

견고한 점토층에서 실시된 터널근접시공으로 인한 단독말뚝의 거동에 대한 연구

A Study on the Behaviour of Single Piles to Adjacent Tunnelling in Stiff Clay

전 영 진¹⁾ · 이 철 주[†]

Youngjin Jeon · Cheolju Lee

Received: February 16th, 2015; Revised: March 4th, 2015; Accepted: April 21st, 2015

ABSTRACT : In the current work, a series of three-dimensional (3D) numerical modelling has been performed in order to study the effects of the relative locations of tunnels with respect to the position of pile tips which governs the behaviour of pre-existing, adjacent single piles. In the numerical analyses, several governing factors, such as tunnelling-induced pile head settlements, relative displacements, volume losses, axial pile forces, interface shear stresses and apparent factors of safety have been analysed. When the pile tips are inside the tunnelling influence zone, of which the pile tip location is considered with respect to the tunnel position, tunnelling-induced pile head settlements are larger than the ground surface settlements, resulting in tunnelling-induced tensile pile forces. On the contrary, when the pile tips are outside the influence zone, compressive pile forces associated with downward shear stresses at the upper part of the piles are developed. Based on computed load and displacement relation of the pile, the apparent factors of safety of the piles inside the tunnelling influence zone have been reduced by 36% in average. The shear transfer mechanism based on the relative tunnel locations has been analysed in great detail by considering tunnelling-induced pile forces, interface shear stresses and the apparent factors of safety.

Keywords : 3D numerical analysis, Piles, Pile-soil interaction, Tunnel, Tunnelling influence zone

요 지 : 본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 수행하여 터널굴착에 의한 말뚝의 거동변화를 지배하는 말뚝선단에 대한 터널의 상대 위치를 고려하여 분석하였다. 수치해석 결과를 순수하게 터널굴착으로 발생한(Tunnelling-induced) 말뚝두부의 침하, 상대변위, 체적손실률(Volume loss), 말뚝의 축력, 전단응력 그리고 겹보기안전율을 등을 분석하였다. 터널과 말뚝선단의 상대위치를 고려했을 때 말뚝 선단이 터널굴착으로 인한 지반침하 영향권 내부에 존재하는 경우 Tunnelling-induced 말뚝두부의 침하는 지표면의 침하보다 크게 나타났으며, 이는 말뚝에 Tunnelling-induced 인장력을 발생시켰다. 반대로 말뚝선단이 터널굴착으로 인한 지반침하 영향권 외부에 존재할 경우, 말뚝상부에서 유발된 하향의 전단응력으로 인해 말뚝에는 Tunnelling-induced 압축력이 작용하였다. 수치해석을 통해 분석된 하중-변위 관계를 이용하여 겹보기안전율을 분석한 결과 말뚝선단이 터널굴착으로 인한 지반침하 영향권 내부에 존재할 경우 말뚝의 겹보기안전율은 평균 약 36% 감소하는 것으로 나타났다. 터널의 상대위치에 따른 전단응력전이 메커니즘을 Tunnelling-induced 말뚝축력, 전단응력과 말뚝의 겹보기안전율을 고려하여 심도 있게 고찰하였다.

주요어 : 말뚝, 말뚝-지반 상호거동, 3차원 수치해석, 터널, 터널굴착 영향권

1. 서 론

사용 중인 말뚝기초에 근접하여 터널이 시공되는 경우 터널굴착에 의한 지반의 변위로 말뚝-인접지반 사이에 상대 변위(전단응력전이, Shear stress transfer)가 유발되며 축력 분포가 변하게 된다. 최근 국내에서도 이러한 상황이 도심지에서 실시되는 터널의 설계 및 시공 시 자주 발생하고 있으며, 다양한 연구가 수행되어 왔다(Lee, 2008; Cho, 2012;

Lee, 2012; Korea Rail Network Authority, 2012). Dias & Bezujien(2014a)은 터널굴착으로 인한 인접말뚝의 거동을 명확히 분석하지 못한 상태에서 터널 시공이 실시되는 경우가 자주 발생하기 때문에 이에 대한 연구가 필요한 실정이라고 주장하였다. 그동안 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동 변화에 대한 다양한 연구가 이론연구, 실내 및 원심모형실험 그리고 수치해석 등을 통해 수행되어 왔다(Lee, 2012; Dias & Bezujien, 2014a; Mair & Williamson, 2014). Lee(2012)에

1) Department of Civil Engineering, Kangwon National University

† Department of Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : cj32@kangwon.ac.kr)

따르면 일반적으로 말뚝의 하부에서 실시되는 터널굴착은 말뚝의 측면에서 실시되는 터널굴착보다 말뚝의 사용성에 더 유해한 영향을 발생시킨다고 알려져 있다. 이러한 연구의 성과에 의하면 말뚝의 축력분포는 말뚝-인접지반 사이에서의 전단응력전이로 인해 변하고, 말뚝에 대한 터널의 상대위치에 따라 침하 혹은 횡방향 변형이 발생하는 것으로 보고되었다. 지금까지의 연구에 의하면 터널굴착에 의한 말뚝의 거동은 말뚝선단의 위치에 대한 터널의 상대위치에 따라 큰 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(Jacobsz, 2002). 그동안 여러 연구자들이 터널굴착에 의한 지반의 침하 영향을 제시하였다(Attewell et al., 1986; Jacobsz, 2002; Kaalberg et al., 2005; Selemetas, 2005). Fig. 1은 Kaalberg et al.(2005)이 제시한 점토지반의 터널굴착 영향을 말뚝두부침하 및 지표면 침하의 크기를 비교하여 세 개의 구역으로 구분하여 보여주고 있다.

Dias & Bezuijen(2014a, 2014b)은 터널굴착으로 유발된 말뚝의 거동과 관련된 기존의 연구를 종합적으로 분석하였다. 이에 의하면 말뚝선단이 터널상부에 존재하고 터널의 횡방향 이격거리가 짧은 경우 말뚝두부의 침하는 지표면의 침하를 초과하는 데 비해, 터널의 횡방향 이격거리가 증가한 경우 지표면의 침하가 말뚝두부의 침하를 초과한다. 말뚝선단이 터널상부에 존재하고 터널의 횡방향 이격거리가 짧은 경우 말뚝에는 인장력이 발생하며, 말뚝선단으로부터 터널의 횡방향 이격거리가 증가한 경우 말뚝에는 압축력이 발생한다고 보고하였다. 이와 같이 터널굴착에 의한 말뚝의 거동에 있어서 가장 중요한 지배인자는 터널과 말뚝선단의 상대적 위치라고 분석되었다.

