

# GIS 기반 지형 정보를 고려한 터널 굴착에 따른 지반침하와 터널 변위 비교 분석

조재은<sup>1</sup> · 정예림<sup>1</sup> · 송성민<sup>1</sup> · 윤지석<sup>1</sup> · 하상귀<sup>2</sup> · 유한규<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>학생회원, 한양대학교 스마트시티공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 박사수료

<sup>3</sup>정회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수

## Comparative analysis of ground settlement and tunnel displacement due to tunnel excavation considering topographic information based on GIS

Jae-Eun Cho<sup>1</sup> · Ye-Rim Jung<sup>1</sup> · Seong-Min Song<sup>1</sup> · Ji-Seok Yun<sup>1</sup> · Sang-Gui Ha<sup>2</sup> · Han-Kyu Yoo<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Dept. of Smart City Engineering, Hanyang University

<sup>2</sup>Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University

\*Corresponding Author : Han-Kyu Yoo, hankyu@hanyang.ac.kr

### Abstract

Recently, as the development of underground spaces has become active due to rapid urbanization and population density, interest in the ground behavior according to the construction of underground spaces is increasing. In large cities with high population density and many buildings, ground subsidence has a great impact on structures and there may be a risk of collapse, so the analysis of ground behavior due to underground construction is essential. Previous studies have been conducted on the subsidence pattern of the surface and the deformation of the tunnel when constructing the tunnel, but analysis has rarely been conducted by using actual topographic information. Therefore, this study analyzed the difference in ground behavior between the actual topography and the flat topography. As a result, it was confirmed that ground settlement occurs at higher elevations, such as in mountainous topography, and when the numerical analysis is performed considering topographical information, the crown settlement of the tunnel is up to about approx. It showed a difference of 10 mm, and it was found that the sensitivity was less in the case of displacement of tunnel wall compared to the crown settlement and ground settlement. The numerical analysis considering the actual GIS-based topographic information presented in this study can be used to obtain more accurate surface subsidence data to understand the behavior of the upper structure due to tunnel excavation.

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
25(1)13-26(2023)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.1.013>

eISSN: 2287-4747  
pISSN: 2233-8292

Received December 26, 2022

Revised January 6, 2023

Accepted January 6, 2023



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

**Keywords:** GIS, FLAC 3D, Ground settlement, Crown settlement, Real terrain

## 초 록

최근 급속한 도시화, 인구 과밀화로 지하공간의 개발이 활발해지면서 지하공간의 공사에 따른 지반거동에 대한 관심이 높아지고 있다. 인구밀집도가 크고 건물도 많은 대도시에서의 지표침하하는 구조물에 큰 영향을 주고 붕괴의 위험이 있을 수 있기에 지하공사로 인한 지반거동에 대한 분석은 필수적으로 진행되어야 한다. 지금까지 터널 굴착 시 지표의 침하양상과 터널의 변형에 관한 연구가 많이 이루어져 왔으나, 실제 지형 정보를 반영하여 분석을 진행한 경우는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 FLAC 3D를 활용하여 실제지형과 평면지형에서의 지반거동의 차이를 분석하였다. 지형은 부산의 OO~OO 지하고속도로 구간의 OO역 인근의 지형으로 적용하였으며, 상행선과 하행선을 각각의 Case로 나누어 지형과 터널의 위치에 따라 3차원 수치해석을 수행하였다. 그 결과 지반침하하는 산악지형과 같이 표고가 높을수록 크게 발생한다는 것을 확인할 수 있었으며, 터널의 천단침하는 지형 정보를 고려하여 수치해석을 진행하였을 때, 같은 지점에서 지형을 고려하지 않은 경우와 최대 약 10 mm의 차이를 보였으며, 내공변위의 경우 천단침하와 지반침하에 비해 민감도가 적은 것을 알 수 있었다. 수치해석을 통해 현장을 잘 모사하기 위해서는 지형을 고려하는 것뿐만 아니라 상부 구조물을 해석에 반영시켜야 하기 때문에 수치해석에 사용할 건물 데이터에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 본 연구에서 제시된 GIS 기반 지형 정보를 고려한 수치해석은 터널 굴착공사로 인한 상부 구조물의 거동을 파악하기 위해 더 정확한 지반침하 데이터를 얻는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어:** GIS, FLAC 3D, 지반침하, 천단침하, 실제지형

## 1. 서론

최근 급속한 도시화, 인구 과밀화로 지상공간이 포화됨으로써 지하공간의 개발은 급속도로 발전하는 추세이다. 이러한 지하공간의 개발이 활발해지면서 지하공간의 공사에 따른 지반거동에 대한 관심이 높아지고 있다. 인구밀집도가 크고 건물도 많은 대도시에서의 지표침하하는 구조물에 큰 영향을 주고 붕괴의 위험이 있을 수 있기에 지하공사로 인한 지반거동에 대한 분석은 필수적으로 진행되어야 한다. 터널 시공 시 지표의 침하양상, 터널 및 인접 구조물의 변형에 대한 연구가 많이 이루어져 왔으나(Peck, 1969; Clough and Schmidt, 1981; O'Reilly and New, 1982; Attewell et al., 1986; Mair et al., 1993; Loganathan and Poulos, 1998; Ng et al., 2004; Ahmed and Iskander, 2011; Do et al., 2014; Yang et al., 2020; Piciullo et al., 2021) 실제 지형조건을 고려하여 지표의 침하와 터널의 변형양상을 분석한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 GIS를 활용하여 실제 지형 정보를 적용한 모델과 평면 지형 모델의 3차원 수치해석을 통해 지표침하와 터널의 거동 특성을 파악하였다. 실제 지형과 터널은 부산의 OO~OO 지하고속도로 구간의 OO역 인근 지형 정보와 터널선형을 적용하였으며, 상행선과 하행선을 각각의 Case로 나누어 지형과의 위치에 따라 지표침하, 터널의 천단변위와 내공변위를 분석하였다.

