

록볼트 점소성 거동에 의한 지보효과 분석 - 수치해석 Reinforcement Effect of Viscoplastic Rockbolt - Numerical Study

趙台鎭 (Cho, TaeChin)
李正仁 (Lee, Chung-In)

부산수산대학교 응용지질학과
서울대학교 자원공학과

요약/Abstract

암반은 지질학적 속성에 따라 다양한 형태의 구조적 특징을 나타내며, 특히 암반 내부에 발달되어 있는 절리계의 공간적, 역학적 특성은 외부응력 변화에 대한 전체 암반의 거동 및 파괴 강도 등에 중대한 영향을 끼치고 있다. 본 연구에서는 절리가 발달되어 있는 암반의 점소성 거동(viscoplastic behavior)을 연속체적 개념으로 분석할 수 있는 유한요소 모델을 개발하였다. 또한 암반구조물 보강에 일반적으로 사용되는 록볼트의 점소성 거동을 분석할 수 있는 능력을 추가시켜, 록볼트 지보효과가 고려된 절리암반의 점소성 거동에 대한 수치해석 모델을 완성하였다. 절리암반 및 록볼트의 점소성 거동에 대한 연속체 모델의 정확도 및 신뢰도는 예제적 모델분석을 수행하여 입증하였다. 실제적 암반구조물 거동분석에 대한 활용성을 고찰하기 위하여 현재 굴착이 진행되고 있는 지하 원유비축공동의 시간적 거동을 분석하여 현장 계측결과와 비교하였으며, 록볼트 설치비율에 따른 지보효과를 산출하였다.

In-situ rock mass demonstrates the variety of structural features, and especially the mechanical and spatial characteristics of joint (or joint system) greatly affect the deformation and failure strength of the rock mass. In this study finite element model capable of analyzing the viscoplastic behavior of reinforced jointed rock mass has been developed based on equivalent material approach. Accuracy and reliability of the numerical model have verified by simulating the behavior of simplified block model and comparing the results with analytic solutions. Practical applicability was also demonstrated by analyzing the time-dependent behavior of underground oil storage tunnel and assessing the reinforcement effect of rockbolt.

서론

암반에 존재하는 다양한 불연속면들의 공간적 속성과 역학적 특성은 지하구조물 설계에 대한 안전도 분석 및 지보방법 결정에 중대한 영향을 끼친다. 암반구조물의 보강을 위해 일반적으로 사용되는 록볼트의 지보효과에 대한 수치해석 기법은 절리암반에 대한 모델개념에서 처럼 연속체적 및 개별체적 록볼트 거동분석으로 구분되어 개발되어 왔다. 개별체적 록볼트 거동에 대한 초기의 유한요소법 분석은 록볼트의 기하학적 형태를 고려한 요소를 이용하여 수행되었으며(Heuze and Goodman, 1973; Lee et al., 1988), 볼트와 grout의 거동을 고려한 록볼트 요소가 St. John and van Dillen(1983)과 Cho and Lee(1993)에 의해 개발되어 주위 암반과의 상호작용 및 지보효과 등이 분석되었다. 연속체적 개념에서의 록볼트 거동 및 지보작용에 대한 분석이 Larsson and Oloffson(1983) 및 Larsson et al. (1985) 등에 의해 수행되었다. Gerrard and Pande(1985)는 록볼트가 설치된 절리암반의 점소성 거동모델 구성에 대하여 이론적으로 고찰하였으며, Sharma and Pande(1988)는 절리암반 경사면의 안전도를 록볼트의 점소성 거동분석 결과에 의거하여 분석하였다.

본 연구에서는 록볼트가 설치된 절리암반의 점소성 거동을 분석할 수 있는 수치해석 모델을 개발하여 록볼트 지보작용에 대한 세부적인 메카니즘 및 지하구조물에 대한 지보효과를 분석하였다. 상대적으로 상이한 역학적 특성을 지닌 암석, 절리 및 록볼트 복합체의 점소성 거동을 분석하기 위한 수치해석 모델을 다음과 같이 개발하였다. Owen and Hinton(1980)에 의해 개발된 단일 매체를

대상으로 한 점소성 모델을 기본 모델로 설정하였다. 절리 및 록볼트의 거동을 연속체 개념으로 분석하기 위하여 절리암반의 연속체적 거동(조태진과 이정인, 1992) 및 Sharma and Pande(1988)에 의해 기술된 록볼트의 연속체적 거동분석 개념을 기본 모델에 도입하여 암석, 절리 및 록볼트 복합체에 대한 점소성 거동 모델을 완성하였다. 모델 자체에서 암반 절리 및 록볼트에 형성되는 응력을 산정하여 암반 절리에는 Mohr-Coulomb 법칙을, 록볼트에는 von Mises 법칙을 적용하여 각각의 점소성 거동을 분석하였다.

이론적 고찰

점소성체의 변형거동은 Fig. 1에 도시된 rheological model 개념을 이용하여 설명될 수 있다. 하중재하에 의한 일차적인 탄성거동은 spring의 강성도에 의해 지배된다. 점소성체의 내부 응력이 일정수준 이상일 때, 즉 slider

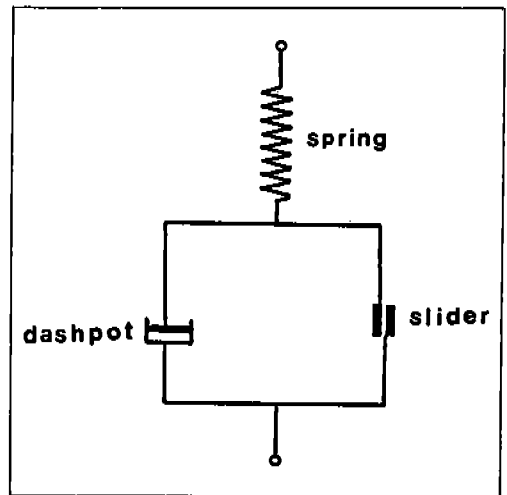


Fig. 1 Rheological model.

지지력이 한계점에 도달할 경우 dashpot의 시간 의존성 변형거동이 발생된다. 점소성 거동에 근거한 암반, 절리 및 록볼트 복합체의 변형률증가는 다음과 같다.

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon^e + \Delta \epsilon^{vp} \quad (1)$$

여기서,

- $\Delta \epsilon$: 총 변형률 증가분
- $\Delta \epsilon^e$: 탄성 변형률 증가분
- $\Delta \epsilon^{vp}$: 점소성 변형률 증가분

외부응력 변화($\Delta \sigma$)에 대한 탄성 변형률 점소성 변형률 증가분은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta \epsilon^e = D^{-1} \Delta \sigma \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon^{vp} = \mu \langle F \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \Delta t \quad (3)$$

여기서,

- D^{-1} : 컴프라이언스 텐서 (compliance tensor)
- μ : 유동성 계수 (fluidity)
- F : 소성 항복 기준
- $\langle F \rangle = F$ if $F > 0$
 $= 0$ if $F < 0$
- Q : 소성 포텐셜 함수
- Δt : 시간 증가분

연속체 절리암반의 컴프라이언스(C_{Ri})는 암석의 강성도(E) 및 절리면의 강성도(T)를 이용하여 다음 식으로 표현된다.

$$[C_{Ri}] = \sum_{i=1}^n [T_i]^{-1} + [E]^{-1} \quad (4)$$

관계식 (4)에서 첨자 i 는 각 절리군을 나타내며, $[T_i]$ 는 각 절리군의 방향성이 고려된

강성도를 의미한다. $[T_i]$ 에 대한 상세한 기술은 조태진과 이정인(1992)에 수록되어 있다.

