

절리암반 거동에 대한 역해석 모델

조 태 진

부산수산대학교 응용지질학과 교수

1. 서 론

지하 암반구조물의 안정적 설계 및 효율적 시공을 위해서는 공동설계 및 거동예측에 필요한 지질공학적 자료의 획득이 가장 중요하다. 현재 절리 등의 불연속면을 포함한 현장암반의 역학적 특성계수 및 응력상태에 대한 조사기법들이 다양하게 개발되어 신뢰성있는 분석결과를 제공하고 있다. 그러나 현장암반의 암석학적 특성과 구조적 양상 및 전체 거동에 큰 영향을 끼치는 불연속면의 속성이 지역적으로 매우 변화되기 때문에 제반 실험자료에 기초한 암반구조물의 거동은 예측하기 매우 어려운 실정이다. 이상과 같은 문제점을 극복하여 현장암반 특성에 적합한 지하구조물 및 지보체계 설계를 효율적으로 수행하기 위해서는 불연속면을 포함한 현장암반의 역학적 특성과 응력상태를 동시에 수치해석적으로 분석할 수 있는 역해석 모델의 개발이 절실하게 요구된다. 본 연구에서는 지하 암반구조물의 거동 예측에 필수적인 현장암반의 역학적 특성 및 응력상태를 규명하여 지하굴착에 대한 설계 및 지보체계 수립에 효율적으로 활용할 수 있는 역해석 기법을 제시하였다.

2. 이론적 고찰

역해석(back analysis)은 계측결과를 이용하여 현장암반의 역학적 특성 및 응력수준 등을 산정하는 기법이다. 기존에 정립된 역해석 기법들은 직접법 또는 역순법에 의거하여 전체암반의 물성분석에 초점을 두고 개발되었으며, 현장암반의 지질구조적 특성이 암반구조물의 거동

에 미치는 영향 등에 대해서는 세부적인 고찰이 수행되지 못하였다. 본 연구에서는 현장암반에 발달된 불연속면, 특히 절리군의 방향성 및 역학적 특성 등이 고려될 수 있는 역해석 모델을 유한요소법을 이용하여 다음과 같이 개발하였다. 일차적으로 역순법에 의거하여 Sakurai(1993)가 개발한 역해석 이론을 기초로 한 역해석 기본모델을 개발하였다. 이차적으로 Gerrard and Pande(1985) 및 Cho et al.(1991)에 의해 수립된 절리암반의 연속체적 거동에 대한 수치해석 기법을 역해석 기본모델에 도입하여 불연속면의 공간적 속성과 역학적 특성이 고려될 수 있는 역해석 모델을 완성하였다.

절리암반의 연속체적 거동에 의거한 강성도를 계산하기 위하여 요구되는 전체암반의 변형 행렬 [D]를 Cho et al.(1991)이 제시한 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$[D] = ([E]^{-1} + \sum_i [C_i])^{-1} \quad (1)$$

여기서

[E] : 암반의 변형 행렬

[C_i] : i번째 절리군의 컴프라이언스 행렬

원암이 역학적으로 등방성 거동을 나타낸다고 가정하면 암반변형행렬 [E]를 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$[E] = E_R [R] \quad (2)$$

여기서 [R]은 포아송 비(ν)만을 사용하여 구성되며, 변형률 조건에 따라 일반적인 역해석 수행과정에서와 마찬가지로 특정값을 가정할 수 있다. 따라서 관계식 (2)에서의 유일한 미지계수는 암반탄성계수 E_R 이다.

역해석 과정에서 전단 강성도와 법선 강성도가 동일한 것으로 가정될 수 있을 때 절리군의 컴플라이언스 행렬은 다음의 식으로 표현된다.

$$\sum_i [C_i] = \sum_i \frac{1}{S_i k_{s_i}} [J_i] \quad (3)$$

절리거동에 대한 관계식 (3)에서 [J_i]는 현장관측이 가능한 i번째 절리군의 방향성에 관계되는 행렬이다. 본 연구에서는 해석 대상지역의 동일 암종내에서 절리강성도는 절리

군에 관계없이 일정하다(k_s)는 전제하에 역해석 이론을 전개하였다. 이에따라 관계식 (1)에서의 컴프라이언스를 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\sum_i [C_i] = \frac{1}{k_s} \sum_i \frac{1}{S_i} [J_i] \quad (4)$$

