

# 차분진화 알고리즘을 이용한 흙막이 벽체의 다층지반 역해석 : 디지털 트윈 기초연구

## Multi-layered Ground Back Analysis of Retaining Wall Using Differential Evolution Algorithm : Basic Research of Digital Twin

이 동 건<sup>1)</sup> · 강 경 남<sup>2)</sup> · 송 기 일<sup>†</sup>

Donggun Lee · Kyungnam Kang · Kiil Song

Received: November 10<sup>th</sup>, 2021; Revised: November 16<sup>th</sup>, 2021; Accepted: December 3<sup>rd</sup>, 2021

**ABSTRACT** : It is very important to investigate the ground properties of a construction site for the stability during the construction of the retaining wall. In the retaining wall construction stage, ground properties are checked through ground investigation, but the actual ground properties may be different from the ground investigation result. In order to analyze the stability of the retaining wall in real time, it is important to reflect the properties of the actual ground. Also, when it is judged that the wall is unstable, an appropriate solution must be provided for the stability of the wall. This study aims to present a technique for predicting the actual ground properties through a differential evolution algorithm and judging the stability of the earth wall in real time through the digital twin of the retaining wall.

**Keywords** : Back analysis, Digital twin, Retaining wall, FLAC 3D

**요 지** : 흙막이 벽체의 시공 중 안정성을 확보하기 위하여 시공현장의 지반 정보를 조사하는 것은 매우 중요한 일이다. 흙막이 벽체 시공단계에서 지반의 정보는 지반조사를 통해 확인하고 있지만, 실제 지반 정보의 특성은 결과와 상이할 수 있다. 실시간으로 흙막이 벽체의 안정성을 분석하기 위해서는 실제 지반의 상태를 반영하는 것이 중요하다. 또한 벽체가 불안정하다고 판단 시 벽체의 안정성을 확보하기 위하여 적절한 솔루션을 제공해야 한다. 본 연구는 차분진화 알고리즘을 통하여 실제 지반의 정보를 예측하고 흙막이 벽체의 디지털 트윈을 통하여 흙막이 벽체의 안정성을 실시간으로 판단하는 기법을 제시하고자 한다.

**주요어** : 역해석, 디지털 트윈, 흙막이벽체, FLAC 3D

## 1. 서 론

가설 공사 중 공사가 중단되는 사례가 종종 발생하고 있으며, 문제 발생 시 문제에 대한 원인 파악 및 조치로 인하여 공사비용은 비약적으로 증가할 수 있다. 국내에서 발생한 흙막이 벽체의 사고사례 원인 24건을 분석한 결과 지반조사 불충분으로 인한 사고가 12건, 가시설 구조체의 불안정으로 인한 사고가 9건, 지하수위 처리의 미흡으로 인한 사고가 9건으로 분석된 바 있다(Sung et al., 2011). 시공 전 설계단계에서는 지반조사를 실시하여 이를 설계에 반영하고 있지만, 실제 시공 중 지하수위의 갑작스러운 변화나 지반조사 과정에서 발생하는 여러가지 불확실성으로 인한 설계지반정수의 오류 등으로 인하여 흙막이 벽체의 안정성이 저하될 수 있다. 또한, 지하안전관리에 관한 특별법 제정으로

로 굴착공사 시 해당 현장의 2D, 3D 모델링을 통한 수치해석으로 공사의 안전성을 분석하고 있지만, 지반조사로 특정 지반정수는 지반의 불확실성, 불확정성으로 인해 실제 지반의 거동과는 상이하고, 장마 혹은 폭우로 갑작스러운 지하수위 변동 등을 고려하지 못하는 단점이 존재한다. 본 연구는 흙막이 벽체에 대하여 앞서 서술한 지반정수의 불확실성으로 인해 발생하는 문제를 최적화 알고리즘을 통한 역해석과 디지털 트윈을 통해 해결하고자 한다.

