

# Soil slip을 고려한 터널굴착에 의한 단독말뚝의 거동연구

## A Study on the Behaviour of a Single Pile to Tunnelling Including Soil Slip

이 철 주<sup>†</sup>

Lee, Cheol-Ju

**ABSTRACT** : Three-dimensional (3D) numerical analyses have been conducted to study the behaviour of a single pile to tunnelling. The numerical analysis has included soil slip at the pile-soil interface. In the numerical analyses the interaction between the tunnel and the pile constructed in weathered soil and rock has been analysed. The study includes the pile settlement, the relative shear displacement between the pile and the soil and the shear stresses at the interface and the axial force on the pile. In particular, the shear stress transfer mechanism at the pile-soil interface related to the tunnel advancement has been rigorously analysed. Due to changes in the relative shear displacement at the pile-soil interface during the tunnel advancement, the shear stress and the axial force distributions along the pile have been changed. Upward shear stress developed at most part of the pile ( $Z/L=0.0-0.8$ ), while downward shear stress is mobilised near the pile tip ( $Z/L=0.8-1.0$ ) resulting in tensile force on the pile, where  $Z$  is the pile location and  $L$  is the pile length. Some insights into the pile behaviour to tunnelling obtained from the numerical analyses will be reported and discussed.

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

**요 지** : 본 연구에서는 단독말뚝의 주변에서 실시되는 터널의 굴착이 지반 및 말뚝에 미치는 영향을 3차원 수치해석을 통하여 분석하였다. 수치해석에서는 말뚝과 주변지반 사이에 경계면요소를 이용하여 소성항복 발생조건을 모델링하였다. 수치해석을 통하여 풍화도 및 풍화암에 시공된 터널과 말뚝의 상호거동에 대한 분석을 실시하였다. 수치해석을 통해 말뚝의 침하, 말뚝과 지반 경계면에서의 상대변위, 전단응력 및 말뚝의 축력변화를 분석하였다. 특히 터널의 굴착과 관련된 전단응력의 전이과정에 대한 심도있는 분석을 실시하였다. 터널굴착에 의한 말뚝-지반 경계면에서 상대변위의 변화로 인하여 말뚝에 작용하는 전단응력 및 축력의 분포가 변하게 된다. 말뚝 본체 대부분에서는 상향의 전단응력이 발생하는 반면( $Z/L=0.0-0.8$ ), 말뚝선단부근에서는( $Z/L=0.8-1.0$ ) 하향의 전단응력이 발생하여 말뚝에 인장력이 발생된다. 수치해석을 통해서 터널굴착이 말뚝 거동에 미치는 영향을 상세하게 분석하였다.

**주요어** : 수치해석, 말뚝, 미끄러짐, 지반-구조물 상호거동, 터널굴착

## 1. 서 론

최근 도심지에서 말뚝으로 지지되는 건축구조물이나 토목구조물과 인접한 지반의 하부를 굴착하여 터널을 시공하는 경우가 빈번하게 일어나고 있다. 이때 터널의 굴착에 의한 지중응력의 변화 및 지반침하 등에 의해 말뚝의 거동에 큰 변화가 발생하게 된다. 그림 1은 사용중인 교량 기초의 하부에 Channel Tunnel Rail Link Project 의 터널이 시공된 실제사례에 대한 개념도를 보여주고 있다(Jacobsz 2003). 교량의 기초는 현장타설말뚝으로 런던 점토(London clay) 층에 시공된 마찰말뚝이며 직경 8m의 터널이 군말뚝의 하부에 시공되었으며 터널의 크라운과 말뚝선단의 최단 이격거리는 약 1.5m 이다. Jacobsz(2003)는 터널의 굴착으로 인해

약 8mm의 말뚝침하가 발생하였음을 보고한 바 있다. 즉 터널의 굴착에 의해서 상재하중과는 무관하게 말뚝에 추가적인 침하가 유발되어 말뚝의 기능성 저하에 따른 상부구조물의 사용성에 큰 문제가 발생할 수도 있음을 알 수 있다.

이러한 상황에 대해서 유럽이나 싱가포르 등에서 다수의 연구가 실시되었다. Vermeer & Bonnier(1991), Loganathan & Poulos(1998), Chen 등(1999), Mroueh & Shahrour(2002), Cheng 등(2003), Lee(2004), Pang 등(2005), Lee & Ng(2005), Lee & Jacobsz(2006), Cheng 등(2007), Lee & Bassett(2007) 등은 수치해석을 통해 이를 연구하였으며, Yong & Pang(2004), Jacobsz(2003), Selemetas(2005), Kaalberg 등(2005), Pang(2006) 등은 현장실측자료의 분석을 통해 터널굴착에 따른 말뚝의 거동을 분석한 바 있다. 또한 Bezuijen & Schrier(1994), Chiang

<sup>†</sup> 정희원, 강원대학교 토목공학과 조교수(E-mail : cj32@kangwon.ac.kr)

(2002), Jacobsz(2002, 2003), Lee(2004), Lee & Bassett(2007), Lee & 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). 그러나 국내의 경우 아직까지 이 분야에 대한 연구는 매우 제한적이라고 할 수 있으며, 터널-말뚝 상호간의 거동(tunnel-pile interaction)에 대한 근본적인 이해보다는 주로 실무적인 문제와 관련된 터널 및 말뚝 주변지반의 보강에 주안점을 두고 있는 실정이다. 한편 이철주 등(2007)은 터널굴착에 의하여 말뚝 주변지반에서 광범위한 소성항복(plastic soil yielding)이 발생할 수 있는 것으로 보고하였다. 그러나 Cheng 등(2003) 및 Cheng 등(2007)을 제외한 기존연구의 대부분은 말뚝과 주변지반 사이에서의 상대변위 발생을 허용하지 않는 연속체 해석(continuum analysis)을 바탕으로

실시하였기 때문에 소성항복(plastic soil yielding)이 터널-말뚝의 상호거동에 미치는 영향을 상세히 규명하지는 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 터널굴착에 의한 단독말뚝의 거동에 대한 심도있는 분석을 실시하기 위하여 3차원 수치해석을 실시하였으며, 유한차분 해석프로그램인 Flac-3D를 이용하였다(Itasca Consulting Group). 특히 말뚝과 주변지반 사이에 경계요소(interface)를 지정하여 전단변형이 크게 발생하는 경우 미끄러짐(soil slip)의 발생을 허용할 수 있도록 하였다. 수치해석 결과를 분석하여 말뚝의 침하, 말뚝 겹보기 지지력(apparent pile capacity)의 변화 및 전단응력 전이 메커니즘 및 말뚝의 축력 변화 과정 등에 대한 분석을 실시하였다. 본 연구를 통하여 터널의 굴착에 의한 말뚝-지반경계면에서의 상호거동변화에 대해 보다 명확하게 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 수치해석

