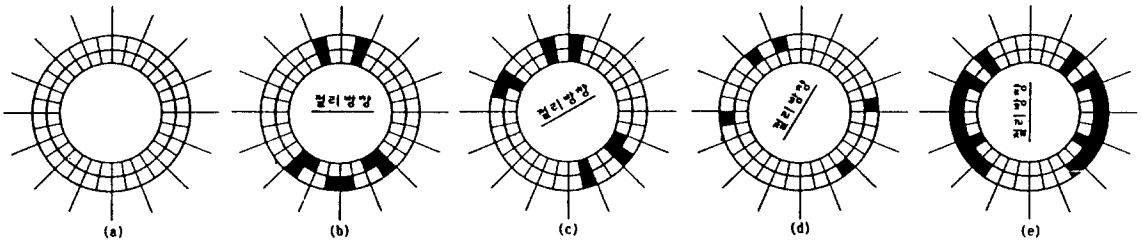


그림9. 절리(단열방향)의 방향변화에 따른 절리 활동영역의 비교
 (a) 절리가 없는 경우 (b) 0° (c) 30° (d) 60°
 (e) 90°로 절리가 없는 경우

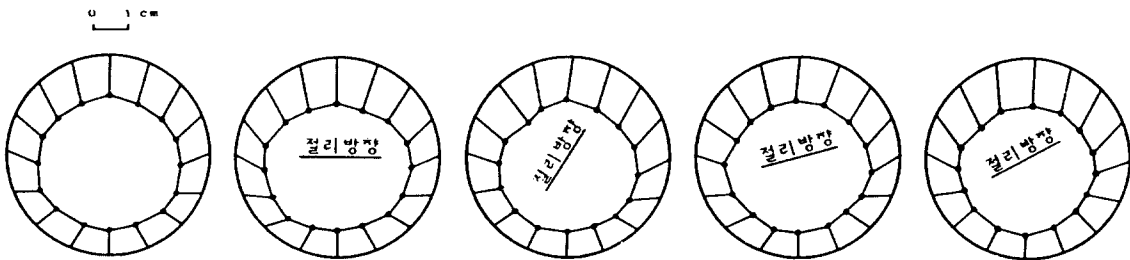


그림10. 절리(단열방향)의 방향변화에 따른 공동 벽면의 변형형태

향의 직각 방향에 절리의 활동이 많이 일어나는 것에 기인하는 것으로 타당한 결과라고 믿어진다.

그림11은 공동 벽면의 여러 점, 즉 그림6의 절점 1, 5, 9등 3개점에서의 변위를 절리의 방향 변화에 대하여 도시한 것이다. 90° 이상의 각도에 대하여는 대칭성을 이용하여 그 이하에 대한 해석치를 사용하였다. 그림11에서 직선은 절리가 없을 경우의 변위로서, 절리가 있을 경우는 절리의 비선형 거동의 결과로 변위가 크게 일어남을 알 수 있다. 또한, 절리의 각도 변화에 따라 변위 해석 값에 있어서 큰 차이가 있음을 볼 수 있어 절리의

방향성을 해석에 고려할 필요성을 느낄 수 있다. 그림11의 각 변위도에서, 생각하는 점의 변위를 가장 크게 하는 절리의 방향은 일반적으로 원점과 그 점을 잇는 선에 직각 방향이다. 이는 그림9 및 10에서 설명된 것과 같이 절리의 방향에 따라 활동이 그 부분에서 집중되기 때문으로 사료된다. 단지, 절점 1(정점)의 변위는 이런 추이에서 벗어나, 45°, 90°, 135°의 경우에 변위가 크다. 즉, 그림9에서와 같이 정점의 부위는 지반의 아치작용에 의하여 활동이 제한되고, 따라서 이 부위의 변위는 활동의 집중에 의한 영향, 또는 전단의 영향이