기존연구의 경우 터널의 위치를 고정시킨 후 말뚝선단의 상대위치를 변화시키면서 그 거동은 분석해 왔으나, 사용 중인 말뚝선단의 위치를 변경시킨다는 것은 논리적으로 모순이다. 또한 기존의 연구들은 터널굴착으로 인한 영향권 분석 시 단순하게 말뚝의 침하량만을 고려했으며, Dias &

Bezuijen(2014a, 2014b)의 연구를 제외하고는 매우 제한적이기 때문에 영향권에 대해 아직까지 명확하게 규명하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 터널굴착으로 발생한 지반침하 영향권을 기준(말뚝선단이 영향권 내부에 있는 경우, 영향권 외부에 있는 경우)으로 말뚝의 거동을 심도 있게 고찰하고, 고정된 말뚝선단의 위치에 대한 터널의 상대위치(횡방향 이격거리)를 변경시키면서 터널근접 시공에 의한 말뚝에 미치는 영향을 심도 있게 고찰하기 위해 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 이를 위해 점토지반에서 실시되는 터널굴착으로 인한 Tunnelling-induced 말뚝의 침하는 물론이고 상대변위, 지반손실률(Volume loss), 말뚝의 축력, 전단응력 그리고 겉보기안전응력(Apparent pile capacity) 등에 대해 상세히 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 유한요소해석 mesh 및 경계조건

본 연구에서는 3차원 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 3D (Plaxis, 2012)를 이용하여 터널굴착에 따른 말뚝의 거동을 말뚝선단의 위치에 대한 터널의 횡방향 이격거리를 변화시키면서 분석하여 터널굴착 영향권을 고찰하였다. Fig. 2(a)는 해석에서 적용된 대표유한요소해석 Mesh를 제시하며, Fig. 2(b)는 해석 단면도를 보여주고 있다. 본 연구에서는 Devriendt & Williamson(2011)의 터널-말뚝의 상호거동과 관련된 연구에서 적용한 경계조건 및 지반조건을 채택하여 견고한 점토층에 기시공되어 있는 말뚝의 하부에서 수행된 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동변화를 고찰하였다. 이에 따라 터널의 직경(D)은 7m이며, 터널 중심부는 지표면으로부터 25m 하부에 위치하고 있으며 말뚝의 직경(d)은 0.6m이며 말뚝의 길이(L)는 20m이다. 지반은 견고한 점토층으로 구성되어 있고 본 연구에서는 말뚝선단의 위치를 고정시킨 조건에서 터

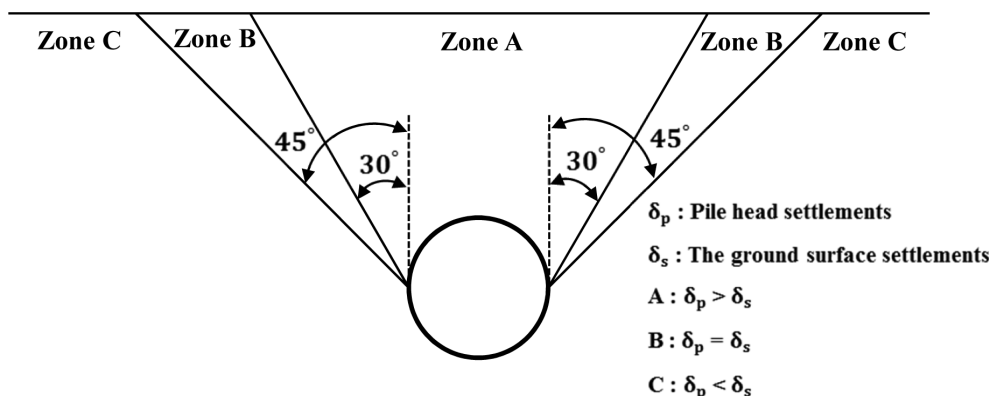


Fig. 1. Influence of pile toe locations on observed pile settlements (undrained condition) (Kaalberg et al., 2005)

널의 위치(횡방향 이격거리)를 변화시키면서 해석을 수행하였다($X_p=0D, 1D, 2D, 3D$ 및 $4D$). Fig. 2(c)에 나타난 것과 같이 본 연구에서는 총 5개 조건의 터널의 상대위치에 대해 분석하였다. 모든 해석은 Devriendt & Williamson(2011)이 가정한 바와 같이 비배수 조건하에서 실시되었다.

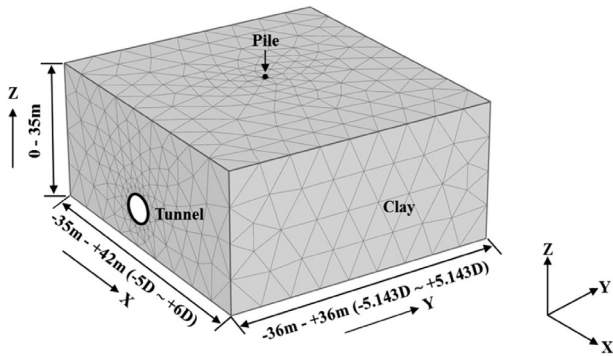


Fig. 2(a). A representative 3D finite element mesh used in the analyses (D: tunnel diameter)

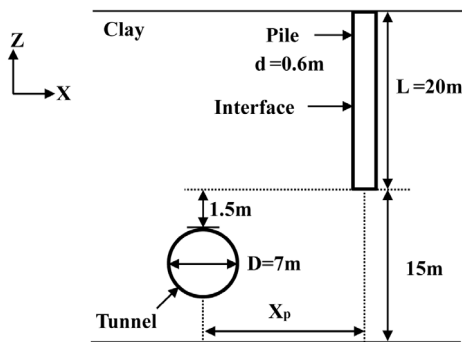


Fig. 2(b). Sectional view of analysis geometry

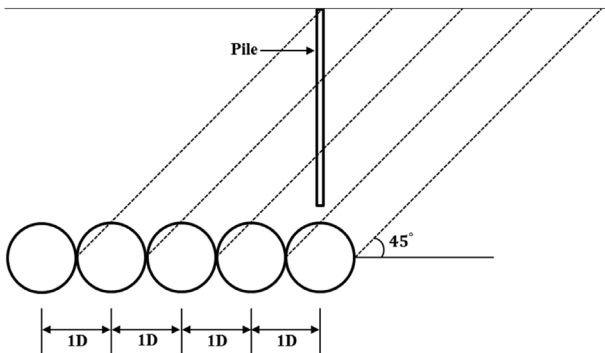


Fig. 2(c). Tunnelling influence zone on piles

2.2 구성모델 및 물성치

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 Devriendt & Williamson (2011)이 가정한 지반 및 재료의 물성치를 그대로 적용하였다. 점토의 비배수전단강도(s_u)는 심도별로 그 크기가 증가하는 것을 고려하여 $s_u(\text{kPa})=50+10z(\text{m})$ 로 가정하였다. 여기서 z 는 지표면에서 임의의 심도까지의 거리이다. 말뚝 및 숏크리트에는 탄성 모델이 적용되었고, 점토에는 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 따르는 탄-소성 모델을 적용하였다. Table 1은 본 연구에서 적용한 지반, 말뚝 및 숏크리트의 모델 및 물성치를 제시하고 있다. 터널굴착에 의한 말뚝의 거동을 명확하게 분석하기 위하여 말뚝-지반 경계면에는 Plastic yielding (소성항복)이 발생하는 경우 Slip(미끄러짐)의 발생을 허용하는 Interface element(경계요소)를 적용하여 말뚝-인접지반 경계면에서의 전단응력전이 과정을 분석할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 모든 응력 성분이 전응력으로 표현되는 비배수 해석(Undrained-C 방법)을 통하여 수행되었다. Undrained-C 방법은 비배수조건의 탄성계수(E_u)와 포와송비(ν_u) 및 비배수 전단강도(s_u)를 적용한다(Plaxis, 2012). Devriendt & Williamson (2011)은 점토의 주면마찰력을 평가하기 위해 α 값을 0.5로 가정하였으므로, 본 연구에서는 강도감소계수(Strength reduction factor) R_{int} 로 0.5를 적용하였다.

