

말뚝의 횡방향 이격거리를 고려한 터널굴착이 인접 단독말뚝 및 군말뚝에 미치는 영향에 대한 연구

전영진¹ · 김성희¹ · 이철주^{2*}

¹비회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정

²정회원, 강원대학교 토목공학과 교수, 교신저자

A study on the effect of tunnelling to adjacent single piles and pile groups considering the transverse distance of pile tips from the tunnel

Young-Jin, Jeon¹, Sung-Hee, Kim¹, Cheol-Ju, Lee^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Kangwon National University

²Department of Civil Engineering, Kangwon National University

ABSTRACT: In the present work, a number of three-dimensional (3D) parametric numerical analyses have been carried out to study the influence of tunnelling on the behaviour of adjacent piles considering the transverse distance of the pile tip from the tunnel. Single piles and 5×5 piles inside a group with a spacing of 2.5d were considered, where d is the pile diameter. In the numerical modelling, several key issues, such as the tunnelling-induced pile settlements, the interface shear stresses, the relative shear displacements, the axial pile forces, the apparent factors of safety and zone of influence have been rigorously analysed. It has been found that when the piles are inside the influence zone, the pile head settlements are increased up to about 111% compared to those computed from the Greenfield condition. Larger pile settlements and smaller axial pile forces are induced on the piles inside the pile groups than those computed from the single piles since the piles responded as a block with the surrounding ground. Also tensile pile forces are induced associated with the upward resisting skin friction at the upper part of pile and the downward acting skin friction at the lower part of pile. On the contrary, when the piles were outside the influence zone, tunnelling-induced compressive pile forces developed. Based on computed load and displacement relation of the pile, the apparent factor of safety of the piles was reduced up to about 45%. Therefore the serviceability of the piles may be substantially reduced. The pile behaviour, when considering the single piles and the pile groups with regards to the influence zone, has been analysed by considering the key features in great details.

Keywords: Three-dimensional (3D) numerical modelling and analysis, Single piles, Group piles, Tunnelling, Tunnelling influence zone

초 록: 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 실시하여 말뚝에 인접한 터널시공으로 인한 말뚝의 거동을 터널로부터 말뚝선단의 횡방향 이격거리를 고려하여 분석하였다. 단독말뚝 및 간격 2.5d인 5×5 군말뚝을 고려하였다. 여기서 d는 말뚝의 직경을 의미한다. 수치해석에서는 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 인해 유발된 말뚝침하, 전단응력, 상대변위, 축력분포, 겹보기안전율을 및 터널굴착 영향권을 고찰하였다. 말뚝이 터널굴착으로 인한 지반침하 영향권 내부에 존재할 경우 말뚝두부의 침하는 Greenfield 조건의 지표면 침하보다 최대 대략 111% 크게 산정되었고, 군말뚝의 경우 단독말뚝과 비교하여 말뚝침하가 크고 축력이 작게 나타났는데 이는 군말뚝내의 말뚝이 인접지반과 함께 블록(block)의 형태로 거동하는 것으로 분석되었다. 또한 말뚝의 상부에서는 상향의 마찰 저항력이 발생하고 말뚝의 하부에서는 하향의 마찰 저항력이 발생하여 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 인해 말뚝에는 인장력을 발생시켰다. 한편 말뚝이 영향권 외부에 존재할 경우 말뚝에는 tunnelling-induced 압축력이 발생하였다. 수치해석을 통해 분석된 하중-침하 관계로부터 말뚝의 겹보기안전율을 계산한 결과 터널굴착 이전에 비해 대략 45% 감소된 것으로 나타났다. 따라서 이는 말뚝의 사용성에 심각한 문제를 유발시킬 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 지반침하 영향권에 따른 단독말뚝 및 군말뚝의 거동을 심도 있게 고찰하였다.

주요어: 3차원 수치해석 및 분석, 단독말뚝, 군말뚝, 터널굴착, 터널굴착 영향권

*Corresponding author: Cheol-Ju, Lee
E-mail: cj32@kangwon.ac.kr

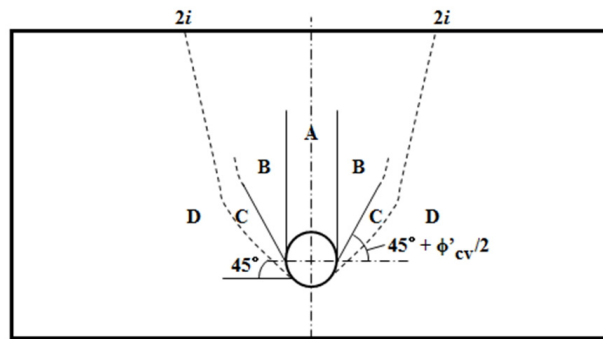
Received October 22; Revised November 6;
Accepted November 11

1. 서론

최근 도심지에서 기존에 존재하는 구조물의 기초와 인접한 터널공사가 빈번하게 수행되고 있다. 터널공사를 실시할 경우 지반굴착은 필연적으로 주변지반의 침하를 유발하고 이로 인해 말뚝의 거동에 영향을 미쳐 변형을 유발시키고 축력분포에 영향을 주게 된다. 또한 지금까지 수행되어온 연구들에 의하면 기존에 존재하는 말뚝기초에 근접하여 터널이 시공되는 경우 터널굴착에 의한 지반의 침하로 말뚝 인접지반 사이에 전단응력전이(shear stress transfer)가 유발되어 말뚝의 축력분포가 변화하게 된다고 보고되었다(Lee, 2012a; 2012b). 이러한 상황에 대해 그동안 많은 연구가 수행되어 왔다. Cheng et al. (2004), Lee and Ng (2005), Pang (2006), Lee (2008), Lee (2012a; 2012b; 2012c), Lee and Jeon (2015) 및 Jeon and Lee (2015)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 실내모형실험이나 원심모형실험을 통한 연구를 수행하였다. 이에 비해 현장실측을 통한 연구는 상대적으로 매우 제한적으로 수행되어 왔는데, Selemetas (2005), Pang (2006), Liu et

al. (2014), Williamson (2014) 및 Mair and Williamson (2014)는 터널굴착으로 인한 인접말뚝의 거동을 현장 실측을 통해 연구한 바 있다. 이러한 연구의 대부분은 말뚝의 측면에서 수행되는 터널굴착에 의한 말뚝의 거동과 관련되어 있다(Lee, 2012a). 또한 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동연구는 대부분 단독말뚝을 중심으로 수행되어 왔으며, 군말뚝의 거동에 대한 연구는 상대적으로 매우 제한되어 있다(Lee, 2012b).

기존의 연구에 의하면 터널굴착에 의한 말뚝의 거동은 말뚝선단의 위치에 대한 터널의 상대위치에 따라 큰 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(Jacobsz, 2002). Attewell et al. (1986), Jacobsz (2002), Kaalberg et al. (2005) 및 Selemetas (2005)는 터널굴착에 의한 지반의 침하 영향권을 제시하였는데, Jacobsz et al. (2002)은 건조한 모래 지반에 근입된 말뚝에 대한 원심모형실험을 통해 분석된 터널굴착 영향권을 말뚝과 지표면 침하의 상대적인 크기를 고려하여 Fig. 1과 같이 제시하였다. 또한 Kaalberg et al. (2005) 및 Selemetas (2005)는 점토층에서 실시된 비배수 조건의 터널굴착에 의한 말뚝의 영향범위를 지표면의 침하와 말뚝의 침하 크기를 고려하여 3가지 영역으로 나누어 제안하였다. 이러한 연구를 토대로 Jeon and Lee (2015)는 견고한 점토지반에서 수행되는 터널굴



- Zone A: Pile settlement = surface settlement
- Zone B: Pile settlement > surface settlement
- Zone C: Pile settlement = surface settlement
- Zone D: Pile settlement < surface settlement
- ϕ_{cv}^* : The critical state friction angle
- i : The distance from the tunnel centreline to the inflection point on the Gaussian surface settlement trough

Fig. 1. Zone of influence around a tunnel in which potential for large pile settlements exists (Jacobsz et al. (2002))

착으로 인한 단독말뚝의 거동을 다양한 말뚝선단의 상대위치(수직 및 횡방향 이격거리)에 따라 Attewell et al. (1986)이 제안한 영향권과 비교하여 말뚝의 거동을 분석하였다.

