

사용 중인 단독 및 군말뚝의 측면에서 실시된 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동

이철주*

Behaviour of single piles and pile groups in service to adjacent tunnelling conducted in the lateral direction of the piles

Cheol-Ju Lee

ABSTRACT Three-dimensional (3D) numerical analyses have been performed to study the behaviour of single piles and grouped piles to adjacent tunnelling in the lateral direction of the pile. In the numerical analyses, the interaction between the tunnel, the pile and the soil next to the piles and shear transfer mechanism have been analysed allowing soil slip at the pile-soil interface by using interface elements. The study includes the shear stresses at the soil next to the pile, the axial force distributions on the pile and the pile settlement. It has been found that existing elastic solutions may not accurately estimate the pile behaviour since several key issues are excluded. Due to changes in the shear transfer between the pile and the soil next to the pile with tunnel advancement, the shear stresses and axial force distributions along the pile change drastically. Downward shear stress develops above the tunnel springline while upward shear stress is mobilised below the tunnel springline, resulting in a compressive force on the pile. In addition, mobilisation of shear strength at the pile-soil interface was found to be a key factor governing pile-soil-tunnelling interaction. It has been found that grouped piles are less influenced by the tunnelling than the single pile in terms of the axial pile forces. The reduction of apparent allowable pile capacity due to pile settlement resulted from the tunnelling seemed to be insignificant.

Keywords: Numerical modelling and analysis, Piles, Soil slip, Soil-structure interaction, Tunnel

요약 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 실시하여 사용 중인 단독말뚝 및 군말뚝의 측면에서 실시된 터널굴착에 의한 말뚝의 거동을 분석하였다. 수치해석에서는 터널굴착으로 유발된 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력전이를 미끄러짐(slip)을 고려할 수 있는 접촉요소(interface element)를 이용하여 분석하였다. 본 연구는 말뚝-지반경계면에서의 전단응력, 말뚝의 축력 및 지반 및 말뚝의 변형에 대한 분석을 포함한다. 탄성이론에 근거한 기존의 연구는 말뚝의 거동에 영향을 미치는 주요인자들을 적절히 고려하지 못하여 말뚝의 거동을 명확하게 분석할 수 없는 것으로 나타났다. 터널굴착으로 유발된 말뚝-지반 사이에서의 전단응력전이로 인하여 말뚝인접 지반의 전단응력 및 말뚝의 축력분포가 크게 변하는 것으로 나타났는데, 터널 springline 상부에서는 하향의 마찰력이 발생하였으며, 그 하부에서는 상향의 저항력이 발생되어 말뚝에는 압축력이 발생하였다. 경계면에서의 전단응력 발현정도는 말뚝-지반의 상호거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 군말뚝의 축력분포에 대한 분석결과 단독말뚝에 비해 터널굴착의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다. 터널굴착으로 유발된 말뚝의 침하와 관련된 말뚝의 겉보기 지지력 감소는 크지 않은 것으로 분석되었다.

주요어: 수치해석 및 분석, 말뚝, 미끄러짐, 구조물-지반상호 거동, 터널

접수일(2012.07.04), 수정일(2012.07.12), 게재확정일(2012.07.16)

¹정희원, 강원대학교 토목공학과 부교수

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

1. 서론

최근 도심지에서 실시되는 터널건설공사에서 기 존재하는 말뚝의 측면이나 하부에서 터널굴착이 실시되는 경우가 빈번하게 발생한다. 이로 인한 터널인근 지반의 침하로 말뚝의 축력분포가 변화하며, 침하 및 횡방향 변위가 발생하는 것으로 알려져 있다. Pang(2006)은 싱가포르에서 실시된 지하철터널 굴착으로 인해 인접말뚝에 매우 큰 압축력 및 횡방향 변위가 발생한 상황을 광범위한 현장실측을 통하여 보고한 바 있다.

이러한 문제에 대해 그동안 다수의 연구가 실시되어 왔는데, 그 가운데 이론적인 연구가 가장 흔하게 수행되었다(Loganathan and Poulos 1998; Chen et al., 1999; Loganathan et al., 2001; Xu and Poulos 2001; Mroueh and Shahrour 2002; Cheng et al., 2003, 2007; Lee 2004; Kitiyodom et al., 2005; Lee and Ng 2005; Pang 2006; Lee and Bassett 2007; Huang et al., 2009; Lee et al., 2009, 2010; Poulos 2011; 최고니 등 2011). 한편 Loganathan et al.(2000), Chiang(2002), Jacobsz (2002, 2003), Lee(2004), Ong et al.(2006), Lee and Bassett(2007), Lee and Chiang(2007), 이용주 (2008), Meguid and Mattar(2009) 및 이용주 & 황재욱(2011)은 실내모형실험이나 원심모형실험을 실시하여 말뚝의 거동을 분석하였다. 그러나 현장실측을 통한 말뚝의 거동 연구는 상대적으로 제한적으로 수행되었다(Coutts and Wang 2000; Yong and Pang 2004; Jacobsz 2003; Selemetas 2005; Kaalberg et al., 2005; Pang 2006). 이러한 연구에 의하면 말뚝의 측면에서 터널시공이 실시되는 경우 말뚝에는 압축력이 유발되며, 침하 및 횡방향 변형이 발생하는 것으로 보고되었다.

말뚝의 측면에서 실시된 터널의 굴착에 의한 말뚝거동연구의 대부분은 주로 탄성이론을 바탕으로 실시되었다(Loganathan and Poulos 1998; Xu and Poulos 2001; Kitiyodom et al., 2005; Huang et al., 2009; Poulos 2011). 이러한 연구들은 보통 Mindlin이 제시한 반무한 탄성평면에 대한 해석적 기법을 이용한다. 그러나 기존연구의 대부분은 실제 터널의 시공과 관련된 몇 가지 인자들을 고려할 수 없다는 문제를 내포하고 있다. Lee et al.(2010) 이 논의한 바와 같이 기존 연구의 대부분은 터널굴착 이전에 사용 중인 말뚝의 두부에 설계하중을 작용시키지 않으며, 터널굴착이 2차원 평면 변형율(plane strain) 조건에서 실시된다고 가정하여 3차원 조건으로 실시되는 단계별 터널굴착을 적절히 모사하지 못하며, 또한 주요 터널지보재인 터널라이닝을 고려하지 않는 등 많은 문제점을 안고 있다. 또한 지중에 인공구조물이 존재하지 않는 Greenfield 지반조건에서 터널의 굴착으로 유발된 지반의 변형을 이용하는 탄성해법은 말뚝이 지중에 존재하는 경우 발생하는 구속 효과로 인한 지반변위의 감소를 적절히 고려할 수 없다는 문제를 가지게 된다. 한편 Lee(2001)는 탄성이론은 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력전이 현상을 제대로 분석할 수 없음을 보인바 있다. 특히 기존

