

유한요소 - 경계요소 조합에 의한 터널 계측결과의 역해석

김문겸¹⁾ · 장정범²⁾

Back Analysis of the Measured Displacements by the Coupled Method of Finite Elements - Boundary Elements in Tunnel

Moon-Kyum Kim and Jung-Bum Jang

ABSTRACT In order to construct underground structural systems safely and economically, exact identification of the system parameters and accurate analysis of the system behaviors are required. Therefore, necessity of back analysis which is able to identify material properties of underground structural systems is increased. In this study a back analysis program which can identify the system parameters is developed using the direct method to be combined with the forward analysis program. Results of the back analysis program show good agreement with that of Gens et al. Sensitivity of the accuracy and convergency of the back analysis program on the number of measuring points is investigated. Comparison between the results of the back analysis with measurement data and the obtained material properties from the field tests shows good agreement for the real construction site.

1. 서 론

지하구조물과 관련된 문제들의 대부분이 반무한의 해석영역으로, 전영역을 유한개의 요소로 이산화하는 기존의 수치해석방법은 해석모형에 인위적인 경계조건을 설정하기 때문에 그에 따른 수치해석상의 오차는 필수불가결하다. 또한, 지반물성도 지반탐사 자료와 채취 시료의 실험실 시험에 의해 결정하고 있으나 이는 현지의 지반조건을 제대로 반영하지 못하여 수치해석시 해석자의 주관적 판단이 반영된 지반물성을 사용하는 경우가 많다. 특히, 지하구조물은 굴착과 관련된 경우가 대부분으로, 이 경우 수치해석시 등가절점하중으로 변환되는 초기응력상태를 파악하는 것도 지반물성을 파악하는 것과 더불어 매우 중요하다. 이와같이 해석영역의 범위, 지반물성, 초기응력 상태의 중요성에 비하여 현재 이 값들을 정량적으로 파악할 수 있는 방법은 너무 제한적이다. 따라서, 이러한 값들을 실제 구조물의 시공 중 측정하는 계측자료를 분석하여 파악하는 역해석의 필요성이 증가하고 있다.

지하구조물의 역해석은 일반적으로 해석영역의 범위, 즉 기하학적 조건과 지반물성, 초기응력 상태를 그 대상으로 하는데, 본 연구에서는 해석영역의 기하학적 조건은 유한요소와 경계요소를 조합한 해석기법을 사용하여 반무한영역의 경계조건을 이론적으로 해결하였다. 따라서 본 연구에서는 시공 중 발생하는 계측변위를 입력자료로 하여 지반물성과 초기응력을 역해석하는 프로그램의 개발과 계측점의 수에 따른 역해석 결과의 민감도분석을 수행하였다. 또한, 실제 현장의 계측 자료를 입력하여 그에 따른 역해석 결과를 해석대상 지점에서 수행된 각종 실험결과 등과 비교함으로써 역해석 결과의 실제 적용성을 검토하였다.

2. 역해석

역해석은 일반적으로 정해석의 수치해석결과가 현장

* 1995년 9월 2일 접수

- 1) 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수, 정회원
- 2) (주) 대우 건설기술연구소 토목연구실 주임연구원, 정회원

계측자료에 일치하도록 수치해석모형의 미지 매개변수를 정의하는 해석과정을 말한다. 역해석 대상인 미지의 매개변수들을 정확히 파악하기 위하여는 활용가능한 계측결과들이 다음과 같은 다양한 정성적인 요구조건들을 만족해야만 한다. 첫째, 계측결과에 영향을 주는 계측오차가 충분히 작아야 한다. 즉, 역해석의 기본적인 자료인 현장계측결과는 일반적으로 계측결과와 속성(변위, 변형률, 공극수압 등), 계측장비의 특성, 현장조건, 작업자의 경험 등에 좌우되는 오차에 큰 영향을 받는다. 따라서, 이러한 오차들이 포함된 계측결과는 역해석 결과에 무시할 수 없는 영향을 미치며 때때로 실제값과는 매우 다른 매개변수의 값을 이끌어낼 수 있다. 둘째, 역해석 대상인 미지의 매개변수는 계측결과에 상당한 영향력을 가져야만 한다. 따라서, 계측위치나 계측항목의 선정에 있어서 세심한 주의를 기울여야만 한다. 셋째, 계측결과는 역해석 대상인 미지 매개변수의 선형조합에 좌우되지는 않는다. 즉, 다층으로 구성된 지역에서 1~2 지점의 계측결과로 각 층의 미지 매개변수를 파악한다는 것은 불가능하다.

