

Shield TBM 터널시공으로 유발된 말뚝선단의 변형이 말뚝거동에 미치는 영향에 대한 연구

전영진¹ · 박병수² · 최영남³ · 이철주^{4*}

¹비회원, 강원대학교 산업기술연구소 선임연구원

²비회원, 강원도립대학교 건설지적토목과 교수

³비회원, 충남연구원 기후변화연구센터 책임연구원

⁴정회원, 강원대학교 토목공학과 교수

A study on the effect of the pile tip deformations on the pile behaviour to shield TBM tunnelling

Young-Jin Jeon¹ · Byung-Soo Park² · Young-Nam Choi³ · Cheol-Ju Lee^{4*}

¹Senior Researcher, College Institute of Industrial Technology, Kangwon National University

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon State University

³Senior Researcher, Center for Climate Change Research, Chungnam Institute

⁴Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

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

Abstract

In the current work, a series of three-dimensional finite element analyses have been carried out to understand the behaviour of pre-existing single piles and pile groups to adjacent Shield TBM tunnelling by considering various reinforcement conditions. The numerical modelling has analysed the effect of the pile cutting, ground reinforcement and pile cap reinforcement. The analyses concentrate on the ground settlements, the pile head settlements, the axial pile forces and the shear stress transfer mechanism at the pile-soil interface. In all cases of the pile tips supported by weathered rock, the distributions of shear stresses presented a similar trend. Also, when the pile tips were cut, tensile forces or compressive forces were induced on the piles depending on the relative positions of the piles. Furthermore, when the pile tips are supported by weathered rock, approximately 70% of the load is supported by surface friction, and only the remaining 30% is supported by the pile tip. Furthermore the final settlement of the piles without reinforcement showed approximately 70% more settlement than the piles for which ground reinforcement is considered. It has been found that the ground settlements and the pile settlements are heavily affected by the pile cutting and reinforcement conditions. The behaviour of the single pile and group piles, depending on the pile cutting, conditions of ground and pile cap reinforcement, has been extensively

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
26(3)169-189(2024)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.3.169>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received April 5, 2024

Revised April 30, 2024

Accepted May 9, 2024



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 © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

examined and analysed by considering the key features in great details.

Keywords: Shield TBM, Reinforcement condition, Pile cutting, Numerical analyses

초 록

본 연구에서는 Shield TBM 터널 근접 시공으로 인한 기 존재하는 단독말뚝 및 군말뚝의 공학적 거동을 파악하기 위해 다양한 보강조건을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 수치해석에서는 말뚝 절단, 지반보강 및 기초판 보강을 고려하여 말뚝의 거동을 분석하였으며, 터널굴착으로 유발되는 지반침하, 말뚝두부 침하, 말뚝의 축력 및 말뚝-지반 사이 경계면에서 발생하는 전단응력을 고찰하였다. 말뚝선단이 풍화암에 지지되는 모든 말뚝에서는 전단응력의 분포가 비슷한 경향을 보였으며, 말뚝선단이 절단되는 말뚝의 경우 말뚝의 상대적 위치에 따라 인장력 혹은 압축력이 동시에 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 말뚝선단이 풍화암에 지지된 경우 약 70%가 주면마찰력에 지지되며, 나머지 약 30%가 말뚝선단에 지지되는 것으로 분석되었다. 추가적으로 보강을 고려하지 않은 말뚝의 경우 그라우팅 보강을 실시한 말뚝에 비해 최종침하가 약 70% 크게 발생하였다. 말뚝선단 절단 및 보강조건 유무에 따라 지반 침하와 말뚝 침하가 큰 영향을 받는 것으로 조사되었으며, 본 연구를 통해 말뚝절단, 지반보강 및 기초판 보강 조건에 따른 단독말뚝 및 군말뚝의 거동에 영향을 미치는 주요인자를 심도있게 고찰하였다.

주요어: Shield TBM, 보강조건, 말뚝절단, 수치해석

1. 서론

최근 인구 밀집도가 높은 수도권을 중심으로 편리한 인프라 구축을 위해 다양한 터널시공이 이루어지고 있으며, 터널시공의 경우 지반침하를 유발하여 말뚝의 공학적 거동에 영향을 미치게 된다. 또한, 지금까지 수행되어온 기존 연구성과에 의하면 터널굴착은 터널 주변지반의 침하를 필연적으로 발생시키므로 터널과 인접한 말뚝 구조물에는 변형이 발생하여 축력분포 역시 변하게 되므로 말뚝의 사용성에 큰 영향을 받는다고 보고되었다(Lee, 2012a). 터널굴착으로 인한 말뚝의 사용성 문제를 해결하기 위해 수치해석적 연구, 이론적 연구, 실내모형실험 및 원심모형실험 등 다양한 연구들이 수행되었다(Jacobsz, 2002; 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; 2023; Jeon et al., 2015; 2017; 2018; 2020a; 2020b; 2022; Lee et al., 2016; Soomro et al., 2018; Zhang et al., 2021; Wang and Yuan, 2023). 이에 비해 현장실측을 실시한 연구의 경우 상대적으로 제한적인데, Pang (2006), Selemetas (2006), Liu et al. (2014), Mair and Williamson (2014), Williamson (2014) 및 Selemetas and Standing (2017)은 터널굴착으로 인한 인접 말뚝의 거동을 현장실측을 통하여 연구한 바 있다. Fig. 1은 Pang (2006)이 싱가포르 Mass Rapid Transit (MRT)의 North-East line에서 실시된 터널시공에 따른 인접말뚝의 거동을 현장실측으로 연구한 모식도를 보여주고 있다. 연구에 따르면 터널에 근접한 말뚝의 경

우 말뚝에는 상당히 큰 축력과 휨모멘트가 발생하며 이러한 축력 및 휨모멘트는 터널굴착으로 발생하는 지반손실률(volume loss)과 선형적인 관계를 가지는 것으로 보고하였다.

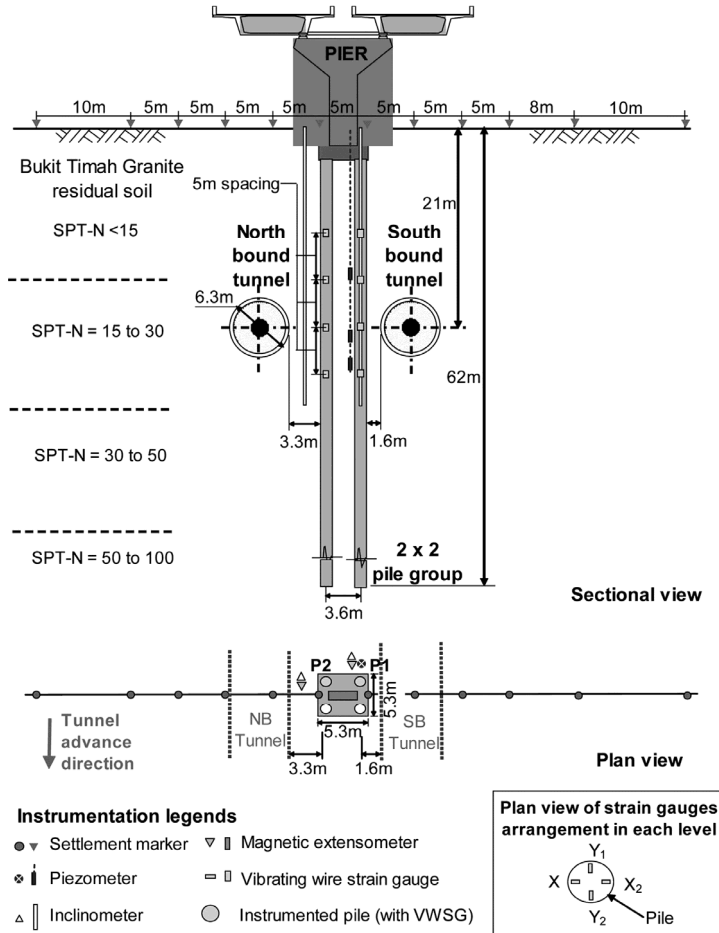


Fig. 1. Layout of Singapore MRT (Pang, 2006)

국내 연구의 대부분은 터널굴착에 따른 말뚝의 절단(손상)을 유발하지 않은 상태에서 터널굴착에 따른 지반침하와 이로 인한 말뚝의 거동을 분석하는 것과 관련되어 있으며, 기 존재하는 말뚝을 직접 절단하여 터널시공이 이루어졌을 때 발생하는 말뚝의 거동연구는 전무한 실정이다. Wang and Yuan (2023)에 의하면 중국 및 이스라엘의 경우 기 존재하는 철근콘크리트 말뚝을 절단하여 TBM 시공이 종종 발생하며, 이스라엘의 경우 최대 14개의 말뚝을 절단하여 터널굴착이 수행된 시공이력을 제시하였다. Fig. 2는 Wang and Yuan (2023)이 제시한 Harbin Metro 3호선 교량말뚝을 절단하며 통과하는 프로젝트 계획구역을 보여주고 있으며, 이러한 말뚝의 절단은 사용성에 문제를 야기하므로 이와 관련된 연구가 필요하다고 보고하였다.