연구의 대부분은 터널굴착에 의한 말뚝축력 및 말뚝변위의 분포만을 단순하게 나열하는 수준으로 연구를 수행하였다. 그러나 말뚝의 거동에 직접적인 영향을 미치는 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력 전이 과정에 대해서 충분히 명확하게 규명하지 못하였다. 따라서 터널굴착에 의해 유발된 말뚝의 거동을 올바르게 분석하기 위해서는 터널의 단계별 시공 및 말뚝-지반 경계면에서의 소성항복(plastic yielding)에 따른 미끄러짐(slip)을 적절히 고려할 수 있는 고급 3차원해석이 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 사용 중인 단독말뚝 및 군말뚝의 측면에서 실시된 터널건설로 인해 유발된 말뚝의 거동을 3차원유한요소해석을 실시하여 분석하였다. 본 연구에서 수행된 수치해석은 크게 기존연구와의 비교를 위한 2차원조건의 탄성해석 및 3차원조건의 탄소성해석으로 구분할 수 있다. 탄성해석의 경우 Loganathan and Poulos(1998), Xu and Poulos(2001), Huang et al.(2009) 및 β -방법에 의한 결과와 비교 분석하였다(Burland 1973). 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동은 주로 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력 분포, 전단응력 전이 메커니즘, 말뚝의 축력 변화 등을 고찰하여 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 유한요소해석 메쉬 및 경계조건

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(2010)를 이용하여 사용 중인 단독말뚝 및 군말뚝의 측면에서 수행된 터널의 굴착을 모사하여 이로 인한 말뚝의 거동을 분석하였다. 그림 1은 해석에서 적용된 유한요소해석 메쉬를 보여주고 있다(기초판으로 연결된 2×2 군말뚝). 또한 그림 2a-2b는 해석에서 가정한 단독말뚝 및 군말뚝의 경계조건에 대하여 보여주고 있는데 이는 Xu and Poulos(2001)가 가정한 조건에서 말뚝선단에서 메쉬 바닥까지의 거리 및 군말뚝의 기하학적 조건을 일부 수정한 것이다. 터널의 직경은 (D) 6 m이며, 터널중심부는 지표면에서 20 m 하부에 위치하고 있다. 말뚝의 길이는 (L) 25 m이며 그 직경은 (d) 0.5 m이다. 터널중심부의 위치는 단독말뚝의 중심에서 횡방향으로 4.5 m 혹은 6.0 m(0.75D, 1.0D)에 위치하고 있는 것으로 가정하였다. 군말뚝의 경우 2×2 말뚝을 가정하였고 말뚝간의 거리는 1.5 m이며(말뚝사이의 간격: 3D) 기초판으로 연결되지 않은 말뚝 및 기초판으로 연결된 말뚝을 고려하였다. 기초판으로 연결된 군말뚝의 경우 기초판은 지표면과 접촉되지 않은 것으로 가정하였다. 군말뚝내 각 말뚝의 위치는 그림 2b에 나타나 있다. 본 연구에서는 총 7회의 해석이 실시하였으며 각 해석의 특징은 표 1에 요약되어 있다. 터널의 굴착은 연약지반에서 실시되는 SCL(sprayed concrete lining) 터널공법(ICE 1996,

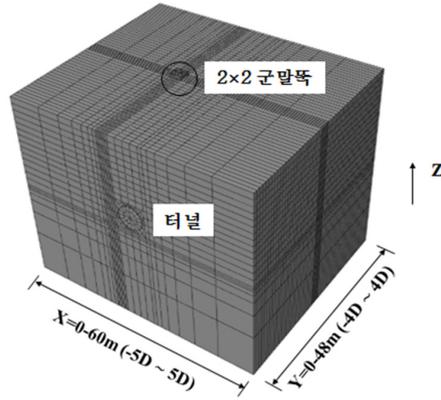
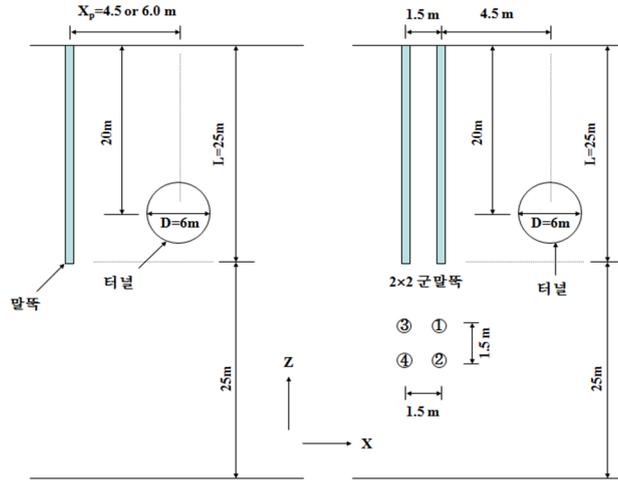


그림 1. 3차원 유한요소해석 메쉬(D: 터널직경) (기초판으로 연결된 2×2 균말뚝)



(a) 단독말뚝

(b) 2×2 균말뚝

그림 2. 유한요소해석에서 가정한 해석단면

표 1. 각 수치해석에 대한 요약

해석		터널굴착	라이닝	말뚝상재하중	비고
G	No-slip	평면변형률	No	No	Greenfield
E					Xu and Poulos(2001)
L	Slip	No	No	Yes	하중재하시험
S1		3차원 (단계별굴착)	Yes		$X_p=4.5$ m
S2					$X_p=6.0$ m
G1					2×2 균말뚝
G2					2×2 균말뚝(기초판)

Thomas 2009)으로 실시되는 것으로 가정하였다. 해석 그리드의 바닥은 핀 그리고 측면은 롤러로 지지된 조건하에서 해석을 실시하였다. 모든 해석은 배수조건하에서 실시되었으며, 지하수위는 지표면에 존재하는 것으로 가정하여 터널굴착으로 인한 인근지반의 지하수위의 저하 가능성은 고려하지 않았다.

2.2 구성방정식 및 물성치

본 연구에서는 Loganathan and Poulos(1998), Xu and Poulos(2001) 및 Huang et al.(2009)이 보고한 탄성이론에 의한 결과와의 비교를 위하여 탄성해석을 수행하였다. 이와 함께 말뚝의 거동을 명확하게 분석하기 위하여 interface 요소를 적용한 탄소성 해석을 실시하였다. 표 2는 본 해석에서 적용한 지반 및 재료의 물성치를 보여주고 있다. 탄성해석의 경우 Xu and Poulos(2001)이 제시한 물성치를 그대로 적용하였다. 탄소성 해석의 경우 말뚝, 기초판 및 슛크리트에는 탄성모델을 적용하였고, 지반에 대해서는 비관련 흐름법칙을 따르는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 지반의 물성치는 Pun and Ho(1996)의 연구결과를 참고로 하여 한계상태마찰각(ϕ_c') 35°를 적용했으며, 팽창각 5°을 가정하였다. 따라서 최대마찰각(ϕ_p')는 Bolton(1991)의 식을 이용하여 근사적으로 40°로 가정 할 수 있다. 말뚝-지반 경계면의 거동은 ABAQUS 프로그램에서 제공하는 interface 요소를 이용하여 모사하였으며, Lee(2001)을 참조하였다. 본 연구에서는 3 mm의 상대변위 발생 시 최대마찰력이 발생하는 것으로 가정하였다. 경계면에서의 거동은 한계 상대변위(limiting shear displacement) 및 마찰계수(interface friction coefficient), μ 의 영향을 받는다, 여기서, μ 는 $\tan(\delta')$ 이고, δ' 는 말뚝과 지반 사이의 마찰각인데 본 연구의 경우 $0.75\phi_p$ 로 가정하였다. 최대 상대변위가 발생하는 경우, $p' \times \mu$ 로 정의되는 최대 마찰응력이 발생한다, 여기서, p' 는 말뚝에 작용하는 유효 수평응력이다.

