

역해석 방법에 의한 터널의 안정성평가

Evaluation of Stability of Tunnel by Using Back Analysis

김 영민, Youngmin, Kim

전주대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng. Jeonju Univ.

개요(SYNOPSIS) : 터널을 굴착하게 되면, 터널주변지반에 이완영역이 발생하게 된다. 시공 중에 발생되는 이완영역을 파악하는 것은 터널의 안정성 및 록볼트의 개수, 길이 등을 검토하는 데 중요하다. 이완영역의 추정법은 실측에 의한 방법과 해석에 의한 방법 등이 있다. 본 논문에서는 일본에서 많이 활용되고 있는 사쿠라이 교수에 의하여 제안된 현장계측변위로부터 역해석방법에 의한 터널의 안정성을 평가하는 방법에 대하여 검토하였다.

주요어(Key Words): Tunnel stability, Back analysis, Critical shear strain, Loosening zone

1. 서론

지반은 지질구조 및 지반을 구성하는 흙 및 암반의 역학적 특성이 매우 복잡하기 때문에 예를 들어 세밀한 지반조사를 수행하고, 정밀한 수치해석법을 이용하여 지반의 거동을 분석하더라도 실제의 지반거동을 정확히 예측하는 것은 매우 어렵다.

이러한 지반구조물 설계에 대한 문제를 대처하기 위하여, 지하공동 및 터널에 대해서는 일반적으로 시공 중에 암반관찰 및 현장계측에 의하여 지반의 역학적 거동을 파악하고 그 결과를 바탕으로 터널의 안정성 및 당초설계의 타당성 등을 평가하는 방법이 수행된다. 이러한 현장계측, 관찰결과를 설계 시공에 피드백하면서 시공하는 방법을 정보화 시공이라고 한다.

터널 등의 지하구조물을 건설하기 위하여 지반을 굴착하는 경우에는, 지반의 강도 등의 특성에 관하여서 굴착주변지반에 이완영역이 발생된다. 이완영역의 범위의 크기는 굴착공법, 지보공의 차이 등에 의해 변화하는 것으로 추정된다. 이완영역의 범위가 추정될 수 있다면, 합리적 굴착공법의 선정, 굴착 시 터널의 허용 변위량 추정, 그리고 주변지반의 손상 및 원인분석, 국부적인 손상에 따른 합리적인 보수, 보강방법의 검토가 가능하게 된다.

2. 이완영역의 추정방법

2.1 지반공학에 대한 역해석

통상 역해석(Back Analysis)이란 구조물에 작용하는 응력, 변형을, 변위 등을 현장에서 계측하여 그 값을 입력 데이터로 하여 그 구조물에 작용하는 하중, 재료의 역학적 특성 등을 구하는 해석방법으로 정의된다. 이러한 방법은 하중, 재료의 역학적 특성 등을 입력하여 응력, 변형을, 변위 등을 구하는 통상의 해석(순해석)과는 완전히 역접근방법으로 역해석이라고 부른다. 역해석법은 동정(Identification) 및 특성화(Characterization)등으로 불리우는 경우가 있으나 현재, 지반공학에서는 역해석이란 명칭이 일반적이다.

역해석 방법은 역정식화법, 직접정식화법, 확률론적 방법으로 나누어 진다. 역정식화 방법은 선형 시스템에, 직접 정식화방법은 비선형 시스템에 적합하며, 확률론적 방법은 얻어진 정보를 포함하여 그 역해석의 신뢰도를 향상시키는 Beyes 방법 및 Kalman filter 이용하는 방법이 있다. 지반공학에 대한 역해석은 지반의 재료정수 뿐만 아니라 그 재료의 구성식이 불확정한 경우가 많아 설계단계에서 유일하게 확정하는 것이 수월하지 않다. 이것은 재료가 인공적으로 만들어진 철근이나 콘크리트 등의 구조물과 본질적인 차이가 된다. 따라서 지반공학에 대한 역해석은 그림-1과 같이 재료정수를 포함한 그 역학모델을 구하는 것도 추정하지 않으면 안된다. 그리고 터널에 대한 역해석 관련 연구를 표-1에 정리하였다.

