

터널근접시공에 의한 말뚝의 거동을 고려한 플랫폼 기반의 예비 설계 가이드라인에 대한 연구

전영진¹ · 이규설² · 이재철³ · 바트보양⁴ · 이철주^{5*}

¹비회원, 한국건설기술연구원 박사후연구원

²비회원, 신영종합건설 대표이사

³비회원, 강원대학교 신산업개발 T-EMS 융합학과 박사과정

⁴비회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정

⁵정회원, 강원대학교 토목공학과 교수

A study on platform-based preliminary design guidelines associated with the behaviour of piles to adjacent tunnelling

Young-Jin Jeon¹ · Gyu-Seol Lee² · Jae-Cheol Lee³ · Chinzorig Batbuyan⁴ · Cheol-Ju Lee^{5*}

¹Postdoctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²CEO, Sinyoung General Construction

³Ph.D., Dept. of Integrated Energy and Infra System, Kangwon National University

⁴Master's Course Student, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

⁵Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

*Corresponding Author : Cheol-Ju Lee, cj32@kangwon.ac.kr

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
24(2)129-151(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.2.129>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received January 13, 2022

Revised February 22, 2022

Accepted February 22, 2022



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 © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Abstract

In the current work, a series of three-dimensional finite element analyses have been carried out to understand the behaviour of piles when the adjacent tunnelling passes underneath grouped piles with a reinforced pile cap. In the current study, the numerical analysis studied the computed results regarding the ground reinforcement condition between the tunnel and pile foundation. In addition, several key issues, such as the pile settlements, the axial pile forces, the shear stresses and the relative displacements have been thoroughly analysed, and the IoT platform based preliminary design guidelines were also presented. The pile head settlements of the nearest pile from the tunnel without the ground reinforcement increased by about 70% compared to the farthest pile from the tunnel with the maximum level of reinforcement. The quality management factor data of the piles were provided as API (Application Programming Interface) of various forms by the collection and refinement. Hence it has been shown that it would be important to provide the appropriate API by defining the each of data flow process when the data were created. The behaviour of the grouped piles with the pile cap, depending on the amount of ground reinforcement, has been extensively analysed, and

the IoT platform regarding the quality management of piles has been suggested.

Keywords: Three-dimensional (3D) numerical analysis, Pile behaviour, Group piles, Ground reinforcement, IoT platform

초 록

본 연구에서는 기초판으로 연결된 군말뚝 형태의 기초 하부를 터널이 근접 통과할 경우 이로 인해 발생하는 말뚝의 거동을 파악하기 위하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 이때 터널과 말뚝기초 사이의 지반보강을 조건별로 고려하여 수치해석을 수행함으로써 결과를 분석하였다. 수치해석에서는 터널 굴착으로 발생하는 말뚝의 침하, 축력, 전단응력 및 상대변위를 고찰하였으며, 추가적으로 IoT 플랫폼 예비 설계 가이드라인을 제시하였다. 지반보강을 고려하지 않으며 터널로부터 이격거리가 가장 가까운 말뚝은 지반보강을 가장 크게 고려하고 터널로부터 이격거리가 가장 멀리 존재한 말뚝에 비해 말뚝두부의 침하가 약 70% 크게 발생하였다. 또한, 말뚝 품질관리 요소 데이터는 수집 및 정제과정을 통해 다양한 형태의 API (Application Programming Interface)로 제공되었으며, 각 데이터 플로우 프로세스를 정의하여 데이터가 생성되는 시점에 따라 적합한 API를 제공하는 것이 중요한 것으로 분석되었다. 본 연구를 통하여 기초판으로 연결된 군말뚝의 거동에 영향을 미치는 주요 인자를 보강조건에 따라 심도 있게 고찰하고, 말뚝의 품질관리 IoT 플랫폼을 제시하였다.

주요어: 3차원 수치해석, 말뚝거동, 군말뚝, 지반보강, IoT 플랫폼

1. 서론

최근 편리한 교통 인프라 구축과 교통 체증을 해소하기 위해 도심지를 중심으로 터널 공사가 활발하게 수행되고 있으며, 이러한 터널 시공은 흔히 기 존재하는 각종구조물에 인접하여 수행된다. 또한 터널 시공은 지반의 침하를 유발하여 말뚝의 공학적 거동에 영향을 미치게 된다(Lee, 2012a). 지금까지 수행되어 온 기존의 연구들에 따르면 기 존재하는 말뚝기초에 근접하여 터널시공이 이루어지는 경우 터널 굴착으로 발생하는 지반침하로 인해 말뚝과 인접 지반 사이에서 전단응력전이(shear stress transfer)가 유발되어 말뚝에 변형이 발생하여 축력분포 역시 변화한다고 보고되었다(Lee, 2012a; 2012b). 이러한 문제를 해결하기 위해 실내모형실험, 원심모형실험, 이론적 연구 및 수치해석 연구와 같은 많은 연구들이 수행되었다(Jacobsz, 2003; Pang, 2006; Cheng et al., 2007; Lee and Chiang, 2007; Lee, 2008; 2012a; 2012b; 2012c; Marshall, 2009; Ng et al., 2013; 2014; Dias and Bezuijen, 2014a; 2014b; Hartono et al., 2014; Liu et al., 2014; Ng and Lu, 2014; Williamson, 2014; Hong et al., 2015; Lee and Jeon, 2015; Jeon and Lee, 2015; Jeon et al., 2015; 2017; 2018; 2020a; 2020b; Lee et al., 2016; Soomro et al., 2018). 이에 비해 현장실측을 실시하여 분석한 연구는 상대적으로 제한적인데, Selemetas (2006), Pang (2006), Liu et al. (2014), Mair and Williamson (2014), Williamson (2014) 및 Selemetas and Standing (2017)은 터널 굴착으로 인한 인접 말뚝에서의 거동을 현장실측을 통해 연구한 바 있다. 대부분의 기존 연구에서는 터널 및

말뚝의 인접 지반에 대하여 적절한 보강이 실시되지 않은 조건 하에 터널 굴착에 따른 지반침하와 그로 인한 말뚝의 거동을 분석하는 것과 관련되어 있다. Fig. 1은 Pang (2006)이 현장실측을 통해 확인한 터널과 말뚝 사이의 상대적 위치 배열 모식도를 보여주고 있으며, 이 연구에 따르면 터널-말뚝의 상대적인 위치에 따라 말뚝의 거동이 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 터널의 굴착이 말뚝의 하부에서 수행되는 경우(Fig. 1에서 type 4)에는 말뚝의 측면에서 실시되는 경우(Fig. 1에서 types 1-3)에 비해 말뚝의 사용성이 크게 저하된다고 보고되었다.

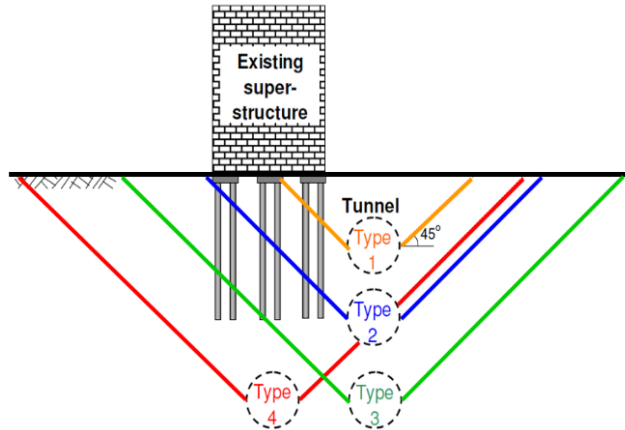


Fig. 1. Relative tunnel-pile configurations observed in practice (Pang, 2006)

Selemetas (2006)는 터널시공으로 발생한 말뚝의 침하는 터널 굴착 이전 말뚝에 작용한 설계하중에 의한 말뚝의 침하보다 상당히 클 뿐만 아니라, 말뚝에 작용하는 심도별 축력 분포가 터널시공 과정에 의해 매우 민감하게 변한다고 보고하였다. 도심지 터널공사로 인하여 터널 굴착 지반 인근의 지상 및 지중에 존재하는 각종 구조물들에 대하여 안정성 확보가 필수적인 요소로 대두되고 있으나, 이들의 안정성 및 사용성 저하를 효율적으로 방지하는 체계적인 연구가 부족한 실정이다. 터널 굴착에 의한 지반침하로 발생한 말뚝의 침하는 상부 구조물의 안정성을 감소시키는 가장 큰 요인으로 볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 현장실무에서는 다양한 보강공법들을 적용하고 있으나(Choi et al., 2005; Jue and Na, 2005), 터널-지반-말뚝 사이에서의 상호거동 메커니즘을 명확하게 규명하지 못하고 있는 실정이다. 즉 구조물의 안정성 확보를 위해 다양한 보강조건을 고려한 터널 굴착에 따른 말뚝의 거동 연구를 체계적으로 수행할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 유한요소해석(3차원)을 통해 기존 존재하는 기초판으로 연결된 4×3 군말뚝의 하부에서 실시되는 터널 굴착에 의한 말뚝의 거동을 터널 주변 지반의 보강을 고려하여 그 영향을 고찰하였으며, 터널시공으로 유발되는 tunnelling-induced 말뚝두부침하, 축력, 상대변위, 경계면에서의 전단응력 및 안정성 등을 분석하였다. 또한 말뚝 품질관리 플랫폼의 구축을 위한 플랫폼 인터페이스 구축에 대한 선정 기준 및 개발 요건에 대한 기준을 제시하였다.

