

# 지진 시 공동구용 수직구-터널 접속부 거동에 대한 경계면 강성 계수의 영향

김정태<sup>1</sup> · 홍은수<sup>2</sup> · 강석준<sup>1</sup> · 조계춘<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>학생회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 국립공주대학교 건설환경공학부 토목환경공학전공 계약교수

<sup>3</sup>정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

## Effects of interface stiffness on dynamic behavior of connections between vertical shafts and tunnels under earthquake

Jung-Tae Kim<sup>1</sup> · Eun-Soo Hong<sup>2</sup> · Seok-Jun Kang<sup>1</sup> · Gye-Chun Cho<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>2</sup>Research Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

\*Corresponding Author : Gye-Chun Cho, gyechun@kaist.edu

### Abstract

A great interest in the seismic performance evaluation of small size tunnel structures such as utility tunnel has been taken since recent earthquakes at Pohang and Gyeongju in Korea. In this study, the three-dimensional dynamic analyses of vertical shaft and horizontal tunnel under seismic load were carried out using FLAC3D. Especially, parametric analyses was performed to investigate the effects of interfacial stiffness on interfacial behavior between soil and structure. The parametric analysis showed that the interfacial stiffness scarcely gave an effect on the global dynamic behavior of the structure, while had a significant effect on the local displacement behavior of the connections. The magnitude of the interfacial stiffness was inversely proportional to the displacement, while the magnitude of interface stiffness was proportional to the normal and shear stresses. The results of this study suggest the limitations of the existing empirical equations for interfacial stiffness and emphasize the need to develop new interfacial stiffness models.

**Keywords:** Numerical analysis, Dynamic behavior, Vertical shaft-tunnel connection, Soil-structure interaction, Interface stiffness

### 초 록

최근 발생한 포항과 경주 지진 이후 공동구와 같은 소단면 터널 구조물에 대한 내진 성능 평가에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 연구에서는 유한 차분법 기반의 FLAC3D를 사용하여 지진 하중에 대한 수직구와 수평 터널 구조물에 대한 3차원 동적 해석을 수행

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
21(6)861-874(2019)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.6.861>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 23, 2019

Revised October 8, 2019

Accepted October 19, 2019



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 © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

하였다. 특히 지반과 구조물 사이 경계면 특성을 고려한 지반-구조물 상호 해석 시 중요 인자인 경계면 강성 계수의 영향을 분석하기 위한 매개변수 해석을 수행하였다. 매개변수 해석을 통해 경계면 강성 계수는 지하 구조물의 전체 동적 거동에는 큰 영향을 미치지 않지만 접촉부의 국부적인 변위 거동에는 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다. 경계면 강성 계수의 크기는 접촉부에서의 변위와 반비례하는 경향을 보였으며, 수직 응력 및 전단 응력에 대해서는 비례하는 경향을 확인하였다. 연구 결과 수치 해석에서 주로 사용되고 있는 경계면 강성 계수에 대한 경험적 식의 한계를 제시할 수 있었으며, 새로운 경계면 강성 계수 모델 개발의 필요성을 확인하였다.

**주요어:** 수치해석, 동적 거동, 수직구-터널 접촉부, 지반 구조물 상호작용, 경계면 강성 계수

## 1. 서론

우리나라의 경우 상대적으로 지진에 대해 안전하다고 여겨져 왔으나 최근 경주와 포항에서 각각 규모 5.8 및 5.4의 기록적인 지진이 발생하였으며, 상대적으로 규모가 큰 지진 발생 빈도도 잦아지고 있다. 이러한 영향으로 국내에서는 구조물 내진 성능에 대한 관심이 증가하고 있다(Grigoli et al., 2018; Kim et al., 2018). 국내외에서 지진에 대한 터널의 동적 거동에 대한 연구는 다수가 수행되었으나 수직구 구조물의 지진 안정성에 대한 연구는 매우 적으며(Ohbo and Ueno, 1992; Kim et al., 2010, 2011), 수직구와 터널의 접촉부에 대한 지진 안정성을 연구한 사례(Aguilar-Télez et al., 2012; Yamazaki et al., 2013; Jang et al., 2017)는 많지 않다. 최근 국내에서 건설되는 도심지 수직구는 기존 지하구조물과의 간섭을 피하기 위해 50 m 이상의 깊이에 건설되는 사례가 증가하고 있다. 지진 발생으로 인한 접촉부 구조물의 구조적 손상, 균열에 의한 침수로 인한 피해 발생 가능성에 대한 연구가 보고되었으나(Yamazaki et al., 2013; Likar et al., 2015), 국내에서 지진 하중에 대한 지하 구조물의 접촉부 구조물의 안정성 분석에 대한 연구는 많지 않다(Kim et al., 2018).

지진과 같은 동적 하중이 작용할 때 지하 구조물의 동적 거동은 구조물만 아니라 주변 지반 및 기초의 거동에 크게 좌우된다. 이에 따라 지하 구조물과 주변 지반 사이의 경계면 특성을 고려하는 지반-구조물 상호작용 해석(Soil-Structure Interaction, SSI)에 대한 중요성이 강조되어 왔으며, 이에 대한 연구가 다양하게 수행되었다(Mylonakis and Gazetas, 2000; Pitilakis et al., 2008; Tuladhar et al., 2008). 구조물과 주변 지반의 경계면 특성을 고려한 수치해석 시 필요한 경계면 입력 특성치는 내부마찰각, 점착력, 팽창각, 흙의 인장강도, 경계면 강성 계수 등이 있으며, 특히 경계면 강성 계수(interface stiffness)는 동적 하중에 대한 지하구조물 응답에 큰 영향을 미치는 경계면 물성이다(Yu et al., 2015). 일반적으로 경계면 강성 계수는 직접 전단 시험(direct shear test) 또는 삼축 시험(triaxial test)을 통해 얻은 응력-변형률 곡선(stress strain curve)으로 도출할 수 있다. 경계면을 이루는 두 매질의 종류에 따라 10 MPa에서 100 MPa 사이(연질 점토가 채워진 암반 경계면) 또는 100 GPa/m 이상(단단한 암반 경계면)으로 다양한 값을 나타낸다(Kulhawy, 1975; Bandis et al., 1983). 또한 경계면 강성 계수는 지하 구조물의 재료와 접촉면에 작용하는 하중에 영향을 받는다는 사실이 밝혀졌다(Rosso, 1976; Li et al., 2015). 그럼

