

Open face 터널시공으로 인한 단독말뚝의 거동

이철주^{1*}

The response of a single pile to open face tunnelling

Cheol-Ju, Lee

ABSTRACT Three-dimensional (3D) finite element analyses have been performed to study the behaviour of a single pile to open face tunnelling in stiff clay. Several key factors such as tunnelling-induced ground and pile settlement, and shear transfer mechanism have been studied in detail. Tunnelling resulted in the development of pile settlement larger than the Greenfield soil surface settlement. In addition, due to changes in the shear transfer between the pile and the soil next to the pile with tunnel advancement, axial force distributions along the pile change drastically. The apparent allowable pile capacity was reduced up to about 30% due to the development of tunnelling-induced pile head settlement. The skin friction on the pile was increased with tunnel advancement associated with the changes of soil stresses and ground deformation and hence axial pile force distribution was reduced. Maximum tunnelling-induced tensile force on the pile was about 21% of the designed pile capacity. The zone of influence on the pile behaviour in the longitudinal direction may be identified as $\pm 1-2D$ (D : tunnel diameter) from the pile centre (behind and ahead of the pile axis in the longitudinal direction) based on the analysis conditions assumed in the current study. Negative excess pore pressure was mobilised near the pile tip, while positive excess pore pressure was computed at the upper part of the pile. It has been found that the serviceability of a pile experiencing adjacent tunnelling is more affected by pile settlement than axial pile force changes.

Keywords: Coupled analysis, numerical modelling and analysis, piles, stiff clay, Soil-structure interaction, tunnel

요약 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 실시하여 견고한 점토에 기시공되어 있는 단독말뚝의 하부에서 실시된 open face 터널굴착에 의한 말뚝의 거동을 분석하였다. 수치해석에서는 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동을 규명하기 위하여 지반, 말뚝의 침하 및 전단응력전이 메커니즘을 심도 있게 분석하였다. 터널굴착으로 인해 Greenfield 조건의 지표면의 침하를 크게 초과하는 말뚝침하가 발생하였으며, 말뚝과 인접지반 사이 경계면에서의 전단응력전이현상으로 인해 말뚝에 작용하는 축력의 분포가 매우 크게 변화하였다. 말뚝침하의 증가로 인하여 말뚝의 겉보기지지력 (apparent pile capacity) 이 약 30% 감소하는 것으로 분석되었다. 터널굴착에 따른 지중응력 및 변형에 의해 말뚝의 마찰력이 증가하는 현상이 발생하고 이에 따라 말뚝의 축력이 터널의 굴착에 따라 지속적으로 감소하였다. 순수하게 터널굴착에 의하여 단독말뚝에는 설계하중의 최대 21%에 상응하는 인장력이 유발되는 것으로 분석되었다. 말뚝은 터널의 시공이 말뚝의 중심에서 종방향으로 $\pm 1-2D$ (D : 터널직경)에서 실시될 때 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 말뚝선단 인근에서는 (-)의

접수일(2012.09.04), 수정일(2012.09.18), 게재확정일(2012.09.24)

¹정회원, 강원대학교 토목공학과 부교수

*교신저자: 이철주 (E-mail: cj32@kangwon.ac.kr)

과잉간극수압이 발생하였으며, 말뚝상부 부근에서는 (+)의 과잉간극수압이 발현하였다. 터널굴착에 의한 말뚝의 사용성은 축력변화에 비해서는 말뚝의 침하에 의해 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.

주요어: 압밀해석, 수치해석 및 분석, 말뚝, 견고한 점토, 구조물-지반상호 거동, 터널

1. 서 론

최근 도심지에서 실시되는 터널근접시공에 의해 기 사용 중인 인근말뚝의 사용성 및 안정성이 저하되는 사례가 자주 발생하고 있다. 그림 1은 Jacobsz(2003)가 보고한 바 있는 견고한 London clay에서 기 시공되어 있는 교량의 하부에서 실시된 터널공사의 개념도를 보여주고 있다. Jacobsz (2003) 에 의하면 이로 인해 교량하부 말뚝에는 지표면의 침하를 초과하는 약 8 mm 침하가 발생하였으며, 말뚝선단부의 축력이 감소하였다. 한편 Selemetas(2005)는 견고한 London clay에서 실시된 터널굴착에 의해 유발된 상부 말뚝의 침하 및 축력분포 변화에 대한 체계적인 현장실측 결과를 보고한 바 있다. Selemetas(2005) 에 의하면 터널의 굴착으로 인하여 터널시공 이전 말뚝에 작용한 설계하중에 의해 발생한 말뚝의 침하를 크게 초과하는 말뚝침하가 발생하였으며, 또한 말뚝축력의 심도별 분포가 터널시공과정 동안 지속적으로 변화하였다. 특히 터널굴착에 의한 말뚝의 심도별 축력분포 변화를 측정하는 것은 Selemetas(2005)의 연구가 유일한 것으로 알려져 있다. 이와 같이 터널굴착이 말뚝하부에서 실시되는 경우 지중에 인공구조물이 존재하지 않는 Greenfield 조건의 지표면 침하를 크게 초과하는 말뚝침하가 발생하며, 또한 말뚝과 인근지반 사이의 전단 응력전이로 인해 말뚝의 축력분포가 변하는 것으로 알려져 있다(Jacobsz 2002).

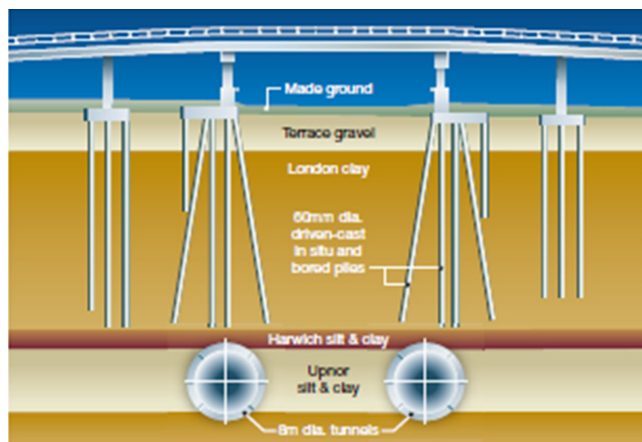
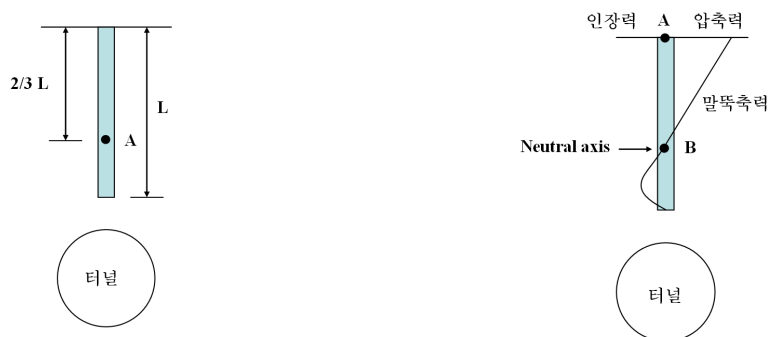