디지털 트윈(digital twin)은 미국 제너럴 일렉트릭(GE)이 주창한 개념으로, 실제 구조물과 동일한 모델을 컴퓨터 속 가상현실로 구축하여 시뮬레이션을 통하여 구조물의 거동, 붕괴 등 다양한 상황을 미리 예측하는 기술이다. 코로나 사태로 전세계적으로 필수인원을 제외한 재택근무가 급격히 증가하고 있고, 직원과 고객의 안전을 위해 디지털 트윈을

1) Graduate Student, Department of Civil Engineering, Inha University

2) Graduate Student, Department of Civil Engineering, Inha University

† Professor, Department of Civil Engineering, Inha University (Corresponding Author : ksong@inha.ac.kr)

사용하는 추세이다. 국내의 경우, 코로나-19 사태로 인한 경제적 위기를 극복하기 위해 디지털 트윈이 “한국판 뉴딜 종합계획”의 10대 대표과제 중 하나로 선정함으로써 그 중요성이 부각되고 있다(Jeong, 2021). 건설현장에서의 디지털 트윈은 각종 상황에서의 예측 정확도를 향상시키고, 시공 중 예상하지 못한 문제가 발생하였을 때 이를 먼저 예측하고 다양한 솔루션을 제공하여 공기, 비용, 리스크를 줄일 수 있을 것으로 예상된다(Jeong et al., 2020). 디지털 트윈이 토목분야에서 연구된 사례로 Han et al.(2019)은 보 구조물의 동적하중에서 지속적인 데이터 계측을 통해 실시간 시각화가 가능함을 보였으며, Shim et al.(2018)은 교량의 점검 데이터를 활용해 장기 성능을 예측할 수 있는 디지털 트윈 모델을 제안하였다. 이와 같이 토목분야에서의 디지털 트윈은 교량과 시설관리 위주로 연구되었으나, 지반정수를 확실하게 특정할 수 없는 지하구조물에서는 연구가 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 굴착 시 획득할 수 있는 계측자료와 이를 이용한 역해석 기법을 통해 지반정수를 확인하고, 굴착단계에 대한 지반조건을 실시간 반영하여 흙막이 벽체의 안정성을 실시간 분석할 수 있는 흙막이 벽체의 디지털 트윈 모델을 제시하고자 한다.

## 2. 역해석 기법 : 차분진화 알고리즘

### 2.1 지반공학 분야의 역해석

실제 지반의 지반정수와 수치해석상의 정수의 차이를 줄이기 위하여 역해석이라는 과정을 거치게 된다. An(2017)은 역해석이라는 용어는 다양한 매개변수와 수치적인 표현이 가능한 문제에 대한 가정 사이에 분석 결과와 예측한 값이 일치하도록 변경하는 과정을 포함한다고 하였다. 지반공학에서 역해석 기법은 가시설 설계, 사면안정해석 등 많은 문제에 사용되고 있다. 본 연구에서는 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 사용하여 흙막이 벽체 주변의 지반정수를 계산하기 위하여 역해석 기법을 사용하였고, FLAC 3D 프로그램과 Python 언어를 통하여 구축하고 이를 알고리즘을 검증하였다.

### 2.2 차분진화 알고리즘을 이용한 역해석

최적화(Optimization)는 어떤 목적함수(Objective function)의 함수값을 최대화 혹은 최소화시키는 변수의 조합을 찾는 방법을 말한다. 최적화 알고리즘에 대한 성능 비교로 Vesterstorm

& Thomsen(2004)은 34개의 수리학적 벤치마크 함수에 대해 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm, DEA)이 빠르게 수렴하며 높은 정확성을 보인다고 보고하였고, Yin et al.(2018)은 지반공학적 문제에 대해 비교분석하였으며 DEA가 가장 적은 오차를 보임을 확인하였다. Kang(2019)은 터널 굴착면에서 변위 예측 이론식을 통해 DEA가 다변수에서 적합함을 보였다. 따라서, 본 연구에서는 차분진화 알고리즘을 사용하여 역해석 알고리즘을 구축하였고 흙막이 벽체의 역해석을 수행하였다. Fig. 1은 일반적인 차분진화 알고리즘의 흐름도를 보여주고 있다(An, 2017).