에도 불구하고 지반 공학 분야에서 널리 사용되고 있는 Itasca사의 FLAC3D의 경우, 접촉면 하중을 고려하지 않고 지하구조물 주변 지반의 강성에만 의존한 경계면 강성 계수 모델을 사용하고 있다. 그러나 대부분의 경계면 강성 계수에 대한 연구는 암반 절리면에 대한 영향에 대한 연구가 주를 이루고 있으며(Saxena et al., 2011; Saxena and Paul, 2012; Choi et al., 2014; Davy et al., 2018; Sawada et al., 2018), 수직구 및 터널 구조물에 대해 경계면 강성 계수 영향을 고려한 연구는 많지 않다. 지진 하중에 따른 수직구 구조물과 수평 터널의 동적 거동에 대한 주변 지반 특성 및 지진파의 주기에 대한 영향에 대하여 지반-구조물 상호작용 해석을 통한 연구가 수행된 바 있지만 경계면 강성 계수에 따른 동적 거동 영향성에 대한 검토는 거의 수행된 것이 없다(Kim et al., 2018).

이 연구에서는 수직구 구조물의 동적 거동에 대한 경계면 강성 계수의 영향을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 지반 공학 분야에서 널리 사용되고 있는 유한 차분법 기반의 FLAC3D 프로그램을 활용하여 3차원 동적 해석을 수행하였다. 경계면 강성 계수 크기에 따라 매개변수 케이스를 설정하여 지진 하중에 대한 수직구와 터널 구조물의 전체 거동 및 접촉부 부분의 국부적인 동적 거동을 비교 분석 하였다. 이 연구의 결과는 공동구와 같은 소단면 터널 구조물에 대한 것이며 수치 해석적 연구 결과로써 실제 수직구 접촉부의 거동을 정확하게 나타낸다고 할 수는 없지만, 지하 구조물의 동적 해석에 대한 경계면 강성 계수의 영향을 제시하여 기존에 사용되고 있는 경험적 모델을 보완한 새로운 경계면 강성 계수 모델 개발의 필요성을 확인 할 수 있었다.

## 2. 해석 개요

수직구, 터널과 같은 지하 구조물에 대한 동적 해석 수행 시, 구조물과 지반 사이의 상호작용(Soil Structure Interaction, SSI)을 고려한 내진 해석이 수행 되어야 한다. 경계면 강성 계수(interface stiffness)는 수치 모델에서 SSI 해석 수행 시 강성이 다른 두 물체 사이의 경계 면에서 하중 산정을 위해 중요한 입력 인자로 사용되고 있다(Rayhani and El Naggar, 2008). 이 연구에서는 경계면 강성 계수에 따른 매개변수 케이스를 설정하고 일반적인 지진파인 단주기 특성을 가진 실제 지진파(Ofunato) 데이터를 활용하여 3.5 m급 소단면 공동구 터널의 수직구 및 터널 구조물에 대한 동적 거동 해석을 수행하였다. 해석은 지반 공학 분야에 널리 사용되고 있는 유한 차분법 기반의 Itasca 사의 FLAC3D를 사용하였다.

### 2.1 경계면 특성 모델(FLAC3D)

FLAC3D를 활용한 구조물-지반 경계면 특성을 고려한 SSI해석 수행 시, 강성이 다른 두 물체의 경계면에서의 하중 전달(load transfer)은 아래와 같은 식 (1)과 (2)와 같은 구성 모델(constitutive model) 따른다. 일반적으로 경계면 강성 계수는 식 (3)을 따르며, 특정 값에 대한 해석을 원할 경우 FISH 함수를 이용하여 사용자가 원하는 값으로 사용 가능하다.

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A, \quad (1)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{(t+(1/2)\Delta t)} A + \sigma_{si} A, \quad (2)$$

$$k_s = k_n = \max \left[ \frac{\left( K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (3)$$

여기서,  $F_n^{(t+\Delta t)}$ ,  $F_{si}^{(t+\Delta t)}$ 는 각각 시간( $t + \Delta t$ )에서의 전달되는 수직 및 전단 하중[N]이며,  $u_n$ ,  $u_{si}$ 는 각각 수직, 전단 방향의 변위[m],  $k_s$ ,  $k_n$ 은 각각 전단 경계면 강성 계수[Pa/m], 수직 경계면 강성 계수[Pa/m]이다. 또한  $\sigma_n$ ,  $\sigma_{si}$ 는 각각 수직 및 전단 응력[Pa]이며,  $A$ 는 경계면 적용 면적[m<sup>2</sup>],  $K$ 는 체적 탄성계수[Pa],  $G$ 는 전단 탄성계수[Pa]이다.  $\Delta z_{\min}$ 은 구조물과 인접한 요소 망의 최소 높이[m]이다(Itasca, 2013). 위 구성 모델에 따르면 역학적으로 안정된 계(system)에 대하여 일정한 외부 하중이 가해질 때, 경계면 강성 계수가 클수록 발생하는 변위는 줄어들 것이라는 예측이 가능하다. Itasca는 “1)인접 지층 강성 값의 10배 이상의 경계면 강성 계수 값이 해석에 적용될 경우 해석 수행 시간은 늘어나지만 해석 결과에는 크게 영향을 미치지 않으며, 2) 경계면 강성 계수의 경험 값은 구조물 주변 지반 강성의 10배이다.”라고 제안한바(Itasca, 2013) 있다.

