막장압의 크기를 고려한 Shield TBM 터널 근접시공이 단독말뚝의 거동에 미치는 영향에 대한 연구

전영진[1] · 김정섭[2] · 전승찬[2] · 전상준[2] · 박병수[3] · 이철주[4*]

[1]비회원, 강원대학교 토목공학과 박사과정
[2]비회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정
[3]비회원, 강원도립대학교 건설지적토목과 교수
[4]정회원, 강원대학교 토목공학과 교수

A study on the behaviour of single piles to adjacent Shield TBM tunnelling by considering face pressures

Young-Jin Jeon[1] · Jeong-Sub Kim[2] · Seung-Chan Jeon[2] · Sang-Joon Jeon[2] · Byung-Soo Park[3] · Cheol-Ju Lee[4*]

[1]Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University
[2]Master's Course Student, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University
[3]Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon State University
[4]Professor, 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
20(6)1003-1022(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.1003

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received September 3, 2018
Revised October 18, 2018
Accepted October 25, 2018

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 ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Abstract

In the current work, a series of three-dimensional finite element analyses were carried out to understand the behaviour of a pre-existing single pile to the changes of the tunnel face pressures when a shield TBM tunnel passes underneath the pile. The numerical modelling analysed the results by considering various face pressures (25~100% of the in-situ horizontal stress prior to tunnelling at the tunnel springline). In the numerical modelling, several key issues, such as the pile settlements, the axial pile forces, the shear stresses have been thoroughly analysed for different face pressures. The head settlements of the pile with the maximum face pressure decreased by about 44% compared to corresponding settlement with the minimum face pressure. Furthermore, the maximum axial force of the pile developed with the minimum face pressure. The tunnelling-induced axial pile force at the minimum face pressure was found to be about 21% larger than that with the maximum face pressure. It has been found that the ground settlements and the pile settlements are heavily affected by the face pressures. In addition, the influence of the piles and the ground was analysed by considering characteristics of the soil deformations. Also, the apparent safety factor of the piles are substantially reduced for all the analyses conducted in the current simulation, resulting in severe effects on the adjacent piles. Therefore, the behaviour of the piles, according

to change the face pressures, has been extensively examined and analysed by considering the key features in great details.

Keywords: Single piles, Face pressure, Tunnel-soil-pile interaction, Three-dimensional (3D) numerical modelling and analysis, Shield TBM

초 록

본 연구에서는 Shield TBM 터널굴착이 기 시공된 단독말뚝의 하부를 근접하여 통과할 경우 터널 막장압에 따른 말뚝의 공학적 거동을 파악하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 이때 터널 막장압의 크기를 터널굴착 이전 springline 위치에서 수평토압의 25~100%로 변화시키면서 그 영향을 고찰하였다. 수치해석에서는 막장압의 변화에 따른 터널굴착으로 유발된 말뚝의 침하, 축력 및 전단응력을 고려하였다. 말뚝의 두부침하는 막장압의 크기를 가장 크게 적용한 조건이 막장압의 크기를 가장 작게 적용한 조건에 비해 약 44% 감소하여 발생하였다. 말뚝의 최대축력은 막장압의 크기를 가장 작게 적용한 조건에서 가장 크게 나타났으며, 이는 막장압의 크기를 가장 크게 고려한 조건에 대비하여 약 21% 큰 것으로 분석되었다. 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동은 막장압의 변화에 따른 지반침하의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있었으며, 막장압의 크기에 따른 말뚝 및 지반의 거동을 등고선을 이용하여 재분석하였다. 또한 모든 막장압 조건에 대하여 말뚝의 겉보기안전율이 1.0 이하로 산정되어 터널굴착이 인접말뚝에 유해한 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 통해 말뚝의 거동에 영향을 미치는 주요인자를 막장압의 변화에 따라 심도 있게 고찰하였다.

주요어: 단독말뚝, 막장압, 터널-지반-말뚝 상호거동, 3차원 수치해석 분석, Shield TBM

1. 서 론

최근 도심지의 편리한 교통과 각종 사회기반시설의 구축을 위해 전국적으로 터널 및 지하공간의 수요가 급증하고 있으며, 이러한 터널시공은 대부분 기 시공된 말뚝기초에 인접하여 수행된다. 터널근접시공은 터널 주변지반에 변형이 유발되고 이로 인해 말뚝의 공학적 거동이 영향을 받는다. 현재까지 수행되어온 기 연구성과에 의하면 말뚝기초에 근접한 지반에서 터널 시공이 이루어질 경우 터널굴착은 지반의 침하를 유발하고 이로 인해 말뚝-인접지반 사이에 전단응력전이(shear stress transfer)가 유발되어 말뚝의 변형을 발생시키며 축력분포 역시 변한다고 보고되었다(Lee, 2012a, 2012b). Cheng et al. (2004), Lee and Ng (2005), Pang (2006), Lee (2008), Lee (2012a, 2012b, 2012c), Lee and Jeon (2015), Jeon and Lee (2015), Jeon et al. (2015), Lee et al. (2016) 및 Jeon et al. (2017)은 수치해석을 실시했으며, Jacobsz (2002), Marshall (2009), Ng et al. (2013), Hartono et al. (2014), Ng et al. (2014), Williamson (2014) 및 Hong et al. (2015)은 원심모형실험 또는 실내모형실험을 통한 연구를 수행하였다. 이에 비해 현장실측자료 분석을 통한 연구는 상대적으로 제한적인데, Selemetas (2005), Pang (2006), Liu et al. (2014), Williamson (2014) 및 Mair and Williamson (2014)는 터널굴착으로 인한 인접말뚝의 거동을 현장실측을 통하여 연구한 바 있다. Fig. 1은 Liu et al. (2014)이 보고한 중국 상하이 지하철 공사 중 발생한 대구경 Shield TBM 터널 초근접 시공의 단면도를 보여주고 있으며, 저자들은 터널굴착으로 인한 측면말뚝의 거동을

현장실측 및 수치해석을 통하여 분석하였다.

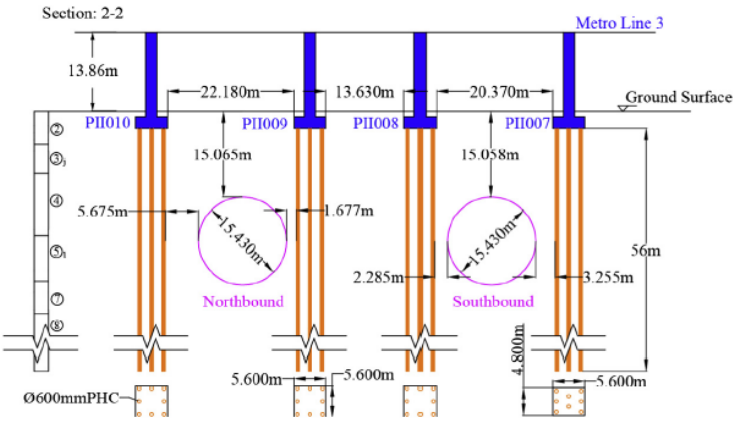


Fig. 1. Sectional view of tunnel crossing bridge foundation (Liu et al., 2014)

최근 국내에서는 도심지 터널시공의 경우 전통적으로 적용되어 온 NATM 공법에 비해 인근지반의 변형 및 민원을 최소화할 수 있는 Shield TBM 공법이 최적의 대안으로 대두되고 있다. Shield TBM 공법의 경우 굴착과 동시에 세그먼트 조립 및 그라우트를 주입하는 연속공정으로 타 터널굴착공법에 비해 공기를 단축시킬 수 있으며, 굴진시 막장압을 작용시켜 지반침하를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. Park et al. (2014)은 3차원 수치해석을 활용한 TBM 공법 모사를 통해 터널굴착에 따른 지반의 거동을 막장압의 크기를 고려하여 연구를 수행하였다. 그러나 국내에서 수행된 대부분의 Shield TBM 관련 연구는 막장압의 변화를 고려하지 않은 터널 및 지반의 거동 특성 분석과 관련되어 있으며, 대표적으로 Cho et al. (2014a, 2014b), You and Kim (2017) 및 Ahn et al. (2018)의 연구들이 있다. 또한 최근까지 Shield TBM에 대한 연구는 활발하게 진행되어오고 있으나, Shield TBM의 근접시공에 따른 인접말뚝의 거동과 관련된 연구는 매우 부족하여 그 거동이 명확히 규명되지 못한 실정이다.