2. 수치해석

2.1 해석개요 및 경계조건

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램 Plaxis 3D (2019)를 사용하여 기초판으로 연결된 4×3 군말뚝의 하부에서 수행된 터널의 시공을 모사함으로써 터널인접지반에서의 보강(그라우팅 보강)에 따른 말뚝 거동을 분석하였다. Fig. 2는 해석에서 적용된 대표 유한요소 mesh를 보여주고 있으며, Fig. 3 및 Fig. 4는 해석단면도를 나타내고 있다. 수치해석에서 가정한 터널의 직경(D)은 8 m이고 터널의 중심부(springline)는 지표면으로부터 26.5 m 하부에 위치하고 있다. 전체 지반은 풍화토층으로 구성되었다고 가정하였다. 또한 말뚝은 직경(d) 1 m의 대구경 현장타설말뚝으로 설정하였는데, 이는 기존 연구의 대부분이 소구경 말뚝에 대한 것이므로 대구경 말뚝으로 하였다. 말뚝의 길이(L)는 20 m이며, 군말뚝의 말뚝 중심 간의 간격은 3D로 가정하였다. 본 연구에서는 터널 굴착에 대한 말뚝의 거동을 분석하기 위해 터널 주변 지반의 그라우팅 보강을 고려하여 해석을 수행하였다. 그라우팅체는 보강 각도를 180° 로 고정된 상태에서 두께를 1 m 또는 2 m로 조건을 달리하였으며 1회 보강 시 보강 길이는 4 m로 하였다. 보강과 관련된 내용은 2.3절에 상세히 설명하였다. 기초판(pile cap)의 경우에 그 두께는 0.5 m로 가정하였다. Table 1에는 본 연구에서 수행된 각각의 해석 특징이 요약되어 있으며, 총 5회의 해석이 수행되었다. 말뚝의 경우 터널로부터 이격거리가 가장 가까운 말뚝(1번)에서부터 내부말뚝(2번) 및 이격거리가 가장 먼 말뚝(3번)에 대하여 분석하여 고찰하였다. 그 위치는 Fig. 5에 나타나있다. 또한, Table 2는 말뚝의 위치 및 보강 조건에 따라 분류된 말뚝의 명칭들을 각각 설명한 표이다. 본 해석에서는 지하수위를 고려하지 않았다.

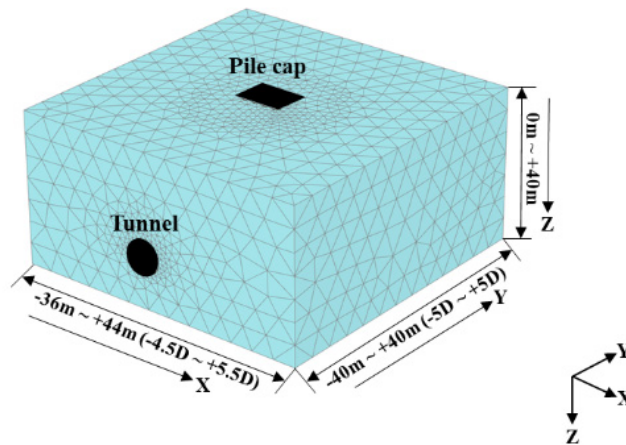


Fig. 2. A representative 3D finite element mesh used in the current study (a 4×3 pile group, D: tunnel diameter)

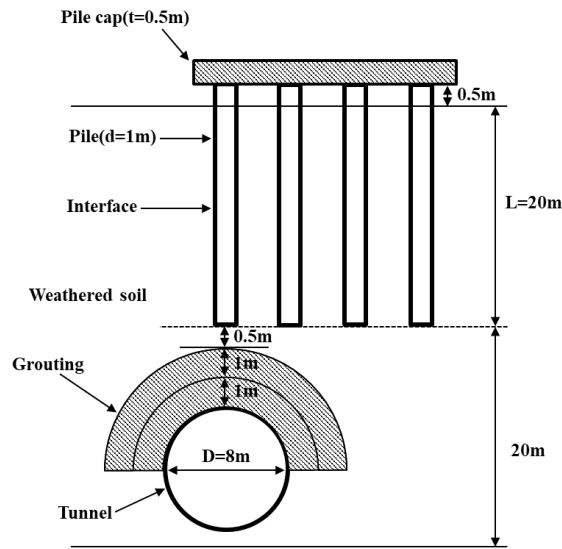


Fig. 3. Sectional view of analysis geometry

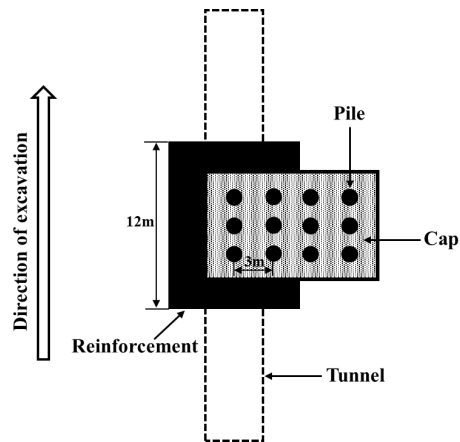


Fig. 4. Longitudinal section of analysis geometry

Table 1. Summary of numerical analyses

Analysis series	Thickness of ground reinforcement	Angle of ground reinforcement	Remarks
PL	-	-	Pile load test
G	-	-	Greenfield
PG	-	-	Pile group without ground reinforcement
PG (1-180)	1 m	180°	Pile group with ground reinforcement
PG (2-180)	2 m	180°	Pile group with ground reinforcement

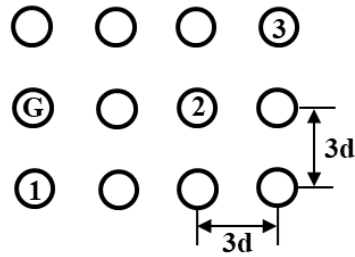


Fig. 5. Location of piles inside a 4 × 3 pile group

Table 2. Summary of the location and condition of the pile

Pile name	Thickness of ground reinforcement	Angle of ground reinforcement	Pile location number of Fig. 4	Remarks
DLP-1	-	-	1	Design load condition
DLP-2	-	-	2	Design load condition
DLP-3	-	-	3	Design load condition
NRP-1	-	-	1	Pile group without ground reinforcement
NRP-2	-	-	2	
NRP-3	-	-	3	
IRP-1	1 m	180°	1	Pile group with ground reinforcement
IRP-2	1 m	180°	2	
IRP-3	1 m	180°	3	
2RP-1	2 m	180°	1	
2RP-2	2 m	180°	2	
2RP-3	2 m	180°	3	

2.2 적용 구성모델 및 물성치

터널의 굴착을 모사하기 위하여 탄-소성해석이 실시되었으며 특히 지반-말뚝 사이의 경계면에서 소성항복 (plastic yielding)이 나타날 경우에 미끄러짐(slip)의 발생을 허용하는 경계요소(interface element)를 적용하였다. 이는 말뚝과 인접 지반 경계면에서 전단응력의 전이 과정을 분석하기 위함이며, 특히 말뚝선단에도 경계요소를 지정함으로 말뚝에 인장력이 발생할 경우 말뚝선단과 지반이 서로 분리 될 수 있도록 하였다. Table 3은 수치 해석에서 적용된 재료 및 지반의 물성치를 정리하였는데 이는 국내의 풍화토 및 콘크리트의 일반적인 물성치이며(Lee, 2012a), 그라우팅 물성치의 경우 Choi et al. (2003)의 역해석을 통해 제시한 그라우트체 물성치 산정방법을 적용하여 탄성계수와 점착력을 원지반 물성치의 각각 10배 및 5배로 증가시켜 반영하였다(내부마찰각은 변화가 없는 것으로 가정). 또한 기초판 물성치는 말뚝에 적용한 물성치와 동일한 값을 사용하였다. 풍화토에서는 비관련흐름법칙(non-associated flow rule) 및 Mohr-Coulomb의 파괴기준(failure criterion)을 따르는 탄-소성 모

델을 적용하였고 기초판, 말뚝 및 숏크리트에는 등방탄성모델(isotropic elastic model)을 지정하였다. 말뚝 시공으로 인한 말뚝주면-지반 및 말뚝선단-지반 경계면에서의 전단강도 상수(c'_{int} , ϕ'_{int})가 감소되는 것을 고려하기 위해 Brinkgreve et al. (2015)의 지침을 참고하여 강도감소계수(strength reduction factor) $R_{int} = 0.7$ 를 적용하고 아래의 식 (1) 및 식 (2)를 통해 적절한 전단강도 상수를 산정하였다.

$$c'_{int} = R_{int} \times c'_{soil} \tag{1}$$

$$\tan(\phi'_{int}) = R_{int} \times \tan(\phi'_{soil}) \tag{2}$$

여기서, c'_{soil} 은 지반의 점착력, R_{int} 는 강도감소계수, ϕ'_{soil} 은 지반의 내부마찰각, ϕ'_{int} 는 interface 마찰각(26.1°)이다.