## 3. 다층지반에 근입된 흙막이 벽체의 역해석

### 3.1 수치해석 모델링

구축한 역해석 알고리즘의 정확도를 확인하기 위해 Schweiger(2002)가 지반 공학적 문제에 다양한 수치해석 모델을 사용하여 비교분석하였던 사질토에서의 벽체 수치해석 모델을 사용하였다. Fig. 2는 수치해석 모델을 도식화한 것으로 4단 굴착, 3단 앵커로 구성되어 있으며 벽체는 지하연속벽(Soil Sement Wall, S.C.W)공법을 사용하였다. 수치해석 case는 단일지반, 다층지반(2층, 3층)으로 총 3가지 case에 대해 수치해석을 실시하였으며, 지반의 탄성계수와 점착력에 대해 분석하였다. 수치해석에 사용된 앵커 및 벽체 물성치는 Table 1, Table 2와 같으며 각 지층에서의 지반정수는 Table 3, 역해석에서 사용한 지반 정수의 설정 범위는 Table 4와 같다.

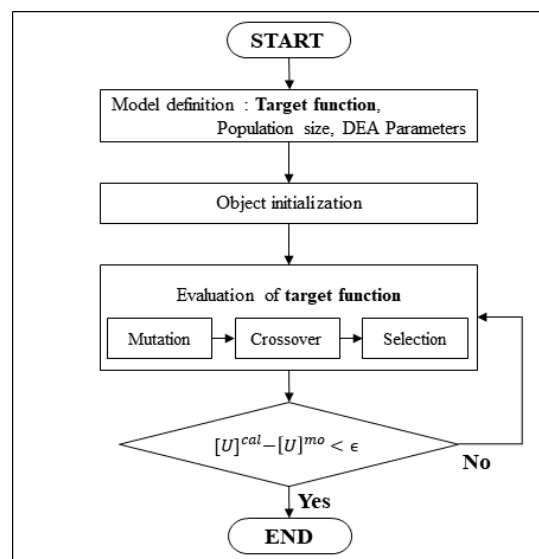


Fig. 1. Flowchart of a general differential evolution algorithm (An, 2017)

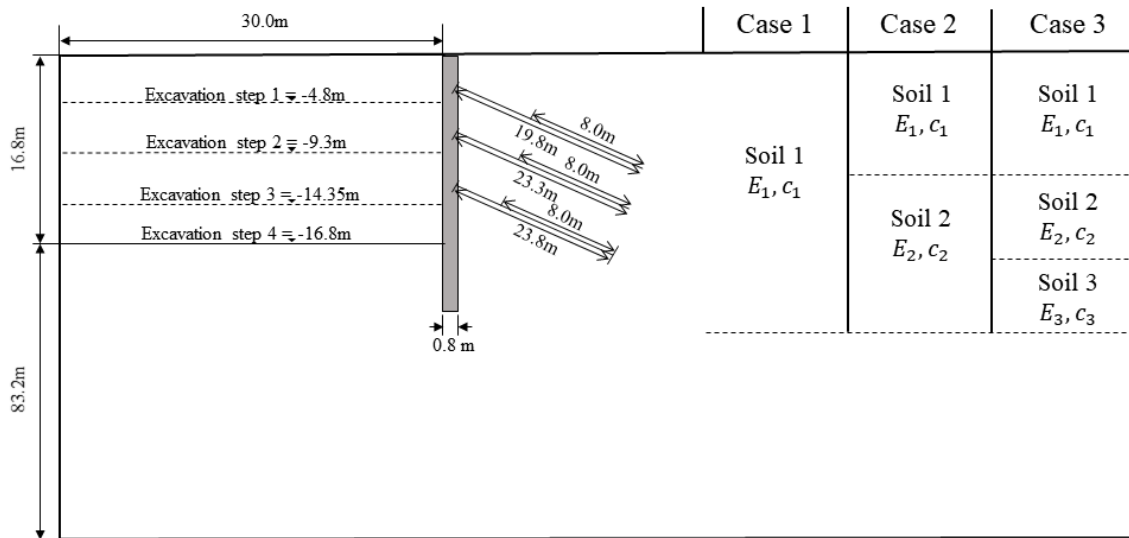


Fig. 2. Numerical analysis case (Schweiger, 2002)

