

단독말뚝의 측면으로 시공되는 터널에 의한 말뚝의 거동 연구

A Study on the Behaviour of a Single Pile to Adjacent Tunnelling Conducted in the Lateral Direction of the Pile

이 철 주[†]

Lee, Cheolju

ABSTRACT : Three-dimensional(3D) numerical analyses have been conducted to study the behaviour of a single pile to adjacent tunnelling conducted in the lateral direction of the pile. In the numerical analyses, the interaction between the tunnel, the pile and the soil next to the pile has been analysed. The study includes the pile settlement, the relative shear displacement between the pile and the soil, the shear stresses at the soil next to the pile and the axial force on the pile. In particular, the shear stress transfer mechanism along the pile related to the tunnel advancement has been rigorously analysed. Due to changes in the relative shear displacement between the pile and the soil next to the pile during the tunnel advancement, the shear stress and the axial force distributions along the pile have been changed. Downward shear stress developed above the tunnel springline ($Z/L=0.0-0.7\sim 0.8$), while upward shear stress is mobilised below the tunnel springline ($Z/L=0.7\sim 0.8-1.0$) resulting in compressive force on the pile, where Z is the pile location and L is the pile length. Maximum compressive force of about $0.475P_a$ was developed on the pile after completion of tunnel advancement, where P_a is the allowable pile capacity. Some insights into the pile behaviour to tunnelling obtained from the numerical analyses will be reported and discussed.

Keywords : Numerical modelling and analysis, Pile, Soil-structure interaction, Tunnelling

요 지 : 본 연구에서는 단독말뚝의 측면에서 시공되는 터널에 의한 말뚝의 거동에 대하여 3차원 수치해석을 통하여 분석하였다. 수치해석을 통하여 터널-말뚝-지반의 상호거동에 대한 심도 있는 분석을 실시하였다. 수치해석을 통해 말뚝의 침하, 말뚝과 주변지반 사이의 상대변위, 전단응력 및 말뚝의 축력변화를 고찰하였다. 특히 터널굴착에 의한 전단응력의 전이과정에 대한 심도 있는 분석을 실시하였다. 터널굴착에 의한 말뚝과 인근지반에서의 상대변위 변화로 인하여 말뚝에 작용하는 전단응력 및 축력의 분포가 변하게 되는 것으로 나타났다. 터널 중심부의 상부에서는 하향의 전단응력이 발생하는 반면($Z/L=0.0-0.7\sim 0.8$), 그 하부에서는 ($Z/L=0.7\sim 0.8-1.0$) 상향의 전단응력이 발생하여 말뚝에 압축력이 발생된다, 이때 Z 는 임의의 심도, L 은 말뚝의 길이이다. 터널굴착이 종료된 후 말뚝에는 최대 $0.475P_a$ 의 압축력이 발생하였다, 이때 P_a 는 말뚝의 설계지지력이다. 수치해석을 통해서 도출된 터널굴착이 말뚝 거동에 미치는 영향에 대해 상세히 고찰하였다.

주요어 : 수치해석, 말뚝, 지반-구조물 상호거동, 터널굴착

1. 서 론

최근 도심지에서 건축구조물이나 토목구조물의 하부기초로 기 사용중인 말뚝의 하부나 측면에서 인접한 지반을 굴착하여 터널을 시공하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 이때 터널굴착에 의한 지중응력의 변화 및 지반변위 발생 등에 의해 말뚝의 거동에 큰 변화가 발생하게 된다. 그림 1은 교량의 하부기초로 기 사용중인 현장타설 군말뚝(2×2 말뚝) 좌우 측면에서 시공된 쉐드터널 건설상황을 개략적으로 보여주고 있다(Pang, 2006). 터널은 풍화토지반에서 시공되었으며 그 직경은 6.3m 이며, 말뚝의 직경은 1.2m, 길

이는 62m 이다. 이때 말뚝중심에서 터널 중심까지의 거리는 5.45-7.15m 이다. Pang(2006)에 의하면 터널굴착으로 발생한 지중변위로 인해 말뚝에는 횡방향 변위가 발생하였으며, 말뚝에는 최대 5,800kN의 압축력이 측정되었다.

기 사용중인 말뚝의 인근에 터널을 시공하는 상황에 대해서 유럽 및 싱가포르를 중심으로 다수의 연구가 수행되어 오고 있다. Vermeer와 Bonnier(1991), Loganathan과 Poulos(1998), Chen 등(1999), Xu와 Poulos(2001), Mroueh와 Shahrour(2002), Cheng 등(2003, 2007), Lee(2004), Kitiyodom 등(2005), Lee와 Ng(2005), Lee와 Jacobsz(2006), Pang(2006), Huang 등(2009), Lee 등(2009, 2010)은 이론적 방법으로 이를 연구하

[†] 정희원, 강원대학교 토목공학과 부교수(E-mail : cj32@kangwon.ac.kr)

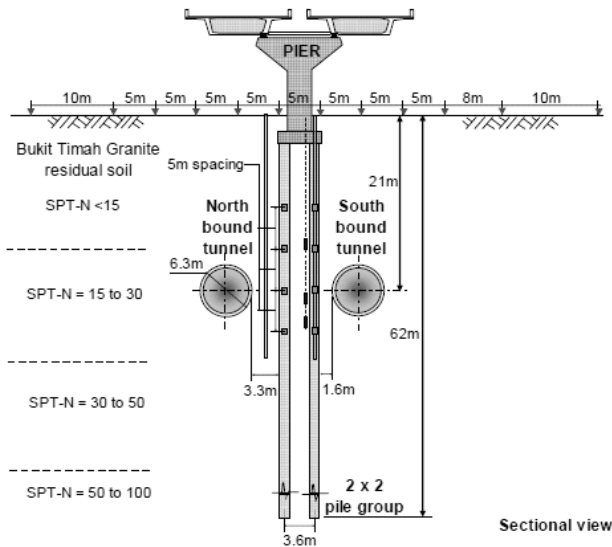


그림 1. 말뚝 좌우 측면에 터널이 시공된 사례(Pang, 2006)

였으며, Lee 등(1994), Coutts와 Wang(2000), Yong과 Pang (2004), Jacobsz(2003), Selemetas(2005), Kaalberg 등(2005), Pang(2006) 등은 현장실측자료의 분석을 통해 터널굴착에 따른 말뚝의 거동을 분석한 바 있다. 또한 Morton과 King (1979), Bezuijen과 Schrier(1994), Loganathan 등(2000), Chiang (2002), Jacobsz(2002, 2003), Lee(2004), Ong 등(2006), Lee (2004), Lee와 Chiang(2007) 등은 실내모형실험이나 원심모형실험을 통해 이를 연구하였다. 최근 국내에서도 이러한 문제에 대한 관심이 커지고 있는데 2005년에는 대한토목학회 주관의 기술세미나가 개최되기도 하였다(제 5회 터널 시공기술 향상 대토론회-도심지 터널 근접시공을 중심으로, (대한토목학회, 2005)). 그러나 국내의 경우 아직까지 이 분야에 대한 연구는 매우 제한적이라고 할 수 있으며, 터널-말뚝-지반 상호간의 거동(tunnel-pile-soil interaction)에 대한 근본적인 이해보다는 주로 실무적인 문제와 관련된 터널 및 말뚝 주변지반의 보강에 주안점을 두고 있는 실정이다.

