

# 터널굴착에 의한 변위계측값을 활용한 역해석 기법 연구

## Feedback Analysis for Tunnel Safety using displacements measured during the tunnel excavation

박 시 현\* · 송 원 근\*\* · 오 영 석\*\*\* · 신 용 석\*\*\*\*  
Park, Si-Hyun · Song, Won-Gen · Oh, Young-Seok · Shin, Yong-Seok

---

### ABSTRACT

This research aimed at to develop a quantitative assesment technique which uses the measured displacements at the excavated plane during tunnel construction. Tunnel structure has a feature with long extents comparing to the excavated section so that the tunnel safety assesment is more effective by using the measured data of displacements. Tunnel structures show different structural behaviors due to the mechanical characteristics of ground and supports themselves, excavation methods and construction methods of supports, etc. From this point of view, it has very important meanings on the practical aspects that the measured data from the construction cite represent the features of the interaction effects between ground and supports as they are. In this study, both the stress state and the properties of surrounding ground are analyzed by newly incorporated feedback analysis technique which can use the measured displacements directly. Then, the stress state and the properties of ground will be used to obtain the strain distribution of surrounding ground. Finally the tunnel safety can be assessed by comparing the estimated strain through the analysis to the allowable strain of ground quantitatively.

*Key words* : *Feedback analysis, Tunnel safety, Tunnel displacement*

---

## 1. 서 론

일반적으로 구조물의 안정성을 판단하는 방법으로는 응력 개념과 변형률 개념으로 나눌 수 있다. 이러한 판단기준은 터널 시공현장에서도 그대로 활용되고 있으며 오늘날 대부분의 터널현장에서 막장의 지반굴착과 더불어 변위 및 응력과 관련된 계측을 실시하도록 규정(대한터널협회, 1999)하고 있다.

터널굴착과 더불어 주변지반의 변위량을 계측하는 것은 응력계측에 비해 매우 단순하며 계측지점도 손쉽게 확보할 수 있어 이를 터널 안정성 판단에 활용하는 것이 훨씬 경제적이며 유리한 것을 알 수 있다. 그러나 변위 계측치를 관리기준치와 비교하여 안정성을 판단함에 있어서는, 변위

---

\* 한국시설안전기술공단 지하시설실 과장 Email: parksh@kistec.or.kr

\*\* 한국시설안전기술공단 기술개발실 과장 Email: song98@kistec.or.kr

\*\*\* 한국시설안전기술공단 지하시설실 부장 Email: oys8565@kistec.or.kr

\*\*\*\* 한국시설안전기술공단 지하시설실 실장 Email: sys3281 @kistec.or.kr

계측을 시작하는 시점과 막장으로부터 떨어진 거리 및 굴착 후 지보재 설치까지의 시간 등에 의해 계측되는 변위값이 크게 달라질 수 있기 때문에, 단순히 계측된 변위값을 그대로 관리기준치와 비교할 수 없다. 또한 무엇보다도 중요한 것은, 현장에서 계측된 변위로 안정성 여부를 판단하기 위해 활용되고 있는 계측관리기준치는, 나라마다 지역마다 그리고 터널시공현장마다 서로 다른 값을 보이고 있는데, 그 근거에 대한 뚜렷한 지침이 없는 실정이다. 다만 계측관리기준치를 설정함에 있어서 현장의 경험적 사례나 수치해석을 통해 설정하는 것으로 알려져 있을 뿐이다.

따라서 새로운 터널현장에서 계측관리 기준치를 설정함에 있어서 통일적 지침이 될 수 있는 뚜렷한 기준이 부재한 실정이기 때문에 아직까지 국내 터널시공현장에서 터널계측에 대한 중요성이 높지 않으며 그 활용성도 미비한 실정(천병식 등, 1996)이다. 그러나 앞에서 지적한 바와 같이, 터널시공현장에서 신속한 안정성 판단을 위해서는, 응력계측보다 변위계측이 매우 효과적이며 그 활용성이 크다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 최근 영국터널협회에서 제시하고 있는 Critical strain 개념을 활용하여 시공 중인 터널에서의 계측결과를 활용하여 터널의 안정성을 평가하는 역 해석 기법을 새롭게 개발한 것이다.