2.3 수치해석 절차

수치해석에서는 말뚝의 시공에 의한 근입효과 및 이로 인한 지반의 응력변화는 포함시키지 않았다. 따라서 본 연구에서 가정한 말뚝은 현장타설말뚝의 거동과 유사하다고 가정할 수 있다. 터널의 굴착은 종방향(Y)에 대하여 $-5.14D$ 에서 $+5.14D(-36m \sim +36m)$ 구간 사이에서 실시되었다(Fig. 2(a)). 터널굴착에 앞서 말뚝의 두부에는 Devriendt & Williamson (2011)이 적용한 상재하중인 $1,000\text{kN}$ 을 작용시켰다. 이후 터널의 굴착은 각 단계별로 3m 씩 실시되어 총 24단계에 걸쳐서 실시되었다. 각 단계별로 터널굴착이 종료된 이후 굴착면에는 두께 200mm 의 숏크리트를 타설하였으며, 숏크리트는 15GPa 의 탄성계수를 가지는 것으로 가정하였다. 해석

Table 1. Material parameters used in the numerical modelling

Material	Model	γ_t (kN/m ³)	K_0	ν	E' (GPa)	E_u (MPa)	s_u (kPa)
Clay	Mohr-Coulomb	20	1	0.495	-	60	$50+10z$
Tunnel lining	Elastic	25	-	0.20	15	-	-
Pile		25	-	0.20	20	-	-

Note: γ_t (Unit weight of material), K_0 (Lateral earth pressure coefficient at rest), ν (Poisson's ratio), E' & E_u (Young's modulus), s_u (Undrained shear strength)

결과의 분석에 있어 임의의 심도에서 말뚝의 축력 P 는 $\sigma_{zz,avg} \times A_p$ 으로 산정하였다. 여기서 $\sigma_{zz,avg}$ 는 특정 심도에서 말뚝 수직응력의 값을 평균한 것이고, A_p 는 말뚝의 단면적이다. 한편 말뚝-지반의 경계면에서의 상대변위 및 전단응력은 임의의 심도에서의 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 말뚝의 하중-침하관계를 보여주는데 말뚝두부의 하중이 2,500kN 부근에 도달할 때까지는 말뚝하중과 말뚝두부침하 사이에 거의 선형적인 관계를 보이고 있다. 그러나 이를 초과하는 하중이 작용할 경우 말뚝에 급격한 침하가 발생하고 있다. Devriendt & Williamson (2011)은 별도의 설명 없이 말뚝의 설계지지력을 1,000kN으로 가정하였는데, 본 연구에서는 말뚝의 하중-침하 관계를 고찰하고 파괴하중(Failure load)을 평가하기 위해 일반적으로 널리 사용되는 Davisson(1972)의 방법을 적용하여 이를 3,130kN으로 산정하였다. 여기서 산정된 파괴하중을 Devriendt & Williamson(2011)이 가정한 설계지지력 1,000kN으로 나누었을 경우 말뚝의 안전율은 약 3.13으로 평가되는데 이는 Devriendt & Williamson(2011)이 자신들의 해석에서 가정한 3.5의 안전율보다는 약간 작은 값이다($FS=3,130/1,000=3.13$). 또한 상재하중 1,000kN 작용하에서 말뚝두부의 침하량(δ_i)은 6.7mm이다.

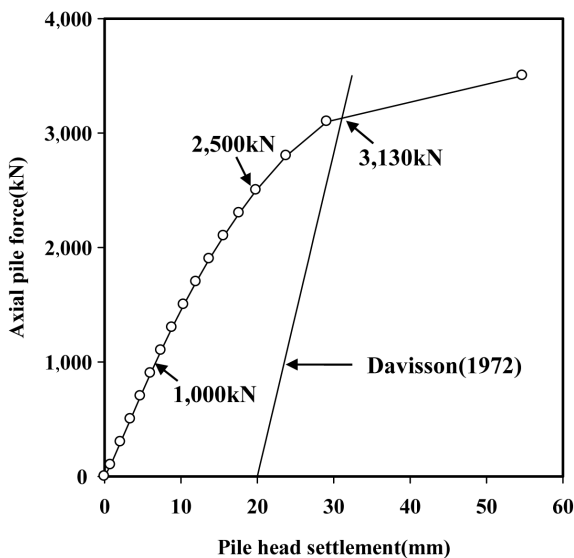


Fig. 3. Relation of axial pile force and pile head settlement

3.2 말뚝 및 지반 침하

Fig. 4(a)는 말뚝으로부터 다양한 터널의 횡방향 이격거리($X_p=0D-4D$)에 대한 해석을 통해 산정된 터널굴착 단계별 정규화된 말뚝두부의 침하 $\delta_{net}/\delta_{gr,max}$ 및 $\delta_g/\delta_{gr,max}$ 분포를 보여주고 있다. 여기서 δ_{net} 은 순수하게 터널굴착에 의해서 발생한 터널굴착 단계별 말뚝두부의 침하(Tunnelling-induced pile head settlements)를 나타내며, δ_g 는 지중에 말뚝이 존재하지 않는 Greenfield 해석조건에서 터널굴착에 의해 발생한 $X_p=0D$ 위치의 터널굴착 단계별 지표면 침하를 의미한다. 또한 $\delta_{gr,max}$ 는 Greenfield 해석조건에서 터널굴착에 의한 지표면 최대침하를 의미한다($\delta_{gr,max}=3.6mm$). Fig. 4(a)는 정규화된 침하 $\delta_{net}/\delta_{gr,max}$ 및 $\delta_g/\delta_{gr,max}$ 가 터널의 굴착이 진행될수록 점차 증가하고 있음을 보여주고 있다. 터널굴착 종료 후 터널의 수직이격거리가 증가 할수록 $\delta_{net}/\delta_{gr,max}$ 는 점차 감소하여 $X_p=0D, 1D, 2D, 3D$ 및 $4D$ 의 경우 각각 1.40, 1.13, 0.83, 0.57 및 0.38로 분석되었다. 특히 $X_p=0D$ 인 경우 δ_{net} 은 Greenfield 조건의 지표면 침하와 비교하여 약 40% 더 큰 것으로 분석되며, $X_p=4D$ 인 경우 δ_{net} 은 약 63% 작은 것으로 분석된다. 말뚝두부의 침하는 $X_p=0D-1D$ 의 경우 Greenfield 조건의 지표면 침하를 초과하지만 $X_p=2D-4D$ 의 경우는 Greenfield 조건의 침하보다 작게 발생하였다. 이러한 경향은 Fig. 1에 나타난 Kaalberg et al.(2005)의 연구결과와 일치한다. 말뚝두부의 침하는 말뚝으로부터 터널의 횡방향 이격거리가 증가할수록 감소하여 완만한 형태를 나타내고 있다. $X_p=0D-1D$ 의 경우 말뚝두부의 침하가 증가하는 경향을 분석한 결과 각 터널굴착 단계에서 침하속도가 가장 크게 발생하는 경우는 터널이 말뚝선단의 바로 아래 지점을 통과하는 $Y/D=-0.4 \sim +0.4$ 부근인 것으로 나타났으며 그 이후로는 침하증가의 속도는 현저히 감소되는 것으로 분석되었다. 터널굴착이 $Y/D=0$ 에 도달했을 때 ($\delta_{net}/\delta_{gr,max}$)는 터널굴착 종료 후 최종침하의 약 70% 정도가 발생하였는데 이러한 경향은 Lee & Ng(2005)의 연구결과와 유사하다. Devriendt & Williamson(2011)은 $X_p=0D$ 인 경우 다양한 방법을 통해 Tunnelling-induced 말뚝두부의 침하를 17.2-19.2mm로 평가하였는데 이 값들은 본 연구에서 산정된 5.1mm에 비해 매우 큰 값인데 이는 본 연구에서 산정된 지반손실률(3.4장 참조)이 Devriendt & Williamson(2011)이 가정한 값의 약 50%이며 비배수조건의 해석을 수행했기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 4(b)는 말뚝으로부터 터널의 다양한 수평이격거리($X_p=0D-4D$)에 대해 터널굴착 종료 후 정규화된 Tunnelling-induced 말뚝 및 지표면 침하 $\delta_{net}/\delta_{gr,max}$ 및 $\delta_g/\delta_{gr,max}$ 의 횡방향분포를 보여주고 있다. 지표면의 침하는 말뚝으로부터의 이격거리가 증가할수록 Gaussian 침하형태와 유사해지는 것

