

## 역해석을 이용한 지반 강성 산정 및 굴착 지지벽체의 변형 평가

# Evaluation of Soil Stiffness and Excavation Support Wall Deformation at Deep Excavation Site Using Inverse Analysis

김 태 식<sup>1)</sup> · 정 영 훈<sup>†</sup>

Taesik Kim · Young-Hoon Jung

Received: October 5<sup>th</sup>, 2020; Revised: October 14<sup>th</sup>, 2020; Accepted: November 19<sup>th</sup>, 2020

**ABSTRACT** : In this study, the evolution of soil engineering property values according to excavation was analyzed through the inverse analysis for the OO deep excavation site located in Incheon. The stiffness of the ground was updated by comparing the horizontal wall deformation of the excavation support wall calculated by the finite element analysis at each stage of excavation and the value measured using an inclinometer. The updated stiffness was used to predict the response of the excavation support wall in the next excavation step. The finite element analysis method using the Hardening Soil model was used, and the stratum where the excavation support wall is located was selected as the stratum for the inverse analysis. The inverse analysis results showed that the stiffness value at the initial stage of excavation is larger than the stiffness used in the original design. As the excavation proceeds, the stiffness calculated through the second inverse analysis was found to decrease compared to the value derived by the first inverse analysis. Therefore, it can be stated that the deformation of the excavation support wall can be accurately calculated through finite element analysis when an appropriate stiffness value is input according to the excavation stage.

**Keywords** : Inverse analysis, HS model, Soil parameters, Ground deformation, Deep excavation

**요 지** : 인천에 위치한 OO 깊은 굴착 현장을 대상으로 굴착에 따른 지반 물성값의 변화를 역해석을 통해 분석하였다. 굴착 단계별로 유한 요소 해석을 통해 예측한 굴착 지지 벽체의 수평방향 변위와 현장에서 지중경사계를 이용하여 측정한 값을 비교하여 지반의 강성을 업데이트하였다. 업데이트한 지반의 강성을 다음 굴착 단계에서 굴착 지지 벽체의 거동 예측에 사용하였다. Hardening Soil 모델을 이용한 유한요소해석 기법을 사용하였으며, 굴착 지지 벽체가 위치하는 지층을 역해석 대상 지층으로 선정하였고, 그 지층의 강성값을 역해석 대상으로 선정하였다. 굴착 초기 단계의 지반의 강성값은 당초 설계에서 사용한 강성값에 비해 큰 것으로 나타났다. 굴착이 진행됨에 따라 재역해석을 통해 산정한 지반의 강성값은 초기에 역해석으로 도출한 값에 비해 감소한 것으로 나타났다. 따라서, 굴착 단계에 따라 적절한 지반의 강성값을 입력하여 유한 요소 해석을 통해 정확한 굴착 지지 벽체의 변형을 산정할 수 있을 것으로 판단한다.

**주요어** : 역해석, HS 모델, 물성 값, 지반 변형, 깊은 굴착

## 1. 서 론

도심지에 위치한 깊은 굴착 현장의 경우, 굴착 중 발생하는 지반의 변형은 인접 구조물의 균열, 지중 매설 관로의 손상, 도로의 꺼짐 등 사회 안전에 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 이를 예방하기 위해 설계단계에서 공사 중 발생하는 지반변형을 예측해야 한다. 일반적으로 굴착 배면 지반 변형의 예측을 위해서 경험 공식을 사용하거나 유한요소해석 기법(Finite Element Method, FEM)을 사용한다.

깊은 굴착의 배면 침하량 산정을 위한 경험 공식은 Caspe (1966), Peck(1969), Clough & O'Rourke(1990) 등에 의해 제

안되었으며, 현장 계측 결과를 분석하여 지반의 침하양상을 포락선(Envelope)의 함수로 나타낸 것이다. 이는 컴퓨터를 활용한 유한요소해석 기법이 고도로 발달되기 이전에 제안된 것으로, 유한요소해석 기법이 아닌 보-스프링 모델을 사용하여 깊은 굴착의 흙막이 벽체를 설계할 경우 배면 지반의 침하량 예측에 사용된다. 경험 공식은 현장의 계측 값을 바탕으로 작성되었기 때문에, 유한요소해석 기법을 사용하여 배면 지반의 침하를 예측한 경우에도 비교 참고값(Reference value)으로 널리 사용된다.