## 2. 터널 굴착으로 인한 지표침하

터널 굴착 시 터널의 천단침하를 포함해 발생하는 터널의 변형은 지반을 통해 지표로 전파된다. Peck (1969)은 터널 굴착으로 발생하는 지반침하곡선의 대한 경험식을 제안하였다. 침하곡선은 Fig. 1과 같이 가우스 분포곡선의 형태로 가정하여 다음과 같이 최대침하량( $S_{max}$ )과 변곡점( $i$ )의 함수로 나타낼 수 있으며, 이를 적분함으로써 침하곡선의 단위 길이 당 부피( $V_s$ )를 구할 수 있다.

$$S_v(x) = S_{max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v(x)dx = \sqrt{2\pi(S_{max} \cdot i)} \quad (2)$$

여기서,  $S_v$  : Amount of subsidence

$S_{max}$  : Maximum subsidence at the center of tunnel

$i$  : Inflection point

$x$  : Horizontal distance from the center of tunnel

$V_s$  : Volume of the subsidence curve

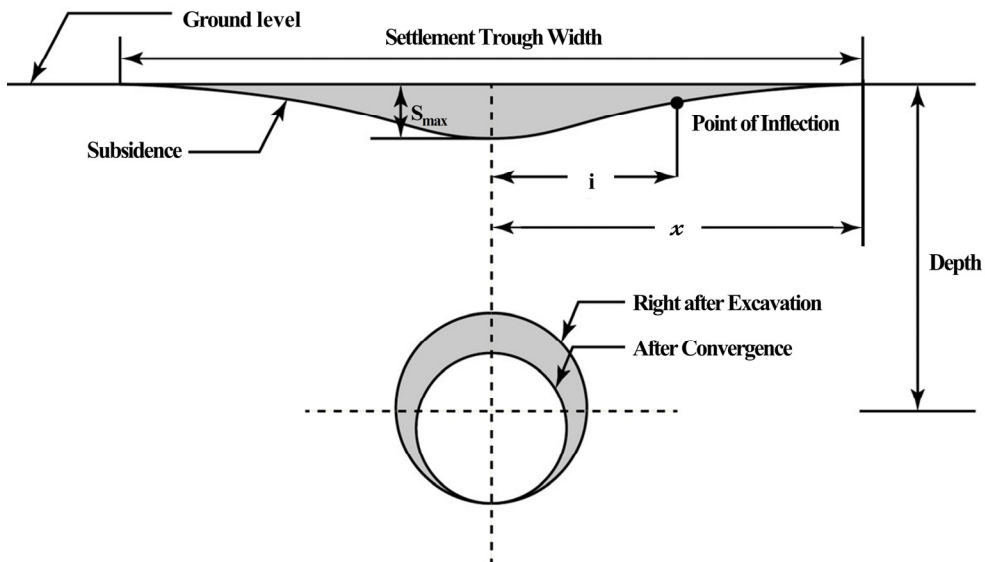


Fig. 1. Settlement profile due to tunnel excavation (modified from Clough and Schmidt, 1981)

여러층의 지층조건과 주변 구조물의 하중을 고려한 특수한 시공에서 Hosseini et al. (2012)은 선행연구들의 지표침하 경험식(Peck, 1969; Sagaseta, 1987; Loganathan and Poulos, 1998; Verruijt and Booker, 1998)과 유한차분(Finite Difference Method, FDM) 프로그램을 활용한 시뮬레이션 결과를 비교 분석함으로써, 다층지반 조건이나 인접 구조물의 하중을 고려하는 경우 FDM 프로그램을 활용한 시뮬레이션이 지표침하 양상을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

Park and Lee (2017)는 경사지반 하부를 굴착할 때 지표 침하와 터널의 변위를 모형실험을 통해 분석하였으며, 수평인 지형 보다 지표경사가  $10^\circ$ 에서  $20^\circ$ 로 증가할수록 토피고가 높은(경사지형의 상부) 부분에서 지표침하가 크게 일어나는 것을 확인하였다. 터널의 천단변위의 경우 지표경사 각도 보다는 터널 상부의 토피고가 증가함에 따라 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

### 3. GIS 기반 지형 정보를 적용한 수치해석

본 연구는 터널 굴착 시 실제 지형 정보와 평면으로 간소화 한 지형에서의 지표 침하양상과 터널의 천단변위, 좌우측 벽의 변형 양상의 차이를 분석하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 실제 지형은 부산의 OO-OO 지하화 고속도로 시공 구간 중 OO역 인근의 지형 정보를 적용하였으며, 상하행 터널을 각각 시공한 경우로 나누어 해석을 수행하였다. 지형의 GIS정보와 터널의 선형, 지층의 모델링은 상용 3D CAD 프로그램인 Rhinoceros (ver. 7)을 사용하여 Fig. 2와 같이 모델링 하였고, 모델의 유한차분해석은 상용 프로그램인 FLAC 3D (ver. 7.0)을 사용하였다. 평면 지형에서 좌측 터널을 Case 1, 실제 지형에서 좌측 터널을 Case 2, 평면 지형에 우측터널을 Case 3, 실제 지형에 우측터널을 Case 4로 하여 터널의 변형을 분석하였다(Fig. 3, Fig. 4). 본 연구는 터널 굴착 시 지형 정보 반영에 따른 지반과 터널의 거동을 분석한 것으로 터널 라이닝의 경우 보다 뚜렷한 거동을 확인하기 위해 콘크리트 라이닝만을 고려하였으며, 수치해석에 적용한 지반물성과 터널 라이닝의 입력 정보는 Table 1과 같고 터널의 단면 형상은 Fig. 5와 같다. 또한 초기응력 해석 시 터널 경계면에서  $K_0$  값이 1.5로 Table 1에서 적용한 값을 검증한 후 수치해석을 진행하였다.