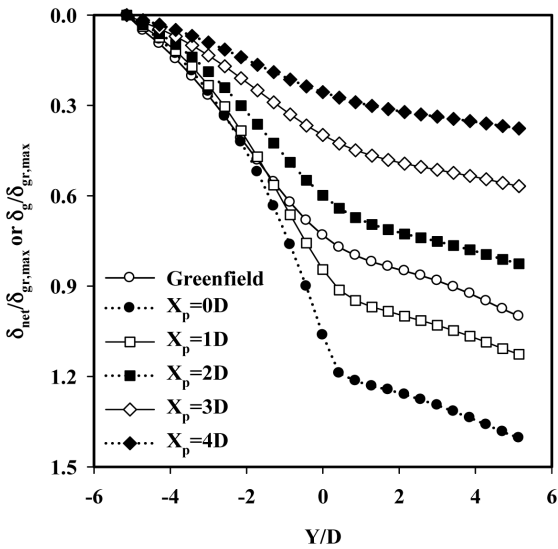


Fig. 4(a). Distributions of normalised tunnelling-induced pile head and soil surface settlement with tunnel advancement

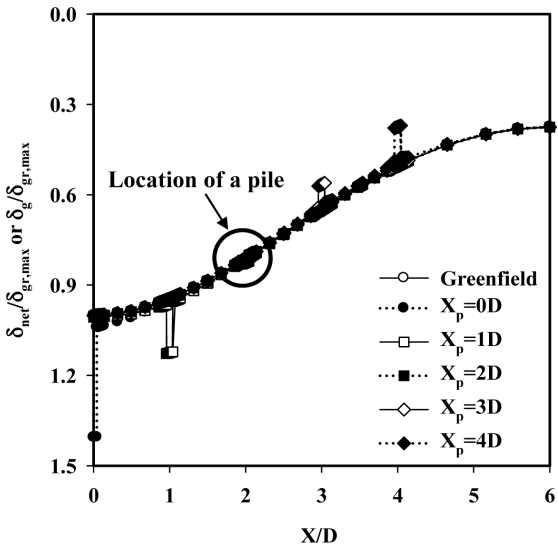


Fig. 4(b). Distributions of normalised tunnelling-induced settlement troughs in transverse direction

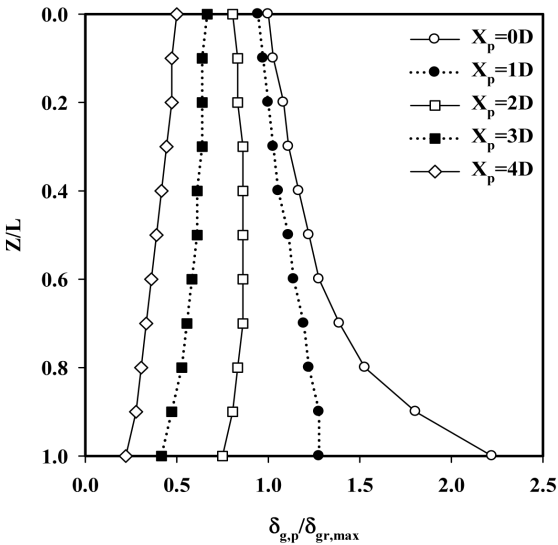


Fig. 4(c). Distributions of normalised subsurface soil settlements with depth

을 확인 할 수 있다. $X_p=0D-1D$ 에서는 말뚝의 침하가 지표의 침하를 초과하는 데 비해, 터널의 횡방향 이격거리가 증가하여 $X_p=2D$ 부터는 말뚝의 침하가 지표면의 침하보다 작게 발생하게 된다. 특히 이런 경향은 $X_p=3D-4D$ 인 경우 명확하게 나타난다. $X_p=2D$ 인 경우 말뚝과 인근지반에서의 상대변위의 크기가 서로 유사하므로 전단응력전이의 정도가 작아서 말뚝-인접지반의 경계면에서의 전단강도의 극히 일부만이 발휘될 것으로 판단된다. 이는 이후 상세히 설명할 것이다. 그에 비해 $X_p=3D-4D$ 인 경우는 전단응력 전이가 비교적 크게 발생할 것으로 추정된다.

Fig. 4(c)는 Greenfield 조건의 $X_p=0D-4D$ 위치에서의 터널굴착 종료 후 지반의 침하를 정규화된 $\delta_{g,p}/\delta_{gr,max}$ 에 대하여 정규화된 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 $\delta_{g,p}$ 는 Greenfield 조건에서 말뚝위치에서의 심도별 지반침하를 의미한다. $X_p=0D$ 및 $X_p=1D$ 위치의 지반의 침하는 심도가 증가할수록 점차 증가하여 말뚝선단에서 각각 $\delta_{g,p}/\delta_{gr,max}=2.22, 1.28$ 인 것을 확인할 수 있다. 이는 터널굴착으로 인한 지반의 침하는 지표로 갈수록 점차 감소한다는 것을 나타낸다. 그러나 $X_p=2D-4D$ 의 경우는 $X_p=0D-1D$ 의 경우와는 반대로 지표를 향할수록 지반의 침하가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. $X_p=0D$ 인 경우 Devriendt & Williamson(2011)이 제안한 2/3 depth 방법을 이용하여 평가한 Tunnelling-induced 말뚝의 침하는 4.8mm인데 이는 수치해석 결과인 5.1mm와 매우 유사한 것으로 분석된다.

3.3 경계면에서의 상대변위 분포

Fig. 5(a)는 설계하중 작용단계 및 터널굴착 완료 후 말뚝-지반 사이의 경계면에서 발생한 상대변위의(경계면에서 말뚝의 침하(δ_{pile})-인접지반의 침하(δ_{soil})) 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대해 터널의 횡방향 이격거리(X_p)에 따라 보여주고 있다. 터널굴착이전 말뚝두부에 작용한 설계하중(1,000kN)으로 인해 말뚝 전체 구간에서 말뚝의 침하가 인접지반의 침하를 초과한다. 터널의 굴착이 완료된 후 $X_p=0D-1D$ 인 경우 대략 0-0.7L 구간에서 상대변위가 증가하며, 그 하부에서는 감소하는 경향을 보인다. 그에 비해 $X_p=2D$ 인 경우 상대변위의 증감이 매우 작으므로 전단응력 전이 역시 작을 것으로 추정된다. 그러나 $X_p=3D-4D$ 인 경우 말뚝의 상부에서는 상대변위가 약간 감소하는데 비해, 하부에서는 오히려 증가하는 경향을 보인다. 즉 터널의 상대위치에 따라 상대변위의 변화경향이 상이하므로 순수하게 터널의 굴착으로 인해서만 유발된 상대변위(Tunnelling-induced relative shear displacement)를 검토하기 위하여 말뚝두부하중의 영향을 제거할 필요가 있다.

