

다중 미지변수를 고려한 다층지반 역해석

Back Analysis Method for Material Properties of Multi-layers Ground Considering Multiple Unknown Variables

김 세 진¹ Kim, Se-Jin

김 문 겸² Kim, Moon-Kyum

원 종 화³ Won, Jong-Hwa

김 정 수⁴ Kim, Jung-Soo

Abstract

A core procedure of the direct search method used in this study is optimizing a difference between objective function and real displacement and correcting unknown variables. Because the research procedure comes from back-analyzing of the unknown variable of each layer, back-analyzing results need an additional optimization to minimize interferential effects of unknown variables. Therefore, the direct search method is used to obtain optimized solutions without a partial differentiation of an objective function. The object of this research is developing the back analysis technique for multi-unknown variables by modeling the soil including underground structure into upper and lower layer. In order to minimize interferent errors, repeated back analysis is performed and applicability on the real tunnel is examined. Consequently, the multi-layer analysis model is more precise in describing the real behavior of underground structure. It shows the validity of back analysis for multi-layer model which is the understructure placed on multi-layer boundaries.

요 지

본 연구에서 역해석에 이용한 직접법은 실제 변위와 목적함수의 차이를 최소화하고 미지변수를 보정하는 최적화가 핵심 과정이다. 연구과정이 복수의 지층을 단계별로 역해석하여 각 지반의 미지변수를 역해석하기 때문에 지층 간 미지변수의 간섭 효과를 최소화 할 수 있는 추가적인 최적화가 필요하다. 따라서 효율적이고 정확한 최적화를 위해서 목적함수의 편미분 계산과정이 없이 최적해를 구할 수 있는 직접탐색법(direct search method)을 사용하였다. 본 연구의 목적은 지하구조체가 포함된 지층을 상부와 하부의 지층으로 모형화하고, 다중 미지변수를 역해석하는 기법을 개발하는 데에 목적을 둔다. 또한 단계별 역해석된 미지변수의 상호 간섭 오차를 최소화하기 위해서 반복 역해석을 실시하고, 실제 존재하는 터널에 대하여 적용성에 대해 검토하였다. 그 결과, 단층 모형화보다 다층 모형화 결과가 실제 지하구조물 거동을 정확히 나타냈으며 다층 경계부에 위치한 지하구조물의 다층지반 모형화를 통한 역해석이 유효함을 확인하였다.

Keywords : Back analysis, Direct search method, Multi-layer, Multiple unknown variables optimization

1 동부건설(주) 토목사업부 대리 (Assistant Manager, Civil Engrg. Division, Pukyong National Univ.)

2 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., exameve@yonsei.ac.kr, 교신저자)

4 연세대학교 토목공학과 보조연구원 (Assistant Researcher, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지하구조체의 특성상 주변 지반이 단일층으로 구성되기는 쉽지 않으며, 단일층으로 구성되어있다고 하여도 지층의 위치에 따라 물성의 차이가 발생할 수 있다. 이러한 점을 고려할 때, 역해석을 이용하여 지반 물성을 산정하는 경우에는 지하구조체의 주변 지반을 단일층이 아닌 다층지반으로 모형화하는 것이 신뢰성이 높다. 또한, 지하구조체가 연속된 두 층의 경계부에 위치한 때는 갑작스런 지반물성 변화로 인해 지하구조체 변위에 미치는 영향이 크고 복잡하다. 따라서 지하구조물 시공시 구조체가 통과하는 해당 층에 급격한 지반 물성 변화가 존재하는 경우 지하구조체가 위치한 층을 다층으로 모형화 하는 것이 합리적이다.

본 연구에서 사용된 역해석은 최적화 과정에서 매개변수, 지반물성을 보정하여 실제 구조계에서 예측된 변위와 수치해석의 결과 값을 일치하게 함으로써 시공현장에 발생하는 지반물성의 변화에 합리적으로 대응하도록 하는데 그 목적이 있다.

국내의 다층지반(multi-layer) 역해석에 관한 연구는 토류구조물, 도로포장 분야의 경우 이승훈(2002), 이승원(2002) 등에 의해 활발하게 진행되었으나, 지하구조물에 대한 연구는 그렇지 못한 편이다. 다층구조체의 터널거동에 대한 역해석을 수행한 사례가 전병승(1994), 김문겸(1995) 등이 있기는 하나, 검증과정에서 실측변위를 사용하지 않았고, 단계별 역해석된 미지변수의 상호 간섭 오차에 대한 고려가 부족하였다. 또한, 지하구조체가 속한 해당 지층을 다층으로 모형화한 연구가 활발하게 진행되지 못했다. 반면 국외의 경우, 지하구조체의 다층지반으로 모형화된 지층 내 거동과 지반물성을 결정하는 다양한 역해석 수행 작업이 S Jiang(2004), Li Wen-Xiu(2009) 등에 의해 활발히 행해졌다.