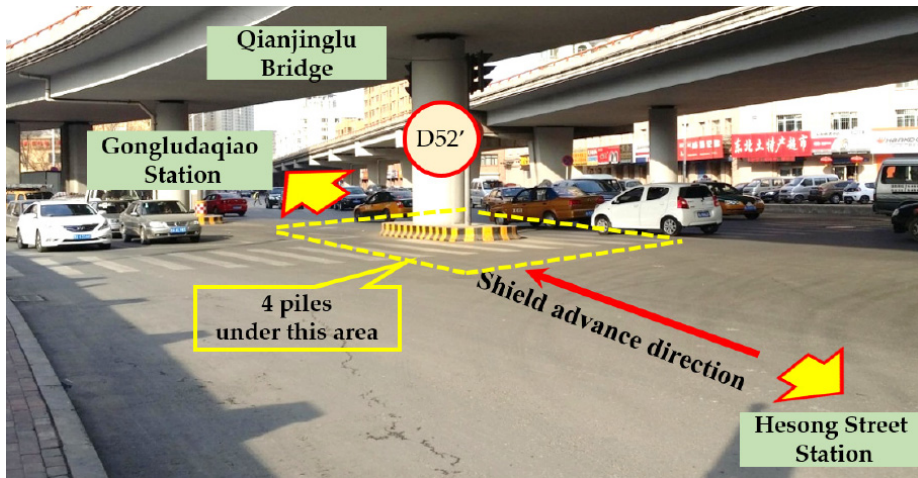


Fig. 2. Plan of the project (Wang and Yuan, 2023)

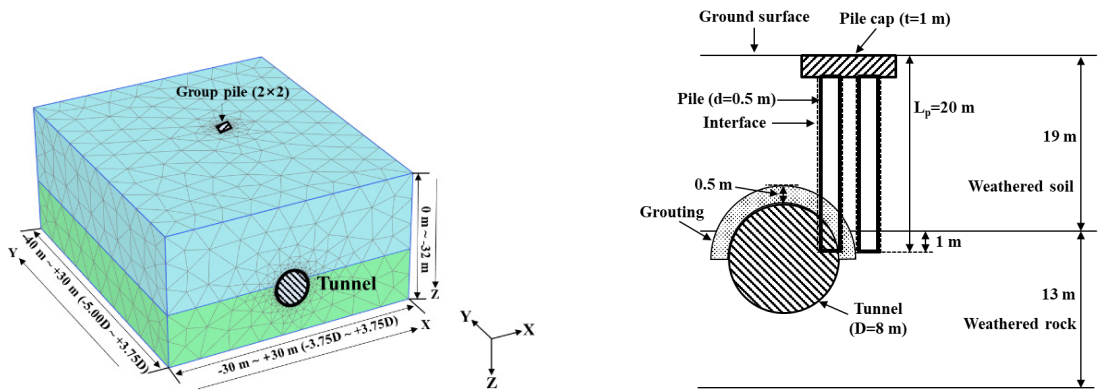
또한 최근에는 지반 변형 및 민원의 발생을 최소화할 수 있는 Shield TBM 공법이 최적의 대안으로 대두되고 있다. Shield TBM 공법의 경우 굴진시 막장압을 작용시켜 지반의 침하를 최소화하며, 굴착과 동시에 세그먼트 조립 및 그라우트를 주입하는 연속공정으로 공기를 단축시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. Kaalberg et al. (2005)은 TBM 공법이 적용된 현장실측 및 수치해석을 실시하여 터널굴착에 따른 지반 및 말뚝의 침하 영향을 고찰하였으며, 터널과 말뚝선단의 상대적 위치를 고려하여 터널굴착으로 발생하는 지반침하 영향권과 비교분석을 수행하였다. Williamson (2014)은 터널굴착에 의한 지반침하 영향권과 관련하여 연구를 수행하였는데 터널굴착 영향권 내에 말뚝이 존재하는 경우 터널굴착 영향권 외부에 존재하는 말뚝에 비해 말뚝에 작용하는 겹보기안전율이 낮게 나타나는 것으로 보고하였고 이에 대한 규명이 명확하지 않아 체계적인 연구가 필요하다고 보고하였다. Mroueh and Shahrour (2008)은 막장압을 일정하게 유지한 상태에서 TBM 굴착을 수치해석으로 모사하여 터널 시공에 따른 지표면 침하 및 터널인근 지반의 변화를 분석하였다. 또한 Jeon et al. (2018)은 막장압의 변화에 따른 Shield TBM 공법을 모사하여 터널 근접시공에 따른 말뚝거동을 수치해석을 활용하여 수행하였다. 추가적으로 케임브리지 대학교 Smart infrastructure 연구소는 터널굴착 과정에서 일부가 절단되는 Under-reamed 말뚝의 거동을 모니터링 했으며, 진동 센서를 사용하여 말뚝의 축력변화를 감지하고 데이터의 수집 및 분석을 통해 말뚝의 안정성을 평가하였다. 따라서 터널굴착에 따른 말뚝의 거동에 대한 모니터링은 말뚝의 안정성을 유지하는데 큰 역할을 한다고 보고하였다(University of Cambridge: 2020 Case Studies, 2024).

이에 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통해 Shield TBM 공법을 모사하여 터널굴착으로 인한 말뚝선단의 절단이 발생할 경우 말뚝거동에 미치는 영향을 분석하였으며, 다양한 보강조건을 추가적으로 고려하여 보강유무에 따른 단독 및 군말뚝의 tunnelling-induced 말뚝두부침하, 축력, 상대변위 및 경계면에서의 전단응력 등을 고찰하였다.

2. 수치해석

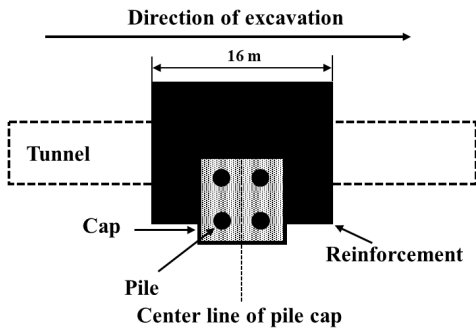
2.1 해석개요 및 경계조건

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램 Plaxis 3D (2024)를 사용하여 단독말뚝 및 군말뚝에 인접한 터널 굴착을 모사함으로써 말뚝선단의 절단, 터널인접지반에서의 보강(그라우팅 보강) 및 기초판 보강에 대한 다양한 조건을 고려하여 말뚝의 거동을 분석하였다. Fig. 3(a)는 해석에서 적용된 유한요소 대표 mesh를 보여주고 있으며, Fig. 3(b) 및 Fig. 3(c)는 해석단면도를 나타내고 있다. 유한요소해석에서 가정한 터널의 직경(D)은 8 m이며 터널의 중심부는 지표면으로부터 20.5 m 하부에 위치하고 있다. 지반의 경우 지표면에서 19 m 까지 풍화토층으로 구성하였고 그 하부로는 풍화암층이 존재한다고 가정하였다. 또한 말뚝의 직경(d)은 0.5 m로 현장타설말뚝으로 설정하였다. 말뚝길이(L_p)는 20 m이며, 군말뚝에 대해서는 말뚝 중심간의 간격을 2.5d로 가정하였다. 말뚝의 거동을 분석하기 위해 단독말뚝 및 군말뚝으로 분류하여 해석을 수행하였으며, 터널굴착으로 인한 말뚝선단의 절단은 군말뚝에서만 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 단독말뚝의 경우 군말뚝의 2번 위치로 선정하였으며 (Fig. 3(d)), 모든 말뚝에 대해서는 말뚝의 선단이 풍화암에 1 m 근입되어 말뚝선단이 지지를 받도록 하였다. 군말

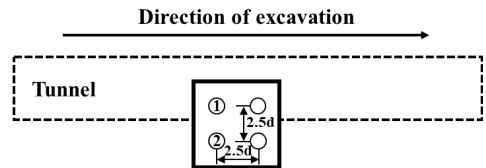


(a) A representative 3D finite element mesh used in the current study (a 2x2 pile group, D : tunnel diameter)