표 2. 수치해석시 가정한 물성치

해석/재료		Model	K_0	ν'	E (MPa)	γ_t (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ_c' (°)
G/E	지반	탄성	1.0	0.499	24	20		
	말뚝		.	0.2	30,000	20		
L	지반	Mohr Coulomb	0.5	0.25	50	20	10	35
S1/S2	말뚝/기초판	탄성	.	0.2	30,000	25		
G1/G2	스틉크리트		.	0.2	15,000	25		

2.3 수치해석절차

수치해석에서는 말뚝의 근입효과 및 이로 인한 지반의 응력변화는 고려하지 않았기 때문에 본 연구에서 가정한 말뚝은 현장타설말뚝의 거동과 유사하다고 가정할 수 있다. 해석 G 및 E의 경우 기존 탄성이론에 근거한 연구와의 비교를 위하여 Kitiyodom et al.(2005)과 같이 터널굴착을 해석구간 종방향 전체구간($Y/D = -4.0$ 에서 4.0)에 대해 1 단계의 해석으로 수행하였고, 터널지보재(라이닝)는 설치하지 않았다. 그러나 다른 해석에서는 (해석 S1/S2 및 G1/G2) 단계별 터널굴착 및 지보재 설치를 고려한 3차원 조건의 해석을 실시하였다. 터널의 굴착은 종방향에 대하여 $-4.0D$ 에서 $4.0D$ 구간 사이에서 실시되었다. 초기 평형단계 이후 말뚝의 두부에는 해석 L에서 결정한 말뚝의 설계지지력을 말뚝의 두부에 작용시켜 사용 중인 말뚝을 모사하였고 이후 48 단계의 터널 굴착을 모사하였다(3.1 참조). 각 터널의 굴착은 1 m의 길이로 실시되었으며 200 mm의 두께를 가지는 슛크리트 라이닝을 전단계에서 실시된 굴착면에 적용시켜 터널지보재의 설치를 모델링하였다. 즉 터널의 비지지거리는 모든 터널굴착 단계에서 1 m로 가정하였다.

3. 해석결과 분석

3.1 단독말뚝의 설계지지력 결정

그림 3은 단독말뚝의 설계지지력을 결정하기 위하여 실시한 말뚝하중재하시험 모사를 통해서 산정된 단독말뚝의 하중-침하관계를 보여주고 있다(해석 L). 해석 L은 그림 1 및 2a에 나타난 것과 동일한 해석조건 하에서 실시되었으나 터널굴착은 포함되지 않았으며, 말뚝하중재하시험을 모사하기 위하여 말뚝두부에 단계별로 압축력을 증가시켰다. 그림 3에 의하면 말뚝두부 하중이 1,500 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 3에 나타나 있듯이 말뚝의 극한지지력을 1,850 kN으로 산정하였다. 여기에 안전율 2.0을 적용하여 말뚝의 설계지지력 P_a 를 925 kN으로 결정하였으며($P_a = 1,850/2.0 = 925$ kN), 이때 말뚝두부의 침하량(δ_i)은 4.96 mm이다. 말뚝설계하중 작용하에서 말뚝-지반 사이의 경계면에서는 말뚝두부 인근 지반($Z/L = 0.0-0.2$)에서만 소성항복이 발생하였고 그 하부는 탄성상태를 유지하였다. Z 는 말뚝의 심도, L 은 말뚝의 길이이다. 한편 군말뚝의 경우 단독말뚝에 비하여 더 큰 침하가 발생하는데 기초판이 없는 경우(해석 G1) 및 말뚝이 기초판으로 연결되어 있는 경우(해석 G2) 중첩효과로 인해 각각 약 $1.42\delta_i$ 및 $1.43\delta_i$ 의 침하가 발생하는 것으로 분석되었다. 터널굴착이

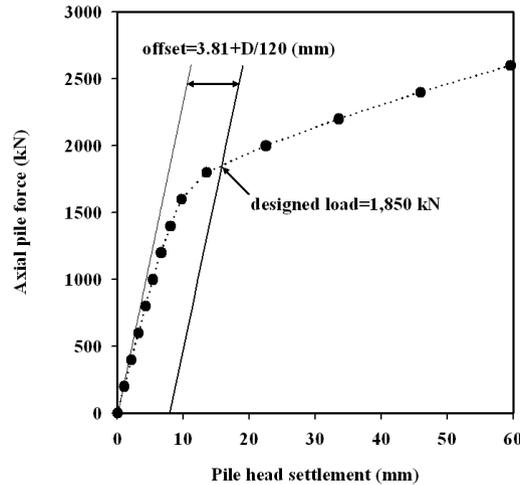


그림 3. 말뚝재하시험에 의한 단독말뚝의 하중-침하관계(해석 L)

포함된 다른 해석의 경우(S1, S2, G1 and G2), 터널굴착 이전 각 말뚝의 두부에 925 kN의 설계 하중을 작용시켜 사용 중인 말뚝의 상태를 모사하였다.

3.2 기존 탄성이론과의 비교

Loganathan and Poulos(1998), Xu and Poulos(2001) 및 Huang et al.(2009)은 탄성이론을 이용하여 터널굴착으로 인해 말뚝에 유발된 변형이나 축력분포를 분석하였다. 이에 대한 비교를 위하여 수치 해석에서 터널의 굴착은 평면변형률(plane strain) 조건에서 한번에 실시되는 것으로 가정하였으며, 터널라이닝은 고려하지 않았다(해석 G and E)(Kitiyodom et al., 2005). 또한 터널 굴착 이전 말뚝 두부에는 상재하중을 작용시키지 않았다. 본 연구에서 말뚝의 변형(침하 및 횡방향 변형)은 Loganathan and Poulos(1998) 이론과 비교하였으며(해석 G), 말뚝의 축력분포는 Xu and Poulos(2001) 및 Huang et al.(2009)의 연구와 비교하였다(해석 E).