일반적으로 연구된 단층 지반 역해석은 반복연산의 횟수가 적어서 해석 시간이 빠르나, 본 연구에서 사용한 다층 지반 역해석은 반복연산의 횟수가 단층 지반 역해석에 비해서 2배 이상의 시간이 소요된다. 경제성을 고려하면 단층 지반 역해석이 유리하지만, 지하구조체의 변위와 응력을 살펴보면 구조물의 거동을 과소평가하는 결과가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단층 지반 역해석에 의해 계산된 환산지반 물성을 사용하여 정해석을 실시하고, 이를 다층지반 내 지하구조체에 발생하는 변위와 응력을 비교하고 실제 구조물의 거동 평

가에 유리한 방법에 대해 검토하였다.

2. 역해석

일반적으로 역해석 문제는 역산법(inverse method)과 직접법(direct method)의 두 가지 방법이 사용되고 있으나, 본 연구에서는 지반의 탄소성 거동을 보다 정확히 반영하기 위해서 직접법을 사용하였다.

직접법은 그림 1과 같이 계측결과와 해석결과를 비교하여 그 차이가 최소가 될 때까지 수치해석 과정의 반복 연산을 통하여 역해석 대상인 미지변수를 수정하는 방법이다. 직접법은 미지변수의 수정과 그에 따른 반복계산과정이 없는 역산법에 비해 계산시간이 많으나, 비선형문제 등 다양한 문제에 적용할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

또한, 직접법을 사용한 역해석에서는 실제 변위와 목적함수의 차이를 최소화하고 미지변수를 보정하는 최적화가 핵심 과정으로, 본 연구가 복수의 지층을 단계별로 역해석하여 각 지반의 미지변수를 역해석하기 때문에 지층 간의 간섭 효과를 최소화 할 수 있는 추가적인 최적화가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 효율적이고 정확한 최적화를 위해서 목적함수의 편미분 계산과정이 없이 최적해를 구할 수 있는 직접탐색법(direct search method)을 사용하였다.

직접법에서의 비선형문제에 대한 최적화기법으로는 경사법(descent method)과 직접탐색법으로 구분된다. 직접탐색법은 목적함수의 도함수 계산이 어려운 경우 주어진 몇 개의 점에서의 목적함수(objective function)의

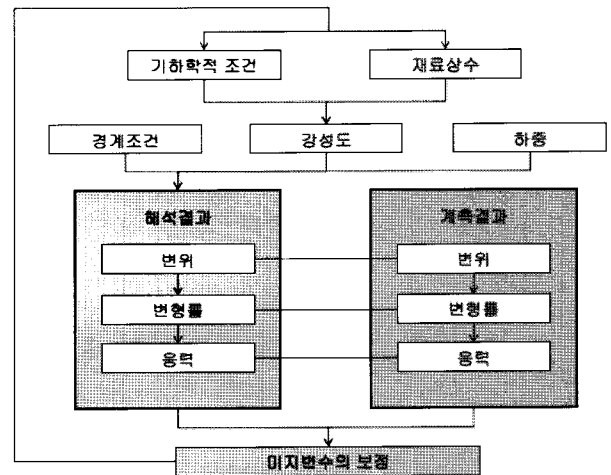


그림 1. 직접법

값을 이용하여 최소점을 찾는 방법이다. 직접탐색법은 목적함수의 도함수 결정 없이 반복계산을 통해 미지변수를 결정할 수 있어 경사법 보다 활용성이 크다 할 수 있다.

3. 목적함수의 최적화

본 연구에서 사용한 직접법은 목적함수인 U_k 와 계산변위 U_k^* 에 의해 구성된 오차함수(error function)을 최소화하는 과정을 통해서 미지변수를 찾아내는 기법이다.

3.1 최적화 과정

목적함수 U_k 와 오차함수는 식 (1), 식 (2)과 같다.

$$U_k = Fn(E, K_0) \quad (1)$$

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

여기서, E 는 탄성계수, K_0 는 정지토압계수, N 은 계측점의 수이고 ξ 는 오차량, ξ_a 는 허용오차범위이다. 식 (2)의 오차함수는 d_k 로 치환하여 식 (3)과 같이 정의할 수 있다. 여기서 $d_k = U_k - U_k^*$ 이다.