### 2.1 유한차분해석 그리드

본 연구에서는 3차원 유한차분해석을 통하여 터널굴착에 의한 터널 및 말뚝의 상호 거동에 대한 분석을 실시하였다. 그림 2(a) 및 2(b)는 수치해석에 적용된 해석그리드 및 개략 단면도를 보여주고 있다. 해석 그리드는 크게 하부의 터널과 터널 크라운 중앙의 상부에 위치한 말뚝 및 인근의 지반으로 구성되어 있다. 이때 단독말뚝의 중심이 터널 크라운의 중앙부 바로 위에 위치하는 것으로 가정하였다. 터널 크라운 중앙에서 말뚝 선단부까지의 수직거리는 2m이다. 해석에서는 직경 10m의 원형 터널을 적용하였으며, 말뚝은

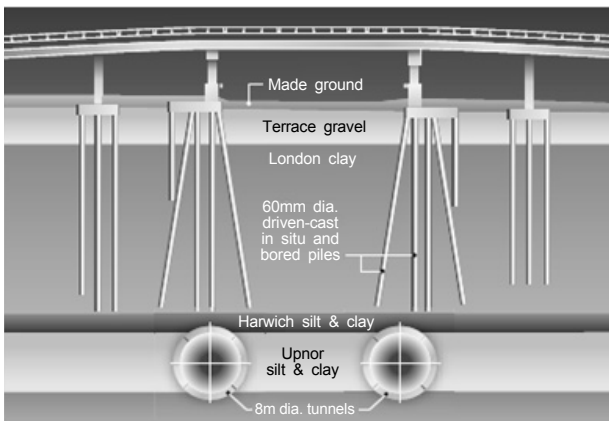
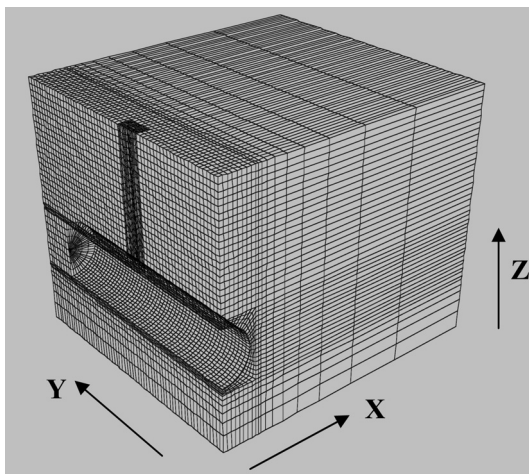
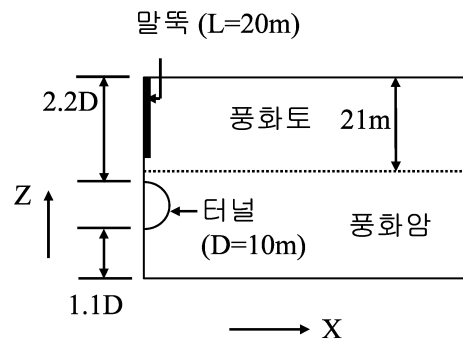


그림 1. 기존 교량 기초의 하부에서 건설된 런던 Channel Tunnel Rail Link Project의 터널 시공 개념도(Jacobsz 2003)



(a)



(b)

그림 2. 3차원 유한차분 해석 그리드 (a), 터널 및 말뚝의 위치 (b)

한 변의 크기 0.5m, 길이 20m를 가지는 정사각형 콘크리트 말뚝으로 가정하였다. 본 연구에서는 해석범위를 X방향에 대한 좌우대칭을 고려하여 전체의 1/2에 대해서만 해석을 실시하였다. 해석에 적용된 지층은 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 상부의 풍화토 및 하부의 풍화암으로 구성되어 있다. 말뚝은 풍화토 지반에 설치되었으며, 터널은 풍화암층에서 시공되었다. 터널은 150mm의 두께를 가지는 슛크리트에 의해 지지되는 것으로 가정하였다.

해석에서 가정한 경계조건(X, Y 및 Z의 범위)은 매개변수 분석(parametric study)을 통하여 결정하였다. 경계조건은 수평방향(X 방향)으로 5.0D, 터널의 하부로 1.1D로 설정하였다. 해석 그리드의 바닥(Z=0m)은 pin으로 고정되었으며, 측면(X=-50m, 50m; Y=-19.5m, 26.25m)은 roller로 고정되었다. 본 연구에서는 해석조건을 변경시키며 2회의 수치해석을 실시하였는데 터널굴착 모델링에 앞서서 터널굴착 과정이 포함되지 않은 말뚝의 하중-침하관계만을 분석하기 위한 해석(해석 0으로 칭함) 및 설계하중이 작용하는 가운데 터널굴착으로 인한 말뚝의 거동분석을 위한 해석(해석 1로 칭함)을 실시하였다.

## 2.2 지반 및 기타재료의 모델링

수치해석에서 지반요소(풍화토 및 풍화암)를 모델링하기 위하여 Mohr Coulomb 모델을 적용하였고, 말뚝 및 슛크리트에는 탄성모델을 적용하였다. 수치해석에 적용된 각종 물성치는 국내 터널설계에서 일반적으로 사용되는 값을 이용하였다. 슛크리트의 경우 시간에 따라 강성이 증가하는 점을 반영하기 위하여 터널시공 순서에 따라 soft 슛크리트(스�크리트 타설 직후) 및 hard 슛크리트(다음 막장의 슛크리트가 타설될 때)의 경우로 구분하여 모델링을 실시하였다. 본 해석에서 hard 슛크리트는 soft 슛크리트보다 2배 증가한 탄성계수를 가지는 것으로 가정하였다. 해석에서 가정한 지반, 말뚝 및 슛크리트의 물성치는 표 1에 정리되어 있다.