기존 연구에서는 터널굴착으로 인한 말뚝의 영향권 분석시 단순하게 말뚝의 침하량만을 고려했으며, Dias and Bezuijen (2014a; 2014b) 및 Lee and Jeon (2015)의 연구를 제외하고는 매우 제한적이기 때문에 이를 명확하게 영향권에 대해 규명하지 못하고 있으며, 특히 군말뚝의 거동에 대한 연구는 사실상 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통해 단독 및 군말뚝의 인근에서 실시되는 터널시공에 의한 단독말뚝 및 군말뚝의 거동을 터널굴착 영향권을 중심으로 분석하고, 터널의 위치에 대한 말뚝선단(단독 및 군말뚝)의 횡방향 이격거리를 변경시키면서 터널근접 시공에 의한 말뚝에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 군말뚝의 거동을 말뚝의 상대위치(외곽 및 중앙)에 따라 분석하여 터널굴착이 말뚝에 미치는 영향을 심도 있게 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 해석개요 및 경계조건

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 3D (Plaxis, 2012)를 이용하여 터널굴착에 따른 말뚝의 거동을 모사하여 터널에 대한 말뚝선단(단독 및 군말뚝)의 횡방향 이격거리에 따른 말뚝의 거동을 분석하였다. Fig. 2(a)는 해석에서 적용된 대표 유한요소해석 mesh를 나타내고 있고, Fig. 2(b)는 해석 단면도를 보여주고 있다. 해석에서 가정한 터널의 직경(D)은 8 m이며, 터널의 중심부(springline)는 지표면으로부터 26.2 m 하부에 위치하고 있다. 지표면에서 50 m 하부까지 풍화토층으로 구성된 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 터널에 대한 말뚝선단(단독말뚝 및 군말뚝)의 상대위치(횡방향 이격거리)를 고려하여 말뚝의 거동을 분석하기 위해 해석을 수행하였는데, 터

널중심으로부터 말뚝의 중심까지의 거리를 횡방향으로 0-24 m 이격시켜 해석을 수행하였다(단독말뚝 및 군말뚝: $H_p = 0D, 0.5D, 1D, 2D, 3D$). 말뚝의 직경(d)은 0.5 m이며, 그 길이(L)는 20 m이다. 군말뚝의 경우

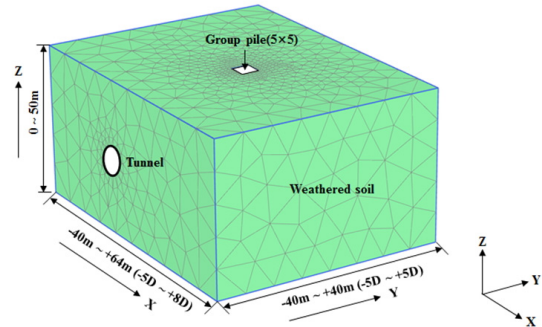


Fig. 2a. A representative 3D finite element mesh used in the current study (a 5×5 pile group, D: tunnel diameter)

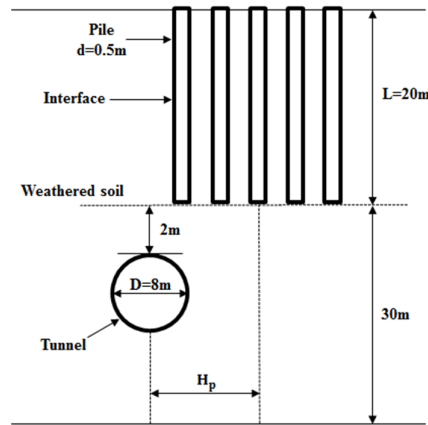


Fig. 2b. Sectional view of analysis geometry (a 5×5 pile group)

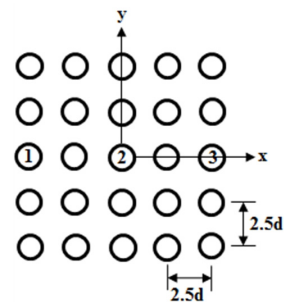


Fig. 2c. Locations of piles inside a 5×5 pile group

말뚝중심간의 간격이 2.5d인 5×5 말뚝을 가정하였다. 군말뚝 해석에 대한 분석을 위해 본 연구에서는 중앙 말뚝(centre pile) 및 모서리말뚝(corner pile)에 대하여 그 거동을 고찰하였으며, 그 위치는 Fig. 2(c)에 나타나 있다. 본 해석에서 지하수위는 존재하지 않는 것으로 가정하였다.

2.2 적용 구성모델 및 물성치

터널의 굴착을 모사하기 위하여 탄-소성해석을 실시하였으며 특히 말뚝-지반 경계면에는 소성항복(plastic yielding)이 발생하는 경우 미끄러짐(slip)의 발생을 허용하는 경계요소(interface element)를 적용하여 말뚝-인접지반 경계면에서의 전단응력전이 과정을 분석 할 수 있도록 하였다. 특히 말뚝선단에도 경계요소를 지정하여 말뚝선단과 지반 사이에서의 인장응력이 부착강도를 초과할 경우 말뚝선단과 지반이 서로 분리될 수 있도록 하였다. Table 1은 수치해석에서 적용한 지반 및 재료의 물성치를 정리하였는데, 이는 국내 풍화토 및 슛크리트의 일반적인 물성치이다(Lee, 2012b). 말뚝 및 슛크리트에는 등방탄성모델(isotropic elastic model)이 적용되었고, 풍화토에는 비관련흐름법칙(non-associated flow rule) 및 Mohr-Coulomb의 파괴기준(failure criterion)을 따르는 탄-소성 모델을 적용하였다. 말뚝의 경우 말뚝주변의 흙 요소(soil element)를 따로 지정하여 말뚝주변에서 발생하는 흙의 거동을 분석 할 수 있도록 하였으며, 터널막장면의 슛크리트 라이닝 또한 변위 및 휨모멘

트를 분석할 수 있도록 흙 요소를 별도로 지정하였다. 말뚝의 시공으로 유발된 말뚝주면-지반 경계면에서의 강도감소를 고려하기 위하여 강도감소계수($R_{int} = 0.7$)를 적용하였다(Plaxis, 2012). 이를 통해 식 (1), (2)를 이용해 전단강도 상수(c'_{int}, ϕ'_{int})를 산정할 수 있다. 여기서 c'_{soil} 은 지반의 점착력, ϕ'_{soil} 은 지반의 내부마찰각이다.

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

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

2.3 수치해석 과정 및 분석

수치해석에서는 말뚝의 시공에 의한 근입효과 및 이로 따른 지반의 응력변화는 포함시키지 않았으므로 본 연구에서 가정한 말뚝은 현장타설말뚝의 거동과 유사하다고 가정할 수 있다. 터널의 굴착은 종방향(Y)에 대하여 -5D에서 5D(-40 m~+40 m)구간 사이에서 실시되었다(Fig. 2(a)). 초기 평형단계 도달 이후 별도의 해석을 통하여 설계하중($P_0 = 1,715$ kN)을 결정하였으며, 터널굴착 이전 말뚝두부에는 점차적으로 하중을 증가시켜 설계하중을 작용시켰다(500 kN→1000 kN→1,715 kN, 3.1절에서 설명). 터널의 굴착은 각 단계별로 1 m씩 실시되는 것으로 가정하여 총 80단계에 걸쳐서 실시되었다. 터널굴착 단계가 종료된 이후 굴착면에 두께 200 mm의 슛크리트를 타설하였는데, 터널굴착 직후에는 연성 슛크리트로 가정하

Table 1. Material parameters assumed in the numerical modelling

| Material | Model | γ_t (kN/m ³) | K_0 | ν' | E' (MPa) | c' (kPa) | ϕ' (°) |
|----------|--------------|------------------------------------|-------|--------|-----------------------|---------------|-------------|
| Soil | Mohr-Coulomb | 20 | 0.75 | 0.35 | 80 | 50 | 35 |
| Lining | Elastic | 25 | - | 0.2 | 5,000(s) 15,000(h) | - | - |
| Pile | | 25 | 0.01 | 0.2 | 30,000 | - | - |

Note: 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)

여 5,000 MPa의 탄성계수를 적용하였으며, 이를 다음 굴착단계에서 강성 슛크리트의 물성치로 변환하여 15,000 MPa의 탄성계수를 가지는 것으로 가정하였다. 해석 결과의 분석을 위하여 임의의 심도에서 말뚝의 축력 P 는 $P = \sigma_{zz,avg} \times A_p$ 식으로 산정하였다. 여기서 $\sigma_{zz,avg}$ 는 특정심도에서의 말뚝 수직응력의 평균값이고, A_p 는 말뚝의 단면적이다. 특히 군말뚝의 경우 말뚝-지반 경계면에서의 상대변위 및 전단응력의 크기가 그 위치에 따라 큰 차이를 보이므로 특정심도에 대한 모든 경계면에서의 상대변위 및 전단응력의 평균값을 적용하였다.