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

$$= \{(d_1)^2 + (d_2)^2 + \dots + (d_N)^2\}^{\frac{1}{2}} \leq \xi_a \quad (3)$$

$$\xi \leq \xi_a \quad \text{iff} \quad d_k \cong 0 \quad \text{for} \quad k = 1, \dots, N \quad (4)$$

식 (3)의 오차함수가 허용범위로 수렴하기 위해서는 d_k 의 각각의 크기가 0으로 수렴해야 하는 식 (4)과 같은 필요충분조건을 만족하여야 한다. 따라서, 식 (4)와 같이 오차함수가 허용범위로 수렴하여 d_k 의 각각의 크기가 0으로 수렴한다는 것은 각 계측지점의 계측변위와 계산변위가 거의 일치하게 된다는 것으로 이 때의 미지변수가 최적해가 되는 것이다. 직접탐색법, 간접법과 같은 최적화방법들 초기치로부터 연속적인 반복계산과정을 통하여 최적해로 접근하게 된다. 최적화과정의 수치해석적인 접근방법은 다음과 같다.

(1) 초기점 \vec{X}_1 을 설정한다.

(2) i 번째 반복계산에 대하여, 최적해로 접근하는 적절한 방향 \vec{S}_i 를 정한다.

(3) 방향 \vec{S}_i 를 따라 이동할 step length λ_i^* 를 정한다.

(4) 식 (5)에 따라 새로운 점 \vec{X}_{i+1} 을 구한다.

$$\vec{X}_{i+1} = \vec{X}_i + \lambda_i^* \vec{S}_i \quad (5)$$

(5) \vec{X}_{i+1} 이 최적점(optimal point)인지의 여부를 검토한다. \vec{X}_{i+1} 이 최적점이면 반복연산과정은 종료하나, 그렇지 않으면 $i=i+1$ 로 증가하며 (2) 단계로 돌아가서 반복연산과정이 계속된다.

최적화의 효율성 및 차이점은 설계변수의 크기와 방향을 정의하는 step length λ_i^* 와 search direction \vec{S}_i 를 결정하는 방법에 따라 좌우됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 최적화방법으로 직접탐색법을 사용하였으며 최적화방법의 효율성을 좌우하는 λ_i^* 와 \vec{S}_i 는 계측변위와 계산변위의 변위비를 이용하여 산정하였다.

3.2 보정계수

일반적으로 지하구조체를 수치해석하는 경우, 계산변위는 작용하는 하중을 알고 있는 경우에 지반의 강성

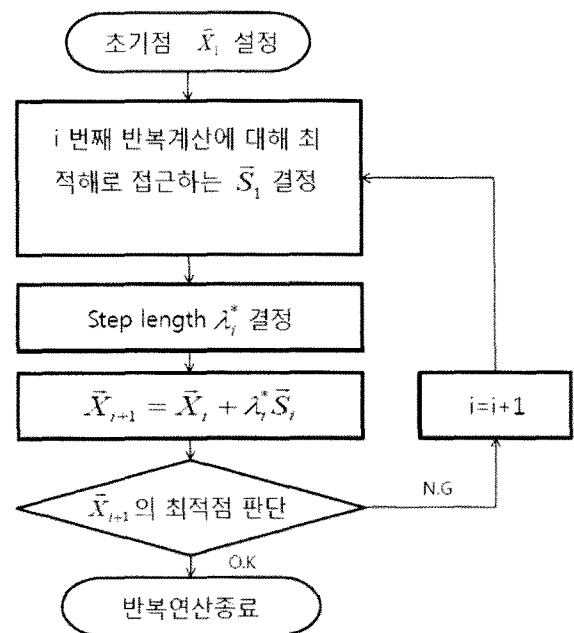


그림 2. 최적화과정 알고리즘

에 의하여 결정된다. 즉, k번째 측점에 대한 계산변위 u_k 는 식 (6)과 같이 지반의 강성을 나타내는 미지변수들의 함수로 나타낼 수 있다.

$$u_k = u_k(E, K_0, \dots) = u_k(\vec{X}) \quad (6)$$

따라서, 직접법의 경우 이러한 미지변수를 보정하여 계산변위가 계측변위에 일치하도록 함으로써 식 (2)의 오차함수가 최소가 되는 최적의 미지변수를 찾아낼 수 있다. 이러한 미지변수를 최적해로 수렴할 때까지 단계마다 보정하는 λ_i^* 는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_i^* = \vec{X}_{i+1}(\beta_i - 1) \quad (7)$$

여기서, β_i 는 보정계수로 계측변위 U_k^* 와 i-1번째 계산변위 u_k^{i-1} 에 의하여 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$\beta_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{u_k^{i-1}}{u_k^*} \quad (8)$$

3.3 수렴기준

최적화과정에서 중요한 부분 중 하나는 최적해에 대한 탐사과정을 종료하는 수렴기준(convergence criteria)을 결정하는 것이다. 수렴기준은 보정계수와 더불어 최적화과정의 효율성 및 신뢰성에 큰 영향을 미친다.