Table 1. Anchor properties

Variables		Value
Prestress (kN)	1st	768
	2nd	945
	3rd	980
Cross-sectional area (cm <sup>2</sup> )		15
Elastic modulus (GPa)		210

Table 2. Wall properties

Variables	Value
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	23.5
Elastic modulus (GPa)	30
Poisson's ratio	0.15

Table 3. Target variables

Layer of soil	Elastic modulus (GPa)	Cohesion (kPa)
Soil 1	300	2.5
Soil 2	350	2.8
Soil 3	400	3

Table 4. Range of variables

Layer of soil	Elastic modulus (GPa)	Cohesion (kPa)
Soil 1	100 ≤ E <sub>1</sub> ≤ 1000	1 ≤ c <sub>1</sub> ≤ 10
Soil 2	100 ≤ E <sub>2</sub> ≤ 1000	1 ≤ c <sub>2</sub> ≤ 10
Soil 3	100 ≤ E <sub>3</sub> ≤ 1000	1 ≤ c <sub>3</sub> ≤ 10

### 3.2 역해석 조건

역해석은 시공 중 계측 값과 역해석을 통해 도출된 해석 값의 차이가 최소가 되는 것이 역해석의 목적이고 변위 기반 역해석의 적합도는 Eq. (1)과 같다. 이때  $dx_i$ 는 역해석에 의해 계산된 변위이며,  $Dx_i$ 는 시공현장에서 계측된 변위이다.

$$f = \sum_{i=1}^n \sqrt{(dx_i - Dx_i)^2} \quad (1)$$

하지만 발생 변위가 미소한 경우, 변위와 물성치의 영향이 작아 변위만으로 적합도를 고려할 때 국부해로 수렴할 수 있으므로 변위와 응력을 무차원화 시켜 An(2017)이 제안한 변위-응력 기반의 적합도 공식으로 역해석을 실시하였다. 변위-응력 기반의 적합도 공식은 Eq. (2)와 같다. 이때  $dy_i$ 는 역해석에 의해 계산된 응력이며,  $Dy_i$ 는 시공현장에서 계측된 응력이다.

$$f = \sum_{i=1}^n \left\{ \sqrt{\left( \frac{dx_i - Dx_i}{dx_i} \right)^2} + \sqrt{\left( \frac{dy_i - Dy_i}{dy_i} \right)^2} \right\} \quad (2)$$

이와같이 변위-응력 기반의 적합도를 고려하기 위해 흙막이 벽체 모델에서 Fig. 3과 같이 벽체의 변위, 지반침하, 앵커의 축력을 고려하여 역해석을 실시하였다.

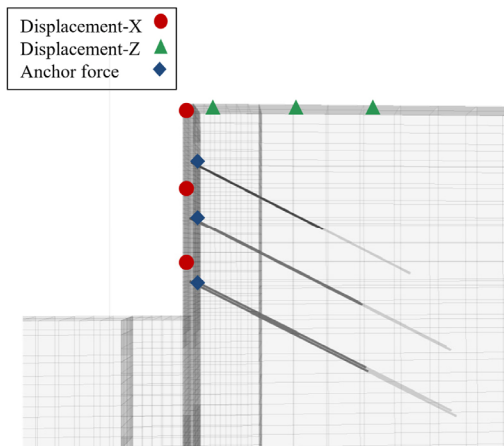


Fig. 3. Measuring point in retaining wall

### 3.3 역해석 결과

Fig. 4, Fig. 5와 Table 5는 벽체 변위, 지반침하, 앵커 축력에 대해 case 1, 2, 3의 역해석 결과를 보여주고 있다. 지층이 많아질수록 즉, 변수의 개수가 많아질수록 수렴되는 세대수는 많아지게 된다. 또한 6변수 해석에서 앵커 축력에 대한 정확도가 높아짐을 보였으나 평균적으로 변수의 개수가 많아질수록 정확도는 낮아지게 된다. 3.2절에서의 적합도 함수를 통해 계산한 적합도는 높아져 정확도는 낮아지는 것으로 보이거나 2, 4, 6변수의 수치해석 결과 모두 95% 이상의 정확성을 보인다.