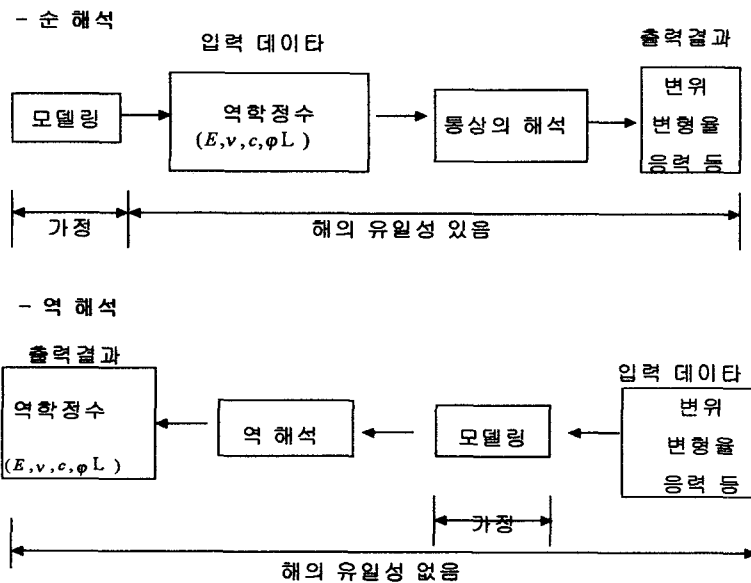


그림 1 지반공학에서의 순 해석 과 역 해석 관계

표 2 터널에 대한 역해석 연구

연구자	추정 파라메타	문 류	최소화방법	해석수법
1. 역학정수, 초기응력, 기하학적 조건				
Gioda and Maier (1980)	점착력, 내부마찰각, 초기응력	D	직접탐색법 (Simplex법, Rosenbrock법)	축대칭 FEM

口井、武 (1983)	초기응력 파라메타 (초기응력, 탄성계수)	I	최소자승법	2차원 FEM
Shimizu and Sakurai(1983)	초기응력파라메타 (초기응력, 탄성계수)	I	최소자승법	3차원 BEM
荒曲、片 (1984)	변형, 강도정수 (Duncan-Chang)	D	공액구배법	축대칭 FEM
久武ら(1984)	점탄성계수	D	Simplex법 최소자승법	3차원 FEM
大西、東出(1985)	탄성계수, 불균질 경계위치	D	Simplex법 비선형최소자승법	2차원 BEM
Cividini et al.(1985)	점소성계수	D	Simplex법	정밀해
Sakurai and Ine(1986)	이방탄성파라메타 초기응력파라메타	I	최소자승법 trial and error	2차원 FEM
久武(1986)	탄성계수	I	최소자승법	3차원 FEM
足立、矢野(1987)	탄성계수	I	노모그래프이용	엄밀해
口井口水ら (1987)	초기응력파라메타 (초기응력, 탄성계수)	I	최소자승법	3차원 BEM
Feng and Lewis(1987)	초기응력	D	비선형최소자승법	2차원 FEM
口井口水ら (1988)	소성영역, 점착력	I	최소자승법	2차원 FEM
Kyoya et al.(1988)	손상 텐서	I	최소자승법	2차원 FEM
Gens et al. (1988)	탄성계수 측정	S	최우추정법	2차원 FEM
Yang and Sterling(1989)	초기응력, 탄성계수	I	최소자승법	2차원 BEM
門田ら(1989)	이방탄성계수	S	확정Kalmanfilter	2차원 FEM
小嶋、足立、荒井 (1989)	탄성계수	D	공액구배법	2차원 FEM
平嶋 ら(1991)	이방탄성계수	I	Trial an error	엄밀해
Ohkami et al. (1991)	이방탄성계수	D	비선형최소자승법	2차원 BEM
2. 토압추정				
Kovari et al.(1977)	지보공, 배면토압	I	연립방정식	보 이론
Gioda and jurina(1981)	복공, 배면토압	I	최소자승법	2차원 FEM
Fanelli et al.(1986)	복공배면토압	I	최소자승법	2차원 FEM
3. 시공관리				
荒井ら(1984)	변형, 강도정수 (Duncan-Chang)	D	공액구배법	축대칭FEM
口井、進士(1985)	초기응력파라메타	I	최소자승법	2차원 FEM
口井、谷河 (1989)	이방성 파라메타 초기응력 파라메타	I	최소자승법 trial and error	2차원 FEM
口井、口水ら(1988)	초기응력 파라메타 (초기응력, 초기응력) 소성영역	I	최소자승법	2차원 FE-BEM 결합법