유한요소해석 기법을 사용하여 지반 변형을 산정하는 경우, 어떤 구성방정식(Constitutive equation)을 사용하느냐에

1) Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

† Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University (Corresponding Author : jyounghoon@khu.ac.kr)

따라 지반 거동 예측 결과는 다양하게 나타날 수 있다. 지반 거동 예측의 정밀도를 높이기 위해 많은 입력 변수를 사용하는 복잡한 구성방정식을 사용할 경우, 물리적인 의미가 없는 변수(Fudge factor) 혹은 일반적인 실험실에서는 평가할 수 없는 입력정수가 있는 경우도 있어 설계 현실에 맞지 않는 경우가 많다. 이와는 반대로, 단순한 구성방정식을 사용할 경우 입력정수의 평가는 상대적으로 쉬우나 현장 지반 거동 예측하는데 그 한계가 명확하다.

설계 단계에서 평가한 지반의 물성 값은 공사가 진행되면서 변하는 것으로 알려져 있다. 특히, 지반 구성 물질의 응력-변형률 관계를 살펴보면 변형률의 증가에 따라 강성 값이 감소하는 비선형적인 양상이 나타난다(Kim & Finno, 2012; Finno & Kim, 2012; Kim et al., 2015). 이런 특성으로 인해 지반의 변형을 예측하기는 쉽지 않다.

본 논문에서는 도심지 굴착현장의 지반 변형 관리를 목표로, 비교적 단순한 구성 방정식을 사용하여 지반의 변형을 잘 모사할 수 있는 방안으로 역해석(Inverse analysis) 기법에 대한 연구를 수행하였다. 굴착 단계별로, 예측한 지반의 거동과 현장에서 계측한 값을 비교하여, 지반 정수를 업데이트하고, 업데이트한 지반 정수를 다음 굴착 단계에서 굴착지지벽체의 거동 예측에 사용하는 알고리즘을 구현하였다.

본 논문에서는, 인천에서 위치한 OO 깊은 굴착현장을 대상으로 역해석 기법을 적용하였다. 굴착지지벽체의 수평방향 변위를 역해석의 대상으로 선정하였다. 유한요소해석 프로그램은 PLAXIS 2D를 사용하였으며, 구성모델은 Hardening Soil(HS) 모델을 사용하였다.

## 2. 역해석 기법

Fig. 1은 본 논문에서 사용한 역해석의 흐름도를 나타낸다. 초기 물성 값을 사용하여 유한요소해석을 실시하여 예측값을 산정한다. 이 예측값과 관측값을 사용하여 목적함수(Objective function)를 다음 식과 같이 작성한다.

$$S(b) = [y - y'(b)]^T [y - y'(b)] \quad (1)$$

여기서,  $b$ 는 입력변수의 입력물성값을,  $y$ 는 현장 관측값(Observation)을,  $y'$ 은 입력물성값  $b$ 를 사용하였을 때의 유한요소해석을 통한 예측값을 의미한다. 목적함수 값이 작을수록 유한요소해석을 통한 예측값이 관측값에 근사함을 의미하게 된다. 본 논문에서는 깊이에 따른 굴착 지지벽체의