그림 1. London clay 에서 실시된 교량기초 하부 터널근접시공 개념도(Jacobsz 2002)

Devriendt and Williamson(2011)는 Greenfield 조건에서 실시된 터널굴착으로 인해 발생한 지반 침하 및 지중에 말뚝이 존재하는 경우 터널굴착에 의한 말뚝의 축력분포를 이용하여 터널굴착으로 인해 발생하는 말뚝의 침하를 경험적으로 평가하는 두가지 방법을 제시하였다(그림 2 참조) (2/3 depth approach, 2/3L 방법으로 지칭함, L 은 말뚝의 길이 및 Neutral axis approach). 2/3L 방법에서는 터널굴착에 의한 말뚝두부 침하는 Greenfield 조건에서 심도 2/3L위치에서 발생한 지중침하와 동일하다고 가정한다. 또한 Neutral axis approach 방법에서는 Greenfield 조건에서의 Neutral axis (중립축)에서의 지중침하는 터널굴착에 의한 말뚝두부 침하의 크기와 동일하다고 가정한다. 이때 중립축은 터널굴착에 의해 말뚝의 축력이 압축력에서 인장력으로 변하는 위치를 의미한다(그림 2 참조).

터널근접시공에 의한 기존말뚝의 거동과 관련된 기존 연구의 대부분은 터널이 말뚝의 측면에서 시공되는 경우로 제한되어 있는 실정이다(Loganathan and Poulos, 1998; Loganathan et al., 2001; Xu and Poulos, 2001; Mroueh and Shahrour, 2002; Jacobsz, 2002 and 2003; Kitiyodom et al., 2005, Lee and Ng 2005; Selemetas 2005; Pang 2006; Cheng et al., 2007; Lee and Bassett 2007; 이용주 2008; Huang et al., 2009; Lee et al., 2010; 최고니 등 2011; 이철주 2012). 그러나 터널시공이 기존재하는 말뚝선단의 바로 아래에서 실시되는 경우 말뚝의 거동에 대한 연구는 Lee(2004), Kaalberg 등(2005), Selemetas(2005) 및 Devriendt and Williamson(2011)의 연구를 제외하고는 매우 제한적이며, 터널굴착에 의한 말뚝의 거동을 아직까지 명확하게 규명하지 못하고 있는 실정이다. 일반적으로 말뚝의 하부에서 터널굴착을 실시하는 경우 말뚝의 측면에서 터널이 시공되는 경우에 비해 말뚝에 더 유해한 영향이 발생한다고 알려져 있어 이 부분에 대한 연구가 시급하게 요구되고 있다(Jacobsz 2002).



Greenfield 조건에서 A 지점의 침하 =
터널굴착에 의한 말뚝두부의 침하

(a) 2/3 L 방법(2/3 depth approach)

Greenfield 조건에서 B 지점의 침하 =
터널굴착에 의한 말뚝두부의 침하

(b) 중립축 방법(Neutral axis)

그림 2. 터널굴착에 의한 말뚝침하를 평가하기 위한 방법 (Devriendt & Williamson 2011)

이에 본 연구에서는 견고한 점토에 근입된 말뚝의 하부에서 실시되는 open face 터널시공에 의한 말뚝의 거동을 압밀을 고려한 3차원 유한요소해석을 실시하여 이전의 연구에서는 명확하게 규명되지 못한 터널굴착에 의한 말뚝의 거동을 상세히 분석하였다. 터널굴착에 의한 상부말뚝의 거동을 말뚝의 침하, 지반의 침하, 체적손실률(volume loss) 및 말뚝의 축력분포 등에 대한 상세한 고찰을 통하여 고찰하였으며, 앞서 언급한 말뚝의 침하를 평가할 수 있는 두 가지 경험공식 및 Selemetas (2005)가 보고한 말뚝의 축력 분포를 수치해석 결과와 비교하였다. 또한 체적손실률과 말뚝침하의 상관성을 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 유한요소해석의 경계조건

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 3D(Plaxis 2011)를 이용하여 사용중인 단독말뚝의 하부에서 수행된 터널의 굴착을 모사하여 이로 인한 말뚝의 거동을 분석하였다. 그림 3은 해석에서 적용된 유한요소해석 mesh를 보여주고 있으며, 그림 4는 해석조건의 단면도를 보여주고 있다. 본 연구에서는 Lee(2003) 및 Lee and Ng(2005)이 적용한 해석조건을 참조하여 경계조건 및 기타 해석조건을 가정하였다. 터널의 직경은 (D) 6 m이며, 터널중심부는 지표면에서 25 m 하부에 위치하고 있다. 즉 터널크라운은 말뚝선단에서 2 m 이격되어 있다. 말뚝의 길이는 (L) 20 m이며 그 직경은 0.8 m이다. 본 연구에서는 총 3회의 해석을 실시하였으며 각 해석의 특징은 표 1에 요약되어 있다. 터널의 굴착은 연약지반에서 실시되는 SCL 공법(sprayed concrete lining)으로 지지되는 open face 터널공법(ICE, 1996; Thomas, 2009; Chapman, 2010)으로 실시되는 것으로 가정하였다.