절리암반에 록볼트가 설치될 경우 전체 강성도는 록볼트 자체의 역학적 특성, 설치 방향 및 빈도수에 영향을 받는다. 록볼트가 Fig. 2에 도시된 방향으로 설치되었을 경우, 국부 좌표계에서의 록볼트 강성도(D_B^L)는 록볼트 축방향 및 전단 방향에서의 변형을 고려하여 다음과 같이 설정된다.

$$[D_B^L] = \begin{bmatrix} E_B & 0 \\ 0 & G_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 E_B 와 G_B 는 록볼트의 탄성계수와 강성률(shear modulus)이다. 국부 좌표계에서 설정된 록볼트의 강성도는 좌표전환 행렬(T_B)을 이용하여 전체 좌표계에 대한 강성도(D_B)로 전환된다.

$$[D_B] = [T_B]^T [D_B^L] [T_B] \quad (6)$$

여기서,

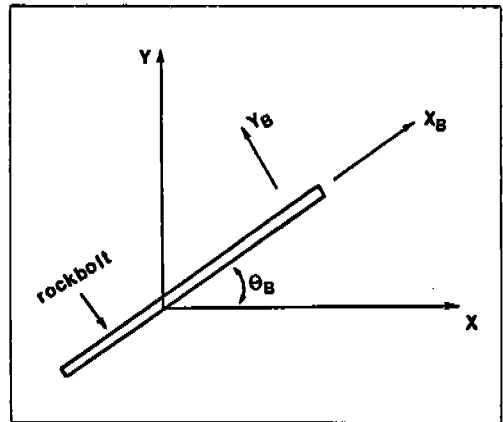


Fig. 2 Orientation of rockbolt.

$$[T_B] = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & CS \\ -2CS & 2CS & C^2 - S^2 \end{bmatrix}$$

$$C = \cos\theta_B$$

$$S = \sin\theta_B$$

θ_B : X-축과 X_B -축 사이의 각도

절리암반 + 록볼트 복합체의 강성도(D)는 록볼트의 체적비율(pi)을 고려하여 다음과 같이 산정된다.

$$[D] = (1 - \sum_i pi) [C_{Ri}]^{-1} + \sum_i pi [D_{Bi}] \quad (7)$$

전체 강성도는 유한요소법에 의거한 각 요소에서의 강성 매트릭스 $[k_e]$ 산정에 이용된다.

$$[k_e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (8)$$

여기서,

$[B]$: 변형률 - 변위 매트릭스

각 요소별 $[k_e]$ 를 조합하여 전체 stiffness matrix $[K]$ 를 구성하고, 응력 벡터 $[R]$ 에 대한 변위 벡터 $[d]$ 를 산정한다.

$$[K] [d] = [R] \quad (9)$$

변위벡터 $[d]$ 가 계산되어지면 각 요소내 Gauss 점에서의 변형률(ϵ)과 응력(σ)을 다음과 같이 산정한다.

$$\{\epsilon\} = [B] \{d\} \quad (10)$$

$$\{\sigma\} = [D] (\{\epsilon\} - \{\epsilon^p\}) \quad (11)$$

여기서,

$\{d\}$: 요소내 절점에서의 변위

관계식 (10)에서 산정된 $\{\epsilon\}$ 를 이용하여 록

볼트에서의 변형률 $\{\epsilon_B\}$ 및 응력 $\{\sigma_B\}$ 를 계산한다.

$$\{\epsilon_B\} = [T_B] \{\epsilon\} \quad (12)$$

$$\{\sigma_B\} = [D_B^T] \{\epsilon_B\} \quad (13)$$

관계식 (13)의 $\{\sigma_B\}$ 는 록볼트 설치 방향에 따른 국부 좌표계에서의 응력이며, 절리암반과의 파괴비율 pi를 고려하여 절리암반에 형성되는 응력 $\{\sigma_{Ri}\}$ 이 산정된다.

$$\{\sigma_{Ri}\} = \{\sigma\} - \sum_i pi [T_{Bi}]^T \{\sigma_{Bi}\} \quad (14)$$

절리면에 형성되는 응력은 $\{\sigma_{Ri}\}$ 를 이용하여 절리면 방향에 따라 좌표계를 변환하여 산정된다. 이때 계산된 각 절리군에서의 응력과 록볼트에 형성된 응력 $\{\sigma_B\}$ 를 기준으로 관계식 (3)에 의거하여 점소성 변형의 가능성 및 변형값을 산정한다.

본 연구에서 개발된 점소성 모델에서의 소성항복 기준은 록볼트의 경우에는 von Mises법칙을, 절리면의 경우에는 Mohr-Coulomb법칙을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 계산된 절리면과 록볼트에서의 점소성 변형률 (ϵ^p)은 내부응력의 변화를 유발시켜 다음의 관계식으로 초기 외부압력과 결합되어 새로운 시간대별 점소성 거동분석에 사용된다.

$$R = R_0 + \int_V B^T D \epsilon^p dV \quad (15)$$

여기서,

R_0 : 초기 외부응력

관계식 (15)에 의해 계산된 R을 이용하여 절리암반 및 록볼트의 점소성 변형이 일정 수준으로 수렴될 때까지 관계식 (9) - (15)의 과정을 반복한다.

모델 분석 결과

본 연구에서 개발된 모델의 정확도 및 신뢰성을 검증하기 위하여 일차적으로 Fig. 3에 설정된 암반모형의 점소성 거동을 분석하여 이론적 결과와 비교하였다. 암반모형의 점소성 거동에 대한 이론적 분석 결과를 도출하기 위하여 모형내에 절리면과 록볼트설치는 가정하지 않았다. 모형 상부에 균일 하중 1MPa/m를 작용시켰으며, 1차원적 거동을 유도하기 위하여 하부 및 왼쪽 측면에서의 거동을 구속하였다. 모델 분석에 사용된 암반의 역학적 특성들을 Table 1에 수록하였다.

Fig. 3에 도시된 암반 모형의 1차원적 점소성 거동은 이론적으로 다음의 관계식으로 기술된다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_A}{E} + \frac{\sigma_A - \sigma_Y}{H'} [1 - e^{-H'\gamma t}] \quad (16)$$

여기서,

σ_A : 암반 응력

σ_Y : 항복 응력

H' : hardening parameter

γ : 유동성 계수

t : 시간

암반의 점소성 거동에 대한 관계식 (16)에

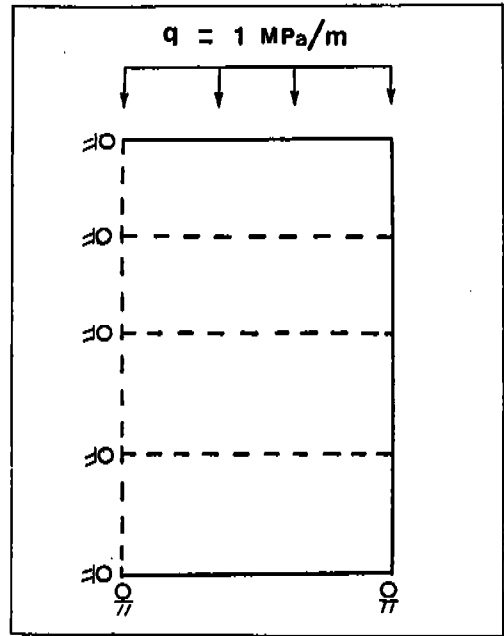


Fig. 3 Block model for viscoplastic rock.

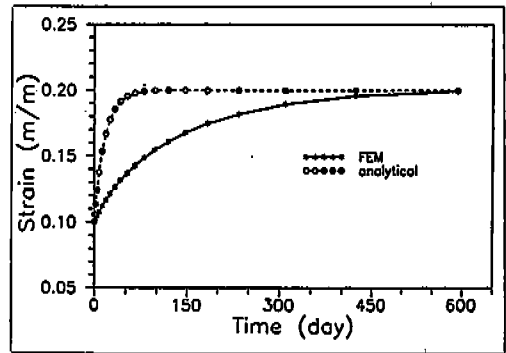


Fig. 4 Viscoplastic behavior of rock.