## 2.2 해석 대상 구조물 및 지반 모델링

해석에 사용된 수직구와 터널의 구조물의 규모는 소단면 공동구와 규모가 비슷한 최근 국내 전력구 현장의 추세를 반영하였으며(Table 1), 수직구의 심도는 50 m로 모델링 하였다. 다층 지반 모사를 위해 지층은 풍화토~연암층(Layer 1~3)으로 3개 층으로 구분하였으며, 이 연구는 접촉부 동적 변위에 대한 경계면 강성 계수의 정성적 영향을 수치해석을 통해 분석한 연구로 동적 해석을 위한 지층의 동적 특성은 Seed and Idriss (1970)의 사질토 시험 데이터를 인용하였다(Table 2). 수직구-터널 접촉부는 풍화암 지반(Layer 2)에 위치하도록 모델링 하였다. 모델의 규모는 경계 효과가 발생하지 않도록 충분한 거리를 두었으며, 100 m × 50 m × 100 m (가로 × 세로 × 높이)의 3차원 반단면으로 구성 하였다. 수직구-터널 접촉부의 경우 직경이 서로 다른 수직구와 터널이 만나는 부분으로 그 구조가 복잡한 3차원 형태를 가지고 있다. 이러한 접촉부의 3차원 구조를 모델링하기 위해, 상대적으로 모델링이 간편한 유한 요소 기반의 MIDAS GTX NX 프로그램을 활용하여 접촉부 구조를 모델링하고 이를 FLAC3D와 연동하였다.

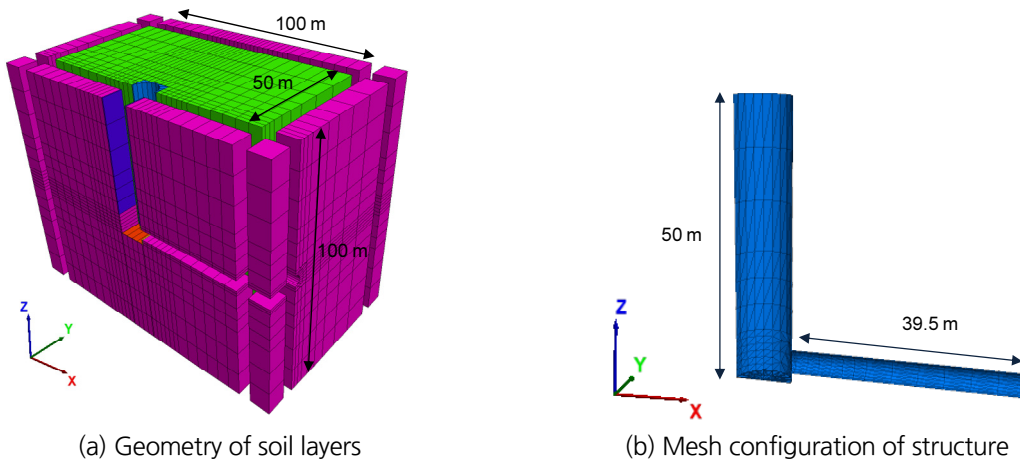
**Table 1.** Underground structure dimension and properties for analysis

Structure	External diameter [m]	Inner diameter [m]	Thickness [m]	Length [m]
Vertical shaft	11.0	10.0	0.50	50.0
Tunnel	5.00	4.50	0.25	39.5
Properties	Elastic modulus [Pa]		Poisson's ratio [-]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
Value	2 × 10 <sup>10</sup>		0.2	2500

**Table 2.** Properties of soil layers

Soil layers	Weathered soil	Weathered rock	Soft rock
Layer No.	Layer 1	Layer 2	Layer 3
Model type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Depth range [m]	0~40	40~70	70~100
Shear modulus [Pa]	$1.92 \times 10^7$	$1.92 \times 10^8$	$8.0 \times 10^8$
Bulk modulus [Pa]	$4.17 \times 10^7$	$4.17 \times 10^8$	$1.33 \times 10^9$
Unit weight [ $\text{kg/m}^3$ ]	1800	2300	2500
Friction angle [ $^\circ$ ]	30	33	35
Cohesion [Pa]	$2.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^5$
Damping model	Default hysteresis model		
Damping parameter	$L_1 = -3.325, L_2 = 0.823$ (Seed and Idriss, 1970)		

또한 경계면에서 동적 하중이 반사되어 지반 내에서 증폭 또는 간섭 되는 영향을 제거하기 위해 자유 경계면 (Free-field boundary)을 모델링 하였다(Fig. 1(a)). 수직구와 터널 구조물의 모델링은 경계면에서의 전단, 수직 및 인장 응력에 대한 경계면 거동 특성 분석이 가능한 liner structure 요소를 사용 하였으며 동적 하중에 대한 접촉부의 최대 변위 분석을 위해 상대적으로 큰 점착력( $C = 1 \times 10^{20}$  Pa)을 경계면에 적용하여 미끄러짐 현상이 발생하지 않도록 모델링하였다. 또한, 지반과 구조물 사이의 경계는 경계면 특성을 고려할 수 있는 경계면 요소망 (Interface node, element)을 배치하였다(Fig. 1(b)). 구조물은 선형 탄성 재료로 고려하였으며 지반은 모호-쿨롱 (Mohr-Coulomb) 모델을 파괴 모델로 사용하여 탄소성(elastoplastic) 재료로 모델하였다.



**Fig. 1.** Modelling for numerical analysis

### 2.3 동적 하중 조건

해석에 사용된 지진파는 실제 지진 데이터 중 일반적인 단주기 특성을 가진 Ofunato 지진파 데이터를 활용하였으며, 국내 내진설계 기준의 1등급 붕괴방지수준인 최대 가속도 0.154 g로 지진 데이터를 스케일링 하여 모사하였다(Fig. 2). 지진파는 서로 직교하는 전단 방향( $S_H$ (X축) 및  $S_V$ (Y축))로 각각 최대 가속도 0.154 g ( $S_H$ ), 0.077 g ( $S_V$ )의 스케일로 Z축 방향으로 기반암에서부터 지표면으로 동시에 진행하도록 입력 하였다.