Kaalberg et al. (2006)의 경우 TBM 공법을 적용한 수치해석 및 현장실측을 통하여 터널굴착에 따른 말뚝 및 지반 침하의 영향을 분석하였으며, 터널굴착에 따른 지반침하 영향권을 말뚝 선단 위치와 비교하여 연구를 수행하였다. 또한 단계별 터널굴착에 따라 터널이 말뚝의 선단 직하부를 통과하기 전과 후로 나누어 CPT 시험을 통해 말뚝의 지지력 변화를 고찰하였다. Mroueh and Shahrour (2008)은 막장압 크기변화에 따른 TBM 터널의 측면에 위치한 인접말뚝의 거동을 수치해석을 통하여 분석하였다. Lee et al. (2012)은 TBM 공법 적용에 따른 상부구조물의 거동에 대하여 수치해석을 통한 연구를 수행하였으며, 터널굴착 순서에 따라 구조물의 거동이 상이하므로 현장조건을 고려한 터널시공이 이루어져야 한다고 보고하였다. Lee et al. (2012), Cho et al. (2014a, 2014b), Xu et al. (2015), You and Kim (2017) 및 Ahn et al. (2018) 의 기존 관련 연구들은 막장압의 변화를 고려하지 않은 조건에서 터널굴착에 의한 지반침하와 이로 인해 유발되는 말뚝의 거동을 분석하는 것과 관련되어 있다. 또한 말뚝의 하부에서 터널굴착이 수행되는 경우 말뚝의 측면에서 실시되는 터널굴착에 비해 말뚝의 겉보기안전율이 낮게

나타나는 것으로 알려져 있으나 아직까지 그 거동을 명확하게 규명하지 못하고 있는 실정이며, 이에 대한 체계적인 연구가 시급하게 요구되고 있다(Williamson, 2014). 이에 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통해 기 시공된 말뚝의 하부에서 실시되는 Shield TBM 시공을 막장압의 크기변화를 고려하여 지반 및 말뚝의 공학적거동(침하 및 전단응력전이 특성)을 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 해석개요 및 경계조건

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 3D (2017)를 이용하여 말뚝의 하부에서 수행된 Shield TBM 터널의 굴착을 모사함으로써 막장압의 변화에 따른 말뚝의 거동을 분석하였다. Fig. 2는 해석에서 적용된 대표 유한요소 half mesh를 나타내고 있고, Fig. 3은 해석 단면도를 보여주고 있다. 본 해석에서는 Mroueh and Shahrour (2008)이 적용한 지반조건을 채택하였으며 해석에서 가정한 터널의 직경(D)은 세그먼트 두께(t = 250 mm)를 포함하여 8.5 m이며, 터널의 중심부(springline)는 지표면으로부터 26.25 m 하부에 위치하고 있다. 말뚝의 직경(d)은 0.5 m이며, 그 길이(L_p)는 20 m이다. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타나 있듯이 9 m 길이의 Shield TBM 장비를 모사하기 위해 판요소(plate element) 적용했으며 1회 굴착장(세그먼트의 폭)은 1.5 m로 하였다(Plaxis 3D, 2017). 터널굴착과 관련된 내용은 2.3절에서 상세히 설명하였다. 또한 막장압은 터널굴착면에 대하여 일정하게 작용한다고 가정하였으며, 그 크기는 지표면으로부터 터널 spingline까지의 거리(Z)를 고려하여 $A \times Z \times \gamma \times K_0$ 식(A = 막장압의 크기 변화(본 연구에서는 0.25~1 적용), Z = 지표면에서 터널 springline 까지의 거리, γ = 흙의 단위중량, K_0 = 정지토압계수)으로 산정하였다(Mroueh and Shahrour, 2008). Table 1은 본 연구에서 실시한 각 해석에서의 막장압이 요약되어 있으며, Greenfield 조건 및 말뚝이 존재하는 조건을 포함하여 총 8회의 해석이 수행되었다. Table 1에 나타나 있듯이 막장압의 경우 터널굴착이전 springline에서 초기 수평토압(262.5 kPa)의 25~100%를 적용하였다(65.63~262.50 kPa). 본 연구에서 가정한 최저 막장압 65.63 kPa은 Bolton (1991)에 의해 제시된 식 (1)의 유도된 사질토 지반에 시공되는 터널의 붕괴시의 막장압의 크기(σ_{TC})인 90.06 kPa 보다 약간 작지만, 이는 근사적으로 터널붕괴 상태의 막장압의 크기와 유사하다고 간주할 수 있다. 한편 각 막장압에 대해 공식 (2)의 load factor (LF)를 적용하여 막장압 크기의 영향을 고찰하였다. 이때 LF = 1은 터널붕괴를 의미하며 LF 는 근사적으로 안전율의 역수로 가정할 수 있다.

$$\sigma_{TC} = \left[\frac{\gamma D}{2(K_p - 2)}\right] \times \left[1 - \left(\frac{D}{(2C + D)}\right)^{(K_p - 2)}\right] \tag{1}$$

$$LF = \frac{\gamma Z + q - \sigma_T}{\gamma Z + q - \sigma_{TC}} \tag{2}$$

여기서, γ = 흙의 단위중량, Z = 지표면에서 터널의 중심까지의 거리, q = 지표면 상재하중, σ_{TC} = 막장압의 크기, D = 터널의 직경, K_p = 수동토압계수, C = 터널 크라운에서 지표면 까지의 거리를 말한다. 본 해석에서는 지표면 상재하중 및 지하수위는 고려하지 않았다.

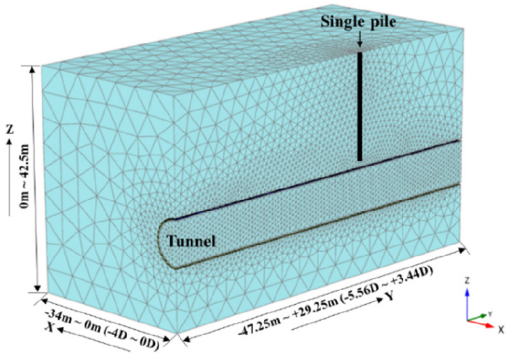


Fig. 2. A representative 3D finite element half mesh used in the current study (D: tunnel diameter)

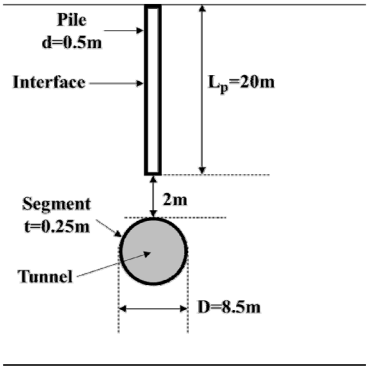


Fig. 3. Sectional view of analysis geometry

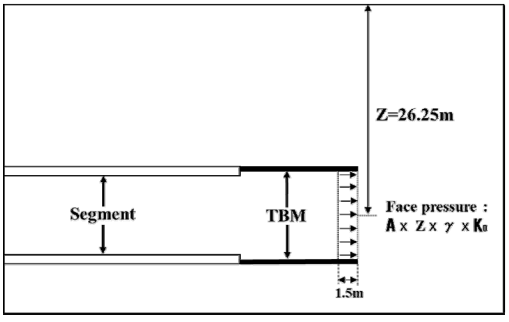


Fig. 4. Method used for the tunnel construction using TBM (A = the changes of the tunnel face pressures (0.25~1 in the current work), Z = distance from the surface to the tunnel springline, γ = unit weight of material, K_0 = lateral earth pressure coefficient at rest)

Table 1. Summary of numerical analyses

Analysis series	Face pressures (kPa)	LF
G (0.60)	262.50	0.60
G (0.75)	196.88	0.75
G (0.91)	131.25	0.91
G (1.06)	65.63	1.06
LF (0.60)	262.50	0.60
LF (0.75)	196.88	0.75
LF (0.91)	131.25	0.91
LF (1.06)	65.63	1.06