다층지반에서의 굴착공사 시 안정성에 문제가 있거나 지반의 안정성을 판단하고 하려고 할 때, 혹은 지하구조물에 대한 디지털 트윈을 구축할 때 차분진화 알고리즘을 사용하

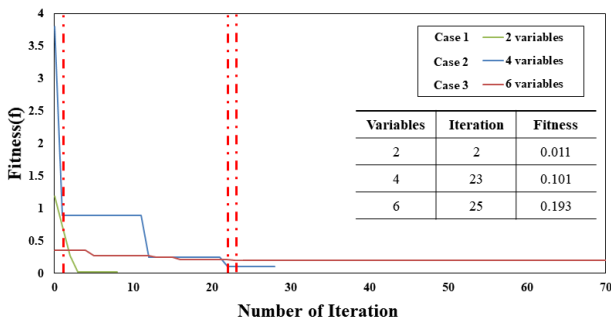


Fig. 4. Variation of fitness depending on the number of variable

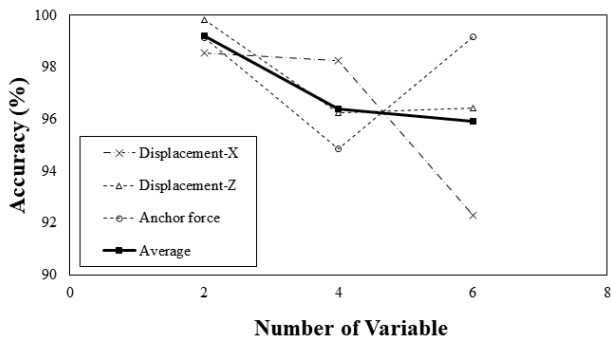


Fig. 5. Effect of number of variable on back analysis accuracy

Table 5. Multivariate back analysis fit of retaining wall

Target		Case 1		Case 2		Case 3	
		Result	Accuracy	Result	Accuracy	Result	Accuracy
Displacement-X (mm)	Real	12.99	98.54	13.35	98.27	13.18	92.29
	Back	13.07		13.12		13.65	
Displacement-Z (mm)	Real	3.42	99.82	3.86	96.24	3.76	96.43
	Back	3.37		3.72		4.05	
Anchor force (kN)	Real	108.30	99.14	102.28	94.85	98.08	99.17
	Back	107.37		97.28		97.27	
Accuracy (%)		99.2		96.4		95.9	

여 역해석을 실시하면 높은 정확도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 4. 흙막이 벽체의 디지털 트윈 구축

