

하저터널에서 상대내공변위 계측을 통한 지반정수 예측 Geotechnical parameter estimation in underwater tunnel using relative convergence measurement

김도훈¹⁾, Do-Hoon Kim, 장재혁²⁾, Jea-Hyuck Jang, 이인모³⁾, In-Mo Lee

- 1) 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea University
- 2) 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea University
- 3) 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea University

SYNOPSIS : If a tunnel is constructed below the groundwater level, the groundwater flow will occur inducing the seepage force toward the tunnel and will result in the increase of tunnel convergence. The longitudinal deformation during tunnel excavation will also be increased due to seepage pressure. A back-analysis methodology in underwater tunnel was proposed in this study based on the relative longitudinal deformation measured in-situ. Geotechnical parameters can be estimated utilizing the proposed method where the prior estimate as well as the measured convergence can be reasonably combined by adopting the Extend Bayesian Method.

Key words : Underwater tunnel, Seepage, Back-analysis, Parameter estimate, Relative convergence

1. 서론

하저터널에서 지하수의 이동으로 발생하는 침투력은 터널의 굴착과 굴착 후 터널의 안정에 영향을 미치는 지반의 중요한 요소이다. 이러한 터널의 안정은 종단변형곡선, 지반반응곡선, 지보재 특성곡선의 3대요소로 구성되는 내공변위 제어법에 의해 터널 굴착으로 인하여 발생하는 변위를 제어함으로써 유지될 수 있다. 여기서, 종단변형곡선은 지보재가 설치되지 않았다는 가정하에서 터널의 막장을 중심으로 터널굴착방향으로 막장 전후방에 대한 내공변위의 변화를 나타낸 것이고, 지반반응곡선은 터널의 내압을 지반압에서부터 감소시키며 내공변위의 변화를 나타낸 것이다. 마지막으로 지보재 특성곡선은 터널의 내공변위가 증가함에 따라, 지보재에 가해지는 지보압의 변화를 보여주는 곡선이다. 내공변위 제어법에서의 세가지 곡선은 터널의 안정성을 제어하는 중요한 요소로써 많은 연구가 수행되어져왔고, 특히 지하수에 의한 침투력이 작용할 때에 지반반응곡선에 대한 연구가 Lee 등(2006)에 의해 수행되었다. Lee 등(2006)의 연구결과에서는 지하수가 존재하는 경우 건조상태에 비해 변위가 크게 발생하고, 지하수위가 높아질수록 변위의 증가가 커짐을 확인하였다. 이러한 지하수의 침투력으로 인한 변위의 증가는 내공변위 제어법의 한 요소인 종단변형곡선에도 영향을 미치는 자명한 사실일 것이다.

또한, 터널 설계의 중요한 요소인 대상지반의 공학적인 특성을 파악하기 위한 연구가 이루어져 왔으며, Cho 등(2006)는 종단변형곡선에서 실제 계측이 가능한 상대변위 곡선과 초기 예측치 및 계측치로부터 예측된 값을 합리적으로 조합하는 확장 Bayesian 방법(EBM)과 최적모델의 산정을 위한 Akaike Information Criterion(AIC)을 이용한 역해석 기법을 제안하였다.

본 연구에서는 기존에 지반의 공학적인 특성을 구하기 위해 Cho 등(2006)이 제안한 역해석 기법의 검증이 지하수를 고려하지 않은 지반에서 수행되어졌음을 감안하여, 역해석 기법을 하저터널에 적용하

여 그 적합성을 파악하고자 한다. 역해석 기법의 적합성을 판단하기 위하여 하저터널에서 지하수의 이동에 의한 침투력이 고려된 상대변위곡선을 파악하였다. 이러한 상대변위곡선은 가상지반을 형성하고 가상지반에서의 터널 시공에 의한 종단변형곡선에서부터 획득하며, 이를 역해석 기법에 적용하여 하저터널에서의 역해석에 의한 지반 특성치를 산정하였다.

2. 하저터널에서의 종단변형곡선의 산정

2.1 개요

지반 공학에서 지하수가 존재하는 경우에는 전응력이 유효응력과 수압인 두가지 요소로 이루어져 터널에 작용하는 응력체계가 달라지게 된다. 따라서 하저터널과 같이 수위가 지표위에 존재하여 터널의 굴착에 따른 지하수위의 변화없이 항상 지하수위가 지표면인 경우에 배수터널에서는 터널의 중심부로 정상류의 투수가 계속하여 발생하는 경우로 대상 지반 경계부에는 유효응력과 수압이 전응력으로 작용하며, 지반에서는 유효응력과 침투수압이 전응력으로 작용하게 된다. 본 연구에서는 정상류 지하수의 흐름에 의해 작용하는 침투수력이 터널의 종단변위곡선에 미치는 영향을 판단하기 위해 연계해석이 가능한 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON-3D를 이용하였다.

지반의 단위체적 내에서 작용하는 침투력은 $i\gamma_w$ 와 같이 동수경사(i)와 지하수의 단위중량(γ_w)로 표현할 수 있으며, 침투력의 산정을 위해서는 지하수의 흐름방정식에서부터 터널 주위의 전수두 분포를 산출하여야 한다. PENTAGON-3D (1998)에서는 기본 흐름방정식으로 식(1)과 같은 Darcy의 법칙을 따르며, 포화된 지반의 정상류 조건에서의 흐름 지배방정식은 식(2)와 같이 표현된다.

$$q = ki \quad (1)$$

여기서 q 는 침투수량, k 는 투수계수, i 는 동수경사이다.