Table 3. Material parameters assumed in the numerical modelling

Material	Model	γ_i (kN/m ³)	K_0	ν'	E' (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Soil (Lee, 2012a)	Mohr-Coulomb	20	0.75	0.35	80	50	35
Grouted material	Mohr-Coulomb	25	0.01	0.2	800	250	35
Lining	Elastic	25	0.01	0.2	5,000 (s) 15,000 (h)	-	-
Pile/Pile cap		25	0.01	0.2	30,000	-	-

Note: γ_i (unit weight of material), K_0 (lateral earth pressure coefficient at rest), ν' (poisson's ratio), E' (Young's modulus), c' (cohesion), ϕ' (internal friction angle), s (soft shotcrete), h (hard shotcrete)

2.3 수치해석 과정 및 분석

수치해석에서는 말뚝 시공 시 발생하는 근입효과에 따른 지반 응력변화는 불포함시켰으므로 본 연구에서 가정 한 말뚝은 현장타설말뚝과 유사한 것으로 볼 수 있다. 터널의 굴착은 종방향(Y)에 대하여 -5D에서 +5D (-40 m~+40 m) 구간 사이에서 실시되었다(Fig. 2(a)). 터널의 굴착은 각 단계에서 1 m 씩 수행되는 것으로 가정하여 총 80 단계에 걸쳐서 실시되었다. 단계별로 터널 굴착이 종료된 이후 굴착면에 두께 200 mm의 숏크리트를 타설하였는데, 터널 굴착 직후에는 5,000 MPa의 탄성계수를 가진 연성(soft) 숏크리트를 적용하였으며, 다음 굴착단계에서는 15,000 MPa의 탄성계수를 가지는 강성(hard) 숏크리트의 물성치로 변환하여 터널의 굴착을 모사하였다. 또한 그라우팅 보강의 경우 기초판의 중심에서 종방향(Y) $\pm 0.75D$ (± 6 m, 총 12 m 보강) 만큼 보강을 실시하였으며 (Fig. 6), 각 보강별 길이는 0.5D (4 m)로 가정하여 보강 후 터널 굴착을 1 m 씩 실시하였다(12 m 보강의 경우: 보강 (4 m) → 굴착(4 m) → 보강(4 m) → 굴착(4 m) → 보강(4 m) → 굴착(4 m)). 본 연구에서는 그라우팅 보강 두께에

따라 말뚝의 거동을 분석하였는데 무보강(PG, T = 0 m), 두께 1 m 보강(PG (1-180), T = 1 m) 및 두께 2 m 보강(PG (2-180), T = 2 m)에 대한 조건을 고려하였다. 그라우팅의 횡방향 보강각도는 180°로 하였다. 초기 평형단계 도달 이후 터널 굴착 이전 말뚝두부에는 별도의 해석(PL)을 통해 결정한 설계하중(P_a)을 작용시켰으며(4,737 kN), 단계적으로 하중을 증가시켜 설계하중을 작용시켰다. 해석결과를 분석을 위하여 임의의 심도에서 말뚝의 축력 P 는 $P = \sigma_{zz,avg} \times A_p$ 식으로 산정하였다. 여기서 $\sigma_{zz,avg}$ 는 특정심도에서의 말뚝 수직응력 값을 평균한 것이고 A_p 는 말뚝 단면적이다. 한편 말뚝과 지반 경계면(interface)에서의 전단응력은 임의의 심도에서 그 값을 평균하여 산정하였다.

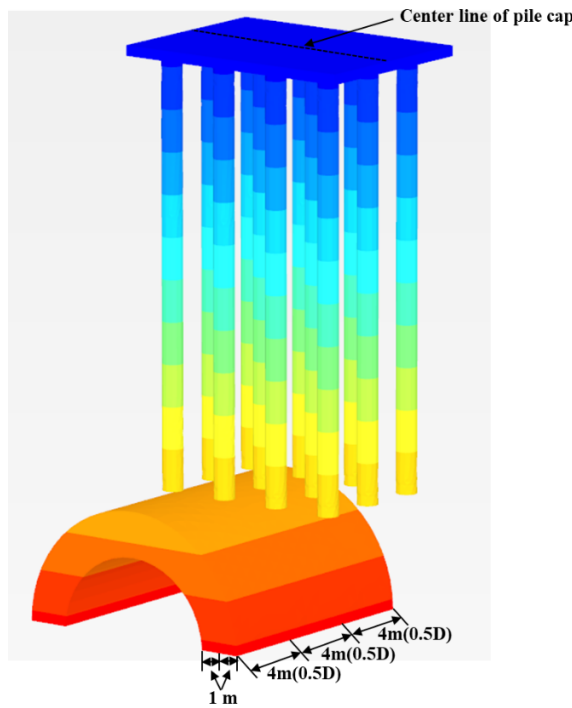


Fig. 6. Location of piles inside a 4 × 3 pile group

3. 해석결과 분석

3.1 말뚝의 설계지지력 결정

Fig. 7은 말뚝의 설계지지력 결정을 위하여 말뚝재하시험 모사를 통해 산정된 말뚝의 하중-침하 관계를 보여주고 있다. 또한 터널의 굴착을 포함시키지 않은 말뚝의 하중-침하 관계를 보여주고 있으며, 말뚝두부에 단계별로 압축력을 증가시켜 하중재하 시험을 모사하였다. Fig. 7에 나타나 있듯이 말뚝두부의 하중이 7,500 kN 인근으로 도달할 때까지 말뚝 하중과 말뚝두부 침하 사이에서 거의 선형적인 관계를 보이고 있으며, 반면 이를 초과하는 하

중이 작용할 경우 급격한 침하가 발생하고 있다. 본 연구에서는 말뚝에 발생하는 하중-침하 관계로부터 말뚝의 설계지력을 결정하기 위해 널리 사용되는 Davisson (1972)의 방법을 적용하였으며, 이를 통해 말뚝의 파괴하중 (failure load)을 9,475 kN으로 산정하였다. 여기에 안전율(FS) 2.0을 적용하여 말뚝의 설계하중(P_a)은 4,737 kN으로 결정되었다($9,475 \text{ kN}/2 = 4,737 \text{ kN}$). 이때 말뚝두부의 침하량(δ)은 9.10 mm이다. 말뚝과 지반 사이에서 경계면 굴착에 따른 기 시공된 말뚝의 거동을 분석하기 위하여 터널 굴착 이전 말뚝두부에는 3단계(1,579 kN → 3,158 kN → 4,737 kN)에 걸쳐 하중을 증가시키므로 설계하중(P_a)을 작용시켰다. 이를 통하여 사용 중인 말뚝의 거동을 모사하였으며 이후에는 터널의 굴착을 단계별로 진행시켰다.

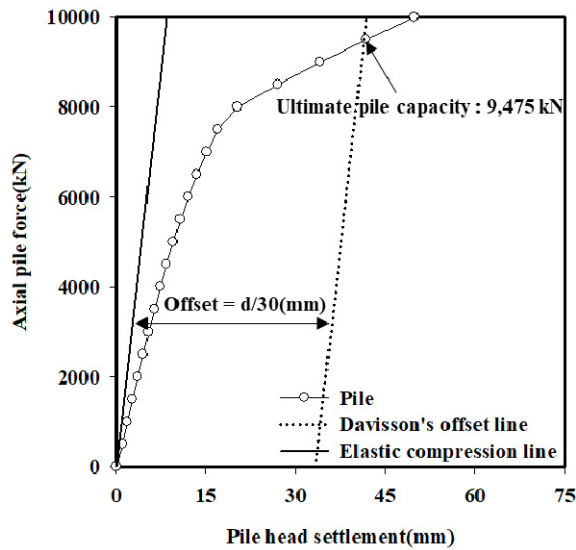


Fig. 7. Relation of axial pile forces and pile head settlements

3.2 터널 굴착에 따른 말뚝 두부 침하 및 지표면 침하

Fig. 8은 기초판으로 연결된 균말뚝에 대해 그라우팅의 보강 두께에 따라 해석을 통하여 산정된 터널 굴착 단계별로 정규화 되어진 $\delta_{p,net} / \delta_{gr,max}$ 및 $\delta_g / \delta_{gr,max}$ 침하의 분포를 보여주고 있다(Y/D: 정규화된 종방향). 여기서, δ_g 는 지중으로 말뚝이 존재하지 않으며 지반보강을 고려하지 않은 Greenfield 해석조건에서 균말뚝의 G변 위치에서의 터널 굴착으로 발생한 터널 굴착 단계별 지표면의 침하를 나타내며, $\delta_{p,net}$ 은 터널 굴착 단계별 말뚝두부 침하를 나타낸다. 또한 $\delta_{gr,max}$ 는 Greenfield 해석조건에서 터널 굴착으로 인한 지표면 최대침하를 의미한다($\delta_{gr,max} = 8.9 \text{ mm}$). Fig. 8에 나타나 있듯이 정규화된 침하 $\delta_{p,net} / \delta_{gr,max}$ 및 $\delta_g / \delta_{gr,max}$ 는 터널의 굴착이 수행될수록 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 터널 굴착 단계에서의 지표면 및 말뚝두부 침하비율이 가장 크게 발생하는 경우는 터널이 Y/D = -1.5~+1.5 지점을 통과할 때로 나타났으며, 그 이후 터널 굴착에 따른 침하의 비율은 현저히 감소되는 것으로 분석되었다. 따라서 터널 굴착으로 인한 말뚝의 침하가 주로 발생하는 범위는 Y/D = -2.0~+2.0 지점을 통