역해석 방법으로는 Trial & Error법, 역산법, 직접법 등이 있으나 본 연구에서는 다양한 지반모델에 적용할 수 있는 직접법을 사용하였다. 직접법(Direct method)은 계측결과와 해석결과를 비교하여 그 차이가 최소화될 때까지 수치해석과정의 반복연산을 통하여 역해석 대상인 미지 매개변수를 수정하는 방법이다. 이 방법은 정해석과정과 계측결과와 해석결과와의 차이인 오차함수를 최소화하는 과정이 결합되어 오차함수의 크기가 허용범위에 수렴할 때까지 반복연산과정이 수행되도록 되어있다. 따라서, 계산시간이 역산법에 비하여 많이 소요된다는 단점이 있으나 해석대상의 비선형성 등 다양한 문제에 적용할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

직접법은 계산변위 u_i 와 계측변위 \bar{u}_i 에 의해 구성된 식(1)과 같은 오차함수(error function)를 최소화하는 미지 매개변수를 반복연산에 의하여 찾아내는 방법이다.

$$Error = \left\{ \sum_{i=1}^n [u_i - \bar{u}_i]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서, n은 계측점의 수이다.

계산변위는 작용하는 하중을 알고 있는 경우에 지반의 강성에 의하여 결정된다. 즉, 계산변위 u_i 는 식(2)와

같이 지반의 강성을 나타내는 재료상수들의 함수로 나타낼 수 있다.

$$u_i = u_i(E, K_o, \dots) \quad (2)$$

따라서, 직접법의 경우 이러한 매개변수를 보정함으로써 오차함수가 최소가 되는 최적의 미지 매개변수의 값을 찾아내는 것이다.

오차함수가 최소가 되도록 미지의 매개변수를 보정하는 방법은 다음과 같다.

1 단계: 미지의 매개변수 V_i 에 대한 적당한 값을 입력하여 구조계의 초기조건을 정의한다. 여기서, i 는 매개변수의 수이다. 이때 반복연산횟수는 0으로 놓는다.

2 단계: 반복연산횟수 $j = j + 1$ 로 증가하며, j 번째 매개변수의 입력치로 그에 따른 새로운 변위 및 응력을 계산한다.

3 단계: j 번째 입력치를 사용하여 계산된 변위와 응력이 계측변위와 일치하지 않는 경우 다음과 같이 보정계수를 사용하여 매개변수를 수정한다.

$$V_i^{(j)} = V_i^{(j-1)} * \beta_i^{(j)} \quad (3)$$

여기서 보정계수 $\beta_i^{(j)}$ 는 계측변위 \bar{u}_i 와 계산변위 u_i 에 의하여 정의할 수 있다.

$$\beta_i^{(j)} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{u_k^{(j-1)}}{u_k} \quad (4)$$

여기서 K 는 계측점의 수이다. 이러한 과정을 계측변위와 계산변위가 일치하여 오차함수가 허용범위내로 수렴할 때까지 반복적으로 수행하게 된다.

본 연구에서 개발한 역해석 프로그램의 흐름을 살펴보면, 대상구조물의 기하학적 조건과 역해석 대상을 제외한 나머지 변수는 기지의 값으로 입력하고, 역해석 대상인 미지의 매개변수는 임의의 초기값을 설정하여 입력한다. 정해석에 필요한 모든 변수들의 입력이 완료되면 정해석이 수행되어 계측지점과 일치하는 계산변위를 산정한다. 정해석 수행후 계산변위와 계측변위로 오차함수를 구성하고 오차함수의 값이 허용범위내로 수렴하였으면 프로그램은 종료한다. 그러나, 오차함수의 값이 허용범위내로 수렴하지 못하면 보정계수에 의해 미지 매개변수를 수정하여 정해석을 재수행하는 과정이 반복

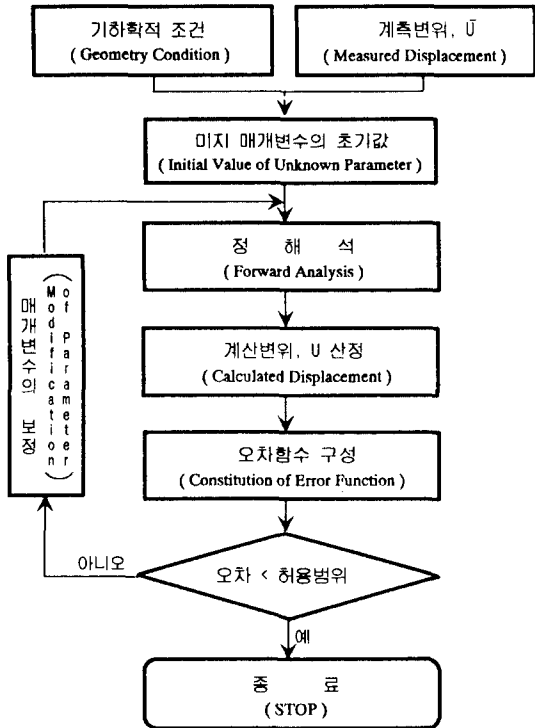


그림 1. 역해석 프로그램의 구성.

된다. 그래서, 오차함수의 값이 허용범위내에 수렴하던 이때의 값이 최적의 매개변수가 되는 것이다. 그림 1은 역해석 프로그램의 전체적인 구성을 보여주고 있다.