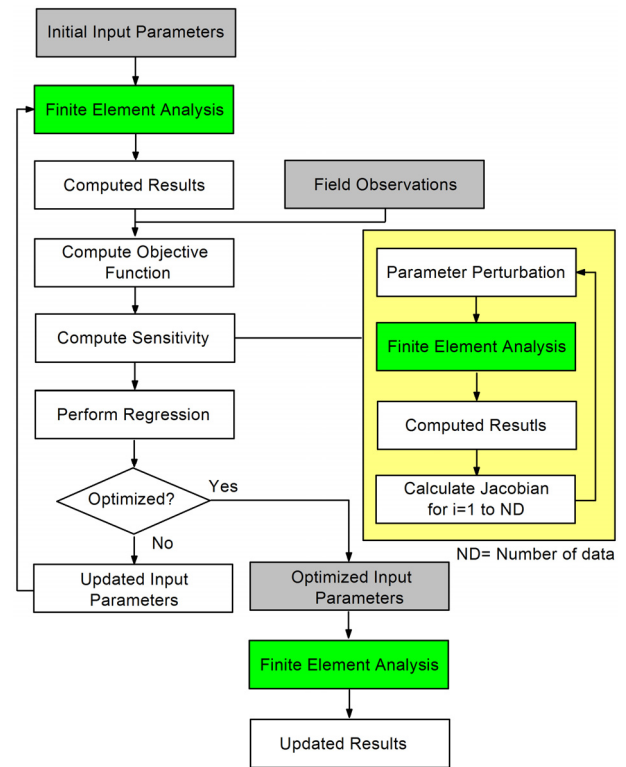


Fig. 1. Flow chart for input parameter optimization by inverse analysis (from Finno & Calvello 2005)

수평 변위 값을 벡터  $y$ 로 사용하였다.

목적함수를 최소화시키는 입력 물성값을 찾기 위해, 입력 물성값의 크기를 변화시키고(Perturbation), 그 변화에 따른 목적함수 값의 크기의 변화를 비교하여, 각 입력변수별로 목적함수에 미치는 민감도(Sensitivity)를 평가한다. 이 민감도를 바탕으로 목적함수 값을 최소화시키는 입력 물성값을 찾고, 이 값이 수렴조건을 만족시키지 못하면, 수렴조건을 만족할 때 까지 반복계산을 수행하게 된다. 입력 물성값이 수렴조건을 만족할 경우, 그 값을 업데이트 물성값으로 정하여 다음 유한요소해석에 사용하게 된다.

## 3. 현장개요 및 흙막이 설계

### 3.1 현장개요

인천에 위치하고 있는 OO 깊은 굴착현장의 굴착 심도는 8.45~9.55m로, 흙막이 벽체 공법은 Soil Cement Wall(SCW)을 사용하였고, 흙막이 지보는 강관 스트럿을 사용하였다. 지반조사 결과, 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암층이 나타났으며, 통일 분류법(USCS)에 따른 흙의 분류, N값, 단위중량, 점착력, 마찰각은 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1. Stratigraphy summary

Stratigraphy (USCS)	Description
Fill (SW)	$\gamma_t = 17.7 \text{ kN/m}^3$ , $c = 0 \text{ kPa}$ , $\phi = 21^\circ$
Sediment (CL)	$\gamma_t = 17.2 \text{ kN/m}^3$ , $c = 34 \text{ kPa}$ , $\phi = 0^\circ$
Weathered soil (SM)	$\gamma_t = 17.7 \text{ kN/m}^3$ , $c = 0 \text{ kPa}$ , $\phi = 24^\circ$
Weathered rock	$\gamma_t = 18.6 \text{ kN/m}^3$ , $c = 10 \text{ kPa}$ , $\phi = 34^\circ$

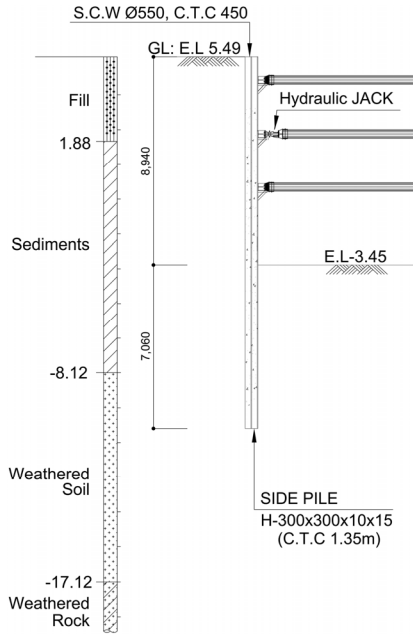


Fig. 2. Illustration of soil retaining wall and support system with soil stratigraphy

### 3.2 흠막이 설계

당초 흠막이 벽체의 설계는, 벽체에 토압을 적용하여 벽체의 구조적 안정을 계산하는 구조해석 프로그램인 SUNEX를 사용하였다. 벽체를 빔(Beam)요소로 가정하고, 빔요소에 작용하는 응력을 Rankine 토압으로 산정하여 벽체가 그 토압을 지지할 수 있도록 설계하였다. 유한요소해석에 비해 간단하게 설계를 할 수 있으나, 굴착 현장 인근 지반의 변형은 직접 계산할 수 없다는 단점이 있다. 원 설계의 지반 변형에 대한 검토는 Caspe(1966)의 방법으로 수행되었다.