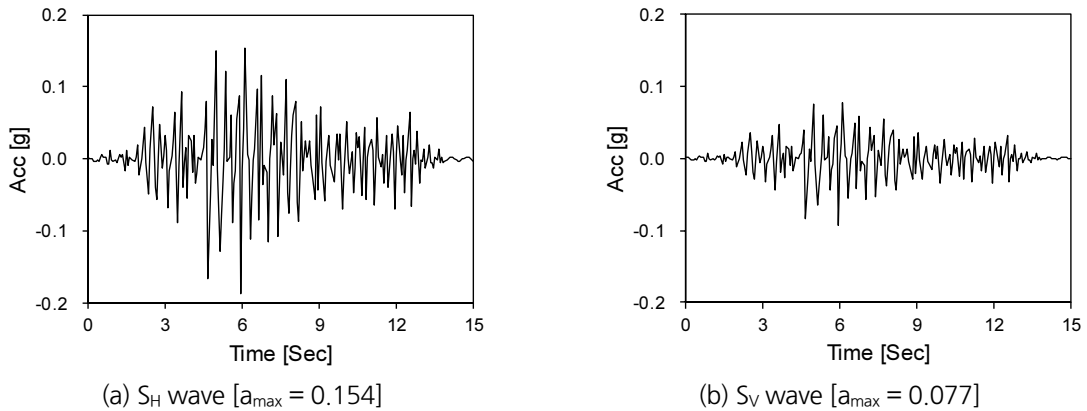


Fig. 2. Scaled earthquake for analysis (Ofunato)

### 2.4 매개변수 해석 케이스 선정

매개변수 해석 케이스 선정은 FLAC3D에서 사용되는 식 (3)을 통해 도출한 경계면 강성 계수(Layer 1 = 22.75 MPa/m, Layer 2 = 1.975 GPa/m)를 기준(Case A)으로 선정하였다. Case B와 C의 경우, 각각 Case A의 5배, 10 배의 경계면 강성 계수를 적용함으로써 구조물의 동적 응답에 대한 경계면 강성 계수 크기의 영향을 검토하기 위한 케이스로 설정하였다. 또한 Case A에서 적용된 경계면 강성 계수 값은 FLAC3D에서 제안한 주변 지반 강성 값의 10배인 경험값(Layer 1 = 192 MPa/m, Layer 2 = 1.92 GPa/m)과는 각각의 지층에 대하여 약 8.4배와 0.97배 로그 차이가 작지 않다(Fig. 3). 따라서 Case D와 E의 경우는 각각 풍화토(Layer 1), 풍화암(Layer 2) 지반의 전단 강성 계수( $G$ )와 전단 강성 계수의 10배 값을 경계면 강성 계수로 적용하여 FLAC3D에서 제안한 경험값과 경계면 강성 계수 모델(식 (3))의 값을 비교하기 위해 설정하였다. 경계면 강성 계수 값은 경계면을 이루는 두 매질의 특성에 따라 다양한 값을 나타내며, 각 매개변수 케이스에 적용된 경계면 강성 계수의 범위는 1.92 MPa에서 19.75 GPa 사이의 값으로 적절하게 적용하였다. 매개변수 해석을 위한 케이스는 아래 Table 3에 정리하였다.

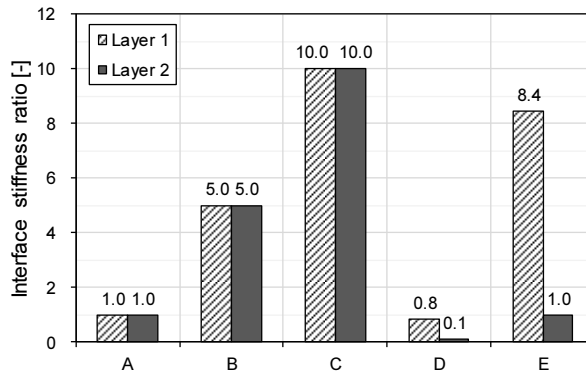


Fig. 3. Interface stiffness ratio for all cases compared with Case A

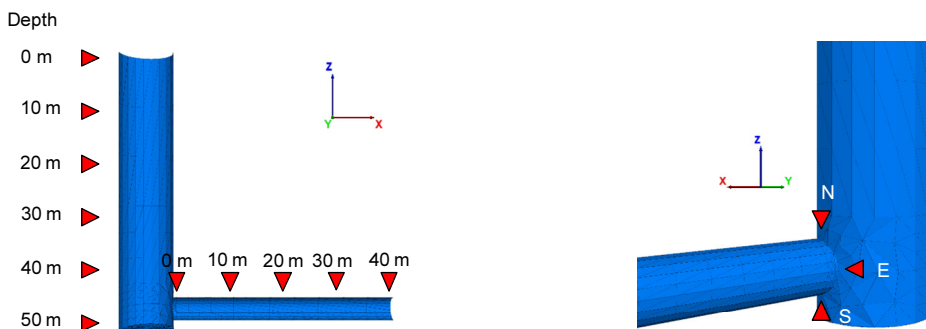
Table 3. Interface stiffness for analysis cases

[Pa/m]

Layer	A	B	C	D	E
1	$2.275 \times 10^7$	$5 \times 2.275 \times 10^7$	$10 \times 2.275 \times 10^7$	$1.920 \times 10^7$	$1.920 \times 10^8$
2	$1.975 \times 10^9$	$5 \times 1.975 \times 10^9$	$10 \times 1.975 \times 10^9$	$1.920 \times 10^8$	$1.920 \times 10^9$

### 2.5 관측 지점 선정

지진 하중에 대한 수직구 및 터널 구조물 전체의 동적 거동 파악을 위해 아래 Fig. 4(a)와 같이 관측 지점을 선정하였다. 수직구의 경우, 상대적으로 큰 지진 가속도를 가진 S<sub>H</sub>파의 진동 방향(X축 방향) 거동 파악을 위해 깊이에 따라 10 m 간격으로 X축 방향 변위 관측 지점 여섯 곳을 선정하였고, 수평 터널에 대해서는 지진파의 진행 방향과 같은 Z축 방향 변위 관측을 위해 수평 터널 축 방향을 따라 10 m 간격으로 다섯 곳의 관측 점을 선정하였다. 또한 지진파에 대한 접촉부 부분의 국부적인 거동파악을 위해 터널 상단부(tunnel crown, N), 하단부(tunnel bottom, S), 그리고 터널 중앙부(spring line, E)의 변위 관측을 위한 관측 점 세 곳을 Fig. 4(b)와 같이 선정하였다.