Table 1 Mechanical properties of rock for simulating viscoplastic behavior

| Property | Value |
|-------------------------------|---------------|
| modulus of elasticity (E) | 10.0 MPa |
| hardening parameter (H') | 5.0 MPa |
| yield strength (σ_Y) | 0.5 MPa |
| fluidity (γ) | 0.001 /Pa/day |

의거한 이론적 결과와 수치해석 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 암반모형 내부에서의 변형을 고려할 때 초기 탄성변형의 이론적 결과와 수치해석 결과가 일치하고 있다. 시간변화에 따른 변형의 경우에는 이론적 결과가 수치해석 결과보다 크게 나타나고 있다. 이론적

분석결과는 각 시간대별로 완결된 점소성 변형을 지시하고 있으나, 수치해석 분석의 경우에는 점소성 거동이 진행중인 상태에서의 결과이기 때문에 시간대별로 확정된 변형치보다 낮은 값을 지시하고 있다. 점소성 거동이 완료된 시점에서의 변형치는 초기 탄성 변형 경우와 마찬가지로 이론적 결과와 일치하고 있다. 이상과 같은 결과에 의거할 때 암반을 대상으로 한 모델 분석 결과의 일차적인 정확도와 신뢰성이 입증된다.

록볼트가 설치된 절리암반에 대한 모델 분석의 신뢰성 검증을 위해 Sharma and Pande (1988)에 의해 설정된 2차원 블록 모형(Fig. 5)을 이용하여 점소성 거동을 분석하였다. 모형암반 내부에는 경사각 45° 와 135° 인 2개의 절리군이 발달되어 있고, 록볼트는 수평방향(경사각 0°)으로 설치된 것으로 가정하였다. 모형 최하부의 변위를 구속하였으며, 최상부에 외부하중을 작용하였다. 모델분석에 사용된 암반, 절리 및 록볼트의 제반 특성을 Table 2에 수록하였다. Sharma and Pande (1988)는 Fig. 5의 모형에 대해 8개 node를 갖는 사각 요소 4개를 사용하였으나, 본 연구에서는 4개 node를 갖는 사각요소 16개를 사용하여 최상부의 외부하중을 변화시킨 상태에서의 점소성 거동을 분석하였다. 절리면의 점착강도(c)에 대한 비율로 표현된 각 외부하중 수준에서 수렴된 점소성 변형에 대한 모델분석 결과를 Fig. 6에 표시하였다. 본 연구결과와 Sharma and Pande(1988)의 결과를 비교할 때 전체적으로 응력 증가에 따라 일정한 변형 증가를 공통적으로 나타내고 있다. 본 연구 결과가 약간 강성 거동을 보여주고 있으나 그 차이는 매우 미약하며, 점소성 변형이 수렴되지 않는 파괴응력 수준이 $q/c =$

Table 2 Mechanical properties of rock, joint, and rockbolt for simulating the behavior of reinforced rock mass

| Material | Property | Value |
|----------|--|-------------------------|
| Rock | modulus of elasticity (E_r) | 70.0 GPa |
| | Poisson's ratio (ν) | 0.2 |
| Joint | normal stiffness (k_n) | 5.0×10^3 GPa/m |
| | shear stiffness (k_s) | 5.0×10^3 GPa/m |
| | cohesion (c) | 50.0 kPa |
| | internal friction angle (ϕ) | 40° |
| | spacing (S) | 1.0 m |
| Rockbolt | modulus of elasticity (E_b) | 200.0 GPa |
| | Poisson's ratio (ν) | 0.27 |
| | uniaxial yield strength (σ_y) | 0.25 GPa |
| | rockbolt portion | 0.005 |

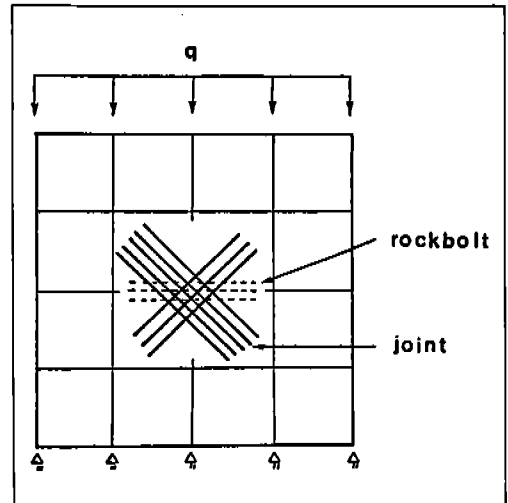


Fig. 5 Viscoplastic model of reinforced rock mass.

300 (15.0 MPa)으로 일치하고 있다. 결론적으로 본 연구에서 개발된 록볼트가 설치된 절리암반의 점소성 거동분석을 위한 수치해석 모델의 신뢰성이 입증된다.

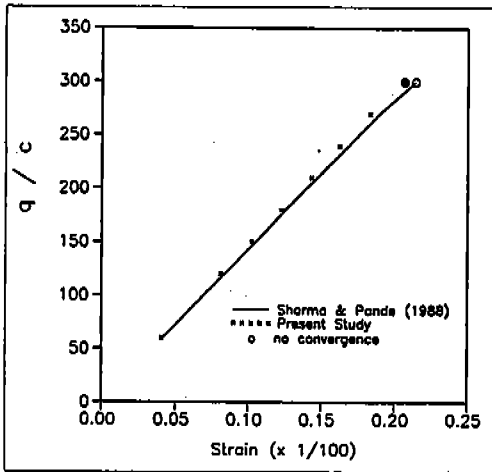


Fig. 6 Viscoplastic behavior of reinforced rock mass.

절리암반에 설치된 록볼트 지보작용 및 설치방향에 따른 지보효과를 분석하기 위하여 Fig. 7에 도시된 모형을 설정하였다. 절리암반 모형 하부의 변위를 구속하였고, 최상부에 균일 하중 $q = 10.0\text{MPa/m}$ 를 작용하였다. 모델분석 수행에 사용된 암반, 절리 및 록볼트의 제반 특성들은 Table 3에 수록되어 있다. 일

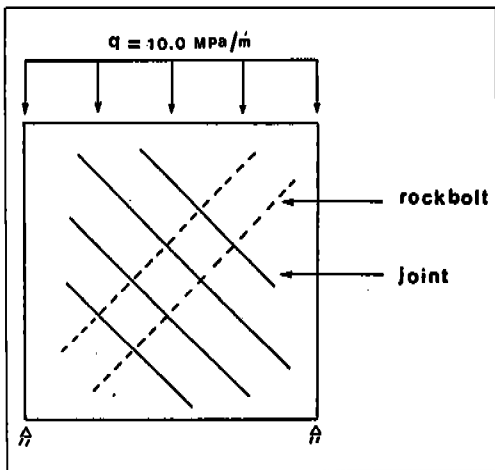


Fig. 7 Block model for simulating rockbolt action.

차적으로 절리암반의 거동 특성을 고찰하기 위하여 록볼트가 설치되지 않은 경우를 가정하였으며, 절리면의 경사각(δ) 변화에 따른 점소성 거동을 Mohr-Coulomb법칙에 의거하여 분석하였다. 절리면의 내부마찰각(ϕ)이 40° , 점착강도(c)가 50kPa 일때(Table 3참조) 절리면 경사각이 41° 이하인 경우에는 점소성 거동이 발생되지 않았다. 절리면 경사각이 42° 이상일 경우 점소성 거동이 발생되며, Fig. 7의 모형에서처럼 측면 변위가 구속되지 않은 상태에서 시간 변화에 따른 절리암반의 변형은 수렴되지 않고 있다. 결과적으로 절리면의 전단지지 효과가 고려된 암반절리의 한계 경사각은 내부마찰각 40° 보다 약간 증가된 41° 로 분석되었다.