3. 역해석 프로그램의 검증

본 연구에서 개발한 역해석 프로그램의 신뢰성을 검토하기 위하여, 동일한 해석조건에 대하여 Gens⁵⁾ 등의 역해석 결과와 비교함으로써 역해석 프로그램의 타당성을 검증하였다.

Gens 등의 역해석 프로그램은 전형적인 유한요소해석 프로그램을 기본도구로 하여 Gauss-Newton 방법을 사용함으로써 오차함수를 최소화시키는 최적의 미지 매개변수를 구하는 것으로 구성되어 있다. Gens 등이 역해석에 사용한 해석모형은 그림 2에 도시한 바와 같이 지표로부터 원공의 중심이 9.75 m의 깊이에 위치한 직경이 4.5 m인 원형터널이다. 해석모형은 선형 등방성 탄성체로 하였으며, 계측변위로는 터널 주변부에 있어서 extensometer와 inclinometer의 계측자료인 7개의 수평변위와 5개의 수직변위를 사용하였다.

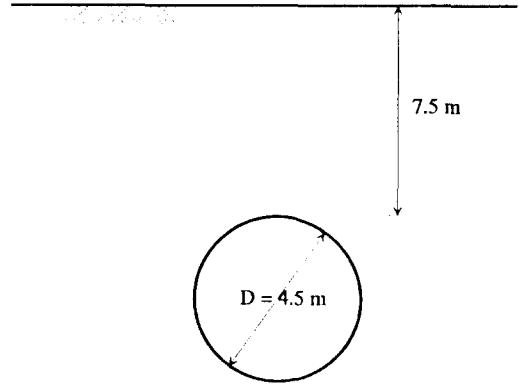


그림 2. 검증모형.

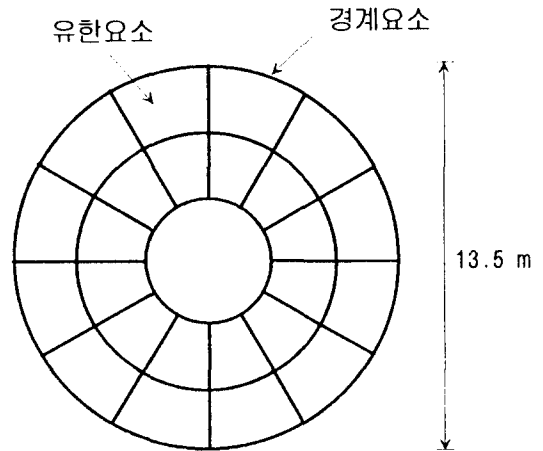


그림 3. 해석영역의 이산화모형.

표 1. 역해석모형에 사용한 지반물성

탄성계수	10 MPa
단위중량	20 kN/m ³
포아손비	0.49
정지토압계수	1.0

Gens 등이 역해석에 사용한 해석영역의 지반물성은 표 1과 같으며, 이중 탄성계수와 정지토압계수를 역해석 대상으로 하였다. 그래서, 미지 매개변수의 실제값을 탄성계수의 경우는 10 MPa, 정지토압계수의 경우는 1.0으로 하여 역해석을 수행하였다.

본 연구에서는 역해석모형으로서 그림 3과 같이 경계요소영역은 12개의 요소와 12개의 절점으로, 유한요소영역은 24개의 요소와 36개의 절점으로 이루어진 해석요소망을 구성하였다.

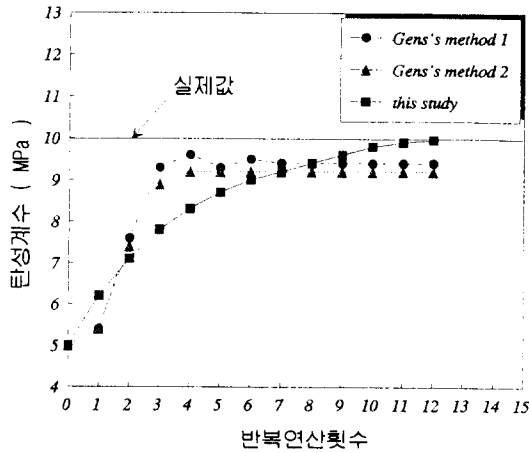


그림 4. 탄성계수의 역해석 결과.

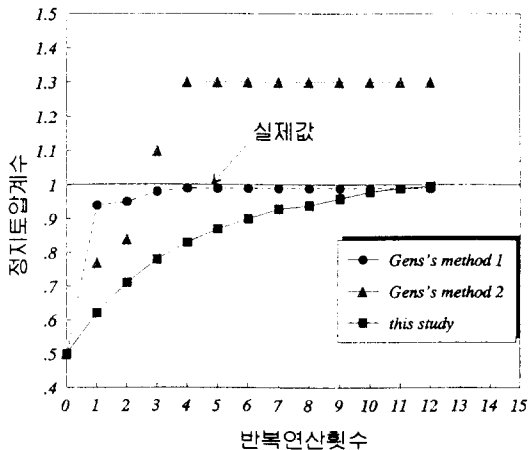


그림 5. 정지토압계수의 역해석 결과.