Fig. 5(b)는 Tunnelling-induced 상대변위의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대해 터널의 횡방향 이격거리에 따라 보여주고 있다. $X_p=0D-1D$ 말뚝의 경우 터널굴착 종료 후 말뚝두부에서 대략 $Z/L=0.6-0.7$ 부근까지는 말뚝의 침하가 인접지반의 침하를 초과하고 있으며, 그 하부에서는 반대의 경향을 보인다. 즉 $Z/L=0.6-0.7$ 부터 말뚝선단에서는 터널굴착으로 인한 지반침하로 인해 말뚝에 하향의 마찰력(Downward acting skin friction)이 작용하며, 반대로 말뚝두부에서 $Z/L=0.6-0.7$ 까지는 지반이 말뚝의 침하에 대해 저항하는 형태의 상향의 마찰 저항력(Upward resisting skin friction)이 발견되는 것으로 판단된다. 그러나 $X_p=2D$ 인 경우 말뚝두부 인근 구간을 제외하고는 상부에서는 하향의 상대변위가 발생하며, 선단 부근에서는 상향의 상대변위가 발생한다. 한편 $X_p=3D-4D$ 의 경우 말뚝두부에서 $Z/L=0.45$ 까지는 지반

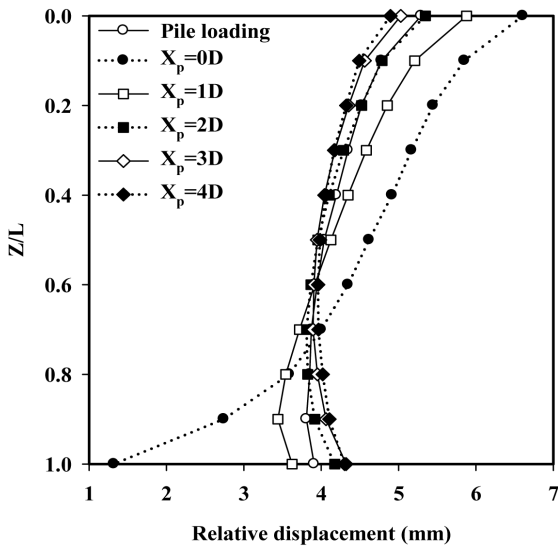


Fig. 5(a). Distributions of relative displacement with depth

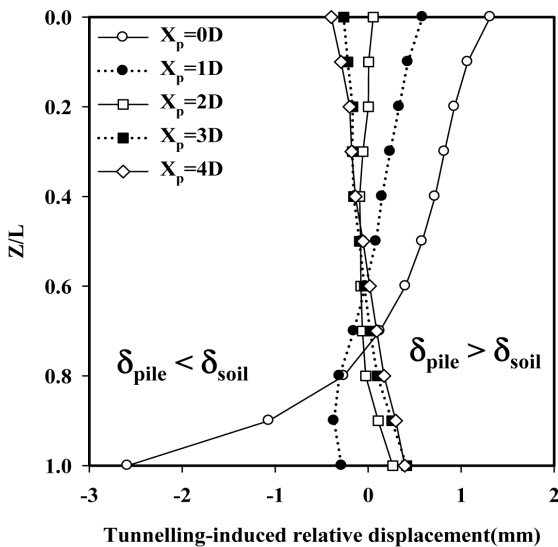


Fig. 5(b). Distributions of tunnelling-induced relative displacement with depth

의 침하가 말뚝의 침하를 초과하고, 그 아래 구간에서는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하는 분포를 보인다. 즉 말뚝의 상부에서는 터널굴착으로 인한 지반침하와 관련된 하향의 마찰력(Downward acting skin friction)이, 말뚝의 하부 구간에서는 말뚝의 침하에 저항하는 형태의 상향의 마찰력(Upward resisting skin friction)이 발생하는 것으로 판단되는데 이는 말뚝의 대부분이 터널굴착에 의한 지반침하 영향권 외부에 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 침하가 진행 중인 연약지반에 근접된 말뚝에 발생하는 부마찰력이 발생하는 메커니즘과 매우 유사하다(Lee, 2012).

Fig. 6(a) 및 6(b)는 터널이 말뚝에서 가장 가까운 경우($X_p=0D$) 및 가장 멀리 이격된 경우($X_p=4D$)에 대해 순수하게 터널의 굴착으로 유발된 말뚝 및 인접지반의 침하에 대한 등고선을 보여주고 있다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있는 것처럼 $X_p=0D$ 인 경우 말뚝의 상부에서 말뚝의 침하는 주변지반의 침하를 초과하는 데 비해, 말뚝의 하부에서는 주변지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하는 분포를 보인다. 이와는 반대로 $X_p=4D$ 인 경우 말뚝의 상부에서는 주변지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하며, 말뚝의 하부에서는 말뚝의 침하가 주변지반의 침하를 초과하는 경향을 보인다(Fig. 6(b)). 이는 앞서 언급한 말뚝과 인접지반에서의 침하 특성과 일치한다는 것을 확인할 수 있다.

3.4 체적손실률과 말뚝두부 및 지표면 침하

Fig. 7은 터널굴착 종료 후 Greenfield 조건의 최대지반침하 $\delta_{gr,max}$ 로 정규화된 순수하게 터널굴착에 의한 말뚝두부의 침하 $\delta_{net}/\delta_{gr,max}$ 및 Greenfield 조건의 지표면침하 $\delta_g/\delta_{gr,max}$ 와 체적손실률(Volume loss)과의 상관관계를 보여주고 있다. 여기서 체적손실률은 터널굴착 종료 후 터널굴착으로 인한 단

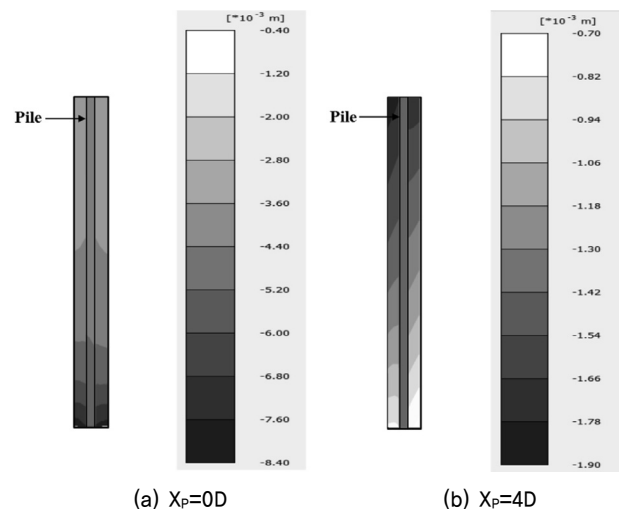


Fig. 6. Settlements of pile and adjacent soil

위 폭 당 횡방향 지표면 침하를 단위 폭 당 터널의 체적으로 나타내는 값이다. 본 연구에서 산정된 터널굴착이 종료된 후의 지반손실률은 Greenfield 조건 및 말뚝이 존재하는 경우에 대해 각각 약 0.52% 및 0.55%(Tunnelling-induced volume loss)인데 이는 Devriendt & Williamson(2011)이 해석에서 가정한 지반손실률 1.0%의 절반 정도의 크기를 갖는다. Greenfield 조건의 경우 지표면의 침하는 체적손실률과 거의 선형적인 관계를 보이고 있음에 비해, $X_p=0-1D$ 인 경우 비선형적인 관계를 보이는데 터널이 말뚝선단 인근을 관통할 때 말뚝의 침하속도가 빠르지만 말뚝선단을 관통 후($Y/D=0$) 말뚝으로부터의 종방향 이격거리가 멀어질수록 말뚝의 침하속도 역시 감소하는 경향을 보인다. 한편 $X_p=2D-4D$ 인 경우 Greenfield 조건의 경우와 유사하게 말뚝침하와 지반손실률 사이에 거

의 선형적인 관계가 관찰된다.