(a) Observing points for global behavior of structure (b) Observing points for local behavior of connection

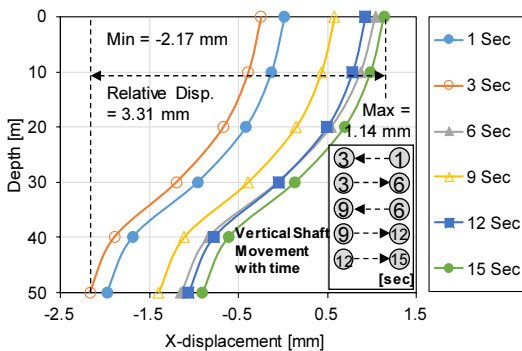
Fig. 4. Inspection points for estimating structural behavior during earthquake

### 3. 매개변수 해석 결과

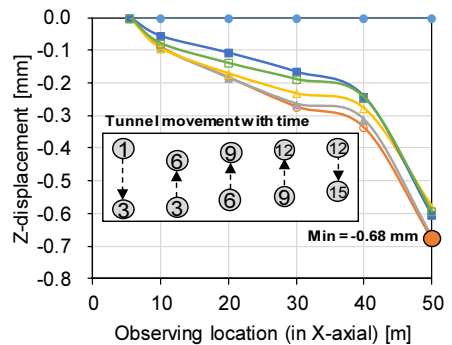
이 연구에서는 지하 구조물의 동적 응답에 대한 경계면 강성 계수에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 설치된 관측 지점을 통해 수직구와 수평 터널의 전체 거동 특성을 검토하고, 구조물에 발생하는 전단 응력 분포와 주변 지반 변위 분포를 통해 응력이 집중되는 위치에 대한 분석을 수행하였다. 또한 접촉부 위치에서의 국부적인 변위 특성과 경계면 강성 계수의 관계를 분석하였다.

#### 3.1 전체 수직구 구조물 및 수평 터널의 동적 거동 특성

수직구 및 터널 구조물의 전체 거동 분석은 지하 구조물 주변 지반의 체적 탄성계수(bulk modulus) 및 전단 탄성계수(shear modulus)를 활용하여 FLAC3D 내의 경계면 강성 계수 모델(식 (3))을 통해 도출된 Case A에 대한 결과를 통해 검토하였다. 지진 하중에 대한 수직구 구조물의 터널 축방향 변위(X축 방향)는 아래 Fig. 5(a)와 같다. 수직구 구조물은 지진 발생 시간 동안 수직구 전체가 지진 진동 방향에 따라 종방향(X축)으로 좌우 거동이 발생하는 것을 확인하였다. 수직구 구조물의 최대 종변위( $X_{max}$ ) 및 최소 종변위( $X_{min}$ )의 상대적인 차이는 약 3.31 mm로 수직구 구조물의 심도 50 m에 비해 종방향 변위는 구조물의 전체적인 거동 파악에 있어 무시할 수 있는 수준으로 판단된다. 다만, 위 결과에서 주목할 만한 특징은 다층 지반에 속한 지하구조물의 동적 거동은 구조물 주변 지반에 크게 영향을 받는 것을 확인하였다. 서로 다른 지반의 경계면이 존재하는 지표 하 약 40 m 지점에서 종방향 변위가 크게 변하는 것을 확인하였다. 이는 해석에 사용된 지진 하중의 규모가 구조물에 큰 변위를 발생시킬 만큼 크지 않았던 점과 각각의 지층의 동적 하중에 대한 전단탄성계수 감쇠 특성의 차이 때문이라고 판단된다. 이는 유한 요소 기반의 MIDAS GTX NX 프로그램을 활용한 이전의 연구 결과(Kim et al., 2018)와 유사하다.



(a) Global behavior of vertical shaft (in X axis)



(b) Global behavior of horizontal tunnel (in Z axis)

Fig. 5. Global responses of vertical shaft and tunnel (Case A)

수평 터널의 지진파의 진행 방향(Z축)에 대한 동적 거동은 Fig. 5(b)와 같다. 수직구 구조물의 동적 거동과 유사하게 수평 터널도 지진파 발생 시간에 따라 지진파 진행 방향으로 위 아래로 거동하는 것을 확인하였다. 터널 구



조물의 수직 방향의 최대 변위는 약 0.68 mm로 수직구 구조물의 종방향 동적 거동과 같이 그 차이가 무시할 수 있을 만큼 적어 경계면 강성 계수는 수평 터널의 전체 동적 거동에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

지진 하중 발생에 따른 수직구 주변 지반 거동은 아래 Fig. 6과 같다. 수직구 구조물의 종방향 변위 결과(Fig. 5(a))와 같이 지하 구조물의 최대 변위가 발생하였던 지표 부근에서 최대 지반 변위가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 지하 구조물 주변 지반 변위에서도 서로 다른 지반 물성을 가진 지반 경계면이 위치하는 지표면 아래 40 m 주위에서 수평 방향으로 큰 변위 분포가 발생하는 것을 확인하였다(Fig. 6(a)). Case A에서 발생한 최대 변위 값은 약 1.61 mm로 그 크기는 크지 않은 것을 확인하였다.

지진 하중에 대한 지하 구조물의 응력 분포는 Fig. 6(b)와 같다. 수직구 구조물의 경우 최대 변위가 발생하는 수직구 상단부에 응력이 집중하는 것을 확인 할 수 있었으며, 수평 터널의 경우 전체적으로 균등한 응력 분포가 발생하는 것을 확인하였다. 특히 종방향으로 거동하는 수직구와 횡방향으로 거동하는 수평 터널이 접하는 접속부의 경우 응력 집중 현상이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 접속부에 발생하는 최대 전단 응력은 약 0.46 MPa로 구조물의 허용 전단 강도 0.23 MPa보다 큰 값으로 전단 파괴가 발생할 것으로 예측 되었다.