3. 해석결과 분석

3.1 말뚝의 설계지지력 결정

Fig. 3은 말뚝의 설계지지력을 결정하기 위하여 실시한 말뚝재하시험 모사를 통하여 산정된 말뚝의 하중-침하관계를 보여주고 있다. Fig. 3은 터널의 굴착이 포함되지 않은 말뚝의 하중-침하관계를 보여주고 있으며, 하중재하 시험을 모사하기 위하여 말뚝두부에 단계별로 압축력을 증가시켰다. 말뚝두부의 하중이 3,250 kN 인근에 도달할 때까지는 말뚝하중과 말뚝두부침하 사이에 거의 선형적인 관계를 보이고 있다. 그러나 이를 초과하는 하중이 작용하는 경우 급격한 침하가 발생하고 있다. 본 연구에서는 말뚝에 발생한 하중-침하 관계로부터 말뚝의 설계지지력을 결정하기 위하여 널리 사용되는 Davisson (1972)의 방법을 적용하였다. 이를 통하여 Fig. 3에 나타나 있듯이 말뚝의 파괴하중(failure load)을 3,430 kN으로 산정하였다. 여기에 안전율 2.0을 적용하여 말뚝의 설계하중(P_0)은 1,715 kN으로 결정되었으며($3,430/2 = 1,715$ kN), 이때 말뚝두부의 침하량(Δ_i)은 7.7 mm이다. 한편 군말뚝의 경우 단독말뚝에 비하여 더 큰 침하가 발생하였는데, 응력의 중첩효과로 인해 $3.2\Delta_i \sim 3.9\Delta_i$ 의 침하가 발생하는 것으로 분석되었다. 말뚝설계

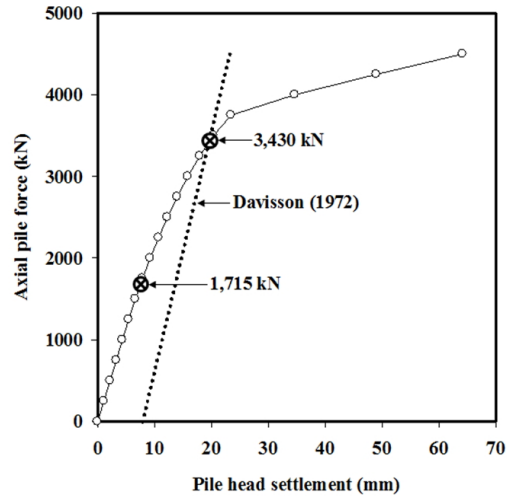


Fig. 3. Relation of axial pile forces and pile head settlements and determination of allowable capacity of the single pile

하중 작용하에서 말뚝-지반 사이의 경계면 굴착으로 인한 기준에 존재하는 말뚝의 거동을 심도 있게 분석하기 위해 터널굴착 이전 말뚝두부에 하중을 3단계 (500 kN→1,000 kN→1,715 kN)에 걸쳐 단계별로 증가시켜 설계하중(P_0)을 말뚝두부에 작용시켰다. 이를 통해 사용 중인 말뚝의 거동을 모사했으며 이후 터널의 단계별 굴착을 진행시켰다.

3.2 지반 및 말뚝의 변형

Fig. 4(a)는 터널중심으로부터 다양한 횡방향 이격거리($H_p = 0D, 1D, 2D$)에 위치하는 단독말뚝 및 군말뚝에 대한 해석을 통해 산정된 터널굴착 단계별 정규화된 말뚝두부 $\Delta_{net}/\Delta_{gr,max}$ 및 $\Delta_g/\Delta_{gr,max}$ 의 침하분포를 보여주고 있다(Y/D : 정규화된 종방향). 여기서, Δ_{net} 은 순수하게 터널굴착에 의해서 발생한 터널굴착 단계별 말뚝두부 침하(tunnelling-induced pile head settlements)를 나타내며, Δ_g 는 지중에 말뚝이 존재하지 않는 Greenfield 해석조건에서 $H_p = 0D$ 위치에서 터널굴착에 의해 발생한 터널굴착 단계별 지표면 침하를 나타낸다. 또한 $\Delta_{gr,max}$ 는 Greenfield 해석조건에

서 터널굴착에 의한 지표면 최대 침하를 의미한다($\Delta_{gr,max} = 5.9 \text{ mm}$). 한편 군말뚝의 경우 중앙말뚝(centre pile)만을 고려하였다. Fig. 4(a)에 나타나 있듯이 정규화된 침하 $\Delta_{net}/\Delta_{gr,max}$ 및 $\Delta_g/\Delta_{gr,max}$ 는 터널의 굴착이 진행될수록 점차 증가함을 알 수 있다. 터널굴착 단계에서 말뚝두부의 침하속도가 가장 크게 발생하는 경우는 터널이 $Y/D = -0.5 \sim +0.5$ 부근을 통과하는 지점으로 나타났으며, 그 이후 터널굴착에 따른 말뚝두부의 침하속도는 현저히 감소되는 것으로 분석되었다. 따라서 터널굴착에 의해 말뚝의 침하가 주로 발생하는 범위는 $Y/D = -1.0 \sim +1.0$ 부근을 통과하는 지점으로 분석되었다. 또한 말뚝두부의 침하는 터널로부터 말뚝의 횡방향 이격거리가 증가할수록 감소하여 완만한 형태를 나타내고 있다. 터널굴착 종료 후 말뚝의 침하는 $H_p = 0D$ 군말뚝의 2번 말뚝(centre pile)에서 가장 크게 발생하였다($\Delta_{net}/\Delta_{gr,max} = 2.10$). 또한 이는 동일한 이격거리의 단독말뚝의 침하에 비해 대략 41% 증가한 값이다. 군말뚝의 경우 동일한 이격거리의 단독말뚝에 비해 침하보다 크게 발생하는데 이는 중첩효과로 인해 군말뚝이 단독말뚝 보다 터널굴착으로 인한 영향을 더 크게 받기 때문인 것으로 판단된다. $H_p = 2D$ 위치에 존재하는 단독말뚝 및 군말뚝의

경우 Greenfield 침하보다 작은 침하가 발생하였으며, 이러한 경향은 Fig. 1에 나타난 Jacobsz et al. (2002)의 연구결과와 유사하게 나타났다.

Fig. 4(b)는 단독말뚝 및 군말뚝의 터널로부터 말뚝의 다양한 횡방향 이격거리에 대해 터널굴착 종료 후 정규화된 tunnelling-induced 말뚝 및 지표면 침하 $\Delta_{net}/\Delta_{gr,max}$ 및 $\Delta_g/\Delta_{gr,max}$ 의 횡방향 분포를 보여주고 있다(X/D : 정규화된 횡방향). 지표면의 침하는 말뚝으로부터의 이격거리가 증가할수록 Gaussian 침하형태와 유사해지는 것을 확인 할 수 있다. 군말뚝의 경우 중앙말뚝(centre pile, 2번 말뚝)을 고려하였다. 앞서 언급한 바와 같이 군말뚝의 침하는 단독말뚝의 침하를 초과한다. $H_p = 0D, 0.5D, 1D$ 에서는 말뚝의 침하가 Greenfield 조건의 지표면의 침하를 초과하는데 비해, 말뚝의 횡방향 이격거리가 증가하여 $H_p = 2D$ 이후부터는 말뚝의 침하가 지표면의 침하보다 작게 발생하게 된다. 즉 말뚝의 이격거리에 따라 터널굴착으로 유발된 말뚝 거동이 상이할 것으로 예상된다. 터널굴착으로 인한 지반침하 영향권을 검토한 결과 말뚝두부 및 Greenfield 침하의 관계는 Dias and Bezuijen (2014a; 2014b)의 연구와 비슷한 양상을 보인다.

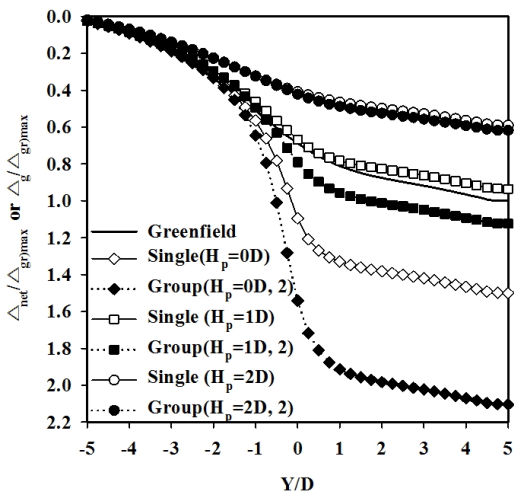


Fig. 4a. Distributions of normalised tunnelling-induced pile head and soil surface settlements with tunnel advancement

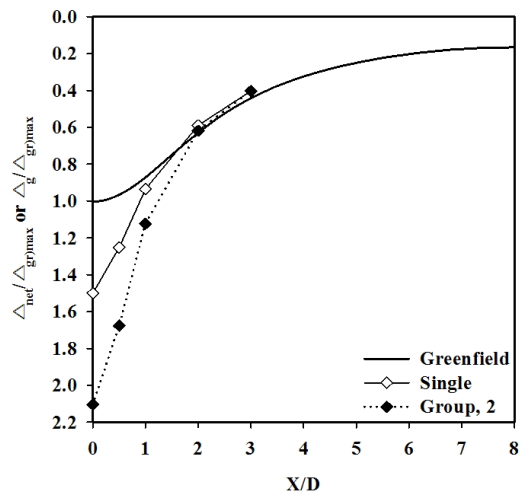


Fig. 4b. Distributions of normalised tunnelling-induced pile head and soil surface settlements in the transverse direction

3.3 말뚝-지반경계면에서의 전단응력

Fig. 5(a)는 단독말뚝의 횡방향 이격거리에 따른 말뚝-인접지반 경계면에서의 전단응력의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대해 보여 주고 있으며, 설계하중작용에 의한 전단응력 및 터널굴착 종료 후의 전단응력의 분포를 같이 보여주고 있다. 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 상재하중에 의해서 말뚝 전체 구간에서 상향의 전단응력(positive shaft resistance)이 발생한다. 하지만 터널굴착 종료 후 전단응력전이 과정을 통해 말뚝의 횡방향 이격거리에 따라 그 분포가 변하는 것을 볼 수 있다. $H_p = 0D, 0.5D$ 인 경우 말뚝두부에서 특정심도까지 전단응력이 증가하며, 반대로 말뚝선단으로 갈수록 그 크기가 점차 감소한다. 한편 $H_p = 1D, 2D, 3D$ 인 경우 말뚝상부에서는 전단응력이 감소하며, 하부구간에서는 증가하는 경향을 보인다. 즉 터널로부터 말뚝의 이격거리에 따라 전단응력전이 과정이 서로 다르므로 순수하게 터널의 굴착으로 인해서 유발된 전단응력(tunnelling-induced interface shear stress)의 분포를 상세히 검토하기 위해서는 말뚝두부에 작용한 상재하중의 영향을 제거할 필요가 있다.