3.3.1 목적함수의 절대값 또는 상대값의 변화량

최적화과정 중 반복연산 횟수로 인하여 최적해로 수렴하는데 많은 시간이 소요되는 경우, 두 가지 수렴기준을 사용하였다. 첫 번째는 연속적으로 반복연산되는 목적함수의 절대값을 비교하는 것으로 이 경우에 수렴기준은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left| F(\vec{X}_i) - F(\vec{X}_{i-1}) \right| \leq \xi_A \quad (9)$$

여기서, $F(\vec{X}_i)$ 는 목적함수, ξ_A 는 절대허용범위이다.

다른 수렴기준은 연속적으로 반복연산되는 목적함수의 상대적인 변화를 비교하는 것으로 이 경우의 수렴기준은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 목적함수의 절대값과 상대값의 변화에 대한 수렴기준의 사용은 목적함수

의 크기에 상관없이 수렴여부를 확인할 수 있다.

$$\frac{\left| F(\vec{X}_i) - F(\vec{X}_{i-1}) \right|}{\left| F(\vec{X}_{i-1}) \right|} \leq \xi_R \quad (10)$$

여기서, ξ_R 은 상대허용범위이다.

3.3.2 설계변수의 변화량

설계변수의 변화량을 수렴기준으로도 목적함수에 대한 수렴기준과 마찬가지로 식 (11)과 같이 수렴여부를 확인할 수 있다.

$$\left| \vec{X}_i - \vec{X}_{i-1} \right| \leq \xi_A \quad (11)$$

식 (9)와 식 (10), 그리고 식 (11)의 모든 수렴기준을 만족하는 것이 최적의 상황이지만, 본 연구에서는 다층지반의 다중 미지변수를 역해석하기 때문에 목적함수의 절대값과 상대값의 변화량을 수렴기준으로 확인하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 설계변수의 변화량을 수렴기준으로 사용하여 다중 미지변수의 미소한 변화가 수렴기준에 영향을 미치지 않도록하고자 한다.

4. 다중 미지변수를 고려한 다층지반 역해석

4.1 다층지반 역해석

본 연구의 실제 연구 대상은 터널의 중심부를 기준으로 2개의 지층으로 구성되어 있으며 터널의 내부 변위를 지배하는 지층인 풍화암층과 연암층을 실제 지하구

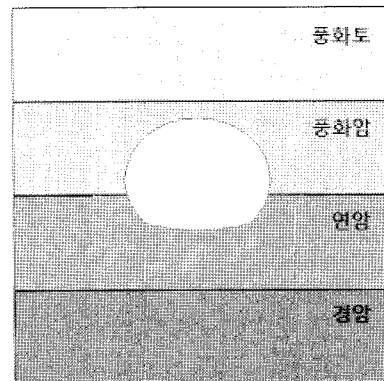
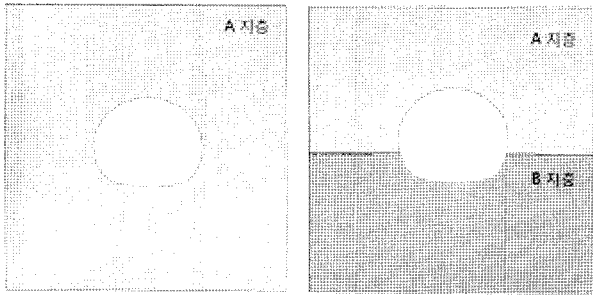


그림 3. 실제 지하구조를 지반조건



(a) 단층 지반 모형 (b) 다층 지반 모형
그림 4. 단층 및 다층지반 모형

조계와 동일한 위치를 기준으로 상부와 하부 지층을 모형화 하였다. 그림 3에서 살펴보는 바와 같이 실제 지하 구조체가 4개의 지층으로 구성된 경우에는 구조체가 존재하는 2개의 지층이 내부의 변위를 지배하게 된다. 그러나 그림 4의 (a)와 같이 단층지반으로 모형화할 경우에는 해당 변위를 모두 만족시키기가 쉽지 않고, 실제 발생하는 지반의 거동을 정확하게 예측하기가 힘들다. 따라서 그림 4의 (b)와 같이 2개의 지층으로 모형화하여 실제 거동에 보다 유사하도록 묘사하였다. 2개 이상의 지층으로 모형화 하지 않은 이유는 해당 지층의 물성을 정확하게 역해석할 수 있는 계측변위가 존재하지 않기 때문이다. 그러나 해당 지층의 지반물성에 지배 받는 계측변위가 존재한다면 2개 이상의 지층을 역해석하는 것도 가능하다.

