

역해석에 의한 지하구조체의 거동예측에 관한 연구

장정범¹⁾ · 김문겸²⁾

A Study on the Behavior Prediction of Underground Structures by Back Analysis

Jung-Bum Jang and Moon-Kyum Kim

ABSTRACT The reliable estimation of the system parameters and the accurate prediction of the system behavior are important to design underground structures safely and economically. Especially, the elastic modulus and the in-situ stresses are very important parameters in predicting the behavior of the underground structure. Therefore, the back analysis using the field measurement data is developed to determine accurately the elastic modulus and the in-situ stresses of the underground structural system in this study. A back analysis using the combined finite and boundary element is developed. It can consider the far field boundary condition and is efficient in computation. In this study, a back analysis is performed to predict behaviors of underground structures for the real construction site. The comparison between the results of the back analysis with field measurement data and the obtained material properties from the field test shows good agreement for the real construction site.

1. 서 론

지하구조체와 관련된 문제의 수치해석에 있어서는 해석영역의 기하학적 조건과 지반물성, 초기응력 상태 등의 정확한 입력이 가장 중요하다. 그러나, 대부분의 경우 지하구조체의 수치해석에 입력되는 지반물성은 시추자료와 채취시료의 실내시험 등에 의해 결정되며, 이로 인해 현지의 지반조건을 제대로 반영하지 못하여 수치해석시 해석자의 주관적 입장이 반영된 지반물성을 사용하는 경우가 많다. 그리고, 지하구조체는 굴착과 관련된 경우가 대부분으로 이 경우 수치해석시 등가 절점하중으로 작용하는 초기응력상태를 파악하는 것도 지반물성을 파악하는 것과 더불어 매우 중요하다. 또한, 지하구조체와 관련된 문제의 대부분이 반무한의 해석영역으로, 유한요소법이나 유한차분법과 같은 기존의 수치해석방법은 인위적인 경계조건의 설정으로 인하여 실제 지반보다 강성이 크게 모형화되기 때문에 지하구조체의 실제 거동과 수치해석결과의 차이는 필수 불가결하다. 이와같이 해석영역의 범위와 지반물성, 초기응력 상태의 중요성에 비하여 현재 이 값들을 정량적으로 파악할 수 있는 방법은 매우 제한적이다. 따라서,

이러한 값들을 실제 지하구조체의 시공 중에 발생하는 계측결과를 분석하여 파악하는 역해석의 필요성이 증가하고 있다.

지하구조체의 역해석은 일반적으로 해석영역의 범위 즉, 기하학적 조건, 지반물성, 초기응력 상태 등을 그 대상으로 하는데, 본 연구에서는 해석영역의 기하학적 조건에 대하여 굴착부 주변은 유한요소로 모형화하고 반무한영역은 경계요소로 모형화하는 조합해석기법을 사용함으로써 해석영역의 인위적인 경계조건 설정으로 인한 수치해석 오차를 제거하였다. 따라서, 본 연구에서는 시공 중 발생하는 계측변위를 입력자료로 하여 실내시험과 현장실험 등으로 부터 그 크기를 결정하기 어렵고 지하구조체의 탄소성거동을 지배하는 탄성계수와 굴착으로 인하여 굴착부 주변에 불평형하중으로 작용하는 초기응력을 역해석대상으로 하였다. 본 연구에서 개발한 정해석 및 역해석기법은 타 연구결과와의 비교 분석을 통해 그 신뢰성을 입증한 바 있다.⁹⁻¹¹⁾ 따라서, 본 연구에서는 개발된 역해석기법의 실제 적용성을 검토하기 위해 현장 계측결과를 사용하여 역해석을 수행

1) 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
2) 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

한 결과와 역해석 대상지점에서 수행된 각종 실험결과 등을 비교하고, 또한 역해석결과를 이용하여 예측한 지하구조체의 거동과 실제 거동을 비교·분석하였다.

