

## 적응형 관리 기법을 이용한 지반 물성 값의 평가

### Evaluation of Soil Parameters Using Adaptive Management Technique

구 본 휘<sup>1)</sup> · 김 태 식<sup>†</sup>

Bonwhee Koo · Taesik Kim

Received: December 1<sup>st</sup>, 2016; Revised: December 15<sup>th</sup>, 2016; Accepted: January 4<sup>th</sup>, 2017

**ABSTRACT :** In this study, the optimization algorithm by inverse analysis that is the core of the adaptive management technique was adopted to update the soil engineering properties based on the ground response during the construction. Adaptive management technique is the framework wherein construction and design procedures are adjusted based on observations and measurements made as construction proceeds. To evaluate the performance of the adaptive management technique, the numerical simulation for the triaxial tests and the synthetic deep excavation were conducted with the Hardening Soil model. To effectively conduct the analysis, the effective parameters among the parameters employed in the model were selected based on the composite scaled sensitivity analysis. The results from the undrained triaxial tests performed with soft Chicago clays were used for the parameter calibration. The simulation for the synthetic deep excavation were conducted assuming that the soil engineering parameters obtained from the triaxial simulation represent the actual field condition. These values were used as the reference values. The observation for the synthetic deep excavation simulations was the horizontal displacement of the support wall that has the highest composite scaled sensitivity among the other possible observations. It was found that the horizontal displacement of the support wall with the various initial soil properties were converged to the reference displacement by using the adaptive management technique.

**Keywords :** Adaptive management technique, Composite scaled sensitivity, Soil parameters, Ground deformation, Inversing

**요 지 :** 본 논문에서는 공사현장의 지반 변형을 예측한 값을 바탕으로 지반의 물성 값을 재산정하는 “적응형 관리 기법”의 핵심인 역해석을 통한 물성 값의 최적화 알고리즘을 구현하였다. 적응형 관리 기법은 공사 중 모니터링을 통해 설계와 시공을 업데이트하는 프레임워크를 일컫는다. 최적화 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 실내시험과 가상의 굴착현장 두 경우에 대해 Hardening Soil 모델을 사용하여 전산해석을 실시하였다. 최적화 알고리즘을 적용할 구성모델의 입력변수는 복합민감도 값이 큰 입력변수를 선정하여 효율성을 고려하였다. 실내시험의 전산 해석은 비배수상태에서의 삼축압축시험과 삼축인장시험에 대해 시료의 파괴까지 수행하였다. 실제 시카고 연약 점성토로 수행한 삼축시험 결과인 전단응력-변형률과 과잉간극수압-변형률 관계를 관측 값으로 사용하였다. Hardening Soil 모델에 대하여, 관측 값을 가장 잘 모사할 수 있는 물성 값을 산정하기 위해 최적화 알고리즘을 적용하였다. 알고리즘을 적용한 결과, 관측 값을 잘 모사할 수 있는 물성 값을 성공적으로 찾을 수 있었다. 가상의 굴착현장에서는 삼축시험으로부터 산정한 지반의 물성 값을 현장의 대표 물성 값으로 가정하였고, 이때의 굴착 지지벽체의 수평 변위를 주요 관측 값으로 사용하였다. 다양한 초기 물성 값을 사용하여 전산해석을 수행하였고, 이 결과에 최적화 알고리즘을 적용하면 전산해석 결과가 현장 예측 값으로 수렴하는지 평가하였다. 최적화 알고리즘을 적용한 결과, 현장 예측 값으로 전산해석 결과 값이 거의 동일하게 일치함을 확인할 수 있었다.

**주요어 :** 적응형 관리 기술, 복합 민감도, 물성 값, 지반 변형, 역해석

## 1. 서 론

지반 공학 관련 프로젝트를 진행하기 위해서는 현장 및 실내 시험 등을 통해 지반의 물성 값을 평가해야 하며, 그 값에 따라 설계 및 시공이 진행된다. 설계 단계에서 일반적으로 사용하는 전산 해석에서 예측한 결과와 시공 중 현장에서 예측한 값과 비교해보면 일치하지 않는 경우가 많다. 이는 설계 단계에서 사용한 지반 물성 값이 공사 중 발생하는

다양한 사건들에 영향을 받아 그 값이 변하여 발생하는 것으로, 변화한 물성 값을 전산 해석에 반영해야 정확한 현장 예측이 가능하다.