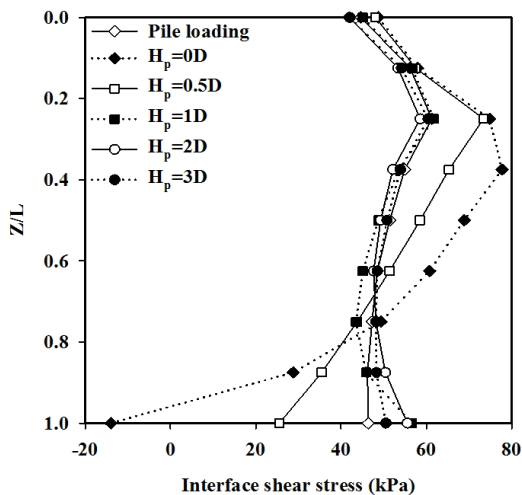


Fig. 5a. Distributions of interface shear stresses with depth (Single piles)

Fig. 5(b)는 단독말뚝의 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 정규화된 말뚝의 전단응력의 분포를 말뚝의 횡방향 이격거리($H_p = 0D, 0.5D, 1D, 2D, 3D$)에 대해 보여주고 있다. $H_p = 0D, 0.5D$ 인 경우 말뚝의 상부에는 상향의 전단응력이 발생하는 반면 말뚝의 하부에서는 하향의 전단응력이 발생한다. $H_p = 0D$ 일 때 말뚝의 두부에서 대략 $Z/L = 0.38$ 까지 전단응력이 증가하는 양상을 보이고, 말뚝의 선단까지 감소하며 결국 그 부호가 변하는 것을 알 수 있다. $H_p = 1D, 2D$ 인 경우 전단응력의 분포가 $H_p = 0D, 0.5D$ 와는 반대의 경향을 보이는데 말뚝의 상부에서는 하향의 전단응력이 발생하고, 말뚝의 하부에서는 상향의 전단응력이 발생한다. 또한 $H_p = 3D$ 인 경우 매우 작은 변화만 관찰되므로 전단응력전이가 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다.

Fig. 6(a)~(c)는 다양한 횡방향 이격거리에서의 ($H_p = 0D, 1D, 2D$) 단독말뚝 및 군말뚝의 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 정규화된 말뚝의 전단응력의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 군말뚝에 대해서는 $H_p = 0D$ 인 경우 중앙말뚝(centre pile, 2번 말뚝)과 모서리말뚝(corner pile, 3번 말뚝)을, $H_p = 1D, 2D$

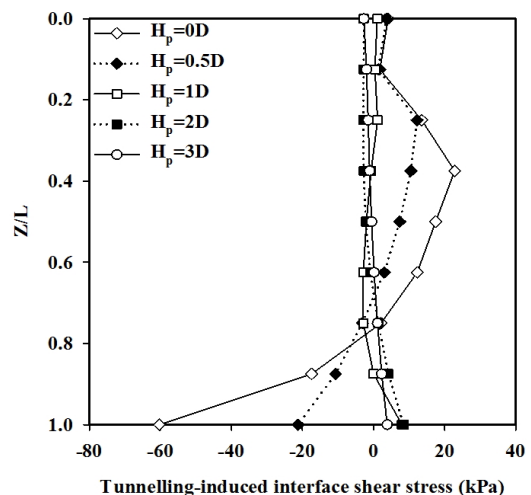


Fig. 5b. Distributions of tunnelling-induced interface shear stresses with depth (Single piles)

인 경우 말뚝의 대칭이 성립하지 않으므로 1번, 2번 및 3번 말뚝을 고려하였다. 모든 이격거리에 대해 군말뚝의 경우 단독말뚝과 유사한 분포를 보이나 상대적으로 작은 전단응력이 발현된다. Fig. 6(a)에서 $H_p=0D$ 인 경우 단독말뚝과 군말뚝의 경우 모두 말뚝의 하부에서 하향의 전단응력이 발생하였으며, 단독말뚝의 경우 말뚝의 상부에서 상향의 전단응력이 군

말뚝의 경우보다 크게 발생하여 tunnelling-induced 인장력이 더 크게 발생할 것으로 예상된다.

$H_p=1D$ 위치의 단독말뚝의 경우 $H_p=0D$ 위치의 말뚝과는 다른 형태의 tunnelling-induced 전단응력의 분포를 보여준다(Fig. 6(b)). 이 경우 군말뚝의 2번 및 3번 말뚝의 경우 단독말뚝의 전단응력 분포와 비슷한 양상을 보이며, 1번 말뚝의 경우 말뚝의 상부에서 하부로 갈수록 전단응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 1번 말뚝이 2번 및 3번 말뚝과는 상이한 상대전단 변위(relative shear displacement) 분포를 가지기 때문인 것으로 판단되며, 이후 상대변위 부분에서 상세히 설명할 것이다. $H_p=2D$ 인 경우 Fig. 6(c)에 나타나 있듯이 단독말뚝 및 군말뚝의 모든 말뚝에서 유사한 형태의 전단응력 분포를 보이는데 말뚝의 상부에는 하향의 전단응력과 말뚝의 하부에는 상향의 전단응력이 발생하는 분포를 보이고 있다. 또한 말뚝에 작용하는 전단응력의 크기가 $H_p=0D$ 인 단독말뚝에 비해 매우 작다. 이는 터널굴착으로 인한 지반침하 영향권으로부터 충분히 이격되어 있어서 터널굴착에 따른 영향이 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

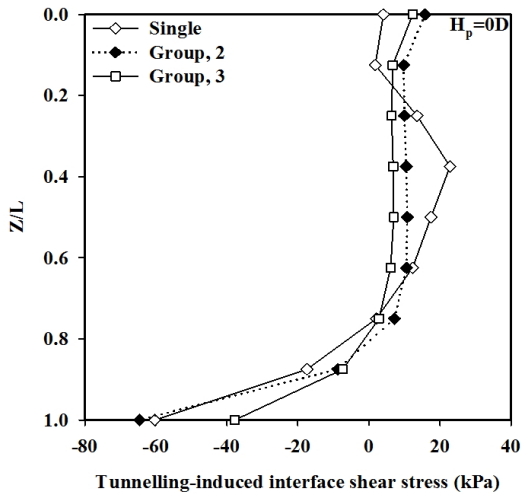


Fig. 6a. Distributions of tunnelling-induced interface shear stresses with depth

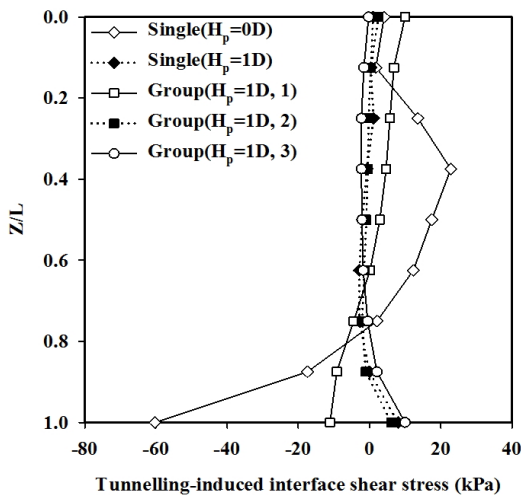


Fig. 6b. Distributions of tunnelling-induced interface shear stresses with depth

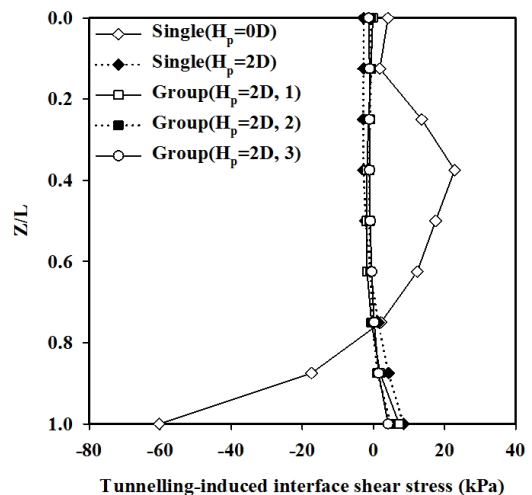


Fig. 6c. Distributions of tunnelling-induced interface shear stresses with depth

3.4 말뚝경계면에서의 상대변위 분포

Fig. 7(a)~(c)는 다양한 횡방향 이격거리에 대한 단독말뚝 및 군말뚝의 tunnelling-induced 상대변위의 분포를 정규화된 말뚝의 침도(Z/L)에 대해 보여주고 있다. 군말뚝에 대해서는 $H_p = 0D$ 인 경우 중앙말뚝 (centre pile, 2번 말뚝)과 모서리말뚝(corner pile, 3번 말뚝)을 $H_p = 1D, 2D$ 인 경우 말뚝의 대칭이 성립하지