특히 최근 말뚝의 측면으로 터널이 시공되는 사례가 자주 보고되고 있다(Lee 등, 1994; Mair 등, 1997; Coutts 등, 2000; Pang, 2006; Lee 등, 2009, 2010). 이러한 경우에 대해 Xu와 Poulos(2001), Kitiyodom 등(2005) 및 Huang 등(2009)은 평면변형을 조건하에서 탄성이론을 이용하여 말뚝의 거동을 분석한 바 있다. 그러나 기존의 연구는 단계별 터널굴착이나 말뚝두부에 상재하중을 작용시키지 않았으며, 터널굴착에 의한 지반의 변위산정 시 지중에 인공구조물이 없는 그린필드(greenfield 혹은 free-field) 조건을 가정했다는 근본적인 문제를 포함하고 있다. 또한 단순히 말뚝의 축력 및 변위 변화만을 고려하였고, 말뚝-지반의 상호거동에 의한 전단응력 전이에 대한 분석을 실시하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 터널굴착에 의한 단독말뚝의 거동에 대한 보다

심도 있는 분석을 위하여 3차원 수치해석을 실시하였으며, 유한차분 해석프로그램인 Flac-3D를 이용하였다(Itasca Consulting Group). 수치해석 결과를 분석하여 말뚝의 침하, 전단응력 전이 메커니즘 및 말뚝의 축력 변화 과정 등에 대한 분석을 실시하였다. 본 연구를 통하여 터널의 굴착에 의한 말뚝-지반 사이에서 전단응력 전이에 대해 보다 명확하게 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수치해석

2.1 유한차분해석 그리드

본 연구에서는 Flac-3D 프로그램을 이용한 3차원 유한차분해석을 통하여 터널굴착에 의한 터널-말뚝-지반의 상호 거동에 대한 분석을 실시하였다. 그림 2, 3은 수치해석에 적용된 해석그리드(그림 2) 및 개략단면도(그림 3)을 보여주고 있다. 본 연구에서는 기존연구와의 비교분석을 위하여 Xu & Poulos(2001)이 제시한 조건을 토대로 해석을 실시하였다. 즉 직경 6m의 터널과 터널중심(터널 중심의 좌표: $X=0m$, $Y=0m$)에서 수평으로 4.5m의 위치에 존재하는 단독말뚝을 가정하였다(말뚝중심의 좌표: $X=4.5m$, $Y=0m$). 말뚝의 직경은 0.5m, 길이는 25m이며, 터널은 단계별로 굴착되며(그림 2의 Y축 방향) 200mm의 두께를 가지는 슛크리트에 의해 지지되는 것으로 가정하였다. 터널 및 말뚝은 풍화토 지반에 시공되는 것으로 가정하였다.

해석에서 가정한 경계조건(X, Y 및 Z의 범위)은 매개변수 분석(parametric study)을 통하여 결정하였다. 해석 그리드의 바닥($Z=0m$)은 핀(pin)으로 고정되었으며, 측면($X = -30m$,

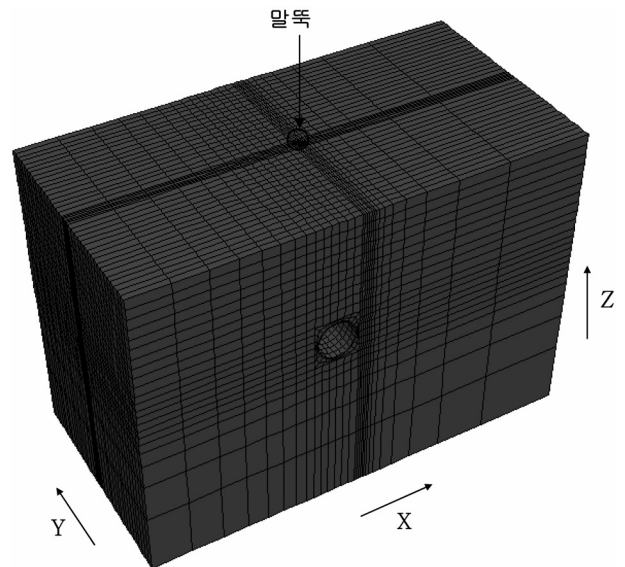


그림 2. 3차원 유한차분 해석 그리드

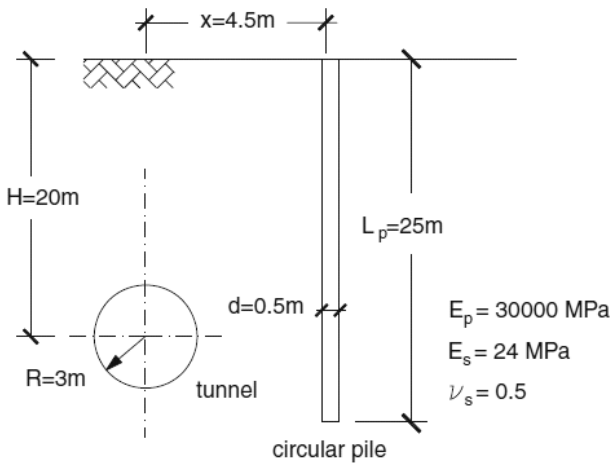


그림 3. 수치해석에서 가정한 해석단면(Xu와 Poulos, 2001)
(E_p : 말뚝의 탄성계수, E_s : 지반의 탄성계수, ν_s : 지반의 포아송비)

40m; Y = -18m, 18m)은 롤러(roller)로 고정되었다. 한편 말뚝과 주변지반 사이에서의 상대변위 발생을 허용하지 않는 연속체 해석을 실시하였다. 본 연구에서는 해석조건을 변경시키며 해석을 실시하였는데 터널굴착 모델링에 앞서서 말뚝의 설계하중을 결정하기 위하여 터널굴착 과정이 포함되지 않은 말뚝의 하중-침하관계만을 분석하기 위한 해석(해석 a로 칭함) 및 설계하중이 작용하는 가운데 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동분석을 위한 해석(해석 b로 칭함)을 실시하였다. 이와 함께 기존의 탄성이론에 의한 연구결과와의 비교를 위하여 Xu와 Poulos(2001)이 가정한 것과 동일한 조건에 대하여 탄성모델을 이용한 해석을 실시하였다.

2.2 지반 및 기타재료의 모델링

수치해석에서 지반요소(풍화토)를 모델링하기 위하여 Mohr Coulomb 모델을 적용하였고, 말뚝 및 슛크리트에는 탄성모델을 적용하였다. 해석에서 가정한 지반, 말뚝 및 슛크리트의 물성치는 표 1에 정리되어 있다. 수치해석에 적용된 각종 물성치는 국내 터널설계에서 일반적으로 사용되는 값을 이용하였다. 슛크리트의 경우 시간에 따라 강성이 증가하는 점을 반영하기 위하여 터널시공 순서에 따라 연성(soft) 슛크리트(타설 직후) 및 강성(hard) 슛크리트(다음 막장의 슛크리트가 타설될 때)의 경우로 구분하여 모델링을 실시하였

표 1. 유한차분해석에 적용된 물성치

재료	Model	탄성계수(MPa)	점착력(kPa)	ν'	ϕ (°)	K_0	γ_t (kN/m ³)
말뚝	탄성	30,000		0.2			25
Soft 슛크리트		7,500		0.2			25
Hard 슛크리트		15,000		0.2			25
풍화토	Mohr Coulomb	50	20	0.25	35	0.5	20

Note; ν' = 포아송 비, ϕ = 내부마찰각, K_0 = 정지토압계수, γ_t = 단위중량

다. 본 해석에서 hard 슛크리트는 soft 슛크리트보다 2배 증가한 탄성계수를 가지는 것으로 가정하였다. 한편 앞서 언급한 바와 같이 Xu와 Poulos(2001)의 기존연구와의 비교분석을 위한 고찰에서는 지반에 대해 탄성모델을 적용하여 해석을 실시하였다(3.1절 참조).