적응형 관리 기술(Adaptive management technique)은 센서, IT, 전산해석 기술 등을 활용하여, 지반 공학 관련 프로젝트에서 발생하는 다양한 문제를 해결하는 도구를 의미한다. Peck(1969)가 제안한 “관측방법(Observation method)”을 기본 틀로 사용하여 적응형 관리 기술을 적용한다면, 지반 공

1) Department of Civil Engineering, Hongik University

† Department of Civil Engineering, Hongik University (Corresponding Author : taesik.kim@hongik.ac.kr)

학 관련 프로젝트의 설계 적정성을 시공현장과 비교하여 평가하는 데 적절히 사용할 수 있다. 현대는 센서, IT, 전산해석 기술의 발달로 현장의 정보를 필요로 하는 곳에 빠르게 전달하고 해석할 수 있는 환경이 구축되어 있다. 이런 환경에서 지반 공학 관련 문제에서 적응형 관리 기술을 사용하는데 있어서 핵심 요소는 현장 계측 사항을 정량적으로 설계에 반영할 수 있는 물성 값의 역해석이라 할 수 있다. 즉 초기 설계에 사용한 물성 값을 현장 상황에 맞추어 역계산하여 업데이트하는 것이 필요하다.

적응형 관리 기술은 다양한 용도로 사용이 가능하다. 지반 공학 관련 프로젝트 중 도심지 굴착 현장의 경우, 굴착 현장 주변에 인접한 구조물이 많아 지반의 변형 관리가 중요하다. 지반의 변형 예측과 관계있는 물성 값 중 강성은 지반에서 발생하는 변형에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. 따라서 꾸준히 지반 강성 값을 업데이트해야 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 관측한 값을 바탕으로 물성 값을 재산정하는 알고리즘인 “적응형 관리 기법”의 핵심인 역해석을 통한 최적화를 구현하였다. Hardening Soil(HS)의 구성모델을 사용하였으며, 복합민감도(Composite Scaled Sensitivity, CSS) 분석을 실시하여 CSS 값이 높은 입력변수를 최적화 대상으로 선정하였다. 시카고 연약 점성토를 대상으로 실시한 삼축시험 결과 값을 관측 값(Observation)으로 사용하여 삼축시험 전산해석을 실시하였다. 또한 이 값을 정해(Reference)로 사용하여 가상의 굴착현장(Synthetic excavation)에 대해 역해석 알고리즘을 적용하여, 정해에 수렴하는지 확인하였다.

## 2. 역해석 기법

Fig. 1은 적응형 관리 기법의 핵심인 역해석 흐름도를 나타낸다. 설계 단계에서 평가한 초기 지반 물성 값을 사용하

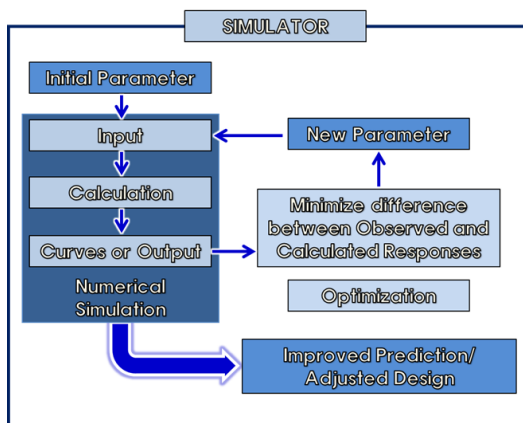


Fig. 1. Flow chart for adaptive management technique: Inversing

여 전산 해석을 수행하여 공사 중 지반의 거동을 분석한다. 전산 해석결과와 현장 모니터링 값을 비교하여 그 차이의 제곱을 목적함수(Object function)으로 설정하고 목적함수를 최소값으로 만드는 지반 물성 값을 새로운 물성 값으로 업데이트한다. 전산 해석결과와 모니터링 값을 비교하는 대상은 현장의 특성에 맞게 선정할 수 있다. 예를 들어, 지반의 변형이 주요한 현장은 변형을 대상으로 선정할 수 있으며, 간극 수압이 주요한 현장은 간극수압을 그 대상으로 선정하여 목적함수를 설정할 수 있다.

