터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 9, 1999, pp. 296~305

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 9, 1999, pp. 296-305
J. of Korean Society for Rock Mech.

수치해석 기법을 이용한 터널 라이닝 안전성 평가에 관한 역해석 연구

박치현[1] · 김창용[2] · 이희근[3]

A Back Analysis Study for the Assessment of Tunnel Lining Safety Using Numerical Analysis Model

Chi-Hyun Park, Chang-Yong Kim and Hi-Keun Lee

ABSTRACT In ordinary back analysis it is hardly possible to obtain the mechanical properties of tunnel lining by using commonly measured displacements of tunnel lining, because only a few displacements could be measured at the site. Therefore, it is necessary to develop a new method which can evaluate the state of stresses of tunnel by using measured data. In this study, in order to assess tunnel lining stability by estimating its stresses with a few measured displacements, a formulation of back analysis method was proposed. The accuracy of results were investigated through the parametric study for several types of measurement model of two dimensional elastic lining. This new back analysis method to assess tunnel lining stresses and strains with a few numbers of measured displacements showed high accuracy and good applicability when compared to the results of numerical experiments by FEM. The method has been tested on subway tunnel and its applicability has been confirmed by comparing field and analytical data. It is verified that the stress on the tunnel lining can be obtained by only more than 3 point of input displacements without any condition of external loads.

Key words : back analysis, tunnel lining, displacement, measurement, stress

초 록 많은 터널 현장에서 계측을 수행하고 있지만, 일반적인 역해석 방법으로 이 계측자료를 통해 라이닝에 작용하는 변형율과 응력 등의 역학량을 추정하기는 어렵다. 그 이유는 현장에서 계측이 가능한 적은 변위수로부터 라이닝의 응력상태를 추정할 수 없기 때문이다. 계측의 시간과 비용을 고려해 볼 때, 계측자료를 이용할 수 있는 기법의 개발은 시급한 연구과제라 할 수 있다. 본 연구에서는 터널계측에서 계측 가능한 소수의 변위로 전체 라이닝의 변위와 응력 등의 역학량을 계산할 수 있는 역해석 모델을 개발하였다. 역해석 방법으로서 복공 외면에 작용하는 외력의 자승이 최소화될 때 해를 구하는 방법을 사용하였다. 라이닝 외면에 작용하는 하중을 가정하여 유한요소법으로 변위와 응력을 계산하고, 여기서 얻은 몇 개의 변위를 계측 변위로 가정하여 역해석 모델에 입력함으로써 절점 변위, 요소의 변형율 및 응력 등을 다시 구하였다. 처음 계산된 변위와 역계산으로 구한 변위를 비교함으로써 모델의 신뢰성을 평가하였다. 자동계측으로 라이닝의 비교적 정확한 계측을 수행하고 있는 지하철 한강 하저터널 현장에서 얻은 계측변위를 개발한 역해석 모델을 적용하여 실제 계측한 응력과 유사한 결과를 얻었다.

핵심어 : 역해석, 터널 라이닝, 변위, 계측, 응력

1. 서 론

터널에 있어서 가장 중요한 것은 작업과정에서나 터널의 이용 중의 안정성이다. 콘크리트 라이닝은 과거 NATM 공법에서 터널의 외장재로서 강조되었지만, 최근 노후화된 터널의 콘크리트 라이닝에서 발생하는 심각한 역학적 균열은 균열발생 원인에 대한 연구와 함께 지보재로서의 라이닝의 필요성이 제기되면서 터널의 안정성을 유지하는 최종지보수단으로 고려되고 있다.[1-3] 또한, 터널에 작용하는 지반응력 및 지반과 라이닝, 숏크리트, 록볼

1) 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물그룹 연구원
2) 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물그룹 선임연구원
3) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
원고접수일 : 1999년 5월 28일
원고 심사완료일 : 1999년 11월 1일

트 등의 지보요소 간의 상호작용이 총체적으로 드러나는 면이 라이닝 면이다. 라이닝이 시공되기 전 터널의 안정성은 주변 지반의 안정성에 의지하지만, 시공이 끝난 후에는 라이닝의 안정성이 터널의 안정성에 직결된다. 터널 주변지반의 전단변형률이 임계점을 지났다고 할지라도 라이닝의 안정성이 잘 유지된다면 터널은 안정하지만, 라이닝의 안정성에 문제가 있다면, 지반의 변형률이 임계점에 도달하지 않았을지라도 터널의 안정성에 문제가 발생하게 된다. 이와 같은 사실로 인해 라이닝 설치 후의 지속적인 계측이 요구되고 있으며, 최근에 빈번한 대형 사고들은 시공 중에서뿐만 아니라, 시공 이후에도 지속적인 관측과 조사를 통해 안전성의 평가가 필요함을 말해주고 있다.