3.5 말뚝의 축력 분포

Fig. 8(a)는 터널의 횡방향 이격거리가 $X_p=0D-4D$ 일 때 터널굴착 완료 후 산정된 정규화된 말뚝의 축력(P/P_a)의 분포를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 P 는 임의의 위치에서의 말뚝의 축력, P_a 는 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중(1,000kN)이다. 설계하중 작용하에서 주변마찰력의 발현으로 인해 말뚝축력은 말뚝의 심도가 증가할수록 점진적으로 감소하고 있고 약 80%의 설계하중이 주변마찰력에 의해 지지되어 말뚝선단에는 약 20%의 하중만이 발생함을 알 수 있다. $X_p=0D$ 및 $1D$ 인 경우 터널굴착 종료 후 말뚝의 축력이 감소된 것에 비해, $X_p=2D-4D$ 인 경우 말뚝의 축력은 $X_p=0D$ 및 $1D$ 인 경우에 비해 오히려 약간 증가한 것을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 순수하게 터널굴착에 의해 유발된(Tunnelling-induced) 정규화된 말뚝의 축력(P_{net}/P_a)을 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 P_{net} 은 순수하게 터널굴착에 의한 말뚝의 축력이다. $X_p=0D$ 및 $1D$ 인 경우 $P_{net,max}/P_a$ 는 각각 -0.1 및 -0.03의 크기를 가진 인장력 형태의 Tunnelling-induced 축력이 발생하는데, 이는 압축력이 발생하는 $X_p=3D$ 및 $4D$ 와는 상이하다($P_{net,max}/P_a=0.021, 0.025$). 이는 앞서 언급한 바와 같이 말뚝의 침하에 비해 주변지반의 침하가 더 크게 발생하게 되면 말뚝에 부마찰과 유사한 형태의 하향의 마찰력이 발생하기 때문으로 판단된다(Lee, 2012). $X_p=2D$ 인 경우 앞서 설명한 말뚝과 지반 침하의 차가 크지 않아 터널굴착에 따른 말뚝의 축력분포가 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 8(b)에는 Selemetas(2005) 및 Williamson(2014)가 각각 현장실측 및 원심모형실험을

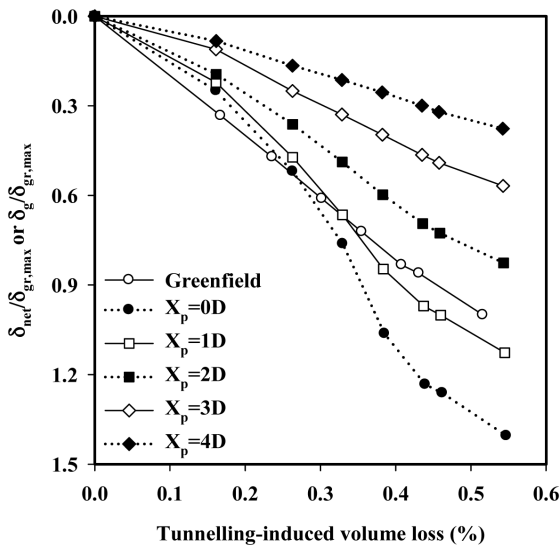


Fig. 7. Distributions of normalised tunnelling-induced pile head and Greenfield soil surface settlement with tunnelling-induced volume loss

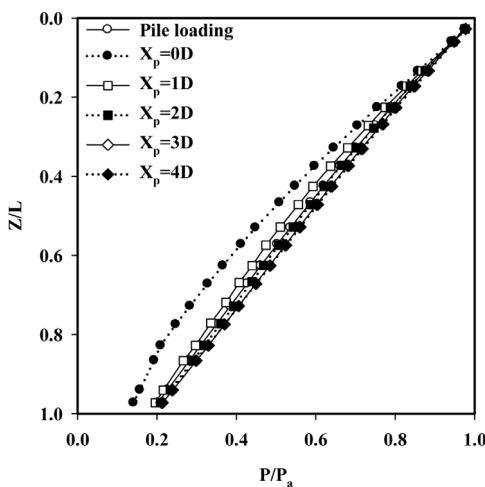


Fig. 8(a). Distributions of normalised axial pile forced with depth

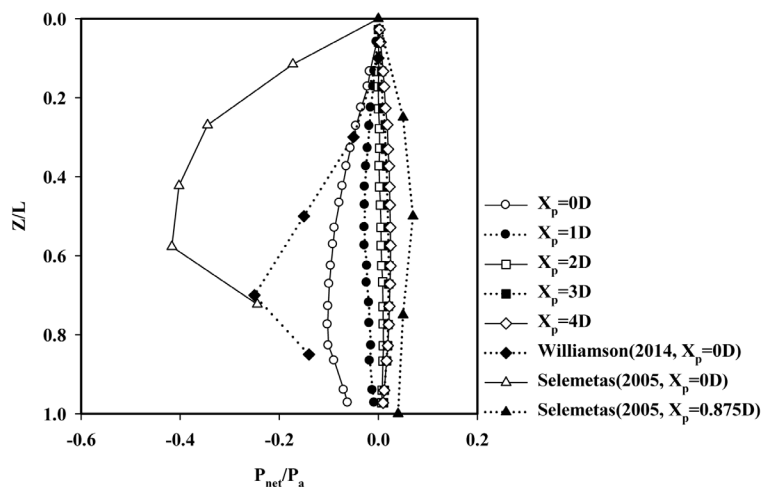


Fig. 8(b). Distributions of normalised tunnelling-induced axial pile forces with depth

통해 측정된 P_{net}/P_a 를 같이 포함하고 있다. Selemetas(2005)의 연구결과는 $X_p=0D$ 및 $0.875D$ 의 경우에 대해 $P_{net,max}/P_a$ 의 크기가 각각 약 -0.42 및 0.07 으로 평가되며, Williamson(2014)의 경우는 -0.25 로 산정되었다. 터널굴착이 말뚝상단에서 수행된 경우는 Tunnelling-induced 인장력이 발생했으며, 터널이 수평으로 이격되어 있는 경우에는 Tunnelling-induced 압축력이 발생하는데 이는 본 연구에서 분석된 결과와 일치한다. 그러나 기존에 측정된 말뚝축력의 분포는 본 연구에서 산정된 결과와 유사하지만, 그 크기는 더 큰 것으로 분석되는데 본 연구의 경우 체적손실률이 0.55% 정도이며, 비배수조건하에서 해석이 수행되었기 때문으로 판단된다. 한편 Devriendt & Williamson(2011)의 해석결과는 $X_p=0D$ 및 $1.43D$ 의 경우에 대해 $P_{net,max}/P_a$ 의 크기는 각각 약 -0.80 및 0.28 평가되는데 이는 위에서 언급된 $P_{net,max}/P_a$ 크기와는 크게 상이한 비현실적인 값으로 Devriendt & Williamson(2011)의 분석이 제대로 수행되었는지에 대한 검토를 실시할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.6 경계면에서 전단응력의 분포

Fig. 9(a)는 설계하중 작용 및 터널굴착 완료 후 말뚝의 경계면에서 발생한 전단응력의 분포를 다양한 터널의 횡방향 이격거리($X_p=0D-4D$)에 대해 보여주고 있다. 터널굴착이 전 말뚝두부에 작용한 상재하중에 의해서 예상대로 말뚝 전체구간에서 상향의 전단응력이 발생한다. 그러나 터널굴착이 종료된 후에는 앞서 언급한 전단응력전이 과정을 통해 그 분포가 터널의 상대위치에 따라 크게 변하는 것을 볼 수 있다. $X_p=0D$ 및 $1D$ 인 경우 말뚝상부의 전단응력은 증가하며, 반대로 하부구간에서는 그 크기가 점차 감소한다. 한편 $X_p=2D$ 인 경우 전단응력의 변화가 매우 작으므로 이때 전단응력전이가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있는데 이는 앞

서 언급한 상대변위의 분포특성과 일치한다. 그러나 $X_p=3D$ 및 $4D$ 인 경우는 말뚝상부에서는 전단응력이 감소하며, 하부구간에서 증가하는 경향을 보인다. 즉 터널의 상대위치에 따라 전단응력전이 과정이 상이하므로 순수하게 터널의 굴착으로 인해서 유발된 전단응력(Tunnelling-induced interface shear stress)의 분포특성을 검토하기 위해서는 말뚝두부에 작용한 상재하중에 의해 발생한 전단응력의 영향을 제거할 필요가 있다.