2. 역해석

역해석은 일반적으로 정해석(Forward Analysis)의 수치해석결과가 현장 계측결과에 일치하도록 수치해석 모형의 미지 매개변수를 정의하는 해석과정을 말하며, 역해석방법에는 Trial & Error 법, 역산법, 직접법 등이 있다.^{1,4)} Trial & Error 법은 역해석의 가장 기본적인 접근방법으로 정해석결과인 변위와 응력 등을 바로 그에 대응하는 계측결과와 비교하여 잘 일치하는 경우에는 작업을 종료하고 일치하지 않는 경우에는 역해석의 대상이 되는 입력자료, 즉 미지 매개변수를 수정하여 다시 정해석을 수행하는 방법이다. 이 방법은 해석자가 해석결과와 계측결과가 일치하지 않을 때마다 입력값을 수정하여 해석을 수행하는 관계로 입력자료 수정과정이 시간소모적인 경우가 많다. 역산법(Inverse Method)은 계측결과인 변위, 응력으로부터 직접 역해석대상인 미지 매개변수를 정의하는 방법이다. 이 방법은 기존의 정해석과는 반대되는 문제형성을 사용하는 것으로 정해석문제의 지배방정식을 역으로 하여 계산하는 방법이다. 역산법은 다른 역해석방법에 비하여 미지 매개변수를 수정하는 과정과 그에 따른 반복연산과정이 없어 계산시간이 적다는 장점이 있으나, 해석대상의 비선형성이나 굴착과 같은 시간에 따른 거동 등 다양한 문제에 적용하는 데에는 한계가 있다. 직접법(Direct Method)은 계측결과와 해석결과를 비교하여 그 차이가 최소화 될 때까지 수치해석과정의 반복연산을 통하여 역해석대상인 미지 매개변수를 수정하는 방법이다. 이 방법은 정해석과정과 계측결과와 해석결과와의 차이인 오차함수를 최소화하는 과정이 결합되어 오차함수의 크기가 허용범위에 수렴할 때까지 반복연산과정을 수행한다. 따라서, 계산시간이 역산법에 비하여 많다는 단점이 있으나 비선형문제 등 다양한 문제에 적용할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

이외에도 역해석방법을 결정론적 접근방법과 확률론적 접근방법으로도 구분할 수 있다. 결정론적 접근방법은 실제 문제에서 높은 정확도로 계측이 수행되었거나 계산과정의 수학적 알고리즘이 입력자료의 오차에 대하여 안정한 경우에 유용하게 사용할 수 있다. 반면에

확률론적 접근방법은 계측결과와 불확실성이 해석결과에 큰 영향을 미치는 경우에 효율적으로 사용할 수 있다.

본 연구의 적용대상은 지하구조체로, 이 경우 굴착으로 인한 굴착부 주변 지반의 소성영역 발생은 필수불가결하다. 따라서, 본 연구에서는 역해석방법 중 비선형성 등 다양한 문제에 적용이 가능한 직접법을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 직접법은 계산변위 u_k 와 계측변위 u_k^* 에 의해 구성된 (1)식과 같은 오차함수를 최소화하는 최적화 방법에 의하여 미지의 매개변수를 찾아내는 방법이다.

$$Error = \left\{ \sum_{k=1}^N [u_k - u_k^*]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \xi \quad (1)$$

여기서, N은 계측점의 수이고 ξ 는 허용범위이다.

(1)식의 오차함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

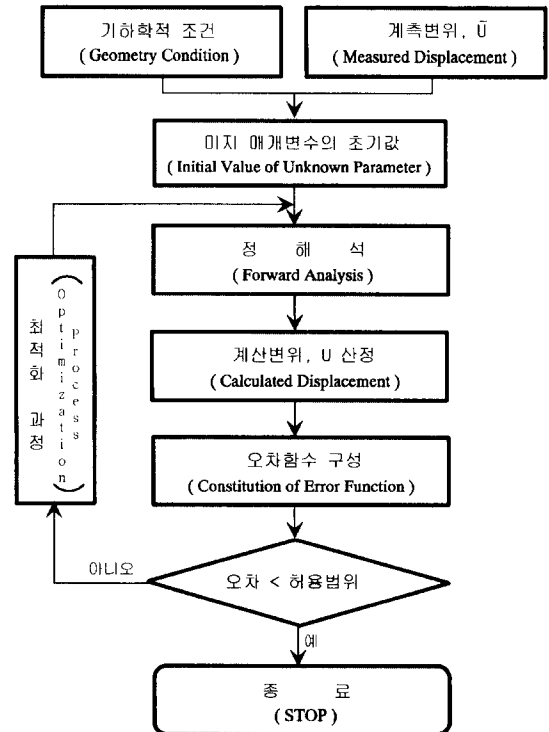


Fig. 1. Flowchart of back analysis

$$\text{Error} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (d_k)^2} \leq \xi$$

$$= \{(d_1)^2 + (d_2)^2 + \dots + (d_N)^2\}^{\frac{1}{2}} \leq \xi \quad (2)$$

여기서 $d_k = u_k - u_k^*$ 이다.