4.2 목적함수의 미지변수

지하구조체가 포함된 주변 지반을 다층지반으로 환산하여 모형화할 경우에 단일층으로 모형화하는 경우보다 많은 미지변수를 발생시킨다. 즉, 식 (12)와 같은 목적함수의 미지변수의 개수가 입력변수의 개수보다 증가하여 역해석을 실행함에 있어서 문제가 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 초기에 굴착되는 상반부의 지층을 선행 역해석하고, 추가로 굴착되는 하반부의 지층과 기굴착된 상반부의 지층을 동시에 재 역해석하는 단계별 역해석 기법을 사용하였다.

$$U_k = Fn(E_1, K_0^1, E_2, K_0^2) \quad (12)$$

여기서, E_i 는 해당 지층의 탄성계수이고, K_0^i 는 해당 지층의 정지토압계수이다.

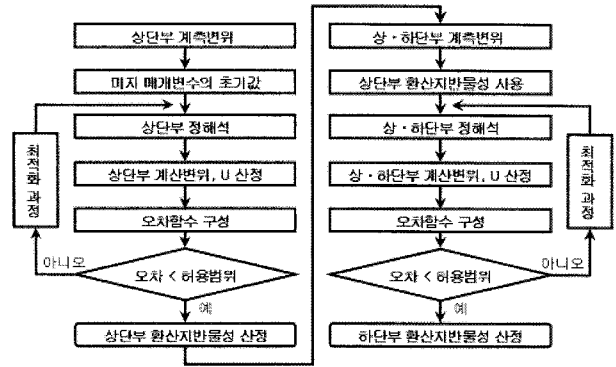


그림 5. 다층지반 역해석 프로그램의 구성

4.3 상호 간섭을 고려한 역해석 기법 구성

지반이 굴착될 때에는 매번 굴착 마다 지반 응력이 재분배되어 최종적인 기하학적 형상으로 수렴한다. 즉 상부의 굴착이 하부의 지반 상태에 미소한 영향을 주며, 다시 하부의 굴착이 상부 지반의 상태에 영향을 주게 된다. 그림 5의 정해석을 위해 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC 2D를 사용하였다. 또한, FLAC 2D 내 프로그램을 확장할 수 있도록 개발된 언어인 FISH 문을 이용하여 역해석 기법을 구성하고, 구축된 최적화 역해석 모듈을 이용하여 반복적인 역해석을 자동으로 실시하고 최적화된 결과를 도출하였다. 또한 해석의 신뢰성을 향상시키기 위해서 유한격자를 1m 내로 구성하고, 정확도를 실제 터널과 동일하게 모형화 하였다. 그림 5에서 살펴본 단계별 역해석의 경우에는 지층 간의 상호 영향을 고려하지 않은 방법으로 산정된 결과는 신뢰도가 부족할 수 있다. 따라서 지층의 미지변수 간 상호 간섭을 고려한 역해석을 반복 실행할 필요가 있다.

4.4 반복 역해석 기법의 적용성 검토

풍화암층을 통과하는 지하철 터널에 대해 다층지반의 단계별 역해석을 진행하고 오차함수를 최소화하는 반복 역해석을 하였다. 본 연구에서 제시한 역해석 기법의 적용성을 검토하기 위해서 총 4개의 대표단면에 대해 역해석을 실시하고 단층지반 역해석과 결과를 비교하여 신뢰도를 확인하였다.