표 1. 유한차분해석에 적용된 물성치

재료	Model	탄성계수 (MPa)	점착력 (kPa)	$\nu'$	c (°)	$\phi_c$ (°)	$K_0$	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )
말뚝	Isotropic elastic	25,000	.	0.2	.	.	0.01	25
Soft 슛크리트		7,500		0.2				
Hard 슛크리트		15,000		0.2				
풍화토	Mohr	50	20	0.3	35	10	0.5	20
풍화암	Coulomb	100	50	0.3	45	10	0.5	20

Note;  $\nu'$  = 포아송 비,  $\phi_c$  = critical state friction angle,  $\psi$  = 팽창각,  $K_0$  = 정지토압계수,  $\gamma_t$  = 단위중량

## 2.3 해석조건 및 과정

터널의 굴착을 모델링하는 것에 앞서 초기평형 상태도달, 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 residual force 등의 영향은 수치해석 과정에 포함시키지 않았다. 즉 말뚝의 시공에 의한 주변지반의 물성이나 응력변화는 고려하지 않았고, 말뚝에 발생할 수 있는 겉보기 압축력 또한 고려하지 않았다.

본 연구에서는 Flac-3D의 interface 요소를 이용하여 말뚝과 경계면 사이의 상호거동을 모델링하여 항복발생시 말뚝과 지반의 경계면에서 상대변위의 발생을 허용하였다. FLAC-3D의 interface 요소는 말뚝과 지반사이의 경계면에 동일한 좌표를 가지는 두 개의 node 를 지정하여 말뚝과 지반 사이에서의 상대변위 발생을 허용할 수 있게 한다. Interface 요소의 모델링을 위해서는 전단( $K_s$ , shear stiffness), 수직강성( $K_n$ , normal stiffness), 경계면에서의 점착력(cohesion), 마찰각(friction angle) 및 팽창각(dilation angle) 등이 요구된다. 이에 본 연구에서 interface 요소의 입력물성치 매개변수연구(parametric study) 및 기존의 유사연구(Chen & Martin, 2001)를 참조하여 그 영향을 검토하였으며, 최종적으로  $K_s$ 는 50 MPa/m,  $K_n$ 는 100MPa/m의 값을 적용하였다. 한편 경계면에서의 전단강도 상수는 풍화토의 물성치와 동일하다고 가정하였다.

말뚝의 두부에는 터널굴착에 의한 말뚝거동을 분석하기 위한 해석(해석 1) 이전에 수치해석(해석 0)을 실시하여 결정한 말뚝의 설계지지력인 800kN의 설계하중을 말뚝의 두부에 작용시켰으며 터널굴착이 진행되는 동안 일정하게 유지시켰다[해석 0에 대해서는 아래의 3.1 절에 자세히 설명되어 있음].

그림 3(a)-3(b)는 전체적인 해석과정에 대한 개념도를 보여주고 있다. 터널의 굴착은 말뚝에서 종방향(Y축)으로 (-)1.95D 떨어진 위치에서 시작되어 말뚝의 하부를 지나 1.95D 떨어

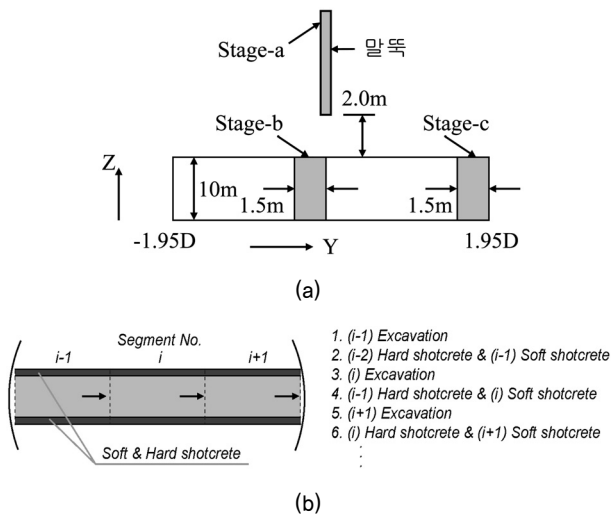


그림 3. 해석 과정 및 터널굴착 모델링 방법(not to scale)

진 위치까지 실시되는 것으로 하였다(그림 3(a)). 해석결과를 분석하기 위하여 말뚝에 설계하중을 가한 단계를 Stage-a, 터널이 말뚝의 바로 아래까지 굴착한 해석단계를 Stage-b 그리고, 터널의 굴착이 종료된 경우를 Stage-c로 정의하였다. 터널의 굴착은 1회에 1.5m씩 실시되는 것으로 하였고 해석은 모두 배수조건에서 실시하였다. 지하수는 지표면에 위치하는 것으로 가정 하였고, 터널굴착에 의한 지하수위의 변동은 없는 것으로 가정하여 지중에 정수압을 작용시켰다. 터널의 시공은 지반굴착 및 두께 150mm의 soft 슛크리트 ( $E=7,500\text{MPa}$ ) 타설로 구성되며, 이후 다음 단계의 막장굴착 시 전 단계에서 타설한 soft 슛크리트의 물성치를 hard 슛크리트의 물성치( $E=15,000\text{MPa}$ )로 변경하여 슛크리트의 강성 증가를 반영하였다(그림 3(b)). 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  $(\sigma_{zz})_{\text{avg}}$ 을 아래의 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

$$P = (\sigma_{zz})_{\text{avg}} \times A, \quad \text{여기서 } A = \text{말뚝의 단면적} \quad (1)$$

### 3. 수치해석 결과

수치해석을 통하여 산정된 말뚝의 침하, 말뚝-지반 경계면에서의 상대변위와 전단응력의 분포 및 말뚝의 축력분포 등에 대하여 아래와 같이 분석하였다.