(2)식의 오차함수가 허용범위로 수렴하기 위해선 d_k 의 크기가 0으로 수렴해야하는 (3)식과 같은 필요충분조건을 만족하여야 한다.

$$\text{Error} \leq \xi \text{ if } d_k \approx 0 \text{ for } k=1, \dots, N \quad (3)$$

따라서, (3)식과 같이 오차함수가 허용범위로 수렴하여 d_k 의 크기가 0으로 거의 수렴한다는 것은 각 계측지점의 계측변위와 계산변위가 거의 일치하게 된다는 것이므로 이 때의 매개변수가 최적해가 되는 것이다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 역해석 프로그램의 전체적인 구성을 보여주고 있다.

3. 계측결과에 의한 역해석

본 연구에서 개발한 역해석기법의 적용성을 검토하기 위해, 계측이 수행된 실제 터널현장을 대상으로 4 지점에 대하여 역해석을 수행하였다. 역해석 대상은 반경이 7.6 m인 복선 반원형 터널로 NATM 공법으로 설계, 시공되었으며 굴착공법은 상, 하반 분할 굴착공법 및 롱 벤치컷(long bench cut) 공법을 사용하였다.¹²⁾

역해석 대상구간의 지반은 고생대 선캄브리아기의 흑운모 편마암과 안구상 편마암, 그리고 화강암질 편마암 등이 기반암을 이루고 있으며, 역해석 대상지점에서는 지반물성을 파악하기 위하여 시추조사, 실내시험, 탄성파탐사, 현장시험 등이 수행되었다.¹³⁾

Fig. 2와 Fig. 3은 역해석 대상지점의 시추조사결과와 함께 역해석 대상지점의 종단면도 및 횡단면도를 도시한 것으로, 지표로부터 풍화암, 연암, 경암의 순으로 분포하고 있다. Fig. 3에서 a, b, c는 지표로부터 각 지층까지의 심도를 나타내는 것으로, 각 역해석지점에 대한 지층별 심도는 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 2는 역해석 대상구간에 분포하고 있는 기반암의 실내시험결과를 요약, 정리하여 나타난 것이며, 또한 현장시험으로서 공내재하시험 결과에 의한 지반의 변형계수 값은 Table 3과 같다. Table 3의 공내재하시험 결과가 Table 2의 실내시험에 의한 결과보다 작은

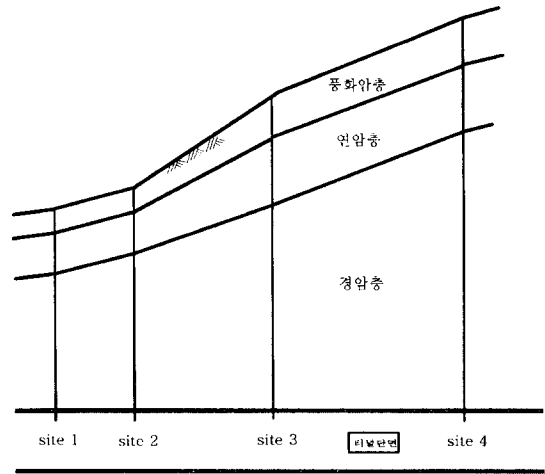


Fig. 2. Longitudinal cross section of each site

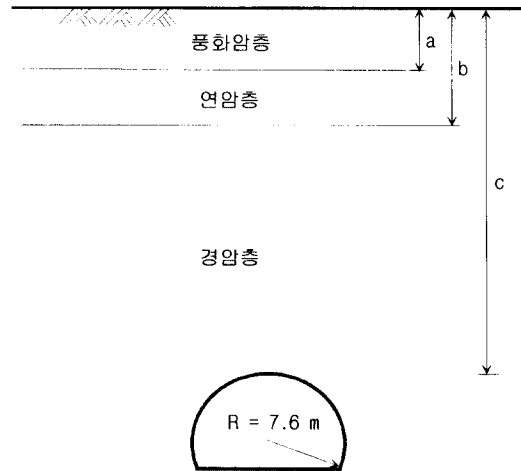


Fig. 3. Lateral cross section of each site

Table 1. Rock depth of each site

Sites	a (m)	b (m)	c (m)
1	6	12	48
2	6	12	54
3	7	16	78
4	12	17	98

값을 나타내는 이유는 지반에 형성되어 있는 균열, 절리 등에 의한 영향인 것으로 판단된다.