2.3 해석조건 및 과정

터널의 굴착을 모델링하는 것에 앞서 초기평형 상태 도달, 말뚝의 설치 및 말뚝두부에 설계하중 작용의 세 단계로 구분하여 해석을 수행하였다. 말뚝의 설치는 해당위치의 지반을 말뚝의 물성치로 변경하는 방식으로 모델링 하였다. 본 연구는 정량적인(quantitative) 연구보다는 정성적인(qualitative) 연구임을 감안하여 말뚝의 근입효과에 의한 주변지반의 응력변화나 이에 의한 잔류응력(residual stress) 등의 영향은 수치해석 과정에 포함시키지 않았다. 즉 말뚝의 시공에 의한 주변지반의 물성이나 응력변화는 고려하지 않았고, 말뚝에 발생할 수 있는 겉보기 압축력(apparent compressive force) 또한 고려하지 않았다.

말뚝의 두부에는 터널굴착에 의한 말뚝거동 변화를 고찰하기 위한 해석 b 이전에 말뚝의 설계지지력을 결정하기 위한 해석 a를 실시하여 설계하중을 1,550kN으로 결정하여 이를 말뚝의 두부에 작용시켰으며 터널굴착이 진행되는 동안 일정하게 유지하였다(해석 a에 대해서는 아래의 3.2절에 상세히 설명되어 있음).

터널의 굴착은 말뚝에서 종방향(Y축)으로 (-)3.0D 떨어진 위치에서 시작되어 말뚝의 하부를 지나 3.0D 떨어진 위치까지 실시되는 것으로 하였다. 여기서 D는 터널의 직경이다. 터널의 굴착은 1회에 1.0m씩 실시되는 것으로 하였고 해석은 모두 배수조건에서 실시하였다. 지하수는 지표면에 위치하는 것으로 가정하였고, 터널굴착에 의한 지하수위의 변동은 없는 것으로 가정하여 지중에 정수압을 작용시켰다. 터널의 시공은 지반굴착 및 두께 200mm의 soft 슛크리트(E=7,500MPa) 타설로 구성되며, 이후 다음 단계의 막장굴착 시 전 단계에서 타설한 soft 슛크리트의 물성치를 hard 슛크리트의 물성치(E=15,000MPa)로 변경하여 슛크리트의 강성 증가를 반영하였다. 터널의 굴착은 해석프로그램에서

제공하는 NULL요소를 이용하여 모델링하였으며, 슛크리트의 타설은 해당위치의 지반 물성치를 슛크리트로 변경함으로써 모델링하였다. 한편 임의의 위치에서 말뚝에 작용하는 축력(P)은 말뚝요소의 심도별 평균수직응력(σ_{zz})_{avg}을 아래의 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

$$P = (\sigma_{zz})_{avg} \times A \quad (1)$$

여기서 A = 말뚝의 단면적

또한 말뚝과 인접한 지반의 평균전단응력은 식 (2)를 이용하여 산정하였다.

$$\tau = (P_{i+1} - P_i)/(\pi D dz) \quad (2)$$

여기서 P_{i+1} , P_i = 말뚝요소 i+1 및 i에서의 축력, dz = 말뚝요소 i와 i+1 사이의 거리

3. 수치해석 결과 분석

수치해석을 통하여 산정된 말뚝의 축력분포, 전단응력의 분포, 말뚝-지반 사이에서의 상대변위, 말뚝의 변위 등에 대하여 다음과 같이 분석하였다.

3.1 기존 탄성이론과의 비교

앞서 언급한 바와 같이 Xu와 Poulos(2001), Kyttyodom 등(2005), Huang 등(2009)은 탄성이론을 이용하여 터널 굴착에 따른 말뚝의 거동을 분석한 바 있다(그림 3 참조). 터널

의 굴착에 의한 지반침하는 Loganathan과 Poulos(1998)이 제시한 greenfield 조건하의 해석적 방법에 의한 closed-form 공식을 이용하였으며, 이를 통하여 말뚝의 축력, 횡방향 변위 및 침하를 산정하였다. 본 연구에서는 기존 연구와의 비교를 위하여 기존 연구에서 가정한 것과 동일한 조건에서 해석을 실시하였다. 즉 지반은 탄성모델에는 적용하였으며 터널의 굴착은 평면변형률 조건에서 실시되는 것으로 가정했으며, 터널굴착 이전에 말뚝에는 상재하중이 작용하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 터널에는 별도의 지보시스템을 적용하지 않는 것으로 하였다. 본 해석은 등방조건 및 비배수 조건하에서 수행되었으며, 경계조건 및 지반의 단위중량은 적절히 가정하였다.

그림 4, 5는 Xu와 Poulos(2001)가 보고한 기존연구 및 본 연구에서 산정한 말뚝의 축력 및 횡방향 변위분포를 보여준다. 여기서 Z는 임의의 심도, L은 말뚝의 길이이다. 본 연구에서는 지반손실률(volume loss 혹은 ground loss)이 약 2.3%로 산정되었고, 기존연구와의 비교를 위해 Xu와 Poulos(2001)가 제시한 지반손실률이 2.5%인 경우의 축력 및 횡방향 변위분포와 비교하였다. 이때 지반손실률은 단위폭당 횡방향(X방향) 지표침하 면적을 단위폭당 터널의 단면적으로 나누는 값으로 정의된다(Mair 등, 1997). 본 연구에 의하면 말뚝에는 터널중심부(tunnel springline, Z/L=0.8) 부근에서 최대 1,723kN의 압축력이 발생하였고, 최대 18.5mm의 횡방향 변위가 발생하였다. 대체로 본 연구에 의한 말뚝의 축력 및 변위분포는 기존연구와 대체로 유사한 경향을 보이고 있으나 전반적으로 약간 작게 나타났다. 이는 본 연구에서 지반손실률이 약간 작게 산정되었기 때문으로 보이며, 또한 경계조