Note: G (Greenfield), LF (Load factor), The bracket ( ) means values of LF

2.2 적용 구성모델 및 물성치

터널의 굴착을 모사하기 위하여 탄-소성해석을 실시하였으며 특히 지반과 말뚝 경계면에서는 소성항복(plastic yielding)이 발생할 경우 미끄러짐(slip)의 발생을 허용하는 경계요소(interface element)를 적용하여 말뚝과 인접 지반 경계면에서의 전단응력전이 과정을 분석 할 수 있도록 하였다. 특히 말뚝선단에도 경계요소를 지정하여 말뚝에 인장력이 작용할 경우 말뚝선단과 지반이 서로 분리 될 수 있도록 하였다. 또한 Shield TBM 장비의 경우 판요소(plate element)를 사용하여 모사하였으며 터널의 막장면을 제외한 터널과 지반사이에도 경계요소를 지정하였다. Table 2는 수치해석에서 적용한 지반, 말뚝, Shield TBM 장비 및 세그먼트의 일반적인 물성치를 정리하였다(Mroueh and Shahrour, 2008; Plaxis 3D, 2017). 말뚝, Shield TBM 장비 및 세그먼트에는 등방탄성모델(isotropic elastic model)이 적용되었고 지반에 대해서는 비관련 흐름 법칙(non-associated flow rule)과 Mohr-Coulomb의 파괴기준(failure criterion)을 따르는 탄-소성 모델을 적용하였다. 말뚝의 시공에 의한 말뚝주면-지반 및 말뚝선단-지반 경계면에서의 전단강도 상수(c'_{int}, ϕ'_{int})가 감소되는 것을 고려하기 위하여 Brinkgreve et al. (2015)의 지침을 참고하여 강도감소계수(strength reduction factor) R_{int} = 0.7를 적용하고 식 (3) 및 (4)를 통해 적절한 전단강도 상수를 산정하였다.

$$c'_{int} = R_{int} \times c'_{soil} \tag{3}$$

$$\phi'_{int} = \tan^{-1}\left(R_{int} \times \tan(\phi'_{int})\right) \tag{4}$$

여기서, c'_{int}은 지반의 점착력, ϕ'_{int}은 지반의 내부마찰각이다.

Table 2. Material parameters assumed in the numerical modelling

Material	Model	γ (kN/m^3)	K_0	υ'	E′ (MPa)	c′ (kPa)	ϕ' (°)
Soil (Mroueh and Shahrour, 2008)	Mohr-Coulomb	20	0.5	0.3	30	5	27
TBM machine (Plaxis 3D, 2017)	Elastic	247	-	-	200,000	-	-
Segment (Plaxis 3D, 2017)		27	0.01	-	31,000	-	-
Pile		25	0.01	-	30,000	-	-

Note: γ (unit weight of material), K_0 (lateral earth pressure coefficient at rest), υ' (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 말뚝시공에 의한 근입효과 및 이에 따른 지반의 응력변화는 포함시키지 않았으므로 본 연구에서 가정한 말뚝은 현장타설말뚝과 유사하다고 볼 수 있다. 터널의 굴착은 종방향(Y)에 대하여 -5.56D에서 +3.44D (-47.25 m~+29.25 m)구간 사이에서 실시되었다(Fig. 2). 초기 평형단계 도달 이후 터널굴착 이전 말뚝두부에는 별도의 해석을 통해서 결정한 설계하중 P_a (625 kN)를 결정하였으며, 터널굴착 이전 말뚝두부에는 단계적으로 하중을 증가시켜 설계하중을 작용시켰다(225 kN → 425 kN → 625 kN, 3.1장에서 설명). 터널의 굴착 시작에 앞서 18 m 길이의 터널굴착이 이미 완료되었다고 가정하였으며, Shield TBM 장비의 길이는 9 m로 각각의 해석 단계에서 1.5 m 씩 굴진하면서 총 33단계에 걸쳐서 수행되었다(Fig. 4). 또한 각 해석단계별로 굴착과 세그먼트의 조립을 동시에 적용하였다. 터널 막장압의 경우 앞서 2.1절에서 설명하였듯이 지표면에서 터널중심부까지의 거리(Z = 26.25 m)와 흙의 단위중량(γ) 및 토압계수(K_0 = 0.5)를 고려하였으며 터널막장에 대하여 심도와 무관하게 일정한 크기로 작용한다고 가정하였다. 해석결과의 분석을 위하여 임의의 심도에서 말뚝의 축력 P는 $P = \sigma_{zz)avg} \times A_p$식으로 산정하였다. 여기서 $\sigma_{zz)avg}$는 특정심도에서 말뚝 수직응력의 값을 평균한 것이고 A_p는 말뚝의 단면적이다. 한편 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력은 임의의 심도에서의 값을 평균하여 산정하였다.

3. 해석결과 분석

3.1 말뚝의 설계지지력 결정

Fig. 5는 말뚝의 설계지지력을 결정하기 위해 말뚝재하시험을 모사하여 실시한 말뚝의 하중-침하 관계를 보여주고 있다. Fig. 5는 터널의 굴착이 포함되지 않은 말뚝의 하중-침하 관계를 보여주고 있으며, 말뚝두부에 단계별로 압축력을 증가시켜 하중재하 시험을 모사하였다. 말뚝두부의 하중이 1,000 kN 인근에 도달할 때까지는 말뚝하중과 말뚝두부침하 사이에 거의 선형적인 관계를 보이고 있으나 이를 초과하는 하중이 작용하는 경우 급격한 침하가 발생하고 있다. 본 연구에서는 말뚝에 발생된 하중-침하 관계로부터 말뚝의 설계지지력을 결정하기 위하여 널리 사용되는 Davisson (1972)의 방법을 적용하였으며 이를 통하여 Fig. 5에 나타나 있듯이 말뚝의 파괴하중

(failure load)을 1,250 kN으로 산정하였다. 여기에 안전율 2.0을 적용하여 말뚝의 설계하중(P_a)은 625 kN으로 결정되었다(1,250 kN/2 = 625 kN). 이때 말뚝두부의 침하량(δ_p)은 4.6 mm이다. 말뚝 설계하중 작용하에서 말뚝-지반 사이의 경계면 굴착으로 인한 기 시공된 말뚝의 거동을 심도있게 분석하기 위해 터널굴착 이전 말뚝두부에 3단계(225 kN → 425 kN → 625 kN)에 걸쳐 하중을 단계별로 증가시켜 설계하중(P_a)을 말뚝두부에 작용시켰다. 이를 통해 사용중인 말뚝의 거동을 모사하였으며 이후 터널의 단계별 굴착을 진행시켰다.