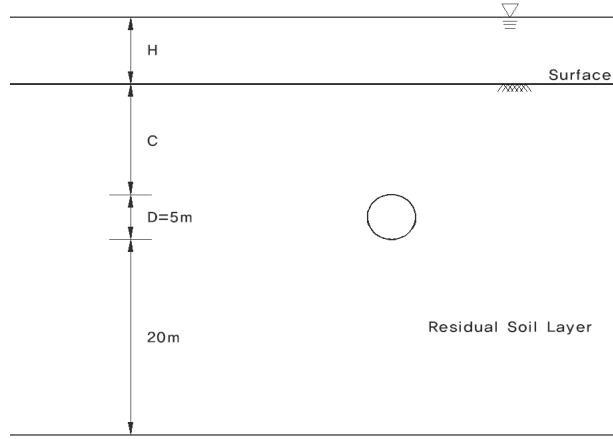
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

여기서, h 는 전수두, k_x, k_y, k_z 는 투수계수이다.

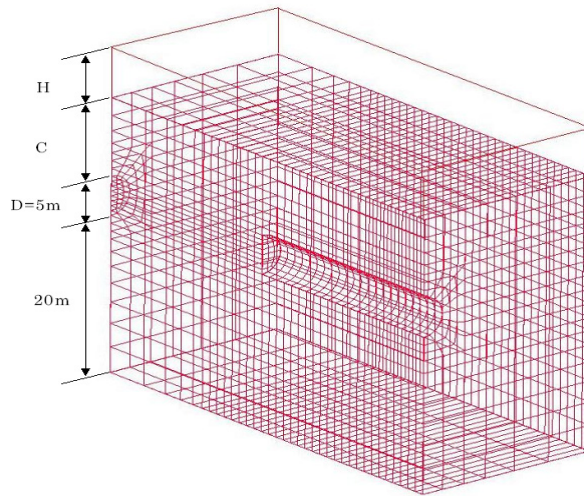
침투해석에서 구해진 전수두로써 압력수두를 구하고, 간극수압을 산출하였다. 산출된 간극수압과 유효응력을 고려하여 연계해석을 실시하였다. 일반적으로 물은 전단응력을 받을 수 없으므로 유효 전단력은 총 전단응력과 같으며, 응력체계는 침투수압과 유효응력으로 지반에 작용하게 된다. 이를 Hooke의 법칙에 의해 연계하여 해석을 수행하게 된다. 본 장에서는 지표면의 수위의 변화에 따른 해석을 실시하여 수위 변화에 따른 종단변위곡선을 산출하였다.

2.2 종단변형곡선 및 상대변위곡선 산정

하저터널에서 종단변형곡선을 산정하기 위하여 그림 1에서 보인바와 같이 대상지반을 설정하였다. 터널직경(D)는 5.0m로 원형으로 계획하였다. 지하수 이동에 의한 침투력의 고려 여부에 따른 비교를 수행하기 위해 건조한 지반에서의 해석과 수위에 따른 변화를 검토 조건으로 선정하였다. 터널천단에서 지표까지는 C로 하였고, 지표면에서의 수위를 H로 하여 표 1과 같이 변화하여 15가지 조건으로 해석을 수행하였다. 그림 1(a)로 가정한 지반을 그림 1(b)와 같은 해석 요소망으로 형성하여 영향을 분석하였다. 횡방향과 종방향 투수계수는 동일한 것으로 가정하였다.