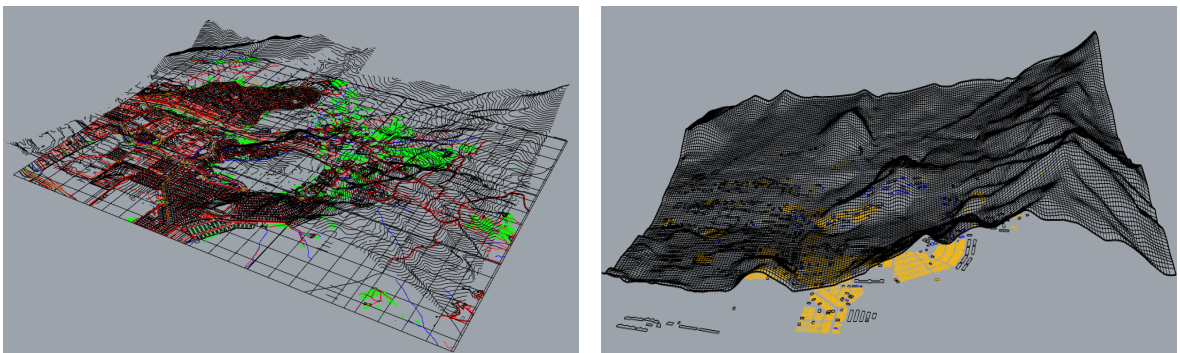


Fig. 2. Terrain modeling using GIS data

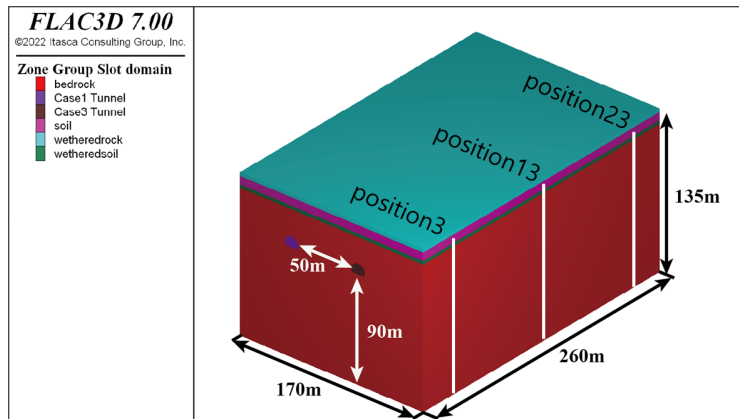


Fig. 3. Case of numerical analysis in planar terrain

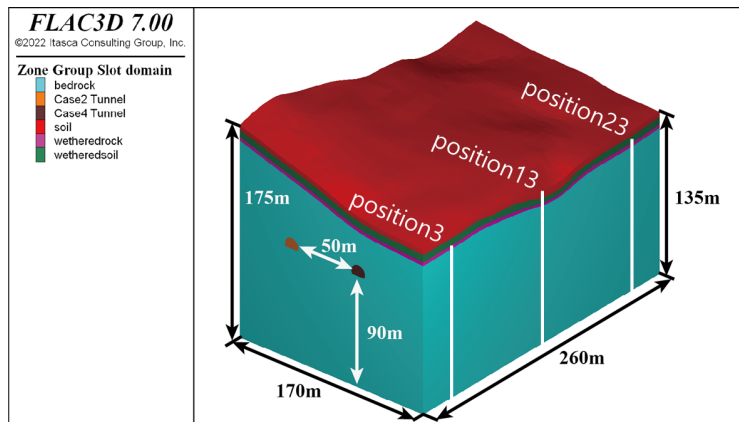


Fig. 4. Case of numerical analysis in real terrain

Table 1. Input parameters of the numerical analysis

Material	Sedimentary soil	Weathered soil	Weathered rock	Soft rock	Tunnel lining
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	18.0	18.0	23.0	25.5	22
Cohesion (kPa)	0	20.0	35.0	400.0	-
Angle of friction	28.0	30.0	33.0	35.0	-
Elastic modulus (kPa)	15,000	50,000	300,000	1,500,000	10.5E6
Poisson's ratio	0.35	0.33	0.3	0.25	0.25
K <sub>o</sub>	0.5	0.5	1.3	1.5	-
Model type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Elastic
Depth (m)	0~4	4~10	10~13	13~50	-