## 2. Critical strain 개념

영국터널협회에서 최근 새롭게 개정된 Tunnel lining design guide (british tunnelling society, 2004)에서는 Critical strain 개념을 소개하고 있는데, 이는 Sakurai(1997)의 개념을 그대로 인용한 것으로서 원저자의 자료를 토대로 요약하면 다음과 같다.

Critical strain( $\epsilon_0$ )은 그림 1과 같이 현장에서 채취한 시편의 일축압축시험결과인 응력-변형률 관계로부터 구해진다. 즉 Critical strain은 일축압축시험으로부터 초기탄성영역의 거동특성과 파괴시의 일축압축강도를 이용하여 다음 식과 같이 정의되며, 일반적으로 파괴변형률( $\epsilon_f$ )보다는 작은 값을 가지게 된다.

$$\epsilon_0 = \sigma_c / E_i \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_c$ 와  $E_i$ 는 각각 암석시편의 일축압축강도와 초기접선 탄성계수를 나타낸다.

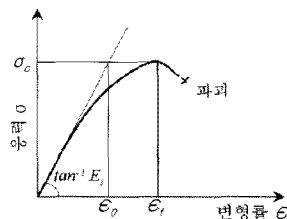


그림 1 일축압축시험에 의한 응력-변형률선도

흙 및 암석에 대한 Critical strain과 일축압축강도의 관계는 그림 2와 같다. 그림 2에서 나타낸 바와 같이 Critical strain은 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다.櫻井(Sakurai)에 의하면, 파괴변형률이 Critical strain보다 최대 2.5~4.0배 정도 더 큰 값을 나타내고 있으며, 또한 암반에서의 Critical strain이 암석공시체의 Critical strain에 비해 1.0~4.0배 정도 더 큰 값을 보이는 것으로 조사되었다. 이러한 사실은 Critical strain을 실무에서 활용함에 있어서 보수적으로 타당한 근거를 제시하고 있다. 본 연구에서는 터널 시공현장에서 계측된 변위값을 이용하여 주변지반에 대한 변형률을 역해석기법을 이용하여 추정하고 이를 상지에서 제시한 해당지반

에 대한 Critical strain과 비교함으로써 터널의 안정성을 평가하는 기법을 구축하기 위한 연구를 수행한 것이다.

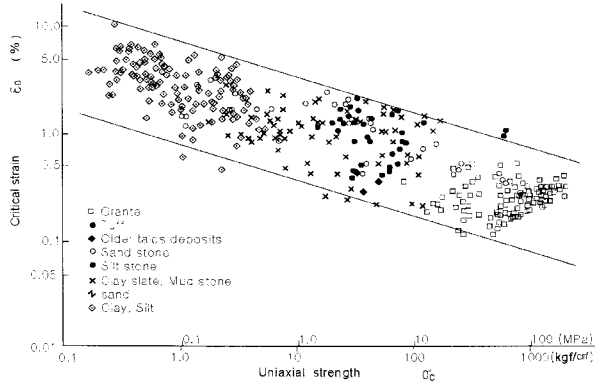


그림 2 Critical strain과 일축압축강도와의 관계 (櫻井, 1982)

### 3. 역해석 기법 개발

#### 3.1 정해석 기법 개요

전체 요소의 각 절점에 작용하는 외력과 각 절점에서의 변위에 의한 외부일과 개별 요소의 내부에서 발생한 응력과 변형률의 내부일을 전체 요소에 대해서 합산한 것이 서로 같다는 가정에 의해 가상일의 원리를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \overline{u_{node(g)}}^T \cdot \overline{F_{(g)}} = \sum^E \int_V \delta \overline{\epsilon_{(e)}}^T \overline{\sigma_{0(e)}} dV \quad (2)$$