과할 때로 나타났다. 말뚝두부의 최종 침하는 모든 말뚝에서는 Greenfield 조건의 지표면 최종 침하를 초과하는 침하가 발생하였으나, NRP-3, 1RP-3 및 2RP-3 말뚝은 터널 굴착이 말뚝의 직하부($Y/D=0$) 부근을 통과하기 이전에는 Greenfield 조건의 지표면 침하보다 작게 나타났다. 이는 말뚝의 위치가 터널로부터 이격거리가 가장 멀리 존재하기 때문에 터널 굴착으로 인한 지반의 침하 영향을 상대적으로 적게 받기 때문으로 분석되었다. 터널로부터 이격거리가 가장 가까우며 지반보강을 가장 크게 고려한 2RP-1은 지반보강을 고려하지 않은 말뚝에 비하여 침하가 약 15% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 지반보강을 고려하지 않으며 터널로부터 이격거리가 가장 가까워 지반침하의 영향을 가장 많이 받을 것으로 예상되는 NRP-1 말뚝은 지반보강을 가장 크게 고려하고 터널로부터 이격거리가 가장 멀리 존재하여 지반침하의 영향을 가장 작게 받는 2RP-3 말뚝에 비해 말뚝두부의 침하가 약 70% 크게 발생하였다. 기초판으로 연결된 군말뚝 내부의 말뚝 위치에 따라 말뚝 두부의 침하가 다른 양상을 보이므로 기초판에는 부등침하가 발생할 것으로 예상되며, 부등침하에 따른 구조물의 안전성 평가 및 메커니즘의 파악이 필요할 것으로 판단된다.

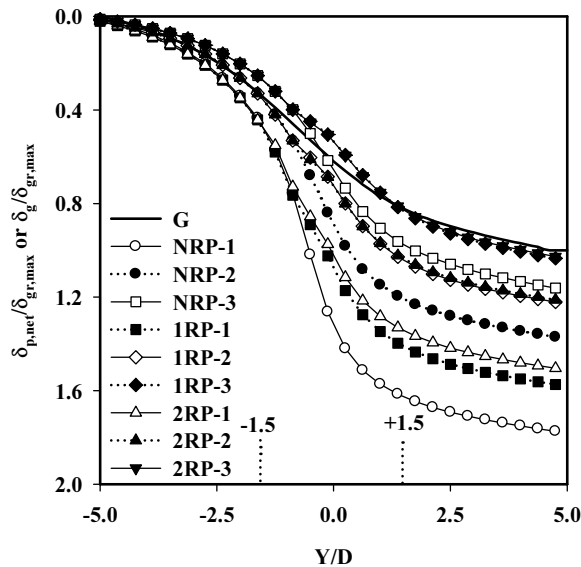


Fig. 8. Distributions of normalised pile head and soil surface settlements with tunnel advancement ($\delta_{gr,max} = 8.93$ mm)

3.3 말뚝의 축력분포

Fig. 9는 터널 굴착 종료 후에 산정된 보강조건(무보강 및 1 m 두께 그라우팅 보강)에 따른 정규화된 군말뚝의 축력(P/P_a) 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 따라 보여주고 있다. 또한 Fig. 9는 터널 굴착 이전에 말뚝두부에 작용한 설계하중(pile loading)의 축력분포도 포함하고 있다. 여기서, P는 임의 심도에서 말뚝의 축력을 의미하고, P_a 는 터널 굴착 이전에 말뚝두부에 작용한 설계하중(4,737 kN)이다. 앞서 언급하였듯이 말뚝의 축력은 임의의 심도에 대해 평균수직응력을 산정하여 계산하였다. 설계하중(pile loading) 작용 아래에서 말뚝 축력은 심도가

증가할수록 점차적으로 감소하여 약 75%가 주면마찰력에 의해 지지되며, 나머지 약 25%의 하중만이 말뚝선단에 의해 지지되는 것을 알 수 있다. 또한 균말뚝의 외곽에 위치한 1번 및 3번 말뚝의 경우 말뚝 두부 부근에서 P/P_a 의 값이 설계하중을 초과($P/P_a > 1$)하는 것으로 나타났는데 이는 기초판의 무게가 외곽 말뚝에 집중되어 작용하는 것으로 분석되었다. 반면 균말뚝의 내부에 존재하는 2번 말뚝의 경우에는 그 영향을 적게 받는 것으로 나타났다($P/P_a < 1$). 터널로부터 가장 근접하게 위치한 1번 말뚝의 경우 터널 굴착 종료 후 말뚝의 주면마찰력 지지율이 약 85%로 증가하여 선단지지율이 약 15%로 감소하였다. 이것으로 기초판으로 연결되어 일체거동하는 균말뚝 일지라도 터널크라운 직상부에 위치한 말뚝의 경우 지반 침하의 영향을 가장 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

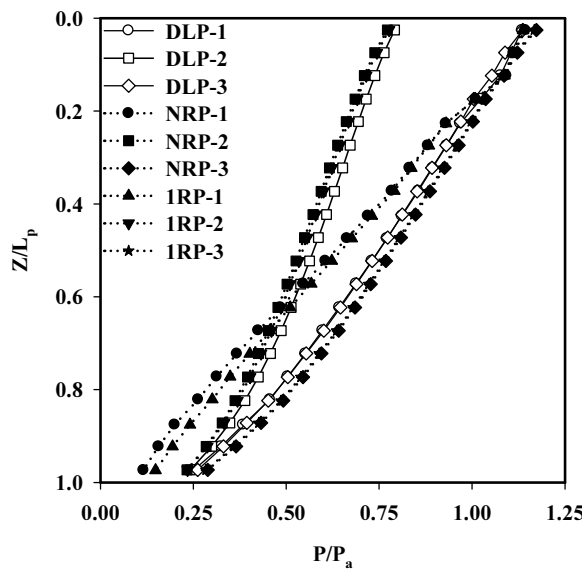


Fig. 9. Distributions of normalized axial pile forces with depth

Fig. 10은 터널 굴착 종료 후 산정된 보강조건(무보강 및 2 m 두께 그라우팅 보강)에 따른 정규화된 균말뚝의 축력(P/P_a) 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대해서 보여주고 있다. 또한 Fig. 10은 터널 굴착 이전에 말뚝두부로 작용한 설계하중(pile loading)의 축력분포도 포함하고 있다. 여기서, P 는 임의 심도에서의 말뚝 축력을 의미하고, P_a 는 터널 굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중(4,737 kN)이다. Fig. 10은 앞서 설명한 Fig. 9의 축력 분포와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 그라우팅의 두께가 1 m에서 2 m로 증가함에 따라 축력의 분포 또한 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이는 그라우팅 보강 두께의 증가(1 m → 2 m)로 인해 지반 침하의 감소효과를 가져와 말뚝 주면지지력의 감소를 유발하기 때문으로 판단된다. 따라서 보강조건(무보강, 1 m 그라우팅 보강 및 2 m 그라우팅 보강)에 따른 말뚝의 축력분포를 상세히 검토하기 위해 순수하게 터널 굴착으로 인해 유발된 말뚝의 축력 분포(tunnelling-induced axial pile force)를 분석하고 이에 따라 말뚝두부에 작용한 상재하중의 영향을 제거할 필요가 있다.

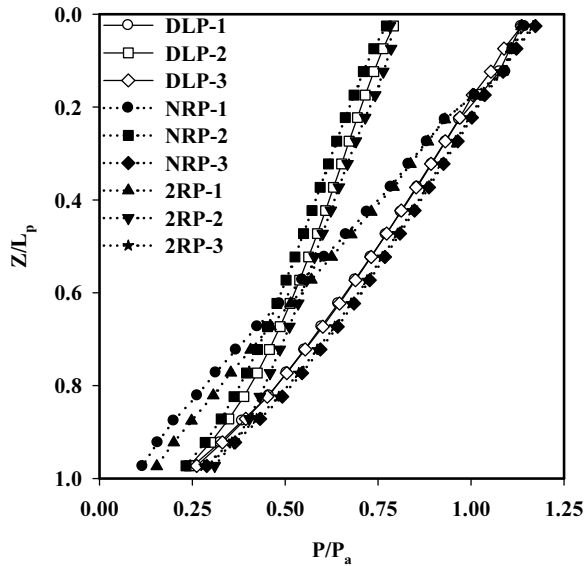


Fig. 10. Distributions of normalized axial pile forces with depth

Fig. 11은 터널 굴착에 의한 말뚝의 축력변화를 명확하게 규명하기 위하여 보강조건(무보강, 1 m 그라우팅 보강 및 2 m 그라우팅 보강)에 따라 정규화된 tunnelling-induced 말뚝 축력(P_{net}/P_a)의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. 여기서, P_{net} 은 순수하게 터널 굴착에 의해서 발생한 말뚝의 축력(tunnelling-induced)이다. Fig. 11에 나타나 있듯이 터널로부터 이격거리가 가장 가까운(터널 크라운 직상부) 1번 말뚝의 경우