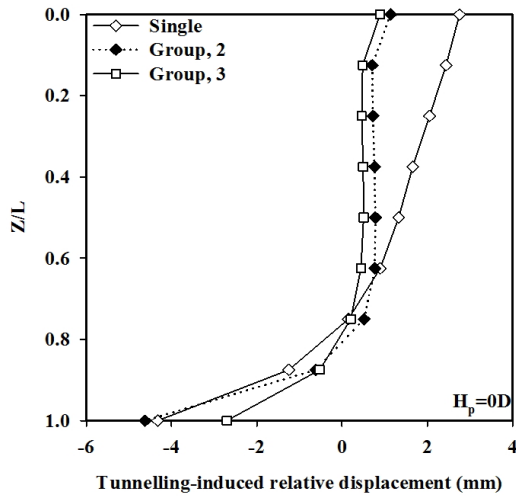


Fig. 7a. Distributions of tunnelling-induced relative shear displacements with depth

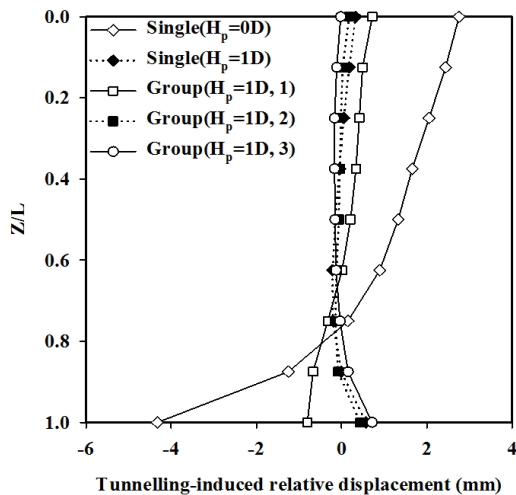


Fig. 7b. Distributions of tunnelling-induced relative shear displacements with depth

않으므로 1번, 2번 및 3번 말뚝을 고려하였다. Fig. 7(a)에서 단독말뚝 및 군말뚝의 경우 터널굴착 종료 후 말뚝두부에서 $Z/L = 0.7 \sim 0.8$ 부근까지는 말뚝의 침하가 인접지반의 침하를 초과하고 있으며, 그 하부에서는 반대의 경향을 보인다. 즉 말뚝두부에서 약 $Z/L = 0.7 \sim 0.8$ 까지는 터널굴착으로 인한 지반 침하로 지반이 말뚝의 침하에 대해 저항하는 형태의 상향의 마찰 저항력(upward resisting skin friction)이 발현되며, $Z/L = 0.7 \sim 0.8$ 부터 말뚝선단에서는 인해 말뚝에 하향의 마찰력(downward acting skin friction)이 발현되는 것으로 판단된다. 단독말뚝의 경우 말뚝의 두부에서 대략 $Z/L = 0.6$ 까지는 군말뚝보다 큰 상대변위의 값을 가지는데, 이는 Fig. 6(a)에서도 나타나 있듯이 단독말뚝에서의 전단응력이 군말뚝 보다 크게 발생하는 메커니즘을 상대변위의 분포특성을 통해 재확인 할 수 있음을 입증한다.

Fig. 7(b)에서 $H_p = 1D$ 위치의 단독말뚝의 경우 말뚝의 상부에서 $Z/L = 0.25$ 부근까지는 상향의 상대변위가 발생하며, 대략 $Z/L = 0.38 \sim 0.89$ 구간에서는 하향의 상대변위가 발생하며, 대략 $Z/L = 0.89$ 에서 말뚝의 하부까지는 다시 상향의 상대변위가 발현된다. 또한 군말뚝의 중앙말뚝(centre pile)인 2번 말뚝의 경우 단독말뚝의

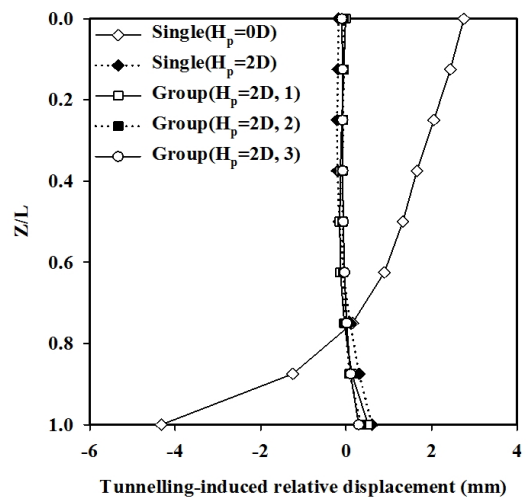


Fig. 7c. Distributions of tunnelling-induced relative shear displacements with depth

저동과 유사한 형태의 매우 작은 상대변위가 발생하였다. 한편 균말뚝의 3번 말뚝의 경우 말뚝의 상부에서 $Z/L = 0.75$ 구간까지는 하향의 상대변위가 발생하고 그 하부로부터는 상향의 상대변위가 발생하여 말뚝에는 tunnelling-induced 압축력 형태의 축력분포가 발생할 것으로 예상된다. 반대로 균말뚝의 1번 말뚝의 경우 3번 말뚝과는 정반대로 말뚝에 tunnelling-induced 인장력 형태의 축력이 발생할 것으로 보인다. 한편 $H_p = 2D$ 위치의 단독말뚝 및 균말뚝의 모든 말뚝에서는 Fig. 7(c)에 나타나 있듯이 $H_p = 0D$ 위치에서의 말뚝과는 정반대의 상대변위 분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 말뚝의 상부에는 지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하고, 그 아래 구간에서는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하는 분포를 보인다. 이러한 연유로 인해 말뚝의 상부에서는 하향의 마찰 저항력(downward acting skin friction)과 말뚝의 하부에서는 상향의 마찰 저항력(upward resisting skin friction)이 발현하게 되며, 따라서 tunnelling-induced 압축력 형태의 축력이 발생하는 것으로 분석된다.

3.5 말뚝의 축력분포

Fig. 8(a)는 횡방향 이격거리가 $H_p = 0D, 0.5D, 1D, 2D, 3D$ 일 때 터널굴착 종료 후 산정된 정규화된 단독말뚝의 축력(P/P_0)의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 또한 Fig. 8(a)는 터널 굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중에 의한 축력분포도 포함하고 있다. 여기서 P 는 임의의 위치에서의 말뚝의 축력을 의미하고, P_0 는 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중(1,715 kN)이다. 설계하중 작용하에서 주면마찰력의 발현으로 인해 말뚝의 축력은 심도가 증가할수록 점진적으로 감소하여 설계하중의 87% 정도가 주면마찰력에 의해 지지되며 말뚝 선단에는 대략 13%의 하중만이 발생한다. $H_p = 0D, 0.5D$ 말뚝의 경우 터널굴착 종료 후 말뚝의 축력이 감소된 것을 확인 할 수 있고 그에 비해 $H_p = 1D, 2D, 3D$ 의 경우 축력이 오히려 약간 증가한 것을 알

수 있다.