그림 4a 및 4b는 Greenfield 조건에서 $X_p/D=0.75(X=4.5 \text{ m})$, $Y/D=0$ 위치에서의 지반의 침하 및 횡방향변위를 보여주고 있다. 수치해석 G를 통하여 체적손실률(volume loss) 4.69%가 계산되었는데, 이는 유사한 해석조건에 대하여 Kitiyodom et al.(2005)이 3차원 유한차분해석을 통하여 산정한 값과 매우 유사하다. 이때 체적손실률은 터널굴착으로 인해 변형된 터널의 형상을 이용하여 산정하였다. 수치해석을 통해서 산정된 지반의 변형을 Loganathan and Poulos(1998)이 제시한 연구결과와 비교하였다. 그림 4a-4b에 의하면 Loganathan and Poulos(1998)이 보고한 지반변위의 분포에 비해 본 연구에서 분석된 변위는 터널중심부위에서는 약간 크고, 그 아래에서는 약간 작게

산정되었다. 그러나 대체로 탄성이론에 의한 지반변위 분포의 경향과 어느 정도 유사한 결과를 얻었다.

지중에 말뚝이 존재하는 경우(해석 E) Greenfield 조건(해석 G)에 비해 체적손실율이 4.69%에서 4.52%로 감소한다. 즉 말뚝으로 인해 지반의 변형이 약간 감소됨을 알 수 있다. 그림 5는 수치해석을 통해서 산정된 말뚝의 축력분포를 Xu and Poulos(2001) 및 Huang et al.(2009)이 탄성이론을 이용하여 분석한 말뚝축력의 분포와 비교하여 제시하고 있다. 기존연구는 터널굴착으로 지반에 1.0, 2.5 및 5.0%의 체적손실율이 발생한 경우에 대한 말뚝의 축력분포를 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 체적손실율이 5.0%인 조건에 대하여 기존연구에서 제시한 말뚝의 축력분포를 수치

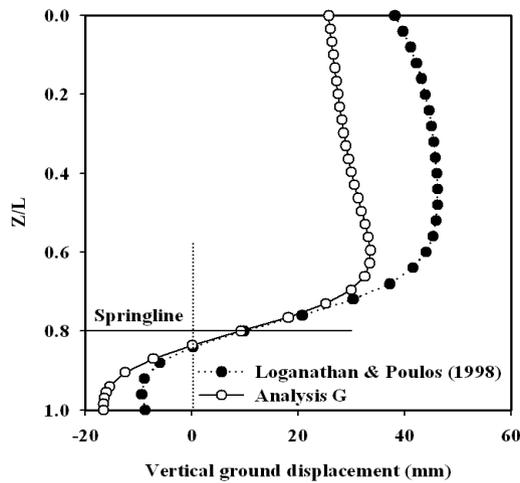


그림 4a. 지반의 침하분포 비교(해석 G)

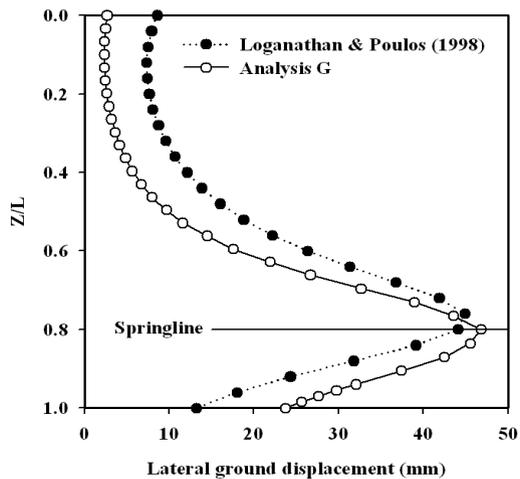


그림 4b. 지반의 횡방향 변위분포 비교(해석 G)

해석 결과와 비교하였다. 이는 본 연구에서 산정된 체적손실율인 4.52%와 다소의 차이를 보이지만 정성적인 측면에서 개략적인 비교가 가능할 것으로 판단된다. 그림 5에 나타나 있듯이 본 연구에서 분석한 말뚝의 축력분포와 기존연구에 의한 값은 대체로 비슷한 경향을 보여준다. 말뚝의 축력은 터널 springline 부근까지 지속적으로 증가하며, 그 하부에서는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 기존연구 가운데 Xu and Poulos(2001)의 축력분포가 본 연구에서 산정된 축력값과 비교적 유사하며, Huang et al.(2009)의 축력은 약간 작은 값을 예측하고 있다. 그러나 탄성이론에 의한 말뚝축력 평가의 경우 앞서 언급한 터널굴착과 관련된 여러 지배인자를 적절히 반영하지 못하기 때문에, 터널굴착이 인근 말뚝에 미치는 영향을 과하게 평가하게 될 것으로 판단된다.

터널굴착에 의한 말뚝의 축력을 평가하기 위하여 널리 알려진 β -방법을 이용하였다(Burland 1973). 수치해석에서 가정한 탄성계수가 24 MPa인 지반의 가능한 최소 및 최대 내부마찰각을 각각 30°, 40°으로 가정하고, 말뚝-지반 경계면에서의 마찰각을 내부마찰각의 75%로 취하면 등방조건 하에서 β 값은 0.41, 0.58로 평가할 수 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 말뚝두부에서 터널 springline 인근까지는 하향의 마찰력이 작용하고, 그 하부에서는 상향의 전단응력이 발생한다고 가정하면 그림 5에서와 같이 말뚝에 발생하는 압축력의 분포를 계산할 수 있다. 이러한 계산에 의하면 말뚝에는 β 가 0.41, 0.58인 경우 각각 2,576 및 3,644 kN의 축력이 발생하는 것으로 평가할 수 있다. 이는 앞서 언급한 말뚝의 축력과 대체로 비슷한 크기이다. 즉 β -방법은 최소한 예비설계 단계에서 말뚝축력의 분포를 평가하는데 근사적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 터널 굴착으로 인한 지반변형과 전단강도 발현과 관련된 상관성은 보다 명확하게 규명될 필요가 있을

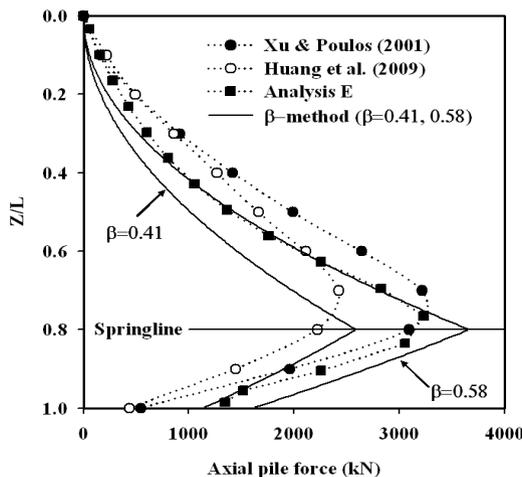


그림 5. 말뚝의 축력분포 비교(해석 E)

것으로 판단된다. 따라서 β -방법의 실제 적용성에 대하여 말뚝-지반 경계면에서의 전단강도 발현정도에 대한 고찰을 통해 보다 명확하게 규명할 것이다.