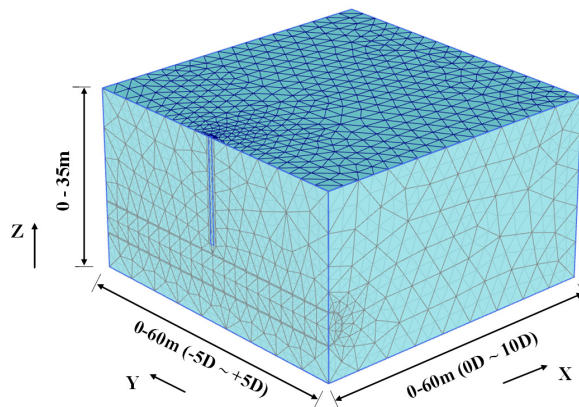


그림 3. 3차원 유한요소해석 mesh (D: 터널직경)

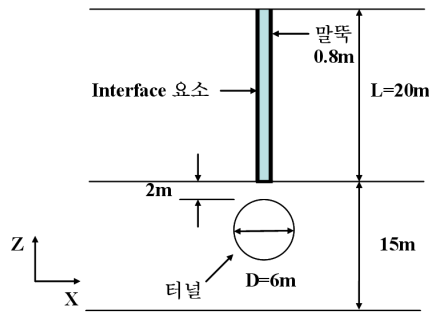


그림 4. 유한요소해석에서 가정한 해석조건 단면도

표 1. 각 수치해석에 대한 요약

해석	특성
G	Greenfield 조건 해석(배수조건 해석)
L	Pile loading test(터널굴착 없음) (effective coupled consolidation 해석)
P	지중에 말뚝존재(effective coupled consolidation 해석)

해석 그리드의 바닥은 핀 그리고 측면은 롤러로 지지된 조건하에서 해석을 실시하였다. 해석 L을 제외한 해석 G 및 P는 압밀조건하에서 실시되었으며, 터널굴착으로 인한 지하수위 저하의 가능성은 점토의 특성을 반영하여 고려하지 않았다.

2.2 지반 및 재료의 물성치

표 2는 Lee(2003) 및 Lee and Ng(2005)의 연구결과를 참고로 하여 본 해석에서 적용한 지반 및 재료의 물성치를 보여주고 있다. 점토의 경우 Lee(2003) 및 Lee and Ng(2005)이 보고한 London clay의 강성 및 강도를 채택하였다. 점토의 강성은 심도별로 증가하는 것을 고려하여 $E \text{ (MPa)} = 7.5 + 3.9z \text{ (m)}$ 로 가정하였다, 여기서 z 는 지표면에서 임의의 위치까지의 거리이다. 말뚝 및 슛크리트에는 등방탄성모델이 적용되었고, 점토에는 비관련흐름 법칙 및 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 따르는 탄소성 모델을 적용하였다. 말뚝의 거동을 명확하게 분석하기 위하여 말뚝과 인접지반사이에 interface 요소를 적용하여 경계면에서 소성항복이 발생하는 경우 미끄러짐이 발생할 수 있도록 하였다. 점토의 거동을 반영하기 위하여 배수조건인 지반물성치를 적용한 effective coupled consolidation 해석을 실시하였으며, 점토의 투수계수는 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 로 가정하였다. 즉 터널굴착에 의한 점토의 압밀에 따른 과잉간극수압을 고려하는 동시에 말뚝과 인접지반의 상호거동은 유효응력에 의해 결정되었다.

표 2. 수치해석에서 가정한 물성치(Lee 2003; Lee and Ng 2005)

재료	모델	K_0	ν'	E' (MPa)	γ_t (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
점토	Mohr-Coulomb	1.0	0.125	$7.5 + 3.9z^*$	20	5	22
말뚝	Elastic	.	0.20	30,000	25	.	.
숏크리트 라이닝		.	0.20	5,000 (S#) 15,000 (H#)	25	.	.

참고: K_0 (정지토압계수), ν' (포아송비), E' (탄성계수), γ_t (단위중량), c' (점착력), ϕ' (내부마찰각), 점토의 dilation angle:

11°, 점토의 초기간극비: 1.0

Note *: z 지표면에서 임의의 위치까지의 거리(m)

Note #: S (연성 숏크리트), H (강성 숏크리트)

2.3 수치해석 과정

수치해석에서는 말뚝의 근입효과 및 이로 인한 지반의 응력변화는 고려하지 않았기 때문에 본 연구에서 가정한 말뚝은 현장타설말뚝의 거동과 유사하다고 가정할 수 있다. 터널의 굴착은 종방향 (Y)에 대하여 -5.0D에서 5.0D(-30 m ~ +30 m) 구간 사이에서 실시되었다(그림 3). 말뚝의 수직축은 $Y/D = 0.0$, $X/D = 0$ 에 위치하고 있다. 초기 평형단계 도달 이후 말뚝두부에는 해석 L을 통해서 결정한 설계하중인 2,100 kN을 배수조건하에서 작용시켰다(3.1 절에서 설명). 이후의 터널굴착은 앞서 언급한 effective coupled consolidation 조건으로 해석을 실시하였다. 터널의 굴착은 각 단계별로 3 m 씩 실시되는 것으로 가정하여 총 20 단계에 걸쳐서 실시되었으며, 터널굴진속도는 3 m/day로 적용하였다(Lee 2003). 터널굴착 단계가 종료된 이후 굴착면 3 m에는 두께 250 mm의 숏크리트를 타설하였는데 터널굴착 직후에는 연성 숏크리트로 가정하여 5,000 MPa의 탄성계수를 적용하였으며, 이를 다음 굴착단계에서 강성 숏크리트의 물성치로 변환하여 15,000 MPa의 탄성계수를 가지는 것으로 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_p 는 말뚝의 단면적이다.

3. 해석결과 분석

3.1 말뚝의 설계지지력 결정

그림 5는 말뚝의 설계지지력을 결정하기 위하여 실시한 말뚝하중재하시험 모사를 통해서 산정된 말뚝의 하중-침하관계를 보여주고 있다(해석 L). 해석 L은 그림 3에 나타난 것과 동일한 해석조건 하에서 실시되었으나 터널굴착은 포함되지 않았으며, 말뚝하중재하시험을 모사하기 위하여 말뚝

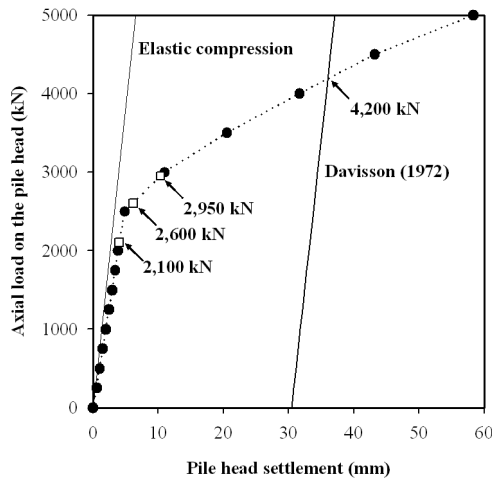


그림 5. 말뚝상재하중과 두부침하와의 상관관계

두부에 단계별로 압축력을 증가시켰다. 그림 5에 의하면 말뚝두부 하중이 2,500 kN 부근에 도달할 때까지는 말뚝하중과 말뚝두부침하 사이에 거의 선형적인 관계를 보이고 있다. 그러나 이를 초과하는 하중이 작용할 경우 말뚝에 급격한 침하가 발생하고 있다. 하중-침하 관계로부터 말뚝의 설계지지력을 결정하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 Davisson(1972)의 방법을 적용하여 그림 5에 나타나 있듯이 말뚝의 극한지지력을 4,200 kN으로 산정하였다. 여기에 안전율 2.0을 적용하여 말뚝의 설계 지지력 P_a 를 2,100 kN으로 결정하였으며($P_a = 4,200/2.0 = 2,100$ kN), 이때 말뚝두부의 침하량(δ_i)은 4.06 mm이다.