Fig. 9(b)는 순수하게 터널굴착에 의해 유발된(Tunnelling-induced) 정규화된 말뚝의 전단응력의 분포를 터널의 횡방향 이격거리($X_p=0D-4D$)에 대해 보여주고 있다. $X_p=0D$ 및 $1D$ 인 경우 말뚝의 상부에는 상향의 전단응력이 발생하며, 선단 인근에서는 하향의 전단응력이 발생한다. $X_p=2D$ 인 경우 매우 작은 변화만 관찰되므로 전단응력전이가 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다. 그러나 $X_p=3D$ 및 $4D$ 인 경우 전단응력의 분포는 $X_p=0D$ 및 $1D$ 와는 반대의 경향을 보여서 말뚝의 상부에서는 하향의 전단응력이 발생하고, 선단 인근에서는 상향의 전단응력이 발생한다. 또한 전단응력의 절대크기도 상대적으로 작다. 즉 $X_p=2D-4D$ 인 경우 말뚝상부에서는 앞서 언급한 바와 같이 지반의 침하가 말뚝의 침하를 약간 초과하며 반대로 선단 인근에서는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 약간 초과하기 때문에 이러한 분포가 발생한 것으로 분석된다(Lee, 2012). $X_p=0D$ 및 $1D$ 인 경우 말뚝에는 Fig. 8(b)와 같이 Tunnelling-induced 압축력이 발생하는 것은 말뚝상부에서의 상향과 말뚝하부에서의 하향의 전단응력 성분의 조합에 의한 것으로 판단되고, $X_p=2D-4D$ 의 경우 이와는 반대로 말뚝상부의 하향과 말뚝하부의 상향의 전단응력 성분의 조합에 의해 인장력이 발생하는 것으로 판단된다. 한편 Fig. 8(b)에는 앞서 설명한 Selemetas(2005) 및 Williamson(2014)의 실측된 말뚝축력의 값으로부터 도출된

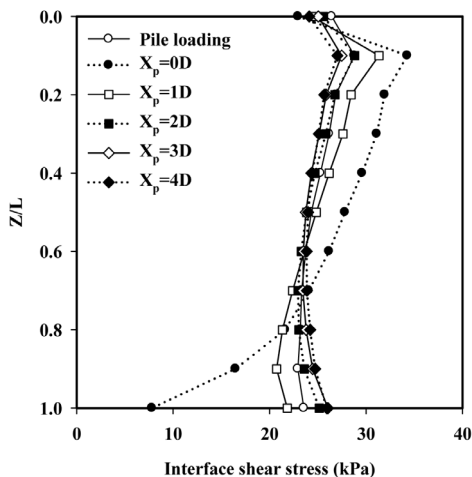


Fig. 9(a). Distributions of interface shear stresses with depth

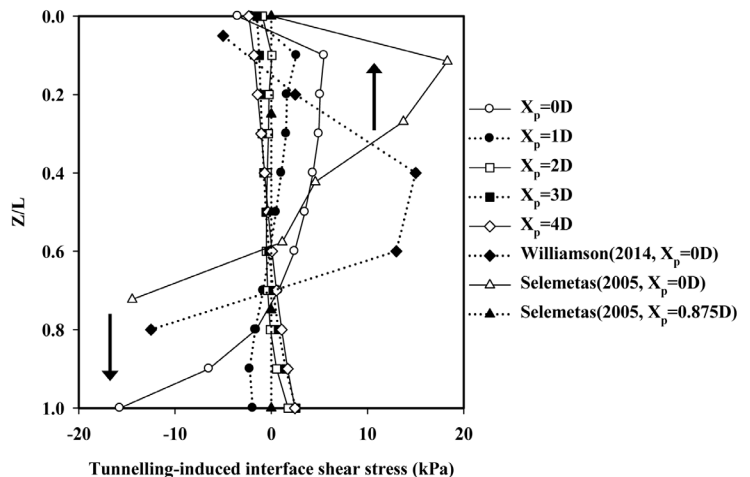


Fig. 9(b). Distributions of tunnelling-induced interface shear stresses with depth

전단응력 분포의 값도 나타내고 있다. 이는 본 연구에서 분석된 것보다 더 큰 값을 보이고 있으나 터널의 상대위치에 대해 본 연구에서 분석된 전단응력의 작용방향과 일치된 결과를 보여주고 있다.

3.7 터널굴착의 영향권

본 연구에서는 말뚝의 횡방향 이격거리에 따른 말뚝의 거동을 터널굴착으로 인한 지반침하 영향권과 비교를 위해 Fig. 1의 Kaalberg et al.(2005)가 제안한 영향권을 적용하였다. $X_p=0D$ 및 $1D$ 인 경우 말뚝의 선단이 영향권 내부에 존재하며 따라서 이는 터널굴착으로 인해 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 그러나 $X_p=3D$ 및 $4D$ 인 경우는 말뚝선단은 물론 말뚝의 대부분의 구간이 영향권 외부에 존재하여 터널굴착으로 인한 영향이 크지 않을 것으로 판단된다. 본 연구에서 분석한 결과에 의하면 말뚝선단이 영향권 내부에 존재하는 경우 Tunnelling-induced 말뚝의 침하가 비교적 크며 말뚝에는 인장력이 발생한다. 한편 말뚝선단이 영향권 외부에 존재하는 경우 Tunnelling-induced 말뚝의 침하가 상대적으로 작으며 말뚝에는 압축력이 발생한다. $X_p=2D$ 인 경우 비록 말뚝선단은 영향권 외부에 존재하지만, 말뚝의 두부로 부터 말뚝 전체 길이의 약 75%가 영향권 내부에 존재하는 전이단계인데 이때 전단응력전이 과정이 비교적 복잡하며 말뚝에 작은 크기의 압축력이 발생하는 것으로 분석되었다.

Fig. 10은 터널의 횡방향 이격거리($X_p=0D-4D$)에 따른 Tunnelling-induced 말뚝두부의 침하 및 말뚝의 겉보기안전율(Apparent factor of safety)을 나타낸다. 여기서 겉보기안전

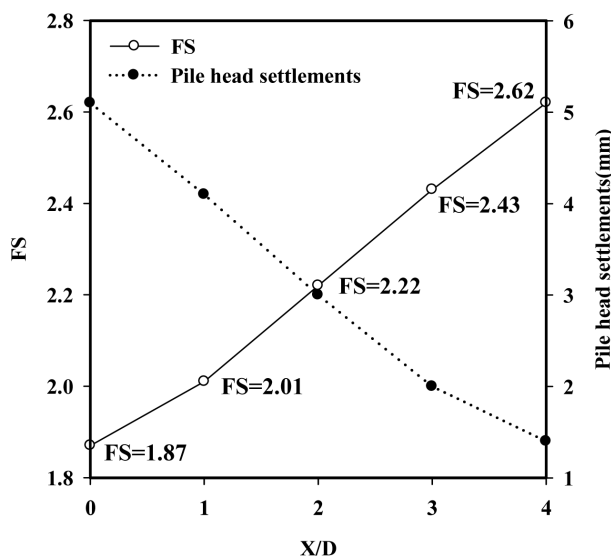


Fig. 10. Distributions of apparent factors of safety and pile head settlement (FS prior to tunnelling: 3.13)