많은 터널 공사 현장에서는 일상적으로 계측이 수행되고 있지만 그러한 결과로부터 라이닝에 작용하는 응력을 추정할 수 있는 경우는 드물고, 계측에 중요한 시간, 비용을 유용하게 활용하고 있는 경우는 말하기 어려운 실상에 있다. 그러한 원인은 계측할 수 있는 적은 변위수로부터 라이닝의 응력형태를 정확하게 추정하는 역해석법이 개발되어 있지 않기 때문이다.[4,5] 이로 인해 현장에서는 입력에 사용되는 수만큼의 계측이 불가능하여 정확한 지보압의 산정이 어려웠었다. 그동안 터널 라이닝에서의 안전성 해석을 위한 몇 가지 역해석방법들을 제안하였고, 현장계측을 수행하고 있지만, 소수의 현장변위를 이용해서 라이닝을 평가하는 확실한 방법이 발전되지 않았기 때문에 측정 결과는 항상 터널평가를 위해 유용하지 않았다. 이런 단점을 극복하기 위해서 최근 연구에서는 소수의 현장변위로부터 응력, 변형률, 변위를 추정함으로써 터널라이닝의 안정성을 평가하는 새로운 역해석 방법을 제안하였다.[6-10]

역해석에 대한 연구는 S. Sakurai[11-12], G. Gioda[13], A. Cividini[14] 등에 의해 주도되어 현재 지하 공동의 안전성 문제를 포함한 지반공학의 여러 문제에까지 연구되고 있다. 역해석방법으로는 주로, 해석적방법과 수치해석적방법을 이용한 직접법(direct method)과 역순법(inverse method)이 연구되어져 왔고[15-18] 터널 라이닝에서의 역해석은 M. Hisatake에 의해 실험으로 검증된 바 있다. 국내에서도 NATM 공법의 적용 이후로 역해석에 대한 관심이 증대되고 있으나, 터널라이닝에서의 역해석 연구는 빈약하며 정확한 계측의 부족과 연구에 대한 다양한 현장검증도 제대로 이루어지지 않은 상태이다.[19,20]

본 연구에서는 터널의 일반계측으로부터 얻은 변위를 입력변수로 하여 라이닝의 전체 변위, 변형율, 응력 등의 역학량을 계산하는 역해석 프로그램을 개발하였다. 터널라이닝의 역학량을 역해석하는 방법은 적은 계측변위수를 이용하여 라이닝의 외면에 작용하는 외력의 자승화가 최소화되는 해를 구하였다. 라이닝모델과 라이닝 외면에 작용하는 하중모델을 가정하고 유한요소법을 이용하여 변위 및 최대전단응력을 계산하여, 그것을 참값으로 간주하였다. 여기서, 얻어진 라이닝 내면변위 중에서 몇 개를 터널에서 계측한 값으로 가정하고 역해석법에 대입하여 절점변위, 최대전단응력을 구함으로서 참값과 비교하였다. 개발된 역해석 프로그램을 이용하여 비교적 계측이 정확하게 수행되고 있는 지하철 한강하저터널에 적용하였다.

2. 터널라이닝 역해석 이론 및 프로그램 구성

2.1 기본이론

터널라이닝에 가해지는 외부하중은 다음조건이 만족된다면 역해석이 가능하다.[4]

$$Nu \geq Nf \tag{1}$$

여기서, Nu는 측정된 라이닝변위의 개수이고 Nf는 외부하중과 같은 미지수의 개수이다.

Fig. 1에서와 같이 많은 외부하중의 값들을 실제문제에서 가정한다. 그래서, 일반적인 역해석을 적용하기 위해서는 (1)식에서처럼 외부하중의 미지수에 상응하는 것보다 많은 개수의 변위계측을 현장에서 수행하여야 한다. 이 조건을 충족시키는 것은 실무자의 관점에서 보면 비현실적이다. 이런 이론적인 단점을 극복하기 위해 새로운 역해석방법을 이용하여 프로그램을 개발하였다. 터널 라이닝 안쪽면에 작용하는 외력의 자승화가 최소화되는 해를 이용하여 변위를 추정한 다음 탄성 라이닝에 외력이 작용하는 경우에 대해서 2차원 유한요소법에 의한 수치해석을 수행하여 얻은 결과를 역해석 결과와 비교하여 그 정밀도

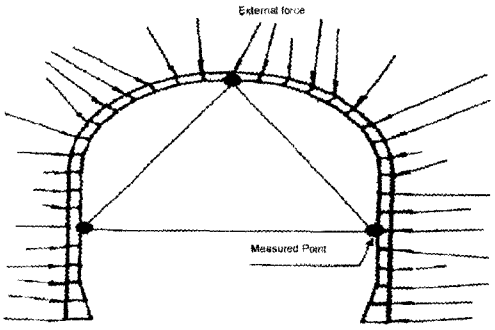


Fig. 1. Finite element meshes of a tunnel lining

를 확인하였다. 본 연구에서 제안한 방법은 미지수보다 상당히 적은 계측변위가 있더라도 단일해의 집합을 제공하고 비교적 정확성을 보장한다.

2.2 외력의 자승화의 최소화를 통한 역해석법의 FEM 정식화

u, f, K를 각각 절점 변위, 절점력, 강성 매트릭스라 하면, (2)식과 같이 라이닝의 강성방정식을 표시할 수 있다[21]

$$\begin{pmatrix} f_* \\ f_i \\ f_o \\ f_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} K_{12} K_{13} K_{14} \\ K_{21} K_{22} K_{23} K_{24} \\ K_{31} K_{32} K_{33} K_{34} \\ K_{41} K_{42} K_{43} K_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_* \\ u_i \\ u_o \\ u_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, 첨자 *, i, o 는 아래와 같다.

* : 라이닝내면의 절점 중, 계측절점을 표시한다($f_* = 0$).

i : 외력이 작용하지 않는 절점(상기 절점을 포함하지 않는다)을 표시한다($f_i = 0$).

o : 외력이 작용하는 절점을 표시한다($f_o \neq 0$).

c : 변위를 구속하는 절점을 표시한다($f_c \neq 0$).