(b) Sectional view analysis geometry



(c) Longitudinal section of analysis geometry



(d) Locations of piles in 2x2 pile group

Fig. 3. Elements and geometries used in study analyses

뚝의 경우 일부 말뚝의 선단이 터널굴착으로 인해 절단이 되므로 터널이 말뚝하부를 통과하기 이전 그라우팅 보강 또는 기초판 보강을 실시하였으며, 그라우팅체는 보강 각도를 180°로 고정한 상태에서 그 두께를 0.5 m 하였다. 그라우팅체 보강의 경우 최초보강 및 마지막보강시에는 각각 2 m 보강을 실시하였으며, 그 사이에 존재하는 보강의 경우 1.5 m 씩 보강을 실시하였다. 또한 기초판의 보강까지 고려할 경우에는 최초 그라우팅 보강이 실시 될 때 동시에 기초판 보강을 실시하였다. 이후 2.3절에서 상세히 설명하겠다. 터널 막장압 크기의 경우 터널굴착으로 지반이 붕괴되지 않는 최소 막장압을 역해석을 통해 산정하였으며 그 값은 180 kPa로 막장면에 일정하게 작용한다고 가정하였다. Table 1은 본 연구에서 수행된 각각의 해석 특징을 요약한 것으로 총 6회의 해석이 수행되었다. 군말뚝의 경우 말뚝의 선단이 절단되는 1번 말뚝 및 절단이 이루어지지 않는 2번 말뚝에 대하여 분석하여 고찰하였다. 그 위치는 Fig. 3(d)에 나타나있다. Table 2는 말뚝 위치 및 보강 조건에 따라 분류한 말뚝의 명칭을 각각 설명한 표이다. 본 해석에서는 지하수위가 지표면으로부터 5 m 아래 존재한다고 가정하였으며, 터널굴착이 수행될 경우 터널내부는 지하수위가 존재하지 않는 상태로 유지하여 해석을 수행하였다.

Table 1. Summary of numerical analyses

Analysis series	Thickness of ground reinforcement	Thickness of pile cap reinforcement	Remarks
PL	-	-	Pile load test
G	-	-	Greenfield
SP	-	-	Single pile without reinforcement
GP	-	-	Pile group without reinforcement
GP-G	0.5 m	-	Pile group with ground reinforcement
GP-GC	0.5 m	1 m	Pile group with ground and pile cap reinforcement

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

Pile name	Ground reinforcement	Pile cap reinforcement	Pile location number of Fig. 3(d)	Remarks
SP-2	-	-	2	Single pile without pile cap and ground reinforcement
GP-1	-	-	1	Pile group without pile cap and ground reinforcement
GP-2	-	-	2	
GP-G-1	Y	-	1	Pile group with ground reinforcement
GP-G-2	Y	-	2	
GP-GC-1	Y	Y	1	Pile group with pile cap and ground reinforcement
GP-GC-2	Y	Y	2	

2.2 적용 구성모델 및 물성치

터널굴착을 모사하기 위해 탄-소성해석을 실시하였으며, 특히 지반과 말뚝 사이 경계면에서의 소성항복 (plastic yielding)이 나타날 경우에는 미끄러짐(slip) 발생을 허용하는 할 수 있는 경계요소(interface element)를 적용하였다. 이는 말뚝 및 인접 지반 경계면에서의 전단응력 전이 과정을 분석하기 위함이며, 특히 말뚝선단에서도 경계요소를 지정함으로써 말뚝에 인장력이 작용할 경우 말뚝의 선단과 지반이 서로 분리될 수 있도록 하였다. Table 3은 수치해석에서 적용한 재료 및 지반의 물성치를 정리한 것이며 국내의 풍화토, 풍화암 및 콘크리트의 일반적인 물성치이다(Lee, 2012a). 그라우팅 물성치의 경우 Choi et al. (2003)의 역해석을 통해 제시한 그라우트체 물성치 산정방법을 적용하여 반영하였으며, 기초판 물성치는 말뚝에 적용된 물성치와 동일한 값을 사용하였다. 풍화토 및 풍화암의 경우 비관련흐름법칙 및 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 따르는 탄-소성 모델이 적용되었고 기초판, 말뚝 및 세그먼트에는 등방탄성모델(isotropic elastic model)을 지정하였다. 말뚝 시공에 대한 말뚝주면-지반 및 말뚝선단-지반 경계면에서 전단강도 상수(c'_{int} , ϕ'_{int})가 감소되는 것을 고려하기 위해 Brinkgreve et al. (2015)의 지침을 참조하여 강도감소계수(strength reduction factor) $R_{int} = 0.75$ 를 적용하고 아래의 식 (1) 및 식 (2)를 통해 적절한 전단강도 상수를 산정하였다.

$$c'_{int} = R_{int} \times c'_{soil} \quad (1)$$

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

여기서, c'_{soil} 은 지반의 점착력, R_{int} 는 강도감소계수, ϕ'_{soil} 은 지반의 내부마찰각, ϕ'_{int} 는 interface 마찰각이다.

Table 3. Material parameters assumed in the numerical modelling

Material	Model	γ_t (kN/m ³)	K_0	ν'	E' (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Weathered soil (Lee, 2012a)	Mohr-Coulomb	20	0.75	0.35	80	50	35
Weathered rock (Lee, 2012a)	Mohr-Coulomb	20	0.75	0.25	200	100	35
Grouted material	Mohr-Coulomb	25	0.01	0.2	800	250	35
Shield TBM machine (Plaxis 3D, 2024)	Elastic	247	-	-	200,000	-	-
Segment (Plaxis 3D, 2024)		27	0.01	0.1	31,000	-	-
Pile/Pile cap		25	0.01	0.2	30,000	-	-

γ_t (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

수치해석에서 말뚝 시공으로 발생하는 근입효과에 대한 지반 응력변화는 포함시키지 않았으므로 본 연구에서 가장한 말뚝은 현장타설말뚝과 유사하다고 볼 수 있다. 터널의 굴착은 종방향(Y)에 대하여 -5.00D에서 +3.75D (-40 m~+30 m) 구간 사이에서 실시되었다(Fig. 3(a)). 단계별 터널굴착이 실시되기 이전 별도의 해석을 통해 결정된 설계하중 P_a (1,800 kN)를 결정하였으며, 터널의 굴착이 실시되기 이전 말뚝두부에는 단계적으로 하중을 증가시켜 설계하중이 작용되도록 하였다(600 kN → 1,200 kN → 1,800 kN). 단계별 터널굴착에 앞서 19 m 길이에 대하여 터널굴착이 이미 완료되었다고 가정하였으며, 19 m 중 Shield TBM 장비는 9 m로 터널굴착 단계별 1.5 m 씩 굴진하여 총 34단계에 걸쳐서 수행되었다. 터널굴착으로 인한 말뚝선단의 절단은 Fig. 3(b)에 나타나 있듯이 터널단면과 말뚝선단이 접한 부분에서 절단을 모사하였으며, 말뚝의 선단이 약 1 m 절단되는 것으로 가정하였다. 그라우팅 보강의 경우 기초판의 중심에서 종방향(Y) $\pm 1D$ (± 8 m, 총 16 m 보강) 만큼 보강을 실시하였으며(Fig. 3(c)), 최초 보강 및 마지막 보강시에 각각 2 m를 보강하고 사이에 존재하는 보강은 터널의 굴착길이 1.5 m 대응하는 보강을 8회 실시하였다(18 m 보강의 경우 : 보강(2.0 m) → [굴착(1.5 m) → 보강(1.5 m)] × 8회 → 굴착(1.5 m) → 보강(2.0 m)). 또한 기초판 보강과 그라우팅 보강을 동시에 고려한 해석에서는 그라우팅 보강이 시작되는 시점에 기초판 보강을 실시하였다. 터널 막장압의 경우 2.1절에서 설명하였듯이 터널굴착으로 지반이 붕괴되지 않는 최소 막장압을 역해석을 통해 산정하여 막장면에 일정한 크기로 작용시켰다. 해석결과의 분석을 위해 임의의 심도에서 말뚝축력 P 는 $P = \sigma_{zz,avg} \times A_p$ 식으로 산정하였다. 여기서 $\sigma_{zz,avg}$ 는 특정심도에 대한 말뚝의 수직응력 값을 평균한 것이며 A_p 는 말뚝 단면적이다.