#### 3.1 말뚝설계하중의 결정(해석 0)

그림 4는 말뚝의 두부에 수직하중이 작용할 때의 하중-침

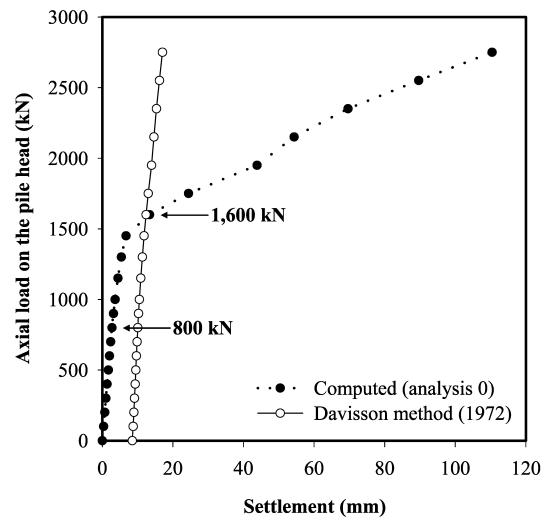


그림 4. Load-settlement relation

하관계를 보여주고 있다. 작용하중이 1,500kN 까지 증가할 때는 하중-침하가 거의 선형관계를 보이므로 근사적으로 탄성거동을 하고 있다고 가정할 수 있으나 이를 초과하는 경우 급격한 침하가 발생하고 있어서, 이 부근에서 항복이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이때 말뚝의 설계지지력을 결정하기 위하여 국내에서 일반적으로 사용되는 Davisson(1972)의 판정법을 적용시킬 경우 약 1,600kN의 극한지지력을 결정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 극한지지력을 1,600kN으로 가정하고, 여기에 안전율 2.0을 적용시켜 말뚝의 설계지지력을 800kN으로 결정하였다(말뚝의 침하: 2.8mm). 설계하중 작용하에서는 말뚝의 두부( $Z/L=0.0$ )에서만 소성항복이 발생하였으며, 다른 구역에서는 모두 탄성거동을 보이고 있다. 여기서  $Z$ 는 말뚝 임의의 위치에서의 심도,  $L$ 은 말뚝의 길이이다(20m). 이후 분석에서는 그림 4의 하중-침하관계를 이용하여 터널의 굴착에 따른 말뚝의 거동변화를 고찰하고, 이를 통해 말뚝의 겉보기 지지력(apparent pile capacity) 변화를 분석하였다. 해석 1에서는 말뚝두부에 설계하중 800kN이 작용하는 조건 하에서 터널의 굴착을 모델링하였다.

#### 3.2 말뚝의 침하(해석 1)

그림 5는 터널 굴착이 진행되는 동안의 말뚝두부의 침하 변화를 나타내고 있다. 여기서  $Y$ 는 터널 종방향의 거리이며  $D$ 는 터널의 직경이다. 그림에서는 터널굴착 이후 말뚝 두부의 침하를 터널굴착 이전 말뚝에 작용한 설계하중(Stage-a)에 의해 발생한 초기침하량( $\delta_i$ )으로 정규화한 값인  $\delta/\delta_i$ 으로 나타내어 터널의 굴착이 진행되는 동안의 변화를 보여주고 있다. 여기서  $\delta$ 는 터널굴착 이후 말뚝의 두부침하이다. 터널의 굴착동안 말뚝의 침하는 지속적으로 증가하고 있으며, 말뚝선단의 하부 부근( $Y/D=0.0$ )이 굴착될 때 가장 크게 증

가하고 있으며, 터널굴착이 말뚝하부를 지난 이후는 그 증가속도가 점진적으로 감소되는 것으로 나타났다. 해석에서 가정한 Y의 범위내에서는  $[(-) 1.95 D$  에서  $1.95 D]$  터널의 굴착에 의해서 지속적으로 말뚝의 침하가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이를 통해 터널굴착으로 인해 말뚝이 영향을 받는 영향범위는 종방향으로 터널직경의 2.0배 보다는 더 큰 것으로 추정할 수 있다.

해석단계 Stage-b와 Stage-c에서  $\delta/\delta_i$ 은 각각 2.57 및 4.33 으로 분석된다. 따라서 터널굴착에 의한 말뚝의 침하는 설계 하중 작용하에서 발생한 말뚝의 두부침하량(2.76mm)을 크게 초과함을 알 수 있다(말뚝두부의 침하량, Stage-b: 7.09mm, Stage-c: 11.94mm). 이를 앞서 언급한 그림 4의 하중-침하관

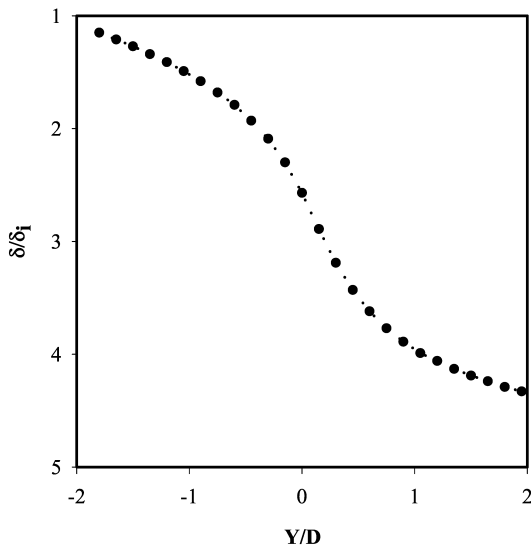


그림 5. Pile head settlement with tunnel advancement

계에 적용하면 Stages-b/c에서 말뚝에는 각각 약 1,450kN 및 1,550kN의 상재하중이 작용하는 경우와 유사한 침하량이 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉 터널의 굴착으로 인해 말뚝의 지지력이 크게 감소하여 터널의 굴착이 종료된 후 말뚝의 안전율(F. S)이 2.0에서 1.03로 감소되어 말뚝의 허용지지력이 약 50% 감소될 수 있음을 보여준다(말뚝의 극한지지력: 1,600kN, 겹보기 작용하중: 1,550kN,  $F. S = 1,600/1,550 = 1.03$ ). 이는 Lee & Ng(2005)에 의한 분석 결과와도 유사하며, 터널의 굴착으로 인하여 말뚝의 침하가 발생하여 말뚝 상부구조물에 대단히 유해한 영향이 발생할 수도 있음을 보여주고 있다.

한편, 말뚝의 종/횡방향(X 및 Y 방향)의 변위는 최대 0.4mm 정도로서 침하의 크기에 비해서는 상대적으로 매우 작은 값이다. 따라서 말뚝의 선단이 터널 크라운부의 상부에 존재하는 경우 터널의 굴착에 의한 말뚝의 침하는 주로 수직방향에 대하여 발생하였으며, 말뚝에 발생하는 모멘트는 무시할 정도로 작은 것을 알 수 있었다. 그러나 Mrueh & Shahrour(2002), Lee & Ng(2005) 및 Pang 등(2005)이 보고한 것과 같이 말뚝선단이 터널 측면하부에 위치하는 경우 매우 큰 수평변위가 발생한다고 알려졌는데 이때는 말뚝의 침하만이 아닌 수평변위 및 모멘트에 대한 검토도 필요할 것이다.