두 연구의 비교결과는 그림 4 및 그림 5에 도시하였으며, 그림 4는 탄성계수를, 그림 5는 정지토압계수의 역해석 결과를 보여주고 있다. 그림 4 및 그림 5에 도시한 Gens 등의 방법은 첫번째 경우가 해석결과와 계측결과로 정의되는 전형적인 오차함수에 계측장비 및 계측결과와의 오차를 통계학적으로 고려한 것이며, 두번째 경우는 오차함수에 계측결과와의 오차만을 통계학적으로 고려한 것이다.

그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 탄성계수의 경우, Gens 등의 방법은 실제값에 대하여 9.4 MPa와 9.2 MPa의 결과를 보여 6%와 8%의 오차를 보이나, 본 연구결과는 12회의 반복연산과정을 통하여 9.96 MPa로서 0.4%의 오차를 보이며 실제값에 정확히 일치하고

표 2. 민감도분석에 사용한 지반물성

탄성계수	392 MPa
단위중량	21 kN/m ³
포아손비	0.3
점착력	50 kPa
내부마찰각	20°
인장강도	25 kPa
정지토압계수	0.5

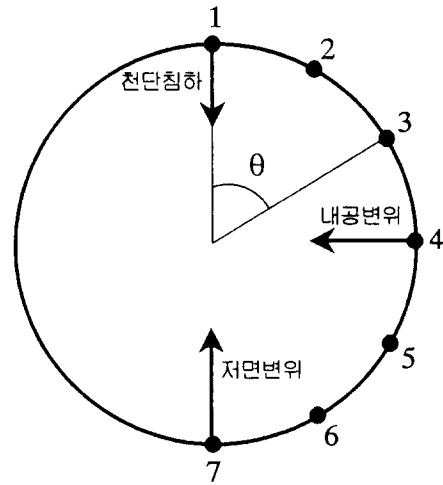


그림 6. 계측위치.

있음을 알 수 있다.

또한, 그림 5의 정지토압계수도 Gens의 역해석 결과는 0.99와 1.3으로서 1%와 30%의 오차를 보이나, 본 연구결과는 0.996으로서 0.4%의 오차를 보이며 정확히 실제값에 근접하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 위와 같은 연구결과를 살펴볼 때 본 연구에서 개발한 역해석 프로그램은 지하구조물의 해석에 있어서 그 영향이 큰 탄성계수와 초기응력의 추정에 효율적으로 사용될 수 있다고 판단된다.

4. 민감도 분석

계측점(measuring point)의 수에 따른 역해석 결과의 정확도(accuracy) 및 수렴속도를 분석하기 위하여 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였다. 민감도 분석에 사용된 계측변위는 표 2와 같은 지반물성을 사용하여, 지표로부터 원공의 중심이 22.5 m이고 직경이 5.0 m인 원형터널을 정해석한 결과를 사용하였다. 계측변위의 위치는 그림 6과 같다.

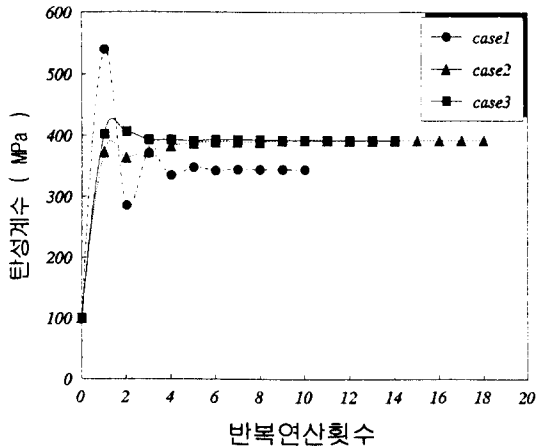


그림 7. 각 경우에 대한 탄성계수의 역해석.

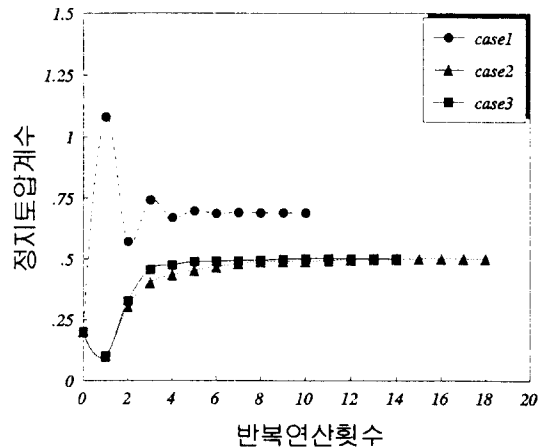


그림 8. 각 경우에 대한 정지토압계수의 역해석.

민감도 분석에 있어서 첫번째 경우는 천단변위만으로, 두번째 경우는 천단변위, 내공변위를 이용하여, 세번째 경우는 천단변위, 내공변위, 저면변위를 이용하여 탄성계수와 정지토압계수를 역해석하였다.