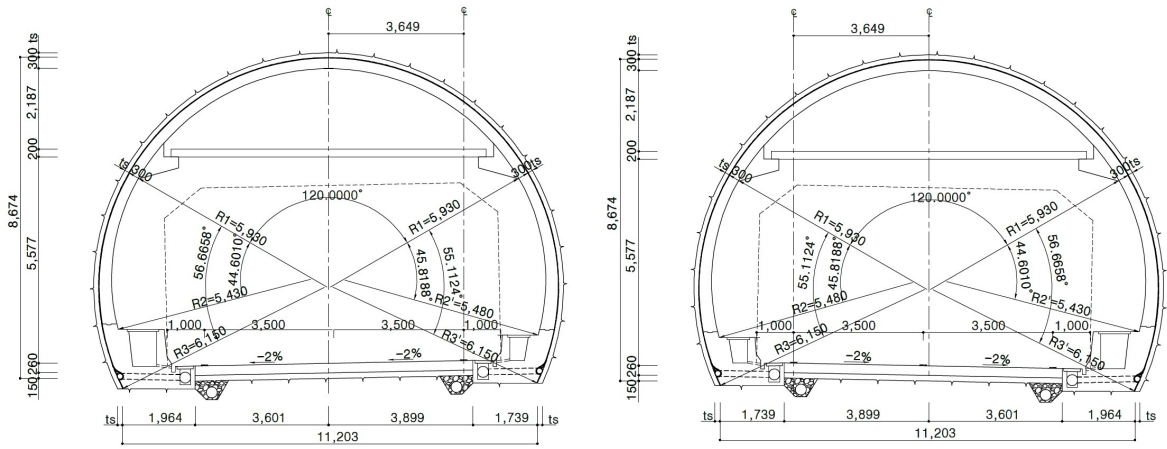


Fig. 5. Cross-sectional shape of tunnel

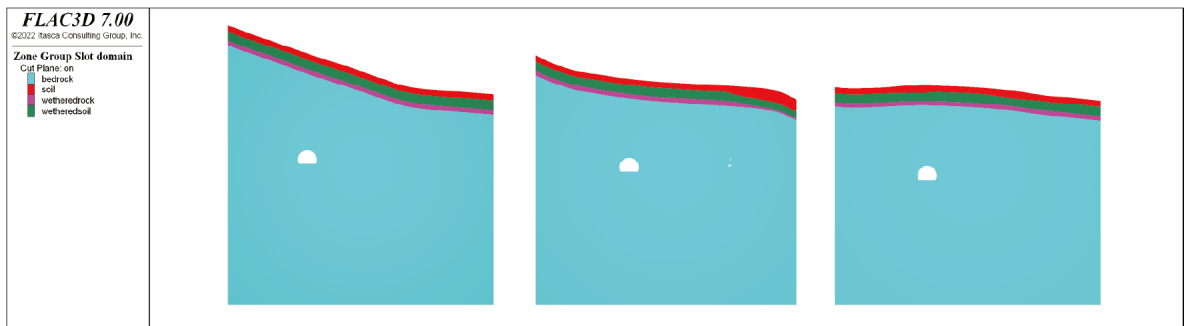
## 4. GIS 기반 지형 정보를 적용한 수치해석 결과분석

### 4.1 지반 거동 분석

지형 정보를 수치해석에 반영하였을 경우, 지반 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 지표침하를 분석하였다. 수치해석에 모사한 터널 굴착 Cycle에 따라 Table 2와 같이 데이터를 3가지 Position에서 추출하여 지표침하를 분석하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각 터널 별 데이터 추출 Position에 따른 단면도를 나타낸 것이다.

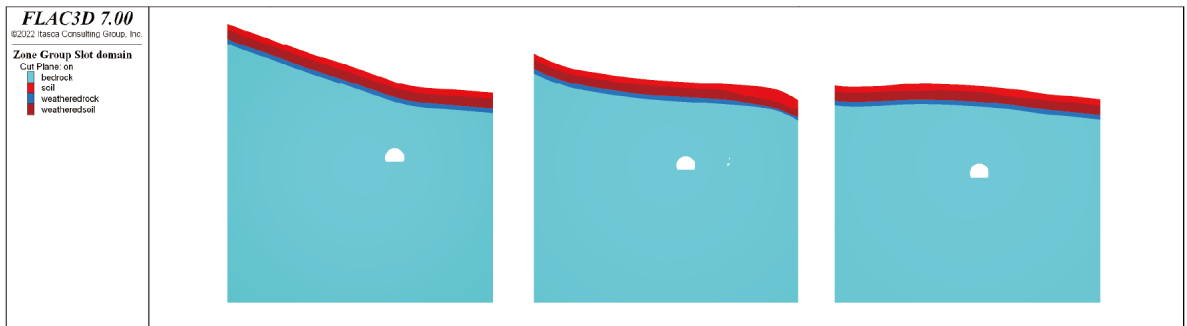
Table 2. Location of each position

	Position 3	Position 13	Position 23
Cycle No.	3-Cycle	13-Cycle	23-Cycle
Data location	20 m	120 m	220 m



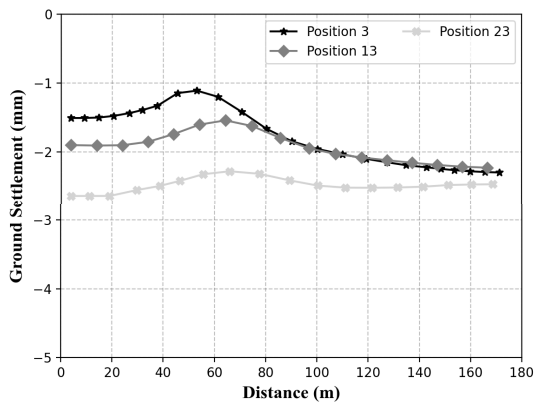
(a) Position 3 (b) Position 13 (c) Position 23

Fig. 6. Cross-sectional shape of each position in Case 2

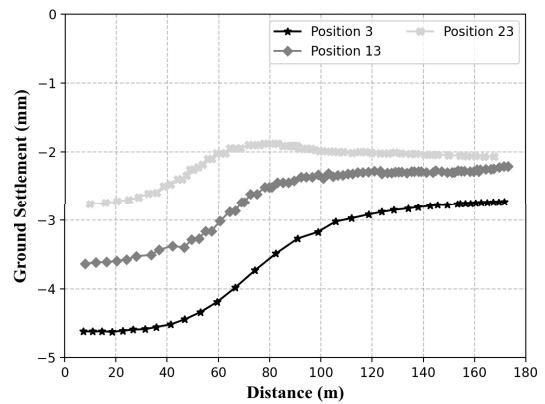


(a) Position 3 (b) Position 13 (c) Position 23  
**Fig. 7.** Cross-sectional shape of each position in Case 4

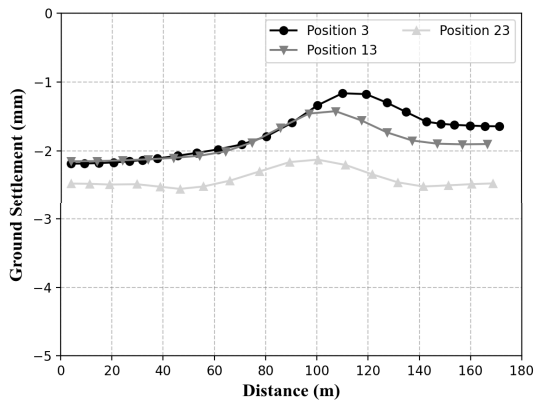
Fig. 8에 각 Case 별 지표침하에 대한 결과를 나타내었다. 실제 지형 정보가 반영되지 않은 Case 1과 Case 3 은 터널이 굴착된 지점에서 다른 지표와 약 0.5 mm의 차이가 발생하였으며, 그 외 지표에 대해서는 전반적으로



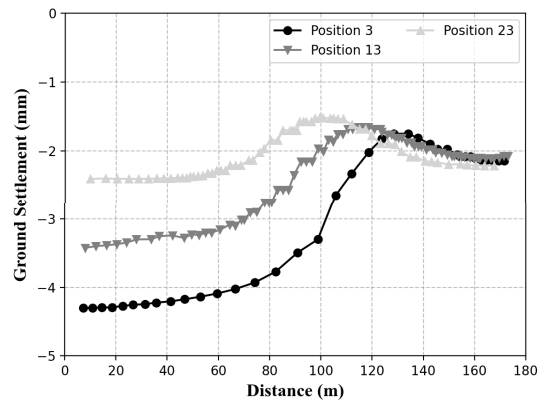
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

**Fig. 8.** Ground settlement profile of each case

1 mm 내 비슷한 수치의 지표침하가 발생하였다. 터널이 굴착되는 지점에서 주변 지표보다 지표침하가 덜 발생하는 이유는 터널이 위치한 지층인 암반층의 측압계수가 1보다 크며, 마제형의 터널 단면이 수렴될 때 천단부보다 spring line으로 많은 영향을 받았기 때문이라고 판단된다.