3.3 말뚝의 변위 및 지표면 침하 분포

그림 6은 터널굴착으로 말뚝에 작용하는 횡방향(M_{xx}) 및 종방향(M_{yy}) 모멘트의 분포를 보여주고 있다. 모멘트의 크기는 수치해석에서 얻은 말뚝중심에서의 횡방향($f(x)$) 및 종방향 변위 ($f(y)$)를 이용하여 아래의 식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 산정하였다.

$$M_{xx} = EI \times \left(\frac{d^2 f(x)}{dz^2} \right) \quad (1)$$

$$M_{yy} = EI \times \left(\frac{d^2 f(y)}{dz^2} \right) \quad (2)$$

여기서 E는 탄성계수, I는 관성모멘트이며, dz는 두 절점간의 수직거리이다. 대체로 횡방향 말뚝의 변위가 종방향 말뚝의 변위보다 크기 때문에 M_{xx} 가 M_{yy} 보다 큰 분포를 보이고 있다. M_{xx} 의 경우 터널의 굴착이 종료된 후 31.4 kNm의 모멘트가 터널 springline 부근에서 발생하고 있으며 터널 springline 인근에서 모멘트의 분포가 급격하게 변하고 있다. 그러나 M_{xx} 에 비해 M_{yy} 는 터널 굴착이 종료된 후가 아닌 $Y/D=0.0$ 인 경우의 크기가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 M_{yy} 의 분포는

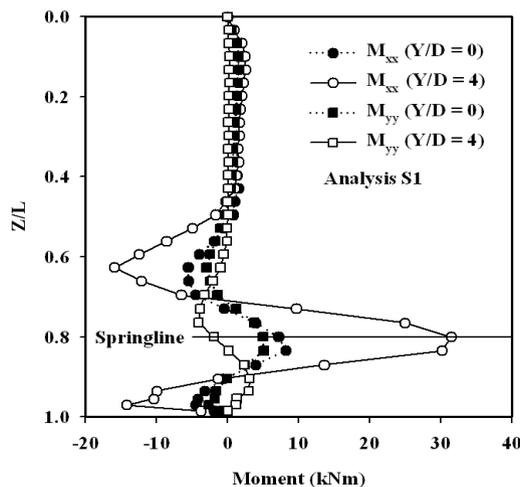


그림 6. 말뚝에 작용하는 횡방향 및 종방향 모멘트의 분포(해석 S1)

터널굴착 동안 바뀌고 있다. 이는 터널굴착 동안 말뚝의 종방향 변위의 방향이 변환되기 때문이다. 콘크리트의 허용휨강도를 7.5 MPa로 가정한 경우 말뚝의 허용모멘트는 92.0 kNm로 이는 계산된 최대 모멘트의 약 34.1%이다. 즉 터널굴착으로 유발된 말뚝의 횡방향 변위로 인해 지반변형의 크기에 따라서는 말뚝의 사용성에 문제가 발생할 수도 있음을 알 수 있다.

그림 7a는 터널굴착 과정 동안 발생한 정규화된 횡방향 지표면침하 Δ/δ_i 를 다양한 해석단계에 대하여 보여주고 있다, 여기서 Δ 는 지표면의 침하이며, δ_i 는 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중으로 인한 말뚝두부의 침하이다. 그림 7a에서는 말뚝의 침하 또한 포함되어 있다. 터널굴착

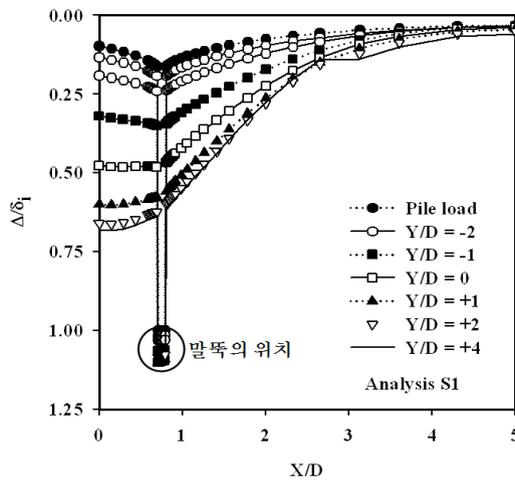


그림 7a. 지표면 및 말뚝 두부의 침하분포(해석 S1)

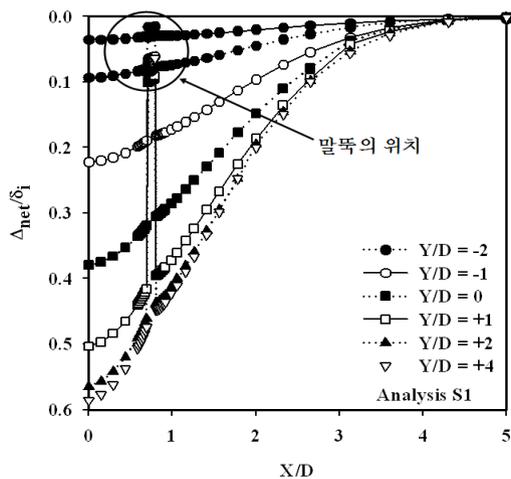


그림 7b. 순수하게 터널굴착으로 유발된 지표면 및 말뚝두부의 침하 분포(해석 S1)

이전에는 오목한 형태의 지표면 침하가 발생하였고 이러한 분포는 터널의 굴착이 $Y/D=0.0$ 이 될 때까지 지속되고 있다. 그러나 터널의 굴착이 $Y/D=0$ 구간을 지난 이후로는 잘 알려진 Gaussian 침하분포가(Gaussian settlement trough) 발생하고 있다. 즉 말뚝에 작용하는 설계하중으로 인해 터널의 굴착 초기 단계에서는 Gaussian 침하분포를 이용할 수 없고, 터널의 굴착이 종료된 후에는 Gaussian 침하분포를 이용할 수 있음을 알 수 있다. 그림 7b의 순수하게 터널의 굴착으로 유발된 지표면의 침하 및 말뚝두부의 침하를 나타내는 정규화된 침하 Δ_{net}/δ_i 는 지표면의 침하가 말뚝두부의 침하를 초과함을 분명하게 보여준다, 여기서 Δ_{net} 는 순수하게 터널의 굴착으로 인해 발생한 지표면침하이다. 터널굴착 종료 후 Δ_{net}/δ_i 는 0.59로 평가된다.

터널굴착이전 단독말뚝의 두부에 작용한 상재하중으로 인한 말뚝의 침하는 4.96 mm 이었으나 터널의 굴착이 종료된 후 말뚝의 최종침하량은 5.30 mm로 0.34 mm 증가하였다. 이 경우 그림 3의 하중-침하 관계를 이용하여 분석할 경우 말뚝에 약 985 kN의 수직하중이 작용하는 경우의 침하에 해당된다. 따라서 이를 통해 말뚝의 겉보기 안전율(apparent factor of safety)은 설계지지력 결정시 적용한 2.0에서 1.88로 약 10% 정도 감소됨을 알 수 있다($FS=1,850/985=1.88$). 해석 S2의 경우 ($X_p=6.0$ m) 터널굴착으로 인해 말뚝의 최종침하량은 5.07 mm로서 X_p 가 4.5 m인 경우에 비해 침하량이 크게 감소했음을 알 수 있다(0.11 mm). 한편 기초판을 고려하지 않은 균말뚝의 경우(해석 G1) 순수하게 터널의 굴착으로 인해 말뚝 1 및 말뚝 3에 각각 0.36 및 0.19 mm의 침하가 발생하였으며, 기초판으로 연결되어 있는 경우 0.35 mm의 침하량이 발생하였다. 따라서 균말뚝의 경우 단독말뚝에 비해 터널굴착으로 인해 말뚝의 침하량이 약간 증가함을 알 수 있다.