## 4. 굴착 단계별 물성값 변화 추적

인천에 위치한 OO 깊은 굴착현장을 대상으로 역해석 기법을 적용하였으며, Fig. 3은 해당 굴착 현장의 유한요소해석 모델을 나타내며, Table 2는 굴착 및 지보재 시공 순서를 나타낸다.

굴착현장에서 관측값으로 사용할 수 있는 현장 계측 데이터의 종류로는 굴착 지지 벽체의 수평 및 수직 방향 변위,

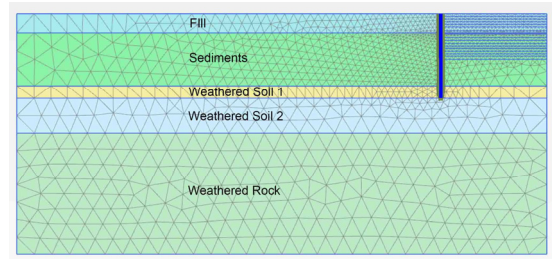


Fig. 3. Finite element model of OO excavation site

Table 2. Construction procedure

Stage No.	Construction activity
1	SCW wall installation
2	Excavation up to -1.5 m
3	Strut installation at -1.5 m
4	Excavation up to -3.8 m
5	Strut installation at -3.8 m
6	Excavation up to -6.0 m
7	Strut installation at -6.0 m
8	Excavation up to -8.54 m

버팀대에 작용하는 응력, 간극 수압 등 여러 가지가 있을 수 있다. 굴착 지지 벽체의 수평변위가 관측값 중 민감도가 가장 높은 것으로 알려져 있어(Koo & Kim, 2017), 관측값으로 사용하였다.

굴착 지지 벽체가 위치하고 있는 매립층(Fill)과 퇴적층(Sediments)을 역해석 대상 지층으로 선정하였다. 역해석 대상 지층을 모사하기 위해 Hardening Soil(HS) 모델을 사용하였고, 다른 지층에 대해서는 Mohr-Coulomb(MC) 모델을 사용하였다. 유한 요소 해석의 지층상태는 비배수 조건(Undrained condition)으로 실시하였다.

유한요소해석을 위한 초기 물성값은 당초 설계에 사용한 물성값을 이용하여 산정하였다. 유한요소해석에 사용되는 지반 물성의 입력값은 파괴에 관련된 물성값과 변형에 관련된 물성값으로 구분할 수 있다. 일반적으로 현대의 굴착 설계는 굴착 지지 벽체의 파괴는 발생하지 않는 것이 당연하고, 굴착에 따른 지반의 변형이 중요하게 여기는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 변형과 관련된 강성을 역해석 대상 물성값으로 설정하였다. HS 모델은  $E^{ref_{50}}$ ,  $E^{ref_{od}}$ ,  $E^{ref_{wr}}$ 을 지반의 강성관련 입력값으로 사용한다. 본 연구에서는 전단변형과 관계된  $E^{ref_{50}}$ 를 역해석의 대상으로 결정하였으며,  $E^{ref_{od}}$ ,  $E^{ref_{wr}}$ 는 Eq. (2), (3)에 따라 업데이트하였다.

$$E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} \quad (2)$$

$$E_{od}^{ref} = 0.8 \cdot E_{50}^{ref} \quad (3)$$

Table 3. Initial parameter values for inverse analysis

Parameters	Fill	Sediments
$E^{ref_{50}}$ (kPa)	10,000	8,000
$E^{ref_{end}}$ (kPa)	10,000	5,600
$E^{ref_w}$ (kPa)	30,000	24,000
m	0.5	0.8
c (kPa)	0	34
$\phi$ (°)	21°	0°
$\psi$ (°)	5°	0°

Table 3에 매립층과 퇴적층에 대한 해석 물성값이 정리되어 있다. 각층의 물성값은 현장에서 실시한 시추공조사 및 다운홀 시험과, 실내에서 실시한 압밀 시험, 삼축압축 시험을 토대로 산정되어 있다. Table 3에서 지수 m은 탄성계수의 응력종속 관계를 결정한다.