암반절리의 경사각이 42° 이상인 경우에 대한 록볼트 지보효과를 고찰하기 위하여 절리경사각에 따라 절리암반의 미끄러짐 파괴를 방지하기 위하여 요구되는 최소 록볼트

Table 3 Mechanical properties of rock, joint, and rockbolt for simulating the bolt action in the jointed rock mass

| Material | Property | Value |
|----------|---|------------|
| Rock | modulus of elasticity (E_r) | 70.0 GPa |
| | Poisson's ratio (ν) | 0.2 |
| Joint | normal stiffness (k_n) | 5.0 GPa/m |
| | shear stiffness (k_s) | 5.0 GPa/m |
| | cohesion (c) | 50.0 kPa |
| | internal friction angle (ϕ) | 40° |
| Rockbolt | modulus of elasticity (E_b) | 200.0 GPa |
| | Poisson's ratio (ν) | 0.27 |
| | initial yield strength (σ_{yo}) | 250.0 MPa |
| | Ultimate yield strength (σ_{yu}) | 400.0 MPa |
| | Ultimate viscoplastic shear strain | 0.23 |

설치비율 및 최적 설치각도를 분석하여 Table 4에 수록하였다. 절리암반의 안정성 유지를 위해 요구되어지는 록볼트 설치 효율성은 Fig. 8에 도시된 바와 같이 절리 경사각 60-75° 일때 최대치를 나타내고 있다. 경사각이 60° 이하인 경우와 75° 이상인 경우에는 경사각 변화에 따라 록볼트 설치효율성도 급격하게 감소하고 있어, 상대적으로 낮은 비율의 록볼트 설치에 의해서도 절리암반의 안정성을 기할 수 있다.

록볼트 지보작용을 고찰하기 위하여 록볼트 설치에 따라 절리암반에 형성되는 응력변화를 분석하였다. Fig. 9에 도시된 바와 같이 록볼트 설치에 의해 절리면의 법선응력은 절리경사각에 따라 약간씩 차이는 있으나 일차적으로 증가되고 있으며 (elastic joint + bolt 경우), 점소성 거동에 의한 응력 재분포 영향에 의해 추가적인 법선응력의 증가 상태를 나타내고 있다 (viscoplastic joint + bolt 경우). 이에 비해 절리면의 전단응력은 (Fig.

Table 4 Rockbolt proportion required to stabilize the rock mass and optimum installation angle

| Joint Dip (deg) | Rockbolt Proportion | Installation Angle (deg) |
|-----------------|---------------------|--------------------------|
| 42 | 0.0011 | 33~35 |
| 45 | 0.0029 | 33~46 |
| 50 | 0.0048 | 42~50 |
| 55 | 0.0059 | 46~48 |
| 60 | 0.0067 | 49~53 |
| 65 | 0.0065 | 62~68 |
| 70 | 0.0067 | 74~81 |
| 75 | 0.0062 | 82~89 |
| 80 | 0.0048 | 80~88 |
| 85 | 0.0029 | 85~97 |

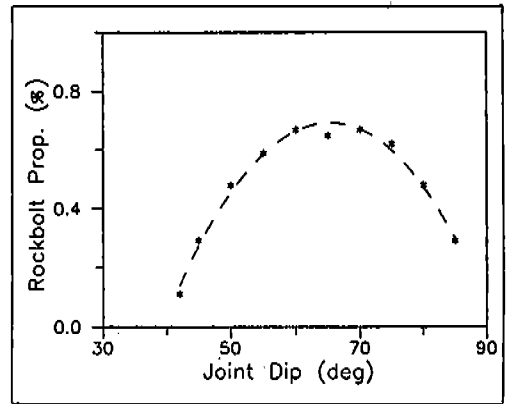


Fig. 8 Rockbolt proportion required to stabilize the jointed rock mass.

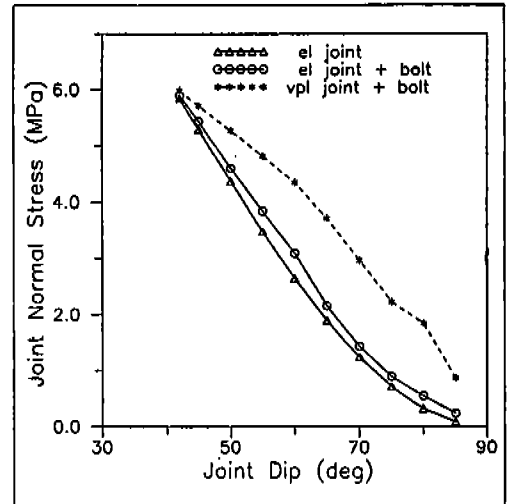


Fig. 9 Effect of rockbolt action on the joint normal stress.

10) 록볼트 설치에 의해 감소되고 있으며, 점소성 거동에 의한 추가적인 전단응력 감소현상이 발생된다. 결과적으로 록볼트 설치에 의한 절리면에서의 법선응력 증가와 전단응력 감소가 복합적으로 작용하여 절리암반의 안정도를 향상시켜 주고 있다. 한편, 점소성 거동에 의한 록볼트 자체의 응력변

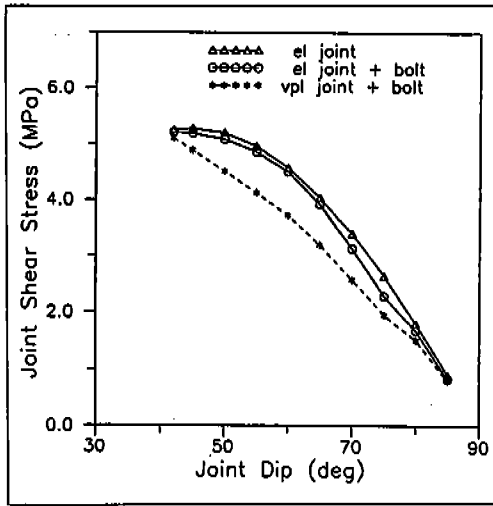


Fig. 10 Effect of rockbolt action on the joint shear stress.

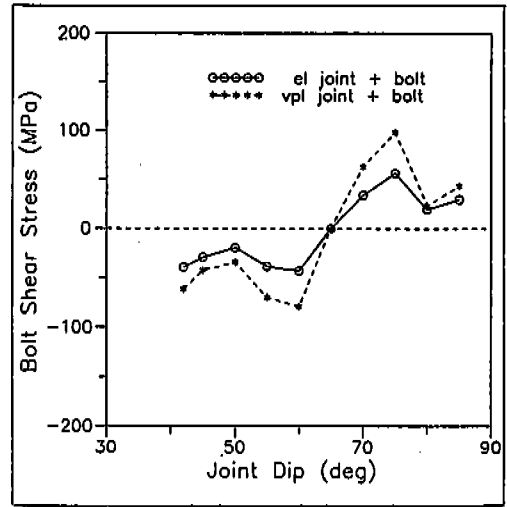


Fig. 12 Rockbolt shear stress change.