3.2 말뚝, 지표면 침하 및 지중 침하 분포

그림 6는 해석 G 및 P를 통해 계산된 터널굴착에 의해 발생한 정규화된 말뚝두부의 침하 $\Delta \delta_p / (\Delta \delta_p)_{\max}$ 및 지표면의 침하 $\Delta \delta_g / (\Delta \delta_g)_{\max}$ 의 분포를 보여주고 있다, 여기서 $\Delta \delta_g$ 는 임의의 터널굴착단계에서 터널굴착이전 말뚝에 작용한 상재하중에 의한 침하 $\Delta \delta_i$ 를 제외한 순수하게 터널굴착에 의해서 발생한 말뚝두부의 침하, $(\Delta \delta_p)_{\max}$ 는 순수하게 터널굴착에 의해서 발생한 말뚝두부의 최대침하(6.34 mm), $\Delta \delta_g$ 는 Greenfield 조건하에서 임의의 터널시공단계에서 발생한 말뚝두부중양에서의 침하, $(\Delta \delta_g)_{\max}$ 는 Greenfield 조건하에서 말뚝두부중양에서의 최대침하이다 (2.66 mm). 그림 6은 정규화된 말뚝 및 지표면의 침하가 터널의 굴착이 진행될수록 점차 증가하고 있음을 보여주고 있다. 즉 지중에 말뚝이 존재하는 경우 순수하게 터널의 굴착으로 인하여 발생한 말뚝두부의 침하는 Greenfield 조건의 지표면 침하와 비교하여 약 238% 더 큰 것으로 분석된다.

Greenfield 조건의 지표면 침하의 증가에 비해 말뚝두부의 침하는 주로 $Y/D = -2 \sim 2$ 구간에서 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 말뚝침하가 증가하는 경향에 비하여 지표면의 침하는 비교적 일정한 비율로 터널굴착과 함께 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 터널굴착으로 말뚝의 침하는 말뚝의 중심에서 종방향으로 일정한 범위에서 크게 발생하지만, 지표면의 침하는 지속적으로 발생함을 알 수 있다. 터널의 굴착이 말뚝선단의 하부까지 도달하였을 때($Y/D = 0$) 말뚝전체침하량의 약 57%가 발생하였다. 한편 말뚝을 중심으로 종방향으로 $\pm 1D$ 구간에서는 전체침하량의 약 65.6%, 종방향으로 $\pm 2D$ 구간에서는 전체침하량의 약 83.6%가 발생하여 터널굴착에 의해 말뚝의 침하가 주로 발생하는 범위는 말뚝중심에서 종방향으로 $\pm 2D$ 이내 인 것을 알 수 있다. 이는 기존에 Mroueh and Shahrouh(2002) 및 Lee and Ng(2005)이 보고한 범위보다는 약간 넓은 편이다. 한편 말뚝의 중심에서 종방향으로 $\pm 2D$ 바깥의 구간에서 실시되는 터널굴착은 말뚝의 거동에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 알 수 있다.

터널굴착 종료 후 말뚝에서 발생한 설계하중 및 터널굴착에 의한 말뚝두부의 전체침하량은 $Y/D = 0$ 및 5일 때 각각 7.68 mm 및 10.40 mm로 계산되었다. 따라서 Lee and Ng(2005)이 적용한 방식을 이용하여 그림 5의 하중-침하 관계를 분석하면 터널굴착으로 인해 말뚝두부에 상재하중이 작용할 때와 동일한 결과가 유발되므로 이를 겉보기 말뚝하중(apparent axial pile load)으로 환산한다면 그 크기는 하중-침하관계를 이용하면 $Y/D = 0$ 및 5일 때 각각 약 2,600 kN 및 2,950 kN로 평가할 수 있다. 따라서 말뚝의 겉보기 안전율(apparent factor of safety, FS)은 감소하여 각각 약 1.61 및 1.42로 평가된다($Y/D = 0$: $FS = 4,200/2,600 = 1.61$, $Y/D = 5$: $FS = 4,200/2,950 = 1.42$).

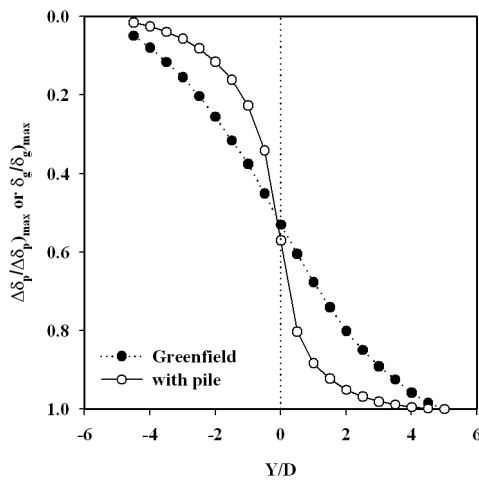


그림 6. 터널굴착에 따른 정규화된 말뚝두부 및 Greenfield 조건의 지표면 침하
 $(\Delta\delta_p)_{\max} = 6.34\text{mm}$, $(\delta_g)_{\max} = 2.66\text{mm}$

즉 터널굴착 종료 후 말뚝의 겉보기 안전율이 약 30% 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 터널굴착으로 인한 말뚝두부의 침하로 인해 말뚝의 사용성은 Lee and Ng(2005) 및 Selemetas (2005)이 보고한 것처럼 크게 저하될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 말뚝의 침하에 비하여 터널굴착에 의한 말뚝의 종방향 및 횡방향 변형은 비교적 작아, 말뚝에 작용하는 모멘트 또한 무시할 정도인 것으로 계산되었다(Selemetas 2005). 터널의 굴착이 진행되는 동안 말뚝의 종방향 변위는 굴착이 진행 중인 터널의 막장면을 향하여 발생하기 때문에 터널굴착이 말뚝선단의 하부에 도달되기 이전과 말뚝의 하부를 관통하고 난 이후의 방향이 바뀌는 것으로 나타났다.