구성 모델은 다양한 여러 입력 변수를 사용하며 입력변수마다 목적함수에 미치는 영향이 다르다. 따라서 역해석을 수행할 때 여러 입력 변수에 대해 동시에 수행하면 효율이 떨어지며, 입력 변수 상호 간의 간섭으로 인해 목적함수를 최소로 만들기 어렵다. 따라서, 여러 입력 변수 중 목적함수에 미치는 영향이 큰 변수를 선정하여 그 변수들에 대하여 역해석을 수행하는 것이 효율적이다. 이를 위해서 각 입력 변수에 대해 복합 민감도 분석(Composite Scaled Sensitivity)을 실시하였다. 입력변수 값의 1%를 자극 값(Perturbation)으로 사용하여 목적함수가 변하는 정도를 평가하여 CSS 값을 결정하였다.

## 3. 삼축시험 전산해석

삼축시험에 대해서 PLAXIS 2D를 사용하여 유한 요소 해석을 실시하였다. 구성 모델은 HS 모델을 사용하였으며, 시카고 빙적 점성토에 대해서 비배수삼축압축시험(Triaxial Compression, TC)과 인장시험(Reduced Triaxial Extension, RTE) 데이터 중 전단변형률(Shear strain,  $\epsilon_{sh}$ ), 축차 응력(Deviatoric stress,  $q$ ), 과잉간극수압(Excess pore water pressure,  $u_e$ )을 관측 값으로 사용하였다(Kim et al., 2015).

### 3.1 복합 민감도 분석

HS 모델의 입력변수에 대해 Eq. (1)을 이용하여 CSS 분석을 실시하였다 (Finno & Calvello, 2005).

$$CSS_j = \left[ \sum_{i=1}^{ND} \left( \left( \frac{\partial y'_i}{\partial b_j} \right) b_j w_{ii}^{1/2} \right)^2 / b_j / ND \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서,  $y'_i$ 는  $i$ 번째 계산 값,  $b_j$ 는  $j$ 번째 입력 변수,  $\frac{\partial y'_i}{\partial b_j}$ 는  $i$ 번째 계산 값의  $j$ 번째 입력 변수에 대한 민감도,  $w_{ii}$ 는  $i$ 번째 관측 값의 가중치, ND는 관측 값의 개수를 각각 의미한다. HS 모델의 입력변수는 Table 1에 정리되어 있다.

$E_{50}^{ref}$ 는 삼축시험 결과인 응력-변형률 곡선에서 강도의 50%에 해당하는 모빌라이제이션에서의 할렬강성(Secant modulus)에 해당되며,  $E_{ur}^{ref}$ 는 재하 및 재하를 통해 산정하는 Young's modulus로 탄성거동을 모사하며,  $E_{oed}^{ref}$ 는 항복이후 소성부피변화를 모사하기 위해 사용하는 변수로 압밀시험으로부터 산정한다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이, 한계상태를 정의하는 마찰각  $\phi$ 의 CSS 값이 가장 큰 것으로 나타났으며,  $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{oed}^{ref}$ ,  $m$ ,  $E_{ur}^{ref}$ 의 순으로 CSS가 큰 것으로 나타났다.

이 결과에 따라 삼축시험 결과를 이용한 입력변수의 최적화는  $\phi$ 와  $E_{50}^{ref}$ 에 대하여 수행하였다. PLAXIS 2D에서는  $E_{oed}^{ref}$ 와  $E_{ur}^{ref}$ 를  $E_{50}^{ref}$ 에 대해 Eq. (2)와 Eq. (3)의 관계를 이용하여 정의한다.

$$E_{oed}^{ref} = 0.7 \cdot E_{50}^{ref} \quad (2)$$

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

$E_{oed}^{ref}$ 와  $E_{ur}^{ref}$ 는  $E_{50}^{ref}$ 의 최적화 결과에 따라 종속적으로 변화하게끔 설정하였다.