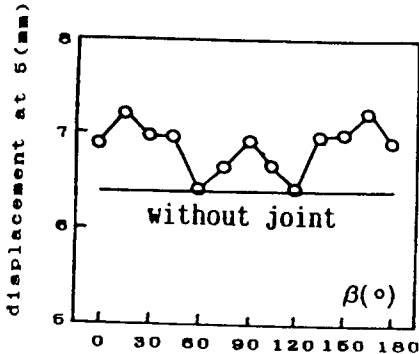
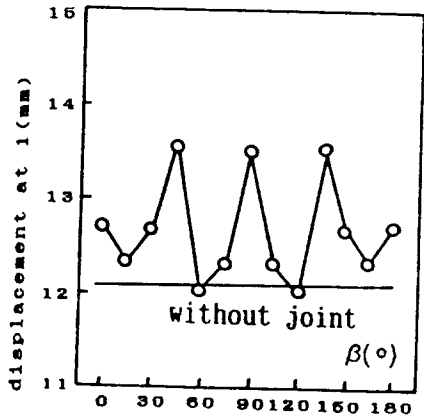
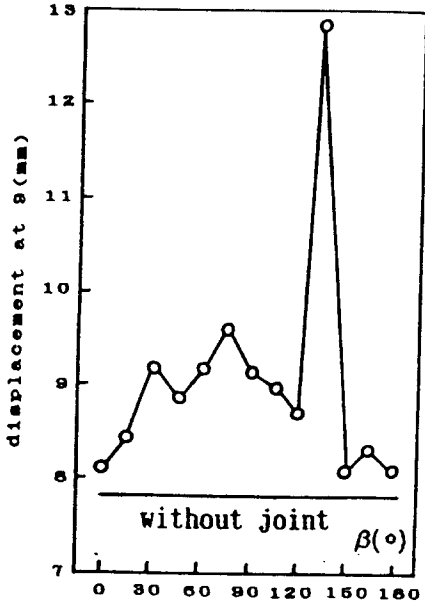


그림 11. 절리(단일방향)의 방향변화에 따른 공동 벽면 각 절점의 변위

아니라 공동 벽면 주위의 전반적인 비선형거동에 좌우된다고 사료된다. 그림9의 90°에서 측면 전체에 걸쳐 활동부가 생긴것도 이와 연결시킬 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 암반체의 구조거동에 대한 절리의 영향을 검토하기 위하여, 효율적인 유한요소모형을 연구하였고, 이를 원형 공동을 대상으로 적용시켜 기존 절리의 방향성이 암반 내의 응력이완에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구의 결과 암반 내에 구조물을 설계할 경우, 암반 내 기존의 절리의 방향에 따라, 암반 내 응력 및 변위형태에 큰 변화가 있으므로 이 영향을 고려하여 암반의 안정성과 보강 체계를 분석하는 것이 필요하는 것을 알 수 있었다. 또한, 이러한 절리 거동의 영향은 절리의 파괴기구를 유한요소 모형화함으로써 해석할 수 있다는 것을 밝혔다.

개발된 해석방법을 여러 방향의 절리를 가진 원형 공동에 적용시켜 그 결과를 검토한 결과, 기존의 절리가 암반에 존재할 경우 굴착 원점을 중심으로 하여, 암반의 활동은 절리방향에 수직인 부위에서 일어나며 변형형태는 절리방향을 장축으로 하는 타원형으로 되는 것을 밝혔다. 또한, 굴착부의 정점 변위의 크기가 굴착이 암반 내에 미치는 영향을 종합적으로 판단할 수 있는 근거로서 적합하다는 것을 유추하였다.

감사의 글

본 연구는 아산사회복지재단의 연구개발지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Hoek, E. and Brown, E. T., *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, 1980. pp.183-243.
2. Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, Trans Tech Publication, 1978.

3. Golser, J., The New Austrian Tunneling Method (Theoretical background—practical experience), *Shotcrete for Ground Support*, ASCE & ACISP—54, 1977, pp.323—347.
4. Brebbial et al. ed., *Boundary Elements*, Proceedings of the International conference, Springer—Verlag, 1978—1988.
5. Heuze, F. E. and Barbour, T. G., New models for rock joints and interfaces, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol. 108, 1982, pp.75-7—776.
6. Dowding, C. H., Belytschko, T. B., and Yen, H. J., A coupled finite element—rigid block method for transient analysis of rock cavern, *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 7, 1983, pp.117—127.
7. Thomas, R. K. *A Material Constitutive Model for Jointed Rock Mass Behavior*, SAND 90—1418, Sandia National Laboratories, 1980.
8. Wilbur, L. D., Rock Tunnels, in *Tunnel Engineering Handbook*, Bickel, J. O. and Kuesel, T. R. ed., Van Nostrand Reinhold 1982 pp.123—207
9. Stagg, K. G. and Zienkiewicz, O. C., *Rock Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, 1968, pp.99-124.
10. Wittke, W., New design concepts for underground openings in rocks, in *Finite Elements in Geomechanics*, Gudehus, G. ed., John Wiley & Sons, 1977, pp.413—478.

(접수일자 : 1989. 8. 25)