그림 7은 터널굴착에 의해 발생한 정규화된 말뚝의 침하 $\Delta \delta_{p_sub} / \Delta \delta_{p_max}$ 및 Greenfield 조건하에서 말뚝중앙위치에서의 지중침하 $\Delta \delta_{g_sub} / \Delta \delta_{g_max}$ 를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다. 여기서 $\Delta \delta_{p_sub}$ 는 순수하게 터널굴착에 의해서 발생한 말뚝의 침하, $\Delta \delta_{g_sub}$ 는 Greenfield 조건하에서 말뚝중앙부에서의 지중침하, Z는 말뚝의 심도를 나타낸다. 이때 터널굴착이전 말뚝 두부에 작용한 설계하중에 의해 발생한 말뚝의 침하는 제외하였기 때문에 그림 7의 말뚝침하는 순수하게 터널굴착에 의해서 발생한 말뚝의 침하를 의미한다. 대체로 말뚝두부에서 임의의 심도 까지에서는 말뚝의 침하가 Greenfield 조건의 지중침하를 초과하며, 그 하부에서는 Greenfield 침하가 비선형적으로 급격히 증가하여 말뚝의 침하를 초과한다. 말뚝의 침하와 Greenfield 조건의 지중침하가 일치하는 위치는 Y/D = 0 및 5대하여 각각 Z/L = 0.575 및 0.70로 분석되었다. 말뚝의 침하분포는 탄성압축량의 크기가 Y/D = 5인 경우에 Y/D = 0 경우보다 약간 감소하는 것을 고려할 때 말뚝의 축력분포가 감소하고 있음을 유추할 수 있다.

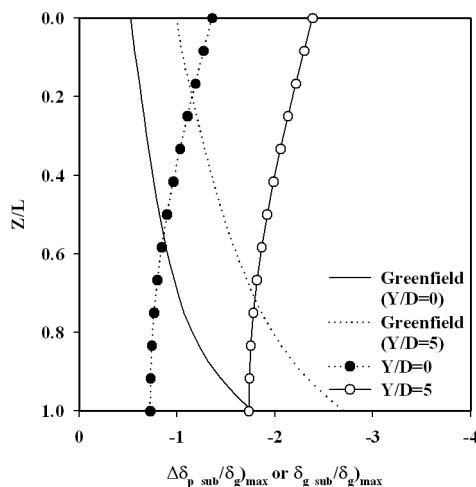


그림 7. 터널굴착에 따른 정규화된 말뚝 및 Greenfield 조건의 지중침하

앞서 언급한 2/3L 방법을 통해서 평가된 말뚝의 침하는 Greenfield 조건에서 심도 13.3 m에서 발생한 지중침하를 이용하여 구하면 $Y/D = 0$ 및 5인 경우 각각 2.62 mm 및 4.64 mm인데, 이는 수치해석을 통해서 산정된 말뚝두부의 침하인 3.62 mm 및 6.34 mm보다는 다소 차이를 보이고 있다. 한편 Neutral axis approach 경우 본 연구에서는 터널의 굴착에 의해 말뚝에 인장력이 발생하지 않기 때문에 적용할 수 없다(3.5 절에서 설명). 즉 Neutral axis approach 방법은 터널의 굴착에 의해 말뚝선단부에 인장력이 발생해야만 한다는 전제조건이 요구되므로 적용에 한계가 있음을 알 수 있다.

3.3 횡방향 지표면 침하 곡선(Surface Settlement Troughs)

그림 8은 터널굴착이 종료된 후 발생한 정규화된 횡방향 지표면 침하 $\delta/\delta_g)_{max}$ 분포를 보여주고 있다, 여기서 δ 는 해석 G 및 P에서 산정된 지표면의 침하를 의미하는데 해석 P의 경우 말뚝두부의 침하도 여기에 포함된다. 해석 P의 경우 터널굴착 이전에 발생한 지반 및 말뚝의 침하는 포함시키지 않았기 때문에 순수하게 터널굴착으로 유발된 지반 및 말뚝의 침하만을 고려하였다. 횡방향지표면 침하를 이용하여 체적손실률은 계산한 결과 Greenfield 조건에 대하여 0.556%로 산정되었다. 이는 Mair and Taylor(1997), Bakker and Bezuijen(2008) 및 Chapman 등(2010) 등이 보고한 점토질이나 모래질 지반에서 실시된 터널굴착에 의해 발생하는 일반적인 체적손실률의 크기인 0.5-2.0%와 유사하다. 한편 해석 P의 경우 터널굴착 이전에 말뚝두부에 작용한 설계하중으로 인하여 0.11%의 체적손실률이 산정되었으며, 말뚝에 작용한 상재하중으로 인한 체적손실률을 제외하고 순수하게 터널굴착에 의해서 발생한 체적손실률은 0.573%로 산정되었다. 이는 Greenfield 조건에서 발생한

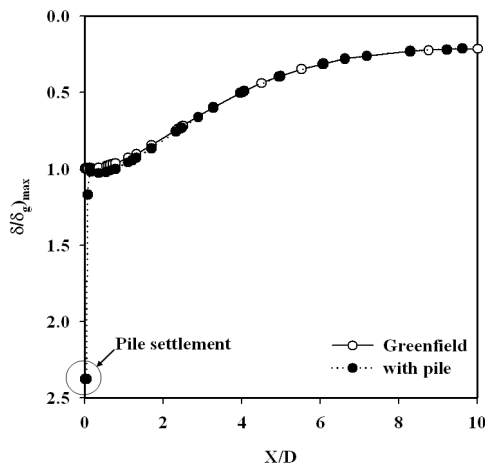


그림 8. 정규화된 횡방향지표면 침하

체적손실률과 거의 비슷한데 그림 8에 나타나 있듯 지표면의 침하분포가 말뚝인근을 제외하고는 Greenfield 조건과 거의 일치하기 때문이다. 그러나 말뚝과 인접한 지반사이에서는 매우 큰 상대변위가 발생하는데 이는 터널의 굴착으로 인해 지표면의 침하를 크게 초과하는 말뚝의 침하가 발생하기 때문이다. 즉 Greenfield 조건의 횡방향지표면 침하분포를 이용해서는 터널굴착에 의해 발생하는 말뚝침하의 크기를 올바르게 산정할 수 없음을 알 수 있다. 말뚝이 존재하는 경우 지표면침하분포는 $X/D = 2.0D$ 부근에서부터 Greenfield 조건의 침하분포와 유사해 지는 것을 알 수 있다.