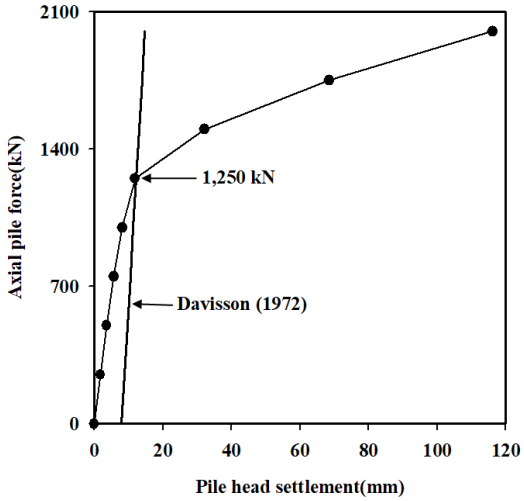


Fig. 5. Relation of axial pile forces and pile head settlements

3.2 터널굴착에 따른 말뚝 두부 침하 및 심도별 침하

Fig. 6은 단독말뚝에 대해 막장압의 크기 변화에 따른 해석을 통해 산정된 터널굴착 단계별 정규화된 $\delta_{p,net}/\delta_{gr,max}$ 및 $\delta_g/\delta_{gr,max}$의 침하분포를 보여주고 있다(Y/D: 정규화된 종방향). 여기서, δ_g는 지중에 말뚝이 존재하지 않는 Greenfield 해석조건에서 막장압의 크기의 변화에 따른 단독말뚝 위치에서 터널굴착 단계별 지표면 침하를 나타내며, $\delta_{p,net}$은 순수하게 터널굴착에 의해 발생한 터널굴착 단계별 말뚝두부의 침하를 나타낸다. 또한 $\delta_{gr,max}$는 Greenfield 해석조건에서 막장압의 크기를 가장 크게 고려한 조건(LF = 0.60)에서 터널굴착에 의한 단독말뚝 위치의 지표면 최대침하를 의미한다($\delta_{gr,max}$ = 16 mm). Fig. 6에 나타나 있듯이 정규화된 침하 $\delta_{p,net}/\delta_{gr,max}$ 및 $\delta_p/\delta_{gr,max}$는 터널의 굴착이 진행될수록 점차 증가함을 알 수 있다. 또한 Greenfield 조건의 경우 모든 조건의 막장압에 대하여 지표면의 침하가 막장압의 크기에 반비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 터널굴착 단계에서 지표면 및 말뚝두부의 침하비율이 가장 크게 발생하는 경우는 터널이 Y/D = -0.8~+0.8 부근을 통과하는 지점으로 나타났으며, 이는 말뚝의 직하부(Y/D = 0) 부근을 통과할 때이다. 그 이후 터널굴착에 따른 침하비율은 현저히 감소되는 것으로 분석되었다. 모든 말뚝에 대해 대부분의 터널굴착 구간에서 Greenfield 조건의 지표면 침하를 초과하는 침하가 발생하였으나 터널굴착 초기 말뚝두부의 침하는 모든 말뚝에서 Greenfield 조건의 지표면 침하보다

작은 침하가 발생하였으며, 특히 LF (0.60) 및 LF (0.75) 상태의 말뚝의 경우 약 Y/D = 0.5 부근까지 Greenfield 조건의 지표면 침하보다 작은 침하가 나타났다. 이는 막장압의 영향에 따른 지반의 융기에 의한 것으로 판단된다. 막장압을 가장 크게 고려한 조건(LF (0.60))의 말뚝두부의 침하는 막장압을 가장 작게 고려한 조건(LF (1.06))의 말뚝두부의 침하에 대하여 약 1.8배 감소하는 것으로 나타났으며 이는 Mroueh and Shahrour (2008)의 연구결과와 비슷한 경향을 보였다. Mroueh and Shahrour (2008)의 연구결과에 따르면 기준 막장압 대비 막장압을 20% 증가시킨 경우 최대침하가 약 70% 감소하는 반면, 기준 막장압 대비 막장압을 20% 감소시킨 경우 최대침하가 160% 증가한다고 보고하였다. Fig. 6에 나타나 있듯이 말뚝두부의 최종 침하는 막장압 조건 LF (0.91) 과 LF (1.06) 사이에서 가장 큰 차이를 보였으며, 막장압 조건 LF (0.60) 와 LF (0.75) 사이에서 가장 작은 차이를 보였다. 즉, 막장압의 크기가 일정하게 감소하는 조건과는 달리 말뚝두부의 침하는 비 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 추가적으로 Lee and Ng (2005)가 제안한 방식을 통해 Fig. 5의 하중-침하 관계를 분석하여 겉보기 안전율(apparent factor of safety)을 평가하였으며, LF (0.60) 조건의 경우 말뚝의 최종침하량이 31.4 mm로 나타나 말뚝의 겉보기안전율이 약 0.84로 분석되었다(FS = 1,250/1,480 (극한지지력/겉보기하중) = 0.84). 여기서 겉보기하중은 터널굴착 종료 후 말뚝의 최종침하량(설계하중에 의한 침하 + tunnelling-induced 침하)으로 말뚝하중의 크기를 평가하였다. LF (1.06) 조건에 대하여 말뚝의 겉보기안전율은 약 0.77 (FS = 1,250/1,628 = 0.77)로 나타났으며, 막장압의 모든 조건에서 말뚝의 사용성에 문제가 유발되는 것을 알 수 있다. 따라서 상부구조물의 사용성 및 안정성 저하를 적절히 평가할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

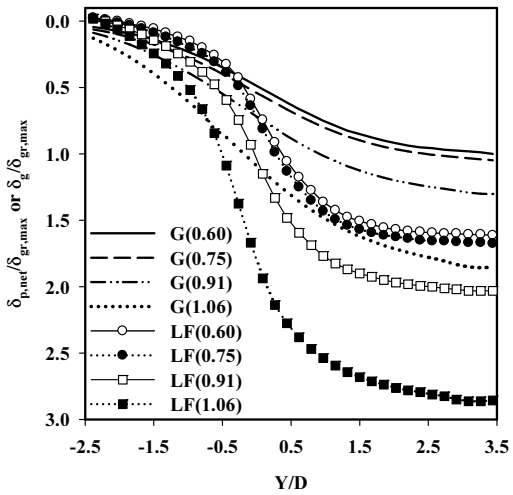


Fig. 6. Distributions of normalised pile head and soil surface settlements with tunnel advancement ($\delta_{gr,max}$ = 16 mm for face pressure of 262.5 kPa)

Fig. 7은 터널굴착 종료 후 막장압의 변화에 따른 말뚝의 심도별 침하 및 말뚝 위치의 Greenfield 조건의 심도별 지중침하(subsurface soil settlement)를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 Z는 말뚝

및 지중의 심도를 나타낸다. 또한 터널굴착이전 말뚝 두부에 작용한 설계하중에 의해 발생한 말뚝의 침하는 제외하였기 때문에 순수하게 터널굴착에 의해서 발생한 말뚝의 침하만을 고려하였다. Fig. 7에 나타나 있듯이 LF (0.60), LF (0.75) 및 LF (0.91) 조건의 말뚝에 대해 말뚝두부에서 각각 Z/L_p = 0.80, 0.83 및 0.95 까지 말뚝 침하는 G (1.00) 조건의 지중침하를 초과하며, 그 하부에서는 G (1.00)의 침하가 비선형적으로 급격히 증가하여 말뚝의 침하를 초과한다. 여기서 Z/L_p = 0.80, 0.83 및 0.95 의 심도는 말뚝의 침하와 G (1.00) 조건의 지중침하가 동일한 위치를 나타낸다. 막장압의 크기가 감소할수록 G (1.00) 조건의 지중침하와 말뚝의 침하가 동일해지는 지점의 위치가 점점 말뚝의 선단을 향하는 것을 알 수 있으며, 막장압의 크기가 가장 작은 조건 LF (1.06)의 말뚝에서는 말뚝 전구간에 대해 G (1.00) 조건의 지중침하를 초과하는 침하가 발생하였다. 동일한 막장압 조건에 대한 Greenfield 지중침하 및 말뚝의 심도별 침하 분포의 경우 Z/L_p = 0.8 인근에서 동일한 침하가 발생하였으며 이를 기준으로 말뚝의 상·하부에서 서로 반대방향의 전단응력이 작용함을 추측할 수 있다. 말뚝의 침하는 하부로 갈수록 증가하는 형태를 보이는데 이를 통해 말뚝에 인장력이 발생하고 있음을 추측할 수 있다. 따라서 말뚝과 지중침하의 분포를 통해 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동 발생여부를 거시적으로 알 수 있으며 말뚝에 작용하는 축력, 전단응력 및 상대변위에 대해서는 추후 상세히 설명하겠다.