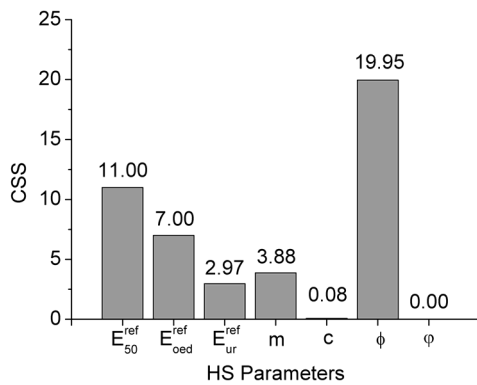


Fig. 2. CSS values of HS parameters

Table 1. Parameters of HS model

| Parameters      | Description   | Units             |
|-----------------|---|-------------------|
| $E_{50}^{ref}$  | Plastic straining due to primary deviatoric loading | kN/m <sup>2</sup> |
| $E_{oed}^{ref}$ | Plastic straining due to primary compression        | kN/m <sup>2</sup> |
| $E_{ur}^{ref}$  | Elastic loading/unloading                           | kN/m <sup>2</sup> |
| $m$             | Stress dependent stiffness according to a power law | -                 |
| $c$             | Cohesion  | kN/m <sup>2</sup> |
| $\phi$          | Friction angle                                      | °                 |
| $\psi$          | Dilatancy angle                                     | °                 |

### 3.2 물성 값 변화 평가

역해석의 성능 검증을 위해 전산 해석에 사용한 초기 물성 값은 시험결과를 정확하게 모사하지 못하는 값을 의도적으로 사용하였다. 역해석을 통한 입력변수의 최적화는 앞서 언급한 바와 같이 CSS 값이 높은 입력변수인  $\phi$ 와  $E_{50}^{ref}$ 를 대상으로 실시하였다. Fig. 3은 삼축시험 결과와 전산해석 결과를 나타낸다. 초기 물성 값을 사용하여 전산해석을 수행한 결과, 의도했던 바와 같이 시험결과를 정확하게 반영하지 못했다. 적응형 관리 기법의 핵심인 역해석을 통한 물성 값의 최적화를 수행한 결과, 전산해석결과가 삼축시험 결과를 잘 모사함을 확인할 수 있었다. Table 2는 초기 물성 값과 최적화된 물성 값을 나타낸다.

### 4. 가상의 굴착 현장 모사

깊은 굴착 현장에 대한 적응형 관리 기법의 적용성 평가를

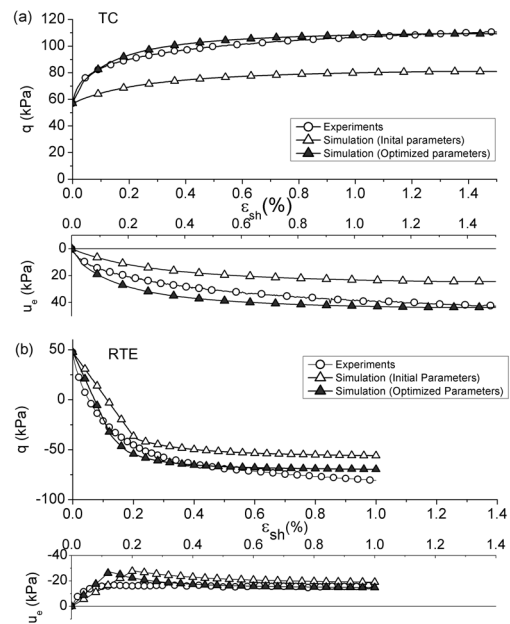


Fig. 3. Triaxial test simulations: (a) TC, (b) RTE

Table 2. Parameters of HS model

| Parameters      | Initial    | Optimized  |
|-----------------|------------|------------|
| $E_{50}^{ref}$  | 5,000 kPa  | 7,877 kPa  |
| $E_{oed}^{ref}$ | 3,500 kPa  | 5,514 kPa  |
| $E_{ur}^{ref}$  | 15,000 kPa | 23,631 kPa |
| $m$             | 0.5        | 0.5        |
| $c$             | 0 kPa      | 0 kPa      |
| $\phi$          | 20°        | 28.8°      |
| $\psi$          | 0°         | 0°         |

위해 Fig. 4와 같이 가상의 굴착현장(Synthetic excavation site)을 설정하여 비배수 상태로 전산해석을 실시하였다. Table 3은 시공 순서를 나타낸다.