3. 해석결과 분석

3.1 말뚝의 설계지지력 결정

Fig. 4는 말뚝의 설계지지력 산정을 위해 말뚝재하시험 모사를 실시하여 산정된 말뚝의 하중-침하 관계를 보여 주고 있다. 말뚝의 설계지지력 산정시 터널의 굴착을 포함시키지 않았으며, 말뚝두부에 단계별 압축력을 증가시켜 하중재하시험을 모사하였다. Fig. 4에 나타나 있듯이 말뚝두부의 하중이 3,100 kN 인근에 도달할 때까지 말뚝 하중과 말뚝두부의 침하 사이에서는 거의 선형적인 관계를 보이고 있으며, 이를 초과하는 하중의 작용이 발생할 경우 급격한 침하가 나타나고 있다. 본 연구에서는 말뚝에 발생하는 하중-침하 관계로부터 말뚝 설계지지력을 결정하기 위하여 널리 이용되는 Davisson (1972) 방법을 적용하였다. 이를 통하여 말뚝의 파괴하중(fail load)을 3,600 kN으로 산정하였으며, 여기에 안전율(FS) 2.0을 적용하여 말뚝의 설계하중(P_a) 1,800 kN으로 결정하였다 (3,600 kN / 2 = 1,800 kN). 설계하중(P_a) 적용 아래에서 말뚝두부의 침하량(δ)은 5.6 mm이다. 말뚝과 지반 사이의 경계면 굴착에 따른 기 시공된 말뚝 거동을 분석하기 위해 터널굴착 이전 말뚝의 두부에 3단계(600 kN → 1,200 kN → 1,800 kN)에 걸친 하중을 증가시켜 설계하중(P_a)을 작용시켰다. 이를 통해 사용중인 말뚝 거동을 모

사하였으며 이후에 터널굴착을 단계별로 수행하였다.

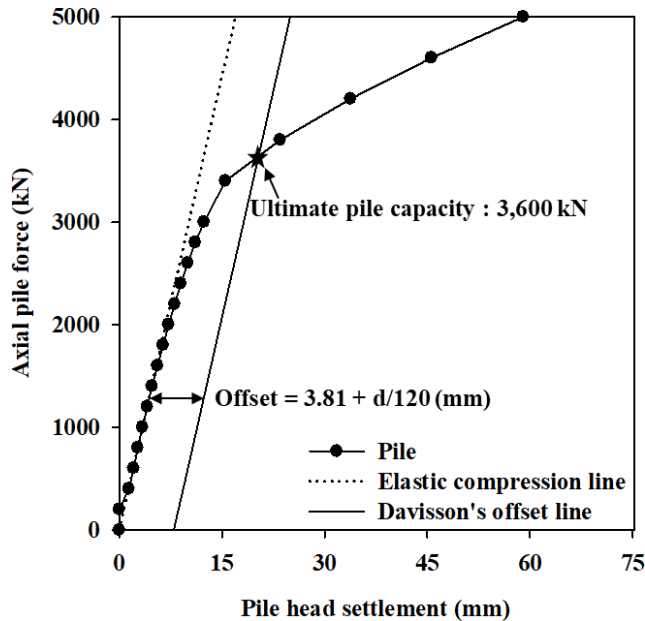


Fig. 4. Relation of axial pile forces and pile head settlements

3.2 터널굴착에 따른 말뚝두부 침하 및 지표면 침하

Fig. 5는 단독말뚝 및 군말뚝에 대해 다양한 보강 조건을 고려하여 해석을 통해 산정된 터널굴착 단계별 정규화된 $\delta_{p_net}/\delta_{gr_net}$ 및 $\delta_{gr}/\delta_{gr_max}$ 침하 분포를 보여주고 있다(Y/D : 정규화된 종방향). 여기서, δ_{gr} 은 지중에 말뚝이 존재하지 않으며 보강조건을 고려하지 않은 Greenfield 해석조건에 대한 군말뚝 1번 위치에서의 터널굴착 단계별 지표면 침하를 나타내며, δ_{p_net} 은 터널굴착 단계별 말뚝두부 침하를 의미한다. 또한 δ_{gr_max} 는 Greenfield 해석조건에 대한 터널굴착으로 발생한 지표면 최대 침하이다($\delta_{gr_max} = 5.56$ mm). Fig. 4에 나타나 있듯이 정규화된 침하 $\delta_{p_net}/\delta_{gr_net}$ 및 $\delta_{gr}/\delta_{gr_max}$ 는 단계별 굴착이 진행될수록 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 단계별 터널굴착에서 말뚝두부 및 지표면 침하비율이 가장 크게 발생한 경우는 터널이 Y/D = -1.5~+1.5 지점을 통과하는 시점으로 나타났으며, 이후 터널굴착에 따른 침하 비율이 현저히 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 터널굴착에 따른 말뚝두부의 침하는 주로 Y/D = -1.8~+1.8 구간을 통과할 때로 나타났다. 말뚝두부의 최종 침하는 GP-G-2 말뚝을 제외하고 모든 말뚝에서 Greenfield 조건의 지표면 최종 침하를 초과하는 침하가 발생하였으며, 터널이 말뚝의 직하부(Y/D = 0)를 통과하기 이전에는 모든 말뚝에서 Greenfield 조건의 지표면 침하보다 작게 나타났다. 또한 모든 말뚝에 대해 터널굴착이 Y/D = 0 지점을 통과할 때 침하가 감소하는 것으로 조사되었으며 이는 Shield TBM 굴착 공법 모사에 따른 세그먼트 설치 효과에 의한 것으로 판단된다. GP-G-2 말뚝의 경우 말뚝두부의 침하

가 가장 작게 발생하였는데 이는 말뚝의 선단이 풍화암에 지지되며 그라우팅에 의한 보강효과가 나타났기 때문으로 분석되었다. 추가적으로 기초판 보강 및 그라우팅 보강을 고려한 GP-GC-2 말뚝의 경우 GP-G-2 말뚝에 비해 상대적으로 침하가 크게 계산되어 그 원인을 분석해본 결과 말뚝두부에 연결된 기초판의 무게가 말뚝에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 반면 말뚝선단의 절단이 발생한 GP-G-1 및 GP-GC-1 말뚝의 경우 GP-GC-1에서의 말뚝두부의 침하가 GP-G-1 말뚝에 비해 감소하였는데 이 경우에는 기초판의 보강 효과가 적절하게 적용되어 나타난 것으로 판단된다. 따라서 말뚝의 선단이 지지되는지의 유·무에 따라 기초판의 보강 효과가 상이하게 나타났다. 또한 GP-1 말뚝의 최종침하는 가장 작은 침하가 발생한 GP-G-2 말뚝에 비해 약 70% 크게 발생하였다. 침하 패턴을 분석한 결과 기초판으로 연결된 군말뚝의 경우 1번 및 2번 위치에 존재하는 말뚝에서 침하의 크기가 다르게 발생하였으므로 기초판에는 부등침하가 발생할 가능성이 있을 것으로 예상된다.

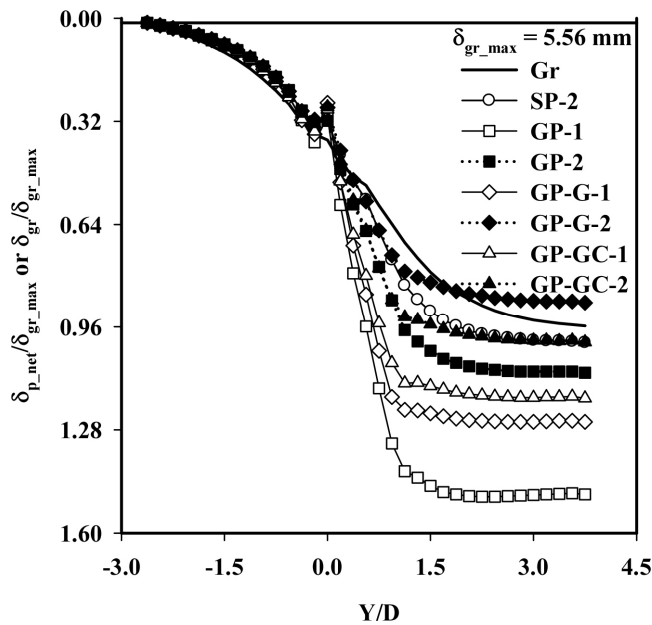


Fig. 5. Distributions of normalised pile head and soil surface settlements with tunnel advancement ($\delta_{gr_max} = 5.56$ mm)