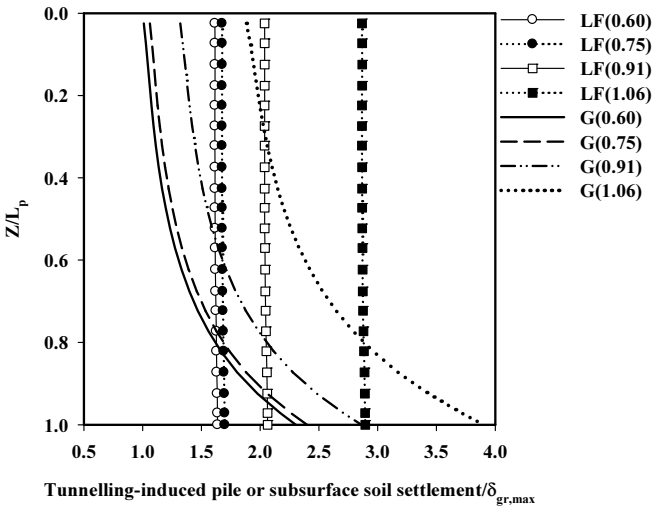


Fig. 7. Distributions of normalised tunnelling-induced pile and subsurface soil settlements with depth

3.3 말뚝의 축력 분포

Fig. 8은 터널굴착 종료 후 산정된 막장압의 변화에 따른 정규화된 단독말뚝 축력(P/P_a)의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. 또한 Fig. 8은 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중(pile loading)의 축력분포도 포함하고 있다. 여기서 P는 임의 심도에서 말뚝의 축력을 의미하고, P_a는 터널굴착 이전 말뚝두부

에 작용한 설계하중(625 kN)이다. 앞서 언급한 바와 같이 말뚝의 축력은 임의의 심도에 대하여 평균수직응력을 산정하여 계산하였다. 설계하중(pile loading) 작용하에서 말뚝의 축력은 심도가 증가할수록 점진적으로 감소하여 설계하중의 약 79%가 주면마찰력에 의해 지지되고 나머지 약 21%의 하중만이 말뚝선단에서 지지되는 것을 알 수 있다. 터널굴착 종료 후 모든 말뚝의 선단부근에서의 축력은 0보다 작은 (-)의 값이 나타나는데 이는 말뚝의 선단에 의해서 지지되던 하중의 일부가 주면마찰력에 의해 지지되는 전단응력 전이가 발생했음을 알 수 있다. 이는 주면마찰력의 증가를 나타내며 Jacobsz (2002)가 보고한 Soil arching 및 전단응력의 증가로 설명할 수 있다. 또한 막장압의 모든 조건에 대하여 말뚝의 심도 약 $Z/L_p = 0.74$ 지점부터 축력의 값이 (-)으로 변화하였는데 터널굴착 종료 후의 말뚝의 중립축(netural axis)을 나타낸다. 말뚝의 중립축은 Lee (2012c)가 보고한 바와 같이 말뚝의 축력이 압축력에서 인장력으로 변화하는 위치이므로 말뚝에 인장력 형태의 축력이 발생하는 것을 추론할 수 있다.

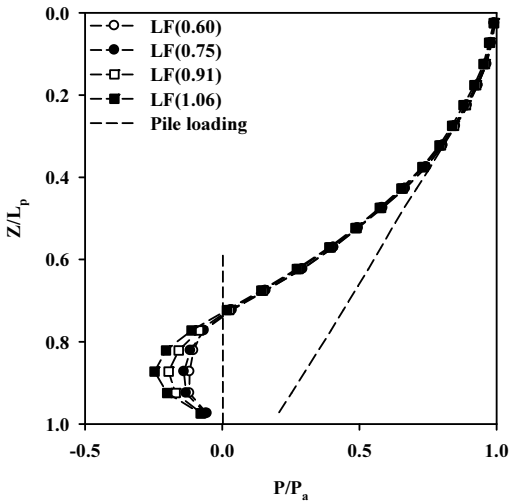


Fig. 8. Distributions of normalised axial pile forces with depth

Fig. 9는 터널굴착에 의한 단독말뚝의 축력변화를 명확하게 규명하기 위하여 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 정규화된 말뚝의 축력(P_{net}/P_a)을 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 P_{net}은 순수하게 터널굴착에 의한 말뚝의 축력이다. 순수하게 터널굴착으로 인한 말뚝의 축력 분포는 대부분의 말뚝에서 비슷한 양상을 보이고 있으며, 지표면에서부터 말뚝 심도 $Z/L_p = 0.32$ 부근 까지는 터널굴착으로 발생한 인장력의 값이 0에 가깝게 나타났다. 그러나 $Z/L_p = 0.32$~0.82 부근에서는 말뚝의 심도가 깊어질수록 말뚝의 인장력은 감소하고 있으며 그 이후 선단까지는 다시 증가하는 형태를 보이고 있다. Lee (2012c)가 보고한 바와 같이 말뚝의 인장력은 말뚝 상부의 상향의 전단응력과 하부의 하향의 전단응력으로 서로 반대방향으로 작용하는 전단응력 성분의 조합에 의한 것으로 판단된다. 이는 이후 3.3절 말뚝에 작용하는 전단응력 분포에서 상세히 설명하였다. 막장압의 크기를 가장 작게 고려한 LF (1.06) 및 가장 크게 고려한 LF (0.60)의 경우 터널굴착이 종료된

이후 $P_{net,max}/P_a$는 각각 -0.57 및 -0.47로 나타났다. 여기서 $P_{net,max}$는 말뚝의 최대 인장력이다. 막장압 변화에 따른 말뚝의 축력분포는 모든 말뚝에 대해 대부분의 심도에서 비슷한 축력값들을 보이나 말뚝 심도 Z/L_p가 0.72~0.93 구간에서는 상대적으로 큰 차이를 보였다. 상대적으로 큰 차이를 보인 구간은 터널굴착으로 인한 지반 침하의 영향이 가장 크게 발생하여 말뚝에 유해한 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 한편 Fig. 9에는 Selemetas (2005) 및 Williamson (2014)이 각각 현장실측 및 원심모형실험을 통해 측정한 P_{net}/P_a를 같이 포함하고 있다. Selemetas (2005) 및 Williamson (2014)의 축력분포 또한 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대하여 정규화를 실시했다. Selemetas (2005)의 연구결과에서는 $P_{net,max}/P_a$의 크기는 약 -0.42로 평가되며, Williamson (2014)의 경우는 -0.25로 산정되었다. Selemetas (2005) 및 Williamson (2014)의 연구에서도 말뚝에 Tunnelling-induced 인장력이 발생하는 것으로 나타났으며 본 연구에서 산정된 결과와 비슷한 경향을 보이고 있어 본 연구의 적합성을 입증한다.

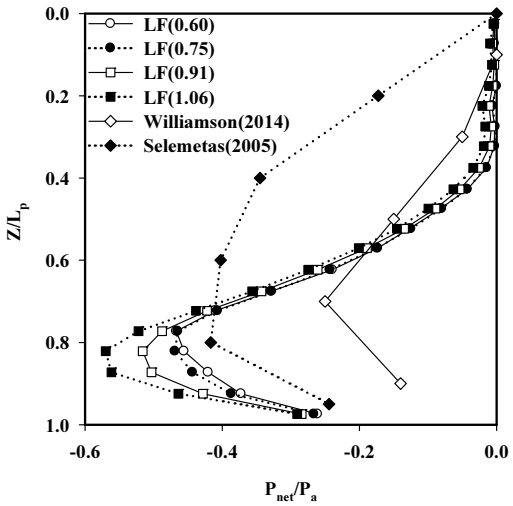


Fig. 9. Distributions of normalised tunnelling-induced axial pile forces with depth

3.4 말뚝의 전단응력 분포

Fig. 10은 막장압의 변화에 따른 터널굴착 종료 후 산정된 말뚝-인접지반 경계면에서의 전단응력의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대해 보여주고 있으며, 터널굴착 이전 설계하중작용(pile loading)에 의한 전단응력 및 터널굴착 종료 후의 전단응력의 분포를 같이 보여주고 있다. 터널굴착 이전 말뚝전체구간에서는 설계하중에 대하여 상향의 전단응력이 발현하고 있다. 그러나 터널의 굴착이 종료된 후 모든 조건의 말뚝에 대하여 말뚝의 두부에서 특정심도(약 $Z/L_p = 0.70$)까지 전단응력이 증가하고, 그 아래에서는 전단응력이 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이를 통해 말뚝두부에서 특정심도까지 전단강도가 완전히 발현하고, 그 아래에서는 전단강도의 일부만이 발현됨을 알 수 있다. 또한 말뚝의 심도 약 $Z/L_p = 0.88$ 부근에서 전단응력의 부호가 반대로 변하고

있는데 이는 전단응력의 작용방향이 반대로 변했음을 의미한다. 다시말해 부호가 바뀌는 부근을 기점으로 상부에서는 상향의 전단응력이 하부에서는 하향의 전단응력이 발생하였다. 막장압의 변화에 따른 전단응력전이에 대하여 상세히 검토하기 위해서는 순수하게 터널의 굴착으로 인해 유발된 전단응력(tunnelling-induced interface shear stress)의 분포를 검토할 필요가 있다. 따라서 말뚝 두부에 작용한 상재하중의 영향을 제거하여 이를 아래에서 상세히 고찰하였다.