(a) 지반 개요



(b) 적용 해석 요소망

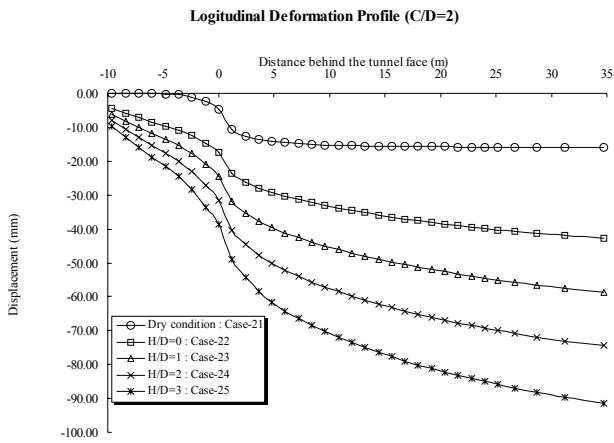
그림 1. 해석에 사용한 가상 지반

표 1. 종단변형곡선 산정을 위한 해석 조건

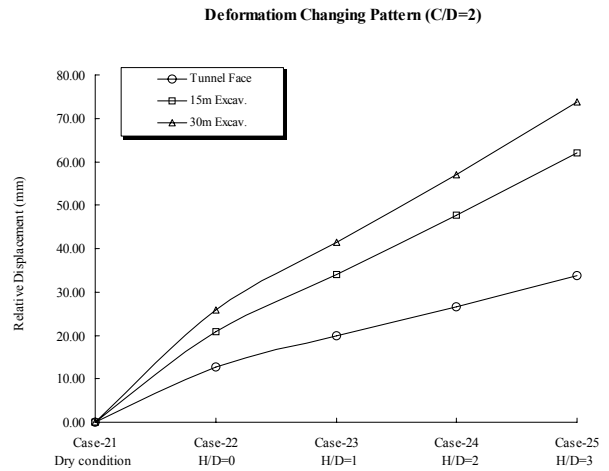
| 구분 | Dry Condition | H/D | | | |
|---------|---------------|---------|---------|---------|---------|
| | | H=0m | H=5m | H=10m | H=15m |
| C/D = 2 | Case-21 | Case-22 | Case-23 | Case-24 | Case-25 |
| C/D = 3 | Case-31 | Case-32 | Case-33 | Case-34 | Case-35 |
| C/D = 4 | Case-41 | Case-42 | Case-43 | Case-44 | Case-45 |

표 1에서의 조건으로 해석을 수행하여 예측된 종단변형곡선은 그림 2~4와 같다. 산정된 종단변형곡선은 그림 2~4의 (a)로 나타내었다. 막장면(계측위치), 막장전방 15m굴착후(계측위치에서 전방 15m 굴착), 30m굴착후(계측위치에서 전방 30m 굴착)의 변위결과에서 각 C/D조건에서의 건조 상태의 변위결과를 제외하고 표현한 값은 그림 2~4의 (b)와 같다.

그림 2~4의 (a), (b)에서 건조한 지반과 침투수력이 고려된 지반의 비교에서는 침투력이 고려된 종단 변형곡선이 상당한 증가를 보인다. 또한, 수위(H)가 증가함에 따라 종단 변위는 증가함을 보인다. 특히, 그림 2~4의 (b)에서 C/D조건별 Case-1과 Case-2의 변위 차이는 막장면과 15m, 30m 굴착후의 결과 모두 나머지 Case-2, 3, 4, 5의 변화에 비해 큰 값을 도출하였고, 수위(H)의 증가에 의한 침투수력의 증가는 선형적으로 나타났다.

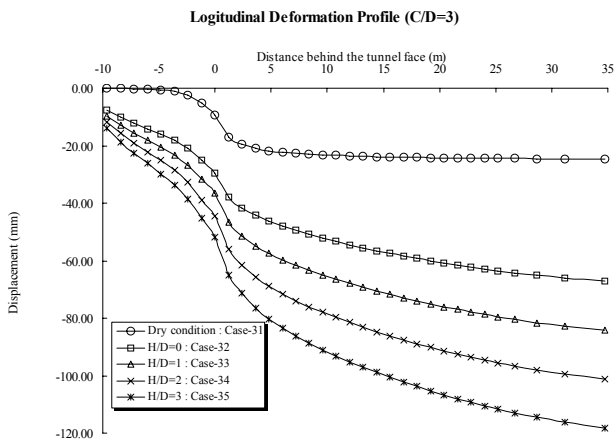


(a) 조건별 종단변형곡선

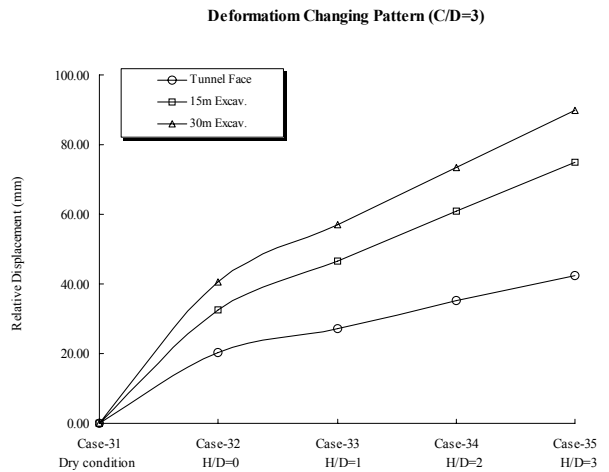


(b) 조건별 변위경향

그림 2. 수위에 따른 종단변형곡선의 변화 (C/D=2)

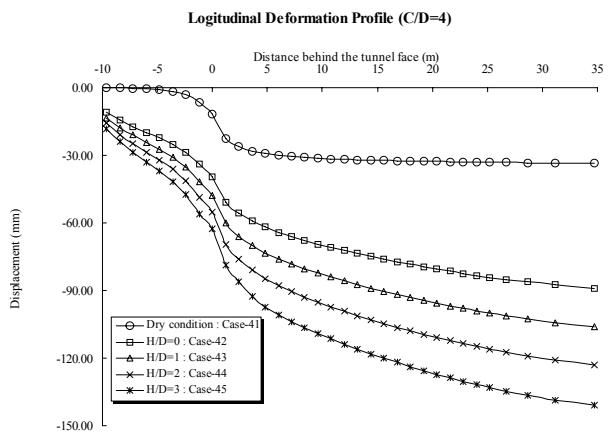


(a) 조건별 종단변형곡선

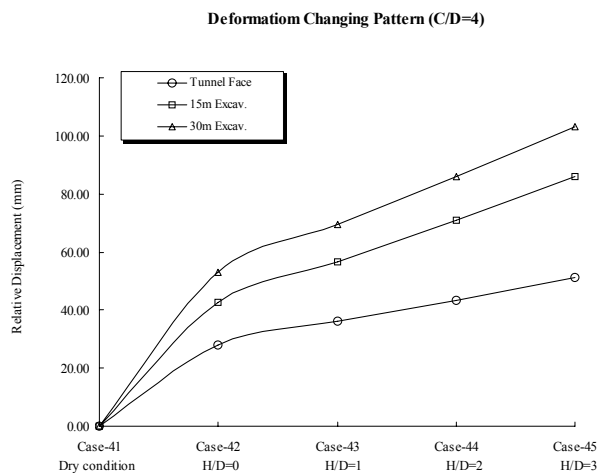


(b) 조건별 변위경향

그림 3. 수위에 따른 종단변형곡선의 변화 (C/D=3)