GIS 기반 지형 정보를 수치해석에 반영한 Case 2, Case 4의 경우, 지반의 형상에 따라 발생하는 침하양상이 지형을 고려하지 않은 경우와 매우 다르게 나타났으며, 지표침하 발생 정도에도 큰 차이를 보였다. 지표침하는 산악 지형과 같이 표고가 높을수록 크게 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

또한 Case 2와 Case 4의 Position 3과 같이, 같은 지형에서도 터널의 굴착 위치에 따라 발생하는 지표침하 값과 침하양상은 다르게 나타났다. Case 2는 산악지형 바로 아래 터널이 굴착된 경우로, 최대 -4.63 mm의 지표침하와 최소 -2.73 mm의 지표침하가 발생하였다. 반면에 Case 4는 산악지형 보다 우측에 치우쳐 터널이 굴착된 경우로, 최대 -4.30 mm의 지표침하와 최소 -1.75 mm의 지표침하가 발생하였다. 표고가 높은 지형 바로 아래 터널을 굴착하는 것보다 치우쳐 굴착하는 경우 최소 침하 값에서 약 1 mm 정도의 차이가 나타났다. 그러나 Case 4의 경우, 암반지층에서 측압계수와 마제형 터널 단면 형상으로 인해 터널 굴착 지점에서 지표침하가 덜 발생하는 현상과 지표 형상에 의해 Case 2에 비해서 침하 양상이 약 3 mm 차이로 매우 급격하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Table 3은 Case 별 발생하는 지반침하의 최대값과 최소값을 Position에 따라 나타낸 것이다.

**Table 3.** Maximum and minimum values of ground subsidence according to the position of each case (mm)

	Position 3		Position 13		Position 23	
	Min. Disp.	Max. Disp.	Min. Disp.	Max. Disp.	Min. Disp.	Max. Disp.
Case 1	-1.11	-2.30	-1.54	-2.23	-2.28	-2.64
Case 2	-2.73	-4.63	-2.18	-3.64	-1.88	-2.76
Case 3	-1.16	-2.19	-1.42	-2.15	-2.13	-2.55
Case 4	-1.75	-4.30	-1.66	-3.43	-1.52	-2.41

## 4.2 터널 거동 분석

### 4.2.1 터널의 천단변위

지형 정보를 수치해석에 반영하였을 경우, 터널에 미치는 영향을 분석하기 위해 터널 굴착에 따른 천단변위와 내공변위에 대해 분석하였다. 시공단계에 따른 각 Case 별 터널의 천단변위는 Fig. 9와 같다.

지형 정보가 고려되지 않은 Case 1과 Case 3의 경우, 터널이 굴착된 지점에서 최소 -4.47 mm 부터 최대 -8.08 mm 까지 천단침하가 비슷한 수치로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 굴착이 진행됨에 따라 터널의 천단부는 점차 침하하며, 터널 선형을 따라 굴착이 진행되지 않은 지점에서도 최대 -1.54 mm 천단침하가 발생하는 것을 알 수 있었다.

지형 정보가 고려된 Case 2의 경우 최대 천단침하가 -13.3 mm 발생하였으며, 상부 산악지형으로 인해 같은 지



점에서 지형을 고려하지 않은 Case 1과 약 10 mm의 차이를 보였다. 또한 터널 선형을 따라 굴착이 진행되지 않은 지점에서 터널의 천단부는 최대 0.3 mm 융기가 발생하였다. Case 4의 경우, 상부 지형으로 인해 최대 천단침하하는 -7.45 mm로 나타났으며, 최대 0.34 mm의 융기가 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 지형 정보를 고려하여 수치해석을 진행한 Case 2와 Case 4의 경우, 터널 굴착에 따라 발생하는 천단침하 뿐만 아니라 상부 지형에 따라 발생하는 천단침하의 영향이 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. Table 4는 Case 별 터널 천단침하의 최대값과 최소값을 나타낸 것이다.