### 3.3 말뚝-지반 경계면에서의 상대변위

그림 6(a)-6(b)는 해석단계 Stage-a 및 c에서의 말뚝과 인접지반의 침하에 대한 등고선을 보여주고 있다. 그림 6(a)에

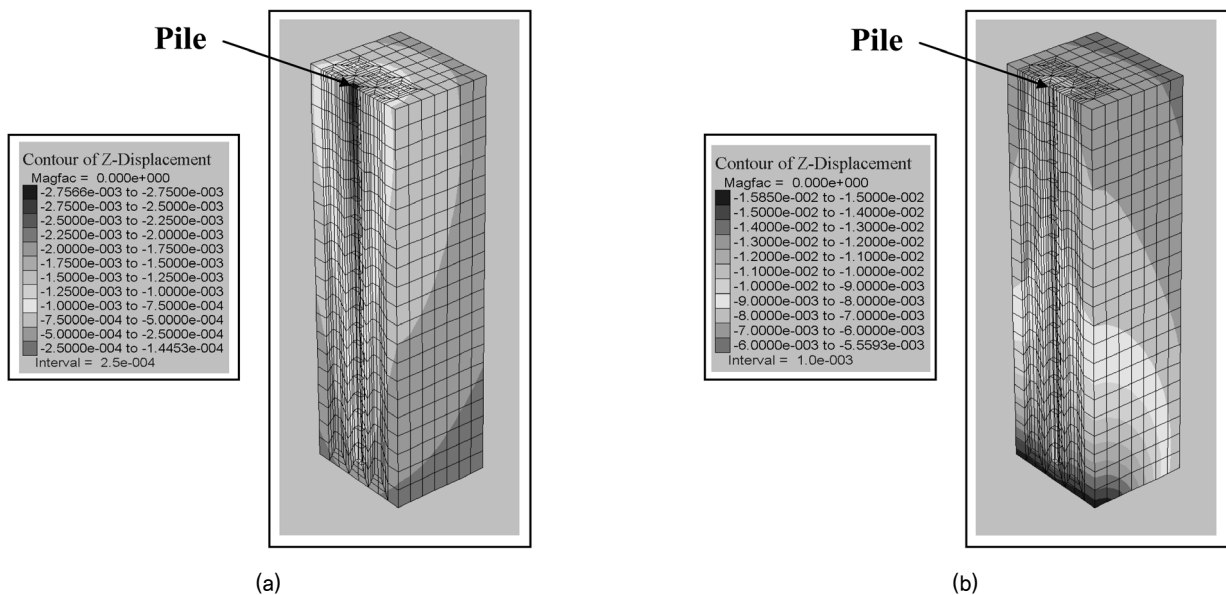


그림 6. Contour of vertical displacement around the pile, Stage-a (a), Stage-c (b)  
(Max. pile settlement: 2.8 mm (Stage-a), 11.9 mm (Stage-c) Max. soil settlement: 2.1 mm (Stage-a), 15.9 mm (Stage-c))

서 볼 수 있는 것처럼 말뚝의 두부에 상재하중이 작용하는 경우 동일한 심도에서는 말뚝의 변위가 지반의 변위를 초과하고 있다. 그러나 그림 6(b)에서 터널의 굴착이 종료된 경우의 등고선을 살펴보면 말뚝의 상부에서는 말뚝의 변위가 지반의 변위보다 크게 나타나지만, 말뚝선단부 인근에서는 오히려 지반의 변위가 말뚝의 변위를 초과함을 알 수 있다. 즉 터널 크라운 부근에서는 지반이 말뚝보다 더 크게 침하하게 된다. 이는 말뚝의 전단응력 및 축력 분포에 대단히 큰 영향을 미치게 될 것으로 판단된다.

따라서 터널의 굴착에 따른 말뚝과 주변지반 경계면에서의 전단거동을 분석하기 위해서는 먼저 경계면에서의 상대변위 분포를 고찰할 필요가 있을 것이다. 여기서 상대변위는 말뚝의 침하량과 인접한 지반에서의 침하량의 차이를 의미한다[상대변위 = 말뚝의 침하 - 경계면에서의 지반 침하]. 그림 7(a)는 경계면에서의 해석단계별 상대변위의 분포를 보여주고 있다. 해석단계 Stage-a에서는 모든 경계면에서 말뚝의 침하가 지반의 침하보다 크게 발생하기 때문에 (+)의 상대변위가 발생하고 있으나, 해석단계 Stages-b/c에서는 말뚝 선단부 일부 구역에서 (-)의 상대변위가 발생하고 있다. 즉 앞선 언급한 바와 같이 말뚝선단부의 일부 구역에서는 지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하고 있다. 이는 터널의 굴착으로 인해 터널 주변의 지반침하가 비교적 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 경향은 Stage-a에서의 상대변위를 '0'으로 초기화시켜 순수하게 터널의 굴착만에 의해 발생한 상대변위의 분포를 고찰하면 더욱 더 두드러지게 나타난다(그림 7(b)). 즉 말뚝 대부분의 구역에서는(Z/L=0.0-0.8) 터널 굴착에 의해 발생한 말뚝의 침하량이 지반의 침하를 초과하고 있으나, 말뚝선단부(Z/L=0.8-1.0)

에서는 지반의 침하가 말뚝의 침하를 상회하고 있다. 이는 압밀이 진행중인 지반에 근입된 말뚝에 작용하는 부마찰과 유사하여 결국 말뚝의 상부에는 상향의 전단응력이 하부에는 하향의 전단응력이 발생할 것으로 예상된다. 이러한 전단응력의 분포특성으로 인해 궁극적으로 말뚝의 하부에는 인장력이 발생할 것으로 추정할 수 있다.