그림 7은 각 경우에 따른 탄성계수의 역해석 결과를 보여주고 있다. 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 계측변위가 1개인 경우는 10회의 반복연산에 -12.0%의 오차를 나타내는 역해석 결과를 보이고 있으며, 계측변위가 2개인 경우는 18회의 반복연산에 -0.08%의 오차를 보이며 수렴하는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 계측변위가 1개인 경우, 즉 기지의 값이 1개인 경우에 2개의 미지 매개변수를 추정하는 것은 식으로 성립할 수 없는 관계로 미지 매개변수 각각의 크기는 정확한 해와 큰 차이를 보이면서도 2개의 미지 매개변수의 조합에 의하여 오차함수의 크기가 허용범위에 수렴하는 결과를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 계측변위가 2개 이상인 경우는 거의 정확히 미지 매개변수를 역해석하고 있으며 특히, 미지 매개변수보다 계측자료가 많은 경우는 허용범위에 대하여 수렴속도가 빨라 반복연산횟수가 적음에도 거의 정확한 결과를 주고 있다.

그림 8은 각 경우에 대한 정지토압계수의 역해석 결과를 보여주고 있다. 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 계측변위가 1개인 경우는 10회의 반복연산에 38.0%의 오차를 나타내는 역해석 결과를 보이고 있으며, 계측변위가 2개인 경우에는 18회의 반복연산에 0.4%, 계측변위가 3개인 경우에는 14회의 반복연산에 0.4%의 오차

를 보이며 수렴하는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 계측변위가 1개인 경우에는 2가지 미지 매개변수의 조합에 의하여 오차함수의 크기는 허용범위에 수렴하는 결과를 보이나 각각의 미지 매개변수는 큰 오차를 보이는 것이며, 계측변위가 2개 이상인 경우는 거의 정확히 미지 매개변수를 역해석하고 있음을 알 수 있다. 또한, 정지토압계수도 탄성계수의 경우와 같이 계측자료가 3개인 경우는 2개인 경우보다 수렴속도가 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 계측결과에 의한 역해석

본 연구에서 개발한 역해석 프로그램에 실제 터널현장의 계측자료를 입력하여 역해석을 수행하였다.

역해석 대상은 반경이 7.6 m인 복선 반원형 터널로 NATM 공법으로 설계, 시공되었으며 굴착공법은 상, 하반 분할 굴착공법 및 롱벤치컷 공법을 사용하였다. 역해석 대상구간의 지질은 고생대 선캠브리아기의 흑운모 편마암과 안구상 편마암, 그리고 화강암질 편마암 등이 기반암을 이루고 있다. 역해석 대상지점에서는 시추조사, 실험실 실내시험, 탄성파탐사, 현장시험 등이 수행되었다.

그림 9는 시추조사결과와 함께 역해석 대상지점의 횡단면도를 보여주고 있으며, 표 3은 대상구간에 분포하고 있는 기반암의 실내시험결과를 요약, 정리하여 나타낸 것이다. 또한, 현장시험으로서 공내재하시험 결과에 의한 변형계수의 값은 표 4와 같다. 표 4의 공내재하

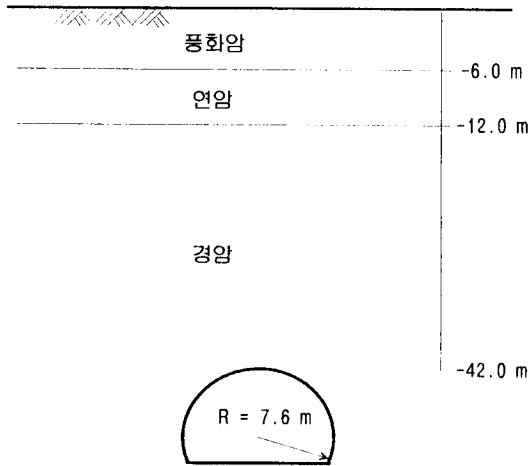


그림 9. 역해석 대상의 횡단면도.

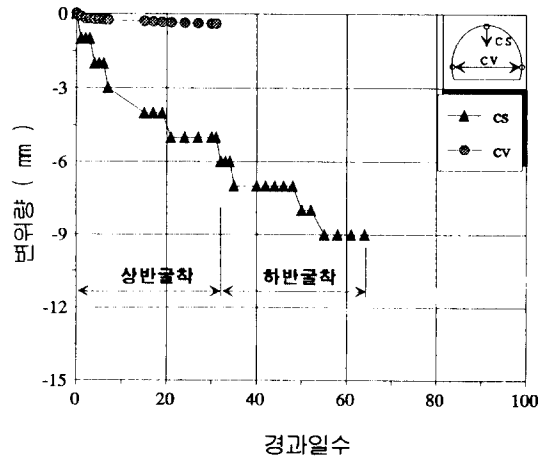


그림 10. 천단침하와 내공변위.