(a) 조건별 종단변형곡선



(b) 조건별 변위경향

그림 4. 수위에 따른 종단변형곡선의 변화 (C/D=4)

터널 막장면에서 침투수력에 의한 종단변위곡선의 변화를 종합하여 그림 5로 정리하였다. 그림 2~4(b)의 결과와 같이 그림 5에서도 Case-1과 Case-2 변위의 변화가 크게 나타남을 보인다. 수위(H)의 증가에 따른 변위의 증가는 Case-2, Case-3, Case-4, Case-5의 변화로 나타난다. 수위 증가에 따른 변위의 차이는 조건에 따라 다르지만, 각 조건별로 선형적으로 증가하고 기울기는 비슷하게 나타난다. 이는 터널 천단에서부터 지표면까지 거리인 C의 증가에 의해 침투수력이 터널 주변의 소성영역의 확장과 수위의 증가에 변화되는 것으로 판단되며, 이후 침투수력의 선형적인 증가는 일정한 수위(H)의 증가에 의한 전수두의 증가로 인해 나타나는 것으로 판단된다.

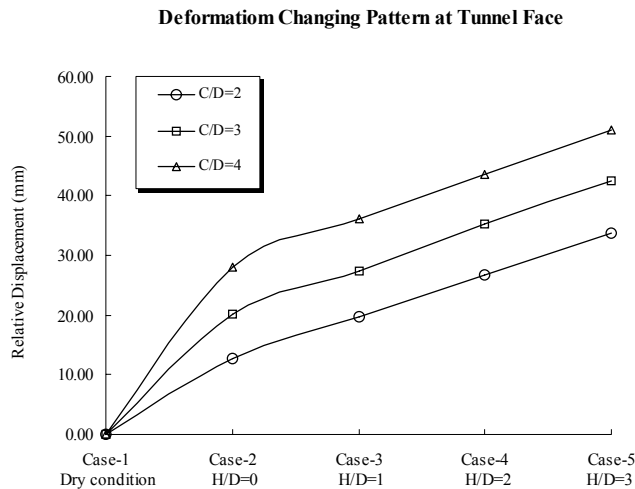


그림 5. 막장에서의 C/D 변화에 따른 변위 변화 경향

3. 역해석 기법 이론

개발된 역해석 기법은 주관적인 정보와 객관적인 정보의 효과적인 조합이 가능한 확장 Bayesian 방법(Extended Bayesian Method, EBM)과 이를 사용할 때에 요구되어지는 최적의 β 를 산정하기 위한 Akaike 정보 기준을 사용하였다. 또한, 터널 내공변위에서 현장에서 계측 가능한 상대변위를 사용하여 역해석을 수행한다.

3.1 확장 Bayesian 방법

확장 Bayesian 방법은 계측모델(observational model)과 사전 정보모델(prior information model)로 구성되며, 예측값과 계측값의 관계를 설정하는 계측 모델은 식(3)과 같이 나타난다(Honjo 등, 1994a; Honjo 등, 1994b).

$$u^{*k} = u^k(x|\theta) + \epsilon^k \quad (3)$$

여기서, u^{*k} 와 u^k 는 k 번째의 관측값과 예측값을 나타내며, x 는 알고 있는 입력값, ϵ^k 는 k 번째에서의 오차벡터 θ 를 분석하는 지반정수 벡터이다. ϵ^k 가 정규분포를 따르면, 계측값의 분포는 다변수의 정규분포를 가지게 된다.

사전 정보모델은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = p + \delta \quad (4)$$

여기서, p 는 초기 예측된 지반정수의 평균값, δ 는 사전 정보의 불확정성을 나타낸다. 사전정보의 분포도 정규 분포로 표현이 가능하다. 최적의 θ 값은 EBM의 목적함수로 표현되는 식(5)를 최소화하며, 식(5)는 식(6)으로 간단히 표현된다.

$$J(\theta|\beta) = \sum_{k=1}^K \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}^T V_u^{-1} \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\} + \beta(\theta - p)^T V_p^{-1}(\theta - p) \quad (5)$$

여기서, K 는 측정 총 개수, p 는 정규분포를 따를 경우 지반정수 θ 의 평균값, V_p 는 지반정수 θ 의 공분산 행렬, V_u 는 오차백터 ϵ^k 의 공분산 행렬, β 는 불확실성의 크기를 나타내는 스칼라양이다.

$$S_{EBM} = J_o + \beta J_p \quad (6)$$

여기서, $J_o(\theta) = \sum_{k=1}^K \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}^T V_u^{-1} \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}$ 로, $J_p(\theta) = (\theta - p)^T V_p^{-1}(\theta - p)$ 로 표현된다. 즉, 확장 Bayesian 방법은 객관적인 정보 J_o 와 주관적인 정보 J_p 간의 상대적인 가중치를 스칼라 양 β 를 통하여 조절하여 조화되지 않은 두 정보의 적절한 조절이 가능하다.