### 3.4 말뚝-지반 경계면에서의 소성항복

앞서 터널의 굴착이 진행됨에 따라 점진적으로 말뚝 및 지반침하가 발생함을 보였다. 따라서 말뚝-지반 경계면에서 상대변위가 증가하여 미끄러짐(soil slip) 혹은 소성항복(plastic yielding)이 발생하는 구역이 증가할 것으로 예상된다. 말뚝의 두부에 설계하중이 작용하는 해석단계 Stage-a에서는 말뚝두부에서만(Z/L=0.0) 말뚝-지반 경계면에서 소성항복이 발생하고 있다. 즉 설계하중 작용하에서는 말뚝과 접한 지반이 대부분 탄성상태에 있음을 알 수 있다. 그러나 터널의 굴착이 진행됨에 따라 소성항복이 발생하는 구간이 점진적으로 확장되어서 해석단계 Stages-b/c에서는 각각 소성항복이 발생한 범위가 Z/L=0.0-0.38 & 1.0, Z/L=0.0-0.62 & 1.0으로 확장되었다[말뚝 하부의 경우 선단부 Z/L=1.0)에서만 항복발생]. 이는 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 발생할 가능성이 있음을 보여준다. 즉 이러한 경우는 반드시 지반의 항복을 고려한 해석을 실시하는 것이

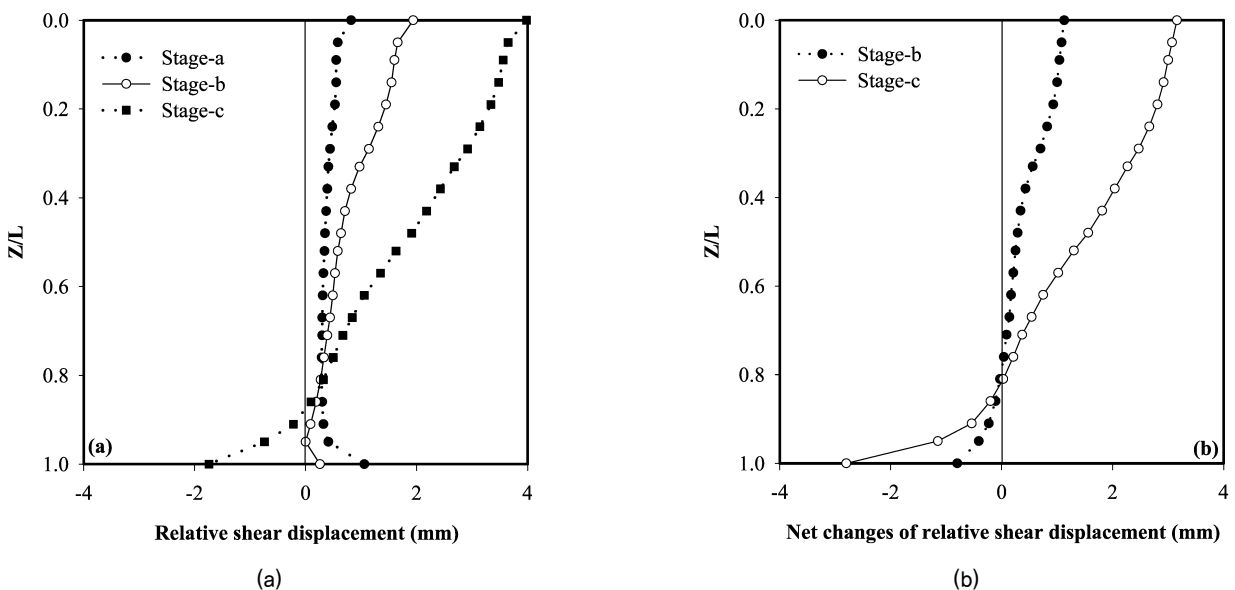


그림 7. Distribution of relative shear displacement (a), net changes of relative shear displacement (b) with depth

합리적이며, 향후 터널굴착에 따른 말뚝과 지반 사이 경계면에서의 소성거동에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2절에서 터널굴착에 의한 말뚝의 겉보기 지지력 감소를 언급한 바 있다. 이를 말뚝두부에 상재하중이 작용하는 경우와 비교 하기로 한다. 해석 0의 결과에 의하면 말뚝의 두부에 1,600kN의 상재하중이 작용할 경우 경계면에서 7.3-11.1mm의 상대변위가 발생하며(상대변위의 차이는 말뚝의 탄성변형으로 인한 것임), 모든 경계면에서 소성항복이 발생한다. 이는 위에서 논한 터널의 굴착에 의해서 겉보기 허용지지력이 감소하는 경우와는 근본적으로 다르다고 할 수 있다. 따라서 터널굴착에 의해서 말뚝의 겉보기 허용지지력이 감소하는 것과 말뚝의 두부에 겉보기 허용지지력과 동일한 크기의 상재하중이 작용하는 경우와는 말뚝의 거동에 있어 공학적으로 현격한 차이가 있음을 주목할 필요가 있다. 따라서 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.5 말뚝-지반 경계면에서의 전단응력 분포

그림 8은 말뚝과 인접지반 사이의 경계면에서 발생하는 전단응력 분포를 보여주고 있다. 그림에서는 수치해석에서 산정된 전단응력(그림 8(a))과 순수하게 터널의 굴착에 의해서만 발생한 전단응력의 분포를 보여주고 있다(그림 8(b)). 그림 8(a)에서 터널의 굴착이 진행됨에 따라 전단응력의 값이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 전단응력의 증가는 앞서 언급한 상대변위가 터널의 굴착에 따라 점진적으로 증가하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 해석단계 Stage-b에서는  $Z/L=0.38$ 까지, 해석단계Stage-c에서는  $Z/L=0.62$ 까지 전단강도가 100% 발현되고 그 하부에서는 일부만이 발현하는 경

향을 보인다. 이는 3.4절에서 언급한 말뚝주변 지반에서 소성항복이 발생하는 구간과 일치한다.

그림 8(b)는 설계하중 작용조건(Stage-a)에서의 전단응력을 '0'으로 가정하여 산정한 해석단계 Stages-b/c에서의 전단응력의 분포를 보여주고 있다. 다시 말해 이는 순수하게 터널의 굴착에 의해서 말뚝에 작용하는 전단응력의 분포이다. 말뚝의 거의 대부분에서는( $Z/L=0.0 - 0.8$ )에서는 상향의 전단응력이 발생하였고, 그 하부에서는 하향의 전단응력이 발생하고 있다. 이러한 하향의 마찰력이 증가하면 결국 말뚝의 선단부에는 인장력이 발생할 것으로 추정된다. 이는 Pang(2006), Lee & Chiang(2007)이 관찰한 부마찰력의 발생과도 유사한 현상이라고 할 수 있다. 특히 말뚝선단부에서는 Stages-b/c에서 각각 최대 52.1, 98.6kPa의 매우 큰 하향의 전단응력이 발생하고 있음을 주목할 필요가 있다. 말뚝의 상부에서는 상향의 전단응력이 발생하여 말뚝의 축력이 감소할 것이고, 말뚝의 하부에서는 하향의 전단응력으로 인해 결국 말뚝에 부마찰이 작용하는 경우와 유사한 현상이 발생하여 말뚝에 인장력이 발생하게 될 것으로 예상할 수 있다.