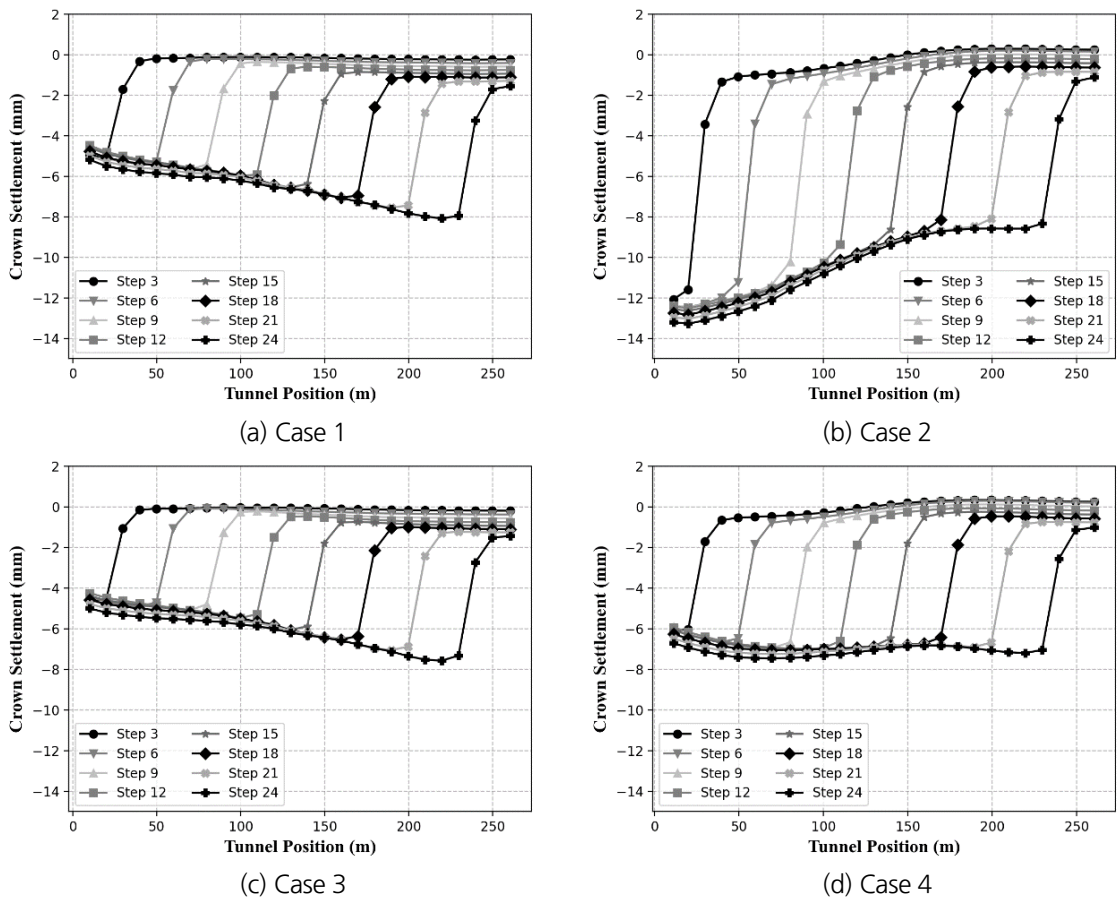


Fig. 9. Crown settlement profile of each case

Table 4. Maximum and minimum values of crown settlement of each case (mm)

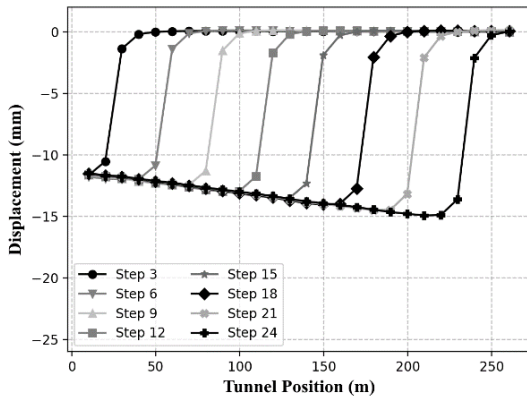
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Min. Disp.	-0.10	0.3	-0.03	0.34
Max. Disp.	-8.08	-13.3	-7.57	-7.45

### 4.2.2 터널의 내공변위

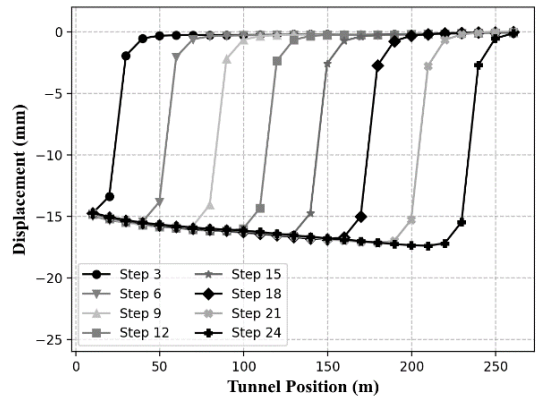
터널 굴착에 따른 내공변위의 경우, 상부 지형의 영향을 판단하기 위해 터널 단면에서 Spring Line을 따라 터널 좌측벽과 우측벽에 발생하는 변위를 분석하였다. 시공단계에 따른 각 Case 별 터널의 좌측 내공변위와 우측 내공 변위는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 10에서 나타난 바와 같이 터널 좌측벽에서 발생하는 변위의 경우, 지형을 고려하지 않은 Case 1과 Case 3에서 최소 10.53 mm에서 최대 15.44 mm까지 비슷한 양상으로 터널 단면이 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Case 1이 Case 3보다 터널이 지반의 좌측에 위치해 좌측벽에 발생하는 변위값이 다소 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

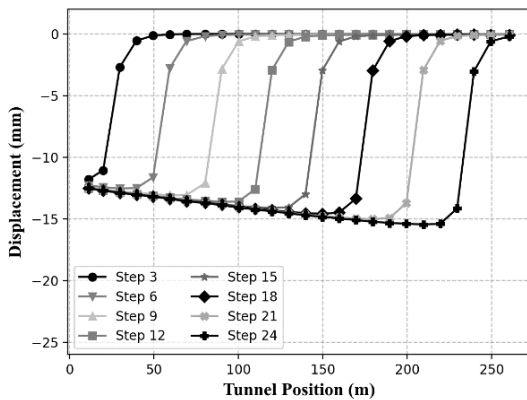
지형 정보가 고려된 Case 2와 Case 4의 경우, 상부 지반에 의해 좌측 내공변위 값에 차이를 보이는 것을 확인하였다. Case 2는 터널 굴착에 따라 최소 14.73 mm에서 최대 17.38 mm의 변위가 발생하였으며, 이는 지형 정보를 고려하지 않았을 때와 최대 4.2 mm 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 Case 4는 터널 굴착에 따라 최소



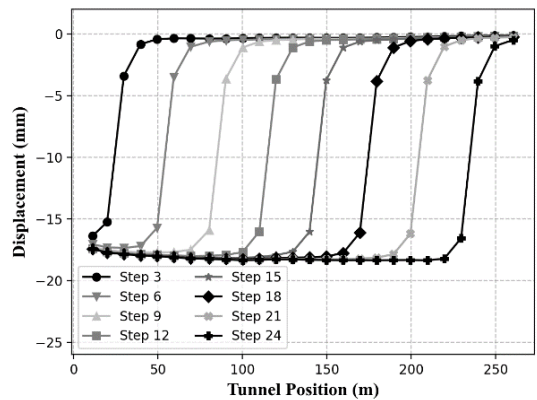
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