3.3 말뚝의 축력분포

Fig. 6은 터널굴착 종료 후 다양한 보강조건에 따른 단독말뚝 및 군말뚝에 대하여 정규화된 말뚝의 축력(P/P_a) 분포를 정규화된 말뚝 심도(Z/L_p)에 따라 보여주고 있다. 또한 Fig. 6은 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중(pile loading)에 대한 축력의 분포도 포함하고 있다. 여기서, P 는 임의 심도에서의 말뚝축력을 의미하며, P_a 는 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중(1,800 kN)이다. 2.3절에 언급하였듯이 말뚝의 축력은 임의의 심도에서 평균수직응력을 산정하여 계산하였다. 오직 설계하중만 작용하고 있는 SP-2 (DL) 및 GP-1 (DL)의 경우 심도

가 증가할수록 말뚝의 축력은 점차적으로 감소하여 약 80%가 주면마찰력에 의해 지지되며, 나머지 약 20%의 하중만이 말뚝선단에 지지되는 것을 알 수 있다. 또한 말뚝의 선단이 풍화암에 지지된 SP-2, GP-2, GP-G-2 및 GP-GC-2 말뚝의 경우 터널굴착 종료 후 약 70%가 주면마찰력에 의해 지지되며, 나머지 약 30%가 말뚝선단에 지지되는 것으로 조사되었다. 이는 터널굴착으로 인한 말뚝의 침하가 선단에서 크게 저항하기 때문으로 판단된다. 반면 터널굴착으로 인한 말뚝선단의 절단이 이루어지는 GP-1, GP-G-1 및 GP-GC-1 말뚝의 경우 지표면에서 $Z/L_p = 0.85$ 부근까지 축력이 점차 감소하였으며 그 하부로는 축력이 다시 증가하여 말뚝선단에서는 설계하중에 가까운 축력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 터널굴착 직후 말뚝선단의 절단과 동시에 세그먼트의 설치 및 그라우팅 보강 효과에 의한 것으로 보이며 다시말해 선단지지력이 해방된 이후 다시 선단지지력의 확보가 이루어졌기 때문으로 판단된다. 반면 설계하중을 포함한 말뚝축력 분포는 순수하게 터널굴착으로 발생한 축력분포를 파악하기 어려우므로 순수하게 터널굴착으로 발생한 tunnelling-induced 축력의 분포를 살펴볼 필요가 있다.

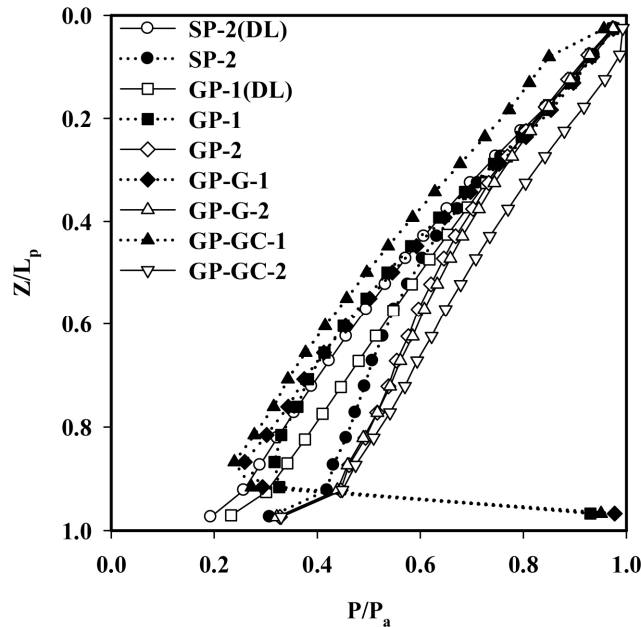


Fig. 6. Distributions of normalised axial pile forces with depth

Fig. 7은 터널굴착으로 인한 말뚝 축력의 변화를 명확하게 규명하기 위해 다양한 보강조건에 따른 단독말뚝 및 군말뚝에 대하여 정규화된 tunnelling-induced 말뚝의 축력(P_{net}/P_a) 분포를 정규화된 말뚝 심도(Z/L_p)에 따라 보여주고 있다. 여기서, P_{net} 은 순수하게 터널 굴착에 의해 발생한 말뚝 축력(tunnelling-induced)이다. Fig. 7에 나타나 있듯이 말뚝의 선단이 풍화암에 지지되어 있는 2번 위치의 모든 조건의 말뚝에서는 지표면에서부터 $Z/L_p = 0.9$ 부근까지 터널굴착으로 인하여 말뚝의 축력이 점차 증가하고 이후 $Z/L_p = 0.9$ 에서 말뚝선단까지 감소하는 것을 알 수 있다. 반면 터널굴착으로 인한 말뚝선단의 절단이 발생하는 1번 위치 모든 조건의 말뚝에서는 지표면에

서부터 $Z/L_p = 0.9$ 부근까지 말뚝의 축력이 점차 감소하고 이후 $Z/L_p = 0.9$ 에서 말뚝선단까지 크게 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이는 1번 위치에서의 말뚝의 경우 터널굴착으로 인해 말뚝의 선단이 절단되고 세그먼트 설치 및 그라우팅 보강 효과가 나타났기 때문으로 판단된다. 또한 1번 위치 말뚝 및 2번 위치 말뚝에서는 각기 다른 형태의 축력분포를 보이는데, 말뚝선단이 풍화암에 지지되는 2번 말뚝의 경우 터널굴착으로 인해 압축력 형태의 축력분포가 나타났다. 터널굴착으로 인해 말뚝선단이 절단되는 1번 위치 말뚝의 경우 지표면에서 $Z/L_p = 0.9$ 부근까지 인장력 형태의 축력분포를 보였으나 이후 선단까지는 압축력 형태를 띠는 것으로 나타났다. 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력 발생 메커니즘을 이후 3.4절 말뚝의 상대변위 분포에서 자세히 설명하겠다. GP-GC-1 및 GP-GC-2 말뚝의 경우 그라우팅 보강 및 기초판 보강이 모두 고려된 말뚝으로 인장력 및 압축력 형태의 축력 값이 다른 말뚝에 비해 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 그라우팅 보강이 실시됨과 동시에 기초판 보강이 실시되어 말뚝에는 기초판 무게만큼의 하중이 말뚝에 작용하기 때문에 나타난 결과로 볼 수 있다.

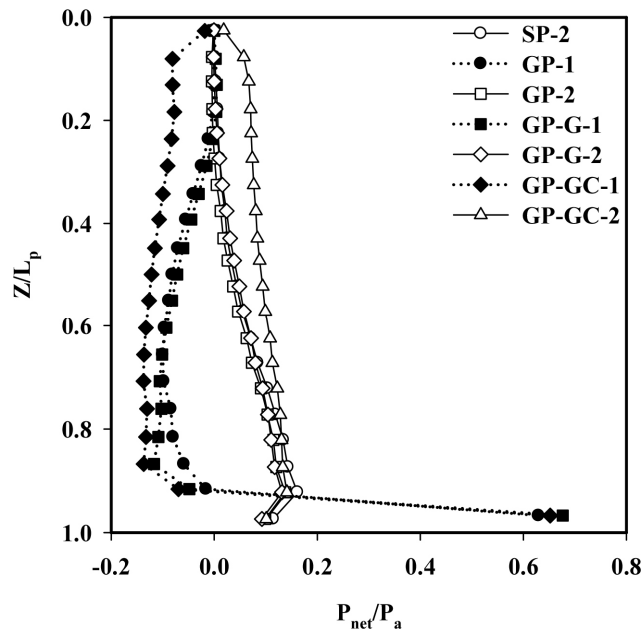


Fig. 7. Distributions of normalised tunnelling-induced axial pile forces with depth

3.4 말뚝의 전단응력 분포

Fig. 8은 단독말뚝 및 군말뚝에 대하여 다양한 보강조건을 고려한 터널굴착 종료 후 산정된 말뚝-인접지반 경계면의 전단응력 분포를 정규화된 말뚝심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. 또한, 터널굴착 이전 설계하중작용 (pile loading) 및 터널굴착 종료 후의 전단응력 분포를 같이 보여주고 있다. 터널굴착 이전 말뚝에 작용된 설계하중 상태 SP-2 (DL) 및 GP-1 (DL) 말뚝에서의 전단응력 분포의 경우 비슷한 경향을 보이고 있으나 그 값에서는 약

간의 차이가 나타났는데 이는 군말뚝에서 작용하는 군효과(group effect)에 의한 것으로 판단된다. 터널굴착으로 인한 말뚝의 절단이 발생하는 GP-1, GP-G-1 및 GP-GC-1 말뚝의 경우 지표면에서 $Z/L_p = 0.3$ 부근까지 전단응력이 증가하다가 그 하부 $Z/L_p = 0.9$ 까지 전단응력이 감소하였으며 재차 말뚝의 선단까지 그 값이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 GP-G-1 및 GP-GC-1 말뚝의 경우 $Z/L_p = 0.9$ 부근에서 전단응력의 값이 음(-)의 값을 가지게 되었는데 이는 그라우팅 보강 및 세그먼트 설치효과로 판단된다. 말뚝의 선단이 풍화암에 지지되는 2번 위치의 모든 말뚝에서는 지표면에서 $Z/L_p = 0.75$ 부근까지 전단응력이 감소하였으며 그 아래로 말뚝선단까지 증가하였다. 말뚝의 선단이 풍화암에 지지되는 경우에는 설계하중 작용상태에서의 전단응력 분포와 비슷한 경향을 보였으며, 터널굴착으로 인한 말뚝 및 지반사이의 영향을 최소화하는 것으로 나타났다.