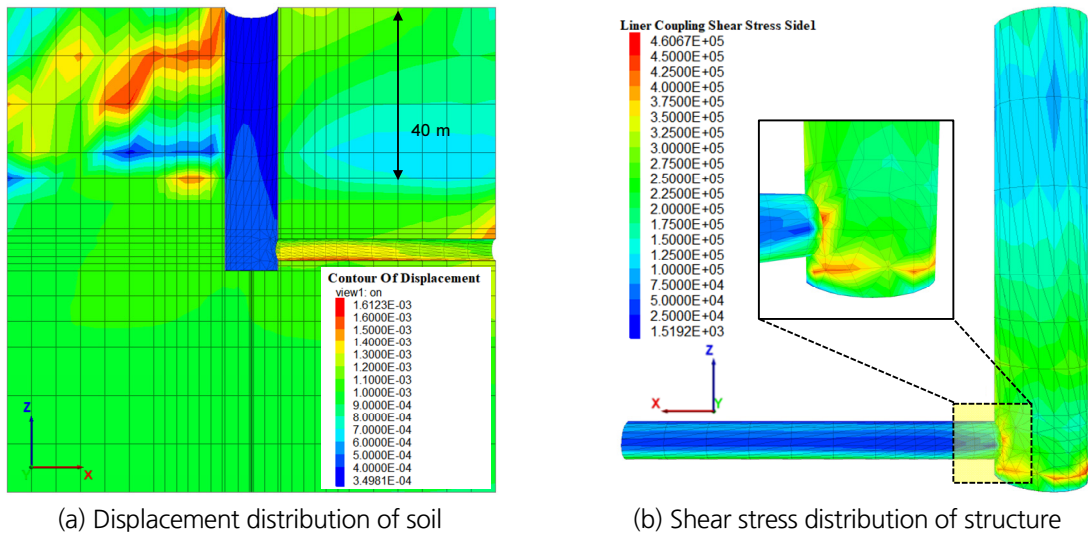


Fig. 6. Dynamic responses of soil and underground structure (Case A)

### 3.2 접속부 주변의 국부적 동적 거동 특성

지진 하중 발생 시, 접속부 주변의 국부적인 변위 발생 및 응력의 최대 최소 값은 아래 Table 4에 정리하였다. 또한 Case A, B, C에서의 접속부 변위 분포는 아래 Fig. 7(a)와 같다. 비교 군으로 사용된 Case B와 C에 적용된 강성 계수는 Case A에 적용된 강성 계수보다 각각 5배, 10배 큰 값이 적용되었다. 터널 상단부, 중앙부, 그리고 하단부에서 발생한 변위는 모두 적용된 강성 계수의 크기와 반비례하는 특성을 보였다. 특히 중앙부에 비해 터널 상단부

와 하단부에서 발생하는 변위가 경계면 강성 계수에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다(Fig. 7(a)). Case A와 C에서 발생한 최대 변위 차이는 터널 상단부, 중앙부, 하단부에서 각각 1.36배, 1.08배, 1.76배 Case A에서 크게 발생하는 것을 확인하였으며, 최소 변위의 차이는 각각 1.75배, 1.07배, 2.68배 Case A에서 크게 발생하는 것을 확인하였다. 특히, Case C에서 접속부가 위치하는 지층2 (Layer 2)에 적용된 경계면 강성 계수(19.75 GPa)는 주변 지반 강성(Shear modulus = 0.192 GPa)에 비해 약 100배 이상 큰 값이 적용되었다. FLAC3D 매뉴얼에서는 경계면 강성 계수의 값을 지반 강성의 10배 이상을 적용하였을 때, 해석 시간이 길어지지만 해석 결과에는 영향이 거의 없다는 가정과는 달리 Case A와 C에서 적용된 경계면 강성 계수에 따라 터널 중앙부에서 최소 1.07배, 터널 하단부에서 최대 1.75배 차이가 나는 것을 확인하였다. 이는, 매뉴얼에서 제안된 것과 달리 지하 구조물의 동적 거동은 경계면 강성 계수의 영향을 크게 받는다는 것을 의미한다. 또한 경계면 강성 계수 크기에 따른 해석 시간의 차이는 거의 없는 것으로 확인되었다.

추가적으로 케이스 A와 E를 통해 FLAC3D에서 사용되는 경계면 강성 계수 모델(식 (3))과 경험값(주변 지반 강성의 10배)을 적용하였을 때의 해석 결과 차이를 살펴보았다(Fig. 7(b)). 앞선 Case A, B, C의 결과와 같이 중앙부에 비해 터널 상단부와 하단부에서 발생하는 변위가 경계면 강성 계수에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 두 케이스에 적용된 경계면 강성 계수는 각 지층에 대하여 각각 약 8.44배, 0.97배 차이가 나며, 접속부 주변 변위 차이는 터널 상단, 중앙, 하단부에 대하여 각각 1.30배, 1.06배, 1.70배 Case A의 경우가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 경계면 특성을 고려한 동적 해석 수행 시 경계면 강성 계수 적용에 신중을 가해야 함을 알 수 있다.