표 3. 기반암의 실내시험결과

구 분	최 소	최 대
비중	2.58	2.85
인장강도 (MPa)	5	15
일축압축강도 (MPa)	46	187
포아손비	0.11	0.28
탄성계수 (MPa)	24,900	106,000
점착력 (MPa)	10	28
내부마찰각(°)	43	59

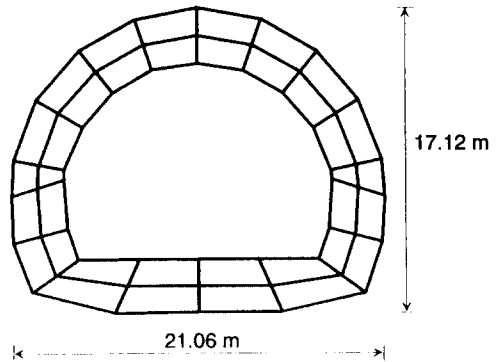


그림 11. 역해석 대상의 조합해석모형.

표 4. 공내재하시험 결과

지 층	최소 탄성계수 (MPa)	최대 탄성계수 (MPa)
연암층	310	1,200
경암층	1,100	37,700

표 5. 역해석에 사용된 지반물성

구 분	크 기
단위중량	27.2 kN/m ³
포아손비	0.20
점착력	18.6 MPa
내부마찰각	51.0°
인장강도	9.8 MPa

시험 결과가 표 3의 실내암석시험에 의한 결과보다 작은 값을 나타내는 이유는 암석에 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 수평 내공변위에 대하여 수행되었으며 그 결과는 그림 10과 같다. 계측결과를 살펴보면 상부 반단면 굴착 후 천단침하는 5.0 mm, 수평 내공변위는 0.4 mm로 수렴하였으며, 이후 하부 반단면 굴착이 진행되면서 천단침하는 9.0 mm로 증가하였다가 수렴되었다.

위와 같은 구간에 대해 역해석을 수행하기 위하여 해

석대상을 그림 11과 같이 모형화하였으며 입력자료로는 표 3의 실내시험결과를 근거로 하여 최대와 최소의 중간값을 사용하였다. 표 5는 역해석에 사용된 지반물성을 나타내고 있으며, 역해석의 기본이 되는 입력자료인 계측변위는 그림 10에 도시한 바와 같이 상부 반단면 굴착후에 수렴한 천단침하와 수평 내공변위를 입력하였다. 이때, 수평 내공변위는 역해석 대상단면이 좌, 우 대칭적으로 거동을 하므로 좌,우 측점에서 0.2 mm

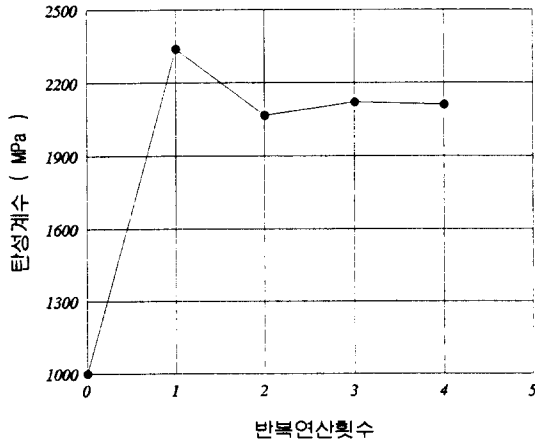


그림 12. 탄성계수의 역해석 결과.

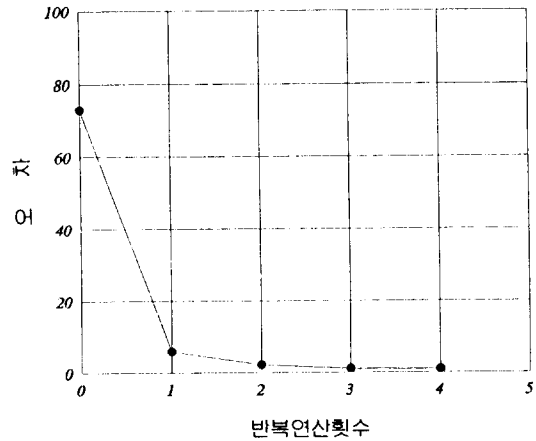


그림 14. 오차의 수렴과정.

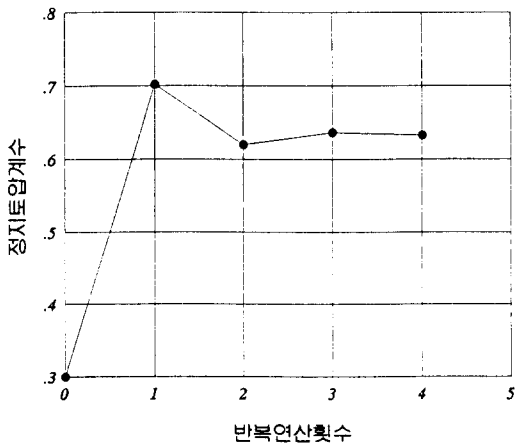


그림 13. 정지토압계수의 역해석 결과.

씩 변위가 발생한 것으로 하여 해석을 수행하였다.