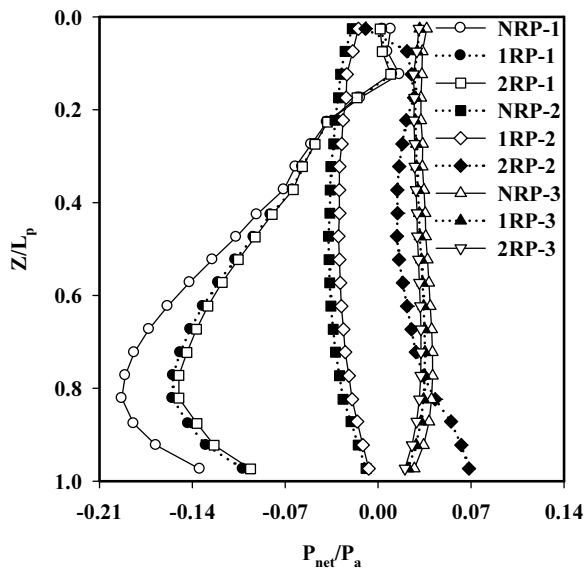


Fig. 11. Distributions of normalised tunnelling-induced axial pile forces with depth

지표면에서부터 $Z/L_p = 0.8$ 부근까지 터널의 굴착으로 인해 말뚝의 축력이 점차 감소하고 이후 $Z/L_p = 0.8$ 에서 말뚝 선단까지 증가하는 것을 알 수 있다. Table 4는 해석조건별 말뚝에 작용하는 최대 인장력 및 압축력의 값을 나타내고 있다. 보강을 고려하지 않은 NRP-1 말뚝에서는 $P_{net(-)max}/P_a$ 의 값이 -0.19로 나타났으며, 1RP-1 및 2RP-1의 경우에는 약간 증가하여 $P_{net(-)max}/P_a$ 의 경우 두 말뚝에서 모두 약 -0.15의 값을 보였다. 여기서, $P_{net(-)max}/P_a$ 은 말뚝에 발생한 최대인장력의 값을 의미한다. NRP-2 및 1RP-2 말뚝의 경우 인장력 형태의 축력 분포를 보이고 있으나, 보강을 가장 크게 고려한 2RP-2 말뚝에는 압축력 형태의 축력 분포가 반대로 발생하였다. 이는 보강을 크게 할수록 보강 효과를 극대화시켜 말뚝 선단 부근의 지반 침하가 말뚝의 침하를 초과하지 않기 때문으로 판단된다. 터널로부터 가장 멀리 이격되어 있는 NRP-3, 1RP-3 및 2RP-3 말뚝의 경우 압축력 형태의 축력 분포가 말뚝두부에서 선단까지 큰 차이를 보이지 않으며 나타났다. 말뚝에 작용하는 인장력 및 압축력 발생 메커니즘을 이후 3.5 절 상대변위에서 상세히 설명하겠다.

Table 4. Computed maximum axial pile forces

Analysis series	$P_{net(-)max}/P_a$	$P_{net(+)max}/P_a$
NRP-1	-0.19	-
1RP-1	-0.15	-
2RP-1	-0.15	-
NRP-2	-0.03	-
1RP-2	-0.02	-
2RP-2	-	0.06
NRP-3	-	0.04
1RP-3	-	0.03
2RP-3	-	0.03

Note: $P_{net(-)max}/P_a$ (maximum tensile pile force), $P_{net(+)max}/P_a$ (maximum compressive pile force)

3.4 말뚝의 전단응력 분포

Fig. 12는 무보강 조건에서 터널 굴착 종료 후 산정되어진 말뚝-인접지반 경계면에서의 전단응력 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대해 보여주고 있다. 또한, 터널 굴착 이전 설계하중작용(pile loading)에 의한 전단응력 및 터널 굴착 종료 후의 전단응력의 분포도 같이 보여주고 있다. 터널 굴착 이전 말뚝에 작용한 설계하중에 의해 발생한 전단응력의 경우 균말뚝 외곽에 존재하는 DLP-1 및 DLP-3 말뚝에서는 비슷한 경향을 보이나, 균말뚝 내부에 존재하는 DLP-2 말뚝은 상대적으로 작은 전단응력이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 설계하중 작용 하에 있는 말뚝의 경우 말뚝두부에서부터 $Z/L_p = 0.3$ 부근까지 말뚝심도의 증가에 따라 전단응력이 감소하였으나 이후 말뚝의 선단까지는 전단응력이 다시 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 터널의 굴착이 수행되고 난 후 NRP-1 말뚝의 경우 NRP-2 및 NRP-3 말뚝과 달리 말뚝 심도가 증가 할수록 전단응력이 점차적으로 감소하여 말

뚝의 선단에서는 약 50 kPa 전단응력 값이 발생했다. 이는 NRP-1 말뚝의 경우 터널크라운(crown) 직상부에 존재하여 지반침하의 영향을 가장 크게 받아 나타나는 결과로 분석되며, 말뚝의 선단에서는 지반의 침하가 상대적으로 크게 발생하여 말뚝-인접지반 경계면에서의 전단력이 감소하기 때문에 전단응력의 값이 감소하는 것으로 판단된다.

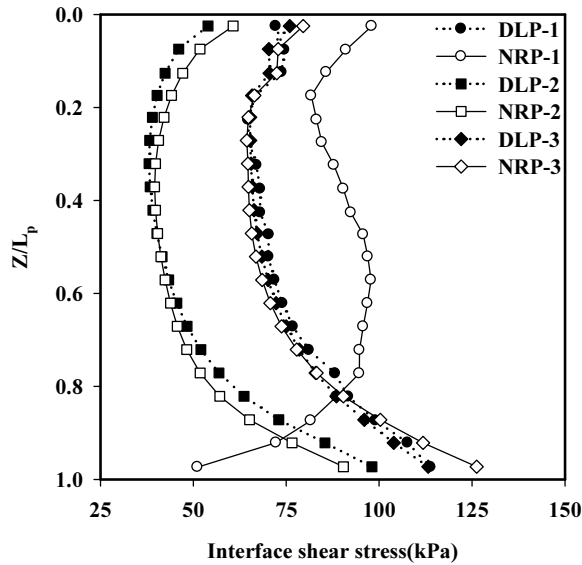


Fig. 12. Distributions of interface shear stresses with depth

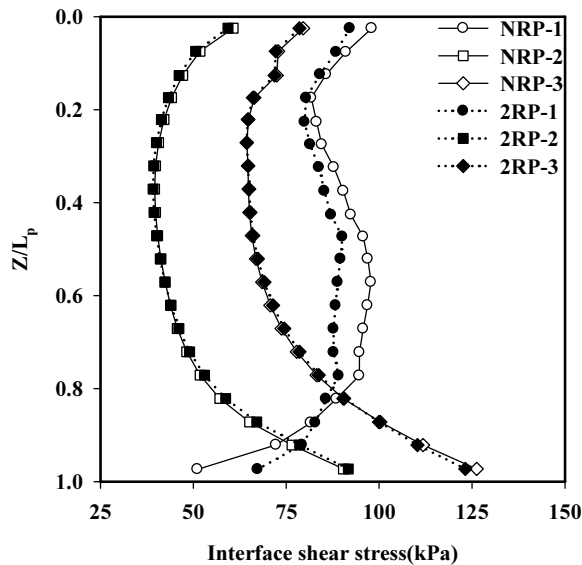


Fig. 13. Distributions of interface shear stresses with depth

Fig. 13은 터널 굴착 종료 후 산정된 보강조건(무보강 및 2 m 두께 그라우팅 보강)에 따른 말뚝-인접지반 경계면에서의 전단응력 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. 보강조건에 따른 전단응력 분포의 차이를 명확히 구분하기 위해 1 m 두께 그라우팅 보강 조건을 Fig. 13에는 제시하지 않았으며, 이후 순수하게 터널 굴착(tunneling-induced)으로 발생하는 전단응력 분포에서 고려하여 상세히 설명하겠다. Fig. 13에 나타나 있듯이 전단응력의 분포는 무보강 조건 및 2 m 그라우팅 보강 조건의 말뚝에서 모두 비슷한 경향으로 나타났다. 특히, 2번 및 3번 말뚝의 경우 무보강 조건 및 2 m 두께 그라우팅 보강 조건 모두 전단응력의 분포가 차이를 보이지 않았다. 반면, 1번 말뚝의 경우 전단응력의 값이 약간의 차이를 보였으며 말뚝의 선단부근에서 약 16 kPa의 차이가 나타났다. 터널 굴착으로 인한 말뚝의 전단응력을 보강조건에 따라 세부적으로 파악하기 위해서는 말뚝 두부에 작용한 설계하중의 효과를 제거하여 그 영향을 분석할 필요가 있다.