**Table 4.** Local responses at the vertical shaft-tunnel connections during earthquake

Case	A					B				
	Tunnel crown [mm]	Spring line [mm]	Tunnel bottom [mm]	Normal stress [MPa]	Shear stress [MPa]	Tunnel crown [mm]	Spring line [mm]	Tunnel bottom [mm]	Normal stress [MPa]	Shear stress [MPa]
Max	3.04	1.98	2.16	0	0.461	2.59	1.86	1.46	0	0.458
Min	-2.13	-1.22	-1.42	-0.631	$1.52 \times 10^{-3}$	-1.68	-1.15	-0.83	-0.622	$1.62 \times 10^{-3}$
Case	C					D				
	Tunnel crown [mm]	Spring line [mm]	Tunnel bottom [mm]	Normal stress [MPa]	Shear stress [MPa]	Tunnel crown [mm]	Spring line [mm]	Tunnel bottom [mm]	Normal stress [MPa]	Shear stress [MPa]
Max	2.24	1.84	1.23	0	0.463	3.06	1.97	2.15	0	0.458
Min	-1.22	-1.14	-0.53	-0.615	$1.23 \times 10^{-3}$	-2.21	-1.21	-1.42	-0.636	$1.69 \times 10^{-3}$
Case	E					* Yield compressive strength of lining = 3.25 MPa * Yield shear strength of lining = 0.29 MPa				
	Tunnel crown [mm]	Spring line [mm]	Tunnel bottom [mm]	Normal stress [MPa]	Shear stress [MPa]					
Max	2.33	1.87	1.27	0	0.449					
Min	-1.38	-1.19	-0.61	-0.591	$0.88 \times 10^{-3}$					

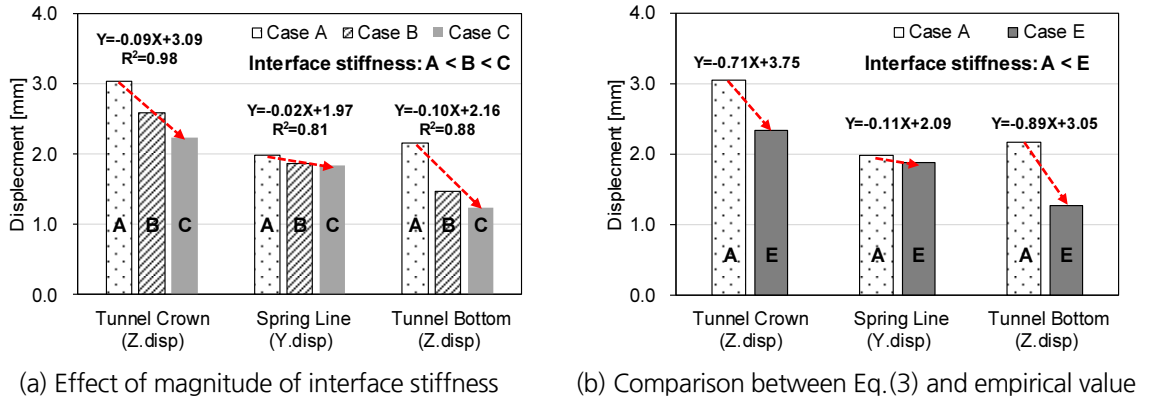


Fig. 7. Local dynamic responses at connections

이 연구에서 수행된 모든 케이스에 대한 변위 및 응력 결과는 Fig. 8과 같다. 이 결과들을 통해 경계면 강성 계수는 접속부 주변 국부적인 변위에 대해서는 큰 영향을 미치지(최대 1.76배) 수직 응력 및 전단 응력 발생에 대해서는 큰 영향이 없는 것(최대 1.07배)으로 확인되었다. 이는 각 케이스에서 발생된 최대 변위가 접속부 직경에 비해 상대적으로 작은 변위가 발생되었기 때문이라고 판단된다. 이 연구는 직경 3.5 m급의 소단면 터널에 대한 것으로 대단면 교통 터널의 경우 다른 결과가 나올 가능성을 배제할 수 없다.

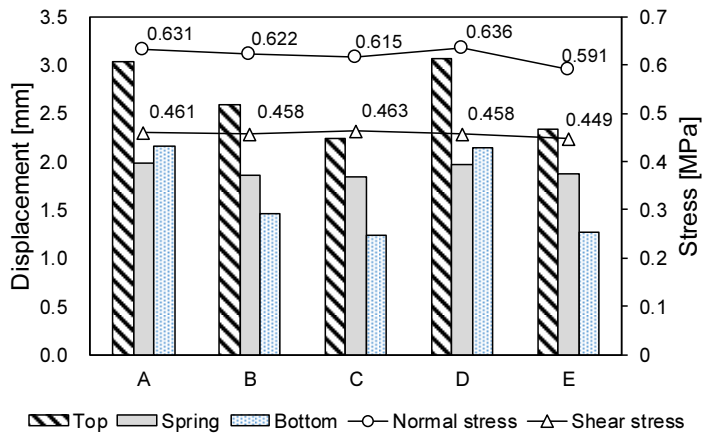


Fig. 8. Local dynamic responses at connections for comparison all cases (A, B, C, D, E)

#### 4. 결론 및 토의

이 연구에서는 지진 하중이 발생하였을 때 수직구와 터널 구조물의 동적 거동에 대한 경계면 강성 계수의 영향을 파악하기 위한 매개변수 해석을 수행하였다. 경계면 강성 계수에 따른 수직구와 터널 구조물의 전체 동적 거동

및 지반 거동을 파악하였으며, 접속부에서의 국부적인 변위 및 응력 분포에 대한 검토를 수행하였다. 이 연구에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 지진 발생에 대한 수직구와 터널 구조물의 전체 동적 거동(global behavior)에 대한 경계면 강도 특성의 영향은 크지 않지만, 다층 지반에 속한 지하 구조물의 동적 거동은 주변 지반의 특성에 상대적으로 큰 영향을 받는다. 또한 동일한 지진 하중에 대하여 경계면 강도 계수가 클수록 변위는 더 작게 발생하는 경향을 확인하였다.
2. 수직구 구조물과 수평 터널의 접속부의 국부적 변위(local displacement)는 FLAC3D 매뉴얼에서 언급한 지반 강성 크기의 10배의 경계면 강도 계수를 적용할 경우 동적 거동에 거의 영향을 미치지 않는다는 가정과 달리 경계면 강성 계수 크기에 따라 국부적인 동적 거동에 큰 영향을 받는다.
3. 접속부 직경에 비해 상대적으로 작은 변위가 발생할 경우 수직 응력 및 전단 응력 발생에 대한 경계면 강도 계수의 영향은 크지 않다.
4. 기존 수치 해석에서 주로 사용되고 있는 경계면 강성 계수 모델(식 (3))을 통해 도출된 경계면 강성 계수 값과 FLAC3D 매뉴얼에서 제안한 경계면 강성 계수 경험값(지반 강성의 10배 값)에는 서로 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으며, 경계면 강성 계수에 따라 접속부에 발생하는 국부적 동적 거동에는 큰 차이가 발생한다. 따라서 기존 경계면 강성 계수 모델에 한계가 있음을 알 수 있었으며 합리적인 경계면 강성 계수 모델 개발의 필요한 것으로 보인다.