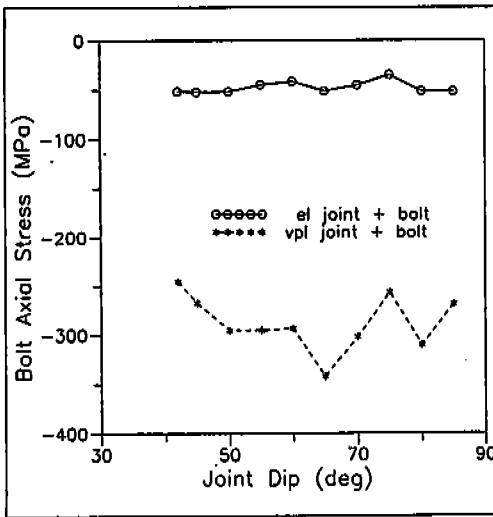


Fig. 11 Rockbolt axial stress change.

우에서와 같이 점소성 거동에 의해 절대적인 응력치가 증가된다. 결과적으로 록볼트 설치에 의한 전체 암반의 점소성 거동 결과는 록볼트 자체의 응력을 증가시키는 방향으로 진행되고 있으나, 전체적으로 암반절리의 안정성은 향상되고 있다.

암반 절리의 경사각에 따라 최대 지보효과를 형성시키는 최적 록볼트 설치각도를 절리경사면을 기준으로 산정하여 Fig. 13에 도시하였다. 절리경사각이 증가함에 따라 최적 설치각도는 절리면에 수직된 방향으로 변화되며, 절리경사각에 따라 약간의 차이는 있으나 대체적으로 5° ~ 10°의 설치범위를 허용하고 있다. 암반절리의 경사각이 45° ~ 60°인 경우에는 절리면에 대한 최적 록볼트 설치각도가 30°에서 50°까지 완만하게 증가하며, 경사각이 60° 이상인 경우에는 최적 설치각도가 급격히 변화하여 75° 이상의 경사각인 경우 절리면에 거의 수직인 방향으로 록볼트를 설치하였을 때 최대 지보효과가 발생되고 있다. 이와같은 결과는 Fig. 9와 10에

화는 절리면에서의 응력변화 양상과 상이한 결과를 나타내고 있다. Fig. 11에 도시된 바와 같이 인장력상태의 록볼트 축응력은 점소성 거동에 의해 절대적 응력치가 증가되고 있다. 또한, 절리경사각에 따라 방향이 전환되어 있는 록볼트 전단응력도(Fig. 12) 축응력 경

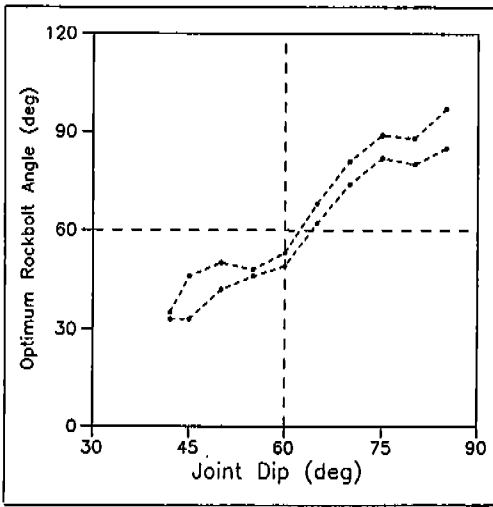


Fig. 13 Optimum angle of rockbolt installation.

도시된 절리면의 응력변화 상태를 고찰하여 도출할 수 있다. 록볼트 설치전에 절리면에 형성되는 법선응력과 전단응력은 절리 경사각 증가에 따라 공통적으로 감소하고 있다. 따

라서, 절리 경사각이 낮을 경우에는 록볼트 설치에 의해 상대적으로 높게 형성된 전단 응력을 감소시키는 것이 효과적이며, 절리 경사각이 높은 경우에는 낮게 형성된 전단 응력을 변화시키는 것보다는 절리면에 수직 방향으로 록볼트를 설치하여 법선응력을 증가시키는 것이 효과적이다. 실제 록볼트 지보효과가 고려된 수치해석 결과도 이와같은 관점에서의 절리 경사각에 따른 법선응력과 전단응력 변화양상을 나타내고 있다 (Fig. 9와 10 참조).

점소성 모델을 이용하여 굴착이 진행중인 원유저장 지하공동의 거동을 수치해석적으로 분석하였다. 원유비축시설은 Fig. 14에 도시된 바와 같이 축방향(N27° W)으로 평행한 6개의 지하공동으로 구성되어 있다. 수압과쇄법에 의해 측정된 비축기지 암반의 현장 초기 수평응력은 상부에서는 깊이에 따라 변화되기는

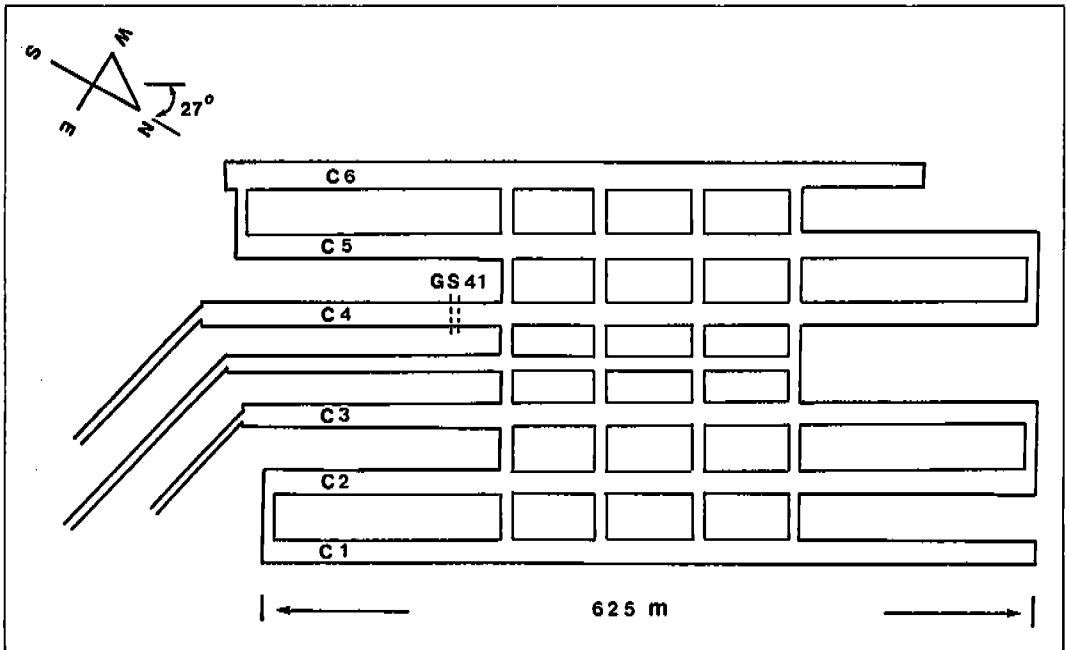


Fig. 14 Plan view of oil storage cavern system.

하지만 $S_H = 5.4\text{MPa}$, $S_h = 3.4\text{MPa}$ 로 조사되었다. 시추공 깊이 119.1m 이상에서는 최대수평응력(S_H) 10.3MPa, 최소수평응력(S_h) 5.7MPa이며, 최대수평응력의 방향은 북쪽을 기준할 때 시계회전방향으로 101° 이다.