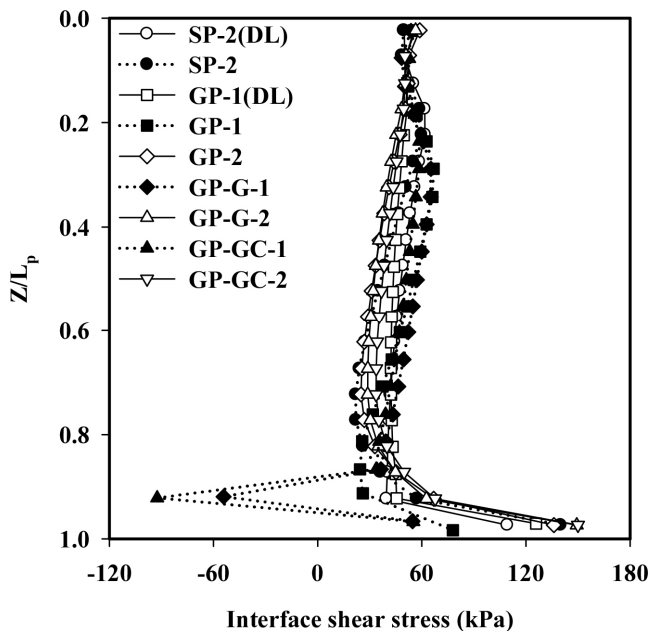


Fig. 8. Distributions of interface shear stresses with depth

Fig. 9는 단독말뚝 및 군말뚝에 대하여 다양한 보강조건을 고려한 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 말뚝의 전단응력 분포를 정규화된 말뚝 심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. Fig. 9에 나타나 있듯이 말뚝의 선단이 풍화암에 지지되는 모든 말뚝의 경우 순수하게 터널굴착으로 발생하는 전단응력의 분포가 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 2번 위치에 해당하는 모든 말뚝에서 특정심도($Z/L_p = 0.87$)를 기준으로 말뚝에 작용하는 전단력의 방향이 반대로 발생하였다. 이는 말뚝두부에서 심도 $Z/L_p = 0.87$ 까지는 지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하여 하향의 전단응력이 발생하였으며, 반대로 $Z/L_p = 0.87$ 에서 말뚝선단까지는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하는 상향의 전단응력이 나타나 말뚝에는 압축력 형태의 축력분포를 보이는 것으로 나타났다. 반대로 GP-1, GP-G-1 및 GP-GC-1 말뚝의 경우 지표면에서 $Z/L_p = 1.5$ 부근까지 전단응력의 값이 0에 가까운

값을 보였으며, 그 하부로 약 $Z/L_p = 0.7$ 지점까지 전단응력이 증가하다 감소하여 $Z/L_p = 0.7$ 지점을 지난 이후 음(-)의 값이 나타났다. 또한, 선단에서는 채차 양(+)의 값이 나타나 말뚝전체에 걸쳐 압축력 및 인장력 형태의 축력 분포가 동시에 나타나는 것을 알 수 있다. 다시말해 1번 위치 말뚝의 심도 $Z/L_p = 0.17 \sim 0.70$ 에서는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하는 상향의 전단력이 나타났으며 그 하부로는 하향의 전단력이 계산되어 인장력 형태의 축력을 보이고 그 하부로는 다시 부호가 바뀌어 말뚝전체 심도에 걸쳐 인장력 및 압축력이 동시에 작용하는 것을 알 수 있다. 특히 GP-G-1 및 GP-GC-1 말뚝의 경우 말뚝의 선단부근에서 상당히 큰 전단응력이 계산되었는데 이는 그라우팅 보강 효과에 의해 말뚝의 침하를 상대적으로 억제하여 나타난 압축력 형태의 축력분포로 판단된다.

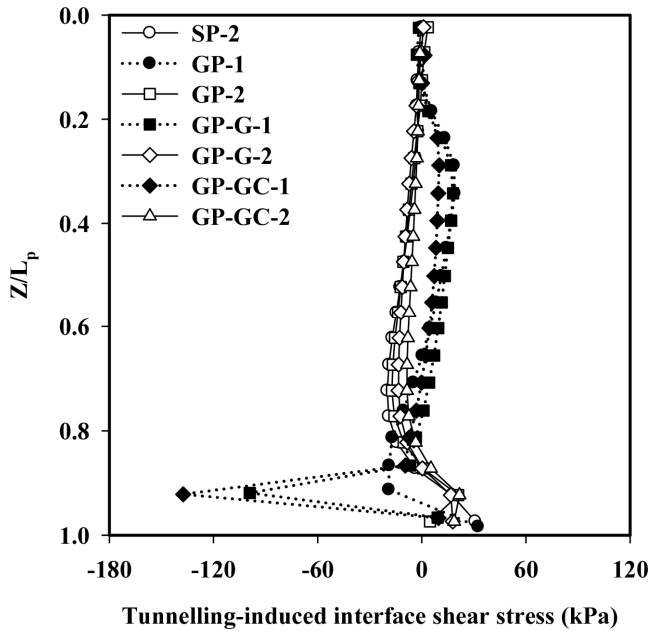


Fig. 9. Distributions of tunnelling-induced interface shear stresses with depth

3.5 말뚝의 상대변위 분포

Fig. 10은 단독말뚝 및 군말뚝에 대해 다양한 보강조건을 고려한 터널굴착으로 산정된 말뚝-지반 사이 interface 요소에서 발생하는 상대변위 분포를 정규화된 말뚝 심도(Z/L_p)에 대해 보여주고 있다. 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중으로 인한 말뚝 전체 구간에서 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하였다. 설계하중작용 상태에서 말뚝 상대변위 분포는 단독말뚝 및 군말뚝에서 비슷한 경향을 보였으나 군말뚝의 경우 단독말뚝에 비해 상대적으로 말뚝 전체의 상대변위는 작게 나타났는데 이는 군효과에 의한 것으로 판단된다. 또한 터널굴착 종료 후 산정된 모든 말뚝 조건에서의 상대변위는 지표면에서 $Z/L_p = 0.8$ 부근까지 감소하다가 그 아래로 말뚝선단까지 증가하는 것으로 나타났다. 터널굴착으로 인한 말뚝선단이 절단되는 1번 위치 말뚝의 경우 말뚝선단이 풍화암

에 지지되는 말뚝에 비해 터널굴착 종료에 따른 상대변위가 상대적으로 크게 나타나므로 말뚝선단 절단으로 인한 말뚝의 사용성에 영향을 끼칠 수 있다는 것을 알 수 있다. GP-GC-1 말뚝의 경우 그라우팅 보강 및 기초판 보강이 수행됨으로써 상대변위의 크기가 현저히 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 보강효과가 적절히 반영되었다는 것을 의미한다. 말뚝선단 절단 유·무 및 다양한 보강조건에 따른 적용 유·무에 따른 상대변위의 변화 경향이 상이하므로 순수하게 터널 굴착으로 유발된 상대변위(tunnelling-induced relative displacement)를 검토할 필요가 있다.