* I:역정식화법 D:직접정식화법 S:통계적추정법

2.2 이완영역의 정의

터널을 굴착하면, 주변지반에는 일반적으로 원 지반 상태와 다른 느슨한 구조의 이완영역이 발생하게 된다. 이완영역은 굴착의 영향을 받아서 지반의 역학적 특성이 굴착전의 특성과 다르게 변화된 영역으로서 정의하는 것이 가능하다. 그러나 그 발생에 대해서는 몇 가지 다른 메커니즘을 생각 할 수 있다. 요인을 크게 나누어 설명하면 다음과 같다.

(1) 중력의 작용에 의하여 원지반의 균열의 폭이 넓어진다.

(얕은 터널의 천정부의 인장력 발달 경우)

(2) 지반강도비(연직지중응력에 대한 지반의 일축압축강도 비)가 적은 경우에는 터널주변 지반이 소성화 된다.

(3) 발파에 의한 진동 또는 풍화작용

이완영역의 크기는 굴착공법의 검토, 복공의 두께, 록볼트의 개수 및 길이의 설계 등에 있어서 중요한 요인이 되고, 이완영역의 크기에 대한 추정이 가능하면, 터널의 합리적인 설계, 시공안전관리가 가능하게 된다. 그러나 위에서 설명한 대로 이완영역의 발생에 대한 역학관계가 명확하게 밝혀지지 않아서 추정이 곤란하며, 그 크기는 굴착공법, 지보공법의 차이에 의해 변화하기 때문에 이완영역 추정은 용이하지 않다. 또 현장에서 계측기에 의해 측정하더라도 측정방법 및 결과의 평가 방법에서도 문제가 많다.

이러한 상황에 대하여 일본 터널기술협회에서는 이완영역의 추정방법 및 굴착공법에 의한 이완영역의 차이를 파악하기 위해서 과거의 측정 데이터를 조사, 분석하였다. 또 이완영역의 측정방법으로서 갱내 탄성파시험 또는 공내 속도 검층에 의한 방법을 제안했다. 그러나 보고서에서도 지적했듯이 탄성파의 저하영역이 설계에서 이용하고 있는 이완영역과 어떠한 관계가 있는 것이 명확하지 않고, 지중 변위측정에 의하여 얻어진 이완영역과의 관계 등 금후에 연구해야 할 문제가 많다.

본 논문에서는 이완영역의 추정방법으로서 일본 터널현장에서 널리 사용되고 있는 계측변위를 이용하는 방법으로 사쿠리이 교수가 제안한 터널안정성 평가기법을 중심으로 검토한다

2.3 한계전단변형을

터널 주변 지반이 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 따른다면, 축차 응력은 아래와 같은 식을 만족한다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi + 2c \cos \phi \quad (1)$$

여기서, c 는 점착력, ϕ 는 내부마찰각이다.

또한, 축차 변형율은 Hook의 법칙에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = \frac{(1+\nu)}{E}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

여기서, $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ 는 최대, 최소 변형율, E 는 탄성계수, ν 는 포아슨 비이다.

식(1)과 식(2)을 이용하여 아래와 같은 식으로 한계 전단변형율을 정의하였다.

$$\begin{aligned} \gamma_c = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 &= \frac{(1+\nu)}{E}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi + 2 \frac{1+\nu}{E} c \cos \phi \quad (3) \\ &\cong 2 \frac{(1+\nu)}{E} p_0 \sin \phi + 2 \frac{1+\nu}{E} c \cos \phi \end{aligned}$$

여기서, γ_c 는 한계 전단변형율, p_0 는 초기상태의 평균 주응력이다.

2.4 소성영역의 추정

우선, 예측된 변위에 대하여, 탄성체 모델을 이용한 역해석 방법으로 탄성계수를 추정한다. 이러한 경우에 실제 터널 주변지반에 소성영역이 발생하여 있다면, 여기서 구한 탄성계수는 실제의 탄성계수가 아니고 겉보기 탄성계수로 볼 수 있다. 이 겉보기 탄성계수와 실제 탄성계수 간의 관계를 추정할 수 있다면, 겉보기 탄성계수로부터 실제 탄성계수를 구할 수가 있다.