3.4 체적손실률과 말뚝두부 및 지표면 침하

그림 9는 터널굴착 종료 후 정규화된 말뚝두부의 침하 $\Delta \delta_p / \Delta \delta_{p, \max}$ 및 지표면침하 $\Delta \delta_g / \Delta \delta_{g, \max}$ 와 체적손실률(V_1)과의 상관관계계를 보여주고 있다. Greenfield 조건의 경우 지표면의 침하는 V_1 과 거의 선형적인 관계를 보이고 있음에 비해 말뚝두부의 침하는 초기엔 변화가 작다가 V_1 이 0.2-0.4% 구간에서 급격히 증가하고 있다. 한편 0.4% 이후로는 V_1 은 약간 더 증가하지만 그에 비해 말뚝의 침하는 거의 증가하지 않는다. 즉 말뚝의 선단하부를 관통한 이후 지표면의 침하는 지속적으로 발생하지만 상대적으로 이로 인한 말뚝의 침하는 상대적으로 작은 것으로 분석된다. 이러한 말뚝침하의 경향은 앞서 언급한 그림 6의 결과와 일치한다. 이러한 경향은 Jacobsz(2002) 가 원심모형실험을 통하여 분석한 경향과 매우 유사하다. 그러나 V_1 이 0.4%를 초과하는 경우 이후의 말뚝의 침하 거동은 Jacobsz(2002)의 연구와 다소 차이를 보이는데 이는 원심모형실험의 경우 터널의 굴착이 2차원 조건으로 모사되었던 한계에 기인된 것으로 추정된다.

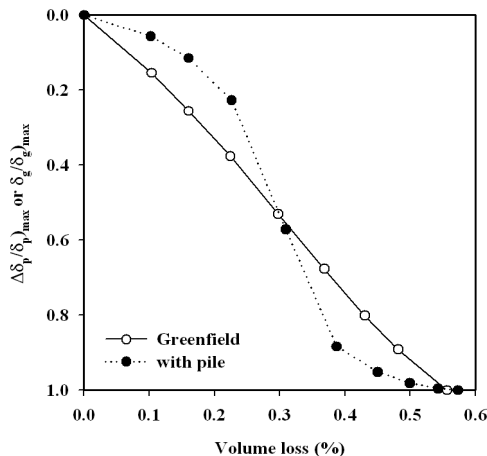


그림 9. 터널굴착에 따른 정규화된 말뚝 및 지표면의 침하

3.5 말뚝의 축력 분포

그림 10a는 말뚝에 대한 해석을 통해서 산정한 정규화된 축력의 (P/P_a) 분포를 각 터널굴착 단계에 대하여 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다(설계하중작용, $Y/D = -2, -1, 0, 1, 2, 5$ (터널굴착종료)), 여기서 P 는 임의의 심도에서의 말뚝의 축력, P_a 는 터널굴착 이전에 말뚝에 작용한 설계하중이다(2,100 kN). 앞서 언급한 바와 같이 말뚝의 축력은 임의의 심도에 대하여 평균수직응력을 산정하여 계산하였다. 터널굴착이전에는 주면마찰력의 발현으로 인해 말뚝축력은 말뚝의 심도가 증가할수록 점진적으로 감소하고 있다. 약 78.3%의 설계하중이 주면마찰력에 의해 지지되며 따라서 말뚝선단부에선 단지 21.7% 정도의 하중만이 작용함을 알 수 있다. 터널의 굴착이 시작되어 $Y/D = -1$ 에 도달될 때 까지는 말뚝의 축력에 미소한 변화만이 발생한다. 그러나 터널의 굴착이 진행됨에 따라 말뚝의 축력은 점차 감소하는 경향을 보인다. 특히 말뚝선단부에서는 $0.08P_a$ 정도의 작은 압축력만이 발생하고 있다. 즉 말뚝 주면마찰력에 의해 지지되는 하중이 터널의 굴착이 종료된 후 약 20% 증가함을 알 수 있다. 따라서 터널굴착 이전에 말뚝의 선단에 의해서 지지되던 하중의 일부가 터널굴착으로 인해 Jacobsz(2002)이 보고한 바와 같이 soil arching 및 전단응력의 분포변화와 관련된 증가된 주면마찰력에 의해 지지되고 있음을 알 수 있다.

그림 10b는 터널굴착에 의한 말뚝의 축력변화를 명확하게 규명하기 위하여 순수하게 터널굴착에 의해 유발된 정규화된 말뚝의 축력($\Delta P/P_a$)을 보여주고 있다, 여기서 ΔP 는 순수하게 터널의 굴착에 의해서 발생한 말뚝의 축력이다. 터널굴착이 $Y/D = -1$ 부근까지 진행되는 동안은 앞서 언급한 바와 같이 말뚝축력에 거의 변화가 없다. 그러나 터널굴착이 $Y/D = -1$ 를 지나 진행되면서

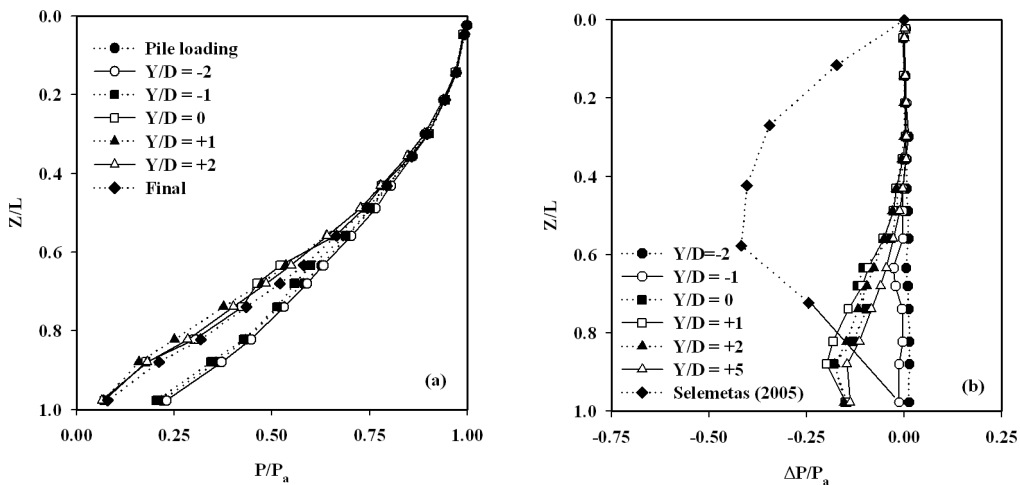


그림 10. 터널굴착에 따른 말뚝의 축력(a), 순수하게 터널굴착에 의해 유발된 말뚝의 축력(b)