4.4.1 해석모형

터널은 일반적인 3심원(3心圓) 터널이며, 정확한 해석결과를 위해서 수평방향으로 터널 지름의 5배, 연직

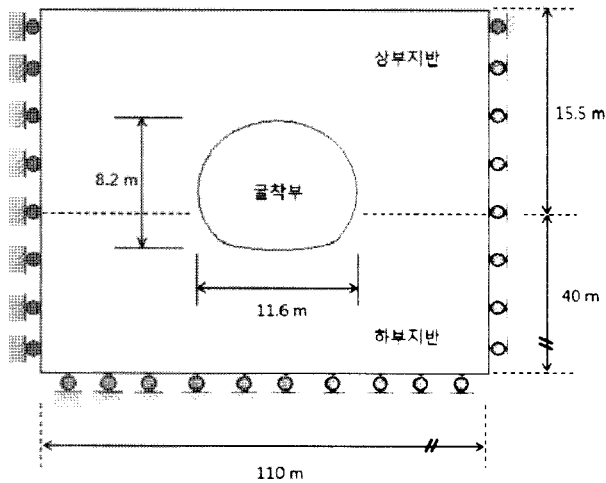


그림 6. 해석 모형

방향으로 4배로 설정하여 일반적 터널해석의 경계조건보다 넓게 설정하여 연구 결과의 신뢰성을 향상하였다. 터널의 수평방향 폭은 11.6m이며, 수직방향 높이는 8.2m이므로 터널의 모델은 R_1 원의 중심으로부터 상부 방향으로 15.5m, 하부 방향으로 40m, 측면으로 55m 모형화하여 경계조건에 영향을 받지 않게 구성하였다. 입력변수의 종류는 천단변위, 상부내공변위, 하부내공변위를 선택하였고, 계산하고자 하는 미지변수는 2개의 지층에서 각각 2개의 지반물성(탄성계수, 정지토압계수)으로 총 4개의 변수를 역해석하였다. 반복 단계별 역해석의

적용성을 검토하기 위하여 분리한 다층지반 모형과 전체를 단층으로 구성한 단층지반 모형을 사용하였다.

4.5 해석결과

시공 중인 터널의 대표단면 중 4개의 단면 A, B, C, D에 대하여 해석을 실시하였다. 단면은 일반적인 도심지 지하철 터널 구조물에서 20m 간격으로 선택되었고, 지층이 다양하게 변화하는 구간으로 1회의 시추(boring)에 의한 정적 지반물성 자료로는 구조물의 안정성을 판단할 수 없기 때문에 역해석이 필요한 구간이었다. 선택된 단면 위치는 그림 7과 같다.

4.5.1 반복연산 횟수의 비교

본 연구에서는 단일층 지반의 역해석과 다층 지반의 역해석 결과를 비교하기 위하여 역해석이 수렴하는 형상과 반복해석 횟수를 분석하였다. 표 1에서는 선택된 대표단면 중에 A단면의 최적화 수렴형상과 반복연산 횟수를 나타내었다. 단일층 지반 역해석의 경우에는 15회의 최적화 연산과정 후에 수렴하였고, 다층 지반 역해석의 경우에는 상반부에서 9회, 하반부에서 8회의 반복 연산 시간이 소요되었다. 그러나 다층 지반 역해석의 경우에는 지층 사이의 상호 간섭 효과를 제거하기 위해서