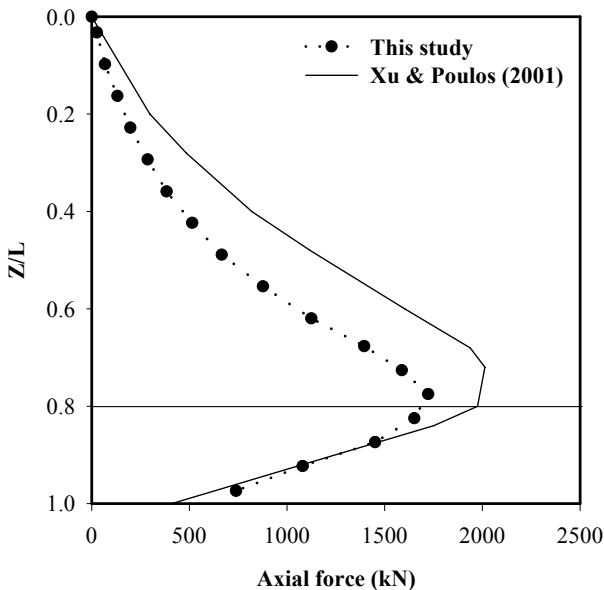


그림 4. 탄성해석에 의한 말뚝의 축력분포

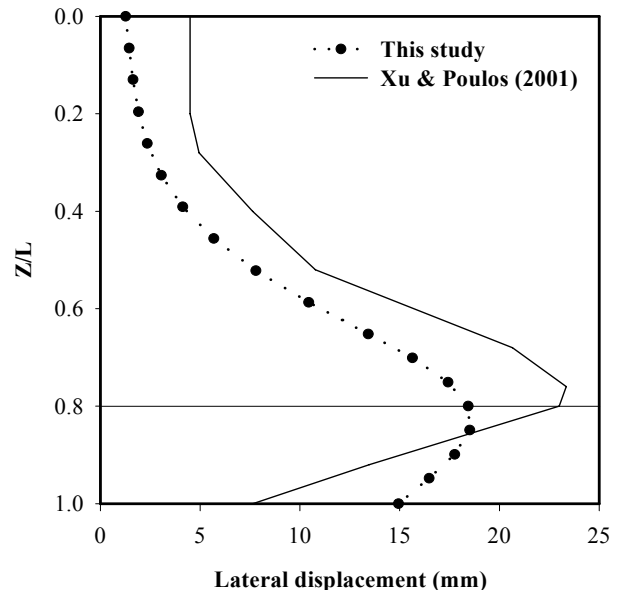


그림 5. 탄성해석에 의한 말뚝의 횡방향 변위 분포

간이 기존연구에서 가정된 것(half-space surface)과 다소의 차이를 보이기 때문으로 판단된다.

그러나 기존의 탄성이론에 의한 접근법은 Lee 등(2009)이 지적한 바와 같이 greenfield 조건에서 산정된 터널굴착에 의한 지반변위를 터널-말뚝의 상호거동분석에 이용한다는 문제점을 내포하고 있다. 즉 터널굴착에 의한 말뚝인근에서의 지반변위는 말뚝이 존재하지 않는 greenfield 조건에서 산정된 값과는 차이를 보일 수 밖에 없을 것이다. 그 밖에도 탄성이론을 사용함으로써 인해 지반의 소성항복 발생 가능성을 고려하지 못하여 말뚝-지반의 상호거동을 제대로 분석할 수 없다는 점, 단계별 터널굴착 및 터널 지보시스템에 대한 고려없이 평면변형 조건의 터널굴착을 모사한 점, 터널 굴착 이전에 말뚝에는 하중이 작용하지 않은 점 등 여러 가지 근본적인 문제점을 내포하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 3차원 해석이 필수적이라 할 것이다.

3.2 말뚝설계하중의 결정(해석 a)

그림 6은 해석 a를 통해 산정된 말뚝의 두부에 단계별 수직하중이 작용할 때의 하중-침하관계를 보여주고 있다. 작용하중이 3,000kN까지 증가할 때는 하중-침하가 거의 선형에 가까운 관계를 보이므로 근사적으로 탄성범위로 가정할 수 있으나, 이를 초과하는 경우 급격한 침하가 발생하고 있어서, 이 부근에서 항복이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이때 말뚝의 설계지지를 결정하기 위하여 국내에서 일반적으로 사용되는 Davisson(1972)의 판정법을 적용시킬 경우 약 3,100kN의 극한지지를 결정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 극한지지를 3,100kN으로 가정하고, 여기에

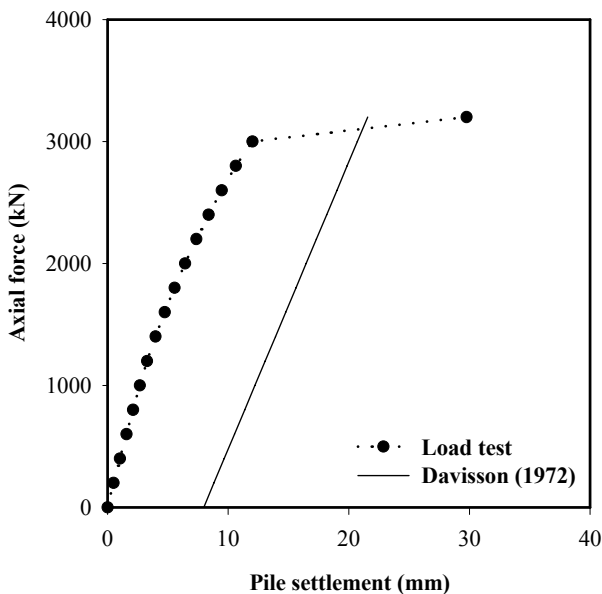


그림 6. 수치해석에 의한 말뚝두부의 하중-침하곡선

안전율 2.0을 적용시켜 말뚝의 설계지지를 P_a 을 1,550kN으로 결정하였다(말뚝두부의 침하: 4.54mm). 따라서 해석 b에서는 터널의 굴착이전에 말뚝두부에 설계하중 1,550kN이 작용하는 조건에서 터널의 굴착을 모델링하였다.

3.3 말뚝의 축력변화

그림 7은 말뚝의 두부에 설계하중이 작용하는 경우 및 터널 굴착단계별($Y/D = -2, -1, 0, 1, 2$) 산정된 말뚝의 축력분포를 설계하중 $P_a(1,550kN)$ 으로 정규화(P/P_a)하여 각각의 해석단계별로 나타내고 있다, 여기서 Y 는 터널 종방향의 위치이며 D 는 터널의 직경이다. 그림 7에 의하면 본 연구에서 가정된 말뚝은 축력 분포를 고려할 때 대부분의 설계하중(약 91%)이 주면마찰력에 의해 지지되는 마찰말뚝의 거동과 유사한 것으로 나타났다. 말뚝의 선단에는 설계하중의 약 9% 만의 하중이 작용하고 있다. 한편 터널의 굴착이 진행되면서 지반이 침하함에 따라 말뚝에 작용하는 축력이 점차 증가하고 있다. 축력은 말뚝의 상부에서 터널의 중심부 부근까지 계속 증가하고 있으나, 그 아래에서는 감소하는 형태를 보이고 있다. 특히 $Y/D = -1, 1$ 사이 구간에서 가장 큰 변화가 발생하고 있다.

그림 8은 설계하중 작용 단계에서의 축력을 '0'으로 가정하여 산정한 각 터널굴착 단계에서의 축력(P_{net})을 설계하중으로 정규화시킨 축력(P_{net}/P_a) 분포를 보여주고 있다. 다시 말해 이는 순수하게 터널의 굴착에 의해서 말뚝에 발생한 축력의 분포이다. 말뚝 대부분의 구간에서는 ($Z/L=0-0.7-0.8$) 축력이 증가하고 있으며, 터널의 중심부 하부에서는 축력이 감소하는 경향을 보이고 있다. Coutts와 Wang(2000), Pang(2006)