말뚝의 축력이 점진적으로 감소하는데 이는 기존의 연구와 같이 말뚝에 인장력이 발생하는 것을 의미한다(Selemetas, 2005; Lee 등 2010; Devriendt and Williamson 2011). 특히 $Y/D = -1$ 에서 $Y/D = 1$ 사이 구간을 굴착하는 동안 대부분의 인장력이 발생한다. 그러나 $Y/D = 1$ 를 지나서 터널굴착이 진행될 때는 축력의 변화는 거의 없으며 약간 감소한다. 따라서 터널굴착으로 인해 말뚝축력이 영향을 받는 범위는 대체로 말뚝을 중심으로 종방향에 대하여 $Y/D = \pm 1$ 라고 할 수 있는데, 이는 앞서 언급한 말뚝침하의 영향범위보다는 작은 값이다. 터널굴착이 말뚝의 바로 아래($Y/D = 0$)를 지나는 경우와 터널굴착이 종료된 경우 $\Delta P_{\max}/P_a$ 는 각각 0.21 및 0.16으로 산정된다, 여기서 ΔP_{\max} 는 말뚝의 최대 인장력이다. 말뚝의 두부로부터 대략 $Z/L = 0.90$ 까지는 인장력이 증가하며 그 아래로는 인장력이 감소하는 분포를 보인다.

터널굴착이 시작된 이후 $Y/D = -2$ 에서는 말뚝에 미소한 크기의 압축력이 발생하지만(축력의 증가), $Y/D = -2$ 에서 $Y/D = 1$ 까지 진행된 터널굴착에서는 축력이 지속적으로 감소하여 말뚝에 인장력이 발생하며, $Y/D = 1$ 이후로는 인장력이 다시 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 터널의 굴진과정에 따른 이러한 축력분포변화의 경향은 Selemetas(2005)가 측정된 터널시공 단계별 말뚝 축력의 변화와 매우 유사한데 이는 터널굴착에 의한 말뚝의 종방향변위발생과 관련이 있는 것으로 추정된다. 그림 10b는 수치해석 결과와의 비교를 위하여 Selemetas(2005)가 보고한 정규화된 말뚝의 인장력 분포를 보여주고 있다. 측정된 말뚝의 인장력은 말뚝의 상부에서 크게 발생하고 약 ($Z/L = 0.6$)까지 증가하며, 그 하부에서는 감소하는 경향을 보인다. 한편 그림 10b에 실선으로 나타나 있듯 Selemetas(2005)의 경우 축력이 선단으로 갈수록 지속적으로 감소했을 것으로 추정된다. Selemetas(2005)의 경우 인장력이 상대적으로 크게 발생하였으며, 주로 말뚝의 상부에서 발생하여 본 연구결과와는 다소의 차이를 보인다. 그러나 정성적인 측면에서 볼 때 Selemetas(2005)의 측정 자료는 본 연구에서 산정된 인장력의 분포와 유사하다고 할 수 있다.

3.6 말뚝인접 지반의 과잉간극수압 분포

그림 11은 말뚝과 인접한 지반에서 발생한 심도별 정규화된 과잉간극수압 $\Delta u/u_i$ 의 분포를 각 터널굴착단계별로 제시하고 있다($Y/D = -2, -1, 0, 1, 2, 5$ (터널굴착종료), 여기서 Δu 는 터널 굴착으로 발생한 지반의 과잉간극수압이며, u_i 는 터널굴착 이전의 정수압이다. 그림 11에 의하면 말뚝상부($Z/L = 0.0-0.2$)에서는 (+)의 과잉간극수압이 발생하며, 말뚝선단 부근($Z/L = 0.8-1.0$)에서는 (-)의 과잉간극수압이 발생한다. 한편 말뚝의 중앙부($Z/L = 0.2-0.8$)에서는 비교적 작은 과잉간극수압이 분포한다. 과잉간극수압의 절대값은 말뚝상부에 비하여 선단부 인근 지반에서 더 큰 크기를 가지는데 이로 인해 말뚝에 작용하는 유효수평응력의 분포가 일정부분 영향을 받을

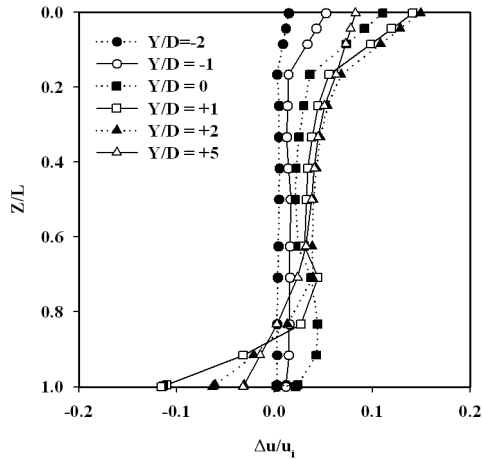


그림 11. 터널굴착에 따른 말뚝인접지반의 정규화된 과잉간극수압 분포

것으로 판단된다. 이러한 현상은 터널의 굴착과 관련된 종방향 응력재분배 및 수직방향의 전단응력 전이 메커니즘과 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Lee 2003, Lee and Ng 2005). $Y/D = -1$ 까지는 과잉간극수압의 변화가 크지 않지만 $Y/D = -1$ 에서 2 구간에서 비교적 큰 변화가 발생하고 $Y/D = 2$ 를 지나서는 일부가 소산되어 그 크기가 약간 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 Lee and Ng(2005)의 연구결과와 유사하다. 말뚝선단부 지반에서는 최대 $0.11u_t$ 의 (-)의 과잉간극수압이 발생한다(약 (-) 23 kPa). 이는 Lee & Ng(2005)가 보고한 값보다는 매우 작는데 이는 수치해석에서 가정한 말뚝의 위치가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 견고한 연약점토에 시공되어 있는 말뚝의 하부에서 실시된 open face 터널시공에 의한 말뚝의 거동을 압밀을 고려한 3차원 유한요소해석을 실시하여 분석하였다. 터널의 굴착으로 인하여 Greenfield 조건의 지표면 침하를 크게 초과하는 말뚝두부의 침하가 발생한다. 터널 굴착에 의한 말뚝의 침하를 고려하여 분석한 결과 말뚝의 겉보기지지력이 최대 약 30% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 말뚝의 침하는 Greenfield 조건의 지반침하의 경향에 비하여 말뚝의 중심부에서 종방향으로 터널굴착이 일정한 범위에서 실시되는 경우에 크게 증가하는 경향을 보였다. 터널굴착에 의한 말뚝의 침하는 말뚝을 중심으로 종방향에 대하여 $\pm 2D$ 범위에서 주로 발생하였다. 이를 바탕으로 터널굴착으로 인해 말뚝의 사용성에 문제가 발생할 가능성이 존재하는 경우 터널인접 지반의 보강범위를 적절히 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