Fig. 8(b)는 터널굴착에 의한 단독말뚝의 축력변화를 명확하게 규명하기 위하여 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 정규화된 말뚝의 축력($\Delta P/P_0$)을 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 ΔP 는 순수하게 터널굴착에 의한 말뚝의 축력이다. 말뚝이 $H_p = 0D, 0.5D$ 의 위치에 존재하는 경우 각각 $\Delta P/P_0 = -0.17, -0.08$ 의 크기

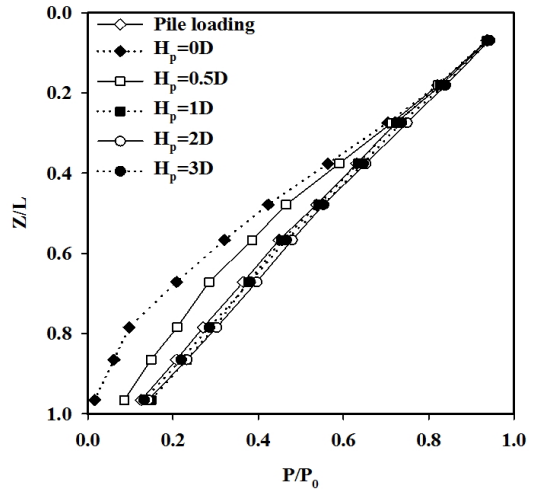


Fig. 8a. Distributions of normalised axial pile forces with depth (Single piles)

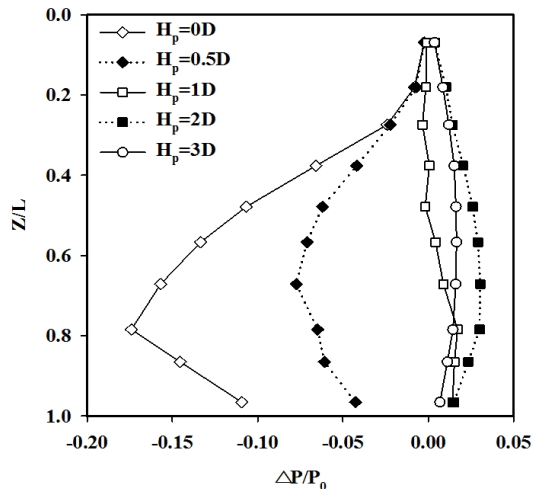


Fig. 8b. Distributions of normalised tunnelling-induced axial pile forces with depth (Single piles)

를 가진 인장력 형태의 tunnelling-induced 축력이 발생하는데 비해, $H_p = 2D, 3D$ 의 위치에 존재하는 말뚝의 경우 각각 $\Delta P/P_0 = 0.03, 0.02$ 의 크기를 가진 압축력 형태의 tunnelling-induced 축력이 발생한다. $H_p = 0D, 0.5D$ 인 경우 말뚝에는 tunnelling-induced 인장력이 발생하는데 말뚝의 상부(상향의 전단응력)와 하부(하향의 전단응력)에서 서로 반대방향의 전단응력 성분의 조합에 의한 것으로 판단되며, $H_p = 1D, 2D$ 의 경우 이와는 반대로 말뚝의 상부는 하향의 전단응력과 말뚝의 하부에는 상향의 전단응력이 발생하여 tunnelling-induced 압축력이 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 앞서 언급한 바와 같이 tunnelling-induced 전단응력 분포의 특성에 의한 것으로 판단되며 이는 연약지반에 근입된말뚝에 작용하는 부마찰 발생 메커니즘과 유사하다(Lee, 2012a). 한편 말뚝이 $H_p = 1D$ 에 존재하는 경우 말뚝의 두부에서 $Z/L = 0.67$ 까지 tunnelling-induced 축력분포가 크게 변하지 않고, $Z/L = 0.67$ 부터 말뚝의 선단까지는 압축력 형태의 축력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 말뚝의 선단부근에서 말뚝과 지반사이의 상대변위가 상대적으로 크게 발생하기 때문으로 판단된다.

Fig. 9(a)~(c)는 $H_p = 0D, 1D, 2D$ 위치에서 단독말

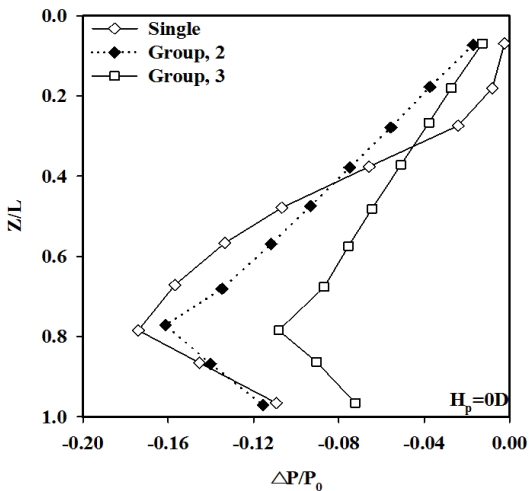


Fig. 9a. Distributions of normalized tunnelling-induced axial pile forces with depth

뚝 및 군말뚝에 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 정규화된 말뚝 축력($\Delta P/P_0$)을 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 군말뚝의 경우 $H_p = 0D$ 에 대해서는 중앙말뚝(centre pile, 2번 말뚝)과 모서리말뚝(corner pile, 3번 말뚝)을, $H_p = 1D, 2D$ 에 대해서는 말뚝의 대칭이 성립하지 않으므로 1-3번 말뚝을 고려하였다. Fig. 9(a)에서 $H_p = 0D$ 일 때 단독말뚝은 군말뚝의 중앙말뚝(centre pile)과

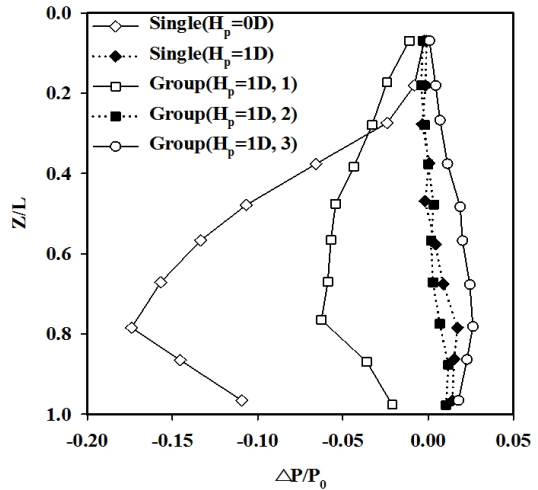


Fig. 9b. Distributions of normalized tunnelling-induced axial pile forces with depth

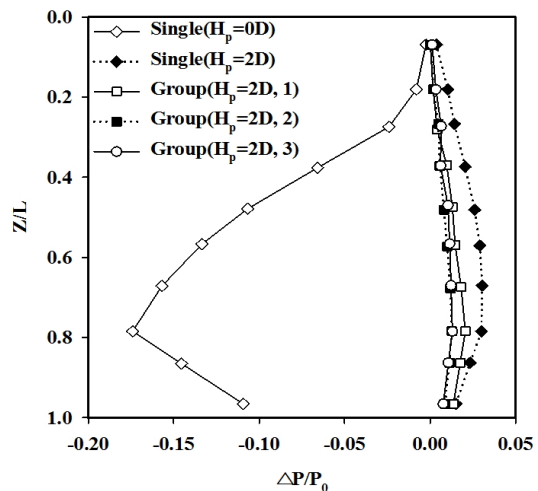


Fig. 9c. Distributions of normalized tunnelling-induced axial pile forces with depth

모서리말뚝(*corner pile*)보다 큰 인장력이 발생하였는데, 단독말뚝에는 $\Delta P/P_0 = -0.17$ 의 축력이, 군말뚝의 중앙말뚝과 모서리말뚝의 경우 각각 $\Delta P/P_0 = -0.16$, -0.11 의 축력이 발생하였다. 이는 단독말뚝의 인접지반에서 군말뚝의 인접지반의 경우에 비해 상대적으로 말뚝과 지반 사이의 상대전단변위가 크게 발생하기 때문으로 분석된다. 즉 말뚝의 상부에서는 말뚝의 침하가 지반의 침하보다 크게 발생하며, 반대로 말뚝의 하부에서는 지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하여 인장력 형태의 축력 분포가 나타나는 것으로 판단된다.

$H_p = 1D$ 인 경우 군말뚝의 1번과 3번 말뚝에서 각각 $\Delta P/P_0 = -0.06$, 0.03 의 축력이 발생하였는데 이는 군말뚝 내 말뚝에서 인장력과 압축력이 동시에 발생하는 것으로 나타난다(Fig. 9(b)). 터널굴착으로 인한 지반침하 영향권으로부터 1번 말뚝의 경우 말뚝의 전체가 영향권 내에 위치하고, 3번 말뚝의 경우 말뚝의 선단부분(말뚝 전체의 대략 20%)이 영향권을 벗어나기 때문에 서로 상이한 형태의 말뚝축력(인장력 및 압축력) 분포를 보인다. 단독말뚝 및 군말뚝 2번 말뚝의 경우 앞서 설명하였듯이 말뚝과 지반사이의 상대변위가 크게 나타나지 않으므로 말뚝의 축력이 작은 것으로 판단된다. Fig. 9(c)에서 $H_p = 2D$ 인 경우 단독말뚝 및 군말뚝의 2번 말뚝의 경우 앞서 설명하였듯이 말뚝과 지반사이의 상대변위가 크게 발생하지 않으므로 말뚝의 축력 또한 작게 발생한 것을 알 수 있다. 이 경우 모든 말뚝에서 압축력이 발생하였는데, 단독말뚝에서 가장 큰 압축력($\Delta P/P_0 = 0.03$)이 발생하였다. 이는 단독말뚝의 경우 말뚝과 지반의 상대변위가 군말뚝의 경우보다 크게 발생하기

때문으로 판단된다. 또한 군말뚝의 경우 모든 말뚝에서 비슷한 크기의 축력분포를 보이는데 말뚝과 인접지반 사이에서 상대변위가 거의 발생하지 않기 때문인 것으로 분석된다. 이와 같이 Fig. 9(a)~(c)에 나타난 횡방향 이격거리에 대한 말뚝의 tunnelling-induced 축력의 발생 경향은 Hartono et al. (2014)가 원심모형 실험을 통해 관찰된 것과 일치한다.