Fig. 10. Displacement of left tunnel wall in each case

16.37 mm에서 최대 18.35 mm의 변위가 발생하였으며, 이는 지형 정보를 고려하지 않았을 때와 최대 4.58 mm 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 산악지형 바로 아래 터널이 굴착된 Case 2보다 산악지형 우측아래에 치우쳐 터널이 위치한 Case 4의 경우, 터널 좌측벽에 발생하는 변위에 더 큰 차이를 보였으며 좌측벽에 발생하는 변위 또한 더 크게 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

터널의 우측벽에서 발생하는 변위의 경우, Fig. 11에 나타난 바와 같이 지형을 고려하지 않은 Case 1과 Case 3에서 터널 굴착에 따라 최소 11.60 mm에서 최대 15.74 mm의 변위가 발생하였으며, 터널의 위치에 상관없이 값은 큰 차이를 보이지 않았으며 터널 굴착이 진행될수록 변위값은 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

지형 정보가 고려된 Case 2와 Case 4의 경우, 상부 지반에 의해 터널 우측벽에 발생하는 변위가 지형 정보가 반영되지 않은 경우보다 더 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 터널 굴착에 따라 Case 2는 최소 15.04 mm에서 최대 17.79 mm의 변위가 발생하였으며, Case 4는 최소 15.98 mm에서 최대 17.43 mm의 변위가 발생하였다. 지형 정보를 고려하지 않은 경우와 비교하여 Case 2는 최대 3.04 mm의 차이가 발생하였으며, Case 4는 최대 4.38 mm의

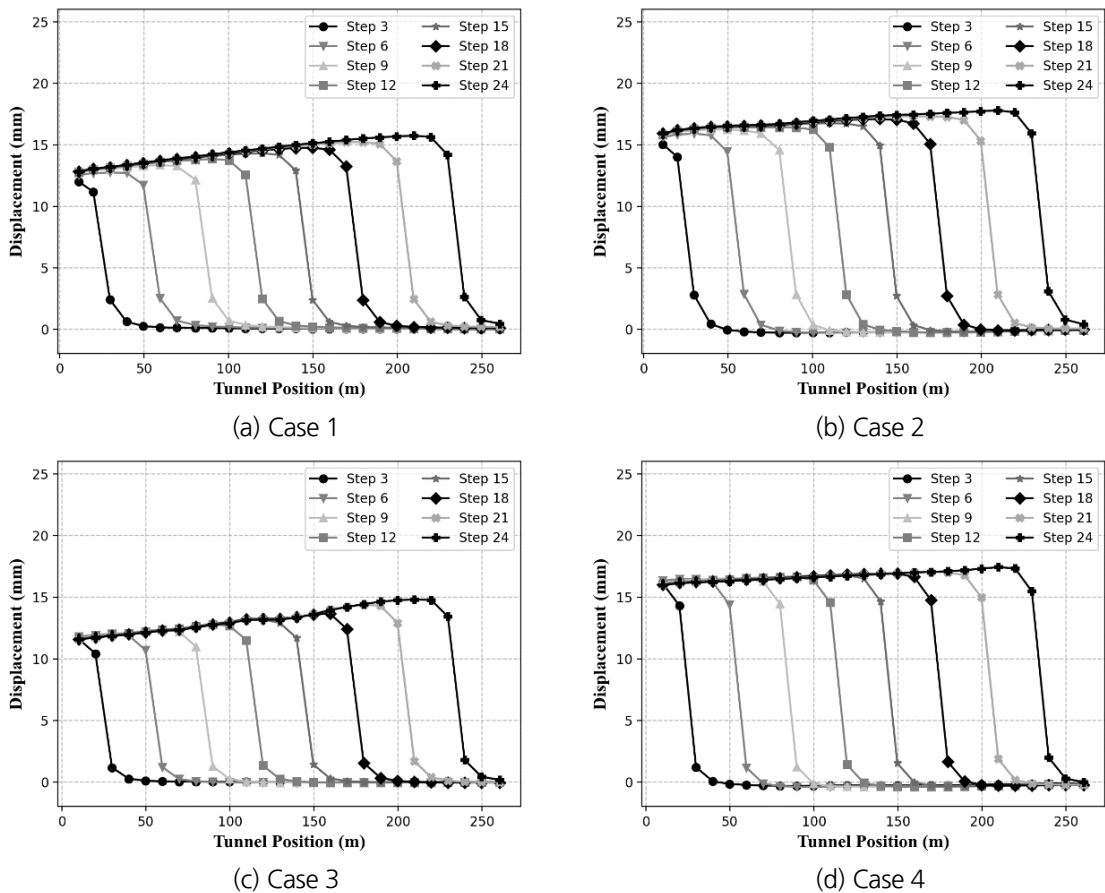


Fig. 11. Displacement of right tunnel wall in each case

차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Case 별 터널 좌측벽과 우측벽에 발생하는 최대 변위는 Table 5에 나타내었으며, 전반적으로 지형을 고려하였을 때 터널 내공변위의 경우 터널의 천단침하와 지표침하에 비해 지형 정보에 따른 민감도가 적음을 알 수 있었다.