수치해석 모델분석 대상인 원유비축 지하공동의 단면을 Fig. 15에 표시하였다. 지하공동은 상부에 타원형의 갤러리 부분과 하부에 3단의 bench로 구성되어 있으며, 각각의 높이는 7.5m, 너비는 18.0m이다. 갤러리 천장 부분은 해수면 기준 -30.0m, 3단 bench 바닥은 해수면 -60.0m로 설계되어 있다. 계측 지점인 C4 터널 GS41 지점에서의 현장조사에 의하면 갤러리 우측부분에 너비 5m의 shear zone이 관찰되었으며 내부에는 주향 $N55^\circ W$, 경사 $84.8^\circ NE$, 간격 1.25m인 절리군이 발달되어 있다. 한편, 암반에는 2개의 절리군이 발달되어 있으며 이들의 기하학적 속성은 다음과 같다. 절리군 1 : 주향 $N50^\circ - 60^\circ W$, 경사 $75^\circ - 85^\circ SW$, 간격 3.55m ; 절리군 2

: 주향 $NS - N10^\circ E$, 경사 $75^\circ - 80^\circ SW$, 간격 3.14m. 본 연구에서는 이와같은 절리암반의 지역적 속성을 고려하였으며, 모델 분석에 사용된 절리암반 및 보강재인 록볼트의 역학적 특성을 Table 5에 수록하였다. 또한 전술한 수압과쇄법에 의해 측정된 현장 수평응력과 다음의 관계식으로 산정된 수직응력

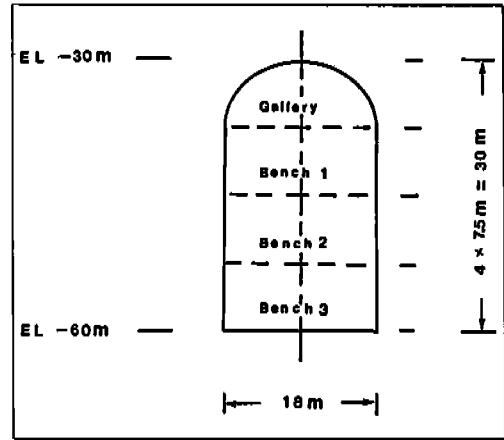


Fig. 15 Cross-section of oil storage cavern.

Table 5 Mechanical properties of rock, joint, and rockbolt for simulating the behavior of oil storage cavern

| Material | Property | Value | | |
|----------|------------------------------------|-----------------------------------|------------|------------|
| Rock | modulus elasticity (E_r) | 67.7 GPa | | |
| | Poisson's ratio (ν) | 0.23 | | |
| | mass density | $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ | | |
| Joint | | set #1 | set #2 | set #3 |
| | normal stiffness (k_n) | 6.6 GPa/m | 6.6 GPa/m | 1.0 GPa/m |
| | shear stiffness (k_s) | 3.3 GPa/m | 3.3 GPa/m | 0.5 GPa/m |
| | cohesion (c) | 50.0 kPa | 50.0 kPa | 10.0 kPa |
| | internal friction angle (ϕ) | 40° | 40° | 30° |
| | spacing | 3.55 m | 3.14 m | 1.25 m |
| Rockbolt | modulus of elasticity (E_b) | 200.0 GPa | | |
| | Poisson's ratio (ν) | 0.27 | | |
| | yield strength (σ_y) | 250.0 MPa | | |

(σ_v) 분포를 모델분석에 사용하였다.

$$\sigma_v \text{ (MPa)} = 0.027 \times \text{depth (m)} \quad (17)$$

지하원유비축 공동의 갤러리 굴착에 대한 거동을 수치해석 모델을 이용하여 분석하였다. 모델 분석에 사용된 유한요소 mesh를 Fig. 16에 도시하였다. Mesh 하부와 양쪽 측면에서의 변위를 구속하였으며, 굴착에 의해 발생하는 하중을 현장응력 수준에 따라 산정하여 갤러리 벽면에 외력으로 작용시켰다. Mesh요소는 Fig. 17에 도시된 바와 같이 2개의 절리군이 내재되어 있는 부분과 shear zone으로 구분되어 있으며, 보강을 위한 록볼트 시공은 설치비율에 따라 균일시공(case #1)과 차별시공(case #2)의 경우를 가정하였다.

Fig. 18에 도시된 계측지점 A, L, R에서의

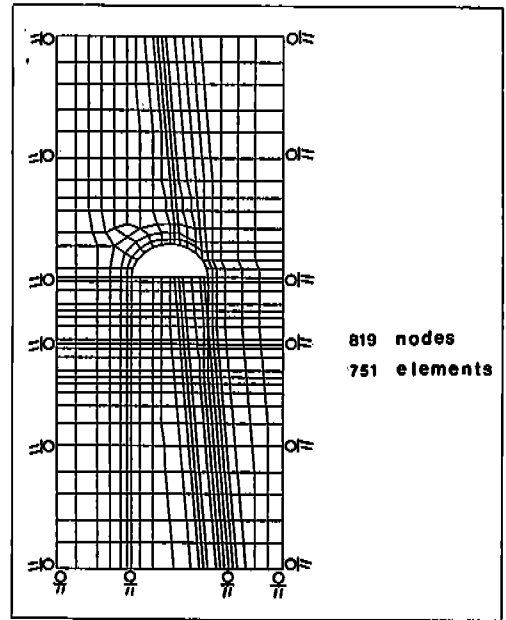


Fig. 16 Finite element mesh for simulating the behavior of gallery.

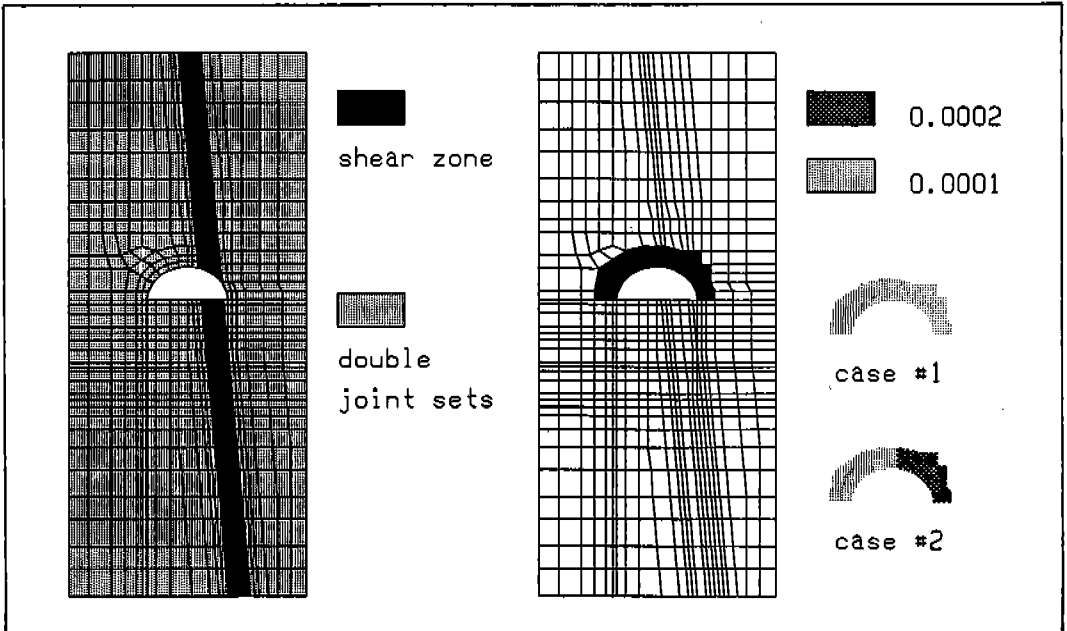


Fig. 17 Mesh illustrating joint sets and rockbolt installation gallery.

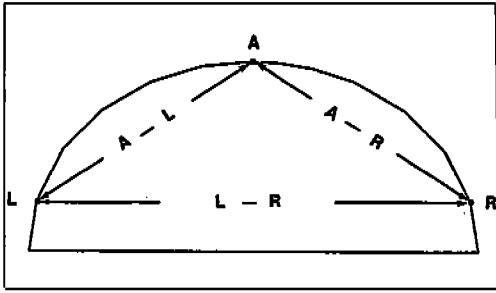


Fig. 18 Positions for measuring the internal distance change around gallery.