(2)식의 행렬에서 3번째까지의 행을 (3)식과 같이 표시할 수가 있다.

$$\begin{pmatrix} f_* - K_{14}u_c \\ f_i - K_{24}u_c \\ f_o - K_{34}u_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} K_{12} K_{13} \\ K_{21} K_{22} K_{23} \\ K_{31} K_{32} K_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_* \\ u_i \\ u_o \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3)식을 변위에 대해서 정리하면 (4)식과 같다.

$$\begin{pmatrix} u_* \\ u_i \\ u_o \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} L_{12} L_{13} \\ L_{21} L_{22} L_{23} \\ L_{31} L_{32} L_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_o \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} L_{11} L_{12} L_{13} \\ L_{21} L_{22} L_{23} \\ L_{31} L_{32} L_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} K_{14}u_c \\ K_{24}u_c \\ K_{34}u_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, [L]은 행렬 [K]의 역행렬이다. (4)식에서 각각의 변위에 대해 정리하면 (5)식, (6)식, (7)식과 같다.

$$u_* = L_{13}f_o - U_* \quad (5)$$

$$u_i = L_{23}f_o - U_i \quad (6)$$

$$u_o = L_{33}f_o - U_0 \quad (7)$$

여기서,

$U_* = [L_{11}K_{14} \;\; L_{12}K_{24} \;\; L_{13}K_{34}]u_c$

$U_i = [L_{21}K_{14} \;\; L_{22}K_{24} \;\; L_{23}K_{34}]u_c$

$U_o = [L_{31}K_{14} \;\; L_{32}K_{24} \;\; L_{33}K_{34}]u_c$

(5)식을 만족하고, f_0의 자승화한 값인 P를 최소화하는 f_0를 구하기 위해서, Lagrange의 미정승수 λ을 이용하여 P를 표시하면 (8)식과 같다.

$$P = f_0^T f_0 - \lambda^T (L_{13}f_0 - U_* - u_*) \quad (8)$$

P를 최소화로 하는 f_0, λ를 구하기 위해 f_0, λ에 의한 P의 편미분을 각각 구하여 0으로 치환하면,

$$2f_0 - L_{13}^T \lambda = 0 \quad (9)$$

$$-L_{13}f_0 + U_* + u_* = 0 \quad (10)$$

(9)식과 (10)식에 의해 f_0를 구할 수 있다.

$$\lambda = 2\{L_{13}L_{13}^T\}^{-1}\{U_* + u_*\} \quad (11)$$

$$f_0 = L_{13}^T \{L_{13}L_{13}^T\}^{-1}\{U_* + u_*\} \quad (12)$$

2.3 프로그램 구성 및 검증

2.3.1 역해석 모델

라이닝 모델과 라이닝 외면에 작용하는 하중모델을 가정한 다음, 일반적인 순해석에 의해서 하중이 작용했을 때의 변위 및 최대전단응력을 계산하고서, 그것을 참값으로 간주하였다. 다음으로 위에서 얻어진 라이닝 내면변위 중에서, 몇 개를 터널 계측 변위로서 생각하여 이 값을 역해석 프로그램에 입력하였다. 여기서 얻은 나머지 절점 변위와 변형율 및 최대 전단응력을 구함으로써, 참값과 비교하였다. 해석에 이용된 마제형 터널모형과 난형모형을 Fig. 2와 Fig. 3에서 보여주고 있다. 요소망의 총 절점수는 70개이며, 4개의 절점으로 이루어진 34개의 요소로 구성되어 있다. 이때 요소망은 변위를 계측한 지점의 위치와 절점이 일치하도록 하였다. 경계조건으로는 1번, 2번, 69번, 70번 절점의 X방향과 Y방향의 변위을 무시할만한 수치(10-17 mm)로 가정하였다. 터널 내면에서의 변위계측은 Fig. 4에서 표시한 모양으로 계측점수를 달리한 5종류

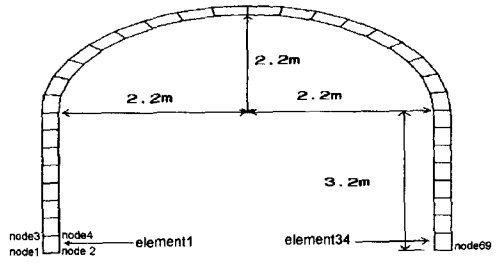


Fig. 2. Finite element mesh of horse shoes tunnel lining for verification of back analysis program

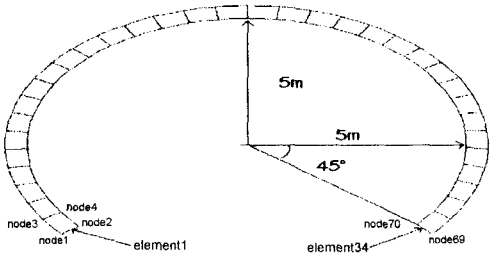


Fig. 3. Finite element mesh of ellipsoidal tunnel lining for verification of back analysis program