그림 3에 나타나 있듯이 초기응력이 정수압 상태에 있는 균질등방 탄소성지반에 원형공동이 굴착되어진 경우, 지반의 반경방향 변위는 아래와 같이 얻어진다.

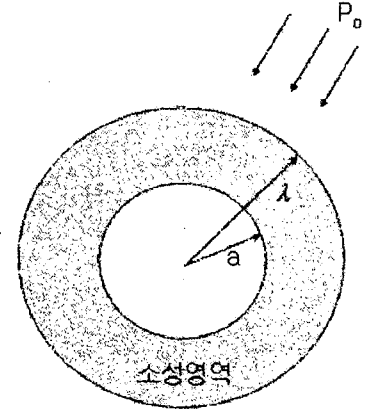


그림 3 정수압상태의 원형터널

$$u^p = \frac{1+\nu}{E} (p_o \sin \phi + c \cdot \cos \phi) \left(\frac{\lambda}{a}\right) \frac{a^2}{r}$$

$$\frac{\lambda}{a} = \left\{ (1 - \sin \phi) \left(\frac{p_o}{c} \tan \phi + 1 \right) \right\}^{\frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi}} \quad (4)$$

단, a 는 공동반경, λ 는 소영역 반경이다.

또한, 탄성 지반에 굴착되어진 원형 공동에 대하여 지반의 반경방향 변위는 다음과 같이 구해진다.

$$u^e = \frac{1+\nu}{E} p_o \frac{a^2}{r} \quad (5)$$

식(4)에 표시되어진 변위를 예측변위로 보고, 겉보기 탄성계수를 구하기 위하여 식(4)과 식(5)을 등치한다.

$$u^e = u^p \quad (6)$$

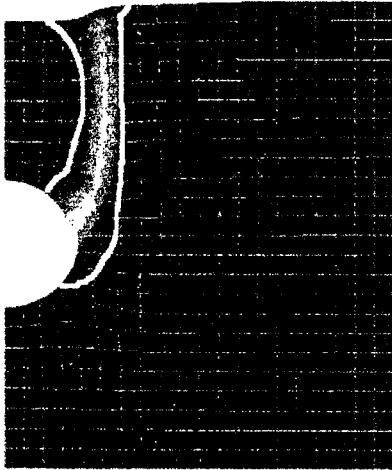
여기서, 식(4)에 대한 탄성계수 및 포아슨 비는 각각 겉보기 탄성계수 E^* 및 겉보기 포아슨 비 ν^* 가 된다. 식(4)~식(6)을 고려하면, 식(7)으로부터 지반의 실제 탄성계수와 겉보기 탄성계수 간의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E = \frac{E^* \sin \phi}{\left\{ \left(\frac{2p_o}{\epsilon_o E} - 1 \right) \sin \phi + 1 \right\}^{\frac{1 - \sin \phi}{\sin \phi}} - \frac{\epsilon_o E^*}{2p_o} (1 - \sin \phi)} \quad (7)$$

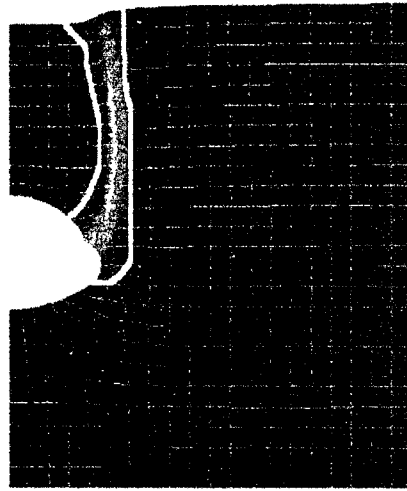
단, 겉보기 탄성계수로부터 실제 탄성계수를 구하기 위하여 계산결과에 미치는 영향이 작은 포아슨 비를 $\nu = \nu^*$ 로 가정하여 위 식을 유도하였다.

겉보기 탄성계수는 변위계측결과로부터 역해석방법에 의하여 용이하게 구할 수 있다. 따라서 p_0 에 토피압으로 보고, 내부마찰각 및 한계변형율을 가정하면 식(7)으로부터 실제 탄성계수를 쉽게 추정할 수 있다.