상기 식에 대해 [응력-변형률] 및 [변형률-변위]관계식으로 도입하게 되면 식 (3)과 같이 나타내어진다.

$$\overline{F_{(g)}} = \sum^E \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot \overline{u_{node(e)}} dV = [K] \cdot \overline{u} \quad (3)$$

또한, 2차원 평면변형률 조건에서의 [D]는 아래와 같다.

$$[D] = \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 3.2 역해석 기법 개발

역해석 기법을 개발함에 있어서, [초기응력상태], [변위계측값], [주변지반의 물성치]를 연관시켜야 한다. 지반은 일반적으로 비등방비균질하며 지반재료는 비선형적, 비탄성적 등의 다양한 특성을 지니고 있으나, 본 연구에서는 지반조건을 등질등방의 선형탄성적인 특성으로 가정하기로 한다.

##### (1) [초기응력상태]와의 연관

식 (3)은 아래와 같이 초기응력성분과 연관시킬 수 있다. 이때, 요소는 4절점 요소, 초기응력성

은 해석대상 영역에 걸쳐 일정한 것으로 가정하기로 하며, 따라서 상수로서 취급이 가능하다.

$$\sum \overline{F_{(e)}} = \sum \int_V \begin{bmatrix} F_0 x \\ F_0 y \\ F_1 x \\ F_1 y \\ F_2 x \\ F_2 y \\ F_3 x \\ F_3 y \end{bmatrix} = \sum \int_V \begin{bmatrix} N_{0,x} & 0 & N_{0,y} \\ 0 & N_{0,y} & N_{0,x} \\ N_{1,x} & 0 & N_{1,y} \\ 0 & N_{1,y} & N_{1,x} \\ N_{2,x} & 0 & N_{2,y} \\ 0 & N_{2,y} & N_{2,x} \\ N_{3,x} & 0 & N_{3,y} \\ 0 & N_{3,y} & N_{3,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x_0} \\ \sigma_{y_0} \\ \tau_{xy_0} \end{bmatrix} dV = \overline{F_1} + \sigma_{y_0} \overline{F_2} + \tau_{xy_0} \overline{F_3} \quad (5)$$

(2) [주변지반의 물성치, [변위계측값]과의 연관 (櫻井, 1982)

우선, 굴착주변지반의 물성치는 지반의 탄성계수를 이용하여 아래와 같이 연관시킨다.

$$\overline{F_{(g)}} = [K] \cdot \overline{u} = E_g [K_g] \cdot \overline{u} \quad (6)$$

여기서, 지반의 탄성계수  $E_g$  이며,  $[K_g]$  은  $E_g=1$  일 때의 지반 강성으로서, 지반의 포아송비에 의해 결정된다.

한편, 변위 계측값과 연관시키기 위해서는 식 (7)을 식 (8)과 같이 변환시킴으로써 가능하다.

$$\sigma_{x_0} \overline{F_{1(g)}} + \sigma_{y_0} \overline{F_{2(g)}} + \tau_{xy_0} \overline{F_{3(g)}} = E_g [K_g] \cdot \overline{u} \quad (7)$$

$$\sigma_{x_0} \left\{ \begin{bmatrix} \overline{F_{11}} \\ \overline{F_{12}} \\ \overline{F_{13}} \end{bmatrix} \right\} + \sigma_{y_0} \left\{ \begin{bmatrix} \overline{F_{21}} \\ \overline{F_{22}} \\ \overline{F_{23}} \end{bmatrix} \right\} + \tau_{xy_0} \left\{ \begin{bmatrix} \overline{F_{31}} \\ \overline{F_{32}} \\ \overline{F_{33}} \end{bmatrix} \right\} = E_g \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{u_1} \\ \overline{u_2} \\ \overline{u_3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $\overline{u_1}$  는 굴착면에서 측정되는 절점의 변위(기지),  $\overline{u_2}$  는 모델 내부의 측정점 이외의 절점 변위(미지),  $\overline{u_3}$  는 모델 경계상의 절점 변위(바깥경계)이다. 따라서 상기의 식 (9)의  $\overline{u_1}$  을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\overline{u_1} = [K_N]^{-1} \overline{F_a} \quad [K_N]^{-1} \overline{F_b} \quad [K_N]^{-1} \overline{F_c} \begin{Bmatrix} \sigma_{x_0}/E_g \\ \sigma_{y_0}/E_g \\ \tau_{xy_0}/E_g \end{Bmatrix} = [A] \cdot \overline{c} \quad (9)$$