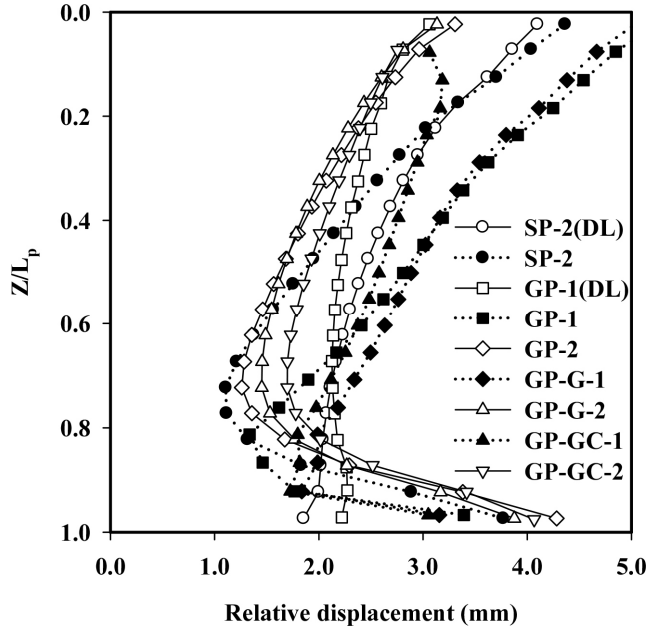


Fig. 10. Distributions of relative displacement with depth

Fig. 11은 단독말뚝 및 군말뚝에 대해 다양한 보강조건을 고려한 tunnelling-induced 상대변위의 분포를 정규화된 말뚝 침도(Z/L_p)에 대해 보여주고 있다. GP-1 및 GP-G-1 말뚝의 경우 타 말뚝들에 비해 상대변위가 크게 발생하였으며, 보강을 고려하지 않은 GP-1 말뚝에서 가장 큰 상대변위가 발생하였다. 또한 그라우팅 보강 및 기초판 보강이 수행된 GP-GC-1 말뚝의 경우에는 말뚝의 선단이 절단되는 타 말뚝에 비해 상대변위가 가장 적게 발생함으로 보강 효과가 적절하게 수행되었다는 것을 다시 한번 증명 하였다. GP-1, GP-G-1 및 GP-GC-1 말뚝의 경우 $Z/L_p = 0.75$ 지점에서 상대변위의 값이 음(-)로 바뀌는 것을 알 수 있으며, $Z/L_p = 0.9$ 지점부터 재차 부호가 바뀌게 되는데 이는 말뚝전체에 걸쳐 마찰력의 방향이 2회 변경되는 것을 의미한다. 따라서 말뚝에는 압축력 및 인장력 형태의 2가지 축력이 발생하는 것을 알 수 있다. 풍화암에 지지되는 말뚝의 경우 지표면에서 $Z/L_p = 0.7$ 부근까지 상대변위가 감소하다 증가하여 $Z/L_p = 0.85$ 부근에서 부호가 바뀌게 되는데 말뚝의 상부에서는 지반의 침하로 하향의 마찰력이 작용하며, 반대로 그 하부에서는 지반이 말뚝의 침하에 대해 저항하여 상향의 마찰력이 발현되는 것으로 보인다. 따라서, 앞서 설명한 축력 및 전단응력의 분포를 tunnelling-induced 상대변위를 통하여 재

차 입증하였다. 터널굴착으로 인한 말뚝선단의 절단은 말뚝-지반 사이의 상대변위를 증가시키지만 보강효과를 적절하게 고려한다면 상대변위를 감소시킬 수 있는 것으로 조사되었다.

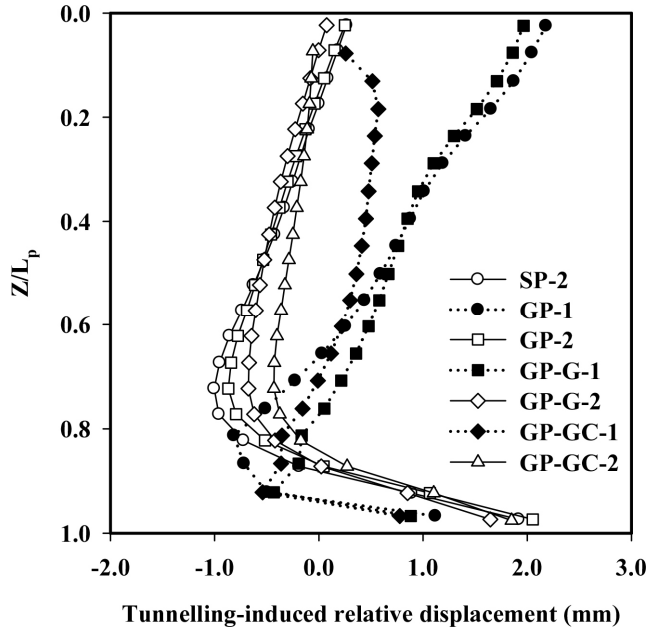
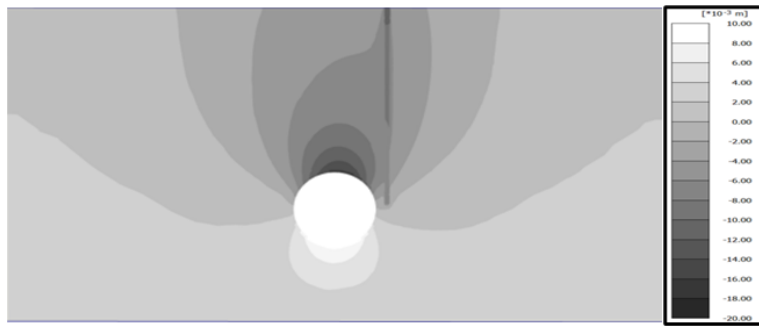


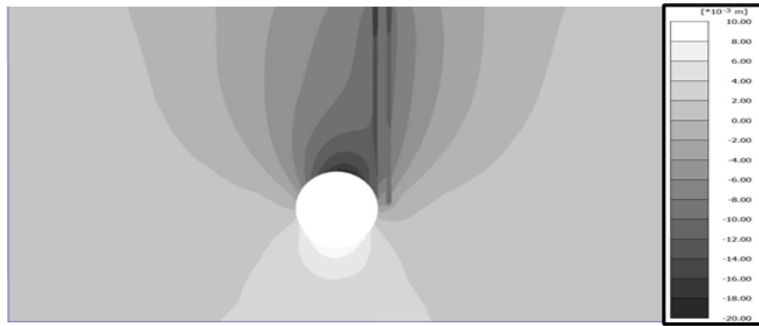
Fig. 11. Distributions of tunnelling-induced relative displacement at the pile-soil interface with depth

3.6 다양한 보강조건에 따른 말뚝 및 지반침하 분포(등고선)

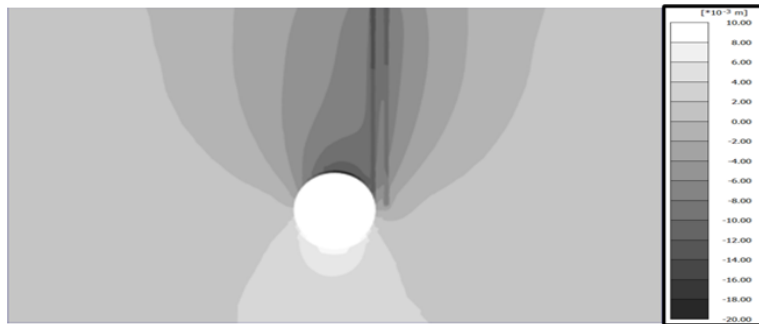
Fig. 12(a)~12(d)는 말뚝이 존재하는 위치에서 단독말뚝 및 군말뚝에 대해 다양한 보강조건을 고려한 터널굴착 종료 후 산정된 말뚝 및 지반의 침하 등고선을 X-Z 단면에 대해 보여주고 있다. Fig. 12(a)는 보강을 고려하지 않은 단독말뚝에 대해 터널굴착으로 유발된 말뚝 지반의 수직변위 등고선을 보여주고 있다. 단독말뚝의 말뚝두부에서는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하는 것을 알 수 있으며 말뚝의 심도가 깊어질수록 반대의 경향이 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 12(b)는 보강을 고려하지 않은 군말뚝으로 말뚝의 선단이 절단되는 1번 말뚝이 말뚝의 선단이 지지되는 2번 말뚝에 비해 상대적으로 큰 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 군말뚝의 무리효과로 인해 지반의 침하 또한 단독말뚝 주변 침하에 비해 크게 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 12(c) 및 12(d)는 군말뚝에 대하여 그라우팅 보강 또는 (그라우팅 + 기초판) 보강에 대한 수직변위 등고선을 보여주고 있으며, 1번 말뚝 및 2번 말뚝에서는 서로 상이한 침하가 발생하여 기초판으로 연결된 군말뚝의 경우 부등침하가 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 터널굴착으로 인한 말뚝선단이 절단된 말뚝의 두부 및 선단부근에서는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하여 말뚝을 서로 반대방향으로 서로 잡아당기는 효과가 발생하였으므로 결국 앞서 설명한 바와 같이 인장력이 발생하는 메커니즘을 설명하고 있다.