Fig. 6은 흙막이 벽체의 역해석을 통한 디지털 트윈 흐름도이다. 벽체의 변위, 지반침하, 앵커의 축력 등을 실시간으로 역해석하는 것을 목적으로 하며 앵커하중계, 지표침하계, 지중경사계를 통해 앵커의 축력, 지반침하, 벽체의 변위 등을 측정한다. 실시간으로 계속되는 값과 계측기 설치 위치를 해석모델에 적용시켜 디지털 트윈 프로세스를 진행하게 된다. 흙막이 벽체 설계단계에서 지반조사를 통해 얻어진 지반 탄성계수, 점착력, 내부마찰각과, 굴착현장과 동일한 수치해석 모델링을 통해 굴착에 대한 수치해석을 실시한다. 계측 변위( $\delta_{Monitoring}$ )와 수치해석 상의 해석결과( $\delta_{Simulation}$ )가 서로 상이할 경우 굴착지반의 3장에서의 다층지반 역해석을 통해 수치해석 상의 지반정수를 실제 지반정수에 가까운 지반정수로 개선하여 다시 수치해석을 실행한다. 계측데이터와 개선된 지반정수로 수치해석을 한 수치해석 결과가 관리기준치( $\delta_{Criteria}$ ) 이내일 경우 굴착단계를 마무리하고 다음 굴착단계로 넘어가게 된다. 굴착단계에서 앵커의 축력이 부족하거나, 벽체의 변위가 관리기준보다 초과하는 등 벽체의 안정성에 위험요소가 발견될 경우 수치해석 단계에서 미리 앵커의 축력을 증가시키거나, 추가, 버팀보를 추가적으로 설치하는 등의 대책을 미리 강구하여 실제 현장에 실시간으로 적용시키는 단계를 거치게 된다.