또한, 시공 중 터널에 대한 실시설계의 타당성 및 시공방법의 적합성을 검토하기 위하여 현장계측이 수행되었는데, 계측은 천단침하와 내공변위에 대하여 수행되었다. Fig. 4는 각 역해석 지점에서 계측된 천단침하

Table 2. Laboratory test results of bed rock

Descriptions	Min. value	Max. value
Specific gravity	2.58	2.85
Tensile strength (MPa)	5	15
Uni-axial compressive strength (MPa)	46	187
Poisson's ratio	0.11	0.28
Elastic modulus (MPa)	24,900	106,000
Cohesion (MPa)	10	28
Friction angle (degree)	43.0	59.0

Table 3. In-situ test results

Rock Classification	Min. Elastic Modulus (MPa)	Max. Elastic Modulus (MPa)
Soft Rock	310	1,200
Hard Rock	1,140	37,700

와 내공변위를 도시한 것이다. Fig. 4에서 천단침하는 전단면 굴착시까지 계측이 수행되었으나, 내공변위는 상부 반단면 굴착시까지 계측이 수행되었다.

위와같은 구간에 대해 역해석을 수행하기 위하여 해석대상을 Fig. 5와 같이 모형화 하였으며, 역해석대상을 제외한 나머지 입력자료로는 Table 2의 실내시험결과를 근거로 하여 최대와 최소의 중간값을 사용하였다. Table 4는 역해석에 사용된 지반물성을 나타내고 있으며, 역해석의 기본이 되는 입력자료인 계측변위는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 상부 반단면 굴착 후 수렴한 천단침하와 내공변위를 입력하였다. 그리고, 계측기 설치 이전에 발생한 선행변위는 본 역해석구간이 터널굴착 후 계측기 설치시간 간격이 짧고, 지반의 강성이 매우 큰 경암층에 터널이 시공되므로 그 영향이 작을 것으로 예상되어 고려하지 않았다.

위의 계측결과를 입력하여 역해석을 수행한 결과는 Fig. 6 및 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 6은 각 역해석지점에 대한 탄성계수의 수렴과정을, Fig. 7은 축압계수의 수렴과정을 도시한 것으로, 각 역해석지점에서의 최종적인 역해석결과는 Table 5와 같다. Fig. 8은 역해석결과를 이용하여 상부 반단면 굴착후의 해석변위를 계측변위와 비교하여 도시한 것이다.

역해석결과는 현장조건이 고려된 계측구간의 평균적인 지반물성을 나타내기 때문에, 시추조사 자료에 의한 실내시험결과와 현장시험결과를 역해석결과와 비교하기 위하여 실내시험결과를 현장조건을 고려한 계수로

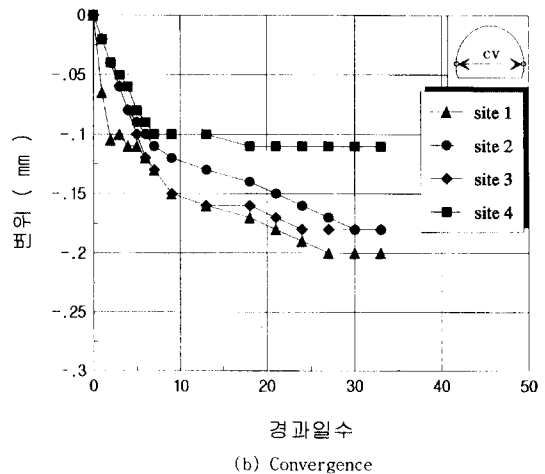
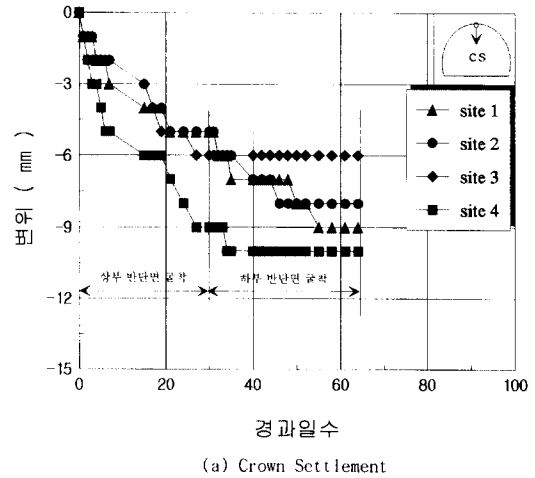