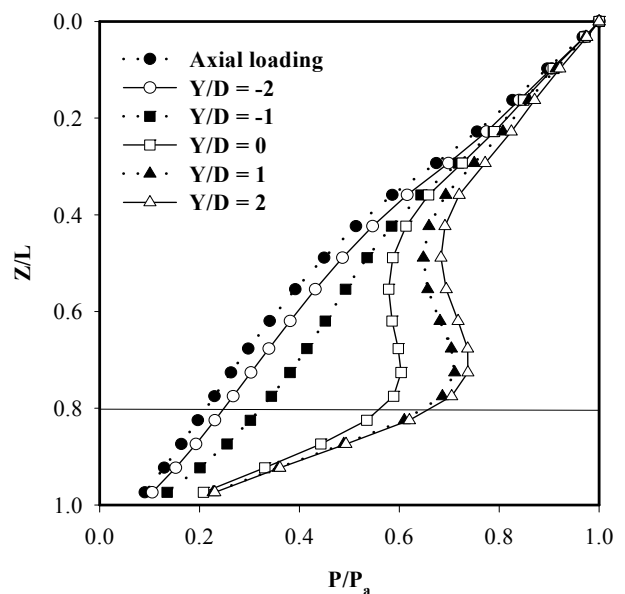


그림 7. 해석 단계별 말뚝의 정규화된 축력분포

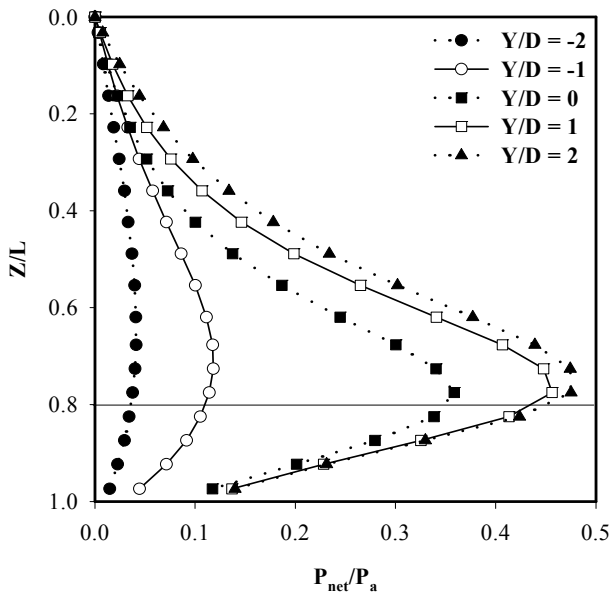


그림 8. 순수하게 터널굴착으로 인해 발생한 말뚝의 정규화된 축력분포

이 보고한 바와 같이 말뚝의 최대압축력은 터널의 중심부 부근에서 발생하고 있다. $Y/D = -1$ 에서 0 사이의 경우 $0.22P_a$ 의 축력이 발생하고, $Y/D = 0$ 에서 1 사이의 경우 $0.11P_a$ 의 축력이 발생한다. 한편 $Y/D = 1$ 이 지난 경우는 그 증가가 그리 크지 않다. 한편 최대 압축력은 터널굴착이 종료된 후 $Z/L = 0.775$ 에서 발생하며 그 크기는 $0.475P_a$ 로 이는 736.5kN에 해당되는 큰 값이다. 이러한 경향은 Coutts와 Wang(2000), Pang(2006), Lee와 Chiang(2007)이 현장실측이나 원심모형 실험을 통해 관찰한 부마찰력의 발생과도 유사한 현상이라고 할 수 있다. 한편 말뚝선단부 부근에서는 축력이 감소하고 있는데 이는 상향의 전단응력 발현으로 인한 것으로 보인다. 따라서 말뚝과 인접한 지반에서의 전단응력의 분포를 고찰할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.4 지반의 전단응력 분포

그림 9는 설계하중 작용조건에서 말뚝인근 지반의 평균 전단응력을 '0'으로 가정하고 식 (2)를 이용하여 산정한 해석단계별 지반의 평균전단응력의 분포를 보여주고 있다((-) 부호: 하향의 전단응력, (+) 부호: 상향의 전단응력). 다시 말해 이는 순수하게 터널의 굴착에 의해서 말뚝에 작용하는 전단응력의 분포이다. 말뚝의 거의 대부분에서는 ($Z/L=0.0 - 0.7 \sim 0.8$)에서는 하향의 전단응력이 발생하였고, 그 하부에서는 상향의 전단응력이 발생하고 있다. 또한 $Z/L=0.6$ 구간에서는 전단응력이 선형에 가깝게 증가하지만 그 하부에서는 지속적으로 그 값이 감소하다가 터널 중심부 하부에서는 그 부호가 바뀌고 있다. 특히 말뚝선단부 부근에서 매우 큰 상향의 전단응력이 발생하고 있음을 주목할 필요가

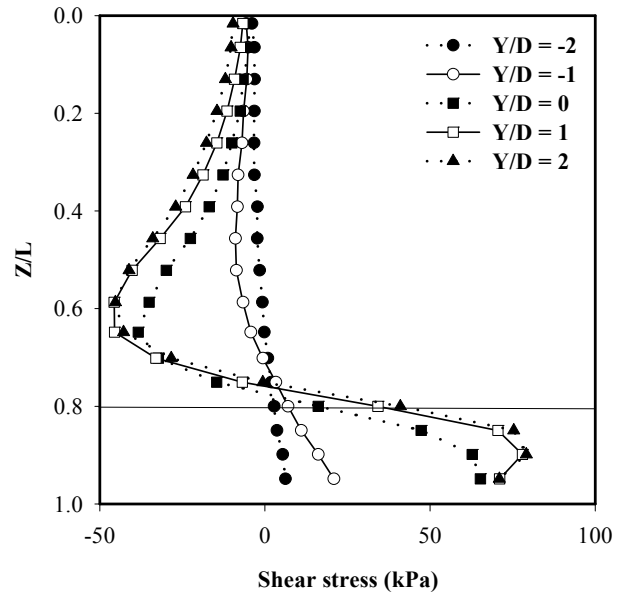


그림 9. 순수하게 터널굴착으로 발생한 전단응력의 분포

있다. $Z/L=0.775$ 구간 부근의 상/하에서는 상대변위의 부호가 바뀌고 있어 중립면이 존재함을 알 수 있는데 이는 말뚝에 최대축력이 발생하는 지점과 일치하고 있다. 즉 앞서 언급한 말뚝 축력의 분포처럼 말뚝의 상부에서 터널의 중심부까지는 하향의 전단응력이 발생하여 말뚝축력이 증가하고, 그 아래에서는 상향의 전단응력으로 인해 말뚝축력이 지속적으로 감소되는 것으로 추론할 수 있다. 이는 부마찰이 작용하는 기본메커니즘과 매우 유사하다. 이를 분석하기 위해서 말뚝과 인접한 지반 사이에서의 상대변위 분포를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.5 말뚝과 주변지반 사이의 상대변위

앞선 언급한 바와 같이 터널의 굴착에 따른 말뚝과 주변지반 사이에서의 전단거동을 분석하기 위해서는 먼저 상대변위 분포를 고찰할 필요가 있을 것이다. 여기서 상대변위는 말뚝의 침하량과 인접한 지반에서의 침하량의 차이를 의미한다(상대변위 = 말뚝의 침하 - 주변지반의 변위). 이때 앞서 언급한 것과 유사하게 터널굴착 이전 말뚝에 발생한 변위는 고려하지 않고 순수하게 터널굴착에 의한 변위만을 고려하였다. 그림 10은 해석단계별 상대변위의 분포를 보여주고 있다. 터널의 굴착이 진행될수록 말뚝의 상부에서는 하향의 상대변위가 발생하고 있고(지반 침하 > 말뚝의 침하), 그 터널중심부 하부에서는 상향의 상대변위가 발생하고 있다(말뚝: 침하, 지반: 상향의 변위). 말뚝 대부분의 구역에서는 ($Z/L=0.0-0.75$) 터널 굴착에 의해 발생한 주변지반의 침하가 말뚝의 침하량을 초과하고 있으나, 터널중심부 아래에서는 ($Z/L=0.75-1.0$)에서는 상향의 지반변위로 인하여