3.2 Akaike Information Criterion(AIC)에 의한 최적 모델 선정

적절한 모델을 선정하기 위해서 확장 Bayesian 방법은 AIC를 사용한다. AIC를 이용하여 최적의 모델을 선정하기 위해서는 로그-라이크후드(log-likelihood)로 나타내어지는 식(7)을 최소화하는 β 를 선택함으로써 이루어진다. AIC 값은 식(8)로 표현된다(Honjo 등, 1994a; Honjo 등, 1994b).

$$l(\beta|u^*, p) = \ln\{\beta|u^*, p\} \cong -\frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{\beta | V_p^{-1}}{\sum_{k=1}^K X^{(k)T} V_u^{-1} X^{(k)} + \beta V_p^{-1}} \right\} + const. \quad (7)$$

$$AIC = -2 \ln\{\beta|u^*, p\} + 2(\text{Number of hyper-Parameters model}) \quad (8)$$

식(8)에서 첫 번째 항은 모델에 대한 계측값의 적합성을 의미하며, 두 번째 항은 hyper-parameter의 개수를 의미한다. Bayesian 접근법을 이용하여 지반정수를 평가할 경우, 최적모델 선정은 식(8)에서 AIC 값이 최소화되는 경우로부터 선정된다.

3.3 상대변위곡선

일반적으로 터널 굴착으로 인한 변형은 지반 조건에 따라 터널 막장 전방으로 약 1~3D (D는 터널 직경)의 거리에서부터 발생하여 터널 막장이 기준 단면으로부터 약 3D만큼 전진한 뒤 거의 일정하게 수렴한다. 이러한 지반의 변형특성곡선은 그림 6과 같은 형태를 보이며, 막장도달 전에 발생한 선행 변형량과 막장 굴착시 발생한 변형량은 계측이 곤란하다. 결국, 계측을 통해서 확인할 수 있는 변형량은 터널의 절대변위가 아닌 것이다.

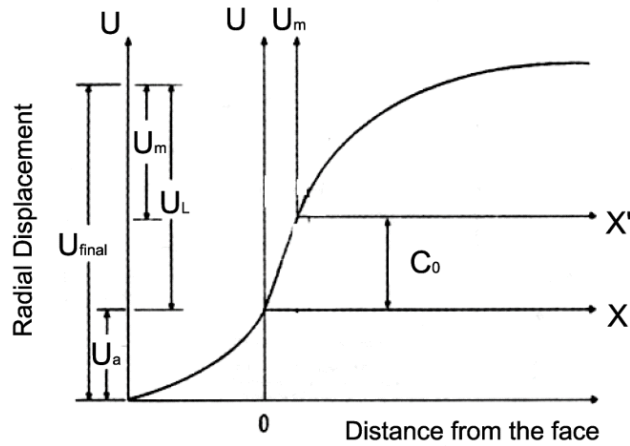


그림 6. 막장에서의 변위 경향

그림 6에서 U_{final} 은 터널의 전체변형량이며 절대변위라 표현된다. U_{final} 은 계측변위 U_m , 계측이 이루어지기까지의 손실인 C_0 , 막장 도달전 발생한 선형 변형량 U_a 으로 구성된다. Cho 등(2006)에 의해 개발된 역해석 기법은 일반적인 현장에서 계측이 어려운 선형변위인 U_a 와 막장 굴착후 계측이 수행되기 전에 발생한 변위 C_0 을 제외한 계측변위 U_m 을 적용하였다. 이러한 계측변위(상대변위)의 적용은 역해석에서의 절대변위를 사용하였을 때 발생가능한 오차를 감소하였다.

4. 하저터널에서의 역해석 기법 적용

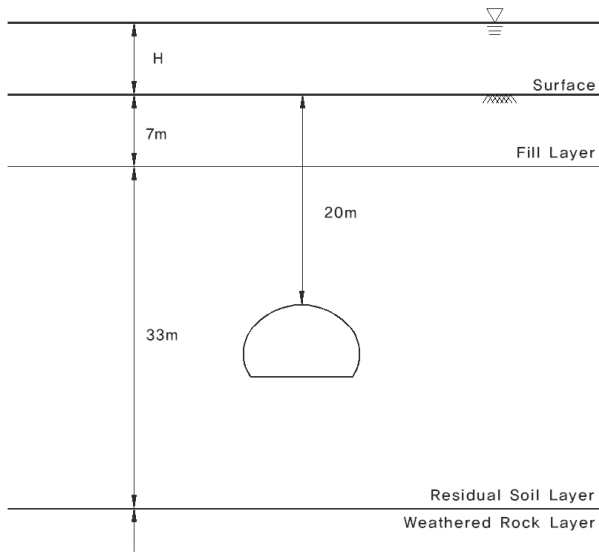
본 연구에서는 하저터널의 상대변위를 통한 역해석의 적용성 판단을 위해 가상의 지반을 설정하고, 가상지반에 대한 역해석을 실시하였다. 가정한 지반의 계측자료가 존재하지 않기 때문에 수치해석을 수행하여 발생한 변위를 실제 계측치로 가정하고 이를 적용하였다. 또한 침투수력의 고려 유무에 따른 역해석을 실시하고, 예측된 지반정수를 비교하였다.