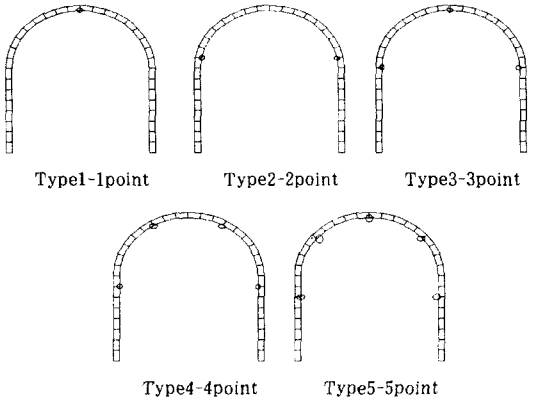


Fig. 4. Types of measured displacement

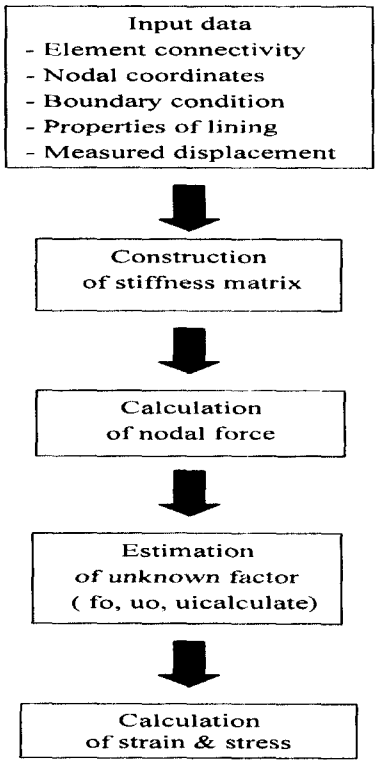


Fig. 6. Flow chart of Back analysis program

의 형태에 대해서 해석을 수행하였다. 하나의 계측점마다 각각 연직과 수평방향의 변위 성분을 구하였다. 하중 조건은 Fig. 4에서와 같이 균등한 분포압이 작용할 경우뿐만 아니라, 편압이 작용할 경우와 심도에 의해 측압비가 변하는 경우를 고려할 수 있도록 하중조건을 다양하게 하였다. Fig. 5의 case2는 심도에 따라 측압비가 다를 때와 편압이 작용할 경우를 고려한 경우며, case3에서는 case2의 경우에서 편압이 심하게 작용하는 하중조건이다. 라이닝의 물성은 말굽형모델의 경우 탄성계수는 1.0×10^5 kgf/cm^2, 포아송비는 0.15로 하고 난형모델은 탄성계수는 2.0×10^5kgf/cm^2, 포아송비는 0.25로 하였다.

Fig. 6은 위에서 살펴본 역해석법의 정식화를 통한 프로그램의 순서도를 작성한 것이다.

2.3.2 역해석 프로그램 검증역해석

프로그램에 대한 검증을 위해서 앞에서 제시한 두가지 형태의 터널형상에 대해 3가지 조건의 하중조건일 때의 순해석과 역해석을 비교하였다. 먼저, 유한요소법을 이용한 순해석 프로그램으로 Fig. 5에서 가정한 3가지로 하중을 가했을 때 터널 라이닝의 절점 변위와 변형율 및 응력을 계산하였다. 계산한 변위 중 3개 절점에서의 절점변

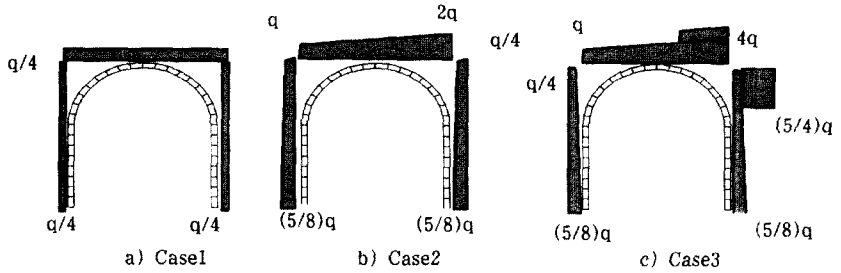
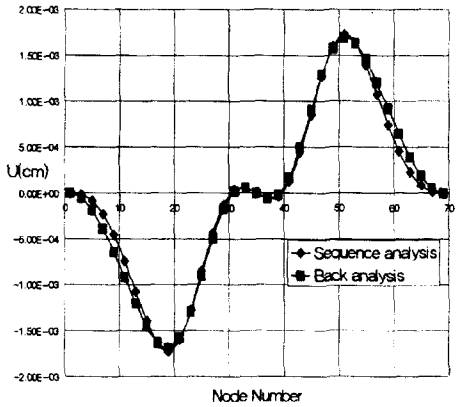
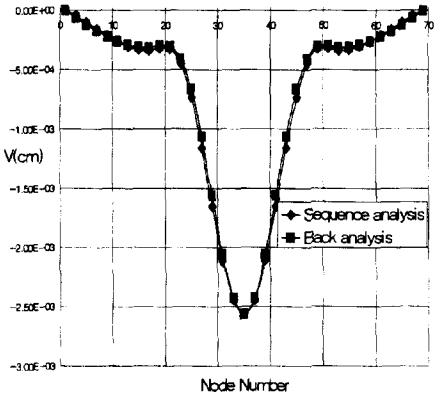