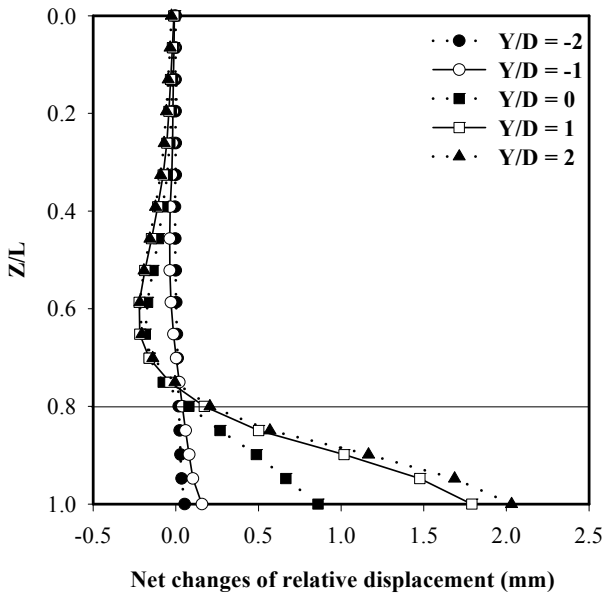


그림 10. 순수하게 터널굴착에 의한 발생한 말뚝-인근지반의 상대변위 분포

여 상향의 상대변위가 발생하고 있다. 한편 터널중심부 인 근에서는 상대변위가 점점 감소하다가 그 부호가 바뀌는 형태를 나타내고 있다. 즉 말뚝 하부에서는 터널굴착으로 인한 상향의 지반변위 발생으로 지반이 말뚝의 침하에 저항하는 상황이 발생하게 된다. $Z/L=0.75$ 부근에서는 말뚝과 인 근지반 사이에서의 상대변위가 '0'인 중립면(neutral plane)이 위치하는데 이는 압밀이 진행 중인 지반에 근입된 말뚝에 작용하는 부마찰과 유사하여 결국 말뚝의 상부에는 하향의 전단응력이 하부에는 상향의 전단응력이 발생할 것으로 예상된다. 이러한 전단응력의 분포특성으로 인해 궁극적으로 말뚝에는 앞서 보인 것처럼 압축력이 발생하게 되는 것으로 판단된다.

3.6 말뚝두부의 침하

그림 11은 터널 굴착이 진행되는 동안의 말뚝두부의 침하변화를 나타내고 있다. 그림에서는 터널굴착 이후 말뚝두부의 침하(δ)를 터널굴착 이전 말뚝에 작용한 설계하중에 의해 발생한 초기침하량(δ_i)으로 정규화한 값인 δ/δ_i 으로 나타내어 터널의 굴착이 진행되는 동안의 변화를 보여주고 있다. 터널 굴착 동안 말뚝의 침하는 지속적으로 증가하고 있으며, 말뚝선단의 하부 부근($Y/D=0$)이 굴착될 때 가장 크게 증가하고 있으며, 터널굴착이 말뚝하부를 지난 이후는 그 증가속도가 점진적으로 감소되는 것으로 나타났는데 이러한 경향은 Lee와 Ng(2005)가 보고한 것과 유사하다. 이는 터널 중심부 상부에서 발생한 부마찰의 대부분이 터널굴착으로 인해 터널 중심부 하부에서 발생한 상향의 지지력으로

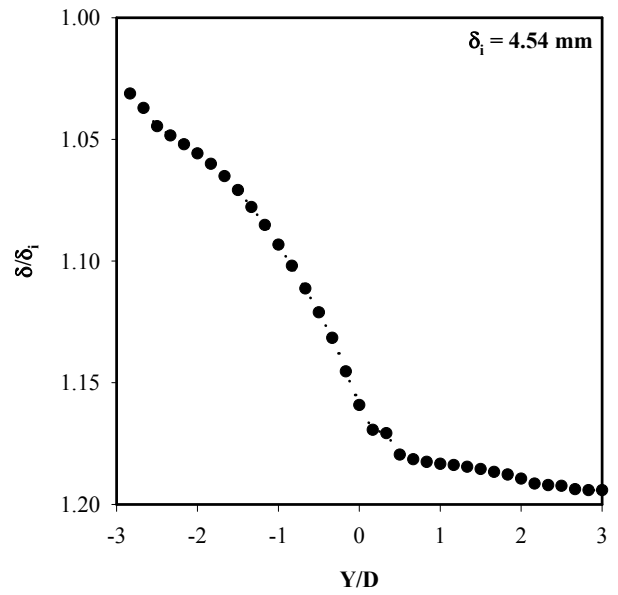


그림 11. 말뚝두부의 침하

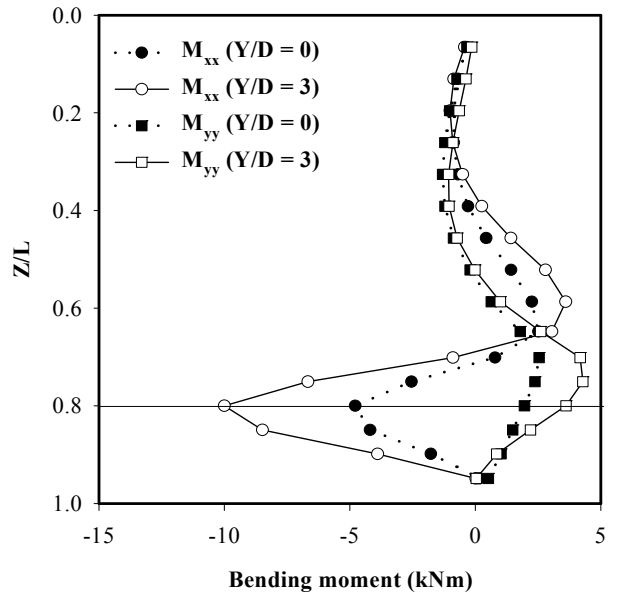


그림 12. 말뚝에 작용하는 모멘트 분포

저항되고 있기 때문인 것으로 분석된다. 터널굴착 후 최종 말뚝침하인 5.42mm는 터널 굴착 이전에 약 1,765kN의 압축력이 말뚝에 작용하는 경우에 해당되는 값으로(그림 6 참조), 터널의 굴착으로 인한 말뚝의 침하증가로 인한 겉보기지지력(apparent pile capacity) 감소는 그리 크지 않다고 할 수 있다. 즉 말뚝의 안전율이 당초의 2.0에서 1.75(3,100kN/1,765kN = 1.75)로 약 12.5% 감소하였다.