3.4 경계면에서의 전단응력

그림 8a는 설계하중 및 각 터널굴착 단계시 경계면에서 발생한 전단응력의 분포를 보여주고 있다(설계하중작용, $Y/D = -2.0, -1.0, 0, +1.0, +2.0, +4.0$). 터널 굴착 이전 작용한 말뚝설계하중으로 인해 말뚝 전체에서 상향의 전단응력(positive shaft resistance)이 발생하였다. 전단응력은 말뚝의 심도가 증가할수록 증가하는 경향을 보이며, 말뚝의 두부 일부에서 소성항복이 발생하였다($Z/L=0.0-0.2$). 그러나 터널의 굴착이 진행될수록 말뚝두부에서 터널 springline 부근까지는($Z/L=0.0-0.8$) 전단응력이 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 한편 그 하부에서는 전단응력이 점차 증가하는 경향을 보이고 있다($Z/L=0.8-1.0$). 이러한 분포는 앞서 Lee and Chiang(2007)이 보고한 바와 유사하다. $Z/L=0.6$ 부근에서 작은 크기의 (-)의 전단응력이 계산되었다. 그러나 $Z/L=0.6$ 아래에서는 전단응력이 점차 증가하여 말뚝선단까지 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이를 통해 말뚝의 상부에서는 하향의 전단응력이, 터널의 중심부 하부에서는 상향의 전단응력이 발생함을 알 수 있다.

그림 8b는 순수하게 터널의 굴착으로 유발된 전단응력의 분포를 보여주고 있는데 터널의 굴착이 진행될수록 전단응력 전이가 급격하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 말뚝의 두부에서 터널 springline 부근까지는 하향의 전단응력(negative skin friction, acting)이 발생하고 있으며, 그 하부에서는 상향의 전단응력(positive shaft resistance, resisting)이 발생함을 알 수 있다. 또한 터널 springline 인근에서는 비교적 작은 전단응력이 발생하며, 말뚝의 심도가 깊어질수록 하향의 전단응력에서 상향의 전단응력으로 그 분포가 변하는 것으로 볼 수 있다. 즉 $Z/L=0.75$ 부근에서는 전단응력의 극히 일부만이 발현되며 그 작용방향이 변화하였다. 말뚝과 지반 사이에 상대변위가 존재하지 않아 전단응력의 전이가 발생하지 않는 중립면(neutral plane)은 터널 springline 부근에 위치하고 있다.

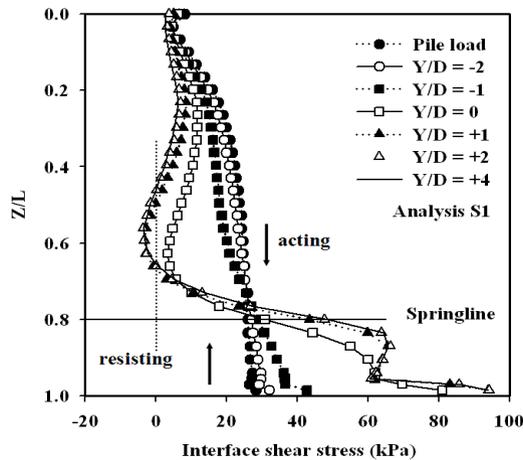


그림 8a. 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력의 분포(해석 S1)

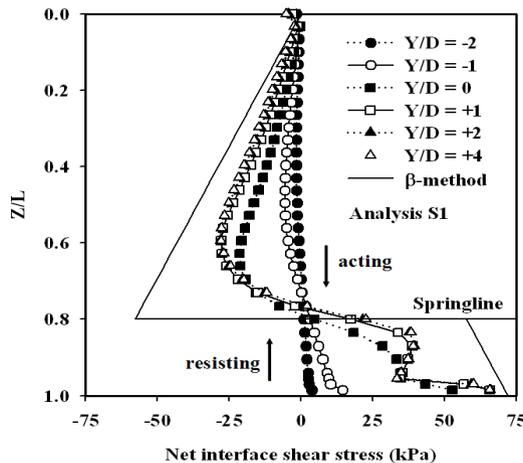


그림 8b. 순수하게 터널굴착으로 유발된 전단응력의 분포(해석 S1)

터널의 굴착으로 인해 터널 springline의 상부지반에서 침하가 발생하고 말뚝과 인접지반 사이의 상대변위 유발로 인하여 지반이 말뚝을 아래로 끌어내리는 현상이 발생하게 된다. 한편 터널 springline 하부에서는 터널의 굴착으로 약간의 상향의 지반변위가 발생하며 말뚝의 변위에 저항하게 된다. 결국 말뚝상부 인근의 지반은 말뚝을 아래로 잡아당기고(부마찰, negative skin friction), 그에 비해 터널중심부 하부 구간에서는 말뚝침하에 저항하는 전단응력이 유발되는 것으로 판단된다(정마찰, positive shaft resistance). 이는 압밀이 진행중인 지반에 근입된 말뚝에 부마찰이 발생하게 되는 원리와 매우 유사하다. 그렇지만 연약지반에 근입된 말뚝의 경우와는 달리 터널굴착에 의한 부마찰 발생은 터널중심부 하부에서는 상향의 지반변위가 발생하고 있다는 점에서 보다 정교한 분석이 필요함을 알 수 있다. 그림 8b는 β -방법에 의해 산정된 전단응력의 분포를 보여주고있다. β -방법에 의해 평가된 전단응력의 크기는 수치해석에 의한 값에 비해 매우 큼을 알 수 있다. 즉 대부분의 말뚝-지반 경계면에서의 상대변위가 전단강도를 발현시킬 만큼 충분하지 못해 전단강도의 일부만이 발현되었기 때문으로 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중으로 인해 소성항복은 말뚝의 두부 근처에서만 발생하였다. 그러나 터널의 굴착이 진행됨에 따라서 말뚝의 하부에서 소성항복이 발생하였다($Z/L=0.87-0.97$). 이는 말뚝-지반의 경계면에서의 상대변위가 3 mm를 초과하여 소성항복이 발생했기 때문이다.