4.1 가상지반의 상대변위곡선 산정

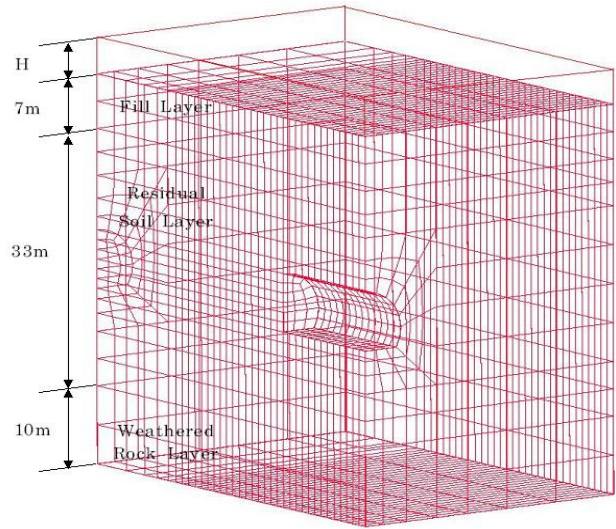
하저 지하공간 개발에서 발생하는 지하수이동에 의한 침투수력이 작용하는 지반의 계측치를 획득하기 위해 수치해석을 실시하였다. 가정한 지반은 그림 7(a)와 같이 3개의 지층으로 이루어져있으며, 터널은 잔적토에 설치되는 것으로 가정하였다. 내공변위는 실제 계측이 가능한 시점을 고려하여 계측위치에서 다음 막장의 굴착후를 계측 시점으로하여 막장 후방에 대하여 상대변위를 산정하였다. 각 지층에 적용된 대표지반의 정수는 표 2와 같고, 앞선 중단변형곡선 산정의 해석과 같이 횡방향과 종방향의 투수계수는 동일하게 적용하였다. 수치해석 요소망은 그림 7(b)로 표현하였다.

표 2. 단면의 지반정수

| | E (MPa) | μ | γ (kN/m ³) | K_0 | c(kPa) | Φ (degree) | k(cm/sec) |
|-----|---------|-------|-------------------------------|-------|--------|-----------------|-----------------------|
| 매립토 | 19.62 | 0.35 | 9.81 | 0.5 | 9.81 | 30 | 1.00×10^{-6} |
| 잔적토 | 49.0 | 0.33 | 18.64 | 0.5 | 34.3 | 33 | 1.00×10^{-6} |
| 풍화암 | 196.2 | 0.23 | 21.58 | 0.5 | 49.05 | 35 | 2.04×10^{-4} |



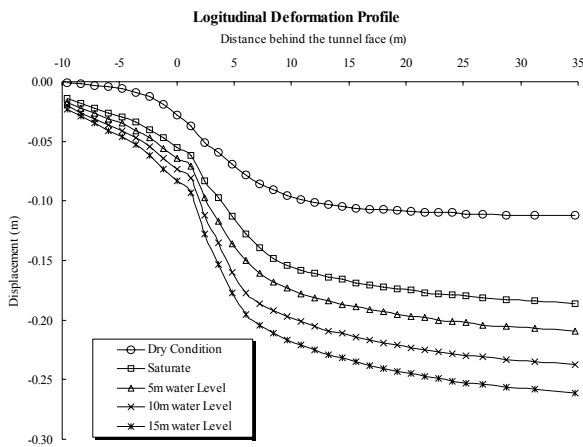
(a) 지반 개요



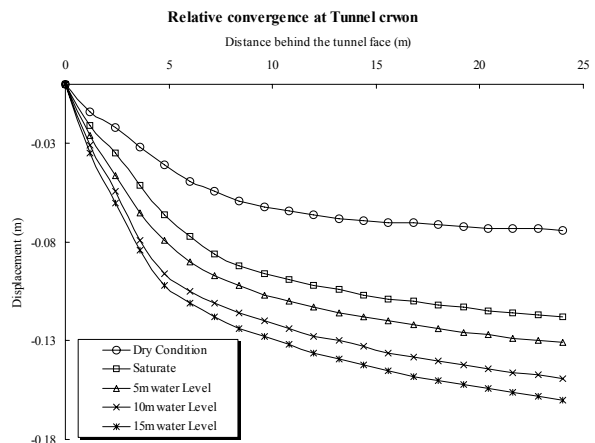
(b) 적용 해석 요소망

그림 7. 가상지반 개요 및 해석 요소망

수치해석은 앞에서 침투력의 유무와 수위의 변화에 따른 종단변형곡선과의 비교를 위해 수위(H)를 0~10m로 변화하여 수행하였다. 가상지반에서의 수치해석결과 종단변형곡선은 그림 8(a)로 나타나며, 이는 앞에서 산정한 종단변형곡선과 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 그림 8(b)는 막장후방의 굴착으로 인한 계측치(상대변위곡선)를 종단변형곡선으로부터 산정하여 나타낸 것이다. 수위(H)에 따른 종단변형곡선 및 계측치의 변화는 수두증가로 인한 침투력에 증가로 나타나는 것으로 판단되어 지반정수의 산정을 위해 수행될 역해석에서는 수위(H)가 5m인 경우를 선택하여 적용하였다.