### 5. 결 론

다층지반에서의 굴착공사 시 차분진화 알고리즘을 사용한 역해석을 활용하여 벽체의 안정성을 판단할 수 있다. 또

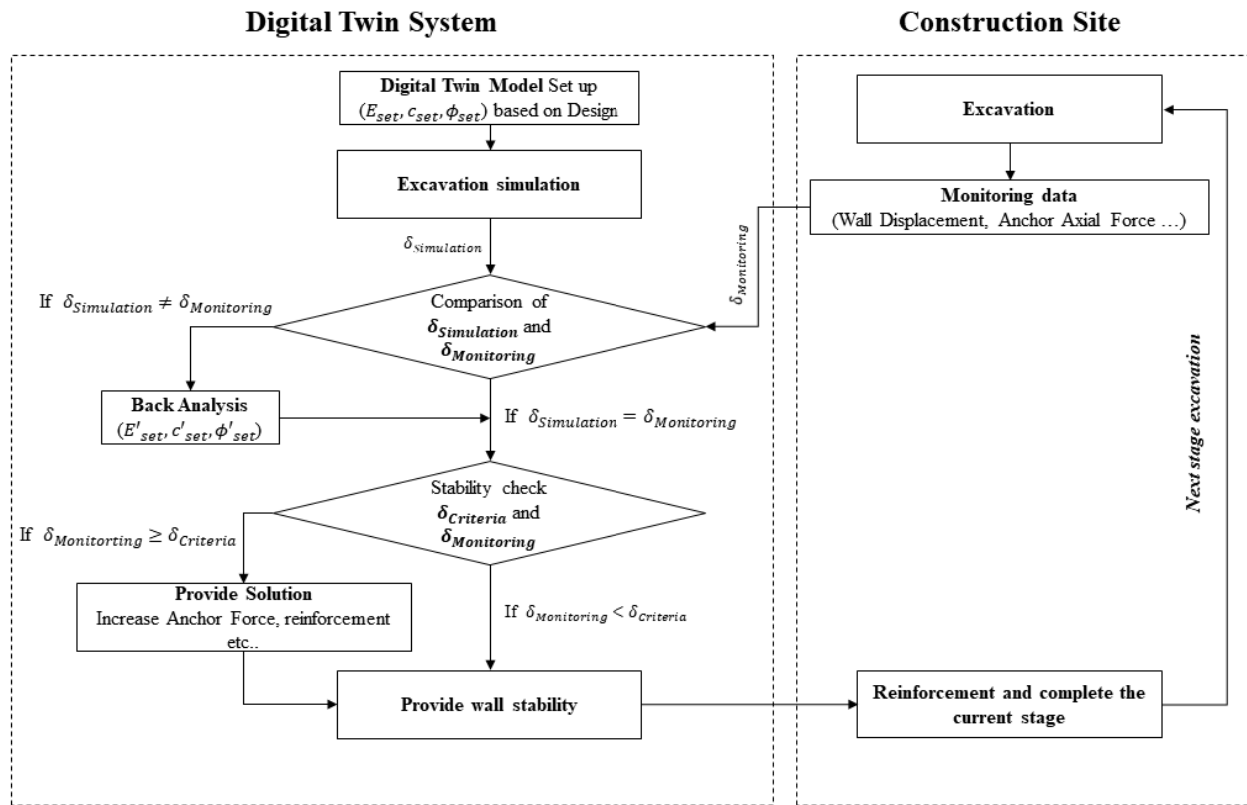


Fig. 6. Digital twin flowchart of retaining wall

한 디지털 트윈 모델과 결합하여 굴착 공사를 진행하는 동안 관리기준치와 병용하여 실시간으로 벽체의 안정성을 정량적으로 모니터링할 수 있는 도구로 활용이 가능하다.

본 연구의 결과를 이용하여 디지털 트윈 시스템은 물성치를 정확하게 알 수 있는 교량 및 구조물 이외에도 차분진화 알고리즘을 통한 역해석을 이용, 지반의 불확정성을 고려하여 굴착현장 및 터널현장 등 다양한 지반공사현장에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 디지털 트윈 시스템의 수치 해석을 통해 다양한 해결방법을 미리 적용해본 후 안정성 분석을 통하여 현장의 안정성을 높일 수 있을 것으로 판단되며, 공사 중단기간을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 구축한 디지털 트윈 모델은 앵커와 흙막이 벽체에 한정하여 제시하였으나 추후 연구를 통하여 버팀대, 락업 등 다양한 현장 상황 및 지보공법을 고려하여 모델 구축 및 운용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 2 변수에서는 비교적 수렴이 빠르게 이루어지나, 변수가 늘어날수록 수렴되는 세대수가 늘어나고, 정확도가 떨어지는 경향이 있어, 추후 연구로 차분진화 알고리즘 외의 다른 최적화 알고리즘과 결합하여 정확도를 높이는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가 R&D사업(과제번호 21SMIP-A158708-02)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. An, J. S. (2017), The development of differential evolution-based back analysis algorithm for the evaluation of operating tunnel stability, Ph.D's thesis, Inha University (In Korean).
2. Han, M. S., Shin, S. B., Moon, T. W., Kim, D. W. and Lee, J. H. (2019), Digital twin model of a beam structure using strain measurement data, Journal of KBIM, Vol. 9, No. 3, pp. 1~7 (In Korean).
3. Jeong, D. Y. (2021), A five-level model of the technical definition and detailed evolution of the digital twin, OSIA Standards & Technology Review, Vol. 34, No. 1, pp. 10~16 (In Korean).
4. Jeong, J. H., Hwang, S. Y., Yun, H. J. and Yu, U. S. (2020), [IV Focus Area] Smart construction digital platform construction and test bed operation, Construction Engineering and Management, Vol. 21, No. 4, pp. 25~30 (In Korean).

5. Kang, K. N. (2019), Design and reinforcement plan of NATM tunnel with optimization algorithm, Master's thesis, Inha University (In Korean).
6. Schweiger, H. F. (2002), Benchmarking in geotechnics 1. Computational Geotechnics Group, CGG IR006.
7. Seong, J. H., Jeong, S. H. and Shin, J. Y. (2011), A study on safety management improvement plan for retaining excavation construction through accident case analysis, Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection., Vol. 15, No. 6, pp. 175~183 (In Korean).
8. Shim, C. S., Jeon, C. H., Kang, W. R., Dang, G. S. and Sso, K. Y. (2018), Definition of digital twin models for prediction of future performance of bridges, Journal of KBIM, Vol. 8, No. 4, pp. 13~22 (In Korean).
9. Vesterstrom, J. and Thomsen, R. (2004), A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems, In Proceedings of the 2004 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 04TH8753), Vol. 2, pp. 1980~1987.
10. Yin, Z. Y., Jin, Y. F., Shen, J. S. and Hicher, P. Y. (2018), Optimization techniques for identifying soil parameters in geotechnical engineering: comparative study and enhancement, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 42, No. 1, pp. 70~94.