### 4.1 초기 물성값을 이용한 해석

당초 설계에 사용한 물성값을 입력값을 이용하여 요소 해석을 실시하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 유한요소해석 결과가 지중 경사계를 이용한 굴착 지지 벽체의 수평 변위 비해 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 해당 굴착 단계에서, 유한요소해석에 사용된 지반의 강성이 실제 지반의 강성에 비해 저평가 되어있음을 의미한다. 굴착 단계별로 계측값과 유한요소해석 결과의 평균 오차를 계산한 결과, 굴착깊이 2.5m에서 14.4mm, 굴착깊이 6.0m에서 35.4mm, 굴착깊이 7.0m에서 37.8mm, 굴착깊이 8.0m에서 40.7mm 인 것으로 나타났다.

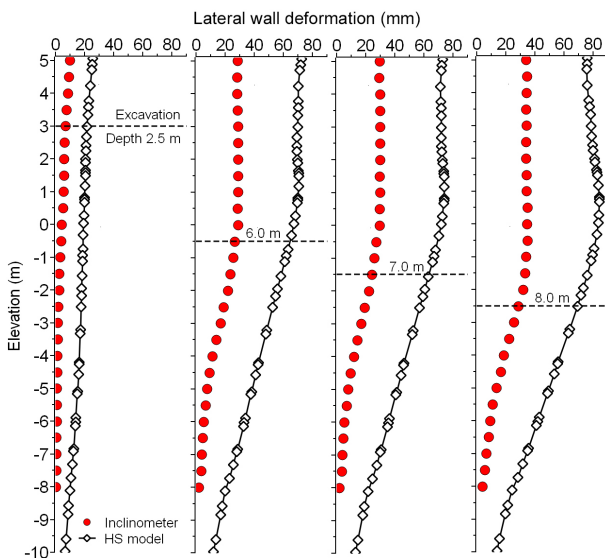


Fig. 4. Lateral wall deformation comparison between the inclinometer data and the simulation results with the initial parameters

### 4.2 굴착 단계별 역해석

당초 설계에 사용한 물성값이 굴착 지지 벽체의 수평 방향 변위를 모사하지 못하였으므로 굴착 단계별로 역해석을 실시하였다. 굴착 깊이가 2.5m일 때, 굴착 지지 벽체의 수평 변위를 관측값으로 설정하고 평균오차가 5mm 이하가 되도록 1단계 역해석을 실시하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 굴착 깊이가 2.5m 일 때 유한요소해석 결과가 현장 계측값을 잘 모사할 수 있는 지반 강성( $E^{ref_{50}}$ )을 역해석을 통해 산정할 수 있었다. 계측값과 유한요소해석 결과의 오차를 계산한 결과, 굴착깊이 2.5m에서 1.5mm의 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 당초 설계에서 발생한 평균오차인 14.4mm에서 약 13mm정도 감소한 것이다. 그러나 해당 지반 강성을 이용하여 계산한 다음 단계의 굴착, 즉 굴착 깊이가 6.0m일 때 발생하는 벽체 수평 변위는 현장 계측값과 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