관계식 (2)과 (4)를 이용하여 전체암반의 변형행렬 [D]를 산정할 때 2개의 미지계수 E_R 과 k_s 가 독립적으로 존재하는 한 관계식 (1)에서의 역행렬 계산이 불가능하여 [D] 산정에 문제점이 발생된다. 이 문제점을 해결하기 위하여 E_R 과 단위절리 간격이 곱하여진 k_s 간의 관계를 설정하면($k_s \cdot 1m = \beta \cdot E_R$) 관계식 (1)의 계산을 다음 방법으로 수행할 수 있다.

$$[D] = E_R \left([R]^{-1} + \frac{1}{\beta} \sum_i [C_i] \right)^{-1} \quad (5)$$

관계식 (5)에 의거하여 산정된 변형행렬 [D]를 이용한 연속체 절리암반의 역해석 과정은 일반적인 암반의 경우와 동일하게 수행되며, 최종단계에서 $k_s = \beta E_R$ 에 의거하여 절리면의 강성도가 산정된다.

3. 역해석 모델 구성

굴착에 의해 유발된 지하공동의 거동을 수치해석적으로 분석하기 위하여는 굴착 이전에 존재하던 암반에 의해 지지되던 응력을 정확하게 산정하여야 한다. 지하공동의 기하학적 특성과 현장응력의 방향성을 고려하여 공동 표면에 대한 유한요소망에서의 등가 절점력을 산출할 수 있는 유한요소모델 EXCLOAD를 일차적으로 개발하였다. EXCLOAD에서는 굴착 영역에 대한 유한요소망을 구성하여 지하공동 표면에서의 등가 절점력을 계산한다. 현장응력 상태가 조사된 경우에는 실제 절점력을 산정하여 수치해석 분석에 활용할 수 있으며, 역해석의 경우에는 현장응력 성분에 대한 명목상의 절점력을 산정할 수 있도록 하였다. 특히, 굴착영역에 대한 유한요소망에서의 절점과 역해석에 이용될 유한요소망에서의 절점위치를 일치시켜 EXCLOAD 결과를 직접 역해석에 활용시킬 수 있도록 고안하였다.

일반 암반에 대한 역해석 모델 BAR을 탄성이론에 기초하여 개발하였다. BAR은 절리암반

거동에 대한 역해석 모델의 기본모델로 개발되었으며, 일반적인 암반에 굴착된 지하공동의 거동에 대한 역해석을 수행할 수 있다.

암반거동에 대한 역해석 모델 BAR에 기초하여 절리거동 특성을 고려할 수 있는 역해석 모델 BAJ를 개발하였다. BAJ의 정확도를 검증하기 위하여 Fig. 1에 도시된 암반굴착 모형에 1개 절리군을 내재시켜 절리암반 모형을 설정하였다. 절리군의 간격은 $S = 1.0 \text{ m}$, 전단강성도 $k_s = 1000 \text{ GPa/m}$, 경사각 $\theta = 0.0^\circ$ 로 가정하였다. EXCLOAD를 사용하여 절리암반 모형의 중앙부 굴착에 의한 등가 절점력을 산정한 후, 기존에 개발된 연속체적 절리암반 모델(Cho et al., 1991)을 사용하여 절점 변위를 계산하였다. 유한요소망의 절점 A, B, C (Fig. 1 참조)에서 산정된 변위를 역해석 모델 BAJ의 입력자료로 이용하여 암반 탄성계수(E_R), 절리 전단강성도 (k_s) 및 현장응력을 산정하였다. 이 경우 BAJ의 정확도가 검증될 수 있도록 E_R 과 k_s 관계를 결정하는 $\beta = 100$ 을 역해석에 사용하였다. 수평절리군 ($\theta = 0.0^\circ$)을 내재시켰을 때 BAJ를 이용한 역해석 결과는 절리모형에서 변위산정을 위해 가정된 절리암반의 특성계수 및 현장응력과 정확히 일치하였다. 절리모형에 내재된 절리군을 회전시켜 경사각을 30.0° 로 가정하였을 때에도 암반 탄성계수와 전단강성도가 정확하게 산정되었다. 현장응력의 경우에는 법선응력 σ_x 와 σ_y 는 모형 설정치인 1.0MPa 과 일치하였으나(Fig. 1 참조), 전단응력은