Fig. 4. Field Measurement data

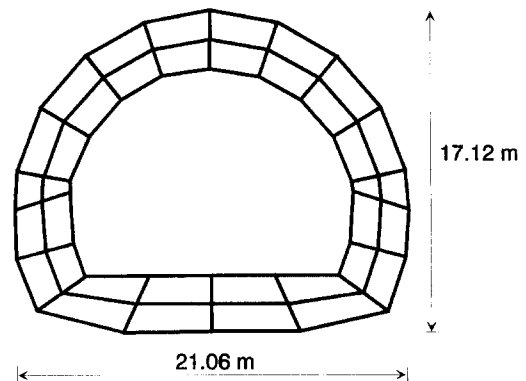


Fig. 5. Combined finite and boundary element model for back analysis

변환시킬 필요가 있다. 이 경우 탄성계수는 RQD와 관

Table 4. Material Properties used in back analysis

Descriptions	Average Value
Unit weight	27.2 kN/m ³
Poisson's ratio	0.20
Cohesion	18.6 MPa
Friction angle	51.0°
Tensile strength	9.8 MPa

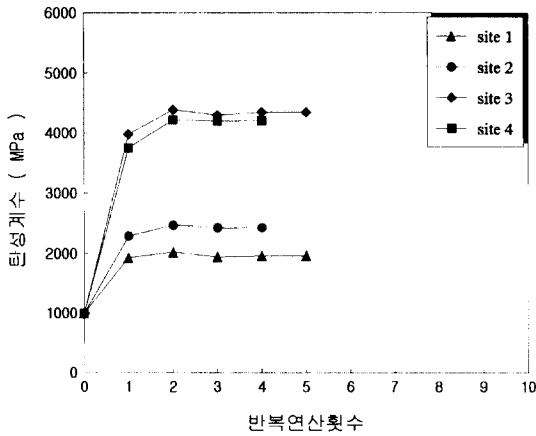


Fig. 6. Back analysis results of Elastic modulus

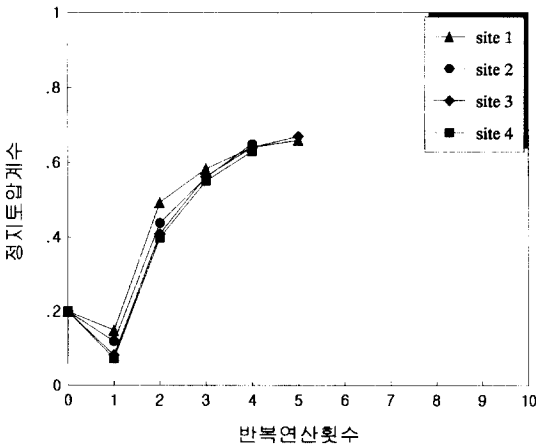


Fig. 7. Back analysis results of coefficient of lateral earth pressure

런시킬 수 있는데 RQD가 50% 이하인 경우는 탄성계수의 감소비가 0.1이며 RQD가 70% 이하인 경우는 탄성계수의 감소비가 0.2 정도를 나타내고 있다.¹⁴⁾

본 역해석 적용구간은 Fig. 2 및 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 풍화암층으로부터 경암층까지 분포하고 있으며, 특히 터널 주변층을 이루고 있는 경암은 코아

Table 5. Back analysis results of each site

Back analysis parameters	Sites			
	1	2	3	4
Elastic Modulus (MPa)	1,960	2,430	4,350	4,210
Coeff. of lateral earth pressure	0.66	0.65	0.67	0.63
No. of Iteration	5	4	5	4