3.5 말뚝의 축력

그림 9a는 각 해석단계별 정규화된 말뚝의 축력분포(P/P_a)를 정규화된 말뚝의 심도(Z/L)에 대하여 보여주고 있다(설계하중작용, $Y/D=2, -1, 0, 1, 2, 4$), 여기서 P 는 임의의 위치에서의 말뚝의 축력, P_a 는 터널굴착 이전 말뚝두부에 작용한 설계하중이다. 말뚝의 축력산정에 있어 각 유한요소 중앙점에서의 수직응력을 고려하였고 동일한 심도에서의 평균응력값을 적용하였다. 터널굴착이전 말뚝두부에 작용한 설계하중은 상향의 전단응력 발생으로 인해 말뚝의 심도가 증가할수록 점차 감소하고 있다. 약 80%의 설계하중이 주면마찰저항으로 지지되며, 말뚝의 선단에는 약 20%의 설계하중이 작용하고 있다. 그러나 터널의 굴착이 진행될수록 말뚝 축력의 분포가 급격하게 변하고 있다. 터널의 굴착이 종료된 후 말뚝의 축력은 두부에서 터널 springline 인근까지 거의 일정한 분포를 보이고 있는데, 이로부터 터널굴착으로 인해 말뚝의 축력은 거의 선형에 가깝게 증가했음을 추론할 수 있다.

그림 9b은 순수하게 터널의 굴착으로 유발된 말뚝축력의 분포를 각 굴착단계에 대하여 보여주고 있다, P_{net} 는 순수하게 터널의 굴착과 관련된 말뚝의 축력이다. 즉 터널굴착 이전의 말뚝축력은

‘0’으로 가정하였다. 터널굴착 이후 말뚝의 축력은 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 한편 각 굴착단계별 말뚝의 축력은 두부에서 터널 springline($Z/L=0.8$) 부근까지 증가하여 최대값이 발생하며, 그 하부에서는 그 값이 감소하는 경향을 보이고 있다. (Coutts and Wang 2000, Xu and Poulos 2001, Kitiyodom et al., 2005, Pang 2006 and Huang et al., 2009)이 현장실측이나 이론적 해석을 통해서 얻은 것과 매우 유사하다. 이러한 말뚝축력의 분포는 압밀이 진행중인 연약지반에 근입된 말뚝에 발생하는 부마찰력의 분포와 매우 유사하다. 말뚝에 작용하는 최대압축력 476.7 kN으로 이는 0.52 P_a 이다. 한편 말뚝의 선단에서는 약 0.20 P_a 의 압축력이 발생하였다.

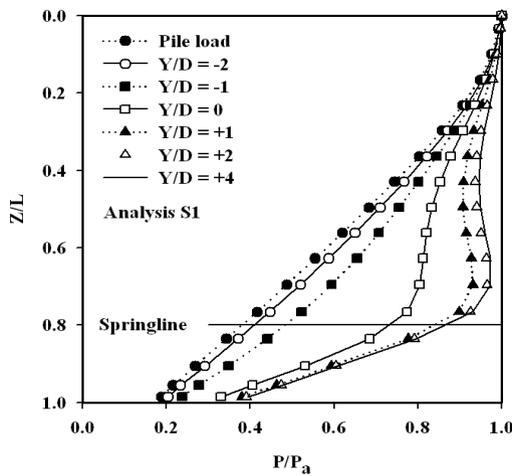


그림 9a. 말뚝축력의 분포(해석 S1)

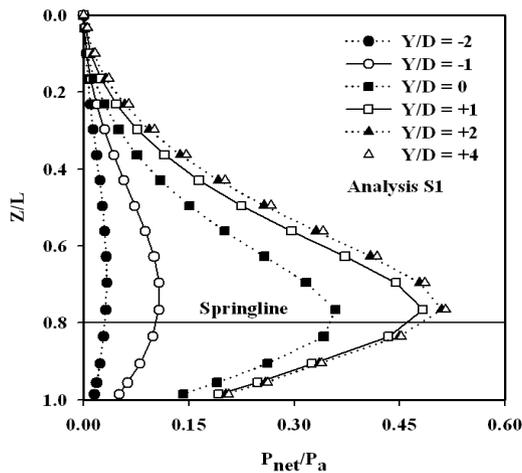


그림 9b. 순수하게 터널굴착으로 유발된 말뚝축력의 분포

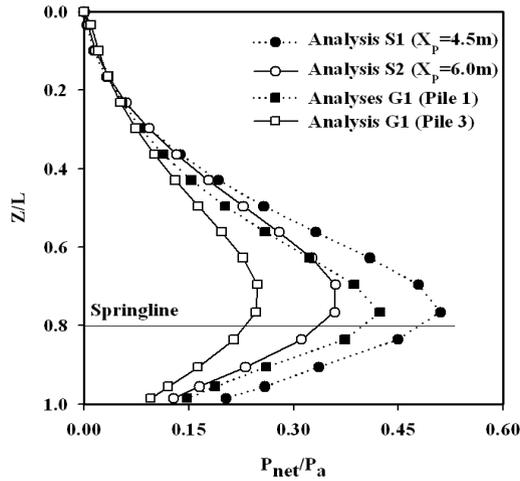


그림 9c. 순수하게 터널굴착으로 유발된 단독말뚝 및 군말뚝의 축력 분포(해석 S1/S2/G1)

3.6 군말뚝에서의 말뚝의 축력분포

그림 9c는 순수하게 터널굴착으로 인해 단독말뚝 및 군말뚝에 유발된 축력의 분포를 보여주고 있다. 군말뚝의 경우 기초판의 유무와 무관하게 매우 유사한 말뚝축력의 분포를 보이기 때문에 그림 9c에는 기초판이 고려되지 않은 해석 G1의 결과만을 제시하였다. 단독말뚝의 경우 말뚝의 위치가 터널중심에서 4.5 m에 존재하는 경우가 6.0 m 떨어진 경우에 비해 더 큰 축력이 발생한다. 또한 군말뚝의 경우 터널에서 가까운 말뚝에 더 큰 축력이 발생한다. 단독말뚝의 경우와 군말뚝에서 같은 위치에 존재하는 각 말뚝의 축력을 비교할 때 군말뚝에 더 작은 축력이 발생하는데 이는 기존에 Huang et al.(2009) 이 보고한 것과 유사한 것으로 지중의 말뚝으로 인해 말뚝 인근 지반의 횡방향 변위가 단독말뚝이 존재하는 경우에 비해 보다 광범위하게 구속되기 때문으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 사용 중인 단독말뚝 및 군말뚝의 측면으로 실시되는 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동을 고급 3차원 유한요소해석을 실시하여 분석하였다. 수치해석 결과를 탄성이론 및 β -방법 등 기존의 연구와 비교 분석하였다. 탄성이론에 근거한 기존의 해석기법은 터널굴착이 말뚝의 거동에 미치는 영향을 지나치게 과하게 평가하는 것으로 분석되었는데, 이는 터널의 굴착과정 및 이에 대한 말뚝의 거동을 매우 단순하게 가정하기 때문이다.

터널의 굴착으로 인해 말뚝에는 매우 큰 축력의 변화가 유발된다. 말뚝두부에서 터널의 중심선 부근까지 발생하는 하향의 마찰응력 때문에 터널의 굴착진행에 따라 말뚝에는 압축력이 발생한다.