3.6 말뚝선단의 횡방향 이격거리에 따른 말뚝의 거동

Table 2는 다양한 횡방향 이격거리($H_p = 0D, 0.5D, 1D, 2D$)에서 단독말뚝 및 군말뚝의 두부침하를 보여준다. 터널굴착 종료 후 tunnelling-induced 말뚝의 침하는 $H_p = 0D$ 에서 가장 크게 발생하였으며, 말뚝의 횡방향 이격거리가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 상재하중에 의해서 발생한 말뚝두부의 침하는 군말뚝의 중앙말뚝(*centre pile*, 2번 말뚝)에서 가장 크게 발생하였다. $H_p = 0D$ 인 경우 군말뚝의 경우 하중중첩효과로 인해 tunnelling-induced 침하가 단독말뚝에 비해 대략 27-40% 증가하는 것으로 분석된다. 또한 $H_p = 2D$ 인 경우 $H_p = 0D$ 에 비해 침하는 단독말뚝 및 군말뚝에 대해 대략 61-72% 감소하였다. $H_p = 0D$ 인 경우 군말뚝의 최대침하는 2번 말뚝에서 발생하지만 다른 조건의 군말뚝에서는 1번 말뚝에서 최대침하가 발생한다. 이는 말뚝의 거동이 말뚝과 인접한 지반에서 터널굴착으로 인한 침하의 크기 및 터널로부터의 말뚝 선단의 이격거리와 관련이 있음을 의미한다. 본 연구에서

Table 2. Maximum pile head settlements according to the transverse pile distance (unit: mm, maximum Greenfield field settlement: 5.9 mm)

| | | Pile loading | Tunnelling-induced settlements | | | |
|---------------------|-------|--------------|--------------------------------|--------------|------------|------------|
| | | | $H_p = 0D$ | $H_p = 0.5D$ | $H_p = 1D$ | $H_p = 2D$ |
| Single pile | | 7.72 | 8.88 | 7.42 | 5.54 | 3.49 |
| Piles inside groups | No. 1 | 26.90 | 11.27 | 11.05 | 7.95 | 4.29 |
| | No. 2 | 30.00 | 12.46 | 9.93 | 6.65 | 3.66 |
| | No. 3 | 26.90 | 11.27 | 8.13 | 5.54 | 3.20 |

가정한 지반 및 시공조건에서는 군말뚝에서의 말뚝의 부등침하가 크지 않지만, 터널굴착으로 인한 지반손실율이 큰 경우라면 상부구조물에 유해한 영향을 줄 수 있을 정도의 큰 전체침하량 및 부등침하가 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

Table 3은 횡방향 이격거리($H_p = 0D, 0.5D, 1D, 2D, 3D$)에 따른 단독말뚝의 겉보기 안전율(apparent factor of safety)을 요약하고 있다. 여기서 겉보기 안전율은 Fig. 3의 하중-침하 관계를 이용하여 산정하였다. $H_p = 0D$ 인 경우 터널굴착 종료 후 말뚝의 최종침하량(설계하중에 의한 침하 + tunnelling-induced 침하)은 16.61 mm로 산정되었다. 따라서 Lee and Ng (2005)이 제안한 방식을 이용하여 하중-침하 관계를 분석하면 겉보기 말뚝하중의 크기를 근사적으로 3,110 kN로 평가할 수 있다. 따라서 말뚝의 겉보기안전율(apparent factor of safety)이 약 1.10로 크게 감소하는 것으로 분석된다($FS = 3,430/3,110$ (극한지지력/겉보기하중) = 1.10). 즉 말뚝선단이 터널 크라운의 바로 위에 존재하는 경우 말뚝의 사용성에 큰 문제가 유발되는 것을 알 수 있다. 특히 군말뚝의 경우 더 큰 침하가 발생하므로 이에 의해 유발될 수 있는 상부구조물의 안정성 저하를 적절히 검토해야 할 것으로 판단된다. 또한 유사한 방식에 의해 말뚝의 이격거리에 따라 겉보기 안전율은 $H_p = 0.5D, 1D, 2D, 3D$ 에 대해 각각 1.18, 1.29, 1.47, 1.59로 나타났다. 터널굴착으로 인한 말뚝 침하의 증가로 말뚝의 겉보기안전율은 설계하중 결정 시 사용된 안전율(2.00)을 기준으로 하여 비교하였을

때 말뚝선단이 영향권 내부에 존재할 경우 평균 대략 41% 감소하며, 영향권 외부에 존재할 경우 평균 24% 정도 감소하는 것으로 분석된다. 따라서 말뚝이 터널 굴착 영향권 내부에 존재하는 경우 터널굴착으로 인해 말뚝의 사용성이 크게 저하될 수 있음을 알 수 있다. 또한 터널굴착 영향권 외부에 말뚝선단이 존재 하더라도 말뚝의 사용성이 저하될 가능성은 여전히 존재하므로 이를 명확히 검토해야 한다고 판단된다.

Table 4는 단독말뚝에 대해 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 정규화된 말뚝의 최대축력($\Delta P/P_0$)을 다양한 말뚝의 횡방향 이격거리에 대해 보여주고 있다. $H_p = 0D, 0.5D$ 의 경우 인장력이 말뚝에 유발되며, $H_p = 1D-3D$ 의 경우 압축력이 발생하였는데, 그 가운데 $H_p = 2D$ 인 경우의 말뚝에서 가장 큰 축력이 발생하였다. 이는 $H_p = 2D$ 의 경우 말뚝상부에서 하향의 전단응력과 말뚝하부에서 상향의 전단응력이 $H_p = 1D, 3D$ 보다 상대적으로 크기 때문으로 분석된다. 그러나 어느 경우라도 말뚝재료의 허용하중에 비해서는 비교적 작은 값이므로 특별한 주의를 요하지는 않는 것으로 분석된다. 이와 같이 말뚝의 횡방향 이격거리에 따른 말뚝의 거동이 서로 상이하므로 터널굴착으로 인한 말뚝의 사용성은 이격거리에 따라 체계적으로 검토해야 한다고 판단된다.

Fig. 10(a)~(c)는 단독말뚝의 횡방향 이격거리 $H_p = 0D, 1D, 2D$ 에 대해 순수하게 터널의 굴착으로 유발된 말뚝과 인접한 지반의 상대변위에 대한 등고선을 보여주고 있다. 여기서 상대변위는 동일한 심도에서

Table 3. Distributions of apparent factors of safety of the single piles

| Division | $H_p = 0D$ | $H_p = 0.5D$ | $H_p = 1D$ | $H_p = 2D$ | $H_p = 3D$ |
|----------------------------|------------|--------------|------------|------------|------------|
| Apparent factors of safety | 1.10 | 1.18 | 1.29 | 1.47 | 1.59 |

Table 4. Maximum normalised tunnelling-induced tensile forces or compressive forces of single piles

| Division | $H_p = 0D$ | $H_p = 0.5D$ | $H_p = 1D$ | $H_p = 2D$ | $H_p = 3D$ |
|---|------------|--------------|------------|------------|------------|
| Max tensile force or compressive force of pile(P/P_0) | -0.17 | -0.08 | 0.02 | 0.03 | 0.02 |