**Table 5.** Maximum values of the displacement of tunnel wall in each case (mm)

Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right
-14.92	15.74	-17.38	17.79	-15.44	14.80	-18.35	17.43

## 5. 결론

본 연구에서는 수치해석을 진행할 때 실제 지형 정보를 반영한 해석과 그렇지 않은 경우의 차이점을 분석하기 위해서 3차원 수치해석을 진행하였다. 실제 지형을 반영한 모델과 평면 지형모델을 비교하였으며, 상행선과 하행선을 각각의 Case로 나누어 터널의 굴착 위치에 따라 실제 지형과 평면지형에서의 지표 침하양상과 터널의 거동에 관하여 분석한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 지표침하에 있어, 평면으로 지층 모델을 설정하여 수치해석을 진행할 경우 전반적으로 1 mm 내 비슷한 수치의 지표침하가 발생하며, 터널이 굴착되는 지점에서 주변 지표보다 지표침하가 덜 발생하였다. 이는 터널이 위치한 암반층의 측압계수가 1보다 크고, 마제형의 터널 단면이 수렴될 때 천단부보다 spring line으로 많은 영향을 받기 때문이라고 판단된다. 반면에 GIS 기반 지형 정보를 수치해석에 반영한 경우, 지표침하는 산악지형과 같이 표고가 높을수록 크게 발생한다는 것을 확인할 수 있었으며, 같은 지형이라 할지라도 터널 굴착 위치에 따라 지표침하량과 지표침하 양상은 다르게 나타나며, 표고가 높은 지형 바로 아래 터널을 굴착하는 것이 치우쳐 굴착하는 경우보다 지반침하가 더 크게 발생하였다.
2. 터널의 천단침하는 지형 정보가 고려되지 않은 경우 비슷한 수치와 양상을 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 굴착이 진행됨에 따라 터널의 천단부는 점차 침하하며, 터널 선형을 따라 굴착이 진행되지 않은 지점에서도 최대 -1.54 mm 천단침하가 발생하는 것을 알 수 있었다. 반면에 지형 정보를 고려하여 수치해석을 진행하게 되면, 같은 지점에서 지형을 고려하지 않은 경우와 최대 약 10 mm의 차이를 보였으며, 터널 굴착에 따라 발생하는 천단침하 뿐만 아니라 상부 지형에 의해 발생하는 천단침하의 영향이 매우 큰 것을 확인할 수 있었다.
3. 터널의 내공변위는 터널 좌측벽과 우측벽에 발생하는 변위를 분석하여 상부 지형의 영향을 판단하였다. 터널 좌측벽에서 발생하는 변위의 경우, 지형을 고려하지 않았을 때, 터널이 지반의 우측에 위치하는 경우보다 좌측에 위치하는 경우에서 변위값이 다소 작게 나타남을 확인할 수 있었으며, 지형 정보가 고려된 경우, 상부 지반에 의해 지형이 고려되지 않은 경우보다 최대 4.58 mm 차이를 보이는 것을 확인하였다. 터널의 우측벽에서

발생하는 변위의 경우, 지형을 고려하지 않았을 때, 터널의 위치에 상관없이 값은 큰 차이를 보이지 않았으며 터널 굴착이 진행될수록 변위값은 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 지형 정보가 고려된 경우, 상부 지반에 의해 터널 우측벽에 발생하는 변위가 지형 정보가 반영되지 않은 경우보다 최대 4.38 mm 더 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

최종적으로 본 연구에서 GIS 기반으로 실제 지형 정보를 반영한 결과, 지반침하의 경우 표고가 30 m 이상일 때 지반거동에 있어 명확한 차이를 보였으며 이 때 천단침하의 경우 최대 약 10 mm의 차이를 보였다. 향후 본 연구를 기반으로 도심지 터널 굴착 시 지형과 인접구조물을 고려한 지반거동과 터널거동 분석을 위해 지형 정보 뿐만 아니라 인접 구조물 데이터를 반영하여 추가적인 분석을 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 ‘도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구(22UUTI-B157787-03)’ 연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 저자 기여도

조재은은 연구 개념 및 설계, 수치해석을 수행하였고, 정예림은 원고작성 및 데이터 분석을 하였고, 송성민, 윤지석은 데이터 수집을 하였고, 하상귀는 원고작성 및 원고 검토를 하였고, 유한규는 연구 개념 및 설계와 원고 검토를 하였다.

## References

1. Ahmed, M., Iskander, M. (2011), “Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 5, pp. 525-535.
2. Attewell, P.B., Yeates, J., Selby, A.R. (1986), *Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures*, Chapman and Hall, New York, pp. 310-317.
3. Clough, G.W., Schmidt, B. (1981), “Chapter 8 - Design and performance of excavations and tunnels in soft clay”, *Developments in Geotechnical Engineering (Soft Clay Engineering)*, Vol. 20, Elsevier, pp. 567-634.
4. Do, N.A., Dias, D., Oreste, P., Djeran-Maigre, I. (2014), “Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 42, pp. 40-51.
5. Hosseini, S.A.A., Mohammadenejad, M., Hoseini, S.M., Mikaeil, R., Tolooiyan, A. (2012), “Numerical and analytical investigation of ground surface settlement due to subway excavation”, *Geosciences*, Vol. 2, No. 6, pp. 185-191.

6. Loganathan, N., Poulos, H. (1998), "Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 9, pp. 846-856.
7. Mair, R.J., Taylor, R.N., Bracegirdle, A. (1993), "Subsurface settlement profiles above tunnels in clays", *Geotechnique*, Vol. 43, No. 2, pp. 315-320.
8. Ng, C.W., Lee, K.M., Tang, D.K. (2004), "Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 523-539.
9. O'Reilly, M.P., New, B.M. (1982), "Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction", *Tunnelling 82, Proceedings of the 3rd International Symposium, Brighton*, pp. 173-181.
10. Park, C.H., Lee, S.D. (2017), "Experimental study on the ground subsidence due to the excavation of a shallow tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 5, pp. 761-778.
11. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City*, pp. 225-290.
12. Piciullo, L., Ritter, S., Lysdahl, A.O.K., Langford, J., Nadim, F. (2021), "Assessment of building damage due to excavation-induced displacements: The GIBV method", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 108, 103673.
13. Sagaseta, C. (1987), "Analysis of undrained soil deformation due to ground loss", *Geotechnique*, Vol. 37, No. 3, pp. 301-320.
14. Verruijt, A., Booker, J.R. (1998), "Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane", *Geotechnique*, Vol. 48, No. 5, pp. 709-713.
15. Yang, H., Shi, H., Jiang, X., Liu, C. (2020), "Influence of construction process of double-line shield tunnel crossing frame structure on ground settlement", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 38, No. 2, pp. 1531-1545.