Fig. 14는 다양한 보강조건(무보강, 1 m 및 2 m 두께 그라우팅 보강)에서 군말뚝 내 1번, 2번 및 3번 말뚝에 대하여 순수하게 터널 굴착(tunneling-induced)으로 유발된 말뚝의 전단응력 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. Fig. 14에 나타나 있듯이 1번 말뚝의 경우 모든 보강조건에 대해 비슷한 경향을 보이고 있으나 무보강 조건인 NRP-1 말뚝의 경우에 특정 말뚝의 심도에서 1RP-1 및 2RP-1 말뚝에 비해 상대적으로 큰 전단응력의 값을 보이고 있다. 또한, 모든 보강조건에 대하여 1번 말뚝의 경우 약 $Z/L_p = 0.8$ 부근에서 전단응력 값의 부호가 바뀌게 되는데 이는 특정 심도(약 $Z/L_p = 0.8$)를 기준으로 하여 말뚝에 작용하는 전단력의 방향이 반대로 바뀌는 것을 의미한다. 다시 말해 말뚝두부에서 심도 $Z/L_p = 0.8$ 까지는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하여 상향의 전단응력이 발생하였으며, 반대로 $Z/L_p = 0.8$ 에서 말뚝선단까지 지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하므로 하향의 전단응력이 나타나 말뚝에는 인장력 형태의 축력 분포를 보이는 것으로 나타났다. 2번 및 3번 말뚝의

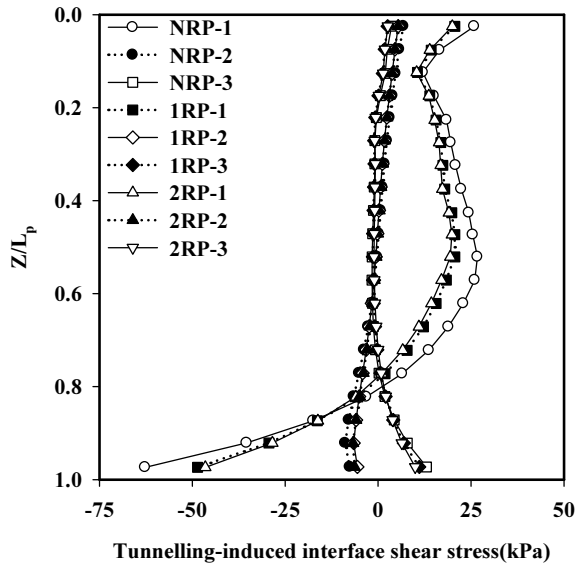


Fig. 14. Distributions of tunnelling-induced interface shear stresses with depth

경우에도 모든 보강조건에 대해 비슷한 경향을 보이고 있으며, 2번 말뚝의 경우 심도 약 $Z/L_p = 0.45$ 부근에서 전단응력의 부호가 바뀌는 것을 확인 할 수 있다. 이는 앞서 설명한 1번 말뚝에 작용하는 전단응력 메커니즘과 비슷하여 인장력 형태의 축력 분포를 보이겠으나, 말뚝두부 및 말뚝선단 부근에서의 전단응력 값의 차이가 크지 않아 축력의 값이 작게 나타날 수 있음을 추론 할 수 있다. 따라서, 3.3절 말뚝의 축력분포에서 설명한 바를 전단응력을 통해 증명하였다. 1번 및 2번 말뚝과 달리 3번 말뚝의 경우 말뚝두부에서 $Z/L_p = 0.2$ 부근까지 상향의 전단응력이 발생하였으며, $Z/L_p = 0.7$ 부근에서 말뚝선단까지 또한 상향의 전단응력이 나타났다. 다시 말해 말뚝두부 및 말뚝 선단의 두 구역에서 상향의 전단응력이 발생하였는데, 두부에서의 전단응력 값이 선단에서의 전단응력 값 보다 상대적으로 작게 발생하여 말뚝에는 압축력 형태의 축력분포를 유발시켰다. 전단응력의 방향과 관련해서는 이후 3.5절 말뚝의 상대변위에서 다시 설명하겠다.

3.5 말뚝의 상대변위 분포

Fig. 15는 터널 굴착 종료 후 보강을 고려하지 않은 조건에서 터널 굴착에 의해 산정된 말뚝-지반 사이에 존재하는 interface 요소의 상대변위 분포를 군말뚝 내 1번, 2번 및 3번 말뚝을 고려하여 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 따라 보여주고 있다. 터널 굴착 이전 말뚝두부 및 기초판에 작용한 설계하중으로 인해 말뚝 전체 구간에서 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과한다. 설계하중작용(pile loading) 상태에서 말뚝의 상대변위 분포는 군말뚝의 외곽에 존재하는 1번 및 3번 말뚝에서는 비슷한 경향을 보였으며, 군말뚝 내부에 존재하는 2번 말뚝의 경우에는 외곽에 존재하는 말뚝에 비해 말뚝에 발생하는 상대변위가 상대적으로 감소하여 나타났다. 보강을 고려하지 않은 상태에서 터널 굴착 이후 말뚝에 발생한 상대변위는 1번 말뚝에서 가장 크게 발생하였으며, 나머지 말뚝(2번 및 3

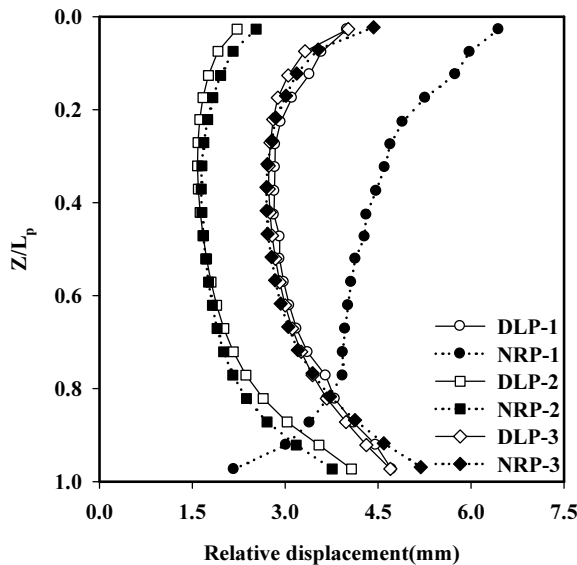


Fig. 15. Distributions of relative displacements with depth

번)에서는 터널 굴착 이전 설계하중작용 상태에서의 상대변위 값과 비슷하였다. 터널 굴착 종료 후 1번 말뚝의 경우에는 말뚝 두부에서부터 심도가 증가 할수록 상대변위는 점차 감소하였으며, 말뚝의 선단에서는 약 2.0 mm의 상대변위 값을 보였다. 즉, 군말뚝 내 말뚝의 위치에 따라 상대변위의 변화 경향이 상이하므로 순수하게 터널 굴착으로 인해서 유발된 상대변위(tunnelling-induced relative displacement)를 검토할 필요가 있다.

Fig. 16은 다양한 보강조건(무보강, 1 m 및 2 m 두께 그라우팅 보강)에서 군말뚝 내 1번, 2번 및 3번 말뚝에 대하여 tunnelling-induced 상대변위의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 따라 보여주고 있다. 1번 말뚝의 경우 모든 보강조건에 대하여 말뚝의 상대변위가 타 말뚝들(2번 및 3번)에 비해 크게 발생하였으며, 보강을 고려하지 않은 NRP-1 말뚝에서 가장 크게 나타났다. 1번 말뚝의 경우 약 $Z/L_p = 0.8$ 부근에서 상대변위 값의 부호가 바뀌게 되는데, 이는 특정 심도(약 $Z/L_p = 0.8$)를 기준으로 하여 말뚝에 작용하는 상대변위의 방향이 반대로 바뀌는 것을 의미한다. 즉, $Z/L_p = 0.8$ 부터 말뚝선단까지는 터널 굴착으로 인한 지반침하로 하향의 마찰력이 말뚝에 작용하며, 반대로 말뚝두부에서 $Z/L_p = 0.8$ 까지는 지반이 말뚝의 침하에 대해 저항하는 형태의 상향의 마찰 저항력이 발현되는 것으로 보인다. 따라서, 앞서 설명한 전단응력의 분포를 tunnelling-induced 상대변위를 통하여 재차 입증하였다. 또한, 2번 말뚝의 경우 1번 말뚝과 비슷한 형태의 상대변위 메커니즘을 보이고 있으나, 말뚝의 두부 및 선단에는 발생하는 상대변위 값의 차이가 크지 않으므로 마찰 저항력이 크게 발현되지 않아 앞서 보여준 전단응력의 크기가 작게 나타나는 이유를 증명 하였다. 3번 말뚝에서는 말뚝의 선단에서 1번 및 2번 말뚝과 달리 (+) 양의 상대변위 값이 발생하여 상향의 마찰 저항력이 발현되고 말뚝의 두부에는 상대변위가 거의 발생하지 않아 말뚝에는 압축력 형태의 축력이 작용하는 것을 알 수 있다.

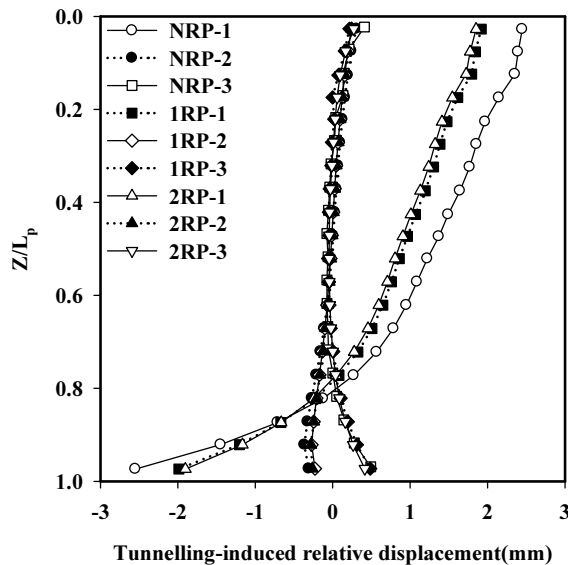


Fig. 16. Distributions of tunnelling-induced relative displacements at the pile-soil interface with depth

3.6 말뚝관리 IoT 플랫폼 예비 설계 가이드라인

앞서 설명한 내용들은 터널 굴착으로 인해 필연적으로 발생하는 지반 침하에 의한 말뚝의 공학적인 거동을 수치해석으로 분석한 말뚝 메커니즘을 제시하고 있다. 본 연구에서는 단순히 수치해석을 통하여 구조물의 거동을 분석하는 것 뿐만 아니라, 비즈니스 서비스 프로세스 및 인터페이스 설계서를 바탕으로 한 말뚝관리 IoT 플랫폼 예비 설계 가이드라인을 제시하고자 한다. IoT (Internet of Things)는 인터넷에 연결되어 애플리케이션이나 네트워크에 연결된 장치 또는 산업 장비와 같이 다른 사물들과 데이터를 공유할 수 있는 수많은 사물을 의미한다. 본 연구에서 제시한 예비 설계 가이드라인은 향후 IoT 플랫폼 구축을 위한 연구의 한 부분으로써 터널 굴착으로 인한 인접말뚝의 거동을 플랫폼으로 분석하기 위한 기초 연구 단계로 볼 수 있다.