Note: (-)ve: tension, (+)ve: compression

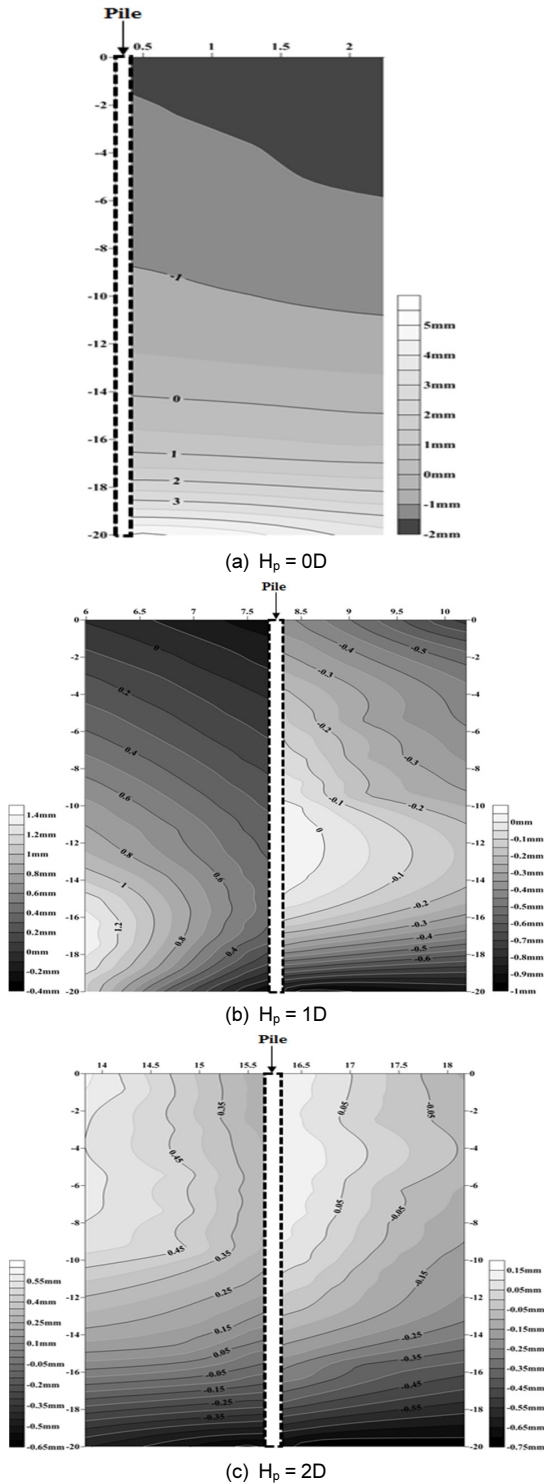


Fig. 10. Distributions of normalised tunnelling-induced axial pile forces with depth

의 인접지반의 침하와 말뚝의 침하의 차이를 의미한다 ((+ve: 지반침하 > 말뚝침하, (-)ve: 말뚝침하 > 지반침하). $H_p = 0D$ 인 경우 말뚝상부에서 말뚝의 침하가 인접지반의 침하를 초과하는데 비해, 말뚝의 하부에서는 인접지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하는 분포를 보인다. 한편 $H_p = 1D, 2D$ 인 말뚝은 $H_p = 0D$ 에 비해 반대의 분포를 보이며, 말뚝을 중심으로 좌측 등고선과 우측 등고선의 분포가 다르게 나타난다. 이는 말뚝에 작용하는 상대변위가 서로 상이하여 말뚝에 대한 인접지반의 상대위치에 따라 말뚝에 작용하는 전단응력 역시 다르다는 것을 의미한다. 이러한 이유로 추후 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동을 분석할 경우 인접지반의 상대위치에 대한 상세한 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 터널근접 시공에 의한 단독말뚝 및 군말뚝의 거동을 다양한 횡방향 이격거리에 대해 3차원 유한요소해석을 실시하여 분석하였다. 이를 통해 터널에 대한 말뚝의 횡방향 상대위치를 순수하게 터널굴착(tunnelling-induced)으로 유발된 말뚝의 침하, 전단응력, 상대변위, 축력분포 및 터널굴착 영향권에 대하여 상세히 고찰하였고, 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 터널굴착 종료 후 단독말뚝 및 군말뚝 중앙말뚝 (centre pile)의 tunnelling-induced 말뚝두부의 침하는 Greenfield 조건의 지표면 침하와 비교하여 각각 대략 51%, 111% 더 큰 것으로 분석되었다. 또한 말뚝이 터널굴착 영향권 내부에 존재하는 경우 말뚝의 침하속도는 터널굴착이 말뚝선단의 하부 인근을 통과하는 $Y/D = -0.5 \sim +0.5$ 구간에서 진행 될 때 가장 크게 변하는 것으로 분석되었다. 말뚝이 터널굴착 영향권 내부에 존재하는 경우 tunnelling-induced 말뚝의 침하는 Greenfield 조건

의 지표면 침하를 초과하는데 비해, 영향권 외부에 존재하는 경우는 그와는 반대의 경향을 보였다. 즉 말뚝의 거동은 터널굴착 영향권을 중심으로 서로 상이한 양상을 보였으며, $H_p = 0D$ 말뚝의 경우 말뚝침하가 말뚝이 영향권 외부에 존재하는 $H_p = 2D$ 말뚝에 비해 대략 2.54-3.40배 증가하였다.

2. 군말뚝의 경우 단독말뚝에 비해 tunnelling-induced 말뚝의 침하는 증가하는데 비해, tunnelling-induced 말뚝의 축력은 말뚝과 인접지반이 일종의 블록과 유사한 형태로 거동하여 전단응력 전이가 크지 않으므로 매우 작게 발생하였다. 특히 터널굴착에 의한 지반손실율이 큰 경우 말뚝에서 횡방향으로 약간 이격된 군말뚝의 경우 상부구조물의 사용성에 유해한 영향을 줄 수 있는 정도의 침하가 발생할 수 있을 것으로 분석되었다.
3. 군말뚝 내 말뚝의 거동은 터널로부터의 횡방향 이격거리는 물론 군말뚝 내에서의 위치(중앙, 모서리)에도 영향을 받는 것으로 분석되었다. 말뚝이 터널굴착 영향권 내부에 존재하는 $H_p = 0D, 0.5D$ 의 경우 말뚝의 상부에는 상향의 전단응력이, 말뚝의 하부에는 하향의 전단응력이 발현되었으며, 말뚝이 영향권 외부에 존재하는 $H_p = 2D, 3D$ 경우 이와는 반대의 분포를 보였다. 말뚝이 영향권을 관통하는 $H_p = 1D$ 인 경우 말뚝과 인접지반에서의 상대전단변위가 매우 작게 발생하므로 전단응력 전이가 거의 발생하지 않은 것으로 분석되었다.
4. 터널굴착으로 인한 단독말뚝의 겉보기안전율 변화 및 말뚝에 작용하는 최대 인장력/압축력을 분석한 결과 말뚝의 사용성에 가장 큰 영향을 받는 말뚝의 위치는 $H_p = 0D$ 인 경우로 tunnelling-induced 침하로 인해 겉보기안전율이 설계하중 작용조건에 비해 대략 45% 감소하였다. 또한 말뚝이 영향권 외부에 존재하더라도 $H_p = 2D$ 에 위치한 말뚝의 경우 $H_p = 1D$ 보다 큰 tunnelling-induced 압축력이 발생하였다. 그러나 tunnelling-induced 압축력의 크기는 말뚝재료의 허용하중에 대해서는 비교적

작은 값이므로 말뚝자체에는 별다른 문제를 유발시키지는 않을 것으로 분석된다. 이는 말뚝이 영향권의 외부에 존재하는 경우라 해도 말뚝의 사용성이 저하될 위험성은 여전히 존재함을 의미한다. 따라서 향후 터널굴착 영향권에 대한 연구가 지속적으로 수행될 필요가 있는 것으로 판단된다.

References

1. Attewell, P.B., Yeates, J., Selby, A.R. (1986), "Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures", Blackie, Glasgow. pp. 277-279.
2. 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. Proc. of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress Singapore, pp. 1-8.
3. Davisson, M.T. (1972), "High capacity piles. proceedings of lecture series in innovations in foundation construction", ASCE, Illinois Section, pp. 81-112.
4. Dias, T.G.S., Bezuijen, A. (2014a), "Pile tunnel interaction: Literature review and data analysis", ITA World Tunnel Congress 2014, pp. 1-10.
5. Dias, T.G.S., Bezuijen, A. (2014b), "Pile-tunnel interaction: A conceptual analysis", 8th International symposium on Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, CRC Press, Vol. 1, pp. 251-255.
6. 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.
7. 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, pp.105-119.
8. Jacobsz, S.W. (2002), "The effects of tunnelling on piled foundations", PhD thesis, University of

- Cambridge, pp. 1-348.
9. Jacobsz, S.W., Standing, J.R., Mair, R.J., Hagiwara, T., Sugiyama, T. (2002), "Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles", In Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Toulouse, pp. 49-56.
 10. 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.
 11. 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 5th International Conf. of TC 28 of the ISSMGE, pp. 123-133.
 12. Lee, C.J. (2012a), "Three-dimensional numerical analyses of the response of a single pile and pile groups to tunnelling in weak weathered rock", Tunnel Underground Space Technology, Vol. 32, pp. 132-142.
 13. 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.
 14. 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.
 15. 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.
 16. Lee, G.T.K., Ng, C.W.W. (2005), "The effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 2, pp. 193-201.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Marshall, A.M. (2009), "Tunnelling in sand and its effect on pipelines and piles", PhD thesis, University of Cambridge.
 20. 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.
 21. Ng, C.W.W., Lu, H., Peng, S.Y. (2013), "Three-dimensional centrifuge modelling of twin tunnelling effects on an existing pile", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 35, pp. 189-199.
 22. 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.
 23. Pang, C.H. (2006), "The effects of tunnel construction on nearby pile foundation", PhD thesis, The National University of Singapore.
 24. Plaxis (2012), "Reference manual", Plaxis 3D user's manual, pp. 122-124.
 25. Selemetas, D. (2005), "The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling", PhD thesis, University of Cambridge, pp. 1-302.
 26. Williamson, M.G. (2014), "Tunnelling effects on bored piles in clay", PhD thesis, University of Cambridge UK.