위의 계측자료를 입력하여 역해석을 수행한 결과는 그림 12 및 그림 13에 도시하였다. 그림 12는 탄성계수의 수렴과정을, 그림 13은 정지토압계수의 수렴과정을 도시한 것으로, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 4회의 반복연산에 탄성계수는 2,100 MPa, 정지토압계수는 0.64를 나타냈다. 그림 14는 오차함수의 수렴과정을 보여주고 있다.

역해석 결과는 현장의 상황을 고려한 계측구간의 평균적인 지반물성을 나타내는 것으로, 시추조사 자료에 의한 실내실험 결과와 현장실험 결과를 역해석 결과와 비교하기 위하여 실내실험 결과를 현장조건을 고려한 값으로 변환시킬 필요가 있다. 이 경우 탄성계수는

RQD(Rock Quality Designation)로 관계지을 수 있는데 RQD가 50% 이하의 경우는 탄성계수 감소비가 0.1이며 RQD가 70% 이하의 경우는 탄성계수 감소비가 0.2정도를 나타내고 있다.

본 역해석 적용구간은 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 풍화암층으로부터 경암층까지 분포하고 있으며, 특히 터널 주변층을 이루고 있는 경암은 코아 회수율이 39~100%, RQD가 0~100% 정도를 나타내고 있다. 따라서, 본 구간의 기반암층인 경암층의 실내실험결과를 RQD에 의한 탄성계수 감소비로 변환시키는 경우, 탄성계수는 최소 2,490 MPa에서 최대 10,600 MPa를 나타낸다.

역해석 결과를 공내재하실험 결과 및 RQD에 의하여 현장조건을 반영한 실내실험 결과와 비교할 때, 역해석 결과는 실험결과들의 최소와 최대사이에 나타나는 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구의 역해석 결과가 대상구간의 평균적인 지반물성을 나타낸다고 볼 때 타당한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 정지토압계수도 0.64로서 국내 터널 설계시 사용되는 정지토압계수가 0.5~1.0 사이에 분포하는 값을 사용한다고 할 때 타당한 결과를 보인다고 판단된다.

역해석 결과의 또 다른 검증방법으로서, 상부 반단면 굴착 후에 수렴한 변위로 역해석한 결과를 이용하여, 하부 반단면 굴착 후에 예상되는 천단침하를 예측, 실제 시공 중 하부 반단면 굴착 후에 수렴한 계측변위와 비교하였다. 역해석으로 평가된 지반물성을 입력하여 정해석한 결과는 그림 15와 같으며, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 천단침하는 7.6 mm가 예측되어, 실제 시

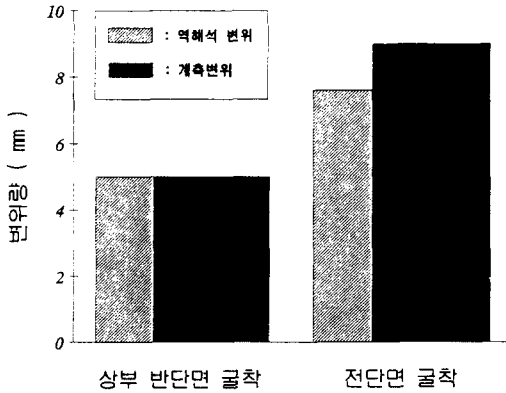


그림 15. 계측변위와 역해석 변위의 비교.

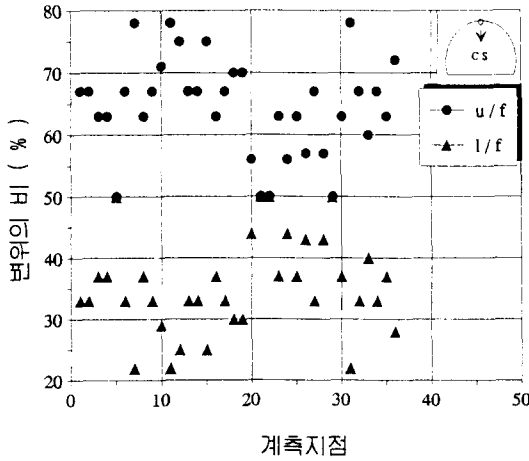


그림 16. 최종변위에 대한 굴착변위의 비.

공 시 발생한 전단침하 9.0 mm에 비하여 15.5% 작게 나타났다.

이러한 결과가 나타난 원인을 규명하기 위해 터널 구간에서 있어서 변위를 계측한 지점에 대하여 변위의 비를 도시하였다. 즉, 상부 반단면을 굴착하면서 발생한 변위와 하부 반단면을 굴착하면서 발생한 변위에 대하여 전단면이 굴착되면서 수렴한 변위의 비로 도시하였다. 그림 16은 전단면 굴착에 대한 상부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비(upper/full, u/f)와 전단면 굴착에 대한 하부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비(lower/full, l/f)를 나타낸 것이다. 그림 16에서 알 수 있는 바와 같이 전단면 굴착에 대한 상부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비는 대부분의 계측지점이 60~70%에 위치하고 있고, 전단면 굴착에 대한 하부 반단면 굴착시 발생한 변위의

비는 대부분이 30~40%에 분포하고 있음을 알 수 있다. 36곳의 계측지점에 대하여 평균적인 변위의 비를 산정한 결과, 전단면 굴착에 대한 상부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비는 65%를 나타냈고, 전단면 굴착에 대한 하부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비는 35%의 크기를 나타냈다. 그러나, 본 연구의 역해석 대상지점은 전단면 굴착에 대한 상부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비가 56%, 전단면 굴착에 대한 하부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비가 44%의 크기를 나타내, 전단면 굴착에 대한 하부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비가 다른 계측지점의 변위비에 비하여 10% 정도 큰 결과를 나타내고 있다.