3.6.1 프레임워크 인터페이스 구축 선정 기준 가이드라인

Table 5는 프레임워크(framework) 인터페이스 개발 선정에 대한 판단 기준 표를 보여주고 있다. 플랫폼은 그 속성상 다양한 디바이스 시스템, 데이터 연계 및 프로세스 연계가 필수적으로 요구되며, 이에 따라 프레임워크의 인터페이스 가이드라인의 정립이 필요한 실정이다. 따라서, 말뚝관리 IoT 플랫폼에서 생성되는 모든 데이터 및 서비스에 대한 인터페이스를 모두 구현하는 것은 품질 서비스 모델 가이드라인에 위배되므로 인터페이스 개발의 필요 여부를 선정하는 기준 가이드라인을 요구하고 있다. 이를 위해서는 시공현장에서 자주 고려하고 있는 터널의 안정성, 지반보강, 말뚝의 침하, 안전율 등에 관한 가이드라인을 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Table 5. A standard of judgment for selected development of framework interface

Classification	Content
Using the multiple systems (institutions)	<ul style="list-style-type: none"> • When the multiple users utilise the information resources of specific data and process on the IoT platform in common. • If the specific information resources required for each systems are developed individually, the efficiency maybe reduced. • The interface development is carried out by dividing into the data and sharing process according to the type of information resource.
Using the real-time connection	<ul style="list-style-type: none"> • When a large number of users need to access in the real-time connection by requesting and receiving the information on the IoT platform for pile management. • Avoid the link of batch data.
Using the multi-channel service	<ul style="list-style-type: none"> • When the various UX are used in channel, such as the web, mobile apps and kiosk, the data are shared through the standard link interface. • In the case of standard link interface such as the SOAP and REST, the supports of multi-channel service are possible with an interface without the duplication in various channels.
Using the multi-middleware platform	<ul style="list-style-type: none"> • When the interfaces using a IoT platform are performed in various middleware platforms, such as J2EE, NET and PHP. • If the interfaces in the heterogeneous environments are developed by operating independently the language and technical standards in the individual middleware.

Note: UX (user experience), J2EE (java 2 enterprise edition), NET (NET framework), PHP (hypertext preprocessor)

3.6.2 프레임워크 인터페이스 개발 요건 기준 가이드라인

터널 굴착으로 인해 유발된 말뚝의 거동과 관련된 각종 데이터를 바탕으로 말뚝관리 IoT 플랫폼 구축을 위해 기초 인터페이스를 개발하는데 필요한 핵심 개발 요건 기준 가이드라인을 제시하고자 하며, 그 내용은 다음과 같다.

① 오픈 API 요청에 대하여 Access Token 방식의 인증 및 권한 제어

- 터널 굴착으로 유발한 말뚝의 거동관련 데이터(변위, 축력, 전단응력 및 손상여부 등)의 수집 및 정제된 IoT 센서 정보에 대하여 레이어가 분리된 형태로 타 시스템에서 접근 하여 조회, 수정 및 삭제 처리한다.
- API 요청에 대한 인증 및 권한 제어를 Access Token 기반으로 하여 구현해야 한다.

② 오픈 RESTful API and Authorization 방식의 JSON DATA 포맷

- 구체적인 API에 대한 구현은 JSON 데이터 포맷의 웹기술 표준인 RESTful API over HTTP(S)로 달성한다.
- 접근 제어를 위해서 IoT 디바이스의 식별자에 따른 접근 제어 방식으로 특정 API에 대한 권한 제어 구현이 필요하다.
- 접근 제어 인증을 위한 체계적인 관리를 위해 OAuth2 Access Token 관리 등의 구현 체계가 필요하다.

③ API 인터페이스 사용현황 로그화

- 향후 분석을 위해서 API Call 및 API Return Time와 같이 API 자체 사용현황을 로그화한다.
- API call 횟수 및 Response Time은 향후 성능 향상 요소를 위한 백데이터로도 사용한다.

3.6.3 프레임워크 인터페이스 API 데이터 플로우 가이드라인

프레임워크 인터페이스는 말뚝관리요소와 관련된 데이터(변위, 축력, 전단응력 및 손상 등)를 수집 및 정제하여 이를 활용하는 데이터 플로우 상에서 다양한 형태의 API로 가공되어 제공된다. 따라서, 각 데이터 플로우 프로세스를 정의하고 데이터가 생성되는 시점에 따라 적합한 API를 제공하는 것이 필요하다. 이를 위해 데이터의 정확도를 향상시키며, 수치해석, 실험 및 현장 데이터의 오류를 최소화하기 위해 데이터 분류 작업을 정밀하게 수행하여야 한다.

상기에 제시된 예비 설계 가이드라인을 바탕으로 하여 말뚝관리 IoT 플랫폼이 구축되면 사용자가 터널 굴착으로 유발되는 말뚝의 변형 및 손상을 쉽게 파악하고, 말뚝의 유지관리를 편리하게 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 말뚝관리 IoT 플랫폼 구축을 위해서는 데이터의 수집을 위한 저장공간, 센서의 설치 및 데이터 유지관리 등과 같은 문제가 수반되므로 이를 해결하기 위한 후속 연구가 동반되어야 한다. 따라서, 수치해석 데이터 및 현장 데이터를 활용한 관련 연구를 지속적으로 수행하여, 이를 바탕으로 한 말뚝관리 IoT 플랫폼의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 실시하여 기초판으로 연결된 균말뚝 형태의 기초 하부를 터널이 근접 통과할 경우 이로 인해 발생하는 말뚝의 거동분석을 수행하였다. 이를 통해 터널 굴착으로 유발된 말뚝침하, 축력, 전단응력 및 상대변위를 분석하였으며, 추가적으로 말뚝관리 IoT 플랫폼 예비 가이드라인을 제시함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 터널 굴착 단계에서 지표면 및 말뚝두부 침하의 비율이 가장 크게 발생하는 경우는 터널이 $Y/D = -1.5 \sim +1.5$ 지점을 통과할 때 나타났으며, 그 이후 터널 굴착에 따른 침하의 비율은 현저히 감소되는 것으로 분석되었다. 터널로부터 이격거리가 가장 가까우며 지반보강을 가장 크게 고려한 2RP-1은 지반보강을 고려하지 않은 말뚝에 비해 침하가 약 15% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 지반보강을 고려하지 않으며 터널로부터 이격거리가 가장 가까워 지반침하의 영향을 가장 많이 받을 것으로 예상되는 NRP-1 말뚝은 지반보강을 가장 크게 고려하고 터널로부터 이격거리가 가장 멀리 존재하여 지반침하의 영향을 가장 작게 받는 2RP-3 말뚝에 비해 말뚝두부의 침하가 약 70% 크게 발생하였다.
2. 설계하중(pile loading) 작용 아래에서 말뚝의 축력은 심도가 증가할수록 점차적으로 감소하여 약 75%가 주면 마찰력에 의해 지지되고 나머지 약 25%의 하중만이 말뚝선단에서 지지되는 것으로 나타났다. 반면 터널로부터 가장 근접하게 위치한 1번 말뚝의 경우 터널 굴착 종료 후 말뚝의 주면마찰력 지지율이 약 85%로 증가하여 선단지지율이 약 15%로 감소하였다. 이는 기초판으로 연결되어 일체거동하는 균말뚝 일지라도 터널크라운 직상부에 위치한 말뚝의 경우 지반 침하의 영향을 가장 크게 받는다는 것으로 분석되었다. 또한, NRP-2 및 1RP-2 말뚝의 경우 인장력 형태의 축력 분포를 보이며, 보강을 가장 크게 고려한 2RP-2 말뚝에는 압축력 형태의 축력 분포가 반대로 발생하였는데, 이는 보강을 크게 할수록 보강 효과를 극대화시켜 말뚝 선단 부근의 지반 침하가 말뚝의 침하를 초과하지 않기 때문으로 판단된다.
3. 무보강 조건인 NRP-1 말뚝의 경우에 특정 말뚝의 심도에서 1RP-1 및 2RP-1 말뚝에 비해 상대적으로 큰 전단응력의 값을 보였으며, 모든 보강조건에 대하여 1번 말뚝의 경우 약 $Z/L_p = 0.8$ 부근에서 전단응력 값의 부호가 바뀌게 되는데, 이는 전단력의 방향이 반대로 바뀌는 것을 의미한다. 1번 및 2번 말뚝과 달리 3번 말뚝의 경우 말뚝두부 및 말뚝선단의 두 구역에서 상향의 전단응력이 발생하였는데, 두부에서의 전단응력 값이 선단에서의 전단응력 값 보다 상대적으로 작게 발생하여 말뚝에는 압축력 형태의 축력분포를 유발시켰다.
4. 상대변위의 경우 1번 말뚝에서 모든 보강조건에 대한 말뚝의 상대변위가 타 말뚝(2번 및 3번)에 비해 크게 발생하였으며, 보강을 고려하지 않은 NRP-1 말뚝에서 가장 크게 나타났다. 1번 말뚝의 경우 약 $Z/L_p = 0.8$ 부근에서 상대변위 값의 부호가 바뀌게 되는데, 이는 특정 심도를 기준으로 하여 말뚝에 작용하는 변위의 방향이 반대로 바뀌는 것을 알 수 있다. 다시말해 특정 심도를 기준으로 하여 특정구간에서는 하향의 마찰력이 말뚝에 작용하며, 반대로 다른 특정구간에서 지반이 말뚝의 침하에 대해 저항하는 형태인 상향의 마찰 저항력이 발현

되는 것으로 나타났다.