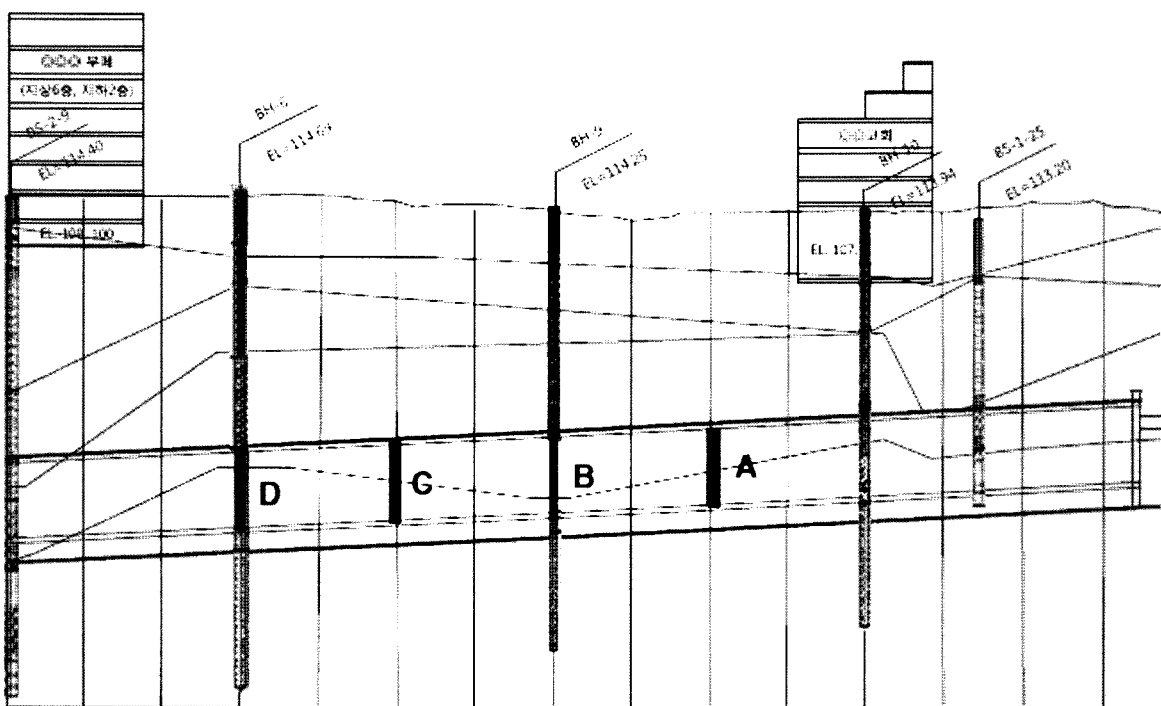
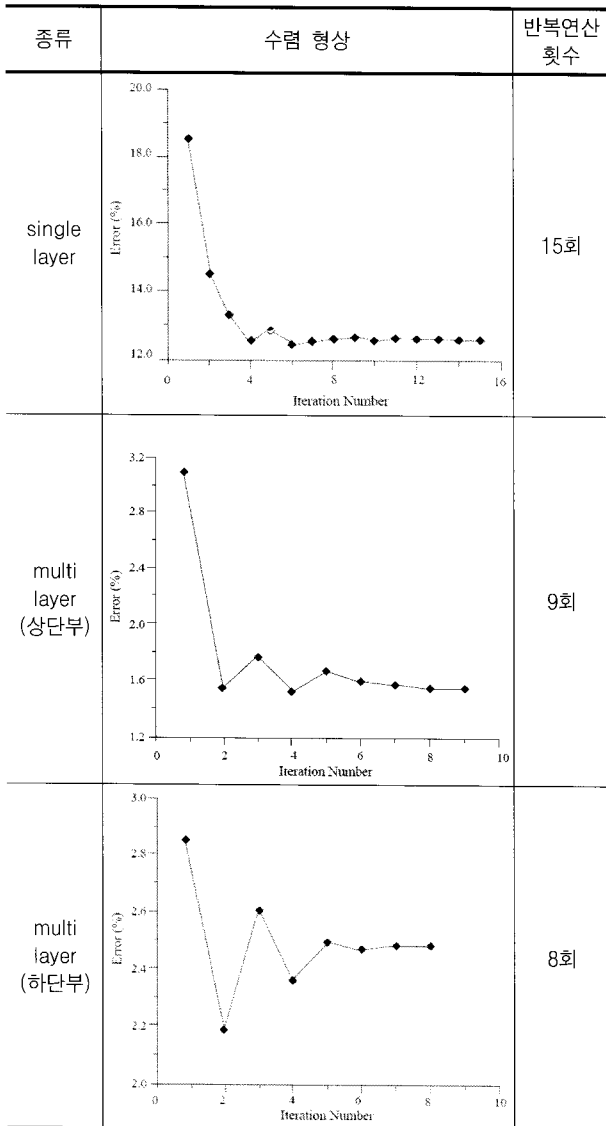


그림 7. 해석 단면의 위치

표 1. A section의 수렴형상 및 반복연산 횟수



상, 하부의 연산을 다시 실시하므로 17회의 2배인 34회 정도의 반복연산을 소요하였다.

4.5.2 변위의 검증

단일층 역해석이 다층지반 역해석에 비해 경제적이고 신속하지만 두 경우 모두 목적함수가 수렴된 경우에서 계산 변위의 차이가 발생하며, 그 오차는 표 2와 표 3, 표 4와 같이 단일층 역해석의 결과가 다층지반 역해석의 결과보다 크다.

표 3을 살펴보면 단일층 역해석의 경우 변위와 비교해서 10% 내외의 오차를 나타내고 있으며, 다층지반 역해석의 경우에는 총 변위에 비교해서 약 1%의 오차를 보인다. D 단면의 경우에는 단일층 역해석의 치명적인 결점을 나타내는 단면으로 기하학적으로 단일층으로는

표 2. 천단변위 비교

section	single-layer		multi-layer	
	disp. (mm)	error (%)	disp. (mm)	error (%)
A	1.736	8.7	1.94	2.1
B	1.619	10.0	1.813	0.7
C	1.377	8.2	1.517	1.2
D	0.9775	30.2	1.402	0.1

표 3. 상부내공변위 비교

section	single-layer		multi-layer	
	disp. (mm)	error (%)	disp. (mm)	error (%)
A	1.512	8.0	1.392	0.55
B	1.405	8.1	1.293	0.52
C	1.186	7.9	1.083	1.51
D	0.802	14.6	0.6924	1.09

표 4. 하부내공변위 비교

section	single-layer		multi-layer	
	disp. (mm)	error (%)	disp. (mm)	error (%)
A	3.066	4.2	3.163	1.15
B	2.978	0.74	2.958	1.4
C	2.397	4.13	2.502	0.1
D	2.586	36.1	1.886	0.72

지층을 모형화할 수 없다는 것을 알 수 있다.