Fig. 5. Cases of load condition (q = 2tf/m^2)



a) Horizontal displacement

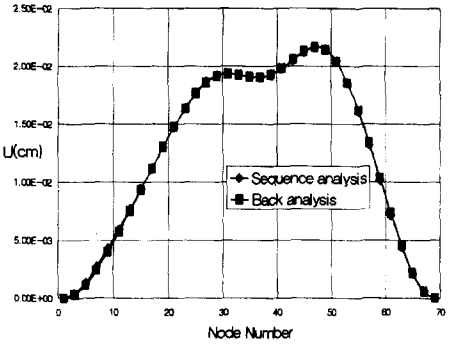


b) Vertical displacement

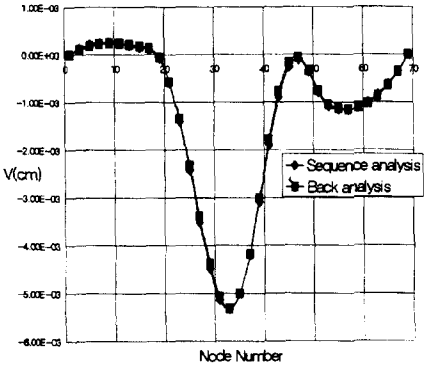
Fig. 7. Outside displacements of the horse shoes tunnel lining under load case1

위를 계측변위로 가정하여 역해석 프로그램의 입력자료로 사용하였다. 프로그램을 수행하여 계산한 미지의 절점변위와 각 요소의 변형율 및 응력을 순해석 결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 하중조건이 case1이고 type3의 계측



a) Horizontal displacement

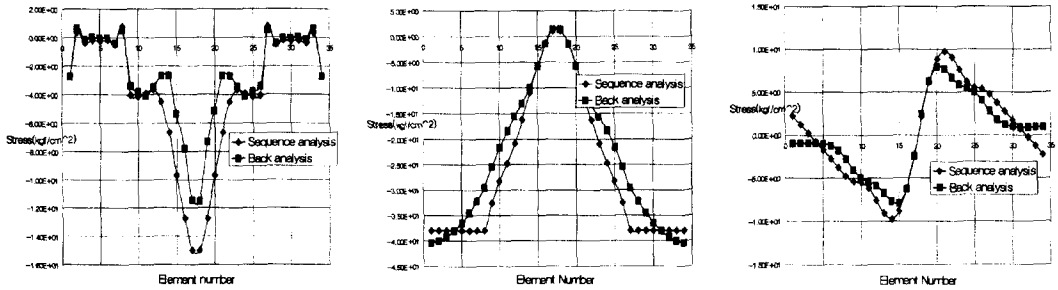


b) Vertical displacement

Fig. 9. Outside displacements of the horse shoes tunnel lining under load case2

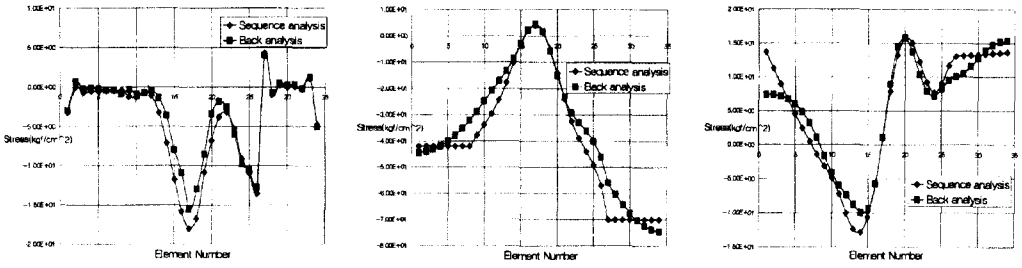
이 이루어질 때의 순해석과 역해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 9, Fig. 10과 Fig. 11, Fig. 12는 type3의 계측이 이루어지고, 하중조건이 case2와 case3일 때의 결과를 각각 보여준다.

변위의 부호는 좌표축과 같으며 해석에 적용한 터널모형은 마제형터널이다. Fig. 7에서 U는 수평변위, V는 수직변위이다.



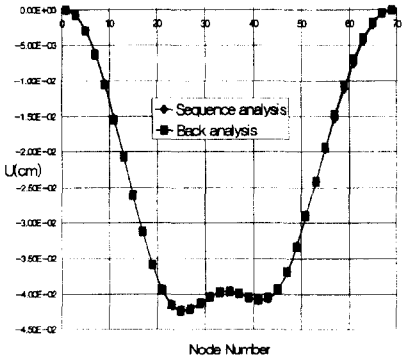
a) Horizontal stress b) Vertical stress c) Shear stress