한편 터널굴착 종료 후 ($Y/D=3$) 말뚝의 횡방향 및 종방향 수평변위는 각각 0.8mm, 1.7mm 로 침하와 유사하게 터널굴착으로 인한 말뚝의 변위는 미미하다고 할 수 있다. 그림 12는 말뚝의 변위를 이용하여 산정한 $Y/D = 0, 3$ 인 경

우의 횡방향 모멘트 M_{xx} 및 종방향 모멘트 M_{yy} 의 분포를 보여주고 있다. $Y/D=3$ 인 경우 $Y/D=0$ 인 경우와 비교하여 약 2배의 모멘트가 발생함을 알 수 있다. 터널굴착이 종료된 후 말뚝에는 $M_{xx} = -10.0\text{kNm}$, $M_{yy} = 4.3\text{kNm}$ 의 최대 모멘트가 발생하고 있다. 말뚝에 발생한 최대 휨모멘트 -10kNm 는 말뚝재료의 허용휨모멘트인 49.1kNm 의 20.4%에 해당하는 값으로, 균열발생의 가능성은 높지 않다고 할 수 있다(콘크리트의 허용휨압축강도를 4MPa 로 가정, 철근의 영향은 고려하지 않음). 이때 횡방향 모멘트가 종방향 모멘트보다 크게 산정된 것은 Pang(2006)이 보고한 바와 유사하며, 말뚝의 최대변위는 종방향이 더 크지만 변위의 분포는 횡방향으로 더 급격하게 변하기 때문이다.

3.7 수직 및 수평응력의 변화

그림 13, 14는 두 해석 단계별 ($Y/D=0, 3$) 말뚝주변 지반의 평균 수평 및 수직응력의 분포를 해석초기에 가정한 지중 응력상태와 비교하여 보여주고 있다. 터널의 굴착이 진행됨에 따라 응력이 변하고 있는데 상부에서 터널의 중심부까지는 응력의 변화가 거의 없는 편이다. 그러나 터널중심부 아래에서는 비교적 큰 응력의 변화가 발생하였다. 수직응력은 최대 109kPa 가까이 감소하고 있으며, 반면 수평응력의 변화는 26kPa 로 상대적으로 작게 나타났다. 즉 수직응력의 감소가 수평응력의 감소에 직접적으로 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 말뚝-지반 사이의 전단응력 전이는 지중응력 변화보다는 주로 상대변위 변화와 더 깊이 관련되어 있다고 할 수 있다.

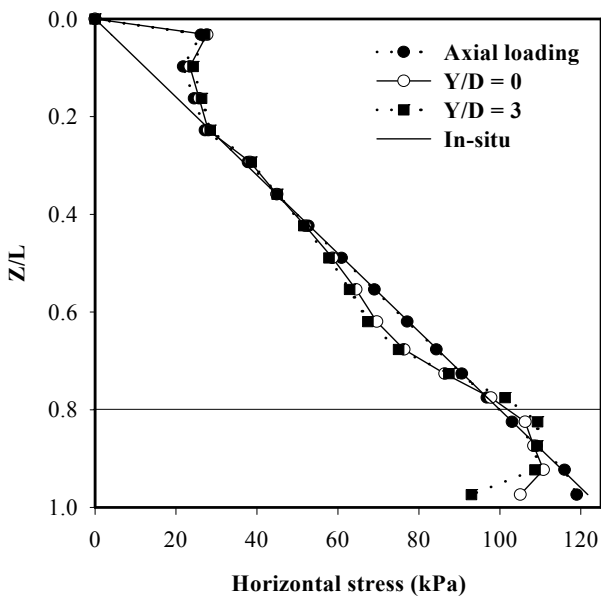


그림 13. 말뚝 인근 지중의 수평응력 분포

3.8 말뚝 인근지반의 소성항복 및 소성변형

앞서 터널의 굴착이 진행됨에 따라 점진적으로 말뚝 및 인근 지반에 침하가 발생함을 보였다. 따라서 말뚝-지반의 사이의 상대변위 발생으로 인한 전단응력 전이과정을 통하여 미끄러짐(soil slip) 혹은 소성항복(plastic yielding)이 발생하는 구역이 발생할 것으로 예상된다. 이를 고찰하기 위하여 말뚝 인근지반에서 소성항복이 발생하는 과정을 분석하였다. 터널굴착 이전에 말뚝의 두부에 설계하중이 작용하는 경우 말뚝두부 부근에서만 소성항복이 발생하고 있다 ($Z/L=0.0 - 0.26$). 즉 설계하중 작용하에서는 말뚝과 접한 지반의 대부분이 탄성상태에 있음을 알 수 있다. 그러나 터널의 굴착이 진행됨에 따라 터널중심부의 하부를 중심으로 소성항복이 발생하는 구간이 점진적으로 확장되어 터널의 굴착이 $Y/D=0$ 까지 진행된 경우 소성항복이 발생한 범위가 터널 중심부의 하부에서 발생하여 $Z/L=0.8-1.0$ 로 확장되었다. 한편 터널의 굴착이 종료된 후 ($Y/D=3$) 항복이 발생하는 구간은 $Z/L=0.59-0.70$, $0.8-1.0$ 로 더 확장되었다. 한편 $Z/L=0.7-0.8$ 사이에서는 소성항복이 발생하고 있지 않는데 이는 중립면의 위치와 일치한다. 즉 이 구간에서는 상대변위의 부호가 바뀌면서 상대변위가 발생하지 않거나 그 크기가 작아서 소성항복이 발생하지 않는다고 할 수 있다.

따라서 터널의 굴착에 따른 지반침하에 의해 추가적으로 발생한 말뚝과 주변지반 사이에서 발생한 상대변위에 의한 것으로 보인다. 일반적인 경우 말뚝은 설계하중 작용 하에서 탄성거동을 보인다고 가정할 수 있다. 그러나 터널의 굴착에 의해서 추가적으로 말뚝 및 지반침하가 발생하는 경우 그 크기에 따라서는 말뚝 주변지반에서 광범위한 소성항복이