즉 말뚝두부에서 터널의 springline 인근까지의 구간에서는 말뚝과 인접한 지반이 말뚝두부에 작용하는 하중을 거의 지지하지 못하고 오히려 부마찰을 발생시켜 말뚝에 유해한 영향을 미치게 된다. 터널굴착 종료 후 순수하게 터널굴착으로 인해 말뚝에는 $0.52 P_a$ 의 압축력이 발생하였다, 여기서 P_a 은 터널굴착 이전 말뚝의 두부에 작용한 말뚝의 설계지지력이다.

말뚝에 유발되는 축력의 변화는 주로 종방향에 대해 $Y/D=-2$ 에서 $Y/D=2$ 사이의 구간에서 발생하는 것으로 나타나 터널굴착으로 인한 영향범위는 말뚝에서 대략 $\pm 2D$ 인 것으로 나타났다. 터널의 굴착으로 인해 말뚝의 선단부근과 인접한 지반에서 소성항복이 발생하였다.

β -방법은 말뚝에 작용하는 축력분포 평가에 대한 예비평가 시 적절히 사용할 수 있다. 그러나 전단응력의 평가 시 전단강도가 말뚝전체 구간에서 모두 발현되었다고 가정하기 때문에 이 방법은 말뚝에 발생할 수 있는 최대축력의 값을 제시하는 것이므로 유의해야 할 것이다. 즉 말뚝의 축력을 올바르게 평가하기 위해서는 터널굴착으로 인한 지반변형과 말뚝-지반 경계면에서 전단강도의 발현 정도를 적절히 반영할 수 있어야 할 것이다.

터널굴착으로 발생한 횡방향 및 종방향 말뚝의 변위는 크지 않지만 터널 springline에서 상대적으로 크게 변화하여 큰 모멘트가 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 이에 의한 말뚝본체의 구조적 파손에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 터널의 굴착으로 인한 말뚝의 침하량은 그리 크지 않다. 그러나 선단의 지지력이 충분하지 않은 경우(마찰말뚝) 이로 인해 말뚝의 겉보기 지지력이 크게 감소될 수도 있을 것으로 분석된다. 단독말뚝 및 군말뚝의 축력분포에 대한 분석 결과 단독말뚝에 비해 군말뚝이 터널굴착의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해서 분석된 결과는 수치해석에서 가정한 조건에 어느 정도 영향을 받았다고 할 수 있다. 따라서 향후 실내모형실험이나 현장실측을 통하여 이를 적절히 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이용주 (2008), “기존 파일기초에 근접한 터널굴착으로 인한 전단변형률 형성에서의 경계선”, 한국터널공학회논문집, 제10권, 제3호, pp. 283-293.
2. 이용주, 황재욱 (2011), “터널굴착에 따른 모형말뚝의 기울기 정도 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 305-317.
3. 최고니, 우승제, 유충식 (2011), “교량 직하부에 시공되는 터널에 의한 말뚝기초의 거동변화”, 한국터널지하공간학회논문집, 제13권, 제1호, pp. 51-69.

-
4. ABAQUS (2010), ABAQUS user's manual, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.
 5. Bolton, M.D. (1991), A guide to soil mechanics, 232 Queen Edith's Way, Cambridge, CB1 4NL, U.K
 6. Burland, J.B. (1973), "Shaft friction of piles in clay-A simple fundamental approach", *Ground Eng.*, Vol. 6, No. 3, pp. 30-42.
 7. Chen, L.T., Poulos, H.G., Loganathan, N. (1999), "Pile responses caused by tunnelling", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp. 207-215.
 8. Cheng, C.Y., Dasari, G.R., Leung, C.F., Chow, Y.K. (2003), "Finite element study of tunnel-soil-pile interaction", National University of Singapore Publication, Hulme Prize Winning Paper.
 9. 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.
 10. Chiang, G.H. (2002), "The load transfer behavior of piles caused by nearby tunnelling", Master thesis, National Central University, Taiwan (in Chinese).
 11. Coutts, D.R., Wang, J. (2000), "Monitoring of reinforced concrete piles under lateral and vertical loads due to tunneling", *Tunnels and Underground Structures*, Balkema, London, pp. 541-546.
 12. Davisson, M.T. (1972), "High capacity piles", *Proceedings of Lecture Series in Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, pp. 81-112.
 13. 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.
 14. Jacobsz, S.W. (2002), "The effects of tunnelling on piled foundations", PhD thesis, University of Cambridge.
 15. Jacobsz, S.W. (2003), "Tunnelling effects on piled foundations", *Tunnels and Tunnelling international*, June, pp. 28-31.
 16. 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.
 17. 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.
 18. The Institution of Civil Engineers (ICE). (1996), "Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground", *ICE Design and Practice Guides*, Thomas Telford, London.
 19. Lee, C.J. (2001), "The influence of negative skin friction on piles and in pile groups", PhD thesis, Cambridge University.

20. Lee, C.J., Chiang, K.H. (2007), "Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, pp. 1224-1241.
21. 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.
22. Lee, S.W., Cheang, W.W.L., Swolfs, W.M., Brinkgreve, R.B.J. (2009), "Tunnelling near a building supported by end-bearing piles", *Proc. of Hong Kong Tunnelling Conf*, pp. 135-145.
23. 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.
24. Lee, Y.J. (2004), "Tunnelling adjacent to a row of loaded piles", PhD Thesis, University College London, University of London.
25. 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.
26. 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.
27. Loganathan, N., Poulos, H.G., Stewart, D.P. (2000), "Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformations", *Geotechnique*, Vol. 50, No. 3, pp. 283-294.
28. Loganathan, N., Poulos, H.G., Xu, K.J. (2001), "Ground and pile-group responses due to tunneling", *Soils and Foundations*, 41, pp. 57-67.
29. Meguid, M.A., Mattar, J. (2009), "Investigation of tunnel-soil-pile interaction in cohesive soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 7, pp. 973-979.
30. 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.
31. Ong, O.W., Leung, C.F., Yong, K.Y., Chow, Y.K. (2006), "Pile responses due to tunneling in clay", *Physical Modelling in Geotechnics*, 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Taylor & Francis Group, London, pp. 1177-1182.
32. Pang, C.H. (2006), "The effects of tunnel construction on nearby pile foundation", PhD thesis, The National University of Singapore.
33. Poulos, H.G. (2011), "Comparisons between measured and computed responses of piles adjacent to tunnelling operations", *Geotechnique Letters*, 1-5 (www.geotechniqueletters.com)
34. Pun, W.K., Ho, K.K.S. (1996), Analysis of triaxial tests on granitic saprolite performed at public works central laboratory, Discussion note DN 4/96, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong Government of the Special Administrative region, Hong Kong.

-
35. Selemetas, D. (2005), "The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling", PhD thesis, University of Cambridge.
 36. Thomas, A. (2009), *Sprayed concrete lined tunnels*, Taylor & Francis, London and New York.
 37. 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.
 38. Yong, K.Y., Pang, C.H. (2004), "Geotechnical challenges of the mass rapid transit (MRT) system in singapore", In *Malaysian Geotechnical Conference 2004*, March 2004, Special Lecture.