Fig. 8. Stresses of horse shoes tunnel lining under load case1

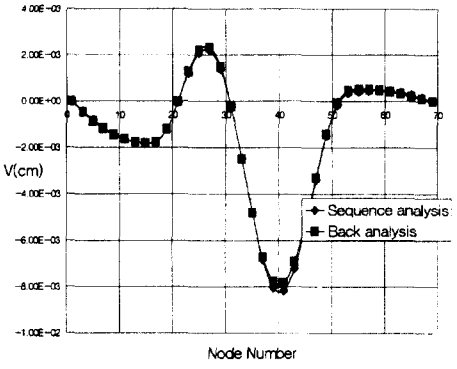


a) Horizontal stress b) Vertical stress c) Shear stress

Fig. 10. Stresses of horse shoes tunnel lining under load case2



a) Horizontal displacement



b) Vertical displacement

Fig. 11. Outside displacements of the horse shoes tunnel lining under load case3

3. 계측변위의 수에 따른 역해석 결과

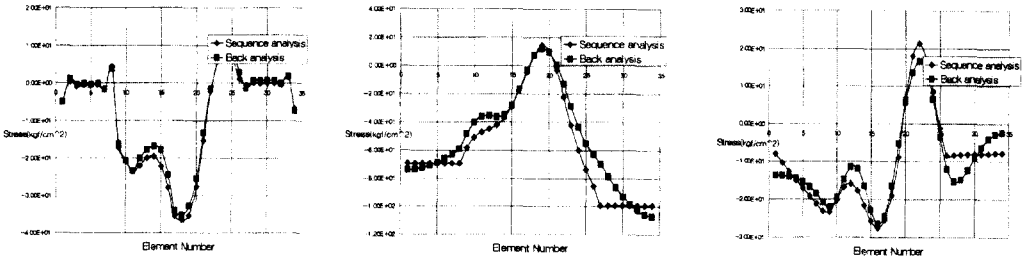
입력변위의 수에 대한 역해석 결과의 정확도를 보기 위해 측점의 개수를 달리하여 해석을 수행하였다. Fig. 5에서 제시한 3가지 하중조건의 경우에 대해서 역해석 프로그램의 입력자료인 변위계측점의 수를 다르게 함으로써 참값과 역해석의 변위와 응력을 비교하였다. 계측점이 3개 이상일 때 변위가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있었다. Fig. 13와 Fig. 14에서는 마제형터널모델에 대해서 2번째 하중조건일 때 계측변위의 수에 따른 역해석 결과를 보여주고 있다.

순해석과 역해석 해석값의 차를 보기 쉽게 비교하기 위하여 (13)식을 이용하여 두 결과값의 오차를 계산하였다.

$$\text{Error}=\sum_{i=1}^{N}\left\{\frac{|S(i)_{*}\max - S(i)_{\max}|}{S(i)_{\max}}\right\}\times\frac{100}{N}(\%) \qquad (13)$$

여기서, N은 FEM의 전체 라이닝요소수, $S(i)_{*max}$ 는 순해석으로부터 구한 라이닝요소 i의 최대전단응력, $S(i)_{max}$는 역해석으로 구한 최대전단응력이다.

최대 전단 응력에 대한 오차를 Fig. 14에서 비교하여 보여주고 있다. 여기서, 입력변위수의 증대에 따라 오차가 작아짐을 알 수 있다. 즉, 변위계측점 수의 증가와 함께



a) Horizontal stress b) Vertical stress c) Shear stress

Fig. 12. Stresses of horse shoes tunnel lining under load case3

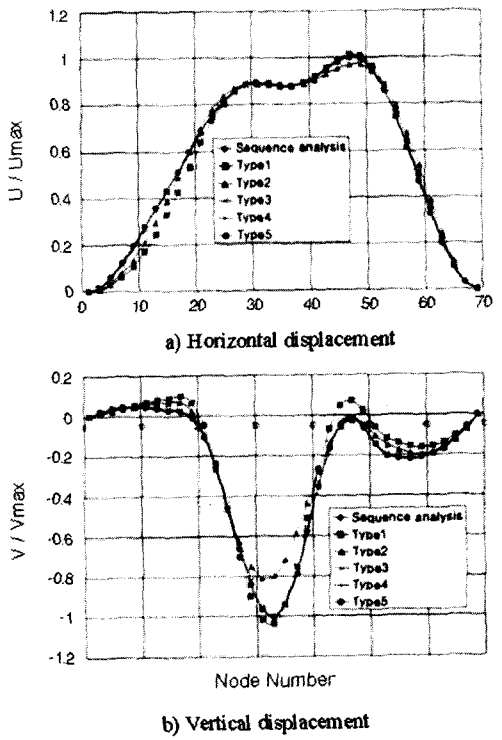


Fig. 13. Outside displacements of the horse shoes tunnel lining under load case2

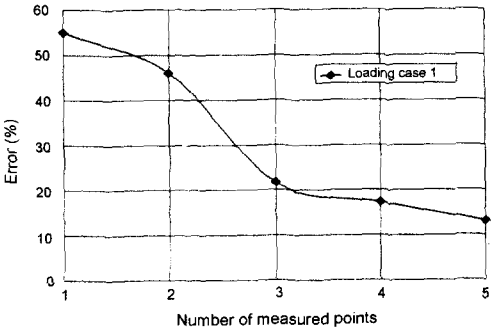


Fig. 15. Error of results by back analyses

응력에 대한 역해석 정밀도가 향상된다. 응력은 변위를 미분하여 얻어지는 변형율로부터 산출되므로, 역해석으로부터 얻어지는 응력의 정밀도는 변위에 비해 당연히 저하된다.

Fig. 14에서 계측점이 3점일 때는 약 20%의 오차를 보이고 있다. 외력자승화를 이용한 역해석 프로그램을 수행한 결과를 종합해 보면, 보통 수행하는 일반단면계측 정도의 입력변위수가 3개의 측점이라고 볼 때, 일상적인 시공관리방법으로서 본 방법을 현장에 이용하여도 좋을 것으로 생각된다.

자동계측이 수행되고 있는 서울지하철 5호선 하행 20K500 지점인 한강하저터널에서 계측한 변위를 이용하여 역해석 프로그램으로 구한 응력을 응력계로 구한 실측치와 비교하였다.[22,23] Fig. 16에서 한강하저터널 5-18공구의 계측도를 보여주고 있다. 한강하저터널 구간은 경기변성암 복합체의 시흥층군에 속하며, 대·소 단층들에 의해 교란되어지고 풍화가 깊게 진행되어 있는 지반구조적으로 매우 복잡한 구조대에 해당하고 터널시공을 위한 공학적 성질은 매우 취약한 상태였다. 본 계측이 이루어진 여의도 하행선 STA 20K 495 ~ 20K 580 구간은 단층각력암(fault breccia)이 출현하면서 곧바로 완전히 풍화된 풍화토 및 부분적으로 단층점토(fault clay)가 협재된 토양화된 단층구간으로 하자터널 공사 중 최대의 난공사 구간이었다.