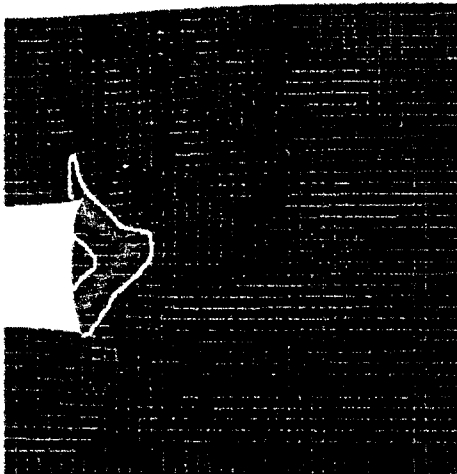
2.5 적용예



(a) 원형 단면



(b) 타원형 단면



(c) 직사각형 단면

그림 4 최대전단변형율도



토피가 얇은 터널을 굴착하는 경우, 터널형상에 따른 주변지반의 파괴거동을 분석하기 위해서 토피비(H/D)가 1인 굴착면적이 약 50m²인 (a)원형 단면(D=8m) (b)타원형 단면 (c)정사각형 단면을 가정하고, 지반정수 값으로 $c = 1\text{t/m}^2$, $\phi=35^\circ$, $\psi=0^\circ$, $\nu=0.3$, $E=1e5\text{t/m}^2$, $\gamma=2.1\text{t/m}^3$, $K=0.5$ 조건에서 500회까지 수렴되지 않는 경우, 파괴로 간주하여 각 경우에 대하여 최종 굴착하중 및 주변지반의 파괴거동을 분석하였다. 파괴시의 각 터널형상에 따른 주변지반의 파괴거동을 분석하여 보면, 원형 단면의 경우에는 터널SL 위치보다 위인 지점에서 파괴가 발달되어 터널 천정부로 진행하여 가는 토끼 귀 형태의 파괴형태를 나타낸다(그림-4,a참조). 타원형 단면의 경우에도 터널SL부근에서 파괴가 발생되어 원형 단면의 파괴형태와 유사하게 파괴가 발달되어, 파괴면이 지표면으로 발달되는 것을 볼 수 있다(그림-4,b참조). 또한 정사각형의 단면의 경우에는 터널측벽부의 양모서리에서 발달되어 오는 전단대에 의하여 흙썰기 형태의 파괴가 발생되고, 터널 바닥부에서 용기되는 파괴가 진행되는 것을 알 수 있다(그림-4,c참조). 이러한 터널의 안정성 평가방법으로 한계 전단변형율을 적용하면 $\gamma_c=0.04\%$ 값으로 산정되며 이 한계전단 변형율 이상의 영역을 굵은 선으로 표시하면 그림-4과 같이 파괴영역을 잘 묘사하고 있다.

3. 결론

터널과 같은 지하구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 지반의 역학적특성과 초기응력을 파악하는 것이 기본이 된다. 그러나 이러한 값들은 지반조사 및 원위치시험을 수행하는 것에 의하여 구할 수 있지만, 한정된 시험규모, 위치, 횡수에 따라 정확한 값을 구하는 것이 용이하지 않다. 따라서 터널공사 중에 현장계측을 행하고 그 결과의 역해석에 의하여 역학적특성 및 초기응력을 결정하면 설계시 가정한 값들의 타당성을 검토할 수 있다. 또한, 추정된 값을 이용하여 주변지반의 전단변형율을 계산하고 한계전단변형율과 비교하면 터널의 안정성을 판단하는 것이 가능하다.

참고문헌

1. 김영민, 유한요소법에 의한 터널굴착방법에 따른 터널 안정성분석, 대한토목학회논문집, 제22권, 제2-C호, pp.173~180, 2002
2. 口井春輔夫武 터널굴착에 대한 변위계측결과의 역해석법, 일본토목학회논문집, 제337호, 137~145, 1983
3. Sakurai, S. and K. Takeuchi, Back analysis of measured displacements of tunnels, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.16, 173~180, 1983
4. 口井春輔, 口水則一, 변위계측에 근거한 지하공동 주변지반에 발생하는 소성영역 추정법, 일본토목학회논문집, 제394/3-9호, 1988
5. 터널굴착에 의한 이완영역 조사보고서, 일본터널기술협회, 1982
6. Cividini A., I. Jurina and G. Gioda, Some Aspects of Characterization Problems in

Geomechanics, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.18, 487~503, 1981

7. Gioda G. and S. Sakurai, Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol.11, 553~583, 1987