삼축시험에서 최적화된 물성 값, 즉 Table 2의 Optimized 값을 참값(Reference parameter)으로 간주하여 해석을 실시하여 그 결과를 정해로(Reference)로 사용하였다. 최적화에 사용한 물성 값은 CSS 값이 높은 입력변수인  $E_{50}^{ref}$ 를 사용하였다.  $\phi$ 는 한계상태를 정의할 때 사용하는 입력변수로, 가상의 굴착 현장이 파괴에 이르지 않는다는 가정 하에  $\phi$ 를 배제하고  $E_{50}^{ref}$ 만을 고려하여 역해석을 실시하였다. 전산 해석 결과를 살펴보면, 발생한 전단변형률의 범위는 0~0.3%로, 지반이 파괴에 이르지 않은 것을 확인할 수 있었다.

“Sand” 층에 대해서는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며,  $E=15,000\text{kPa}$ ,  $\phi=25^\circ$ ,  $c=0$ ,  $\nu=0.3$ 을 사용하였다. 본 논문에서는 “Sand” 층의 역해석을 통한 입력변수 최적화는 실시하지 않았다.

#### 4.1 복합 민감도 분석

가상의 굴착현장에서 측정 가능한 관측 값들에 대해서 민감도 분석을 실시하였다. 굴착 지지벽체의 수평변위(H), 배면지반의 침하(S), 간극수압(P), 버팀대힘(F)에 대해서  $E_{50}^{ref}$  값이 1% 변할 때 각각의 값이 변하는 정도를 정량적으로 분석하였다. 또한 H와 F, S와 F, P와 F의 조합에 대해서도 민감도 분석을 실시하였다. Fig. 5는 각각의 관측 값에 대한 민감도를 나타낸다.  $E_{50}^{ref}$ 의 1% 변화에 대해 굴착 지지벽체

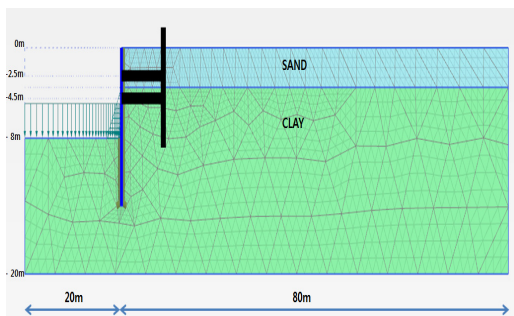


Fig. 4. Finite element model of synthetic excavation site

Table 3. Construction procedure

| Stage No. | Activity                     |
|-----------|------------------------------|
| 1         | Sheet pile installation      |
| 2         | Excavation up to -2.5 m      |
| 3         | Strut installation at -2.5 m |
| 4         | Excavation up to -4.5 m      |
| 5         | Strut installation at -4.5 m |
| 6         | Excavation up to -8 m        |

의 수평변위(H)가 가장 민감한 것으로 나타났으므로, H를 관측 대상으로 정하였다.

#### 4.2 역해석 알고리즘 평가

Reference parameter의  $E_{50}^{ref}$  값과 다른 값을 초기 물성 값으로 입력하고 최적화 알고리즘을 이용한 최적화를 통해 입력 변수 값이 Reference parameter 값으로 수렴하는지에 대해서 조사하였다. Reference parameter  $E_{50}^{ref}$  값의 “1/4,” “1/2,” “2” 배의 값을 초기 입력 값으로 사용하였으며, 이에 따라 종속적으로  $E_{oed}^{ref}$ ,  $E_{ur}^{ref}$ 의 값은 Eq. (2)와 Eq. (3)을 따라 설정하였다. m, c,  $\phi$ ,  $\psi$ 에 대해서는 Reference parameter 값을 그대로 사용하였다. 각각의 경우에 대해 입력한 값은 Table 4에 정리되어있다. Fig. 6에 보인 바와 같이 각각의 초기 입력 변수들을 입력하여 전산 해석을 수행하였을 경우, 예상하는 바와 같이 Reference와 차이를 나타냈다. 입력변수 “1/4”의 경우가 Reference와의 차이가 가장 컸으며, 입력변수 “2”의 경우가 그 차이가 가장 작았다. 그러나, Fig. 6에 나타난 바와 같이 역해석을 통해 입력변수를 최적할 경우 초기 물성 값에 관계없이 벽체의 수평변위 H가 Reference 값에 모두 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