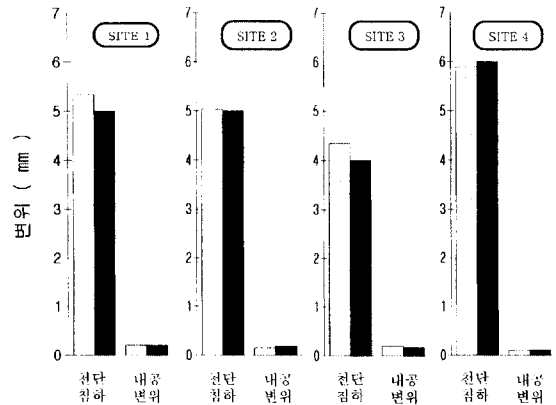


Fig. 8. Comparison of back analysis results and field measurement results after upper half excavation

□ : 해석변위, ■ : 계측변위

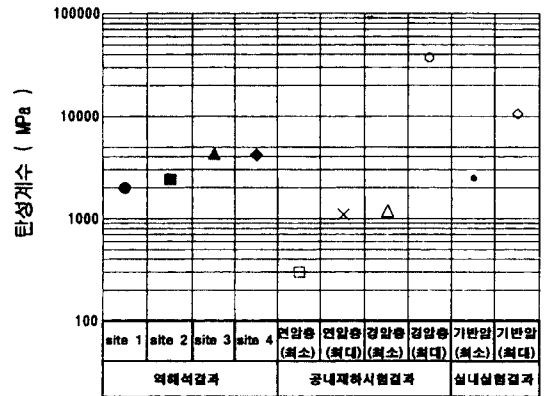


Fig. 9. Comparison of back analysis results and field test results

회수율이 39~100%, RQD가 0~100% 정도를 나타내고 있다. 따라서, 본 구간의 기반암층인 경암층의 실내시험결과를 RQD에 의한 탄성계수 감소비를 이용하여 현장시험결과로 변환시키는 경우, 탄성계수는 최소 2,490 MPa에서 최대 10,600 MPa을 나타낸다.

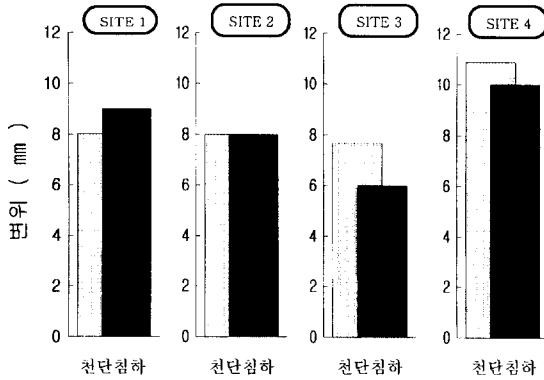


Fig. 10. Comparison of back analysis results and field measurement results after lower half excavation

□ : 해석변위, ■ : 계측변위

Fig. 9는 각 지점의 역해석결과를 공내재하 실험결과 및 RQD에 의하여 현장조건을 반영한 실내시험결과와 비교하여 도시한 것이다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 역해석결과와 실험결과들의 최소값과 최대값 사이에 분포하는 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구의 역해석결과가 대상구간의 평균적인 지반물성을 나타낸다고 볼 때 타당한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

또한, 축압계수도 각 역해석지점에서 0.65 내외의 크기를 보여, 국내 터널 설계시 사용되는 축압계수가 0.5~1.0 사이에 분포하는 값을 사용한다고 볼 때, 본 연구는 타당한 결과를 보인다고 판단된다.

역해석결과와 또 다른 검증방법으로서, 상부 반단면 굴착 후에 수렴한 계측변위로 역해석한 결과를 이용하여 하부 반단면 굴착 후에 예상되는 전단침하를 예측하고 하부 반단면 굴착 후에 수렴한 계측변위와 비교하였다. 역해석으로 평가된 각 지점에서의 지반물성을 입력하여 전단면 굴착 후 예상되는 해석변위와 계측변위를 비교한 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 계측변위와 해석변위는 각 역해석지점에서 최소 0.0%~최대 28.0%의 차이를 나타내며 비교적 잘 일치하는 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 10에서 site 3가 다른 역해석지점에 비하여 계측변위와 해석변위가 큰 차이를 보이는 원인은 site 1, site 2, site 4는 전단면 굴착후의 변위가 8~10 mm의 분포를 보이 나 site 3는 6 mm의 변위를 나타내 다른 지점에 비하여 변위가 작게 계측이 되었으며, 또한 site 1, site 2, site 4는 하부 반단면 굴착후의 변위 발생량이 전체변