전율은 Fig. 3의 하중-침하 관계를 이용하여 산정하였다. 터널의 이격거리가 증가할수록 말뚝두부의 침하는 감소하며 이에 따라 겉보기안전율은 증가하는 경향을 보이고 있다. $X_p=0D$ 말뚝의 경우 겉보기안전율이 $FS=1.87$ 로 계산되었으며 나머지 말뚝과 비교하였을 때 가장 작은 값으로 나타났다. 즉 말뚝선단이 터널 크라운의 바로 위에 있는 경우 안정상에 가장 큰 문제를 가져오는 것을 알 수 있다. 그러나 터널의 횡방향 이격거리가 증가할수록 말뚝의 겉보기안전율은 점차 증가하여 $X_p=4D$ 에서 $FS=2.62$ 로 계산되었으며, 이는 당초 평가된 안전율인 $FS=3.13$ 에 가장 근접한 값으로 나타났다. 터널굴착으로 인한 말뚝침하의 증가로 말뚝의 겉보기안전율은 설계하중 결정 시 사용된 안전율(3.13)을 기준으로 하여 비교하였을 때 말뚝선단이 영향권 내부에 존재할 경우 평균 약 36% 감소하는 데 비해, 영향권 외부에 존재할 경우 평균 약 23% 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 터널이 터널굴착 영향권 내부에 존재하는 경우 터널굴착으로 인해 말뚝의 사용성이 저하될 수 있음을 알 수 있다. 또한 터널이 터널굴착 영향권 외부에 존재하더라도 말뚝의 사용성이 저하될 가능성은 존재하므로 이에 대해 명확하게 검토해야 한다고 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 견고한 점토지반에 근입된 말뚝의 선단에 대한 터널의 횡방향 이격거리가 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 터널의 상대위치에 따른 순수하게 터널굴착과 관련된(Tunnelling-induced) 말뚝의 침하, 상대변위, 체적손실률, 축력, 전단응력, 영향권 및 겉보기안전율에 대하여 상세히 고찰하였고 이를 통해 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 터널굴착 종료 후 Tunnelling-induced 말뚝두부의 침하는 Greenfield 조건의 지표면 침하와 비교하여 말뚝선단이 터널 크라운 바로 위에 존재하는 경우 약 40% 증가하였으며, 말뚝에서 가장 멀리 이격된 터널($X_p=4D$)의 경우 Greenfield 조건의 지표면 침하에 비해 약 63% 작은 말뚝침하가 발생하였다. 또한 말뚝선단이 터널굴착 영향권 내부에 존재하는 경우 말뚝두부의 침하는 터널굴착이 말뚝선단을 관통하는 $Y/D=-0.4 \sim +0.4$ 에서 진행될 때 가장 큰 변화가 발생했으며, 터널이 말뚝선단에 도달하였을 때 전체 Tunnelling-induced 말뚝침하의 약 70%가 발생하였다.

- (2) $X_p=0D$ 및 $1D$ 인 경우 말뚝의 상부에서는 말뚝의 침하가 지반의 침하를 초과하여 상향의 전단응력(Upward resisting shear stress)이 발생하는 데 비해, 말뚝의 하부에서는 지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하기 때문에 하향의 전단응력(Downward acting shear stress)이 발생하므로 결국 말뚝에는 인장력(Tunnelling-induced tensile forces)이 발생하였다. 이에 비해 $X_p=3D$ 및 $4D$ 인 경우는 반대의 상황이 발생하여 말뚝의 상부에는 하향의 전단응력(Downward acting shear stress)이, 말뚝의 하부에는 상향의 전단응력(Upward resisting shear stress)이 발생하여 말뚝에 압축력(Tunnelling-induced compressive forces)이 발생하는 것으로 분석되었다.
- (3) 터널굴착으로 인한 영향권을 기준으로 말뚝의 거동은 서로 상이한 양상을 보였다. 말뚝선단이 지반침하 영향권 내부에 존재하는 경우 말뚝에는 말뚝선단이 영향권 외부에 존재하는 경우에 비해 더 큰 침하가 발생하였다. 말뚝의 전단응력전이(Shear stress transfer)는 영향권을 기준으로 차이를 보였는데 영향권 내부 말뚝에는 인장력이, 외부 말뚝에는 압축력이 발생하였다. 이러한 현상은 Tunnelling-induced 전단응력의 작용방향이 서로 상이하기 때문인 것으로 분석되었다. 이는 기존에 보고된 원심모형실험 및 현장실측을 통해서 측정된 Tunnelling-induced 축력으로부터 산정된 전단응력의 분포특성과 일치한다는 점을 확인하였다.
- (4) 터널굴착으로 인한 말뚝의 겹보기안전율을 분석한 결과 말뚝의 사용성이 저하될 수 있는 것으로 나타났다. $X_p=0D$ 인 조건의 말뚝(터널 크라운 바로 위)에서는 말뚝의 겹보기안전율이 가장 크게 감소하는 것으로 평가되었다. 또한 말뚝의 선단이 영향권의 외부에 존재하더라도 겹보기안전율은 말뚝의 설계하중 산정 시 적용된 기준안전율보다 적게 나타났다. 이는 말뚝의 선단이 영향권의 외부에 존재하는 경우라 해도 말뚝의 기능성이 저하될 위험성이 존재함을 의미한다. 따라서 향후 터널굴착에 의한 말뚝의 안정성(Stability) 및 사용성(Serviceability) 감소에 대한 연구를 지속적으로 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였습니다
(과제번호 : 120141382).

References

1. Attewell, P. B., Yeates, J. and Selby, A. R. (1986), Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, Blackie, Glasgow and London, pp. 277~279.
2. Cho, I. H. (2012), Behavior of the tunnel constructed in the vicinity of an existing deep foundation, Master's thesis, University of Ajou, pp. 57~58 (in Korean).
3. Davisson, M. T. (1972), High capacity piles. Proceedings of lecture series in innovations in foundation construction, ASCE, Illinois Section, pp. 81~112.
4. Devriendt, M. and Williamson, M. (2011), Validation of methods for assessing tunnelling-induced settlements on piles, Ground Engineering, CRC Press, March, pp. 25~30.
5. Dias, T. G. S. and Bezuijen, A. (2014a), Pile tunnel interaction: Literature review and data analysis, ITA World Tunnel Congress 2014, pp. 1~10.
6. Dias, T. G. S. and 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.
7. Jacobsz, S. W. (2002), The effects of tunnelling on piled foundations, PhD thesis, University of Cambridge, pp. 1~348.
8. Kaalberg, F. J., Teunissen, E. A. H., van Tol A. F. and 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.
9. Korea Rail Network Authority (2012), A technical report on change of tunnelling method underneath an existing superstructure, (unpublished internal report), pp. 1~14 (in Korean).
10. Lee, C. J. (2012), 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.
11. Lee, G. T. K. and 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.
12. 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 (in Korean).
13. Mair, R. J. and Williamson, M. G. (2014), The influence of tunnelling and deep excavation on piled foundations, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Korean Geotechnical Society, Seoul, pp. 21~30.
14. Plaxis (2012), Reference manual, Plaxis 3D user's manual, pp. 122~124.
15. Selemetas, D. (2005), The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling, PhD thesis, University of Cambridge, pp. 1~302.
16. Williamson, M. G. (2014), Tunnelling effects on bored piles in clay, PhD thesis, University of Cambridge UK, pp. 1~475.