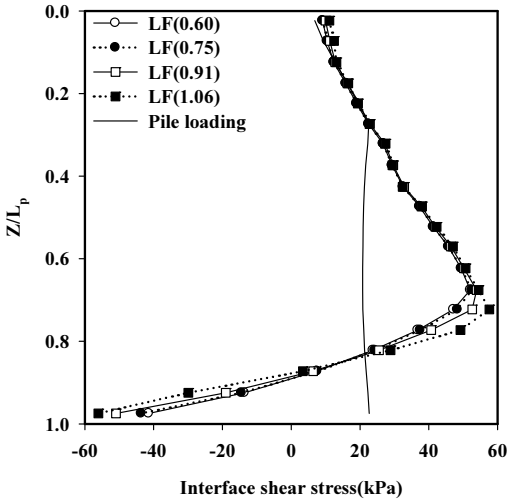


Fig. 10. Distributions of interface shear stresses with depth

Fig. 11은 막장압의 변화에 따라 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 정규화된 말뚝의 전단응력 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대해 보여주고 있다. Fig. 11에 나타나 있듯이 모든 조건의 말뚝에서 비슷한 경향을 보이고 있으며, 말뚝두부에서 심도 $Z/L_p = 0.27$ 까지 약간 감소하다 $Z/L_p = 0.7$ 까지는 증가하는 양상을 보이고 있다. 그 이후 말뚝의 선단까지 막장압 조건 LF (0.60), LF (0.75), LF (0.91) 및 LF (1.06)에 대하여 각각 -64.13 kPa, -66.56 kPa, -74.36 kPa 및 -80.31 kPa 까지 지속적으로 감소하였다. 또한 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력의 값이 (+)에서 (-)으로 바뀌는 심도가 순수하게 터널굴착만을 고려한 경우에 비해 설계하중을 고려한 조건에서 약간 깊게 나타났다. 이는 말뚝에 작용하는 상향의 전단응력과 하향의 전단응력의 발현되는 기준 심도가 바뀌었다는 것을 의미한다. 따라서 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동을 분석할 시 순수하게 터널굴착으로 유발된 말뚝의 거동도 추가적으로 검토할 필요가 있다고 판단된다. 막장압의 크기를 가장 작게 고려한 LF (1.06)의 경우 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력의 값이 타 조건의 말뚝들 보다 상대적으로 큰 결과값을 보였으며, 이는 막장압의 크기를 가장 적게 고려한 경우 지반의 침하가 크게 나타나 상대변위 또한 크게 발생하기 때문으로 보인다. 또한 앞서 설명한 말뚝의 축력분포에서 말뚝에는 인장력 형태의 축력이 발생한다고 보고하였으며, 이는 말뚝의 상부에는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과(상향의 전단응력)하고 반대로 말뚝의 하부에는 지반의 침하가 말뚝

의 침하를 초과(하향의 전단응력)하기 때문인 것으로 분석할 수 있다. 추가적으로 말뚝-지반의 경계면에 작용하는 수직응력(normal stress)의 분포를 분석한 결과 모든 막장압 조건에 대하여 매우 유사한 값을 보였다. 한편 Fig. 11에는 앞서 설명한 Selemetas (2005) 및 Williamson (2014)의 실측된 말뚝축력의 값으로부터 도출된 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대한 전단응력의 분포도 나타내고 있다. 이는 본 연구에서 분석된 결과의 값들보다 다소 작은 값을 보이고 있으나, 본 연구에서 산정된 전단응력의 분포와 일치하는 경향을 보이고 있다.

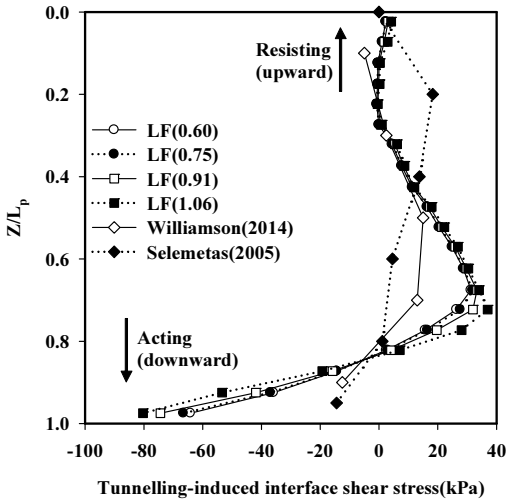


Fig. 11. Distributions of tunnelling-induced interface shear stresses with depth

3.5 말뚝의 상대변위 분포

Fig. 12는 터널굴착 종료 후 막장압의 변화에 따라 순수하게 터널굴착에 의해 산정된 말뚝-지반의 Interface 요소에서 발생한 상대변위의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L_p)에 대하여 보여주고 있다. Fig. 12에 나타나 있듯이 모든 조건의 말뚝에 대하여 말뚝두부에서 $Z/L_p = 0.82$ 부근까지는 말뚝의 침하가 인접지반의 침하를 초과하고 있으며, 그 하부에서는 반대의 경향을 보인다. 즉 말뚝두부에서 약 $Z/L_p = 0.82$ 까지는 터널굴착으로 인한 지반 침하로 지반이 말뚝의 침하에 저항하는 형태인 상향의 마찰 저항력(upward resisting skin friction)이 발현되며, $Z/L_p = 0.82$ 부터 말뚝선단에서는 반대로 하향의 마찰력(downward acting skin friction)이 나타나는 것으로 판단된다. 다시말해 말뚝의 상부는 지반이 말뚝의 움직임을 구속시키는 형태로 볼 수 있으며, 말뚝선단 인근에서는 지반이 말뚝의 움직임을 유발시키고 있는 것으로 분석된다. LF (1.06)의 경우 타조건에 비해 상대적으로 큰 상대변위를 발생시키는데, 이는 앞서 설명한 LF (1.06) 조건의 말뚝에 타조건에 비해 상대적으로 큰 전단응력이 발생하는 경향을 상대변위의 분포특성을 통해 재확인 할 수 있다.

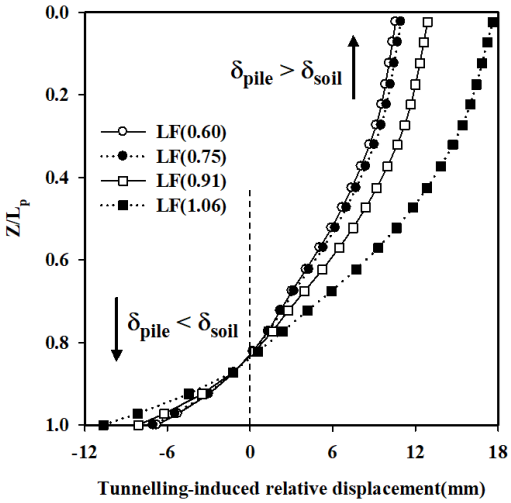
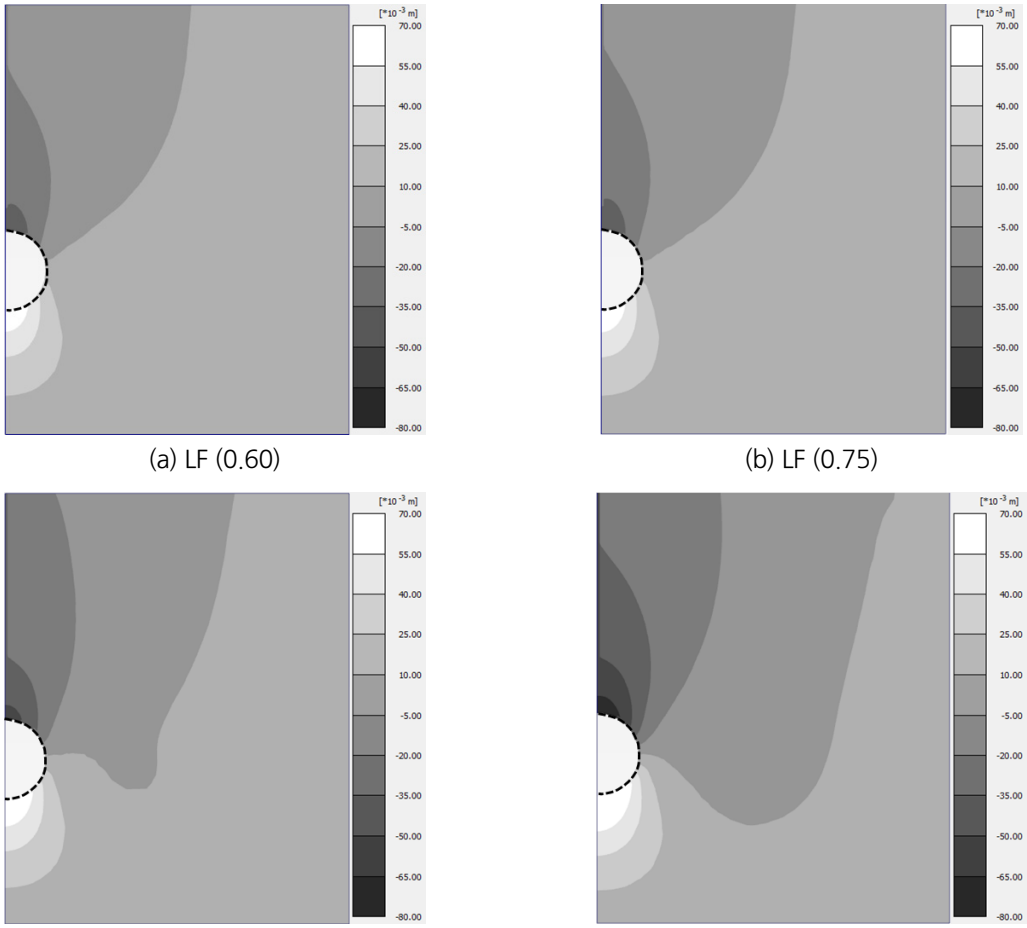