(a) 종단변형곡선



(b) 상대변위곡선(계측치)

그림 8. 가상지반의 종단변형곡선 및 상대변위곡선(계측치)

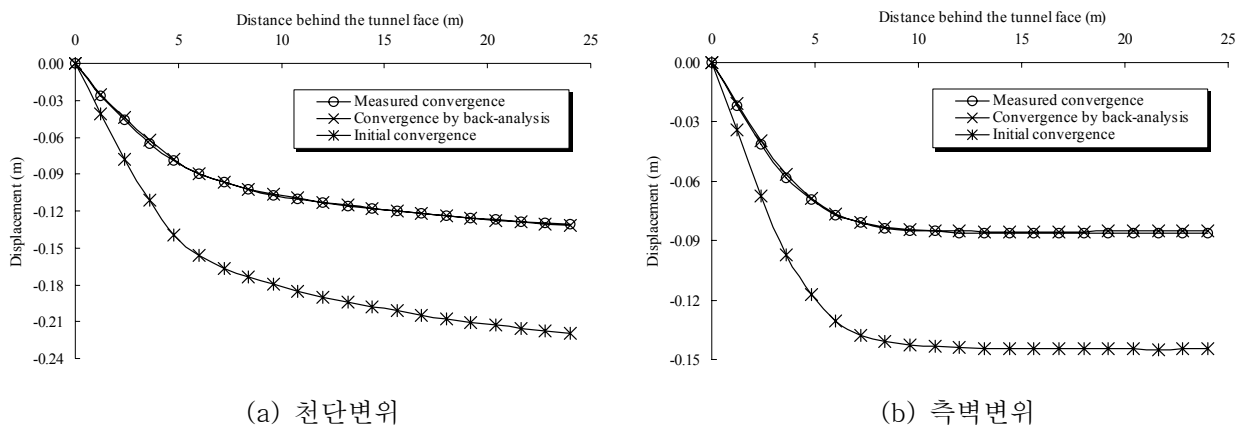
4.2 지반정수 산정

4.2.1 E, K_0 예측

하저터널의 굴착에 의한 전수두의 차이로 발생하는 침투력의 고려 여부에 따라 두가지의 경우로 역해석을 실시하고 지반 정수를 예측하였다. 앞에서 밝힌 바와 같이 수위가 5m인 경우의 계측치를 이용하여 역해석을 수행하였고, 개발된 역해석기법을 적용하여 지반물성을 산정하였다. 사전정보는 가상지반에서 상대변위 산정을 위해 적용한 표 3에 제시된 지반물성이며, 초기값은 임의적으로 선택하여 적용하였다. 지반물성 중 E, K_0 를 예측변수로 하여 산정하였다.

표 3. 조건에 따라 예측된 지반정수

| 구분 | 침투력 미고려 | | 침투력 고려 | |
|--------|-----------|-------|-----------|-------|
| | E (MPa) | K_0 | E (MPa) | K_0 |
| 사전정보 | 49.0 | 0.5 | 49.0 | 0.5 |
| 초기값 | 49.0 | 0.7 | 29.4 | 0.7 |
| 역해석 결과 | 42.0 | 0.74 | 51.1 | 0.46 |



(a) 천단변위

(b) 측벽변위

그림 9. 가상지반에서의 상대변위 예측 결과 (침투력 고려)

침투력에 고려 유무에 따른 역해석을 통하여 예측된 지반정수 E, K_0 는 표 3과 같이 나타났다. 침투력을 고려하지 않은 경우 예측된 지반정수는 사전정보와 비교하여 다르게 예측됨을 보였다. 이는 침투력으로 인한 내공변위가 침투력이 고려되지 않은 지반과 비교하여 크기 때문에 변형계수는 실제 가정한 지반정수보다 작은 값을 도출하였다. 또한, 침투력은 측압계수와 상관없이 등방으로 작용하여 천단과 측벽의 내공변위를 증가시키므로 이를 반영하기위해 상대적으로 측압계수가 증가한 것으로 보인다. 침투력을 고려한 역해석에서 예측한 지반정수는 사전정보와 흡사하게 산출되었다. 이는 침투력을 고려하면 그렇지 않은 경우와 달리 적절한 물성에 예측이 가능함을 보이는 것이라 판단된다. 그림 9는 역해석 결과인 상대변위 곡선의 변화를 나타낸 것이다. 역해석의 수행으로 초기의 변위가 계측값으로 수렴해 감을 보인다.