벽체의 수평변위 H가 역해석을 통해 Reference에 수렴하

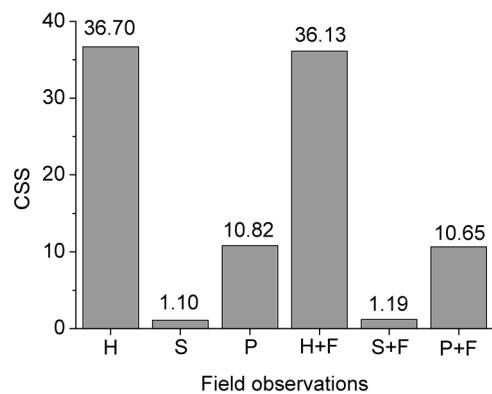


Fig. 5. CSS values of field observation associated with  $E_{50}^{ref}$

Table 4. Initial parameter values

| Parameters            | 1/4   | 1/2    | 2      |
|-----------------------|-------|--------|--------|
| $E_{50}^{ref}$ (kPa)  | 1,969 | 3,938  | 1,5754 |
| $E_{oed}^{ref}$ (kPa) | 1,378 | 2,757  | 11,028 |
| $E_{ur}^{ref}$ (kPa)  | 5,907 | 11,814 | 47,262 |
| m                     | 0.5   | 0.5    | 0.5    |
| c (kPa)               | 0     | 0      | 0      |
| $\phi$ (°)            | 28.8  | 28.8   | 28.8   |
| $\psi$ (°)            | 0     | 0      | 0      |

Table 5. Optimized parameter values

| Parameters            | 1/4    | 1/2    | 2      |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| $E_{50}^{ref}$ (kPa)  | 7,857  | 7,871  | 7,698  |
| $E_{oed}^{ref}$ (kPa) | 5,500  | 5,510  | 5,389  |
| $E_{ur}^{ref}$ (kPa)  | 23,635 | 23,631 | 23,647 |
| m                     | 0.5    | 0.5    | 0.5    |
| c (kPa)               | 0      | 0      | 0      |
| $\phi$ (o)            | 28.8   | 28.8   | 28.8   |
| $\psi$ (o)            | 0      | 0      | 0      |

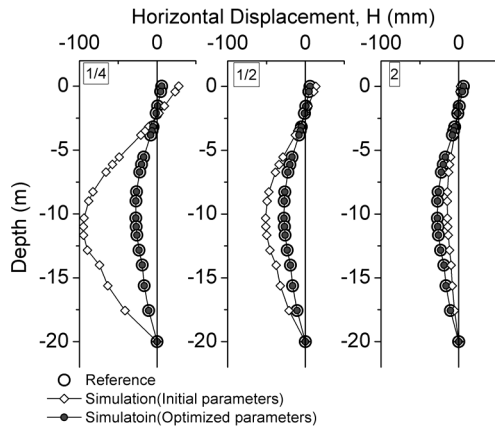


Fig. 6. Horizontal displacement of simulations

였을 때의 물성 값은 Table 5에 정리되어있다. Table 5의 입력 물성 값들을 살펴보면 Table 2에 나타난 Optimized 물성 값과 거의 유사함을 확인할 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

본 논문에서는 관측한 값을 바탕으로 물성 값을 재 산정 해내는 알고리즘인 “적응형 관리 기법”의 핵심인 역해석을 통한 최적화를 구현하였다. 삼축시험과 가상의 굴착현장에

대해 HS 모델을 사용하여 전산해석을 실시하였다. CSS 분석을 통해 그 값이 큰 입력 변수를 선정하여 최적화시켰다. 삼축시험은 TC와 RTE에 대해 비배수상태로 전산해석을 실시하였다. 역해석을 통한 최적화 결과, 관측 값을 잘 모사할 수 있는 물성 값을 성공적으로 찾을 수 있었다. 가상의 굴착현장에서는 삼축시험으로부터 산정한 지반의 물성 값을 현장의 물성 값으로 간주하고, 이때의 굴착 지지벽체의 수평 변위를 관측 값으로 사용하였다. 다양한 구성 모델과 다양한 초기 물성 값을 사용하여 전산해석을 수행하였고, 이 결과에 최적화 알고리즘을 적용하면 전산해석 결과가 현장 값으로 수렴하는지 평가하였다. 최적화 알고리즘을 적용한 결과, 현장 계측 값으로 전산해석 결과 값이 거의 동일하게 일치함을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2014R1A1A1003402). 또한 이 논문은 2016학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다.

## References

1. 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.
2. 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.
3. Peck, R. B. (1969), Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics, *Géotechnique*, Vol. 19, No. 2, pp. 171-187.