본 역해석 결과에 의하여 발생한 변위비는 전단면 굴착에 대한 상부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비가 66.1%, 전단면 굴착에 대한 하부 반단면 굴착시 발생한 변위의 비가 33.9%의 크기를 나타냈다. 이는 터널 구간에서 대한 계측지점의 변위비 65%와 35%에 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 따라서, 역해석 지점에서 전단면 굴착후의 예측변위가 계측변위와 차이를 보이는 것은 하부 반단면 굴착 후에 발생하는 계측변위가 굴착면적, 굴착형상에 따라 다르지만, 이 단면의 경우 비교적 크게 변위가 계측되었기 때문인 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 실제 현장에서 시공 중 발생하는 계측 자료를 이용하여 지반의 탄성계수와 초기응력을 추정하는 역해석 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 역해석 프로그램은 유한요소와 경계요소를 조합한 해석프로그램에 다양한 지반모델에서의 구성 매개변수를 추정할 수 있는 직접법을 조합하여 구성하였다. 개발된 역해석 프로그램의 검증은 Gens 등의 역해석 모형을 입력하여 그들의 역해석 결과와 비교하였으며, 그 결과 본 연구에서 개발한 역해석 프로그램의 신뢰성을 입증하였다. 또한, 계측점 수에 따른 역해석 결과의 정도 및 수렴속도를 분석하기 위하여 계측점 수에 따른 민감도분석을 수행하였다. 분석결과, 미지 매개변수보다 계측변위가 적은 경우는 미지 매개변수의 조합에 의해 오차함수가 허용범위로 수렴하는 결과를 보여 오차가 큰 역해석 결과를 주나, 미지 매개변수와 동일한 수 이상의 계측자료가 있는 경우는 정확한 역해석 결과를 주고 있음을 알 수 있었다. 또한, 실제 시공현장의 계측

자료를 입력하여 본 연구에서 개발한 역해석 기법의 적용성을 검토한 결과, 본 연구의 역해석 결과가 대상지점의 시추조사자료, 실내 및 현장실험 결과에 대하여 잘 일치하는 결과를 보였다.

참 고 문 헌

1. Cividini, A., Jurina, L. and Gioda, G., "Some Aspects of Characterization Problems in Geomechanics", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* **18**, 1981, pp. 487 - 503.
2. Sakurai, S. and Takeuchi, K., "Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels", *Rock Mech. Rock Eng.* **16**, 1983, pp. 173 - 180.
3. Yang, L. and Sterling, R. L., "Back Analysis of Rock Tunnel Using Boundary Element Methods", *J. of Geotech. Eng. Div. ASCE.* **115**, 1989, pp. 1163-1169.
4. Akutagawa, S., Brown, E. T. and Meek, J. L., "A Back Analysis Procedure for Establishing Load Parameters and Young's Moduli from Stress and Displacement Measurements", *Proc. of the 7th Int. Congress on Rock Mechanics, Aachen*, 1991.
5. Gens, A., Ledesma, A. and Alonso, E. E., "Maximum Likelihood Parameter and Variance Estimation in Geotechnical Back Analysis", *Proc. 5th Int. Conf. Applications of Statistics and Prob. in Soil and Struct. Eng.*, 1987, pp. 613-621.
6. Takahashi, Y., Dohi, M. and Sakurai, S., "Application of Back Analysis to a Tunnel with Two-Step Bench", *Proc. of the International Symposium on Engineering in Complex Rock Formations*, 1986, pp. 785-790.
7. Hisatake, M., "Three Dimensional Back Analysis for Tunnels", *Proc. of Int. Symp. on Eng. in Complex rock Formation, Beijing*, 1986, pp. 791-797.
8. Gioda, G. and Sakurai, S., "Back Analysis Procedures for the Interpretation of Field Measurements in Geomechanics", *Int. J. of Numerical Analysis Methods Geomechanics.* **11**, 1987, pp. 555-583.
9. 김문겸, 장정범, 오금호, "유한요소-경계요소 조합에 의한 지반매개변수 추정에 관한 연구", 한국 전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제 8권, 제 1집, 1995, pp. 28-34.
10. (주) 대우 건설기술연구소, 경부고속철도 제 4-3공구 노반신설공사 계측보고서, 1994.
11. 한국 고속철도 건설공단, 서울-부산간 경부고속철도 제 4공구 지질조사보고서, 1992.