5. 말뚝관리 IoT 플랫폼은 그 속성상 다양한 디바이스 시스템, 데이터 및 프로세스 연계가 필수적으로 요구되며, 이에 따라 프레임워크의 인터페이스 가이드라인의 정립이 필요한 것으로 나타났다. 이를 위해 예비 가이드라인을 바탕으로 한 말뚝관리 IoT 플랫폼을 구축함으로써 사용자로 하여금 터널 굴착에 의한 말뚝의 거동 및 유지관리의 파악이 간편해 질 것으로 분석되었다. 따라서, 수치해석 및 현장데이터를 융합하고 이를 활용한 말뚝관리 IoT 플랫폼 개발에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.: 2017R1D1A1B05035579).

저자 기여도

전영진은 원고 작성을 하였고, 이규설은 데이터 정립을 하였고, 이재철 및 바트보양은 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였고, 이철주는 논문의 검토 및 방향을 수립하였다.

References

1. Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M. (2015), Reference manual, Plaxis 3D 2015 User's Manual, Delft, pp. 1-284.
2. Cheng, C.Y., Dasari, G.R., Chow, Y.K., Leung, C.F. (2007), "Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, No. 4, pp. 450-466.
3. Choi, H.J., Kim, S.G., Jang, K.J., Shim, J.D., Eun, S.J. (2005), "Case study on tunnel design under terminal structure of Gimpo airport", Proceedings of the KSCE Tunnel Committee Special Conference, Seoul, pp. 49-66.
4. Choi, Y.G., Park, J.H., Woo, S.B., Jeong, Y.J. (2003), "Reinforcing effect of FRP multi-step grouting for NATM tunnel through weathered zone", Proceedings of the KSCE 2003 Convention Program, Seoul, pp. 4805-4810.
5. Davisson, M.T. (1972), "High capacity piles", Proceedings of the Lecture Series in Innovations in Foundation Construction, ASCE, Illinois, pp. 81-112.
6. Dias, T.G.S., Bezuijen, A. (2014a), "Pile tunnel interaction: literature review and data analysis", Proceedings of the ITA World Tunnel Congress 2014, Iguassu Falls, Brazil, May, pp. 1-10.
7. Dias, T.G.S., Bezuijen, A. (2014b), "Pile-tunnel interaction: a conceptual analysis", Proceedings of the 8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, CRC

- Press, Seoul, Korea, August, 1, pp. 251-255.
8. Hartono, E., Leung, C.F., Shen, R.F., Chow, Y.K., Ng, Y.S., Tan, H.T., Hua, C.J. (2014), "Behaviour of pile above tunnel in clay", Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics 2014 (ICPMG 2014), Perth, Australia, pp. 833-838.
 9. Hong, Y., Soomro, M.A., Ng, C.W.W. (2015), "Settlement and load transfer mechanism of pile group due to side-by-side twin tunnelling", Computers and Geotechnics, Vol. 64, No. 1, pp. 105-119.
 10. Jacobsz, S.W. (2003), The effects of tunnelling on piled foundations, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, pp. 51-180.
 11. Jeon, Y.J., Jeon, S.C., Jeon, S.J., Lee, C.J. (2020a), "Study on the behaviour of pre-existing single piles to adjacent shield tunnelling by considering the changes in the tunnel face pressures and the locations of the pile tips", Geomechanics and Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 187-200.
 12. Jeon, Y.J., Jeon, S.C., Jeon, S.J., Lee, C.J. (2020b), "A study on the behaviour of pre-existing single piles to adjacent shield TBM tunnelling from three-dimensional finite element analyses", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 22, No. 1, pp. 23-46.
 13. Jeon, Y.J., Kim, J.S., Jeon, S.C., Jeon, S.J., Park, B.S., Lee, C.J. (2018), "A study on the behaviour of single piles to adjacent shield TBM tunnelling by considering face pressures", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 6, pp. 1003-1022.
 14. Jeon, Y.J., Kim, S.H., Kim, J.S., Lee, C.J. (2017), "A study on the effects of ground reinforcement on the behaviour of pre-existing piles affected by adjacent tunnelling", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 3, pp. 389-407.
 15. Jeon, Y.J., Kim, S.H., Lee, C.J. (2015), "A study on the effect of tunnelling to adjacent single piles and pile groups considering the transverse distance of pile tips from the tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 6, pp. 637-652.
 16. Jeon, Y.J., Lee, C.J. (2015), "A study on the behaviour of single piles to adjacent tunnelling in stiff clay", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 16, No. 6, pp. 13-22.
 17. Jue, K.S., Na, D.S. (2005), "A study on the construction of tunnel near the piles of foundation of an overpass", Proceedings of the KSCE Tunnel Committee Special Conference, Seoul, pp. 89-100.
 18. Lee, C.J. (2012a), "Three-dimensional numerical analyses of the response of a single pile and pile groups to tunnelling in weak weathered rock", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 32, No. 1, pp. 132-142.
 19. Lee, C.J. (2012b), "Behaviour of single piles and pile groups in service to adjacent tunnelling conducted in the lateral direction of the piles", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 4, pp. 337-356.
 20. Lee, C.J. (2012c), "The response of a single pile and pile groups to tunnelling performed in weathered rock", KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 32, No. 5C, pp. 199-210.
 21. Lee, C.J., Chiang, K.H. (2007), "Responses of single piles to tunnelling-induced soil movements in sandy ground", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, No. 10, pp. 1224-1241.
 22. Lee, C.J., Jeon, Y.J. (2015), "A study on the effect of the locations of pile tips on the behaviour of piles to

- adjacent tunnelling”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 2, pp. 91-105.
23. Lee, C.J., Jeon, Y.J., Kim, S.H., Park, I.J. (2016), “The influence of tunnelling on the behaviour of pre-existing piled foundations in weathered soil”, *Geomechanics and Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 553-570.
 24. Lee, Y.J. (2008), “A boundary line between shear strain formations associated with tunneling adjacent to an existing piled foundation”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 10, No. 3, pp. 283-293.
 25. Liu, C., Zhang, Z., Regueiro, R.A. (2014), “Pile and pile group response to tunnelling using a large diameter slurry shield - case study in Shanghai”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 59, No. 1, pp. 21-43.
 26. Mair, R.J., Williamson, M.G. (2014), “The influence of tunnelling and deep excavation on piled foundations”, *Proceedings of the 8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (IS-Seoul 2014)*, Seoul, pp. 21-30.
 27. Marshall, A.M. (2009), *Tunnelling in sand and its effect on pipelines and piles*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, pp. 43-180.
 28. Ng, C.W.W., Lu, H. (2014), “Effects of the construction sequence of twin tunnels at different depths on an existing pile”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 51, No. 2, pp. 173-183.
 29. Ng, C.W.W., Lu, H., Peng, S.Y. (2013), “Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunnelling on an existing pile”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 35, No. 1, pp. 189-199.
 30. Ng, C.W.W., Soomro, M.A., Hong, Y. (2014), “Three-dimensional centrifuge modelling of pile group responses to side-by-side twin tunnelling”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 350-361.
 31. Pang, C.H. (2006), *The effects of tunnel construction on nearby pile foundation*, Ph.D. Thesis, The National University of Singapore, pp. 24-170.
 32. Plaxis 3D (2019), *Reference manual, Plaxis 3D User’s Manual*, pp. 75-130.
 33. Selemetas, D. (2006), *The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, pp. 44-132.
 34. Selemetas, D., Standing, J.R. (2017), “Response of full-scale piles to EPBM tunnelling in London clay”, *Géotechnique*, Vol. 67, No. 9, pp. 823-836.
 35. Soomro, M.A., Ng, C.W.W., Memon, N.A., Bhanbhro, R. (2018), “Lateral behaviour of a pile group due to side-by-side twin tunnelling in dry sand: 3D centrifuge tests and numerical modelling”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 101, No. 1, pp. 48-64.
 36. Williamson, M.G. (2014), *Tunnelling effects on bored piles in clay*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, pp. 61-121.