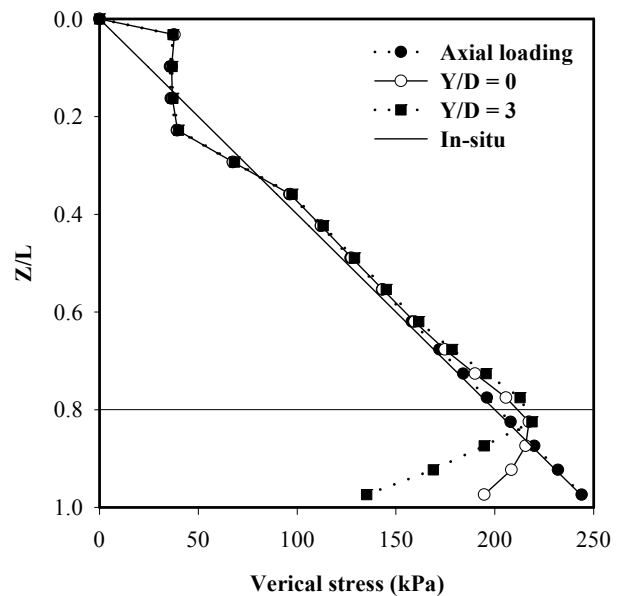


그림 14. 말뚝 인근 지중의 수직응력 분포

발생할 가능성이 있음을 보여준다. 즉 이러한 경우 지반의 항복을 고려한 해석을 실시할 필요가 있을 것으로 보이며, 향후 터널굴착에 따른 말뚝과 인접한 지반에서의 소성거동에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 측면으로 시공되는 터널에 의한 단독말뚝의 거동 변화를 3차원 유한차분해석을 통하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 수치해석 결과에 의하면 터널의 굴착에 의해 인근 말뚝-지반 사이의 상대변위 발생으로 인해 말뚝에 압축력이 발생한다. Xu & Poulos(2001)에 의한 기존의 연구와 동일한 조건에서 실시한 수치해석 결과는 매우 유사한 경향을 보였다.
- (2) 터널의 굴착이 진행됨에 따라 말뚝 대부분의 구간에서 하향의 전단응력(하향의 상대변위)이 발생하고, 터널의 중심부 아래에서는 상향의 전단응력(상향의 상대변위)이 발생한다. 이러한 전단응력 성분의 상호작용으로 인해 말뚝에는 압축력이 발생하게 되어, 부마찰력 발생과 유사한 현상이 발생하였다. 본 연구에서 가정한 조건에 의하면 터널의 굴착으로 인해 말뚝에는 설계지저력의 최대 47.5%의 압축력이 발생하는 것으로 나타났으며, 말뚝재료 허용모멘트의 약 20.4%에 해당하는 모멘트가 발생하여 말뚝에 구조적인 문제가 발생할 가능성은 크지 않은 것으로 분석되었다.
- (3) 본 연구에서 가정한 해석 조건하에서는 터널의 굴착으로 인한 말뚝 침하의 크기는 그리 크지 않은 것으로 나타났으며, 따라서 말뚝 사용성의 감소나 구조적으로 문제가 발생할 가능성은 작은 것으로 분석되었다.
- (4) 터널의 굴착이 진행됨에 따라 말뚝과 인접한 지반에서는 소성항복이 발생하는 영역이 확장되는 것으로 나타났다. 따라서 향후 말뚝-지반 사이에서의 소성항복에 대한 보다 심도 있는 분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (5) 향후 터널의 위치에 대한 말뚝의 상대위치에 따른 말뚝의 거동 및 군말뚝의 거동을 분석할 필요가 있을 것이다. 또한 본 연구에서는 순수하게 수치해석을 통한 터널의 굴착에 따른 말뚝의 거동변화에 대한 분석을 실시하였다. 따라서 적절한 실내실험을 실시하거나 현장계측 자료와의 비교분석 등을 통한 추가연구가 필요할 것으로 보인다.

참고 문헌

1. 대한토목학회(2005), 도심지 터널 근접시공을 중심으로, 제5회 터널 시공기술 향상 대토론회, 대한토목학회.
2. Bezuijen, A. and Schrier, J. V. D.(1994), *The Influence of a Bored Tunnel on Pile Foundations*, Centrifuge 94, (Edited by Lee & Tan), Balkema, Rotterdam, pp. 681~686.
3. Cheng, C. Y., Dasari, G. R., Chow, Y. K. and 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.
4. Cheng, C. Y., Dasari, G. R, Leung, C. F. and Chow, Y. K.(2003), *Finite Element Study of Tunnel-soil-pile Interaction*, National University of Singapore Publication, Hulme Prize Winning Paper.
5. Chen, L. T., Poulos, H. G. and Loganathan, N.(1999), Pile Responses Caused by Tunnelling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp. 207~215.
6. Chiang, G. H.(2002), *The Load Transfer Behavior of Piles Caused by Nearby Tunnelling*, Master thesis, National Central University, Taiwan (in Chinese).
7. Coutts, D. R. and Wang, J.(2000), *Monitoring of Reinforced Concrete Piles under Horizontal and Vertical Loads due to Tunneling*, Tunnels and Underground Structures, Balkema, London, pp. 541~546.
8. Davisson, M. T.(1972), High Capacity Piles, *Proceedings and Lecture Series in Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, pp. 82~112.
9. Huang, M., Zhang, C. and 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*, Ph D thesis, University of Cambridge, pp. 3-1~3-28, 5-1~5-70.
11. Jacobsz, S. W.(2003), Tunnelling Effects on Piled Foundations, *Tunnels and Tunnelling International*, pp. 28~31.
12. Kaalberg, F. J., Teunissen, E. A. H., van Tol, A. F. and Bosch, J. W.(2005), Dutch Research on the Impact of Shield Tunnelling on Pile Foundations, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, *Proceedings of 5th International Conf. of IC 28 of the ISSMGE*, pp. 123~133.
13. Kitiyodom, P., Matsumoto, T. and 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. Lee, C. J. and Jacobsz, S. W.(2006), The Influence of Tunnelling on Adjacent Piled Foundations, *ITA 2006*, CD.
15. Lee, C. J. and Chiang, K. H.(2007), Responses of Single Piles to Tunnelling-induced Soil Movements in Sandy Ground, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, pp. 1224~1241.
16. Lee, G. T. K., and Ng, C. W. W.(2005), The Effects of Advancing Open Face Tunnelling on an Existing Loaded Pile, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 2, pp. 193~201.
17. Lee, R. G., Turner, A. J., and Whitworth, L. J.(1994), Deformations Caused by Tunneling beneath a Piled Structure, *Pro-*

- ceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, Vol. 2, pp. 873~878.
18. Lee, S. W., Cheang, W. W. L., Swolfs, W. M. and Brinkgreve, R. B. J.(2009), Tunneling Near a Building Supported by End-bearing Piles, *Proc. of Hong Kong Tunneling Conf*, pp. 135~145.
 19. Lee, S. W., Choy, C. K. M., Cheang, W. W. L., Swolfs, W. and Brinkgreve, R.(2010), Modeling of Tunneling Beneath a Building Supported by Friction Bored Piles, *The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference* (Accepted).
 20. Lee, Y. J.(2004), *Tunnelling Adjacent to a Row of Loaded Piles*. Ph D Thesis, University College London, University of London, pp. 35~64.
 21. Loganathan, N. and Poulos, H. G.(1998), Analytical Prediction for Tunneling-induced Ground Movement in Clays. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp. 846~856.
 22. Loganathan, N., Poulos, H. G. and Stewart, D. P.(2000), Centrifuge Model Testing of Tunneling-induced Ground and Pile Deformations, *Geotechnique*, Vol. 50, No 3, pp. 283~294.
 23. Mair, R. J. and 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.
 24. Morton, J. D. and King, K. H.(1979), Effect of Tunneling on the Bearing Capacity and Settlement of Piled Foundation, *Proceedings of Tunneling 79*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 57~68.
 25. Mroueh, H. and Shahrour, I.(2002), Three-dimensional Finite Element Analysis of the Interaction between Tunneling and Pile Foundation. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, Vol. 26, pp. 217~230.
 26. Ong, O. W., Leung, C. F., Yong, K. Y. and Chow, Y. K. (2006), Pile Responses due to Tunneling in Clay, *Physical Modeling in Geotechnics*, 6th International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, Taylor & Francis Group, London, pp. 1177~1182.
 27. Pang, C. H.(2006), *The Effects of Tunnel Construction on Nearby Pile Foundation*, Ph D thesis, The National University of Singapore, pp. 27~56.
 28. Selemetas, D.(2005), *The Response of Full-scale Piles and Piled Structures to Tunneling*, Ph D thesis, University of Cambridge, pp. 113~219.
 29. Vermeer, P. A., and Bonnier, P. G.(1991), Pile Settlements due to Tunneling, *Proc. 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Florence, Balkema, Vol. 2, pp. 869~872.
 30. Xu, K. J. and Poulos, H. G.(2001), 3-D Elastic Analysis of Vertical Piles subjected to "Passive" Loadings, *Comput. Geotech.* Vol. 28, pp. 349~375.
 31. Yong, K. Y. and Pang, C. H.(2004), Geotechnical Challenges of the Mass Rapid Transit(MRT) System in Singapore, *In Malaysian Geotechnical Conference 2004*, March 2004, Special Lecture.

(접수일: 2010. 9. 11 심사일: 2010. 9. 15 심사완료일: 2010. 10. 26)