여기서,  $[A] = [[A_1][A_2][A_3]]$ ,  $[A_1] = [K_N]^{-1} \overline{F_a}$ ,  $[A_2] = [K_N]^{-1} \overline{F_b}$ ,  $[A_3] = [K_N]^{-1} \overline{F_c}$ ,

$$\overline{F_a} = \overline{F_{11}} - [K_{12}][K_{22}]^{-1} \overline{F_{12}}, \quad \overline{F_b} = \overline{F_{21}} - [K_{12}][K_{22}]^{-1} \overline{F_{22}}, \quad \overline{F_c} = \overline{F_{31}} - [K_{12}][K_{22}]^{-1} \overline{F_{32}},$$

$$[K_N] = [K_{11}] - [K_{12}][K_{22}]^{-1}[K_{21}], \quad \overline{c} = \begin{Bmatrix} \sigma_{x_0}/E_g \\ \sigma_{y_0}/E_g \\ \tau_{xy_0}/E_g \end{Bmatrix}$$

상기의 식 (9)에서  $[A]$  는 요소의 형상함수, 절점의 좌표, 그리고 지반재료의 포아송비에 의해 결정된다. 따라서 지반재료의 포아송비를 가정할 수만 있으면, 터널 계측현장에서 굴착면에서의 변

위( $\bar{u}_1$ )만을 이용하여 원지반에 대한 응력성분( $\bar{c}$ )을 추정할 수 있게 된다. 또한, 미지수  $\bar{c}$ 는 3개 항으로 이루어져 있기 때문에 3개의 계측정보만으로 구할 수 있으며, 정보가 더 많은 경우에는 신뢰도를 더욱더 높일 수 있게 된다. 초기 응력을 나타내는  $\bar{c}$ 가 구해지면,  $\gamma H = \sigma_{y0}$  라는 가정으로부터  $\sigma_{y0}$ 를 구하게 되며, 이어서,  $E_g, \sigma_{x0}, \tau_{xy0}$ 를 각각 구하여 정해식에 의해 주변지반의 변형률 분포를 파악할 수 있게 된다.

### (3) 슛크리트 라이닝 고려

굴착주변지반의 물성치( $E_g$ )와 슛크리트 라이닝의 물성치( $E_l$ )를 함께 연관시킬 수 있다.

$$\sigma_{x0}\bar{F}_{1(g)} + \sigma_{y0}\bar{F}_{2(g)} + \tau_{xy0}\bar{F}_{3(g)} = E_g[K_g] \cdot \bar{u} \quad (10)$$

$$[K] \cdot \bar{u} = ([K_g] + [K_l]) \cdot \bar{u} = (E_g[K_g]^* + E_l[K_l]^*) \cdot \bar{u} \quad (11)$$

두가지의 물성중에서 슛크리트의 물성치는 기지로 하고 지반의 탄성계수는 계산해내야 할 값이지만, 일단 임의 값을 가정하여  $[K_g]^* = [K_g]/E_g$ 를 계산한다. 그리고 파라미터  $R = E_l/E_g$ 을 새롭게 도입하여 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{x0}\bar{F}_{1(g)} + \sigma_{y0}\bar{F}_{2(g)} + \tau_{xy0}\bar{F}_{3(g)} = E_g[K]^* \cdot \bar{u} \quad (12)$$

$$\text{여기서, } [K]^* = [K_g]^* + R[K_l]^* = [K_g]^* + E_l/E_g[K_l]^*$$

### (4) 지반의 이방성 특성의 반영

이방성 지반의 특성을 반영한 해석기법을 개발하기 위하여 본 연구에서는 한 방향의 절리가 존재하는 경우에 대해 그림 3에서와 같이 식 (13)를 이용하여 이를 역해석 기법에 반영하는 새로운 기법을 도입하였다. 아래의 이방성 특성을 반영하기 위한 변수로는 절리의 간격 S, 절리각도, 수직강성( $K_n$ ), 수평강성( $K_s$ ) 4가지로 이끌어 낼 수 있다.