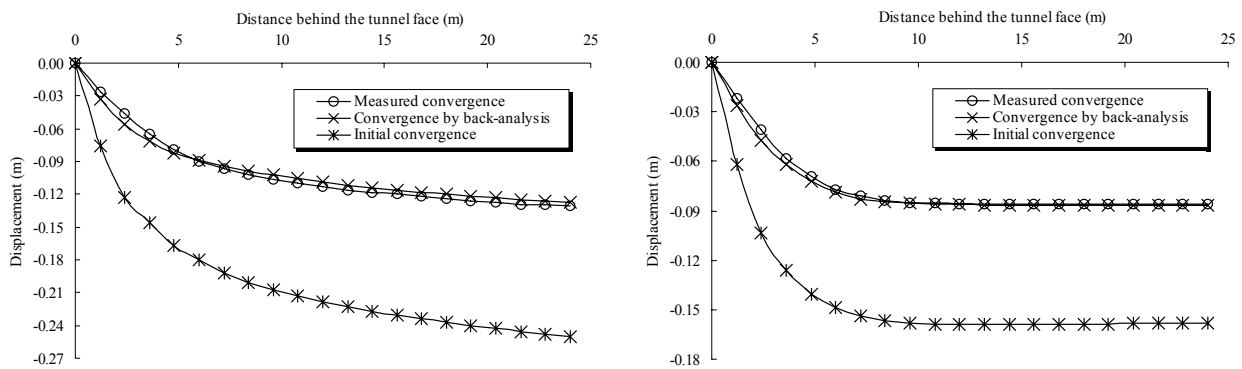
4.2.2 하저터널에서의 지반정수 산정

앞선 하저터널에서 침투력을 고려한 지반정수의 예측은 신뢰성있는 결과를 도출하였다. 정확한 지반에 대한 예측을 위하여 지반정수 E , K_0 와 c , ϕ 를 역해석을 통하여 산출하였다. 적용된 지반은 앞서 적용된 연구와 동일한 가상지반에서 수위가 5m로 존재하는 경우이다. 주관적인 정보인 초기값은 임의적으로 산정하였다.

하저터널에서 역해석에 의하여 산정된 지반정수 E , K_0 , c , ϕ 를 다음 표 4에 정리하였다.

표 4. 예측된 지반정수

| 구분 | E (MPa) | K_0 | c (kPa) | ϕ (°) |
|--------|-----------|-------|-----------|------------|
| 사전정보 | 49.0 | 0.5 | 3.5 | 33 |
| 초기값 | 29.4 | 0.7 | 2.5 | 23 |
| 역해석 결과 | 48.6 | 0.46 | 3.2 | 30.3 |



(a) 천단변위

(b) 측벽변위

그림 10. 역해석 상대변위곡선 결과

역해석 결과 도출된 지반정수는 가상지반에서 사용된 사전정보와 유사한 값으로 산출되었고, 그림 10에서 보이듯이 천단, 측벽부의 상대변위곡선도 역해석 결과 수렴함을 보였다. 하저터널 굴착에 의한 지하수 흐름을 고려하여 개발된 역해석기법을 사용하였을 때, 적절한 지반정수를 예측할 수 있었고, 이는 역해석기법의 하저터널에서의 적용이 타당함을 보여주는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 건조한 지반에서 검증된 상대변위를 사용한 역해석을 통한 지반정수 예측법을 하저터널에 적용하여 지반정수를 산정하였다. Cho 등(2006)에 의해 제안된 역해석 기법의 하저지반에서의 적용을 위하여, 하저터널에서 지하수 흐름에 의해 발생하는 침투력이 종단변형곡선에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 가상 하저지반을 형성하고 이를 역해석에 적용하여 적합성을 판단하였다. 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 아래와 같다.

- 1) 침투력이 작용하는 하저지반에서의 터널을 굴착함으로써 인해 발생하는 종단변형곡선은 건조한 지반에

서의 종단변형곡선에 비하여 증가하였다. 또한, 수위 변화에 따른 종단변형곡선의 변화는 전수두에 증가에 의해 선형적으로 증가하였다.

- 2) 침투력의 고려 유무에 따른 지반정수의 예측에서는 서로 상이한 결과를 도출하였다. 이는 침투력을 고려하지 않을 경우 산출된 상대변위와 객관적인 정보인 계측결과와의 조화를 위해 상대적으로 다른 지반물성이 산출되는 것으로 침투력을 고려하지 않은 지반정수의 예측은 신뢰할 수 없는 결과를 도출하게 됨을 알 수 있다.
- 3) 가상 하저지반에서의 침투력을 고려한 역해석으로부터 예측된 지반물성은 사정정보의 값과 유사하게 산출되었다. 이를 통해 제안된 역해석 기법의 하저터널의 적용이 적합함을 보여준다. 또한, 이러한 기법을 통하여 설계와 시공에서 지반 상태를 계략적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 주관하고 한국건설교통평가원에서 위탁시행하는 2004년도 건설핵심기술연구 개발산업, “공사핵심기술 C01”에 의하여 연구비가 지급된 연구로써 이에 감사드립니다.

참조문헌

1. 에메탈드소프트 (1998), “PENTAGON-3D User Manual”, 서울
2. Cho, K. H., Choi, M. K., Nam, S. W., Lee, I. M. (2006), "Geotechnical parameter estimation in tunnelling using relative convergence measurement", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., vol 30, pp.137~155
3. Honjo, Y., Wen-Tsung, L., Guha, S. (1994a), "Inverse analysis of an embankment on soft clay by extended Bayesian method" International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol 18, pp.709~734.
4. Honjo, Y., Wen-Tsung, L., Guha, S. (1994b), "Application of akaike information criterion statistics to geotechnical inverse analysis: the extended Bayesian method", Structural Safety, vol 14, pp.5~29.
5. Lee, S. W., Jung, J. W., Nam, S. W. and Lee, I. M. (2006), "The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 22, pp.28~38