$\tau_{xy} = 0.335 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ 로 법선응력에 비해 미세한 응력이 존재하는 것으로 역해석되었

다. 이와같은 수치해석상의 오차는 절리암반 모델에서 산정된 절점 변위를 BAJ에 입력하는 과정에서 발생된 round-off 오차에 기인된 것으로 사료되며, 전단응력의 크기가 법선응력 $\sigma_x = \sigma_y = 1.0 \text{ MPa}$ 에 비해 매우 미약하여(0.1% 이하) 역해석 모델 BAJ의 정확도는 검증되었다고 사료된다.

4. 지하공동 거동분석

본 연구에서 개발된 절리암반 거동에 대한 역해석 모델 BAJ의 신뢰성과 현장 활용성을 입증하기 위하여 원유 지하비축용 터널거동에 대한 역해석을 실시하였다. 비축기지 설치대상 암반은 화강섬록암이며, 비축터널은 갤러리와 3단의 벤취부분으로 구성되어 있다. 역해석 입력자료는 갤러리 굴착시 계측된 지중변위를 이용하였으며, 계측지점 주위암반에서의 절리 방

향성은 현장관찰자료를 토대로 하였다. 역해석으로 분석될 절리암반의 특성계수들의 정확도를 판단하기 위하여 계측지점 암반의 역학적 특성을 측정하여 기준치로 설정하였다. 현장시추코어를 이용하여 실내실험에 의해 측정된 절리암반의 특성계수(한국석유개발공사, 1990)들을 Table 1에 수록하였다. 갯터리가 굴착된 상태에서의 역해석을 수행하기 위한 절리암반 모형을 Fig. 2에 도시하였다. 갯터리 중앙부에서의 지형고도는 해발 125 m 이며, 천정부는 -30 m이다. 역해석에 사용된 수직응력은 갯터리 중심을 기준으로 갯터리 높이 및 지형고도를 고려하여 산정하였으며, A-A', B-B', C-C' 3개 구간(Fig. 2 참조)에서 측정된 지중변위를 기본 역해석자료로 활용하였다.

지중변위 측정지점 A', C'는 벽면내부 3 m에 위치하며, B'는 천정내부 2 m에 위치하는 측정점이다. 현장계측결과 3개 구간에서 수렴상태에 도달했을 때의 상대변위 A-A' = 0.14 mm, B-B' = 0.59 mm, C-C' = 0.18 mm를 역해석 입력자료로 사용하였다. 절리암반에 설치된 지하원유비축 터널의 갯터리 거동에 의거하여 BAJ 모델을 이용한 역해석 결과를 Fig. 3에 도시하였다. $k_s = \beta \cdot E_R$ 관계에서의 β 를 변화시키면서 역해석에 의해 산정되는 E_R 이 기준값으로 설정된 화강섬록암의 탄성계수 66.3GPa (Table 1 참조)와 일치되는 지점을 추적하였다. β 를 0.05 ~ 0.10 사이에서 0.01씩 증가시켜 역해석을 수행한 결과 $\beta = 0.08$ 일때 $E_R = 66.0\text{GPa}$ 가 산정되었다. 따라서 $k_s = \beta \cdot E_R = 5.33\text{GPa/m}$ 로 계산되며, 실내실험에 의해 측정된 절리면의 전단강성도(Table 1 참조)에 상당히 접근된 수치를 나타내고 있다. 한편, 현장계측은 계측기 설치 이전에 발생된 변위를 측정할 수 없어서 계측변위는 실제 발생된 변위보다 작게 나타난다. 따라서 계측기 설치 이전에 발생된 변위가 총 변위량의 30 % 정도로 가산하여 지중변위를 재산정하였다. 지중변위가 30% 정도 증가하였을 때 BAJ를 이용하여 산정된 암반 탄성계수를 Fig. 3에 도시하였다. $\beta = 0.05$ 일 때 $E = 68.9 \text{ GPa}$ 가 산정되었으며, 따라서 $k_s = 3.45 \text{ GPa/m}$ 가 계산되어 졌다. 이 수치는 Table 1에 수록된 전단강성도 측정치 3.23 GPa/m에 거의 일치하는 정확한 결과이다. 결과적으로 계측된 지중변위의 총량을 정확히 분석할 수 있는 방법이 현단계에서는 명확히 정립되지 않아서 k_s 추정이 가변적일 수 있으나, 산정된 결과들이 실제 측정치에 근사한 값을 나타내고 있어 역해석 모델 BAJ의 정확성과 계수추정 방법의 신뢰성을 입증하고 있다.