다만 이 연구는 상대적으로 강성이 큰 사질토 지반에 위치한 소단면 공동구의 수직구 구조물과 수평 터널 구조물에 대한 경계면 강도 특성을 연구한 것으로 대단면의 교통 터널의 경우 다른 결과를 나타낼 수 있다. 또한 이 연구에서 도출된 결과는 비교적 단단한 풍화암 지반에 대한 것으로 상대적으로 연약한 지반에 위치한 지하 구조물의 동적 거동에 대한 경계면 강성 계수의 영향성을 대변할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 보다 정확한 접속부의 동적 거동을 파악하기 위하여 터널의 규모와 지반의 연경도 등을 고려한 추가 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 ‘도심지 소단면( $\phi$  3.5 m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(19SCIP-B105148-05)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

1. Aguilar-Téllez, M.A., Méndez-Marroquin, R., Rangel-Núñez, J.L., Comulada-Simpson, M., Maidl, U., Auvinet-Guichard, G. (2012), “Mexico City deep eastern drainage tunnel”, Proceedings of the 7th Inter-

- national Symposium TC28 IS: Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Vol. 1, London, pp.175-191.
2. Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R. (1983), "Fundamentals of rock joint deformation", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 20, No. 6, pp. 249-268.
  3. Choi, W.Y., Park, J.D., Lee, S.W. (2014), "Influence of the joint stiffness on the segment design", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 1, pp. 63-74.
  4. Davy, P., Darcel, C., Le Goc, R., Mas Ivars, D. (2018), "Elastic properties of fractured rock masses with frictional properties and power law fracture size distributions", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 123, No. 8, pp. 6521-6539.
  5. Grigoli, F., Cesca, S., Rinaldi, A.P., Manconi, A., López-Comino, J.A., Clinton, J.F., Westaway, R., Cauzzi, C., Dahm, T., Wiemer, S. (2018), "The November 2017  $M_w$  5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea", Science, Vol. 360, No. 6392, pp. 1003-1006.
  6. Itasca, F. (2013). Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, Online Manual.
  7. Jang, D.I., Kim, J.I., Kwak, C.W., Park, I.J. (2017), "Study on flexible segment efficiency for seismic performance improvement of subsea tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 3, pp. 503-515.
  8. Kim, J.T., Cho, G.C., Kang, S.J., Kim, K.J., Hong, E.S. (2018), "3-dimensional numerical study on dynamic behavior of connection between vertical shaft and tunnel under earthquake loading", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 5, pp. 887-897.
  9. Kim, Y.M., Jeong, S.S, Kim, K.Y., Lee, Y.H. (2011), "A study on the dynamic behavior of vertical shaft in multi-layered soil", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 31, No. 4C, pp. 109-116.
  10. Kim, Y.M., Jeong, S.S, Lee, Y.H., Jang, J.B. (2010), "Seismic design of vertical shaft using response displacement method", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 30, No. 6C, pp. 241-253.
  11. Kulhawy, F.H. (1975), "Stress deformation properties of rock and rock discontinuities", Engineering Geology, Vol. 9, No. 4, pp. 327-350.
  12. Li, W., Bai, J., Cheng, J., Peng, S.Y.D., Liu, H. (2015), "Determination of coal-rock interface strength by laboratory direct shear tests under constant normal load", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 77, pp. 60-67.
  13. Likar, J., Marolt, T., Grøv, E. (2015), "Seismic influences on underground structures", Proceedings of the 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, Montreal, pp. 1-11.
  14. Mylonakis, G., Gazetas, G. (2000), "Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 277-301.
  15. Ohbo, K., Ueno, K. (1992), "Dynamic behavior of super deep vertical shaft during earthquake", Proceedings of the 10th World Conference, Madrid, pp. 5031-5036.
  16. Pitilakis, D., Dietz, M., Wood, D.M., Clouteau, D., Modaressi, A. (2008), "Numerical simulation of dynamic soil-structure interaction in shaking table testing", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28, No. 6, pp. 453-467.
  17. Rayhani, M.H., El Naggar, M.H. (2008), "Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on

- soft soil”, *International Journal of Geomechanics*, Vol. 8, No. 6, pp. 336-346.
18. Rosso, R.S. (1976), “A comparison of joint stiffness measurements in direct shear, triaxial compression, and in situ”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 13, No. 6, pp. 167-172.
  19. Sawada, M., Haba, K., Hori, M. (2018), “Estimation of surface fault displacement by high performance computing”, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 12, No. 4, 1841003.
  20. Saxena, N., Paul, D.K. (2012), “Effects of embedment including slip and separation on seismic SSI response of a nuclear reactor building”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 247, pp. 23-33.
  21. Saxena, N., Paul, D.K., Kumar, R. (2011), “Effects of slip and separation on seismic SSI response of nuclear reactor building”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, No. 1, pp. 12-17.
  22. Seed, H.B., Idriss, I.M. (1970), *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*, Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Research Center, University of California, Berkeley, pp. 48.
  23. Tuladhar, R., Maki, T., Mutsuyoshi, H. (2008), “Cyclic behavior of laterally loaded concrete piles embedded into cohesive soil”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, No. 1, pp. 43-59.
  24. Yamazaki, Y., Segawa, N., Koizumi, A. (2013), “Evaluation of earthquake resistance of shield-tunnel/vertical-shaft connections and countermeasure technology”, *NTT Technical Review*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-6.
  25. Yu, Y., Damians, I.P., Bathurst, R.J. (2015), “Influence of choice of FLAC and PLAXIS interface models on reinforced soil-structure interactions”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 65, pp. 164-174.