터널굴착으로 인한 지반 및 말뚝의 침하로 유발된 말뚝과 인접지반사이에서의 전단응력전이로 인해 주면마찰력이 증가하여 결국 말뚝의 축력이 감소하게 되어 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용된 상재하중에 의한 영향을 제외하고 터널굴착효과만을 고려할 경우 말뚝에 인장력이 발생하는 현상이 발생한다. 본 연구에서 가정한 해석조건에 의하면 순수하게 터널굴착에 의하여 말뚝에는 최대 $0.21P_a$ 의 인장력이 유발되는 것으로 나타났다, P_a 는 터널굴착 이전에 말뚝 두부에 작용시킨 설계 하중이다. 말뚝축력의 변화는 주로 말뚝을 중심으로 종방향에 대하여 $\pm 1.0D$ 범위에서 발생하는 것으로 분석되었다, 여기서 D 는 터널의 직경이다. 말뚝에 발생하는 최대인장력은 터널의 굴착이 종료된 시점이 아닌 $Y/D = 1$ 에서 발생하며 그 이후 약간 감소하는 경향을 보이는데 이는 말뚝의 종방향변형 발생과 관련된 것으로 보이며 Selemetas(2005)의 현장관측결과와 일치한다.

터널굴착에 따라 말뚝인접 지반에서는 그 위치에 따라 말뚝상부에서는 (+)의 과잉간극수압이, 말뚝선단 부근에서는 (-)의 과잉간극수압이 발생하여 지중응력이 변하게 되어 말뚝의 거동에 변화가 발생하게 된다. 터널굴착으로 유발된 말뚝의 침하 및 축력변화의 경향을 종합적으로 분석한 결과 말뚝의 사용성은 말뚝의 축력변화에 비하여 침하에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 본 연구를 통해서 분석된 결과는 수치해석에서 가정한 조건에 어느정도의 영향을 받아 제한적이라고 할 수 있다. 따라서 이를 실내모형실험이나 현장실측을 통하여 적절히 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 터널의 상부에 기존재하는 군말뚝의 경우 단독말뚝에 비해 터널의 굴착으로 인해 더 큰 영향을 받을 것으로 예상되므로 향후 이에 대한 연구도 필요할 것으로 분석된다.

참고문헌

1. 이용주 (2008), 기존 파일기초에 근접한 터널굴착으로 인한 전단변형률 형성에서의 경계선, 한국터널공학 회 논문집, 제10권, 제3호, pp. 283-293.
2. 이철주 (2012), 사용 중인 단독 및 군말뚝의 측면에서 실시된 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동, 한국터널지 하공간학회논문집. 제14권, 제4호, pp. 337-356.
3. 최고니, 우승제, 유충식 (2011), 교량 직하부에 시공되는 터널에 의한 말뚝기초의 거동변화, 한국터널지하 공간학회논문집, 제13권 제1호, pp. 51-69.
4. Bakker, K.J., Bezuijen, A. (2008), "Ten years of bored tunnels in the netherlands", *Geotechniek*, April, pp. 6-13.
5. Chapman, D., Metje, N., Stärk, A. (2010), "Introduction to tunnel construction", Spon Press, pp. 128-129, 268
6. Cheng, C.Y., Dasari, G.R, Chow, Y.K., Leung, C.F. (2007), "Finite element analysis of tunnel-soil-pile

-
- interaction using displacement controlled model”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, pp. 450-466.
7. Davisson, M.T. (1972), “High capacity piles. Proceedings of Lecture Series in Innovations in Foundation Construction”, ASCE, Illinois Section, pp. 81-112.
 8. Devriendt, M., Williamson, M. (2011), “Validation of methods for assessing tunnelling-induced settlements on piles”, *Ground Engineering*, March, pp. 25-30.
 9. Huang, M, Zhang, C., Li, Z. (2009), “A simplified analysis method for the influence of tunnelling on grouped piles,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 410-422.
 10. Jacobsz, S.W. (2002), “The effects of tunnelling on piled foundations”, PhD thesis, University of Cambridge.
 11. Jacobsz, S.W. (2003), “Tunnelling effects on piled foundations”, *Tunnels and Tunnelling international*, June, pp. 28-31.
 12. 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.
 13. Kitiyodom, P., Matsumoto, T., Kawaguchi, K. (2005), “A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunneling”, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* Vol. 29, pp. 1485-1507.
 14. The Institution of Civil Engineers (ICE). (1996), “Sprayed Concrete Linings (NATM) for tunnels in soft ground”, *ICE Design and Practice Guides*, Thomas Telford, London. pp. 1-14.
 15. Lee, G.T.K. (2003), “Three-dimensional numerical studies of NATM tunnelling in stiff clay,” MS Philosophy thesis, the Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
 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. Lee, S.W, Choy, C.K.M, Cheang, W.W.L, Swolfs, W., Brinkgreve, R. (2010), “Modelling of tunnelling beneath a building supported by friction bored piles”, *The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference*, pp. 215-218.
 18. Lee, Y.J. (2004), “Tunnelling adjacent to a row of loaded piles”, PhD Thesis, University College London, University of London.
 19. Lee, Y.J., Bassett, R.H. (2007), “Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis”, *Tunnelling and underground space technology*, 22, pp. 325-342.
 20. Loganathan, N., Poulos, H.G. (1998), “Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays,” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 846-856.

21. Loganathan, N., Poulos, H.G., Xu, K.J. (2001), "Ground and pile-group responses due to tunneling", *Soils and Foundations*, 41, pp. 57-67.
22. Mair, R.J., Taylor, R.N. (1997), "Theme lecture: bored tunnels in the urban environment", *Proc. 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Balkema, Vol. 4. pp. 2353-2385.
23. Mroueh, H., Shahrour, I. (2002), "Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunnelling and pile foundation", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* Vol. 26, pp. 217-230.
24. Pang, C.H. (2006), "The effects of tunnel construction on nearby pile foundation", PhD thesis, The National University of Singapore.
25. Plaxis. (2011), *Plaxis 3D user's manual*.
26. Selemetas, D. (2005), "The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling", PhD thesis, University of Cambridge.
27. Thomas, A. (2009), "Sprayed concrete lined tunnels", Taylor & Francis, London and New York. pp. 1-8.
28. Xu, K.J., Poulos, H.G. (2001), "3-D elastic analysis of vertical piles subjected to 'passive' loadings", *Comput. Geotech.* Vol. 28, pp. 349-375.