변위를 이용하여 갤러리 굴착후 록볼트가 설치되기 이전 15일 동안 산정된 내공변위 변화에 대한 실제 계측결과와 모델 분석결과를 Fig. 19에 도시하였다. 실제 계측결과는 A-L, A-R, L-R 3 지점간에서 공통적으로 초기단계에서는 매우 불규칙한 내공변위 변화 상태를 나타내며, 굴착후 5일 경과후부터는 전반적으로 내공변위의 변화폭이 감소되고 있다. 내공변위에 대한 수치해석 모델 결과는 실제 계측결과와 유사하게 산출되고 있으나 시간별 변화폭이 매우 작게 나타나고 있다. 굴착후 15일이 경과된 시점을 기준으로 할때 A-L과 L-R 지점간의 내공변위에 대한 모델 결과는 계측결과보다 작게 산정되었으며, shear zone의 영향을 직접적으로 받는 A-R 지점간에서는 계측결과보다 크게 나타나고 있다. 이러한 세부적인 결과 차이는 3차원 절리면을 2차원 모델을 이용하여 분석한 것에 부분적으로 기인된 것으로 사료된다.

록볼트를 설치할 경우 예상되는 갤러리 거동을 수치해석적으로 분석하여 Table 6에 수록하였다. 록볼트 시공에 따른 전체암반의 강성도 증가에 의해 A-L, A-R, L-R지점간의 내공변위량은 록볼트 설치비율이 증가

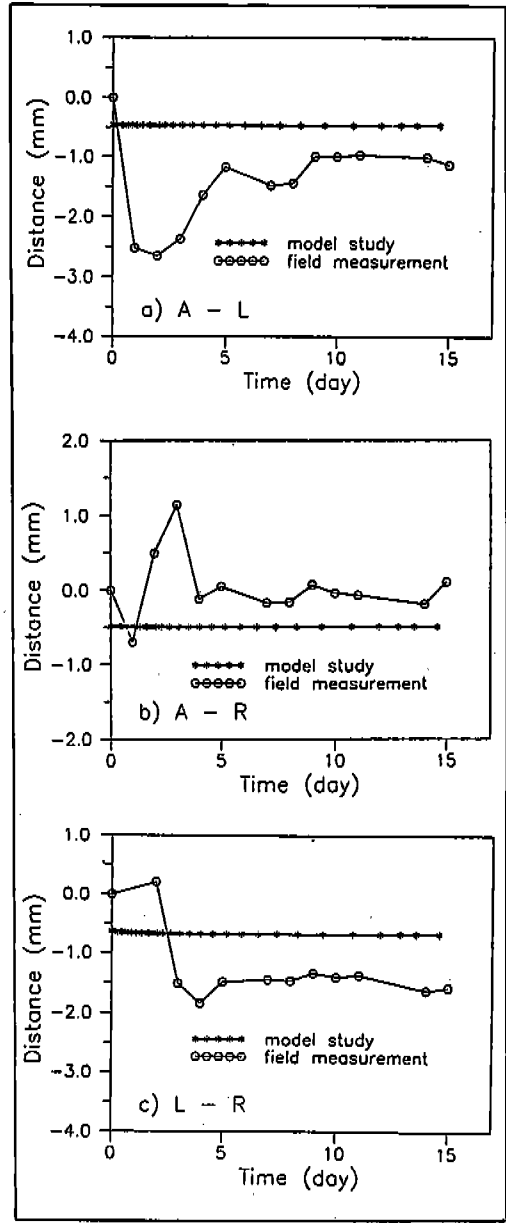


Fig. 19 Internal distance change around gallery without rock-bolt installation. a) A-L, b) A-R, c) L-R.

함에 따라 미세하게 감소되고 있으나, 점소성 변형이 완료되는 기간은 상당히 단축되어 있다. 록볼트가 설치되지 않은 경우에는 점

Table 6 Viscoplastic behavior of reinforced gallery

| | internal distance change(mm) | | | convergence time (day) |
|---------|------------------------------|--------|--------|---------------------------|
| | A-L | A-R | L-R | |
| no bolt | -0.473 | -0.496 | -0.678 | 26.7 |
| case #1 | -0.474 | -0.494 | -0.673 | 18.9 |
| case #2 | -0.474 | -0.495 | -0.674 | 7.3 |

소성 거동 수렴기간이 약 27일 소요되고 있으며, 록볼트 설치비율이 0.0001인 균일시공(case #1)의 경우 약 19일로 단축된다. Shear zone(Fig. 17 참조) 부근에서의 록볼트 설치비율을 0.0002로 2배 증가시켰을 경우(case #2)에는 점소성 거동 수렴기간이 약 8일로 크게 단축되어 지보효과가 단기간에 발생되는 것을 지시하고 있다.

원유비축 지하공동의 전단면(Fig. 15 참조)이 굴착되었을 경우를 가정하여 예상되는 공동의 점소성 거동을 수치해석적으로 분석하였다. 모델 분석에 사용된 유한요소 mesh를 Fig. 20에 도시하였다. 변위구속 조건은 갤러리 분석의 경우와 동일하며, 현장응력에 따라 굴착 전단면에 형성되는 하중을 산정하여 외력으로 작용시켰다. Bench 굴착대상 암반에는 갤러리 경우와 동일하게 2개 절리군과 shear zone의 존재를 가정하였다. 터널 보강을 위한 록볼트 시공은 설치비율에 따라 2가지 경우로 구분하였고, 지하공동 주위 암반에 대한 설치비율을 Fig. 21에 도시하였다. 터널 전단면의 오른쪽 부분에는 연약대로 판단되는 shear zone이 위치하고 있어 Fig. 21 case #2에서와 같이 록볼트 설치 비율을 증가시켜 지하공동 거동을 분석하였다. 모델 분석에 사용된 암반, 절리 및 록볼트의 특성들은 Table 5에 수록되어 있다.

점소성 거동분석에 의한 터널 벽면의 변

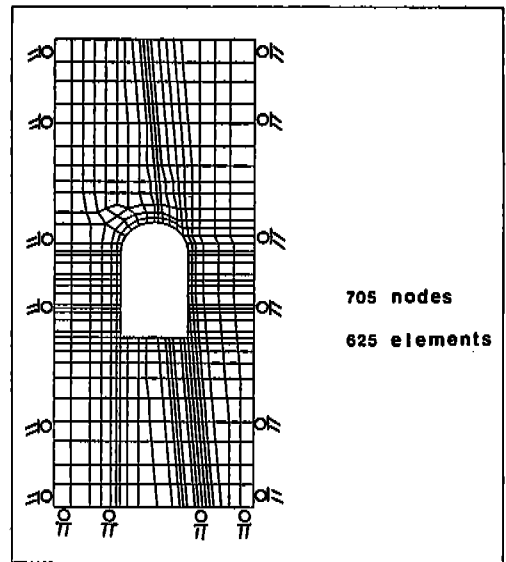


Fig. 20 Finite element mesh for simulating the behavior of oil storage cavern.