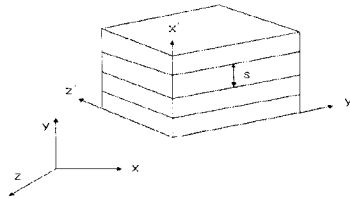


그림 3 전체요소와 개별요소

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{x'} \\ \epsilon_{y'} \\ \epsilon_{z'} \\ \gamma_{xy'} \\ \gamma_{yz'} \\ \gamma_{zx'} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{K_n S}\right) & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{K_s S}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{K_s S}\right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \sigma_{z'} \\ \tau_{xy'} \\ \tau_{yz'} \\ \tau_{zx'} \end{pmatrix} \quad (13)$$

역해석 수행을 위한 가정으로써 절리간격 S와 절리각도는 현장조사로써 알게 된 값(기지값)을 사용하고  $K_n = K_s$  로 가정하여 미지수의 수를 하나로 줄이고,  $K_n$  이 일반적으로  $K_s$ 보다 큰 값이지만, 터널굴착 주변의 이완의 영향으로  $K_n$  값이 작아지게 되며, 1개의 미지수인  $K_n$  (또는  $K_s$ ) 값을 강성 매트릭스  $[K]$ 에 함께 사용하기 위해서  $K_n \cdot 1m = \alpha \cdot E_g$  을 이용한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 터널시공현장에서 일상적으로 계측되는 터널변위 계측 값을 신속하게 평가하여 터널의 안정성을 정량적으로 파악하기 위한 연구를 수행한 것이다. 이를 위하여 터널이 시공되는 주변지반에 대한 역학적 특성을 Critical strain 개념으로 평가하는 방법을 새롭게 제안하였으며, 이를 위해서는 굴착변위를 활용하여 변형률로 변환시킬 필요가 있으며, 이를 위한 해석적 기법에 대한 연구를 수행하였다. 이하에서는 본 연구의 결론을 요약한 것이다.

- 1) 굴착터널에 대한 안정성을 평가하기 위해 Critical strain 개념을 도입하여 평가하는 방법을 새롭게 제안하였다.
- 2) 굴착변위를 이용하여 변형률을 산정하는 역해석 기법을 개발하기 위하여, 일반적인 FEM 해석 기법에 대하여 초기응력상태, 변위계측값 그리고 주변지반의 물성치를 각각 연관시키는 방법을 제안하였다.
- 3) 굴착터널에 대하여 슛크리트 라이닝을 반영할 수 있는 해석적 기법을 제안하였다.
- 4) 지반이 비균질하고 이방성인 경우를 반영하기 위하여 한방향의 탁월한 불연속면이 존재하는 경우를 반영할 수 있는 새로운 해석적 기법을 제안하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 지원에 의하여 건설핵심기술연구개발사업(과제관리번호 R&D/05건설핵심 D03-01) 주관으로 수행된 과제 내용의 일부를 정리한 것입니다. 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 대한터널협회 (1999) 건설교통부제정 터널표준시방서, 구미서관, 서울, pp.72~84.
- 천병식, 남순성 (1996) 서울지하철 터널의 계측관리 기준치에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 16(III-1) pp.47~59.
- 櫻井春輔 (1982) トソネル工事における變位計測結果の評價法, 土木學會論文報告集, 317, pp.93~100.
- 櫻井春輔 (1986) NATMにおける現場計測と管理基準値變, 土と基礎, 34(2), pp.5~10.
- British Tunnelling Society (2004), *Tunnel lining design guide*, ICE.
- Sakurai, S. (1997) Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12(4), pp.453~460.