굴착 깊이가 6.0m일 때, 굴착 지지 벽체의 수평 변위를 관측값으로 재설정하고 2단계 역해석을 실시하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이, 굴착 깊이가 6.0m 일 때 유한요소해석 결과가 현장 계측 값을 잘 모사할 수 있는 지반 강성( $E^{ref_{50}}$ )을 역해석을 통해 산정할 수 있었다. 또한, 해당 지반 강성을 이용하여 굴착 깊이가 7.0, 8.0m일 때, 굴착 지지 벽체의 수평방향 변위를 계산한 결과, 현장 계측 값을 잘 모사할 수 있는 것으로 나타났다. 굴착단계별로 계측값과 유한요소해석 결과의 평균오차를 계산한 결과, 굴착깊이 6.0m에서 3.4mm, 굴착깊이 7.0m에서 3.4mm, 굴착깊이 8.0m에서 2.4mm 인 것으로 나타났다. 초기 물성값을 이용한 해석에 비해 오차가 10% 수준으로 감소한 것으로 나타났다. Table

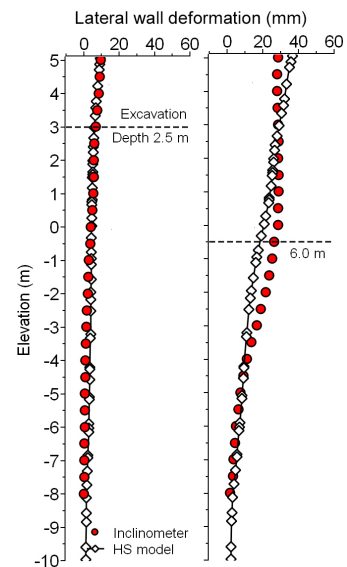


Fig. 5. Lateral wall deformation computed with the first optimized parameters and inclinometer data

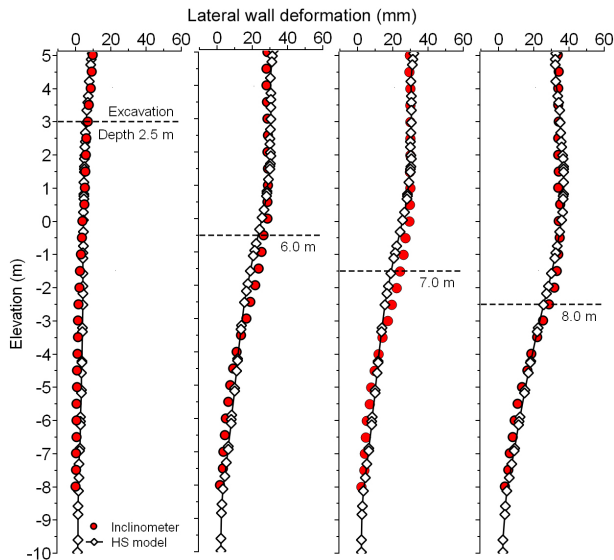


Fig. 6. Lateral wall deformation computed with the second optimized parameters and inclinometer data

Table 4. 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> Optimized parameter values

Parameters		Fill	Sediments
1 <sup>st</sup>	$E^{ref_{so}}$ (kPa)	35,000	32,000
	$E^{ref_{od}}$ (kPa)	35,000	22,400
	$E^{ref_w}$ (kPa)	105,000	96,000
2 <sup>nd</sup>	$E^{ref_{so}}$ (kPa)	8,000	23,000
	$E^{ref_{od}}$ (kPa)	8,000	16,100
	$E^{ref_w}$ (kPa)	24,000	69,000

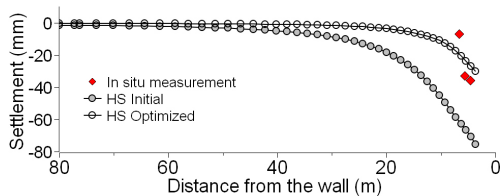


Fig. 7. Ground settlement at the final excavation

4는 1, 2단계 역해석으로 산정한 물성값을 나타낸다.