역해석을 위한 유한요소망은 Fig. 3과 같다. 요소망의 총 절점수는 70개이며, 4개의 절점으로 이루어진 34개의 요소로 구성되어 있다. 이때 요소망은 변위를 계측한 지점의 위치와 절점이 일치하도록 하였다. 경계조건으로는 터널 하단 인버트부분의 X방향과 Y방향의 변형을 구속하였다.

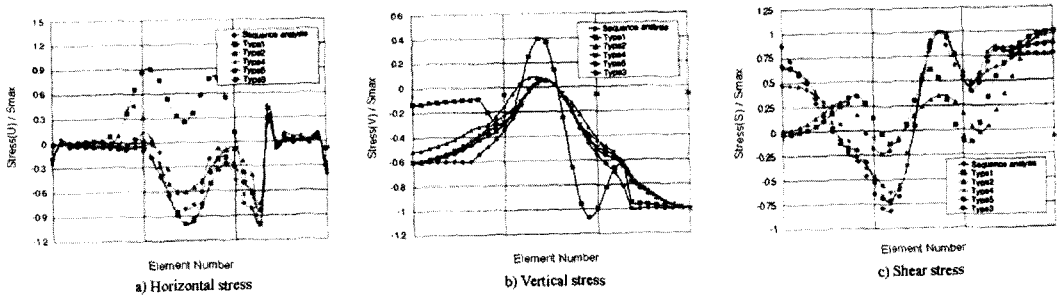


Fig. 14. Stresses of horse shoes tunnel lining under load case2

서울시 지하철 5-18공구 영구계측 설치 배선도

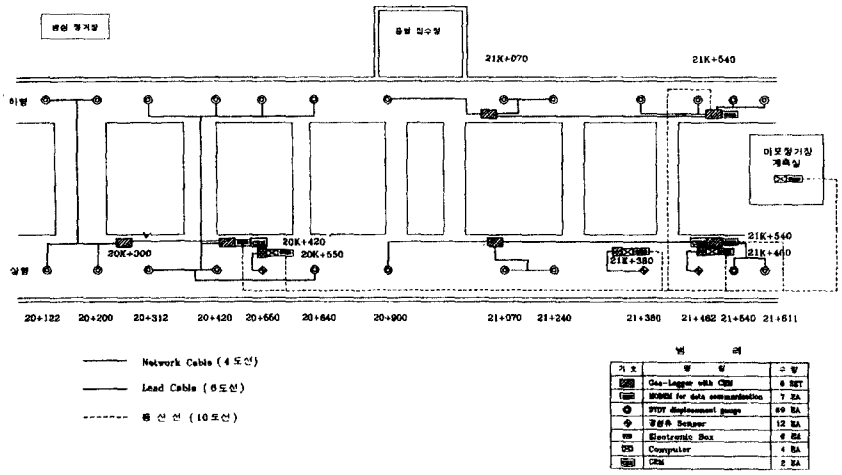


Fig. 16. A plane figure of the measurement upon the subway tunnel under Han river

해석을 실시한 터널에 사용된 콘크리트 라이닝의 두께는 50 cm이고, 라이닝의 영율은 223998 kgf/cm^{2}였다. 계측한 변위는 천단변위가 2.9 mm, 측벽의 외벽에서의 변위가 2.3 mm이며, 내벽에서의 변위가 2.5 mm였다. 이를 입력자료로 하여 역해석 프로그램을 이용해 응력을 계산한 결과 6.7 kgf/cm^{2}였다. 응력계로 계측한 응력값이 콘크리트 라이닝의 강도인 210 kgf/cm^2 에는 크게 미치지 않는 5.4 kgf/cm^{2}여서 터널의 안전에는 이상이 없었지만, 천단과 양쪽 측벽에서 계측한 3절점에서의 변위를 이용하여 역해석한 결과, 콘크리트 응력계로 실측한 값과 약 25%의 오차를 보임으로서 현장적용성이 가능함을 보여주었다.

4. 결 론

본 연구에서는, 외력에 관한 경계조건을 고려하여, 일반단면계측 정도의 적은 계측변위수로부터 터널라이닝의 응력을 구하는 역해석기법으로 프로그램을 개발하였다. 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위해, 유한요소법을 이용한 터널모델에 다양한 하중조건을 적용하여 해석을 실시하였다. 또한, 계측점의 개수를 달리하여 입력변위의 수에 따른 해석결과의 정밀도에 대해 검토하였다. 이 연구에서 얻은 결론을 요약하면 아래와 같다.

1) 계측변위수가 적은 경우에는, 그 변위를 발생시키는 형태의 라이닝 외력의 조합을 무수히 고려할 수 있지만, 그 중 라이닝에 작용하는 외력의 자승화가 최소화 되는 형태의 외력조합을 Lagrange의 미정승수법을 사용한 유한요소법에 의해 역해석 프로그램을 개발하였다. 터널의 형태가 마제형과 난형인 모델에 대해 균등하게 하중이 분포하는 경우뿐만 아니라, 편압이 작용하는 하중조건을 고려하여 역해석을 수행한 결과 정확한 변위와 응력을 계산함으로써 프로그램의 신뢰성을 확인하였다.