위의 약 40%를 나타내고 있으나 site 3는 33%를 나타내 하부 반단면 굴착후의 변위 발생량도 작게 계측이 되었기 때문에 전단면 굴착후에 예상되는 해석변위와 차이가 발생한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 역해석을 이용하여 지하구조체의 거동을 예측하기 위해, 현장 계측결과를 입력하여 역해석을 수행한 결과와 역해석 대상지점에서 수행된 각종 실험결과 등을 비교하고, 또한 역해석결과를 입력하여 예측한 지하구조체의 거동과 실제 거동을 비교·분석하였다.

실제 현장에서 시공 중 계측한 터널 내부의 전단침하와 내공변위를 본 연구에서 개발한 역해석기법에 입력하여 역해석을 수행한 결과와 역해석 대상지점의 시추조사결과 및 실내, 현장실험결과 등을 비교분석한 결과, 역해석결과가 현장조건이 반영된 계측구간의 평균적인 지반물성을 나타낸다고 볼 때, 역해석결과는 실험결과들의 최소값과 최대값 사이에 분포하는 타당한 결과를 보였다. 또한, 역해석으로 평가된 각 지점에서의 지반물성을 입력하여 전단면 굴착 후 예상되는 해석변위와 실제 시공중 발생한 계측변위를 비교한 결과도 각 역해석지점에서 잘 일치하는 결과를 보였다. 따라서, 본 연구에서 개발한 역해석기법이 지하구조체의 주변 구조체를 정확히 파악하고, 지하구조체의 거동을 예측하는데 있어서 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Cividini, A., Jurina, L. and Giorda, G., 1981, "Some Aspects of Characterization Problems in Geomechanics", International Journal of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 18, pp. 487-503.
2. Sakurai, S. and Takeuchi, K., 1983, "Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels", Rock Mechanics and Rock Engineering 16, pp.173-180.
3. Yang, L. and Sterling, R. L., 1989, "Back Analysis of Rock Tunnel Using Boundary Element Methods", Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE. 115, pp.1163-1169.
4. Akutagawa, S., Brown, E.T., and Meek, J.L., 1991, "A Back Analysis Procedure for Establi-

- shing Load Parameters and Young's Moduli from Stress and Displacement Measurements", Proceedings of the 7th International Congress on Rock Mechanics, Aachen.
5. Gens, A., Ledesma, A. and Alonso, E. E., 1987, "Maximum Likelihood Parameter and Variance Estimation in Geotechnical Back Analysis", Proceeding 5th International Conference Applications of Statistics and Prob. in Soil and Struct. Engineering, pp.613-621.
 6. Takahashi, Y., Dohi, M., and Sakurai, S., 1986, "Application of Back Analysis to a Tunnel with Two-Step Bench", Proceedings of the International Symposium on Engineering in Complex Rock Formations, pp.785-790.
 7. Hisatake, M., 1986, "Three Dimensional Back Analysis for Tunnels", Proceeding of International Symposium on Engineering in Complex Rock Formation, Beijing, pp.791-797.
 8. Gioda, G. and Sakurai, S., 1987, "Back Analysis Procedures for the Interpretation of Field Measurements in Geomechanics", International Journal of Numerical Analysis Methods Geomechanics. 11, pp.555-583.
 9. 김문겸, 장정범, 오금호, 1995, "유한요소-경계요소 조합에 의한 지반매개변수 추정에 관한 연구", 한국 전산구조공학회 학술발표회, pp.28-34.
 10. 김문겸, 장정범, 1995, "유한요소-경계요소 조합에 의한 터널계측결과의 역해석", 한국암반공학회 논문집, 제 5권, 제 3호, pp.205-213.
 11. 김문겸, 장정범, 1995, "유한요소와 경계요소의 조합에 의한 지하구조체의 정해석 및 역해석", 대한토목학회논문집, 제 5권, 제 4호, pp.555-567.
 12. (주) 대우건설기술연구소, 1994, 경부고속철도 제 4-3 공구 노반신설공사 계측보고서.
 13. 한국 고속철도 건설공단, 1992, 서울-부산간 경부고속철도 제 4 공구 지질조사보고서.
 14. Sinha, R. S., 1989, Underground Structures; Design and Instrumentation, Elsevier.