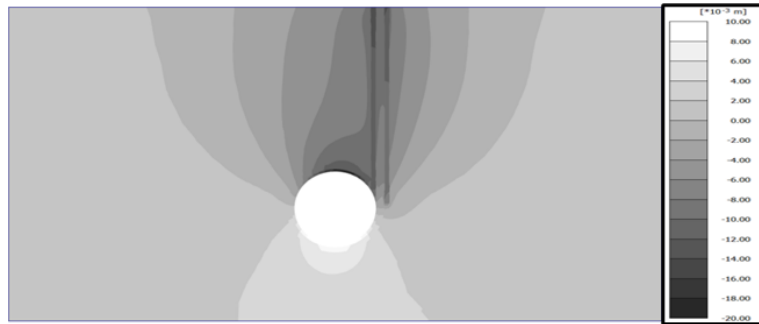
(a) Single pile without reinforcement



(b) Pile group without reinforcement



(c) Pile group with ground reinforcement



(d) Pile group with pile cap and ground reinforcement

Fig. 12. The contour of settlements the pile and subsurface (X-Z plane)

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 실시하여 단독말뚝 및 군말뚝에 인접한 Shield TBM 터널굴착을 모사함으로써 말뚝선단의 절단, 터널인접지반에서의 보강(그라우팅 보강) 및 기초판 보강에 대한 다양한 조건을 고려하여 고찰하였다. 이를 통해 터널굴착으로 유발된 말뚝침하, 축력, 전단응력, 상대변위 및 터널 주변지반의 변위를 분석하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 단계별 터널굴착에서 말뚝두부 및 지표면 침하비율이 가장 크게 발생한 경우는 터널이 $Y/D = -1.5 \sim +1.5$ 지점을 통과하는 시점으로 나타났으며, 이후 터널굴착에 따른 침하 비율이 현저히 감소하는 것으로 분석되었다. 말뚝두부의 최종 침하는 GP-G-2 말뚝을 제외하고 모든 말뚝에서 Greenfield 조건의 지표면 최종 침하를 초과하는 침하가 발생하였으며, 터널이 말뚝의 직하부($Y/D = 0$)를 통과하기 이전에는 모든 말뚝에서 Greenfield 조건의 지표면 침하보다 작게 나타났다. 모든 말뚝에 대해 터널굴착이 $Y/D = 0$ 지점을 통과할 때 침하가 감소하는 것으로 조사되었는데 이는 Shield TBM 굴착 공법에 따른 세그먼트 설치 효과에 의한 것으로 판단된다.
2. 터널굴착으로 인해 말뚝선단이 절단되는 말뚝의 경우 인장력 및 압축력 형태를 띠는 것으로 나타났다. 그라우팅 보강 및 기초판 보강이 모두 고려된 GP-GC-1 및 GP-GC-2 말뚝에는 인장력 및 압축력 형태의 축력 값이 다른 말뚝에 비해 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 그라우팅 보강이 실시됨과 동시에 기초판 보강이 실시되어 말뚝에는 기초판 무게만큼의 하중이 말뚝에 작용하기 때문으로 분석되었다.
3. 말뚝의 선단이 풍화암에 지지되는 말뚝의 경우 순수하게 터널굴착으로 발생하는 전단응력의 분포가 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 터널굴착으로 인한 말뚝의 절단이 발생하는 말뚝은 말뚝의 상부에서 두부침하가 지반의 침하를 초과하는 상향의 전단력이 나타났으며 그 하부로는 하향의 전단력이 나타나 인장력 형태의 축력이 발생하였다. 특히 GP-G-1 및 GP-GC-1 말뚝의 경우 말뚝의 선단부근에서 상당히 큰 전단응력이 계산되었는데 이는 그라우팅 보강 효과에 의해 말뚝의 침하를 상대적으로 억제하여 나타난 압축력 형태의 축력 분포로 판단된다. 이를 통해 말뚝 선단이 절단된 말뚝에서는 압축력 및 인장력 형태의 축력분포가 둘다 존재하는 것으로 나타났다.
4. 그라우팅 보강 및 기초판 보강이 수행된 말뚝의 경우에는 타 말뚝에 비해 상대변위가 가장 적게 발생함으로 보강 효과가 적절하게 수행되었다. 풍화암에 지지되는 말뚝의 경우 지표면에서 $Z/L_p = 0.7$ 부근까지 상대변위가 감소하다 증가하여 $Z/L_p = 0.85$ 부근에서 부호가 바뀌게 되는데 말뚝의 상부에서는 지반의 침하로 하향의 마찰력이 작용하며, 반대로 그 하부에서는 지반이 말뚝의 침하에 대해 저항하여 상향의 마찰력이 발현되는 것으로 조사되었다. 따라서 다양한 보강조건에 따라 말뚝의 공학적 거동이 상이하게 나타나므로, 이에 대한 말뚝 및 터널인접지반에 대한 보강효과를 충분히 검토한 방안이 제시되고 향후 이에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-0027 8033) 또한 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2022R1A6A3A01085973).

저자 기여도

전영진은 연구 개념 및 설계, 원고를 작성하였고, 박병수는 원고를 검토 하였고, 최영남은 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였고, 이철주는 논문작성 및 검토를 하였다.

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, 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.
4. Davisson, M.T. (1972), "High capacity piles", Proceedings of the Lecture Series in Innovations in Foundation Construction, ASCE, Illinois Section, Chicago, pp. 81-112.
5. 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, pp. 1-10.
6. 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, pp. 251-255.
7. 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", Physical Modelling in Geotechnics, pp. 833-838.
8. 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, pp. 105-119.
9. Jacobsz, S.W. (2002), The effects of tunnelling on piled foundations, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, pp. 51-180.
10. 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.

11. 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.
12. 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 Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 6, pp. 1003-1022.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Jeon, Y.J., Lee, C.J. (2023), "Analysis of pile group behaviour to adjacent tunnelling considering ground reinforcement conditions with assessment of stability of superstructures", *Geomechanics and Engineering*, Vol. 33, No. 5, pp. 463-475.
17. Jeon, Y.J., Lee, G.S., Lee, J.C., Batbuyan, C., Lee, C.J. (2022), "A study on platform-based preliminary design guidelines associated with the behaviour of piles to adjacent tunnelling", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 24, No. 2, pp. 129-151.
18. Kaalberg, F.J., Teunissen, E.A.H., Van Tol, A.F., Bosch, J.W. (2005), "Dutch research on the impact of shield tunneling on pile foundations", *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground - Proceedings of the 5th International Conference of TC28 of the ISSMGE*, Amsterdam, pp. 123-131.
19. 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, pp. 132-142.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.

25. 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.
26. 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, pp. 21-43.
27. Mair, R.J., Williamson, M.G. (2014), "The influence of tunnelling and deep excavation on piled foundations", *Proceedings of the Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Seoul, pp. 21-30.
28. Marshall, A.M. (2009), *Tunnelling in sand and its effect on pipelines and piles*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, pp. 43-180.
29. Mroueh, H., Shahrour, I. (2008), "A simplified 3D model for tunnel construction using tunnel boring machines", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 38-45.
30. 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.
31. 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, pp. 189-199.
32. 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, pp. 350-361.
33. Pang, C.H. (2006), *The effects of tunnel construction on nearby pile foundation*, Ph.D. Thesis, The National University of Singapore, pp. 24-170.
34. Plaxis 3D (2024), *Reference manual, Plaxis 3D User's Manual*, pp. 75-130.
35. Selemetas, D. (2006), *The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, pp. 44-132.
36. 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.
37. 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, pp. 48-64.
38. University of Cambridge: 2020 Case Studies, *Monitoring of under-reamed piles during tunnelling interception using distributed fibre optic sensing*, <https://www-smartinfrasturcture.eng.cam.ac.uk/projects-and-case-studies/2020-case-studies/monitoring-under-reamed-piles-during-tunnelling> (March 25, 2024).
39. Wang, X., Yuan, D. (2023), "Research on the interaction between the pile and shield machine in the process of cutting a reinforced concrete pile foundation", *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 1, 245.
40. Williamson, M.G. (2014), *Tunnelling effects on bored piles in clay*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, pp. 61-121.
41. Zhang, C., Zhao, Y., Zhang, Z., Zhu, B. (2021), "Case study of underground shield tunnels in interchange piles foundation underpinning construction", *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 4, 1611.