2) 변위의 역해석에서는 3개 이상의 계측점에서는 참값에 부합하는 결과를 보였다.

3) 응력 역해석에서는 일반단면계측 정도와 같은 계측점이 3점인 입력의 경우에 비교적 작은 오차가 발생하여, 일반단면계측에 의한 일상적인 시공관리기법에 대해서 본 방법을 적용하여도 타당할 것이라 여겨졌다.

4) 자동계측이 이루어지고 있는 서울지하철 5호선 한강하저터널구간에서 계측한 변위를 이용하여 본 프로그램으로 해석을 실시한 결과, 실측한 값과 부합하는 값을 보였다.

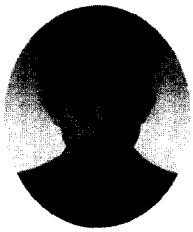
특수한 연약지반이나 갑작스러운 지반의 변동이 우려되는 곳에 시공된 터널의 경우에서는 지속적인 계측과 안전성 평가가 필요하며, 숏크리트의 특성을 함께 고려하여 적용할 수 있는 역해석의 연구가 필요하다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

1. X. Nie and Q.Zhang, 1994, A System of Monitering and Dimensioning Tunnel Support, Rock Mechanics and Rock Engineering, 23-36

2. 이대혁, 1998, 모형 실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균영 특성에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문
3. A. Negro, L.E.Sozio and A.A.Ferreira, 1996, Tunnelling in Sao Paulo, Brazil, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 295-300
4. Masayasu Hisatake and Tomio Ito, 1983, Back Analysis Methods to Tunnel Linings, International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich, 1047-1056
5. Hisatake. M. and Ito.T., 1983, Back Analysis Methods to Tunnel Linings, Proc. Int.sym. Field Measurments in Geomech, 1047-1056
6. M. Hisatake, 1991, Back-analysis of tunnel lining stresses, Computer Methods and Advances in Geomechanics, 1479-1484
7. 久武他, 1990, トソネルA計測變位による覆工力の推定, 제 22 회 岩盤力學にするシソポジゥム, 16-20
8. Hisatake. M. and Murakami.T., 1992, Nondestructive Evaluation of Tunnel Lining Stresses, 4th Int. Symp. on Numerical Models in Geomech. Vol. 2, 685-695
9. M. Hisatake, J. Murakami & T.Toki, 1994, A non-destructive assessment of tunnel lining stability, Tunnelling and Ground Conditions., 493-500
10. Hisatake M., Toki T., Murakami J. and Murakami T., 1993, Assessment Method Model Experiments, Proc. the 25th Symp. Rock Mech. in Japan, 201-205
11. S. Sakurai, 1983, Displacement measurements associated with the design of underground openings, International Symposium of Field Measurements in Geomechanics, Zurich, 1163-1178
12. S.Sakurai and K.Takeuchi, 1983, Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels, Rock Mechanics and Rock Engineering 16, 173-180
13. G. Gioda and S. Sakurai, 1987, Back Analysis Procedures for the Interpretation of Field Measurements in Geomechanics, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 11, 555-583
14. Cividini A., Jurina L., and Gioda G., 1981, Some Aspects of Characterization Problems in Geomechanics, International Journal of Numerical Analysis Methods in Geomechanics 5, 33-56
15. A. Guenot, M. Panet and J. Sulem, 1985, A new aspect in tunnel closure interpretation, 26th US Symposium on Rock Mechanics, 455-460
16. Z. L. Peng and R. W. Lewis, 1987, Optimal Estimation of In-situ Ground Stresses from Displacement Measurements, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 11, 391-408
17. Akira Murakami, Takashi Hasegawa & Hide Sakaguchi, 1991, Interpretation of ground performances based on back analysis results, Computer Methods and Advances in Geomechanics, 1011-1015
18. Yang Zhifa, Liu Zhuhua and Wang Sijing, 1983, A Practical Back-Analysis Method from Displacements to Estimate Some Parameters of A Rock Mass for Design of Underground Openings, International symposium on Field Measurements in Geomechanics, 1267-1276
19. 허종석, 1995, 연암에 굴착되는 터널에서 계측 변위의 역해석에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문
20. 조태진, 1996, 절리암반의 역학적 특성 분석을 위한 역해석 모델 개발, 터널과 지하공간 6, 19-29
21. E. Hinton and D. R. J. Owen, 1977, Finite Element Programming, Academic Press, 305p
22. 서울특별시 지하철건설본부, 1996, 계측자료정리 및 분석 종합보고서(서울지하철 5호선 영등포·여의도·마포구간), 465-582
23. 서울특별시 지하철건설본부, 1997, 서울지하철 5호선 유지관리 자동계측 측정 보고서

박 치 현



1996년 전남대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사

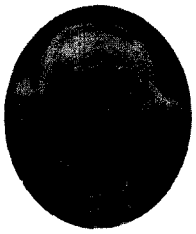
Tel : 0344-9100-231
E-mail : chichi@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

김 창 용

1990년 한양대학교, 자원공학, 공학사
1992년 한양대학교, 암반공학, 공학석사
1999년 한양대학교, 암반공학, 공학박사

Tel : 0344-9100-224
E-mail : cykim@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물그룹 선임연구원

이 희 근



1970년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1973년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1977년 일본 교오또대학(京都大學) 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 02-880-7222
E-mail : irram@plaza.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수