5. 결 론

절리암반의 연속체적 거동개념에 의거하여 현장암반, 특히 절리면의 역해석 특성을 분석할 수 있는 방법론을 개발하였으며, 유한요소법에 의거하여 역해석 모델을 구성하였다. 절리암반 거동에 대한 역해석 모델의 정확성은 예제적 모형을 이용하여 수치해석적으로 입증하였다. 원암 및 절리군의 역학적 특성계수들을 동시에 산출할 수 있는 알고리즘은 현단계에서 정립되지 못하였으나, 상대적으로 용이하게 측정될 수 있는 원암 탄성계수의 대표값을 설정하여 절리 전단강성도를 추정하는 방법론을 제시하였다.

6. 참고문헌

조태진, 김혁진. 1995. 거제지역 화강암체의 지질공학적 특성. 대한지질공학회지. 5(2): 139-153.

한국석유개발공사. 1990. U-2 추가비축기지조사설계용역 기본조사보고서.

Cho, T. F., Plesha, M. E., and Haimson, B. C. 1991. Continuum modelling of jointed porous rock. *Int. J. Num. Anal. Methods Geomech.* 15: 333-353.

Gerrard, C. M. and Pande, G. N. 1985. Numerical modelling of reinforced jointed rock masses. I. Theory. *Comput. Geotech.* 1: 293-318.

Sakurai, S. 1993. Back Analysis in Rock Engineering. In *Comprehensive Rock Engineering*. Ed. J. A. Hudson, Pergamon Press.

Table 1. Mechanical properties of rock mass for underground oil storage cavern

	parameter	value
rock	γ	26.9 kN/m ³
	E_{lab}	66.3 GPa
	E_{field}	34.7 GPa
	ν	0.23
Joint	k_s	3.23 GPa/m