### 3.6 말뚝의 축력변화

그림 9는 해석 1을 통해서 산정된 말뚝에 작용하는 축력 P의 심도별 분포를 설계하중  $P_a(800kN)$ 으로 정규화( $P/P_a$ )하여 각각의 해석단계별로 나타내었다. 그림 9(a)에서 본 연구에서 가정한 말뚝은 축력 분포를 고려할 때 대부분의 설계하중(약 92%)이 주면마찰력에 의해 지지되는 마찰말뚝의 거동과 유사한 것으로 나타났다. 말뚝의 선단에는 설계하중의 약 8% 만의 하중이 작용하고 있다. 한편 터널의 굴착이

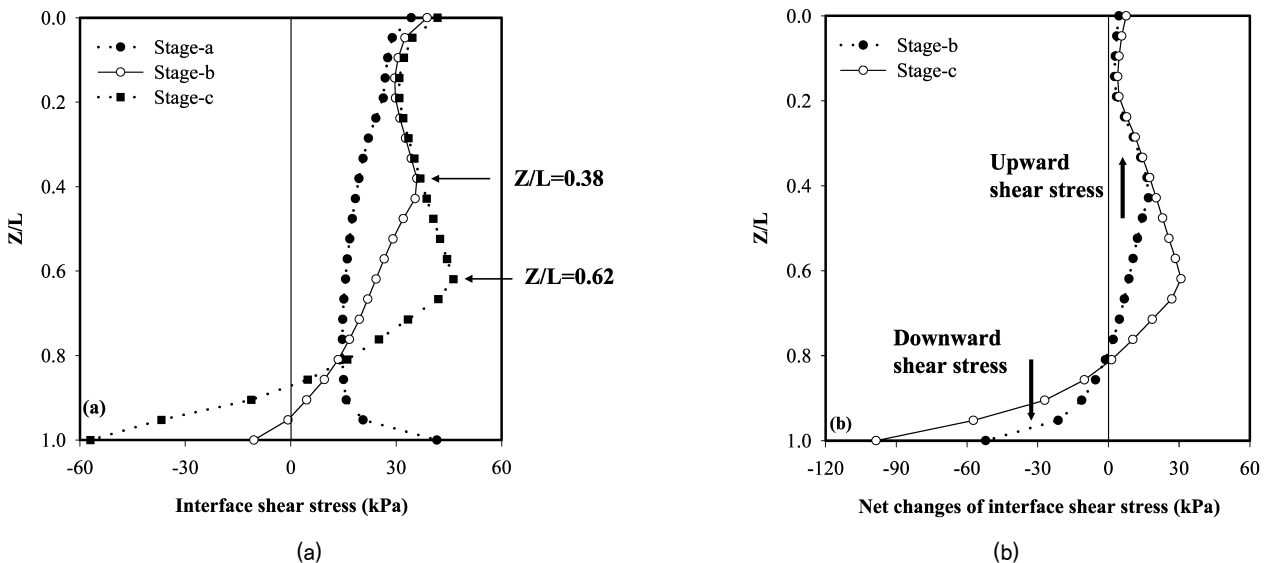


그림 8. Distribution of interface shear stress (a), net changes of interface shear stress (b) with depth

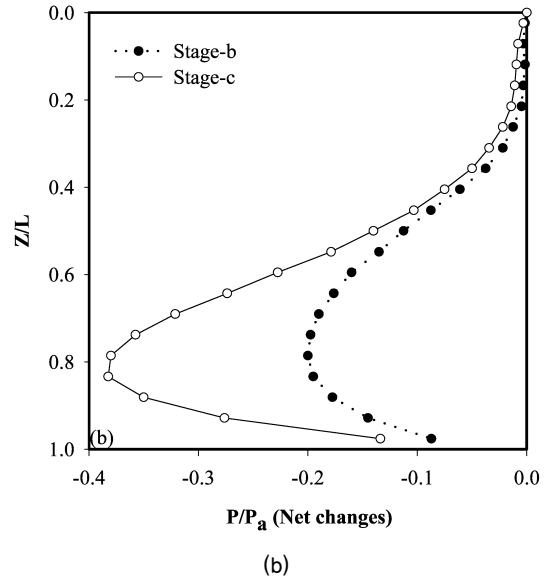
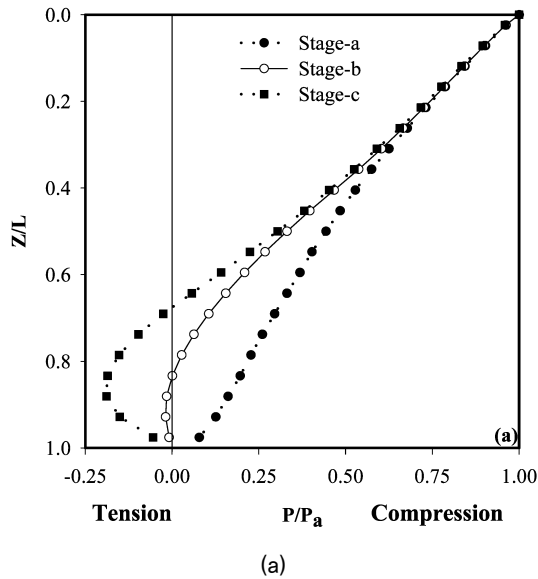


그림 9. Distribution of axial force (a), net changes of axial force (b) on the pile with depth

진행되면서 지반이 침하함에 따라 말뚝에 작용하는 축력이 점차로 감소하고 있다. 이는 말뚝의 상부( $Z/L=0.0-0.8$ )에서 상대변위 및 전단응력이 터널의 굴착에 따라 점진적으로 증가하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 이는 Jacobsz(2002, 2003)가 원심모형실험을 통해서 관찰한 결과와 유사하다고 할 수 있다. 해석단계 Stages-b/c에서는 말뚝 선단부 부근에서 인장력이 발생하고 있다. 이는 일종의 부마찰(negative skin friction)과 관련이 있다고 할 수 있는데, 이러한 경향은 Lee & Chiang(2007)이 원심모형실험을 통해 관찰한 것과 유사하며 말뚝 선단부 인근에서는 지반의 침하가 말뚝의 침하를 초과하여 하향의 전단응력을 유발시키기 때문인 것으로 분석된다.