Fig. 12. Distributions of tunnelling-induced relative displacements at the pile-soil interface with depth

3.6 막장압 변화에 따른 말뚝 및 지반침하 분포(등고선)

Fig. 13(a)~13(d)는 말뚝이 존재하는 Y/D = 0 위치에서 터널굴착 종료 후 유발된 막장압의 변화에 따른 말뚝 및 지반의 침하 등고선을 X-Z 단면에 대하여 보여주고 있다. Fig. 13(a)는 막장압을 가장 크게 고려한 LF (0.60) 조건의 터널굴착으로 유발된 말뚝 및 지반의 수직변위에 대한 등고선을 보여주고 있다. 터널 크라운(crown)바로 상부 지반에서는 약 45 mm의 변위가 발생하였고 지표면으로 올라 갈수록 변위가 점차 감소하여 지표면에서는 약 17 mm의 지반 변위가 나타났다. 또한 LF (0.75), LF (0.91) 및 LF (1.06)의 조건에 대하여 터널 크라운 바로 상부에서 각각 약 47 mm, 56 mm 및 74 mm의 변위가 발생하였고 지표면에서는 각각 약 18 mm, 23 mm 및 31 mm의 수직 변위가 나타났다. Fig. 13(d)는 막장압의 크기를 가장 작게 고려한 LF (1.06) 조건을 보여주고 있으며 말뚝 선단 주변의 지반에서는 상대적으로 타 조건들의 침하보다 크게 발생하고 말뚝의 침하보다 지반의 침하가 크게 발생하여 지반이 말뚝을 아래로 잡아당기는 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 말뚝상부에서는 이와는 반대의 현상이 나타났으며 말뚝이 침하가 지반의 침하를 초과하여 지반이 말뚝을 위로 잡아당기는 효과가 발생하여 결국 앞서 설명한 바와 같이 인장력이 발생하는 메커니즘을 설명하고있다. 다시 말해 말뚝에 작용하는 인장력 형태의 축력이 다른 타 조건의 말뚝보다 막장압이 가장 작은 조건에서 가장 크게 발생하는 것을 보여준다. 또한 막장압의 크기에 따라 말뚝 및 지반의 침하특성이 상이하게 나타나므로 등고선을 통해 막장압의 영향이 적절히 표현된 것을 알 수 있다.



(a) LF (0.60)

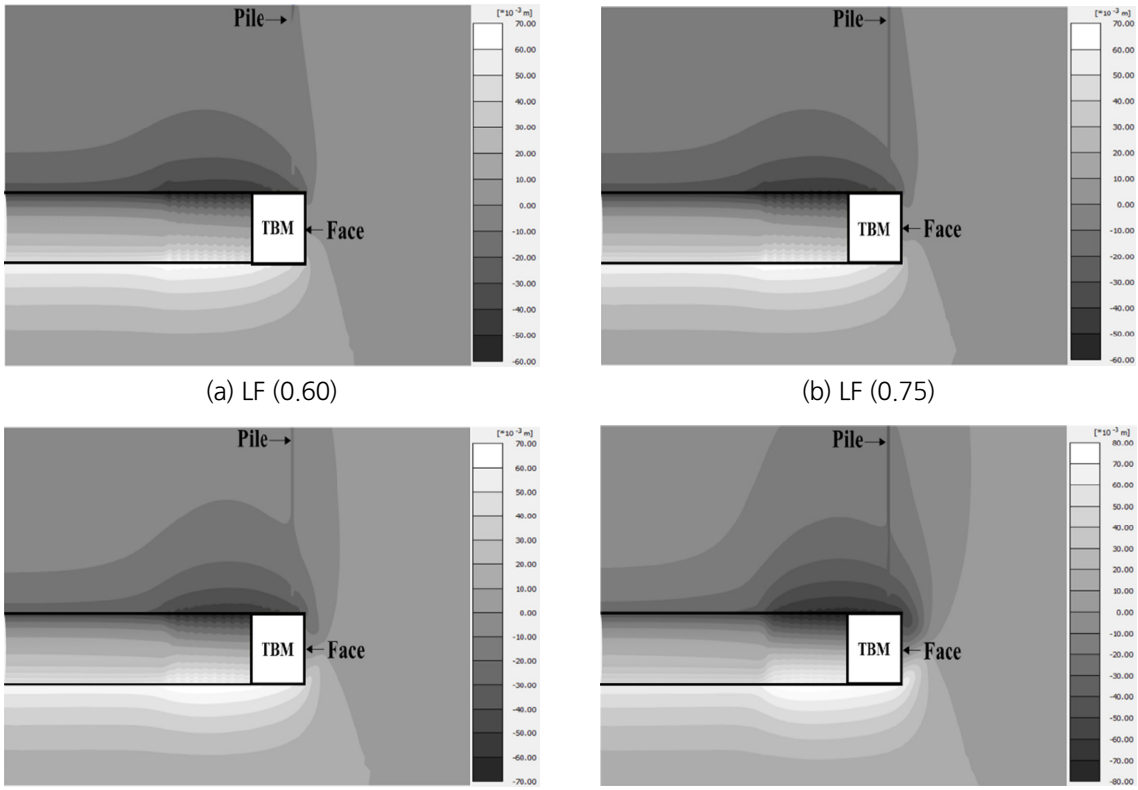
(b) LF (0.75)

(c) LF (0.91)

(d) LF (1.06)

Fig. 13. The contour of settlements the pile and subsurface (X-Z Plane)(Y/D = 0)

Fig. 14(a)~14(d)는 터널이 말뚝의 직하부(Y/D = 0)를 통과하는 순간에 유발된 말뚝 및 지반의 침하 등고선을 Y-Z 단면에 대하여 보여주고 있다. 여기서 막장의 후면에는 8 m 길이의 Shield TBM 이 모사되었다. Fig. 14(a)~14(d)에 나타나 있듯이 막장압의 크기가 감소할수록 터널크라운 바로 상부의 지반에서 지표면까지 수직변위 및 변위분포가 증가하는 것을 알 수 있으며, 또한 막장압 전면부의 경우 막장압의 크기가 감소할수록 수직변위 분포가 다양하게 나타나는 것으로 나타났다. 다시말해 막장압이 작게 작용할수록 막장압 주변 지반의 침하에 크게 영향을 끼치는 것으로 분석된다. 터널이 말뚝의 하부를 통과할 때 모든 조건의 말뚝에 대하여 말뚝의 상부에서는 말뚝의 침하가 주변지반의 침하를 초과하는 것으로 나타나고, Fig. 14(a)에 보이듯이 LF (0.60)에서는 말뚝두부 인근에서만 말뚝과 지반사이에 침하의 차이를 보여주고 있다. 그러나 이를 제외한 타조건에서는 말뚝과 인접지반 사이의 침하가 명확히 구분되는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 막장압의 변화가 말뚝의 거동에 지배적인 영향을 미치는 것을 다시금 확인 할 수 있다.