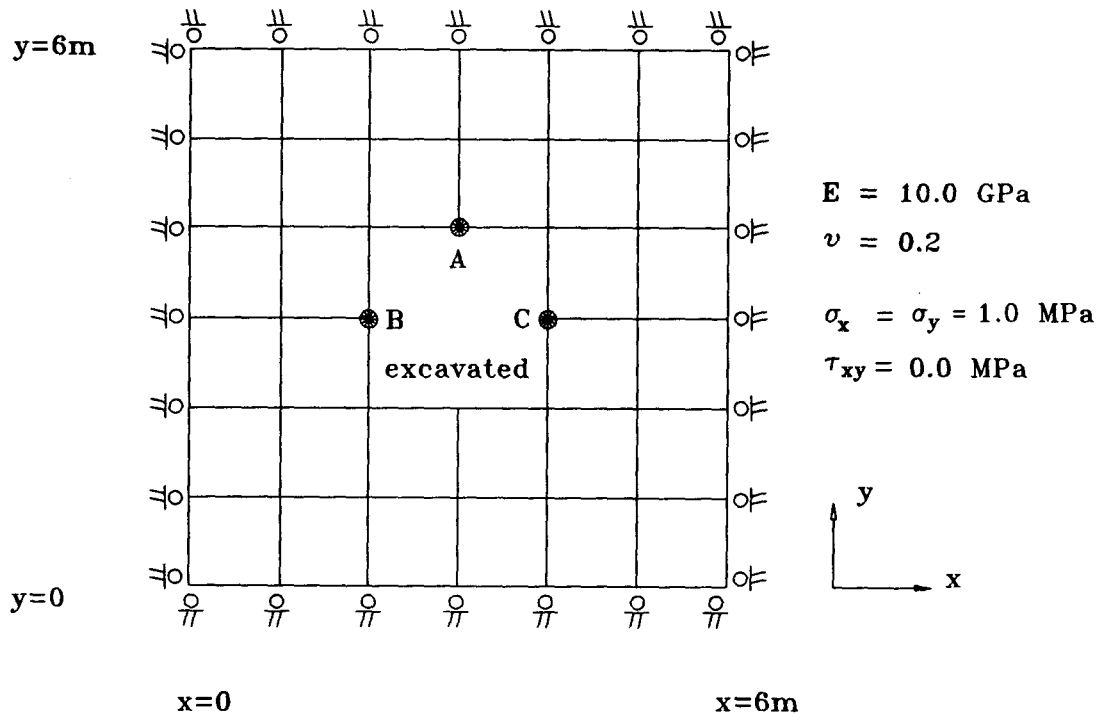


Fig. 1. Simplified Model of Underground Excavation .

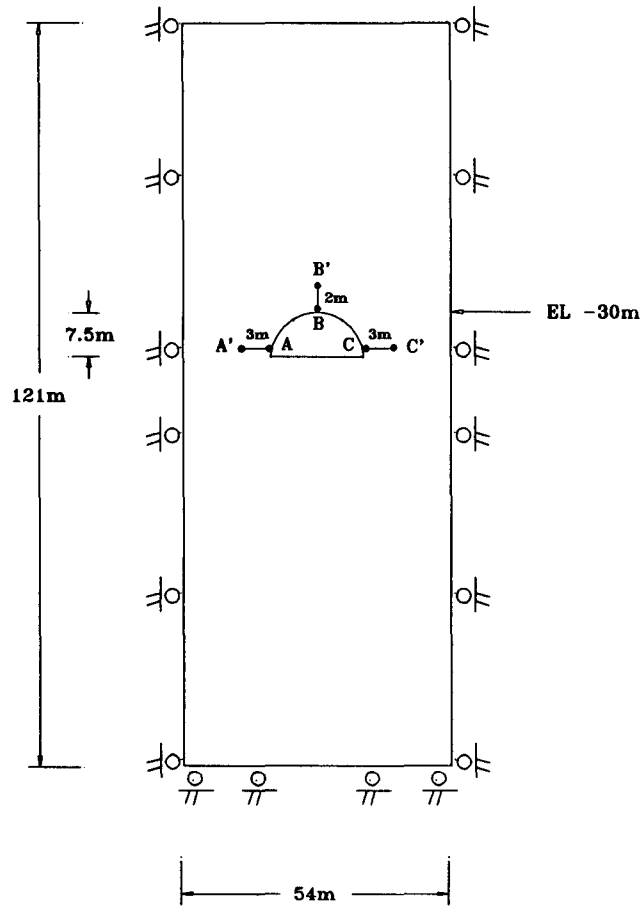


Fig. 2. Schematic diagram for underground oil storage - gallery excavation.

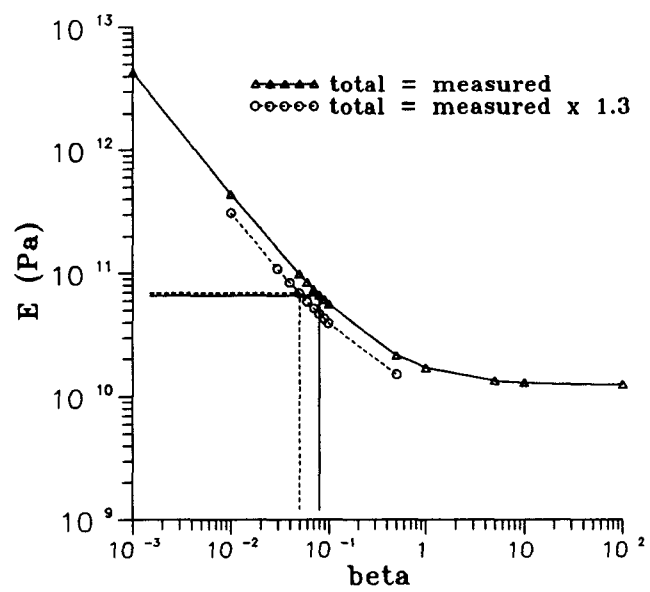


Fig. 3 E vs beta for the gallery behavior of oil storage cavern.