내공변위의 경우에서도 천단변위와 유사하게 단일층 역해석의 경우는 일반적으로 총 변위에 비교해서 4% 이상의 오차를 띄며, 다층지반 역해석의 경우에는 총 변위에 비교해서 1% 내외의 오차를 나타낸다. 또한, D 단면은 기하학적 결점으로 단일층 역해석에서 큰 오차를 보인다.

위의 결과로부터 본 연구에서 제안된 다층지반의 경계부에 위치한 지하구조물의 거동 및 지반물성의 역해석 기법이 지층구조물의 실제거동을 예측하는데 보다 높은 수준의 신뢰성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 굴착이 진행되고 있는 다층지반 내 지하구조체의 안전한 시공을 위해서 필요한 지반물성을 역해석 하였다. 이를 위해서 계층 변위를 입력변수로 사용하고 다층지반 지하구조체의 단계별 역해석 과정에서 발생하는 지층간의 상호 영향을 최소화할 위해 반복적으로 단계별 역해석을 적용하여 최종적으로 다층지반의 미지변수를 얻는 과정을 실시하였다.

본 연구는 각각의 시공단면상의 천단, 상부내공, 하부내공변위를 단일층으로 모형화하여 얻은 값과 다층으로 모형화하여 얻은 값을 비교하였다. 실측변위에 대해 단일층의 경우 약 10% 가량의 오차비율을 가지며 최대 36.1% 오차를 보이므로(D, 하부내공변위) 단일층 역해석은 부적합한 것으로 판단할 수 있다. 반면 다층 모형화 경우 약 1% 내외의 오차범위를 가져 지하구조체의 거동을 보다 정확히 나타낼 수 있었다.

일반적으로 연구되는 다층지반의 역해석과 달리 본 연구는 지하구조체가 위치한 층을 다층으로 고려하였고 이는 지하구조체에 발생하는 거동을 보다 정확히 표현하여 현장에서 필요한 지반의 상태를 높은 신뢰성으로 역해석 할 수 있게 하였다. 또한 단계별 역해석된 미지변수의 상호 간섭 오차를 줄이기 위해 반복적인 단계별 역해석을 수행함으로써 해석의 정확성을 높였다.

본 연구에서는 지하구조물을 다층지반의 경계층에 위치하도록 모형화하였고, 이에 따른 지반과 지하구조물의 상호거동을 실측변위를 이용해 평가함으로써 다층지반 해석조건이 복잡하고 간섭오차가 클 수 있는 경우에 대해서도 지하구조물의 거동을 표현, 예측하기 위해 역해석방법이 유효함을 보였다. 이에 근거해 볼 때 해당 지층의 물성에 지배 받는 계층변위만 존재한다면

실제 현장의 지층 구성과 일치되는 세 층 이상의 다층지반도 정확하게 역해석 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 김문겸, 장정범 (1995), 유한요소와 경계요소의 조합에 의한 지하구조체의 정해석 및 역해석, *대한토목학회논문집*, Vol.15, No.6.
2. 권호진, 변광욱 (1993), 지반응력변형과 지하수침투 해석에 대한 연성해석 및 역해석-역해석기법을 이용한 지반변형 해석, *한국지반공학회지*, Vol.9, No.1.
3. 이승훈, 김종민, 김수일, 장범수 (2002), 다층지반에 근입된 흙막이 벽의 역해석에 관한 연구, *한국지반공학논문집*, Vol.18, No.1, 2002.
4. 이승원, 윤경구, 김지원, 유태석 (2002), 콘크리트 포장의 구조해석, *도로*, Vol.4, No.2, 2002.
5. Jakob Likar, Vladimir Vukadin (2003), "Time-Dependent Back Analysis of a Multianchored Pile Retaining Wall", *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, pp.91, 129.
6. Roberto F. Azevedo, Alexandre B. Parreira, Jorge G. Zornberg (2002), "Numerical Analysis of a Tunnel in Residual Soils", *J. Geotech. And Geoenviron. Engrg.*, pp.128, 227.
7. S. Jiang, Y. Zhao (2004), "Study on monitoring and back analysis of road tunnel with complex geology", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*.
8. Li Wen-Xiu, Li Hai-Ning (2009), "FSMs for analysis of rock mass displacement caused by underground mining in soft rock strata", *Expert Systems with Applications* 36 (2009), 4637-4645.

(접수일자 2009. 7. 2, 심사완료일 2009. 9. 3)