(a) LF (0.60) (b) LF (0.75)

(c) LF (0.91) (d) LF (1.06)

Fig. 14. The contour of vertical displacements for the pile and subsurface (Y-Z Plane)(Y/D = 0)

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 실시하여 기 시공된 말뚝의 하부를 지나는 Shield TBM 터널의 굴착으로 인한 말뚝과 인접지반의 거동을 막장압의 변화를 고려하여 고찰하였다. 이를 통해 터널굴착으로 인해 유발된 말뚝침하, 축력, 전단응력 및 터널 주변지반의 변위를 분석하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 터널굴착 단계에서 Greenfield 조건의 지표면 및 말뚝두부의 침하비율은 Y/D = -0.80~+0.80 부근을 통과하는 지점에서 가장 크게 나타났으며, 말뚝의 두부침하는 막장압의 크기를 가장 크게 적용한 조건이 막장압의 크기를 가장 작게 적용한 조건에 비해 약 1.8배 감소하여 발생하였다. 막장압의 크기변화와 말뚝두부의 침하는 선형적인 관계를 보이지 않는 것으로 분석되었다. 막장압의 크기를 가장 크게 고려한 LF (0.60) 조건의 경우 터널굴착으로 인해 말뚝의 겉보기안전율이 약 0.84로 감소되며, LF (1.06) 조건의 경우에도 말뚝의 겉보기안전율은 약 0.77로 나타나 말뚝의 사용성이 심각하게 감소할 수 있어 이를 정량적으로 평가할 수 있는 기법이 필요함을 보여준다.

2. 막장압의 변화에 따른 터널굴착으로 유발된 말뚝의 축력의 경우 모든 조건의 말뚝에 대하여 축력 분포의 양상이 유사하게 나타났다. 막장압 변화에 따른 말뚝의 축력분포는 모든 말뚝에 대해 대부분의 심도에서 비슷한 축력 값들을 보이나 말뚝 심도 Z/L_p = 0.72~0.93 구간에서는 상대적으로 큰 차이를 보였다. 또한 말뚝에 작용하는 최대축력의 경우 막장압의 크기를 가장 작게 적용한 조건에서 가장 크게 발생하였는데, 이는 막장압의 크기를 가장 크게 고려한 조건에 대비하여 약 21% 증가된 값이다.
3. 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력은 말뚝두부에서 일정심도까지 지속적으로 증가하며, 그 하부에서 말뚝의 선단까지는 막장압 조건 LF (0.60), LF (0.75), LF (0.91) 및 LF (1.06)에 대하여 각각 -64.13 kPa, -66.56 kPa, -74.36 kPa 및 -80.31 kPa 까지 지속적으로 감소하였다. 막장압의 크기를 가장 작게 고려한 LF (1.06)의 경우 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력의 값이 타 조건의 말뚝들 보다 상대적으로 큰 결과값을 보였으며, 이는 막장압의 크기를 가장 작게 고려한 경우 지반의 침하가 가장 크게 발생하여 상대변위 역시 크게 발생하기 때문으로 판단된다.
4. 말뚝 및 지반의 수직변위 등고선을 분석한 결과 터널 크라운(crown) 직상부에서는 약 45 mm의 변위가 발생하였고 지표면으로 올라 갈수록 변위가 점차 감소하여 지표면에서는 약 17 mm의 지반 변위가 나타났다. 막장압의 크기가 작아질수록 수직변위의 값은 크게 발생하였으며 이에 따라 인장력 형태의 축력값이 점차 증가하였다. 또한 막장압 전면부의 경우 막장압의 크기가 감소할수록 수직변위 분포가 다양하게 분석되었는데 이는 막장압이 작게 작용할수록 막장압 주변 지반의 침하에 크게 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 따라서 막장압의 조건에 따라 말뚝의 공학적 거동이 상이하게 나타나므로, 이에 대한 막장압 및 말뚝 및 터널 인접지반에 대한 보강효과를 충분히 검토한 방안이 제시되고 향후 이에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

"2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-520170171). 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호-18RDRP-B103401-04) 또한 이 성과는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1D1A1B05035579)".

References

1. Ahn, C.K., Yu, J.S., Lee, S.W. (2018), "Evaluation of the backfill injection pressure and its effect on ground settlement for shield TBM using numerical analysis", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 2, pp. 269-286.
2. Bolton, M.D. (1991), "A guide to Soil Mechanics", M.D. & K. Bolton, Cambridge, pp. 313.
3. Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M. (2015), "Reference manual", Plaxis 3D 2015 User's Manual, Delft, pp. 1-284.
4. Cheng, C.Y., Dasari, G.R., Leung, C.F., Chow, Y.K., Rosser, H.B. (2004), "3D numerical study of

tunnel-soil-pile interaction", Underground Space for Sustainable Urban Development, Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress Singpore, pp. 1-8.

5. Cho, W.S., Song, K.I., Kim, K.Y. (2014b), "The study on the effect of fracture zone and its orientation on the behavior of shield TBM cable tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 4, pp. 403-415.
6. Cho, W.S., Song, K.I., Ryu, H.H. (2014a), "Analysis on the behavior of shield TBM cable tunnel: The effect of the distance of backfill grout injection from the end of skin plate", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 2, pp. 213-224.
7. Davisson, M.T. (1972), "High capacity piles", Proceedings of the Lecture Series in Innovations in Foundation Construction, ASCE, Illinois Section, pp. 81-112.
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", Physical Modelling in Geotechnics, 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, pp. 105-119.
10. Jacobsz, S.W. (2002), "The effects of tunnelling on piled foundations", Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Cambridge, pp. 1-348.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Lee, C.J. (2012c), "The response of a single pile and pile groups to tunnelling performed in weathered rock", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 32, No. 5C, pp. 199-210.
18. 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.
19. 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.

20. Lee, G.T.K., Ng, C.W.W. (2005), "The effects of advancing open face tunnelling on an existing loaded pile", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 2, pp. 193-201.
21. Lee, J.H., Lee, J.M., Lee, Y.J. (2012), "Behavior of the superstructure subjected to TBM tunnel excavation sequence", Proceedings of the KSCE 2017 Convention Conference & Civil EXPO, pp. 1334-1337.
22. 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.
23. 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.
24. Mair, R.J., Williamson, M.G. (2014), "The influence of tunnelling and deep excavation on piled foundations", Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, pp. 21-30.
25. Marshall, A.M. (2009), "Tunnelling in sand and its effect on pipelines and piles", Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Cambridge, pp. 1-243.
26. Mroueh, H., Shahrour, I. (2008), "A simplified 3D model for tunnel construction using tunnel boring machines", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, pp. 38-45.
27. 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.
28. 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.
29. Pang, C.H. (2006), "The effects of tunnel construction on nearby pile foundation", Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, The National University of Singapore, pp. 27-56.
30. Park, H.K., Chang, S.B., Lee, S.B. (2014), "3-Dimensional numerical modeling of SPB shield TBM tunneling-induced ground settlement considering volume loss processes", Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, pp. 221-224.
31. Plaxis (2017), Reference manual, Plaxis 3D User's Manual.
32. Selemetas, D. (2005), "The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling", Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Cambridge, pp. 1-302.
33. Williamson, M.G. (2014), "Tunnelling effects on bored piles in clay", Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Cambridge, pp. 1-418.
34. Xu, Q., Zhu, H., Ma, X., Ma, Z., Li, X., Tang, Z., Zhuo, K. (2015), "A case history of shield tunnel crossing through group pile foundation of a road bridge with pile underpinning technologies in Shanghai", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 45, pp. 20-33.
35. You, K.H., Kim, Y.J. (2017), "A study on numerical modeling method considering gap parameter and backfill grouting of the shield TBM tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 5, pp. 799-812.