터널의 굴착이전에는 약  $0.08P_a$ 의 압축력이 작용하지만 터널의 굴착에 따라 압축력이 차차 감소하다가 나중에는 약  $0.05P_a$ 의 인장력이 발생하게 된다. 한편 최대 인장력은  $151\text{kN}$ 으로 약  $0.19P_a$ 이며  $Z/L=0.88$  부근에서 발생한다. 따라서 말뚝의 허용인장력이 작은 경우라면 균열이 발생하여 사용상 문제가 발생할 수도 있을 것으로 보인다.

그림 9(b)는 설계하중 작용조건(Stage-a)에서의 축력을 '0'으로 가정하여 산정한 해석단계 Stages-b 및 c에서의 정규화된 축력( $P/P_a$ ) 분포를 보여주고 있다. 다시 말해 이는 순수하게 터널의 굴착에 의해서 말뚝에 발생한 축력의 분포이다. 말뚝 대부분의 구간에서는 ( $Z/L=0-0.8$ ) 축력이 감소하고 있다. 이는 말뚝에 작용하는 상향의 전단응력으로 인한 말뚝 주면저항력의 증가로 인한 것으로 판단된다. 한편 말뚝 선단부에서는 축력이 더 이상 감소되지 않고 있는데 이는 하향의 전단응력 발현으로 인한 것으로 보인다. 인장력이 가장 크게 증가하는 곳은  $Z/L$ 이 약 0.8인 지점으로 해석단

계 Stages-b 및 c에서( $P/P_a$ )의 값은 각각 약  $0.2P_a$ ,  $0.38P_a$ 이다. 이는 상대변위 및 전단응력의 분포가  $Z/L$ 이 약 0.8인 지점을 중심으로 변화하고 있는 경향과 일치하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 터널의 굴착에 의해 터널 상부에 위치하는 단독말뚝의 거동 변화를 3차원 유한차분해석을 통하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 수치해석 결과에 의하면 터널의 굴착에 따른 지반침하에 의해 말뚝 및 지반이 침하하여 상대변위가 발생하여 말뚝과 지반의 경계면에서 전단응력 전이가 발생한다.
- (2) 터널의 굴착이 진행됨에 따라 말뚝 대부분의 구간에서는 상향의 전단응력이 발생하지만, 말뚝 선단부 인근에서는 하향의 전단응력이 발생한다. 이러한 상향 및 하향의 전단응력의 상호작용으로 의하여 말뚝 선단부근에는 인장력이 발생하게 되며, 상대하중 크기의 약 19%의 최대 인장력이 발생하였다.
- (3) 말뚝의 두부에 설계하중이 작용하는 경우와 달리 터널의 굴착으로 인해 말뚝-지반 경계면에서는 광범위한 소성항복이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 말뚝-지반 사이 경계면에서의 전단거동에 대한 심도 있는 분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 향후 터널의 위치에 대한 말뚝의 상대위치에 따른 말뚝의 거동 및 군말뚝의 거동을 분석할 필요가 있을 것이다.
- (5) 본 연구에서는 순수하게 수치해석을 통한 터널의 굴착



에 따른 말뚝의 거동변화에 대한 분석을 실시하였다. 따라서 향후 적절한 실내실험을 실시하거나 현장계측자료와의 비교분석 등을 통한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- 대한토목학회 (2005), 제 5회 터널 시공기술 향상 대토론회, 도심지 터널 근접시공을 중심으로, 대한토목학회.
- 이철주, 전상현, 유남재 (2007), 터널굴착에 의한 단독말뚝의 거동, 대한토목학회 논문집, 27 (2C), pp. 121~127.
- 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.
- Chen, L.T., Poulos, H.G. and Loganathan, N. (1999), Pile responses caused by tunneling, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(3), ASCE, pp. 207~215.
- Chen, C. Y. and Martin, G. R. (2001), Effect of embankment slope on lateral response of piles, *FLAC and numerical modeling in Geomechanics*, (Billiaux et al Eds), Swets & Zeitlinger, pp. 205~213.
- 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.
- 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*, 22, pp. 450~466.
- Chiang, G. H. (2002), *The load transfer behavior of piles caused by nearby tunneling*, Master thesis, National Central University, Taiwan (in Chinese).
- Davisson, M. T. (1972), High capacity piles, *Proceedings and Lecture Series in Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, pp. 82~112.
- Jacobsz, S.W. (2002), *The effects of tunnelling on piled foundations*, PhD thesis, University of Cambridge.
- Jacobsz, S.W. (2003), Tunnelling effects on piled foundations, *Tunnels and Tunnelling international*, June, pp. 28~31.
- 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.
- Lee, C. J. and Jacobsz, S.W. (2006), The Influence of Tunnelling on Adjacent Piled Foundations, *ITA 2006*, CD
- Lee, C. J. and Chiang, K. H. (2007), Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground, *Canadian Geotechnical Journal*, 44, pp. 1224~1241.
- 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, 131(2), pp. 193~201.
- Lee, Y. J. (2004), *Tunnelling adjacent to a row of loaded piles*. PhD Thesis, University College London, University of London,
- Lee, Y. J. and 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.
- Loganathan, N. and Poulos, H.G. (1998), Analytical prediction for tunnelling induced ground movements in clays. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, ASCE, 124(9), pp. 846~856.
- Mroueh, H. and Shahrouh, I. (2002), Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunnelling and pile foundation, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 26, pp. 217~230.
- Pang, C. H., Yong, K.Y., Chow, Y.K. and Wang, J. (2005), The response of pile foundations subjected to shield tunnelling, *5th Int'l Symposium Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema.
- Pang, C. H. (2006), *The effects of tunnel construction on nearby pile foundation*, PhD thesis, The National University of Singapore.
- Selemetas, D. (2005), The response of full-scale piles and piled structures to tunneling, PhD thesis, University of Cambridge.
- Vermeer, P. A. and Bonnier, P. G. (1991), Pile settlements due to tunneling, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Soil mechanics and Foundation Engineering*, 2, pp. 869~872.
- 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: 2009. 4. 12 심사일: 2009. 4. 17 심사완료일: 2009. 5. 26)