Fig. 7은 최종 굴착 깊이인 8.0m를 굴착했을 때, 굴착 지지 벽체의 배면 지반 침하량을 나타낸다. 당초 설계에 사용한 물성값을 이용하여 계산한 배면 지반의 침하량이 침하계를 이용하여 측정한 현장값에 비해 과대 평가 되어있음을 확인할 수 있다. 굴착 배면 지반의 침하는 굴착 지지 벽체의 변위와 밀접한 관계가 있으므로 Fig. 4에 나타난 벽체 변위를 고려할 때 당연한 결과로 판단된다. 역해석으로 산정한 물성값을 이용하여 계산한 굴착 배면 지반의 침하량은 당초 설계 물성값을 사용하여 계산했을 때에 비해 상당히 감소하였으며, 현장 계측값에 상당히 근접했음을 확인할 수 있었다. 그러나 현장 계측값과의 오차는 존재하였는데, 이는 유

한요소해석에 사용된 구성 모델인 HS모델이 미소변형률 구간의 지반 거동을 모사할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 요약 및 결론

인천에서 위치한 OO 깊은 굴착현장을 대상으로 역해석 기법을 적용하였다. 설계 단계에서 예측한 굴착 지지 벽체의 수평방향 변위와 현장의 계측값을 비교하고, 역해석을 통해 현장의 계측값을 만족시키는 지반 물성값을 산정하였다. 이 과정은 굴착이 진행됨에 따라 실시하였으며, 이전 단계의 지반 변형을 만족시키는 지반 물성값을 사용하여 다음 굴착 단계의 지반 변형을 예측하고 현장의 계측값과 비교하였다. 본 연구에서 수행한 분석을 바탕으로 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 설계 단계에서 사용한 지반의 강성값은 굴착 초기 단계의 굴착 지지 벽체의 변위를 과대평가하며, 발생한 오차는 굴착 단계별로 최대 40.7mm까지 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 첫 번째 역해석을 통해, 현장에서 측정한 굴착 초기의 굴착 지지 벽체의 수평변위를 만족시키는 강성값을 찾을 수 있었다. 이 강성값은 설계 단계에서 사용한 값에 비해 큰 것으로 나타났다.
- (3) 첫 번째 역해석을 통해 산정한 지반의 강성값을 이용하여 다음 굴착 단계를 예측해 보았으나, 현장에서 측정한 굴착지지 벽체의 수평변위를 모사하기에는 적절하지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 두 번째 역해석을 통해, 현장에서 측정한 굴착 지지 벽체의 수평변위를 만족시키는 강성값을 찾았다. 이 강성값을 이용하여 다음 굴착 단계에서 발생하는 굴착지지 벽체의 수평변위를 분석한 결과 오차는 굴착단계별로 최대 3.4mm까지 발생하는 것으로 나타났다. 초기 물성값을 이용한 해석에 비해 오차가 급격하게 감소하였음을 확인할 수 있었다.

지반의 강성은 지반에서 발생하는 변형률이 증가함에 따라 감소하는 특징을 갖고 있다. 굴착 지지 벽체의 변위가 많이 발생하지 않은 굴착 초기는 지반의 강성이 높고, 굴착이 진행됨에 따라 지반 변형률의 증가와 함께 지반의 강성도 감소하는 것으로 판단된다. 굴착 단계에 따라 지반의 강성값을 입력해야 유한 요소 해석을 통해 정확한 변형을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 : 20SCIP-C151438 -02)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Caspe, M. S. (1966), Surface settlement adjacent to braced open cuts, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 92, No. 4, pp. 51~59.
2. Clough, G. W. and O'Rourke T. D. (1990), Construction induced movements of insitu walls, *Proceedings, Conference on design and performance of earth retaining structure*, Geotechnical Special Publication, No. 25, ASCE, New York, pp. 439~470.
3. Finno, R. J. and Calvello, M. (2005), Supported excavations: Observational method and inverse modeling, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 7, pp. 826~836.
4. Finno, R. J. and Kim, T. (2012), Effects of stress path rotation angle on small strain responses, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, No. 4, pp. 526~534.
5. Kim, T. and Finno, R. J. (2012), Anisotropy evolution and irrecoverable deformation in triaxial stress probes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, No. 2, pp. 155~165.
6. Kim, T., Han, J-T. and Cho, W. (2015), Nonlinear stress-strain response of soft Chicago glacial clays, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 1139~1149.
7. Koo, B. and Kim, T. (2017), Evaluation of soil parameters using adaptive management technique, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 47~51.
8. Peck, R. B. (1969), Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics, *Géotechnique*, Vol. 19, No. 2, pp. 171~187.