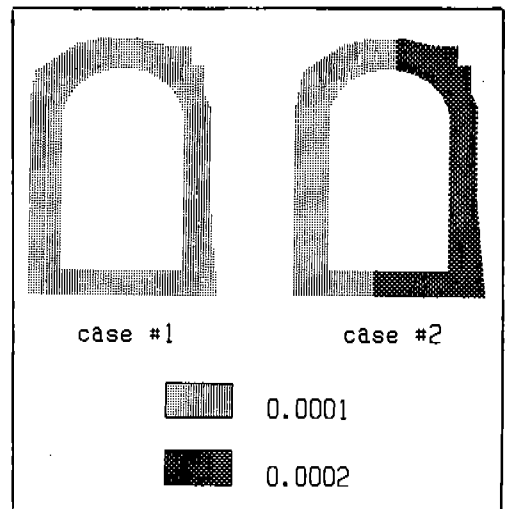


Fig. 21 Rockbolt installation around oil storage cavern

위를 1000배 확대하여 Fig. 22에 도시하였다. 점선으로 표시된 전단면 변위는 록볼트가 시공되지 않은 경우와 록볼트 설치 case #1과 case #2 경우에 분석된 결과를 중복하여

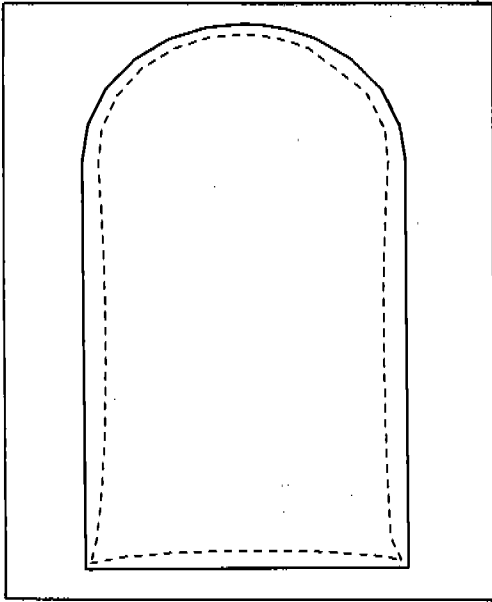


Fig. 22 Deformation of oil storage cavern.

표시하였다. Fig. 22의 결과에 의거할 때 록볼트 설치비율에 관계없이 공통적으로 공동은 내부쪽으로 축소되고 있으며, 암반에 발달된 높은 경사의 절리 방향성에 의해 터널 벽쪽에서의 변형이 천장부분과 바닥부분에서보다 우세하게 나타나고 있다. 또한 연약대인 shear zone의 위치에 기인하여 갤러리 오른쪽 부분에서의 변형이 왼쪽부분보다 확대되어 있으며, 수직벽면의 경우에도 오른쪽에서의 변형이 증가되어 있다. 록볼트 설치에 따른 보강효과를 Fig. 22에 도시된 터널변위량 변

화에 의거하여 고려할 때, 갤러리 거동분석의 경우에서와 마찬가지로, 터널변위량 자체에 대한 가시적인 효과는 발견되지 않는다.

암반의 점소성 거동에 의한 내공변위 변화를 Fig. 23에 표시한 5개 구간에서 분석하여 Table 7에 수록하였다. 각 구간에서의 내공변위량은 추가적인 록볼트 설치에 의해 감소하는 추세를 나타내고 있으나, 절대적인 내공변위량 감소는 매우 미약하다. 변위가 수렴된 상태에서의 내공변위량을 살펴보면

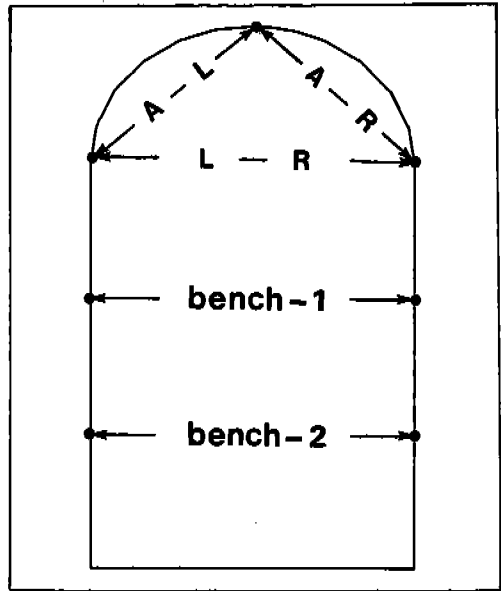


Fig. 23 Positions for measuring the internal distance change around cavern.

Table 7 Viscoplastic behavior of reinforced cavern

| | Internal distance change (mm) | | | | | converg. time |
|----------|-------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------------|
| | A-L | A-R | L-R | bench-1 | bench-2 | (day) |
| no bolt | -0.952 | -0.971 | -0.186 | -0.249 | -0.235 | 42.9 |
| case # 1 | -0.952 | -0.972 | -0.186 | -0.249 | -0.234 | 21.5 |
| case # 2 | -0.952 | -0.973 | -0.186 | -0.249 | -0.234 | 15.6 |

Fig. 22의 결과에서와 같이 전구간에서 터널 단면이 축소되는 현상을 나타내고 있으며, 갤러리 부근에서 보다는 터널 벽면쪽(bench-1, bench-2 구간)에서의 내공변위 변화가 우세하다. 각 구간에서 점소성 거동에 의해 내공변위가 수렴되는 기간은 록볼트를 설치하지 않을 경우에 약 43일 소요된다. 록볼트 설치비율을 0.0001로 균일하게 시공하였을 경우(case #1)에는 변이 수렴기간이 약 20일 정도로 크게 단축되며, shear zone 인근 지역에 록볼트 설치비율을 0.0002로 증가시켰을 경우(case #2) 변위 수렴기간이 약 16일 정도로 단축되고 있다. 이상과 같은 결과에 의거할 때 공동 주위암반에 설치된 록볼트 지보효과는 터널변위량 자체를 감소시키는 것보다는 점소성 거동 수렴에 대한 기간을 단축시키는 데 더욱 큰 영향을 끼치고 있는 것으로 사료된다.

결 론

절리암반에 설치된 록볼트의 점소성 거동을 분석할 수 있는 수치해석 모델을 개발하였다. 록볼트의 점소성 거동에 의해 암반절리 및 록볼트에 형성되는 내부응력 변화는 암반절리의 안전도를 증가시키는 방향으로 진행되며 록볼트 자체의 안전도는 감소되고 있었다. 절리암반의 안전성 유지를 위해 요구되는 록볼트 설치비율은 절리 경사각에 따라 변화되며, 일반적으로 경사각이 70° 내외 일때 최대 비율의 록볼트 설치가 요구된다. 록볼트 설치비율을 최소화할 수 있는 최적 설치각도도 절리 경사각에 따라 변화된다. 절리면에 형성된 전단응력이 낮을 경우에는 법선응력을 증가시키는 방향으로, 법선응력이 높을 경우에는 전단응력을 감소시키는 방향으로 록볼

트를 설치할때 최대 지보효과가 발생되었다.

절리암반에 굴착된 지하공동 갤러리 부분의 내공변위에 대한 수치해석 결과는 실제 계측치와 유사한 변화 양상을 나타내었다. 갤러리 부분의 전반적인 점소성 거동은 굴착 초기단계에서는 연약대인 shear zone에서의 거동에 주된 영향을 받으며, 이후에는 암반 절리의 거동에 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 갤러리 부분 및 터널 전단면 굴착 경우에 대한 2차원 모델분석 결과에 의하면 록볼트 지보효과는 지하공동 자체의 변위를 감소시키는 것보다는 점소성 거동이 수렴되는 기간을 단축시키는 데에 주된 영향을 끼치고 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 90년 목적기초 연구 “지하암반내 에너지 비축기지 건설을 위한 지반공학적 연구”의 제1세부과제 “에너지 비축기지용 암반구조물 안정성 평가를 위한 시험 및 수치해석”에 관한 연구의 일부이다. 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 감사를 드린다.

趙台鎮 :

부산수산대학교 응용지질학과

부산 남구 대연동 599-1

608-737

TEL : (051) 620-6238

FAX : (051) 620-1096

李正仁 :

서울대학교 자원공학과

서울 관악구 신림동 56-1

151

TEL : (02) 385-7902

FAX : (02) 871-8938